

文章编号:1671-8879(2015)06-0122-06

基于非线性系统 Lyapunov 理论的车辆转向动力学

宋宏勋,马 建,冯 镇

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了解车辆转向动力学的转向特性,并为车辆转向控制策略的开发提供理论依据,基于非线性系统运动稳定性 Lyapunov 理论,根据车辆非线性转向系统模型,构建车辆转向动力学 Lyapunov 函数,并对车辆转向动力学特性进行分析,得到车辆转向稳定区域,并通过遗传算法求解车辆非线性转向模型的平衡点,对理论结果进行验证。研究结果表明:二者结果一致,说明所建立的车辆转向动力学 Lyapunov 函数可用于车辆转向动力学的理论研究。

关键词:汽车工程;车辆转向动力学;运动稳定性;非线性系统;Lyapunov 函数

中图分类号:U461.1 **文献标志码:**A

Vehicle steering dynamics based on Lyapunov theory of nonlinear system

SONG Hong-xun, MA Jian, FENG Zhen

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To know the features of vehicle steering dynamics and provide theoretical basis for development of vehicle steering control strategy, Lyapunov function of vehicle steering dynamics was built based on the Lyapunov theory of nonlinear motion stability and the model of vehicle steering system. Characteristics of vehicle steering dynamics were studied and the stable area of vehicle steering was gained. To verify the results of the Lyapunov stability, equilibrium point of vehicle nonlinear steering model was solved based on genetic algorithm. The results show that the two results are consistent. Thus, the Lyapunov theoretical method of vehicle steering dynamics can be used to the theoretical research of vehicle steering dynamics. 3 tabs, 6 figs, 18 refs.

Key words: automobile engineering; vehicle steering dynamics; motion stability; nonlinear system; Lyapunov function

0 引 言

车辆转向动力学主要研究车辆转向运行时的运动特性,包括车辆低速小转角、低速大转角、高速小转角及高速大转角等转向特性。传统车辆转向特性

研究的前提是假设车辆转向角较小^[1-3],此时轮胎工作特性可近似为线性变化,但轮胎线性假设不能适用于车辆大转角转向研究^[4-7]。目前在车辆转向动力学研究中,主要采用控制经验来研究车辆转向特性,并没有从理论上对转向机理与特性进行研究。

收稿日期:2015-08-06

基金项目:陕西省科学技术研究发展计划项目(2014K04-01);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310822151023);
中央高校创新团队项目(310822153303)

作者简介:宋宏勋(1958-),男,河南荥阳人,高级工程师,工学硕士,E-mail:songhongx@163.com。

羊盼等建立车辆动力系统线性模型,基于比例控制对车辆转向操稳性进行研究^[8];杜峰等建立车辆线性模型,研究不同控制方法对车辆转向特性的影响,得到最优控制策略,改善了车辆转向操稳性^[9]。在车辆非线性转向动力学研究中,转向模型多使用低自由度简单模型。张伯俊基于车辆单车低自由度模型对车辆横向动力学特性进行研究^[10];杨秀建基于分岔理论的必要条件对车辆转向非线性特性进行研究^[11]。基于此,本文根据非线性动力学运动稳定性 Lyapunov 理论,构建出高维车辆 Lyapunov 函数,对车辆转向动力学进行非线性理论分析,为车辆转向动力学研究提供理论依据,同时为车辆转向控制系统的研发提供一定的理论指导。

1 车辆转向动力学模型

1.1 车辆模型

建立的车辆转向动力学模型如图 1 所示^[12-13]。图 1 中: F_{wxi} 分别为车辆 4 个车轮的纵向力; F_{wyi} 分别为车辆 4 个车轮的侧向力, $i=1,2,3,4$; v_x 为车辆纵向车速; v_y 为车辆侧向车速; v 为车辆速度, $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, $v_y = v_x \tan(\beta) \approx v_x \beta$; l_{jq} 为前轴轴距; l_{jh} 为后轴轴距; l_{jq} 为前轮轮距; l_{jh} 为后轮轴距; O_h 为车辆质心; O_q 为车辆侧倾中心; h 为质心高度; Ψ 为侧倾角; Y 为车辆侧向方向; Z 为车辆垂向方向,根据研究需要,忽略纵向影响因素,得到

$$M_z \dot{v}_x (\gamma + \dot{\beta}) - M_h h \dot{R} = F_{wy1} \cos(\delta_{f1}) + F_{wy2} \cos(\delta_{f2}) + F_{wy3} \cos(\delta_{f3}) + F_{wy4} \cos(\delta_{f4}) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}x_2 + b_{12}x_3 + b_{13}x_4 + b_{14}F_{wy1} + b_{15}F_{wy2} + b_{16}F_{wy3} + b_{17}F_{wy4} \\ b_{21}F_{wy1} + b_{22}F_{wy2} + b_{23}F_{wy3} + b_{24}F_{wy4} \\ x_4 \\ b_{41}x_2 + b_{42}x_3 + b_{43}x_4 + b_{44}F_{wy1} + b_{45}F_{wy2} + b_{46}F_{wy3} + b_{47}F_{wy4} \end{bmatrix}$$

式中: b_{ij} ($i=1,2,3,4; j=1,2,\dots,7$) 为车辆模型的状态方程系数,由车辆结构参数决定。

1.2 轮胎模型

通过轮胎模型推导出轮胎侧向力与侧偏角的变化关系。下页图 2 是车辆轮胎承受不同垂直载荷 F_z 时的侧偏力特性^[14-15]。由图 2 可知,轮胎侧偏角小于 4° 时,轮胎工作特性可近似为线性的;当轮胎转角大于 4° 时,轮胎工作特性不能再视为线性。因此在研究车辆转向动力学特性时,所建立的轮胎模型既要考虑低速小转角转向的近似线性特性,也要考虑大转角转向的非线性特性^[6-7]。

本文选择魔术轮胎模型,即

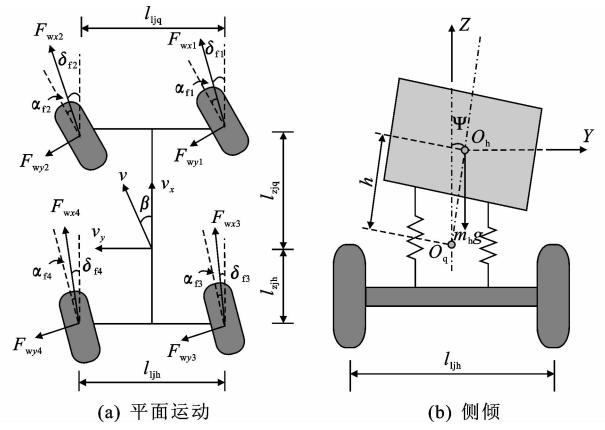


图 1 车辆转向动力学模型

Fig. 1 Dynamics model of vehicle steering model

$$I_z \dot{\gamma} + I_{zxh} \dot{R} = l_{jq} (F_{wy1} \cos(\delta_{f1}) + F_{wy2} \cos(\delta_{f2})) - l_{jh} (F_{wy3} \cos(\delta_{f3}) + F_{wy4} \cos(\delta_{f4})) \quad (2)$$

$$I_{xh} \dot{R} + I_{zxh} \dot{\gamma} - M_h h v_x (\gamma + \dot{\beta}) = M_h g h \psi - K_{cq} \psi - D_{cq} R \quad (3)$$

式中: M_z 为整车质量; M_h 为车辆悬挂质量; I_z 为绕垂向轴转动惯量; β 为车辆质心侧偏角; $\dot{\beta}$ 为质心侧偏角速度; γ 为车辆横摆角; $\dot{\gamma}$ 为横摆角速度; R 为侧倾角速度; \dot{R} 为侧倾角加速度; δ_{fi} 为车轮转角, $i=1,2$ 时表示前轮, $i=3,4$ 时表示后轮; I_{xh} 为绕纵向轴转动惯量; I_{zxh} 为绕纵向轴、垂向轴转动惯量为; K_{cq} 为轮胎侧偏刚度; D_{cq} 为轮胎侧倾阻尼; g 为重力加速度。

取该动力学方程组的状态变量为

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (\beta, \gamma, R, \Psi)^T, \text{ 其中 } R = \dot{\Psi}. \text{ 则式(1) ~ 式(3) 的状态方程可表示为}$$

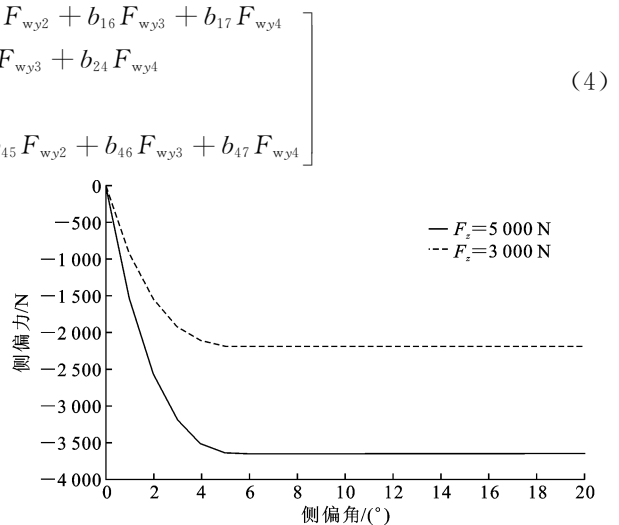


图 2 轮胎侧偏角与侧偏力关系

Fig. 2 Relationship between tire side-slip angle and cornering force

$$F_y = D \sin(\text{Carctan}(B\alpha - E(B\alpha -$$

$$\arctan(B\alpha))) \tag{5}$$

式中: F_y 为轮胎侧偏力; $B、C、D、E$ 为轮胎拟合参数; α 为轮胎侧偏角。

忽略前后轮侧倾引起的侧倾转向角,车轮侧偏角可近似简化为

$$\alpha_{fi}=\beta+\frac{l_{zjq}\gamma}{v_x}-\delta_{fi} \quad i=1,2$$

$$\alpha_{fi}=\beta-\frac{l_{zjh}\gamma}{v_x}-\delta_{fi} \quad i=3,4$$

式中: $\alpha_{fi}(i=1,2,3,4)$ 分别为车辆 4 轮的侧偏角。

2 车辆转向动力学 Lyapunov 函数

目前对于非线性系统运动稳定性的分析方法较为成熟全面的是 Lyapunov 法。Lyapunov 法对非线性系统稳定性的分析方法有 2 种,即 Lyapunov 第 1 法与第 2 法^[16-19]。根据车辆转向动力学模型特点,本文采用 Lyapunov 第 2 法研究车辆转向动力学特性。

Lyapunov 第 2 法借助一个近似能量泛函的标量函数,即 Lyapunov 函数 $V(x)$,构造和分析这个 $V(x)$ 函数符号性质来判断非线性系统运动稳定性。Lyapunov 第 2 法判据如下。

设系统(1) 在 $x_a=0$ 处为系统的平衡点,即 $f(x_a)=0$,若存在辅助标量正定函数 $V(x),V(x)$ 的一阶偏导数存在且连续,其全导数 $\frac{dV}{dt}$ 满足:

(1) 若 $V'(x)$ 为半负定,即 $V'(x) \leq 0$,则称系统在平衡点 $x_a=0$ 处 Lyapunov 意义下稳定;

(2) 若 $V'(x)$ 为负定,即 $V'(x) < 0$,则称系统在平衡点 $x_a=0$ 处 Lyapunov 意义下渐进稳定;

(3) 若 $V'(x)$ 为正定,即 $V'(x) > 0$,则称系统在平衡点 $x=0$ 处 Lyapunov 意义下不稳定。

构建车辆转向动力学 Lyapunov 函数。令

$$B_1(x_1,x_2,x_3,x_4)=$$

$$b_{11}x_2+b_{12}x_3+b_{13}x_4+b_{14}F_{wy1}+b_{15}F_{wy2}+b_{16}F_{wy3}+b_{17}F_{wy4}$$

$$B_2(x_1,x_2,x_3,x_4)=$$

$$b_{21}F_{wy1}+b_{22}F_{wy2}+b_{23}F_{wy3}+b_{24}F_{wy4}$$

$$B_4(x_1,x_2,x_3,x_4)=$$

$$b_{41}x_2+b_{42}x_3+b_{43}x_4+b_{44}F_{wy1}+b_{45}F_{wy2}+b_{46}F_{wy3}+b_{47}F_{wy4}$$

将式(3) 转化为

$$\frac{dx_i}{dx_j}=\frac{f_i(x_1,x_2,\cdots,x_n)}{f_j(x_1,x_2,\cdots,x_n)}, \quad \text{且 } j>i$$

即

$$\frac{dx_1}{dx_2}=\frac{B_1(x_1,x_2,x_3,x_4)}{B_2(x_1,x_2,x_3,x_4)} \tag{6}$$

$$\frac{dx_2}{dx_3}=\frac{B_2(x_1,x_2,x_3,x_4)}{x_4} \tag{7}$$

$$\frac{dx_3}{dx_4}=\frac{x_4}{B_4(x_1,x_2,x_3,x_4)} \tag{8}$$

将式(6) ~ 式(8) 通过变换,转化为

$$B_2(x_1,x_2,x_3,x_4)dx_1+(x_4-B_1(x_1,x_2,x_3,x_4))dx_2+x_4dx_4=0 \tag{9}$$

根据式(9) 构造车辆转向动力学 Lyapunov 函数 $V(x_1,x_2,\cdots,x_n)$

$$V(x_1,x_2,x_3,x_n)=\int_0^{x_1}B_2(x,0,0,0)dx_1+\int_0^{x_2}(x_4-B_1(x_1,x_2,0,0))dx_2-\int_0^{x_3}(B_2(x_1,x_2,x_3,0)+B_4(x_1,x_2,x_3,0)+B_4(x_1,x_2,x_3,0)+B_4(x_1,x_2,x_3,0))dx_3+\int_0^{x_4}x_4dx_4 \tag{10}$$

对式(10) 求全导

$$\frac{dV(x)}{dt}=\frac{\partial V(x)}{\partial x_1}\frac{dx_1}{dt}+\frac{\partial V(x)}{\partial x_2}\cdot\frac{dx_2}{dt}+\frac{\partial V(x)}{\partial x_3}\frac{dx_3}{dt}+\frac{\partial V(x)}{\partial x_4}\frac{dx_4}{dt} \tag{11}$$

由 Lyapunov 稳定性判据,分析车辆转向动力学方程任意一个平衡解的 $V(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 与 $\frac{dV(x)}{dt}$ 的符号特性,判断车辆转向是否在该平衡点领域内稳定,即可得到车辆转向的稳定区域。

3 理论分析验证

3.1 实车转向稳定性分析

车辆参数如表 1 所示。

表 1 车辆参数

Tab. 1 Parameters of vehicle

参数	数值	参数	数值
M_z/kg	1 824	$I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	5 889.3
M_h/kg	1 584	l_{zjq}/m	1.044
h/m	0.475	l_{zjh}/m	1.743
$I_{zx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	21.09	l_{lj}/m	1.535
$I_{zxh}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	744	$K_{eq}/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	90 672
$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8	$D_{eq}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5 677

令车辆转向车速为 20 m/s,后轮转向角为 0。由下页表 2 可知,车辆以 20 m/s 的车速转向时,前轮转角在 0~0.14 rad 内,在此范围内任意取值计算分析可知, $V(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 正定, $\frac{dV(x)}{dt}$ 负定。

由 Lyapunov 判据可知,车辆转向系统在此转角范围内对应的平衡点任意邻域内 Lyapunov 意义下渐进稳定,由此可知车辆以 20 m/s 转向,前轮转角转向稳定范围为 0~0.14 rad。

令车辆转向车速为 10 m/s,后轮转向角为 0。由表 3 可知,车辆以 10 m/s 的车速转向时,前轮转角在 0~0.24 rad 内,在此范围内任取值计算分析可知, $V(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 正定, $\frac{dV(x)}{dt}$ 负定。由 Lyapunov 判据可知,车辆转向系统在此转角范围内对应的平衡点任意邻域内 Lyapunov 意义下渐进稳定,由此可知车辆以 10 m/s 转向,前轮转角转向稳定范围为 0~0.24 rad。

由表 2、表 3 可知,随着车速的增加,车辆转向稳定区域减小,车辆转向稳定性降低。

表 2 车速为 20 m/s 情况下不同前轮转角时 Lyapunov 函数符号变化
Tab. 2 Lyapunov function symbol change with different front wheel angles based on 20 m/s speed

前轮转角/rad	$V(x)$	$\frac{dV(x)}{dt}$
0.01	>0	<0
0.02	>0	<0
0.05	>0	<0
0.07	>0	<0
0.10	>0	<0
0.12	>0	<0
0.14	>0	<0
0.15	<0	>0

表 3 车速为 10 m/s 情况下不同前轮转角时 Lyapunov 函数符号变化
Tab. 3 Lyapunov function symbol change with different front wheel angles based on 10 m/s speed

前轮转角/rad	$V(x)$	$\frac{dV(x)}{dt}$
0.07	>0	<0
0.10	>0	<0
0.15	>0	<0
0.17	>0	<0
0.20	>0	<0
0.21	>0	<0
0.24	>0	<0
0.25	>0	>0

3.2 模型验证

遗传算法适合于求解非线性较强的系统,基于目标函数或称为适应度函数,参照生物的自然遗传机制,一代一代的搜索目标函数^[20]。基于遗传算法求解车辆非线性转向模型的平衡点,车辆分别以 10 m/s

与 20 m/s 的车速转向,结果如图 3~下页图 6 所示。

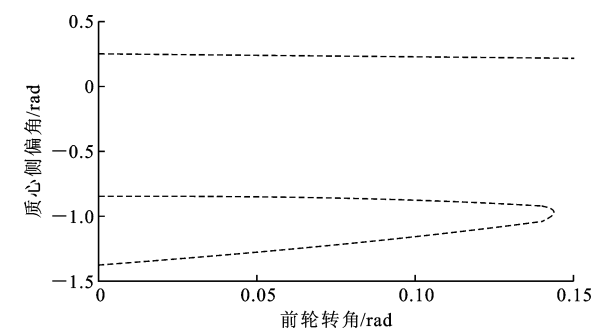


图 3 20 m/s 时前轮转角与质心侧偏角变化曲线
Fig. 3 Change of front wheel angle and vehicle side-slip angle with 20 m/s vehicle speed

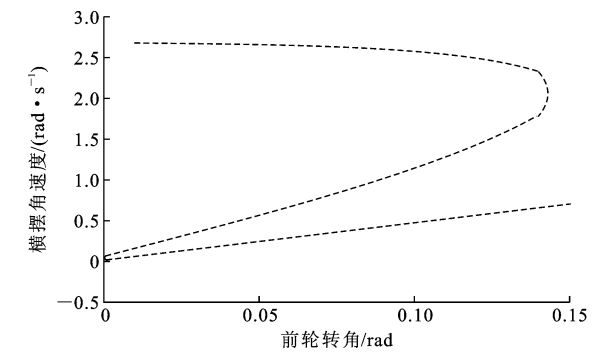


图 4 20 m/s 前轮转角与横摆角速度变化曲线
Fig. 4 Change of front wheel angle and vehicle yaw rate with 20 m/s vehicle speed

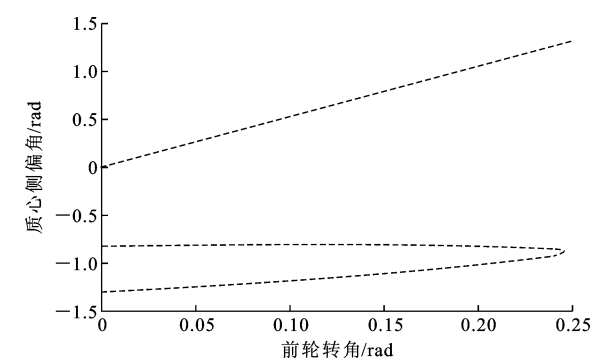


图 5 10 m/s 前轮转角与质心侧偏角变化曲线
Fig. 5 Change of front wheel angle and vehicle side-slip angle with 10 m/s vehicle speed

由图 3、图 4 可知,当前轮转角大于 0.148 rad 时,车辆转向系统稳定平衡点不存在,车辆转向处于不稳定转态,转向稳定性降低。而在前轮转角小于 0.148 rad 时,系统稳定平衡点存在,车辆转向处于稳定状态。该结果与 Lyapunov 稳定结果一致。

由图 5、图 6 可知,当车辆前轮转角大于 0.244 rad 时,车辆转向系统稳定平衡点消失,车辆转向处于不稳定转态;当转角小于 0.244 rad 时,系统稳定平衡点存在,车辆转向处于稳定状态。该结果与 Lyapunov

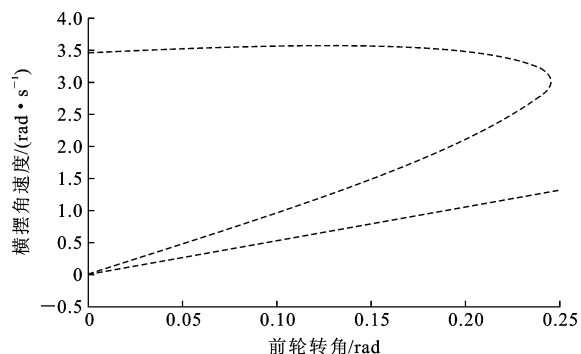


图6 10 m/s 前轮转角与横摆角速度变化曲线

Fig. 6 Change of front wheel angle and vehicle yaw rate with 10 m/s vehicle speed

Lyapunov 稳定结果一致。

4 结 语

(1) 基于非线性动力学运动稳定性 Lyapunov 理论, 结合车辆非线性转向动力系统模型, 构建了车辆转向动力学 Lyapunov 函数。

(2) 基于所建立的车辆转向动力学 Lyapunov 函数, 对样车转向特性进行研究, 得到车辆转向的稳定区域。

(3) 基于遗传算法求解车辆非线性转向模型的平衡点, 验证所得到的车辆转向稳定区域, 二者结果一致, 所构建的车辆转向动力学 Lyapunov 函数可用于车辆转向动力学的理论研究。

(4) 本文研究中并未考虑车辆后轮转向时对转向特性的影响, 因此下一步将对车辆后轮转向动力学特性进行理论研究, 完善车辆转向动力学的相关理论。

参考文献:

References:

- [1] 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2011.
GUO Kong-hui. Vehicle steering dynamics principle [M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 2011.
- [2] John S, Huston J C. Estimating lateral stability region of a nonlinear 2 degree of freedom vehicle[J]. SAE Paper 981172.
- [3] 杜 峰, 魏 朗, 赵建有. 车辆主动转向的变结构控制器设计[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(1): 35-39.
DU Feng, WEI Lang, ZHAO Jian-you. Design of variable structure controller for active steering vehicle [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineer-

ing, 2009, 9(1): 35-39. (in Chinese)

- [4] 李雪原, 张 宇, 苑士华, 等. 基于载荷非均匀分布的轮胎侧偏特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(1): 37-41.
LI Xue-yuan, ZHANG Yu, YUAN Shi-hua, et al. Study of tire lateral characteristics based on non-uniform load [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(1): 37-41. (in Chinese)
- [5] 刘梦岩, 李雪原, 孙大勇, 等. 轮式速差转向车辆轮胎力学特性研究[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(2): 86-92.
LIU Meng-yan, LI Xue-yuan, SUN Da-yong, et al. Study of tire characteristics of skid steering vehicle [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2014, 4(2): 86-92. (in Chinese)
- [6] Maclaurin B. Comparing the steering performances of skid and Ackerman-steered vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(5): 739-756.
- [7] Guo K, Lu D. UniTire: unified tire model for vehicle dynamic simulation[J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2007, 45(S1): 79-99.
- [8] 羊 玢, 陈 宁, 田 杰, 等. 基于比例控制的 4WS 汽车操纵稳定性仿真研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(8): 820-823.
YANG Bin, CHENG Ning, TIAN Jie, et al. Simulation research of 4WS vehicle handling stability based on proportional control[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(8): 820-823. (in Chinese)
- [9] 杜 峰, 闫光辉, 魏 朗, 等. 主动四轮转向汽车最优控制及闭环操纵性仿真[J]. 汽车工程, 2014, 36(7): 848-852.
DU Feng, YAN Guang-hui, WEI Lang, et al. Optimal control and closed-loop controllability simulation for active four-wheel steering vehicle[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(7): 848-852. (in Chinese)
- [10] 张伯俊. 四轮转向汽车横向动力学特性及控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
ZHANG Bo-jun. Study on lateral dynamics characters and control of 4WS vehicle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [11] 杨秀建. 极限工况下汽车转向失稳的非线性动力学特性与主动控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
YANG Xiu-jian. Research on the nonlinear dynamics

- and active control for vehicle cornering destabilization in critical situations[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese)
- [12] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2009. YU Zhi-sheng. Automobile theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)
- [13] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005. YU Fan, LIN Yi. Vehicle system dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
- [14] Lukowski S, Momot M, Krawmer D, et al. Basic linear theory of handling and stability of automobiles[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2009, 223(1): 1-10.
- [15] Abe M. Vehicle dynamics and control for improving handling and active safety: from four-wheel-steering to direct yaw moment control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part K: Journal of Automobile Engineering, 2009, 213(2): 87-101.
- [16] 舒仲周, 张继业, 曹登庆. 运动稳定性[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. SHU Zhong-zhou, ZHANG Ji-ye, CAO Deng-qing. Motion stability[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese)
- [17] Polach O. Comparability of the non-linear and linearized stability assessment during railway vehicle design[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44 (S1): 129-138.
- [18] 张卫华, 李艳, 宋冬利. 高速列车运动稳定性设计方法研究[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 1-9. ZHANG Wei-hua, LI Yan, SONG Dong-li. Design methods for motion stability of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48 (1): 1-9. (in Chinese)
- [19] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000. ZHANG Wen-xiu, LIANG Yi. Mathematical foundation of genetic algorithms[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000. (in Chinese)
- [20] 苏浩秦, 于红艳. 基于遗传算法对燃料电池客车能量分配优化研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(11): 1471-1474. SU Hao-qin, YU Hong-yan. Optimization of energy distribution for fuel-cell bus with genetic algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(11): 1471-1474. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 110 页)
- [12] 秦国民. 西方国家政府绩效评估的新趋势[J]. 中国行政管理, 2008(5): 102-104. QIN Guo-min. The new tendency of government performance assessment in western countries[J]. Chinese Public Administration, 2008(5): 102-104. (in Chinese)
- [13] 高喜真. 公共项目绩效评价体系及绩效实现机制研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. GAO Xi-zhen. Research on public project performance evaluation system and performance realization mechanism[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [14] 交通运输部. 交通预算项目绩效考核实施办法[Z]. 北京: 交通运输部, 2008. Department of Transportation. Implementation method of performance assessment for traffic budget project[Z]. Beijing: Department of Transportation, 2008. (in Chinese)
- [15] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006. XIE Ji-jian, LIU Cheng-ping. Method of fuzzy mathematics and its application[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [16] 杨保安, 张科静. 多目标决策分析理论方法与应用研究[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008. YANG Bao-an, ZHANG Ke-jing. Study on the method and application of theory of multi-objective decision analysis[M]. Shanghai: Donghua University Press, 2008. (in Chinese)