

# 采用大闭环控制方式的城市轨道交通 列车制动控制系统研究

王其伟 王令军 王超逸

(中车青岛四方车辆研究所有限公司,266031,青岛//第一作者,教授级高级工程师)

**摘要** 大闭环控制方式的城市轨道交通列车制动控制系统,以既有的城市轨道交通列车制动系统为基础,加以适当改造,构建大闭环,通过对减速度的精确控制实现对城市轨道交通列车制动力的精确控制。介绍并比较分析了大闭环控制方式的列车制动控制系统与既有列车制动控制系统的构成、主要功能和作用原理,从理论上推断出大闭环控制方式的城市轨道交通列车制动控制系统能够显著改善列车的制动品质,实现列车精准定点停车。

**关键词** 城市轨道交通;列车;制动控制系统;大闭环控制

**中图分类号** U270.35

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.04.002

## Brake System of Urban Rail Transit Train with Large Closed Loop Control Mode

WANG Qiwei, WANG Lingjun, WANG Chaoyi

**Abstract** Based on the existing urban rail train brake system and proper improvement and through accurate control of the deceleration, a new system adopts the large closed loop control mode to carry out precise control of train break. In this paper, the new urban rail brake control system adopting large closed loop control mode and the existing urban rail brake systems are comparatively analyzed from aspects of system composition, main functions and working principle, the advantages of this brake control system are theoretically deduced, which can significantly improve the braking quality for urban rail transit trains and realize accurate fixed-point stop.

**Key words** urban rail transit; train; brake control system; large closed loop control mode

**Author's address** CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China

目前,我国城市轨道交通车辆制动控制系统采用的是直通式制动机。在列车运行过程中,制动机根据接收到的制动指令,准确地控制电制动力和制动缸风压。但是,既有的城市轨道交通车辆的制动控制系统不是完全意义上的闭环控制,制动控制系

统的控制品质有待提升。本文介绍了一种新型的城市轨道交通车辆制动控制系统,能够实现对列车总制动力的精确控制。

## 1 既有城市轨道交通车辆制动控制系统

既有城市轨道交通车辆的制动控制系统构成实际上是小闭环大开环,其构成之一如图1所示。

在人工驾驶模式下,制动指令由激活端司机室的制动控制器及指令转换器产生。制动指令有二进制编码、PWM(脉宽调制)信号和网络信号3种模式。这些制动指令信号被传输至全列。在ATO(列车自动运行)等自动驾驶模式下,制动指令多采取PWM或网络信号模式。制动指令传输的是列车减速度需求值。

由于制动指令采用的是电信号方式,因此可以认为制动指令是被同步送达各节车辆。列车编组内的直通式制动机根据指令,可以频繁实施制动和缓解,直到列车停止运行,施加停车保持制动。

目前,城市轨道交通列车一般以“一动一拖”或“二动一拖”为1个单元,在单元内进行空电联合制动。图1所示的是“一动一拖”的单元架构。列车通常由2个或多个单元编成,总制动力为诸单元制动力之和。

### 1.1 制动力计算与分配

列车的总制动力为列车主动施加的制动力与列车被动施加的制动力之和。以编成为2个单元的列车为例,列车主动施加的制动力为2个单元的电制动力与2个单元的空气制动力之和。

单元内承担主控任务制动机的EBCU(电子制动控制单元)在接收到制动指令后,根据载荷信号(载荷修正),计算出单元所需的制动力,提交给牵引单元。牵引单元据此施加电制动,并将施加的电制动值反馈给EBCU。如果电制动能够满足制动力

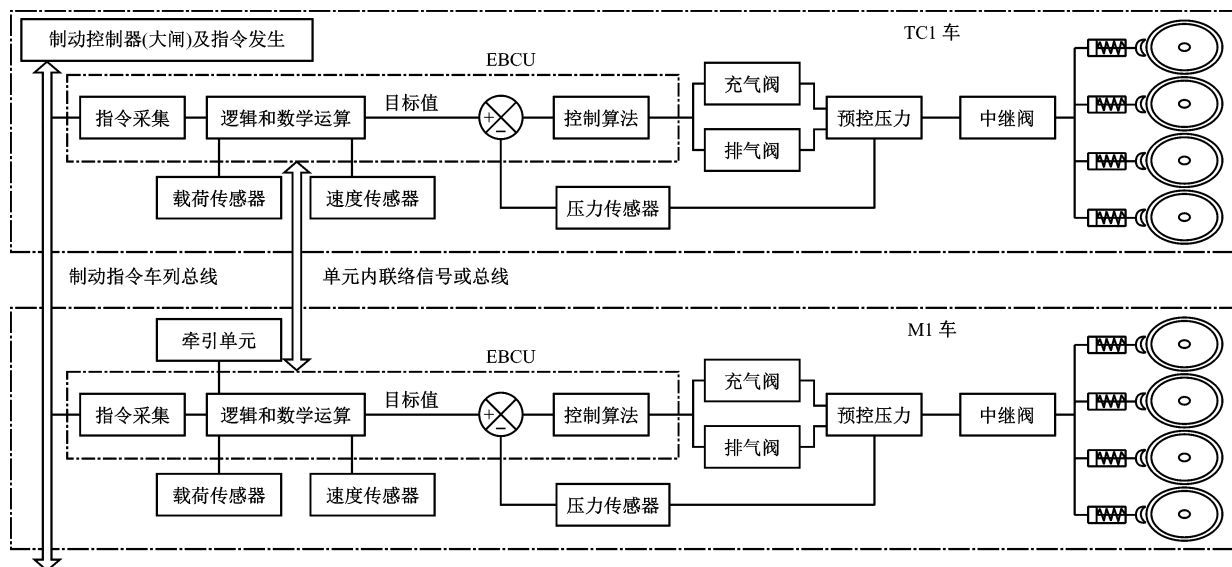


图1 既有城市轨道交通制动控制系统构成之一

的需求,则不施加空气制动力。否则,不足部分由空气制动力承担。

列车的制动力还受到车辆本身沿坡道方向上的重力分量的影响、风的阻力的影响等,这些影响都表现为被动施加的制动力。

## 1.2 空气制动力的闭环控制

主控任务制动机 EBCU 先计算出单元内需要承担的空气制动力,然后以等磨耗或拖车优先施加的方式求出并发布单元内各车(架控方式下是各转向架)的空气制动力的目标值,各车(或转向架)EBCU 再将收到的空气制动力的目标值换算为相应的制动缸预控压力目标值,闭环精确控制预控压力。预控压力经过中继阀流量放大后控制制动缸,再通过轮对踏面或制动盘产生摩擦制动力。

## 1.3 列车总制动力的精确控制问题

### 1.3.1 列车主动施加制动力误差

列车主动施加的制动力存在以下误差:

(1)制动力计算误差:受载荷传感器精度、采样电路精度、载荷传感器安装位置等因素的影响,计算出的载荷存在误差,这会导致制动力需求的误差。

(2)电制动力控制误差:电制动力在控制和反馈采集环节,不可避免地会产生误差。

(3)空气制动力控制误差:目前,对预控压力可以实现精确控制,但是,经过中继阀后,输出压力的误差会达到  $\pm 10$  kPa。中继阀输出压力到达单元制动器(缸)后,经过杠杆作用实现倍率变化,这导致施加在制动盘或踏面上的压力(夹钳/闸瓦推力)的误差将进一步扩大。此外,还存在着摩擦片与制动

盘(盘形制动)、闸瓦与踏面之间摩擦系数随夹钳/闸瓦推力、制动持续时间、速度、温度不同而发生的变化。以某型国产地铁车辆合成闸瓦为例<sup>[2]</sup>,在干态情况下,实施 1 次性停车制动试验,试验条件及结果如下:

(1)当制动初速度为 100 km/h、闸瓦推力为 38 kN 时,两次试验测得的平均摩擦系数分别为 0.245 和 0.195,两者相差 25.64%。

(2)当制动初速度为 100 km/h、闸瓦推力为 30 kN 时,两次试验测得的平均摩擦系数分别为 0.236 和 0.224,两者相差 5.35%。

此外,当闸瓦推力相同、制动初速度不同时,测得的平均摩擦系数也不相同。由此可见,闸瓦摩擦系数受闸瓦推力、速度等多个因素的影响,且离散性较大,对制动力影响较大。

综上所述,主动施加的制动力的误差 = 计算误差 + 电制动力控制误差 + 空气制动力误差。对克诺尔公司而言,主动施加制动力误差可能达到目标值的 15%<sup>[3]</sup>。

### 1.3.2 列车被动施加制动力

车辆本身沿坡道方向上的重力分量以及不同速度下的风阻都会对制动力产生影响,导致误差,在此只讨论坡道上的重力分量的影响。

根据 GB/T 7928—2003《地铁车辆通用技术条件》,地铁线路正线坡度不宜超过 30‰,困难地段可采用 35‰,联络线、出入段(场)线不宜超 40‰。本文相关计算的坡度取值为 30‰。设列车处于下坡状态,列车质量为  $m$  (kg),重力加速度  $g$  为 9.8 m/

$s^2$ , 则列车重力沿坡道方向的分量  $F_1 = m \cdot 0.29387 \text{ m/s}^2$ ; 设常用全制动减速度为  $1 \text{ m/s}^2$ , 当施加常用全制动时, 主动施加的制动力  $F_2 = m \cdot 1 \text{ m/s}^2$ 。此时, 重力分量导致制动力减少, 减少的幅度为:  $F_1/F_2 = 29.39\%$ 。

当施加全制动的 70% 时, 主动施加的制动力  $F_2 = m \cdot 0.7 \text{ m/s}^2$ 。此时, 重力分量影响的幅度为:  $F_1/F_2 = 41.98\%$ 。

若列车处于上坡状态, 则上述重力分量影响致制动力增加的幅度分别为 29.39% 和 41.98%。

如果取正线坡度的中值 15‰ 计算, 列车处于下坡时, 施加常用全制动, 重力分量影响致制动力减少的幅度为 14.70%。当施加全制动的 70% 时, 重力分量影响的幅度为 21.00%。

若列车处于上坡状态, 则上述重力分量影响致制动力增加的幅度分别为 14.70% 和 21.00%。

可见主动施加的制动力越小, 坡度越大, 坡道上重力分量的影响就越大, 反之影响就小。

### 1.3.3 列车制动力误差对制动距离的影响

工况 1: 假设列车在平直线路上运行, 列车制动力误差为 0, 列车制动初速度为  $50 \text{ km/h}$  ( $13.89 \text{ m/s}$ ), 列车制动减速度为  $1 \text{ m/s}^2$ , 由此可以计算出列车制动距离为  $96.466 \text{ m}$ 。

工况 2: 假设列车制动初速度和制动减速度与工况 1 相同, 列车主动施加的制动力的误差为 15%<sup>[2]</sup> (假设减少), 且列车在坡度 15‰ 下坡条件下实施制动, 则坡度对制动力的影响为 14.70%; 最恶劣情况下, 二者叠加, 即制动力减小 29.70%。由此可以计算出列车的制动力为  $m \cdot 0.703 \text{ m/s}^2$ , 制动减速度为  $0.703 \text{ m/s}^2$ , 制动距离为  $137.22 \text{ m}$ 。

两种工况下的制动距离相差  $40.754 \text{ m}$ 。城市轨道交通列车“门对门”停车, 要求误差不能超过正负  $300 \text{ mm}$ , 因此, 列车进站停车时, 只能通过反复调整制动指令来调整不同线路工况下的制动距离。

## 1.4 列车的总制动力的控制

由上述分析可见, 由于目前列车的制动力控制属于开环控制, 在存在多种控制误差以及影响因素的情况下, 虽然能够以闭环方式较精确控制空气制动力的预控压力, 但是, 最终总的制动力仍然是一个在一定范围内变化的数值, 该变化将严重影响制动距离, 影响列车的定点停车的操作。

在自动驾驶的情况下, ATO 系统通过预设的定标点, 需要多次修正制动指令, 以实现准确停车。

在人工驾驶的情况下, 列车总制动力的控制是采用“人在回路中”的模式, 由驾驶员根据路况、距离、速度等参数, 通过制动控制器 (大闸) 调整制动指令, 控制列车的制动力, 最终实现精确停车的目的。实际上, 只有通过驾驶员的参与才能形成列车总制动力的闭环控制, 但就制动设备本身而言, 列车总制动力的控制方式是开环控制。在列车制动停车过程中, 驾驶员承担了获取反馈并进行运算的任务。驾驶员的经验、对路况的熟悉程度, 对制动力的精确控制起很大的作用。因此, 有必要将列车制动力的开环控制方式, 改为闭环控制方式, 以降低制动操控的复杂程度。

## 2 制动力大闭环控制方式下的制动控制系统构想

### 2.1 制动控制系统构成

制动力大闭环控制方式下的制动控制系统构成如图 2 所示。

由图 2 可知, 制动控制系统的基本架构没有改变, 只是修改了制动控制器 (大闸) 及指令发生装置。修改后的指令发生装置不再是简单地把司机控制器 (大闸) 的位置信号转为电指令信号, 而是增加了采集轴速信号、计算列车运行速度和列车减速度功能, 这些采集信号和计算数值作为反馈信号使用。这样, 制动控制系统就具有了构成列车减速度闭环控制的条件。

### 2.2 指令传输方式比较

PWM 或网络信号模式, 可以传输模拟量信号, 能够准确传递经过计算的指令值, 适合于大闭环控制的城市轨道交通制动控制系统。对于二进制编码的指令传输方式而言, 由于指令值通常只有 0~7 级, 级间差较大, 因此, 二进制编码指令传输方式不足以准确表达指令, 但是也可以使制动控制系统达到闭环控制的目的, 只是制动距离的精度差一些。

### 2.3 减速度信号来源

目前, 城市轨道交通列车的速度信号来源于车辆上的轴端速度传感器。将驾驶室所在车辆的轴端速度传感器的速度信号送到修改后的指令发生装置, 该装置可据此速度信号计算出列车的减速度。

### 2.4 工作原理说明

修改后的指令发生装置以列车的减速度作为控制目标, 将司机控制器 (大闸) 给出的指令作为目

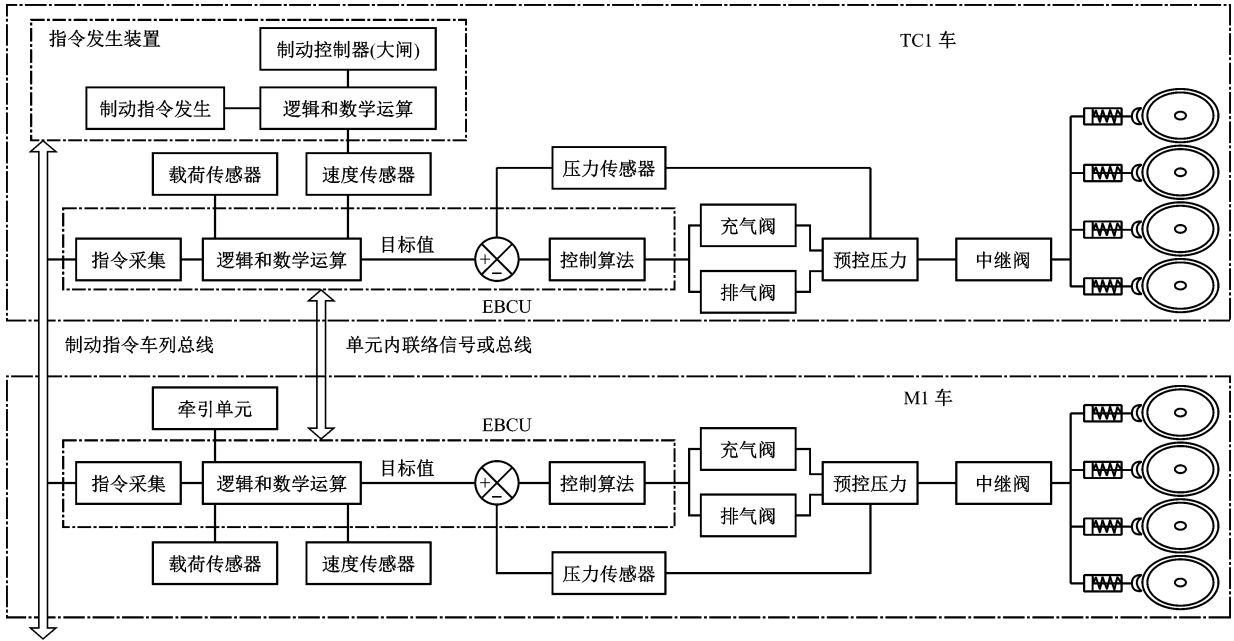


图2 制动力大闭环控制方式下的制动控制系统构成

标减速度。修改后的指令发生装置把根据轴端速度信号计算出的列车减速度与目标减速度进行比较,如果比目标减速度绝对值小,则遵循相关的算法,给出一个适当增加后的制动指令值;如果比目标减速度绝对值大,则适当减小制动指令值。如此一来,虽然各车主动施加的制动力会发生调整、变化,但是作为控制对象的列车减速度是稳定的,因此列车制动力是稳定的。

2.5 大闭环模式下指令发生装置控制算法

在列车制动力控制过程中存在着较多外部扰动、信号建立及制动缸压力建立等延时,因此,可以考虑采用鲁棒性较强的模糊(FUZZY)控制+智能PID(比例-积分-微分)控制模式,该模式的控制算法模型如图3所示。其具体的控制策略是:当减速度的反馈值与目标值相差较大时采用模糊控制,相差较小时采用智能PID控制。

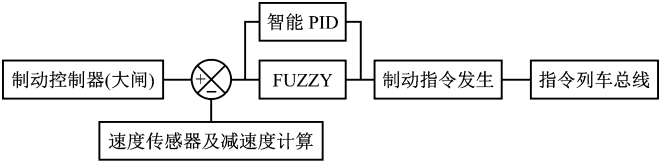


图3 大闭环模式下指令发生装置控制算法模型

2.6 大闭环控制的城市轨道交通列车制动控制系统优点

大闭环控制的城市轨道交通列车制动控制系统,能够有效克服计算误差、补偿误差、坡度等造成的对制动力的影响,能够较为准确地控制列车减速度,因此能够较为精确地控制列车制动距离,有利于实现精准定点停车。在ATO运行模式下,经过了1次对标定位后,ATO系统就可以清楚地计算出列车距停车点的距离,然后根据通过车辆轴端速度传感器获得的列车速度计算出需要的减速度,并将此减速度提交给指令发生装置作为输入信号;在减速度被列车制动控制系统准确控制的情况下,一次制

动指令的给出就可以实现精准定点停车,这是最理想的情况。即使是人工驾驶方式,由于司机控制器(大闸)给出的指令和列车减速度之间近乎是一一对应的关系,减少了系统的不可知程度和偶然因素,因此能够大大降低司机预估预判的难度,有利于减少制动力调整的次数。

2.7 速度信号异常对减速度计算的影响及其对策

如果在制动过程中出现了滑行,就有可能影响到速度信号的采集,进而影响减速度的计算。在非紧急制动情况下,除非轨面遭到污损,否则一般不会超黏着发生滑行。一旦滑行发生,如果不是4轴都发生了滑行,根据4轴轴速取大原则,也可以准确

地计算出列车速度。

对于驾驶室所在车辆而言,由于拥有4个轴端速度传感器,所以,即使出现其中的3个及以下的速度传感器损坏的情况,也可以继续有效地实现速度信号的采集。

如果出现4轴都发生了滑行,或4个轴端速度传感器都损坏的情况,则可以将大闭环控制方式转换为原来的大开环小闭环模式。

## 2.8 制动系统故障对大闭环控制的影响及其对策

如果发生制动指令传输故障,制动指令不能被送达至每节车辆,则列车需要救援。如果是编组内的某一车辆的制动机发生了故障,则可以将该车的制动机切除,该车需要的制动力由其它车辆分担。大闭环控制模式尤其适应于发生该类故障情况下的制动力校正。

## 2.9 电制动失效对大闭环控制的影响及其对策

在某单元电制动失效的情况下,空电联合制动模式变为纯空气制动模式,控制环节减少了,但是大闭环控制的品质没有降低,只是加大了该单元闸瓦/片的磨耗,需要在本趟运行结束后入库检修。

## 2.10 大闭环控制的城市轨道交通列车制动控制系统与ATO的关系

大闭环控制的城市轨道交通制动控制系统,其目标是构建一个制动力更为稳定的制动控制系统,该系统可以为ATO的应用提供一个更好的基础。

## 3 大闭环控制方式在铁路列车制动控制系统的应用前景

高铁列车运行速度较高,因此其制动距离较大,可以用于调节的时间更长,采用大闭环控制方式更有意义。再者,高铁列车的制动技术也是直通式制动(非备用模式下),因此也具备采用大闭环控制的条件。由于高铁列车不强调在车站门对门式的精准停车,因此需要的调节次数更少,采用大闭环控制方式,可以减少进站停车制动时间,从而减少整个列车的运行时间。

对于大铁路普通车辆而言,采用了ECP(电控制动)技术的列车也可以采用大闭环控制方式。因为其制动指令和城市轨道交通列车的相类似,时间延迟极小。而且,车辆上也是采用直通式制动机,能够快捷地响应制动指令变化。

其它采用自动式制动机的铁路列车,其制动/缓解指令为列车风管的减压/增压信号,由于空气波速和制动波速的限制,该信号通过列车风管传递到整个列车的过程相对缓慢。譬如我国目前在线运行的F8型自动制动机。在不加电控的情况下,15辆编组列车,其第一辆车和第15辆车间的空气制动延迟相差为 $1.5\text{ s}^{[4]}$ ,在采用更多辆编组的列车,其空气制动延迟将更大。致使整列车制动的同步性、动态响应特性较差,难以整列车实施制动力的快速调整。而且,我国目前铁路货车车辆上使用的车辆制动机多采用二压力机构分配阀,只具有阶段制动和一次缓解能力,难以根据需要精确及时地达到需要的缓解压力,这样一来,就难以实现对列车制动缸压力的精确控制。因此,采用自动式制动机的铁路列车,其制动控制系统暂不适应本文所说的大闭环控制方式。

## 4 结语

在保持整个城市轨道交通列车制动控制系统架构其它部分不变的情况下,通过适当修改指令发生装置,就可以实现以大闭环控制方式控制列车的制动力,有效克服或部分克服由于计算误差、坡度变化、风阻变化、摩擦系数变化等对制动力控制造成的影响,较为准确地控制列车的减速度和制动距离,实现精准定点停车。大闭环控制方式降低了人工驾驶方式下列车进站停车控制的复杂度,减少了人为因素导致的误操作。尤其是在ATO模式并日趋普遍向FAO模式发展的情况下,大闭环控制方式能够有效简化精确停车的算法,提高列车停车的精确度。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁车辆通用技术条件: GBT 7928—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [2] 铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验中心. 地铁车辆用合成闸瓦检验报告(2009年)[R]. 北京: 铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验中心, 2009.
- [3] 王艳伍, 陈爱丽. 西安地铁1号线车辆牵引制动及信号系统的接口设计实践[J]. 城市轨道交通研究, 2013(7): 75.
- [4] 刘凡, 王俊勇, 袁锦林. F8型空气分配阀及其电控制动机[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.

(收稿日期: 2017-08-08)