

电解铝桥式起重机永磁电机技术的设计与应用

马立刚

青铜峡铝业股份有限公司宁东铝业分公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19210

[摘要] 电解铝桥式起重机运行环境严苛,对永磁电机有特殊技术要求。本文阐述其核心技术指标,从拓扑结构、材料选型、电磁、结构防护及控制系统等方面设计电机,并探讨电机安装调试、运行监测维护及环境适应性保障等应用关键技术。通过这些设计与应用,可提升电机性能,满足电解铝生产需求,降低能耗与成本,推动行业技术发展。

[关键词] 电解铝桥式起重机; 永磁电机; 设计核心; 应用关键技术

中图分类号: TH215 文献标识码: A

Design and Application of Permanent Magnet Motor Technology for Electrolytic Aluminum Bridge Crane

Ligang Ma

Ningdong Aluminum Branch of Qingtongxia Aluminum Co., Ltd.

[Abstract] The operating environment of electrolytic aluminum bridge crane is harsh, which imposes special technical requirements on permanent magnet motors. This paper expounds its core technical indicators, designs the motor from aspects such as topological structure, material selection, electromagnetics, structural protection, and control system, and discusses key application technologies including motor installation and commissioning, operation monitoring and maintenance, and environmental adaptability assurance. Through these designs and applications, motor performance can be improved, production demands of electrolytic aluminum can be met, energy consumption and costs can be reduced, and industry technological development can be promoted.

[Key words] electrolytic aluminum bridge crane; permanent magnet motor; design core; key application technologies

引言

电解铝生产规模不断扩大,桥式起重机作为关键设备,其性能至关重要。传统电机在高温、多尘、腐蚀性环境下,难以满足起重机频繁启停、重载启动等需求。永磁电机凭借高转矩密度、高功率密度等优势,成为电解铝桥式起重机的理想选择。深入探讨其设计与应用技术,有助于提升起重机性能,降低生产成本,对电解铝行业发展具有重要意义。

1 电解铝桥式起重机对永磁电机的技术要求

1.1 电解铝生产场景特性

电解铝生产中,桥式起重机运行环境严苛。车间温度高,普遍可达80~120℃,电解反应本身释放大量热量,设备密集运行进一步加剧热量积聚^[1]。高温不仅影响电机零部件物理性能,还可能改变材料热膨胀系数,导致配合精度下降,影响正常运行。多尘是电解铝车间另一显著特征,铝电解、铸造等工序产生大量粉尘。粉尘若进入电机内部,会附着在绕组等关键部件上,降低绝

缘性能,增加漏电风险,还可能堵塞散热通道,影响散热效果。腐蚀性环境同样不容忽视,生产使用的电解质溶液等,在高温下易挥发形成腐蚀性气体(如氟化氢)。氟化氢气体对电机金属部件具有强烈腐蚀作用,会降低部件强度和密封性。电解铝桥式起重机采用间歇式运行模式,频繁启动、制动和停止。重载启动时,电机需短时间内输出较大转矩以克服负载惯性。50吨级起重机重载启动,要求电机在3~5秒内输出至少200%额定转矩,这对电机动态响应和过载能力提出很高要求。

1.2 核心技术指标要求

为满足运行需求,永磁电机需具备较高的转矩密度与功率密度。高转矩密度可确保在有限体积内输出足够转矩,一般要求达到40~60Nm/L,满足重载启动要求;高功率密度则能使电机在相同功率下体积更小、重量更轻,便于安装维护。调速范围与控制精度也是关键指标。起重机在不同工况下需要不同运行速度,这就要求电机具有较宽的调速范围,通常需达到1:100甚至更

宽。为保证运行的平稳性和定位准确性,电机需具备高精度的控制能力。电机还需具备耐高温、抗干扰的可靠性。在高温下,电机的绝缘材料、永磁体等部件性能会变化,因此需采用耐高温材料和特殊设计,确保稳定运行。此外,车间内的电磁干扰、粉尘干扰等也会影响电机,需具备良好的抗干扰能力。能耗与运行效率标准同样重要。降低能耗、提高效率不仅可减少成本,还符合节能减排要求。永磁电机需通过优化设计,提高能量转换效率,降低运行损耗。

2 电解铝桥式起重机永磁电机的设计核心

2.1 电机拓扑结构设计

转子永磁体排列方式选择是电机拓扑结构设计的关键环节。不同排列方式,如表面式、内置式等,对电机的磁场分布、转矩特性以及机械强度有着显著影响。表面式排列结构简单,制造工艺相对容易,但在高速运行时永磁体易发生脱落;内置式排列则能提供更高机械强度,且可通过合理设计磁路改善转矩输出性能,适用于重载启动频繁的电解铝桥式起重机。定子铁芯结构优化也不容忽视^[2]。定子铁芯的槽型设计会影响绕组的嵌线工艺和电机的电磁性能,合理槽型可降低槽漏抗,提高功率因数。转子铁芯的结构设计需考虑与永磁体的配合,确保磁路顺畅,减少磁阻,同时要保证足够机械强度以承受运行中的各种应力。气隙长度设计与磁场调控是提升电机性能的重要手段。气隙长度过小,会增加电机杂散损耗,降低效率,还可能引发机械摩擦;气隙长度过大,则会使磁场强度减弱,影响电机转矩输出。一般气隙长度设计在2-5mm之间,通过精确设计并结合磁极形状、充磁方式等进行磁场调控,可实现电机性能的优化。

2.2 关键材料选型与适配

材料类型	选型方案	性能参数	适用场景
永磁材料	钕铁硼N42H (耐高温 $\geq 120^{\circ}\text{C}$)	铁氧体 高剩磁	耐温 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ 低成本
绝缘材料	聚酰亚胺薄膜 耐热 220°C 、击穿场强 $200\text{kV}/\text{mm}$	耐热高温	耐腐蚀
铁芯/导电材料 /低电阻率铜导体 降低铁损/铜损	$\geq 120^{\circ}\text{C}$ 高剩磁 $\geq 80^{\circ}\text{C}$	220°C 低成本 $200\text{kV}/\text{mm}$	$200\text{kV}/\text{mm}$ 降低铁损/铜损

图 1

永磁材料的性能参数与选型依据需综合考虑电机的设计要求。钕铁硼永磁材料具有高剩磁、高矫顽力和高磁能积等优点,能提供强大的磁场,但温度稳定性相对较差;铁氧体永磁材料成本低,温度稳定性好,但磁性能较弱。在电解铝桥式起重机中,需根据电机的工作温度、转矩需求等因素选择合适的永磁材料。当电机工作温度在 80°C 以下时,可选用铁氧体永磁材料;当工作温度超过 80°C 时,应选用钕铁硼永磁材料,且需选用耐温等级为 120°C 以上的钕铁硼N42H等型号。耐高温绝缘材料的选用标准要严格。电解铝车间高温环境会加速绝缘材料的老化,降低绝缘性能。需选用耐高温等级高的绝缘材料,如聚酰亚胺薄膜等,确保电机在高温下仍能保持良好的绝缘性能,保障电机的安全运行。聚酰亚胺薄膜的耐热等级可达 220°C ,在 180°C 环境下可长期稳

定运行,其击穿场强达 $200\text{kV}/\text{mm}$ 。铁芯材料与导电材料的优化匹配能提高电机的效率。铁芯材料应具有高导磁率和低铁损,以减少磁滞损耗和涡流损耗;导电材料则要具有低电阻率,降低铜损。通过合理匹配这些种材料,可降低电机的总损耗,提高运行效率,如图1所示。

2.3 电磁设计要点

磁场仿真与磁路优化是电磁设计的基础。利用有限元分析软件对电机的磁场进行仿真分析,可直观地了解磁场的分布情况,发现磁路中存在的问题,并通过调整磁极形状、气隙长度等参数对磁路进行优化,提高电机的电磁性能。损耗计算与发热控制设计至关重要。电机在运行过程中会产生铜损、铁损和机械损耗等,这些损耗会转化为热量,使电机温度升高。通过精确计算各种损耗,并设计合理的散热结构,如散热翅片、冷却风道等,可有效控制电机的发热,确保电机在允许的温度范围内运行。启动转矩与过载能力设计需满足电解铝桥式起重机的运行需求。电机要能在重载情况下快速启动,并提供足够的过载能力,以应对运行过程中的突发情况,如重物卡滞等。

2.4 结构与防护设计

电机整体结构的轻量化设计可降低起重机的自重,提高起重能力。通过采用新型材料和优化结构设计,如采用空心轴、薄壁结构等,可在保证电机强度和刚度的前提下,减轻电机重量。密封防护结构与散热系统设计能有效保护电机免受电解铝车间多尘、腐蚀性环境的影响。密封结构可防止粉尘和腐蚀性气体进入电机内部,散热系统则能及时将电机产生的热量散发出去,确保电机的正常运行。适应电解铝环境的抗腐蚀设计需从材料选择和表面处理等方面入手。选用耐腐蚀材料制作电机的外壳和关键部件,并对电机表面进行防腐处理,如喷涂防腐涂料等,可提高电机的抗腐蚀能力。

2.5 控制系统匹配设计

永磁电机专用控制器的功能适配要满足电机的控制需求。控制器应具备调速、保护、通信等功能,能根据电机的运行状态实时调整控制参数,确保电机的稳定运行。控制器应具备过流、过压、欠压、过热等保护功能,保护动作时间不超过 100ms ,以确保电机在异常情况下能及时得到保护。调速算法与负载特性的匹配优化可提高电机的控制精度和响应速度。根据电解铝桥式起重机的负载特性,选择合适的调速算法,如矢量控制、直接转矩控制等,并进行优化,使电机能更好地适应不同的运行工况。采用矢量控制算法,可使电机的速度控制精度提高至 $\pm 0.05\%$,转矩控制精度达到 $\pm 1\%$ 。制动能量回收系统设计可将电机在制动过程中产生的能量回收利用,提高能源利用效率。通过合理设计制动电阻和能量回收装置,将制动能量转化为电能并回馈到电网中,实现节能的目的。

3 电解铝桥式起重机永磁电机的应用关键技术

3.1 电机安装与调试技术

在电解铝桥式起重机中,永磁电机与起重机机械系统连接适配至关重要。电机输出轴与起重机传动装置需通过合适联轴

器连接。联轴器选型需综合传递扭矩、转速及安装空间等因素, 确保运行中稳定传递动力, 避免连接不当导致的振动、噪声甚至传动失效。传递扭矩1000-5000N·m的电机可选用弹性柱销联轴器, 允许角位移偏差 $1^{\circ} - 1.5^{\circ}$, 径向位移偏差0.1-0.3mm。安装精度控制与对中技术直接影响电机运行性能和使用寿命, 安装时需保证电机轴与传动轴同轴度符合规定^[3]。同轴度偏差过大会使电机承受额外径向力和轴向力, 增加轴承磨损、降低效率甚至引发故障, 可采用激光对中仪等精密测量工具调整, 将同轴度偏差控制在0.05mm以内, 该仪器可使对中精度提升至0.02mm以内。空载与负载调试是电机正常运行的关键环节, 空载调试时让电机单独运行, 检查转向、转速是否符合设计要求, 观察运行平稳性及有无异常振动噪声, 检验控制系统调速、制动等功能, 确保空载转速波动 $\pm 1\%$ 以内, 振动加速度有效值不超过 2.8m/s^2 。负载调试在起重机实际吊运重物时进行, 逐步增加负载, 监测电机电流、电压、温度等参数, 检验重载下启动性能、过载能力及运行稳定性, 根据结果优化电机和控制系统参数。

3.2 运行监测与维护技术

电机状态监测参数选取需全面且具代表性。除常见的电流、电压、温度等参数外, 还应监测电机振动、噪声、绝缘电阻等。振动参数能反映电机机械状态, 如轴承磨损、转子不平衡等问题; 噪声参数可辅助判断电机内部故障情况; 绝缘电阻则能及时发现问题, 预防漏电事故。振动加速度有效值监测范围一般为 $0.1-100\text{m/s}^2$, 噪声级监测范围为30-120dB, 绝缘电阻监测值应不小于 $0.5\text{M}\Omega$ 。永磁体性能衰减的监测与预警是保障电机长期稳定运行的重要措施。永磁体在高温、强磁场等环境下, 磁性会逐渐衰减, 影响电机转矩输出和效率。可通过定期检测电机反电动势、空载电流等参数, 间接评估永磁体性能状态。当这些参数发生异常变化时, 及时发出预警, 采取更换永磁体或调整控制策略等措施。反电动势下降超过5%或空载电流上升超过10%时, 应发出永磁体性能衰减预警。针对性维护策略制

定依据电机实际运行状况和监测结果。对于轻微磨损的轴承, 可定期添加润滑油保养; 对于绝缘性能下降的电机, 可进行烘干、浸漆等处理; 对于性能衰减严重的永磁体, 需及时更换。同时建立完善维护档案, 记录电机维护历史和运行数据, 为后续维护决策提供依据。

3.3 环境适应性保障技术

高温环境下的热管理措施能有效降低电机的温度, 保障电机的正常运行。可在电机外壳上设置散热翅片, 增加散热面积; 采用强制风冷或水冷等散热方式, 提高散热效率。对于温度较高的区域, 还可安装温度传感器, 实时监测电机温度, 当温度超过设定值时, 自动启动散热装置或调整电机的运行参数。粉尘与腐蚀性气体的防护强化可延长电机的使用寿命。在电机的进风口和出风口处安装防尘网, 阻止粉尘进入电机内部; 对电机的外壳和关键部件进行防腐处理, 如喷涂防腐涂料、采用不锈钢材质等, 提高电机的抗腐蚀能力。应定期清理电机表面的灰尘和污垢, 保持电机的清洁。

4 结束语

电解铝桥式起重机永磁电机设计与应用技术的探索, 为解决传统电机在恶劣环境下的运行难题提供了有效方案。通过合理设计电机各部分结构、选型适配关键材料、优化电磁性能及完善控制系统, 并掌握安装调试、运行维护和环境适应等关键技术, 可显著提升电机性能, 保障起重机稳定运行, 降低能耗与成本, 为电解铝行业的高效生产提供有力支撑。

[参考文献]

- [1]唐龙庆.高速永磁电机结构设计及损耗分析[J].防爆电机,2023,58(02):13-16+58.
- [2]李茂林,李永健.新能源汽车驱动用永磁同步电机设计技术[J].内燃机与配件,2025(13):101-103.
- [3]黄守道,张一凡,冯垚径,等.永磁风力发电机技术发展综述[J].电气工程学报,2025,20(4):22-42.