

模糊自适应控制在微机 SCR 全数字化直接相位控制中的应用

王祥国

(安徽大学计算机科学与工程系·合肥, 230039)

摘要: 本文结合碳纤维生产的微机温度控制系统设计, 介绍了模糊自适应控制在 SCR 全数字化直接相位控制中的应用. 文中提出了增量式模糊控制的概念, 用以解决传统模糊控制存在稳态误差或在工作点附近振荡的问题, 并给出一种实用性很强的控制算法, 即 PID-增量式模糊自适应控制算法及其计算机实现.

关键词: SCR 全数字化直接相位控制; 微机温度控制; 增量式模糊控制; 自适应控制

1 引言

晶闸管(SCR)是一种可控功率输出器件, 能以微小的电流(毫安级)来控制大功率的电气设备(几百、几千甚至上万千瓦). 它的出现及在它之后的一系列功率器件的诞生, 在工业上引起了一场技术革命, 使电子技术和自动控制理论的诸多最新成就扩大应用到强电领域.

在微机控制系统中, 对 SCR 输出的控制一般可分为开关式控制和相位控制两大类. 对于复杂的控制场合, 如变流控制, 大都采用相位控制. 微机 SCR 全数字化直接相位控制是 SCR 应用领域一直追求的目标. 即只用一条机器输出指令就能直接控制 SCR 的任一指定的相位角, 实现对 SCR 相位角的不经 D/A 转换的、不占用 CPU 时间和中断资源的直接数字输出控制. 文[1]给出了微机 SCR 全数字化直接相位控制的接口设计方法.

传统的模糊(Fuzzy)控制器, 由于其输入(偏差 e 和偏差的变化率 $\dot{e}$)被量化环节离散分档后, 其输出本质上是抖动的. 因而被控量存在稳态误差或在工作点附近存在一定幅度的振荡. 这一直是 Fuzzy 控制有待解决的问题. 本文通过碳纤维生产的微机温度控制系统设计实例, 提出了增量式 Fuzzy 控制的概念, 将传统 Fuzzy 控制器的全量输出改为增量式输出, 并引入了积分作用, 从而能实现 Fuzzy 控制器的无差控制和在平衡点上的渐近稳定控制. 根据这一设想, 我们给出一种实用性很强的控制算法, 即 PID-增量式 Fuzzy 自适应控制, 并结合 SCR 全数字化直接相位控制技术, 实现了对碳纤维生产的温度参量的有效控制.

2 被控对象的结构特点及控制要求

碳纤维生产是将含碳量高的化纤原丝如丙烯晴等加热, 经氧化碳化后成为高强度的纯碳丝. 生产过程中要控制的参数主要有温度、走丝速度、牵伸张力和气氛. 其中温度控制是保证质量的关键. 被控装置由六个管状电加热炉实现, 分为六个温控区, 十五个控制、检测点. 1号炉~4号炉是预氧化区, 均为 3m 长的可调分段恒温控制, 精度要求 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$. 5

号炉是低温碳化区. 为两端可调的温度梯度控制, 两端温控精度 $\leq \pm 3^\circ\text{C}$. 6 号炉是高温碳化区, 为可调的恒温控制, 精度 $\leq \pm 3^\circ\text{C}$. 由于炉腔两端是与外部连通的, 为了保证反应过程中炉膛内的气氛, 在氧化炉中需通入适量的压缩空气, 并保证炉内气压高于大气压, 而碳化炉则通入氩气, 以保证完全碳化. 另外, 碳纤维生产过程中要裂解出许多有毒气体, 为了保证操作人员的健康和污染环境, 每个炉子的两端都装有抽风管. 这就是气氛控制. 气氛控制是系统热交换过程的组成部分, 是影响温度的重要因素.

由上可知, 为了保证长距离的恒温控制和所要求的温度梯度控制, 每个温区都采用多点控制. 因此各个控制点之间是相互影响和制约的. 再者, 为了降低系统成本, 对于气氛控制, 用户要求不采用专门的压力控制装置. 因此其压力不稳和时变对温度的影响只得由软件来加以解决. 由此可见, 我们所设计的系统, 是一个涉及到分布参数的非线性时变系统. 故欲通过理论分析为其建立准确的数学模型是十分困难的, 采用常规 PID 控制是无法对系统进行高精度控制的, 采用自校正调节器又摆脱不了对系统进行参数辨识及复杂的矩阵运算. 因此, 如何用低档次的微机来实现鲁棒性很强的自适应控制, 以保证系统具有长期的稳态精度, 是我们所要解决的关键问题.

3 进行 SCR 全数字化直接相位控制的相位分度方法

在微机 SCR 相位控制中常要遇到正弦或余弦的三角函数运算. 这对低档次的微机来说, 不但编程比较麻烦, 而且执行起来要占用较多的机器时间. 又由于在 SCR 相位角的不同相位上, 单位增量的功率输出所对应的相位角的变化量是不等的, 所以在进行增量控制时, 增量的计算也是比较麻烦的. 这里介绍一种编程简单, 且可以大大减少运算时间的“分度查表法”. 它可方便地实现 SCR 的直接相位输出控制和直接相位增量输出控制.

以 SCR 作为执行元件的温控系统, 是通过控制 SCR 的负载电阻 (如电热丝) 所产生的热量来调节温度的. 因此所谓“分度”, 就是按 SCR 输出的电能能在发热器上产生的单位热量对 SCR 的相位角进行分度. 下面给出分度函数.

设温控系统采用 SCR 单相全波调压供电, 电阻性负载. 交流电的每一个二分之一周波在导体上产生的热量 (以焦耳为单位) 为

$$Q = \int_0^\pi \frac{V_m^2}{R} \sin^2 t dt.$$

这里 R 为电热器电阻. 假若 SCR 导通时的压降忽略不计, 则经 SCR 后为

$$Q = \int_\alpha^\pi \frac{V_m^2}{R} \sin^2 t dt. \quad (1)$$

对 (1) 式微分求出 Q 的一个增量 ΔQ 与 α 所需的修正值 $\Delta\alpha$ 之间的对应关系

$$dQ = -\frac{V_m^2}{R} \sin^2 \alpha d\alpha,$$

即

$$\Delta\alpha = -\frac{R}{V_m^2} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha} \Delta Q.$$

因为我们习惯于用度数来表示移相角 α , 所以须乘以 $\frac{180^\circ}{\pi}$, 再将 V_m 换成有效值 V , 则上式可写为

$$\Delta\alpha = -\frac{R}{V^2} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha} \Delta Q \frac{180^\circ}{\pi}.$$

或者表示为

$$\Delta\alpha = -C(R) \cdot \frac{1}{\sin^2\alpha} \Delta Q. \quad (2)$$

(2)式即我们所要求的分度函数。 $C(R)$ 作常数处理。写成 $C(R)$ 的形式主要是考虑在进行多通道控制时,各个通道 SCR 的负载电阻可能不一样。设建表所用的 $R=R_0$,则其它各通道查表时只要乘以一个比例系数 μ_j 即可

$$\mu_j = \frac{C(R_j)}{C(R_0)}.$$

j 为通道号。这样,不同负载的各个通道就可共用一张分度表。根据式(2),若

$$\Delta\alpha_i = -C(R_0) \cdot \frac{1}{\sin^2\alpha_{i-1}} \Delta Q,$$

则移相角的分度值

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + \Delta\alpha_i.$$

其中 i 为分度序号。在分度建表时,宜从 90° 开始向两边分度。 ΔQ 由用户根据调节精度来确定。

例如,碳纤维生产的预氧化炉 $R_0=25\Omega$, $V=220\tilde{V}$,单位调节量 $\Delta Q=4$ 卡 (4.186×4 焦耳),则将 $0 \sim 180^\circ$ 的移相角分度为 188 个单元已足以满足系统的控制要求。可见,建表所用的存储单元对于现代的微机来说是不足道的。

4 控制算法设计

根据前面对被控对象的结构特点及控制要求的介绍可知:1) 同一个炉子的各温控点间存在着交互影响;2) 气氛控制存在较多的不确定性;3) 电网电压昼夜变化的幅度较大等。这些都是对系统稳态精度影响较大的因素。为达到用户的要求和系统的设计目标,我们把以上各种影响因素和其它环境影响因素都看成是对被控对象的扰动,而变原来多输入单输出系统为单输入单输出系统,变分布参数系统为集中参数系统。另外,就归并后的扰动的性质来看,它是有界的,所以这样做是可行的。为此我们设计了“PID-增量式模糊自适应控制”。这是一种变结构的鲁棒控制。它无须对被控对象进行模型辨识和在线求解差分方程,也无须进行复杂的矩阵运算,用比例控制(P)、或比例微分控制(PD)、或比例积分微分控制(PID)实现系统的快速跟踪,用增量式模糊控制实现向期望值的几乎无超调的趋近,从而提高了系统的动态性能和稳态精度。其算法如图1所示。

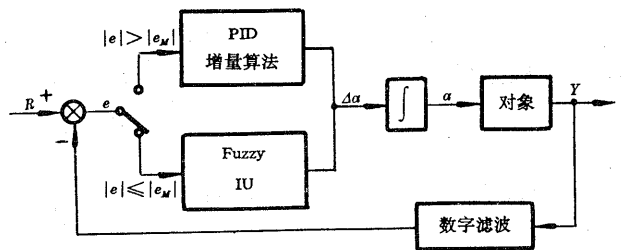


图1 控制算法结构示意图

4.1 增量式PID控制

增量式PID控制的编程公式为^[2]

$$\Delta u_k = a_0 e_k + a_1 e_{k-1} + a_2 e_{k-2}.$$

其中

$$a_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right),$$

(3)

$$a_1 = -K_p \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right),$$

$$a_2 = K_p \frac{T_d}{T}.$$

T 为采样周期, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间, T_d 为微分时间, k 为采样序号.

由第3节可知, 式(3)中, 控制变量 u 是不宜直接用 SCR 的移相角 α 的, 故我们采用中间变量 Q . Q 是电热器所提供的热量. 而 SCR 的移相角正是用单位热量 ΔQ 进行分度的. 因此, Δu_k 对应的即 ΔQ_k . 这样, 我们就可通过查表直接求取相应的 $\Delta \alpha_k$.

查询表是这样建立的: 根据式(2), 设

$$f(\alpha_i) = C(R_0) \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha_i},$$

在计算机的数据区(ROM 中)建立一个关于 α_i 和 $f(\alpha_i)$ 一一对应的表(i 为分度序号). 在计算机求出 α_k 后, 只要偏移一个地址取出相应的 $f(\alpha_k)$, 这样在下一采样周期, 由(3)式求出增量 ΔQ_{k+1} 后, 马上就可根据 $\Delta \alpha_{k+1} = -f(\alpha_k) \Delta Q_{k+1}$ 算出移相角的输出控制增量 $\Delta \alpha_{k+1}$.

由于 SCR 的相位控制属于位置式控制, 所以 $k+1$ 采样周期的控制输出

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + \Delta \alpha_{k+1}, \quad (4)$$

(4)式也即图1中积分功能的实现.

相应于 α_{k+1} 的计算机输出值为 M_{k+1}

$$M_{k+1} = C \alpha_{k+1}.$$

这里 $C = \frac{2^n}{\alpha_{\max}}$, $\alpha_{\max} = \max\{\alpha_{\max}^{(j)}\}$, n 为输出接口寄存器的位数.

但是, PID 调节器是一种线性调节器. 用 PID 控制不能从根本上解决系统的非线性问题和时变问题. 因此我们采用变结构的切换控制, 当 $|e| \leq |e_M|$ 时, 由智能单元(IU)——增量式模糊自适应控制器来实现对对象时变的高精度跟踪和提高对扰动的不敏感性.

4.2 增量式模糊自适应控制

设被控变量 Y 的偏差 $e = R - Y$, 偏差的变化率 $\dot{e}_k = e_k - e_{k-1}$. 所谓“增量式模糊控制”, 是指 Fuzzy 控制器根据 e 和 $\dot{e}$ 及某种语言规则综合出来的控制输出, 不是全量输出 u 而是增量 Δu , 由 Δu 再经积分环节得到 u . 积分作用可以由控制器实现, 也可由执行机构(如步进电机)实现. 增量式 Fuzzy 控制是一种在控制系统的高层次的“精细”控制. 它也是基于人的大脑对周围环境的反应方式而设计的.

本系统的 Fuzzy 控制器是按

IF A AND B THEN C

语言控制规则设计的. 这里 A 即 $\tilde{E}_i$ 为偏差论域 E 中定义的 Fuzzy 子集; B 即 $\tilde{E}_j$ 为偏差变化率论域 $\dot{E}$ 中定义的 Fuzzy 子集; C 即 $\tilde{U}$, 为增量输出论域 ΔU 中定义的 Fuzzy 子集. 控制器的输入 e 分为12级, $\dot{e}$ 分为8级. 为了减少中间换算环节并利于查表, 可取量化因子为1, 即各级的档值直接填写相应的 e 和 $\dot{e}$ 值. 为提高在平衡点上的渐近稳定性, e 随着向零趋近可逐渐分得细一些. $\dot{e}$ 同样也可采用非均匀分级. 表1表2为本系统采用的分级方式. 表3为语言变量 $\tilde{U}$ 的隶属度赋值表格式, 其中 $d_i (i=1, 2, \dots, l)$ 为前述单位分度 ΔQ 的个数. 由各条语言控制规则求得模糊关系 $\tilde{R}$ 及最后求得控制表与一般 Fuzzy 控制类似^[3].

表 1 偏差 e 的分级方式

隶属度 $\bar{E}$	档次	<	-2.00	-1.00	-0.75	-0.50	-0	+0	+0.50	+0.75	+1.00	+2.00	>
		-4.00											+4.00
$\bar{E}_i$		μ_{i1}	μ_{i2}	μ_{i3}	μ_{i4}	μ_{i5}	μ_{i6}	μ_{i7}	μ_{i8}	μ_{i9}	μ_{i10}	μ_{i11}	μ_{i12}

表 2 偏差变化率 $\dot{e}$ 的分级方式

隶属度 $\dot{E}$	档次	<	-1.00	-0.50	-0.25	-0	+0	+0.25	+0.50	>
										+1.00
$\dot{E}_j$		μ_{j1}	μ_{j2}	μ_{j3}	μ_{j4}	μ_{j5}	μ_{j6}	μ_{j7}	μ_{j8}	

表 3 $\Delta \bar{U}$ 的隶属度赋值表格式

隶属度 $\Delta \bar{U}$	档次	$-d_i$	$-d_{i-1}$	...	$-d_1$	0	d_1	...	d_{i-1}	d_i
$\Delta \bar{U}_i$		μ_{i-1}	μ_{i-1+1}	...	μ_{i-1}	μ_0	μ_1	...	μ_{i-1}	μ_i

在输出控制表的调试优化过程中,通过加权,充分地考虑了对超调的抑制和在平衡点的渐近稳定性.设未加权的控制表矩阵为 $\bar{D} = (\bar{d}_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, 8$, $j = 1, 2, \dots, 12$, 权矩阵为 $Q = (q_{ij})$, 则加权后的控制表矩阵为

$$D = (d_{ij}) = (\text{int}(\bar{d}_{ij}q_{ij} + 0.5)).$$

其中权系数

$$q_{ij} = a^{k(\alpha_i + \beta_j)}. \quad (5)$$

在增量式 Fuzzy 控制中一般可取 $0.9 \leq \alpha < 1$, $0 \leq \beta \leq 2$. α 为反映系统动特性的参数, 当 $\alpha > 1$ 时, 表示要强调偏差的变化率 $\dot{e}$, 反之, 则 $\alpha \leq 1$. $k > 0$ 是用来适应 e 和 $\dot{e}$ 的论域范围或协调量化因子的. 这种加权对 e 和 $\dot{e}$ 很小时作用不大, 因此不影响在模糊化的过程中对渐近稳定性的考虑, 而主要是抑制超调.

在 Fuzzy 控制中, 特别是在增量式 Fuzzy 控制中, 操作者的经验一般都是在系统稳态时统计地得到的, 再加系统本身具有惯性, 因此按照这样的经验或统计结果设计的 Fuzzy 控制器一般都比较“保守”. 经(5)式加权后就体现了“积报控制”的精神, 从而提高了系统的动态性能. 这种加权方法另一个明显的优点是可以在线调试或优化.

表4为预氧化炉和低温碳化炉的低温端共用的控制表. 低温碳化炉的高温端和高温碳化炉使用此表时只须乘以相应的系数即可. 通过查表即可直接得到当前采样周期的控制输出 $\alpha(k)$, 如根据 e 和 $\dot{e}$ 查表得 d_m , 则

$$\Delta u_m \triangleq \begin{cases} \sum_{i=1}^{d_m} [\alpha_i(k) - \alpha_{i-1}(k)], & d > 0, \\ 0, & d = 0, \\ \sum_{i=-1}^{-d_m} [\alpha_i(k) - \alpha_{i+1}(k)], & d < 0. \end{cases}$$

这里 d_m 为相应 Δu_m 的查表(分度表)地址偏移量, 符号为地址偏移方向. 因为是基于 $(k-1)$ 周期的输出 $\alpha(k-1)$ 进行查表的, 故查表所得即当前采样周期的输出 $\alpha(k)$.

表 4 控制表

$\begin{matrix} E \\ D \end{matrix}$	$\begin{matrix} E \\ D \end{matrix}$	$<$	-2.00	-1.00	-0.75	-0.50	-0	+0	+0.50	+0.75	+1.00	+2.00	$>$
$\begin{matrix} E \\ D \end{matrix}$	$\begin{matrix} E \\ D \end{matrix}$	-4.00											+4.00
<-1.00		18	13	9	6	4	2	1	0	0	0	0	0
-0.50		12	9	6	4	3	1	0	0	0	0	0	-1
-0.25		10	6	4	3	1	0	0	0	0	0	-1	-2
-0		7	4	2	1	1	0	0	0	0	-1	-2	-3
+0		3	1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-4	-6
+0.25		2	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-5	-8
+0.50		1	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-5	-7	-10
$>+1.00$		0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-5	-7	-10	-15

由于 PID-增量式 Fuzzy 控制器是在 PID 控制的高层加进了智能自适应控制,故它不受 PID 参数的约束,因而提高了对系统的不确定性和时变的适应能力,明显地优于单纯 PID 控制.图2,图3是 PID-增量式 Fuzzy 控制(虚线)与单纯数字 PID 控制都整定在理想状态下的比较结果.图2是在预氧化炉某一控制点上记录的升温曲线.从图中可看到,①的调节时间只要3个多小时,而②要5个多小时,而且有

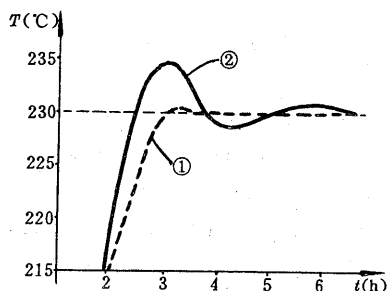
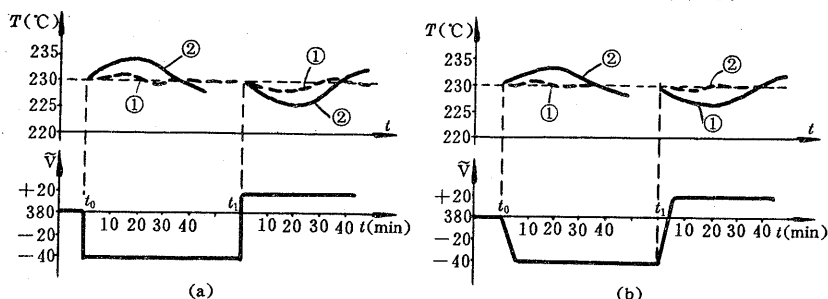


图 2 升温曲线的比较

4℃以上的超调。在整个运行过程中,①的精度能控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,而②只能控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。图3是在同一点记录的空压机电压扰动(或时变)的试验曲线。当系统处于稳态时,给一个 -40V 的阶跃扰动,这时送风量减少,在系统其它参数不变的情况下,系统的热交换速度变慢。当系统重新稳定在设定值后(②须减少 K_s),再给一个 $+60\text{V}$ 的阶跃扰动,同样在其它参数不变的情况下,系统的热交换速度加快。从图3(a)可看出,①对参数扰动的适应能力也大大优于②。若将同样幅度的扰动改为在5分钟内由人工控制完成的速度输入(模拟电压参数的时变),①几乎毫无反应,而②同样有一定幅度的超调与振荡。



(a) 阶跃扰动 (b) 系统时变

图 3 适应能力比较

5 结束语

碳纤维生产的温度控制系统中存在着不确定性和时变性,这在工业电加热炉中有着

一定的代表性. 本文介绍的微机 SCR 全数字化直接相位控制的设计和算法设计, 无须对系统进行模型辨识, 就可获得令人满意的控制效果, 并且可以用低档次的微机来实现, 从而也大大降低了系统成本. 它的推广价值和应用前景是不言而喻的.

参 考 文 献

- [1] 王祥国. 微机 SCR 全数字化直接相位控制接口板的设计及应用. 安徽大学学报(自然科学版), 1987, 4: 41—48
- [2] 谢剑英. 微型计算机控制技术. 北京: 国防工业出版社, 1985, 120
- [3] 王学慧, 田成方. 微机模糊控制理论及其应用. 北京: 电子工业出版社, 1987, 142—158

The Application of Fuzzy Adaptive Control in Microcomputer SCR Full-Digital Direct Phase Control

WANG Xiangguo

(Department of Computer Science and Engineering, Anhui University, Hefei, 230039, PRC)

Abstract: Taking the design of microcomputer temperature control system in carbonic fibres production as an example, the paper introduces the application of fuzzy adaptive control in SCR full-digital direct phase control. In the paper, the concept of incremental form fuzzy control is presented. It can solve the problems of steady-state deviation and oscillation in the vicinity of the set point that exist in the general fuzzy control. The paper also gives a kind of control algorithm with good applicability, that is, PID incremental form fuzzy adaptive control algorithm as well as its implementation of computer.

Key words: SCR full-digital direct phase control; microcomputer temperature control; incremental form fuzzy control; adaptive control

本文作者简介

王祥国 1944年生. 1967年毕业于安徽大学数学系, 1970年进工厂, 1975年调回安徽大学从事教学与科研工作至今. 主要研究兴趣为微型计算机自适应控制与机电一体化设计. 目前正从事微机交流调速系统的自适应控制和具有可变模型的模型参考自适应控制的理论与应用的研究.