

文章编号:1000 - 582X(2005)05 - 0076 - 04

# 基于遗传算法的发动机自寻优模糊控制\*

廖仕利<sup>1</sup>, 陈渝光<sup>1</sup>, 周登义<sup>1</sup>, 赵玮霖<sup>2</sup>

(重庆工学院 1. 电子信息与自动化学院; 2. 材料科学与工程学院, 重庆 400050)

**摘要:**针对汽车发动机参数具有离散性、非线性和不确定性,采用传统控制模型难以精确控制瞬态过程的过量空气系数和点火时刻的问题,提出了一种基于遗传算法的发动机自寻优模糊控制模型。设计了实现该控制模型的嵌入式控制器,讨论了实时在线仿真基础上,采用遗传算法对模糊控制参数的自动寻优。实验表明,发动机动力性和经济性指标取得到了明显提高,以及控制模型在降低燃油消耗方面具有明显的优势。

**关键词:**自动寻优; 遗传算法; 模糊控制; 发动机

**中图分类号:**TP271.4

**文献标识码:**A

遗传算法是模拟生物进化机制新发展起来的一种搜索和优化方法,它具有良好的寻优能力,针对求解问题的全局合理性,其运行仅由适应度函数值驱动,而不需要被优化对象的局部信息<sup>[1]</sup>。基于遗传算法的自寻优模糊控制很好地融合了模糊控制的参数变化适应性强和遗传算法优秀的参数寻优的功能,形成了一种混合优化控制方法。采用基于遗传算法自寻优的模糊控制,通过调整修正因子使其在不同工况下自动寻优,用以克服由于汽油发动机具有的离散性、非线性和不确定性导致难以精确控制汽油机瞬态运行过程的过量空气系数和点火时刻等局限性,实现最优控制。

## 1 系统的硬件与软件平台

### 1.1 系统的硬件平台

整体系统由发动机实时仿真系统和发动机集中控制装置组成。发动机集中控制装置完成电子点火提前、电子燃油喷射、怠速稳定、废气再循环控制。发动机集中控制装置通过 USB(Universal Serial Bus)总线接口实现与发动机实时仿真系统之间的通信,实现发动机控制的在线实时仿真<sup>[2]</sup>,完成基于遗传算法的模糊控制参数自寻优,使发动机集中控制装置获得最佳的动力性、燃油经济性和减少排放污染。系统硬件平台如图 1 所示。

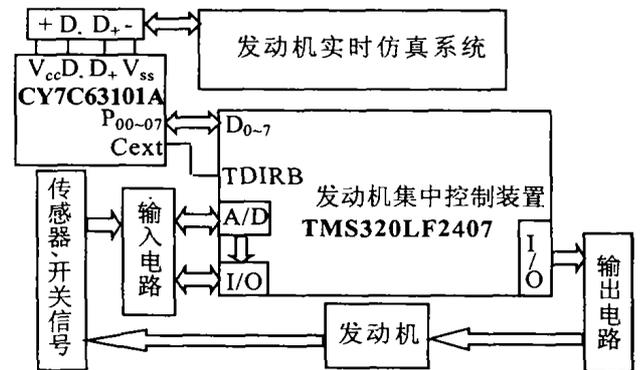


图 1 系统工作平台

发动机集中控制装置的电子控制单元采用 DSP TMS320LF2407。TMS320LF2407 采用哈佛总线结构,32 位中央算术逻辑单元,专用硬件乘法器,单周期指令执行时间为 50 ns;内置 32K Byte × 16 位 Flash E<sup>2</sup>PROM、2K 字 SARAM,2 个事件管理模块 EVA 和 EVB、5 个外部中断、2 个 8 通道 10 位高速 A/D 转换器、40 个可独立编程的 I/O 引脚,以及具有软件等待发生器的外部存储器接口模块、由看门狗和实时中断定时器组成的系统监视模块等<sup>[3]</sup>。系统扩充了定时器、输入、输出接口、Flash E<sup>2</sup>PROM、USB 接口,以及键盘和工况信息与故障代码显示器等。

电子点火控制子系统由爆震传感器构成反馈通

\* 收稿日期:2005 - 04 - 04

基金项目:重庆市科委应用基金项目(7244);重庆市教委应用基金项目(030606)

作者简介:廖仕利(1970 -),男,四川仁寿人,重庆工学院讲师,硕士,主要从事工业自动化和机械工程的研究。

道,组成间接的闭环控制系统,采用专用集成点火组件完成通电时间控制、恒电流控制、一次电流上升率控制、停车保护等功能。

电子燃油喷射控制子系统采用 D 型多点喷射和闭环控制方式。系统利用氧传感器反馈信号,随时修正喷油量,保持混合气的浓度在规定的范围内。

怠速稳定控制子系统采用带转速负反馈的控制方式。转速调节器根据转速设定值和实际值之间的差值计算节气门转角设定值。ECU 通过控制输入到真空控制调节阀脉冲电压的占空比来改变辅助空气控制阀的开度,控制进气量,从而达到控制怠速的目的。

电子控制单元根据发动机当前工况,控制废气再循环阀脉冲占空比,以调节进入真空控制调节阀负压室的空气量,得到控制废气再循环阀不同开度所需各种真空度,从而获得所需的废气再循环率。

## 1.2 系统的软件平台

软件系统采用嵌入式实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 。功能齐全的优化编译器 TMS320C2x/C2xx/C5x C 可以将标准的 ANSIC 语言转换为 TMS320LF2407 能够识别的汇编语言代码。为了实现  $\mu\text{C}/\text{OS II}$  在 TMS320LF2407 上的移植,修改了它与处理器有关的 OS\_CPU.H、OS\_CPU\_A.ASM 和 OS\_CPU\_C.C 三个文件。TMS320LF2407 中,采用定时器 1 周期中断 T1PNT 作为时钟节拍源(频率在 10 ~ 100 Hz 左右),采用软件中断作为任务切换的中断服务例程。

( )SInit() 函数用于初始化  $\mu\text{C}/\text{OS II}$  所有的变量和数据结构,同时建立总是处于就绪状态、优先级最低的空闲任务。根据系统的配置,初始化包括任务控制块缓冲区、事件缓冲区、队列缓冲区和存储器缓冲区。OS\_Start() 用于启动多任务。创建任务进程部分主要用于创建用户的任务,当调用 OS\_Start() 时,OS\_Start() 从任务就绪表中找出用户建立的优先级最高任务的控制块,然后调用高优先级就绪任务启动函数 OS\_StartHighRdy()。OS\_StartHighRdy() 将最高优先级任务在任务堆栈中保存的值弹回到 CPU 寄存器中,然后执行一条中断返回指令。中断返回指令强制执行该任务代码,在最高优先级任务中初始化时钟节拍中断函数后,进行任务调度。系统采用静态优先权,即在运行过程中任务优先权不变。

## 2 模糊控制

电子点火控制、电子燃油喷射控制、怠速稳定控制和废气再循环控制子系统均采用带修正因子的自调整模糊控制,以电子燃油喷射控制为例,将氧传感器测出

的实际空燃比与给定值的差值,及其变化率进行模糊化处理,由隶属度函数确定其所属等级。通过自寻优获得的最优模糊规则来确定模糊控制信号,并将此模糊信号进行解模糊处理,得出准确的控制信号<sup>[4]</sup>,对汽油机的空燃比进行控制。电子燃油喷射控制子系统框图,如图 2 所示。图中  $K_1$ 、 $K_2$  为量化因子, $K_3$  为比例因子, $\alpha_i$  为修正因子。

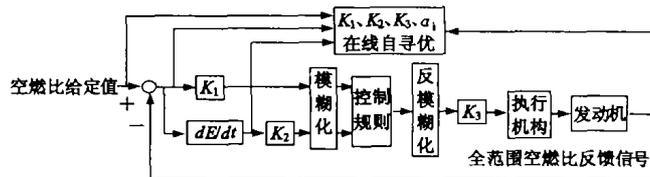


图 2 电子燃油喷射控制子系统框图

对不同的偏差等级引入各自的修正因子  $\alpha_i$ ,通过调整  $\alpha_i$  值,改变偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$  对输出  $U$  的加权程度。当偏差绝对值较大时,控制系统主要目的是消除偏差,减小系统的动态误差,因此,应加大偏差的权重;当偏差较小时,控制系统主要目的是抑制系统超调,使系统尽快达到稳态,应加大偏差变化率的权重。选取

$$\{E\} = \{EC\} = \{U\} = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\},$$

$$\text{则: } U = \langle \alpha_i E_i + (1 - \alpha_i) EC_i \rangle,$$

$$\alpha_i \in [0, 1]; |E_i| = i. \quad (1)$$

式(1)中, $i = 0, 1, 2, 3$ ;  $\langle \rangle$  表示四舍五入。

为了提高系统的适应能力和鲁棒性,改善系统的动态品质,使之达到最优,必须对修正因子  $\alpha_i$ 、量化因子  $K_1$ 、 $K_2$  和比例因子  $K_3$  进行寻优。

## 3 模糊控制参数的自动寻优

### 3.1 优化目标

控制参数优化的优化目标和约束条件与发动机性能密切相关。在不同工况条件下的优化匹配目标不同。部分负荷工况,在满足排放法规的前提下,实现最低的燃油消耗;全负荷工况,在避免出现爆震的前提下,主要考虑发动机的动力性;怠速工况,在保证目标转速稳定的前提下,主要考虑燃油经济性和降低排放污染;过渡工况、冷启动和暖机过程中,在兼顾降低排放要求的条件下,保证发动机快速启动;加速工况,主要考虑加浓混合气的响应特性;减速工况,应供给较稀的混合气。

某一工况点控制参数的优化还取决于其它工况的性能情况。因此,控制参数需要进行全局优化,以达到整体性能最优。全局优化的过程实际上是资源合理分

配的问题,它将允许的总排放量分别按特定的比例分配给各个代表工况点,并满足达到整体燃油经济性最佳的要求。全局优化以各代表工况点处油耗率的加权和作为燃油经济性指标,各代表工况点处  $HC$ 、 $CO$ 、 $NO_x$  排放率的加权和作为排放指标,并以 3 项排放指标小于在满足排放法规下的各自的限值  $\varphi_{HC_{max}}$ 、 $\varphi_{CO_{max}}$  和  $\varphi_{NO_x_{max}}$  为约束条件,以燃油经济性指标最小为优化目标。因此,优化匹配的目标可以描述为:

$$\begin{aligned} & \min \sum (W_i b_{ei}); \\ & \text{s. t. } \sum (W_i \varphi_{HC_i}) < \varphi_{HC_{max}}; \\ & \quad \sum (W_i \varphi_{CO_i}) < \varphi_{CO_{max}}; \\ & \quad \sum (W_i \varphi_{NO_{xi}}) < \varphi_{NO_{x_{max}}}. \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中:下标  $i$  为代表工况点,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为工况点总数;  $W_i$  为各工况点的权值,  $W_i = n_i/N$ ,  $N$  为发动机全部工况点的频次;  $b_i$  为各工况点稳定运行时的油耗率;  $\varphi_{HC_i}$ 、 $\varphi_{CO_i}$  和  $\varphi_{NO_{xi}}$  分别为各工况点稳定运行时的  $HC$ 、 $CO$  和  $NO_x$  的质量排放率。

### 3.2 遗传算法

遗传算法是将优化问题的一组可行解编码为一组二进制的字符串,每个字符串包含多个子字符串,每个子字符串是目标空间的某一个参数的二进制编码。这样,每一个字符串代表一个寻优目标空间内的可行解,根据优化问题的目标函数值,多个基本可行解的集合被称为一个群体,该群体被用在每次寻优选代中。通过几种简单算子操作而生成新的可行解群体,称为一个世代<sup>[5]</sup>。

1) 初始群体与编码。按照数理统计原理,在待求变量的定义域内由实验产生由  $n$  个体组成的满足约束条件的初始群体  $P(t)$  ( $t = 0, n$  表示群体规模,这里  $n$  取为 20),该群体代表优化问题的可行解的集合。

采用串联二进制映射编码法。每个参数都用一定长度(取决于求解的精度)的二进制串进行编码,然后将各参数的编码连接起来形成一个组合代码串<sup>[6]</sup>。参数取值范围的上下限分别为  $\gamma_{maxj}$ 、 $\gamma_{minj}$ 。参数串的代表值和实际参数值之间的关系为:

$$\gamma_j = \gamma_{minj} + \frac{b}{2^{\lambda_i}} (\gamma_{maxj} - \gamma_{minj}). \quad (3)$$

式(3)中,  $b$  为  $\lambda$  位字符串所表示的二进制整数;  $\gamma_j$  为实际参数值;  $j$  表示参数序列号。

若需要优化的参数个数为  $k$ ,则所使用的 GA 编码就有  $\sum_{j=1}^k \lambda_j$  个二进制数串。

2) 评价。为改善被控制对象动态和静态性能,控制系统的目标函数定义为  $J = e^T e = \min$ 。定义适应度函数  $F = 1/J$ ,用此函数计算群体中每个个体的适应度  $f_i$ 。适应度越大,表示该个体适应度越高,更适应于  $F$  所定义的环境。

3) 选择。从群体  $P(t)$  中选取  $n$  个串形成一个匹配集,匹配集是用于繁殖后代的双亲个体源。采用转轮法,任意一个串  $i$  被选中的概率  $P_i$  与适应度  $f_i$  成正比。

4) 交叉和变异。按照交叉和变异的繁殖方法由匹配集产生  $n$  个新串,得到一个新的群体。这里采用改进的均匀交叉。当 2 个父个体位值相异的位数为  $m$  时,从中随机选取  $m/2$  个位置,实行父个体位值的互换。变异的位置按变异概率  $P_m$  随机确定,  $P_m$  一般很小。实际算法中,进化前期不采取变异操作。当种群进化到一定的收敛时期,从优秀个体中选择一部分个体进行初始化。初始化的方法是选择取 0.35 的基因座,随机地决定它们的位置。遗传算法的寻优流程,如图 3 所示。

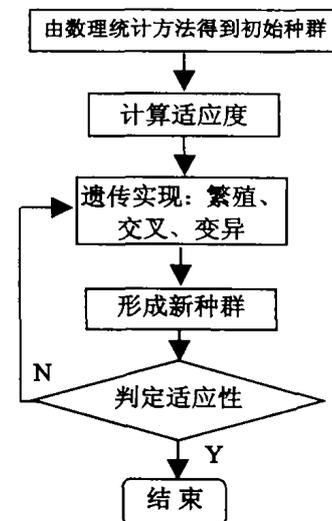


图 3 遗传算法寻优流程

## 4 实际应用效果

按照国标 GB/T 18297 - 2001《汽车发动机性能试验方法》对 465Q 发动机作了负荷特性试验和外特性试验,分别如图 4、图 5 所示。同时,进行了台架性能对比试验。从对比数据可以看出,采用基于遗传算法的自寻优模糊控制系统比采用化油器式供油的系统提高了输出功率 10.8% 左右和降低燃油消耗 14.5% 左右,从而大大地改善了发动机的动力性和经济性,排放性能指标也得到了很大的改善,获得了较好的控制效果。

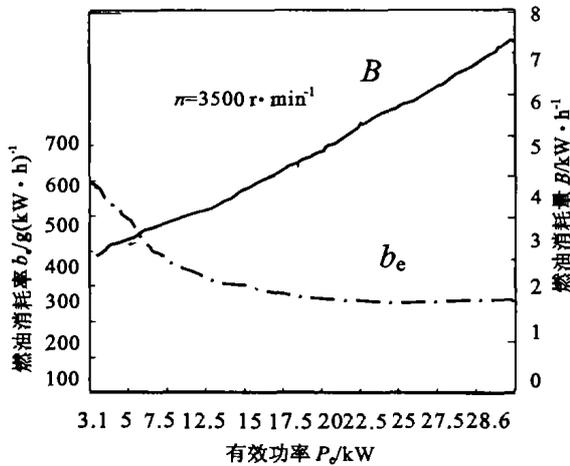


图 4 负荷特性试验曲线

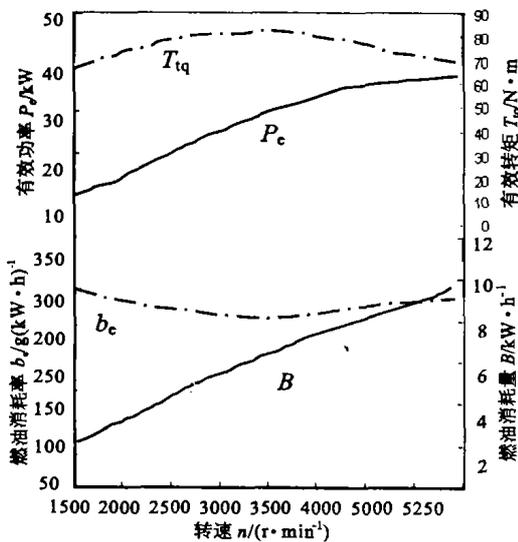


图 5 外特性试验曲线

## 5 结 语

以基于嵌入式操作系统的控制器为核心的发动机集中控制系统的硬件与软件平台,可以方便地实现在实时在线仿真基础上,采用遗传算法对模糊控制参数的自动寻优。系统采用遗传算法分阶段对  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  和  $\alpha_i$  进行自动寻优,实现了基于遗传算法的自寻优模糊控制,达到了提高发动机功率和降低燃油消耗的目的。试验结果表明,在发动机的整个工作范围内,系统工作可靠,抗干扰能力强。同时,试验结果也表明了该控制模型与其它控制模型相比,在降低燃油消耗方面具有明显优势。

### 参考文献:

- [1] 李士勇. 模糊控制·神经网络和智能控制论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.
- [2] 陈渝光,孙跃,黄丽雯. 具有实时仿真功能的通用发动机集中控制系统[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2003,26(10):23-26.
- [3] 章云,谢莉萍,熊红雁. DSP 控制器及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [4] 韩峻峰,李玉惠. 模糊控制技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,2003.
- [5] 张文修,梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [6] 卢红光,李平. 基于遗传算法的模糊控制器的设计[J]. 自动化与仪器仪表,2000,(4):8-10.

## One Auto-optimized Fuzzy Control of Car-engines Based on GA

LIAO Shi-li<sup>1</sup>, CHEN Yu-guang<sup>1</sup>, ZHOU Deng-yi<sup>1</sup>, ZHAO Wei-lin<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information & Automation; 2. School of Material Science & Engineering, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China)

**Abstract:** One new auto-optimized fuzzy control model of car-engines based on genetic arithmetic was introduced aiming at the problem that the parameters of car-engine are of the discreteness, the nonlinear and the uncertain characteristics, with which it is difficult to control accurately the excess air coefficient and the spark advance angle in dynamic procedure when using a conventional control model. The rule of the design scheme of the controller achieving the model based on embedded operating system is discussed. Further more, it is probed that the fuzzy control parameters are optimized automatically using GA based on on-line real-time simulation. The results of experiments show that the dynamic indexes and the fuel economy indexes are all improved greatly and the advantage of the model on reducing fuel consumption is obvious.

**Key words:** auto-optimizing; genetic arithmetic; fuzzy control; car-engine