

文章编号: 1000-4750(2014)02-0025-10

论大型星载展开天线结构系统的可靠性

陈建军, 曹鸿钧, 张建国, 赵 宽

(西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 西安 710071)

摘 要: 简述了大型星载展开天线结构系统的结构概况、特点以及可靠性研究的必要性; 分八个子专题对其可靠性方面的研究工作进行了梳理和综述; 对大型星载展开天线结构系统提出了从发射运载、展开锁定到在轨服役三个阶段中应开展的全过程、多状态的综合可靠性研究内容和方法; 最后对星载展开天线结构系统提出了未来可靠性研究中亟待解决的问题。

关键词: 大型星载展开天线; 失效树分析; 机构运动功能可靠性; 结构动力可靠性; 结构热可靠性

中图分类号: O302 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.ST10

RELIABILITY OVERVIEW OF LARGE SPACEBORNE DEPLOYABLE ANTENNA-STRUCTURE SYSTEM

CHEN Jian-jun, CAO Hong-jun, ZHANG Jian-guo, ZHAO Kuan

(Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The general situation of a structure, the characteristics and necessity of reliability research for a large spaceborne deployable antenna-structure system are presented. Eight topics are reviewed in the research work on the reliability of the structural system. In addition, the comprehensive research content and methods of the reliability in the whole process and multiple states are carried out for three phases from the launch vehicle, development and shock and on-orbit service of the structure system. Finally, the unsolved problems of the future spaceborne deployable antenna-structure in the system reliability are described.

Key words: large spaceborne deployable antenna; fault tree analysis; motion function reliability of the mechanism; structure dynamic reliability; thermal reliability of the structure

空间可展开结构是近 30 年来伴随着航天事业的发展而诞生的一种新型太空构造物, 其中大型星载可展开天线是当前空间可展开结构中最为重要和常见的形式之一, 它作为空间通信、侦察以及太空攻防微波武器等的重要设备之一, 已被逐渐配置在大容量通讯卫星、中继卫星、电子侦察卫星等之中。近年来, 各航天强国为在航天科技和太空军事领域继续占据优势地位, 都竞相研发了不同类型和口径的星载可展开天线, 并对星载天线提出了大口径、轻重量、高精度、高增益和宽频带等更高的设

计要求。

目前研制中的星载可展开天线主要有三大类型^[1], 即固面反射面天线、充气天线和网状反射面天线。固面反射面天线为星载天线发展中的最早期类型, 该类天线收纳比较小, 只适合于小口径天线。充气类天线则是近年来星载展开天线设计领域中提出的一种新的结构类型, 目前尚处在概念设计和理论探讨阶段。网状反射面天线则具有收纳比大、重量较轻以及适合于大口径展开天线的方案设计等优点, 且目前在制造技术方面也相对比较成熟,

收稿日期: 2013-05-08; 修改日期: 2013-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175398, 50905134); 国家 863 高技术研究发展计划项目(2006AA04Z402)

通讯作者: 陈建军(1951—), 男, 河北保定人, 教授, 硕士, 博导, 主要从事机械与结构可靠性研究(E-mail: jjchen@xidian.edu.cn).

作者简介: 曹鸿钧(1968—), 男, 山西运城人, 副教授, 博士, 主要从事结构分析和优化研究(E-mail: hongjun.cao@gmail.com);

张建国(1973—), 男, 湖南衡阳人, 副教授, 博士, 主要从事机械与结构可靠性研究(E-mail: jgzhang2003x@yahoo.com.cn);

赵 宽(1984—), 男, 河南开封人, 博士生, 主要从事机构可靠性研究(E-mail: xinkuan123@126.com).

现已有若干个该类天线在卫星上服役。

网状反射面天线的结构部分主要由索网、反射膜面以及可展支撑框架等部分组成,其结构形式主要有周边框架式天线和铰接肋式天线等。图 1 为 Astro Aerospace 公司研制的典型的周边框架式 Astro Mesh 展开天线的结构形式^[2],它由前后索网(支撑索网)、反射膜面、调整索以及可展的支撑框架组成。支撑框架包含若干平行四边形单元,每一单元的斜边由两根圆管杆件对插组成,其中一杆件可在另一杆件的内部滑动,从而改变平行四边形单元的形状,以实现天线结构的展开和收拢。图 2 为天线展开态和收拢态示意图。

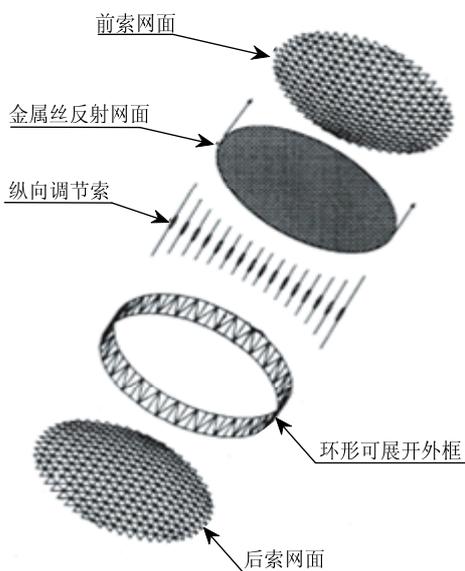


图 1 Astro Mesh 天线的组成

Fig.1 Astro Mesh antenna structure

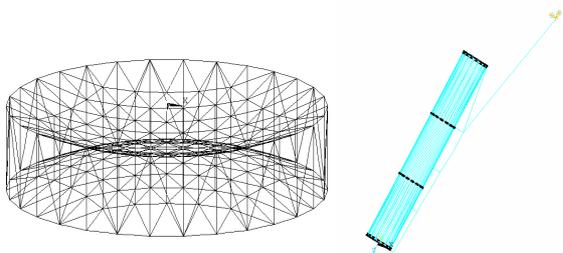


图 2 周边框架式天线的展开态和收拢态

Fig.2 Expansion and folding state of the circular frame-type antenna

对于星载可展开天线,展开机构是系统中不可或缺的重要部分,该机构一般由电机、绳轮、扭簧、牵引拉绳、转动关节及中心圆筒等零部件组成。天线的展开全过程分为解锁、展开、锁定三个阶段。解锁阶段:紧固收拢天线的抱箍被爆断脱落,在旋转关节扭簧的作用下,使铰接在关节处的杆件稍

微张开一小角度以摆脱自锁位置;展开阶段:电机启动,穿过四边形对角杆的牵引拉绳被收紧缠绕在绳轮上,使对角杆的长度缩短,四边形单元逐渐由细长菱形变为矩形,同时缠绕在中心圆筒上的网面及其拉索从中心圆筒中拉出,逐渐张紧形成天线反射面;锁定阶段:当对角杆滑动至极限位置,触动行程开关,使牵引电机停止转动,在对角杆弹簧锁和各关节限位块的作用下,天线结构被锁定在工作姿态。

星载展开天线结构与工作于地面的整体式天线结构相比有如下其自身的特点:

1) 由于火箭运载舱空间的限制,大型星载天线在发射运载阶段须采用折叠收纳方式,待卫星进入预定轨道且整流罩脱落之后,再通过遥控指令启动展开机构,按既定的展开程序和方案将天线展开至工作状态并加以锁定。因此,星载天线在展开过程中为一典型的受控时变结构,其可展开性、可控性和可建造性将成为星载展开天线结构的最显著特征。

2) 由于升空的要求,大型星载展开天线结构呈现出尺寸大、重量轻、柔性甚等特点,导致其结构体系呈现出非线性,继而给其结构的设计、分析、制造和使用带来了一系列新的问题。

3) 星载展开天线结构在发射运载阶段将经历剧烈和持续的振动作用,在轨服役阶段将处在极其恶劣的太空环境之中,受到高真空、无重力、巨大高低温差(大约 $-120^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$),以及各种复杂的空间外热流的作用。如此不同阶段、多工况下的机械与热荷载的复合作用,使其结构的强度、刚度和天线反射面精度的分析与计算相当困难和复杂。

4) 由于星载展开天线系统的不可修复性,决定了其在发射、展开和服役全生命周期中的可靠性成为研发过程中必须关注与解决的问题。

由于大型星载展开天线结构系统所具有的上述特点,使对它的研究内容繁多,同时涉及到:结构和机构的设计、运动学和动力学分析、展开过程和振动控制、反射面形面调整、结构热分析、系统可靠性分析和预测等诸多学科。

显而易见,星载天线系统能否被安全地送入太空,能否顺利地展开并锁定在工作状态,能否在轨服役期内正常地工作,即在很大程度上标志着卫星发射任务的成败。一旦天线系统在某一阶段或某一状态下失效,导致卫星无法正常控制与工作,意味

着为卫星发射而投入的巨大人力、物力和财力都将付之一篑。此外,由于星载展开天线的造价高、研制生产周期长,并且不可修复,因此对其全生命周期的可靠性指标往往提出了很高的要求,故对星载展开天线的可靠性问题开展研究其意义和价值是毋庸置疑的。本文将着重论述和研究与星载可展开天线结构系统相关的可靠性专题。

1 大型星载展开天线可靠性研究的综述

从现有文献来看,关于星载展开天线的方案设计和结构分析、展开过程的动力学分析和控制、反射面调整和精度测试、结构优化和在轨热分析、以及研究进展等方面都有许多研究成果。然而相比之下,迄今有关星载展开天线可靠性方面的研究文献却极少,特别是国外相关的文献和技术资料几乎鲜见公开发表^[3]。

由于对星载展开天线的可靠性建模和预测分析具有很强的实物针对性,仅从理论上开展一般性的研究是不适宜的。因而,现有的研究工作往往是针对某个展开天线具体的样机或设计方案来进行。

对于星载天线,其结构的可展开性至关重要,为此该问题成为首要被关注的研究热点。显然,天线结构系统可否顺利的展开并锁定的可靠性,在很大程度上属于展开机构运动功能的可靠性范畴,它涉及到机构卡滞失效、运动精度和运动功能受损等问题,与结构强度和刚度可靠性的研究内容有所不同。此外,由于机构系统较结构系统其构造复杂、形体可变、失效机理多样,故机构运动功能的可靠性问题远比结构的可靠性问题难度更大。

以下将分为八个子专题,对目前星载可展开天线系统可靠性理论方面的研究工作进行梳理与概括。

1) 旋转关节转动功能的可靠性

旋转关节是天线展开机构中普遍采用的一种运动副,几乎在所有可动杆件的铰接点处都是旋转关节,故其卡滞失效成为天线展开机构系统中的主要失效模式之一。

文献[4]针对星载展开天线旋转关节开展了热变形防卡滞的可靠性分析。根据太空环境,分别利用有限元法和弹性力学方法对展开机构中旋转关节的间隙进行了温差变化计算,建立了旋转关节矩的功能极限状态方程和功的功能极限状态方程,对

四种环境温度荷载工况下关节转动功能的可靠性进行了分析和计算。

文献[5]针对某星载伞状天线展开机构中的旋转关节,分析了其运动功能可靠性中包含的两个并联的功能函数:即矩和功的功能函数;利用随机函数的矩法和可靠性分析中的一次二阶矩法,分别对天线展开过程中的起始阶段、展开阶段和网面产生预紧力阶段,构建了按矩的功能函数和按功的功能函数表达的可靠性算式;通过实例计算获得了天线展开机构运动功能的可靠性指标随展开角度的变化结果。

文献[6]则利用未确知理论,对某星载伞状天线展开机构中的旋转关节运动机理进行了研究,建立了基于未确知理论的旋转关节运动功能可靠性分析模型,其中综合考虑电机输出力矩值的波动性、构件材料参数取值的分散性和尺寸的制造误差,将运动功能函数视为未确知变量函数。利用未确知有理数计算法则,分别导出了按矩的功能函数和按功的功能函数对应的可靠性算式;对机构在整个展开过程中的运动可靠性进行了预测。与成熟的概率方法相比,该方法简单易行,且能在缺乏足够数据或信息不完整的情况下,获得更安全、可信度更高的可靠性计算结果。算例给出了未确知性天线旋转关节运动功能函数的可能值及其可信度的计算结果,表明该方法的合理性和可行性。

文献[7]针对某大型周边框架式展开天线系统中的铰链,引入权重因子用于描述不同铰链的权重比例及位置权重,并基于此分析了铰链转动功能的可靠性。

2) 扭簧的可靠性

在天线刚被解锁之后即展开的最初瞬间,为使铰接在关节处的杆件稍微张开一角度以摆脱其自锁位置,往往需在关节处配置一扭簧。显然,扭簧失效也是天线展开系统中可能发生的主要失效模式之一。

文献[8]利用概率方法对不同位置关节处扭簧失效对天线展开过程的影响进行了分析,进而得出扭簧失效使天线无法完全展开或使其展开形面精度很差的扭簧位置,和扭簧失效后对天线展开及其展开形面精度基本上没有影响的扭簧位置,并将此分析结果引入可靠性分析中,通过某周边框架式展开天线的具体算例计算了可展开的可靠度。

3) 同步齿轮副防卡滞的可靠性

在大型的星载天线展开机构中,常采用同步齿轮副来实现相邻四边形单元杆件的同步展开,故同步齿轮副的卡滞失效亦是天线展开机构中的一种可能发生的主要失效形式。

文献[9]从齿轮啮合的极限位置出发,给出了同步齿轮副不发生卡滞的条件。在综合考虑齿轮加工误差、装配误差和太空环境温度等因素的基础上,构建了齿轮副防卡滞的概率可靠性分析模型,即利用最小齿顶隙表示的齿轮啮合运动功能函数。将齿轮的形状和位置误差视为随机变量,利用一次二阶矩方法推导出齿轮防卡滞的概率可靠度计算公式。对某周边框架式星载天线实例进行了计算,得到如下结论:1) 温度荷载对同步齿轮卡滞可靠性的影响不容忽视;2) 如果两齿轮以标准中心距安装,太空环境中的热变形将会明显降低齿轮的传动性能;3) 适当采用正变位中心距安装齿轮副,并避免星载天线的展开机构在高温下工作,可提高其防卡滞的可靠度。

相对于传统的概率分析方法,区间分析方法无需不确定变量的概率分布和分布参数,只需知道不确定变量所在的范围,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。为此,文献[10]将不确定变量均视为区间变量,针对某周边框架式大型星载天线展开机构中的同步齿轮副防卡滞失效模式,建立了非概率可靠性预测模型,导出了齿轮副防卡滞的非概率可靠度计算公式,并利用优化算法求解,对该同步齿轮副在不同装配误差和不同温度环境下防卡滞的非概率可靠度进行了预测。

4) 天线系统展开可靠性的概率预测

大型星载展开天线系统通常是由电器、机构和结构组成的机电一体化系统,由于其系统构造复杂,失效模式众多,故对天线展开性能的可靠性分析和预测最为行之有效的方法无疑当数失效树分析(Fault Tree Analysis, FTA)方法。考虑到一般大型天线的展开过程均比较平稳和缓慢(持续约 30min~60min),在整个展开过程中系统内无有明显的冲击性载荷作用,展开机构的各运动副均为低速运动且有效工作时间较短,因此,在星载展开天线系统失效树的建树过程中,可无需考虑系统中的动力效应、运动副的磨损和零件的疲劳失效等因素。

文献[11]通过对某周边框架式大型星载天线展开系统的各种机械、电气以及其他各种失效模式(底

事件)的分析,特别着眼于展开机构的运动功能,构建了以天线不能展开为顶事件的展开系统的 FA 模型,探讨了星载天线展开系统失效树中各底事件的失效概率计算。在此基础上对天线系统可展开的概率可靠度进行了定量分析和预测,并分别通过对系统可靠度的重要度和关键重要度分析,从中确定了影响天线展开可靠性的薄弱环节。分析和预测的结果表明:提高系统展开可靠性的关键环节在于防止系统中动力矩不足和避免各类运动副的卡滞失效。

文献[12]对某周边框架式大型星载天线的展开可能性进行了研究。在其展开运动机理分析的基础上,综合考虑尺寸误差和太空环境因素的影响,将运动功能函数视为随机变量函数,建立了展开机构的力学分析模型,并推导了桁架杆内力的计算式。从天线展开应满足的功能函数出发,给出机构运动可靠性的分析模型,利用一次二阶矩法导出可靠性的计算公式。最后对机构在整个展开过程中的运动可靠性进行预测和仿真。计算结果的变化趋势与实际进程比较吻合,表明文中方法合理性和有效性。

文献[13]对某铰接肋式星载天线背架肋展开的概率可靠性进行了研究。根据该天线展开过程中两阶段运动机理的不同,分别对绳索在脱离铰接点前后两阶段建立了相应的力学分析模型。在此基础上,考虑结构几何尺寸误差以及太空环境等随机性因素的影响,构建了基于力矩和累积功两种失效模式的可靠性功能函数,利用一次二阶矩法推导出各功能函数对应的可靠性计算公式。通过 Astro-Mesh 星载天线设计方案的可靠性预测分析,验证了所建模型的合理性和有效性,并获得了一些有意义的结论。

文献[14]则基于太阳翼展开机构的组成和展开原理,从静力矩裕度、力矩和力矩做的功三个方面对卫星太阳翼展开机构进行可靠性分析,建立该展开机构的失效树并进行了定量分析,得出扭簧储存动力矩不足和展开机构卡死是太阳翼展开失效的主要原因,并对此提出了相应的预防和改进措施。

5) 天线系统展开可靠性的区间预测

通过早期对展开天线系统的概率可靠性研究,人们意识到:大型展开天线属于复杂且贵重的航天产品,非批量生产,故极端缺乏与可靠性相关的统计数据,属于小样本和贫信息的情况,利用传统的概率失效树分析方法预测其可靠性不是一种合理的选择,较为合理的选择应利用基于区间的失效树

分析方法。该法的基本作法是利用区间分析的思想设法获得所有底事件的区间概率,再基于各底事件之间的可靠性逻辑关系,并应用区间数学的运算规则进行区间数值计算,最终获得顶事件发生的区间概率。

文献[15]在对某周边框架式大型星载天线的展开运动机理研究的基础上,综合考虑尺寸误差和太空环境因素的影响,建立了展开机构力学分析和运动功能可靠性分析的非概率模型。将运动功能函数视为区间变量函数,利用优化算法推导出天线展开的非概率可靠性计算公式。对机构在整个展开过程中的运动非概率可靠性进行预测,并将此预测结果与将运动功能函数中的变量视为正态分布的概率模型的可靠度结果进行了比较,表明概率可靠性指标约为非概率可靠性指标的3倍,但两者随展开过程的变化趋势完全相同,并与天线展开的实际进程比较吻合。

文献[16]以某周边框架式星载可展开天线原理样机为对象,对与区间可靠性相关的两个问题开展了研究:1)针对传统失效树分析中存在的区间变量难以量化的问题,结合D-S(Dempster-Shafer)理论^[17]和区间概率理论,对星载天线展开机构提出了失效树区间分析方法,分别构造了失效独立和失效相关两种情况下失效树区间分析与门区间算子和或门区间算子,利用区间数学的方法导出区间可靠性计算公式;2)根据该天线展开机构运动机理,综合考虑尺寸误差和太空环境因素的影响,建立了以区间为变量的展开机构的力学分析模型和机构运动功能可靠性的分析模型,对该展开机构在整个展开过程中的运动可靠度的区间进行了预测和仿真分析。

文献[18]对某铰接肋式展开天线的展开机构的非概率可靠性分析问题进行了研究。基于天线背架肋在展开过程中的运动机理,并综合考虑尺寸误差和太空环境等不确定性因素的影响,建立了具有区间变量的可靠性运动功能函数,对机构在整个展开过程中的运动可靠性进行了预测和仿真。

文献[19]亦将非概率方法引入到铰接肋式展开天线展开的可靠性分析中,在区间失效树建树的基础上,综合D-S理论,提出了基于超椭球模型的失效树区间分析方法,给出了区间失效树中的与门算子和或门算子的计算方法,并运用这些方法对文献[18]中铰接肋式展开天线可展开的非概率可靠

性进行了预测。

6) 天线系统展开可靠性预测的其他模型

迄今,关于星载展开天线系统的可靠性研究,除了上述基于概率的模型与方法及基于区间的模型与方法的文献之外,还有一些文献则另辟蹊径,尝试着构建了其他多种不确定性分析和预测模型,如:模糊模型、未确知模型、中介状态模型、贝叶斯网络模型、随机Petri网模型等。

文献[20]对某星载天线展开系统进行了模糊可靠性分析。首先,利用模糊失效树分析(Fuzzy Fault Tree Analysis, FFTA)理论,在借鉴该天线常规可靠性数据的基础上,通过对实例的定量计算,给出了该系统顶事件和部分关键中间事件发生的概率区间数。其次,利用能度可靠性分析方法,对该展开系统中的部分关键底事件进行了模糊可靠性分析;给出了在隶属函数阈值为一定值 λ 时,对应事件的模糊可靠性指标,得到了对应事件失效的可能度。

文献[21]则考虑到星载天线其结构所具有的随机性,而其功能要求所具有的模糊性,利用随机-模糊可靠性分析方法对天线展开系统中关键失效事件进行分析,给出了功能函数模糊可能度的计算方法。

文献[22]在对某周边框架式大型星载天线的展开运动机理研究的基础上,综合考虑尺寸误差和太空环境因素的影响,建立了该展开机构的力学分析和运动功能可靠性分析的未确知模型,将运动功能函数视为未确知变量函数,利用未确知有理数计算的法则推导出可靠性计算公式,对机构在整个展开过程中的运动可靠性进行了预测,给出了未确知性天线展开机构功能函数的可能值及其可信度的计算结果。

文献[23]则认为星载展开天线系统及其所有底事件都具有安全、中介和失效三种可能状态,对其系统进行可靠性分析的结果应同时提供安全概率 P_R 、中介概率 P_M 和失效概率 P_F ,即概率向量 $[P_R, P_M, P_F]$ 。文中给出了具有中介状态的可靠性向量的计算方法和步骤,并考虑了系统中各底事件之间的失效相关性问题,并将计算可靠性向量的方法应用于某星载天线失效树系统分析之中,获得了系统顶事件的可靠性向量。

文献[21]还利用贝叶斯理论,对星载天线展开系统的可靠性模型和概率计算问题进行了研究。针对天线展开机构的工作原理,列出整个展开过程中

可能引起天线展开失效的所有事件,以及各事件之间的可靠性逻辑关系,将各失效事件对应为贝叶斯网络模型中的一个节点,并考虑网络中各节点都存在着“正常”、“临界”和“失效”三种可能状态。在给出各根节点先验概率的情况下,利用贝叶斯网络中的独立关系和桶消元推理算法,计算出贝叶斯网络中其余各节点的条件概率,并对展开系统中各失效事件进行了重要度分析。文中还依据星载天线展开系统贝叶斯网络模型的拓扑结构,设计了软件整体架构,编写了该天线展开系统可靠性预测软件。

文献[24]则利用随机 Petri 网易于描述并行、并发模型的优点,对星载展开天线的故障树模型进行描述和分析,将故障树模型转换为 Petri 网结构模型,并进一步抽象成数学模型,即利用一个矩阵来描述模型,再对此模型进行属性定义、区分延时变迁和瞬时变迁,并假定各个变迁均服从于负指数分布,获得了完全的随机 Petri 网模型。在进行故障传播分析时,其输入为检测系统得到的故障信息。因此在对系统失效进行理论分析时,需要假定有一个故障发生。

当然,上述多种关于不确定性分析和预测模型的研究,虽在理论方面有新意,但其合理性和实用性等问题还有待于进一步探讨。

7) 系统的故障诊断和 FMEA 分析

文献[25]针对星载天线展开系统可靠性分析中数据缺乏的实际特点,将灰色关联法引入到系统的可靠性分析中。在天线展开系统的故障诊断中,采用灰色关联法确定系统的故障特征与内部特征之间的相关性,确定实际失效模式归属于某个标准模式,并对系统失效树诊断进行综合分析。以某星载天线展开系统为例,给出了系统故障的分析结果,表明该方法的可行性和有效性。文献[19]则利用系统可靠性评估的故障模式、影响和危害分析方法(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA),对某铰接天线系统提供了完整的 FMEA 分析过程。

8) 系统的可靠性分配

系统的可靠性分配问题是与系统可靠性预测相对应的反问题,它在系统的可靠性设计中是必须的工作。为此,有关文献还对星载展开天线系统的可靠性分配问题开展了研究。文献[4]利用加权方法对某星载天线展开系统中各子系统的设计可靠度进行了分配。文献[26]针对星载天线展开系统设计

初期可靠性数据缺乏的情况,提出了系统可靠性分配的未确知方法。在综合评分为权的系统可靠性分配法的基础上,将未确知信息引入系统可靠性分配的权系数矩阵中,建立了星载天线展开系统可靠性分配的未确知模型。利用未确知有理数的运算规则,推导出系统可靠性分配的未确知权系数表达式。以某星载天线展开系统为例,给出了系统可靠性分配的可能值和可信度的计算结果,以及对应于不同累积可信度的分配结果,表明了该方法的可行性和有效性。文献[27]在综合评分为权的系统可靠性分配法的基础上,将模糊数学引入系统可靠性分配的权系数矩阵中,建立了星载天线展开系统可靠性分配的模糊模型。利用模糊数学的运算规则,推导出天线展开系统可靠性分配的权系数表达式。以某星载天线展开系统为实例,给出系统可靠性的分配结果。文献[19]针对星载天线系统可靠性分配过程中影响因素众多、且不易定量分析的特点,提出了一种将区间分析、模糊综合评判和层次分析相结合的可靠性分配方法。根据因素影响程度赋予不同的权重,以区间数来表达不确定信息,建立了铰接肋式展开天线系统可靠性分配模型,并结合实例进行了系统的可靠性分配。

2 大型展开天线结构系统的全过程多状态可靠性研究内容

对现有文献的梳理表明,迄今有关星载天线可靠性方面的研究工作主要集中在天线展开过程中的系统可展开的可靠性专题上,而对天线在其他阶段和状态下的可靠性问题涉及较少。事实上,大型星载天线结构由于在方案设计、材料成型、构件加工和装配调试等各个研制过程中,以及在发射运载、空间展开和在轨服役等各个工作阶段中均不可避免地存在着多种不确定性因素,将对天线结构系统的升空入轨、展开锁定、正常服役的可靠性均产生影响。显然,只针对系统在升空、展开和服役的某一阶段、或某一状态进行可靠性分析与研究,其工作是不完整和系统的。前期的研究已表明:在展开阶段,系统可否顺利展开并锁定的可靠性问题,主要取决于展开机构运动功能的可靠性,而系统在发射升空和在轨服役两阶段的可靠性问题,均属于结构强度和刚度的可靠性范畴。

为了确保大型星载可展开天线结构系统能够顺利安全地发射运载、展开锁定和在轨服役,在设

计阶段,对其系统开展全过程、多状态的综合可靠性研究是十分必要的。基于此,以下将对大型索网式可展开天线结构系统在全过程中所面临的多状态的可靠性问题进行分析 and 讨论,旨在明确与系统可靠性相关的建模、分析、预测和数值仿真等研究的内容和方法。

2.1 在发射运载阶段天线结构的可靠性问题

在发射运载阶段,可展开天线结构将呈收拢状态、且被抱箍捆绑约束,再通过几处连接点被固定在卫星体上,此时系统将经由火箭飞行所产生的持续随机振动激励。该阶段系统可能面临的主要失效模式为振动导致的结构破坏。对应的可靠性问题是:针对系统在发射升空全过程中的复杂受力状态,建立呈收拢状的天线结构系统的力学模型,对发射升空过程中系统的受力状态进行计算机仿真,从中寻找结构系统在强度可靠性方面的薄弱环节。与此相关需要研究和解决的问题如下:

1) 构建天线结构收拢态的有限元模型

由于天线收拢之后以多根杆件堆放并被捆绑的形式出现,抱箍与外围杆件相互接触,大量的节点和单元重叠,其结构布局 and 连接方式非常杂乱,如此复杂的“复合”结构在工程中极为少见,按常规的结构有限元建模相当困难。为此,文献[28]根据某周边框架式可展开天线收拢后的结构特点,建立了一种基于结构刚度和质量等效原则的简化模型,即将收拢态的天线结构等效简化为由三层不同材料组合而成的一实体圆筒,其中第一层包括周边桁架各单元、连接关节和周边外围的各类拉索单元;第二层由中间的反射面拉索系统和金属反射网面构成;第三层即为原有的中间圆筒结构。有限元计算时将等效圆筒的所有部分均取为等效的实体单元,并按原结构具有的运动条件保留了有关节点相应的自由度,利用 ANSYS 软件计算出该等效模型的前若干阶固有频率。

显然,该有限元模型虽几何构型简单,但模型中结构刚度和质量的等效性难以准确保证,因而也难以保证结构固有频率的计算精度。另外,对该模型的结构分析计算结果,除几处连接点处的工作应力可用于强度可靠性校核外,其他结果几乎没有更多的实际价值。如何合理且准确地构建大型星载展开天线收拢状态的结构有限元模型,是目前结构分析中亟待解决的重要问题。

2) 结构动力特性和动力响应分析及动力可靠性预测

对收拢态的天线结构有限元模型进行动力特性分析,其目的是为了获得结构系统的前若干阶固有频率,以防共振的可能性,而对其进行动力响应分析则是为了获得在随机激励下结构应力响应的数字特征,为结构动力可靠性预测提供必要的信息。随机振动响应计算中所采用的振动激励功率谱密度函数 PSD 理应来自于卫星所搭乘的运载火箭,如无可能,则可采用国军标提供的航天军用电子设备随机振动功率谱,见图 3。该功率谱覆盖的频带范围宽(20Hz~2000Hz)、量级大(均方根加速度达 23g 以上),对于箭载电子设备的抗振性能是一种相当严酷的动力环境。

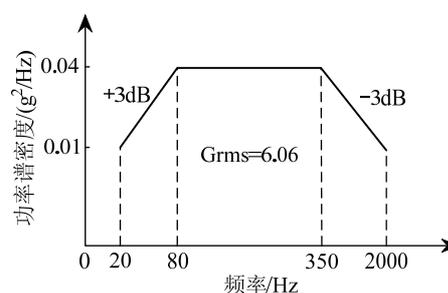


图3 PSD 激励谱

Fig.3 PSD excitation spectrum

随机振动激励通过卫星体与收拢态天线的连接点处作用于结构系统上,经随机振动响应分析,获得结构振动中各单元应力响应和应力对时间导数响应的均方值,进而再对结构系统进行动应力响应首次超越的结构动力可靠性分析,获得结构中各主要构件在发射运载全过程中的动力可靠度时间历程,从中确定整个结构系统动力可靠性的薄弱环节,为结构系统的可靠性评价和方案改进提供理论依据。

从力学角度可定性判断,收拢态天线结构在随机振动激励下,其结构中应力响应的最大值应发生在几个连接点处及其附近,为此在结构动力可靠性预测中应对这些点处给予特别关注。

2.2 在太空展开阶段天线结构的可靠性

此阶段的可靠性主要涉及到天线展开机构系统,为前期重点关注的问题,迄今已有许多工作。故对该阶段可靠性的研究内容已较为明确和系统,其中一个最为关键问题是:合理且准确地构建星载天线展开系统的失效树。

建树之后如何获得其中各底事件的失效概率是首要面临的问题,这可通过以下三种途径:1)对可进行理论计算的底事件,建立该失效事件的可靠性功能函数,利用一次二阶矩等可靠性计算方法求得该底事件的失效概率,如对转动关节卡滞失效、同步齿轮卡死等底事件;2)对无法开展理论计算的底事件,可通过搜集相关资料,或进行类比、或通过物理试验获得相关的统计数据,再应用D-S理论得到底事件的失效概率,如对电机失效、弹簧锁配合失效等底事件;3)对那些不能通过前两种途径获得失效概率的底事件,则只能凭借专家的经验人为给定其失效概率的估计值,如对绳索缠绕等底事件。

2.3 在轨服役阶段天线结构的可靠性

在轨服役阶段,展开的天线将处在太空环境中,随卫星环绕地球转动,结构系统承受的主要荷载为周期性交变大温差的作用,使天线有可能发生两种失效模式,即结构热变形导致的反射面精度劣化进而使天线的电性能丧失,和周期性交变热应力导致的结构构件疲劳失效。针对这两种失效模式,需对天线结构系统开展热可靠性建模与分析的研究,主要工作包括:

1) 将太空环境高低温荷载在时间上视为周期性交变的、在幅值上视为区间变量,利用区间有限元方法对天线结构系统热变形和热应力的动力响应区间进行计算;

2) 在结构热变形计算的基础上,建立天线反射面形面精度的非概率可靠性分析模型,对反射面精度的非概率可靠度进行预测;

3) 利用结构周期性交变热应力响应的结果,对结构系统的热疲劳寿命进行分析和预测。

3 总结与展望

对大型星载展开天线结构系统的全过程、多状态的可靠性进行全面和系统的分析和预测研究,其结果可为天线结构系统的设计与方案改进提供必要的参考依据,这一则可大大降低天线发生不能正常工作的风险,具有巨大的工程价值;二则研究中所提出的有关理论、方法和模型,亦将具有普遍意义和重要的传承与借鉴作用,可应用于其他各种类型的大型空间可展开式结构系统的可靠性分析和预测之中,如:展开式太阳能帆板、伸缩式太空机械臂、以及其他空间大型可展开结构装置等。

随着我国多项航天工程的启动,对大型星载可展开天线的需求迫在眉睫。伴随着各种星载展开天线工程样机的研制,它们在发射、展开、服役全过程中的可靠性将成为研发中必须关注且须自主解决的重大问题。目前在我国,关于星载可展开天线可靠性的研究仍是一个比较薄弱的环节,笔者认为在理论与工程应用研究等方面尚存在着以下若干问题有待于深入探讨和完善:

(1) 构建合理且准确的大型星载展开天线收拢状态的结构有限元模型。

(2) 在旋转关节、同步齿轮卡滞的可靠性分析中,同时综合考虑太空温度荷载、构件弹性变形、加工装配误差和零部件间隙等对转动功能可靠性的影响。

(3) 进一步对转动副的随机接触模型进行研究。

(4) 研究给定置信度下的系统可靠性预测问题。

(5) 考虑结构不同部位的相互遮挡对天线结构热辐射的影响,开展基于温度梯度的结构热分析。

(6) 对太空环境中松弛的网绳发生随机缠绕的机理以及如何进行数学描述开展研究。

(7) 尽快并努力地改变目前可靠性相关的统计数据极度匮乏的现状。

(8) 现有的可靠性研究工作多为理论方面,应进一步研究合理且可行的可靠性试验方法。

参考文献:

- [1] 刘荣强,田大可,邓宗全.空间可展开天线结构的研究现状与展望[J].机械设计,2010,27(9):1-10.
Liu Rongqiang, Tian Dake, Deng Zongquan. Research actuality and prospect of structure for space deployable antenna [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(9): 1-10. (in Chinese)
- [2] Mark W Thomson. The astro mesh deployable reflector [C]. IEEE Antenna and Propagation Society, APS International Symposium, 1999: 1516-1519.
- [3] Gerhard S S, Wolfgang H T. Practical procedures for reliability estimation of spacecraft structures and their components [J]. AIAA, 1998, 36(8): 1509-1515.
- [4] 陈勇.机构可靠性分析及其在星载天线展开机构中的应用[D].西安:西安电子科技大学,2000.
Chen Yong. Analysis on mechanism reliability and its applied to satellite antenna deployment mechanism [D]. Xi'an: Xidian University, 2000. (in Chinese)
- [5] 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]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, 25(6): 552—557. (in Chinese)
- [6] Zhu Zengqing, Chen Jianjun. Motion reliability analysis of rotation joint in umbrella antenna [J]. *International Journal of Performability Engineering*, 2010, 6(3): 233—242.
- [7] 肖振林, 肖宁聪, 黄洪钟. 考虑权重因子的大型桁架可展开天线可靠性建模方法研究[J]. *质量与可靠性*, 2012(1): 7—9.
Xiao Zhenlin, Xiao Ningcong, Huang Hongzhong. Reliability modeling method analysis of large truss deployable antenna considering the weighting factor [J]. *Quality and Reliability*, 2012(1): 7—9. (in Chinese)
- [8] 张惠峰, 关富玲, 侯国勇. 考虑扭簧失效的桁架式可展开天线可靠性研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(6): 1207—1212.
Zhang Huifeng, Guan Fuling, Hou Guoyong. Reliability analysis of truss deployable antenna considering torsional spring failure [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(6): 1207—1212. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 林立广, 陈建军, 朱增青, 刘国梁. 基于非概率模型的星载天线展开机构中同步齿轮系防卡滞研究[J]. *高技术通讯*, 2007, 17(12): 54—59.
Lin Liguang, Chen Jianjun, Zhu Zengqing, Liu Guoliang. Dynamic analysis of uncertain structures and research on reliability of satellite antenna mechanism [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2007, 17(12): 54—59. (in Chinese)
- [11] 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): 6—9.
Chen Jianjun, Zhang Jianguo, Duan Baoyan, et al. Faulty tree analysis of the deployment system of a large satellite antenna [J]. *Machine Design and Research*, 2005, 21(3): 6—9. (in Chinese)
- [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(S1): 130—134.
Chen Jianjun, Zhang Jianguo, Duan Baoyan, et al. Probability analysis of the deployment of a large satellite antenna with hoop-truss [J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(S1): 130—134. (in Chinese)
- [13] 王敏娟, 陈建军, 段宝岩, 等. 铰接肋天线背架肋展开的可靠性分析[J]. *高技术通讯*, 2012, 22(3): 6—11.
Wang Minjuan, Chen Jianjun, Duan Baoyan, et al. Reliability analysis of the back frame rib expanding of articulated rib antenna [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2012, 22(3): 6—11. (in Chinese)
- [14] 肖宁聪, 李彦锋, 黄洪钟. 卫星太阳翼展开机构的可靠性分析方法研究[J]. *宇航学报*, 2009, 30(4): 1704—1710.
Xiao Ningcong, Li Yanfeng, Huang Hongzhong. Reliability analysis method of deployment mechanism of a satellite solar arrays [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(4): 1704—1710. (in Chinese)
- [15] Zhang Jianguo, Chen Jianjun. 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] 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)
- [17] 段新生. 证据理论与决策、人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989: 1—34.
Duan Xinsheng. Evidence theory, decisions and artificial intelligence [M]. Beijing: China Renmin University Press, 1989: 1—34. (in Chinese)
- [18] 王敏娟. 不确定智能梁结构振动控制及展开机构的可靠性预测[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
Wang Minjuan. Vibration control of unascertained intelligent beam structures and prediction on reliability of deployment mechanism [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [19] 刘珺蕙. 基于非概率的星载天线可靠性分析与研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
Liu Junhui. Reliability analysis and research of a large satellite antenna based on the non-probabilistic [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [20] 梁波. 模糊可靠性分析在星载天线展开系统中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
Liang Bo. Application of fuzzy reliability analysis to the deployment of a large satellite antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
- [21] 靳宁. 基于贝叶斯网络的大型星载展开天线多状态可靠性分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
Jin Ning. Multi-state reliability analysis of a large deployable satellite antenna based in bayesian networks [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [22] 朱增青, 陈建军, 刘国梁, 宋宗凤. 星载天线展开机构可靠性的未确知分析法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2009, 36(5): 909—915.

- Zhu Zengqing, Chen Jianjun, Liu Guoliang, Song Zongfeng. Reliability analysis for the deployment mechanism of a large satellite antenna based on unascertained information [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(5): 909—915. (in Chinese)
- [23] 郭迅. 考虑中介状态的可靠性分析方法在星载展开天线系统中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
Guo Xun. Reliability Analysis considered intermediate state to the deployment of a large satellite antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [24] 朱作龙. 基于随机 Petri 网的星载展开天线故障传播分析研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
Zhu Zuolong. Research on the fault propagation analysis of a large satellite antenna based on stochastic petri nets [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [25] 林立广, 陈建军, 刘国梁, 王敏娟. 基于灰色关联法的星载天线展开机构系统故障树分析[J]. 高技术通讯, 2010, 20(9): 905—910.
Lin Liguang, Chen Jianjun, Liu Guoliang, Wang Minjuan. Fault analysis of the deployment mechanism system of satellite antenna based on grey relation method [J]. Chinese High Technology Letters, 2010, 20(9): 905—910. (in Chinese)
- [26] Liang Zhentao, Chen Jianjun. Reliability allocation of large space borne antenna deployment mechanism system using unascertained method [C]. 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics ISSCAA 2006 Jan. 19-21. Harbin, China. Proceedings of ISSCAA 2006: 1098—1103.
- [27] 林立广, 陈建军, 马娟, 等. 基于模糊综合评判法的星载天线展开机构系统可靠性分配[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(3): 375—379.
Lin Liguang, Chen Jianjun, Ma Juan, et al. A fuzzy comprehensive evaluation method for reliability allocation of a space borne antenna deployment mechanism system [J]. Mechanical Science and Technology, 2009, 28(3): 375—379. (in Chinese)
- [28] 罗鹰. 大型星载可展开天线的动力优化设计与工程结构的系统优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
Luo Ying. Study on dynamic optimization of large deployed antenna and structural systematic optimization [D]. Xi'an: Xidian University, 2004. (in Chinese)

注: 该文在第 22 届结构工程学术会议(2013 新疆)应邀作特邀报告

(上接第 24 页)

- [3] 蔡克铨, 黄彦智, 翁崇兴. 双管式挫屈束制(屈曲约束)支撑之耐震行为与应用[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(3): 1—8.
Tsai Kehchyan, Hwang Yeanchih, Weng Chungshing. Seismic performance and applications of double-tube buckling-restrained braces [J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(3): 1—8. (in Chinese)
- [4] 郭彦林, 王小安, 江磊鑫. 装配式防屈曲支撑构件及框架设计理论[J]. 结构工程师, 2010, 26(6): 164—176.
Guo Yanlin, Wang Xiaoan, Jiang Leixin. Design theory of assembled buckling-restrained braces and buckling-restrained braced frames [J]. Structural Engineers, 2010, 26(6): 164—176. (in Chinese)
- [5] 江磊鑫. 装配式防屈曲耗能支撑构件设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
Jiang Leixin. Research on the design methods of assembled buckling-restrained braces [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [6] Wang XA, Guo YL, Tian GY, et al. A design method for a new type of assembled steel buckling-restrained braces [C]//Proceeding of the 7th International Conference on Advances in Steel Structures. Nanjing, China: 2012.
- [7] 郭彦林, 江磊鑫. 型钢组合装配式防屈曲支撑性能及设计方法研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 30—37.
Guo Yanlin, Jiang Leixin. Behavior and application of buckling-restrained braces assembled with section steels [J]. Building Structure, 2010, 40(1): 30—37. (in Chinese)
- [8] Iwata M, Murai M. Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(14): 1807—1826.
- [9] 郭彦林, 王小安. 一种四角钢组合约束型防屈曲支撑的外围约束机理及刚度取值研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 79—87.
Guo Yanlin, Wang Xiaoan. Study on restrain stiffness of a four-angle assembled steel buckling-restrained brace [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 79—87. (in Chinese)
- [10] 郭彦林, 王小安. 一种四角钢组合约束型防屈曲支撑外围连接的设计方法研究: 理论推导[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 56—63, 84.
Guo Yanlin, Wang Xiaoan. Bolt connection behavior and design of a four-angle assembled steel buckling-restrained brace: theoretical analysis [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 56—63, 84. (in Chinese)
- [11] GB50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 2003.
GB50017-2003, Code for design of steel structures [S]. 2003. (in Chinese)
- [12] 陈绍蕃. 门式刚架端板螺栓连接的强度和刚度[J]. 钢结构, 2000, 15(1): 6—11.
Chen Shaofan. The strength and stiffness of bolt end-plate connection in portal frames [J]. Steel Construction, 2000, 15(1): 6—11. (in Chinese)