

## 一类跟踪系统的预见预测控制算法的研究

吴海宗 鸣

于锡存 徐心和

(沈阳工业大学自动控制与系统工程研究所·沈阳, 110023) (东北大学控制仿真研究中心·沈阳, 110006)

**摘要:** 在数控加工、机器人焊切割等一类应用的轨迹跟踪问题中, 未来目标轨迹信息对于提高跟踪精度具有十分重要的意义。本文提出的预见预测控制算法, 充分利用未来信息, 能够克服模型误差等干扰。仿真结论表明该方法能够大幅度提高系统的跟踪精度, 说明了该方法的有效性和实用性。

**关键词:** 预测控制; 预见控制; 跟踪误差; CNC 机床

**文献标识码:** A

### Preview Predictive Control for a Class of Following Systems

WU Hai and ZONG Ming

(Institute of Control & System Engineering, Shenyang University of Technology · Shenyang, 110023, P. R. China)

YU Xichun and XU Xinhe

(Institute of Control & Simulation, Northeastern University · Shenyang, 110006, P. R. China)

**Abstract:** Future information is very important to improve following accuracy in a class of application, such as CNC (computerized numerical control) machining, welding. A novel preview predictive control is proposed, to make the best use of future trajectory information. Meanwhile overcome modeling error and disturbance. Simulation shows the new method can improve system following accuracy distinctly.

**Key words:** predictive control; preview control; following error; CNC lathe

### 1 引言(Introduction)

在高档数控机床、机器人弧焊装置、汽车悬架控制等一类应用中, 曲线的跟踪控制具有其特性, 即轨迹部分已知、或全部已知。这使其控制器的设计, 也有别于通常意义下的跟踪控制。因为已知的目标轨迹是提高控制精度的重要信息。这一类控制定义为预见控制(preview control)或前瞻控制(lookahead control)。

预见控制思想, 源于 T. B. Sheridan 1966 年提出三种预见控制的模型<sup>[1]</sup>。Bender 应用 Wiener 滤波原理解决了一类预见控制的问题, 并应用于汽车悬架控制<sup>[2]</sup>。P. K. Kulkarni 研究了有限预见系统的优化控制<sup>[3]</sup>。E. Mosca 等归纳了确定性系统线性二次型预见跟踪控制问题。预见控制的应用通常基于优化控制理论<sup>[4]</sup>。本文作者基于轮廓误差概念提出了机床进给伺服系统的预见控制, 它在原有闭环系统中用作前馈控制, 用来改变系统的动态响应<sup>[5,6]</sup>。这种方法的缺点是在系统存在模型误差和外界干扰的情况下的鲁棒性差。这种情况在机床加工等应用中普遍

存在, 例如工件切削深度的变化、材质不均、机床本身的非线性等<sup>[7]</sup>。

预测控制是 70 年代后期出现的一类新型计算机控制算法<sup>[8]</sup>。它在工业过程控制中显现出良好的控制性能, 它的滚动优化、反馈校正策略使系统品质具有鲁棒性。对于目标轨迹部分已知的跟踪情况, 如果直接应用预测控制, 而不考虑变化规律已知的输入, 把它当作不可知干扰用反馈形式加以校正, 显然是不合理的; 因为反馈校正只有当误差产生后才能起作用, 带有一定的被动性, 延长了系统的动态过程。而且采用非因果关系的误差预报和校正, 不能充分利用这部分误差产生的因果信息。

本文提出了一种预见预测控制算法, 它克服了两者的不足, 适用于一类未来轨迹已知(或部分已知)的跟踪控制<sup>[9-12]</sup>。在本文的第二部分, 讨论最优预见控制系统的设计, 求出无模型误差和干扰条件下的预见控制规律  $u_{pre}$ ; 第三部分研究预见预测控制的设计; 然后结合仿真, 说明该方法的有效性, 最后给出结论。

## 2 系统与预见控制设计(System and preview control design)

被控对象用状态方程表示即为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (1)$$

定义误差信号为

$$e(k) = R(k) - y(k), \quad (2)$$

其中  $R(k)$  为理想轨迹. 写出扩展误差系统

$$\begin{bmatrix} e(k+1) \\ \Delta x(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m & -CA \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -B \\ B \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} I_m \\ 0 \end{bmatrix} \Delta R(k+1), \quad (3a)$$

或写成

$$X_0(k+1) = \Phi X_0(k) + G \Delta u(k) + G_R \Delta R(k+1). \quad (3b)$$

对于(3)式, 设未来  $P$  步的轨迹  $R(k) \cdots R(k+P)$  已知, 取性能指标

$$J = \sum_{k=-P+1}^{\infty} [X_0^T(k) Q X_0(k) + \Delta u^T(k) H \Delta u(k)], \quad (4)$$

其中:  $Q$ —半正定矩阵,  $H$ —正定矩阵; 我们取

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix},$$

以使跟踪误差  $e$  最小. 根据最优控制原理

$$\Delta u_{pre}(k) = \sum_{j=0}^P F_R(j) \Delta R(k+j).$$

其中

$$\begin{aligned} F_0 &= -[H + G^T P G]^{-1} G^T P \Phi, \\ F_R(j) &= -[H + G^T P G]^{-1} G^T (\xi^T)^{j-1} P G_R (j \geq 1), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\xi = \Phi + G F_0,$$

$$P = Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P G [H + G^T G]^{-1} + G^T P \Phi.$$

预见控制量  $u_{pre}$  可以离线求得, 将其作用于系统的模型, 产生理论轨迹

$$y_{pre}(k) = C[Ax(k) + Bu_{pre}(k)],$$

将其作为前馈量加入被控对象中, 弥补系统的动态延迟.

## 3 预见预测控制器的设计(Design of preview predictive control)

对象的输入通常可分为两类. 一类是可控输入,

即控制量; 另一类是不可控输入, 它包含了可测量或可预知但无法改变的外部作用以及由对象、环境不确定性引起的未知干扰. 控制的目的是要不断调整可控输入, 用于克服不可控输入的影响, 并使对象的输出具有期望的动态特性. 对于无规律可循的不可控输入, 这一调整只有在它反映到可测量输出后才能进行, 因而必须采用反馈的方式. 但对于变化规律已知的不可控输入, 由于其对输出的影响有一定的可预见性, 则可以通过前馈预先加以补偿, 这里我们把轨迹的变化视为规律已知的不可控制输入, 设计复合控制器, 利用预见控制在到达目标轨迹之前, 加入控制量, 并通过预测控制的滚动优化和反馈校正, 以改善模型误差及外界干扰造成的影响. 如图 1 所示.

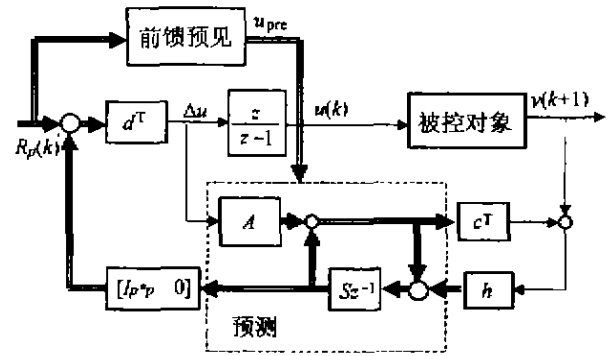


图 1 预见预测控制框图

Fig. 1 Block diagram of preview predictive control

这里我们基于动态矩阵控制(DMC)<sup>[7]</sup>实现 PPC (preview predictive control) 控制. 系统的阶跃响应矩阵定义为:

$$w = [w_0, w_1, \cdots, w_N]^T.$$

它可由系统的阶跃响应得到, 该矩阵构成 DMC 的预测模型,  $N$  是阶跃响应的截断点, 称为建模时域长度,  $N$  的选择应该使过程响应值接近其稳态值, 即  $w_N = w_\infty$ . 由初始预测值  $y_{p0}(k)$  利用预测模型, 得到  $\Delta u_{pre}$  和控制增量  $\Delta N_M$  共同作用下  $p$  个时刻的预测值  $\bar{y}_{PM}$ . 得到

$$\begin{aligned} \bar{y}_{PM}(k) &= \bar{y}_{p0}(k) + A \Delta u_M(k) + y_{pre}^{pre}, \\ \bar{y}_{PM}(k) &= \begin{bmatrix} \bar{y}_M(k+1|k) \\ \vdots \\ \bar{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}, \bar{y}_{p0}(k) = \begin{bmatrix} \bar{y}_0(k+1|k) \\ \vdots \\ \bar{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

其中:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & & & \\ \vdots & \ddots & & \\ w_M & \cdots & w_1 & \\ \vdots & & \vdots & \\ w_P & \cdots & w_{P-M+1} & \end{bmatrix}, y_{pre}^{pre} = \begin{bmatrix} y_{pre}(k) \\ \vdots \\ y_{pre}(k+p) \end{bmatrix}.$$

$P$  为优化时域(即为已知轨迹步长),  $M$  为控制量的变化次数,  $W$  为阶跃响应系数  $w_i$  组成的  $P \times M$  维动态矩阵, 一般规定  $M \leq P \leq N$ , 取  $K$  时刻的性能指标为:

$$\min J(k) = \|R_p(k) - \tilde{y}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta u_M(k)\|_H^2,$$

其中

$$R_p(k) = [R(k+1) \cdots R(k+P)]^T,$$

$$Q = \text{diag}(q_1 \cdots q_P), H = \text{diag}(h_1 \cdots h_M).$$

在不考虑约束条件的情况下, 可得控制向量:

$$\Delta u_M(k) =$$

$$c_0^T (W^T Q W + H)^{-1} W^T Q [R_p(k) - y_{p0}(k) - y_{p0}^{pe}] =$$

$$d^T [R_p(k) - y_{p0}(k) - y_{p0}^{pe}].$$

其中  $P$  维行向量:

$$d^T = c_0^T (W^T Q W + H)^T W^T Q \Delta [d_1 \cdots d_p],$$

$$c_0^T = [1 \ 0 \ \cdots \ 0],$$

$d^T$  可以一次离线计算. 则应用即时的控制增量  $\Delta u(k)$ , 在其作用下的输出预测值为

$$\tilde{y}_{N1}(k) = \tilde{y}_{N0}(k) + w \Delta u(k).$$

反馈校正是预测控制中用以消除模型失配、环境干扰的重要方法. 因为实际测量值  $y(k+1)$  与模型预测输出  $\tilde{y}_{N1}(k+1|k)$  之间存在误差

$$e(k+1) = y(k+1) - \tilde{y}_{N1}(k+1|k).$$

采用加权的方法, 修正对未来输出的预测初始值:

$$\tilde{y}_{cor}(k+1) = \tilde{y}_{N1}(k) + h e(k+1),$$

其中

$$\tilde{y}_{cor}(k+1) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{cor}(k+1|k+1) \\ \vdots \\ \tilde{y}_{cor}(k+N|k+1) \end{bmatrix}.$$

校正向量  $h = h[h_1 \cdots h_N]^T$ , 并定义位移矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \\ \vdots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$\tilde{y}_{cor}(k)$  的元素通过移位, 成为  $k+1$  时刻的初始预测值:

$$\tilde{y}_{N0}(k+1) = S \tilde{y}_{cor}(k+1).$$

整个控制过程就按这种预见控制结合反馈校正的滚动优化方式反复进行.

#### 4 仿真分析(Simulation analysis)

我们以数控机床的进给伺服控制为例, 说明预见预测控制对一类轨迹可预知系统的轨迹跟踪控制的有效性. 机床单轴的系统框图如图 2 所示. 选取数控加工中, 典型的直线加工和圆弧加工两种情况. 我

们知道机床曲线加工是由插补器产生指令, 通过两个或多个轴之间的协调配合完成的. 一般各个轴是独立控制的. 对于直线加工, 单轴插补器的输出信号为斜坡信号, 如图 5 所示; 对于圆弧加工, 单轴插补器输出信号为正弦波信号, 如图 6 所示.

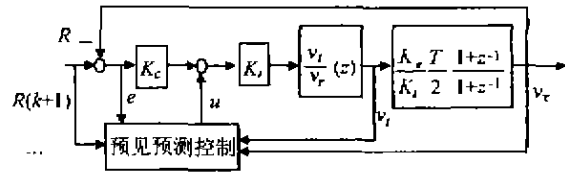


图 2 单轴控制系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of single axis control system

伺服电机的速度环为一阶模型:

$$\frac{v_t}{v_r} = \frac{b_0 z^{-1}}{1 + a_0 z^{-1}}.$$

我们考虑两种情况:

1) 实际模型与辨识模型之间无误差, 即:  $b_1 = b_0, a_1 = a_0$ ;

2) 实际模型与辨识模型之间存在误差, 这在实际应用中更有意义. 即:  $b_1 \neq b_0, a_1 \neq a_0$ .

取预见长度  $P = 20$ , 建模时域  $N = 35$ , 控制时域  $M = 2$ . 系统参数为:

$$b_0 = 1.33623, a_0 = -0.75438,$$

$$b_1 = 1.68146, a_1 = -0.176386,$$

$$K_c = 1, K_i = 1.36, T_e = 0.004s, K_t = 12000,$$

$$c_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}.$$

其中  $T_e$  为仿真步长. 仿真分析在 Matlab 环境下完成. 图 3 为系统的阶跃响应, 仿真结果如图 7~10 所示. 对于圆弧加工和直线加工情况下, 可以得到类似的结论:

1) 在已知轨迹步长相同的情况下, 预见控制优于预测控制, 预见控制可以提高预测控制的跟踪精度; 预测控制可以提高系统的鲁棒性, 在存在较大的模型误差时, 预见控制不能使系统稳定(图 8 中无法画出), 预测控制虽然能镇定系统, 但跟踪精度不如本文提出的预见预测控制.

2) 从图 9 还可以看出, 当预见步长  $P$  增加时, 这一点充分说明了未来信息对于跟踪控制的重要性, 这些是本文 PPC(preview predictive control) 预见预测控制的根本点.

3) 当  $P$  增加到某一限度后,  $P$  再增加对跟踪误差的作用不大, 说明近处的信息较比远处的信息更重要. 所以  $P$  不宜选取太大, 以免增加运算量.

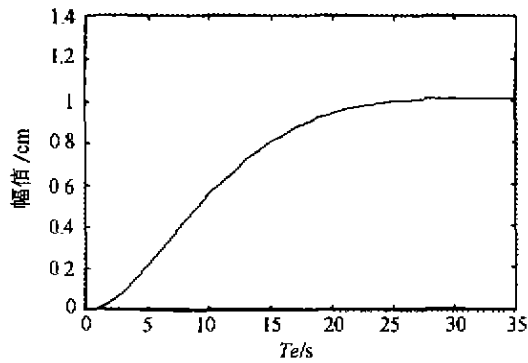


图3 系统阶跃响应

Fig. 3 Step response of systems

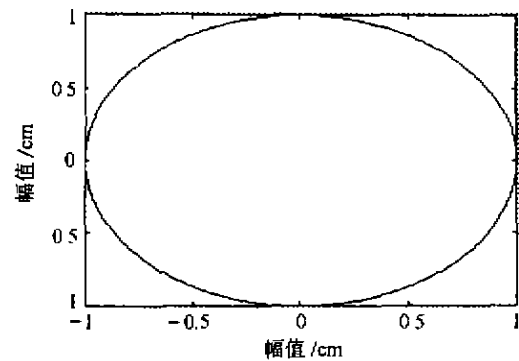


图4 双轴圆弧轨迹

Fig. 4 Circle trajectory

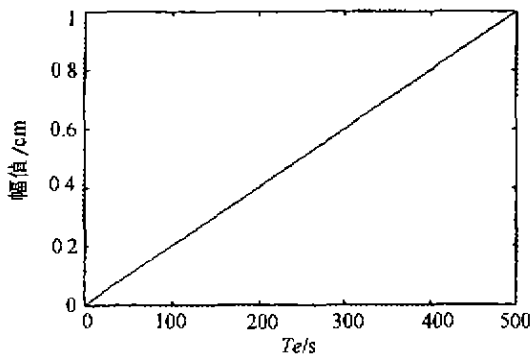


图5 单双轴直线轨迹

Fig. 5 Straight line trajectory

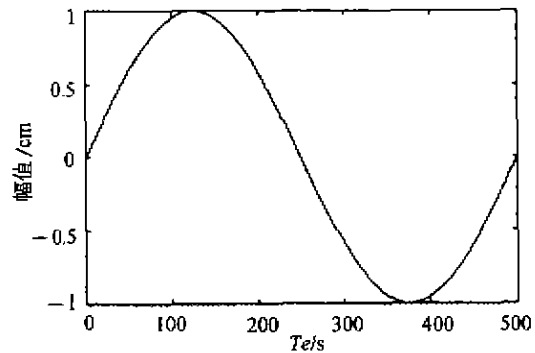


图6 单轴正弦波轨迹

Fig. 6 Sine curve-shaped trajectory

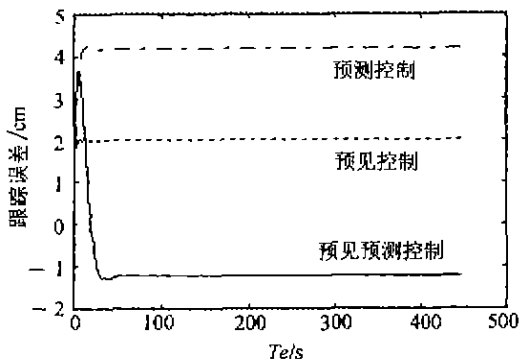


图7 无模型误差时的直线跟踪仿真

Fig. 7 Following error without modeling error in straight tracking

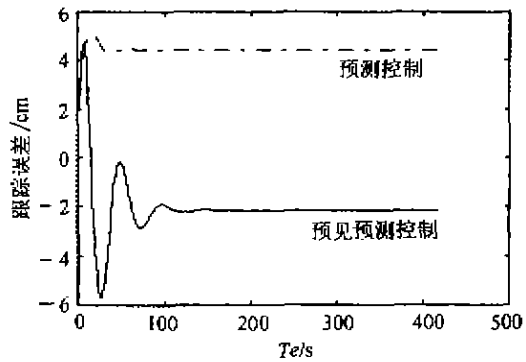


图8 存在模型误差时的直线跟踪仿真

Fig. 8 Following error in straight tracking with modeling error

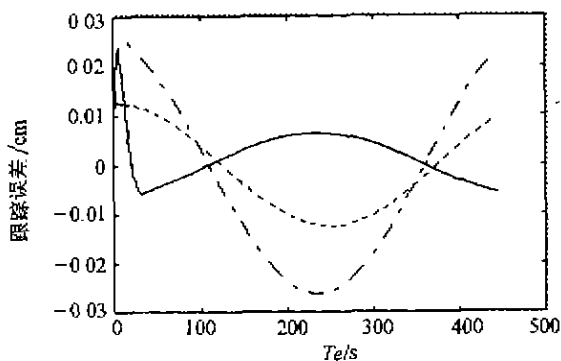


图9 无模型误差时的正弦波跟踪仿真

Fig. 9 Following error in sine curve tracking without modeling error

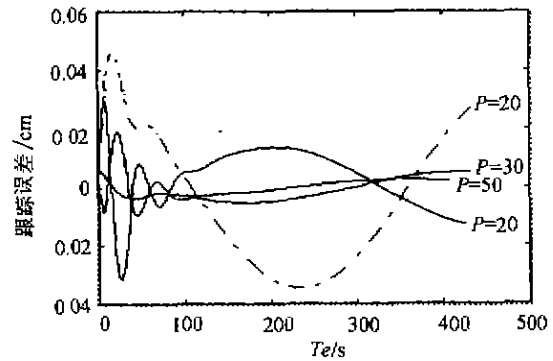


图10 存在模型误差时的正弦波跟踪仿真

Fig. 10 Following error in sine curve tracking with model error

## 5 结论(Conclusion)

这里我们应用预见控制的基本原理,结合预测控制鲁棒性强的优点,针对一类轨迹可预知系统的特点,提出了预见预测控制.它强调了数控加工、机器人切割机、汽车悬架控制等一类跟踪控制中,未来信息的重要性,得出以下结论.

1) 仿真结果说明,未来  $P$  步目标轨迹  $R(k+1)\cdots R(k+P)$ ,可以用来提高跟踪精度.

2) 仿真结果表明,预见预测控制的跟踪精度,优于预见控制和预测控制,而且具有预测控制的鲁棒性.

3) 当未来信息增加时,跟踪误差减小;但  $P$  增大一定限度后的  $R(k+P+l)$ ,对跟踪误差影响很小,说明近处的信息较比远处的信息更重要;就好比汽车弯路驾驶,司机更注意近处的路况,远方的情况只能作参考.

预见预测控制对于一类目标轨迹部分已知的跟踪问题,是一种较为实用的方法.但是,针对复杂工件加工、两维以上轨迹跟踪中的轮廓误差概念,如何应用该思想方法,还有待于我们进一步的分析.总之,预见预测控制思想对实际应用中的一类伺服控制具有一定实际意义.

## 参考文献(References)

- [1] Sheridan T B. Three models of preview control [J]. IEEE Trans. Human Factor in Electronics, 1996,7(2):91-102
- [2] Bender E K. Optimal linear preview control with application to vehicle suspension [J]. Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, 1998, 90(22):213-221
- [3] Kulkarni P K and Srinivasan K. Optimal contouring control of multi-axial feed drive servo-mechanisms [J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1989,40(111):140-148

- [4] Tsuchiya T, Egami T. Digital Preview Control [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1996(in Chinese)
- [5] Wu Hai, Yu Xichun, Xu Xinhe. Optimal contouring control with preview of biaxial feed drive servomechanisms [A]. Proc. of 2nd Asian Control Conference [C], Seoul, 1997,835-838
- [6] Wu Hai, Yu Xichun and Xu Xinhe. Optimal Contouring control with preview of biaxial feed drive servomechanisms [J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(9): 22-24(in Chinese)
- [7] Wu Hai, Yu Xichun and Xu Xinhe. The analysis of source of the CNC lathe control system [J]. J. of Northeastern University (Natural Science), 1998, 19(4):366-369 (in Chinese)
- [8] Xi Yugeng. Predictive Control [M]. Beijing: National Defensive Industry Press, 1993 (in Chinese)
- [9] Poo A, Bollinger J G, Younkun W. Dynamic errors in type 1 contouring system [J]. IEEE Trans. on Industrial Applications, 1972, 8 (4): 477-484
- [10] Koren y. Cross-coupled biaxial computer controls for manufacturing system [J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1980, 102 (12):265-272
- [11] Ber A, Roitberg J and Zombach S. A method for cutting force of end mills [J]. Annals of the C IR, 1988, 37(1):37-40
- [12] Tomizuka M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. ASME Transaction, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 109 (3):65-68
- [13] Koren y. Computer Control of Manufacturing System [M]. New York:McGraw-Hill, 1983

## 本文作者简介

吴海 1967年生 沈阳工业大学信息科学与工程学院讲师, 1988年毕业于空军导弹学院导弹工程系,1995年于东北大学获得硕士学位,1999年于东北大学获得博士学位.研究方向为计算机数控控制系统的分析与设计.

宗鸣 1957年生.沈阳工业大学副教授.研究方向为电机控制系统的分析与设计.

于锡存 1945年生.东北大学教授.研究领域为过程控制与仿真分析.

徐心和 1940年生.东北大学教授,博士生导师.研究领域为过程控制与仿真分析,离散事件动态系统.