

DOI: 10.3901/JME.2022.04.232

# 独立旋转轮对轨道车辆自适应导向控制研究

张济民 宗振海 周和超 寇 杰

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海 201804)

**摘要:** 独立旋转轮对轨道车辆由于左右车轮解除耦合作用, 失去了传统刚性轮对所具有的自动复位能力。为改善独立旋转轮对的导向性能, 提出一种独立旋转轮对车辆的自适应导向控制方法。该方法可以自动识别车辆是否处于曲线段并且计算曲线半径的大小, 针对不同线路状态采取适合的控制策略, 实现独立旋转轮对轨道车辆的运行的自适应控制。在加入自适应控制后, 独立旋转车辆恢复了纵向蠕滑力和直线复位对中能力, 使独立旋转轮对具备更加优良的导向性能。总体来看, 自适应控制下的车辆的曲线导向性能与安全性能均优于独立旋转轮对车辆; 在小半径曲线上, 自适应控制车辆具备比传统刚性轮对车辆更加优良的曲线导向性能以及安全性能; 在曲线半径较大时, 由于纵向蠕滑力不足, 自适应控制车辆的导向性能要弱于传统刚性轮对车辆。

**关键词:** 独立旋转轮对; 自适应控制; 复位性能; 导向性能; 安全性;

**中图分类号:** U270

## Research on Adaptive Steering Control of Independent Rotating Wheelset

ZHANG Jimin ZONG Zhenhai ZHOU Hechao KOU Jie

(Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804)

**Abstract:** The traditional wheelset has lost the ability of automatic reset due to the independent rotation of the left and right wheels. An adaptive steering control method is presented for independent rotating wheelset vehicles to improve steering ability. Adaptive steering control can automatically identify whether the vehicle is in a curve segment and calculate the radius of the curve. Suitable control strategies are used for different line states. After the adaptive control is added, the longitudinal creep force and the ability of linear reset alignment are restored, which makes the independent rotating wheelset have better steering performance. In general, the curve guidance performance and safety performance of the adaptive vehicle with control is better than that of the independent rotating wheelset vehicle; on the small radius curve, the adaptive vehicle has better curve guidance performance and safety performance than the traditional rigid wheelset; when the half diameter of the curve is larger, the performance of the independent rotating wheelset with control is better because of the smaller longitudinal creep force. It is weaker than the traditional rigid wheelset.

**Key words:** independent rotating wheelset; adaptive control; reset performance; steering performance; safety

## 0 前言

随着城市轨道交通的发展, 采用独立旋转车轮从而有效降低轨道车辆的地板高度已成为一种趋势, 无需高站台设计, 方便乘客上下车, 并能消除传统刚性轮对转向架的蛇行失稳现象<sup>[1]</sup>; 在铁路高速客运方面, 采用独立旋转车轮降低轨道车辆的地板高度则为发展双层高速列车创造了有利条件, 使

得同样的速度和同样的列车断面下, 双层高速列车的经济性将得到显著的提升, 并且有效消除了高速蛇行失稳的风险。由此可见, 无论是在城市轨道交通领域还是在高速铁路领域, 独立旋转车轮都具有巨大的发展潜力<sup>[2]</sup>。

由于独立旋转车轮特征为同一轮对的左右车轮解耦, 缺乏传统刚性轮对的纵向蠕滑力及相应的回转力矩, 因此在消除了传统刚性轮对蛇行运动失稳现象的同时, 也失去了沿轨道自动对中及复位的能力, 曲线导向能力大大降低。不同于传统刚性轮对左右两车轮总是以一样的转速进行旋转运动, 独立

车轮车辆在行驶过程中因线路不平顺或过曲线段线路时左右车轮的行驶距离不相同等原因<sup>[3]</sup>容易使得左右车轮的转速不等，独立轮对车辆的车轮差速控制技术也随之产生且得到不断发展。车辆车轮差速控制的主要定义是指通过曲线段线路时，采用包括作动器、轮毂电机及耦合轮对等结构或者不同装置使得车辆外侧车轮的转速比内侧车轮的转速要快一些，以适应其在曲线段线路外侧车轮行驶距离比内侧车轮的要长的状况的控制方法，使车辆能在较理想化情况下通过曲线线路，同时可以使车辆在直线线路上运动时获得与传统刚性轮对类似的自动复位性能<sup>[4]</sup>。为实现独立旋转轮对的差速功能，相关学者提出了多种控制方法。寇杰等<sup>[5-7]</sup>提出了一种基于机械差速器的独立车轮横向差速控制，李浩天等<sup>[8]</sup>提出了基于滑模控制模型的电气耦合轮对，西南交通大学的文永翔等<sup>[9]</sup>提出一种基于主动差速器的独立旋转转向架概念结构，曲文强等<sup>[10]</sup>提出了门架式独立旋转单轮组径向动力转向架方案，杨哲等<sup>[11]</sup>采用  $\mu$  综合方法设计了一种低地板有轨电车主动导向鲁棒控制器，SUDA 等<sup>[12]</sup>提出了一种具有自导向性能的反向锥度独立旋转车轮机构，孙效杰等<sup>[13]</sup>提出了一种盘式永磁同步电机直接驱动独立车轮及导向控制技术。目前对于独立车轮差速研究多是提出一种全线路统一的控制策略<sup>[13]</sup>实现，尚未有人针对车辆所处线路状态的不同采取不同的控制策略进行研究。文章提出了一种基于 PID 的自适应控制策略，该策略可自行识别车辆是否处于曲线轨道，并且计算轨道曲线半径的大小，根据曲线半径大小改变控制策略，实现独立旋转轮对轨道车辆的自适应导向控制。文章主要研究了在该控制策略下的轨道车辆的导向性能，包括直线导向性能、曲线导向性能以及通过曲线安全性和轮轨磨损性能。

1 独立旋转轮对车辆建模

在动力学仿真软件 UM 中所建立的某有轨电车辆仿真计算模型，该模型为四轴车辆，整车只考虑 1 个车体、2 个构架、4 个轮对，共 7 个刚体。车体通过二系悬挂连接在构架的上表面。车辆系统自由度包括车体与构架伸缩、横摆、浮沉、侧滚、摇头、点头 6 个自由度，四个轮对伸缩、横摆、摇头、点头 4 个自由度，独立旋转车轮左右点头自由度相互独立，因此轮对点头自由度增加 4 个。整车共有 38 个自由度。车辆系统中各刚体坐标系的原点设在刚体质心上，X 轴指向车辆前进方向，Y 轴

在轨道理论平面内垂直于 X 轴向右，Z 轴竖直向上。车辆模型如图 1 所示，车辆系统主要建模参数如表 1 所示。

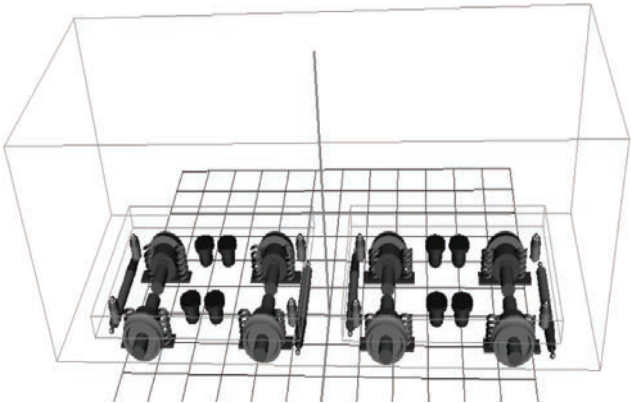


图 1 车辆模型

表 1 车辆系统主要建模参数

刚体	参数	数值
轮对	轴距/mm	1 800
	滚动圆半径/mm	290
	滚动圆跨距/mm	1 500
	质量/kg	862.7
	转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	(415.2 49, 26.2 72, 415.2 47)
车体	质量/kg	9 750
	质心(x, y, z)/mm	(0, 0, 1 520)
	转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	(1 512 1.93, 3 779 0.27, 3 179 2.83)
构架	质量/kg	2 368
	质心(x, y, z)/mm	(1 800, 0, 340)
	转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	(161 4.28, 83 2.37, 235 1.23)
车轮踏面形式		LM

2 独立旋转车轮轮对运动的数学模型

与传统刚性轮对不同，独立旋转轮对由于自由车轮的耦合作用消失，不存在刚性轮对的纵向蠕滑力以及其产生的回转力矩，因此在消除了传统刚性轮对蛇行失稳现象的同时，传统轮对原有的自动复位和曲线导向功能在独立车轮也上不复存在。这使得独立轮对在直线轨道上失去了直线自动居中的能力，曲线上只能依靠钢轨与轮缘之间的接触导向，大大加速了轮对与轨道的磨损，严重时甚至会产生脱轨事故。同时在过曲线时，由于独立旋转轮对的左右车轮解耦，左右车轮可以以不同的转速向前滚动。弹性约束下独立车轮的主动控制方程<sup>[14]</sup>为

$$m_w \ddot{y}_w + \frac{2f_{22}}{V} y_w - 2f_{22} \psi + 2k_{py} y_w = m_w \left( \frac{v^2}{R} - g\theta \right) + F_{wy} \quad (1)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi} + \frac{2f_{11} b \lambda}{r_0} \left( y_w - \frac{r_0 b}{\lambda R} \right) + \frac{2f_{11} b^2}{V} \dot{\psi} + \frac{2f_{11} b r_0}{V} \dot{\beta} + k_{p\psi} \psi = T_\psi \quad (2)$$

$$I_{wy} \ddot{\beta} + f_{11} \lambda \left( y_w - \frac{r_0 b}{\lambda R} \right) + \frac{f_{11} b r_0}{V} \dot{\psi} + \frac{f_{11} r_0^2}{V} \dot{\beta} = T_\beta \quad (3)$$

式中,  $m_w$  为轮对质量;  $y_w$  为轮对横移;  $f_{22}$  是横向蠕滑系数;  $f_{11}$  是纵向蠕滑系数;  $\psi$  为车轮的摇头角;  $V$  为轮对速度;  $R$  为曲线半径;  $\theta$  为曲线超高角;  $I_{wz}$  为轮对绕  $Z$  轴的转动惯量;  $b$  为左右车轮滚动圆横向跨距之半;  $\lambda$  为车轮等效斜度;  $r_0$  为车轮滚动圆半径;  $T_\psi$  为施加的摇头力矩;  $T_\beta$  是作用在独立旋转车轮上的车轮控制转矩,  $\beta$  一阶导数为左右轮速差即  $\dot{\beta} = \frac{(w_L - w_R)}{2}$ ,  $k_{py}$  为每轴箱一系横向悬挂刚度;  $k_{p\psi}$  为一系摇头刚度。

将上述方程变换之后可以得到独立旋转轮对的主动控制方程, 状态方程可以表示为

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \quad (4)$$

式中,  $x$  表示系统状态变量,  $w$  表示外部因素的干扰,  $u$  表示作动器的力矩输入。

### 3 独立旋转车轮主动导向控制策略

独立车轮主动导向控制的原理主要是利用轮对实时的状态信息, 如车轮相对于钢轨中心的横向位移、轮对冲角、左右车轮转速差<sup>[15]</sup>等信息, 对左右车轮转速或运动姿态进行控制, 使独立旋转车轮在合适的转速差或合适的冲角下通过曲线。文章提出的主动导向控制策略是基于左右车轮转速差进行控制的。

如图 2 所示, 在车轮以纯滚动形式行驶时, 外侧车轮通过的路程比内侧车轮要多  $\Delta S = 2b\theta$ , 通过时间为  $t = R\theta/V$ , 外侧车轮比内侧的多出的线速度

$$\Delta V = \frac{\Delta S}{t} = \frac{2b\theta}{R\theta/V} = \frac{2bV}{R} \quad (5)$$

外侧车轮比内侧车轮多出来的转速

$$\Delta w = \frac{2bV}{r_0 R} \quad (6)$$

即控制左右车轮转速差

$$\dot{\beta} = \frac{2bV}{r_0 R} \quad (7)$$

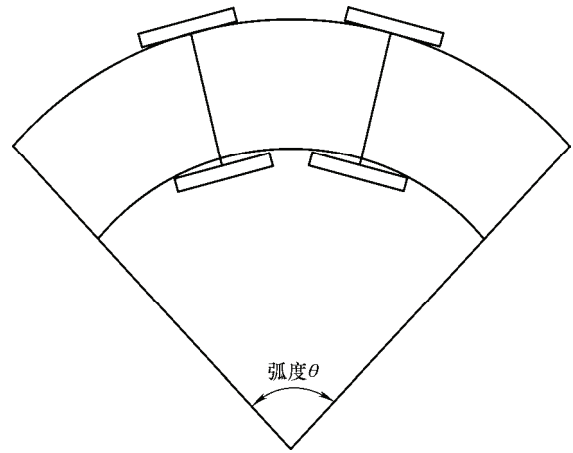


图 2 轮对过曲线示意图

可以实现独立车轮径向通过曲线。假设控制量与状态量为线性关系, 即

$$T_\beta = K_c x \quad (8)$$

式中,  $K_c$  为增益矩阵, 加入基于左右车轮转速差的控制后, 左右车轮不再完全独立, 重新恢复部分耦合关系, 而改变  $K_c$  相当于改变耦合刚度与阻尼的大小。

将控制目标设定为在直线上行驶时, 独立车轮相对于轨道中心线的偏移量为 0; 在曲线上行驶时, 降低轮轨冲角, 增加曲线导向性能, 减少轮轨之间的磨损。

列车在曲线不发生偏移即横移量为 0 时, 左右车轮的转速差如式(7)所示。

定义  $e = \dot{\beta}_0 - \dot{\beta}$ , 利用 PID 控制算法即

$$T_\beta = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (9)$$

使得曲线上左右轮转速差达到  $\dot{\beta}_0$ 。

当列车行驶在直线轨道上时, 独立旋转车轮会紧贴在轨道的一侧, 而刚性轮对的摇头运动使左右车轮的接触点处的滚动圆半径产生差值, 产生纵向蠕滑力, 在纵向蠕滑力的作用下产生回转力矩, 驱使车轮产生偏转, 偏转产生横向蠕滑力, 并且指向轨道中心。在此横向蠕滑力与重力复原力的共同作用下向轨道中心复位。可以参照刚性轮对的导向机理, 给独立旋转车轮施力矩, 替代刚性轮对中的纵向蠕滑力矩, 使独立旋转轮对反向摇头, 获得与刚性轮对一样的导向性能。文

章参照刚性轮对的导向机理, 设计了在直线上的控制策略: 利用 PID 控制算法, 使左右车轮的轮速趋于一致, 使原先解除耦合的左右车轮重新恢复一定的耦合刚度以此获得类似刚性轮对的导向性能。

#### 4 控制流程与控制参数的获取

自适应控制流程如图 3 所示。其中, 车体横向加速度  $a$  由加速度传感器测得, 车辆前进速度  $V$  由速度传感器测得, 轮对转速  $W_L$ 、 $W_R$  由转速传感器测得, 由左侧  $r_0=V/W_L$  获得左侧滚动圆半径, 根据轮轨接触关系可以获得滚动圆横向跨距  $b$ 。轨道曲线段的曲线半径测量可以由二自由度单轴陀螺仪平台间接测得, 单轴二自由度陀螺仪平台系统<sup>[16]</sup>能测量出列车转弯角速度的两角速率分量  $w_{ipy}^p$ 、 $w_{ipz}^p$  (相对于陀螺仪平台坐标系), 再由公式

$$w_{ipy}^p = \pm \frac{v}{R} \sin \gamma \quad (10)$$

$$w_{ipz}^p = \pm \frac{v}{R} \cos \gamma \quad (11)$$

可以获得车辆通过的曲线半径。

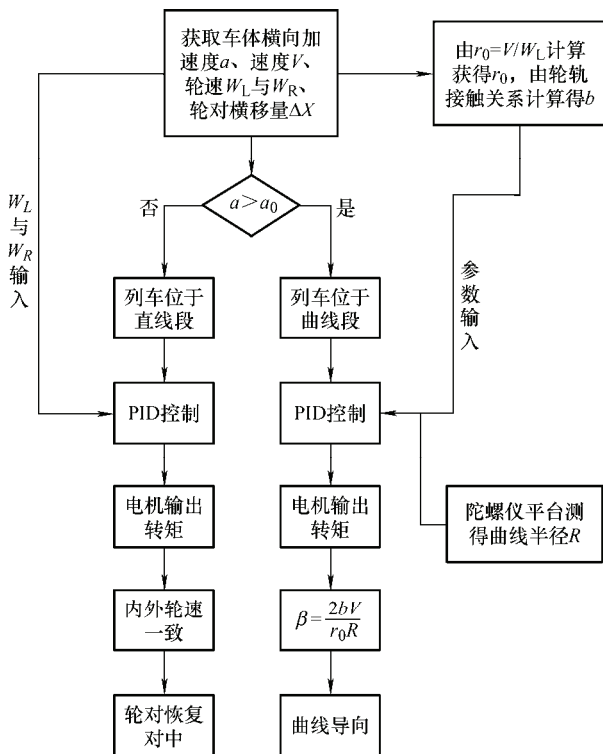


图 3 自适应控制流程图

#### 5 动力学性能研究

根据某 100% 低地板有轨电车的参数建立独立旋转转向架轨道车辆模型以及除轮对形式为刚性轮对以外其他参数均相同的刚性轮对车辆模型。同时在独立旋转车轮车辆上加入自适应控制。文章的主要研究工况为 36 km/h 过 50 m 曲线半径(工况 1)、54 km/h 过曲线半径 100(工况 2)、72 km/h 过曲线半径 500 m(工况 3)、90 km/h 过曲线半径 1 000 m(工况 4), 对比研究车辆在四种不同工况下的曲线导向性能、直线复位性能、安全性性能。

##### 5.1 曲线导向性能

通过比较分析独立旋转轮对、自适应控制下的独立旋转轮对与刚性轮对的轮轨冲角与纵向蠕滑力, 研究自适应控制策略下的车辆的曲线导向性能。

从图 4 与图 5 的轮轨冲角与纵向蠕滑力的变化曲线可知, 在 50 m 的小半径曲线上, 加入 PID 控制后的独立旋转轮对车辆轮轨冲角(绝对值), 略小于独立旋转轮对车辆, 导向性能最好。对比纵向蠕滑力的曲线可知在加入控制后, 左右车轮恢复耦合, 也由此获得最大为 4 015.69 N 的纵向蠕滑力大于刚性轮对的 3 564.77 N, 纯独立旋转轮对则几乎没有纵向蠕滑力。当曲线半径增至 100 m 时, 轮轨冲角之间差距变大, 自适应控制车辆的纵向蠕滑力依旧最大, 轮轨冲角最小。在小半径曲线上, 刚性轮对纵向蠕滑力较小, 轮轨冲角较大; 独立旋转轮对由于左右车轮可以差速旋转, 轮轨冲角依旧小于刚性轮对车辆。曲线半径为 500 m 时, 独立旋转轮对车辆没有纵向蠕滑力, 曲线导向性能最差; 刚性轮对车辆纵向蠕滑力达到 318 0.61 N, 超过了自适应控制车辆的 2 696.93 N, 二者曲线导向性能接近。当线路为 1 000 m 半径的大半径曲线时, 刚性轮对由于左右车轮的耦合作用, 获得 2 670.04 N 的纵向蠕滑力远大于自适应控制车辆的 1 742.47 N, 轮轨冲角最小, 导向性能最好。总体而言, 自适应控制车辆的导向性能要优于纯独立旋转轮对车辆, 在曲线半径较小时, 导向性能要优于刚性轮对车辆, 曲线半径较大时导向性能比刚性轮对车辆略差。



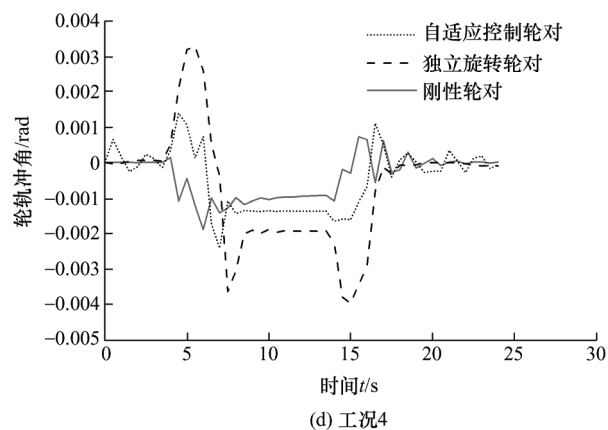
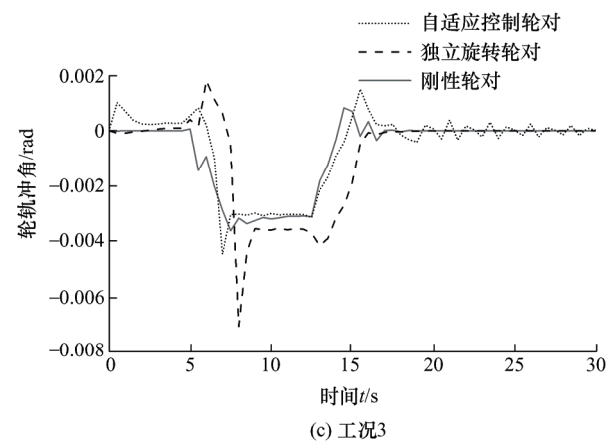
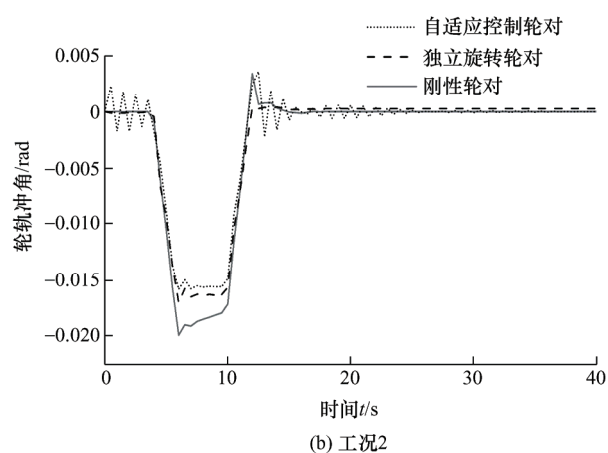
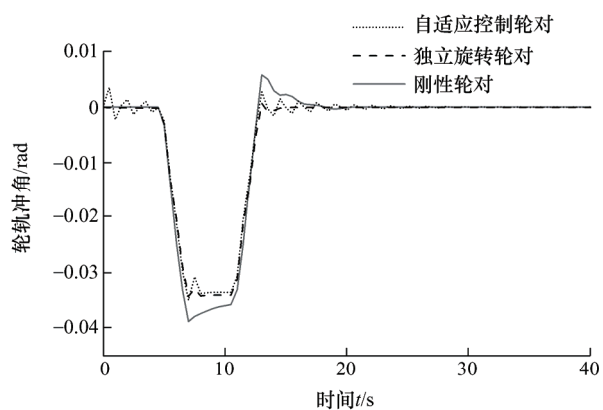


图 4 轮轨冲角

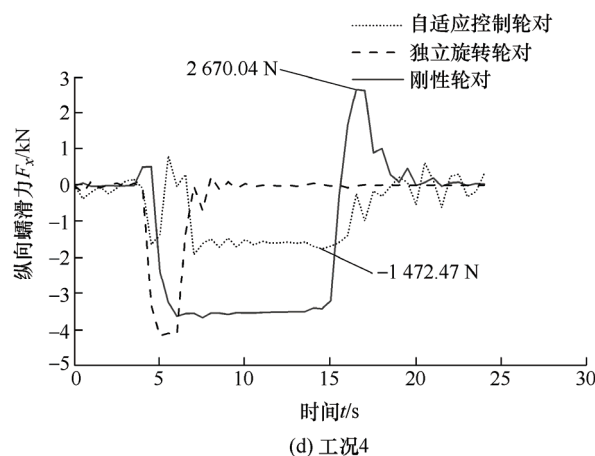
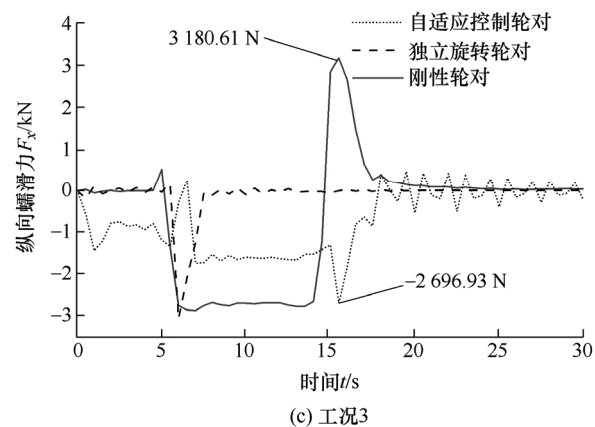
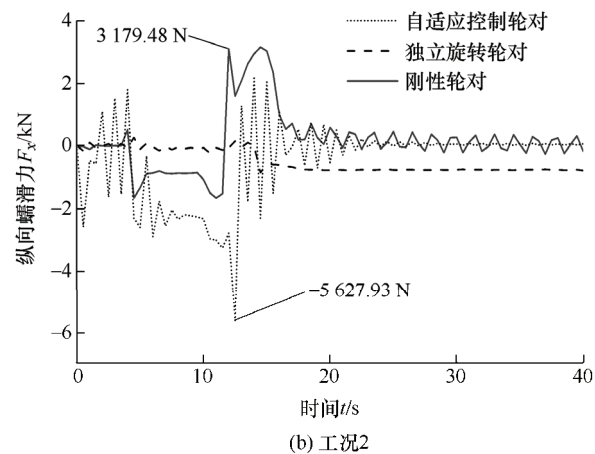
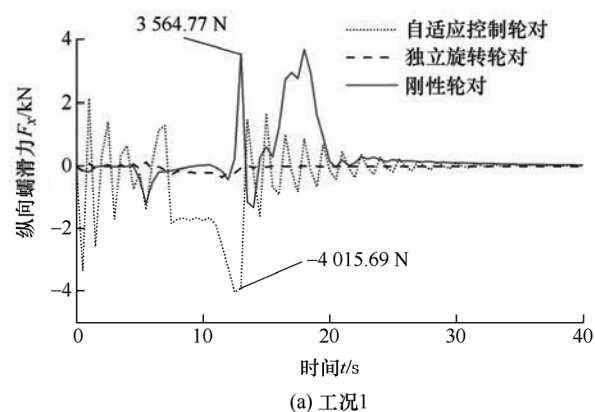


图 5 纵向蠕滑力曲线

## 5.2 直线自动复位性能

当轨道车辆以 72 km/h 的速度通过曲线半径为 500 m 的曲线段时, 由于离心力的作用, 车辆会向外侧发生滑移, 轮对将靠近外侧钢轨运行。列车驶出曲线进入直线轨道之后, 对比分析一位轮对的横移量以及纵向蠕滑力研究车辆在曲线上的自动复位性能, 结果如图 6 和图 7 所示。

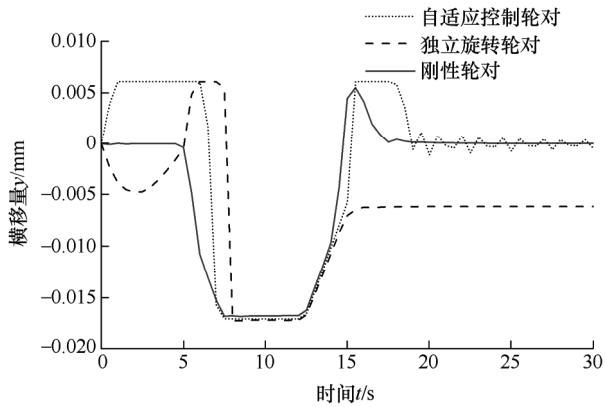


图6 横移量曲线

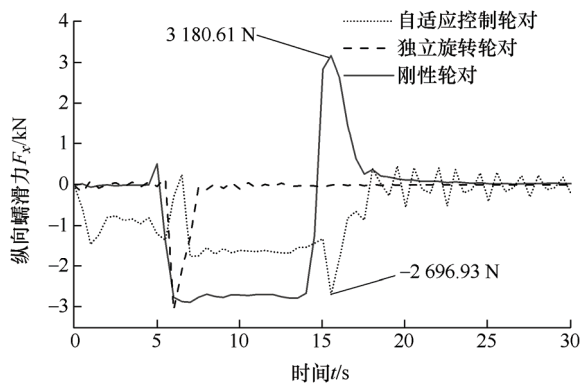


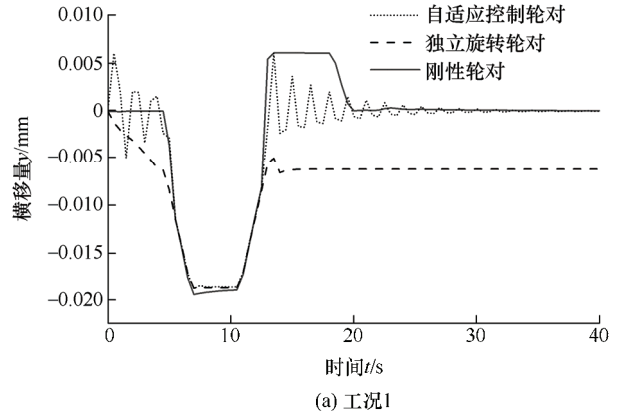
图7 纵向蠕滑力曲线

由一位轮对的曲线横移量可以看出刚性轮对出曲线时恢复对中的响应速度最快, 最快实现复位; 自适应控制车辆比刚性轮对车辆的响应稍慢, 恢复对中的过程较平缓, 最终的对中时间也与刚性轮对车辆接近; 纯独立旋转轮对车辆没有直线对中能力, 通过曲线后, 轮对横移量最终稳定于一定值, 无法实现复位。从纵向蠕滑力曲线可以看出, 由于独立旋转轮对车辆缺少纵向蠕滑力无法实现直线自动复位, 加入自适应控制之后, 左右车轮部分耦合, 恢复了一定的纵向蠕滑力, 但部分耦合获得的纵向蠕滑力小于刚性轮对车辆的, 因此恢复对中的响应速度要慢于刚性轮对车辆。除此以外, 还可以看出纵向蠕滑力的变化趋势与轮对的横移量变化趋势一致。

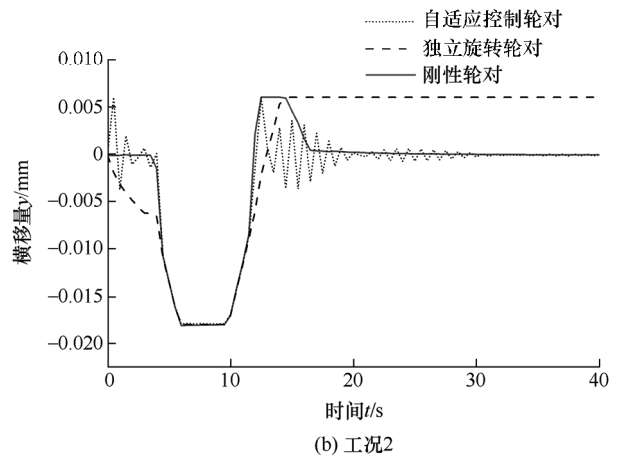
## 5.3 曲线安全性能

为研究在自适应控制下的独立旋转轮对车辆通过曲线时的安全性能, 对比三种车辆在四种工况下的轮

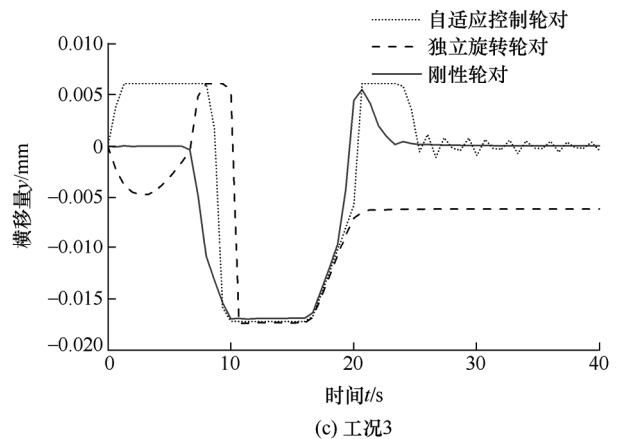
对横向位移量与脱轨系数, 结果如图 8 和图 9 所示。



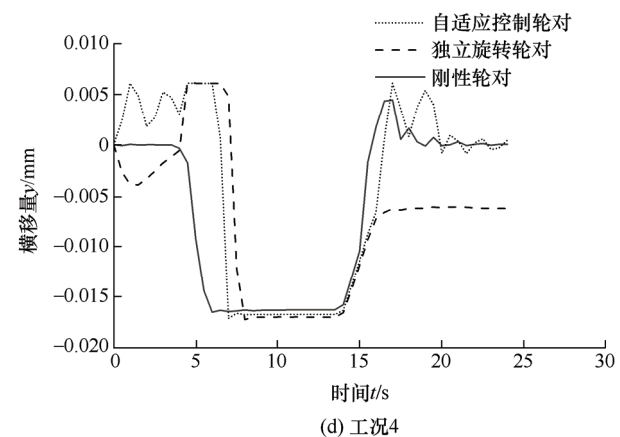
(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3



(d) 工况4

图8 轮对横向位移曲线

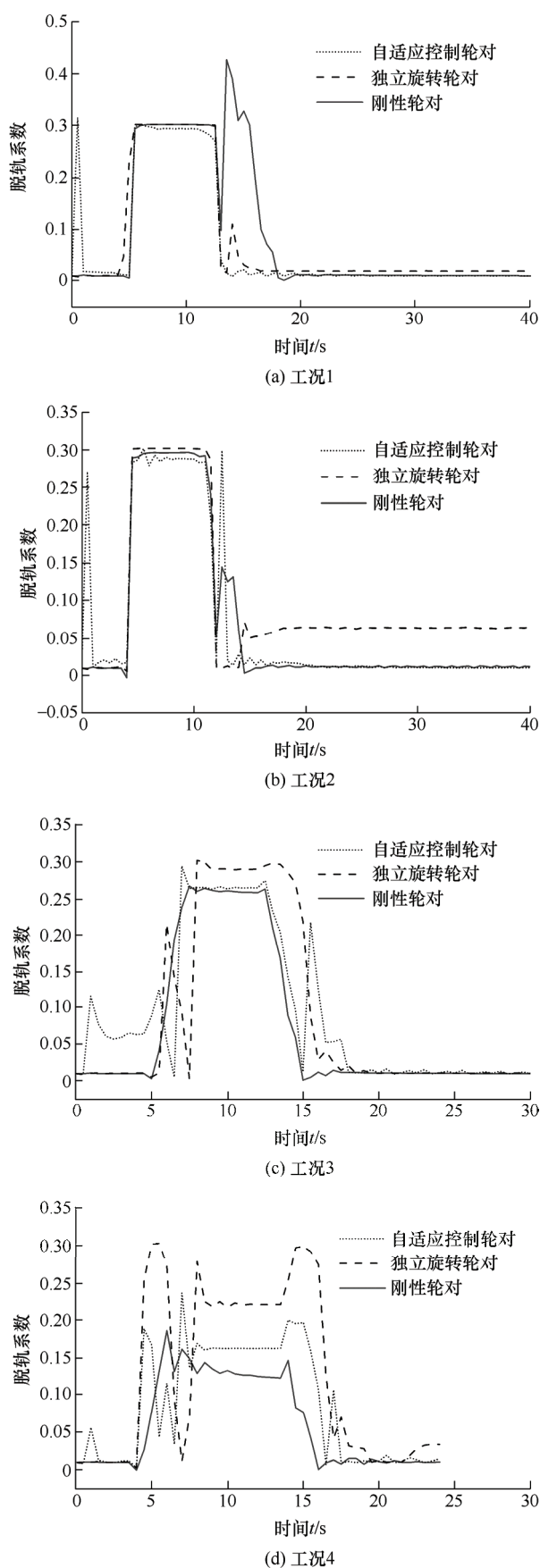


图9 脱轨系数

由轮对横向位移变化曲线可知, 在小半径曲线上, 独立旋转轮对车辆由于左右车轮的耦合作用消

失, 外侧车轮可以以高于内侧车轮转速向前滚动, 轮对的横向位移小于刚性轮对, 脱轨系数与刚性轮对接近相等(实际略小), 而自适应控制的车辆内外轮的轮速差更加接近理想值, 轮对的横向位移更小, 脱轨系数低于其他两种车辆。在半径较大的曲线上运行时, 独立旋转轮对由于纵向蠕滑力的缺失, 导向性能差, 脱轨系数较高; 随着曲线半径逐渐增大, 部分耦合获得的纵向蠕滑力要小于完全耦合的刚性轮对获得的纵向蠕滑力, 自适应控制车辆的脱轨系数超过了刚性轮对车辆, 而刚性轮对的耦合产生的纵向蠕滑力最大, 导向性能最好, 安全系数也最高。

## 6 结论

在独立旋转轮对车辆上加入线路自适应导向控制, 对左右车轮的轮速差进行控制, 使左右车轮恢复部分耦合作用。通过动力学分析, 对比分析了刚性轮对车辆、独立旋转轮对车辆、自适应控制车辆的直线复位性能、曲线导向性能以及安全性能。得出以下结论。

(1) 在自适应控制的耦合作用下, 独立旋转轮对恢复了部分纵向蠕滑力, 同时左右车轮依旧可以以不同的转速转动, 因此在一定的工况下可以同时获得独立旋转轮对与传统刚性轮对的优势。而由于加入了陀螺仪平台, 线路的曲线半径可以实时获得, 使控制具有了自适应能力, 在通过曲线时自动控制轮速差处于对应曲线状态的最佳值。

(2) 自适应控制下的独立旋转轮对, 曲线上可以实现左右车轮差速运行, 在曲线半径较小时, 导向性能要优于刚性轮对车辆, 而曲线半径较大时, 由于纵向蠕滑力不足, 情况则正好相反; 直线上可以同步旋转, 直线复位能力得到恢复但是响应速度略慢于刚性轮对。

(3) 在小半径曲线上, 自适应控制车辆曲线上的横移量与脱轨系数均最小。随着曲线半径加大, 刚性轮对的横移量与脱轨系数逐渐减小至小于其他两种车辆; 而自适应控制车辆的安全性能始终要好于独立旋转轮对车辆。

总体而言, 自适应控制车辆在小半径曲线上, 导向性能与安全性能均好于刚性轮对; 曲线半径变大时, 纵向蠕滑力小于刚性轮对, 导向性能与安全性能比刚性轮对车辆略差。

## 参 考 文 献

- [1] CHO Y, KWAK J. Development of a new analytical

- model for a railway vehicle equipped with independently rotating wheels[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(7): 1047-1056.
- [2] 刘晓宇. 独立旋转车轮导向技术概览[J]. 科技视界, 2015(18): 5-6.
- LIU Xiaoyu. Overview of independent rotating wheel guidance technology[J]. Science and Technology Horizon, 2015(18): 5-6.
- [3] 王伯铭. 独立旋转车轮系统特点及应用前景[J]. 电力机车技术, 2001(3): 27-29.
- WANG Boming. Characteristics and application prospect of independent rotating wheel system[J]. Electric Locomotive Technology, 2001(3): 27-29.
- [4] 曹恺, 王伯铭, 张德乾, 等. 城市轨道交通车辆车轮差速控制的原理及其应用[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(4): 111-115.
- CAO Kai, WANG Boming, ZHANG Deqian, et al. Principle and application of wheel differential control for urban rail transit vehicles[J]. Urban rail Transit Research, 2015, 18(4): 111-115.
- [5] 张济民, 寇杰, 周和超, 等. 差速器耦合轮对车辆曲线通过性能[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 94-99.
- ZHANG Jimin, KOU Jie, ZHOU Hechao, et al. Curving performance of vehicle with differential coupling wheelset [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (10): 94-99.
- [6] KOU J, ZHANG J, ZHOU H, et al. Dynamics of the differential coupling independently rotating wheels for railway vehicle[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2020, 14(6): M79.
- [7] 寇杰, 张济民, 周和超, 等. 机械差速器耦合轮对轨道车辆导向性能分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 128-135.
- KOU Jie, ZHANG Jimin, ZHOU Hechao, et al. Analysis of steering performance of rail vehicle with mechanical differential coupling wheelset[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 128-135.
- [8] 李浩天, 池茂儒, 吴兴文, 等. 城市轻轨车辆独立旋转车轮速差控制及导向特性研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 107-114.
- LI Haotian, CHI Maoru, WU Xingwen, et al. Study on speed difference control and steering characteristics of independently rotating wheels of urban light rail vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(2): 107-114.
- [9] 文永翔. 独立轮对轻轨车导向技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- WEN Yongxiang. Research on steering technology of independent wheelset light rail vehicle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [10] 曲文强. 门架式独立旋转单轮组径向动力转向架研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- QU Wenqiang. Research on portal independent rotary single wheel radial power bogie[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [11] 杨哲, 陆正刚, 张矿岩, 等. 独立旋转车轮有轨电车  $\mu$  综合导向控制[J]. 同济大学学报, 2017, 45(11): 1688-1693.
- YANG Zhe, LU Zhenggang, ZHANG Kuangyan, et al.  $\mu$  integrated steering control of independent rotating wheel tram[J]. Journal of Tongji University, 2017, 45(11): 1688-1693.
- [12] SUDA Y, WANG W, NISHINA M, et al. Self-steering ability of the proposed new concept of independently rotating wheels using inverse tread conicity[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(Suppl.): 291-302.
- [13] 孙效杰, 陆正刚, 张劲. 盘式永磁同步电机直接驱动独立车轮及导向控制技术[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(6): 93-98.
- SUN Xiaojie, LU Zhenggang, ZHANG Jin. Disc permanent magnet synchronous motor direct drive independent wheel and steering control technology[J]. China Railway Science, 2013, 34(6): 93-98.
- [14] 聂依照. 轻轨车辆独立旋转车轮转向架导向技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- NIE Zhui. Research on steering technology of independent rotating wheel bogies for light rail vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [15] 任利惠. 独立车轮导向技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- REN Lihui. Research on independent wheel steering technology[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [16] 王雪梅, 倪文波, 李芾. 基于陀螺平台的摆式列车线路信息检测系统研究[J]. 中国铁道科学, 2004(1): 42-46.
- WANG Xuemei, NI Wenbo, LI Fu. Research on tilting train line information detection system based on gyro platform[J]. China Railway Science, 2004(1): 42-46.

作者简介: 张济民, 男, 1969 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为车辆系统动力学及主动控制。

E-mail: zjm397a@163.com

寇杰(通信作者), 男, 1994 年出生, 博士。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: 838911823@qq.com