

稀土永磁直流无刷电机设计研究

楼春辉 李静芬 张考杰 胡旭刚
宁波海伯集团有限公司 浙江 宁波 315800

摘要：稀土永磁直流无刷电机设计涵盖电机本体、电磁参数、热场机械及驱动控制等多方面。本文详细阐述电机本体结构与磁路构成，分析电磁参数与绕组设计要点，探讨热场与机械结构设计关键，介绍驱动控制策略与电路结构。通过优化各部分设计，可提升电机性能、效率与可靠性，满足不同应用场景对电机性能的多样化需求，为稀土永磁直流无刷电机的高性能设计提供全面指导。

关键词：稀土永磁；直流无刷电机；电机设计；电磁参数；驱动控制

引言：稀土永磁直流无刷电机凭借高效、高功率密度等优势，在电动汽车、工业自动化等领域广泛应用。电机设计涉及多学科知识，需综合考量电磁、热、机械等多方面因素。电机本体结构与磁路构成是基础，影响电机性能；电磁参数与绕组设计决定电机输出特性；热场与机械结构设计关乎电机可靠性与寿命；驱动控制策略与电路结构则影响电机运行效率与动态性能。深入研究各部分设计要点，对提升电机整体性能具有重要意义。

1 电机本体结构与磁路构成

1.1 稀土永磁材料特性与选用依据

稀土永磁材料是电机性能的核心基础，钕铁硼（NdFeB）因高剩磁密度与矫顽力成为主流选择，工作温度超过150℃时需改用钐钴（SmCo）以避免不可逆退磁。材料选用需综合考量剩磁、矫顽力及温度系数，例如在电动汽车驱动电机中，采用高矫顽力钕铁硼可拓宽工作温度范围，而消费电子领域则更注重成本与剩磁的平衡^[1]。

1.2 定子绕组形式与连接方式

定子绕组形式直接影响电机效率与谐波含量。分布式绕组将线圈分散嵌入多个槽内，可降低齿槽转矩，但嵌线工艺复杂；集中式绕组则将线圈集中绕制在少数槽中，结构简单、散热好，但谐波含量较高。连接方式上，星形连接（Y型）因中性点悬浮，可抑制三次谐波电流，适用于对电压平衡要求高的场景；三角形连接（ Δ 型）则允许更高相电压，适合高压驱动系统。设计时需根据电机极数、槽数及控制策略选择匹配方案。

1.3 转子磁极拓扑结构与极弧系数

转子磁极拓扑结构决定气隙磁场分布，表贴式结构因制造简单成为主流，内置式结构则通过磁极嵌入式设计提升凸极率，增强磁阻转矩。极弧系数是磁极宽度与极距的比值，对转矩脉动与效率具有显著影响，极弧

系数过大会导致磁场畸变，过小则增加漏磁。设计时需通过磁场仿真确定最优极弧系数，例如在无刷直流电机中，采用0.7-0.8的极弧系数可平衡转矩输出与脉动抑制。

1.4 位置传感器类型与安装布局

位置传感器是电子换相的基础，霍尔传感器因成本低廉广泛应用于低精度场景，输出三路方波信号实现六步换相；编码器则通过光电或磁性编码盘提供高精度位置反馈，适用于伺服控制系统。安装布局需避开磁场干扰区域，霍尔传感器通常嵌入定子槽口，编码器则安装于电机轴端。对于无传感器控制，可通过反电动势过零检测或高频信号注入实现位置估算，但需牺牲部分动态性能。

1.5 电子换相逻辑与导通顺序

电子换相通过功率开关器件控制绕组电流方向，实现电机连续旋转。六步换相法是常用逻辑，每60°电角度切换一次导通状态，生成近似梯形波的气隙磁场。导通顺序设计需避免上下桥臂直通，例如在三相全桥逆变器中，采用“ON-OFF-ON”的导通模式，确保每相绕组在120°区间内导通。对于高速电机，可引入重叠换相技术，通过延长导通时间抑制转矩脉动，但需增加死区时间防止短路风险。

2 电磁参数与绕组设计

2.1 气隙磁场分布与磁密选取

气隙磁场分布是电机电磁设计的核心参数，直接影响电机输出转矩与效率。磁场分布需兼顾基波幅值与谐波抑制，基波幅值决定转矩密度，而谐波含量过高会导致铁耗增加与振动噪声恶化^[2]。磁密选取需平衡材料利用率与饱和风险，钕铁硼永磁体剩磁密度通常在1.1至1.4T范围内，气隙磁密设计值一般取0.6至0.9T，以避免定子齿部过早饱和。对于高速电机，气隙长度需适当增大以降低风摩损耗，但过大的气隙会削弱磁场耦合强度，需

通过优化磁极形状补偿。

2.2 每极磁通量与反电动势波形

每极磁通量是计算反电动势的关键参数，其大小由气隙磁密与极面积共同决定。磁通量不足会导致反电动势幅值降低，限制电机输出能力；磁通量过大则可能引发磁路饱和，降低电磁转换效率。反电动势波形需与电流波形协同设计，方波驱动电机要求反电动势为梯形波，以实现最大转矩输出；正弦波驱动电机则需反电动势接近正弦波，以降低转矩脉动。波形优化可通过调整磁极形状或绕组分布实现，例如采用斜极结构或分布式绕组改善磁场谐波成分。

2.3 绕组匝数、线径与并联支路数

绕组匝数决定每相感应电动势大小，匝数过多会增大铜耗与电阻压降，匝数过少则导致反电动势不足，影响低速性能。线径选择需综合考量电流密度与集肤效应，大电流场景需选用粗线径以降低直流电阻，但高频运行时集肤效应会限制电流有效截面，此时需采用多股细线并绕。并联支路数可灵活调整绕组电阻与电感参数，增加支路数可降低电阻但会增大电感，适用于需要快速动态响应的伺服系统；减少支路数则相反，常用于对效率敏感的驱动场景。

2.4 电负荷与磁负荷的匹配关系

电负荷与磁负荷的匹配是电机设计的关键权衡点。电负荷（线负荷）反映定子绕组电流密度与槽满率的综合效应，磁负荷（气隙磁密）体现永磁体与磁路的利用效率。二者乘积决定电机功率密度，但过高会导致温升失控，电负荷过高会加剧铜耗，磁负荷过高则引发铁耗激增。设计时需根据冷却条件与材料特性确定合理匹配范围，例如，自然冷却电机电负荷通常取300至500A/cm，磁负荷取0.6至0.8T；强制风冷或液冷电机可适当提高至600A/cm与0.9T。

2.5 齿槽转矩的成因与结构削弱措施

齿槽转矩由定子槽开口与转子磁极相互作用产生，其周期性与槽数和极数相关，会导致电机低速运行时出现转矩波动与振动。结构削弱措施包括，优化磁极形状，采用不等宽磁极或偏心磁极，破坏齿槽转矩的谐波叠加条件；斜极或斜槽设计，通过空间错位分散齿槽效应；选择合适的极槽配合，如采用分数槽绕组，使齿槽转矩频率升高至可忽略范围。此外，定子槽口采用闭口槽或磁性槽楔，可进一步降低齿槽转矩幅值，但需权衡工艺复杂度与成本。

3 热场与机械结构设计

3.1 定子铁损与绕组铜损的热源分布

定子铁损与绕组铜损是电机热源的核心组成部分，二者分布特性直接影响散热路径设计。铁损主要由磁滞损耗与涡流损耗构成，磁滞损耗与磁场交变频率成正比，涡流损耗则与铁芯叠片厚度平方相关，设计时需通过降低工作频率或采用超薄硅钢片抑制涡流^[1]。铜损源于电流通过绕组产生的焦耳热，其大小与电流平方及绕组电阻成正比，集中绕组因端部长度短可减少铜损，分布式绕组则因电阻分散需优化线径选择。

3.2 永磁体高温退磁风险及防护结构

永磁体高温退磁是电机可靠性设计的关键挑战，钕铁硼材料矫顽力随温度升高显著下降，当工作温度超过拐点温度时，退磁风险呈指数级增长。防护结构需从隔热与散热两方面协同设计，隔热层面可采用纳米气凝胶毡包裹永磁体，阻断高温环境热传导；散热层面则通过在转子背部开设轴向通风道，利用离心风扇强化空气对流，将永磁体温度控制在拐点温度以下。对于封闭式电机，需在机壳内壁设置散热翅片，通过热辐射与对流传合作用降低内部温升，确保永磁体长期稳定性。

3.3 转轴机械强度与临界转速配置

转轴机械强度需满足扭矩传递与弯曲应力双重约束，材料通常选用40Cr或42CrMo合金钢，通过调质处理提升抗疲劳性能。临界转速配置需避开电机工作转速范围，一阶临界转速过低会导致共振，过高则增加制造成本。设计时通过有限元模态分析确定转轴固有频率，结合电机额定转速与调速范围，采用增大轴径或增加支撑轴承数量等方式提升临界转速，例如在高速电机中采用空心轴结构减轻质量，通过优化跨距降低弯曲刚度对临界转速的影响。

3.4 轴承选型、预紧力与支撑刚度

轴承选型需综合考量负载特性与转速要求，深沟球轴承适用于低摩擦、高转速场景，角接触球轴承则通过轴向预紧提升支撑刚度，满足高精度定位需求。预紧力设计需平衡刚度与寿命，预紧力过大会加剧磨损，预紧力不足则引发振动，通常采用弹簧或液压装置实现预紧力动态调节。支撑刚度对电机动态性能具有决定性影响，可通过增加轴承座壁厚或采用双列轴承结构提升刚度，例如在数控机床主轴电机中，通过配对安装角接触球轴承并施加轴向预紧，实现支撑刚度显著提升。

3.5 机壳散热路径与密封结构

机壳散热路径需兼顾热传导与对流效率，铝制机壳因导热系数高成为主流选择，表面阳极氧化处理可进一步提升热辐射能力。散热路径设计包括自然对流与强制对流两种方式，自然对流依赖机壳表面散热筋增大散热

面积,强制对流则通过内置风扇或外置散热器强化空气流动^[4]。密封结构需平衡防护等级与散热需求,IP54防护等级电机采用迷宫式密封或橡胶密封圈,IP65及以上等级则需填充导热硅脂或采用气凝胶密封,确保防尘防水性能同时维持散热通道畅通。

4 驱动控制策略与电路结构

4.1 三相全桥逆变器主电路拓扑

三相全桥逆变器是电机驱动的核心功率转换单元,采用六个功率开关器件构成H桥结构,通过交替导通实现直流到交流的能量变换。拓扑设计需兼顾效率与可靠性,上桥臂与下桥臂开关器件需配置反向并联二极管,为感性负载提供续流通路,避免电压尖峰损坏器件。针对高压大功率场景,可采用IGBT模块替代MOSFET,通过优化散热布局降低结温;低压小功率场景则选用低导通电阻MOSFET,减少开关损耗。

4.2 转子位置信号检测与处理电路

转子位置信号是矢量控制与无传感器算法的基础,检测精度直接影响电机控制性能。传统方案采用旋转变压器或光电编码器,通过机械或光学方式获取绝对位置信息,但存在成本高、体积大等局限。现代驱动系统多采用霍尔传感器或磁阻式编码器,通过检测转子磁场变化生成相位差120°的方波信号,经硬件滤波与软件插值处理后,可获得分辨率达0.1°的转子位置信息。对于无传感器控制,需通过反电动势过零检测或高频信号注入法估算转子位置,算法复杂度随转速范围扩展显著增加,需在动态响应与计算负荷间寻求平衡。

4.3 PWM调制方式与开关序列

PWM调制方式直接影响电机运行效率与噪声水平,正弦脉宽调制通过比较参考正弦波与三角载波生成开关信号,输出电压谐波含量低,但开关频率固定导致损耗集中;空间矢量调制则通过优化开关序列使合成电压矢量均匀连续旋转,提升直流母线电压利用率,适用于宽调速范围场景。开关序列设计需平衡开关损耗与电磁干扰,采用零电压开关或零电流开关技术可减少开关瞬态冲击,例如在谐振软开关电路中配置辅助谐振网络,实现开关器件零电压导通。

4.4 启动逻辑与开环加速时序

电机启动阶段需克服静摩擦力与转子惯性,传统方案采用开环V/F控制,通过逐步提升电压频率使电机加速

至额定转速,但低速时反电动势较弱,电流控制难度大。改进方案结合预定位启动与分段加速策略:先施加固定方向直流电压使转子对齐至预设位置,再切换至开环V/F模式,按预设斜率增加频率,同时监测电流幅值防止过载。对于无传感器控制,需在低速段注入高频旋转电压,通过检测电流响应估算转子位置,待转速提升至反电动势可观测范围后切换至闭环模式,实现平滑过渡。

4.5 转速闭环与电流闭环结构

转速闭环通过比较实际转速与给定值生成误差信号,经PI调节器输出电流参考值,实现转速精确跟踪。电流闭环以电流参考值为目标,调节PWM占空比控制绕组电流,抑制负载扰动与参数变化影响。双闭环系统需合理设计调节器参数:转速环带宽通常设为电流环的1/5至1/10,以保证动态响应分层;电流环需采用抗饱和设计,防止积分项累积导致超调。对于高精度应用,可引入前馈补偿或自适应控制,通过在线辨识电机参数动态调整控制策略,提升系统鲁棒性。

结束语

稀土永磁直流无刷电机设计是一个复杂且系统的工程,各部分设计相互关联、相互影响。从电机本体结构到驱动控制策略,每个环节都需精心设计与优化。通过合理选择稀土永磁材料、优化定子绕组与转子磁极结构、精确匹配电磁参数、完善热场与机械结构设计以及采用先进的驱动控制策略,能够有效提升电机的性能、效率与可靠性。在实际应用中,需根据具体需求灵活调整设计方案,以实现电机性能的最优化。

参考文献

- [1]许亚星,任磊,李庆楠,等.基于高速稀土永磁无刷直流电机的分段控制方法研究[J].山西电子技术,2023(5):103-104.
- [2]许亚星,王晓航,漆旭平,等.基于稀土永磁无刷直流电机的双闭环控制方式比较研究[J].山西电子技术,2023(6):104-106.
- [3]李兴进,轩传吴,李龙,等.基于稀土永磁同步电机的线缆挤塑机系统改造[J].光纤与电缆及其应用技术,2023(2):27-29.
- [4]孔佳元,秦未.Halbach磁化钕铁氮磁环在有刷直流电机的应用设计[J].微特电机,2023,51(7):14-17,24.