时滞系统参数辨识与最优控制联合问题求解的块脉冲算子方法

吴建民
(中国航空无线电电子研究所·上海,200052)

王行愚
(华东化工学院自动化研究所·上海,200237)

摘要：本文介绍了一种利用块脉冲算子方法求解时滞系统参数辨识与最优控制联合问题. 利用块脉冲算子,将带有二次型性能指标的联合问题转化成了函数的极值问题,采用多级优化技术,导出了一个三级递阶控制算法. 仿真例子表明了该方法的有效性.

关键词：时滞系统;最优控制;正交函数逼近

1 引 言

参数辨识与最优控制的联合问题研究近年来受到了重视[1~3]. 这主要是由于参数辨识与最优控制的联合问题,在理论上,它使过去认为辨识与优化独立的两个概念有机地结合在一起,彼此相互协调构成了一个很有实际意义的联合问题;在实际应用上,它为实际系统(常常是带有未知参数)的最优控制,尤其是为大系统,时变参数系统的最优控制提供了一个新的求解方法.

本文讨论了时滞系统的联合问题,并采用块脉冲算子方法来处理所讨论的联合问题,导出了一个求解该联合问题的三级递阶控制算法.

2 时滞系统的参数辨识与最优控制联合问题

n 阶确定性线性时变的时滞系统的状态和控制变量可由以下方程来描述

$$\dot{x}(t) = f(t,x(t),x(t-\lambda),u(t),\theta), \quad 0 \leqslant t \leqslant T, \tag{1}$$

$$x(t) = \varphi(t), \quad -\lambda \leqslant t \leqslant 0. \tag{2}$$

输出方程

$$y(t) = g(x(t),u(t),\theta). \tag{3}$$

其中 $x(t) \in \mathrm{R}^n, \quad u(t) \in \mathrm{R}^r, \quad \varphi(t) \in \mathrm{R}^n, \quad \theta \in \mathrm{R}^k.$

$x(t)$是状态,$u(t)$是控制量,θ 为未知参数,$\lambda = q\dfrac{T}{m} + \tau$,$1 \leqslant q \leqslant m$,$0 \leqslant \tau < \dfrac{T}{m}$;$y(t)$为输出向量,$m$ 为自然数.

1) 最优控制问题. 在参数 θ^0 已知的条件下,寻找一个最优控制 $u^*(t)$,使得如下二次型性能指标为最小

$$J = \frac{1}{2}\int_0^T [x^{\mathrm{T}}(t)Qx(t) + u^{\mathrm{T}}(t)Ru(t)]\mathrm{d}t, \tag{4}$$

$$Q \geqslant 0, \quad R > 0.$$

2) 参数估计问题. 在给定控制量的条件下,求出最优的参数,使得以下的性能指标达到最小

本文于1991年5月6日收到. 1992年4月1日收到修改稿.

$$V = \frac{1}{2}\int_0^T [y(t) - y^0(t)]^T S [y(t) - y^0(t)]\mathrm{d}t, \tag{5}$$

$$y(t) = g(x^0(t), u^0(t), \theta).$$

其中 $x^0(t)$和 $y^0(t)$分别是当输入控制量为 $u^0(t)$的系统状态量和输出量.

3) 联合问题. 决定 $u^0(t)$和 $\theta^0(t)$, $t\in[0,T]$,使得$[J,V]$在约束条件(1)~(3)为最小.

1),2)分别考虑了单个目标的优化问题,如果系统模型得出的参数值较准确地符合于预先估计的值,那么根据这样的模型得出的最优控制具有良好的性能. 但是多数系统尤其是实际系统的参数变化很大,以致使得基于固定的预先计算的参数值的控制不适用,因此需要实现参数估计与动态的最优控制联合,3)考虑的是个双目标优化问题,利用运筹学中多目标函数求解的参数法可以将联合问题的双目标函数结合成一个适当的形式

$$Z = (1 - \beta)J + \beta V, \tag{6}$$

$$0 < \beta < 1. \tag{7}$$

这样,一个双目标优化问题转化成了一个由参数 β 构成的一个单目标优化问题,也即将双目标综合成一个能从总体上衡量优劣的总目标,然后由此择优出最满意的解,其中加权系数的大小体现出了二个目标的相对重要性.

3 块脉冲算子及其运算规则[8]

3.1 块脉冲算子的定义

设 $L_r^2[0,T]$表示 Hilbert 空间,其元是 r 维矢量,且每个分量是$[0,T]$上 Lebesque 平均可积的有界实值函数.

当 $r=1$ 时,此空间记为 $L^2[0,T]$.

设 N_m 表示由长度 m 的规格化块脉冲函数系$\{\Phi_i(t);=1,2,\cdots,m\}$所构成的线性空间,即

$$N_m \triangleq \mathrm{span}\{\Phi_i(t),\quad i = 1,2,\cdots,m\},$$

$$\Phi_1(t) = \begin{cases}\sqrt{m/T}, & 0\leqslant t\leqslant \dfrac{T}{m},\\ 0, & \text{otherwise},\end{cases} \tag{8}$$

$$\Phi_i(t) = \begin{cases}\sqrt{m/T}, & (i-1)\dfrac{T}{m} < t\leqslant i\dfrac{T}{m},\\ 0, & \text{otherwise},\end{cases} \tag{9}$$

$$(i = 2,3,\cdots,m).$$

定义 1 $N_m\subset L^2[0,T]$的子空间,对于任意 $g(t)\in L^2[0,T]$存在唯一的 $\hat{g}(t)\in N_m$. 即

$$\hat{g}(t) \triangleq \hat{G}^T\Phi(t). \tag{10}$$

其中

$$G^T = [g_1, g_2, \cdots, g_m],$$

$$\Phi(t) = [\Phi_1, \Phi_2, \cdots, \Phi_m]^T,$$

$$g_i = < g(t), \Phi_i(t) >_{L^2} = \int_0^T g(t)\Phi_i(t)\mathrm{d}t.$$

由于 $\{\Phi_i(t);i=1,2,3,\cdots,m\}$当 $m\to\infty$时为完备正交系,所以 $\hat{g}(t)$将平均收敛于 $g(t)$.

定义 2 对任意给定的自然数 m 和任一 $g(t)\in L^2[0,T]$作块脉冲算子 $\mathscr{B}(L^2[0,T]\to R^m)$

$$\mathscr{B}g(t)=G^{\mathrm{T}}. \tag{11}$$

其中
$$G=[g_1,g_2,\cdots,g_m]^{\mathrm{T}}.$$

定义 3　对任一向量值函数 $u_k(t)\in L^2[0,T]$，$(k=1,2,\cdots,r)$，

$$\mathscr{B}u(t)=[(\mathscr{B}u_1(t))^{\mathrm{T}},(\mathscr{B}u_2(t))^{\mathrm{T}},\cdots,(\mathscr{B}u_r(t))^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}. \tag{12}$$

其中
$$u(t)=[u_1(t),u_2(t),\cdots,u_r(t)]^{\mathrm{T}}.$$

定义 4　对于任一矩阵值函数 $A(t)$，其元素 $a_{ij}(t)\in L^2[0,T]$，$i=1,2,\cdots,p$；$j=1,2,\cdots,q$，

$$\mathscr{B}A(t)=\begin{bmatrix}\mathscr{B}a_{11}(t) & \mathscr{B}a_{12}(t) & \cdots & \mathscr{B}a_{1q}(t)\\ \mathscr{B}a_{21}(t) & \mathscr{B}a_{22}(t) & \cdots & \mathscr{B}a_{2q}(t)\\ & & \vdots & \\ \mathscr{B}a_{p1}(t) & \mathscr{B}a_{p2}(t) & \cdots & \mathscr{B}a_{pq}(t)\end{bmatrix}. \tag{13}$$

定义 5　若 $\|\mathscr{B}g(t)-\mathscr{B}f(t)\|\to 0(m\to\infty)$ 则称 $\mathscr{B}g(t)$，$\mathscr{B}f(t)$ 在均方收敛意义下渐近相等，记为 $\mathscr{B}g(t)\sim\mathscr{B}f(t)$，$\mathscr{B}g(t)\doteq\mathscr{B}f(t)$. 其中 $\|\cdot\|\triangleq\sqrt{\langle\cdot\quad\cdot\rangle}$

3.2　块脉冲算子运算规则

规则 1（积分定理）　如果 $f(t)\in L^2[0,T]$ 则有

$$\mathscr{B}\left(\int_0^t f(x)\mathrm{d}x\right)\sim\mathscr{B}f(t)P_m. \tag{14}$$

其中 P_m 为积分运算矩阵

$$P_m=\frac{T}{m}\begin{bmatrix}\frac{1}{2} & 1 & 1 & \cdots & 1\\ & \frac{1}{2} & 1 & \cdots & 1\\ & & \frac{1}{2} & \cdots & 1\\ & \mathbf{0} & & \ddots & \vdots\\ & & & & \frac{1}{2}\end{bmatrix}_{m\times m}.$$

规则 2（平移定理）　设 $\lambda=q\dfrac{T}{m}+r$. 其中 q 为自然数，且 $1\leqslant q\leqslant m$，$0\leqslant\lambda\leqslant\dfrac{T}{m}$ 则有

$$\mathscr{B}f(t-\lambda)\sim(\mathscr{B}f(t))\left[I_m-\left(\frac{rT}{m}\right)Q\right]w^q. \tag{15}$$

其中
$$W=\begin{bmatrix}0 & 1 & & \mathbf{0}\\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & 1\\ \mathbf{0} & & & 0\end{bmatrix}_{m\times m},\quad Q=\begin{bmatrix}1 & -1 & & \mathbf{0}\\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & -1\\ \mathbf{0} & & & 1\end{bmatrix}_{m\times m}.$$

$[\circ]^{\mathrm{T}}$ 表示向量或矩阵的转置，I_m 为 $m\times m$ 阶单位矩阵.

规则 3　如果

$$g(t),f(t),g(t)f(t)\in L^2[0,T],\quad |g(t)|\leqslant M,\quad |f(t)|\leqslant M,\quad M\in\mathrm{R},\ M>0,$$

则有

$$\mathscr{B}(g(t)f(t)) \sim \sqrt{m/T}(g_1f_1, g_2f_2, \cdots, g_mf_m). \tag{16}$$

其中
$$\mathscr{B}g(t) \sim [g_1, g_2, \cdots, g_m],$$
$$\mathscr{B}f(t) \sim [f_1, f_2, \cdots, f_m].$$

4 利用块脉冲算子方法求解联合问题

设系统方程为

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)x(t-\lambda) + C(t)u(t), \quad 0 < t \leqslant T, \tag{17}$$
$$x(t) = \varphi(t), \quad -\lambda \leqslant t \leqslant 0, \tag{18}$$
$$y(t) = Dx(t). \tag{19}$$

其中 $x(t) \in \mathrm{R}^n$, $u(t) \in \mathrm{R}^r$, $\varphi(t) \in \mathrm{R}^n$, $A(t), B(t) \in \mathrm{R}^{n\times n}$,
$C(t) \in \mathrm{R}^{n\times r}$, $y(t) \in \mathrm{R}^l$, $D \in \mathrm{R}^{l\times n}$.

$A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ 和 $\varphi(t)$ 为连续函数.

令 $\theta = [A(t) \vdots B(t) \vdots C(t)]$, θ 为未知参数.

设

$$J = \frac{1}{2}\int_0^T [x^{\mathrm{T}}(t)Qx(t) + u^{\mathrm{T}}(t)Ru(t)]\mathrm{d}t, \tag{20}$$

$$V = \frac{1}{2}\int_0^T [y(t) - y^0(t)]^{\mathrm{T}}S[y(t) - y^0(t)]\mathrm{d}t. \tag{21}$$

联合问题

$$\min_{\theta, u(t)} Z = \min_{\theta, u(t)} \beta V + (1-\beta)J, \tag{22}$$

约束条件

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)x(t-\lambda) + C(t)u(t), \quad 0 < t \leqslant T, \tag{23}$$
$$x(t) = \varphi(t), \quad -\lambda \leqslant t \leqslant 0, \tag{24}$$
$$y(t) = Dx(t), \tag{25}$$
$$0 < \beta < 1. \tag{26}$$

利用块脉冲算子将原函数空间的联合问题转化成块脉冲算子象空间对应的逼近问题进行求解.

令
$$X = \mathrm{vec}(\mathscr{B}(x(t)) = (x_1^{\mathrm{T}}\, x_2^{\mathrm{T}} \cdots x_m^{\mathrm{T}}),$$
$$U = \mathrm{vec}(\mathscr{B}(u(t)) = (u_1^{\mathrm{T}}\, u_2^{\mathrm{T}} \cdots u_m^{\mathrm{T}}).$$

利用块脉冲算子运算规则1(积分定理)和规则2(平移定理)可以得

$$\mathscr{B}\left(\int_0^t x(t-\lambda)\mathrm{d}t\right) \sim \mathscr{B}(\varphi(t))(I_m - w^q)P_m + \mathscr{B}(x(t))w^qP_m, \tag{27}$$

$$\mathrm{vec}\left(\mathscr{B}\int_0^t A(t)x(t)\mathrm{d}t\right) \sim (P_m^{\mathrm{T}} \otimes I_n)\hat{A}\mathrm{vec}(\mathscr{B}x(t)) = (P_m^{\mathrm{T}} \otimes I_n)\hat{A}x. \tag{28}$$

其中⊗表示 Kronecker 积, Vec(·)为矩阵拉直运算.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A(\hat{t}_1) & & & \\ & A(\hat{t}_2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & A(\hat{t}_m) \end{bmatrix}, \quad \hat{t}_i = (2i-1)T/2m.$$

于是，系统方程(17)可由块脉冲算子表示成如下的代数方程

$$X = G_0 + G_1 U. \tag{29}$$

其中 $G_0 = (I_{mn} - (P_m^{\mathrm{T}} \otimes I_n)\hat{A} - ((w^q P_m)^{\mathrm{T}} \otimes I_n)\hat{B})^{-1}(\mathrm{vec}\mathscr{B}\varphi(0))$

$\quad - ((I_m - w^q)P_m)^{\mathrm{T}}\hat{B}\mathrm{vec}(\mathscr{B}(\varphi(t)))$,

$G_1 = (I_{mn} - (P_m^{\mathrm{T}} \otimes I_n)\hat{A} - ((w^q P_m)^{\mathrm{T}} \otimes I_n)\hat{B})^{-1}((P_m^{\mathrm{T}} \otimes I_n)\hat{C})$,

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A(\hat{t}_1) & & & \\ & A(\hat{t}_2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & A(\hat{t}_m) \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B(\hat{t}_1) & & & \\ & B(\hat{t}_2) & & \\ & & \cdot & \\ & & & B(\hat{t}_m) \end{bmatrix},$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} C(\hat{t}_1) & & & \\ & C(\hat{t}_2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & C(\hat{t}_m) \end{bmatrix}.$$

联合问题的性能指标函数可改写成如下形式

$$\begin{aligned} Z_m &= (1-\beta)J_m + \beta V_m \\ &= \frac{1}{2}(1-\beta)\frac{T}{m}(X^{\mathrm{T}}(I_m \otimes Q)X + U^{\mathrm{T}}(I_m \otimes R)U) \\ &\quad + \frac{1}{2}\frac{T}{m}\beta(\hat{Y} - Y^0)^{\mathrm{T}}(I_m \otimes Q_0)(\hat{Y} - Y^0). \end{aligned} \tag{30}$$

其中 $\hat{Y} = \mathrm{vec}(\mathscr{B}(Y(t)))$; $Y^0 = \mathrm{vec}(\mathscr{B}(Y^0(t)))$.

令 $$y(T) = DX^0(t),$$

则 $$\hat{Y}(t) = (I_n \otimes D)X^0 = S(G_0 + G_1 U^0), \tag{31}$$

$$\begin{aligned} Z_m &= \frac{1}{2}(1-\beta)\frac{T}{m}(X^{\mathrm{T}}(I_m \otimes Q)X + U^{\mathrm{T}}(I_m \otimes R)U) \\ &\quad + \frac{1}{2}\beta\frac{T}{m}((I_n \otimes D)X^0 - Y^0)^{\mathrm{T}}(I_m \otimes Q_0)((I_n \otimes D)X^0 - Y^0). \end{aligned} \tag{32}$$

在式(30)中 V_m 仅与 θ 有关，而 J_m 与 θ 和 U 有关，于是 Z_m 可写成

$$Z_m(\theta, U) = \beta V_m(\hat{\theta}) + (1-\beta)J_m(\theta, U), \tag{33}$$

$$\begin{aligned} V_m(\theta) &= \frac{T}{2m}G_0 S(I_m \otimes Q_0)SG_0 + \frac{T}{m}G_0 S(I_m \otimes Q_0)SG_1 U^0 - \frac{T}{m}G_0 S(I_m \otimes Q_0)Y^0 \\ &\quad + \frac{T}{2m}U^0 G_1 S(I_m \otimes Q_0)SG_1 U^0 - \frac{T}{m}Y^0(I \otimes Q_0)SG_1 U^0 + \frac{T}{2m}Y^0(I \otimes Q_0)Y^0, \end{aligned} \tag{34}$$

$$J_m(\theta, U) = \frac{T}{2m}G_0(I_m \otimes Q)G_0 + \frac{T}{m}(G_0(I_m \otimes Q)U) + \frac{T}{2m}U(G_1(I_m \otimes Q)G_1 + I_m \otimes R)U. \tag{35}$$

将式(34)和(35)代入式(33)，可得 Z_m 关于 θ 和 U 的显式表达式，直接从 Z_m 中寻求最优 θ 和 U，但对于复杂系统来说这是件非常困难的事，为此，采用大系统理论中的递阶结构方法，得到一个三级递阶控制算法.

引入伪变量 θ^0，且满足 $\theta^0 = \theta$，于是 Z_m 被等价地写成

$$Z_m = \beta V_m(\theta) + (1-\beta)J_m(\theta^0, U), \tag{36}$$

$$\theta^0 = \theta. \tag{37}$$

构造一个拉格朗日函数 $L[U\ \theta^0\ \theta\ \pi]$

$$L[U\ \theta\ \theta^0\ \pi] = L_1[U\ \theta^0\ \pi] + L_2[\theta\ \pi], \tag{38}$$

$$L_1[U\ \theta^0\ \pi] = (1-\beta)J_m(\theta^0\ \pi) + \pi^T\theta^0.$$

其中

$$L_2[\theta\ \pi] = \beta V_m(\theta) - \pi^T\theta.$$

π 为拉格朗日乘子向量.

由 L_1和 L_2构成一个三级递阶控制算法,其结构框图如图1所示.

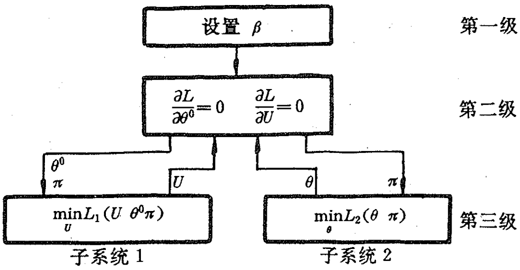

图 1 三级递阶控制结构

5 数值仿真

考虑下列一标量的时滞系统[5]

$$\dot{x}(t) = x(t-1) + c(t)u(t), \quad t > 0,$$

$$x(t) = 1, \quad -1 \leqslant t \leqslant 0,$$

$$y(t) = x(t).$$

联合问题的性能指标为

$$Z = \frac{1}{2}\beta\int_0^2[y(t) - y^0(t)]^2 dt + \frac{1}{2}(1-\beta)\int_0^2[x^2(t) + u^2(t)]dt.$$

其中 $c(t)$为未知参数,y^0取为 $Y^0(t)=X^0(t)[1+K\mathrm{gassu}(0,\ 0.01)]$.

式中 gassu(0,0.01)表示均值为零,方差为0.01的正态噪声,K 为一个设定参数,可分别取成 $K=0,0.01,\cdots$,$u^0(t)$为一阶跃函数

$$u^0(t) = \begin{cases} 1, & t \geqslant 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases}$$

采用上述介绍的块脉冲算子方法对此联合问题进行求解,取 $m=10$,文献[6]给出了当 $c(t)\equiv 1$时,最优控制问题的解 $x^*(t)$,$u^*(t)$. 表1~4同时给出了不同方法所得的结果($\beta=0.9$). 表中的 x_i 和 u_i 分别取成

$$x_i = \frac{1}{2}[x^*(t_{i-1}) + x^*(t_i)],$$

$$u_i = \frac{1}{2}[u^*(t_{i-1}) + u^*(t_i)], \quad t_i = \frac{iT}{m}\ (i = 1,2,\cdots,m).$$

表 1 最优性能指标的比较

文献[6]的结果	本文仿真结果 ($\beta=0.9$)		
($c(t)\equiv 1$)	$K=0$	$K=0.01$	$K=0.02$
1.6419	1.6497	1.6466	1.6362

表 2 最优控制的比较

序号	文献[6]的结果	u_i 的 BPO 结果		
	u_i	$K=0$	$K=0.01$	$K=0.02$
1	−1.82335	−1.82848	−1.84505	−1.84486
2	−1.51785	−1.51039	−1.44782	−1.39468
3	−1.26545	−1.27642	−1.37191	−1.44459
4	−1.05575	−1.05003	−0.92137	−0.80054

(续上表)

序号	文献[6]的结果	u_i 的 BPO 结果		
	u_i	$K=0$	$K=0.01$	$K=0.02$
5	−0.87890	−0.89393	−1.01338	−1.11413
6	−0.72275	−0.73178	−0.64479	−0.56331
7	−0.57310	−0.59910	−0.60266	−0.59501
8	−0.41835	−0.43579	−0.44499	−0.45578
9	−0.25135	−0.27897	−0.26775	−0.25176
10	−0.08205	−0.09421	−0.10948	−0.12511

表 3　最优状态的比较

序号	文献[6]的结果	x_i 的 BPO 结果		
	x_i	$K=0$	$K=0.01$	$K=0.02$
1	0.91690	0.91659	0.91295	0.91191
2	0.78175	0.78309	0.78770	0.79473
3	0.70295	0.70446	0.70066	0.69930
4	0.67020	0.67177	0.67141	0.67171
5	0.67723	0.67744	0.67484	0.66868
6	0.69640	0.70645	0.69361	0.67471
7	0.73430	0.74344	0.74614	0.74200
8	0.78680	0.78858	0.78892	0.78391
9	0.86155	0.85487	0.85525	0.85038
10	0.95740	0.95226	0.95128	0.94472

表 4　辨识结果的比较

t	真值	c_i 的 BPO 结果		
	$c(t)$	$K=0$	$K=0.01$	$K=0.02$
0.0～0.2	1	1.00302	1.01377	1.01950
0.2～0.4	1	0.99380	0.95452	0.92563
0.4～0.6	1	1.00689	1.08489	1.15144
0.6～0.8	1	0.99206	0.87271	0.76507
0.8～1.0	1	1.00851	1.14630	1.27261
1.0～1.2	1	0.99084	0.87408	0.76989
1.2～1.4	1	1.00946	1.01507	1.00848
1.4～1.6	1	0.98980	1.00976	1.04199
1.6～1.8	1	1.01098	0.97086	0.91888
1.8～2.0	1	0.98937	1.15094	1.32428

图2给出了当 β 从小到大搜索时，Z_m 的变化规律，从中得出，逼近的性能指标 Z_m 随着 β 的增大而逐渐减小.

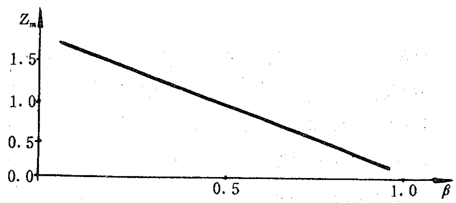

图 2　Z_m 与 β 的关系

6 结　论

采用块脉冲算子方法求解时滞系统的联合问题，可将其转化成相应块脉冲算子象空间中

的问题进行求解，利用代数求极值的方法直接进行求解，最后同时得到了未知参数和最优控制，且在求解过程中，避免了求解带有时滞和超前项的二点边值问题.

参考文献

[1] Haimes, Y. Y. and Wismer, D. A.. A Computational Approach to the Combined Problem of Optimization and Parameter Identification. Automatica, 1972, 8(3):337—346

[2] Singh, M. G.. Dynamical Hierachical Control. Assterdam, North-Holland, 1977

[3] 吴建民，王行愚. 具有未知参数的非线性系统递阶模型跟踪控制器的设计. 华东化工学院学报，1989，(2)：113—121

[4] Hwang, G. and Shih, Y. P.. Optimal Control of Delay System via Block Pluse Functions. J. Optimization Theory & Application, 1983, 45(1):101—112

[5] Palanisamy, K. R.. Optimal Control of Linear Systems with Delays in State and Control via Walsh Function. IEE Pro-D, 1985, 130(6):300

[6] Rao, G. P.. Piecewise Constant Orthogonal Functions & Their Application to Systems and Control. Sringer-Verlag, 1983

[7] Wu Jian-min and Wang Shien-yu. Optimal Cotnrol for the Non-Linear Time-Delay Systems via Block Pulse Operator. Proc. Intern. AMSE Confer. on Modelling & Simulation, 1988, 11,548

[8] 王行愚. 块脉冲算子及其在控制理论中的应用. 华东化工学院学报，1983，1：1—8

An Approach to the Combined Problem of Parameter Identification and Optimal Control of Time-Delay Systems via Block Pulse Operator

WU Jianmin

(Chinese Aeronautical Radio Electronics Research Insitute·Shanghai, 200052, PRC)

WANG Xingyu

(Automation Research Institute, East China University of Chemical Technology·Shanghai, 200237, PRC)

Abstract: An approach via block pulse operater (BPO) to the combined problem of parameter identification and optimal control of time-delay systems is presented in this paper. Using BPO, the combined problem with quadraic performance index is transformed into the optimization problem with quadraic form index. A three-level hierarchical control algorithm is derived by using multi-level technique. The simulation results show the effectiveness of this method.

Key words: time-delay systems; optimal control; orthogonal functions approximation

本文作者简介

吴建民 1963年生. 1986年毕业于华东化工学院自动控制系，1989年获华东化工学院工业自动化专业硕士学位. 现任中国航空无线电电子研究所工程师. 主要从事计算机应用和系统设计工作. 曾荣获国家教委科技进步二等奖.

王行愚 1944年生. 1967年毕业于上海复旦大学数学系. 1981年获华东师范大学数学系控制论专业硕士学位，1984年获华东化工学院工业自动化专业博士学位. 现任华东化工学院教授，副院长. 国际 AMSE IASTED 和美国 IEEE 委员. 主要从事控制理论及应用工作. 共发表学术专著两部，学术论文件40余篇. 曾二次荣获国家教委科技进步二等奖. 被评为“做出突出贡献的中国博士学位获得者”.