DOI: 10.3901/JME.2020.16.147

城市胶轮导轨车辆电差速控制技术*

李浩天 池茂儒 梁树林 刘开成 贾鹏 赵昀陇

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 为提高城市胶轮导轨车辆的电差速导向性能,从运动学角度分析曲线上各车轮转速与曲线半径的关系,推导车辆质心侧偏角和横摆角速度状态观测方程。建立胶轮导轨车辆的动力学模型,提出前后轮转角传递方案。将预设路径作为输入信息,建立线路前馈和转速反馈的闭环控制系统。在50 m半径曲线上,通过SIMAT联合仿真,对比分析胶轮导轨车辆的电差速主动控制和自适应差速的导向性能差异。结果表明,相较于电机自然差速特性,提出的基于转速反馈的电差速控制技术,其导向车轮的稳态冲角、横向力、横向滑移率、磨损指数分别减小了2%、13%、16%、15%,横摆角速度增益提高了7%;电差速控制既能降低车轮冲角和磨损,同时还能提高车辆转向的灵敏度。

关键词: 车辆工程; 胶轮导轨车辆; 电差速; 转速反馈; 控制参数; 导向性能

中图分类号: U482

Electronic Differential Control Method of Urban Guideway Vehicle

LI Haotian CHI Maoru LIANG Shulin LIU Kaicheng JIA Peng ZHAO Yunlong

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: To improve the steering performance of the urban guideway vehicle (UGV), the relationship between the wheel rotation speed and the curve radius is analyzed from the kinematics point of view, the observation equations of the centroid sideslip angle and the yaw rate are derived. An electromechanical-dynamical coupling model constructed of the UGV is established and a transmission scheme is proposed between the front and the rear wheels to dominate the yaw angle. The preset route is used as an input information to build a closed-loop control system based on track feedforward and wheel rotation speed feedback information. On the 50 meters radius curve, through the SIMAT co-simulations, the effects of the curving performance with the electronic speed-differential control of the curving performance are investigated by comparison with the UGV in absence of the control system in terms of some steering parameters. The simulation results show that, the proposed electronic differential control method based on the track information and the wheel rotation speed can reduce the attack angle, tyre lateral force, lateral slip, and wear index by 2%, 13%, 16%, 15%, also make the yaw velocity gain increases by 7% comparing with the self-adaption differential vehicle without the control system. The electronic differential control method can not only weaken the conflict between the tyre and the road, but also improve the turning flexibility of the vehicle.

Key words: vehicle engineering; urban guideway vehicle(UGV); electronic differential control; rotation rate feedback; speed-differential control parameters; steering performance

0 前言

传统有轨电车大多采用钢轮钢轨制式,具有一些天生的短板,如轮轨噪声、爬坡能力和脱轨安全等问题,这成为了制约其发展的突出问题^[1]。为此,一种由胶轮承载、导向轮轨接触导向的轨道交通形式——胶轮导轨车辆被提了出来。目前,胶轮导轨车辆作为城市轨道交通的重要组成部分运营在世界各地,代表性的有法国 TransLohr 有轨电车、庞巴迪 GLT 和巴黎地铁 2 号线等^[2]。

胶轮导轨车辆虽然规避了一些钢轮钢轨车辆的劣势,但也面临新的挑战,车辆多数转向行为发生在城市内小半径曲线,需要验证车辆能否顺利地通过曲线以保证行驶安全性和乘坐舒适性。传统汽车的曲线通过主要依靠转向系和差速器的配合实现,但是对于轨道交通车辆,倘若在每对驱动轮上都安装差速器,车辆机械系统会变得繁杂,即便布置多

式——胶轮导轨车辆被提了出来。目前,胶轮导轨车辆作为城市轨道交通的重要组成部分运营在世界各地,代表性的有法国 TransLohr 有轨电车、庞巴迪 GLT 和巴黎地铁 2 号线等^[2]。

* 国家重点研发计划(2018YFB1201600)、四川省科技计划 (2018JY0557) 和牵引动力国家重点实验室自主课题(2018TPL_T04)资助项目。
20191105 收到初稿,20200308 收到修改稿

个轮间差速器,由于车辆前后端路面附着条件的差异,也很难保证行驶的稳定性^[3]。因此,可以考虑采用电差速方式对车轮转速进行速差控制。相较于现有的机械差速器,电控差速预示着未来发展趋势,其关键问题是控制策略的选取和算法的建立^[4]。电差速在汽车领域的研究由来已久,但在轨道交通领域尚少,所以,有必要针对胶轮导轨车辆这一轨道交通形式的电差速控制技术展开研究。电差速控制技术是一项涉及车辆动力学、机电耦合、自动控制等领域的复杂问题。控制策略主要分为3种,自适应差速、转速控制和直接转矩控制^[5],自适应差速与机械差速器原理类似,只需给各轮分配近似相等的转矩,是最简单的被动控制,效果难以保证;转速控制以车轮转速为反馈变量,控制算法较简单,但受路面附着条件的影响,可能导致车轮滑移率不尽相同;直接转矩控制可以基于反馈变量调节驱动/制动转矩,进而调节车辆姿态,但考虑电动机的负载转矩变化频繁且易出现脉冲波动,所以控制鲁棒性难以保证。文献[6]基于机械差速器工作原理,提出了转向驱动电动机等转矩分配的自适应电子差速策略,属于自适应差速。文献[7]以车辆左前轮为速度标定,调节其他车轮转速,以尽量保证车轮纯滚动状态,属于转速控制。文献[8]通过控制车轮滑移率,计算每个车轮需要的驱动力矩,进而控制电动机输出转矩,属于直接转矩控制。通过以上分析可以看出,电差速的实质是对驱动轮的转速或转矩进行独立分配。控制理论包括比例控制、最优控制^[9]、自适应控制^[10]和模糊控制^[11]等。研究发现,前馈控制加反馈联合控制可以使得车辆对环境干扰的适应性更高^[12]。

综上,有必要对多车轮的轨道交通车辆以电控差速方式通过曲线的动态特性进行研究,以提高车辆转向灵活性和降低轮胎磨耗。从曲线上车辆位姿入手,理论推导了车轮转速的和曲线半径的关系。考虑车辆运动特性,推导了车轮控制状态方程,描述了车辆质心侧偏角状态观测方法。建立了基于转速反馈的闭环控制系统。最后,仿真分析了电差速控制车辆的导向性能。

1 多轮转向原理和理论模型

1.1 基于运动学的车轮转速分析

胶轮导轨车辆结合了轨道车辆接触式导向和汽车橡胶轮走行的特点。本文研究的胶轮导轨车辆有4个走行部,每个走行部包含2个走行轮和1对导向轮,每个走行轮皆为动轮,由轮毂电动机驱动,转向架相对于车体可以摇头转动。不同于文献

[13-14]中的多轮转向的汽车,胶轮导轨车辆没有转向盘和转向梯形,走行轮的转角信息由各自前部的导向轮轨提供,两侧车轮根据各自不同的曲线半径自然形成内大外小的转角。忽略导向杆长度,轮胎自动指向弯心。两侧车轮未采用机械装置连接,目的是实现两侧转速和转角的解耦,取而代之的是电控系统进行速差调节。前轮转向轴与导向轮连接,如图1所示,由导向轮轨提供导向车轮的转角信息。

图1 整车动力学模型

传统的多轮转向车辆主要通过复杂的电控系统使得前后轮保持一定比例的同向或反向转动,对控制系统的要求较高^[15]。受文献[16]的启发,为使得各车轮趋于径向位置,简化转角传递过程,本文研究的胶轮导轨车辆取消了汽车的机械式差速器和转向梯形,取而代之的是导向轮与走行轮转向轴连接,形成新的转向系统。为获得更小的转弯半径,往往采用多轮转向而不是两轮转向^[17],车辆前后轮转向轴通过机械摇臂连接,导向轮提供前轮转角信息后,由摇臂传递给后轮一个大小相等、方向相反的一个转角,如图2所示。其目的与其他车辆一样,即寻找 Ackermann 转向中心,转向中心位于车辆纵向中轴延长线上。

图2 转角传递机构

胶轮导轨车辆曲线通过情况如图3所示,同一刚体上所有点对于转向中心O的角速度相等。对于外侧前轮,有

$$\frac{v_o}{v_m} = \frac{R_o}{R_m} \quad (1)$$

而

$$R_o = \sqrt{(R_m + a)^2 + b^2} \quad (2)$$

$$R_m = \sqrt{R^2 - b^2} \quad (3)$$

可以得到基于运动学的车轮速度

$$v_o = \sqrt{\frac{R^2 + a^2 + 2a\sqrt{R^2 - b^2}}{R^2 - b^2}} v_m \quad (4)$$

同理，对于内侧车轮有

$$v_i = \sqrt{\frac{R^2 + a^2 - 2a\sqrt{R^2 - b^2}}{R^2 - b^2}} v_m \quad (5)$$

假定所有车轮滚动圆半径相同，车轮转速与转角关系

$$\frac{v_i}{v_o} = \frac{R_i}{R_o} = \frac{\sin \theta_o}{\sin \theta_i} \quad (6)$$

式中， v_i 、 v_o 是内、外侧车轮行驶速度； v_m 为车辆质心前进速度； R_i 、 R_o 是内、外侧车轮与转向中心的距离； R_m 为车辆质心与转向中心的距离； R 为车辆前轴中心与转向中心的距离，即曲线半径； a 、 b 是车辆横、纵向跨距之半； θ_i 、 θ_o 是内、外侧车轮与车辆纵轴线夹角。

图3 胶轮导轨车辆曲线通过示意图

由于前后轮转角大小相等，所以同侧前后轮转速一样。由式(4)、(5)可以得到基于运动学的各车轮理想转速。

1.2 车辆二自由度模型状态观测

多轮转向车辆的控制评价指标主要是车辆质心侧偏角 β 和横摆角速度 $\dot{\varphi}$ ，质心侧偏角越小，转向稳定性越好，横摆角速度增益越大，转向灵敏度越高^[18-20]。文献[21]根据轮胎侧偏角-侧向力非线性关系，给出了质心侧偏角估算方法

$$\dot{\beta} = \frac{a_y}{v} - \dot{\varphi} \quad (7)$$

式中， a_y 为横向加速度； v 为质心速度。

如图4所示，对于每个走行部在 xoy 平面的运动，其运动方程可以描述成

$$mv(\dot{\beta} + \dot{\varphi}) = 2(k_1 - k_2)\beta + 2b(k_1 - k_2)\dot{\varphi} / v_x - 2(k_1\theta_1 - k_2\theta_2) \quad (8)$$

$$I_z \ddot{\varphi} = 2b(k_1 + k_2)\beta + 2b^2(k_1 + k_2)\dot{\varphi} / v_x - 2b(k_1\theta_1 - k_2\theta_2) \quad (9)$$

式中， m 是整车质量； k_1 、 k_2 是前、后轮侧偏刚度； v_x 为质心前进速度； θ_1 、 θ_2 是前、后轮转角； I_z 是车辆转动惯量。

图4 车轮转向模型

将上述微分方程转化状态方程

$$\begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2(k_1 - k_2)}{mv_x} & \frac{2b(k_1 + k_2)}{mv_x^2} - 1 \\ \frac{2b(k_1 + k_2)}{I_z} & -\frac{2b^2(k_1 + k_2)}{I_z v_x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{2k_1}{mv_x} & \frac{2k_2}{mv_x} \\ -\frac{2bk_1}{I_z} & -\frac{2bk_2}{I_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

取 $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \beta \\ \varphi \end{pmatrix}$ 为状态变量； $\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}$ 为输入变量；

$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \beta \\ \varphi \end{pmatrix}$ 为输出变量，则式(10)可化为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U} \end{cases} \quad (11)$$

式中， $\mathbf{A}$ 为系统矩阵，由系统内部变量决定； $\mathbf{B}$ 为控制矩阵，表示各个输入变量对状态变量的控制特性； $\mathbf{C}$ 为输出矩阵，是输出变量和状态变量之间的关系； $\mathbf{D}$ 为输出变量与状态变量之间的传递矩阵。

通过上述方法，即可得到车辆质心侧偏角和横摆角速度。

2 基于转速反馈的速差控制系统模型

2.1 车辆系统动力学模型

为全面分析导向性能，需要考虑车辆系统纵向动力学，因此本文利用 SIMPACK 9.8 建立了胶轮导轨车辆驱动控制整车模型，仿真模型如图5所示。

每个走行轮独立驱动，相对于转向架可以摇头

转动。两侧转向架相对于车体可以独立摇头转动，二系簧提供垂向支撑和一定的回正力矩。

图 5 仿真模型

对于图 3 中的车轮，其横向运动方程为

$$ma_y = F_{xf} \sin \theta_1 + F_{yf} \cos \theta_1 - F_{xr} \sin \theta_2 + F_{yr} \cos \theta_2 \quad (12)$$

$$I_z \ddot{\phi} = (-F_{xf} \sin \theta_1 - F_{yf} \cos \theta_1 - F_{xr} \sin \theta_2 + F_{yr} \cos \theta_2)b + M_D \quad (13)$$

式中， F_{xf} 、 F_{xr} 是前、后轮纵向力； F_{yf} 、 F_{yr} 是前后轮横向力； M_D 是直接横摆力矩。

本文提出了一种八字形双轮轨导向制式，如图 6 所示，目的是在提供车轮转角信息的同时保证其转向稳定性。

图 6 导向轮轨示意图

车辆走行采用橡胶轮胎，行驶在导向轨之间的路面。轮胎采用 Pacejka 模型。由于车辆行驶在城市内，其线路设计需适应公路条件，所以未设置缓和曲线和超高。

2.2 基于转速反馈的控制模型

联立车轮状态方程(7)、(12)、(13)，得到质心侧偏角和横摆角速度

$$\beta = \beta_0 + \frac{1}{m} \int [(F_{xf} \sin \theta_1 + F_{yf} \cos \theta_1 - F_{xr} \sin \theta_2 + F_{yr} \cos \theta_2) / v - \dot{\phi}] dt \quad (14)$$

$$\dot{\phi} = \dot{\phi}_0 + \frac{1}{I_z} \int [(-F_{xf} \sin \theta_1 - F_{yf} \cos \theta_1 - F_{xr} \sin \theta_2 + F_{yr} \cos \theta_2)b + D] dt \quad (15)$$

可以看出，要控制质心侧偏角和横摆角速度，最根本的是控制车轮与地面之间的横向力和纵向力，但实际运用过程中，很难直接测得车轮力，所以直接控制车轮力的方法较为困难。

车轮力是由车轮运动状态决定的，其决定因素较多。一般认为，在线路条件和轮胎参数确定时，车轮纵向力主要与轮胎滑移率相关，横向力主要与车轮侧偏角相关^[22]。对于本文研究对象，车轮转角由导向轮轨决定，所以控制变量为车轮转速，这也是最直接的控制方法。

根据现有电机功率和机械特性，设计一套基于速差反馈的控制系统。如图 7 所示，目标转速是根据式(4)、(5)计算出的各车轮运动学理论转速，作为控制目标与车轮当前状态的实际转速作比较，通过两个判断开关，释放相应的加速或减速信号，进而转换成力矩信号。经过一定的相应时间，最后通过轮轨电机作用在车轮上。更新的车轮实际转速不断与目标转速进行迭代比较，形成一个转速闭环控制系统。

图 7 转速控制流程

决定控制效果和可靠性的主要是三个关键参数，分别为监测精度、响应时间和驱动转矩。

具体来说，监测精度是信号比较器的容差范围，当车轮实际转速与目标转速差值大于此阈值时，加、减速控制系统介入，输出转矩信号；当转速差值小于此阈值时，系统认为该差值是电动机正常精度误差，控制系统不释放加、减速信号。一般步进电动机转速误差可以控制在转速的 $\pm 0.5\%$ ^[23]，结合车轮转速，监测精度取 0.065 rad/s。

响应时间是考虑电动机作动的迟滞特性，即电动机从启动到峰值转矩所必需的时间，此处取参考值 0.1 s^[24]。

驱动转矩是考虑电动机的机械特性。如图 8 所示, 在转速达到 n_b 之前, 电动机转矩恒定, 功率上升; 在转速超过 n_b 之后, 电动机转矩下降, 功率不变。车辆低速通过曲线时, 两侧车轮目标转速不同, 控制系统转矩需求较大, 而此时电动机转矩刚好稳定在较高水平; 车辆高速行驶在直线上时, 两侧车轮目标转速一样, 控制系统转矩需求较小, 电动机工作在恒功率区间。

图 8 电机转矩特性

胶轮导轨车辆每个车轮内部都放置一个轮毂电机。查阅电机选型手册, 某型 55 kW 电机转矩-转速特性如表 1 所示。可以看出, 当电动机转速不超过 1 200 r/min, 车速不超过 194 km/h 时, 电动机输出转矩基本稳定在 451 N·m 左右。

工程实践中, 这三个参数可根据电机实际情况调整。

表 1 电动机转矩-转速特性

转速 $n/(r/min)$	转矩 $T/(N \cdot m)$
1	452.19
240	451.93
480	451.67
720	451.41
960	451.14
1 200	450.9
1 440	397.71
1 680	343.61
1 920	292.56
2 160	251.61

3 转速控制系统导向性能分析

利用 Simpack 软件中的 Matlab 接口, 将控制系统模型输入到动力学模型, 形成 SIMAT 联合仿真模型。为检验转速控制系统的效果, 将转速控制的动车模型和自适应差速的动车模型进行仿真, 对两种车辆的车轮冲角、轮胎横向力、横向滑移率和磨耗进行对比分析, 结果如图 9 所示。

仿真线路设置为直线($L=200$ m)→圆曲线($R=$

50 m, $L=80$ m)→直线($L=200$ m), 车辆过弯速度为 20 km/h。对于转速控制车辆, 车辆从静止开始加速, 每个车轮按照各自的目标转速通过曲线; 自适应差速的车辆每个车轮上作用有相等的转矩, 各车轮自适应差速通过曲线。此方法是利用机械差速器平均分配转矩的原理^[25], 目的是模拟传统机械差速器的车辆。为尽量清晰地对比控制效果, 线路未设置轨道激励。

从图 9a~9e 可以看出, 采用转速控制的车轮导向性能优于自适应差速的。导向位内侧车轮的冲角、横向力、横向滑移率、磨耗分别减小了 2%、13%、16%、15%, 横摆角速度增益提高了 7%。

具体来说, 车轮冲角是指走行轮轮轴与所在位置曲线切线方向的夹角, 这一指标表达了车轮趋于径向线位置的能力, 冲角越大, 说明偏离径向线位置越远。

从式(14)、(15)可以看出, 轮胎横向力从很大程度上决定了车辆的质心侧偏角和横摆角速度, 轮胎横向力越大, 说明轮胎所受横向冲击越大。

横向滑移率的定义是 $v_y/|v_x|$, 即横向速度与前进速度的比值。横向滑移率与轮胎磨耗相关, 横向滑移率越大, 说明车轮磨耗越严重^[26]。另外, 横向滑移率 $\arctan(v_y/|v_x|)$ 显然与轮胎侧偏角也紧密相关, 当 v_y 较小时, 两者数值上大致相等。

目前还没有公认指标对轮胎磨耗进行评价^[27], 所以本文借鉴铁道车辆的磨耗指数对轮胎磨耗进行评价, 采用冲角与横向力的乘积进行计算。从图 9d 可以看出, 采用此方法评价的轮胎磨耗与图 9c 中采用横向滑移率的磨耗评价规律类似。

横摆角速度增益又称转向灵敏度, 常用来评价转向机动性^[28], 定义为稳态下前轮横摆角速度除以前轮转角

$$\frac{\omega_1}{\theta_1} = \frac{v/2b}{1+Kv^2} \quad (16)$$

式中, K 为稳定性因数, 表征车辆转向稳定性。容易看出, 转向灵敏度与稳定性是负相关的。如图 9e 所示, 转速控制的车辆稳态横摆角速度增益比自适应差速的车辆略大, 说明转速控制提高了转向灵敏度。

(c) 横向滑移率

(d) 轮胎磨损

(e) 横摆角速度增益

图9 转速控制的车轮导向性能

为进一步分析车辆导向性能,提取转速控制转向架的质心侧偏角、摇头角速度和横向加速度,与自适应差速的转向架对比,如图10所示。

图10 转速控制的转向架导向性能

转速控制的转向架质心侧偏角最大值比自适应差速的车辆略大,说明转速控制在提升转向灵敏度的同时,会降低转向稳定性,这是因为转向灵敏度和转向稳定性是一对天生的矛盾;转速控制的转向架摇头角速度最大值比自适应差速的车辆略大,和车轮转向灵敏度规律类似;转速控制的转向架横向加速度最大值比自适应差速的车辆小,说明转速控制的转向架所受横向冲击更小。这与车轮冲角、横向力分析的结论吻合。

4 结论

车轮转速控制可以有效地调节转向架姿态,对车辆导向性能影响较大。本文从二自由度车辆模型出发,阐述了车辆质心侧偏角和横摆角速度的观测方法,提出了前后轮转角传递方案,选定了车轮转

速控制策略。

本文采用电差速的方式,对各个独立车轮进行控制,将曲线半径作为前轮前馈信息,将车轮转速作为控制变量,建立了基于转速反馈的转速控制和动力学联合仿真模型。对比分析了有无转速控制的车辆导向性能差异,结论如下。

(1) 电差速技术大大降低了机械系统的复杂性,在结构简单紧凑的城市胶轮导轨车辆上具有较好的应用前景。

(2) 本文采用的车轮转速控制策略,不需要加装复杂的传感装置去获得车辆质心侧偏角,只需知道车轮转速即可,减小了车辆状态观测的难度和控制系统精度要求。

(3) 基于转速控制的电差速技术,既能有效降低车轮冲角和磨损,同时还能提高车辆转向的灵敏度,使车轮转速和转角更为匹配。

参 考 文 献

- [1] 刘加华, 练松良. 城市轨道交通振动与噪声[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(1): 29-33.
LIU Jiahua, LIAN Songliang. Vibration and noise of the urban rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(1): 29-33.
- [2] 李芾, 杨阳. 城市自导向胶轮电车技术特点与应用[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 291-299.
LI Fu, YANG Yang. Characteristics and application of urban rubber-tyred self-steering trams[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 291-299.
- [3] 骆倩. 低附着系数下轮毂驱动电动车横摆稳定分段控制方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
LUO Qian. PWA based yaw stability control for in-wheel-motor electric vehicle on low adhesion coefficient road[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [4] 徐寅, 陈东. 电动汽车差速系统研究综述[J]. 中国机械工程, 2011(4): 498-503.
XU Yin, CHEN Dong. Summary on research of differential for a electric vehicle[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2011(4): 498-503.
- [5] YANG Y, LO C. Current distribution control of dual directly driven wheel motors for electric vehicles[J]. Control Engineering Practice. 2008, 16(11): 1285-1292.
- [6] 唐自强, 龚贤武, 赵轩, 等. 分布式驱动汽车自适应差速仿真研究[J]. 合肥工业大学学报, 2017, 40(10): 1320-1325.
TANG Ziqiang, GONG Xianwu, ZHAO Xuan, et al.

- Simulation research on self-adaptive differential of distributed drive electric vehicle[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40(10): 1320-1325.
- [7] 万钢, 陈辛波, 余卓平, 等. 四轮电子差速转向控制系统: 02136498.2[P]. 2004-02-18.
- WAN Gang, CHEN Xinbo, YU Zhuoping, et al. Four-wheel electronic differential steering control system: 02136498.2[P]. 2004-02-18.
- [8] 赵艳娥, 张建武. 轮毂电机驱动电动汽车电子差速系统研究[J]. 系统仿真学报, 2008(18): 4767-4771.
- ZHAO Yane, ZHANG Jianwu. Study on electronic differential control system of independent in-wheel motor drive electric vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2008(18): 4767-4771.
- [9] HIGUCHI A, SAITOH Y. Optimal control of four wheel steering vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 1993, 22(5): 397-410.
- [10] RASTE T, KRETSCHMANN M, LAUER P. Sideslip angle based vehicle dynamics control system to improve active safety[C]// Proceedings of FISITA World Automotive Congress. Budapest. 2010.
- [11] PI D W, CHEN N, WANG J X, et al. Design and evaluation of sideslip angle observer for vehicle stability control[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(3): 391-399.
- [12] ITO K, FUJISHIRO T, KAWABE T, et al. A new way of controlling a four wheel steering vehicle: an approach of model following control[J]. Transactions of the Society of Instrument & Control Engineers, 2009, 23(8): 828-834.
- [13] IRIE N, KUROKI J. 4WS technology and the prospects for improvement of vehicle dynamics[C]// Vehicle Electronics in the 90's: Proceedings of the International Congress on Transportation Electronics. IEEE, 1990: 429-437.
- [14] YUHARA N. A review of four-wheel steering studies from the viewpoint of vehicle dynamics and control[J]. Vehicle System Dynamics, 1989, 18(1-3): 151-186.
- [15] SHIBAHATA Y. Progress and future direction of Chassis control technology[J]. Annual Reviews in Control, 2005, 29(1): 151-158.
- [16] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 新型独立轮对柔性耦合径向转向架[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 9-15.
- CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing, et al. New flexible coupled radial bogie with independently rotating wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 9-15.
- [17] 郭孔辉, 轧浩. 车辆四轮转向系统的控制方法[J]. 吉林工业大学学报, 1998(4): 1-4.
- GUO Konghui, YA Hao. Progress in controlling method of four-wheel-steering system[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1998(4): 1-4.
- [18] FARRELLY J, WELLSTEAD P. Estimation of vehicle lateral velocity[C]// IEEE International Conference on Control Applications. IEEE, 1996: 552-557.
- [19] YIH P, RYU J, CHRISTIAN G. Vehicle state estimation using steering torque[C]// Proceeding of the 2004 American Control Conference, 2004(3): 2116-2121.
- [20] 郭孔辉, 付皓, 丁海涛. 基于扩展卡尔曼滤波的汽车质心侧偏角估计[J]. 汽车技术, 2009(4): 1-3.
- GUO Konghui, FU Hao, DING Haitao. Estimation of cg-sideslip angle based on extended kalman filter[J]. Automobile Technology, 2009(4): 1-3.
- [21] 刘飞, 熊璐, 邬肖鹏, 等. 车辆质心侧偏角估计算法设计与对比分析[J]. 同济大学学报, 2015, 43(3): 0448-0455.
- LIU Fei, XIONG Lu, WU Xiaopeng, et al. Vehicle sideslip angle estimation and contrastive analysis[J]. Journal of Tongji University, 2015, 43(3): 448-455.
- [22] 张雷. 分布式驱动电动汽车制动系统关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- ZHANG Lei. Research on the key technologies of braking system of distributed driven electric vehicle[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [23] 闫政, 权龙, 张晓刚. 变速异步电动机比例恒压泵电液动力源特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 183-190.
- YAN Zheng, QUAN Long, ZHANG Xiaogang. Research on the characteristic of the electro-hydraulic power source composed of variable speed asynchronous motor and proportional constant pressure pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 183-190.
- [24] 雷凯. 步进电机细分驱动技术的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2003.
- LEI Kai. Study on subdivision driving technique of stepper motor[D]. Suzhou: Suzhou University, 2013.
- [25] 祁炳楠, 张利鹏. 差速器在汽车上的多方面应用研究[J]. 机械设计与制造, 2010(3): 94-96.
- QI Bingnan, ZHANG Lipeng. Multi-application of differential in vehicle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(3): 94-96.
- [26] 戴一凡. 分布式电驱动车辆纵横向运动综合控制[D].

北京：清华大学，2013.

DAI Yifan. Integrated longitudinal and lateral motion control of distributed electric vehicles[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

- [27] 那洪东. 轮胎磨损力学研究现状[J]. 世界橡胶工业, 2016, 43(5): 46-51.

NA Hongdong. Research status of tire wear mechanics[J]. World Rubber Industry, 2016, 43(5): 46-51.

- [28] 宗长富, 韩衍东, 何磊, 等. 汽车线控转向变角传动比特性研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9): 115-120.

ZONG Changfu, HAN Yandong, HE Lei, et al. Research on variable angle transmission ratio characteristics for automotive with SBW[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9): 115-120.

作者简介：李浩天，男，1991 年出生，博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学、城市轻轨车辆设计理论及控制。

E-mail: tpl_lht@163.com

池茂儒(通信作者)，男，1973 年出生，博士，研究员，博士研究生导师。主要研究方向为车辆系统动力学、城市轻轨车辆设计理论及控制、空轨列车设计理论。

E-mail: cmr2000@163.com