

挠性航天器姿态机动和主动振动抑制控制

张立尧, 焦晓红

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:针对挠性航天器姿态机动控制和主动振动抑制问题,提出一种具有干扰抑制的自适应输出反馈机动主动振动抑制控制器设计方法。首先,利用挠性附件固有物理特性构造了一种结构简单的开环模态观测器,然后以此获得的模态估计信息及可测量的姿态四元数和角速度信息,基于自适应反步设计方法进行反馈控制器设计。设计中无需忽略挠性附件和中心刚体的耦合,且挠性模态振动抑制效果明显,保证了闭环系统在参数不确定存在和外部干扰作用下的姿态稳定鲁棒性,对外部干扰力矩具有 L_2 增益抑制性能。通过理论证明和仿真研究证明了所设计控制器的有效性和可行性。

关键词:挠性航天器;姿态机动;主动振动抑制;模态观测器;自适应反步技术

中图分类号:V448.22

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2012)01-0004-05

航天器姿态控制系统作为航天器控制中的重要组成部分,关系着入轨后的航天器能否以一定的精度保持在预定的指向或位置。设计一个高性能的姿态控制器会面临很多困难。航天器在轨运动中,太阳能帆板等附件的展开和收缩、燃料的消耗以及有效载荷的运动都会引起航天器惯量参数的变化,同时航天器不可避免地受到各种外部力矩的干扰以及外界的其他信号的干扰。另外,中心刚体和挠性附件间的强耦合作用,以及附件的振动势必影响到中心刚体姿态机动的控制性能,而挠性附件模态的不可直接测量,给附件振动的主动抑制带来困难。因此,挠性航天器姿态机动和主动振动抑制问题的研究得到了广泛的重视。

针对挠性附件振动对航天器中心刚体姿态机动的抑制问题,文献[1-2]将附件振动对中心刚体的作用看成外部有界扰动,控制律在一定程度上能达到较好效果,但对系统稳定性有一定影响,需进一步改善控制品质。文献[3-5]采用基于 Lyapunov 稳定性方法的输出反馈,提出了基于附件模态观测器的姿态控制律。该方法有效地抑制了附件振动,提高了控制精度,只是大多需要转动惯量精确已知^[3-4]或其界已知^[5]。

主动振动抑制,即通过在附件上添加压电智能材料作为执行器的补偿器,可以较大幅度地提高模态阻尼,抑制振动效果明显^[6-10]。文献[6]基于挠性模态观测器设计了控制器,在转动惯量已知的条件下进行轨迹跟踪问题研究。文献[7-8]和文献[9]分别采用反步自适应控制方法和滑模变结构控制方法与基于压电智能材料的主动振动抑制技术相结合的复合控制策略,有效抑制了挠性附件的振动。然而,上述文献一方面将附件振动对中心刚体的作用看成外部有界扰动,另一方面则忽略中心刚体与挠性附件耦合。文献[10-11]针对挠性附件单独进行控制策略研究。文献[10]在附件参量未知的情况利用隐式自适应

控制方法进行了主动振动抑制控制研究。文献[11]对比了简单的 PD 控制器和滑模控制对挠性附件阻尼的增加效果,并以实验平台验证了控制效果。但文献[10-11]的控制器研究同样是在忽略中心刚体和挠性附件耦合的前提条件下进行的。

本文研究了惯量参数未知、存在外部干扰及挠性振动模态不可测量情况下挠性航天器姿态机动和附件主动振动抑制问题。考虑目前常采用的挠性附件主动振动抑制控制技术,在挠性附件上粘贴压电智能元件,提供辅助控制增强附件阻尼性,然后设计具有姿态机动和挠性振动抑制的反馈控制器。所得控制器具有以下特性:①设计中无需忽略挠性附件耦合对中心刚体的影响;②通过压电智能元件的应用和控制器设计,挠性附件振动抑制效果明显;③设计中考虑了航天器转动惯量未知的情况,无需将附件振动对中心刚体的作用看成外部有界扰动,改善了系统的控制品质;④对外部干扰力矩具有 L_2 增益抑制性能,并保证了闭环系统在参数不确定存在和外部干扰作用下的姿态稳定鲁棒性。

1 系统动态性能描述及控制问题

采用压电作动器控制附件振动,带挠性附件的航天器姿态机动的运动学和动力学方程为^[3,6]

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q^T \\ q_0 I_3 + q^\times \end{pmatrix} \omega \\ J\dot{\omega} + \delta^T \ddot{\eta} = -\omega^\times (J\omega + \delta^T \dot{\eta}) + \delta^T \delta_p u_p + u(t) + d(t) \\ \begin{pmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K & -C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I \\ C \end{bmatrix} \delta\omega - \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \delta_p u_p \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\psi = \dot{\eta} + \delta\omega$ 为系统状态变量; $[q_0 \ q^T]^T$ ($q =$

收稿日期:2011-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60774018)

作者简介:张立尧(1985—),男,硕士,主要从事航天器姿态控制研究;通信作者 焦晓红(1966—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事自动控制原理和现代控制理论研究。

$[q_1 \ q_2 \ q_3 \]^T$)为定义的四元数,满足约束条件 $q^T q + q_0^2 = 1$; I_3 表示 3×3 单位矩阵; $\omega \in R^3$ 为航天器姿态角速度矢量; J 为整体转动惯量矩阵,是正定对称的常值矩阵; δ 为刚体与挠性附件的耦合矩阵; η, ψ 为挠性模态; $u \in R^3$ 为控制力矩; $d \in R^3$ 代表外部干扰力矩; $C = \text{diag}\{2\xi, \omega_{ni}\}$, $K = \text{diag}\{\omega_{ni}^2\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 分别为阻尼矩阵和刚度矩阵; $\delta_p = \{\delta_{p1}^T, \delta_{p2}^T, \dots, \delta_{pn}^T\}^T$ 为压电作动器与附件的耦合系数矩阵, N 为模态个数; ω_{ni} 为挠性结构振动模态频率; ξ_i 为振动模态的阻尼比; u_p 为压电作动器的输入; $(\cdot)^*$ 为叉乘算子,对于 $a = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$, 有

$$a^* = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

系统的物理条件为:姿态状态变量 q_0, q, ω 可以直接测量,而挠性模态 η, ψ 不可测量;系统转动惯量矩阵 J 是不确定的;外部干扰 $d(t)$ 不仅包括由于轨控和各种环境力矩引起的常值干扰,还包括由外部激励诱导的属于扩展 L_2 空间的各种干扰信号,并且这些干扰具有不确定性。

挠性航天器姿态机动控制目标为:针对系统(1),在考虑挠性卫星转动惯量未知、挠性附件模态不可测和带有外部干扰力矩的情况下,设计一类非线性输出反馈控制器,在完成姿态机动控制的同时,抑制挠性附件的结构振动。即设计控制器,使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} q_0 = 1, \lim_{t \rightarrow \infty} q = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \omega = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \eta = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \psi = 0$

这样形成了如下的控制问题:针对存在未知参数 J 和外部干扰 $d(t)$ 的系统(1),在变量 η, ψ 不可测量的情况下,设计挠性模态主动振动抑制补偿器 u_p 和姿态机动控制器 $u(t)$, 使得闭环系统满足如下性能:

P1 当 $d=0$ 时,闭环系统在平衡点处是全局 Lyapunov 稳定的,且系统状态具有收敛性,即闭环系统所有信号有界,且 $t \rightarrow \infty$ 时, $q_0 \rightarrow 1, q \rightarrow 0, \omega \rightarrow 0, \eta \rightarrow 0, \psi \rightarrow 0$ 。

P2 当 $d \neq 0$ 时,闭环系统具有从干扰信号 $d(t)$ 到评价信号 $y(t)$ 的 L_2 增益不大于某一给定的抑制性能指标值 γ 。即对于任意外部干扰 $d(t) \in L_2[0, T)$ ($\forall T > 0$), 满足

$$\int_0^T \|y(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|d(t)\|^2 dt + \beta \quad (2)$$

其中: γ 为给定的正常数; β 为一非负常数。

2 姿态机动和振动抑制控制器设计

针对振动模态不可测,选取构造模态观测器,通过反馈模态估计信号实现振动的主动抑制;针对转动惯量未知,采用自适应控制技术,且利用非线性自适应反步设计方法给出一个具有 L_2 增益性能的自适应输出反馈控制器,保证姿态机动和振动抑制同时达到满意的控制性能。具体的控制器设计思想和步骤如下:

2.1 挠性附件模态估计器

根据系统(1)的物理条件可以知道,矩阵 A 是 Hurwitz 矩阵,因此,对不可测量的变量 η, ψ , 在模态参数 A 和 $B\delta$ 已知的情况

下,可以构造一种简单的开环渐近稳定观测器,其形式如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\eta}} \\ \dot{\hat{\psi}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \hat{\eta} \\ \hat{\psi} \end{bmatrix} + B\delta\omega - \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \delta_p u_p \quad (3)$$

其中 $\hat{\eta}, \hat{\psi}$ 分别为 η, ψ 的估计信号。通过反馈可获得的信号 $\hat{\eta}, \hat{\psi}$ 代替不可测得信号 η, ψ , 实现系统姿态机动与振动抑制控制,因为令 $\tilde{\eta} = \hat{\eta} - \eta, \tilde{\psi} = \hat{\psi} - \psi$, 则有

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\eta}} \\ \dot{\tilde{\psi}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \tilde{\eta} \\ \tilde{\psi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于 A 是 Hurwitz 阵,保证了 $\hat{\eta} \rightarrow \eta, \hat{\psi} \rightarrow \psi$ ($\tilde{\eta} \rightarrow 0, \tilde{\psi} \rightarrow 0$)。

2.2 姿态机动和主动振动抑制控制器设计

首先设计主动振动抑制控制器。选取 PD 振动控制器,其结构如下:

$$u_p = k'_p \delta_p^T \hat{\eta} + k'_v \delta_p^T \dot{\hat{\eta}} \quad (5)$$

其中 k'_p, k'_v 分别为可调的正实数。通过这 2 个参数的调整可有效增加附件阻尼。

然后进行姿态机动控制器设计。将式(5)代入式(1),同时令 $k_p = \delta_p k'_p \delta_p^T, k_v = \delta_p k'_v \delta_p^T$, 则系统(1)可改写为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q^T \\ q_0 I_3 + q^* \end{bmatrix} \omega \\ J_0 \dot{\omega} = -\omega^* J_0 \omega - \omega^* \delta^T \psi + \delta^T K \eta + \delta^T C \psi - \delta^T C \delta \omega - \delta^T k_v \delta \omega + \delta^T k_p \hat{\eta} + \delta^T k_v \dot{\hat{\psi}} + u(t) + d(t) \\ \begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \eta \\ \psi \end{bmatrix} + B\delta\omega - \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} (k_p \hat{\eta} + k_v \dot{\hat{\eta}}) \\ \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\eta}} \\ \dot{\tilde{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -(K + k_p) & -(C + k_v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\eta} \\ \tilde{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I \\ C + k_v \end{bmatrix} \delta \omega \end{cases} \quad (6)$$

其中 J_0 为中心刚体的转动惯量, $J_0 = J - \delta^T \delta$, 可知 J_0 是未知正定对称的常值矩阵。

采用非线性反步递归设计方法,可设计出一个具有 L_2 干扰抑制功能的自适应姿态机动与振动抑制综合控制器,其结果陈述为如下命题:

命题 1 对于带有观测器(3)的挠性航天器姿态控制系统(6),若设计一个反馈控制器

$$\begin{aligned} u = & -\{q^T + k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\} + \omega^* \delta^T \hat{\psi} + \\ & \delta^T (C + 2k_v) \delta \omega - \delta^T (C + k_v) \hat{\psi} - \delta^T (K + k_p) \hat{\eta} - \\ & \frac{1}{2} \varepsilon_1^{-1} (\omega^* \delta^T \delta \omega^* + \delta^T C C \delta) Z - \frac{1}{2} \varepsilon_2^{-1} \delta^T K K \delta Z - \\ & \left(\frac{1}{2\gamma^2} + k_3 \right) Z - F(q_0, q, \omega, \hat{\eta}, \hat{\psi}) \theta \end{aligned} \quad (7)$$

和自适应律

$$\dot{\theta} = \Gamma^{-1} F^T(q_0, q, \omega, \hat{\eta}, \hat{\psi}) Z \quad (8)$$

则可保证相应的闭环系统满足所要求的控制性能 P1 和 P2, 其中: $k_1 > 0, k_3 > 0, \varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$ 均为可调参数; Γ 是 6×6 的正定矩阵; $\gamma > 0$ 是给定的干扰抑制评价指标值; θ 为惯量矩阵 J_0 中未知参数的估计; Z 是关于状态 $(q, \omega, \hat{\eta}, \hat{\psi})$ 的函数向量; $F(q_0, q,$

$\omega, \hat{\eta}, \hat{\psi}$ 是关于状态变量的函数矩阵。在证明中将给出它们的定义式。

证明 首先考虑系统(6)中的子系统($q_0, q, \hat{\eta}, \hat{\psi}$), 构造一个 Lyapunov 候选函数:

$$V_1 = (1 - q_0)^2 + q^T q + \frac{k_1}{2} [\hat{\eta}^T \quad \hat{\psi}^T] P \begin{bmatrix} \hat{\eta} \\ \hat{\psi} \end{bmatrix} + \frac{k_2}{2} [\tilde{\eta}^T \quad \tilde{\psi}^T] P \begin{bmatrix} \tilde{\eta} \\ \tilde{\psi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$P = \begin{bmatrix} 2(K + k_p) + (C + k_v)^2 & C + k_v \\ C + k_v & 2I \end{bmatrix}, k_1, k_2 > 0$$

为可调参数。将 ω 作为虚拟控制输入, 定义新变量

$$Z = \omega - \alpha(q, \hat{\psi}, \hat{\eta}) \quad (10)$$

并选取 $\alpha(q, \hat{\psi}, \hat{\eta})$ 为

$$\alpha(q, \hat{\psi}, \hat{\eta}) = -q - k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}] \quad (11)$$

则沿着子系统的轨迹, 对 V_1 求时间导数, 并利用系统的物理性质 $q^T \dot{q} = 0$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & \{q^T + k_1 [\hat{\psi}^T (C + k_v) - 2\hat{\eta}^T (K + k_p)] \delta^T Z - \\ & k_1 [\hat{\psi}^T (C + k_v) \hat{\psi} + \hat{\eta}^T (C + k_v) (K + k_p) \hat{\eta}] - \\ & k_2 [\tilde{\psi}^T (C + k_v) \tilde{\psi} + \tilde{\eta}^T (C + k_v) (K + k_p) \tilde{\eta}] - \\ & \{q + k_1 \delta [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\}^T \cdot \\ & \{q + k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\} \} \end{aligned} \quad (12)$$

再考虑整个系统(6), 构造 Lyapunov 候选函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} Z^T J_0 Z \quad (13)$$

则 V_2 的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & \dot{V}_1 + Z^T \{J_0 \dot{\omega} + J_0 \dot{q} + \\ & J_0 k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\} = \\ & \dot{V}_1 + Z^T \{-\omega^\times J_0 \omega - \omega^\times \delta^T \hat{\psi} + \delta^T K \hat{\eta} + \delta^T C \hat{\psi} - \\ & \delta^T C \delta \omega - \delta^T k_v \delta \omega + \delta^T k_p \hat{\eta} + \delta^T k_v \hat{\psi} + u(t) + d(t) + \\ & J_0 \dot{q} + J_0 k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\} \end{aligned} \quad (14)$$

注意到惯性参数

$$J_0 = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{12} & J_{22} & J_{23} \\ J_{13} & J_{23} & J_{33} \end{bmatrix}$$

是未知的, 需要处理, 因此, 定义线性算子 $L: R^3 \rightarrow R^{3 \times 6}$ 如下^[2]:

$$L(a) = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & a_2 & a_3 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & a_1 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 & a_1 & a_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

则对于 $\forall a = [a_1 \quad a_2 \quad a_3]^T \in R^3$, 有

$$J_0 a = L(a) \theta \quad (16)$$

其中 $\theta = [J_{11} \quad J_{22} \quad J_{33} \quad J_{12} \quad J_{13} \quad J_{23}]^T$ 。进而式(14)中含 J_0 项可以处理如下:

$$-\omega^\times J_0 \omega + J_0 \dot{q} = [-\omega^\times L(\omega) - L(\dot{q})] \theta \quad (17)$$

$$J_0 k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}] = k_1 J_0 f(\hat{\eta}, \hat{\psi}, \omega) = k_1 L(f) \theta \quad (18)$$

还需要处理式(14)中含有不可测量 η, ψ 的项:

$$\begin{aligned} Z^T (-\omega^\times \delta^T \hat{\psi} + \delta^T C \hat{\psi} + \delta^T K \hat{\eta}) & \leq \\ Z^T (-\omega^\times \delta^T \tilde{\psi} + \delta^T C \tilde{\psi} + \delta^T K \tilde{\eta}) & + \\ \frac{1}{2} \varepsilon_1^{-1} Z^T \omega^\times \delta^T \delta \omega^\times Z + \frac{1}{2} \varepsilon_1^{-1} Z^T \delta^T C C \delta Z & + \\ \frac{1}{2} \varepsilon_2^{-1} Z^T \delta^T K K \delta Z + \varepsilon_1 \tilde{\psi}^T \tilde{\psi} + \frac{1}{2} \varepsilon_2 \tilde{\eta}^T \tilde{\eta} & \end{aligned} \quad (19)$$

考虑含外部扰动项, 有如下不等式成立:

$$Z^T d \leq \frac{1}{2\gamma^2} Z^T Z + \frac{\gamma^2}{2} d^T d \quad (20)$$

将式(12)、(17)~(20)代入式(14)中, 整理得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & Z^T \{q + k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}] - \delta^T k_v \delta \omega - \\ & \delta^T C \delta \omega - \omega^\times \delta^T \hat{\psi} + \delta^T C \hat{\psi} + \delta^T K \hat{\eta} + \delta^T k_p \hat{\eta} + \delta^T k_v \hat{\psi} + u + \\ & F(q_0, q, \omega, \hat{\eta}, \hat{\psi}) \theta + \frac{1}{2\gamma^2} Z + \frac{1}{2} \varepsilon_1^{-1} (\omega^\times \delta^T \delta \omega^\times + \\ & \delta^T C C \delta) Z + \frac{1}{2} \varepsilon_2^{-1} \delta^T K K \delta Z\} - k_1 \hat{\eta}^T (C + k_v) (K + k_p) \hat{\eta} + \\ & \frac{\gamma^2}{2} d^T d - \tilde{\psi}^T [k_2 (C + k_v) - \varepsilon_1 I] \tilde{\psi} - \tilde{\eta}^T [k_2 (C + k_v) \cdot \\ & (K + k_p) - \frac{1}{2} \varepsilon_2 I] \tilde{\eta} - k_1 \hat{\psi}^T (C + k_v) \hat{\psi} - \\ & \{q + k_1 \delta [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\}^T \\ & \{q + k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\} \} \end{aligned} \quad (21)$$

式中 $F(q_0, q, \omega, \hat{\eta}, \hat{\psi}) = -\omega^\times L(\omega) - L(\dot{q}) + L(f)$ 。

考虑反馈控制律(7), 并且选取评价信号

$$y = [p_1 \tilde{\eta}^T \quad p_2 \tilde{\psi}^T \quad p_3 Z^T]^T \quad (22)$$

其中, 简单地选取 $p_i (i = 1, 2, 3)$ 为加权系数, 则 \dot{V}_2 满足如下不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -\{q + k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\}^T \{q + \\ & k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\} - \\ & k_1 \hat{\psi}^T (C + k_v) \hat{\psi} - k_1 \hat{\eta}^T (C + k_v) (K + k_p) \hat{\eta} - \\ & (k_3 - \frac{1}{2} p_3^2) Z^T Z - \tilde{\psi}^T [k_2 (C + k_v) - \varepsilon_1 I - \\ & \frac{1}{2} p_2^2 I] \tilde{\psi} + Z^T F(q_0, q, \omega, \hat{\eta}, \hat{\psi}) (\theta - \hat{\theta}) + \frac{\gamma^2}{2} d^T d - \\ & \frac{1}{2} y^T y - \tilde{\eta}^T [k_2 (C + k_v) (K + k_p) - \frac{1}{2} \varepsilon_2 I - \frac{1}{2} p_1^2 I] \tilde{\eta} \end{aligned} \quad (23)$$

对整个闭环系统, 选取 Lyapunov 候选函数 V 为

$$V = V_2 + \frac{1}{2} (\theta - \hat{\theta})^T \Gamma (\theta - \hat{\theta}) \quad (24)$$

对 V 求时间导数, 并考虑不等式(23)及自适应控制律式(8), 整理得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\{q + k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\}^T \\ & \{q + k_1 \delta^T [(C + k_v) \hat{\psi} - 2(K + k_p) \hat{\eta}]\} - \\ & k_1 \hat{\psi}^T (C + k_v) \hat{\psi} - k_1 \hat{\eta}^T (C + k_v) (K + k_p) \hat{\eta} - \\ & (k_3 - \frac{1}{2} p_3^2) Z^T Z + \frac{\gamma^2}{2} d^T d - \frac{1}{2} y^T y - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \tilde{\psi}^T [k_2(C+k_v) - \varepsilon_1 I - \frac{1}{2} p_2^2 I] \tilde{\psi} - \\ & \tilde{\eta}^T [k_2(C+k_v)(K+k_p) - \frac{1}{2} \varepsilon_2 I - \frac{1}{2} p_1^2 I] \tilde{\eta} \end{aligned} \quad (25)$$

通过选取可调参数 k_1, k_2, k_3 和 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 满足不等式:

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0, k_1 > 0, k_3 > \frac{1}{2} p_3^2$$

$$k_2(C+k_v) > \varepsilon_1 I + \frac{1}{2} p_2^2 I$$

$$k_2(C+k_v)(K+k_p) > \frac{1}{2} (\varepsilon_2 + p_1^2) I$$

则有如下结论:

1) 当 $d=0$ 时,有

$$\dot{V} \leq -Q(q, \hat{\eta}, \hat{\psi}, \tilde{\eta}, \tilde{\psi}, Z), \forall q_0, q, \omega, \hat{\eta}, \hat{\psi}, \tilde{\eta}, \tilde{\psi}, \tilde{\theta}$$

其中 Q 是关于所有状态 $(q_0, q, \omega, \hat{\eta}, \hat{\psi}, \tilde{\eta}, \tilde{\psi}, \tilde{\theta})$, $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 的半负定函数,因此,由 LaSalle 不变集原理,易得:当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\hat{\eta} \rightarrow 0, \hat{\psi} \rightarrow 0, Z \rightarrow 0, \tilde{\eta} \rightarrow 0, \tilde{\psi} \rightarrow 0, -q - k_1 \delta^T [(C+k_v)\hat{\psi} - 2(K+k_p)\hat{\eta}] \rightarrow 0$, 进而得到当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\eta \rightarrow 0, \psi \rightarrow 0, q \rightarrow 0, q_0 \rightarrow 1, \omega \rightarrow 0, \tilde{\theta} \rightarrow \text{const}$. 即闭环系统满足性能 P1:所有信号有界,且原系统状态 $(q_0, q, \omega, \eta, \psi)$ 具有收敛性。

2) 当 $d \neq 0$ 时,有

$$\dot{V} \leq \frac{\gamma^2}{2} d^T d - \frac{1}{2} y^T y \quad (26)$$

对式(26)两边取 $[0, T)$ ($\forall T > 0$) 积分,并考虑到 V 的正定性,即可得到不等式(2),进而闭环系统满足性能 P2,具有从外部干扰信号 $d(t)$ 到评价信号 $y(t)$ 的 L_2 增益性能。证明完毕。

3 仿真研究

对某型航天器姿态控制系统进行仿真研究,用以验证上述控制方法的有效性。挠性航天器的主要参数参考文献[3,10]选取如下:

主体转动惯量矩阵的标称值

$$J = \begin{bmatrix} 350 & 3 & 4 \\ 3 & 270 & 10 \\ 4 & 10 & 190 \end{bmatrix} (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

耦合矩阵

$$\delta = \begin{bmatrix} 6.45637 & 1.27814 & 2.15629 \\ -1.25619 & 0.91756 & -1.67264 \\ 1.11687 & 2.48901 & -0.83674 \\ 1.23637 & -2.65810 & -1.12503 \end{bmatrix} (\text{kg}^{1/2} \text{m})$$

压电作动器与附件的耦合系数矩阵

$$\delta_p = \begin{bmatrix} 2.342552 \times 10^{-2} \\ -4.225368 \times 10^{-2} \\ 3.912984 \times 10^{-2} \\ 7.026176 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \sqrt{\text{kg}} \times \text{m}/(\text{Vs}^2)$$

考虑挠性附件的前4阶挠性模态,其振动频率和阻尼比分别为:

$$\omega_{n1} = 0.7681 \text{ rad/s}, \omega_{n2} = 1.1038 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{n3} = 1.8733 \text{ rad/s}, \omega_{n4} = 2.5496 \text{ rad/s}$$

$$\xi_1 = 0.005607, \xi_2 = 0.008620$$

$$\xi_3 = 0.012830, \xi_4 = 0.025160$$

仿真研究中,给定航天器初始欧拉角选为 160° ,即系统(5)的姿态状态初始值选为:

$$\omega(0) = [0 \ 0 \ 0]^T \text{rad/s}, q_0(0) = 0.173648$$

$$q(0) = [-0.263201 \ 0.789603 \ -0.526402]^T$$

挠性附件模态状态初始值选为

$$\eta_i(0) = 0.001, \psi_i(0) = 0.001, i = 1, 2, 3, 4$$

外部干扰信号选取为

$$d(t) = \begin{bmatrix} 0.3 \cos(0.1t) + 0.1 \\ 0.15 \sin(0.1t) + 0.3 \cos(0.1t) \\ 0.3 \sin(0.1t) + 0.1 \end{bmatrix}$$

自适应输出反馈控制器可调参数选为:

$$k_1 = 0.5, k_2 = 3, k_3 = 10, k_p = 200, k_v = 900,$$

$$\varepsilon_1 = 0.5, \varepsilon_2 = 0.5, \gamma = 0.1, p_1 = p_2 = p_3 = 1,$$

$$\Gamma = \text{diag}\{0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1\}$$

观测器的初值:

$$\hat{\eta}_i(0) = 0, \hat{\psi}_i(0) = 0, i = 1, 2, 3, 4$$

自适应估计的初始值:

$$\hat{\theta}(0) = [42 \ 30 \ 35 \ 0.7 \ -1.5 \ 2]^T$$

闭环系统的响应曲线如图1~5所示。

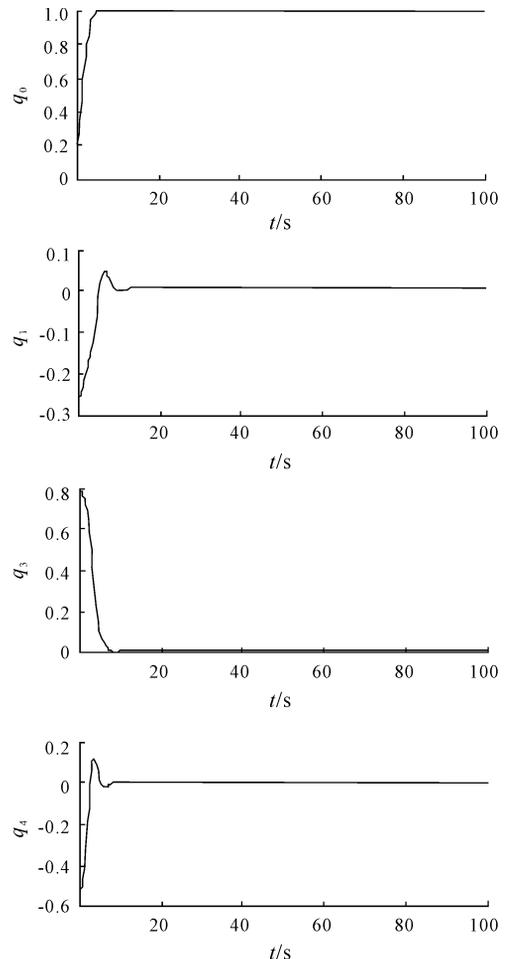
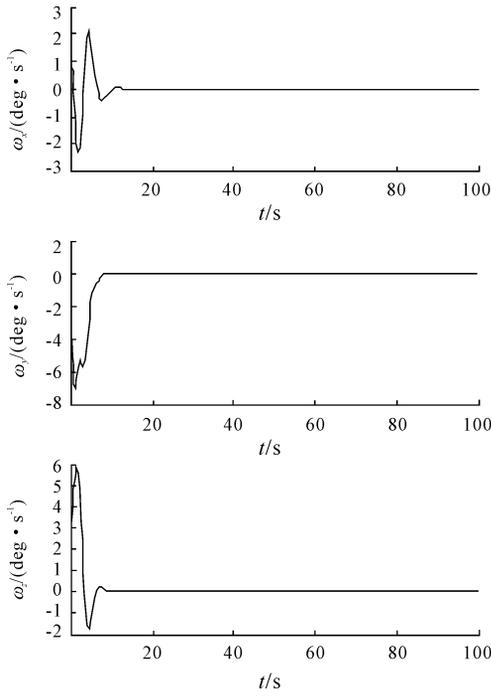
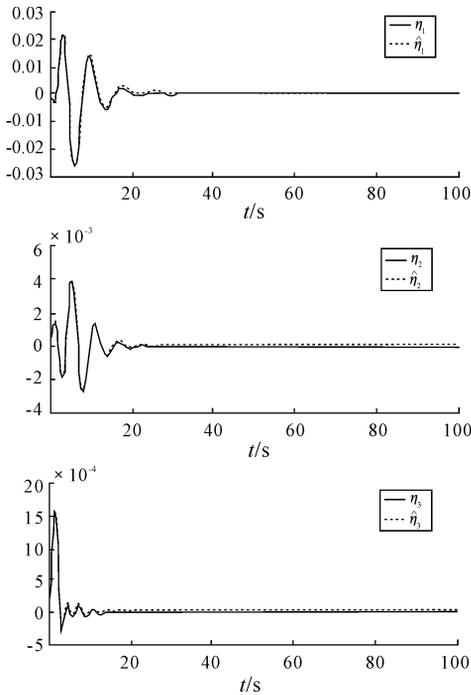
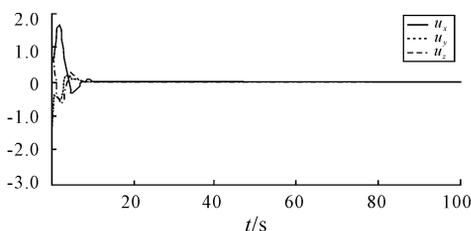


图1 四元数 q_0 与 q 的时间响应

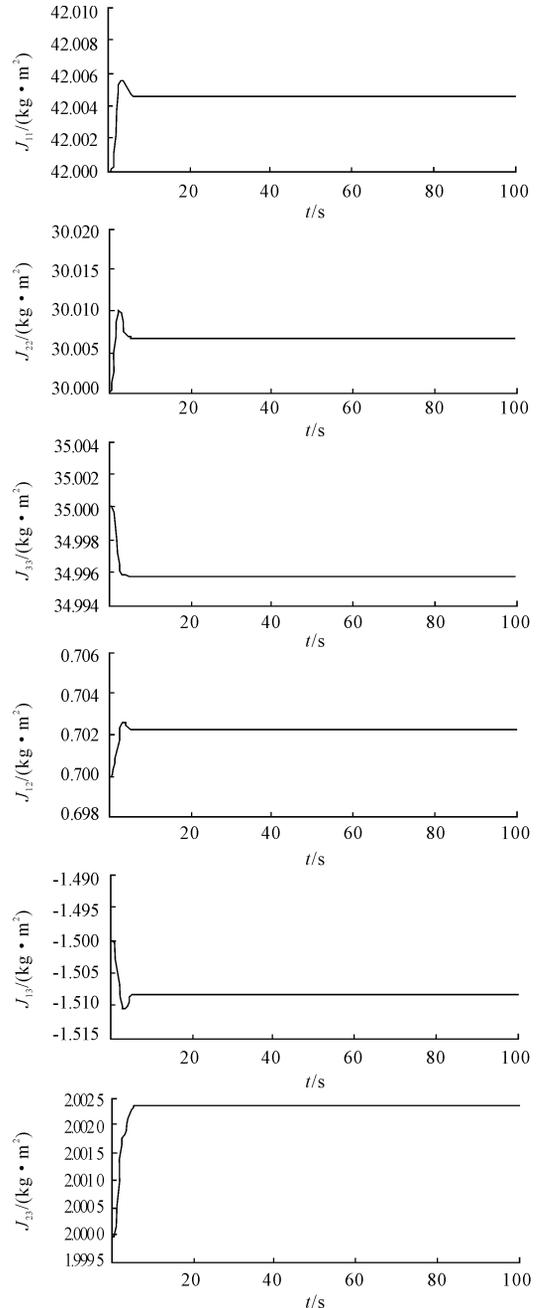
图2 角速度 ω 的时间响应图3 模态位移 η_1 、 η_2 、 η_3 和估计值 $\hat{\eta}_1$ 、 $\hat{\eta}_2$ 、 $\hat{\eta}_3$ 的响应曲线图4 控制力矩 u_x 、 u_y 、 u_z 变化曲线

由仿真结果,可以得到如下结论:

1) 图1~2可以看出,本文涉及的自适应输出反馈控制器保证了姿态机动具有较好的动态特性和稳定性。

2) 图3可以看出:挠性附件振动大致在25 s内达到零点附近,快速性良好;各阶模态的超调分别为0.02、0.004、0.0016,振动抑制效果明显,说明了控制器出色的完成了挠性附件结构振动的抑制。

3) 图5可以看出,估计的惯量参数基本收敛到真值,设计的控制器保证航天器完成了姿态机动任务,即各状态量均收敛到零平衡点的一个较小范围内。

图5 估计的惯量参数 J_{11} 、 J_{22} 、 J_{33} 、 J_{12} 、 J_{13} 、 J_{23}