

综
述
与
评
论

高速列车制动技术综述

张建柏¹, 彭辉水², 倪大成², 刘 雄²(1. 兰州铁路局 机务处, 甘肃 兰州 730050;
(2. 株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)

作者简介: 张建柏 (1968-), 男, 兰州铁路局机务处总工程师, 高级工程师, 从事机车运用维修技术管理工作。

摘 要: 阐述了制动系统与高速列车安全性的关系, 综述了高速列车的制动方式及其性能, 并给出各自在国内外高速列车上的应用情况; 介绍了高速列车空电联合制动力的控制模式并就各种模式的优缺点进行对比, 概述了高速列车的防滑再粘着控制技术, 论述了高速列车制动技术的发展趋势。

关键词: 高速列车; 制动; 控制模式; 防滑行再粘着控制

中图分类号: U260.35; U269.91+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)04-0001-04

Overviewing Braking Technology of the High-speed Trains

ZHANG Jian-bai¹, PENG Hui-shui², NI Da-cheng², LIU Xiong

(1. Locomotive Department, Lanzhou Railways Bureau, Lanzhou, Gansu 730050, China;

(2. Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The relationship between the braking system and the security of the high-speed trains was expounded, comparative analysis about the brake modes and the corresponding braking performance as well as reviews of their domestic and oversea applications was provided. Control modes of braking force in high-speed trains were introduced, and comparative analysis about their pros and cons was given out. Anti-skid re-adhesion control technologies of the train were reviewed. Development trend of high-speed train braking technology was prospected at last.

Key words: high-speed trains; braking; control mode; anti-skid and readhesion control

0 引言

高速铁路是世界轨道交通发展的潮流。截至2011年1月底,我国高速铁路总里程达8 358 km,规划到2012年底,总里程达到13 000 km。高速铁路快速发展的同时,其安全性也备受瞩目。高速列车制动技术对于列车安全运行至关重要,在意外情况下,高速列车紧急制动距离越短,高速列车才能越安全,旅客安全系数越高。本文将对当前高速列车制动技术领域的关键技术及其进展进行综合论述。

1 制动与安全的关系

制动的实质是将列车动能转换为其他形式的能量或列车动能在制动装置间的传递和消散,高速列车制动能力主要体现停车制动过程列车的制动距离。在线路、制动系统、制动方式和司机操纵方式等条件不变

的情况下,列车制动距离基本上与列车制动初速度平方呈正比关系。因而随着列车速度的提高,必须改进其制动装置和制动控制方式来满足高速列车制动距离相对较短的要求。高速列车一般包括常规制动和紧急制动,其中紧急制动距离最短,是检验列车制动能力和运行安全性的重要技术条件,同时也是通信信号系统设计和运输组织合理规划的重要依据。目前,国外运行速度为300 km/h的高速列车其紧急制动距离一般在3 000~4 000 m。我国CRH3列车时速300 km/h平直道紧急制动距离为3 700 m,时速350 km/h则为6 500 m,而CRH380高速列车时速380 km/h,平直道紧急制动距离不到8 500 m。

当然,影响制动距离的因素还包括列车组成和线路条件等等,应按不同列车的运行阻力和坡道、曲线阻力进行具体计算。为保证满足列车运行安全性的基本要求,在设计高速列车的制动能力时应留有充分的安全裕量。

收稿日期: 2011-04-06

2 高速列车的制动方式

高速列车的制动系统一般由电制动系统、空气制动系统、防滑装置和制动控制系统等组成,所以高速列车采用的制动方式主要包括电制动和空气制动,此外还有涡流制动、磁轨制动和风阻制动等制动方式^[2-3]。

2.1 电制动

电制动是通过控制电机电流大小和方向,使电机产生一个与列车运行方向相反的力使列车减速。电制动主要有电阻制动和再生制动^[1,4]。

电阻制动是将列车的动能通过电机转换为电能并消耗在电阻上的制动方式,而再生制动则是将列车动能转换为电能回馈至电网的制动方式,其能量由电机传递给主变流器、牵引变压器,最后回馈至接触网上,如图1所示。电阻制动主要应用于早期的高速列车上,如法国的TGV-R等高速列车;而再生制动由于可使电能回馈电网供其他列车使用,是一种节能环保的制动方式,备受当代高速列车设计者的青睐,得到广泛应用,如德国ICE350、法国TGV-TMST、日本新干线700系、我国CRH系列等等高速列车^[3,5]。

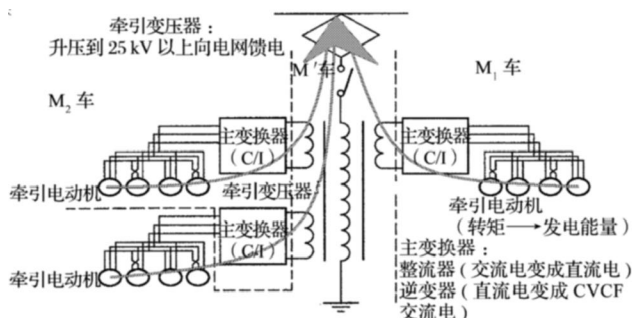


图1 高速列车再生制动能量传递示意图

2.2 空气制动

空气制动是通过控制空气压缩机输出的空气压力大小来控制制动闸片作用到制动盘上的力。这种制动方式属于机械制动,是通过制动盘和制动闸片的摩擦产生制动力。在列车其他制动方式失效的情况下,空气制动必须保证高速列车能够在规定的距离之内停车,以确定列车运行的安全,因而又称基础制动^[1]。

高速列车的空气制动主要采用轴盘制动和轮盘制动2种盘形制动方式,其区别在于轴盘制动是在车轴上安装制动盘(如图2所示),而轮盘制动是在车轮辐板侧面安装制动盘。

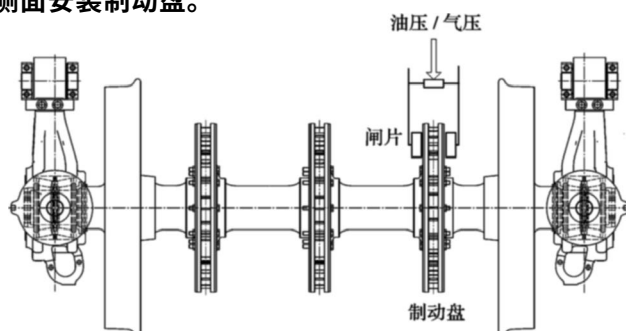


图2 轴盘制动示意图

盘型制动是通过制动盘与闸片之间的相互摩擦来实现列车减速和停车,制动盘和闸片材料性能对制动效果有着直接的影响,必须具备:①稳定的摩擦性能,摩擦系数不随压力、温度、速度和湿度而变化或变化很小;②良好的耐磨疲劳性能,极好的抗热裂纹扩展能力;③极高的耐磨损性能,保证材料相当低的磨损率^[6-7]。

目前,高速列车制动摩擦材料主要有:①铁系金属材料,良好的强度和韧性,较高的抗热龟裂性、良好的耐热性和耐疲劳性,使用寿命长,但密度较大^[8];②粉末冶金材料,摩擦系数高、稳定性好以及磨损小、导热性好^[9];③陶瓷颗粒增强铝基复合材料,高耐磨性、高硬度及膨胀系数低,热传导性良好和密度低,但其塑韧性较低,伸长率不高,承受热交变载荷时易萌生裂纹并迅速扩展;更高的速度下磨损将显著增加^[10];④C/C复合材料,较低的密度、优异的抗热冲击性和高温强度、高速下具有较佳的高温摩擦性能,但其价格昂贵^[6-7];⑤纤维增强陶瓷材料,质量密度低、强度高、耐高温、抗氧化和耐磨损,代表当今制动材料的最高水平,但其价格昂贵^[11]。

随着高速列车技术向轻量化方向的发展,制动材料的轻量化对减轻簧下重量、节省能耗意义重大。

2.3 非粘着制动方式

电制动和空气制动最终都是通过车轮与轨道的摩擦来产生制动力,因此都属于粘着制动。粘着制动是指因车轮与钢轨滚动接触而产生制动力的制动方式。

随着高速列车速度等级的不断提升,紧急制动距离的要求越来越高,必然导致列车的制动力要求越来越高。但车轮和轨道之间产生的粘着力是有限的,传统的粘着制动已不能满足其需求,非粘着制动应运而生。

目前各国研究的非粘着制动主要有涡流制动、磁轨制动和风阻制动^[1]。

2.3.1 涡流制动

涡流制动是指通过电磁铁产生的磁场与钢轨或旋转导体产生的磁场相互作用产生制动力,包括旋转涡流制动和线性涡流制动(亦称轨道涡流制动)^[1,12]。

旋转涡流制动:牵引电机轴上装有金属涡流盘,制动时,涡流盘在电磁铁形成的磁场中旋转,盘表面感应出涡流,使其发热,涡流盘带有散热筋并起鼓风机叶轮作用,可加速盘的散热。

线性涡流制动:制动时,悬挂在转向架上的电磁铁放下到离轨面上方几毫米处,利用和钢轨的相对运动使钢轨表面感应出涡流,从而产生阻力并使钢轨发热。德国高速试验动车组ICE3高速列车应用了该种制动方式。其线形涡流制动装置安装于拖车转向架侧架上,每台转向架2套,每辆拖车的磁铁串联励磁,由牵引变流器减压斩波器供电,每块磁铁长1 290 mm,由8

个线圈励磁, 磁铁高度可调。8辆编组列车的最大涡流制动功率可达800 kW, 最大涡流制动力200 kN, 证明该非粘着制动方式具有广阔的前景^[12-13]。

2.3.2 磁轨制动

磁轨制动是利用列车上的电磁铁与钢轨面之间摩擦而产生制动力。由于接触面积的增加, 磁轨制动力要比粘着制动力大, 且磁轨制动力还包括电磁铁受到的电磁阻力。磁轨制动多用做紧急制动的辅助制动方式。

德国ICE1、ICE2高速列车和西班牙摆式动车组X2000均使用了磁轨制动技术。ICE1和ICE2的每辆拖车上安装了4套磁轨制动机, 总重约1 t。在速度250 km/h时, 每米电磁铁和滑撬所产生的制动力为3~3.5 kN, 可提供 0.25 m/s^2 的减速度, 可使列车紧急制动距离缩短20%~30%。但是, 在速度50 km/h以下需将磁轨制动切除, 因为磁轨的摩擦系数在低速时迅速上升, 其适应的最高速度则为330 km/h左右^[1,5]。

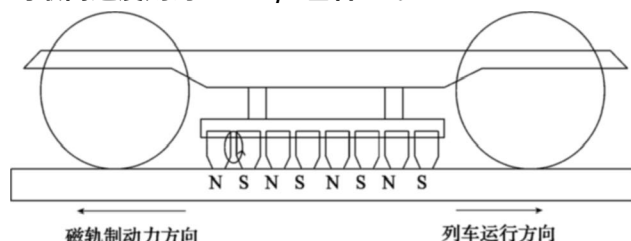


图3 磁轨制动示意图

2.3.3 风阻制动

风阻制动是日本Fastech360采用的一种全新的制动方式, 制动时, 车体上伸出减速板来增加空气阻力, 空气阻力可增加3~4倍^[1]。Fastech360使用风阻制动能使列车的制动距离在360 km/h时可与未使用该装置275 km/h时的大致相同(日本新干线500系最高速度为275 km/h, 紧急制动距离为4 060 m)。

由于空气动力阻力与速度平方成正比, 速度越高则风阻制动力越大, 在高速时制动性能优越。其缺点是: 在车体的端部安装风阻制动装置, 需对车体进行改造, 削弱了车体强度; 制动风翼在展开工作后, 会改变列车周围的流场, 对列车过隧道、小曲率半径线路、会车或者横风下运行时都会产生一定的影响, 但是否会影响到列车运行的安全性, 还有待进一步的研究。

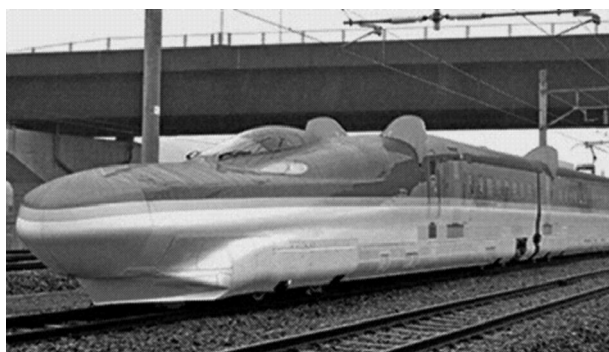


图4 日本新干线Fastech360风阻制动

3 空电联合制动制动力的控制模式

高速列车制动系统是由多种制动方式组合而成的复合制动系统, 复合制动的电空联合制动制动力的控制模式主要有单车模式和多车模式2种^[4,14]。

3.1 单车模式

单车模式是建立在各车辆制动能力均匀分配的基础上, 是一种比较简单的控制模式。各车辆根据制动指令的要求, 各自控制本车的制动力。由于拖车没有动力, 所以不存在制动的电空配合问题; 动车在制动时, 优先使用电制动; 当电制力不能满足要求时, 不足部分由本车的空气制动补足。单车控制模式在制动级别较低的情况下, 存在动车制动能力过剩, 动力制动不能充分利用的弊端。

3.2 多车模式

多车模式有2种方法: ①单元控制, 在动力分散动车组的固定单元内的车辆间, 实施充分利用电制动能力的控制技术, 如图5, 其补足方式包括拖车空气制动滞后补足、拖车空气制动优先补足、动车拖车空气制动均等补足等模式; ②编组控制, 在整个列车编组内, 实施充分利用电制动能力的控制技术, 如图6。

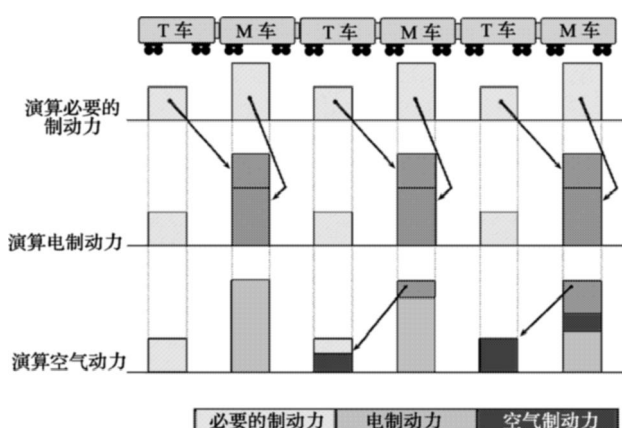


图5 单元控制的电空配合模式

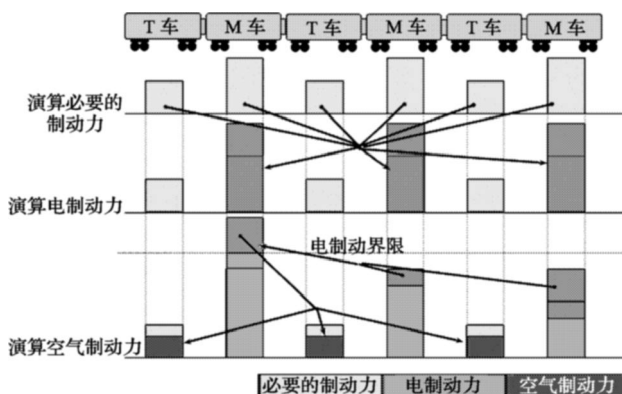


图6 编组控制的电空配合模式

相对于单车模式, 多车模式更能充分利用电制动能力。多车模式是建立在列车制动能力分布不均匀的基础上, 设计时必须要考虑列车对制动能力分布不均

匀的承受能力以及粘着条件的限制,在充分发挥电制动能力时,要尽量避免动力轴滑行;列车制动信息的交换速度必须足够快,避免由于信息交换不及时而造成车辆间制动力的叠加引起冲动或者反叠加引起制动距离过长。

随着非粘着制动技术的发展,制动力控制模式必然要在电制动方式、空气制动方式和非粘着制动方式之间的优先顺序进行排位,实行合理的制动力控制模式,为更高速度的高速列车缩短制动距离提供有效的安全保障措施。

4 防滑再粘着控制技术

列车在实施粘着制动的过程中,如果施加的制动力大于轮轨间的粘着限制力,必然导致轮对抱死,出现滑行现象。轮对滑行会导致轮对和钢轨磨损加速,给列车运行带来不安全因素。要尽量避免轮对滑行,必须依赖高速列车的防滑再粘着控制技术^[15]。

高速列车防滑再粘着控制技术主要是通过检测轮对减速度 β 以及同架或同车轮对转速之差 ΔV 综合判定是否发生或即将发生滑行现象,并采取卸载制动力的措施直至滑行或滑行趋势消除,再逐渐恢复制动力。

高速列车防滑再粘着控制由防滑装置来实现。防滑装置由速度传感器、滑行检测装置及防滑电磁阀组成。滑行检测装置根据速度传感器送来的轴转动脉冲信号进行速度计算、 β 计算和 ΔV 计算,据此对轮对滑行或滑行趋势进行分析和判断,指示防滑电磁阀是否动作来降低车轮的制动力,如图7所示。目前,高速列车的防滑装置均采用微机控制技术,运行速度快、信息交换及时、控制性能好^[16]。

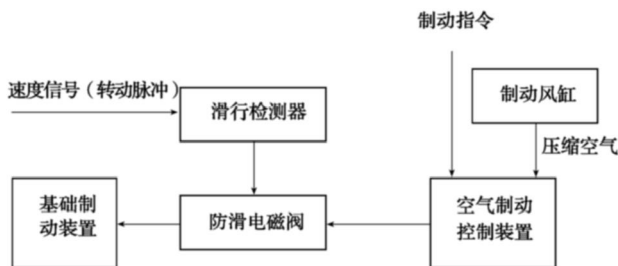


图7 防滑器原理示意图

在列车发生滑行现象之后,防滑控制装置在降低制动力的同时,还会给出撒砂指令(日本新干线采用喷砂颗粒),使轮轨间粘着系数迅速提高,制动力得到较快的恢复,从而保证列车调速及时或停车的制动

距离仍在规定之内,保障列车运行的安全。

5 制动技术的发展趋势

随着高速列车速度等级越来越高,其制动技术的发展必然向安全、可靠、舒适和环保节能方向发展。基础制动装置向材料的轻量小型化、低噪声、大容量、高摩擦方向发展,复合制动制动力控制模式必将优先考虑非粘着制动与再生制动的配合,制动系统的高可靠性与智能化,防滑技术的反应速度与高性能,非粘着制动方式的广泛应用等等都将是高速动车组制动技术的研究关键与探索方向。

参考文献:

- [1] 彭辉水,谷杨心,吴松荣,郭秀伟. 走进中国高速铁路(三)——探秘动车组(下)[J]. 铁道知识,2010(3):54-57.
- [2] 李岳恒. 高速列车制动系统性能的探讨[J]. 铁道机车车辆,1997(4):28-29.
- [3] 钱立新. 300 km/h 高速动车组制动系统的最新进展[J]. 电力机车与城轨车辆,2004,27(1):1-3.
- [4] 苗勇,王新海,王旭如. 高速列车(300 km/h)电空控制单元的研究[J]. 铁道机车车辆,2000(5):5-6.
- [5] 臧其吉. 德国高速列车的发展[J]. 机车电传动,2003(5):10-14.
- [6] 宋宝福,高飞,陈吉光,等. 高速列车制动盘材料的研究进展[J]. 中国铁道科学,2004,25(4):11-17.
- [7] 王红英,李志军,莫守形,等. 高速列车制动盘失效分析及材料研究进展[J]. 焊接,2007(4):28-29.
- [8] 钱坤才,刘颖,阙红波. 高速列车铸钢制动盘材料的研究[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2009(4):250-254.
- [9] 刘颖. 高速列车粉末冶金制动闸片的研制[J]. 机车车辆工艺,2008(5):5-6.
- [10] 滕杰. 高速列车铝基复合材料制动盘及其闸片的制备、摩擦磨损性能及机理研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.
- [11] 宋剑敏. A1_20_3 陶瓷摩擦材料的结构与性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
- [12] 张萼辉. 高速列车涡流制动试验与研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [13] 应之丁. 涡流制动技术在高速列车上的应用[J]. 电力机车与城轨车辆,2007(5):19-22.
- [14] 邵丙衡,张鑫. 高速列车制动模式探讨[J]. 机车电传动,1995(5):10-15.
- [15] 李江红,马健,彭辉水. 机车粘着控制的基本原理和方法[J]. 机车电传动,2002(6):4-8.
- [16] Satoshi Kadowaki, Shinobu Kasukawa, et al. Anti-skid Readhesion Control Based on Disturbance Observer Based Considering Air Braking for Electric Commuter Train[C]. USA:AmC 2004, 2004:169-174.