

操作人员控制规则的模糊建模及其应用¹⁾

张化光 柴天佑 王殿辉

(东北大学自动化研究中心 沈阳 110006)

陈来九

(东南大学动力工程系 南京 210018)

摘 要

根据操作人员对生产设备的实际手动控制数据,提出了辨识模糊控制规则,进而自动地生成模糊控制状态作用表以及查询表的新颖方法。仿真研究表明,该方法是有用的。

关键词: 模糊辨识,状态作用表,模糊模型,控制规则。

1、引言

在经典模糊控制系统中,当模糊化方法和模糊决策方法取定时,选取适宜的模糊控制规则是该系统实现良好控制的核心问题。传统上获得模糊控制规则的方法是利用人们从受控对象得到的模糊信息,进行归纳和操作经验的总结^[1,2,3]。然而,在实际中常常出现这样的情况:熟练操作人员能够很好地手动控制某一生产设备的运行,但是却很难提出对应的模糊控制规则,或者只能给出粗糙的、不完善的模糊控制规则。这是因为,实际上手动操作者对被控对象的控制策略有时仅有可以意会而难以言传的认识,同时也由于手动操作者自觉或不自觉地使用控制准则的模糊品质判据。因此,研究一种由手动控制数据自动提取模糊控制规则的方法是很有意义的。

本文利用对现场操作人员操作过程的模糊辨识来自动地提取模糊控制规则模型,同时也可以自动地生成模糊控制状态作用表或查询表。后者是经典模糊控制系统的主要组成部分。

2、控制规则模型的数学描述

具有 p 个输入,单个输出的离散时间控制规则模型可以由 n 条模糊规则组成的集合

本文于 1992 年 5 月 6 日收到。

1) 本课题得到国家博士后科学基金资助。

来表示^[4-6], 其中第 i 条模糊规则的形式为

$$\begin{aligned}
 R^i: & \text{ if } y(k-1) \text{ is } A_1^i, y(k-2) \text{ is } A_2^i, \dots, y(k-n_y) \text{ is } A_{n_y}^i, \\
 & u_1(k-\tau_1) \text{ is } A_{n_y+1}^i, \dots, u_1(k-\tau_1-n_1) \text{ is } A_{n_y+n_1+1}^i, \dots, \\
 & u_p(k-\tau_p) \text{ is } A_{n_y+n_1+\dots+n_{p-1}+p}^i, \dots, u_p(k-\tau_p-n_p) \text{ is } A_{n_y+n_1+\dots+n_p+p}^i, \\
 & \text{ then } y^i(k) = p_0^i + p_1^i y(k-1) + p_2^i y(k-2) + \dots + p_{n_y}^i y(k-n_y) \\
 & + p_{n_y+1}^i u_1(k-\tau_1) + \dots + p_{n_y+n_1+1}^i u_1(k-\tau_1-n_1) + \dots + p_{n_y+n_1+\dots+n_{p-1}+p}^i \\
 & u_p(k-\tau_p) + \dots + p_{n_y+n_1+\dots+n_p+p}^i u_p(k-\tau_p-n_p). \quad (1)
 \end{aligned}$$

这里 R^i 表示第 i 条模糊规则; A_j^i 是一个模糊子集, 其隶属函数中的参数称为前提参数; y^i 是第 i 条模糊规则的输出; p_j^i 是结论参数; $u_1(\cdot), \dots, u_p(\cdot)$ 是输入变量; $y(\cdot)$ 是输出变量; $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_p$ 是纯时间滞后; n_y, n_1, \dots, n_p 是有关变量的阶数。有关纯时间滞后 ($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_p$) 和阶数 (n_y, n_1, \dots, n_p) 可采用类似于常规的辨识方法来确定。

为方便起见, 令

$$\begin{cases}
 x_1(k) = y(k-1), \\
 x_2(k) = y(k-2), \\
 \vdots \\
 x_{n_y}(k) = y(k-n_y), \\
 x_{n_y+1}(k) = u_1(k-\tau_1), \\
 \vdots \\
 x_m(k) = u_p(k-\tau_p-n_p), \\
 m = n_y + \sum_{i=1}^p (n_i + 1).
 \end{cases} \quad (2)$$

于是, 方程(1)可写成如下的形式

$$\begin{aligned}
 R^i: & \text{ if } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i, \\
 & \text{ then } y^i = p_0^i + p_1^i x_1 + \dots + p_m^i x_m. \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中 x_j 是 $x_j(k)$ 的简写, $j = 1, 2, \dots, m$ 。

下面约定: x_j 称为模糊模型的广义输入变量; 在前提中, 如果 “ x_j is A_j^i ” 略写, 则意味着 x_j 未加限制。本文中模糊子集的隶属函数取为分段直线组成的凸函数形式。

假如给定一个广义输入向量 ($x_{10}, x_{20}, \dots, x_{m0}$), 那么由诸规则的输出 $y^i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的加权平均可求得输出

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n G^i y^i}{\sum_{i=1}^n G^i}. \quad (4)$$

这里 n 是模糊规则的数目, y^i 由第 i 条规则的结论方程式求得, 权 G^i 代表对应于此广义输入向量的第 i 条规则的真值, 由下式确定:

$$G^i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_{j0}). \quad (5)$$

这里 Π 是模糊算子, 采用取小运算。

3、控制规则模型的模糊辨识

由输入输出数据求取控制规则模型的模糊辨识方法由两部分组成：前提结构辨识和参数辨识^[4]。参数辨识又分为前提参数辨识和结论参数辨识。

现简单介绍每步的具体算法。

3.1 结论参数的辨识

本节的目的是：假若给定模糊模型的前提结构和参数，并给定一组输入输出数据，求取最优的结论参数。

由式(3)–(5)，有

$$\hat{y} = \left[\sum_{i=1}^n G^i (p_0^i + p_1^i x_1 + \cdots + p_m^i x_m) \right] / \sum_{i=1}^n G^i = \mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\theta}^T. \quad (6)$$

其中 $\mathbf{H} = (w^1, w^1 x_1, \cdots, w^1 x_m, w^2, w^2 x_1, \cdots, w^2 x_m, \cdots, w^n, w^n x_1, \cdots, w^n x_m)$; $\boldsymbol{\theta}^T = (p_0^1, p_1^1, \cdots, p_m^1, p_0^2, p_1^2, \cdots, p_m^2, \cdots, p_0^n, p_1^n, \cdots, p_m^n)^T$; $w^j = G^j / \sum_{i=1}^n G^i, j = 1, 2, \cdots, n$.

由最小二乘法可以求得误差平方最小条件下的最优结论参数。

3.2 前提参数的辨识

在模糊辨识算法中，涉及到三类隶属函数，都是由分段直线组成的。它们是 small (见图 1(a))，medium (见图 1(b)) 及 large (见图 1(c))。

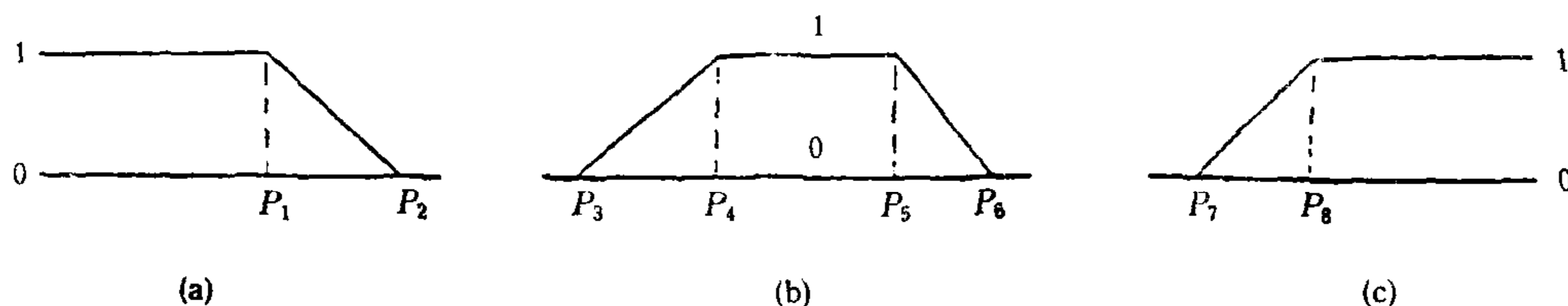


图 1 三种隶属函数的形式

图 1 中 p_1, p_2, \cdots, p_8 等为前提参数，表示各类隶属函数的转折点，对应的隶属度是 1 或 0；模糊子集 small 和 large 有两个前提参数；medium 有四个前提参数待辨识。

前提参数的辨识问题，就是对于给定的一组输入输出数据，寻求使性能指标达到极小的前提参数。本文在辨识算法中采用的性能指标为误差平方的均方，这里的误差是实际系统的输出值与辨识器输出值之差。采用解非线性规划问题的复合型方法求取最优前提参数。

3.3 前提结构的辨识

前提结构的辨识包括两个内容。首先是确定那些广义输入变量需要出现在前提中，其次是这些变量空间的最优划分。例如，某个含有四个广义输入变量的系统由以下三条规则给出：

$$\left. \begin{aligned} R^1: & \text{if } x_2 \text{ is small}_1 \text{ and } x_3 \text{ is small}_2, \text{ then } y = 2.0 + 3.0x_1 + 6.0x_4; \\ R^2: & \text{if } x_2 \text{ is small}_1 \text{ and } x_3 \text{ is large}_2, \text{ then } y = 1.0 + 0.5x_2 + 3.0x_3; \\ R^3: & \text{if } x_2 \text{ is large}_1, \text{ then } y = 7.0 + 0.8x_1 + 1.0x_3 + 2.0x_4. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可见, 变量 x_1 和 x_4 并未出现在任何前提中, R^3 仅有一个前提变量 x_2 . 有关前提结构辨识的方法详见文献[4,6].

4、模糊控制状态作用表的建立及示例分析

这里以火电厂过热汽温过程为例, 阐述如何利用模糊控制规则模型建立模糊控制状态作用表的问题.

首先, 应该到现场收集手动控制汽温过程的大量输入输出数据, 但由于条件的限制和时间的紧迫, 我们没有能够这样做. 这里的输入输出数据是计算机仿真方法产生的. 作为一个例子, 这里采用传统的过热汽温串级调节系统生成实验数据.

某过热汽温自动调节系统构成框图如图 2 所示^[3].

表 1

| k | $E(k)$ | $CE(k)$ | $U(k)$ | k | $E(k)$ | $CE(k)$ | $U(k)$ |
|-----|-----------|-----------|----------|-----|-----------|-----------|----------|
| 1:* | -.247E-01 | -.154E-02 | .480E+02 | 19: | -.161E+00 | -.127E-02 | .469E+02 |
| 2: | -.346E+00 | -.201E-01 | .473E+02 | 20: | -.160E+00 | .832E-04 | .469E+02 |
| 3: | -.548E+00 | -.127E-01 | .468E+02 | 21: | -.140E+00 | .123E-02 | .469E+02 |
| 4: | -.642E+00 | -.586E-02 | .465E+02 | 22: | -.108E+00 | .202E-02 | .469E+02 |
| 5: | -.639E+00 | .181E-03 | .463E+02 | 23: | -.698E-01 | .238E-02 | .470E+02 |
| 6: | -.558E+00 | .507E-02 | .463E+02 | 24: | -.326E-01 | .232E-02 | .470E+02 |
| 7: | -.425E+00 | .834E-02 | .465E+02 | 25: | -.182E-02 | .192E-02 | .471E+02 |
| 8: | -.269E+00 | .975E-02 | .467E+02 | 26: | .191E-01 | .131E-02 | .471E+02 |
| 9: | -.117E+00 | .946E-02 | .470E+02 | 27: | .288E-01 | .608E-03 | .472E+02 |
| 10: | .650E-02 | .775E-02 | .472E+02 | 28: | .281E-01 | -.469E-04 | .472E+02 |
| 11: | .895E-01 | .519E-02 | .474E+02 | 29: | .191E-01 | -.560E-03 | .472E+02 |
| 12: | .126E+00 | .230E-02 | .475E+02 | 30: | .513E-02 | -.873E-03 | .471E+02 |
| 13: | .120E+00 | -.374E-03 | .475E+02 | 31: | -.104E-01 | -.968E-03 | .471E+02 |
| 14: | .812E-01 | -.244E-02 | .475E+02 | 32: | -.243E-01 | -.871E-03 | .471E+02 |
| 15: | .223E-01 | -.368E-02 | .474E+02 | 33: | -.344E-01 | -.634E-03 | .471E+02 |
| 16: | -.422E-01 | -.403E-02 | .472E+02 | 34: | -.395E-01 | -.318E-03 | .470E+02 |
| 17: | -.997E-01 | -.359E-02 | .471E+02 | 35: | -.394E-01 | .954E-05 | .470E+02 |
| 18: | -.141E+00 | -.258E-02 | .470E+02 | | | | |

图 2 中 PI_1 是主调节器, PI_2 是副调节器. 若要求系统输出衰减率是 75%, 那么按照文献[7]的方法, 可以求得主、副调节器分别为:

$$PI_1(s) = \frac{1}{0.5} \left(1 + \frac{1}{74s} \right), \quad (8)$$

$$PI_2(s) = 25 \left(1 + \frac{1}{2000s} \right). \quad (9)$$

在扰动 I 为 0.1mA, 扰动 II 为 5mA, 采用周期为 16 秒时, 对上述控制系统进行

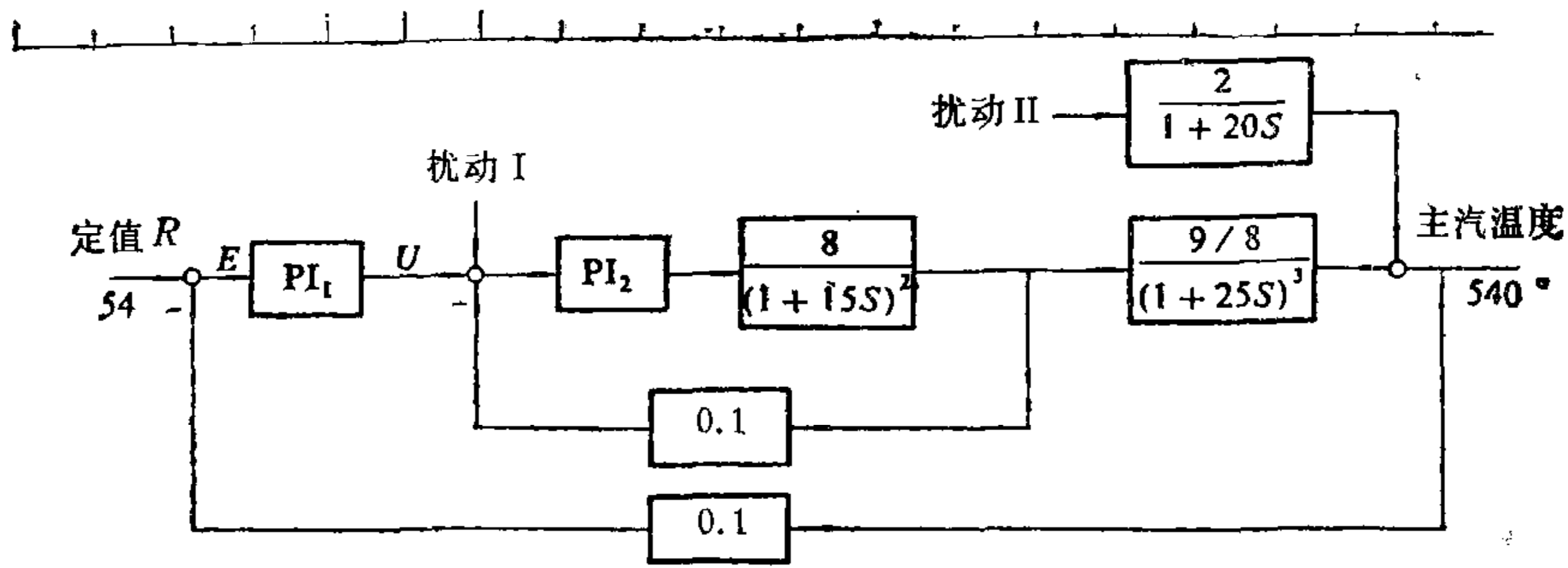


图 2 过热汽温串级调节系统

数字仿真可求得 35 组实验数据,如表 1 所示。

表中误差 $E(k) = 54 - 0.1Y(k)$ (图 2 所示)。误差的变化率 $CE(k) = \frac{1}{T} [E(k) -$

$$E(k - 1)] = \frac{1}{16} [Y(k - 1) - Y(k)].$$

如果直接由表 1 中的 35 组数据通过观察形成一组控制规则,继而生成状态作用表,将会遇到很多困难。用前面提出的模糊辨识方法来求解这个问题,所得控制规则模型如图 3 所示(取 $\epsilon = 0.06$)。

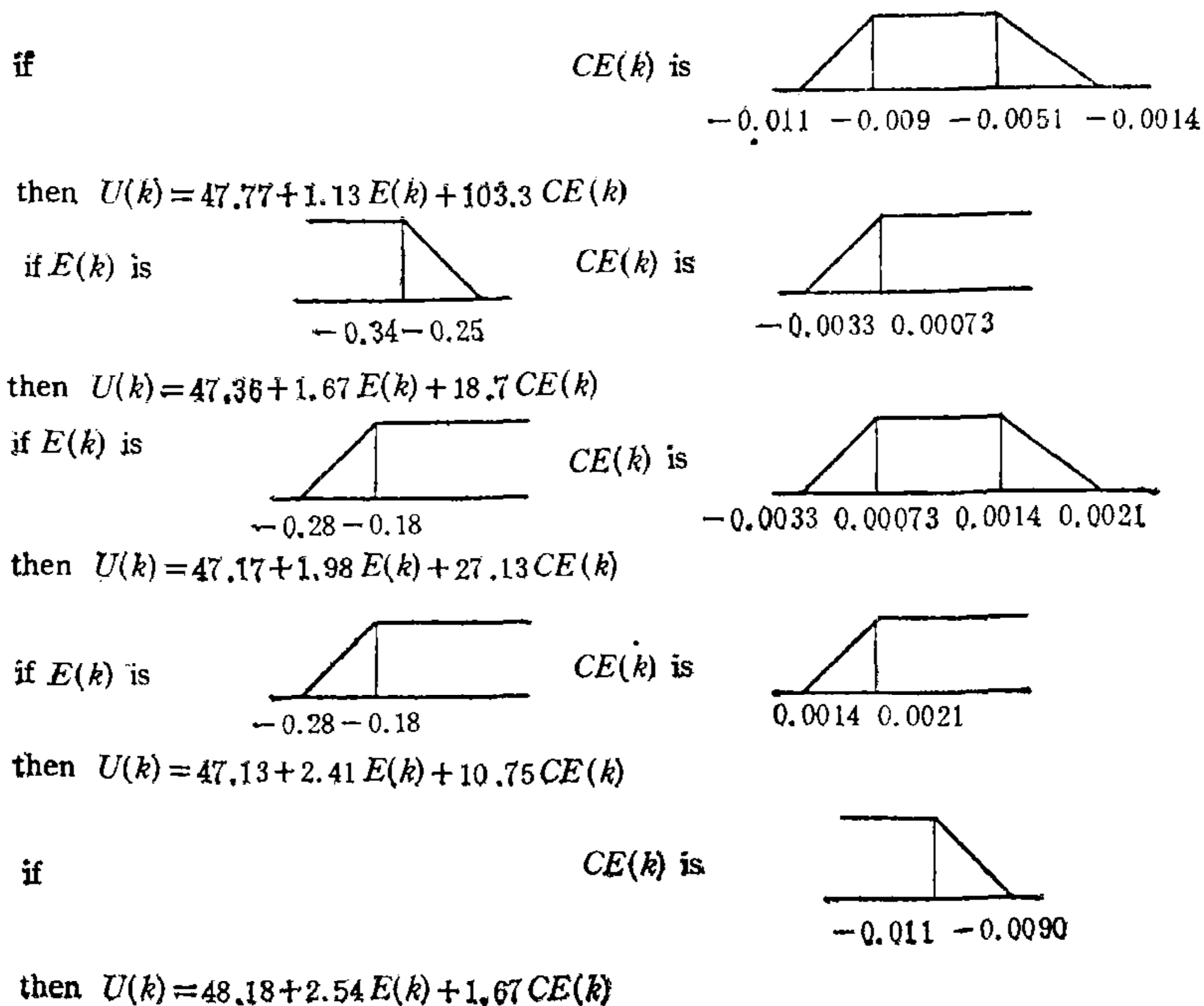


图 3 一组模糊控制规则模型。

图 4(a) 是模型产生的控制曲线,图 4(b) 是根据原始数据画出的曲线。可见,两条曲线是很相近的,这说明了模糊辨识算法的有效性。

由此模糊模型和公式(4), (5)就可求得模糊控制状态作用表, 下面给出所采用的具体方法:

1) 将 E 的取值区间(见表 1) 平均分成八个子区间, 即 $NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB$;

2) 将 CE 的取值区间平均分成七个子区间, 即 $NB, NM, NS, O, PS, PM, PB$;

3) 将 U 的取值区间平均分成七个子区间, 即 $NB, NM, NS, O, PS, PM, PB$;

4) 将 E 的某个子区间的中间值和 CE 的某个子区间的中间值代入控制规则模型中, 采用公式(4)和(5)即可求得对应的控制作用 U , 然后按第 3) 步的划分可查得对应的模糊子集。所形成的模糊控制规则为:

$$\text{if } \underline{E} \text{ is } A_i \text{ and } \underline{CE} \text{ is } B_j \text{ then } \underline{U} \text{ is } U_{ij}. \quad (10)$$

这里 A_i, B_j, U_{ij} 是模糊子集, 如 NB, PO 等;

5) 如果 E 和 CE 的所有子区间都已处理完毕, 则结束; 否则返回第 4) 步。

按照这种方法, 可以形成 56 条模糊控制规则, 综合起来形成状态作用表, 如表 2 所示。

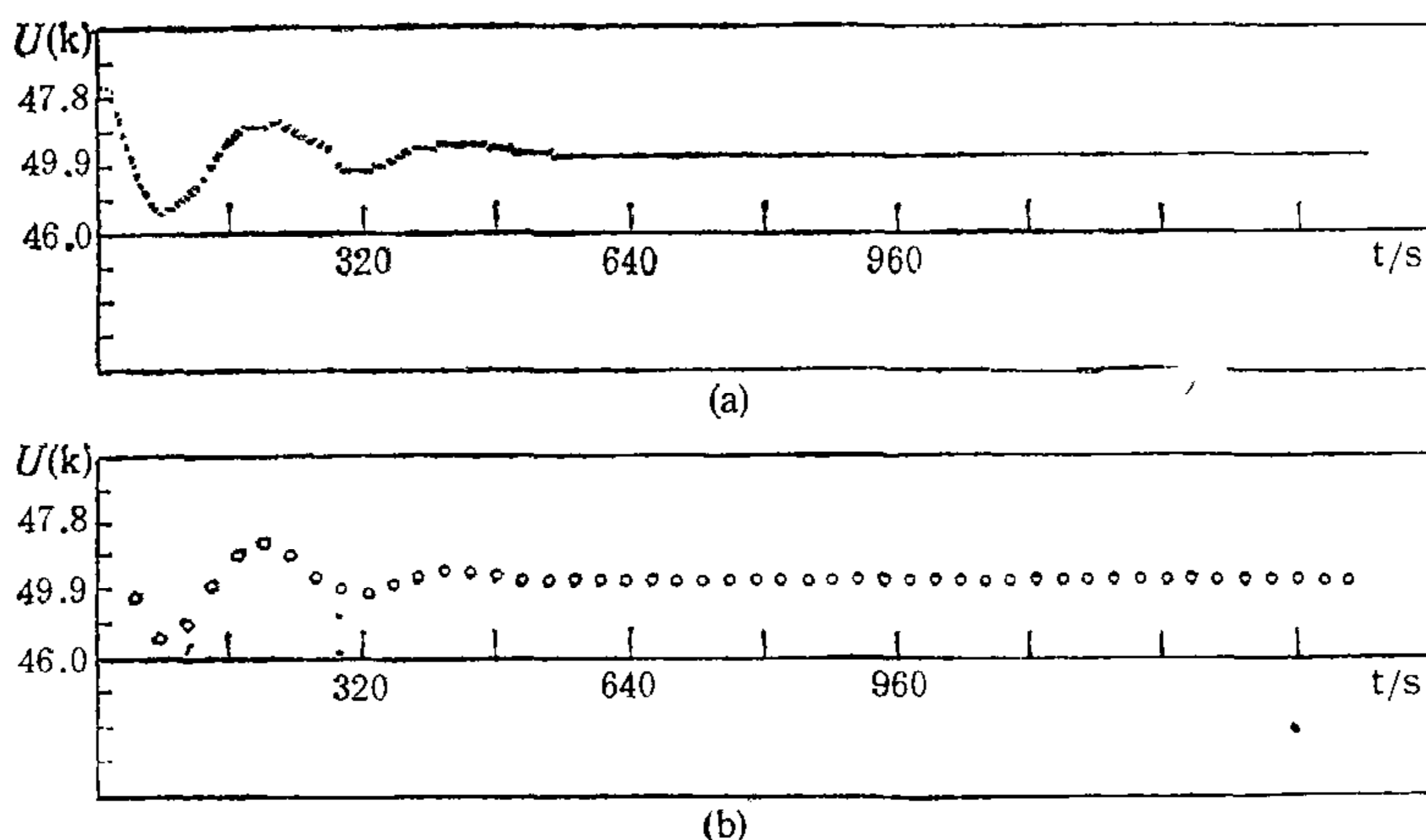
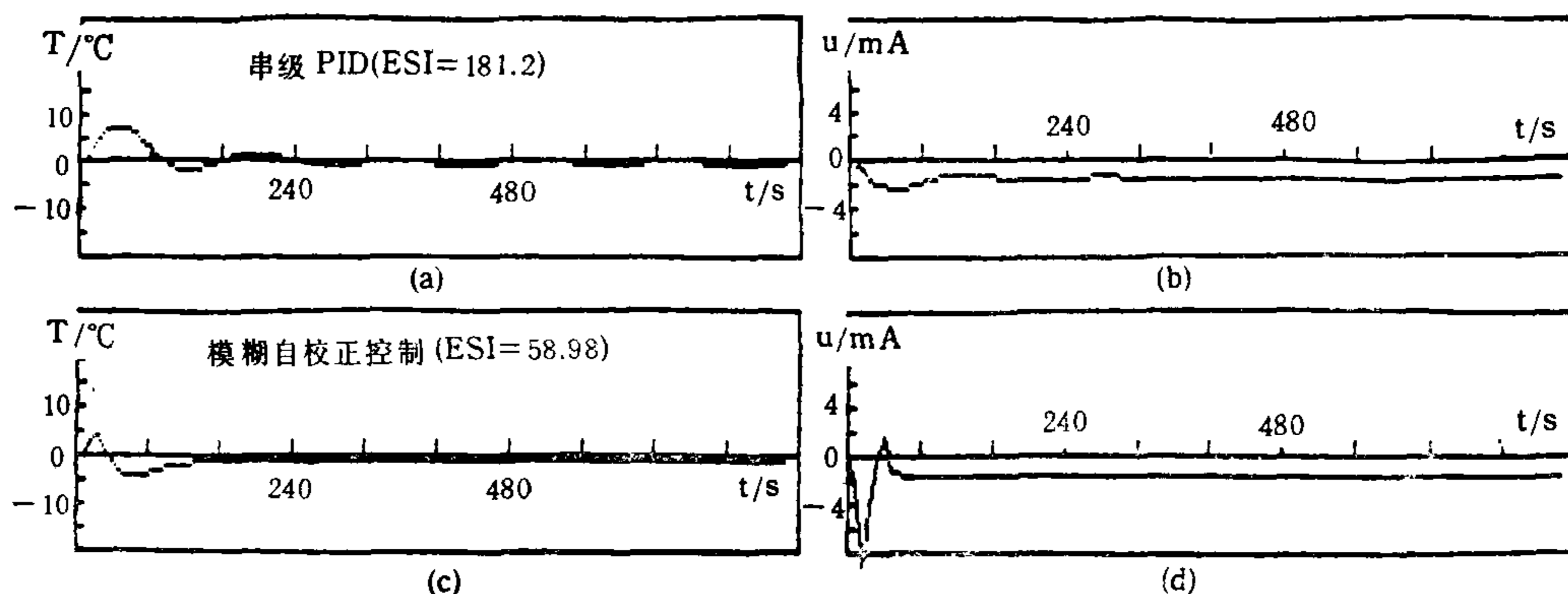


图 4 控制规则模型的输出 (a) 和原始数据 (b)

表 2

| \underline{u} / \underline{CE} | \underline{E} | NB | NM | NS | NO | PO | PS | PM | PB |
|------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NB | | PB | PB | PB | PB | PM | PS | PS | PS |
| NM | | PB | PB | PM | PM | PM | PS | NS | NM |
| NS | | PB | PM | PM | PS | PS | NS | NM | NM |
| O | | PM | PM | PS | O | O | NS | NM | NM |
| PS | | PM | PM | PS | NS | NS | NM | NM | NB |
| PM | | PM | PS | NS | NM | NM | NS | NS | NB |
| PB | | NS | NS | NS | NM | NB | NB | NB | NB |



(a) 常规 PID 系统的输出量 (b) 常规 PID 系统的控制量
(c) 模糊自校正控制的输出量 (d) 模糊自校正控制的控制量

图 5 扰动 II 阶跃改变 +5mA, 扰动 I 阶跃改变 +0.4mA 时的响应

作者在文献[3]中曾经提出了一种模糊自校正控制方案,当把上面求得的状态作用表 2 用于该模糊自校正控制方案时,其控制效果是令人满意的。图 5 所示为扰动 II 阶跃改变 5mA, 扰动 I 阶跃改变 0.4mA 时系统的响应曲线。为了便于比较性能,也给出了常规串级 PID 系统的响应。图中 ESI 表示误差平方的积分。可见模糊控制系统具有较小的超调、较快的响应速度和较短的调节时间。

5、结论

采用模糊辨识方法提取控制作用模型和自动形成模糊控制状态作用表是一种有效的方法。它具有计算量小、收敛速度快、结果的准确性高、人机交互作用能力强的特点。

虽然本文中的仿真数据不是直接从现场中取来的,但是分析问题和解决问题的方法是具有一般性的,可以推广于实际应用之中。

参 考 文 献

- [1] 鲍新福等. 自调整比例因子模糊控制器. 自动化学报, 1987, 2: 129—133.
- [2] 于锡纯, 任兴权. 一类最优模糊调节器的设计. 控制与决策, 1987, 1: 18—21.
- [3] 张化光等. 一种模糊自校正控制器及其在单元机组汽温过程控制中的应用. 中国电机工程学报, 1992, 1: 46—52.
- [4] Zhang Huaguang, etc. Multivariable Fuzzy Model Identification of Industrial Processes. Symposium on APCMC, Guangzhou, 1991: 398—403.
- [5] 张化光, 陈来九. 考虑两种不确定性的模糊决策方法. 中国科学 A 辑, 1991, 7: 776—784.
- [6] 张化光, 陈来九. 一种模糊辨识方法及其应用. 控制理论与应用, 1992, 6.
- [7] 陈来九. 热工过程自动调节原理和应用. 水利电力出版社, 1982: 311—327.

FUZZY MODELING OF OPERATOR'S CONTROL RULES AND ITS APPLICATIONS

ZHANG HUAGUANG CHAI TIANYOU WANG DIANHUI

(Research center of automation, Northeast university, Shenyang, 110006, P. R. China)

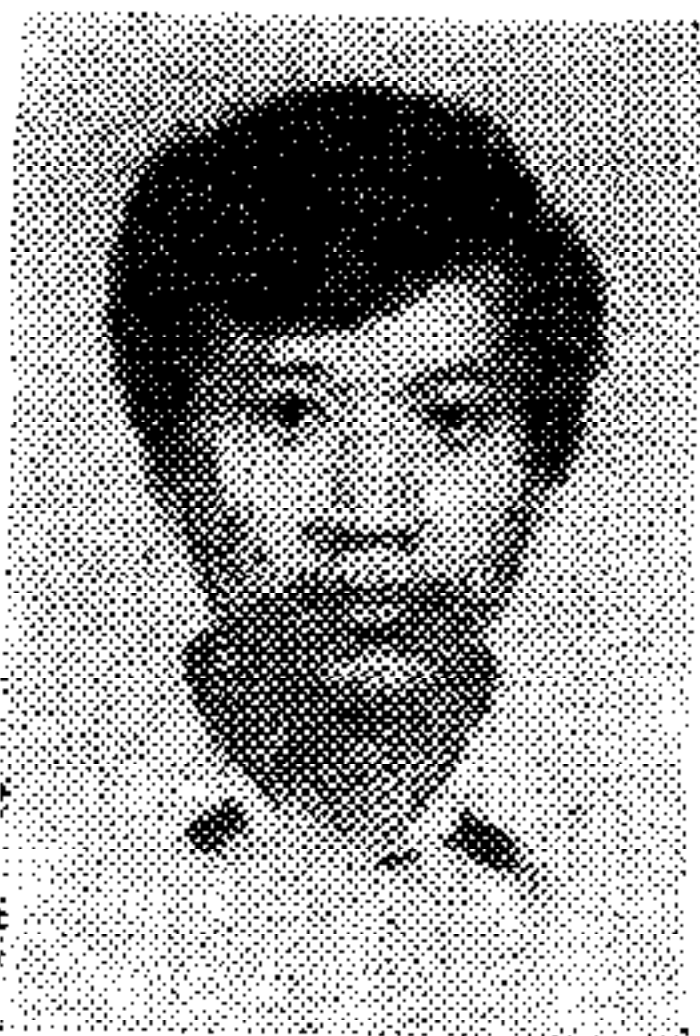
CHEN LAIJU

(Dept. of power engineering, Southeast university, Nanjing, 210018, P. R. China)

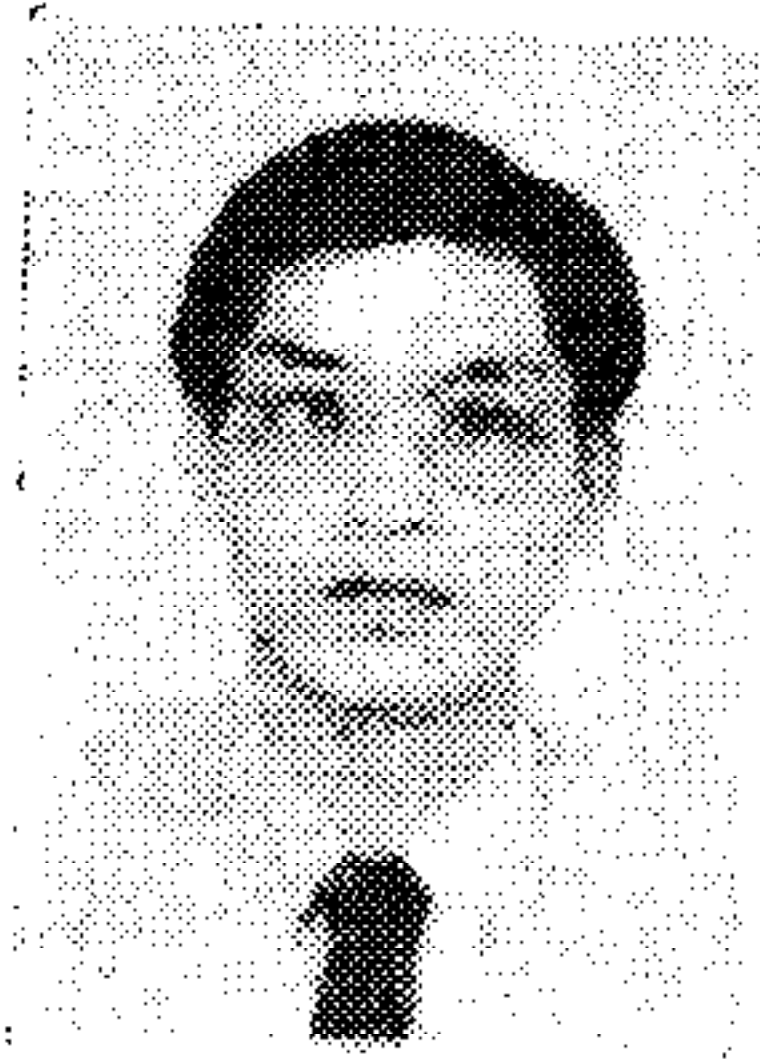
ABSTRACT

In this paper, we present a new method to form a set of fuzzy control rules by means of the fuzzy modeling of human operator's control actions. By the fuzzy model we can also formulate the corresponding fuzzy control state action table as well as look up table automatically. Its effectiveness has been shown by simulation study.

Key words: fuzzy identification; state action table; fuzzy models; fuzzy rules.



张化光 1959年5月生。1982年、1985年在东北电力学院分别获得工学学士、硕士学位,1991年于东南大学获博士学位,1991年被能源部破格晋升为副教授。现在东北大学自动控制博士后流动站工作。主要从事模糊控制、智能控制、自适应控制的理论研究和工程开发工作。



王殿辉 1962年12月生。1984年毕业于辽宁大学计算数学专业,1984至1987年在航空部第626研究所从事数值分析工作,1991年底于东北工学院应用数学系获硕士学位,同年入东北工学院自控系攻读博士学位。主要研究兴趣有广义系统、模糊自适应控制、神经网络等。