

# Research on Electromechanical Brake Impulse Limit Control

Hanwen Zhang\*, Mengling Wu, Chun Tian#

Institute of Railway Transit, Tongji University, Shanghai  
Email: #2964646313@qq.com

Received: Dec. 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 12<sup>th</sup>, 2020; published: Jan. 19<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Electro-mechanical braking is a new type of rail transit braking method that uses electricity as a power source. In the rail transit industry, train impulse limit control is related to driving safety and passenger experience, and is an important part of train braking control. Most urban rail trains and high-speed EMUs in China require the train impact rate to be  $0.75 \text{ m/s}^3$  or less. According to this standard, this paper uses PID control to perform force feedback control on electromechanical braking devices, and conducts electromechanical braking impulse limit control research. Then the control effect of the electromechanical braking device under the train impact rate of  $0.75 \text{ m/s}^3$  or less was verified by tests.

## Keywords

Electromechanical Braking, Impulse Limit Control, PID Control

---

# 电机械制动冲动限制控制研究

张瀚文\*, 吴萌岭, 田 春#

同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海  
Email: #2964646313@qq.com

收稿日期: 2019年12月29日; 录用日期: 2020年1月12日; 发布日期: 2020年1月19日

---

## 摘 要

电机械制动是一种采用电力作为动力源的新型轨道交通制动方式。在轨道交通行业内, 列车冲动限制控

\*第一作者。

#通讯作者。

制关系着行车安全和乘客的乘车体验,是列车制动控制中及其重要的一环。国内大部分城轨列车和高速动车组要求列车冲击率小于等于 $0.75 \text{ m/s}^3$ ,按照该标准,本文通过PID控制对电机械制动装置进行力反馈控制,进行了电机械制动冲限制控制研究,试验验证了电机械制动装置在列车冲击率小于等于 $0.75 \text{ m/s}^3$ 等工况下的控制效果。

## 关键词

电机械制动, 冲限制控制, PID控制

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

制动力控制是制动系统的重要的功能,而列车的冲限制控制是制动力控制中必不可少的一环,也是乘客舒适度评价指标中较为重要的一环。

有研究员在西安地铁 2 号线的试验中实测的结果,防滑阀处测点的制动缸压力变化率不大于  $158.2 \text{ kPa/s}$  就能保证列车冲限制不超过  $0.75 \text{ m/s}^3$ ,但列车在人工驾驶模式下同样测点制动缸压力上升斜率为  $117.5 \text{ kPa/s}$ ,ATO 系统自动运行时同样位置测点制动缸压力上升斜率为  $57.5 \text{ kPa/s}$  [1]。固然较小的制动缸压力上升斜率,即较小的列车冲击率能够满足限制要求,也不会造成旅客乘车不适的体验感。但是由于无法精确控制夹钳的运动,虽然能够满足冲限制控制的下限,同样也限制了冲限制控制的上限。

还有研究人员在论文中描述的黏着条件极差、速度较低( $40 \text{ km/h}$ )的列车运行情况。减速度在此时突变为  $6 \text{ m/s}^2$ 。若按冲限制进行控制,列车速度将在  $2 \text{ s}$  左右降为  $0$ ,且此时仍有  $4.4 \text{ m/s}^2$  的减速度。这样大的减速度和  $2 \text{ s}$  的减速时间将使车轮处于抱死滑行。所以在防滑控制,尤其是低速阶段可以不按照冲限制的要求控制制动力的减小[2]。

对于这些主流的空气制动系统,无论其控制系统是以压力空气作为制动信号传递和制动力控制介质,或是以电气信号来传递制动信号,最终都是需要控制制动缸气压从而控制列车的制动和缓解。制动缸的压力精度有限( $\pm 20 \text{ kPa}$ ),时滞性较大(响应时间在  $1 \text{ s}$  以上) [3],所以空气制动系统非线性很强,较难对夹钳运动和夹钳夹紧力进行精准控制,空气制动系统列车冲限制则是通过控制制动缸压力目标曲线来间接实现[4]。

电机械制动是一种新型的轨道交通制动装置,其系统动力源为电力,依靠电力直接驱动基础制动系统中电机,带动夹钳,使闸瓦(片)与其摩擦副摩擦产生摩擦力,将列车动能转化为热能产生制动效果。电机械制动在国外首先应用于航空领域[5],渐渐在汽车领域[6]也有较多应用和研究,但在轨道交通领域中应用较少,目前仅在日本鹿儿岛 1000 型低地板车上安装过该原理的制动器[7],韩国有相关技术专利,但未进行实际应用。在国内,同济大学吴萌岭课题组在电机械制动方面做出了较深的探索研究,目前已经有较为成型的使用于轨道交通车辆的电机械制动系统。

电机械制动系统能够精确控制夹钳的运动,在夹紧后也能通过力闭环,较为精确控制地控制实际夹紧力跟随目标夹紧力。从而在进行冲限制控制的过程中能够较为精准地控制列车的冲击率。此时列车冲击率不再是一个定值,而是可以随着列车运行环境的不同进行调整的变值,可见电机械制动系统能够实现上述研究员所设想的冲限制控制调整。

以下本文研究了电机械制动系统冲动限制控制原理，采用了 PID 算法实现了控制的调节，试验验证了控制的效果。

## 2. 电机械制动系统冲动限制控制原理

电机械制动单元的功能是接收电机械制动系统上层控制器发送的单元目标制动力的信号，通过控制本制动单元的电机驱动后续机械结构完成制动缓解动作，产生相应的制动力或者缓解到位。控制要求在制动时，电机械制动单元响应速度要快，实际制动力能够快速准确地跟随目标制动力的变化。

电机械制动单元主要包括电机，电机驱动单元，传递装置，夹钳等部分组成。控制流程主要如图 1 所示。

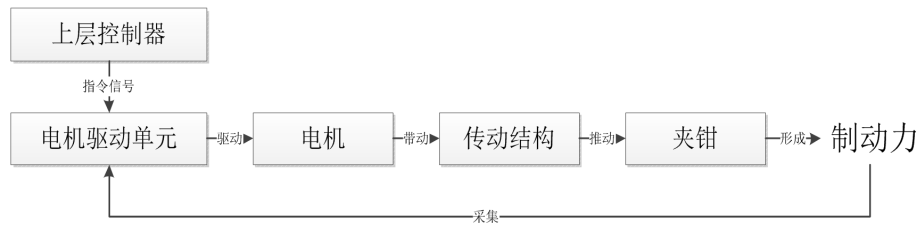


Figure 1. Control flowchart of electromechanical braking unit  
图 1. 电机械制动单元控制流程图

针对上述控制流程，本文采用图 2 所示的控制策略进行控制，在电机电流环控制的外环进行 PID 的力反馈控制。通过力反馈值与目标值的对比，改变电机驱动单元控制的电机电流，最终实现制动力的控制。下图中  $F_B^*$  为目标制动力， $F_B$  为实际制动力。

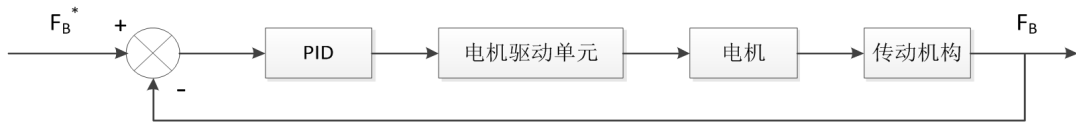


Figure 2. Control strategy of electromechanical braking unit  
图 2. 电机械制动单元控制策略

PID 控制应用在本套系统的制动力控制中的表达式如公式(1)所示

$$\begin{cases} e(t) = F_B^* - F_B \\ u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $e(t)$  为目标制动力和实际制动力的差值， $u(t)$  为控制的输出值， $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  为系数整理之后的比例系数，积分系数和微分系数。

系统的控制目标为调整合适的三项系数，使系统的制动力实际值能够较好地跟随目标值的变化。

## 3. 控制调节算法实现

要实现制动力闭环的控制，需要在制动力产生的部位安装力传感器。本文中采取在电机推出端安装力传感器，该传感器测出的推出力经过传动机构放大之后即是实际制动力。本文采用 NI 公司的 Labview 编程环境进行所需控制算法的编制。整体算法主要由四部分功能组成，分别是：数据采集，PID 算法实现，CAN 通讯以及数据保存及显示。下面本文将分别结合 Labview 编程环境介绍着四部分功能的实现。

数据采集部分如图 3 所示。

采用 NI Labview 的 DAQmx 程序包内的电压采集模块对力传感器的电压信号进行采集，设定相应的采样频率后对采集的数据进行处理。本文中对每 20 个数据去除其最大最小值后取其平均值的方法对采集信号进行噪声处理，处理完毕得到较为平稳和精确的实际制动力的值。该值再参与图 4 的 PID 算法实现部分。

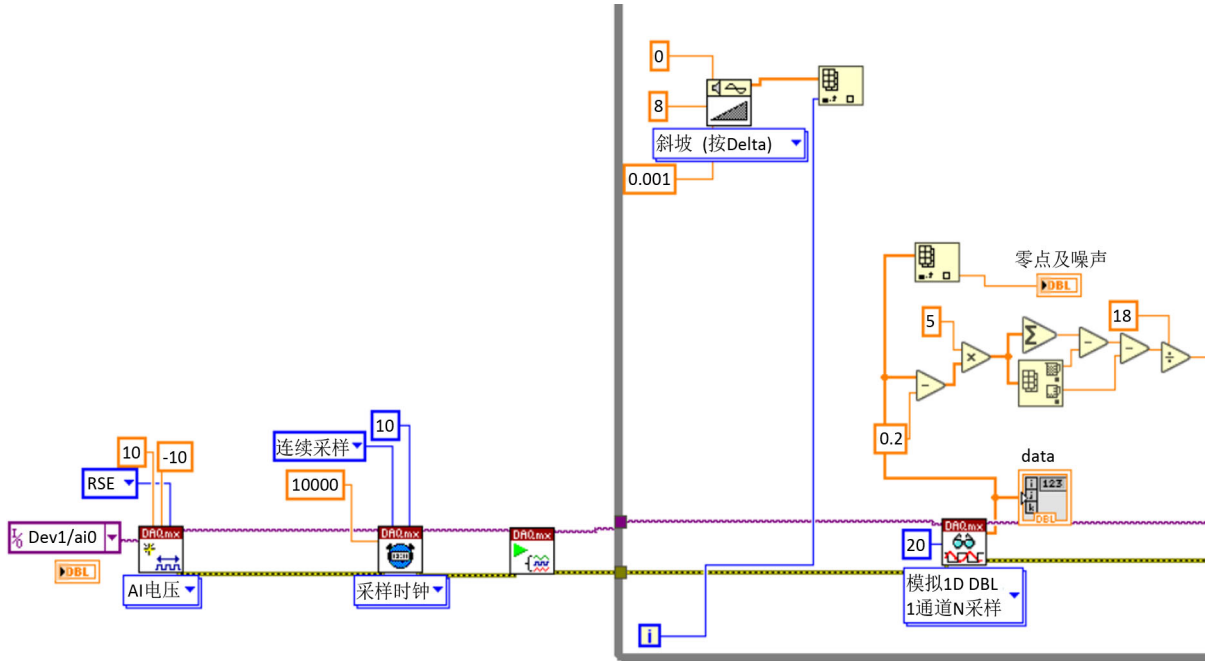


Figure 3. Data acquisition program block diagram  
图 3. 数据采集程序框图

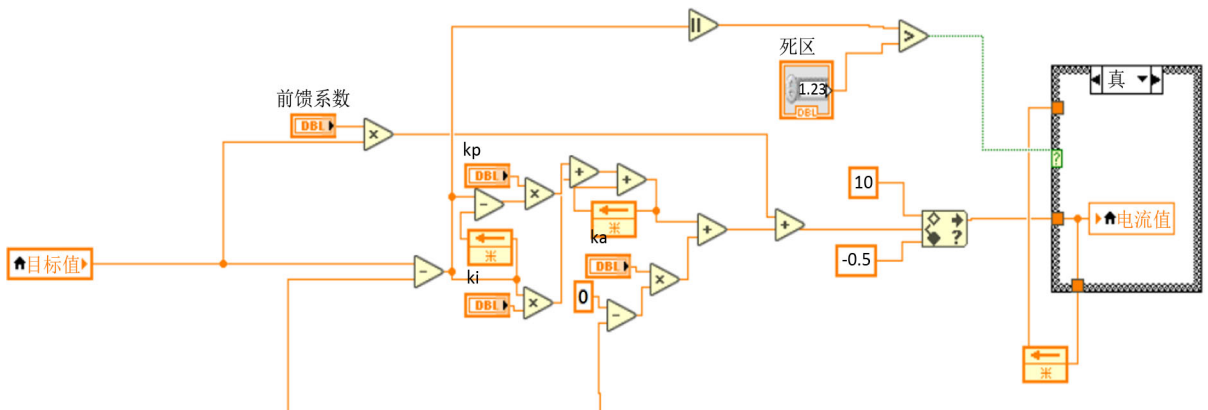


Figure 4. PID algorithm implementation block diagram  
图 4. PID 算法实现程序框图

将制动力目标值和实际制动力的值相减得到差值，再将该差值进行 PID 算法运算从而得到控制的输出值，在本文的机械制动系统中，控制输出的值为电机的电流值，所以在经过运算后得到的实际控制量为电机电流值。对该电流值进行上下限限制后需要将这个值发送至电机驱动模块中，则需要由 CAN 通讯程序实现通讯功能，保证驱动模块能够正常收到指令。CAN 通讯程序见图 5。

采用对应 NI CAN 卡所需的 CAN open 模块进行调用，按照通信协议设置对应波特率和相关参数后即可实现通信。

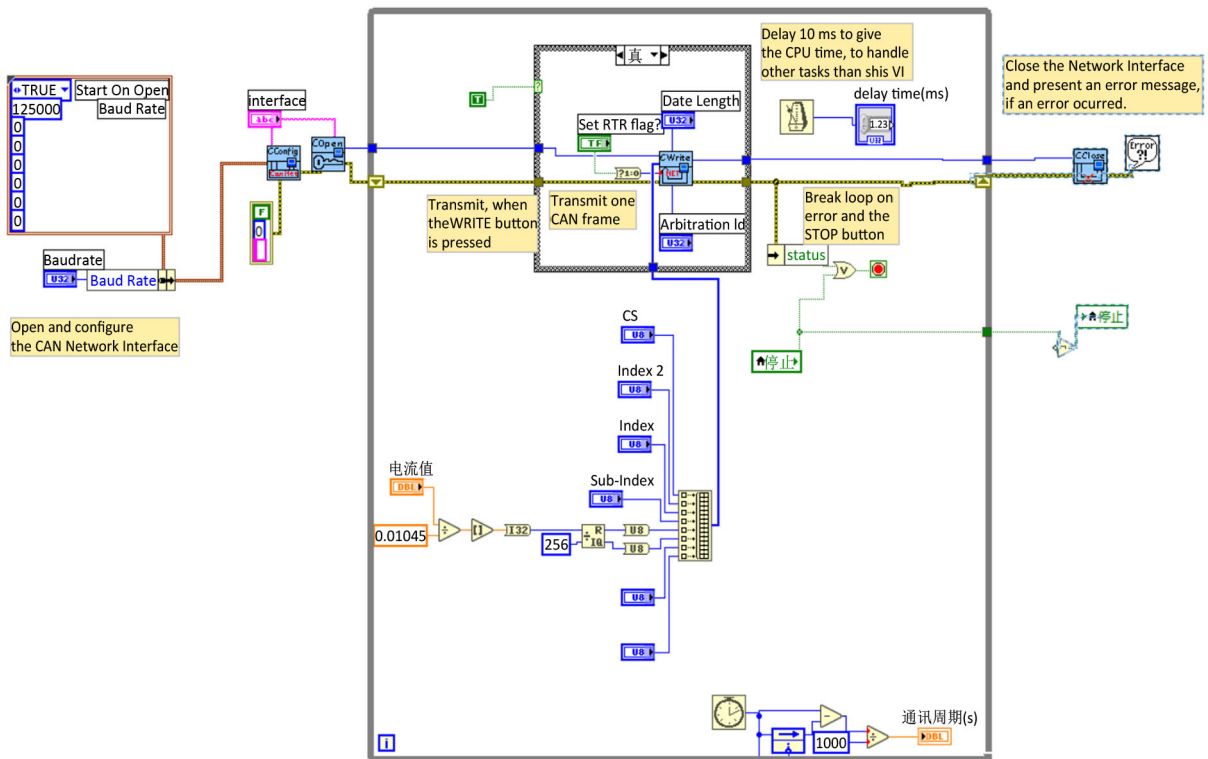


Figure 5. CAN communication implementation flowchart  
图 5. CAN 通信实现程序框图

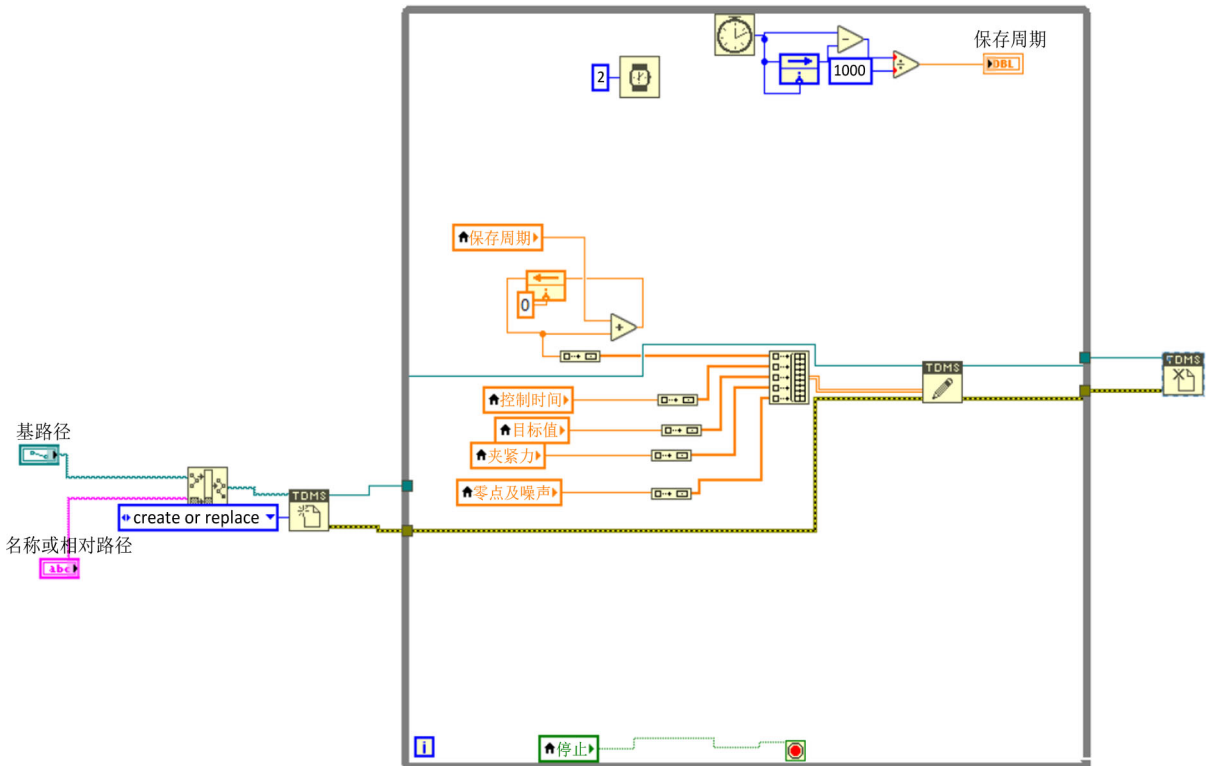


Figure 6. Block diagram of data saving  
图 6. 数据保存程序框图

最后程序结果需要保存和显示，保存对应框图如图 6。

如图 6 所示，本文中所保存的数据有实际夹紧力，制动力目标值，控制周期等数据。而数据的显示面板则如图 7 所示，包含前面所介绍的 PID 参数，CAN 通信参数，实际力和目标力的显示，冲动限制的控制等等。

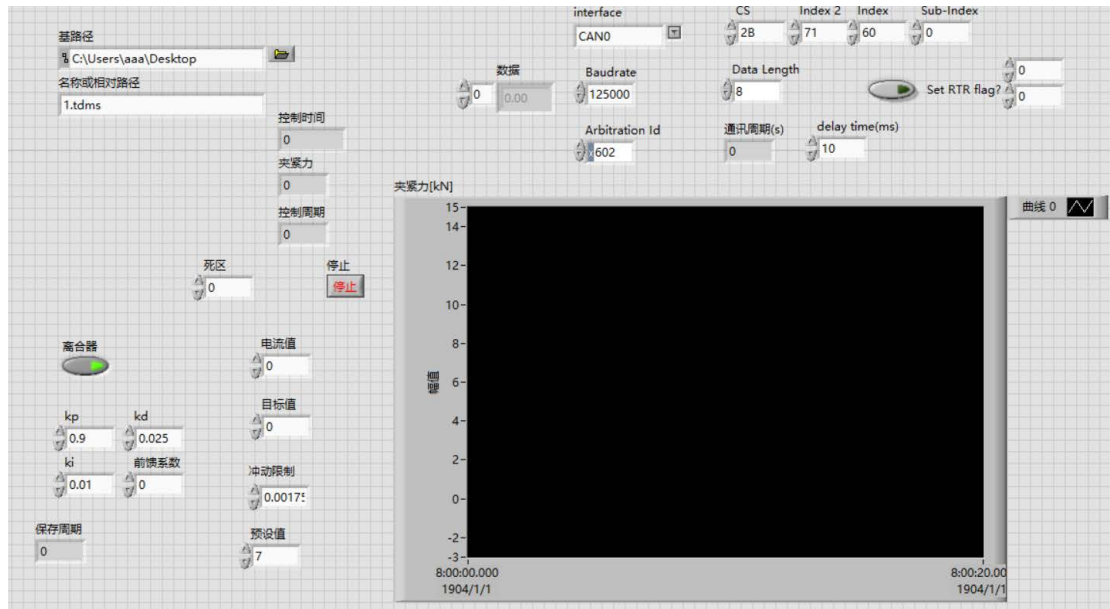


Figure 7. Data display panel  
图 7. 数据显示面板

整体的制动力控制算法实现部分在本节中进行了详细介绍，冲动限制控制则是对制动力的上升斜率进行控制，后续将通过试验效果进行算法的验证，得到对应合适的 PID 参数，并在不同的冲动限制条件下进行试验。

#### 4. 试验效果验证

本文的试验验证均在图 8 所示试验台上进行试验，图中为安装在模拟制动盘上的电机械制动装置，夹钳为地铁使用的同款夹钳。



Figure 8. Test bench for electromechanical braking system  
图 8. 电机械制动系统试验台

在前期试验中,针对 PID 参数进行了调试试验,得到针对本套试验设备在  $k_p = 0.9$ 、 $k_i = 0.01$ 、 $k_d = 0.025$  时,实际制动力能够较好地跟随目标制动力曲线。

在此基础上采用试验验证的方式对电机械制动冲动限制控制的能力进行检测,电机械制动拟设定的参数采用青岛 11 号线技术参数进行设定,即轴重  $\leq 14$  t (AW3),最大常用制动的平均减速度  $\geq 1$  m/s<sup>2</sup>,列车纵向冲击率  $\leq 0.75$  m/s<sup>3</sup> (除紧急制动),每节地铁车辆拟安装 8 个电机械制动夹钳单元。计算可得,在常用平均减速度为 1 m/s<sup>2</sup> 时,每个电机械制动夹钳单元需要提供 7 kN 的力。故本文在试验中测试了制动力为 7 kN 时,冲动限制控制分别为 0.75 m/s<sup>3</sup>, 0.5 m/s<sup>3</sup>, 0.25 m/s<sup>3</sup> 时的电机械系统控制效果。如下图 9,图 10,图 11 所示。

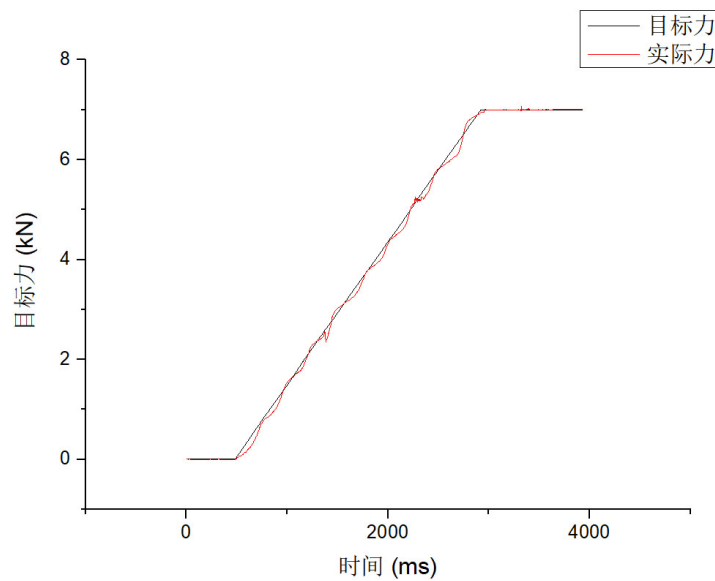


Figure 9. Impulse limit of 7 kN at target force of 0.75 m/s<sup>3</sup>  
图 9. 目标力 7 kN 冲动限制 0.75 m/s<sup>3</sup>

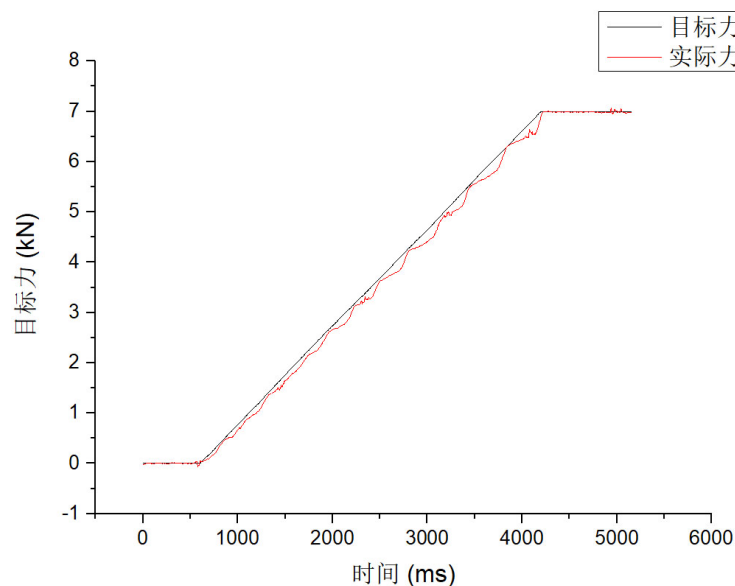


Figure 10. Target force 7 kN impulse limit 0.5 m/s<sup>3</sup>  
图 10. 目标力 7 kN 冲动限制 0.5 m/s<sup>3</sup>

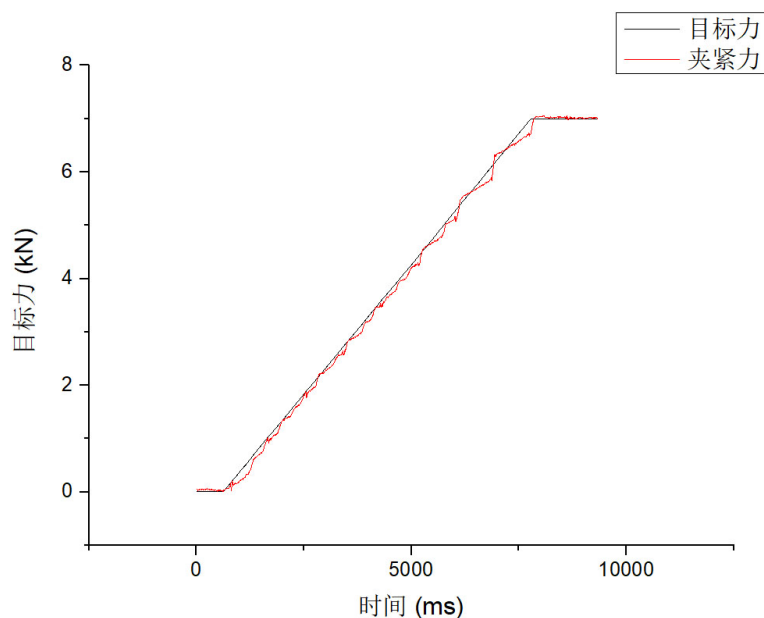


Figure 11. The target force 7 kN impulse limit  $0.25 \text{ m/s}^3$

图 11. 目标力 7 kN 冲动限制  $0.25 \text{ m/s}^3$

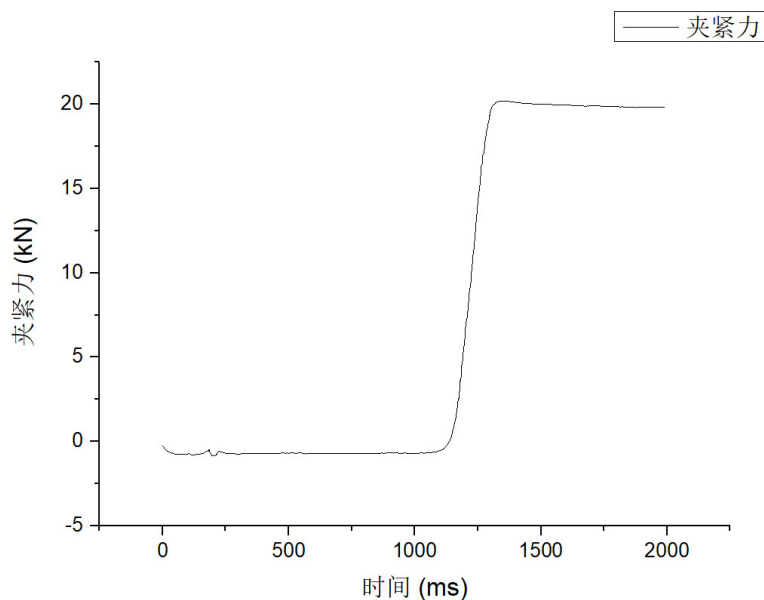


Figure 12. Impulse limit control at 20 kN target force

图 12. 目标力 20 kN 无冲动限制控制

由试验数据可以看出, 由于采用了 PID 控制算法, 电机械制动系统的实际夹紧力曲线在实际力和目标力产生差值时, 能够发觉该差值并针对差值进行相应控制, 反应在实际曲线中则是在滞后和超调状态中不断寻找合适的控制值, 使实际夹紧力曲线能够较好跟随目标力曲线, 整体上可以得出实际制动力和目标值的曲线最大差值小于  $0.35 \text{ kN}$ , 即控制值和目标值的差值小于 5%, 满足工程应用要求。由图 12 可以得出在目标力为  $20 \text{ kN}$  即不进行冲动限制控制的紧急制动情况下, 电机械制动系统制动力从 10% 上升到 95% 的时间(空气制动系统升压时间)只需  $0.17 \text{ s}$ 。电机械制动系统在满足基础的冲动限制控制(列车纵向冲击率  $\leq 0.75 \text{ m/s}^3$ )要求外, 能够进行自定义的冲动限制控制, 如上述冲动限制为  $0.5 \text{ m/s}^3$ ,  $0.25 \text{ m/s}^3$ ,



或者其他冲动限制值,这将有利于引言中提到的防滑,低黏着等情况下的制动力控制。从下图 13 电机械制动系统和空气制动系统制动力上升的对比可以看出,相对于传统空气制动系统,电机械制动系统制动力上升速度有较大优势。

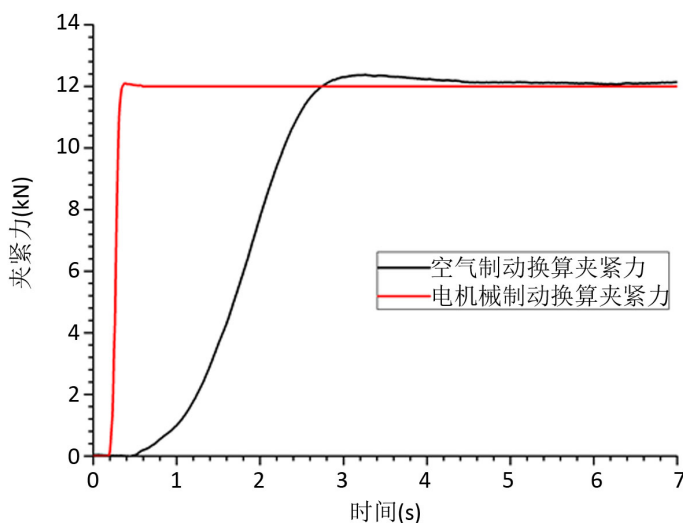


Figure 13. Contrast curve of increasing braking force between electromechanical brake and air brake

图 13. 电机械制动与空气制动制动力上升对比曲线

综上所述,电机械制动系统能够精确进行冲动限制控制,制动力上升可以快也可以慢,且能够由系统进行实时调整。

## 5. 结语

本文进行了电机械制动系统冲动限制控制的研究,采用 PID 算法实现了制动力闭环控制,并且通过试验验证了目标夹紧力为 7 kN,列车冲动限制为  $0.75 \text{ m/s}^3$ ,  $0.5 \text{ m/s}^3$ ,  $0.25 \text{ m/s}^3$  等工况下的电机械系统控制效果。验证结果显示电机械制动系统在夹钳运动控制上有着结构精简、响应时间快、控制精确、智能化电气化程度高等优势,这些优势能够提升制动系统的控制能力。除去本文介绍的冲动限制控制方面外,电机械制动因为在夹钳运动控制上的优势,能够更容易地实现闸瓦间隙调整、在线磨耗检测、制动摩擦副在制动时产生的冲击控制等方面的控制,这些问题等待更多研究人员的开发和实现。

## 基金项目

国家自然科学基金资助: U1534205。

## 参考文献

- [1] 禹建伟. 西安地铁 2 号线列车冲动限制及电空转换功能试验研究[J]. 铁道车辆, 2016, 54(5): 11-14.
- [2] 李培署. 制动系统的冲动限制控制[J]. 铁道车辆, 2015, 53(3): 12-15.
- [3] 吴萌岭. 列车制动技术发展趋势探讨[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 134-144.
- [4] 饶忠. 列车制动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [5] 李晖晖, 刘航, 谢利理. 飞机全电刹车系统研究[J]. 飞机设计, 2003(3): 62-65.
- [6] 熊璐, 余卓平, 张立军. 车用电制动器(EMB)样机设计[J]. 汽车技术, 2005(8): 15-18.
- [7] 荣藤忠重. 日本 NABTESCO 公司制动系统的最新技术与产品[J]. 国外铁道车辆, 2007, 44(1): 16-22.