

重载列车制动系统自适应减压控制研究与应用

韦顺健¹ 赵成² 曾凡军¹

1. 中车株洲电力机车有限公司, 中国·湖南 株洲 412000

2. 中车制动系统有限公司株洲分公司, 中国·湖南 株洲 412000

摘要: 随着中国重载铁路运量的持续增长, 朔黄、大秦等重载铁路干线列车编组长度已突破 4km, 牵引质量达到 3 万吨级, 对列车制动性能要求也愈来愈高。在长大下坡道循环制动工况下, 制动系统充风时长不足且同时中继阀存在迟滞效应, 会造成循环初制动减压量不足、累计减压量误差扩大, 影响重载列车运行的安全性与平稳性。针对此问题, 论文提出一种修正均衡目标压力值的自适应减压控制方法, 并对优化前后的机车试验数据进行对比分析, 结果表明该方法可有效提升初制动减压量控制的精准性与稳定性。

关键词: 重载列车; 缓解迟滞; DK-2 型制动机; 自适应减压控制

Research and Application of Adaptive Decompression Control for Braking System of Heavy Haul Train

Shunjian Wei¹ Cheng Zhao² Fanjun Zeng¹

1. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan, 412000, China

2. CRRC Brake System Co., Ltd. Zhuzhou Branch, Zhuzhou, Hunan, 412000, China

Abstract: With the continuous growth of heavy-haul railway volume in China, the train marshalling length of Shuohuang, Daqin and other heavy-haul railway trunk lines has exceeded 4km, the traction quality has reached 30,000 tons, and the requirements for train braking performance are becoming higher and higher. Under the cyclic braking condition of the long downhill lane, the relay valve of the air braking system has hysteresis effect, which will cause the insufficient decompression of the initial brake and the expansion of the cumulative decompression error, and affect the stability and safety of the heavy duty train operation. For this problem, this paper proposes an adaptive decompression control method to correct the equilibrium target pressure value, and compared analyzes the locomotive test data before and after optimization. The results show that this method can effectively improve the accuracy and stability of the braking system.

Keywords: heavy-duty train; relieve lag; DK-2 type brake; adaptive pressure reduction control

0 前言

中国重载铁路运输通道广泛安全开行万吨重载列车, 有效推动国民经济强有力持续发展, 也标志着中国重载铁路建设及技术装备创新发展跨入世界重载铁路先进行列^[1]。随着重载铁路运量的持续增长, 目前朔黄、大秦等重载铁路干线列车编组长度已突破 4km, 牵引质量达到 3 万吨级, 重载列车操纵安全重要性日益凸显。在长大下坡道循环制动工况下, 由于制动系统充风时长不足且同时中继阀存在迟滞效应, 会造成初制动减压量偏小的问题, 影响重载列车运行的安全性与平稳性。据统计, 某重载铁路干线列车 (HXD1 型电力机车+C80 货车) 在长大下坡道循环制动工况下, 初制动减压量不足率达 50%。因此, 研究一种精准、高效的减压补偿控制方法十分必要。论文基于某重载铁路列车实际运用需求进行研究与验证, 提出了一种修正均衡目标压力值的自适应减压控制方法, 并对优化前后的列车试验数据进行对比分析, 结果表明该方法可有效提升初制动列车管减压量的

精准性与稳定性。

1 初制动减压量偏小问题分析

现有电力机车基本上是通过制动系统微机控制机车均衡管压, 通过中继阀间接控制列车管压力变化, 实现对全列车的制动与缓解, 如目前 HXD1 型机车上广泛使用的 DK-2 型机车制动机, 其控制原理框图如图 1 所示。制动控制单元通过接收制动控制器闸位信号, 设定均衡风缸目标压力值, 比较目标值与压力传感器反馈的均衡风缸实时压力值, 精确控制均衡风缸压力。中继阀根据均衡风缸的压力变化来控制列车管的压力变化, 从而完成列车的制动、保压和缓解^[2]。

其中, 中继阀是控制列车管压力变化的核心部件, 由于机械摩擦、气体流动阻力、膜板复位延迟等因素, 中继阀在动作 (制动) 与缓解 (充风) 过程中会产生迟滞效应 (中继阀迟滞值 = 均衡风缸压力 - 列车管实际压力, 一般为 0~10kPa), 造成初制动减压量不足、累计减压量误差扩大

的问题，从而增大列车的纵向冲动力并增加司机的操纵难度，影响列车运行的安全性^[9]。

为了减小中继阀迟滞效应对列车管压力变化的影响，通常采用中继阀固定迟滞值（通常取最大迟滞值的中值）对均衡目标压力值进行补偿，以减小列车管实际压力与设定目标压力的偏差。但在长大下坡道工况下，重载列车需频繁进

行循环制动来控制车速，由于两次初制动间隔时间较短，列车管充风时长不足，车辆未完全充满风，会导致中继阀缓解迟滞偏大，最终导致循环制动时列车管减压量偏小的问题。

因此，研究一种更精准的减压控制方法，以解决循环制动时列车初制动减压量偏小的技术难题，对提升制动系统列车管压力控制的精准性、稳定性具有关键作用。

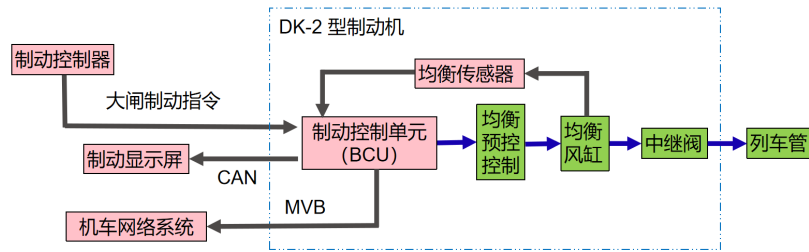


图 1 机车列车管压力控制原理图

2 自适应减压控制方法

自适应减压控制方法的核心目标是动态补偿中继阀的缓解迟滞效应，确保在不同制动工况下的减压精度。控制框架采用“状态感知—动态补偿—闭环调节”的三级架构，流程图如图 2 所示。

2.1 压力状态感知

通过均衡风缸压力传感器、列车管压力传感器，实时获取制动系统关键节点压力信号。实施初制动时，制动控制器进入制动位的第一时刻，获取此刻的均衡风缸压力 (P_{er}) 及列车管压力 (P_{bp})，每次制动缓解后 P_{er}/P_{bp} 都复位，再次实施初制动都重新获取 P_{er}/P_{bp} 。

2.2 迟滞补偿计算

基于实时获取的压力信号计算动态缓解迟滞值：

$$\Delta P_{hys} = P_{er} - P_{bp}$$

每次制动缓解后缓解迟滞值 (ΔP_{hys}) 都复位，再次实施初制动都重新获取 (ΔP_{hys})。

2.3 动态目标生成

基于动态缓解迟滞值进行减压补偿，设定自适应的均

衡目标压力：

$$P_{target} = P_{er} - 54 - \Delta P_{hys}$$

式中，54kPa 为基准减压量。

3 试验验证与数据分析

3.1 试验验证方案

随机选取 1 列万吨编组列车（编组形式：HXD1 型机车 +108 辆 C80 货车），模拟列车管压力偏大或偏小（列车管压力偏离 $600 \pm 5kPa$ ）的异常制动工况，进行列车静态初制动减压试验，并下载机车的 BCU 数据，对优化前后的初制动减压量数据进行对比分析。

随机选取 4 列万吨编组列车（编组形式：HXD1 型机车 +108 辆 C80 货车），在某重载铁路干线某区段进行循环制动工况下的运行试验，每列车在制动控制单元更新自适应减压控制程序前后各运行一趟，并下载 4 台机车的 BCU 数据，对优化前后的初制动减压量数据进行对比分析。

3.2 试验数据分析

具体试验数据如表 1、表 2、图 3、表 3 所示。

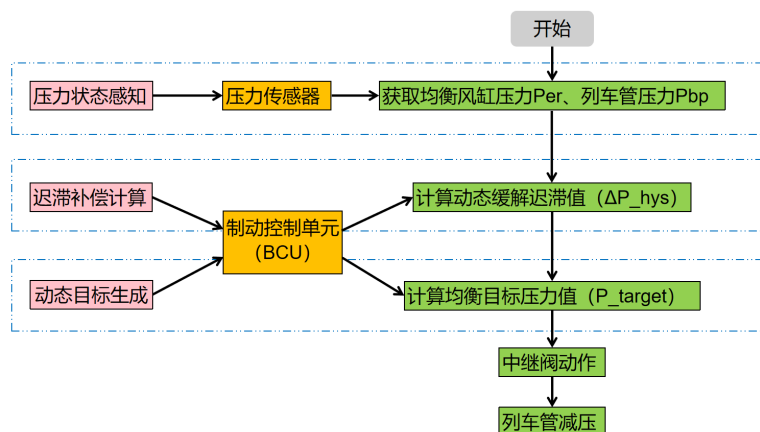


图 2 自适应减压控制方法流程图

表 1 机车优化前静态试验数据

组别	均衡压力 (kPa)	列车管压力 (kPa)	均衡压力 (kPa)	列车管压力 (kPa)	初减压量 (kPa)
1	597	591	542	547	44
2	597	590	542	547	43
3	601	607	546	551	56
4	601	610	546	551	59

表 2 机车优化后静态试验数据

组别	均衡压力 (kPa)	列车管压力 (kPa)	均衡压力 (kPa)	列车管压力 (kPa)	初减压量 (kPa)
1	597	591	535	541	50
2	597	590	536	541	49
3	601	607	553	558	49
4	601	610	554	559	51

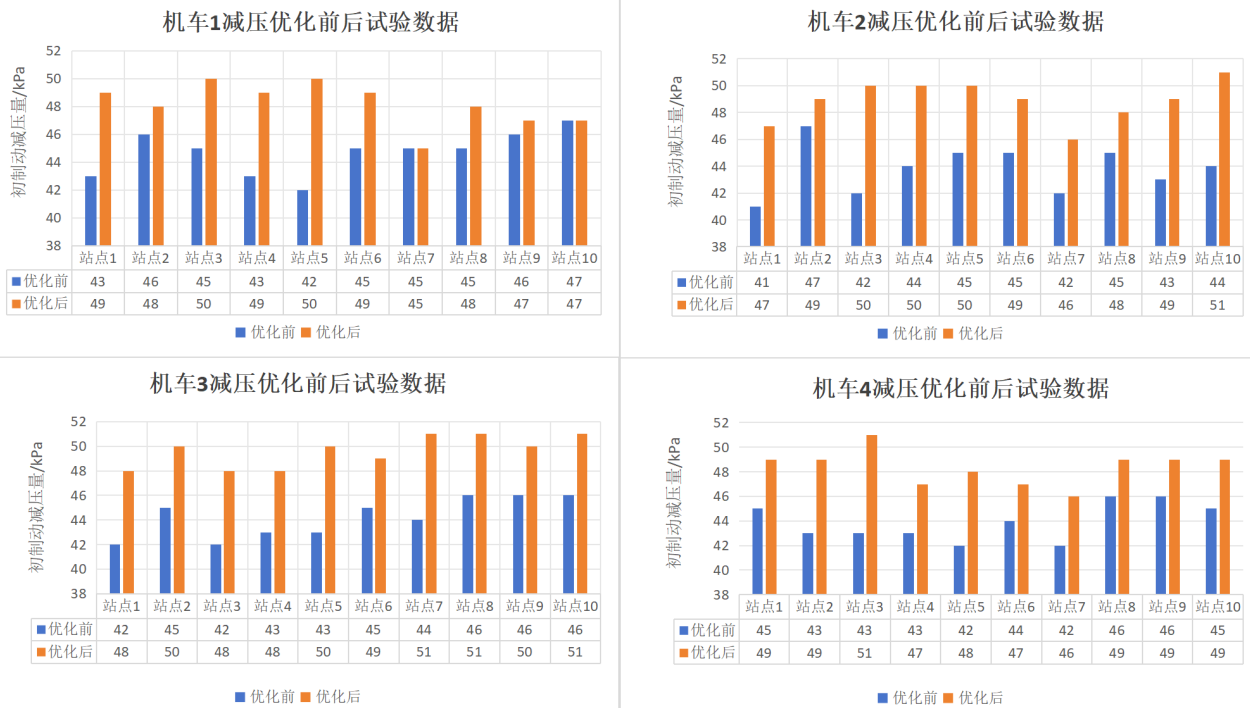


图 3 机车减压优化前后运行试验数据

表 3 机车优化前后制动性能指标对比

指标	优化前	优化后	提升率
初制动达标率 (4 台机车平均值)	50%	100%	100%
最大、最小减压量偏差 (4 台机车平均值)	5.75kPa	4.25kPa	26%

通过对上述列车静态、动态试验 BCU 数据的分析, 采用自适应减压控制方法后取得了以下显著效果:

①在列车管压力偏大或偏小的异常制动工况下, 减压控制程序优化后, 初制动加压力仍能保持在 $50 \pm 5\text{kPa}$ 的标准要求范围内, 说明自适应减压控制方法相较于中继阀固定迟滞值补偿方法, 更适用于重载列车在复杂工况下的精准制动控制。

②初制动减压量增大。减压控制程序优化后, 在循环制动工况下, 初制动减压量较优化前有所增大, 最小减压

46kPa, 最大减压量 51kPa, 均满足初制位列车管减压的标准 ($50 \pm 5\text{kPa}$), 说明自适应减压控制方法有效解决了因循环制动工况下初制动间隔时间较短, 列车管未完全充满风, 中继阀缓解迟滞造成的减压量偏小的问题, 制动系统响应更加灵敏, 实现了对列车管的精准减压, 提升了机车操作的平稳性。

③减压量偏差减小。循环制动区段的减量偏差值较程序优化前有所减小, 平均偏差由 5.75kPa 下降 4.25kPa, 说明制动控制的精度提高, 制动过程更加稳定。同时, 根据司

机运用反馈,程序优化后列车在循环制动过程中的控速能力显著增强,有效降低了列车操纵难度,提升了运行安全性。

4 结语

论文结合某重载列车实际运用需求,对初制动减压量控制方法进行优化研究,通过试验机车在循环制动工况下优化前后的BCU数据进行对比分析,验证了基于实时补偿缓解中继阀迟滞的自适应减压控制方法,在提升制动系统的精准性和稳定性方面具有显著效果,有效解决了初制动减压量偏小的技术难题,为解决重载列车循环空气制动减压量小的问题,提供了关键技术支撑,对重载列车技术升级和运行安全保障具有积极推动作用。

重载列车制动性能受多方面的因素的影响,不同载重编组形式对制动控制策略要求也不同,本文基于万吨编组重载列车的试验数据进行验证分析,试验成果较为单一,未来

可往2万吨、3万吨编组列车及减压量与车钩受力关联关系方向深入研究,对不同载重编组列车运用工况下的机车减压量迟滞值进行优化,为自适应减压控制方法的普适性提供更多的技术理论支撑。

参考文献:

- [1] 段蕴桔,李樱灿,游艳雯.铁路货物运输发展趋势及对策研究[J].铁道货运,2019,37(12):19-23.
- [2] 付衡,方强.DK-2制动系统介绍[J].技术与市场,2018,25(12):50-53.
- [3] 李巧银,林小杰,谢磊,等.小减压量下制动力差异对重载列车纵向力影响研究[J].铁道车辆,2024,62(5):164-168.

作者简介:韦顺健(1997-),男,壮族,中国广西南宁人,本科,助理工程师,从事电力机车系统集成设计研究。