

两万吨重载列车多机协同牵引稳定性控制方法与系统优化研究

李文

国能新朔铁路有限责任公司机务分公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8707

[摘要] 随着社会的发展, 交通运输业的快速发展, 轨道交通已经成为现代化城市中不可或缺的一部分, 其中铁路运输是重要的组成部分。工业化进程中铁路运输的需求量逐渐增加, 越来越多的货物需要通过铁路进行运输, 从而两万吨重载组合列车应运而生。两万吨重载列车是由多个车厢组成的火车运输单元, 两万吨重载列车作为重载运输的重要形式, 进一步提升了铁路货运能力。然而, 多机协同牵引时, 由于列车编组较长、机车之间的协同控制复杂等因素, 其稳定性面临诸多挑战。不稳定的牵引可能导致车辆间的纵向冲动增大, 增加车钩磨损, 甚至引发脱轨等严重安全事故。本文将对两万吨重载列车机车牵引稳定性控制方法和系统优化研究, 以供参考。

[关键词] 两万吨重载列车; 多机协同牵引; 稳定性控制; 系统优化

Research on Stability Control Methods and System Optimization for Multi-Locomotive Coordinated Traction of 20, 000-Ton Heavy-Haul Trains

Li Wen

Guoneng Xinshuo Railway Co., Ltd. Locomotive Division

[Abstract] With the development of society and the rapid growth of the transportation industry, rail transit has become an indispensable part of modern cities, with railway transportation serving as a crucial component. As industrialization progresses, the demand for railway transportation continues to rise, necessitating the transport of increasing amounts of goods, leading to the emergence of 20, 000-ton heavy-haul combined trains. These trains, composed of multiple carriages, represent a vital form of heavy-haul transportation, further enhancing railway freight capacity. However, when multiple locomotives work in tandem, factors such as the extended train formation and the complex coordination between locomotives pose significant challenges to stability. Unstable traction may result in increased longitudinal impulses between vehicles, accelerated wear of couplers, and even severe safety incidents like derailments. This paper will explore methods for controlling locomotive traction stability and optimizing systems for 20, 000-ton heavy-haul trains, providing valuable insights for reference.

[Key words] 20, 000-ton heavy-haul train; multi-locomotive coordinated traction; stability control; system optimization

引言:

当前, 传统列车运行控制系统难以满足线路更高运输能力需求。《交通强国建设纲要》中明确到 2035 年基本建成交通强国, 实现 2-3 万吨级重载列车重大突破。依靠列车运行控制技术创新来进一步缩短列车追踪间隔、提高线路运输能力等, 将成为实现铁路提质增效的关键手段与方法。对于两万吨重载列车多机协同牵引的研究也取得了丰硕成果。随着我国铁路重

载运输的快速发展, 众多科研机构 and 高校积极投身相关研究, 但仍存在一些不足之处和可拓展方向。一方面, 现有的研究多侧重于单一因素对多机协同牵引工况的影响, 而实际运行中, 多机协同牵引受到多种因素的综合作用, 对这些多因素耦合作用下的协同牵引工况研究还不够深入。另一方面, 随着铁路技术的不断发展, 新型车辆、新型牵引系统以及智能化控制技术不断涌现, 如何将这些新技术应用于两万吨重载列车多机协同

牵引系统，提高其运行安全性和效率，还需要进一步的研究和探索。

一、列车稳定性控制关键因素分析

(一) 列车纵向动力学特性

列车纵向动力学特性是影响两万吨重载列车多机协同牵引稳定性的关键因素之一。在列车启动工况下，各机车同时输出牵引力，使列车从静止状态开始加速。此时，列车的纵向力主要表现为机车的牵引力和车辆间的摩擦力。由于列车编组较长，各车辆的启动时间存在差异，这会导致车辆间产生纵向冲击，使纵向力呈现波动变化。加速工况下，随着列车速度的不断提升，各机车的牵引力分配需根据列车的实际运行状态进行优化。若牵引力分配不均，会导致部分车辆受力过大，增加纵向冲击，影响列车的稳定性。减速和制动工况是列车纵向动力学特性最为复杂的阶段。在减速时，如果各机车和车辆的制动力不能协同一致，就会产生过大的纵向冲击力。在紧急制动时，由于制动力瞬间增大，列车的纵向冲击会急剧增加。较大的纵向冲击，导致车钩受力过大，增加车钩断裂风险；同时，纵向冲击还会影响货物运输安全，加剧车辆部件损耗，降低列车运行舒适性。

(二) 通信系统的可靠性与延迟

在两万吨重载列车多机协同牵引系统中，通信系统处于核心地位，其可靠性和延迟直接关系到列车的运行稳定性和安全性。通信延迟是影响列车稳定性的一个重要问题。由于通信信号在传输过程中需要经过多个环节，或在经过复杂地形时，不可避免地会产生一定的延迟。当通信延迟较大时，从控机车接收到主控机车的操纵指令会出现滞后，导致各机车的动作不能及时同步。信号干扰也是通信系统面临的一个严峻挑战。铁路沿线的电磁环境复杂，存在来自电力设备、通信基站等的各种干扰源。这些干扰可能导致通信信号失真、误码甚至中断，影响通信的可靠性。当信号受到干扰时，通信系统可能会出现数据丢失或错误，使从控机车接收到错误的指令，引发列车运行异常。通信系统的不稳定性导致主控机车的指令无法被各从控机车同步执行，出现多机协同失步现象，这会导致部分机车牵引动力过剩，部分机车动力不足，加剧轮轨磨损与车钩受力，影响列车稳定运行。

(三) 机车车辆的技术状态

机车车辆的技术状态是保障两万吨重载列车多机协同牵引稳定性的基础，其各关键部件的性能对列车运行稳定性有着直接且重要的影响。机车的牵引性能是决定列车能否顺利启动、加速以及在不同线路条件下保持稳定运行的关键。大功率的机车能够提供强大的牵引力，以满足两万吨重载列车的牵引需求；制动性能对于列车的安全运行至关重要。两万吨重载列车在高速运行或遇到紧急情况时，需要可靠的制动系统来实现快速、平稳的停车。若车辆制动系统出现故障，会导致车辆制动力不一致，在制动时产生过大的纵向冲击力，危及列车安全；

车辆的悬挂系统对列车运行稳定性起着重要的缓冲和减震作用。良好的悬挂系统能够有效减少车辆在运行过程中受到的振动和冲击，提高车辆的平稳性和舒适性。在一些老旧车辆中，由于悬挂系统老化，列车在运行时会出现明显的颠簸，增加了车辆间的纵向冲击，对列车的稳定性产生不利影响；车钩缓冲装置是连接车辆、传递纵向力的关键部件，其性能直接关系到列车的纵向动力学特性和运行稳定性。在一些重载列车的运行事故中，就有因车钩缓冲装置故障，导致车钩断裂，列车分离的情况发生。

二、多机协同牵引稳定性控制方法研究

(一) 基于多智能体系统的协同控制方法

多智能体系统是一种分布式人工智能系统，由多个智能体组成，这些智能体具有感知、决策和执行能力，能够在特定环境下自主地完成任务。其理论基础在于将每个机车视为一个智能体，每个智能体能够根据自身的感知信息和与其他智能体的交互信息，自主地做出决策，以实现整个列车系统的协同运行目标。首先在智能体感知与建模方面，通过在机车上安装各类传感器，如速度传感器、加速度传感器、力传感器以及位置传感器等，实时收集列车运行过程中的各种信息。利用这些感知数据，建立列车运动学模型和动力学模型。通过这些模型，智能体能够对列车的运行状态进行准确的建模和预测，为后续的决策和执行提供坚实的基础。其次，智能体决策与规划环节，各机车智能体根据感知到的信息和建立的列车运动学模型、动力学模型，运用优化算法进行决策和规划。最后协同控制策略是基于多智能体系统的协同控制方法的核心。利用通信系统，各机车智能体实时交换运行状态信息、控制指令等，使得每个智能体都能了解整个列车系统的运行情况。通过建立协同控制算法，协调各机车智能体的行为，使它们能够按照预定的策略协同工作。

(二) 分布式协同控制策略

分布式协同控制策略在解决复杂地形和通信不可靠情况下两万吨重载列车多机协同控制问题方面具有显著优势。在复杂地形中，如山区铁路，线路坡度变化大、弯道多，传统的集中式控制方法难以实时准确地获取每个机车和车辆的运行状态，也难以根据复杂的线路条件及时调整控制策略。而分布式协同控制策略将控制任务分散到各个机车智能体上，每个智能体能够根据自身所处的位置和感知到的局部信息，自主地做出决策，从而能够更好地适应复杂地形的变化。在通信不可靠的情况下，分布式协同控制策略不需要依赖于中心控制器与所有机车之间的实时、可靠通信，各机车智能体之间可以通过局部通信进行信息交互和协同工作，从而提高了整个列车系统的可靠性和鲁棒性。在控制器设计方面，分布式协同控制策略通常采用基于一致性算法的控制器。一致性算法的核心思想是使多个智能体的状态在一定条件下逐渐趋于一致。在重载列车多机协同控制中，通过设计合适的一致性算法，使各机车的速度、

牵引力等状态变量逐渐趋于一致，从而实现列车的协同运行。

(三) 自适应控制技术在稳定性控制中的应用

自适应控制技术在两万吨重载列车多机协同牵引稳定性控制中具有重要的应用价值，能够根据列车运行状态和环境变化实时调整控制参数，从而显著提高列车运行的稳定性。首先自适应控制技术通过实时监测列车的运行状态，如速度、加速度、车钩力等参数，以及环境信息，如线路坡度、弯道半径等，利用自适应算法自动调整控制参数。例如在列车爬坡时，自适应控制技术能够根据实时监测到的坡度信息和列车速度的变化，自动增大机车的牵引力，同时调整各机车之间的牵引力分配，以确保列车能够保持稳定的速度爬坡。其次，自适应控制技术还能够应对车辆载重变化对列车运行稳定性的影响。当列车的载重发生变化时，自适应控制技术可以根据传感器测量到的车辆载重信息，实时调整控制参数，确保列车在不同载重情况下都能稳定运行。在实际应用中，自适应控制技术通常与其他控制方法相结合，以更好地适应复杂的运行环境和工况变化。通过这种结合，能够充分发挥自适应控制技术和多智能体系统协同控制方法的优势，进一步提高两万吨重载列车多机协同牵引的稳定性和可靠性。

三、两万吨重载列车多机协同牵引系统优化策略

(一) 操纵策略优化

操纵策略是影响两万吨重载列车运行效率和稳定性的关键因素之一。结合大量实际运行数据的深入分析，对机车的牵引、制动操纵策略进行优化，能够有效提升列车的运行性能。充风时间是制动系统中的一个重要参数，它直接影响着列车的制动和缓解效果。在实际运行中，适当的充风时间列车的制动和缓解性能达到最佳平衡，既保证了列车的安全运行，又提高了运输效率；缓解速度是指列车在制动缓解后开始加速的初始速度。合理的缓解速度能够避免列车在启动过程中产生过大的冲击，保证列车的平稳运行；减压量是制动操纵中的另一个关键参数，在车辆和车钩能够承受的范围内，通过适当增大或减小减压量，列车能够实现平稳制动，制动距离也能满足安全要求；再生力是电力机车在制动过程中利用电机反转产生的制动力，它不仅可以实现能量回收，还能减少空气制动的使用，从而降低列车的纵向冲动，这样可以使列车的制动过程更加平稳，同时也提高了能源利用效率。

(二) 制动系统优化

制动系统是两万吨重载列车安全运行的关键保障，其性能直接影响列车的制动效果和运行稳定性。随着铁路运输技术的不断发展，研究新型制动系统和制动控制算法，提高制动系统的响应速度和制动力分配的均匀性，对于降低列车制动时的纵向冲动具有重要意义。新型制动系统的研究主要集中在提高制动系统的智能化和集成化水平。如电子制动系统(EBS)采用电子控制技术代替传统的空气制动阀，通过传感器实时监测列

车的运行状态和制动需求，然后通过电子控制单元(ECU)精确控制制动缸的压力，实现制动过程的智能化控制。与传统的空气制动系统相比，EBS具有响应速度快、制动力调节精确、可靠性高等优点。制动控制算法的优化也是提高制动系统性能的重要方面。传统的制动控制算法往往采用固定的控制策略，难以适应复杂多变的运行工况。而先进的制动控制算法，如基于模糊控制和神经网络控制的算法，能够根据列车的实时运行状态和环境变化，动态调整制动控制参数，实现制动力的优化分配。

(三) 智能化控制系统的构建

随着人工智能、大数据等先进技术的飞速发展，将这些技术引入两万吨重载列车多机协同牵引系统，构建智能化控制系统，已成为提升列车运行性能和管理水平的必然趋势。智能化控制系统能够实现列车运行状态的实时监测、故障诊断和智能决策，为列车的安全、高效运行提供强有力的支持。在列车运行状态实时监测方面，利用传感器技术和物联网技术，将采集到的数据通过无线通信网络传输到列车的中央控制系统，实现对列车运行状态的全方位、实时监测。故障诊断方面，利用大数据分析技术和机器学习算法，对实时监测到的列车运行数据进行深度挖掘和分析，建立列车设备的故障预测模型。通过对历史故障数据和正常运行数据的对比分析，提取故障特征和规律，然后将实时监测数据与故障预测模型进行比对，当发现数据异常时，系统能够快速准确地判断故障类型和故障位置，

并立即向操作人员发出警报，提醒其采取相应的维修措施，避免故障进一步扩大，确保列车的安全运行。智能决策方面，基于人工智能技术，结合列车的运行状态、线路条件、运输任务等信息，实现列车运行的智能决策。

综上，针对重载列车的稳定性控制和系统优化对列车的平稳运行有着重要的意义。随着物联网、5G通信、人工智能等技术的飞速发展，智能化将是未来重载列车发展的重要趋势，未来需要进一步深入研究智能化技术在重载列车中的应用，开发更加智能的控制系统，进一步提升两万吨重载列车的运行性能和安全水平，推动我国铁路重载运输技术的持续发展，为我国经济社会的发展提供更加强有力的运输保障。

[参考文献]

- [1]卢小永;田昊;宋逸飞;郭嘉.2万吨重载组合列车充排风特性对纵向冲动影响分析[J].科学技术创新,2025(03)
- [2]李中奇;袁玲玉;杨辉.虚拟编组列车的分布式协同预测控制[J].交通运输工程学报,2024(05)
- [3]何闻;常崇义;王俊彪;郭刚.3万吨重载列车制动工况纵向力关键影响因素分析[J].铁道学报,2024(01)
- [4]杨忠良;孙林平;马卫华;罗世辉;王波.2万吨重载列车牵引启动工况的纵向冲动分析[J].动力学与控制学报,2024(09)