双轴卫星天线扰动特性建模、仿真及试验

伍时建 程 伟

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 卫星天线微振动是影响卫星姿态控制精度的重要因素,卫星天线扰动建模的目的是掌握其扰动规律,进而采取相应的控制方法和隔离技术. 综合考虑卫星天线扰动源步进电机的扰动力以及天线结构固有模态对星体的扰动影响,建立了卫星天线机构机电一体系统对星体扰动力的数学模型. 通过仿真计算,设计试验测试卫星天线扰动力,比较仿真结果和试验结果,对所建模型进行验证. 比较结果表明:建立的天线扰动模型准确可靠,对卫星指向控制精度和稳定性的影响提供了借鉴和参考.

关 键 词: 双轴天线; 步进电机; 扰动

中图分类号: TB 123; TM 356

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1446-05

Two-axes mechanism for satellite antenna disturbance characteristics simulation and experiment

Wu Shijian Cheng Wei

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

Abstract: The micro-disturbance of satellite antenna is a key factor which will affect the accuracy of satellite attitude control. The satellite disturbance modeling is aimed for obtaining the disturbance characteristics and then adopting corresponding control methods and isolation systems to restrain it. On account of the influence of both the antenna structure's nature mode and the stepper motor to the satellite body disturbance, the satellite antenna structure's disturbance math model was built. Based on the model simulation was calculated and an experiment was designed to test the disturbance. Comparing the simulation and experiment results the math model is correct and reliable and it's a reference and a consult to the influence of the antenna to the pointing control precision and stability of the satellite

Key words: two-axes satellite antenna; stepper motor; disturbance

航天器微振动是影响高精度航天器指向精度和成像质量等关键性能的重要因素. 在航天器中有较多的扰动源,如动量轮、控制力矩陀螺、太阳翼驱动机构和卫星天线等,其中国内外对动量轮和控制力矩陀螺的扰动都进行了长期的研究,并取得了较好的成绩,而对卫星天线影响的研究则很少. 建立简明实用的卫星天线的扰动模型,对于采取相应的隔离技术和控制方法,进而提高卫星的定位和指向精度,具有重要意义.

双轴卫星天线在国外的通信卫星和数据中继卫星上已经有了较多的研究和应用[1-2],主要是在中继卫星天线高精度指向控制领域做了一定的研究工作,文献[3]对天线控制系统和星体姿态控制系统的相互耦合影响进行了初步理论分析. 国内文献[4-5]研究卫星星体和天线两级控制之间的动力学耦合时,在仿真中作了简化假设,只能作为星体和天线两级控制耦合影响的初步仿真研究. 文献[6]对双轴卫星天线的定位机构进行

收稿日期: 2010-07-10; **网络出版时间**: 2011-11-14 17:20; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111114.1720.014

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111114.1720.014.html

基金项目: 航空科学基金资助项目(20071551016)

作者简介: 伍时建 (1986-),男,四川内江人,硕士生,wushijian888@yahoo.cn.

了虚拟样机建模、控制与仿真研究,但未做试验验证,且系统局限于刚体,对系统部件间的非刚体因素以及系统的柔性未做探讨. 步进电机作为卫星天线的驱动机构,国内外已对其做了较多独立研究[7-8],但微振动方向研究较少. 目前国内外还没有查阅到双轴卫星天线微振动的相关资料,尚未有电机与天线结构系统整体扰动建模相关研究,国内天线实体扰动力测试试验更是空白.

本文综合考虑卫星天线扰动源步进电机的扰动力以及天线结构固有模态对星体的扰动影响,建立了卫星天线机构机电一体系统对星体扰动力的数学模型,能够更加完全反映实际系统的性能. 进行仿真计算,并设计试验测试扰动力验证仿真结果,证明所建模型准确可靠,可为评估天线扰振特性对卫星在轨摄像质量的影响服务,具有一定的参考和实用价值.

1　中继天线驱动原理分析

双轴卫星天线(见图 1)通过双轴定位机构在空间进行信号的捕获和定位,由天线支承臂与卫星连接,提供天线结构支承. 定位机构是指通过控制两个轴向相互垂直的步进电机运转,实现天线沿两个转动轴的双自由度旋转. 中继天线的驱动力由步进电机产生,并由谐波减速器调节.

双轴卫星天线在进行上述操作时,由于电机驱动、天线旋转机构和天线头部的运动,不可避免地会产生一定的扰动. 这些扰动与卫星结构运动相偶合,会对卫星的指向精度和稳定性造成影响.

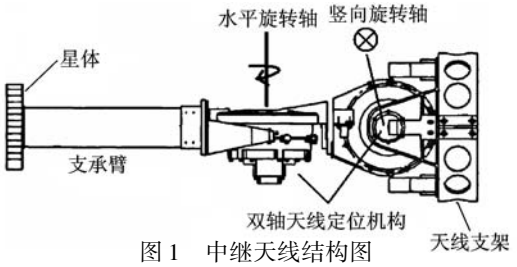

图 1　中继天线结构图

1.1　步进电机运行原理

中继天线的驱动力由步进电机产生,步进电机是将电脉冲信号转变为角位移的开环控制元件. 当步进驱动器接收到一个脉冲信号,它就驱动步进电机按设定的方向转动一个“步距角”,可以通过控制脉冲个数来控制角位移量,脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度.

试验用中继天线转子齿数 $Z=50$ 齿,运行方式拍数 $d=4$. 由步距角 θ 与齿数及拍数之间的关系,步距角为

$$\theta = \frac{360^\circ}{Zd} = 1.8^\circ \tag{1}$$

受制造工艺的影响,步进电机的步距角一般较大,存在低频振动. 普通的驱动方式,因步距大引起的振幅也大,在系统自然谐振区内,可能造成失步. 为提高设备的控制精度,本文采用了电流控制技术以及细分驱动技术,控制电机各相励磁绕组的相电流,将步进电机输入的正(余)弦电流细分成随正(余)弦函数变化的梯形波,从而实现步距角细分.

试验用步进电机细分数为 16,所以电机轴每步转过的角度为

$$\phi = \frac{1.8^\circ}{16} = 0.1125^\circ \tag{2}$$

1.2　谐波减速器原理

谐波齿轮减速器是利用行星齿轮传动原理,依靠柔性零件产生弹性机械波来传递动力和运动的一种行星齿轮传动. 步进电机产生的中继天线的驱动力和速度,经由谐波减速器减小速度,增大力矩后,输出到天线载荷端. 试验用谐波齿轮传动的传动比 $i=100$.

设中继天线平均转速为 v,为谐波减速器减速前转速,大小应为中继天线减速后输出转速的 i 倍,步进电机电流 16 细分后,中继天线存在两个扰动基频,分别为

$$\left.\begin{aligned} f_1 &= \frac{vi}{\theta} \\ f_2 &= 16\,\frac{vi}{\phi} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

1.3　天线结构扰动力模型

考虑天线结构固有模态对星体扰动力的影响,如图 2 所示,将天线单轴转动结构简化为多自由度线性系统,m_1 为天线负载端质量,$m_2, m_3, \cdots, m_n$ 为天线支承臂离散化的多自由度系统的质量,k, c 为相应自由度的刚度和阻尼. 下标 n 为需考虑的结构固有频率总数,由试验测试结果确定,T 为步进电机经过减速器输出的扰动力. 由振动理

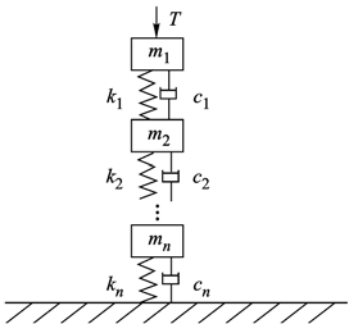

图 2　天线结构扰动力模型

论[9]受迫振动的模态叠加法,可建立具有比例阻尼的系统在电机激励作用下的运动微分方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = T \tag{4}$$

在文献[10]的基础上,由式(4)提出了一种针对天线结构的半经验半解析的扰动力模型,扰动力为

$$m(t) = \sum_{i=1}^{k} C_i \beta_i \sin(2\pi h_i \Omega t + \alpha_i) \tag{5}$$

其中,$m(t)$是考虑天线结构固有频率对扰动力 T 的影响,天线子结构传递到卫星星体的扰动力,N·m;C_i 为电机相应的第 i 次谐波的幅值,N·m;k 是模型中含有的谐波数;Ω 为转速频率;h_i 是第 i 次谐波数(例如 $h_1=1, h_2=2$ 等);α_i 是随机相角,假定均匀分布在$[0,2\pi]$;$\beta_i(h_i\Omega)$为天线内部结构固有特性引起的放大系数,其表达式

$$\beta_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{\alpha_j}{\sqrt{(1 - s_{ij}^2(\Omega))^2 + (2\xi_{ij} s_{ij}(\Omega))^2}} \tag{6}$$

$$s_{ij}(\Omega) = \frac{h_i \Omega}{\omega_j} \tag{7}$$

其中,ω_j 为结构固有频率;ξ_{ij}为模态阻尼比;α_j 为各个固有频率处的放大系数,并令 $\alpha_1=1$,以便对该系数向量归一化.

模型式(6)的辨识方程为

$$\begin{bmatrix} m_i(\Omega_1) \\ m_i(\Omega_2) \\ \vdots \\ m_i(\Omega_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_{i1}(\Omega_1) & \Lambda_{i2}(\Omega_1) & \cdots & \Lambda_{in}(\Omega_1) \\ \Lambda_{i1}(\Omega_2) & \Lambda_{i2}(\Omega_2) & \cdots & \Lambda_{in}(\Omega_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Lambda_{i1}(\Omega_g) & \Lambda_{i2}(\Omega_g) & \cdots & \Lambda_{in}(\Omega_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \tag{8}$$

其中,g 为频率点总数.

$$\Lambda_{ij}(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - s_{ij}^2(\Omega))^2 + (2\xi_{ij} s_{ij}(\Omega))^2}} \tag{9}$$

2 步进电机及谐波减速器仿真

步进电机数学模型包括转矩方程、物理方程和运动方程,这些方程是实现对步进电机控制的依据. 两相混合式步进电机的数学模型为

电机转矩:

$$T_e = p[L_2(I_a^2 - I_b^2)\sin(2p\theta_1) - 2I_a I_b L_2 \cos(2p\theta_1)] + K_t[I_b \cos(p\theta_1) - I_a \sin(p\theta_1)] - D\sin(4p\theta_1) \tag{10}$$

电磁方程:

$$U_a = I_a R + L\frac{\mathrm{d}I_a}{\mathrm{d}t} - K_e \dot{\theta}_1 \sin(p\theta_1) \tag{11}$$

$$U_b = I_b R + L\frac{\mathrm{d}I_b}{\mathrm{d}t} + K_e \dot{\theta}_1 \cos(p\theta_1) \tag{12}$$

谐波减速器将步进电机输入的速度按减速比减小 i 倍,转矩则放大 i 倍.

电机的运动方程:

$$T_e = J_1 \ddot{\theta}_1 + B_1 \dot{\theta}_1 + \frac{T}{i} \tag{13}$$

谐波减速器的转矩方程:

$$T = K\left(\frac{\theta_1}{i} - \theta_2\right) \tag{14}$$

谐波减速器的运动方程:

$$T = J_2 \ddot{\theta}_2 + B_2\left(\dot{\theta}_2 - \frac{\dot{\theta}_1}{i}\right) \tag{15}$$

其中,p 为电机转子齿数;L_2 为互感系数;K_t 为力矩系数;K_e 为反动势系数;θ_1,θ_2 为电机转子、谐波减速器的角位移;R 为电阻;L 为自感系数;J_1,J_2 为电机轴、谐波减速器负载转动惯量;B 为粘滞摩擦系数;I_a,I_b 为两端绕组电流;U_a,U_b 为两相绕组的电压;D 为定位力矩系数. 部分参数由于难以测试,采取引用文献数值,估计测试的方法,其余参数由电机出厂商提供. 各参数单位均为国际单位.

基于步进电机及谐波减速器数学模型,进行 simulink 仿真,仿真原理如图 3 所示.

电机模块的输入是周期性的脉冲信号,经过电流细分器输出细分后相位相差 $\pi/2$ 的 A 与 B 两相正弦电流 I_a 和 I_b,再将电流输入电机以及谐波减速器的数学模型,最后输出为天线的机械角位移 θ,天线扰动力矩 T. 其中电机仿真电流 I_a,I_b 和天线角加速度 $\ddot{\theta} = \mathrm{d}^2\theta/\mathrm{d}t^2$ 可由仿真直接得到.

以转速 $v=0.3(°)\cdot s^{-1}$ 对步进电机及谐波减速器数学模型进行仿真. 由式(1)~式(3)及其参数,得出电机实际运转过程中的两个基频分别为:$f_1=16.66$ Hz,$f_2=266.66$ Hz. 仿真电流及仿真角加速度、角度见图 4~图 6.

图 4 中,仿真电流整体波形为离散化的正弦(或余弦)波,幅值为 0.6 A,实现了 1/4 周期 16 步的细分. 电流细分后脉冲周期为 0.00375 s,对应频率为 266.66 Hz;电流正弦(或余弦)1/4 周期 0.06 s,对应的频率为 16.66 Hz.

从图 5 可见,天线转动频率较多,包含步进电

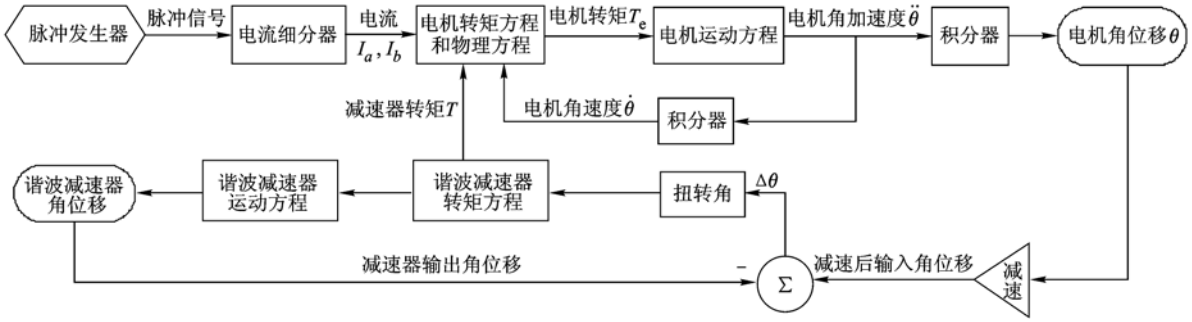

图 3　步进电机仿真原理

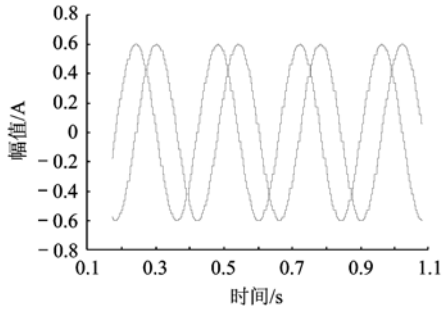

图 4　步进电机仿真电流

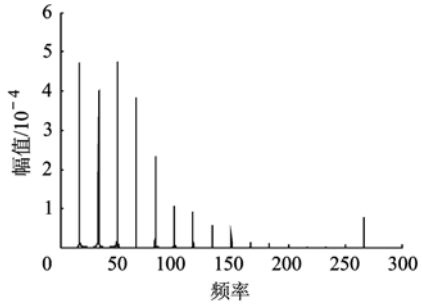

图 5　转速 $v=0.3(°)\cdot s^{-1}$,仿真角加速度频域

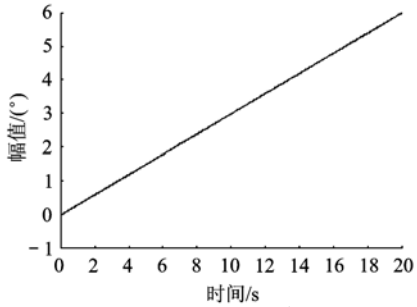

图 6　转速 $v=0.3(°)\cdot s^{-1}$,仿真角度曲线

机电流细分前的 16.66 Hz 及其倍频,最高阶倍频为步进电机电流 16 细分后的 266.66 Hz.

中继天线仿真角位移为 20 s 内转动 6°,符合稳态转速 $0.3(°)\cdot s^{-1}$ 的角速度,验证了仿真模型的正确性.

3　天线扰动力测量试验

采用六分量八传感器测试台,与中继天线的支承臂刚性连接,可测试天线安装点的 6 个力分量,即天线子结构传递到卫星星体的扰动力.

测试台的固有频率在 700 Hz 以上,远高于天线扰动频率,不会影响扰动力测试. 试验时,中继天线由步进电机驱动旋转,天线支承臂固支安装于试验平台安装盘中心,如图 7 所示. 根据测试系统的坐标方向,下电机转动方向对应测试系统 y 轴,称其为 y 轴电机;上电机转动方向对应测试系统 x 轴,称其 x 轴电机.

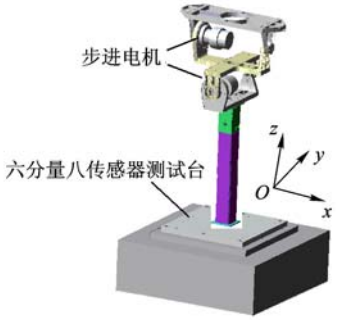

图 7　中继天线安装状态

3.1　扰动力测试结果

卫星天线的工作转速为 $0.1(°)\cdot s^{-1}$,x 轴电机以转速 0.05,0.1,0.2,0.3 $(°)\cdot s^{-1}$ 单独转动,扰动力瀑布图如图 8 所示.

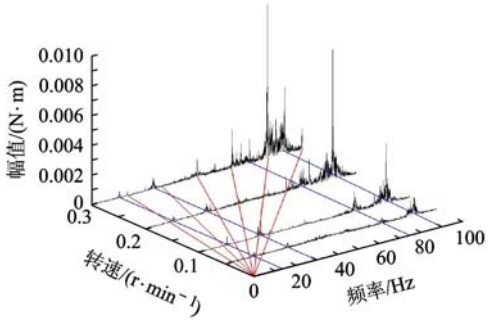

图 8　扰动力分量 M_x 测量值瀑布图

由于高频部分扰动力较小,各扰动力分量最大值均在 100 Hz 以内,故瀑布图频率范围为 0 ~ 100 Hz. x 轴电机对应测试系统 x 轴,M_x 规律较明显,图中 6 条频率随转速变化的峰值线代表 6 个扰动力谐波,前 3 次谐波幅值较小. 另外有多条频率不随转速变化的峰值线,为天线系统固有频率.

由于天线系统固有频率 88 Hz 的放大作用,在 5 次谐波 0.3(°)·s^{-1}转速对应的 83.31 Hz 处扰动力最大,幅值为 1.035×10^{-3} N·m.

x 轴电机以 0.2(°)·s^{-1}转速单独转动,试验所测 M_x 分量,即电机扰动力经天线结构传递到卫星星体的电机转动方向扰动力如图 9 所示.

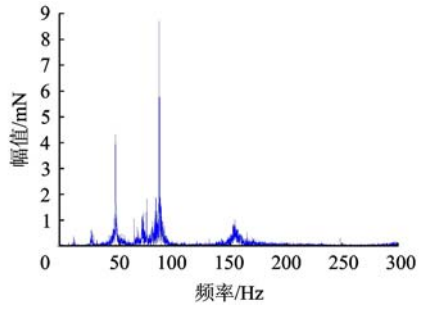

图 9 扰动力分量测量值 M_x

x 轴电机以 0.2(°)·s^{-1}转速单独转动,未考虑天线结构系统,步进电机及谐波减速器的仿真扰动力如图 10 所示.

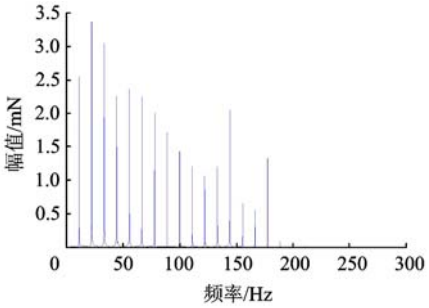

图 10 电机仿真谐波峰值

图 10 和图 9 比较可知,除天线测试台系统固有频率外,仿真各阶扰动频率与测试扰动频率相同,幅值变化较大. 这是由于测试扰动力矩是步进电机以及谐波减速器的输出力矩经过天线柔性连接臂传递到试验测试台的力矩,整体测试幅值应当小于仿真,比较结果也符合此规律. 再者测试系统本身存在固有频率,当扰动频率与中继天线或测试台固有频率重合时,会造成扰动放大.

3.2 天线扰动力模型验证

除去天线结构固有频率,由测试扰动力提取出的扰动力谐波峰值如图 11 所示.

根据瀑布图辨识出天线结构 4 个固有频率为 12.5,30,88.7,150 Hz,由天线结构扰动力模型式(4)~式(9),通过参数辨识方法得到拟合放大系数,对电机仿真谐波峰值进行修正,修正后仿真谐波峰值及误差如图 12、图 13 所示.

由图 13 可见 144.4 Hz 处相对误差为 8.45%,其余误差均在 7% 以内. 由于仿真模型中步进电机参数较多以及谐波减速器内部的柔轮刚

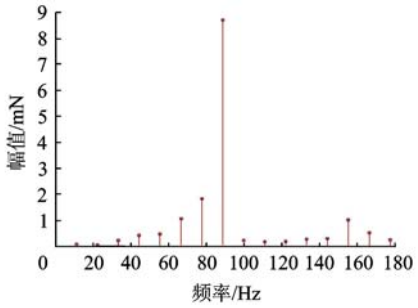

图 11 扰动力测量值 M_x 谐波峰值

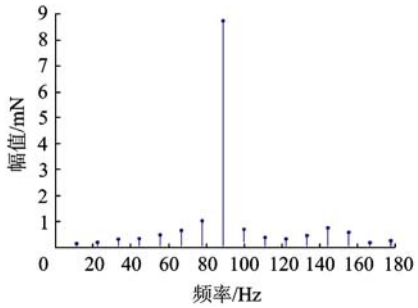

图 12 修正后仿真谐波峰值

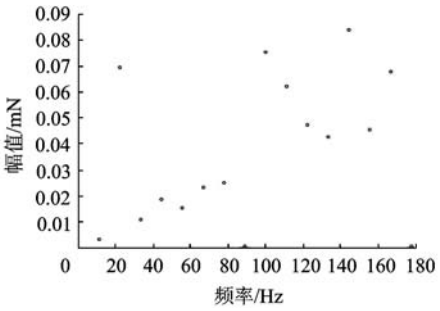

图 13 修正后谐波峰值误差

度和部分电器参数难以测量,采用查阅文献和资料的办法误差较大.

4 结 论

1)建立了中继天线驱动系统的步进电机以及谐波减速器的扰动力应用模型,为准确可靠地描述中继天线扰动力动态特性打下了理论基础.

2)建立了卫星天线机构机电一体系统对星体扰动力的数学模型,能够更加完全地反映实际系统的性能. 进行仿真计算,并设计试验测试扰动力验证了仿真结果,为在卫星平台上应用其他活动部件扰动模型提供了借鉴.

参考文献(References)

[1] Herald M. Two-axis antenna positioning mechanism[R]. SEE N94-33291,1994

[2] Brandel D. The advanced tracking and data relay satellite system (ATDRSS), the next generation[J]. AAS,1988:263-269

(下转第 1455 页)

参考文献（References）

[1] Yang Feng, Zhong Cheng, Yin Mengxiao, et al. Teaching cryptology course based on theory-algorithm-practice-application mode [C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Education Technology and Computer Science. Shanghai: Inst. of Elec and Elec Eng Computer Society, 2009: 468 – 470

[2] Koray K, Berkant U. Invalid-curve attacks on (hyper) elliptic curve cryptosystems[J]. Advances in Mathematics of Communications, 2010, 4(3): 307 – 321

[3] 祝跃飞,张亚娟. 椭圆曲线公钥密码导引[M]. 北京:科学出版社,2006:129,219 – 223
Zhu Yuefei, Zhang Yajuan. Introduction of elliptic curve cyptosystem[M]. Beijing: Science Press, 2006: 129, 219 – 223 (in Chinese)

[4] Shah P G, Huang Xu, Sharma D. Sliding window method with flexible window size for scalar multiplication on wireless sensor network nodes[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Communication and Sensor Computing. New York: IEEE Computer Society, 2010: 1 – 6

[5] Katja S S, Olivier S, Tsuyoshi T. Analysis of fractional window recoding methods and their application to elliptic curve cryptosystems[J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(1): 48 – 57

[6] 赵佳,韩臻. 自适应的椭圆曲线滑动窗口标量乘法[J]. 北京交通大学学报,2007,31(2):6 – 9
Zhao Jia, Han Zhen. Adaptive elliptic curve sliding window scalar multiplication algorithm[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(2): 6 – 9 (in Chinese)

[7] Shah P G, Huang Xu, Sharma D. lgorithm based on one's complement for fast scalar multiplication in ECC for wireless sensor network [C]//Proceedings of the 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. New York: IEEE Computer Society, 2010: 571 – 576

[8] Wu Keke, Li Dawei, Li Huiyun, et al. Partitioned computation to accelerate scalar multiplication for elliptic curve cryptosystems [C]//Proceedings of the 15th International Conference on Parallel and Distributed Systems. New York: IEEE Computer Society, 2009: 551 – 555

[9] Miller V. Uses of elliptic curves in cryptography[C]//Advances in Cryptology-Crypto85. Berlin: Springer-Verlag, 1985: 417 – 426

[10] Koblitz N. Elliptic curve cryptosystems[J]. Mathematics of Computation, 1987, 48(17): 203 – 209

[11] Stinson D R. Cryptography theory and practice[M]. 3rd ed. London: Chapman & Hall/CRC Press Taylor & Francis Group, 2006: 257 – 258

[12] Diffie W, Hellman M E. New directions in cryptography[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, 22(6): 644 – 654

[13] 董付国,厉玉蓉. 秦九韶算法思想在 RSA 密码算法中的应用研究[J]. 计算机工程与应用,2008,44(28):65 – 66
Dong Fuguo, Li Yurong. Study on Qin Jiushao algorithm and its application in RSA[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(28): 65 – 66 (in Chinese)

(编　辑:文丽芳)

(上接第 1450 页)

[3] 孙小松,杨涤,耿云海,等. 中继卫星天线指向制策略研究[J]. 航空学报,2004,25(4):376 – 380
Sun Xiaosong, Yang Di, Geng Yunhai, et al. The antenna pointing control strategy study of tracking and data relay satellite [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4): 376 – 380 (in Chinese)

[4] 佘海鹰,曲广吉. 中继卫星正常模式星体和天线两级控制耦合动力学初步仿真[J]. 航天器工程,1998,7(4):5 – 10
She Haiying, Qu Guangji. The tracking and data relay satellite's main body and antenna coupling dynamic elementary simulation [J]. Space Craft Engineering 1998, 7(4): 5 – 10 (in Chinese)

[5] 刘锦阳. 刚柔耦合动力学系统的建模理论研究[D]. 上海:上海交通大学船舶与建筑工程学院,2000
Liu Jinyang. Study on dynamic modeling theory of rigid-flexible coupling system[D]. Shanghai: School of Naval Architectye, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, 2000 (in Chinese)

[6] 李长江,廖瑛,廖超伟,等. 卫星天线双轴定位系统虚拟样机动力学仿真[J]. 中国空间科学技术,2005(5):52 – 55
Li Changjiang, Liao Ying, Liao Chaowei, et al. The dynamic simulation of the virtual prototype of the two-axes position mechanism for satellite antennas[J]. Chinese Space Science and Technology, 2005(5): 52 – 55 (in Chinese)

[7] Melkote H, Khorrami F. Robust nonlinear control and torque ripple reduction for permanent magnet stepper motors[J]. Control Theory and Applications, IEEE Proceedings, 1999, 146(2): 186 – 196

[8] 林瑞,孙兴进. 步进电机的细分电流波形及其实现[J]. 上海大学学报,1999,12(5):501 – 502
Lin Rui, Sun Xingjin. Subdivision current wave of stepping motor and its implementation [J]. Journal of Shanghai University, 1999, 12(5): 501 – 502 (in Chinese)

[9] 诸德超,邢誉峰,程伟,等. 工程振动基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004
Zhu Dechao, Xing Yufeng, Cheng Wei, et al. The base of engineering vibration[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004 (in Chinese)

[10] 张鹏飞,程伟,王和,等. 航天器反作用轮扰动建模及参数辨识[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(7):879 – 882
Zhang Pengfei, Cheng Wei, Wang He, et al. Disturbance modeling and parameters identification of reaction wheel assembly on spacecraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(7): 879 – 882 (in Chinese)

(编　辑:李　晶)