

低地板有轨电车液压制动系统及制动力管理策略研究

牛玉国 张彦伟 董振威

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛//第一作者, 工程师)

摘要 介绍了所研制的低地板有轨电车液压制动系统的组成及工作原理。重点论述了电制动力与液压制动力转换阶段制动冲击率的控制方法, 以及正常工况下和故障模式下的制动力管理策略。提出了一种故障模式下新的液压制动力管理策略, 可有效降低车轮擦伤风险。

关键词 低地板有轨电车; 液压制动系统; 制动力管理

中图分类号 U482.1.03

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.011

Management Strategy for Hydraulic Braking System and Braking Force of Low-floor Tram

NIU Yuguo, ZHANG Yanwei, DONG Zhenwei

Abstract The composition and working principle of the developed hydraulic braking system are introduced. By focusing on the control method of braking impact rate during the braking process of electrodynamic braking and hydraulic braking, the braking management strategies under normal working condition and fault mode are elaborated. On this basis, a new hydraulic braking force under the fault mode management strategy is put forward, in order to effectively reduce the risk of wheel scratch.

Key words low-floor tram; hydraulic braking system; braking force management

Author's address CRRC Qingdao Sifang Vehicle Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China

有轨电车为方便乘客上下车, 普遍采用低地板的车体结构。也因其低地板特性, 能量密度大的液压制动系统成了有轨电车必须采用的制动系统^[1]。液压制动系统相比于空气制动系统, 质量轻、响应速度快, 可实现更高的制动性能^[2]。低地板有轨电车制动方式包括电制动、液压制动和磁轨制动。不同制动模式下各制动力的合理分配及管理, 能够在不延长制动距离的基础上, 降低擦轮风险, 并提高乘客乘坐舒适性。

1 低地板有轨电车液压制动系统组成

液压制动系统的作用是在列车运行的制动过程中对电制动力的补充, 或在保持制动和停放制动状态施加制动力使列车静止。液压制动系统由电子制动控制单元(EBCU)、液压控制模块(HCM)、液压单元、辅助缓解装置、液压夹钳、制动盘、闸片等组成。

EBCU(见图1)用于对拖车液压单元的控制, 处理网络控制系统或车辆硬线发送的制动请求, 输出控制指令给拖车液压单元, 控制液压单元中的阀、泵和电机; 同时, 监测来自拖车液压单元中的制动缸压力信息, 可实现无级的制动力调节。EBCU的功能包含制动控制、载荷补偿、防滑保护及故障诊断与反馈等。

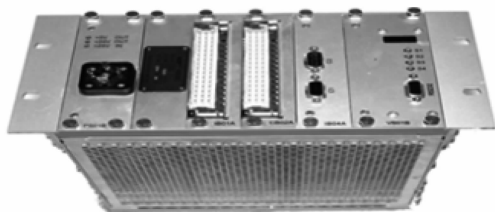


图1 电子制动控制单元

HCM(见图2)用于对动车液压单元的控制, 接收列车控制单元发送的制动硬线指令, 将相应的控制命令传输给动车液压单元, 可实现三级(step0、step1、step2)制动力控制。根据液压制动系统的实

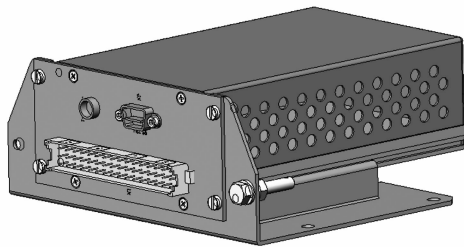


图2 液压控制模块

际工作状态, HCM 将“制动缓解”、“制动施加”和“主要故障”等信号发给列车控制单元用于对液压制动系统监控和诊断。

拖车液压单元(见图3)具有制动及缓解控制、安全制动、保持制动、停放制动等功能,主要由压力供给和压力控制两部分组成:压力供给部分主要包括泵、电机、油箱、过滤器、限压阀和单向阀。压力控制部分主要包括调压阀、换向阀和背压阀。拖车液压单元受 EBCU 控制输出液压压力操纵夹钳施加制动力。

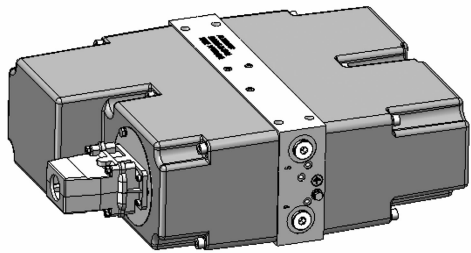


图3 拖车液压单元

动车液压单元(见图4)具有制动及缓解控制、安全制动、保持制动和停放制动等功能。动车液压单元由 HCM 控制输出液压压力并操纵夹钳施加制动力。

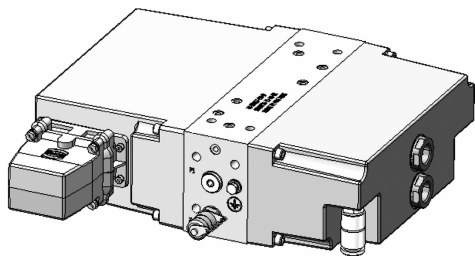


图4 动车液压单元

采用被动式夹钳的转向架都需要配置辅助缓解装置(见图5),辅助缓解装置分为电动式和手动式。在制动控制单元或液压单元故障不能控制夹钳缓解时,辅助缓解装置提供备用液压源缓解被动式夹钳制动力。本文所设计的辅助缓解装置为电动式,施加缓解可实现一键操作。

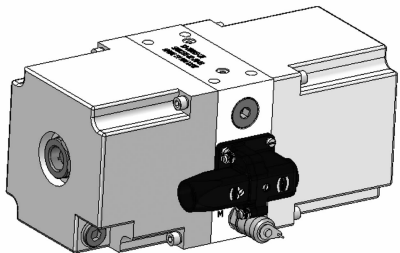


图5 辅助缓解装置

基础制动装置作为执行部件用于制动力的产生和传递,主要包括夹钳(见图6)、制动盘和闸片。液压制动夹钳的夹紧力由液压单元输出的压力控制,每个制动夹钳有一个闸片磨耗间隙自补偿机构。当制动夹钳缓解时,保证制动盘和闸片之间的间隙大小不变。夹钳通过闸片将夹紧力作用到制动盘。制动盘均配置了防磨标志,用来标记制动盘的最小厚度。

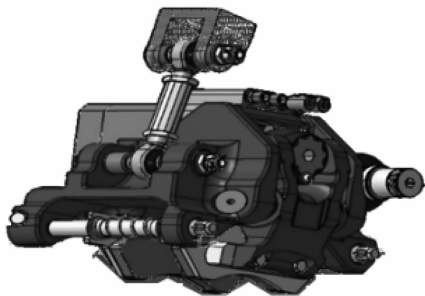


图6 液压制动夹钳

2 液压制动系统的工作原理

液压制动系统在列车中的配置情况为:拖车配置1台电子制动控制单元和1台拖车液压单元,拖车转向架配置4个被动式液压制动夹钳和两个磁轨制动器;动车配置1台液压控制模块和1台动车液压单元,每个动车转向架配置两个被动式液压制动夹钳和两个磁轨制动器;每个转向架都配置有1个辅助缓解单元。转向架上的被动式夹钳基于弹簧施加的原则,具有停放制动的功能。停放制动通过弹簧力实现施加,由液压压力实现缓解。液压制动系统主要结构配置分布如图7所示。

液压制动系统的工作原理为:EBCU 和 HCM 根据列车发出的制动或缓解指令,控制液压单元输出有压力的液压油;液压油经管路进入液压夹钳制动缸,通过操纵夹钳夹紧力达到制动或缓解目的。同时,EBCU 和 HCM 可接收列车发出的液压制动力需求,通过控制液压单元输出的液压压力大小,来控制闸片对制动盘的摩擦力,实现对列车施加不同的制动力。磁轨制动器主要用于安全制动和紧急制动模式,得电后产生吸力吸附于轨道生成制动力。

车辆制动系统按原制动力的不同,有电制动、液压制动和磁轨制动等3种形式。其中,电制动优先级最高,液压制动其次,磁轨制动优先级最低。制动系统根据制动需求的不同,具有常用制动、强迫制动(紧急制动1)、安全制动(紧急制动2)、危害

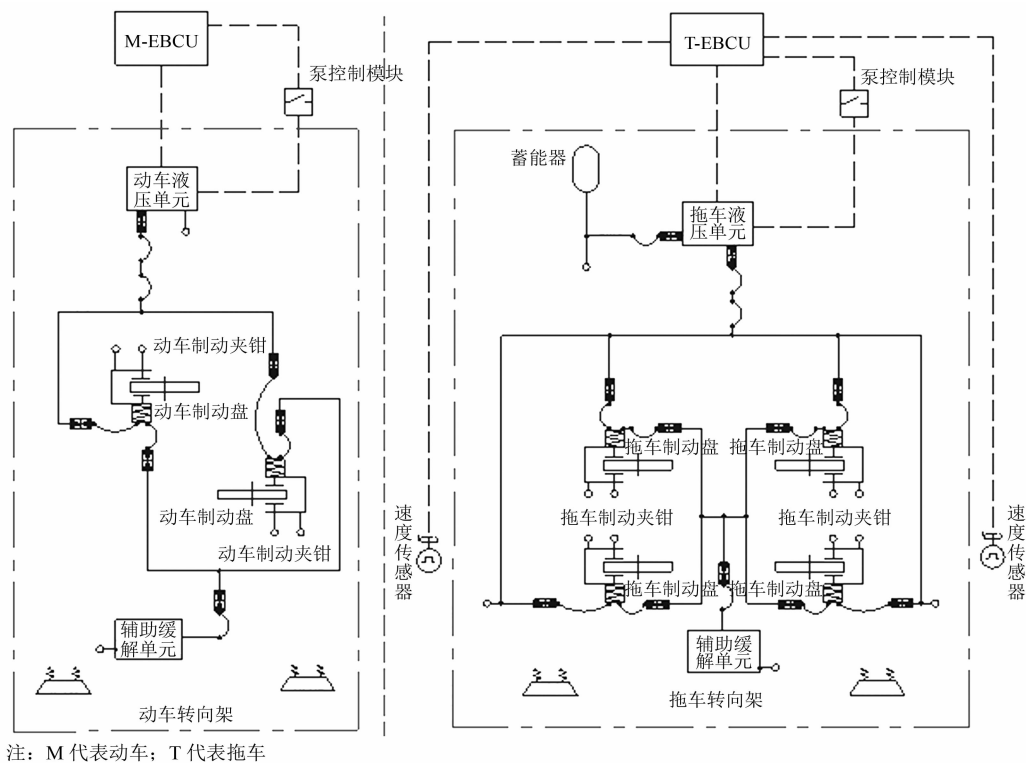


图7 液压制动系统管路图

制动(紧急制动3)、停车制动、保持制动和停放制动7种制动模式。常用制动时优先采用电制动,以减小基础制动装置的磨损,不足部分由拖车或动车上的液压制动进行补充。常用制动采用电液混合制动方式,司机操纵司机控制器可以产生7级制动编码指令,该指令通过列车线和MVB(多功能车辆总线)传送到制动控制单元进行制动力控制。在电制动力无损失的情况下,常用制动时由动车施加电制动力,至列车低速时进行电制动与液压制动的转换,由动车和拖车施加相应的液压制动力。在有电制动力损失的情况下,根据车辆载荷和制动指令由拖车或动车液压制动系统补充剩余所需的制动力。不同制动模式下液压制动系统工作方式如表1所述。

表1 不同制动模式下液压制动系统的工作方式	
制动模式	制动系统工作方式
常用制动	ED制动(0~100%)+EH制动(T)
强迫制动	ED制动+EH制动(T)
危害制动	ED制动+EH制动+MT制动
安全制动	EH制动+MT制动
停车制动	ED制动+EH制动
保持制动	EH-制动(T+M)
停放制动	EH-制动(T+M)

注:① ED——电制动;EH——液压制动;MT——磁轨制动。② 制动减速度中:危害制动>安全制动>强迫制动

3 液压制动力管理

不同制动模式下制动力的合理管理可提高行车的安全性。制动冲击率是指列车减速度变化速率。为提高乘车舒适性,还需对制动力施加和缓解的冲击率进行控制。

3.1 电制动与液压制动转换阶段制动冲击率的控制方法

列车制动过程分为常用制动阶段、停车制动阶段和保持制动阶段。常用制动阶段由电制动施加制动力,使列车速度下降。车速低于约9 km/h时,进入停车制动阶段,车辆发出停车制动指令,开始进行电制动力与液压制动力的转换。停车制动激活后,经过一定时间,电制动按固定斜率开始下降。液压制动在收到停车制动指令后按相同固定斜率开始上升,制动施加存在响应延时,液压制动力逐渐替代电制动力。电制动与液压制动转换过程中保持列车减速度平稳无冲动。车速低于约0.5 km/h时,激活保持制动,进入保持制动阶段。在保持制动模式下,通过控制液压单元中的电磁阀将液压油完全卸压,所有转向架上的液压夹钳施加最大弹簀力的制动,以保证车辆在线路最大坡道启动时不溜车。停车制动阶段制动冲击率控制方法

如图 8 所示。

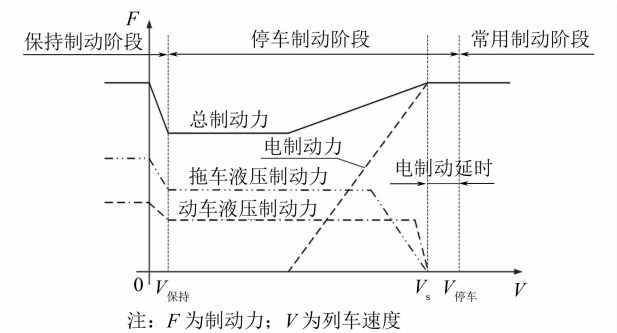


图 8 停车制动阶段液压制动力的施加方式

3.2 正常与故障工况下液压制动力管理

液压制动力的管理分为正常工况和故障工况两种模式。正常工况指电制动完全正常；故障工况指电制动力出现损失，只能发挥一部分电制动力。正常工况不同制动模式下制动力配合方式如表 2 所述，故障工况不同制动模式下液压制动力施加策略如表 3 所示。

表 2 正常工况不同制动模式下制动力施加策略					
制动模式	ED	EH(T)	EH(M)	MT	撒沙
常用制动	✓	✓			
强迫制动	✓	✓			
危害制动	✓	✓	✓	✓	✓
安全制动		✓	✓	✓	✓
停车制动	✓	✓	✓		
保持制动		✓	✓		
停放制动		✓	✓		

表 3 故障工况不同制动模式下液压制动力施加策略			
制动模式	故障工况	不同类型的车辆液压制动补偿方式	
		M	T
常用制动	1 个轴电制动故障 (1/4 或 “1/4+1/4”)	不补偿	补偿
	1 个转向架 2 个轴同时电制动故障 (1/2)	本车 Step1 施加液压制动力, 另一动车不补偿	剩余由拖车液压制动补偿 (不超黏着极限)
强迫制动	1 个轴电制动故障 (1/4 或 “1/4+1/4”)	不补偿	补偿
	1 个转向架 2 个轴同时电制动故障 (1/2)	本车 Step1 施加液压制动力, 另一动车不补偿	剩余由拖车液压制动补偿 (不超黏着极限)
紧急制动	1 个轴电制动故障 (1/4 或 “1/4+1/4”)	Step1 施加液压制动力	补偿
	1 个转向架 2 个轴同时电制动故障 (1/2)	本车 Step2 施加液压制动力, 另一动车 Step1 施加液压制动力	剩余由拖车液压制动补偿 (不超黏着极限)

注：Step2 的液压制动力大于 Step1；故障工况括号中的数据代表电制动损失程度

原制动力管理策略是：发生损失 1/2 (含 1/4+1/4) 及以上电制动故障时，由两个动车液压制动均进行补偿。这就会存在下述情况：如果某个动车发生电制动全故障时，另一个动车的电制动叠加本车补偿的液压制动，易引起该动车制动超黏着，同时由于动车液压制动不具防滑功能，易造成车轮擦伤。

本文研究的液压制动系统的制动力管理策略是：发生损失 1/4+1/4 电制动时，仅拖车液压制动进行补偿；完全损失一个动车的电制动时，由本动车液压制动和拖车液压制动进行补偿，另一个动车液压制动不进行补偿。这就降低了该动车的计算黏着要求和擦轮风险。

两种不同制动力管理策略下的黏着系数需求计算，如表 4 所示。由表 4 可知，新的制动力管理策略可有效降低最大制动黏着系数需求。

表 4 两种不同制动力管理策略下的黏着系数需求				
制动管理策略	工况	制动黏着系数需求		
		M1	T	M2
原策略	最大常用制动 (1/4+1/4)	0.13	0.12	0.13
	最大常用制动 (1/2)	0.03	0.14	0.18
	紧急制动 (1/4+1/4)	0.19	0.09	0.19
	紧急制动 (1/2)	0.04	0.17	0.32
新策略	最大常用制动 (1/4+1/4)	0.10	0.18	0.10
	最大常用制动 (1/2)	0.03	0.17	0.15
	紧急制动 (1/4+1/4)	0.15	0.17	0.15
	紧急制动 (1/2)	0.08	0.17	0.28

注：黏着系数计算为车辆额定载荷 (满座+6 人/m²) 时的计算值

4 结语

本文设计的液压制动系统为完全自主研发，且满足低地板有轨电车对制动系统的功能需求及各项技术指标要求，目前已投入生产。整个液压制动系统设计符合故障导向安全原则，故障情况下的液压制动力管理考虑了降低轮轨黏着要求及擦轮风险，可以为低地板有轨电车液压制动力管理提供借鉴。

参考文献

[1] 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(12): 9.

[2] 杜凯军,韩龙,王斌儒,等. 低地板有轨电车制动系统总体技术方案设计研究[J]. 铁道机车车辆,2016(5): 126.

(收稿日期:2019-12-19)