

# 基于模糊控制的车辆弯道防抱制动系统仿真分析

汪知望, 孙习武

(合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**建立了8自由度的非线性汽车弯道行驶整车模型,在此模型基础上,采用模糊控制理论,分别对车速与轮速的变化、车轮载荷转移的变化以及制动器制动力矩的变化进行计算机仿真。仿真结果表明,采用模糊控制可以达到很好的制动控制效果。

**关键词:**整车模型;制动防抱系统;模糊控制;弯道

**中图分类号:**U461.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2550(2006)01-0027-04

汽车弯道行驶工况是一种危险工况,在制动过程中,若前轮先抱死,则汽车失去转向能力,无法遵循弯道行驶。若后轮先抱死,则汽车在侧向风、路面坡度等干扰下,后轴发生侧滑、甩尾等,操纵稳定性恶化,严重时,导致交通事故的发生。

汽车防抱制动系统(Anti-lock Braking System),简称ABS,能有效地缩短汽车制动距离,提高制动时的操纵稳定性,使汽车在制动过程中保持良好的行驶稳定性。ABS的基本原理就是自动调节制动力,使车轮的纵向附着系数始终保持在最大值,此时,制动性能最好,侧向稳定性也很好。

收稿日期:2005-04-27

作者简介:汪知望,合肥工业大学机械与汽车学院硕士研究生。

目前,逻辑门限控制方法广泛用于实用的汽车防抱制动系统中。这种方法在选择门限值、车速估计以及路面识别上存在困难,而且需要针对不同车型进行大量的参数匹配试验,耗资大,产品开发周期长。

模糊控制是一种智能控制方法,能模拟人脑的模糊推理机理,按照一定的控制规则,结合实际经验,对系统进行动态调控,具有不依赖对象数学模型,鲁棒性好,实用性强的特点。很好地适用于ABS变工况、非线性系统。

## 1 车辆动力学系统建模

车辆ABS系统模型应尽可能准确,但考虑到实

动力客车的各参数基本达到设计目标,虽然爬坡能力有所下降,但作为公交用车,可以满足其使用要求。

(2)通过比较仿真得到的数据,混合动力客车比原有车型在燃油经济性方面得到了很大提高。

(3)仿真使用的是仿真软件原有的车型部件(经过相应的修改)和循环工况。对于循环工况,可以在进一步实验的基础上,获得我国城市道路路况的详细数据,便于今后的实验计算。

(4)鉴于混合动力汽车的特点以及公交车辆行驶特点,再生制动能够成为城市混合动力公交车辆能源补充的重要手段,但在以上的仿真计算中制动回收能量最大仅占全部能量的11%。因此,根据我国城市道路和公交车辆的行驶特点,可以进一步优化再生制动控制系统。

(5)考虑到使用软件的局限和仿真计算中的简化处理,所得仿真结果仅供参考。

### 参考文献:

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:

北京理工大学出版社, 2002.

- [3] 朱诗顺, 朱道伟, 李欣, 等. 串联式混合动力汽车发电机与电动机功率匹配的研究[J]. 汽车研究与开发, 2001, (6):46-48.
- [4] 张翔, 赵韩, 钱立军, 等. 电动汽车仿真软件ADVISOR [J]. 汽车研究与开发, 2003, (4):14-16.

## Parameters choose and simulation of hybrid electric bus

XU Yang, QIAN Li-jun

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:**Based on comparison and analysis of the three different construction hybrid electric vehicles, this paper chose the series hybrid electric constructions as the structure of a hybrid electric bus. The paper introduced a method of the series hybrid electric vehicle design. The paper advanced many performance parameters of the hybrid electric bus, which are calculated and simulated in ADVISOR, based on characters of city road and city bus in China,

**Keywords:** hybrid electric, design, parameter selection, simulation, ADVISOR

际情况的复杂性,必须对实际的车辆进行简化。本模型具有八自由度,分别是4个车轮转动、车身纵向、横向、横摆、侧倾。整车模型见图1。

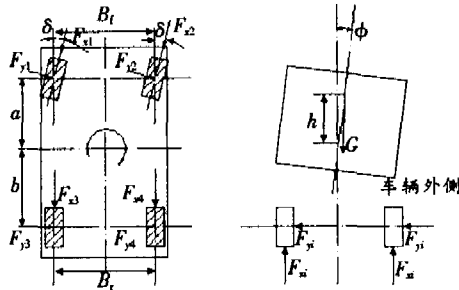


图1 整车模型

考虑到空气阻力 $F_w$ 和轮胎滚动阻力 $F_R$ 的影响,车辆运动基本方程如下:

$$-F_w - \sum F_R - \sum F_a = m(\dot{v}_x - v_y \gamma) \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中, $m$ 是车辆整备质量; $v_x$ 是车辆质心沿 $x$ 方向的速度; $v_y$ 是车辆质心沿 $y$ 方向的速度; $\gamma$ 是横摆角速度; $F_w$ 是迎风阻力; $F_R$ 是轮胎滚动阻力; $F_a$ 是地面制动力。

$$F_w = C_D A v_x^2 / 21.15 \quad (2)$$

式中, $C_D$ 是空气阻力系数; $A$ 是迎风面积。

$$\sum F_R = mg[0.0072 + 0.002(0.01v_x) + 0.001(0.01v_x)^4] \quad (3)$$

$$\sum F_a = (F_{a1} - F_{a2})\cos\delta + F_{a3} + F_{a4} + (F_{y1} + F_{y2})\sin\delta \quad (4)$$

式中, $\delta$ 是转向轮转向角; $F_{yi}$ 是轮胎侧向力。

$$\sum F_y = (F_{y1} + F_{y2})\cos\delta + F_{y3} + F_{y4} - (F_{a1} + F_{a2})\sin\delta = m(\dot{v}_x - v_y \gamma) \quad (5)$$

$$\sum M_x = K_\phi \phi - C_\phi \dot{\phi} + m_g h \sin\phi + m_s h(\dot{v}_y - v_x \gamma) = I_x \ddot{\phi} \quad (6)$$

式中, $K_\phi = K_f + K_r$ ,  $K_f = k_f B_f^2/2$ ,  $K_r = k_r B_r^2/2$ ;  $C_\phi = C_f + C_r$ ,  $C_f = c_f B_f^2/2$ ,  $C_r = c_r B_r^2/2$ ;  $K_\phi$ 是悬架角刚度; $C_\phi$ 是悬架角阻尼系数; $K_f$ ,  $K_r$ 是前、后悬架角刚度; $C_f$ ,  $C_r$ 是前、后悬架角阻尼系数; $k_f$ ,  $k_r$ 是前、后悬架线刚度; $c_f$ ,  $c_r$ 是前、后悬架线阻尼系数; $B_f$ ,  $B_r$ 是前轴距、后轴距; $\phi$ ,  $\dot{\phi}$ ,  $\ddot{\phi}$ 是侧倾角、侧倾角速度、侧倾角加速度; $m_s$ 是悬挂质量; $h$ 是悬挂质心到侧倾轴线距离; $I_x$ 是悬挂质量绕 $x$ 轴的转动惯量; $\sum M_x$ 是绕 $x$ 轴的力矩。

$$\sum M_z = I_z \ddot{\gamma} = [B_f(F_{a2} - F_{a1})\cos\delta + (F_{y2} - F_{y1})\sin\delta] + B_r(F_{a4} - F_{a3})/2 - a[(F_{a1} + F_{a2})\sin\delta + (F_{y1} + F_{y2})\cos\delta] - b(F_{y3} + F_{y4}) \quad (7)$$

式中, $I_z$ 是整车横摆转动惯量; $a$ ,  $b$ 是质心距前、后轴距离;

$\sum M_z$ 是绕 $z$ 轴的力矩。

$$I_{w_i} \dot{\omega}_{w_i} = F_{x_i} R_w - T_{b_i} - T_{R_i} \quad (8)$$

式中, $T_{b_i} = F_{x_i} R_w$ ;  $T_{R_i} = (P_i - P_0) A_{w_i} \eta B F_i r$ ;  $I_{w_i}$ 是车轮转动惯量; $\omega_{w_i}$ 是车轮角速度; $T_{b_i}$ 是车轮制动力矩; $T_{R_i}$ 是轮胎滚动阻力矩; $P_i$ 是各分泵液压管路压力; $P_0$ 是推出制动蹄使之与制动鼓接触的压力损失(推出压耗); $A_{w_i}$ 是车轮分泵工作面积; $\eta$ 是分泵效率; $B F_i$ 是车轮制动效能因数; $r$ 是制动鼓半径。

$$F_{a_i} = [(b - f R_w) m g + \alpha m \dot{v}_x H - F_w H_w] / (2L) \quad (9)$$

$$F_{a_i} = [(b - f R_w) m g + \alpha m \dot{v}_x H - F_w H_w] / (2L) \quad (10)$$

$$F_{a_i} = [(a - f R_w) m g + \alpha m \dot{v}_x H + F_w H_w] / (2L) \quad (11)$$

$$F_{a_i} = [(a - f R_w) m g + \alpha m \dot{v}_x H + F_w H_w] / (2L) \quad (12)$$

式中, $f=0.0072+0.002(0.01v_x)+0.001(0.01v_x)^4$ ;  $m_f$ ,  $m_r$ 是前、后轴非悬挂质量; $L$ 是轴距; $a$ ,  $b$ 是悬挂质心距前、后轴距离; $H$ 是整车质心高度; $H_w$ 是风阻中心高度; $h_f$ ,  $h_r$ 是前、后非悬挂质心高; $h_{f_{mod}}$ ,  $h_{r_{mod}}$ 是前、后侧倾中心高。

## 2 轮胎模型

本文采用Pacejka等人提出的半理论半经验模型,即魔术公式。计算公式如下:

横向力 $F_{y0}$ 为:

$$F_{y0} = D \sin[\text{Carctan}(B\phi)] + \Delta S_y \quad (13)$$

式中, $D=a_1 F_z^2 + a_2 F_z$ ;  $C=1.30$ ;  $B=\frac{a_3 \sin[a_4 \arctan(a_5 F_z)]}{CD} (1-a_{13} Y)$ ;

$E$ 是曲率因子,  $E=a_6 F_z^2 + a_7 F_z + a_8$ ;  $\Delta S_y=a_9 Y$ ;  $\phi=(1-E)(\alpha + \Delta S_h) + (E/B) \arctan[B(\alpha + \Delta S_h)]$ ;  $B$ 是斜率因子; $C$ 是形状因子; $D$ 是最大值因子; $\Delta S_h$ 是水平切换因子; $\Delta S_y$ 是垂直切换因子; $a_1 \sim a_{13}$ 是拟和参数; $\lambda$ 是车轮滑移率; $F_{z0}$ ,  $F_{y0}$ 是轮胎单一工况下的纵向力和横向力。

纵向力 $F_{x0}$ 为:

$$F_{x0} = D \sin[\text{Carctan}(B\phi)] \quad (14)$$

式中, $C=1.65$ ;  $B=\frac{a_1 F_z^2 + a_2 F_z}{C D e^{a_3 F_z}}$ ;  $\phi=(1-E)k + (E/B) \arctan(Bk)$ 。

在联合工况下,轮胎模型如下:

$$\sigma_x = -\frac{s}{1+s}; \sigma_y = -\frac{\tan\alpha}{1+s}; \sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2};$$

$$F_x = \frac{\sigma_x}{\sigma} F_{x0}; F_y = \frac{\sigma_y}{\sigma} F_{y0}$$

车辆运动过程中,轮胎侧偏角 $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$ 可由下列式子计算:

$$\alpha_1 = \delta - \arctan \frac{v_y + \alpha \gamma}{v_x + B_f \gamma}; \alpha_2 = \delta - \arctan \frac{v_y + \alpha \gamma}{v_x - B_r \gamma};$$

$$\alpha_3 = -\arctan \frac{v_y - b \gamma}{v_x + B_f \gamma}; \alpha_4 = -\arctan \frac{v_y - b \gamma}{v_x - B_r \gamma}。$$

## 3 模糊控制器的开发

本模型采用滑移率控制,就是把四个车轮的实际滑移率控制在最佳的期望滑移率点 $s_{exp}$ ,定义滑移率偏差 $e = s - s_{exp}$ ,滑移率偏差的变化率 $e' = (e_k - e_{k-1})/T$ ,  $T$ 为采样间隔,其中, $e$ ,  $e'$ 为系统的输入量,控制量 $U$ 为制动油压,它决定了制动力矩的大小, $U$ 为模糊控

制系统的输出量。本系统为两输入一输出模糊控制系统。

### 3.1 隶属度函数的设计

选取trimf函数为滑移率偏差的隶属度函数,期望滑移率为0.2,则滑移率偏差 $e$ 的变化范围是 $(-0.2, 0.8)$ ,取其论域 $U$ 为 $(-0.2, 0.8)$ ,将滑移率偏差 $e$ 语言变量分为6个子项:(负大,负中,零,正小,正中,正大),各自参数为 $(-0.2, -0.2, 0)$ 、 $(-0.2, -0.1, 0)$ 、 $(-0.1, 0, 0.1)$ 、 $(0, 0.1, 0.4)$ 、 $(0.2, 0.5, 0.7)$ 、 $(0.5, 0.8, 0.8)$ ,滑移率偏差变化率 $e'$ 的论域取为 $(-1, 1)$ ,子项为(负大,负中,负小,零,正小,正中,正大),隶属度函数均为三角形,各自参数为 $(-1, -0.7, -0.4)$ 、 $(-0.7, -0.4, -0.1)$ 、 $(-0.4, -0.1, 0.2)$ 、 $(-0.1, 0, 0.1)$ 、 $(-0.2, 0.1, 0.4)$ 、 $(0.1, 0.4, 0.7)$ 、 $(0.4, 0.7, 1)$ ,车轮分泵制动液油压的改变量 $P$ 为输出语言变量,其论域和子项的隶属度函数在论域上的分布和滑移率偏差变化率相同。

### 3.2 控制规则

根据经验,制定的模糊逻辑控制规则集见表1。

表1 模糊逻辑控制规则集

$e' \backslash e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PS
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	ZE
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NS
PS	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NM
PM	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

解模糊的方法采用重心法。

## 4 仿真结果分析

本文利用MathWorks公司的MATLAB/Simulink软件建立车辆仿真模型,试验时车辆制动初始速度为22.2 m/s。从仿真结果图2上可以看出,没有采取控制时,在1秒钟左右前轮先于后轮抱死,这虽然是一种稳定工况,但前轮失去了转向能力。采取控制后,滑移率的变化如图3、图4所示,所有车轮均没有抱死,因此车辆在弯道行驶时可以获得较高的纵向附着力和侧向力,保证了汽车制动时方向稳定性和操纵稳定性。

采取控制后,制动时整车纵向及侧向速度的变化如图5所示。汽车获得较大的制动减速度,能准确的按弯道行驶。制动时车轮制动力矩的变化如图6、

图7所示。右转弯制动时,由于车辆侧倾的影响,导致左侧车轮上的制动力矩大于右侧车轮上的制动力矩,这种制动力矩的变化能把左前轮滑移率控制在目标滑移率0.2附近。

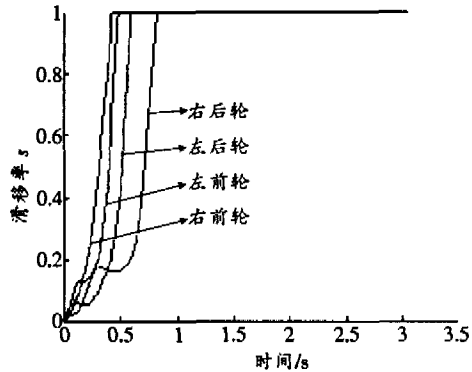


图2 没有采取控制时的滑移率变化

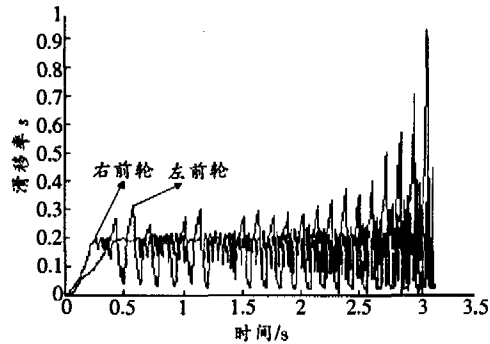


图3 采取控制后的前轮滑移率变化

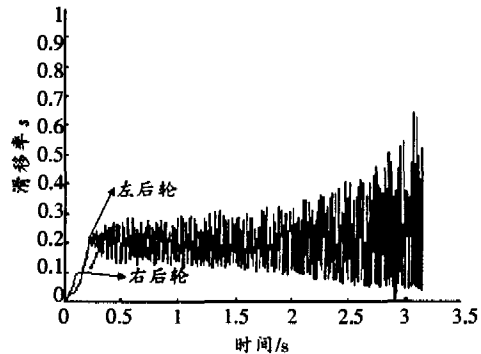


图4 采取控制后的后轮滑移率变化

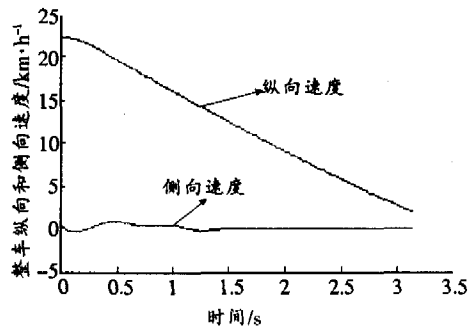


图5 采取控制后的整车纵向及侧向速度变化

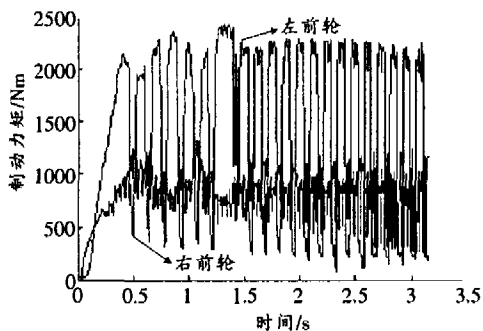


图6 采取控制后的前轮制动力矩变化

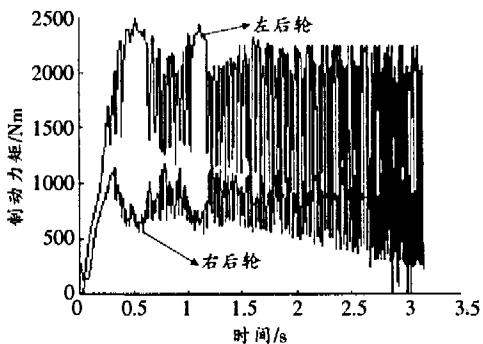


图7 采取控制后的后轮制动力矩变化

## 5 结束语

本文所建立的车辆模型和所采取的模糊控制模型对实际车辆弯道行驶的模拟、对车辆制动性的预测和有关指标的评价均能够取得较好的效果,对于快速开发ABS系统有很好的参考意义。

### 参考文献:

[1] 李君, 张建武, 喻凡, 等. 基于混合仿真技术车辆ABS开发

控制系统快速开发研究[J]. 机械工程学, 2002, 38(7): 84-90.

[2] 陈朝阳, 顾勤林, 张代胜. 车辆转向时制动防抱系统的仿真研究[J]. 合肥工业大学学报, 2004, (12): 1600-1604.

[3] 张利鹏. 汽车转弯制动性能分析与防抱控制仿真研究[D]. 2004(7).

[4] 张代胜, 李伟. 基于滑移率的汽车防抱模糊控制方法与仿真[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 28-31.

[5] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 96-100.

[6] 程军. 车辆控制系统集成开发系统[J]. 汽车工程, 2000, 22(2): 109-113.

[7] 张志涌. 精通MATLAB6.5版 [M]. 北京航空航天大学, 2003.3.

[8] Hatipoglu C, Malik A. simulation based ABS algorithm development[R]. SAE Technical Paper, 1999-01-3714.

## Simulation of the vehicle's anti-lock braking system on crooked roads based on fuzzy logic control

WANG Zhi-wang, SUN Xi-wu

(Department of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** A nonlinear dynamic model of 8 degrees of freedom for full vehicle model in consideration of crooked roads is established. Based on this model, the changes of vehicle speed, wheel load and braking torque are simulated with using fuzzy logic control. The result of simulation shows that a good control effect can be achieved.

**Key words:** full vehicle model; anti-lock braking system; fuzzy logic control; crooked roads

## 欢 迎 向 本 刊 投 稿

《汽车科技》杂志是东风汽车有限公司主办、面向全国汽车行业及相关行业的综合性技术类期刊。国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅。

本刊以报道汽车产品的设计、研究、制造及汽车工业相关技术和有实用价值的科技成果等内容为主, 辟有聚焦东风有限、特稿、设计·研究、计算机应用、试验·测试、工艺·材料、管理·使用·维修及综述等栏目。

本刊除为汽车行业的工程技术人员和大学教师及在校大学生提供权威性、科学性的科技信息外, 还为汽车爱好者和使用者提供具有知识性、史料性、信息性内容的文章及有收藏价值的图片。

亲爱的广大作者、译者, 希望您能和我们一起在《汽车科技》杂志这块阵地上共同奋斗, 勤奋笔耕, 并欢迎您多向本刊赐稿。

来稿须符合以下要求:

(1) 来稿内容应具有科学性、先进性、创新性、实用性, 应主题突出, 语言简练通顺、阐述透彻、数据真实、术语规范、立论有据。

(2) 来稿的格式顺序是: 题名、作者、工作单位、中文摘要、关键词、正文、参考文献。本刊严格执行《中国学术期刊(光盘版)技术规范》, 请作者投稿

时对照此《规范》要求。

(3) 来稿字数一般要求控制在5000字以内, 摘要应包括目的、方法、结果和主要结论, 应独立成文, 并附相应的英文题名、摘要和关键词。

(4) 参考文献择其主要者列入, 著录格式采用顺序编码制。书写顺序为: 序号、著者姓名、题名、书刊名称、出版地、出版单位、出版年、卷(期)。

(5) 来稿如为打印稿, 应用A4纸单面打印, 留适当行距; 如为手写稿, 则要求抄写在16开单面方格稿纸上, 字迹要清晰。来稿应采用法定计量单位, 外文字母大小写、正斜体、符号与角标必须分明; 插图应符合出版标准, 要求清晰美观(能直接扫描)。

(6) 来稿一般不退还, 请作者自留底稿。如收到录用通知, 请及时告知编辑部; 一个月后未见录用通知可自行处理。稿件另投请务必通知本刊编辑部。

(7) 来稿须在稿件后注明作者的详细地址、联系电话及电子邮箱地址。

(8) 来稿可通过发电子邮件或邮寄等方式。请寄湖北省十堰市东风汽车有限公司科技情报所《汽车科技》编辑部收。邮政编码: 442001。E-mail: qichekeji@df.com.cn