

轮胎侧向力影响因素试验*

郭孔辉 李 宁 庄 晔

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025)

【摘要】 轮胎侧向力与轮胎侧偏角、垂直载荷、车轮外倾角、纵向滑移率、轮速及胎压等因素直接相关,是车辆横向动力学重要的组成部分。通过对轮胎试验数据整理分析,阐述了车轮侧向力与各种影响因素间的关系。随着轮胎侧偏角的增大,车轮侧向力呈现很强的非线性。随着垂直载荷的增大,车轮侧向力不会呈比例增大。由于侧向力与侧偏角及垂直载荷间的非线性关系对车辆行驶性能及悬架调校非常重要,应用计算实例描述了载荷变化的影响。车轮外倾角与侧向力间的关系对悬架外倾角补偿特性非常重要,对此进行了计算说明。

关键词: 车辆 轮胎侧偏特性 影响因素 试验

中图分类号: U463.34 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)12-0001-05

Affecting Factors Experiment in Tire Lateral Force

Guo Konghui Li Ning Zhuang Ye

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

The tire lateral force was influenced by tire side slip angle, vertical force, camber angle, longitudinal slip ratio, wheel speed, tire pressure and so on, and was one important part of vehicle lateral dynamics. Based on the research of tire test data, the relation between tire lateral force and all affecting factors was described in detail. The characteristic diagram of the lateral force versus the tire slip angle showed a degressive shape. An increase of wheel load did not lead to a proportional increase of the transferable lateral force. The degressive dependence of the lateral force upon the slip angle as well as upon the wheel load was very important for the driving behavior and the tuning of suspension, as would be clarified by a numerical example. The relation between tire lateral force and camber angle was very important for suspension camber recovery property, and a numerical example was used to clarify.

Key words Vehicle, Tire side slip property, Affecting factors, Experiment

引言

轮胎侧偏特性直接影响车辆的转弯性能,主要与轮胎侧偏角、轮胎垂直载荷、车轮外倾角、车速和胎压等因素有关。轮胎特性的研究主要依靠试验手段,目前国内没有对外承揽试验的高速轮胎特性试验台,因此国内高速轮胎试验数据比较缺乏,对轮胎特性的研究仅限于少数高等学校中^[1-5]。

本文将已积累的轮胎侧偏试验数据进行整理,致力于完整地呈现轮胎侧向力与轮胎运动状态间的

关系,为研究轮胎力学特性提供便利。本文所有试验数据来源于文献[3]。

1 轮胎力学特性

由于轮胎结构复杂,还没有理论模型能够准确仿真轮胎力学特性,目前主要依靠试验手段来获取。在车辆行进过程中,轮胎力与轮胎垂直载荷、轮胎侧偏角、车轮外倾角、纵向滑移率、轮速、胎压、路面摩擦因数等参数有直接关系,轮胎模型就是用来表达上述关系,如图1所示。由于轮胎模型公式复杂,使

收稿日期: 2011-04-10 修回日期: 2011-05-08

* 国家自然科学基金资助项目(51005094)

作者简介: 郭孔辉,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事汽车动态仿真与控制研究,E-mail: guokonghui@gmail.com

通讯作者: 庄晔,副教授,主要从事汽车动态仿真与控制研究,E-mail: yzhuang_cn@163.com

用不便,本文主要应用差值方法处理轮胎试验数据,直接表现轮胎侧向力变化特性。

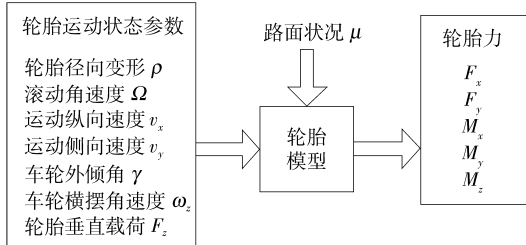


图 1 轮胎模型输入与输出

Fig. 1 Tire model input and output

本节着重研究侧偏角、载荷、外倾角、速度等因素对轮胎侧向力的影响,图 2 是在外倾角为零时不同垂直载荷 F_z 下轮胎侧向力与侧偏角 α 的关系,轮胎侧偏刚度及侧向力峰值都受垂直载荷的影响。

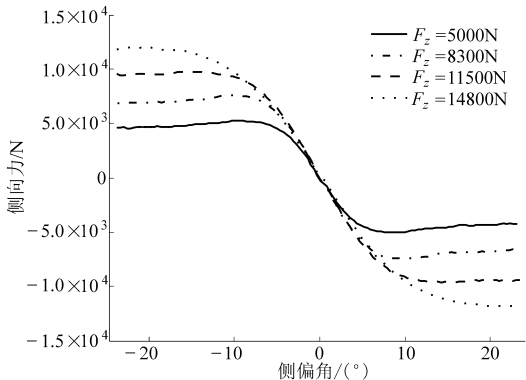


图 2 不同载荷时轮胎侧向力随侧偏角变化曲线

Fig. 2 Tire lateral force vs tire slip angle at different load conditions

将不同车轮外倾角 γ 下的轮胎侧偏数据进行对比分析,能够直接反映轮胎侧偏侧倾特性,如图 3 所示。本文轮胎侧偏、侧倾试验状态如表 1 所示。

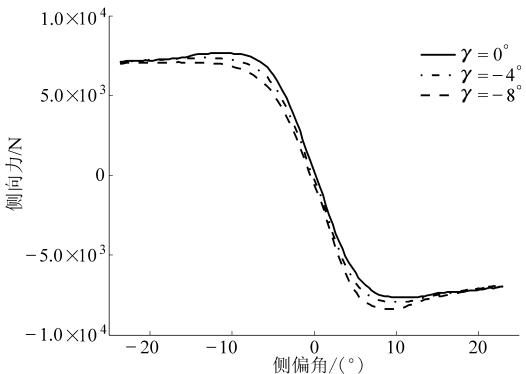


图 3 不同外倾角时轮胎侧向力随侧偏角变化曲线

Fig. 3 Tire lateral force vs tire slip angle with different camber angles

轮胎试验数据中,车轮外倾角的正负受侧偏角方向的影响。对于 SAE 轮胎坐标系,当车辆右转弯时,负外倾角是指车轮上端向车辆外侧倾斜,此时轮胎侧偏角为负,如图 3 曲线左侧所示。对于绝大部

分乘用车辆,当车辆转弯时,车轮会随车身一起侧倾,对于右转弯车辆,随着车轮外倾角负向增大,轮胎侧向力相应减小。

表 1 轮胎试验状态参数
Tab. 1 Parameters of test tire

参数	数值
轮胎型号	P245/65R17
垂直负荷/N	5 000, 8 300, 11 500, 14 800, 18 100
侧偏角/(°)	-25 ~ 25
外倾角/(°)	0, ±2, ±4, ±6, ±8
纵向滑移率/%	0
胎压/kPa	228, 262
速度/km·h ⁻¹	40

为了研究车速的影响,将不同速度 v 下的侧向力随侧偏角变化曲线进行比较,如图 4 所示,车轮行驶速度对侧偏刚度影响并不明显,但是对侧向力峰值影响很大。在大侧偏角情况下,低速时轮胎侧向力达到饱和后没有降低的趋势,高速时轮胎侧向力峰值有明显的降低,而且随着侧偏角的增加侧向力有降低趋势。图 4 中轮胎型号为 Goodyear Wrangler ST 245/75R16,胎压为 240 kPa,轮胎载荷为 6 000 N,参数与表 1 不同。

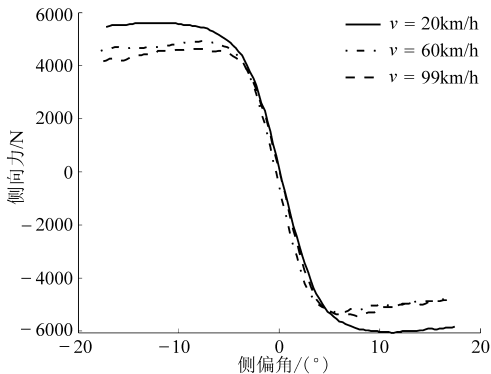


图 4 不同车速时轮胎侧向力随侧偏角变化曲线

Fig. 4 Tire lateral force vs tire slip angle at different vehicle speeds

为了研究胎压 p 的影响,将不同胎压下的侧向力变化曲线进行比较,如图 5 所示,轮胎试验状态参数如表 1 所示。轮胎载荷较小时,胎压对轮胎侧向力特性影响不明显,对于较大的车轮垂直载荷,胎压影响显著。在负侧偏角时,胎压大则侧向力受外倾角影响较大,如图 5 曲线左侧所示。正侧偏角时,胎压小则侧向力受外倾角 γ 影响较大,如图 5 曲线右侧所示。

将 3 家轮胎生产企业同一型号的轮胎进行测试,比较结果如图 6 所示(车轮外倾角为 -4°)。A、B 两家企业轮胎特性比较接近,另一家相差较大。

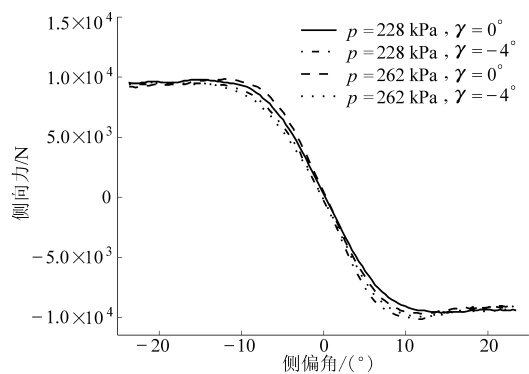


图 5 不同胎压时轮胎侧向力随侧偏角变化曲线

Fig. 5 Tire lateral force vs tire slip angle at different tire pressures

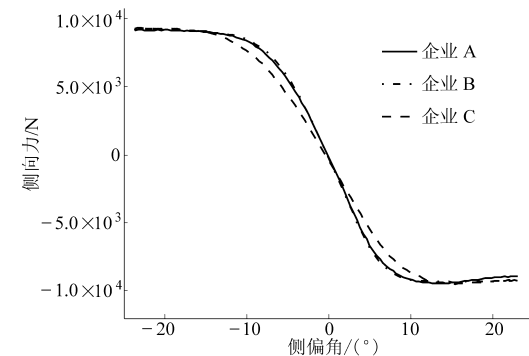


图 6 不同厂家轮胎侧向力随侧偏角变化曲线

Fig. 6 Tire lateral force vs tire slip angle with different tire manufactures

由于轮胎特性需要与整车特性相匹配，因此单纯地比较分析不同轮胎特性很难得出有意义的结果。由于不同厂家的轮胎特性存在差异，因此需要获取轮胎测试数据，计算分析轮胎特性对汽车动力学特性的影响。

轮胎纵向力对轮胎侧向力特性也有较大影响。将同一载荷不同侧偏角和外倾角时的侧向力测试数据进行比较，能够分析轮胎侧偏纵滑特性，如图 7 所示。纵向滑移率范围是 $-50\% \sim 50\%$ ，车轮垂直载荷为 $8\,300\text{ N}$ 。在小侧偏角时，纵向力对侧向力影响较小，但车轮外倾角作用明显，只有当纵向力将要达到饱和时，侧向力才会降低；对于大的轮胎侧偏角，随着纵向力的增加，轮胎侧向力有明显降低，同时车轮外倾角作用明显。

2 车轮外倾角补偿特性

悬架是汽车重要的组成部分，决定着轮胎的运动状态，两者具有密不可分的关系，下面具体分析汽车悬架对车轮外倾角的补偿作用。

汽车悬架 K&C 特性主要表达车轮定位参数的变化特性、悬架与轮胎的刚度特性以及主销轴线的空间位置。悬架是连接车身与车轮的中介，汽车的

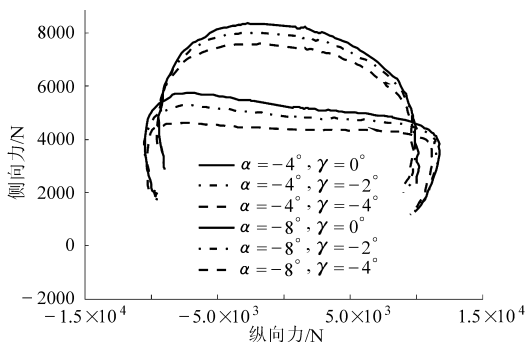


图 7 轮胎侧向力随纵向力变化曲线

Fig. 7 Tire longitudinal force vs tire lateral force

悬架 K&C 特性直接影响轮胎的运动状态，而轮胎的运动状态最终决定轮胎受力，最终影响整车运动状态，因此研究悬架 K&C 特性具有重要应用价值。

目前国内主要汽车生产企业都能测量悬架 K&C 特性。在汽车悬架开发过程中，车轮外倾角补偿特性是一项重要的设计内容，是评价悬架好坏的重要指标，本文分析几种主要悬架类型的外倾角变化特性。

不同悬架形式的外倾角补偿特性不完全一样，图 8 所示为 3 种不同类型悬架的车轮外倾角补偿特性，其中麦弗逊悬架外倾角补偿特性最差。在悬架 K&C 特性中，正的车轮外倾角是指车轮上端向车外倾斜，当车辆转向时，如果外侧车轮相对车身上跳时车轮外倾角相对车身负向增大，那么将产生外倾补偿效果。

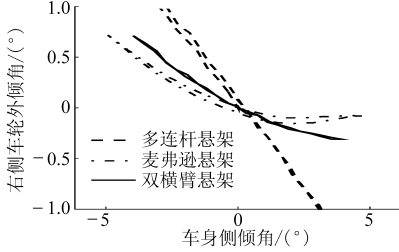


图 8 车轮外倾角补偿特性曲线

Fig. 8 Camber recovery property

3 轮胎与悬架的相互作用

目前，很多追求操稳性能的车辆后轮普遍采用负的初始外倾角，就是为了减小外倾角变化引起的侧向力损失，下面将具体讨论车轮外倾角变化及载荷转移对车轮侧向力的影响。

车辆转弯性能主要与车轮载荷转移以及车轮外倾角变化有关，虽然制动力对侧向力影响较大，但是出现的情况极少，本文不作讨论。本节依然采用轮胎坐标系来定义轮胎侧向力方向，当车辆右转弯时，轮胎侧偏角为负，受车身侧倾的影响，车轮外倾角负向增大将导致轮胎侧向力降低。

应用插值方法或轮胎模型可以得到某个侧偏角

下轮胎侧向力与垂直载荷的关系,改变外倾角可以得到一族曲线,如图 9 所示(侧偏角为 -6.00°)。试验轮胎名义载荷 F_{zn} 为 11 500 N,试验过程中载荷设定为 F_{zn} 的 43%、71%、100%、129%、157%。从图中可以看出,载荷较小时,外倾角对侧向力的影响较小;随着载荷的增大,外倾角影响加大。对于单条试验曲线来讲,侧向力随载荷先增加后减小,表现出很强的非线性,这就是车辆转弯时载荷转移会引起侧向力损失的根本原因。

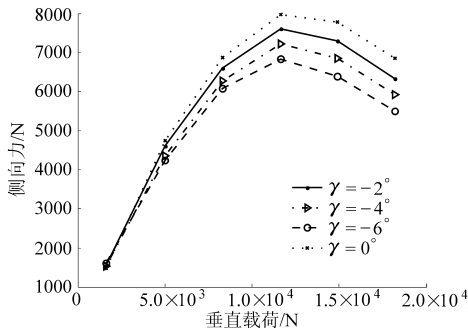


图 9 轮胎侧向力与垂直载荷的关系曲线

Fig. 9 Tire lateral force vs vertical force

对于底盘调校来讲,由于可调整的轮胎参数有限(例如胎压、型号等),而且还会影响其他方面的性能,通常情况下都是通过调整悬架 K&C 特性来改善车辆性能,而不轻易更换轮胎,因此如何控制轮胎的运动状态,发挥轮胎最大效能是悬架设计的关键。目前,改善悬架性能的途径主要有:协调 4 个车轮的载荷分布、控制车轮外倾角和控制车轮纵向力等。

车辆转弯时质心位置变化较小,当质心侧向加速度恒定时,前、后轴车轮侧向力分布变化不大,研究在侧向力不变时车轮侧偏角与载荷转移、外倾角等因素之间的关系对悬架设计非常有意义。在图 9 中能够得到某个侧偏角下不同载荷转移及不同外倾角时的轮胎侧向力,进而得到不同载荷转移状态下侧偏角与侧向力的关系曲线,如图 10 所示。

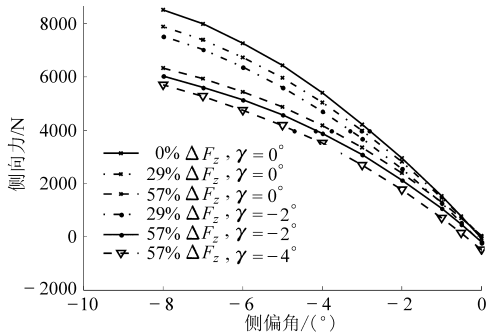


图 10 轮胎侧向力与载荷转移及外倾角的关系

Fig. 10 Tire lateral force vs lateral load transfer and camber angle

均为 F_{zn} ,载荷转移为 0%、29%、57%,对应的车轮外倾角分别为 0° 、 -2° 、 -4° ,从图 10 可以得到侧向力为 4 000 N 时侧偏角随载荷转移及外倾角的变化情况:

(1) 车轮外倾角为 0° 时, -2.82° 侧偏角产生侧向力为 4 000 N。

(2) 左右车轮载荷转移为 29% 时, -3.00° 侧偏角对应的左右轮平均侧向力为 4 000 N;车轮外倾角由 0° 增加到 -2° 时,平均侧向力保持不变,侧偏角增加到 -3.30° 。

(3) 载荷转移为 57% 时, -3.77° 侧偏角对应 4 000 N 侧向力;车轮外倾角由 0° 增加到 -2° 时,平均侧向力保持不变,侧偏角增加到 -4.16° , -4° 外倾角对应 -4.71° 侧偏角。

(4) 相对载荷转移及外倾角均为 0° 时的轮胎侧偏特性,57% 的载荷转移增大侧偏角 0.95° , 4° 外倾角增大侧偏角 0.94° ,可见 2 种因素对轮胎侧偏特性都很重要。

图 10 下方 3 条曲线形状一样,但是相互之间存在不同的间距,这主要是因为车轮外倾角不同造成的。将图 10 中的曲线沿 Y 轴平移过原点得到图 11 所示曲线。从图 11 可以看出,当侧偏角在 -8.00° 以内时,相同载荷转移但外倾角不同的曲线基本重合,最大水平偏移小于 0.10° ,说明在一定的侧偏角范围内载荷转移与外倾角作用互不影响,因此可以采用线性相加的方法近似计算两者的共同作用,此时仅需要轮胎纯侧偏(图 2)及轮胎纯侧倾试验数据(图 12)即可,可以极大地减少试验及分析工作。

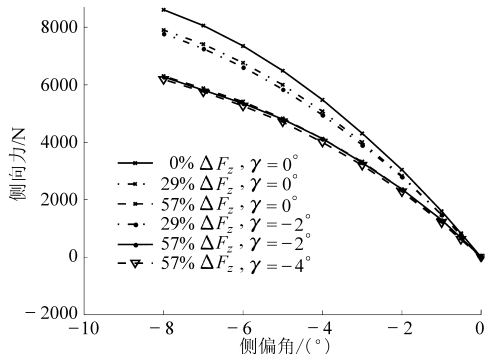


图 11 轮胎侧向力与载荷转移的关系

Fig. 11 Tire lateral force vs lateral load transfer

悬架 K&C 特性一方面通过影响车轮转向角来影响车辆行驶状态,另一方面通过影响车轮外倾角及载荷转移改变轮胎侧偏角,进而影响车辆行驶状态,因此轮胎力学特性与悬架 K&C 特性是密不可分的。图 13 详细表达了悬架 K&C 特性及轮胎特性与车辆不足转向特性之间的关系。

假设车辆在转弯过程中前轴两侧车轮初始载荷

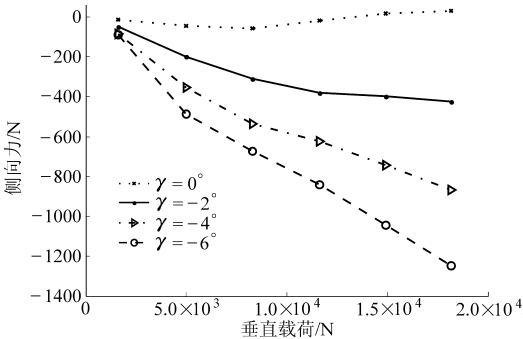


图 12 轮胎侧向力与外倾角的关系

Fig. 12 Tire lateral force vs camber angle

4 结束语

对已有的轮胎试验数据进行了整理,详细论述了各种影响因素与轮胎侧向力之间的关系。随着轮胎侧偏角的增大,车轮侧向力呈现很强的非线性。随着垂直载荷的增大,车轮侧向力不会呈比例增大。车轮载荷转移及外倾角补偿特性是影响车辆操纵稳定的重要因素,着重研究了载荷转移及外倾角变化与轮胎侧向力间的关系,结果显

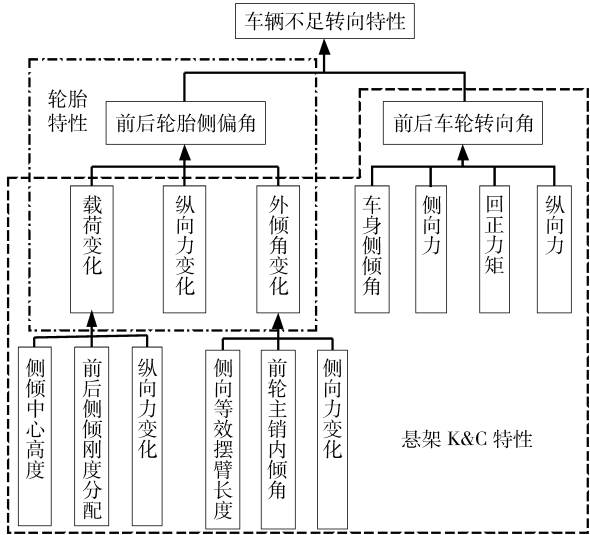


图 13 不足转向特性的影响因素

Fig. 13 Affecting factors of vehicle understeer character

示在一定范围内载荷转移及外倾角的影响可以分别计算,然后线性迭加,简化了试验及分析工作。最后给出了悬架及轮胎与车辆不足转向性能之间的关系。

参 考 文 献

1 魏道高,洪添胜,蒋国平,等. 汽车轮胎侧偏特性研究综述[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2002,23(3):54~59.
Wei Daogao,Hong Tiansheng, Jiang Guoping, et al. A review of cornering properties of pneumatic tire[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2002, 23(3): 54~59. (in Chinese)

2 管迪华,党兆龙. 轮胎垂直特性预测精度对侧偏特性的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(11):1 518~1 521.
Guan Dihua, Dang Zhaolong. Influence of tire vertical property prediction accuracies on cornering models[J]. Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech., 2005,45(11):1 518~1 521. (in Chinese)

3 袁忠诚. UniTire 轮胎稳态模型研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
Yuan Zhongcheng. Study of UniTire steady state tire model[D]. Changchun:Jilin University,2006. (in Chinese)

4 Guo K H, Lu D. UniTire: unified tire model for vehicle dynamic simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(Supp.): 79~99.

5 郭孔辉,袁忠诚,卢荡. UniTire 轮胎稳态模型的联合工况预测能力研究[J]. 汽车工程,2006, 28(6):565~568.
Guo Konghui, Yuan Zhongcheng, Lu Dang. A study on the prediction capability of UniTire model for combined slips mode[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(6):565~568. (in Chinese)

(上接第 17 页)

3 陈无畏,徐娟,胡芳,等. 整车非线性系统的输入输出解耦及解耦比例微分控制[J]. 机械工程学报,2007,43(2):64~70.
Chen Wuwei, Xu Juan, Hu Fang, et al. I/O decoupling and decoupling proportion and differential control of nonlinear full car system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 64~70. (in Chinese)

4 朱冰,李幼德,赵健,等. 基于多变量频域控制方法的车辆底盘集成控制[J]. 农业机械学报,2010,41(1):14~17.
Zhu Bing, Li Youde, Zhao Jian, et al. Integrated chassis control based on multivariable frequency domain control methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 14~17. (in Chinese)

5 Kazuya Kitajima, Huei peng. H_{∞} control for integrated side-slip, roll and yaw controls for ground vehicles[C]//Proceedings of AVEC 2000, 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Michigan, 2000: 22~24.

6 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

7 Zhang Jinzhu, Zhang Hongtian. Vehicle stability control based on adaptive PID control with single neuron network[C]//2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), Wuhan, 2010,1: 434~437.