

电机械制动系统在地铁列车中的应用

王晓东¹ 田 春² 袁泽旺² 王相波¹

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛;

2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 地铁列车空气制动系统存在电能转化成空气压力能的中间环节, 限制了制动响应速度和控制精度的进一步提高。探讨了一种应用于地铁列车上的直接采用电能驱动摩擦副的电机械制动技术。介绍了电机械制动系统的组成原理、系统方案, 并分析了其使用特点。相比于空气制动系统, 电机械制动系统简化了结构, 提高了可靠性, 可实现地铁列车制动动力源、制动控制和制动执行的分布化、全电气化和高度智能化。

关键词 地铁列车; 电机械制动系统; 智能化

中图分类号 U270.352

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.033

Application of Electro-Mechanical Braking System in Metro Train

WANG Xiaodong, TIAN Chun, YUAN Zewang, WANG Xiangbo

Abstract The intermediate link of converting electrical energy into air pressure energy in metro train air braking system might limit the further improvement of braking response speed and control accuracy. In this paper, the application of electro-mechanical braking technology to metro train is discussed, which directly uses electric energy to drive the friction pair for metro train. The composition principle and system scheme of electro-mechanical braking system are introduced, the application characteristics of which are analyzed. Compared with the air braking system, the electro-mechanical braking system simplifies the system structure, improves the system reliability, and therefore can realize the distributed design, full electrification and high intelligence of metro train breaking power source, braking control and execution.

Key words metro train; electro-mechanical braking system; intelligence

First-author's address CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

目前, 地铁列车广泛应用空气制动这一传统的摩擦制动方式。空气制动系统的动力源需要历经电流—空气压力能—机械摩擦的转换过程^[1], 存在

电能转化为空气压力能这个中间环节, 降低了能量利用率。空气制动系统的制动信号传输虽然是电气指令式, 但产生制动力的信号也仍然要经历电—空气压力—机械作动的转变, 响应速度和控制精度不高。随着地铁列车电气化的发展和电气电子技术的进步, 将电能直接转化为机械驱动能、电信号直接转化为机械作动信号的电机械制动系统, 已成为地铁列车的新一代制动系统^[2]。电机械制动技术最早出现在航空领域^[3-4], 而后在汽车领域也得到了广泛应用和研究^[5-6]。本文旨在探讨电机械制动技术在地铁列车上的应用。

1 地铁列车电机械制动原理

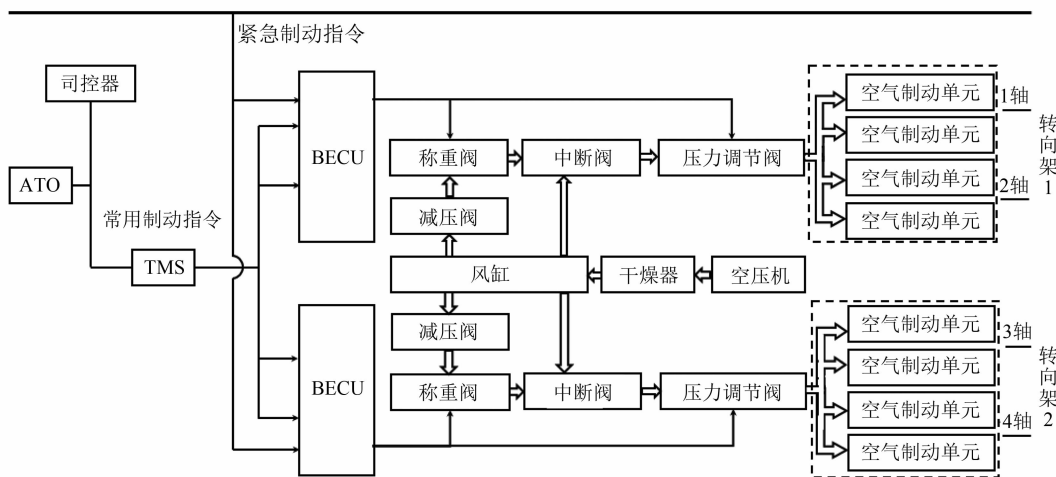
地铁上较典型的空气制动系统结构原理如图 1 所示, 制动源动力来自于空压机提供的空气压力能; 来自 BECU(制动电子控制装置) 的制动指令需要经过减压阀、中继阀等多个阀类部件, 最终将制动压力传递至空气制动单元。

电机械制动系统采用电机直接驱动闸片/闸瓦, 利用闸片与制动盘或闸瓦与车轮踏面的摩擦而产生制动力。与空气制动相比, 省去了电能转化为空气压力能的中间环节。图 2 是电机械制动系统结构原理图。其制动源动力来自于电能, BECU 发出的制动指令直接传递至每个电机械制动单元, 可实现每个车轮的独立控制。

对比图 1 和图 2 可以发现, 电机械制动系统省去了空压机、制动风缸、制动管路和阀类等诸多部件, 简化了系统结构, 提高了制动系统可靠性。

2 地铁列车电机械制动系统方案

电机械制动系统适用于各型地铁列车, 可满足不同轴重、不同运营速度列车的需求。本文以 6 辆编组地铁列车为例, 对地铁列车电机械制动系统方案进行介绍。



注：ATO代表自动运行；TMS代表列车管理系统

图 1 空气制动系统结构原理图

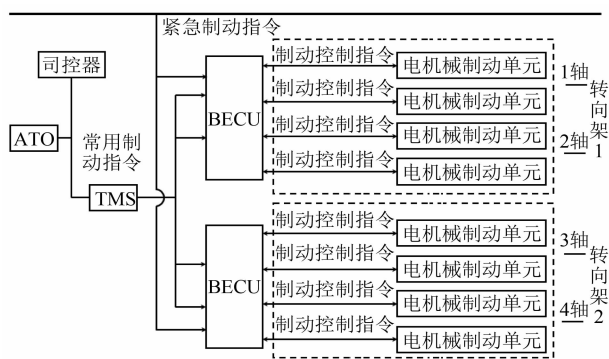


图 2 电机械制动系统结构原理图

2.1 电机械制动系统组成

地铁列车电机械制动系统采用微机控制方式，可实现动力制动与摩擦制动复合制动功能。电机械制动系统主要组成部件包括电机械制动控制装置和电机械夹钳单元。图 3 是中车青岛四方下一代地铁列车上的电机械制动系统及其主要组成部件。电机械制动控制装置为系统的控制部件，电机械夹钳单元为摩擦制动的执行器，均采用电机驱动。所有电机械夹钳单元相互独立，制动控制装置可对每一个电机械夹钳单元进行独立控制，即制动力的控制实际上是轮控/盘控形式。

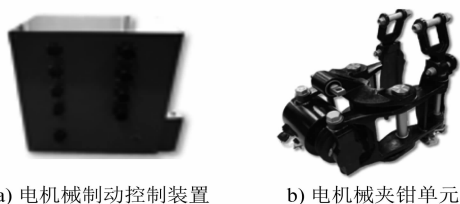
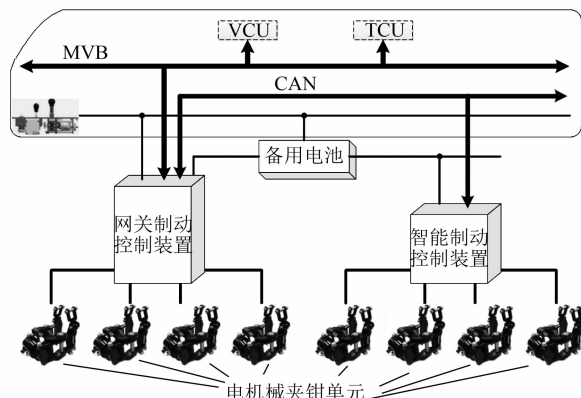


图 3 中车青岛四方下一代地铁列车上的电机械制动系统主要部件

根据具体应用中安装空间及安装位置的需要，制动控制装置可采用集中式或分布式设计。为便于电机械制动控制装置与夹钳单元间布线，制动系统采用分布式方式在转向架附近就近安装，可减少线缆长度。图 4 给出了此方式下的电机械制动系统单车拓扑图。图 4 中，1 辆车设置 2 台电机械制动控制装置，分别为网关制动控制装置（GBCE）和智能制动控制装置（SBCE），这两种装置均具有本转向架制动及防滑控制等功能。其中，具备网关功能的 GBCE 还可通过 MVB（多功能车辆总线）等方式与列车其他系统进行通信，具有制动力计算、分配、与电动力混合作用等功能。此模式下每个制动控制装置控制 4 套电机械夹钳单元。每辆车设置 1 套备用电池，电池管理模块集成于控制装置内部，当列车 DC 110 V 控制电源失电时，自动切换为备用电池供电，充分保证制动能力。



注：VCU代表车辆控制单元；TCU代表索引控制单元；CAN代表控制器局域网

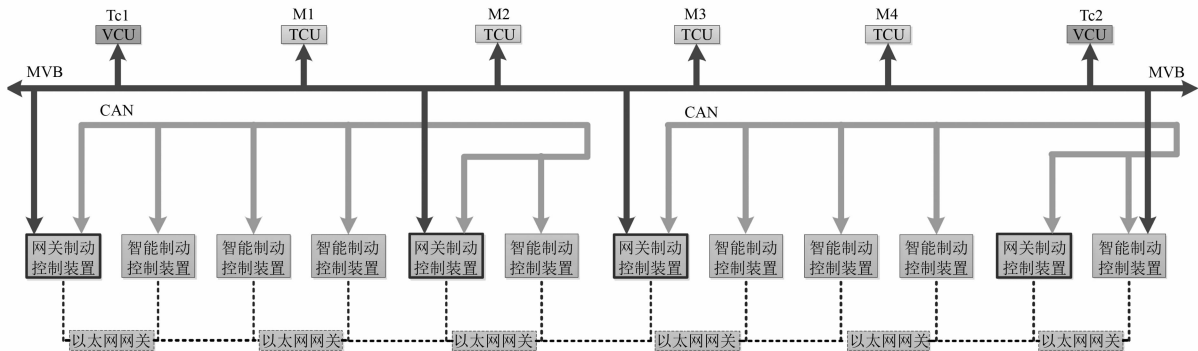
图 4 Tc 车单车电机械制动系统拓扑图

2.2 电机械制动系统的网络架构

电机械制动系统的网络架构可灵活配置,根据制动控制装置的选型和实际需要,可配置为无制动内网和有制动内网两种模式。其中,无制动内网模式下,每套控制装置均需配备列车网络接口,制动控制装置间通信通过列车网络实现;有制动内网模式下,根据冗余度等要求可以减少带列车网络接口的网关制动控制装置数量,以不带列车网络接口的智能制动控制装置代替,制动控制装置间通信通过制动内网实现。一般情况

下,列车总线采用 MVB 或以太网,制动系统内网采用 CAN。

如图 5 所示为有制动内网模式的网络架构。其中,GBCE 是带 MVB 接口的网络制动控制装置,SBCE 为本地制动控制装置,两者之间通过 CAN 进行联系。全列车分 2 个 CAN 网段,每个网段包含 3 辆车的 6 台制动控制装置节点。每个网段中部署 2 台 GBCE,其中,1 台为主控,另外 1 台为冗余。同时,各架制动控制装置均设有以太网接口,贯穿全列车组网,用于系统维护。



注：M1、M2、M3、M4 表示无受电弓的动力车；Tc1、Tc2 表示带司机室的拖车

图 5 电机械制动系统网络架构

2.3 电机械制动系统功能

电机械制动系统可具备空气制动系统的所有功能,包括常用制动、紧急制动、保持制动、停放制动、制动隔离、载荷调整、冲动控制、滑行控制、预压力和电制动预衰减校正(补偿)、制动不缓解检测功能、制动力已施加状态检测功能、停放制动力已施加状态检测功能、自诊断功能、救援与回送、远程缓解(选配)、空压机启停控制、故障诊断,以及数据日志与数据的存储等。同时,由于电机械制动系统中电机械夹钳单元通过对电机的精确控制可实现闸片间隙智能调整,因而具备闸片/闸瓦磨耗的在线监测功能。这是电机械制动系统独有的特性之一。

2.4 电机械制动系统可靠性

电机械制动系统和空气制动系统在制动指令产生、指令传输和制动摩擦副这些环节上基本无差别,主要区别在于动力传递方式的不同。对于动力传递环节,原系统和电机械制动系统的可靠性框图对比如图 6 所示。

电机械制动系统取消了大部分气路元件,并且制动缸组件采用更简单的机械传动结构,因此系统的零部件数量比空气制动系统更少。此外,空气制动系统包含较多气路元件,且气路元件通常比较容

易出现故障。因此,电机械制动系统在零部件数量和动力传递可靠性方面比空气制动系统更具优势。

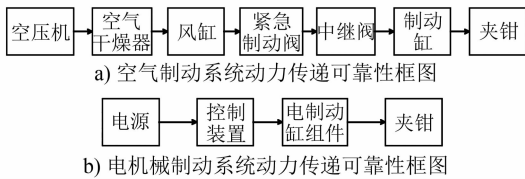


图 6 动力传递可靠性框图对比

另外,电机械制动系统的执行机构采用单元制动器形式,可独立接收制动控制信号以实现每个盘形制动单元的制动与缓解。理论上,当某一制动器发生故障时,对于列车而言仅损失了该单元制动器的摩擦制动力。对于空气制动系统而言,由于气路连通极易造成 1 套制动装置发生故障,引起多套甚至一辆车的制动力损失。由此可见,电机械制动系统在提供制动力层面上具有更高的可靠性。

3 地铁列车电机械制动系统特点分析

电机械制动系统可实现制动力源、制动控制和制动执行的分布化、全电气化和高度智能化。主要特点如下：

1) 高冗余度。电机械制动系统可以实现“轮/

盘控”,每个基础制动单元都是相互独立进行控制,这也就意味着其制动力的冗余度极高。

2) 系统轻量化。电机械制动控制与电机械夹钳一体化,结构紧凑且系统轻量化。相比空气制动系统,每辆车减重 30% 以上,大大简化了系统结构、降低了装配和维护的难度,节约了成本。

3) 制动响应快。电机械制动系统由于其响应迅速、控制精度高,不但有利于列车制动过程的舒适度控制和停车精度的提高,也为研究新型智能防滑控制手段创造了条件,有望实现对沿用至今的防滑控制模式做出重大突破。图 7 a) 是电机械制动系统阶段制动与阶段缓解试验曲线,由图 7 a) 可以看出,通过试验测得的制动缸推出力与给定的参考值跟随性极好;图 7 b) 是电机械制动系统按照正弦指令输出的制动缸推出力结果,由图 7 b) 可知,制动缸推出力试验值与参考值之间跟随性很好,这是传统的空气制动系统难以实现的控制精度。

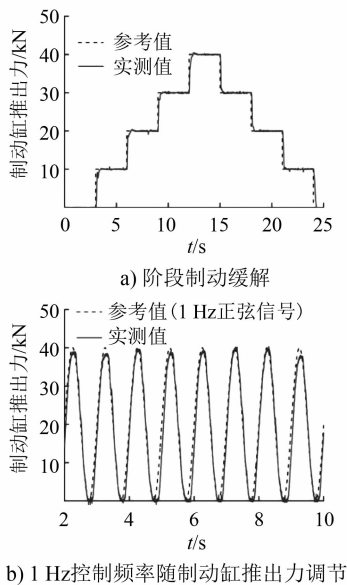


图 7 电机械制动单元试验曲线

4) 系统控制智能化。电机械制动系统不但实现了制动缸推出力的闭环控制,而且实现了闸瓦/闸片间隙的智能调整和磨耗量的在线智能监测,以及系统功能的智能化控制。

5) 系统监测智能化。由于电机械制动系统实现了全电气化,可以对全系统进行全面监测,做到对系统动态信息的实时感知、智能诊断和决策及

在途预警,以及对各种可能出现的故障系统自动处理或提示司机采取对应的安全措施,实现对故障的快速定位和处理。

6) 系统运维智能化。电机械制动系统易监测、电气化、智能化、模块化的特点也为电机械制动系统运维智能化奠定了基础,可以减少制动系统维护量,降低系统的全寿命周期成本。

7) 节能环保。由于电机械制动系统采用电能直接转化为机械能而产生摩擦制动力,无需将电能先转化为气体或液体的压力能再转化为机械能的中间环节,降低了效率损失,提高了能源利用率。电机械制动技术无需气、液传动介质,提高了其生产、运输、安装调试、运用维护全过程的清洁度,并使空气制动系统压缩空气带来的噪声显著降低。

4 结论

1) 电机械制动系统采用电能直接驱动摩擦副,省去了空气制动系统将电能转化成压力空气能的中间环节,简化了系统结构,提高了系统可靠性。

2) 电机械制动系统可实现地铁列车的制动动力源、制动控制和制动执行的分布化、全电气化和高度智能化。

参考文献

- [1] 饶忠. 列车制动[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [2] 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(1): 134.
- [3] MOSELEY D D, CARTER T J. Performance testing of an electrically activated aircraft braking system[C]//Aerospace technology conference and exposition. Anaheim: SAE international, 1998: 1-32.
- [4] LIU Z, LI Z, QIN C, et al. The review and development of the brake system for civil aircraft[C]//IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems. Beijing: IEEE, 2016: 762-767.
- [5] MARON C, DIECKMANN T, HAUCK S, et al. Electromechanical brake system: actuator control development system[C]//SAE International Congress and Exposition. Detroit: SAE International, 1997: 37-42.
- [6] 赵一博. 电子机械制动系统执行机构的研究与开发[D]. 北京:清华大学,2010.

(收稿日期:2020-03-05)