



电绝缘轴承

防止电腐蚀的滚动轴承

产品技术信息

1 前言

在以下应用场景中，滚动轴承可能发生电流现象：

- 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和交流电机
- 风力发电行业的发电机

在不利条件下，过电流会导致轴承滚道和滚动体损坏以及润滑剂老化，最终可能造成电机和发电机突发性早期失效。除了需要执行维修工作之外，还会因设备停机或完全停产而带来额外成本。

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。

本刊物针对特定应用的绝缘建议：包括对单个还是一对轴承采取绝缘措施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 轴承损坏的发展机理 8

2.2.4 对润滑剂的影响 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 陶瓷涂层轴承设计 17

3.2.6 订购示例 17

3.3 混合轴承 19

3.4 应用建议 21

2 技术原理

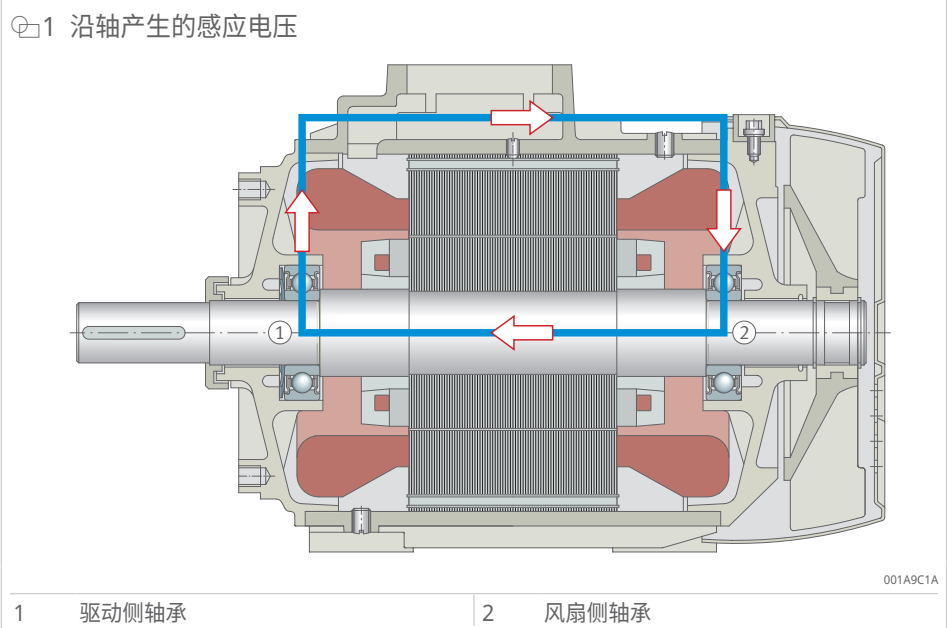
2.1 滚动轴承轴电流 – 产生原因和补救措施

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 three（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，磁通量分布不均匀会产生低频轴电压。对于中心高超过 100 mm 且由变频器控制的电机，流经定子槽绝缘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，一种有效的解决方案是采用 Schaeffler 带有陶瓷涂层 (Insutect A) 的滚动轴承或混合滚动轴承。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。

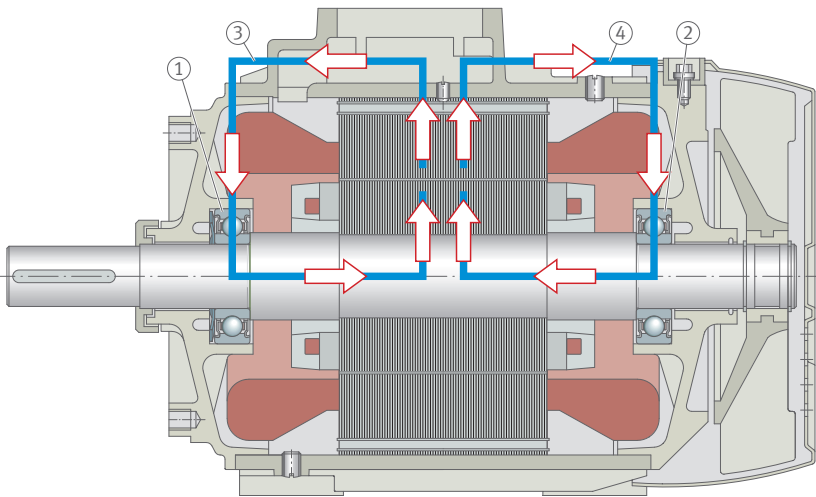


放电电流

共模电压是变频器控制的电机中不希望出现的电压。这种电压存在于轴和轴承座之间，会产生放电电流（特别是在中心高不超过 315 mm 的小型电机中），这些电流会分别流经两个轴承。

实践证明，采用陶瓷滚动体的混合轴承或导电解决方案是解决放电电流的有效措施。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了哪种解决方案更适合特定的应用场合。

2 放电电流



001A9CC8

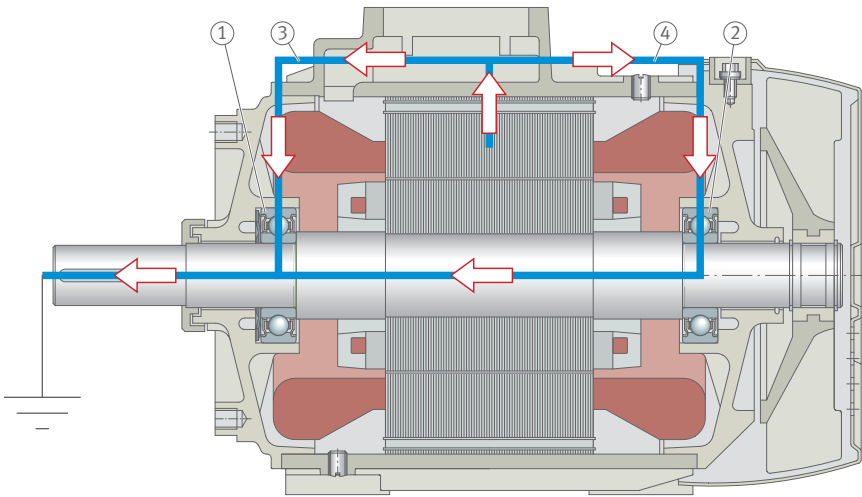
1	驱动侧轴承	2	风扇侧轴承
3	可能的电流通路 1	4	可能的电流通路 2

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。

此类电流的适用补救措施包括适用于高频电流的接地系统、绝缘联轴器，或对驱动侧和风扇侧滚动轴承绝缘。

3 转子接地电流



001A9D19

1	驱动侧轴承	2	风扇侧轴承
3	可能的电流通路 1	4	可能的电流通路 2

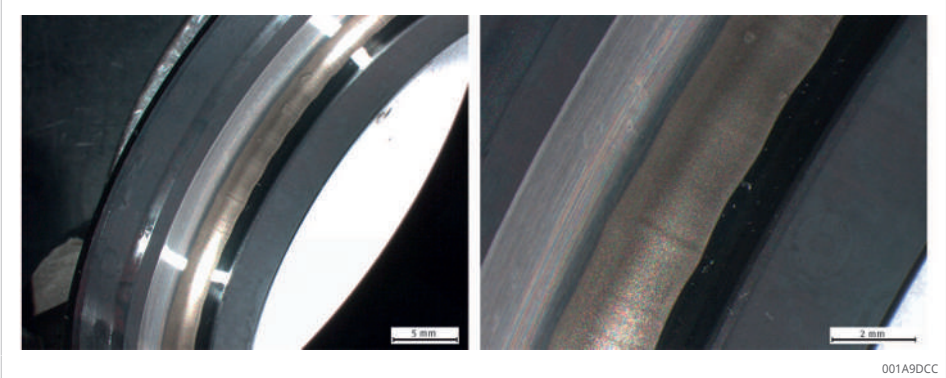
2.2 过电流导致的典型轴承损伤

不管轴承承受的是直流电还是频率高达MHz级别的交流电，我们总能在轴承内部发现同样的失效形式。

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磨屑成分造成的。

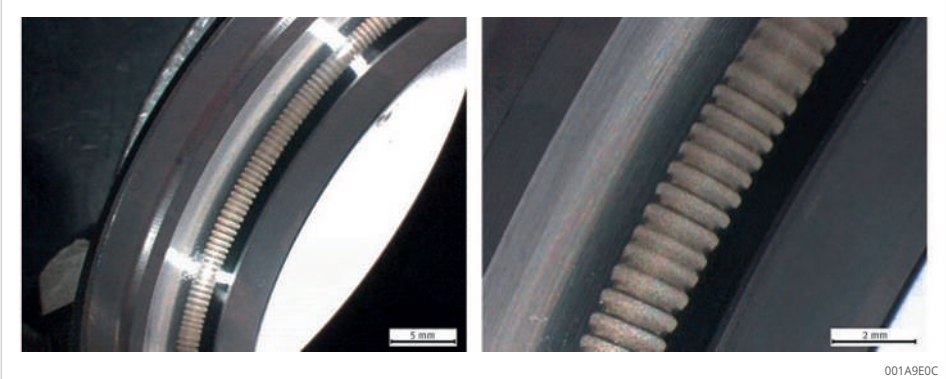
图4 滚道上的痕迹



2.2.2 电蚀沟痕

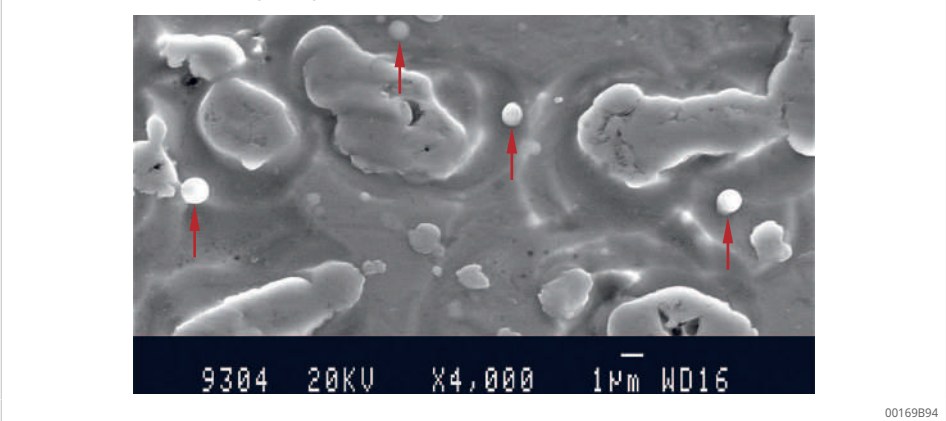
电蚀沟痕由规律性沟槽组成，这些沟槽沿滚动方向出现在不同深度的表面上。过电流通常是造成电蚀沟痕的原因。

图5 电蚀沟痕



使用扫描电子显微镜 (SEM) 观测后可发现，这两种损伤结构都由 μm 级别的熔坑和焊点组成。损伤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) 下的损伤结构



2.2.3 轴承损坏的发展机理

熔坑和焊点是在滚道和滚动体表面上的微小的接触点之间发生电流放电时形成的。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点。有些焊点与润滑剂混合，并沉积在金属表面上。随着轴承不断运转，这些熔坑和焊点被碾压并磨平。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电腐蚀故障的原因 ▶7 | 图5。

其成因背后的机理如下所示：

当滚动体滚过任何足够大的熔坑时，它会产生径向位移。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放电火花，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 对润滑剂的影响

过电流也会对润滑剂产生不利影响。它会损坏基础油和添加剂。润滑剂过早老化和铁粉含量增加会导致轴承的润滑特性和噪音性能明显恶化。

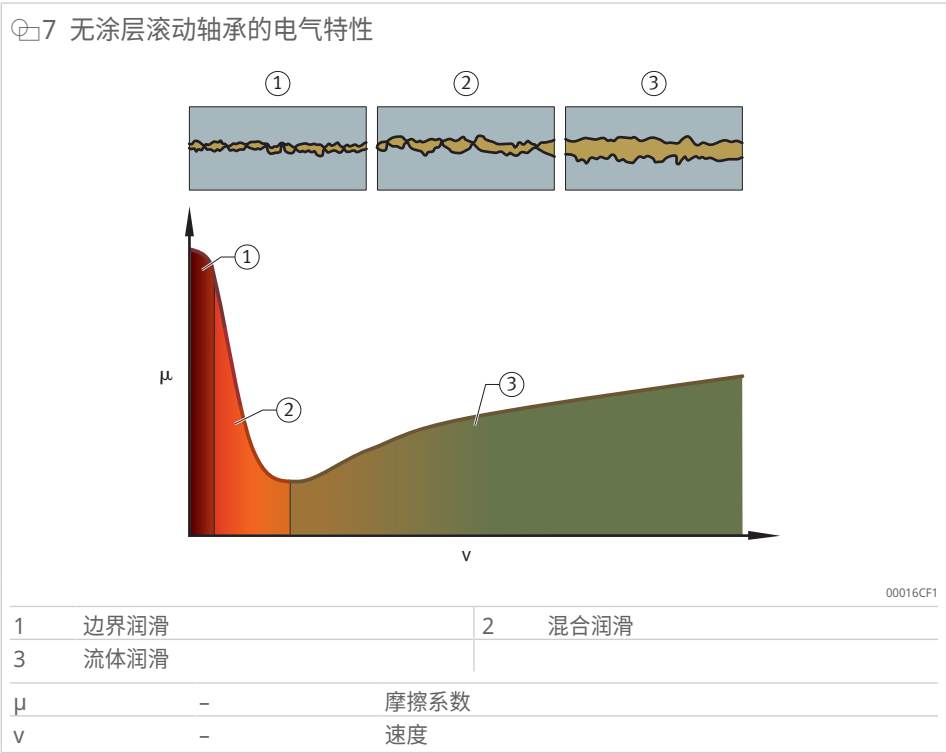
3 电绝缘轴承

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。这些轴承的滚动体可以阻止电流通过

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



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。

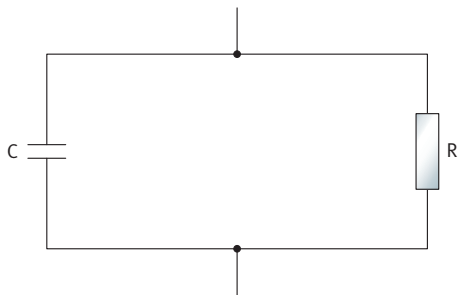
如果相对滚动的接触面被润滑油膜完全隔开，则称为“流体润滑”（区域 3）。在流体润滑的情况下，滚动轴承表现出电容特性。

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，而电容应尽可能低。

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，欧姆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控制的电机中，其频率通常从几个 100 kHz 至几个 MHz 不等。

以下 2 种类型的电阻非常重要：

- 直流电压电阻值
以涂层 J20AB 为例，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，这些变频器可产生几个 100 kHz 至几个 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作用在轴承上的电流频率和轴承电容。

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

可使用以下公式计算带 Insutect A 涂层的滚动轴承电容：

图2 根据面积和涂层厚度计算电容

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

ε ₀	As/Vm	介电常数
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	涂层厚度

不过，较厚的涂层和较小的涂层面积会导致低电容，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。计算的电流密度大小与轴承类型和工况有关。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，还会出现白色腐蚀裂纹 (WEC)。白色腐蚀裂纹是某些润滑剂与附加载荷（例如过电流）之间相互作用的结果。

f13 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

图 9 外圈上有陶瓷涂层的深沟球轴承



001A9C4F

图 10 外圈上有陶瓷涂层的圆柱滚子轴承



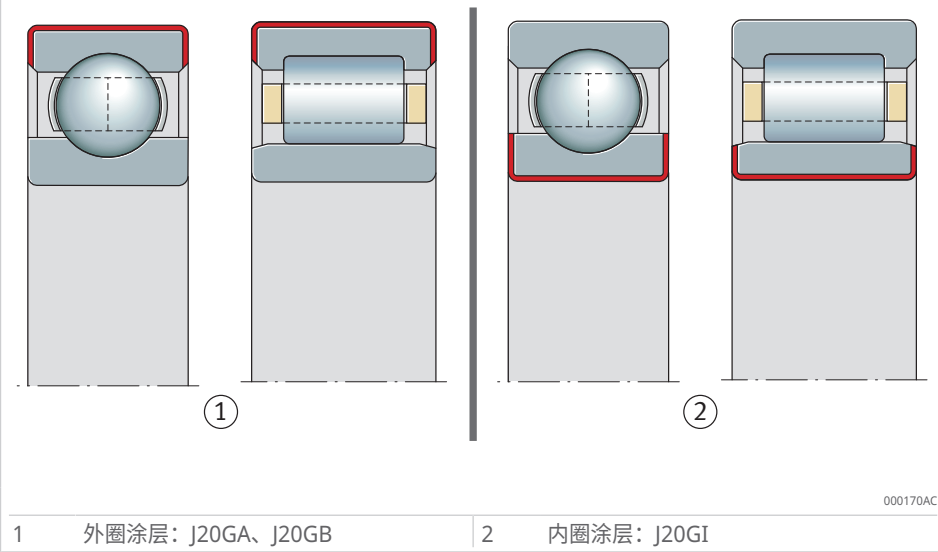
001A9C2F

带有 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。

电绝缘轴承的外形尺寸与 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。

采用绝缘涂层的不同类型轴承截面图如下

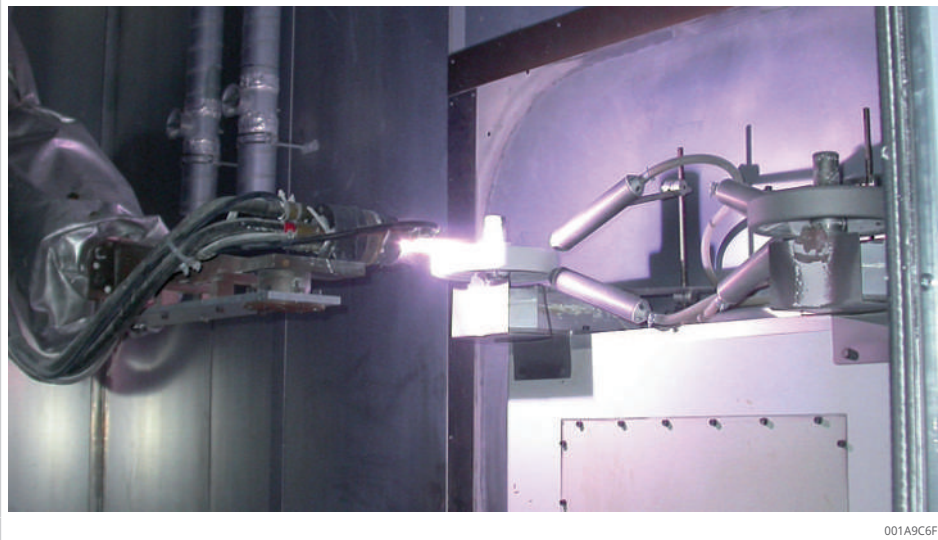
图11 涂层类型



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。

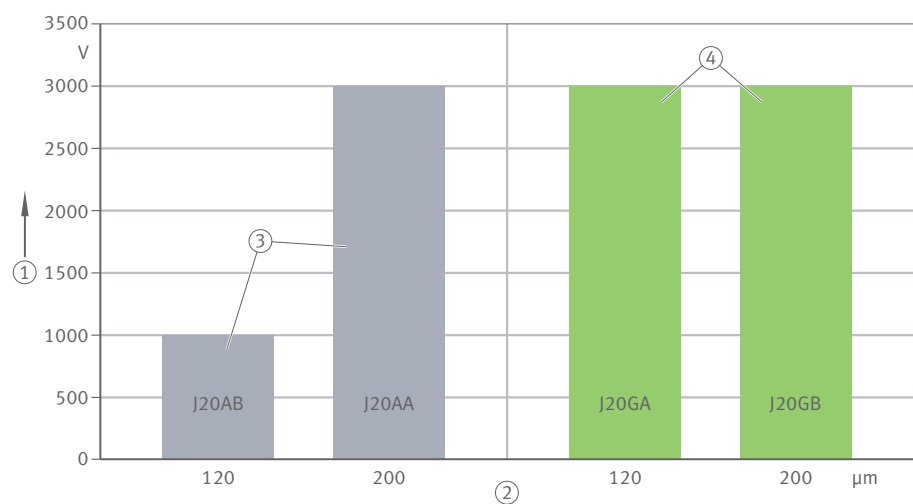
图12 等离子喷涂工艺



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。除了改善了干燥环境中的绝缘性能外，在潮湿的运行条件下，其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。

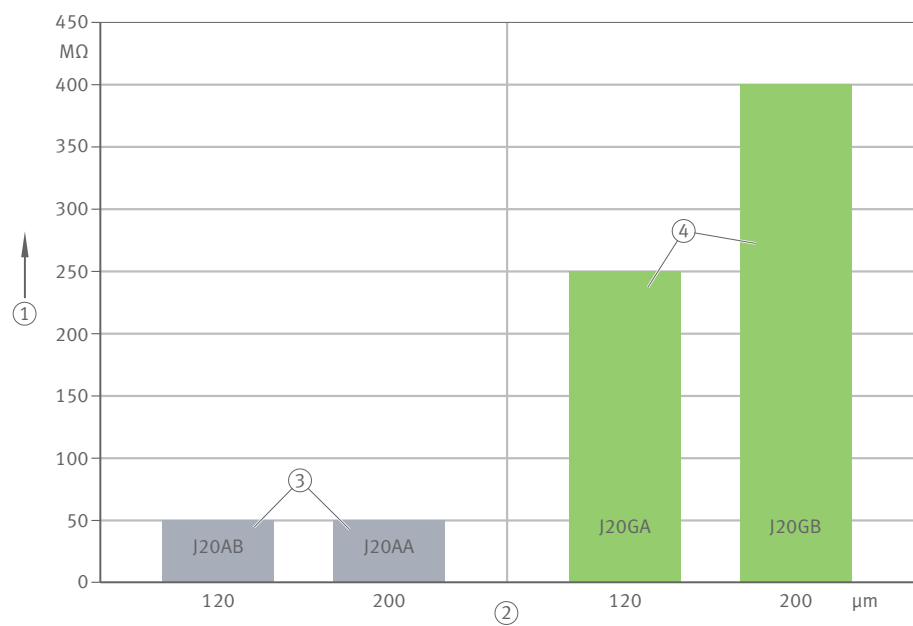
13 干燥和潮湿环境中的介电强度



001A9D9B

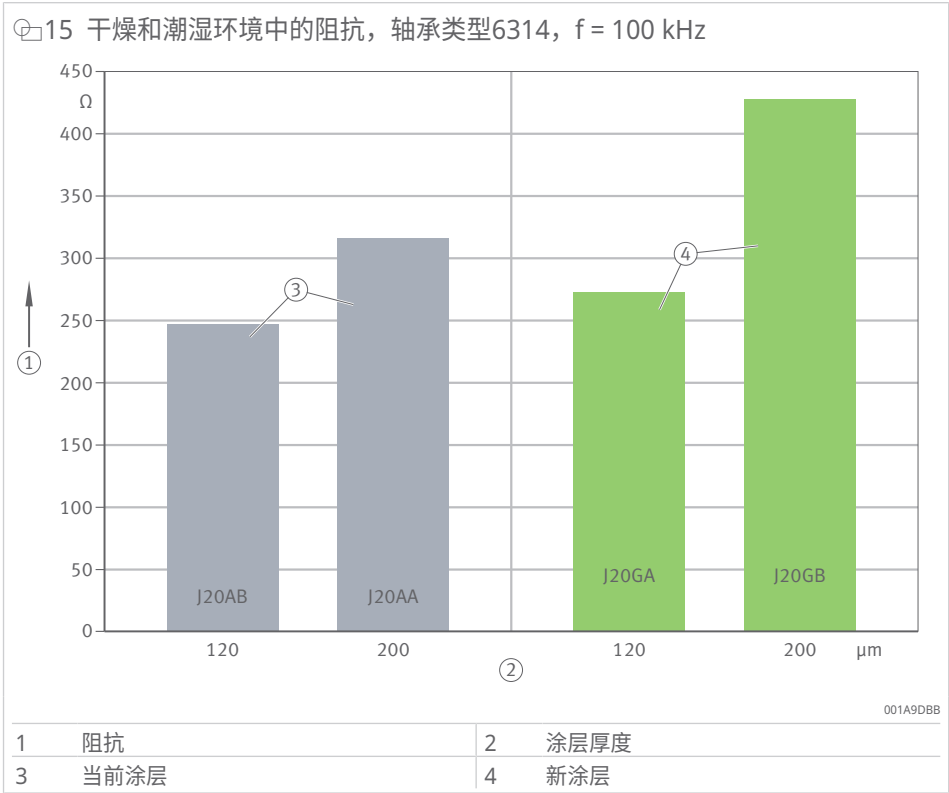
1	击穿电压	2	涂层厚度
3	当前涂层	4	新涂层

14 干燥环境中的欧姆电阻



001A9DAB

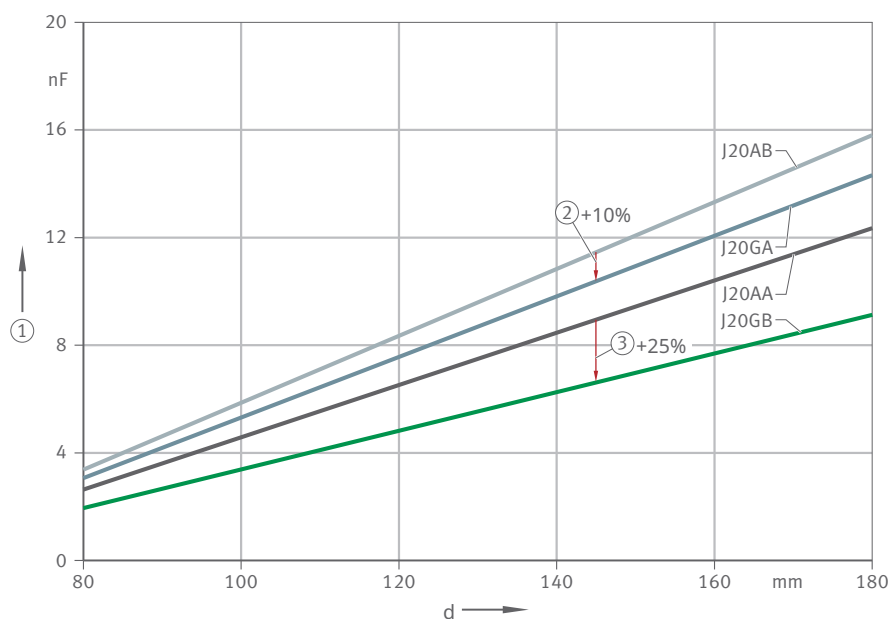
1	欧姆电阻	2	涂层厚度
3	当前涂层	4	新涂层



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通过下图查询。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形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。

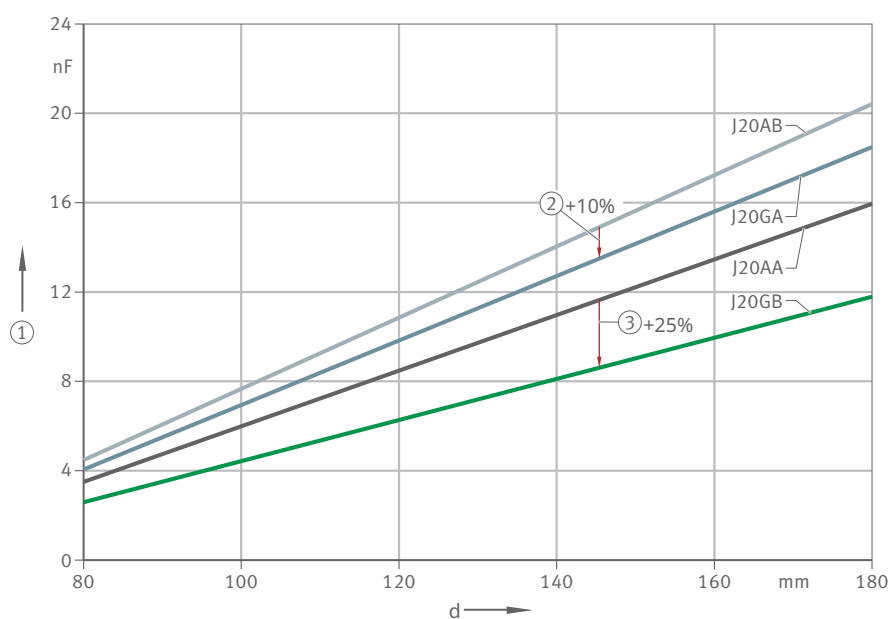
16 60 系列滚动轴承电容的参考值



001A9E7D

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

17 62 系列滚动轴承电容的参考值



001A9E8D

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

图18 63 系列滚动轴承电容的参考值

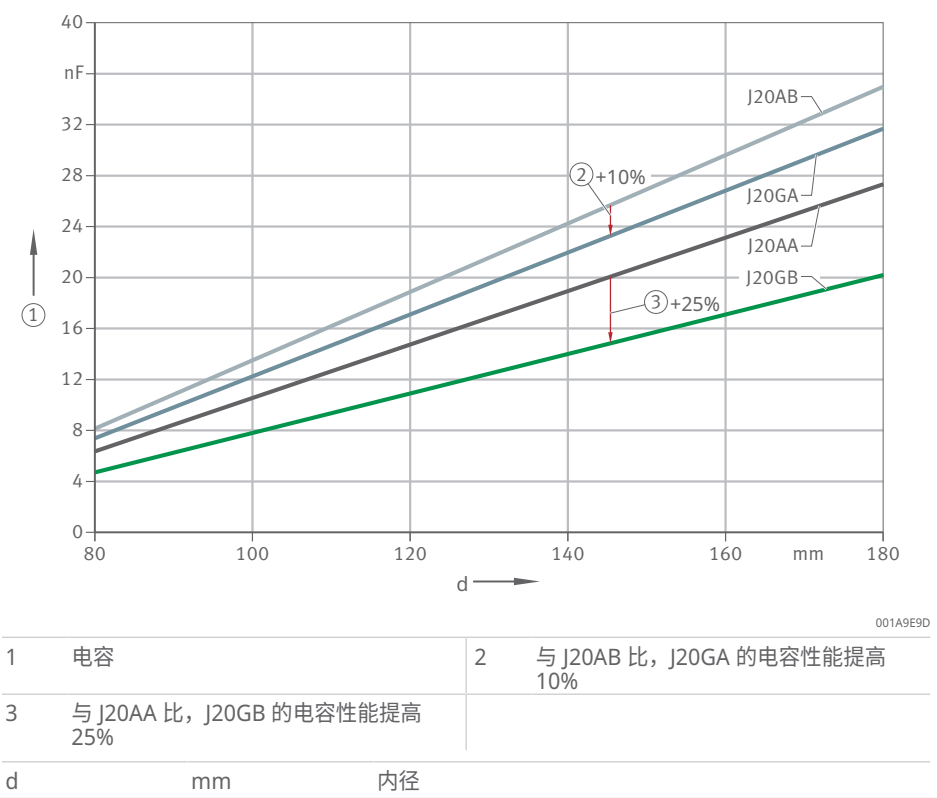


图1 Insutect A J20G 涂层参数

参数		J20GA	J20GB	J20GI
轴承涂层	-	外圈	外圈	内圈
涂层厚度	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
内径范围	mm	-	-	≥ 70
外径范围	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 的相关应用部门。

带涂层的套圈都经过 100 % 绝缘检测。

3.2.5 陶瓷涂层轴承设计

现有陶瓷涂层轴承设计方案以横截面图形式展示。

19 轴承类型设计示例

000170AE

1

仅带有 J20GI 涂层

3.2.6 订购示例

20 外圈带绝缘涂层的深沟球轴承

62 14 - 2RSR - J20GA - C3

轴承系列

62 深沟球轴承

内径代码

14 14 · 5 = 70 mm

密封

2RSR 两侧密封，
接触式橡胶密封

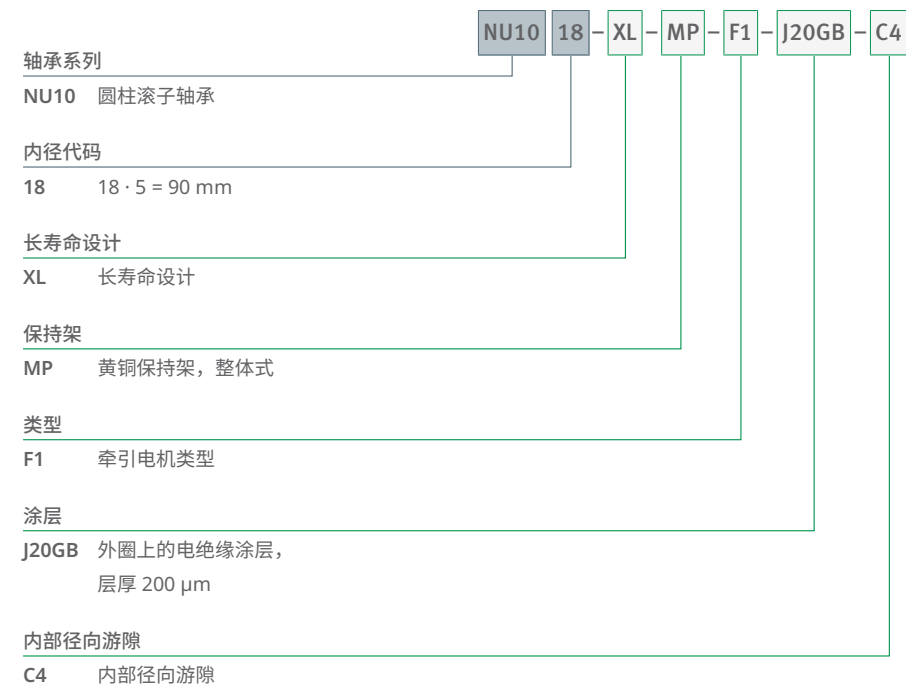
涂层

J20GA 外圈上的电绝缘涂层，
层厚 120 μm

内部径向游隙

C3 内部径向游隙

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

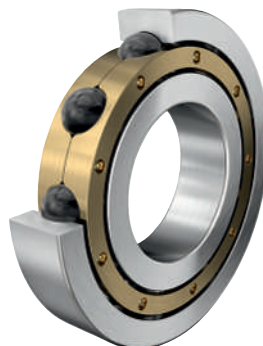


001B54B0

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。混合轴承包括球轴承和圆柱滚子轴承。

图 23 混合球轴承



0019D336

图 24 混合圆柱滚子轴承



001A9EE3

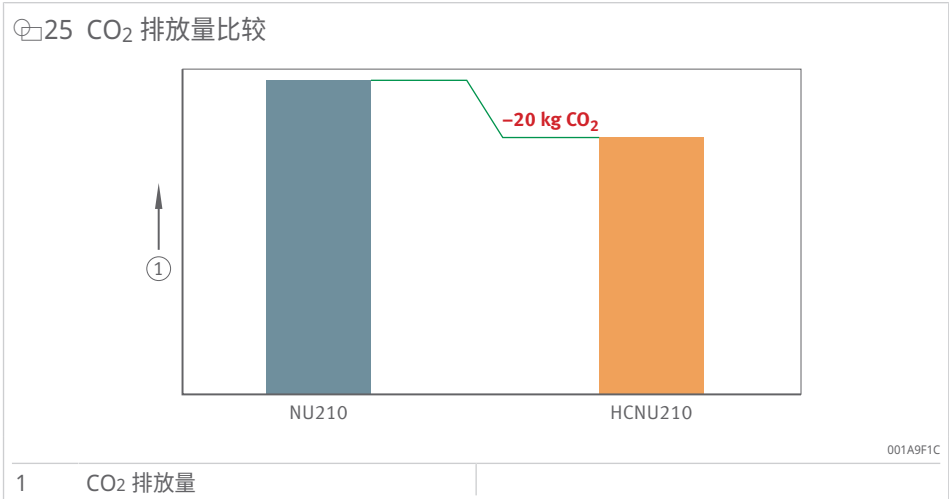
混合轴承的优点

与陶瓷涂层轴承相比，混合轴承具有以下优势：

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。电容值约为 40 pF，因此是带有陶瓷涂层的轴承的 100。

混合轴承由于摩擦更低，而且运转时温升也更低，所以允许更高的转速。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 600.000 km 的情况下，标准圆柱滚子轴承与混合圆柱滚子轴承的 CO₂ 排放量之间的对比表明，后者 CO₂ 减少了 20 kg。

混合轴承比标准轴承在极端工况下具有更为出色的运转性能。



其他特性

与标准轴承相比，混合轴承具有以下特性：

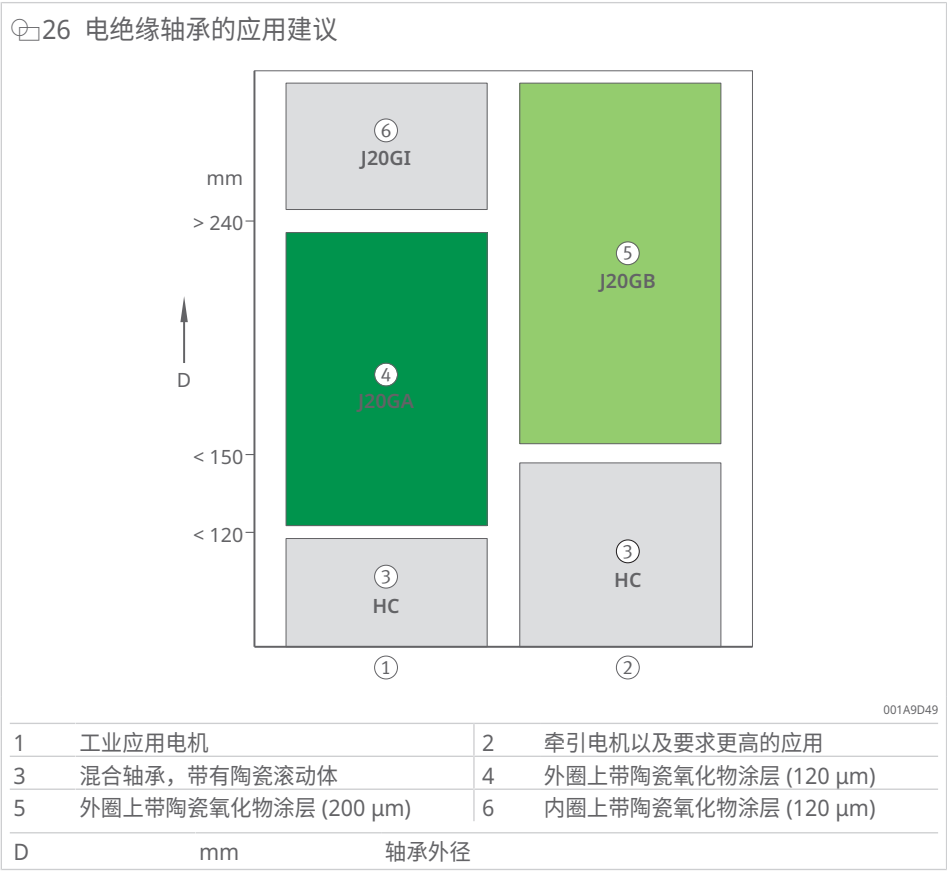
- 有同等的基本额定动载荷值 C_r ，符合 ISO 20056-1 要求
- 具有同等的基本额定静载荷值 C_{0r} ，符合 ISO 20056-2 要求
- 极限转速 n_G 高出 20 %

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。混合轴承在寿命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寿命成本降低多达 20 %。

我们的销售工程师很乐意为您提供相关建议，助您选择兼顾经济效益与技术性能的最优方案。

3.4 应用建议

在特定电机或发电机中，防止电流通路损坏的最佳解决方案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。根据经验，提供电绝缘轴承的初步应用建议。



快速开关变频器越来越多地应用于各种领域，这会使滚动轴承承受较高的电气负载。针对此类应用，Schaeffler 推荐使用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

我们对所有信息进行了仔细编辑和检查，但无法保证信息完全准确。我们保留对信息进行更正的权利。因此，请务必检查是否有更多最新信息或修订后的信息可用。本出版物取代旧出版物中所有存在偏差的信息。只有在经我们批准的情况下才允许打印本出版物，包括节选内容。
© Schaeffler Technologies AG Co. KG
TPI 206 / 03 / zh-CN / CN / 2025-08