

变增益模糊控制器

梁 滨 徐荣葆 赵培炎

(精密机械与仪器系)

摘要 本文导出了选择比例因子的定量约束条件。以此约束条件为基础,论述了选择比例因子时存在的难以同时兼顾控制系统动态和稳态性能的问题。提出用变增益的方法实现模糊控制。数字仿真结果表明,该方法比通常的固定增益模糊控制具有动态特性好,稳态误差小,以及对被控对象参数变化适应性强等优点。

关键词 模糊控制, 动态特性, 变增益

用模糊集合理论设计过程控制器,已经取得了一些应用成果^[1,3]。但模糊控制却迟未能应用于机械制造过程控制,其主要原因之一是通用的模糊控制器不能同时兼顾控制系统的动、静态特性。笔者拟把模糊控制引入到磨削过程控制。磨削过程控制既要求快速响应又要求小的稳态误差以满足实时控制和磨削精度的双重指标。因此,普通固定增益模糊控制器不能适用。有些文献^[4,5]从不同角度论述了减小模糊控制器稳态误差的方法,提出了有价值的改进建议,但问题并没有根本解决。本文提出用变增益的方法使模糊控制系统同时获得快速响应和高的稳态精度,并且经过变增益处理后的控制器对被控对象参数变化适应性更强。

1. 选择比例因子的定量约束条件

常用的模糊控制器,其控制规则为“如 \underline{E} 且 $\dot{\underline{E}}$ 则 \underline{U} ”型,写成

$$\text{IF } \underline{E} \text{ THEN (IF } \dot{\underline{E}} \text{ THEN } \underline{U})$$

式中 \underline{E} ——输出值对设定值的误差; $\dot{\underline{E}}$ ——输出值对设定值的误差变化率; \underline{U} ——控制输出。 \underline{E} 、 $\dot{\underline{E}}$ 、 \underline{U} 是用模糊集合表达的模糊概念。

实际控制中,按一系列控制规则离线计算出查询表(控制表),系统运行时,根据实际误差 e 和误差变化率 \dot{e} 从查询表中获得控制输出增量 Δv ,进而完成对系统的控制作用。

普通(固定增益)模糊控制系统如图1实线部分所示,一个查询表的例子见表1^[2]。

在推导选择比例因子的定量约束条件时，我们设定所讨论的模糊控制系统是稳定的。

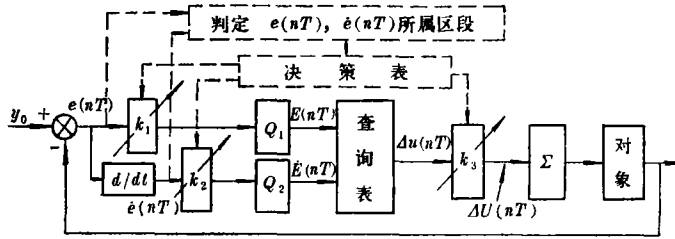


图 1 模糊控制系统方框图

表 1

| \dot{E} Δu | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | +4 | +5 | +6 |
|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| -6 | 7 | 6 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| -5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 4 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| -4 | 7 | 6 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| -3 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 3 | 2 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| -2 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | -3 | -2 | -1 |
| -0 | 4 | 4 | 4 | 5 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | -1 | -4 | -4 | -4 |
| +0 | 4 | 4 | 4 | 5 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | -1 | -4 | -4 | -4 |
| +1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | -1 | -4 | -4 | -3 | -4 | -4 | -4 |
| +2 | 1 | 1 | 1 | -2 | 0 | -3 | -4 | -4 | -4 | -3 | -4 | -4 | -4 |
| +3 | 0 | 0 | 0 | 0 | -3 | -3 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 |
| +4 | 0 | 0 | 0 | -2 | -4 | -4 | -7 | -7 | -7 | -6 | -7 | -6 | -7 |
| +5 | 0 | 0 | 0 | -2 | -4 | -4 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 |
| +6 | 0 | 0 | 0 | -2 | -4 | -4 | -7 | -7 | -7 | -6 | -7 | -6 | -7 |

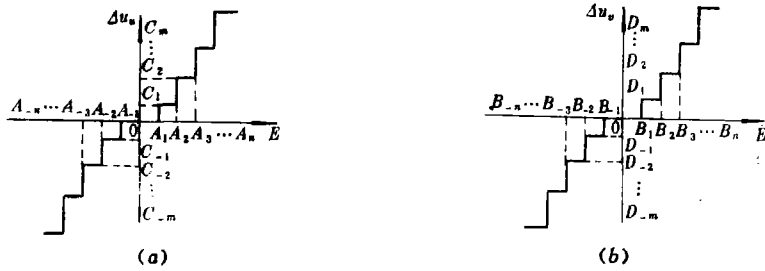


图 2

1) 在 $k_2=0$, $k_1 \neq 0$, $k_3 \neq 0$ 情况, 查询表可用图 2(a) 来表示。 $A_{-1} \sim A_1$ 之间为控制死区, 一般总是取 $|A_{-1}| = |A_1| = |A|$ 。当实际误差 e 满足关系 $|Q_1(k_1 e)| < |A|$ 时, 控制器不敏感。这是造成稳态误差的主要原因。记当 $k_1=1$, $|Q_1(k_1 e)| = |A|$ 时的 $|e_{\max}| = e_0$, e_0 —— 误差控制死区。这样实际落入死区的误差为

$$|e| < \frac{e_0}{k_1} \quad (1)$$

由(1)式可见 k_1 对 $|e_{w\max}|$ 的影响关系 ($e_{w\max}$ 为最大稳态误差)。当 $k_1=1$ 时, $|e_{w\max}| = e_0$ 。当 $k_1 > 1$ 时, $|e_{w\max}|$ 减小为 e_0 的 $1/k_1$ 。反之当 $k_1 < 1$ 时, 则 $|e_{w\max}|$ 增大。

k_1 对系统性能的另一个主要影响是上升速度, 这是因为 k_1 的增大提高了控制灵敏度的缘故。

从图 2(a) 中可得输出增量的最小值为 $|C_{-1}|$ 或 $|C_1|$, 一般它们也是相等的 (由控制规则决定), 记为 $\Delta u_{u\min}$ 。记入 k_3 作用, 则

$$\Delta U_{u\min} = k_3 \Delta u_{u\min} \quad (2)$$

设控制器输出加之被控对象后, 引起对象的输出变化为 Δy , 对于确定的被控对象, Δy 和 Δu_u 之间的关系是确定的

$$\begin{aligned} \Delta y &= f(\Delta U_u) \\ \Delta y_{u\min} &= f(\Delta U_{u\min}) = f(k_3 \cdot \Delta u_{u\min}) \end{aligned} \quad (3)$$

对于单位闭环反馈控制系统

$$|\dot{e}_{u\min}| = |\Delta y_{u\min}| = |f(k_3 \cdot \Delta u_{u\min})| \quad (4)$$

由设定, 系统是稳定的, 所以控制作用 $\Delta u_{u\min}$ 造成的误差变化的一半, 即 $|\dot{e}_{u\min}|/2$ 必须小于控制死区, 即需满足

$$|\dot{e}_{u\min}|/2 = |\Delta y_{u\min}|/2 = |f(k_3 \cdot \Delta u_{u\min})|/2 < \frac{e_0}{k_1}, \text{ 或 } \frac{k_1}{2} \cdot |f(k_3 \cdot \Delta u_{u\min})| < e_0 \quad (5)$$

(5) 式为 k_1 和 k_3 之间的定量约束条件, 对于确定的被控对象, 它们可以完全确定。通常可近似为某种反比关系。若要求系统快速响应, 则 k_1 、 k_3 均需取大值, 但因为往往不能满足约束条件(5), 使系统不能稳定收敛。大的 k_1 , 小的 k_3 , 或小的 k_1 , 大的 k_3 均可保证满足约束条件(5), 使系统稳定工作。但前者虽可得到较好的稳态性能, 却使系统的响应显著减慢。而后者正相反, 使系统的响应速度大大加快, 却损失了稳态精度。所以当 $|A|$, $\Delta u_{u\min}$ 确定以后, k_1 和 k_3 的选择是受(5)式约束的, 固定不变的 k_1 和 k_3 不能同

时获得满意的动、静态特性。

2) 在 $k_1 = 0$, $k_2 \neq 0$, $k_3 \neq 0$ 时, 查询表可用图 2(b) 表示。同样, 定义误差变化不敏感死区为: 当 $k_2 = 1$, $|Q_2(k_2 \dot{e})| = |B|$ 时的 $|\dot{e}_{\max}| = \dot{e}_0$, \dot{e}_0 —— 误差变化控制死区。实际落入死区内的 \dot{e} 为

$$|\dot{e}| < \frac{\dot{e}_0}{k_2} \quad (6)$$

可见, k_2 影响误差变化的敏感范围。所以 k_2 愈大, 系统抑制超调和振荡周期的能力愈强, 否则愈弱。但 k_2 的增大愈扩大了对干扰的响应。

$$\text{同上所述} \quad |\dot{e}_{v\min}| = |\Delta y_{v\min}| = |f(k_3 \cdot \Delta u_{v\min})| \quad (7)$$

$$\text{若使系统稳定必须有} \quad |\Delta \dot{e}_{v\min}| / 2 < \frac{\dot{e}_0}{k_2} \quad (8)$$

才可满足假设系统稳定的条件。把已知量代入(8), 即得

$$\frac{k_2}{2} \cdot (|f(k_3 \cdot \Delta u_{v\min})| + \delta_e) < \dot{e}_0 \quad (9)$$

其中 $\delta_e = \min \left[\frac{Q_2^{-1}(|B|)}{k_2} \right]$; Q_2^{-1} 表达量化取整的逆运算。(9) 式给出了 k_2 和 k_3 之间的定量约束条件。若要求快速收敛, 小超调, 少振荡周期, 则取大的 k_2 ; 若要求有效抑制干扰影响, 则选小的 k_2 。而 k_3 的选取则同时受到 k_1 和 k_2 的约束。

上面导出了选择比例因子的定量约束条件 (5)、(9)。根据约束条件, 讨论了选择 k_1 和 k_3 及 k_2 和 k_3 时的矛盾现象。显然, 在通常的固定增益模糊控制器中, 比例因子的选择, 必须折中考虑各项性能指标。一般以牺牲某些性能指标的优良性, 来换取控制器的稳定工作。

2. 变增益模糊控制器

参阅图 1, 系统输出 $y = f_1(e, \dot{e}, k_1, k_2, k_3, \Delta u)$, 即输出 y 不仅取决于 $e, \dot{e}, \Delta u$, 还取决于隐增益 k_1, k_2, k_3 (一般称为比例因子)。为了解决普通模糊控制器在选择比例因子时的矛盾, 使模糊控制器具有更广泛的应用对象, 笔者提出了变增益模糊控制器。为简明起见, 我们称比例因子固定的普通模糊控制系统为固定增益模糊控制系统, 笔者提出的比例因子可变的模糊控制系统为变增益模糊控制系统。基本思想是, 把模糊控制系统对阶跃信号的误差响应和误差变化响应分成三段 (图 3)。根据每一段的主要性能指标优选合适的比例因子 k_1, k_2, k_3 , 使得整个系统的动态和稳态性能能同时接近或达到理想状态。第一段误差 e 或误差变化 \dot{e} 较大, 这时主要指标是快速消除误差, 即高的响应速度, 所以需要小的 k_1 和 k_2 , 大的 k_3 。第二段误差 e 和误差变化 \dot{e} 较小, 这时系统需要收敛快且超调小, 选取中等的 k_1 和 k_2 , 以及中等的 k_3 较为合适。第三段已接近设定点, e 和 \dot{e} 均很小, 此时的主要指标是较高的稳态精度和稳定收敛。所以应该选取大的 k_1 和 k_2 , 小的 k_3 。详见表 2。其算法框图见图 4。经过变增益处理后的模糊控制器, 可以得到很好的动态和稳态特性, 对被控系统的适应能力更强, 仿真实例见下节。

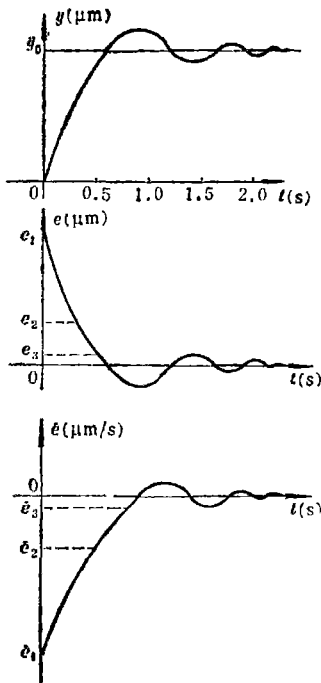


图 8

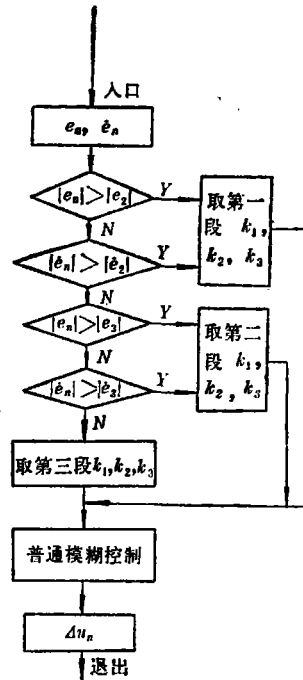


图 4

各段的比例应该视具体系统决定。我们推荐第一段可取设定值的70%左右，第二段约取设定值的22%，第三段取设定值的8%。设定值是根据实际被控对象可能出现的最大误差选定，然后选择分段并优化出各段 k_1 , k_2 , k_3 值。 k_1 , k_2 , k_3 的选取顺序为，按系统要求，先选取 k_1 ，然后由约束条件(5)选出 k_3 ，再由约束条件(9)确定 k_2 。以上约束条件仅提供了可选择的最大值，并不是最佳值，还必须进行优化或优选得到最佳的比例因子。为了防止失控，选择 k_3 时，必须使控制器最终输出在各段相接处有一定的重叠。

表 2

| 比例因子 | e | | |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | 第一段 | 第二段 | 第三段 |
| $\frac{e}{e}$ | $\frac{e_1 e_2}{e}$ | $\frac{e_2 e_3}{e}$ | $\frac{e_3 0}{e}$ |
| 第一段 $\frac{e}{e_1 e_2}$ | k_1 小 k_2 小 k_3 大 | k_1 小 k_2 小 k_3 大 | k_1 小 k_2 小 k_3 大 |
| 第二段 $\frac{e}{e_2 e_3}$ | k_1 小 k_2 小 k_3 大 | k_1 中 k_2 中 k_3 中 | k_1 中 k_2 中 k_3 中 |
| 第三段 $\frac{e}{e_3 0}$ | k_1 小 k_2 小 k_3 大 | k_1 中 k_2 中 k_3 中 | k_1 大 k_2 大 k_3 小 |

3. 仿真实例

变增益模糊控制系统如图1虚线所示。被控对象选择为一阶惯性环节，这在一定程度上是磨削过程模型的近似。为便于比较，固定增益模糊控制器和变增益模糊控制器均采用表1所示的查询表。设定值按系统可能出现的最大误差选取为 $50\mu\text{m}$ 。固定增益模糊控制器的比例因子按文献[2]给出的方法进行优化选择，得其比例因子为： $k_1=0.15$ ， $k_2=0.15$ ， $k_3=3.0$ 。变增益模糊控制器各段比例和比例因子按上述方法优选确定。

第一段为设定值的70%， $k_1=0.10$ ， $k_2=0.05$ ， $k_3=3.5$ ；第二段为设定值的22%， $k_1=0.7$ ， $k_2=1.1$ ， $k_3=0.8$ ；第三段为设定值的8%， $k_1=3.0$ ， $k_2=4.0$ ， $k_3=0.2$ 。

取被控对象参数为 $K=1$ ， $T=0.2$ ，则 $G(S)=\frac{K}{TS+1}=\frac{1}{0.2S+1}$ 。系统采样时间均取 0.1s 。下面是几组比较试验：

1) 设定值变化

图5(a)设定值为 $50\mu\text{m}$ ；图5(b)设定值为 $25\mu\text{m}$ ，图5(c)设定值为 $5\mu\text{m}$ 。

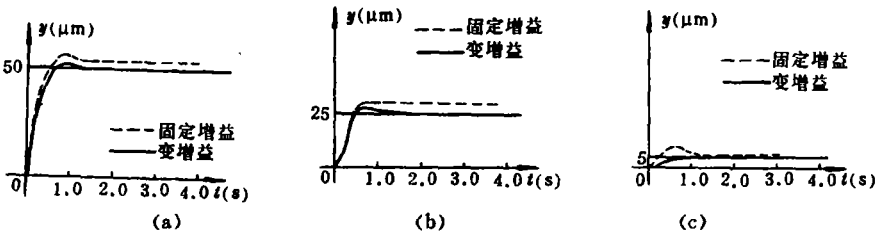


图 5

可见，在设定值变化10倍的范围内，固定增益模糊控制器已不能很好响应，超调大，稳态误差大。而变增益模糊控制能够始终保持良好的动态和稳态性能，稳态误差均在2%以内。

2) 被控对象参数变化

设定值均取 $50\mu\text{m}$ ，其它参数同前。

(1) K 值变化 ($T=0.2\text{s}$)：图5(a) $K=1.0$ ，图6(a) $K=3.0$ ，图6(b) $K=0.2$ 。

(2) T 值变化 ($K=1.0$)：图5(a) $T=0.2\text{s}$ ，图6(c) $T=0.8\text{s}$ ，图6(d) $T=0.05\text{s}$ 。

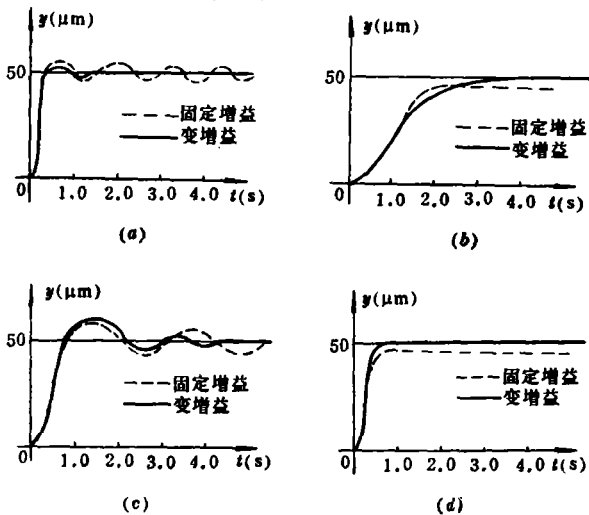


图 6

通过 K ， T 变化对比仿真可见，变增益模糊控制器不仅比固定增益模糊控制器

具有更好的动、静态特性，且对被控对象参数的变化适应性更强。

4. 结 论

- 1) 本文导出的约束条件对合理选择比例因子具有参考意义。
- 2) 固定增益模糊控制器不能同时兼顾系统动、静态特性，所以对既要求快速响应又要求较高稳态精度的工程控制问题，普通固定增益模糊控制难以适用。
- 3) 变增益模糊控制器可以同时获得动态、稳态性能均较理想的控制效果。它扩展了模糊控制的应用范围。
- 4) 变增益模糊控制器对被控对象参数变化比固定增益模糊控制器有更强的适应性，即模糊性更好。
- 5) 变增益模糊控制器与固定增益模糊控制器相比，所占机器内存几乎相等，仅多几条逻辑判别语句，微机易实现。

致 谢

本文的计算机仿真软件及使用，得到了黄柯棣副教授、戴金海老师和朱志强同志的热情帮助，谨在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 宫本雄二：FUZZY 制御とその应用，计測と制御，VOL.25，NO.5，1985
- [2] 鲍新福等：自调整比例因子模糊控制器，自动化学报，VOL.13，NO.2，1987
- [3] 邵世煌等：用微型机实现模糊控制的试验研究，自动化学报，VOL.9，NO.4，1985
- [4] 庞富胜：模糊线性复合控制，模糊数学，第1期，1987
- [5] 徐承伟：关于FUZZY 调节器的积分作用，自动化学报，VOL.11，NO.2，1985

A Variable Gain Fuzzy Controller

Liang Bin Xu Rongbao Zhao Penyan

Abstract

In this paper, the quantitative restraint conditions of choosing scaling factors are derived. On this basis, the contradictory of giving hardly consideration to both the control system's dynamic and static characteristics is discussed in choosing scaling factors. For this reason, a variable gain fuzzy control method is presented. Through numerical simulation, it is proved that this method is by far better than the fixed gain method in giving consideration to the dynamic and static characteristics. And this method adapts better itself to the variation of the parameters of controlled object than the fixed one.

Key words Fuzzy control, Dynamic Characteristic, Variable gain