第 22 卷第 3 期
1993 年 6 月

信 息 与 控 制
Information and Control

Vol.22,No.3
June, 1993

无穷维时滞系统的变结构控制

李文林

(河南师大数学系,新乡,453002)

摘要 本文在 Banach 空间研究了无穷维时滞系统的变结构控制问题,给出了滑动模态的稳定性条件,滑动模态的到达条件和变结构控制的一般形式,最后用分布参数系统变结构控制的例子说明了方法的有效性.

关键词: 时滞系统 变结构控制 半内积 强连续半群

1 引言

目前变结构控制的研究,主要集中在有限维系统,然而一些实际系统需要用偏微分方程才能精确描述,所以无穷维系统变结构控制是一个重要的研究课题,这方面的研究已经有了初步进展[1-4],目前的研究结果表明,从有限维系统到无限维系统,许多问题是不能简单推广的,困难在于无穷维系统的动态性质与系统本身的特性有着复杂的关系,比如,从本文中举的例子可以看出,边界条件的改变就会破坏稳定性和到达条件. 另外,无穷维系统变结构控制还缺乏一般的理论,变结构控制的一些基本问题:滑动模态的稳定性,滑动模态的到达条件,变结构控制律的一般形式和时滞系统的情况都还没有得到研究. 本文引入半内积和泛函分析中的一些概念,对上述几个问题进行研究,给出了时滞系统滑动模态的稳定性条件,滑动模态的到达条件,变结构控制律的一般形式,并以分布参数系统的例子,说明了结论的有效性.

考虑时滞系统

$$\dot{x} = Ax + Bu(x,t) + f(x(t-h),t) \tag{1}$$

其中 $x \in X$,X 是抽象函数组成的 Banach 空间,A 是 X 中闭线性算子,A 的定义域 $D(A)$在 X 中稠密;$f(x,t)$,$u(x,t)$分别是取值于 Banach 空间 X 和 V 中的算子函数;$B \in L(V,X)$,$L(V,X)$表示 $V \to X$ 的全体有界线性算子组成的线性空间,h 表示时间延迟.

2 滑动方程

取切换函数为

$$S(x) = Cx, \quad C \in L(X,V) \tag{2}$$

切换流形为

$$S_0 = \{x \mid x \in X, S(x) = 0\}$$

为了研究滑动模态,先给出几个概念和引理,这些概念和引理后面要多次用到.

定义 1[5] 对$\forall$ $x,y \in X$,定义半内积

$$[x,y] = \inf\{y^*(x) \mid y^* \in X^*(X \text{ 的共轭空间}), \quad y^*(y) = \|y\|^2 = \|y^*\|^2\}$$

引理 1[5] 半内积有下面性质

(1) $|[x,y]| \leqslant \|x\| \, \|y\|$

(2) $[\alpha x+\beta y,y] = \alpha[x,y]+\beta\|y\|^2$

收稿日期:1992—05—03,收到修改稿日期:1992—09—18,国家自然科学基金资助项目.

(3) $\|x(t)\| D\|x(t)\| \leqslant [\dot{x}(t), x(t)]$

其中 $D\|x(t)\| = \lim\limits_{r\to 0} \sup\limits_{(0,r)} \dfrac{\|x(t)\| - \|x(t-h)\|}{h}$

引理 2[4] 设 A 是 X 中的闭线性算子,且存在实数 a,使得

$$\|(\lambda I - A)^{-1}\| \leqslant (\lambda + a)^{-1}, \quad \lambda > \max\{0, -a\}$$

则以 A 为无穷小生成元可产生一个强连续半群 $T(t)$,使得

(1) $\dfrac{d}{dt}(T(t)x) = AT(t)x, \ x \in D(A)$

(2) $\|T(t)\| \leqslant e^{-at}, \quad t \geqslant t_0$

由引理 1,可得下面结论.

定理 1 (1)滑动模态存在的充分必要条件为 $\lim\limits_{|S|\to 0}[\dot{S}(x), S(x)] < 0$;(2)滑动方程可由式(1)和 $\dot{S}(x) = 0$ 确定.

证明

(1)由引理 1,$D\|S(x)\| \leqslant [\dot{S}, S]/\|S\|$

(1)显然.

(2)
$$D\|S(x)\| = \lim_{h\to 0^+} \frac{\|S(x(t))\| - \|S(x(t-h))\|}{h}$$
$$= \lim_{h\to 0^+} \frac{\|S(x(t))\| - \|S(x(t)) - h\dot{S}(x(t))\| + 0(h)}{h}$$

在切换流形 S_0 上,$S(x) = 0$,所以

$$D\|S(x)\| = 0 \Leftrightarrow \dot{S}(x) = 0, \quad x \in S_0$$

因此,等效控制 u_{eq} 可由 $\dot{S} = 0$ 确定,令 $\dot{S} = 0$,由系统(1)得

$$CAx + CBu(x,t) + Cf(x(t-h),t) = 0 \tag{3}$$

若 CB 可逆,由式(3)可解得

$$u_{eq} = -(CB)^{-1}C(Ax + f(x(t-h),t)) \tag{4}$$

将式(4)代入(1),得等效控制方程为

$$\dot{x} = (I - B(CB)^{-1}C)(Ax + f(x(t-h),t)) \tag{5}$$

记 $P = B(CB)^{-1}c$,若 P,A 可交换,在 S_0 上,式(5)化为

$$\dot{x} = Ax + (I - P)f(x(t-h),t) \tag{6}$$

这就是滑动模态的运动方程.

本文以下均假设 P,A 是可交换的.

3 滑动模态的稳定性

滑动运动是变结构控制最本质的运动,滑动模态的稳定性是变结构控制的基本要求.

引理 3 若存在 $a \geqslant 0$,使得

$$[\dot{x}(t), x(t)] < a(\|x(t-h)\|^2 - \|x(t)\|^2)$$

则
$$\lim_{t\to\infty}\|x(t)\| = 0$$

证明
$$D\|x(t)\|^2 = \lim_{r\to 0}\sup_{(0,r)} \frac{\|x(t)\|^2 - \|x(t-h)\|^2}{h}$$

$$= \lim_{r\to 0}\sup_{(0,r)}(\|x(t)\| + \|x(t-h)\|)\frac{\|x(t)\| - \|x(t-h)\|}{h} = 2\|x(t)\| D\|x(t)\|$$

令
$$v(t) = \frac{1}{2}\|x(t)\|^2 + a\int_{t-h}^{t}\|x(\tau)\|^2 d\tau$$
$$Dv(t) = \|x(t)\| D\|x(t)\| + a(\|x(t)\|^2 - \|x(t-h)\|^2)$$

由定理条件 $Dv(t)<0$，即
$$Dv(t) = \lim_{r\to 0}\sup_{(0,r)}\frac{v(t)-v(t-h)}{h} < 0$$

于是存在 $\tau>0$，使得
$$v(t) < v(t-h),\quad 0<h\leqslant\tau$$

所以 $v(t)\to 0$，从而 $\|x(t)\|\to 0, t\to\infty$.

引理 4 若存在 $\alpha\geqslant 0$ 和 $a\geqslant 0$，使得
$$[\dot{x}(t),x(t)] + \alpha(\|x(t)\|^2 - \|x(t)\|\ \|x(t-h)\|) < -a\|x(t)\|$$

则 $\lim\limits_{t\to\infty}=0$，且到达零的速率不小于 a.

证明 $$[\dot{x}(t),x(t)] + \alpha(\|x(t)\|^2 - \|x(t)\|\ \|x(t-h)\|)$$
$$\geqslant [\dot{x}(t),x(t)] + \alpha(\|x(t)\|^2 - \frac{\|x(t)\| + \|x(t-h)\|^2}{2})$$
$$= [\dot{x}(t),x(t)] + \frac{\alpha}{2}(\|x(t)\|^2 - \|x(t-h)\|^2)$$

由引理条件得
$$[\dot{x}(t),x(t)] + \frac{\alpha}{2}(\|x(t)\|^2 - \|x(t-h)\|^2) \leqslant -a\|x(t)\|$$

利用引理 3 的结论，得
$$\lim_{t\to\infty}\|x(t)\| = 0$$

于是得到
$$\|D\|x(t)\| \leqslant [\dot{x},x(t)]/\|x(t)\| \leqslant \alpha(\|x(t-h)\| - \|x(t)\|) - a \to -a$$

故 $\|x(t)\|$ 以速率 a 到达零.

引理 5 若 $[Ax,x]\leqslant -a\|x\|^2, \forall\ x\in D(A)$，则 $\|(\lambda I-A)^{-1}\|\leqslant(\lambda+a)^{-1}, \lambda>\max\{0,-a\}, a\in R$，反之也成立.

证明 $$\|(\lambda I - A)x\|\ \|x\| \geqslant [(\lambda I - A)x,x] =$$
$$= \lambda\|x\|^2 - [(Ax,x] \geqslant (\lambda + a)\|x\|^2 \|(\lambda I - A)x\| \geqslant (\lambda + a\|x\|$$

特别取 $x=(\lambda I-A)^{-1}y$，得
$$\|y\| \geqslant (\lambda + a)\|(\lambda I - A)^{-1}y\|$$
$$\|(\lambda I - A)^{-1}y\| \leqslant (\lambda + a)^{-1}\|y\|,\quad \lambda > \max\{0, -a\}$$
$$\|(\lambda I - A)^{-1}\| \leqslant (\lambda + a)^{-1},\quad \lambda > \max\{0, -a\}$$

将上述证明倒推，即知结论的逆也成立.

定义 2[5] 若对 $\forall\ x\in D(A)$，有 $[Ax,x]\leqslant 0$，称算子 A 是耗散的，若仅当 $x=0$ 时，等号才成立，称算子 A 是严格耗散的.

引理 6 对于弱紧的 Banach 空间，若 A 是严格耗散的. 则存在 $a>0$，使得
$$[Ax,x] \leqslant -a\|x\|^2,\quad \forall\ x\in D(A)$$

证明 因 A 严格耗散，对 $\forall\ y\in D(A)$，$\|y\|=1$，$[Ay,y]<0$
由此推知，必存在 $a>0$，使得

$$[Ay,y]\leqslant -a,\quad y\in D(A),\quad \|y\|=1 \tag{7}$$

否则，必存在序列 $\{y_n | y_n\in D(A),\|y_n\|=1\}$，

$$[Ay_n,y_n]>-\frac{1}{n} \tag{8}$$

因为 A 是闭算子，且 X 弱紧，于是存在子序列 $\{y_{n_k}\subset\{y_n\}$ 和 $y_0\in D(A)$，$\|y_0\|=1$，使得

$$[Ay_0,y_0]=\lim_{k\to\infty}[Ay_{n_k},y_{n_k}]\geqslant \lim_{k\to\infty}\frac{-1}{n_k}=0$$

与 A 严格耗散矛盾，所以(7)成立，于是

$$[A\frac{x}{\|x\|},\frac{x}{\|x\|}]\leqslant -a,\quad \forall\ x\in D(A),\quad x\neq 0$$

故 $[Ax,x]\leqslant -a\|x\|^2$，$\forall\ x\in D(A)$.

定理2 设 $\|(\lambda I-A)^{-1}\|\leqslant(\lambda+a)^{-1}$，$\lambda>0$，其中 a 是某一正数，若下面条件之一成立，则滑动模态是渐近稳定的.

(1) $$[(I-P)f(x,t),x']\leqslant\beta\|x\|\,\|x'\|,\quad \beta<a$$

特别 $$\|(I-P)f(x,t)\|\leqslant\beta\|x\|,\quad \beta<a$$

(2) $$\|(I-P)f(x,t)\|\leqslant|g(t)|\,\|x\|$$

$$\frac{1}{t}\int_0^t|g(\tau)|\mathrm{d}\tau\leqslant\delta,\quad \delta e^{ah}<a$$

证明

(1)由滑动方程(6)，得

$$[\dot{x}(t),x(t)]=[Ax(t),x(t)]+[(I-P)f(x(t-h),t),x(t)]$$
$$\leqslant -a\|x(t)\|^2+\beta\|x(t-h)\|\,\|x(t)\|\quad(\text{引理}5)$$

由此得 $$[\dot{x}(t),x(t)]+\beta(\|x(t)\|^2-\|x(t)\|\,\|x(t-h)\|)$$
$$\leqslant -(a-\beta)\|x(t)\|^2<0,\quad(\beta<a)$$

利用引理4，得

$$\lim_{t\to\infty}\|x(t)\|=0$$

(2)因 $\|(\lambda I-A)^{-1}\|\leqslant(\lambda+a)^{-1}$，由引理2，存在强连续半群 $T(t)$，$\|T(t)\|\leqslant e^{-at}$，利用半群 $T(t)$ 解滑动方程(6)，得

$$x(t)=T(t)x(0)+\int_0^t T(t-s)(I-P)f(x(s-h),s)\mathrm{d}s$$

$$\|x(t)\|\leqslant\|T(t)\|(\|x(0)\|+\int_0^t\|T(-s)\|\,\|(I-P)f(x(s-h),s)\|\mathrm{d}s)$$

$$\leqslant e^{-at}(\|x(0)\|+\int_0^t e^{as}|g(s-h)|\,\|x(s-h)\|\mathrm{d}s$$

$$\leqslant e^{at}\|x(t)\|\leqslant\|x(0)\|+\eta+\int_0^t e^{a(\tau+h)}|g(\tau)|\,\|x(\tau)\|\mathrm{d}\tau$$

其中 $$\eta=\int_{-t}^{t}e^{a(\tau+h)}|g(\tau)|\,\|x(\tau)\|\mathrm{d}\tau\leqslant\bar{\eta}$$

由 Gronwall 引理，得

$$e^{at}\|x(t)\| \leqslant (\|x(0)\| + \bar{\eta})e^{\int_0^t e^{ah}|g(\tau)|d\tau}$$

$$\|x(t)\| \leqslant (\|x(0)\| + \bar{\eta})e^{\int_0^t e^{ah}|g(\tau)|d\tau} \cdot e^{-at}$$

$$\leqslant (\|x(0)\| + \bar{\eta})\exp[(\delta e^{ah} - a)t] \to 0$$

定理 3 若存在算子 $K \in L(X,V)$ 和 $a>0$，使得

$$\|(\lambda I - (A+BK))^{-1}\| \leqslant (\lambda + a)^{-1}, \lambda > 0$$

且定理 2 中的条件(1)或(2)成立，则取切换函数为 $S=Kx$，可使滑动模态渐近稳定.

证明 取 $S(x)=Kx$，在 S_0 上 $Kx=0$，于是滑动方程(6)可写成

$$\dot{x}(A+BK)x + (I-P)f(x(t-h),t) \tag{9}$$

记 $\bar{A}=A+Bk$，由定理 2 的证明滑动模态渐近稳定.

变结构控制的最大缺陷是滑动流形附近的抖动问题，为了减少抖动，常设立边界层

$$S_\delta = \{x | x \in X, \|S(x)\| \leqslant \delta\}$$

在边界层内用连续控制代替变结构控制，对于边界层 S_δ 内的运动，我们有下面的结果.

定理 4 设 $\|(\lambda I - A)\|^{-1} \leqslant (\lambda + a)^{-1}, \lambda > 0$，$a$ 是某一正数，若下面条件之一成立

(1) $$\|(I-P)f(x,t)\| \leqslant |g(t)| \, \|(I-P)x\|$$

$$\frac{1}{t}\int_0^t |g(\tau)|d\tau \leqslant \varepsilon, \quad \varepsilon e^{ah} < a$$

(2)当 $g(t)$ 为常数时，条件可放宽为

$$[(I-P)f(x',t),(I-P)x] \leqslant \beta\|(I-P)x'\| \, \|(I-P)x\|, \beta < a$$

特别 $$[(I-P)f(x,t)] \leqslant \beta\|(I-P)x\|, \beta < a$$

则保持在 S_δ 内的运动量 δ 稳定的，即 t 充分大时

$$\|x(t)\| \leqslant \alpha\delta, \alpha \text{ 是某一常数}$$

证明

(1) 由(1)式得

$$P\dot{x} = PAx + PBu(x,t) + Pf(x(t-h),t)$$
$$= PAx + Bu(x,t) + Pf(x(t-h),t) \tag{10}$$

将(10)与(1)式相减，得

$$(I-P)\dot{x} = A(I-P)x + (I-P)f(x(t-h),t) \tag{11}$$

将 $(I-P)x$ 看成定理 2 中(2)的 x，同法可证

$$\|(I-P)x\| \to 0, (t \to \infty)$$

$$\|x(t)\| \leqslant \|(I-P)x(t)\| + \|P(x(t)\| \tag{12}$$

$$\to \|Px(t)\| \leqslant \|B(CB)^{-1}\| \, \|S(x)\| \leqslant \alpha\delta, \alpha = \|B(CB)^{-1}\|$$

(2) 由(11)式，得

$$[(I-P)\dot{x}(t),(I-P)x(t)] = [A(I-P)x,(I-P)x]$$
$$+ [(I-P)f(t-h),t),(I-P)x(t)]$$
$$\leqslant -a\|(I-P)x(t)\|^2 + \beta\|(I-P)x(t)\| \, \|(I-P)x(t-h)\|$$

记 $(I-P)x(t)=P(t)$，由定理 2 中 (1)的证明方法，可得 $\|(I-P)x(t)\| \to 0$，再由式(12)，存在 $\alpha>0$

$$\lim_{t\to\infty}\|x(t)\| \leqslant \alpha\delta$$

4 滑动流形的到达条件

引理 7 (1)算子 $P=B(CB)^{-1}C$ 是 X 中的幂等算子，且 $PB=B, CP=C$

(2)存在 $\alpha,\beta>0$，使得

$$\alpha\|Cx\| \leqslant \|Px\| \leqslant \beta\|Cx\|$$

证明

(1)可由 $P=B(CB)^{-1}C$ 直接验证.

(2)
$$\|Px\| = \|B(CB)^{-1}Cx\| \leqslant \|B(CB)^{-1}\| \|Cx\|$$
$$\|Cx\| = \|CPx\| \leqslant \|C\| \|Px\|$$

令 $\alpha\|C\|^{-1}, \beta=\|B(CB)^{-1}\|$，即得(2).

定理 5 设 A 是严格耗散的，且

$$\|Pf(x,t)\| \leqslant \gamma_1\|Px\|$$

则取控制 $u=-\gamma(CB)^{-1}Cx$, $\gamma>\gamma_1$

可使系统的任意状态都趋于切换流形 S_0.

证明 由式(10)得

$$[P\dot{x},Px]=[APx,Px]+[Bu,Px]+[Pf(xt-h)),Px]$$
$$\leqslant[APx,Px]-\gamma\|Px\|^2+\gamma_1\|Px\| \|Px(t-h)\|$$

由此得
$$[P\dot{x},Px]+\gamma_1(\|Px\|^2-\|Px(t-h)\| \|Px\|)$$
$$\leqslant[APx,Px]\|-(\gamma-\gamma_1)\|\|Px\|^2\leqslant[APx,Px]<0,\quad (A\text{ 严格耗散})$$

由引理 4，$\|Px\|\to0$，从而 $\|S(x)\|\to0, t\to\infty$.

为了给出变结构控制的一般形式，引入下列记号

(1) P 类函数，若 $u(x,t)\in V$，且

$$[Bu(x,t),Px]<0$$

称 $u(x,t)$ 为 P 类函数，记为 $u\in P$

(2)记 $\mathrm{sign}P=\dfrac{(CB)^{-1}Cx}{\|Px\|}$，显然 $-\mathrm{sign}P\in P$，因为 $[-B\mathrm{sign}P,Px]=-[\dfrac{Px}{\|Px\|},Px]$ $=-\|Px\|$

定理 6 设 $\|Pf(x,t)\|\leqslant\beta\|Px\|$，则取控制

$$u(x,t)=-(CB)^{-1}CAx-\bar{\beta}(CB)^{-1}Cx-\varepsilon\mathrm{sign}P,\quad \bar{\beta}\geqslant\beta$$

则系统(1)的任一状态经有限长时间都将到达 S_0，且到达 S_0 时的速率不小于 ε.

证明 利用(10)式

$$[P\dot{x},Px]\leqslant[APx+Bu,Px]+[Pf(x(t-h),t),Px]$$
$$=-[\bar{\beta}B(CB)^{-1}Cx,Px]-\varepsilon[B\mathrm{sign}P,Px]+\beta\|P(x(t-h)\| \|Px(t)\|$$
$$=-\bar{\beta}\|Px\|^2-\varepsilon\|Px\|+\beta\|Px(t-h)\| \|Px\|$$

即
$$[P\dot{x}Px]+\beta(\|Px\|^2-\|Px(t-h)\| \|Px\|)\leqslant$$
$$-(\bar{\beta}-\beta)\|Px\|^2-\varepsilon\|Px\|\leqslant-\varepsilon\|Px\|$$

由引理 4，$\|Px(t)\|$ 有限时间内到达零，且到达零的速率不小于 ε.

由定理 6，变结构控制的一般形式为

$$u=-(CB)^{-1}CAx-\beta(CB)^{-1}Cx-\varepsilon\mathrm{sign}P \tag{13}$$

对于无时滞的系统，控制应取为

$$u = u_{eq} - \varepsilon \mathrm{sign} P \tag{14}$$

总之,控制 u 由两部分组成 $u=u_1+u_2$, $u_1=-(CB)^{-1}C(Ax+\beta x)$用来抵消原系统的动态性能,$u_2=-\varepsilon\mathrm{sign}P$ 用来改变系统的结构,这和有限维系统情况是一致的.

5 例子

几个有高温炉车间的温度调节问题,其数学模型可由下面分布参数系统描述

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2} + f(Q(x,y,z,t-h),t) + Bu(Q,t) \tag{15}$$

$$\begin{cases} Q(0,y,z,t) = Q(l_1,y,z,t) = T & (T\ \text{环境温度}) \\ Q(x,0,z,t) = Q(x,l_2,z,t) = T, & t \geqslant t_0 \\ Q(x,y,0,t) = Q(x,y,l_3,t) = T & (\text{边界条件}) \\ Q(x,y,z,0) = Q_0(x,y,z) & (\text{初始条件}) \end{cases}$$

其中 $Q\in R^n$,表示车间内的温度分布,$f(Q,t)$表示炉子的热流密度,一般有时滞;Bu 表示控制项,$u\in R^m$,控制的目的是希望车间内的温度维持在 T,显然,此问题和均匀细杆的温度调节问题

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + f(Q(x,t-h),t) + Bu(Q,t) \tag{16}$$

$$\begin{cases} Q(0,t) = Q(1,t) = 0, & t \geqslant t_0 \\ Q(x,t) = Q_0(x) \end{cases}$$

基本一样,为叙述方便起见,下面仅以均匀细杆的温度调节(16)为例,说明本文方法的有效性,(其中各项的物理意义同(15),$Q\in R^n$,$u\in R^m$)

定义算子
$$A = \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

$$D(A) = \{Q \in H^1(0,1),\quad Q(0,t) = Q(1,t) = 0\}$$

$H^1(0,1)$表示 Sobolev 空间,由偏微分方程基本知识知道,A 是下面强连续半群 $T(t)$的无穷小生成元

$$T(t)Q = \sum_{k=1}^{\infty} Ake^{-k^2\pi^2 t}\sin K\pi x$$

所以
$$\| T(t) \| \leqslant e^{-\pi^2 t}.$$

选取切换函数 $S(Q)=CQ(x,t)$,由(4),得等效控制为

$$\begin{aligned} u_{eq} &= -(CB)^{-1}C(AQ + f(Q(x,t-h),t) \\ &= -(CB)^{-1}C(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + f(Q(x,t-h),t) \end{aligned}$$

滑动方程为
$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + (I-P)f(Q(x,t-h),t)$$

由定理 2 中(1),若 $\|(I-P)f(Q,t)\| < \pi^2$,则滑动模态渐近稳定.

再由定理 6,若还有 $\|Pf(Q,t)\| \leqslant \beta \|Q\|$,则取控制

$$u = -(CB)^{-1}C\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \beta(CB)^{-1}CQ - \varepsilon\mathrm{sign}P$$

可使系统(16)的任一状态在有限时间内到达切换流形$\{Q|CQ=0\}$,因此,系统渐近稳定,即$\lim\limits_{t\to\infty} Q(x,t)=0$,类似的对系统(15)取控制

$$u=-(CB)^{-1}C\left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 Q}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 Q}{\partial z^2}-\beta Q\right)-\varepsilon\,\mathrm{sign}P$$

则可使车间内的温度最终维持在T.

参　考　文　献

1　Breger A M, *et al.* Sliding Modes in Control of Distributed Plants Subjected to a Mobile Multicycle Signal. (in Russian) Automation and Remote Control, 1980; (3): 72—83

2　Orlov Yu V. Using the Lyapunov Method in Distributed Systems. (in Russian) Automation and Remote Control, 1983; (4): 22—28

3　Orlov Yu V, Utkin V I. Sliding Mode Control in Indefinite-Dimensional Systems. Automatica, 1987; 23(6): 753—757

4　胡跃明,周其节.抛物形分布参数系统的变结构控制.控制理论与应用,1991;8(1):38—42

5　Klaus D. Ordinary Differential Equations in Banach Space. Spring-Verlag, Berlin Heidelbery, New York, 1977

6　Martin S. Principles of Functional Analysis. Academic Press, New York and London, 1971: 229—235

VARIABLE STRUCTURE CONTROL OF TIME-DELAY INDEFINITE DIMENSIONAL SYSTEMS

LI Wenlin

(Department of Mathematics, He Nan Normal University, Xin Xiang)

Abstract

In Banach space, the variable structure control of time-delay indefinite dimensional systems are studied. The stability of sliding mode, the reaching conditions of sliding mode and general control forms are suggested. Finally, a variable structure control example of distributed parameter system is considered.

Key words: time-delay systems　variable structure control　semi-inner product　strongly continuous semi-group

(李文林,男,44岁,硕士,副教授.所从事的研究领域为非线性系统控制理论和变结构控制.)

通　知

《中国大百科全书·自动控制与系统工程》卷已开始向作者发稿酬,因近些年来人员变动较大,有些作者我们已无法联系.因此,请尚未收到稿酬的作者,与北京市阜城门北大街17号(邮编:100037)中国大百科出版社研究室戴中器同志联系.回信时请注明收款人姓名、地址和邮编.

《中国大百科全书·自动控制与系统工程》卷

1993年5月10日