

水泥窑外分解窑的自动控制*

汪 浩 张少华 李天民 毛 健 程志民

(中国科学院新疆物理研究所·乌鲁木齐, 830011)

摘要: 本文针对水泥窑外分解窑控制的多变量强耦合, 非线性和时变的特点, 提出了一种基于知识的智能控制方法. 其基本思想是采用专家判别方法辨识工况, 对系统参数进行失效诊断, 进而自动选择不同的控制策略——随机多变量最优控制或基于模糊控制语言的自学习模糊控制. 该方法已经实际应用于窑外分解窑的自动控制.

关键词: 水泥窑控制; 模糊控制; 专家控制; 多变量控制

1 引 言

自 1964 年 Phillips^[1]等提出的基于理论模型的方法和 1968 年 K. J. Wang^[2]等发表的状态空间方法以来, 水泥回转窑的自动控制得到了很大的发展和提高. 特别是 70 年代中期至今, 控制方法的研究对象集中在窑外分解窑这一先进但又复杂的水泥生产新工艺上. 目前, 水泥窑控制的方法可归纳为两种. 一种是统计建模的方法, 它针对窑外分解窑的多变量和多扰动的特点, 利用时间序列分析方法建立系统的多变量模型. 通常采用状态空间的方法设计随机最优反馈控制器. 该方法以 T. Otomo 和 H. Akaike^[3]等为典型代表, 他们提出了一整套以多维 AR 模型为基础的水泥回转窑的多变量系统的分析设计方法, 并在日本秩父水泥公司的湿法窑上实现了计算机工业控制运行. 该方法是从统计的角度分析了各变量之间的关系, 具有各参量控制的协调一致和在其设计域内调节准确等特点. 另一种水泥窑控制方法是模糊控制方法. 它是 1982 年由丹麦 F. L. Smith 公司首先提出的. 模糊控制方法是将工人的操作经验总结成一级模糊控制规则从而利用计算机进行有效的控制^[4~5].

目前, 国内水泥回转窑控制的研究集中在普通回转窑上, 而窑外分解窑的自动控制却有待进行开发性的研究, 以弥补目前的“空白”.

本文针对窑外分解窑的多变量, 强耦合, 非线性和时变等特点, 面向整个工艺提出了一种基于知识的智能控制方法. 该方法已经应用于新疆水泥厂 3[#]窑, 在国产窑外分解窑上首次成功地实现了计算机控制.

2 窑外分解窑工艺特点

新疆水泥厂 3[#]窑为日产 700 吨熟料窑外分解窑, 其工艺流程图如图 1 所示. 生料经过 4 级预热器(I_A, I_B, II, III 和 IV)和分解炉逐步加热分解后进入回转窑高温锻烧成熟料; 出窑的高温熟料在篦冷机内强制风冷. 经熟料加热的二次风大部分入窑和预分解炉作为

* 本项研究为国家“七·五”重点科技攻关项目, 获中国科学院 1991 年度科技进步三等奖.
本文于 1992 年 6 月 22 日收到. 1992 年 8 月 14 日收到修改稿.

助燃风,其余通过废气阀 D_9 排入大气.显然,窑外分解工艺过程在几个不同的设备内完成.预热器,分解炉和回转窑内物料基本上是一个加热过程,而在篦冷机内则是冷却过程,后者仅通过个别参数(二次风温 T_m ,窑头负压 P_m 等)显示出耦合作用.同时,从系统的可靠性出发,将窑外分解窑的计算机控制分两个子系统,即篦冷机控制子系统和回转窑、分解炉及预热器控制子系统.

根据工艺要求,窑外分解窑控制的基本任务是稳定热工制度,以达到提高设备运转率,稳定质量和降低能耗的目的.篦冷机子系统的控制目的是在调节热端篦速 C_1 和冷端篦速 C_2 稳定热端料层厚度 H_1 和冷端料层厚度 H_2 的同时,调整二、三、四室风阀(D_2, D_3 ,和 D_4)和废气风阀 D_9 ,稳定入窑二次风温 T_m 和窑头负压 P_m ,以减少对回转窑的扰动.回转窑子系统的直接目标是通过调节窑头喂煤量 F_{c1} ,喂料量 F_r ,预分解炉喂煤量 F_{c2} ,三次风阀 D_m 和总排风阀 D 稳定四级出口温度 T_1 ,烧成带温度和窑尾废气氧含量 O_2 .由于烧成带温度不能直接测得,我们用窑头比色计温度 T_{Bz} ,窑中电机转矩 M 和窑尾温度 T_e 来间接反映.

窑外分解窑控制的难点首先是关键参数的检测.如烧成带温度只能用其它参数间接反映.其次,多变量耦合突出.特别是有两个燃料喂入点.两者的喂入量均与窑内物料温度有直接关系,且其间比例又影响着温度分布和燃烧状况等.这是窑外分解窑不同于普通回转窑的固有特点.同时,调节对象存在时变和非线性特性.正是由于这些问题,使国产窑外分解窑长期处于手动操作状态,普遍存在运转率低、能耗高和产品质量难以保证等问题.

3 基于知识的智能控制方法

根据窑外分解窑工艺的特点,其控制方法必须解决如下问题:

- 多变量耦合问题——该工艺各参数间具有很强的耦合,如果仅考虑单输入,单输出调节,则不能达到控制整个工艺的目的.
- 多干扰问题——由于窑外分解工艺本身的复杂性和参数不可测性造成的多干扰为采用基于确定模型的控制算法设置了障碍.
- 时变问题——随着物料及设备状况的变化,系统特性呈缓慢的迁移.
- 故障诊断问题——窑外分解窑控制参数多.

完整的参数检测为控制提供了依据,但个别参数的失效不应使整个控制解体.

为此,我们提出了窑外分解窑的基于知识的智能控制方法.该方法以熟练工人的操作经验为基础,针对被控对象的多变量特点,采用多策略控制,并具有自学习能力.其结构如图2所示,它分两级由3个子系统组成.

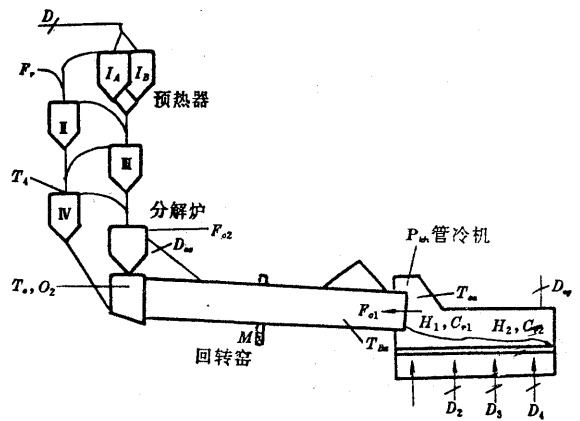


图1 窑外分解窑工艺简图

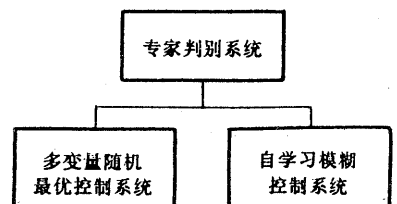


图2 基于知识的智能控制方法结构图

3.1 专家判别系统^[6]

专家判别系统是整个方法的上层,它包括知识库,推理机构和数据预处理器.知识库是该系统的核心.推理机构由产生式规则组成,规则反映了专家控制的经验.在数据预处理器根据控制指令和实时采集数据得出系统状态后,推理机构在知识库和当前系统状态的基础上实时做出结论.

知识的获取是基于对几名熟练工人操作的较长时间的观察分析提问,采用归纳式学习方法从具体操作判断中得出一般性的以产生式表示的规则,再将这些规则在对实际问题的演绎中进行检验修正.它具有客观性,可重复性和一致性好等优点,归纳的结果也易于理解.

专家判别系统的任务首先是系统元件失效诊断,然后根据工况分析和失效诊断结果选择不同的控制策略.系统的基本控制律包括随机多变量最优控制和自学习模糊控制.一般地说,当对象在稳定点附近运行且没有参数失效时,采用随机多变量最优控制,否则选择自学习模糊控制.随着降级运行,控制特性指标呈下降趋势,但它大大提高了控制系统的投运率.这在象水泥窑外分解窑这样的系统中是特别不可少的.

3.2 随机多变量最优控制系统

水泥烧成过程是一个极为复杂的强耦合多变量过程.同时,由于工艺操作的限制,使人们不可能通过施加试验信号的方法建立系统的模型,而所能利用的仅是在工人操作下记录的一组数据.为此只能采取统计建模的方法.实际上,我们可以将系统的输入和输出看作为一组时间序列 $\{x_1(s), x_2(s), \dots, x_k(s)\}$,考虑取足够大的 M ,则可用下式近似地描述该系统^[5]

$$x_i(s) = \sum_{j=1}^K \sum_{m=1}^M a_{ij}(m)x_j(s-m) + u_i(s), \quad (i = 1, 2, \dots, k). \quad (1)$$

式中 $\{a_{ij}(m)\}$ 是输出 $x_i(s)$ 对输入 $x_j(s)$ 的脉冲响应函数, $u_i(s)$ 是固有噪声.经变换,即可得系统的多维自回归模型为

$$x_i(s) = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^K A_{ijm}x_j(s-m) + \varepsilon_i(s), \quad (i = 1, 2, \dots, k). \quad (2)$$

式中 $\varepsilon_i(s)$ 是白噪声,且 $\varepsilon_i(s)$ 和 $\varepsilon_j(s)$ ($i \neq j$)互不相关. A_{ijm} 是 $a_{ij}(m)$ 的某种确定的线性表示.这样,根据时间序列建模的方法拟合出式(2)的多维自回归模型后,即可得到系统模型式(1),进而可对系统进行噪声贡献率分析.有理谱分析,频率响应分析和脉冲响应分析,分析系统各变量间的耦合程度,选择变量,构成合理的多变量控制系统.采用随机二次型指标,即可设计得到随机最优控制系统.

例如,对篦冷机系统,我们在记录的数据中选取了880组作为分析设计依据,得到如下5阶模型

$$X(s) = \sum_{m=1}^5 a_m X(s-m) + \sum_{m=1}^5 b_m Y(s-m) + U(s), \quad (3)$$

$$a_1 = \begin{bmatrix} 0.121080D + 01 & 0.153429D + 01 & 0.513939D + 00 & 0.231491D + 00 \\ -0.204767D - 02 & 0.401842D + 00 & -0.150560D - 01 & 0.329368D - 02 \\ 0.159245D - 01 & -0.251786D + 00 & 0.474721D + 00 & -0.124896D + 00 \\ 0.206878D - 02 & 0.528818D + 00 & 0.217327D - 01 & 0.624529D + 00 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 a_2 = & \begin{bmatrix} -0.337755D + 00 & -0.159860D + 01 & -0.244403D - 01 & -0.295639D + 00 \\ 0.354308D - 02 & 0.923330D - 01 & -0.115273D - 01 & -0.349658D - 02 \\ -0.415220D - 02 & -0.436156D - 01 & 0.193864D + 00 & -0.509288D - 01 \\ -0.260384D - 02 & -0.250386D + 00 & 0.310523D - 01 & 0.234574D + 00 \end{bmatrix}, \\
 a_3 = & \begin{bmatrix} 0.154155D - 01 & 0.539497D + 00 & -0.620575D + 00 & 0.251077D + 00 \\ -0.251996D - 02 & 0.149460D + 00 & 0.108007D - 01 & -0.221852D - 02 \\ -0.286584D - 02 & 0.582818D - 01 & 0.802559D - 01 & 0.668687D - 01 \\ -0.191626D - 02 & 0.289588D + 00 & 0.106564D + 00 & -0.174153D + 00 \end{bmatrix}, \\
 a_4 = & \begin{bmatrix} -0.465840D - 01 & 0.329786D + 00 & 0.151664D + 00 & -0.613796D + 00 \\ 0.205964D - 02 & 0.105261D + 00 & 0.114015D - 01 & -0.131386D - 01 \\ 0.531589D - 04 & 0.909796D - 01 & 0.176523D + 00 & 0.393296D - 01 \\ 0.140504D - 01 & -0.636723D - 01 & 0.435986D - 01 & 0.582926D - 01 \end{bmatrix}, \\
 a_5 = & \begin{bmatrix} 0.476053D - 01 & -0.853102D + 00 & -0.274547D + 00 & 0.347504D + 00 \\ -0.131921D - 02 & 0.589351D - 01 & 0.910928D - 02 & 0.141064D - 01 \\ 0.136073D - 02 & -0.109599D + 00 & 0.483580D - 02 & 0.844134D - 01 \\ 0.120570D - 01 & 0.347957D + 00 & -0.130924D + 00 & 0.258964D - 01 \end{bmatrix}, \\
 b_1 = & \begin{bmatrix} 0.295143D + 00 & -0.314187D - 01 & -0.419936D + 00 & 0.417353D + 00 & -0.769314D + 00 & -0.727030D + 00 \\ 0.264684D - 01 & 0.619047D - 02 & 0.236967D - 01 & -0.807644D - 02 & -0.476440D - 02 & 0.252916D - 02 \\ -0.231174D - 01 & 0.185260D - 01 & -0.823856D - 01 & -0.131529D - 02 & -0.162414D + 00 & -0.536025D - 01 \\ -0.155525D + 00 & 0.358672D - 01 & 0.658716D - 01 & 0.655786D - 01 & 0.488385D + 00 & -0.254414D + 00 \end{bmatrix}, \\
 b_2 = & \begin{bmatrix} 0.500496D + 00 & -0.839327D - 01 & 0.359320D + 00 & -0.475165D + 00 & 0.158278D + 01 & 0.389102D + 00 \\ 0.193251D - 02 & 0.218099D - 02 & -0.263598D - 01 & -0.200911D - 02 & -0.100053D - 02 & -0.119910D - 01 \\ 0.700825D - 01 & 0.131451D - 01 & 0.344727D - 01 & -0.859405D - 02 & 0.230038D + 00 & -0.103026D - 01 \\ -0.488556D - 01 & 0.499259D - 02 & -0.867858D - 01 & -0.100798D + 00 & -0.369661D + 00 & -0.129468D + 00 \end{bmatrix}, \\
 b_3 = & \begin{bmatrix} 0.291685D - 01 & 0.163769D + 00 & 0.244983D + 00 & 0.124012D - 01 & -0.108626D + 01 & -0.137839D + 00 \\ -0.816566D - 02 & -0.704205D - 02 & 0.224025D - 01 & -0.805614D - 02 & -0.232295D - 01 & 0.154969D - 01 \\ -0.369958D - 01 & 0.231182D - 02 & -0.812683D - 01 & 0.382110D - 01 & -0.117061D + 00 & -0.762689D - 01 \\ 0.410635D + 00 & -0.797728D - 01 & 0.579135D - 01 & 0.259377D - 01 & -0.862772D - 01 & 0.338342D - 01 \end{bmatrix}, \\
 b_4 = & \begin{bmatrix} 0.849539D - 01 & -0.326857D - 01 & -0.197587D + 00 & -0.131985D + 00 & 0.487964D - 01 & 0.795259D + 00 \\ 0.161014D - 01 & 0.575320D - 02 & -0.142426D - 01 & 0.113763D - 01 & 0.169134D - 02 & 0.524845D - 02 \\ -0.874485D - 02 & -0.771365D - 03 & 0.105653D + 00 & -0.491266D - 02 & -0.338649D + 00 & 0.102362D + 00 \\ -0.311900D + 00 & 0.132375D - 01 & 0.130708D - 01 & 0.207897D - 01 & 0.467764D + 00 & -0.200935D + 00 \end{bmatrix}, \\
 b_5 = & \begin{bmatrix} -0.148281D + 00 & 0.760486D - 01 & -0.446941D + 00 & 0.220043D + 00 & 0.380915D + 00 & -0.849680D + 00 \\ -0.360275D - 01 & -0.800759D - 03 & 0.170239D - 02 & -0.226507D - 02 & 0.384716D - 01 & -0.161586D - 01 \\ -0.612427D - 02 & 0.860114D - 02 & -0.127359D - 01 & -0.226529D - 01 & 0.187893D + 00 & -0.149024D + 00 \\ 0.709732D - 01 & -0.567965D - 02 & -0.598154D - 01 & 0.956639D - 02 & -0.247919D + 00 & 0.268072D + 00 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

这里 $X(s) = \{x_1(s), x_2(s), x_3(s), x_4(s)\}$ 分别表示 T_{ca}, P_{kb}, H_1 和 H_2 , 而 $Y(s) = \{y_1(s), y_2(s), y_3(s), y_4(s), y_5(s), y_6(s)\}$ 分别表示 $D_2, D_3, D_4, D_{eg}, C_{r1}$ 和 C_{r2} .

采用这种方法,可以对窑外分解窑的安定工况实施有效的控制.但是,当系统工况变化较大,偏离稳定点较远或系统中某些参数失效时,这种方法很难奏效,必须采用自学习模糊控制方法.

3.3 自学习模糊控制系统^[4,7]

模糊控制实际上是将熟练工人的经验总结为若干条模糊推理规则,由计算机模拟操作工人的动作.模糊控制目前已应用于许多控制对象中,但其在水泥窑控制中尤为突出,有许多常规调节算法不可控的工况,经过熟练工人的调整仍能恢复到正常.

模糊控制方法的实现可以采用不同的技术手段.目前,国内一般是对模糊控制规则离线进行关系运算得到控制表,采用计算机实时查表的方式控制.这种方法生成的软件不直观,灵活性差,不利于一般工程技术人员的编程和调试.为此,我们在FY-II两级分布式计算机控制系统上开发了模糊控制语言.例如

“如果转矩适当且尾温偏低则喂煤略加”

可由

IFF M OK ANDF TE SNEG THEN DFC1 SPOS

实现.

假设对 DFC1 有 N 条规则,而上述规则为第 i 条,则其推理算法为

$$DFC1_i = (\mu_{OK}(M) \wedge \mu_{SNEG}(TE)) * SPOS. \quad (4)$$

这里 M, TE 均为规范化参量,即有 $M, TE \in [-10, 10]$,且 $\mu_{OK}(M), \mu_{SNEG}(TE)$ 分别表示 M 对 OK 的隶属度和 TE 对 SNEG 的隶属度, SPOS 表示“正小”的模糊定义,而 $DFC1_i$ 即为 $DFC1$ 的第 i 条规则的推理结果. $DFC1$ 的最后确定值 $dfc1$ 为

$$dfc1 = \text{cent}(DFC1). \quad (5)$$

式中

$$DFC1 = \bigcup_{i=1}^N DFC1_i,$$

cent 为中位数函数.实际输出为

$$dfc1' = K_{dfc1} \cdot dfc1. \quad (6)$$

式中 K_{dfc1} 为物理量化系数.

为了提高适应性,控制算法的自学习是十分必要的.为简单起见,这里仅考虑输出物理量化系数的自学习.假若,通常实际输出增量为

$$df' = K_{df}(k) \cdot df, \quad (7)$$

则自学习算式为

$$K_{df}(k) = \alpha K_{df}(k-1) + (1-\alpha)\lambda(k). \quad (8)$$

式中 $0 < \alpha < 1$, 且 $\lambda(k) > 0$. α 是与学习速度有关的常数,而 $\lambda(k)$ 则是取决于特性估计的学习变量.

基于模糊控制语言的自学习模糊控制系统如图3所示.

例如,在回转窑系统中,根据新疆水泥厂3#窑的操作经验,总的控制策略为:

- 根据窑尾温度 T_s , 窑中电机转矩 M , 窑头比色计温度 T_{BZ} 和窑尾废气氧含量 O_2 , 以2分钟为周期,调整窑头喂煤量 F_c ;

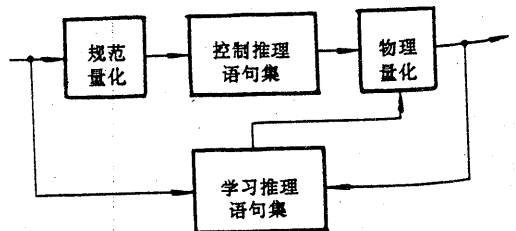


图3 自学习模糊控制系统

• 根据 20 分钟内窑尾温度 T_e 和窑中电机转矩 M 的平均值及时调节喂料量

F_e ;
• 处理好窑头喂煤量 F_{c1} 和预分解炉喂煤量 F_{c2} 的比例关系。

图 4 给出了回转窑系统计算机控制运行的部分数据记录曲线。

4 结束语

我们已经成功地将上述方法用于窑外分解窑。经考核,其自控投运率 $>75\%$, 提高运转率 3.79% 且煤耗降低 5%。

我们认为,为了实现窑外分解窑的自动控制,必须视其为多变量系统处理。同时,熟练工人的经验是必不可少的。

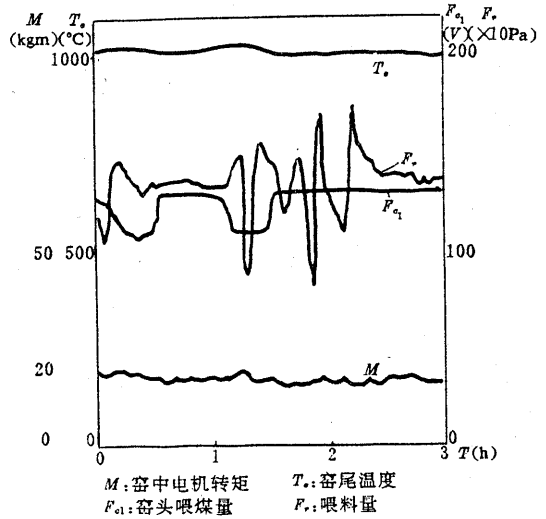


图 4 回转窑系统计算机控制运行记录

参 考 文 献

- [1] Phillips, R. A. . Automation of a Portland Cement Plant Using a Digital Control Computer. Automatic and Remote Control, Proc. 2nd IFAC Congress, Applications and Components, Butterworths, London, 1964, 347—357
- [2] Wong, K. J. , Wiig, K. M. and Allbritton, E. J. . Computer Control of the Clarkville Cement Plant by State Space Design Method. IEEE Cement Industry Technical Conference, St. Louis, U. S. A. , 1968, May 20—24
- [3] Otomo, T. , Nakagawa, T. and Akaike, H. . Statistical Approach to Computer Control of Cement Rotary Kilns. Automatica, 1972, 8:35—48
- [4] Holmblad, L. P. and Ostergaard, J. J. . Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic, Fuzzy Information and Decision Process. North—Holland Publishing Company, 1982, 389—399
- [5] Sheridan, S. E. and Skjoth, P. . Automatic Kiln Control at Oregon Portland Cement Company's Durkee Plant Utilizing Fuzzy Logic. IEEE. Trans. On Industry Applications, 1984, IA-20(3):562—568
- [6] Doraiswami, R. and Jiang, J. . Performance Monitoring in Expert Control Systems. Automatica, 1984, 25(6):799—811
- [7] Dubois, D. and Prade, H. . Fuzzy Sets and Systems—Theory and Application. Academic Press, 1980

Automatic Control of Cement Precalcining Kiln

WANG Hao, ZHANG Shaohua, LI Tianmin, MAO Jian and CHENG Zhimin

(Computer Application Department, Xinjiang Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences • Urumqi, 830011, PRC)

Abstract: In order to solving the control of cement precalcining kiln, we have to pay attention to its features, eg. multivariable, strong coupling, non-linear, time-varying, etc. . In this paper, a knowledge-based intelligent control method is presented in detail. The essentials of this method are to identify the operation condition and then to choose different control strategies by expert judgement system. These strategies include stochastic multivariable

optimal control and FCL (Fuzzy Control Language)-based self-learning fuzzy control. This method has been used to realize the automatic control of a cement precalcining kiln.

Key words: control of cement kiln; fuzzy control; expert control; multivariable control

本文作者简介

汪浩 1946年生. 1967年毕业于西安交通大学. 现为中国科学院新疆物理所研究员, 长期从事多变量控制, 最优控制的应用和计算机过程控制方面的研究工作. 曾获中国科学院及省部级科技进步奖多项. 1988年至1989年在美国伊利诺大学进行CIMS中的多级实时决策控制合作研究取得突出成果.

张少华 1962年生. 1984年毕业于浙江大学, 1987年在浙江大学工业自动化专业获硕士学位. 现为中国科学院新疆物理所助研. 研究兴趣为多变量控制和智能控制方法及其在过程控制中的应用.

李天民 1945年生. 中国科学院新疆物理所工程师. 1969年毕业于西安交通大学. 现主要从事工业过程计算机控制的应用研究.

毛健女 1962年生. 1984年毕业于新疆工学院工业自动化专业, 现为中国科学院新疆物理所助研, 从事控制系统软件设计工作.

程志民 1963年生. 1985年毕业于合肥工业大学, 1990年在清华大学自动化系获硕士学位. 现为中国科学院新疆物理所助研, 从事控制理论应用方面的研究工作.

《控制理论与应用》编委程勉教授病逝

本刊编委程勉教授因病医治无效, 于1993年6月13日在北京不幸逝世, 享年61岁.

程勉教授是中国自动化控制理论专业委员会委员, 中国航空学会自动控制专业委员会委员, 《控制理论与应用》杂志编委, 中国科协全国青年科学奖评审组成员. 程勉教授是我国自动控制及应用学科唯一的女博士生导师, 发表专著《变质量力学》和《非线性振动》, 论文60多篇. 程勉教授先后两次获航空航天部科技进步二等奖, 1989年被评为北京市优秀教师并获“北京市三·八红旗手标兵”的称号.

程勉教授热爱社会主义祖国, 拥护党的路线、方针、政策, 坚持四项基本原则, 坚持改革开放, 忠诚党的教育事业. 她治学严谨, 才思敏捷, 公正廉洁, 任劳任怨, 关心同志, 团结协作, 深受同事和学生的爱戴. 程勉教授的一生是在教育战线上勤奋忘我工作的一生. 他的逝世是我国控制界的一大损失, 广大同行深表哀悼.