

# 卫星帆板不确定性分析

冯娅娟<sup>1</sup> 陈国平<sup>1</sup> 张保强<sup>2</sup>

(1.南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016 2.厦门大学 航空系,福建 厦门 361005)

**摘 要:** 为了研究不确定性参数对卫星帆板系统展开锁定动力学响应过程的影响,对参数为随机和认知不确定性两种情况进行了分析。首先在 ADAMS 中建立了卫星帆板系统多体动力学模型并建立模型语言文件 ADM、脚本控制文件 ACF,在 MATLAB 环境下编辑脚本仿真分析程序进行不确定性多体动力学仿真分析。当参数为随机不确定性时,采用蒙特卡罗方法进行参数抽样并求得响应的置信区域,参数为认知不确定性时,用区间分析的方法求得系统响应边界。联合仿真结果表明两种不确定性分析方法均能定性分析参数不确定性对卫星帆板系统展开锁定响应过程的影响,为卫星帆板系统结构设计提供一定的参考依据。

**关键词:** 卫星帆板系统 随机不确定性 认知不确定性 MATLAB-ADAMS 联合仿真

**中图分类号:** TH16 P134.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2014)01-0193-04

## Uncertainty Analysis of Satellite Panel System

FENG Ya-juan<sup>1</sup>, CHEN Guo-ping<sup>1</sup>, ZHANG Bao-qiang<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China 2.Department of Aeronautics, Xiamen University, Fujian Xiamen 361005, China)

**Abstract** In order to study the impact of uncertainty parameters on the satellite panel system's launched and locked dynamic response, random uncertainty and epistemic uncertainty of parameters is studied. First the multi-body dynamic model of satellite panel system is established in ADAMS. The model language file ADM and script control file ACF are also established. Uncertainty multi-body dynamics is analyzed using MATLAB script program. When the parameters are random uncertainty, using monte-carlo sampling methods for parameters obtains the confidence region of response. When the parameters are epistemic uncertainty, interval analysis method is used to study the boundary of system response. Co-simulation results show that two kinds of uncertainty analysis method can qualitatively analyze the impact of parameters uncertainty on the satellite panel system response. That provides some reference basis to design satellite panel system structure.

**Key Words** Satellite Panel System ;Random Uncertainty ;Epistemic Uncertainty ;MATLAB-ADAMS Co-Simulation

## 1 引言

现代航天器上通常带有大型太阳帆板,考虑到运载工具空间的限制和在发射过程中要承受较大的过载,在发射阶段航天器太阳帆板一般呈收拢状态,直到航天器与运载工具分离后,太阳帆板方可解锁展开。前人的研究工作主要集中于在确定参数模型的基础上,对卫星帆板系统的展开运动动力学、展开状态的动态特性以及“柔性效应”等特性的研究<sup>[1-3]</sup>。然而由于制造、装配产生的尺寸误差,受环境因素影响的物理参数等会产生诸多不确定性因素,使传统的确定性模型得到的系统响应与试验测试结果之间存在很大差距。因此,卫星帆板系统建模中考虑参数不确定性的影响,并分析这些不确定性参数对响应的影响是很有必要的。

二十多年来,概率论方法已经广泛应用于结构动力学的不确定性建模中<sup>[4-5]</sup>。但是,对于多体系统不确定性的研究正处于起步阶段,且极少有文献专门对卫星帆板系统的不确定性进行过研

究。以往绝大部分有关多体不确定性的文献都将不确定性处理为随机不确定性,再选用概率方法(如概率论方法和贝叶斯概率理论等)对其进行量化。抽样方法是应用最为普遍的一种不确定性传递方法,比如蒙特卡罗抽样。由蒙特卡罗抽样技术求得多体系统动力学响应后,由响应的概率分布求得置信区域,再以置信区域来评判不确定性参数对系统响应的影响<sup>[6]</sup>。有的时候,因为知识的不足没法得到不确定性参数的概率分布,这种不确定性为认知不确定性。对认知不确定性进行量化只能选用非概率方法<sup>[7]</sup>(如区间分析、概率边界分析、证据理论等)。虽然认知不确定性已经广泛应用于结构动力学的不确定性建模中<sup>[8-9]</sup>。但是,极少应用于存在不确定性的多体系统中。考虑到真实的卫星帆板系统在简化过程中存在很多不确定性,以国产某型号的太阳帆板系统为研究对象,利用 MATLAB-ADAMS 联合仿真对参数不确定性为随机不确定性和认知不确定性的情况进行了仿真分析。

来稿日期 2013-06-17

基金项目 国家“863”计划(2008AA12A205) 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NJ2010009 NS2012015)

作者简介 冯娅娟(1988-)女 湖南株洲人 硕士研究生 主要研究方向 结构动力学仿真;

陈国平(1956-)男 浙江新昌人 教授 博士研究生导师 主要研究方向 复杂结构动力学

## 2 卫星帆板系统模型和基于 ADAMS 建模方法

卫星帆板系统仿真模型如图 1 所示。试验台、卫星转接器、太空仓和太阳能电池板等部分组成,同时也包含帆板展开驱动机构、展开同步机构以及体间连接的旋转铰接副组成。

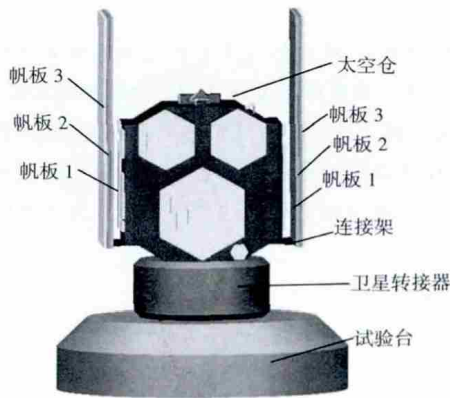


图 1 卫星帆板系统模型

Fig.1 Satellite Panel System Model

### 2.1 收拢与释放机构

就机构设计而言,收拢起来的太阳帆板由加上预载荷的紧杆压紧于航天器本体侧壁,爆炸螺栓爆炸切断压紧杆即可实现太阳帆板的释放。太阳帆板释放前的折叠状态如图 1 所示。相对航天器本体静止。从 ADAMS 建模来看,将帆板的收拢状态作为建模的初始状态,由于扭簧预紧扭矩的驱动作用,当动力学仿真从时间  $t=0$  开始,即可实现帆板的自动收拢、释放的动力学建模。

### 2.2 展开驱动机构数学模型

展开机构类型很多,航天器太阳帆板展开机构设计上可采用铰链卷曲弹簧式机构,释放后的展开由安装在每个铰链处的已经预紧的卷曲弹簧来驱动。在 ADAMS/View 中,卷曲弹簧可以指定刚度系数和阻尼系数,其作用扭矩计算公式如下:

$$T = -k(\theta - \theta_0) - c \frac{d\theta}{dt} + T_0 \quad (1)$$

式中  $k$ —卷曲弹簧的刚度系数  $p$ 、 $\theta_0$ —卷曲弹簧的角度和初始角度  $i$ —阻尼系数  $T_0$ —预载荷(preload)。

### 2.3 展开同步机构数学模型

在展开过程中,为保证各块太阳能电池板能按预定轨迹运动并同步展开,太阳能电池阵上都安装有展开控制机构,其中最常见的是绳索联动机构(CCL)。

在 ADAMS/View 中采用关联副法(Coupler)对同步机构进行建模,关联副确定的两个运动副的约束关系是  $k_1\theta_1 + k_2\theta_2 = 0$ 。在理想参数状态下,由于内侧帆板展开  $90^\circ$ ,外侧帆板展开  $180^\circ$ ,所以内侧旋转副与外侧旋转副之间关联副的传动比  $k_1/k_2$ ,外侧旋转副与外侧旋转副之间的关联副传动比  $k_1/k_2 = -1$ 。

### 2.4 锁定机构数学模型

航天器太阳帆板展开机构在展开终了时,当内板与卫星本体侧壁夹角为  $90^\circ$ ,内板与外板平行时启动锁定机构,使其成为一体。锁定机构如图 2 所示。凸轮 C 固定安装在内侧板 A 上,轴 D 固定在外侧板 B 上,轴 D 和凸轮 C 之间为转动铰,滑销 E 通过板簧 F 安装在外测板 B 上,当外侧板 B 展开时带动滑销 E 在凸

轮 C 表面上滑动,最终进入槽窝 G 中,与凸轮窝槽表面经过数次接触碰撞后停止相对运动,实现锁定。

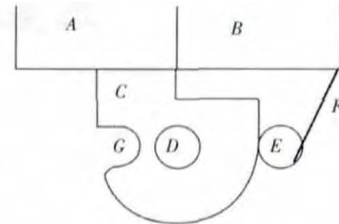


图 2 锁定机构原理图

Fig.2 Lock Mechanism Principle Diagram

### 2.5 ADAMS 仿真分析

卫星帆板系统在进入轨道后将要进行展开动作,展开过程和完全展开后的结果如图 3、图 4 所示



图 3 帆板展开

Fig.3 Panels are Launched



图 4 帆板展开锁定

Fig.4 Panels are Launched and Locked

## 3 不确定仿真分析

### 3.1 随机不确定分析

工程机构中存在的不确定性参数,可以通过试验找出其概率分布,这种参数不确定性为随机不确定性。一般采用经典的蒙特卡罗抽样方法解决随机不确定性的量化和传递问题。文中选择用传统概率方法来处理随机不确定性,具体步骤为:(1)确定不确定性参数的抽样数量  $N$ ,为准确描述响应的分布,要求  $N$  比较大。(2)从每一个随机不确定性分布中选择一个样本。(3)采用完整的抽样序列计算系统响应。(4)判定  $N$  个样本是否已经完成。否,回到步骤(3),是,继续步骤(5)(5)根据计算得到的各样本的响应求均值。(6)直接由响应求概率分布,置信度从(2.5~97.5)%的响应区域为 95%置信区域。(7)将均值与置信区域边界画图显示,以分析随机不确定性参数对系统响应的影响。

### 3.2 认知不确定性

认知不确定性问题,通常采用非概率方法,比如模糊集理论、区间分析、证据理论、可能性理论等。选择用区间分析方法来处理认知不确定性,主要步骤为(1)~(4)与传统概率方法相似,只是抽样时是对认知不确定性参数进行抽样,考虑到计算效率,可以选用拉丁超立方抽样。(5)按照系统响应求边界。(6)将响应边界画图显示,以分析认知不确定性参数对系统响应的影响。

## 4 MATLAB-ADAMS 联合进行不确定性仿真分析

在实际工程中,卫星工作的高真空、强辐射和较大温差变化环境导致密度、几何尺寸等产生变化使帆板的质量参数具有不确

定性,同时帆板的板间不同步现象总是存在,有时甚至很大,这种不同步现象和质量参数的不确定性将直接影响到帆板的运动轨迹和锁定时的角速度,进一步将影响到锁定时冲击力的大小,以帆板的角加速度作为反映运动轨迹和锁定冲击力的指标。当同步机构传动比和质量参数取设计值时帆板角加速度响应,如图5所示。

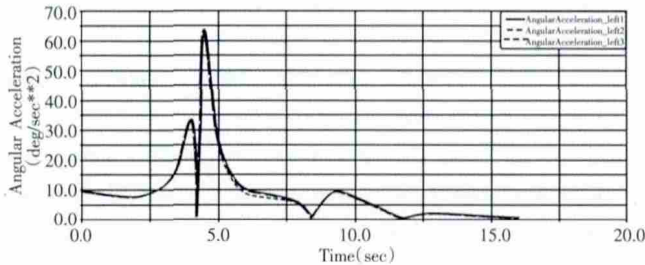


图5 帆板角加速度响应

Fig5 Angular Acceleration Response of Panels

在 MATLAB 中对不确定性参数进行抽样的计算作为主程序,将蒙特卡罗抽样和拉丁超立方抽样产生的随机参数写入 ADAMS/Solver 的模型语言 ADM 文件中,对模型中的 6 块帆板质量参数  $m$  和同步机构的传动比  $k_1/k_2$  进行修改,由于 ADM 中  $k_1$  和  $k_2$  分别为两个数值,修改时仅将  $k_2$  乘以一个比例系数  $k$  体现参数不确定性,因此具体参数取值,如表 1 所示。修改好模型参数后调用仿真控制 ACF 文件对该模型进行仿真计算,仿真结果保存在定义了输出变量的 REQ 文件中。MATLAB 主程序读取 REQ 文件中的加速度响应值,并对响应值进行均值和响应边界计算(随机不确定性计算概率边界,认知不确定性计算响应边界)。

表 1 不确定参数取值

Tab.1 The Value of Uncertainty Parameters

参数	随机不确定性	认知不确定性
帆板质量 $m(\text{kg})$	$N(8, 0.8^2)$	[5, 12]
传动比相关参数 $k$	$N(1, 0.1^2)$	[0.1, 2]

#### 4.1 随机不确定性分析

当参数为随机不确定参数,先求得系统的角加速度响应概率分布计算出响应 95%置信区域,再以置信区域的边界来评判不确定性参数对系统响应的影响。帆板质量  $m$  和传动比相关参数  $k$  都属于随机不确定性,采用传统的蒙特卡罗抽样技术对两个参数抽样 400 次。样本点如图 6 所示。帆板质心角加速度值,如图 7 所示。

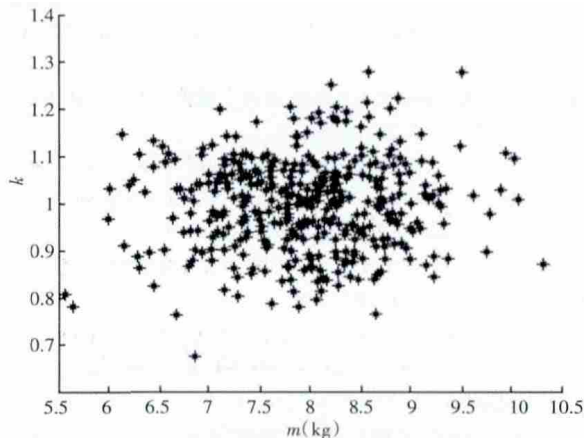


图6 两不确定参数样本点

Fig.6 Sample Point of Two Uncertain Parameters

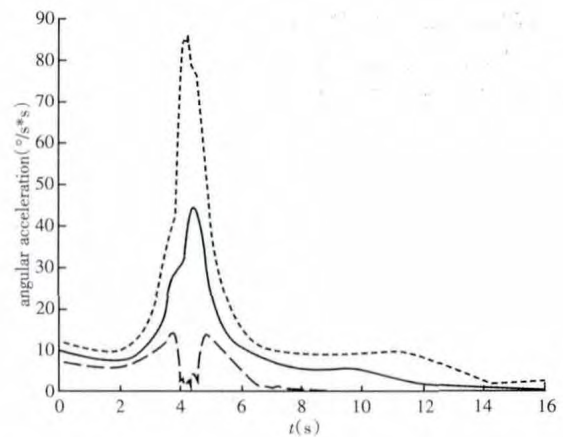


图7 角加速度均值及 95%置信边界图

Fig.7 The Mean and 95% Confidence Boundary of Angular Acceleration

图 5 中服从正态分布的不确定性参数进行蒙特卡罗抽样时样本点集中在均值点附近,符合正态分布规律。图 6 中内、外虚线表示角加速度响应 95%置信边界,中间粗实线表示角加速度均值。95%置信边界之间的空白区域越大表明影响越大,从图中可以看出帆板质量  $m$  和传动比相关参数  $k$  的不确定性对角加速度响应的影响非常大。低(2.5%)置信边界在 4s 多时刻本该是展开锁定时出现最大值却出现一段突变,图 5 中展开锁定前会出现一个很小的值,分析可知两个参数的改变不仅仅影响角加速度的大小,还影响了整个卫星帆板展开锁定的时间历程。

#### 4.2 参数为认知不确定性

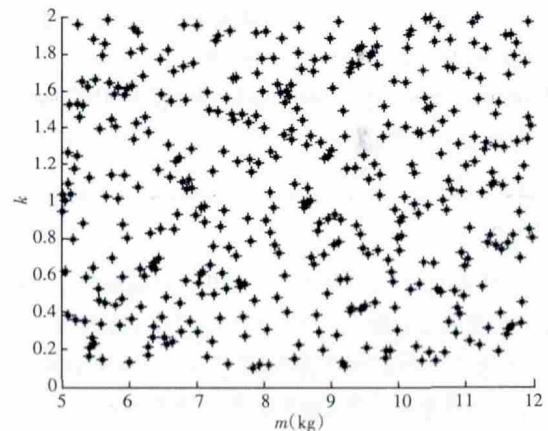


图8 两不确定参数样本点

Fig.8 Sample Point of Two Uncertain Parameters.

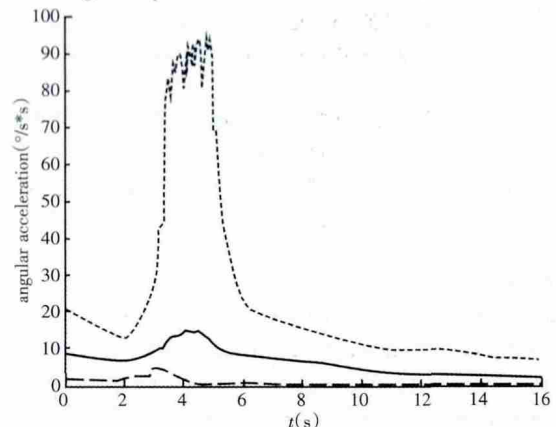


图9 角加速度均值及最大、最小边界值

Fig.9 the Average and Max/Min Boundary of Angular Acceleration

当参数为认知不确定性参数,给定参数的从属区间,得到的角加速度也是区间数。这里采用拉丁超立方对两个参数抽样 400 次。样本点如图 8 所示。将样本点写入 ADM 模型文件并求得帆板质心角加速度响应。然后,求出响应的最大值和最小值和标准值,如图 9 所示。图 8 中利用拉丁超立方抽样的区间参数的样本点相对随机参数来说分布比较分散,无规律。如图 9 所示内、外虚线表示角加速度响应最大、最小边界,中间粗实线表示角加速度均值。从图中仍然可以分析出帆板质量  $m$  和传动比相关参数  $k$  的不确定性对角加速度响应的影响很大,这与随机不确定参数的分析结果相同。

## 5 结论

在 ADAMS 中建立了国产某型号的卫星帆板系统多体动力学模型,并在设计参数下进行多体动力学分析。联合 MATLAB 和 ADAMS 计算仿真,有效地将虚拟样机技术和不确定性抽样技术进行结合处理复杂多体系统的不确定性分析。不管参数为随机不确定性还是认知不确定性,都有相应的抽样技术分析参数对系统响应的影响,都能得到系统响应的区域,传统概率得到的是置信区域,区间分析得到的则是响应区域,两种不确定性分析方法都能定性得到参数对响应的影响。帆板质量  $m$  和传动比相关参数  $k$  的不确定性对角加速度响应的影响非常大,而且影响整个卫星帆板展开锁定的时间历程。

## 参考文献

- [1] 王远锋,水小平.基于 ADAMS 柔性体的分析及在太阳阵展开中的应用[J].机械设计与制造,2006(9):146-148.  
(Wang Yuan-feng, Shui Xiao-ping. Analysis of ADAMS flexible body

and application of solararray deployment[J].Machinery Design & Manufacture. 2006(9):146-148.)

- [2] 白争锋,赵阳,田浩.含铰链间隙太阳帆板展开动力学仿真[J].哈尔滨工业大学学报,2009(3):11-14.  
(Bai Zheng-feng Zhao Yang, Tian Hao. Dynamics simulation of deployment for solar panels with hinge clearance[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009(3):11-14.)
- [3] 郭峰,黄振华,邓扬明.基于 ADAMS 航天器刚性太阳帆板动力学仿真分析[J].机械设计与制造,2004(4):71-73.  
(Guo Feng, Huang Zhen-hua, Deng Yang-ming. Test simulation of deployment motion of satellite solar array using ADAMS [J]. Machinery Design & Manufacture, 2004(4):71-73.)
- [4] Soize C. Random matrix theory and non-parametric model of random uncertainties in vibration analysis [J]. Journal of Sound And Vibration, 2003(263):893-916.
- [5] Schuller G I. On the treatment of uncertainties in structural mechanics and analysis[J]. Computers & Structures, 2007(85):235-343.
- [6] Batou A, Soize C. Rigid multibody system dynamics with uncertain rigid bodies [J]. Multibody System Dynamics, 2012(27):285-319.
- [7] Oberkampf W L, Roy C J. Verification and Validation in Scientific Computing [M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [8] Bae Ha-Rok, Grandhi R V, Canfield R A. Epistemic uncertainty quantification techniques including evidence theory for large-scale structures [J]. Computers & Structures, 2004(82):1101-1112.
- [9] Ferson S, Joslyn C A, Helton J C, et al. Summary from the epistemic uncertainty workshop: consensus amid diversity [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004(85):355-369.

(上接第 192 页)

通过改进的弹性交互系数法计算出了目标载荷为 100kN 时各个螺杆需要施加的预紧力,然后使用计算得到的预紧力进行了仿真,最终获得了近似均布的螺杆载荷,完成了研究目标。研究对于实际工程具有重要的理论指导意义,为改善压装的工艺质量提供了依据。

## 参考文献

- [1] 胡志强.电机制造工艺学[M].北京:机械工业出版社,2011.  
(Hu Zhi-qiang. Motor Manufacturing Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.)
- [2] 徐超,余绍蓉,郑晓亚.机械螺栓法兰连接的有限元力学模型比较研究[J].机械设计与制造,2009(6):37-39.  
(Xu Chao, Yu Shao-rong, Zheng Xiao-ya. Comparative evaluation of finite element models for mechanical structures with bolted joints [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(6):37-39.)
- [3] Bibel G D, Ezell R M. An improved flange bolt-up procedure using experimentally determined elastic interaction coefficients [J]. Journal of pressure vessel technology, 1992, 114(4):439-443.
- [4] Bickford J H. The bolting technology council and the search for more accurate preload [C]/ASME Pressure Vessels and Piping Conference on Advances in Bolted Joint Technology, 1989:1-6.
- [5] Alkelani A A, Nassar S A, Housari B A. Formulation of elastic interaction

between bolts during the tightening of flat-face gasketed joints [J]. Journal of mechanical design, 2009, 131(2).

- [6] Alkelani A A, Nassar S A, Housari B A. A Novel Formulation of Elastic Interaction in Gasketed Bolted Joints [C]. ASME, 2007.
- [7] 刘明.螺栓法兰密封结构优化预紧施工方案研究[D].大连:大连理工大学,2011.  
(Liu Ming. The research and optimization on the tightening scheme of bolted flange connections [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.)
- [8] 喻健良,闫兴清,刘明.交叉及顺次加载下螺栓交互作用的有限元分析[J].压力容器,2012,29(2):30-35.  
(Yu Jian-liang, Yan Xing-qing, Liu Ming. Finite element analysis to elastic interaction between bolts during cross and sequential tightening [J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(2):30-35.)
- [9] 喻健良,闫兴清,刘明.顺次及交叉加载方案下螺栓弹性交互作用规律[J].压力容器,2011,28(10):1-8.  
(Yu Jian-liang, Yan Xing-qing, Liu Ming. Elastic interaction rules between bolts during cross and sequential bolt-up process [J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(10):1-8.)
- [10] Nassar S A, ZHILJUN W U, XIANJIE Y. Achieving uniform clamp load in gasketed bolted joints using a nonlinear finite element model [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(3).