

# 有轨电车电子机械制动系统设计

骆凯, 杨磊, 吕艳宗, 高琳焜, 崔雷, 苗峰

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 山东 青岛 266031)

**摘要:**为应对轨道车辆制动系统向全电气化、智能化发展的新需求,对电子机械制动技术在轨道车辆上的应用展开研究。针对有轨电车车型构建了基于电子机械制动的整车制动系统架构,并完成电子机械制动系统样机的设计生产。提出基于卡尔曼滤波的融合力闭环控制方法,并通过搭建的综合性能试验台,对电子机械制动系统的功能和性能进行了地面试验。结果表明,系统能够自动精确补偿磨损间隙,具有快速响应能力、良好的稳态控制精度以及多机一致性。

**关键词:**轨道车辆;有轨电车;电子机械制动;卡尔曼滤波;性能试验

**中图分类号:**U270.35

**文献标志码:**A

## Design of Electromechanical Braking System for Tram

LUO Kai, YANG Lei, LÜ Yanzong, GAO Linkun, CUI Lei, MIAO Feng

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266031, China)

**Abstract:** To respond to the new requirements of the railway vehicle braking system for the fully electrified and intelligent development, this paper studied the application of electromechanical braking technology to railway vehicles. A complete vehicle braking system architecture based on electromechanical braking was constructed for the tram models and the prototype of the electromechanical braking system was designed and produced. A closed-loop control method of fusion force based on Kalman filter was proposed and a ground test of the function and performance of the electromechanical braking system was carried out by building a comprehensive performance test bed. The results show that the system can compensate for the wear gap automatically and accurately, and has the functions of rapid response capability, good steady-state control accuracy, and good multi-machine consistency performance.

**Key words:** rail vehicles; tram; electromechanical braking; Kalman filter; performance test

制动系统作为轨道交通车辆的核心关键系统之一,是列车安全运营的基本保障。在轨道车辆行业众多制动方式中,机械摩擦制动仍是广泛使用且最为安全的制动方式<sup>[1]</sup>,空气制动、液压制动系统作为现有的机械摩擦制动系统已发展多年,积累了成熟的技术方案并实现了广泛应用。随着工业控制技术的革新和轨道交通整体性能的不断提,对制动系统电气化、智能化的要求也不断提高。目前,轨道交通制动系统制动指令已经实现电气化转变,但在将制动指令转换为制动力的实现环节仍然无法摆脱对空气或液压介质的依赖,限制了制动系统的进一步发展。

电子机械制动(electromechanical braking, EMB)技术是一种利用电能直接驱动基础制动中的摩擦副产生摩擦力,从而使得运动减缓或停止的制动技术。该技术不仅使制动系统真正地实现全电气化,具备高集

收稿日期:2021-09-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1201700)

作者简介:骆凯(1993—),男,山东青岛人,工程师,硕士,主要从事电子机械制动系统研究。

苗峰(1990—),男,山东青岛人,工程师,硕士,主要从事轨道交通车辆核心系统研究,本文通信作者。

E-mail:miaofeng646@126.com

成、快响应、高精度的特点,也为制动系统的智能化控制及智能化维护提供了发展空间,成为新一代制动系统的发展方向,有替代轨道交通车辆空气、液压制动系统的趋势<sup>[2-4]</sup>。

在轨道交通行业,国内外科研人员针对电子机械制动技术进行了相关研究。德国 Raco 公司在 1979 年公布了世界上首例轨道车辆的 EMB 专利<sup>[5]</sup>。2002—2007 年之间,日本鹿儿岛市的 1000 型和长崎 3000 型低地板有轨电车车型采用电子机械制动系统替换原车的液压制动系统进行了相关试验研究<sup>[6]</sup>。2018 年,韩国未来铁路研究中心开始高速列车 EMB 的研发设计,包括建模仿真验证基于电流闭环的夹紧力控制方法的有效性<sup>[7]</sup>、完成样机试制并进行了性能测试<sup>[8]</sup>,通过 1:1 制动试验及疲劳特性试验,证明电子机械制动系统可以在高速列车上替代空气、液压制动<sup>[9-10]</sup>。轨道车辆制动系统的世界主流供应商达卡公司研发了电子机械制动系统,于 2019 年在波兰 Modertrans Poznań 有轨电车上进行了批量装车运用<sup>[11]</sup>。德国克诺尔公司于 2019 年公布了电子机械制动样机成果<sup>[12]</sup>。国内方面,相关技术还停留在理论研究和试验样机阶段,同济大学吴萌岭等<sup>[13-14]</sup>运用电气技术的最新成果设计了适用于轨道车辆的新型电子机械制动系统;西北工业大学林辉等<sup>[15-16]</sup>借鉴其在无人机领域中全电刹车技术的经验,针对轨道车辆电子制动系统设计了原理样机,并进行了地面试验。

本研究针对轨道车辆电子机械制动系统开展了研发工作,目前已完成基于低地板有轨电车平台的电子机械制动系统设计和样机试制,搭建测试平台验证了电子机械制动系统的功能和性能,为电子机械制动系统在轨道交通领域的应用提供理论基础。

### 1 基于有轨电车制动系统架构

基于有轨电车的电子机械制动系统构架如图 1 所示,目标有轨电车车型为两动车一拖车“Mc1-Tp-Mc2”的编组型式。整车系统采用两级架控的系统架构,以一个转向架的制动系统为一个配置单元,独立执行控制逻辑,各转向架间预留系统内网接口,可实现协同工作机制。动车 Mc1、Mc2 车分别配置一套动车电子机械制动系统,包括安装于车内司机室的一台动车电子制动控制单元、转向架吊挂的一台电机控制器、安装于转向架的两套基础制动装置等部件。拖车 Tp 车配置一套拖车电子机械制动系统,包括安装于车内顶板的一台拖车电子制动控制单元、分别在转向架下方和侧方吊挂的两台电机控制器、安装于转向架的四套基础制动装置、轴端轴速传感器等部件。整列制动系统配置如表 1。

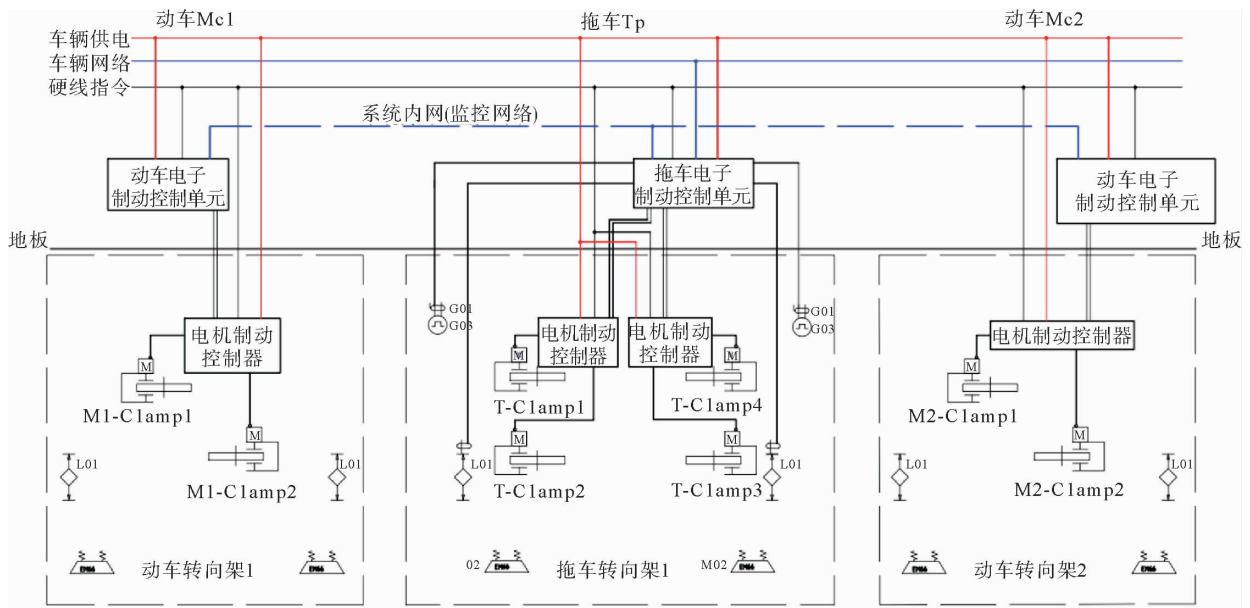


图 1 基于有轨电车的电子机械制动系统构架图

Fig. 1 Architecture diagram of electromechanical braking system based on tram

## 2 系统组成及工作原理

由上述整车制动系统架构可知,电子机械制动系统主要包括三大部分,分别为制动控制单元、电机控制器以及基础制动装置,如图2所示。

制动控制单元是制动系统的控制核心,承担制动控制、防滑控制等功能,具体包括接收处理司机室不同类型、级位制动指令,采集及处理车辆载重、速度信号,对接车辆网络完成与车辆各子系统间通信,完成制动力计算并协调多种制动方式进行混合制动,以及完成制动状态监测、诊断、故障处理及数据存储等功能。

表1 整列电子机械制动系统配置

Tab. 1 Entire train's electromechanical braking system configuration

名称	数量			总计
	Mc1	Tp	Mc2	
制动控制单元	1	1	1	3
制动盘	2	4	2	8
基础制动装置	2	4	2	8
电机控制器	1	2	1	4
速度传感器	2	2	2	6
载荷传感器	2	2	2	6

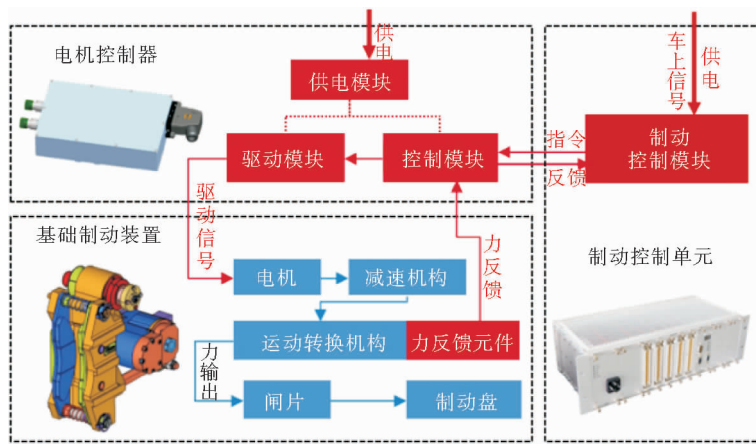


图2 电子机械制动系统组成及工作原理图

Fig. 2 Composition and working principle diagram of electromechanical braking system

电机控制器由供电模块、控制模块、驱动模块等部分组成。控制模块、驱动模块主要功能是接收制动控制单元发出的制动指令驱动基础制动装置输出目标制动力,并实时反馈自身及基础制动装置的运行、故障状态。供电模块并联在列车低压供电线路上,主要功能是在列车低压供电线路正常时,电机控制器从列车低压供电线路获取电能,此时供电模块仅起到状态监控和自身充电管理、健康状态管理的功能;当列车低压供电异常时(如电压过低或断开),则由供电模块自身电源模组为电机控制器、基础制动装置供电,使电子机械制动系统在车上电源异常或断开时仍具备以下工作能力:一是在列车停车蓄电池断电后具备施加停车制动功能;二是在列车发生解编等极限工况导致车辆蓄电池断电时,保证电子机械制动仍可施加紧急制动力。

基础制动装置主要由电机、减速机构、闸片、运动转换机构等部件组成。电机接收到电机控制器的驱动信号后旋转,通过运动转换机构将转矩转换成输出轴的推力,推动制动杠杆作用于闸片,使得活动爪侧的闸片先接触制动盘;随着接触力的增大,夹钳钳体沿着安装轴的轴向移动使得另一侧的闸片接触到制动盘,实现夹紧动作,最终达到所需的夹紧力。基础制动装置中设置力反馈元件,能实时反馈夹紧力值,实现夹紧力的精确控制。缓解时电机旋转,通过运动转换机构使输出轴退回。电机中设置霍尔元件,能够实时反馈位置信息,从而确保缓解间隙的准确。

制动系统具体工作原理为:制动控制单元接收到车辆目标制动指令后,考虑黏着、防滑、冲动限制等参数,实时动态计算出车辆目标制动力并转换为各基础制动装置的目标夹紧力,通过制动系统内网络和模拟量分别下发指令给本车各个电机控制器;各电机控制器接收到制动力指令后,通过驱动模块输出驱动电流控制

基础制动装置内的电机旋转,通过内部的减速机构及传动机构将转矩转换成输出轴的推力,推动制动杠杆作用于闸片实现夹紧动作,并实时采集布置于输出轴后端的力反馈元件力值信息进行制动夹紧力闭环控制。

以力反馈元件获得的力值信息作为唯一反馈,进行单闭环比例积分(proportion intergration,PI)控制的方式是最直接和常用的方式。但这种控制方法对传感器的稳定性、可靠性要求极高,在实际工程应用中,尤其是在极端恶劣工况下,传感器的漂移、失效都会对制动系统制动力损失造成风险。为了摆脱单点失效造成系统功能丧失的风险,保障轨道车辆的安全平稳运行,本研究提出基于卡尔曼滤波的融合力闭环控制方法,利用电机堵转时的电流推算力值,结合传感器采集的反馈力值,选取适当的卡尔曼增益,得到融合后的力值  $F_m$ ,以融合力值作为系统闭环控制对象。

计算堵转时的力值,有电机转矩平衡公式

$$\begin{cases} T_m = I_m K_m, \\ T_m = T_a + T_i + T_f, \\ I_m K_m = \gamma_{\text{dot}} F_C + J_{\text{dot}} \frac{d^2\theta}{dt^2} + T_f. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_m$ 、 $I_m$  和  $K_m$  分别为电机转矩、电机电流和电机转矩常数;  $T_a$  为应用转矩,与夹紧力  $F_C$  成正比关系;  $T_i$  为惯量转矩,用于克服转动惯量影响;  $T_f$  为摩擦转矩,用于克服摩擦阻力;  $\gamma_{\text{dot}}$  为基础制动装置的力放大系数;  $\frac{d^2\theta}{dt^2}$  为电机转子角加速度;  $J_{\text{dot}}$  为电子机械制动动作器的转动惯量。

电机堵转时电机转子角加速度  $\frac{d^2\theta}{dt^2} = 0$ , 有

$$F_C = \frac{I_m K_m - T_f}{\gamma_{\text{dot}}}. \quad (2)$$

由于摩擦转矩  $T_f$  在电机转矩  $T_m$  中占得比例较小,可忽略摩擦转矩,有

$$F_C = \frac{I_m K_m}{\gamma_{\text{dot}}}. \quad (3)$$

即电机堵转时,夹紧力与电流近似成线性关系。

卡尔曼滤波方程

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}u_k + \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \\ \hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_k). \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为状态转移矩阵,  $\mathbf{B}$  为控制矩阵,  $\mathbf{C}$  为观测矩阵;  $\hat{\mathbf{x}}_k$  为  $k$  时刻模型预测状态值,体现为推算力  $F_C$ ;  $u_k$  为  $k$  时刻输入变量,  $\mathbf{w}_k$  为模型预测噪声;  $\mathbf{y}_k$  为传感器观测值,体现为反馈力;  $\mathbf{x}_k$  为真实状态值,  $\mathbf{v}_k$  为传感器观测噪声;  $\hat{\mathbf{x}}_k$ 、 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$  分别为  $k$  和  $k-1$  时刻卡尔曼滤波后的值,体现为融合力  $F_m$ ;  $\mathbf{K}_k$  为  $k$  时刻卡尔曼增益。

为求解卡尔曼增益  $\mathbf{K}_k$ , 有

$$\begin{cases} \mathbf{P}_k = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}, \\ \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{C})\mathbf{P}_k, \\ \mathbf{S}_k = \mathbf{C}\mathbf{P}_k\mathbf{C}^T + \mathbf{R}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\mathbf{P}_k\mathbf{C}^T + \mathbf{R})^{-1}. \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{P}_k$  为模型预测协方差矩阵,  $\mathbf{Q}$  为模型预测噪声协方差矩阵;  $\mathbf{S}_k$  为传感器观测协方差矩阵,  $\mathbf{R}$  为传感器观测噪声协方差矩阵;  $\mathbf{P}_k$  为卡尔曼滤波后的协方差矩阵。

$\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  分别代表对预测值和测量值的置信度(反比),通过影响卡尔曼增益  $\mathbf{K}_k$  的值,影响预测值和测量值的权重。以矩阵维数等于1为例( $\mathbf{K}_k \in [0, 1]$ ),当  $\mathbf{K}_k = 0$  时,即预测误差为0,系统的状态值完全取决于

预测值( $\hat{x}_k = \hat{x}_k$ )。当  $K_k = 1$  时,即测量误差为 0,系统的状态值完全取决于测量值( $\hat{x}_k = y_k$ )。通过上述方法使系统避免了对力反馈元件的强依赖性,摆脱了单点失效的风险,提高了系统的冗余性与控制精度。

### 3 试验及结果分析

为了对电子机械制动系统的特性进行全方面研究,搭建了电子机械制动综合性能试验台,如图 3 所示。该平台由制动控制单元、电机控制器、基础制动装置、直流稳压电源及试验控制平台等组成。

试验控制平台集成 S7-1200PLC、PCI-1780U、PCL-720+、PCI-6225、USBCAN 等模块并配备测试用压力、电流、位移等传感器,配备上位机软件,具备夹紧力、电流、位移等试验数据的采集、存储功能,可模拟车辆各种制式指令信号,如硬线、模拟量、网络指令,实现对电子机械制动系统的功能及性能测试和分析。具体试验方法为:通过上位机给制动控制单元下发制动指令,制动控制单元将制动指令转化为具体夹紧力指令下发给电机控制器,电机控制器接收到指令后驱动基础制动装置输出夹紧力,上位机软件将试验过程中的试验数据保存进行分析。

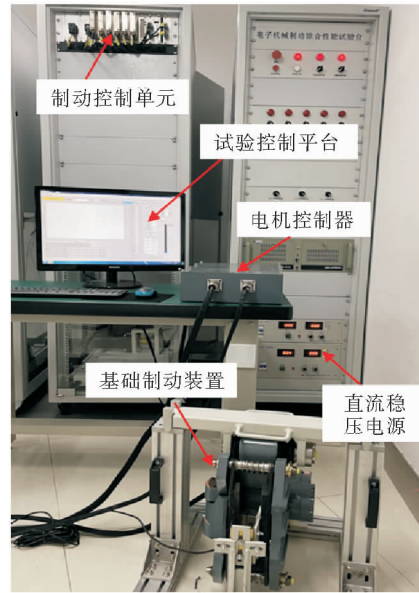


图 3 电子机械制动综合性能试验台

Fig. 3 Electronic mechanical brake comprehensive performance test bench

#### 3.1 间隙调整试验

制动系统在非制动情况下需保证闸片与制动盘具备间隙,而制动系统在使用过程中,由于闸片与制动盘产生磨损而使制动间隙增大,将导致电子机械制动系统响应改变。为解决这种问题,本研究制定了间隙调整策略,自动补偿磨损间隙,使其在整个寿命周期始终保持为初始设定间隙值。通过试验控制台发送间隙调整指令,电机控制器控制基础制动装置调整间隙值,更改两闸片之间模拟制动盘的厚度模拟磨损情况,试验过程通过位移传感器记录间隙值。由表 2 可知,在不同模拟制动盘厚度情况下,回退间隙始终为 2 mm 左右,表明系统具备自动精确补偿磨损间隙的功能。

#### 3.2 静态阶跃试验

试验控制台通过 CAN (controller area network) 通信发送目标夹紧力指令,电机控制器接收指令并控制输出夹紧力,试验控制台记录目标夹紧力指令并通过网络接收电机控制器采集的实际夹紧力波形,采样时间为 10 ms。

1) 在初始状态为 2 mm 间隙时给定目标夹紧力指令 0→20 kN。试验结果如图 4 所示,

表 2 间隙调整结果

Tab. 2 Gap adjustment results

试验次数	模拟制动盘厚度/mm	间隙值/mm
1	60	2.01
2	50	1.96
3	40	1.99
4	30	1.97
5	20	2.02

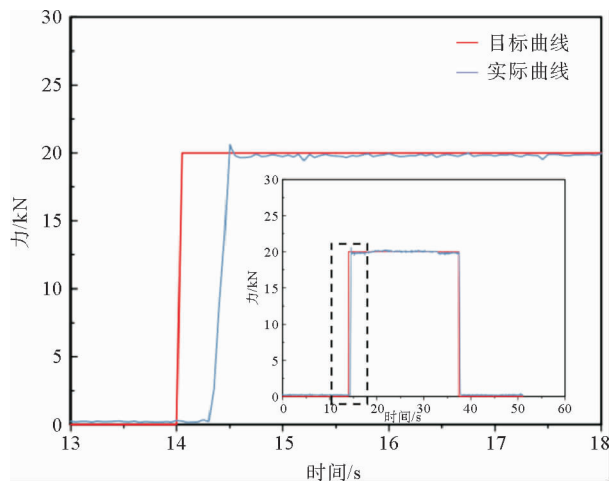


图 4 目标指令 0→20 kN 阶跃曲线

Fig.4 Target command 0→20 kN step curve

系统从接收制动指令开始到 90%目标夹紧力时间约为 300 ms,系统稳态误差为±0.3 kN,体现了电子机械制动系统在响应和稳态误差控制上具有良好效果。

2) 在初始状态为 2 mm 间隙情况下连续给定目标级位夹紧力指令 4→12→20→28→20→12→4 kN,将每个级位保持一定时间。试验结果如图 5 所示,夹紧力从 0→4 kN 阶跃时,因需要消除 2 mm 空行程具有相对长的响应时间,约 300 ms。其余级位的阶跃因无空行程响应时间较快,平均约 110 ms。结果表明,电子机械制动系统能够快速响应各制动级位的切换,可快速稳定施加和缓解夹紧力。

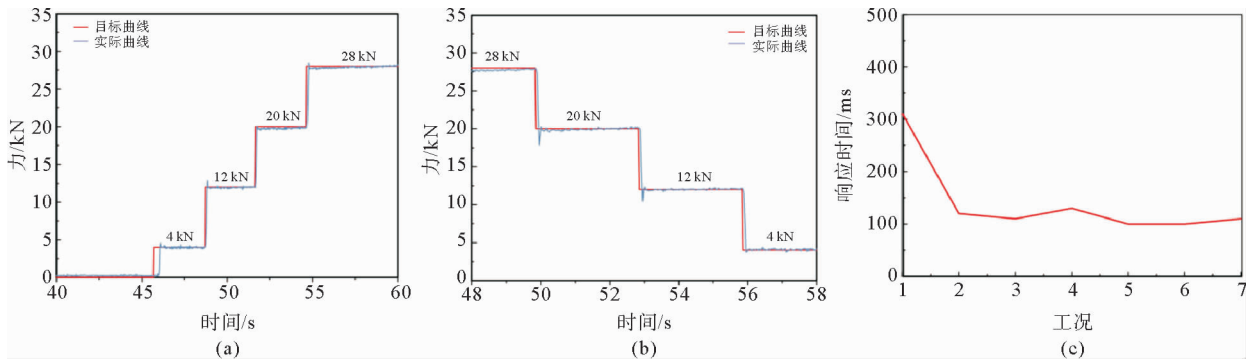


图 5 变级位阶跃曲线

Fig. 5 Variable level step curve

### 3.3 频响试验

为验证电子机械制动系统的静态频响特性,分别进行夹紧力为 4→28 kN 的 1 Hz 正弦波与三角波目标指令跟随试验,结果如图 6 所示。

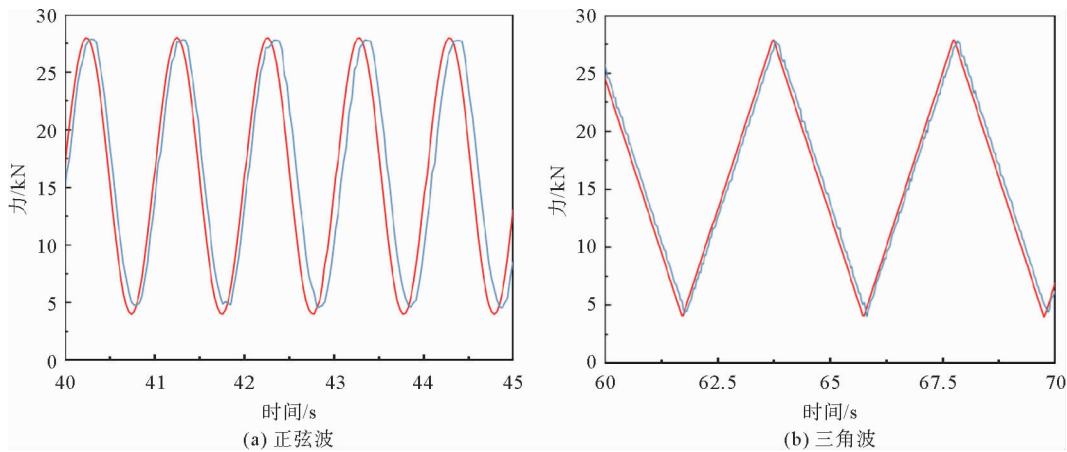


图 6 静态频响曲线

Fig.6 Static frequency response curve

试验结果表明:正弦波跟随拟合度较好,有一定相位延迟,在波峰和波谷处出现约 25 ms 的滞后,幅值衰减小于 1.5%;三角波跟随无明显相位延迟,在波峰和波谷处出现约 20 ms 的滞后,无明显幅值衰减情况,体现了电子机械制动系统具有良好的指令跟随性能。

### 3.4 多机一致性试验

由于电子机械制动系统在使用时为多台配合使用,当制动控制单元同时给多个电机控制器下发指令时,

若基础制动装置的执行一致性较差会导致车辆出现潜在的安全风险,因此本研究进行了多机一致性试验。通过试验控制平台模拟硬线指令,为两台电子机械制动系统同时下发紧急制动控制指令,记录各夹钳外测传感器采集的实时夹紧力、目标指令等数据,通过试验数据分析电子机械制动系统的一致性。硬线指令(紧急制动)多机一致性试验曲线如图7所示,各夹钳响应时间差值小于100 ms,稳态时力误差小于0.5 kN,表明多机施加制动时系统具有较好的一致性。

#### 4 结论

基于有轨电车车型对电子机械制动系统开展研究,针对有轨电车车型构建了电子机械制动的整车系统架构,并完成制动控制单元、电机控制器、基础制动装置样机的设计及生产,搭建了整套电子机械制动系统。提出基于卡尔曼滤波的融合力闭环控制方法,利用搭建的综合性能测试试验台,对电子机械制动系统的功能和性能进行地面试验,得出以下结论。

1) 通过不同厚度制动盘进行的模拟间隙调整试验,表明本电子机械制动系统具备自动精确补偿磨损间隙的功能。

2) 静态阶跃试验表明,电子机械制动系统从指令接收到达到90%目标夹紧力的响应时间约为300 ms,无空行程响应时间约为110 ms,稳态误差为±0.3 kN,具有快速响应能力及良好的稳态控制精度。

3) 1 Hz正弦波与三角波目标指令跟随试验结果表明,跟随曲线无明显相位延迟,幅值衰减小于1.5%,实际力值可稳定精确跟随目标力值,具备良好的动态性能。

4) 多机一致性试验表明,电子机械制动系统多机响应时间小于100 ms,具有较好的一致性。

本电子机械制动系统是基于现有低地板有轨电车平台所需功能和实际接口设计的,并针对实际需求进行了功能及性能试验,为后续装车试验奠定基础,为电子机械制动系统应用于轨道交通领域提供参考。

#### 参考文献:

- [1]王军.电机械制动(EMB)技术[D].北京:机械工业出版社,2021.
- [2]吴萌岭,马天和,田春,等.铁道车辆制动技术发展趋势探讨[C]//和谐共赢创新发展:旅客列车制动技术交流会论文集.2017.
- [3]吴萌岭,周嘉俊,田春,等.轨道交通制动系统创新技术[J].现代城市轨道交通,2019(7):30-35.  
WU Mengling, ZHOU Jiajun, TIAN Chun, et al. Innovative technology of rail transit braking system[J]. Modern Urban Transit, 2019(7): 30-35.
- [4]吴萌岭.低地板有轨电车国产制动系统及运用[J].现代城市轨道交通,2014(1):38-41.  
WU Mengling. Braking system made in China and its application on low-floor tram[J]. Modern Urban Transit, 2014(1): 38-41.
- [5]BRINKERT F. Electrically resettable railway brake; US, US4175645A[P], 1979-11-27.
- [6]Agasaki Electric Tramway. Detailed report of 3000-tram. [EB/OL]. <http://nagaden.fc2web.com/geneki/report-3000gata/3000-yukasita/3000-yukasita.html>, 2004-11-14.
- [7]BAEK S K, OH H K, KWAK M H, et al. A design method of three-phase IPMSM and clamping force control of EMB for high-speed train[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2018, 19(4): 578-585.
- [8]BAEK S K, OH H K, KIM S W, et al. A clamping force performance evaluation of the electro-mechanical brake using PMSM

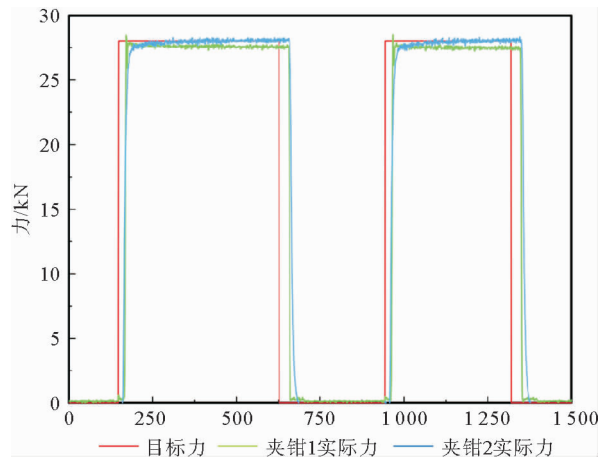


图7 多机一致性曲线

Fig.7 Multi-machine consistency curve

- [J].Energies,2018,11(11).DOI:10.3390/en11112876.
- [9]BAKE S K,OH H K,PARK J H,et al.A evaluation of emergency braking performance for electro-mechanical brake using interior permanent magnet synchronous motor[J].Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society,2020,21(6):170-177.
- [10]OH H K,BAEK S K,JEON C S.Fatigue analysis for electro-mechanical brake caliper based on eccentric rotating shaft[J].Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society,2020,21(9):596-603.
- [11]Industry Europe.DAKO-CZ;Safety on railways[EB/OL].https://industryeurope.com/dako-c/,2018-9-26.
- [12]LISKOUNIG R.Driving innovation on railways[Z].https://cmt.sym.place/serve-file/e0/11569839900/di/c0/,2019-9-17.
- [13]吴萌岭,马天和,田春,等.列车制动技术发展趋势探讨[J].中国铁道科学,2019,40(1):134-144.  
WU Mengling,MA Tianhe,TIAN Chun,et al.Discussion on development trend of train braking technology[J].China Railway Science,2019,40(1):134-144.
- [14]吴萌岭,雷驰,陈茂林.基于列车电机械制动系统夹紧力的控制算法优化[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(6):898-903.  
WU Mengling,LEI Chi,CHEN Maolin.Control algorithm optimization of clamping force based on train electro-mechanical-braking system[J].Journal of Tongji University (Natural Science),2020,48(6):898-903.
- [15]赵逸云,林辉,李兵强,等.城轨列车电子机械制动系统的非线性PI控制[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(5):1593-1600.  
ZHAO Yiyun,LIN Hui,LI Bingqiang,et al.Electromechanical brake system based on the nonlinear PI controller of urban rail train[J].Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2021,51(5):1593-1600.
- [16]ZHAO Y Y,LIN H,LI B Q.Sliding-mode clamping force control of electromechanical brake system based on enhanced reaching law[J].IEEE Access,2021,9:19506-19515.

(责任编辑:齐敏华)