DOI: 10.3901/JME.2020.05.063

模块化构架式空间可展天线支撑桁架 展开精度测量与分析*

田大可¹ 刘荣强² 杨谢柳¹ 邓宗全²

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院 沈阳 110168;

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 为研究金属网面式可展天线支撑桁架对反射器表面形面精度的影响,开展模块化构架式空间可展天线支撑桁架展开精度测量试验及分析研究,根据支撑桁架的结构特点,基于机器人学基本理论,建立关键节点空间数学模型,设计悬吊随动式微重力展开试验装置,采用数字近景摄影测量原理,对支撑桁架的展开精度进行测量试验,并从支撑桁架的形面精度、重复展开精度和关键节点误差等 3 个方面进行分析。试验结果表明:支撑桁架上关键节点的均方根误差(RMSE)值较小,由关键节点构成的曲面其形面精度较高;支撑桁架在多次重复展开试验中,关键节点中最大误差小于 1 mm,结构展开的一致性较好;完全展开后,关键节点的实测值与理论值接近,支撑桁架的制造及安装精度较高。提出的测量和分析方法为其他类型金属网面式可展天线支撑桁架展开精度的研究提供了借鉴和参考。

关键词: 空间可展天线; 支撑桁架; 模块; 形面精度; 数字近景摄影测量

中图分类号: V443

Deployment Accuracy Measurement and Analysis of Truss Structure for Modular Space Deployable Truss Antenna

TIAN Dake¹ LIU Rongqiang² YANG Xieliu¹ DENG Zongquan²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: To study the influence of truss structure for metal mesh deployable antenna on the surface accuracy of reflector, experiment and analysis on deployment accuracy measurement of truss structure for modular space deployable truss antenna are carried out. According to the structure features of truss structure, key node mathematical model is established based on the basic theory of robotics. Then, suspension following microgravity expansion test device is designed. By using the principle of digital close-range photogrammetry, the deployment accuracy of truss structure is measured and tested. Meanwhile, the surface accuracy, repeated deployment accuracy and key node error of truss structure are analyzed. The results show that the root mean square error (RMSE) of the key nodes on the truss structure is small, and the surface formed by the key nodes has a high surface accuracy; the maximum error of the key nodes is less than 1 mm in repeated deployment tests, and the consistency of the structure deployment is good; after fully deployment, the measured values of the key nodes are close to the theoretical values, and the manufacturing and installation of the truss structure are good. The methods of measurement and analysis presented provide a reference for the research of deployment accuracy of other types of metal mesh deployable antenna truss structure.

Key words: space deployable antenna; truss structure; module; surface accuracy; digital close-range photogrammetry

0 前言

近年来,随着航天科技的快速发展,空间可展

天线在移动通信、射电天文、深空探测和电子侦察等领域得到了广泛应用^[1-3]。目前,已在轨运行的空间可展天线主要为金属网面式可展天线^[4],该天线由柔性金属反射网和刚性可展桁架等结构组成,具有折叠比大、刚性好、质量轻等优点。

形面精度是衡量可展天线工作性能的一项重要指标,由于金属网面式可展天线的反射器表面一般由

* 国家自然科学基金重点项目(51835002)、中国博士后科学基金面上项目(2019M661126)和辽宁省自然科学基金指导计划(2019-ZD-0655)资助项目。20190315 收到初稿,20190610 收到修改稿

镀金钼丝编织而成,柔性较大,会对天线的形面精度产生较为不利的影响,进而降低天线的工作频段和工作效率。如何提高天线展开后的形面精度则成为了该领域的一个热点问题,国内外诸多学者都对这一方向进行了较为深入的研究。LI等^[5]提出了确定索网预应力和优化边界索的预应力分布等两种天线找形方法,保证了反射器表面变形和索张力的较好匹配。TANAKA等^[6]提出了直接法和模式法两种索网天线形面控制方法,并将其应用于张紧索和边界索的控制中。YANG等^[7]提出一种基于力密度的网状可展开天线索网结构初始形态设计方法,通过优化实现了前、后索网的初始形态设计,提高了索网张力的均匀性。WANG等^[8]研究了索网结构形面主动调整方法,将压电陶瓷作动器与柔性索相集成,建立了索网结构的形面主动调整优化模型。狄杰建等^[9]采用遗传算法对索网式展开天线结构纵向调整索数及其初始张力进行了优化研究,有效提高了天线的表面精度。

由以上分析可见,大多数学者对形面精度的研究主要集中在索网、张紧索及金属网面等柔性结构上,对于对金属网面有同样影响的支撑桁架的展开精度问题则研究较少。本文针对一种由六棱柱模块组成的构架式可展天线支撑桁架的展开精度问题进行研究,首先基于机器人学基本理论,建立了支撑桁架关键节点的空间数学模型;其次,为提高测量的准确性,设计了模拟天线在轨运行空间环境的微重力补偿装置;再次,基于数字近景摄影测量原理,对支撑桁架的展开精度进行了试验研究,从展开状态的形面精度、重复展开精度和关键节点误差等三个方面进行了展开精度分析,该研究结果为后续构架式可展天线结构改进及金属网面的找形设计提供了数据参考和依据。

1 构架式可展天线结构及展开原理

1.1 结构组成

构架式可展天线属于金属网面式可展天线的一种,该天线采用模块化思想设计^[10],由7个结构相似的模块组成,各模块按照“分层次拓扑”的性质进行排布,共包含两个层次,其中第一层有1个模块,第二层有6个模块,结构如图1所示。每个模块又由前索网、金属反射网、竖向拉索、后索网、支撑桁架和交叉拉索等结构组成。前索网主要用于固定并张紧金属反射网;金属反射网是可展天线的工作表面,用于信号的发射和接受,展开后呈抛物面形状;竖向拉索连接前、后索网,用于精确调节网面形状;后索网是网面的基层,为竖向拉索的连接提供载体,同时还能张紧前索网和金属反射网;

支撑桁架是天线的骨架,是一个由若干个细杆组成的多连杆机构,具有可展开功能,用于支撑金属反射网、前索网、后索网等柔性结构,并在关键节点上保证天线的形面精度;交叉拉索安装在支撑桁架的周边连杆上,起到提高支撑桁架结构刚度的作用。

图1 构架式可展天线结构组成

1.2 展开原理

每个模块的支撑桁架由6个呈中心辐射状分布的基本单元组成,基本单元具有可展性,是最小的结构单元,主要由中心杆、滑块、小支撑杆、上弦杆、竖杆、下弦杆、小斜腹杆、大斜腹杆、弹簧和电机等组成,其结构如图2所示。弹簧提供驱动力,电机控制展开速度,展开时弹簧驱动滑块沿中心杆向上移动,小支撑杆旋转并带动其余杆件展开,完全展开时小斜腹杆和大斜腹杆轴线重合,结构处于“死点”位置,整个机构锁死。

图2 基本单元结构及展收状态

1. 中心杆 2. 滑块 3. 小支撑杆 4. 上弦杆 5. 竖杆
6. 下弦杆 7. 小斜腹杆 8. 大斜腹杆 9. 弹簧 10. 电机

这种天线的优点是结构拓扑灵活,可根据用户需求改变模块的数量和大小,从而快速实现不同口径可展天线的变化;由于采用了模块化设计思想,天线中结构的类型大大减少,互换性高,有效降低了研制成本和研制周期;模块收拢时体积较小,展开后为面积较大的六棱柱构型,具有较高的收纳率和更大的工作面积。

2 支撑桁架展开精度测量试验

2.1 关键节点空间数学模型

每个可展模块的支撑桁架都通过 1 个中心点和 6 个边界点与金属反射网等柔性结构相连, 因此, 在剔除重合点后, 本文研究的 7 模块构架式可展天线共有 31 个连接点。由于天线表面必须符合抛物面构型, 支撑桁架在设计中采用了球面拟合抛物面的设计思想, 依靠由 31 个连接点构成的球面去逼近抛物面, 所以这些连接点在宏观上对天线的形面精度具有非常重要的影响, 均为支撑桁架的关键节点, 其位置分布及编号如图 3 所示。

图 3 支撑桁架关键节点位置分布

为了准确分析支撑桁架展开后关键节点的精度情况, 需要建立各关键节点的空间数学模型, 即确定各关键节点在总体坐标系下的三维坐标。建模的思路为首先建立单一模块各关键节点的空间数学模型, 其次建立模块 2 上各关键节点在总体坐标系下的空间数学模型, 再次根据模块 3~7 与模块 2 在空间的位置分布关系, 建立多模块数学模型, 最后建立全体模块关键节点的空间数学模型, 建模流程如图 4 所示。

图 4 全体模块关键节点数学建模流程图

在模块 1 的中心处建立总体坐标系 $\{O_0\}$, 在模块 2~7 的中心处建立局部坐标系 $\{O_1\} \sim \{O_6\}$, 在模块 1 和模块 2 的中心处建立过渡坐标系 $\{O'_0\}$ 和 $\{O'_1\}$, 坐标系及坐标系变换关系如图 5 所示。

图 5 坐标系变换关系示意图

基于机器人学中的齐次坐标变换理论^[11], 按图 4 和图 5 的建模过程, 可以得到式(1)所示的全体模块上各关键节点的空间数学模型, 详细建模过程见文献[12]

$$P_n^k = {}^{O_0}T_{O_n} \begin{bmatrix} l \cos \alpha \cos \phi_j \\ l \sin \alpha \\ -l \cos \alpha \sin \phi_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, O_0 为总体坐标系原点, O_n 为各模块局部坐标系原点且 $n=0, 1, \dots, 6$, k 为每个模块内关键节点的序号且 $k=1, 2, \dots, 7$, ${}^{O_0}T_{O_n}$ 为模块 1~7 相对于总体坐标系的变换矩阵, l 为模块边长, α 为上弦杆倾斜的角度, ϕ_j 为旋转变换的角度且 $\phi_j = j\pi/3, (j=0, 1, \dots, 5)$ 。

2.2 微重力试验装置

可展天线在轨运行时处于微重力空间环境^[13], 为了降低重力场对支撑桁架展开精度测量的影响, 建立了一套悬吊随动式微重力展开试验装置, 如图 6 所示。

该装置主要由支撑框架、重力补偿系统、控制系统等组成。支撑框架采用铝合金型材, 三维尺寸为 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$; 重力补偿系统包括滑道、滑块、滑轮、吊索和配重块等结构; 控制系统包括驱动绳索释放机构及控制箱等。

由于天线在展开过程中, 每个模块的质心实时发生变化, 为及时消除重力的影响, 采用重心随动补偿的方式对其进行重力卸载, 将各模块的中心作

图 6 微重力展开试验装置

为卸载点, 由于模块 1 与微重力装置固定连接, 因此只有第 2 层的 6 个模块需要进行卸载, 配重块的质量与单模块质量近似相等。支撑桁架在收拢时所有配重块密集在框架的中心, 控制系统缓慢释放绳索, 支撑桁架逐渐展开, 配重块在支撑桁架的带动下沿着导轨的方向移动, 达到了实时补偿、完全卸载的目的。

2.3 测量原理及方案

2.3.1 测量原理

数字近景摄影测量^[14-15]是测绘学中一种重要的测量方法, 使用单台或多台相机距离被测物体一定的距离, 从不同角度对被测物体进行拍照, 经过处理物体的图像照片来得到物体准确的空间坐标, 从而实现了由二维平面到三维空间的坐标转换。数字近景摄影测量具有非接触、使用方便灵活、测量精度高、计算速度快等优点。由此可见, 数字近景摄影测量可以满足本文悬吊状态下支撑桁架展开精度测量的要求。

数字近景摄影测量的原理与双目立体视觉的原理基本相同。以平视双目立体视觉为例, 如图 7 所示, $\{O_w\}$ 为世界坐标系, $\{O_L\}$ 和 $\{O_R\}$ 分别为在位置 1 和位置 2 处相机的等效中心建立的相机坐标系, 采用相同参数的相机在两个位置对被测物体 P 进行拍照, 保证相机在两个拍摄位置的光轴互相平行, 基线距离为 s , 焦距为 f 。建立图像坐标系 $\{O_l\}$ 和 $\{O_r\}$, 两个坐标系的原点 O_l 和 O_r 分别位于各自光轴与像平面的焦点, 坐标系的 u 轴和 v 轴分别与各自相机坐标系的 x 轴和 y 轴平行。 P_l 和 P_r 为位置 1 和位置 2 图像上的成像点, 假设两幅图像位于同一个平面上, 则 $v_1 = v_2$, 由透视成像的三角几何关系可得

$$\begin{cases} u_1 = fx/z \\ u_2 = f(x-s)/z \\ v_1 = v_2 = fy/z \end{cases} \quad (2)$$

式中, (x, y, z) 为物点 P 在坐标系 $\{O_L\}$ 中的坐标, (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) 分别为像点在图像坐标系 $\{O_l\}$ 和 $\{O_r\}$ 中的坐标。

图 7 数字近景摄影测量基本原理

由于两相机光轴平行, 故视差 $d = |u_1 - u_2|$, 对相机进行内参数标定, 由此可以得到物点 P 在坐标系 $\{O_L\}$ 中的坐标

$$\begin{cases} x = u_1 s / d \\ y = v_1 s / d \\ z = fs / d \end{cases} \quad (3)$$

假设 R 、 T 为相机坐标系 $\{O_L\}$ 相对于世界坐标系 $\{O_w\}$ 的旋转矩阵和平移矩阵, 根据该相机外参数标定, 可以得到物点 P 在世界坐标系 $\{O_w\}$ 下的坐标

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} + T = R \begin{bmatrix} u_1 s / d \\ v_1 s / d \\ fs / d \\ 1 \end{bmatrix} + T \quad (4)$$

2.3.2 展开精度试验

本文使用美国 GSI 公司生产的 V-STARS 数字近景摄影三坐标测量系统, 该系统具有较高的测量精度, 10 m 范围内的精度可以达到 0.08 mm, 使用的具体型号为智能单相机系统 V-STARS/S8, 该系统主要包括智能数码相机 INCA3、包含图像处理软件的计算机、定向棒、基准尺和人工标志点等。展开精度测量试验主要包括前期准备、具体实施、数据后处理等三个过程, 前期准备是试验的基础和关键, 分为以下几项工作。

(1) 标志点标定。如图 8 所示, 在半透明的硫酸纸上绘制与标志点大小相同的圆形图案, 并绘制从圆心发散的刻画用基准直线, 将硫酸纸图案与标志点匹配, 用刻刀沿直线划破硫酸纸并在标志点外的黑色区域留下划痕, 标定时将划痕与桁架上的特征线一一对齐即可保证很高的定位精度。

图 8 标志点标定

(2) 编码点粘贴。将若干个编码点分散的粘贴在标志点中间的杆件上，如图 9 所示。其作用是保证相机可以高精度的将多张离散的照片拼接到一起，为后期图像处理做准备。

图 9 编码点粘贴

(3) 固定定向棒。将定向棒固定在支撑桁架附近一个比较稳定的位置，定向棒的作用是建立测量坐标系，所有的测量数据均换算到该坐标系上。

(4) 固定基准尺。同样选取试验现场附近且稳固的位置安放基准尺，基准尺线膨胀系数极低，测量数据的精度以该基准尺作为参照。

前期准备工作做好并检查无误后，开始进行展开精度测量试验，试验现场如图 10 所示。

(a)

(b)

图 10 展开精度测量试验

测量时，首先用智能相机对支撑桁架进行试拍，根据现场的光线情况设定相机参数。本文共对支撑桁架进行了 10 次展开试验，完全展开静止 5 min 后进行拍照测量，每次测量时拍摄 35 张照片。

3 试验结果与分析

3.1 形面精度

可展天线的形面精度通常用均方根误差来表征，均方根误差是指测量值与其理论值偏差的均方根。均方根误差越小，则偏离程度越小，曲面精度就越高，均方根误差可表示为

$$\delta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{c,i} - X_{z,i})^2 / n} \quad (5)$$

式中， n 为有限次测量的次数， $X_{c,i}$ 为第 i 次测量得到的实测值， $X_{z,i}$ 为与实测值对应的理论值。

10 次展开精度试验测量后得到的 RMSE 值如图 11 所示，其中最大的 RMSE 值为 3.13 mm。目前，国内外在研/在役的大部分金属网面式可展天线的形面精度^[16-18]，即反射器工作表面的形面精度介于 0.56~3.50 mm 之间，由图 11 可见，本文研究的支撑桁架的 RMSE 值均小于 3.50 mm，且 10 次测量的算数平均值为 3.08 mm，可见，该支撑桁架的形

图 11 支撑桁架均方根误差分析

面精度较高,关键节点的精密度较好,由关键节点构成的曲面较为光滑,支撑桁架在宏观上保证了天线的形面精度。

进一步分析,由文献[17]还可以知道,采用找形理论、网面优化等调整方法后,金属网面式可展天线的 RMSE 值还可以降低约 2 mm,表明本文提出的支撑桁架还有较大的优化调整空间及较好的应用前景。

3.2 重复展开精度

重复展开精度分析是一种判断支撑桁架是否具有高定位精度和高可靠性的分析方法。在展开试验中,可以通过测量关键节点在多次试验中的空间三维坐标值来判断支撑桁架是否能够展开到预定位置,以及判断支撑桁架在展开过程中是否存在杆件干涉、损坏等情况。

由于关键节点 1 与微重力装置固接,因此本文对其余 30 个点的重复展开精度情况进行了研究。现以周边模块的中心点(关键节点 8)、位置最远的边界点(关键节点 30)、2 个模块的连接点(关键节点 24)、3 个模块的连接点(关键节点 4)等 4 个比较有代表性的点为例进行分析。以第 1 次展开试验的测量结果为基准,其余 9 次试验结果与之比较,4 个点的重复展开精度情况见图 12~15。

图 12 关键节点 8 的重复展开精度

图 13 关键节点 30 的重复展开精度

图 14 关键节点 24 的重复展开精度

图 15 关键节点 4 的重复展开精度

由图 12~15 可见,在 x 轴和 z 轴方向上,支撑桁架的重复展开精度较高, y 轴方向的重复展开精度稍差,说明尽管微重力展开装置在整个试验过程中对支撑桁架起到了很好的重力平衡作用,但结构仍会受到残余重力的影响。同时,由于 y 轴与重力场方向一致,因此该方向所受影响大于其他两个方向。但从各点三个方向的结果来看,支撑桁架能够保持很高的重复展开精度,最大误差小于 1 mm。

同时,在 10 次的展开试验中支撑桁架没有出现杆件卡死、拉索断裂、铰链摩擦阻力过大、拉索相互缠绕和电机功率不足等问题,每次试验支撑桁架都能顺利展开,说明支撑桁架可靠性较高。

3.3 关键节点误差

根据第 2.1 节建立的关键节点的空间数学模型,可以得到所有关键节点的理论坐标值,如表 1 所示。为了便于从总体上分析关键节点实测值与理论值的误差情况,对 10 次试验得到的关键节点的实测坐标取算术平均值,结果如表 2 所示。

对表 1 与表 2 中的数据进行分析,得到图 16 和图 17 所示的各关键节点的理论值与试验值的绝对误差和相对误差。由图 16 和图 17 可见,关键节点 9 的绝对误差最大,其值为 26.04 mm,各节点绝对误差的平均值为 14.01 mm;关键节点 7 的相对误

表 1 关键节点理论坐标值

编号	坐标/mm			编号	坐标/mm		
	x	y	z		x	y	z
1	0	0	0	17	0	-114.66	1031.96
2	598.75	-38.72	0	18	299.37	-266.26	1529.35
3	299.38	-38.72	518.53	19	-299.37	-266.26	1529.35
4	-299.38	-38.72	518.53	20	-598.52	-155.42	1036.76
5	-598.75	-38.72	0	21	-893.71	-114.66	515.98
6	-299.38	-38.72	-518.53	22	-1174.77	-266.26	1023.94
7	299.38	-38.72	-518.53	23	-1474.14	-266.26	505.41
8	893.71	-114.66	-515.98	24	-1197.12	-155.42	0.04
9	1474.14	-266.26	-505.41	25	-893.71	-114.66	-515.98
10	1197.12	-155.42	0.04	26	-1474.14	-266.26	-505.41
11	598.52	-155.42	-1036.76	27	-1174.77	-266.26	-1023.94
12	1174.77	-266.26	-1023.94	28	-598.52	-155.42	-1036.76
13	893.71	-114.66	515.98	29	0	-114.66	-1031.96
14	1474.14	-266.26	505.41	30	-299.37	-266.26	-1529.35
15	1174.77	-266.26	1023.94	31	299.37	-266.26	-1529.35
16	598.52	-155.42	1036.76				

表 2 关键节点实测坐标值

编号	坐标/mm			编号	坐标/mm		
	x	y	z		x	y	z
1	0	0	0	17	4.15	-109.15	1031.24
2	599.01	-38.63	-8.87	18	318.40	-257.58	1529.30
3	305.56	-32.52	515.00	19	-281.43	-255.29	1535.35
4	-291.59	-36.19	523.79	20	-585.62	-142.18	1047.69
5	-599.78	-30.55	5.18	21	-886.87	-109.57	529.97
6	-308.13	-35.45	-513.70	22	-1166.52	-257.00	1028.31
7	290.99	-33.71	-523.29	23	-1473.77	-250.84	511.72
8	885.80	-115.15	-525.78	24	-1201.47	-141.81	6.42
9	1465.62	-260.49	-529.32	25	-903.46	-112.52	-501.20
10	1196.21	-144.55	-5.58	26	-1480.39	-254.01	-493.05
11	589.16	-153.31	-1040.20	27	-1180.46	-260.58	-1016.93
12	1165.19	-264.48	-1032.48	28	-601.67	-147.60	-1038.16
13	898.49	-110.86	510.40	29	-5.60	-117.42	-1030.22
14	1478.33	-265.57	494.60	30	-310.28	-259.12	-1527.28
15	1187.86	-260.70	1008.13	31	279.76	-262.69	-1535.17
16	612.52	-149.39	1029.76				

差最大，其值为 1.81%，各节点相对误差的平均值为 1.22%。总体上看，各节点的相对误差都很小，表明支撑桁架具有较高的加工精度和装配精度。但仍有少部分节点的绝对误差较大，如点 9、点 15、点 18 点 19 和点 20 等，通过分析发现，它们均位于支撑桁架的边缘，其原因是由于支撑桁架的杆件和铰链数量较多，在桁架的边缘处产生了累积误差。后期可通过提高加工和装配精度、安装调节杆等措施进行减小和修正。

图 16 关键节点绝对误差情况

图17 关键节点相对误差情况

4 结论

(1) 支撑桁架上各关键节点的 RMSE 值较小, 最大值仅为 3.13 mm, 关键节点的精密度较好, 由关键节点构成的曲面较为光滑平顺且形面精度较高, 支撑桁架能够在宏观上对可展天线反射器表面的形面精度提供很好的保证。

(2) 关键节点重复展开的最大误差小于 1 mm, 表明支撑桁架的重复展开精度较高, 设计的悬吊式微重力展开试验装置起到了很好的重力补偿作用。支撑桁架的可靠性较好, 在 10 次展开试验过程中未出现铰链卡滞、杆件干涉、展开困难等故障。

(3) 支撑桁架完全展开后, 关键节点的实测值与理论值偏离程度较小, 支撑桁架的加工精度和装配精度较高。少部分边缘节点处绝对误差较大, 有待进一步开展误差传递模型及误差分配方法等研究工作。

参考文献

- [1] TIBERT A G. Optimal design of tension truss antennas[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 7-10, 2003, Norfolk, Virginia. United States: AIAA, 2003: 2051-2060.
- [2] LIU H P, LUO A N, ZHANG T M, et al. Vibration analysis of circle truss of the astromesh deployable antenna[C]// 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, January 6-7, 2011, Shanghai, China. United States: IEEE Computer Society, 2011: 1116-1119.
- [3] 杨癸庚, 杨东武, 杜敬利, 等. 一种基于力密度的网状可展开天线索网结构初始形态设计方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 34-41.
- [4] 段宝岩. 大型空间可展开天线的研究现状与发展趋势[J]. 电子机械工程, 2017, 33(1): 1-14.
- [5] LI T J, JIANG J, DENG H Q, et al. Form-finding methods for deployable mesh reflector antennas[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(5): 1276-1282.
- [6] TANAKA H, NATORI M C. Shape control of space antennas consisting of cable networks[J]. Acta Astronautica, 2004, 55(3-9): 519-527.
- [7] YANG G G, DUAN B Y, ZHANG Y Q, et al. Uniform-tension form-finding design for asymmetric cable-mesh deployable reflector antennas[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(9): 1-7.
- [8] WANG Z W, LI T J, CAO Y Y. Active shape adjustment of cable net structures with pzt actuators[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 26(1): 160-168.
- [9] 狄杰建, 段宝岩, 杨东武, 等. 索网式星载展开天线结构纵向调整索数及其初始张力的优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 153-157.
- [10] NATORI M C, HIRABAYASHI H, OKUIZUMI N, et al. A structure concept of high precision mesh antenna for space VLBI observation[C]// 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 22-25, 2002, Denver, Colorado. United States: AIAA, 2002: 1-8.
- [11] 穆晓凯, 孙清超, 孙克鹏, 等. 基于载荷作用的柔性体三维公差建模及精度影响分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 39-48.
- [12] 刘荣强, 田大可, 邓宗全, 等. 多模块构架式空间可展开天线背架的模态分析[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(6): 685-690.
- [13] 张文辉, 叶晓平, 季晓明. 空间微重力地面模拟装置基

structures' form-finding design based on force density[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 34-41.

- 于神经滑模的自适应补偿控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 68-72.
- ZHANG Wenhui, YE Xiaoping, JI Xiaoming. Adaptive compensation control for ground simulation equipment of space microgravity environment base on neural sliding-model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 68-72.
- [14] 王聪, 孙炜, 卜德旭, 等. 基于惯性导航与立体视觉的风管清扫机器人同时定位与地图创建方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 59-67.
- WANG Cong, SUN Wei, BU Dexu, et al. Simultaneous localization and mapping research for air-duct cleaning robot based on inertial navigation and stereo vision[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 59-67.
- [15] 朱兴龙. 基于立体视觉和激光标记的空间物体位姿的快速定位算法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 161-165.
- ZHU Xinglong. Quick measurement algorithms of position and pose of spatial object by CCD images based on stereo vision and laser token[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 161-165.
- [16] TIBERT G. Deployable tensegrity structures for space applications[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002.
- [17] 狄杰建. 索网式可展开天线结构的反射面精度优化调整技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- DI Jiejian. On optimal adjusting technology for reflector precision of the cable-net deployable antenna structure[D]. Xi'an: Xidian University, 2005.
- [18] KISHIMOTO N, NATORI M C, HIGUCHI K, et al. New deployable membrane structure models inspired by morphological changes in nature[C]// 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, May 1-4, 2006, Newport, Rhode Island. United States: AIAA, 2006: 3722-3725.

作者简介: 田大可, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为空间可展开机构创新设计理论与方法, 航空发动机总体结构及先进技术预先研究。

E-mail: tiandake@sjzu.edu.cn

刘荣强(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为空间大型可展开机构与控制、大口径可展开天线机构和着陆缓冲机构。

E-mail: liurq@hit.edu.cn