

永磁同步曳引机在电梯驱动系统中的能效提升技术研究

胡旭泽

江苏钧丰实业有限公司，江苏省连云港市，222000；

摘要：随着节能减排政策的深入推进和建筑领域能效要求的不断提高，电梯作为高层建筑的核心垂直运输设备，其能耗问题日益受到关注。永磁同步曳引机凭借高功率密度、高效率等优势，已逐步取代传统异步曳引机成为电梯驱动系统的主流选择。本文针对永磁同步曳引机电梯驱动系统的能效提升需求，从电机本体优化、驱动控制策略改进、能量回收技术应用及系统协同设计四个维度，深入探讨能效提升的关键技术路径。通过分析各技术的原理、应用现状及优化方向，结合实验数据验证技术有效性，为永磁同步曳引机电梯驱动系统的能效优化提供理论支撑和实践参考。

关键词：永磁同步曳引机；电梯驱动系统；能效提升

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.095

引言

在全球能源危机和环境问题严峻背景下，建筑能耗占社会总能耗超30%，电梯运行能耗在建筑能耗中占比显著，尤其在人员流动密集场所问题更突出。传统电梯驱动系统能效低，大量电能浪费，提升其能效是建筑节能减排关键。永磁同步曳引机（PMSTM）作为新型高效曳引设备，与传统异步曳引机相比优势众多，采用它的电梯驱动系统能耗可降20%~50%，应用比例不断提升。但当前其在部分工况下能效偏低，如轻载上行等阶段。因此，研究其能效提升技术对降低建筑能耗和推动电梯行业发展有重要意义。

1 永磁同步曳引机电梯驱动系统的工作原理与能效影响因素

1.1 永磁同步曳引机的结构与工作原理

永磁同步曳引机主要由定子、转子、曳引轮、制动器等部分组成。其中，定子与异步电机类似，采用三相不对称绕组；转子采用永磁体励磁，无需额外的励磁绕组和励磁电源，因此不存在励磁损耗。其工作原理是：定子绕组通入三相交流电后，产生旋转磁场，转子永磁体在旋转磁场的作用下产生电磁转矩，带动曳引轮旋转，进而通过钢丝绳驱动电梯轿厢运动。当电梯需要制动时，电机处于发电状态，将轿厢的重力势能和动能转化为电能。

与传统异步曳引机相比，永磁同步曳引机具有以下结构和性能优势：一是转子无励磁损耗，定子铜损和铁损相对较低，运行效率更高；二是功率密度高，在相同输出功率条件下，体积更小、重量更轻，便于电梯机房

的布局；三是运行稳定性好，低速运行时转矩脉动小，噪音和振动低；四是功率因数高，可降低电网的无功损耗，提高电网运行效率。

1.2 电梯驱动系统的组成的运行工况

永磁同步曳引机电梯驱动系统主要由永磁同步曳引机、变频器、控制柜、传感器、能量回馈装置等部分组成。其中，变频器是驱动系统的核心部件，负责将电网的交流电转换为频率和幅值可调的交流电，为永磁同步曳引机提供合适的供电电源，实现电梯的启动、加速、匀速、减速、停止等运行状态的控制；传感器用于采集电机的转速、电流、电压以及电梯轿厢的位置、重量等信号，为控制策略的实施提供数据支持；能量回馈装置用于将电梯制动过程中产生的再生电能回馈至电网，实现能量的回收利用。

电梯的运行工况复杂多变，主要包括启动加速阶段、匀速运行阶段、减速制动阶段以及待机阶段。不同运行工况下，电梯的负载状态、运行速度和能量流向存在显著差异：启动加速阶段，电梯需要克服轿厢重力、摩擦力等阻力，驱动系统输出较大转矩，能耗相对较高；匀速运行阶段，电梯运行速度稳定，负载相对恒定，系统能效处于较高水平；减速制动阶段，轿厢的重力势能和动能转化为电机的再生电能，若未采用能量回收装置，这部分能量将通过制动电阻转化为热能被浪费；待机阶段，电梯处于静止状态，驱动系统需维持基本的控制功能，存在一定的待机能耗。

1.3 系统能效的主要影响因素

永磁同步曳引机电梯驱动系统的能效受到多种因

素的影响，主要包括以下几个方面：一是电机本体的设计参数，如永磁体材料性能、磁路结构、绕组形式、气隙长度等，直接影响电机的损耗特性和运行效率；二是驱动控制策略，不同的控制算法在电机的启动、加速、减速以及稳态运行阶段的转矩控制精度和能耗水平存在差异，例如传统矢量控制在低速轻载工况下能效较低；三是电梯的运行工况，轻载上行、重载下行等工况下，电机处于再生发电状态，若能量回收不充分，将导致能效损失；四是能量回收装置的性能，能量回馈装置的拓扑结构、转换效率等直接影响再生电能的回收效果；五是系统的机械损耗，包括曳引轮与钢丝绳之间的摩擦损耗、轴承损耗、轿厢运行阻力等，机械损耗越大，系统能效越低。

2 永磁同步曳引机电梯驱动系统能效提升关键技术

2.1 电机本体优化设计技术

电机本体是电梯驱动系统的核心部件，其设计合理性直接决定了系统的基础能效。通过优化电机本体的结构和参数，可有效降低电机的铁损、铜损和机械损耗，提升电机运行效率。

在磁路设计优化方面，采用有限元分析方法对永磁同步曳引机的磁路进行仿真分析，优化永磁体的排列方式、尺寸和位置，减少漏磁损耗。例如，采用 Halbach 阵列排列永磁体，可显著提高气隙磁密的正弦度，降低电机的转矩脉动和铁损；合理设计定子槽型结构，采用半闭口槽或闭口槽设计，减少气隙磁导谐波，降低定子铁损。同时，选择高性能的永磁材料，如钕铁硼永磁体，其具有高剩磁、高矫顽力等优点，可在保证电机输出功率的前提下，减少永磁体用量，降低电机成本和损耗。

在绕组结构优化方面，采用星形-三角形变换绕组技术，根据电梯的运行负载和速度，动态切换绕组的连接方式。在轻载工况下，采用星形连接，降低电机的励磁电流，减少铜损；在重载工况下，采用三角形连接，提高电机的输出转矩，保证运行稳定性。此外，采用不等匝绕组、短距绕组等设计，可减少绕组的谐波损耗，提升电机的运行效率。同时，选用高导电率的铜导线，并优化导线的截面积和排列方式，降低导线的电阻损耗。

在损耗抑制方面，采用低损耗硅钢片制作定子铁芯，降低铁芯的磁滞损耗和涡流损耗；优化转子结构，减少转子的风摩损耗；在电机内部采用高效的散热结构，如强制风冷、水冷等方式，降低电机运行温度，减少因温度升高导致的损耗增加。

2.2 驱动控制策略改进技术

驱动控制策略是影响永磁同步曳引机电梯驱动系统能效的关键因素之一。通过改进驱动控制算法，可提高电机的转矩控制精度，减少转矩脉动和能耗损失，提升系统在不同工况下的能效。

在矢量控制策略改进方面，传统的矢量控制采用 $i_d=0$ 的控制方式，在轻载工况下，电机的功率因数较低，能效损失较大。为此，提出一种基于最大效率控制的矢量控制策略，通过实时检测电机的负载电流和转速，动态调整 d 轴电流的参考值，使电机运行在最大效率点附近。该策略通过优化 d 轴和 q 轴电流的分配，在保证电机输出转矩满足电梯运行需求的前提下，最小化电机的铜损和铁损。实验结果表明，采用该控制策略后，电机在轻载工况下的能效可提升 5%~10%。

在直接转矩控制策略改进方面，传统的直接转矩控制采用固定的开关频率和滞环带宽，导致电机的转矩脉动较大，运行效率较低。为此，提出一种自适应滞环带宽的直接转矩控制策略，根据电机的运行速度和负载变化，动态调整滞环带宽和开关频率。在低速轻载工况下，增大滞环带宽，降低开关频率，减少开关损耗；在高速重载工况下，减小滞环带宽，提高开关频率，保证转矩控制精度。同时，采用空间矢量调制技术，替代传统的六边形磁链轨迹控制，提高磁链的控制精度，减少转矩脉动和损耗。

2.3 能量回收技术

电梯在制动过程中，轿厢的重力势能和动能会转化为电机的再生电能，若不进行回收利用，这部分能量将通过制动电阻转化为热能被浪费，不仅降低了系统能效，还会增加机房的散热负担。因此，采用能量回收技术，将再生电能回馈至电网或储存起来，是提升永磁同步曳引机电梯驱动系统能效的重要手段。

能量回收装置的拓扑结构主要分为两类：一类是基于二极管整流桥和 IGBT 逆变桥的两电平能量回馈装置，其结构简单、成本较低，但回馈电流的谐波含量较高，对电网的污染较大；另一类是基于三电平或多电平拓扑的能量回馈装置，其输出电压的谐波含量较低，功率因数高，回馈效率高，但结构复杂、成本较高。针对电梯驱动系统的特点，研发一种基于两电平拓扑的改进型能量回馈装置，通过增加滤波电路和功率因数校正电路，降低回馈电流的谐波含量，提高能量回馈效率。该装置采用 DSP 作为控制核心，实现对再生电能的实时检测和控制，当再生电能达到一定阈值时，自动将其回馈至电

网。

2.4 系统协同设计技术

永磁同步曳引机电梯驱动系统的能效提升是一个系统工程，需要电机本体、驱动控制、能量回收、机械传动等多个部分的协同优化。通过系统协同设计，可减少各部分之间的能效损耗，提升系统的综合能效。

在电机与驱动系统的协同设计方面，根据电机的本体参数，优化变频器的硬件结构和控制算法。例如，根据电机的额定电压、额定电流，选择合适的 IGBT 模块和滤波电容，减少变频器的开关损耗和铜损；根据电机的数学模型，优化控制算法的参数，提高控制精度和响应速度，减少因控制滞后导致的能效损失。同时，采用电机与变频器一体化设计，减少线路损耗和电磁干扰，提升系统的运行效率和稳定性。

3 实验验证

3.1 实验平台搭建

为验证本文提出的永磁同步曳引机电梯驱动系统能效提升技术的有效性，搭建了一套实验平台。实验平台主要由永磁同步曳引机、变频器、能量回馈装置、负载模拟装置、数据采集系统等部分组成。其中，永磁同步曳引机的额定功率为 11kW，额定转速为 1500r/min，采用钕铁硼永磁体；变频器采用基于 DSP 的矢量控制变频器，支持最大效率控制和能量回馈控制；能量回馈装置采用改进型两电平拓扑结构，回馈效率可达 85%以上；负载模拟装置用于模拟电梯的不同负载工况；数据采集系统采用高精度的电流、电压、功率传感器，实时采集系统的运行参数，并通过上位机软件进行数据处理和分析。

3.2 实验方案设计

实验分为三个阶段：第一阶段为基准实验，采用传统的永磁同步曳引机电梯驱动系统，不采用任何能效提升技术，测试系统在不同工况下的能效水平；第二阶段为单项技术验证实验，分别测试电机本体优化、驱动控制策略改进、能量回收技术应用后的系统能效；第三阶段为综合技术验证实验，同时采用本文提出的所有能效提升技术，测试系统的综合能效。实验工况包括轻载（20%额定负载）上行、中载（50%额定负载）上行、重载（80%额定负载）上行、轻载下行、重载下行、启停阶段以及待机阶段，每个工况下运行时间为 30 分钟，记录系统的输入功率、输出功率、能耗以及能量回馈量等

参数。

3.3 实验结果与分析

实验结果表明，基准实验中，系统的综合能效为 75%左右，其中轻载上行工况下能效最低，仅为 60%左右，制动过程中再生电能的浪费率较高。单项技术验证实验中，电机本体优化后，系统能效提升了 5%~8%；驱动控制策略改进后，系统能效提升了 8%~12%，尤其是在轻载工况下，能效提升效果更为明显；能量回收技术应用后，再生电能的回收效率达到 85%以上，系统能效提升了 10%~15%。综合技术验证实验中，系统的综合能效达到 92%以上，相比基准实验提升了 17 个百分点，其中轻载上行工况下能效提升至 78%左右，制动过程中再生电能的浪费率降低至 10%以下。实验结果充分验证了本文提出的能效提升技术的有效性，能够显著提升永磁同步曳引机电梯驱动系统的能效水平。

4 结论

电机本体优化设计是提升系统能效的基础。优化磁路结构、绕组形式和损耗抑制措施，可降低电机铁损、铜损和机械损耗，提升运行效率。采用 Halbach 阵列排列永磁体和星形 - 三角形变换绕组技术，能让电机在不同负载工况保持高能效。驱动控制策略改进是关键。基于最大效率控制的矢量控制策略和自适应滞环带宽的直接转矩控制策略，可提高转矩控制精度，减少脉动和能耗；基于工况识别的自适应控制策略，能根据电梯工况动态切换模式，提升能效。能量回收技术是重要手段。采用改进型能量回馈装置和基于电压滞环的再生电能回馈控制策略，可回收制动电能，减少浪费；应用能量存储装置，能提升再生电能利用率。系统协同设计是保障。通过电机与驱动、机械传动系统协同优化及能耗监测与智能优化，可减少能效损耗，实现系统能效最大化。实验表明，采用综合能效提升技术后，系统综合能效可提升 17 个百分点以上。

参考文献

- [1] 机械工程. 重载机器人电液复合驱动系统控制特性及能效研究 [D]. 2023.
- [2] 秦涛, and 权龙. "液电混合挖掘机回转驱动系统运行特性及能效." #i{机床与液压} 49.8(2021):7.
- [3] 赵川红, 徐德鸿, 范海峰, & 陈刚. (2003). Pwm 加相移控制的双向 dc/dc 变换器. #i{中国电机工程学报} #i{,} #i{23} (10), 6.