

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.049

朔黄铁路重载列车电控空气制动试验研究

王蒙¹, 廖小康², 易彩², 张兵²

(1. 国能铁路装备有限责任公司, 北京 100011; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 重载列车的制动技术是重载运输发展的关键。针对国内朔黄铁路, 对重载列车电控空气制动系统进行试验研究, 比较分析有无电控空气制动系统作用下列车制动系统的性能指标。实验结果显示: 电控空气制动系统性能指标达到设计要求, 在缓解车钩作用力、同步列车管及制动缸压力和缩短制动距离等方面具有明显的优势, 该电控空气制动系统能够保证重载长、大列车运行的安全性。

关键词: 重载列车; 电控空气制动系统; 试验研究; 性能指标

中图分类号: U296 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)01-0243-07

Experimental Study on Electronically Controlled Air Braking System of Heavy-haul Combined Train on Shuozhou-Huanghua Railway

WANG Meng¹, LIAO Xiaokang², YI Cai², ZHANG Bing²

(1. Guoneng Railway Equipment Co., Ltd., Beijing 100011, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The braking technology of long and heavy haul trains is crucial in the development of heavy-haul transportation. Based on the technical platform of Shuozhou-Huanghua Railway and rolling stock, makes an experimental research on the electronically controlled air braking system of heavy haul train. The performance indexes of train braking system with and without electric control air braking system are analyzed through comparative data. The research results show that the performance index of the electronically controlled air braking system meets the design requirements. The system has obvious advantages in relieving coupler force, synchronizing train pipe and brake cylinder pressure and shortening braking distance. The electric control air braking system can ensure the safe operation of long and heavy haul trains.

Keywords: heavy-haul trains; electronically controlled air braking system; experimental research; performance index

0 引言

重载铁路运输有许多优点, 如: 运输能力强、效率高、货物运输费用低廉和环保等, 是现代以及未来货物运输的主力。重载运输是作为铁路现代化的另一个标志, 也是铁路发展的一个重要途径^[1]。同世界其他重载运输国家一样, 重载长、大列车运输也成为我国铁路货运发展的方向。随着铁路运输要求的不断提高, 对重载长、大列车的运载能力要求也越来越高, 而重载长、大列车安全可靠运行并保障其运载能力的主要因素之一就是列车的制动性能。制动系统是列车的重要组成部分, 是列车能否正常运行的关键, 也是当前铁路运输发展需要解决的重要难题^[2]。

重载列车由分散的多机车和多车辆编组而成, 所涉及的控制系统和组件较多, 且运行工况复

杂多变。重载列车的电控空气制动 ECP (electronically controlled pneumatic) 系统作为保证重载组合列车安全运行的重要技术, 能借助列车网络通信系统, 实现所有车辆的同步制动与缓解, 有着比传统空气制动系统更卓越的性能^[3]。ECP 制动系统克服了传统空气制动系统的许多固有限制, 通过电子指令传输制动信号、连续的列车管充风和再生制动能力, 实现车辆、机车同步制动与缓解, 同时改善了列车制动和缓解过程中纵向冲击的问题, 减小动力消耗、车轮踏面消耗和闸瓦消耗, 降低维护成本并能对每个车辆的制动力进行监控、诊断, 使列车获得更好的运行操控性能, 特别适用于编组超长的重载列车, 在重载货运列车上展现了极高的应用前景。

传统列车的空气制动系统存在一定的缺陷, 如: 列车制动、缓解存在延迟, 会使列车车辆之间

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2019M663899XB); 牵引动力国家重点实验室研究基金项目(2020TPL-T14)

第一作者简介: 王蒙(1990—), 女, 内蒙古鄂尔多斯人, 硕士, 研究方向为铁路机车车辆, lxlkxsh1218@163.com。

产生较大的纵向冲动作用力,这会导致列车的安全性不能被保证,而国外 ECP 系统发展较早并得到了广泛应用^[4]。近些年,我国针对 ECP 系统也进行了大量研究,文献[5-6]对各种制动工况下的 ECP 系统性能进行了试验分析;文献[7]采用列车空气制动与纵向动力学进行联合仿真,对朔黄铁路 2 万 t 重载组合列车纵向动力学性能进行研究,分析了 ECP 系统作用下的列车纵向车钩力;文献[8-9]在 ECP 系统仿真模型的基础上,对各种制动工况下的 ECP 系统性能进行了计算分析。本试验目的是验证重载长、大列车无线 ECP 系统的制动性能,判别无线 ECP 系统的性能指标是否达到设计要求,该研究对今后重载列车装备电控空气制动系统及开行重载列车具有指导意义。

1 试验方案

1.1 试验线路区间

列车制动系统中的列车调速和停车等操纵是保障列车正常安全运行的重要操作,其中,长、大下坡道的制动调速最为关键,故本试验需要在具备长、大下坡道的线路区段进行试验探究。万吨重载列车线路运行试验的试验区间选在朔黄线。综合朔黄线各方面情况,整个测试区间起于神池南止于黄骅港,相关参数如表 1 所示。其中试验线路特点为:自西向东海拔落差 1 500 m,有近 170 km 山区铁路,曲线多。

表 1 试验线路参数

试验参数	数值
正线全长/km	589
重车方向限制坡度/‰	4
空车方向限制坡度/‰	12
最小曲线半径/m	400

1.2 试验机车车辆

试验车辆采用 C80 双浴盆式铝合金运煤专用敞车,如图 1 所示。牵引机车采用基于 LTE-R 无线通信传输技术的同步操控系统,编组方式为“1 台交流机车+108 辆 C80 货车”。列车制动装置采用 120-1 型控制阀、203 mm×254 mm 整体旋压密封式制动缸、ST2-250 型双向闸瓦间隙自动调整器、KZW-A 型无级空重车自动调整装置和高磨合成闸瓦,满足主列车管压力 500 kPa 和 600 kPa 要求。由于列车编组较长,各车辆空气制动、缓解时的同步性会有较大的不同,列车制动力存在较

大差异。当采用 ECP 系统时,系统通电;当不采用 ECP 系统时,只需将 ECP 系统断电,列车制动系统则转换为传统的空气制动系统工作方式。



图 1 C80 运煤专用敞车

1.3 数据采集系统

本试验选用某型号压力传感器 PTX5072-TC,用于测量列车管、制动缸和副风缸的压力,采用 KFW-5-120-D16 型应变片测量车钩左右接触面的受力。为了确保主控制器可以在车上对任意位置进行各个测点的数据采集、对时、参数设置和特征数据接收等操作,将所有测点传感器与无线采集器相连,并利用网络传输速率为 250 kB/s 的 ZigBee 网络进行数据传输。数据采集系统及传感器安装位置如图 2 所示。

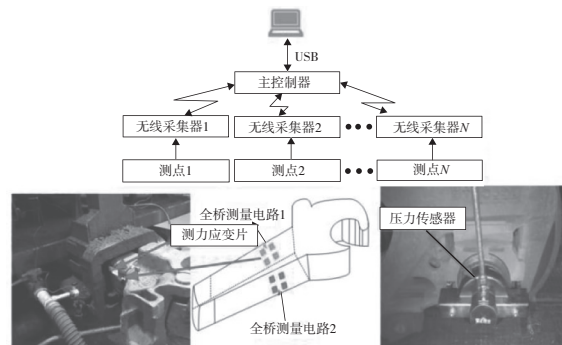


图 2 数据采集系统及传感器安装位置

1.4 测试工况及内容

为研究 ECP 系统对重载列车制动性能的影响,根据重载列车的操纵特点,结合试验线路条件,在开启和关闭 ECP 两种控制条件下对重车常用制动及空车停车制动进行试验对比分析。重车工况为公里标 7.9 处的试验,空车工况为公里标 383 处的试验,具体测试工况如表 2 所示。

采用万吨重载列车空气制动系统静置试验以及线路运行试验的方法,结合上述工况对加装无线 ECP 的万吨列车纵向冲动和制动距离进行分析测试。

表 2 测试工况

工况	ECP	公里标		速度变化/(km/h) (减压 50 kPa)
		起始	结束	
重车	□	7.972	8.984	60→40
重车	■	7.900	9.524	60→44
空车	□	383.061	381.261	70→0
空车	■	383.365	381.765	70→0

注:□—ECP 关,■—ECP 开。

2 静置试验结果分析

相比于传统的空气制动系统,由于结构原理、作用方式的不同,ECP 电控制动系统具有缓解车钩作用力、同步列车管及制动缸压力和缩短制动距离等优点。

2.1 制动波速分析

在试验地点进行压力测试,制动试验结果如表 3 和表 4 所示。由表中数据可以发现,与无 ECP 系统工况相比,存在 ECP 系统下的制动时间差明显缩短,制动波速明显增加,加快了近 5 倍。

表 3 开 ECP 系统时静态制动试验数据统计

试验项	制动时间差/s	制动波速/(m/s)
初制动	1.343	1 074.78
全制动	1.216	1 187.03
循环制动	1.255	1 150.14
追加制动	1.039	1 389.25
初制动缓解	1.100	1 312.21

表 4 关 ECP 系统时静态制动试验数据统计

试验项	制动时间差/s	制动波速/(m/s)
常用制动	7.51	192.20
循环制动	7.01	205.91
追加制动	7.97	181.11
初制动缓解	7.90	182.71

图 3、图 4 为有无 ECP 控制作用下制动缸压力变化曲线图。由图 3 和图 4 可以看出,在 ECP 控制下第 1 辆和第 107 辆车的制动时间差明显缩短,这说明 ECP 系统可以有效对车辆进行制动,以免发生安全事故。

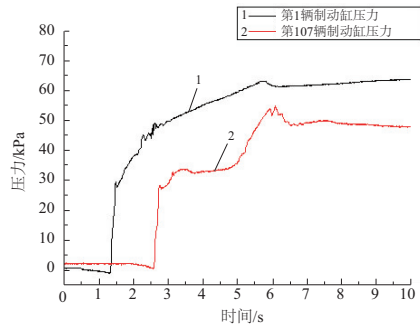


图 3 有 ECP 控制作用下制动缸压力变化曲线图

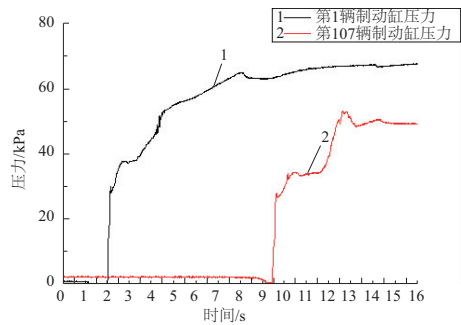


图 4 无 ECP 控制作用下制动缸压力变化曲线图

2.2 列车制动性能试验

接下来对制动系统泄漏、改变制动减压量等工况的列车制动性能进行试验。在进行列车制动系统泄漏试验时,对列车充风,当列车管达到规定压力后减压 100 kPa,之后稳定 1 min,如图 5 所示。从图中可以看到在 1 min 内,列车管压力下降值最多达到了 40 kPa 左右。

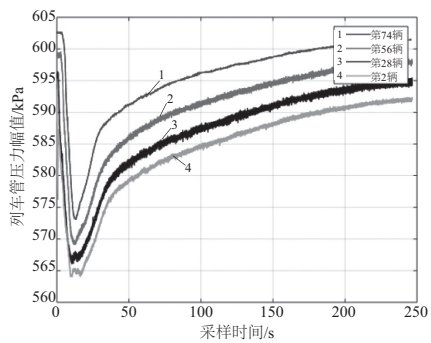


图 5 列车制动系统泄漏下列车管压力变化

在进行常规制动时,对列车充风,当列车管达到规定压力后实施规定减压量的常用制动。图 6 和图 7 给出了减压量为 50 kPa 和 170 kPa 下各断面制动监测参数的全部变化过程。

在进行保压时,机车制动机开通补气位,减压 100 kPa 后开始进行保压。由于现场试验条件协

调的关系,进行了一次短时间的保压然后再进行缓解。最终各断面制动监测参数的全部变化过程如图 8 所示。

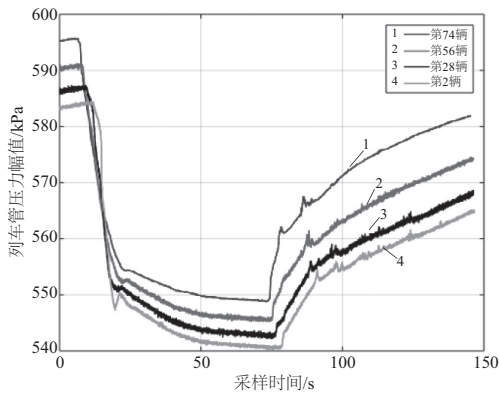


图 6 常用制动减压量为 50 kPa 下列车管压力变化

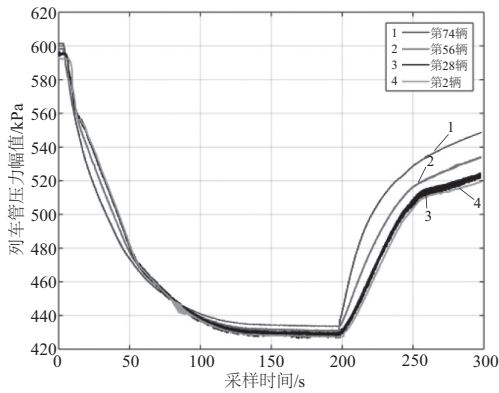


图 7 常用制动减压量为 170 kPa 下列车管压力变化

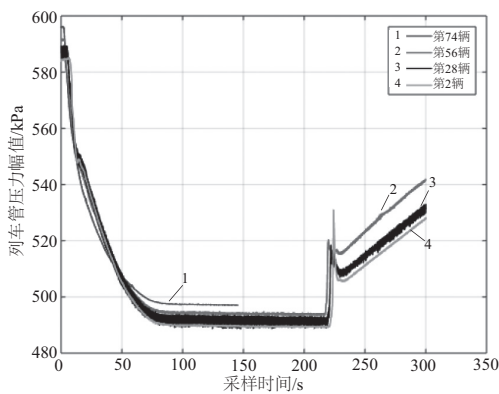


图 8 保压情况下列车管压力变化

在进行紧急制动时,首先对列车充风,当列车管达到规定压力后开始实施紧急制动,待制动缸压力稳定后再充风至列车管达到规定压力。最终各断面制动监测参数的全部变化过程如图 9 所示。由图 9 可以看出,在实施紧急制动时,列车管

压力急剧下降至 0,待制动缸压力稳定后,列车管压力又慢慢恢复至规定的水平。

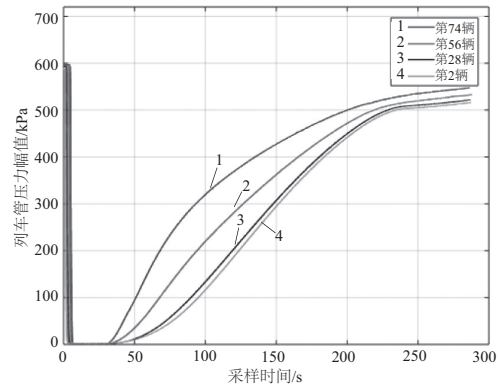


图 9 紧急制动下列车管压力变化

在进行循环制动时,对列车充风,列车管达到规定压力后减压 50 kPa 并进行短时间内的保压,然后再缓慢充风,循环实施常规制动。最终各断面制动监测参数的全部变化过程如图 10 所示。由图 10 可以看出,在实施循环制动时,列车管压力出现了明显下降和上升的循环趋势,列车管的循环变化趋势满足列车循环制动试验的要求。

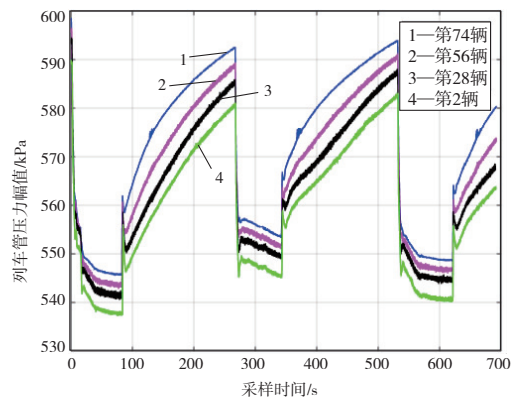


图 10 循环制动下列车管压力变化

3 动态试验结果分析

3.1 有无 ECP 控制作用下的车钩力

列车在停车制动或调速制动时,开始一段时间前后车辆间的制动力不一致,前部车辆制动力较大而明显减速,后部车辆制动力较小而减速不明显,后部车辆在惯性力作用下涌向前方,进而产生列车的纵向冲动,从而易造成车钩的疲劳断裂。有无 ECP 控制作用下重车和空车各测点车钩力随时间的变化曲线如图 11 所示,重车和空车各测点车钩力最大值如表 5 所示。

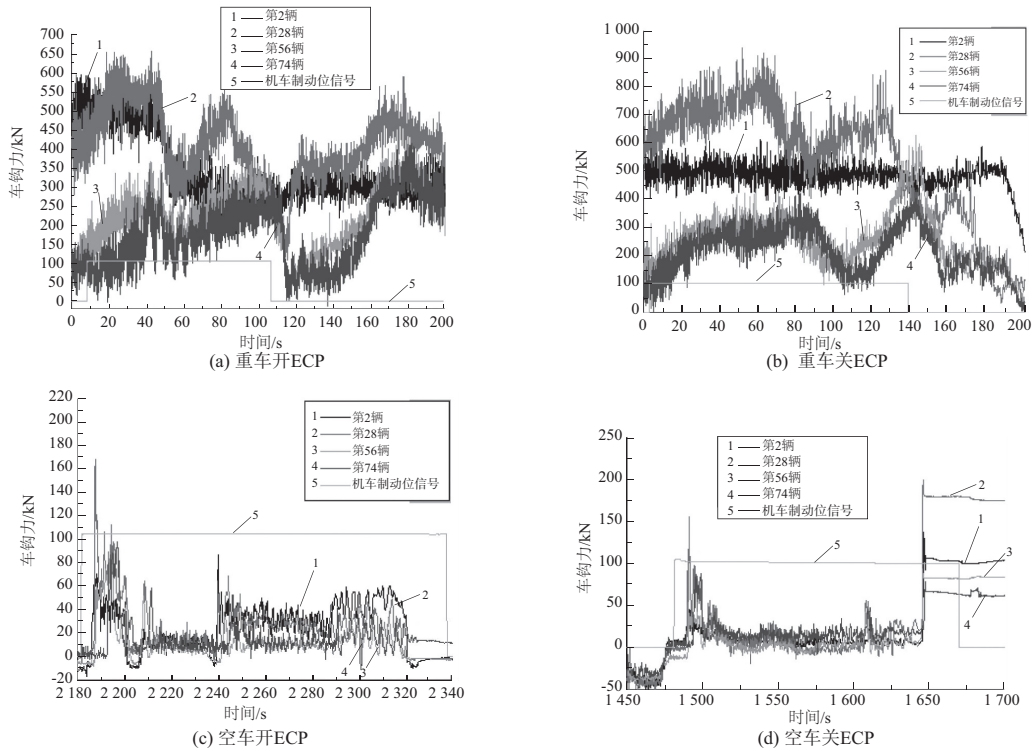


图 11 有无 ECP 控制作用下重车和空车各测点车钩力

表 5 重车/空车各测点车钩力最大值 单位:kN

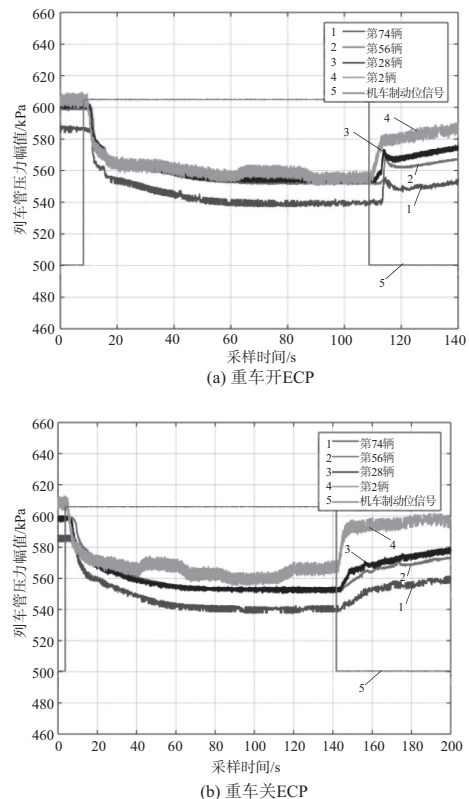
车辆位置	车钩力(重力/空车)	
	有 ECP	无 ECP
第 2 辆	594/71	726/138
第 28 辆	656/171	945/208
第 56 辆	412/85	575/94
第 74 辆	420/97	559/107

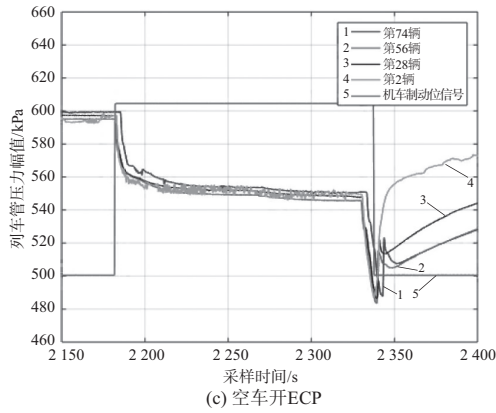
从图 11 和表 5 中可知,ECP 制动系统作用下的列车纵向车钩力要明显低于普通空气制动作用下的列车纵向车钩力,ECP 制动系统的纵向动力学性能指标均优于空气制动。第 28 辆车测点处车钩作用力最大,是受力较为复杂的部位,在自身动力和车辆动能作用下,不断承受前后车辆拉拽、挤压作用,产生涌动的可能性最大,钩缓装置也最容易受压失稳和疲劳伤损。

3.2 有无 ECP 控制作用下的列车管压力

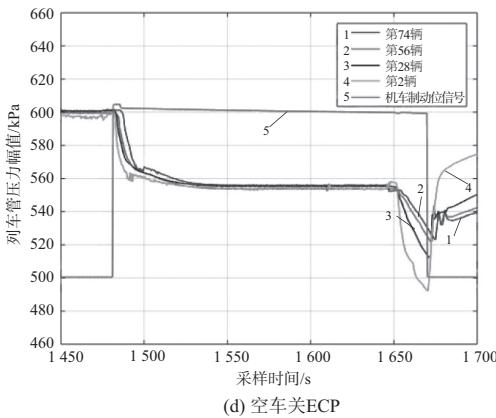
图 12 为有无 ECP 控制作用下重车和空车制动时各车列车管压力。从图 12 中可以看出,在列车制动位信号结束时,第 2 辆车的列车管压力响应最快并且响应幅度最大。在 ECP 开启的情况下,其他 3 辆车的列车管压力也尽快地达到了与第 2 辆车相一致的压力变化幅度。而在 ECP 关闭的情况下,其他 3 辆车的列车管压力幅度变化较慢,并且完全达不到

第 2 辆车的压力变化幅度。这证明在 ECP 控制的加持下,首尾列车的列车管压力发生了较为接近的变化方式,表明采用 ECP 系统控制车辆制动时可以保证列车制动及缓解的同步性。



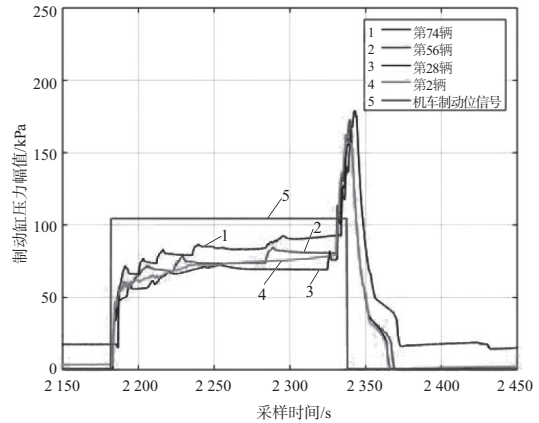


(c) 空车开ECP

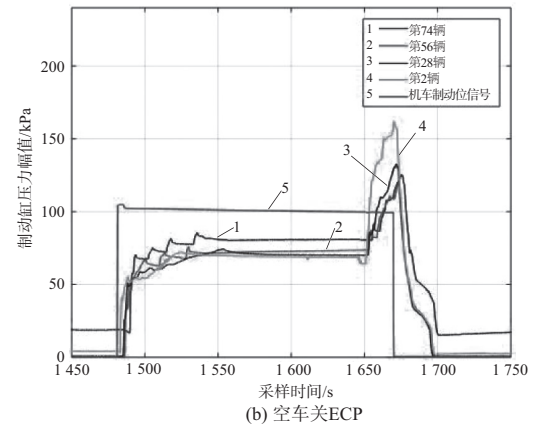


(d) 空车关ECP

图 12 有无 ECP 控制作用下重车和空车各车列车管压力



(a) 空车开ECP



(b) 空车关ECP

图 13 有无 ECP 控制作用下空车制动时各车制动缸压力

3.3 有无 ECP 控制作用下的制动缸压力

ECP 系统在实施制动时,各车辆制动控制装置能控制各车制动缸基本以同一速率升压,而系统空气制动受 120-1 型控制阀的特性决定,其升压时间较长,升压速率较慢。图 13 为有无 ECP 控制作用下空车制动时各车制动缸压力。从图 13 中可以看出,开启 ECP 时测试列车的制动缸压力变化十分同步,特别是在制动结束时,压力曲线呈现出同步下降的趋势。关闭 ECP 系统测试列车在制动结束时,第 2 辆车的制动缸压力变化非常灵敏,其他车制动缸压力变化呈现出明显的滞后现象。在无 ECP 控制的情况下,空车出现了制动缸压力变化不一致的情况,这证明相比传统空气制动系统,ECP 制动控制系统可以形成贯穿全列车的均匀制动力分配,不仅能够实现机车和车辆之间的制动指令传输,还可以进行双向数据交换,大大降低了列车的空走时间,降低了列车纵向冲动力。

4 结语

电控空气制动系统采用电信号传递制动指

令,传输时间短。相比于空气制动,电控空气制动系统有助于缓解车钩作用力,具有同步列车管及制动缸压力和缩短制动距离等优点。本文结论如下:

1) ECP 系统的制动/缓解具有较好的同步性,制动能力较强,其阶段缓解功能可以提高重载列车操纵的灵活性;

2) 相比传统纯空气制动,开启 ECP 控制后列车中的最大车辆纵向车钩力减小 17% 以上,满足“最大车辆纵向车钩力降低 15% (比纯空气制动)”的要求;

3) 试验验证了重载长、大列车无线 ECP 系统的制动性能,判定无线 ECP 系统的性能指标达到设计要求。

参考文献:

[1] 李和平,严霄惠.70 年来我国铁路机车车辆制动技术的发展历程[J].铁道机车车辆,2019,39(5):25-35.
 [2] 马大炜,王成国,张波.我国重载列车制动技术的研究[J].铁道车辆,2009,47(5):8-11,48.
 [3] 陈建德,李伯清.在重载列车上实现 ECP 的可行性探

- 讨[J]. 铁道机车车辆,2008,28(B12):228-230,257.
- [4] ROBERT C K,张蓉. ECP 制动在重载铁路上的运用[J]. 国外铁道车辆,2002,39(6):29-35.
- [5] 段明民. 30 t 轴重重载列车电控空气制动试验研究[J]. 铁道机车车辆,2020,40(4):34-38,79.
- [6] 林晖,钱立新. 重载列车有线电控空气制动系统的研究[J]. 中国铁道科学,2007(1):63-70.
- [7] 张益铭. 2 万 t 列车通过朔黄铁路长大坡道优化研究[D]. 大连:大连交通大学,2020.
- [8] 张波. 重载组合列车牵引及制动系统的试验与仿真研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2009.
- [9] 陆强. 重载列车 ECP 制动系统方案设计及仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.

收稿日期:2022-07-25

(上接第 227 页)

3.3 优化前后输出转矩对比分析

本文主要对气隙大小和永磁体内径进行了优化,得到了内置式盘式永磁电机优化前后的输出转矩和齿槽转矩,如表 4 所示。

表 4 内置式永磁电机优化前后对比

参数	优化前	优化后
气隙大小/mm	0.8	0.6
永磁体内径/mm	147.5	146.0
输出转矩/(Nm)	16.5	20.21

4 结语

本文建立了内置式盘式永磁电机的三维模型,推导出盘式永磁电机的转矩大小,通过与表贴式永磁电机输出转矩进行对比,内置式永磁电机输出转矩得到了提升;为了验证内置式盘式永磁电机运行的可行性,对其空载反电动势、气隙磁密、齿槽转矩进行仿真与分析;通过对电机的气隙大小及永磁体内径的优化,输出转矩得到了 22.5% 的提升。

参考文献:

- [1] 骆敏舟,方健,赵江海. 工业机器人的技术发展及其应用[J]. 机械制造与自动化,2015,44(1):1-4.
- [2] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报,2014,50(9):1-13.

- [3] 朱兴旺,黄开胜,吴帮超,等. 工业机器人用永磁同步电机的设计[J]. 微特电机,2018,46(3):14-17.
- [4] 李艳凯,郭振兴,张清艺,等. 轴向磁通与径向磁通永磁同步电机性能对比[J]. 微特电机,2021,49(12):8-13.
- [5] 胡土雄,胡弼,王伟,等. 高密度永磁同步电机永磁体失磁特征量分析[J]. 电气工程学报,2019,14(2):121-126.
- [6] 张文晶,徐衍亮,魏顺航,等. 软磁复合材料-Si 钢组合铁心轴向磁通永磁电机的结构设计与研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(13):4656-4665.
- [7] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997:312-314.
- [8] 魏续彪. 多盘式轴向磁通永磁电机研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [9] 王仲. 立体化仓库用永磁电机研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [10] 张文晶,徐衍亮,李树才. 新型盘式横向磁通永磁无刷电机的结构原理及设计优化[J]. 电工技术学报,2021,36(14):2979-2988.
- [11] 谢颖,李厚宇,蔡蔚,等. 发卡绕组双层内置式永磁同步电机设计与研究[J]. 电机与控制学报,2022,26(4):47-56.
- [12] 韩雪岩,张新刚,朱龙飞,等. 内置式多层磁钢永磁同步电机振动噪声抑制措施[J]. 电机与控制学报,2021,25(8):67-75.

收稿日期:2022-08-12