第18卷 第3期　　自 动 化 学 报　　Vol. 18, No. 3
1992 年 5 月　　ACTA AUTOMATICA SINICA　　May, 1992

链预估器及其应用

陈铁军　　邱祖廉
(郑州工学院计自系,郑州 450002) (西安交通大学信控系,西安 710049)

摘　　要

本文基于链系统给出一种结构分散型预估算法．设计子预估器需要的结构信息仅为相应子系统的模型,而不必考虑其它子系统的结构信息．构成子预估器的测量信息也是分散化的,除含该子系统的输入和输出外,仅含与它直接关联的测量信息． 文中提出了即时预估和超时预估的概念,研究了有关的性质．最后讨论了链预估器在过程控制中的一个应用实例．

关键词: 预估,链系统,结构分散化．

一、前　　言

结构分散化方法是研究大系统的有效方法之一． 文献[1,2]讨论了大系统结构分解问题． 文献[3]研究了串联结构系统的预估问题． 文献[4]提出用一种结构分散化模型—链系统—描述一般多输入多输出受控系统的动态特性． 它以子系统模型给出,显含整体系统的因果结构，为大系统和复杂系统的结构分散化分析和控制方法的研究奠定了基础．

本文研究链预估器的概念、分析和设计方法．预估器定义在子系统级．在设计各子预估器时不必考虑其它子系统的结构信息．子预估器间测量信息的交换取决于对象的固有关联方式,亦不必集中考虑整体系统的所有测量信息．因此,所给出的链预估器设计过程简单,适用于大系统和复杂系统的分析与设计．在结构分散和时间滞后互异的条件下,从充分利用控制输入信息的要求出发,文中提出了即时预估和超时预估的概念,研究了一些相关的性质,给出了预估算法．该方法已在多项较复杂的实际系统中应用,均取得良好效果和明显经济效益．本文给出其在微机中温变换控制系统中的应用结果．

二、子 预 估 器

考虑以如下子系统 Σ_{ij} 给出的链系统[4]

$$z_{ij}(t+1)=F_{ij}(X_{ij}(t))z_{ij-1}(t-d^{ij}_{ij-1}). \tag{1}$$

其中

本文于 1991 年 10 月 11 日收到．

$$X_{ij} \triangleq \{z_{hm}(t - d_{hm}^{ij} - l_{hm}^{ij}) \mid hm \in N_{ij}\}, \tag{2}$$

$$N_{ij} \triangleq \{hm \mid 0 \leqslant d_{hm}^{ij} < \infty, m = 0, 1, \cdots, k_h; h = 1, 2, \cdots, p_1\}, \tag{3}$$

$z_{ij}(\cdot) \in Z$，Z 是一维变量集；$F_{ij}(X_{ij}(t)): Z \to Z$ 是以变量串 $X_{ij}(t)$ 为参量的因果映射．d_{ij-1}^{ij} 是 $z_{ij-1}(\cdot)$ 相对于 $z_{ij}(\cdot)$ 的时间滞后．$z_{i0}(\cdot)$ 相对于 $z_{ij}(\cdot)$ 的滞后为

$$D_{ij} = \sum_{m=1}^{j} (1 + d_{im-1}^{im}), \quad D_{i0} \triangleq 0 \tag{4}$$

子预估器 $\hat{\Sigma}_{ij}$ 是一个多输入单输出系统，其输出是 $z_{ij}(\cdot)$ 的预估，记之为 $\hat{z}_{ij}(t + l_{ij}|t)$，是信息集 $I_{ij}(t)$ 上的函数，且使

$$\hat{J}_{ij} = \hat{f}_{ij}\{[z_{ij}(t + l_{ij}) - \hat{z}_{ij}(t + l_{ij}|t)]^2 | I_{ij}(t)\} \tag{5}$$

达到极小．式中 $\hat{f}_{ij}\{\cdot\} \geqslant 0$，$\hat{f}_{ij}\{0\} = 0$．$l_{ij} = 1, 2, \cdots, l_{ij}^M$，是预估步数，$l_{ij}^M$ 是信息集 $I_{ij}(t)$ 上 $\hat{\Sigma}_{ij}$ 的最大预估步数．

$$I_{ij}(t) \triangleq I'_{ij}(t) \cup I''_{ij}(t), \tag{6}$$

$I'_{ij}(t)$ 是 t 时刻 $\hat{\Sigma}_{ij}$ 拥有的功能信息，

$$I'_{ij}(t) = \{z_{ij}(s),\ \hat{z}_{ij-1}(t + \tau|t),\ \hat{z}_{hm}(t + l_{hm}|t) \mid s \leqslant t,$$
$$\tau \leqslant D_{ij-1}, l_{hm} \leqslant l_{hm}^M,\ hm \in N_{ij}\}. \tag{7}$$

$I''_{ij}(t)$ 是 t 时刻 $\hat{\Sigma}_{ij}$ 拥有的结构信息

$$I''_{ij}(t) = \{F_{ij}(\cdot)(\cdot)(t)\}. \tag{8}$$

对于确定性系统，指标(5)可转化为

$$\hat{z}_{ij}(t + l_{ij}|t) = z_{ij}(t + l_{ij}). \tag{9}$$

对于线性随机链系统，设随机序列 $e_{ij}(t)$ 定义于概率空间 $(\Omega_{ij}, I_{ij}, P_{ij})$ 上，有统计特性

$$E\{e_{hm}(\tau) | I_{ij}(t)\} = 0, \ \tau \geqslant t, \tag{10}$$

$$E\{\theta e_{hm}(\tau) | I_{ij}(t)\} = 0, \ hm \neq ij \text{ 或 } \theta \bar{\in} I''_{ij}(t), \tag{11}$$

$$E\{e_{ij}(\tau) e_{hm}(s) | I_{ij}(t)\} = \begin{cases} \sigma_{ij}^2, & hm = ij \text{ 及 } s = \tau, \\ 0, & hm \neq ij \text{ 或 } s \neq \tau. \end{cases} \tag{12}$$

这里 Ω_{ij} 是基本事件空间，I_{ij} 是 Ω_{ij} 中的一个 σ-代数

$$I_{ij} = \{I'_{ij} \cup I''_{ij} | I'_{ij}, I''_{ij} \subset \Omega_{ij}\}. \tag{13}$$

P_{ij} 是 I_{ij} 上的概率测度，$I_{ij}(t)$ 是由功能信息集 $I'_{ij}(t)$ 和结构信息集 $I''_{ij}(t)$ 联合生成的 σ-代数流．此时(5)式转化为

$$\hat{J}_{ij} = E\{[z_{ij}(t + l_{ij}) - \hat{z}_{ij}(t + l_{ij}|t)]^2 | I_{ij}(t)\}. \tag{14}$$

可见，链预估器是结构分散化的．

三、即时预估

如果最大预估步数 l_{ij}^M 满足

$$l_{ij}^M = D_{ij}, \tag{15}$$

则称 $\hat{z}_{ij}(t + l_{ij}^M|t)$ 为 $z_{ij}(\cdot)$ 的即时预估．如果链系统的所有子系统都存在即时预估，

则称该链系统能即时预估.

定理 1. 链系统能即时预估的充分必要条件是,对所有的 $j=1,2,\cdots,k_i$; $i=1,2,\cdots,p_1$, 都有

$$D_{ij}-d_{hm}^{ij}-1\leqslant D_{hm},\ hm\in N_{ij}. \tag{16}$$

证明. 设链系统能即时预估,但对某 $sf\in N_{ij}$ (16)式不成立,即有

$$D_{ij}-d_{sf}^{ij}-1>l_{sf}^{M}. \tag{17}$$

于是为保证 $\hat{\Sigma}_{ij}$ 能即时预估, $\hat{\Sigma}_{sf}$ 必违反定义式(15), 反之亦然. 因此必有(16)式成立.

现在设对链系统的所有子预估器 $\hat{\Sigma}_{ij}$, (16) 式均成立. 考虑确定性链系统, 在 $j=1$ 时,由于 $z_{i0}(t)\in I_{i0}(t)$, 显然(9)和(15)式成立,能即时预估.

设 $j=f$ 时 $\hat{\Sigma}_{if}$ 也存在即时预估,所以

$$\hat{X}_{ij+1}(t+D_{ij+1}-1)\subset I_{ij+1}(t), \tag{18}$$

$$\hat{z}_{ij}(t+D_{ij}|t)\in I_{ij+1}(t). \tag{19}$$

则以 $\hat{\Sigma}_{ij+1}$ 也存在即时预估,即所有子预估器都存在即时预估.

对于随机链系统,利用条件 (10)—(12) 式, 并考虑由 $I_{ij}(t)$ 和$I_{ij}(l)$, $l>t$, 构成的正交空间里的正交投影,同样可以证明其能即时预估性. 证毕.

推论 1. 若对于所有子预估器,都有

$$d_{hm}^{ij}\geqslant D_{ij}-1,\ hm\in N_{ij} \tag{20}$$

则该链系统能即时预估.

推论 2. 设所有链长 $k_i=1$. 若对所有的 $\hat{\Sigma}_{i1}$,

$$d_{i0}^{i1}=d, \tag{21}$$

及

$$d_{h0}^{i1}\geqslant d,\ h=1,2,\cdots,p_1;\ h\neq i \tag{22}$$

则该链系统能即时预估.

即时预估概念实际上暗示了链系统各链的所有输出的最大步数预估中都含相应的当前时刻的链首(控制输入);换言之,能估计出当前链首对相应链各输出的影响. 由于链系统各链和各子系统间存在关联,条件 (15) 式往往得不到满足. 推论 1 对应于关联滞后足够大的一类系统. 推论 2 指的是各链滞后均相同,链间滞后足够大的一类正方系统.

四、超 时 预 估

能即时预估的系统结构显然对控制算法的设计很有利. 然而许多实际系统可能并不具备此结构. 这时如果想了解当前时刻各控制输入对相应链各输出的影响, 就要求必须知道某些控制输入在未来一定时间内的状态. 换言之, 要求有关子系统预先做出未来一定时间内的控制决策,并通知有关的子系统,以扩充其功能信息集. 这就超出了即时预估的范围.

设 $\tau_i=0,1,\cdots,\ \tau_i<\infty$, 令

$$t_i=t+\tau_i, \tag{23}$$

这时功能信息集扩充为

$$I'_{ij}(t_i) = \{z_{ij}(s), \hat{z}_{ij-1}(t_i + l|t_i),\ \hat{z}_{hm}(t_h + l_{hm}|t_h)|s \leqslant t,$$
$$l \leqslant D_{ij-1}, l_{hm} \leqslant l^M_{hm}(t_h)\}, \tag{24}$$

其中 $l^M_{hm}(t_h)$ 表示信息集 $I_{hm}(t_h)$ 上的最大预估步数. 对于一个链系统,若有 τ_i, 使

$$\sum_{i=1}^{p_1} \tau_i = \min, \tag{25}$$

$$\text{s.t.} l^M_{ij}(t_i) = D_{ij} + \tau_i,\ j = 0,1,\cdots,k_i;\ i = 1,2,\cdots,p_1, \tag{26}$$

则称该系统能超时预估. 令

$$d^*_{ih} = \min_{1\leqslant j\leqslant k_i} \{\min_{0\leqslant m\leqslant k_h} \{D_{hm} + d^{ij}_{hm} + 1 - D_{ij}\}\}, \tag{27}$$

$$\Psi = \{\tau_i, i = 1,2,\cdots,p_1| -d^*_{hi} \leqslant \tau_i - \tau_h \leqslant d^*_{ih},\ i = 1,2,\cdots,p_1 - 1;$$
$$h = i,\cdots,p_1\}. \tag{28}$$

定理 2. 一个链系统能超时预估的充分必要条件是

$$\Psi \neq \phi. \tag{29}$$

证明. 假设信息集 $I_{ij}(t_i)$ 上存在 $l^M_{ij}(t_i)$ 步预估 $\hat{z}_{ij}(t_i + l^M_{ij}(t_i)|t_i)$, 仿照定理 1 的证明,有

$$D_{ij} + \tau_i - d^{ij}_{hm} - 1 \leqslant D_{hm} + \tau_h,\ hm \in N_{ij}. \tag{30}$$

不难证明

$$-d^*_{hi} \leqslant \tau_i - \tau_h \leqslant d^*_{ih},\ i = 1,\cdots,p_1 - 1;\ h = i,\cdots,p_1, \tag{31}$$

从而式(29)成立.

现在设式(29)成立,显然式(26)总得到满足,对于Ψ中的任意一组 τ_i, 式(25)左边是一个整数,因此总存在一组 τ_i 使其右边成立. 证毕.

定理 3. 对于链长均为 1 的链系统,若

$$d^{h1}_{i0} \geqslant D_{i1} + d^{h1}_{i1},\ h1 \in N_{i1}, i = 1,2,\cdots,p_1, \tag{32}$$

则该链系统能超时预估.

定理 4. 若对任 $i \in \{1,2,\cdots,p_1\}$, 存在 $j,m \in \{0,1,\cdots,k_i\}$, 使

$$d^{ij}_{im} < D_{ij} - 1 - D_{im}, \tag{33}$$

则该链系统不能超时预估.

定理 5. 设

$$d^{ij}_{im} \geqslant D_{ij} - 1 - D_{im}, \tag{34}$$

若存在 $s,n \in \{1,2,\cdots,k_h\}$, 使

$$d^*_{hi} = D_{is} - D_{hm} + 1 + d^{hn}_{is},\ d^*_{ih} = D_{hn} - D_{is} + 1 + d^{is}_{hn}, \tag{35),(36}$$

则该链系统能超时预估.

如果把链系统的各条链看成各控制通道,则超时预估概念的实际意义是,某链首对该通道某些输出的影响不如其它某通道的控制输入的影响快. 因此需要预先确定在未来一定时间内的某些控制决策.

五、预估算法及其应用

对于一个能即时预估的链系统，子预估器可表示为

$$\hat{z}_{ij}(t+l_{ij}|t)=\hat{F}_{ij}(\hat{X}_{ij}(t+l_{ij}-1))\hat{z}_{ij-1}(t+l_{ij}-d^{ij}_{ij-1}-1|t), \tag{37}$$

其中 $1\leqslant l_{ij}\leqslant D_{ij}$，$\hat{F}_{ij}(\cdot)(\cdot):Z\to Z$ 是一个因果映射，以 $\hat{X}_{ij}(\cdot)$ 为参集，在结构上它仅取决于系统 Σ_{ij} 的结构信息 $F_{ij}(\cdot)(\cdot)$。因此子预估器 (37) 式是结构分散化的。从 (37) 式中所含的功能信息看，该子预估器仅需要那些与 Σ_{ij} 直接关联的子系统的预估信息。这规定了子预估器间的通讯模式。因此子预估器 (37) 式的功能信息也是非集中的。

对于能超时预估的链系统，亦有类似的算法。

前述预估方法已在合成氨生产过程的中温度变换控制系统中成功应用。该系统可以看成是一个三输入六输出关联系统，由六个子系统构成三条因果链。该系统的结构分散型模型可表示为[5]

$$\begin{aligned}
&z_{11}(t+1)=\theta_{11}z_{10}(t)+v_{11},\\
&z_{12}(t+1)=\theta_{21}z_{11}(t-d^{12}_{11})/(v_{12}\cdot v_{13})+\theta_{22}z_{32}(t-d^{12}_{32})+\theta_{23}z_{22}(t-d^{12}_{22}),\\
&z_{21}(t+1)=\theta_{31}z_{21}(t)+\theta_{32}z_{32}(t-d^{21}_{32})+\theta_{33}z_{20}(t-d^{21}_{20}),\\
&z_{22}(t+1)=z_{22}(t)+\theta_{41}[z_{11}(t-d^{22}_{11})+v_{12}][z_{21}(t-d^{22}_{21})-z_{22}(t)]+\theta_{42}v_{13},\\
&z_{31}(t+1)=\theta_{51}z_{31}(t)+\theta_{52}z_{30}(t-d^{31}_{30})+\theta_{53}z_{22}(t-d^{31}_{22}),\\
&z_{32}(t+1)=z_{32}(t)+[\theta_{61}z_{11}(t-d^{32}_{11})+\theta_{62}v_{12}][z_{31}(t-d^{32}_{31})-z_{32}(t)]+\theta_{63}v_{13},
\end{aligned} \tag{38}$$

其中 $z_{10}(t)$ 表示蒸气阀门开度；$z_{11}(t)$ 蒸气流量；v_{11} 扰动量；$1-z_{12}(t)$ 变换炉出口一氧化碳含量；v_{12} 入炉半水煤气流量；v_{13} 入炉气一氧化碳含量；$z_{21}(t)$ 敏点温度；$z_{20}(t)$ 冷付线阀门开度；$z_{22}(t)$ I 段热点温度；$z_{31}(t)$ II 段入口温度；$z_{30}(t)$ 换热阀门开度；$z_{32}(t)$ II 段热点温度；θ 模型参数；d^{hm}_{ij} 时间滞后。根据实际测量，这些时间滞后满足

$$\begin{aligned}
&d^{12}_{11}-d^{12}_{22}-1<d^{22}_{21}+d^{21}_{20},\ d^{12}_{11}-d^{12}_{32}-1<d^{32}_{31}+d^{31}_{30},\\
&d^{21}_{20}-d^{21}_{32}<d^{32}_{31}+d^{31}_{30}+2,\ d^{22}_{21}+d^{21}_{20}-d^{22}_{11}<0,\\
&d^{31}_{30}-d^{31}_{22}<d^{22}_{21}+d^{21}_{20}+2,\ d^{32}_{31}+d^{31}_{30}-d^{32}_{11}<0.
\end{aligned} \tag{39}$$

根据定理 1，该链系统能即时预估，各子预估算法为

$$\begin{aligned}
&\hat{z}_{11}(t+1|t)=\theta_{11}z_{10}(t)+v_{11},\\
&\hat{z}_{12}(t+d^{12}_{11}+2|t)=\theta_{12}\hat{z}_{11}(t+1|t)/(v_{12}v_{13})+\theta_{22}z_{32}(t+d^{12}_{11}+1-d^{12}_{32})\\
&\qquad\qquad+\theta_{23}z_{22}(t+d^{12}_{11}+1-d^{12}_{22}),\\
&\hat{z}_{21}(t+d^{21}_{20}+1|t)=\theta^{D_{21}}_{31}z_{21}(t)+\sum_{i=0}^{D_{21}-1}\theta^{i}_{31}[\theta_{32}\hat{z}_{32}(t-d^{21}_{32}+D_{21}-1-i|t)\\
&\qquad\qquad+\theta_{33}z_{20}(t-i)+\theta_{42}v_{13}],\\
&\hat{z}_{22}(t+D_{22}|t)=\prod_{i=0}^{D_{22}-1}[1-\theta_{1}(t+D_{22}-i)]z_{22}(t)\\
&\qquad+\sum_{i=0}^{D_{22}-1}\prod_{j=0}^{i-1}[1-\theta_{1}(t+D_{22}-j)][\theta_{1}(t+D_{22}-i)\hat{z}_{21}(t+D_{21}-i|t)
\end{aligned}$$

$$+\theta_{42}v_{13}],$$

$$\theta_1(t+D_{22}-i)\triangleq\theta_{41}[\hat{z}_{11}(t-d_{11}^{22}+D_{22}-1-i|t)+v_{12}], \tag{40}$$

$$\prod_{j=0}^{-1}[\cdot]\triangleq 1,$$

$$\hat{z}_{31}(t+D_{31}|t)=\theta_{51}^{D_{31}}z_{31}(t)+\sum_{i=0}^{D_{31}-1}\theta_{51}^{i}[\theta_{52}z_{30}(t-i)+\theta_{53}\hat{z}_{22}(t-d_{22}^{31}+D_{31}-1-i|t)],$$

$$\hat{z}_{32}(t+D_{32}|t)=\prod_{i=0}^{D_{32}-1}[1-\theta_2(t+D_{32}-i)]z_{32}(t)+\sum_{i=0}^{D_{32}-1}\prod_{j=0}^{i-1}[1-\theta_2(t+D_{32}-j)][\theta_2(t+D_{32}-i)\hat{z}_{31}(t+D_{31}-i|t)+\theta_{63}v_{13}],$$

$$\theta_2(t+D_{32}-i)\triangleq\theta_{61}\hat{z}_{11}(t-d_{11}^{32}+D_{32}-1-i|t)+\theta_{62}v_{12}.$$

可见诸子预估器在结构上是分散的。它们之间的功能信息交换量也很有限，只在直接相关联的子系统间进行。该预估算法已在两个化肥厂合成氨生产过程的微机中变系统控制中应用，均取得满意控制效果和明显经济效益。

六、结　束　语

链系统是一般多输入多输出系统的一种结构分散型模型，以显含整体系统因果结构的子系统形式给出。本文以链系统为基础，在子系统级定义了子预估器 $\hat{\Sigma}_{ij}$，它取决于分散型信息集 $I_{ij}(t)$。在一定条件下，各子预估器能包含当前时刻有关控制输入的信息，此类系统被定义为能即时预估的链系统。当相应的条件得不到满足时，又引入了超时预估的概念。此类系统要求某些子系统预先确定未来一定时间内的控制决策，并通知有关的子系统。所给出的链预估器在结构上是分散化的，在测量信息方面也是非集中的。该方法可应用于大系统和复杂系统的分析和设计，是进一步进行结构分散化控制方法研究的基础；亦可推广应用于各子系统采样周期互异，各通道时间滞后随机可变和局部出现故障等更复杂的系统。

参　考　文　献

[1] Šiljak, D. D., On Reachability of Dynamic Systems, *Int. J. Sys. Sci.*, 8(1977), 321—338.

[2] Sezer, M. E., et al., On Structural Decomposition and Stabilization of Large-scale Control Systems, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, AC-26(1981), 439—444.

[3] Tiejun, C., Zulian, Q., A Predictor for Systems with Large Time-Delays, *Chinese Journal of Automation*, 1(1989), (4), 359—366.

[4] 陈铁军和邱祖廉，结构分散模型及其应用，自动化学报，已录用.

[5] 陈铁军，中变系统的链能达性分析，郑州工学院学报，3(1990)，96—101.

A PREDICTOR FOR CHAIN SYSTEMS AND ITS APPLICATION

CHEN TIEJUN

(*Dept. of Computer and Automation, Zhengzhou Institute of Technology* 450002)

QIU ZULIAN

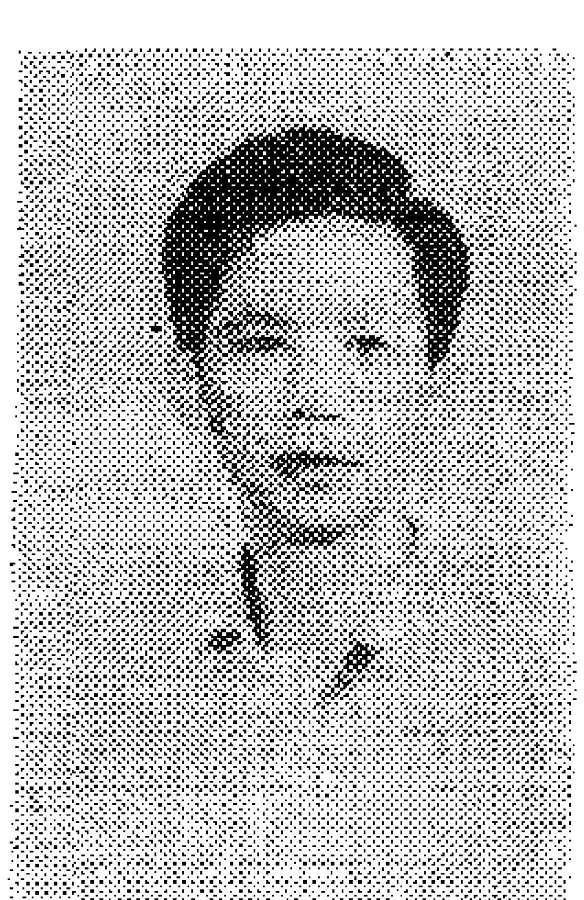
(*Dept. of Information and Control, Xi'an Jiaotong University* 710049)

ABSTRACT

A structural decentralized predictor for the chain system is presented. The only structural information required in the design of a sub-predictor is the model of the related subsystem, without taking into account of the structural information of other subsystems. The measured information in the sub-predictor is also decentralized. In addition to the input and output of the subsystem, it contains only the directly connected measures. The concepts of on-time prediction and super-time prediction are introduced, and some of their properties are studied. Finally, its application to a process control is discussed.

Key words : Prediction; chain system; structural decentralization.

陈铁军 1989 年毕业于西安交通大学,获博士学位. 现任郑州工学院计自系副教授. 理论研究为大系统和复杂系统控制, 自适应控制和智能控制方面. 1989 年提出链系统方法, 已完成多项难控制的实际课题. 其中微机氢氮比控制系统 1990 年获国家教委科技进步二等奖.



邱祖廉 1960 年毕业于西安交通大学自控专业,并留校任教至今,现为副教授. 1981 年在南开大学进修现代控制理论一年, 此后讲授研究生线性系统理论. 研究方向为生产过程综合自动控制系统、现代控制理论及其应用. 近年来主要在合成氨生产、硫酸等行业综合计算机控制方面做工作,并取得成果,发表论文多篇.