



机车自动驾驶关键技术与问题研究

胡云卿, 江帆, 张征方

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 文章分析了机车自动驾驶技术的特点与关键问题, 介绍了机车自动驾驶国内外发展现状与关键技术的研究进展; 对列车纵向动力学建模、约束构建、操纵评价、场景决策、运动规划、跟随控制等关键技术的研究进展和技术路线进行了详细的阐述, 并针对循环空气制动控制、复杂组合场景控制等关键技术的技术方案进行了探讨; 最后, 对自动驾驶技术未来的发展趋势进行了展望, 指出要实现更高品质和更高等级的机车自动驾驶, 还需对机车自动驾驶场景集的快速构建、车地信息融合态势感知等技术进行深入研究。

关键词: 自动驾驶; 机车; 重载列车; 动力学; 决策与控制; 操纵评价

中图分类号: U268.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-5427(2024)04-0001-10

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2024.04.001

0 引言

近年来,以“大、智、移、云”为代表的智能化技术飞速发展,其与轨道交通技术相融合,为铁路的发展带来了新的契机和动力。作为轨道交通领域智能化技术的典型应用代表,自动驾驶依靠计算机、决策与控制技术,可以在无人操纵的情况下,实现列车的安全、平稳、准点和节能运行。目前,在城市轨道交通(简称“城轨”)领域,自动驾驶技术较为成熟,已得到大规模商业应用^[1];在动车领域,京张高铁智能动车组实现了有人值守的自动驾驶^[2];在机车领域,受机车车辆运用条件、运营线路复杂度以及操纵复杂性等因素影响,自动驾驶控制难度总体高于城轨领域的,在国内尚未形成大规模商业应用。本文介绍了国内外机车自动驾驶技术的应用情况,并对机车自动驾驶的关键技术和问题进行分析和探讨。

1 机车自动驾驶技术现状及关键问题

机车自动驾驶的总体目标是在标准运行时间、线

路限速等全局限制以及信号变化、临时限速等局部限制的约束下,实现列车的安全、平稳、准点和节能运行。

1.1 机车自动驾驶技术国内外发展现状

国外,针对机车自动驾驶,列车控制系统厂商负责研发自动驾驶列车调度与防护功能,机车车辆制造商或关键控制系统厂商研发车载自动驾驶控制技术,两者相互结合,取长补短,以此形成系统最优。澳大利亚力拓公司的 AUTOHAUL 采用“ETCS+ATO”架构,其中欧洲列车控制系统(European train control system, ETCS)由安萨尔多公司提供,列车自动运行(automatic train operation, ATO)系统是克诺尔公司于 2018 年研发的 LEADER 系统第三代 AutoPilot 系统,制动系统厂家和信号厂家合作完成重载列车自动驾驶系统的开发。美国 GE 公司开发的列车优化操纵系统(Trip Optimizer)累计装车 7 000 余套,可与北美的列车主动控制(positive train control, PTC)信号系统匹配。英国、法国和德国等欧洲国家在欧盟 Shift2Rail 铁路创新计划的框架下开展了干线铁路基于 ETCS 的 ATO 技术与试验^[3],其中要求车载 ETCS 信号系统设备和不同供应商的 ATO 设备兼容互通,可实现自由切换。

国内,机车自动驾驶总体尚未进入大规模应用阶段,部分复杂场景和控制技术还需持续研究。中车株洲

收稿日期: 2024-03-25; 修回日期: 2024-07-01

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重大课题(SY2023J002)

第一作者: 胡云卿(1984—),男,博士,正高级工程师,主要从事轨道交通领域智能控制技术研究。

通信作者: 江帆(1982—),男,高级工程师,研究方向为自动驾驶技术和网络控制技术,jiangfan@csrzc.com。

所^[4]研制的机车自动驾驶系统于2018年在中国铁路西安局集团有限公司(简称“西局”)国产化HXD1型机车上装车,国内首次实现了货运普载列车在正线“零起零停”的自动驾驶,共装车5台并开展常态化运行,累计运行里程118万km;2019年在包神铁路开行了首列具备干线铁路异物入侵检测、覆盖正线自动驾驶与站段自动调车的万吨重载自动驾驶列车,2023年累计装车30台并开展常态化运行,累计运行里程157万km;2020年以来,分别在大秦线、朔黄铁路开展了两万吨重载组合列车自动驾驶线路试验,试验里程累计5万km,2024年在朔黄铁路实现批量装车,并即将投入常态化运用。相比人工驾驶,自动驾驶在提高列车运行速度、节约能耗等方面均有一定优势。中车大连所于2019年5月开始在西局配属的HXD2、HXD3型机车上进行了自动驾驶系统装车,并在西康线开展了线路运行测试,运行里程达4万km^[5]。中车大连厂于2020年在西局配属的HXD3CA型机车上进行了自动驾驶系统装车,并在西康线开展线路运行测试,运行里程5000km^[6]。中国铁道科学研究院于2019年9月~11月在国产化HXD1型机车上进行了自动驾驶系统装车,并在浩吉铁路西峡东-襄州北段进行了自动驾驶现场试验^[7]。西南交通大学、北京交通大学、华东交通大学等高校针对机车自动驾驶相关技术开展了研究,针对关键场景的建模、决策规划与控制提出了相关方法^[8-10]。

1.2 机车自动驾驶技术特点与关键问题

我国由机车牵引的客运和货运列车,其自动驾驶操纵难度高于地铁列车和动车组的,主要原因在于:

(1) 机车自动驾驶面临的运用场景和受控对象复杂多变。在动力源方面,其需适应电力机车、内燃机车、双源机车和新能源机车等多种动力源;在车辆类型和编组方面,其需自适应不同编组(不同车型混编、空重车混合等)、不同货物类型(固体、液体、固液混合货物等)和不同车辆类型(敞车、罐车、篷车、行包车、客车等)的需求。

(2) 普载列车具有灵活配属、跨路局和多交路运行的特点。需制定灵活的自动驾驶策略,以应对因路局站改、线改、交路跳转和转场运行等因素产生的复杂组合场景,如限速条件瞬变、大坡道不同分相类型引起无电区长度不同等特殊场景。

(3) 重载专线操纵难、容错率低。重载列车一方面由于编组长、载重大、覆盖的纵断面多等原因导致列车受力不均匀,与长大坡道、起伏坡道、分相区和恶劣天气等因素叠加,使得列车在运行过程中受力情况非常复杂,列车运行平稳性控制和车钩力控制较难;另一方面,

列车本身惯性大、动力裕量不足、空气制动力离散性大等因素导致其控制裕量很小。因此,对重载专线而言,尽管线路和编组相对固定,但是对操纵的要求更高。

机车自动驾驶目前需解决的核心问题涉及循环空气制动场景和复杂组合场景。货运列车在连续长大下坡道运行时,仅电制动不能有效保证车辆的安全,需要空气制动配合来实现安全控速。但车辆的空气制动系统非线性且随机性较强、鲁棒性较差(在相同的减压量下,空气制动力在不同的温度、海拔、天气情况下的发挥只有定性的趋势,难以做定量的计算),并具有不可逆性(只能阶段施加,不能阶段缓解。如果某次空气制动施加的量比较大,无法减小或阶段缓解,将带来较大的空气制动力)。如何实现循环空气制动场景的平稳控制是机车自动驾驶需解决的核心问题之一。

列车在运行过程中容易连续接收各种变化的信息,如机车信号以及过分相、临时限速和车机联控等信息,从而形成各种组合场景耦合。列车在长大下坡线路运行情况如图1所示,其中 $v_1 \sim v_3$ 分别代表第一次制动的速度、第一次缓解的速度和第二次制动的速度; s 代表列车位置(公里标)。这是一种典型的复杂组合场景,在连续接收变化的机车信号、车机联控信息等信息下需经过临时限速区段,且需在分相前缓解空气制动,以保证列车顺利实现侧线出站。在运行过程中,不仅要避免停车再缓解起车,同时要保证过分相时操纵平稳,且过分相后能满足限速要求。然而,列车在运行过程中会受到电制动、减压量、平稳性等多重强约束,控制裕量非常小,如果操纵不当,极易出现列车超速、冲动和停缓等问题。面对复杂组合场景,如何保证列车能够安全、正点和平稳运行是机车自动驾驶需解决的另一核心问题。

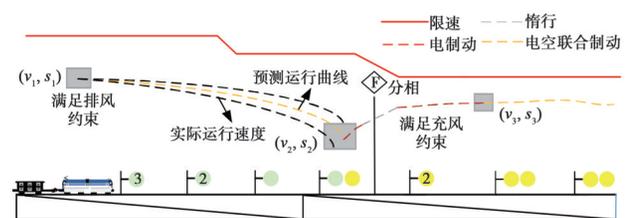


图1 典型复杂组合场景

Fig. 1 Typical complex combination scenarios

1.3 关键技术总体框架

从空间维度划分,机车自动驾驶关键技术(图2)^[4]分为车载侧技术与地面侧技术。在车载侧,机车自动驾驶装置作为决策控制的核心,通过信息感知(图像及激光感知等)、建模与评价、决策规划和跟随控制等实现自动驾驶的决策行为,然后将车载控制指令的序列发送给关联系统执行并实时观测列车运行状态。在地面

侧,为保障自动驾驶列车具备根据运行计划、临时调度命令等信息动态调整的功能,需通过地面调度系统进行车地协同。与此同时,为保障自动驾驶系统的高效安全运行,需构建一套基于列车纵向动力学的半实物仿真平台,为自动驾驶运行品质的不断提升提供完备、真

实的仿真功能与测试保障。在这些技术中,纵向动力学建模与操纵评价、决策规划与跟踪控制是机车自动驾驶基础核心技术,本文对其研究进展、技术路线和关键问题进行深入研究和探讨。

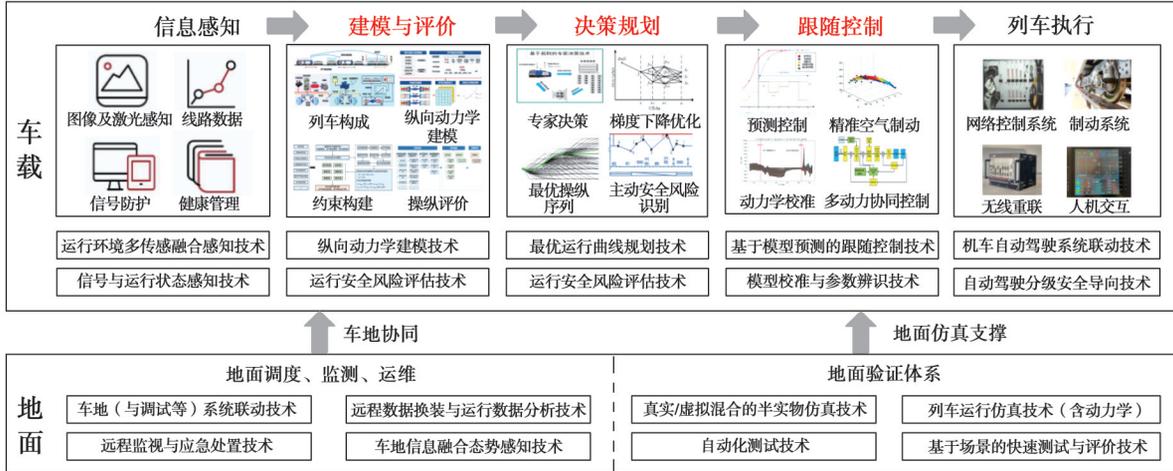


图2 机车自动驾驶关键技术总体框架

Fig. 2 Overall framework of key technologies for locomotive automatic operation

2 机车自动驾驶建模与评价技术

在机车自动驾驶的控制对象中,长大编组重载列车的控制尤为复杂,首先需对重载列车进行纵向动力学建模;然后,利用纵向动力学模型对自动驾驶的运行场景开展操纵策略分析,形成约束条件,以此作为自动驾驶进行决策规划的依据,而约束的迭代优化需要依赖操纵评价技术。

2.1 列车纵向动力学建模

开展列车纵向动力学建模前需对重载列车的系统构成、受力情况和系统特性等进行深入剖析,在此基础上形成纵向动力学建模技术路线(图3)^[11-13]。以某线路1+1编组两万吨重载列车为例,该列车长2.6 km,含210辆货车。整列车在运行过程中通常覆盖多个线路纵断面,同时空气制动过程中不同位置车辆存在制动/缓解时间差,使得各机车车辆受力情况复杂且存在差异。因此,需对重载列车建立多质点模型。现有技术路线中,每台机车车辆都具有独立的自由度,首先需要对牵引及阻力系统、钩缓系统和空气制动系统分别建模,得到各自自由度的牵引/电制动力、列车阻力、车钩力与车钩位移关系、空气制动力等信息;然后,将这些信息集成到列车纵向动力学方程组中,使用Newmark和Runge-Kutta等数值求解算法^[14]同时迭代求解各个机车车辆的速度、加速度和车钩力等。其中,对钩缓系统、

空气制动系统实现高精度建模是重点和难点。

2.1.1 钩缓系统模型

车钩缓冲器是机车车辆连挂的关键装备,其包括车钩和缓冲器两部分,常用缓冲器主要分为摩擦斜楔型和胶泥型等。

针对胶泥型缓冲器,文献[15]利用试验数据解耦试验特性曲线,构建了静态试验特性和动态阻尼特性函数,过渡特性则基于自然指数函数模拟。针对摩擦斜楔缓冲器,一般对内部物理结构的几何运动关系进行建模,文献[16]将摩擦斜楔缓冲器视作一个由弹簧和楔块等组成的对称模型,弹簧力可通过查表法获取,楔块间力的传递则由楔块角和摩擦系数等决定,通过构建双参数摩擦系数来模拟楔块间的动态和静态摩擦;文献[17]详细分析了摩擦斜楔缓冲器4个运动阶段,针对每个运动阶段内部楔块间相互作用,设计了缓冲器阻抗力模型,并围绕该缓冲器研究了摩擦模型、锁定刚度和铜条润滑等关键特性。

胶泥缓冲器和摩擦斜楔缓冲器串联仿真对机车前/后钩受力精确模拟有重要意义。可先分别对两种类型缓冲器进行建模。由于两种缓冲器通过车钩或牵引杆串联联结,形成的串联阻抗力是唯一的,因此可以将机车与车辆间的相对位移和相对速度作为已知量,通过对相对位移进行二次分配,实现两种缓冲器阻抗力平衡,从而得到两种缓冲器各自的压缩量和机车车辆间作用力。

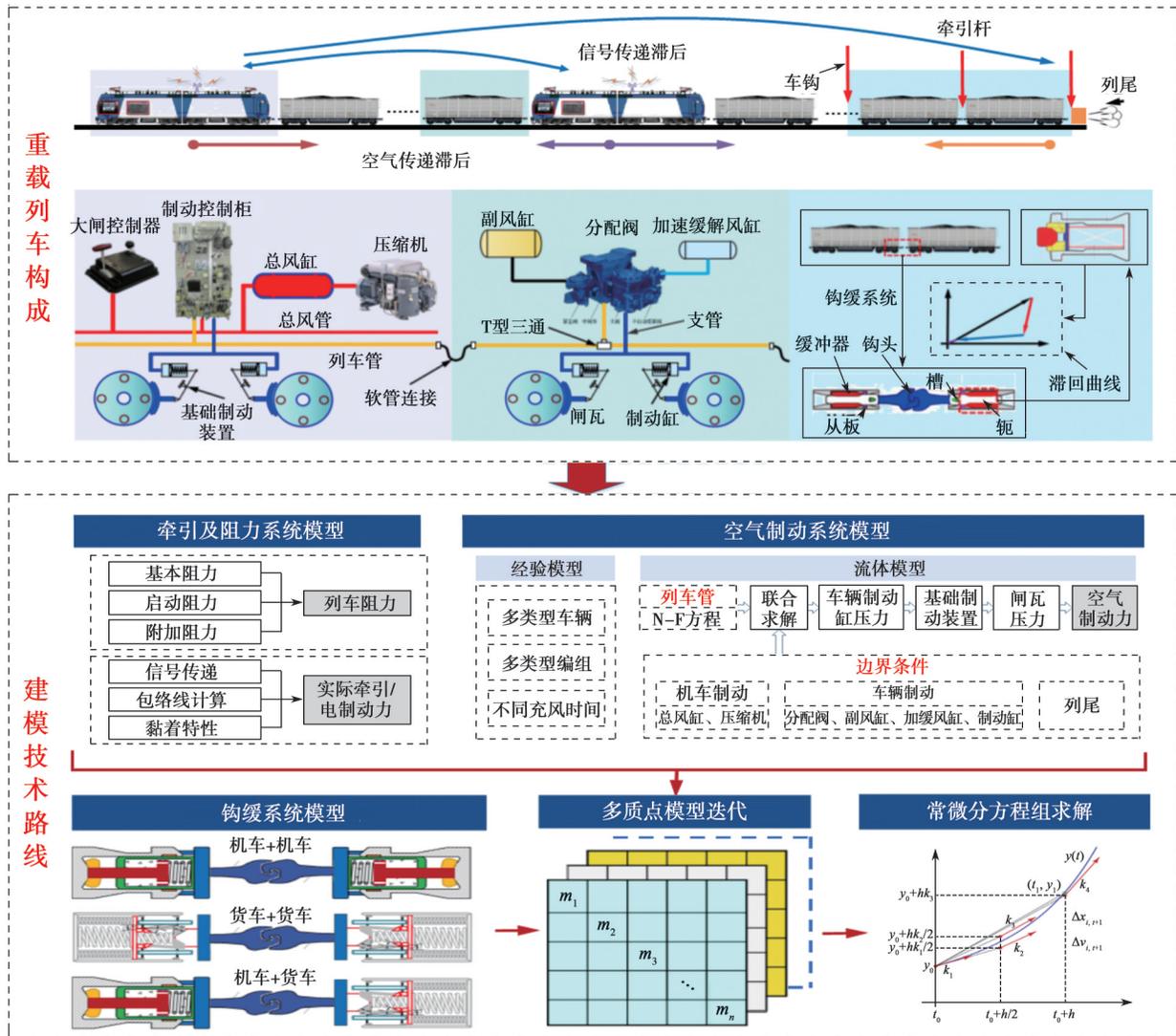


图3 重载列车分析及其纵向动力学建模技术路线

Fig. 3 Analysis of heavy-haul train and technical route of longitudinal dynamic modeling

2.1.2 空气制动系统模型

重载列车空气制动系统包含机车/车辆制动机、列车管、分配阀、列尾和基础制动装置等部件,建模方法分为物理模型和基于数据驱动的经验模型。

物理模型方面,文献[18]利用国际铁路联盟所开发的TrainDy软件,采用连续方程、动量方程和能量方程对列车管进行建模,考虑了管道泄漏和壁面摩擦等因素,模拟了软管连接;文献[19]开发了可模拟摩擦、变截面等因素的空气制动系统物理模型,其对质量、流量变化过程的描述是通过单独构造不同边界条件而实现,并给出了详细的支管模型;文献[20-22]均针对各自的120阀开发了制动阀模型,详细构建了主阀动态运动模型,形成了完整的空气制动系统模型。经验模型方面,主要方法为提取制动缸压力数据特征、以“减压量-制动缸压力”为核心灵活构建数学模型^[23],制动缸压力上升/稳定/下降等过程可用查表法、幂函数、自然指数函

数和多项式函数等形式表达。物理模型能够模拟空气制动客观规律,适应力强;而经验模型依赖空气制动试验数据,面对没有试验数据的场景,计算精度会有损失。

2.2 机车自动驾驶约束构建

面对复杂场景时,需构建操纵相关的多种约束条件,以保证自动驾驶系统控制列车安全、平稳、节能运行。基于列车纵向动力学模型,可构建全面的机车自动驾驶约束;而乘务员操作规范部分是基于操纵经验形成的,因此不能被直接用于构建自动驾驶约束。

机车自动驾驶约束一般需要结合线路和操纵并利用列车纵向动力学工具量化分析获得。以循环空气制动约束为例,其包括制动/缓解地点、制动/缓解速度、缓解电制动力等约束条件,每个约束条件均从多个因素(速度、坡度和电制动力等)通过动力学性能评估和有限次仿真获得。肖致明等通过制定空气制动性能指

标分析列车运行速度的影响因素^[24]并考虑制动性能差异,提出一种重载列车模式化操纵方法,得出追加减压应保持电制动力的结论,为机车自动驾驶控制约束提供了参考;周黄标等在“鱼背”形变坡道牵引转换电制动和空气制动工况下^[25],比较列车在不同位置转换工况的操纵平稳性,设计了该场景下较佳的机车自动驾驶控制策略,优化了自动驾驶操纵位置约束。

实际应用过程中,可将机车自动驾驶优化控制问题设计为控制目标函数和各种约束,但将约束直接融入目标函数易导致迭代优化计算量大且决策空间复杂、出现最优解选择压力过大的问题,因此可以设计一个合理的目标函数来针对机车自动驾驶构建约束条件,包括动力学约束(列车纵向动力学控制方程)、状态

约束、控制约束、初始位置速度约束(主要为制动工况)和末端位置速度约束(主要为缓解工况)等。如图4所示,围绕自动驾驶不同场景,如循环空气制动、起车、停车和过分相等,基于列车纵向动力学模型对各个自动驾驶场景进行仿真分析,提取自动驾驶关键数据,获取动力学仿真参数,通过有限次动力学仿真或试验,分析多个因素对动力学性能的影响及其变化规律。针对机车自动驾驶系统控制,构建不同场景约束,将动力学响应方程转化为具体场景约束方程,包括机车牵引/电制动力、加速度、惰行维持时间、操纵位置和速度等约束,从而既能保证每次迭代出来的速度规划曲线符合控制目标要求,又能利用约束实现机车的安全、平稳、节能运行。

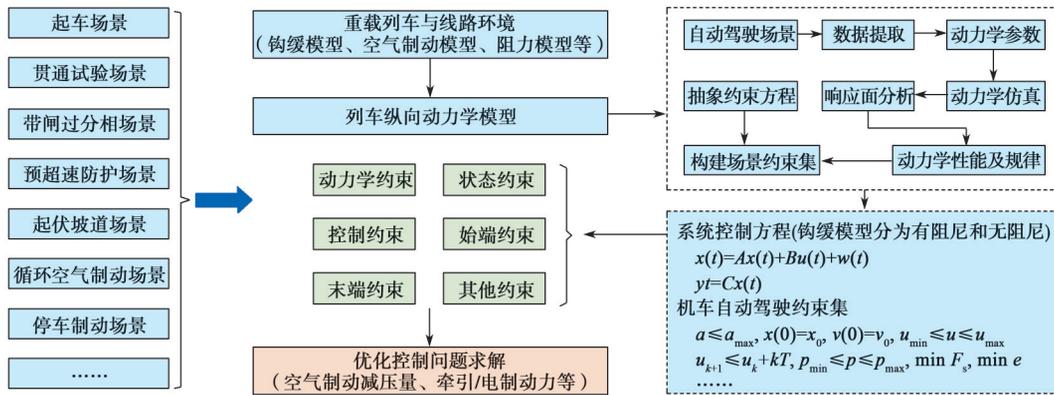


图4 基于纵向动力学模型的机车自动驾驶约束构建

Fig. 4 Construction of constraints for locomotive automatic operation based on longitudinal dynamics model

2.3 机车自动驾驶操纵评价

机车自动驾驶约束的迭代优化需要首先从约束符合度、车钩力等级、平稳性和基础性能等4个方面对基于原有自动驾驶约束生成的操纵序列进行评价;然后依据

评价结果选出较优操纵,基于择优的操纵对自动驾驶约束进行反馈改进,其技术路线如图5所示。

2.3.1 评价标准

自动驾驶约束是操纵需遵循的基本准则。约束符

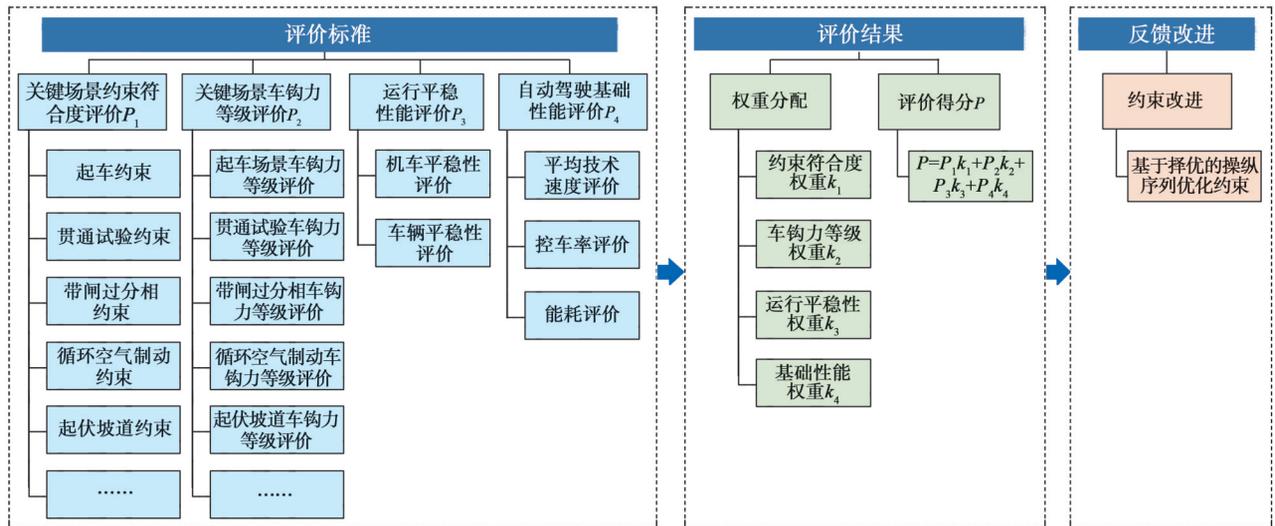


图5 基于纵向动力学模型的机车自动驾驶操纵评价技术

Fig. 5 Evaluation technology for locomotive automatic operation based on longitudinal dynamics model

合度评价,涉及起车、贯通试验、带闸过分相、循环空气制动和起伏坡道等场景,得分设为 P_1 ;车钩力等级评价,涉及起车、贯通试验、带闸过分相、循环空气制动和起伏坡道等关键场景,设为得分 P_2 ;运行平稳性评价,包括机车平稳性评价和车辆平稳性评价,机车冲动易导致LKJ速度突变进而引起超速和触发LKJ制动风险,车辆冲动易引发车钩损坏等风险,因此需对机车和车辆的平稳性同步进行评估,得分设为 P_3 ;基础性能评价,包括平均技术速度(列车全绿灯场景的平均运行速度)评价和控车率评价、能耗评价,得分设为 P_4 。

2.3.2 评价结果

根据约束符合度、车钩力等级、运行平稳性和基础性能对列车运行安全性和平稳性的影响程度,对每种评价标准的评分权重进行划分,分别设为 k_1, k_2, k_3 和 k_4 。根据4个方面的得分和权重,计算评价总分 $P=P_1k_1+P_2k_2+P_3k_3+P_4k_4$ 。

2.3.3 反馈改进

通过操纵评价计算后获得较优的操纵序列,基于择优的操纵序列可对自动驾驶约束进行迭代优化,以进一步提升自动驾驶操纵的安全性和平稳性。

3 机车自动驾驶决策规划与控制技术

机车自动驾驶技术通过控制机车实现列车的安全、平稳、准时和节能运行。其主要特征在于具有相对固定的运行路径,但在运动控制方面存在独特的挑战,这些挑战主要包括牵引/制动能力相对载重不足、场景复杂多变、列车模型参数分散和编组自由度远高于控制量。因此,机车运动控制技术面临着与其他运动控制领域不同的挑战。具体来说,面临的不确定典型因素包括:(1)空气制动系统参数受充风时间、环境温度、闸瓦温度和漏风等因素的影响;(2)调度指令和目标任务的变化;(3)线路条件(如坡道、桥梁和隧道)及天气状况(如雨雪)的变化。此外,自动驾驶的操控策略不仅要符合既定的操纵规定,还要能够清晰地向驾驶人员传达行为意图,以避免违规操纵和不必要的人工干预,这对控制算法的智能化、实时性和安全性等方面提出了严格的要求。因此,为了实现机车运动控制的安全、平稳、准时和节能等多重目标,机车自动驾驶必须通过决策规划-控制的分层结构设计合理的策略,以快速而精准地实现驾驶操纵。

3.1 决策规划与控制应用算法

机车自动驾驶决策规划与控制技术的支撑算法涉及场景决策、运动规划和跟随控制(图6)。

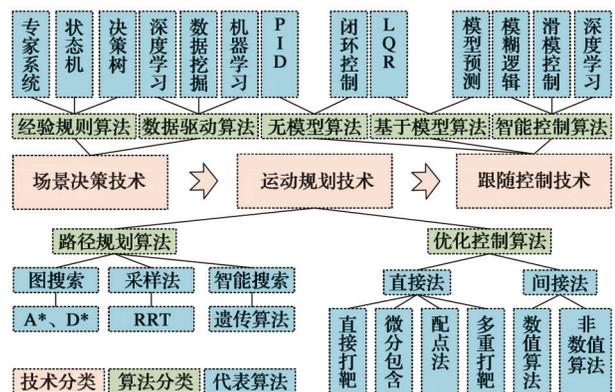


图6 机车自动驾驶决策规划与控制技术的支撑算法
Fig. 6 Supporting algorithms for decision, planning, and control technology of locomotive automatic operation

场景决策技术主要应用算法分为基于经验规则算法和基于数据驱动算法两大类。基于经验规则的代表性算法包括专家系统、状态机和决策树,基于数据驱动的代表性算法包括深度学习、数据挖掘和机器学习。

运动规划技术应用算法涉及路径规划和最优化控制。应用在汽车自动驾驶和机器人的路径规划算法,同样也适用于机车自动驾驶运动规划技术^[26],主要分为3大类:图搜索(代表性算法为A*等启发式搜索算法)、采样法(代表性算法为快速扩展随机树算法等)和智能搜索算法(代表性算法为遗传算法、蚁群算法等)。同样,最优化控制算法也应用于机车自动驾驶运动规划技术的目标优化计算,主要分为两大类:直接法(直接打靶法、微分包含法、配点法、多重打靶法等)与间接法^[27](数值算法和非数值算法)。其中,直接法主要为无导数优化方法,常用的方法如伪谱法;间接法为使用导数的优化方法,应用在深度优先搜索^[28]与广度优先搜索,尤其在广度优先搜索上具有优势。

跟随控制技术中无模型控制算法(代表性算法为PID、闭环控制等)、基于模型的控制算法^[29](代表性算法为LQR、MPC等)和智能控制算法^[30](代表性算法为模糊逻辑、滑模控制、深度学习等),均在机车自动驾驶的特殊场景中得到应用。

3.2 决策规划与控制技术路线

机车自动驾驶场景决策、运动规划、跟随控制算法的技术路线如图7所示。

3.2.1 场景决策技术

场景决策技术作为机车自动驾驶系统的核心关键技术之一,它融合了基于规则的经验算法和基于数据驱动的方法,以实现在机车运行过程中对各种场景的实时响应和精确决策。

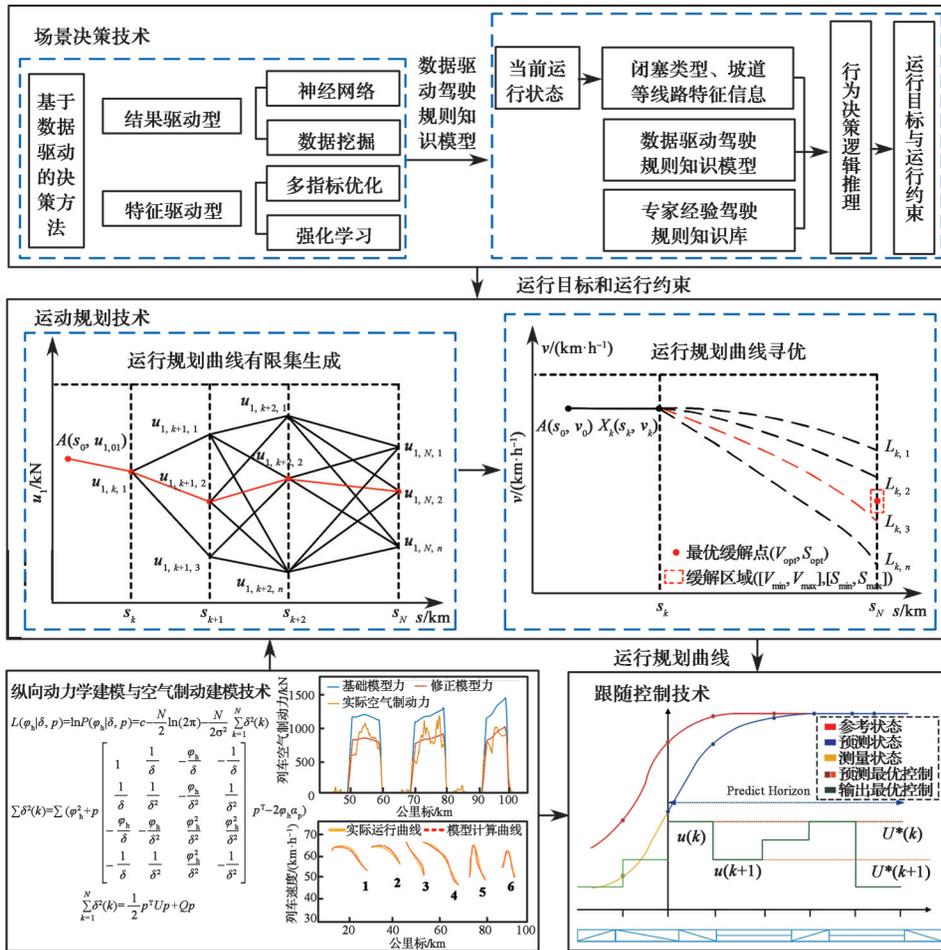


图7 决策、规划与控制技术路线

Fig. 7 Technical route of decision, planning, and control

首先,该技术根据列车的状态以及线路的静态信息(例如闭塞类型等)使用专家系统、状态机和决策树等方法来定义和划分运行场景。接着,采用数据驱动的方法,包括深度学习、数据挖掘和机器学习等先进技术,根据具体的需求,通过结果驱动和特征驱动的方法来自动识别优质驾驶数据中的模式和关键特征。该过程要求持续从历史数据中学习并改进,以能够更好地适应新的数据和场景。最后,利用机理建模法将相关机车操纵规程及优秀司机的经验进行多层次分类与组合,结合专家知识库和数据聚类技术,以识别并补充缺失或边缘场景,从而完善关键特征场景,形成一个专家经验驾驶规则实时库。基于列车当前的运行状态,并通过上述方法的协同,实现在复杂场景中决策出当前场景的列车运行目标和运行约束,以此提高规划求解的效率,确保操作的合理性,并降低安全风险。

3.2.2 运动规划技术

在场景决策技术确定的运行目标和运行约束基础上,运动规划技术生成包含速度、工况和牵引/制动指

令的运动规划曲线,并作为控制的期望曲线。从功能上,运动规划技术包括站站之间的全局规划和自动闭塞防护曲线内的局部规划。

站站之间的全局规划考虑了固定的目标函数和状态信息,在规划采样时刻内固定,并通过有限集方法将连续的状态或路径空间离散化为有限的集合来简化搜索问题,适合使用图搜索、采样法和智能搜索算法。

局部规划针对瞬态环境和列车的特定操作特性,需考虑初始点状态、停车状态、速度约束以及全局规划曲线目标。局部规划问题本质上是一个涉及双端约束的优化问题。直接法在最优化控制算法中能够有效地解决列车自动驾驶中的运动规划问题,该方法通过求解加权多目标函数,综合考量并平衡了准点性、平稳性、节能效果以及安全性等关键目标要求,它不仅能适应多变的运行条件,还能同时确保运行的效率、舒适性和安全性,非常适合用于列车自动驾驶系统局部运动规划。

3.2.3 跟随控制技术

机车自动驾驶需要精确的执行能力,跟随控制技术以运动规划曲线为追踪目标,以列车动力学和运动

学模型为基础,结合控制算法进行运动规划跟踪。PID等无模型控制算法设计简单,在简单场景下有着较好的跟随控制效果。基于模型的控制算法(如线性二次调节器LQR、模型预测控制MPC)可以克服模型失准和欠驱动等影响因素,得到精确的控制列车运行的牵引/制动指令。智能控制算法(如模糊逻辑、深度学习等)可以用于关键控制参数的辨识,实现自适应与鲁棒的运动规划跟踪。

场景决策技术不断学习和适应新的运行环境与条件,运动规划技术依据实时数据调整规划曲线,而跟随控制技术则根据实际运行情况动态调整控制策略。通过整合场景决策技术、运动规划技术和跟随控制技术三大关键技术,形成一个闭环控制系统,实现了持续的优化和迭代。这一方案显著提升了机车自动驾驶系统的平稳性和鲁棒性,并可有效处理意外情况和不确定性,确保列车运行的安全性。

4 机车自动驾驶关键问题技术方案

针对循环空气制动控制和复杂组合场景控制两大关键问题,以建模与评价、决策规划与控制技术为基础,分别形成相关技术方案。

针对循环空气制动控制问题,以场景决策技术得到的最优施加和缓解状态(速度和位置)为目标,根据循环空气制动特性,研究关键参数辨识方法来确定非线性空气制动模型,研究非线性空气制动力预测方法对强随机性和差鲁棒性的空气制动力进行精确预测;以空气制动过程的安全性和平稳性为目标,将其归纳

为带非线性约束的双端优化问题(两端分别为施加和缓解状态),研究自适应预测控制方法,对该带非线性约束的双端优化问题进行求解,得到可执行的运动规划曲线,并通过控制策略完成每个采样点的跟随控制,实现循环空气制动过程平稳的空电协同控制。图8为循环空气制动控制技术方案架构。

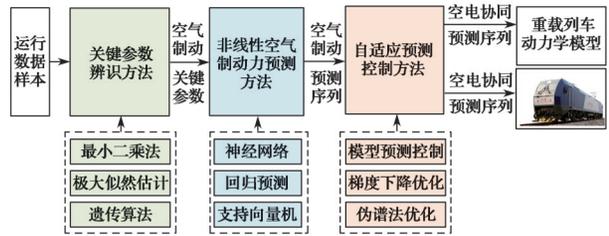


图8 循环空气制动控制技术方案

Fig. 8 Technical scheme for circulating air braking control

针对复杂组合场景控制,首先构建基于决策树的机车自动驾驶复杂组合场景识别模型,以快速、准确地判断当前复杂组合场景,并进入驾驶决策系统;然后在机车自动驾驶决策中融合专家系统的经验知识和神经网络的学习能力,以实现高效而智能的决策过程。专家系统负责管理基本的规则、逻辑和经验知识,包括对于特定场景下的行驶指导、安全策略和应对突发情况的处理方法。神经网络则通过大量数据的训练和学习,不断优化系统的决策能力,逐步提升对于复杂环境的理解和应对能力。这种方法能够综合考虑各种因素,包括车辆状态、环境条件、运营需求等,实现智能的速度规划和紧急情况处理,从而提高列车自动驾驶的安全性、高效性和舒适性。图9示出复杂组合场景控制方案架构。

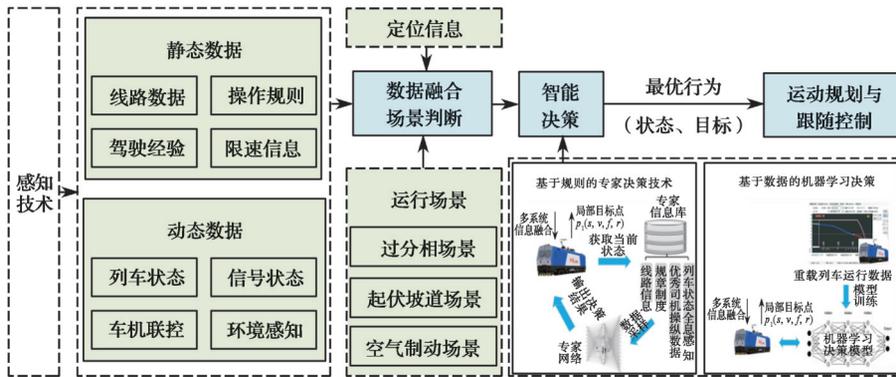


图9 复杂组合场景控制技术方案

Fig. 9 Technical scheme for complex combination scenarios control

5 结束语

铁路作为国民经济的大动脉,是优化资源配置、畅通全国市场、拉动地区发展的重要基础设施保障;而我国幅员辽阔、资源分布不均衡,使得货运铁路科技创新

的重要性和紧迫性愈发突出。机车自动驾驶作为智能化技术在货运铁路的典型应用,具备高科技、高效能和高质量等特征,不仅是实现我国货运铁路高水平科技自立自强的制高点,更是全球科技竞争的高地。未来要实现更高品质、更高等级的机车自动驾驶,除了本文重

点研究的关键技术以外,还需重点研究如下技术:

(1) 面向机车自动驾驶功能的快速测试与评价技术。机车自动驾驶现场试验存在成本高、周期长等问题,其工程化应用的重点将由技术的突破与实现逐渐向测试、验证与控制功能完善方向转移。场景是虚拟测试的基础,如何准确构建机车自动驾驶测试场景集,并提出高效的机车自动驾驶性能测试体系与方法,值得重点关注和研究。

(2) 机车自动驾驶车地信息融合态势感知技术。与汽车自动驾驶不同的是,机车牵引货运列车的制动距离长,线路条件更为复杂,光靠车载感知手段在距离及反应速度裕量上无法完全保证列车的安全运行。机车自动驾驶车载控制系统需要融合车载、地面、线路等各方面的信息,进行综合决策与控制,实现安全、高效的自动驾驶。如何获取长大编组列车各关键位置及全域线路环境信息,并进行高效融合处理与识别,也是需要关注和研究的重点。

参考文献:

- [1] 路向阳,李雷,雷成健,等.城市轨道交通全自动驾驶技术发展综述[J].机车电传动,2018(1):6-12.
LU X Y, LI L, LEI C J, et al. A review of the development of urban railway transport full automatic operation technology[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(1): 6-12.
- [2] 赵博.京张铁路CTCS-3+ATO信号系统工程方案设计研究[J].铁道工程学报,2021,38(10):79-84.
ZHAO B. Research on the engineering scheme design of CTCS-3+ATO signal system for beijing-zhangjiakou railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(10): 79-84.
- [3] SCHRÖDER J, ALPOIM C G, DICKGIEßER B, et al. Digitale S-bahn hamburg-erstmalige realisierung von "ATO over ETCS" in deutschland[J]. Signal+ Draht, 2021, 113(7/8): 52-59.
- [4] 尚敬,刘勇,江帆.机车自动驾驶技术研究与应用[J].机车电传动,2023(1):1-12.
SHANG J, LIU Y, JIANG F. Research and application of locomotive automatic operation technology[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 1-12.
- [5] 姜正,王瑞,杜海滨,等.重载自动驾驶机车长大下坡空电联合制动运用研究[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(3):311-318.
JIANG Z, WANG R, DU H B, et al. Electro-pneumatic brake for heavy haul locomotive during automatic driving at long downgrade segment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3): 311-318.
- [6] 侯化安,田光兴,吕泉,等.HXb3C型机车装用JZ-8型制动系统对自动驾驶操纵的适应性研究[J].铁道机车与动车,2021(12):13-16.
HOU H A, TIAN G X, LV X, et al. Research on adaptability of JZ-8 brake system in HXD3C locomotive to ATO[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2021(12): 13-16.
- [7] 任宇杰,林晖,吴仁恩,等.重载列车辅助驾驶试验与分析[J].铁道机车车辆,2022,42(5):47-51.
REN Y J, LIN H, WU R E, et al. Test and analysis on auxiliary driving of heavy haul train[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(5): 47-51.
- [8] 王青元,赵紫宁,刘强强,等.两万t重载列车空气制动过程建模[J].机车电传动,2022(4):70-76.
WANG Q Y, ZHAO Z N, LIU Q Q, et al. Modeling of air braking process of 20000 ton heavy haul train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(4): 70-76.
- [9] 高士根,董海荣,朱海楠.面向操纵优化的智能列车辅助驾驶系统[J].铁道学报,2019,41(11):88-94.
GAO S G, DONG H R, ZHU H N. Intelligent driver advisory system for improving manual train driving performance[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(11): 88-94.
- [10] 杨辉,王禹,李中奇,等.专家监督的SAC强化学习重载列车运行优化控制[J].控制理论与应用,2022,39(5):799-808.
YANG H, WANG Y, LI Z Q, et al. Supervised SAC reinforcement learning method for heavy haul train optimization control[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(5): 799-808.
- [11] WU Q, SPIRYAGIN M, COLE C, et al. Longitudinal train dynamics: an overview[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(12): 1688-1714.
- [12] 魏伟,赵旭宝,姜岩,等.列车空气制动与纵向动力学集成仿真[J].铁道学报,2012,34(4):39-46.
WEI W, ZHAO X B, JIANG Y, et al. The integrated model of train air brake and longitudinal dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 39-46.
- [13] 宁侨,李铁兵,霍晟,等.重载列车自动驾驶纵向动力学仿真技术研究[J].机车电传动,2020(1):58-64.
NING Q, LI T B, HUO S, et al. Research on longitudinal dynamics simulation technology of automatic driving of heavy haul train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 58-64.
- [14] 翟婉明,黄志辉.列车动力学的非线性数值分析方法[J].西南交通大学学报,1991(1):82-90.
ZHAI W M, HUANG Z H. Nonlinear numerical methods for train dynamic analysis[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1991(1): 82-90.
- [15] WU Q, YANG X J, COLE C, et al. Modelling polymer draft gears[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(9): 1208-1225.
- [16] COLE C. Improvements to wagon connection modelling for longitudinal train simulation[C]//Centre for Railway Engineering. Engineering CORE 1998 Engineering innovation for a competitive edge Conference on Railway Engineering. Queensland: Centre for Railway Engineering, 1998: 187-194.
- [17] WU Q, SPIRYAGIN M, COLE C. Advanced dynamic modelling for friction draft gears[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(4): 475-492.
- [18] CANTONE L. TrainDy: the new union internationale des chemins de fer software for freight train interoperability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225(1): 57-70.
- [19] 魏伟,张善荣,刘庆忠.长大列车制动系统减压特性的计算机模拟[J].大连铁道学院学报,1992(4):43-49.
WEI W, CHANG S R, LIU Q Z. A study on characteristic of pressure reduction of air brake system in long train[J]. Journal of

- Dalian Railway Institute, 1992(4): 43-49.
- [20] 魏伟. 120 阀及试验台的计算机模拟[J]. 铁道学报, 2000, 22(1): 31-35.
WEI W. Computer simulation of 120 vehicle distributing valve and its test rig[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(1): 31-35.
- [21] WU Q, COLE C, SPIRYAGIN M, et al. Railway air brake model and parallel computing scheme[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2017, 12(5): 051017.
- [22] GE X, CHEN Q H, LING L, et al. An approach for simulating the air brake system of long freight trains based on fluid dynamics[J]. Railway Engineering Science, 2023, 31(2): 122-134.
- [23] JIANG F, LI K, WU H H, et al. An experiment-based empirical model for heavy-haul train air brake[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2023, 15(5): 1-10.
- [24] 肖致明, 王大龙, 王青元, 等. 考虑制动性能差异的重载列车模式化操纵方法[J]. 机车电传动, 2023(1): 24-32.
XIAO Z M, WANG D L, WANG Q Y, et al. Pattered manipulation method for heavy-haul trains considering air brake performance diversity[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 24-32.
- [25] 周黄标, 杜凯冰, 罗源, 等. 基于多质点模型的重载列车平稳操纵仿真研究[J]. 控制与信息技术, 2021(2): 8-17.
ZHOU H B, DU K B, LUO Y, et al. Simulation research on the smooth operation of heavy-haul train based on multi-particle model[J]. Control and Information Technology, 2021(2): 8-17.
- [26] 梅文庆, 史可, 张征方. 基于迭代诱导遗传算法的列车自适应节能策略研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 117-123.
MEI W Q, SHI K, ZHANG Z F. Train adaptive energy saving strategy based on iterative induced genetic algorithm[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(3): 117-123.
- [27] 刘平, 胡云卿, 廖俊, 等. 基于两阶段自适应 Gauss 配点重构伪谱法的电力机车优化操纵[J]. 自动化学报, 2019, 45(12): 2344-2354.
LIU P, HU Y Q, LIAO J, et al. Optimization operation of electric locomotive based on two-stage adaptive Gauss re-collocation pseudospectral approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(12): 2344-2354.
- [28] 钟谱华, 张征方, 熊佳远. 一种重载列车自动驾驶操纵曲线规划方法[J]. 控制与信息技术, 2021(6): 35-42.
ZHONG P H, ZHANG Z F, XIONG J Y. A planning method of automatic driving control curve for heavy haul train[J]. Control and Information Technology, 2021(6): 35-42.
- [29] 李程, 张征方, 沈子扬. 基于预测控制的货运机车自动驾驶技术研究[J]. 控制与信息技术, 2020(6): 8-13.
LI C, ZHANG Z F, SHEN Z Y. Research on freight locomotive automatic driving based on predictive control[J]. Control and Information Technology, 2020(6): 8-13.
- [30] 史可, 张征方, 白金磊, 等. 基于模糊神经网络的重载列车空气制动力预测方法[J]. 控制与信息技术, 2022(1): 1-6.
SHI K, ZHANG Z F, BAI J L, et al. Prediction method of air braking force of heavy load train based on fuzzy logic-based neural network[J]. Control and Information Technology, 2022(1): 1-6.

Research on Key Technologies and Issues of Locomotive Automatic Operation

HU Yunqing, JIANG Fan, ZHANG Zhengfang

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This paper analyzes the characteristics and key issues of locomotive automatic operation technology, and introduces the domestic and international developmental status of locomotive automatic operation, as well as the research progress in key technologies within this field. It elaborates the research progress and technical routes of key technologies, including train longitudinal dynamics modeling, construction of constraints, control evaluation, decision-making for scenarios, motion planning, and follow control. In addition, this paper discusses technical solutions to key issues such as circulating air braking control, and control in complex combination scenarios. In conclusion, the discussion focuses on future development trends in locomotive automatic operation technologies and emphasizes the need for in-depth research on technologies that contribute to achieving higher quality and higher level of locomotive automatic operation, such as rapid construction of locomotive automatic operation scene set and situational awareness based on vehicle-ground information fusion.

Keywords: automatic operation; locomotive; heavy-haul train; dynamics; decision and control; operating evaluation

引用格式: 胡云卿, 江帆, 张征方. 机车自动驾驶关键技术与问题研究[J]. 控制与信息技术, 2024(4): 1-10.

Citation: HU Yunqing, JIANG Fan, ZHANG Zhengfang. Research on Key Technologies and Issues of Locomotive Automatic Operation[J]. Control and Information Technology, 2024(4): 1-10.