

轨道车辆电子机械制动研究进展

苗峰, 毛景禄*, 杨磊, 张敬斌, 王帅

中车制动系统有限公司, 青岛 266031

摘要 阐述了轨道车辆电子机械制动技术的研究进展, 介绍了电子机械制动技术的制动原理, 分析了电子机械制动技术在轨道车辆应用领域所需攻克的关键技术; 概述了国内和国外轨道车辆电子机械制动技术的研究现状; 探讨了电子机械制动在轨道车辆行业实现批量商业应用所面临的挑战。

关键词 轨道车辆; 电子机械制动; 制动原理

目前, 轨道车辆制动系统以空气制动和液压制动等流体传动技术为主, 随着轨道车辆向高速、重载、智能化方向的不断发展, 传统的流体传动制动系统已无法满足日益提升的制动要求。为应对轨道车辆制动系统发展的新要求, 需提高制动产品的电气化、自动化、智能化程度, 因此电子机械制动 (electro-mechanical brake, EMB) 作为新一代工业摩擦制动技术正受到行业越来越多的关注^[1]。

EMB 最早由美国 Loral Aircraft Braking System 公司提出, 应用在 A-10 攻击机上, 称为全电制动; 随后美国 Goodrich 公司不断加大 EMB 在航空领域的投入, 带动了该技术在航空领域的快速发展^[2], 目前该技术已在波音 787、空客 A220 等机型批量运用, 成为航空领域新机型的主流制动技术。随着汽

车行业制动性能需求的不断提高, 尤其是电动汽车技术的迅速发展, 自 20 世纪 90 年代开始, EMB 逐渐在汽车领域开展了广泛的研究。

一些国际著名的汽车零配件生产厂商, 如德国的 Bosch、Siemens、Teves, 美国的 TRW、Delphi, 韩国的 HYUNDAI MOBIS、MANDO, 瑞典的 Haldex、SKF, 澳大利亚的 PBR 等公司相继研发了自己的 EMB 产品, 但受限于成本等原因未获得大批量应用。

在轨道车辆领域, EMB 研究起步较晚, 现有研究大多停留在理论研究和实验室样机阶段, 实际应用仍不成熟。本文调研了国内外轨道车辆的 EMB 研究进展。

收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-10-14

基金项目: 中国科协青年人才托举工程项目 (2020QNRC001); 国家重点研发计划项目 (2018YFB1201700)

作者简介: 苗峰, 工程师, 研究方向为轨道交通新型制动系统, 电子信箱: miaofeng646@126.com; 毛景禄 (通信作者), 工程师, 研究方向为轨道交通新型制动系统, 电子信箱: 1609953140@qq.com

引用格式: 苗峰, 毛景禄, 杨磊, 等. 轨道车辆电子机械制动研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(21): 90-97; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.21.009

1 EMB 原理和优势

1.1 EMB 基本原理

传统空气制动系统通过空气压缩机将电能转换为压缩空气能储存于风缸,由制动控制器接收制动指令并通过阀驱动电路驱动气路控制阀组,输出可控压力输入空气制动缸,产生制动力。EMB 系统由制动控制器通过电机驱动电路直接驱动夹钳产生制动力;区别于空气制动电信号—流体介质压力—机械动作的转化过程,EMB 无需流体介质,能够实现电信号—机械动作的直接转化^[3],实现真正的全电驱摩擦制动。

空气制动系统与 EMB 系统原理对比如图 1 所示。

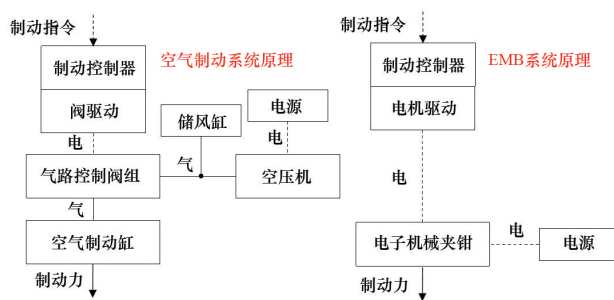


图1 空气制动系统与 EMB 系统工作原理对比

电子机械夹钳是 EMB 的关键部件,接收电机驱动信号完成电能到机械输出力的转换,典型的电子机械夹钳内部结构示意图如图 2 所示。

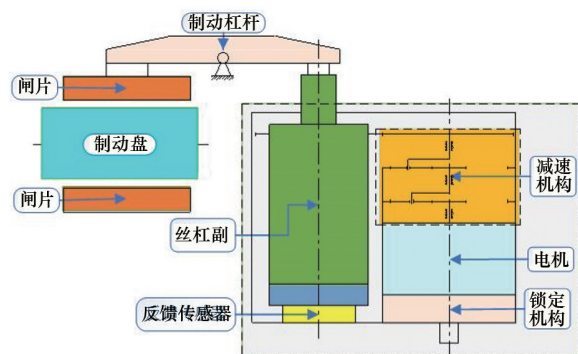


图2 电子机械夹钳原理示意

在电机驱动电路控制下,夹钳内部电机发生可控旋转,旋转运动通过减速机构和丝杠副转换为直线运动作用于闸片和制动盘,上游控制器依据夹钳

内部的反馈传感器实现制动力的闭环控制;考虑安装空间限制、力放大以及阻隔摩擦副热量传递等需求,丝杠副的直线运动通常通过制动杠杆作用于摩擦副。另外,对有长期停放制动力需求的场合^[4],夹钳内部设计锁定机构完成掉电状态下的夹紧力保持功能。

1.2 EMB 技术优势

与空气/液压制动相比,EMB 具有以下优势^[5]。

1) 安全性方面,EMB 无需流体传动介质等中间环节,可直接实现输出力的闭环控制。因此,其控制精度高、响应时间短、制动距离短。

2) 舒适性方面,EMB 产生噪音较少,同时可以实现更好冲动控制,优化乘客的乘车体验。

3) 环境友好性方面,EMB 完全摆脱了对传动介质的依赖,解决了制动系统介质泄露的缺点,使列车制动更加环保、更加高效;同时,EMB 有效减少了制动过程中的电能损耗,提升能源利用效率。

4) 全周期成本方面,EMB 减少了中间环节的制动介质管路,降低了系统复杂度以便后期维护,降低了全生命周期成本。

5) 轻量化方面,EMB 采用更加紧凑的设计方案,占用空间小、质量轻。

6) 模块化、智能化方面,EMB 采用模块化设计方案,可以即插即用,实现制动系统能源供应、指令传输、末端执行全过程的全电化,能够实现智能状态自检。

因此,EMB 在轨道车辆领域具有良好的发展前景与巨大的市场空间。

2 轨道车辆 EMB 研究现状

2.1 国外研究现状

国外开展轨道车辆 EMB 技术研究较早,以德国、日本、韩国为代表的国家在轨道车辆 EMB 技术研究领域取得了一定成果。

作为世界先进电动执行器供应商,德国 Raco 公司借鉴其在电动执行器先进研发经验,在 1979 年公布了世界上首个轨道车辆领域的 EMB 专利^[6],其采用弹簧式结构,当电源中断时可通过释放弹簧

能量施加制动,满足故障导向安全设计要求。目前最新产品如图3所示,制动响应时间维持在500 ms以内,夹紧力覆盖3.6~36 kN范围,已被广泛应用在有轨电车(杜塞尔多夫、慕尼黑、卡尔加里等城市)与悬挂式单轨电车(伍珀塔尔、多特蒙德),但由于该系列产品技术平台较早,没有采用新型电力电子器件、安全运算平台、伺服控制等新技术,结构尺寸较大、控制性能受限,无法适应轨道车辆新型制动系统技术需求。

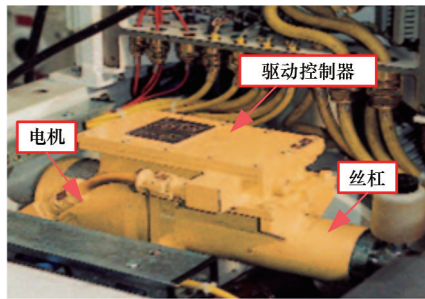


图3 德国Raco公司EMB

2002年,日本交通局将如图4所示的弹簧式EMB应用在鹿岛1000型低地板有轨电车上(2002年为9列,2007年追加至13列)^[7];2005年,又将其应用于3列长崎3000型低地板有轨电车上^[8],与德国Raco公司产品类似,该系列产品采用弹簧式结构,结构尺寸较大且功能简单,仅作为紧急制动和停放制动系统用于40 km/h速度等级有轨电车上,无法实现高精度输出力调节、高性能防滑等功能。

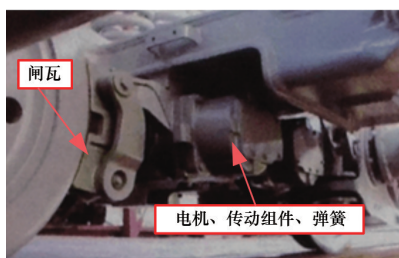


图4 日本鹿岛有轨电车EMB

2005年,德国Siemens VDO公司借鉴其在汽车EMB领域的先进技术,提出了一种应用于轨道车辆的楔形自增力EMB概念样机^[9](图5),通过自增力效应实施制动,能够有效减少电机所需驱动功率。该技术方案停留在概念设计方案阶段,并未持续研究,没有进行样机测试。

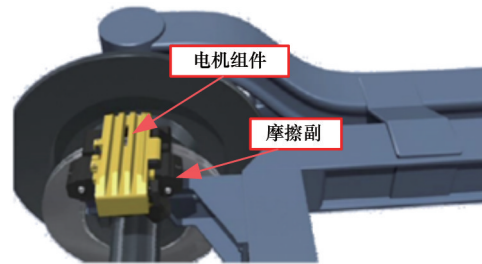


图5 德国Siemens VDO公司EMB

2008年,日本铁道综合技术研究所基于“轻型车辆用制动装置开发”项目设计了减速机与丝杠组合的EMB机构^[10](图6)。其中减速机采用内啮合齿轮系(图7),该方案能保证在满足制动力所需减速比的同时,使执行机构轴向尺寸缩短,满足轮边狭小空间的布置需求。同年,此EMB装置在广岛5100有轨电车上完成对原车液压制动系统的换装试验,在40 km/h初速度的停车制动试验中,实际平均减速度为0.85 m/s²,能够满足0.67 m/s²的平均减速度要求。

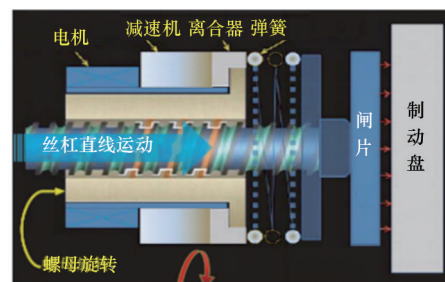


图6 日本铁道综合技术研究所EMB

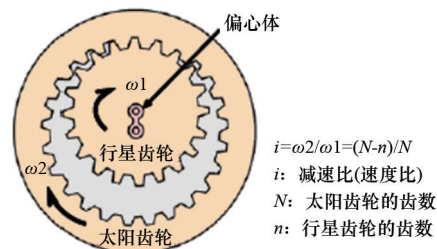


图7 “内接摇动式”减速机

2016年,韩国铁道研究所设计了如图8所示的杠杆式EMB样机^[11],并进行了响应特性测试试验。与空气制动相比,杠杆式EMB制动施加响应时间缩短0.1 s,制动缓解响应时间缩短0.46 s。同时模拟了120 km/h紧急制动工况下杠杆式EMB与空气

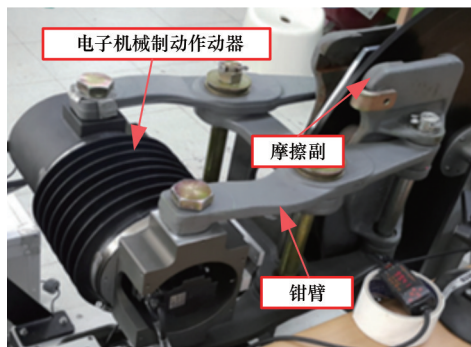


图8 韩国铁道研究所 EMB

制动的功率消耗,通过模拟测试表明,杠杆式 EMB 与空气制动的功率消耗基本保持一致,差异性小。

自 2018 年开始,韩国未来铁路研究中心开始着眼于高速列车 EMB 的技术研究,2018 年 4 月设计了凸轮轴型 EMB 并对其夹紧力控制方法进行建模仿真分析,通过仿真验证了基于电流闭环的夹紧力控制方法的有效性^[12];2018 年 10 月,设计了如图 9 所示的高速列车 EMB 的试制装置^[13],设计电流闭环控制用于实现三相永磁同步电动机的扭矩控制,引入抗饱和算法用于实现电流的快速跟踪,通过仿真与实验验证了所设计的控制方法能够将制动响应时间控制在 500 ms 以内,夹紧力误差控制在 5% 以内。

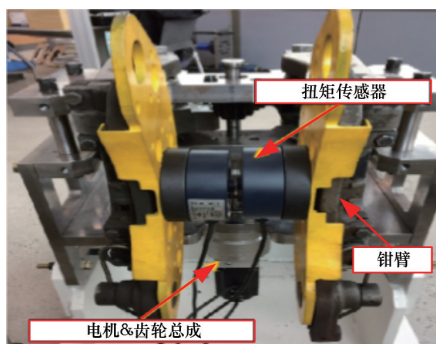


图9 韩国未来铁路研究中心 EMB

在试制样机基础上,韩国未来铁路研究中心开始着眼于控制算法的优化改进以及样机可靠性的试验验证。2019 年 4 月,在电流环中引入最大安培转矩控制算法(maximum torque per ampere, MTPA)^[14],通过仿真验证了在引入 MTPA 后,功率损耗减少约 40%;2019 年 9 月,为保证凸轮轴型 EMB 的安全性、耐久性与可靠性,对其中的齿轮和偏心轴零件进行了应力特性的定量分析^[15];2020 年 4 月,进行了 HEMU-430X 高速列车动态 1:1 制动试

验^[16],300 km/h 初速度下的紧急制动试验表明,EMB 能够在 73 s 内实现制动停车,计划在未来进行现 HEMU-430X 高速列车的 EMB 换装;2020 年 7 月,进行了疲劳特性试验^[17],获取疲劳特性曲线,通过疲劳结果分析得到 EMB 可实现 53 万次制动/缓解过程,能够满足商业需求;2020 年 9 月,研究出闸片磨损补偿算法^[18],在闸片磨损状态下,制动过程开始响应至最大夹紧力的响应时间增加 0.1 s,以减缓闸片磨损情况。

德国 Knorr-Bremse 公司作为轨道车辆制动系统的行业领先者,自 20 世纪 80 年代开始就一直致力于轨道车辆 EMB 装置的研究,经过 30 多年的持续研究和产品迭代,于 2019 年公布了最新的轨道车辆样机成果^[19](图 10),新成果不仅能够有效减少预防性维护和修复性维修成本,同时还使制动距离缩短 10%~15%。

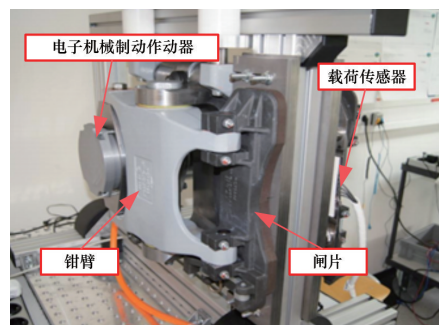


图10 德国 Knorr-Bremse 公司 EMB

作为机车、有轨电车等轨道车辆制动系统的主流供应商,捷克 DAKO 公司同样持续开展轨道车辆 EMB 的研发设计。2018 年,DAKO 公司发布了基于有轨电车的 EMB 装置^[20](图 11),并于 2019 年取得波兰波兹南有轨电车装车试用订单。

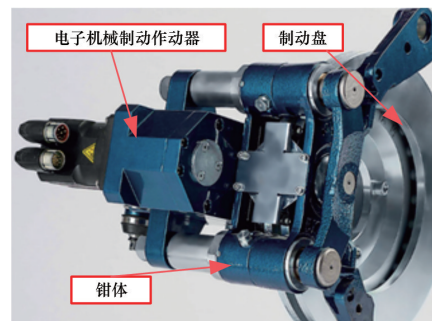


图11 捷克 DAKO 公司 EMB

2.2 国内研究现状

相较国外,国内轨道车辆EMB研究起步较晚,但近几年高校和相关企业研究投入加大、进展明显,已完成技术验证、原理样机研究阶段向装车试验和持续工程化阶段转变。

自2014年开始,上海六警机电科技有限公司与同济大学进行合作,开展轨道车辆EMB的研发^[21],已先后申请了3项专利,分别设计了行星齿轮减速滚珠丝杠带离合器方案^[22]、滚珠丝杠双电磁离合器主被动一体式方案^[23]、楔形增力滚珠丝杠方案^[24]等3种轨道车辆EMB实现形式。目前,已研制出第四代EMB样机(图12),2018年,作为中车青岛四方机车车辆股份有限公司下一代地铁列车的制动系统参加了Innotrans德国柏林轨道交通展^[25]。2019年,上海六警机电科技公司与中车株洲电力机车有限公司中低速磁悬浮、中车唐山机车车辆有限公司200 km/h中速磁悬浮、西南交通大学超导磁悬浮合作开展样机研发合作。

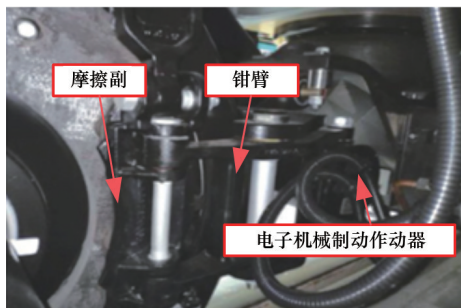


图12 同济大学第四代EMB样机

在此基础上,2020年,同济大学吴萌岭团队^[26]针对电子机械制动开展控制算法的研究。张瀚文等验证了基于比例、积分、微分(proportional integral derivative, PID)闭环控制的制动力控制算法,能够有效满足 0.75 m/s^3 的冲动限制要求。吴萌岭等^[27]提出了基于改进PID的夹紧力控制算法,在传统PID控制器中引入缓冲过程算法和跟踪微分器,能够有效避免系统超调问题,控制精度在0.05 kN范围内,改善制动过程中的瞬态响应,阶跃响应时间控制在0.1~0.2 s范围内,并建立了硬件在环仿真分析平台,为后续EMB的研究试验提供有效支撑^[28]。

中车制动系统有限公司凭借轨道车辆制动系统技术积累,2014年开始开展轨道车辆EMB研发工作,目前已完成适用于有轨电车、单轨车等车型的紧凑型EMB制动系统和适用于地铁、市域车等车型的盘型和踏面制动形式的EMB系统开发和试验验证。如图13(a)所示的紧凑型EMB已完成动态1:1制动试验、疲劳试验、型式试验等地面试验验证,28 kN阶跃响应时间为484 ms,稳态误差控制在0.85 kN范围内,2021年已完成在沈阳市浑南区100%现代有轨电车的装车型式试验和3000 km里程运行考核。如图13(b)所示的地铁踏面EMB已完成地面试验验证^[29],2021年在徐州市地铁3号线完成装车调试及线路试验验证。图13(c)所示的EMB夹钳已完成型式试验和地面联调试验,具

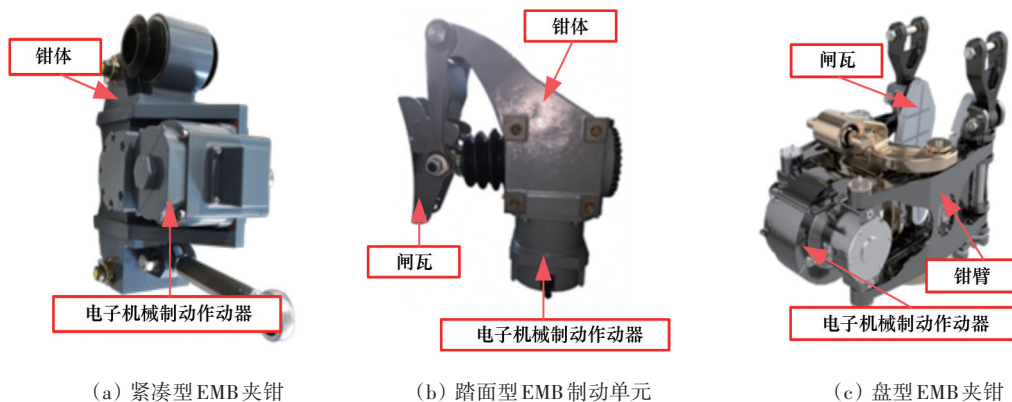


图13 中车制动系统有限公司EMB样机

备停放制动、手拉缓解等多样化功能,更加贴近工程化应用需求。

控制方法方面,2020年中车制动系统有限公司与西北工业大学合作,提出了基于非线性变结构比例、积分(proportional integral, PI)控制器的夹紧力控制策略^[30],在夹紧力控制中,设计双曲非线性PI控制算法,解决传统PI控制抗干扰能力弱、鲁棒性差的问题,同时引入变结构抗积分饱和算法,降低控制系统的稳态误差,均方根误差控制在0.05范围内。2021年设计了基于滑膜控制的新型夹紧力控制策略和间隙控制策略^[31],缩短了系统响应时间,28 kN阶跃响应时间仅为235 ms,并提升了夹紧力控制的动态性能和跟踪精度;2022年针对压力传感器故障问题,设计了基于扩张状态观测器的无压力传感器控制策略^[32],此策略保证了28 kN阶跃响应时间小于300 ms,稳态误差小于2%。

2.3 小结

国内外研究主要集中于EMB夹钳结构及控制方法,其中夹钳结构总体均采用电机、减速及力放大机构、运动转换机构组合的方案,但在适用车型、具体实现、成果成熟度上仍有较大差别。

目前,国内外研究的EMB夹钳适用车型涵盖城轨车辆、市域车、高速列车和磁浮车辆。紧凑型EMB夹钳适用于有轨电车、悬挂车等城轨车辆;盘形EMB夹钳适用于城轨车辆、市域车和高速列车;踏面型EMB制动单元适用于城轨车辆;此外,上海六警机电科技有限公司研发了适用于磁浮车辆的EMB制动单元。

电子机械制动夹钳主要分为弹簧式和不带弹簧式两类。Raco公司和日本交通局研发的EMB为弹簧式,内置蓄能弹簧,依靠电机进行蓄能,弹簧力用于施加停车制动力和停放力,结构尺寸和质量相对较大,目前研究和应用较少。传动机构实现方面,Simens VDO公司采用丝杠和楔形自增力机构的方式,能够降低电机功率;日本铁道综合技术研究所采用摇臂式内啮合齿轮系,结构紧凑;韩国未来铁路研究中心采用凸轮轴进行力的放大;应用较多的方案是齿轮系和滚柱丝杠组合的方式,例如Raco公司、DAKO公司、上海六警机电科技有限公

司和中车制动系统有限公司等。

产品成熟度方面,Raco公司、日本交通局的EMB产品虽已小批量应用于有轨电车和悬挂车,但功能单一,不满足现代轨道车辆要求;日本铁道综合技术研究所、中车制动系统有限公司和DAKO公司已完成产品的地面试验和装车试验,为工程化推广奠定了基础;Knorr-Bremse公司EMB样机已进行多次迭代;韩国铁道研究所和未来铁路研究中心目前仍停留在EMB实验室样机试制阶段。

总体上,虽然国外轨道车辆EMB研究起步较早,在制造工艺、验证充分性等工程化方面相对领先,但是具备全功能的轨道车辆EMB系统仍处于样机和装车试验阶段,还未实现工程化大批量应用;国内研究虽起步较晚,但依托强大的产业基础,近几年成为研究热点,完成了技术验证和样机装车试验,进展较快,与国外基本处于同一技术阶段。

3 应用挑战

此前,EMB的研究主要集中在汽车、航空等领域,轨道车辆领域的特殊制动功能需求和极高的安全性、可靠性要求对EMB的产品化批量运用提出了挑战,在供电安全性、机构可靠性和寿命、控制鲁棒性、全生命周期维护方法等方面目前仍然存在一定技术不确定性。

目前国内外轨道车辆制动仍然大范围使用空气或液压制动系统,EMB仍处在样机试制阶段,其与现有制动系统在实现原理、电气接口、控制方式等方面均有重大差别,由于EMB与传统制动系统的巨大差异导致行业主机企业、业主用户普遍呈观望态度,完全接受新技术仍需要一定时间;另外,在前期试验验证和推广阶段不可避免地要实现与传统制动系统的混装,需要解决与现有轨道车辆存在的兼容性和适应性问题。

随着对EMB技术持续研发和优化,通过充分的试验运行数据累积和全生命周期考核验证,可以逐渐提高该技术在轨道车辆应用的技术成熟度和行业接受程度,不断地向批量商业化应用迈进。

4 结论

EMB以体积小、质量轻、电气化、智能化等优点,在轨道车辆领域具有良好的技术和市场前景,具备成为新一代轨道车辆摩擦制动系统的潜力。本文从EMB原理和优势出发,介绍了轨道车辆EMB所需攻克的关键技术,总结了目前EMB在轨道车辆领域的国内外研究现状。目前,轨道车辆EMB的研究主要停留在技术验证和样机试制阶段,在系统架构、制动器设计和控制算法设计上仍然有很大的进步空间,由于技术成熟度和行业接受程度的限制,距离大规模商业化应用条件仍有差距,但随着EMB技术、相关配套条件的不断完善和市场接受度的提升,轨道车辆制动系统将会大跨步地迈向EMB时代。

参考文献(References)

- [1] 吴萌岭, 马天和, 田春, 等. 铁道车辆制动技术发展趋势探讨[C]//和谐共赢创新发展——旅客列车制动技术交流会论文集. 眉山: 中国铁道学会车辆委员会, 2017: 9-15.
- [2] 王军. 电子机械制动(EMB)技术[D]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [3] 吴萌岭, 周嘉俊, 田春, 等. 轨道交通制动系统创新技术[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 30-35.
- [4] 廖铉. 基于电子机械制动的停放制动方式研究[D]. 上海: 同济大学, 2017.
- [5] 王健. 城市轨道交通电子机械制动系统总体设计方案和关键技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(11): 36-40.
- [6] Brinkert F. Electrically resettable railway brake: US, US4175645A[P]. 1979-11-27.
- [7] 吴萌岭. 低地板有轨电车国产制动系统及运用[J]. 现代城市轨道交通, 2014(1): 38-41.
- [8] Nagasaki Electric Tramway. Detailed report of 3000-tram [EB/OL]. (2004-11-14) [2023-02-17]. <http://nagaden.fc2web.com/geneki/report-3000gata/3000-yukasita/3000-yukasita.html>.
- [9] Bernd Gombert. Electronic Wedge Brake EWB[EB/OL]. (2005-12-13) [2023-02-17]. http://dmg-berlin.info/page/downloads/Vortrag_Gombert.pdf.
- [10] 南京政信, 彭惠民. 日本制动装置的最新研发动向[J]. 国外铁道车辆, 2012, 49(5): 14-17.
- [11] Kim M S, Oh S C, Kwon S J. Characteristic test of the electro mechanical brake actuator for urban railway vehicles[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2016, 33(7): 535-540.
- [12] Baek S K, Oh H K, Kwak M H, et al. A design method of three-phase IPMSM and clamping force control of EMB for high-speed train[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2018, 19(4): 578-585.
- [13] Baek S K, Oh H K, Kim S W, et al. A clamping force performance evaluation of the electro mechanical brake using PMSM[J]. Energies, 2018, 11(11): 2876.
- [14] Baek S K, Oh H K, Park J H, et al. Evaluation of efficient operation for electromechanical brake using maximum torque per ampere control[J]. Energies, 2019, 12(10): 1869.
- [15] Oh H K, Baek S K, Jeon C S. Structural analysis of power transmission mechanism of electro-mechanical brake device for high speed train[J]. Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society, 2019, 20(12): 237-246.
- [16] Baek S K, Oh H K, Park J H, et al. A evaluation of emergency braking performance for electro mechanical brake using interior permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2020, 21(6): 170-177.
- [17] Oh H K, Baek S K, Jeon C S. Fatigue analysis for electro-mechanical brake caliper based on eccentric rotating shaft[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2020, 21(9): 596-603.
- [18] Baek S K, Oh H K, Park C S, et al. A brake pad wear compensation method and performance evaluation for electromechanical brake[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2020, 21(10): 581-588.
- [19] Shift2Rail. Driving innovation on railways[EB/OL]. (2019-09-17) [2023-02-17]. <https://cmt.sym.place/serve-file/e0/11569839900/di/c0/>.
- [20] Industry Europe. DAKO-CZ: Safety on railways[EB/OL]. (2018-09-26) [2023-02-17]. <https://industryeurope.com/dako-c/>.
- [21] 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, 40(1): 134-144.
- [22] 吴萌岭, 廖铉, 陈茂林, 等. 一种轨道车辆电机驱动摩擦制动装置: 中国, CN106224415A[P]. 2016-12-14.
- [23] 吴萌岭, 陈茂林, 廖铉, 等. 一种主被动一体式轨道车

- 辆电机驱动摩擦制动装置: 中国, CN206086753U[P]. 2017-04-12.
- [24] 吴萌岭, 田春, 陈茂林, 等. 一种斜楔式轨道车辆电机驱动摩擦制动装置: 中国, CN206086754U[P]. 2017-04-12.
- [25] 王晓东, 田春, 袁泽旺, 等. 电子机械制动系统在地铁列车中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 138-141.
- [26] 张瀚文, 吴萌岭, 田春. 电子机械制动冲动限制控制研究[J]. 交通技术, 2020, 9(1): 23-31.
- [27] 吴萌岭, 雷驰, 陈茂林. 基于列车电子机械制动系统夹紧力的控制算法优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 898-903.
- [28] 吴萌岭, 雷驰. 电子机械制动系统硬件在环仿真分析平台设计[J]. 现代城市轨道交通, 2020(10): 47-52.
- [29] 丁剑. 机车电子机械制动制动力控制研究与应用[J]. 内燃机与配件, 2021(18): 9-12.
- [30] 赵逸云, 林辉, 李兵强, 等. 城轨列车电子机械制动系统的非线性PI控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(5): 1593-1600.
- [31] Zhao Y, Lin H, Li B. Sliding-mode clamping force control of electromechanical brake system based on enhanced reaching law[J]. IEEE Access, 2021(9): 19506-19515.
- [32] 赵逸云, 林辉, 李兵强. 电子机械制动系统无压力传感器控制策略研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-16 [2023-02-17]. doi: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2021. 0748.

Research progress of electro-mechanical braking system for rail vehicles

MIAO Feng, MAO Jinglu*, YANG Lei, ZHANG Jingbin, WANG Shuai

CRRC Breaking System Co., Ltd., Qingdao 266031, China

Abstract Electro-mechanical braking technology has gradually found wide applications in aviation, automobile and other industrial fields due to its remarkable technical advantages, it also has a good development prospect and market space in the field of rail vehicles. This paper summarizes the research progress of electro-mechanical braking technology for rail vehicles. Firstly, the braking principle of electro-mechanical braking technology is introduced and the key technologies to be overcome for the application of electro-mechanical braking technology to rail vehicles are analyzed. Then, the research status of the electro-mechanical braking technology of rail vehicles at home and abroad is summarized. Finally, the challenges faced by the mass commercial application of electro-mechanical braking in rail vehicle industry are analyzed, so as to provide reference for the follow-up research and product development of electro-mechanical braking for rail vehicles.

Keywords rail vehicles; electro-mechanical braking system; braking principle ●



(责任编辑 傅雪)