

汽车电子节气门模糊控制器快速控制原型设计*

王斌 刘昭度 王仁广 吴利军 王国业

【摘要】 阐述了电子节气门控制系统的组成及其工作原理,设计了模糊控制器。基于 dSPACE 公司的单板实时仿真系统 DS1103 PPC,进行了电子节气门模糊控制器快速控制原型设计。试验表明,开发的模糊控制器能够很好地满足电子节气门控制的需要。

关键词: 电子节气门 模糊控制器 快速控制原型

中图分类号: U464.134⁺.3 **文献标识码:** A

Design of Rapid Control Prototyping for Automotive Electronic Throttle Fuzzy Controller

Wang Bin Liu Zhaodu Wang Renguang Wu Lijun Wang Guoye
(Beijing Institute of Technology)

Abstract

The constitution and working principles of the electronic throttle control system were introduced, and a design of the fuzzy controller of electronic throttle was represented in this paper. In addition, the rapid control prototyping of the fuzzy controller was designed based on the dSPACE GmbH's real-time simulation system DS1103 PPC single controller board. The experimental results indicate the developed fuzzy controller can satisfy the requirements for running practical application of the automotive electronic throttle.

Key words Electronic throttle, Fuzzy controller, Rapid control prototyping

引言

汽车电子节气门控制系统(electronic throttle control system,简称 ETCS)是现代发动机电子控制技术之一,广泛地应用于汽车的怠速控制、驱动防滑控制、巡航控制以及自动变速控制等汽车动力学控制系统中^[1]。ETCS 取代传统的机械式节气门操作系统,是汽车发展的趋势。目前国外对该项技术的研究已经十分深入^[2],国内研究尚处于起步阶段。节气门在工作过程中,受到弹簧复位扭矩、阻尼力矩、进气扰流和粘性摩擦扭矩、电动机驱动力矩的作用,

具有强非线性时变性和很强的不确定性^[3~4]。这使得控制算法成为 ETCS 开发过程的核心和关键。快速控制原型(rapid control prototyping,简称 RCP)技术作为汽车电子控制系统设计与开发的主要手段,具有开发周期短、成本低、容易验证研发方向的正确性,以及可将控制算法开发中的错误和不当之处消除于设计的初期阶段等优点。本文在 Matlab/Simulink 和 Fuzzy Logic Toolbox 环境下构建 ETCS 模糊控制算法,采用 dSPACE 公司的 DS1103 PPC 单板实时仿真系统,进行 ETCS 模糊控制器的快速控制原型设计。

收稿日期:2006-06-09

* 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50122155)

王斌 北京理工大学机械与车辆工程学院 博士生,100081 北京市

刘昭度 北京理工大学机械与车辆工程学院 教授 博士生导师

王仁广 北京理工大学机械与车辆工程学院 讲师

吴利军 北京理工大学机械与车辆工程学院 讲师

王国业 北京理工大学机械与车辆工程学院 副教授

1 ETCS 组成及工作原理

ETCS 由控制器、驱动电路、执行机构、传感器组成,图 1 为 ETCS 简图。ETCS 根据加速踏板位置传感器和其它控制单元确定节气门的目标开度。通过对力矩电动机进行脉宽调制 (pulse-width modulation, 简称 PWM) 实现对电动机输出力矩的精细控制。电动机输出力矩与占空比成正比。当电动机的输出力矩与阻力矩平衡时,节气门稳定在目标开度;占空比增大时,电动机驱动力矩大于阻力矩,节气门开度增加;反之,节气门开度减小。节气门位置传感器将位置反馈给控制器,构成一个闭环反馈控制系统。

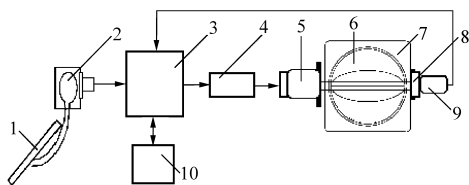


图 1 ETCS 结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the ETCS

1. 加速踏板 2. 加速踏板位置传感器 3. 控制器 4. 驱动电路
5. 力矩电动机及减速机构 6. 节气门阀片 7. 节气门体
8. 复位弹簧 9. 节气门位置传感器 10. 其它控制单元

2 ETCS 模糊控制器快速原型设计

2.1 dSPACE 实时仿真系统

dSPACE 实时仿真系统是由德国 dSPACE 公司开发的一套基于 Matlab/Simulink 控制系统开发及测试的实时仿真平台,它实现了与 Matlab/Simulink 的完全无缝连接,拥有方便的实现代码生成/下载和试验/调试的软件环境,可以完成从系统建模、分析、离线仿真直到实时控制的全过程。本文采用的 dSPACE 公司 DS1103 PPC 单板实时仿真系统拥有 PowerPC 750GX 处理器,可进行浮点运算。它将 I/O、CAN 控制器以及 TI 公司的 TMS320F240 数字信号处理器集成在同一板上,可以方便地实现 A/D、D/A、数字 I/O、PWM 信号发生器等功能,满足控制系统快速控制原型开发的需求。

2.2 模糊控制器设计

模糊控制器具有不依赖于对象的数学模型、便于利用人的经验知识、鲁棒性好、简单实用等优点^[5],特别适合于电子节气门这类具有非线性、时变和难以精确建模的复杂控制过程。与常规的 PID 控制器相比,它的响应速度快,超调小。

采用二维模糊控制器,以节气门目标开度与实

际开度的误差 e 及其变化率 \dot{e} 作为输入语言变量;以占空比增量 Δu 为输出语言变量。 e 的论域为 $[-100, 100]$, \dot{e} 的论域为 $[-2000, 2000]$, Δu 的论域为 $[-1, 1]$ 。输入输出语言变量的模糊子集均分为 7 级: {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 简记为 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}。量化因子 K_1 、 K_2 与比例因子 K_3 的取值分别为 1、1/2000、1。为了提高稳态点控制的精度,适应被控对象非线性的特点,输入输出变量的隶属函数均采用非对称结构^[6]。图 2 为输入语言变量 (e 、 \dot{e}) 和输出语言变量 (Δu) 的隶属函数。模糊推理采用 Mamdani 推理法。

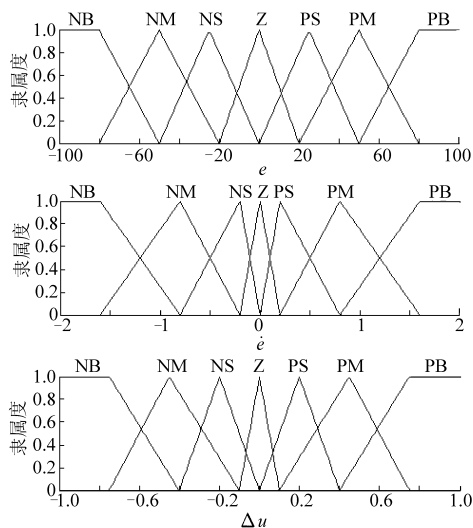


图 2 输入、输出语言变量的隶属函数

Fig. 2 Membership functions of input and output language variables

双输入单输出二维模糊控制器的模糊控制规则的形式为“IF e and \dot{e} then u ”。根据手动控制策略,以及多次实时仿真试验结果,对模糊控制规则进行了修改、优化,最终制定了 49 条模糊规则。模糊控制规则表如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Tab. 1 Rule table of fuzzy control

e	\dot{e}						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	PS	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	NS	PS	PS	PB	PB
PM	NS	NS	Z	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB

2.3 快速控制原型模型构建

DS1103 PPC 单板实时仿真系统作为模糊控制

算法及控制逻辑代码的硬件运行环境,实现 ETCS 控制器的功能。实时硬件负责与外部输入输出设备连接。用硬件接口关系代替原来的逻辑连接关系,交互控制信息与反馈信息,在原型控制算法和控制对象之间实现实时连接。控制对象选用的是西门子威迪欧 L06AG 型电子节气门总成。它将图 1 所示的力矩电动机及减速机构,节气门体与阀片,以及复位弹簧和节气门位置传感器集成为一个整体。将所有的输入输出设备与 DS1103 PPC 单板系统、控制对象直接连接,通过 Matlab/Simulink、Fuzzy Logic Toolbox 和 dSPACE 提供的实时硬件接口库 RTI (real-time interface),就可以采用图形化方式方便快捷地搭建电子节气门模糊控制器快速控制原型。

如图 3 所示,信号模拟器用于产生节气门的目标开度,DS1103SL-DSP-ADC-C1 模块连接节气门位置传感器的反馈信号,通过一维查表模块,将 A/D 采集的电压信号转换为节气门实际开度信号。在控制过程中,模糊控制器根据 e 和 \dot{e} ,实时地计算出占空比的增量 Δu 。 Δu 与前一采样时刻控制输出 $u(k-1)$ 叠加后即为当前时刻占空比输出 $u(k)$,通过 DS1103SL-DSP-PWM 模块产生 PWM 信号,再经驱动电路直接驱动节气门执行机构动作,实现电子节气门的模糊控制。

节气门在阶跃信号、变频正弦信号以及变幅锯齿信号输入下的响应曲线。

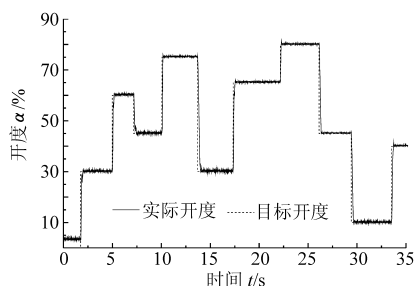


图 4 阶跃信号输入的响应曲线

Fig. 4 Response waveform of step input

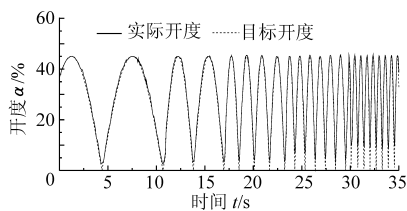


图 5 变频正弦信号输入的响应曲线

Fig. 5 Response waveform of variable sine input

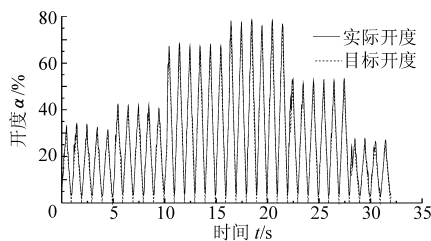


图 6 变幅锯齿信号输入的响应曲线

Fig. 6 Response waveform of variable sawtooth input

电子节气门在阶跃输入响应的上升时间不超过 100 ms,下降时间不超过 200 ms。上升时间与下降时间不同,是由于电子节气门采用单极性驱动造成的。从试验结果可以看出,采用设计的模糊控制器能很好地解决电子节气门控制中非线性问题,控制器具有较强的鲁棒性。对阶跃信号、变频正弦信号、变幅锯齿波信号都能有很好的跟踪性能,超调量较小,获得了比较满意的控制效果,能满足实际电子节气门控制的要求。

4 结束语

基于 Matlab/Simulink、Fuzzy Logic Toolbox 以及 DS1103 PPC 单板系统进行了电子节气门模糊控制器的快速控制原型设计。试验表明:所构建的模糊控制器具有较好的控制效果。在电子节气门模糊控制器快速控制原型开发过程中,需要编写的代码少,模型参数的修改、代码的生成及下载非常方便。

(下转第 16 页)

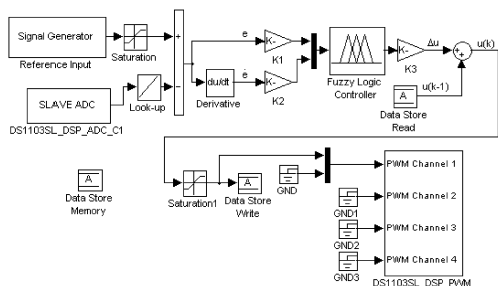


图 3 模糊控制器快速控制原型

Fig. 3 Rapid control prototyping for fuzzy controller

3 试验结果与分析

在控制系统快速控制原型模型搭建完成后,通过 RTI 与 Matlab 实时工作空间 RTW 就可实现从 Simulink 模型到 dSPACE 实时硬件代码的无缝自动下载,并自动在 DS1103 PPC 单板系统中执行。通过 dSPACE 的综合试验软件 ControlDesk 可以实现对实时硬件的图形化管理,建立用户虚拟仪表,实现变量和参数的可视化、试验数据采集以及试验过程自动化管理。

通过信号模拟器分别进行了电子节气门对不同信号的跟随控制试验。试验时,系统的采样周期为 0.01 s,占空比频率为 250 Hz。图 4~6 分别为电子

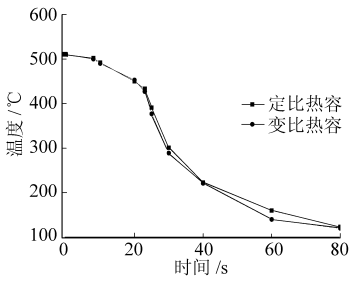


图 11 比热容对温度场的影响

Fig. 11 Influences of specific heat to temperature

的对比表明数学模型具有很好的精度。

(2) 未耦合值、耦合值、试验值的对比可以看出:耦合值略高于试验值,是由于转子鼓轮辐和联轴器的散热途径未考虑在内。

(3) 耦合因素电阻率、磁导率对温度场影响很大,在温度场、磁场分析中必须考虑。

(4) 转子鼓物性参数变化会引起温度场的变化。导热系数的变化不能忽略,而在满足工程需求的情况下,比热容的变化可以忽略不计。

参 考 文 献

- 1 Sakamoto H, Arak K, Akiyoshi I, et al. Design of permanent magnet type compact ECB retarder[J]. SAE Paper 973228, 1997.
- 2 何仁,衣丰艳,刘成晔. 车用缓速器结构参数对制动力矩的影响分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 21~24.
- 3 Shiraishi R, Demachi K, Uesaka M. Numerical simulation of coupled problem of electromagnetic field and heat conduction in superconducting magnetic bearing[J]. Physica C, 2003, 32(5): 734~738.
- 4 Meinecke C, Miri A M. Coupled electromagnetic and thermal analysis of magnets wound from cable-in-conduit conductors[J]. Physica C, 2002, 30(3): 1 427~1 433.
- 5 牛润新,何仁. 永磁式缓速器的稳健性设计[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2006, 27(6): 493~497.
- 6 Johan Driesen, Ronnie Belmans, Kay Hameyer. The computation of the effects of harmonic currents on transforms using a coupled electromagnetic-thermal FEM approach[C]. Harmonics and Quality of Power Proceedings of Ninth International Conference, 2000.
- 7 唐兴伦,范群波,张朝晖. ANSYS 工程应用教程:热学、电磁学篇[M]. 北京:中国铁道出版社, 2003.
- 8 谢德馨,姚纛英,白保东,等. 三维涡流场的有限元分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
- 9 何仁,牛润新. 车用永磁式缓速器设计中漏磁影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 44~48.

(上接第 11 页)

参 考 文 献

- 1 王斌,刘昭度,何玮,等. 汽车电子节气门技术研究现状及发展趋势[J]. 小型内燃机与摩托车, 2005(6): 32~34.
- 2 Daniel M. Delphi electronic throttle control system for model year 2000; driver features, system security, and OEM benefits. ETC for the mass market[C]. SAE Paper 2000-01-0556, 2000.
- 3 Lars E, Lars N. Non-linear model-based throttle control[C]. SAE Paper 2000-01-0261, 2000.
- 4 Deur J, Pavkovic D, Peric N, et al. An electronic throttle control strategy including compensation of friction and limp-home effects[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2004, 40(3): 821~834.
- 5 丛爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2001.
- 6 Driankov D, Hellendoorn H, Reinfrank M. An introduction to fuzzy control[M]. Berlin-Springer-Verlag, 1993.