

大型空间结构的动态输出变结构控制*

曲志强 高为炳

(北京航空航天大学七研)

摘要 本文研究大型柔性空间结构作单轴大角度操纵时的状态估计及变结构控制方法。建立指数律的状态观测器实现了以较少传感器估计系统弹性振动模态的目的。利用状态观测器状态及系统输出变量反馈方法设计了大型空间结构的动态输出变结构控制律。针对一个实际模型仿真计算,得到了满意的结果。

关键词: 柔性结构; 非线性系统; 观测器; 变结构控制

1. 引言

随着空间科技的发展,发射大型复杂空间结构进入太空轨道已成为可能,这种空间结构是一种分布参数系统,其所带有的柔性部件个体大、质量轻且刚性极小。其运动方程是由常数微分方程及偏微分方程组成的混合方程组,在实际研究中,通常采用假定模态法或有限元素法将混合方程化成有限维空间的常微分方程来描述。它不同于一般的力学系统(如机械手),带来了许多新问题,对动力学及控制系统理论提出了新的挑战,近年来已经得到了普遍关注和大量研究^[1]。

大型柔性空间结构的运动形式,一是其总体位置及姿态运动,二是其柔性部件的弹性振动。这两种运动是相互耦合的,必须同时进行控制。小角度的姿态调节归结为一类高维线性系统控制问题,已有很多文章探讨了它的多种控制方法^[2];而大角度的姿态操纵及对快速运动目标姿态跟踪控制,则是复杂的耦合非线性问题,目前成果还不是很多。最优控制理论应用于大角度操纵控制,取得了一定的进展^[3],但其需要较大的计算量,难于实时控制。将现代非线性控制理论(如变结构控制)用来解决大角度操纵问题是一项有益的尝试^[4,5]。

本文研究大角度操纵问题的状态观测及控制方法。由于系统运动具有高维的特点,故系统状态瞬时值不可能直接精确测量,只能利用较少的传感器去估计较多数量的状态值。本文依据运动方程的特点,构造了一种非定常线性形式的部分状态观测器,研究了利用此观测器进行变结构控制综合的方法,分析且证明了这种动态输出变结构控制系统的一些性质。最后,文末给出了较为满意的仿真计算曲线。

2. 系统的数学模型

一类较为典型的大型柔性

* 航空工业部科学研究基金资助项目。

本文于1988年5月30日收到。1989年6月24日收到修改稿。

空间如图 1 所示. 它由一个刚性中心体及 N 个相同并对称固联在刚性中心上的柔性悬臂梁组成, 这些柔性梁上装有吸收太阳能的幅板.

为简单计, 对于这个物理模型作如下假设:

- (1) 只考虑结构绕 Z 轴的大角度操纵;
- (2) N 个柔性梁的弹性变形仅发生在垂直于旋转轴 Z 的平面上, 且为反对称小变形;

- (3) 力矩 u_0 产生大角度 θ 变化, 而外力 $F_1, F_2, \dots, F_m$ 控制弹性振动. 忽略传感器及作动器的设置对系统动力学的影响.

用假定模态法(Rayleigh-Ritz)将弹性振动位移表为无穷谐波形式, 再做 n 次截断近似,

$$V(s, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(s-r) \xi_i(t), \quad (1)$$

其中 $V(s, t)$ 为 s 点、 t 时刻的弹性位移, $\Phi_i(x)$ 为允许振型函数, $\xi_i(t)$ 为弹性振动模态.

这样, 由拉格朗日动力学方程可得到系统的有限维运动方程为

$$\begin{cases} I^* \ddot{\theta} + M_{0\xi}^T \ddot{\xi} + 2\dot{\theta} \dot{\xi}^T M^* \xi = u_0 + N \sum_{i=1}^m F_i S_i, \\ M_{\xi\xi} \ddot{\xi} + (K_{\xi\xi} - \dot{\theta}^2 M^*) \xi + M_{0\xi} \ddot{\theta} = N \sum_{i=1}^m \Phi_i(s_i-r) F_i, \end{cases} \quad (2)$$

其中 I^* 为结构无弹性变形时的转动惯量;

S_i 为作用力 F_i 的作用点坐标;

$$\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T,$$

$$[M_{\xi\xi}]_{ij} = N \int_r^{r+L} \Phi_i(s-r) \Phi_j(s-r) dm,$$

$$[M_{0\xi}]_{ij} = N \int_r^{r+L} s \Phi_i(s-r) dm,$$

$$[\overline{M}]_{ij} = N \int_r^{r+L} \frac{1}{2} [(r+L)^2 - s^2] \Phi_i'(s-r) \Phi_j'(s-r) dm,$$

$$[K_{\xi\xi}]_{ij} = N \int_r^{r+L} EI \Phi_i''(s-r) \Phi_j''(s-r) ds,$$

$$M^* = M_{\xi\xi} - \overline{M},$$

$$(\cdot)' = \frac{d}{ds}(\cdot), \quad (\cdot)'' = \frac{d^2}{ds^2}(\cdot)$$

EI 为悬臂梁的弹性刚度.

由力学系统动能及弹性能的正定性, 知 $M_{\xi\xi}$ 及 $K_{\xi\xi}$ 均为对称正定阵. 解如下广义特征值问题

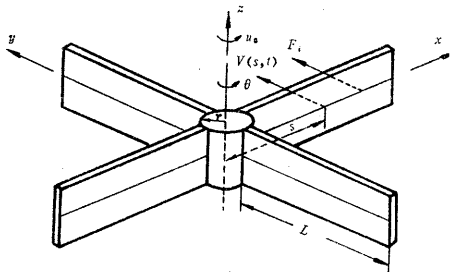


图 1 大型空间结构示意图

$$\sigma_r^2 M_{\xi\xi} \zeta_r = K_{\xi\xi} \zeta_r \quad (3)$$

得到正交化特征矩阵 $E = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n]$, 使

$$\begin{cases} E^T M_{\xi\xi} E = I & (I \text{ 为单位阵}), \\ E^T K_{\xi\xi} E = [\Delta^2] = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2), \end{cases} \quad (4)$$

不失一般性, 假定 $0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \dots \leq \sigma_n$.

作模态变换 $\xi = E\eta$, 则方程 (2) 变为

$$\begin{cases} I^* \ddot{\theta} + \delta^T \ddot{\eta} + 2\dot{\theta} \dot{\eta}^T K \eta = b_0 u, \end{cases} \quad (5a)$$

$$\begin{cases} \ddot{\eta} + [\Delta^2] \eta - \dot{\theta}^2 K \eta + \delta \ddot{\theta} = B_0 u, \end{cases} \quad (5b)$$

其中 $\delta = E^T M_{0\xi}$, $K = E^T M^* E$,

$$u = [u_0 \ F_1 \ F_2 \ \dots \ F_m]^T,$$

$$b_0 = [1 \ NS_1 \ NS_2 \ \dots \ NS_m],$$

$$B_0 = E^T \begin{bmatrix} 0 & N\Phi_1(s_1 - r) & \dots & N\Phi_1(s_m - r) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & N\Phi_n(s_1 - r) & \dots & N\Phi_n(s_m - r) \end{bmatrix}.$$

称 η 为广义振动模态, δ 为耦合向量, K 为非线性项矩阵.

3. 状态观测器

系统中的姿态角 θ 及角度速度 $\dot{\theta}$ 是可以借助传感器直接测得的, 而振动模态却不能直接获得. 安装在柔性梁上的点位移传感器的输出是振动模态的线性函数, 即

$$\begin{cases} v(a, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(a-r) \xi_i(t), \\ v_i(b, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(b-r) \dot{\xi}_i(t). \end{cases} \quad (6)$$

$v(a, t)$ 是 a 点处的线位移传感器的实测值; $v_i(b, t)$ 是 b 点处的线速度传感器的实测值.

欲得到精确的模态值, 就必须设置 n 个位移传感器及 n 个速度传感器, 然后通过解线性代数方程组来获得 $\xi_i(t)$ 及 $\dot{\xi}_i(t)$. 然而系统的模态数 n 往往是很大的, 结构上不允许设置过多数目的传感器, 所以很有必要建立状态观测器来估计系统状态的瞬时值.

对于非线性系统, 状态观测器理论是很不完善的, 象方程 (5) 那样的系统很难构造一个切合实际的完全状态观测器. 本文根据方程 (5) 的特点, 构造一个只用于估计 η 及 $\dot{\eta}$ 的部分状态观测器, 即撇开方程 (5a) 而只研究 (5b).

令 $\dot{x} = (\eta^T, \dot{\eta}^T)^T$, 则有状态方程

$$\dot{x} = A(t)x - \begin{bmatrix} 0 \\ \delta \end{bmatrix} \ddot{\theta} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_0 \end{bmatrix} u, \quad (7)$$

其中

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[\Delta^2] + \dot{\theta}^2 K & 0 \end{bmatrix}.$$

柔性梁上的传感器输出为

$$y = Cx = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix}, \quad y \in R^p, \quad (8)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} \Phi_1(q_1) & \Phi_2(a_1) & \cdots & \Phi_n(a_1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Phi_1(a_{p_1}) & \Phi_2(a_{p_1}) & \cdots & \Phi_n(a_{p_1}) \end{bmatrix} E,$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} \Phi_1(b_1) & \Phi_2(b_1) & \cdots & \Phi_n(b_1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Phi_1(b_{p_2}) & \Phi_2(b_{p_2}) & \cdots & \Phi_n(b_{p_2}) \end{bmatrix} E,$$

其中 $a_1, a_2, \dots, a_p$ 及 $b_1, b_2, \dots, b_{p_2}$ 分别为线位移传感器在梁上的位置坐标, $p = p_1 + p_2$.

设定观测器为

$$\dot{z} = A(t)z - \begin{bmatrix} 0 \\ \delta \end{bmatrix} \ddot{\theta} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_0 \end{bmatrix} u - G(y - Cz), \quad (9)$$

矩阵 $G \in R^{2n \times p}$ 待定, $z \in R^{2n}$, 则观测器误差 $e = x - z$ 的动态方程为

$$\dot{e}[A(t) + GC]e = [\bar{A} + GC + R(\dot{\theta})]e, \quad (10)$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[\Delta^2] & 0 \end{bmatrix}, \quad R(\dot{\theta}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dot{\theta}^2 K & 0 \end{bmatrix}.$$

我们假定 $|\dot{\theta}| \leq M$ (常数), 从运动轨迹的设计实际来看, 这样的假定是合理的.

定理 1 设 $|\dot{\theta}| \leq M$, $(\bar{A}, C)$ 可观测, 若 Lyapunov 方程

$$Q(\bar{A} + GC) + (\bar{A} + GC)^T Q = -P, \quad (11)$$

对于正定对称阵 P 有解 Q (正定、对称), 且

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{\lambda_{\min}(P)}{\lambda_{\max}(Q)} - M^2 \left[\lambda_{\max}(K^T K) \right]^{\frac{1}{2}} > 0, \quad (12)$$

则观测器为渐近稳定观测器.

证 因 $(\bar{A}, C)$ 可观测, 故选择矩阵可使 $(\bar{A} + GC)$ 的特征值有任意的实部, 方程 (11) 总存在唯一解 P, Q . 取 Lyapunov 函数

$$V(e) = e^T Q e,$$

$$\dot{V}(e) = -e^T P e + 2e^T Q R(\dot{\theta}) e$$

$$\leq \left[-\lambda_{\min}(P) + 2M^2 \|Q\| \cdot \|K\| \right] \|e\|^2,$$

其中矩阵范数定义为 $\|A\| = \left[\lambda_{\max}(A^T A) \right]^{\frac{1}{2}}$.

又 $\lambda_{\min}(Q) \|e\|^2 \leq V(e) \leq \lambda_{\max}(Q) \|e\|^2$, 可以推得

$$\|e\| \leq \left[\frac{\lambda_{\max}(Q)}{\lambda_{\min}(Q)} \right]^{\frac{1}{2}} \|x(t_0) - z(t_0)\| \exp[-\sigma(t - t_0)], \quad (13)$$

由条件(12), $\sigma > 0$, 知 $e \rightarrow 0$, 定理得证.

本节构造的部分状态观测器(9)属于一种 Lyapunov 意义下的指数律观测器^[6], 其收敛条件是比较保守的. 若将 $\dot{\theta}$ 及 $\ddot{\theta}$ 看成时变参数, 则可以认为(9)实质上是一种非定常线性模型.

另外, 若不希望观测器中引入 $\ddot{\theta}$ 信号, 可作如下变换 $\eta = \omega - \delta\theta$, $\dot{\eta} = \dot{\omega} - \delta\dot{\theta}$, 将方程(5b)变为

$$\ddot{\omega} + [\Delta^2]\omega - [\Delta^2]\delta\theta - \dot{\theta}^2 K\omega + \dot{\theta}^2 K\delta\ddot{\theta} = B_0 u, \quad (14)$$

然后以同样方法构造类似的观测器来避免引入 $\ddot{\theta}$.

4. 动态输出变结构控制

在方程(5)中, 定义状态向量

$$\begin{aligned} x_{11} &= \theta, \quad x_{12} = \dot{\theta}, \quad x_{21} = \eta, \quad x_{22} = \dot{\eta}, \\ x &= (x_{11}, x_{21}^T, x_{12}, x_{22}^T)^T \in \mathbf{R}^{2(n+1)}, \end{aligned} \quad (15)$$

则可写出系统状态方程, 通常的变结构控制就是依据此状态方程设计的^[4]. 但是实际上 x_{21} 及 x_{22} 不能直接获取, 只能得到其观测值 $z = [z_{21}^T, z_{22}^T]^T$, 从而便形成了本节的动态输出变结构控制方法.

文献[7]针对一般非线性系统的完全状态观测器在一般理论上阐述了动态输出变结构控制的概念及其性质. 本文在部分状态观测器设计基础上, 具体研究大型柔性空间结构的动态输出变结构控制.

由方程(5a)及观测器方程(9), 可得状态方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{11} \\ z_{21} \\ x_{12} \\ z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, z, y) \\ f_2(x_1, z, y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta f_2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\text{其中 } f_1(x_1, z, y) = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ z_{21} \\ x_{12} \\ z_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ G_1 \end{bmatrix} (y - Cz),$$

$$f_2(x_1, z, y) = \tilde{M}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ -[\Delta^2] z_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2x_{12} z_{22}^T K z_{21} \\ x_{12}^2 K z_{21} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ G_2 \end{bmatrix} (y - Cz) \right\}$$

$$\Delta f_2 = \tilde{M}^{-1} \begin{bmatrix} 2x_{12} (z_{22} K z_{21} - x_{22} K x_{21}) + \delta^T (\dot{z}_{22} - \dot{x}_{22}) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \tilde{M}^{-1} \begin{bmatrix} b_0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{M} = \begin{bmatrix} I^* & \delta^T \\ \delta & I_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} G_1^T & G_2^T \end{bmatrix}^T.$$

这里 Δf_2 可看成是由于部分状态观测器引起的模型误差. 因观测器 (9) 渐近稳定, 显然有 $\Delta f_2 \rightarrow 0$ (当 $t \rightarrow \infty$ 时), 故对任意正数 $\varepsilon > 0$, 总存在正数 t_0 , 使得 $t \leq t_0$ 时, $\|\Delta f_2\| < \varepsilon$.

控制的目标是使姿态角 θ 跟踪函数 $\theta^*(t)$, 而振动模态 η 衰减为零, 即 $x_{11} \rightarrow \theta^*(t)$, $x_{12} \rightarrow \dot{\theta}^*(t)$, $x_{21} \rightarrow 0$, $x_{22} \rightarrow 0$.

取切换函数为

$$S(x_1, z) = \begin{bmatrix} x_{12} - \dot{\theta}^*(t) \\ z_{22} \end{bmatrix} + \Lambda \begin{bmatrix} x_{11} - \theta^*(t) \\ z_{21} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

其中 $\Lambda = \text{diag}(\Lambda_0, \Lambda_1, \dots, \Lambda_n) > 0$. 假设 $m = n$, 于是 B 为满秩方阵. 至于 $m < n$ 的情形, 将另文研究.

取滑动状态的到达规律为^[8]

$$\dot{S}_i = -h_i S_i - \varepsilon_i \cdot \text{sgn}(S_i), \quad (18)$$

其中 $h_i > 0$, $\varepsilon_i > 0$, ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) 可得变结构为

$$u = -B^{-1} \{ hS + \varepsilon \text{sgn}(S) + \Lambda f_1(x_1, z, y) + f_2(x_1, z, y) - \begin{bmatrix} \theta^*(t) \\ 0 \end{bmatrix} - \Lambda \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \}, \quad (19)$$

其中 $h = \text{diag}(h_0, h_1, \dots, h_n)$.

$$\varepsilon \text{sgn}(S) = [\varepsilon_0 \text{sgn}(S_0), \varepsilon_1 \text{sgn}(S_1), \dots, \varepsilon_n \text{sgn}(S_n)]^T.$$

这里 h 是被用来提高到达滑动状态的速度的, 而 ε 则是为消除偏差 Δf_2 设计的, 以使控制 (19) 满足到达条件 $\dot{S}^T S < 0$. 但是若取 ε_i 的值过大, 会造成控制系统较大的抖振 (chattering), 故我们采取如下定义:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i0} + a_i \|x_2(0) - z(0)\| \exp[-\sigma(t - t_0)], \quad (20)$$

其中 ε_{i0} 为不存在 Δf_2 情形下到达规律 (18) 中所设计的 ε_i 值; $a_i > 0$ 为常数; σ 为观测器的衰减度. 这样做既能较好地补偿偏差 Δf_2 , 又能保持到达规律 (18) 的原有特点.

控制 (19) 能够确保系统运动在有限时间内进入滑动状态, 即

$$S^{(1)}(x_1) = S_0 = \left(x_{12} - \dot{\theta}^*(t) \right) + \Lambda_0 (x_{11} - \theta^*(t)) = 0. \quad (21)$$

通过适当选择 $\Lambda_0 > 0$, 使得 $\theta \rightarrow \theta^*(t)$ 具有较好的动态品质; 以及

$$S^{(2)}(z) = z_{22} + \Lambda^{(2)} z_{21} = 0, \quad (22)$$

其中 $\Lambda^{(2)} = \text{diag}(\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_n)$.

下面的定理阐明了系统真实状态的滑动运动

$$S^{(2)}(x_2) = x_{22} + \Lambda^{(2)} x_{21} = 0 \quad (23)$$

的收敛性.

定理 2 若观测器(9)是渐近收敛的, 即

$\|x_2(t) - z(t)\| \leq a \|x_2(t_0) - z(t_0)\| \exp[-\sigma(t - t_0)], a > 0, \sigma > 0$, 则存在 $b > 0$, 使

$$\|S^{(2)}(x_2) - S^{(2)}(z)\| \leq b \|x_2(t_0) - z(t_0)\| \exp[-\sigma(t - t_0)]. \quad (24)$$

推论 1 条件同上定理, 且 $S^{(2)}[z(t_0)] = 0$,

则

$$\|S^{(2)}(x_2)\| \leq b \|x_2(t_0) - z(t_0)\| \exp[-\sigma(t - t_0)]. \quad (25)$$

定理 2 及推论 1 的证明是很明显的, 故从略. 由此可知, 控制(19)保证了

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\dot{\eta}(t) + \Lambda^{(2)} \eta(t)] = 0, \quad (26)$$

即 $\eta(t) \rightarrow 0$, 且可具有良好的动态响应.

讨论: (1) 滑动状态(21)可以在有限时间内真正到达, 故姿态角跟踪具有变结构系统特有的鲁棒性; 而滑动运动(23)是渐近逼近的, 故振动模态运动已不具有对外界干扰等因素的强鲁棒性了.

(2) 本文所述的观测器收敛性与控制特性之间不具有分离性原理. 如, 观测器收敛条件 $|\dot{\theta}| \leq M$, 限制了控制规律的设计; 而若控制过程中不满足条件 $|\dot{\theta}| \leq M$, 则可能影响到观测器的收敛性.

5. 仿真实例

实际模型的原始结构数据^[3]为: $I^* = 6764$ 千克 / 米², $\rho = 0.04096$ 千克 / 米, $L = 35$ 米, $r = 1.0$ 米, $EI = 1500$ 千克 · 米² / 秒², $N = 4$.

式(1)中的允许振型函数取为

$$\Phi_p(s-r) = 1 - \cos\left[\frac{P\pi(s-r)}{L}\right] + \frac{1}{2}(-1)^{P+1} \left[\frac{P\pi(s-r)}{L}\right]^2, \quad (P=1, 2, \dots, \infty) \quad (27)$$

控制任务为由 $\theta_0 = 0^\circ$ 操纵至 $\theta^*(t) = 10^\circ$, 且假定 $|\dot{\theta}| \leq 0.1$ 弧度 / 秒 $= 5.73^\circ / \text{秒}$. 为简单起见, 这里只取前三个振动模态进行计算, 即 $n = 3$. 设置唯一的线位移传感器于 $0.33L$ 处控制力 F_1 、 F_2 及 F_3 分别作用于 $0.29L$ 、 $0.53L$ 及 $0.84L$ 处.

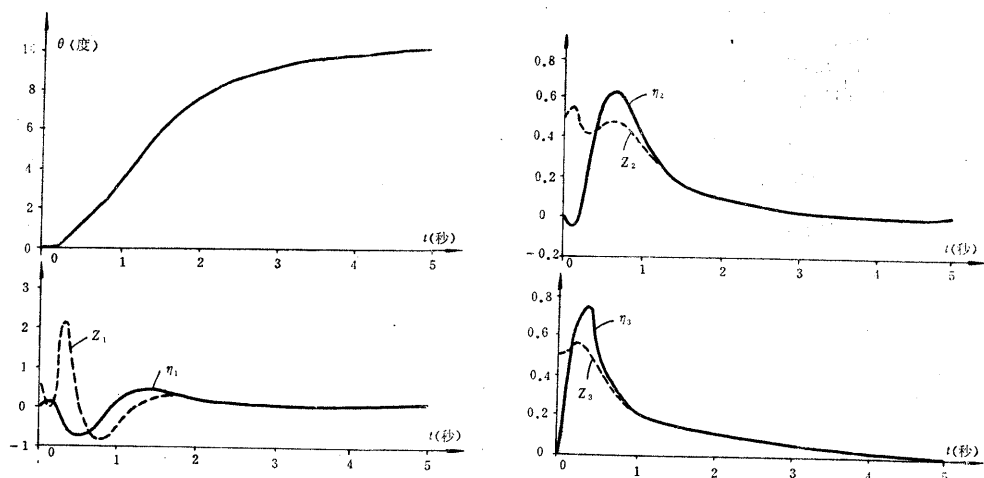


图2 θ 、 η_1 、 η_2 及 η_3 仿真曲线

通过计算得到的观测器矩阵为 $G = [-559.66, 38.78, -13.06, -425.57, 352.6, -672.36]^T$, 变结构控制律设计数据为 $h = 0.0$, $h_1 = h_2 = h_3 = 0.5$, $\varepsilon_0 = 0.1 + 0.1e^{-t}$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.1 + 2.5e^{-t}$, $\Lambda_0 = \Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 = 1.0$, 观测器状态初始值设为 $z_i(0) = 0.5 (i = 1, 2, \dots, 6)$.

经过模型推算、配置极点及解 Lyapunov 方程等离线计算过程, 最后仿真控制系统得到 θ 、 η_1 、 η_2 及 η_3 的仿真曲线 (如图2) 以及控制输入 u_0 、 F_1 、 F_2 及 F_3 变化曲线 (图略), 结果是令人满意的.

6. 结 论

本文首次给出了大型柔性空间结构大角度操纵的状态观测方法, 初步解决了用较少传感器去估计大量弹性振动的难题, 研究了带有部分状态观测器的系统的变结构控制设计方法及其控制特性. 仿真结果表明方法是可行的, 具有实用价值.

参 考 文 献

- (1) Nurre, G. S., Ryan, R. S., Scofield, H. N. and Sims, J. L., Dynamics and control of Large Space Structures, J. of Guidance, Control and Dynamics, 7, 5, (1984), 514-526.
- (2) Balas, M. J., Trends in Large Space Structure Control Theory: Fondest Hopes, Wildest Dreams, IEEE Trans., AC-27, 3, (1982), 522-535.
- (3) Turner, J. D. and Chen, H.M., Optimal Distributed Control of a Flexible Spacecraft During a Large-angle Maneuver, J. Guidance, Control and Dynamics, 7, 3, (1984), 257-264.
- (4) 高为炳、程勉、曾文陵, 柔性空间飞行器的变结构控制, 航空学报, 9, 5, (1988), A274-A280.
- (5) 曲志强、高为炳, 变结构模型跟随控制及其在柔性航天器控制上的应用, 全国控制理论与应用年会论文集, 湖南, (1987), 177-180.
- (6) Kou, S. R., Elliott, D. L. and Tarn, T. J., Exponential observers for Nonlinear Dynamic Systems, Inform. & Control, 29, (1975), 204-215.
- (7) Bartolini, G. and Zolezzi, T., Dynamic Output Feedback for Observed Variable Structure Control Systems, Systems & Control Letters, 7, 3 (1986), 189-193.
- (8) 高为炳、程勉, 变结构控制系统的品质控制, 控制与决策, 4, 3, (1989), 1-7.

State Estimation and Variable Structure Control of Flexible Spacecrafts

Qu Zhiqiang, Gao Weibing

(Department of Applied Mathematics and Physics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract: In this paper, an approach of state estimation and a variable structure control strategy are presented for large-angle single-axis maneuvers of flexible spacecrafts. An exponential observer base on fewer sensors is constructed so that elastic modes of the systems can be available at all instants of time, furthermore dynamic output feedback variable structure control using outputs of the system and states of the observer is studied, Satisfactory simulation results obtained for a practical model are given.

Key words: flexible structure; nonlinear system; observer; variable structure control