

文章编号: 1000-4750(2017)07-0214-10

基于区间与概率的星载网状天线展开可靠性分析

刘帅杰^{1,2}, 段宝岩¹, 张逸群¹

(1. 西安电子科技大学电子结构装备设计教育部重点实验室, 陕西, 西安 710071;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南, 洛阳 471000)

摘 要: 针对大型星载网状天线展开过程的特点, 该文采用区间与概率混合可靠性分析方法对星载网状天线的展开过程可靠性进行了分析和评估。首先, 建立了星载网状天线的展开失效树模型, 并对失效树模型中各底事件进行了归类; 其次, 将关键底事件中所涉及到的不确定量视其特点描述为随机变量或区间变量, 并利用混合可靠性模型分析方法获得了相应底事件的失效概率; 再者, 制作了 2 m 口径试验天线与典型试验展开机构样件, 通过试验获得了天线展开过程中伸缩杆滑动的失效概率, 进而得到了星载网状天线总的展开失效概率和展开可靠度; 最后, 对基本底事件进行了重要度分析, 找出了可能导致星载网状天线展开失效的薄弱环节。

关键词: 星载网状天线; 区间概率混合模型; 可靠性; 失效树; 重要度

中图分类号: U443+.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0082

RELIABILITY ANALYSIS OF SATELLITE MESH ANTENNAS BASED ON INTERVAL AND PROBABILITY

LIU Shuai-jie^{1,2}, DUAN Bao-yan¹, ZHANG Yi-qun¹

(1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: The deployment process reliability of a satellite mesh antenna is analyzed and evaluated using the hybrid reliability model of interval and probability. Firstly, the failure tree model of the satellite mesh antenna is established, and the basic event of the failure tree model is classified. Secondly, the uncertainties involved in the key bottom events are divided into random variables and interval variables based on their characteristics. The failure probability of the corresponding bottom event is obtained using the hybrid reliability model. A two-meter practical model is made and the failure probability of the telescopic rod in the deployment process of the antenna is obtained according to the test method. The total failure probability and reliability of the antenna is obtained. Finally, an importance degree analysis of the basic event identifies the weak link in the failure of the satellite mesh antenna.

Key words: satellite mesh antenna; interval and probability mixed model; reliability; failure tree; importance degree

星载可展开天线被安全送入太空后, 如果要在太空进行正常工作, 首先需要确保该天线能够顺利展开。星载网状天线, 如图 1 所示, 在展开的过程

中由于各种原因, 可能会出现不同形式的失效, 例如绳索管理机构失效、动力矩不足、网绳断裂、伸缩杆滑动、旋转关节卡死以及同步齿轮卡滞等失效

收稿日期: 2016-01-28; 修改日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51490660)

通讯作者: 张逸群(1986—), 男, 陕西人, 副教授, 博士, 主要从事空间可展开结构展开过程动力学分析与控制的研究 (E-mail: yiqunzhang@xidian.edu.cn).

作者简介: 刘帅杰(1990—), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事天线展开可靠性研究(E-mail: lsjxidian@163.com);

段宝岩(1985—), 男, 河北人, 教授, 博士, 博导, 主要从事电子装备机电耦合理论及应用的研究(E-mail: byduan@xidian.edu.cn).

问题,任何一种失效都会使天线不能顺利展开,从而导致卫星无法正常工作^[1]。所以,在研制阶段对星载网状天线进行展开可靠性分析与预测成为一项必要任务。

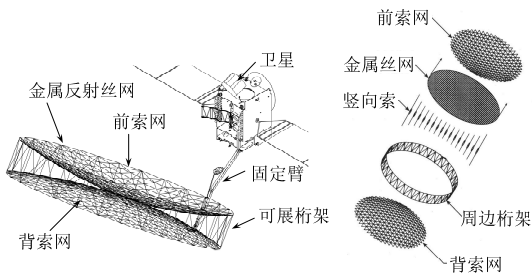


图1 星载网状天线组成

Fig.1 Composition of satellite mesh antenna

关于星载网状可展开天线的研究,目前主要集中在网面调整、反射面找形、展开过程中动力学控制与分析、空间在轨热分析以及电性能分析等方面,并且已经有很多相关的研究成果。Mistugi^[2]等对可展开天线的运动功能进行了研究和探讨。Hutton^[3]等应用有限元的方法分析了天线可展开机构展开过程中的动态特性。段宝岩等^[4-7]在星载可展开天线反射面找形,优化设计,在轨热分析,电性能分析,以及展开过程的运动分析和控制等方面进行了大量的研究工作。

可是,迄今为止关于星载网状天线展开可靠性方面的研究文献却非常少,尤其是国外相关的技术资料 and 文献更是鲜见公开发表。Misawa等^[8]针对星载天线展开机构的可靠性作了估计和探讨。Gerhard等^[9]应用 Monte Carlo 方法预测了空间折展机构的可靠性。胡太彬等^[10]针对某伞状可展开天线机构中旋转关节的运动功能进行了可靠性分析。Zhu等^[11]基于未确知理论,建立了某星载可展开天线旋转关节的可靠性分析模型,对天线机构展开过程中的可靠性进行了预测。陈建军等^[12-13]针对某周边桁架式可展开天线的展开可能性和齿轮卡滞可靠性进行了研究,并利用概率可靠性方法计算了天线展开可靠度。林立广等^[14]以周边桁架式可展开天线原理样机为对象,结合 DS 理论和区间概率理论,建立了以区间为变量的可靠性分析模型。Zhang等^[15]针对某周边桁架式可展开天线建立了展开机构运动功能的非概率可靠性分析模型,并对机构展开过程中的非概率可靠性进行了分析和预测。

事实上,概率可靠性分析方法需要确定参数的概率密度函数,而这需以大量的样本数据为基础,并且概率可靠性模型对原始数据的依赖性较强,模

型的小偏差可能会引起计算结果出现较大误差甚至错误^[16-18]。由于信息量有限,有些不确定量很难得到其精确的概率分布,只能给出其变化的区间,称这些不确定量为未知但有界变量(区间变量)。而能否从实际角度出发并能科学的描述不确定信息,直接对可靠性分析结果的准确与否起决定性作用。大型星载网状天线是结构复杂且造价昂贵的航天产品,往往单件生产,缺乏与可靠性相关的统计数据,许多变量都属于贫信息和小样本的情况,利用传统的概率可靠性分析方法预测其可靠性不再是一种合理的选择。因此,考虑采用区间与概率相结合的可靠性分析方法。

目前已有国内外学者针对区间与概率相结合的可靠性问题作了一些相关的探讨和研究。如 Elishakeoff等^[19]率先探讨了关于不确定性概率模型和凸模型的混合问题,对概率与凸集混合可靠性方法的研究起到了奠基性的作用。郭书祥等^[20]提出了一种概率非概率混合模型,但这种方法只适用于简单问题的可靠性分析。Luo等^[21]利用数学规划方法将可靠度下限的求解问题转化为单层优化问题,但该方法不适用于可靠度上限的求解。Jiang等^[22]把区间变量看作服从均匀分布的概率变量,将区间与概率混合可靠性问题转化成概率可靠性问题,但该方法不能计算出可靠度的实际变化范围。文献[23-25]把概率变量与区间变量共存的问题转化为两层嵌套优化问题,并将其成功应用于汽车车身等的可靠性分析中,然而目前基于区间与概率方法的星载网状天线展开可靠性分析与研究尚未见公开报道。

1 星载网状天线展开失效树

FTA(Failure Tree Analysis)是一种系统化的方法,可以有效的找出结构或产品的基本缺点和发生缺点的原因,以及发生的概率,从而作为可靠性分析的依据。故本文通过该方法来对星载网状可展开天线的展开失效进行分析。

1.1 失效树模型的建立

本文涉及的星载网状天线的展开口径为 16 m,天线从收拢到展开的过程中主要经历了解锁、展开以及定位三个阶段。在解锁阶段,天线靠扭簧作用摆脱自锁位置;展开阶段,天线在电机的带动下逐渐展开;锁定阶段,天线在限位开关作用下锁定在工作状态,天线的收拢与展开状态如图 2 所示。

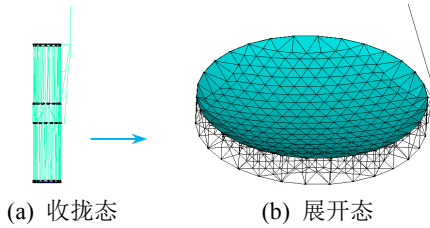


图 2 星载网状天线的收拢态和展开态

Fig.2 Folding and expansion states of satellite mesh antenna

根据天线在太空中的工作环境和机构展开原理确定天线展开失效的顶事件、中间事件和底事件。顶事件为星载网状天线展开失效，直接和间接导致星载网状天线展开失效的事件为中间事件和底事件。在各底事件与中间事件之间建立相应的逻辑关系，确定导致顶事件失效的失效模式，星载网状可展开天线的展开失效树模型如图 3 所示。

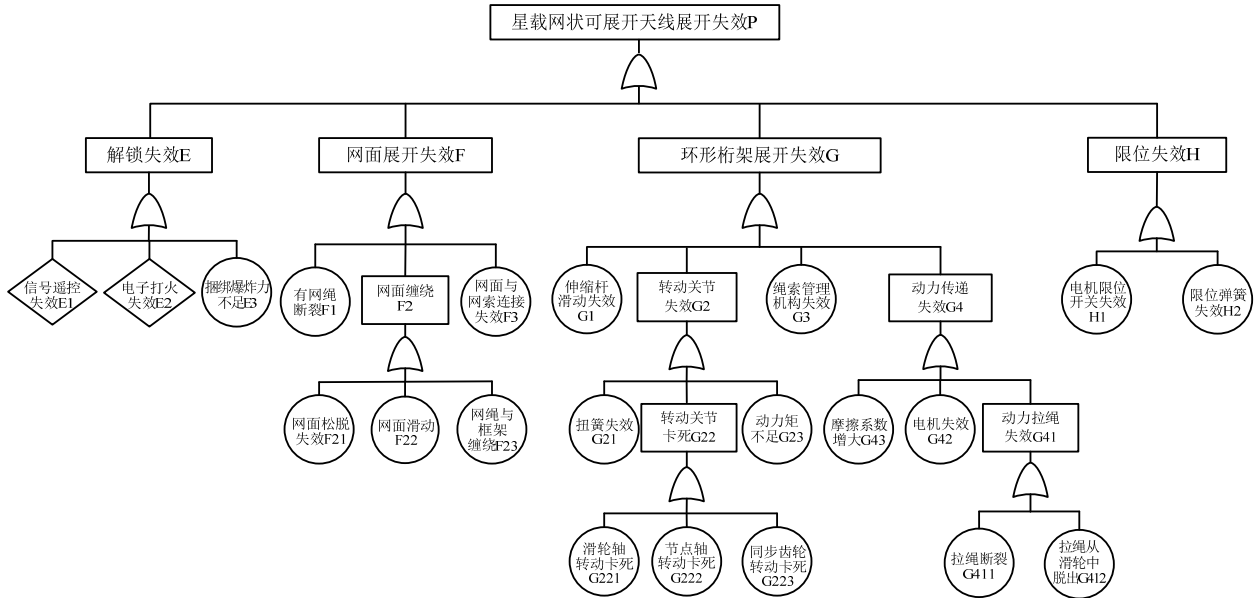


图 3 星载网状天线展开失效树模型

Fig.3 Expanded failure tree model of satellite mesh antenna

1.2 底事件的分类

按照可靠度的获取途径不同，可将星载网状可展开天线失效树模型的底事件分为三类：

- 1) 计算获得可靠度的事件：扭力弹簧失效 G21，滑动轴转动卡死 G221，节点轴转动卡死 G222，同步齿轮转动卡死 G223，动力矩不足 G23，拉绳断裂 G411。
- 2) 实验获得可靠度的底事件：伸缩杆滑动失效 G1。
- 3) 调研，专家意见以及参考资料获得可靠度的底事件：信号遥控失效 E1，电子打火失效 E2，捆索爆炸力不足失效 E3，有网绳断裂失效 F1，网面松脱失效 F21，限位弹簧失效 H2，网绳与框架缠绕失效 F23，网面与索网失效 F3，电机失效 G42，电机限位开关失效 H1，网面滑动失效 F22，绳索管理机构失效 G3，拉绳从滑轮中脱出 G412。

2 区间与概率混合可靠性模型

2.1 概率可靠性模型

进行结构可靠性分析时，最常用的方法是建立

关于不确定量的概率模型，利用概率可靠性方法进行分析。假设 $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为结构的极限状态功能函数， $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为结构的 n 维随机向量，各变量之间相互独立。将基本随机向量 \mathbf{X} 转换到独立的标准正态空间 U 中，则曲面 $G(\mathbf{u}) = 0$ 将 n 维 U 空间划分为安全域和失效域两部分，如图 4 所示。

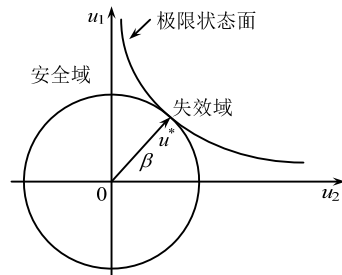


图 4 可靠性指标的几何解释

Fig.4 Geometric interpretation of reliability index

根据概率可靠性理论，不确定结构的可靠度可由以下积分形式来确定，

$$R = \Pr\{g(\mathbf{X}) \geq 0\} = \int_{G(\mathbf{u}) \geq 0} f_u(\mathbf{u}) d\mathbf{u} \quad (1)$$

式中, $f_u(\mathbf{u})$ 为 \mathbf{u} 的联合概率密度函数。根据可靠性指标法, 式(1)可以转化成一个最优化问题^[22]:

$$\begin{cases} \beta = \min \|\mathbf{u}\| = \min \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \\ \text{s.t. } G(\mathbf{u}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

优化所得的最优解 \mathbf{u}^* 为最可能失效点, $\beta = \|\mathbf{u}^*\|$ 为可靠度指标, 几何意义是指: 在标准化正态空间 U 中, 从坐标系原点到失效曲面(极限状态面)的最短距离。通过可靠性指标即可计算出不确定结构安全的可靠度为 $R = \Phi(\beta)$ 。

2.2 区间与概率混合可靠性模型

传统的可靠性分析中, 针对的不确定量都是随机变量, 往往需要大量的实验或统计数据来确定其概率密度函数, 并且当没有足够的描述不确定量的分布时, 通常会假设一种概率分布, 而这样往往会导致不可靠的计算结果。大多数情况下结构系统的不确定量既有随机变量又包含区间变量, 此时不能按照传统的方法进行分析。为了充分利用已知的信息, 避免做一些传统性的不必要假设, 随机变量用概率模型来描述, 区间变量采用区间模型来描述。针对既有概率模型又有区间模型的情况, 需要寻求一种新的可靠性分析方法。设 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 分别为随机变量和区间变量, 其中 $X_i \sim (\mu_{X_i}, \sigma_{X_i})$, $i=1, 2, \dots, n$, $Y_i \in [Y_i^L, Y_i^R]$, $i=1, 2, \dots, m$, 由系统失效准则创建的极限状态功能函数为 $g(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 。把不确定变量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 标准化为 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} , 极限状态功能函数转化成 $G(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ 。其中, 随机变量 \mathbf{X} 以及区间变量 \mathbf{Y} 的标准化过程如下:

$$u_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}, v_i = \frac{Y_i - Y_i^c}{Y_i^r}, i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中: $Y_i^c = \frac{Y_i^L + Y_i^R}{2}$; $Y_i^r = \frac{Y_i^R - Y_i^L}{2}$ 。

对于既有随机变量又有区间变量的混合可靠性模型, 极限状态方程 $G(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = 0$ 代表了在标准化的 U 空间中一簇失效面。整个 U 空间被极限状态曲面分成安全域、临界域和失效域三部分, 图 5 为具有两个随机变量 u_1, u_2 和一个区间变量 v 的情况, 图中 β_m 为混合模型的可靠性指标, $\bar{\beta}_m$ 和 $\underline{\beta}_m$ 分别为可靠性指标的上下限^[26]。

在随机变量空间内, 可定义混合可靠性模型的可靠度为 $P_m = \Pr\{G(\mathbf{u}) > 0\}$, 由于区间变量的存在, 所以结构可靠度也应该为一个区间, 即可靠度

$$P_m \in [P_m^-, P_m^+]$$

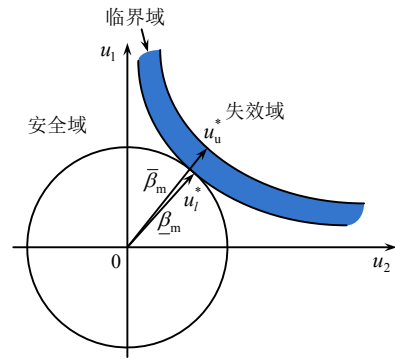


图 5 混合模型下可靠性指标的描述

Fig.5 Description of reliability index in mixed model

由可靠性指标几何含义, 区间变量 \mathbf{v}^* 存在的情况下, 可靠性指标的表达式为^[21]:

$$\beta_m = \text{sgn}(G(0, \mathbf{v}^*)) \cdot \sqrt{\mathbf{u}^T \mathbf{u}} \quad (4)$$

其中, $\text{sgn}(G(0, \mathbf{v}^*))$ 为结构的随机变量取名义值时的符号函数, 具体定义如下:

$$\text{sgn}(G(0, \mathbf{v}^*)) = \begin{cases} 1, & G(0, \mathbf{v}^*) > 0 \\ 0, & G(0, \mathbf{v}^*) = 0 \\ -1, & G(0, \mathbf{v}^*) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$G(0, \mathbf{v}^*) > 0$, 则 $\beta_m > 0$, 结构处于安全状态, 并且 β_m 值越大, 结构安全状态越稳健, 结构越可靠; $G(0, \mathbf{v}^*) < 0$, 则 $\beta_m < 0$, 结构处于失效状态, 并且 β_m 值越小, 结构失效状态越稳健, 结构可靠性越差; $G(0, \mathbf{v}^*) = 0$, 则 $\beta_m = 0$, 结构处于临界状态, 即结构可能可靠, 也可能失效, 在区间变量取某一定值时, 微小的变化便会导致结构的状态发生变化, 此时, 结构的失效状态和安全状态均不具备稳健性。

由图 5 可知可靠性指标的下限为:

$$\underline{\beta}_m = \text{sgn}(G(0, \mathbf{v}_l^*)) \cdot \sqrt{\mathbf{u}_l^{*T} \mathbf{u}_l^*} \quad (6)$$

该下限 $\underline{\beta}_m$ 可通过下述两个嵌套优化模型得到, 外层优化为寻找区间变量取值为 \mathbf{v}_l^* 时的 MPP (Most Probable failure Point) 点 \mathbf{u}_l^* , 其优化模型为:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{u}} \{\mathbf{u}^T \mathbf{u}\} \\ \text{s.t. } G(\mathbf{u}, \mathbf{v}_l^*) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

内层优化为寻找最差情况点 \mathbf{v}_l^* , 其优化模型为:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{v}} G(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \\ \text{s.t. } v_i^L \leq v_i \leq v_i^R, i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

通过可靠性指标 β_m 可以得到结构可靠度的下限:

$$P_m = \phi(\beta_m) = \int_{-\infty}^{\beta_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) du \quad (9)$$

同理, 将式(8)中的问题转化为求最大值问题, 则可以得到最好情况点 v_u^* 和 MPP 点的上界 u_u^* , 以及可靠性指标上限 $\bar{\beta}_m$ 和可靠度上限 \bar{P}_m 。

可靠性指标下限 $\underline{\beta}_m$ 的几何意义为: 在标准化 U 空间中从坐标原点到最差情况点所在失效面的最短距离。上限 $\bar{\beta}_m$ 表示从坐标原点到最好情况点所在失效面的最短距离。当所有的不确定变量均为随机变量时, 混合可靠性模型则退化为传统的概率可靠性模型, 可靠性指标 β_m 就退化为传统的概率可靠性指标。

3 基于区间与概率混合模型的星载网状天线关键底事件可靠性分析

3.1 关键底事件可靠性分析时所涉及的不确定量分类

表 1 对星载网状天线各关键部位底事件可靠度计算中所涉及到的不确定量进行分类。此处涉及的不确定量如销轴直径和支架孔内径等, 往往以名义值加公差上下限的形式给出, 这些不确定量的范围容易确定, 故往往看作区间变量^[27-28]。其余的不确定量如摩擦系数、垂直度、偏转角、拉绳拉力以及拉绳的强度等一般都具有较强的随机性, 故通常把这些不确定量看作随机变量。

表 1 底事件中不确定量的分类

Table 1 Classification of uncertainties in bottom events			
	扭力弹簧失效	滑轮轴转动卡死	节点轴转动卡死
	G21	G221	G222
随机变量	摩擦系数 f	垂直度 Δ_{A1} 和 Δ_{B1}	垂直度 Δ_{A2} 和 Δ_{B2}
区间变量	弹簧扭臂 l , 销轴半径 r	滑轮销轴直径 a_1 , 支架孔 b_{A1} , 轴套内径 b_{B1}	节点销轴直径 a_2 , 支架孔 b_{A2} , 轴套内径 b_{B2}
	同步齿轮转动卡死 G223	拉绳断裂 G411	动力矩不足 G23
随机变量	齿轮轴线的偏转角 θ_1 , θ_1 和两齿轮的中心距 a	拉绳强度 r , 拉绳拉力 F	节点轴与轴套间摩擦系数 f_1 , 滑轮轴与轴套间摩擦系数 f_2 , 绳子拉力 T
区间变量	齿轮的齿顶圆直径 d_a 和齿轮的齿根圆直径 d_f	拉绳直径 d	销轴半径 R_1 和 R_2

针对各关键底事件失效条件分别建立相应的

极限状态功能函数, 利用第 2 节中的区间概率混合可靠性模型分析方法分析评估其可靠性。以“节点轴转动卡死”底事件为例, 说明其分析过程。

3.2 “节点轴转动卡死”底事件可靠性分析

星载网状可展开天线的旋转关节主要包括节点销轴和滑轮轴, 它们的配合原理相同, 具体配合如图 6 所示。在一些比较重要的构件配合中, 例如火箭、卫星、飞机等的旋转关节处的构件以及组合件的配合, 都要求有很高的配合精度。因此, 在研制的过程中其错位对配合的协调问题是必须要首先解决的问题。影响其配合失效的主要因素有轴和孔在其轴线方向的垂直度误差、轴和孔的中心轴线协调准确度等。

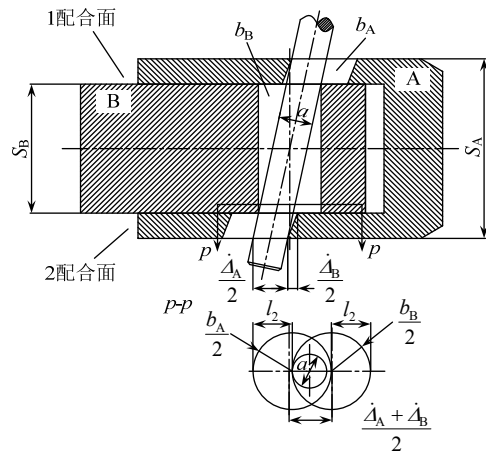


图 6 双配合面自由定位轴孔配合

Fig.6 Free location shaft hole fit in double mating surface

旋转关节处轴孔自由定位配合如图 6 所示, 要保证销轴顺利插入孔中并且可以自由转动, 则在 1 配合面处需满足:

$$\bar{b}_A - \bar{a} - \left[\dot{a} + \frac{S_A(\dot{\Delta}_B - \dot{b}_B) + S_B(\dot{\Delta}_A - \dot{b}_A)}{S_A + S_B} \right] \geq 0 \quad (10)$$

在 2 配合面处需满足:

$$\bar{b}_B - \bar{a} - \left[\dot{a} + \frac{S_A(\dot{\Delta}_B - \dot{b}_B) + S_B(\dot{\Delta}_A - \dot{b}_A)}{S_A + S_B} \right] = 0 \quad (11)$$

其中: \bar{b}_A 和 \bar{b}_B 分别为构件 A 和构件 B 的孔径的均值; \dot{b}_A 和 \dot{b}_B 分别为构件 A 和构件 B 的孔径经过中心化处理后的随机变量; $\dot{\Delta}_A$ 和 $\dot{\Delta}_B$ 则分别为构件 A 和构件 B 的孔径在轴线方向上的垂直度误差。由 $\bar{b}_A = \bar{b}_B$ 可得, 节点轴转动卡死的极限状态功能函数为:

$$g = \bar{b}_A + \left(\frac{\dot{b}_A + \dot{b}_B}{2} - \frac{\dot{\Delta}_A + \dot{\Delta}_B}{2} \right) - a \quad (12)$$

功能方程标准化为:

$$G(\delta_{\Delta_A}, \delta_{\Delta_B}, \delta_a, \delta_{b_A}, \delta_{b_B}) = 0 \quad (13)$$

根据区间与概率混合可靠性分析方法,“节点轴转动卡死”底事件的可靠性指标下限 $\underline{\beta}$ 可以通过如下优化模型得到:

Find $\delta_{\Delta_A}, \delta_{\Delta_B}$

外层优化 $\min_{(\delta_{\Delta_A}, \delta_{\Delta_B})} \sqrt{\delta_{\Delta_A}^2 + \delta_{\Delta_B}^2}$

s.t. $G(\delta_{\Delta_A}, \delta_{\Delta_B}, \delta_a, \delta_{b_A}, \delta_{b_B}) = 0$

↓ $\delta_{\Delta_A}, \delta_{\Delta_B}$

内层优化 $\min_{(\delta_a, \delta_{b_A}, \delta_{b_B})} G(\delta_{\Delta_A}, \delta_{\Delta_B}, \delta_a, \delta_{b_A}, \delta_{b_B})$

s.t. $|\delta_a| \leq 1$
 $|\delta_{b_A}| \leq 1$
 $|\delta_{b_B}| \leq 1$

(14)

一组旋转关节卡死的失效概率上限:

$$P_{fixz} = \phi(-\underline{\beta}_{fixz}) = 1 - \int_{-\infty}^{\underline{\beta}_{fixz}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) du \quad (15)$$

将式(14)中内层优化的目标函数改为 \max 函数,则可得到“节点轴转动卡死”底事件的失效概率下限。

展开天线结构中有 N 组旋转关节,且关节之间相互独立,由以上计算可得到底事件“节点轴转动卡死”失效概率为:

$$P_{fixz} = [1 - (1 - P_{fixz})^N, 1 - (1 - \bar{P}_{fixz})^N] \quad (16)$$

同样,利用区间与概率混合可靠性分析方法可以得到其他关键底事件的失效概率。

4 伸缩杆滑动实验装置及试验方法

伸缩杆能够顺利滑动而不发生卡滞是环形桁架式可展开天线能够顺利展开的必要条件。在星载网状天线环形桁架展开过程中伸缩杆的运动过程如图 7 所示。

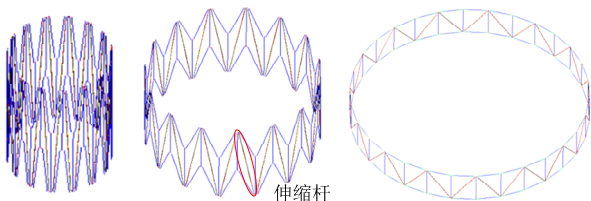
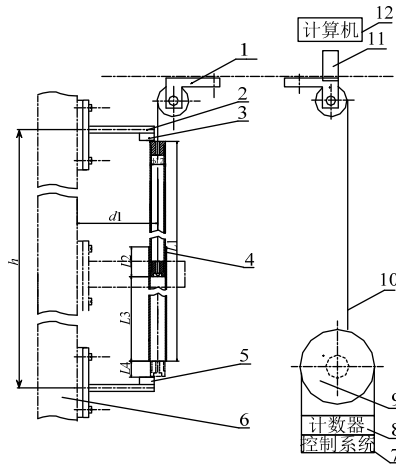


图 7 星载网状天线环形桁架展开过程

Fig.7 Deployment process of circular truss of satellite mesh antenna

由于伸缩杆的运动易于实现,故可以通过设计一套相应的实验装置来进行展开过程中伸缩杆的运动试验,从而获得伸缩杆滑动不卡滞的可靠度。设计的实验装置如图 8 所示,该装置结构简单,设计合理,可以用来进行星载网状可展开天线伸缩杆可靠性的测定^[29]。



注: 1. 定滑轮组; 2. 上开关座; 3. 上端限位开关; 4. 伸缩杆; 5. 下端限位开关; 6. 固定装置; 7. 控制系统; 8. 计数器; 9. 直流步进电机; 10. 钢丝绳; 11. 数显式推拉力计; 12. 计算单元

图 8 伸缩杆滑动可靠性实验装置

Fig.8 Reliability experimental device of telescopic rod sliding

进行该伸缩杆可靠性试验的具体方法和流程如图 9 所示。

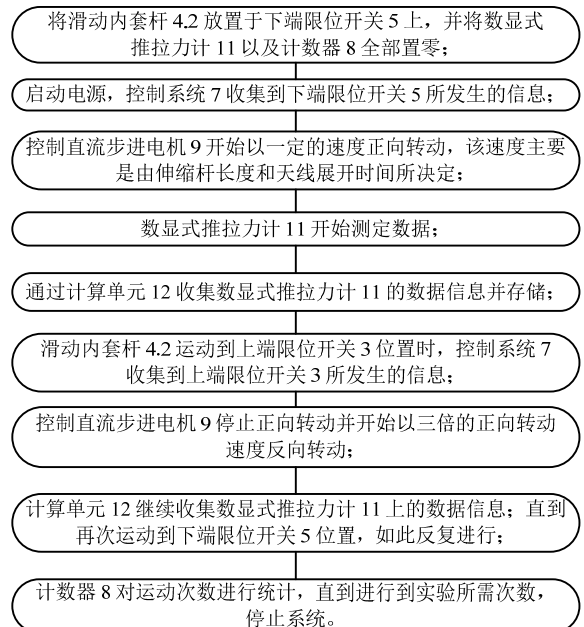


图 9 伸缩杆滑动可靠性试验方法和流程

Fig.9 Reliability experimental methods and procedures

利用该实验装置进行实验,根据矩估计方法,利用实验所测得的数据找出随机变量所服从的概率分布及其分布参数,然后根据概率分布即可得到

伸缩杆滑动的失效概率。

5 星载网状天线展开失效概率计算

通过第 3 节可以计算出关键底事件的失效概率区间, 对于“伸缩杆滑动失效”底事件, 通过第 4 节中的实验装置和试验方法可以获得其失效概率估值区间, 而对于第三类底事件, 则通过调研相关单位的数据以及相关专家给出的参考意见, 得到了其他底事件的失效概率估值区间, 具体数据见表 2 所示。

表 2 星载网状天线展开失效树中底事件失效概率

Table 2 Failure probability of bottom events in deployable failure tree of satellite mesh antenna

底事件	失效概率	底事件	失效概率
E1	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	G221	$2.50 \times 10^{-24} \sim 2.97 \times 10^{-4}$
E2	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	G222	$9.00 \times 10^{-26} \sim 1.28 \times 10^{-4}$
E3	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	G223	$2.66 \times 10^{-11} \sim 7.63 \times 10^{-4}$
F1	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	G23	$3.93 \times 10^{-5} \sim 3.95 \times 10^{-5}$
F21	$10^{-9} \sim 10^{-7}$	G3	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
F22	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	G411	$1.30 \times 10^{-21} \sim 1.00 \times 10^{-19}$
F23	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	G412	$10^{-8} \sim 10^{-7}$
F3	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	G42	$10^{-7} \sim 10^{-6}$
G1	$7.33 \times 10^{-7} \sim 3.06 \times 10^{-6}$	H1	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
G21	$3.03 \times 10^{-16} \sim 3.53 \times 10^{-13}$	H2	$10^{-6} \sim 10^{-5}$

根据失效树分析方法, 顶事件“星载网状天线展开失效”的失效概率是由各级事件经过一定的逻辑关系计算得到。考虑到各事件之间关系的复杂性与未知性, 本文假定星载网状天线失效树中每一层事件的各个事件都是相互独立的, 任何一个事件的发生与否都不影响其他事件的发生, 故失效树中每一层事件中的各个事件之间都是“或”门关系。通过各种方法得到底事件的失效概率估值区间, 再根据区间数学的方法, 逐级向上层计算, 最终得到顶事件“星载网状天线展开失效”的失效概率估值区间, 进而可以得到其可靠度估值区间。具体计算流程如图 10 所示。

转动关节卡死 G22 的失效概率是通过滑轮轴转动卡死 G221, 节点轴转动卡死 G222 以及同步齿轮转动卡死 G223 得到的, 具体计算公式为:

$$P_f(G_{22}) = [1, 1] - ([1, 1] - p_f(G_{221})) \times ([1, 1] - p(G_{222}))([1, 1] - p(G_{223})) \quad (17)$$

转动关节失效 G2 是通过扭簧失效 G21、转动关节卡死 G22 以及动力矩不足 G23 得到的, 具体计算公式为:

$$P_f(G_2) = [1, 1] - ([1, 1] - p(G_{21})) \times ([1, 1] - p(G_{22}))([1, 1] - p(G_{23})) \quad (18)$$

同理, 可计算出 $p(G_1)$ 、 $p(G_3)$ 、 $p(G_4)$, 从而可得到:

$$P_f(G) = [1, 1] - ([1, 1] - p(G_1))([1, 1] - p(G_2)) \times ([1, 1] - p(G_3))([1, 1] - p(G_4)) \quad (19)$$

进而可计算出 $p(E)$ 、 $p(F)$ 、 $p(H)$, 顶事件星载网状天线展开 P 的失效概率为:

$$P_f(P) = [1, 1] - ([1, 1] - p(E))([1, 1] - p(F)) \times ([1, 1] - p(G))([1, 1] - p(H)) = 1 - \prod_{i=1}^n ([1, 1] - p(i)) \quad (20)$$

代入数据可得到顶事件“星载网状天线展开失效”的失效概率估值区间:

$$P_f(P) = [2.56 \times 10^{-4}, 1.663 \times 10^{-3}]$$

$$\text{可靠度: } P_r(P) = [0.998337, 0.999744]$$

与传统方法得到的可靠度为一个单值相比, 本文方法考虑了区间变量的存在, 计算得到的可靠度为一个区间, 充分利用了已知的信息, 计算出的结果更加具有参考价值。

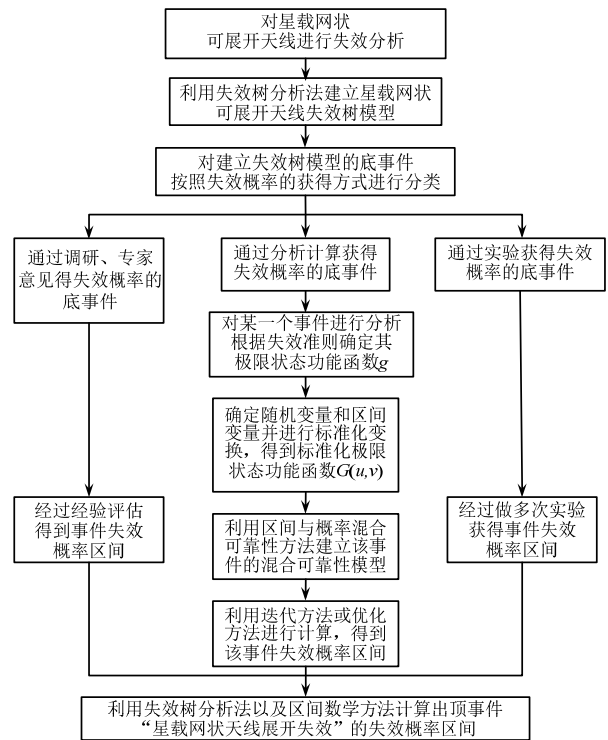


图 10 星载网状天线展开可靠度计算流程图

Fig.10 Deployable reliability calculation flow chart of satellite mesh antenna

6 星载网状天线底事件重要度计算

重要度是表述失效树中基本事件对系统故障的贡献, 重要度分析有不同的意义和计算方法, 工程中常用的有概率重要度和关键重要度。概率重要

度衡量基本事件的状态对系统发生故障概率的影响程度,物理意义为,只有第 j 个基本事件发生时,对系统失效概率的影响程度^[30]。其具体定义为:

$$I_j = \partial G(P) / \partial P_j \quad (21)$$

其中: I_j 为第 j 个底事件发生时,相对应的概率重要度; P_j 为第 j 个底事件的失效概率; $G(P)$ 是顶事件概率表达式。

对于本文中的星载网状天线展开失效树,根据概率重要度的定义知:

$$I_j = \prod_{i=1, i \neq j}^n (1 - P_i) \quad (22)$$

底事件的关键重要度同时考虑了基本事件的概率重要度和基本事件本身发生的概率对系统故障的影响,其定义为:

$$K_j = P_j I_j / G(P) \quad (23)$$

其中, K_j 为第 j 个底事件的关键重要度。本文中获得的星载网状可展开天线底事件的失效概率都为—个区间,为了保证得到的计算结果更加稳健可靠,在进行概率重要度和关键重要度的计算时,采用底事件的最大失效概率来进行计算。概率重要度和关键重要度的具体计算结果见表3。

表3 底事件的概率重要度和关键重要度

Table 3 Probability importance degree and key importance degree of bottom events

底事件	概率重要度	关键重要度
E1(信号遥控失效)	0.998354054	0.006028963
E2(电子打火失效)	0.998443914	0.060295056
E3(捆索爆炸力不足失效)	0.998443914	0.060295056
F1(有网绳断裂失效)	0.998354054	0.006028963
F21(网面松脱失效)	0.998344170	6.0289×10^{-5}
H2(限位弹簧失效)	0.998354054	0.006028963
F23(网绳与框架缠绕失效)	0.998354054	0.006028963
F3(网面与索网失效)	0.998354054	0.006028963
G42(电机失效)	0.998345068	0.000602891
H1(电机限位开关失效)	0.998354054	0.006028963
F22(网面滑动失效)	0.998354054	0.006028963
G3(绳索管理机构失效)	0.998354054	0.006028963
G412(拉绳从滑轮中脱出)	0.998344170	6.0289×10^{-5}
G1(伸缩杆滑动失效)	0.998347125	0.00184485
G21(扭力弹簧失效)	0.998344080	6.0289×10^{-6}
G221(滑动轴转动卡死)	0.998640525	0.179026365
G222(节点轴转动卡死)	0.998472304	0.077439443
G223(同步齿轮转动卡死)	0.999106559	0.460459773
G23(动力矩不足)	0.998527999	0.111072846
G411(拉绳断裂)	0.998344071	6.0289×10^{-7}

从表3可以看出,对星载网状可展开天线的展开过程影响最大的几个基本底事件依次是:同步齿轮转动卡死(G223)、滑动轴转动卡死(G221)、动力矩不足(G23)、节点轴转动卡死(G222)等底事件,在进行工程设计时应着重考虑。

7 结论

对于星载网状可展开天线,由于其结构的复杂性,进行展开可靠性分析时所涉及的不确定变量较多,而其中的一些不确定量大多数情况下很难得到其精确的概率信息,对于这些不确定量如果仍假设为随机变量,利用传统的概率方法来处理,难免会造成计算结果的不可靠。因此,本文采用区间与概率混合可靠性分析方法对星载网状天线的展开可靠性进行分析和评估,基于文中16 m口径星载网状天线,通过理论分析、数值仿真以及实物验证,作者得到如下结论。

(1) 采用混合可靠性分析方法得到了天线展开可靠度的估值区间,该方法能够充分利用已知的信息,避免一些人为的假设,可以解决星载网状天线在可靠性分析时随机变量与区间变量共存的问题,计算出的结果更加具有参考价值。

(2) 对于星载网状天线展开失效树,按照可靠度的获取途径不同可将底事件分为三类,对于不同种类的底事件可以分别通过不同的方法获得其失效概率区间。

(3) 针对伸缩杆滑动失效底事件导致的天线展开失败,通过设计一种文中所述的伸缩杆滑动实验装置和试验方法可以得到伸缩杆滑动失效的失效概率区间。

(4) 通过星载网状天线失效树基本底事件的重要度分析,可以得知同步齿轮转动卡死,滑动轴转动卡死,动力矩不足,节点轴转动卡死等底事件对星载网状天线展开可靠性的影响最大,是天线展开过程中的薄弱环节。

本文对星载网状天线展开可靠性进行了详细地分析和研究,利用混合可靠性分析方法对天线的展开可靠度进行了评估和预测,为天线的研制和工程应用提供了参考。但是仍然存在一些问题需要进行考虑,如失效树各底事件之间不独立,随机变量的取值范围不是 $\pm\infty$ 等情况时模型与方法应如何变化等。

参考文献:

- [1] 陈建军, 曹鸿钧, 张建国, 等. 论大型星载展开天线结构系统的可靠性[J]. 工程力学学报, 2014, 31(2): 25—33.
Chen Jianjun, Cao Hongjun, Zhang Jianguo, et al. Reliability overview of large spaceborne deployable antenna structure system [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 25—33. (in Chinese)
- [2] Mistugi J. Comparative Analysis of deployable truss structures for mesh antenna reflectors [J]. AIAA, 1998, 36(8): 1546—1548.
- [3] Hutton D V. Modal analysis of deployable truss using the finite element method [J]. Spacecraft, 1984, 21(5): 468—472.
- [4] 段宝岩. 天线结构分析、优化与测量[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998: 306—315.
Duan Baoyan. Analysis, optimization and measurement of antenna structure [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998: 306—315. (in Chinese)
- [5] 段宝岩. 柔性天线结构设计、优化与精密控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 278—343.
Duan Baoyan. Design, optimization and precision control of flexible antenna structure [M]. Beijing: Science Press, 2005: 278—343. (in Chinese)
- [6] Zhang Y Q, Duan B Y, Li T J. A controlled deployment method for deployable flexible space antennas [J]. Acta Aerospace, 2012, 81(1): 19—29.
- [7] Zhang S X, Du J L, Duan B Y, et al. Integrated structural electromagnetic shape control of cable mesh reflector antennas [J]. AIAA Journal, 2015, 53(5): 1395—1398.
- [8] Misawa M, Yasaka T, Miyake S. Analytical and experimental investigations for satellite antenna deployment mechanisms [J]. Spacecraft, 1989, 26(3): 181—187.
- [9] Gerhard S. S, Wolfgang H. T. Practical procedures for reliability estimation of spacecraft structures and their components [J]. AIAA, 1998, 36(8): 1509—1515.
- [10] 胡太彬, 陈建军, 张建国, 等. 伞状天线旋转关节运动功能的可靠性分析[J]. 空间科学学报, 2005, 25(6): 552—557.
Hu Taibin, Chen Jianjun, Zhang Jianguo, et al. Movement reliability of rotation joint of umbrella antenna [J]. Chinese Journal of Space Science, 2005, 25(6): 552—557. (in Chinese)
- [11] Zhu Z Q, Chen J J. Motion reliability analysis of rotation joint in umbrella antenna [J]. International Journal of Performability Engineering, 2010, 6(3): 233—242.
- [12] 陈建军, 张建国, 段宝岩, 等. 周边桁架式大型星载天线的展开可能性分析[J]. 宇航学报, 2005, 26(10): 130—134.
Chen Jianjun, Zhang Jianguo, Duan Baoyan, et al. The expand probability analysis of a surrounding large truss-board antenna [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(10): 130—134. (in Chinese)
- [13] 陈建军, 张建国, 段宝岩, 等. 大型星载天线展开机构中同步齿轮系防卡滞的可靠性分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(3): 1—5.
Chen Jianjun, Zhang Jianguo, Duan Baoyan, et al. Analysis of the seizure-preventing reliability of synchronous gears in the deployment mechanism of a large satellite antenna [J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(3): 1—5. (in Chinese)
- [14] 林立广, 陈建军, 马娟, 等. 大型星载天线展开系统故障树的区间分析方法[J]. 机械强度, 2010, 32(1): 68—73.
Lin Liguang, Chen Jianjun, Ma Juan, et al. Interval analysis method of faulty tree for the deployment system of a large satellite antenna [J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(1): 68—73. (in Chinese)
- [15] Zhang J G, Chen J J. Reliability analysis of the deployment mechanism of a large satellite antenna based on the Non-probabilistic model [C]. 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2006, Jan. 19-21. Harbin, China. Proceedings of ISSCAA, 2006: 1109—1114.
- [16] Ben-Haim Y. A Non-probabilistic Concept of Reliability [J]. Structural Safety, 1994, 14(4): 227—245.
- [17] Elishakoff I. Essay on uncertainties in elastic and viscoelastic structures: from A M Freudenthal's criticisms to modern convex modeling [J]. Computer Structure, 1995, 56(6): 871—895.
- [18] Schettrokogel A, Elishakoff I. On the ergodicity assumption in an applied mechanics problem [J]. Journal of Applied Mechanics, 1985, 52(1): 133—136.
- [19] Elishakoff I, Colomhi P. Combination of probabilistic and convex models of uncertainty when scarce knowledge is present on acoustic excitation parameters [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1993, 104(2): 187—209.
- [20] 郭书祥, 吕震宙. 结构可靠性分析的概率和非概率混合模型[J]. 机械强度, 2002, 24(4): 524—526.
Guo Shuxiang, Lü Zhenzhou. Hybrid probabilistic and non-probabilistic modal of structural reliability [J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(4): 524—526. (in Chinese)
- [21] Luo Y J, Kang Z, Alex L. Structural reliability assessment based on probability and convex set mixed model [J]. Computers and Structures, 2009, 87(21): 1409—1410.
- [22] Jiang C, Lu G Y, Han X, et al. A new reliability analysis method for uncertain structures with random and interval variables [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2012, 8(2): 169—182.
- [23] Du X P. Interval reliability analysis [C]// Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering

- Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Las Vegas: ASME, 2007: 2—3.
- [24] Qiu Z P, Wang J. The interval estimation of reliability for probabilistic and non-probabilistic hybrid structural system [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2010, 17(5): 1142—1154.
- [25] Jiang C, Li W X, Han X, et al. Structural reliability analysis based on random distributions with interval parameters [J]. *Computers and Structures*, 2011, 89(23): 2292—2302.
- [26] 刘帅杰, 段宝岩, 杨东武. 基于区间与概率的星载可展天线齿轮防卡分析[J]. *西安电子科技大学学报*, 2016, 43(3): 57—72.
Liu Shuaijie, Duan Baoyan, Yang Dongwu. Interval and probability based analysis of seizure-preventing for synchronous gears of Astromesh deployable satellite antenna [J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(3): 57—72. (in Chinese)
- [27] Ferson S, Joslyn C A, Helton J C, Oberkampf W L. Summary from the epistemic uncertainty workshop: Consensus amid diversity [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2004, 85(1): 355—369.
- [28] Du X, Sudjianto A, Huang B. Reliability-based design under the mixture of random and interval variables [J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(6): 1068—1076.
- [29] 西安电子科技大学. 一种周边桁架式可展开天线伸缩杆可靠性试验装置及方法[P]. 中国: CN104101493A. 2014-10-15.
Xidian University. An experimental apparatus and method for reliability of circular truss deployable antenna [P]. China: CN104101493A. 2014-10-15. (in Chinese)
- [30] 陈建军, 张建国, 段宝岩, 等. 大型星载天线的展开系统失效树分析[J]. *机械设计与研究*, 2005, 21(3): 7—8.
Chen Jianjun, Zhang Jianguo, Duan Baoyan, et al. Faulty tree analysis of the deployment system a large satellite antenna [J]. *Machine Design and Research*, 2005, 21(3): 7—8. (in Chinese)

(上接第 185 页)

- [9] Huang M F, Lou W J, Chan C, Lin N, Pan X T. Peak distributions and peak factors of wind-induced pressure processes on tall building [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2013, 139(12): 1744—1756.
- [10] Huang M F, Lou W J, Chan C, Sheng B. Peak factors of non-Gaussian wind forces on a complex-shaped tall building [J]. *Structure Design of Tall and Special Building*, 2013, 22(14): 1105—1118.
- [11] 李寿科, 李寿英, 陈政清, 孙洪鑫. 围护结构非高斯风压极值估计的改进 Hermite 峰值因子法[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(4): 112—118.
Li Shouke, Li Shouying, Chen Zhengqing, Sun Hongxing. Prediction of non-Gaussian wind pressure extreme value on claddings with modified Hermite peak factor method [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(4): 112—118. (in Chinese)
- [12] 王飞, 全涌, 顾明. 基于广义极值理论的非高斯风压计算方法[J]. *工程力学*, 2013, 30(2): 44—50.
Wang Fei, Quan Yong, Gu Ming. An extreme-value estimation of non-Gaussian wind pressure based on generalized extreme value theory [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 30(2): 44—50. (in Chinese)
- [13] Gioffre M, Gusella V, Grigoriu M. Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. II: Numerical simulation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(9): 990—995.
- [14] 庄翔, 董欣, 丁洁民, 郑毅敏. 矩形高层建筑表面风压脉动的非高斯特性研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(增刊 1): 13—18.
Zhuang Xiang, Dong Xin, Ding Jiemin, Zheng Yimin. Non-Gaussian features of wind pressure fluctuations on a rectangular high-rise building [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(Suppl 1): 13—18. (in Chinese)
- [15] Kim Y C, Kanda J. Wind pressures on tapered and set-back tall buildings [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 39: 306—321.
- [16] Kareem A, Zhao J. Analysis of non-Gaussian surge response of tension leg platforms under wind loads [J]. *Journal of Off-shore Mechanics and Arctic Engineering*, ASCE, 1994, 116(3): 137—144.
- [17] Kumar K S, Stathopoulos T. Power spectra of wind pressures on low building roofs [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74(6): 665—674.