

# 卫星天线定向复合控制全物理仿真系统 误差模型及分析

贾 杰, 周凤岐, 周 军

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

**摘 要:** 为了提高卫星天线定向全物理仿真精度, 从力学的角度研究了卫星天线定向复合控制全物理仿真系统试验时影响天线指向与定点控制精度的几个不理想因素。对系统的误差进行了分析和研究, 得出了其误差模型, 在此基础上设计了自适应控制律并对其进行了稳定性证明。最后对该系统进行了仿真和测试, 并给出了结果。结果表明该系统可以满足高精度天线定向复合控制要求。为进一步提高卫星天线定向复合控制全物理仿真精度奠定了基础。

**关键词:** 全物理仿真; 误差模型; 稳定性; 复合控制

**中图分类号:** V448.25<sup>+</sup>.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1328(2006)01-0126-04

## 0 引言

一般像数据中继卫星和配备高性能传感器的观测卫星都安装了大型、可动式卫星间通讯用的天线。当驱动这些天线时会对卫星本体产生干扰力矩, 反过来卫星本体也会影响天线的指向与定点控制精度, 所以必须消除这些干扰<sup>[1]</sup>。为了验证这种星体姿态与天线间相互耦合的非线性动力学特性, 我们在惯性结构卫星控制系统全物理仿真的单轴气浮台的基础上, 独立开发、研制了一套天线模拟系统以支持在多体力学环境下测试真实天线框架驱动系统和复合控制系统的性能<sup>[2]</sup>。

本文以“卫星天线指向复合控制全物理仿真系统”的研制为背景, 主要研究了影响天线指向与定点控制精度及其与台体相互影响的几个不理想因素, 并对模拟天线系统的误差进行了分析和研究并经过该系统的整体测试表明: 系统的指向精度能够达到 $\pm 0.5^\circ$ , 各项指标均满足工程技术要求。并且该系统的研制在国内也处于领先水平。

## 1 模拟天线的技术途径

此套具有大型天线的多体卫星复合控制全物理仿真系统实物(图见文献<sup>[2]</sup>)。其中, 天线悬臂梁固定安装在气浮台的侧面上, 其上安装大型天线, 为了更

真实地体现卫星工程思想, 设计的天线可以在悬臂梁上左右滑动, 距离气浮台转轴有 350 ~ 1650mm 不等(可以模拟台体和天线的不同惯量)。

根据我们的试验测试, 此系统可以用来很好地模拟卫星的定姿和天线的定、指向控制, 但考虑到原系统添加天线后, 气浮台整体质心要偏离, 如不校正, 在仿真时, 随着气浮台的旋转, 系统将有额外的长周期螺旋力矩开销, 将对试验结果产生不良的影响。为此, 我们通过计算对气浮台进行了重量配置, 对质心偏移进行了校正。另外, 本文也研究了这一现象对天线定点控制精度的影响。

## 2 天线回转运动常值误差模型分析

由于天线模拟系统的指向精度要求较高, 系统必须有较高的同轴度和回转精度。同时, 又由于采用的是垂直支撑, 顶部会因为轴承游隙和转轴扭角引起转轴顶端跳动而产生传动轴摆动, 从而造成天线系统指向、定向误差的形成。为此, 采用支撑刚度大的推力密珠轴承较为合适。它既可以均化深珠运动提高轴系的回转精度, 也可以发挥其低速性能好、支撑精度和运动精度高的优点<sup>[2]</sup>。

由赫兹接触理论可知<sup>[3]</sup>, 在载荷的作用下球轴承区域表面压力符合半椭圆分布。密珠轴承相当于点接触轴承, 由于内外圈滚道是圆柱面, 所以接触区

域表面压力仍符合椭圆分布。为确保实现该模拟天线的跟踪精度要求,特在此处对其进行了误差分析。

由于存在径向游隙  $G_r$ , 轴承的内外轴套将产生相对倾斜的角度游隙  $\Delta_1$ ,  $\Delta_1$  等于内圈与外圈的相

对倾斜角之和<sup>[3,4]</sup>:

$$\Delta_1 = \delta_i + \delta_o \quad (1.1)$$

$\delta_i, \delta_o$  的计算公式如下:

$$\cos \delta_i = 1 - \frac{\left( \frac{1}{2}(2f_i - 1)D_o \right)^2 - \left\{ \frac{D_{pr}}{2} - \frac{1}{2} \left[ D_{pr} + (2f_i - 1)D_o - \frac{G_r}{2} \right] \right\}^2}{2 \left( \frac{D_{pr}}{2} \right) \left\{ \frac{1}{2} \left[ D_{pr} + (2f_i - 1)D_o - \frac{G_r}{2} \right] \right\}} \quad (1.2)$$

$$\cos \delta_o = 1 - \frac{G_r \left[ (2f_o - 1)D_o - \frac{G_r}{4} \right]}{2D_{pr} \left[ D_{pr} - (2f_o - 1)D_o + \frac{G_r}{2} \right]} \quad (1.3)$$

其中,球径  $D_o = 5.5 \text{ mm}$ ; 钢球节圆直径  $D_{pr} = 5D_o = 27.5 \text{ mm}$ ;  $G_r = 0.013 \text{ mm}$ ; 内圈沟道曲率半径与球径之比  $f_i = 0.515$ ; 外圈沟道曲率半径与球径之比  $f_o = 0.525$ ; 代入式(1.1)、(1.2)和(1.3)计算可得:  $\Delta_1 = \delta_i + \delta_o = 44.784^\circ + 34.308^\circ = 79.092^\circ$ 。

另外,考虑轴承的其他不理想因素所造成的误差分别如下:

(1) 轴承的有效直径  $D = 8 \text{ mm}$ , 滚道基体的端跳动为  $\delta_1 = 0.002 \text{ mm}$ , 则由此造成的方位轴最大摆动误差为:  $\Delta_1 = \arctg \frac{\delta_1}{D} = 5.685^\circ$ 。

(2) 滚道端跳动为  $\delta_2 = 0.002 \text{ mm}$ , 由此造成方位轴的最大摆动误差为:  $\Delta_2 = \arctg \frac{\delta_2}{D} = 5.685^\circ$ 。

(3) 钢球的直径误差为  $\delta_3 = 0.002 \text{ mm}$ , 由此造成方位轴的最大摆动误差为:  $\Delta_3 = \arctg \frac{\delta_3}{D} = 5.685^\circ$ 。

由以上四个因素引起的总的天线指向低头误差为:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \Delta_i^2} = 79.70^\circ \quad (1.4)$$

由于该轴承是由步进电机直接驱动的,所产生的水平转角误差主要是轴的扭角误差。经计算由此引起的轴系水平转角误差为  $\Delta_4 = 0.5^\circ \ll \Delta$ , 所以可以忽略。

若天线转轴中心到目标的距离为  $L = 2 \text{ m}$ , 天线转轴中心到台体转轴的距离为  $l = 0.65 \text{ m}$ , 那么,天线指向将产生低头线性偏移误差:  $e_1 = (L - l) \times \tan(\Delta + \delta)$ ,  $\delta$  为台体转轴相对铅直轴的偏角; 天线的水平线性偏移误差:  $e_2 = (L - l) \times \tan \Delta_1$ 。

### 3 天线横向与定向长周期运动误差模型分析

事实上,台体在经过配平后,仍然有一个小角度的倾斜<sup>[5]</sup>。这样就有一个小的重力矩作用在台体上,即便是很小的重力矩也会通过导致台体姿态低频周期漂移而影响长周期动力学,这个影响在短时期内是不明显的,但在长周期时间内,就变的明显起来。当然,这也有其他不理想因素的影响。下面我们主要研究重力矩的影响。

由前面可知台体转轴相对铅直轴的偏角为  $\delta$ 。为了获得气浮台主要动力学性质,设重心与气浮台的轴心间的距离为  $r$ ,当气浮台转过一定角度  $\theta$  时,那么,气浮台所受重力矩为:

$$M_g = -mgr \sin \delta \sin \theta \quad (1.5)$$

其中,  $m$  是台体的质量,  $g$  是实验室重力加速度,假设  $r$  在转动过程中是不变的。由于台体稳定当时可固化  $\delta$ , 由式(1.5)可知,  $\theta$  变化量  $\Delta_\theta$  为:

$$\Delta_\theta = -\Delta M_g / mgr \delta \quad (1.6)$$

其中,  $\Delta M_g$  为重力矩的变化量。以天线定点控制为例,引起天线总的水平线误差:  $l \times \Delta_\theta + \Delta_1(L - l) \approx l \times \Delta_\theta$ ; 相应总的水平回转误差:

$$\Delta_\theta = \Delta_\theta \times \frac{l}{L - l} = -\frac{\Delta M_g l}{mgr(L - l)} \frac{1}{\delta} \quad (1.7)$$

令  $\varepsilon = \frac{\Delta M_g l}{mgr(L - l)}$ ,  $\beta = \frac{1}{\delta}$ 。所以天线水平回转误差所产生的干扰角动量为:  $I_a \varepsilon \beta$ ,  $I_a$  为天线转动惯量。

### 4 异点检测

以天线水平回转误差为例,采用上述的误差模型,设计一套基于参数估计的天线定点自适应控制器。根据刚体角动量定理可得天线的动力学方程如下:

$$J_a \ddot{\alpha} + C\dot{\alpha} + u_c = 0 \quad (1.8)$$

其中  $C = I_a \dot{\alpha}$ ;  $\dot{\alpha}$  为天线转动角速度;  $u_c$  为控制输入。从  $C\dot{\alpha}$  的形式就可清楚, 它仅由与台体角速度、天线、卫星质心位置有关的项组成, 可以和与此之外的固定参数分离。  $C\dot{\alpha}$  可用下式表示:

$$C\dot{\alpha} = C\dot{\xi} \quad (1.9)$$

其中,  $\xi$  是与台体角速度等相依存的量, 虽不能彻底弄清  $\xi$  的精确值, 但可看作是一常量。令  $\xi$  的估计值为  $\hat{\xi}$ , 考虑下面的控制律:

$$u_c = -C\hat{\xi} + K_p \alpha + K_i \lambda \quad (1.10)$$

$$\lambda = \int \alpha dt$$

其中  $K_p, K_i$  为控制增益。在此基础上加以参数估算率:

$$\dot{\hat{\xi}} = -P C^T \alpha \quad (1.11)$$

其中  $P$  为正定对称的估算增益矩阵。

构造下面的 Lyapunov 函数可以证明该控制律的稳定性:

$$V = \frac{1}{2} \{ J_a \alpha^2 + K_i \lambda^2 + P^{-1} (\xi - \hat{\xi})^2 \} \geq 0 \quad (1.12)$$

对式(1.12)求导, 并代入(1.10)、(1.11)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (J_a \ddot{\alpha} + K_i \lambda) \alpha + P^{-1} (\xi - \hat{\xi}) (\dot{\xi} - \dot{\hat{\xi}}) \\ &= -K_p \alpha^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (1.13)$$

因此, 只要  $K_p > 0$ , 由 Lyapunov 稳定性定理可知该控制律是稳定的。

## 5 系统测试结果分析与评价

为了验证本文方法的有效性, 本文以台体机动  $30^\circ = 0.524 \text{ rad}$  时, 天线定点控制为例进行了数值仿真, 结果见图 1-6。同时也进行了天线加速度指

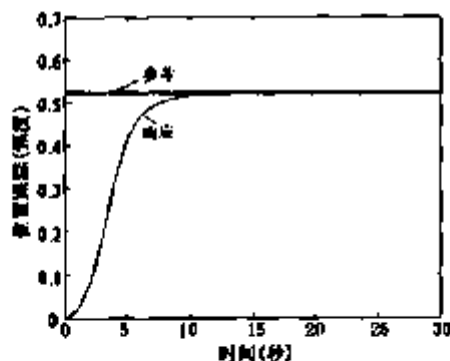


图1 天线指令跟踪时台体的  $30^\circ(0.524)$  机动曲线图

Fig.1 The position tracking of platform

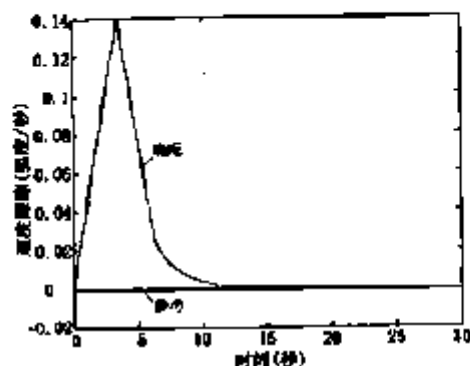


图2 天线指令跟踪时台体的速度跟踪曲线图

Fig.2 The speed tracking of platform

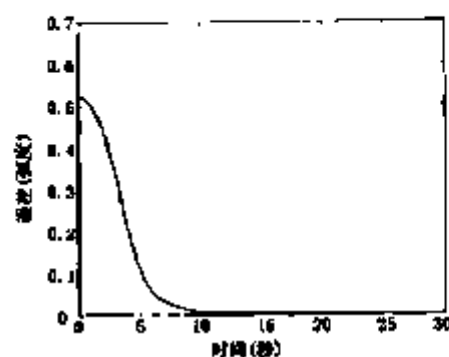


图3 天线指令跟踪时台体的误差曲线图

Fig.3 The error of platform

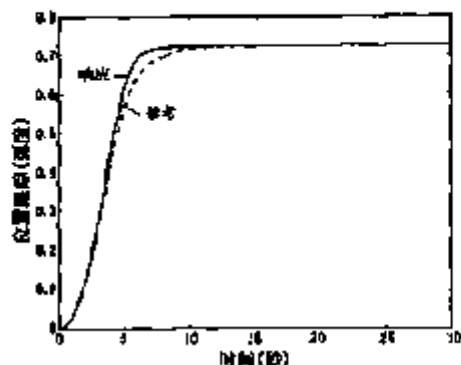


图4 台体机动时天线的位置跟踪曲线图

Fig.4 The position tracking of antenna

令跟踪测试, 试验的误差响应曲线图见图 7。图 1-3 为: 天线定点控制干扰下, 台体的  $30^\circ$  机动位置跟踪、速度跟踪及其误差曲线图; 图 4-6 为: 台体机动  $30^\circ$  的情况下, 天线的指令跟踪、速度跟踪及其误差曲线图。从图 7 可以看出其精度为:  $\leq \pm 0.5^\circ$ , 符合精度要求; 通过仿真与测试可以得出以下结论: (1) 本天线系统试验设计方案合理, 可行, 能满足卫星天线指向复合控制方案阶段验证要求。(2) 通过仿真,

也验证了本文构造的天线高精度指向带有参数估计的自适应控制方案的可行性。

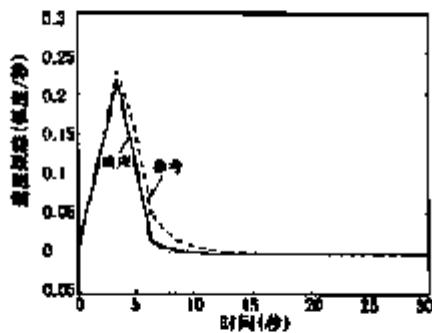


图5 台体机动时天线的速度跟踪曲线图

Fig.5 The speed tracking of antenna

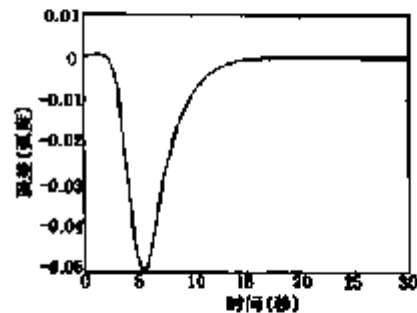


图6 台体机动时天线的跟踪误差曲线图

Fig.6 The error of antenna

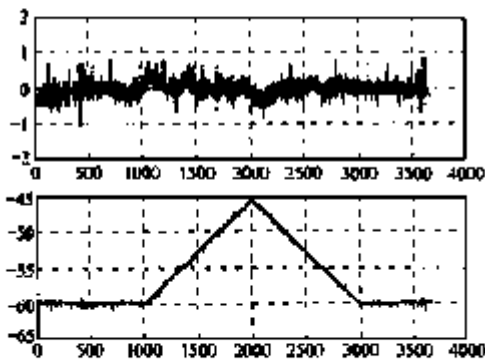


图7(1) 天线加速度跟踪试验误差响应曲线图

Fig.7(1) The acceleration error of antenna examination

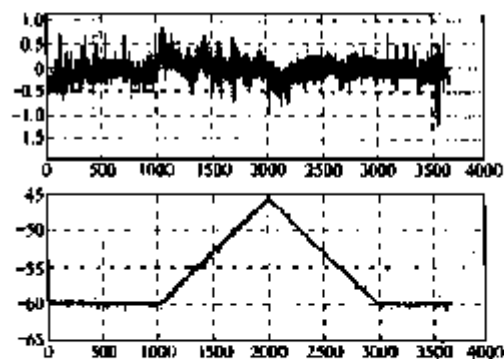


图7(2) 天线加速度跟踪试验误差放大显示图

Fig.7(2) The acceleration error zoom display of antenna examination

#### 参考文献:

- [1] 蔡国平, 洪嘉振. 中心刚体-柔性悬臂系统的位置主动控制[J]. 宇航学报, 2004, 25(6):616-620. CAI Guo-ping, HONG Jia-zhen. Active position control of a flexible hub-beam system[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6):616-620]
- [2] 周平, 等. 某卫星天线指向复合控制全物理仿真试验系统研制报告[R]. 西安:西北工业大学航天学院, 2004. [Zhou ping, et al. Certain Satellite Antenna Pointing Complex Controlling Full-Physical Simulation System Development Report[R]. Xi'an: College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, 2004]
- [3] 岡本均三, 等. 球轴承的设计与计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2004. [OKAMOTO JUNZO, et al. The Designing and Calculating of Ball Bearing[M]. Beijing: Mechanism Industry Press, 2004]
- [4] 钱肱, 等. 机械设计手册第4卷[M]. 北京:机械工业出版社,

1987. [Xie Hui, et al. Mechanism Designing Manual(4)[M]. Beijing: Mechanism Industry Press, 1987]

- [5] Bernstein D S. Development of Air Spindle and Triaxial Air Bearing Testbeds for Spacecraft Dynamics and Control Experiments[R]. Proceedings of the American Control Conference Anchorage, VA June 2001, 93-100



作者简介:贾杰(1972-),男,博士研究生,西北工业大学航天学院,导航、制导与控制专业,研究方向为卫星全物理仿真系统及其试验方法研究,非线性控制与系统仿真。通信地址:西北工业大学航天学院 230 信箱 (710072) 电话:(029)88486080

(下转第 138 页)

- [7] 毛寿荣, 杨洪, 周百令. 小波分析技术在陀螺故障诊断中的应用研究[J]. 中国惯性技术学报, 6(2), 1998, 49-54 [Wang Shou-rong, Yang Hong, Zhou Bai-ling. Study on usage of wavelet transform technique in fault diagnosis of gyro[J]. Journal of Inertial Technology of China, 6(2), 1998, 49-54]



作者简介: 陈伟(1981-), 男, 湖北武汉人, 现为第二炮兵工程学院在读硕士研究生, 主要研究方向为控制系统测试与故障诊断。

通信地址: 第二炮兵工程学院 302 教研室 (710025)

电话: 13670175139

E-mail: m-cw027@yahoo.com.cn

## Gyroscopic Drift Forecasting on Least Squares Support Vector Machine

CHEN Wei<sup>1</sup>, HU Chang-hua<sup>1</sup>, CAO Xiao-ping<sup>2</sup>, FAN Hong-dong<sup>1</sup>, FANG Hua-yuan<sup>1</sup>

(1. 302 Unit, The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China;

2. Mechatronics and Automation School of National University of Technology, Changsha 710073, China)

**Abstract:** This paper researches the regression estimate algorithm with SVM. Pinpoint the problem that the training speed of the standard algorithm is slow and it is hard to solve large scale problem. To overcome this drawback, a Least Squares Support Vector Machine (LSSVM) is put forward in this paper through improving the constraint condition of standard SVM algorithm. The training speed and the ability to solve large scale problem are much improved through using LSSVM. Finally, the LSSVM is applied to forecasting the gyroscopic drift in this paper. The simulated experiment proved the algorithm is valid and acceptable, and it supplies a way to real-time forecast and fault-predict of the gyroscopic.

**Key words:** Least squares support vector machine (LSSVM); Regression estimate; Gyroscopic drift forecasting

(上接第 129 页)

## Satellite Antenna Pointing Complex Controlling Full-Physical Simulation System Error Model and its Examination Analysis

JIA Jie, ZHOU Feng-qí, ZHOU Jun

(College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To improve the precision of the satellite antenna pointing full-physical simulation, in this paper, on the viewpoint of mechanics, several unideal factors that affected the antenna pointing complex controlling precision were researched when the Satellite Antenna Pointing Complex Controlling Full-Physical Simulation System was tested. And the system error was analyzed and studied. The error model was given too. Then the adaptive controlling law had been designed and its stability had been proved. In the end, the simulation results were given. The simulation results have shown that this system can satisfy the high-precision requirements of Satellite Antenna Pointing Complex Controlling. This work establishes the base of the further improving satellite antenna pointing complex controlling precision.

**Key words:** Full-physical simulation; Error model; Stability; Complex controlling