

基于 Cruise 和 Matlab 的 CVT 车辆联合仿真

周云山, 赵斌

湖南大学汽车电子与控制技术教育部工程研究中心, 长沙 410082

摘要 针对无级变速器 (CVT) 常规速比控制器的局限性, 提出了一种具有工程价值的改进 PID 速比控制算法, 在分析 CVT 速比控制原理的基础上, 在 Matlab 环境中设计了改进的速比 PID 控制器, 同时考虑到单一的仿真软件不能精确地表达整车模型的参数, 在 Cruise 中搭建了整车模型, 将 Simulink 中模型以 API 形式导入并进行不同工况的联合仿真。仿真结果表明, 设计的控制器和联合仿真研究的方法是可行的, 改进的速比控制器能够很好地跟踪目标速比, 具有良好的动态响应和较高的稳态控制精度, 联合仿真研究的结果与原车型的实际状况具有良好的一致性, 验证了理论分析的正确性, 也体现了 CVT 在汽车燃油经济性和动力性方面的技术优势。

关键词 无级变速器; 速比控制器; 建模; 联合仿真

中图分类号 U462.3

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.19.006

Co-simulation of CVT Vehicle Based on Cruise and Matlab

ZHOU Yunshan, ZHAO Bin

Engineering Research Center of Automotive Electrics and Control Technology, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract Aiming at the limitations of general ratio controller for Continuously Variable Transmission (CVT), an improved PID control algorithm, which has the engineering value, is presented based on the CVT ratio control strategy, an improved PID controller is designed in the Matlab environment. Moreover, considering that the single simulation software is unable to precisely express model parameters, the vehicle model is developed in Cruise, and co-simulation with Simulink model in term of API is conducted. The simulation results show that the designed controller and joint simulation are feasible, the improved speed ratio controller could well follow the target speed ratio and has the good dynamic response and high control accuracy in a steady state, the results of simulation are well consist with the actual status of the prototype cat, the correctness of the theoretical analysis is verified, and also reflected the CVT's technological superiority in terms of vehicle fuel economy and power.

Keywords CVT; ratio controller; modeling; co-simulation

0 引言

无级变速器 (Continuously Variable Transmission, CVT), 主要由带轮组和金属带构成, 其无级变速原理是: 主、从动带轮的节圆半径连续变化, 二者的节圆半径之比即为传动比。由于金属带的长度不变, 在传动过程中, 主从动带轮的动锥盘通过轴向移动, 使金属带沿着两带轮构成的 V 型槽中做径向滑动, 从而实现速比的连续均匀变化^[1]。CVT 之所以成为

汽车界研究的热点, 是因为它能够使汽车在行驶过程中可以根据实际的行驶工况实现速比连续变化, 从而使汽车获得最佳的动力性和燃油经济性, 降低排放污染等, 实现节能环保的目的。

Matlab/Simulink 是一个用以进行动态系统建模、仿真和分析的软件包。优越的交互界面、丰富的模块库和接口使其在汽车领域内有强大的工程应用价值。但在 Matlab 中建立一

收稿日期: 2011-03-03; 修回日期: 2011-06-16

作者简介: 周云山, 教授, 研究方向为自动变速器理论、汽车传动技术、液压传动技术, 电子邮箱: zys_8888@sina.com

个整车模型对于使用者来说十分困难,且精度难以得到保证^[2]。Cruise 是由奥地利著名的发动机制造与咨询公司 AVL 公司开发,用于研究汽车动力性、燃油经济性、排放性能及制动性能的高级模拟分析软件,其灵活的模块化理念使其可以对任意结构形式的汽车传动系统进行建模和仿真。本文采用这两种软件的优势,在基于传统车辆模型的基础上,利用 Cruise 搭建了装载 CVT 的整车模型,在 Matlab 中设计了改进的 PID 速比控制策略,并通过与 Matlab(API)的接口,便捷地对速比控制策略和整车性能进行研究分析。

1 CVT 速比控制器改进

1.1 CVT 速比控制原理

速比与夹紧力的控制是 CVT 控制系统的关键,通过控制主、从动带轮活塞缸内的压力实现,二者具有耦合效应。主动缸的压力控制主动带轮活动部分的轴向位移,改变金属带的工作半径,从而改变速比,使其在汽车行驶阻力功率与发动机输出功率之间按驾驶员的意图实现动态最佳匹配;从动缸的压力控制从动带轮的夹紧力,是提高 CVT 传动效率和关键部件使用寿命的保证^[3]。因此 CVT 速比控制需要解决两个问题:(1) 根据发动机转速和当前车速按一定的匹配规律确定目标速比;(2) 通过控制算法对目标速比做尽量精确的跟踪,跟踪的效果是衡量控制器优劣的主要标准。由发动机的速度特性与负荷特性可以得到发动机的最佳经济工作曲线或最佳动力性工作曲线,这意味着对于不同工作模式,总是存在一个最佳发动机目标转速。速比控制的原则就是在车辆运行状况变化时,通过控制速比使得发动机转速和目标转速保持一致,以保证发动机始终工作在合适的模式。

1.2 CVT 速比控制器模型

PID 控制由于算法简单、鲁棒性好及可靠性高,被广泛应用于过程控制和运动控制中。它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差 $e(t)=r(t)-c(t)$,将偏差的比例 P 、积分 I 和微分 D 通过线性组合构成控制量,控制规律如下^[4]:

$$u(t)=K_P \left[e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \right] + u_0 \quad (1)$$

式中, K_P 为比例系数, K_I 为积分时间常数, K_D 为微分时间常数, u_0 为偏差 $e=0$ 时的调节器输出。速比 PID 控制器以目标速比 $i_{obj}(t)$ 与实际速比 $i_{real}(t)$ 构成的偏差 $e(t)=i_{obj}(t)-i_{real}(t)$ 作为确定控制量的依据。传统的 PID 速比控制算法流程如图 1 所示。

事实上,由于复杂的路况条件和驾驶员操纵意图的不断改变,固定的 PID 参数难以满足汽车行驶状态的变化。考虑到汽车起步、急停和其他大速比变化率情况时,短时间内系统出现大偏差,导致 PID 运算的积分积累,为了防止系统较大的超调量和振荡,可以通过引入积分分离加以调节。数字 PID 控制的表达式为

$$u(k)=K_P e(k) + \beta K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] + u_0 \quad (2)$$

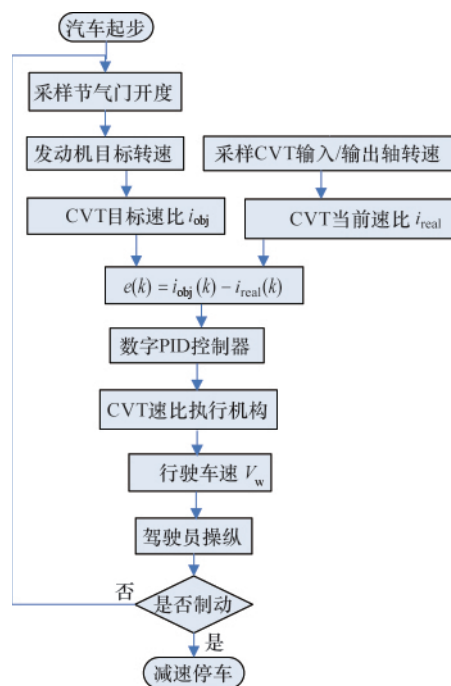


图 1 速比控制算法流程

Fig. 1 Flow chart of speed ratio control algorithm

其中, β 为权重系数, $e(k)$ 为偏差。控制规律为: $\beta=1$ 时, $|e(k)| > e_0$, e_0 为门限偏差值,用 PI 控制; $\beta=0$ 时, $|e(k)| \leq e_0$,用 PID 控制。同时考虑到消除目标速比迅速变化对控制器的影响,引入了微分先行做出调节。也就是说只对控制量 $i_{real}(t)$ 微分,不对偏差 $e(t)$ 微分,即用偏差微分项 $e(k)-e(k-1)$ 改为控制目标微分项 $i_{real}(k)-i_{real}(k-1)$,从而避免了目标速比阶跃变化对微分环节的不利影响。经过差分运算和离散化,综合形成的 CVT 速比改进 PID 控制的离散化表达式为

$$u(k)=K_P e(k) + \beta K_I \sum_{j=0}^k e(j) + u_0(k-1) + i_{real}(k) - i_{real}(k-1) + u_0 \quad (3)$$

为了对发动机和变速器进行综合控制还必须控制发动机的转矩,可以将发动机油门开度作为控制参数。因此,在系统的运行过程中,把发动机实际转速 n_1 、目标转速 n_2 和即时车速 V_w 作输入,采用积分分离微分先行的改进 PID 控制器,速比变化率 di/dt 为输出,在 Simulink 中建立了速比控制器模型,如图 2 所示。

2 整车联合仿真建模

Cruise 整车模型采用模块化的建模方式,将整个动力总成分为若干小的模型分开建模,当各个子系统模型选定之后,再根据汽车配置方案和部件连接关系建立模拟的物理连接。信息的传递则通过信号连接进行^[5]。Cruise 中已经建立好汽车上所有零部件的模块,如整车、发动机、离合器、变速箱、分动器、主减速器、差速器、制动器、轮胎等模型,均可以在元件库中找到,建模时只需要将原型车对应的部件拖入建模窗口,按照发动机到轮胎的动力传输依次连接。Cruise 跟 Matlab

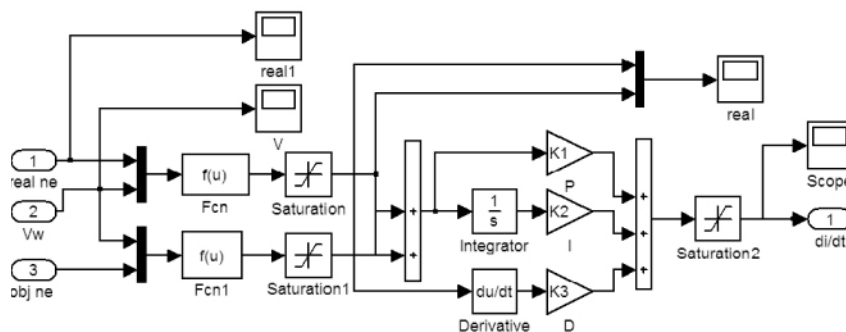


图 2 速比控制器模型

Fig. 2 Ratio controller model

的接口可以让用户将自己设计的逻辑程序集成到 Cruise 里面,尤其方便的是可以使用 Simulink 进行建模。一般有两种方法:(1)通过 Matlab 将 Simulink 模型转化为 DLL 格式;(2)在 Matlab 和 Cruise 之间进行联合仿真。本文采用后者。同时选择湖南江麓容大公司某一款原型车为参考。原型车的动力系统结构简图如图 3 所示。

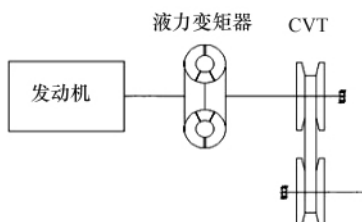


图 3 CVT 传动系简图

Fig. 3 Diagram of CVT transmission

从传动系简图可以看到,此车搭载了液力变矩器。而它与 CVT 共同工作,可明显改善车辆的起步性能、低速性能和加速性能。同时液力变矩器还有增大转矩的作用,能扩大传动系统的转矩变化范围,降低机械 CVT 最大速比的使用率。因此,在原型车的基础上,利用 Cruise 软件,搭建整车模型如图 4 所示。

2.1 整车模块

整车模块^[6-7]包含车辆的基本数据,整车模块在模型中只有一个。

(1) 整车质量。整车质量为

$$m_{V,act}=m_V(z_{V,load}) \quad (4)$$

空载时, $z_{V,load}=0$,则

$$m_V(0)=m_{V,min}$$

满载时, $z_{V,load}=2$,则

$$m_V(0)=m_{V,max}$$

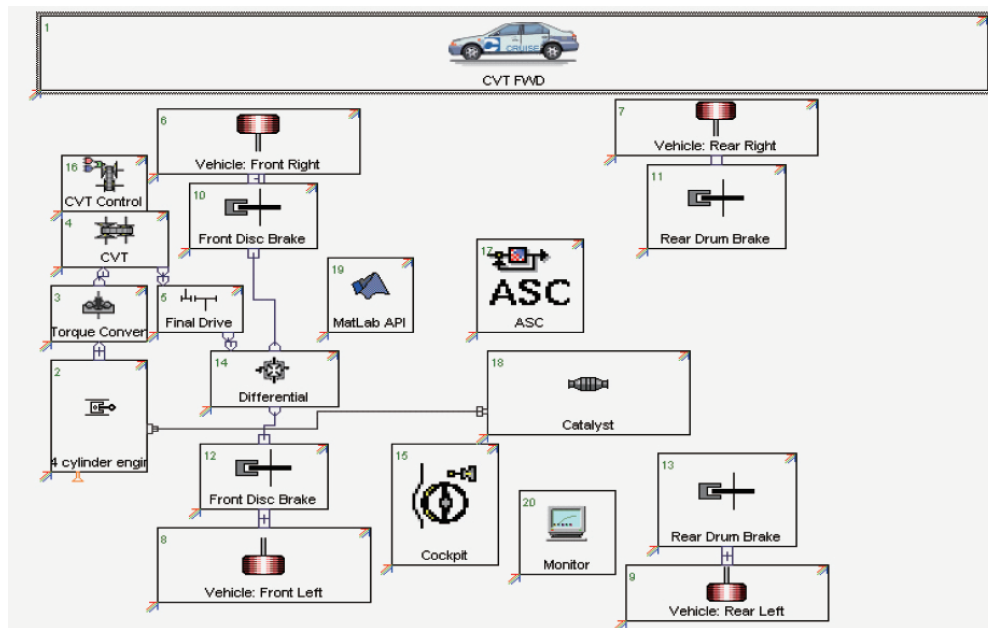


图 4 整车模型

Fig. 4 Diagram of vehicle model

半载时, $z_{V,load}=1$, 则

$$m_V(1)=(m_{V,max}+m_{V,min})/2 \quad (5)$$

其中, $m_{V,act}$ 为与载荷状态有关的瞬态整车质量, kg; $m_{V,min}$ 为整车净重, kg; $m_{V,max}$ 为整车总质量, kg; $z_{V,load}$ 为载荷状态。

(2) 阻力。这里的阻力包括空气阻力 F_W 和坡道阻力 F_a

$$F_W=-0.5c_W \cdot A_V \cdot \rho \cdot v_{rel}^2 \quad (6)$$

$$F_a=m_{V,act} \cdot g \cdot \sin a$$

其中, c_W 为阻力系数; A_V 为迎风面接, m^2 ; v_{rel} 为车辆相对风的速度, m/s, a 为路面坡度, rad。

则阻力和为

$$F=F_W+F_a+(k_{tra}+k_{push}) \cdot m_{V,act} \cdot g \quad (7)$$

其中, k_{tra} , k_{push} 分别为相对牵引力和推力系数, g 为重力加速度, m/s^2 。

2.2 发动机模块

发动机模块所需要的数据信息有: 发动机排量、工作温度、最高转速、转动惯量、怠速转速、燃油类型、燃油密度、热值等。其数学模型为

$$\begin{aligned} P_e &= M \cdot \phi \\ p &= P_e \cdot N \cdot \pi / (V \cdot \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, P_e 为全负荷特性的功率, W; ϕ 为发动机转速, rad/s; M 为全负荷特性转矩, $N \cdot m$; p 为全负荷特性的平均有效压力, Pa; N 为冲程数; V 为发动机排量, L。

2.3 液力变矩器模块

整车模型中采用液力变矩器作为起步装置。其数学模型为

$$\begin{aligned} K &= M_{T,turb,cat} / \sqrt{\phi_{T,turb}} \\ \nu_{T,act} &= \phi_{T,pump} / \phi_{T,turb} \\ \mu_{T,act} &= M_{T,pump,act} / M_{T,turb,act} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, K 为容量系数; $\nu_{T,act}$ 为速比; $\mu_{T,act}$ 为转矩比; $M_{T,turb,cat}$ 为涡轮转矩, $N \cdot m$; $M_{T,pump,act}$ 为泵轮转矩, $N \cdot m$; $\phi_{T,pump}$ 为泵轮转速, rad/s; $\phi_{T,turb}$ 为涡轮转速, rad/s。

2.4 变速箱模块

变速箱模块包含不同类型的变速器, 用户可以根据自己的需要制定传动比的范围, 转动惯量的大小和力矩的损失。本论文选用的是无级变速器, 其数学模型为

$$i_{act} = \frac{\phi_{in}}{\phi_{out}} \quad (10)$$

其中, i_{act} 为传动比; ϕ_{in} 为输入轴角速度, rad/s; ϕ_{out} 为输出轴角速度, rad/s。

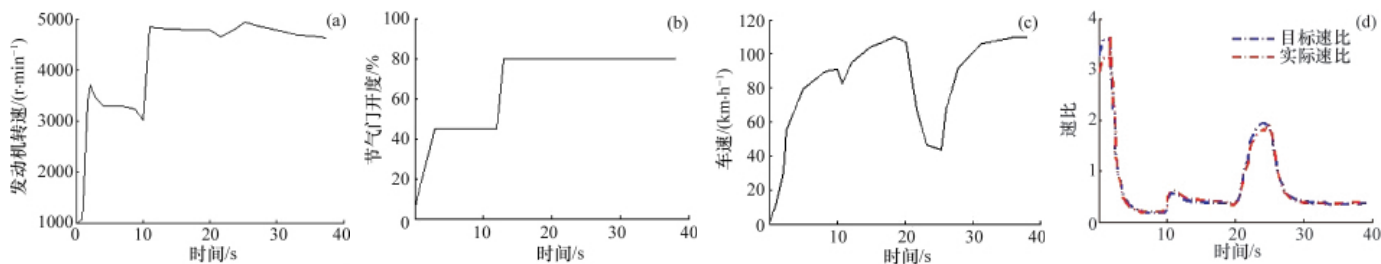


图 5 速比仿真结果

Fig. 5 Figure of ratio simulation results

上述整车模型中, 部件 Matlab API 将改进的 PID 速比控制器程序集成在其中。双击某个部件图标, 可以将部件的参数对应输入。以已选择的原型车作为依据, 对应输入的整车主要参数, 如表 1 所示。

表 1 整车主要参数表

Table 1 Main parameters of the vehicle

整车质量/kg	1550	迎风面积/ m^2	1.8
车轮半径/m	0.285	风阻系数	0.32
CVT 传动比范围	0.45—2.6	总主减速器传动比	6.247
CVT 传动效率	0.91	带轮摩擦系数	0.07
(最大功率/kW)	58/5500	(最大转矩/($N \cdot m$))	120/3500
/(转速/($r \cdot min^{-1}$))		/(转速/($r \cdot min^{-1}$))	
发动机曲轴转动惯量/($kg \cdot m^2$)	0.12	CVT 输入端转动惯量/($kg \cdot m^2$)	0.065
前后车轮总转动惯量/($kg \cdot m^2$)	3.12	CVT 输出端转动惯量/($kg \cdot m^2$)	0.81

3 仿真结果分析

3.1 速比验证分析

为了验证改进 PID 控制在 CVT 速比控制中的效果, 在 CVT 整车模型中, 通过调整节气门开度和路面坡度信息, 加载了包括起步、加速和爬坡在内的 40s 典型工况, 以此观察速比的跟踪情况。仿真结果如图 5 所示。仿真过程中, 前 3s 为起步工况, 节气门开度从 5% 线性增加到 45%, 随后保持不变, 发动机转速增加, 车速上升; 速比开始保持在最大速比, 当发动机到达稳定点后, 速比开始下降, 车速继续上升, 直到与外界阻力相平衡。第 10s 开始为加速工况, 节气门开度突然增大到 80%, 加速过程中, 速比增大, 车速升高, 但是发动机处于非稳态工况, 当发动机转速到达目标转速后, 速比开始减小, 直到与外界阻力相平衡。第 20s 进入爬坡工况, 汽车以一定的坡度行驶时, 外界阻力增大, 发动机为了适应阻力矩的变化, 转速有所下降, 车速减小, 随后为了克服外界阻力, 发动机转矩增大, 速比增大, 坡度消失后, 外界阻力减小, 发动机转速增大, 车速增大, 速比也随之减小。

从上面的分析可知汽车在不同的行驶工况下, 实际速比都能较好地跟踪目标速比, 在外界阻尼下仍具有较好的动态稳定性, 精度较高, 实际速比滞后较小, 因此, 所改进的速比控制器达到了优化的效果。

3.2 动力性和经济性分析

汽车的动力性指的是汽车在良好路面上直线行驶时由汽车受到的纵向外力决定的所能达到的平均行驶速度。汽车动力性主要由最高车速 $V_{\max}$ 、汽车加速时间 t 、汽车最大爬坡度 $I_{\max}$ 3 个指标评定^[8]。图 6 为在 Cruise 中搭载的全负荷加速性能仿真。

由图 6 可知,汽车由 0 加速到 100km/h 的时间约为 16s,与其他配置不同变速器的车型相比,该加速时间是一个不错的成绩,反映了动力性匹配的正确性。从光滑的曲线可以看出,加速过程比较平稳。表 2 为同款车型不同变速箱配置的仿真结果对比,可以看出,汽车 100km 加速时间改善了近 6%。

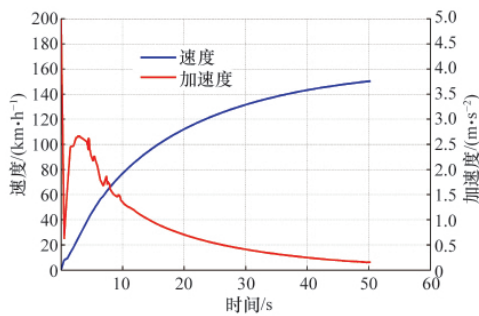


图 6 全负荷加速仿真

Fig. 6 Full load accelerated simulation

表 2 CVT 和 AT 动力性仿真对比

Table 2 Dynamic simulation comparison between CVT and AT

变速器类型	最高车速 (km·h ⁻¹)	100km 加速 时间/s	最大爬坡度/%
CVT	145	16	35
AT	145	17	34

在保证动力性的条件下,汽车以尽量少的燃油消耗量经济行驶的能力,称作汽车的燃油经济性。汽车的燃油经济性可由一定运行工况下汽车行驶 100km 的燃油消耗量或一定燃油量能使汽车行驶的里程衡量^[9]。考虑到市区行驶出现的加速、减速、怠速停车等行驶工况更能全面反映汽车的实际运行状况,本次仿真加载了欧洲经济委员会(ECE)城市循环

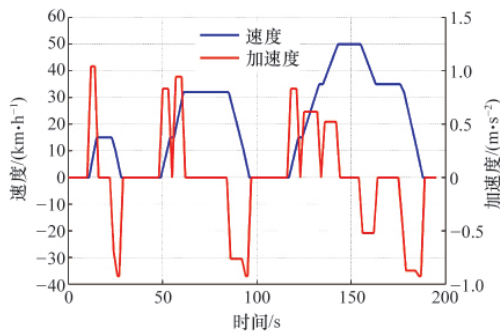


图 7 ECE 城市循环工况仿真

Fig. 7 Simulation of urban driving cycle ECE

工况。如图 7 所示。仿真结果表明,车辆 100km 耗油 9.38L,与同类 4 档 AT 相比,其燃油经济性可以提高 10%左右。

4 结论

通过改进的速比控制器仿真,并引入了 Cruise 软件的 CVT 变速车辆传动系统的建模与联合仿真分析,以某款原型车为实例,仿真结果能满足原型车的技术要求,并达到了优化的效果。得出结论如下。

(1) 本文采用 Matlab 和 Cruise 软件成功地对装有 CVT 的整车进行了建模仿真分析,速比控制器的改进使得整车传动系统在瞬态和稳态工况下均能获得满意的性能,汽车动力性和经济性仿真结果均与试验数据误差很小。

(2) 直接用 Cruise 进行整车建模,可大大方便建模的过程,如果发现问题,可以回到各自的模型中进行独立的修改,再进行联合仿真。整个过程表明这种综合性的设计方法是可行的,也为真正的工程研发提供了更可靠的依据。

参考文献 (References)

- [1] 程乃士. 汽车金属带式无级变速器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Cheng Naishi. Auto metal CVT [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007.
- [2] 王正林, 郭阳宽. 过程控制与 Simulink 应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
Wang Zhenglin, Guo Yangkuan. Process control and Simulink applications[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006.
- [3] 栾文博, 周云山. 金属带式无级变速器 Fuzzy-PID 复合速比控制系统研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(9): 778-782.
Luan Wenbo, Zhou Yunshan. Automotive Engineering, 2010, 32(9): 778-782.
- [4] 宋传学, 谢飞, 王建华. CVT 分段参数自调整 PID 速比控制研究[J]. 汽车技术, 2007(8): 23-25.
Song Chuanxue, Xie Fei, Wang Jianhua. Automotive Technology, 2007 (8): 23-25.
- [5] 范大鹏, 吴光强. 无级变速器速比控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(11): 266-270.
Fan Dapeng, Wu Guangqiang. Computer Simulation, 2008, 25(11): 266-270.
- [6] 刘振军, 赵海峰, 秦大同. 基于 Cruise 的动力传动系统建模与仿真分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(11): 8-12.
Liu Zhenjun, Zhao Haifeng, Qin Datong. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(11): 8-12.
- [7] 王保华, 罗永革. 基于 Cruise 的汽车建模与仿真 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2005, 19(2): 5-9.
Wang Baohua, Luo Yongge. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2005, 19(2): 5-9.
- [8] 王锐, 何洪文. 基于 Cruise 的整车动力性能仿真分析 [J]. 车辆与动力技术, 2009, 15(2): 24-27.
Wang Rui, He Hongwen. Vehicle and Power Technology, 2009, 15 (2): 24-27.
- [9] 王丽荣, 上官云飞. 基于 Cruise 自卸车动力经济性仿真分析与优化[J]. 专用汽车, 2007(4): 29-32.
Wang Lirong, Shanguan Yunfei. Special Purpose Vehicle, 2007(4): 29-32.

(责任编辑 代丽)