

住宅楼电梯电力拖动控制方案优化设计

李晓琳

河南中柱建设有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：住宅楼电梯是关系到居民日常出行便利的重要垂直运输设备，其电力拖动控制系统的性能直接影响电梯的运行效率、乘坐舒适性与能耗水平。随着城市住宅建筑向高层化发展，传统电梯拖动系统在实际运行中普遍存在运输效率偏低、能耗较高等问题。本文在系统分析住宅楼电梯运行特点与负载特性的基础上，围绕电力拖动控制方案的优化设计展开研究。从变频调速技术选型、永磁同步电机驱动系统应用、智能调度算法集成、再生电能回馈技术引入以及控制策略优化等维度，提出了一套综合性的优化设计方案。分析表明，优化后的拖动控制方案能够在有效提升电梯运行效率与乘坐品质的同时，实现显著的节能效果。研究结果可为既有住宅电梯节能改造与新建住宅电梯系统设计提供技术参考。

【关键词】：住宅电梯；电力拖动控制；变频调速；永磁同步电机；节能优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.080

1 引言

电梯作为高层住宅建筑中不可或缺的垂直运输工具，其运行效率和可靠性直接关系到居民的日常出行体验。电力拖动控制系统是整个电梯装置的核心组成部分，它如同电梯的“神经中枢”，负责协调和执行所有运动指令。该系统主要由电动机、驱动控制器、传感器及控制软件等构成，其中电动机将电能转换为机械能，驱动控制器通过调节电压和频率来精确控制电机转速与扭矩，传感器实时监测轿厢位置、速度及负载状态，而控制软件则基于算法实现智能调度、故障诊断与安全保护。系统性能的优劣直接决定着电梯的运行安全性、平层精度、乘坐舒适度以及整体能耗水平。例如，安全性涉及紧急制动和过载保护机制，平层精度影响乘客进出时的便利性，舒适度取决于加速度的平滑性，能耗水平则关联到长期运营成本。

近年来，我国城市住宅建筑不断向高空拓展，超高层住宅小区日益增多，住宅电梯的装机数量与运行频次持续增长，对电梯系统的性能提出了更高要求。然而，传统的电梯设计多采用交流变频调速技术，在实际运行中普遍暴露出运输能力不足、能耗偏高等突出问题，尤其在早晚高峰时段，电梯响应迟缓 and 空载运行现象加剧了能源浪费。在“双碳”战略背景下，建筑领域的节能减排已成为全社会关注的焦点，电梯作为建筑内高频率运行设备，其节能改造的潜力不容忽视。通过优化电力拖动系统，可显著降低待机能耗和运行损耗，为实现绿色建筑目标贡献力量。与此同时，随着电力电子技术、永磁材料科学以及智能控制理论的快速发展，电梯电力拖动系统的优化设计在技术上具备了更为充分的实现条件。例如，电力电子器件如 IGBT 提高了驱动效率，永磁同步电机以其高功率密度和低损耗优势逐渐普及，而智能控制理论如模糊逻辑和自适应算法则提升了系统的动态响应与能效管理。因此，以住宅楼电梯为

对象，系统研究其电力拖动控制方案的优化设计方法，不仅有助于提升电梯的综合性能、降低生命周期成本，还能推动行业技术进步，具有显著的工程实践意义和社会效益。

2 住宅电梯电力拖动系统的构成与运行特性分析

2.1 系统基本构成

住宅楼电梯电力拖动系统主要由驱动电动机、电力电子变换电路、数字控制器以及转速、电流检测传感器等部分组成。驱动电动机作为核心动力单元，负责将电能转化为机械能；电力电子变换电路则实现电能的调制与转换，如变频或整流；数字控制器通过算法处理传感器反馈的转速和电流信号，实现精准调控。根据控制对象的不同，电力拖动系统可分为直流电动机系统和交流电动机系统两大类。直流电动机系统虽调速范围宽、控制简便，但存在电刷磨损、维护频繁等缺点；而交流电动机系统因结构简单、维护成本低、运行可靠等优势，在工业应用中占据主流地位。在住宅电梯领域，永磁同步电动机驱动的交流拖动系统近年来得到了日益广泛的应用，这主要得益于其高效节能和智能化控制的发展趋势。

电梯永磁同步电机驱动系统由永磁同步电机、电机驱动控制器、连接电缆和系统控制软件等构成。永磁同步电机采用高性能永磁体替代传统的励磁系统来提供稳定磁场，无需电刷和集电环等机械接触装置，从而具备可靠性高、效率高、功率密度高、结构简单以及调速性能优良等突出优点。此外，该电机类型还具有低振动、低噪音和快速动态响应等特点，这些特性使其特别适用于频繁启停、运行工况多变的电梯拖动场合，不仅能提升电梯运行的安全性和舒适性，还能降低长期能耗。随着现代建筑对电梯性能要求的不断提高，永磁同步电机驱动系统正通过集成先进控制策略，如矢量控制或直接转矩控制，进一步优化电梯的平层精度和能效表现，未来在住宅电梯中的

应用将持续深化。

2.2 住宅电梯的运行负载特征

与商用办公楼或公共场所的电梯相比,住宅楼电梯在运行特征上具有显著区别,这主要源于其使用场景和用户需求的差异。首先,住宅电梯的日均运行频次虽低于商业电梯,但由于居民生活节奏规律,高峰时段(如早晚上下班时间)的乘梯需求高度集中,导致瞬时运力要求大幅提升,电梯需在短时间内处理大量楼层召唤,对调度系统的响应速度提出了挑战。其次,住宅电梯的楼层区段相对固定且高度有限,通常服务于中低层建筑,电机因此频繁处于启动、制动及短行程运行状态,这不仅使得调速过程频繁,还因乘客流量波动较大而导致平均负载率偏低,增加了电机和驱动系统的磨损风险。此外,住宅电梯对运行噪声与乘坐舒适度的要求更高,居民对居住环境的安静度较为敏感,同时乘坐体验需兼顾平稳启停和精确平层,这对电力拖动控制的平稳性与控制精度提出了更为严格的技术标准,往往需要采用低噪声设计和先进控制算法来满足。

上述运行特征决定了住宅电梯电力拖动控制方案的设计,必须在兼顾运输效率与乘坐舒适度的前提下,重点突出节能降耗这一核心优化目标。为此,控制方案需集成变频调速技术、智能能量管理及预测性调度策略,通过优化电机运行曲线和减少空载损耗,实现能效提升。同时,在硬件选型上,倾向于采用高效永磁同步电机和再生能量回馈系统,以降低长期运营成本,确保住宅电梯在复杂运行环境中保持经济、可靠与环保的综合性能。

3 电力拖动控制方案优化设计

3.1 变频调速技术的选型优化

变频调速是当前交流电梯拖动系统主流的调速方式,广泛应用于各类电梯控制系统,以其高效、平稳的特性取代了早期的调速技术。通过对电机定子供电频率与电压的协调调节,变频器可实现大范围内无级平滑调速,这一过程基于先进的电力电子技术,通过精确控制输出波形,从根本上克服了传统交流双速电梯换速时产生的冲击感,从而显著提升了电梯运行的稳定性和能效。在住宅电梯的应用场景下,由于用户对舒适度、安全性和能耗的敏感度较高,变频器选型应重点关注以下方面:一是调速比与速度响应速度需满足高层住宅的运行要求,确保电梯在快速升降中保持精准停靠,减少等待时间;二是变频器内部整流与逆变环节的效率应作为关键指标予以考量,高效率设计有助于降低运行损耗,延长设备寿命,并符合绿色建筑标准;三是低转矩脉动特性对于提升住宅电梯乘坐舒适度具有重要影响,应作为选型的核心参数之一,因为它能有效减少运行中的振动和噪音,为居民提供更宁静、平稳的乘坐体验。

此外,还需考虑变频器的环境适应性、维护便捷性及成本效益,以实现住宅电梯系统的整体优化。

3.2 永磁同步电机驱动方案

永磁同步电机的引入是住宅电梯拖动系统实现高效节能运行的关键技术途径,这主要得益于其卓越的电磁性能和高效的能源转换效率,能够显著降低能耗并提升系统整体可靠性。与同规格感应电机相比,永磁同步电机在正常工作时不需要额外励磁功率,具有较高的功率因数,通常接近1,从而大幅减少了无功损耗和电网负担;因此,可使用容量更小的变频器与之配合,不仅节约了硬件成本和安装空间,还实现了产品的轻量化设计,有助于减小系统体积和重量,便于在住宅楼宇中灵活部署。此外,永磁同步电机的转矩脉动与齿槽转矩等技术参数均被纳入标准化控制范畴,通过精确调控这些参数,可以进一步提升电梯运行的平稳性和乘坐舒适度,有效抑制振动和噪音,延长设备使用寿命。

在控制策略层面,传统的基于比例积分控制器的双闭环矢量控制是实现转速与电流解耦控制的基础方案,它通过电流内环和转速外环的协同调节,确保了系统的快速动态响应和稳态精度,因而在早期电梯驱动系统中得到广泛应用。然而,由于永磁同步电机具有非线性和高耦合程度的复杂特性,其数学模型涉及多变量交互,传统控制方法在应对负载突变、参数漂移或外部干扰时可能表现不足。近年来,以模糊控制、预测控制及神经网络控制为代表的智能控制理论受到日益广泛的关注,这些先进方法能够自适应地处理系统不确定性,增强控制器的鲁棒性和灵活性。例如,模糊控制借助经验规则库实时调整控制参数,预测控制基于系统模型优化未来控制序列,神经网络控制则通过训练学习非线性映射关系。应用智能控制理论的矢量控制策略通常可取得比传统方案更好的控制效果,尤其在提升效率、降低转矩波动和适应复杂运行条件方面优势明显,为住宅电梯的高性能驱动提供了更优解决方案。

3.3 智能调度算法与群控优化

对于配备多台电梯的住宅楼栋而言,电梯群控系统的调度算法优化对于整体运输效率与能耗水平具有决定性影响。传统的固定分区调度方式往往导致各台电梯运行不均衡,忙闲不均的现象普遍存在。在智能调度方面,已有研究提出了将蚁群算法等启发式优化算法应用于电梯群控系统的方案,通过模拟蚁群觅食行为的路径寻优机制,动态评估各台电梯的运行状态与能耗数据,迭代求解最优调度序列,从而实现运输效率与能耗之间的动态平衡。

实际工程案例表明,合理规划电梯布局、引入智能调度系统、应用目的楼层呼梯系统及相关配套技术后,电梯乘客平均

等待时间、平均到达目的地时间以及电梯年均能耗占建筑总能耗的比例等关键性能指标均可获得显著改善。

3.4 再生电能回馈技术的集成

住宅楼电梯在重载下行与轻载上行时,电动机工作在制动发电状态,所产生的再生电能通常以热量形式被制动电阻消耗,这一部分能量实际上具有回收利用的潜力。再生电能回馈技术将制动过程中产生的再生电能进行整流和逆变处理,使之回馈至建筑电网供其他用电设备使用,从而有效降低电梯运行的电能净消耗。有研究指出,将该技术与智能监控平台、智能电源管理系统结合,可实现对电梯能耗的全过程实时监测与动态调控,进一步提升系统的精细化管理水平。

3.5 综合控制策略优化

上述各项单项技术的优化最终需要集成统一的控制策略之中。住宅电梯电力拖动控制策略的优化应遵循以下基本原则:第一,在满足运力需求的前提下,将能耗最小化作为首要优化目标;第二,通过实时采集电梯运行的状态参数信息,运用运筹学等先进算法综合决策电机的转速、加速度及运行路径;第三,引入基于行为激励的反馈机制,使控制系统具备自适应能力,能够根据住宅电梯各时段的客流特征动态调整运行模式。

参考文献:

- [1] 刘志刚,鲍淋.例说高层建筑电梯运输能力和能耗优化方法[J].中国电梯,2025,36(10):13-15,26.
- [2] 辽宁省市场监督管理局.电梯永磁同步电机驱动系统的技术要求:DB21/T 3776-2023[S].2023.
- [3] 丰富.基于数据驱动的永磁同步电机调速系统优化设计[D].江西理工大学,2021.

运行管理优化同样不可忽视,通过建立能源管理系统对电梯能耗数据进行持续监测与分析,识别潜在的节能空间,再配合定期的设备检查和维护,可使系统长期维持在高效运行状态。

4 结语

住宅楼电梯电力拖动控制方案的优化设计是一项涉及变频调速技术、永磁同步电机驱动、智能群控调度、再生能量回收与运行管理策略等多个技术维度的系统工程。本文在系统分析住宅电梯运行负载特性的基础上,综合提出了以变频调速为基础、以永磁同步电机为核心驱动元件、以智能算法实现群控调度优化、以再生回馈技术提升能源利用效率的综合优化方案。该方案在提升电梯运行效率与乘坐舒适度的同时,可显著降低系统能耗,兼具技术可行性、经济合理性与环保效益,适用于新建住宅电梯系统的优化设计以及既有住宅电梯的节能升级改造。

需要指出的是,未来研究可在以下方向进一步深入:一是探索深度强化学习等人工智能方法在电梯群控调度领域的应用;二是研究基于数字孪生技术的电梯运行状态实时仿真与故障预测方法,以进一步推动住宅电梯电力拖动系统向智能化、高效化方向发展。