

大型星载天线展开系统故障树的区间分析方法*

INTERVAL ANALYSIS METHOD OF FAULTY TREE FOR THE DEPLOYMENT SYSTEM OF A LARGE SATELLITE ANTENNA

林立广** 陈建军*** 马娟 刘国梁 段宝岩

(西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

LIN LiGuang CHEN JianJun MA Juan LIU GuoLiang DUAN BaoYan

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

摘要 针对某周边桁架式大型星载天线进行展开可靠性研究。分析大型星载天线的展开机理,并在对星载天线展开系统故障树分析的基础上,针对传统故障树分析中存在的不确定性难以量化的问题,结合 D-S(dempster-shafer)理论和区间概率理论,提出星载天线展开机构故障树区间分析方法,构造失效独立和失效相关情况下故障树区间分析的与门区间算子和或门区间算子,在此基础上对系统的展开可靠度进行分析和预测。可靠性分析的结果表明文中提出的计算模型和分析方法是合理和可行的。

关键词 星载天线 展开机构 故障树 D-S(dempster-shafer)理论 区间概率理论

中图分类号 V240.2

Abstract A study on the deployment reliability of a large satellite antenna with hoop-truss was presented. Firstly, the movement principium of the large antenna was studied. Secondly, To formulate the uncertainties of conventional fault tree analysis, the method of fault tree interval analysis based on D-S(dempster-shafer) theory and interval probability theory is proposed. On the condition that the premises in FTA(faulty tree analysis) is dependence or independence between basic events, the AND operator and the OR operator are proposed to compute interval probability of FTA, and upon which the system reliability was forecasted. The reliability analysis shows that the rationality and validity of the presented method.

Key words Spaceborne antenna; Deployment mechanism; Faulty tree analysis; D-S(dempster-shafer) theory; Interval probability theory

Corresponding author: LIN LiGuang, E-mail: jichen@xidian.edu.cn, Tel: +86-29-88204489, Fax: +86-29-88232281

The project supported by the National 863 plans (No. 2006AA04Z402), and the National Defence Pre-research of Foundation of China (No. Y13406040101).

Manuscript received 20080403, in revised form 20080701.

1 引言

随着人类对宇宙空间的探索,各种星载天线相继问世,现已广泛应用于地球静止轨道通信卫星、跟踪与数据中继卫星、电子侦察卫星等多种卫星上。由于运载火箭中风罩和卫星平台尺寸空间的限制,大型星载天线在发射运载阶段一般采用折叠方式,待卫星入轨定位后通过地面遥控指令,使其展开机构启动将天线网面展开至设计要求位置并予以锁定。因此,展开机构是展开天线结构中不可或缺的重要部分,星载天线最终能否可靠地展开并锁定保持其工作状态,在某种意义上即意味着卫星发射任务的成功与否。为确保星

载天线在太空中能按要求顺利地展开,在研制阶段对其结构展开的可靠性进行理论分析和预测,具有重要的现实意义。

在系统的可靠性度量中,故障树分析是一种广泛应用于复杂系统的可靠性分析方法,它由顶事件和描述顶事件发生的底事件所组成的逻辑框图。虽然整个系统出现故障的不确定度很难表达清楚,但却可以通过概率理论进行度量。基于概率的传统故障树分析方法已被证明是非常有价值的,已成为工程中常用的一种系统分析法,广泛应用于机械、电子等领域。但是传统的故障树分析法往往因为难于获取充分的数据,具体实现起来难度很大,特别是像大型星载天线展开系

* 20080403 收到初稿, 20080701 收到修改稿。国家 863 高技术研究发展计划项目(2006AA04Z402)和国防预研基金(Y13406040101)资助。

** 林立广, 男, 1975 年 5 月生, 河南南阳人, 汉族。西安电子科技大学博士研究生, 讲师, 研究方向为机械与结构可靠性。通信地址: 西安电子科技大学 187 信箱。

*** 陈建军, 男, 1951 年 3 月生, 河北保定人, 汉族。西安电子科技大学教授, 博士生导师, 研究方向为计算结构力学、机械可靠性工程。

统,一般在缺少足够数据的情况下,要对故障概率作出精确的估计是很困难的。考虑到估计值的不确定性,故障率往往被当作服从已知概率分布的随机变量进行处理,显然这种处理有失偏颇。目前,有关不确定输入可靠性数据问题的研究,大多数通过故障树分析传递输入数据的不确定性特征。文献[1]采用可靠性统计标准方差。文献[2-3]提出另外一种与概率不同的方法,采用模糊逻辑对故障可能性编码,将可能性范围作为概率估计反映输入数据的不确定性。文献[4]用模糊数描述时间发生的概率,避免分析人员为获取事件发生概率精确值而遇到的难题,但是隶属度函数的确定对数据量有一定的要求。

星载天线展开装置的机械部分为机构,目前关于机构可靠性方面的理论和方法还不成熟,对于运动功能可靠性研究很少^[5-7]。当前关于星载天线的研究主要集中在展开结构设计和展开动力学分析方面^[8-9]。迄今为止,有关星载天线展开可靠性研究的文献甚少。本文利用区间概率理论^[10-12]和D-S(dempster-shafer)理论^[11],提出星载天线展开系统故障树区间分析方法,构造故障树区间算子,对研制中的某周边桁架式大型星载天线的展开可靠性问题进行研究,并在展开系统故障树分析的基础上对系统的可靠性进行预测。

2 星载天线展开机构工作原理及展开过程故障树分析

2.1 天线展开机构工作原理

本文涉及的星载展开天线示意图见图1,为周边桁架式结构,天线口径17米,由拉索形成抛物面轮廓,上面铺设金属反射网,桁架单元有48组,每组桁架单元均由矩形框架和对角杆构成,并在对角处增加外伸三角杆,以提高桁架刚度,杆与杆之间分别由八支杆节点、四支杆节点和两支杆节点相联。图2是周边桁架两个等分段的放大图,从图中可见周边桁架的结构组成和桁架连接方式。



图1 天线结构示意图

Fig.1 Diagram for antenna structure

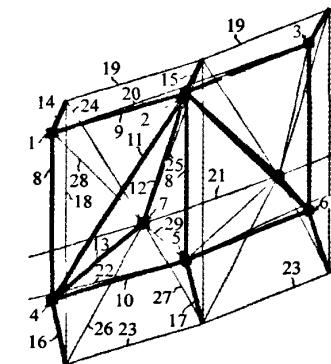


图2 周边桁架的两单元示意图

Fig.2 Diagram for 2 elements of hoop-truss

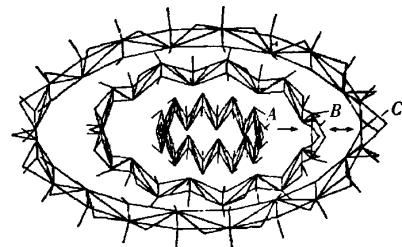


图3 展开过程示意图

Fig.3 Diagram of deployment process

天线展开机构由电机、绳轮、扭簧、牵引拉绳、转动关节及中心圆筒等零部件组成,天线展开过程主要涉及解锁、展开、定位三个阶段。解锁阶段,天线的捆索爆断脱落,在扭簧作用下,桁架稍微张开以摆脱自锁位置;展开阶段,电机启动,穿过桁架对角杆的牵引拉绳收紧缠绕在绳轮上,对角杆的长度缩短,桁架单元由细长菱形逐渐变为矩形,缠绕在中心圆筒上的网面及其拉索从中心圆筒拉出;定位阶段,牵引电机停止转动,

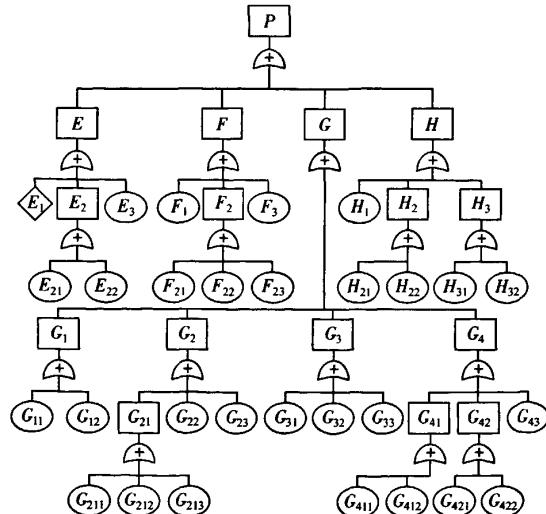


图4 星载天线展开系统故障树

Fig.4 Faulty tree of deployment system of satellite antenna

在对角杆弹簧锁和各关节限位块的作用下,天线展开到位并锁定。图 3 为周边桁架展开过程的示意图。

2.2 天线展开过程故障树分析

故障树分析(fault tree analysis, FTA)是在系统设计过程中,通过对造成系统失效的各种可能因素(包括硬件、软件、环境、人为因素)进行分析,画出故障树逻辑框图;根据故障树中系统失效原因的各种组合和发生概率,可以计算出整个系统的失效概率。故障树建立的目标事件被称为底事件,将引起顶事件发生的最根本原因的事件称为底事件,位于顶事件与底事件之间的其他事件称为中间事件,建立故障树的过程即在顶事件、中间事件和底事件之间确定逻辑关系。

本文针对所研究的星载天线的设计方案,根据展开系统的工作原理、展开过程和太空工作环境等分析,构

建天线展开机构系统的故障树,如图 4 所示,其中的符号说明见表 1。该故障树的建立未考虑天线展开的动力效应和各运动副的磨损与疲劳失效因素。不考虑天线的展开动力效应是由于天线的展开是一个极缓慢的过程,且无过大的冲击性载荷作用。目前的天线展开机构有相当的刚度,因此展开的动力效应(冲击作用)对天线展开可靠性的影响较小。不考虑磨损和疲劳失效的理由是展开机构中各运动副的有效工作时间短,而且为低速运动,磨损和疲劳失效的现象几乎不会发生。

3 星载天线展开机构故障树区间分析方法

3.1 故障树区间分析法基本思想及与传统的故障树分析方法比较

在实际工程中,故障树的一些底事件以前很少发

表 1 系统故障树符号说明

Tab.1 Symbol instruction of system faulty tree

代号 Symbol	含义 Signification	代号 Symbol	含义 Signification	代号 Symbol	含义 Signification	代号 Symbol	含义 Signification
<i>P</i>	天线展开失效 Antenna deployment fault	<i>F</i> ₂	网面缠绕 Mesh-surface intertwist	<i>G</i> ₂₁	转动关节卡死 Rotary joints jam	<i>G</i> ₄₁₁	有杂质入侵 Impurity immerse
<i>E</i>	解锁失效 Uncoil lock fault	<i>F</i> ₃	网索连接失效 Mesh-cable connection fault	<i>G</i> ₂₂	扭力弹簧失效 Torque spring fault	<i>G</i> ₄₁₂	润滑脂老化 Lubricative grease aging
<i>F</i>	网面展开失效 Mesh-surface deployment fault	<i>F</i> ₂₁	网面松脱失效 Mesh-surface loose and doff fault	<i>G</i> ₂₃	动力矩不足 Torque insufficient	<i>G</i> ₄₂₁	拉绳断裂 Pull cordage rupture
<i>G</i>	桁架展开失效 Truss deployment fault	<i>F</i> ₂₂	网面轴向滑移 Mesh-surface axial move	<i>G</i> ₃₂	绳索结构缠绕 Cordage structure intertwist	<i>G</i> ₄₂₂	从滑轮中脱出 Disengage from pulley
<i>H</i>	限位失效 Location limited fault	<i>F</i> ₂₃	网绳框架缠绕 Mesh-cable frame intertwist	<i>G</i> ₃₃	不是有序拉出 Not pull orderly	<i>H</i> ₁	电机限位失效 Location limited of electromotor fault
<i>E</i> ₁	电子打火失效 Electro-strike fire fault	<i>G</i> ₁	角杆滑动失效 Diagonal bar slippage fault	<i>G</i> ₄₁	摩擦因数增大 Friction coefficient increase	<i>H</i> ₂	弹簧锁位失效 Spring lock-location fault
<i>E</i> ₂	信号遥控失效 Signal telecontrol fault	<i>G</i> ₂	转动关节失效 Rotation joint fault	<i>G</i> ₄₂	动力拉绳失效 Power of draw-cordage fault	<i>H</i> ₃	限位挡板失效 Location limited baffle fault
<i>E</i> ₃	捆索爆炸不足 Insufficient blast on binding cable	<i>G</i> ₃	索网管理机构失效 Administrant mechanism of cable-net fault	<i>G</i> ₄₃	电机失效 Electromotor fault	<i>H</i> ₂₁	弹簧强度失效 Spring strength fault
<i>E</i> ₂₁	发射装置失效 Launch equipment fault	<i>G</i> ₄	动力传递失效 Power transfer fault	<i>G</i> ₂₁₁	滑轮轴卡死 Pulley axletree jam	<i>H</i> ₂₂	珠孔配合失效 Fit of ball bearing and aperture
<i>E</i> ₂₂	接收装置失效 Receiver equipment fault	<i>G</i> ₁₁	弹簧锁阻过大 Spring self-lock resistance over large	<i>G</i> ₂₁₂	节点轴卡死 Node axletree jam	<i>H</i> ₃₁	限位挡板变形 Distortion of location-limited baffle
<i>F</i> ₁	有网绳断裂 Mesh-cable rupture	<i>G</i> ₁₂	套管卡死 Bushing jam	<i>G</i> ₂₁₃	齿轮转动卡死 Gears rotate jam	<i>H</i> ₃₂	限位挡板断裂 Rupture of location-limited baffle

生或者从未发生过,无法提供充分的数据,而传统的故障树分析方法则要求提供这些底事件发生概率的精确值,实际系统存在的不确定性以及数据的不精确,会对事件发生的概率产生影响。另外,概率模型的应用需要较多数据信息描述参数的概率分布,且通常计算量较大,概率数据的小误差可能导致顶事件概率出现较大误差。因而,概率模型在统计数据较少或计算模型不够精确时,不是一种理想的模型,亦难以用精确值表示事件发生的概率。

故障树区间分析法则利用区间分析^[12]的思想,采用D-S理论得到底事件的区间概率,再应用区间分析理论进行区间数值运算,解决故障树量化计算的问题,从而获得的是顶事件发生的故障区间概率。相对于传统的故障树分析方法,区间分析方法不需要不确定变量的概率分布,只需知道不确定变量所在的范围,而后者比前者更容易确定。故该方法对数据量要求相对较少,更适合数据缺乏或者小样本的情况。考虑到大型星载天线属于昂贵复杂的航天设备,而且是单件生产,统计数据匮乏,故基于区间分析的故障树分析方法将更为合理。

3.2 区间概率理论

区间概率理论^{[10][13-16]}(interval probability theory)是Cui和Blockley在20世纪90年代提出的,用于量化表示专家系统的证据。区间概率理论作为描述不确定性的统一的概念,是对经典概率理论的推广,可以用于描述一般的不确定性。它实质上是将区间数应用于概率理论,即任意概率可用区间数表示,以一种简单的方式处理系统的模糊性和不完整性。该理论适用于数据量少、数据不完整及不连续知识的复杂推理,它可以将各种不同类型的数据融合在一起,根据全概率理论给出问题的解。

3.3 D-S理论

D-S理论作为研究事物的不确定性和不可知性的一种数学理论,由于满足比概率更弱的公理系统,因此可视为对经典概率论的一种推广,具有比贝叶斯方法更广泛的应用范围,特别适合于证据较少的问题领域。该理论的主要优点在于既可以获得每个事件的区间概率,又综合专家们的不同观点,避免某些偏见,为故障树分析输入数据的获取提供一种途径。

D-S理论^{[11][13-25]}的一个基本概念是基本概率分配函数 m ,满足

$$0 \leq m(A) \leq 1 \quad \sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1$$

$$0 \leq m(\emptyset) \leq 1 \quad (\emptyset \text{ 表示空集}) \quad (1)$$

其中, A 表示一个属于 Ω 的子集, 对应于区间 $[0, 1]$ 之

间的一个数; $m(A)$ 为 A 的基本概率数或 Mass 函数。

A 的信任函数 $B: 2^{\Omega} \rightarrow [0, 1]$ 为

$$B(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (2)$$

其中, $B(A)$ 表示所有 A 的子集的准确信任程度的和,是总的信任。

A 的似然函数 $L: 2^{\Omega} \rightarrow [0, 1]$ 为

$$L(A) = 1 - B(\bar{A}) = \sum_{B \subseteq \Omega} m(B) - \sum_{B \subseteq A} m(B) = \sum_{B \cap A = \emptyset} m(B) \quad (3)$$

其中 $\bar{A} = \Omega - A$

根据 D-S 理论的合成公式^[13]有

$$m_1 \oplus m_2(c) =$$

$$\begin{cases} 0 & C = \emptyset \\ \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) \oplus m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) \oplus m_2(B)} & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $m_1(A)$ 表示根据证据 A 的 Mass 函数; $m_2(B)$ 表示根据证据 B 的 Mass 函数; $m(C)$ 表示总的 Mass 函数。

用 D-S 理论确定底事件故障发生的区间概率 $[B(A), L(A)]$, 是故障树区间分析的关键一步。

3.4 各底事件相互独立的故障树分析的基本区间算子

若有 m 个底事件,其中事件 j 发生的区间概率可表为

$$p_j = [a_j, b_j] \quad (5)$$

其中, a_j 和 b_j 分别对应信任函数 B 和似然函数 L 。

下面根据区间运算法则,构造“与门区间算子”和“或门区间算子”。有了基本区间算子,则可方便求出禁门、异或门等区间算子。

(1) 如果某个与门的输入为 m 个底事件,则与门区间算子的表达式为

$$I_{\text{AND}} = \prod_{i=1}^m p_i = \prod_{i=1}^m [a_i, b_i] \quad (6)$$

其中, I_{AND} 表示与门输出,为一区间数。

(2) 如果某个或门的输入为 m 个底事件,由于实数 1 用区间分析理论可以表示为区间数 $[1, 1]$,根据区间运算规则可得或门区间算子为

$$I_{\text{OR}} = [1, 1] - \prod_{i=1}^m ([1, 1] - p_i) =$$

$$[1, 1] - \prod_{i=1}^m ([1, 1] - [a_i, b_i]) =$$

$$[1, 1] - \prod_{i=1}^m [1 - b_i, 1 - a_i] \quad (7)$$

其中, I_{OR} 表示或门输出,为一区间数。

3.5 各底事件失效相关时的故障树失效概率计算

3.5.1 故障树底事件失效相关性

定义1 设事件 A 发生的概率可以用区间数 $I(A)$ 度量, 则可表示为 $I(A) = [P_L(A), P_U(A)]$, 则称 $I(A)$ 是事件 A 发生的区间概率, $P_L(A)、P_U(A)$ 分别为区间概率 $I(A)$ 的下界和上界。 $I(A) = [0, 0]$ 表示底事件一定不发生, $I(A) = [0, 1]$ 表示底事件一定发生, $I(A) = [1, 1]$ 表示底事件是否发生完全未知。

定义2 底事件 A 和底事件 B 之间的相关程度可用相关系数 ρ_{AB} 定义为

$$\rho_{AB} = \frac{I(A \cap B)}{\min(I(A), I(B))} \quad (8)$$

其中, $I(A \cap B)$ 表示两个底事件同时发生时的区间概率, 显然相关系数 ρ_{AB} 也是一区间数, 即 $\rho_{AB} = [\rho_L, \rho_U]$ 。当 $\rho_{AB} = [1, 1]$ 时, 表示底事件 A 和 B 之间存在 $A \subset B$ 或 $B \subset A$ 的关系, 当 $\rho_{AB} = 0$ 表示底事件 A 和 B 之间相互独立。

相关系数可推广到多个底事件的情况, 对任意 n 个底事件 A_1, A_2, \dots, A_n , 相关系数为

$$\rho = \frac{I(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n)}{\min_{1 \leq i, j, \dots, l \leq n; i \neq j, \dots, l} (I(A_i \cap A_j \cap \dots \cap A_l))} \quad (9)$$

3.5.2 失效相关时的故障树失效概率估算

根据区间概率理论给出失效相关时故障树分析的基本区间算子。

(1) 与门区间算子

考虑到底事件的失效相关性, 与门算子应该修改为与门区间算子, 即

$$I_{AND} = I(A \cap B) = \rho_{AB} \cdot \min(I(A), I(B)) \quad (10)$$

其推广式为

$$I_{AND} = I(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) = \rho \cdot \min(I(A_i \cap A_j \cap \dots \cap A_l)) \quad (11)$$

式中, I_{AND} 表示与门输出, 显然为一区间数。

(2) 或门区间算子

考虑到底事件的失效相关性, 或门算子应该修改为或门区间算子, 即

$$I_{OR} = I(A_1 \cup A_2) = I(A_1) + I(A_2) - I(A_1 \cap A_2) = I(A_1) + I(A_2) - \rho_{AB} \cdot \min(I(A), I(B)) \quad (12)$$

其推广式为

$$I_{OR} = I(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = \sum_{i=1}^n I(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} I(A_i \cap A_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} I(A_i \cap A_j \cap A_k) + \dots + (-1)^{n-1} \sum_{1 \leq i < j < \dots < l \leq n} I(A_i \cap A_j \cap \dots \cap A_l) = \sum_{i=1}^n I(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} \rho \cdot \min(I(A_i), I(A_j)) +$$

$$\dots + (-1)^{n-1} \sum_{1 \leq i < j < \dots < l \leq n} \rho \times \min_{\substack{1 \leq i < j < \dots < l \leq n \\ i \neq j, j \neq k, \dots, l \neq l}} (I(A_i \cap A_j \cap \dots \cap A_l)) \quad (13)$$

式中, I_{OR} 表示或门输出, 显然为一区间数。

在建立故障树区间算子后, 即可对星载天线故障树进行区间分析。

4 星载天线展开机构失效区间概率计算

4.1 确定各底事件的失效区间概率

根据所建立的故障树模型, 通过搜集相关信息, 综合不同专家的知识, 用 D-S 理论确定各底事件的失效区间概率, 具体数据见表 2。并且通过功能关系判定该星载天线展开故障树模型中的各底事件是相互独立的。

表 2 各底事件失效区间概率

Tab. 2 Fault interval probability of bottom events

底事件	区间概率	底事件	区间概率
Bottom events	Interval probability	Bottom events	Interval probability
E_1	$[0.9 \times 10^{-5}, 1.2 \times 10^{-5}]$	G_{23}	$[2.8 \times 10^{-4}, 3.3 \times 10^{-4}]$
E_{21}	$[0.8 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-5}]$	G_{31}	$[0.8 \times 10^{-6}, 1.2 \times 10^{-6}]$
E_{22}	$[0.7 \times 10^{-5}, 1.2 \times 10^{-5}]$	G_{32}	$[0.9 \times 10^{-6}, 1.1 \times 10^{-6}]$
E_3	$[0.9 \times 10^{-5}, 1.1 \times 10^{-5}]$	G_{33}	$[0.8 \times 10^{-6}, 1.3 \times 10^{-6}]$
F_1	$[0.8 \times 10^{-6}, 1.2 \times 10^{-6}]$	G_{411}	$[0.7 \times 10^{-6}, 1.1 \times 10^{-6}]$
F_{21}	$[0.7 \times 10^{-5}, 1.2 \times 10^{-5}]$	G_{412}	$[0.8 \times 10^{-6}, 1.0 \times 10^{-6}]$
F_{22}	$[0.9 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-5}]$	G_{421}	$[0.9 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7}]$
F_{23}	$[0.8 \times 10^{-5}, 1.1 \times 10^{-5}]$	G_{422}	$[0.6 \times 10^{-6}, 1.1 \times 10^{-6}]$
F_3	$[0.9 \times 10^{-5}, 1.1 \times 10^{-5}]$	G_{43}	$[0.7 \times 10^{-5}, 1.2 \times 10^{-5}]$
G_{11}	$[0.7 \times 10^{-6}, 1.2 \times 10^{-6}]$	H_1	$[0.8 \times 10^{-5}, 1.1 \times 10^{-5}]$
G_{12}	$[0.8 \times 10^{-6}, 1.3 \times 10^{-6}]$	H_{21}	$[0.9 \times 10^{-6}, 1.2 \times 10^{-6}]$
G_{211}	$[5.2 \times 10^{-5}, 5.6 \times 10^{-5}]$	H_{22}	$[0.7 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-5}]$
G_{212}	$[2.6 \times 10^{-5}, 3.1 \times 10^{-5}]$	H_{31}	$[0.6 \times 10^{-5}, 1.1 \times 10^{-5}]$
G_{213}	$[6.8 \times 10^{-5}, 7.3 \times 10^{-5}]$	H_{32}	$[0.9 \times 10^{-6}, 1.3 \times 10^{-6}]$
G_{22}	$[2.1 \times 10^{-7}, 2.5 \times 10^{-7}]$		

4.2 确定顶事件和底事件的布尔代数关系, 求得顶事件的区间概率

(1) 通过故障树区间分析, 可将星载天线中故障树的顶事件表示成如下各底事件的关系式

$$P = E \cup F \cup G \cup H$$

$$E = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \quad E_2 = E_{21} \cup E_{22}$$

$$F = F_1 \cup F_2 \cup F_3 \quad F_2 = F_{21} \cup F_{22} \cup F_{23}$$

$$G = G_1 \cup G_2 \cup G_3 \cup G_4 \quad G_1 = G_{11} \cup G_{12}$$

$$G_2 = G_{21} \cup G_{22} \cup G_{23} \quad G_{21} = G_{211} \cup G_{212} \cup G_{213}$$

$$G_3 = G_{31} \cup G_{32} \cup G_{33} \quad G_4 = G_{41} \cup G_{42} \cup G_{43}$$

$$G_{41} = G_{411} \cup G_{412} \quad G_{42} = G_{421} \cup G_{422}$$

$$H = H_1 \cup H_2 \cup H_3$$

$$H_2 = H_{21} \cup H_{22} \quad H_3 = H_{31} \cup H_{32}$$

(2) 根据本文定义的与门区间算子和或门区间算子, 得到如下关系式

$$I_P = 1 - (1 - I_E)(1 - I_F)(1 - I_G)(1 - I_H)$$

$$I_E = 1 - (1 - I_{E_1})(1 - I_{E_2})(1 - I_{E_3})$$

$$I_{E_2} = 1 - (1 - I_{E_{21}})(1 - I_{E_{22}})$$

$$I_F = 1 - (1 - I_{F_1})(1 - I_{F_2})(1 - I_{F_3})$$

$$I_{F_2} = 1 - (1 - I_{F_{21}})(1 - I_{F_{22}})(1 - I_{F_{23}})$$

$$I_G = 1 - (1 - I_{G_1})(1 - I_{G_2})(1 - I_{G_3})(1 - I_{G_4})$$

$$I_{G_1} = 1 - (1 - I_{G_{11}})(1 - I_{G_{12}})$$

$$I_{G_2} = 1 - (1 - I_{G_{21}})(1 - I_{G_{22}})(1 - I_{G_{23}})$$

$$I_{G_{21}} = 1 - (1 - I_{G_{211}})(1 - I_{G_{212}})(1 - I_{G_{213}})$$

$$I_H = 1 - (1 - I_{H_1})(1 - I_{H_2})(1 - I_{H_3})$$

$$I_{H_2} = 1 - (1 - I_{H_{21}})(1 - I_{H_{22}})$$

$$I_{H_3} = 1 - (1 - I_{H_{31}})(1 - I_{H_{32}})$$

以上 12 式当中, I_x ($x = P, E, \dots, H_{32}$) 分别表示和表 2 中相对应的各底事件的失效区间概率。

(3) 将表 1 中的底事件区间概率分别代入, 按照区间运算规则, 计算得到星载天线展开机构发生故障的区间概率为

$$I_P = [5.352 \times 10^{-4}, 6.422 \times 10^{-4}]$$

进一步求得星载天线展开的可靠度预测值的区间概率为

$$I_S = 1 - I_P = [0.999\,357\,8, 0.999\,464\,8]$$

该计算结果与传统的故障树分析方法得到的结果^[14]非常接近, 说明该计算模型是可行和有效的。

5 结论

文中针对周边桁架式大型星载天线的展开过程进行系统故障树分析, 基于区间分析, 结合 D-S 理论和区间概率理论, 提出星载天线展开机构故障树区间分析方法, 构造失效独立和失效相关情况下的故障树区间分析的与门区间算子和或门区间算子, 并对星载天线展开机构系统设计方案的展开可靠度进行分析和预测。计算结果表明这种方法是有效和可行的, 为设计方案的改进和调整提供参考依据。该方法对数据量要求较少, 因此更适合数据缺乏或小样本情况。

本文是对大型星载天线展开可靠性问题的探索性研究, 其故障树的建立亦需要随着天线展开机构方案的深入不断细化, 相关的计算模型也有待进一步研究完善。

参考文献(References)

- [1] Page L B, Perry J E. Standard deviation as an alternative to fuzziness in fault tree models[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(3): 402-407.
- [2] Singer D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 37(2): 267-286.
- [3] Tanaka H, Fan L T, Lai F S, et al. Fault tree analysis by fuzzy probability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1983, 32(5): 453-457.
- [4] Suresh P V, Babar A K, Venkat Raj V. Uncertainty in fault tree analysis: a fuzzy approach[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 83: 135-141.
- [5] Feng Y S. The development of theory of mechanism reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1993, 41(1): 95-99.
- [6] Mitigui Jin. Comparative analysis of deployable truss structures for mesh antenna reflector[J]. Aircraft Industries Association of America, 1998, 36(8): 1546-1548.
- [7] Masayoshi Misawa, Tetsuo Yasaka, Shojiro Miyake. Analytical and experimental investigations for satellite antenna deployment mechanism[J]. J Spacecraft, 1989, 26(3): 181-187.
- [8] 金恂叔. 论航天器的环境试验和可靠性[J]. 中国空间科学技术, 1997, 17(5): 33-40.
- [9] JIN XunShu. On environmental test and reliability spacecraft[J]. Chinese Space Science and Technology, 1997, 17(5): 33-40 (In Chinese).
- [10] 冯达武, 赵人杰. 空间大型网状展开天线展开机构的研究[J]. 中国空间科学技术, 1997(1): 64-70.
- [11] FENG DaWu, ZHAO RenJie. Research of larger-size space mesh antenna deploying mechanism[J]. Chinese Space Science and Technology, 1997 (1): 64-70 (In Chinese).
- [12] Cui W, Blockley D I. Interval probability theory for evidential support [J]. International Journal of Intelligent System, 1990(5): 183-192.
- [13] 段新生. 证据理论与决策、人工智能[M]. 北京: 中国人民出版社, 1989: 1-34. (In Chinese).
- [14] DUAN XinSheng. D-S theory and decision-making artificial intelligence [M]. Beijing: China Renmin University Press, 1989: 1-34 (In Chinese).
- [15] Moor R E. Methods and applications of interval analysis[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics Publications, 1979: 3-41.
- [16] Dempster A P. A generalization of Bayesian inference[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1968, Series B 30: 205-247.
- [17] 陈建军, 张建国, 段宝岩. 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): 6-8.
- [18] CHEN JianJun, ZHANG JianGuo, DUAN BaoYan. Faulty tree analysis of the deployment system of a large satellite antenna[J]. Machine Design and Research, 2005, 21(3): 6-8 (In Chinese).

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>