

基于数字孪生的高可靠性城市轨道交通 永磁牵引系统发展展望^{*}

周成尧¹ 司玉林² 赵雷廷³ 唐 蕾³

(1. 北京市轨道交通运营管理有限公司, 100068, 北京; 2. 铁科院(北京)工程咨询有限公司, 100081, 北京;
3. 北京纵横机电科技有限公司, 100094, 北京)

摘 要 [目的]随着永磁同步电机设计及控制技术日趋成熟,永磁牵引系统已成为新一代轨道交通牵引系统的发展方向。利用数字孪生技术可实现城市轨道交通列车永磁牵引系统的高可靠性和智能化提升。需以实现系统数字设计、状态感知、故障反演、健康管理及性能预测为目标,对构建永磁牵引系统数字孪生平台的关键技术进行探究。[方法]首先对永磁牵引系统和数字孪生技术的特点和应用现状进行了综述。进而针对具有高速移动、多物理场耦合、多时间尺度、动态特性丰富等特点的城市轨道交通列车牵引系统,提出了基于模型与数据混合驱动的多时间尺度数字孪生架构设想,以及利用数字孪生技术实现系统集成及匹配优化设计、永磁电机控制性能提升、系统故障预警及故障反演等功能的可行性技术方案。[结果及结论]数字孪生技术可提升永磁牵引系统的可靠性、安全性,优化系统智能感知水平,为系统性能预测、健康管理乃至车辆的智能运维提供良好技术支撑。基于数字孪生的高可靠性城市轨道交通永磁牵引系统在实际应用中仍面临物理场建模、车地信息交互等技术难点。

关键词 城市轨道交通; 永磁牵引系统; 数字孪生; 高可靠性

中图分类号 U264.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.016

Development Prospect of High-reliability Urban Rail Transit Permanent Magnet Traction System Based on Digital Twin Technology

ZHOU Chengyao¹, SI Yulin², ZHAO Leiting³, TANG Lei³

(1. Beijing Metro Operation Administration Co., Ltd., 100068, Beijing, China; 2. Engineering Consulting Co., Ltd., CARS, 100081, Beijing, China; 3. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., 100094, Beijing, China)

Abstract [Objective] With the maturity of permanent magnet synchronous motor design and control technologies, PMTS (permanent magnet traction systems) have emerged as the de-

velopmental direction for next-generation rail transit traction systems. By leveraging digital twin technology, it is possible to enhance the reliability and intelligence of PMTS in urban rail transit trains. This requires targeting the realization of system digital design, state perception, fault inversion, health management, and performance prediction while exploring the key technologies for constructing a PMTS digital twin platform.

[Method] First, a review of PMTS characteristics and current applications and digital twin technology is conducted. Then, considering the features of urban rail transit train traction system such as high-speed mobility, multi-physical field coupling, multi-time-scale interactions, and rich dynamic characteristics, a multi-time-scale digital twin architecture based on hybrid drive of model and data is proposed. Feasible technical solutions for achieving system integration and matching optimization design, improving the control performance of permanent magnet motors, and implementing system fault warning and inversion through digital twin technology are discussed. [Result & Conclusion] Digital twin technology can enhance reliability and safety of PMTS, optimize intelligent system perception, and provide strong technical support for system performance prediction, health management, and intelligent vehicle operation and maintenance. However, practical application of high-reliability urban rail transit PMTS based on digital twins still faces technical challenges such as physical field modeling and vehicle-wayside information interaction.

Key words urban rail transit; permanent magnet traction system; digital twin; high reliability

随着城市人口增加,大运量的城市轨道交通在优化城市空间结构、缓解交通拥堵等方面的积极作用日益凸显。绿色低碳以及智能化发展已成为城市轨道交通行业面临的历史性任务,也是城市轨道交通发展的重大战略。

^{*} 中国城市轨道交通协会重点科研专项课题(CAMET-KY-2022039);中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金重大项目(2022YJ230)

永磁同步电机设计及控制技术日趋成熟,其与异步电机相比,具有高功率密度、高效率、高功率因数、低噪声等诸多优点^[1]。对于具有运行站间距短、列车起停频繁等特点的城市轨道交通列车,永磁牵引系统的节能效果更为显著,已成为新一代轨道交通牵引系统的发展方向^[2]。近年来随着城市轨道交通车辆 PHM(故障预测与健康管理)、主动安全、网络化双向变流牵引供电技术^[3-5]及智能运维理念的相继提出,对车辆各关键系统的可靠性提升、数据挖掘和信息融合提出了更高要求。因此,以永磁牵引系统集成及匹配设计技术、永磁电机控制技术、系统故障预警及反演技术为基础,利用数字孪生手段实现城市轨道交通永磁牵引系统的高可靠性和智能化提升具有广阔前景。

1 城市轨道交通永磁牵引系统特点及发展现状

城市轨道交通永磁牵引系统的特殊性主要体现在永磁体和轴控两方面。永磁体的存在使得电机无励磁电流,故而不会产生励磁损耗,使系统具有高效率、高功率密度、高功率因数等优点;采用轴控方式是因为永磁电机不存在转差,但不同轮对对应的永磁电机定子频率可能不一致,因此不同永磁电机不能由同一个逆变单元驱动。

目前,国外诸如法国阿尔斯通、德国西门子、日本东芝等公司为代表的轨道交通装备制造企业早已竞相开展永磁牵引系统的研究,并且已经进入了工程化和商业化应用阶段^[6]。

国内起步相对较晚。2016 年,长沙地铁 1 号线采用永磁牵引系统的列车成为国内首列正式投入商业运营的永磁牵引地铁列车。2019 年 12 月长沙地铁 5 号线投入运行,成为国内首条全线采用永磁牵引系统车辆的线路。近年来,北京、天津、宁波、广州等各大城市均已开始批量采购永磁牵引系统。

2 数字孪生技术特点及发展现状

数字孪生是一种实现物理系统向信息空间数字化模型映射的关键技术,通过充分利用传感器,对物理实体进行数据分析与建模,形成多学科、多物理量、多时间尺度、多概率的仿真过程,将物理系统在不同真实场景中的全生命周期过程反映出来。该概念最早由美国密歇根大学 Michael Grieves 教授于 2003 年提出,被称为“镜像空间模型”(Mir-

rored Spaced Model, MSM),直至 2011 年,才正式命名为数字孪生。

最初,数字孪生技术被应用于飞行器领域,美国国家航空航天局构建了航天器数字孪生体,用以模拟和预测实际航天器在太空中的运行状态。近年来,数字孪生技术逐渐应用到其他领域,诸如船舶、生产制造、建筑设计、医疗等。随着我国轨道交通行业的迅猛发展,车站综合态势监控、车辆运维、牵引供电系统、车辆制动系统等相关专业已相继引入数字孪生技术并得到初步应用,为乘客带来更加便捷、安全、舒适的出行体验。牵引系统作为列车的重要子系统,是列车运行动力来源。以实现数字设计、状态感知、故障反演、健康管理、性能预测为目标,为城市轨道交通构建数字孪生平台具有重要意义。

3 关键技术展望

3.1 永磁牵引系统数字孪生架构设计

由于城市轨道交通永磁牵引系统部件种类繁多且存在机电磁热多物理场耦合,是一个具有多时间尺度、动态特性丰富的复杂系统,比如纳秒级的电力电子开关动态过程、微秒级的电磁暂态过程、毫秒级到秒级的机电转换过程、分钟级到小时级的温度或外形变化过程,其中短时间尺度的电气模型对建模离散化频率、解算实时性要求高。由于牵引系统属于高速移动装备,受车地数据无线传输的速率、延迟、带宽以及丢包率限制,当前如图 1 所示的“物理实体层+互动感知层+地面虚拟体层+智慧共享层”的传统数字孪生架构,尤其是孪生模型在

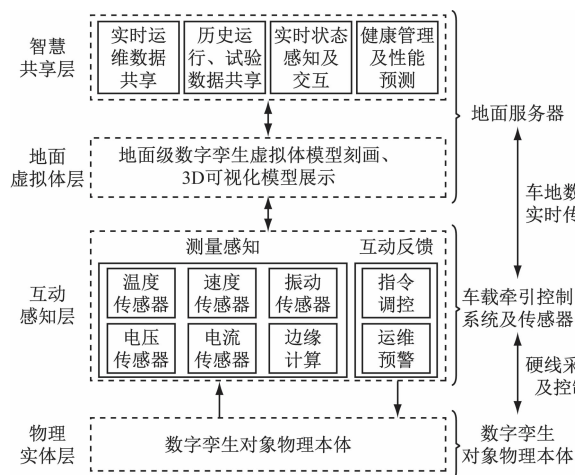


图 1 传统数字孪生技术架构

Fig. 1 Traditional digital twin technology architecture

地面虚拟体层刻画,已无法满足牵引系统数字孪生模型输入数据对采样精度、准确度和实时性的需求,从而导致模型解算误差大,与实际系统状态不一致。

鉴于此,增加车载虚拟体层,搭建由“物理实体层+互动感知层+车载虚拟体层+地面虚拟体层+智慧共享层”组成的基于模型与数据双驱动的多时间尺度数字孪生架构,将成为未来发展方向。

多时间尺度数字孪生架构中,物理实体层由永磁牵引系统的物理实体构成;互动感知层利用传感器采集和边缘计算为实体与虚拟体之间的交互创造条件;车载虚拟体层实现电气实时数字孪生模型刻画;地面虚拟体层实现3D可视化物理、几何实时数字孪生模型刻画;智慧共享层对车载虚拟体层和地面虚拟体层模型输出的数据进行存储和管理,并通过云计算技术实现各数字孪生体之间的信息交换与共享。

3.2 系统集成及匹配设计

永磁牵引系统组成如图2所示,主要由永磁电机、牵引变流器、制动电阻、高压箱组成。

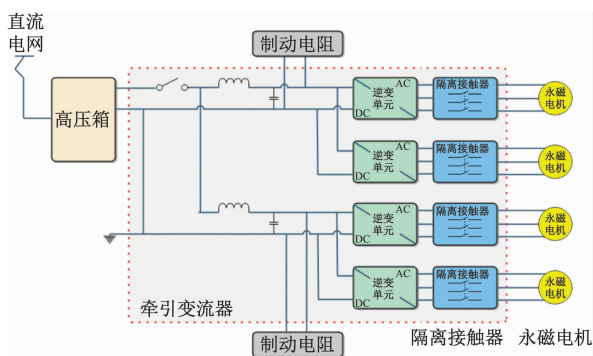


图2 永磁牵引系统组成

Fig. 2 Composition of permanent magnet traction system

系统集成及匹配设计是城市轨道交通永磁牵引传动领域的核心问题。为使搭载永磁牵引系统的城市轨道交通列车的牵引/电制动性能得以最优发挥,必须合理匹配高压电器箱功能^[7]、制动电阻阻值^[8]、牵引变流器容量、牵引变流器电气回路参数、永磁电机功率、电机反电势^[9-10]等。

以各子系统和关键部件运行机理为基础,结合试验数据,实现数字孪生模型刻画,构建如图3所示的数字孪生平台,利用模型仿真和牵引计算可实现最终的系统匹配设计。

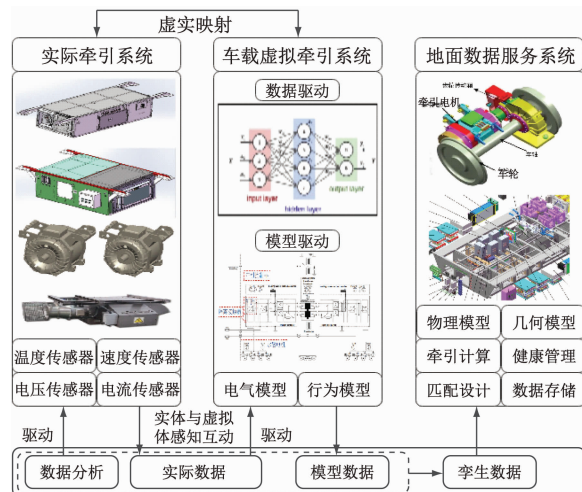


图3 永磁牵引系统数字孪生平台

Fig. 3 Digital twin platform of permanent magnet traction system

此外,综合考虑车辆快速启动和电制动能力需求以及牵引变流器和永磁电机的外型、尺寸、质量要求,还可以利用数字孪生平台探索不同线路和技术条件下基于永磁牵引系统的列车最优动拖比配置和黏着优化利用方案。

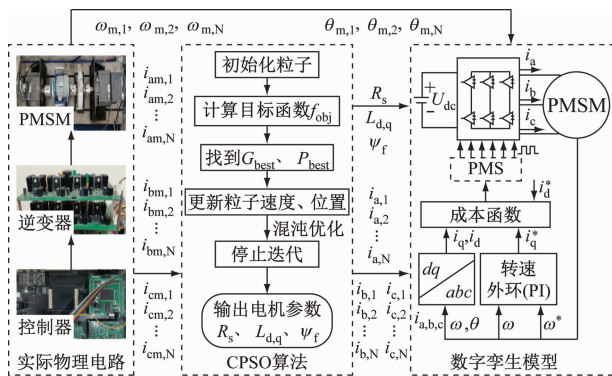
3.3 高性能永磁电机控制技术

城市轨道交通永磁牵引系统必须采用轴控模式,但各轴转矩输出特性的偏差易导致车辆动力学性能恶化,影响运行安全,因此必须保证各轴转矩输出的一致性。由于永磁牵引系统受参数非线性、时变影响,难以实现转矩高精度控制。

鉴于此,可利用如图4所示的逆变器+控制电路+永磁电机的数字孪生模型,以中间直流电压、逆变器输出电流作为模型外部特征量并设置目标函数。由于与实际系统逼近的上述外部特征量不止一个,因此永磁牵引系统数字孪生模型的构建本质是多参数多目标优化过程,对优化算法的要求较高,可采用CPSO(混沌粒子群优化算法)迭代更新孪生模型的内部参数,例如直流侧支撑电容值、直流侧电容等效阻值、IGBT(绝缘栅双极晶体管)饱和压降、永磁电机交直流电感、永磁电机磁链等,使得模型输出外部特征量逐渐逼近实际物理实体的外特性,最后当目标函数满足阈值或者迭代次数达到上限后,即可感知电机实际参数,从而优化电机控制算法。

3.4 故障预警及故障反演技术

永磁牵引系统的可靠性直接关系到列车的安



注: PMSM—永磁同步电机。

图4 基于数字孪生技术的永磁电机参数实时感知(截图)

Fig. 4 Parameter real-time sensing of permanent magnet motors based on digital twin technology (screenshot)

全性和运行效率。随着轨道交通行业的快速发展,牵引系统的复杂性和重要性日益增加,其故障预警及反演技术的研究和应用变得尤为重要。

引入数字孪生技术之后,不仅可以利用如图5所示的云平台实现故障的实时预警,还可以利用离线模型完成故障的反演。

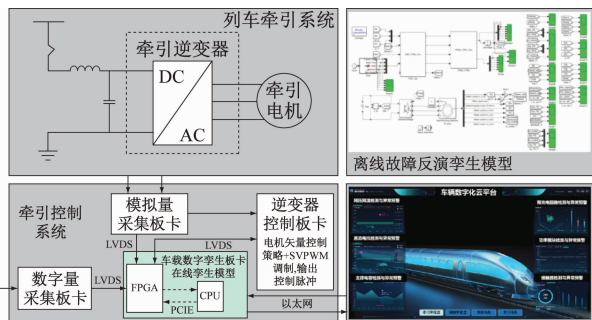


图5 基于数字孪生技术的故障预警与反演(截图)

Fig. 5 Fault warning and inversion based on digital twin technology (screenshot)

利用车载实时数字孪生模型输出的三相电流与传感器采集获取的实际物理电路电流相比较,通过判断电流正负半周差异,计算三相静止坐标系下电流残差平方,从而实现 IGBT(绝缘栅双极晶体管)开路故障和电机匝间短路故障的定位。

此外,在地面虚拟体层构建牵引系统离线数字孪生模型。根据车载虚拟体层电气孪生模型输出的内部参数信息,以及地面虚拟体层物理信息、几何孪生模型输出信息,实时更新离线数字孪生模型参数值,确保离线模型与实际系统的一致性。当系统发生故障后,可将自动或人工下载的高采样精度实际系统输出数据作为离线数字孪生模型输入,采

用粒子群算法驱动该模型离线迭代计算,使得离线数字孪生模型输出外部特征量逐渐逼近实际物理实体的外特性,进而完成系统故障反演。

4 结语

综上所述,数字孪生技术不仅有助于提升永磁牵引系统的可靠性、安全性,同时可以优化牵引系统智能感知水平,为系统性能预测、健康管理乃至车辆的智能运维提供良好支撑,契合“智慧城轨”的发展需求。虽然目前数字孪生技术在永磁牵引系统实际工程的应用过程中,仍存在多物理场建模、车地信息交互等难点与挑战,但随着技术的进步,上述难点必定可以逐一攻克。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 地铁车辆通用技术条件: GB/T 7928—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. General technical specification for metro vehicles; GB/T 7928—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [2] 赵清良, 杨浩, 谭绍军, 等. 地铁车辆电传动系统标准化产品平台研制[J]. 现代城市轨道交通, 2019(5): 16.
ZHAO Qingliang, YANG Hao, TAN Shaojun, et al. Research and development of standardized product platform for electric drive system of metro vehicles[J]. Modern Urban Transit, 2019(5): 16.
- [3] 胥红敏, 郭湛, 李晓宇. 地铁列车牵引计算算法及程序实现[J]. 现代城市轨道交通, 2011(5): 80.
XU Hongmin, GUO Zhan, LI Xiaoyu. Calculation algorithm and program realization of subway train traction[J]. Modern Urban Transit, 2011(5): 80.
- [4] 宁波, 马丹萍, 李凯, 等. 标准地铁列车永磁牵引系统设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022(2): 45.
NING Bo, MA Danping, LI Kai, et al. Design of traction system of PMSM for standard metro train[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2022(2): 45.
- [5] 申永勇, 陈文红, 金庆华, 等. 上海国产化A型地铁列车牵引电传动系统设计[J]. 现代城市轨道交通, 2010(1): 10.
SHEN Yongyong, CHEN Wenhong, JIN Qinghua, et al. Design of traction electric drive system for Shanghai localized type A metro vehicle[J]. Modern Urban Transit, 2010(1): 10.
- [6] 陈萍, 罗情平. 国外永磁同步牵引系统的发展与应用[J]. 国外铁道车辆, 2017, 54(5): 14.
CHEN Ping, LUO Qingping. Analysis of the development and application of the permanent magnet synchronous traction system at abroad[J]. Smart Rail Transit, 2017, 54(5): 14.

(下转第97页)

出行链输出熵值的修正系数,并以链间相似度指标确定系数,使改进后的模型有更精确的规律性水平量化结果,适用的乘客范围更广。但在熵值合理性验证方面,目前主要从乘客出行链与乘客在群体中的相对规律性水平进行考量,仍需要进一步探索能证明输出熵值合理性的方法。

参考文献

- [1] GOULET-LANGLOIS G, KOUTSOPOULOS H N, ZHAO J. Inferring patterns in the multi-week activity sequences of public transport users[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 64: 1.
- [2] GOULET-LANGLOIS G, KOUTSOPOULOS H N, ZHAO Z, et al. Measuring regularity of individual travel patterns[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(5): 1583.
- [3] LEI D, CHEN X, CHENG L, et al. Inferring temporal motifs for travel pattern analysis using large scale smart card data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 120: 102810.
- [4] LEI D, CHEN X, CHENG L, et al. Minimum entropy rate-improved trip-chain method for origin-destination estimation using smart card data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 130: 103307.
- [5] 姚志刚, 杨杰, 王元庆. 基于个体出行模式的公交乘客活动

规律性度量[J]. *北京交通大学学报*, 2022, 46(4): 68.

YAO Zhigang, YANG Jie, WANG Yuanqing. Measurement of public transport passenger behavior regularity based on individual travel pattern[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2022, 46(4): 68.

- [6] 张娜, 陈峰, 王剑坡, 等. 基于时空序列相似性的城轨乘客出行模式识别[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2024, (9): 2588.
- ZHANG Na, CHEN Feng, WANG Jianbo, et al. Recognition of travel patterns for urban rail transit passengers based on spatiotemporal sequence similarity[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2024, (9): 2588.
- [7] SHOU Z, DI X. Similarity analysis of frequent sequential activity pattern mining[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 96: 122.
- [8] FAROQI H, MESBAH M, KIM J. Spatial-temporal similarity correlation between public transit passengers using smart card data[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, 2017: 1.

· 收稿日期:2024-08-25 修回日期:2024-09-30 出版日期:2025-03-10
Received:2024-08-25 Revised:2024-09-30 Published:2025-03-10
· 第一作者:洪玲, 正高级工程师, ss980308@tongji.edu.cn
通信作者:江志彬, 副教授, jzb@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第92页)

- [7] 姜丽娟. S01-10 型蓄电池牵引车[J]. *工程机械*, 2005, 36(10): 12.
- JIANG Lijuan. Model S01-10 battery powered tractor[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2005, 36(10): 12.
- [8] 赵辉, 李铁才, 孙立志, 等. 电池供电的永磁电动机系统的再生制动[J]. *电机与控制学报*, 1999, 3(4): 207.
- ZHAO Hui, LI Tiecai, SUN Lizhi, et al. Regenerative braking of permanent magnet motor system fed by battery[J]. *Electric Machines and Control*, 1999, 3(4): 207.
- [9] 张传林, 胡文静. 稀土永磁材料的发展及在电机中的应用[J]. *微电机*, 2003, 36(1): 38.
- ZHANG Chuanlin, HU Wenjing. The development of the rare-earth material and its applications to the electric machine[J]. *Micromotors*, 2003, 36(1): 38.
- [10] 裴建红. 基于碳化硅及永磁电机技术的新型城轨车辆牵引系统研究[J]. *江苏科技信息*, 2020, 37(8): 41.
- PEI Jianhong. Research on new traction system of urban rail vehicle based on silicon carbide and permanent magnet motor technology[J]. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2020, 37

(8): 41.

- [11] 唐朝辉, 唐立国, 李宝泉, 等. 地铁车辆永磁牵引系统与异步牵引系统的对比分析[J]. *电工技术*, 2018(24): 142.
- TANG Zhaohui, TANG Ligu, LI Baoquan, et al. Comparative analysis of permanent magnet traction system and asynchronous traction system for metro vehicles[J]. *Electric Engineering*, 2018(24): 142.
- [12] 朱伟鹏. 深圳地铁永磁同步牵引系统研究分析[J]. *现代城市轨道交通*, 2021(4): 38.
- ZHU Weipeng. Research and analysis of permanent magnet synchronous traction system for Shenzhen Metro[J]. *Modern Urban Transit*, 2021(4): 38.

· 收稿日期:2023-03-07 修回日期:2023-05-20 出版日期:2025-03-10
Received:2023-03-07 Revised:2023-05-20 Published:2025-03-10
· 第一作者:周成尧, 高级工程师, 13811491797@163.com
通信作者:赵雷廷, 副研究员, zhaoleiting@zemt.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license