



PRADO

普拉多电子科技上海有限公司



PRADO TECHNICAL WHITEPAPER · 技术白皮书

变频驱动电机 轴电流防护技术综述

成因机理 · 失效演进 · 标准依据 · 防治技术对比

Bearing Currents in Inverter-Fed Motors — A Technical Review

文件类型	技术白皮书 / Technical Whitepaper
版本	v1.0
适用对象	设备工程 · 运维管理 · 采购与招标
编制单位	普拉多电子科技上海有限公司
日期	2026 年 5 月

To Make the Best Solution for Electrical Power Drive Systems

© 2026 普拉多电子科技上海有限公司 · 本资料供技术交流参考

01 概述：被低估的可靠性挑战 OVERVIEW

在现代工业中，变频驱动（VFD / PWM 逆变器）已成为电机系统的标准配置——它带来了调速节能与精确控制，却也悄然改变了电机的电气环境。一个长期被低估的后果是：变频器输出的高频共模电压，正在电机轴承内部持续制造电气性损伤。

行业研究与现场实践一致表明，变频驱动电机的轴承失效中，有相当高的比例并非源于润滑不良或机械疲劳，而是源于「轴电流 / 轴承电腐蚀」。维护记录上「润滑不良」「机械疲劳」「碳刷接触不良」等结论，往往掩盖了真正的根因。

多份行业文献与现场统计显示，变频驱动电机轴承的非机械性早期失效中，电腐蚀相关因素占比可达 40%-70%。（数据来源：IEC 60034-25 / IEEE 行业文献 / Muetze 2004）

本白皮书面向设备工程、运维与采购人员，系统梳理轴电流的物理成因、轴承损伤的演进规律、相关国际标准，并对比各类防治技术的原理与局限，最终说明 PRADO 所主张的「源头治理」路线——以共模滤波器在变频器输出端直接削减共模电流。

02 轴电流的物理成因 PHYSICAL MECHANISM

共模电压的产生

在传统正弦电网供电下，三相电压的瞬时和恒为零，电机中性点对地不存在净电位。但 PWM 逆变器通过 IGBT / SiC MOSFET 的高速开关，将直流母线电压切割为脉冲序列；在任意开关瞬间，三相输出不再平衡，三相电压瞬时和的 $1/3$ 即构成共模电压（Common-Mode Voltage, U_{CM} ）。

共模电压的幅值可达 $\pm U_{DC}/2$ ；开关频率通常为 2-16 kHz；电压上升率 dv/dt 可达数 $kV/\mu s$ ，采用 SiC 等宽禁带器件时更高。陡峭的 dv/dt 使共模电压的频谱成分扩展至 MHz 量级——这正是轴电流问题在新一代高频驱动系统中愈发尖锐的原因。

寄生电容耦合与轴电压

共模电压并不会直接停留在绕组。电机内部存在多条寄生电容路径——绕组对转子、转子对机壳、绕组对机壳。共模电压经由这些寄生电容分压，将一部分电位耦合到转轴上，形成轴电压（Shaft Voltage, U_b ）。

轴电压与共模电压之比称为轴电压比（Bearing Voltage Ratio, BVR），典型值为 3%-10%。当轴电压超过轴承润滑油膜的介电强度（现场经验阈值约 5-15 V）时，油膜被击穿，电荷以火花放电方式穿过轴承——即电火花加工（EDM）式放电。

5-15 V

油膜击穿轴电压阈值

3-10%

轴电压比 BVR 典型值

MHz

共模电压频谱扩展量级

四种典型轴电流

依据

Muetze

等学者的研究，逆变器驱动电机中的轴电流可归纳为四种主要类型，它们的产生机制与危险范围各不相同：

类型	产生机制	主要风险范围
容性放电型 EDM 电流	共模电压经定-转子寄生电容耦合至转轴，轴电压超过油膜介电强度时火花放电	所有变频驱动电机；在小型电机中尤为主导
高频环流型电流	共模电流在定子绕组激励高频环形磁通，沿轴感应端到端电压，形成轴-轴承-机壳环流	中大型电机（> 75 kW）的主要风险，可达数安培
转子接地电流	电机接地阻抗高于下游负载时，共模电流经轴、联轴器、下游设备轴承入地	接地或屏蔽端接不当时发生，会损坏下游设备
dv/dt 感应电流	陡峭电压沿激发的短促高频电流尖峰	高 dv/dt 的 SiC / 高频 IGBT 系统更显著

03 轴承损伤的演进过程 DAMAGE EVOLUTION

轴承一旦进入「电气性老化」，损伤通常沿一条可识别的路径加速演进。下列五个阶段在现场实拍中反复出现：

阶段	名称	特征
01	微凹坑 Micro-pitting	5-8 μm 微观熔坑，每秒可产生数千个
02	磨砂 Frosting	滚道表面失去镜面光泽，粗糙度上升，摩擦增大
03	油脂劣化 Grease degradation	润滑脂变灰 / 变黑，析出金属颗粒，介电强度下降
04	搓板纹 Fluting	滚道出现等距横向凹槽，振动出现轴承特征频率
05	灾难性失效 Catastrophic	保持架断裂 / 滚珠剥落，电机抱死，非计划停机

从首次微凹坑到完全失效，最快可在 3 个月内发生，平均 12-24 个月。演进速率取决于：共模电压幅值、开关频率、轴电压幅值、轴承负荷与温度、润滑脂介电状态。

工程上常以轴电流密度 J_b 评估风险： $J_b \leq 0.1 \text{ A/mm}^2$ 视为相对安全； $J_b > 1 \text{ A/mm}^2$ 几乎必然导致搓板纹。轴电压峰值 $\geq 5 \text{ V}$ 即应列入风险关注。

04 标准与权威共识 STANDARDS & CONSENSUS

轴电流并非新发现的问题。多项国际标准与主要电机 / 变频器厂商对此已有明确共识：

标准	核心内容
IEC 60034-25	用于电力驱动系统的交流电机应用指南；指出大功率变频驱动电机应预期出现轴电流并采取专门防护
IEC 60034-17	笼型感应电机变频供电应用指南；对较大机座电机建议采用具共模抑制能力的变频器、dv/dt 滤波或绝缘轴承
IEC TS 60034-27-2	轴电压与轴承电流的测量方法，为现场量化诊断提供方法学依据
NEMA MG-1 Part 31	美国变频器供电电机标准，包含轴电流防护相关要求

在厂商层面，西门子、ABB、SKF、舍弗勒（Schaeffler）等已在其变频器与电机产品中普遍提供 dv/dt 滤波、共模滤波选件或绝缘轴承推荐组合。在学术层面，奥地利格拉茨工业大学（TU Graz）的 Annette Muetze 教授是该领域公认权威，其 2004 年博士论文《Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors》至今仍是行业引用基础。

05 传统防治技术及其局限 CONVENTIONAL MITIGATION

学术界与工业界已发展出多类轴电流防治技术。需要强调的是：没有任何单一技术能解决全部四种轴电流，且大多数传统方案属于「末端补救」——先有电流，再去引流或隔离。

技术	原理	主要局限
绝缘轴承（陶瓷涂层）	外圈 / 内圈喷涂陶瓷绝缘涂层，切断环流回路	对容性 EDM 电流仍呈高频电容；电流可能改道至下游齿轮箱轴承
混合陶瓷轴承	滚动体改用氮化硅陶瓷球，本身电绝缘	成本为钢轴承的 3-5 倍；散热较差；不解决下游设备问题
轴接地环 / 碳刷	为轴电流提供低阻抗旁路通道	纤维 / 碳刷磨损快（6-12 个月）；高频下阻抗上升；只引流不减流
dv/dt 与正弦滤波器	降低电压上升率或将 PWM 整形为准正弦输出	正弦滤波器昂贵、体积大、损耗高；共模分量仍部分存在
导电润滑脂	在润滑脂中添加导电材料，降低油膜电阻	传统导电脂会加速机械磨损；纳米配方长期可靠性数据有限
PWM 调制优化	通过调制策略降低共模电压幅值或频次	依赖变频器固件可改性；对存量设备难以改造

上述方案的共同问题在于：共模电流的幅值并未在源头被削减，损伤仍在持续发生。绝缘轴承甚至可能把电流改道至下游齿轮箱轴承——问题被转移，而非被消除。

06 源头治理：共模滤波器方案 SOURCE-LEVEL MITIGATION

PRADO 的方法论是一句话：「在共模电流形成的源头削减它」。共模滤波器由高磁导率纳米晶 / 铁基非晶磁芯构成，三相动力电缆作为一次匝穿过磁芯。在差模方向，三相电流磁通相互抵消，对电机正常工作零影响；在共模方向，磁通叠加，磁芯在 MHz 频段呈现极高阻抗，将共模电流在源头削减 50%-80%。



对比维度	传统末端补救	PRADO 源头治理
处理位置	电流通路已形成后引流或隔离	在变频器侧抑制，共模电流不再传导
电流幅值	几乎不变，只是改变路径	在源头削减 50%-80% (已有大量实测)
下游设备	齿轮箱、外接设备轴承仍承压	齿轮箱、电缆、传感器一并受益
EMI / 跳闸	高频 EMI 仍然存在	高频 EMI 同步降低，EMC 跳闸减少
维护	碳刷 6-12 个月更换	无源、免维护，寿命与设备同步

源头治理是唯一能同时保护「电机轴承 + 齿轮箱 + 电缆 + EMC 环境」的方案——一个无源组件，保全整条变频驱动链。

07 选型与适用工况 APPLICATION GUIDE

出现以下任一情况，建议将变频驱动系统纳入轴电流风险评估，并考虑加装共模滤波器：

- 电机功率 > 75 kW，且采用 PWM 变频驱动
- 开关频率 > 2 kHz，高载波频率系统更需要
- 已出现轴承异响、振动告警或周期性更换
- 齿轮箱、传感器等下游设备同时受电磁干扰
- 现场难以维护——海上风电、高空、防爆区等场景

共模滤波器可与轴接地环、绝缘轴承叠加，构成多重防护体系。对于已安装绝缘轴承却仍出现下游设备故障的场景，在源头加装共模滤波器尤为关键。具体产品型号与规格参数（额定电流、磁芯尺寸、内孔径、适配功率段），将由 PRADO 根据机组工况提供选型建议。

08 结论 CONCLUSION

轴电流是变频驱动时代一个真实、普遍而又长期被误判的可靠性问题。传统的「末端补救」方案能缓解症状，却无法消除根因。在变频器输出端以共模滤波器进行「源头治理」，从根本上削减共模电流，是当前兼顾可靠性、经济性与可维护性的最优路径。PRADO 愿以现场实测数据，与您共同验证这一结论。

术语简释

U_{CM} 共模电压	三相输出电压瞬时和的 1/3，由 PWM 开关不平衡产生
U_b 轴电压	经寄生电容耦合到转轴上的电位
BVR 轴电压比	轴电压与共模电压之比，典型 3%-10%
EDM 放电	电火花加工式放电，油膜击穿瞬间的火花放电
dv/dt	电压上升率，反映开关沿陡峭程度
Fluting 搓板纹	滚道表面等距横向凹槽，轴电流损伤的典型宏观特征

免责声明：本白皮书为技术交流资料，所引数据与标准结论来自公开行业文献与 PRADO 现场实践；标准条款请以官方现行版本为准。