第3卷 第3期
1986年9月

控制理论与应用
CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

Vol.3, No.3
Sept., 1986

大时延过程的控制方法

王月娟　　万百五

（西安交通大学）

摘　要

有很多工业过程控制系统包含纯时延．克服纯时延是改善时延过程控制质量的一个关键性问题．本文综述自Smith提出的预估控制器以来，近30年内关于解决大时延系统的一系列控制方法．并着重介绍最近几年的研究成果，例如改进型Smith预估控制法，最优控制法，自适应控制法，以及有限谱配置设计方法．借助微计算机实现各种控制算法，可以有效地控制时延系统．论文最后对大时延系统的研究提出了小结和展望．

一、引　言

很多工业控制系统普遍都存在着纯时延现象．例如化工、炼油生产中物料的传输，冶金、玻璃、造纸等工业中板材厚度的控制，加热炉、熔窑的传热，反应器的化学合成以及应用质量分析仪的系统等都存在着纯时延．所以，时延系统的设计在工业过程控制中是一个重要问题．由于系统中含有纯时延，系统的设计比之无时延系统的设计要困难得多，尤其对大时延系统，这个问题更加突出．

关于时延系统的研究，主要有预估控制法、最优控制法、自适应控制法、有限谱配置法等．而最早是O.J.M.Smith在1957年提出的预估控制器，他从理论上成功地解决了时延系统的设计问题．人们称这种控制器为Smith预估控制器．然而，在那时采用模拟技术实现含有e^{-sL}形式的Smith预估器还是相当困难的，因而Smith方法在当时并没有能得到广泛的实际应用．计算机的出现，为实现这种预估器提供了有力的工具．微计算机的发展和价格的不断下降，使利用微计算机控制时延系统成为完全可能的事．

七十年代以来，许多学者对时延系统的研究又给予极大关注，这方面的文献从五十年代末期至今约有三百余篇．本文围绕计算机实现时延系统控制这一目的来综述这方面的成果．这对于大时延系统的设计和采用计算机实现时延过程的控制是十分有用的．这正是与前人发表的二篇综述文章[1,2]不同之处．

二、Smith预估控制法（Smith　Predictor方法简称SP法）

Smith提出一种时延补偿方法[3~5]．这种方法利用过程的数学模型以内反馈方式

本文于1986年1月21日收到．1986年3月25日收到修改稿．

包围常规的控制器(如PI、PID)，构成Smith预估控制器，它与过程串联构成Smith预估控制系统（简称SPCS），其结构如图1所示．图中$G_c(s)$是常规控制器，$G(s)e^{-sL}$是过程传递函数，L是时延时间，$G(s)-G(s)e^{-sL}$是过程模型传递函数．如不考虑外扰动d，对单输入单输出系统，其输出$y(s)$对参考输入$r(s)$的传递函数为

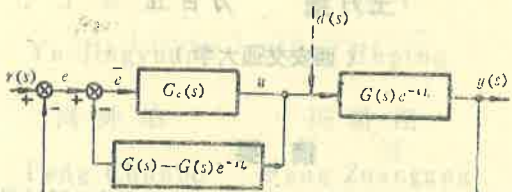

图 1　Smith预估控制系统

$$G_r(s)=\frac{y(s)}{r(s)}=\frac{G_c(s)G(s)}{1+G_c(s)G(s)}e^{-sL}. \tag{1}$$

上式表示闭环特征方程中已不出现时延L，即时延部分已移到闭环外边，因此控制器$G_c(s)$的设计完全可以按照无时延情况进行．这样，一个时延系统的设计问题已转化为无时延系统的设计问题．这一点是SP方法最大的优点和最吸引人的地方，也是后来许多学者采用其它方法研究时延系统时常常借鉴的一个思想．第二个优点是当$G_c(s)$有积分作用时，系统无论对参考输入还是外扰输入的稳态误差都为零．第三个优点是可以采用一般工程实用系统的品质指标．因为它是频域设计方法，反馈控制是采用系统的输出反馈．因此可采用增益和相余量、阻尼比、建立时间等一整套工程技术人员所熟知的经典频域方法进行时延系统的设计工作．多年来工程师们使用SP法解决了很多时延过程的控制问题[6~8]．SP方法是一种简单而有效的控制方法．但只适用于单输入单输出系统．在实际应用时，要求有一个精确的过程模型，否则由于系统参数和模型参数相差较大，闭环系统变得不稳定[9]．

三、最优控制方法

随着最优控制理论的发展，到六十年代后期，Fuller、Donoghue、Cook和Price等人提出了另一种设计方法——二次型性能指标最优设计方法[10~12]．这是一种时域设计方法，采用状态反馈来获得时延系统的二次型性能指标为最优．这种方法可以直接用于多变量时延系统．对如下控制有时延的系统：

$$\begin{cases} \dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t-L), \\ y(t)=Cx(t), \end{cases} \tag{2}$$

式中　$u(t)$是控制向量，$x(t)$是状态向量，$y(t)$是输出向量，L是控制向量的时延．系统到达稳态时，以u_0、x_0、y_0表示．与SP法一样，首先将式（2）表示的有时延系统转化为如下无时延系统：

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bv(t), \\ e(t) = Cz(t), \end{cases} \tag{3}$$

其中调节误差$e(t) = y_0 - y(t)$；状态偏差$z(t) = x_0 - x(t)$；新的控制向量 $v(t) = u_0 - u(t - L)$. 控制的目的是使性能指标 $I = \int_{t_0+L}^{\infty} (e^T R_1 e + v^T R_2 v) dt$ 为极小. 根据最优控制理论. 对式(3)系统的最优控制律为 $v(t) = -Fz(t)$，于是式(2)系统的最优控制为

$$u(t) = -Fx(t+L) + Fx_0 + u_0,$$

式中　$F = R_2^{-1} B^T K$，（常数阵K是矩阵Riccati方程的解），并

$$x(t+L) = \Phi(L)x(t) + \int_{t-L}^{t} \Phi(t-\tau) Bu(\tau) d\tau, \tag{4}$$

$\Phi(t) = e^{At}$，它是系统的状态转移矩阵.

可以证明[13]：$Fx_0 + u_0 = H_c^{-1}(0)r$，$r$是参考输入向量，$H_c(0)$是当$s = 0$时闭环回路传递函数矩阵，即$H_c(0) = C[-(A - BF)]^{-1}B$.

必须指出：控制向量$u(t)$是完全状态的函数. 要构成最优控制系统，必须连续不断地测量出时延过程的当前状态或它的泛函，一般来说，这是不容易做到的. 因此常常需要采取次优控制. 最初Fuller[10]提出实现状态泛函的几种方法，其中一个方法是使用某种过程模型，只要将当前控制信号输入到该模型，在模型的输出端就可得到需要的时延部件的当前状态或它的泛函，这样就避开了连续测量的难题. 式（4）右边第二项可写成

$$\int_{t-L}^{t} e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau = \int_{0}^{t} e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau - e^{AL} \int_{0}^{t-L} e^{A(t-L-\tau)} Bu(\tau) d\tau. \tag{5}$$

上式右边第一、第二项是熟悉的卷积形式，它们可以由控制信号u分别通过传递函数为$(sI - A)^{-1}B$和$e^{AL}(sI - A)^{-1}Be^{-sL}$的模型而得到. Fuller提出的过程模型如图2所示. 实现该模型就可获得所需的最优控制信号，而不再需要进行状态的连续测量. 这是一个非常有用的结果. 但是，Fuller方法只是按照调节器方法进行的，即假设参考输入为零.

Donoghue[11]把Fuller的研究成果推广应用到如图3所示的伺服系统中. 按

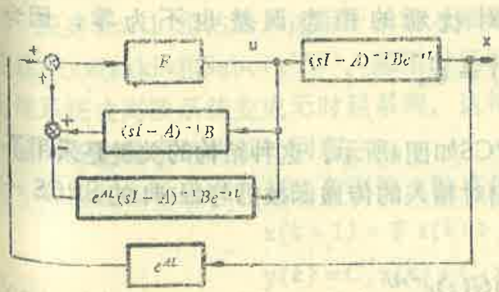

图 2　Fuller最优控制系统

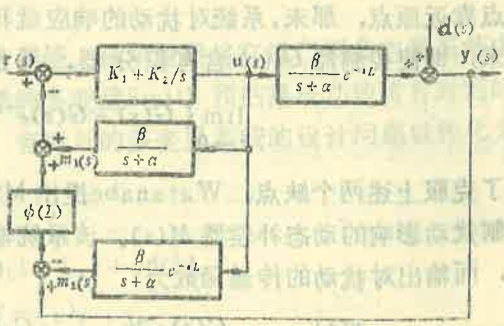

图 3　Donoghue最优控制系统

Donoghue 方法设计出的系统对参考输入的稳态误差为零；而对外扰输入，即使控制器有积分作用，系统仍有稳态误差．这是因为最优系统结构中多了乘子$\Phi(L)$，这是与SP方法最大的差别．假设外扰动是阶跃a/s，a为常向量，那末$y(t)$的稳态值为$a(I-\Phi(L))$，也就是说最优设计对外扰有稳态误差．Donoghue提出：要消除此误差，必须引入对外扰估计值的附加反馈．当然这样就会增加反馈系统的复杂性．

Cook和Price[12]指出：当外扰是白噪声时，最优系统与Marshall等人[14]提出的系统等效，这时$\Phi(L)=e^{-aL}$；当外扰是随机幅值的阶跃扰动时，最优系统与SPCS等效，这时$\Phi(L)=I$．也就是说，Cook和Price认为当外扰是随机幅值的阶跃扰动时，SPCS是最优系统．而实际上SPCS对外扰的响应很慢，且当过程有积分性质时，对外扰也有稳态误差．因此该文的结论在某些情况下是不完全正确的．

另外，当测量值附有噪声时，Kleinman[15]指出：使二次型性能指标为极小的最优控制作用，可由Kalman滤波器和最小均方预估器相串联而产生．Jamshidi[16]对非线性时延系统提出了三级次优控制方法．

总之，相对于SP方法，最优设计方法的主要优点是直接可用于多变量时延系统的设计，缺点是对外扰有稳态误差．

但是，无论SP法或以上各种最优设计方法，当系统存在外扰或非零初始条件时都呈现一定的缺陷．而一些文章中都未阐明过造成这些缺点的原因．扰动抑制已成为解决时延过程控制系统的一个主要问题．1981年Watanabe分析了扰动的影响，并提出了解决扰动抑制的办法——改进型Smith预估控制系统，对抑制扰动取得了很好的效果．

四、改进型Smith预估控制系统（简称MSPCS）

1981年、1983年Watanabe（渡部）分析了经典Smith预估控制系统存在的两个主要缺点[17,18]：一是系统对扰动的响应很差；由于系统输出对扰动的传递函数为

$$G_d(s)=\frac{y(s)}{d(s)}=\frac{G(s)e^{-sL}}{1+G_c(s)G_s(s)}+\frac{G_c(s)G(s)e^{-sL}}{1+G_c(s)G(s)}\{G(s)-G(s)e^{-sL}\},\tag{6}$$

$G_d(s)$的极点是$1+G_c(s)G(s)$的零点加上$\{G(s)-G(s)e^{-sL}\}$的极点，因此，如果$G(s)$有极点靠近原点，那末，系统对扰动的响应就非常迟钝．二是如果$G(s)$在原点有一极点，那末，即使控制器$G_c(s)$含有积分器，系统对扰动的稳态误差也不为零，因为

$$\lim_{s\to 0}\{G(s)-G(s)e^{-sL}\}\neq 0.$$

为了克服上述两个缺点，Watanabe提出MSPCS如图4所示．这种结构的关键是采用了抑制扰动影响的动态补偿器$M(s)$．该系统输出对输入的传递函数仍与经典的SPCS一样，而输出对扰动的传递函数为

$$G_d(s)=\frac{y(s)}{d(s)}=\frac{G(s)e^{-sL}}{1+G_c(s)G(s)}+\frac{G_c(s)G(s)e^{-sL}}{1+G_c(s)G(s)}\{G(s)-M(s)G(s)e^{-sL}\}.\tag{7}$$

为了获得比较满意的扰动响应和对扰动的稳态误差为零（当 $G(s)$ 在原点有极点时），其充分与必要条件是：(i) $G_c(s)$ 有积分器性质；(ii) $M(s)$ 的极点能任意配置；(iii) $(s+\alpha_i)\{G(s)-M(s)G(s)e^{-sL}\}_{s=-\alpha_i}=0$，其中$\alpha_i$是$G(s)$的任意一个极点，此式表示相应于该极点的模态分量为零；(iv) $\lim\limits_{s\to 0}\{G(s)-M(s)G(s)e^{-sL}\}=0$。满足条件（iii）意味着在$\{G(s)-M(s)G(s)e^{-sL}\}$中$G(s)$的极点与它的零点相抵消，这样，$G_d(s)$的极点仅是$1+G_c(s)G(s)$的零点和$M(s)$的极点，因为这些零极点均可任意配置，于是就可获得满意的扰动响应特性。满足条件(iv)意味着$\{G(s)-M(s)G(s)e^{-sL}\}$的零点与控制器中积分器相抵消，使积分器的状态在y_L中不可观测，而达到系统对扰动的稳态误差为零。

文[15]又指出：如原(A、B、C)系统满足以下条件：(1)$\mathrm{rank}[sI-AB]=n, \forall s\in C$；(2) $\mathrm{rank}\begin{bmatrix} sI-A \\ C \end{bmatrix}=n, \forall s\in C$；(3) $\mathrm{rank}\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}=n+1$。则（$\tilde{C}e^{-\tilde{A}L}$ $\tilde{A}$）是一可控对，（这里$\tilde{A}=\begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$，$\tilde{C}=$ $[C\ \ 0]$），那末就存在满足下式的 D、E、F、H和变换矩阵T[10]，

$$\begin{cases} T\tilde{A}-DT=E\tilde{C}e^{-\tilde{A}L}, \\ FT+H\tilde{C}e^{-\tilde{A}L}=\tilde{C}. \end{cases} \qquad (8)$$

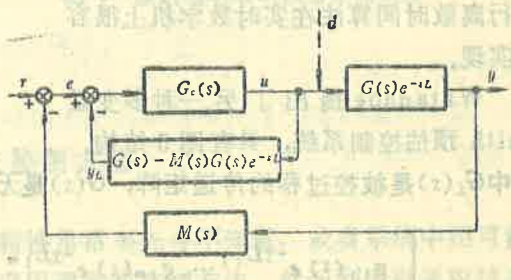

图 4　改进型Smith预估控制系统

这是一个观测器型式的矩阵方程。于是能推得满足条件(ii)、(iii)和(iv)的动态补偿器$M(s)=F(sI-D)^{-1}E+H$。

除了 Watanabe 从模型结构出发提出改进型Smith预估模型外，还有 Marshall、Kantor和 Andres 等人[20,21]分别提出各种抑制扰动的方法，然而，这些方法都改变了SPCS输入—输出间的传递函数。

五、多变量Smith预估控制系统

经典Smith 预估法只适用于单输入单输出系统。最早直接将它推广到多变量系统中的是Alevisakis和Seborg[22]。采用时延补偿的多变量Smith 预估器成功地将有时延的连续系统或离散系统变成无时延系统。这样，有时延的多变量系统的设计问题就转化为一般的多变量系统的设计问题。

对控制和输出有时延的多变量离散系统

$$\mathrm{x}(k+1)=\Psi\mathrm{x}(k)+\Gamma\mathrm{u}(k-L_1)+\theta\mathrm{d}(k),$$
$$\mathrm{y}(k)=C_1\mathrm{x}(k)+C_2\mathrm{x}(k-L_2),$$

其中 $\mathrm{x}(k)$是 n 维状态向量，$\mathrm{u}(k)$是 m 维控制向量，$\mathrm{d}(k)$是p维扰动向量，$\mathrm{y}(k)$是r维输

出向量，L_1、L_2是控制向量和输出向量的时延．式中Ψ，Γ、θ、C_1和C_2是具有适当维数的常矩阵．Alevisakis 等人提出如下多变量 Smith 预估算法：

$$\begin{cases} \mathbf{u}(k) = -K_c\mathbf{y}(k) - K_c\mathbf{p}(k), \\ \mathbf{p}(k) = C_1\mathbf{p}_1(k) + C_2\mathbf{p}_2(k), \\ \mathbf{p}_1(k) = \Psi\mathbf{p}_1(k-1) + \Gamma\mathbf{u}(k-1) - \Gamma\mathbf{u}(k-L_1-1) \quad n \geq 1, \\ \mathbf{p}_2(k) = \Psi\mathbf{p}_2(k-1) + \Gamma\mathbf{u}(k-1) - \Gamma\mathbf{u}(k-L_1-L_2-1) \quad n \geq 1. \end{cases} \tag{9}$$

假定初值 $\mathbf{p}_1(0) = \mathbf{p}_2(0) = 0$．上式中反馈控制器$K_c$是$m\times r$常矩阵，它可按无时延系统进行设计．可以证明[22]，按这组预估算法设计的系统，其特征方程中不出现时延．另一个优点是按式(9)进行离散时间算法在实时数字机上很容易实现．

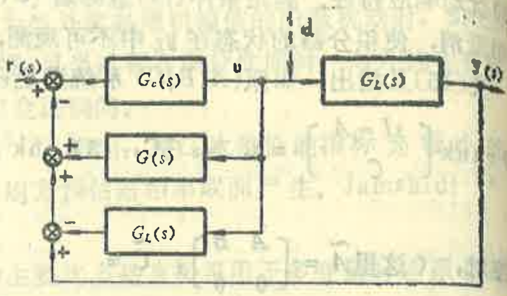

图 5 多变量Smith预估控制系统

Watanabe 提出了另一种多变量 Smith 预估控制系统，具有图 5 结构．图中$G_L(s)$是被控过程的传递矩阵，$G(s)$是无时延模型．

$$G_L(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s)e^{-sL_{11}} & \cdots & g_{1m}(s)e^{-sL_{1m}} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ g_{m1}(s)e^{-sL_{m1}} & \cdots & g_{mm}(s)e^{-sL_{mm}} \end{bmatrix}, \quad G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & \cdots & g_{1m}(s) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ g_{m1}(s) & \cdots & g_{mm}(s) \end{bmatrix}$$

其中$g_{ij}(s)e^{-sL_{ij}}$是第j个输入和第i个输出之间的传递函数．对于$\mathbf{r}(s)$而言，

$$\mathbf{y}(s) = G_L(s)[I + G_c(s)G(s)]^{-1}G_c(s)\mathbf{r}(s). \tag{10}$$

假设参考输入$\mathbf{r}(s) = [r_1/s, r_2/s, \cdots, r_m/s]^T, r_i(i=1,\cdots,m) \in \mathbf{r}$；又设$G_c(s) = G_l(s)G_2(s)$，且$G_2(s) = \mathrm{diag}[1/s, \ \cdots, \ 1/s]$，这样，可将$G_2(s)G(s)$看作被控系统来进行$G_l(s)$的设计，以达到输出$\mathbf{y}$对参考输入具有预期的响应，但是，对扰动而言，$\mathbf{y}(s) = G_L(s)[I + G_c(s)G(s)]^{-1}\mathbf{d}(s) + G_L(s)[I + G_c(s)G(s)]^{-1}G_c(s)[G(s) - G_L(s)]\mathbf{d}(s)$．假如$G_L(s)$（也即$G(s)$）在原点无极点，并$\mathbf{d}(s) = [d_1/s, \ d_2/s, \ \cdots, \ d_m/s]^T$，$d_i(i=1, \ \cdots, m) \in R'$由于$G(0) - G_L(0) = 0$，所以系统对扰动的稳态误差为零．但是，对扰动的响应很差，这种情况与SISO系统一样．

为了抑制扰动，与改进型单变量Smith预估控制类似，Watanabe 提出图 6 所示的改进型多变量 Smith 预估控制系统．对参考输入，式(10)不变，而对扰动的输出变成

$$\mathbf{y}(s) = G_L(s)[I + G_c(s)G(s)]^{-1}\mathbf{d}(s) + G_L(s)[I + G_c(s)G(s)]^{-1} \cdot G_c(s)[G(s) - M(s)G_L(s)]\mathbf{d}(s). \tag{11}$$

所以，关键是设计一个动态补偿器$M(s)$，它的极点可以任意配置，且满足：

(i) $\lim\limits_{s\to 0}[G(s)-M(s)G_L(s)]=0$；(ii) $G_L(s)$ 的极点与 $[G(s)-M(s)G_L(s)]$ 的零点相抵消．这样，输出对扰动的响应就只受 $\det[I+G_c(s)G(s)]=0$ 的根和 $M(s)$ 的极点控制．因为这些极点可以任意配置，所以能获得比较好的扰动响应．这个解决扰动抑制方法的关键还是使 $(sI-A)^{-1}B$ 和 $G_2(s)$ 的状态在 y_L 中完全不可观测．基于这个思想，设计出的动态补偿器 $M(s)=F(sI-D)^{-1}E+H$．

1984年 Watanabe[28] 又对复杂时延的多变量系统进行研究，系统的输入和输出具有多个时延，且存在不可测的多项式扰动，他提出用线性预估控制或过程模型控制来获得较好的扰动响应特性．

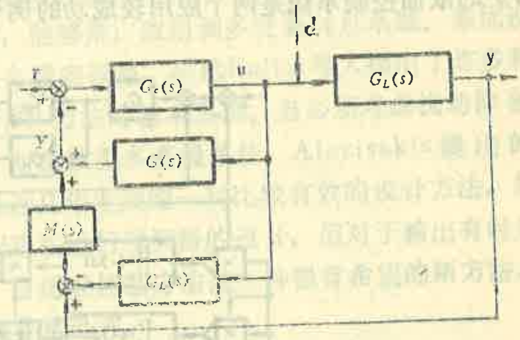

图 6　改进型Smith预估控制系统

六、自适应控制方法

许多工业控制过程，其过程特性和扰动特性常常事先并不知道，或者系统中还可能包含某些变化的参数．对于这类系统，很难采用通常的控制方法，然而利用自适应技术可以获得满意的控制结果．

Bahill[24] 研究了过程模型有误差的情况．他提出在Smith 预估控制器的基础上，利用模型参考自适应原理[25]，构成自适应Smith 预估控制系统，以使模型参数能够不断跟踪对象参数的变化，达到使性能指标 $J=0.5\int e^2dt$ 为极小，其中 $e=y_p-y_m$（这里 y_p 是对象输出，y_m 是模型输出）．

如果只考虑一个参数改变（假如只有模型时延有 ΔL_m 的变化），则可以求得模型时延变化的自适应算法为

$$\Delta L_m=-K\int_{t_1}^{t_2} e\,\frac{\partial y_p}{\partial L_p}\,dt, \tag{12}$$

其中　$1/k=-\int_{t_1}^{t_2}\left|\frac{\partial y_p}{\partial L_p}\right|^2 dt$．图 7 表示了这种自适应 Smith 预估控制系统的结构图．Marshall[20] 对该系统进行了仿真研究．仿真结果表明此系统是稳定的，且当模型时延与对象时延相差 20％时，系统仍可取得良好的动态特性．关于增益自适应方法可参阅[26]，一个应用例子见[27]。

另一类是 Åström 和 Clark 等人[28,29] 提出的自校正调节器和控制器．利用一台小型计算机或微处理机就可实现这类调节器；并且对象参数估计和调节器参数计算能够

方便地采用分时处理．根据不同的参数估计方法和不同的控制策略可以提出许多不同类型的自校正器，而其中以递推最小二乘参数估计方法（RLS）和最小方差（MV）为控制目标的自校正调节器获得最广泛的实际应用．造纸工业中纸基重和湿度的控制，玻璃窑炉的液面控制系统是两个应用较成功的例子[30,31]．

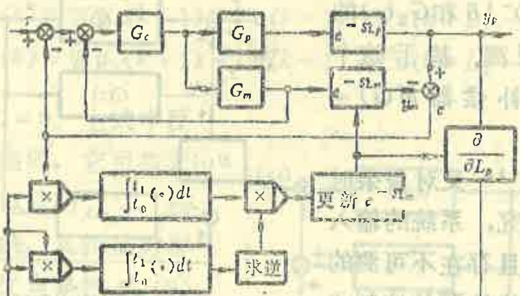

图 7　自适应Smith预估控制系统

对于非最小相位系统和时延有变化的情况，Wellstead[32]和Åström[33]提出极点配置自校正调节器，采用这个方法实现了一个非最小相位系统的液位控制．

七、有限谱配置方法

Pandolfi[34]、Kamen[35]等人主要从理论方面研究线性时延系统的谱配置问题和反馈稳定性问题．而Manitius、Olbrot 以及 Watanabe 是从实际应用方面进行研究，他们提出有限谱配置方法．Manitius 和 Olbrot[36]研究了状态和控制有时延的系统．对控制有时延的系统，如 $\dot{x}(t)=Ax(t)+B_0u(t)+B_1u(t-L)$，$x\in R^n$，$u\in R^m$，论文证明采用如下反馈控制 $u(t)=Fx(t)+F\int_{-L}^{0}e^{-(L+\theta)}B_1u(t+\theta)d\theta$，式中 F 是 $m\times n$ 矩阵．控制作用除了状态的线性反馈外，还包含控制作用全部过去值的积分．在可控性条件下，通过选择 F，就可以使闭环系统获得任意配置的有限谱．对于状态有时延的情况，求得的反馈控制律是当前状态和全部过去状态的比例加积分．文〔37〕是一个应用于风洞控制的例子．如果系统的状态不可测，可采用 Watanabe 提出的观测器设计方法[38]．在有限谱配置的理论基础上，他指出：对状态和控制有时延的系统，

$$\dot{x}(t)=\sum_{i=0}^{P}A_ix(t-iL)+\sum_{i=0}^{P}b_iu(t-iL);\quad y(t)=Cx(t),$$

如果系统是谱可观测的，则存在一个能够渐近地估计状态变量的观测器．论文给出设计观测器的一套方法．Watanabe 方法的优点是不需要知道开环系统的谱，但限于状态和控制有时延的情况．

八、结 束 语

如上所述，Smith 预估控制方法是最成熟的方法，并结合经典频域设计法的利用，可以得到对参考和外扰输入的稳态误差均为零，能够推广应用到多变量时延系统。最优设计法可直接用于多变量系统，但对外扰输入有稳态误差，虽然Fuller等人提出了许多种最优设计方法，但就其实质来讲，都离不开SP 方法的基本思想。当必须考虑扰动抑制时，采用改进型Smith 预估算法效果较好。对离散型多变量系统，Alevisakis 提出的一组算法是比较方便的。有限谱配置法是最近几年发展的一种比较有效的设计方法，如果只能取得输入输出信号，则可以利用谱配置法进行观测器的设计，但对于输出有时延的系统，观测器的设计还有待进一步研究。自适应控制方法是一种很有希望的新方法，近年来受到人们的极大的重视，这方面发展非常迅速。

过去人们一直认为大时延系统难以控制，由于微计算机能够比较容易地实现各种控制算法，可以预见，大时延过程的计算机在线控制必将得到迅速发展。

除了工程系统存在时延外，在不少领域中，例如：社会系统、经济系统、生物系统都有一些时延问题值得研究。因此，随着控制理论在许多领域中的广泛应用，毫无疑问，时延系统的研究也将会延伸到这些领域中。

参 考 文 献

〔1〕 Donoghue, J. E., Review of Control Design Approaches for Transport Delay Processes, ISA Trans., **16**, (1977), 27－34.

〔2〕 Marshall, J. E., Chotai, A. and Garland, B., A Survey of Time－delay System Control Methods, IEE Publ., **194**, (1981), 316－322.

〔3〕 Smith, O. J. M., Closer Control of Loops with Dead Time, Chemical Engineering Progress, **53**, (1957), 217－219.

〔4〕 Smith, O. J. M., Feedback Control Systems, McGraw－Hill, New York, (1958).

〔5〕 Smith, O. J. M., A Controller to Overcome Dead Time, ISAJ., **6**, 2, (1959), 28－33.

〔6〕 Meyer, C. B. G., Wood, R. K. and Seborg, D. E., Experimental Evaluation of Analytical and Smith Predictors for Distillation Column Control, Amer. Inst. Chem. J., **25**, 1, (1979), 24－32。

〔7〕 Lupfer, D. E. and Oglesby, M. W., The Application of Dead Time Compensation to a Chemical Reactor for Automatic

Control of Production Rate, ISA Trans., **1**, (1962), 72-80.

〔8〕 Dahlin, E. B., Design and Tuning Digital Controllers, Instrument and Control Systems. **41**, 6, (1968), 77-83.

〔9〕 Palmor, Z., Stability Properties of Smith Dead Time Compensator Controllers, Int. J. Contr., **32**,6, (1980), 937-949.

〔10〕 Fuller, A. T., Optimal Nonlinear Control of System with Pure Delay, Int. J. Contr., **8**, (1968), 145-168.

〔11〕 Donoghue, J. F., A Comparison of the Smith Predictor and Optimal Design Approaches for Systems with Delay in the Control, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., IECI-**24**, (Feb., 1977), 109-117.

〔12〕 Cook, G. and Price, M., Comments on a Comparison of the Smith Predictor and Optimal Design Approaches for Systems with Delay in the Control, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., IECI-**25**, (May, 1978), 180-181.

〔13〕 Kwakernaak, H. and Sivan, R., Linear Optimal Control Systems, Wiley-Interscience, New York, (1972).

〔14〕 Marshall, J. E., Ireland, B. and Garland, B., Comments on an Extension of Predictor Control for Systems with Control Time-delays, Int. J. Contr., **26**, 6, (1977), 981-982.

〔15〕 Kleinman, D. I., Optimal Control of Linear Systems with Time-delay and Observation Noise, IEEE Trans. Automat. Contr., AC-**14**, (1969), 524-527.

〔16〕 Jamshidi, M., A Three-stage Design of Non-linear Control Systems with Time-delay, Int. J. Contr., **21**,5, (1975), 753-762.

〔17〕 Watanabe, K. and Ito, M., A Process-model Control for Linear Systems with Delay, IEEE Trans., AC-**26**, 6, (Dec., 1981), 1261-1269.

〔18〕 Watanabe, K., Ishiyama, Y. and Ito, M., Modified Smith Predictor Control for Multi-variable Systems with Delays and Unmeasurable Step Disturbances, Int. J. Contr., **37**, 5, (1983),959-973.

〔19〕 Fortman, T. E. and Williamson, D., Design of Low-order Observers for Linear Feedback Control Laws, IEEE Trans., AC-**17**, 3, (1972), 301-308.

〔20〕 Marshall, J. E., Control of Time-delay Systems, Peter Peregrinus Ltd. Stevenage, United Kingdom, (1979).

〔21〕 Kantor, J. C. and Andres, R. P., The Analysis and Design of Smith Predictor Using Singular Nyquist Arrays, Int. J. Contr., **31**, 4, (1980), 655-664.

〔22〕 Alevisakis, G. and Seborg, D. E., An Extension of the Smith Predictor Method to Multi-variable Linear Systems Containing Time Delays, Int. J. Contr., **18**, (1973), 541-551.

〔23〕 Watanabe, K. and Sato, M., A Process-model Control for Multivariable Systems with Multiple Delays in Inputs and Outputs Subject to Unmeasurable Disturbances, Int. J. Contr., **39**, 1, (1984), 1-17.

〔24〕 Bahill, A. T., A Simple Adaptive Smith Predictor for Controlling Time-delay Systems, Control System Magazine, (May, 1983), 16-22.

〔25〕 Landou, Y. D., Adaptive Control, Marcel Dekker, Inc., New York, (1979).

〔26〕 Giles, R. F. and Bartley, T. M., Gain-adaptive Dead Time Compensation ISA Trans., **16**, 1, (1977), 59-64.

〔27〕 Chiang, H. S. and Durbin, L. D., Variable Gain Dead Time Compensation for the Second-order Time Lag Case, ISA Trans., **20**, 3 (1981), 1-12.

〔28〕 Åström, K. J. and Wittenmark, B., On Self-tuning Regulators, Automatica, **9**, (1973), 185-199.

〔29〕 Clark, D. W. and Gawthrop, P. J., Self-tuning Controller, PIEE, **122**, (1975), 929-934.

〔30〕 Cegrell, T. and Hedquist, T., Successful Adaptive Control of Paper Machines, Automatica, **11**, 1, (1975), 53-59.

〔31〕 Haber, R., Hetthessy, J., Keviczky, L., Vajk, I., Feher, A., Czeiner, N., Csaszar, Z. and Turi, A., Identification and Adaptive Control of a Glass Furnace by a Portable Process Computer Laboratory, The 5th International Symposium on Identification and System Parameter Estimation, **1**, (1979), 209-220.

〔32〕 Wellstead, P. E., Prager, D. and Zanker, P., Pole Assignment Self-tuning Regulator, PIEE, **126**, 8, (1979).

〔33〕 Astrom, K. J. and Wittenmark, B., Self-tuning Controllers Based on Pole-zero Placement, PIEE. Control Theory and Appl., **127**, 3, (1980), 120-129.

〔34〕 Pandolfi, D., On Feedback Stabilization of Functional Differential Equations, Belletino U. M. I., 4, 11, Supplemental Fascicolo 3, Giugno (1975), Serie IV, XI. 626-635.
〔35〕 Kamen, E., An Operator Theory of Linear Functional Differential Equations, J. Differential Equations, 27, (1978), 274-297.
〔36〕 Manitius, A. Z. and Olbrot, A. W., Finite Spectrum Assignment Problem for Systems with Delays. IEEE Trans. Automat. Contr., AC—24, (Aug., 1979), 541-553.
〔37〕 Manitius, A. Z., Feedback Controllers for a Wind Tunnel Model Involving a Delay: Analytical Design and Numerical Simulation, IEEE Trans. Automat. Contr., AC—29, 12, (1984), 1058-1068.
〔38〕 Watanabe, K. and Ouchi, T., An Observer of Systems with Delays in State Variables, Int. J. Contr., 41, 1(1985), 217-229.

CONTROL OF LARGE TIME—DELAY PROCESSES: A REVIEW

Wang Yuejuan, Wan Baiwu
(Xian Jiaotong University)

Abstract

There are many controlled processes in industry containing time-delays. It is important to treat time-delay problem in order to improve the control quality. During the latest thirty years, since O. J. M. Smith suggested the predictor method, there have been various control approaches proposed. The paper surveys these approaches. Emphasis is put on those achievements in the recent years, namely, modified Smith predictor control method; optimal control method; adaptive conrol method and finite spectrum assignment method. By using microcomputer the implementation of various control algorithms is a very efficient way to control the time-delay system. Finally a discussion of those approaches is given.