基于摄动模型的挠性航天器姿态控制系统设计

崔美瑜 徐世杰 贾英宏

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为了完成挠性航天器高精度姿态控制任务,首先采用摄动法分析了挠性航天器动力学方程,得到相应的0阶和1阶动力学系统.针对0阶非线性时不变系统,同时考虑到转动惯量不确定性和干扰,对已有的非线性直接自适应控制律进行改进,设计PI(Proportional-Integral)型参数自适应律,以提高姿态控制精度,同时给出了稳定性证明.针对1阶系统设计PI控制器及PPF(Positive Position Feedback)控制器,以有效抑制挠性结构振动.仿真结果表明,在采用摄动法对动力学方程分析的基础上设计姿态控制系统,可以有效完成挠性航天器高精度姿态控制任务.

关 键 词: 挠性航天器; 摄动法; 高精度; 姿态控制

中图分类号: V 448.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010)12-1387-05

Flexible spacecraft attitude control based on perturbation method analysis

Cui Meiyu Xu Shijie Jia Yinghong

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to achieve flexible spacecraft high precision attitude control, using the perturbation method, the dynamic equations were divided into the zero order and first order systems. For the zero-order nonlinear time-invariant systems, taking into account the inertia uncertainty and disturbance, the nonlinear direct adaptive control law was improved, and the improvement of the gain adaptation law aimed at the higher precision. Also, the stability proof was given. For the first-order system, the proportional-integral(PI) controller and positive position feedback(PPF) controller were designed to suppression the vibration. The simulation shows that the perturbation analysis and the corresponding controller design can achieve the flexible spacecraft high precision attitude control.

Key words: flexible spacecraft; perturbation method; high precision; attitude control

传统的挠性航天器建模中,所得动力学方程不仅具有非线性,而且维数高,考虑到姿态控制系统设计,因此需要化简.虽然简化后的模型具有工程应用价值,但由此带来的与原系统的误差,并没有详细的理论研究结果.为实现挠性航天器的高精度姿态控制,有必要详细研究姿态动力学模型.

国内外学者对挠性航天器姿态控制进行了大量研究.文献[1—3]直接忽略中心刚体和挠性附件耦合,单独设计姿态控制律和主动振动控制律,这对精度要求不高的系统是适用的,但由于没有真正从动力学出发,分析控制律间的关系和影响,很难实现高精度姿态控制.文献[4]总结了刚柔耦合系统动力学研究进展,文献[5]设计了组合控制律,以消除刚柔耦合,分别对刚体和柔性进行控制.文献[6—8]采用摄动法分析了挠性航天器动力学方程.文献[7]基于挠性航天器拟Lagrange方程,采用摄动法得到0阶和1阶系统,但没有全面讨论如何设计0阶和1阶系统控制器;文献[8]对机械臂动力学进行了摄动法分析,并设计了控制器.本文首先采用摄动法分析挠性航天器动力学方程,然后分别设计0阶和1阶控制系统,从而实现高精度姿态控制.直接自适应控制由于算法设计简便,广泛用于工业、航空等控制系统[9—10].文献[11]在考虑了参数不确定性、干扰和非线性

收稿日期: 2009-10-30

作者简介: 崔美瑜(1983—),女,辽宁义县人,博士生,cuimeiyuer@163.com.

时设计了非线性直接自适应控制律,仅需要开环系统为几乎严格正实,及非线性项为局部 Lipschitz 连续的.但其中的参数自适应律为积分型,且只给出了仿真算例,对于在挠性航天器中的应用没有进一步讨论.本文在此基础上,在0阶姿态控制中采用比例-积分型自适应律,以进一步提高精度[10],并给出了稳定性证明.

1 基于摄动法的姿态动力学模型

考虑挠性附件与航天器固连,同时忽略系统的平动项,则中心刚体的转动方程和挠性附件的振动方程可分别写为[12]

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}}+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{H}_{a_j}^{\circ}\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j}^{\circ}\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\omega}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}}+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\Omega}a_j}^{\circ}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{H}_{a_j}^{\circ\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}}+\boldsymbol{M}_{a_j}\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{\Omega}a_j}\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}-\boldsymbol{P}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}}-\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}}+\boldsymbol{K}_{a_j}\boldsymbol{q}_{a_j}=\boldsymbol{Q}_{a_j\boldsymbol{v}} \tag{2}$$

其中各变量及参数具体形式参见文献[12].下面采用摄动法对此动力学方程进行分析和化简.本文假设挠性振动项 $\boldsymbol{q}_{a_j}$ 及其各阶导数相对航天器0阶姿态为1阶小量.

1.1 挠性航天器转动方程

设 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}}=\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}+\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}$,则式(1)展开为

$$(\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}1})(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}+\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}1})+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}(\boldsymbol{H}_{a_j0}^{\circ}+\boldsymbol{H}_{a_j1}^{\circ})\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}(\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\circ}+\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j1}^{\circ})\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+(\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}0}+\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}1})(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}+\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1})+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}(\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\circ}+\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Omega}a_j1}^{\circ})\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}+\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1})=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}0}+\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}1} \tag{3}$$

忽略式(3)中的1阶及其以上高阶小量,整理可得0阶转动方程为

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}+\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}\mathrm{b}0}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}0} \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}\mathrm{b}0}=\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}0}+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\circ}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}$.

可以看出,0阶转动方程为非线性时不变方程,其中 $\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}\mathrm{b}0}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}$ 为非线性项,且不含振动项 $\boldsymbol{q}_{a_j}$.合理设计 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}0}$,可以实现刚体姿态控制,但本文并不能抑制挠性振动.

忽略式(3)中的2阶及其以上高阶小量,则1阶转动方程为

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}1}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{H}_{a_j0}^{\circ}\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\circ}\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}\mathrm{b}0}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}+\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}1}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\circ}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}+\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Omega}a_j1}^{\circ}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}1}$$

下面将其写成1阶转动变量 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}$ 和振动模态 $\boldsymbol{q}_{a_j}$ 为变量的函数.由于

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}=\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j2}(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})\boldsymbol{q}_{a_j}$$

$$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}\mathrm{b}1}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}=\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{\omega}1_6}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}+\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j6}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})\boldsymbol{q}_{a_j}$$

$$\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\circ}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}=\sum_{j=1}^{n}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{J}_{a_j}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}+\sum_{j=1}^{n}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\widetilde{\boldsymbol{S}}_{a_j}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Omega}a_j1}^{\circ}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}=\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j8}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})\boldsymbol{q}_{a_j}+\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{\omega}1_8}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}$$

则1阶转动方程经整理可得

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}1}+\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}\mathrm{b}1}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{H}_{a_j0}^{\circ}\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\circ}\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{q}a_j1}\boldsymbol{q}_{a_j}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}1} \tag{5}$$

由式(5)可以看出,1阶转动方程为线性时变方程,其中包括转动和振动间的耦合.合理设计 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}1}$ 不仅可以提高姿态精度,同时可以抑制挠性振动.

1.2 挠性航天器振动方程

设 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}}=\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}+\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}$,则挠性航天器振动方程为

$$(\boldsymbol{H}_{a_j0}^{\circ\mathrm{T}}+\boldsymbol{H}_{a_j1}^{\circ\mathrm{T}})\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}+\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}1})+\boldsymbol{M}_{a_j}\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2(\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}+\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{\Omega}a_j1})\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}-\boldsymbol{P}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}(\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}+\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}1})\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}+\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1})-(\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j1}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}+\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1})+\boldsymbol{K}_{a_j}\boldsymbol{q}_{a_j}=\boldsymbol{Q}_{a_j\boldsymbol{v}0}+\boldsymbol{Q}_{a_j\boldsymbol{v}1} \tag{6}$$

忽略式(6)中的1阶及其以上高阶小量,整理可得0阶振动方程为

$$\boldsymbol{H}_{a_j0}^{\circ\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}+\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}=\boldsymbol{Q}_{a_j\boldsymbol{v}0} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\mathrm{T}}=-\boldsymbol{P}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}-\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}$.

由式(7)可以看出,0阶振动方程为非线性时不变方程,其中 $\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}$ 为非线性项.尽管其中的变量不包括挠性振动,但所有系数均与挠性附件结构和参数有关.式(7)描述了挠性振动对0阶姿态的影响.若 $\boldsymbol{Q}_{a_j\boldsymbol{v}0}$ 为0,则式(3)左侧所有项都可以看作是对0阶转动方程的干扰.后面的控制系统设计中取 $\boldsymbol{Q}_{a_j\boldsymbol{v}0}=0$.

忽略式(6)中的2阶及其以上高阶小量,类似地,将其写成以 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}$ 和 $\boldsymbol{q}_{a_j}$ 为变量的函数.由于

$$\boldsymbol{H}_{a_j1}^{\circ\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}=\hat{\boldsymbol{H}}_{a_j0_da_j}^{\circ\mathrm{T}}(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})\boldsymbol{q}_{a_j}$$

$$\boldsymbol{P}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}1}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}=\boldsymbol{P}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}(\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j})\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}$$

$$\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}1}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}=$$

$$\hat{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}+\hat{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0_\mathrm{d}a_j}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})\boldsymbol{q}_{a_j}$$

则 1 阶振动方程整理后可得

$$\boldsymbol{H}_{a_j0}^{\mathrm{oT}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}1}+\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}01}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}1}+\boldsymbol{M}_{a_j}\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0}\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+\boldsymbol{H}_{\mathrm{d}a_j}\boldsymbol{q}_{a_j}=\boldsymbol{Q}_{a_j\boldsymbol{v}1}\tag{8}$$

由式(8)可以看出,1 阶振动方程为线性时变方程,其中,挠性振动和 1 阶转动是耦合的.

由上面的摄动法分析可见,0 阶系统为非线性时不变的、动态解耦的,而 1 阶系统为线性时变耦合方程. 式(5)和式(8)中各系数详细表达式为

$$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}\mathrm{b}1}=\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\omega}\mathrm{b}0}+\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{\omega}1_6}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0}^{o}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}+\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{\omega}1_8}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})$$

$$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{q}a_j1}=\sum_{j=1}^{n}\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j2}(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})+\sum_{j=1}^{n}\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j6}(\boldsymbol{\omega}_{b0})+\sum_{j=1}^{n}\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j8}(\boldsymbol{\omega}_{b0})$$

$$\boldsymbol{H}_{a_j0}^{\mathrm{oT}}=\boldsymbol{P}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{H}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}$$

$$\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}01}^{\mathrm{T}}=-(\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}+\hat{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}+\boldsymbol{P}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}+\boldsymbol{P}_{a_j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}$$

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{d}a_j}=\hat{\boldsymbol{H}}_{a_j0_\mathrm{d}a_j}^{\mathrm{oT}}-\hat{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0_\mathrm{d}a_j}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{K}_{a_j}$$

$$\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j2}(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})=\sum_{j=1}^{n}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\widetilde{\dot{\boldsymbol{\omega}}}_{\mathrm{b}0}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{P}_{a_j}+\sum_{j=1}^{n}(\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})^{\times}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{P}_{a_j}-\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\int_{a_j}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{a_j}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})^{\times}\boldsymbol{N}_{a_j}\mathrm{d}m+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\int_{a_j}(\widetilde{\boldsymbol{r}}_{a_j}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})^{\times}\boldsymbol{N}_{a_j}\mathrm{d}m$$

$$\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j6}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})=\sum_{j=1}^{n}(\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{P}_{a_j}$$

$$\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{\omega}1_6}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})=-(\boldsymbol{J}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{m}_{a_j}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{m}_{a_j}^{\mathrm{T}}(\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}+\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\widetilde{\boldsymbol{S}}_{a_j}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}(\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}$$

$$\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{\omega}1_8}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})=-(\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{J}_{a_j}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}-\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\widetilde{\boldsymbol{S}}_{a_j}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}$$

$$\hat{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{q}a_j8}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})=\widetilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{b}a_j}^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}^{\mathrm{T}}\int_{a_j}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\boldsymbol{N}_{a_j}\mathrm{d}m+\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\int_{a_j}\widetilde{\boldsymbol{r}}_{a_j}(\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}\boldsymbol{N}_{a_j}\mathrm{d}m+\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}\boldsymbol{A}_{\mathrm{b}a_j}\int_{a_j}(\widetilde{\boldsymbol{r}}_{a_j}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}\boldsymbol{N}_{a_j}\mathrm{d}m$$

$$\hat{\boldsymbol{H}}_{a_j0_\mathrm{d}a_j}^{\mathrm{oT}}(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})=\int_{a_j}\boldsymbol{N}_{a_j}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})^{\times}\boldsymbol{N}_{a_j}\mathrm{d}m$$

$$\hat{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})=-\int_{a_j}\boldsymbol{N}_{a_j}^{\mathrm{T}}(\widetilde{\boldsymbol{r}}_{a_j}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})^{\times}\mathrm{d}m$$

$$\hat{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0_\mathrm{d}a_j}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0})=\int_{a_j}\boldsymbol{N}_{a_j}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})^{\times\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0})^{\times}\boldsymbol{N}_{a_j}\mathrm{d}m$$

2　控制系统设计

本文的控制系统设计包括两部分. 首先对 0 阶转动系统设计非线性直接自适应控制器,本文取 $\boldsymbol{Q}_{a_j\boldsymbol{v}0}=0$,则式(7)左侧项为 0 阶转动系统所受的干扰. 然后对 1 阶系统分别设计 PI(Proportional-Integral)控制器和 PPF(Positive Position Feedback)控制器,以抑制挠性振动,实现高精度姿态控制. 控制系统简图如图 1 所示.

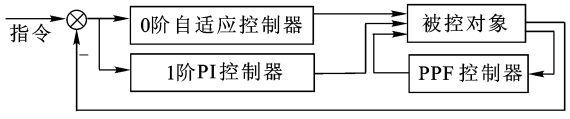


图 1　控制系统简图

2.1　0 阶控制系统设计

对于式(4),取 $\boldsymbol{x}_0=[\boldsymbol{\omega}_0\quad\dot{\boldsymbol{\omega}}_0]^{\mathrm{T}}$,所以

$$\dot{\boldsymbol{x}}_0=\boldsymbol{A}_0\boldsymbol{x}_0+\boldsymbol{B}_0\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}0}+\boldsymbol{g}_0(\boldsymbol{x}_0)+\boldsymbol{u}_{\mathrm{D}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}&\boldsymbol{I}\\\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}\end{bmatrix}\boldsymbol{x}_0+\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}^{-1}\end{bmatrix}\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}0}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}\\-\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}^{-1}[\boldsymbol{J}_{\omega\mathrm{b}0}]\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}\end{bmatrix}+\boldsymbol{u}_{\mathrm{D}}\tag{9}$$

由式(7)得,式(9)所受外部干扰为

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{D}}=\boldsymbol{H}_{a_j0}^{\mathrm{o}\,\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{a_j\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}0}+[\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\Omega}_{a_j}0}^{\mathrm{T}}]\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{b}0}\tag{10}$$

假设它是有界的,可写作[11] $\boldsymbol{u}_{\mathrm{D}}=\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{z}_{\mathrm{d}}$,$\boldsymbol{z}_{\mathrm{d}}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}$. 式中,$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}$ 是由已知基函数组成的向量,$\boldsymbol{\Theta}$ 和 $\boldsymbol{L}$ 由于过于复杂,篇幅所限,详见文献[12].

为简洁起见,后面将下标 0 省略. 其中,非线性项 $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})$ 满足局部 Lipschitz 连续条件[11].

参考模型和理想轨迹选取参见文献[9]. 设 $\boldsymbol{u}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{br}0}$,选取如下自适应控制律:

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{u}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{e}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{y}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}$$

令

$$\boldsymbol{\eta}=[\boldsymbol{x}_{\mathrm{m}}\quad\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}\quad\boldsymbol{e}_{\mathrm{y}}\quad\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{G}=[\boldsymbol{G}_{\mathrm{m}}\quad\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{u}}\quad\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{e}}\quad\boldsymbol{G}_{\mathrm{d}}]$$

参数自适应律取为

$$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{I}}=-\boldsymbol{e}_{\mathrm{y}}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{e}_{\mathrm{y}}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}$$

则

$$\dot{\boldsymbol{e}}=\dot{\boldsymbol{x}}-\dot{\boldsymbol{x}}_{*}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{e}+\boldsymbol{B}[\boldsymbol{G}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{\eta}-\boldsymbol{C}\boldsymbol{e}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{\eta}-\boldsymbol{S}_{21}^{*}\boldsymbol{x}_{\mathrm{m}}-\boldsymbol{S}_{22}^{*}\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}-\boldsymbol{S}_{23}^{*}\boldsymbol{L}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}]+\Delta\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})$$

根据 Lyapunov 稳定性定理,取

$$V_1=\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{e}$$

$$V_2=\mathrm{tr}[\boldsymbol{S}(\boldsymbol{G}_{\mathrm{I}}-\boldsymbol{G})\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}^{-1}(\boldsymbol{G}_{I}-\boldsymbol{G})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}]$$

其中 $\boldsymbol{S}$ 为非奇异矩阵,又由于

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{G}}\boldsymbol{\eta}=\widetilde{\boldsymbol{G}}_e\boldsymbol{C}\boldsymbol{e}+\widetilde{\boldsymbol{G}}_x\boldsymbol{x}_{\mathrm{m}}+\widetilde{\boldsymbol{G}}_u\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}$$

$$\|\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_1)-\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_2)\|\leqslant\mu(r)\|\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2\|^{[11]}$$

取 $\widetilde{\boldsymbol{G}}_x=\boldsymbol{S}_{21}^*$，$\widetilde{\boldsymbol{G}}_u=\boldsymbol{S}_{22}^*$，$\widetilde{\boldsymbol{G}}_{\mathrm{d}}=\boldsymbol{S}_{23}^*\boldsymbol{L}$，则

$$\dot{V}_1+\dot{V}_2=\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P})\boldsymbol{e}-$$

$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{C}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P})\boldsymbol{e}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{\eta}+2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{G}_1\boldsymbol{\eta}-$$

$$2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{G}_1-\widetilde{\boldsymbol{G}})\boldsymbol{\eta}-2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}(\boldsymbol{S}_{21}^*\boldsymbol{x}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{S}_{22}^*\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}+$$

$$\boldsymbol{S}_{23}^*\boldsymbol{L}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}})+\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\Delta\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})+\Delta\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{P}\boldsymbol{e}\leqslant$$

$$-\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e}+2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\mu(r)\boldsymbol{e}-2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}(\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{e}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{\eta}$$

式中，$\boldsymbol{P}$ 为 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_{\mathrm{c}}=-\boldsymbol{Q}<0$，$\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}$ 的解.

由于 $q_{\min}\|\boldsymbol{e}\|^2\leqslant\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e}\leqslant q_{\max}\|\boldsymbol{e}\|^2$，$\mu(r)p_{\min}\|\boldsymbol{e}\|^2\leqslant\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\mu(r)\boldsymbol{e}\leqslant\mu(r)p_{\max}\|\boldsymbol{e}\|^2$，所以 $\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e}+2\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\mu(r)\boldsymbol{e}\leqslant(-q_{\min}+2\mu(r)p_{\max})\|\boldsymbol{e}\|^2$ 只需选择 $\boldsymbol{P}$，$\boldsymbol{Q}$，使其满足：

$$-q_{\min}+2\mu(r)p_{\max}<0 \tag{11}$$

即可. 当 $r\to0$ 时，$\mu(r)\to0$，所以式(11)成立，所以 $\dot{V}_1+\dot{V}_2\leqslant0$. 根据 Barbalat 引理，当 $t\to\infty$ 时，$\boldsymbol{e}_*\to0$ 和 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{y}}\to0$[11].

2.2 1阶控制系统设计

由于本文1阶转动控制中的输入由中心刚体上的执行机构提供，因此将挠性振动作为外部干扰处理. 类似地，由于1阶振动控制中的输入由分布式作动器提供，因此将刚体1阶转动项作为振动的外部干扰，则式(5)和式(8)进一步简化为

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{b}1}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}1}+\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}1\mathrm{d}} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{M}_{a_j}\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{\Omega}a_j0}\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+\boldsymbol{H}_{\mathrm{d}a_j}\boldsymbol{q}_{a_j}=\boldsymbol{Q}_{a_jv_1}+\boldsymbol{Q}_{a_jv1\mathrm{d}} \tag{13}$$

由于 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}1}$ 采用通常的 PI 控制，即 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{br}1}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{\omega}_1+\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}}\int\boldsymbol{\omega}_1\mathrm{d}t$，篇幅所限，本文不再赘述.

为抑制挠性振动，$\boldsymbol{Q}_{a_jv1}$ 采用 PPF 控制. 暂不考虑外部扰动，将式(13)进行归一化处理，得

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+2\boldsymbol{\zeta}\boldsymbol{\omega}\dot{\boldsymbol{q}}_{a_j}+\boldsymbol{\omega}^2\boldsymbol{q}_{a_j}=\boldsymbol{g}\boldsymbol{\omega}^2\boldsymbol{\eta} \tag{14}$$

PPF 控制器为

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}+2\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}\dot{\boldsymbol{\eta}}+\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}^2\boldsymbol{\eta}=\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{f}}^2\boldsymbol{q}_{a_j} \tag{15}$$

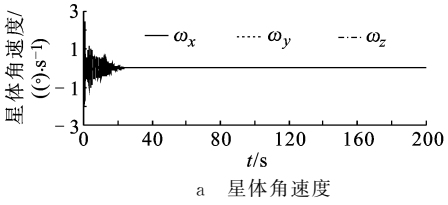
相关参数说明参见文献[13].

3 仿真结果及分析

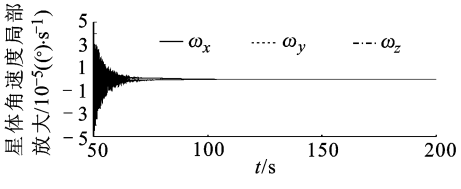
仿真中，被控对象采用式(3)和式(6)所示的挠性航天器动力学模型，0阶动力学对应转动惯量 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}=\begin{bmatrix}7\,383&0&-158\\0&12\,345&0\\303&0&9\,292\end{bmatrix}\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2$，参考模型转动惯量 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0_\mathrm{m}}=0.01\times\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}0}$，挠性附件与中心体耦合系数矩阵：

$$\begin{bmatrix}-3.7712\times10^{-11}&1.0950\times10^{-3}&-4.6131\times10^{1}\\5.0458\times10^{1}&-2.7599\times10^{-9}&-2.2055\times10^{-6}\\-1.005\times10^{-9}&-1.8269\times10^{1}&-5.7306\times10^{-3}\\2.9841\times10^{-1}&6.3840\times10^{-3}&-7.7946\times10^{0}\\-6.5581\times10^{-11}&1.5661\times10^{-3}&-5.8870\times10^{-1}\\2.6646\times10^{-11}&-1.5766\times10^{-3}&2.8075\times10^{0}\\-1.1404\times10^{-11}&-1.1247\times10^{0}&-5.2410\times10^{-4}\\-2.9859\times10^{-12}&8.7868\times10^{-5}&-3.8398\times10^{-1}\\1.2233\times10^{-11}&1.9697\times10^{0}&1.0022\times10^{-3}\\6.2230\times10^{-9}&7.8456\times10^{-1}&7.9902\times10^{-4}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

本文选取前10阶振动模态，其阻尼比为0，频率为：diag{0.5387 1.5271 2.3532 2.5661 5.4499 8.4578 9.8074 15.2876 17.9994 23.5783}. 航天器初始姿态角为[1.89 0.72 −0.80]°，初始姿态角速度为[0 0 0](°)/s；期望姿态角为[2 1 −1]°. 仿真结果如图2～图5所示.



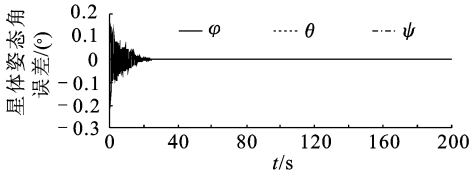
a 星体角速度



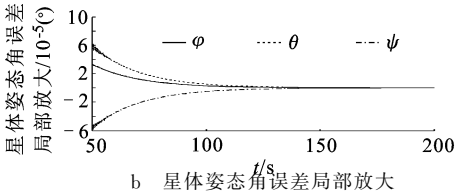
b 星体角速度局部放大

图2 星体角速度及其局部放大

由仿真结果可以看出，大约50 s后，姿态稳定度达到 10^{-5} (°)/s 量级，姿态控制精度达到 $(10^{-5})^\circ$ 量级. 同时，由于采用了1阶PI控制器和PPF控制器，有效抑制了挠性附件的振动，基本消除了它对航天器控制精度和稳定度的影响.



a　星体姿态角误差



b　星体姿态角误差局部放大

图 3　星体姿态角误差及其局部放大

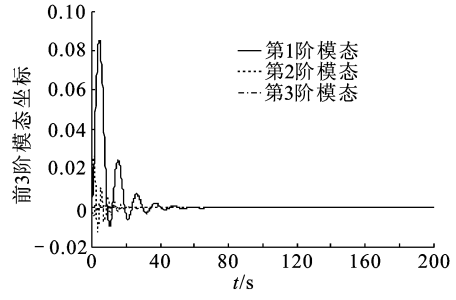
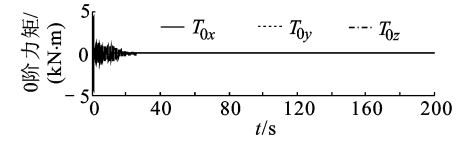
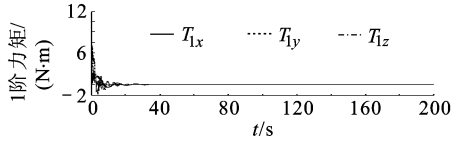


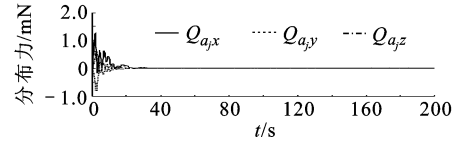
图 4　前 3 阶模态坐标



a　0 阶力矩



b　1 阶力矩



c　分布力

图 5　指令力矩和指令力

4　结　论

本文采用摄动法分析挠性航天器的动力学方程,得到了 0 阶时不变非线性方程和 1 阶时变线性方程,并基于此设计了高精度姿态控制系统. 针对 0 阶系统,同时考虑到转动惯量不确定性,干扰及非线性项,采用非线性直接自适应控制器实现姿态控制,其中,对原有自适应参数调节律进行了改进,以进一步提高控制精度;针对 1 阶系统,分别设计了 PI 控制器和 PPF 控制器,以实现主动振动抑制,从而实现高精度姿态控制. 仿真结果表明,设计的控制系统可有效抑制挠性振动.

参考文献(References)

[1] Hu Qinglei. A composite control scheme for attitude maneuvering and elastic mode stabilization of flexible spacecraft with measurable output feedback[J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(2/3): 81－91

[2] Singh S N, de Araujo A D. Adaptive control and stabilization of elastic spacecraft[R]. AIAA-97-3747, 1997

[3] Hu Qinglei. Input shaping and variable structure control for simultaneous precision positioning and vibration reduction of flexible spacecraft with saturation compensation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 318: 18－35

[4] 洪嘉振,尤超蓝. 刚柔耦合系统动力学研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2004, 2(2): 1－6
Hong Jiazhen, You Chaolan. Advances in dynamics of rigid-flexible coupling system[J]. Journal of Dynamics and Control, 2004, 2(2): 1－6(in Chinese)

[5] 张国庆,王永,梁青. 一类动量交换刚柔耦合系统的自学习组合控制[J]. 自动化学报, 2008, 34(4): 500－504
Zhang Guoqing, Wang Yong, Liang Qing. Self-learning assembling control of a class of momentum exchange rigid-flexible coupling systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(4): 500－504(in Chinese)

[6] Meirovitch L, Kwakf M K. Control of flexible spacecraft with time-varying configuration[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1992, 15(2): 314－324

[7] Meirovitch L. State equations for maneuvering and control of flexible bodies using quasimomenta [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1993, 16(5): 882－891

[8] Meirovitch L, Chen Y. Trajectory and control optimization for flexible space robots[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18(3): 493－502

[9] Kaufman H, Bar-Kana I, Sobel K. Direct adaptive control algorithms: theory and applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1994: 1－75

[10] 刘小雄,章卫国,武燕,等. 直接自适应鲁棒飞行控制技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(3): 341－345
Liu Xiaoxiong, Zhang Weiguo, Wu Yan, et al. A different design of robust flight control system based on direct adaptive control [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(3): 341－345(in Chinese)

[11] Balas M J, Seth A H, Mehiel E. Nonlinear adaptive control with persistent disturbances[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii: AIAA, 2008

[12] 张军. 含控制力矩陀螺的航天器姿能量/姿态一体化控制系统研究[D]. 北京:北京航空航天大学宇航学院, 2007
Zhang Jun. Study on integrated power/attitude control system of spacecraft with control moment gyros[D]. Beijing: School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)

[13] Fanson J L, Caughey T K. Positive position feedback control for large space structures[R]. AIAA 87-0902, 1987

(编　辑:刘　晔)