

重庆地铁列车牵引系统与制动系统的配合分析

黄显武, 张 宾, 毛康鑫, 王 龙

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 介绍了重庆地铁列车国产化牵引系统主电路配置与制动系统配合的原则, 对比分析牵引系统与中国铁道科学研究院机车车辆研究所研制的制动系统和法维莱交通设备科技有限公司研制的制动系统配合在控制上的区别。试验证明牵引系统与制动系统的良好配合满足地铁的运用要求。

关键词: 牵引系统; 制动系统; 列车控制; 诊断系统; 电空配合; 重庆地铁

中图分类号: U231

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.05.022

Matching Analysis of Traction and Brake System for Chongqing Metro Vehicle

HUANG Xianwu, ZHANG Bin, MAO Kangxin, WANG Long

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The principle of domestic traction system main circuit configuration and the matching with the brake system for Chongqing metro vehicle was introduced. The control difference of traction system matching with China Academy of Railway Sciences developed brake system and Faiveley Transport Group developed brake system was compared and analyzed. The test proved that the good matching of traction system and brake system satisfied the metro vehicle operation requirement.

Keywords: traction system; brake system; vehicle control; diagnosis system; coordination of electric brake and pneumatic brake; Chongqing metro

0 引言

重庆市是中国著名的“山城”, 主城区地势起伏不平、人口密集、道路狭窄、坡陡弯急、交通拥挤, 为了促进城市发展, 必须建设载客容量较大的城市轨道交通系统。截止到2015年, 重庆市已相继开通跨座式单轨2、3号线及地铁1、6号线共4条线路, 大大缓解了市民出行的压力。开通的地铁1、6号线部分列车, 所采用制动系统有法维莱交通设备科技有限公司(简称法维莱)的产品, 也有中国铁道科学研究院机车车辆研究所(简称铁科院)的产品, 电气牵引系统均采用株洲中车时代电气股份有限公司自主开发的产品, 所以存在牵引系统同时与不同的制动系统配合问题。

1 列车参数及性能要求

1.1 车辆基本参数

列车采用架空接触网受电, 供电电压DC 1 500 V (DC 1 000~1 800 V), 车轮轮径为840/805/770mm(新轮/半磨耗/全磨耗), 传动比为6.312 5 (101/16)。列车由6辆车组成, 4动2拖配置。具体编组形式: +Tc-Mp-M+M-Mp-Tc+。T为带司机室的拖车, M为动车, Mp为带受电弓的动车, +采用半自动车钩, -采用半永久棒式车钩。

1.2 动力性能

列车在干燥、清洁的平直轨道上, 在超员载荷(AW3)、额定网压以及车轮半磨耗状态下, 性能要求如下:

列车平均加速度 从0加速到40 km/h为1.0 m/s²

从 0 加速到 100 km/h 为	0.5 m/s ²
常用制动平均减速度	≥ 1.0 m/s ²
紧急制动平均减速度	≥ 1.2 m/s ²
平均旅行速度	不小于 43 km/h

1.3 列车故障救援运行及坡道救援能力

6 辆编组列车在超员（AW3）状态下，当损失 1/4 动力时，列车仍然可以在 35‰（考虑新线车辆的通用性）的坡道上启动，并维持一次全程运行，行驶至终点站乘客下车后返回车辆段。

6 辆编组列车在超员（AW3）状态下，当损失 1/2 动力时，列车仍然可以在 35‰（考虑新线车辆的通用性）的坡道上启动，并运行至下一站，清客后自行运行回段。

2 电气牵引系统

重庆地铁列车电气牵引系统由电传动系统、列车控制及诊断系统（TCMS）以及辅助系统构成。电传动系统满足规定的车辆动力性能、故障运行 / 救援能力以

及实现预期的旅行速度等，并综合考虑系统各参数匹配，满足地铁列车特殊的运行工况以及电气性能要求；TCMS 系统实现列车控制、通信管理、监视及故障诊断等功能；辅助系统负责为整车提供中 / 低压电源，此项目采用的辅助系统由于应用已经相当普遍，此处将不再赘述。

2.1 电传动系统

牵引电传动系统主要由主电路、牵引传动控制单元组成，提供列车的牵引 / 电制动力，实现列车的牵引顺序逻辑控制、故障保护及列车牵引 / 电制动运行等。

2.1.1 主电路

主电路原理图如图 1 所示，包括熔断器及隔离开关箱、高压电器箱、线路电抗器箱、牵引逆变器箱等设备。列车基本配置为 6 辆车编组，包括 4 辆动车和 2 辆拖车，每辆动车配置 1 套牵引系统。

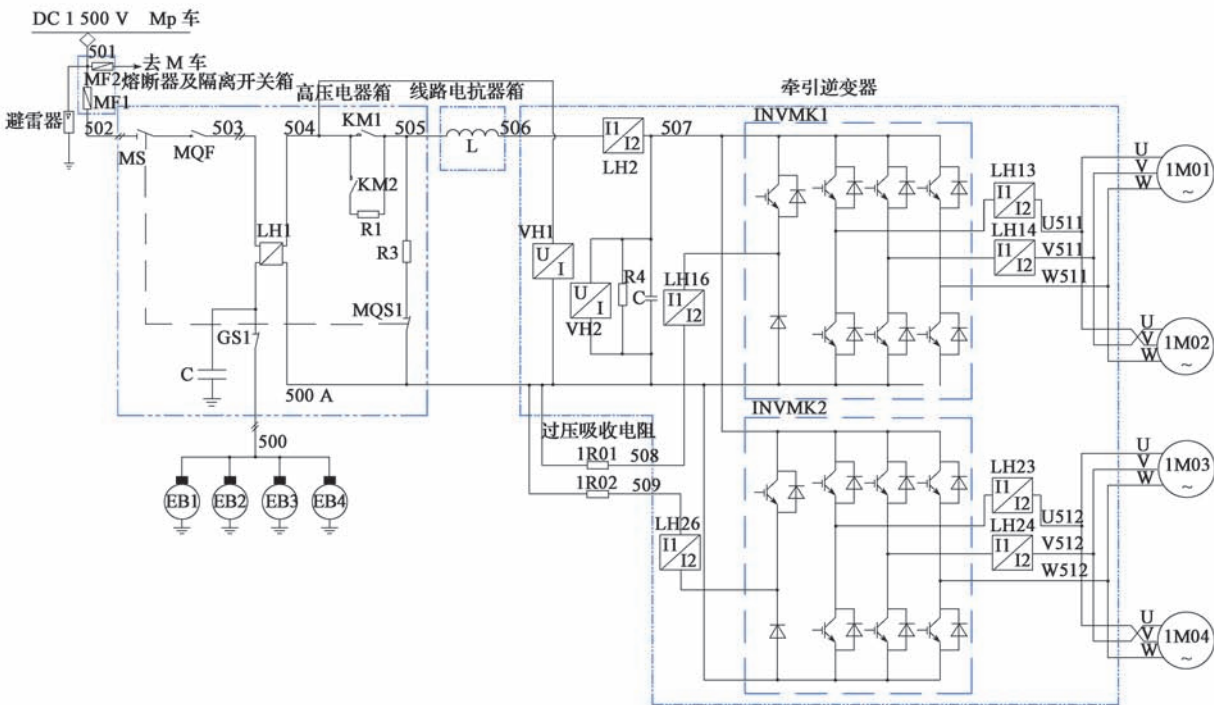


图 1 主电路原理图

2.1.2 牵引传动控制单元

牵引逆变器内含 1 个传动控制单元（DCU）。DCU 对外连接列车总线（MVB），将牵引电传动系统与 TCMS 联系起来，与列车制动控制系统通过 TCMS 互相通信，实现信息交换，具有可靠、高效、标准化、智能化的特点。

2.2 列车控制及诊断系统（TCMS）

TCMS 采用分布式控制技术，符合 IEC 61375 标准，整个列车通信网络划分为 2 级：列车控制级、车辆控制级。列车控制级总线和车辆控制级总线均采用 EMD 通信介质的 MVB。中继模块 REP 作为列车级总线和车辆级总线的网关，实现列车级总线到车辆级总线的

数据转发功能。

3 与制动系统配合总原则

铁科院制动系统与法维莱制动系统虽在控制理论上不同，但对于车辆的硬线电路以及逻辑控制基本相同。图 2 为制动系统（EBCU）、牵引系统以及列车控制及诊断系统（TCMS）的硬电路图。

制动系统（EBCU）、牵引系统、列车控制及诊断系统（TCMS）之间的配合原则：

① EBCU 与 TCMS 采用 MVB（EMD）总线进行通信，EBCU 采用级连方式。

② 列车制动管理和制动力分配、计算（含全列车

交叉混合制动)由EBCU负责。EBCU根据制动级位和载荷等信息,计算总制动力和电制动力大小,并将申请电制动力大小经由TCMS发送给DCU。TCMS将DCU传来的实际电制动力大小、电制动可用、电制动衰减、电制动滑行、电制动有效信息发送给EBCU。同时TCMS传输列车的总制动力及各EBCU的工作状态

③在电制动衰减前0.45 s,由DCU通过TCMS向EBCU提供电制动衰减信号。

④VVVF在再生制动过程中,向EBCU输出电制动有效信号。当电制动检测到滑行时,电制动进行防滑控制,同时向EBCU发出电制动滑行信号,发生滑行动车的空气制动力不再增加。当电制动防滑控制失效时,电制动切除,同时切除牵引电机的励磁电流,发给EBCU的电制动有效信号和滑行检测信号的输出均为无效,由空气制动实施防滑控制。在电空混合制动中,一旦电制动退出,在一次制动过程中(指令没有转为牵引)不再施加电制动。

⑤非ATO模式且TCMS正常情况下,保持制动的施加和缓解由网络系统提供。

⑥紧急牵引情况下,保持制动的施加与缓解由制动系统实施。

⑦增加一个保持制动旁路开关硬线信号给TCMS,该信号有效时,TCMS向EBCU输出保持制动旁路信号。

⑧空压机采用单双日控制方式,由TCMS将空压机启动允许信号发送给EBCU,EBCU通过硬线控制空压机启动。

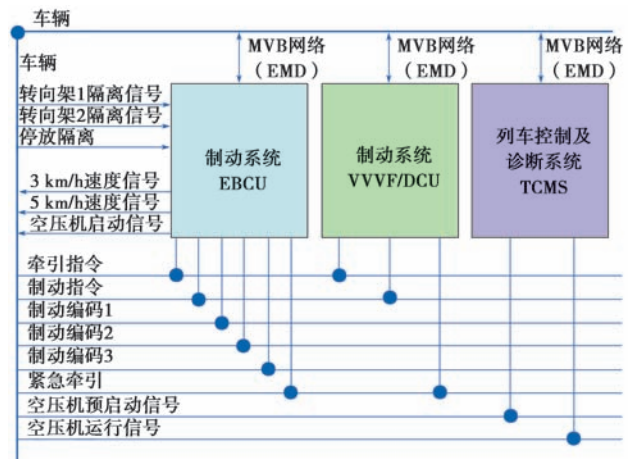


图2 硬线电路图

4 制动系统配合控制逻辑对比分析

4.1 高速段电空配合

重庆地铁列车制动力管理、分配和计算由制动系统(EBCU)完成,EBCU计算每节动车电制动力申请值的大小,并经由TCMS将电制动力申请值发送给牵引传动控制单元DCU,DCU依据电制动申请值发挥电制动,并将实际电制动力反馈给EBCU,EBCU补充不足部分。高速时,电制动力的建立需要一定的时间,包括网络延时和电制动力的上升时间,如图3所示,

EBCU收到TCMS的制动指令和制动级位后,计算电制动申请值并发送给DCU,经过时间 Δt_1 后,DCU接收到电制动申请值,并按一定斜率增加电制动力至100%,电制动力的上升时间为 Δt_2 。在此期间,EBCU会实时比较实际电制动力是否是列车所需的总制动力,若不满足就会补充空气制动,显然在 Δt_1 、 Δt_2 期间电制动力是不能满足整车制动力要求的,需补充一定的空气制动,然后又迅速撤销。但实际上 Δt_1 、 Δt_2 期间补充空气制动是不必要的,会增加闸瓦磨耗,因此需要采取一定的措施在电制动建立期间不补空气制动。

针对该问题,在装有铁科院制动系统的列车上,由网络在电制动建立过程中发送虚拟的实际电制动力给EBCU,如图4所示。在电制动正常的情况下,检测到制

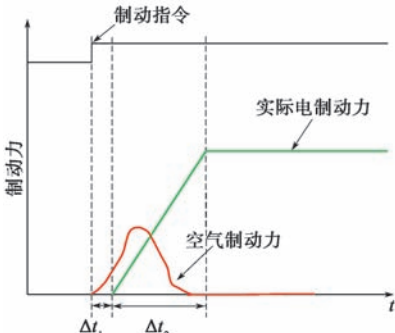


图3 电制动建立过程中会补充空气制动

动指令后的 Δt_3 内模拟一个实际电制动力给EBCU,此时EBCU认为电制动力能满足整车需求,因而不会补充空气制动。该虚拟电制动力仅持续 Δt_3 ,之后网络撤销虚拟电制动力,将来自DCU的实际电制动力转发给EBCU。此时DCU的电制动力已经建立,EBCU仍然不会补充空气制动,这样使得整个电制动建立过程中都不会补充空气制动。另一方面,电制动虚拟值仅维持 Δt_3 时间,且当网络监测到电制动故障时,会立即取消,因而在列车对制动指令响应的及时性方面不会有影响。在装设法维莱制动系统的列车上采取另一种方法:若电制动正常,EBCU在检测到制动指令的2 s内不补充空气制动,2 s后根据DCU反馈的实际电制动力计算,若电制动力能满足整车制动力需求则不补充空气制动,否则补充不足部分;若检测到电制动故障,则立即补充空气制动。

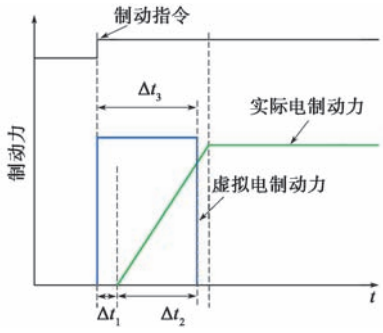


图4 增加虚拟电制动后不会补充空气制动

虽然与铁科院制动系统和法维莱制动系统配合时采取的方法不一样,但其本质和目的是一致的,都是在电制动正常的情况下,等待一段时间,让电制动完全建立,从而达到高速段不补充空气制动的目的。

4.2 低速段电空转换

电空转换是指低速段电制动退出、空气制动补充的

过程,即列车制动力由全电制动转为全空气制动。该转换过程对ATO精确停车影响较大,一般要求转换过程中减速度变化平滑,尽量不损失车辆减速度,且要求不同工况下的一致性。电空转换时,由DCU提前一段时间 Δt_1 发“电制动预退出”信号给EBCU, Δt_1 后电制动按一定的方式下降至0,空气制动以同样的方式上升至最大值,从而保证整车制动力没有较大的波动。

与法维莱制动系统配合时,DCU发“电制动预退出”信号的速度点是不固定的,电制动力退出遵循以下原则:①电制动力开始退出的速度点不固定,级位越小,开始退出的速度点越小;②电制动力按照固定的减速度变化率(冲击率)曲线退出,冲击率为 K ;③电制动力在 $V=1.5\text{ km/h}$ 左右完全退出;④DCU发出电制动退出信号的时间与电制动力真正开始退出的时间存在一定时间间隔 Δt_1 。

电制动退出曲线如图5所示。DCU在 t_1 时刻(此时速度为 V_1)发出电制动退出信号,经过 Δt_1 时间后,在 t_2 时刻(此时速度为 V_2)电制动开始退出,同时制动系统开始补充空气制动,在 t_3 时刻(此时速度为 V_3)电制动完全退出。

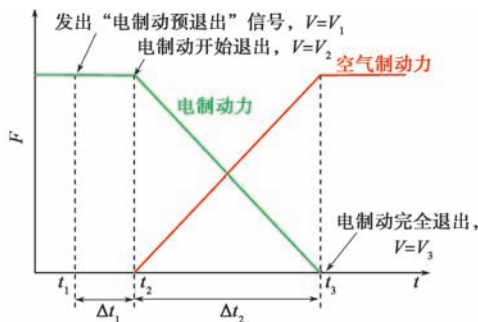


图5 法维莱制动系统电制动退出示意图

为了最大限度利用电制动,DCU发出“电制动退出”信号的速度点 V_1 与电制动开始退出的速度点 V_2 不固定,根据当前车辆状态的变化而变化。

DCU根据当前载荷(M),级位信息(减速度 a),电制动力请求(F),计算 V_1, V_2 :

$$\Delta t_2 = \frac{F}{M \times K} \quad (1)$$

$$V_1 = V_3 + 3.6 \times a \times (\Delta t_1 + \Delta t_2) = V_3 + 3.6 \times a \times \left(\Delta t_1 + \frac{F}{M \times K} \right) \quad (2)$$

$$V_2 = V_3 + 3.6 \times a \times \Delta t_2 = V_3 + 3.6 \times a \times \frac{F}{M \times K} \quad (3)$$

根据式(2)与式(3)可以看出,当前电制动力越小,电制动开始退出的速度点越小,当前电制动力越大,电制动开始退出的速度越大。

与铁科院制动系统配合时采用的是固定速度点发“电制动预退出”信号,如图6所示。DCU发出“电制动预退出”信号 Δt_1 时间后,电制动根据列车速度

大小逐渐退出,约 2 km/h 退完;EBCU为了能快速响应,会提前补充一定的预压力,在收到“电制动预

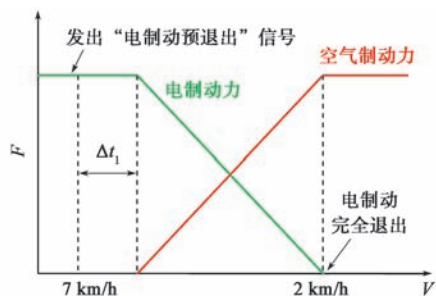


图6 铁科院制动系统电制动退出示意图

退出”信号后开始补充空气制动,同样根据速度大小,约 2 km/h 时补充至当前制动级位下的最大制动力。

5 试验验证

高速段电空配合时,与法维莱制动系统、铁科院制动系统配合采取的方法本质上是一样的,因此试验结果基本一致,电制动建立过程中几乎没有补充空气制动,配合效果比较好。

低速段电空转换,跟法维莱的配合方式1优于跟铁科院的配合方式2。方式1中,当制动级位越小时,电制动退出的速度点越低、空气制动补充得越少、电空转换的时间越短;而方式2中,电制动退出的速度点和电空转换时间都是固定的,都比较大。相对来说,方式1对闸瓦磨损和ATO精确停车都比较有利,因此后续列车与铁科院制动系统电空转换的配合方式也改成了方式1。

6 结语

DC 1 500 V 重庆地铁1、6号线列车是株洲中车时代电气股份有限公司电气牵引系统首次与不同制动系统供货商配合的地铁列车,配合达到了相同效果。1号线于2010年7月、6号线于2012年9月相继载客运营,装载着不同制动系统而牵引系统相同的列车混跑在重庆地铁6号线线路上,均满足合同指标,运营效果良好。

参考文献:

- [1] 丁荣军, 陈文光. 地铁车辆用交流传动系统的设计[J]. 机车电传动, 2001(5).
- [2] 陈文光, 丁荣军. 国产化北京地铁列车牵引电传动系统设计[J]. 机车电传动, 2006(4).
- [3] 李伟, 陈文光, 陈超录, 等. 重庆地铁6号线车辆牵引与电制动特性设计及性能计算仿真[J]. 机车电传动, 2012(5).



作者简介: 黄显武(1977-), 男, 工程师, 一直从事城市轨道交通变流器部件及牵引系统的研究。