

轨道交通车辆牵引电机的能效优化分析

郭天宇

重庆交通建设管理有限公司 重庆 401121

【摘要】：轨道交通系统中牵引电机是核心动力设备，其能效直接影响能源消耗和运营成本。随着能源需求和环保要求的提高，优化牵引电机的能效成为提升系统经济性和可持续性的重要途径。本文深入分析了牵引电机能效优化的技术路径，重点探讨了电机控制系统的优化、电机驱动方式的选择与优化，以及电机参数的调整等方面的技术方案。通过对国内外轨道交通系统实践的案例分析，揭示了优化措施在能效提升中的实际效果。结合新技术的应用，探索了牵引电机能效优化的未来发展方向，提出了多种技术路径和优化策略。研究表明，通过系统优化和技术创新，可以显著降低电能消耗，提升轨道交通系统的整体效率，为绿色交通的发展作出贡献。

【关键词】：轨道交通；牵引电机；能效优化；控制系统；驱动技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.096

引言

轨道交通作为现代城市公共交通的重要组成部分，承担着大量的客运任务。随着车辆数量的增加和运行需求的变化，轨道交通的能效问题日益突出。牵引电机作为车辆的动力来源，其能效直接影响着整体系统的能源利用效率。如何提高电机的能效，减少能源消耗，成为当前轨道交通系统发展的关键问题之一。优化牵引电机的能效不仅有助于降低运营成本，还能为绿色交通贡献力量。在电机设计、控制策略、运行模式等多个方面进行优化，能够有效提升系统整体性能，推动轨道交通可持续发展。因此，研究牵引电机的能效优化具有重要的现实意义。

1 牵引电机能效优化的挑战

1.1 电机效率低下的原因

轨道交通车辆牵引电机的效率低下，往往受到多方面因素的影响。电机本身的设计和制造质量，尤其是磁铁和线圈的材料选择、绕组结构等，都直接影响其能效。电机在运行过程中会受到温度、负载波动等环境因素的影响，导致其工作效率降低。高负载时电机容易出现过热现象，降低能效。另一个重要因素是电机的控制策略，如果没有采取合理的调速方式或优化控制方法，电机工作时的能量损失也会增加，最终导致效率下降。

1.2 现有优化技术的局限性

当前牵引电机能效优化技术存在三大突出问题：一是传统控制策略依赖预设数学模型，采用PID控制或固定参数矢量控制，对负载突变、温度漂移等动态工况的适应性不足，能效提升空间被限制在5%以内；二是驱动系统与电机本体匹配度不足，传统异步电机驱动系统的功率因数仅为0.8-0.85，能量转换过程中无功损耗显著；三是参数设计缺乏动态优化机制，定子绕组匝数、气隙磁密等关键参数多基于额定工况静态设计，难以适配复杂多变的实际运行场景。此外，先进技术方案的成

本溢价（如永磁同步电机较异步电机成本高15%-20%）也制约了其规模化应用。

1.3 能效优化的战略价值

能效提升对轨道交通系统具有多重战略意义：经济层面，按单条地铁线路年均耗电量1亿kWh计算，电机能效提升10%可年节约电费600-800万元，全生命周期（30年）可降低运营成本1.8-2.4亿元；环保层面，每节约1kWh电能可减少0.785kg二氧化碳排放，能效提升10%的地铁线路年减排量可达7850吨；技术层面，高效电机的应用可降低绕组发热与机械磨损，使电机维护周期延长30%以上，减少停机检修时间，提升系统运营可靠性。

2 牵引电机能效优化的技术路径

2.1 电机控制系统的优化

电机控制系统的优化对提高牵引电机能效至关重要。现代电机控制技术主要依赖于精确的调速和转矩控制。常见的牵引电机控制方式有直流电机的PWM调制控制和交流电机的矢量控制，这些方法能够通过调节电机的输入电压、频率和相序来实现高效运行。传统控制策略在处理高负载、频繁启停等工况时，难以做到实时优化，导致能效下降。为了克服这一问题，基于模型预测控制(MPC)和自适应控制的技术逐渐成为主流。这些先进控制方法能够根据电机负载和运行环境的实时变化动态调整控制策略，确保电机在最优工况下运行，从而提高整体效率。智能算法如遗传算法和粒子群优化(PSO)也被应用于控制系统优化中，通过全局搜索找到更合适的控制参数，进一步减少能量损失。

2.2 驱动方式的高效化转型

采用永磁同步电机(PMSM)替代传统异步电机，其功率密度可达3.5-4.5kW/kg，较异步电机提升50%以上，额定效率可稳定在94%-96%。其驱动系统通过精确的d/q轴电流控制，实现单位功率因数运行，减少无功损耗。构建“制动-发电-回馈”

一体化能量回收系统，制动过程中电机切换为发电机模式，将列车动能转化为电能，通过双向变换器回馈至电网或储能装置^[2]。基于电磁感应定律与损耗模型，对定子绕组匝数、绕组系数和铁心最大磁通密度，可使电磁损耗降低 10%-15%。采用非晶合金铁心材料替代传统硅钢片，磁滞损耗可减少 50%以上，涡流损耗降低 30%-40%。

2.3 电机参数的优化调整

牵引电机的参数优化是提升能效的另一项关键技术。电机的各项设计参数，如定子绕组的匝数、磁场强度、转子结构等，直接影响工作效率。通过精确调整这些参数，在不改变电机基本结构的前提下，可使运行效率提升 3%-5%。对于同步电机和异步电机，优化磁场设计、减少电磁损耗是核心途径，通过优化铁心材料与绝缘材料选择，能使涡流损耗降低 15%-20%、磁滞损耗减少 10%-12%。冷却系统优化同样关键，合理散热设计可将电机工作温度控制在额定范围，避免过热导致效率下降 8%-10%，保障高效长期运行。电机控制系统需依据负载与环境实时调整工作点，规避非最佳区间运行，进一步提升能效。采用大数据分析、机器学习等智能化参数优化手段，可实时监控电机状态并自动调节参数，持续优化能效表现。

3 能效优化的实施方法与步骤

3.1 数据收集与分析

能效优化的首要步骤是系统化的数据收集与分析。轨道交通牵引电机的工作状态、运行参数和环境条件等数据是优化过程中不可或缺的基础。通过安装传感器、使用数据采集系统和实时监控设备，可以全面获取电机的电流、电压、温度、转速等运行数据，同时还应记录电机负载情况、启动与停车周期以及运行工况的变化。这些数据不仅帮助识别电机的工作模式，还能揭示能效低下的潜在原因。数据收集后，通过大数据分析技术对这些信息进行处理与挖掘，可以准确把握电机在不同工况下的能效表现，进而发现改进的关键点。特别是通过数据建模和趋势预测，能够为后续的优化措施提供科学依据。结合电机的历史数据，可以进行对比分析，识别出能源浪费的规律，从而为优化策略的制定提供有效支持。

3.2 优化模型的构建与验证

建立精准的优化模型是能效提升的核心步骤。构建模型需充分考虑电机工作特性及各项参数影响因素，基于物理模型、仿真模型及统计学方法，针对不同运行状态下的电机能效开展深入分析。模型构建需兼顾电机负载特性、功率因数、电流波形等多维度影响，引入能效优化目标函数 $\min f(\eta, P_{\text{loss}}) = \omega_1(1 - \eta) + \omega_2(P_{\text{loss}}/P_{\text{in}})$ （其中 η 为电机效率， P_{loss} 为总损耗， P_{in} 为输入功率， ω_1 、 ω_2 为权重系数且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ），实现对电机各工况表现的全面评估。模型构建后，需通过不少于 1200 组实测实验数据验证，确保预测误差控制在 $\pm 2.5\%$ 以内，保障准确性与有

效性。验证中通过对比实验与仿真数据检测预测精度，结合最优控制理论、遗传算法等数学优化技术调整模型参数，逐步完善模型以确保实际应用可行性。模型准确性验证不仅能提升优化策略可靠性，更能为后续优化措施实施提供坚实理论支持^[3]。

3.3 实施效果评估与调整

能效优化实施后的效果评估至关重要，它为后续的调整和改进提供了反馈依据。评估过程中，需通过对比优化前后的电机能效数据，判断优化方案的实际效果。常见的评估指标包括电能消耗、系统运行稳定性、维护成本、环境污染排放等，综合分析这些指标的变化，能够直观地反映优化措施的成效。考虑到轨道交通系统的复杂性，优化效果的评估还应注重长期稳定性与可靠性。实施后的调整过程通常包括对电机控制系统的进一步调试、优化参数的细化及运行模式的适应性调整等。根据评估结果及时调整优化方案，确保电机在不同工况下始终保持最佳的能效水平。定期进行效果回顾与优化调整，将帮助系统持续提升能效，降低能源消耗，确保长期节能减排目标的实现。

4 优化牵引电机能效的实际应用

4.1 案例分析：国内外轨道交通系统的实践

国内外轨道交通系统在优化牵引电机能效方面进行了多种实践和尝试。部分城市的地铁和轻轨系统通过引入高效永磁同步电机（PMSM）以及变频调速技术，显著提高了牵引电机的工作效率。国外一些城市的轨道交通系统还在电机控制算法上进行了创新，采用了基于实时反馈的优化控制技术，以应对复杂的运行环境和变化的负载需求。在这些应用中，电机的效率提升通常伴随着系统的能量回收能力的增强。在制动过程中，利用再生制动技术将电机的机械能转化为电能并回馈到电网，进一步提升了整体能效。国内部分地铁系统在对旧有设备进行改造时，结合先进的电机驱动技术与智能控制系统，成功地将电能消耗降低，同时提高了运营的可靠性和稳定性。通过这些成功案例，可以为后续的电机能效优化提供宝贵的经验。

4.2 优化方法的应用效果

优化方法在牵引电机中的应用已显示出显著的能效提升效果。通过精确的电机控制系统调节，结合高效的驱动方式和优化的电机参数配置，能效提升幅度可达到显著水平。在某些地铁和轻轨系统的实际应用中，优化措施不仅提高了电机效率，还降低了系统的总能耗，延长了电机的使用寿命。采用动态优化的电机驱动系统，能够实时调整电机的工作模式，确保其始终在最佳工作区间内运行，避免了不必要的能量浪费^[4]。在电机参数优化方面，通过对电机绕组、磁场设计等细节进行调整，有效减少了磁损耗和电阻损耗。这些技术应用的结果表明，牵引电机能效的优化能够为轨道交通系统带来可持续的经济效益，并大幅提升系统整体的能源利用效率。

4.3 挑战与解决方案

在优化牵引电机能效的过程中,面临的挑战主要集中在技术实施和成本控制上。一方面,现有电机系统往往存在着技术更新滞后、控制系统不够智能等问题,导致优化效果未能达到预期的最大化。另一方面,轨道交通系统的设备改造和优化需要投入大量的资金和技术支持,这在一定程度上限制了优化方案的普及和应用。针对这些问题,解决方案可以通过分阶段的实施计划来逐步推进。对已有系统进行局部优化,并结合智能化控制手段逐步替代传统的控制方式,从而逐步提升能效。另一方面,随着技术的不断发展,新型高效电机和智能控制系统的成本正在逐步降低,为优化方案的普及提供了条件。通过政策支持与行业合作,推动技术革新和成本降低,将有助于更广泛地推广牵引电机能效优化技术。

5 优化牵引电机能效的前景与展望

5.1 新技术对能效提升的推动作用

新技术的引入为牵引电机的能效提升提供了新的机遇。随着电力电子技术、智能控制技术以及新型材料的不断发展,电机的控制精度和效率得到了显著提高。现代电机驱动系统采用了更加高效的功率半导体和更先进的控制算法,这些技术的集成使得牵引电机在多变工况下能够实现精确调节和高效运行。永磁同步电机(PMSM)和高温超导材料的使用,进一步降低了能耗,提高了电机的功率密度和效率。智能传感器和数据分析技术的应用,使得电机可以实时监控并调整工作状态,从而优化能效表现。基于人工智能的预测性维护系统也能显著降低故障率,减少能源浪费,延长电机使用寿命。随着这些新技术的广泛应用,牵引电机的能效优化将迎来新的突破。

5.2 未来优化方向的探索

未来牵引电机能效优化的方向将更加注重系统化的整体优化和深度智能化。针对电机运行中负荷波动较大的问题,研

究人员正致力于开发更加精准的负载预测模型,并结合实时控制系统调整电机的运行策略,从而实现更高效的能量调度。多级能量回馈技术将在未来得到更加广泛的应用,尤其是在高速列车和地铁系统中,利用刹车能量回收技术将更多的能量回馈至电网^[5]。基于大数据和云计算的电机性能监控与优化方案,将实现更加精细的能效管理。未来的研究将深入探索电机的集成化设计,将电机和驱动系统的优化结合在一起,进一步提升系统的综合能效表现。随着对能源管理要求的不断提高,未来电机能效的优化将更加注重环境友好和可持续发展。

5.3 对轨道交通行业的长期影响

牵引电机能效优化将对轨道交通行业产生深远影响。通过提升电机效率,能显著降低轨道交通系统的能源消耗,从而降低运营成本,提升经济效益。能效的提升将有助于减少碳排放和其他污染物的排放,推动轨道交通行业朝着更加绿色、低碳的方向发展。牵引电机能效的提升将提高轨道交通系统的可靠性和运行效率,减少故障率并延长电机的使用寿命,降低了维护和替换的成本。随着节能技术的普及,轨道交通行业将能够承担更多的运输任务,缓解城市交通压力。优化后的电机系统还能够提高轨道交通的乘客舒适度,因其更高的运行平稳性和更低的噪声水平,将进一步提升轨道交通的竞争力和吸引力。

6 结语

牵引电机的能效优化是轨道交通系统高效、低碳发展的重要环节。通过先进的控制技术、智能算法和优化设计,电机的能效水平能够得到显著提升,降低能源消耗并减少运营成本。未来,随着新技术的不断进步,轨道交通领域将迎来更加高效、绿色的能源解决方案。能效优化不仅有助于提高轨道交通系统的经济效益,还能推动行业向可持续发展迈进。随着智能化、数字化技术的应用,电机能效优化的前景更加广阔,推动了轨道交通行业的全面升级,为实现低碳、节能目标提供了强有力的支撑。

参考文献:

- [1] 郑云广,程路明,张蕾,等.基于非晶合金材料的轨道交通永磁牵引电机性能研究[J].电力机车与城轨车辆,2025,48(05):36-41.
- [2] 熊骞,徐小涵.在轨道交通车辆牵引电机制造中开发拼装夹具研究[J].工程机械文摘,2025,(04):55-60.
- [3] 邹焕青,刘闰婵,张萌,等.轨道交通牵引电机典型故障的电磁特征分析[J].微电机,2025,58(03):1-9.
- [4] 支永健,朱柄全,袁科亮,等.轨道交通牵引系统电磁兼容技术研究及应用[J].安全与电磁兼容,2024,(03):25-38.
- [5] 刘杰,王进,江乾,等.轨道交通牵引电机用耐电晕聚酰亚胺材料的制备及性能研究[J].绝缘材料,2024,57(08):61-65.