



无刷电机驱动：EMC技术、标准与行业

YintEng

2025-Feb

目录

1. 无刷电机：应用、技术与行业规模
2. 无刷电机标准：国际与国内规范
3. 标准中的EMC电磁兼容内容
4. 无刷电机驱动电子部分：传导与辐射产生机理
5. 电磁兼容EMC痛点剖析

01

无刷电机：应用、技术与行业规模

●● 无刷电机的广泛应用



无刷电机作为一种高效、可靠的动力设备，在众多领域发挥着关键作用。在电动汽车和混合动力汽车中，它用于驱动轮毂或副轮毂，凭借高扭矩密度、低维护需求和高能效，为车辆提供强劲动力



在工业自动化设备里，如机器人、传送带和流水线，无刷电机的高精度、低噪音和高效率特性，保障了生产过程的精准与稳定

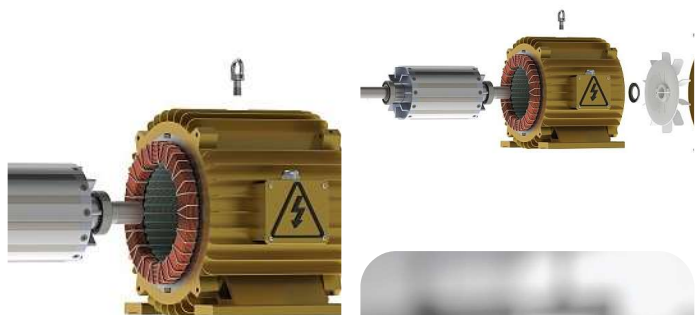


家用电器领域，洗衣机、空调、吸尘器和电动工具等都离不开无刷电机，它实现了更高的能效和更低的噪音，提升了用户体验



在无人机、模型飞机、医疗保健设备、航空航天领域、电动自行车和滑板车，甚至太阳能充电系统以及其他消费电子产品中，无刷电机都有着不可或缺的应用

●● 技术路线解析



01

无刷电机的技术路线不断演进，旨在提升性能和拓展应用。在宽速控制范围方面，包括低速运行和高速运行的优化

02

低速运行时，通过低齿槽效应设计，如合理组合齿数与磁极数、优化磁体和定子形状等，降低齿槽转矩，使电机运行更平稳；利用正弦波驱动，确保绕组磁通密度和电流为正弦波，减少转矩脉动；提高速度检测精度，增加转子磁极数，使低速反馈信号更平滑。

03

高速运行时，采用相位控制输出转矩校正超前角控制，根据电机速度计算电流相位滞后并提前电压相位，校正输出扭矩。

04

从控制方案发展来看，芯片向高集成方向发展，电机驱动控制芯片集成度不断提高；控制算法向SoC硬件化发展，从简单的120度方波控制逐步发展到复杂的无感FOC控制算法，并通过硬件化降低开发门槛；电机向超高速趋势发展，电气转速不断提升。

●● 行业规模与市场前景

2023年全球无刷交流电动机市场规模约为213百万美元，预计2030年将达到313百万美元，2024 - 2030期间年复合增长率（CAGR）为5.2%。从销量上看，其规模也在不断增长



按产品类型划分，低于200V是最大的细分市场，占据37%的市场份额；按下游应用来看，自动仪器为主要应用领域，占有约49%的份额。随着技术的不断进步和应用领域的拓展，无刷电机市场前景广阔

全球主要生产商包括ABB、Nidec、AMETEK等，前三大厂商市场份额占全球45%。日本是最大的市场，占有大约36%份额

02

无刷电机标准：国际与国内规范

●● 国际标准一览

标准号	内容
IEC 60335-2-77	是国际电工委员会（IEC）制定的关于电动工具的安全标准的一部分，涉及到电动工具用电机及驱动器的安全要求，对电动工具用直流无刷电机驱动器的电气安全、机械安全、电磁兼容性等方面作出了规定
UL 1004-1 和 UL 1004-2	国保险商实验室（UL）制定的标准。UL 1004-1 是电机和发电机的安全标准，UL 1004-2 是关于特定类型电机如直流无刷电机等的标准
EN 60745 系列	是欧洲的电动工具安全标准，对电动工具的直流无刷电机驱动器的性能、安全和电磁兼容性等方面进行了规范

●● 国内标准解读

标准号	内容
GB/T 3883.1-2014	等同采用 IEC 60745-1 的国家标准，是电动工具安全标准的通用要求部分，规定了电动工具包括直流无刷电机驱动器在内的一般安全要求
GB/T 3883.2-2015	对应不同类型电动工具的特殊要求，在涉及使用直流无刷电机驱动器的电动工具时，对驱动器在特定工具中的应用作出了进一步规定
GB/T 18211-2017	微电机安全通用要求，对包括直流无刷电机及其驱动器在电动工具中的应用，在安全方面提出了通用的规范
GB/T 21418-2008	永磁无刷电动机系统通用技术条件，对永磁无刷电动机系统包括驱动器的基本技术要求、试验方法、检验规则等进行了规定

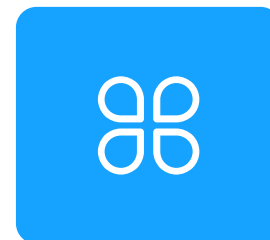
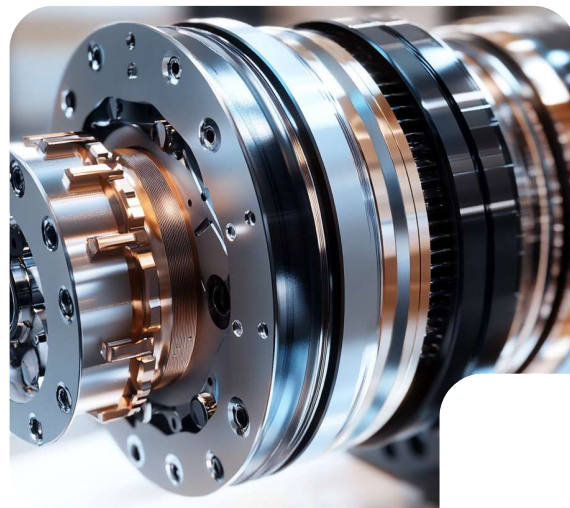
03

标准中的EMC电磁兼容内容

●● 国际标准中的EMC电磁兼容

01

在国际标准中，EMC电磁兼容是无刷电机的重要考量部分。电磁兼容要求无刷电机在正常运行时，不会对周围的电子设备产生过多的电磁干扰，同时自身也要具备一定的抗干扰能力



02

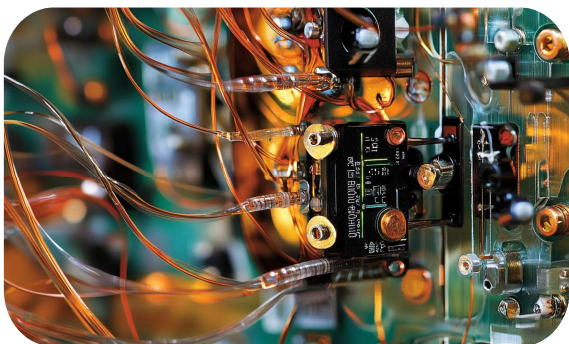
在一些国际标准中，会规定无刷电机的电磁辐射限制，确保其辐射的电磁能量在安全范围内，避免影响其他电子设备的正常工作。同时，也会对电机的抗静电放电、抗射频干扰等能力提出要求，保证电机在复杂电磁环境下能够稳定运行



04

无刷电机驱动电子部分： 传导与辐射产生机理

●● 国内标准中的相关内容



国内标准同样重视无刷电机的EMC电磁兼容。在相关标准中，会针对不同应用场景的无刷电机，制定相应的电磁兼容测试方法和限值要求。



对于家用无刷电机，可能会重点关注其对家庭电子设备的电磁干扰情况，规定严格的电磁辐射和传导干扰限值。对于工业用无刷电机，除了考虑对周边设备的干扰，还会强调其在复杂工业电磁环境中的抗干扰能力，通过一系列测试来确保电机符合标准要求，保障其在国内市场的安全使用和稳定运行。

●● 电机驱动BLDC电路模块



电源管理模块

将输入的直流电压转换为适合电路其他部分工作的不同电压等级，以满足如 MCU、传感器等不同元件的供电需求，提高电源利用效率，稳定输出电压



核心处理模块

MCU（微控制器）：作为电路的核心、通信接口电路：

如：CAN 接口和 LIN 接口电路



驱动模块

三相桥电路：通常由六个功率 MOSFET 组成，形成三相全桥结构，通过控制不同 MOSFET 的导通和关断组合，为 BLDC 电机的三相绕组提供不同的电压和电流，实现电机的正反转、调速等控制



反馈信号采集模块

电流检测电路

反电动势（BEMF）检测电路

温度检测电路

01

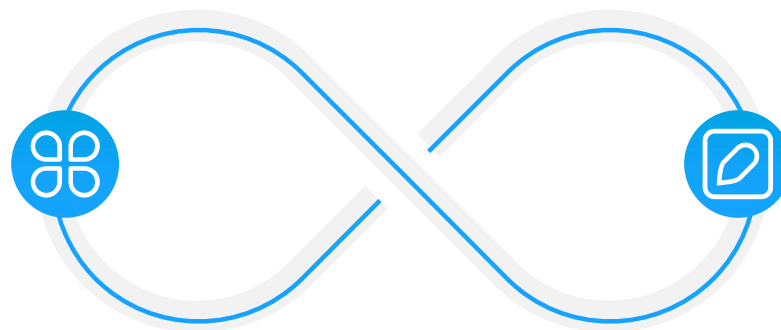
无刷电机驱动电子部分的传导主要源于电流的变化。当电机运行时，驱动电路中的功率开关器件不断地导通和关断，导致电流快速变化。

02

这种快速变化的电流会在电路中产生谐波，这些谐波电流通过电源线、信号线等传导到其他设备。例如，功率开关器件在导通瞬间，电流会迅速上升，产生高频的电流脉冲，这些脉冲会沿着电源线传播，对连接在同一电源线上的其他设备造成干扰。此外，电机绕组的电感和电容特性也会影响传导干扰，当电流变化时，电感会产生反电动势，电容会储存和释放电荷，进一步加剧了传导干扰的产生

●● 辐射产生机理

当功率开关器件工作时，其周围会形成变化的电场和磁场，这些电磁场会以电磁波的形式向外辐射。例如，电机的控制电路中，高速数字信号的传输会产生电磁辐射。如果电路布局不合理，信号走线过长或者没有良好的屏蔽措施，电磁辐射会更加严重。此外，电机的绕组也会成为辐射源，当绕组中有电流通过时，会产生磁场，随着电流的变化，磁场也会发生变化，从而产生电磁辐射。



辐射产生的根源在于变化的电场和磁场。无刷电机驱动电子部分中的高速信号传输和快速变化的电流，会产生变化的电场和磁场。

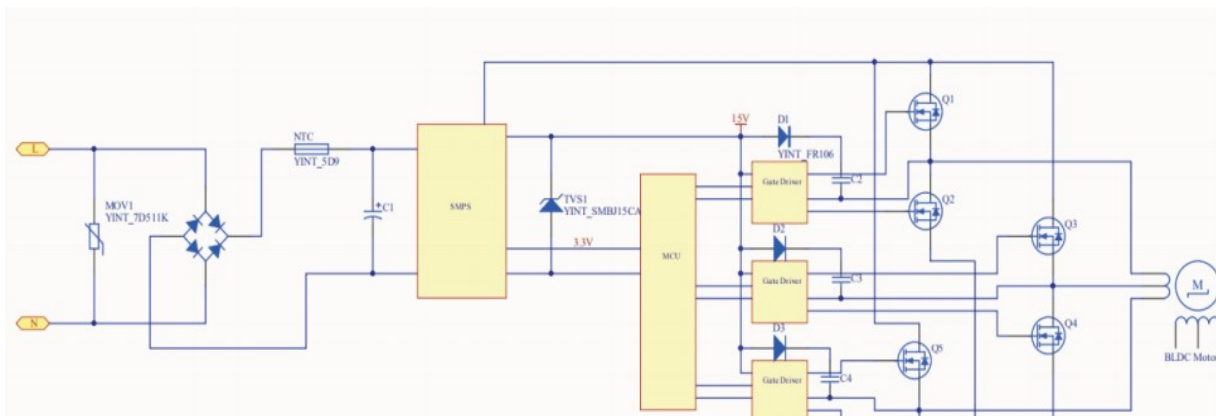
05

电磁兼容EMC痛点剖析

●● 电源管理模块问题及解决

序号	问题描述	解决方案
1	电机驱动的 PWM 信号产生的高次谐波会在电源线上形成传导干扰，电源线上存在高频干扰信号，通过电源线传导到其他电路	<ol style="list-style-type: none">1.合理设计 PCB 布线，缩短电源线长度2.电源输入输出端安装合适的滤波器3.减小高频电流回路面积，降低传导干扰的路径阻抗
2	辐射干扰问题,驱动电路中的开关元件在快速通断时会产生较强的电磁辐射	优化电路布局，将易产生辐射的元件远离敏感元件和天线等
3	电磁抗扰度问题,外界电磁干扰时，电源管理模块可能出现工作异常、死机或输出错误	关键信号和电路进行保护，如使用瞬态抑制二极管（TVS）等器件，抑制瞬间的过电压和过电流
4	电源纹波问题,电机驱动的稳定性和转速不佳，导致电机转速不稳定	<ol style="list-style-type: none">1.增加电源滤波电容的容量和数量2.高性能的电源稳压器

●● 电源管理模块问题及解决

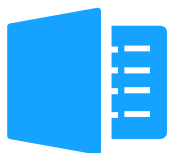


Part	Yint' s保护器件	功能及标准符合
AC转DC模块	MOV 7D511K/10D511K/14D511K	主要防止电源波动及感应雷击浪涌 IEC61000-4-5/GB-T17626.5
	NTC 5D7/5D9/5D13	主要保护MCU免于反向电动势干扰，提高DC 电源纹波质量IEC61000-4-4/GB-T17626.4
	M7/1N4007	高品质整流管*

注：Mov和NTC选择需要根据电机功率及使用场景选择

* M7 选择散热优良、VF性能优良器件很重要

●● 核心处理模块问题及解决



问题描述	现象及解决思路
地环路干扰问题	<p>描述： 由于不同接地点之间存在电位差，形成地环路电流，导致干扰信号通过地线传导到其他电路，影响系统的稳定性和可靠性</p> <p>解决方案：</p> <ol style="list-style-type: none">1.采用单点接地或多点接地的方式，根据电路频率和布局合理选择2.使用隔离变压器或光耦等隔离器件，切断地环路，防止干扰信号的传播

●● 驱动模块问题及解决(一)

问题描述	现象及解决思路
IGBT或IPM	<p>问题现象:</p> <p>驱动模块中的高速开关动作、高频 PWM 信号等会产生电磁辐射, 可能干扰附近的无线通信设备、传感器等, 比如会使附近的收音机出现杂音、无线传感器数据传输异常</p> <p>解决思路:</p> <p>缩短高频信号走线长度, 减少辐射天线效应, 避免平行布线, 特别是MCU类似预驱线</p>
IGBT、MOS、IPM 损坏	<p>问题现象: 核心器件损坏, 测量驱动开关引脚对地短路;</p> <ol style="list-style-type: none">1. Vce 异常升高、饱和压降 Vce (sat) 增大, discap金属化层重构或焊接层退化2. 栅极与发射极之间短路或开路3. 集电极 - 发射极漏电流 (Ices) 增大, 芯片表面存在缺陷、氧化层受损

●● 驱动模块问题及解决(二)

问题描述

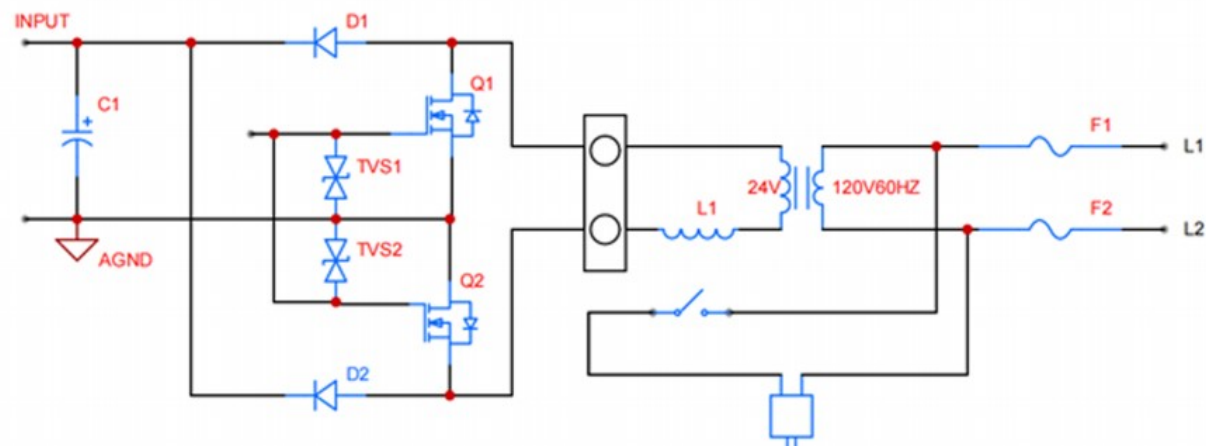
现象及解决思路

IGBT、MOS、IPM
损坏

Part	Yint' s保护器件	功能及标准符合
MOS FET/IGBT 有源钳位部分	TVS1 P6SMB550CA/P6SMB600CA	当IGBT或MOSFET发生上下桥或负载短路， 驱动电路关闭IGBT/MOSFET造成电压尖峰 时起到有源钳位

注：如果直流母线电压不是太高，可以由单颗TVS完成，如果电压太高，可以由多颗低压IVS串联完成，
但要注意抑制串联寄生感抗避免有源钳位时过电压过高。

Vgs 或Vbe 保护



●● 反馈信号采集模块问题

电磁干扰导致信号失真

现象1描述:

在电机高速运行时，位置反馈信号出现跳变，导致电机控制出现异常抖动。示波器采集信号变形，到的反馈信号出现噪声、畸变，使电机的位置、速度等信息不准确，进而影响电机的控制精度和稳定性；判定为**电磁干扰导致信号失真**

解决思路:

方法1 磁耦等隔离器件对反馈信号进行隔离，切断干扰传导路径

方法2 信号采集电路中加入合适的滤波器，如低通滤波器可滤除高频干扰，带通滤波器可选择特定频率范围的信号，提高信号的纯净度

现象2描述:

电机控制系统误判，出现控制失误；示波器看到，采集到的信号超出正常范围；排查属于**电源纹波干扰**

解决思路:

方法1 使用 DC-DC 隔离电源模块为反馈信号采集模块单独供电，将其与其他电路的电源隔离开来，避免其他电路的电源干扰传入采集模块

方法2 优化电源滤波

谢谢大家!!!

 汇报人: YintEng

 时间: 2025.Feb