

模糊控制在高速、高精度数字伺服系统中的实现

王执铨 李军 孙金生

(华东工学院自动控制系 南京 210014)

摘 要

该文针对自行研制的由 MCS-96 系列单片机与 PWM 驱动器组成的高速、高精度数字伺服系统,提出了“模糊粗、精调整控制”和“ e, \dot{e} 非线性量化法”,并明确指出模糊控制规则状态表中各量的物理意义,从而可有目的地对该表进行人为修正。采用上述方法后,实验表明系统具有很高的跟踪精度与平稳性。在单元阶跃作用下,系统具有快速过渡过程和超调量近于零的优良品质。

关键词: 模糊控制、数字控制、伺服系统。

1 引言

模糊控制在缓慢变化的工业过程中已得到成功的应用。文献^[1-3]指出 Fuzzy 控制同样可以适用于快速过程,但实例很少。而本文将介绍我们成功地将 Fuzzy 控制用于自行研制的由 MCS-96 系列单片机与 PWM 驱动器组成的高速、高精度数字伺服系统中。为了实现 Fuzzy 控制需要在理论与技术手段上有所突破。为此我们提出了“Fuzzy 粗、精调整控制”、“ e, \dot{e} 的非线性量化法”,并明确指出 Fuzzy 控制规则表中各量对执行电动机运行状态的影响,从而可以有目的地对该表进行修正。采用上述措施后,在速度跟踪与加速度跟踪时辅以适当的前馈补偿,实验表明系统在单元阶跃输入下超调量近于零,并具有快速过渡过程、跟踪精度高的优良动、静态品质。

2 系统结构

系统由以 MCS-96 系列单片机为主体,按最小系统原则设计的控制计算机、调节对象、位置反馈三部分组成。其结构如图 1 所示。

3 Fuzzy 控制的实现

由于高速、高精度数字伺服系统采样周期往往很短(本系统仅为 1.5 ms),在这样短

的周期内要完成取给定值 θ_i 、输出值 θ_o ，完成控制算法的收敛计算并输出控制量等许多工作。故诸如：自适应算法、变结构控制算法等均受到算法收敛时间的限制，往往难以用上。简单的 PID 调节又难以得到优良的动态性能。鉴于此，我们采用 Fuzzy 控制表法，充分利用计算机存数、取数极快的特点将 Fuzzy 控制成功地应用于高速、高精度数字伺服系统。

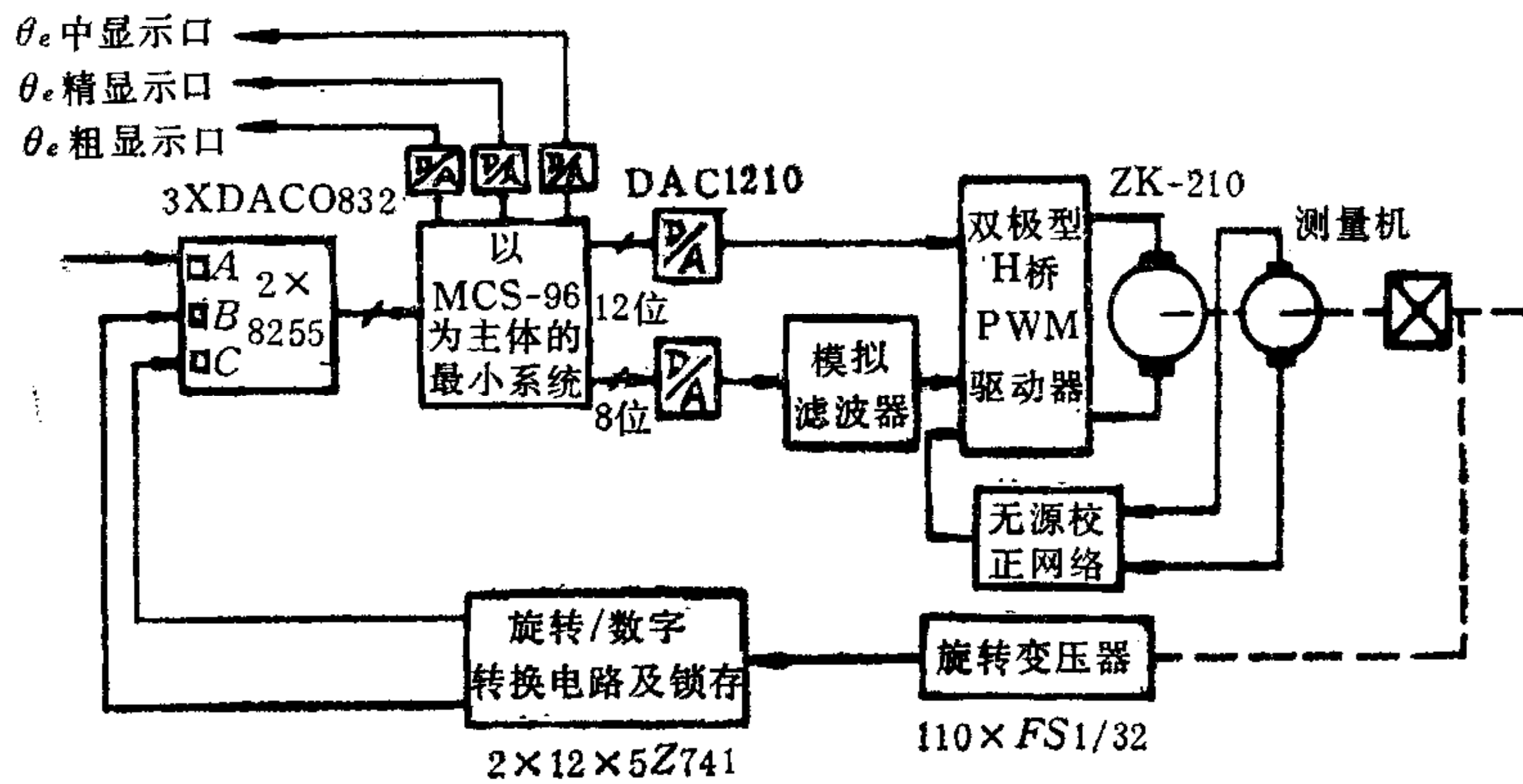


图1 系统的结构图

3.1 Fuzzy 控制表的求取

1) 将 E 、 C 和 U 分为 7 个 Fuzzy 变量子集；确定 E 、 C 和 U 的 Fuzzy 论域；根据实际情况给定它们各自的 Fuzzy 子集的隶属度并用表格表示。

2) 用一组语句总结控制策略，可得一系列控制规则。为便于对其研究和修改，分析典型的阶跃响应曲线可得 Fuzzy 控制规则原理图，如图 2 所示。图中，曲线上方字母表示误差变化率 C 的 Fuzzy 子集，曲线下方字母表示误差 E 的 Fuzzy 子集。由每条控制规则可得一个三元模糊关系：

$$R_{ij} = (E_i \times C_j) \times U_{ij} \quad (1)$$

则

$$\mu_{R_{ij}}(x, y, z) = \mu_{E_i}(x) \wedge \mu_{C_j}(y) \wedge \mu_{U_{ij}}(z) \quad (2)$$

$$\forall x \in X, \forall y \in Y, \forall z \in Z$$

系统总的控制规则对应关系 R 有：

$$R = \bigcup_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} R_{ij} \quad (3)$$

其中

$$\mu_R(x, y, z) = \max_{\substack{i=1 \rightarrow m \\ j=1 \rightarrow n}} [\mu_{R_{ij}}(x, y, z)] \quad (4)$$

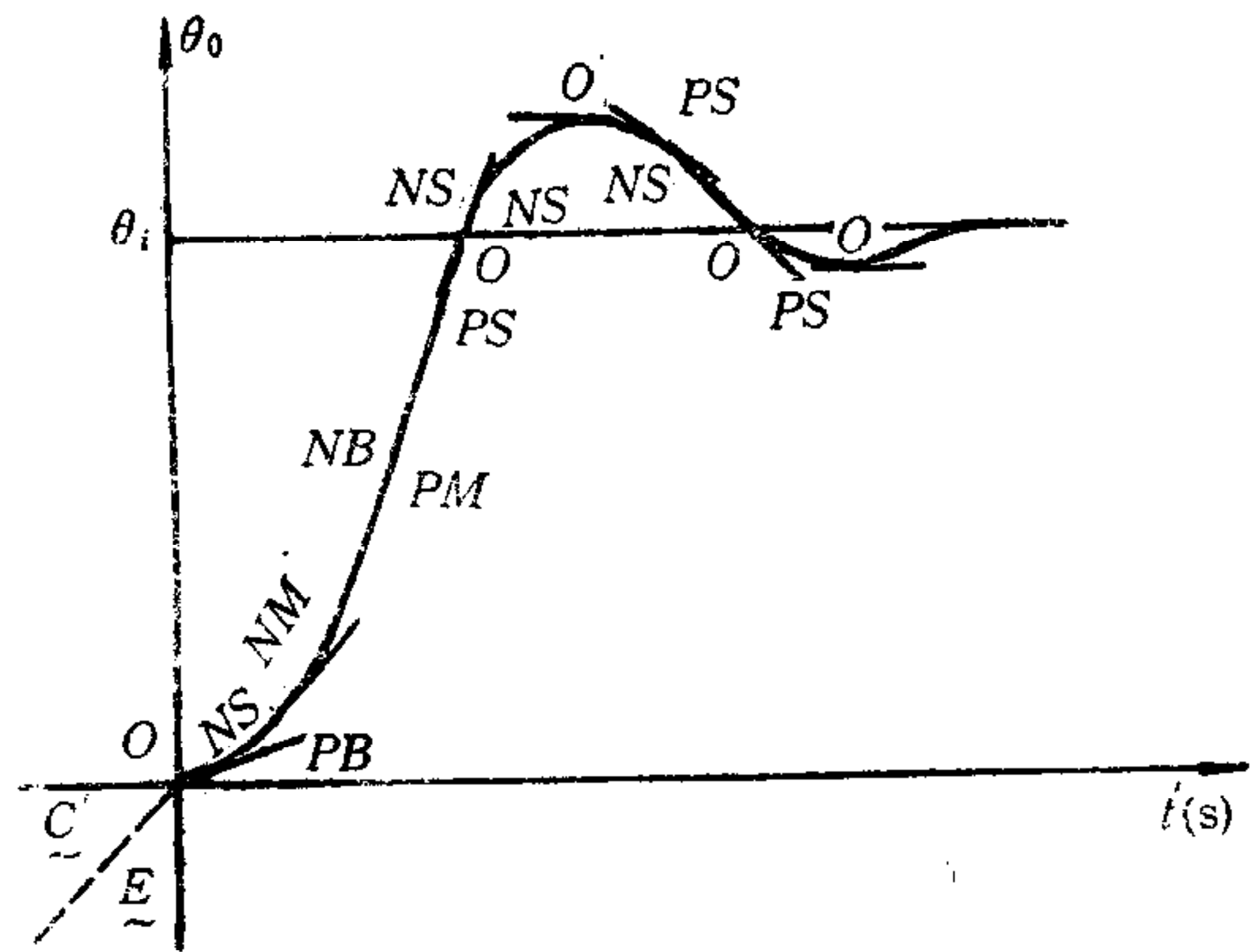


图2 Fuzzy 控制规则原理图

根据输入 E 和 C , 由(5)式求控制量 U .

$$U = (E \times C) \circ R, \tag{5}$$

其中

$$\mu_U(z) = \bigvee_{\substack{x \in X \\ y \in Y}} \mu_R(x, y, z) \wedge [\mu_E(x) \wedge \mu_C(y)]. \tag{6}$$

3) 由上面计算得到的 Fuzzy 子集 U , 采用加权平均判决法即得到控制量 U_{max} .

$$U_{max} = \left(\sum_{i=1}^n \mu(u_i) \cdot U_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \mu(u_i) \right) \tag{7}$$

对应每组 E 和 C 有相应控制量, 结合实际进行修改, 即可得 Fuzzy 控制表.

3.2 控制规则状态表的物理意义

在图 3 中控制量为 $\langle 0 \rangle$ 的子集恰好处于对角线上, 可以用这条对角线将控制状态表

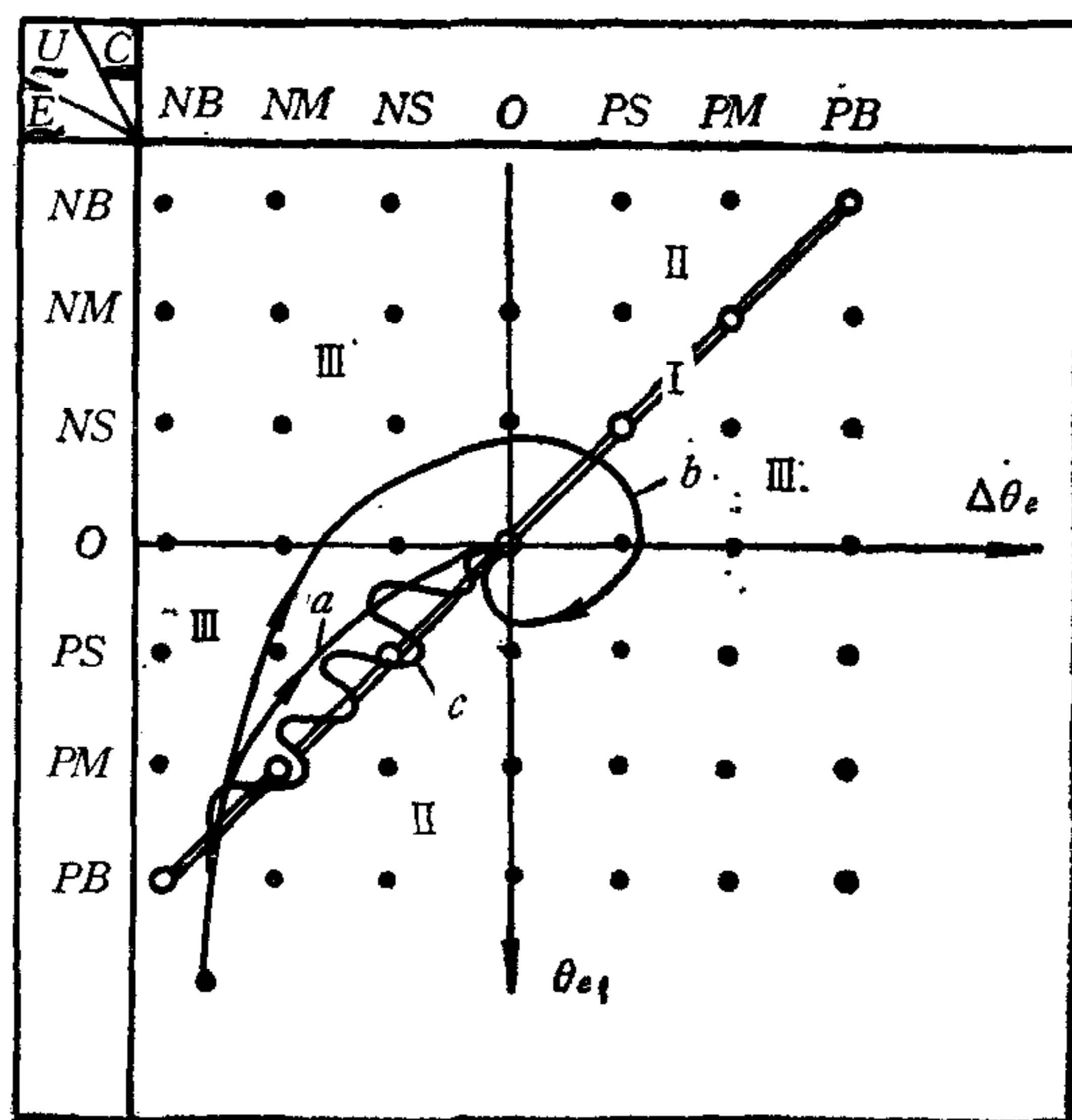


图 3 控制规则状态表的物理意义

分成三个区域。在 I 区执行电动机处于能耗制动区; 当误差 e 为正, 在 II 区电机处于反接制动状态, 在 III 电机处于电动状态或回馈制动状态; e 为负时, II 区与 III 区与上述状态相反。

设系统有一正的大幅值阶跃输入, 由图 3 知, 希望系统沿曲线 a 运动, 该过程充分利用了回馈制动和能耗制动状态, 系统运行平稳、响应速度快且超调量近于零。沿曲线 b 运动系统超调量大、振荡次数增多, 说明控制表取值及 e 的量化不够合适; 沿曲线 c 运动系统将不断地在电动状态与反接制动状态间转换, 这时系统运动不够平稳且过渡过程时间长, 这是 e 量化不当而造成的。

基于以上分析, 在系统调试中可根据系统的现实响应与对其要求, 有目的、有针对性地对控制表进行修改。

3.3 Fuzzy 粗、精调整控制

由于系统带有很大的惯性负载, 仅采用单一的 Fuzzy 控制、使用线性量化方法, $\langle 0 \rangle$ 等级很大, 即系统死区很大, 难以保证控制精度。文献[1,2]所提的方法对本系统效果不佳。为此, 笔者提出了“Fuzzy 粗、精控制方法”, 即根据误差 e 之大小而采用“Fuzzy 粗控制”、“Fuzzy 精控制”, 并在精控制范围内对误差 e 采用“非线性量化方法”来提高稳态精度。非线性量化公式为:

$$K = \text{SGN}(e) * \text{CINT}(7/\sqrt{a} * \sqrt{|e|}) \tag{8}$$

e 的论域为 $(-a, a)$, K 取 $[0, 1, \dots, 6]$, 为使控制精度高, “Fuzzy 精控制”误差 e 的 $\langle 0 \rangle$ 等级要小, 但过小会引起系统在 0 位的振颤。综合考虑后定下 $\langle 0 \rangle$ 等级的最小值 $\theta_{e, \min}$, 再

由 $\theta_{e\min}$ 决定进入“Fuzzy 精控制区”的切换值 a (约为 1°)。为使系统响应迅速,粗控制区与 Bang-Bang 的切换值取决于系统物理上可实现的最大速度。“Fuzzy 精控制区”决定了系统的精度,“Fuzzy 粗控制区”对动态性能起决定性作用。

3.4 前馈补偿

因系统所跟踪的角速度及角加速度均很大,对跟踪精度又要求极高,故采用前馈来提高跟踪精度。为减小输入量 θ_i 量化的影响,对 $\Delta\theta_i$ 采用平均值滤波,有:

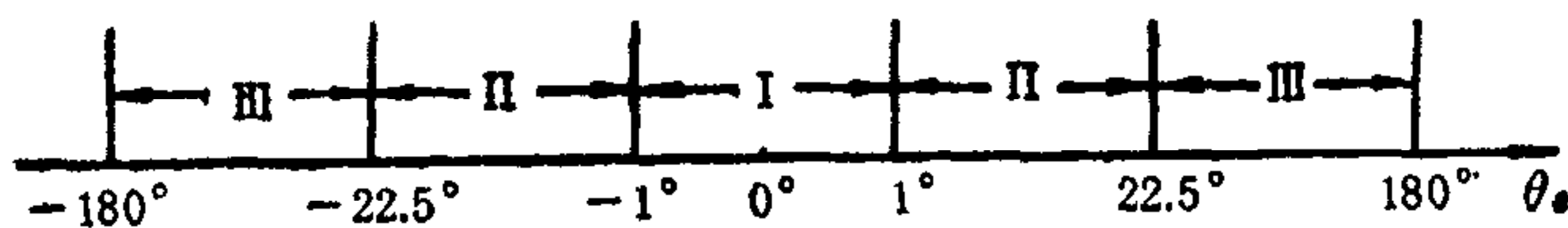


图4 Fuzzy 精、粗控制切换示意图

$$C_{fv} = 8(1 - z^{-4}) \quad (9)$$

对 $\Delta^2\theta_i$ 采用如下滤波器,单位样本响应为

$$h(n) = \begin{cases} 1 & \text{当 } n = 0, 1, 2, \dots, M-1 \\ 0 & \text{当 } n > M \end{cases} \quad (10)$$

若 $x(n)$ 为该数字滤波器的输入信号,则其输出信号为:

$$y(n) = \sum_{j=0}^{M-1} x(n-j) \quad (11)$$

又

$$\Delta^2\theta_i = \theta_i(n) - 2\theta_i(n-1) + \theta_i(n-2) \quad (12)$$

则 $\Delta^2\theta_i(n)$ 经该数字滤波器乘以 K_a 即得平滑后的二阶差分前馈信号 C_{fa} 。取 $K_a = 32$, $M = 62$,

$$\begin{aligned} \text{则 } C_{fa} &= K_a \sum_{j=0}^{M-1} \Delta^2\theta_i(n-j) \\ &= 30[\theta_i(n) - \theta_i(n-1) - \theta_i(n-62) + \theta_i(n-63)] \end{aligned} \quad (13)$$

于是前馈控制信号的传递函数为:

$$\begin{aligned} D_f(z) &= 30(1 - z^{-1} - z^{-62} + z^{-63}) \\ &\quad + 8(1 - z^{-4}) \end{aligned} \quad (14)$$

前馈信号经模拟滤波后去控制PWM驱动器。

4 实验结果与结论

实验数据及曲线表明:

1) 由图5看出,在误差为 180° 的单元阶跃输入作用下,系统具有理想的过渡过程,超调量近于0,过渡过程时间极快,仅为3.2s。

2) 系统以 $60^\circ/s$ 作等速跟踪时,速度误差很小,仅为 0.06° ,均方差仅为 0.024° 。

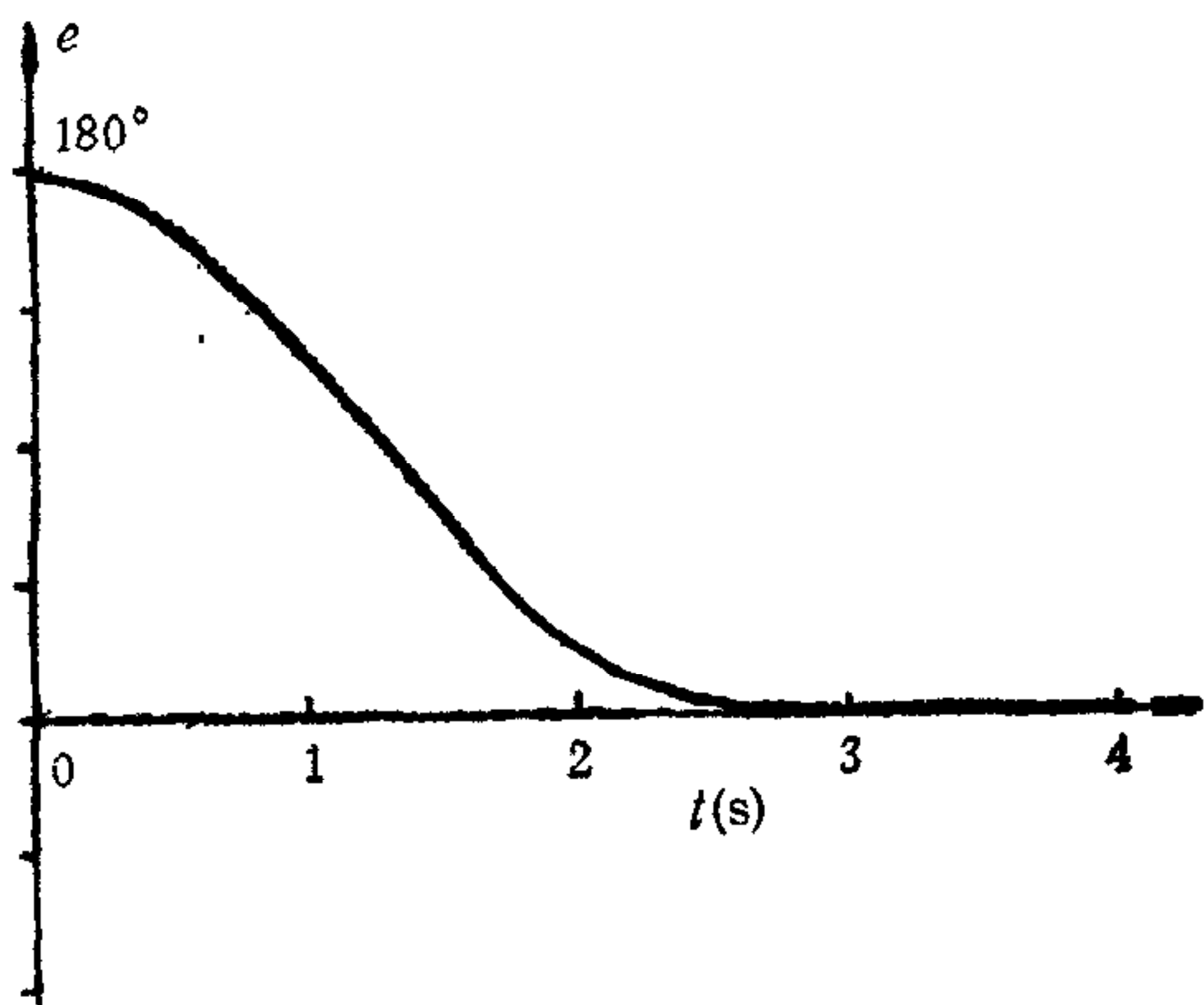


图5 单元阶跃输入时系统的过渡过程

差很小,仅为 0.06° ,均方差仅为 0.024° 。

3) 系统以角速度 $60^\circ/\text{s}$ 角加速度 $60^\circ/\text{s}$ 作正弦跟踪时,跟踪误差仅为 0.096° ,均方差为 0.036° .

采取本文提出的方法后, Fuzzy 控制不仅可以用于缓变过程,也可成功地用于高速、高精度数字伺服系统中,并取得令人满意的结果. Fuzzy 控制对被控对象的数学模型精确性要求不高,因而将会有广阔的应用前景.

参 考 文 献

- [1] 胡家耀等. 参数自调整 Fuzzy-PI 调节器. 信息与控制, 1987, **16**(6): 26—33.
- [2] 王建国等. 改善模糊控制系统稳态性能的新方法. 自动化与仪表, 1988, **3**(3): 15—19.
- [3] Mamdani E H and Assilian. A Fuzzy Logic Controller for a dynamic Plant. *Int. J. Man-Machine stud.*, 1975, **7**.
- [4] 庞富胜. 模糊-线性复合控制. 模糊数学, 1987, **7**(1): 55—60.
- [5] 王学慧, 田成芳编. 微机模糊控制理论及应用. 电子工业出版社, 1987年11月.

THE IMPLEMENTATION OF FUZZY CONTROL IN HIGH-SPEED, HIGH-ACCURACY DIGITAL SERVO-SYSTEM

WANG ZHIQUAN LI JUN SUN JINSHENG

(Department of Automatic Control East China Institute of Technology)

ABSTRACT

This paper describes a high-speed, high-accuracy digital servo-system composed of self-developed MCS-96 Series Single chip computer and PWM driver. The author suggested several methods, such as "Fuzzy rough or accurate regulating Control", "e and e nonlinear quantizing method", and explained the physical meaning of every constant in the state table. Using these methods, experiments show that the system has very high tracking accuracy and good stationary character. Under step-input, the system has a fast transient process and a very small overshoot.

Key words: Fuzzy Control, Digital Control, Servo-System.