

低地板有轨电车制动系统控制研究

李生军¹ 赵建平² 靳 凯¹ 田以涛¹ 何宗领¹

(1. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266114, 青岛; 2. 青岛亚通达铁路设备制造有限公司, 266111, 青岛)

摘 要 [目的]传统的制动控制系统采用列车制动控制单元主机进行机械制动控制,成本较高,且无法对电液制动进行合理的统筹管理。为全面掌握制动系统控制原理和功能,在保证性能可靠的前提下降低系统复杂性和成本,需对低地板有轨电车制动系统的控制方案进行全面的深入研究。[方法]依托欧洲某项目低地板有轨电车采用的德国 HANLING & KAHL 制动系统,通过对其系统进行深入研究分析,设计出一种低地板有轨电车制动系统的电气控制原理和控制方案;通过全面介绍低地板有轨电车制动系统的制动功能、制动方式和制动模式,详细描述电制动、液压制动和磁轨制动的组成、原理和电气控制方案。结合该项目车辆制动控制逻辑全面阐述制动系统在各种运营工况下的电液配合逻辑和制动控制方案。[结果及结论]该制动系统控制方案已在欧洲有轨电车上得到试验验证和批量应用,运营多年来未发生系统控制功能故障,具有性能优良、可靠性高、成本低、控制逻辑清晰等特点。

关键词 低地板有轨电车; 制动系统; 控制方案

中图分类号 U270.35

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.037

Research on Low-Floor Tram Brake System Control

LI Shengjun¹, ZHAO Jianping², JIN Kai¹, TIAN Yitao¹, HE Zongling¹

(1. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co. Ltd., 266114, Qingdao, China; 2. Qingdao Yatongda Railway Equipment Co. Ltd., 266111, Qingdao, China)

Abstract [Objective] The traditional brake control system adopts the train braking control unit host for mechanical braking control, featuring high cost and inability to coordinate reasonable integrated management of electro-hydraulic braking. In order to fully grasp the control principles and functions of the brake system, and to reduce system complexity and cost while ensuring reliable performance, it is necessary to conduct a comprehensive and in-depth research on the control scheme of the low-floor tram brake system. [Method] Based on the German HANLING & KAHL brake system used in a low-floor tram project in Europe, a deep research and analysis of the system is conducted for the design of an electrical control principle

and control scheme of the low-floor tram brake system. By comprehensively introducing the braking function, braking method, and braking mode of the low-floor tram brake system, the composition, principle, and electrical control schemes of electric braking, hydraulic braking, and magnetic rail braking are described in detail. Combined with the vehicle brake control logic of the project, the electro-hydraulic coordination logic and brake control scheme of the brake system under various operating conditions are comprehensively explained. [Result & Conclusion] The brake system control scheme has been tested, verified and widely applied on European trams, showing no system control function failures in many years operation. It has the characteristics of excellent performance, high reliability, low cost, and clear control logic.

Key words low-floor tram; brake system; control scheme

随着城市轨道交通的快速发展,低地板有轨电车因其成本低、绿色环保等独特优点,在城市轨道交通中日益普及,成为现代轨道交通的引领者。有轨电车凭借站间距短、发车频次高、乘坐便捷等优势,成为了市民出行首选的公共交通工具之一^[1]。由于低地板有轨电车的运行线路区别于地铁、城郊铁路等,基于其运行线路和模式的特殊性,对其制动性能提出了很高的要求^[2]。有轨电车在运行中制动操作频繁,对减速度和响应速度的要求都很高,因此,良好的制动性能和合理的制动控制方案是保障列车安全运行的先决条件。

1 低地板有轨电车制动概述

低地板有轨电车具有常用制动、保持制动、停放制动、紧急制动和安全制动的功能^[3]。常用制动是列车正常运行中调节列车运行速度或使列车在预定地点停车的制动。保持制动是列车停车后和牵引启动的一定时间内防止列车溜逸所施加的制动。停放制动是防止列车在静置状态下发生溜逸所施加的制动,车辆断电后自动施加停放制动,保证列车在线路最大坡道或车库内长时间停放的需

求。紧急制动是列车迅速减速并达到在最短距离内紧急停车的制动。安全制动是保证列车安全停车的最高级别的制动措施,由安全制动蘑菇头按钮触发,安全制动回路为“失电制动、得电缓解”,安全制动发生后,在车辆完全停止前不允许缓解制动。

低地板有轨电车的制动方式由电制动、液压制动和磁轨制动组成复合制动,电液制动时优先发挥电制动能力,电制动由牵引系统施加,具有再生制动和电阻制动功能。列车在制动过程中如果电制动发生故障则由液压制动自动补足来施加替代制动,使得总制动力满足车辆制动控制需求^[4]。车辆具有防滑控制功能,优先采用电制动进行防滑控制,以充分利用黏着。车辆配置撒砂装置,当防滑、紧急制动和安全制动时在列车运行方向进行撒砂,以增加轮轨的黏着系数,保证车辆可靠制动。复合制动方式能够适应列车频繁的制动和缓解操作,具有很高的灵敏度,从而确保有轨电车在不同制动工况下能够实现列车减速、停车、停放的制动需求,低

地板有轨电车的制动模式配置如表 1。

表1 低地板有轨电车制动模式配置

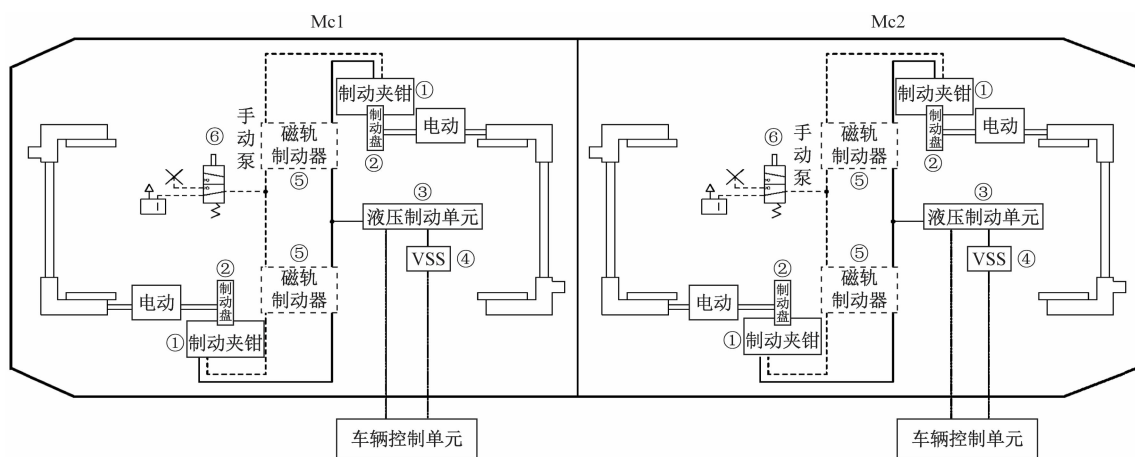
Tab.1 Braking mode configuration of low-floor tram

制动功能	电制动	液压制动	磁轨制动	防滑	撒砂
常用制动	√	√	×	√	×
保持制动	×	√	×	×	×
停放制动	×	√	×	×	×
紧急制动 1、2	√	(√)	×	√	√
紧急制动 3	√	(√)	√	√	√
安全制动	×	√	√	×	√

注:√—必选;×—不适用;(√)—电制动故障时施加替代制动。

2 液压及磁轨制动的组成和原理

某项目 2 节编组有轨电车在 Mc1 (带司机室的动力车 1) 和 Mc2 (带司机室的动力车 2) 的转向架上各安装 1 套 HANNING & KAHL 的液压及磁轨制动系统, 其组成如图 1 所示。



注:①—制动夹钳;②—制动盘;③—液压制动单元;④—VSS(电子阀控制单元);⑤—磁轨制动器;⑥—手动泵。

图 1 液压及磁轨制动系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic and magnetic rail braking system components

2.1 制动夹钳及制动盘

液压制动系统的被动式弹簧制动夹钳与制动盘对齐安装,在每种磨损状态下保持在相对于制动盘的绝对位置,制动夹钳由导向轴、固定爪和活动爪及弹簧执行器单元组成。制动力的产生是通过弹簧制动夹钳来实现的,通过压力杆将可动爪式制动片压向制动盘,固定爪通过压力杆对制动钳的反作用力作用,在制动过程中弹簧制动夹钳的力直接传递到制动片,从而传递到制动盘,通过加压来缓解制动夹钳弹簧力来实现制动缓解,通过减压来释

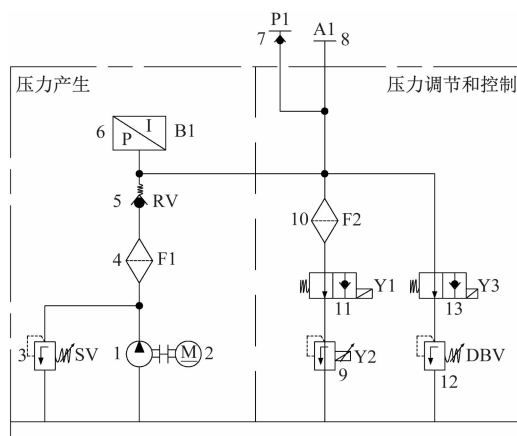
放制动夹钳的弹簧力来实现制动施加。

2.2 液压制动单元

液压制动单元安装于车底转向架附近,主要功能为压力产生和压力调节控制。

液压制动单元的压力产生和调节控制的原理如图2所示。液压制动单元依据电子阀控制单元设定的目标值对液压压力进行调节和控制,通过压力调节来控制制动夹钳的施加和缓解,液压压力由液压单元产生并反馈给制动夹钳,通过制动夹钳的弹簧力产生制动力,弹簧力通过液压压力抵消,从而

减少制动力或缓解制动。



注：1—齿轮泵；2—电机 M；3—安全阀 SV；4—过滤器 F1；5—止回阀 RV；6—压力传感器 B1；7—压力测量接头 P1；8—夹钳连接口 A1；9—压力比例控制阀 Y2；10—过滤器 F2；11—路阀 Y1；12—辅助制动阀 DBV；13—路阀 Y3。

图 2 液压制动单元的压力产生和调节控制原理图
Fig. 2 Schematic diagram of pressure generation and regulation control for hydraulic brake unit

2.2.1 压力产生

液压单元压力产生的原理如图 2 中的左侧部分所示，压力产生装置由油箱、齿轮泵、直流电机、安全阀、止回阀、过滤器、压力传感器组成。直流电机驱动齿轮泵将油箱中的油直接泵入液压块的管路中，液压油经过过滤器和止回阀流向压力调节部件用于压力调节和控制。SV 用来保护液压单元免受不可接受的压力值，当达到设定的压力值时阀门打开，液压油流向油箱中来确保压力不会超过设定值。过滤器 F1 清洁从齿轮泵中的液压油后通过 RV 泵送至制动夹钳。止回阀用来确保齿轮泵泵送的压力油在电机关闭时不会流回油箱，使得所产生的压力值保持不变。压力传感器用来测量制动夹钳压力出口上的压力，并为制动电子设备提供转化后的电流信号。

2.2.2 压力调节和控制

液压单元压力调节和控制的原理如图 2 中的右侧部分所示，压力调节和控制单元由压力比例控制阀、过滤器、Y1 或 Y3 路阀、辅助制动阀、压力传感器组成，液压块上用来安装所有用于产生压力和调节压力的部件。压力比例控制阀作为压力调节和控制的核心部件，根据电子阀控制单元输出的 PWM（脉宽调制）电信号转换为压力值来控制制动夹钳的压力。过滤器 F2 防止管路中的杂质（例如软管、油管、制动夹钳上的杂质）对液压单元比例控

制阀的损坏和污染，当夹钳施加制动时回流的液压油首先经过过滤器，然后再通过液压单元的其他部件导入油箱，夹钳上的弹簧施加压力后形成制动。在制动夹钳和比例压力控制阀 Y2 回路及 DBV 回路之间均设有 1 个路阀；Y1 用在常用制动回路，在车辆制动缓解时确保制动系统中积聚的压力不泄漏，防止泵电机在车辆运行过程中重新启动；Y3 用在辅助制动阀回路，紧急制动时，积聚的压力通过辅助制动阀排入油箱，辅助制动阀使得制动夹钳施加固定的制动力。通过压力传感器来测量制动夹钳上的压力，将压力反馈信号传递给车辆控制单元来判断制动施加和制动缓解的状态。

2.3 电子阀控制单元

VSS 安装于车内控制柜中，用于对液压单元的比例阀进行控制，根据车辆控制单元输出的制动模式数字量信号组合对应转换成比例阀的 PWM 电流信号来调节制动压力。电子阀控制单元 VSS 的输入信号如表 2 所示。

表 2 电子阀控制单元 VSS 输入信号

VSS 接点	替代制动施加	停车制动施加	保持制动施加	保持制动缓解
P3	0	1	0	1
P2	1	0	0	1
P1	1	1	0	1

注：1—直流电压 24 V；0—0 V；P3、P2、P1 为电子阀控制单元接点。

2.4 手动泵

手动泵配备在车内，是液压制动辅助缓解系统的主要组成部分，用来辅助缓解制动夹钳，还用于排出辅助缓解的压力。将手动泵连接至轮对的辅助缓解回路，关闭排放阀，手动操作手动泵手柄，液压油从手动泵的油箱流向制动夹钳，直到达到制动夹钳的缓解压力后制动辅助缓解。制动时手动打开排放阀，将辅助缓解压力排放到手动泵的油箱中，一旦辅助缓解管路中的压力降至 0，取下手动泵。

2.5 磁轨制动器

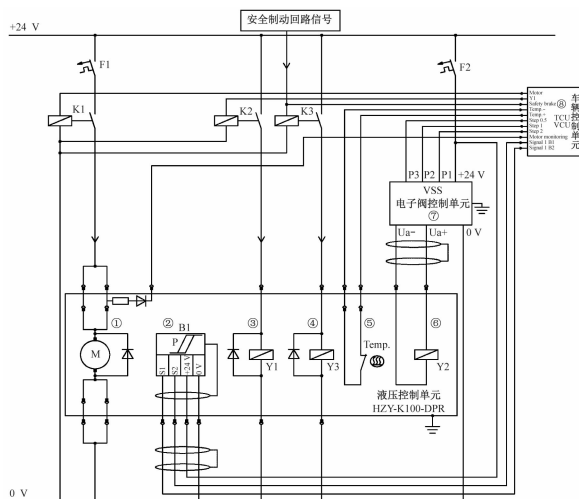
磁轨制动器包括导向器、电磁铁和悬挂单元，采用低悬挂方式安装在转向架两侧的底部，位于两车轮之间；在轨道正上方约 7 ~ 10 cm 处，在施加磁轨制动时通过磁轨制动器与轨道产生摩擦来产生制动力，不依赖于轮轨的黏着，制动效果好，但仅在紧急制动 3 和安全制动工况下由车辆电路自动控

制,其动作原理类似于电磁铁,磁轨线圈得电时产生磁场,与轨道产生磁力后吸附在轨道上,轨靴和铁轨产生磁接触,磁轨制动器的制动力通过载体传递给转向架,进而传递给车辆,从而实现磁轨制动施加。列车停车后取消紧急制动或安全制动后磁轨线圈失电,磁轨制动器的两个弹簧将从轨道上升起以抵抗其剩磁,并将磁轨制动器带回初始位置^[5],从而实现磁轨制动缓解。

3 液压及磁轨制动控制方案

3.1 液压制动控制电气原理图

液压制动系统的电气控制原理如图 3 所示,由 VCU(车辆控制单元)或 TCU(牵引控制单元)来控制继电器 K2 和接触器 K1 的线圈,其触点控制保压电磁阀 Y1 和液压电机 M,由安全制动回路信号控制继电器 K3 线圈来控制安全制动电磁阀 Y3,网络 VCU 或牵引 TCU 主机控制电子阀制动单元的 P3、P2 和 P1 点,VSS 根据 P3/P2/P1 的指令组合输出 PWM 电流到液压单元内的比例控制阀 Y2 来调节日制动力大小,从而实现对液压制动的施加和缓解。网络 VCU 和牵引 TCU 实时采集液压单元内压力开关状态、温控开关状态、电机的工作状态等信号参与监控和控制。



注:①—液压机 M;②—压力传感器 B1;③—保压电磁阀 Y1;④—安全制动电磁阀 Y3;⑤—温控开关;⑥—比例电磁阀 Y2;⑦—电子阀控制单元 VSS;⑧—车辆控制器 VCU/TCU。

图3 液压制动系统电气控制原理图

Fig. 3 Electrical control schematic diagram of hydraulic braking system

3.2 磁轨制动控制电气原理图

H&K 磁轨制动系统的车辆电气控制原理如图 4

所示。

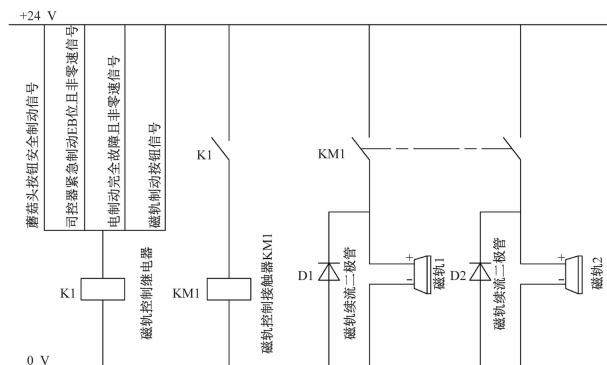


图 4 磁轨制动系统电气控制原理图

Fig.4 Electrical control schematic diagram of magnetic rail braking system

磁轨制动器由车辆供电,通过车辆电路控制继电器 K1 来控制接触器 KM1 进而给磁轨供电。司机可通过操作磁轨测试按钮进行磁轨施加和缓解的测试;在列车运行中,当司机按下安全制动蘑菇头按钮或将司控器置于紧急制动位置时,磁轨制动将自动施加,直至停车后磁轨制动缓解;当电制动损失 100% 且车辆非零速的情况下,由车辆网络控制器触发磁轨施加制动,直至停车后磁轨制动缓解。

3.3 制动控制方案

有轨电车制动系统的控制包括电制动、液压制动和磁轨制动的控制,由牵引系统和制动系统施加相应工况下的制动力实现车辆平稳、准确停车。

正常工况:在列车常用制动工况下制动时由牵引系统施加电制动;在停车制动时当列车速度降到电液制动转化速度临界点($1\text{ km/h} < v < 5\text{ km/h}$)时,电制动按照固定斜率退出,由网络 VCU 输出停车制动指令组合信号(P1、P2、P3 分别为 1、0、1)至电子阀控制单元 VSS 来控制液压制动单元通过制动夹钳施加相应的停车制动力;在制动过程中当列车速度 $\leq 1\text{ km/h}$ 时,由网络 VCU 输出保持制动施加指令组合信号(P1、P2、P3 分别为 0、0、0)至电子阀控制单元 VSS 来控制液压制动单元通过制动夹钳施加相应的保持制动力,在车辆断电后液压制动管路中没有压力,弹簧力完全施加,自动施加停放制动。列车由零速起车过程中,当司控器级位由制动级位变为牵引级位,牵引逆变器启动,牵引力施加到一定值时由网络 VCU 输出保持制动缓解指令组合信号(P1、P2、P3 分别为 1、1、1))给电子阀控制单元 VSS 来控制液压制动单元通过制动夹钳缓解

保持制动,通过压力开关的状态反馈来监控制动是否缓解并在司机台上显示制动状态;在列车运行中,当出现司机警惕、乘客紧急制动、列车运行中车门打开、超速时由牵引系统施加100%电制动力;在发生紧急情况时司机将司控器手柄置于紧急制动位或拍下安全制动蘑菇头按钮后由牵引系统施加最大电制动力,同时车辆硬线电路自动控制列车落磁轨施加安全制动。

故障工况:牵引系统故障时,当电制动损失50%时,由网络VCU输出替代制动施加指令组合信号(P1、P2、P3分别为1、1、0)给电制动故障侧的电子阀控制单元VSS来控制液压制动单元通过制动夹钳施加相应的替代制动力,并在显示屏显示电制动故障状态,车辆需限速运行;牵引系统故障时,当电制动损失100%时,由网络VCU输出替代制动施加指令组合信号(P1、P2、P3分别为1、1、0)给各车的电子阀控制单元VSS来控制液压制动单元通过制动夹钳施加相应的替代制动力,同时通过硬线控制磁轨制动自动施加并提醒司机电制动完全故障;当网络系统故障时,通过司机台上的紧急牵引开关旁路网络,由牵引系统TCU接管对制动系统电子阀控制单元和液压制动单元的控制,控制逻辑一致,车辆需限速运行。

4 结语

制动系统作为保障列车安全停车的“守护神”,在列车行车安全中发挥着极其关键的作用。本文针对低地板有轨电车制动系统的组成、原理、制动功能及控制方案进行了全面的研究和设计,所设计的制动系统方案已在运营的有轨电车上批量应用和试验验证,该制动系统控制方案能够满足列车制

动需求,性能可靠,工作稳定,后续可对低地板有轨电车制动系统国产化及列车制动控制设计研究提供借鉴。

参考文献

- [1] 李生军. 基于RFID技术的低地板有轨电车位置检测系统设计[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(6): 90.
LI Shengjun. Design of low floor tram position detection system based on RFID technology[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(6): 90.
- [2] 乔杨. 浅谈现代有轨电车制动系统[J]. 交通运输, 2018(22): 98.
QIAO Yang. A brief discussion on modern tram braking system[J]. Transportation, 2018(22): 98.
- [3] 丁辉, 李军辉. 城阳低地板有轨电车制动系统组成及液压制动原理[J]. 现代城市轨道交通, 2016(6): 17.
DING Hui, LI Junhui. Braking system composition and hydraulic braking principle of low floor tram in Chengyang[J]. Modern Urban Transit, 2016(6): 17.
- [4] 赵春光, 韩晓辉, 樊贵新, 等. 低地板有轨电车制动系统技术现状[J]. 现代城市轨道交通, 2014(1): 42.
ZHAO Chunguang, HAN Xiaohui, FAN Guixin, et al. Technical situation of low-floor tram braking system[J]. Modern Urban Transit, 2014(1): 42.
- [5] 李莉, 王明星, 郝保磊. 100%低地板有轨电车制动系统研制[J]. 铁道车辆, 2017, 55(12): 38.
LI Li, WANG Mingxing, HAO Baolei. Development of the braking system for 100% low floor tram cars[J]. Rolling Stock, 2017, 55(12): 38.

· 收稿日期:2022-06-22 修回日期:2022-10-19 出版日期:2024-10-10
Received:2022-06-22 Revised:2022-10-19 Published:2024-10-10
· 通信作者:李生军,高级工程师,lsj041622@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第214页)

- [5] 郭伟. 基于双目视觉的行人检测与识别技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
GUO Wei. Research on pedestrian detection and recognition technology based on binocular vision[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [6] 李正洋. 城市轨道交通多交路多编组列车开行方案优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
LI Zhengyang. Study on optimization of train operation scheme for

urban rail transit with multi-route and multi-formation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

· 收稿日期:2024-07-12 修回日期:2024-07-26 出版日期:2024-10-10
Received:2024-07-12 Revised:2024-07-26 Published:2024-10-10
· 通信作者:高晓鹏,高级工程师,ybbanydn@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license