

SCHAEFFLER



电绝缘轴承

防止电流腐蚀的滚动轴承

FAG

前言

过电流引起的损坏及导致的后果

过电流会发生在以下应用的滚动轴承中：

- 轮对轴承和牵引电机（轨道车辆）
- 直流和交流电机（动力传输系统）
- 发电机（风电）。

在不利的工况下，这可能导致滚道和滚动体的损坏及润滑剂的老化，从而引起电机或发电机过早发生故障。除了需要支付维修费用外，还会增加由于停机和停产带来的额外成本。

一个比较经济的解决方案就是在电机设计阶段就使用绝缘轴承。这将大大降低设备的维护费用，并能提高机器的利用率，这些都意味着会为客户带来巨大价值。

一般来说，根据应用场合的不同，只要将电机的一侧或者两侧轴承换成绝缘轴承，就能够完全切断轴承座和轴之间的电流，[图 1](#)。



图 1
应用举例

目录

	页
特性	
防范于未然的电绝缘轴承.....	4
设计和安全指导	
过电流导致的典型轴承损坏.....	6
陶瓷涂层轴承.....	8
混合式轴承.....	15
应用举例	
三相电机.....	17
轮对轴承.....	18
牵引电机.....	19
风力发电机.....	20

电绝缘轴承

特性

电绝缘轴承包括所有能阻止电流通过的滚动轴承。

无论是内圈还是外圈带陶瓷涂层的轴承都称为绝缘轴承。陶瓷涂层能够防止电流通过，具有绝缘能力。

混合式轴承的滚动体由陶瓷制成，因此也具有绝缘能力。它是由滚动体来防止电流通过的。

防范于未然的电绝缘轴承

一般来说，完全消除掉轴承内部的电势差是非常困难的。然而，如果我们能够阻止或大大降低通过轴承的电流，就可以防止轴承发生电腐蚀。目前各种绝缘轴承都是为了这个目的而设计的。根据产生电压类型的不同，来选择轴承的绝缘方式。

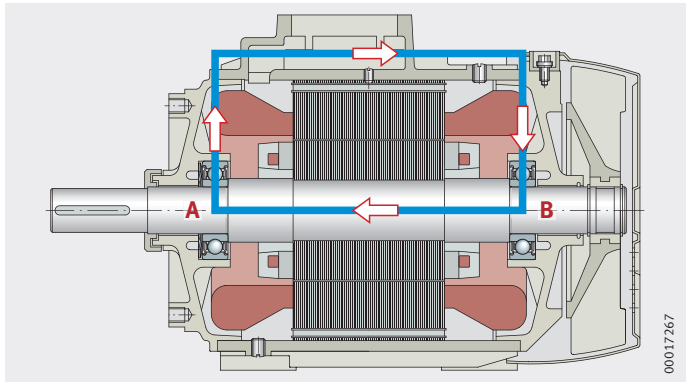
沿轴产生的感应电压

沿轴产生的感应电压会产生同时经过轴承 1，轴承座及轴承 2 的电流回路，图 1。

这类轴电压产生的一个原因是由于电机内部磁通量分布不均匀，尤其在一些极对数较少的电机中。此时，只要绝缘一端轴承就可以完全切断电流回路。通常绝缘非驱动端轴承。

A = 轴承 1
B = 轴承 2

图 1
沿轴产生的感应电压



轴与轴承座之间的电压

如果电压发生在轴与轴承座之间，电流会以相同方向通过每个轴承。这主要是用于变频器带来的共模电压所导致。在这种情况下，电机两端的轴承都应该被绝缘，图 2。

选择绝缘的决定因素是电流电压的时间特性。如果是直流电压或低频交流电压，绝缘效果取决于绝缘层的纯电阻值；如果是高频交流电压（常见于使用变频器的设备中），取决于绝缘层的容抗值。

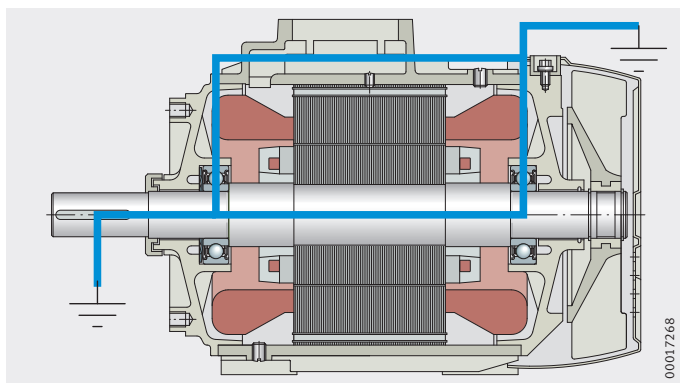


图 2
轴与轴承座之间的电压

电绝缘轴承

设计和安全指导 过电流导致的典型轴承损伤

滚道和滚动体上的痕迹

不管轴承通过直流电还是交流电（频率在 MHz 以下），我们总能在轴承内部发现同样的破坏形式。

在多数情况下，我们都能在滚道和滚动体表面发现均匀的暗灰色痕迹。但是这个视觉特征不是特定的，有时也有可能由其它因素引起，例如润滑剂中含有研磨剂成分，图 3。

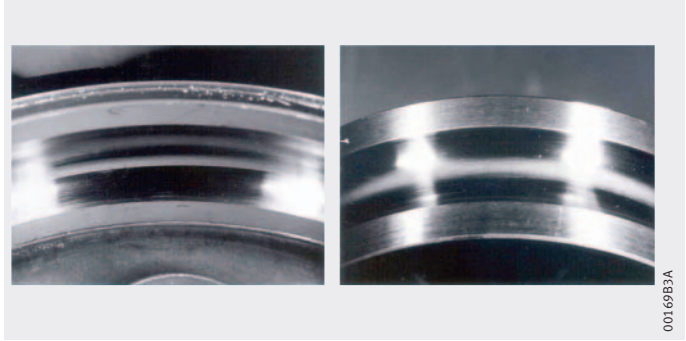


图 3
滚道和滚动体上的痕迹

电蚀沟痕

所谓的电蚀沟痕是指滚道面在运转方向上有连续的周期性沟痕。这类现象大多是由于轴承通过电流所导致，图 4。

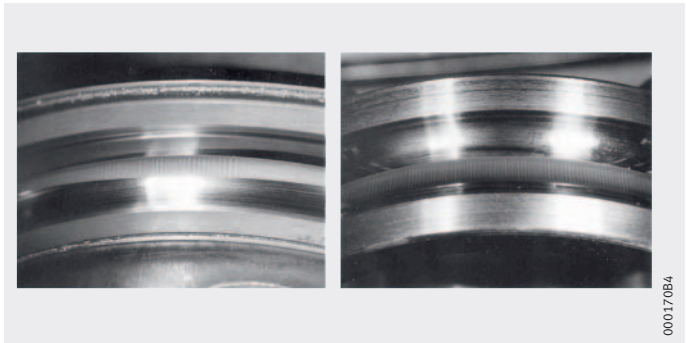


图 4
电蚀沟痕

损伤结构

只有通过扫描电子显微镜（SEM）我们才会明显的看到几乎所有的损伤表面都密布着凹坑和 μm 级的焊点，第 6 页的图 3 和图 4。这也证实了有电流通过轴承，图 5。

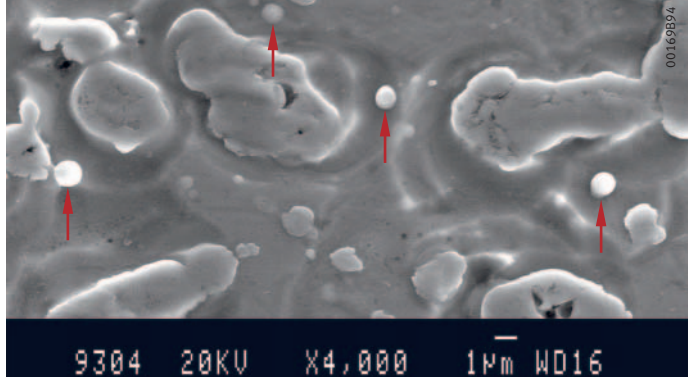


图 5
扫描电子显微镜（SEM）
下的损伤结构

轴承损伤的发展过程

这类凹坑和焊点的形成是由于在滚道和滚动体表面微小的接触点间发生电流放电所导致。在全流体润滑状态下，电流会击穿油膜的薄弱点，电火花产生的能量会在瞬间熔化相邻金属的表面。

在混合摩擦状态下（金属与金属相接触），相邻表面也会发生熔合，但随着轴承的运转又会被迅速地分开。在这两种情况下，都会有材料从金属表面脱离，然后立刻凝固成焊点。也有一些焊点会混入润滑剂，另一些还会沉积在滚道表面。随着轴承的不断运转，这些焊点和凹坑也会被碾压磨平。在持续电流的作用下，在相邻表面的很薄的表层上会重复多次上述熔化和凝固的过程。

然而，在多数电腐蚀轴承的内部，更容易发现电蚀沟痕，第 6 页，图 4。这类滚道和滚动体上的周期型痕迹是持续过电流和轴承部件振动的综合影响所致。当滚动体滚过一个足够大的凹坑时，它会产生纯径向位移，位移的程度取决于轴承的内部几何尺寸、速度和轴承载荷。当滚动体来回摆动时，润滑油膜的厚度会发生变化，同时会在该区域产生更多的放电火花，这种自激式过程就被激发了。一段时间以后，在套圈滚道的整个圆周方向上都布满了电蚀沟痕。这会引起比较明显的轴承振动，最终导致整个轴承的失效。

电绝缘轴承

实践表明，评估轴承过电流风险等级的一个可靠原则是计算通过轴承的电流密度，换句话说就是有效的安培数分别除以滚动体与内圈或外圈滚道的全部接触面积。这与轴承的型号和运转工况有关。当电流密度小于 0.1 A mm^{-2} 时，按照我们目前的经验通过的电流不会造成轴承的损坏。然而当电流密度等于或大于 1 A mm^{-2} 时，轴承内部就会出现明显的电蚀沟痕。

电流对润滑剂的影响

电流通过对润滑剂也会有负面影响。其中的基础油和添加剂会发生氧化和裂化。在红外光谱图中可以清晰看到这个变化。过早老化和铁类金属微粒的聚集会导致润滑剂性能变坏，也可能导致轴承过热运转。

陶瓷涂层轴承

陶瓷涂层轴承是外圈或内圈带绝缘陶瓷涂层 Insutect 的标准轴承，图 6 和图 7。

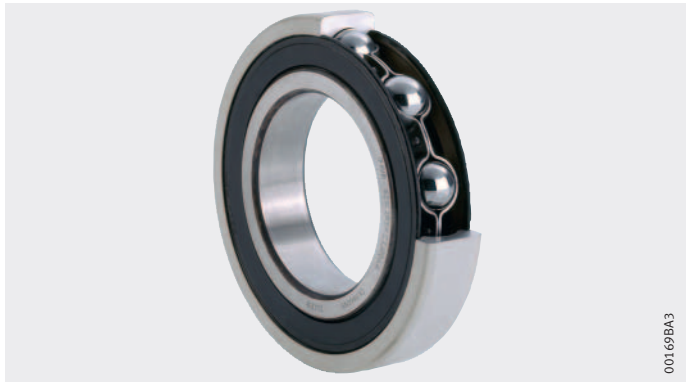


图 6
带陶瓷涂层的深沟球轴承

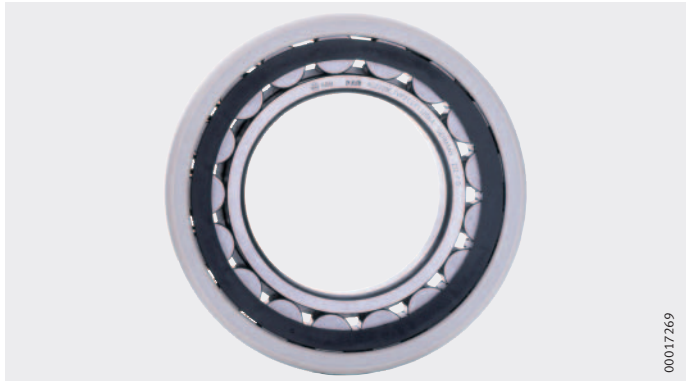
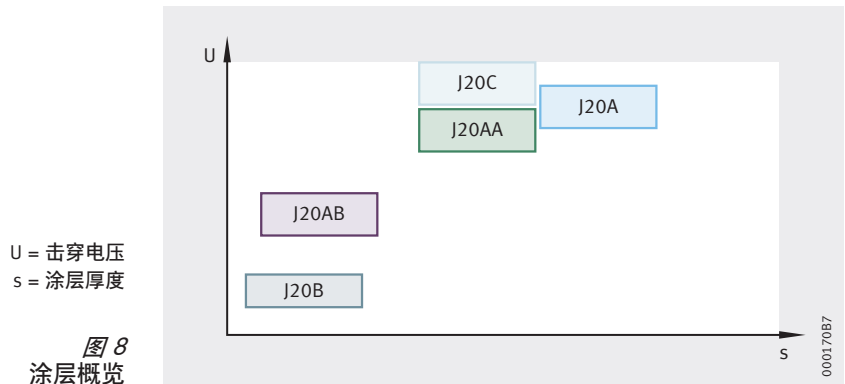


图 7
带陶瓷涂层的圆柱滚子轴承

FAG 带 Insutect 涂层的轴承有以下特性：

- 良好的绝缘性能
 - 带陶瓷氧化物涂层的轴承带有后缀 (J20)。这种涂层以等离子喷涂的方式涂覆在轴承表面，第 10 页，图 9。该陶瓷氧化物剪强度高、耐磨损、并有很好的热传导性能。
- 绝缘层 J20AB 可以很好地防止沿轴产生的感应电压导致轴承的电腐蚀。由于采用特殊的密封工艺，所以即使在潮湿环境中 J20AB 涂层仍能有很好的绝缘效果。
- 绝缘层 J20AA 也是外圈带涂层，涂层厚度是 J20AB 厚度的两倍。因此甚至在较高频率的轴电流下，它仍然具有很好的绝缘效果。
- J20AA 与 J20C 的绝缘层厚度一样。只是后者是内圈带绝缘涂层。因为涂层面积小了，所以阻止高频轴电流的效果更好。它特别适用在具有高频轴电流和外圈旋转的场合。
- Insutect 系列产品还包括绝缘层 J20B 和 J20A，J20B 适合那些需要做一般绝缘的场合，J20A 适用尺寸比较大的绝缘轴承，图 8。
- 带绝缘涂层轴承的外形尺寸同样符合标准 DIN 616 (ISO 15)。也就是说电绝缘轴承可以与标准轴承互换。
- 62 系列以上的深沟球轴承都可以订购带绝缘涂层的产品。另外还可以协议订购一侧或两侧带密封圈的该类型绝缘轴承。这使得用户可以从其较长的润滑寿命中受益。另外，也可以协议供应一定范围内的特殊类型轴承。



电绝缘轴承

涂层处理工艺

等离子喷涂工艺，首先在两个电极间产生电弧，这种电弧使得导入的惰性气体离子化。产生的等离子气流用来传送氧化铝粉末。这种粉末随即被热熔化并以高速喷涂在轴承的内圈或外圈上，*图9*。用这种方式，氧化物涂层可以非常牢固的粘附在基体材料上，基体材料需要提前被打磨粗糙。最后涂层还需要经过一道密封工艺。

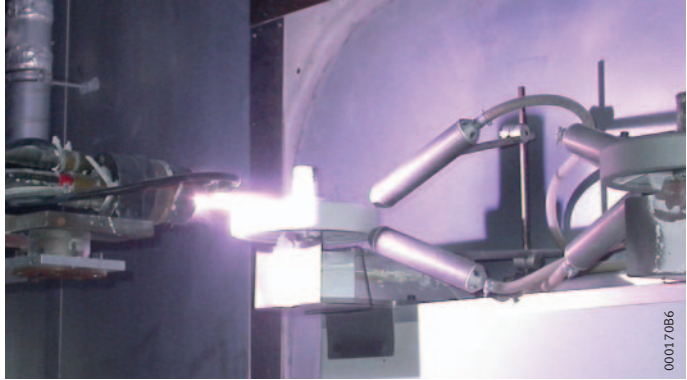


图9
等离子喷涂工艺

介质击穿强度

这种绝缘涂层 100% 都经过质量检测，我们确保涂层的击穿强度至少为：

- J20AB 涂层至少达到 1 000 VDC
- J20AA, J20C 涂层至少达到 3 000 VDC
- J20B 涂层至少达到 500 VDC。

低于以上电压值，绝缘涂层只允许极小的电流通过轴承。

原则上，绝缘轴承可以等效成电阻和电容的并联电路，*图10*。为了保证良好的绝缘效果，欧姆阻值应该尽可能高，电容应该尽可能低。

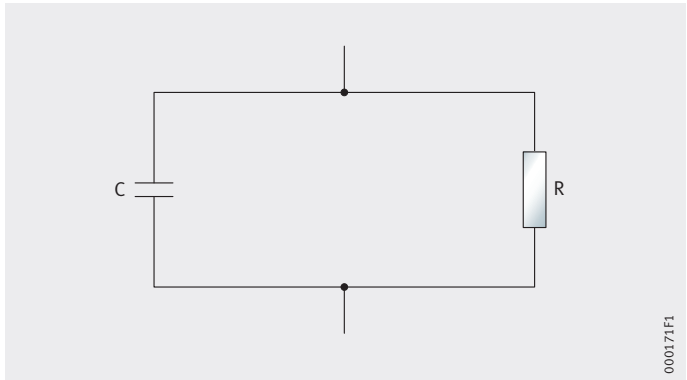


图10
电阻和电容的
并联电路

我们必须区分以下两种情况：

■ 直流阻值

- 在室温下，根据轴承尺寸的不同，直流阻值可以达到 1 GΩ 到 10 GΩ。当温度升高时，它会呈指数下降，温度每升高 10 K 阻值大约下降 40% 到 50%。即便工作温度在 +60 °C 或者 +80 °C 时，仍然有几 MΩ 的阻值，根据欧姆定律 $I = U/R$ 当电压达到 1000 V 时，通过的电流也不足 1 mA，也就是说对轴承没有任何影响。

■ 交流阻抗

- 绝缘层类似于一个电容 C，它可以积聚电荷。在交流电压的作用下，在滚动体和滚道的接触区域会产生交流电流。因为谐波时间取决于角频率 ω ，所以电流和电压的有效值可以用公式 $I = U \cdot \omega \cdot C$ 进行计算。
- 与欧姆定律类似， $Z = 1/(\omega \cdot C)$ 是轴承的容性阻抗。带陶瓷氧化物涂层轴承的电容值一般为 2 nF 到 20 nF，具体数值与轴承尺寸有关。当频率 50 Hz 时，容抗值在 0.15 MΩ 到 1.5 MΩ 之间，这明显比直流阻值低。当频率升高时，这个值还会进一步下降。但是在多数情况下，它都比非绝缘轴承的电阻值高很多，当电压大于等于 1 V 时，非绝缘轴承的阻值非常低 (1 Ω 或者更低)。

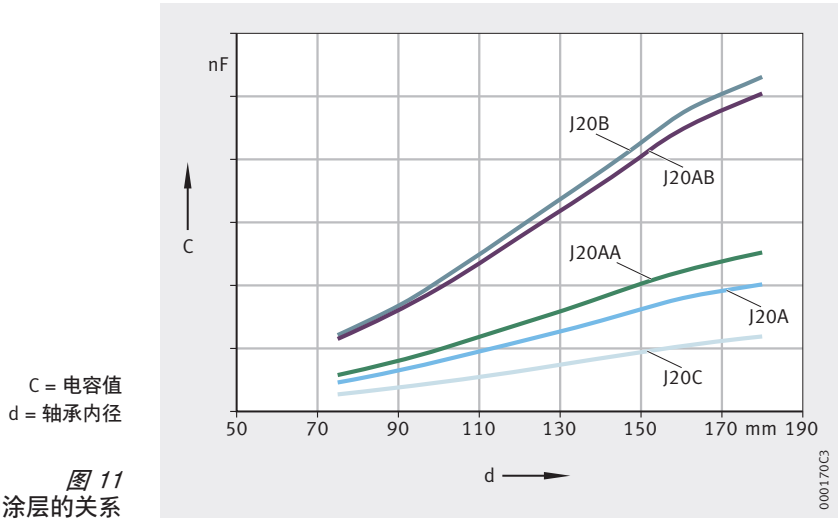
在相同的电压和频率下，通过的电流由整个电路的电容值决定。对于相同尺寸的轴承来说，涂层厚度 s 越厚、涂层面积 A 越小，对应的电容值就越小，因此通过的电流密度也越低，详见公式。

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \left(\frac{A}{s} \right)$$

C	F
涂层的电容值	$FV^{-1}m^{-1}$
ϵ_0	$FV^{-1}m^{-1}$
介电常数	$FV^{-1}m^{-1}$
ϵ_r	$FV^{-1}m^{-1}$
介电系数，与材料有关	m^2
A	m^2
涂层面积	m^2
s	μm
涂层厚度。	μm

电绝缘轴承

轴承电容值和轴承内孔直径及不同涂层之间的关系见下图，
图 11。

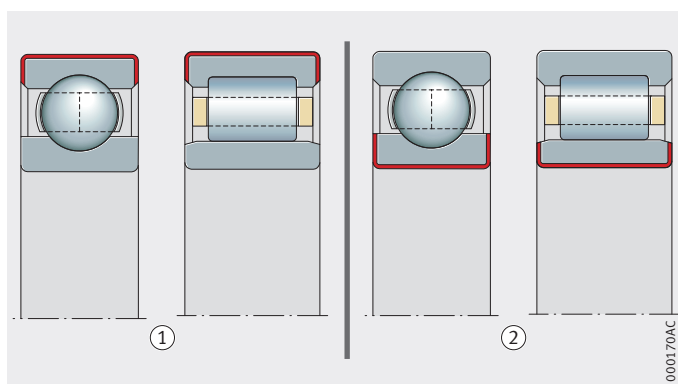


涂层类型和数值范围

采用不同类型绝缘涂层的轴承截面图如下，图 12。参数和数值范围列在下面的对照表中，见表。

- ① 外圈绝缘 J20A, J20B, J20AB, J20AA
- ② 内圈绝缘 J20C

图 12
涂层类型



不同类型涂层的参数

参数	J20AB	J20AA	J20C
击穿电压	1 000 VDC	3 000 VDC	3 000 VDC
工作环境	干燥, 潮湿	干燥, 潮湿	干燥, 潮湿
涂层厚度	100 μm	200 μm	200 μm
尺寸范围	70 mm – 1 400 mm 外径	70 mm – 500 mm 外径	70 mm – 340 mm 内径

不同类型涂层的参数 续表

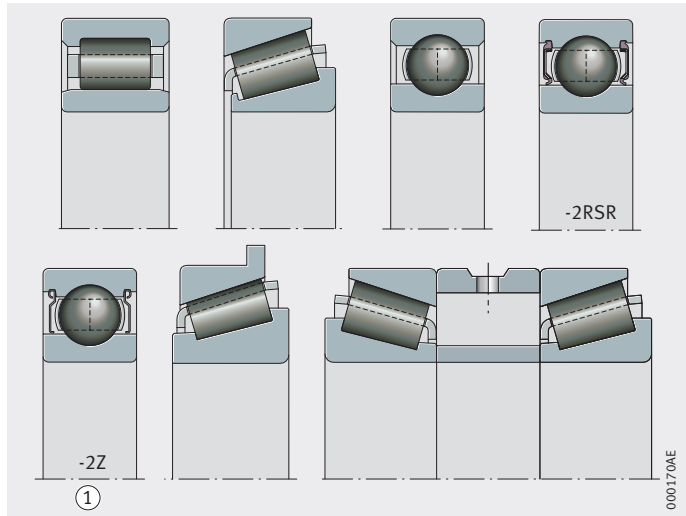
参数	J20B	J20A
击穿电压	500 VDC	1 000 VDC
工作环境	干燥	干燥
涂层厚度	≤ 100 μm	> 300 μm
尺寸范围	70 mm – 1 400 mm 外径	70 mm – 1 400 mm 外径 ¹⁾

1) 尽量在外径大于等于 500 mm 时选用。

需要做涂层的轴承套圈表面必须是圆柱形，并且不能有润滑油槽或油孔等结构。

电绝缘轴承

带绝缘涂层轴承的类型 下列结构的轴承套圈可采用陶瓷绝缘涂层，图 13。



① 仅有 J20C 涂层

图 13
轴承类型

其它类型的带绝缘涂层轴承需要协议供货。

- | | |
|------|------------------------------|
| 订货示例 | ■ 外圈带绝缘涂层的深沟球轴承，两端带密封 |
| | ■ 径向内部游隙 C3 |
| 订货名称 | 6220-2RSR-J20AA-C3 |
| 订货示例 | ■ 外圈带绝缘涂层的圆柱滚子轴承 |
| | ■ 径向内部游隙 C4 |
| 订货名称 | NU214-E-M1-F1-J20B-C4 |
| 订货示例 | ■ 内圈带绝缘涂层的深沟球轴承 |
| | ■ 径向内部游隙 C3 |
| 订货名称 | 6220-2RSR-J20C-C3 |

混合式轴承

绝缘轴承的另一个选择是 FAG 的混合式轴承。混合式轴承的套圈由滚动轴承钢制成，滚动体由陶瓷制成。

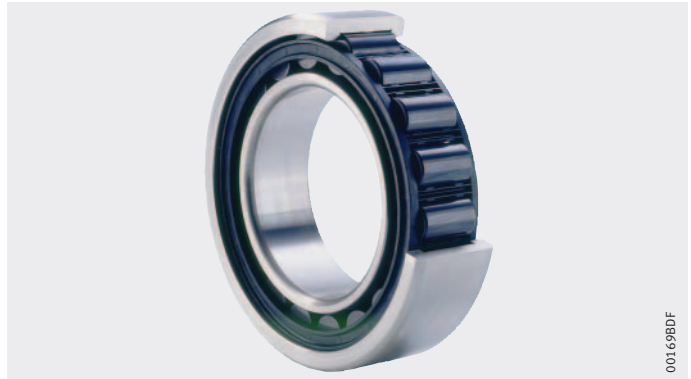
混合式轴承都带有前缀 HC。

陶瓷滚动体非常耐磨并且具有非常好的电绝缘性能。

混合式轴承不仅包括球轴承也包括圆柱滚子轴承，[图 14](#) 和 [图 15](#)。



[图 14](#)
混合式球轴承



[图 15](#)
混合式圆柱滚子轴承

电绝缘轴承

- 混合式轴承的优点** 与陶瓷涂层的绝缘轴承相比混合式轴承具有如下优点：
- 混合式轴承在电流回路中具有非常高的阻抗值。即使在高温下，直流电阻值仍然在 $G\Omega$ 范围内。电容值约 40 pF，这比带绝缘涂层的轴承低了近 100 倍。
 - 混合式轴承由于摩擦更低所以允许更高的转速，而且在运转时温升也更低。
 - 混合式轴承与标准轴承相比运转性能更好。

- 其他特性** 与标准钢球轴承相比，混合式球轴承具有：
- 不同的基本额定动载荷 C_r
 - 基本额定静载荷 C_{Or} 低 30%
 - 极限转速 n_G 高 20%。
- 另外，与带润滑脂的标准轴承相比混合式轴承的润滑脂寿命更长，详见 TPI WL 43-1210, FAG 混合式深沟球轴承。
- 对于小尺寸的滚动轴承来说，混合式轴承要比陶瓷涂层的轴承更经济。

- 订货示例**
- 带陶瓷滚动体的深沟球轴承
 - 实体黄铜保持架
 - 较高的精度等级 P6
 - 内部游隙 C3。

订货名称 **HC6214-M-P6-C3**

- 订货示例**
- 带陶瓷滚动体的圆柱滚子轴承
 - 圆锥孔
 - 实体黄铜保持架
 - 较高的精度等级 SP。

订货名称 **HCN1020-K-M1-SP**

我们的工程师非常愿意为您提供最经济的技术解决方案。

陶瓷和钢的材料参数 陶瓷和钢具有不同的材料参数：见表。

材料参数

材料参数	单位	陶瓷 (氮化硅 Si_3N_4)	钢 (100Cr6)
阻值数量级	$\Omega \cdot mm^2 m^{-1}$	10^{17}	10^{-1}
密度	g/cm^3	3.2	7.8
热膨胀系数	$10^{-6} K^{-1}$	3.2	11.5
弹性模量	MPa	315 000	210 000
硬度	HV 10	1 600 – 800	700 – 150

三相电机

对于三相感应电机，常用带 J20AB 涂层的深沟球轴承来防止电腐蚀的发生。

技术数据

参数	数值
功率	375 kW
设计	四极

技术要求

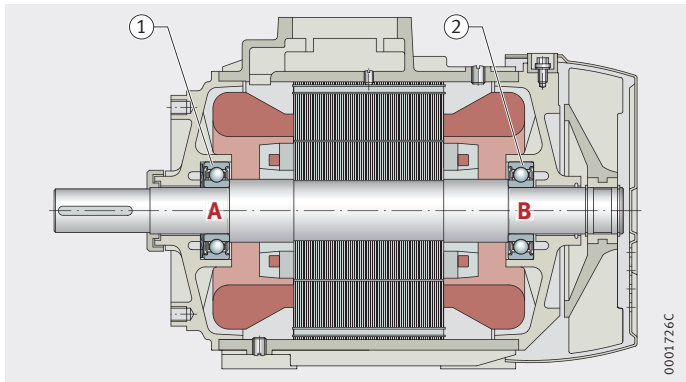
防止电机内部的感应电压产生电流破坏轴承。

解决方案

在该三相电机的风扇端使用一个带绝缘层的深沟球轴承 FAG 6316-J20AB-C3，驱动端使用一个普通深沟球轴承 FAG 6320-C3，图 1。带绝缘层的深沟球轴承切断了沿轴产生的感应电压引起的电流回路。两端轴承都采用脂润滑。需要安装再润滑装置。

A = 驱动端
B = 风扇端

图 1
三相电机



使用的产品

- ① FAG 6320-C3
- ② FAG 6316-J20AB-C3

轮对轴承布置

在低地板桥有轨电车的轮对轴承布置中，常用带 J20B 涂层的圆锥滚子轴承来防止电腐蚀的发生。

技术数据

参数	数值
v_{\max}	70 km/h
牵引轮中径	560 mm

技术要求

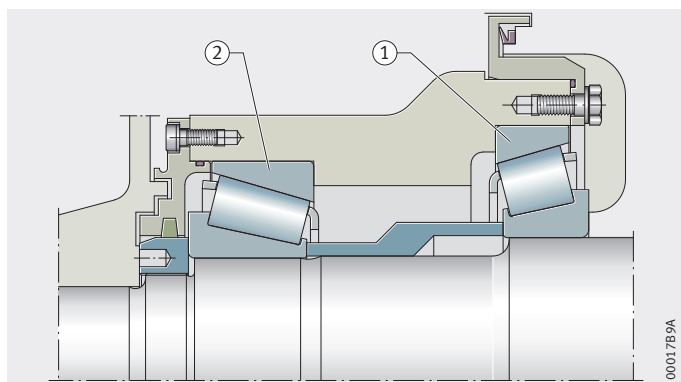
防止电机内部的感应电压产生电流破坏轴承。

解决方案

在低地板桥有轨电车中，圆锥滚子轴承为可调节的轴承布置，[图 1](#)。

在这个可调节的轴承布置中，圆锥滚子轴承以 O 型配置：

- 外侧：圆锥滚子轴承 FAG 580065.30228-A-J20B
- 内侧：圆锥滚子轴承 FAG Z-803889.32224-A-J20B。



[图 1](#)
轮对轴承布置

使用的产品

- ① FAG 580065.30228-A-J20B
- ② FAG Z-803889.32224-A-J20B

安装在有轨电车上的牵引电机轴承布置

在额定功率 500 kW 的三相电机中，常用带 J20AA 涂层的深沟球轴承和圆柱滚子轴承来防止电腐蚀的发生。

技术要求 防止电机内部的感应电压产生电流破坏轴承。

解决方案 在该三相电机转子的风扇端使用深沟球轴承 FAG 6316-J20AA-C3，在驱动端使用圆柱滚子轴承 FAG NU320-E-M1-F1-J20AA-C4。圆柱滚子轴承和深沟球轴承 都带有绝缘涂层 J20AA，图 1。两端轴承都使用脂润滑，并采用迷宫式密封结构来防止外界污染物侵入轴承。需要安装再润滑装置。

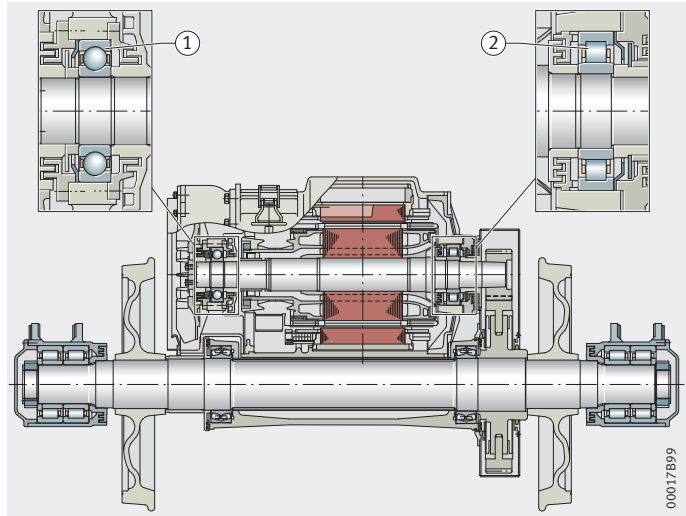


图 1
牵引电机轴承布置

使用的产品

- ① FAG 6316-J20AA-C3
- ② FAG NU320-E-M1-F1-J20AA-C4

风力发电机

在风力发电机中，常用带 J20C 涂层的深沟球轴承来防止电腐蚀的发生。

技术要求 防止电机内部的感应电压产生电流破坏轴承。

解决方案 在风力发电机中安装两个深沟球轴承 FAG 6332-M-J20C-C3。由于电压的快速切换，产生的高频电流将会同时通过两端轴承。最好的防止轴承电腐蚀的方案是选择内圈带 200 μm 绝缘涂层的深沟球轴承，图 1。

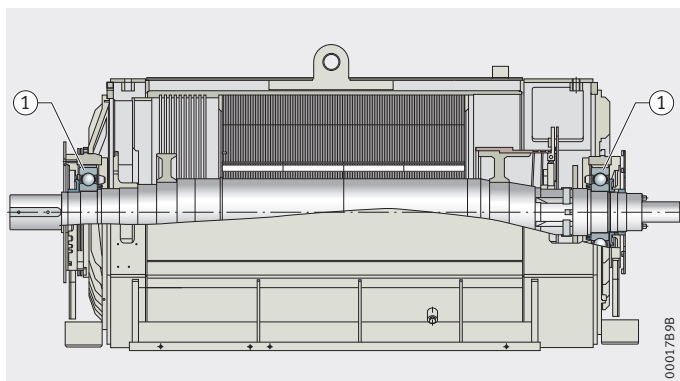


图 1
风力发电机

使用的产品 ① FAG 6332-M-J20C-C3

舍弗勒贸易 (上海) 有限公司

上海嘉定区安亭镇安拓路 1 号

邮编 201804

中国

电话: +86 21 3957 6500

传真: +86 21 3957 6600

为保证资料的正确性, 书中每部分都经过了仔细的审核。但本公司不对任何不正确或不完整的数据承担责任。我们保留做技术修改的权利。

© Schaeffler Technologies AG & Co. KG

版本: 2020 年 11 月

没有本公司的正式授权, 严禁复制本书或其部分内容。

TPI 206 zh-CN