

地铁车辆制动特性及电空转换参数优化分析

王仁庆

(南京地铁建设有限责任公司, 210017, 南京//高级工程师)

摘要 对地铁车辆制动系统的基本特性进行了介绍, 分析了影响 ATO(列车自动运行)控车精度的车辆性能参数, 阐述了电空制动转换过程中控制参数的调整和优化方法。以南京地铁 3 号线车辆制动系统特性的优化为研究对象, 通过对电空制动转换速度点、电制动延迟退出时间、电制动退出斜率等控制参数进行优化, 以及对电空制动转换后的空气制动力目标值进行削减, 使得整个电空制动转换过程中不再存在制动力叠加的现象, 制动减速度曲线亦无明显波动, 从而使制动系统的特性更加稳定。

关键词 地铁车辆; 制动系统; 电空制动转换; 控制参数

中图分类号 U270.35

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.12.022

Metro Vehicle Brake Characteristics and Improvement of Electric-pneumatic Conversion Parameters

WANG Renqing

Abstract The basic characteristics of metro vehicle braking system are introduced, the vehicle performance parameters that directly influence the accurate stop controlled by ATO (automatic train operation) are analyzed. Then, the adjustment and improvement of parameter control in electric-pneumatic brake conversion are explained. Taking the improvement of vehicle braking system characteristics of Nanjing metro Line 3 as the research object, through improving the control parameters of the speed points in electric-pneumatic brake conversion, the electric brake fading delay time and the electric brake fading rate, and reducing the targeted value of aerodynamic braking after the pneumatic brake conversion, the brake characteristics will become more stable, the superposition phenomenon during the electric-pneumatic brake conversion, and the obvious vibration on the breaking deceleration curve no longer exist.

Key words metro vehicle; braking system; electric-pneumatic brake conversion; control parameter

Author's address Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210017, Nanjing, China

(ATO)模式,以降低司机的工作强度,保证列车高效运行^[1]。车辆在 ATO 模式下运行时,ATO 系统代替司机操纵列车牵引和制动,自动实现列车的启动加速、匀速运行及减速制动等基本驾驶功能^[2],这些功能和过程均由信号系统实现和控制。信号系统实时采集车辆速度及到站距离,并输出对应大小的牵引力、制动力供给车辆的牵引系统和制动系统,同时对车辆进行闭环控制,使车辆能按照预先设定的速度曲线行驶。对于减速制动而言,因为牵引系统电制动响应快且跟随性较好,而空气制动系统响应慢且跟随性较差,所以空气制动系统作为被控制对象,只有首先对系统自身进行充分优化,尽可能提高系统特性的稳定性,才能有利于信号系统进行控制策略的制定和控制参数的调整,从而实现高精度控车。信号系统对制动系统的要求主要有以下几方面:

- 1) 制动力大小符合合同要求;
- 2) 制动力的延迟时间和建立时间需稳定,并应达到合同要求;
- 3) 电制动和空气制动的转换过程中,总制动力保持稳定发挥。

1 地铁车辆制动系统的基本特性

地铁车辆的制动系统普遍采用空气制动与电制动混合的形式。电制动由牵引系统提供,在接收到制动指令后,列车牵引电机从电动机状态转换为发电机状态,将机械能转换为电能输出并产生制动力^[3]。空气制动是依靠压缩空气推动闸瓦,作用在制动盘或轮对上,并依靠机械摩擦产生制动力。无论是电制动还是空气制动,其基本的系统特性均主要包括制动力的大小、制动力的延迟时间和建立时间。

1.1 制动力的大小

在项目设计阶段,首先约定 100%制动级位所对应的瞬时减速度 a ,如果整车的质量为 M ,则当制

地铁车辆在运营时普遍采用列车自动运行

动级位为 100% 时, 整车制动力 $F = M \cdot a \cdot 100\%$ 。对于运营速度为 80 km/h 的车辆, 制动减速度 a 一般取 -1.12 m/s^2 。

1.2 制动力的延迟时间和建立时间

制动力的延迟时间 t_1 即为从制动指令发出开始至列车达到目标减速度值的 10% 所需要的时间; 制动力的建立时间 t_2 即为从列车达到目标减速度值的 10% 开始至达到目标减速度值的 90% 所需要的时间^[4]。对于最大常用制动的 a 定义为 -1.12 m/s^2 , t_1 一般取值不大于 0.4 s; 考虑到冲击限制为 0.75 m/s^3 , 需将 t_2 的取值调整为 1.5 s 左右。

2 电空制动转换过程及其调整方法

正常情况下, 在高速区域优先使用电制动, 空气制动并不参与, 但是由于牵引电机特性限制, 电制动并不能持续稳定发挥到车辆完全停止, 所以在低速区域需要有一个电制动和空气制动的转换过程, 此时电制动力开始退出, 空气制动逐步代替电制动, 在列车停止后, 制动系统再自动对列车施加一个保持制动。制动过程如图 1 所示。

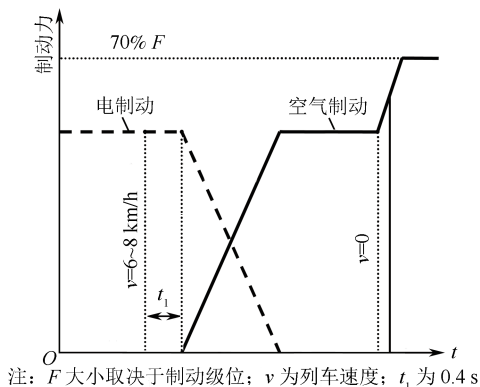


图 1 电空制动的转换控制

由图 1 可知, 当列车速度降低到 6~8 km/h (具体数值根据车辆合同确定) 时, TCMS (列车监控系统) 发出电制动淡出信号传递给牵引系统和制动系统, 电制动和空气制动分别按照约定的斜率 (一般为 1 m/s^3) 开始退出和施加, 直到达到目标值。考虑到空气制动的响应时间比电制动长, 因此牵引系统需要在接收到电制动淡出信号后延迟一段时间 (一般为 0.4 s), 再让电制动按照约定斜率退出, 以此与空气制动的施加动作协调一致。

上述仅是理论上的电空制动转换过程, 但实际上还存在很多其他影响因素, 如 TCMS 网络信号的传输延时、机械动作的不确定性、物理特性的变化、

空气制动力上升过程的非线性等。直接使用约定参数并不能保证空气制动的施加与电制动的退出过程完全吻合, 从而造成电空制动转换过程中瞬时减速度的不平滑^[5]。

研究表明, 影响 ATO 控车精度的车辆性能参数主要包括减速度可控最小步长、列车制动系统延时、保压制动施加及电空混合匹配等。而在列车拥有同样的制动管理系统及网络传输的条件下, 减速度可控最小步长、制动系统延时及保压制动施加参数可认为一致, 唯一不同的则是电空混合匹配问题。而在电空混合匹配中, 主要涉及电空转换速度点、电制动预退出至实际退出的延迟时间、电制动衰退曲线斜率^[6]等 3 个控制参数。

因此, 在调试阶段应不断调整优化影响电空混合匹配的主要控制参数, 即电空转换速度点、电制动延迟退出时间、电制动退出斜率这 3 个参数, 以使电空制动转换过程中总制动力始终保持稳定发挥。

另外, 由于合成闸瓦的瞬时摩擦系数会随着车辆速度的降低而逐渐升高, 因此低速区间的空气制动力往往要偏大一些, 而电制动力在整个高低速区间都比较稳定, 这样就会导致电空制动转换后的列车减速度要高于转换前。

要使得电空制动转换前后的列车减速度保持一致, 必须要在制动软件中对电空制动转换后的空气制动力目标值进行部分削减, 以修正由闸瓦摩擦系数变高而造成的制动力偏差。具体削减策略如图 2 所示。

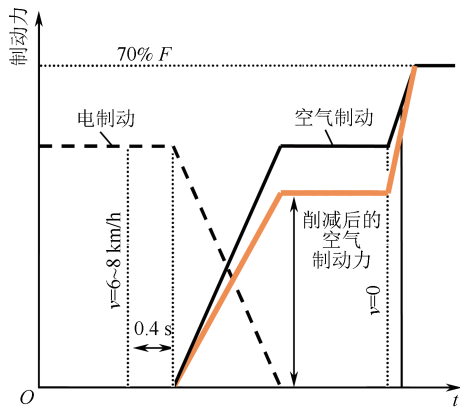


图 2 电空制动转换后空气制动力削减策略

3 南京地铁 3 号线制动特性测定及优化

南京地铁 3 号线列车采用 6 辆编组 (4 动+2 拖) A 型车, 以及采用更快速响应的架控制动控制

系统。在常用制动和快速制动过程中,采用电制动与空气制动混合制动方式。首先优先采用电制动,当电制动力不能满足制动需求时,由空气制动自动补足并优先使用拖车的空气制动力。当列车减速至较低速度时,将电制动转换为空气制动。空气制动需要通过踏面制动单元施加,这就受制于制动气缸充、放气以及踏面制动单元动作固有的机械延迟,导致制动响应时间具有延时性^[7]。因此,为了实现ATO精确控车及降低闸瓦磨损,要求电空转换速度点尽量低,并能实现平稳转换。

南京地铁3号线最高运营速度为80 km/h,最大常用制动减速度为 $1.12(1+5\%) \text{ m/s}^2$,制动延迟时间要求不大于0.4 s,对制动力的建立时间未作要求,但考虑到列车冲击限制为 0.75 m/s^3 ,制动力的建立时间应取1.5 s左右。

3.1 制动减速度和延迟时间、建立时间的测定

对南京地铁3号线制动系统进行测定,结果如图3所示。由图3可知,100%最大常用制动级位下 a 为 -1.104 m/s^2 , t_1 为0.31 s, t_2 为1.45 s,这些数值均符合合同要求。

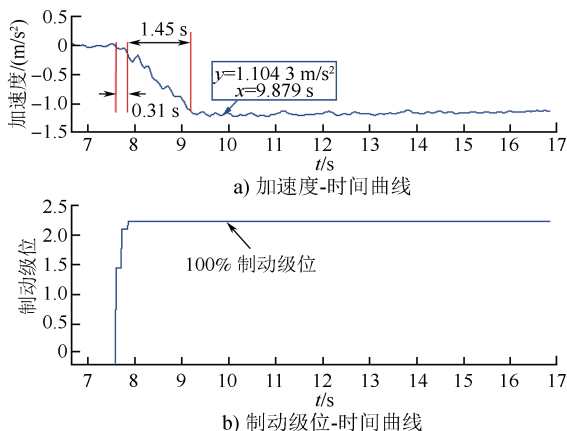


图3 南京地铁3号线制动系统特性测定结果

3.2 电空制动转换参数调整和优化

首先使用合同约定参数,将电空转换速度点设定为6 km/h,电制动延迟退出时间设定为0.4 s,电制动退出斜率设定为 1 m/s^3 ,在制动全程施加60%制动级位时,其电空制动转换过程如图4所示。

由图4可知,在电空制动转换过程中减速度曲线并不平滑,出现了明显的制动力叠加现象,且电空制动转换前后的减速度并不一致。为解决此问题,在列车调试过程中,进行了多次调整控制参数的摸索和尝试。首先将电制动延迟退出时间降低为0.2 s,并将电空制动转换后的空气制动力值削减

20%,发现制动力叠加现象明显改善;电空制动转换前后的制动力大小基本匹配,但是在电空制动转换后期还存在少量的过制动。

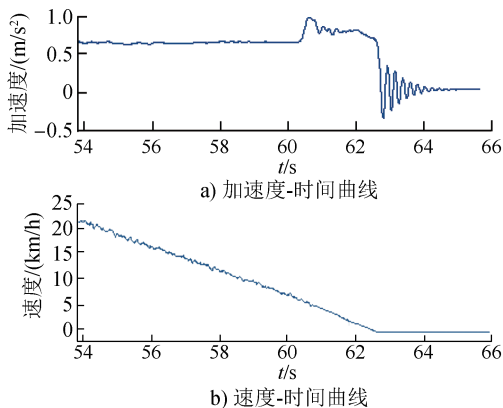


图4 参数调整前电空制动转换过程

因此需继续进行控制参数优化,在上述调整的基础上将电制动退出斜率增加到 1.1 m/s^3 。考虑到电制动退出斜率提高后,电制动的完全退出点将有所提前。为了最大化利用电制动,将电空转换速度点再由6 km/h调整为5.5 km/h。经过多次制动测试后可看出,电空制动转换减速度曲线基本相似,但有明显改善,过制动问题亦均得到解决。

图5~7展示了其中3次电空转换的制动减速度曲线。由图5可见,在经过最终的参数调整和优化后,在电空制动转换过程中,电制动力的下降和空气制动力的上升过程基本都能吻合,整个转换过程中均无制动力的叠加现象产生,制动减速度曲线无明显波动。

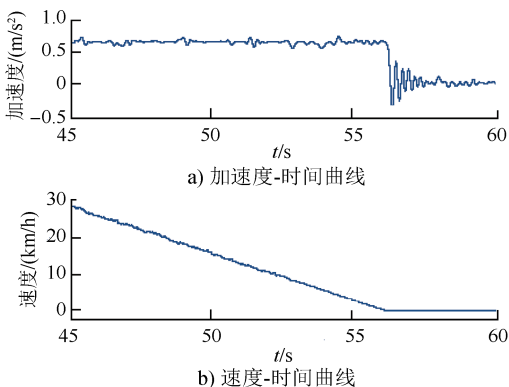


图5 参数调整后的电空制动转换过程(一)

4 结语

地铁车辆的自动控制是一个闭环的控制系统,制动系统是作为被控制对象存在的。制动系统的

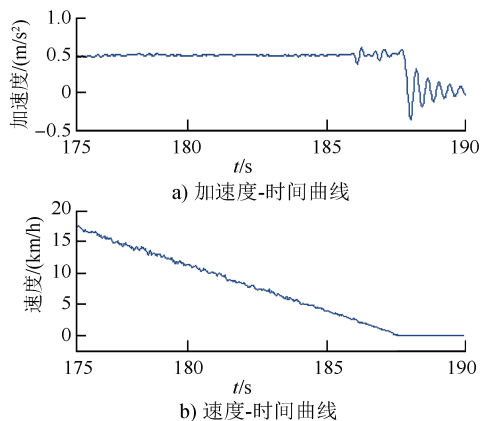


图6 参数调整后的电空制动转换过程(二)

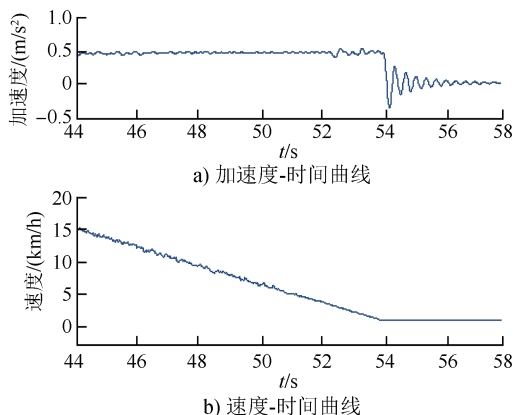


图7 参数调整后的电空制动转换过程(三)

制动力大小、制动力延迟时间及制动力建立时间的测定,有助于信号系统采用合适的控制策略来进行速度闭环控制。通过对电空制动转换控制参数的优化调整,使得制动系统的系统特性更加稳定,以满足信号系统的控制要求,有助于信号系统进一步对车辆进行精确控制。

参考文献

- [1] 王鹏飞,樊贵新,王新海,等.城轨车辆在ATO模式下停车精度问题的分析与探讨[J].铁道机车车辆,2011(6): 77.
- [2] 赵红.列车自动驾驶系统(ATO系统)在地铁中的应用[J].电子世界,2014(7): 30.
- [3] 夏付炳.地铁车辆再生制动能量利用方案[J].科技创新与应用,2016(16): 30.
- [4] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通车辆制动系统 第1部分:电空制动系统通用技术规范: T/CAMET 04004.1—2018 [S].北京:中国铁道出版社,2018.
- [5] 王冬雷.地铁车辆电空混合制动平滑过渡问题分析及改进建议[J].电力机车与城轨车辆,2010(3): 51.
- [6] 路象群.广州地铁A5型车电空混合制动关键参数对列车停车精度的影响分析[J].机电信息,2016(18): 145.
- [7] 魏晓婷.广州地铁3号线列车ATO模式对标原理及异常故障分析[J].铁道机车车辆,2016(2): 112.
- [8] 张海龙,郑月宾,牛化鹏,等.地铁再生制动能量回馈装置框架保护配置研究[J].城市轨道交通研究,2015(11): 136.

(收稿日期:2019-04-03)

(上接第91页)

车站较近,且列车进站时经过节能坡减速后的速度较低,容易出现列车无法惰行通过电分相的事故。

2) 电分相不宜设置在节能坡加速和减速区域,该区域内的纵断面坡度较大,不利于列车惰行通过电分相。建议电分相设置在后续缓坡上,该区域内的纵断面坡度较小,且列车运行至该区域的速度较高,具有足够的速度可保证惰行通过电分相。

3 结语

交流供电制式在以高架和地面为主的市域轨道交通项目中,相对于传统城市轨道交通的直流供电制式具有一定的造价成本优势,然而交流供电制式所带来的电分相对于区间行车存在一定的影响。为最大程度上减少电客车“掉进”电分相的风险,通过理论计算,分析得出了电分相所处区间的最大坡度值、最小站间距,以及电分相两侧的信号布点原则。其结论可以作为工程设计之初主变电所选址、

站点及电分相设置及区间纵断面坡度设计的参考依据,亦可作为信号专业在电分相处的布点设计依据。

参考文献

- [1] 闵国水.关于市域铁路系统制式选择的探讨[J].中国铁路,2014(12): 27.
- [2] 丁建宇.温州市域铁路发展与思考[J].都市轨道交通,2018(4): 6.
- [3] 孙见.市域铁路公交化运营管理辅助系统建设[J].都市轨道交通,2014(2): 58.
- [4] 潘亮.市域铁路信号系统制式的选择[J].城市轨道交通研究,2016(增刊2): 69.
- [5] 黄足平.轨道交通采用25 kV交流制的电分相影响分析及处理对策[J].铁道标准设计,2016(11): 119.
- [6] 邓志翔.市域快轨信号机显示方案研究[J].都市轨道交通,2017(6): 77.
- [7] 徐慧智,张文会.地铁线路节能坡设计显著性影响因素分析[J].城市轨道交通研究,2016(3): 12.

(收稿日期:2019-01-03)