

# 光电经纬仪动态测角精度仿真测量

贺庚贤, 沈湘衡, 周兴义

(长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)



**摘 要:** 研制了测量用旋转靶标, 靶标即可以提供以一定角速度或角加速度运动的空间仿真目标, 又能够记录目标的实时空间位置, 以靶标记录的数据为真值, 光电经纬仪跟踪目标所测量的数据与真值比较, 可得到光电经纬仪的动态测角精度。用 Matlab/simulink 建立了靶标仿真图, 分析了靶标等速和正弦运动的规律, 实现了在规定的角加速度条件下, 对光电经纬仪动态测角精度的测量。

**关键词:** 光电经纬仪; 动态测角精度; 旋转靶标; 仿真目标

**中图分类号:** TP274+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2008)12-3127-03

## Simulation Measurement of Dynamic Angle Precision of Photoelectric Theodolite

HE Geng-xian, SHEN Xiang-heng, ZHOU Xing-yi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Rotary target was established, and it was used to test dynamic angle precision of photoelectric theodolite in laboratory. Simulation aim was provided and space-positions of aim were real-time recorded by target. The aim can move as definite angle speed or as max angle acceleration. Data of target was considered as real-value of aim. Test date of photoelectric theodolite was compared with it, and the dynamic angle precision was obtained. Simulation model of the target was built by Matlab/simulink. The law of target's movement was analyzed by fixed and sine angle speed. Dynamic angle precision of photoelectric theodolite was measured in the condition that angle acceleration met the test requirement.

**Key words:** photoelectric theodolite; dynamic angle precision; rotary target; simulation aim;

### 引 言

光电经纬仪是采用电视测量技术, 具有自动跟踪和实时测量功能的光电测量设备, 主要用于飞机、轮船、星体等特殊试验场空间目标运动轨迹的测量。动态测角精度是指光电经纬仪在规定的角速度和角加速度运动状态下, 实时测量的目标空间指向值与真值之差, 是衡量光电经纬仪最重要的技术指标之一。

长期以来, 光电经纬仪的动态测角精度一直在外场, 通过实测某一飞行目标并与其它高精度设备比对的方法进行验证。由于外场试验受气候、费用、时间等条件的限制, 无法经常进行, 因此, 研究室内测量方法和测量设备是非常必要和急需的。

为了实现光电经纬仪动态测角精度的测量, 必须具有室内仿真目标测量装置, 该装置应同时具备两个条件: 一是具有室内仿真目标, 其运动规律能够代表实际飞行目标的特性; 二是在仿真目标运动过程中, 其实时空间指向位置准确可知。为此, 研制了旋转靶标, 旋转靶标即可以产生供光电经纬仪跟踪的仿真目标, 又可以测量出目标实时空间指向值, 是测量光电经纬仪动态测角精度必不可少的测量设备。

### 1 旋转靶标

#### 1.1 旋转靶标的组成

图 1 为旋转靶标结构示意图, 主要由支撑架、旋转轴系、平行光管、反射镜、电气控制柜等部分组成。

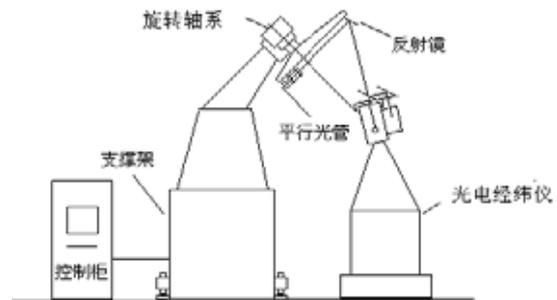


图 1 靶标结构示意图

支撑架的主要作用是稳定支撑旋转目标, 为了便于移动, 支撑架底部设计有万向移动鼓轮和三点式落地支撑地角。旋转轴系主要由精密转轴、直流伺服电机、导电环和 23 位绝对式编码器组成, 旋转轴的作用是带动平行光管和反射镜转动, 产生以一定角速度和角加速度运动的目标, 并通过同轴安装的编码器, 准确地得到靶标目标的空间角度位置。平行光管的焦距为 1m, 口径 100mm, 目标形式为星点。平行光管出射的光经反射镜反射后, 在空间形成一光锥形目标, 提供给光电经纬仪。

电气控制柜中有主控计算机、时统终端、编码器数据采

收稿日期: 2007-03-09

修回日期: 2007-05-18

基金项目: 中科院创新基金项目: 电视红外跟踪测量系统检测平台 (TYCGS05)

作者简介: 贺庚贤 (1964-), 女, 吉林市人, 学士, 副研究员, 研究方向为动态精密检测; 沈湘衡 (1952-), 男, 吉林市人, 博导, 研究方向为光电测量设备研制、精密检测。

集电路、串行通讯电路、伺服控制电路、电源等相关硬件。光电经纬仪和靶标由各自的时统终端通过 GPS 授时功能对时。靶标编码器的采样频率可以根据测量需要, 设定为与光电经纬仪的工作频率相同, 有 400Hz、200Hz、100Hz、50Hz 供选择。实际测量时, 主控计算机在时统终端同步信号的控制下, 实时同步采集并记录绝对时和编码器值, 同时光电经纬仪自动跟踪靶标目标并同步采集绝对时、目标的方位角、俯仰角和脱靶量等测量数据。事后, 按已建立的动态测角误差计算公式完成光电经纬仪的动态测角精度计算。

### 1.2 靶标与光电经纬仪的坐标变换关系

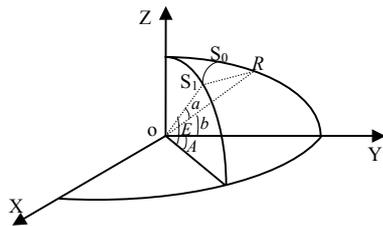


图 2 坐标变换关系图

图 2 为靶标与光电经纬仪的坐标变换关系图, 图中,  $o$  点为光电经纬仪三轴旋转中心, 定义该点为坐标原点,  $a$  为靶标旋转半锥角,  $b$  为靶标旋转轴与水平面的夹角,  $A$  为光电经纬仪的方位角,  $E$  为光电经纬仪的俯仰角。设靶标目标位于空间最高点  $S_0$  处的编码器值为零值, 当目标从  $S_0$  点旋转至  $S_1$  点, 靶标编码器的角度为  $\theta$ 。依据球面三角定理可得<sup>[1]</sup>:

$$E = \arcsin(\cos a \sin b + \sin a \cos b \cos \theta) \quad (1)$$

$$A = \arcsin(\sin a \sin \theta / \cos E) \quad (2)$$

实际应用中, 经测量:  $a=22.5^\circ$ ,  $b=42.5^\circ$ , 代入公式(1)和(2)有:

$$E = \arcsin(k_1 + k_2 \cos \theta) \quad (3)$$

$$A = \arcsin(k_3 \sin \theta / \cos E) \quad (4)$$

式中,  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  为常数。由公式(3)和(4)可知, 已知靶标编码器角度值  $\theta$ , 便可计算出靶标目标相对于光电经纬仪坐标系下的方位角和俯仰角, 该计算值可以作为靶标目标实时空间指向的真值。

### 1.3 旋转靶标精度分析

旋转靶标作为动态测角精度检测设备, 必须对其精度进行标定, 按照误差理论, 靶标应该具有高于被测量设备 3~10 倍的精度。靶标的精度按其运动方式可分为静态精度和动态精度, 标定靶标静态精度所用仪器为精度 0.5" 的 Leica 经纬仪, 标定靶标动态精度所用仪器为精度 0.2" 数显式自准直仪, 自动采样频率 50Hz。

#### 1.3.1 靶标静态精度标定

首先, 校正靶标编码器的零点。用 Leica 经纬仪分别测

量靶标编码器在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  位置的目标空间指向角度值 ( $A_1$ 、 $E_1$ ) 和 ( $A_2$ 、 $E_2$ ), 多次测量取平均值, 计算两点的方位差值, 如果不为零, 说明靶标编码器的零点存在偏差, 目标在  $\pm(A_1 - A_2)/2$  位置将编码器重新清零, 复测两点的方位差值, 直至小于 0.5"。根据测量结果计算靶标的参数  $a$  和  $b$ :

$$a = (E_1 - E_2)/2 \quad (5)$$

$$b = (E_1 + E_2)/2 \quad (6)$$

之后, 在靶标编码器  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围内, 每隔  $10^\circ$  测量一点, 共获得 36 组靶标编码器值和 Leica 经纬仪测量值的对应数据, 将靶标编码器值通过公式(3)和(4)转换为空间指向值 ( $A_i'$ 、 $E_i'$ ), 以 Leica 经纬仪的测量值 ( $A_i$ 、 $E_i$ ) 为真值, 计算靶标空间指向值相对于该真值的均方差, 既是靶标的静态精度:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{36} (A_i' - A_i)^2}{36}} \quad (7)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{36} (E_i' - E_i)^2}{36}} \quad (8)$$

经测量, 靶标的静态精度:  $\sigma_A: 2.7''$ ,  $\sigma_E: 1.5''$ 。

#### 1.3.2 靶标动态精度标定

靶标在运动过程中, 主要有下列误差源: 轴系晃动误差; 编码器动态测角误差; 支撑基座的稳定性; 旋转臂 (平行光管和反射镜) 机械变形误差; 编码器零点校正误差;  $a$  和  $b$  角测量误差<sup>[2]</sup>。其中, 编码器零点校正误差;  $a$  和  $b$  角测量误差已包含在静态测量结果中, 不需要再单独测量。测量靶标轴系晃动误差时, 在靶标旋转轴一端, 垂直于旋转轴固定一平面反射镜, 在靶标旋转过程中, 用自准直仪实时监测反射镜的角度变化量, 该变化量既是靶标的轴系晃动误差, 实测  $\sigma_x = 0.76''$ 、 $\sigma_y = 0.37''$ 。编码器动态测角误差经验值小于 1"。通过在 24 小时内对靶标固定目标的定时监测, 得到支撑基座稳定性小于 2"。旋转臂机械变形误差经验值小于 0.5"。将以上各动态误差和静态误差进行合成, 得到靶标的动态精度,  $\sigma_A: 3.6''$ ,  $\sigma_E: 2.8''$ 。因此, 应用该靶标可以测量动态精度至少比靶标低 3 倍的光电经纬仪。

## 2 靶标运动规律仿真

图 3 为利用 Matlab/simulink, 根据靶标数学模型 (公式 3 和 4) 建立的靶标仿真图<sup>[3,4]</sup>, 输入为编码器的角度  $\theta$ , 具有等速和正弦两种输入方式, 输出为光电经纬仪的方位角速度  $A_v$ 、俯仰角速度  $E_v$ 、方位角加速度  $A_a$ 、俯仰角加速度  $E_a$ 。

通过对靶标等速运动规律的分析可知, 当靶标参数  $a$ 、 $b$ 、 $\omega$  一定, 光电经纬仪跟踪的角速度和角加速度也就一定, 不可改变, 往往是当角速度满足要求时, 角加速度达不到要求, 当角加速度满足要求时, 角速度远远超出要求, 在这种

情况下, 鉴于角加速度对光电经纬仪跟踪性能的影响要远远大于角速度的影响, 因此, 测量时常常以角加速度要求为依据<sup>[5]</sup>。

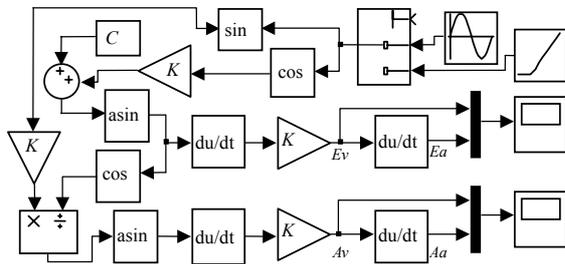


图 3 靶标仿真图

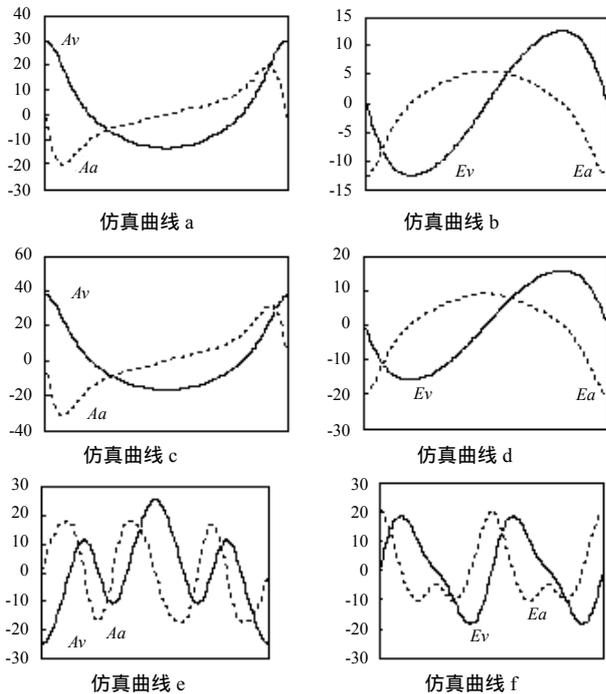


图 4 仿真结果

以实际测量要求为例: 跟踪角速度大于  $30^\circ/\text{s}$ 、跟踪角加速度大于  $20^\circ/\text{s}^2$ , 分析靶标的运动规律。图 4 为靶标运动规律仿真结果。仿真曲线 a 为靶标以  $32.9^\circ/\text{s}$  等速运转时, 光电经纬仪跟踪的方位角速度  $A_v$  和方位角加速度  $A_a$  的变化曲线, 仿真曲线 b 为此速度下光电经纬仪跟踪的俯仰角速度  $E_v$  和俯仰角加速度  $E_a$  的变化曲线, 此时,  $A_v=29.8^\circ/\text{s}$ ,  $A_a=20.0^\circ/\text{s}^2$ ,  $E_v=12.6^\circ/\text{s}$ ,  $E_a=12.6^\circ/\text{s}^2$ , 方位角加速度满足要求, 俯仰角加速度远远低于要求, 靶标在此运动状态下, 只能测量光电经纬仪的方位动态测角精度。

仿真曲线 c、d 为靶标以  $41.4^\circ/\text{s}$  等速运转时, 光电经纬仪的跟踪曲线, 此时,  $A_v=37.5^\circ/\text{s}$ ,  $A_a=31.6^\circ/\text{s}^2$ ,  $E_v=15.8^\circ/\text{s}$ ,  $E_a=20.0^\circ/\text{s}^2$ , 俯仰角加速度满足要求, 但由于此时方位角加速度已高达  $31.6^\circ/\text{s}^2$ , 光电经纬仪已无法正常跟踪工作, 因此, 靶标在此运动状态下, 光电经纬仪的俯仰动态测角精度得不到验证。

为了解决这一问题, 对靶标的正弦运动规律进行了仿真

分析, 仿真曲线 e、f 为靶标以最低角 (编码器为  $180^\circ$ ) 为中心, 摆幅  $160^\circ$ , 最大角速度  $61.7^\circ/\text{s}$  做正弦摆动时, 光电经纬仪的跟踪曲线, 此时,  $A_v=25.1^\circ/\text{s}$ ,  $A_a=17.8^\circ/\text{s}^2$ ,  $E_v=18.4^\circ/\text{s}$ ,  $E_a=20.0^\circ/\text{s}^2$ , 俯仰角加速度满足技术要求, 同时, 方位角加速度低于技术要求, 光电经纬仪可以稳定跟踪靶标工作, 靶标在该运动状态下, 可以测量光电经纬仪的俯仰动态测角精度。

### 3 动态测角精度仿真测量

通过上述分析, 按以下操作实现了对光电经纬仪动态测角精度的仿真测量。

首先, 按照靶标静态精度标定的步骤 1 校正靶标编码器的零点, 得到靶标参数  $a$  和  $b$ 。

其次, 安置光电经纬仪: 使光电经纬仪三轴旋轴中心位于靶标旋转光锥的顶点。通过 GPS 授时功能, 分别调试好靶标和光电经纬仪的时统终端, 两者具有同一绝对时。设置靶标编码器的采样频率  $50\text{Hz}$ , 与光电经纬仪的采样频率相同。

最后, 进行跟踪测量: 依据仿真结果, 分别设定靶标的等速和正弦运动参数, 引导靶标进行运动, 光电经纬仪自动跟踪靶标目标, 稳定跟踪后, 靶标和光电经纬仪分别进行数据记录, 记录至少一个周期的数据。事后对数据进行处理, 将靶标采集的数据和光电经纬仪的测量数据在绝对时上对齐, 通过坐标变换公式(3)和(4), 将靶标编码器值转换为空间指向真值 ( $A_i'$ 、 $E_i'$ ), 计算光电经纬仪测量值 ( $A_i$ 、 $E_i$ ) 相对于该真值的均方根误差, 既是光电经纬仪的动态测角精度:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - A_i')^2}{n-1}} \quad (9)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E_i')^2}{n-1}} \quad (10)$$

经测量, 某型号光电经纬仪在靶标等速运动状态下的方位动态测角精度  $\sigma_A=18.6''$ , 在靶标正弦运动状态下的俯仰动态测角精度  $\sigma_E=15.1''$ 。

在高精度旋转靶标没有建立之前, 光电经纬仪动态测角精度室内检测一直沿用以下传统测量方法。

假设光电经纬仪的动态测角误差由动态系统误差和动态随机误差两部分组成, 而动态系统误差可以认为是静态条件下的系统误差和动态条件下的动态误差增量的合成, 即:

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_r^2 + \sigma^2$$

式中:  $\sigma$  为动态测角误差,  $\sigma_s$  为静态测角系统误差均方值,  $\sigma_r$  为动态随机误差均方值,  $\sigma$  为动态误差增量。

利用在经纬仪周围不同方位和高低方向上安装多个平行光管的检测架, 进行静态测角系统误差的测量, 以精度为  $0.5''$  的 Lecia 经纬仪对各平行光管进行标定, 标定值作为真值, 光电经纬仪对各平行光管的测量值相对标定值的均方根误差既是经纬仪的静态测角系统误差。使光电经纬仪以规定

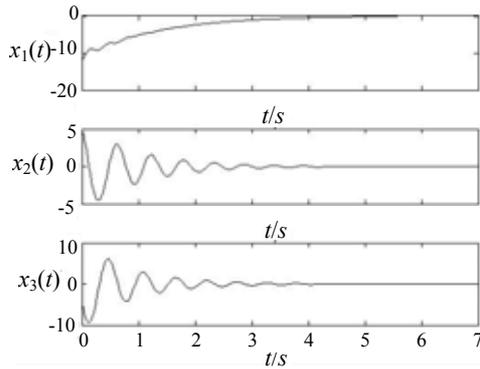


图 2 受控 Nadolschi 混沌系统状态响应曲线

### 5 结论

本文研究了参数不确定性 Nadolschi 混沌系统的控制问题, 利用区间矩阵和 T-S 模糊模型对具有参数不确定性的 Nadolschi 混沌系统进行精确描述, 然后, 基于 Lyapunov 稳定性理论和并行分布补偿 (PDC) 技术, 我们设计了稳定的状态反馈控制器, 并利用线性矩阵不等式求解控制增益矩阵。从仿真结果可以看出, 我们取得了比较满意的控制效果。

### 参考文献:

[1] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling Chaos[J]. Phys. Rev. Lett (S0031-9007), 1990, 64(3): 1196-1199.

[2] Chen L, Chen G. Fuzzy Predictive Control of Uncertain Chaotic Systems Using Time Series[J]. Int. J. Bifur. and Chaos (S0218-1274), 1999, 9(4): 757-767.

[3] 宋运忠, 赵光宙, 齐冬莲. 统一混沌系统的最优控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 123-125. (Song Y Z, Zhao G Z, Qi D L. Optimal Control of Unified Chaos System [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(1): 123-125.)

[4] 董恩增, 陈增强, 袁著祉. Rossler 超混沌系统的多变量广义预测控制[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2521-2524. (Dong E Z, Chen Z Q, Yuan Z Z. The Multi-variable Generalized Predictive Control of Hyperchaotic Rossler Systems [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(9): 2521-2524.)

[5] Wang H O, Tanaka K. Fuzzy Modeling and Control of Chaotic Systems [C]// Studies in Fuzziness and Soft Computing. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006: 45-80.

[6] Chiu C S, Lian K Y. Fuzzy Model Based Chaotic Cryptosystems [C]// Studies in Fuzziness and Soft Computing. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006: 507-525.

[7] 李瑞红, 徐伟, 李爽. 一类新混沌系统的线性状态反馈控制[J]. 物理学报, 2006, 17(2): 598-604.

[8] 吴方向, 史忠科, 戴冠中. 动态区间系统的鲁棒稳定性[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1): 113-115.

[9] 关新平, 范正平, 陈彩莲, 华长春. 混沌控制及其在保密通信中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 121-135.

(上接第 3129 页)

的角加速度跟踪靶标, 通过对测量数据序列差分可求出经纬仪的动态随机误差。使光电经纬仪对准某一平行光管目标, 记录脱靶量为零时的经纬仪角度值, 以此作为静态中心点, 引导经纬仪围绕该中心点扰动, 经纬仪在扰动过程中对中心点目标的测量值与静态值进行比较, 可求得经纬仪的动态误差增量。

应用以上测量方法对光电经纬仪的动态测角精度进行了验证, 测量结果为:

$$\sigma_{AS}=10.5'' , \sigma_{Ar}=11.4'' , \sigma_A =4.1'' ,$$

$$\sigma_{ES}=9.3'' , \sigma_{Er}=6.5'' , \sigma_E =5.7'' ,$$

经计算:  $\sigma_A=16.0'' ; \sigma_E=12.7''$ 。

根据误差理论, 两种测量结果的差值如果小于被测量最大允许误差的 1/3~1/10, 则测量结果可信。传统测量方法的测量结果与靶标的测量结果相比, 最大误差为 2.6'', 光电经纬仪的最大允许误差为 20'', 因此, 可以推断靶标的测量结果是可信的。

### 4 结论

应用旋转靶标, 在室内测量了光电经纬仪的动态测角精度。通过对靶标正弦运动规律的分析, 实现了在要求的跟踪

角加速度条件下, 对光电经纬仪俯仰动态测角精度的测量。测量结果表明: 旋转靶标具有可编程控制和实时测量的特点, 是测量光电经纬仪动态测角精度必不可少的测量设备, 可广泛应用于具有自动跟踪性能的光电测量设备。旋转靶标还可以测量光电跟踪设备的跟踪性能、捕获性能和静态测角精度等其它技术参数, 值得开发和利用。

### 参考文献:

[1] 何照才. 光电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.10: 250-253.

[2] 曹学东. 电视光电经纬仪跟踪精度影响因素分析及检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学图书馆, 2003.

[3] 向博, 高丙团, 张晓华, 等. 非连续系统的 simulink 仿真方法研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1750-1754. (Xiang bo, Gao bing-tuan. Simulink Simulation Research of Uncontinuous System [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(7): 1750-1754.)

[4] 薛定宇. 基于 Matlab/simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[5] 王建立. 光电经纬仪快速目标捕获与跟踪技术的研究[D]. 长春: 长春光机与物理研究所图书馆, 2002.

[6] 原劲鹏, 杨涂, 翟坤, 等. 某型大柔性多体结构卫星半实物仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5):1204-1207. (Yuan Jin-peng, Yang Di. xPC-based Hardware-in-the-Loop Simulation of Certain Large Flexible Multi-body Structure Satellite [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 1204-1207.)