

文章编号:1001 - 2486(2003)05 - 0006 - 03

大挠性太阳能帆板航天器的姿态控制*

刘新建,雷勇军,唐乾刚

(国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:提出了一种简单有效的抑制太阳能帆板变形振动的 PDA 控制方法。其特点主要是在航天工程中常用 PD 方法的基础上,增加了航天器的刚性姿态加速度反馈,该方法经数值仿真和不同的实验系统证明,对大挠性航天器在姿态机动和位置保持控制时是一种简单可行的振动抑制策略,在大挠性航天器变轨和交会对接工程中具有参考价值。

关键词:大挠性航天器;姿态控制;振动抑制

中图分类号:TP13 **文献标识码:**A

The Attitude Control of Spacecraft with Large Flexible Solar Array

LIU Xin-jian, LEI Yong-jun, TANG Qian-gang

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A simple and efficient method PDA is put forward, which can suppress deformation vibration of the solar battery array. The attitude rigid acceleration feedback is combined with the classic PD method used usually in the aerospace engineering. The method has been demonstrated to be efficient in suppression of vibration for the attitude maneuver and keeping by virtue of numerical simulation and experiment. Certain applications may be made to the rendezvous and dock engineering or orbital manoeuvre.

Key words: flexible spacecraft; attitude control; vibration suppression

在航天器(如大型遥感卫星,空间站)的姿态机动速度超过某一范围或者大型挠性太阳能帆板受到外界强干扰特别是冲击干扰(如航天器变轨时火箭发动机的推力偏心,交会对接时可能的碰撞,流星雨)时,挠性太阳能帆板的振动对航天器的姿态有强烈的干扰(图 1),甚至造成不稳定,这与帆板刚性时的情况不同。因为刚性情况只要控制姿态,而挠性情况既要控制姿态又要抑制振动。

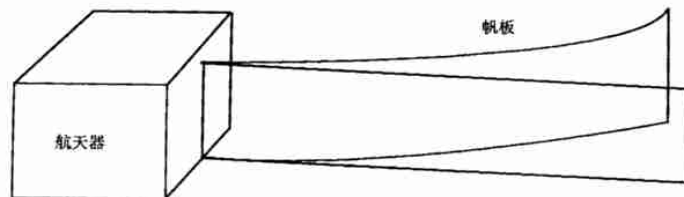


图 1 挠性航天器

Fig. 1 Flexible satellite

本文提出的 PDA 控制方法,已在文献[1]和[2]中详细分析了其抑振机理。其对航天器的姿态具有稳定效果,对帆板的大变形残余振动具有抑制效果。姿态角加速度反馈减小了航天器非最小相位系统的延迟,增加了系统的频宽。

* 收稿日期:2003 - 06 - 08

基金项目:国家 863 高技术资助项目(863 - 2)

作者简介:刘新建(1966 -),男,副教授,博士。

1 姿态加速度反馈抑振机理的频域分析

比例加微分反馈是控制刚体姿态转动的典型方式,也是镇定挠性模态振荡的基本措施。如果直接采用速率陀螺,其带宽远大于模态频率。测量姿态速率,可得纯超前环节 $as + 1$,此零点 $(-\frac{1}{a}, 0)$ 将全部模态极点的闭路根轨迹拉入左半平面,控制回路全模态全局稳定。但是,对于带有大型挠性帆板的超低频航天器,PD 控制的带宽不得不设计得很窄,以避免共振或发生较强烈的振荡,由此会使得控制响应非常缓慢。为加快超低频挠性系统的响应速度,角加速度反馈可以提高响应速度,较快抑制残余振荡。

这里仅从频域简要分析其加速度反馈抑制振动,改善稳定性的原因,在文献[1]中从时域进行了详尽的分析。假定航天器的单通道姿态控制作为一个二阶系统工作在相对较低的一个频域范围,其期望的闭环频率和阻尼比分别是 ω_c 和 ζ_c ,用一个截止频率是 ω_f 的 n 阶低通滤波器消除航天器的高频振动,用加速度反馈 $K_a > 0$,消除响应延迟并改善系统的频宽,见图 2 和图 3。

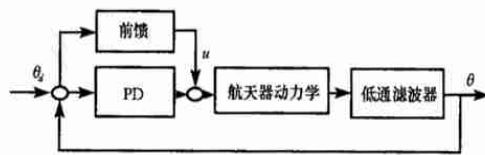


图 2 航天器 PD 姿态控制框图
Fig. 2 The attitude control of satellite with PD method

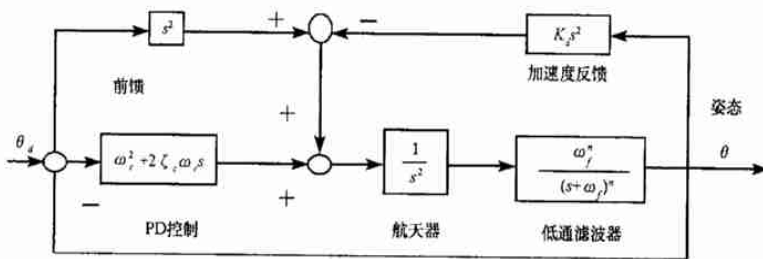


图 3 航天器 PDA 姿态控制框图

Fig. 3 The attitude control of satellite with PDA method

若取 $n = 2$,那么系统的传递函数可写为

$$G(s) = \frac{(s^2 + 2\zeta_c\omega_c + \omega_c^2) \omega_f^2}{s^4 + 2\zeta_c\omega_c s^3 + \omega_c^2(1 + K_a)s^2 + 2\zeta_c\omega_c\omega_f^2 s + \omega_c^2\omega_f^2} \quad (1)$$

根据 Routh-Hurwitz 稳定性判据,其稳定性条件是

$$(1 + K_a) \frac{\omega_c}{1 + \frac{\omega_c^2}{\omega_f^2}} > \frac{\omega_c}{\omega_f} \quad (2)$$

如果是临界阻尼,则稳定性条件简化为

$$(1 + K_a) > 2 \frac{\omega_c}{\omega_f} \quad (3)$$

明显可以看出,引进加速度反馈 K_a ,增加了频宽,使稳定性条件式(2)或式(3)变得更加容易满足,尤其是当闭环系统的频率接近滤波器的截止频率,可以使残余振动快速衰减。

2 PD 与 PDA 控制的实验比较

图 4 是航天器姿态挠性控制实验系统,由两舱段和两块帆板模拟而成,系统的一阶频率为 0.45Hz,可较好地模拟帆板的低频



图 4 航天器姿态挠性控制实验系统
Fig. 4 The Flexible experimental setup of satellite attitude control

弯曲振动与航天器芯体姿态的耦合运动。

控制实验包括 PD 与 PDA 在姿态阶跃响应下和原定位置强冲击干扰下姿态的变化过程,冲击位置在帆板轴线的中点。为了说明不是实验系统的摩擦阻尼给 PDA 起了强烈的帮助作用,特意加快了姿态速度,即加大了位置反馈增益 K_p ,并且二者的速度增益和位置增益 K_d 、 K_p 分别取相同数值,以下实验均满足非线性几何大变形条件^[6]。实验结果记录如图 5 ~ 8:

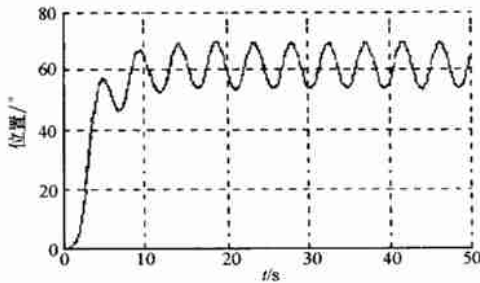


图 5 PD 控制 60°阶跃响应
Fig. 5 The step response of 60°with PD

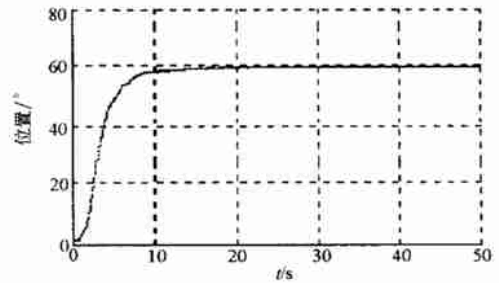


图 6 PDA 控制 60°阶跃响应
Fig. 6 The step response of 60°with PDA

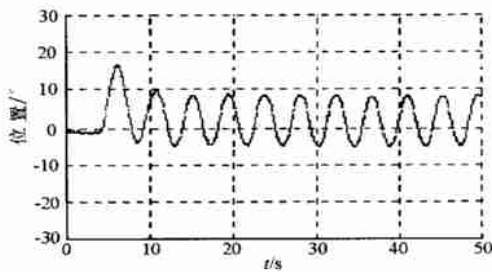


图 7 PD 控制的原点随机冲击响应
Fig. 7 The impact response of zero position with PD

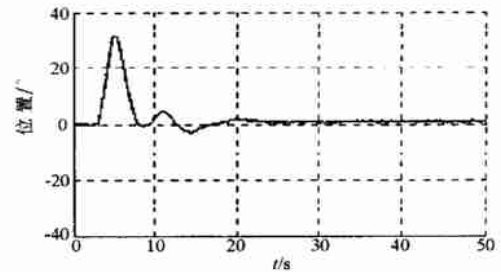


图 8 PDA 控制的原点随机冲击响应
Fig. 8 The impact response of zero position with PDA

图 5 为 PD 控制的 60°阶跃姿态响应,图 6 为 PDA 控制的 60°阶跃响应;图 7 为 PD 控制的原定位置随机冲击响应,图 8 为 PDA 控制的原定位置随机冲击位置响应。

在另一旋转挠性梁控制实验系统上,也得到了完全相同的实验结果。旋转梁的尺寸为 1000mm × 80mm × 1mm,且梁的前端有 50g 的加速度传感器作为集中质量块,该系统的频率 0.3Hz,而转动刚体的质量仅是微力矩电机。

3 结论

对于低频挠性系统,无论是阶跃响应还是原定冲击响应,PDA 控制使帆板的大变形振动被很快衰减和抑制;与经典 PD 控制器结合,可以成为此类挠性控制系统中的一种有效方法。

参考文献:

- [1] 刘新建. 挠性机械手的动力学特性与控制研究[D]. 国防科技大学博士学位论文,1998.
- [2] 刘新建. 空间站大型结构的振动控制研究——刚柔耦合控制篇[R]. 863 技术报告,2000.
- [3] Daniel J Inman. Modeling and Control of Intelligent Flexible Structures[R]. Aeros. TR. 94 0353,1994.
- [4] Khorrani, Jain. Nonlinear Control with End-point Acceleration Feedback for Two-link Flexible Manipulator[J]. J. of Robotic System, 10(4): 505 - 530,1993.
- [5] Singer, Seering. Preshaping Command Inputs to Reduced System Vibration[J]. Dynamic System, Mea. And Control, 1988.
- [6] 成林. 大型帆板的几何非线性振动研究[D]. 国防科技大学硕士学位论文,2000.