

文章编号: 1002-0268 (2007) 11 0154-05

基于电子地图信息的车辆主动转向仿真

郑四发, 李西朝, 李克强, 连小珉

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 以驾驶员预瞄点处的横向偏移最小为目标, 以道路曲率输入的车辆运动模型为基础, 分析了车辆进行主动转向所需要的道路环境信息, 并研究了利用电子地图及车辆定位传感器得到这些信息的方法。利用设计的转向控制器进行了恒定道路曲率及基于电子地图数据的实际道路信息输入下的主动转向仿真。仿真结果表明, 利用电子地图提供的信息能够在投入较低成本的条件下进行主动转向, 使车辆在道路曲率变化的情况下沿预定道路行驶并有着较小的侧向加速度; 从而提高车辆在弯曲道路行驶的安全性、舒适性。

关键词: 汽车工程; 主动转向; 道路信息; 电子地图; 智能车辆

中图分类号: U463

文献标识码: A

Simulation of Vehicle Active Steering Based on Digital Map Information

ZHENG Si fa, LI Xi zhao, LI Ke qiang, LIAN Xiao min

(Tsinghua University, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on vehicle kinematics model including road curvature input with the aim of minimizing lateral deviation, the road information required for active steering was analyzed. A method to obtain the road and vehicle pose information using digital map and vehicle positioning sensors was proposed. The active steering simulation with designed steering controller under idealized constant road curvature and digital map data-based input was studied. The result shows that, active steering could be realized with low cost on the basis of road information input from digital map and positioning sensors, vehicle could run along the target line with a continuously changing curvature and result in a low lateral acceleration to improve the driving comfort, handling and safety while the vehicle running on curved road.

Key words: automobile engineering; active steering; road information; digital map; intelligent vehicle

0 引言

汽车行驶安全性和舒适性是现代汽车发展关注的焦点。在交通需求快速增长的情况下, 现代城市中道路网不断延伸, 路网结构也越来越复杂。例如城市中的立交桥数目、层数逐渐增多, 围绕立交桥的各种转弯路径也越来越复杂。如何快速、安全地通过这些弯曲路段成为驾驶的挑战之一。

主动转向为解决这一问题提供了一种途径。它通过在车上安装的传感器感知道路曲率及车辆相对于期望位置的偏差, 利用执行器控制转向系实施转向, 从而达到转向目的^[1~7]。目前车辆预期行驶轨迹信息的

获取方式有采用机器视觉和磁性道钉识别等方式^[1~5]。磁性道钉方式的优点是: 能够提供很高的精度, 同时不受天气、光线以及地面环境等因素的影响, 具有较高的可靠性。但其也有很大的局限性: 1) 通过磁性道钉只能获取车辆附近的道路信息, 车辆前进方向上一定距离的信息量较少; 2) 在道路上大规模铺设磁性道钉, 耗资巨大。而机器视觉通过安装在车辆上的摄像机获取车辆前方的道路及其他障碍物信息, 道路上也无需增加其他设施。但机器视觉也还存在着一些问题, 如易受到天气、光线以及其他环境条件的影响; 在高速情况下, 摄像机会存在高频振动, 影响图像质量和道路识别; 在数据处理方面, 数据冗

收稿日期: 2006-07-10

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目 (2002BA404A21)

作者简介: 郑四发 (1970-), 男, 湖北孝感人, 工学博士, 副教授, 研究方向为车辆动力学及控制, 车辆运输系统。(zsf@tsinghua.edu.cn)

余量大, 运算量大, 处理复杂等。

与以上两种方式不同, 通过车上安装的电子地图及车辆定位设备也可获得车辆在道路上位置及前进方向上的道路信息。本文研究在单条转向车道的情况下, 从电子地图提取车辆转向道路信息的方法; 并以考虑道路曲率的车辆横向控制模型为基础, 进行主动转向仿真。仿真结果表明: 在弯道行驶时, 利用电子地图提供的道路信息进行主动转向能提高车辆转向的安全性、舒适性。

1 车辆主动转向系统结构

图 1 为车辆主动转向系统结构图。利用从车载位置等传感器及电子地图获取的车辆在道路上的位置及道路曲率等信息, 利用设计的控制器进行车辆转向。使得在转向控制器转向输入的作用下, 车辆在预定的道路上安全行驶。

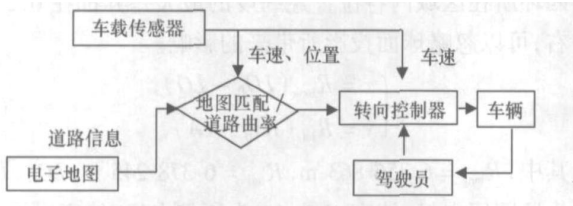


图 1 车辆主动转向系统结构图

Fig 1 Schematic diagram of active steering system

2 主动转向对道路环境信息的要求

2.1 车辆转向运动模型

考虑如下的两自由度车辆模型

$$\begin{cases} I\ddot{\phi} = 2l_f C_f \left(\dot{\delta} - \beta - \frac{l_f \dot{\phi}}{V} \right) - 2l_r C_r \left(\frac{l_r \dot{\phi}}{V} - \beta \right), \\ m\ddot{y}_c = mV(\beta + \phi) = 2C_f \left(\dot{\delta} - \beta - \frac{l_f}{V} \right) + 2C_r \left(\frac{l_r \dot{\phi}}{V} - \beta \right), \end{cases} \quad (1)$$

其中, l_f 、 l_r 为前、后两轮距质心的距离; ϕ 、 γ 为横摆角速度; I 为车辆横摆转动惯量; c_f 、 c_r 为前、后两轮的侧偏刚度; δ 为前轮转角; β 为车辆质心处的侧偏角; v 为车辆质心速度矢量; m 为车辆质量; y_c 为质心处的横向位移。

设车辆沿如图 2 所示的弯曲道路行驶, ρ 为车辆行驶处的道路曲率。车辆在转向行驶过程中, 设 y_{cr} 为当前相对与目标轨迹的横向位置偏差, ϕ_r 为当前相对与目标轨迹的横摆角度偏差, 则:

$$\begin{cases} \ddot{y}_c = \ddot{y}_{cr} + V^2 \rho, \\ \phi_r = \phi + l\rho, \end{cases} \quad (2)$$

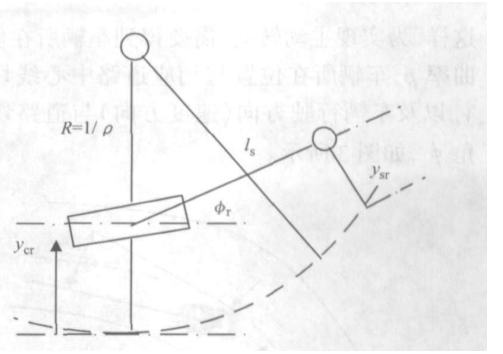


图 2 车辆沿弯曲道路行驶的偏移量

Fig 2 Deviation parameters for vehicle running on curved road

另外由:

$$l\beta = (\dot{y}_c - V\phi) = (\dot{y}_{cr} - V\phi_r), \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{V} \dot{y}_{cr} - \phi_r, \quad (4)$$

则整理得到如下状态空间方程:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (5)$$

$$X = [\phi \quad \phi_r \quad y_{cr} \quad y_{sr}]^T \quad U = [\delta \quad \rho]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$a_{11} = -\frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{IV}, a_{12} = \frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{I},$$

$$a_{13} = -\frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{IV}, a_{31} = \frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{mV},$$

$$a_{32} = \frac{2(C_f + C_r)}{m}, a_{33} = -\frac{2(C_f + C_r)}{mV} = -\frac{a_{32}}{V},$$

$$b_{11} = 2l_f C_f / I, b_{22} = -V, b_{31} = 2C_f / m, b_{32} = -V^2.$$

2.2 主动转向的环境信息要求

如图 2 所示, 实际行驶中驾驶员关心的是前方距离 l_s 处预瞄点位置车辆相对于目标路线的位置偏差 y_{sr} 。假设道路的曲率半径足够大 ($\rho = 1/R$), 则预瞄点处的车辆横向位置偏差:

$$\begin{aligned} y_{sr}(y_{cr} = \phi_r = 0) &= -R + \sqrt{R^2 - l_s^2} = \\ &= \frac{1}{\rho} (-1 + \sqrt{1 - \rho^2 l_s^2}). \end{aligned} \quad (6)$$

下面对前方预瞄点处由于道路曲率造成的位置偏差进行线性化近似, 以得到较简单易于实现的控制系统。当车辆偏离前方目标路线不远时, 上述假设对控制效果影响很小。再考虑 y_{cr} 和 ϕ_r 的作用, 车辆在预瞄点处的横向位置偏差近似表示为:

$$y_{sr} = y_{cr} + l_s \phi_r - \frac{l_s^2}{2} \rho, \quad (7)$$

这样,为实现主动转向,需要得到车辆所在位置的道路曲率 ρ , 车辆所在位置与相应道路中心线切线的距离 y_{cr} 以及车辆行驶方向(速度方向)与道路切线方向夹角 ϕ_r , 如图3所示。

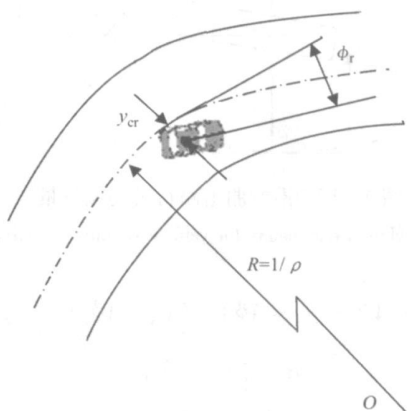


图3 需要利用电子地图获得的信息

Fig 3 Information acquired by using digital map

3 道路及车辆运动信息的获取

3.1 车辆在道路位置获取

采用车载相位差分GPS、陀螺设备获取车辆位置(厘米量级)、状态信息,以及10 Hz以上的刷新频率^[2,6,8]。并采用基于道路连通性的自适应地图匹配方法^[9]获取车辆在道路位置信息,以及车辆运动速度(高于0.1 m/s精度)、方位信息。

3.2 从电子地图获得所需的道路信息

目前已有的产品化电子地图(比例尺1:2 000)经全面的精密核对,实现在城区内定位精度达2 m左右的高精确目标定位显示。对于一些局部区域的电子地图通过对矢量化的地图中的控制点和个别重要地物进行点位精度测定,可以得到分米量级的精度,能够满足主动转向控制的基本需要。

直接从电子地图上导出底层数据,得到的是道路上各节点经纬度信息。这些道路节点一般是无序排列的。用这样的无序的离散点群是无法得到每一个点的曲率值的,首先需要对这些离散点按车辆行驶的方向进行排序,采用的算法逻辑如下:

设点集 $A_n = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $a_i = \{x, y\}$, x 为纬度, y 为经度。

令 $T[n]$ 为一个对 A_n 中元素的纬度的升序排列,则显然 $T[1]$ 是纬度最小的点的纬度值。类似, $S[n]$ 为一个对 A_n 中经度的原始升序排列,并设 $i=1$ 。

(1)在 A_n 中找出所有纬度等于 $S[i]$ 的点。如果

只有一点,那么将该点加入待连线队列;如果有多点,则按经度升序,依次连接这些点,并将起点和终点加入待连线队列;

(2) $i=i+1$;

(3)在 A_n 中找出所有纬度等于 $S[i]$ 的点,记为 $v_1, v_2, \dots, v_m$, 将这些点按经度升序排列,并从中间点值截断。所谓中间点值,是指经度大于待连线点平均经度的点的经度值。截断的左侧,设为 $v_1, v_2, \dots, v_j$, ($j \leq m$), 将这些点从 v_1 依次连线至 v 待连线点的左点;截断的右侧,设为 $v_{(j+1)}, \dots, v_m$, 将这些点从待连线点的右点依次连线至 v_m ;

(4)将待连线变为 v_1 和 v_m , 如果 i 不等于 n , 则返回(2)继续执行;否则直接连线 v_1 和 v_m 。完成。

再将所有点的经纬度值进行投影变换,便得到平面内的各个点到相对原点横、纵坐标距离。如在北京四环所在区域内各位置经纬度的最大差异都在 0.2° 左右,可以忽略球面投影所带来的影响。

$$\begin{cases} x = R_{\text{long}}(LO_0 - LO), \\ y = R_{\text{lat}}(LA_0 - LA), \end{cases} \quad (8)$$

其中, $R_{\text{long}} = 6\,356\,863\text{ m}$, $R_{\text{lat}} = 6\,378\,245\text{ m}$; LO_0, LA_0 为地图原点经、纬度; LO, LA 为所求点经、纬度。

对经过上述处理的有序的坐标数据,用相邻的3个点确定3点所在圆的半径,该值定为中间点的曲率半径 R 。依次用3点球心方程算出道路各离散点的曲率半径。道路上各点的切线方向为采用上述方法所确定圆的切线方向。各数据点之间的曲率半径值和切线方向则通过3次样条插值得出。

道路切线方向与上述利用传感器融合给出的车辆运动方向的夹角就是 ϕ_r 。

4 主动转向仿真

4.1 转向控制器设计

为研究转向可行性,设计了PID控制器进行转向仿真,如图4所示。将预瞄点处车辆质心 O 与目标轨迹之间产生横向偏差经过PID调节器至转向轮转角输入,以实现对车辆的转向控制,即:

$$-\frac{\delta(s)}{y_{sr}(s)} = \frac{T_i K_d s^2 + T_i K_p s + 1}{T_i s} = G(s). \quad (9)$$

4.2 系统仿真参数及结果

以下仿真中车辆模型参数取值如下: $m = 1\,562\text{ kg}$; $I = 2\,630\text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $l_f = 1.104\text{ m}$; $l_r = 1.421\text{ m}$; $C_f = 37\,407\text{ N/rad}$; $C_r = 51\,918\text{ N/rad}$ 。

通过分别研究参数 T_i, K_p, K_d 对系统的影响,选

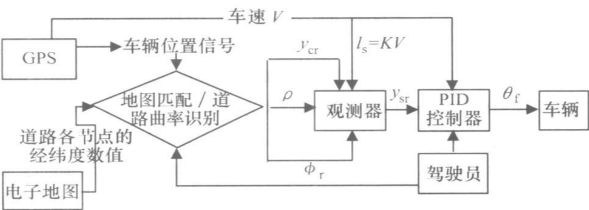


图 4 转向仿真结构图

Fig 4 Structure of active steering simulation
定PID 参数为: $T_i=3, K_p=0.5, K_d=0$ 。

预瞄距离 l_s 的选择对于系统的稳定性及控制效果有一定的影响。在使 l_s 不过大的前提下, 初步按下式选取:

$$l_s = k \cdot V, \tag{10}$$

其中, k 为常数, 仿真中均取 $k=0.5$ 。

(1)恒道路曲率输入下的仿真

设定车辆在车速为 $V=36\text{ km/h}$ 情况下, 由直线进入曲率半径 $R=50\text{ m}$ 的弯道。车辆进入弯道时与弯道中心线横向偏差为 0, 在转向行驶过程中保持车速不变。

从图 5 所示的仿真结果看出, 在转向过程中位置偏差 y_{cr} 小于 0.25 m , 角度偏差 ϕ_r 小于 0.08 rad , 而且在经过 0.5 s 后就能达到稳定。车辆侧向加速度 $\ddot{y}_c$ 在阶跃到来的时刻由于突然的前轮转角会产生较大的变化, 但是其峰值在 7 m/s^2 以内。由于实际道路中不会有绝对的曲率突变, 因此实际加速度要小得多。

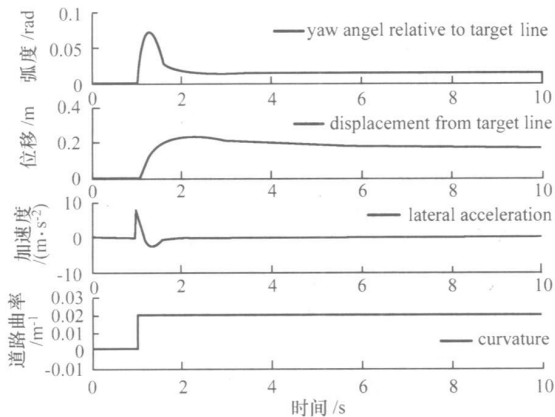


图 5 车辆进入弯道转向的仿真结果

Fig 5 Simulation result under constant road curvature
因此, 从模型阶跃响应可以看出: 采用 PID 控制器, 车辆能够在道路曲率变化的情况下较好地保持车道。

(2)实际道路曲率输入下的仿真

下面以对应市区道路的电子地图数据为基础, 进

行主动转向仿真。图 6 为电子地图上描述的车辆行驶路线示意图, 车速恒定为 36 km/h , 仿真结果如图 7 所示。

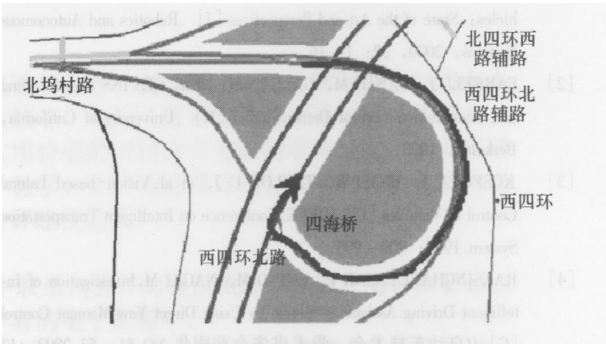


图 6 车辆上桥行驶的弯道路段

Fig 6 A section of a curved highway on a bridge

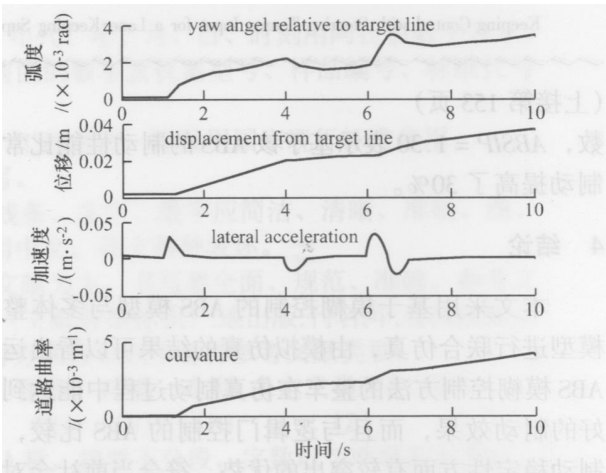


图 7 实际道路曲率下转向的仿真结果

Fig 7 Steering simulation result under real road curvature

可以看到, 由于实际的道路都有较大的曲率半径并且曲率半径不是突变的, 主动转向过程中横向位置偏差小于 0.04 m , 侧向加速度小于 0.04 m/s^2 , 具有很好的舒适性。

5 结论

本文分析了如何利用电子地图获取主动转向所需要的道路信息, 以考虑道路曲率的车辆转向模型为基础, 对车辆主动转向进行了初步的仿真。仿真结果说明: 利用电子地图提供的道路信息进行车辆主动转向, 可以使车辆在道路曲率变化的情况下沿预定道路行驶; 并有着较小的侧向加速度, 从而可以辅助驾驶员转向, 提高驾驶的舒适性、安全性。随着电子地图技术的发展和地图精度的进一步提高可以参与运用到车辆的智能控制中。

参考文献:

- [1] BERTOZZI M, BROGGI A, FASCIOLI A. Vision-Based Intelligent Vehicles: State of the Art and Perspectives [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 32: 1—16.
- [2] FARRELL J, BARTH M, GALIJAN R, *et al.* GPS/INS Based Lateral and Longitudinal Control Demonstration [R]. University of California, Berkeley, 1998.
- [3] KOSECKA J, BLASI R, TAYLOR C J, *et al.* Vision-based Lateral Control of Vehicles [C] //IEEE Conference on Intelligent Transportation System, 1997: 900—905.
- [4] RAKSINCHAROENSAK P, SHINO M, NAGAI M. Investigation of Intelligent Driving Assistance System by Using Direct Yaw Moment Control [C] //自动车技术会. 学术讲演会前刷集 NO. 51—53, 2003: 13—18.
- [5] SHIMAKAGE M, KAWAZOE H, SADANO O, *et al.* Design of Lane-Keeping Control with Steering Torque Input for a Lane-Keeping Support System [C] //Steering and Suspension Technology Symposium 2001 (SP—1597).
- [6] YANG Y CH, FARRELL J A. Magnetometer and Differential Carrier Phase GPS-Aided INS for Advanced Vehicle Control [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19 (2): 269—282.
- [7] NUSSER S M, FOX J E. Using Digital Maps and GPS for Planning and Navigation in Field Surveys [EB/OL]. <http://www.stat.iastate.edu/preprint/articles/2002-09.pdf>
- [8] FARRELL J A, GIVARGIS T D, BARTH M J. Real-time Differential Carrier Phase GPS-Aided INS [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8 (4): 709—721.
- [9] 王荣本, 张荣辉, 储江伟, 等. 新型视觉区域智能车辆导航控制器设计 [J]. *公路交通科技*, 2006, 23 (10): 103—107.
- [10] 丁捷. 车载GPS自主导航方法的研究 [D]. 北京, 清华大学汽车工程系, 2003.
- [11] 隋东, 任刚, 邵进达. 基于GIS的城市交通网络数据模型研究 [J]. *公路交通科技*, 2006, 23 (9): 94—97.

(上接第153页)

数, $ABSIP=1.30$ 表示基于该ABS的制动性能比常规制动提高了30%。

4 结论

本文采用基于模糊控制的ABS模型与多体整车模型进行联合仿真, 由模拟仿真的结果可以看出运用ABS模糊控制方法的整车在仿真制动过程中能达到较好的制动效果, 而且与逻辑门控制的ABS比较, 在制动稳定性方面有较突出的优势, 符合当前社会对防抱死制动系统的需要。

参考文献:

- [1] 齐志权, 刘昭度, 时开斌, 等. 基于汽车ABS/ASR/ACC集成化系统的ABS参考车速确定方法的研究 [J]. *汽车工程*, 2003, 25 (6): 617—620.
- [2] SUN Jun. Development of Fuzzy Logic Anti-Lock Braking System for Light Bus [C] //SAE. 2003—01—0458.
- [3] 程军. 汽车防抱死制动系统的理论与实践 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [4] HOU Yong-ping, YU Zhuo-ping. The Evaluation of ABS Performance [C] //SAE. 2003—01—0255.
- [5] MAURICIO BLANCO INFANTINI, EDUARDO PERONDI. Ney Francisco Ferreira Development of an Anti-lock Braking System Model [C] //SAE. 2005—014032.
- [6] MAMDANI E H. The application of fuzzy set theory to control systems A survey [C] //in *Fuzzy Automata and Decision Processes* Amsterdam, North Holland, 1977.
- [7] BART KOSKO. Neural networks and fuzzy systems [C] //in *A Dynamical Systems Approach*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.
- [8] UTKIN V L. Variable structure systems with sliding modes [C] //IEEE Transactions Automatic Control. 1977.
- [9] DOYLE J C, GLOVER K. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems [C] //IEEE Trans Automat Contr. 1989.
- [10] 陈炯, 王会议, 宋健. 基于滑移率和减速度的ABS模糊控制仿真研究 [J]. *汽车工程*, 2006, 28 (2): 148—151.
- [11] 程才珍. 汽车防抱制动系统控制逻辑及其优化 [D]. 长春: 吉林大学, 2002.
- [12] 项承寨, 夏群生. ABS控制量的计算研究 [J]. *汽车技术*, 2001 (1): 10—13.
- [13] 侯光钰, 张为公. 基于遗传算法的ABS模糊控制器的设计 [J]. *公路交通科技*, 2005, 22 (1): 147—150.
- [14] 张国良, 曾静, 等. 模糊控制及其MATLAB应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [15] GB13594-92. 汽车防抱死系统性能要求和试验方法 [S].
- [16] 孔磊, 宋健, 于良耀, 等. 越野汽车ABS参考车速计算方法 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37 (7): 19—22.