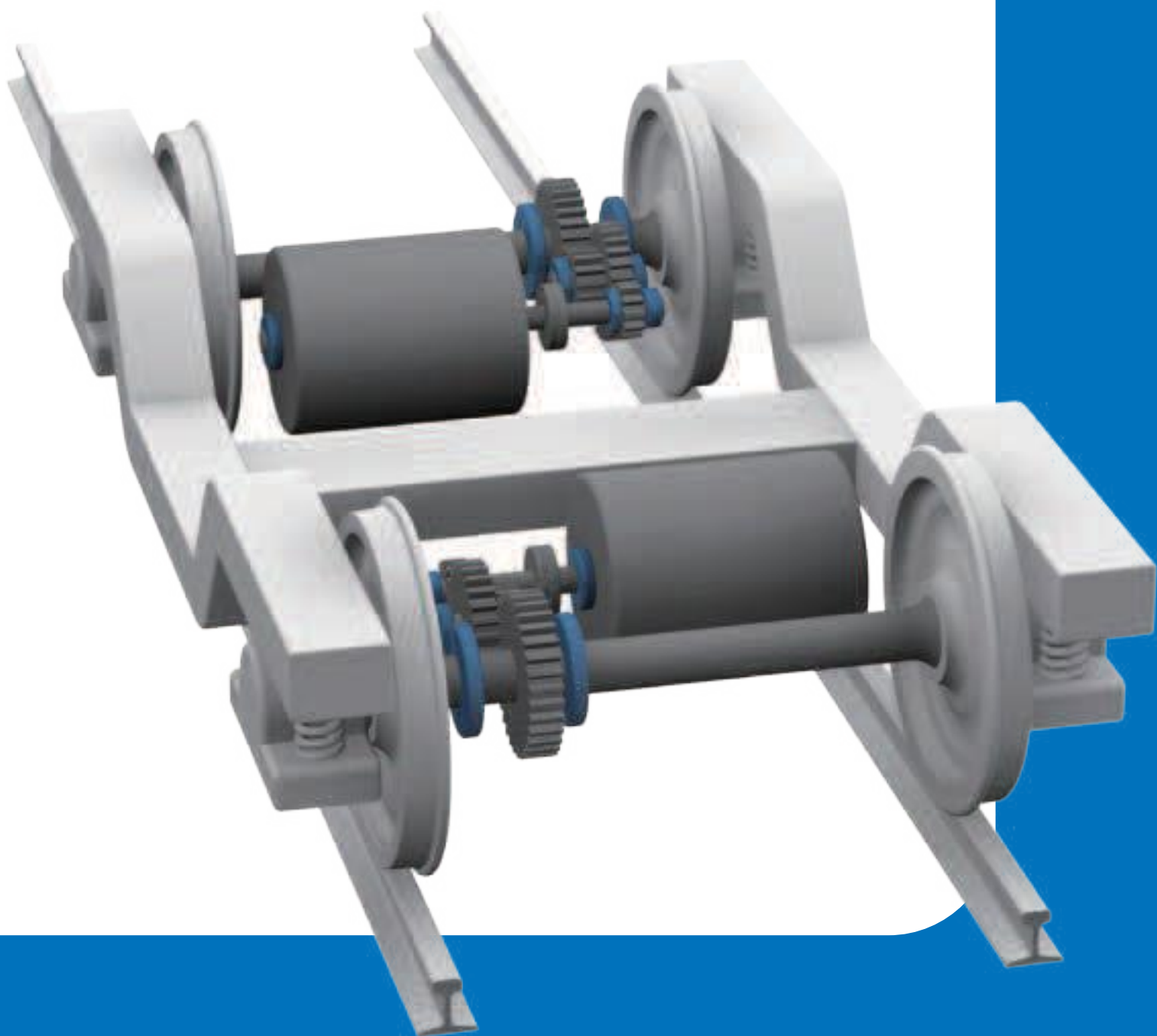


铁路技术手册

第2卷

传动系统：牵引电机和齿轮箱轴承、
传感器、状态监测以及服务



© SKF, AMPEP, @PTITUDE, AXLETRONIC, Baker, EASYRAIL,
INSOCOAT, MRC, MULTILOG是SKF集团的注册商标。

其它商标均归属于各自所有者。

© SKF集团2014

本出版物内容的著作权归出版者所有且未经事先书面许可不得被复制（甚至引用）。我们已采取了一切注意措施以确定本出版物包含的信息准确无误，但我们不对因使用此等信息而产生的任何损失或损害承担任何责任，不论此等责任是直接、间接或附随性的。任何本出版物提及的成本节约及利润增长均来源于斯凯孚客户的经历且不构成对未来的任何结果将保持一致的担保。

PUB 42/P7 13085 ZH · 2014年3月

ISBN 978-91-978966-6-5

部分图片经Shutterstock.com授权允许使用

- 1 历史与现状
- 2 传动设计
- 3 轴承设计
- 4 INSOCOAT 绝缘轴承和混合陶瓷轴承
- 5 牵引电机轴承单元
- 6 轴承计算
- 7 轴承研究
- 8 传感器
- 9 状态监测
- 10 服务
- 11 应用

索引
引用

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

铁路技术手册

第2卷

传动系统：牵引电机和齿轮箱轴承、传感器、状态监测及服务

行业设计师与操作人员手册



铁路技术手册的第 1 卷有印刷本，或从 App Store / Productivity / SKF 中获取 iPad 电子版

前言

SKF铁路技术手册（第2卷）涵盖了传动系统解决方案，例如牵引电机和齿轮箱轴承与轴承单元、传感器、状态监测，以及服务。本手册经过与各方面行业专家讨论后制作。

本手册为设计师提供了关于各种功能设计优化的信息。

本手册还为铁路运营商提供了关于如何通过正确的安装、维护以及状态监测，最大程度地延长轴承使用寿命的建议。

这些建议以SKF几十年来与全世界铁路行业的亲密合作所获得的经验为基础。这些经验以及客户的投入，对SKF的内部产品开发产生了重要的影响，使我们能够不断开发各种新产品和产品变型。

关于球轴承和滚子轴承的选择与计算的通用信息，在SKF轴承综合型录中提供，或请在线访问 skf.com/bearings。本技术手册用于解决牵引电机和齿轮箱轴承的专用解决方案方面的问题。为了清晰起见，本手册中仅引用了SKF轴承综合型录中的数据。

有关铁路产品的其它信息可参考2010年发布的《铁路技术手册 - 第1卷》，该手册主要涉及轴箱、轮对轴承、传感器、状态监测、子系统，以及服务。

有关更多信息，可参考 www.railways.skf.com

Gottfried Kuře及全体人员

目录

1 历史与现状

| | |
|----------------|----|
| 传动系统开发 | 9 |
| 历史应用..... | 11 |
| 当前的轴承设计 | 12 |
| 当前与未来的焦点..... | 14 |
| SKF 解决方案包..... | 16 |
| 生命周期合作伙伴..... | 18 |
| 质量 | 20 |

2 传动设计

| | |
|-------------------|----|
| 设计原则..... | 26 |
| 高速车辆..... | 39 |
| 电力和内燃电力机车..... | 43 |
| 电力和内燃电力乘用车辆 | 47 |
| 低地板车辆..... | 51 |
| 内燃液力车辆 | 58 |
| SKF抱轴悬挂筒 | 60 |

3 轴承设计

| | |
|----------------------|----|
| 轴承性能..... | 63 |
| 轴承安装..... | 66 |
| 角接触球轴承和四点接触球轴承 | 69 |
| 圆柱滚子轴承 | 75 |
| 深沟球轴承..... | 85 |
| 圆锥滚子轴承 | 89 |
| 补充型号..... | 94 |
| 轴承测试..... | 97 |

4 INSOCOAT 绝缘轴承和混合陶瓷轴承

| | |
|---------------------|-----|
| 电流防护 | 99 |
| INSOCOAT 绝缘轴承 | 115 |
| 混合陶瓷绝缘轴承 | 121 |
| 混合陶瓷绝缘轴承测试 | 125 |

5 牵引电机轴承单元

| | |
|---------------|-----|
| 简介 | 128 |
| 设计特点..... | 130 |
| 延长使用寿命 | 132 |
| 定位端的设计 | 136 |
| 非定位端的设计 | 138 |
| 传感器设计 | 140 |

6 轴承计算

| | |
|--------------|-----|
| 计算原则..... | 143 |
| 基本额定寿命 | 149 |
| 润滑 | 159 |
| 高级计算..... | 161 |
| 验证 | 164 |

7 轴承的应用调查

| | |
|---------------|-----|
| 考虑事项..... | 167 |
| 工况 | 168 |
| 轴承损伤..... | 168 |
| 根本原因分析 | 172 |
| 损坏和失效矩阵 | 179 |

8 传感器

| | |
|-----------------|-----|
| 设计原则..... | 181 |
| 集成示例..... | 182 |
| 速度传感器..... | 184 |
| 速度和绝对位置传感器..... | 187 |

9 状态监测

| | |
|-------------------|-----|
| 性能..... | 191 |
| IMx-R 在线监测系统..... | 195 |
| 监测原则..... | 196 |
| 验证测试..... | 201 |
| MICROLOG 分析仪..... | 207 |
| 应用..... | 208 |

10 服务

| | |
|-----------|-----|
| 服务能力..... | 211 |
| 安装..... | 212 |
| 拆卸..... | 217 |
| 检修..... | 218 |
| 测试设备..... | 221 |
| 培训..... | 223 |

11 应用

| | |
|----------------|-----|
| 高速车辆..... | 226 |
| 电力机车和内燃机车..... | 228 |
| 电气和内燃乘用车..... | 230 |
| 低地板车辆..... | 232 |

索引

| | |
|----------|-----|
| 关键词..... | 234 |
| 引用..... | 236 |

SKF - 一家知识工程公司

1907 年, SKF 发端于一个简单但具有创意的摩擦问题解决方案, 当时只是拥有少数几个工程师的瑞典工厂, 现已发展成为全球工业知识领导者。多年来, 我们已经在轴承方面建立了自己的专长, 进而扩展到密封件、机电一体化、服务和润滑系统。我们拥有 46000 名员工、15000 个经销商合作伙伴、遍及 130 多个国家的组织机构, 以及在全球不断发展的 SKF 解决方案工厂。

研发

基于 SKF 员工所掌握的实践知识, 我们拥有在 40 多个行业的丰富实践经验。另外, 我们拥有在摩擦学、状况监测、资产管理 and 轴承生命理论等领域进行先进理论研发的世界一流专家和大学合作伙伴。我们持续开展的研发帮助我们使我们的客户始终处于行业的最前沿。



迎接最艰难的挑战

我们的知识和经验, 加上对如何整合核心技术的深刻理解, 帮助我们开发能够满足最艰难挑战的创新解决方案。我们在整个资产生命周期与我们的客户密切合作, 帮助他们负责任地发展他们的业务, 并实现盈利。



努力创建可持续发展的未来

自 2005 年以来, SKF 一直在努力减少我们自身运营和我们供应商的运营产生的对环境的负面影响。我们持续开展技术研发, 开发了 SKF BeyondZero 产品和服务组合系列, 该系列可提高效率, 减少能耗, 以及使得利用风能、太阳能和海洋能发电的新技术成为现实。该系列产品有助于减少对环境的影响, 无论是在我们自己的运营还是在客户的运营中。

SKF 解决方案工厂利用当地 SKF 的知识和在制造方面的专长, 为我们的客户提供独特的解决方案和服务。

SKF 授权经销商与 SKF IT 和物流系统和应用专家协力, 为全球客户提供有价值的产品和应用知识组合。



我们的知识——您的成功

SKF 生命周期管理是我们将技术平台和先进服务结合起来，并将其应用在资产生命周期的每个阶段，以帮助我们的客户取得更大成功、可持续发展和盈利的方法。



与您紧密合作

我们的目标是帮助我们的客户提高生产效率，最大程度地减少维护，实现更高的能源和资源利用效率，优化设计，延长使用寿命和提高可靠性。



轴承

SKF 是设计、开发和制造高性能滚动轴承、滑动轴承、轴承单元和轴承座的全球领导者。

创新的解决方案

无论是线性应用还是旋转应用，或两者的结合，SKF 的工程师都可以在资产生命周期的每个阶段与您合作，通过了解整个应用提高设备的性能。这种方法并不只是侧重于轴承或密封件等个别部件。它着眼于整个应用，关注部件之间的交互作用。



设备维修

来自 SKF 的状态监测技术及维修服务，可以帮助最大程度地减少计划外停机时间，提高运营效率，降低维护成本。

设计优化与验证

SKF 可与客户紧密合作，采取专利3-D建模软件优化现有的或新的设计，该软件还可以作为一个虚拟测试台来测试设计的完整性。



密封解决方案

SKF 提供标准密封件和定制设计密封解决方案，增加正常运行时间，提高机器的可靠性，减少摩擦和功率损耗，并延长润滑剂的使用寿命。



机电一体化

SKF 线控飞行系统和用于非道路车辆、农业和叉车应用的线控驱动系统可取代既笨重又耗油的机械和液压系统。



润滑解决方案

从专业的润滑油到最先进的润滑系统和润滑管理服务，SKF 润滑解决方案可以帮助降低与润滑相关的停机时间和润滑剂的消耗。

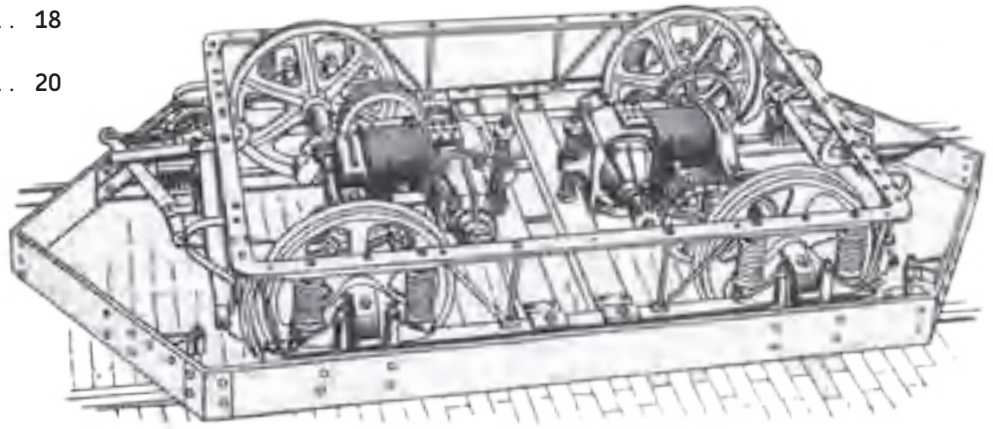


驱动和运动控制

通过各式各样的产品——从驱动器和滚珠丝杠到直线导轨——SKF 与您一起应对最紧迫的线性系统挑战。

1 历史与现状

| | |
|----------------|----|
| 传动系统开发 | 9 |
| 历史应用 | 11 |
| 当前的轴承设计 | 12 |
| 当前与未来的焦点 | 14 |
| SKF解决方案包 | 16 |
| 生命周期合作伙伴 | 18 |
| 质量 | 20 |



抱轴式悬挂传动设计由Frank J. Sprague(1857 - 1934)设计，
用于1887年启用的里士满(佛吉尼亚)的有轨电车上



高速空心轴传动设计集成聊盘式制动装置
来源：西门子

历史与现状

铁路应用的传动系统，例如齿轮箱和牵引电机等，必须具有足够强大的功率、满足各种环境法规、极为可靠、提供极高的性价比，并且仅需要较低程度的维护。与许多其他行业相比，这里对这些应用的要求更加严格，因为铁路车辆的重量更大，并且需要更长的服务期。

作为全球领先的供应商，SKF为铁路行业提供众多的解决方案，涉及轴承、密封件、润滑、机电一体化，以及服务。其中包含各种滚子轴承和配套的服务，从而满足铁路应用中极为严格的要求。

SKF具有丰富而深刻的应用知识，通过多年的努力，已经为传动系统开发出了各种独具特色的产品与解决方案。

铁路行业的发展与日俱进，新的设计层出不穷，性能不断提高。SKF的客户始终关注着市场上最新的趋势，而SKF在研发方面也一直致力于将最新的发明与创新结合到新的解决方案之中。

传动系统开发

SKF铁路技术手册第1卷中已经介绍了以车轮的发明而开始的铁路行业极早期的开发过程、铁路系统的能效型功能，以及第一个轴箱轴承。该版本重点介绍了轴箱、轮对轴承、传感器、状态监测、子系统，以及服务^[1]。

主要的特点有：

- 车轮的设计使牵引力最多节省99%。
- 铁路上承载的货物可最多节省90%的牵引力。
- 引入球轴承后节省86%的牵引力，而滚子轴承可以节省52%的牵引力。

- 轴承的开发非常关注密封解决方案、润滑以及宏观/微观几何形状，从而进一步降低摩擦并节约能源。摩擦越低，轴承的操作温度也就降低，并且这会对润滑脂的寿命产生积极影响。在很多情况下，这就进一步决定了使用寿命和维护时间周期。

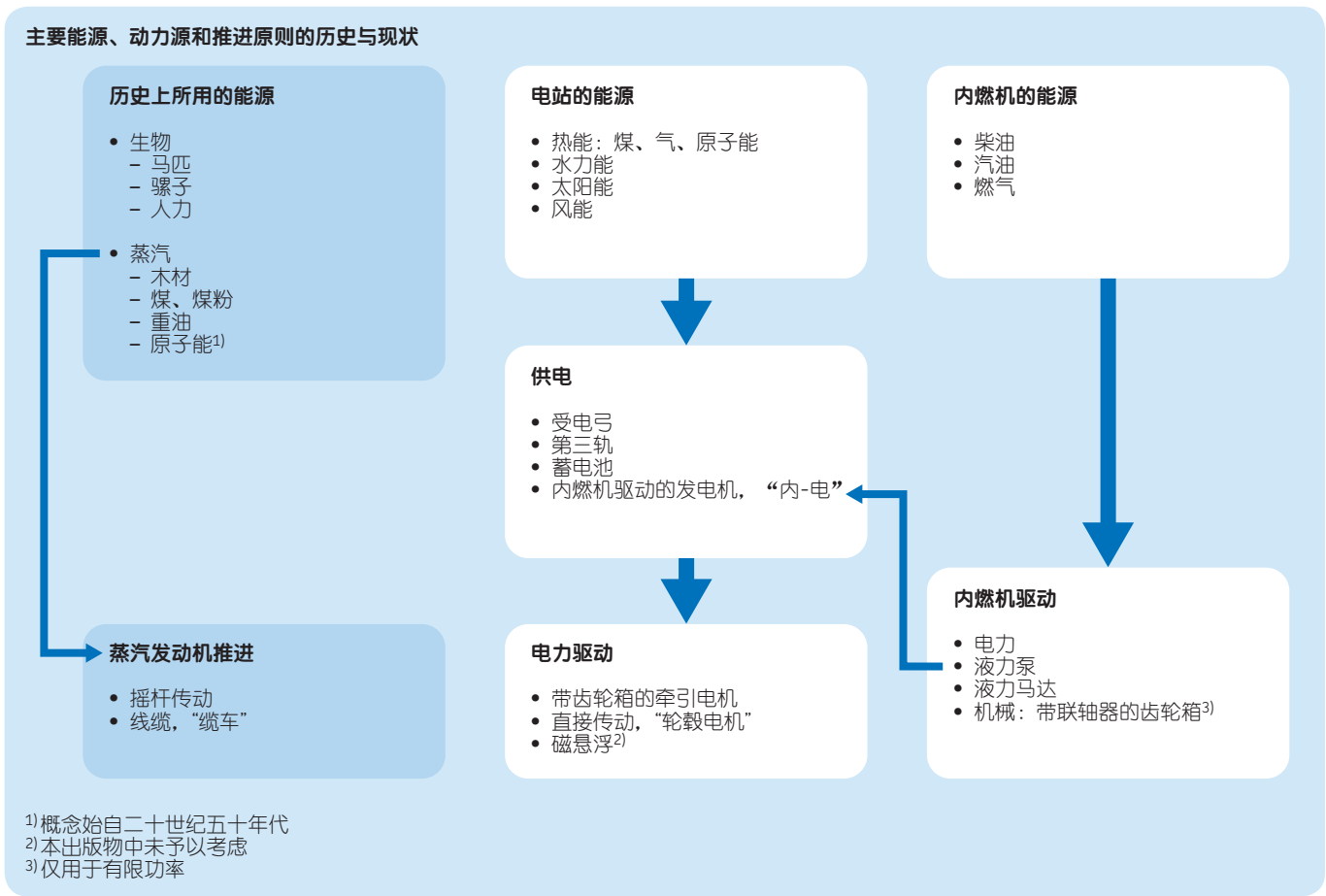
铁路牵引所用的能量往往是受到限制的。早期的铁路车辆由马或者人力进行牵引。之后，引入蒸汽机车的一个优化设计目的，就是节约煤炭和随之产生的煤粉和煤油。二十世纪五十年代，提出了原子能蒸汽涡轮机车的概念，但是从未实现过。下表阐述了有关能源、动力传递和牵引原理的主要概念。

第一种电力推进的轨道车辆是有轨电车，因为其牵引电机的尺寸较小。从马拉有轨车辆到电力牵引车辆的转变始于十九世纪八十年代。这对降低运营成本产生了显著的影响。在文献²⁾中，提到实现了

30%作用的节约。这一过渡在1900年左右进展迅速。那时，投入使用了许许多多的新型电力轨道车辆和地铁。在铁路运营中引入电力推进也在那时起开始，并且，于1903年，在 Marienfelde-Zossen(靠近德国柏林)的测试铁路上使用电力测试机车便实现了210 km/h的最高速度。

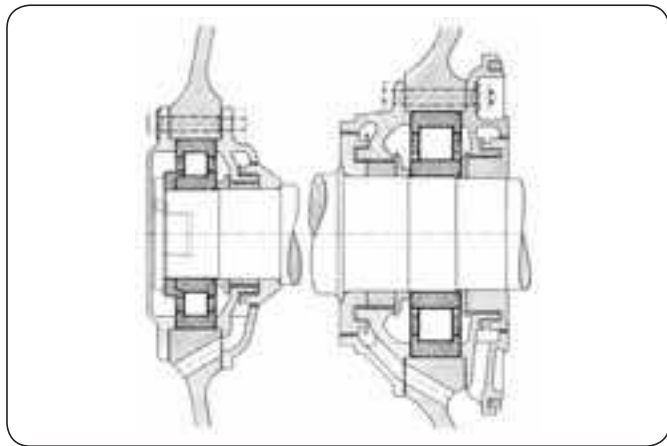
由于机车需要更高的牵引电机额定功率，并且能源供给站之间相隔的距离更远，铁路上引入电力牵引相对有轨车辆来说，花费了更长的时间。

1900年后，内燃机首先在小型机车上汽油、柴油和燃气为动力的发动机。柴油动力机车和动车组自二十世纪三十年代成为主体，两种驱动方式，电力和液压传动这两种推进模式都已得到应用。内-电传动以柴油机驱动发电机为基础，为电力牵引电机供电，而这一设计与电力机车的应用极为相似，但是在很多情况下额定功率要低很多。对于功率有限的车辆，则应用机械牵引。



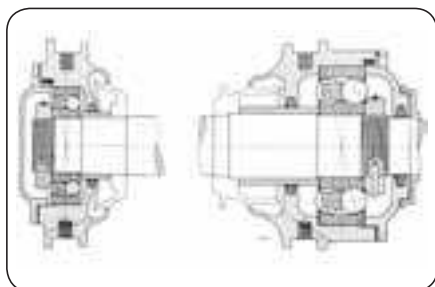
历史应用

降低维护成本、空间要求并提高可靠性，对于为齿轮箱和牵引电机实施新的轴承解决方案来说，始终都作为主要的驱动因素。很早之前的设计中配有润滑油润滑的滑动轴承。该类轴承需要每天检查油位，并补充润滑油。1918年，SKF宣布通过使用自调心球轴承来取代滑动轴承，可以将有轨车辆的轴承维护成本降低25%至高达70%。

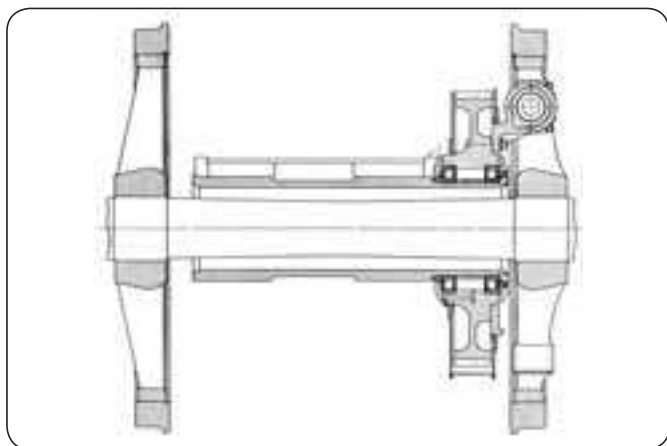
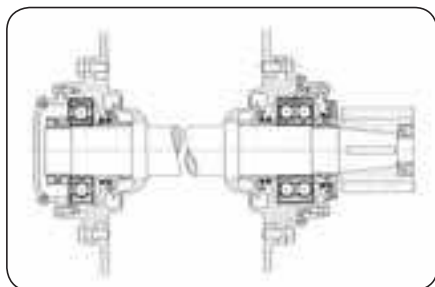


美国宾夕法尼亚州铁路的GG1类电力机车的总功率为3442 kW，可以实现最高160 km/h的速度。该机车于1934年引入。其牵引电机配有两个SKF圆柱滚子轴承，分别为NJ设计+ HJ角环以和NU设计。
来源：Das Kugellager (SKF) 1939 - 2, 第19页

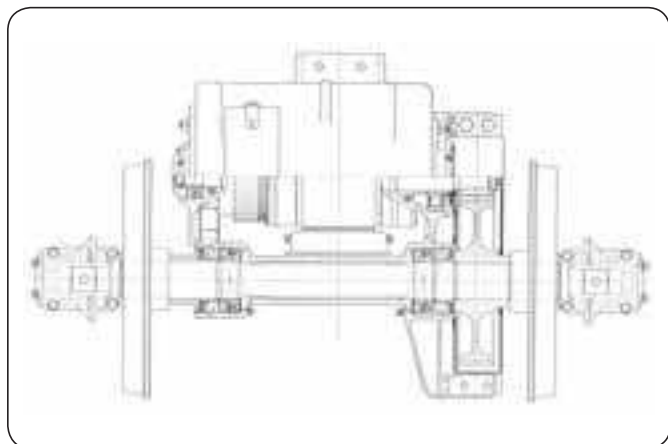
1910年代的哥德堡有轨电车牵引电机采用两个SKF自调心球轴承
来源：Hauptkatalog SKF Kugellager-gesellschaft 1918, 第190页



二十世纪二十年代的有轨电车牵引电机配有两个STEYR深沟球轴承
来源：STEYR Hauptkatalog 1926



美国宾夕法尼亚州铁路的R1类电力机车采用带弹性联轴器的空心轴传动设计。其中采用了两个SKF NJ型圆柱滚子轴承，专用尺寸为380 x 530 x 60 mm。
来源：Das Kugellager (SKF) 1939 - 2, 第21页



二十世纪三四年代起的有轨电车牵引电机和抱轴箱筒装置配有SKF的球面滚子轴承，而牵引电机的小齿轮侧则采用SKF圆柱滚子轴承。
来源：1939年有轨电车服务的SKF轴承，第31页



二十世纪三十年代起的美国联合太平洋铁路列车采用SKF的牵引电机圆柱滚子轴承，每台牵引电机的额定功率平均为220 kW
来源：Das Kugellager (SKF) 1939 - 2, 第18页

当前的轴承设计

传动系统轴承

球轴承

滚子轴承



深沟球轴承



角接触球轴承



四点接触球轴承



圆柱滚子轴承

牵引电机应用

适用于定位端

适用于定位端和非定位端

齿轮箱应用

适用于定位端

适用于定位端，大多数情况下与圆柱滚子轴承一起使用

电绝缘

出厂前密封和预润滑

电绝缘轴承

轴承单元设计



圆锥滚子轴承



球面滚子轴承



INSOCOAT绝缘轴承



混合陶瓷轴承



牵引电机轴承单元

普通应用

当今应用领域众多，但主要使用圆锥滚子轴承和圆柱滚子轴承

可提供深沟球轴承、圆锥滚子轴承和圆柱滚子轴承

可提供深沟球轴承和圆柱滚子轴承

可提供基于深沟球轴承或圆柱滚子轴承的设计

可提供深沟球轴承和圆柱滚子轴承

可提供基于深沟球轴承或圆柱滚子轴承的设计

当前与未来的焦点

速度

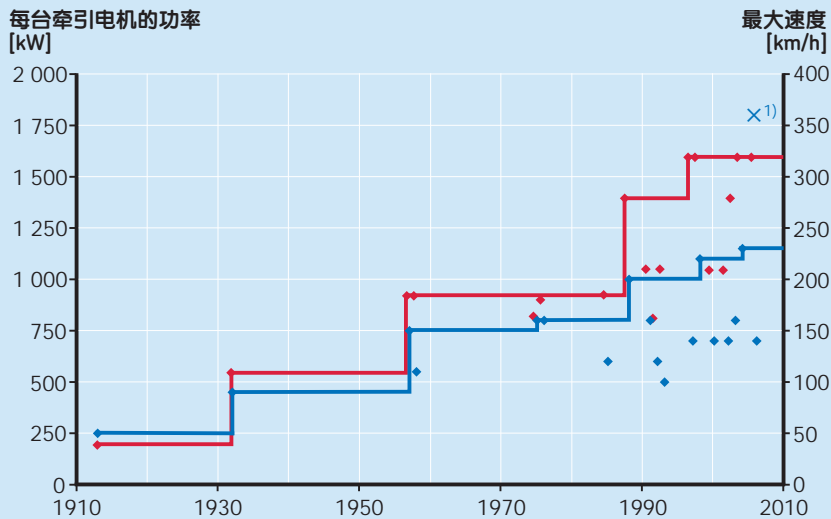
客运与货运非常注重速度。一直以来，铁路的速度都在不断提高。车辆速度和给定的车轮直径可以确定齿轮箱输出轴及相应轴承的转速。齿轮齿数比乘以速度就可以得出齿轮箱的输入和牵引电机速度。旋转速度(n)和轴承平均直径(dm)这两个因子的乘积可作为一个重要的参数，用于选择轴承尺寸和滚子组、保持架设计，以及润滑剂粘度。

超过车辆速度后， $n \cdot dm$ 值将增加，因为牵引电机几何形状尺寸减小可导致牵引电机的速度提高。

另一方面，高功率的牵引电机设计只能通过更高的电机速度来实现。特别之处在于，铁轨轨距所定义的两个车轮之间的距离可限制齿轮箱的总水平长度以及牵引电机的配置。

功率

随着在很长一段历史时期内牵引电机设计的极大发展，功率也在逐步提高。采用一台典型的4轴机车设计作为常用的示例，每条轮对由一台牵引电机驱动(也称为Bo'Bo')¹⁾。与首次采用这一设计时相比，今天的牵引机车功率已接近其10倍。与速度相关的功率对作用在齿轮箱输入轴上的载荷具有直接影响。如第2章所述，当代的传动设计主要致力于降低轴承载荷，并尽可能的采用润滑油润滑。



所选德国铁路Bo'Bo'机车的总额定功率和最大速度的发展

Bo'Bo': 4轴车辆，配有2个转向架，所有轴都采用独立的电机传动，参见铁路技术手册第1卷第28页。

■ 每台牵引电机的功率
■ 最大速度

¹⁾ 西门子Taurus机车于2006年创造的世界速度记录：357 km/h

维护时间间隔

在可以预见的将来将持续的一个当今的重要趋势就是，需要延长维护时间间隔。为电力车辆使用AC推进技术的一个优势在于，可以降低对维护的需求，从而自然可以延长维护的时间间隔。当今，润滑油润滑的牵引电机轴承在使用寿命方面具有一些局限，因为希望在约15年的总体中期使用中不需要维护。某些新的设计、计算模型以及测试结果可以作为基础来一步步的达到该目标(→第5章)。

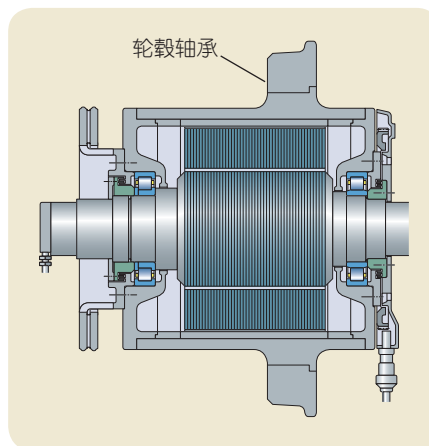
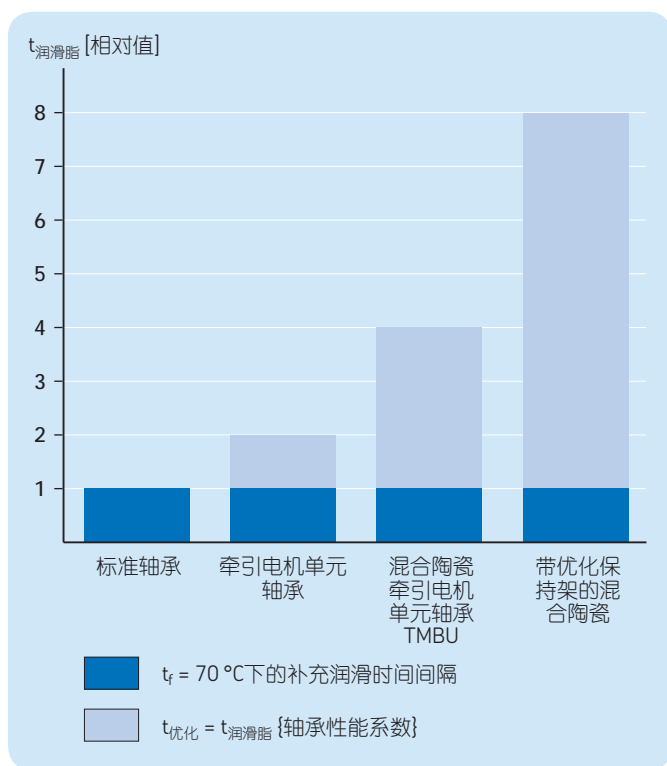
传动产品平台

齿轮箱的设计愈发标准化，并且在某些应用中，相似的设计都已用于极其不同的应用，例如高速车辆、动车组车辆，或者甚至地铁车辆。似乎将来的铁路轨道车辆供应商还将致力于产品平台为基础的设计，以其作为实现更高生产数量并节约成本的产品平台的基础。

低地板车辆

低地板车辆。例如轻轨车辆和有轨电车等，由于空间限制而需要专门的设计。当今，已经存在多种极其不同的设计来用于满足其自身的各种要求(→第2章)。

应用SKF优化润滑脂寿命指南，有关进一步信息请参见第132页



用于低地板车辆的集成式牵引电机设计(→第2章)

SKF解决方案包

100多年以来，SKF已经成为先进轴承技术的同义词，并且也已成为铁路行业全球领先的供应商。除了这一在专业知识领域的雄厚基础外，SKF还是各行业机电一体化装置、润滑系统、密封件和服务的产品和解决方案领域供应商的领导者。

与转向架应用有关的解决方案包括：

- 轴箱，
- 轮对轴承，
- 传感器，
- 状态监测，
- 子系统，以及
- 相关服务

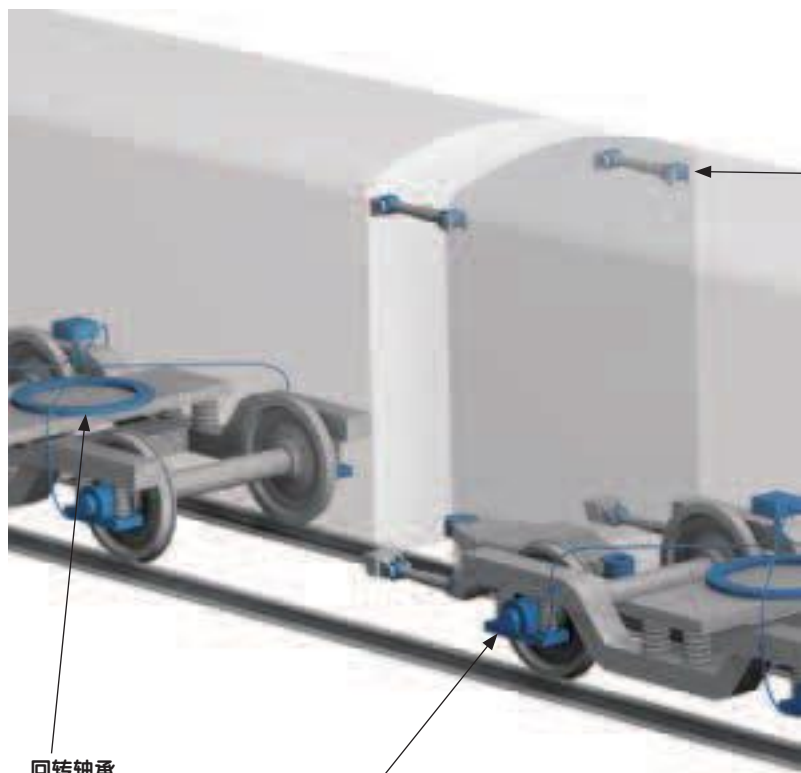
已经在SKF铁路技术手册第1卷中介绍^[1]。

传动解决方案

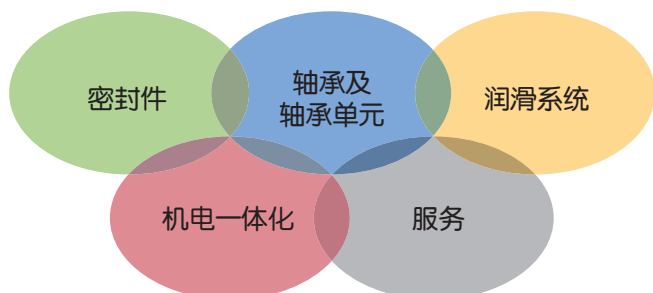
当前和未来的提供产品范围如下：

- 牵引电机和齿轮箱的轴承，
- 电气绝缘的INSOCOAT轴承和混合陶瓷轴承，
- 牵引电机轴承单元，
- 传感器，
- 状态监测，以及
- 服务

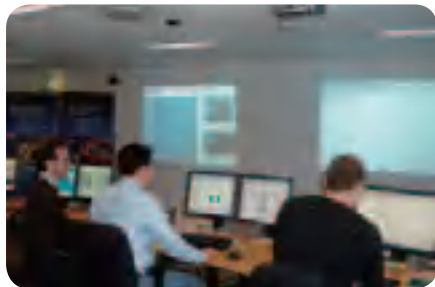
SKF提供独一无二的全球性销售、应用与服务工程师网络，与制造商和操作人员紧密协作，致力于各种国际项目。



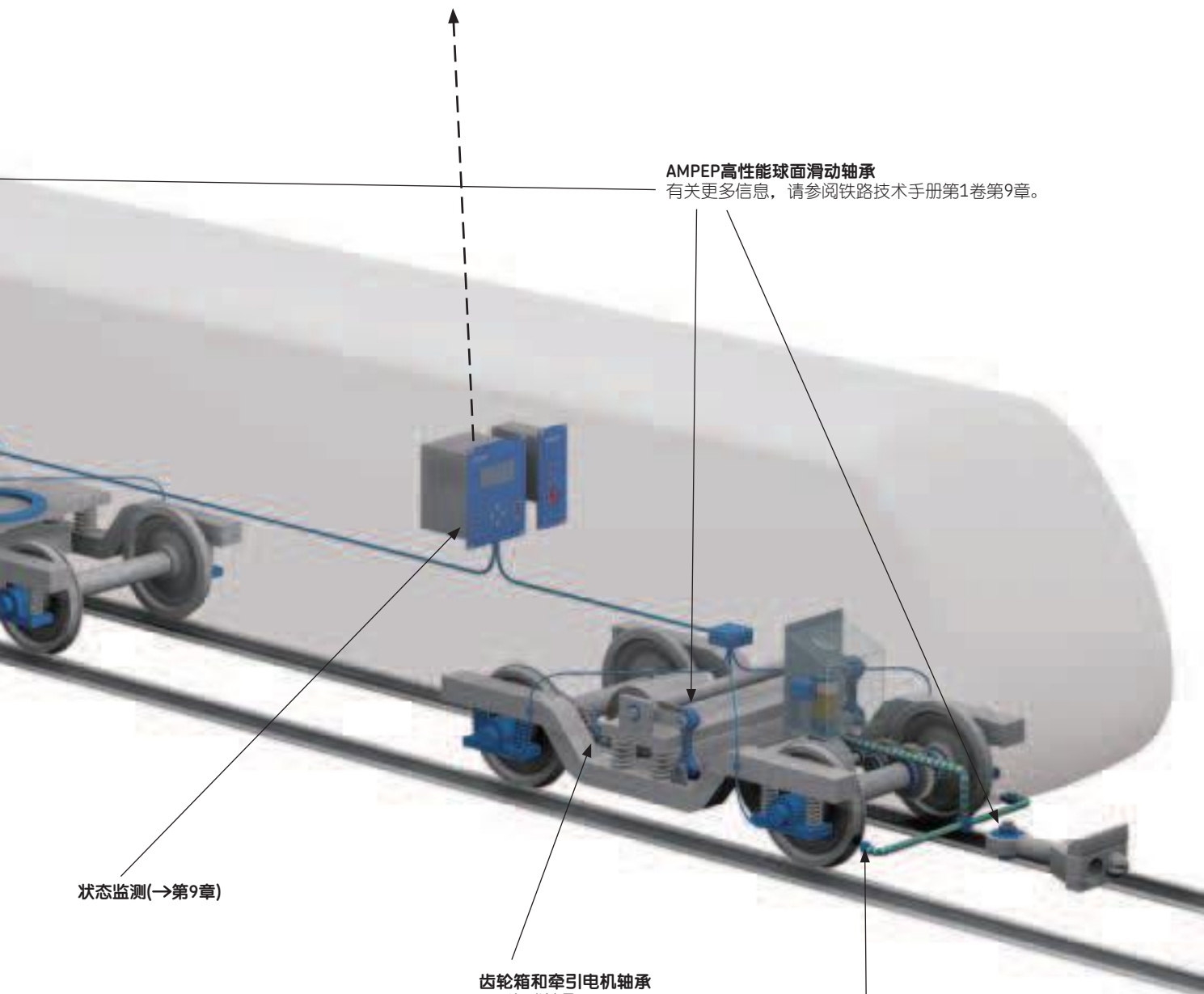
轴箱、轮对轴承和SKF Axletronic传感器
有关更多信息，请参阅铁路技术手册第1卷。



状态数据传输、监测和管理(→第9章)



SKF为铁路行业提供多种服务以满足客户的特定要求(→第10章)



AMPEP高性能球面滑动轴承
有关更多信息, 请参阅铁路技术手册第1卷第9章。

状态监测(→第9章)

齿轮箱和牵引电机轴承

- 深沟球轴承
 - 角接触球轴承
 - 四点接触球轴承
 - 圆柱滚子轴承
 - 圆锥滚子轴承
 - 球面滚子轴承
- (→第3章)

- INSOAT轴承
 - 混合陶瓷轴承
- (→第4章)

- 牵引电机轴承单元
- (→第5章)

轮缘润滑

有关更多信息, 请参阅铁路技术手册第1卷第9章。

生命周期合作伙伴

采用生命周期合作伙伴这一概念，SKF整合了所有专业知识与技术来协助铁路行业客户应对在经济性和环境方面的挑战，介绍如下：

- 通过创新实现盈利和可持续发展
- 开发与实施
- 资产管理和再制造
- 本地运营

技术规格

作为市场的领导者以及技术趋势的制定者，SKF致力于满足铁路行业的特定需求，并提供定制的解决方案与产品。

设计与开发

基于铁路行业的经济与环境要求，SKF知识平台和现有的实用经验可以提供准确的客户需求分析以及面向未来的解决方案。

将SKF与客户紧密联系在一起的不单是合作伙伴关系。由于有着共同的价值观——安全性、质量、利润，以及能效型，从一开始，这便是一种极其紧密且参与度较高的合作关系。

制造与测试

SKF拥有经验极为丰富的铁路行业团队，采用卓越的制造标准，此外还有多种质量控制和质量保证技术，以及位于中国、俄罗斯和欧洲的多处专门的铁路测试中心。

在现代化的测试台以及作业现场开展经权威机构认证、严格的性能与耐久性测试，已成为获得长期可靠性的决定性因素。

安装与调试

SKF的安装服务在从认证服务到现场安装方面提供最佳的全面服务，包括手册和文档以及独立的培训。

培训有素的SKF本地销售与服务工程团队，以本地语言以及定制服务为铁路行业客户提供专门的应用知识和人员支持。

SKF具有强大的资源，在32个国家拥有140处生产和运营单位，从而为全球的铁路行业提供最好的客户服务。

运行与监测

SKF在铁路可靠性方面具有深厚的知识，全球范围内无与伦比。与客户紧密的合作伙伴关系使SKF对铁路行业中每一领域特定的流程与挑战都具有独到而又深入的见解。从而，SKF已出色的成为一家整体解决方案供应商，实现最大程度的可靠性、安全性与操作人员的生产效率。

通过采用状态检测系统并为数据处理应用精密的算法，可以检测出初始损伤，并且从而提供充分的时间以在显著的机械故障发生前进行维修，从而降低生命周期成本。

维护与维修

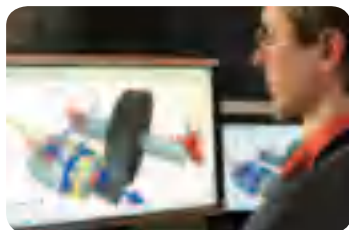
SKF所进行的检修和保养可以实现更长的产品寿命，减少计划外维护，并延长工作时间。SKF可以提供独立的维修策略与工程计划。

SKF可以对轴承进行检修，通过采用最新的技术、严格的检修标准、先进的检修设备系统，以及严密的质量控制措施，可以使检修的产品返回时性能如新轴承。

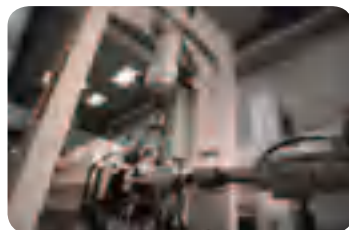
技术规格



设计与开发



制造与测试



维护与维修



运行与监测



安装与调试



质量

SKF追求系统化、学科化的方式以实现所有业务流程上根本性的改进，并以提高客户满意度为主要目标。通过采用六西格玛方法与工具箱，以及SKF卓越经营项目，可以实现持续的改进。

SKF六西格玛

SKF六西格玛是SKF内部的一种持续改进项目，目标为降低所有业务流程中的浪费和缺陷。SKF六西格玛项目提供多种工具与方法，范围从传统的DMAIC与六西格玛设计到精益生产，以及其他减少浪费的方法。SKF六西格玛改进的基础在于基于事实和可持续性，并致力于业务目标。



SKF Six Sigma



SKF卓越经营

SKF卓越经营通过采纳员工的知识、合作伙伴的知识以及公司的技术，可通过尽可能有效的方式为客户交付价值。通过卓越经营项目，SKF将其经验从制造领域拓展到SKF集团内部的其他流程与运营当中。卓越经营不仅仅在于结果，它还积极的对组织提出挑战，要求其考虑是否通过尽可能最好的方式来实现正确的结果。

认证

SKF的质量已通过多家相关的质量认证，基于各种国际标准和客户许可。以下为精选的SKF集团和SKF铁路事业部的各种相关认证。与SKF铁路业务销售和制造部门有关的其他认证可以应要求提交至客户。



ISO 9001质量管理体系认证，授予SKF铁路事业部。



ISO/IEC 17025认证，授予位于荷兰新维根的SKF工程与研究中心，认可其实现技术上有效成果的能力。



IRIS国际铁路行业标准认证，授予SKF铁路事业部。



ISO 14001, OHSAS 18001管理体系标准认证，授予SKF集团。



德国DB Q1质量能力认证。



法国SNCF AOF2无条件质量认证。

奖项

客户奖项可以视作对SKF做出杰出努力以满足并超越客户要求的认可。

通过运作可靠并且高效的流程，并且应用具有零缺陷目标的持续改进项目，可以实现这一目标。这些客户奖项认可了SKF致力于继续努力以持续实施质量改进的承诺。



2012庞巴迪供应商可持续性奖。



2010 GE运输年度供应商奖。



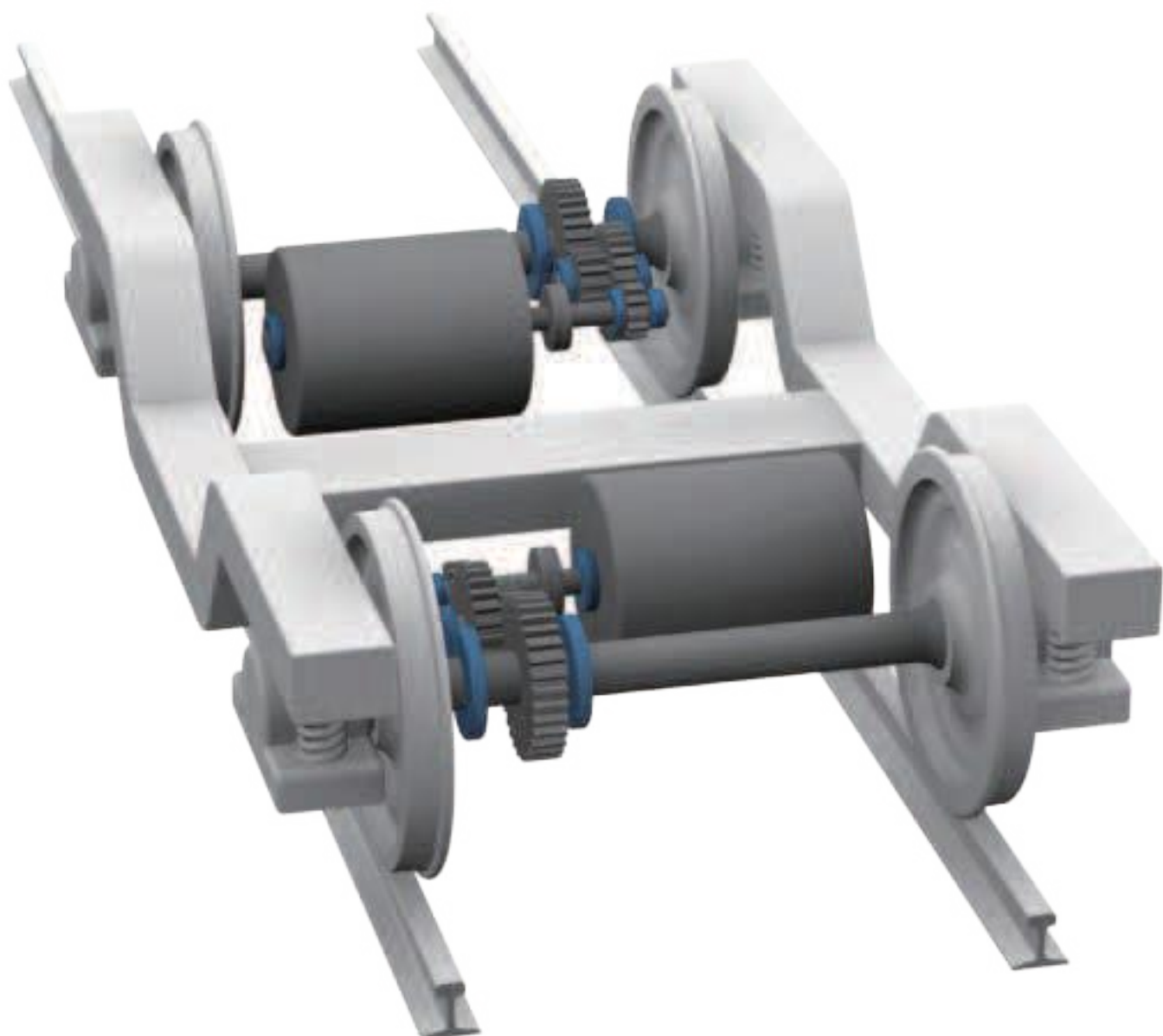
西门子大型传动设备质量奖。



2009年CSR株洲电力机车“卓越供应商”奖。

2 驱动设计

| | |
|-----------------|----|
| 设计原则 | 26 |
| 高速车辆 | 39 |
| 电力和内电机车 | 43 |
| 电力和内电客运车辆 | 47 |
| 低地板车辆 | 51 |
| 内燃液力驱动车辆 | 58 |
| SKF抱轴箱筒 | 60 |



传动设计

铁路应用的驱动系统，例如齿轮箱和牵引电机等，必须具有足够强大的功率、满足各种环境法规、极为可靠、提供极高的性价比，并且仅需要较低程度的维护。与许多其他行业相比，这里对这些应用的要求更加严格，因为铁路车辆的重量更大，并且需要更长的维护间隔。

铁路中的传动系统用于将扭矩从通常在更高速度下运行的牵引电机或内燃机，通过一个、两个或更多的换挡齿轮箱传递到轮对上。

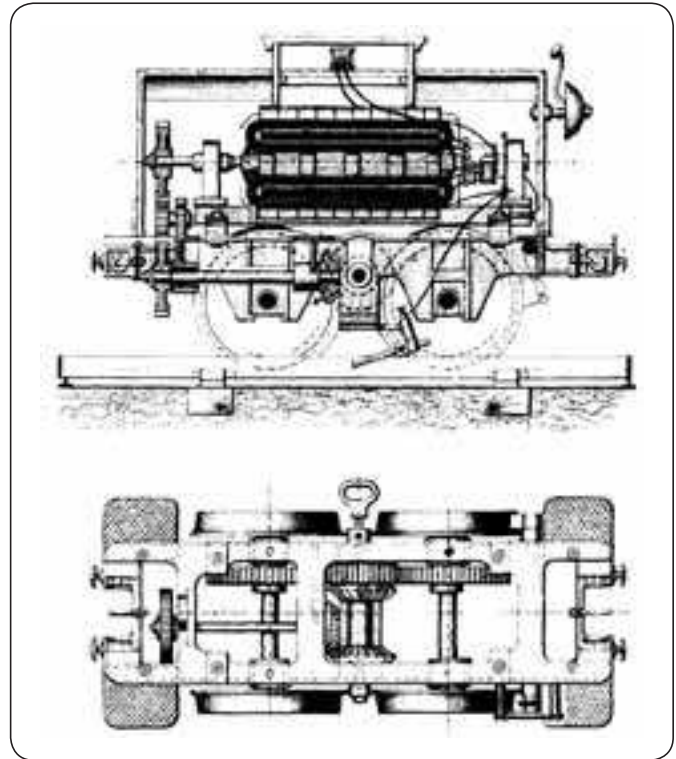
传动系统必须具有强大的功率、对环境无害、具有极高的可靠性与经济性，并且仅需要较低程度的维护。例如，对这类维护的要求，比对汽车的要求要严格的多，因为在两次维护之间所需的时间间隔要长得多。新型的干线机车需要频繁的维护，但是大修仅在机车每运行一百万至一百五十万公里后执行。这类机车平均每天的行驶距离超过1 000 km。超高速列车的运行速度高达350 km/h，所以所需的里程数也就更高。

两种主要的开发成果，例如AC推进系统(→第37页)和低地板公共交通工具设计(→第51至57页)使传动设计发生了根本性的变化。

设计原则

从传动设计开发的早期阶段开始的总体趋势就是应用电机和发动机不断增加的速度，从而实现更低的质量并节约空间。这就带来了在给定列车速度下更高的齿轮齿数比。此外，传动设计必须能够承受转向架/车架和轮对之间的相对运动。齿轮速比差取决于牵引电机和车辆的最大速度。通常，配有空气冷却牵引电机、额定功率为500至1 700 kW的机车使用速比差从3至5的一级变速箱。

设计人员采用各种不同设计以满足所有设计需求的雄心始终与日俱增。在表中(→第28至29页)，列出了传动设计的原则及其变化。



1879年的首台西门子电机机车¹⁾配有极为复杂的传动系统，其中包含带二级直齿轮的牵引电机、带反转的斜齿轮，以及另一个传动两个轮对的正齿轮

照片：西门子公司档案

传动设计要求^[3]

- 节省质量和空间
- 吸收动态冲击
- 在轮对/牵引电机的垂向相对运动中执行正确的旋转传输。不正确的旋转传输在轮对垂向运动过程中可产生作用在牵引电机上的附加的扭矩。
- 连续功率传输而不引起外差振动
- 轮对和牵引电机自由运动
- 不会产生无功电能
- 可以在加速和制动工况下的两个方向运行
- 适用于不同应用要求的模块化设计
- 降低磨损
- 较低的维护要求
- 针对生产成本优化而设计

¹⁾ 早期的电气化铁路里程碑：
1835：Thomas Davenport在美国建立起电力传动铁路的模型。1837或1838：Robert Davidson在英国进一步构建了模型，随后制造了全尺寸的测试机车Galvani。
1840：Johann Philipp Wagner制作了进一步的模型，并尝试在德国建造全尺寸机车，但并未完成。1850：Charles Grafton Page在美国制成电力机车，但是在测试过程中失败。1875：Fjodor Pirozki在俄罗斯开始运营有轨电车，实地测试。

设计变化

存在三个主要考虑事项：

- 存在多种不同的传动配置设计，可以分为三个主要类别：
 - 不同的轮对配置和用于低地板的独立轮。
 - 应用在驱动装置
 - 悬挂装置
 传输和悬挂的原则都对需要考虑的附加动态载荷的直接影响。
- 存在大量不同的齿轮箱设计。这取决于配置、齿轮轴、齿轮换挡、齿轮齿数、每个齿轮箱的轴承数，或者特殊设计。一种非常特别的设计就是无齿轮箱设计，也称为轮毂电机传动系统，用于直接传动的系统，例如通常用于低地板车辆的系统^[4]。
- 传动电机设计主要取决于三种结构
 - 联轴器(应用与否)
 - 直接在齿轮箱中传动的悬臂小齿轮
 - 安装在电机传动轴上的大齿轮
 这对实际增加的动态载荷具有直接影响，需要进行考虑。此外，还存在一些特殊设计(→第55至57页)。最后，电机轴上的轴承数也可有所变化。

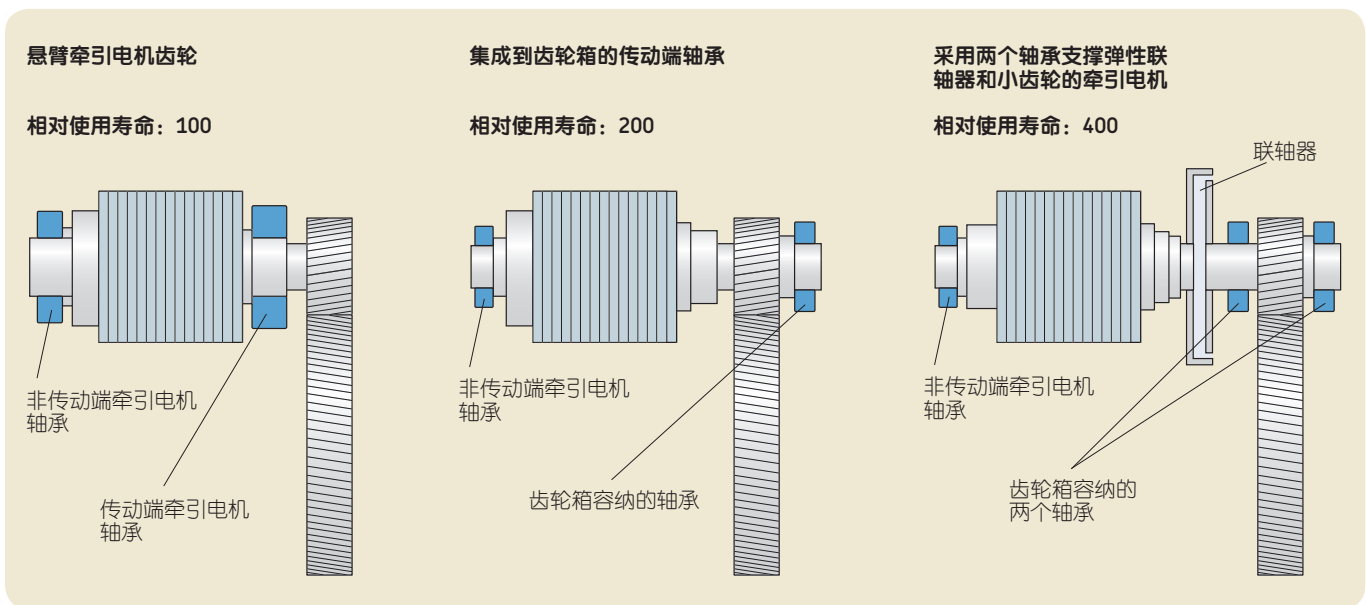
传动系统的设计可以容纳不同的附件，例如传感器、压缩机、为电池充电的发电机、致动器、接地刷，以及状态监测系统。

手册的**第28至29页**的表中列出了几种主要的设计和变型。在考虑该表中列出的所有理论上可行的组合的情况下，可以产生约110万种变型(不包含附件变型)。该表的目的在于提供一个概览。实施上，存在的变型数量甚至比列出的还多。有关齿轮箱和牵引电机设计的更多信息可从制造商处获得^[5]。在该表的脚注中，提及了一些主要的应用。有关所选的当前设计的进一步详细信息通过图纸进行阐述。此外还描述了比较出色并且相对较老的设计，以供与当前设计进行比较^[6、7、8]。

当前与未来

当前和将来可能对所用传动设计的焦点在于提高可靠性、延长维护时间间隔，以及应用更多基于模块的设计原则，从而实现更高的产量并降低成本。实现这些目标的一个重要工具就是为齿轮箱、万向节传动轴和牵引电机应用状态监测(→第9章)。

相对使用寿命^[9]，客户体验



传动设计原则及其变化 – 选用准则¹⁾

配置

轮对和车轮

- 单轮对传动²⁾
- 双轮对传动
- 多轮对传动³⁾
- 独立轮传动⁴⁾
- 两个单独的连接车轮⁴⁾

传输方向

- 纵向
- 横向²⁾
- 竖向⁴⁾
- 倾斜⁴⁾

悬挂

- 刚性抱轴式悬挂
- 半悬挂
- 全悬挂

齿轮箱

数量

- 无齿轮箱，直接传动⁴⁾
- 一个齿轮箱²⁾
- 连接万向节传动轴的两个齿轮箱⁵⁾

配置

- 直齿齿轮²⁾
- 直角齿轮
- 非直角齿轮⁴⁾

换挡

- 一档
- 二档
- 更多档⁵⁾

齿轮齿

- 直齿
- 螺旋齿
- 双螺旋齿⁶⁾

每轴轴承数

- 一个⁷⁾
- 两个
- 三个和更多⁸⁾

设计

- 无特殊设计²⁾
- 行星齿轮⁴⁾
- 转向架轴设计原则⁹⁾

牵引电机

配置

- 小齿轮传动
- 直接联轴器
- 弹性联轴器
- 其他设计

轴承数

- 一个⁷⁾
- 两个
- 三个和更多⁸⁾

设计

- 无特殊设计
- 空心轴
- 压入到轴锥形孔中的小齿轮

附件

牵引电机

- 无附件¹¹⁾
- 传感器，例如速度传感器¹²⁾
- 压缩机¹³⁾
- 发电机¹³⁾

制动器

- 未集成制动装置¹¹⁾
- 电机轴上的制动装置
- 齿轮箱轴上的制动器
- 齿轮箱专用制动器轴上的制动器

接地刷

- 齿轮箱/抱轴箱筒上未连接接地刷¹¹⁾
- 位于牵引电机轴上
- 位于悬挂单元上¹⁴⁾

状态监测¹⁵⁾

- 无状态监测
- 传感器，例如振动、温度传感器、监测单元

1) 仅对于电力传输，对于液压和机械传输(→第58页)

2) 最常用的设计

3) 对于较老的设计，例如，具有连杆传动的设计

4) 对于低地板车辆和单轨车辆

5) 对于高速车辆

6) 避免轴向载荷，也称为人字齿轮

7) 一个轴承位于齿轮箱中，另一个轴承位于牵引电机中；两个轴都可以与刚性联轴器连接

8) 对于极大的螺旋角度，两个轴承支撑径向载荷，一个或两个轴承支撑轴向载荷

9) 例如地铁气动，请见SKF铁路技术手册第1卷第13页的左列

10) 这样可供使用更高的速度并降低制动力

11) 大多数应用

12) 对于AC推进(→第8章)

13) 主要对于无轨电车(→第54页)

14) 例如，安装到悬挂单元上(→第47页)

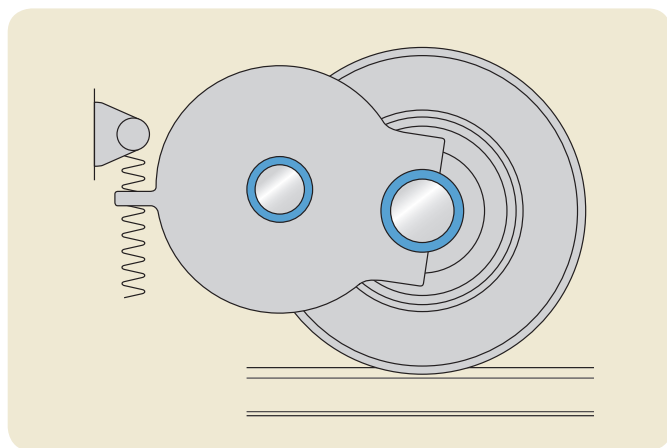
15) 第9章

横向传动

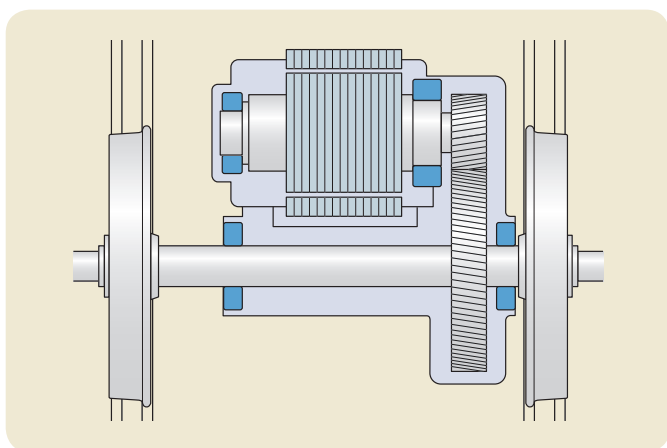
抱轴式悬挂传动

抱轴式悬挂传动设计是最老的设计原则之一。该设计最初用于有轨电车，之后也用于机车和电动以及内燃动力的动车组车辆（→第1章）。

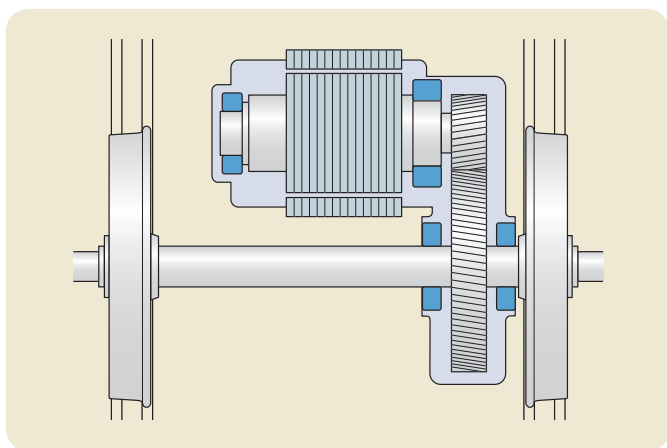
横向布置的牵引电机部分通过转向架支撑，而另一部分则通过齿轮箱直接连接到轮对上。在应用后，该经济节省的设计具有极高的灵活性。由于其动态特性的限制，该设计仅可用于有限的速度(低速)。当今的主要应用为货运机车。对于该应用，抱轴式悬挂传动仍非常普遍。



牵引电机部分通过节点连接在转向架上的构架上，而另一部分则通过抱轴轴承直接与轮对连接



抱轴式悬挂传动设计原则



抱轴式悬挂传动设计在轴上具有缩短的轴承距离，采用更加现代化的设计来减重

抱轴箱筒

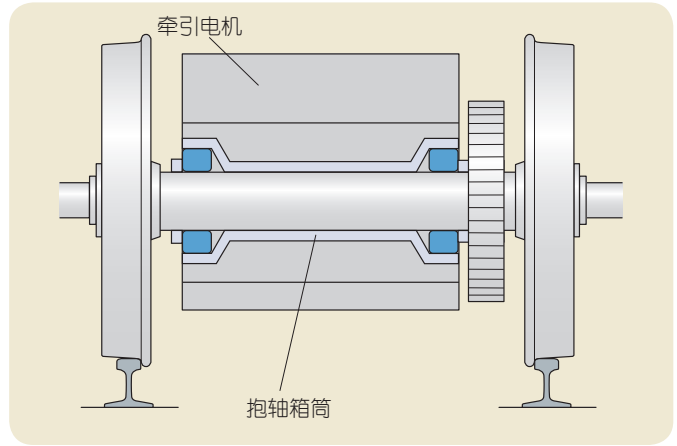
抱轴箱筒作为牵引电机的轮对支撑。根据操作要求和客户规格，SKF基于不同的轴承类型配置提供定制的抱轴箱筒设计(→第60至61页)。

圆锥滚子轴承

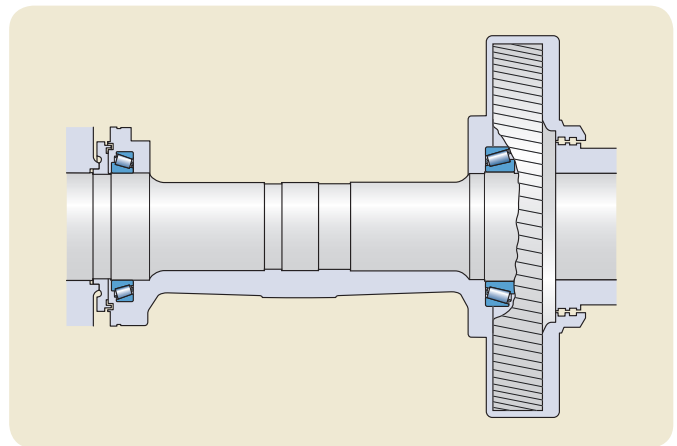
圆锥滚子轴承提供严格而又精确的配置，从而可以实现高度精确的齿轮网格划分。在轴承安装过程中，必须调节指定的轴向游隙，并且这也是实现高度可靠性的先决条件。圆锥滚子轴承还可以提供法兰外圈(→第91页)。这样可以简化邻近的组件。

INSOCOAT圆锥滚子轴承

用于抱轴箱筒的INSOCOAT圆锥滚子轴承在外圈的外表面上采用电气绝缘涂层。INSOCOAT设计可以完全杜绝杂散电流所造成的轴承过早失效问题(→第4章)。



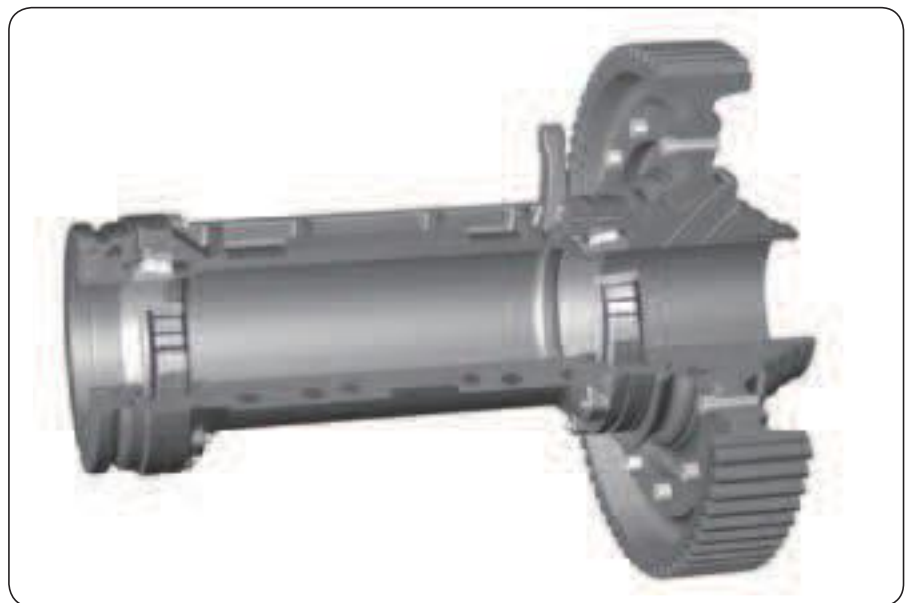
抱轴箱筒设计原则

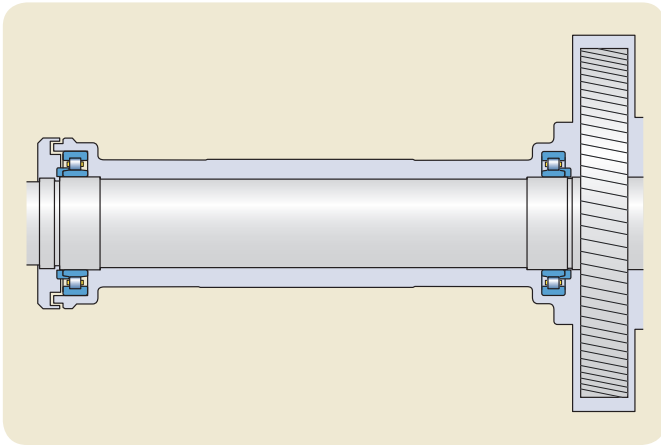


两侧配有圆锥滚子轴承的抱轴箱筒

配有带绝缘涂层的INSOCOAT圆锥滚子轴承的抱轴箱筒

带绝缘涂层的INSOCOAT法兰圆锥滚子轴承(→第9章)





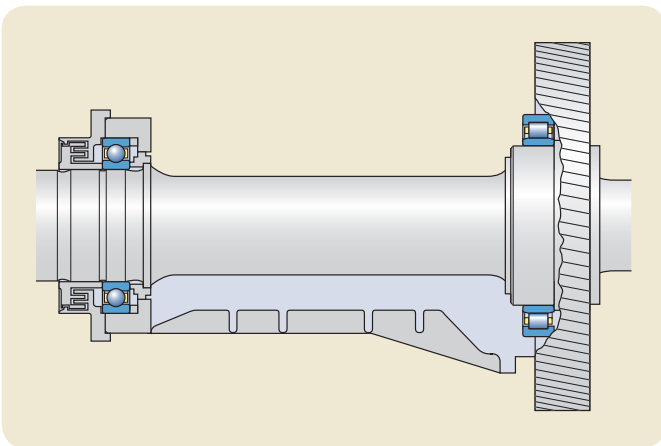
两侧配有NU型圆柱滚子轴承和HJ角环的抱轴箱筒

圆柱滚子轴承

圆柱滚子轴承具有更高的速度性能，与圆锥滚子轴承相比，所需的补充润滑次数更少。其安装和装配操作更为简易，因为安装后的径向游隙可通过选择具有特定径向内部游隙级别(→第80页)以及轴和轴承座配合来实现。可以应用各种不同的轴承设计。通常使用两种带HJ角环的NU型圆柱滚子轴承。在装配过程中，需要在系统中仔细设置适宜的轴向游隙。

圆柱滚子轴承和深沟球轴承的组合

一种类似的设计就是在传动端采用NU型圆柱滚子轴承，在非传动端采用深沟球轴承。该设计用于承受螺旋大齿轮的更重的轴向载荷。另一优点在于，不需要调节轴向游隙。

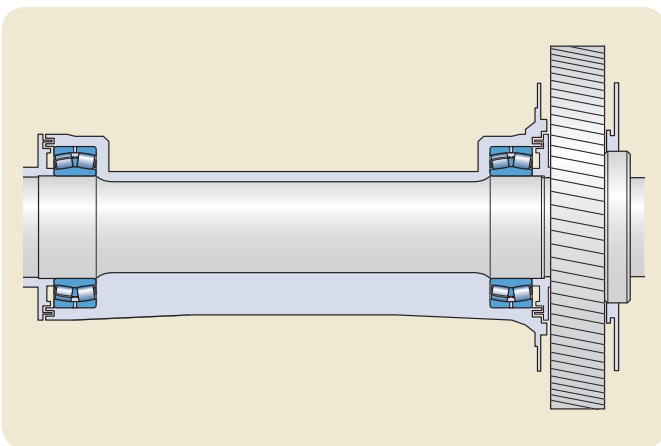


传动端配有NU型圆柱滚子轴承并且非传动端配有深沟球轴承的抱轴箱筒

球面滚子轴承

球面滚子轴承主要用于重载以及较大的车轴折弯。这些轴承具有较低的极限转速，并且补充润滑的时间间隔更短。

优点在于，悬挂箱体基座可以独立制造。另一主要优势则在于，球面滚子轴承可以自调心，从而可以承受不对中(轴折弯)。



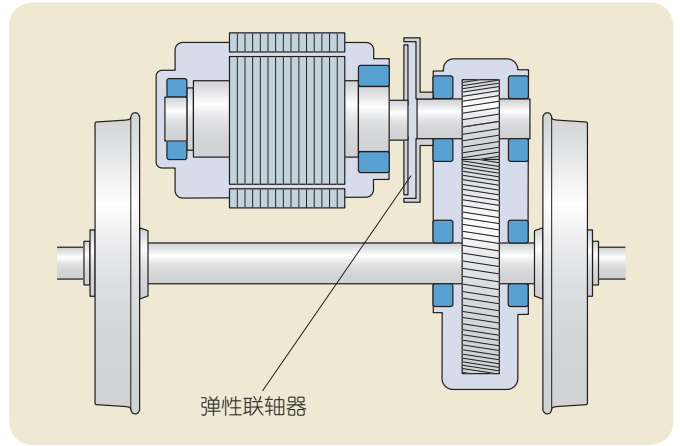
配有两个球面滚子轴承的抱轴箱筒

半悬挂传动

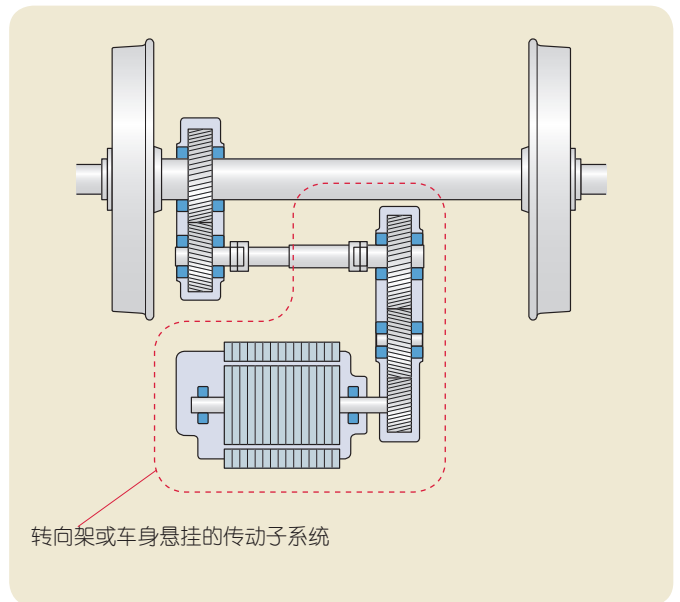
为了减轻作用在牵引电机上的力，通过在牵引电机和传动齿轮箱的轴之间使用联轴器，可以实现更加先进的设计。这有助于提高牵引电机的可靠性，降低传动系统的簧下重量，并降低作用在牵引电机轴承上的动态力，该力主要由转子重量在径向和轴向上加载而形成。

带两个齿轮箱的半悬挂传动

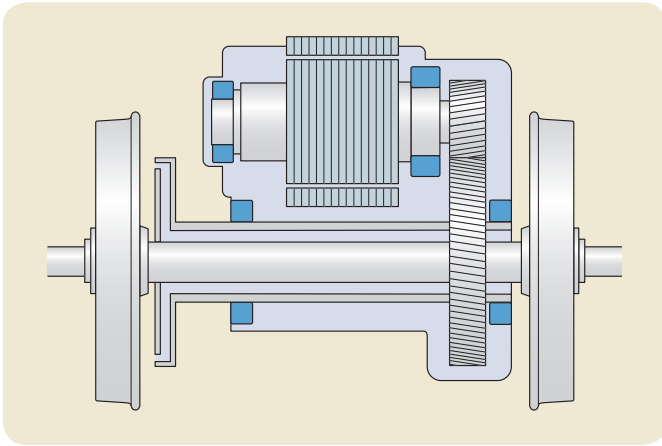
对于高速车应用，牵引电机可以悬挂在车身上。在该情况下，使用两个齿轮箱。其中一个连接到牵引电机，而另一个通过万向节传动轴连接到第二个齿轮箱。悬挂传动位于轮对上方。



位于轮对上的悬挂传动。齿轮箱和牵引电机之间的弹性联轴器。



带两个齿轮箱的半悬挂传动

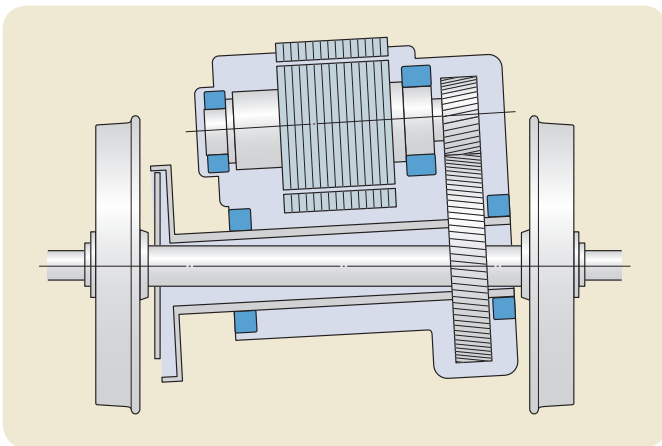


全悬挂空心轴传动原理

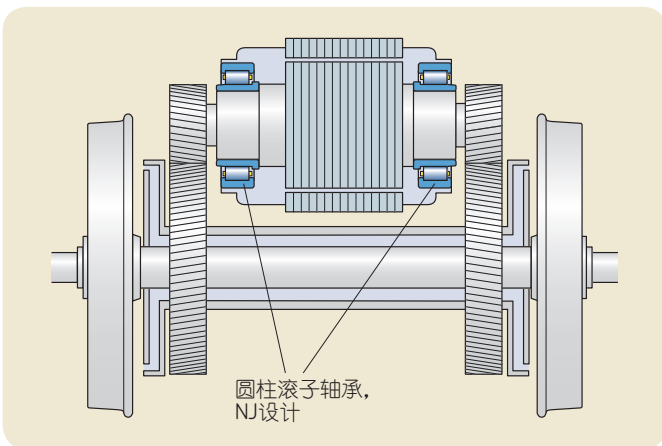
全悬挂传动

最常用的全悬挂传动配置为空心轴传动，以空心轴设计为基础。牵引电机通过螺栓连接到齿轮箱，通过转向架支撑。扭矩从较大的大齿轮处通过连接行星齿轮和带有橡胶悬挂的多个连杆进行传输，这些连杆传动空心轴上的连接行星齿轮。从空心轴处，扭矩通过进一步的联接行星齿轮和带有橡胶悬挂的多个连杆进行传输，这些连杆进一步传动一侧的车轮。相对运动通过连杆的橡胶悬挂的弹性变形进行补偿^[10] (**→第40、42、46、49和51页**)。

空心轴传动可用于所有电动轨道车辆，尤其适用于速度更高的车辆或对降低车轮/轨道磨损具有更加严格要求的应用。在空心轴传动设计刚刚引入市场的初始阶段，在两侧同时应用弹簧悬挂来实现更高的额定功率。



应用过程中作用的全悬挂空心轴传动原理



两侧配有齿轮箱和弹簧悬挂的全悬挂空心轴传动

带有更宽的内圈的NJ设计圆柱滚子轴承，从而提供内圈偏置，实现更大的轴向位移

纵向传动

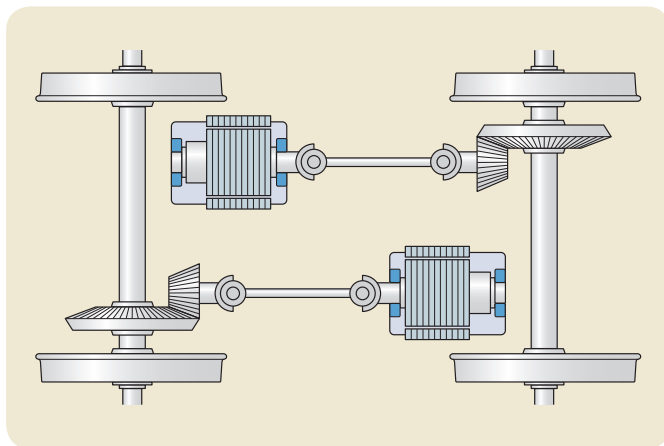
半悬挂传动

该极其基本的设计原则用于传动设计的动车组车辆、地铁列车、轻轨车辆，以及有轨电车。牵引电机在转向架上完全采用弹簧支撑，并通过弹性联轴器来传动螺旋齿轮箱。与单发动机传动设计相比(→第36页)，该设计原理(→第50页)可用于对降低车轮/轨道磨损具有更严格要求的应用。

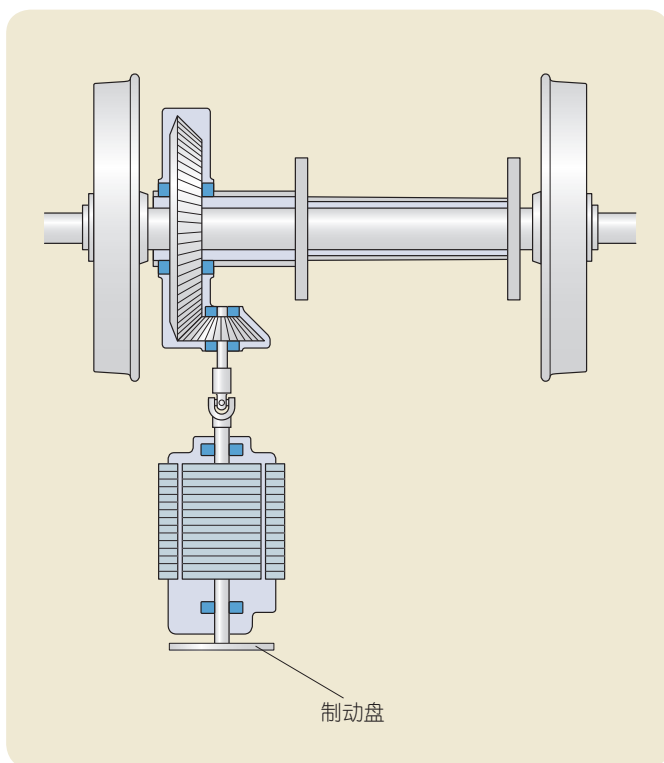
在某些情况下，可以观测到额外的轴向力，因为万向节传动轴在使用过程中无法承受轴向运动。

全悬挂传动

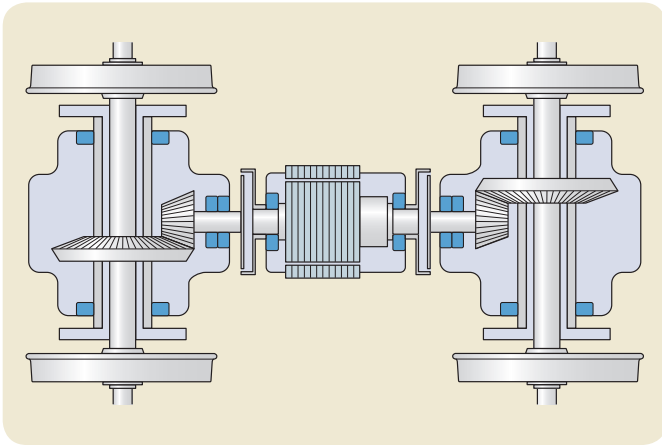
对于高速应用，采用完全悬挂的纵向传动配置。牵引电机由车身支撑，并传动万向节传动轴。该轴通过空心轴连接到齿轮箱。轴可通过联轴器传动轮对。轴可通过联轴器传动轮对。



城轨车辆的半悬挂纵向传动原理



全悬挂纵向传动原理

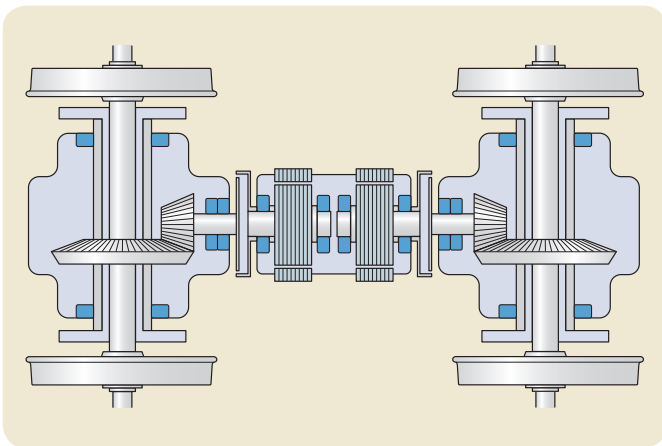


一个牵引电机传动两个螺旋齿轮箱的全悬挂纵向传动

单电机转向架设计

在二十世纪五十年代，曾使用通过一台牵引电机传动转向架的两个车轴。该配置也称为“单发动机设计”。通过机械方式耦合两个轴的优势在于，可以得到更高的粘着率，即使在湿润且光滑的轨道/车轮条件下也可实现更高的加速和制动效果。其不利之处在于，运行过程中，两个车轮直径发生变化，则会产生无功电能。功率通过两个螺旋齿轮箱传输到车轮上，因为轮对速度不同，功率必须通过轻微的滑动来进行平衡。

该设计已在几十年来停止使用，原因是最近的横向传动设计可以实现更低的质量。但是，其基本原理当今仍用于低地板轻轨车辆和有轨车辆。在该情况下，将应用单独的车轮，并且一台传动单元将驱动两个连续的车轮(→第52页)。



一个牵引电机和两个转子传动两个螺旋齿轮箱的全悬挂纵向传动

带两个转子的单发动机转向架设计

为了消除车轮直径不同时产生的无功电能，牵引电机配有两个转子。

牵引电机

第1步

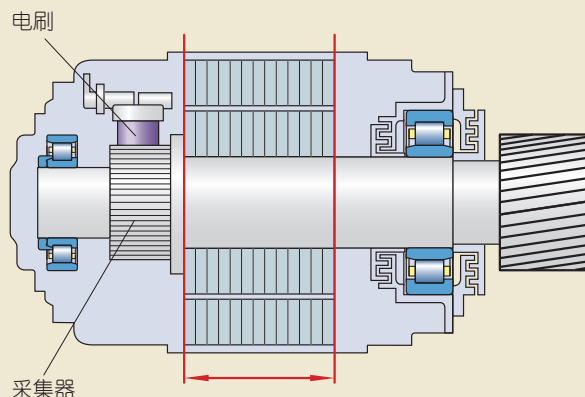
从牵引电机的开发初期起，设计就基于在电气上与电刷相配合的采集器。采集器和电刷都需要较高程度的维护要求(→第11和47页)。

第2步

在二十世纪八十年代早期，AC(三相交流电)推进设计普遍应用于所有类型的电力和柴油电力铁路车辆。AC技术可供开发转子速度更高的牵引电机，使给定尺寸的电机更加紧凑或提高功率。较重的径向载荷，尤其是作用在传动端轴承上的载荷，来自于牵引功率提高后所增加的电机扭矩。由于使用了螺旋轴承并增加了螺旋角度，更加重的轴向力可以作用在定位端轴承上。这就可以优化齿轮箱设计和效率，从而减小体积并使噪声水平降至最低。

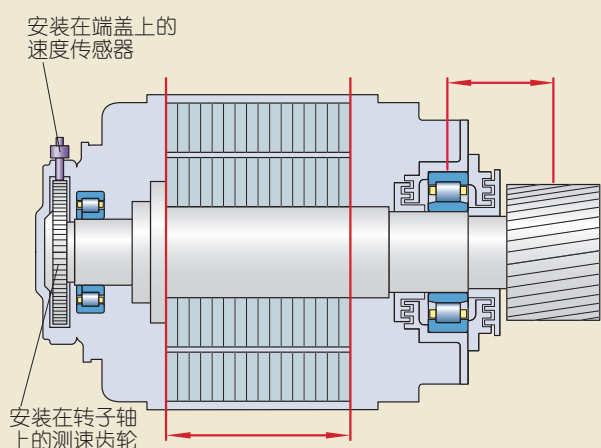
第3步

AC牵引电机引入了润滑油润滑的轴承，尤其是在传动端。通过将缩短小齿轮和传动端轴承之间的距离，这就减轻了悬臂效应。结果就是，减轻了相应的径向载荷并可使设计的尺寸减小，并且可以使用额定速度更高的轴承。与润滑脂润滑的轴承相比，润滑油润滑还可实现更高的轴承速度(→第40页)。



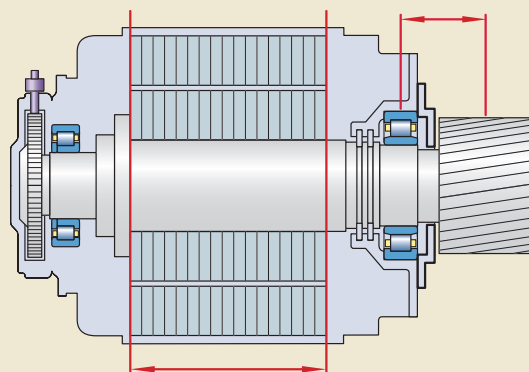
第1步

传统设计的DC或早期AC(单相)牵引电机带采集器和电刷



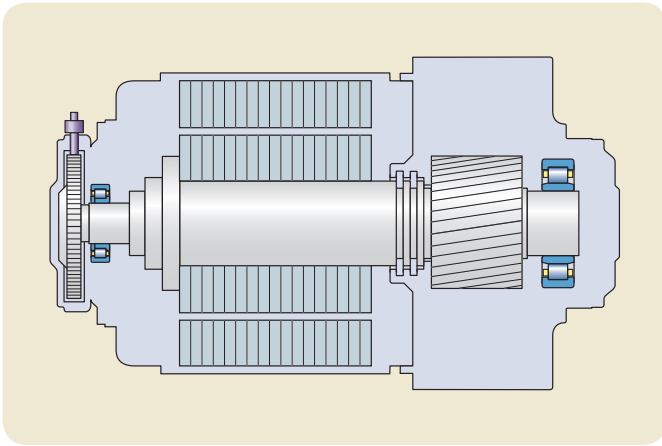
第2步

无刷AC(三相交流电)牵引电机，配有用于驱动系统的速度传感器。早期采用电气绝缘的INSOCOAT轴承用于防止破坏性的电流通过轴承(→第4章)。



第3步

AC牵引电机，在小齿轮端的传动端轴承现在采用齿轮箱油进行润滑，从而可以降低小齿轮的悬臂效应。轴承载荷降低后可以实现尺寸的缩小，从而可供使用额定速度更高的轴承，更为适宜于应用的转子速度。这就进一步利于使用额定功率提高的牵引电机。对于牵引电机的设计，电气绝缘的INSOCOAT轴承逐步成为标准配置。



第4步

AC牵引电机，传动端非定位端轴承受齿轮箱外壳的支撑。从而再不存在任何悬臂效应，并且轴承总载荷将减小。因此，可以进一步减小轴承尺寸，使得设计更加适用于提高的电机速度(→第45至46页)。电气绝缘轴承已成为一种标准配置。根据频率和电容的不同，以及欧姆电阻，与具有更高频率的应用类似，使用带陶瓷滚动体的混合轴承来取代INSOCOAT轴承。

第4步

构成齿轮箱配置一部分的传动端牵引电机轴承配置可以完全消除悬臂效应，并实现更低的支撑载荷。作为齿轮箱配置的一部分，这些轴承采用润滑油润滑，适用于相对较高的转子速度。该设计用于高速列车、机车以及公共交通工具。

由于为机车和动车组车辆的推进系统引入了频率转换器控制的电机，对牵引电机轴承的需求显著上升。在大多数电流应用中，高频杂散电流是无法避免的。通过滚子轴承的电流可以在短时间内导致损坏。

根据应用需求的不同，SKF为牵引电机轴承的电气绝缘提供三种基本的设计解决方案。根据欧姆电阻、频率和电容，电阻抗是一个矢量函数。电容是对给定电势下充电量的一个测量结果(→第4章)。

第5步

全球范围内一个不断增长的趋势就是使用预安装、出厂前注脂的轴承单元，在两侧配有集成的密封系统。这类单元可以大幅度简化安装过程，并可实现更高的可靠性与安全性。

牵引电机轴承单元(TMBU)的概念为实现空间节省、简化安装过程、延长维护时间间隔以及改进性能带来了许多新的机会。TMBU设计用于通过法兰安装到外壳上。非传动端TMBU设计一般使用专用润滑脂进行润滑，从而即使在较高的运行温度下也可延长润滑脂寿命。该轴承单元配有非接触式迷宫密封件，可以在无摩擦情况下运行，从而不会产生磨损。

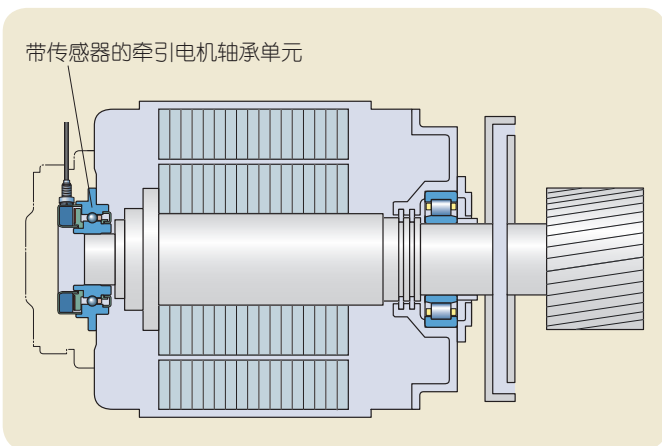
为了提高可靠性，可以使用INSOCOAT涂层或带有陶瓷/氮化硅滚动体的组合式设计来实现电气绝缘。

TMBU的设计带来了节省空间的机会，特别是在轴向方向上。在使用TMBU后，对于给定的电机尺寸可以产生更高的牵引电机功率。

这些轴承设计在许多情况下可以实现更长的额定寿命。

第5步

密封并且预填充润滑脂的牵引电机轴承单元(TMBU)设计，在牵引电机的非传动端实施。根据频率和电容的不同，以及相应的欧姆电阻，与具有更高频率的应用类似，使用带陶瓷滚动体的混合轴承来取代INSOCOAT轴承。



该计算基于载荷条件、可靠性，以及考虑润滑条件和操作期间污染水平的SKF寿命修正系数。由于润滑脂性能的原因，必须考虑现场使用寿命的限制(→第5章)。

发电机

为了在轴向方向上节省空间，使用法兰将发电机通过塑性联轴器直接安装到内燃机上。非传动端发电机轴承仅可承受径向载荷。

安装了发电机的中型内燃机也称为电源组。

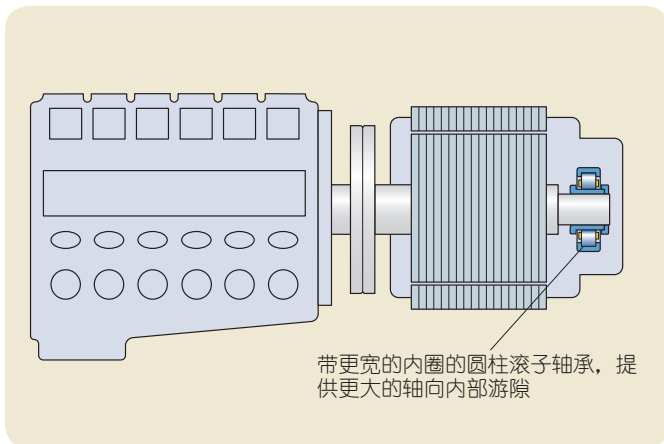
高速车辆

对于几百公里或更长距离的中等距离运输，高速铁路与飞机和汽车相比，可以称为极具吸引力并且更加环保的选择方案。在大多数情况下，列车可以直接通达市中心，而无需使用耗时的接送车辆或在拥堵的机动车道上驾驶，并且遭遇停车问题。

当今，高速铁路在全球范围内大多采用电力运行，仅仅存在很少的例外情况。有关高速的定义以及附加信息，请参阅第226页。

单轴承发电机的设计原则

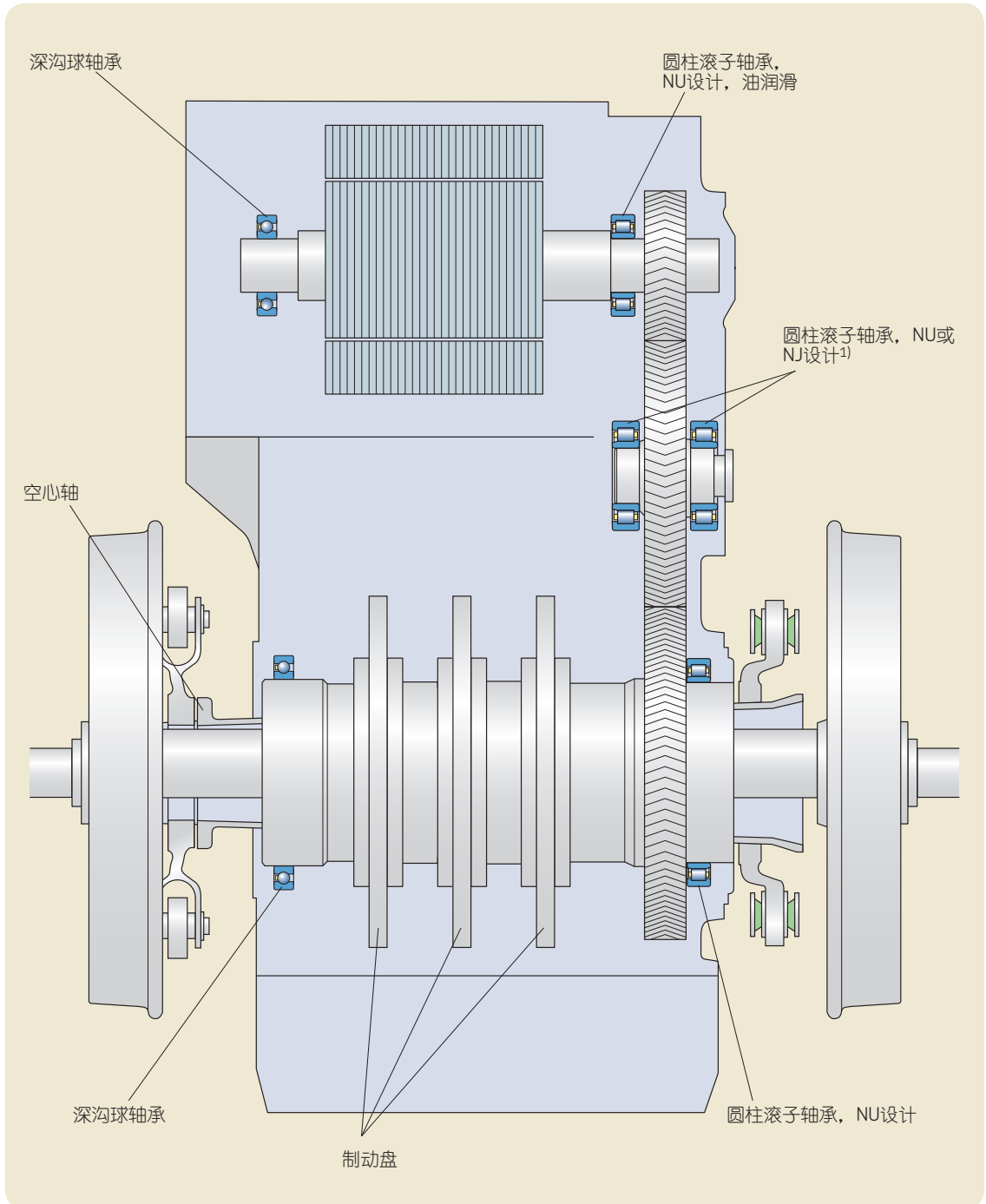
在发生轴向运动的情况下，需要在两个方向上以几个毫米为单位来增加圆柱滚子轴承的轴向游隙。通过使用带专门设计的更宽的内圈的圆柱滚子轴承可以实现这一点。



动力端部单元

在多年以前，动力单元也称为“动力端”，位于车辆一端或两端上。

这些单元安装在乘客乘坐区域之外，极其类似于机车的设计。由于采用了有限数量的动力轴，这种配置更高的轴重，轴重大对轨道上产生不利的动态效应。

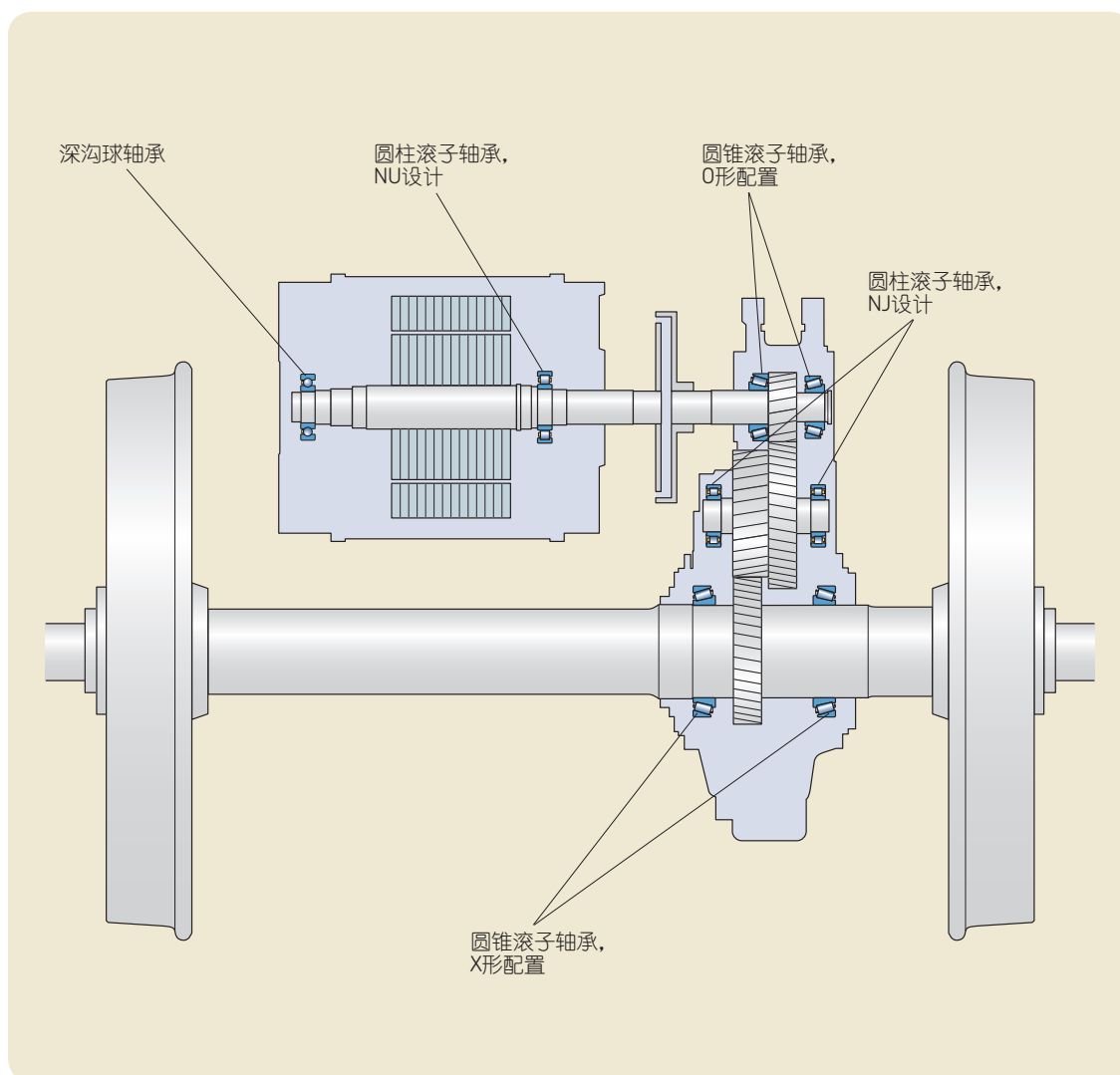


高速动力端部单元传动系统，水平视图

¹⁾ 双螺旋齿轮箱在轴向上与牵引电机轴和带深沟球轴承的轮对定位。中间轴无需定位。原则上来说，可以应用NU设计的圆柱滚子轴承。在某些情况下，出于操作原因，使用NJ设计。在该应用中，内圈/外圈必须以一定的偏移角度安装。可行的规格为VA301(→第80页)或者更宽的内圈滚道。

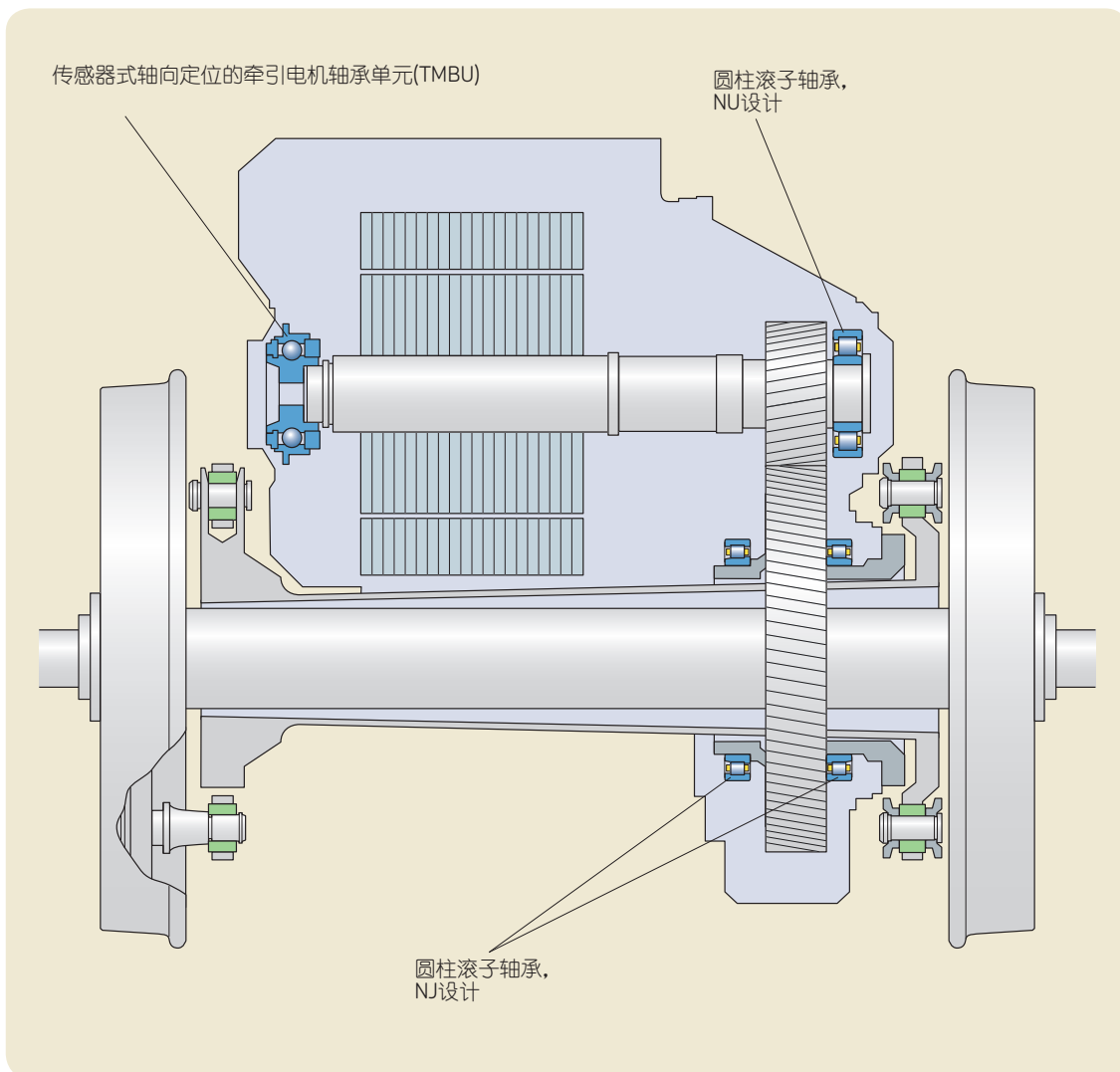
动力分散驱动车辆

当今的一个趋势就是在越来越多的客车中使用动力轴以实现较低的轴重。这类多轴驱动系统在每条轴上的功率要低得多，尺寸相对较小，并且与用于低速的其他电力动车组车辆具有许多类似之处。对于公共交通车辆，也采用了类似的传动系统。



半悬挂驱动系统

全悬挂，空心轴传动系统



电力和内电机车

通过电力运行的货运列车由电力机车所牵引。其设计可以采用典型的货运车辆速度，或作为可用于客运列车的多用机车。尤其在欧洲，某些机车在230 km/h的速度范围内和较高的额定功率下同时用于货运和客运列车。这类用途就对传动设计提出了极为不同的要求。

柴油动力的货运列车可以通过带电传输的机车进行牵引。在该情况下，发电机通过法兰连接到内燃机，并且齿轮箱(→第39页)和牵引电机极其类似于电力机车应用。对于重载货运列车极为典型的一点是使用带有4至6条轴并且大轴重的机车。另一解决方案是使用液压动力传输，对于两个方向上的运行采用反向齿轮(→第58至59页)，并且在轮对上使用万向节传动齿轮。对于较小的功率和速度，使用机械和流体静力传动系统。

抱轴式悬挂

抱轴式悬挂传动配置已在第11页的第1章和第30至32页中涉及。当今，该传动原理已经过进一步发展来更好的结合到解决方案概念中，从而可以降低可产生作用在车轮/轨道系统上的附加的动态力的簧下重量。

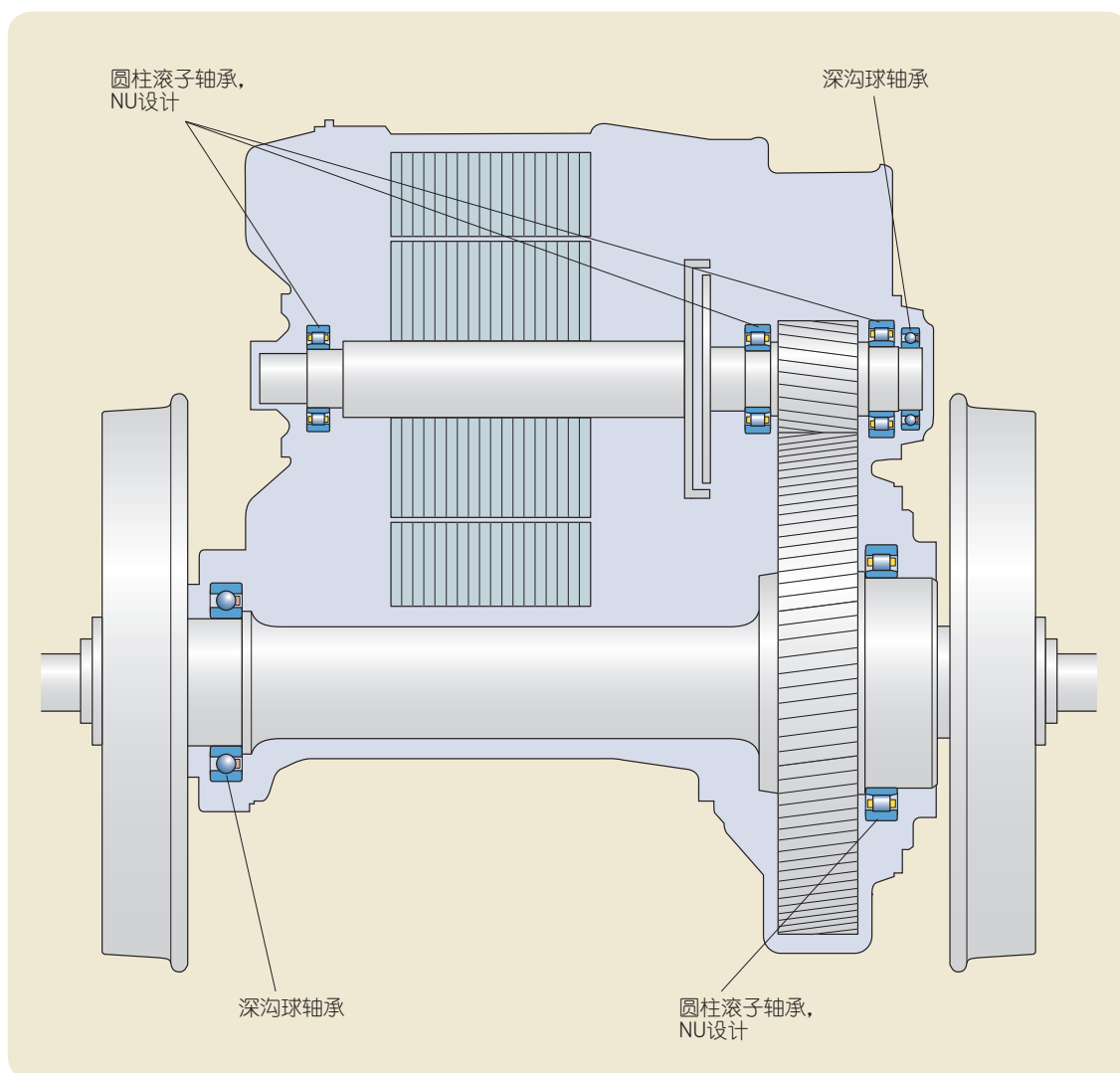
集成式抱轴式悬挂传动

集成原则可使牵引电机和齿轮箱嵌入到一个单元中以节约质量和空间。另一优点在于，无需使用润滑脂进行润滑并且承受重载的悬臂小齿轮轴承。该设计可以使轴承的载荷降低，从而使轴承的尺寸大幅度减小，以便部分采用润滑油润滑。

带3个或更多轴承的输入轴

该设计的特点如下：

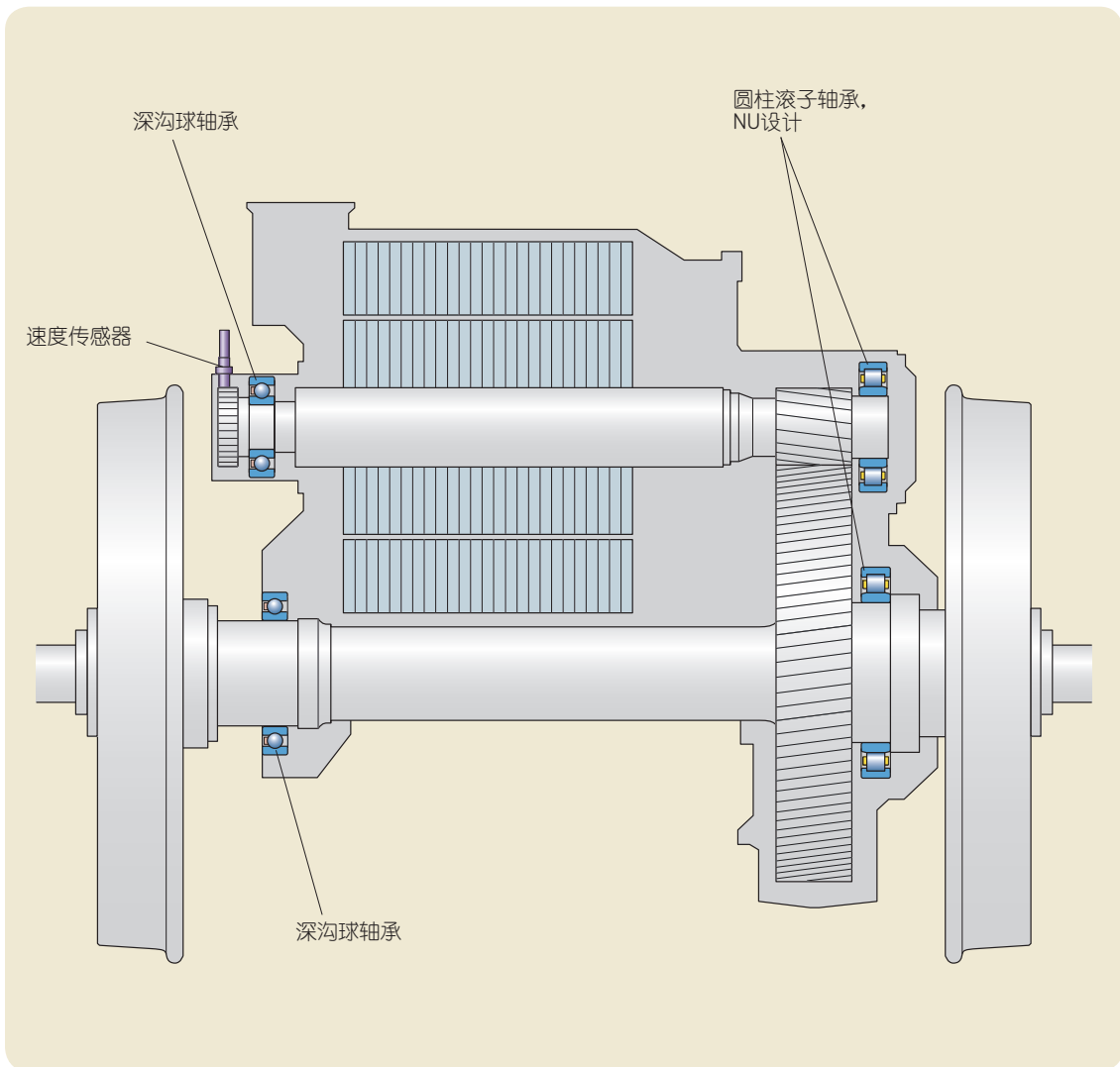
- 牵引电机：直接法兰连接，仅有一个轴承位于非传动端，圆柱滚子轴承，NU设计或NUP/NH设计(→第75页)采用特殊的轴向游隙来承受弹性联轴器的轴向运动。
- 齿轮箱轴通过弹性联轴器与牵引电机连接：主要通过两个NU型圆柱滚子轴承承受径向载荷，使用深沟球轴承承受轴向载荷。
- 齿轮箱悬挂：传动端配有NU型圆柱滚子轴承，非传动端配有深沟球轴承，可承受径向和轴向载荷。



带2个轴承的输入轴

该设计采用弹性联轴器的替代品以及一个齿轮箱轴承或轴承配置。牵引电机轴和齿轮箱输入轴的功能实现了统一。这一常用的轴在传动端采用油润滑NU型圆柱滚子轴承，并且在另一端采用可以承受轴向和径向载荷的脂润滑深沟球轴承。

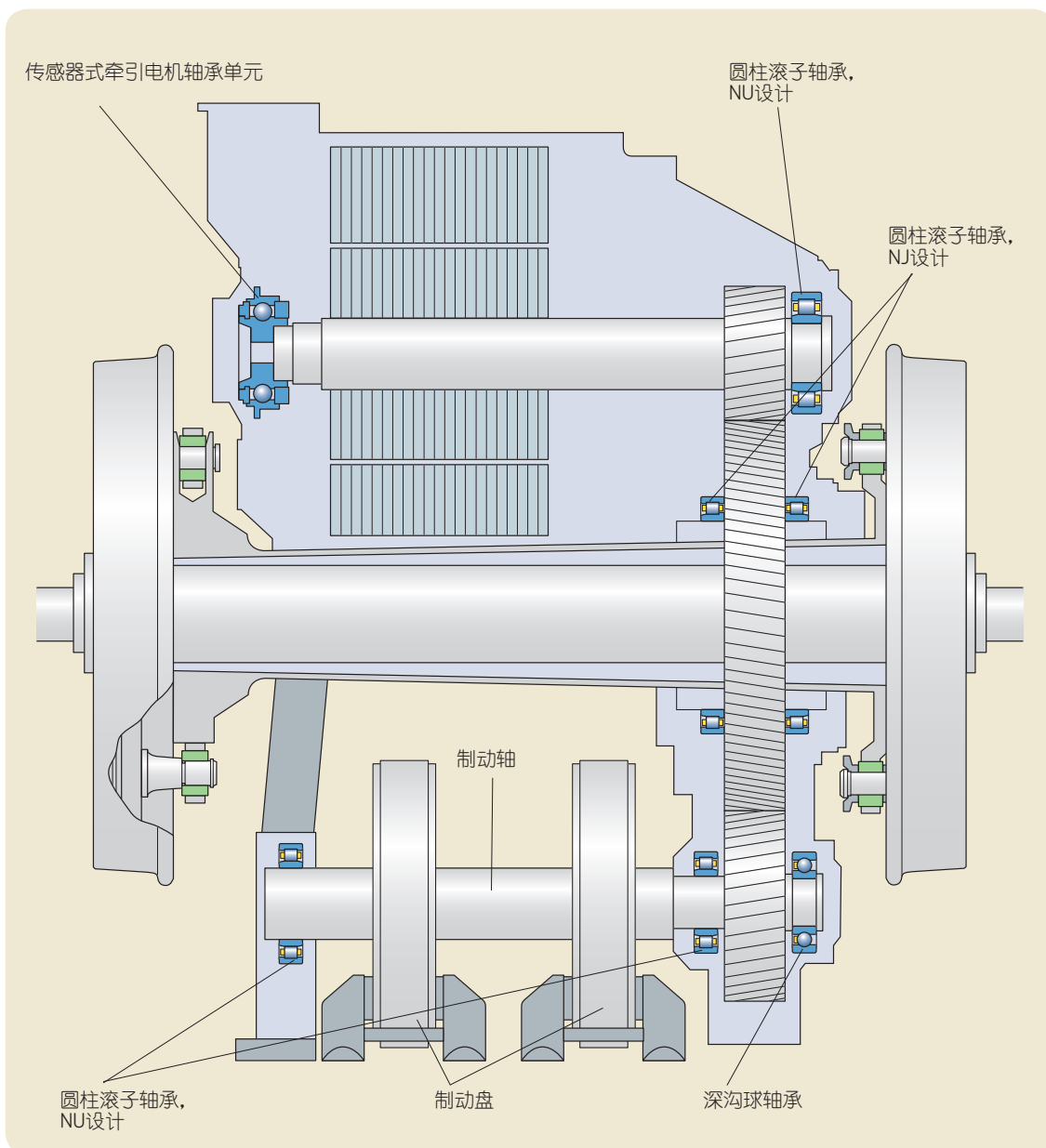
齿轮箱悬挂在传动端配有NU型圆柱滚子轴承，并且在非传动端配有可以承受径向和轴向载荷的深沟球轴承。



抱轴式悬挂传动

全悬挂传动

全悬挂空心轴横向传动原则可以应用于高速机车以降低动态振动。一个设计变型就是配有专用制动轴的齿轮箱。与轮对的速度相比，该轴的速度高得多，从而可以实现更好的制动器利用率，尤其是在高速运行的条件下。



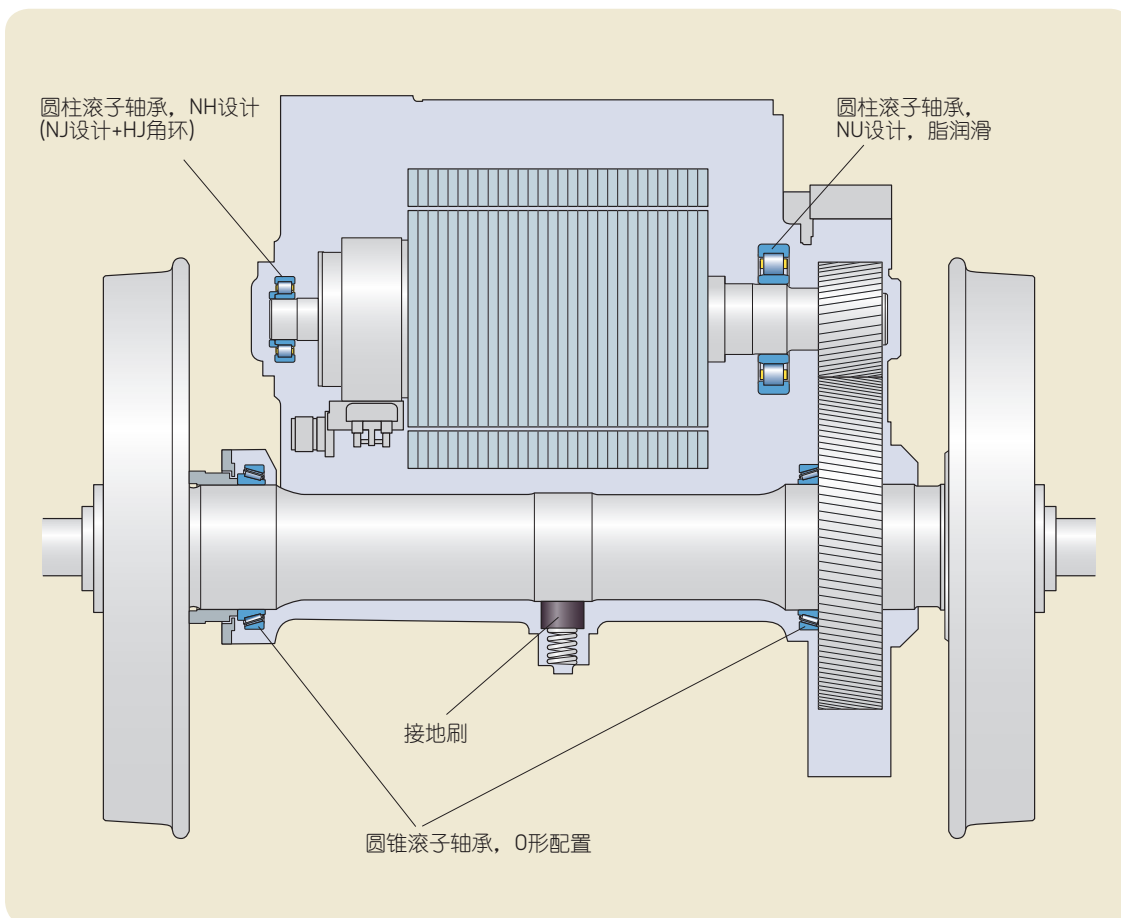
电力和柴油电力乘用车

电力和柴油电力乘用车的主要传动设计可以用于不同的车辆类型。可以作为动车组用于远距离和区域性服务，以及用于公共交通应用。公共交通包括市郊列车，也称为城市轻轨，以及地铁列车和有轨电车。采用高地板设计的所有这些车辆都具有相似的传动配置。

低地板轻轨车辆和有轨电车的传动设计在**第51至57页**中介绍。

横向传动

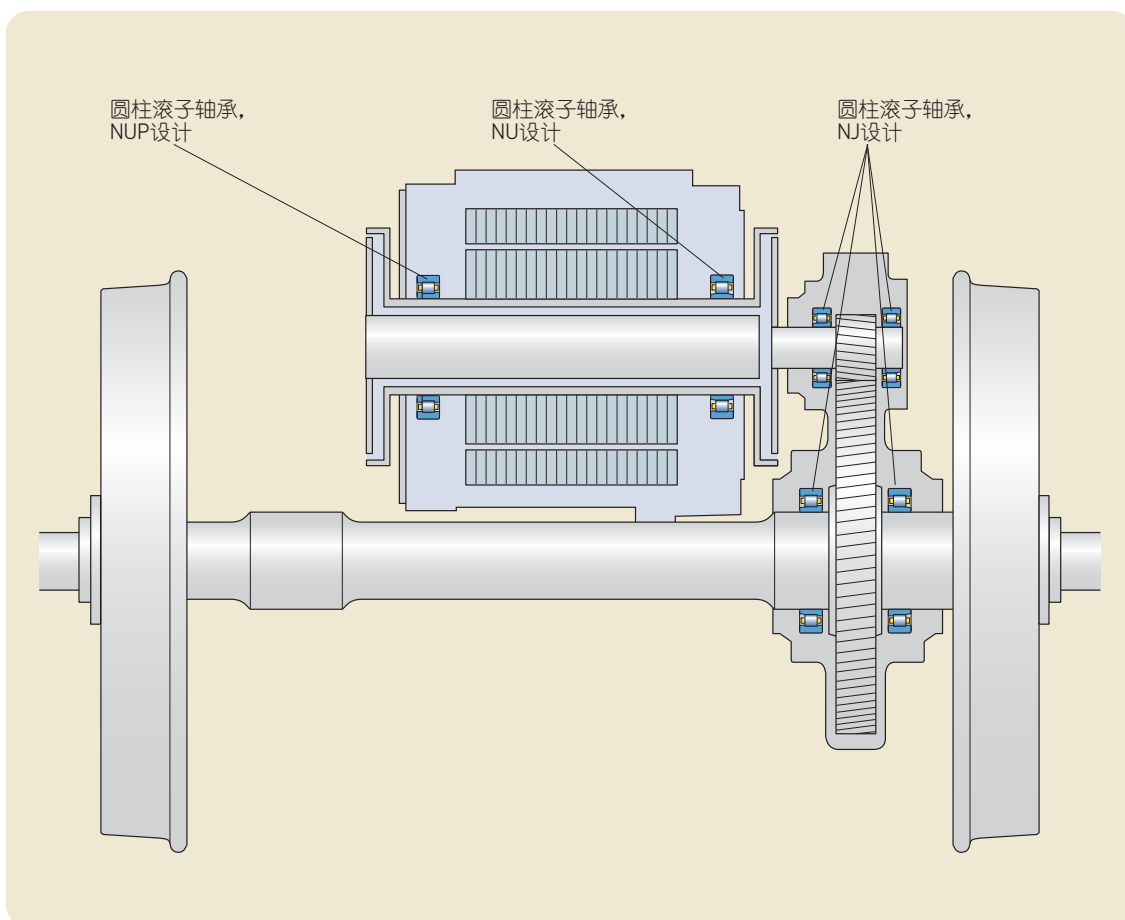
尽管存在抱轴式悬挂传动原则，还存在多种其他传动原则，用于横向和纵向配置。



地铁车辆的抱轴式悬挂传动
在轮对轴上滑动的接地刷在抱轴箱筒的中间位置接受支撑

半悬挂传动

带有角引导齿轮箱的半悬挂传动系统可以采取空心轴牵引电机设计来降低动态振动。相对较大的轴承仅通过轴和转子的重量进行加载。与轴承的额定载荷相比，这些力极其微小。如果没有预见抵消作用，在滚道和滚子上可能发生粘滞。

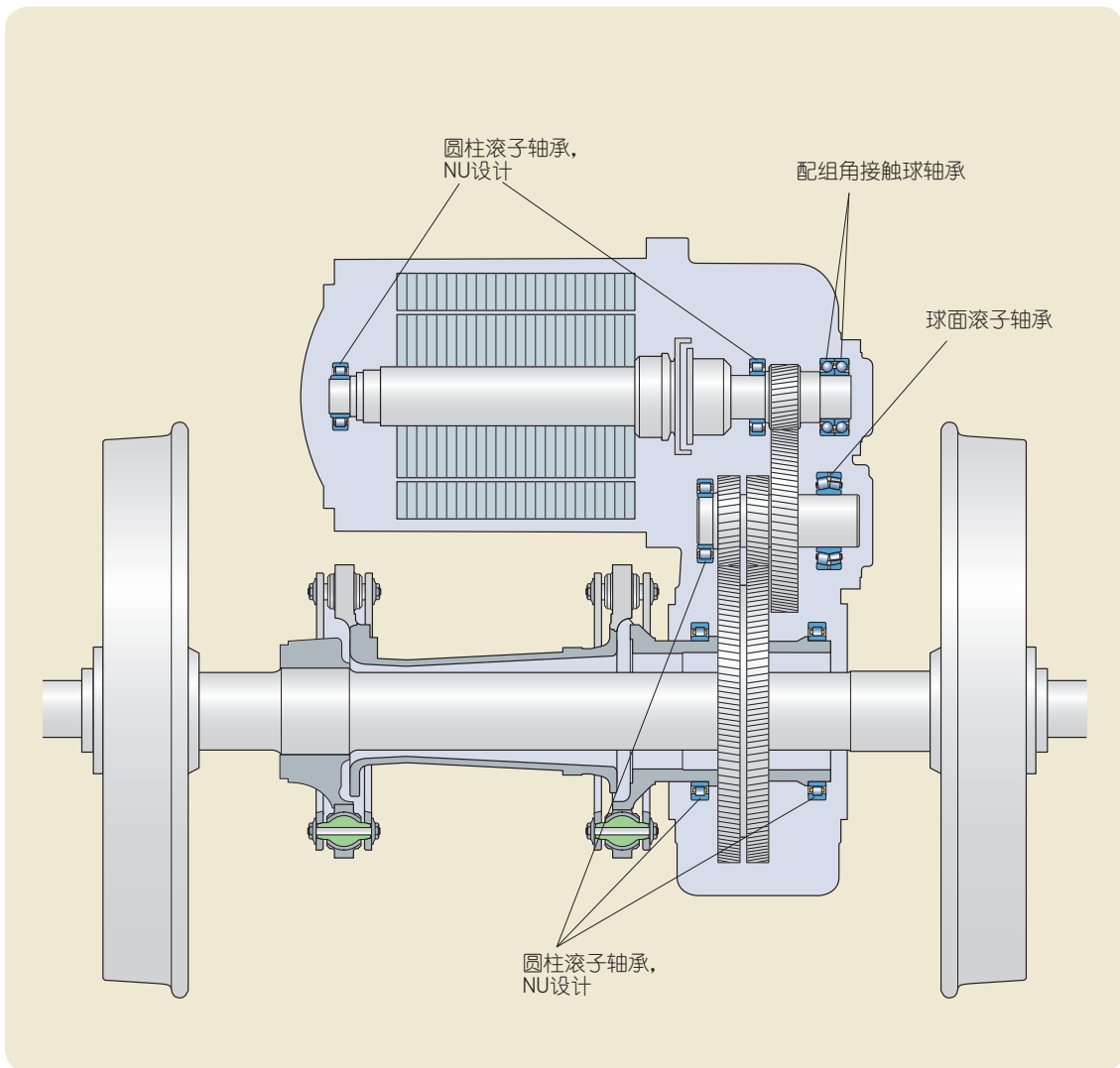


横向空心轴传动，其中牵引电机具有空心轴。该轴在两侧安装了弹性联轴器。

全悬挂传动

与高速车辆应用类似，空心轴横向传动原理也可用于许多其他车辆类型。由于弹簧挠度较小，与高速车辆相比，空心轴原则可以采用小得多的长度。在齿轮箱的空心轴上，可以安装盘式制动器^[10]。

这些传动系统可以用于地铁、轻轨车辆，并可部分用于低地板轻轨车辆以及有轨电车。这些车两侧安装传统的转向架，并且一个或多个低地板部位装配非传动轴或直径更小的独立车轮。

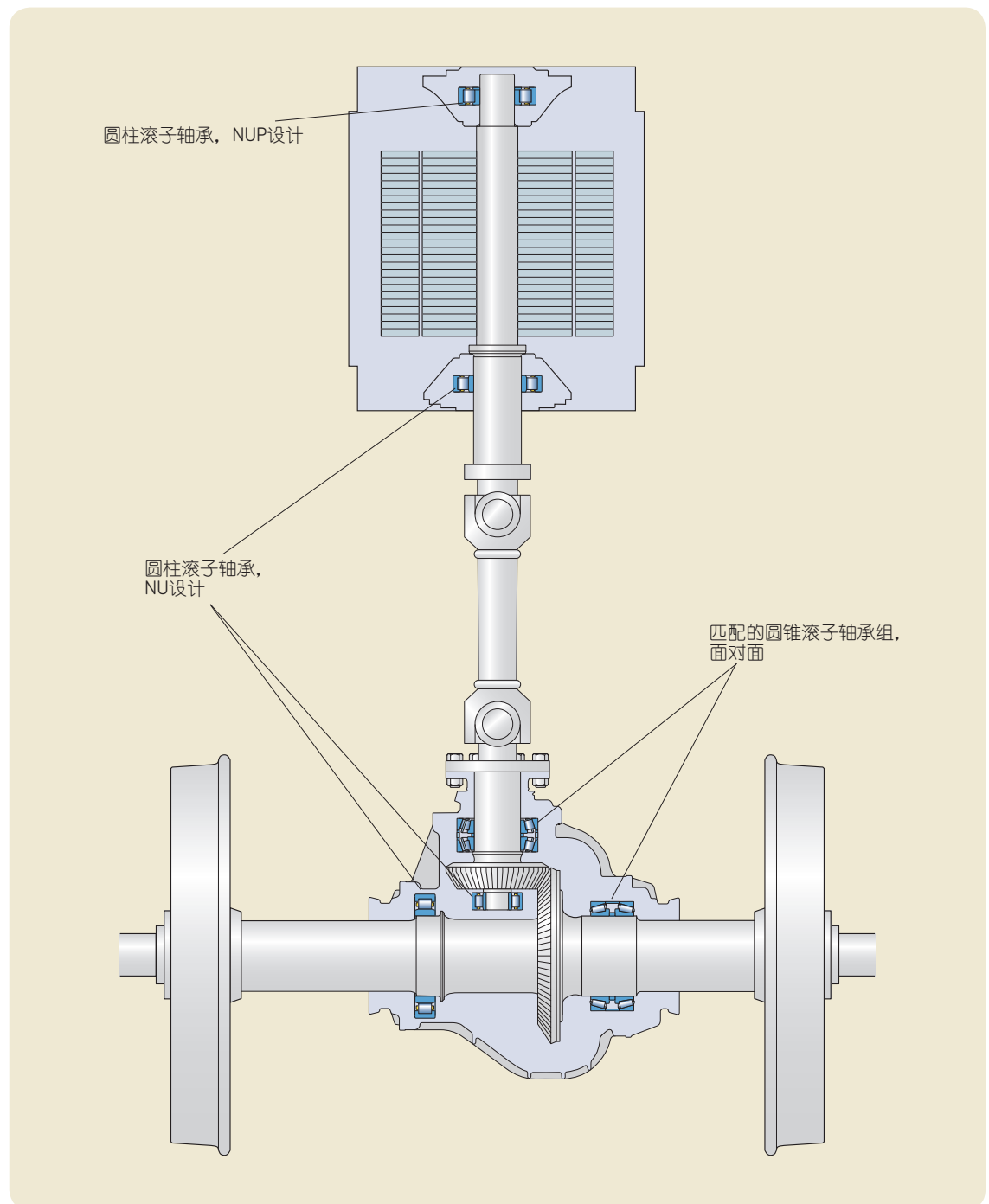


用于高速应用的全悬挂传动系统

纵向传动

纵向传动配置中含有可以配置为轴引导或配备空心轴传动的螺旋齿轮箱，以及具有牵引电机的纵向万向轴。该设计可以减小簧下质量以及作用在牵引电机上的动态振

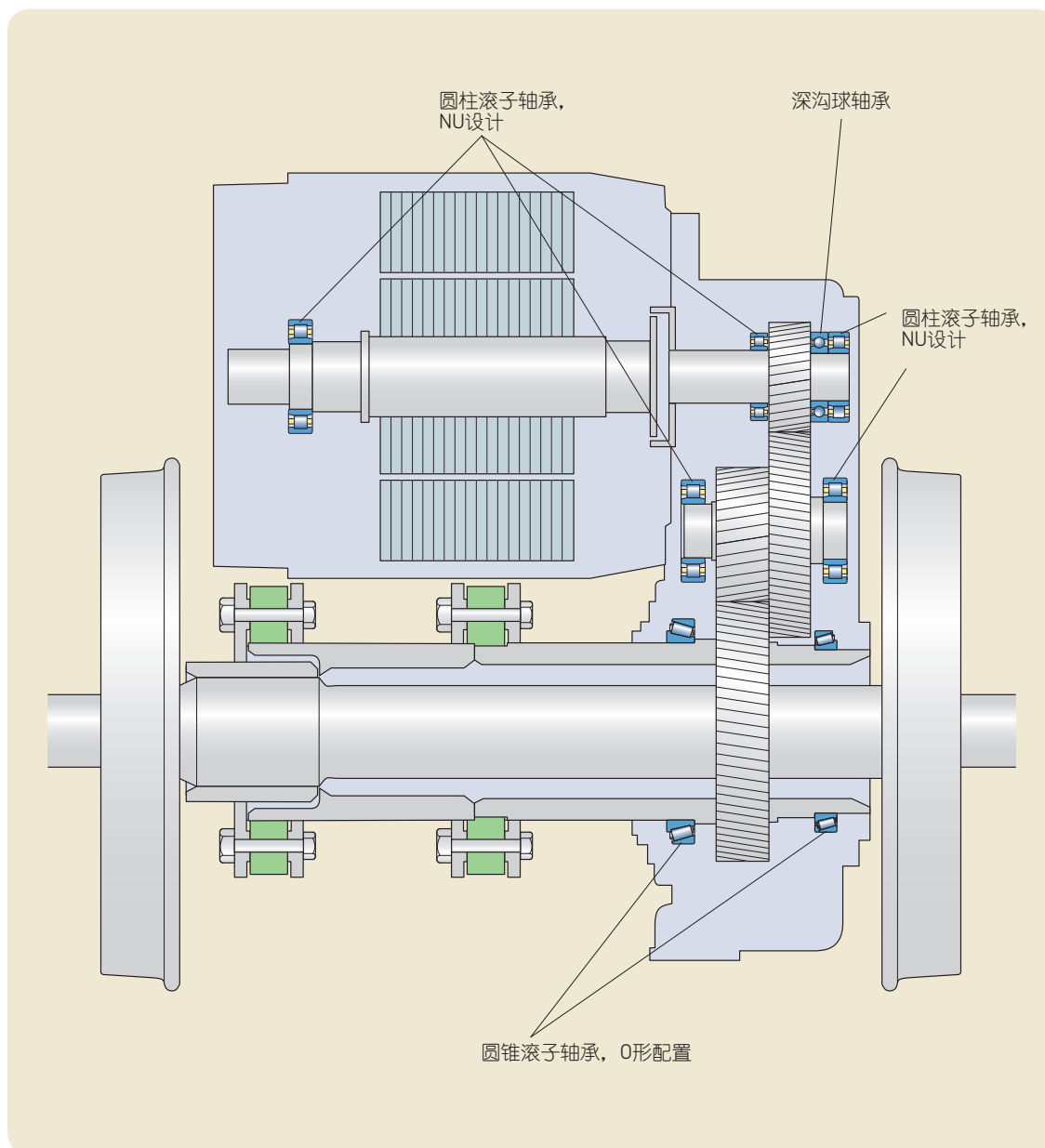
动。牵引电机可以通过转向架设计或车身进行支撑^[11]。相对较长的万向轴在温差的作用下膨胀，将对轴承产生一定的轴向载荷，如果轴向载荷超出特定值，会导致轴承过早失效。



纵向传动配置，包含可以配置为轴导向或配备空心轴传动的螺旋齿轮箱、纵向万向轴，以及牵引电机

低地板车辆

当今，低地板轻轨车辆和有轨电车采用极其不同的传动配置。这些设计以具体使用需求、制造商的设计原则以及严格的空间限制为基础。



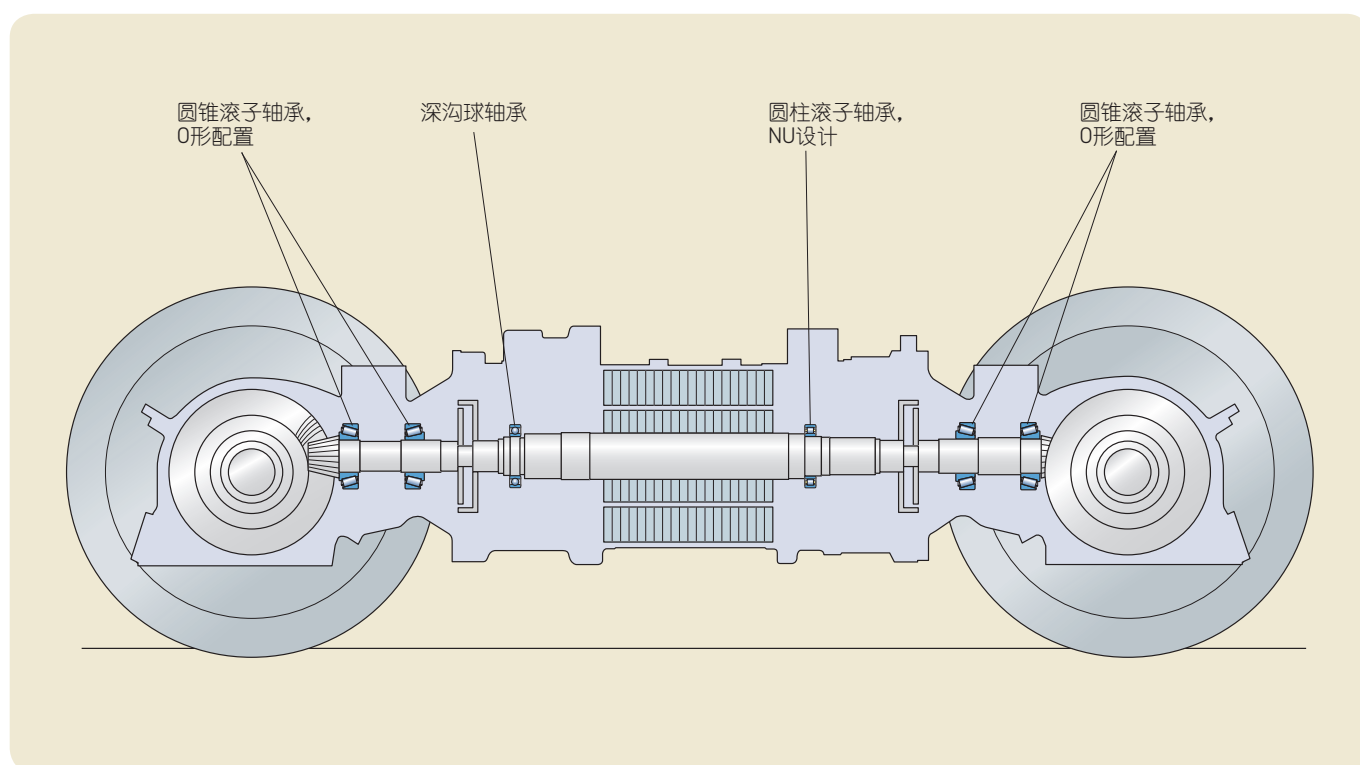
用于70%低地板轻轨车辆的横向传动系统，采用全弹簧悬挂。该集成式传动系统用于低地板车辆中剩余的高度较高的部分，可提供更多的空间。牵引电机轴的轴向定位可以通过联轴器和齿轮箱输入轴来实现。非传动端的牵引电机轴承具有非定位功能，并且仅支持径向载荷。

双轮传动

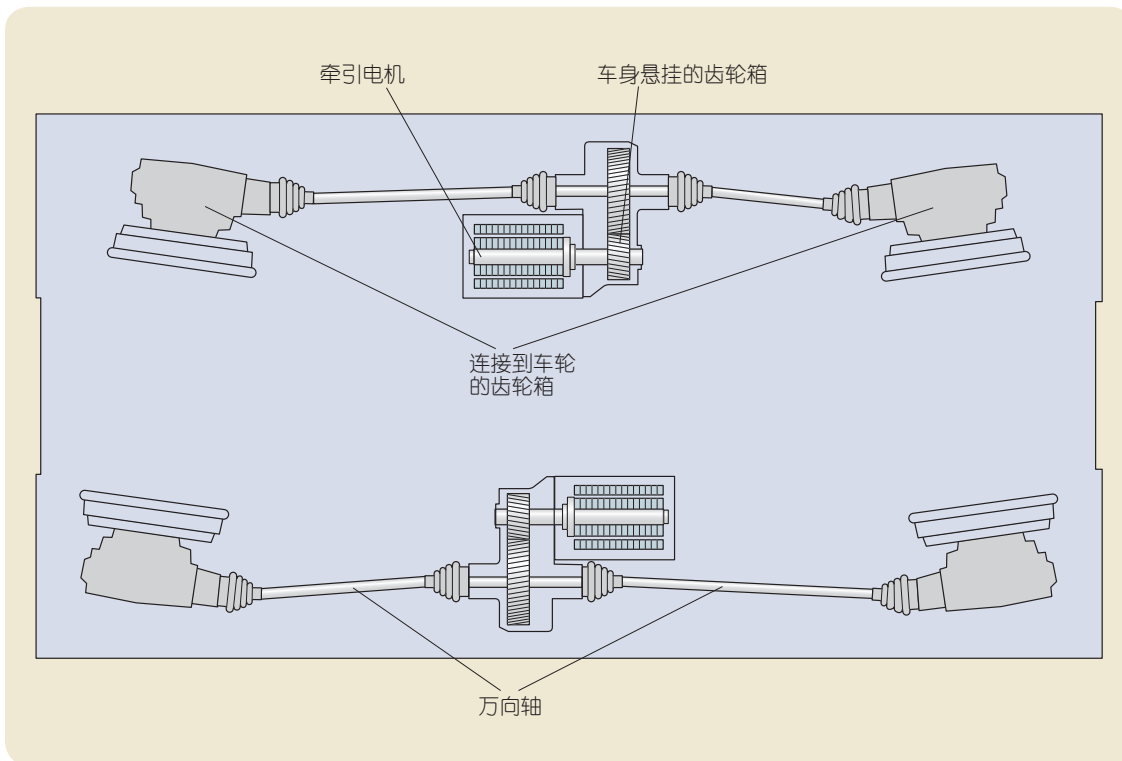
纵向传动

双轮传动系统是一种纵向传动，其中一台牵引电机传动转向架上的两个连续车轮。带有两个传动端的牵引电机的扭矩通过弹性联轴器传输到直角齿轮箱。较大的大齿轮通过较短的空心轴连接到车轮^[10]。

用于低地板轻轨车辆的两个连续车轮传动



对于低地板车辆部分的转向架，使用具有纵向牵引电机和传动齿轮箱设置。牵引电机通过伞齿轮传动万向轴。每个万向轴都连接到传动独立车轮的齿轮箱。制动器(此处未显示)连接到中间的伞齿轮齿轮箱。

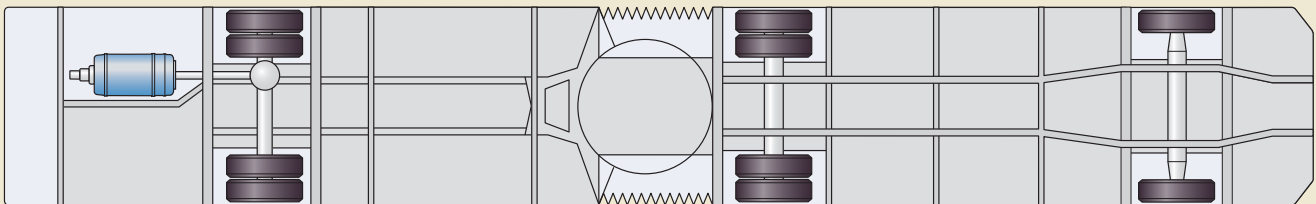


中央纵向牵引电机传动、用于低地板轻轨车辆的两个连续转向轮，以及万向轴、齿轮箱和独立车轮组成的系统

用于无轨电车的纵向传动

低地板无轨电车配有纵向牵引电机。这样一般可以通过万向轴传动一侧的车轴。在许多情况下，铰接的无轨电车具有作用在后轴上的传动系统。在牵引电机的另一侧，空气制动系统的压缩机和发电机通过法兰连接。

用于低地板无轨电车的纵向传动原理。该传动系统驱动后轴。牵引电机在两侧配有牵引电机轴承单元。



低地板部分

车载照明系统
发电机

空气制动器
压缩机

结合了圆柱滚子的牵引电机
轴承单元(TMBU)

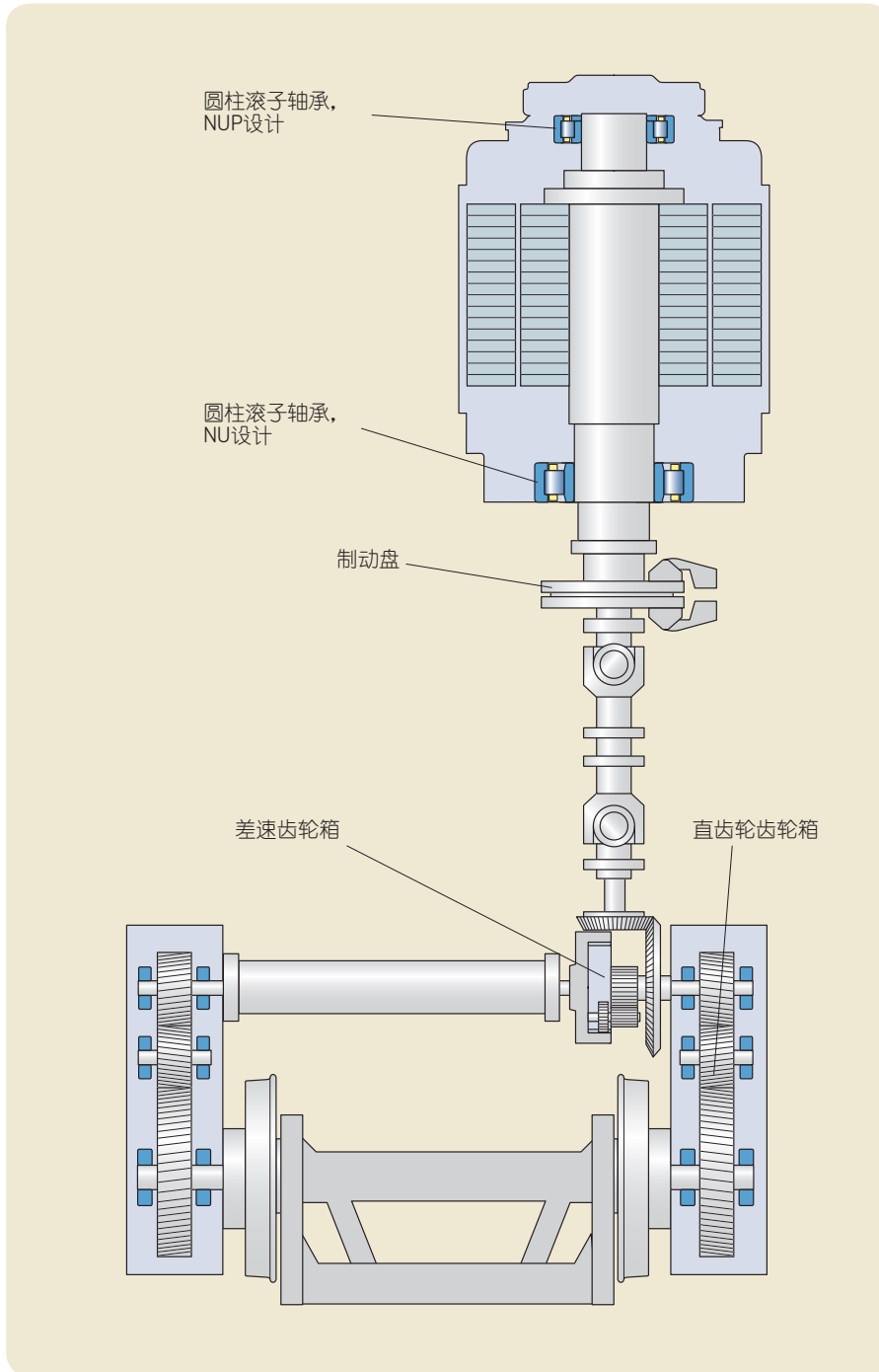
结合了球体的牵引电机轴承
单元(TMBU)

万向轴

纵向/横向传动

纵向牵引电机通过万向轴来驱动传动齿轮箱的轴承。这样可以通过正齿轮来传动一个车轮，并通过直角齿轮来传动横向轴。该轴的位置极低，从而可以获得使地板处于极低位置的自由空间，进而可供乘客更加方便地进入车内。轴通过正齿轮来传动另一侧的车轮。通过采用该传动系统，两个车轮可以通过机械方式进行耦合。¹⁾

¹⁾ 该传动系统最初用于曼恩公司设计的Bremen低地板车辆，随后由安达和庞巴迪公司生产。用于100%低地板轻轨车辆的首台系列应用的设计曾用于德国和日本的许多其他城市。



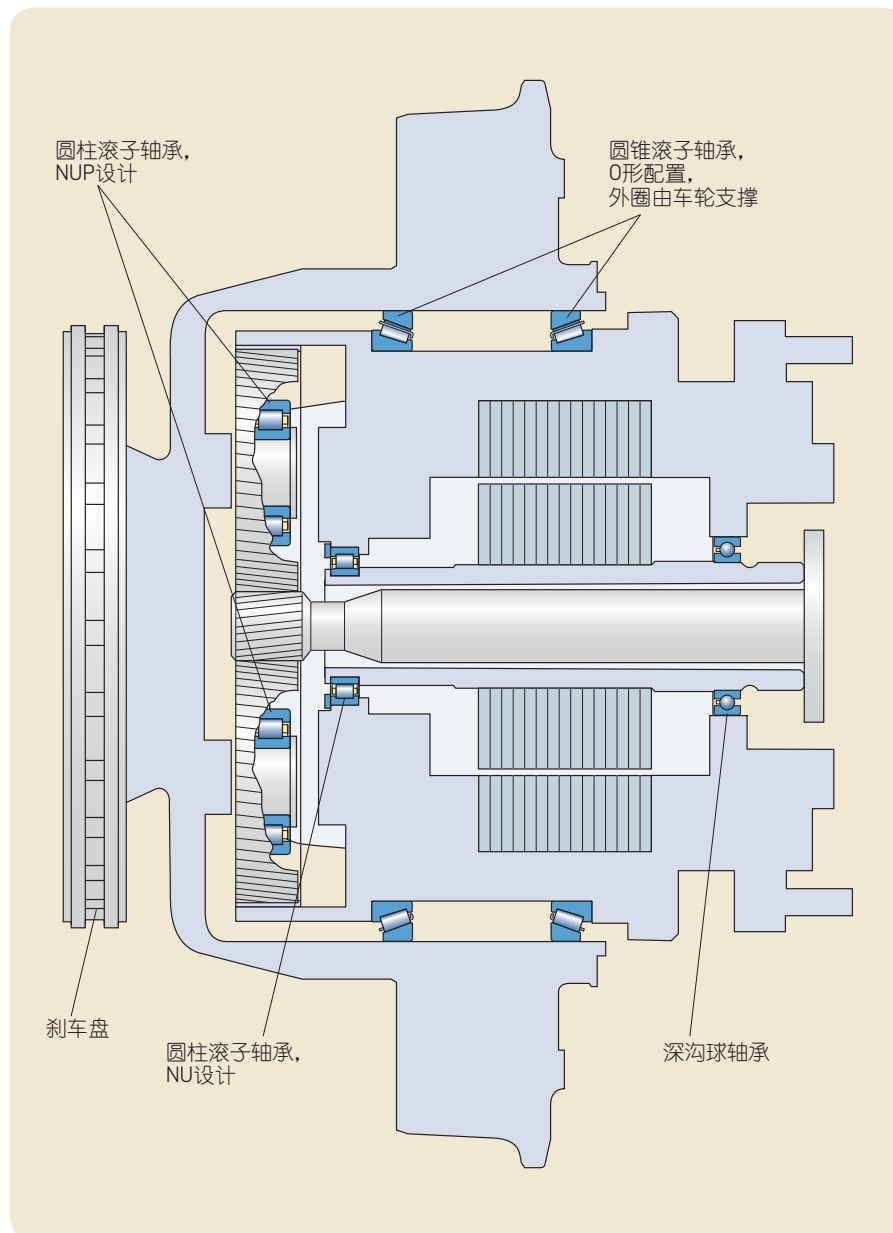
用于低地板轻轨车辆的纵向传动系统

独立轮传动

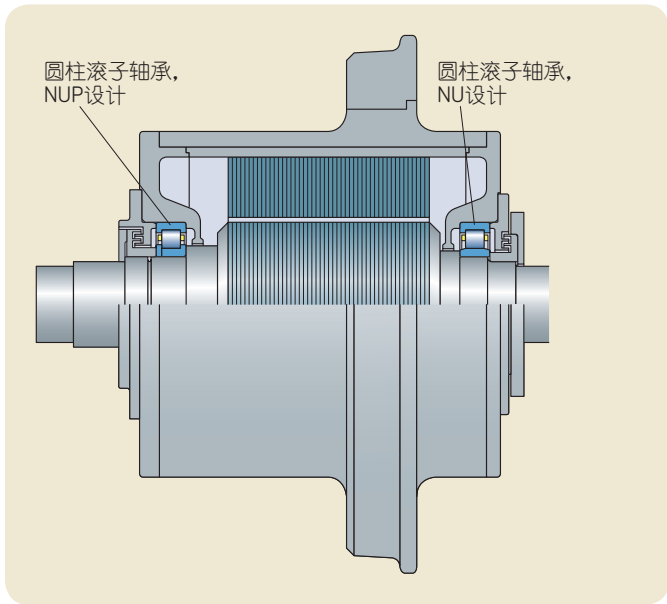
由于低地板车辆设计中存在空间限制，所以应用了单车轮传动系统，采用了多种极其不同的设计来满足操作人员和OEM的要求。主要优势在于，在单车轮系统之间存在自由空间，从而可将地板的位置布置的极低，可供乘客更加方便的进入车内。

行星齿轮传动

牵引电机通过其转子来传动行星传动齿轮箱的太阳轮。行星齿轮轴架与车轮配置相连接，车轮具有橡胶制的悬挂轮胎。与牵引电机转子类似，车轮配置在牵引电机定子外壳上通过两个圆锥滚子轴承进行支撑。



用于低地板轻轨车辆的单车轮传动系统的行星传动系统



轮毂电机传动系统，
通过圆柱滚子轴承支撑，外圈旋转

轮毂牵引电机

轮毂牵引电机的概念以带有集成式车轮功能的直接传动系统为基础。但当今，采用了极其不同的设计原则。其中之一就是在不使用任何齿轮箱或联轴器组件的情况下，牵引电机直接传动车轮并作为车轮支撑和导向^[4]。外部转子直接传动橡胶弹簧悬挂的轮胎。这种节省空间的配置特别适用于100%低地板有轨电车，其平面地板上不存在任何台阶或斜坡。

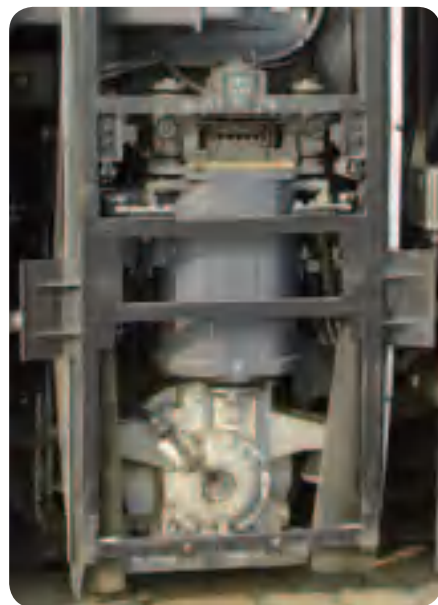
竖直传动

低地板车辆车身各部分之间的空间可用于容纳运行中的齿轮和传动系统。车辆各部分的连接接口通过车轮/齿轮箱单元进行支撑。

竖向牵引电机通过这些接口进行悬挂，并且传动车轮/齿轮箱单元。



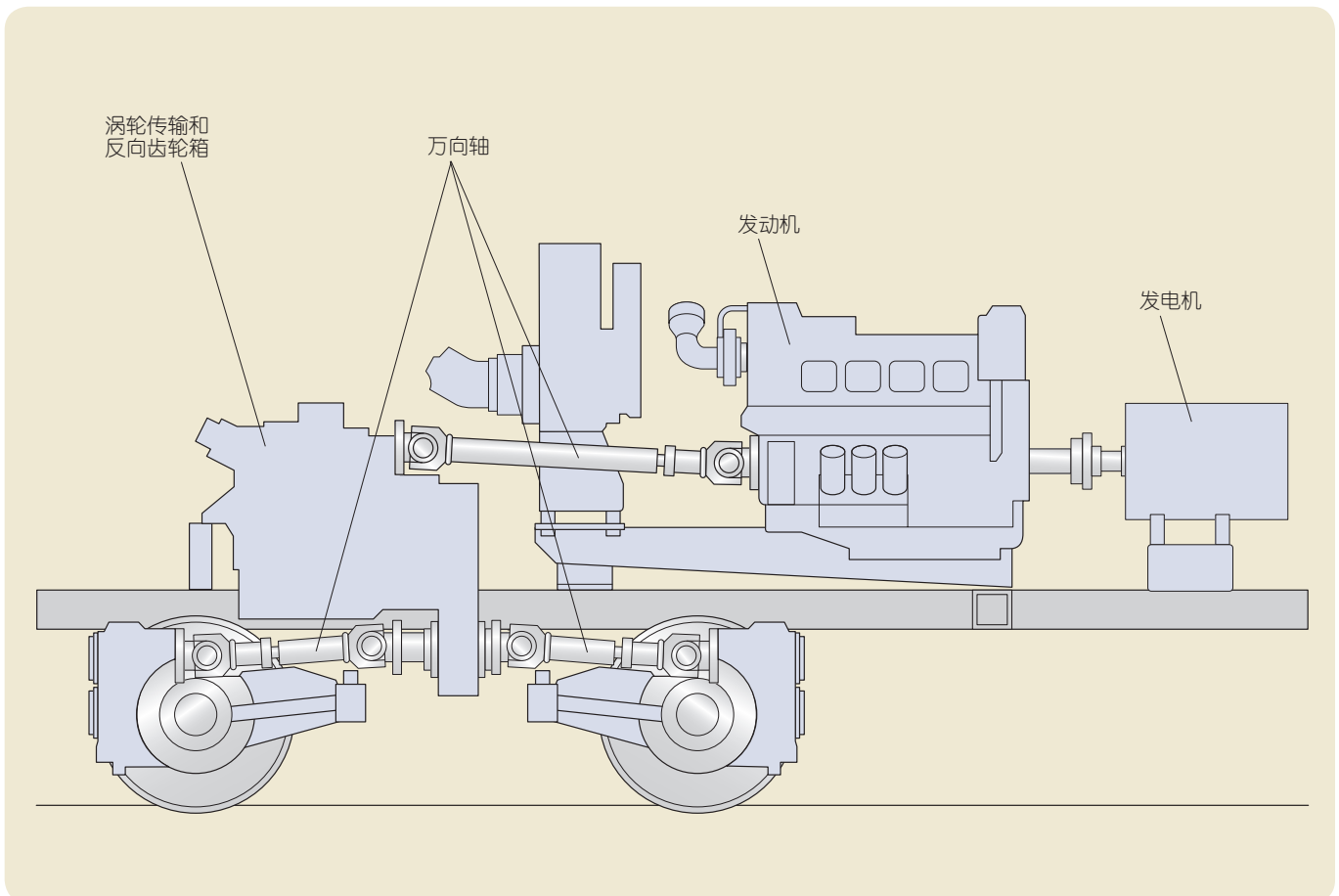
用于低地板轻轨车辆的单车轮系统的竖直传动系统

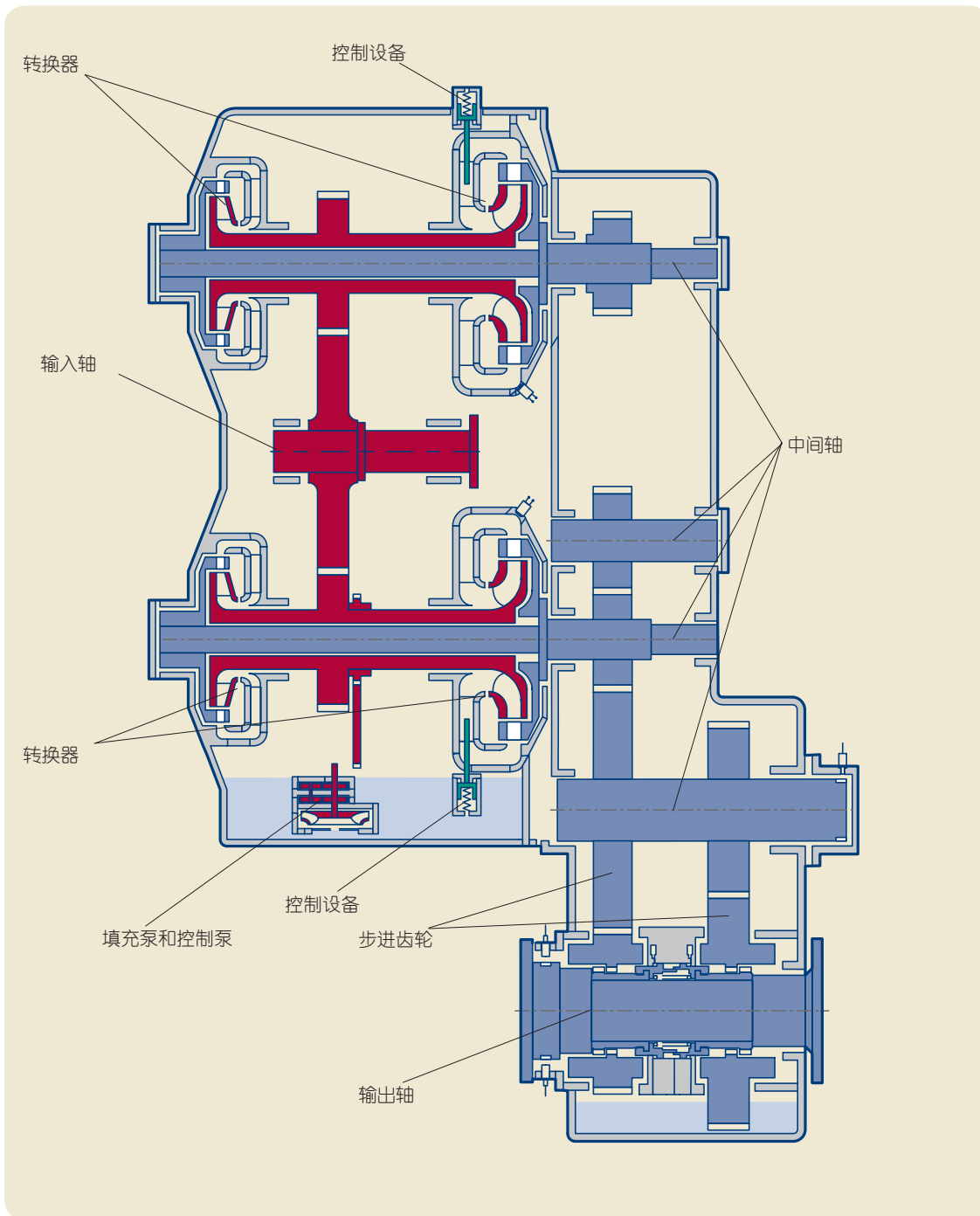


柴油液压车辆

液压传输也称为涡轮传输，可通过液压流体来传输功率与速度，从而传动液压机械。流体在高流速和低压下通过转子叶片进行传动。涡轮传输采用流体动力，可以采用多级传动装配。从流体传输中，功率传输到反向齿轮箱以及轴齿轮。转向架的两个轴一般与附加的万向轴相连接。

应用涡轮传输的柴油液压车辆的推进系统原则





各种轴的轴承配置原则(→第72页):

- 定位端轴承配置：支撑径向载荷的圆柱滚子轴承与在两个方向上支撑轴向载荷的四点接触球轴承的组合
- 非定位端轴承：支撑径向载荷的圆柱滚子轴承



SKF抱轴箱筒的质量控制

SKF抱轴箱筒

在开发与制造抱轴箱筒方面，SKF拥有悠久的历史。其设计原则已在**第31至32页**中描述。在本子章节中，将详细描述抱轴箱筒轴承的特性。

当今，多筒悬挂主要用于重载应用。其设计可以提供优化的刚性以确保准确的齿轮啮合，并减少不对中情况、降低运行过程中的噪声和磨损。多筒悬挂设计必须考虑与整个传动系统的相互作用。

对于全孔抱轴箱筒，可以在孔中嵌入与轴承适配的玻璃纤套筒。这些嵌入的专用套筒可以使得检修过程中的轴承更换变得容易。

根据客户的指定要求，SKF可以提供由应用工程知识所支持的详细的设计研究，从而提供量身定制的解决方案。SKF非常重视制造、质量控制，并可为客户供应随时可以安装的解决方案包。SKF的服务工程师可以为安装人员提供培训，确保良好的安装效果。此外，还可以提供包括SKF服务工程师与安装人员在内的完整的安装服务。

作为铁路车辆维护大纲中的一部分，SKF可以提供对抱轴箱筒的质量检查与修复的服务，包括车削、涡流焊接，以及重新加工轴承的配合。

SKF抱轴箱筒的优点

- 集成到传动子系统中的综合性系统解决方案
- 一站式服务
- 良好处理轴承与轴承座之间的接口
- 定制工程与物流解决方案
- 快装式解决方案包
- 较强的工程服务能力
- 全球客户支持与项目处理
- 售后服务选项



SKF抱轴箱筒设计
红色区域表示机加工表面



SKF抱轴箱筒俯视图
红色区域表示机加工表面

抱轴箱筒设计的主要性能要求



SKF多筒悬挂可提供现货
玻璃纤维套筒安装到孔中，可在需要的情况下在再制造期间方便轴承的更换操作。



3 轴承设计

| | |
|--------------------------|----|
| 轴承性能 | 63 |
| 轴承安装 | 66 |
| 角接触球轴承 和四点接触球轴承 | 69 |
| 圆柱滚子轴承 | 75 |
| 深沟球轴承 | 85 |
| 圆锥滚子轴承 | 89 |
| 补充型号 | 94 |
| 轴承测试 | 97 |



轴承设计

SKF为牵引电机和齿轮箱应用的轴承设计提供众多选择。有关INSOCOAT绝缘轴承和混合陶瓷轴承与轴承单元的信息可在以下章节中获得。有关此处未涉及的其他轴承的信息，例如球面滚子轴承等，可以在SKF轴承综合型录中获得。

轴承性能

传动设计中轴承的操作条件，例如对于牵引电机和铁路齿轮箱等，与在其他行业的电机应用中经常遇到的情况非常不同。这些铁路子系统必须足够牢固、可靠、轻便，并且具有紧凑的构造。轴承必须能够适应具有高度污染和高湿度的环境，以及速度、温度、载荷、振动水平和冲击载荷发生变化的环境。

对于具有较长维护时间间隔的现代设计来说，高度可靠性是一项关键要求。SKF所开发出的解决方案同时具有高可靠性和更长的维护时间间隔。这些解决方案基于对特殊轴承设计功能的进一步改进，或者更为先进的设计，例如电气绝缘轴承和轴承单元设计。更进一步的改进则

是对传感器轴承和监测系统的应用，在后续章节中介绍。

要设计滚子轴承配置，则首先需要执行以下步骤

- 选择合适的轴承类型
- 确定适宜的轴承尺寸和设计

但是这并非全部工作。还必须考虑多种其他因素，例如

- 配置中其他组件的适宜形式与设计
- 合适的配合以及轴承内部游隙或预载荷
- 保持设备
- 合适的密封系统
- 润滑剂的类型和剂量
- 安装与拆卸方法，等等

有关每一方面的相应决策将影响整个轴承配置的性能、可靠性与经济性。

在设计方面所需做出的努力取决于对于类似的配置是否具有应用经验。在缺乏经验的情况下，如果提出过多的要求，或者如果需要特别考虑轴承配置的成本和任何相应的事项，则需要开展更多的工作，例如，实施更加精确的计算和/或测试。

在以下章节中，轴承配置的设计人员可以找到一组传动应用的特定信息。进一步信息可在SKF轴承综合型录中获得，也可从skf.com/bearings在线获得。有关详细信息，请联系SKF应用工程服务部门。

该部门可以提供有关轴承选择的技术支持，同时还可以对完整的轴承配置执行计算。对某一轴承配置的技术要求越高，并且将轴承用于特定应用的有效经验越有限，则更应当采用该服务。

轴承类型的选择

每种轴承因为其不同的设计形式，而表现出不同的性能特质，从而适用于不同的应用情况。例如，深沟球轴承可以承受中等程度的径向载荷和轴向载荷。该轴承运行过程中的滚动摩擦较低，并且可用达到较高的制造精度，运行过程中噪音很低。因此，深沟球轴承更加适用于中小型电机。

球面滚子轴承和圆环滚子轴承可以承受极大的载荷，并且可以自调心。例如，其性质使得极其适用于存在较重载荷、轴挠曲和不对中的重型工程应用。

然而，在许多情况下，选择轴承类型时需要考虑多种因素并加以权衡，因此此处无法提供通用的规则。

此处提供的信息用于说明在选择标准轴承类型时需要考虑的最重要的因素，从而便于做出合适的选择。

- 可用空间
- 载荷
- 不对中
- 精度
- 速度
- 静音运行
- 刚度
- 轴向位移
- 安装和拆卸
- 整体式密封件

在该表格中提供了对标准轴承类型的综合性概述、设计特性，以及对给定应用中要求的适用性。其中的方框表示最常用的牵引电机和齿轮箱轴承。包括特性以及可用设计在内的有关每种轴承的详细信息可在SKF轴承综合型录中获得。

该矩阵仅作为对轴承类型较为浅显的分类。由于符号数量有限，从而无法确切的进行区分，并且某些性质并不完全取决于轴承设计。例如，某一结合了角接触球轴承或圆锥滚子轴承的配置的刚度还与施加的预载荷和运行速度有关，受轴承精度和相关组件的精度以及保持架的设计影响。

对于运行温度更高的特殊应用，可能需要特殊的尺寸与材料上的稳定性。

在设计轴承配置时需要遵守的其他重要准则包括承载能力和寿命、摩擦、许可速度、轴承内部游隙或预载荷、润滑，以及密封。有关信息可从SKF轴承综合型录处或从skf.com/bearings处在线获得。有关详细信息，请联系SKF应用工程服务部门。

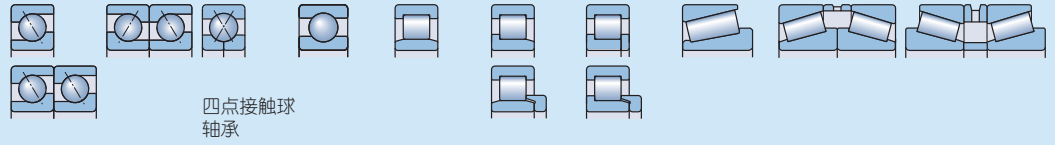
轴承类型 - 设计和特性¹⁾

角接触球轴承

深沟球
轴承

圆柱滚子轴承

圆锥滚子轴承



| | | | | | | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|-----|---------|---------|----------|----------|----------|
| 纯径向载荷 | + | ++ | - | + | ++ | ++ | ++ | ++ | +++ | +++ |
| 纯轴向载荷 | + ← | + ↔ | ++ ↔ | + ↔ | -- | - | - | ++ ← | ++ ↔ | ++ ↔ |
| 联合载荷 | ++ ← | ++ ↔ | + ↔ | + ↔ | -- | + ← | + ↔ | +++ ← | +++ ↔ | +++ ↔ |
| 力矩载荷 | - | + | + | - | -- | -- | -- | - | + | + |
| 高速 | ++ | + | ++ | +++ | ++ | ++ | ++ | + | + | + |
| 高运行精度 | +++ | ++ | + | +++ | ++ | ++ | ++ | + | + | + |
| 高刚度 | + | ++ | + | + | ++ | ++ | ++ | ++ | +++ | +++ |
| 静音运行 | ++ | + | + | +++ | ++ | + | + | + | + | + |
| 低摩擦 | ++ | + | + | +++ | ++ | ++ | ++ | + | + | + |
| 运行中不对中的补偿 | - | -- | -- | - | - | - | - | - | - | - |
| 对中误差(初始)的补偿 | - | -- | -- | - | - | - | - | - | -- | -- |
| 定位端轴承配置 | ++ ← | ++ ↔ | ++ ↔ | ++ ↔ | -- | ++ ← | ++ ↔ | +++ ← | +++ ↔ | +++ ↔ |
| 非定位端轴承配置 | -- | + | - | + | +++ | + ← | + | -- | - | - |
| 轴承中可能的轴向位移 | -- | -- | -- | -- | +++ | + ← | + | -- | -- | -- |

符号: +++ 优秀, ++ 良好, + 一般, - 差, -- 不适用, ← 单向, ↔ 双向

¹⁾ 该矩阵只能提供大概的指导, 因此在每种独立的情况下需要根据 SKF 轴承综合型录中提供的信息进行更加合适的选择。

轴承安装

对于轴承安装的一般建议可从SKF轴承综合型录以及SKF维护手册中获得，也可从 skf.com/bearings 处在线获得。

在以下子章节中，提供了一些适用于常用轴承系统的通用建议。

轴承系统

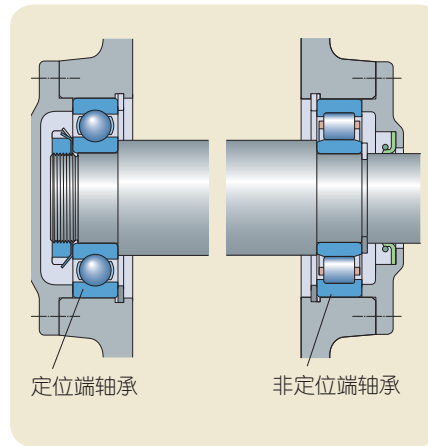
轴承系统通常用于支持旋转轴，相对于轴承座等静止组件，一般需要两个轴承配置在径向和轴向上支撑并定位轴。根据应用、载荷、所需运行精度以及成本考虑，可以设计各种轴承系统：

- 定位/非定位端轴承系统
- 调节式轴承系统
- “浮动式”轴承系统

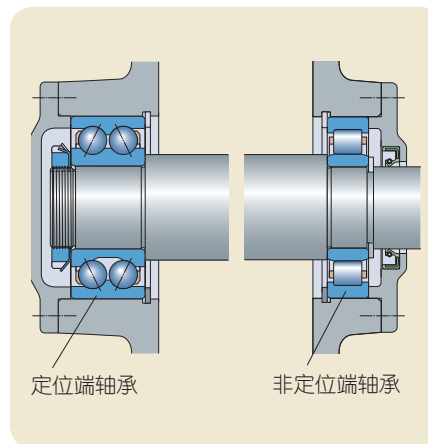
在轴承系统中，轴一端的轴承配置必需能够在轴向上定位轴。可以通过在轴上以及轴承座内轴向固定轴承来实现。在轴相反一端的轴承配置为非定位端设计，并且设计用于承受轴相对于轴承座的热膨胀和位移，从而吸收产生的内部载荷。

对于定位端轴承位置，使用可以承受联合(径向和轴向)载荷的径向轴承。其中包括深沟球轴承、双列或匹配单列角接触球轴承、自调心球轴承、球面滚子轴承、配组圆锥滚子轴承、NUP设计圆柱滚子轴承，或者安装了HJ角环的NJ设计圆柱滚子轴承。

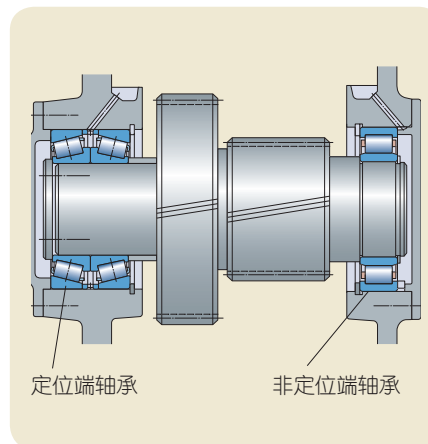
或者，定位端中的轴承配置可以采用以下两种轴承：仅可以承受径向载荷的径向轴承，例如其中一个套圈不带挡边的圆柱滚子轴承，以及可以进行轴向定位的轴承，例如深沟球轴承、四点接触球轴承，或双向推力轴承。可以轴向定位轴的轴承不得在径向上定位，并且一般在轴承座中采用较小的径向游隙来定位。



结合了深沟球轴承和NU(或N)设计的圆柱滚子轴承的定位/非定位端轴承系统



结合了双列角接触球轴承和NU(或N)设计的圆柱滚子轴承的定位/非定位端轴承系统



结合了一组匹配圆锥滚子轴承和NU(或N)设计的圆柱滚子轴承的定位/非定位端轴承系统

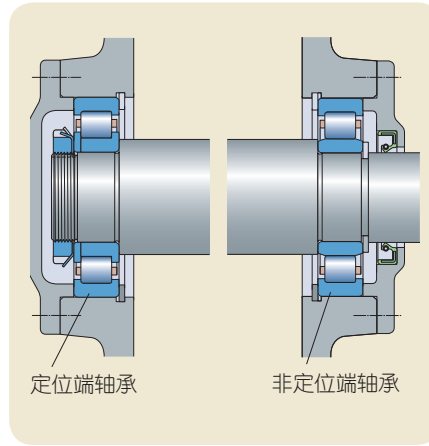
可以通过两种方式在非定位端轴承位置处承受热膨胀和轴向位移。第一种方式是采用仅可以承受径向载荷并可在轴承内部实现轴向位移的轴承。其中包括CARB圆环滚子轴承、滚针轴承，以及一个圈不包含法兰的圆柱滚子轴承。另一方法则是使用在轴承座中采用较小径向游隙进行安装的径向轴承，从而外圈可以在轴向上自由移动。

轴承配合

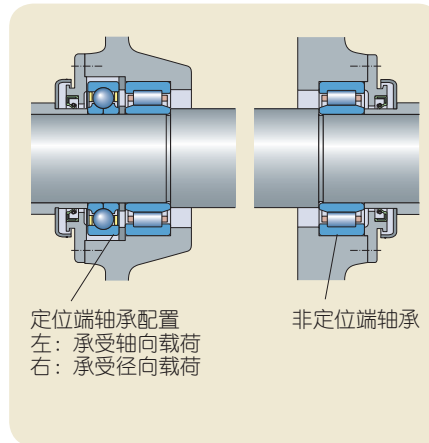
标准滚子轴承的孔与外径公差采用国际标准。请参见SKF轴承综合型录和SKF维护手册，并可在skf.com/bearings在线获得。

为了对带有圆柱孔和圆柱外径表面的轴承实现过盈配合或间隙配合，从ISO公差体系中为轴和轴承座孔中的基座选择适宜的公差范围。对于滚子轴承应用，只需要考虑个别的ISO公差级别。

提供配合建议的表格可在SKF轴承综合型录和SKF维护手册中获得，也可在skf.com/bearings处在线获得。

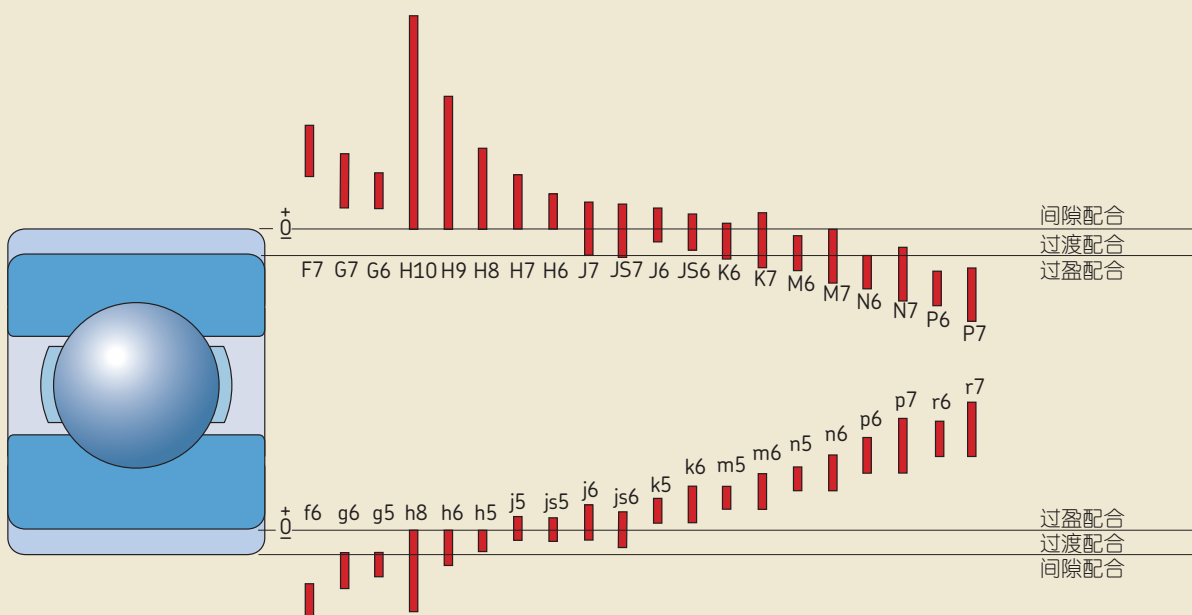


结合了NUP设计圆柱滚子轴承和NU(或N)设计的圆柱滚子轴承的定位/非定位轴承系统



结合了带有四点接触球轴承的NU设计的圆柱滚子轴承以及NU设计的圆柱滚子轴承的定位/非定位轴承系统

相对于轴承孔和外径公差最常用的公差类别的位置





角接触球轴承和四点接触球轴承

角接触球轴承内外圈的滚道可在水平轴线上承受相对位移，这就意味着该设计用于承受联合载荷，例如同时作用的径向和轴向载荷。

设计特点

角接触球轴承的轴向承载能力随着接触角度的增加而不断提高。接触角定义为在径向平面上，钢球和滚道接触点(载荷沿其从一条滚道传递到另一条滚道)的连线与轴承的垂直轴线所成的角度。

SKF可生产多种设计与尺寸的角接触球轴承。最常用的设计如下：

- 单列角接触球轴承
- 双列角接触球轴承
- 四点接触球轴承

单列角接触球轴承

SKF单列角接触球轴承仅可以承受作用在一个方向上的轴向载荷。单列角接触球轴承一般配对使用，两个轴承互相紧靠着。

该轴承不可拆分，并且轴承圈的一条挡肩较高，另一条则较低。较低的挡肩便于将大量钢球安装到轴承中，从而实现相对较高的承载能力。

该类轴承具有40°的接触角，从而可以承受较重的轴向载荷。

在SKF轴承综合型录中可以找到特别是关于最低轴向和径向载荷以及载荷比的详细信息。

基本设计轴承

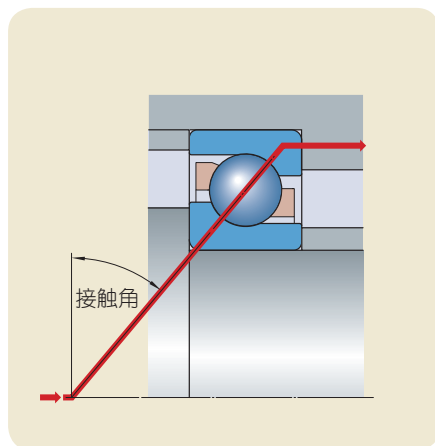
基本设计轴承设计用于在每个轴承位置处仅使用一个轴承的配置。该轴承宽度和端面跳动为普通公差。因此，不适用于配对安装。

通用配组轴承

通用配组轴承设计用于成组使用。轴承圈的宽度和失圆度按精确的公差进行制造。在两个轴承相邻安装时，可获得给定的内部公差或预载荷，甚至在两个轴承之间进行载荷分布，而无需使用薄垫片或类似设备。

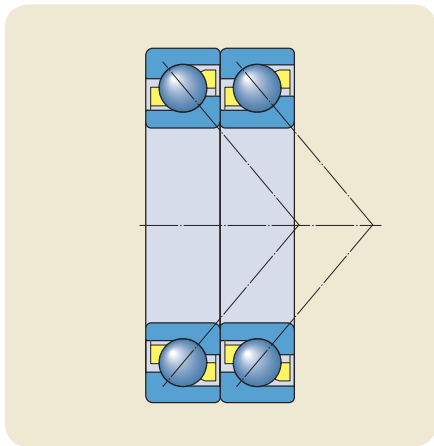
通用配组轴承对于单独轴承的配置也具有优势。大多数轴承都属于SKF Explorer探索者高性能级别轴承，从而具有更高的精度、更高的动态承载能力，以及更好的速度性能。

72 B(E)和73 B(E)系列中的通用配组轴承通过用于内部游隙的后缀CA、CB或CC进行识别，或通过用于预载荷的后缀GA、GB或GC进行识别。70 B系列中的通用配组轴承通过用于游隙的后缀G进行识别。在订购时，请指明所需的每种轴承的编号，而非轴承组编号。

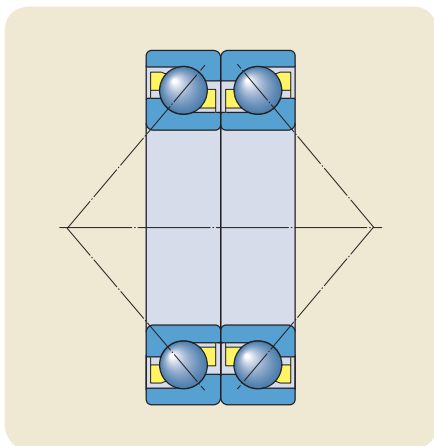


钢球和滚道的接触点的连线与轴承的垂直轴线所形成的角度

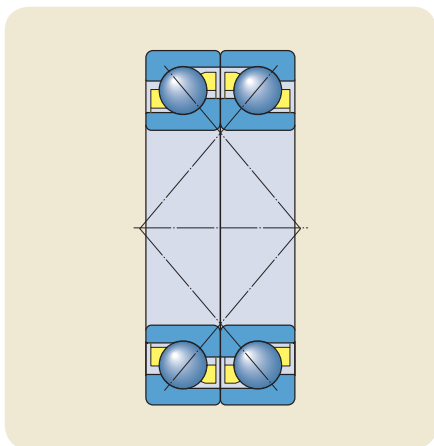
串联配置



背对背配置



面对面配置



成对安装

成对安装可以通过三种方式实施：

- **串联配置**

在单个轴承的承载能力不足时，使用串联配置。在采用串联进行配置时，载荷线相互平行，并且径向和轴向载荷由轴承平均承受。但是，轴承组仅可承受作用在一个方向上的轴向载荷。如果轴向载荷在两个方向上同时作用，则必须添加第三个针对串联轴承对进行调节的轴承。

- **背对背配置**

以背对背方式安装两个轴承可以实现相对刚性较大的轴承配置，同时还可以承受倾斜力矩。在以背对背方式配置时，载荷线朝轴承轴线分开。可以承受作用在两个方向上的轴向载荷，但是每个方向上只能由一个轴承承受。

- **面对面配置**

以面对面方式安装两个轴承，刚度不如背对背配置，但是对角度误差不敏感。在以面对面方式配置时，载荷线朝轴承轴线聚合。可以承受作用在两个方向上的轴向载荷，但是每个方向上只能由一个轴承承受。

四点接触球轴承

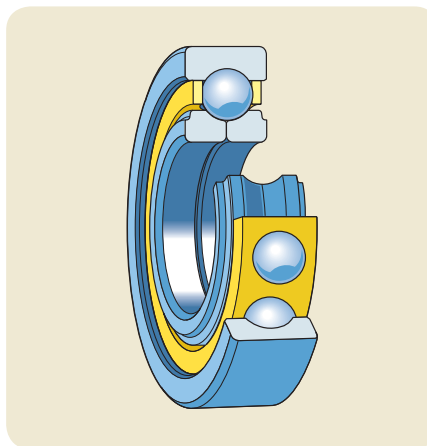
四点接触球轴承是一种径向单列角接触球轴承，其滚道设计用于支持在两个方向上作用的载荷。该类轴承与双列轴承相比，所占的轴向空间要少得多。

内圈采用分离式设计。这就可以使大量的球体结合到轴承中，提高轴承的承载能力。该轴承可以分离，例如，带有钢球的外圈和保持架组件和两部分的内圈可以分别安装。

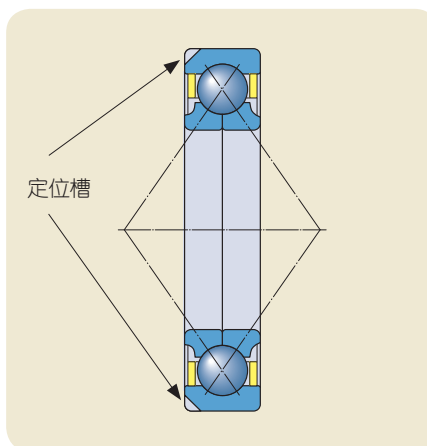
四点接触球轴承的两部分内圈具有凹进的挡肩。这样，在轴承与SKF圆柱滚子轴承一起使用时，可以改善润滑油的流动情况。此外，这些凹入部分可以方便拆卸过程。

定位槽

SKF四点接触球轴承在供货时在外圈上提供两个定位槽，以便防止外圈旋转(型号后缀N2)。定位槽以180°的角度分开设置。

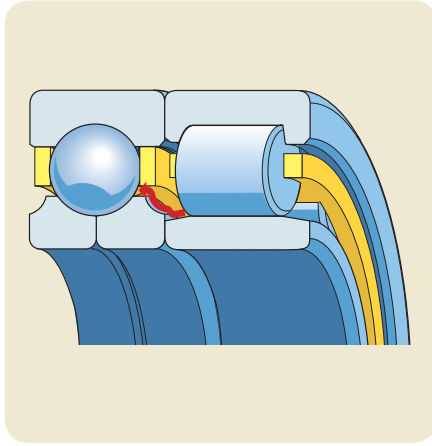


四点接触球轴承



带定位槽的四点接触球轴承

SKF Explorer四点接触球轴承的设计可改善润滑油的流动情况以及润滑接触区域并传递热量



宽度公差

对于铁路齿轮箱应用，SKF四点接触球轴承的宽度公差将减小，后缀B20。

保持架

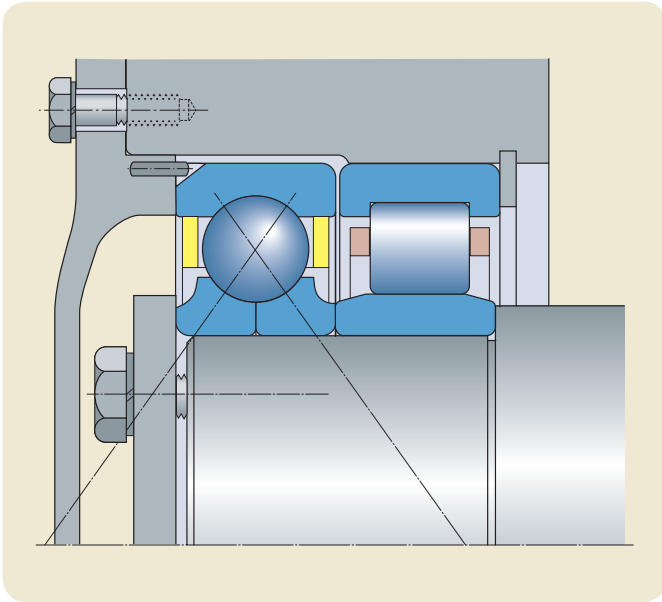
铁路应用中推荐使用黄铜保持架，因为其机械性能更高。

轴向内部游隙

在许多情况下，C4轴向内部游隙用于铁路应用，因为其几何接触性能更高。

其他技术特点

有关技术特点的附加信息，尤其是针对保持架与轴承游隙的信息，可在SKF轴承综合型录中或skf.com/bearings处在线获得。



在众多齿轮箱应用中，径向轴承与四点接触球轴承一起使用，后者可作为纯粹的推力轴承，根据径向游隙来安装在轴承座中

首选范围

用于齿轮箱的角接触球轴承

角接触球轴承的这一标准组合可在SKF轴承综合型录中或在skf.com/bearings处在线获得。有关用于齿轮箱的特定轴承实施以及选择的信息，请联系SKF应用工程服务部门。

四点角接触球轴承

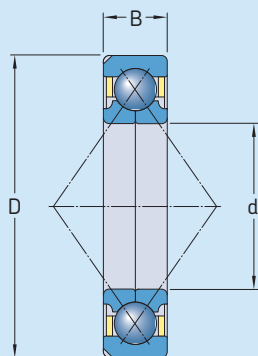
最常用的轴承尺寸列于下表中。

首选产品范围是基于2012年9月的产品组合。产品范围在不断变化，如果需要，将来可能更新并出版。

四点接触球轴承的标准范围以及这些轴承的附加信息可在SKF轴承综合型录中或在skf.com/bearings处在线获得。

型号前缀和后缀的综合列表可在第94至96页找到。

用于齿轮箱的四点接触球轴承



| 主要尺寸 | | | 型号 |
|------|-----|----|-------------------|
| d | D | B | |
| mm | | | - |
| 60 | 110 | 22 | QJ 212 N2MA/C4B20 |
| 70 | 125 | 24 | QJ 214 N2MA/C4B20 |
| 75 | 130 | 25 | QJ 215 N2MA/C4B20 |
| 80 | 140 | 26 | QJ 216 N2MA/C4B20 |
| 85 | 150 | 28 | QJ 217 N2MA/C3 |
| 90 | 160 | 30 | QJ 218 N2MA/C4B20 |
| 100 | 180 | 34 | QJ 220 N2MA/C4B20 |

| 主要尺寸 | | | 型号 |
|------|-----|----|-------------------|
| d | D | B | |
| mm | | | - |
| 110 | 200 | 38 | QJ 222 N2MA/C4B20 |
| 120 | 215 | 40 | QJ 224 N2MA/C4B20 |
| 130 | 230 | 40 | QJ 226 N2MA/C4B20 |
| 140 | 250 | 42 | QJ 228 N2MA/C4B20 |
| 150 | 270 | 45 | QJ 230 N2MA/C3 |
| 160 | 290 | 48 | QJ 232 N2MA/C4B20 |





圆柱滚子轴承

圆柱滚子轴承可用于任何形式的铁路牵引电机和齿轮箱。带有两个整体挡边的轴承圈以及滚子和保持架组件与另外一个套圈是可分离的。这样可以方便安装与拆卸操作。

滚子由外圈上整体式的“开放”挡边进行引导。这种“开放”挡边加上专门设计并经过表面处理的滚子端，可以实现更好的润滑效果、降低摩擦，并且相应地降低操作温度(→第76页)。根据引导挡边配置的不同，圆柱滚子轴承也可以承受有限的推力载荷。

1909年，德国康斯塔特Norma公司的首席工程师Josef Kirner博士发明了带有修正滚道的圆柱滚子轴承。之后，德国Norma公司并入SKF^[12]。

轴承设计原则

最常用的单列圆柱滚子轴承的设计描述如下。有关特定的应用要求和特定的设计与应用，请联系SKF应用工程服务部门。

SKF单列圆柱滚子轴承具有多种不同的设计，其主要区别在于挡边的设计。最常用的为NU、N、NJ、NH和NUP设计。

NU设计

NU设计的轴承在外圈上具有两个整体式挡边，而在内圈上不带挡边。这类轴承可以在两个方向上承受轴相对于轴承座的轴向位移。因此，该轴承可用作非定位端轴承。

N设计

N设计的轴承在内圈上具有两个整体式法兰，而在外圈上不提供法兰。这类轴承可以在两个方向上承受相对于轴承座的轴向位移。因此，该轴承可用作非定位端轴承。

NJ设计

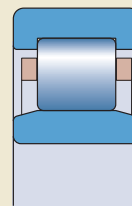
NJ设计的轴承在外圈上具有两个整体式法兰，并且在内圈上具有一个整体式法兰。该类轴承用于在一个方向上以轴向定位轴。该产品仅可在一个方向上承受相对于轴承座的轴轴向位移。

NH设计(NJ设计+HJ角环)

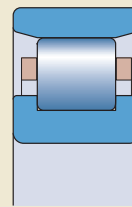
带有HJ角环的NJ设计的轴承用于同时在两个方向上通过轴向定位轴。该组合也称为NH设计。

NUP设计

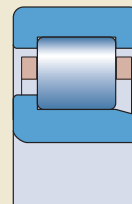
NUP设计的轴承在外圈上具有两个整体式挡边，并且在内圈上具有一个整体式挡边，以及一个非整体式挡边，例如松动法兰环。该类轴承用于同时在两个方向上通过轴向定位轴。



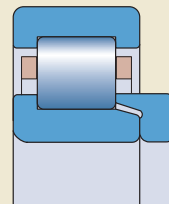
NU设计



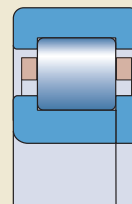
N设计



NJ设计

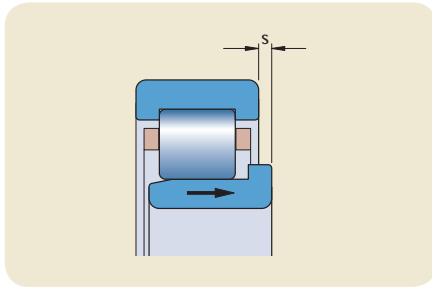


NH设计(NJ设计+HJ角环)

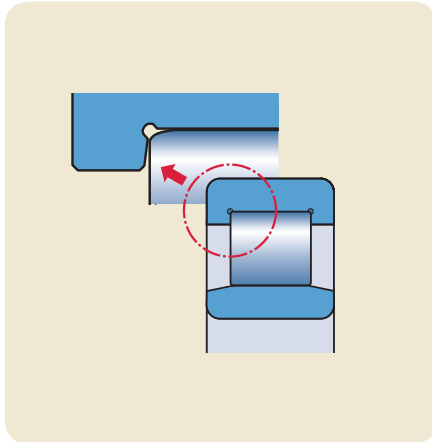


NUP设计

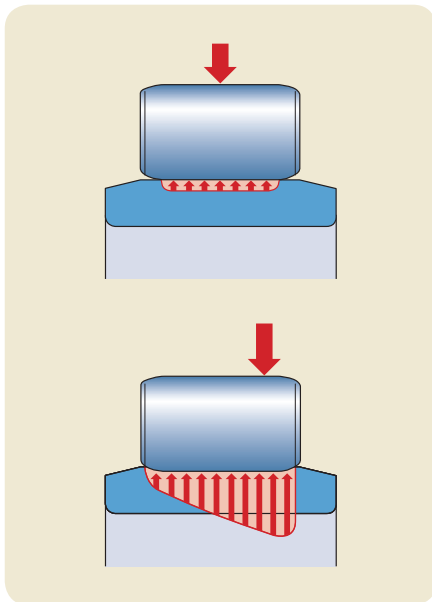
允许轴向位移



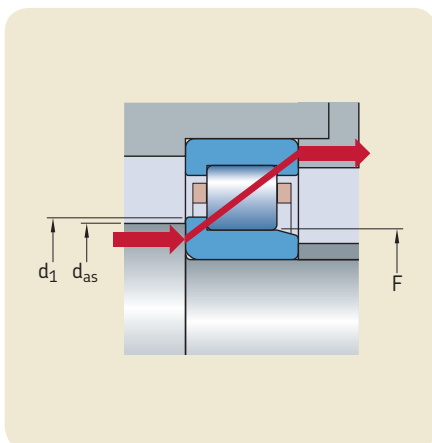
开式法兰设计原则



滚子对数轮廓



内圈应在相当于挡边一半的高度上受到轴向支撑。



轴向位移

在内圈或外圈上都不具有法兰的轴承(分别为NU或N设计), 或者仅在内圈上具有一个整体式挡边的轴承(NJ设计), 可以在一定的限制范围内承受轴相对于轴承座的轴向位移。

在轴承旋转过程中, 几乎不会增加任何摩擦, 因为轴向位移在轴承内部发生, 而不是在轴承和轴或轴承座孔之间发生。SKF轴承综合型录的产品表中提供了一个轴承圈的正常位置相对于其他位置的允许轴向位移“s”的值。

内部几何形状和材料性质

SKF圆柱滚子轴承在内圈或外圈上具有两个整体式挡边, 从而为滚子提供引导。这类轴承具有“开放”挡边, 例如, 挡边的内侧面以一定的角度倾斜。法兰设计与滚子端设计和表面处理一起可以促使形成一层润滑剂膜, 从而降低摩擦以及摩擦热。

滚子的轮廓决定了滚子/滚道接触区域的应力分布。SKF圆柱滚子轴承中的滚子具有对数曲线, 便于在滚子上均匀分布载荷。这样可以在滚子端避免峰值应力, 从而延长轴承的使用寿命。对数曲线还可以降低对不对中以及轴挠曲的敏感性。

对滚子和滚道接触表面的表面处理可最大程度便于流体动力润滑剂膜的形成, 并优化滚子运动。与传统设计相比, 该设计中所实现的优点还包括更高的操作可靠性。

除了径向载荷外, 在内圈和外圈上都带有挡边的圆柱滚子轴承还可以承受轴向载荷。其轴向承载能力主要由滚子端/法兰触点支持载荷的能力来确定。对该性能具有最大影响的因素包括润滑剂、运行温度, 以及轴承的散热能力。

SKF Explorer探索者和E2能效型轴承设计

SKF于2002年推出SKF EXPLORER探索者高性能级别的圆柱滚子轴承。SKF Explorer圆柱滚子轴承性能远远超出早期的标准SKF圆柱滚子轴承，同时也一直保持着相同的边界尺寸与主要内部尺寸。

为了响应对降低摩擦以及相应的减少能耗的不断增长的要求，SKF于2007年提出了“能效型”(E2)滚子轴承的概念。

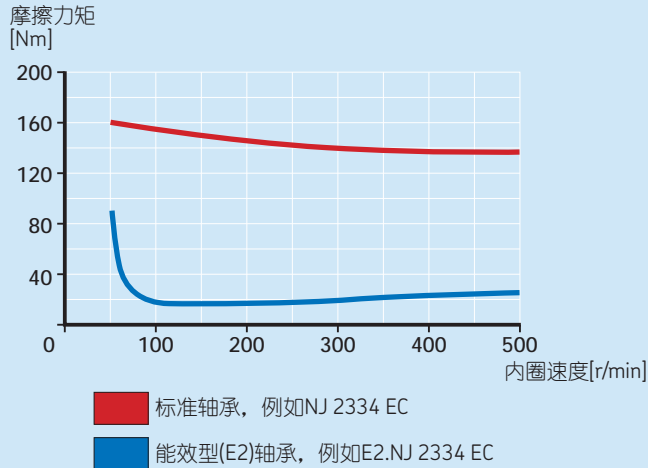
主要改进与优势

- 轴承材料采用极为洁净并且均质的钢材，只含最低程度的杂质。作为对洁净度的一个测量指标，其含氧量已降至极低的水平。还提高了滚动接触点的疲劳强度并可以延长轴承寿命。
- 新的热处理工艺可以优化轴承对操作损伤和操作温度的耐受性，而不会影响尺寸的稳定性。
- 轴承圈与滚子的硬度通过精心选择而提供最优的性能。这样可以降低对污染物的敏感度，同时实现超长的使用寿命。
- 升级制造工艺后，显著提高了产品质量。这意味着轴承圈制造时的圆度得到改进，并且也进一步减少了与滚子最佳形状的偏差。使用更加严格的公差的结果可能并不显著，但是轴承的运行效果明显更加安静，并且振动更轻。
- 进一步优化了滚子的对数接触外形。从而，轴承对微小的不对中的敏感度更低，并且可以承载更重的载荷。

- 从圆柱部分到滚子端面采用出色的过渡设计的对数轮廓可以避免破坏性应力。
- 轴承圈和滚子上滚道的表面加工精度进一步提升，可实现更高的润滑条件，因此即使在不良的润滑条件下轴承的运行时间也显著延长。

对圆柱滚子轴承内部几何形状和材料性质的改进已纳入考虑，以生成摩擦力矩并计算额定轴承寿命。

测试：圆柱滚子轴承中摩擦力矩的测量



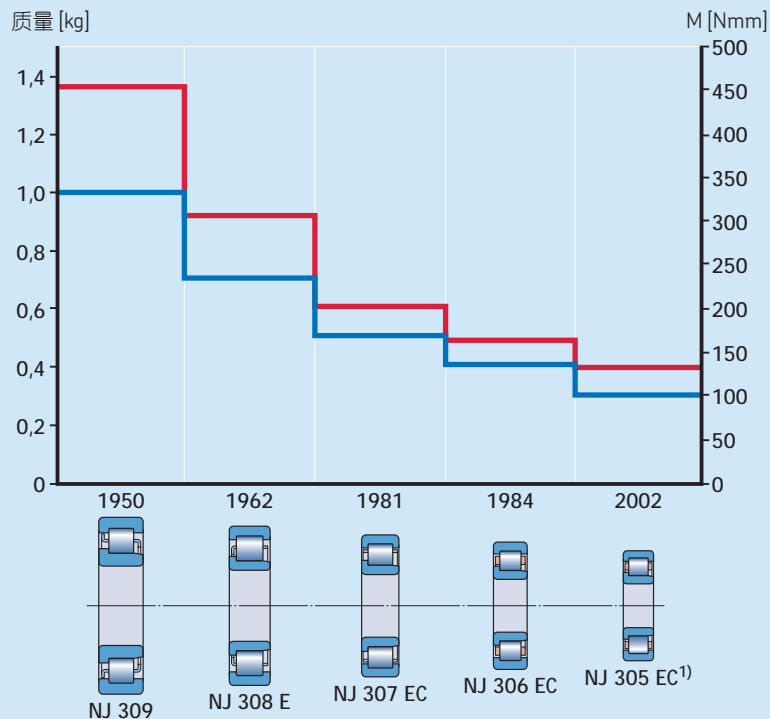
与当前的SKF标准轴承相比，新型SKF能效型(E2)圆柱滚子轴承在轴向载荷应用中最多可以降低摩擦85%。^[13]

连续开发实现显著的尺寸减小^[13]

该应用示例指以下方面：

- 径向载荷5 kN
- 轴向载荷1 kN
- 速度3000 r/min
- 径向游隙30 μm
- 粘度20 mm²/s

■ 轴承质量
■ 摩擦力矩M



| | | | | | |
|-------------|-----|-----|------|------|------|
| 动态额定载荷[kN] | 52 | 53 | 44,6 | 51,2 | 46,5 |
| 质量[kg] | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 |
| 摩擦力矩M [Nmm] | 450 | 300 | 200 | 166 | 129 |

¹⁾ SKF Explorer



两片式机加工黄铜保持架，型号后缀MR

保持架

根据轴承系列、尺寸和设计的不同，SKF 单列圆柱滚子轴承安装以下保持架之一作为标准配置。

保持架性能受各种不同因素的影响，例如载荷水平、载荷周期、持续时间、润滑剂，以及操作过程中的温度范围。保持架能否与这些因素配合，取决于主要功能以及材料性质、几何形状设计，以及引导功能。材料性质包括延展性、耐疲劳性、刚度、抗蠕变性、耐磨损性，以及耐老化性。几何形状设计以及引导功能与保持架系统中的应力分布有关。



整体式机加工黄铜保持架，外圈引导，型号后缀ML

牵引电机应用

一般情况下，用于牵引电机轴承的圆柱滚子轴承配有两片式的机加工黄铜保持架，以滚子引导，型号后缀为M。

对于较重的冲击载荷，则安装整体式机加工黄铜保持架，采用滚子对中，型号后缀为MR。

为了在维护过程中方便加工，可以安装整体式机加工黄铜保持架，采用滚子和外部挡边进行引导，并具有滚子下落功能，型号后缀为MRD或MR3D。

玻璃纤维增强聚酰胺和聚醚醚酮(PEEK)材料的保持架用于某些特定应用。这类保持架可以在与润滑装置的过程中实现材料与结构上的优势。有关特定应用，请联系SKF应用工程服务部门。



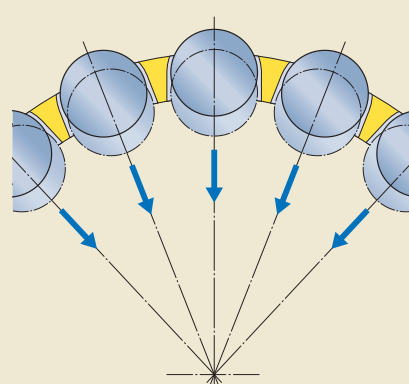
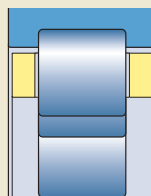
玻璃纤维增强聚酰胺保持架

齿轮箱应用

一般来说，所安装的整体式机加工黄铜保持架以外圈引导，型号后缀为ML或MP。这类高性能保持架具有优化的质量和几何形状。保持架兜孔的设计具有更好的滚子触点。

拆下内圈后的圆柱滚子轴承

滚子跌落式设计可使滚子能从外圈上拆卸，方便进行清洁、检查和再制造



滚子引导的整体式机加工黄铜保持架，具有滚子下落功能^[14]，型号后缀MRD或MR3D

用于传动应用的主要圆柱滚子轴承保持架设计

| 应用 | 润滑剂 | 保持架材料 | | 聚合物 |
|------|------------|------------------|-------------|--------------|
| | | 黄铜 两片式, 铆接 | 整体式 | |
| 牵引电机 | 润滑脂 润滑油 | M | MR和变型 ML | PEEK PEEK |
| 齿轮箱 | 润滑油 | | ML | PEEK |

公差

SKF单列圆柱滚子轴承的制造过程对于尺寸精度采用正常公差，对于运行精度采用P6公差作为标准。对于某些轴承，尤其是窄系列的18、19和10系列轴承，还提供按公差级别P6或P5的高精度产品。有关产品范围和公差的信息可从SKF轴承综合型录中获得。

径向内部游隙

SKF单列圆柱滚子轴承的制造过程采用普通组径向内部游隙作为标准。对于铁路牵引电机和齿轮箱应用，大多数轴承采用更大的C3径向游隙。某些应用需要更大的C4甚至C5径向游隙。有些时候，应用C5H。

径向游隙的值列于SKF轴承综合型录中。这些值对于零测量载荷下的未安装轴承有效。属于相同游隙类别的圆柱滚子轴承的组件可以互换。

轴向内部游隙

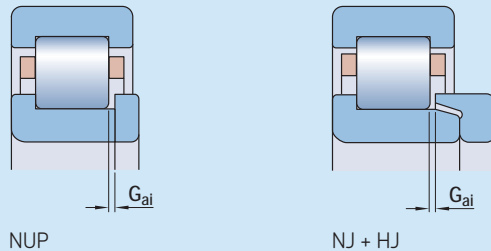
对于牵引电机应用，可以供应具有更大轴向游隙的NUP和NJ + HJ设计圆柱滚子轴承，型号后缀VA301。

在一些较老的文献中，提出使用德国的DIN 43 283标准作为牵引电机应用下圆柱滚子轴承的参考。该标准在二十世纪五十年代首次开发，那时针对牵引电机应用存在大量的专门规格。该德国标准于2000年取消，因为与当时现有的其他通用轴承标准发生重复。当今，VA301型号后缀中所含的规格已经涵盖该过时标准中的要求。

宽度公差

为了限制各种不同组件的公差发生重叠，SKF可以供应降低了宽度公差的圆柱滚子轴承。后缀B20中包含了0 .. -40 μm的宽度公差。

根据SKF VA301规格的圆柱滚子轴承的轴向内部游隙



直径系列, 孔d

| 9, 0, 2 | | 3 | | 4 | | $G_{ai}^{1)}$ | |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|---------------|-----|
| > | ≤ | > | ≤ | > | ≤ | 最小值 | 最大值 |
| mm | | mm | | mm | | μm | |
| 45 | 90 | – | 60 | – | – | 150 | 250 |
| 90 | 160 | 60 | 105 | 45 | 80 | 180 | 300 |
| 160 | 280 | 105 | 200 | 80 | 130 | 230 | 380 |
| 280 | 450 | 200 | 320 | 130 | 300 | 300 | 500 |
| 450 | 700 | 320 | 500 | 300 | 500 | 400 | 650 |

¹⁾ 轴向内部游隙 G_{ai} 的值列于该表中，适用于内圈带挡边与松法兰圈(NUP)设计或角环(NJ + HJ设计)之间的轴向游隙。对于总轴向轴承游隙，还必须考虑滚子长度与外圈挡边之间的轴向游隙。

额定转速

确定速度限制的准则包括保持架的形状稳定性或强度、保持架引导面的润滑、作用在滚动体上的离心力和回转力，以及其他可以限制速度的因素。

最小载荷

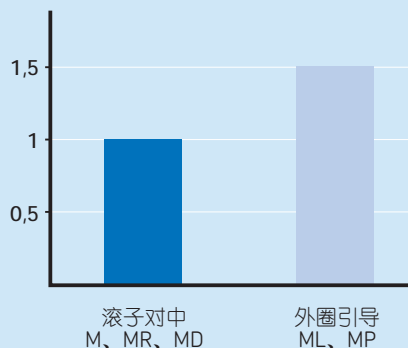
为了实现满意的操作效果，如同所有球轴承和滚子轴承一样，单列圆柱滚子轴承必须始终承受给定的最小载荷，特别是在高速运行时或在承受较高的加速度或载荷方向发生快速变化时。在这类条件下，滚子和保持架的惯性力以及润滑剂中的摩擦可对轴承配置中的滚动条件产生有害影响，并且可能导致在滚子和滚道之间产生破坏性的滑动运动。用于计算最小载荷的公式可在SKF轴承综合型录中找到。

对于抱轴筒悬挂应用，可以采用黑化处理来降低工作过程中打滑或滑伤的风险。

黑色氧化表面处理

黑化处理指一种化学表面处理，在轴承应用中可以提高特性操作条件下的轴承性能。该种处理已成功在现场应用，有利于轴承的磨合过程并在具有较薄润滑剂膜和高滑动率的关键润滑条件下提高对粘着磨损的耐受性。

取决于保持架设计的额定相对速度性能



黑色氧化物表面处理的优点

- 改进磨合行为
- 提高润滑油和润滑剂的附着性
- 改善耐腐蚀性
- 降低配合中的磨蚀风险
- 改善对粘着磨损损坏的耐受性
- 低粘度比 κ 条件下更好的性能
- 降低例如腐蚀性油品添加剂等对轴承钢材的化学损伤(例如齿轮箱油中的EP添加剂)
- 减轻对轴承钢材的氢渗透

首选范围

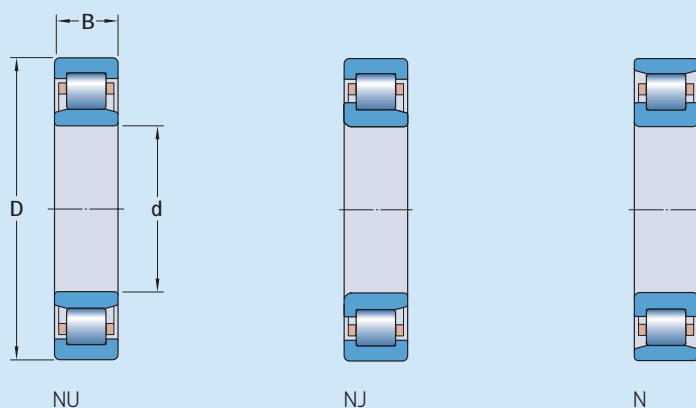
首选范围基于2012年9月的产品组合。该范围是不断变化的产品概览，如果需要，将来可能更新并出版。

圆柱滚子轴承的标准范围以及这些轴承的附加信息可在SKF轴承综合型录中或在skf.com/bearings处在线获得。

用于牵引电机的INSOCOAT和陶瓷圆柱滚子轴承的首选范围可在第4章中获得。

型号前缀和后缀的综合列表可在第94至96页找到。

用于牵引电机的圆柱滚子轴承

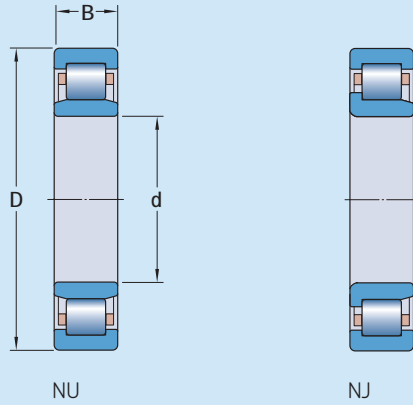


| 主要尺寸 | | | 型号 |
|------|-----|----|-----------------------------------|
| d | D | B | |
| mm | | | - |
| 70 | 150 | 35 | NJ 314 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| | 150 | 35 | NU 314 ECM/C4VA301 |
| 75 | 130 | 25 | NU 215 ECM/C4 VA301 |
| | 160 | 37 | NJ 315 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| 80 | 170 | 39 | NJ 316 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| 85 | 150 | 28 | NU 217 ECM/C4VA301 |
| 90 | 160 | 40 | NJ 2218 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| | 190 | 43 | NJ 318 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| | 190 | 43 | NU 318 ECM/C4VA301 |
| 95 | 170 | 32 | NJ 219 ECM/C3VA301 ¹⁾ |
| 100 | 180 | 34 | NJ 220 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| | 180 | 34 | NU 220 ECM/C4VA301 |
| | 215 | 47 | NJ 320 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| | 215 | 47 | NU 320 ECM/C4VA301 |
| 110 | 170 | 28 | NU 1022 M/C4VA301 |
| | 240 | 50 | NJ 322 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| | 240 | 50 | NU 322 ECM/C4VA301 |

| 主要尺寸 | | | 型号 |
|------|-----|----|----------------------------------|
| d | D | B | |
| mm | | | - |
| 120 | 215 | 40 | NU 224 ECM/C4VA301 |
| | 215 | 58 | NU 224 ECML/C4VA301 |
| | 260 | 55 | NJ 324 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| | 260 | 55 | NU 324 ECM/C4VA301 |
| 130 | 200 | 33 | NJ 1026 M/C4VA301 ¹⁾ |
| | 280 | 58 | N 326 ECMR/C4VA301 |
| | 280 | 58 | NJ 326 ECM/C4VA301 ¹⁾ |
| | 280 | 58 | NU 326 ECMR3D/C4VA322 |
| 140 | 300 | 62 | NU 328 ECMRD/P54VA334 |
| 150 | 320 | 65 | NU 330 ECM/C4VA301 |
| 160 | 340 | 68 | NU 332 ECM/C4VA301 |
| 170 | 310 | 52 | NU 234 ECM/C4VA301 |
| | 360 | 72 | NU 334 M/C4VA301 |
| 180 | 280 | 46 | NU 1036 M/C4VA301 |
| 220 | 340 | 56 | NU 1044 M/P63RVA305 |

¹⁾ 除了 NJ 系列圆柱滚子轴承外，还可以供应带有 VA301 型号后缀的相应的 HJ 系列角环。

用于齿轮箱的圆柱滚子轴承



| 主要尺寸 | | | 型号 | 主要尺寸 | | | 型号 | |
|------|-----|----|-------------------------------|------|-----|-----|------------------------------|----------------|
| d | D | B | | d | D | B | | |
| mm | | | - | mm | | | - | |
| 55 | 100 | 25 | NJ 2211 ECML/C3 ¹⁾ | 110 | 200 | 38 | NJ 222 ECML/C4 ¹⁾ | |
| | 120 | 43 | NJ 2311 ECML/C3 ¹⁾ | | 200 | 38 | NU 222 ECML/C3B20 | |
| | | | | | 200 | 53 | NU 2222 ECML/C3 | |
| 60 | 110 | 22 | NU 212 ECNML/C3B20 | 120 | 180 | 28 | NU 1024 N1ML/C3 | |
| | 130 | 31 | NJ 312 ECML/C3 ¹⁾ | | 260 | 55 | NU 324 ECML/C5H | |
| 65 | 140 | 48 | NJ 2313ECML/C3 ¹⁾ | 130 | 200 | 33 | NU 1026 ML/C3 | |
| 70 | 125 | 24 | NJ 214 ECML/C3 ¹⁾ | | 230 | 40 | NU 226 ECML/C3 | |
| | 125 | 24 | NU 214 ECML/C4 | | 230 | 64 | NU 2226 ECML/C3 | |
| 75 | 130 | 25 | NJ 215 ECML/C3 ¹⁾ | 140 | 210 | 33 | NU 1028 ML | |
| | 130 | 25 | NU 215 ECML/C4 | | 250 | 42 | NU 228 ECML/C3 | |
| | 160 | 55 | NJ 2315 ECML/C3 ¹⁾ | | 250 | 68 | NU 2228 ECML/C3 | |
| | 160 | 55 | NU 2315 ECML/C3B20 | 150 | 225 | 35 | NU 1030 ML | |
| 80 | 140 | 26 | NJ 216 ECML/C3 ¹⁾ | | 160 | 240 | 38 | NU 1032 ML |
| | 140 | 26 | NU 216 ECML/C3H | 170 | 260 | 42 | NU 1034 ML | |
| | 140 | 33 | NJ 2216 ECML/C3 ¹⁾ | | 180 | 320 | 52 | NU 236 ECMA/C3 |
| | 140 | 33 | NU 2216 ECML/P63 | | 190 | 290 | 46 | NU 1038 ML/C3 |
| | 170 | 39 | NU 316 ECML/C3 | 340 | | 55 | NU 238 ECNML/C3VE656 | |
| 85 | 150 | 28 | NU 217 ECML/C3 | 200 | 360 | 58 | NU 240 ECN3ML/C3 | |
| | 150 | 36 | NJ 2217 ECML/C3 ¹⁾ | | | | | |
| 90 | 160 | 30 | NJ 218 ECML/C3 ¹⁾ | | | | | |
| | 160 | 40 | NU 2218 ECML/C4 | | | | | |
| 95 | 170 | 43 | NJ 2219 ECML/C4 ¹⁾ | | | | | |
| 100 | 180 | 34 | NJ 220 ECML/C3 ¹⁾ | | | | | |
| | 180 | 34 | NU 220 ECML/C3 | | | | | |
| | 180 | 46 | NU 2220 ECML/C3 | | | | | |

1) 除了NJ系列圆柱滚子轴承外，还可以供应带有VA301型号后缀的相应的HJ系列角环。



深沟球轴承

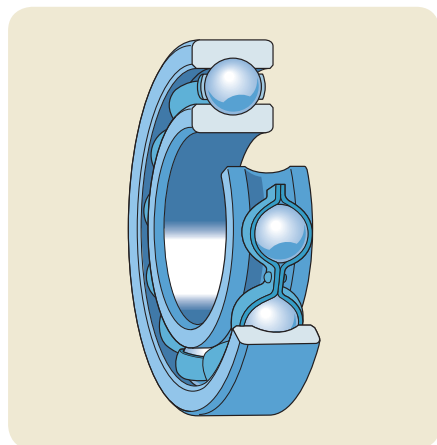
深沟球轴承具有极高的灵活性。其设计较为简单，不可拆分，适用于高速以及极高速度应用，具有稳定的运行效果，所需维护也极少。由于深沟球轴承是最常用的轴承类型，因此SKF可以提供众多的设计、变型以及尺寸。

对于铁路应用，单列深沟球轴承可用于牵引电机中，主要作为与非定位圆柱滚子轴承结合使用的定位端轴承。许多现代的牵引电机设计都需要电气绝缘。除了本章中介绍的轴承外，电气绝缘深沟球轴承，例如INSOCOAT和混合陶瓷轴承，将在第4章中介绍。

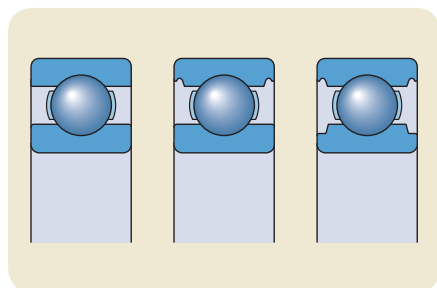
在齿轮箱应用中，深沟球轴承可用于定位端轴承位置，特别适用于较轻的载荷。这类轴承还可在铁路车辆中用于辅助设备，例如：

- 牵引电机冷却系统的换气扇
- 制动系统中空气压缩机的电机
- 旋转转换器

以及许多其他应用。



深沟球轴承



深沟球轴承
 左：无凹槽
 中：在外圈上带有凹槽
 右：在外圈和內圈上带有凹槽

设计特点

单列深沟球轴承具有较深且连贯的滚道沟槽。这些滚道沟槽与钢球有着较好的配合，从而可供轴承承受两个方向上的径向载荷和轴向载荷。

单列深沟球轴承提供开式或防尘盖式的设计(通过密封件或防尘盖)。开式轴承也可提供加盖设计，在外圈上可带有凹槽。

密封解决方案

可供应最常用尺寸的深沟球轴承，在一侧或两侧配有密封件或防尘盖。在各种工况下不同密封解决方案的选用指南可参考SKF轴承综合型录。

防尘盖

带有防尘盖的轴承主要设计用于内圈发生旋转的应用。防尘盖安装在外圈上，不与内圈发生接触，但可与其构成一个较窄的间隙。防尘盖采用钢板制成。

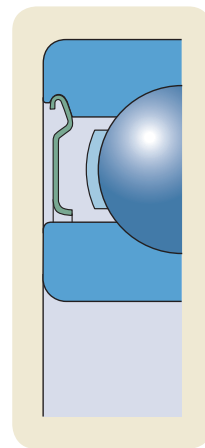
根据轴承设计、系列和尺寸的不同，SKF供应采用各种不同设计的防尘盖。防尘盖通过型号后缀Z进行标识，从防尘盖孔处延伸以与内圈挡边的平面部分形成一条长且窄的间隙。某些防尘盖并不具有延伸部分。

非接触式密封件

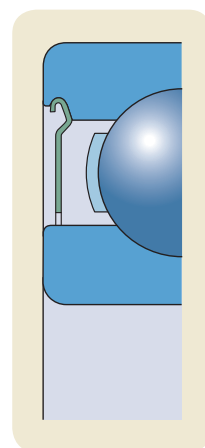
带有非接触式密封件的轴承可以与防尘盖轴承相同的速度运行，但密封的有效性更高。

该密封件可与内圈挡肩的平面部分形成一条极为狭窄的间隙。非接触密封件采用耐油且耐水的丁腈橡胶(NBR)制成，通过插入的钢板进行加固。

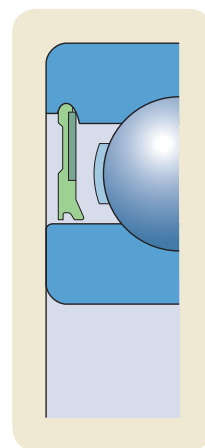
在一侧或两侧带有非接触密封件的SKF深沟球轴承通过型号后缀RZ或2RZ进行标识。



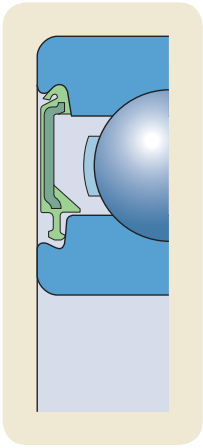
防尘盖孔中的延伸部分与内圈挡肩的平面部分形成一条长且窄的间隙



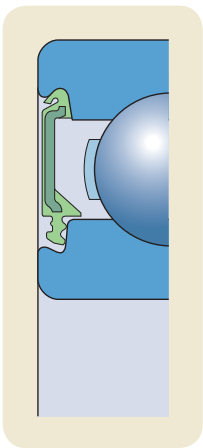
某些防尘盖不具有延伸部分



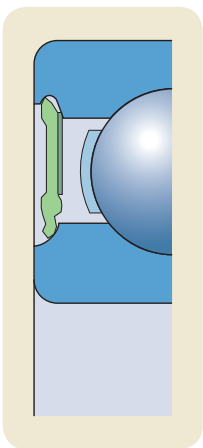
非接触RZ密封件



低摩擦 RSL 密封件
25 mm < D ≤ 52 mm



接触式 RSH 密封件
25 mm < D ≤ 52 mm



接触式密封件
(示例)

低摩擦密封件

带有低摩擦密封件的轴承可以与带防尘盖的轴承承受相同的速度，但是密封有效性更高。该密封件实际上并不与内圈挡肩上的凹槽发生接触。

在一侧或两侧带有低摩擦密封件的单列深沟球轴承可通过型号后缀RSL或2RSL进行标识。该密封件采用耐油且耐水的NBR材料制成，并通过插入的钢板进行加固。

接触密封件

接触式密封件采用NBR或氟橡胶(FKM)材料制成，并通过插入的钢板进行加固。这类密封件插入到外圈上的凹槽中，可与凹槽产生良好的接触而不会使外圈变形。在一侧或两侧带有NBR材料接触密封件的SKF深沟球轴承根据轴承的不同而在制造时可采用多种不同的设计：

- 25 mm < D ≤ 52 mm时，60、62和63系列中的轴承配有RSH密封件。
- 其他轴承配有RS1密封件，可对内圈挡边上的平面部分进行密封或对内圈侧面的凹槽进行密封。其区别通过尺寸d1或d2进行表示，在SKF轴承综合型录中或在skf.com/bearings处可在线获得。

带止动环凹槽的轴承

带止动环凹槽的深沟球轴承可以简化配置的设计，因为轴承可以通过止动环在轴向上定位于轴承座中。这样可以节省空间，并显著缩短安装时间。产品表中提供了相应的止动环，及其型号与尺寸。产品可以单独供货，或安装到轴承中。有关附加信息，请参见SKF轴承综合型录或在线访问skf.com/bearings。

保持架

根据设计、系列和尺寸的不同，SKF深沟球轴承配有不同类型的保持架。

通常用于滚子轴承的润滑剂不会对保持架的特性产生不利影响。然而，某些合成油和合成油基的润滑脂以及含有大量EP添加剂的润滑剂在高温下使用时，可对聚酰胺保持架产生不良影响。有关保持架适用性的更多信息，请参见SKF轴承综合型录或在线访问skf.com/bearings。

径向内部游隙

SKF单列深沟球轴承的制造采用普通组径向内部游隙作为标准。大多数轴承都采用C3径向内部游隙。对于牵引电机应用，使用远远高于C4或C5的游隙，因为配合更为紧密。未采用标准内部游隙的轴承可以应要求供货。

性能分级

SKF Explorer探索者轴承

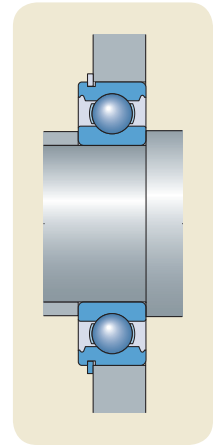
作为对现代机械行业中越来越严格的性能要求的响应，SKF开发出了SKF Explorer探索者高性能级别滚子轴承。

通过优化内部几何形状以及所有接触表面的表面精度、重新设计保持架、将其极其洁净并且均质的钢材与独特的热处理相结合，以及改善钢球的质量与一致性，SKF Explorer探索者深沟球轴承在性能方面实现了巨大的改进。

该性能级别下的深沟球轴承可实现出色的性能，特别是在电机和其他应用中。这些改进可以带来以下优点：

- 更高的动态承载能力
- 降低噪声与振动水平
- 更低的摩擦生热
- 显著延长轴承的使用寿命

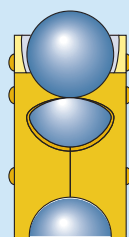
通过减小尺寸并降低润滑剂和能源的消耗，该类轴承可以减轻环境影响。重要的一点在于，SKF Explorer轴承可以降低对维护的要求，并可以提高生产效率。有关更多信息，请参见SKF轴承综合型录或在线访问skf.com/bearings。



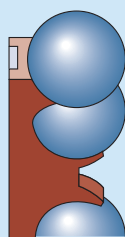
带止动槽和止动环的深沟球轴承应用

深沟球轴承保持架

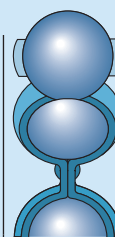
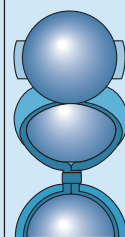
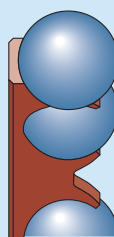
黄铜保持架



聚合物保持架



钢保持架



| | | | | | | | |
|-------|-------------|-------------|-----------------|----------------------|-----------------|--------------|-------------|
| 保持架类型 | 铆接， 球体引导 | 铆接， 外圈引导 | 卡型，钢球引导 | | | 搭扣式， 钢球引导 | 铆接， 钢球引导 |
| 材料 | 机加工黄铜 | | PA66， 玻璃纤维增强 | PA46， 玻璃纤维增强 | PEEK， 玻璃纤维增强 | 冲压钢 | |
| 后缀 | M | MA | TN9 | VG1561 ¹⁾ | TNH | - | - |
| 应用 | 牵引电机 | 齿轮箱 | 辅助设备 | | | 牵引电机 | 辅助设备 |
| 润滑 | 润滑脂 | 润滑油 | 润滑脂 | | | 润滑脂 | |

¹⁾ SKF E2轴承的标注配置，请检查其他轴承的可用性

SKF能效型(E2)轴承

为了满足对降低摩擦和能效型的不断增长的要求，SKF开发出SKF能效型(E2)高性能级别滚子轴承。该性能级别下的深沟球轴承的特点在于，与相同尺寸的SKF Explorer轴承相比，可以至少降低 30%的摩擦力矩。

通过优化轴承的内部几何形状、重新设计保持架，并应用新型的低摩擦润滑脂，该轴承显著降低了摩擦力矩。

与类似的SKF Explorer深沟球轴承相比，SKF E2深沟球轴承具有更长的使用寿命，并且所耗的润滑剂更少。典型应用包括电机、泵机、传动带以及风扇。有关更多信息，请参见SKF轴承综合型录或在线访问skf.com/bearings。

产品组合

深沟球轴承的完整产品组合可在SKF轴承综合型录中或从skf.com/bearings处在线获得。由于牵引电机和齿轮箱中的运行条件较为苛刻，可主要使用带有黄铜保持架并具有更紧密配合的深沟球轴承。由于配合较紧，需要使用更大的径向内部游隙，例如C4和C5。有关正确选用轴承的更多信息，请参见SKF轴承综合型录，或联系SKF应用工程服务部门。用于牵引电机的INSOCOAT和陶瓷深沟球轴承的首选范围在第4章中介绍。



圆锥滚子轴承

SKF生产的圆锥滚子轴承提供多种设计与尺寸，从而满足众多的应用要求：

- 单列圆锥滚子轴承
- 匹配单列圆锥滚子轴承
- 双列和四列圆锥滚子轴承

SKF还基于圆锥滚子轴承来制造密封、脂润滑并且预调整的轴承单元，特别适用于汽车和铁路的轮对应用。这类圆锥滚子轴承单元在SKF铁路技术手册第1卷中介绍。

设计特点

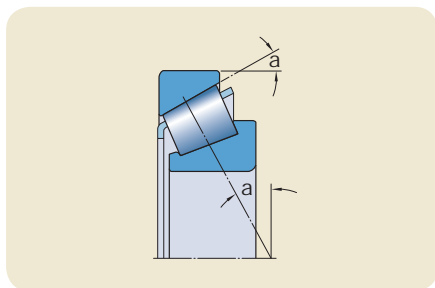
圆锥滚子轴承的内圈和外圈滚道为锥形，并采用锥形滚子。该产品设计用于承受联合载荷，例如同时作用的径向和轴向载荷。滚道的投影线在轴承轴的共同点处相交，从而提供真正的滚动并实现较低的摩擦。圆锥滚子轴承的轴向承载能力可以通过提高接触角 α 而提高。

角度可以通过计算系数 e 来表示。 e 的值越大，接触角度就越大，并且轴承对承受轴向载荷的适用性就越高。

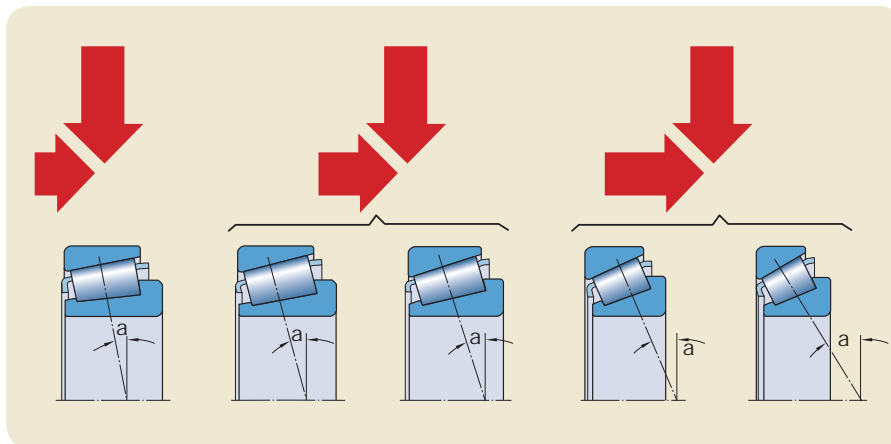
圆锥滚子轴承通常为分离式，例如，包含带滚子和保持架的内圈组件，可以与外圈分开安装。

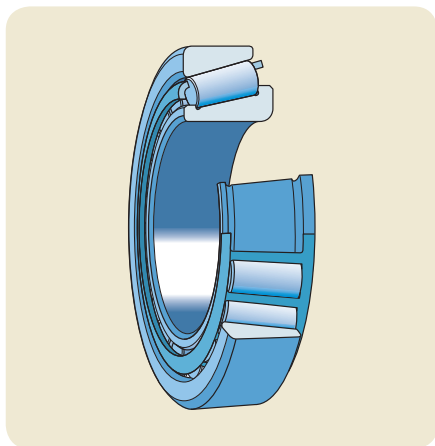
TQ产品线组合的SKF圆锥滚子轴承具有对数曲线，可以在滚子/滚道触点处提供最优的应力分布。引导挡边的滑动表面以及大型滚子端的特殊设计可显著促进滚子端/挡边接触点上的润滑膜形成。其优点包括更高的运行稳定性，以及可承受更大的不对中。

圆锥滚子轴承的轴向承载能力在很大程度上由接触角 α 确定



接触角 α 越大，轴向载荷的承载能力越高。





单列圆锥滚子轴承

通用的SKF圆锥滚子轴承，包括符合Q规格的SKF轴承在内，已经针对内圈引导挡边的滑动接触平面、滚子端面以及触点轮廓进行优化。

此外，高精度的制造过程使轴承相互之间的调整更为可靠，从而显著提高性能，尤其是在刚刚开始运行的几个小时内。

TQ线轴承

TQ线圆锥滚子轴承通过型号后缀Q进行标识，并且其操作特性使得明显区别于采用传统设计的轴承。对数曲线可在滚子/滚道接触区域实现最优的载荷分布，从而即使在发生轻微的不对中的情况下也可将峰值应力保持在可以接受的限制范围内。与SKF Explorer轴承类似，TQ线圆锥滚子轴承的滚子端/挡边接触区域设计用于降低启动时的摩擦和磨损。该轴承在安装后不需要特殊的磨合过程。预加载的轴承只会遇到受控并且较小的初始预载荷损失。

QCL7C轴承

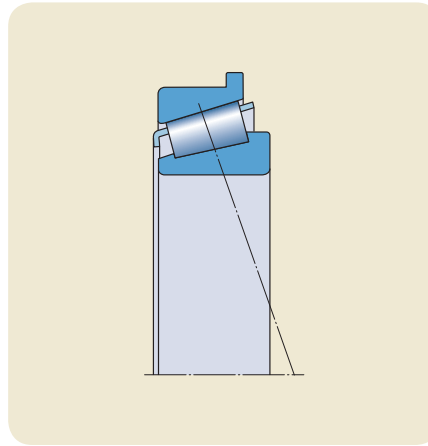
通过型号后缀QCL7C标识的轴承最初设计用作工业齿轮箱差速器中的小齿轮轴承，以提供恒定、精确的齿轮啮合。该轴承的特点在于具有极高的运行精度和出色的预载荷能力。产品具有特殊的摩擦特性，可以使用摩擦扭矩方法在狭窄的空间内进行轴向调节。其内部设计可促进流体动力油膜的形成，从而显著降低摩擦并相应降低磨合过程中的操作温度。在安装、润滑并经适当维护后，带有QCL7C型号后缀的轴承可以保持其预载荷设置。

外圈带挡边的轴承

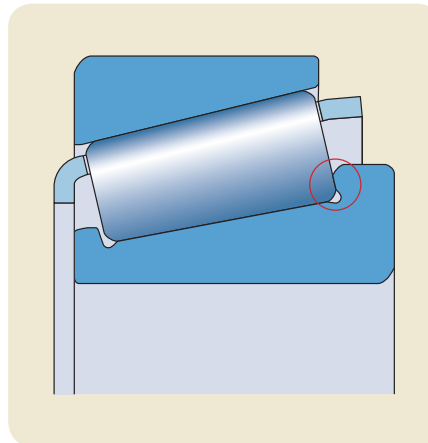
还可提供外圈上带有挡边的特定尺寸的SKF单列圆锥滚子轴承。具有挡边的轴承可以在轴承座中轴向定位，实现简化并且更为紧凑的轴承配置。轴承座孔的制造更为简单，因为不再需要挡肩。有关更多信息，请参阅第31页。

磨合

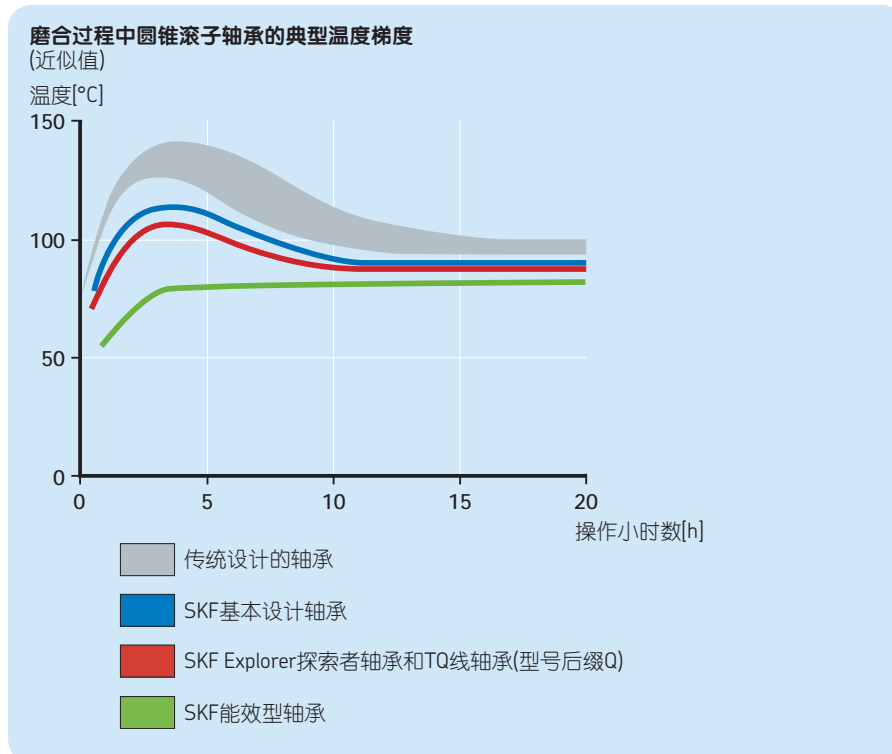
圆锥滚子轴承一般需要一段磨合期。在磨合期中，传统设计的圆锥滚子轴承将经受大量的摩擦，导致磨损，表现为温度的上升。采用当前的SKF圆锥滚子轴承设计后，在轴承正确安装并润滑的前提下，磨损和摩擦生热可以明显降低。



外圈上带有法兰的单列圆锥滚子轴承 (→第115页)



滚子端/法兰接触区域
滚子端的几何形状与表面处理以及法兰上与滚子端发生接触的区域已经通过优化来促进润滑剂薄膜的形成并加以保持。这样可以降低摩擦和摩擦生热，以及法兰磨损。该轴承可以维持更高的预载荷，并且运行的噪声更低。



保持架

用于铁路行业齿轮箱应用的SKF单列圆锥滚子轴承主要配有窗式冲压钢保持架，通过滚子引导，不具有型号后缀，或是采用J1、J2或J3型号后缀。

对于重型工况，使用优化的保持架设计：

- 高强度钢保持架
- 材料更厚

内部游隙和预载荷

单列圆锥滚子轴承的内部游隙只能在安装后获得，并通过调节两个在相反方向进行定位的轴承之一来确定。

根据应用的不同，可能需要在轴承配置中提供一个正值或负值的操作游隙。在大多数应用中，操作游隙应为正值。例如，在操作过程中，尽管非常微小，但轴承仍应具有剩余游隙。

匹配单列圆锥滚子轴承

在单个圆锥滚子轴承的承载能力不足的轴承配置中，或者轴需要做两个方向的轴向定位，则应采用配对轴承。该轴承组成套提供，并采用适宜的中间隔圈。

DB

配对单列圆锥滚子轴承，背对背配置。DB后紧跟的数字标识出中间圈的设计。

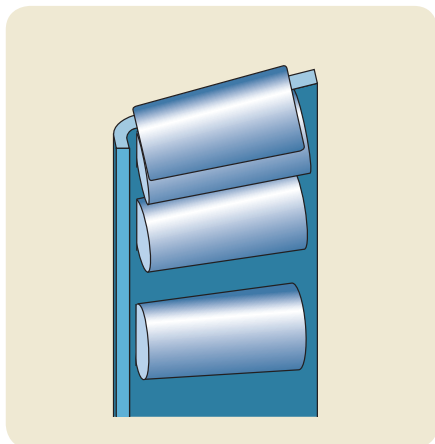
DF

配对单列圆锥滚子轴承，面对面配置。DF后紧跟的数字标识出中间圈的设计。

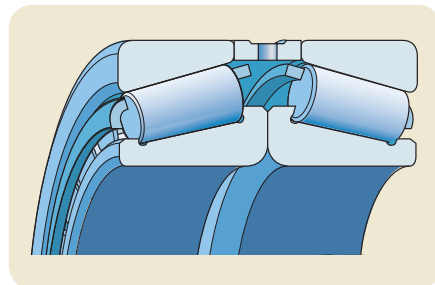
DT

配对单列圆锥滚子轴承，串联配置。DT后紧跟的数字标识出中间圈的设计。

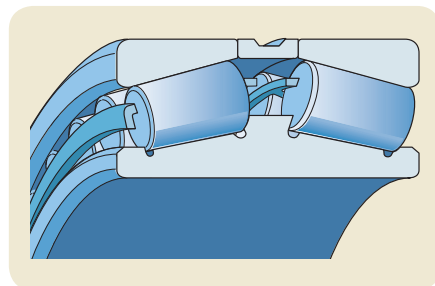
有关进一步信息，请联系SKF应用工程服务部门。



窗式冲压钢保持架，滚子引导



配对单列圆锥滚子轴承



双列圆锥滚子轴承

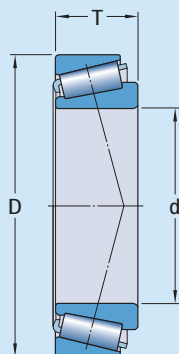
首选范围

首选范围基于2012年9月的产品组合。范围产品不断变化，如果需要，将来可能更新并出版。

圆锥滚子轴承的标准范围以及这些轴承的附加信息可在SKF轴承综合型录中或在skf.com/bearings处在线获得。

型号前缀和后缀的综合列表可在第94至96页找到。

用于齿轮箱的圆锥滚子轴承



| 主要尺寸 | | | 型号 | 主要尺寸 | | | 型号 |
|---------|--------------------|------------------|--|---------|------------------------------|----------------------------|--|
| d | D | T | | d | D | T | |
| mm | | | - | mm | | | - |
| 95 | 170 | 45,5 | 32219 J2/VE141 | 213 | 285 | 41 | T2DC 220/213/VE679 |
| 120 | 215 | 61,5 | 32224 J1/VG237 | 216,408 | 285,75 | 46,038 | LM 742747/710 |
| 140 | 250 | 71,75 | 32228 J2/VG237 | 216,5 | 285 | 41 | BT1-0667/VE679 |
| 177,800 | 227,012 227,012 | 30,162 33,274 | 36990/36920 N1/VA833 BT1-0410/VA833 | 220 | 285 340 | 41 76 | T2DC 220/VE679 32044 X/VA805 |
| 178,595 | 265,112 | 51,595 | M 336948/912 | 231,775 | 300,038 317,5 317,5 | 33,338 47,625 47,625 | 544091/544118/VE141 LM 245848/810 LM 245848/810/VE141 |
| 180 | 250 | 45 | BT1-0005/VE141 | 240 | 320 | 42 | T4EB 240/VE679 |
| 189,738 | 282,575 | 50,800 | BT1-0729 | 255,6 | 342,9 | 57,15 | M 349547/510/VG237 |
| 190 | 260 | 46 | JM 738249/210/VE141 | 257,175 | 342,90 358,775 385,775 | 57,15 71,440 71,438 | M 349549/510/VE174 M 249747/710/VG237 M 249747/710/VG237 |
| 198,298 | 300,000 | 49,212 | BT1-2111 | | | | |
| 199,949 | 282,550 282,575 | 46,038 46,038 | BT1-0704/HA4 BT1-2110 | | | | |
| 200,025 | 276,225 | 42,862 | LM 241147/110/VE673 | | | | |
| 210 | 285 | 41 | T2DC 220/210/VE679 | | | | |

补充型号

前缀

前缀用于标识轴承的组件，并且通常后面跟随整个轴承的型号，或用于避免与其他轴承型号相混淆。更多信息可参考SKF轴承综合型录或可从skf.com/bearings处在线获得。

对于定制的轴承设计，可使用以下前缀。完整的轴承型号包含前缀以及图纸编号。

示例：

- BB1** 单列球轴承，定制设计
- BC1** 单列圆锥滚子轴承，定制设计
- BT1** 单列圆锥滚子轴承，定制设计

后缀

以下说明了铁路应用中用于标识SKF轴承特定特征的最常用的型号后缀。有关附加信息，请联系SKF应用工程服务部门。

- B20** 减小宽度公差
- C3** 轴承内部游隙大于正常值(CN)
- C4** 轴承内部游隙大于C3
- C4H** 轴承内部游隙大于C3(C4 间隙的上半部分)
- C5** 轴承内部游隙大于C4
- C5H** 轴承内部游隙大于C4(C5 间隙的上半部分)
- CA**
 1. C设计的球面滚子轴承，但具有内圈上的保持挡边以及机加工保持架
 2. 用于通用配组的单列角接触球轴承。背对背或面对面配置的两个轴承所具有的轴向内部游隙在安装前将小于正常值 (CB)
- CB**
 1. 用于通用配组的单列角接触球轴承。背对背或面对面配置的两个轴承在安装前具有正常的轴向内部游隙
 2. 双列角接触球轴承的受控轴向游隙
- CC**
 1. C设计的球面滚子轴承，但具有增强的滚子导向功能
 2. 用于通用配组的单列角接触球轴承。背对背或面对面配置的两个轴承的轴向内部游隙在安装前大于正常值 (CB)
- CL7C** 小齿轮配置中圆锥滚子轴承的高性能设计
- DB** 匹配单列圆锥滚子轴承对，背对背配置。DB后紧跟的数字标识出中间圈的设计

| | | | |
|------------------|--|---------------|--------------------------------------|
| DF | 匹配单列圆锥滚子轴承对，面对面配置。DF后紧跟的数字标识出中间圈的设计 | MA | 机加工黄铜保持架，外圈引导，用于油润滑 |
| DT | 匹配单列圆锥滚子轴承对，串联配置。DT后紧跟的数字标识出中间圈的设计 | ML, MP | 机加工整体式窗式黄铜保持架，外圈引导，用于润滑油润滑 |
| EC | 结合了多个和/或更大的滚子并具有修改的滚子端/法兰触点的优化内部设计 | MR | 机加工整体式窗式黄铜保持架，滚动体引导 |
| G | 用于通用配组的单列角接触球轴承。背对背或面对面配置的两个轴承将具有“普通组”轴向游隙 | MR3D | 机加工整体式窗式黄铜保持架，特殊设计 |
| GA | 用于通用配组的单列角接触球轴承。背对背或面对面配置的两个轴承将具有较轻的预载荷 | N | 外圈上的止动槽 |
| GB | 用于通用配组的单列角接触球轴承。背对背或面对面配置的两个轴承将具有中等预载荷 | N1 | 一个外圈侧面上的一个定位槽（凹槽） |
| GC | 用于通用配组的单列角接触球轴承。背对背或面对面配置的两个轴承将具有较重的预载荷 | N2 | 一个外圈侧面上以180°分隔的两个定位槽（凹槽） |
| HA | 表面硬化轴承或轴承组件。HA后带以下数字进行详细标识： 0: 整套轴承 1: 外圈和内圈 2: 外圈 3: 内圈 4: 外圈、内圈和滚动体 5: 滚动体 6: 外圈和滚动体 7: 内圈和滚动体 | N3 | 外圈中的止动槽，一个外圈侧面上的一个定位槽（凹槽） |
| HB | 贝氏体硬化的轴承或轴承组件。为了更进一步标识，HB后跟随HA中阐明的数字之一 | P4 | 符合ISO公差级别4的尺寸和运行精度 |
| HC | 混合陶瓷轴承或轴承组件。为了更进一步标识，HC后跟随HA中阐明的数字之一。示例：采用氮化硅制成的HC5滚动体 | P5 | 符合ISO公差级别5的尺寸和运行精度 |
| J, J1, J2 | 窗式冲压钢保持架 | P54 | P5 + C4 |
| M | 机加工黄铜保持架，滚动体对中 | P6 | 符合ISO公差级别6的尺寸和运行精度 |
| | | P63 | P6 + C3 |
| | | P64 | P6 + C4 |
| | | P65H | P6 + C5H |
| | | Q | 优化触点几何形状和表面处理 |
| | | RS1 | 轴承一侧钢板强化的丁腈橡胶(NBR)接触式密封件 |
| | | 2RS1 | 轴承两侧的RS1接触式密封件 |
| | | RSH | 轴承一侧钢板强化的丁腈橡胶(NBR)接触式密封件 |
| | | 2RSH | 轴承两侧的RSH接触式密封件 |
| | | RSL | 轴承一侧的钢板强化丁腈橡胶(NBR)低摩擦接触密封件 |
| | | 2RSL | 轴承两侧的RSL低摩擦接触密封件 |
| | | RZ | 钢板强化的丁腈橡胶(NBR)低摩擦密封件 |
| | | 2RZ | 轴承两侧的RZ低摩擦密封件 |
| | | S0 | 尺寸稳定性高达+150 °C的轴承圈或垫圈 |
| | | T | 后面跟有数字的T标识出以背对背或串联方式配置的单列圆锥滚子轴承对的总宽度 |

TNH 注塑成型的玻璃纤维增强聚醚醚酮 (PEEK) 保持架, 滚动体对中

TN9 注塑成型的玻璃纤维增强聚酰胺 66 保持架, 滚动体对中

V... 与第二个字母组合的 V 标识出变型组, 并且在跟有一个三位或四位数字的情况下表示“标准”型号后缀中未涉及的变型。
 VA: 面向应用的变型
 VB: 边界尺寸偏差
 VE: 外部或内部偏差
 VL: 涂层
 VQ: 非标准质量和公差
 VS: 游隙和预载荷
 VT: 润滑
 VU: 其他应用

Z 轴承一侧的冲压钢防尘盖

2Z 轴承两侧的 Z 防尘盖

VA和VL型号示例

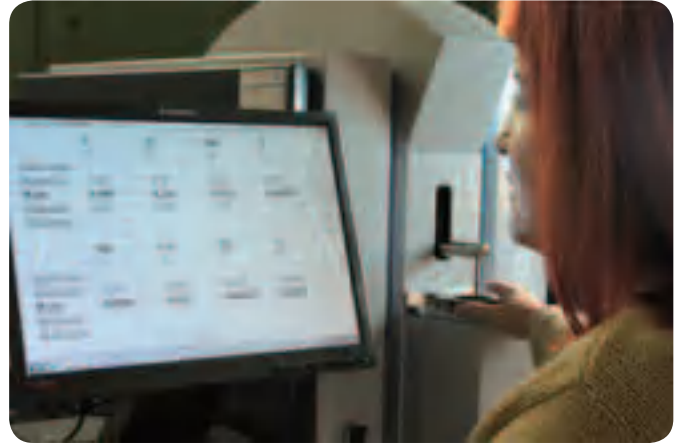
- VA301 牵引电机轴承
- VA 3091 牵引电机轴承, 外圈外表面上的氧化铝涂层, 可承受 1000 V DC 的电压
- VL0241 外圈外表面上的氧化铝涂层, 可承受 1000 V DC 的电压
- VL0271 内圈外表面上的氧化铝涂层, 可承受 1000 V DC 的电压

有关 INSOCOAT 轴承的其他后缀列于第 117 页。

轴承测试

铁路轨道车辆长期可靠性与高性能的关键在于严格的测试。SKF的轴承与轴承单元在荷兰新维根位于SKF商业和技术园的铁路测试中心中接受测试。该设施符合ISO/IEC 17025用于测试实验室的认证标准。其他测试装置位于各个开发中心和生产设施。

有关混合陶瓷轴承测试的信息，请参阅**第125页**；有关现场测试的更多信息，请参阅**第164和165页**的**第6章**。



化学测试

动态测试



用于确定最适宜润滑脂质量的SKF润滑脂测试装置



4 INSOCOAT轴承 与混合陶瓷轴承

| | |
|------------------|-----|
| 电蚀预防 | 99 |
| INSOCOAT轴承 | 115 |
| 混合陶瓷轴承 | 121 |
| 混合陶瓷轴承测试 | 125 |



INSOCOAT轴承与混合陶瓷轴承

在为推进系统引入了频率转换器控制的牵引电机后，对牵引电机轴承的需求显著增长。通过滚子轴承的电流可以在短时间内导致损坏。INSOCOAT轴承和混合陶瓷轴承则可以大幅度降低电流通过轴承的风险。

电蚀预防

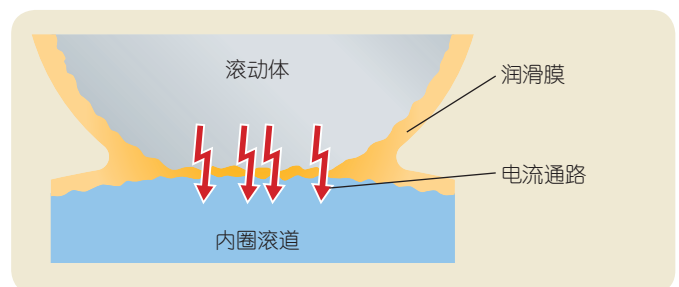
简介

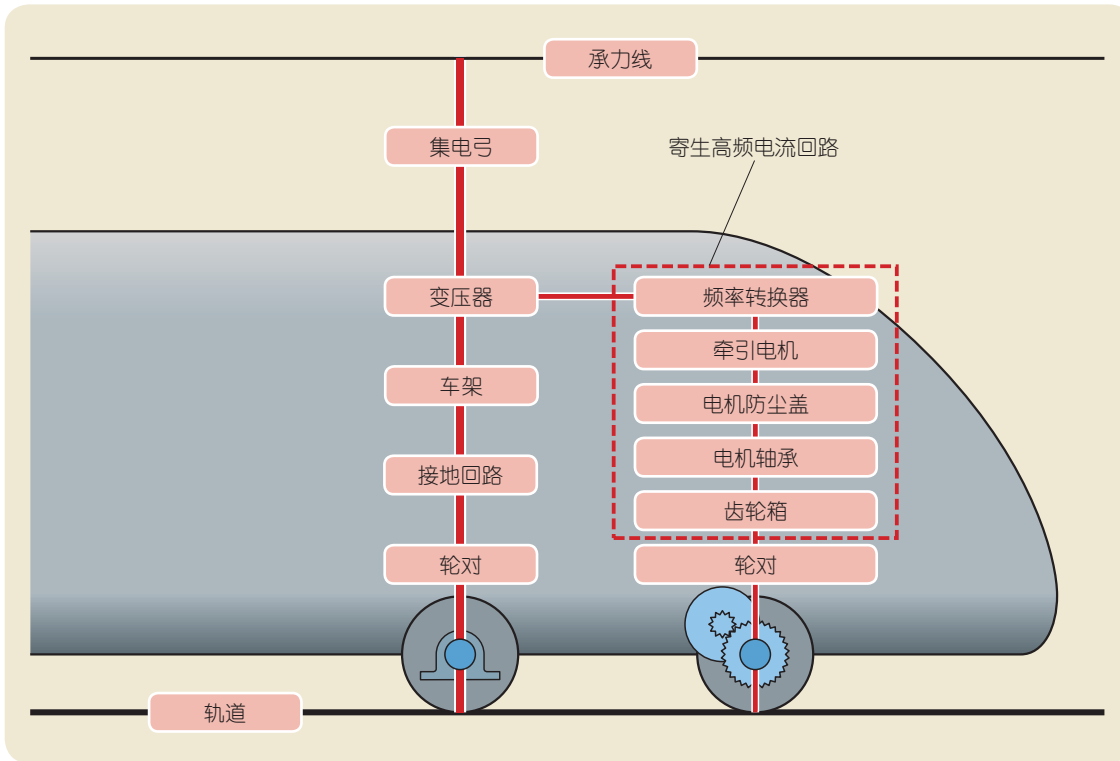
对于现代的轴承以及更长的维护时间间隔来说，可靠性是一项关键性的要求。例如，轴承必须足够牢固，以在采用当今交流技术的电气设备中运行。通过滚子轴承的电流可在相对较短的时间内造成损坏。

为了确保平稳、无故障的操作效果，需要防止电流通过轴承。轴承座、外圈、滚动体、内圈以及轴之间的接触区域可作为电触点。轴承损坏的发生取决于电气系统、轴承阻抗，以及在滚子触点处的

摩擦学行为。电弧/火花形式的放电可损坏滚动体以及轴承圈中的滚道。该过程的特点为类似于熔炼和焊接过程中的极高温。放电痕是典型的损伤，而在随后的阶段中，作为二次效应，将发生开槽或皱缩 (→第 104至 106页以及→第7章)^[15, 16]。

电流通过滚子接触区域的原则





电流原则

潜在风险

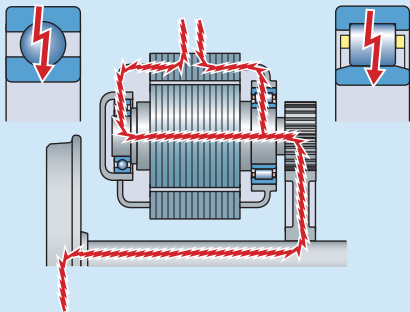
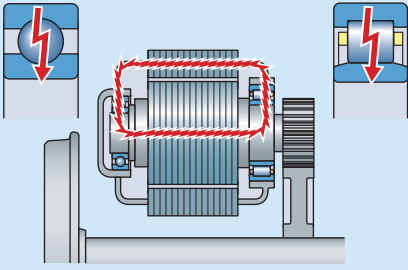
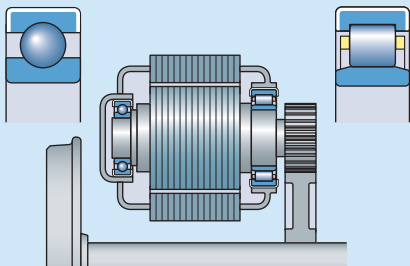
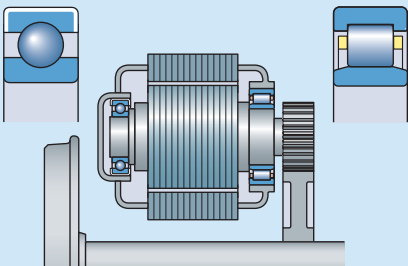
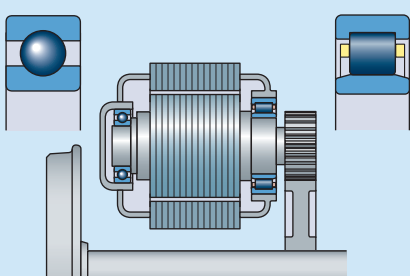
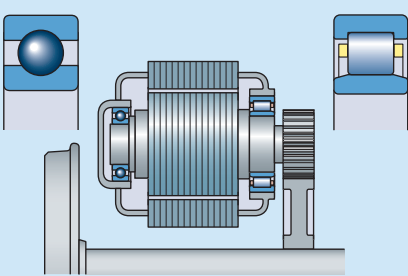
从二十世纪四十年代起，发布了一系列关于电流通路现象的深入研究结果^[17]。二十世纪六十年代，在大范围的实验室和现场测试的支持下，SKF开展了众多的理论研究活动^[18]。这些测试的结果得到了与操作人员实地经验的比较。所得出的结论为，如果电压超过0,5V，则存在放电以及相应的轴承损坏的风险。超过 0,1 A/mm² 的电流密度（与滚动体的接触区域有关）将被视为有害^[19]。这些值经常在当今的文献和 DIN VDE 0123 标准中得到引用。

然而，对于详细的风险分析来说，除了电流的能量外，还需要考虑频率以及功率。这特别适用于频率转换器控制的推进系统，因为当中存在高频电压和电流信号。

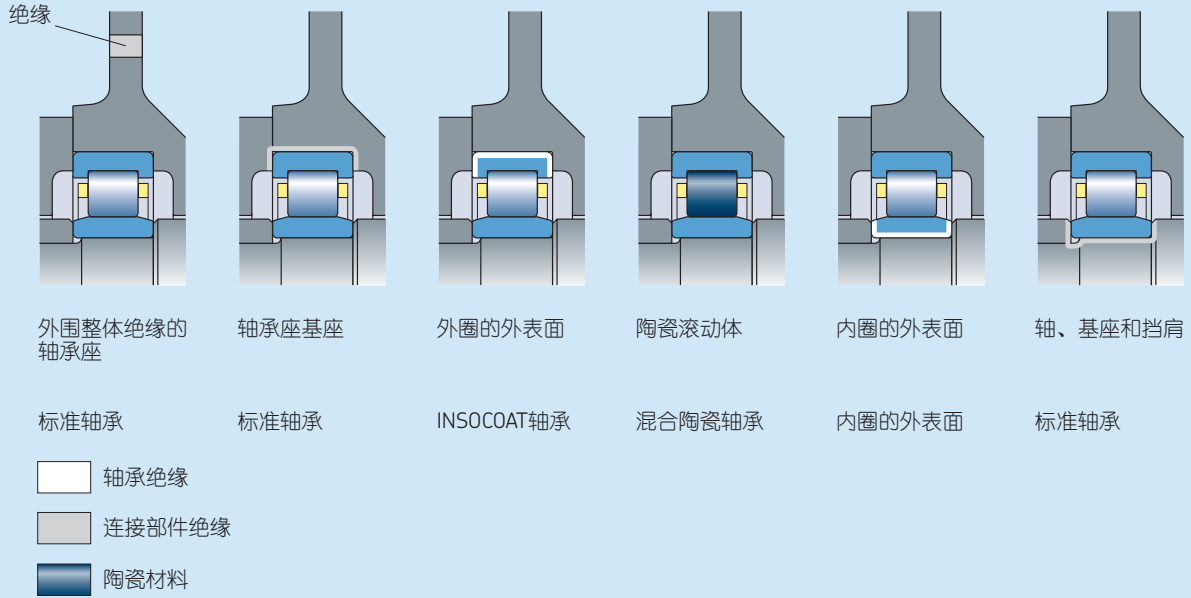
预防措施

在很早的时候就已在电气机械中应用电流通路的预防措施。采用专用立式轴承座组的老式设计的静止电气机械通过在轴承座及其基础之间插入电气绝缘板来进行绝缘。到了二十世纪五十年代，牵引电机配备了轴承防尘盖，在连接到定子和承受轴承重量的部分之间结合了电气绝缘功能。此时，SKF已经生产出第一台在外圈中压入电气绝缘层的轴承^[20]。

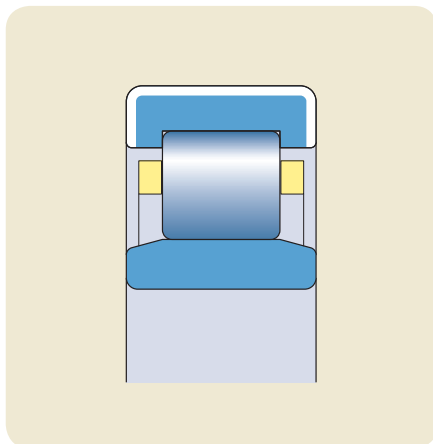
随后，到了七十年代，制造商的绝缘设计已经基于电气防尘盖孔或轴承基座上的火焰喷涂涂层。这种绝缘层一般具有100V DC范围内的击穿电压。牵引电机制造商所做的绝缘方面的努力成本极为高昂，并且有时所需的性能和可靠性无法维持足够长的时间^[21]。

| | 通过牵引电机的寄生电流 - 接地电流 | 牵引电机内部的寄生电流 - 循环电流 |
|------------|---|--|
| 无绝缘 |  |  |
| INSOCOAT轴承 | <p>直流和单相交流牵引电机 两侧的INSOCOAT轴承</p>  | <p>直流和单相交流牵引电机 一侧的INSOCOAT轴承</p>  |
| 混合陶瓷轴承 | <p>带频率转换器的三相牵引电机 两侧的混合陶瓷轴承</p>  | <p>带频率转换器的三相牵引电机 一侧的混合陶瓷轴承</p>  |

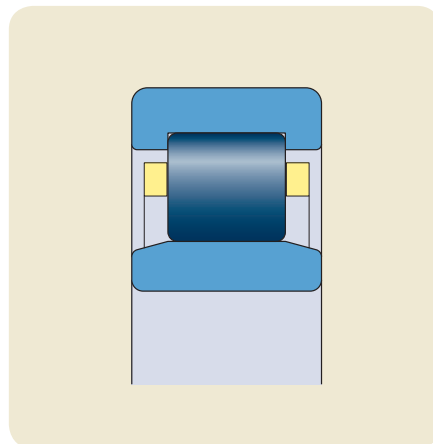
电气绝缘轴承配置的设计变型^[15]



在二十世纪七十年代，SKF已经开始了称为INSOCOAT轴承的首个电气绝缘轴承的连续生产^[15]。几年以后，开始对作为电绝缘体的陶瓷球体和滚子的测试。这些所谓的混合陶瓷轴承于九十年代后期应用于牵引电机中，当时陶瓷滚动体已经可以以稳定的质量从连续生产中提供^[22]。大约在2000年前后，第一台牵引电机轴承单元(TMBU)开始配备陶瓷滚动体(→第5章)。

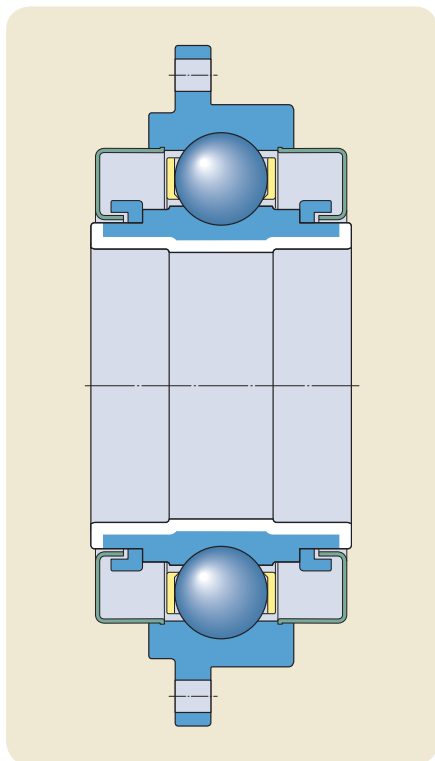


INSOCOAT轴承，基本设计

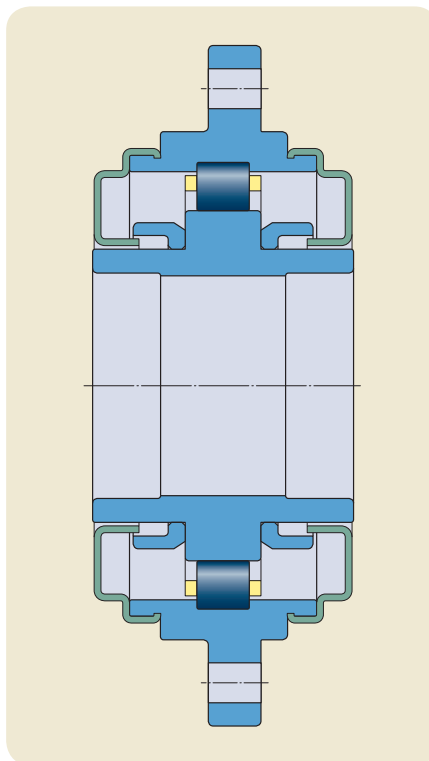


混合陶瓷轴承，基本设计

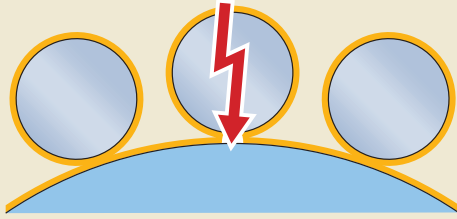
INSOCOAT牵引电机
轴承单元，基本设计



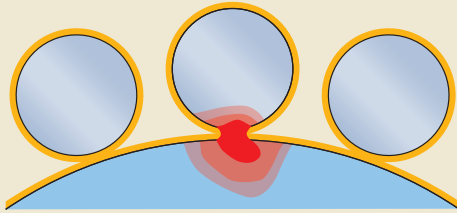
陶瓷牵引电机轴承单
元，基本设计



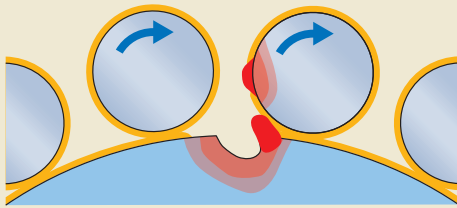
电侵蚀造成的轴承损坏^[15]



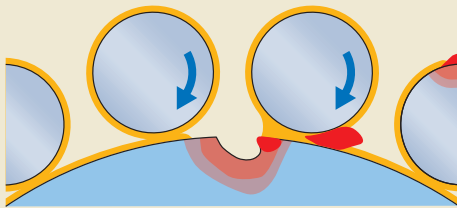
润滑剂膜的电击穿







强烈的局部生热导致滚动体的金属材料 and 接触区域中的轴承圈发生熔化



在滚动体离开接触区域后，熔化的材料颗粒和较小的放电痕将留在原处



在滚动或磨损后，突出的材料将变平，而分离出的颗粒将在轴承内分布开来

-  润滑剂
-  重新熔化的材料
-  重新硬化的材料
-  回火(调质)的材料



过电压
产生较大剥落的球轴承滚道

电侵蚀过程

过载电压

当电流从一个轴承圈通过滚动体转至其他轴承圈，从而使电流通过轴承时，会发生损坏。在接触表面上，该过程类似于电弧焊，其中在较小的接触表面上可存在极高的电流密度。

材料被加热到从退火到熔化之间的温度水平。这就导致出现褪色区域，尺寸大小不一，并且其中的材料发生退火、重新硬化或熔化。在材料熔化的区域中会出现放电痕。

外观：滚道和/或滚动体处单独的放电痕。滚道和滚动体处出现局部烧痕。

漏电

在电流连续以电弧的形式通过使用中的轴承时，即使在较低的强度下，滚道表面都会受热与侵蚀的影响，因为这里会形成上千处微小的放电痕，而其中的大部分位于滚动接触表面。这些放电痕之间的位置非常邻近，并且与过载电压所造成的损害相比，直径要小得多。开槽(皱缩)将作为二次效应随时间而在放电痕处发展开来，并且可在轴承圈和滚子的滚道处发现。

损坏的程度取决于多种因素：轴承类型、轴承尺寸、电气系统、轴承载荷、速度，以及润滑剂。除了轴承的钢表面损坏外，损坏区域附近的润滑脂可能发生碳化，并最终导致润滑条件不良以及相应引起表面破损和剥落。

在轴箱应用中^[1]，并且某些时候在齿轮箱应用中，也会发生极为相似的电侵蚀损坏。DIN VDE 0123标准详细介绍了铁路车辆中的电流。



深灰色的滚动体表面可表明发生微小的放电痕。

左：深灰表面的球体
右：映射了左侧球体的新球体



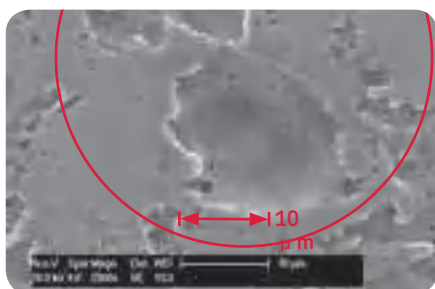
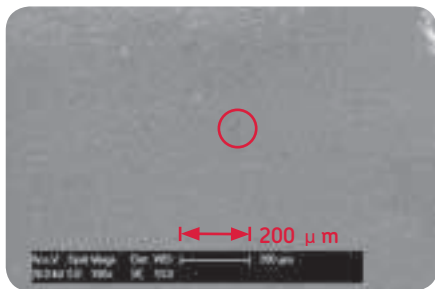
破坏性电流通过所导致的滚道开槽或搓衣板式损伤。
深沟球轴承的外圈滚道

破坏性电流通过所导致的滚道开槽或搓衣板式损伤。



电蚀点

单独的电蚀点一般可在直流应用中发现。由于变速传动应用中越来越多的使用变频器，发生微小的电蚀已成为滚子轴承中最常见的电气损坏之一。在电流连续通过运行中的轴承时，滚道表面将受影响，因为在表面上将产生几千处放电痕，从而导致外观变为深灰色/灰黑色。



润滑剂变质

电流通过导致保持架杆上出现变色的黑色润滑脂

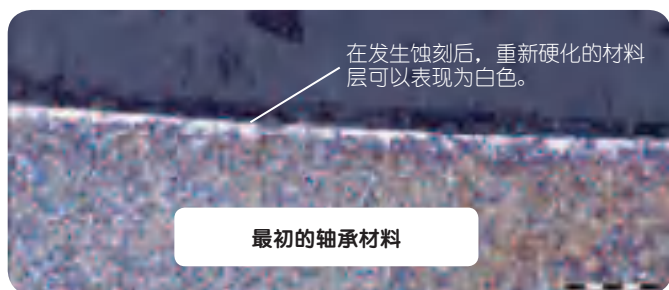
润滑剂变质

较高的局部温度可导致润滑剂中的添加剂碳化或烧蚀基油。这将使添加剂的消耗加快。在使用润滑脂润滑的情况下，润滑脂将变黑并且变硬。这种快速的击穿将大幅度缩短润滑脂和轴承的使用寿命。

重新硬化的轴承钢材

此外，放电痕的材料将经过重新硬化，比原先的轴承钢材料更为脆弱。由于存在持续的电流，轴承支撑面将不断的一次的发生硬化。最后，重新硬化的钢材将覆盖最初的轴承刚才。在蚀刻后，重新硬化的材料层可以在横截面中表现为白色区域。

当心：因高温而再次硬化的轴承钢可能由多种原因引起，而不仅仅是过电流。



牵引电机轴承绝缘要求

| | 频率转换器交流牵引电机 | 直流牵引电机 |
|------|--------------------------------|------------|
| 用途 | 最常用 | 某些操作人员的要求 |
| 电阻要求 | 阻抗 ¹⁾ | 绝缘电阻 |
| 解决方案 | 混合陶瓷轴承 INSOCOAT轴承取决于具体的应用要求 | INSOCOAT轴承 |

¹⁾电阻抗将电阻的概念拓展至交流电路，不仅仅描述电压和电流的相对幅度，并且还涉及相对的相位。在电路由直流驱动时，阻抗和电阻之间不存在区别；后者可以视为相位角为零的阻抗。

电气特性

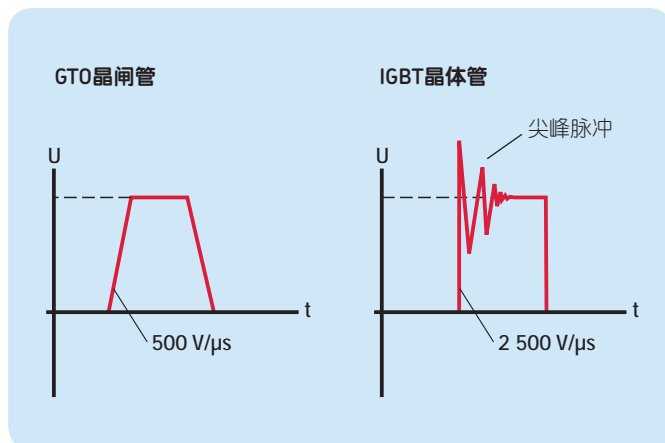
最近几十年间，铁路行业中，尤其是对于工业应用，对交流电机的需求增长迅速。在铁路行业中，三相感应电机是最常用的牵引电机类型。典型的直流牵引电机仍在某些铁路操作人员之间存在较高的需求，但是需求量也在不断的降低。

频率转换器

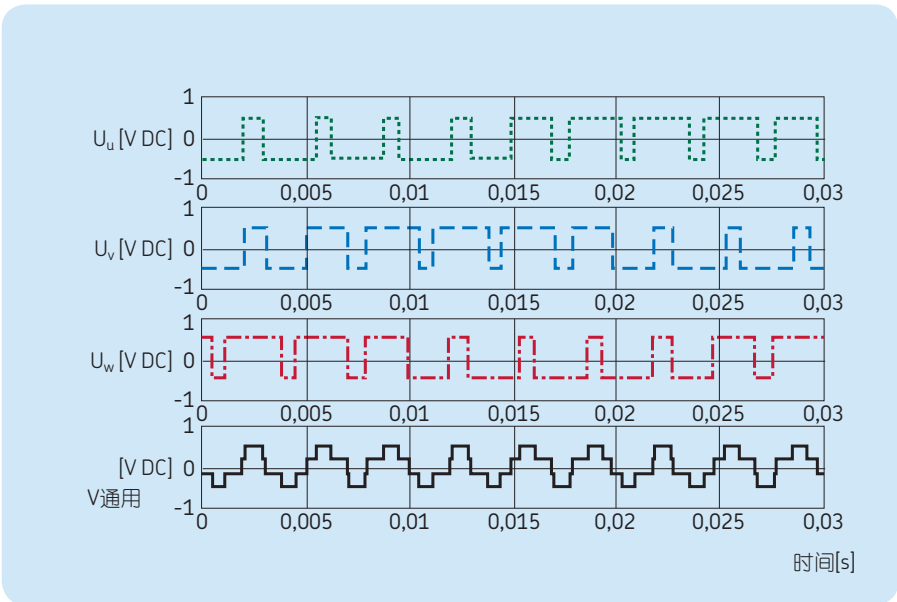
频率转换器中使用的功率切换半导体设备已经从晶闸管过渡到关断性晶体管(GTO)，并且进一步过渡到绝缘门闸双极晶体管(IGBT)。这些IGBT用于生成脉宽调制(PWM)输出电压波形，从而提高效率以及传动的动态性能。然而，伴随着优点的往往是妥协。除了电机自身所生成的经典的电压和电流外，在从PWM转换器为电机供电时(频率为3至12 kHz，取决于功率范围)，已经观测到新的效应。

现在已经发现，轴承损坏由这些快速切换(100 ns)的IGBT半导体设备所感应的高频(5 kHz至10 MHz)电流所造成。这些IGBT还可导致极快的电压升高(du/dt)，高达2.5至8 kV/μs，并且在转换器输出端甚至可达10 kV/μs。

与IGBT晶体管相比的GTO晶闸管电压脉冲



电机中的磁通不对称:
三相及其总和不为零,
但是导致共模电压



轴承电流的基本成因与来源为：

- 电机中的磁通不对称
- 不对称、非屏蔽的布线
- 快速切换的频率转换器及其共模电压

前两个来源对于所有电机都是潜在的风险，而无论是主馈线电机还是转换器馈线电机。

最后一个来源仅在转换器馈线电机中存在。由于存在各种不同的寄生电流，因此会产生潜在的问题：

- 高频轴接地电流
- 高频循环电流
- 电容放电电流^[23]

在滚动轴承正确运行时，一层油膜将把滚动体与滚道分离开来。从电气的角度来说，这层膜可作为一层电介质，由转子电压所释放。在高频下，将形成一个

电容器，其中的电容量取决于各种不同的参数，例如润滑剂类型、温度和粘度，以及膜厚度。如果电压达到特定的限值，称为润滑剂的击穿电压或阈值电压，则电容器将放电，并且产生高频电容放电电流。在该情况下，电流受电机内部杂散电容量的限值，但是每次在转换器切换时都会发生。

显然，频率转换器所供电的感应电机是一种极为复杂的传动系统，受众多参数的影响。包括电源、直流线路、切换元件、电缆、电机和载荷在内的整个传动装置都必须视为一个完整的系统，其中包含电感和分布电容。

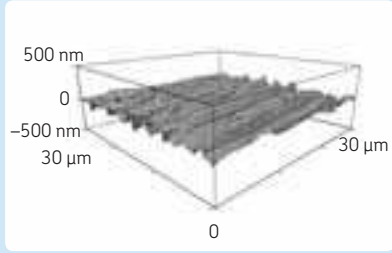
三个基本的牵引电机推进概念和电侵蚀的潜在成因

| | 直流推进系统 | 交流单相推进系统 | 交流频率转换器推进系统 |
|------------|--------|----------|-------------|
| 电机中的磁通不对称 | 是 | 是 | 是 |
| 不对称、非屏蔽的布线 | 否 | 否 | 是 |
| 共模电压 | 否 | 否 | 是 |

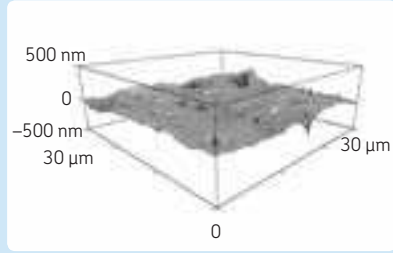
极大放大下的轴承滚道

轴承滚道，无电流通过

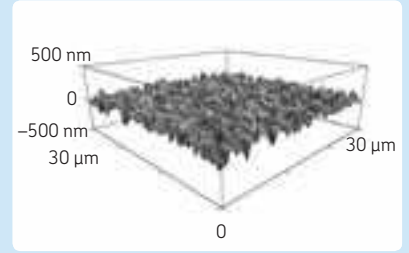
轴承滚道，由通过电流损坏



直流推进系统

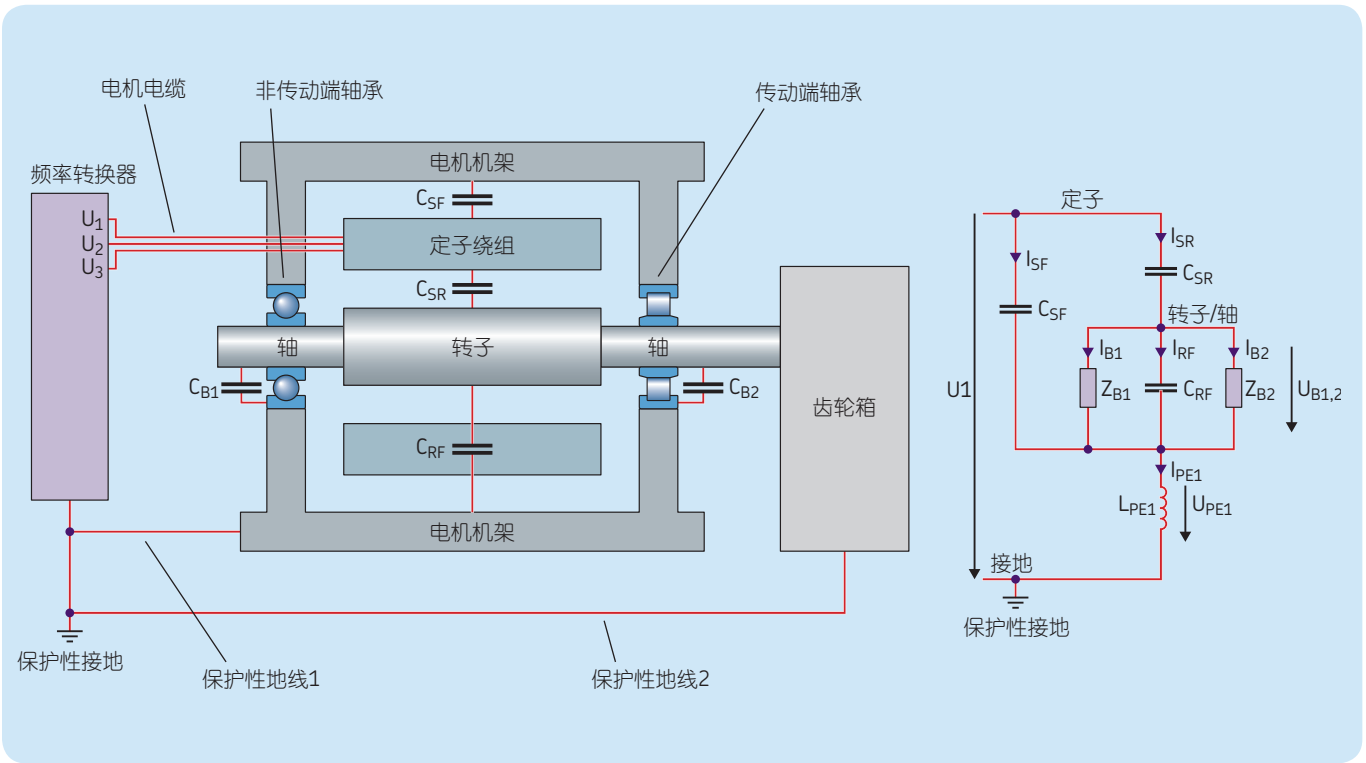


交流频率转换器推进系统

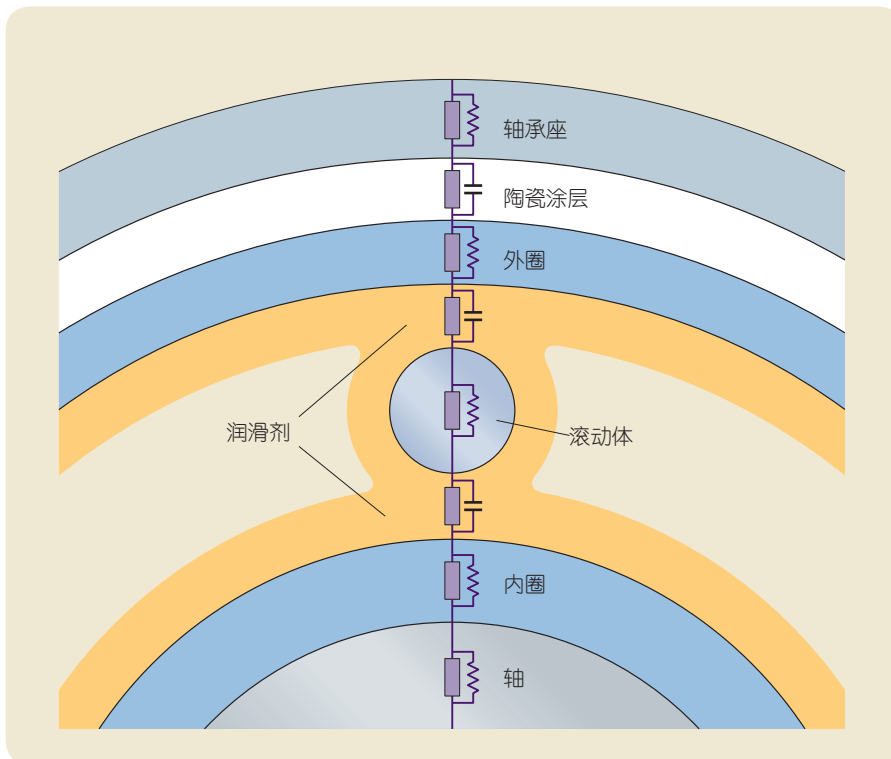


4

带固有杂散电容的牵引电机原理^[24]



已安装INSOCOAT轴承的电路模型原理图



电气参数的影响

直流和交流电气系统之间，以及这些应用的INSOCOAT轴承的行为之间，存在一定的区别。

在直流应用中，INSOCOAT轴承作为正常的(纯欧姆)电阻器。氧化铝层是一层电阻，从而仅有该层的欧姆电阻 R 可作为重要的量化指标。标准层的击穿电压为1000 V DC，而绝缘电阻高于50 M Ω ，从而可为轴承提供有效的绝缘。

在交流应用中，特别是在PWM转换器产生的高频下，不再有效。必须开发整个轴承的等效电路图，其中考虑INSOCOAT轴承的所有元件，例如内圈和外圈、滚动体、保持架、润滑剂、滚动体和滚道之间的接触表面区域，以及陶瓷涂层。该轴承等效电气结果的一个可行近似表示在上图中提供。

为轴承创建精确的等效电路作为电气系统非常困难。此处主要有两个原因：

- 高频电场中的大型金属元件具有极为复杂的三维结构。必须考虑该结构中可能存在点电涡流。
- 外圈和滚动体之间、以及滚动体和内圈之间的接触可产生电容。这些电容的值可根据轴承的动态而随机变化，例如，由于振动而发生变化。

电气绝缘行为的建模

必须对电气绝缘层，例如氧化铝Al₂O₃涂层，进行建模，作为电阻器和电容器的平行联系。因此，必须考虑阻抗Z，如下所述

$$Z = \frac{R}{1 + j \omega R C}$$

其中：

Z = 阻抗

j = 虚数单位

$\omega = 2 \pi f$

R = 系统的直流(欧姆)电阻 [Ohm]

C = 电容[F]

f = 频率[Hz]

阻抗的值可从以下公式中得到：

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + (2\pi f C)^2}}$$

该公式表示，通过提高频率，结合了电容的项可以变大，并导致阻抗降低。为了提高轴承的阻抗，应尽可能将涂层的电容保持在较低水平。INSOCOAT轴承的电容取决于轴承的尺寸(涂层表面积)、绝缘涂层厚度，以及涂层材料，如以下公式所示^[23]

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{s}$$

其中：

ϵ_0 = 真空中的介电常数

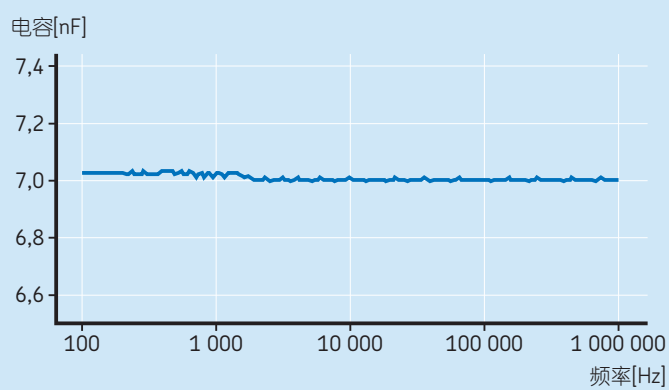
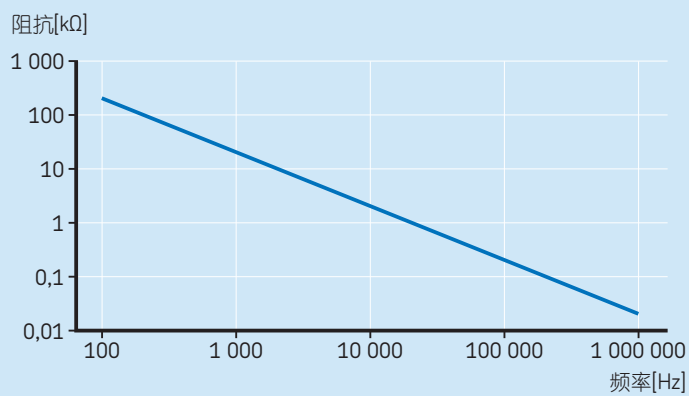
ϵ_r = 绝缘涂层的电容率¹⁾

A = 涂层触点表面积

s = 陶瓷涂层的厚度

¹⁾ 在电磁学中，电容率是对在介质中形成电场时所遇到的电阻量的测量值。

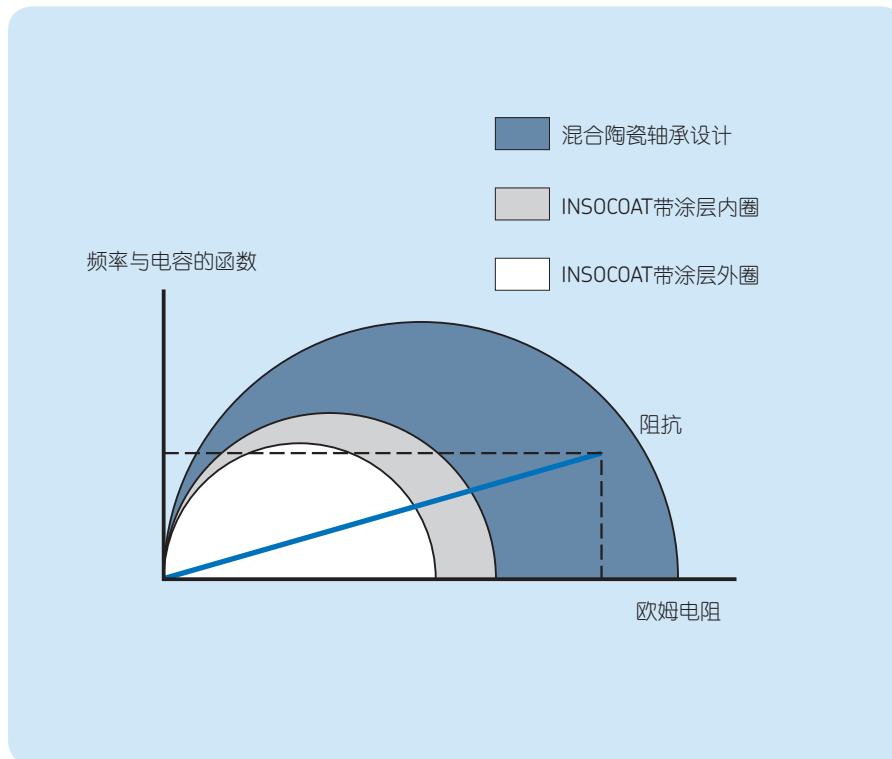
INSOCOAT 6316/VL0241深沟球轴承(外圈带有涂层)的测得阻抗和电容



电气绝缘的选择

根据应用需求的不同，SKF为牵引电机轴承的电气绝缘提供三种基本设计解决方案：

- 混合陶瓷轴承设计
- 内圈带有涂层的INSOCOAT轴承设计，主要用于牵引电机轴承单元和工业电气机械
- 外圈带有涂层的INSOCOAT轴承，用于铁路中的牵引电机和发电机



对于不同欧姆电阻、频率和电容的轴承设计。
 电气阻抗是一种基于欧姆电阻、频率和电容的矢量函数。
 电容是对给定电势下所存储的电量的一种测量。



INSOCOAT轴承

INSOCOAT轴承设计用于防止电流通过轴承。与其他绝缘方法相比，该轴承是一种极为经济的解决方案。通过将绝缘性质整合到轴承中，INSOCOAT轴承几乎可以消除电侵蚀的问题，从而提高可靠性并延长设备的开机时间。

本手册中所列INSOCOAT轴承的标准组合包括以下轴承最常用的尺寸与变型：

- 单列深沟球轴承
- 单列圆柱滚子轴承

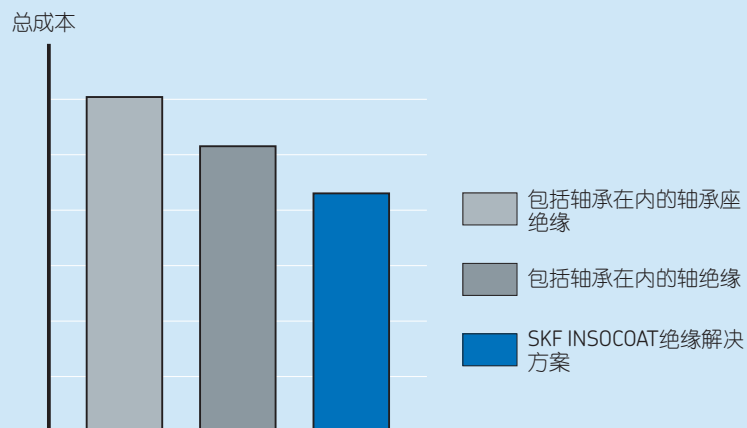
在铁路应用中，牵引电机轴承单元(TMBU)可以设计为使用INSOCOAT涂层(→第5章。)

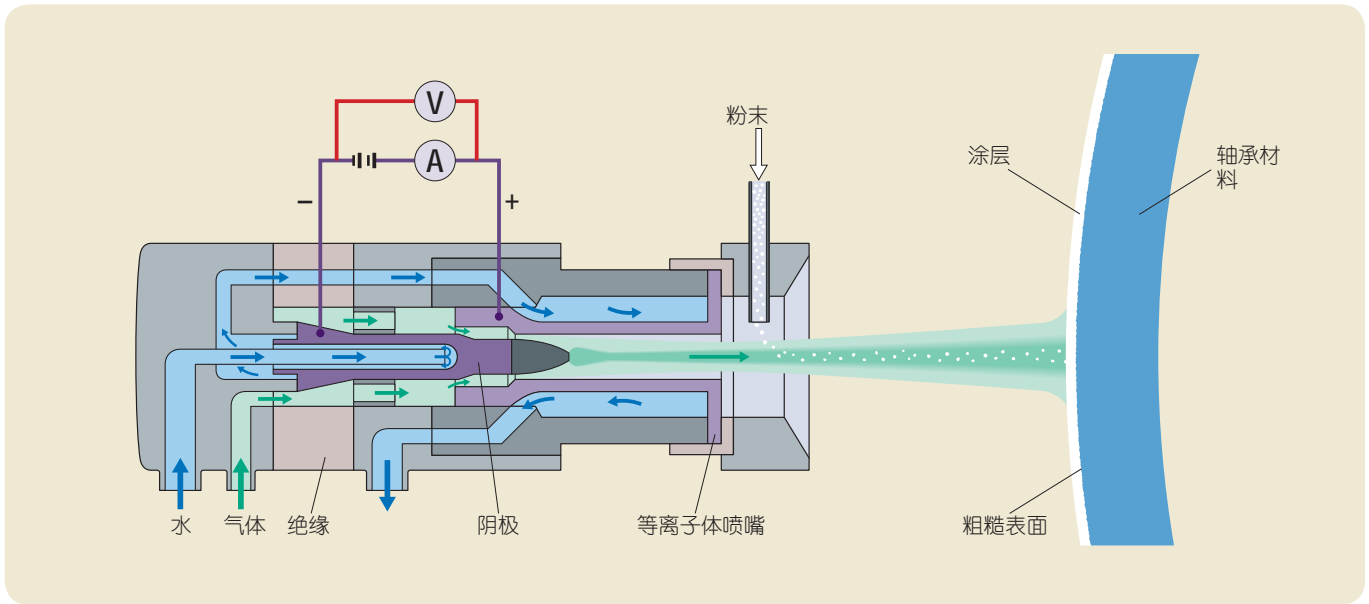
对于多筒悬挂，可以供应外圈带有涂层的专用INSOCOAT圆锥滚子轴承。



用于多筒悬挂的
INSOCOAT法兰圆锥
滚子轴承(→第2章)

SKF绝缘轴承解决方案相对于其他绝缘方式的总成本





等离子体喷涂流程的原理

设计特点

INSOCOAT轴承是一种标准轴承，其内圈(VL2071)或外圈(VL0241)的外表面上通过等离子喷涂了氧化铝，形成一层涂层。该涂层采用树脂密封，可防止水和湿气的导电作用。

在铁路应用中，INSOCOAT轴承外圈的外径和侧面一般涂有氧化铝 [25]。这类轴承通过型号后缀VL0241进行标识。

基本涂层可以承受高达1000 V DC的电压。但是，还可以应要求供应可以承受更高电压的涂层变型(→第117页的表)。

保持架

INSOCOAT轴承配有以下保持架之一：

- 牵引电机和发电机中的深沟球轴承主要配备铆钉连接的机加工黄铜保持架(→第86至87页)。
- 牵引电机和发电机中的圆柱滚子轴承可以配备与类似标准圆柱滚子轴承中相同的保持架(→第79页)。

实施

相关组件的设计

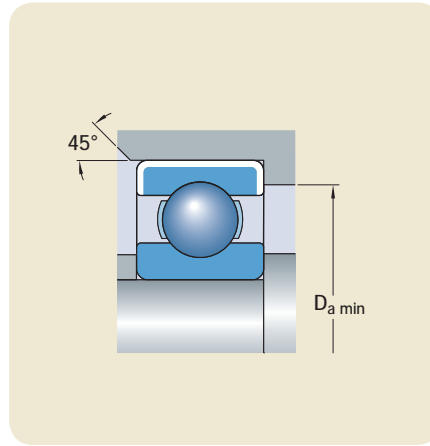
出于绝缘的原因，建议对于型号后缀为VL0241、外圈带涂层的轴承，其轴承座挡边或垫圈套筒的直径不应小于SKF轴承综合型录中所列的挡肩尺寸 $D_{a\ min}$ 。

安装和维护

在安装过程中，INSOCOAT轴承的处理方式应与标准轴承相同。对于完全发挥INSOCOAT轴承的使用寿命，适宜的润滑非常重要。

设计的优点

- 基本上消除杂散电流所造成的轴承过早失效
- 与其他绝缘方法相比更加经济的解决方案
- 可靠性更高
- 更低的生命周期成本



外圈带涂层的
INSOCOAT轴承的挡
肩尺寸

其他设计特点

有关最小载荷、轴向承载能力、当量轴承动载荷、当量轴承静载荷、温度限制，以及速度限制的更多信息，请参阅“牵引电机轴承单元”章节(→第5章)或SKF轴承综合型录。

INSOCOAT轴承数据

深沟球轴承和圆柱滚子轴承

| | |
|-------|---|
| 尺寸标准 | 边界尺寸: ISO 15 |
| 公差 | 普通级公差, 更高精度应要求提供 值: ISO 492, 有关附加信息请参阅 SKF 轴承综合型录。 外圈或内圈外部表面上的氧化铝层不会影响精度。 |
| 内部游隙 | 检查适宜的间隙级别 值对于零测量载荷下拆卸的轴承有效: ISO 5753-1, 参见 SKF 轴承综合型录 |
| 允许不对中 | 与类似标准轴承相同 |
| 电气性质 | 标准INSOCOAT层可对交流和直流电流提供保护。 1000 V DC下最小绝缘电阻为 50 MΩ。SKF的测试显示, 绝缘层的电击穿在3000 V DC以上发生。 |

INSOCOAT规格

| SKF规格, 型号 后缀 | 操作电压下 无电击穿 | 电阻 min. MΩ |
|----------------------|---------------|---------------|
| 涂层外圈 | | |
| VL0241 | 1 000 | 50 |
| VA3091 ¹⁾ | 1 000 | 50 |
| VG2211 ²⁾ | 1 000 | 50 |
| VL0244 | 2 000 | 150 |
| VL0246 | 3 000 | 150 |
| 涂层内圈 | | |
| VL0271 | 1 000 | 50 |

¹⁾ VA3091: 对于牵引电机中的轴承为VL0241以及VA301的实施
²⁾ VG2211: VL0241以及特殊保持架设计

首选范围

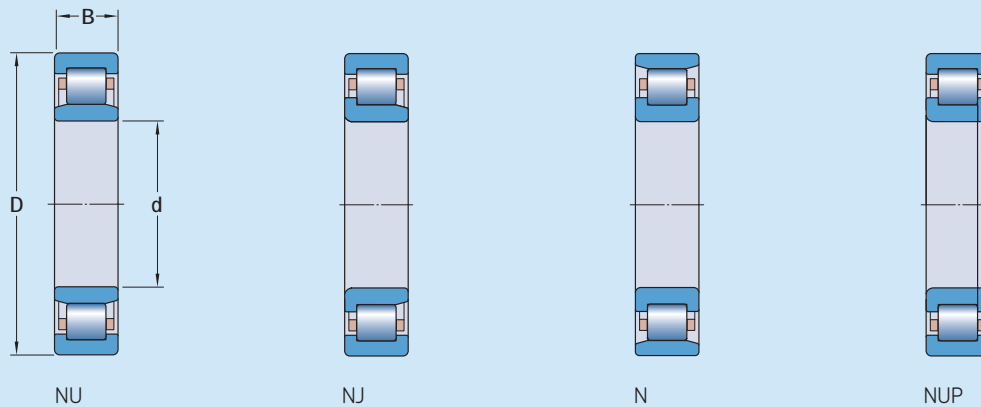
首选范围基于2012年9月的产品组合。该产品范围是不断变化的，如果需要，将来可更新并出版。

INSOCOAT轴承的标准范围以及这些轴承的附加信息可在SKF轴承综合型录中

或在skf.com/bearings处在线获得，其中还可以获得有关应用的数据。

型号前缀和后缀的完整列表可在第94至96页找到。

牵引电机-INSOCOAT圆柱滚子轴承



主要尺寸

型号

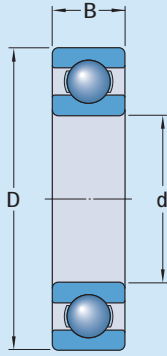
d D B

mm

| d | D | B | 型号 |
|-----|-----|----|------------------------------------|
| 50 | 90 | 20 | NU 210 ECM/C3HVA3091 |
| 65 | 120 | 23 | NU 213 ECM/C4VA3091 |
| 70 | 125 | 24 | NU 214 ECM/C4VA3091 |
| | 125 | 24 | NUP 214 ECM/C4VA3091 |
| 75 | 130 | 25 | NU 215 ECM/C4HVA3091 |
| 90 | 140 | 24 | NU 1018 M/C4VA3091 |
| 95 | 170 | 32 | NU 219 ECM/C4VA3091 |
| 100 | 215 | 47 | NJ 320 ECM/P64VA3091 ¹⁾ |
| 110 | 170 | 28 | NU 1022 M/C3VA3091 |
| | 200 | 38 | NU 222 ECMR/P64VA3091 |
| | 240 | 50 | NUP 322 ECML/C4VL0241 |
| 120 | 260 | 55 | NU 324 ECM/C3VL0241 |
| 130 | 280 | 58 | NU 326 ECML/C5VA3091 |
| 160 | 290 | 48 | NU 232 ECM/C4HVA3091 |
| | 340 | 68 | N 332 EMR/HB3L3BVA841 |

¹⁾除了NJ系列圆柱滚子轴承外，还可以供应带VA301后缀的相应HJ系列角环。

牵引电机-INSOCOAT深沟球轴承



主要尺寸

型号

| d | D | B | 型号 |
|-----|------------|----------|---|
| mm | | | - |
| 40 | 90 | 23 | 6308 M/C4VL0241 |
| 60 | 130 | 31 | 6312 M/C3VL0241 |
| 65 | 160 | 37 | 6413 MC/C5HS2VL0241 |
| 70 | 125 150 | 24 35 | 6214 M/C4VL0241 6314 M/C4VL0241 |
| 75 | 130 160 | 25 37 | 6215 M/C4VL0241 6315 M/C4HVL0241 |
| 80 | 125 | 22 | 6016 M/P65HS0VG2211 |
| 95 | 200 | 45 | 6319 M/C4VL0241 |
| 110 | 240 | 50 | 6322 M/C4VL0241 |
| 120 | 260 | 55 | 6324 M/C3VL0241 |
| 130 | 280 | 58 | 6326 M/C3VL0241 |
| 160 | 290 340 | 48 68 | 6232 N1M/C5HS0VG2241 6332 M/C3VL2071 |
| 180 | 320 | 52 | 6236 M/C5HS0VG2211 |
| 240 | 360 | 56 | 6048 M/C4S0VG2211 |
| 260 | 400 | 65 | 6052 M/C4S0VG2211 |



混合陶瓷轴承

混合陶瓷轴承可以进一步改善电气绝缘性质，尤其是对于现代的高频转换器系统应用。这些轴承配有采用轴承级别氮化硅制成的滚动体。混合陶瓷轴承即使在极高频下也具有绝佳的电气绝缘性质。更长的维护时间间隔可以基于应用新的优化润滑脂寿命指南来实现(→第132至135页)。

本手册中所列 SKF 混合陶瓷轴承的产品组合包含用于铁路电机和发电机的常用尺寸。其中包含：

- 单列深沟球轴承
- 单列圆柱滚子轴承

此外，牵引电机轴承单元(TMBU)还可以设计为混合陶瓷形式(→第5章)。

设计特点

混合陶瓷轴承的轴承圈采用轴承钢制造，滚动体采用轴承级别的氮化硅(Si_3N_4)制造。由于氮化硅是一种出色的电气绝缘材料，混合陶瓷轴承可以有效的将轴承座与交流 and 直流电机以及发电机中的轴绝缘。

除了作为一种出色的绝缘体，与相同尺寸的全钢轴承相比，在相同的操作条件下，混合陶瓷轴承还具有更高的速度性能，并且可以实现更长的使用寿命。在振动或振荡条件下，混合陶瓷轴承也同样具有极为出色的性能。通常，并不需要为轴承施加预载荷或在这类条件下应用专用润滑脂。

轴承性能并不仅仅由额定载荷或额定转速来决定。还存在一系列影响轴承性能的因素。与相同尺寸的全钢轴承相比，可以提高SKF混合陶瓷轴承性能的主要因素包括：

• 绝缘性质

作为一种非导电材料，氮化硅可以保护轴承圈免受电流损伤的影响，并且在破坏性电流可缩短轴承使用寿命的应用中，例如，在交流和直流电机以及发电机中，反而延长轴承的使用寿命。

• 密度更低

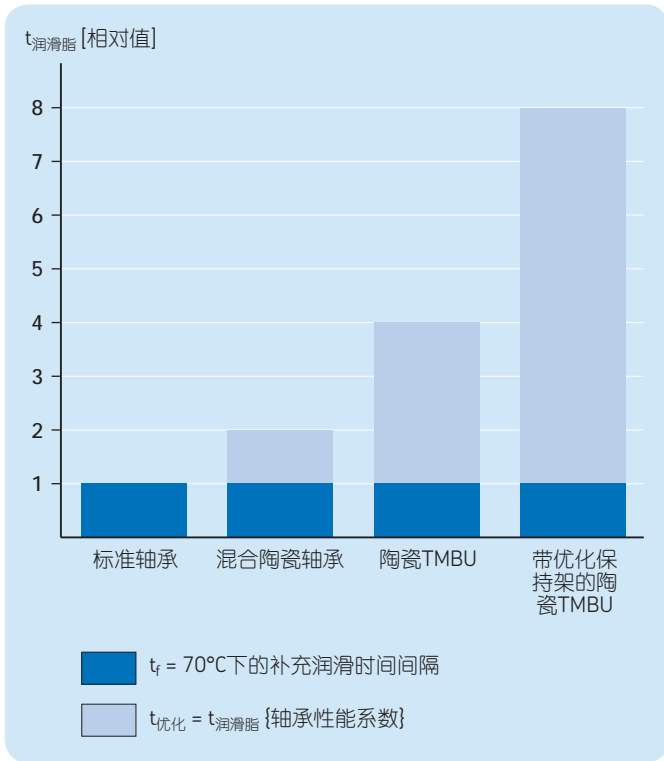
轴承级别氮化硅滚动体的密度比相同尺寸的轴承钢制滚动体低60%。更低的重量意味着更小的惯性 - 并且这将在快速启动与停止下转化为绝佳的性能，以及更高的速度性能。

• 摩擦更小

密度更低的氮化硅滚动体加上较低的摩擦系数，可以在高速下显著降低轴承温度。更低的运行温度可以延长轴承和润滑剂的使用寿命。

• 极高的硬度与弹性模量

氮化硅滚动体的极高水平的硬度意味着更高的耐磨损性、更高的轴承刚度，以及污染环境下更长的轴承使用寿命。



应用的SKF优化润滑脂寿命指南, 有关更多信息, 请参见→第132至135页

混合陶瓷轴承的设计优点

- 即使在极高的频率下也具有绝佳的电气绝缘性质
- 与全钢轴承相比润滑脂寿命更长, 从而延长维护时间间隔
- 摩擦更低、精度更高, 从而实现能效型
- 更低的操作温度实现延长的维护时间间隔

防止假渗透碳化

如果静止的轴承受振动的影响, 则将发生“假渗透碳化”的风险。假渗透碳化指滚道中形成的浅凹陷将最终导致剥落和轴承过早失效。在钢制滚动体由陶瓷滚动体替代的情况下, 已发现轴承受假渗透碳化的可能性要明显降低。

降低氮化硅和钢表面之间发生涂污的风险

即使在润滑不足的情况下, 氮化硅和钢表面之间发生涂污的风险也会降低。

在存在高速与较高加速度的应用中, 或在流体动力油膜不足以支持轴承平稳运转的应用中(例如 $k < 1$, (→第5章)), 混合陶瓷轴承的运行时间更长。对于混合陶瓷轴承, 普遍采用 $k = 1$ 进行轴承寿命计算, 在 $k < 1$ 的情况下, 也是如此。

运行速度更快, 持续时间更长

由于氮化硅的低密度, 加上摩擦系数更低, 硬度更高, 以及氮化硅在不良润滑工况下不会涂污滚道, 因此轴承的转速更高, 并且即使在最为严苛的工况下运行时间也 longer。

更低的热膨胀系数

氮化硅滚动体与相同尺寸采用轴承钢制成的滚动体相比, 热膨胀系数更低。这就意味着在轴承内对温度梯度的敏感度更低, 并且对预载荷/游隙的控制也更精确。

速度性能

一般来说, 混合陶瓷轴承的速度性能比相同尺寸的全钢轴承要高。但是, 在某些情况下, 保持架的执行可能限制允许速度。

钢、氮化硅和陶瓷材料性质基准

| 材料 | 轴承钢级别 | 轴承级别氮化硅 | 陶瓷 |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 压缩强度(MPa) | 2 300 | 3 000 | 950 |
| 抗拉强度(MPa) | 1 900 | 800 | 150 |
| 密度(g/cm ³) | 7,9 | 3,2 | 2,9 |
| 硬度 HV 10(kg/mm ²) | 700 | 1 600 | 800 |
| 弹性模量(GPa) | 210 | 310 | 125 |
| 热膨胀(10 ⁻⁶ /K) | 11,7 | 3 | 5 |
| 电阻系数(Ω cm) | 0,4 × 10 ⁻⁶ (导体) | 10 ¹² (绝缘体) | 10 ¹² (绝缘体) |
| 介电强度(kV/mm) | - | 15 | - |
| 相对介电常数 | - | 8 | - |

陶瓷深沟球轴承

深沟球轴承是使用最为广泛的轴承类型，尤其是在电机领域。这种不可分离的轴承适用于高速应用。较深的不间断管道凹槽可以与球体保持紧密接触，从而可使轴承在两个方向上承受径向载荷和轴向载荷。有关更多信息，请参阅SKF轴承综合型录。

陶瓷圆柱滚子轴承

陶瓷圆柱滚子轴承通常用于电机，尤其是牵引电机领域，以及在苛刻操作条件下运行的应用。可以承受极重的径向载荷与高速。有关更多信息，请参阅“轴承设计”章节(→第3章)。

其他设计特点

有关最低载荷、轴向承载能力、当量轴承动载荷、等效静态轴承载荷、温度限制以及速度限制的更多信息，请参阅“牵引电机轴承单元”章节(→第5章)或SKF轴承综合型录。

混合陶瓷轴承数据

| | 深沟球轴承 | 圆柱滚子轴承 |
|-------|--|-----------------------------|
| 尺寸标准 | 边界尺寸: ISO 15 正常尺寸, 更高精度应 要求提供 | 正常尺寸, P6运行精 度, 更高精度应要求提供 |
| 公差 | 值: ISO 492, 有关更多信息, 请参阅SKF轴承综合型录 | |
| 内部游隙 | 检查适宜的间隙级别(→第5章) 值对于零测量载荷下拆卸的 轴承有效: ISO 5753-1 | |
| 允许不对中 | 与类似标准轴承相同 | |
| 电气性质 | 混合陶瓷轴承可提供对交流和直流电的保护。即使在极高的频率下, 混合陶瓷轴承的阻抗也较高, 从而为高频电流和峰值电压提供出色的保护。有关更多信息, 请联系SKF应用工程服务部门。 | |

首选范围

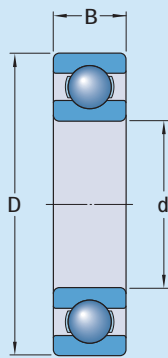
首选范围基于2012年9月的产品组合。该范围是不断变化的产品概览，如果需要，将来可能更新并出版。

混合陶瓷轴承的标准范围以及这些轴承的附加信息可在SKF轴承综合型录中

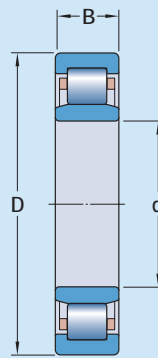
或在skf.com/bearings处在线获得，其中还可以获得有关应用的数据。

型号前缀和后缀的完整列表可在第94至96页找到。

牵引电机 - 混合陶瓷轴承



深沟球轴承



圆柱滚子轴承(NU设计)

主要尺寸

型号

d D B

mm

| | | | |
|-----|-----|----|---------------------|
| 60 | 110 | 22 | 6212 M/HC5C4S0VG319 |
| 70 | 125 | 24 | 6214 M/HC5C4S0VG319 |
| 80 | 125 | 22 | 6016 MC/HC5P65HS0 |
| 85 | 150 | 28 | 6217 M/HC5C5S0VG319 |
| 90 | 160 | 30 | 6218 M/HC5C4S0VG319 |
| 110 | 170 | 28 | 6022 M/HC5C4S0VG319 |

主要尺寸

型号

d D B

mm

| | | | |
|----|-----|----|---------------------|
| 40 | 68 | 15 | NU 1008 ML/HC5C5 |
| 50 | 90 | 20 | NU 210 ECM/C3HVC498 |
| 60 | 95 | 18 | NU 1012 MR/C4HVC498 |
| 70 | 110 | 20 | NU 1014 MR/HC5C4 |
| 75 | 115 | 20 | NU 1015 MR/HC5C4 |
| 80 | 125 | 22 | NU 1016 MR/C4HVC498 |

混合陶瓷轴承测试

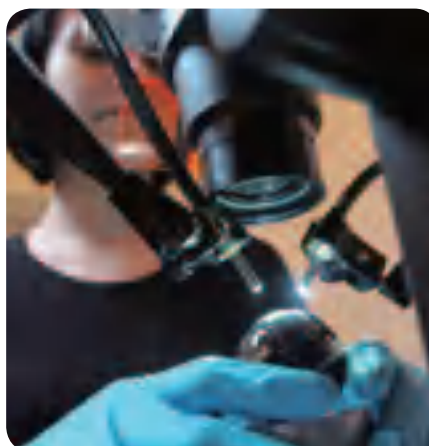
为了确保混合陶瓷轴承在轴承应用中实现最佳性能，需要对用于滚动体的材料进行细致的评估。很久以来，已经针对该目标建立了相应的测试程序。

一般说来，通过样品安装和抛光，对毛坯件或球体材料成品的截面采样进行宏观结构、微观结构和均质性的检查可以实现首次材料评估。同时，还可以相对较快的确定备选轴承材料的硬度以及刻痕破坏耐受性。

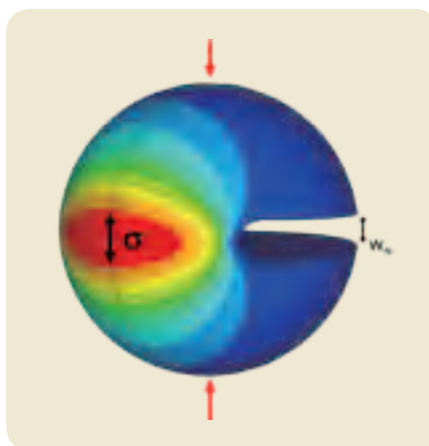
现在已经开发出新的方法来测试陶瓷球体成品的强度。特别是对于高强度材料，已经发现其表面质量对于强度具有显著影响。并且，轴承球的表面质量要远远超过参考样本的折弯杆质量。“凹口球”测试的优点为，可以在真正的轴承球上评估强度，而不是在折弯杆上，如当前的ISO 26602标准所指定。球体带有凹口，并且在竖直方向上加载。其作用方式与折弯条相似^[26]。



检查截面样本上的宏观结构、微观结构和均质性

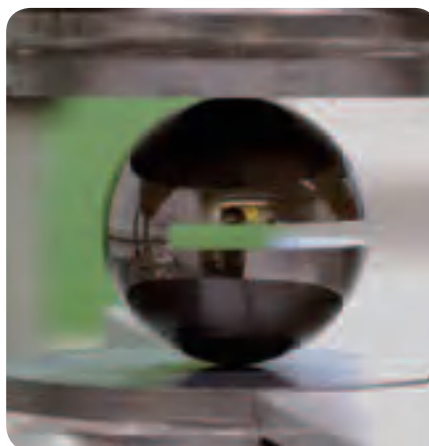


球表面光学测试



用于陶瓷球折弯强度评估的凹口球测试原理
 σ = 应力
 W_N = 宽度

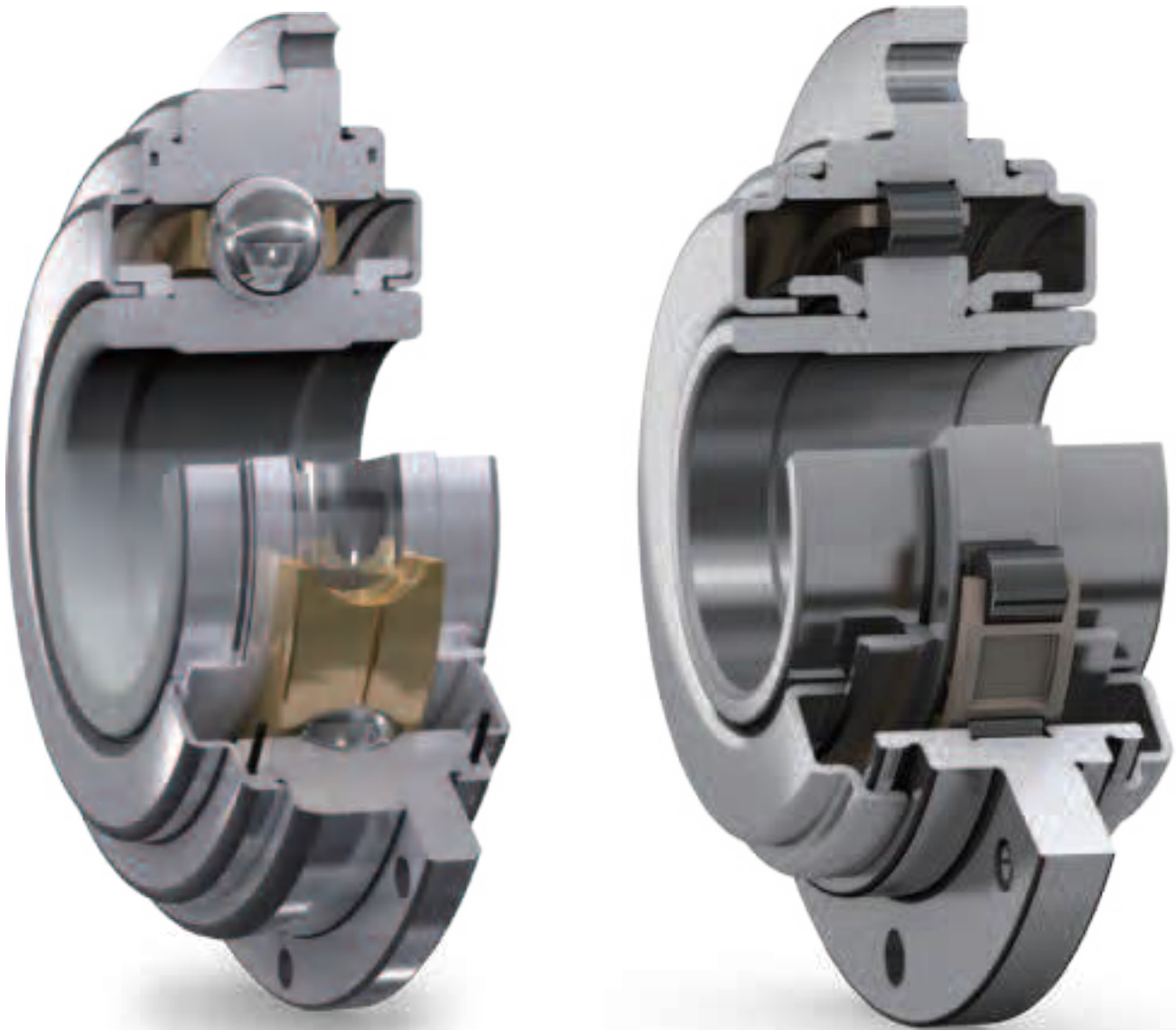
带有两组、每组四个轴向加载陶瓷角接触球轴承的耐久性寿命测试装置



陶瓷球的“凹口球”测试

5 牵引电机轴承单元

| | |
|-------------|-----|
| 简介..... | 128 |
| 设计特点..... | 130 |
| 延长使用寿命..... | 132 |
| 定位端设计..... | 136 |
| 非定位端设计..... | 138 |
| 传感器设计..... | 140 |



牵引电机轴承单元

牵引电机轴承单元(TMBU)的设计可提供免维护的解决方案以实现更长的服务时间间隔。该解决方案以极其紧凑并且节省空间的设计为基础。电机总长度可以缩短，或者可以增加给定电机包络铁块中的转子长度来实现更高的额定功率。该子系统设计原则将多种功能结合到一个单元中，例如润滑脂、密封与定位功能等等。整体式的法兰设计可以实现极为简便的安装过程。

为了开发并设计出完整的轴承配置，处理轴承和包括密封件、垫圈、螺栓和螺钉等在内的所有周边部件的物流，并且对所有部分进行安装，需要大量的工作与时间。此外，安装传统轴承配置的牵引电机的维护对车间工人和物流的技术提出了较高的要求。而这些对OEM客户与运营商的总成本将是轴承采购成本的几倍。这些附加成本部分可以显现出来，但是也暗含在客户的成本计算中。另一方面，还可能发生意外的潜在风险，并且在这类严格要求并且极其复杂的设计下，还会发生严重的失效问题。

牵引电机轴承单元(TMBU)是一种屏蔽式的预润滑轴承单元，设计用于通过法兰安装到轴承座上。选用专用的润滑脂来即使在较高的操作温度下也可延长润滑脂

的寿命。该轴承单元配有非接触的迷宫式密封件，不会发生磨损。轴承单元可以通过混合式设计供货，采用陶瓷滚动体来防止电流通过造成的损伤，并使用传感器探测操作条件。可选的功能包括：电气绝缘和操作数据监测，用于对温度、速度和绝对位置等进行推进系统控制。

简介

早期轴承设计

轴承单元

在工业滚子轴承于十九世纪首次推出后，设计便针对极为特定的应用而不断开发。其中某些设计已经结合了法兰来实现更为简便的安装，并且集成了简单的非接触式密封。

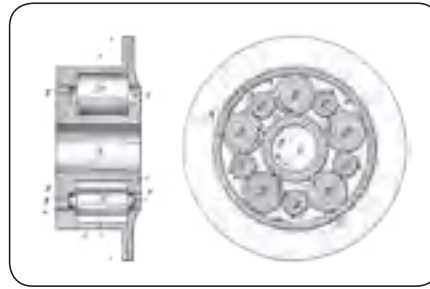
标准化

之后，滚子轴承成功的工业化在极大程度上要归功于边界尺寸的标准化，其目标则是使这些设计元素可以互换。滚子轴承对于大量极其不同的应用都已成为通用的解决方案。德国柏林的Deutsche Waffen- und Munitionsfabriken A.G. (DWF)公司¹⁾于1900年发布了首个系列轴承产品表，其中包含了轴承的多种尺寸和轴承的额定载荷。其中一些主要的轴承边界尺寸在今天还得到广泛的应用，并被收入到当前的ISO标准之中。

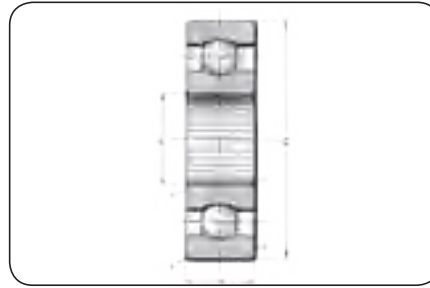
定制

根据与牵引电机客户的日常沟通以及长期的应用工程经验，可以提出大量的应用课题。其中主要包括设计、物流、安装以及维护问题。这就证实了客户及其分包商对于正确安装轴承的要求并不能始终轻松实现，并且有些时候要求也过高。

在汽车和铁路等专门的行业中，标准化的轴承已经从二十世纪前半部分得到广泛使用。定制轴承单元的引入始自1950年前后。在SKF铁路技术手册第1卷^[1]中，用于轮对的圆柱和圆锥滚子轴承单元的开发和当前的产品组合已经得到详细讲述。这些轴承单元采用了密封并在出厂前



L. W. Boyer于1886年获得专利的早期法兰轴承单元设计的示例。其滚子由一组插入的小型滚子进行引导^[12]。



DWF 1906产品型录中322系列深沟球轴承的图示。采用该设计的轴承的边界尺寸随后已被ISO作为标准：例如，具有110 mm孔径、240 mm外径、50 mm宽度以及3 mm倒角的6322^[12]。

添加了润滑脂。L. W. Boyer于1886年获得专利的早期法兰轴承单元设计的示例。其滚子由一组插入的小型滚子进行引导^[12]。

1991年SKF开发出了首台可以探测速度等操作参数的传感器轮对轴承单元。此外，其中结合的振动传感器还可以检测轴承性能，并通过状态监测系统进行观测。这些轴承设计的目标在于使多个组件的处理、安装与维护降至最低，并开发出可以整合多种功能的一个子系统。

重新设计

其目标实现致力于客户的牵引电机轴承解决方案，对设计、物流、安装和维护具有低得多的要求。这一想法于二十世纪九十年代通过重新质疑过去几十年间采用的所有传统设计原则来提出。这种全新设计的客户价值应当是实现极高的可靠性，延长维护的时间间隔，并根据生命周期或所有权来最终达到更低的总成本。开发的目标是定制专门的解决方案，更加以应用和客户为导向。

研究基于对高级设计、计算和测试工具等开发工具的使用，以及强化材料和新的生产技术。这一全新设计基于采用迷宫式密封、电气绝缘的出厂前润滑脂润滑轴承单元，以及将传感器集成以监测运行数据的方案。

¹⁾ 德国柏林的Deutsche Waffen- und Munitionsfabriken A.G. (DWF)公司随后成为Vereinte Kugellagerfabriken (VKF)的子公司，之后由SKF收购获得^[12]

定制轴承单元

所应用设计原则的方式类似于汽车轮毂轴承和轴箱轴承单元。单独的轴承配置得到进一步开发，从而可以进行预先润滑，并提供密封的轴承单元。此外，整体式法兰可以实现更为简便的设计和物流处理，便于客户安装操作。另外，集成的传感器可以监测速度和轴承温度等操作参数。

汽车、铁路轮对轴承和牵引电机应用的开发

单独的轴承

自密封并且预润滑的轴承

传感器轴承单元

汽车车轮



铁路轴箱



铁路牵引电机



设计特点

紧凑性

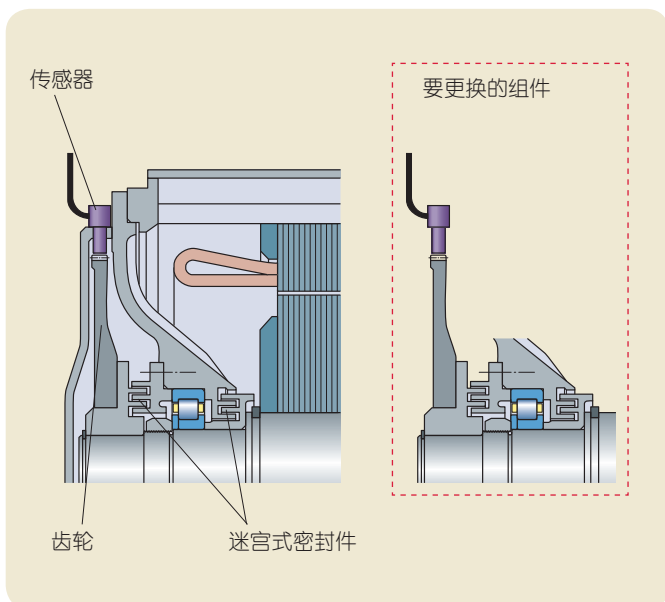
TMBU的主要概念^[27]基于替换直径更大并且需要更多轴向空间的传统传感器与脉冲环。此外，并不需要用于许多应用的复杂的迷宫式密封也得到了替换。下一步则是引入迷宫式密封的传感器和法兰轴承单元，其操作与安装过程更为简便。

在TMBU安装后，可以为整个牵引电机配置来节省空间。这样有助于增加定子/转子长度，从而在给定的几何电机包络中可以提高功率。

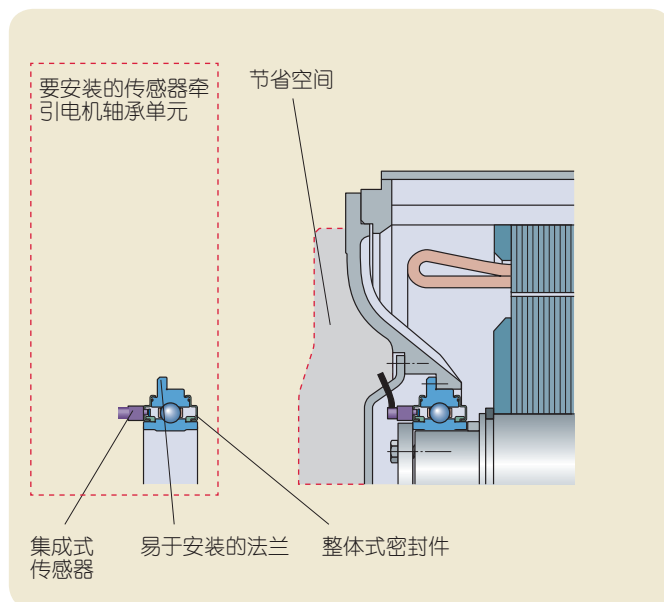
内部设计

内部设计是指对滚动体的设置。基于球轴承的一种设计可用于定位端，而基于圆柱滚子轴承的设计则用于非定位端。节径主要取决于内圈/外圈的尺寸。TMBU设计原理的优势在于，可以实现选用最佳尺寸以及滚动体数的可能性，从而达到特定的额定载荷。在一些牵引电机应用中，特别是对于联轴器传动来说，与给定轴承包络的标准轴承的额定载荷相比，该轴承的载荷相对较小。在这些情况下，轴承载荷不足，并且在操作过程中会产生更多的磨损。

在带有脉冲环和传感器的非传动端安装传统牵引电机轴承



在非传动端安装传感器牵引电机轴承单元



解决方案与特点

特点 全钢轴承 INSOCOAT轴承 混合陶瓷轴承 混合陶瓷TMBU



| | | | | |
|-----------|----|----|-----|-----|
| 保护免受电蚀侵害 | -- | + | +++ | +++ |
| 生热 | + | + | ++ | ++ |
| 速度性能 | + | + | ++ | ++ |
| 润滑脂寿命 | + | + | +++ | +++ |
| 耐受污染环境 | + | + | ++ | +++ |
| 最小载荷能力 | + | + | ++ | +++ |
| 安装简化 | + | + | + | ++ |
| 降低服务与维护要求 | + | + | ++ | +++ |
| 再制造 | 可能 | 是 | 是 | 推荐 |
| 集成式传感器选项 | -- | -- | -- | 是 |

符号: +++ 优秀, ++ 良好, + 一般, -- 不适合

法兰设计

结合了整体式法兰的TMBU设计可供制造商实现更为简便的轴承安装。TMBU法兰可以直接通过螺栓连接到轴承座防尘盖上。除了首选范围内提到的TMBU尺寸外，还可以提供定制的孔径与节径来优化牵引电机轴承设计。另外，法兰中的特殊钻孔和螺纹孔可以承受抽出螺栓以便于拆卸。

污染防治

传统的牵引电机轴承采用开式设计，需要在安装过程中施加润滑脂。在某些情况下，无法实现所需的清洁度，并且污染物可以进入轴承内部，显著缩短轴承寿命。TMBU是一种出厂前预润滑的轴承单元，在两侧通过迷宫式密封件进行保护。这种迷宫式密封件可以在不产生摩擦的情况下运行，并且不会磨损，可以用于多种应用。

在某些情况下，例如在TMBU直接暴露于环境中时，可能需要附加的密封装置。

电气绝缘

为了提高可靠性，可以使用INSOCOAT涂层或带有陶瓷/氮化硅滚动体的混合式设计来实现电气绝缘(→第4章)。混合陶瓷轴承设计的特点有助于提高电气绝缘的性能，并实现更长的维护时间间隔，帮助操作人员降低生命周期成本。

延长使用寿命

如第15页所述，现在在一个不断增长的趋势就是为牵引电机和其中安装的轴承延长维护时间间隔。

许多深入的研究已经证实，润滑脂润滑的牵引电机轴承的维护时间间隔可以在操作中延长^[15]。根据应用参数的不同，必须考虑各种因素。

从1996年TMBU开始投入使用，已经涉及了许多不同的应用参数。其中主要包括机车、动车组车辆、公共交通工具、有轨电车，以及无轨电车。在多年间，已经系统化存档了众多不采用补充润滑的TMBU实地测试结果。

第168页介绍了其中一个实地操作的示例。在本例中，TMBU在机车中运行12年而未进行任何补充润滑。产品运行超过150万公里。其中几乎不存在任何磨损，并且润滑脂的状态极好。该轴承已经过再制造并返回至操作人员处供进一步使用。

各种成功经验促进了新一代优化润滑脂寿命模型的开发。

TMBU的新型优化润滑脂寿命指南

根据这一经验^[4, 28]，SKF开发出了新型的优化润滑脂寿命指南。润滑脂寿命模型基于对多个参数的考虑：

- 优化轴承设计，特别是对于滚动体的数量与尺寸
- 进一步改进保持架设计
- 采用迷宫式密封件来保护轴承系统免受污染物侵害
- 特定的润滑脂类型以及剂量
- 出厂前装配与预填充润滑脂时保持高洁净度

此外，还需要考虑一些特定于应用的因素：

- 速度，速度周期
- 载荷，载荷形式
- 振动
- 温度周期
- 湿度
- 污染，等等

新型SKF优化润滑脂寿命模型是基于现有的基础润滑脂寿命计算模型，可以在SKF轴承综合型录中或从skf.com/bearings处在线获得。

润滑脂性能系数

适宜的润滑脂粘度可使用SKF轴承综合型录或从skf.com/bearings在线提供的工具进行计算(→第160页)。

对于非密封型(开式)牵引电机轴承，最终的润滑脂选用(制造商与润滑脂类型)最初是由牵引电机制造商决定。在某些情况下，操作人员可以根据商业原因或特定于应用的原因而独立选择润滑脂。

对于已预填充润滑脂并且密封的TMBU，润滑脂的选用由SKF确定。

特定于应用的因素

对于特定应用参数，将针对以下方面使用特定的修正系数来对新的计算模型进行进一步考虑：

- 轴承温度
- 操作过程中的振动水平和冲击载荷
- 例如湿度等环境效应
- 通过轴承的气流
- 立式安装工况
- 外圈旋转

考虑特定于应用的因素的计算原则

可以计算出修正后的润滑脂寿命：

$$t_{\text{润滑脂}} = t_r L_a \{\text{修正应用系数}\}$$

其中

$t_{\text{润滑脂}}$ = 修正的润滑脂寿命或补充润滑时间间隔

t_r = 70 °C下的补充润滑时间间隔，或要重新计算的补充润滑时间间隔

L_a = 寿命调整系数

轴承相关因素

除了特定于应用的因素外，还要进一步考虑与轴承有关的性能因素：

- 轴承单元系数：该系数可以为2，取决于所应用的TMBU设计
- 轴承材料系数：在整合了陶瓷滚动体后，该系数可以为2
- 保持架性能：在使用特定的滚子或组合式引导黄铜保持架时，该系数可以为2。组合式引导保持架通过滚子和外圈引导。

考虑轴承相关系数的计算原则

优化的润滑脂寿命可以通过考虑轴承相关的性能系数进行计算：

$$t_{\text{优化}} = t_{\text{润滑脂}} \{\text{轴承性能系数}\}$$

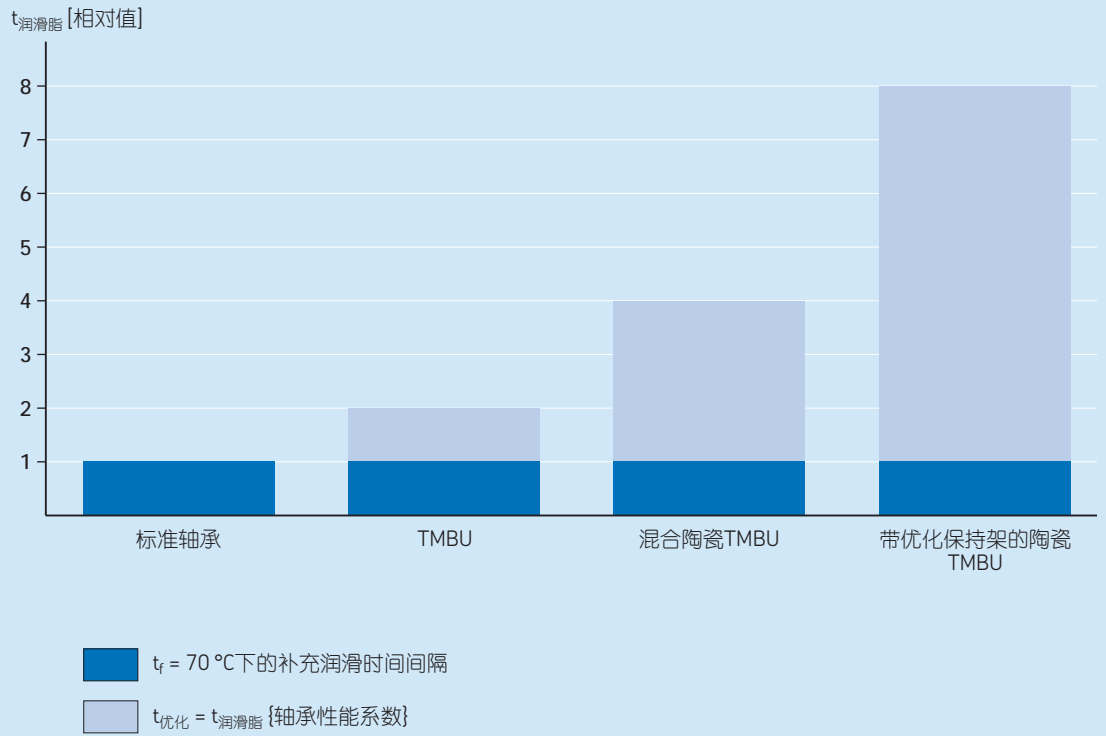
计算示例

根据已经选择了特定轴承和润滑脂相关修正系数的特定应用，对于TMBU应用可以计算出优化的润滑脂寿命：

- 使用相同的润滑脂和相同的保持架，对于采用全钢材料组合的TMBU，优化的润滑脂寿命可以通过系数2来增加
- 使用相同的润滑脂和相同的保持架，对于陶瓷TMBU设计（钢轴承圈/陶瓷滚动体），优化的润滑脂寿命可以通过系数4来增加
- 使用相同的润滑脂和优化的保持架，对于陶瓷TMBU设计(钢轴承圈/陶瓷滚动体)，优化的润滑脂寿命可以通过系数8来增加。该系数仅可在之前未使用优化保持架设计的情况下应用。

有关特定客户应用的更多信息，请联系SKF应用工程服务部门。

应用的SKF优化润滑脂寿命指南

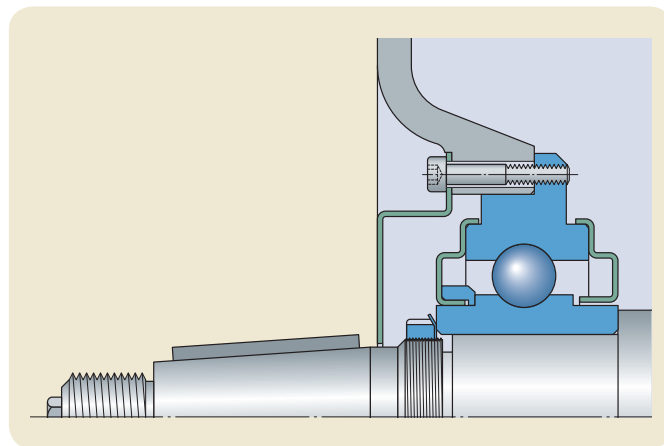


定位端设计

用于定位端轴承配置的牵引电机轴承单元 (TMBU) 基于深沟球轴承设计。该屏蔽的预润滑轴承单元在外圈上带有整体式法兰，通过螺栓连接到牵引电机的防尘盖上。为了承受TMBU，电机防尘盖的基座一般机加工为H7公差级。

通过应用基于陶瓷球体的混合陶瓷轴承设计，或在内圈的外表面采用INSOCOAT涂层，可以实现电气绝缘功能。

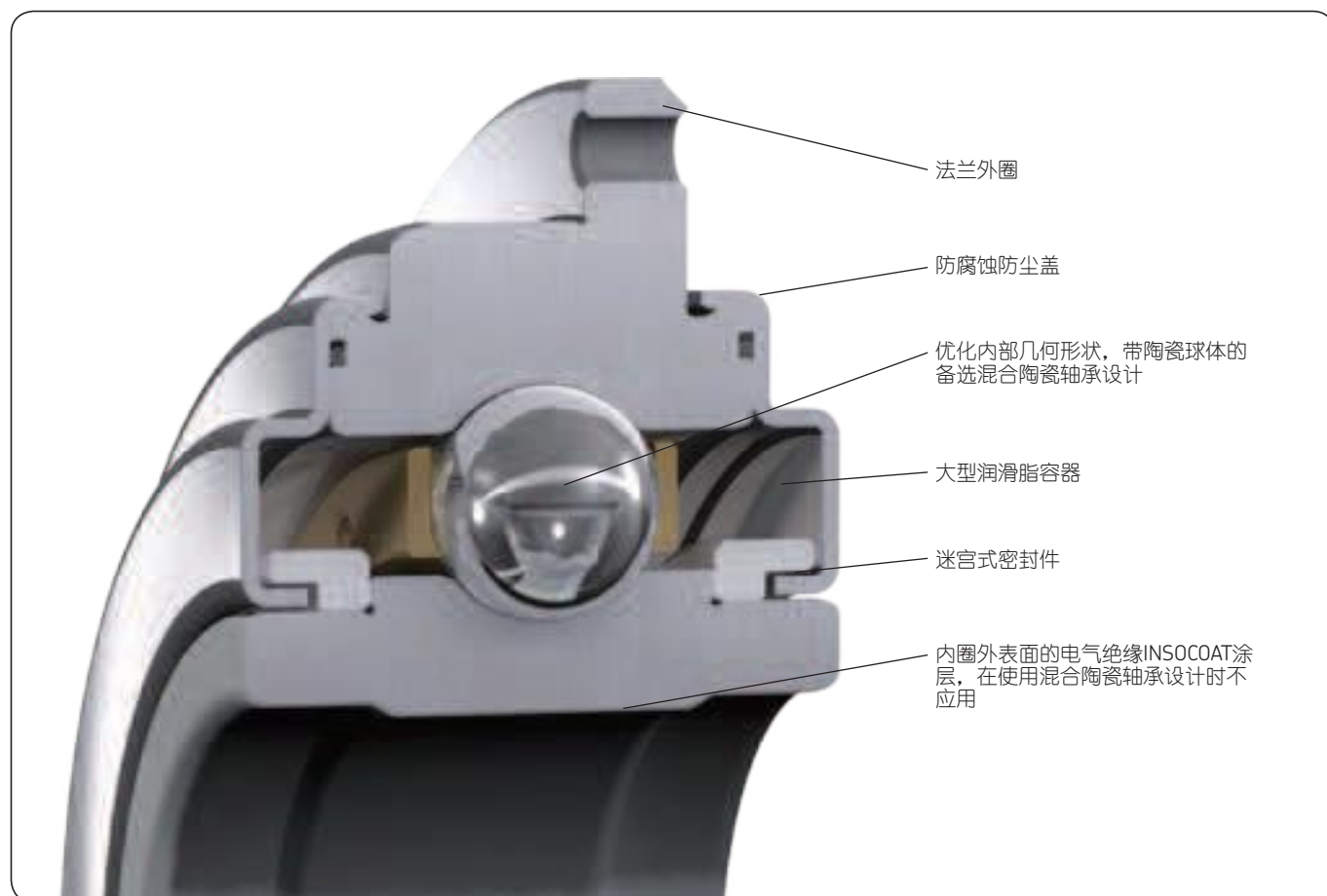
这些TMBU采用定制设计，并且可以进一步定制以满足特定需求。



用于定位端的牵引电机轴承单元应用示例

完整的牵引电机图纸于第212页提供，有关进一步应用，请参见第42、46和54页。

基于深沟球轴承设计、用于定位端轴承配置的全钢TMBU



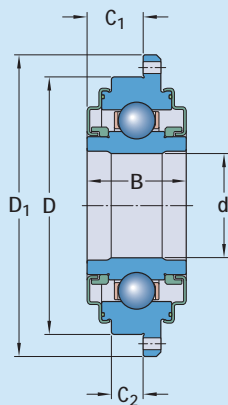
首选产品范围

首选产品是2012年9月推出的产品组合。该范围是不断变化的产品概览，如果需要，将来可能更新并出版。

用于定位端的TMBU设计的特点与优点

- 节省空间，所需部件更少
- 单元概念可以实现极为简便的安装
- 迷宫式密封件
- 润滑脂润滑以延长维护时间间隔

用于定位端的牵引电机轴承单元



主要尺寸

型号

| d | D | B | C ₁ | C ₂ | D ₁ | 型号 |
|-----|-----|------|----------------|----------------|----------------|----------|
| mm | | | | | | - |
| 65 | 170 | 68 | 38,5 | 22 | 200 | BB1-7024 |
| 80 | 145 | 60 | 25 | 10 | 175 | BB1-7116 |
| 90 | 190 | 88 | 47,5 | 28 | 230 | BB1-7141 |
| 110 | 180 | 62 | 31 | 22 | 220 | BB1-7330 |
| 120 | 182 | 48 | 17,5 | 7 | 230 | BB1-7348 |
| 208 | 280 | 65,5 | 18 | 15 | 320 | BMB-7509 |

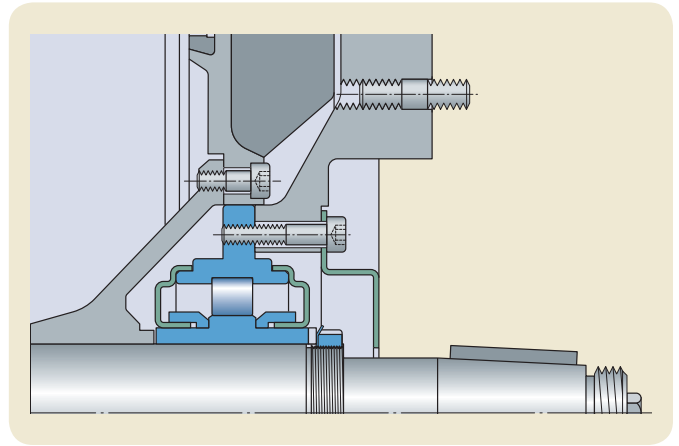
数字仅供参考。有关详细的产品规格，请联系SKF应用工程服务部门。

非定位端设计

用于非定位端轴承配置的牵引电机轴承单元(TMBU)采用圆柱滚子轴承设计。该密封的预填充润滑脂的轴承单元在外圈上带有整体式法兰，可以通过螺栓连接到牵引电机的防尘盖上。

通过在内圈的外表面应用电气绝缘的INSOCOAT涂层，或使用配备氮化硅滚子的混合陶瓷轴承，可以实现电气绝缘功能。

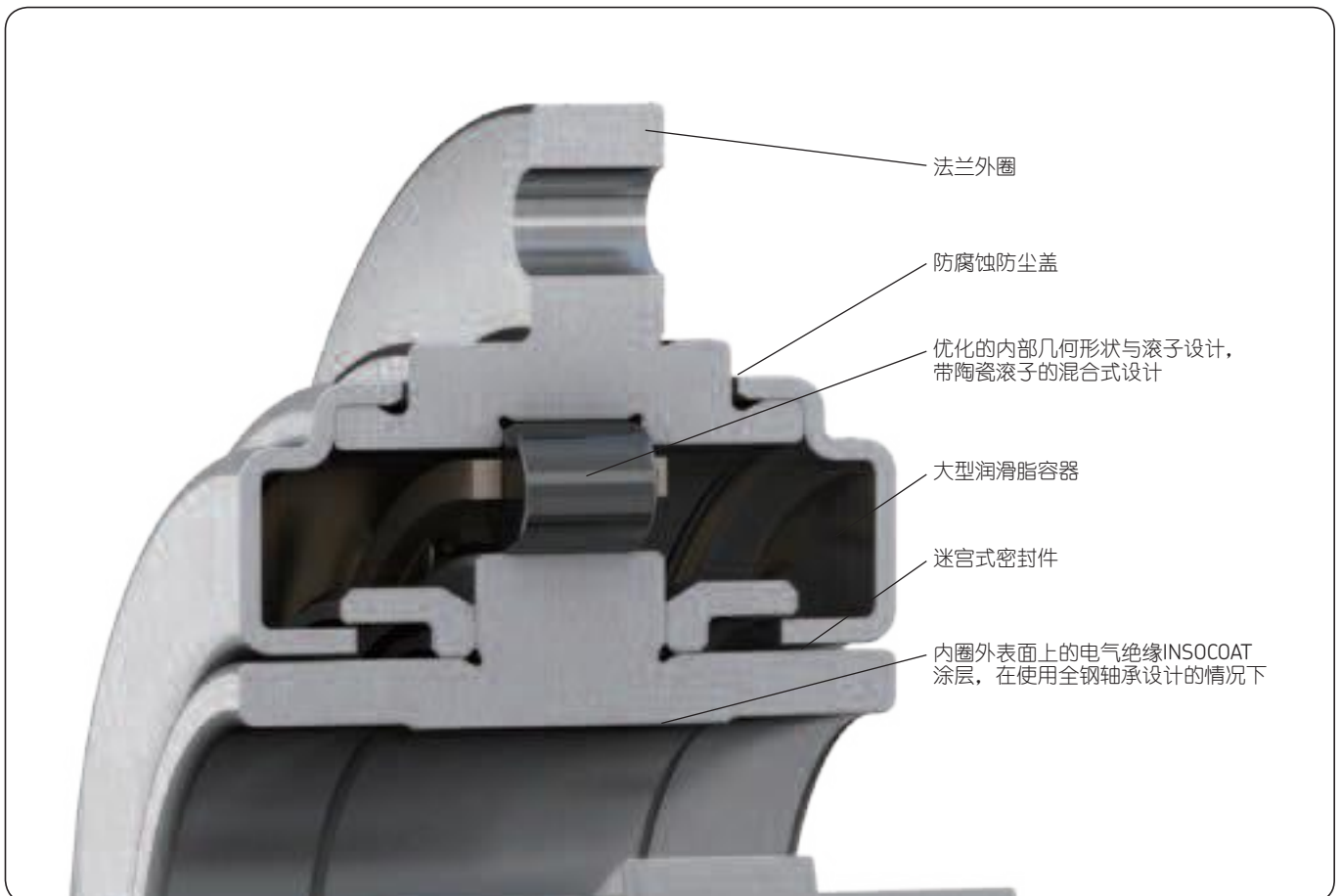
这些TMBU采用定制设计，并且可以进一步定制以满足特定需求。



用于非定位端的牵引电机轴承单元应用示例

完整的牵引电机图纸于第212页提供，有关进一步应用，请参见第54页。

基于圆柱滚子轴承设计、用于非定位端轴承配置的陶瓷TMBU



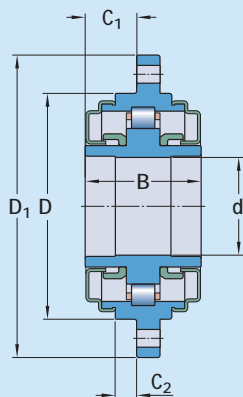
首选产品范围

首选范围是基于2012年9月的产品组合。该范围是不断变化的产品概览，如果需要，将来可能更新并出版。

用于非定位端的TMBU设计的特点与优点

- 节省空间，所需部件更少
- 单元概念可以实现极为简便的安装
- 迷宫式密封件
- 润滑脂润滑以延长维护时间间隔

用于非定位端的牵引电机轴承单元



主要尺寸

| 主要尺寸 | | | | | | 型号 |
|------|-----|----|----------------|----------------|----------------|----------|
| d | D | B | C ₁ | C ₂ | D ₁ | |
| mm | | | | | | - |
| 50 | 115 | 59 | 21 | 6 | 155 | BC1-7229 |
| 80 | 145 | 59 | 21 | 6 | 185 | BC1-7273 |
| 120 | 220 | 56 | 30 | 30 | 268 | BC1-7292 |
| | 220 | 74 | 54 | 54 | 262 | BC1-7293 |
| 210 | 280 | 50 | 29 | 26 | 320 | BC1-7308 |

数字仅供参考。有关详细的产品规格，请联系SKF应用工程服务部门。

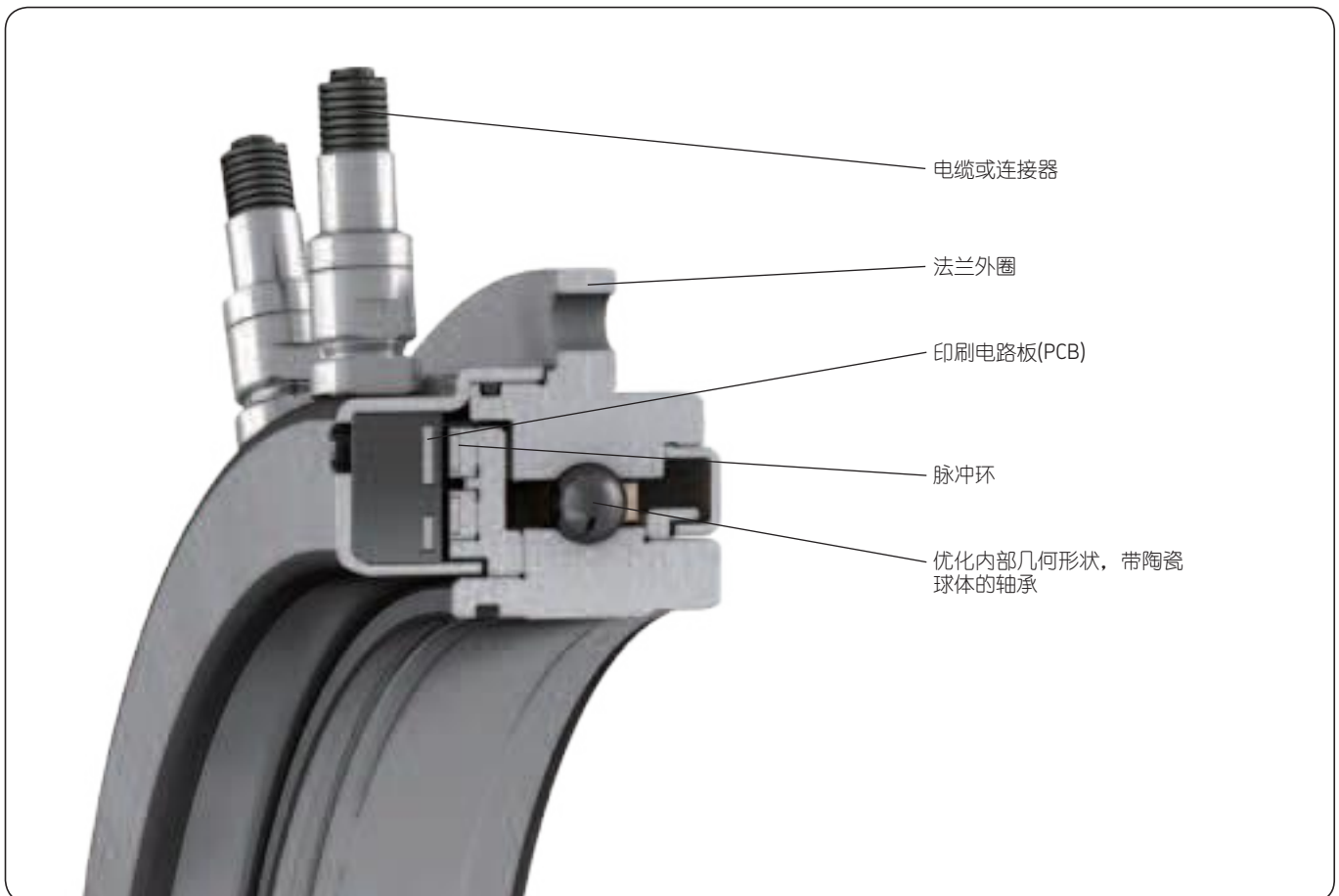
传感器设计

传感器TMBU的概念提供了进行多种探测与测量的可能(→第9章)。增量传感器单元集成到轴承单元外圈的迷宫式密封系统中。与传统的传感器设备相比,该设计极其节省空间,尤其是在轴向方向上。该节省空间的设计采用的部件数量更少,可以实现极高的解析度和精度,并采用牢固的设计以提高轴承单元的寿命。

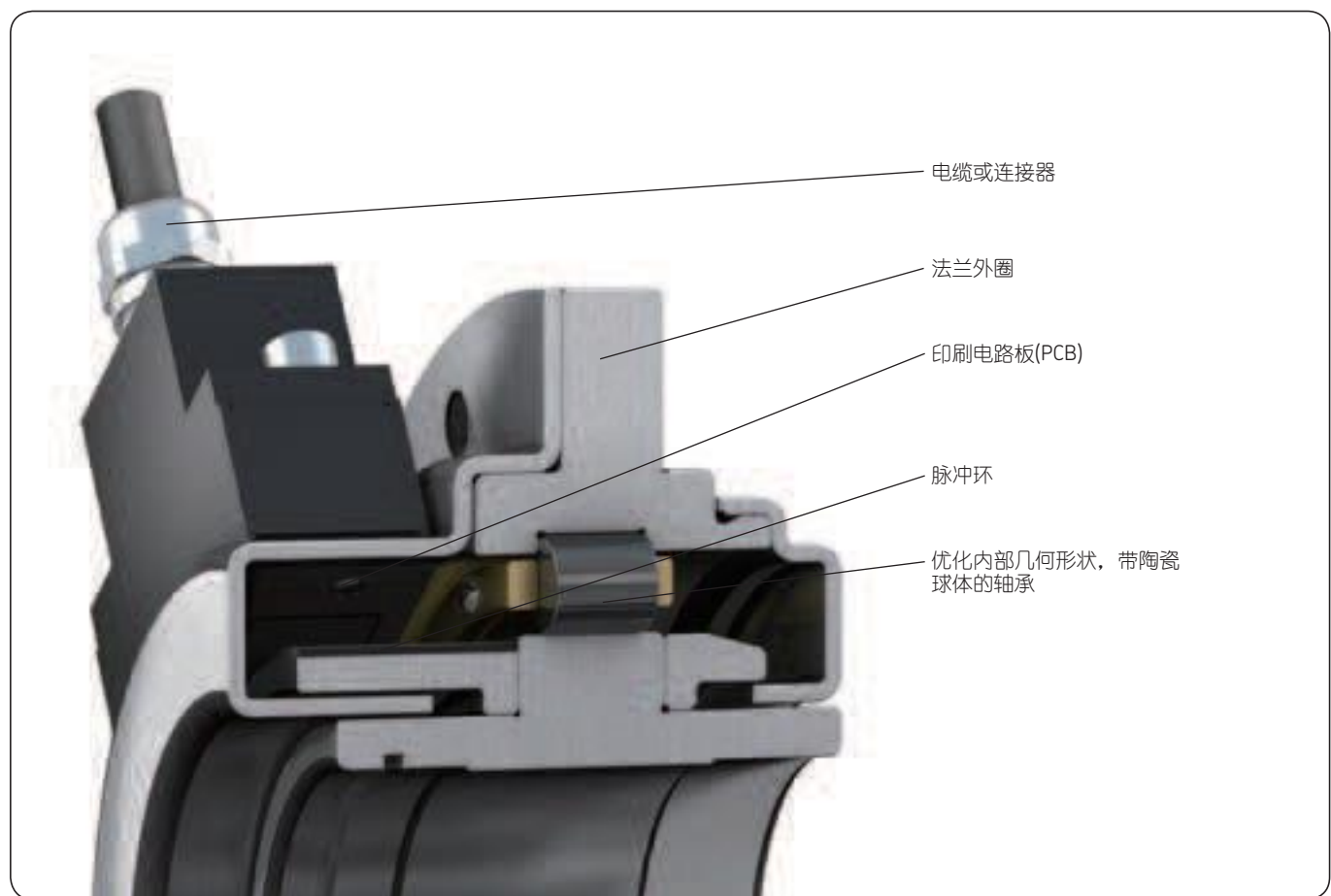
传感器设计选项

- 用于牵引电机控制设备的绝对位置探测
- 旋转方向探测
- 制动控制系统的速度测量
- 监测操作条件的温度测量

用于定位端轴承配置的传感器TMBU设计

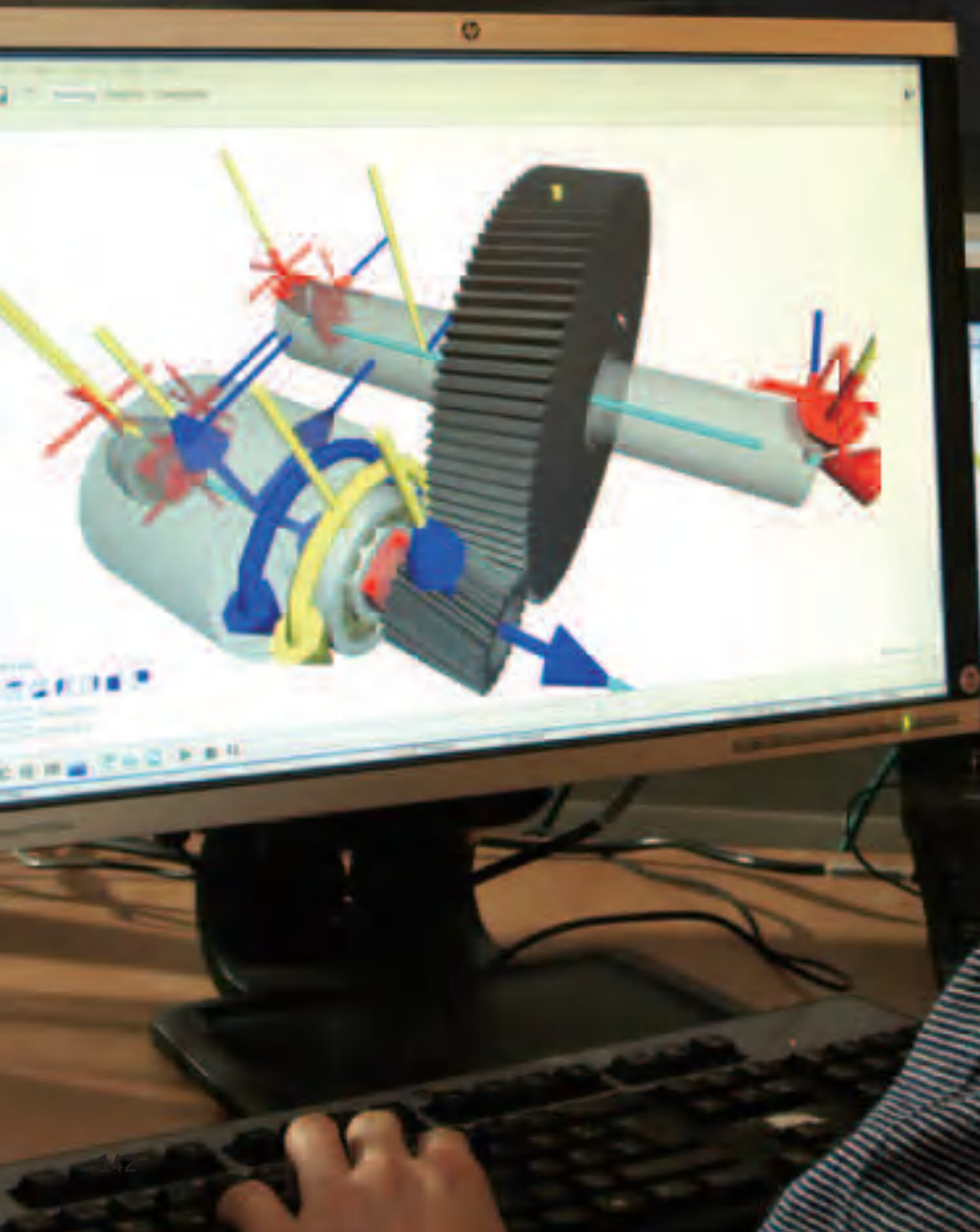


用于非定位端轴承配置的TMBU设计



6 轴承计算

| | |
|--------------|-----|
| 计算原则 | 143 |
| 基本额定寿命 | 149 |
| 润滑 | 159 |
| 高级计算 | 161 |
| 验证 | 164 |



轴承计算

SKF提供一系列不同的计算方法来优化牵引电机和齿轮箱应用的轴承选择。基本计算原则在SKF轴承综合型录中介绍。在本章中，将概要介绍SKF应用与开发工程师所使用的最新方法以及更先进的计算工具。根据每种规格要求的不同以及经验，必须选择最合适的计算工具包来提供具有较低维护需求的可靠设计。如需更为复杂计算方面的协助，请联系SKF铁路应用工程支持部门。

计算原则

在以下部分中，将以通常需要的顺序来介绍基本的计算信息。更为通用的信息可从SKF轴承综合型录中或从skf.com/bearings处在线获得。显然，在这里介绍每种传动系统设计配置所需的信息是不可能的。

除了轴承额定寿命计算外，还应考虑其他设计元素。在轴承配置中，润滑剂也是一项非常重要的组成部分，因为它可以降低磨损并保护轴承免受腐蚀，从而轴承可以达到其完整寿命周期的可能。对于润滑剂的洁净度来说，密封件性能至关重要。洁净度对轴承的使用寿命具有深远的影响，这也就是为什么牵引电机轴承单元的应用越来越多的原因。另一个原因则

是，轴承可以在出厂前润滑，并且具有集成的密封系统(→第5章)。

所需进行的计算量取决于是否已经存在有关类似配置的经验数据。在缺少特定经验并且对产品规格具有过高要求时，则需要执行更多的工作，例如，进行更为精确的计算和/或测试。

功能和轴承寿命

轴承的功能取决于额定寿命，可通过基本额定寿命模型和进一步的高级计算得出。显然，轴承寿命与速度和力有关。

但是，还存在一些其他的因素可以影响轴承的功能。这些将在SKF的额定寿命计算中考虑，例如润滑和操作温度(粘度)，以及洁净度，后者在很大程度上取决于密封系统(污染系数)。

尤其对于润滑脂润滑的牵引电机和悬挂轴承来说，在评估维护时间间隔时，必须考虑润滑脂寿命和污染水平。

高级计算基于附加操作条件的影响，例如轴和轴承座配合的影响、弹性和变形，以及调整操作。

轴承寿命取决于轴承功能，可通过多种计算方式进行建模。此外，机械设计、安装以及用途等应用环境也对轴承寿命和所需维护具有直接影响。

计算所得的轴承寿命应使用实地结果进行验证。可以通过以下方法实现：

- 对润滑剂取样以进行分析
(→第10章，第22页)
- 在组件可以方便的拆卸时调查轴承状态
(→第7章)
- 应用状态监测工具(→第9章)

有关延长牵引电机轴承单元、混合式设计产品等的使用寿命的更多信息，请参阅第122页以及第132至135页。

影响轴承功能和额定轴承寿命的因素

- **组件质量**
 - 轴承/密封件/润滑剂
- **机械设计**
 - 轴承选择
 - 润滑剂选择
 - 轴承座设计
 - 密封件设计
 - 电流
- **设备安装**
 - 轴承安装(配合等)
 - 初始安装
 - 洁净度
- **设备用途**
 - 速度，载荷
 - 冷却/加热
 - 润滑
- **设备维护**
 - 轴承/润滑功能

轴承的使用寿命

轴承寿命在标准计算模型中仅部分涉及。此外，高级计算可以考虑更多的因素，例如各个组件单独的寿命：

- 内圈滚道
- 外圈滚道
- 滚动体
- 保持架
- 润滑剂
- 密封件

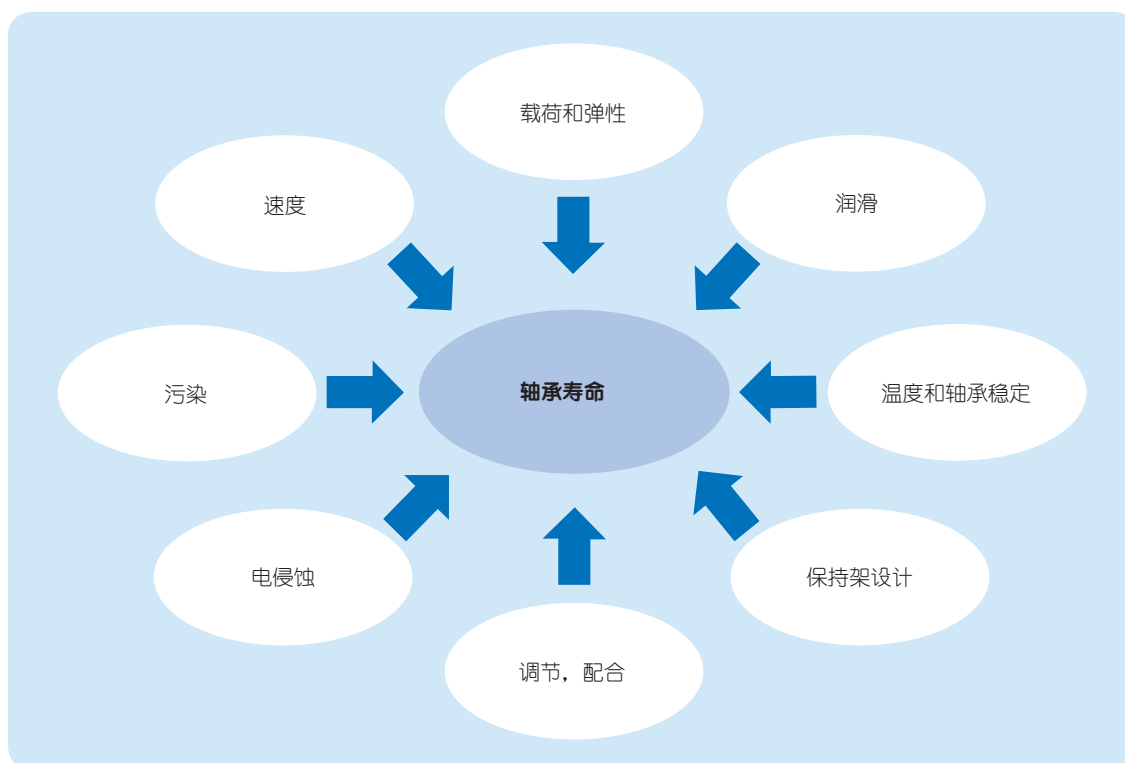
在数学上可以表达为

$$L_{\text{bearing}} = f(L_{\text{raceways}}, L_{\text{rolling elements}}, L_{\text{cages}}, L_{\text{lubricant}}, L_{\text{seals}})$$

在高级计算的子章节中(→第161页)，解释了一些计算模型和示例。

尽管这些计算接近真实操作条件下的寿命，轴承使用寿命最终只能由实地经验来确定。

轴承使用寿命可以通过再制造来延长(→第218页)。



影响额定轴承寿命的主要因素

规格

所有计算与应用建议的基础在于客户的规格。这些都应尽可能的详细。此外，之前类似设计的经验也可以有助于确定所需的计算与应用工程工作。

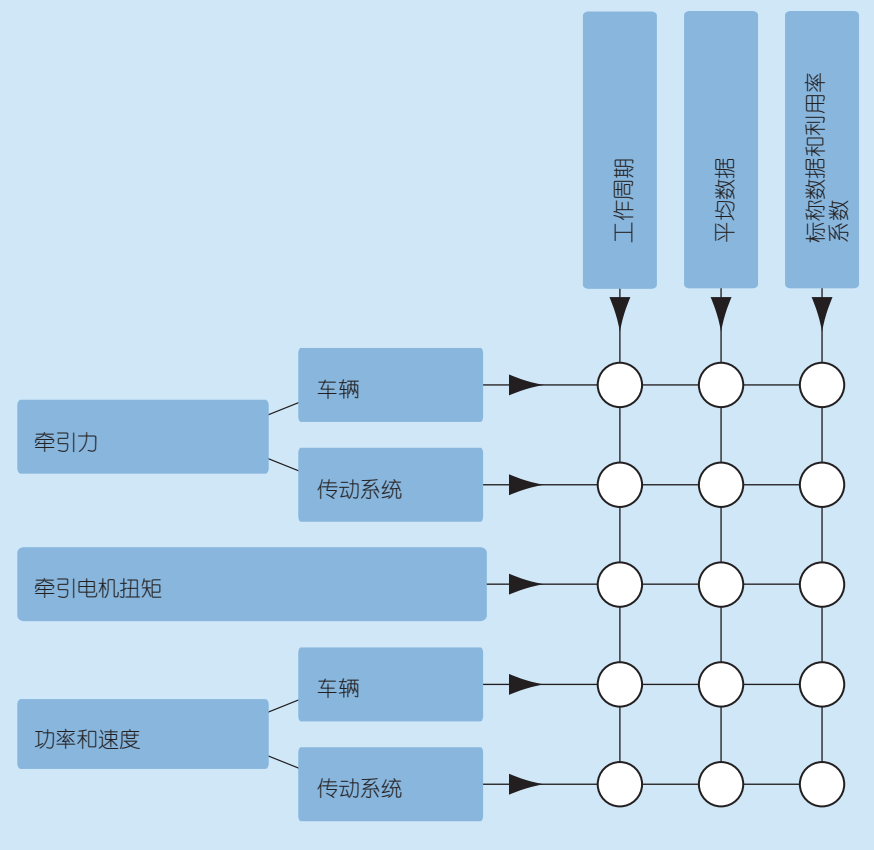
对于基本计算，需要主要的输入数据和其他信息，例如对操作参数和图纸的描述等。根据这些信息，必须确定除了基本额定寿命计算之外，是否需要附加的以及更多的高级计算。

轴承载荷可以根据车辆的牵引力、电机扭矩或功率，以及牵引电机的额定速度来确定。根据不同的应用领域或计算得出的平均值，这些数据应该尽可能的构成一个整体。标称数据可以提供可以用于首次评估的结果。

规格示例

- 车辆制造商
- 转向架制造商
- 齿轮箱制造商
- 牵引电机制造商
- 操作人员姓名和国家
- 车辆类型
- 项目型号
- 最大速度
- 车轮直径：新/平均/磨损
- 每年预计里程数
- 以里程数和时间计的所需维护程度
- 气候条件、最低/最高温度以及湿度
- 轨道条件
- 齿轮箱设计、距离之类的几何数据、齿轮数据
- 轴承座和轴设计详细信息以及所用材料
- 应用设计、距离之类的几何数据、转子以及联轴器重量
- 功率和速度、平均数据或载荷工况，这些可以以扭矩或牵引力数据的形式表示并且列于下表中。
- 轴承载荷，如已知
- 首选轴承/轴承单元的设计和尺寸
- 对于之前使用类似设计的经验
- 现场测试结果，如可用
- 电流通过对轴承绝缘的需求
- 监测：温度、速度和振动

计算轴承载荷的不同传动输入数据^[15]



装机功率和利用率

由于各种规格要求有所不同，相对于要牵引的列车质量来说，存在差别极大的装机功率。一个范例就是一项基于50种不同轻轨车辆设计的调查，这些车辆在1993至2008年间出产，用于城市交通^[29]。特定的功率以4人/m²为基础，与车辆总质量有关，包括就坐乘客与站立乘客。即使这些轻轨车辆的操作条件可以相比较，与车辆的总质量相比，装机功率之间还是存在很大的差别。

操作条件的变化可以由每天不同操作人员工作过程中装机功率的利用率来确定。相同的车辆设计可以在不同的加速度、速度和轨道条件下操作。例如，有些时候再经过多年运行后，轻轨车辆可能会添加附加的无动力部分来增加客容量和/或提高地板乘客的乘用率。在这些情况下，最初的计算规格将不再有效。计算结果只能在最初指定的真实操作条件下发挥作用。

第164页中提及了多用途机车线路测试的结果。基于试运行期间的不同用途，轴承上的作用力和轴承操作温度发生过很大的变化。

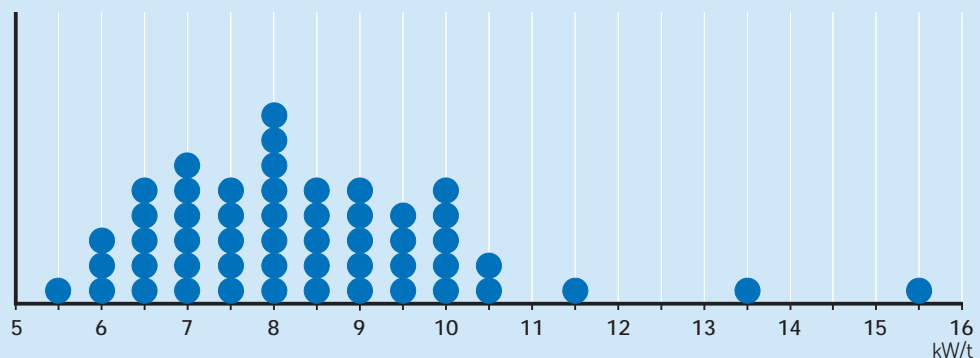
分析过程

根据技术条件以及对计算与调查的目标以及方法的决定，必须开始分析过程，其中包含几个主要步骤：

- 1 确定轴承载荷
- 2 计算轴承寿命
- 3 考虑适宜的温度、润滑与游隙
- 4 确认有关选定轴承设计的结果

相对于轻轨车辆总质量的特定装机功率的变化

车辆设计数



基本额定寿命

出于简化计算的考虑，并且为了获得轴承寿命的近似值，采用所谓的“手册方法”来计算基本额定寿命。根据ISO 281标准，轴承的基本额定寿命为

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

其中

L_{10} = 基本额定寿命(90% 可靠性下)，
[百万次旋转]

C = 基本额定动载荷[kN]

P = 当量轴承动载荷[kN]

p = 寿命公式指数

= 3，对于球轴承

= 10/3，对于滚子轴承，通常在轴箱应用中使用

特定轴承的基本额定寿命基于 ISO 281 标准下的基本额定动载荷。必须根据通过轮对轴颈和轴箱轴承座作用在轴承上的轴承载荷来计算等效轴承载荷。

对于铁路应用，倾向于以操作里程数(单位为百万公里)计算寿命

$$L_{10s} = \frac{\pi D_w}{1\,000} \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

其中

L_{10s} = 基本额定寿命(90% 可靠性下)，
[百万公里]

D_w = 平均车轮直径[m]

在确定轴承尺寸和寿命时，适宜于确认 C/P 的值以及基本额定寿命并将其与现有的值相比较，类似于其中已存在长期实地经验的应用。

对于牵引电机和齿轮箱应用，必须考虑相对于齿轮箱轴的齿轮箱传动比。

基本额定寿命的典型值

| 公共交通车辆和调车机车 | 动车组车辆和机车 |
|------------------------|--------------------------|
| 600 000 – 1 500 000 km | 1 000 000 – 3 000 000 km |

注释：对于特定应用可能存在不同的客户要求

$$L_{10sg} = \frac{L_{10s}}{i}$$

其中

L_{10sg} = 基本额定寿命(90%可靠性下)，百万公里，相对于应用的齿轮箱传动比

i = 齿轮箱传动比

当量轴承动载荷

当计算得出的轴承载荷 F 在幅值和方向上保持恒定、并且径向作用在径向轴承并且在中心方向上作用于推力轴承时， $P=F$ 并且载荷可以直接代入寿命公式中。在所有其他情况下，首先需要计算当量轴承动载荷。其定义为在幅值和方向上恒定、径向作用在径向轴承上或在轴向和中心方向上作用在推力轴承上的假定载荷，在施加后与轴承所承受的实际载荷对轴承寿命可产生相同的影响。

径向轴承一般受同时作用的径向和轴向载荷的影响。如果所得载荷在幅值和方向上保持恒定，在可以从以下通用公式中获得当量轴承动载荷 P

$$P = X F_r + Y F_a$$

其中

P = 当量轴承动载荷[kN]

F_r = 实际径向轴承载荷[kN]

F_a = 实际轴向轴承载荷[kN]

X = 轴承的径向载荷系数

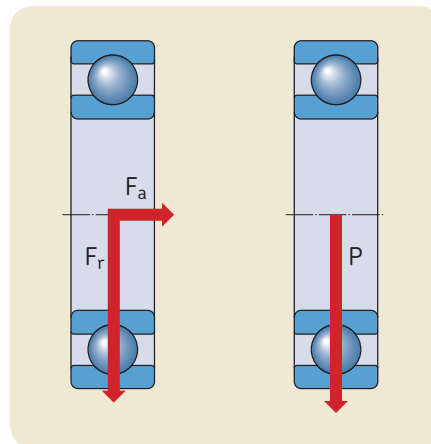
Y = 轴承的轴向载荷系数

在 F_a/F_r 的比值超过特定的限定系数 e 的情况下，附加的径向载荷对于单列径向轴承只会影响等效动态载荷 P 。在使用双列轴承时，即使是较轻的轴向载荷，其影响一般也会非常大。

对于一般仅承受纯轴向载荷的推力轴承，例如推力球轴承和圆柱、滚针和锥形滚子推力轴承，在载荷于中心方向作用时，该公式可以简化为

$$P = F_a$$

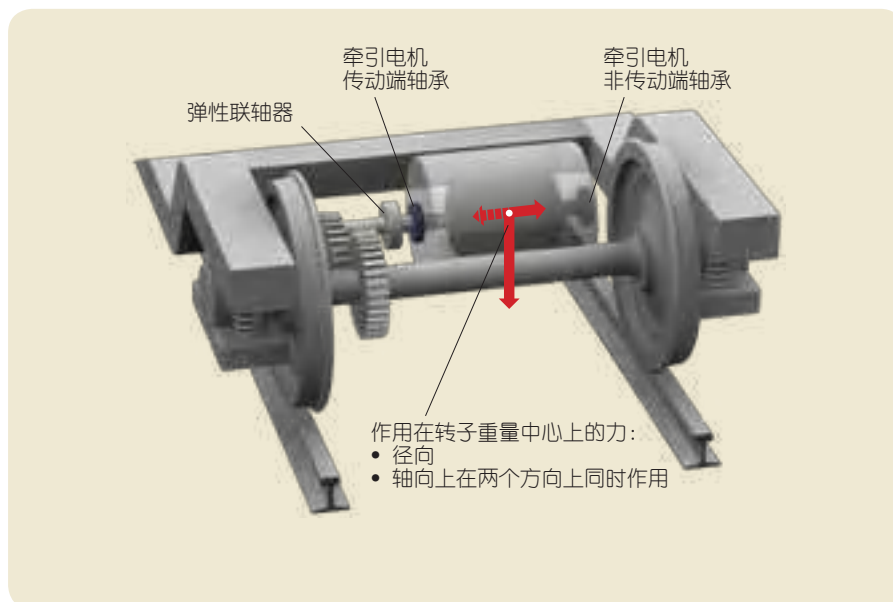
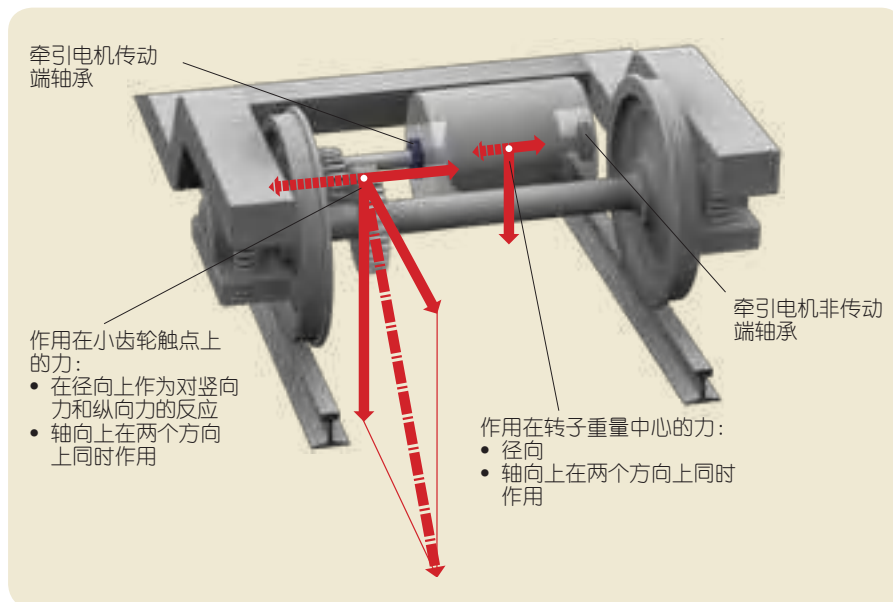
用于计算当量轴承动载荷的信息与数据可从SKF轴承综合型录中获得，并且在 skf.com/bearings 在线提供，或者可从特定的SKF客户图纸中获取。



径向载荷 F_r 和轴向载荷 F_a 由径向作用的当量轴承动载荷 P 表示

轴承动载荷计算

在外力已知或者可以计算的情况下(例如, 功率传输的力、工作力或惯性力), 作用在轴承上的各种载荷可以根据力学定律进行计算^[15]。在计算某一单独轴承的载荷分量时, 轴视为停留在刚性无力矩支撑上的梁, 以便简化计算。轴承、轴承座或机械框架上的弹性变形不会纳入考虑, 并且也不会考虑在轴承中产生并作为轴挠曲结果的力矩。



如果要通过现有的协助，例如便携式计算机，来计算轴承配置，则这些简化非常必要。基本额定载荷和等效轴承载荷计算的标准化方法基于类似的假设。

可以根据弹性理论来计算轴承载荷而不做出上述假设，但是需要使用复杂的计算机程序。在这些程序中，轴承、轴和轴承座将被视为系统的弹性分量。

生成的外力，例如从轴的固有重量与其组件所承受的重量所生成的力，或者车辆重量所产生的力，以及其他惯性力，都是已知或者可以计算得出的。但是，在确定冲击力和附加的动态力等工作力时，例如，作为失衡的结果，则通常需要依赖于根据类似机械或轴承配置所得经验的估计值。

齿轮传动

采用齿轮传动后，可以根据传递的功率以及轮齿的设计特性来计算理论啮合力。然而，还存在一些附加的动态力，由齿轮自身产生或由输入传动或动力输出装置产生。齿轮中附加的动态力来自于轮齿的形状误差，以及失衡的旋转组件。由于存在对安静运行的要求，齿轮的制造将按照较高的精度标准，并且这些力通常非常微小，从而可在轴承计算中忽略。

与齿轮耦合的机械的操作类型与模式所产生的附加力只能在工况已知的情况下确定。其对轴承额定寿命的影响将通过考虑冲击载荷以及齿轮效率的“操作”系数进行考量。该系数对于不同操作条件的值通常可以在齿轮制造商所发布的信息中获得。

可变工况下的寿命计算

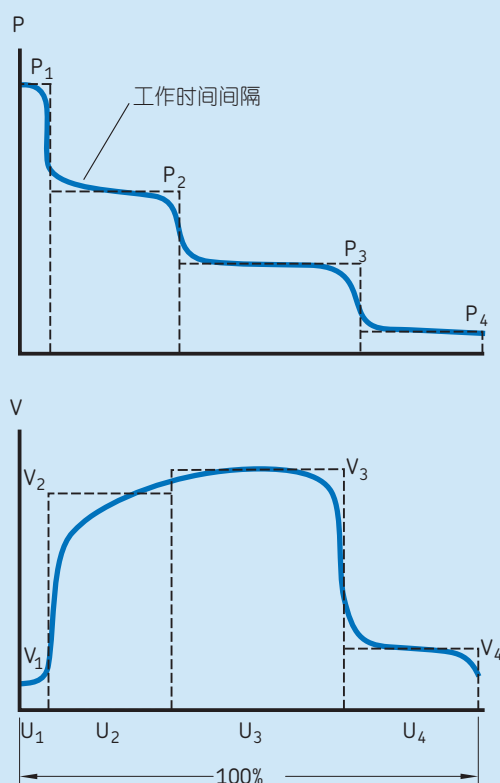
在轴承载荷随时间变化的应用中，如果幅值和方向随速度、温度、润滑条件与污染水平的变化而发生更改，则在没有与可变载荷条件相关的等效载荷的中间计算步骤的情况下，无法直接计算轴承寿命。

但是，在给定系统的复杂程度后，该中间参数的确定过程还是比较复杂，并且不会使计算简化。

因此，在工况发生变化的情况下，需要将载荷谱或应用的工作周期降低至有限数量的更为简单的载荷工况。

在载荷持续变化的情况下，每个不同的载荷水平可以累积，以将载荷谱降低至恒定载荷块的柱状图，其中每个块都表示该应用操作中的一个给定百分比或时间分量。

可变工况示例



注释

与较轻的载荷相比，重型和中等程度的载荷会使轴承寿命更快到期。

因此，重要的一点在于要在载荷图中正确表达冲击载荷和峰值载荷，即使这些载荷的发生机会极为稀少并仅仅限制为几次旋转也是如此。

在每个工作时间间隔或“间隔”中，轴承载荷和操作条件可以取平均值为某个恒定值。此外，每个工作时间间隔中预计的操作小时数或转数可表示该特定载荷条件所需的寿命。因此，举例来说，采用 N_1 表示载荷条件 P_1 下所需转数并采用 N 表示应用总生命周期时，生命周期分数 $U_1 = N_1 / N$ 可由载荷条件 P_1 使用，其计算所得的寿命为 L_{10m1} 。在可变操作条件下，可以预测轴承寿命，请见下表。

该计算方法的用途极大程度上取决于该应用的代表性载荷图(→第153页)的可用性。

对于考虑载荷周期的轴承寿命计算，请参见“SKF轴承选择”项目。

注释

载荷历史也可从典型操作条件或该类型应用所需的标准工作周期中衍生获得。

真实操作条件下用于载荷评估的一项出色工具就是现场测试(→第164至165页)。

可变工况下的寿命计算

$$L_{10m} = \frac{1}{\frac{U_1}{L_{10m1}} + \frac{U_2}{L_{10m2}} + \frac{U_3}{L_{10m3}} + \dots}$$

其中

L_{10m} = 其中 L_{10m} = SKF额定寿命(90%可靠性下)[百万次旋转]

$L_{10m1}, L_{10m2}, \dots$ = 不变工况 1、2、... 下的 SKF 额定寿命(90% 可靠性下)[百万次旋转]

U_1, U_2, \dots = 条件1、2、... 下的生命周期分数

注释: $U_1 + U_2 + \dots + U_n = 1$

载荷周期缩短 - 装箱法

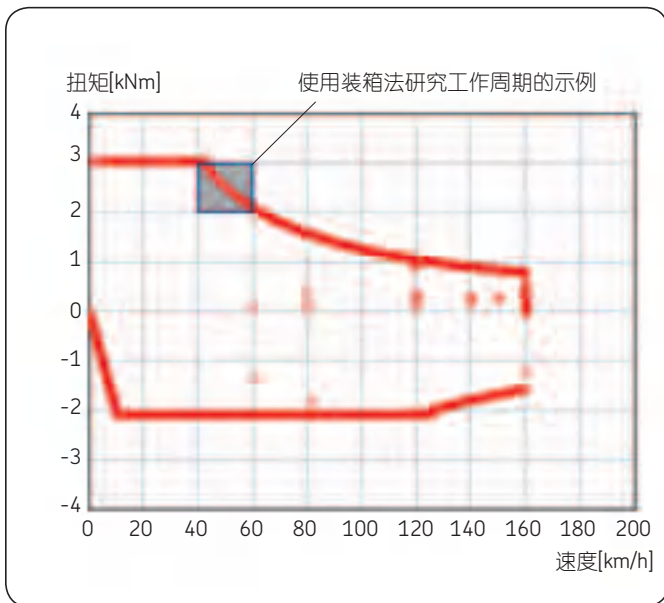
装箱是一种前处理技术，用于减少较大工作周期中的载荷工况数。进入给定较小时间间隔 - 箱子 - 中的原始数据值将被替换为表示该时间间隔的值，通常为中心值。

某些客户规格通过大量的载荷周期进行表达，通常为速度、扭矩和持续时间。装箱法的目的在于，例如，将7 000个工况的载荷谱减至50个工况。这就使得可以在预测齿轮箱寿命的情况下缩短计算时间。

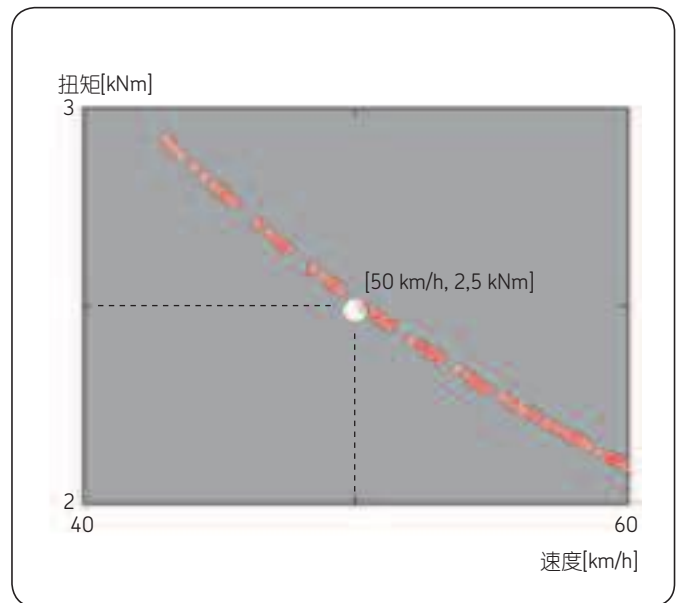
需要验证以及经验来确定给定应用的最小箱子数。

左图表示包含7 000个载荷步骤的列车的工作周期。每个步骤都是速度和扭矩的组合，持续时间为几秒钟。左图中灰色显示的小方块表示包含325个载荷周期的箱子，在右图中放大表示。在该例中，本箱子中的325个载荷周期可以缩减为值为50 km/h以及325秒中2,5 kNm的一个载荷周期。

传动系统工作周期



装箱法示例



SKF额定寿命

对于更为精密的轴承计算，可以进一步改进基本额定值计算方法。原因在于，轴承的使用寿命可以与计算所得的基本额定寿命存在极大的偏差。存在多种影响因素，例如润滑、污染程度、不对中情况、安装的适宜程度，以及环境条件。

因此，ISO 281中包含修正的寿命公式以补充基本额定寿命。该寿命计算利用了修正系数考虑轴承的润滑和污染状态以及材料的疲劳载荷等对轴承的寿命进行修正。

该ISO 281标准可供轴承制造商推荐为寿命修正系数的计算推荐适宜的方法，从而应用于基于操作条件的轴承计算中。SKF寿命修正系数 a_{SKF} 应用了疲劳载荷限制 P_u 的概念，与计算其他设备组件时所使用的相类似。

SKF寿命修正系数 a_{SKF} 为污染水平使用润滑条件(粘度比)和系数 c ，从而反映出真实的应用操作条件。

SKF额定寿命的公式符合ISO 281标准

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

其中

L_{nm} = SKF 额定寿命(100 - n¹% 可靠性下)
[百万次旋转]

a_1 = 可靠性的寿命调整系数

a_{SKF} = SKF寿命修正系数

此处所述计算可以通过 skf.com/bearings 处提供的工具方便的执行。有关SKF额定寿命的更多信息可在SKF轴承综合型录中找到。

可靠性

SKF基本额定寿命 L_{10} 基于90%的可靠性。该计算模型广泛应用于铁路牵引电机和齿轮箱的轴承中。

对于更高可靠性的要求，可以使用寿命调节系数 a_1 来计算SKF额定寿命。

寿命调节系数 a_1 的值

| 可靠性 % | 失效概率 n % | SKF 额定寿命 L_{nm} | 系数 a_1 |
|----------|----------------|----------------------|-------------|
| 90 | 10 | L_{10m} | 1 |
| 95 | 5 | L_{5m} | 0,62 |
| 96 | 4 | L_{4m} | 0,53 |
| 97 | 3 | L_{3m} | 0,44 |
| 98 | 2 | L_{2m} | 0,33 |
| 99 | 1 | L_{1m} | 0,21 |

¹⁾ 系数n表示失效概率，例如，所需可靠性以及100%之差

SKF

Bearing life

Every care has been taken to ensure the accuracy of this calculation but no liability can be accepted for any loss or damage whether direct, indirect or consequential arising out of the use of the calculation.
See section "SKF rating life"

| | | |
|--|--|--|
| Select η_c <input style="width: 50px;" type="text" value="0.5"/> | Bearing d [mm] D [mm] C [kN] P_0 [kN] P [kN] n [r/min] v [mm ² /s] | Select bearing <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input type="button" value="Calculate"/> |
|--|--|--|

| | | |
|--|---|---|
| K <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> V ₁ <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> a _{SKF} <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> | L ₁₀ <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> L _{10m} <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> | L _{10h} <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> L _{10mh} <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> |
|--|---|---|

Old a₂₃ method for comparison:

| | | |
|--|---|--|
| a ₂₃ <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> | L _{10s} <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> | L _{10sh} <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> |
|--|---|--|

For grease lubricated bearings, please check the grease life. See section "Grease lubrication"
 For calculation of two bearings on a shaft, see the program "SKF Bearing Select"
 For calculation of the contamination factor η_c , see the program "SKF Bearing Select"

SKF轴承选择

SKF轴承选择是一种基于Web的轴承选择工具，可以计算滚子轴承的疲劳寿命。

计算基于SKF轴承综合型录中提出的理论，并符合ISO 281标准。

SKF轴承选择基于众所周知的上一代产品-SKF CADalog，并且具有以下特点：

- 可为单独的轴承或轴上的两个轴承计算滚子轴承的疲劳寿命
- 可以通过互联网轻松访问
- 无需安装软件
- 集成了报告生成工具以便快速归档
- 与最新版本的SKF轴承综合型录保持一致
- 随时更新的轴承数据库中包含最新的产品数据，包括SKF Explorer轴承在内
- 可以在服务器中存储输入文件，或存储在您本地的计算机中
- 与之前产品SKF CADalog兼容

SKF Bearing Select

Dynamic loads for one interval in a duty cycle

An "arbitrarily" number of load positions can be given for an interval. For each load position, coordinates and loads can be given either in a Cartesian or a cylindrical coordinate system.

Cartesian coordinate system: The radial load F_r and F_y and axial load F_z are the external loads acting on the bearing.

Cylindrical coordinate system: The radial load F_r and the tangential load F_t are the external loads acting on the bearing.

You can copy and paste loads between the intervals using the copy and paste buttons.

dynamic & static conditions/interval

Done

Specify loads:

| Coordinate | r/r1 | a/d | a | F_v/F_1 | F_v/F_2 | F_z |
|---|------|--------|----|-----------|-----------|-------|
| | mm | mm/deg | mm | lbf | lbf | lbf |
| <input checked="" type="radio"/> Cart. F_r Cyl. F_t | | | mm | lbf | | |
| <input checked="" type="radio"/> Cart. F_r Cyl. F_t | | | mm | lbf | | |

Done

Coordinate system:

Cartesian coordinate system Cylindrical coordinate system

3D diagram showing a shaft with bearings and force vectors F_x , F_y , and F_z applied to the shaft. The diagram also shows a coordinate system with X, Y, and Z axes.

使用skf.com/bearings
的在线工具计算轴承
载荷并选用适宜的轴
承类型

润滑

如果要使滚动轴承可靠运行，则必须进行充分的润滑以防止滚动体、滚道和保持架发生直接的金属接触。润滑剂还可以防止磨损，并保护轴承表面免受腐蚀。因此，为每种轴承应用选用适宜的润滑剂和润滑方法以及合适的维护，都十分重要。

SKF提供多种润滑剂和润滑油来润滑滚动轴承。润滑剂的选用主要取决于操作条件，例如，温度范围和速度，以及周边环境的影响。

一般说来，在提供了可靠润滑某一轴承所需的最低剂量的润滑剂的情况下，可以获得最佳的操作温度。然而，在润滑剂具有其他功能时，例如密封或散热功能，则可能需要更大剂量的润滑剂。

在机械运行、老化和污染物积聚的作用下，轴承配置中的润滑剂会逐渐丧失其润滑性质。因此，需要以固定的时间间隔来补充或更换润滑脂，或者过滤或更换润滑油。

本节中的信息与建议适用于不带整体式密封件或防尘盖的轴承。在两侧带有整体式防尘盖或密封件的SKF轴承与轴承单元在供货时已预先注入润滑脂。有关所用润滑脂的信息可应客户要求提供。

粘度比 κ

润滑剂的效果主要由滚动接触表面的表面分离程度来决定。如果可以形成充分的润滑剂薄膜，则在应用达到其正常操作温度后，润滑剂必须具有给定的最低粘度。润滑剂的状态由粘度比来表示，即对于充分的润滑，实际粘度与额定粘度1的比值，而在润滑剂处于正常操作温度下时，这两个值都要考虑。请参阅SKF轴承综合型录。

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1}$$

其中

κ = 粘度比

ν = 润滑剂的操作粘度[mm²/s]

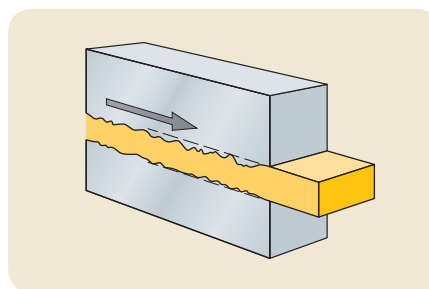
ν_1 = 额定粘度，取决于轴承平均直径和旋转速度[mm²/s]

充分润滑所需的额定粘度 ν_1 可以从SKF轴承综合型录的图表中获得，或可从 skf.com/bearings 处提供的信息中获得。

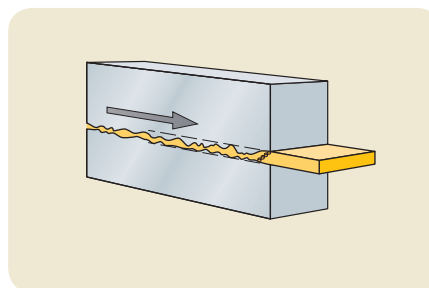
注释

不同工厂生产的看似相同的润滑剂，特别是对于润滑脂来说，其润滑性质可能存在差别。

因此，SKF对于任何润滑剂或其性能不承担任何责任。因此，建议用户详细指定润滑脂性质，从而为其应用获得最适宜的润滑剂。



全油膜润滑，流体动力润滑，表示使用润滑剂薄膜粘度比 ≥ 1 的产品来完全分离滚动接触表面



混合润滑，表示使用润滑剂薄膜粘度比 < 1 的产品来不完全分离滚动接触表面

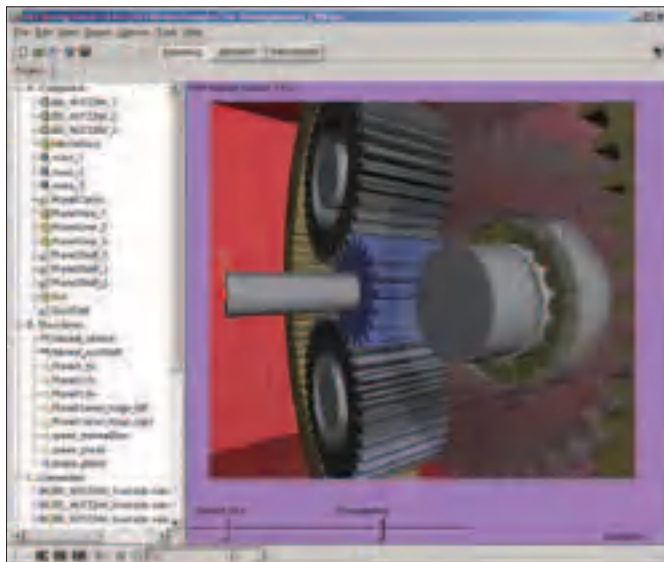
高级计算

SKF提供在轴承行业中最具综合性并且最强大的建模和仿真工具包。这些工具包的范围包括基于SKF轴承综合型录公式的易于使用的工具，直至最复杂精密的、在并行计算机上运行的计算和仿真系统。SKF用于高级寿命计算的一个最常用的工具就是SKF轴承信标工具。

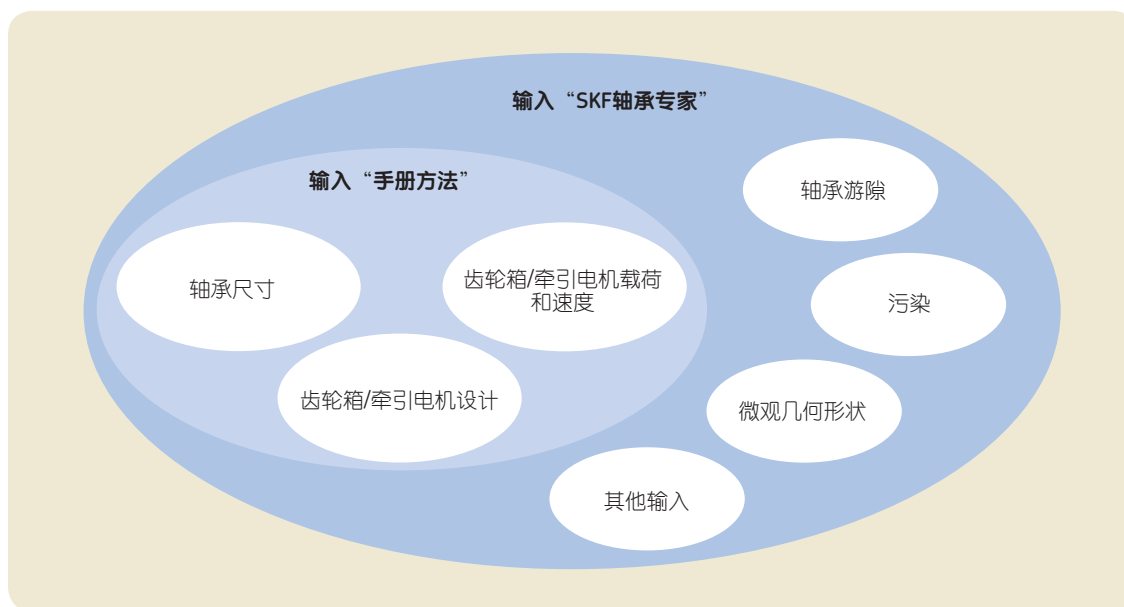
SKF轴承专家

SKF轴承专家是SKF工程师使用的主要轴承应用程序，可为客户的轴承系统查找最佳解决方案。SKF的工程师可在虚拟环境中工作，将包含轴、齿轮和轴承座在内的机械系统与精密的轴承模型相结合，进行深入的系统行为分析。该程序还可以使用SKF额定寿命方法来分析系统中的滚动疲劳程度。SKF轴承专家是SKF多年来研发的成果。

对于SKF传动系统的计算，SKF轴承专家主要用于通过载荷偏置、赫兹应力、截断、轴颈折弯、极端温度条件以及高级轴承疲劳计算来研究特定应用下滚子和内圈/外圈滚道上的载荷分布。



SKF轴承专家三维计算模型



手册结算的输入数据要求与SKF轴承专家计算的对比

最先进的方法称为SKF AFC(高级疲劳计算)。该方法基于滚动体接触应力的全积分。可以评估直至完全加载体积的寿命耗尽时的应力周期数。

高级疲劳计算的优点在于

- 比其他任何模型都更准确
- 全应力积分(实际应力评估)
- 润滑和污染的调节系数
- 考虑钢材疲劳
- 考虑所有可能的载荷和不对中情况

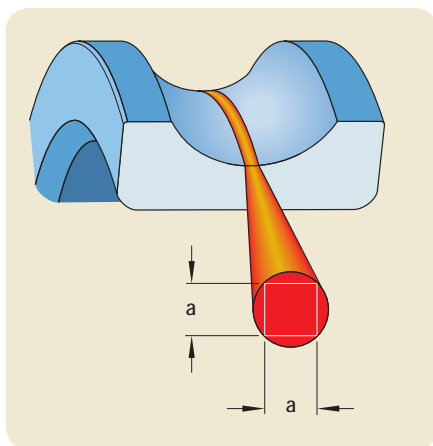
数字化的SKF轴承专家工具可以进一步用于研究并优化噪声和振动关键轴承应用中的动态行为(例如电机、齿轮箱)。该程序还可用于为轴承配置以及包括齿轮、轴和轴承座在内的周边组件求解其运动的完整非线性公式。

该方法可为包括轴承在内的某一应用的动态行为提供深入的理解与建议, 涉及形状偏离(波状)以及安装误差(不对中)。这就可供SKF的工程师为给定应用确定最适宜的轴承类型和尺寸, 以及相应的安装与预载荷条件。

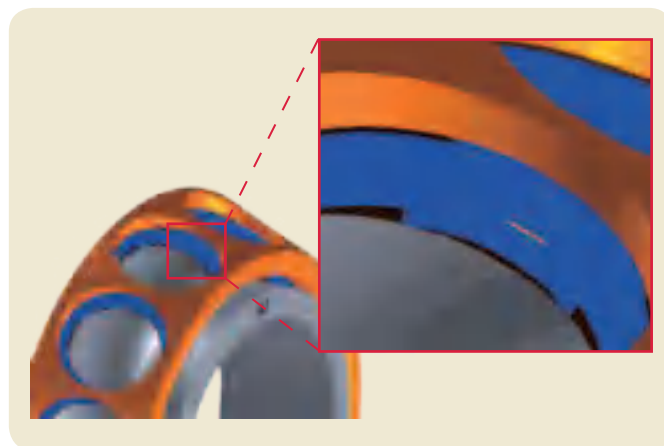
BEAST

BEAST是一种仿真程序, 可供SKF的工程师模拟轴承内部的详细动态情况。它可以视为一种虚拟的测试平台, 用于在几乎任何载荷条件下为轴承内部的力、力矩等执行详细的研究。这样可在更短的时间内“测试”新的概念与设计, 同时与传统的物理测试相比, 获得的信息也更多。

SKF轴承专家方法的AFC计算基于滚动体触点应力的完全积分



角接触轴承中保持架槽和触点应力的BEAST计算结果



FEM计算

有限元方法(FEM)计算是一种机械力学上的模态分析工具，可确定自然模态的形状。这些计算用于查找偏微分方程式以及积分方程的近似解法。

该解法的方式基于完全消除微分方程(稳态问题)或将其转换为常微分方程的逼近体系，然后使用标准方法，例如欧拉法、龙格库塔法等进行数学积分¹⁾。

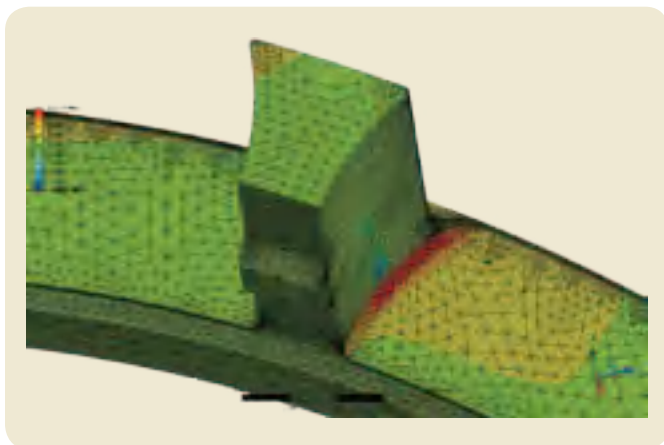
FEM的结果可以基于冯米塞斯²⁾或主要应力的最大值的形式提供。

其他程序

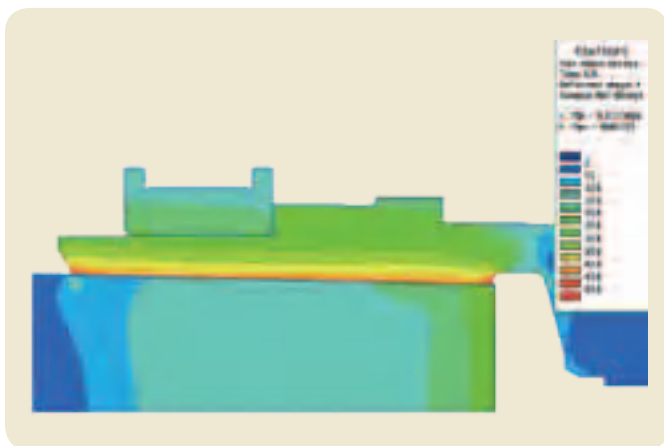
除了上述程序外，SKF还开发出一些专用的计算机程序以使SKF的科学家为客户提供具有优化的轴承表面精度的轴承，从而延长在苛刻操作条件下的轴承寿命。这些程序可以计算弹性流体动力润滑接触中的润滑剂膜厚度。此外，这类触点内部三位表面形貌变形所产生的局部膜厚度也可以进行详细计算，并可得出相应的轴承疲劳寿命缩短量。

为了对自身的工作进行补充，SKF工程师使用商用软件包来执行有限元或常态系统动力学分析等测试。这些工具集成到了SKF专有的系统中，可以与客户的数据和模型进行快速、稳定的整合。

圆柱滚子轴承黄铜保持架最大主应力的FEM计算结果



基于N设计圆柱滚子轴承传动端内圈的冯米塞斯原理的FEM应力计算结果，其小齿轮压入到锥形轴上。



¹⁾ 根据Leonhard Euler (1707 – 1783)、Carl David Tolmé Runge(1856 – 1927)和Martin Wilhelm Kutta(1867 – 1944)分别命名

²⁾ 根据Richard Edler von Mises(1883 – 1953)命名

验证

如第148页所述，应用分析过程应通过验证过程进行确认。一些典型的评估包括

- 静态安全性
- 轴承寿命
- 最小载荷
- 速度限制
- 补充润滑时间间隔
- 温度稳定性
- 润滑剂兼容性

对于高要求的应用，SKF可以进行进一步的验证，例如

- 轴承接触压力
- 工作游隙
- 截断
- 不对中
- 刚度
- 轴承圈周向应力

此外，实地测试结果有利于验证计算结果以及应用工程建议。

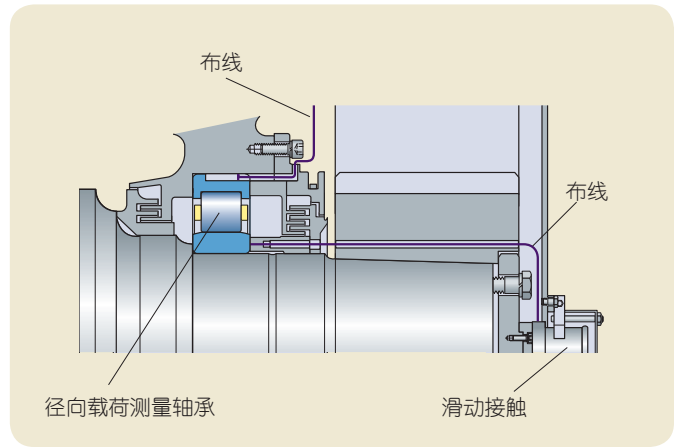
实地测试

通过与铁路运营商合作，可以执行实地测试^[30]。多用途电力机车适用于速度上限为140 km/h的远距离乘客列车，以及在阿尔卑斯地区坡路上运行的950吨级货运列车。最高速度为160 km/h。另外，所进行的专门短途试验采用了175 km/h的测试速度。该实地测试的重点在于测量牵引电机在不同操作条件下于传动和非传动端的径向与轴向载荷。总体的实地测试运行涉及8个不同的操作部分，运行总里程数约为800 km，在两个工作日内所耗时间约为14个运行小时。

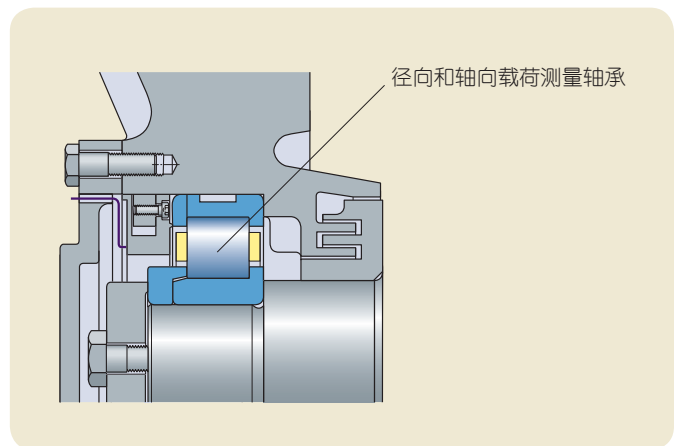
在完整的实地测试中，所测得的最大传动端径向载荷约为平均载荷的3,5倍。在测得载荷和牵引电机电流之间存在良好的关联。

操作过程中传动端轴承的温差在外圈处为26 °C，在内圈处为30 °C。传动端轴承内圈和外圈之间最大的测得温差为11 °C。测试行程中的环境温度极为适宜，约在20 °C。

操作过程中非传动端轴承的温差为37 °C。



配有传感器的传动端侧牵引电机轴承



配有传感器的非传动端侧牵引电机轴承

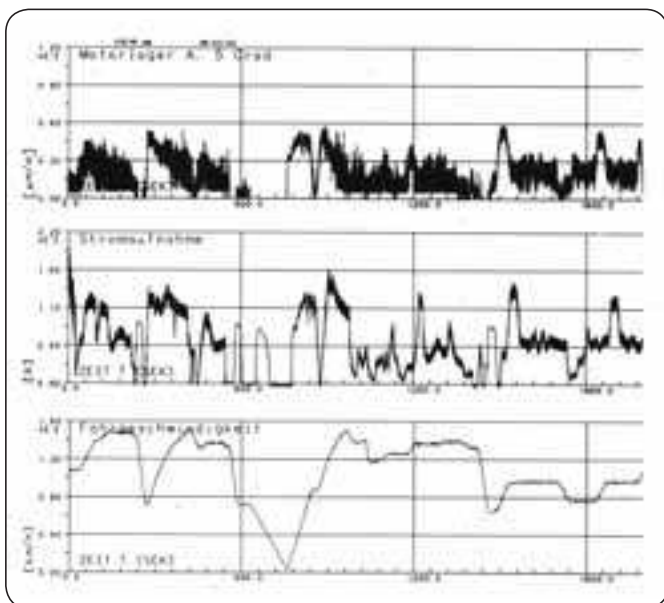
实地测试总结：作用在传动端和非传动端牵引电机轴承上的径向最大载荷和中等载荷

| | 最大径向载荷 F_{max} [kN] | 平均径向载荷 F_m [kN] | 位置 |
|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| 传动端牵引电机轴承 | 168,0 140,0 | 52,4 37,4 | 5° 147° |
| 非传动端牵引电机轴承 | (13,0) (15,0) 29,0 | (3,6) (4,6) 8,4 | 42° 77° 175° |

括号中的值仅指两个测量的测试部分

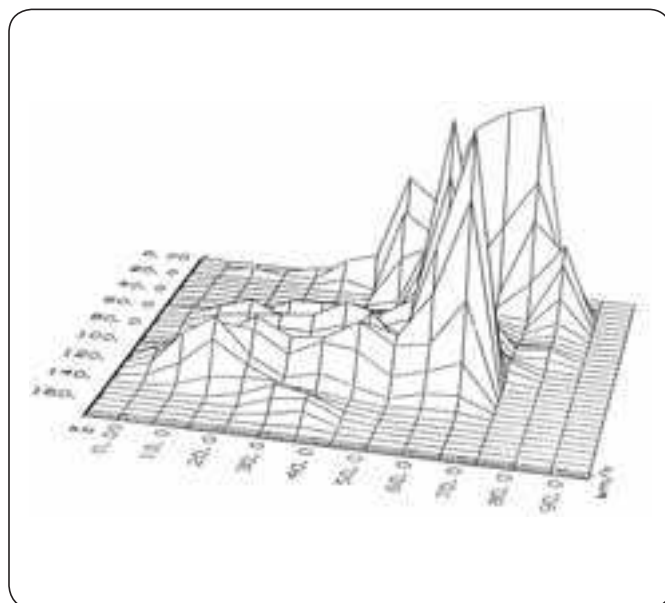
实地测试总结：传动端和非传动端牵引电机轴承上的最高温度和中等温度

| | 最高操作温度 δ [°C] | 平均操作温度 δ [°C] | 位置 |
|------------|-------------------------|-------------------------|----|
| 传动端牵引电机轴承 | 30 ... 56 33 ... 63 | 26 ... 52 28 ... 52 | 外圈 |
| 非传动端牵引电机轴承 | 36 ... 73 | 30 ... 65 | 外圈 |



测量参数示例

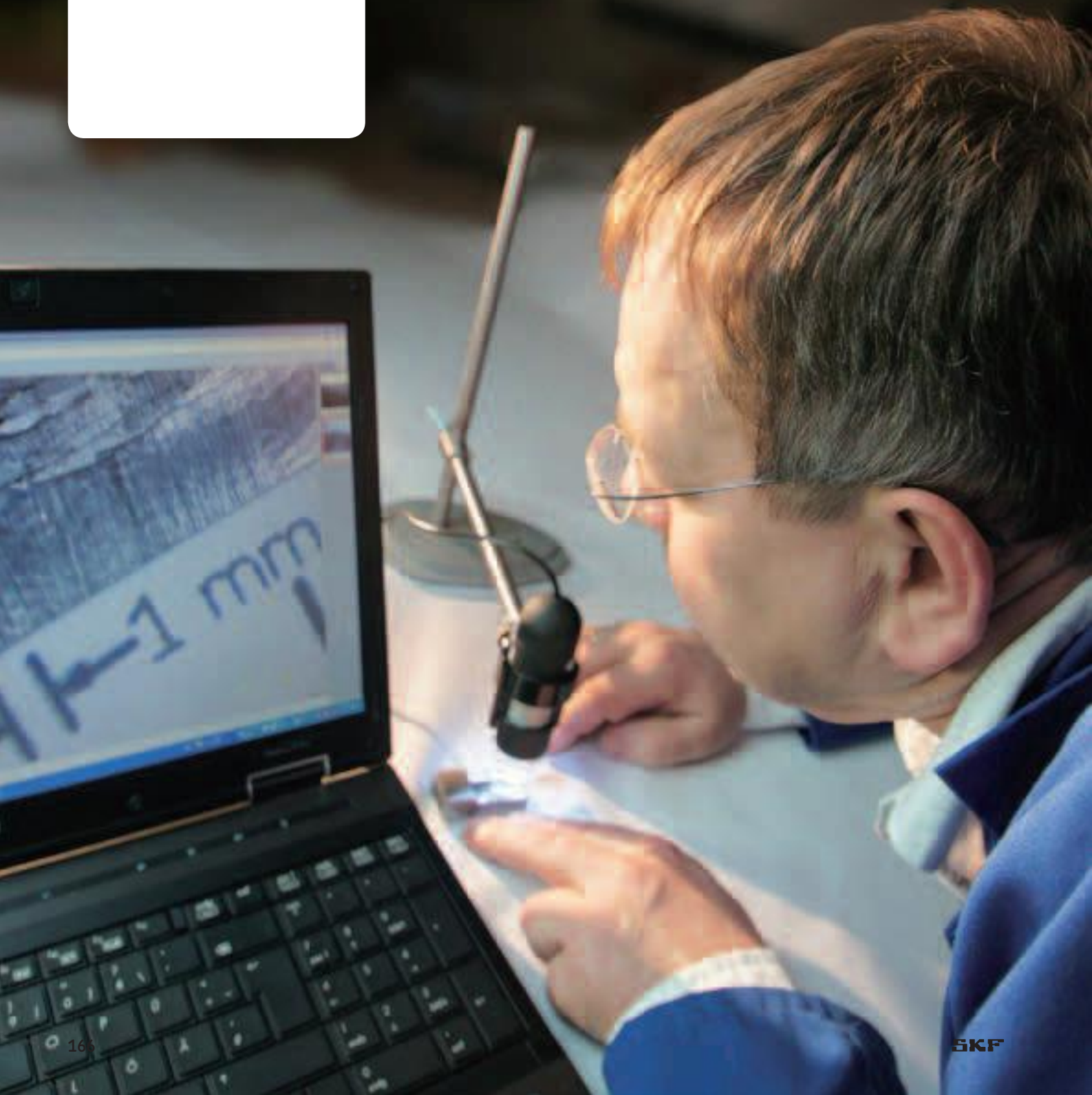
- 第一张图：牵引电机轴承传动端5°位置处的径向力
- 第二张图：牵引电机电流[A]
- 第三张图：机车速度[km/h]



作用在传动端轴承上的测量速度与径向载荷示例

7 轴承研究

| | |
|---------------|-----|
| 考虑因素 | 167 |
| 运用条件 | 168 |
| 轴承损伤 | 168 |
| 根本原因分析 | 172 |
| 损伤和失效矩阵 | 179 |



轴承研究

对于牵引电机和齿轮箱来说，对实现更高的可靠性与更长的安全事件间隔的要求与日俱增。为了验证实地应用下的轴承状态，应当应用状态分析(→第9章)。一个补充性的方法就是由铁路维护人员或轴承制造商实施的轴承研究。在大多数情况下，与对轴承的完全拆卸和研究相比，对润滑脂或润滑油状态的中间性研究可以更加轻松的完成(→第222页)。这样可以有助于通过有限的工作来间接建立起轴承状态。所有这三种方法都可以相互补充，目标则在于增强可靠性、改进排程维护时间间隔，以及在需要处实施修正操作。

考虑因素

在铁路车辆的牵引电机和齿轮箱中，滚动轴承是极为关键的组件。在轴承应用选型时，需要考虑大量因素。但是，这些信息总是不完整的。真实的线路条件可能与标准规定的情况存在很大的区别(→第146页)。

磨损可使运行条件发生变化。因此，车辆的运行条件可能也会随时间而改变。

所有这些因素都可以影响滚子轴承的使用寿命。轴承发生损伤的时间可能会远远早于预期。润滑不良以及轴承损伤可能导致灾难性的故障，例如牵引电机中的转子和定子损坏，以及齿轮箱中的齿轮损坏。在这些情况下，列车的运行服务必须中断，并且动力车辆必须专门牵引到维修车间进行修理。这种非计划的操作会导致

运输停顿，并需要大量的人工来获取必需的备件以及修理操作。

通过引进交流驱动系统，将不再需要之前直流牵引电机的集电器和电刷。通常，这些组件的使用寿命要比润滑脂和轴承短得多。当今，牵引电机维护周期更多的倾向所需的润滑脂寿命和轴承状态及其使用寿命。在将来更重要的是确保高可靠性以实现更长的维护周期。油润滑的齿轮箱对维护的要求相对较低，通过间接检查润滑油的状态来判断轴承状态甚至轴承最终的更换可以通过相对经济的方式完成，而无需拆卸整个驱动系统。

运用条件

轴承寿命的计算要在多个章节中讨论。但是，要做出最终的轴承选型，需要考虑许多的因素。以下为影响轴承选型的几个主要因素：

- 类型
- 尺寸
- 精度
- 配合
- 游隙
- 保持架
- 热处理
- 润滑
- 密封
- 过电流
- 安装/拆卸

为特定的应用选择正确的轴承(→第3至6章)仅仅是实现设备可靠性能的第一步。

如果以上几个影响轴承性能的主要因素都能得到充分满足，则轴承基本能够达到其计算所得的寿命。但是不幸的是，在许多情况下，这仅仅是假设。通常总是发生一些不可预料的情况来破坏“理想”的运用条件。轴承也将发生损坏，并且寿命将受到影响^[31, 32]。

轴承损伤

理论上来说，根据失效的主要成因来为轴承损伤分类具有一定好处。但是，实际上看来各种不同的失效成因通常会发生一定的叠加，在综合作用下会对轴承造成严重的损坏，例如：

- 过度磨损(例如由于密封性能不足而导致润滑剂污染¹⁾)
- 过早失效(例如较小的剥落)，可最终引起大片的剥落并导致运行中牵引电机的严重故障(例如轴承圈和/或滚动体发生裂纹)

由于轴承失效问题可能由多种原因导致，所以轴承损伤的研究工作显得极为复杂并且难以应对。

任何轴承计算所得的预期寿命基于八个假设：

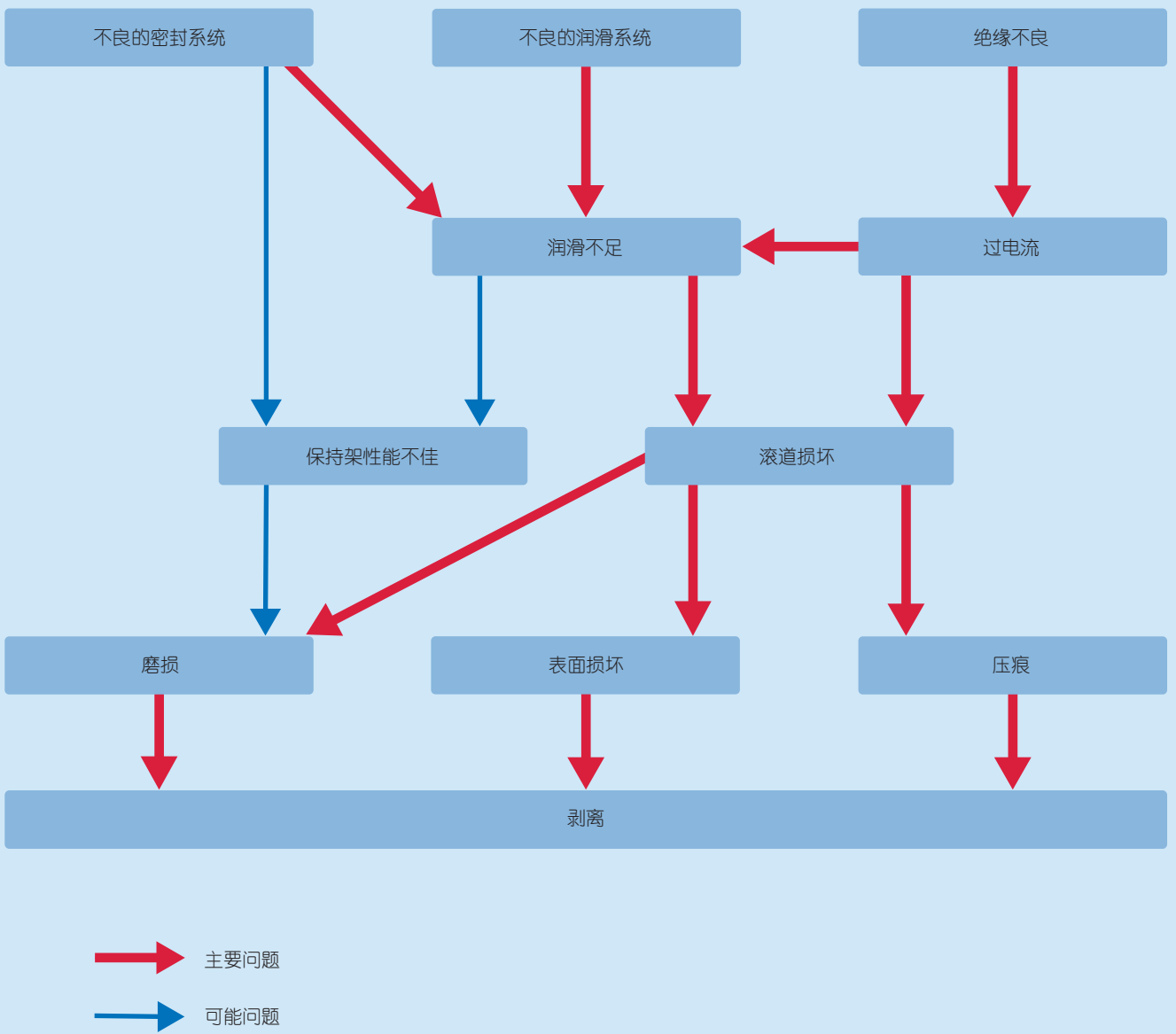
- 1 轴承适用于该应用。
- 2 轴承处于最高的质量级别并且不具有内在缺陷。
- 3 轴和轴承座基座等相关组件的尺寸合适。
- 4 轴承已正确安装。
- 5 始终为轴承提供适宜剂量的合适润滑剂。
- 6 轴承配置得到适当的保护(密封)。
- 7 轴承配置与操作条件相匹配。
- 8 执行推荐的维护操作。

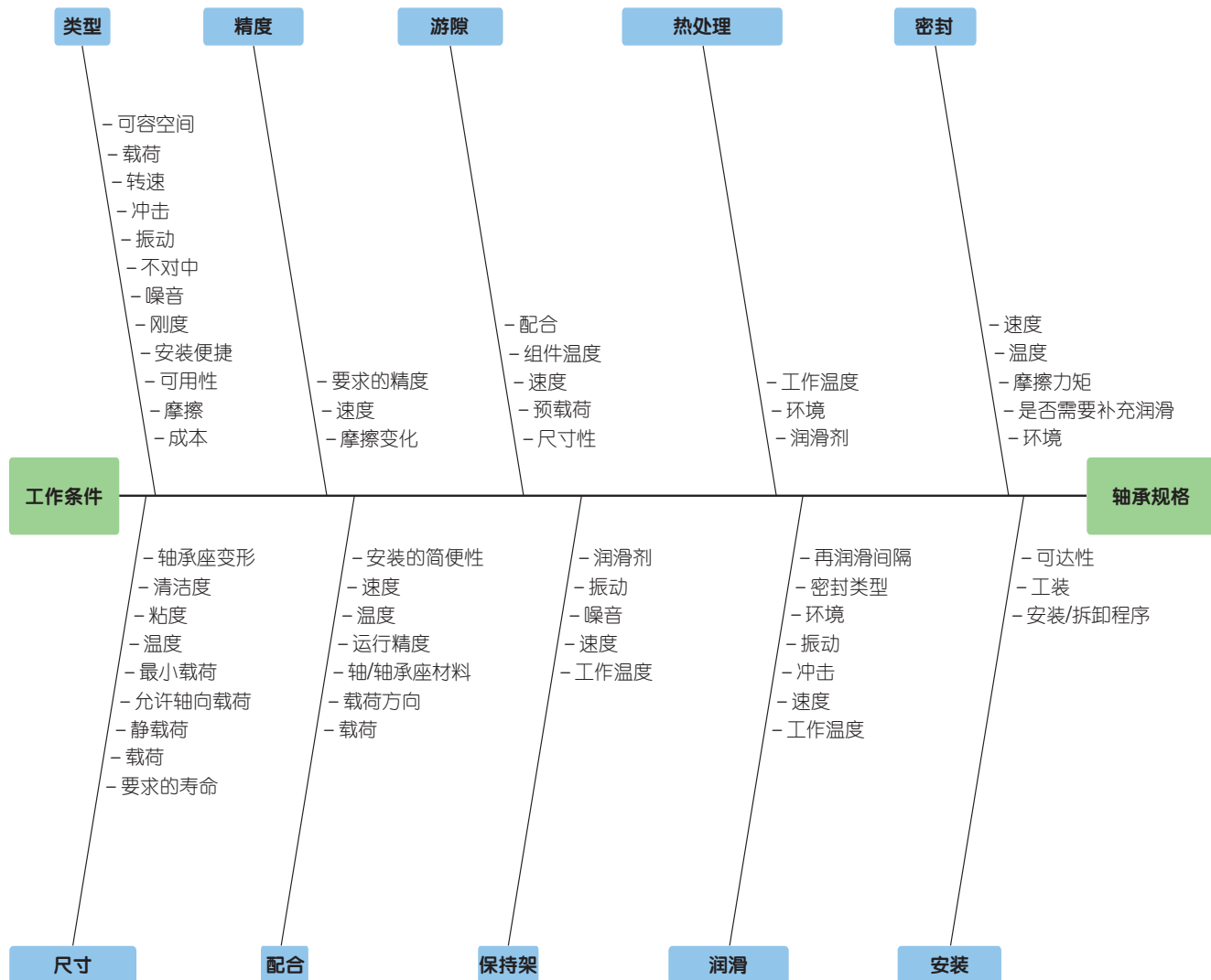
牵引电机轴承检修工艺中的第一步就是对轴承进行详细检查。该牵引电机轴承已使用12年，在重型机车中行驶了150万公里的里程。磨损极其微小，并且所有部件都可在轴承检修后重新使用。



¹⁾ 为得到详细的润滑状态数据，SKF润滑脂测试工具包TKGT 1可以帮助更好的了解润滑脂状态(→第222页)

设计问题 - 简化的交互示例





诸多工况的因素影响着轴承规格

一台运行只有10 km 的一台牵引电机中使用的圆柱滚子轴承。该示例中两个重叠的原因导致损坏：径向游隙过小并且该应用的保持架设计错误。



牵引电机深沟球轴承的保持架和滚子组件失效示例。



损坏的发展阶段

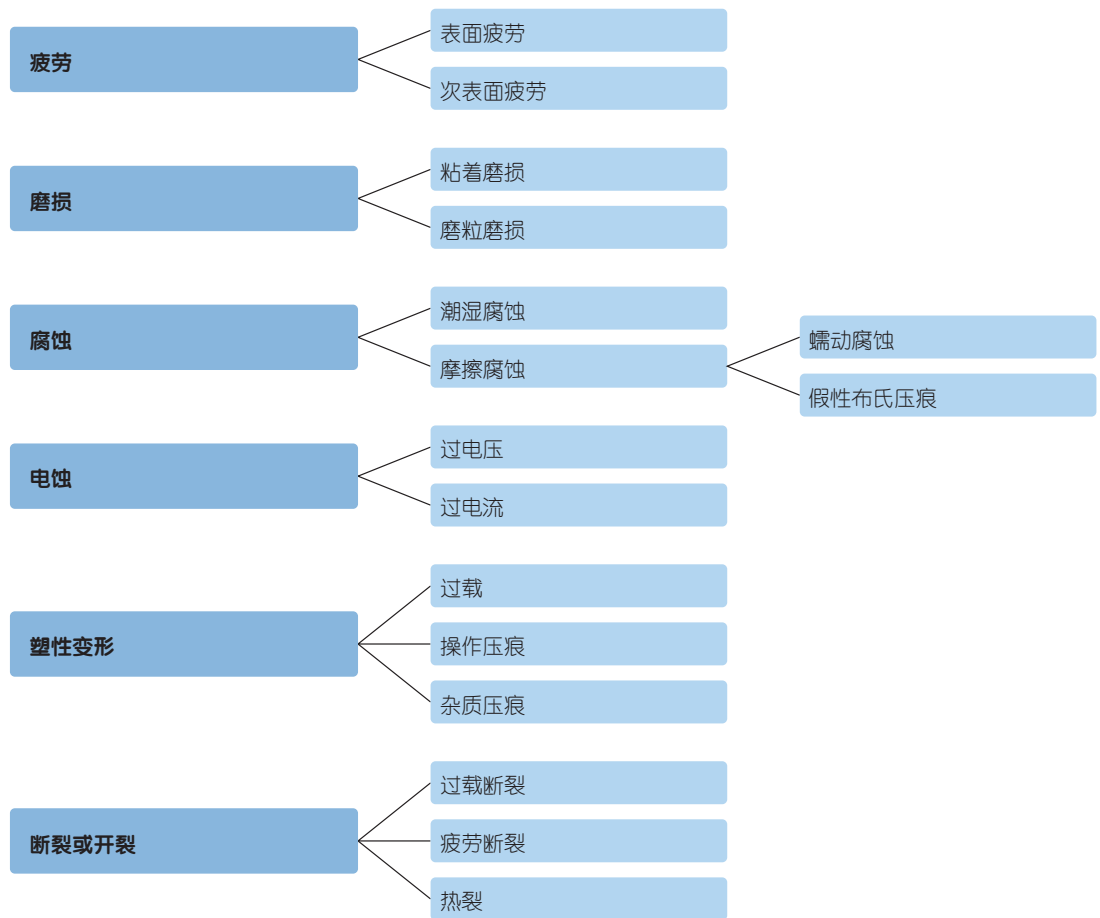
轴承原始损伤可能导致表面疲劳和磨损。随后，可以发生轴承断裂和裂纹。通常驱动端轴承运行过程中会发热并卡死，这时电机、齿轮箱和轮对无法运行。转子和定子可能严重损坏，此时机车需要大修。在该情况下，需要付出昂贵的代价来将铁路车辆从轨道上转移至车辆段，并且这将延误线路上的列车运行。

实践范例

此处提供一个现场的实践范例：在阿尔卑斯地区的一条坡道上，在重载运行期间发生的牵引电机轴承失效。故障的机车堵塞了单向轨道，并且必须采用专用的运输设备将其救援到下一车辆段，而这一过程极为困难并且极其耗费时间。这一事故使多辆列车耽搁了半天的时间。

之后，牵引电机在铁路维护车间进行重新构造。该过程需要新的转子轴、新的定子以及转子绕组。实施上，只保留了牵引电机轴承座。在大多数情况下，不幸的是，这种类型的损坏无法修复。而状态监测则可以在极早期协助探测到这一损伤（→第9章）。

在以下几页中，将介绍几种典型的牵引电机和齿轮箱轴承的故障研究。大多数实例可在SKF铁路技术手册第1卷第6章中找到，或可在ISO 15243标准中获得。



ISO 15243: 轴承损伤分类 - 说明了六种主要的故障形态及其子形态

失效原因分析

主要的共识如下：

- 损坏(失效)的成因可导致具有一定特性的变化。
- 特定的失效机制可导致特定的失效模式(形态)。
- 从所观测到的损坏现象，有可能找到失效的根本原因。

ISO已经开展了众多的工作来定义各种不同的失效模式并对其进行分类。于是形成了ISO 15243标准，并于2004年首次发布。在研究轴承失效问题时，总共可以归结为六种主要的失效模式，并且可以进一步细分为一些子失效模式^[32]。

该分类基于三个主要因素：

- 使用过程中发生的损坏和变化(在轴承出厂后立即发生)
- 由特定原因导致的外观形状改变
- 按可见特征进行分类(包括使用非破坏性设备进行放大观察，例如显微镜)

疲劳

次表面疲劳

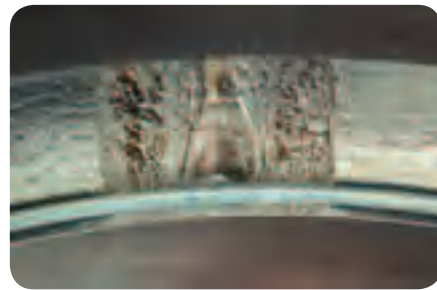
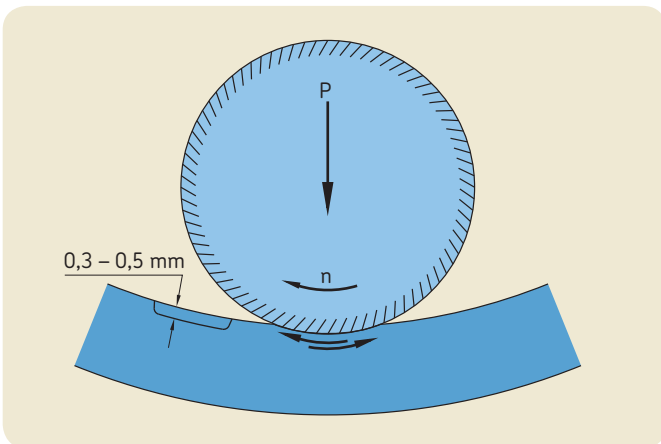
在周期性载荷作用下，滚道表面下不断积累的应力导致轴承材料的变化，从而形成微裂纹，并且裂纹进一步扩展，在裂纹发展到滚道表面后便发生剥离。

表面疲劳

表面疲劳通常由润滑不足导致。润滑剂的作用在于形成油膜并将运动部件分离开来。

在润滑不足的情况下，例如，润滑油污染或粘度不足时，运动部件金属表面将直接接触。金属粗糙的表面(尖峰)相互发生剪切，由此产生的应力将导致材料疲劳，并最终导致微观剥离。开始时，由于降低了表面粗糙度，表面可能变得光亮，但是该过程再持续下去，表面将最终变暗并开裂。

疲劳导致的剥离



次表面疲劳
轴承外圈滚道上的次表面疲劳



表面疲劳
球面滚子轴承外圈中的表面初始疲劳。外圈滚道部分发生表面损坏。在一处已经发生剥离。

磨损

磨损是运动物体接触区域发生的一种典型损坏。磨损通常是无法避免的。但是，环境条件可能导致轴承在运行的早期阶段发生磨损。发生的磨损可分为两种形式，分别为“磨粒磨损”和“粘着磨损”。其发生的原因是滚动接触的表面存在速度差。速度差的原因可以是运动滑动、运动加速或运动减速。

磨粒磨损

其发生原因为润滑剂中存在的磨料颗粒。这些可能是来自外部或内部的污染物颗粒，例如齿轮的磨损颗粒。磨料颗粒可以磨损滚道、滚动体以及金属保持架的表面。通常可导致表面变暗。

但是，如果磨粒极为细小并且足够坚硬，例如水泥粉尘等，则可能发生抛光效应使滚道表面像镜面似的。通常，密封配置不良(或者缺少密封)将导致污染直接进入轴承腔。利用润滑剂分析方法可以找到污染的来源，从而有助于找到解决问题的方案。

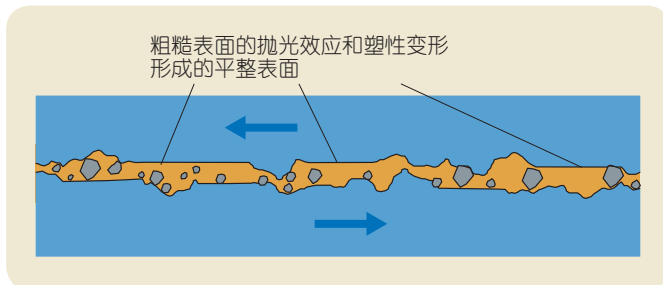
粘着磨损

粘着磨损主要在接触表面上发生，受较轻的载荷、不良润滑条件以及重要的速度差影响，可导致滚动体发生滑动。

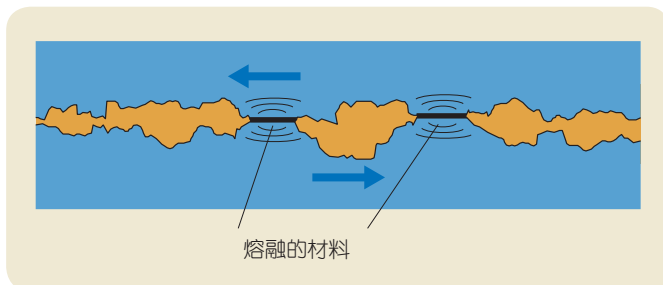
例如从未加载区域到加载区域的滚动体。滚动体在未加载区域可丧失速度，并在返回到加载区域时加速。所产生的结果为润滑膜破裂、发生滑动、生成热，以及在滚动体和滚道之间发生可能的材料转移。在早期阶段，其外观为闪亮的表面，但是将迅速变暗，覆盖（或多或少）涂污的材料。



磨粒磨损
圆锥滚子轴承钢保持架上的磨料磨损



磨粒磨损
抛光效应形成的类似镜面表面的磨损

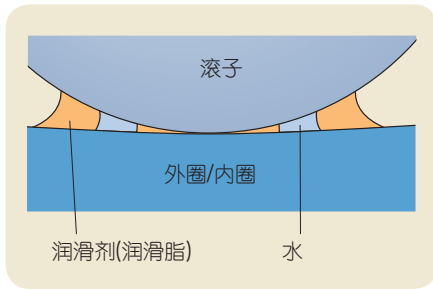


粘着磨损
较大的速度差和过轻的载荷可导致滑动摩擦，从而产生极高的温度和金属粘连现象

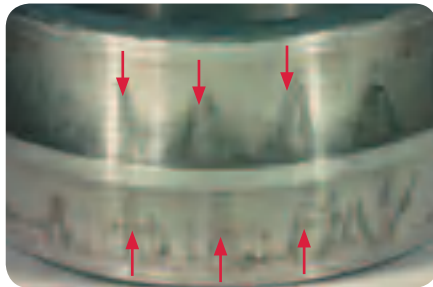


粘着磨损
圆柱滚子轴承内圈滚道上的粘着磨损

湿分腐蚀原理



湿分腐蚀
球面滚子轴承内圈上的湿分腐蚀



摩擦磨蚀
轴承孔中的摩擦磨蚀



摩擦磨蚀
轴承孔中的摩擦磨蚀，由配合不充分引起



腐蚀

湿分腐蚀

与其他损坏过程不同的是，腐蚀发生的速度快，深入金属材料程度深。这可导致严重的轴承损坏。在存在水、腐蚀性液体或水汽的情况下都可能发生腐蚀。此外，高湿度的空气以及手指接触滚道也可导致该类型的腐蚀。

从而，非常重要的一点就是采取良好的保护。腐蚀通常在停机状态下发生，然后在滚动体的距离下通过腐蚀痕迹显现出来。深入的锈蚀可导致轴承过早损坏。

摩擦磨蚀

其根本原因在于两个加载表面之间的微观运动。大多数情况下，这种摩擦腐蚀可在轴承外径和轴承座之间和/或轴承孔与轴之间产生。

在滚动体通过时，微观运动主要由循环载荷导致。接触表面之间的不充分配合、轴折弯和/或瑕疵可成为该现象的成因和/或加速该现象的发生。空气可以进入到未受保护的表面中，并且加速腐蚀的过程

形成的氧化铁比纯钢的体积大得多。这可以导致材料生长并产生较高的应力，甚至延伸至轴承滚道并导致过早失效。

假渗碳硬化

假渗碳硬化，也称为摩擦腐蚀损坏，由于循环振动下的微观运动和弹性触点的回弹性而在滚动体/滚道接触区域发生。由于其在轴承处于静止并加载的状态下发生，破坏将在滚动体节距处表现出来。

根据振动程度、润滑状态以及载荷的不同，可以发生腐蚀与磨损的组合，以致在滚道上形成浅的凹痕。

通常，振动可导致(保护性)润滑膜破裂、产生金属间接触、表面腐蚀，以及磨料磨损。因此，其外观通常变暗、褪色，并且有时由于腐蚀而表现为红色。某些情况下，凹痕部分表现为发亮。假渗碳硬化损坏可在球轴承上造成球形空腔，并在滚子轴承上造成线条。



圆锥滚子轴承外圈的假渗碳硬化损坏
假渗碳硬化损坏在静止状态下发生，特点为在滚动体距离处发生损坏。

过载电压

深沟球轴承外圈的滚道。

- 1 排列的珠型放电痕
- 2 外圈和滚珠体上的曲折图形



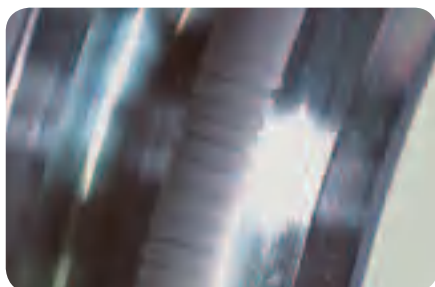
过载电压

产生较大剥离的球轴承滚道



破坏性电流通过导致的搓板状滚道。

深沟球轴承的外圈滚道



破坏性电流通过导致的搓板状滚道。



电侵蚀

电气特性、电侵蚀过程、电流预防以及INSOCOAT和混合陶瓷轴承等绝缘轴承解决方案在**第4章**中讨论(→**第104至106页**)。

此处提供有关电侵蚀损伤的几个图示。

塑性变形

在超出材料屈服强度的情况下即会发生永久性变形。

过载

过载的来源为静态载荷或冲击载荷，并可导致塑性变形。可以通过滚动体距离上的凹痕进行识别。通常，安装程序错误可造成该问题。例如，将安装力施加到错误的轴承圈上，从而在整个滚动体上产生冲击载荷。

残留造成的压痕

产生的原因可以是进入轴承内部并且由滚动体压入到滚道中的异物颗粒(污染物)。压痕的大小和形状取决于颗粒的性质。压痕处的滚道几何形状被破坏，并且润滑受到影响。表面处的应力增加，而疲劳将导致表面过早剥落。

加工造成的压痕

在轴承表面受到硬质、尖锐的物体挤压时，将形成加工造成的压痕。此外，轴承必须始终小心处理。尽管轴承采用最高质量的钢材制成，局部过载，例如轴承跌落等影响，都可能在表面造成压痕，并使轴承无法使用。



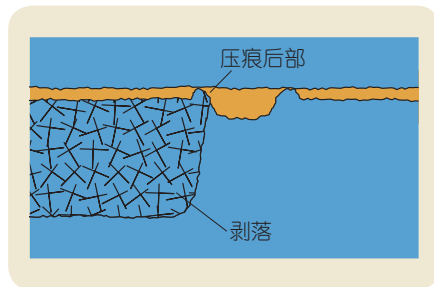
过载

安装力传递到整个滚动体上，在转子元件距离处产生凹痕，轴向位移。



过载

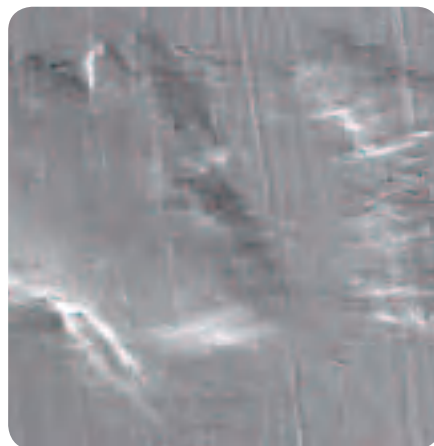
安装错误引起的凹痕将进一步滚压并迅速导致剥落。



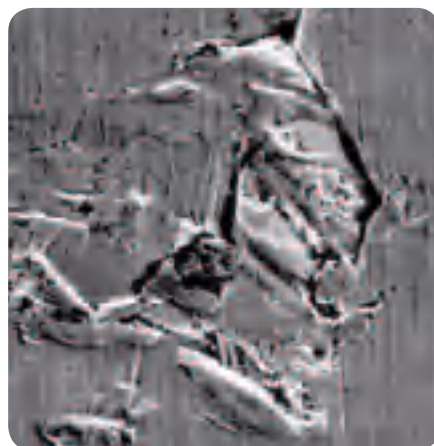
残留造成的压痕

压痕可以破坏几何形状并导致剥落后的区域发生表面初始疲劳

圆柱滚子轴承的内圈-
由于错误安装引起
的人为压痕



软颗粒杂质压痕



硬颗粒杂质压痕

外力断裂

冲击载荷造成圆柱滚子轴承内圈挡边断裂



外力断裂

圆柱滚子轴承的内圈断裂



外力断裂

轴承座基座不良，最终导致外圈裂纹



外力断裂

过度胀紧锥轴造成断裂



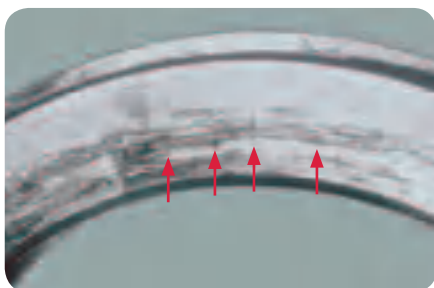
外力断裂

面滚子轴承外圈的疲劳断裂



热裂纹

轴承内圈侧面上极重的金属粘连。摩擦热导致产生裂纹(横向)。该轴承圈最终将通裂。



断裂和裂纹

在超出材料极限抗拉强度时，将发生断裂(或裂纹)。

外力断裂

外力断裂由局部冲击或过度应力引起的超出材料抗拉强度的应力集中所造成。两个常见的成因如下：

- 安装或拆卸轴承时的粗加工(冲击)。锤击硬铲子以直接敲打轴承圈可能导致形成细微的裂纹，从而在轴承使用时导致轴承圈产生碎片并脱落。
- 过度胀紧锥形基座或套筒。从而，在轴承使用时，轴承圈中产生的张应力(环向应力)可导致产生裂纹。

疲劳断裂

疲劳断裂是在超出疲劳强度时发生的屈服。初始裂纹将产生，然后不断延展。最后，引起整个轴承圈或保持架断裂。疲劳断裂一般在使用紧配合时发生，因为其内部存在极高的环向应力。然后，循环应力和环向应力叠加导致轴承过早疲劳，甚至轴承圈断裂。

热裂纹

在两个表面产生严重的相互滑动时可能出现热裂纹。热裂纹在摩擦热作用下不断扩展并导致断裂，热裂纹方向通常与滑动方向垂直。

损伤与故障表

在检查受损轴承时，通常可将其损伤归于ISO损伤形态的一种。

要找出造成该损伤的根源是有一定难度的。可参考下面的操作与故障表进

行。从中可以看出损坏模式(子模式)和运用条件之间的联系，以及某一运用条件是否构成根本原因。该表还显示了轴承损伤研究可以从哪里着手进行。

损伤与故障表

| 可能原因 | | 运用条件 | | | | | 环境因素 | | | 润滑 | | | 安装 | | | | 其他 | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|------|----|-------------|-------|----|--------|---------|----------|----|----|----------------------|------|-------|-----|------------|------|------|------|--------|-----------|------|----|--------|------|------|------|
| | | 过载 | 超速 | 载荷、速度变化频率过高 | 加速度过大 | 振动 | 轴/轴承挠曲 | 温度过高/过低 | 灰尘/污染物进入 | 进水 | 漏电 | 粘度不合适 (稠度)选择添加剂错误 | 润滑不足 | 润滑剂过量 | 有杂质 | 操作不对(冲击载荷) | 安装步骤 | 配合过紧 | 配合过松 | 不对中/倾斜 | 设置错误(预载荷) | 定位错误 | 存放 | 振动(运输) | 轴承选择 | 设备设计 | 制造问题 |
| 具有特征的失效模式 | 疲劳 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 表面剥落 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 磨损 | 磨粒磨损 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 擦痕，刻痕 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 粘着磨损，粘附伤痕 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 烧痕 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 腐蚀 | 潮湿腐蚀 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 蠕动腐蚀 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 假性布氏压痕 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 电蚀 | 放电痕 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 槽痕 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 塑性变形 | 过载 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 杂质压痕 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 刻痕，凹槽 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 断裂或开裂 | 过载断裂 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 疲劳断裂 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 热裂 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 损伤区域 | 滚道 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 径向基座 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | 轴向基座(挡肩) | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |

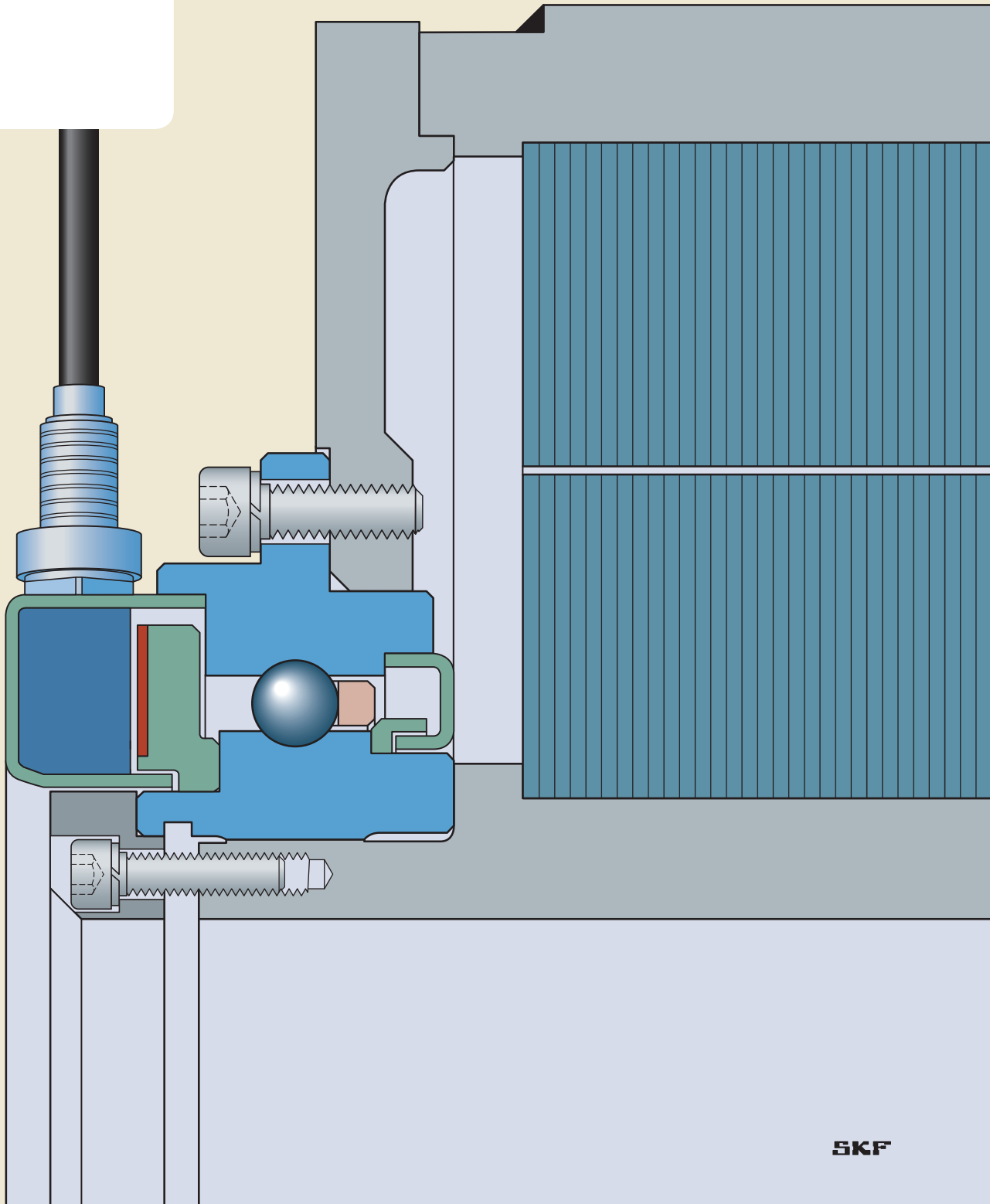
8 传感器

设计原理 181

集成示例 182

速度传感器 184

速度和绝对
位置传感器 187



传感器

传感器牵引电机轴承单元(TMBU)的概念提供了许多检测与测量的机会：用于牵引电机控制设备的绝对位置检测、旋转方向检测、制动系统的速度测量，以及用于监测运行状态的温度测量。

设计原则

集成式传感器的概念提供了许多检测与测量的机会，例如用于牵引电机控制设备的绝对位置检测、方向检测和用于制动控制系统的旋转速度测量，以及在需要情况下用于监测可靠性的温度测量。

在大多数情况下，两种传感器都将集成到轴承单元外圈的密封系统中。该设计可以实现许多改善的机会，例如节省空间以及部件的使用。

传感器设计优点

- 紧凑的解决方案：与传统的传感器装置相比，尤其是在轴向方向上，可以节省空间
- 设计牢固：所需部件更少，无齿脉冲式叶轮
- 高解析度和高精度
- 传感器更换方便
- 设计实现长使用寿命

集成示例

经典设计

在许多应用中，非传动端的经典式牵引电机设计都基于圆柱滚子轴承。为了实现定位功能，则使用NUP设计的圆柱滚子轴承或带HJ角环的NJ设计的圆柱滚子轴承。与深沟球轴承相比，这些圆柱滚子轴承的应用都可以实现简便的安装。通常，深沟球轴承的额定载荷已足够使用。另一方面，圆柱滚子轴承通常尺寸过大。

对于交流三相技术的实施，需要为推进系统使用电机速度检测。对于传统设计来说，可以通过应用固定到转子轴上的齿轮来实现。

在很多情况下，圆柱滚子轴承的密封功能都以轴承两侧的迷宫式密封件为基础。

替换

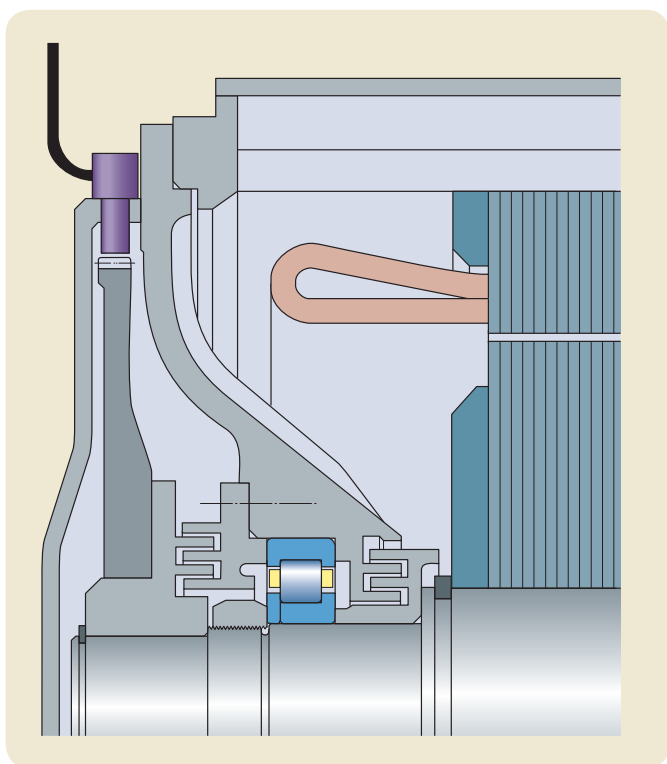
传统的设计原则需要大量的空间，尤其是在轴向方向上。在该区域中，轮缘非常靠近。牵引电机加上齿轮箱的总长度受轨距和轮缘的限制。

该设计可限制活动转子长度，而该长度原则上近似于牵引电机总功率的线性函数。

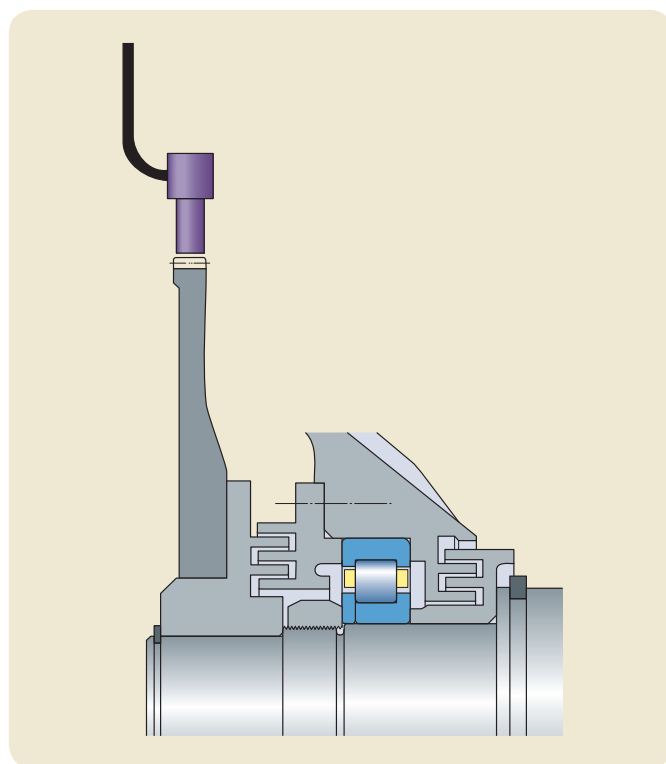
传感器TMBU实施的基本理念是用于取代以下部件：

- 安装在牵引电机中上的齿轮以及安装在牵引电机中间轴承座上的传感器
- 通常尺寸过大的圆柱滚子轴承
- 圆柱滚子轴承两侧的迷宫式密封件

牵引电机非传动端配置的经典设计



结合了TMBU的经典设计的替换部件：脉冲环传感器、圆柱滚子轴承和两个密封系统



TMBU的概念

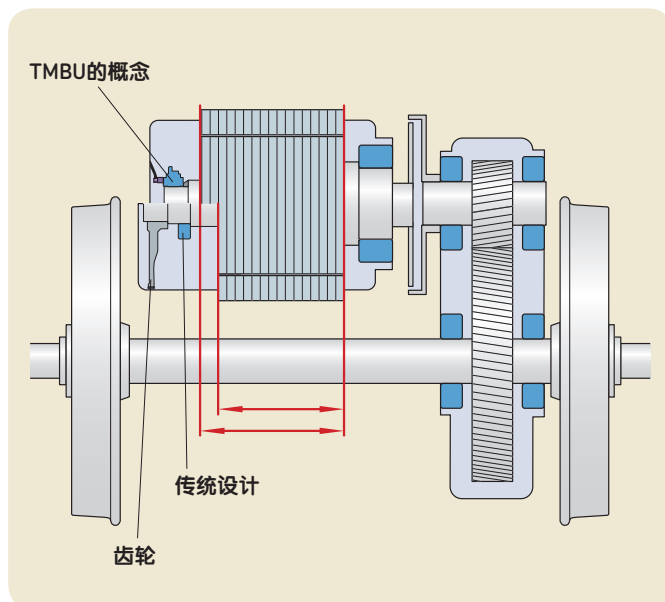
TMBU的概念包含一个基于深沟球轴承设计的预润滑并且密封的轴承单元。可用于牵引电机的非传动端(→第5章)。

旋转脉冲环直接通过法兰安装在TMBU上,而传感器固定在外圈上。

实施

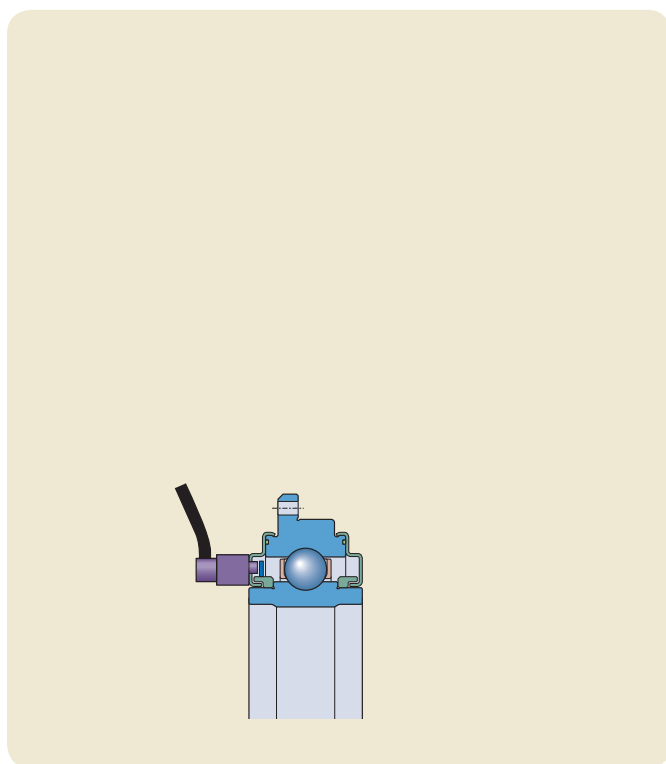
TMBU整合到牵引电机设计中,可供制造商节省轴向方向上的空间。因此,包括活动转子长度在内的牵引电机总长度可以增加,并实现更高的额定功率。

TMBU安装在转子轴上,而牵引电机中间轴承座安装在法兰外圈上。预安装的装配将轴向移动进入牵引电机定子。有关进一步详细信息,请参见第10章。

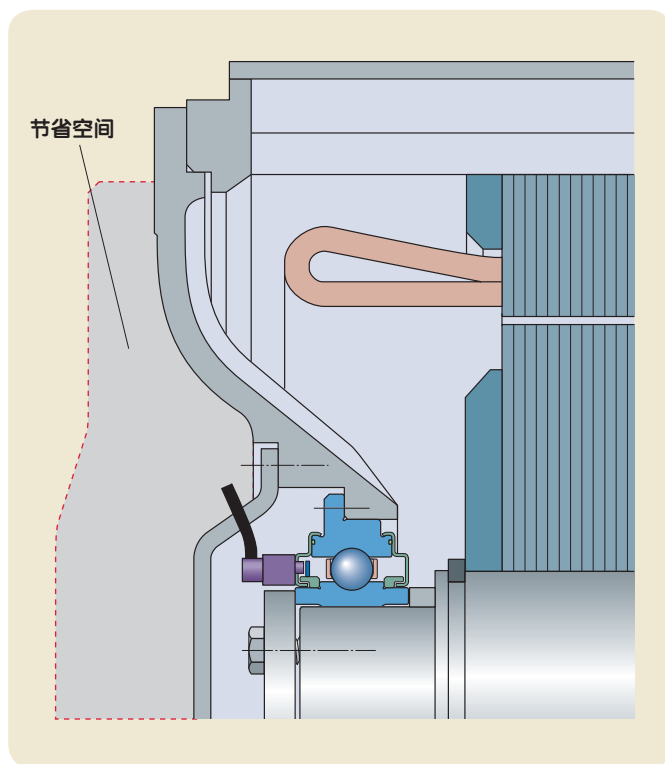


活动转子长度比较

牵引电机轴承单元(TMBU)



实施示例



速度传感器

速度传感器中包含一个代码环，与轴承的旋转内圈相连。该代码环通过北磁极和南磁极的序列进行磁化。该传感器本体内的磁场传感器可以检测到磁场的变化，并将其转化为数字信号。

轴的每次旋转都会产生一个预定义的脉冲数。传感器还可以提供旋转速度和增量输出。



配有速度传感器的陶瓷牵引电机轴承单元

速度传感器 – 技术数据

机械数据

| | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|------|-----|--------------------|-----|----|
| 电缆长度 | - | 定制 | - | m |
| 安装位置 | | 径向 ¹⁾ | | |
| 连接器 | | 开放端为标准配置， 可进行定制 | | |

¹⁾ 轴向可应要求提供

电气数据

| | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|---------------------|---------------|---------------|---------------------|-------|
| 电源电压 | 4,75 | 12 | 30 | V |
| 电源电流 | 15 | 28 | 40 | mA |
| 推拉输出 ¹⁾ | 0 | | 0,8 | V |
| (载荷 = 20 mA) | $V_b - 2,5$ V | | V_b | V |
| 速度和温度范围之外的 传感器精度 | -0,1 | | +0,1 | ° |
| 传感器解析度 | 122 | ²⁾ | 7 808 ³⁾ | ppr |
| 允许旋转速度 | 0 | | 10 000 | r/min |
| 测量范围 | 0 | | 360 | ° |

¹⁾ 可提供类似于RS485的输出

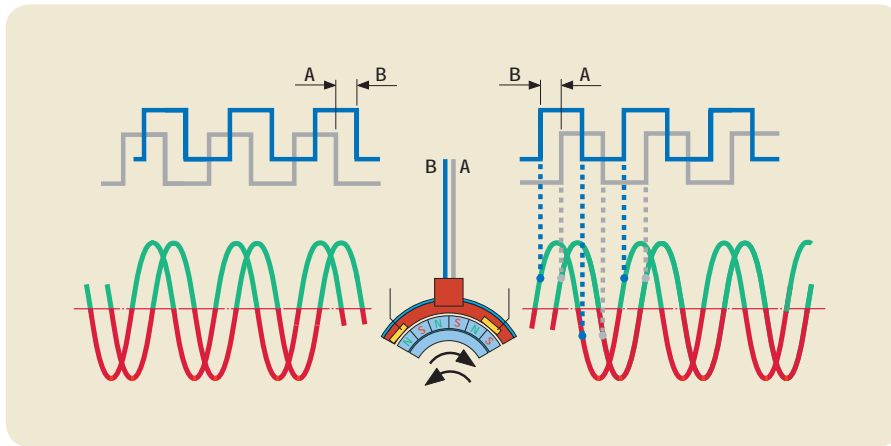
²⁾ 取决于轴承尺寸

³⁾ 对于孔径为65 mm的轴承尺寸有效。更大的尺寸需要更高的解析度。

环境数据

| | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|--------|---|-----|------|----|
| 操作温度 | -40 | 20 | +125 | °C |
| CE/EMC | 符合EMC指令2004/108/EC， 谐振标准 EN 50121-3-2 (2006)铁路 | | | |
| 保护级别 | IP 67 | | | |
| 冲击和振动 | 符合EN 61373第2类 | | | |

速度传感器的输出是具有90°相位差的两个矩形脉冲信号，可供确定旋转方向。



旋转方向检测

速度传感器具有2个输出：A和B。由于A和B输出之间存在相位变换，还可以确定旋转方向。绝对位置传感器具有序列数据输出，可以以二进制的格式提供角度。其他输出可应要求提供。

SKF的集成传感器可以提供速度和增量或者绝对位置的信息。由于在轴承中集成了传感器，该解决方案极为牢固。在苛刻环境中可以同时保护电气与机械性能。

SKF传感器轴承和轴承单元结合了轴承功能以及传感器电子元件。集成的增量传感器能够以极高的解析度和精度来探测轴速度和旋转方向。

输出脉冲数最高为代码环极数的64倍。

极数取决于轴承直径，例如，对于深沟球轴承6213为122。此外，可以提供选项参考位置以及温度，或速度和方向传感器的冗余配置。非接触式传感的原理可以帮助确保更长的运行寿命。SKF的集成增量传感器对电磁扰动具有极高的耐受性，从而可以生成可靠的输出。

以64 mm的孔径规格开始提供，与滚子轴承相集成可以为多种工业应用提供优势，例如牵引电机、电机，以及齿轮等。

速度与绝对位置传感器

对于用于牵引电机的更加精密的交流推进系统，需要为转子采用精度极高的绝对位置检测。SKF开发出了全新的传感器技术，可以在360°范围内实现 $\pm 0,075\%$ 的位置精度。例如，其解析度可以为每转5632个脉冲。该传感器系统可以用于全通轴应用，以及轴端应用。完整的传感器单元已通过铁路标准EN 61373测试以验证其耐冲击和振动性能。其电磁兼容性符合国际标准。传感器带有CE标志以表示符合欧洲指令的关键性健康和安全性要求。

SKF传感器轴承与轴承单元整合了轴承功能和传感器电子元件。

集成式绝对位置传感器HAPS(高解析度绝对位置传感器)能够以极高的解析度和精度来探测轴位置。

该传感器针对电机编码功能优化，可以在转子极中提供绝对转子位置。该传感器单元可以定制以在最好的程度上符合客户需求^[33]。

产品选项包括温度传感器、速度传感器HS(集成增量传感器)或位置、速度和方向冗余传感器。由于采用了非接触传感设计，可以有助于实现较长的运行寿命。SKF集成增量传感器对电磁扰动具有极高的耐受性，并可以生成可靠的输出。与滚子轴承相集成可以为多种工业应用提供优势，例如牵引电机、电机，以及齿轮等。

位置传感器已通过SKF校准，可供立即安装使用-无需任何设置。



配有速度传感器和绝对位置传感器的陶瓷牵引电机轴承单元

速度和绝对位置传感器-技术数据

技术数据

| | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|------|-----|-----|-----|----|
| 电缆长度 | - | 定制 | - | m |
| 安装位置 | | 轴向 | | |
| 连接器 | | 开放端 | | |

电气数据

| | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|-------------------------------|-----------|--------------------|-------------------|-------|
| 电源电压(HAPS, IIS) ¹⁾ | 10 | 12 | 30 | V |
| 电源电流(HAPS) | 40 | 140 | 200 | mA |
| 电源电流(IIS) | 15 | 50 | 100 | mA |
| 输出 ²⁾ | RS485兼容输出 | | | |
| 传感器精度(HAPS) | -0,075 | | +0,075 | % |
| 传感器精度(IIS) | -1 | | +1 | % |
| 传感器解析度(HAPS) | | 5632 ³⁾ | | ppr |
| 传感器解析度(IIS) | | 440 ³⁾ | | ppr |
| 允许旋转速度 | 0 | | 750 ⁴⁾ | r/min |
| 测量范围 | 0 | | 360 | ° |

¹⁾ HAPS = 高解析度绝对位置传感器, IIS = 集成增量传感器

²⁾ HAPS 角度由数据帧提供, 其他输出应要求提供。

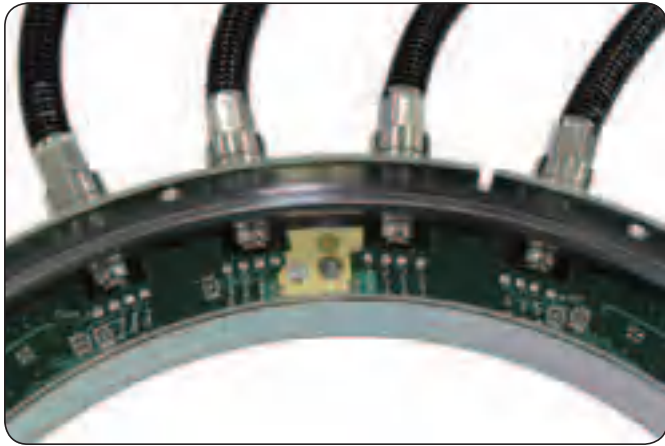
³⁾ 全部旋转传感器解析度针对应用优化。

⁴⁾ 更高的速度尚未测试。

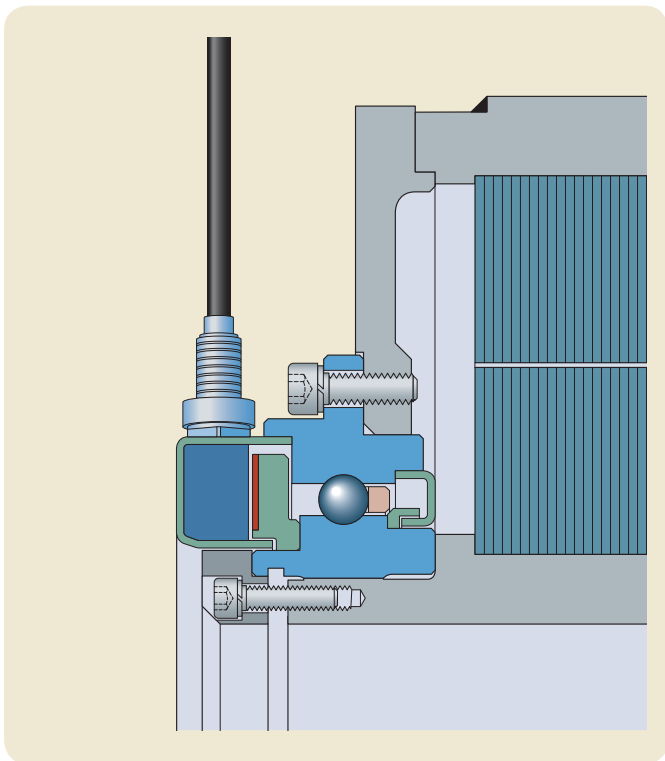
环境数据

| | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|--------|---|-----|------|----|
| 操作温度 | -30 ¹⁾ | 20 | +105 | °C |
| CE/EMC | 根据EMC指令2004/108/EC, 传感器符合铁路谐波标准 EN 50121-3-2 (2006) | | | |
| 保护级别 | IP 67 | | | |
| 冲击和振动 | 符合EN 61373第2类标准 | | | |

¹⁾ 更低的最低温度设计可应要求提供



用于绝对位置检测的
传感器设备



配有TMBU和绝对位
置检测传感器的牵引
电机

9 状态监测

| | |
|-------------------|-----|
| 性能 | 191 |
| IMx-R在线系统 | 195 |
| 监测原理 | 196 |
| 验证测试 | 201 |
| MICROLOG分析仪 | 207 |
| 应用 | 208 |



状态监测

状态监测是一种成熟的技术，可以提供新的功能来增强安全性与可靠性，并延长维护时间间隔。通过使用状态探测系统并为数据处理应用精密的算法，可以探测到初始损坏。这样，在严重的机械破坏或失效发生前，就可以提供充足的时间进行维修。

性能

状态监测是一种监测机械设备中条件参数的过程。对数据的解析基于可表现发展为失效的破坏过程的显著变化。该过程可以构成预防性维护程序的基础。可以供维护人员使用基于状态的维护程序来采取措施，从而在失效发生前，使失效的可能后果降至最低程度。

与传统的基于里程和时间的维护所不同，基于状态的维护可以用于利用组件的最高性能。在可以计划完整的转向架大修的情况下，传动系统的维护时间间隔可以基于真实的车轮寿命，从而优化维护成本。用于铁路状态监测的SKF Multilog在线系统IMx-R可用作实现较高可靠性与安全性的工具，同时延长维护时间间隔。

状态监测是一种有效的技术，可为传动系统提供新的功能。铁路行业现在对

采取积极的方式充满兴趣，致力于实现经济与安全的目标。

SKF Multilog在线系统专为铁路应用而开发，例如IMx-R等，可提供功能强大、经济节省的替代解决方案。SKF Multilog IMx-R采用多种模块化传感器来同时监测并传输一系列转向架操作状态数据，与SKF @plitude Observer软件一同使用，构成一套完整的机械状态监测与保护系统。

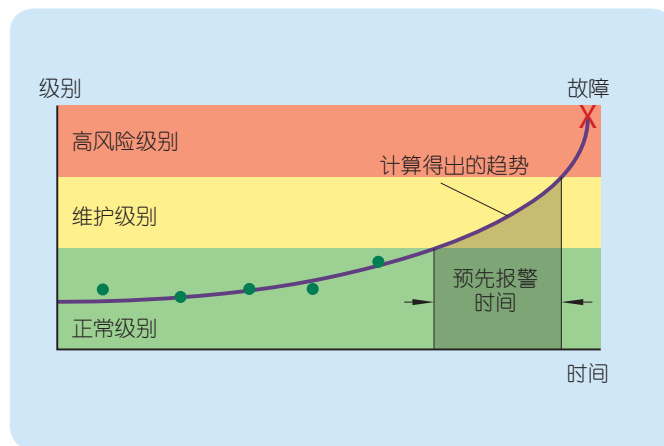
在实现初始损坏探测的同时，SKF Multilog IMx-R可以自动生成更正措施的建议，用于现有或即将发生的状态。该系统还可提供与载荷和速度有关的自动报警和警告。可以触发板载和外部的通讯设备，采用数据处理功能来进行自动诊断，并执行根本原因分析。此外，可以使用日期来联系维护管理系统，进行日程安排、备件和工作单管理，以及执行终端用户、系统以及基于Web的数据访问。

牵引电机和齿轮箱组件，例如轴承、齿轮和转子条等，以及轴和联轴器，都可以采用作为转向架状态监测系统组成部分的振动传感器进行监测。齿轮箱油温和油位可以结合到转向架状态监测系统中。来自推进组件的振动特征将根据施加的实际牵引操作而有所变化。这意味着在数据处理过程中需要考虑有关车辆速度和载荷的信息，以及特定的几何参数和齿轮箱减速比。

传统系统状态监测功能可以作为完整的转向架监测系统的组成部分，进一步探测例如转向架调速、车轮状态以及轴箱轴承状态等参数。

转向架状态监测包括用于运行不稳定性探测的各种传感器，符合欧洲互操作性技术规范(TSI)指令96/48 EC的要求。TSI规定，对运行稳定性的监测必须保持连续状态，或在提供可靠、早期损坏探测的速度下进行。对于第1类车辆，该系统必须与板载里程记录器单元(JRU)连接，从而可以实现可跟踪性的要求。更多信息可在SKF铁路技术手册第1卷第8章中获得^[34, 35, 36]。

转向架的所有旋转组件都可产生典型的振动波谱。这就使其可以通过频率间隔分析来识别出每一种组件。

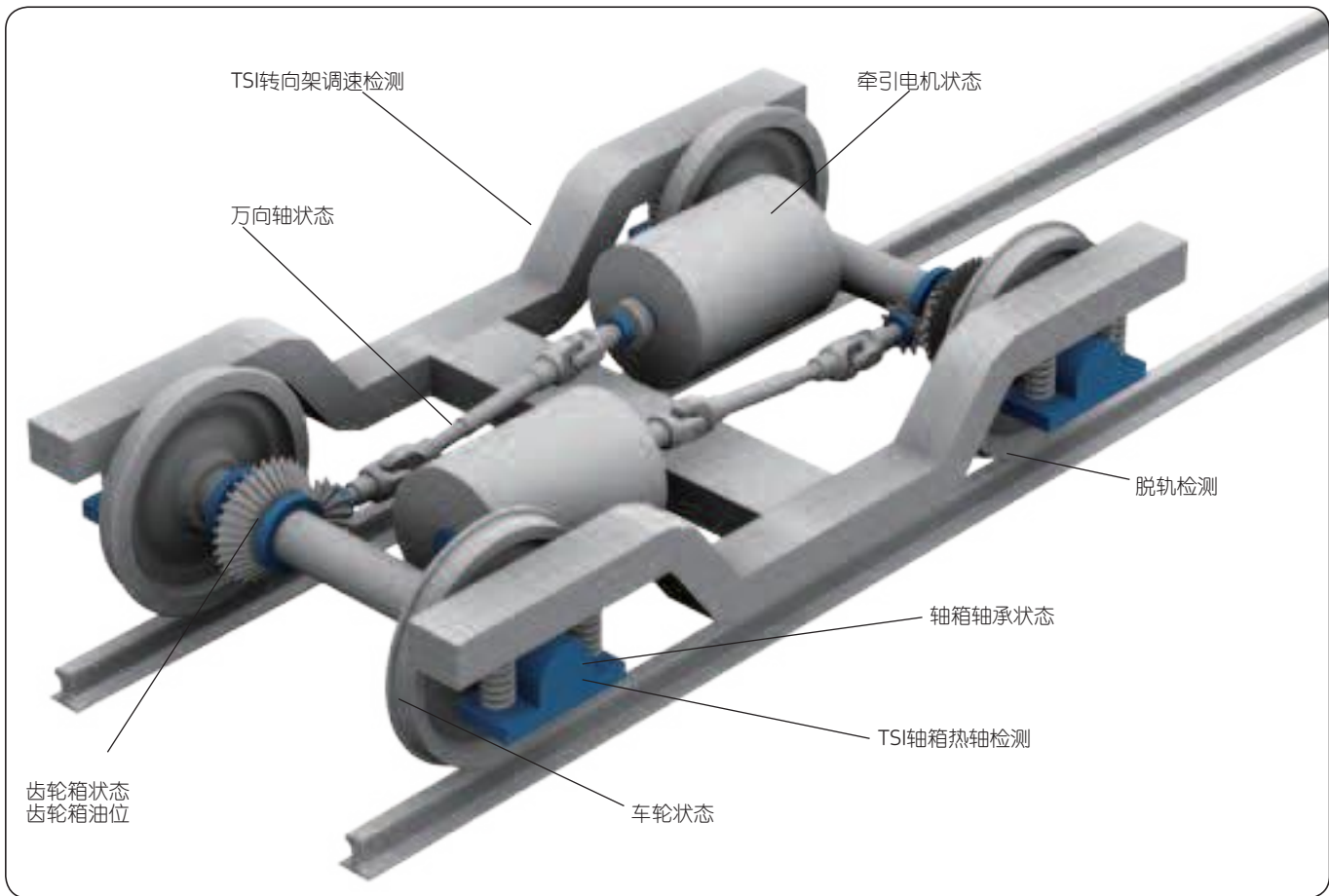


通过趋势观测进行失效保护

转向架状态监测的性能

与传动系统有关的性能和功能

| 子系统 | 检测参数 |
|----------|---|
| 车轮 | 车轮外形/失圆度 |
| 轴箱齿轮 | 温度 与其他轴箱轴承相比的相对温度 早期轴承损坏 振动水平 |
| 齿轮箱(变速箱) | 轴承温度 早期轴承损坏 失衡 不对中 轴探测 松动部件 振动水平 损坏的齿轮 共振 |
| 齿轮箱油 | 油温 油位 |
| 牵引电机 | 轴承温度 早期轴承损坏 振动水平 |
| 万向轴 | 失衡 损坏的联轴器 |

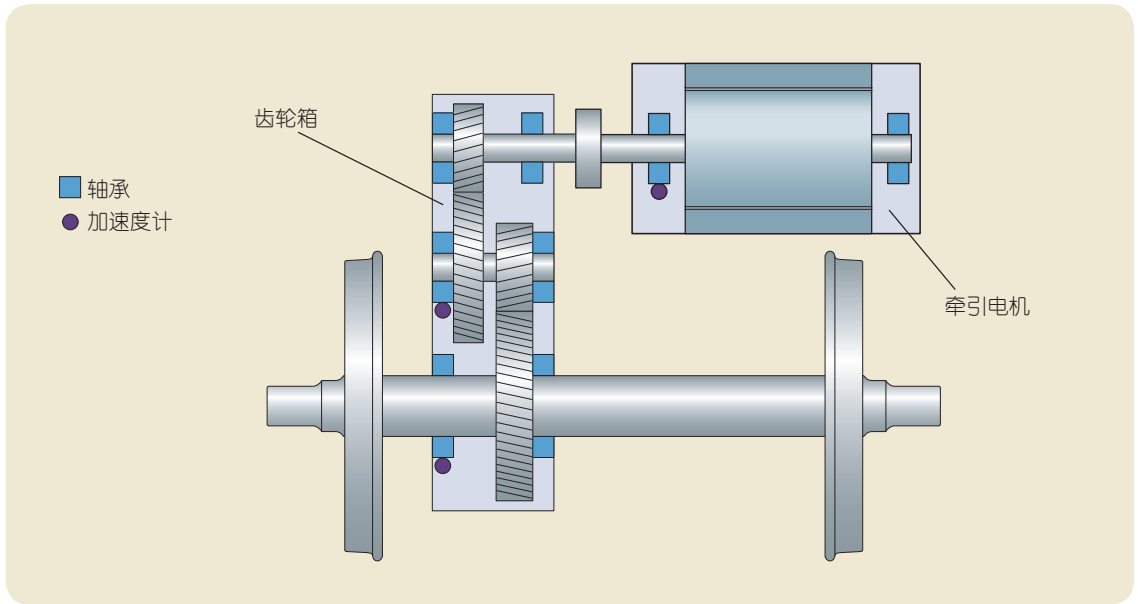


传统系统状态监测可以作为完整的转向架监测系统的一个组成部分，进一步探测例如转向架调速、车轮状态和轴箱轴承状态等参数^[1]

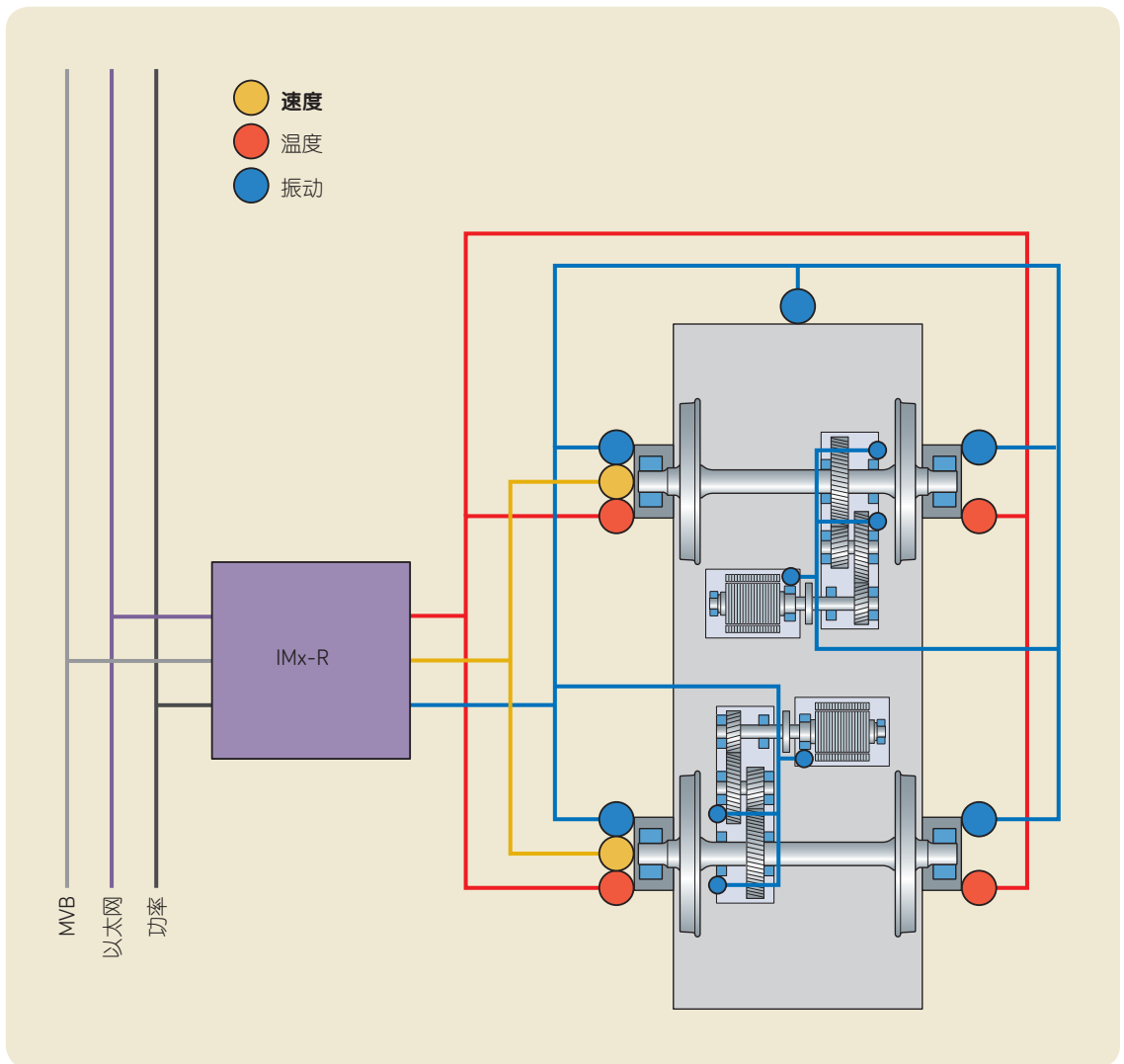
状态监测的优点

- 提高车辆服务的可靠性
- 降低运营商的维护成本：
 - 在极早期通过损坏检测来降低运营成本，从而优化维护计划
 - 缩短车辆停机时间
 - 降低对维护的需求
 - 减少维护的加班工作
- 优化备件物流

减少了振动测量点的齿轮箱和牵引电机的原理示意图，表示每台齿轮箱和每台牵引电机只有一个传感器。该配置更加经济节省，但是潜在的失效问题仅在更为高级的阶段才能检测出。



IMx-R系统设计，用于转向架摆动和轴箱的振动监测和诊断，此外还有轴箱热轴探测



IMx-R在线系统

SKF Multilog IMx-R在线系统是用于铁路车辆的功能强大、经济节省的新一代解决方案。与SKF @ptitude Observer软件结合使用，IMx-R可以提供一套完整的系统来改善机械的可靠性、可用性以及性能。要实现该功能，可以提供早期损坏探测和自动化建议，从而更正现有或即将发生的状态，并实现基于状态的高级维护。

除了模拟通道外，还使用四个数字通道来测量速度、触发或数字状态，例如在可以进行测量时做出提示。可以将多个测量点附加到一个通道。交流和直流测量都可在一个相同的通道上实施。独立的报警和警告状态可以为每个点单独设置。报警和警告级别可以通过设备速度或载荷进行控制。

作为一套机械状态监测和保护系统进行运作，并与许多其他单元一起工作在SKF @ptitude Observer监测软件的网络中。该系统甚至可以在现有的LAN中运行，与其他计算机、打印机、服务器等一起工作，或在互联网中运行。

该单元独特的内置硬件自动诊断系统可以连续检查所有传感器、布线和电子设备中是否存在任何损坏、信号中断、短路或电源故障。任何故障都可触发警告。在系统电源故障的情况下，系统将在电源恢复时自动重新启动。



SKF Multilog IMx-R
在线系统

监测原理

轴承损坏频率由滚动体在外圈或内圈的剥落(掉下极小的材料碎片)上生成;滚动体的剥落可生成特定的频率。保持架频率基于在最佳状态下与滚动体中心的旋转速度吻合的保持架的角转速。该保持架频率的幅度在振动波谱中通常非常低,但是在考虑了在6 000 r/min下运行的高转速设备的情况下将更为明显。在该情况下,幅度在很大程度上与轴承中的间隙以及轴承座的圆度有关。

以下解释基于内圈旋转和外圈静止的最常见的应用情况。

由于全部四个频率都与内圈速度成正比,这些频率在考虑一赫兹的内圈固定速度后将正常化。为了获得实际的缺陷频率,应将轴的旋转频率乘以表中所述公式中所得的值。

SKF包络技术

SKF包络技术从根本上说是一种解调过程,可以过滤出轴承内圈或外圈剥落的滚动体所产生影响过程中所产生信号的指数衰减部分。SKF包络原理基于希尔伯特变换¹⁾。

原则上说,包括是与实际信号有关的分析信号的模数。

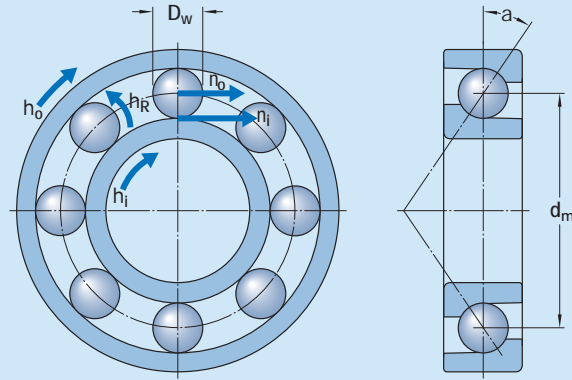
该方法可用于显示在所需频率范围内等距间隔的脉冲序列。

由于失衡造成的振动幅度较大、不对中等,轴承信号一般隐藏在振动信号的结构中。为了获得有效的SKF包络,可以应用带通滤波器来取消掉由于该型结构振动所产生的部分信号。

加速度SKF包络过程可将与轴承损坏谐波有关的能量进行分组,并排除所有其他能量。实际结果可以增强周期脉冲序列所形成的信号。

¹⁾ 根据David Hilbert (1862–1943)命名

轴承球体通过内圈/外圈滚道和球体滚动频率



内圈的轴承球体通过频率(BPFI)

$$BPFI = \frac{z}{2} \left(1 + \frac{D_w}{d_m} \cos \alpha \right)$$

其中

BPFI = 内圈的轴承球体通过频率，在该频率下滚动体通过内圈滚道。表示内圈滚道的损坏情况(裂缝或剥落)

z = 每行滚动体中的滚动体数

D_w = 滚动体直径

d_m = 滚动体节径

α = 接触角

外圈的轴承球体通过频率 (BPFO)

$$BPFO = \frac{z}{2} \left(1 - \frac{D_w}{d_m} \cos \alpha \right)$$

其中

BPFO = 外圈的轴承球体通过频率，在该频率下滚动体通过外圈滚道。表示外圈滚道的损坏情况(裂缝或剥落)

球体滚动频率 (BSF)

$$BSF = \frac{d_m}{2D_w} \left[1 - \left(\frac{D_w}{d_m} \cos \alpha \right)^2 \right]$$

其中

BSF = 球体滚动频率，轴承元件在轴承中旋转的频率。表示每个独立滚动体的损坏情况

保持架损坏频率 (FTF)

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{D_w}{d_m} \cos \alpha \right)$$

其中

FTF = 基本群频，保持架可以保持旋转的滚动元件的频率。表示保持架的损坏情况

技术描述

IMx-R设计用于在全球各地的典型铁路环境下操作，符合客户规格、铁路运营商标准和国际标准的规定。IMx-R符合EN 50155有关电气兼容性(EMC)、冲击和振动水平以及环境温度的规定。

| 参数 | 条件 |
|-------|--|
| 环境温度 | EN 50155, TX级别 |
| 湿度 | 最高95%冷凝 |
| EMC | 符合EN 50121-3-2标准。 测试过程中的最高噪声级别：传感器灵敏度100 mV/g，热轴检测 HABD = 2 °C |
| 高度 | 符合EN 50155标准，使用高达1 200 m高度 |
| 振动和冲击 | 符合EN 61373标准，1B类别 |
| 封装 | IP20(EN 60529) |
| 电源 | 电源中断符合EN 50155，第3.1.1.2章，S2级别 |

IMx-R设计详细信息

- 符合TSI规范UIC 515-1
- SIL安全完整性级别2应要求提供(安全仪器功能所需的性能测量)
- 安装于19"机架上
- 所有通道真正的同时测量
- 多参数选通
- SKF加速度包络
- 自适应警告级别
- 通讯停机后在永久性记忆体中进行数据缓冲
- 输出继电传动装置
- SKF @ptitude Observer完全支持

IMx-R参考标准

| 文档编号 | 文档标题 |
|----------|-----------------------------------|
| EN 50155 | 铁路应用-轨道车辆使用的电子设备 |
| EN 50126 | 铁路应用-可靠性、可用性、可维护性和安全性(RAMS)的规格与演示 |
| EN 50128 | 铁路应用-通讯、信号和处理系统-铁路控制和保护系统的软件 |
| EN 50129 | 铁路应用-通讯、信号和处理系统-用于信号设备的安全相关电子系统 |
| EN 61373 | 铁路应用-轨道车辆设备-冲击和振动测试 |

状态监测传感器

除了SMF Multilog IMx-R状态监测系统和SKF @ptitude Observer软件外，SKF还提供多种其他解决方案用于探测速度、温度和振动等操作参数。

传感器牵引电机轴承单元已在**第8章**中讨论。

速度信号可在轮对上通过SKF Axletronic解决方案进行监测^[37, 38]。有关更多信息，请参阅SKF铁路技术手册第1卷。



混合陶瓷牵引电机轴承单元
左：配有速度传感器
(→第184页)
右：配有速度和绝对位置传感器
(→第187页)



SKF Axletronic传感器轴箱轴承单元



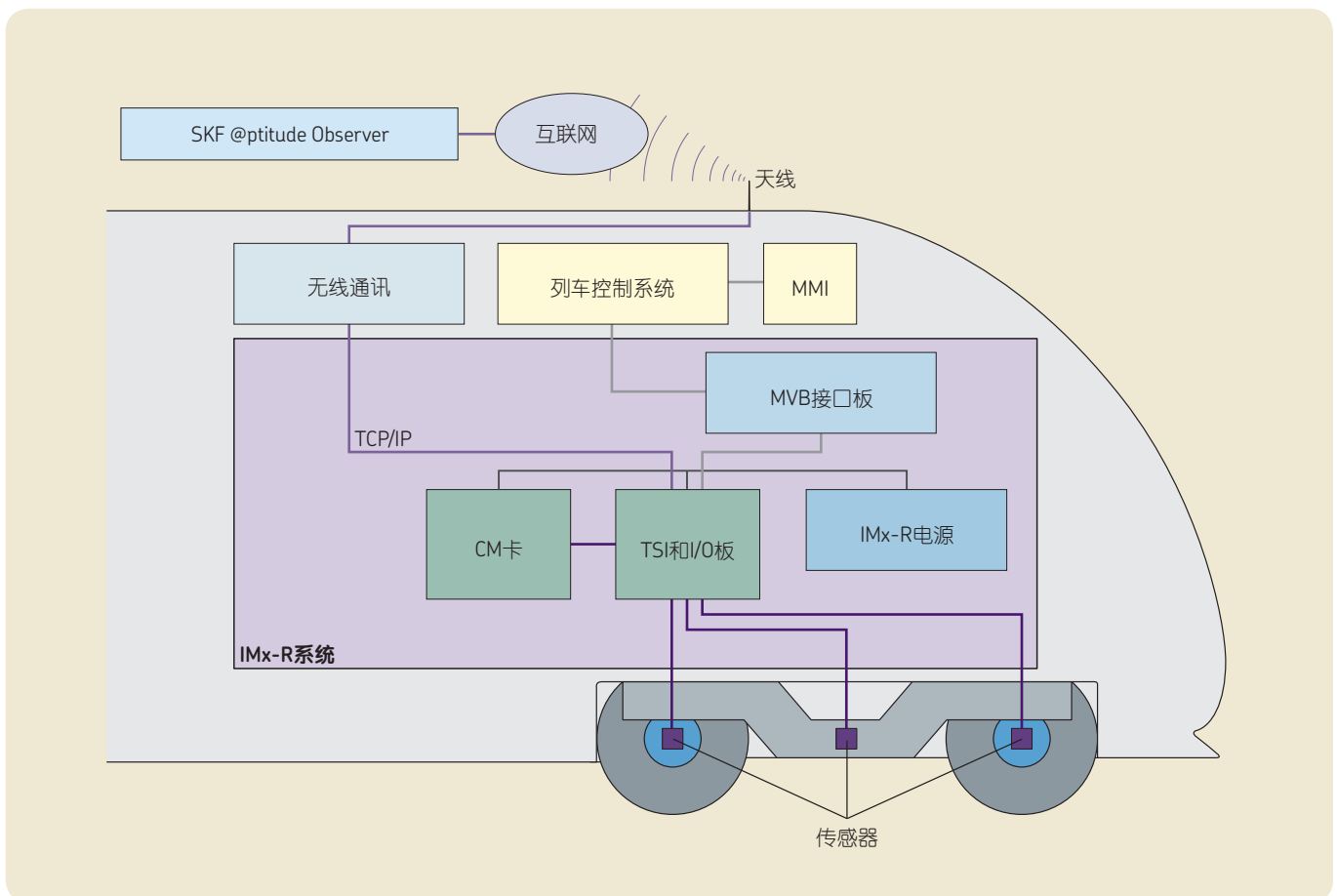
配有前盖和AXLETRONIC传感器的轴箱

SKF @ptitude Observer分析软件

IMx-R的一个任务就是在符合TSI标准进行观测的情况下监测并实时报告轴承温度。此外，IMx-R可以监测轮对、轴箱、牵引电机、齿轮箱和万向轴的状态。

热箱轴箱探测和转向架调速探测以及状态监测的结果存储在SKF @ptitude Observer的数据库中。来自IMx-R的结果将通过SKF @ptitude Observer机器诊断系统进一步处理为机器状态结果，例如趋势和清晰的文本消息，显示探测到的机器损伤。这些结果可以通过SKF @ptitude Observer方便地进行访问。

IMx-R监测系统及其边界



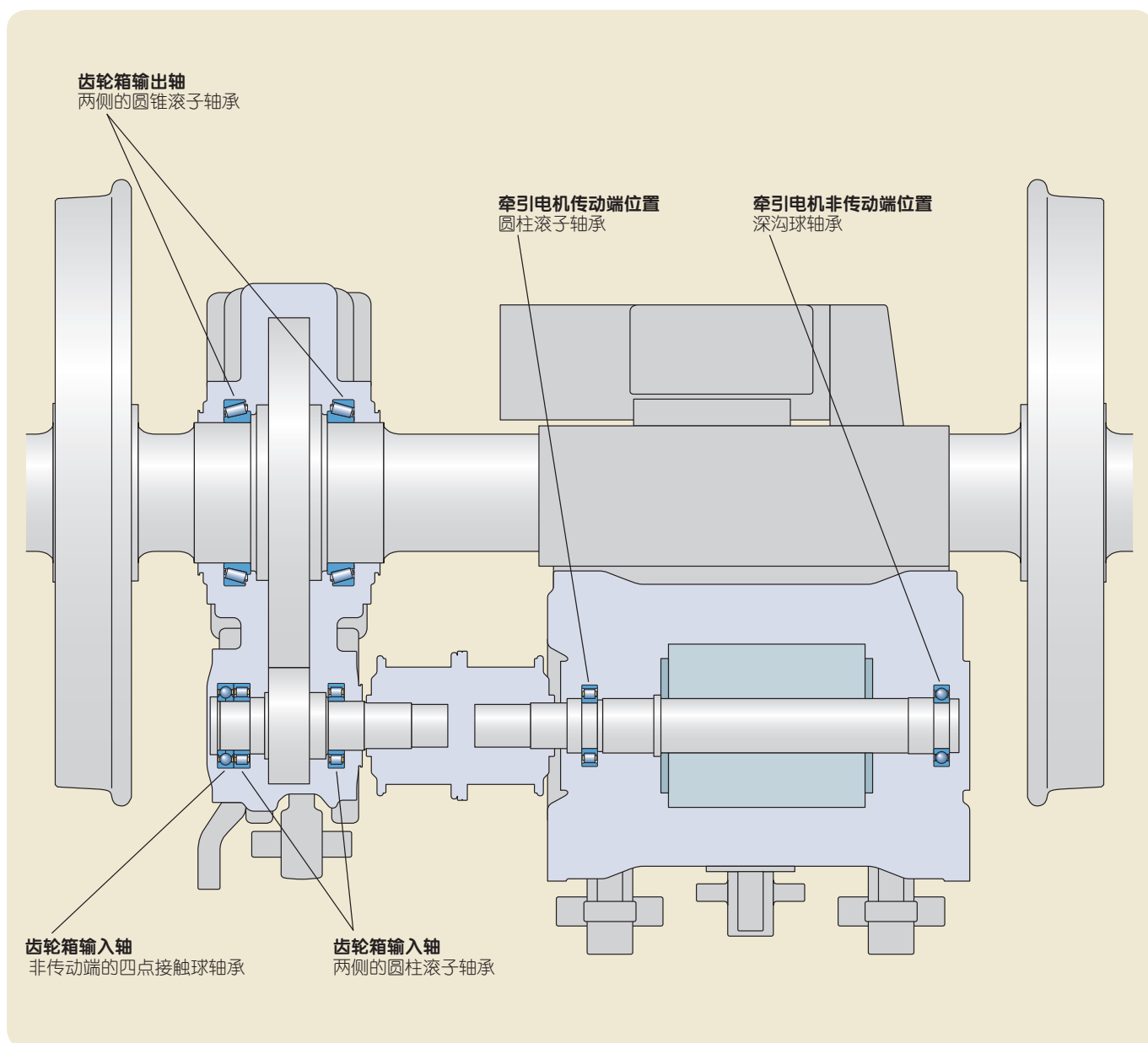
验证测试

为了验证IMx-R系统提供的状态监测数据，SKF已经采用实际的传动系统开展了广泛的研究^[39]。重点在于重现列车服务中所测得牵引系统运行中极重的噪声和动态行为状态。SKF开发了试验台来重现车辆和轨道条件互动所导致的悬挂的运动学以及振动。长期测试基于不同的操作条件，例如电机扭矩和速度等。对牵引电机和竖向、横向和纵向上的轴安装齿轮之间的相对运动进行了模拟。

感谢

感谢庞巴迪运输公司授权发布本报告中的详细信息，如以下引用中所述^[38]。

传动系统验证
测试配置



对现场运行过的典型轴承，以及多个故意人工损坏的轴承，在实验室中进行了测试。作为这些应用中一种极为典型的情况，齿轮箱轴承使用润滑油进行润滑，而牵引电机轴承则使用润滑脂进行润滑。

牵引电机和齿轮箱验证测试的这些示例确认了可以识别已安装轴承状态的能力。在各种极为不同的运行条件下，例如速度、运动方向和载荷等，总共测试了43种不同的损坏和非损坏轴承工况。所有轴承损坏都使用IMx-R系统进行测试。这些测试由意大利Fondazione Politecnico di Milano公司位于米兰大学的联合运输研究中心执行，该机构为一家独立的研究机构^[39]。

验证测试主要结果概述

- SKF Multilog IMx-R系统能够检测多种不同运行条件下的轴承损坏情况。
- 较重的轴承载荷可以提高损坏表现结果的可见性与稳定性。
- 温度可以影响对损坏的检测能力，具体取决于润滑剂的类型，例如润滑油和润滑脂等。例如，润滑脂可以隐藏较低轴承温度下较小的损坏，例如，在测试的开始阶段。
- 该研究进一步说明了局部温度等常规指标不足以检测早期阶段的失效，从而有必要安装加速度计。

牵引电机轴承验证试验

传动端位置的圆柱滚子轴承

传动位置处的牵引电机轴承从现场获得，并经过清洁、补充润滑和重新使用以供验证测试。

以下频率图并未显示出相关的峰值，从而可以确认良好的轴承状态。



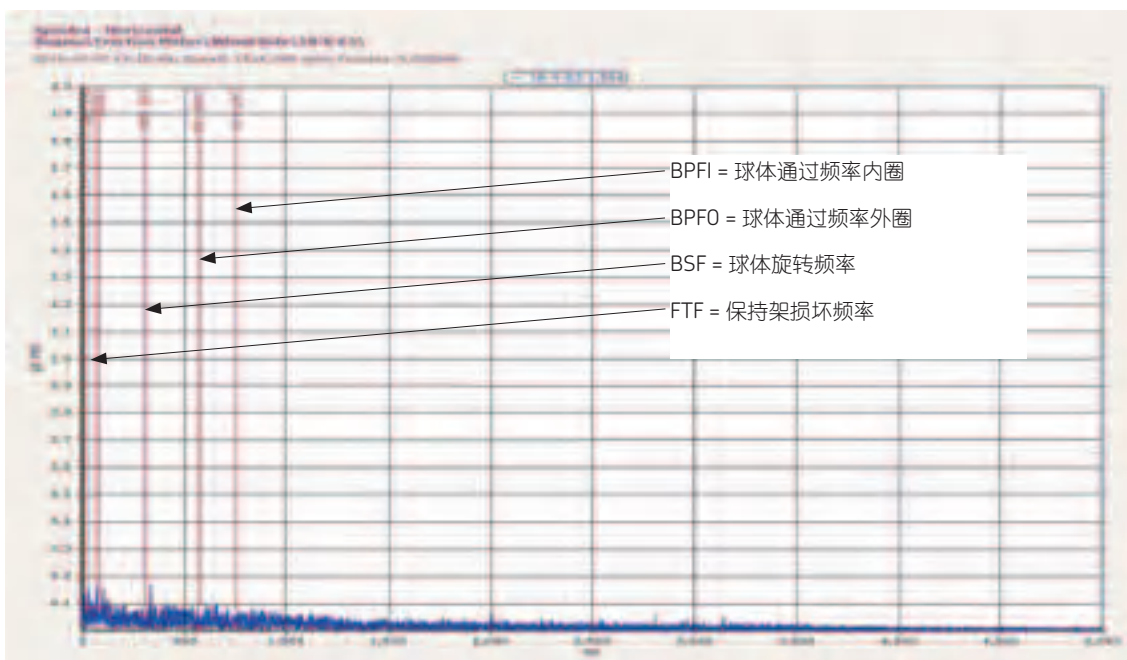
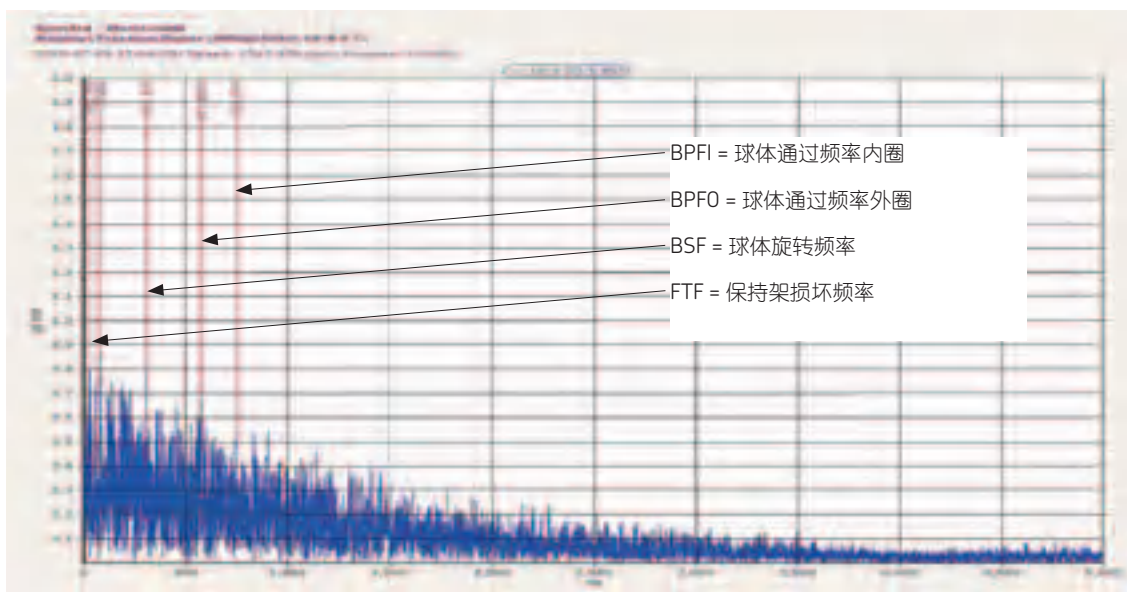
内圈



外圈



保持架和滚子装配



非传动端位置的深沟球轴承

非传动位置处的牵引电机轴承从现场获得，并经过清洁、补充润滑和重新使用以供验证测试。

以下频率图并未显示出相关的峰值，从而可以确认良好的轴承状态。



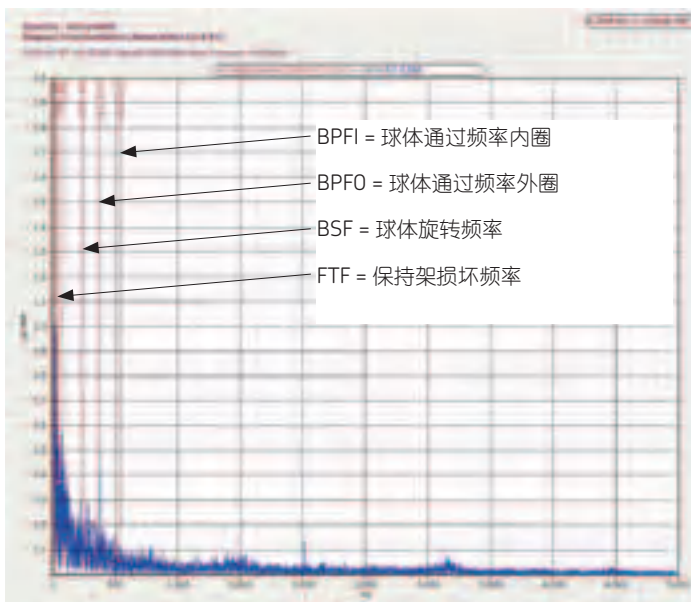
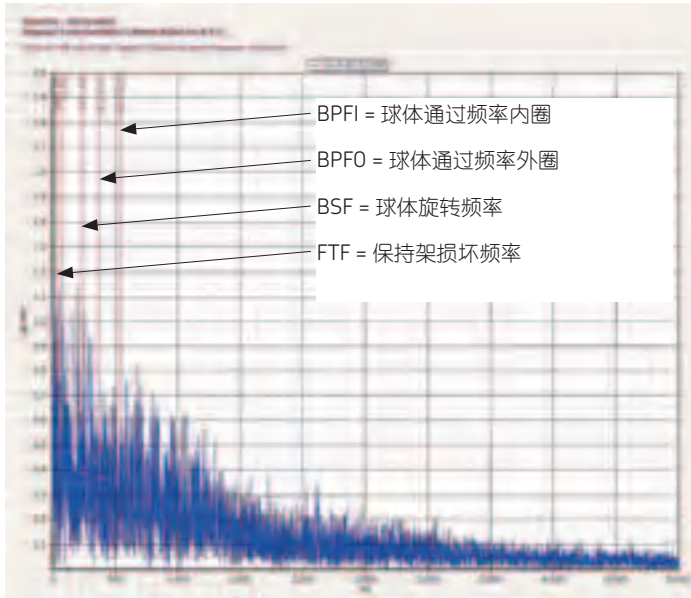
内圈



外圈



球体



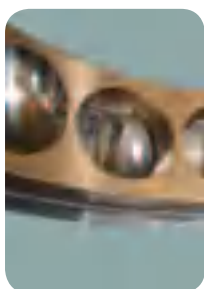
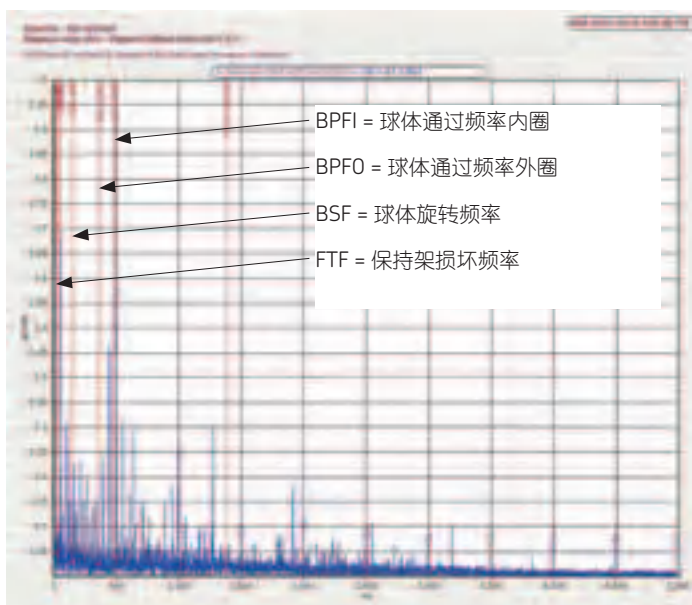
齿轮箱轴承验证测试

输入轴位置的损坏的四点接触球轴承

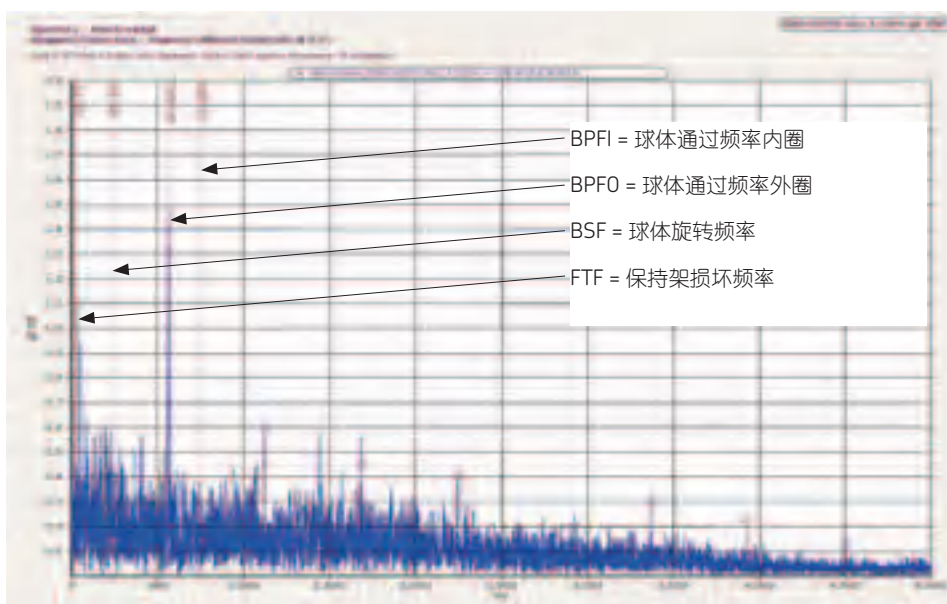
内圈和球体损坏的轴承用于确认状态监测设备的结果。两个图都显示出峰值处与球体和内圈有关的频率。



损坏的四点接触球轴承内圈



四点接触球轴承组件

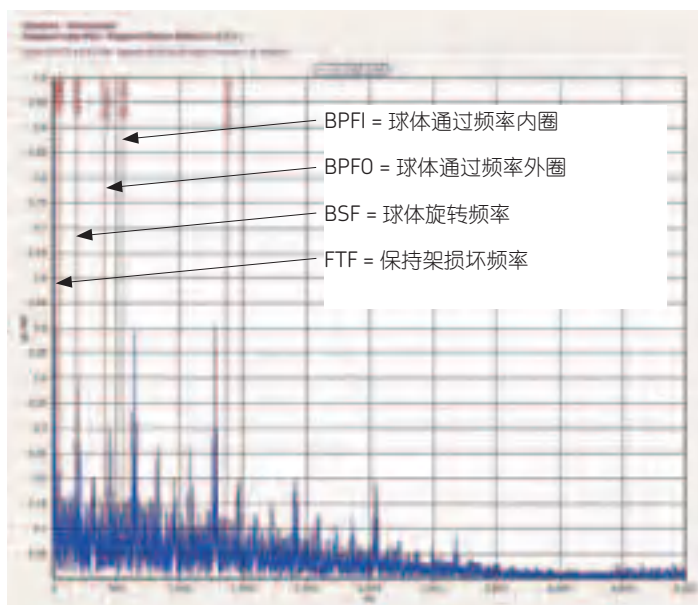


输入轴位置，损坏的圆柱滚子轴承

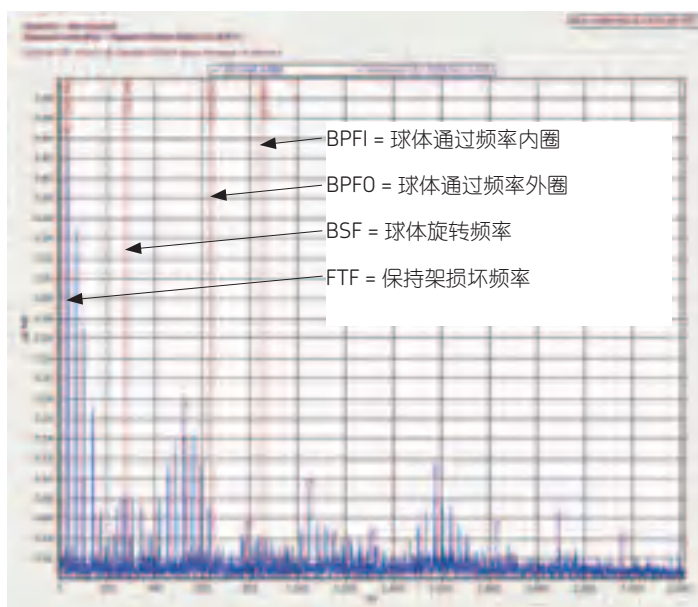
滚子和保持架人工损坏的轴承用于确认状态监测设备的结果。两个图都显示出峰值处与滚子和保持架有关的频率。



保持架损坏



滚子损坏



MICROLOG分析仪

SKF Microlog分析仪的范围使用多达四个通道(与型号有关), 通过分析振动信号和过程变量, 可以解决执行状态监测中遇到的困难。添加此选项可以执行一个或两个平面的静态或动态耦合平衡、瞬态分析(波特图、尼奎斯特、瀑布和光谱图)、模态和操作挠曲形状分析, 并且可以记录要进一步后处理的原始信号, 而这些功能都可作为可选的升级应用方式, 供SKF Microlog分析仪作为一项重要的工具来协助用户维持资产运转。轴承评估采用业界广为认可的SKF加速度包络(gE)技术执行。SKF Microlog的系列采用模拟和数字电子技术方面的最新进展, 包括数字信号处理(DSP)和高解析度sigmadelta模数转换器, 从而在数据采集过程中提供速度与精度。

MICROLOG CMXA系列

SKF Microlog CMXA系列仪器是当今SKF所提供最先进的分析仪。根据现在可用的应用模块, 该设备可同时适用于高级用户以及新用户。

提供两种新的硬件选项, 包括屏幕较大的4通道仪器或屏幕较小的3通道仪器, 可根据单独的要求进行配置。该分析仪以全功能配置进行供货, 但是也极具经济性, 可以确保只支付所需的功能, 而应用则通过许可密钥进行激活。这就可供用户根据自身需求完成设备的配置, 并确保在用户使用该设备时才激活升级功能。

SKF Microlog产品系列可与SKF @plitude Analyst软件无缝连接进行基于路径的数据分析, 或与SKF分析和报告模块软件无缝连接以进行独立分析。

技术描述

- 同步的三通道或四通道测量以进行快速数据收集
- 806 MHz XScale Intel处理器实现更快的实时速率和显示更新
- 结构坚固的防尘/防水IP 65设计, 提高工业环境中的可靠性
- 可充电锂电池支持八小时的连续数据采集作业
- 0.16 Hz至40 kHz(小屏幕)或80 kHz(大屏幕)频率范围, 分辨率高达25 600行



SKF Microlog CMXA
大屏幕采用0.16 Hz至80 kHz的频率范围, 分辨率高达25 600行



SKF Microlog CMXA
小屏幕采用0.16 Hz至40 kHz的频率范围, 分辨率高达25 600行

应用 机车

第一台转向架在线状态监测应用于2001年推出，安装了早期的SKF MasCon16R铁路系统。SKF与瑞典的MTAB铁矿石铁路运营商签订了长期合同，从而提高14台Dm3型三联机车的可靠性。这些机车在瑞典和挪威之间的Kiruna – Narvik的线路上运行。其目的在于提高可靠性并且避免轴箱、牵引电机和齿轮箱等设备问题所导致的计划外停机。在此之前，众多的机械停机问题都导致需要将发生故障的机车与列车从单轨道线上拖走，从而损失大量的时间并造成可观的成本。在SKF的监测与排程维护过程中，未发生任何计划外停机。这些机车在2005年时停止服务，而当时新一代的机车已开始投入运营。通过与SKF的合同，MTAB大幅度节约了成本，并增强了车辆的可靠性。

动车组车辆和公共交通工具

许多不同的应用都采用电力和柴油动力动车组车辆，以及公共交通工具。这些列车一般配有大量的驱动轮对和驱动系统，一起构成可靠且安全的系统的组成部分。

庞大的巴塞罗那地铁网络由数条线路组成，在市中心区域中采用地下运行，并且在城市的郊区采取地上运营。截止至2010年12月31日，巴塞罗那地铁系统总共包含8条线路以及一条缆车，总共拥有140座车站和103公里的轨道总长度。

巴塞罗那地铁公司(TMB)所配备的一些转向架（用于不同列车）用于5 000系列地铁列车，并采用状态监测系统。这些极其现代化的列车的最高时速为80公里，总装机功率为2 000 kW。SKF在转向架状态监测系统工程性能方面做出了极大的贡献，并提供了包括所有所需的硬件、软件和传感器在内的所有设备。系统的安装在监督下完成，并且随后也执行了系统启动。该服务包中包含警报的跟进，并采用UMTS系统进行远程数据通讯，以及定期的转向架状态报告^[40]。

转向架中所执行的安装可实现完全的转向架子系统监测功能，例如齿轮箱、牵引电机、联轴器、轴箱以及车轮和轨道状态互动记录等功能，用于转向架健康识别算法的开发。

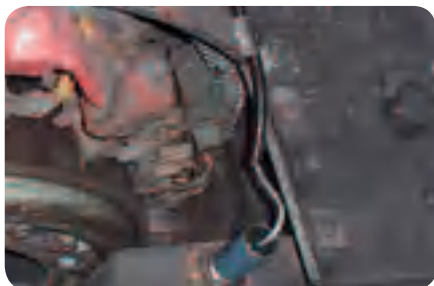
在本例中，主要的关注点在于牵引电机和齿轮箱的监测能力，从而可以检测以下情况：

- 失衡
- 不对中
- 轴挠曲
- 部件松动
- 轴承损坏
- 齿轮损坏
- 共振

瑞典MTAB Dm3机车轴箱中的振动传感器配置



瑞典MTAB Dm3机车牵引电机/齿轮箱中的振动传感器安装



所有已安装转向架传感器的信号将被传送到板载监测单元，该单元具有连续的读取和数据处理能力。在进行警告探测时，系统将立即发出警告，否则数据将每天发送到远程服务器，在其中存储数据以供SKF状态监测服务专家使用SKF @ptitude Observer软件进行分析。Transportes Metropolitanos de Barcelona可以通过互联网并使用专用的SKF应用来连续访问转向架信号。

延长维护时间间隔，并且根据转向架设备的状态来更好的规划运营。对于配有在线监测系统的转向架来说，在以下方面将产生积极的作用，推动这一极具创新性以及挑战性的客户项目。

- 增强车辆的可靠性
- 降低维护的总成本
- 降低极早期阶段问题检测所造成的运营成本，从而可在合适的时间进行优化并对维护进行时间安排
- 减少车辆停机时间
- 减少列车维护的站点数
- 减少维护加班工作
- 优化备件的物流

监测工具包

- 数据提交：
 - 基于IMx-R输出的状态监测数据
 - 客户端服务器提供的数据
 - 客户进行数据分析
- 数据评估：
 - 基于IMx-R输出的状态监测数据
 - SKF服务器提供的数据
 - SKF状态监测中心进行数据分析
 - SKF提供连续的状态报告，包括一切正常或错误报告



不同列车中的巴塞罗那地铁管理人员配有状态监测单元

10 服务

| | |
|------------|-----|
| 服务能力 | 211 |
| 安装 | 212 |
| 拆卸 | 217 |
| 再制造 | 218 |
| 测试设备 | 221 |
| 培训 | 223 |



服务

SKF独一无二的全球铁路网络可为驱动系统的制造商和列车运营商提供多种服务。销售、服务与应用工程师可为SKF的客户提供技术支持并组织各种服务。此外，SKF的再制造单元还可为铁路行业客户提供经济节省并且对环境友好的解决方案。

服务能力

SKF的服务可以协助制造商与运营商实现安全性与出色的性能，并满足对生命周期成本的预期。

一些精选的服务能力包括：

- 可以验证可靠性与安全性要求的独一无二的测试资源(→第97、125、221和222页)
- 致力于特定客户规格的应用工程，以实现优化的解决方案，从而提供最大化的客户价值
- 现场服务工程，包括轴承安装或轴承单元更换服务
- 再制造选项
- 安装、拆卸和润滑工具等维护产品

- 客户资深技术或项目管理人员以及车间员工的专门培训课程，从而获得有关铁路解决方案的更深入的理解，有助于实现轴承更长的使用寿命以及更高的利用率

安装

为了实现适宜的轴承性能并避免过早失效，在存储和安装轴承与轴承单元时需要专门的技能与洁净度。作为一种精确组件，在安装过程中应小心处理滚动轴承。还有重要的一点则在于选择适宜的安装方法，并使用正确的操作工具。

注释

安装前请始终仔细阅读完整的说明；一般性的安装说明可在SKF轴承综合型录中或从skf.com/bearings处在线获得。

SKF提供多种在线服务工程选项、用于车间员工的培训课程，以及针对特定应用的详细安装说明(→第223页)。

安装实例

为了提供简要的概述，以下示例展示了主要的安装程序。

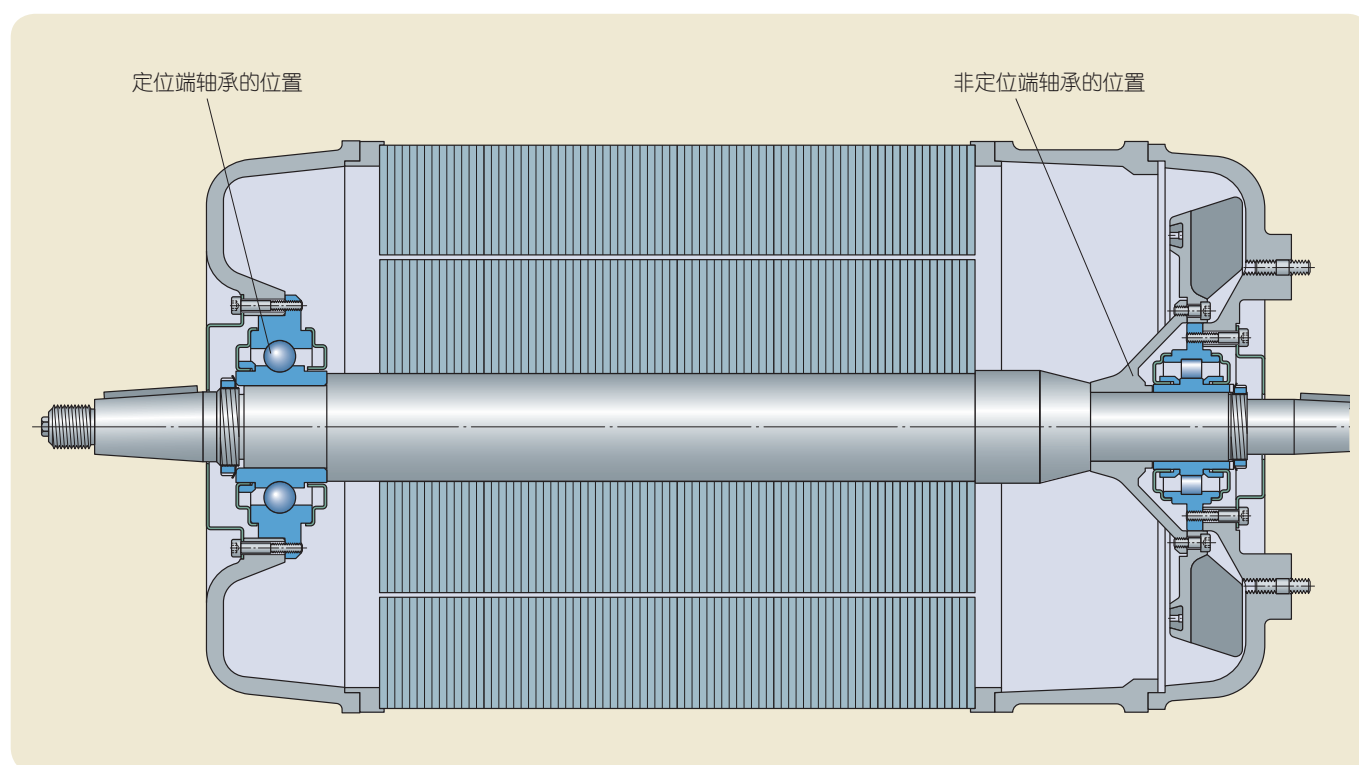
定位端轴承的位置

牵引电机轴承单元(TMBU)通过法兰连接到牵引电机防尘盖上。该轴承单元以球组为基础。

非定位端轴承的位置

牵引电机轴承单元(TMBU)通过法兰连接到牵引电机防尘盖上。该轴承单元以圆柱滚子组为基础。

两侧配有牵引电机轴承单元(TMBU)的牵引电机轴承配置^[41]



准备

第1步：仅在安装前方
可拆开TMBU的包装



第2步：使用SKF便携
式感应加热器TIH
030m进行加热，用
于带迷宫式密封件的
预润滑TMBU的最高
温度为90 °C。该过程
用于定位和非定位
TMBU轴承单元。注
意：不允许对配有传
感器的单元进行感应
加热！



便携式感应加热器TIH 030m

SKF小型感应加热器TIH 030m将极高的加热能力与便携性完美结合。紧凑的轻量设计使得TIH 030m极为便于携带。将感应线圈置于加热器外壳上，使得加热轴承的重量最高为40 kg。感应加热器配有过热保护功能，可以降低感应线圈和电子元件损坏的风险。除了温度模式外，TIH 030m配有用于加热元件而非轴承的时间模式。该感应加热系统以标准配置进行供应，带有三个磁轭，并且提供两个版本：

- 230 V/50 - 60 Hz
- 100 - 110 V/50 - 60 Hz

技术特点

- 紧凑的轻量设计
- 2步电源设置以及更小的磁轭可安全加热更小的轴承，并且能耗更低
- 20分钟内即可加热28 kg的轴承
- 110 °C下预设温度模式在安装开式轴承时可防止过热
- 自动消磁



SKF工作手套TMBA G11W专门设计用于通用的工业维护作业。手套的手掌处涂有阻燃点，可提供绝佳的握持效果。

定位端轴承单元



第3步：安装定位TMBU



第5步：折弯锁定垫圈之一来固定锁定螺母



第4步：在轴向上使用锁定螺母固定TMBU



SKF钩形扳手组

包含9个基于DIN 1810标准的扳手，用于上紧和松开尺寸为4至6的锁定螺母。该钩形扳手设计用于SKF KM螺母以及任何其他符合DIN 981标准的KM螺母。

非定位端轴承单元



第6步：安装非定位端轴承单元



第8步：折弯锁定垫圈之一来固定锁定螺母



第7步：在轴向上使用锁定螺母固定TMBU

牵引电机防尘盖(定位侧)

牵引电机装配



第9步：要将电机防尘盖安装到定位端轴承侧，可以将电机防尘盖加热到 100 °C。小心将电机防尘盖安装（滑动）到 TMBU 法兰的基座上。确保不会施加过度的轴向力。TMBU 轴承单元对轴向（冲击）载荷极为敏感。过重的轴向载荷可以将极硬的陶瓷球压入到滚道中，从而产生凹痕。



第11步：将装配了TMBU和电机防尘盖的转子插入到定子中。



第10步：上紧法兰螺钉以将电机防尘盖固定到TMBU上。



第12步：将电机防尘盖安装到定子的非定位端轴承侧（相反侧）以及 TMBU 法兰的基座上。保持转子和定子对齐以避免滚道出现凹痕或刮伤。上紧法兰螺钉以将电机防尘盖固定到 TMBU 上。

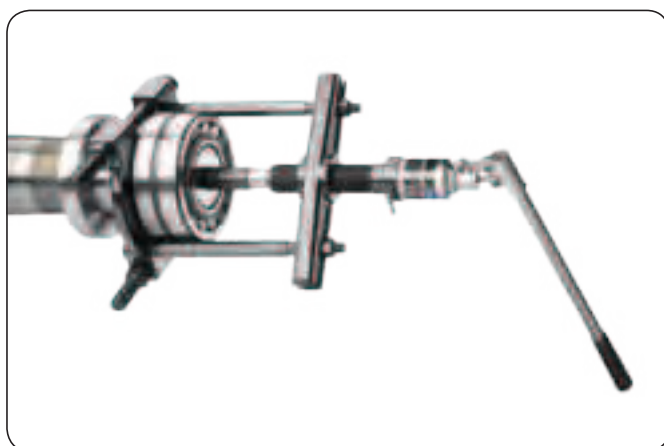
拆卸

在拆卸轴承时，必须小心以确保不会损坏其他机械组件，例如轴或轴承座，因为损坏可导致影响机器的效率与寿命。有些时候需要拆卸轴承以维护或更换设备的其他组件。这些轴承通常将重新使用。选择适宜的拆卸方法与拆卸工具，对于降低轴承损坏，从而供其重新使用来说，极其重要。

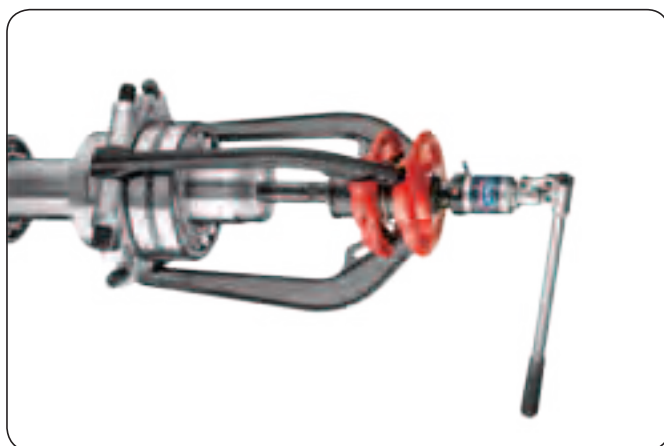
轴承的拆卸是一项极其危险并且要求极高的作业。因此，选择正确的拆卸方法与拆卸工具，对于降低人身伤害的风险来说，具有极高的重要性。



SKF TMM拉拔器系列：液压灵巧式拉拔器组
完整的轴承拆卸解决方案



SKF强力背拉式拉拔器TMBS E系列
即使在最紧密的空间中也可实现简便的轴承拆卸



机械轴承拆卸的适宜工具
降低组件损坏和人身伤害的风险



牵引电机轴承单元的再制造
拆下运输保护装置



牵引电机轴承单元的再制造
拆卸的轴承、带保持架的外圈以及滚子装配，从而可供清洁前检查润滑脂状态



牵引电机轴承单元的再制造
拆卸的轴承，内圈装配可供清洁前检查润滑脂状态

再制造

与生产新的轴承相比，轴承的再制造¹⁾可以显著降低CO₂的排放量。相对于新轴承的生产，再制造最多可以节约97%的能源。通过延长轴承的使用寿命，该过程可以避免组件刮伤以及不必要的自然资源使用。

SKF的专家可以判断是否可以再制造某一轴承^[42]。

为了实现这一目的，请发送以下工况数据：

- 组件损坏情况的详细放大照片
- 轴承配置的常规照片
- 技术输入内容，例如：
 - 应用描述
 - 润滑剂特性(润滑油/润滑脂)
 - 润滑方法
 - 轴承服务时间、载荷和速度

在SKF铁路技术手册第1卷第192中可找到更多信息。

¹⁾ 除了“再制造”这一概括性术语外，一些铁路运营商和制造商还使用“翻新”和“翻修”来区别特定的要求。“再加工”一词一般包括抛光和打磨操作。但是，对于这些术语似乎不存在全局性定义，并且这些词汇可能存在重复，并且可能相互对立。

SKF再制造的优点

轴承的再制造在优化生命周期成本方面具有主要的贡献：

- 与新轴承相比可显著降低成本
- 延长使用寿命
- 改进可用性，从而减少库存
- 损伤分析和修正措施研究
- 再制造过程中进行升级以提高性能
- 应用反馈可改进操作与维护客户的技术
- 减少污染、原材料使用与能耗以减轻环境影响

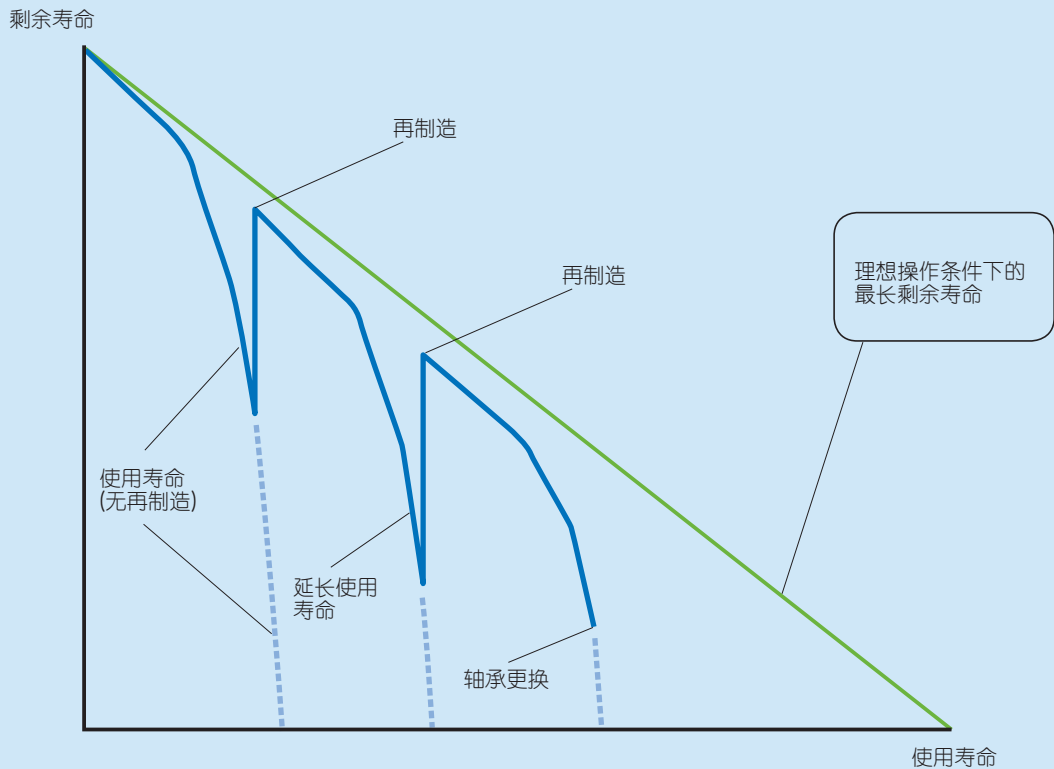
抱轴箱筒的再制造

除了轴承和牵引电机轴承单元(TMBU)的再制造项目外，SKF还提供抱轴箱筒的再制造服务(→第60至61页)。其中包括质量检验以及车削、螺栓焊接和轴承配合的再加工等再制造过程。



用于多筒悬挂的圆锥滚子轴承的再制造
清洁后检查保持架和滚子装配的状态

通过再制造延长使用寿命的示例





SKF专门的先进再制造服务中心的地点

再制造服务中心的全球网络

SKF开发出一系列核心能力、资源和基础设施，可以确保SKF的轴承再制造服务真正达到世界级别：

- 一致性工艺实现顶级质量
- 全球数据库可供知识共享
- 适应翻新的流程
- 计算机化的工况处理
- 轴承分析报告
- 测量协议
- 可追溯性

这些服务中心每年可以处理大量的轴承与相关设备的工作。所有服务中心都采取良好的组织形式，通过培训有素并具有专门技能的团队进行运作。团队作为全球性网络进行运作，持续的共享知识、备件采购以及能力开发。

测试设备

静态电机测试设备

对于满足专业人员要求，从而对电机和旋转机械执行预防性维护和状态监测的仪器，始终存在着重大的需求。

自2007年收购贝克仪器公司以来，对于电机维护专业人员来说，SKF已成为电机电路分析解决方案的行业领导者。

静态设备可以测试交流和直流电机中的绝缘系统，可用作生产或重新绕线流程中的质量测试。还可以探测到连接错误、连接不良以及绕组失衡。静态测试还可用于测试电机生命周期中弱化的绝缘，从而避免突然的绝缘失效问题。静态设备可以提供一系列测试，包括绕组电阻、百万欧姆、极化指数 (PI)、直流步间电压以及浪涌测试。

百万欧姆测试在全球范围内普遍应用，但是在测试电机绝缘时的性能有限。根据物理定律，在线匝之间需要至少325 V的电势差以检测较弱的绝缘。直流百万欧姆测试可以将所有线匝提高至相同的电势，从而解释为什么无法检测到较弱线匝绝缘的问题。由于交流电机中80%的电气失效都是从线匝之间的绝缘弱化开始，重要的一点在于需要执行可以在早期检测到该问题的测试。

浪涌测试可以将极高的电压脉冲注入到绕组中，在线匝之间产生所需的电压电势差，并且从而能够探测到较弱的线匝绝缘。在热、润滑油和化学品等的污染、电机启动过程中线圈的机械运动，以及启动和电机运行过程中过压峰值等的作用下，线匝绝缘较弱的电机将随时间而恶化。在线匝绝缘进一步恶化的过程中，电气启动期间在线匝之间会产生电弧，从而导致更为迅速的绝缘弱化。

最终，发生电弧的线匝将焊接到一起，并且由于自动变压器效应，在该局部

区域中将生成极高的循环电流。这些电流所生成的额外的热可以烧蚀电线上残留的绝缘层，并且开始使作为接地的主绝缘层的槽绝缘衬变质。研究显示，在焊接短环发生15分钟内，交流电机中的焊接短环将导致电机的接地失效。

浪涌测试可以在焊接短环发生前探测到线匝之间、线圈之间以及相位之间的弱绝缘，从而可以事先警告发生中的问题，并且有助于避免突然的电机失效。

除了静态电机设备测试外，还可以提供动态测试设备以及在线测试设备的组合。



交流定子的静态测试



直流转子的静态测试

润滑研究

SKF润滑脂测试工具包TKGT 1

润滑脂分析工具包TKGT 1有助于恰当地应用该方法。该工具包中的产品组合使其可以执行三种不同的测试：

- 稠度
- 分油特性
- 污染

这样可供用户充分了解润滑脂的状态并在现场做出决策。该工具包中包含对良好解释测试结果的指南。

对于存储的润滑脂，该工具包可以帮助确定润滑脂的剩余保质期，并且评估各个不同生产批次之间质量水平的一致性。在测试用过的润滑脂时，测试结果可以帮助用户评估以下事项：对于应用所测试润滑脂的适用性、补充润滑时间间隔的精确度，以及污染发生时可能的污染源。

润滑脂测试工具包对于客户的优点

- 润滑脂补充润滑周期可以根据真实条件进行调节
- 润滑脂质量可以评估以探测批次之间可能无法接受的偏差
- 润滑脂性能可以评估，从而可供确认针对特定应用某一特定润滑脂的适用性



现场使用的SKF便携式润滑脂分析工具包

培训

当今的制造商正面临着巨大的压力来在最低的成本下提供最高的设备生产效率以及最高的质量，同时还要满足日益严格的安全和环境立法要求。为了满足这些对于业务极为关键的要求，维护专业人员需要使设备的可靠性最大化，同时使维护成本降至最低 – 而这的确是一项极难实现的平衡。

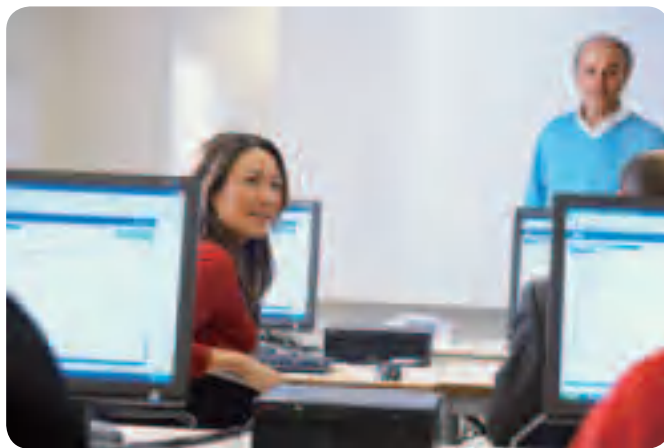
与任何难以实现的技术一样，培训可以作为实现有效性能的关键所在。许多公司都在一个或者多个相关领域提供培训，而仅有SKF提供综合性的培训项目，涵盖设备可靠性方面的每个领域 – 从车间直至经理的办公室。

SKF培训课程

SKF培训课程一般包含理论与实践这两方面课程。

在skf.com处可以获得更多信息。转至当地的SKF站点可以找到实际的培训项目清单。

除了实际的本地培训项目外，SKF还提供针对特定客户要求定制的客户培训项目。这些课程可在客户的场所或在SKF的培训中心提供。

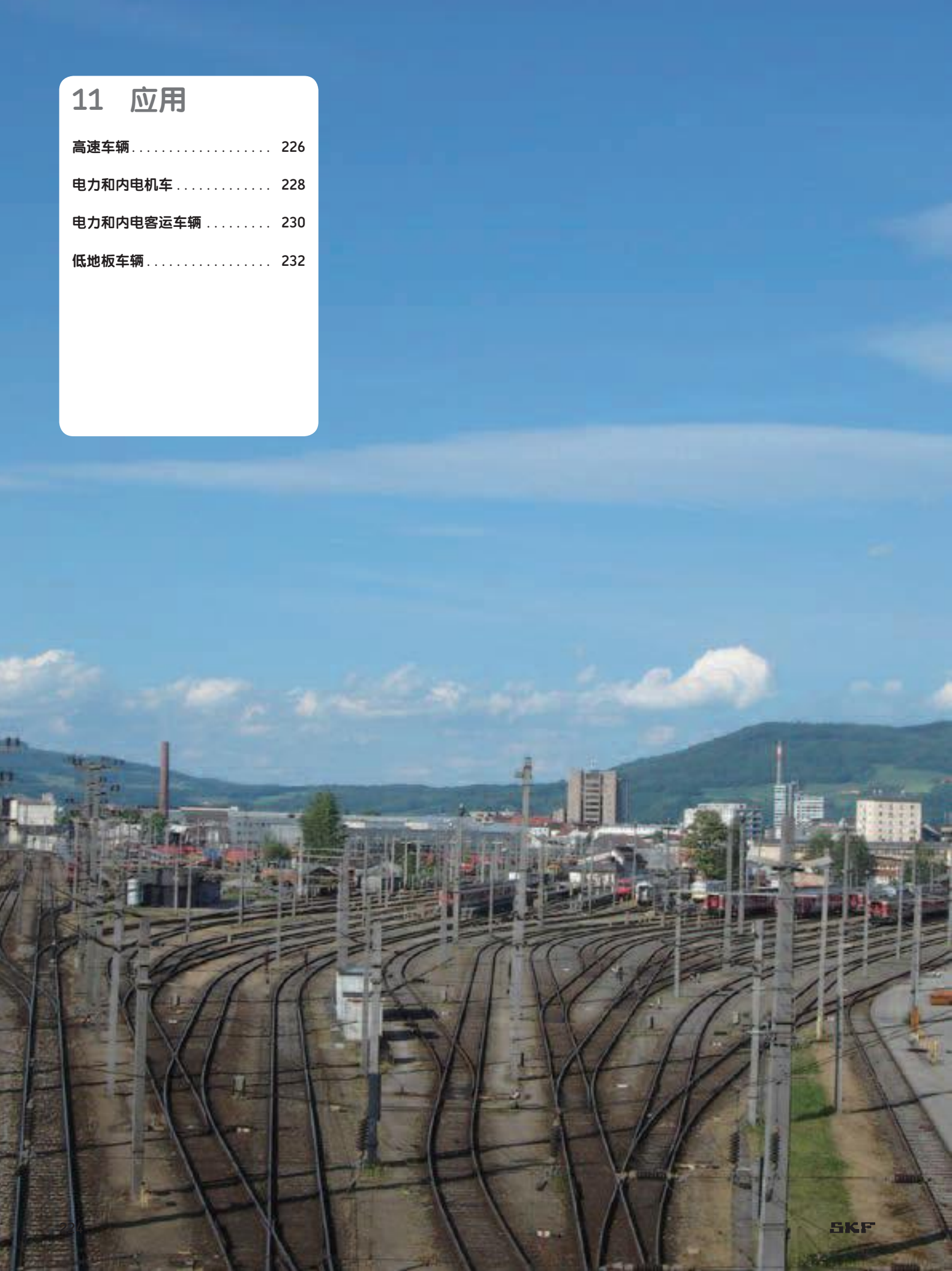


客户优势

- 对轴承和相关问题取得更深入的理解
- 了解相应的处理技术以确保质量与可靠性
- 根据客户特定需求定制培训
- 增加知识并保持极高的能力水平

11 应用

| | |
|-----------------|-----|
| 高速车辆 | 226 |
| 电力和内电机车 | 228 |
| 电力和内电客运车辆 | 230 |
| 低地板车辆 | 232 |



应用

很久以来，牵引电机和齿轮箱都在不断的改进。如之前章节所述，SKF在创新方面做出了诸多的贡献。这些创新基于SKF在开发、设计、应用工程和轴承与轴承单元的制造，以及机电一体化、密封件和服务方面的独到经验。以下部分概要介绍了当前使用中的设计，以及整合了SKF综合性解决方案的主要应用。

在某些情况下，驱动系统经过定制以满足制造商的规格要求和铁路运营商的需求。在多种情况下，对于为极其不同的车辆和运营商部署的转向架供应商平台，驱动系统可以用于相同或类似的应用。

有关以下几页中所列应用的简要描述：

- SKF的驱动系统解决方案在全球范围内广泛应用于所有类型的铁路轨道车辆。与轴箱应用相同的是，当今全球的趋势是使用出厂前润滑并在两侧集成了密封系统、可以立即安装的轴承单元。
- 为了保护轴承免受破坏性电流的损害，SKF提供多种电气绝缘的解决方案，例如INSOCOAT和混合陶瓷轴承，以及牵引电机轴承单元。这些产品当前使用广泛，特别适用于频率转换器控制的推进系统。
- 越来越多的牵引电机都配备了机电一体化系统以测量运行参数、检测推进控制系统的转子位置，并监测驱动系统的状态。
- 服务包经过定制可以满足制造商与运营商的特定要求，包括应用与服务工程、安装、全球售后市场服务、再制造选项，以及物流服务。
- SKF提供独一无二的成套解决方案，由轴承和定制的轴承单元、状态监测系统以及应用与服务工程支持组成。
- SKF提供定制的解决方案包，以每个客户的独立需求为基础。

高速车辆

对于几百公里的中等距离，与飞机和汽车相比，高速铁路是一种极具吸引力并且环保的方案。在大多数情况下，列车可以直接服务于市中心而无需极为耗时的班车接送服务，不用在拥挤的机动车道上驱车并面对任何停车问题。

对于高速铁路存在着许多定义。通常，列车的最高速度至少为200 km/h，但是在其他类别中，行驶速度定义为超过250 km/h。一般说来，极高速列车的运行速度为300 km/h甚至更快。对于高速列车，一般要求达到极高的速度和长距离的维修周期。

一段时间以前，高速列车通过动力设备进行牵引，其设计类似于车前带有驾驶室的机车。由于装机功率更高，与动车组设计相比，该机车设计需要高得多的轴重。现代化的高速列车大多数都由多节车厢组成。大约一半或者三分之一的转向架都具有动力。可以在每列列车上实现极高的总额定功率。由于轴重和簧下质量较低，并且动态性能更好，因此与机车相比，这些驱动系统相对较小。

SKF提供独一无二的成套解决方案，包含轴承和定制的轴承单元、状态监测系统以及应用与服务工程支持。



图例: Becht

中国CRH1A和CRH1B，高速列车，
最高速度为200和250 km/h，功率为5 300和11 000 kW，自2004年投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承



图例: Bombardier

中国CRH 1E，Zefiro 380高速列车，
最高速度380 km/h，功率16 x 500 kW，自2012年投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图例: Siemens press picture

中国CRH3，Velaro CN高速列车，
最高速度350 km/h，功率8800 kW，自2007年投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承



图1: Pendolino

中国 CRH5, Pendolino 高速列车,
运行速度250 km/h, 功率10 x 500 kW, 自
2007年投入运营。

SKF牵引电机轴承



图1: KTX

韩国 KTX 高速列车,
运行速度300 km/h, 功率12 x 1130 kW, 自
2004年投入运营。

SKF牵引电机轴承



图1: DB AG/Wolfgang Klee

德国DB ICE 3高速列车,
最高速度330 km/h, 功率16 x 500 kW, 自
1999年投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图1: Bonaventura Loris

西班牙AVE S 103, Velaro E高速列车,
最高速度350 km/h, 功率16 x 550 kW, 自
2007年投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图1: S&B

**意大利ETR 460, ETR470(照片如上)和ETR
480 Pendolino倾斜式列车,**
最高速度250 km/h, 总功率6000 kW, 自1992
年投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图1: T&G

西班牙 AVE S 102, 高速列车,
最高速度330 km/h, 牵引电机由西门子制造,
功率8 x 1000 kW, 自2005年投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

电力和内燃机车

电力和内燃机车可以牵引货运与客运车辆，是所有铁路运营商的主要设备。这些设备甚至被一些运营商用于高速运营。机车是一种牵引列车而不运载任何乘客或货物的铁路车辆。

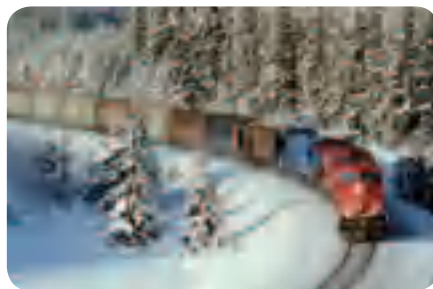
内燃机车可以由电力推进或液压推进来驱动。此外，柴油电力机车配有发电机，带有轴承(→第39页)。由于结合了柴油电机，其总功率受限。在某些情况下，一台机车使用两台柴油电机。

与必须承受较重的柴油电机的内燃机车相比，电力机车可以设计为专用于更高的额定功率。对于更高的速度，越来越多的复杂齿轮箱设计得到试用，以减轻簧下重量并实现更好的动态性能。

较高的牵引电机功率需要相对较大的传动端牵引电机轴承，以及更高的动态和静态额定载荷。某些设计基于齿轮箱油润滑的传动端牵引电机轴承，而该轴承正逐渐成为齿轮箱的一个整体组成部分。SKF为这些应用提供专门的保持架设计(→第3章)。

抱轴式悬挂牵引电机设计用于货运运营等所需的低速运行。最高速度位于120至140 km/h的区间内，具体取决于运营商的规格。速度对轨道、车轮和相关组件具有直接影响。

SKF提供独一无二的成套解决方案，包含轴承和定制的轴承单元、状态监测系统，以及应用与服务工程支持。



美国内电机车

一般牵引很长的货运列车，总额定功率为2200 kW (3000 HP)至4500 kW(6000 HP)。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF发电机轴承



奥地利ÖBB 1016/1116，金牛座电力机车，最高速度230 km/h，功率4 x 1600 kW，自2000年起运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



中国铁路DJ4电力机车，最高速度120 km/h，功率8 x 1200 kW，自2006年起运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承



图片: Aarncm

中国铁路HXD1B (6F)电力机车,
最高速度120 km/h, 功率9600 kW, 自2006年
起运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承



印度WDG-2A内燃机车,
最高速度100 km/h, 总功率2300 kW (3100 HP),
自1995年起投入运营。

SKF牵引电机轴承



图片: www.zacdu.com

中国铁路HXN5内燃机车,
轴式转向架, 最高速度120 km/h, 功率4660 kW,
自2008年起投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图片: Orlovic

意大利Trenitalia E464电力机车,
最高速度160 km/h, 额定功率3000 kW, 自
2000年起投入运营^[43]。

SKF牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图片: 图片: DB AG/Wolfgang Klein

德国DB-Railion 189电力机车,
适用于欧洲不同的电力系统, 最高速度140 km/h,
功率4 x 1600 kW, 自2003年起投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图片: SBB

瑞士SBB Re 460电力机车,
最高速度230 km/h, 功率4 x 1525 kW, 自
1992年起投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承

电力和内电客运车辆

在旅客运输中，越来越多的电力和柴油动力动车组车辆被投入到短程和长途服务中，尤其需要将小编组车辆用于较短的时间间隔的运营。此外，还使用由一台或两台机车和客运车辆组成的列车。

与机车类似，柴油车组可以由电力推进或液压推进来驱动。此外，这些柴油电力动车组配有具有轴承的发电机(→第2章)。由于使用柴油电机并存在空间限制，其总功率受限。在某些情况下，一台车组使用两台柴油电机。

在许多情况下，电力动车组与地铁车辆的推进设计都与高速应用具有很多相似之处。另一方面，其中某些电力车组的设计还可用于公共交通应用，例如郊区列车和地铁列车。由于轴重和簧下质量较低，并且动态性能更好，这些驱动系统相对较小。

对于机车来说，抱轴式悬挂牵引电机设计仅可用于更低的速度。速度对轨道磨损、车轮和其他相关组件具有直接影响。

SKF提供独一无二的成套解决方案，由轴承和定制的轴承单元、状态监测系统以及应用与服务工程支持组成。



图1: Bombardier

中国上海地铁，
速度120 km/h，功率7200 kW，自2006年投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承



图1: Petr Sefek

捷克电力动车组 471，
最高速度160 km/h，功率4 x 500 kW，自2001年起投入运营。

SKF牵引电机轴承单元



图1: Rolf Hufte

德国科隆轻轨车辆，K 5000，
最高速度80 km/h，功率4 x 120 kW，自2002年起投入运营^[41]。

SKF陶瓷牵引电机轴承单元



图例: Patsa C

德国汉堡DT4地铁列车，
最高速度80 km/h，功率8 x 125 kW，自1988年起投入运营^[4]。

SKF牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图例: Oeyman

英国电力动车组350类，Desiro UK由多家公司运营，
最高速度160 km/h，总功率1500 kW，自2005年起投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承



图例: Siemens press picture

斯洛文尼亚EMR 312，Desiro电力动车组，
最高速度140 km/h，功率4 x 412 kW，自2000年起投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承



图例: CAF

土耳其伊斯坦布尔地铁车辆，
最高速度80 km/h，功率8 x 200 kW，自2012年起投入运营。

SKF混合陶瓷牵引电机轴承



图例: SBB

瑞士SBB RABe 521/523，FLIRT电力动车组，
最高速度160 km/h，功率4 x 500 kW，自2004年起投入运营。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承



图例: Laf Agpmason

委内瑞拉加拉加斯地铁车辆，
最高速度80 km/h，功率24 x 200 kW，自2010年起投入运营。

SKF混合陶瓷牵引电机轴承

低地板车辆

与城市和郊区拥挤街道上的车辆相比，公共交通铁路日益成为一种重要的选择方案。郊区列车、地铁、轻轨车辆和有轨电车等车辆都已在全球范围内运营。

在很多情况下，郊区列车、地铁、轻轨和有轨电车之间的区别都以法规定义为基础。这些车辆可以满足铁路车辆标准，并由铁路公司运营。对于非铁路公司、例如地方公共交通运营商所运营的车辆根据运营商所要求的专门标准而设计（例如特定于国家的有轨电车标准）。

与其他应用领域相比，轻轨和有轨电车可以根据极为不同的技术概念而设计，例如低地板、中等高度地板和标准地板设计。某些车辆采用不同的车体截面长度。从而，将使用不同的驱动设计或单车轮配置。这些都可以设计为轮毂牵引电机（→第2章）。

无轨电车在许多城市得到应用，与传统的公共汽车服务相比，可以减轻拥堵区域的污染。这类无轨电车的牵引电机与有轨电车应用具有许多类似之处，并且将在本章中介绍。齿轮箱设计一般以当前公共汽车的差速齿轮箱和车轴齿轮箱组件为基础。

SKF提供独一无二的成套解决方案，由轴承和定制的轴承单元、状态监测系统以及应用与服务工程支持组成。



图11: Grazer Verkehrsbetriebe

奥地利格拉茨，Cityrunner轻轨车辆，
最高速度70 km/h，功率8 x 50 kW，自2001年起投入运营。

SKF陶瓷和INSOCOAT牵引电机轴承



图12: Gunter Mackinger

奥地利萨尔茨堡，无轨电车，
最高速度65 km/h，功率1 x 172 kW，自1996年起投入运营^[44]。

SKF INSOCOAT牵引电机轴承单元



图13: Honsa GmbH

捷克布拉格，15T轻轨车辆，
最高速度60 km/h，功率16 x 60 kW，自2010年起投入运营^[33]。

带绝对位置传感器的SKF陶瓷牵引电机轴承单元

1) 类似的牵引电机用于奥地利：林茨和萨尔茨堡；白俄罗斯：明斯克；捷克共和国：赫拉德茨克拉洛韦；法国：里昂；德国：埃斯林根和索林根；希腊：雅典；匈牙利：布达佩斯特；意大利：博洛尼亚、米兰、摩德纳和帕尔玛；荷兰：阿纳姆；罗马尼亚：布加勒斯特；瑞士：伯尔尼和比尔；美国：波士顿。



图1: SKODA ELECTRIC a.s.

捷克Plzen 21无轨电车，
最高速度65 km/h，功率140 – 175 kW¹⁾，自2001年起投入运营^[4]。

SKF陶瓷牵引电机轴承单元



图1: Liebh

德国纽伦堡轻轨车辆，
最高速度80 km/h，功率3 x 120 kW⁴⁾，自1995年起投入运营。

SKF INSOAT牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承

4) 类似的牵引电机和齿轮箱用于德国：奥格斯堡、柏林、布伦瑞克、不莱梅、法兰克福(奥得)、耶拿、慕尼黑；日本：熊本。

2) 类似的牵引电机和齿轮箱用于澳大利亚：墨尔本；法国：波尔多、里昂、蒙彼利埃、奥尔良和巴黎；爱尔兰：都柏林；荷兰：鹿特丹；西班牙：巴塞罗那。



图1: Schachl

法国巴黎第2线Citadis轻轨车辆，
最高速度70 (80) km/h，功率4 x 120 kW²⁾，自2003年起投入运营。

SKF牵引电机轴承

SKF齿轮箱轴承



图1: Darkone

德国罗斯托克6NGTWDE轻轨车辆，
最高速度70 km/h，功率4 x 95 kW⁵⁾，自1994年起投入运营^[4]。

SKF牵引电机轴承

5) 类似的牵引电机用于德国，包括比勒菲尔德、达姆施塔特、爱尔福特、埃森、弗莱堡、海德堡、卡尔斯鲁厄、莱比锡、路德维希港、马格德堡、曼海姆和罗斯托克；以及比利时：安特卫普。

3) 类似的牵引电机用于德国：波鸿、杜伊斯堡、海德堡、路德维希港、美茵茨、曼海姆、慕尼黑、纽伦堡、博斯坦；澳大利亚：悉尼；奥地利：格拉茨；芬兰：赫尔辛基；挪威：卑尔根。



图1: Oef Just

德国Chemnitz Variobahn轻轨车辆，
最高速度70 km/h，轮毂牵引电机驱动系统(→第2章)，功率8 x 45 kW³⁾，自1998年起投入运营，原型始自1993年^[4]。

SKF牵引电机轴承



图1: Siemens picture

美国-休斯顿，德克萨斯州，MetroRail，Avanto轻轨车辆，
最高速度105 (120) km/h，功率4 x 130 kW，自2001年起投入运营。

SKF INSOAT牵引电机轴承

索引

关键词

@ptitude Observer 200

A

磨粒磨损 173
绝对位置传感器 187
粘着磨损 173
高级计算 161
分析软件 200
分析过程 148
角接触球轴承 69
应用 224
应用IMx-R 208
资产生命周期管理 19
奖项 22
AXLETRONIC传感器 199

B

背拉式拉拔器 217
背对背配置 - 角接触球轴承 70
贝克设备 221
球体通过频率 197
球体旋转频率 197
基本额定寿命 149
Bearing beacon 161
轴承计算 142
轴承性能 63
轴承损坏 168
轴承损坏分类 171
当前的轴承设计 12
轴承配合 67
轴承安装 66
轴承研究 166
Bearing Select 158
轴承使用寿命 145
轴承测试 97
轴承单元 127
BEAST 162
装箱法 155
黑色氧化物表面处理 81
转向架状态监测功能 192
BPI 197
BPFO 197
BSF 197
卓越经营 20

C

保持架 - 圆柱滚子轴承 79

保持架 - 深沟球轴承 86, 87
保持架 - 圆锥滚子轴承 92
认证 20
紧凑性 130
状态监测 190
接触式密封件 86
腐蚀 174
漏电 105
圆柱滚子轴承 75

D

损坏和失效矩阵 179
深沟球轴承 85
设计与开发 18
设计变型 27
柴油液压车辆 58
柴油机车 - 应用 228
柴油动车组 - 应用 230
旋转方向检测 186
拆卸 217
驱动设计原理 26
驱动解决方案 16
驱动系统开发 9
轴承动载荷 - 计算 151

E

E2 轴承设计 - 圆柱滚子轴承 77
E2 轴承设计 - 深沟球轴承 77
电力机车和柴油机车 - 应用 228
电力和柴油客运车辆 - 应用 230
电力和柴油电力机车 - 驱动设计 43
电力和柴油电力
客运车辆 - 驱动设计 47
电流 101
电流预防 99
电侵蚀 104, 176
包络技术 196
当量轴承动载荷 150
过压 104, 176
延长使用寿命 132
扩展服务 219

F

面对面配置 - 角接触球轴承 70
失效矩阵 179
通过趋势观察进行失效保护 192
假性布氏压痕 175
疲劳 172
疲劳断裂 178
FEM计算 163
线路试验 164

当前与未来的焦点 14
外力断裂 178
四点接触球轴承 69, 71
断裂和裂纹 178
频率转换器 107
微振腐蚀 174
FTF 197
全悬挂驱动 34, 46, 49
功能与轴承寿命 144
轴承保持架损坏频率 197

G

发电机 39
脂润滑 160
润滑脂测试工具包 TKGT 1 222

H

高速车辆 - 驱动设计 39
高速车辆 - 应用 226
历史应用 11
钩型扳手组件 214
轮毂牵引电机 57
混合陶瓷轴承测试 125
混合陶瓷轴承 121
液压灵巧式拉拔器组件 217

I

实施 - 传感器 183
IMx-R 在线系统 195
碎片造成的凹痕 177
操作造成的凹痕 177
感应加热器 213
INSOCOAT 绝缘轴承和混合陶瓷轴承 98
INSOCOAT 绝缘轴承数据 117
INSOCOAT 绝缘轴承 115
INSOCOAT 绝缘轴承规格 117
安装与调试 18
装机功率和利用率 148
集成式抱轴式悬挂驱动 43
集成示例 - 传感器 182

L

生命周期管理 19
生命周期合作伙伴 18
载荷周期减少 155
定位端轴承 66
定位端 - TMBU 136
纵向驱动 35, 50
无轨电车的纵向驱动 55

| | | | | | |
|--------------------------|--------|-----------------------------|------------|----------------------|--------|
| 低地板车辆 – 应用 | 232 | 前缀 | 94 | TQ-line 轴承 | 90 |
| 低地板车辆 – 驱动设计 | 51 | 损坏的发展阶段 | 171 | 牵引电机轴承单元 | 126 |
| 低地板车辆 | 15 | 拉拔器 | 217 | 牵引电机 – 开发步骤 | 37 |
| 低摩擦密封件 | 86 | Q | | 培训 | 223 |
| 润滑剂变质 | 106 | QCL7C 轴承 | 90 | 横向传动 | 30, 47 |
| 润滑 | 159 | 质量 | 20 | 双轮传动 | 52 |
| 润滑研究 | 222 | | | U | |
| M | | R | | 单元 | 127 |
| 维护和再制造 | 18 | 额定寿命 | 156 | V | |
| 维护周期 | 15 | 引用 | 236 | 验证测试 IMx-R | 201 |
| 制造与测试 | 18 | 可靠性 | 156 | 可变工况 | 153 |
| 地铁车辆 – 应用 | 230 | 再制造 | 218 | 确认 | 164 |
| MICROLOG 分析仪 | 207 | 根本原因分析 | 172 | 粘度比 | 159 |
| MICROLOG CMXA 系列 | 207 | 试运行 | 91 | W | |
| 最小载荷 – 圆柱滚子轴承 | 81 | S | | 磨损 | 173 |
| 水分腐蚀 | 174 | 轴承类型选择 | 64 | 工作手套 TMBA G11W | 213 |
| 监测原理 | 196 | 电气绝缘选择 | 112 | | |
| 电机测试 | 221 | 半悬挂传动 | 33, 35, 48 | | |
| 安装 | 212 | 传感器设计 - TMBU | 140 | | |
| Multilog IMx-R | 195 | 传感器 | 180 | | |
| N | | 状态监测传感器 | 199 | | |
| N 设计 | 75 | 服务 | 210 | | |
| NH 设计 | 75 | 防尘盖 | 85 | | |
| NJ 设计 | 75 | 单轮驱动 | 56 | | |
| 非接触密封件 | 85 | 六西格玛 | 20 | | |
| 非定位端轴承 | 66 | SKF 卓越经营 | 20 | | |
| 非定位端轴承 - TMBU | 138 | SKF Explorer – 圆柱滚子轴承 | 77 | | |
| 抱轴式悬挂驱动 | 30, 43 | SKF Explorer – 深沟球轴承 | 86 | | |
| NU 设计 | 75 | SKF 资产生命周期管理 | 19 | | |
| NUP 设计 | 75 | SKF 六西格玛 | 20 | | |
| O | | 解决方案包 | 16 | | |
| 油润滑 | 160 | 规格 | 18, 146 | | |
| 单驱动转向架设计 | 36 | 速度 | 14 | | |
| 运行与监测 | 18 | 速度和绝对位置传感器 | 187 | | |
| 工况 | 168 | 额定转速 – 圆柱滚子轴承 | 81 | | |
| 优化润滑脂寿命 | 133 | 速度传感器 | 184 | | |
| 过载 | 177 | 静态电机测试设备 | 221 | | |
| P | | 次表面疲劳 | 172 | | |
| 塑性变形 | 177 | 后缀 | 94 | | |
| 便携式感应加热器 TIH 030m | 213 | 补充型号 | 94 | | |
| 电压电流流动 | 101 | 表面疲劳 | 172 | | |
| 功率 | 14 | 多筒悬挂 | 31, 60 | | |
| 动车 | 41 | T | | | |
| 动车车尾 | 40 | 串联配置 – 角接触球轴承 | 70 | | |
| 首选产品 – 圆柱滚子轴承 | 82 | 圆锥滚子轴承 | 89 | | |
| 首选产品 – 四点接触球轴承 | 73 | 测试设备 | 221 | | |
| 首选产品 – 混合陶瓷轴承 | 124 | 热裂纹 | 178 | | |
| 首选产品 – INSOAT 绝缘轴承 | 118 | TKGT 1 | 222 | | |
| 首选产品 – 圆锥滚子轴承 | 93 | TMBA G11W | 213 | | |
| 首选产品 – TMBU 定位端 | 137 | TMBU | 127 | | |
| 首选产品 – TMBU 非定位端 | 139 | TMMA 拉拔器系列 | 217 | | |
| | | 公差 – 圆柱滚子轴承 | 80 | | |

参考文献

- [1] Kuře, G.: Railway technical handbook. Axleboxes, wheelset bearings, sensors, condition monitoring, subsystems and services. Volume 1, SKF (2011). ISBN 978-91-978966-3-4.
- [2] Reimann, R.: Von der UEG zur AEG. Elektrische Bahnen 1897–1898. Stuttgart: Motorbuch Verlag, reprint 1997, p. 12. ISBN 3-87943-555-3.
- [3] Bendel, H.: Elektrische Triebfahrzeuge. Berlin: Transpress 1981.
- [4] Neudorfer, H., Kuře, G.: New drive systems for mass transit. SKF Evolution magazine (2001) 2, pp. 26–29.
- [5] Köhler, O.: Mechanische Antriebskonzepte für Hochleistungs-Drehstrom-Lokomotiven. Aachen: Shaker Verlag 2004. ISBN 3-8322-3513-2.
- [6] Seefehlner, E., Peter, H.: Elektrische Zugförderung. Berlin: Verlag von Julius Springer 1924.
- [7] Grünholz, H.: Elektrische Vollbahnlokomotiven. Berlin: Druckerei und Verlagsanstalt Norden 1930.
- [8] Müller, P.: Elektrische Fahrzeugantriebe. Beiheft zur Zeitschrift Elektrische Bahnen (1960).
- [9] Baur, K. G.: Drehgestelle – Bogies. Freiburg: EK-Verlag 2009, p. 109. ISBN 978-3-88255-147-1.
- [10] Haigermoser, A.: Schienenfahrzeuge. Vorlesungsskriptum (2002) Technical University Graz.
- [11] Bertorelli, D.: Italian high speed train. SKF Kugellager Zeitschrift 241 (1993), pp. 11–14.
- [12] Jürgensmeyer, W.: Die Wälzlager. Berlin: Verlag von Julius Springer 1937.
- [13] Weidinger, A.: 100 Jahre Zylinderrollenlager. SKF (2009), pp. 58–59.
- [14] Albert, M., Kuře, G.: Wälzlager in Schienenfahrzeugen. ZEV-Glaser Annalen 107 (1983) 8/9, pp. 326–336.
- [15] Kuře, G.: Wälzlager in elektrischen Fahrmotoren. Veröffentlichung 3.4D. STEYR (1990).
- [16] Kuře, G., Palmeshofer, W.: Electrically insulated bearings. SKF Evolution magazine (1996) 3, pp. 22–24.
- [17] Kohaut, A.: Riffelbildung in Wälzlagern infolge elektrischer Korrosion. Zeitschrift für angewandte Physik. 1 (1948) 5, pp. 197–211.
- [18] Wallin, E., Andéason, S., Botö, P. A.: Stromdurchgang durch Wälzlager. SKF (1967) WTS 67 06 01.
- [19] Pittroff, H.: Wälzlager im elektrischen Stromkreis. Elektrische Bahnen (1968) 3, pp. 54–61.
- [20] Schenk, O.: Stromdurchgang durch Wälzlager. Der Maschinenschaden 26 (1953) 11/12, pp. 135–135.
- [21] Kuře, G.: Electric insulated rolling bearings in railway vehicles. English translation by STEYR. Neue Bahn (1989) 4, pp. 26–34.
- [22] Kahlman, L., Nilsson, K. A., Preisinger, G.: Hybrid bearings for electrical machinery. SKF Evolution magazine (2001) 3, pp. 28–31.
- [23] Preisinger, G., Gröschl, M., Kötritsch, H.: Industrial Prevention of electric erosion in bearings. SKF Evolution magazine (2001) 2, pp. 21–25.
- [24] Zika, T., Gebeshuber, I. C., Buschbeck, F., Preisinger, G., Gröschl, M.: Surface analysis on rolling bearings after exposure to defined electric stress. Proc. IMechE Vol. 223 Part J: J. Engineering Tribology (2009), pp. 787–797.
- [25] Madzia, N.: Electrically insulated rolling bearings. English translation by STEYR. M + F (1986) 10, pp. 222–226 and 11/12, pp. 252–254.
- [26] Schöppl, O.: Developments in ceramic bearing balls. SKF Evolution magazine (2012) 1, pp. 25–29.
- [27] Kuře, G.: Development of traction motor bearings. SKF Evolution magazine (1996) 2, pp. 19–22.
- [28] Lulek, A.: Grease life calculation guidelines for traction motors. SKF report XT10U003. SKF (2011), (not published).
- [29] Göbel, S., Lawrenz, D., Weigert, E. A.: 1000 Schienenfahrzeuge. Köln: Naumann & Göbel Verlagsgesellschaft. ISBN 978-3-625-12225-8.
- [30] Kuře, G.: Tests, test runs and applications of rolling bearings in railway vehicles. ZEV Glaser Annalen 113 (1989) 6–7, pp. 313–322.
- [31] Kerry, M., Peterson, L., Cagnasso, R.: An Atlas of railway axle bearing defects including guidelines on how to examine bearings and overhaul practice. SKF (2008).
- [32] Verhaert, W.: Golden opportunities. SKF Evolution magazine (2011) 3, pp. 28–32.
- [33] Kuře, G., Sobotka, L.: Sensorized traction motor bearing units. SKF Evolution magazine (2009) 3, pp. 28–31.
- [34] Kuře, G., Skiller, J.: Added safety for today’s railway industry. SKF Evolution magazine (2001) 1, pp. 21–24.
- [35] Kuře, G.: Condition monitoring: the apotheosis of maintenance. International Railway Journal 49 (2009) 5, pp. 42–43.
- [36] Kuře, G., Schmiechen, R.: Solutions for railway bogie condition monitoring. SKF Evolution magazine (2010) 1, pp. 25–27.
- [37] Kuře, G., Martinetti, M., Moretti, R.: Sensors for railway bearing units. SKF Evolution magazine (2002) 3, pp. 24–26.
- [38] Kuře, G., Martinetti, M.: New sensor solutions for railways. SKF Evolution magazine (2005) 3, pp. 25–27.
- [39] Pennacchi, P., Chatterton, S., Borghesani, P., Ricci, R., Unger-Weber, F., di Donato, A., De Ponte, A., Porzio, F.: CBM on traction system. Fondazione Politecnico di Milano. Joint Research Centre for Transportation (2011), (not published).
- [40] Kuře, G., Martinez, V.: Applied condition monitoring in railways. SKF Evolution magazine (2011) 4, pp. 21–25.
- [41] Kuře, G., Babka, J., Schuster, J.: Hybrid traction motor bearing units for mass-transit vehicles. SKF Evolution magazine (2003) 4, pp. 21–24.
- [42] Kerry, M.: Wheelset maintenance... on a roll. International Railway Journal 50 (2010) 5, pp. 35–38.
- [43] Gukenbiehl, K., Kuře, G.: Optimised bearings for locomotive transmissions. SKF Evolution magazine (1999) 2, pp. 26–29.
- [44] Hudzikowski, J.: Bearings for drive systems for railway vehicles – an outline. SKF science report, Development Centre Steyr (2005–2006), pp. 79–84.

