

# 基于滑模自适应鲁棒控制的城市轨道交通列车电空制动控制策略研究<sup>\*</sup>

赵德生<sup>1</sup> 李德仓<sup>2</sup>

(1. 南京铁道职业技术学院通信信号学院, 210031, 南京; 2. 兰州交通大学机电技术研究所, 730070, 兰州//第一作者, 讲师)

**摘 要** 针对城市轨道交通列车电空制动系统控制过程中外界干扰、执行机构时滞、基本阻力不确定等特性造成 ATO (列车自动运行) 系统速度跟踪及停车不准问题, 根据李雅普诺夫稳定性理论提出一种基于 SMARC (滑模自适应鲁棒控制) 的城市轨道交通列车电空制动控制策略, 设计城市轨道交通列车 ATO 系统基于 SMARC 的制动控制器。通过鲁棒控制将系统模型中非线性、输入时滞和外界扰动等所有不确定量减小到最小范围, 同时也削弱了滑模控制器的抖振现象, 增强了控制器的鲁棒性; 进一步采用滑模控制减小列车制动过程中速度跟踪误差和减速度误差, 从而获得较高的停车精度。仿真结果表明, 基于 SMARC 的制动控制器的控制能完全满足城市轨道交通列车制动要求。

**关键词** 城市轨道交通; 列车; 电空制动; 滑模自适应鲁棒控制

**中图分类号** U260.352; TP273<sup>+</sup>.1

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2020.07.006

## Research on EP Braking Control Strategy for Urban Rail Transit Train Based on SMARC

ZHAO Desheng, LI Decang

**Abstract** Considering the problems of inaccurate speed tracking and stop in ATO (automatic train operation) system caused by external disturbance, actuator delay and uncertain basic resistance in the control process of urban rail transit EP (electro pneumatic) braking system, and according to Liapunov stability theory, a control strategy of electric and pneumatic braking for urban rail transit train based on SMARC (sliding mode adaptive robust control) is proposed, and the SMARC controller is designed for urban rail transit train ATO system. Through robust control, all the uncertainties such as non-linearity, input delay and external disturbance in the system model are reduced to the minimum range. Meanwhile, the chattering of sliding mode controller is weakened while the robustness of the controller is enhanced. The sliding mode con-

trol is further adopted to reduce the speed tracking and decelerating errors in the train braking process, so as to obtain higher stopping accuracy. Simulation results show that SMARC control can fully meet the braking requirements of urban rail transit trains.

**Key words** urban rail transit; train; EP braking; SMARC control

**First-author's address** Communication & Signal Institute, Nanjing Institute of Railway Technology, 210031, Nanjing, China

城市轨道交通列车的制动装置是用于实现列车减速或停止运行的设备。制动是城市轨道交通列车运行的关键技术之一, 制动系统的性能和控制方法直接影响列车的精准停车和安全运行<sup>[1-2]</sup>。列车 ATC (列车自动控制) 和 ATO (列车自动运行) 技术的逐渐成熟及其在城市轨道交通列车上的大量使用, 对城市轨道交通列车制动控制系统提出了更高要求。而城市轨道交通列车制动控制系统的性能在一定程度上影响着列车安全和正点运行, 甚至会危及行车安全。因此, 研究更加可靠有效的城市轨道交通列车制动控制策略对于提高列车制动的安全性具有重要的现实意义。

目前, 列车实际运行过程中需要制动时, 有两种控制方式: 其一, 手动操作, 驾驶员依靠列车自动保护 (ATP) 曲线完全手动操作以实现对列车运行速度的控制, 完成列车的减速或停车<sup>[3]</sup>; 其二, 自动控制, 基于列车 ATC 和 ATO 技术, 使列车通过控制系统追踪参考速度曲线, 以实现对其运行速度的自动控制, 完成列车的减速或停车。但是, 在列车减速或停车制动控制过程中, 由于制动系统执行机构的时滞性、线路阻力的不确定性、闸瓦摩擦系数的非线性及外界扰动性等多因素的影响<sup>[4]</sup>, 使得列车

<sup>\*</sup> 南京铁道职业技术学院“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目 (RCQL18201)

电空制动控制系统很难做出快速、准确的响应,从而降低了制动系统的性能。为了克服和解决这些因素对制动系统的影响,许多控制策略被应用到城市轨道交通列车电空制动控制中,如:PID(比例-积分-微分)控制<sup>[5]</sup>、模糊控制<sup>[6]</sup>、反推控制<sup>[7]</sup>、协调控制<sup>[2]</sup>、自适应控制<sup>[8]</sup>、BP 神经网络控制<sup>[9]</sup>等。虽然这些控制策略对改善列车制动性能方面有一定的效果,但是针对制动过程中电空转换平滑过渡、制动力分配、抗干扰等方面效果不佳或很少涉及。

鉴于此,本文提出一种滑模自适应鲁棒控制(SMARC)策略,通过该策略设计城市轨道交通列车制动控制器,采用自适应方法建模并计算列车需要施加的制动力(包括电制动和空气制动),实现渐进稳定的滑模控制,使得电空转换过程过渡平滑;同时结合鲁棒控制抑制滑膜控制过程状态中的非线性变结构抖振问题,提高抗干扰能力,从而实现城市轨道交通列车制动过程对目标速度的高精度跟踪,确保列车减速或停车过程的安全。

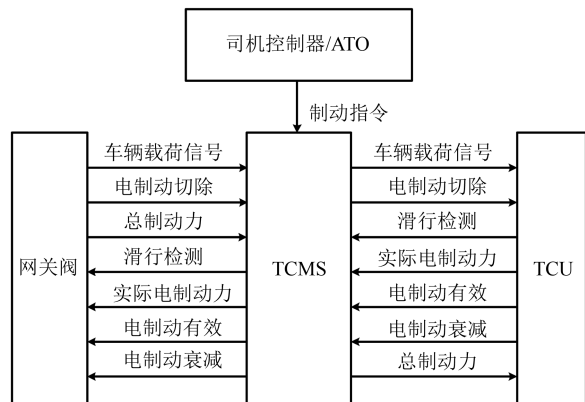
## 1 城市轨道交通列车电空制动系统

### 1.1 电空制动系统组成及工作原理

电空制动主要由气动装置、电子制动控制及基础制动装置三部分构成。制动方式包括电制动和空气制动,在制动过程中以“电制动为主,空气制动为辅”,其中电制动包括再生制动和电阻制动,而空气制动控制系统尤为复杂,包括电空转换阀、紧急电磁阀、限压阀等气动元件。列车在运行过程中,制动一般分为两种,即紧急制动和正常制动。在紧急或异常情况下为使列车尽快停车所施行的制动称为紧急制动;正常情况下用于列车减速或停车所施行的制动为正常制动。实施原则是电制动优先,空气制动作为制动力不足时的补充,是一种电制动与空气制动实时协调配合的混合制动原则。当电制动不足时,在全列车平均补偿空气制动;当车辆速度低于某一限定值(本文设定为 6 km/h)时,电制动逐步由空气制动替代。为了减少对制动闸瓦的磨损,同时又保证制动要求,电、空制动转换点要尽量低,电制动和空气制动转换应平滑,冲击率限制须满足现场实际要求。

城市轨道交通列车电空制动工作原理如图 1 所示。其中,主要制动力管理由网关阀实现,网关阀接收到司控器或者 ATO 系统给出的制动指令,结合车重信息,计算总共需要的制动力。TCMS 将电制动力

情况发送给网关阀,由网关阀计算需要补充的空气制动力,并把计算得到的列车所需总制动力通过 TCMS 平均分配给 4 个动车中正常工作的牵引系统。牵引系统结合车重、冲动限制及可用电制动力大小等条件施加电制动,并把实际施加的电制动力值通过 TCMS 发送给制动系统。若电制动力总和可以满足列车制动力的需求,则全部制动力由电制动实施;若电制动力总和不能满足列车制动力的需求,则由制动系统补充空气制动。若在制动过程中出现电制动滑行,首先由牵引系统进行防滑控制。牵引系统进行防滑控制过程中,空气制动不进行补偿;如果制动系统检测到某个动车出现严重滑行,则通过 TCMS 发送电制动切除信号,切除该动车电制动,由空气制动接管电制动并进行防滑控制。当列车在电制动即将退出时,由牵引系统通过 TCMS 向制动系统发出电制动退出预告信号,并在预定时间后按预定速率退出电制动,制动系统收到该信号后按照预定速率补充空气制动。电空混合制动过程如图 2 所示。



注: TCMS 为列车监控管理系统; TCU 为牵引控制单元

图 1 城市轨道交通列车电空制动工作原理示意图

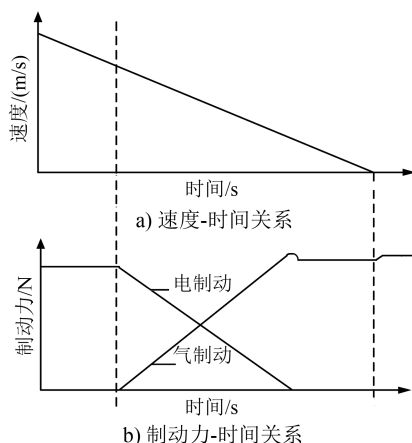


图 2 电空混合制动过程示意图

## 1.2 电空制动系统数学模型

要构建电空制动系统数学模型,必须计算列车所需制动力。根据文献[4],对制动力进行计算并构建电空制动系统数学模型。

理想制动力和实际制动力计算如下:

$$B_0 = k_b \mu_0 p_0 \quad (1)$$

$$B = k_b \mu p \quad (2)$$

式中:

$B_0$ 、 $B$ ——分别表示理想和实际条件下的制动力;

$k_b$ ——比例系数;

$\mu_0$ 、 $\mu$ ——分别表示理想和实际条件下的闸瓦摩擦因数;

$p_0$ 、 $p$ ——分别表示制动缸内标准压强和实际压强。

其中:

$$\mu(v) = \beta_1 e^{-\beta_2 v} + \beta_3 \quad (3)$$

式中:

$\mu(v)$ ——与列车运行速度  $v$  相关的闸瓦摩擦因数;

$\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ ——未知常数,分别取 0.138、0.168 和 0.221<sup>[5]</sup>,且  $\mu_0 = \beta_3 = 0.221$ 。

制动缸内压强的动态变化过程为<sup>[10]</sup>:

$$\dot{p} = -\frac{1}{T}p + \frac{1}{T}p_0(t - \tau) \quad (4)$$

式中:

$T$ ——制动缸时间常数;

$t$ ——制动时间;

$\tau$ ——制动系统延时。

基于上述分析,构建城市轨道交通列车电空制动系统数学模型,则有:

$$\begin{cases} T \frac{dv}{dt} = -g(v)z(t) + T\Delta_1(t) \\ T \frac{dz}{dt} = -z(t) + Tu(t) \cdot (t - \tau) + T\Delta_2(t) \\ g(v) = \mu(v)/\mu_0 \\ z(t) = \frac{1}{m}Tk_b\mu_0p \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$m$ ——列车质量;

$u(t)$ ——制动器输出;

$\Delta_1(t)$ 、 $\Delta_2(t)$ ——分别表示线路阻力和外界扰动。

## 2 基于 SMARC 的制动控制器设计

### 2.1 城市轨道交通列车制动过程数学模型构建

将式(5)中的  $u(t)$  代入到城市轨道交通列车制动过程的动力学方程中,并且将其作为模型的输入,通过牛顿力学定律建立城市轨道交通列车制动过程动力学方程<sup>[3,8]</sup>,即为:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \chi f \\ f = -(u + w) \\ w = \alpha_0 + \alpha_1 v + \alpha_2 v^2 \\ \chi = 0.0098/(1 + \alpha_3) \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$\chi$ ——减速度系数;

$f$ ——制动过程中的单位合力;

$u$ ——单位制动力;

$w$ ——单位基本阻力;

$\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ——分别表示列车的滚动机械阻力系数、其他机械阻力系数和外部空气阻力系数,这 3 个系数的取值都与列车运行环境密切相关;

$\alpha_3$ ——回转质量系数,该值由城市轨道交通列车总质量与其回转部分的质量折算得到。

将式(6)进行简化,可得到城市轨道交通列车制动过程的数学模型,即为:

$$\frac{dv}{dt} + \chi\alpha_0 + \chi\alpha_1 v + \chi\alpha_2 v^2 = -\chi u \quad (7)$$

### 2.2 基于 SMARC 的城市轨道交通列车制动控制器设计

采用 SMARC 方法设计城市轨道交通 ATO 制动控制器,通过滑模鲁棒控制抑制  $\Delta_1(t)$  和  $\Delta_2(t)$  扰动带来的影响,并依靠自适应律尽量减少参数变化对控制精度的不良作用。图 3 是城市轨道交通列车制动过程基于 SMARC 的制动控制器结构框图。针对制动过程中执行机构时滞和滑模变结构抖振问题,通过基于 Lyapunov 误差函数  $V(x)$  构造的滑模鲁棒

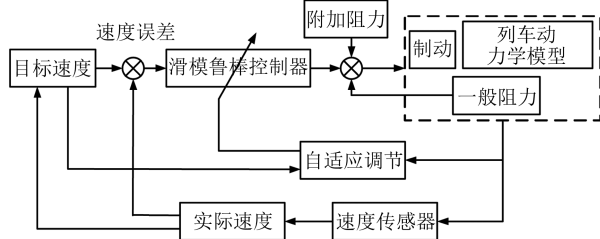


图3 基于 SMARC 的制动控制器结构示意图

控制器控制的增益和边界调节规则<sup>[11]</sup>,改善暂态性能和抖振问题,使列车在制动过程中的实际运行速度能够高精度追踪目标速度曲线,可进一步提高城市轨道交通列车制动系统精度和制动过程安全性。

定义城市轨道交通列车制动系统的状态变量为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(u(t) - \Delta) \end{cases} \quad (8)$$

式中:

- $x_1$ ——列车位移;
  - $x_2$ ——列车速度;
  - $u(t)$ ——列车制动输入;
  - $\Delta$ ——附加阻力、一般阻力等所有不确定项。
- 定义列车状态跟踪误差为:

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - x_d \\ e_2 = \dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d \end{cases} \quad (9)$$

式中:

- $e_1, e_2$ ——分别表示列车的距离和速度跟踪误差;
  - $x_d, \dot{x}_d$ ——分别表示参考位置和参考速度。
- 定义积分型滑模面<sup>[12]</sup>  $s$  为:

$$s = x_1 + cx_2 \quad (10)$$

式中:

- $c$ ——滑模面设计参数。
- 本文定义列车制动过程中需要观测的未知参数向量集合  $\theta$  为:

$$\theta = [\theta_1, \theta_2]^T \quad (11)$$

令  $\hat{\theta}_i (i=1,2)$  为参数估计值,则有:

$$\theta_{i,\min} \leq \hat{\theta}_i \leq \theta_{i,\max} \quad (12)$$

由式(9)一式(12)可得:

$$\theta \dot{s} = \theta(\dot{x}_2 - \ddot{x}_d + c\dot{e}_1) \quad (13)$$

控制律和自适应律分别设计为式(14)和式(15),即:

$$u = k_s(1 + \alpha|s|)s + \eta \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 = -\gamma s(\ddot{x}_d - c\dot{e}) \quad (15)$$

式中:

- $k_s$ ——趋近律指数项系数;
- $\alpha$ ——反馈项系数;
- $\eta$ ——鲁棒项系数;
- $\gamma$ ——自适应律系数。

现证明上述闭环控制系统的渐进稳定,定义 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2}\theta s^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^2 \quad (16)$$

其中,  $\theta = \theta_1 + \theta_2$ , 且  $\tilde{\theta}$  为参数估计误差,  $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 。则有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\theta\dot{s} + \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}} = \\ &s[-k_s(1 + \alpha|s|)s - \eta \operatorname{sgn}(s) - \theta(\dot{x}_2 - \dot{x}_d + c\dot{e})] + \\ &\frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}} \leq -k_s(1 + \alpha|s|)s^2 \leq 0 \end{aligned}$$

由 Lyapunov 稳定性条件可得,只要保证  $\tilde{\theta}[s(x_d - \dot{c}e) + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\theta}}] \leq 0$ , 则可保证  $\dot{V} \leq 0$ , 那么就能证明系统稳定。

### 3 数值仿真及结果分析

为验证 SMARC 算法的有效性和可行性,本文以城市轨道交通 A 型车为对象,在软件 Matlab / Simulink 环境下对其正常制动自动停车过程进行数值仿真研究。同时,为体现 SMARC 算法的优势,在仿真过程中,将 SMARC 算法与传统的 PID 控制器进行了比较。

#### 3.1 仿真参数

城市轨道交通 A 型车的主要参数特性及仿真参数,如表 1 所示。

表 1 A 型车仿真参数

参数	取值
列车满载总质量/t	536
最大制动减速度/(m/s <sup>2</sup> )	-1
制动初速度/(km/h)	72
制动系统时间常数/s	0.65
制动系统输入延时/s	0.3
基本阻力/(N/kN)	$\omega = 0.42 + 0.0016v + 0.000132v^2$
质量回转系数	0.06
制动时间/s	70
制动起始点位移/km	20

#### 3.2 仿真与分析

为了使得仿真过程更接近于城市轨道交通列车的实际制动过程,将列车制动运行过程中的目标曲线设计呈非线性。

图 4 为分别采用传统 PID 和 SMARC 两种制动控制器得到的制动过程速度-位移跟踪仿真曲线图。从图 4 可以看出,在制动曲线中,PID 和 SMARC 两

种控制由于受到制动模型中非线性、输入时滞和外界扰动等因素的影响,速度-位移曲线均存在不同程度的误差,且在目标曲线上波动。其中,PID 控制收敛速度较慢,其控制的最终停车误差为 48 cm,而采用本文的基于 SMARC 的控制器输出的制动曲线虽然也存在误差,但是基于 SMARC 的控制器输出的制动曲线能够迅速收敛到滑模面,最终停车精度为 17 cm,达到了小于 30 cm 的目标,满足城市轨道交通列车高精度停靠的要求。

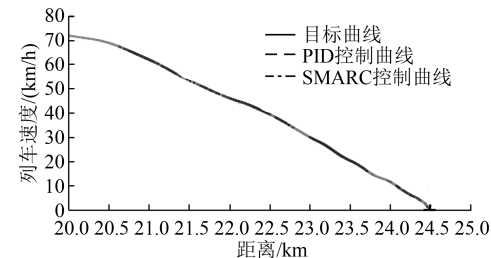


图 4 列车速度-距离跟踪仿真曲线

图 5 为分别采用传统 PID 和 SMARC 两种控制器得到的制动减速度曲线图。从图 5 可以看出,虽然 PID 和 SMARC 两种控制在制动系统输入延时为 0.3 s 的情况下,均没有超过最大制动减速度为  $-1\text{ m/s}^2$  的限值,但是 SMARC 控制对系统延时的鲁棒性要比 PID 控制更强,收敛于期望目标值更快,控制品质更优,也更稳定。

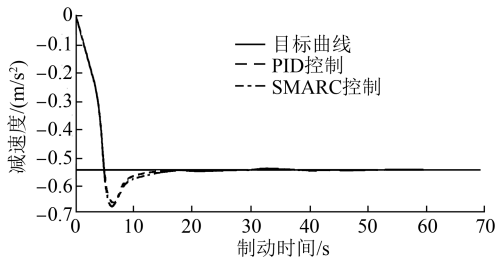


图 5 列车制动减速度仿真曲线

图 6 为分别采用传统 PID 和 SMARC 两种制动控制器得到的制动过程速度误差曲线图。从图 6 可以看出,PID 和 SMARC 两种控制均存在不同程度的误差。其中,PID 控制的速度误差最大值达到 0.43 m/s,而 SMARC 控制的速度误差最大值达到 0.3 m/s。尤其是当列车运行速度达到 6 km/h(即电空转换点)时,PID 控制的速度误差达到 0.48 m/s,而采用本文的基于 SMARC 的制动控制器控制的速度误差最大值达到 0.32 m/s。由此可见,基于 SMARC 的制动控制器比 PID 制动控制器的控制效果更好。

综上所述,在列车整个制动过程中,与 PID 控制相比,SMARC 控制在列车制动过程中的停车精度、速度追踪等方面,其误差都较小。基于 SMARC 的制动控制器输出的曲线迅速收敛到目标曲线(滑模面),且控制系统的品质更为稳定。两种制动控制器的控制效果,如表 2 所示。

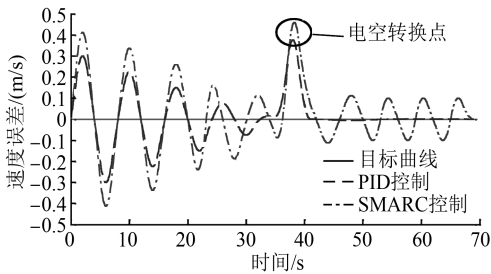


图 6 列车速度误差仿真曲线

表 2 两种制动控制器的控制效果

控制器	停车精度/cm	最大速度误差/(m/s)
PID	48	0.43
SMARC	17	0.30

4 结论

1) 以城市轨道交通列车为研究对象,基于列车电空制动系统工作原理,构建具有输入时滞的非线性电空制动系统模型。将  $u(t)$  代入到列车制动过程的动力学方程中,并且将其作为模型的输入,建立城市轨道交通列车制动过程动力学模型。

2) 基于城市轨道交通列车电空制动系统、制动过程动力学模型和李雅普诺夫稳定性理论,设计城市轨道交通列车自动停车基于 SMARC 的制动控制器。通过鲁棒控制将系统模型中非线性、输入时滞和外界扰动等因素造成的速度追踪误差和减速度误差等减小到最小范围,同时也削弱了滑模控制器的抖振现象,增强了控制器的鲁棒性,从而获得较高的停车精度。

3) 在软件 Matlab /Simulink 环境下对列车正常自动停车过程进行数值仿真研究,并将本文所提的 SMARC 方法与传统的 PID 控制方法进行比较。仿真结果表明,SMARC 方法能较快地收敛到参考制动曲线上,具有 17 cm 的较高停车精度,且速度误差最大不超过 0.3 m/s,完全满足城市轨道交通列车制动停车要求。SMARC 方法不仅能提高制动系统性能,而且对外界扰动、输入时滞有良好的适应性和鲁棒性。

本文提出的基于 SMARC 的制动控制器能使城市轨道交通列车制动过程更接近实际情况,为城市轨道交通列车电空制动控制方法提供了一种新的思路。

参考文献

[ 1 ] 李和平,林祐亭.高速列车基础制动系统的设计研究[J].中国铁道科学,2003(2): 8.

[ 2 ] 朱琴跃,包世炯,谭喜堂,等.动车组电空制动协调控制优化研究[J].计算机工程,2013(12): 17.

[ 3 ] 李德仓,孟建军,胥如迅,等.强风下高速列车滑膜自适应鲁棒  $H\infty$  控制方法[J].铁道学报,2018(7): 67.

[ 4 ] 张梦楠,徐洪泽.基于 Krasovskii 泛函的城市轨道交通列车制动控制器设计[J].吉林大学学报(工学版),2015(1): 104.

[ 5 ] NANKYO M, ISHIHARA T, INOOKA H. Feedback control of braking deceleration on railway vehicle[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME, 2006(2): 244.

[ 6 ] 张昱,刘钊,程海鹰.列车制动“电空”转换的 Bang-Bang 与模

糊 PID 复合控制[J].城市轨道交通研究,2013(2): 76.

[ 7 ] MAZENC F, NICULESCU S I, BEKAIK M. Stabilization of nonlinear systems with delay in the input through back-stepping [C]//50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2011: 7605-7610.

[ 8 ] 李中奇,杨振村.动车组自动驾驶制动过程双自适应优化控制[J].计算机仿真,2016(6): 121.

[ 9 ] ZHOU D, JI H, HE X, et al. Fault detection and isolation of the brake cylinder system for electric multiple units [ J ]. IEEE Journals & Magazines, 2018(5): 1744.

[ 10 ] 罗仁士,王义惠,于振宇,等.城市轨道交通列车自适应精确停车控制算法研究[J].铁道学报,2012(4): 64.

[ 11 ] LIAN J, ZHAO J, ROBUST H. Control of uncertain switched system; a sliding mode control design[J]. Acta Automatica Sinica, 2009(7): 965.

[ 12 ] 林立斌,沈宏丽,郭健,等.基于滑膜自适应鲁棒的超高速电机调速控制[J].机械设计与制造工程,2017(11): 72.

(收稿日期:2019-08-30)

(上接第 29 页)

表 4 下连接座计算工况及计算结果

计算工况	最大计算应力/MPa	材料许用应力/MPa
垂向载荷工况	144.0	355
纵向拉伸工况	74.6	355
纵向压缩工况	97.3	355
“垂向+拉伸”载荷工况	223.0	355
“垂向+压缩”载荷工况	157.0	355

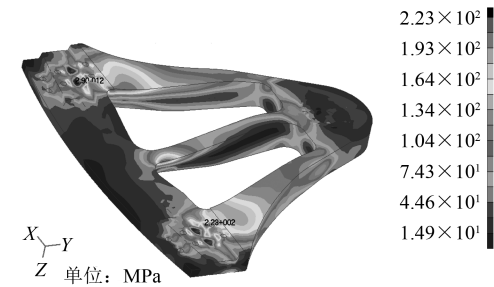


图 11 “垂向+拉伸”载荷下下连接座的应力云图

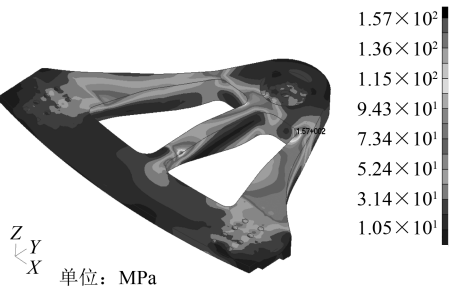


图 12 “垂向+压缩”载荷下下连接座的应力云图

为研究对象,通过建立各车体模块的静力学模型,详细分析了各车体铰接部件的力学特性,并对固定铰连接座进行了静强度仿真分析,可以得出如下结论:在胶轮有轨电车的铰接设备中,下部固定铰为主要承载部件,具有“由垂向静载荷引起的最大纵向静载荷总是使固定铰受压”的力学特性,该特性可有效抑制线性裂纹的扩展,从而提高固定铰的使用寿命;对固定铰连接座进行了静强度仿真分析,结果显示,计算应力均低于材料的屈服强度,连接座强度满足结构强度要求。

参考文献

[ 1 ] 夏春生.新型中运量城市公共交通系统的分析与实践[J].城市轨道交通研究,2018(5): 95.

[ 2 ] 马凯,孙珉堂,周家林,等.胶轮导轨电车车辆的系统设计[J].城市轨道交通研究,2018(3): 127.

[ 3 ] 孙帅,杨明.100%低地板有轨电车车体结构造型研究[J].铁道机车车辆,2017(1): 104.

[ 4 ] 赵大斌,任利惠.70%低地板轻轨车辆的型式比较[J].城市轨道交通研究,2007(4): 29.

[ 5 ] 牛锡平,周希楹,任利惠,等.100%低地板轻轨车辆车体固定铰强度分析[J].铁道机车车辆,2008(6): 127.

[ 6 ] BSI.铁道应用—轨道车辆车体结构的要求 第一部分:机车和客车;EN 12663-1;2010[S].英国:BSI,2010.

[ 7 ] 黄艾香.有限元理论与方法[M].北京:科学出版社,2009.

(收稿日期:2019-05-21)