

重载列车行车安全中制动系统性能评估与优化策略

王成

国家能源集团包神铁路集团有限责任公司机务分公司 陕西榆林 719316

【摘要】在重载列车大量使用的情况下,行车安全问题已逐步成为关系铁路运输效率与安全性的关键因素。制动系统是保障列车运行安全的核心部分,制动系统性能的好坏直接影响列车运行安全,旅客生命安全和运输稳定。本论文研究目的是对重载列车制动系统性能评价方法进行分析,提出优化策略来提高制动系统运行效率与可靠性。

【关键词】重载列车;安全制动;性能评估;优化策略

Performance Evaluation and Optimization Strategies for Braking Systems in Heavy-Haul Train Safety

Wang Cheng

works at the Locomotive Division of Baoshen Railway Group Co., Ltd., National Energy Group,

located in Shenmu City, Yulin City, Shaanxi Province 719316

【Abstract】With the widespread use of heavy-haul trains, operational safety has become a critical factor affecting railway transportation efficiency and security. As the core component ensuring train operation safety, the braking system's performance directly impacts operational safety, passenger life protection, and transport stability. This paper analyzes evaluation methods for heavy-haul train braking systems and proposes optimization strategies to enhance operational efficiency and reliability.

【Key words】heavy-haul trains; safe braking; performance evaluation; optimization strategies

引言:

重载列车是现代铁路运输中的一个重要环节,由于其载重大、运行速度快等特点对制动系统性能要求很高。高速长距离运输时,制动系统既要保证各种复杂道路条件下列车安全停驶,又要处理频繁起停及大负荷工况。特别是在某些山区或者复杂铁路线路中,制动系统性能好坏直接影响行车安全与运输效率。所以如何对重载列车制动系统进行有效地评价和优化就成了铁路行业急需解决的一个重要问题。

1.重载列车制动系统概述

1.1 重载列车制动系统的组成与分类

重载列车制动系统一般都是由若干组件协同工作而成,主要有空气制动系统,电力制动系统,液压制动系统以及与之对应的控制与监测系统等。其中最常用的制动方式就是空气制动系统,它主要利用压缩空气驱动制动装置来达到列车减速的目的。据有关资料介绍,重载列车普遍采用传统空气制动系统,一般都是针对较长,较远距离制动过程而设计的,特别是对于较高负荷运输任务。电力制动系统利用电机将列车的动能转换为电能,这种系统通常与空气制动系统一同工作,以在列车高速行驶时提供更迅速的制动响应;液压制动系统特别适用于某些特定的重载列车和特殊的工作环境,能够提供更为强大的制动能力。制动

系统配有制动控制及监测系统以保证系统在各种工况下能稳定工作,并对制动状态及系统故障进行实时的监控。按现行技术标准规定,重载列车制动系统需满足较严格技术指标,例如制动距离通常要求不得大于3~5次列车长,制动的反应时间必须被限制在0.5秒之内,以确保它能够适应复杂的运输条件和驾驶需求。

1.2 重载列车制动系统的技术要求

制动系统在各种运行工况下都要有充分的制动力。对重载列车尤其是大坡度,复杂地形和远距离运输时对制动系统性能提出了更苛刻的要求。以长坡道运行为例,要求制动系统能有效地避免火车由于重力作用而出现的过快提速,并保证火车在应急情况下能以最短的速度停车。按照《铁路车辆制动技术标准》规定,重载列车制动距离通常要求不得大于4~6倍车长,其具体取值将随列车载重,速度和线路复杂程度而变化。为了让列车能够迅速地应对各种突发情况,制动系统的反应时间必须被限制在0.5秒之内。这就需要制动控制系统具备高效信号处理能力,反应机制快。重载列车制动系统对可靠性及冗余设计提出了更高的要求来应对系统失效的危险。为保证安全性,制动系统需装备自动检测及故障预警功能,能在出现故障的情况下及时报警及采取应急措施以保证列车能安全行驶。高负载时制动时产生较多热量,制动器等关键部件会由于过热导致性能降低。所以制动系统必须使用高效散热技术才能保证系统即使经常制动时仍能够稳定工作。

2.重载列车制动系统性能评估方法

2.1 制动性能评估指标

制动距离作为最关键的评估指标,是指列车在开始制动至完全停车过程中需要行驶的路程。按照《铁路车辆制动技术标准》规定,重载列车制动距离应视不同运行环境而定,通常规定常规情况下制动距离不得大于列车长度 4-6 倍;并且当遇到复杂路况或者紧急情况时制动系统设计需保证较短制动距离来处理突发情况。制动响应时间定义为从发出制动指令到系统启动制动的整个过程所需的时长,这通常不应超过 0.5 秒。制动时间描述的是列车从启动制动到完全稳定的整体时间,这与制动的距离有着紧密的联系。制动力矩作为考核制动系统作用于列车制动力的指标,常用来测量制动装置负载能力。为保证制动系统高负载时仍能维持高制动效能,必须准确计算制动力矩,以适应列车载重情况,并保证其在高速和重载时安全停车要求。制动系统设计要求保证能量回收率尽量高,特别是当采用电力制动系统时,以回馈电能提高整体能效。系统的稳定性被视为评价制动系统长时间稳定运行的关键指标,它涵盖了制动系统在各种环境因素(如高温、低温、湿滑等)下的适应能力,以及系统的自我诊断和故障预警功能。

2.2 性能评估的理论模型

2.2.1 基于物理学的制动性能分析模型

从物理学模型上看,制动系统首先由制动装置产生制动力矩以延缓列车行驶,而制动距离与制动时间计算取决于列车初速度,制动力大小及列车质量。在该模型中,常用的基本公式为牛顿第二定律 $F=ma$,其中 F 为制动力, m 为列车的质量, a 为加速度。通过对制动时加速度变化情况进行分析,可推算出列车制动距离 d 及所用时间 t 等:

$$d = \frac{v^2}{2a}$$

$$t = \frac{v}{a}$$

其中, v 为火车初始速度, a 为制动加速度。利用这些公式可计算出给定工况下列车需要制动的距离及时间。以重载列车为例,当列车的起始速度达到 80 km/h,并且其制动加速度为 -0.8 m/s^2 时,利用上述数学公式,我们可以估算出制动的距离大概是 444.4 米,而所需的制动时间为 100 秒。

在此基础上,物理学模型中考虑列车与轨道之间的摩擦力,空气阻力,特别是高载重时摩擦力以及热效应对于制动性能影响特别明显。比如当频繁制动或者高负荷工作时,制动器就有可能温度过高而造成制动效果减弱。由热力学模型可知:制动时产生的热 Q 跟摩擦力及制动时间相关,可由公式表示:

$$Q = F \cdot v \cdot t = F \cdot d$$

以计算其能耗。所以,在对制动性能进行评价时需考虑

制动系统热管理能力及稳定性等因素,才能保证系统在长期,高负荷的运行中仍能有效地发挥作用。从物理学角度出发建立制动性能分析模型,可为制动系统设计与优化提供理论依据并有助于工程师对制动系统各种工况下性能进行预测,并通过调整设计参数(例如制动器的材质,摩擦系数)来优化制动效果。

2.2.2 数值模拟与仿真评估方法

数值模拟一般是在列车动力学和热力学模型的基础上,利用计算机程序对制动过程力学行为,热效应及摩擦变化等诸多因素进行仿真,从而对制动系统整体性能进行评价。具体运用时,数值模拟必须先建立列车运动学与动力学模型。典型列车动力学模型综合考虑列车质量,车速,制动力矩,轨道条件和制动器摩擦特性。例如,在模拟一个重载列车从 100 km/h 降至静止的过程中,假定列车的总质量是 4000 吨,并采用了传统的空气制动和电力制动相结合的系统。通过模拟,可获得列车不同制动阶段速度,加速度,制动距离的相关数据。在最理想的情况下,这趟列车的制动距离大概是 800 米,但在复杂的地形和高负荷的环境中,制动距离可能会增加 15%-20%。当制动时间较长或制动操作高度频繁时,制动器与制动盘之间由于摩擦而发热较多,这就可能造成制动效能降低。利用热力学模型、数值仿真可对制动器温度变化进行预测,并在此基础上评价制动器热稳定性。例如,在高速重载列车的制动过程中,制动器的温度可能会迅速升高,若超过一定温度阈值(如 500°C),可能导致制动效果下降或设备损坏。

3.重载列车制动系统的优化策略

3.1 优化目标与方向

优化目标一般有缩短制动距离,缩短制动时间,提高制动效率,加强系统热稳定性与可靠性等。在高负荷,高速及复杂环境工况下重载列车制动性能显得尤为重要,因为制动出现任何故障或者不及时均会造成严重安全事故。所以优化的目标一是要保证制动系统能在各种运行条件下,特别是陡坡,远距离下坡和繁忙的运输线路上迅速平稳的停车。一方面优化方向要着眼于提高制动系统响应速度与制动效率。比如增强制动器摩擦性能就是其中一个重点优化方向。采用新型摩擦材料(例如复合材料或者陶瓷材料等)可以显著提高制动器的摩擦系数,从而缩短制动距离。例如,利用高性能的复合材料制成的制动片,可以使制动系统的工作效率增加 15%-20%,而在紧急状况下,制动的距离可能缩短 20%-30%。优化的方向还应包括减少制动系统的能量损失,特别是在频繁的制动操作中,可以通过回收制动能量(如利用电力制动、再生制动等技术)来提高整体能效,减少能源消耗。重载列车高负荷制动过程中,制动器等制动系统的零件可能出现过热现象,从而使制动效果减弱。提升制动系统

的散热能力、优化散热结构（例如，使用液冷系统，增强空气流通）可以有效避免过热现象，确保制动效能长期稳定。

3.2 硬件优化策略

传统制动器一般都是由金属材料制成，但是高负荷高速时金属材料摩擦系数大，耐磨性不一定满足需要。所以使用先进复合材料或者陶瓷材料能显著改善制动器摩擦性能及耐久性。例如，使用碳化硅或碳化硼等陶瓷材料制作的制动片，与传统的金属制动片相比，其摩擦系数可以提高大约 20%–30%，同时其耐高温性能也得到了显著的增强，这有助于有效避免高温导致的制动失效问题。重载列车长时段、高频度制动时，制动器与制动盘之间由于摩擦而发热严重，温度过高将使制动效能衰减。研究发现，当制动系统的温度上升 10°C 时，其制动效能会减少大约 5%–10%。对此，利用液冷或者气冷系统来冷却制动器就成为了重要优化策略。通过改进散热管道的设计、扩大散热区域以及采用高导热性的材料，我们能够使制动器的工作温度下降 15%–20%，从而显著增强制动系统在高负荷状态下的稳定性和安全性。制动系统中各控制部件，例如传感器、阀门和控制单元，其性能的改善在硬件优化中同样具有重要意义。采用先进传感器技术对制动器状态、温度和压力进行实时监控，可实现制动系统动态调节以避免制动过度或制动力不足。

3.3 智能化优化策略

重载列车制动系统智能化优化策略的目标是通过综合运用现代传感器技术、数据分析及智能控制系统等技术，增强制动系统实时响应能力，适应性及安全性。随物联网（IoT）、大数据分析以及人工智能（AI）技术的进步，智能优化方法为传统制动系统带来了创新的优化策略。利用先进传感器网络综合监测列车运行状态是实现智能化优化的根本。例如，通过安装如车速传感器、载重传感器、轨道状态传感器和温度传感器等设备，我们能够实时获取列车的各种运行数据，例如车速和制动压力、温度和其他关键参数的数据可以作为制动决策的基础。当我们结合车辆的速度和载重数据进行智能调整时，制动的距离可以缩短 10%–15%，从而增强制动系统的总体效能。智能控制系统对实时数据进行分析 and 处理可以实现制动策略的动态优化。例如，在复杂的

地形条件下（如下坡、弯道等），智能系统可以自动调整制动力的分配，根据列车的具体状况和环境变化，实现个性化的制动控制。在下坡路段时，该系统根据列车运行速度、坡度等因素自动调节空气制动与电力制动所占比重，从而避免了传统控制方式下制动过多或者制动不足等问题。研究发现，智能控制系统可以使重载列车在复杂的路况下的制动效率提升 20%–30%，并且可以延长制动器的使用寿命。智能化优化也可以有效地实现制动能量回收。利用再生制动技术使智能系统能够把制动时产生的动能转换成电能回馈给电网或者储能装置，降低能源浪费，提高能效。根据数据分析，使用再生制动系统的重载列车在长距离行驶时能够回收大约 10%–15% 的能源，这显著减少了其能源使用和运营的总成本。

3.4 系统优化策略

系统优化策略以通过仔细分析当前制动系统中各环节找出性能瓶颈，有针对性地加以改进为中心目标。首先对制动系统硬件进行了优化设计，使用高强度和耐磨损材料以提高制动装置使用寿命和降低部件老化导致失效。对制动系统控制逻辑进行了优化，使用了更先进的电子控制技术对制动力分配进行精确调整，以保证各种工况制动性能达到最优。另外，引入智能化技术是系统优化中的重要方向，通过大数据分析和人工智能算法对列车运行状态进行实时监测，对可能存在的安全隐患进行预测，并对制动策略进行自动调整，以提高整体反应速度和精度。

结论：

重载列车制动系统对于保障行车安全具有重要意义，对其进行性能评估可辨识出系统可能存在的问题并提供优化依据。采用硬件升级，智能化控制及系统优化的策略可有效增强制动系统运行的稳定性，可靠性及响应速度，减少事故发生风险并提高行车安全性。今后，在智能技术深入发展的背景下，制动系统性能也会不断优化，从而为重载列车安全行驶提供更加强大的保障。

参考文献

- [1]向活跃,王一少,蔡佩宏,等.竖向涡激振动对大跨度城市轨道专用桥行车性能的影响研究[J].振动与冲击,2024,43(24):251–258.
- [2]彭凯雄.地铁列车司机对食品营养功效的需求分析[J].江苏调味副食品,2024,(03):38–41.
- [3]陈亮,郑伟.面向铁路行车调度员疲劳识别的动作检测[J].安全与环境学报,2024,24(06):2286–2294.
- [4]龙玉琴,王小刚,何剑.动态检测技术在列车安全上的应用研究[J].内燃机与配件,2023,(08):58–60.
- [5]李德峰.加格达奇—古莲高寒困难区段旅客列车行车安全保障研究[J].哈尔滨铁道科技,2023,(01):24–27.

作者简介：王成，男，汉族，1993.5.17，陕西省榆林市，大学本科，助理工程师。

male, Han ethnicity, born May 17, 1993, from Yulin City, Shaanxi Province, holds a bachelor's degree and is an assistant engineer.