



电绝缘轴承

防止电腐蚀的滚动轴承

产品技术信息

1 前言

过电流会发生在以下应用的滚动轴承中：

- 轨道车辆领域的轮对轴承、齿轮箱和牵引电机
- 动力传输领域的直流电和交流电电机
- 风力发电行业的发电机

在不利条件下，这会导致轴承滚道和滚动体损坏以及润滑油老化，从而造成电机和发电机过早发生故障。除了需要支付维修成本之外，还会增加由于停机和停产带来的额外成本。

一种比较经济的解决方案是在设计阶段使用电绝缘轴承，从而通过降低维护成本和提高机器利用率来为客户创造巨大价值。

本刊物包含特定应用的绝缘建议、应该对单个还是一副轴承采取绝缘处理以及哪种绝缘方法最合适。

目录

1	前言	3
2	技术原理	5
2.1	滚动轴承轴电流 - 产生原因和补救措施	5
2.2	过电流导致的典型轴承损伤	6
2.2.1	滚道和滚动体上的痕迹	7
2.2.2	电蚀沟痕	7
2.2.3	轴承损坏的发展历程	8
2.2.4	对润滑的影响	8
3	电绝缘轴承	9
3.1	滚动轴承的电气特性	9
3.1.1	无涂层滚动轴承的电气特性	9
3.1.2	电绝缘滚动轴承的电气特性	9
3.2	陶瓷涂层轴承	11
3.2.1	涂层类型	11
3.2.2	涂层工艺	12
3.2.3	新型 J20G 涂层提高了绝缘性能	12
3.2.4	涂层参数	14
3.2.5	带陶瓷涂层的轴承	17
3.2.6	订购示例	17
3.3	混合轴承	19
3.4	标准使用建议	21

2 技术原理

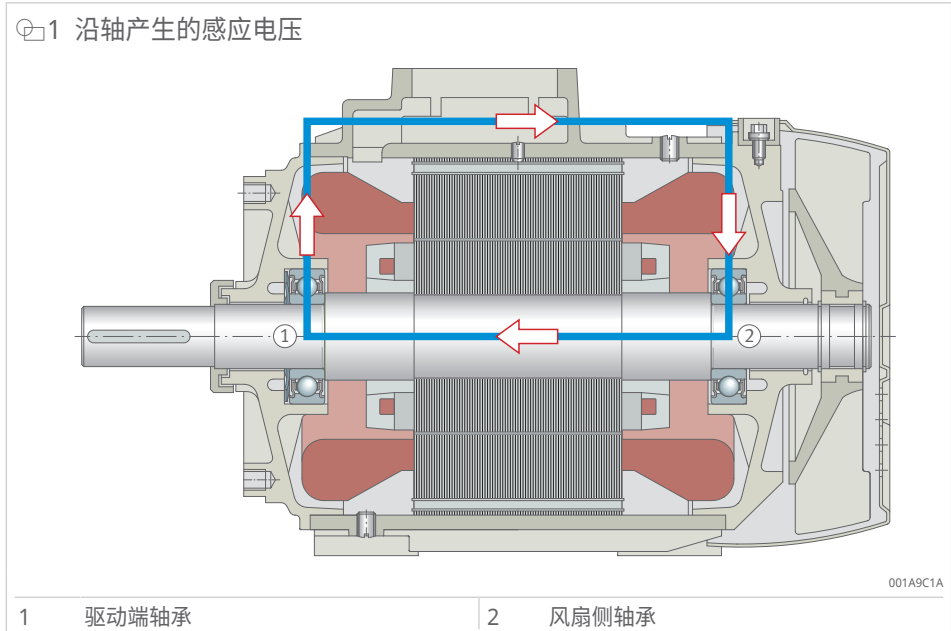
2.1 滚动轴承轴电流 – 产生原因和补救措施

根据电动机、变频器和所涉及的工作条件，电机中主要会出现三种不同类型的多余电流。相应的补救措施也是根据电流原因或类型进行选择的。采用导电滚动体、改进接地以及对滚动轴承绝缘，都是一些成功的措施。

环路电流

对于极数较少、尺寸很大的电动机或发电机，磁不对称会产生低频轴电压。对于机架尺寸超过 100 mm，且由变频器操控的电机，流经定子槽绝缘材料的高频电流会导致高频轴电压。

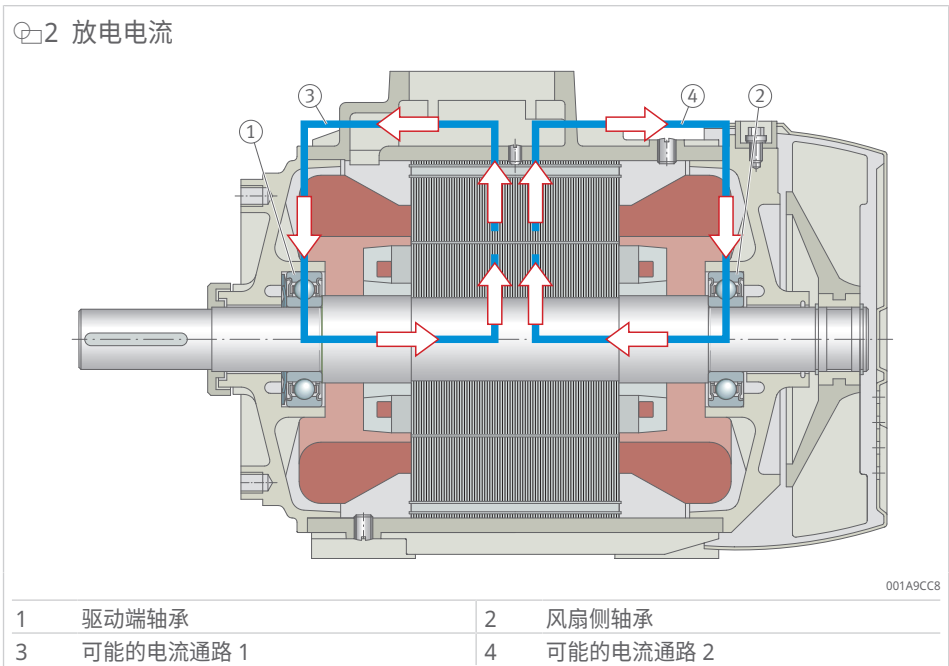
在未使用绝缘轴承的情况下，低频和高频轴电压会产生环路电流。针对此问题，一种有效实用的补救方法是采用带有陶瓷氧化物涂层 (Insutect A) 的滚动轴承和来自 Schaeffler 的混合滚动轴承。涂有 Insutect A 的滚动轴承是风扇侧轴承绝缘特别常见的一种选择。



放电电流

共模电压是变频器操控的电机中意外出现的电压。这种电压存在于轴和轴承座之间，会产生放电电流（特别是在机架尺寸不超过 315 mm 的小型电机中），这些电流会单独流经两个轴承。

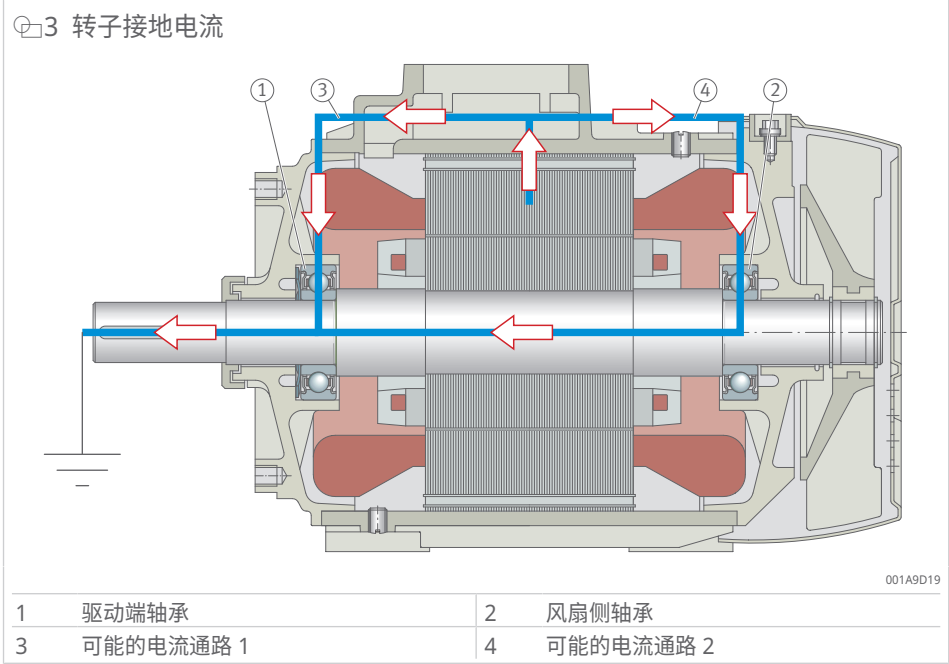
实践证明，采用陶瓷滚动体和/或导电解决方案的两个混合轴承是解决放电电流的有效办法。同时也可以选择 Insutect A 涂层作为解决方案，涂层厚度必须合适。电机和相邻零件决定着哪一种解决方案更适合相应的应用场合。



转子接地电流

特别是在大型固定式电动机械中，接地条件不良会导致电流从机壳中流出，经轴承流入到轴中，并流经从动或驱动装置。

此类电流的合适解决办法包括对高频电流接地、采用绝缘联轴器或对驱动侧和风扇侧滚动轴承绝缘。



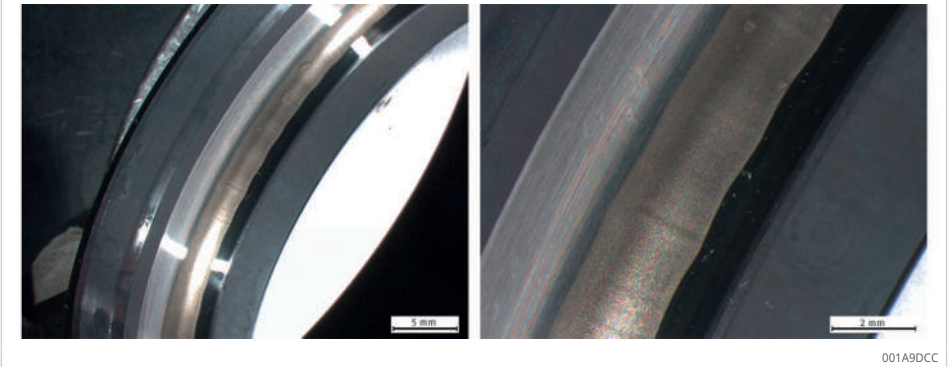
2.2 过电流导致的典型轴承损伤

不管轴承承受的是直流电还是频率高达 MHz 级别的交流电，轴承表面的变化始终相同。

2.2.1 滚道和滚动体上的痕迹

在许多情况下，过电流会在滚道和滚动体表面上产生均匀的暗灰色痕迹。这些痕迹也可能是其他影响因素造成的，例如由受污染润滑剂中的研磨剂成分造成的。

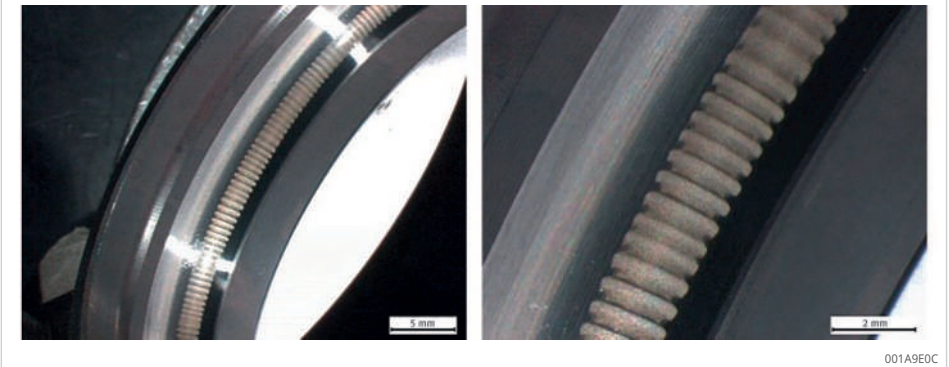
图4 滚道上的痕迹



2.2.2 电蚀沟痕

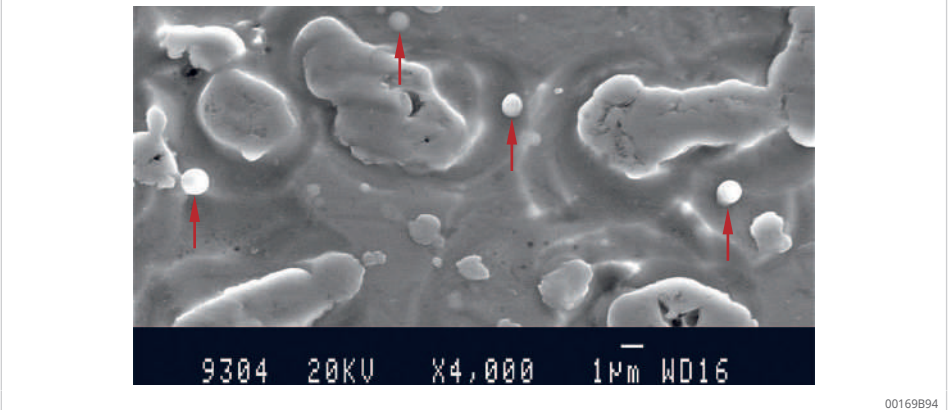
电蚀沟痕由规律性沟槽组成，这些沟槽沿滚动方向出现在不同深度的表面上。过电流通常是造成电蚀沟痕的原因。

图5 电蚀沟痕



使用扫描电子显微镜 (SEM) 观测后可发现，这两种损坏结构都由 μm 级别的熔坑和焊珠组成。损坏结构以紧密压实的形式与碾压过的滚道重叠。这也证实了有电流通过轴承。

图6 扫描电子显微镜 (SEM) 下的损坏结构



2.2.3 轴承损坏的发展历程

熔坑和焊珠是在滚道和滚动体表面上的微小的接触点之间发生放电时形成的。在全流体润滑状态下，电流会击穿油膜的最薄点，电火花产生的能量会在短时间内熔化相邻金属的表面。

在混合摩擦情形中，相邻金属之间的接触表面会熔合在一起。然后，这种熔合会因轴承的旋转而立即重新分离，在此期间，材料会从表面脱离并立即凝固形成焊珠。有些焊珠与润滑剂混合，并沉积在金属表面上。随着碾压不断进行，熔坑和焊珠可以变得平坦和光滑。在持续电流的作用下，在相邻的表面上反复重复上述的熔融、凝固、碾压的过程。

电蚀沟痕是造成大多数轴承故障的原因 ▶7|④5。

其成因背后的普适性理论如下所示：

当滚动体滚过任何足够大的熔坑时，它会经历径向位移。此径向位移的大小取决于轴承的内部几何形状、转速和载荷。当滚动体往复摆动时，润滑油膜的厚度会减小。同时，该区域会产生更多的新的火花，并且触发此种自激式过程，在滚道上产生周期性结构。经过一段时间后，电蚀沟痕会布满套圈滚道的承载区甚至整个圆周。这种电蚀沟痕会导致轴承振动进一步增加，最终导致轴承失效。

2.2.4 对润滑的影响

电流也会对润滑产生不利影响。它会损坏基础油和添加剂。过早老化和铁颗粒浓度增加会导致轴承的润滑特性和噪音性能明显恶化。

3 电绝缘轴承

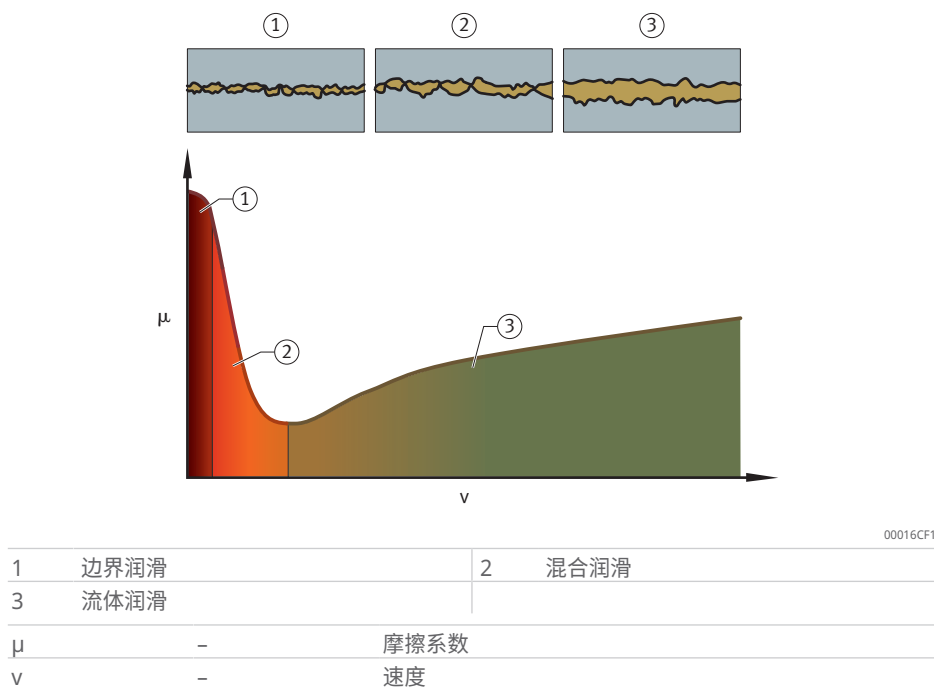
内圈或外圈有陶瓷涂层的滚动轴承是电绝缘轴承。这种陶瓷涂层的功能是减少或消除流经轴承的电流。

还有混合轴承，它含有陶瓷制成的滚动体。在这些轴承中，滚动体可阻止电流通过。

3.1 滚动轴承的电气特性

3.1.1 无涂层滚动轴承的电气特性

图7 无涂层滚动轴承的电气特性



滚动轴承的电气特性取决于润滑状况。主要为固体接触，且仅有部分流体摩擦的润滑条件称为边界润滑（区域 1）。在这种情况下，轴承可视为具有欧姆电阻。

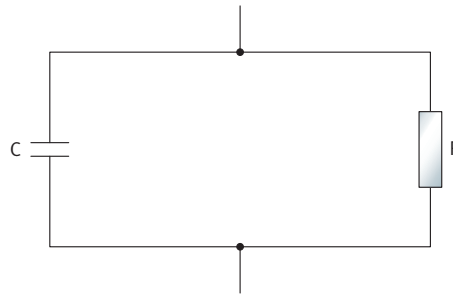
如果相对滚动的接触面被润滑油膜完全隔开，则称为“流体润滑”（区域 3）。在流体润滑的情况下，滚动轴承表现出电容特性。

在混合摩擦或部分润滑（区域 2）的情况下，存在薄薄的润滑油膜，但滚动接触面不断进行接触。在这种情况下，滚动轴承同时表现出欧姆电阻和电容特性。

3.1.2 电绝缘滚动轴承的电气特性

绝缘轴承可视为电阻和电容的并联电路。

图8 电阻和电容的并联电路



000171F1

C	F	电容
R	Ω	欧姆电阻

为了获得良好的绝缘效果，欧姆电阻应尽可能高，电容应尽可能低。

选择电绝缘材料的决定性因素是所产生的电压类型。在直流电和 50 Hz 或 60 Hz 交流电的情况下，则电阻起着决定性作用。如果是较高频率的交流电，则轴承的电容起着决定性作用。这些高频交流电常常出现在应用变频器操控的电机中，其频率通常从 100 kHz 至几MHz 不等。

以下 2 种类型的电阻非常重要：

- 直流电压阻值

根据涂层 J20AB，带有 Insutect A 涂层的轴承其直流电压电阻在室温下至少为 50 MΩ。因此，根据欧姆定律 $I = V/R$ ，电压不高于 1000 V 时，只可能出现明显低于 20 μA 的电流。低于 20 μA 的电流对轴承无关紧要。

- 交流电压阻抗

越来越多的应用使用变频器，这些变频器可产生数百 kHz 至若干 MHz 的多余无用高频电流。在此频率范围内，欧姆电阻起着次要作用。此时决定性因素是轴承绝缘材料的电容阻抗，电容阻抗应尽可能高，这在很大程度上取决于轴承的电流频率和电容。

图1 阻抗取决于频率和电容

$$Z = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

C	F	电容
f	Hz	频率
Z	Ω	阻抗

带 Insutect A 涂层的滚动轴承可使用以下公式计算电容：

图2 根据面积和层厚计算电容

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

ϵ_0	As/Vm	电场常数
ϵ_r	-	相对介电常数，取决于材料
A	mm ²	涂层面积
C	F	电容
s	mm	层厚

不过，较厚的涂层和较小的涂层表面会导致低电容，从而产生高阻抗。

实践中发现了一个用于评估电流通路所带来的危害程度的可靠指标，那就是计算电流密度 J_S ，即有效电流除以滚动体与轴承内圈或外圈之间的总接触面积。计算的电流密度取决于轴承类型和工况。在有效电流大于约 0.1 A/mm^2 的电流密度下，存在电腐蚀的风险 ▶6 | 2.2。此外，在电流密度较低的情况下，还会出现白色蚀刻裂纹 (WEC)。白色蚀刻裂纹是某些润滑油与附加载荷（例如电流通过）之间相互作用的结果。

13 电流密度

$$J_S = \frac{I}{A_{\text{eff}}} \left[\text{A/mm}^2 \right]$$

A_{eff}	mm^2	有效接触面积
I	A	电流强度
J_S	A/mm^2	有效电流密度

3.2 陶瓷涂层轴承

陶瓷涂层轴承是内圈或外圈有陶瓷涂层 Insutect A 的标准轴承。

3.2.1 涂层类型

9 外圈上有陶瓷涂层的深沟球轴承



001A9C4F

10 外圈上有陶瓷涂层的圆柱滚子轴承

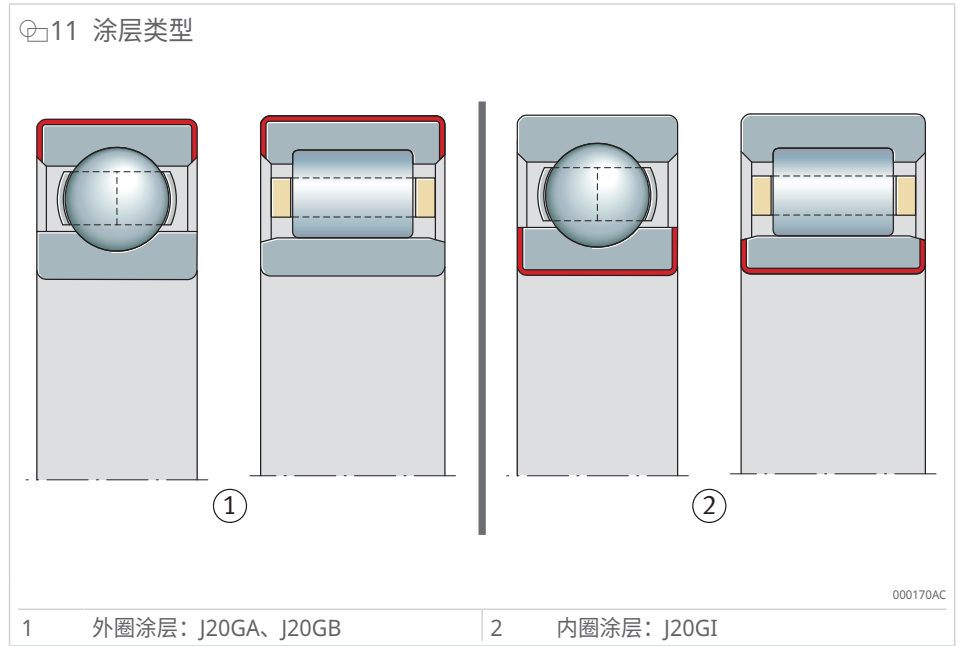


001A9C2F

涂有 Insutect A 的轴承具有出色的电气绝缘保护性。带有氧化物陶瓷涂层的轴承通过后缀 J20 和附加字母组合 GA、GB 或 GI 来标识。以前使用的是 AB、AA 或 C 后缀。氧化物陶瓷层非常坚硬、耐磨，具有良好的导热性。

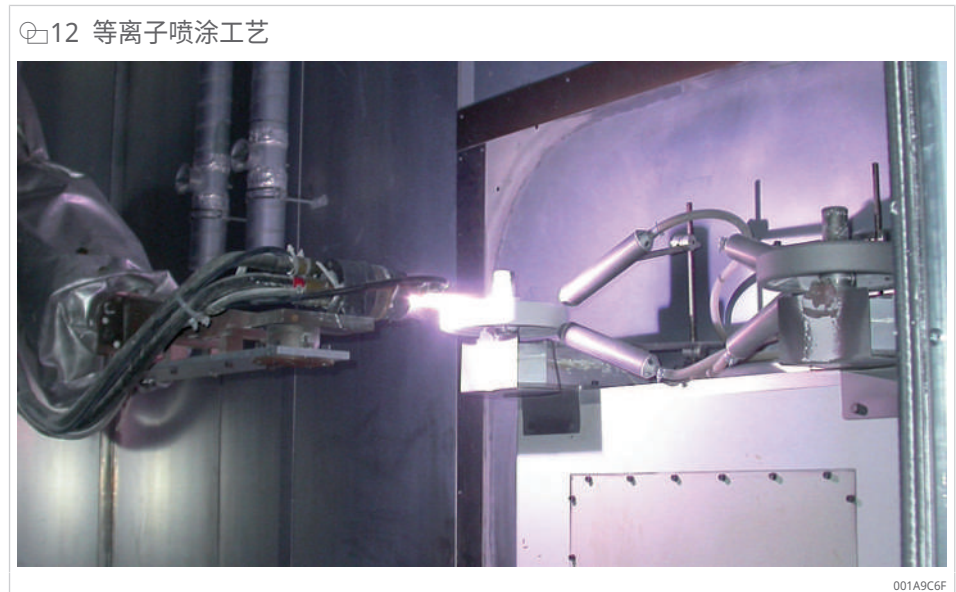
电绝缘滚动轴承的外部尺寸与 DIN 616 (ISO 15) 中的尺寸相对应。因此，电绝缘轴承可与标准轴承互换。

采用不同类型绝缘涂层的轴承截面图如下



3.2.2 涂层工艺

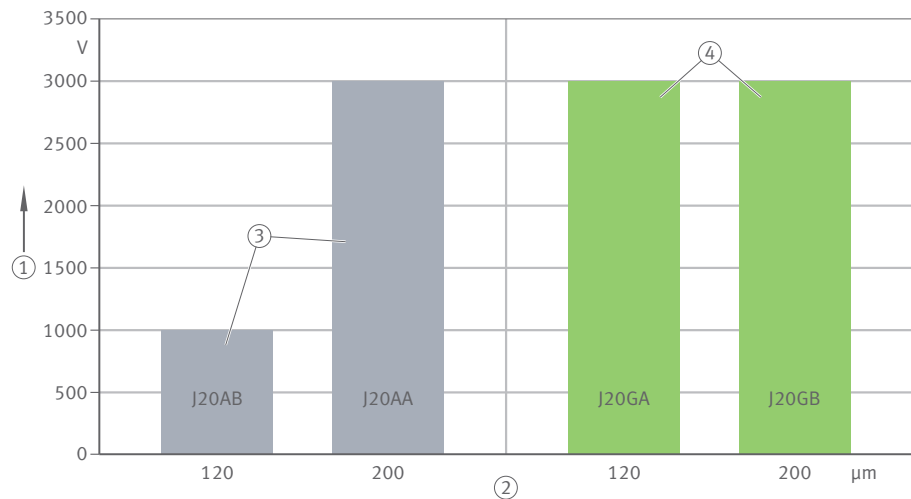
轴承采用等离子喷涂法进行涂层。在等离子喷涂法中，首先在两个电极之间产生电弧，从而使引入的惰性气体离子化。然后，产生的等离子气流用来传送氧化铝粉末到喷涂设备中。氧化铝粉末被熔化并高速喷涂到外圈或内圈上。在进行喷涂之前，基体材料先进行粗化处理。然后进行氧化层喷涂。



3.2.3 新型 J20G 涂层提高了绝缘性能

经过系统性的开发，改善了带有 Insutect A 涂层的滚动轴承绝缘性。除了干燥环境中的绝缘性能改善外，在潮湿的运行条件下，绝缘性能也得到了显著提高。下图是与之前涂层性能参数的比较。

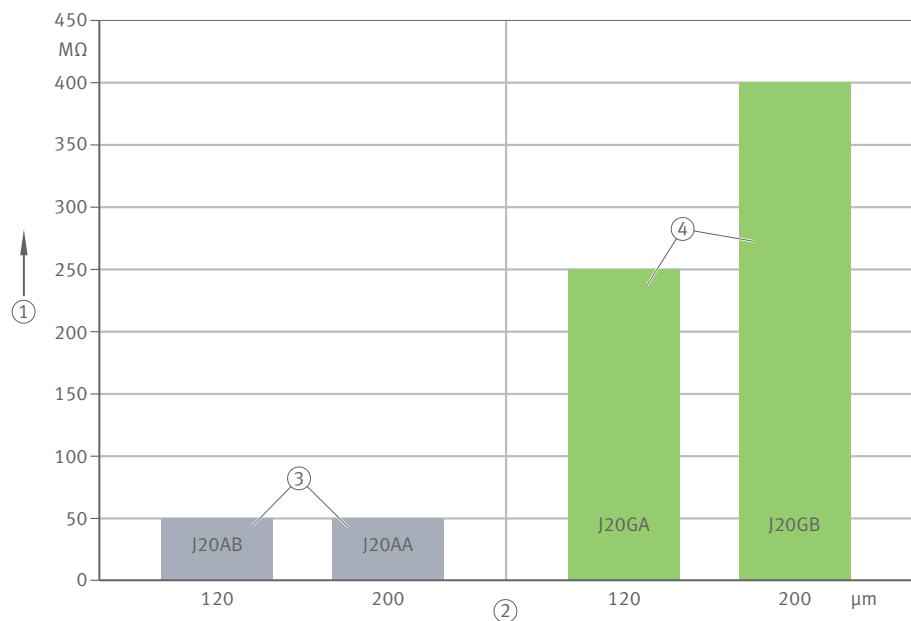
图 13 干燥和潮湿环境中的介电强度



001A9D9B

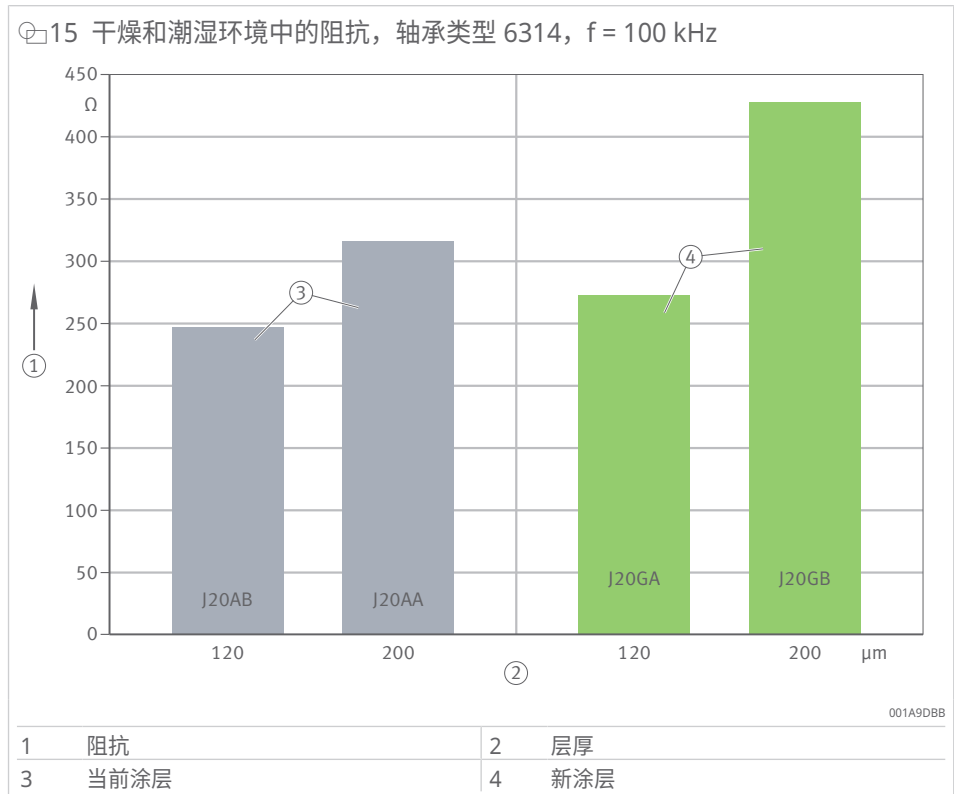
1 击穿电压	2 层厚
3 当前涂层	4 新涂层

图 14 干燥环境中的欧姆电阻



001A9DAB

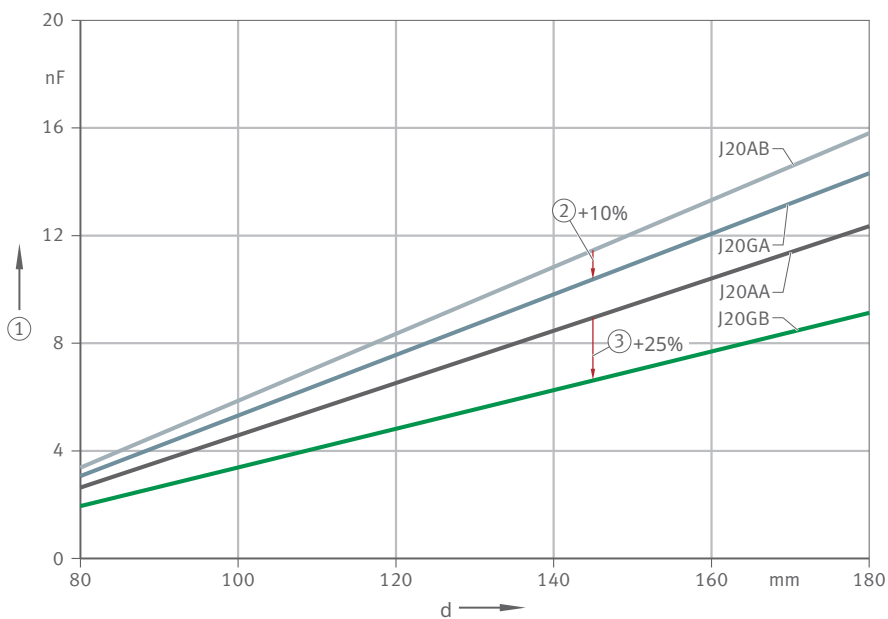
1 欧姆电阻	2 层厚
3 当前涂层	4 新涂层



3.2.4 涂层参数

电气仿真和计算正在越来越多地用于寻找合适的绝缘解决方案 - 滚动轴承的电气性能在此过程中发挥着关键作用。润滑油膜的电绝缘效果只有在确切的工作参数时才能确定下来。Schaeffler为您提供专家指导和相关帮助。阻抗或电容对于 Insutect A 轴承绝缘层的电气特性至关重要。60、62 和 63 系列深沟球轴承的电容参考值可在下图中找到。为了使通过轴承的电流降到最佳效果，需要实现尽可能低的电容。所示数值也可用作具有相同外部尺寸的其他轴承设计的初始近似值，例如，尺寸范围相同的圆柱滚子轴承。电容值也适用于潮湿环境，例如 90 % 相对湿度。

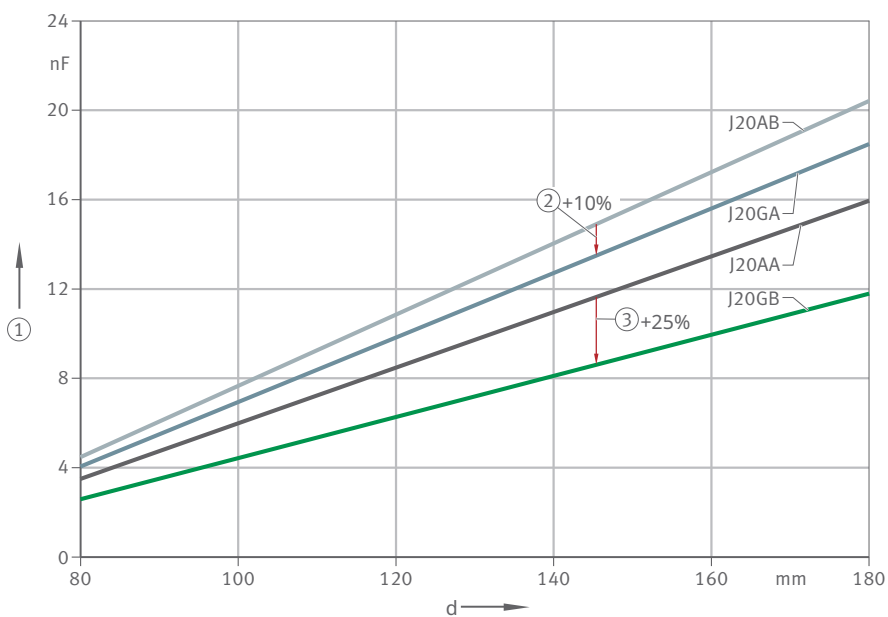
④ 16 60 系列滚动轴承电容的参考值



001A9E7D

1	电容	2	与 J20AB 比, J20GA 的电容提高 10%
3	与 J20AA 比, J20GB 的电容提高 25%		
d	mm	内径	

④ 17 62 系列滚动轴承电容的参考值



001A9E8D

1	电容	2	与 J20AB 比, J20GA 的电容提高 10%
3	与 J20AA 比, J20GB 的电容提高 25%		
d	mm	内径	

图18 63 系列滚动轴承电容的参考值

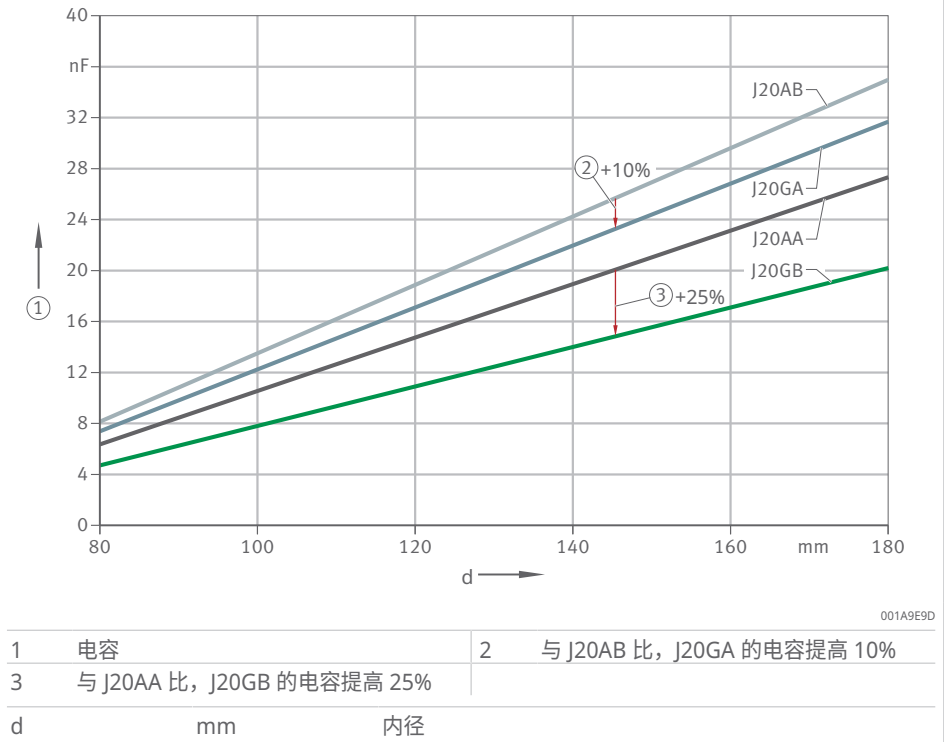


图1 涂层类型的参数符合 Insutect A J20G 的要求

参数		J20GA	J20GB	J20GI
轴承涂层	-	外圈	外圈	内圈
层厚	μm	120	200	120
运行环境	-	干燥、潮湿	干燥、潮湿	干燥、潮湿
击穿电压	DCV	3000	3000	3000
欧姆电阻	MΩ	250	400	250
阻抗, 6314, f = 100 kHz	Ω	273	428	583
可能的内径范围	mm	-	-	≥ 70
可能的外径	mm	70 ... 800	70 ... 800	... 800

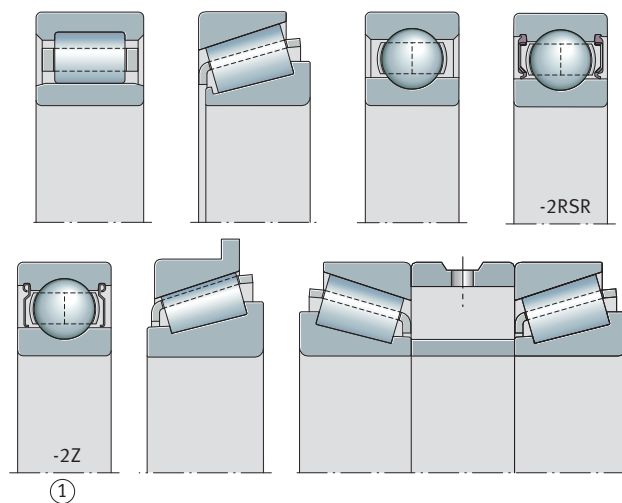
轴承套圈的涂层面为圆柱形。如果有沟槽或润滑孔, 我们建议您联系 Schaeffler 的相关应用工程部门。

涂层的套圈经过 100 % 绝缘检测。

3.2.5 带陶瓷涂层的轴承

下列结构的轴承套圈可采用陶瓷绝缘涂层。

图19 轴承设计示例



000170AE

1 仅带有 J20GI 涂层

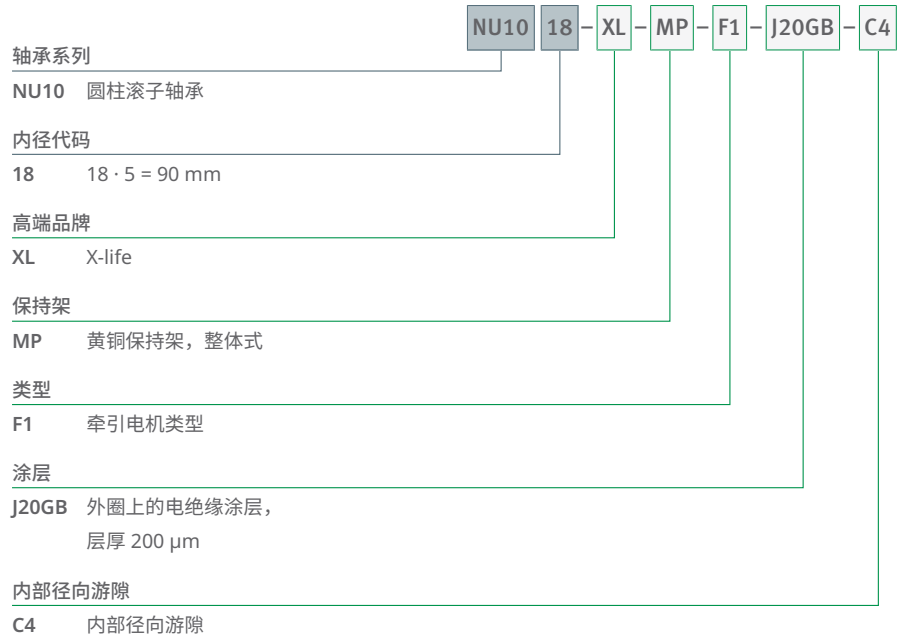
3.2.6 订购示例

图20 外圈带绝缘涂层的深沟球轴承



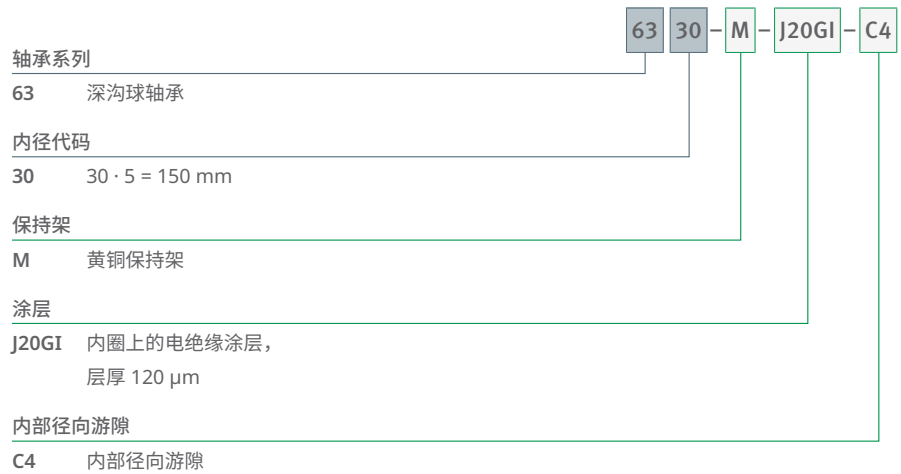
001B5490

21 外圈带绝缘涂层的圆柱滚子轴承



001B54A0

22 内圈带绝缘涂层的深沟球轴承

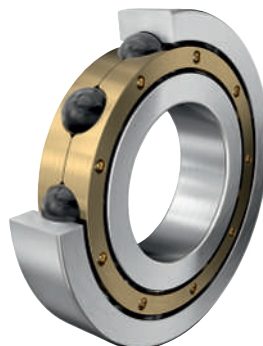


001B54B0

3.3 混合轴承

Insutect A 绝缘轴承另一个选择是 FAG 混合轴承。混合轴承的套圈由滚动轴承钢制成，滚动体由陶瓷制成。混合轴承由前缀 HC 进行标识。陶瓷滚动体非常耐磨并且具有非常好的电绝缘性能。混合轴承可作为球轴承和圆柱滚子轴承提供。

图 23 混合球轴承



0019D336

图 24 混合圆柱滚子轴承



001A9EE3

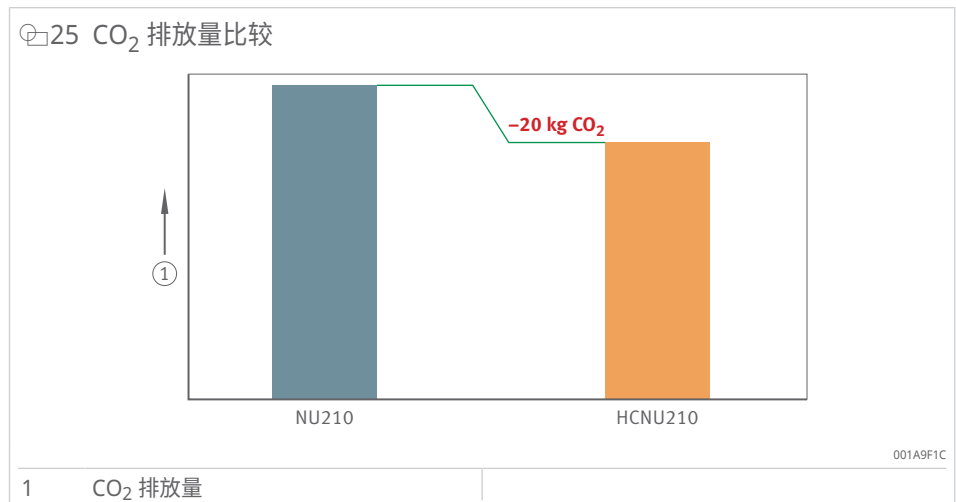
混合轴承的优点

混合轴承与陶瓷涂层轴承相比具有以下优势：

混合轴承对电流通路具有非常高的电阻，即使在高温下，其直流电阻为GHz 级别。电容的典型值为 40 pF，因此是带有陶瓷涂层的轴承 100 分之一。

混合轴承由于摩擦更低，所以允许更高的转速，而且运转时温升也更低。滚动体的重量较轻，因此摩擦力较低。低摩擦可减少应用场景中 CO₂ 的排放量。在高速列车行驶一年大约 600000 km 的情况下，标准圆柱滚子轴承和混合圆柱滚子轴承的 CO₂ 排放量之间的比较表明，后者 CO₂ 减少了 20 kg。

混合轴承比标准轴承具有更为出色的运行特性。



其他特性

与标准轴承相比，混合轴承具有以下特性：

- 具有同等的基本动载荷额定值 C_r ，符合 ISO 20056-1 要求
- 具有同等的基本静载荷额定值 C_{0r} ，符合 ISO 20056-2 要求
- 极限转速 n_G 高出 20 %

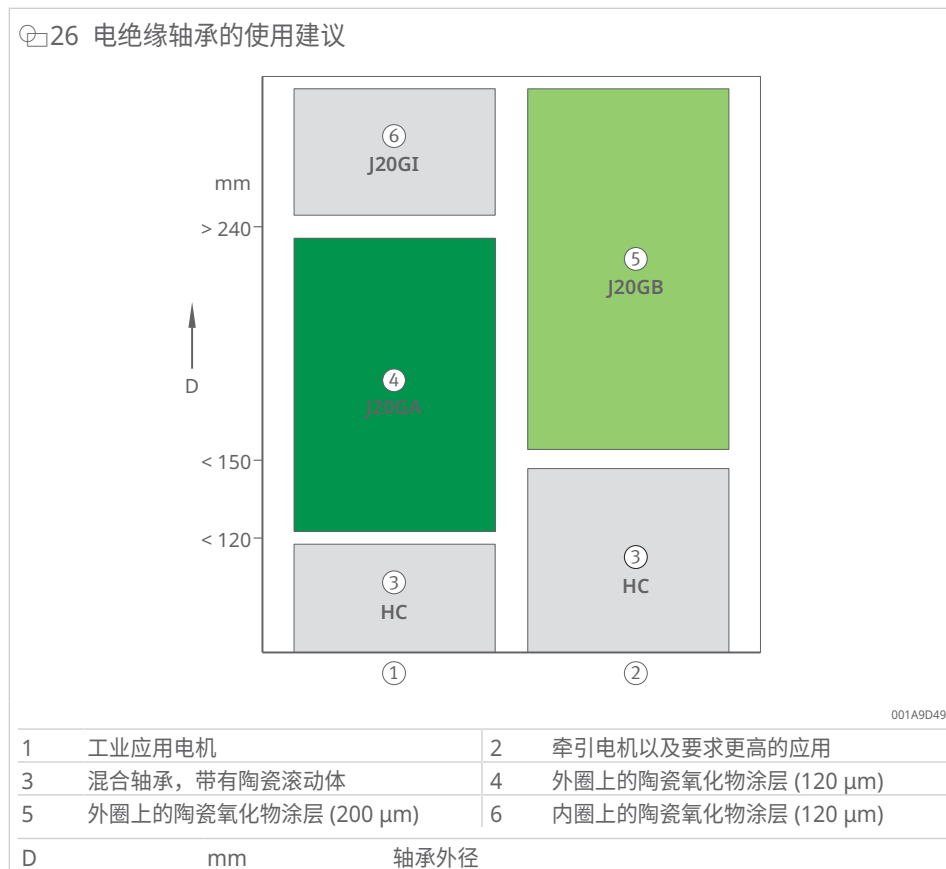
混合轴承具有相同的尺寸，因此适合替换。此外，混合轴承的润滑脂工作寿命是标准轴承的两倍。混合轴承在生命周期成本方面也比标准轴承具有优势。混合轴承可以将特定产品生命周期成本降低多达 20 %。

我们的销售工程师很乐意为您提供相关建议，帮您选择具有最佳经济和技术特性的解决方案。

3.4 标准使用建议

在特定电机或发电机中，防止电流通路损坏的最佳补救措施取决于多种影响因素，例如工作条件、电机类型或变频器类型。对于电绝缘轴承的使用，只能基于经验值提出初步建议。

图 26 电绝缘轴承的使用建议



快速切换式变频器越来越多地用于各种应用领域，这会使滚动轴承承受较高的电气载荷。对于这些应用，Schaeffler 推荐混合轴承或更厚涂层的轴承。Schaeffler 已开发出电绝缘层厚达 700 μm 的滚动轴承，并可按协议供货。

舍弗勒贸易（上海）有限公司
上海市嘉定区安亭镇安拓路 1 号
邮编 201804
中国
www.schaeffler.cn
info_china@schaeffler.com
电话: +86 21 3957 6666

我们已对所有信息进行了仔细的汇编和检查，但我们无法保证完全准确。我们保留进行更改的权利。因此，请始终检查是否有更新或修订的信息。本出版物在旧出版物的基础上进行了更新。只有在我们许可的情况下，才允许打印本出版物（包括摘录）。

© Schaeffler Technologies AG Co. KG
TPI 206 / 03 / zh-CN / CN / 2024-10