

城市轨道交通列车保持制动的控制逻辑优化

唐 虎¹ 陈 旭² 江 腾³ 王 璐⁴ 代忠美⁵

- (1. 株洲时代瑞唯减振装备有限公司, 412007, 株洲; 2. 一汽(南京)科技开发有限公司, 211100, 南京;
3. 南宁轨道交通集团有限责任公司运营分公司, 530028, 南宁;
4. 通号(西安)轨道交通工业集团有限公司北京分公司, 100071, 北京;
5. 昆明铁道职业技术学院, 650200, 昆明//第一作者, 工程师)

摘 要 目的:为解决城市轨道交通列车进站停车后,或大坡度坡道停车后,保持制动能正常施加,却无法正常工作缓解而导致列车不能按时启动的问题,需研究列车保持制动的控制逻辑优化。方法:应用列车保持制动的原理,重点分析其施加制动力大小的原因及其施加和缓解的控制逻辑,找出在设计保持制动时的具体错误原因,并对故障列车的保持制动进行设计优化。结果及结论:提出保持制动力的大小应按照 45% 最大常用制动力来设计的原则,以及基于具体项目制动施加和缓解的控制逻辑方法,将保持制动缓解的逻辑从列车非零速的条件转变为列车牵引力建立超过 2 s 后缓解的逻辑,解决了列车在停车后保持制动的正常施加却无法正常工作缓解的问题。

关键词 城市轨道交通; 列车; 进站停车; 保持制动; 控制逻辑

中图分类号 U270.35

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.024

Optimization of Brake Holding Control Logic for Urban Rail Transit Train

TANG Hu, CHEN Xu, JIANG Teng, WANG Lu, DAI Zhongmei

Abstract Objective: After urban rail transit train applying normal braking during entry and parking at station or on large gradient ramp, the problem of train start-up delay due to abnormal brake release occurs, thus it is necessary to study the optimization of train brake holding control logic. Method: By analyzing the design principle of train holding brake, the reason for the magnitude of braking force applied and the control logic of braking application/release are analyzed emphatically. The specific errors during design that cause brake holding are identified, and the design optimization of faulty train brake holding is conducted. Result & Conclusion: Design principle of setting brake holding force at 45% of maximum full service braking force is proposed, as well as the logic control method of braking application/release according to specific projects. The

logic of releasing the held brake is changed from the condition of train non-zero speed to 2 seconds after train traction establishment, solving the problem of train abnormal brake release after normal parking braking application.

Key words urban rail transit; train; station entry and parking; brake holding; control logic

First-author's address Zhuzhou Times Ruiwei Anti-vibration Equipment Co., Ltd, 412007, Zhuzhou, China

城市轨道交通列车在运营过程中出现设备或者信号故障会导致无法正常运行,需要对故障列车进行救援,实施救援会影响整条线路的使用效率。其中以列车 HB(保持制动)意外施加故障最为常见。虽已有相关文献对保持制动性能和控制逻辑进行分析和探讨^[1-5],但未分析设计原因及具体控制逻辑背后的深层次原因和对应的风险点。因此,本文对当前城市轨道交通列车保持制动的主流设计及其控制逻辑进行了分析,并针对故障列车的保持制动设计进行相关的优化。

1 保持制动的功能要求

结合城市轨道交通列车运营工况和特点,保持制动的功能应该满足如下需求:①当列车以 AW3(满座+9人/m²,超常载荷)停放在线路最大坡道上时,保持制动力应确保列车不溜车;②当列车进站停车时,保持制动应自动施加或启动时自动缓解;③保持制动应具备手动强迫缓解功能。

同时保持制动施加和缓解的相关状态应通过网络或硬线信号显示在司机室显示屏上。

2 保持制动力大小

目前,我国常规城市轨道交通列车项目采用 4 动 2 拖的编组设计^[6],HB 作为 SB(常用制动)的一

种特殊形式,其需要在停车后或者启动前动作确保列车在站台区域安全停车。项目设计之初会对运行线路最大坡道有限制性要求,因此保持制动的设计也要求能够使单编组 AW3 的 6 节列车停放在正线线路的最大坡道上或者 AW0(空载)停放在辅助线路的最大坡道上(通常辅助线路的最大坡道比正线最大坡道大 5‰左右),且列车不溜车。

保持制动作为 SB 的一种特定工况,是在没有机械停放制动力施加的情况下对列车进行作用的,且由于常用制动具有载荷补偿功能,并能在部分转向架空气制动故障或者被切除时实现制动能力的自动补偿。如果被切除制动的转向架过多,则剩余转向架会按照其最大输出制动力施加,此时可能无法满足列车总制动力的要求,因此也不能过多地切除转向架。要保证保持制动力的大小但不需要将其设置得过高,当前主流的作法是将其设定为最大全常用制动的 70%。

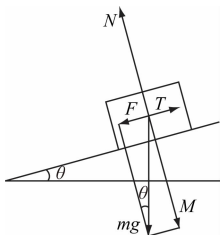
保持制动力的大小应该和列车停放在对应坡道上重力的分力保持平衡。保持制动力计算模型如图 1 所示,即存在如下理论计算式:

$$\sin \theta \cdot S m g = F_{\text{SB}} C = m a C \tag{1}$$

式中:

- S ——安全系数;
- m ——列车质量;
- g ——重力加速度,通常是 9.81 m/s^2 ;
- θ ——线路坡度角, θ 值很小,弧度 $\theta \approx i$ (线路坡度);
- C ——常用制动的百分比;
- F_{SB} ——最大常用制动力;
- a ——最大等效减速度,通常是 1.12 m/s^2 。

利用上述参数化简后得到式(2),即当安全系数 S 大于 1 时,列车即可在坡道上安全停车。不同坡道坡度所对应的保持制动力最小级位建议如表 1 所示。



注: F —下滑力,即列车重力沿平行坡道方向的分力; M —列车重力对坡道的垂向压力; T —轮轨摩擦力; N —坡道支持力。

图 1 列车保持制动力计算模型

Fig. 1 Calculation model of train brake holding force

$$S = 1.14 C / \theta = 1.14 C / i \tag{2}$$

对于主流城市轨道交通线路,其坡道坡度通常不超过 35‰,建议保持制动按照 45% 全常用制动力来设置。对于坡道超过 35‰的项目,保持制动级位可以适当增加,具体可以参考表 1 来选取合适的百分比。

表 1 不同坡道坡度所对应的保持制动的最小级位建议

Tab. 1 Recommended minimum level of brake holding corresponding to different ramp gradients

$i/\text{‰}$	列车下滑力和最大全常用制动力比值/%	建议最小保持制动级位/%	70% 级位时的安全系数	建议级位的安全系数
5	4.38	10	15.98	2.28
10	8.76	15	8.00	1.71
15	13.14	20	1.52	1.52
20	17.52	25	5.33	1.43
25	21.90	30	4.00	1.37
30	26.28	35	3.20	1.33
35	30.66	40	2.66	1.30
40	35.04	45	2.28	1.28
45	39.42	50	1.78	1.27
50	43.80	55	1.60	1.26
55	48.18	60	1.45	1.25
60	52.56	65	1.33	1.24

由表 1 可知,通常情况下 45% 级位即能满足需求,不采用 70% 级位主要有如下考虑:

1) 对保持制动缓解时间而言,小级位意味着小制动缸压力,充排气时间可以相应地缩短。这对于牵引单元利用制动控制单元的制动缸压力缓解状态的开关信号作为列车制动缓解及列车可以起动的前提条件时是相对有利的。

2) 针对部分故障状态下列车无法起动的问题,较小的制动力在此情况下可相对容易通过牵引拖拽使列车移动而不影响故障列车运行到下一站,也不需要通过切换成紧急牵引模式来解决此类问题。

因此,对于采用 45% 级位最大全常用制动的保持制动,在不同的坡道坡度上的具体安全系数可简化为:

$$S = 51.38 / i \tag{3}$$

此计算对于正常情况下是满足要求的,但是当出现部分牵引能力缺失时,可能即使 100% 级位牵引力也不能使列车移动,因此需要不同项目具体定义。当将列车切换到紧急牵引时,45% 最大常用制动的 HB 依然可以满足要求,除非不同项目具体定义级位大小。

所以即使部分转向架(如半列车)空气制动被

切除,但剩余转向架仍可以实现载荷补偿自动调整制动力分配而使列车安全停放在线路最大坡度的坡道上。不同坡道坡度所对应的保持制动级位及最多能切除空气制动的转向架之间的关系如表 2 所示。

表 2 不同坡道坡度所对应的保持制动级位及最多能切除空气制动的转向架数量

Tab. 2 Brake holding level corresponding to different ramp gradients and its relation with the maximum number of air brake bogies that can be removed

列车停放线路 $i / ‰$	空气制动满足安全停放 需要的最小制动级位/ $‰$	6 节编组列车最多能切除 空气制动的转向架数/个
20	25	9
25	30	8
30	35	7
35	40	7
40	45	6

保持制动是一种特殊的常用制动工况,在满足保持制动施加条件时,不需要具体指令就可以施加

项目所设置的默认制动级位大小的空气制动力。

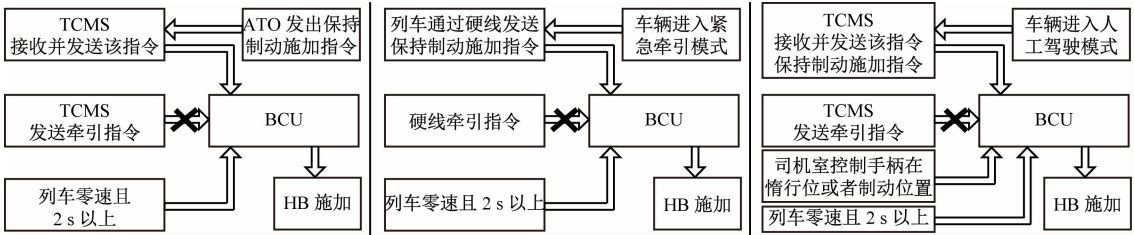
事实上,当列车施加保持制动时,列车处于静止状态,而常用制动施加时是在运动状态,虽两者在制动缸压力上是 45% 的关系,但由于动摩擦因数或者静摩擦因数小于最大静摩擦因数,而通常在理论计算时保持制动使用的动摩擦因数或者静摩擦因数,因此实际保持制动的安全系数比上述理论计算还要大,所以通常只要计算安全系数大于 1 即可。

3 保持制动的控制逻辑

3.1 控制逻辑

保持制动的施加和缓解是在列车进站停车和离站启动期间自动执行的,具体的动作需要对应的前提条件来保证。图 2 为列车保持制动施加的控制逻辑。图 3 为列车保持制动缓解的控制逻辑。在任

任何一种模式下,当至少一半列车的 BCU (制动控制单元) 和 TCMS (列车控制与管理系统) 通信故障时,所有牵引将被 TCMS 切除,且 TCMS 不会再发出保持制动缓解命令,列车需要等待救援。



注:ATO—列车自动运行。
图 2 列车保持制动施加的控制逻辑
Fig. 2 Control logic of train brake holding

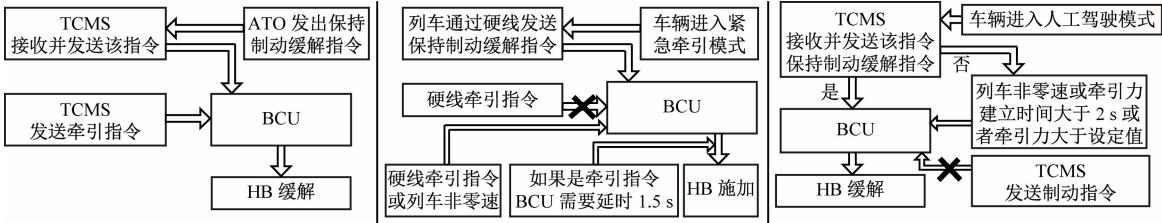


图 3 列车保持制动缓解的控制逻辑
Fig. 3 Control logic of train brake holding release

某些项目针对紧急牵引模式采取切除电制动的方

式:当牵引系统收到紧急牵引硬线信号后,自动切除电制动,避免电制动与空气制动配合混乱。此时电制动的切除意味着牵引力无法发挥。因此,在紧急牵引模式下,列车制动时需执行纯空气制动,牵引时需牵引正常发挥或者部分发挥。

3.2 控制逻辑的隐患

上述保持制动缓解逻辑中提到列车在非零速或牵引力建立时间超过 2 s 作为缓解的条件。但其背后还有深层次的隐患,需要在具体项目设计之初充分考虑到。

如采用非零速作为列车保持制动缓解的条件,

而具体项目在某些特定情况下列车的牵引力又有缺失时,此时采用此缓解条件显然是不合时宜的。因为剩余牵引力无法克服列车在坡道上的下滑力和保持制动力之和,列车不可能动车,因而保持制动一直无法缓解。另外,如列车使用100%的牵引力,则在某些坡道情况下也可能造成列车强行动车,因为此时列车有坡道下滑力和保持制动力的双重施加,100%牵引力需要足够克服这两个力的合力才能动车,否则车轮有一定的空转打滑和擦伤的风险。

如采用牵引力建立时间延时2 s作为保持制动的缓解条件,同样需考虑在特定情况下不能切除部分牵引,需保证剩余的牵引力足够克服线路上最大坡道上列车的下滑力(即牵引力需要大于某一个设定值)。这样在牵引力建立起来延时2 s后,保持制动缓解,列车可在坡道上正常动车。如果牵引力过小,2 s后保持制动缓解而牵引力又不足以克服列车在坡道上的下滑力,列车必然有后退溜车的风险。

此外,文献[4]对于某项目在救援工况下的保持制动缓解逻辑进行了分析并提出改进措施,同时分析了现有控制逻辑和改进控制逻辑的利弊,提出设计之初需要统筹考虑各方面需求,最终保障列车运营安全。

通常情况下当列车需要救援时,是由一辆AW0列车救援AW3故障列车,此时的保持制动力需要大于两列车在最大坡道上的下滑力总和才能确保不溜车。

3.3 故障列车控制逻辑的优化

由上述分析和查阅故障列车保持制动设计的原始资料发现,列车在设计之初没有充分考虑线路大坡度的存在,使用70%最大常用制动力作为保持制动的输出力大小,且对于其缓解逻辑采用列车非零速作为缓解保持制动的条件,而当时列车处于紧急牵引模式下,牵引控制单元的制动力有部分损失,总牵引力小于列车在坡道上列车自身的下滑力和保持制动力总和,因此就造成列车非零速一直无法启动、保持制动一直无法缓解的现象,列车需要等待救援,而严重影响正线运营秩序。

针对上述故障,需要优化其保持制动缓解的逻辑,将非零速缓解调整为牵引力建立时间超过2 s后缓解。同时,通过计算发现列车在紧急牵引模式下的总牵引力大约为最大常用制动力的55%左右大于列车在最大坡度40‰的坡道上的下滑力。综合考虑各方因素,建议将保持制动从70%最大常用制动力调整为45%最大常用制动。这样可满足列

车在最大坡度的坡道上在保持制动力作用下的安全停车。同时当列车在平道上遇到保持制动的意外施加时,由于最小的牵引力已经大于保持制动力,正常模式下牵引系统可以及时牵引列车迅速运行到最近的站台区间,及时疏散客流,以避免大规模正线延误的发生。

4 结语

为解决城市轨道交通列车进站停车后,或在大坡度坡道上停车后列车无法正常启动的问题,提出保持制动力大小的优化设计和制动施加及缓解的控制逻辑优化方案,并对当前保持制动的控制逻辑进行分析,提出相关逻辑条件的隐患,期望在新项目设计之初能够充分考虑各方面的需求和建议,在保证列车使用安全的同时,提前规避设计之初由于考虑不周而造成的故障隐患。

参考文献

- [1] 张杨. 广州地铁一、二、八保持制动缓解控制设计[J]. 技术与市场, 2013, 20(5): 76.
ZHANG Yang. Design of mitigating holding break for Guangzhou Metro Line 1 & 2 & 8[J]. Technology and Market, 2013, 20(5): 76.
- [2] 梁建全,陈谢军,郭小行,等. 时速250 km城际动车组保持制动方案设计[J]. 铁道列车, 2015, 53(4): 15.
LIANG Jianquan, CHEN Shujun, GUO Xiaohang, et al. Design of the braking holding scheme of intercity multiple units with the speed of 250 km/h[J]. Rolling Stock, 2015, 53(4): 15.
- [3] 曾华南,毛凯敏,尹志春. CRH6A型城际动车组保持制动性能研究[J]. 电力机车与城轨列车, 2018, 41(6): 17.
ZENG Hua'nan, MAO Kaimin, YIN Zhichun. Study on keeping brake performance of type CRH6A intercity EMU[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2018, 41(6): 17.
- [4] 赵寅皓. 某项目地铁列车保持制动缓解控制改进探讨[J]. 技术与市场, 2018, 25(8): 61.
ZHAO Yanhao. Discussion on improvement of holding brake release control for metro vehicles in a project[J]. Technology and Market, 2018, 25(8): 61.
- [5] 马永靖,朱灵允,孟繁辉,等. 高速动车组保持制动控制逻辑设计研究[J]. 铁道机车列车, 2019, 39(6): 50.
MA Yongjing, ZHU Lingyun, MENG Fanhui, et al. Research on logic design of holding brake control for high-speed EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(6): 50.
- [6] 陈旭,赵建飞,李毅. 地铁列车纯空气制动滑行研究[J]. 铁路技术创新, 2019(5): 37.
CHEN Xu, ZHAO Jianfei, LI Yi. Research on pneumatic braking system sliding of metro vehicle[J]. Railway Technical Innovation, 2019(5): 37.

(收稿日期:2021-01-20)