

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.048

多传感器融合下城际轨道列车牵引电机节能控制

吴英帅^{1,2}, 丛培鹏¹, 曾云峰¹, 陈龙¹

(1. 中车大连机车车辆有限公司, 辽宁 大连 116046; 2. 北方交通大学, 北京 100044)

摘要: 由于城际轨道列车在运行时, 黏着阻力的变化会导致牵引电机产生较高的能耗, 进而导致列车在运行过程中出现动力不足、加速缓慢等问题。为确保列车在不同环境下能平稳运行, 提出多传感器融合下城际轨道列车牵引电机节能控制。利用多传感器获取城际轨道列车的运行状态信息和环境信息。通过融合不同类型、不同位置的传感器数据, 估算出列车的黏着系数和黏着阻力, 并以黏着阻力为依据, 计算电机最大效率时的转差频率。通过控制电机的转差频率, 对牵引力进行精确调节, 实现节能控制的目的。实验结果表明: 提出的多传感器融合下的节能控制方法能够显著降低城际轨道列车牵引电机的能耗, 提高运营效率, 与其他节能控制方法相比, 能够更好地适应复杂多变运行环境。

关键词: 多传感器融合; 城际轨道; 列车; 牵引电机; 节能控制

中图分类号: U260.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)04-0269-04

Energy Saving Control of Traction Motor of Intercity Rail Train with Multi-sensor Fusion

WU Yingshuai^{1,2}, CONG Peipeng¹, ZENG Yunfeng¹, CHEN Long¹

(1. CRRC Dalian Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Dalian 116046, China;

2. Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Due to the changes in adhesion resistance during the operation of intercity rail trains, the traction motor generates high energy consumption, which in turn leads to problems such as insufficient power and slow acceleration during the train's operation. To ensure smooth operation of trains in different environments, energy-saving control of traction motors for intercity rail trains under multi-sensor fusion is proposed. By utilizing multiple sensors to obtain operational and environmental information of intercity rail trains, and integrating sensor data from different types and locations, the adhesion coefficient and resistance of the train is estimated, and based on adhesive resistance, the slip frequency at the maximum efficiency of the motor is calculated. The traction force is precisely adjusted by controlling the slip frequency of the motor to achieve energy-saving control. The experimental results show that the proposed multi-sensor fusion energy saving control method can significantly reduce the energy consumption of the traction motor of intercity rail trains, improve the operation efficiency, and better adapt to the complex and changeable operating environment compared with other energy saving control methods.

Keywords: multi-sensor fusion; intercity rail; trains; traction motor; energy saving control

0 引言

在城际轨道列车中, 牵引电机是驱动列车运行的关键部件, 其能耗占整个列车能耗的较大比例, 特别是在长距离、高频次的城际运营中, 牵引电机的能耗问题尤为突出^[1-2]。为了有效地控制和降低牵引电机的能耗, 国内外学者提出了多种控制策略和优化方法。

文献[3]提出了考虑电力牵引链路非线性损耗的节能控制方法, 该方法针对列车运行能量和功率流的变化, 建立非线性损耗模型, 同时以实际

的运行环境作为参考建立约束, 以此达到节能控制的目的。但是, 在实际应用中, 计算量较大, 需要消耗较多的计算资源。文献[4]中提到的节能控制方法, 利用改进的 NSGA-II 算法建立多目标优化模型, 求解列车目标速度曲线, 以达到降低牵引能耗和运行时间的目的, 该方法也存在类似的问题, 计算成本较高。文献[5]提出的混合碳化硅器件的节能方法中, 利用碳化硅新一代半导体器件极大地发挥器件低损耗的特点, 提高了列车牵引系统效率, 实现牵引电机的节能降耗。但是, 面对复杂的工况, 获得信息的手段比较单一, 难以

第一作者简介: 吴英帅(1976—), 男, 辽宁锦州人, 高级工程师, 本科, 研究方向为智能控制产品和列车网络控制系统技术管理和电气总体设计, ffas12323@163.com。

满足高可靠性的控制需求。文献[6]提到的节能控制方法,为了确定牵引电机合适的运动命令,采用了电位器和线性位置传感器的编码器对其进行检测,虽然能够达到降低损耗的目的,但是控制流程过于复杂且成本较高。

多传感器融合技术是指将来自不同传感器的数据进行集成、处理和分析,以获得更全面、准确的信息。在城际轨道列车牵引电机节能控制中,多传感器融合技术可以实时监测列车的运行状态、外部环境以及乘客需求等多种信息,为节能控制策略的制定提供数据支持。通过综合分析这些信息,可以更加精准地调整牵引电机的输出功率,实现节能降耗的目标。因此,本文提出多传感器融合下城际轨道列车牵引电机节能控制方法,以提高列车牵引电机的节能性能,降低运营成本,促进城际轨道交通的可持续发展。

1 列车黏着阻力计算

在城际轨道列车的实际运行过程中,牵引电机需要具有较高的效率,以将输入的电能尽可能多地转化为机械能,从而驱动列车前进。黏着阻力是列车车轮与轨道之间由于黏着作用而产生的阻力,它的大小直接影响到牵引力能否有效传递到轨道上,使列车前进。多传感器融合可以综合来自不同传感器的信息,全面地感知列车运行的内部和外部状态信息^[7],实时地估算出列车的黏着系数和黏着阻力,从而快速调整牵引电机的输出转矩和转速,确保列车在不同工况下都能保持稳定的运行状态。

根据传感器对环境变化的敏感性,多传感器融合可以分为惯性传感器融合^[8]和非惯性传感器融合两种类型。惯性传感器融合是一种直接利用加速度计对加速度进行测量的方法。当列车在运行过程中速度发生变化时,加速度计既能够及时监测到加速度变化,又将加速度信息反馈给控制系统。牵引电机需要根据实时的加速度数据来调整其输出转矩和转速,以确保列车在加速、匀速或减速阶段都能获得最佳的牵引力和较高的运行效率。非惯性传感器融合是指利用惯性传感器来检测列车位置和速度。牵引电机需要根据列车的实际速度和位置来调整其工作模式和输出功率。由此可知,将加速度计和非惯性传感器组合在一起,可以使得列车能够在不同工况下都能保持最佳的牵引性能和较高的运行效率。牵引电机精准控制原理如图1所示。

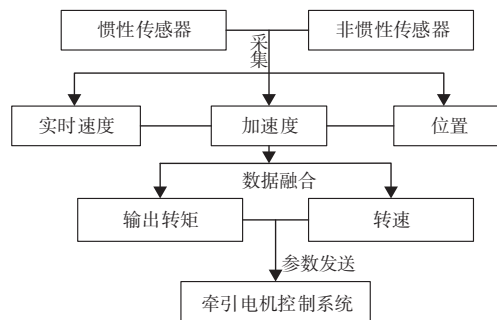


图1 多传感器融合流程

然而,列车状态感知容易受到天气因素影响,在晴天环境下能够获得高质量信息,列车运行环境感知更加准确;在雨天或夜晚等复杂环境下,多传感器采集的信息包含大量噪声,列车运行环境感知精准性容易受到影响。因此,根据不同的工作环境,对黏着系数进行融合修正处理。公式如下:

$$\alpha_1 = \frac{\mu_c \alpha_c + \mu_1 \alpha_1}{2} \quad (1)$$

式中: α_1 为经过融合修正后的黏着系数; α_c 为轮对转速传感器检测目标的置信度; α_1 为轴重传感器检测目标的置信度; μ_c 为轮对转速传感器检测目标置信度的权重; μ_1 为轴重传感器检测目标置信度的权重。在晴天良好环境下, μ_c 取值为1.5, μ_1 取值为0.5;在雨天或夜晚等复杂环境下, μ_c 取值为0.8, μ_1 取值为1.2。

由此,黏着阻力的计算公式可以表示为

$$F_\omega = \alpha_1 (P_\omega g) \quad (2)$$

式中: F_ω 为黏着阻力; P_ω 为列车的黏着质量; g 表示重力加速度。

根据黏着力变化情况,调整牵引电机的输出转矩和转速,使牵引力始终保持在黏着力允许的范围内,从而在保证列车运行安全的前提下,实现节能降耗。

2 牵引传动系统节能控制

牵引电机系统主要由定子、转子、绕组、轴承、冷却系统等关键组件构成。定子作为电机的静止部分,承载着产生旋转磁场的任务,它通过精心设计的绕组与电源相连,当电流通过时,会在定子内部形成旋转磁场。转子则是电机的旋转部分,它与定子磁场相互作用,产生转矩,从而驱动列车前进。绕组则是电流流动的通道,其设计直接影响到电机的效率和性能。轴承则负责支撑转子的旋转,确保电机的平稳运行。冷却系统则负责散热,

防止电机过热,保障其长期稳定运行。当调整牵引电机的供电频率时,电机的转速和转差率会随之发生相应变化。转速直接反映了电机旋转的快慢,而转差率则揭示了电机转子与定子磁场之间的相对运动状态。这两个参数的精确调控对于找到牵引电机效率最高的工作点至关重要。因此,在进行节能控制时,通过控制牵引电机的转差频率,实现对牵引力的精确调节。在保证列车安全运行的前提下,尽量减小牵引力的浪费^[9],提高能量的利用效率。

电机的效率可以表示为

$$\eta = \frac{F_{\omega} \beta_r \beta_s L_m^2 R_r}{\beta_r \beta_s L_m^2 R_r + R_s R_r^2 + R_s \beta_s^2 L_m^2 + R_s \beta_s^2 L_r^2} \quad (3)$$

式中: β_r 为转速; β_s 为转子转差频率; L_r 为转子频率发生变化时的动态电感^[10]; L_m 为静态电感; R_r 为转子频率发生变化时的动态电阻; R_s 为静态电阻。

在理想的工作点上,牵引电机的输入功率(即消耗的电能)和输出功率(即转化为机械能驱动列车前进的能量)之间的差值达到最小,这意味着电机在运行过程中的能量损耗被降至最低,从而实现了节能^[11-12]。因此,通过调整牵引电机的供电频率,可以改变牵引电机的转速和转差率^[13],从而找到牵引电机效率最高的工作点^[14-15]。在这个工作点上,牵引电机的输入功率和输出功率之间的差值最小,即牵引电机的损耗最小,从而实现了节能。由此计算出牵引电机最大效率时的转差频率,公式为

$$\beta_s = \sqrt{\frac{R_s R_r^2}{L_m^2 R_r + R_s L_r^2}} \quad (4)$$

在列车牵引电机节能控制上,利用式(4)调整电机参数,使牵引电机运行在最佳效率点,从而达到节能的目的。

3 实验与分析

3.1 实验设置

在上述控制方法设计完成后,采用对比实验的形式验证控制方法的应用性能。根据城市轨道交通列车的工作需求,以某城市节能减排计划中的牵引变流器系统作为基础,搭建城市轨道交通列车能量互馈牵引传动地面实验平台。具体内容如图2所示。

实验过程中,加速度计输出的电压信号通过专用的信号调理电路进行放大、滤波等处理后,

连接到数据采集模块的模拟输入通道。惯性传感器的输出信号通过专用的通信电缆连接到数据采集模块的相应接口。若为并行格雷码,数据采集模块直接读取编码信息;若为串行通信信号,则数据采集模块需按照相应的通信协议进行数据解析。

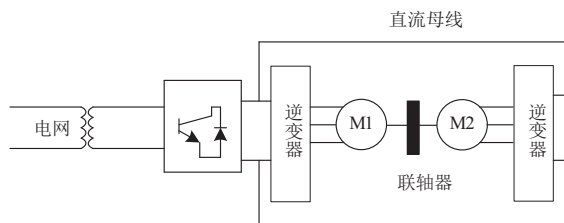


图2 能量互馈牵引传动地面实验系统

加速度计使用的是 LDD-4000 加速度计,频率响应为 22 000 Hz,输入电压为 6~30 V,输出电压为 ± 2 V,零位加速度输出电压为 (2.5 ± 0.05) V,量程为 ± 100 g,电缆长 60 cm。惯性传感器使用的是 M-G325 EPSON 惯性传感器。

数据采集模块将采集到的传感器数据进行初步处理和打包后,通过工业以太网连接到数据融合单元。在数据融合单元中,对来自不同传感器的数据进行融合处理,得到输出转矩和转速等信息,并将这些参数发送到牵引电机控制系统。

牵引电机控制系统中应用的是 YQ-365 型牵引电机,该设备的功率为 365 kW;转速为 4 142 r/min ($26\,024.95$ rad/min)。所构成能量互馈牵引传动地面实验系统参数如表1所示。

表1 实验参数

参数	数值
磁链/(V·s)	0.25~1.10
室内温度/℃	30
电机温度/℃	45
转差频率/Hz	0.05~2.05
实际转速/(r/min)	926
网侧容压/V	940
直流母线电流/A	5.5~9.0
逆变器输出单相电流/A	40~80

实验过程中,黏着阻力估算精度设置为 5%,控制周期为 100 ms。整个实验时间为 8 h,实验负载为 250 kW,可调节,实验速度为 80~300 km/h,以模拟不同速度下的运行。

3.2 结果分析

在能量回收效率实验中,将城市轨道车辆牵引时产生的能量分为两种情况,一种是牵引产生的能量通过发热消耗的能量;一种是牵引产生的能量存储至能量回收系统的超级电容中,待需要的时候再对储存的能量进行利用,这部分能量就是回收能量,通过比较能量回收效率,有助于进一步分析各个控制方法的节能效果。

为验证本文方法的有效性,选择文献[3]方法(方法1)和文献[4]方法(方法2)作为本文方法(方法3)的对比方法,在实验开始前,给实验系统一个速度信号,用于控制牵引电机的运行转速,该信号参照城市轨道列车实际运行中电机的转速来确定,模拟列车运行过程。设定运行时间为120 s,给出的速度信号曲线如图3所示。

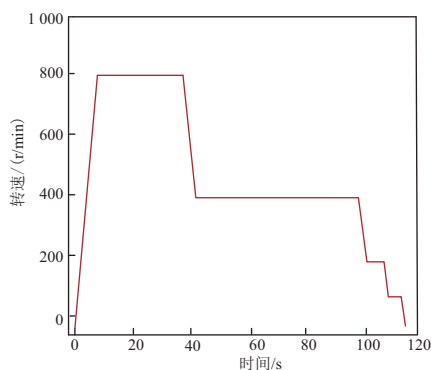


图3 输入信号曲线

按照图3中显示的速度信号曲线控制牵引电机,以恒定的转速使牵引电机转速达到实验要求转速,持续40 s后进行制动过程,降低转速,持续60 s后,再次制动并持续10 s,使转速制动至100 r/min,逐渐停止。整个过程通过功率分析仪和计算机来提取,重复多次实验后提取结果。实验结果如图4所示。

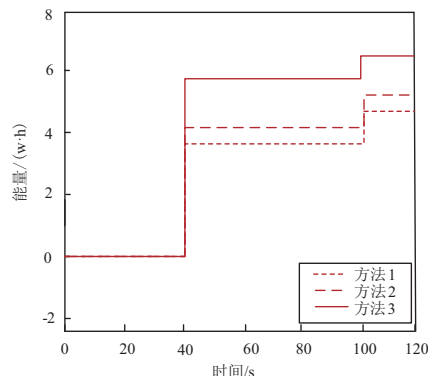


图4 能量回收效率实验结果

对比观察图4中显示的实验结果可知,在转速一定的情况下,各个控制方法的能量回收趋势一致,在前40 s,均处于牵引工况,随着电机开始制动,逐渐有能量产生,回收能量瞬间上升,直到80 s时牵引电机发生第二次制动,此时回收能量又有所增加。其中,本文提出的控制方法下牵引电机产生的回收能量最高。说明该方法的能量回收效率高。结合电机效率实验结果共同分析可知,提出的多传感器融合下城际轨道牵引电机节能控制方法节能效果更好,能源能够得到充分利用,整体性能优于其他控制方法。

4 结语

本文以城际轨道列车作为研究对象,为了降低牵引电机能耗,提出多传感器融合下城际轨道列车牵引电机节能控制方法。实验结果表明:将多传感器融合技术应用于城际轨道列车牵引电机的节能控制中,可有效地提升系统的稳定性。通过融合多种传感器数据,能够更全面地了解列车运行状态和外部环境信息,为节能控制提供了更为准确和可靠的数据支持。

参考文献:

- [1] 李纯,张文,李瑞平. 柔性轮对高速列车牵引传动系统振动特性仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 182-187.
- [2] 李东炎,李常贤. 城轨列车牵引电机轴承监控系统设计与实现[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(1): 143-147.
- [3] 肖壮,冯晓云,王青元,等. 考虑电力牵引链路非线性损耗的列车节能驾驶方法[J]. 铁道学报, 2022, 44(10): 33-39.
- [4] YI L Z, XIE C, WANG Y H, et al. Energy saving optimal operation strategy of freight trains under complex scenarios [J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2023, 16(4): 237-250.
- [5] 万金,施浚珩,戴琦. 基于混合碳化硅器件的城市轨道交通车辆牵引节能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 253-257.
- [6] OK S, BAE J, LEE D H. Curving motion control of a traction rail mover using a dual BLAC motor drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 59(1): 1175-1183.
- [7] 米春,李思颖,牟佳祎,等. 基于多传感器的城市隧道环境监测数据协同融合方法研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(5): 177-185.
- [8] 何坚,刘新远. RGB-D和惯性传感器融合的地面障碍物检测技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2022, 34(2): 254-263.

(下转第293页)

表4 误差对比

项目	温升/℃	误差/%
热仿真	12.5	3.8
理论计算	12.7	2.3
实际测试	13.0	—

3 结语

本文介绍了一款大功率风冷直流充电机的散热设计方法。基于晴天太阳辐射模型,建立了一套户外产品内部温升的理论计算方法,通过数值模拟及试验测试手段,验证了本方法的正确性。为同类型产品提供了设计参考,同时验证了本产品的可靠性。

通过人工模拟太阳辐射试验,在 GB/T 2423.24—2013 标准测试环境下,内部环境温升 13℃,其中太阳辐射对内部环境温升影响为 5.5℃ 左右。同时,掌握了充电模块在特定太阳辐射强度影响下满功率运行的可行性及连续工作的时间特性。

参考文献:

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8): 2806-2819.
- [2] 汪春艳. “双碳”目标下新型能源电力系统的关键技术和发展前景[J]. 通讯世界,2024,31(9):91-93.
- [3] 刘虎,张建洲. 电动汽车充电桩技术的发展策略分析[J]. 集成电路应用,2023,40(4):368-369.
- [4] 徐达成,谢鑫,朱涵,等. 各国电动汽车交流充电桩应用标准解读及技术发展趋势[J]. 汽车与新动力,2023,6(2):5-10.

- [5] 杨雪蛟. 电动汽车交流充电桩的充电安全分析研究[J]. 环境技术,2023,41(1):77-82.
- [6] 陈伟明,胡铭杨. 电动汽车直流充电桩散热系统的设计[J]. 自动化应用,2024(15):165-167,170.
- [7] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,1998.
- [8] 赵俊杰,杨相玉,赵媛. 电动汽车直流充电桩散热系统设计[J]. 汽车知识,2022(4):71-73.
- [9] 徐维新. 电子设备可靠性热设计指南[M]. 北京:电子工业出版社,1995.
- [10] 余建祖. 电子设备热设计及分析技术[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [11] 马志宏,李金国,张景飞. 电子设备太阳辐射模拟试验分析与探讨[J]. 环境技术,2007,25(6): 11-13,17.
- [12] 陈彦,李晓峰,刘剑,等. 太阳辐射对户外密闭箱体热影响的试验研究[J]. 环境技术,2023,41(5): 44-49,58.
- [13] DUFFIE J A, BECKMAN W A, WOREK W M. Solar engineering of thermal processes[J]. Journal of Solar Energy Engineering,1994,116(1):67-68.
- [14] 俞春林,童星星. 基于晴天太阳辐射模型的电力户外机柜热估算与仿真[J]. 华电技术,2015,37(9): 72-74,76,80.
- [15] 张素宁,田胜元. 太阳辐射逐时模型的建立[J]. 太阳能学报,1997,18(3):38-42.
- [16] 秦杰,张清点,孔玉梅,等. GJB 150.7A—2009 太阳辐射试验方法研究与分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2024,42(5):127-134.
- [17] 卢改林,高红斌,马小霞. 热工基础及流体力学[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2018.

收稿日期:2024-07-10

(上接第 272 页)

- [9] 王忻,吉祥雨,韩博衍,等. 城市轨道交通低碳节能技术下牵引供电系统仿真分析[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(10):79-84.
- [10] 陈志,赵文娟,杨湘彦,等. 考虑列车整车接地的牵引电机轴电压和轴电流分析与抑制措施[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(8):12-20.
- [11] 钟麦英,王钦,彭涛,等. 高速列车牵引传动系统运行状态监测技术综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(2):88-97.
- [12] 罗川川,马兴,刘锦洋,等. 计及列车节能运行影响的

城轨储能系统最优化容量配置[J]. 电工电能新技术,2024,43(9):11-22.

- [13] 贺虎成,汪沁,张晨阳,等. 采煤机牵引系统双电机功率平衡控制策略[J]. 控制理论与应用,2023,40(1):121-131.
- [14] 孙振耀,马光同,徐帅,等. 轨道车辆永磁牵引电动机控制技术综述[J]. 铁道学报,2023,45(6):26-40.
- [15] 刘钦生,陈雅岚,万欣,等. 基于列车运行多模型的能耗仿真计算[J]. 都市快轨交通,2024,37(2):47-53.

收稿日期:2024-11-11