

# AMT 车辆节气门执行器的仿人智能模糊控制

苏玉刚, 曹长修, 黄建明

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:** 论述了将仿人智能模糊控制器应用于汽车自动变速器发动机节气门执行器的思路和设计方法。给出了所设计的电液式节气门执行器的结构, 控制系统的组成, 仿人智能模糊控制器的原理和控制算法及实验结果。实际应用证明电液式节气门执行器采用仿人智能模糊控制能很好地保证执行器的快速性、平稳性和较高的控制精度, 其性能满足实际应用的要求。

**关键词:** 自动变速器; 节气门驱动器; 模糊控制; 仿人智能控制

**中国分类号:** TP 273'.4

**文献标识码:** A

在汽车自动变速器中, 对发动机节气门的控制都是通过控制节气门执行器来完成的。该执行器的受控性能好坏直接关系到整个自动变速器的工作性能。选择哪种执行器既能降低产品的成本, 又能得到比较好的控制性能一直是人们研究的热门课题。目前, 得到应用的节气门执行器有步进电机式、直流可逆伺服电机式、线性电磁铁式和真空膜片式等几种类型。这些执行器都有各自的特点和使用局限性。笔者在电液机械式自动变速器 (AMT) 的研究和产品开发中, 针对汽车有液压源的特点, 设计了电液式执行器来控制节气门。电液式节气门执行器具有很多优点, 如结构简单、成本低廉、驱动力大、耐受环境温度能力强、控制电路简单等。其主要缺点是控制技术难度大。由于液压系统存在供油压力波动, 油的粘度随油温度变化而变化, 控制阀的启闭特性, 负载的惯性质量, 液压执行机构的摩擦力等因素的影响, 尤其节气门操纵系统是一个弹簧质量系统, 还免除了由于振动等因素带来干扰。因此, 常规的控制方法无法保证节气门的控制既要具有精确的位置响应, 又要有满足需要的速度响应, 同时还应根据发动机的工况要求灵活实施不同的控制策略。另外, 不同的产品以及使用在不同的车辆中, 节气门执行器控制系统的参数会有所不同, 因此, 若采用依赖于系统精确的数学模型的控制方法, 则产品的调试比较麻烦, 且即使调试好, 也会因汽车在使用中参数变

化而影响性能。因此, 必须采用不依赖于系统精确的数学模型的智能控制方法才能满足节气门执行器的良好性能要求, 并会给产品的调试带来很多方便。针对这一问题笔者提出了应用仿人智能模糊控制技术, 给出了电液式节气门执行器智能控制的系统结构, 控制算法, 控制器设计和实际应用测试结果。

## 1 节气门执行器的控制系统结构

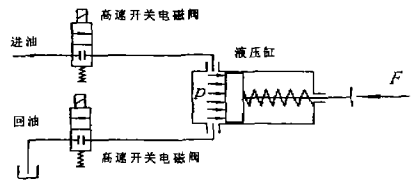


图1 电液式节气门执行器结构原理

### 1.1 电液式节气门执行器的组成结构

电液式节气门执行器为一单向作用数字控制式液压缸。油缸活塞的进程运动靠液压力驱动, 而回程运动是以节气门回位弹簧及执行器回位弹簧作为动力。通过两个高速开关电磁阀调节进出油的流量来实现活塞运动速度的控制。其结构原理如图1所示。高速开关电磁阀采用二位二通电磁球阀, 其启闭响应时间为:

· 收稿日期: 2001-09-18

基金项目: 国家教育部博士点基金资助 (97061104)

作者简介: 苏玉刚 (1962-), 男, 辽宁大连人, 重庆大学副教授, 博士研究生。主要从事智能控制理论及其应用和电力电子技术 & 电气传动领域的研究工作。

开启时间  $< 3.5 \text{ ms}$ , 关闭时间  $< 2.5 \text{ ms}$

## 1.2 节气门执行器的控制系统结构

电液式节气门执行器的控制系统由单片机控制单

元、电磁阀驱动电路、节气门执行器及位移传感器组成,其系统结构如图 2 所示。

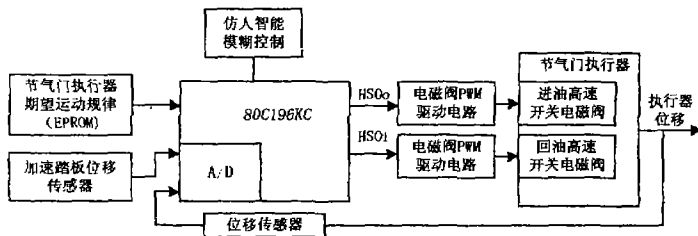


图 2 控制系统结构框图

在汽车自动变速器的控制系统中,采用具有高性能价格比的 Intel 80C196KC16 位单片机作为控制系统的核心元件。该芯片内部自带一个 8 通道 10 位 A/D 转换器,来自节气门和加速踏板的二路位移传感器模拟信号可直接输入到此 A/D 转换器中,使单片机外围电路大为减少。节气门执行器进油和回油的两个控制信号是利用 80C196KC 单片机的高速输出通道 HSO<sub>0</sub> 和 HSO<sub>1</sub> 产生。节气门执行器的控制采用了双重 PWM 控制技术,即 HSO<sub>0</sub> 和 HSO<sub>1</sub> 两路输出的都是控制高速电磁开关阀动作规律的低频 PWM 信号,而两个电磁阀驱动电路中又有一个高频 PWM 控制电路,其用于实现高速电磁开关阀具有大的初始吸合电流和小的保持电流。给定输入信号既可以来自加速踏板的位移传感器,也可以采用事先存放在 EPROM 存储器中的节气门执行器的期望运动规律。当发动机的运转状态需要由驾驶员予以控制时,控制微机便接受加速踏板位移传感器信号作为控制输入,使执行器位移和速度分别与脚踏板的位移和速度保持一致。而当汽车按恒速控制或自动驾驶方式运行时,发动机的运转控制不再需要人干预,因此控制微机在进行状态识别后将自动把某一个节气门执行器的期望运动规律作为控制输入信号。

## 2 仿人智能模糊控制系统结构及控制算法

仿人智能模糊控制器的结构如图 3 所示。这是一种带有仿人智能积分和仿人智能参数自调整的智能型模糊控制器。

### 2.1 仿人智能积分及控制算法

在一个基本模糊控制系统中,系统必将产生稳态

误差,且易产生极限环振荡现象。形成这种极限环振荡的一个重要原因是由输入量的模糊化和输出量的解模糊等因素,使系统具有多值继电器特性而引起的。引入仿人智能积分,不仅能够消除这种稳态误差和极限环振荡现象,而且可以改善系统的动态特性。

仿人智能控制的基本思想就是在控制过程中利用计算机模拟人的控制行为功能,最大限度地识别和利用控制系统的动态过程所提供的特征信息,进行启发和直觉推理,从而实现对缺乏精确模型的对象进行有效的控制。仿人智能积分的策略在于适时的引入积分和仿人控制算法。通过研究和仿真分析,可以得到以下结论:

① 仿人智能积分引入的条件为:  $|e| < \epsilon$

其中  $\epsilon$  表示常规模糊控制系统的稳态误差值,  $\epsilon$  可按下式选取,  $\epsilon = \frac{1}{2ke}$

式中  $ke$  是量化因子。

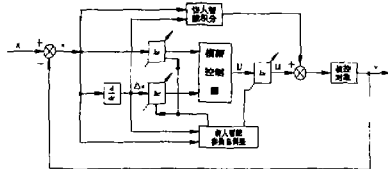


图 3 仿人智能模糊控制系统结构图

因为常规模糊控制系统存在一定范围“用  $\epsilon$  表示”的静态误差,显然,在系统偏差即将进入  $\epsilon$  时加入智能积分,既可以消除静态误差,又不会对原模糊控制规则

产生影响,因而不需要考虑重新调整模糊控制规则,使系统实现简便。

④ 仿人智能控制中,可选择  $e$ 、 $\Delta e$  和  $e \cdot \Delta e$  作为仿人智能积分控制的特征变量。仿人智能积分的逻辑判断条件为:当系统动态过程向误差增大方向变化,而本次采样时刻的误差  $e$  及误差变化  $\Delta e$  具有相同符号,即  $e \cdot \Delta e > 0$  时,对误差进行积分;相反  $e$  与  $\Delta e$  异号,即  $e \cdot \Delta e < 0$  时,不对误差积分。考虑到误差和误差变化的极值点,即边界条件及仿人智能积分的引入条件,可以用产生式规则将仿人智能积分控制算法表示如下:

① IF  $[e \cdot \Delta e > 0 \cap |e| < \epsilon \cap e \neq 0]$  THEN [对误差积分]

② IF  $[e \cdot \Delta e \leq 0 \cup e = 0]$  THEN [不对误差积分]

## 2.2 仿人智能参数自整定算法

为了进一步提高模糊控制器的性能,人们提出了自组织模糊控制器,其中最方便、最简单实用的方法是对量化因子和比例因子进行在线自调整。由于量化因子和比例因子的改变对模糊控制器的控制特性有较大影响,因此,调整这几个参数是改善模糊控制器品质的重要手段。但因  $ke$ 、 $kc$ 、 $ku$  这3个参数是相互牵制、相互制约且对系统的影响是非单调的,因此要使它们实现“最佳组合”而同时得到好的静态与动态特性,仅靠参数的简单自调整,效果并不十分理想。为了解决这一问题,笔者引入了仿人智能控制的思想来对3个参数进行在线自调整。仿人智能参数自整定算法就是根据量化因子和比例因子对模糊控制动态性能和静态性能的影响,在控制过程中模拟人的控制行为功能,最大限度地识别和利用控制系统动态“过程”所提供的特征信息,根据专家经验,通过在线自学习和直觉推理,得出控制决策,从而对被控对象进行有效的控制。具体来讲就是分析和识别系统的输出状态,“动态地、独立地”对参数  $ke$ 、 $kc$  和  $ku$  进行在线自调整,以调整整个控制过程中不同阶段上的控制特性,获得动、静态均满意的控制效果。

通过研究分析和对控制经验的总结,得出一组用来在线自调整量化因子和比例因子的仿人智能控制决策为:

① IF  $e > 0$  AND  $\Delta e < 0$  AND  $e > \epsilon$  THEN

$[A = \Delta KE, B = 0, C = \Delta KU]$

② IF  $e > 0$  AND  $\Delta e < 0$  AND  $e < \epsilon$  THEN

$[A = -\Delta KE, B = \Delta KC, C = -\Delta KU]$

③ IF  $e < 0$  AND  $\Delta e < 0$

THEN  $[A = -\Delta KE, B = \Delta KC, C = \Delta KU]$

④ IF  $e < 0$  AND  $\Delta e > 0$

THEN  $[A = -\Delta KE, B = -\Delta KC, C = -\Delta KU]$

⑤ IF  $e > 0$  AND  $\Delta e > 0$

THEN  $[A = \Delta KE, B = 0, C = -\Delta KU]$

⑥ IF  $e > 0$  AND  $\Delta e < 0$

THEN  $[A = 0, B = 0, C = -\Delta KU]$

其中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为量化因子  $ke$ 、 $kc$  和比例因子  $ku$  的动态修正因子,  $\Delta KE$ 、 $\Delta KC$ 、 $\Delta KU$  分别为  $ke$ 、 $kc$ 、 $ku$  的最小增量,其大小可根据实际情况适当选取。实际设计时对  $ke$ 、 $kc$ 、 $ku$  应选择好初始值和最大值。

设  $ke(n)$  和  $kc(n-1)$ 、 $kc(n)$  和  $kc(n-1)$ 、 $ku(n)$  和  $ku(n-1)$  分别为当前时刻和上一时刻的量化因子和比例因子,则参数在线修正算法如下:

$$ke(n) = ke(n-1) + A, kc(n) = kc(n-1) + B,$$

$$ku(n) = ku(n-1) + C$$

该修正算法体现了在不同的控制阶段采用不同的量化因子和比例因子,以调整不同阶段的输出特性。

## 3 节气门执行器的仿人智能模糊控制设计

选取节气门执行器的位移给定值与实际位移测量值的偏差  $E$  及其偏差变化率  $EC$  作为输入语言变量,把控制阀的开量  $U$  作为输出语言变量。 $e$  的基本论域为  $[-20 \sim +20 \text{ mm}]$ ,  $\Delta e$  的基本论域为  $[-3 \sim +3 \text{ mm}]$ ,  $u$  的基本论域为  $[-1 \sim +1]$ ,  $-1$  对应回油阀以最大占空比打开,  $+1$  对应进油阀以最大占空比打开。其模糊化分别选取如下辞集:

$E = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$

$EC = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$

$U = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$

其中,  $P$ —POSITIVE,  $N$ —NEGATIVE,  $Z$ —ZERO,  $B$ —BIG,  $M$ —MEDIUM,  $S$ —SMALL。若  $E$ 、 $EC$  和  $U$  的论域分别取 13, 13 和 15 个等级,即

$E = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$

$EC = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$

$U = \{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7\}$

则系统中  $ke$ 、 $kc$ 、 $ku$  的初值可取为:  $ke = 0.3$ 、 $kc = 2$ 、 $ku = 0.143$ 。根据仿真分析和实验结果分析,  $\Delta KE$ 、 $\Delta KC$  和  $\Delta KU$  可按下式选择:  $\Delta KE = ke/10$ 、 $\Delta KC = kc/10$ 、 $\Delta KU = ku/10$ 。模糊控制的单片机实现采用查表法,即通过离线计算,建立一个模糊控制表,然后

将控制表存放在计算机存储器中。在控制过程中,计算机只需直接根据采样和论域变换得来的以论域元素形式表现的  $e(x_i)$  和  $\Delta e(y_j)$ , 由控制表的第  $i$  行和第  $j$  列找到对应的同样以论域元素形式表现的控制量  $u(z_k)$ , 将其乘以比例因子, 即可得到模糊控制的输出量。采用查表法有以下几个优点: ① 由于是离线计算建立控制表, 故可把模糊变量的值和论域的元素取得多一点, 可以采用好的控制算法, 提高控制精度。② 可以使单片机程序设计大大简化。③ 实时性好。

在控制表的建立中, 根据费用曲线定义  $E$ 、 $EC$  和  $U$  的隶属函数, 建立其隶属函数表; 根据专家经验和控制工程知识生成控制规则, 建立控制规则表; 模糊推理采用 Mamdani 推理法; 模糊判决采用重心法。有关上述内容的具体实现, 因篇幅所限及相关内容参考文献较多, 文中不在详述。

根据文中叙述的仿人智能模糊控制的基本思想和控制算法, 可以设计出用 80C196KC 单片机实现的控制软件, 其程序框图如图 4 所示。

#### 4 节气门执行器仿人智能模糊控制的实验结果

将上述仿人智能模糊控制用于笔者研制开发的电控机械式自动变速器, 该自动变速器被装在桑塔纳 2000 微型轿车上。电液式节气门执行器通过原车钢拉索与节气门相连, 以便将执行器的直线运动变成节气门的旋转运动。通过实车实验, 分别测取了电液式节气门执行器智能控制系统的进程阶跃响应、回程阶跃响应和位置跟踪响应的试验曲线, 如图 5 所示。

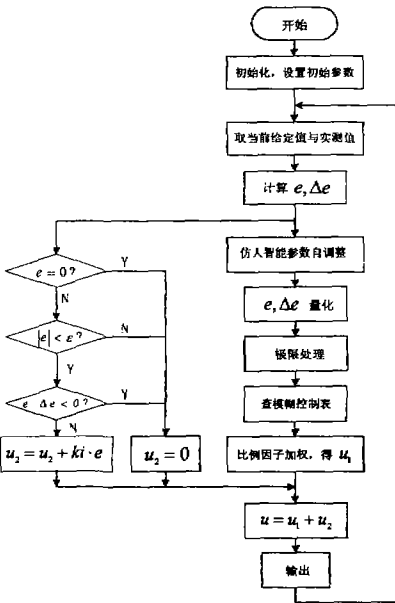


图 4 仿人智能模糊控制程序框图

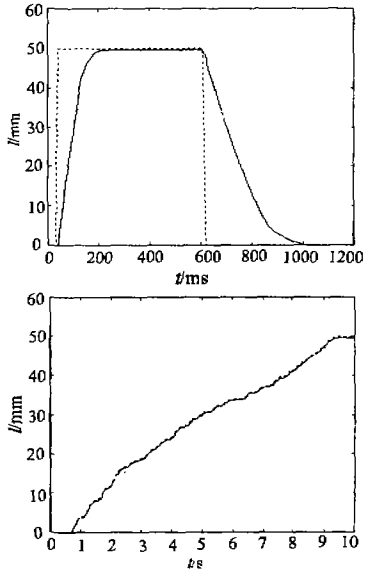


图 5 实验测试结果

图 5(a)中虚线为阶跃给定信号, 实线为节气门进程和回程位移信号。图 5(b)中虚线为脚踏板给定信号, 实线为节气门位移信号。

从图中可以看出, 仿人智能模糊控制技术应用于电液式节气门执行器的控制系统, 可以很好地保证执行器的快速性和平稳性, 可以获得较高的位置控制精度, 完全能够满足工程应用要求。

#### 5 结论

研制的电液式节气门执行器及其控制系统已用于笔者开发的电控机械式自动变速器样机中, 并通过了

成渝高速公路、渝长高速公路和市区不同路况的道路试验。汽车行驶过程中,在各种节气门开度下,执行器定位准确,响应快,操纵自如。试验结果表明,电液式节气门执行器及其控制系统结构简单,造价低,控制方便。文中提出的仿人智能模糊控制器,其设计及运行不需要建立对象数学模型,且实现比较简单,控制效果好。它具有响应速度快、超调小、鲁棒性强等优点,具有一定的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 过学迅. 汽车自动变速器——结构·原理[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [2] MAEDA M, MURAKAMI S A. Self-tuning Fuzzy Controller[J]. Fuzzy Sets and systems. 1992,51(3):29-40.
- [3] 苏玉刚, 黄建明, 曹长修, 等. 电控机械式自动变速器的80C196KC单片机控制[J]. 汽车电器, 1999, (5):7-10.
- [4] 余永权, 曾碧. 单片机模糊逻辑控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1995.

## Simulating Human Intelligent Fuzzy Control to the Throttle Actuator of AMT

SU Yu-gang, CAO Chang-xiu, HUANG Jian-ming

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper discusses the idea and design procedures of applying the fuzzy controller with simulating human intelligent control to throttle actuator of automobile engine of AMT. It is presented that the structure of electronic - controlled hydraulic throttle actuator, the composition of the control system, the control algorithms and the experiment results of the fuzzy controller with simulating human intelligent control. The experiment results and the application show that applying fuzzy controller with simulating human intelligent control to the electronic - controlled hydraulic throttle actuator can ensure the fast response, the stability and the higher control precision and meet the requirements of the actual application.

**Key words:** AMT; throttle actuator; fuzzy control; simulating human intelligent control

(责任编辑 吕蓉英)

### ·下期论文摘要预告·

## 自激振荡脉冲射流喷嘴的试验

廖振方, 唐川林, 张凤华

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 由作者发明和研制成功的自激振荡脉冲喷嘴所形成的脉冲射流, 在相同条件下与常规连续射流相比, 射流的峰值压力, 冲蚀体积和有效靶距均得到明显的提高, 本文将作者多年来所进行的实验室实验(振荡腔内流体压力的测定; 非淹没射流条件下的实验分析; 淹没条件下自激振荡脉冲射流的性能实验及其分析; 在淹没和非淹没条件下自激振荡脉冲射流的冲蚀效果; 碰撞壁碰撞区域的磨损对自激振荡脉冲射流的影响等)及工业现场实验的主要结果进行了简要介绍。