

# 牵引列车纯电制动停车技术研究

马法运<sup>1</sup>, 钟志宏<sup>2</sup>, 方晓春<sup>2</sup>, 张佳波<sup>1</sup>, 杨其林<sup>1</sup>

(1 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 山东 青岛 266031; 2 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 在轨道交通领域, 停车制动技术的性能, 一方面会影响停车过程的舒适性, 另一方面会影响停车的对标精度。目前的停车制动方式为电空联合制动, 即在较低速时开始切除电制动, 使用空气制动停车, 但这种方式存在诸多的缺陷。为了进一步提升停车的性能, 该文提出了一种纯电制动停车技术, 该技术无需增加任何的硬件设施, 采用自然换向的策略, 使电机在低速下进行反接制动停车。在反接制动停车曲线的设计中, 该文充分考虑了停车的平稳性问题, 设计了一种平均冲动率最小的反接制动方式。电机平台以及实车的实验验证了该文方案的可行性。

**关键词:** 纯电制动; 反接制动; 平稳性; 自然换向; 轨道交通

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-6848(2021)04-0085-04

DOI:10.15934/j.cnki.micromotors.2021.04.016

## Research on Pure Electric Braking Parking Technology of Traction Train

MA Fayuan<sup>1</sup>, ZHONG Zhihong<sup>2</sup>, FANG Xiaochun<sup>2</sup>, ZHANG Jiabo<sup>1</sup>, YANG Qilin<sup>1</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao Shandong 266031, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In the field of rail transit, the performance of parking brake technology will affect the comfort of the parking process and the benchmarking accuracy of the parking. The current parking brake method is electro-pneumatic combined braking, that is, the electric brake is cut off at a low speed, and the air brake is used for parking, but this method has many defects. In order to further improve the performance of parking, this article proposed a purely electric brake parking technology, which did not require any additional hardware facilities, adopted a natural commutation strategy, and made the motor perform reverse brake parking at low speed. In addition, this paper fully considered the problem of parking stability, and designed a reverse braking method with the smallest average Jerk. The experiments of the motor platform and the real vehicle have verified the feasibility of this scheme.

**Key words:** pure electric braking; reverse braking; smoothness; natural commutation; rail transit

## 0 引言

目前, 城轨列车的常用制动通常采用电空联合制动, 这是一种以电制动为主, 空气制动为辅的联合制动方式。电空联合制动中, 当电制动失效时, 空气制动可以独立实施; 电制动力不足时, 由空气制动补充, 使列车制动力达到相应的要求。现有的电空联合制动方式存在以下的一些问题<sup>[1-2]</sup>:

- (1) 空气制动力可控性较差, 易造成停车不准;
- (2) 空气制动响应速度较慢;
- (3) 电空切换过程中, 会造成列车减速度的

突变;

- (4) 闸瓦或闸片的磨损和能量的浪费。

为了解决这类问题, 日本东京大学名誉教授曾根悟(Satoru Sone)博士在1997年20世纪90年代提出纯电制动的概念, 即采用电制动替换低速下的电空联合制动, 使用电制动停车<sup>[3]</sup>。

目前的牵引列车大多采用异步牵引电机, 在异步牵引电机制动过程中, 定子频率始终小于转子频率, 因此, 在转子频率降到零之前, 定子频率会先降到零。定子频率降到零之后, 若继续使用再生制动的方式, 电机的再生制动力会逐渐减小, 无法满

收稿日期: 2020-05-26, 修回日期: 2020-08-17

作者简介: 马法运, 男, 工程师, 研究方向为牵引传动系统。

钟志宏(1993), 博士研究生, 研究方向为轨道交通电力牵引传动及储能技术。

方晓春(1987), 博士, 研究方向为轨道交通电力牵引传动。

张佳波(1988), 工程师, 研究方向为轨道交通电力牵引传动。

足列车的整车制动力。因此，需要空气制动进行补充。

解决此问题的方式一般可采用反接制动，即在定子频率到零后，使三相电流反向，从再生制动区域进入反接制动区域。早期的反接制动通常要增加额外的硬件设备，如文献 4 中通过在交流侧并联电阻，可以实现反接制动；随着控制技术的不断发展，软件实现方法逐渐替代了硬件实现方法。在软件实现方案中，主要可以分为调制相序切换方案和自然换向方案<sup>[5-6]</sup>。

调制相序切换方案中，通过改变三相脉冲序列的顺序，可以实现电机反向牵引，即反接制动。与硬件实现方式相比，这种方式简单可行，但其在调整调制相序后，也需要对电流采样相序等进行调整，逻辑上的处理较为繁琐。

自然换向方案，即通过控制电机的定子频率到负值，使电机内部磁场反转，控制转差频率不变，从而保持控制转矩不变。该方式无需在控制上做任何的调整，即可实现反接制动。目前应用纯电制动的线路中，均采用此种反接制动方式。但目前采用的自然换向方案中，在接近零定子频率时，定子频率有一定的跳变，这也会带来转矩的波动，影响停车的平稳性<sup>[5]</sup>。

本文以停车的平稳性为最优目标，对反接制动曲线进行了设计，提出了使平均减速冲动率(Jerk)最小的纯电制动停车方案。

### 1 异步电机转子磁场定向控制原理

异步电机的稳态电压方程展开如下所示。

$$\begin{cases} \omega_e \frac{L_m}{L_r} \varphi_{rq} = -u_{sd} + R_s i_{sd} - \omega_e L_\sigma i_{sq} \\ \omega_e \frac{L_m}{L_r} \varphi_{rd} = u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_e L_\sigma i_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $\omega_e$  为同步角频率， $L_m$  为激磁电感， $L_r$  为转子电感， $L_\sigma$  漏感， $R_s$  为定子电阻， $\varphi_{rd}$  和  $\varphi_{rq}$  分别为  $dq$  轴磁链， $i_{sd}$  和  $i_{sq}$  分别为  $dq$  轴电流， $u_{sd}$  和  $u_{sq}$  分别为  $dq$  轴电压。

异步电机在  $dq$  轴坐标系下的转矩公式如下。

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} \varphi_r i_{sq} \quad (2)$$

式中， $T_e$  为电机的输出转矩， $n_p$  为极对数。在本文采取的间接矢量控制中，当磁链指令值保持不变时，转矩的大小和转差频率成正比的关系。

本文采取的异步电机控制方式为基于转子磁场定向的间接矢量控制，控制框图如图 1。

控制中， $q$  轴电流指令值通过转矩计算得到， $d$  轴电流指令值通过磁链指令计算得到，转差频率由给定磁链  $\varphi_r^*$  和转矩指令  $T_e^*$  计算得到，转子定向角则通过转差频率和转子频率相加后积分所得。

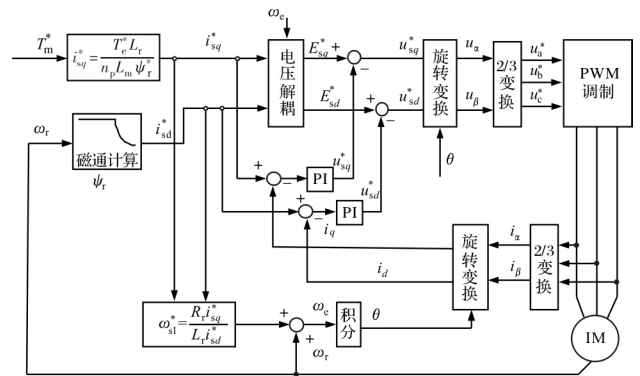


图 1 异步电机转子磁场定向控制框图

### 2 平均 Jerk 最小的曲线研究

在轨道交通领域，为了让乘客在乘车过程中更加舒适，不明显的感觉到加减速的过程，一般对列车的加加速度和减减速度有一定的要求，加加速度和减减速度统称为 Jerk，也叫加/减速冲动率。<sup>[7-9]</sup>

从长期的实际列车运行情况以及现场的调试经验来看，城轨列车在日常运行的制动过程中，Jerk 的大小对乘客的影响如下。

当 Jerk 不超过  $0.6 \text{ m/s}^3$  时，乘客体验到的舒适度不会有明显变化；

当 Jerk 大于  $0.6 \text{ m/s}^3$ ，但不超过  $0.75 \text{ m/s}^3$ ，列车乘坐的舒适度还可以接受；

当 Jerk 超过  $1 \text{ m/s}^3$  时，存在着一定的安全隐患。

在瞬时 Jerk 满足一定限制的情况下，平均 Jerk 值越小，列车的舒适度也就越高。本文将在保证瞬时 Jerk 满足要求的情况下，设计出平均 Jerk 最小的反接制动曲线。

平均 Jerk 定义为 Jerk 在一段时间内的积分：

$$\sum \text{Jerk} = \int \left| \frac{da}{dt} \right| dt \quad (3)$$

本文首先选取几种常见的函数曲线，进行平均 Jerk 的对比，然后通过数学证明，选取出效果最好的加速度曲线。

本文选取如图 2 所示的简单案例，对平均 Jerk 最小的曲线进行研究。

案例描述：有一质点，初始减速度为  $1 \text{ m/s}^2$ ，现要求其在  $1 \text{ s}$  时，将减速度减小到零，设计平均 Jerk 最小的减速度曲线。

首先假设减速度曲线呈一次函数变化，由于一

次函数仅有两个未知量, 带入案例中的已知点, 即可得到: 一次函数的减速曲线中, 减速度变化公式为  $a = 1 - t$ , 其平均 Jerk 为 1。

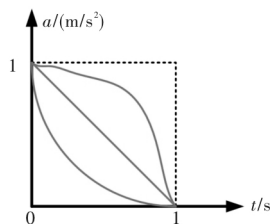


图2 曲线分析案例

二次函数的减速曲线中, 假设减速度公式为  $a = A + Bt + Ct^2$ , 代入已知点, 经过化简, 平均 Jerk 如:

$$\sum \text{Jerk} = \int_0^1 \left| \frac{da}{dt} \right| dt = \int_0^1 |2Ct - (1 + C)| dt \quad (4)$$

对上式求极小值, 可以得到: 只要满足  $C \in [-1, 1]$ , 则可以保证平均 Jerk 最小, 最小值为 1。

指数函数的减速曲线中, 假设减速度为

$$a = A + Be^{Ct} \quad (5)$$

代入已知点, 经过化简, 平均 Jerk 如:

$$\sum \text{Jerk} = \int_0^1 \left| \frac{da}{dt} \right| dt = \int_0^1 \left| B \ln \frac{B-1}{B} e^{(\ln \frac{B-1}{B})t} \right| dt \quad (6)$$

对上式求极小值, 可以得到, 只要  $A, B, C$  参数满足如下要求, 均可保证平均 Jerk 最小, 最小值也为 1。

$$\begin{cases} A = 1 - B \\ C = \ln \frac{B-1}{B} \\ B > 1 \text{ 或 } B < 0 \end{cases} \quad (7)$$

可以看到, 以上三种常规函数下, 最小平均 Jerk 均为 1, 那么这是不是所有曲线中最小的平均 Jerk, 下边将在数学上进行证明。

假设加速度曲线  $a = f(t)$  为区间内任意函数。

若满足在  $t \in [0, 1]$  区间内,  $f(t)$  的一阶导数符号不发生变化, 则

$$\sum \text{Jerk} = \int_0^1 |f'(t)| dt = |f(1) - f(0)| = 1 \quad (8)$$

若满足在  $t \in [0, 1]$  区间内,  $f(t)$  的一阶导数符号发生了一次变化, 则一定存在一个点  $t_0$ , 使得  $f(t)$  在此处的一阶导数为零。平均 Jerk 可以表达成如:

$$\begin{aligned} \sum \text{Jerk} &= \int_0^1 |f'(t)| dt = \left| \int_0^{t_0} f'(t) dt - \int_{t_0}^1 f'(t) dt \right| = \\ &= |2f(t_0) - f(0) - f(1)| = |2f(t_0) - 1| \end{aligned} \quad (9)$$

由于  $f(t_0)$  为函数  $f(t)$  在  $[0, 1]$  内的极值点, 因此, 其取值必然满足如下不等式:

$$f(t_0) \geq f(0) = 1 \text{ 或 } f(t_0) \leq f(1) = 0 \quad (10)$$

因此, 平均 Jerk 一定大于等于 1。

若在区间  $[0, 1]$  内含有多个极值点, 也可以利用以上的思路进行递推证明, 均能得出平均 Jerk 大于等于 1 的结论。

### 3 纯电制动停车方案

在上一小节的案例中, 最小平均 Jerk 值为 1, 与一次减速曲线的平均 Jerk 相同。另一方面, 由于一次函数曲线的瞬时 Jerk 始终相等, 在平均 Jerk 相同的情况下, 一次函数的最大瞬时 Jerk 是最小的。

因此, 综合考虑平均 Jerk, 瞬时 Jerk 以及实现难度, 本文选取一次函数的减速曲线, 对反接制动曲线进行设计。

本文设计的反接制动曲线如下图所示。

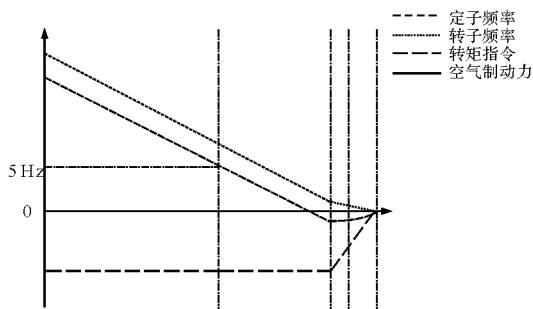


图3 考虑 Jerk 的停车制动曲线

图中, 从上往下看, 四条曲线分别代表定子频率、转子频率、转矩指令和空气制动力。在列车速度(对应转子频率)接近零时, 在保证瞬时 Jerk 的前提下, 开始以一次函数形式减小电制动力, 在停车时电制动力减小到零, 施加停放制动, 防止反转。

可以看到, 此时的转矩指令呈一次函数减小, 列车的速度曲线则呈二次函数减小, 此时的平均 Jerk 可以保证最小。

曲线中的反接制动采用了自然换向的形式, 可以看到, 当定子频率到达零后, 继续减小定子频率, 保持转差频率保持不变, 从而保持列车的制动力保持不变。此时, 由于定子频率为负值, 因此, 电机内部的磁场反向转动, 而电机的转子转动方向为正, 该区域被称为反接制动区域。

### 4 实验

为了验证本文所提异步电机纯电制动策略的正确性和可行性，本文在实验室的小功率平台以及试验列车上进行了试验。

#### 4.1 小功率平台试验

实验室的小功率试验平台参数如表 1 所示。

表 1 电机参数表

参数	参数值	参数	参数值
额定功率/kW	5.5	定子电阻/ $\Omega$	2.2
额定线电压/V	380	定子漏感/mH	17.5
额定频率/Hz	50	转子电阻/ $\Omega$	1.09
极对数	2	转子漏感/mH	17.5
激磁电阻/ $\Omega$	8.19	激磁电感/mH	394.7

基于该 5.5 kW 小功率平台，对平均 Jerk 最小的反接制动停车试验进行了验证。

具体流程描述如下：使用恒转矩制动，当定子频率接近 0，采用自然换向，保持转差频率不变，控制定子频率小于 0。当检测到转子频率小于 0.5 Hz，采用斜坡指令切除电制动力，让电机停止转动。（由于小功率试验台上没有保持制动，所以是一直制动到零速）

图 4 至图 6 为不同转矩下的制动停车试验。图中，上方两曲线分别为定子频率和转子频率，下方曲线为实际的转矩电流。其中，6 Nm 的制动转矩下，由于转差频率较小，可以看到，在 0.5 Hz 时，定子频率并未小于 0，未进入反接制动区；12 Nm 和 18 Nm 的制动转矩下，定子频率先下降到 0，然后自然换向到负值，转子频率下降到 0.5 Hz 后则逐渐贴近转子频率，最终停车。从转矩电流曲线可以看出，反接制动前后，转矩电流的实际值一直跟踪转矩电流指令值，输出制动转矩保持不变；从转子频率可以看出，停车指令采用斜坡指令下，停车过程非常平缓。

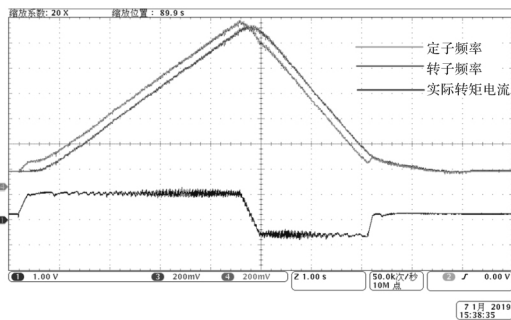


图 4 制动转矩为 6 Nm 的纯电制动停车试验

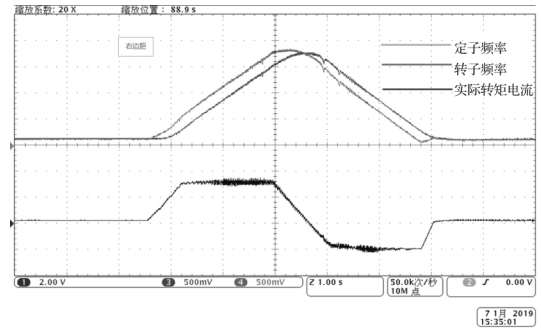


图 5 制动转矩为 12 Nm 的纯电制动停车试验

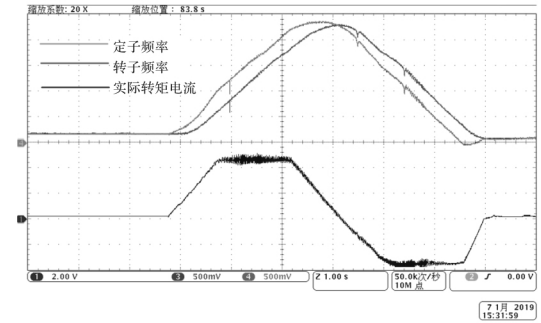


图 6 制动转矩为 18 Nm 的纯电制动停车试验

#### 4.2 试验列车纯电制动停车试验

采用以上的控制算法，本论文在试验列车上进行了纯电制动的停车试验，试验波形如下图 7 所示。如图所示为列车一次牵引制动过程中的加减速试验，制动过程中，全程为投入空气制动，使用了纯电制动停车。图中展示了 d 轴电流、q 轴电流、列车加速度以及列车速度。从图中可看出，q 轴电流在列车速度 2.5 km/h 附近开始下降，在保持制动施加时下降到零。

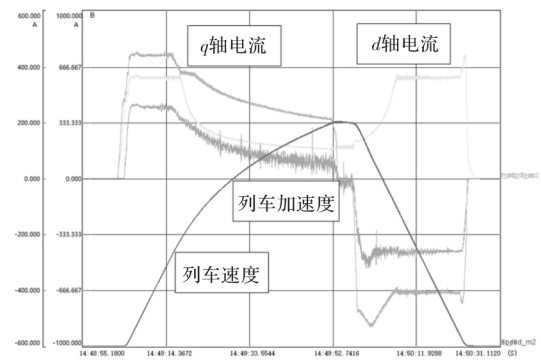


图 7 列车纯电制动停车试验波形

可以看到，在采用本项目的算法后，低速制动性能良好，且实现了城轨列车纯电制动的停车。

### 5 结论

本文针对异步电机驱动的城轨列车，提出了一种平均 Jerk 最小的纯电制动停车方案，并通过了实验以及实车的验证。本文所提的纯电制动方案，无需外接电路，通过自然换向实现反接制动停车，且

(下转第 98 页)

图9为恒定转矩,0.3s时电机转速从1000 r/min突变为600 r/min的情况下,设计算法和传统一阶滑模和PLL结合算法的估计转速对比图。设计算法在转速突变时设计算法的负超调为17%,调节时间为0.07s;传统一阶滑模算法的转速波动较大,调节时间较长。以上两种对比证实了设计算法的优越性。

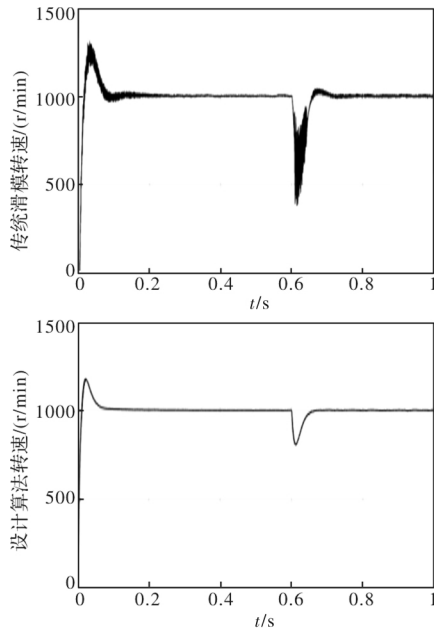


图9 转速突变时转速对比

### 5 结论

本文研究了一种基于二阶滑模和MRAS的PMSM转速估计算法,仿真证明了算法的有效性,可以实现无传感器时永磁同步电机的速度估计。可以得出以下结论:

(1) 设计算法在旋转坐标系下用二阶滑模估计感应电动势,可以有效减小抖振,而且没有微分运算,避免放大噪声。估计的电机转速能实时跟踪电机的实际值,而且具有很高的精度。

(2) 用模型参考自适应辨识了永磁体磁链,避免转速估计受永磁体磁链变化影响,增强了鲁棒性。

### 参考文献

[1] Bojoi R, Pastorelli M, Bottomley J, et al. Sensorless Control of PM Motor Drives — A Technology Status Review [C]. Electrical Machines Design Control & Diagnosis. IEEE, 2013: 168-182.

[2] Kim D, Kwon Y C, Sul S K, et al. Suppression of Injection Voltage Disturbance for High-Frequency Square-Wave Injection Sensorless Drive with Regulation of Induced High-Frequency Current Ripple [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1): 302-312.

[3] Cheng S, Ifrim C. Long Step Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Machines with Extended Kalman Filter [J]. Energy Policy, 2012, 45(2): 1-5.

[4] 李梦瑶, 孙逢春, 何洪文. 基于模型参考自适应的永磁同步电机矢量控制 [J]. 测试技术学报, 2019, 33(04): 322-328, 345.

[5] Zhang Y, Jin Y, Cao R, et al. An Adaptive Sliding Mode Observer for Sensorless Vector Control of Surface-Mounted PMSM [C]. 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017: 1-5.

[6] Lee H, Lee J. Design of Iterative Sliding Mode Observer for Sensorless PMSM Control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1394-1399.

[7] 黄进, 赵力航, 刘赫. 基于二阶滑模与定子电阻自适应的转子磁链观测器及其无速度传感器应用 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 54-61.

[8] Levant A. Principles of 2-Sliding Mode Design [J]. Automatica, 2007, 43(4): 576-586.

[9] Gennaro S D, Rivera J, Castillo-Toledo B. Super-Twisting Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors [C]. 49th IEEE Conference on Decision and Control, 2010: 4018-4023.

[10] 张志艳, 马宏忠, 陈诚, 等. 永磁电机失磁故障诊断方法综述 [J]. 微电机, 2013, 46(3): 77-80.

[11] Moreno J A, Osorio M. A Lyapunov Approach to Second-Order Sliding Mode Controllers and Observers [C]. 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008: 2856-2861.

(上接第88页)

停车过程中能够实现平均 Jerk 最小的控制。相比于现有的电空联合制动,该方案停车过程平稳,停车精度更高,且大大减小了闸瓦的磨损。

### 参考文献

[1] 王鹏飞, 樊贵新. 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, 31(6): 77-80.

[2] 刘卓. 地铁车辆制动系统空气制动施加方式及特点分析 [J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(6): 66-69.

[3] S Sone. Tsukuba Express Close to Ultimate Electric Braking System [J]. Railway Gazette International, 2004(05): 29-31, 34.

[4] 刘伟, 王兆强, 孙群力. 浅议电机的制动方式及应用 [J]. 周口师范学院学报, 2009, 26(05): 61-62 + 89.

[5] M ASHIYA, S Sone. Application of Pure Electric Braking System to Electric Railcars [C]. AMC2000, April 2000: 163-168.

[6] 易泽宇. 基于牵引传动模拟平台的高速列车纯电制动研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[7] H. Liu, X. He, L. Chu, et al. Study On Control Strategy of Regenerative Braking for Electric Bus Based On Braking Comfort [C]. Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, Harbin, Heilongjiang, China, 2011: 1037-1040.

[8] 李和平, 严霄蕙, 曹宏发. 动车组旅客舒适度与制动控制 [J]. 铁道机车车辆, 2011, (05): 111-114.

[9] H. Zhu, X. Sun, L. Shi, et al. A Block Feeding Control Strategy Of Long Primary Linear Induction Motor [C]. 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, 2016: 1-4.