DOI: 10.3901/JME.2020.05.141

大型平面薄膜天线找形及张拉成形数值分析*

项 平¹ 丁 潇¹ 吴明儿¹ 从 强² 邱 慧² 林秋红²

(1. 同济大学建筑工程系 上海 200092;
2. 北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘要: 大型平面薄膜天线具有质量轻、收纳比高、环境适应性好等优点,在航天领域受到了愈加广泛的关注。针对一大型平面薄膜天线结构,考虑一级张拉与二级张拉两种张拉系统,利用 ANSYS 有限元软件对该薄膜天线进行了找形分析,并分别推导了两种张拉系统计算薄膜花边索形状的理论公式。利用找形分析的结果,在 ABAQUS 软件中建立了张拉成型分析模型,探究在张拉过程中,考虑拉索和花边索套之间摩擦力的情况下,膜面和拉索的应力状态。研究表明,在考虑摩擦力的情况下,膜面应力会有所增大,与此同时,膜面应力也变得不均匀,摩擦因数越大,应力不均匀程度越大。对于二级张拉系统,由于内外索连接点附近的膜面产生了应力集中现象,使膜面的有效面积率低于采用一级张拉系统时膜面的有效面积率。

关键词: 薄膜天线; 张拉系统; 有效面积率; 应力均匀性

中图分类号: V414

Numerical Analysis of Form-finding and Tension Forming of Large Planar Membrane Antenna

XIANG Ping¹ DING Xiao¹ WU Minger¹ CONG Qiang² QIU Hui² LIN Qiuhong²

(1. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;
2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

Abstract: Large planar membrane antenna has attracted more and more attention in the field of aerospace because of its light weight, high deployed-folded ratio and good environmental adaptability. Form-finding analysis of a large planar membrane antenna structure is carried out employing the finite element software ANSYS, and theoretical formulae for calculating curved silhouette of the prestressed membrane are derived respectively for two kinds of tensioning systems. By taking the results of form-finding analysis as the initial configuration, a tension forming analysis model is established in the finite element software ABAQUS, and tension process is simulated taking into account the sliding and frictional contact between edge cables and membrane sleeves. The results show that the stress on the membrane will increase when the friction force is taken into account. Furthermore, the stress on the membrane will become non-uniform. The larger the friction coefficient is, the less uniform stress of the membrane becomes. For the inner and outer cable combined tensioning system, the effective area ratio of the membrane surface is lower than that of the inner cable only tensioning system because of the stress concentration near the connection points of the inner and outer cables.

Key words: membrane antenna; tensile system; effective area; stress uniformity

0 前言

国家中长期科学和技术发展规划纲要明确提出要大力发展航天事业,卫星通信、地球观测及深空探测是其重要内容,空间可展开天线^[1-3]是这些领域必不可少的关键设备。相对于传统的航天器平面刚性天线^[4],柔性的平面薄膜天线具有收纳比高、质

量轻、环境适应性好、加工成本低等优点^[5-6],正在成为大型天线的重要发展方向。

平面薄膜天线结构主要由边框支撑结构、薄膜阵面以及张拉系统三部分组成。主要设计指标有基频、薄膜有效面积率、支座反力等。张拉系统和薄膜的边界形状对这些指标均有着十分重要的影响^[7]。

国内外学者对平面薄膜天线的花边形状以及张拉系统已开展了较多研究。2002 年,美国 JPL 公司 FANG 等^[8]制作了直径 3 m 的 KA 波段平面

* “十三五”民用航天预研资助项目。20190324 收到初稿,20190812 收到修改稿

反射面薄膜天线,进行了动力分析和展开过程模拟。2008年,关富玲等^[9]从理论上证明了要使平面薄膜结构处于无褶皱状态,其最优的边界形状应为圆形。2010年,汪有伟等^[10]给出了内外部悬索联合张拉方法下各部分悬索张力的计算方法,并考查了边界跨数对结构的轴压的影响。2015年,刘充等^[11]分析研究了一定应力条件下边界几何参数对薄膜固有频率影响的内在关系。2017年,刘志全等^[7]以可伸展支撑杆承受轴力最小,薄膜阵面有效面积最大、端杆长度最小为优化目标,对张拉系统进行了多目标优化,提出了具有普适性的优化模型和方法。

平面薄膜天线的张拉系统是薄膜阵面和支撑框架之间的绳索系统,通过张拉绳索的两端,对薄膜阵面施加均匀的拉应力,将绳索两端通过中间及角部支座固定于支撑框架上,实现薄膜阵面和支撑框架的柔性连接。薄膜天线的张拉系统有一级张拉系统^[12]和二级张拉系统^[13]两种形式。一级张拉系统将绳索直接穿在薄膜边缘的花边索套内,绳索两端与支座相连,实现对膜面的张拉;二级张拉系统则包括了内索和外索,外索与内索在每一跨内设置多个连接点,在支座处张拉内索和外索,使膜面受拉应力。

目前二级张拉系统的研究主要集中在对于包含中间索及内外索的张拉方法的研究,而在外框尺寸一定时,不含中间索的二级张拉系统可以有效增大薄膜有效率,对于该系统的相关研究还较少;且在已有的分析中,较少考察张拉成形过程中,绳索与花边索套之间的摩擦和滑移接触对于膜面应力状态的影响,而膜面应力均匀性会影响天线工作效率。

针对以上问题,本文以某大型平面薄膜天线的张拉系统为研究对象,分别对传统的一级张拉系统以及不含中间索的二级张拉系统,进行薄膜花边形状的确定,分析考虑绳索与花边索套之间的摩擦和滑移^[14-16]对薄膜阵面应力均匀性的影响,对两种张拉系统的分析结果进行比较。

1 薄膜花边索形状的确定

1.1 薄膜花边索形状理论公式

平面薄膜天线的索膜边界曲线所围形状的内切矩形面积定义为有效面积,有效面积与边框支撑系统所围的面积之比即为有效面积率。薄膜的有效面积对天线工作效率影响较大,需要对薄膜的有效面积进行优化。另一方面,需要减小张拉点支座反力,

尤其是减小对纵向伸缩杆的轴向力。如何控制拉索应力、如何设置张紧边框连接点数目及张拉方式的影响是重点研究内容。本节主要推导在不考虑摩擦的理想状态下,膜面有效面积及支座反力与花边索跨度、索应力的理论关系式。

对于一级张拉系统,理想的边界形状为圆弧^[10],其形状如图1所示。

图1 一级张拉系统花边索形状

根据几何关系,有效面积率

$$\eta = \frac{(b-2\Delta)(l-2\Delta)}{bl} \quad (1)$$

式中, l 和 b 分别为膜面的总长和总宽, Δ 为边索的垂度。

$$\left(\frac{l_0}{2}\right)^2 + (R-\Delta)^2 = R^2 \quad (2)$$

式中, l_0 为边索的跨度, R 为边索的曲率半径。

由式(1)求得 Δ ,将其代入式(2),可求得边索的曲率半径

$$R = \frac{b^2 l(-1+\eta) - l_0^2 + b[-l_0^2 + l(-1+\eta)l - X]}{8b(-1+\eta)l} \quad (3)$$

$$X = \frac{\sqrt{b^2 + 2bl(-1+2\eta) + l^2} [bl(-1+\eta) + l_0^2]}{bl}$$

根据索力和膜面张力的关系^[10],可得索力

$$T_c = R\sigma_m \quad (4)$$

式中, σ_m 为单位长度的薄膜张力,单位N/m。

中间支座的受力如图2所示。

图2 一级张拉系统中间支座受力简图

可以求得中间支座的支座反力

$$F_{mR} = l_0 \sigma_m \quad (5)$$

角部支座的受力如图3所示。

图3 一级张拉系统角部支座受力简图

可以求得角部支座的支座反力

$$F_{cR} = 2R \cos\left(\frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{l_0}{2R}\right)\right) \quad (6)$$

对于二级张拉系统, 在此取内外索连接点数目为 3^[17] 的结构进行分析, 边界形状如图 4 所示, 每一段内索均为圆弧, 外索在相邻两个连接点间呈直线。

图4 二级张拉系统花边索形状

根据几何关系, 可得

$$R = \frac{l_0}{4\sin(\beta + \gamma)(\cos\beta + \cos 3\beta)} \quad (7)$$

$$\Delta = R\cos\beta + R\cos(2\beta - \gamma) - R\cos(2\beta + \gamma) - R\cos(4\beta + \gamma) \quad (8)$$

$$\eta = \frac{(l - 2\Delta)(b - 2\Delta)}{lb} \quad (9)$$

式中, R 为内索的曲率半径, l_0 , β , γ , Δ 如图中所示。

根据力的平衡关系, 可得内索索力

$$T_{ic} = R\sigma_m \quad (10)$$

外索索力

$$T_{oc} = \alpha T_{ic} = R\sigma_m \quad (11)$$

式中, α 为外索与内索索力之比。

易知

$$T_{oc} \cdot \sin\beta = T_{ic} \cdot \sin\gamma \quad (12)$$

将式(10)和式(11)代入式(12), 可得

$$\alpha \sin\beta = \sin\gamma \quad (13)$$

由式(7)~(9)及式(13), 便可根据外内索力之比以及需要的有效面积率, 求得薄膜的花边索形状, 进一步求得内外索索力。

二级张拉系统中间支座受力如图 5 所示。

图5 二级张拉系统中间支座受力简图

可得中间支座的支座反力

$$F_{mR} = 2R\sigma_m [\sin(4\beta + \gamma) + \alpha \sin(3\beta)] = l_0 \sigma_m \quad (14)$$

二级张拉系统角部支座受力如图 6 所示。

图6 二级张拉系统角部支座受力简图

可以求得角部支座的支座反力

$$F_{cR} = 2R\sigma_m [\alpha \cos(\frac{\pi}{4} - 3\beta) + \cos(\frac{\pi}{4} - 4\beta - \gamma)] \quad (15)$$

1.2 有限元找形分析

索膜结构是一种柔性体系, 且薄膜本身没有抵抗弯矩或压力的能力, 抗剪能力也很差。为了使索膜结构具有一定的刚度, 同时保证薄膜表面不出现褶皱, 必须对其施加预应力。寻找一种使索膜结构能够通过张拉后保持平整、不出现褶皱的几何形状即找形分析。

本节采用通用有限元软件 ANSYS 的非线性计算进行找形分析, 并考虑边界的弹性变形, 模型材料参数如表 1 所示。其中膜面预拉力取值应满足基频要求, 边索预拉力取值应满足一定有效面积率下根据第 1.1 节的计算公式确定。

表1 模型材料参数

材料参数	薄膜	边索
密度/(kg/m ³)	41.54(考虑电子元器件质量)	1.40
弹性模量/GPa	3.5	131
泊松比	0.35	0.35
厚度/mm	0.05	—
直径/mm	—	1.2
预拉力	2 N/m	22.6 N (二级: 内外索各 11.3 N)

有限元模型以一级张拉系统为例, 如图 7 所示, 长度方向共 25 跨, 宽度方向共 1 跨。膜面采用 shell41

单元模拟, 降温法施加预张力; 边索采用 link10 单元模拟, 通过定义初应变施加预张力。膜面初始形状为张拉点支座构成的矩形, 拉索为膜面边界, 支座处为简支约束, 若为二级张拉系统, 则内外索连接点处自由度耦合, 采用映射网格划分。

图 7 找形分析初始几何模型

找形分析结果与第 1.1 节中理想状态下采用弹性小变形理论推导得到的膜面边界形状几乎一致, 且膜面应力完全均匀, 以一级张拉系统为例, 其分析结果如图 8 所示。

图 8 找形分析后膜面应力云图(Mises 应力, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)

采用最小二乘法, 对图 8 找形分析结果进行边索形状拟合, 采用抛物线理论拟合的标准差为 2.07×10^{-6} , 采用圆弧理论拟合的标准差为 6.89×10^{-9} , 故实际找形得到的边索形状更接近圆弧, 与理论相符。

找形分析得到的支座反力以及有效面积率如表 2 所示, 表中未区分一级张拉系统与二级张拉系统, 这是由于两者的支座反力和有效面积完全相同。由于二级张拉系统索力由内外索共同承担, 故在相同的薄膜有效面积率要求下, 采用二级张拉系统可以减小索力, 但不影响支座反力即伸展支撑杆受力。

表 2 找形分析结果

指标	中间支座	角部支座
力 F_x/N	0	28
力 F_y/N	10	27
合力 F/N	10	39
有效面积率 $\eta(\%)$	90.08	

2 薄膜张拉成型分析

2.1 有限元模型

为使平面薄膜天线上覆的电子设备能够有效工作, 膜面的应力应保持良好的均匀性。在实际张拉成型过程中, 由于绳索与花边索套之间存在滑移和

摩擦力的作用, 使索力不能按照找形分析的理想情况传递给膜面, 造成膜面应力不均匀。

为研究张拉成型过程中膜面应力的状态, 在通用有限元软件 ABAQUS 中分别建立一级张拉系统和二级张拉系统(内外索连接点数目为 3 个)的分析模型, 为节约计算成本, 由于结构为双轴对称, 在张拉成型过程有限元分析中建立 1/4 模型, 如图 9、10 所示。膜面的边界形状采用第 1.2 节找形分析的结果, 并在边缘建立索套, 膜面和索套均采用 membrane 单元模拟。绳索的形状也按照第 1.2 节的分析结果建模, 用 truss 单元模拟。在一级张拉系统的模型中, 绳索直接穿在索套内; 在二级张拉系统的模型中, 内索穿在索套内, 外索与内索在连接点和支座处自由度耦合。

图 9 一级张拉系统分析模型

图 10 二级张拉系统分析模型

通过张拉支座处每根索的两个端点, 模拟实际张拉过程, 张拉索的力依然采用第 1.2 节中的分析结果, 在模型中通过设置关于摩擦力的通用接触, 以模拟绳索与索套之间的摩擦。

2.2 分析结果

2.2.1 一级张拉系统

当不考虑切向库仑摩擦力而仅考虑边索与索套之间的法向接触力时, 一级张拉系统张拉成型分析结果与找形分析结果几乎相同, 即膜面应力分布几乎均匀, 索应力沿长度方向基本相同, 如图 11 所示。图 11e 为以花边索套内切矩形内所有单元的 Mises 等效应力的平均值为基准应力 S , $S \pm 20\%$ 范围内的膜面 Mises 等效应力云图。

(a) 膜面 x 方向正应力云图

(b) 膜面 y 方向正应力云图

(c) 膜面 Mises 等效应力云图

(d) 边索应力云图

(e) $S \pm 20\%$ 范围($S \pm 20\%$ 范围外为灰色, 有效面积率约 90.04%)

图 11 摩擦因数为 0 的一级张拉成型分析结果

当拉索与花边索套之间的摩擦因数为 $0.3^{[12]}$ 时, 膜面和边索应力均出现了不均匀的情况, 膜面的有效面积率降低, 索力中间小两端大, 如图 12 所示。

(a) 膜面 x 方向正应力云图 (b) 膜面 y 方向正应力云图

(c) 膜面 Mises 等效应力云图

(d) 边索应力云图

(e) $S \pm 20\%$ 范围(大于 $S+20\%$ 为灰色, 小于 $S-20\%$ 为黑色, 有效面积率约 64.17%)

图 12 摩擦因数为 0.3 的一级张拉成型分析结果

图 13 给出了不同摩擦因数下膜面中心单元(有限元模型中的最右下角点) x 方向正应力、 y 方向正应力以及 Mises 等效应力值的变化情况, 根据计算对比, 此单元的应力值可作为薄膜有效面积的基准应力 S 。图 14 给出了边索跨中索力损失随摩擦因数的变化情况。

由图 13、14 可知, 随着摩擦因数增大, 单元 x 方向正应力显著增加, 而 y 方向正应力略有增加, Mises 等效应力亦随着摩擦因数的增大而增大; 摩擦因数越大, 跨中边索应力损失越大。

图 13 中心单元应力随摩擦因数 μ 的变化 图 14 跨中索力损失随摩擦因数 μ 的变化

本节中膜面有效面积率定义为 $S \pm \alpha\%$ 范围内的最大内切矩形面积与外框架包络尺寸($b \times l$)的比值。其中, S 设定为中心单元应力, α 分别取 10, 20, 40, 80。图 15~17 对比了不同摩擦因数情况下, 不同应力基准下对应的膜面有效面积率。

图 15 有效面积率有限元分析结果(以 x 方向正应力为基准)

由图 15~17 可以看出, 随着摩擦因数的增大, 以 x 方向正应力、 y 方向正应力和 Mises 应力为统计基准的膜面有效面积率均在下降, 膜面应力不均匀程度增大。当摩擦因数较大时, 应力会出现负值, 这是由于 ABAQUS 显式动力分析中膜单元既可受

图 16 有效面积率有限元分析结果(以 y 方向正应力为基准)

图 17 有效面积率有限元分析结果(以 Mises 应力为基准)

拉又能受压, 应力负值仅出现在张拉点附近很小的区域内。通过观察正应力大于 0 的膜面有效面积率, 发现即使是摩擦很大的情况, 有效面积率也降低很少, 可认为负应力区对大部分区域膜面应力影响较小。

2.2.2 二级张拉系统

当不考虑切向库仑摩擦力而仅考虑边索与索套之间的法向接触力时, 二级张拉系统张拉成型分析结果(图 18)与找形分析结果有一些差异。膜面应力分布比较均匀, 但是在支座及内外索连接点处膜面会出现应力集中, 如图 18e 所示, 应是膜面缺口造成的影响; 内外拉索应力分布不均匀, 是由于张拉时拉索及连接点发生了位移, 内外索力分配与理想情况有差异, 如图 18d 所示。

(a) 膜面 x 方向正应力云图

图 18 摩擦因数为 0 的二级张拉成型分析结果

当考虑切向库仑摩擦力(摩擦因数为 0.3)时(图 19), 膜面应力分布更加不均匀, 在支座及内外索连接点处膜面仍会出现应力集中; 与不考虑摩擦的张拉分析结果相比, 拉索应力有所减小, 且分布不均匀。

2.2.3 张拉系统对比

摩擦因数为 0 时, 通过比较二级张拉系统与一级张拉系统的计算结果(表 3~8), 可以看出中心单元的应力结果基本一致, 但是二级张拉系统膜面应力的不均匀程度较一级张拉更大, 在张拉点及内外

图 19 摩擦因数为 0.3 的二级张拉成型分析结果

索连接点处出现了明显的应力集中。在有效面积率方面, 二级张拉系统的有效面积率小于一级张

拉系统。

表 3 膜面 x 方向正应力分析结果比较($\mu = 0$, 单位: MPa)

结构形式	最小值	最大值	中心单元值(S_{11})
一级张拉	0.019 7	0.062 0	0.038 0
二级张拉	-0.219 5	0.644 8	0.048 1

表 4 膜面 y 方向正应力分析结果比较($\mu = 0$, 单位: MPa)

结构形式	最小值	最大值	中心单元值(S_{22})
一级张拉	0.028 7	0.075 6	0.045 0
二级张拉	-0.499 6	0.630 3	0.039 1

表 5 膜面 Mises 应力分析结果比较($\mu = 0$, 单位: MPa)

结构形式	最小值	最大值	中心单元值(S_{Mises})
一级张拉	0.033 2	0.068 7	0.042 0
二级张拉	0.027 7	0.614 6	0.044 3

表 6 膜面有效面积率分析结果比较($\mu = 0$, $S=S_{11}$)

结构形式(%)	± 20	± 40	± 80
一级张拉(%)	90	90	90
二级张拉(%)	83	85	87

表 7 膜面有效面积率分析结果比较($\mu = 0$, $S=S_{22}$)

结构形式(%)	± 20	± 40	± 80
一级张拉(%)	90	90	90
二级张拉(%)	76	81	84

表 8 膜面有效面积率分析结果比较($\mu = 0$, $S=S_{Mises}$)

结构形式(%)	± 20	± 40	± 80
一级张拉(%)	90	90	90
二级张拉(%)	79	82	84

表 9~14 列出了摩擦因数为 0.3 的情况下, 二级张拉系统与一级张拉系统的计算结果比较。可以看出中心单元的应力结果有所差异, 二级张拉系统膜面应力的不均匀程度更大, 出现了明显的应力集中; 在有效面积率方面, 二级张拉系统的有效面积率依然小于一级张拉系统。

表 9 膜面 x 方向正应力分析结果比较($\mu = 0.3$, 单位: MPa)

结构形式	最小值	最大值	中心单元值(S_{11})
一级张拉	-0.046 8	0.124 7	0.050 9
二级张拉	-0.663 0	0.755 3	0.063 9

表 10 膜面 y 方向正应力分析结果比较($\mu = 0.3$, 单位: MPa)

结构形式	最小值	最大值	中心单元值(S_{22})
一级张拉	0.015 0	0.103 6	0.046 4
二级张拉	-0.497 7	0.557 8	0.044 8

表 11 膜面 Mises 应力分析结果比较($\mu = 0.3$, 单位: MPa)

结构形式	最小值	最大值	中心单元值(S_{Mises})
一级张拉	0.030 9	0.110 3	0.048 8
二级张拉	0.017 5	0.992 1	0.056 7

表 12 膜面有效面积率分析结果比较($\mu = 0.3$, $S=S_{11}$)

结构形式(%)	± 20	± 40	± 80
一级张拉(%)	62	72	82
二级张拉(%)	50	67	81

表 13 膜面有效面积率分析结果比较($\mu = 0.3$, $S=S_{22}$)

结构形式(%)	± 20	± 40	± 80
一级张拉(%)	86	88	89
二级张拉(%)	—	81	84

注: “—” 表示此应力范围内的区域不连续

表 14 膜面有效面积率分析结果比较($\mu = 0.3$, $S=S_{Mises}$)

结构形式(%)	± 20	± 40	± 80
一级张拉(%)	64	77	87
二级张拉(%)	51	69	81

3 结 论

(1) 基于平面薄膜天线花边索的力学关系和几何条件, 分别推导了一级张拉系统和二级张拉系统的薄膜花边索形状以及支座反力的理论公式, 基于理想状态下(不考虑摩擦)有效面积率与索拉力的相关关系, 用有限元软件进行了找形分析, 理论与数值计算结果几乎一致, 从而证明用此方法确定薄膜的花边索形状是可靠的。

(2) 利用有限元软件中的通用接触算法, 考虑索膜之间的摩擦和滑移, 进行了平面薄膜天线张拉成型过程的分析。结果表明摩擦因数为 0 时, 张拉分析结果与理想的找形分析结果基本一致, 表明此种分析方法是可靠的, 随着摩擦因数的增大, 膜面应力有所增加, 索力损失随之增大, 基于膜面应力均匀度的有效面积率减小。

(3) 对一级张拉系统和二级张拉系统的张拉分析结果进行比较, 可以看出, 二级张拉系统由于内外索连接的构造要求, 即膜面边缘在内外索连接点部位的小缺口, 使缺口周围膜面出现了较明显的应力集中现象, 故其应力不均匀程度较一级张拉系统更大, 相同条件下二级张拉系统的薄膜有效面积率小于一级张拉系统。

参 考 文 献

- [1] 王从思, 韩如冰, 王伟, 等. 星载可展开有源相控阵天线结构的研究进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 107-123.
WANG Congsi, HAN Rubing, WANG Wei, et al. Development of spaceborne deployable active phased array antennas[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 107-123.
- [2] 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.
- YANG Guigeng, YANG Dongwu, DU Jingli, et al. Method for deployable mesh antenna cable network structures' form-finding design based on force density[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 34-41.
- [3] WANG Y, DENG Z Q, LIU R Q, et al. Topology structure synthesis and analysis of spatial pyramid deployable truss structures for satellite SAR antenna[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 683-692.
- [4] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229-240.
- LI Chunsheng, WANG Weijie, WANG Pengbo, et al. Current situation and development trends of spaceborne SAR technology[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(1): 229-240.
- [5] LIU Z Q, QIU H, LI X, et al. Review of large spacecraft deployable membrane antenna structures[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(6): 1447-1459.
- [6] LOPEZ B C, LOU M C, HUANG J, et al. Development of an inflatable SAR engineering model[C]// 42nd AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, April 16-19, 2001, Seattle, Washington. AIAA-2001-1618.
- [7] 刘志全, 邱慧, 李潇, 等. 平面薄膜天线张拉系统优化设计及天线结构模态分析[J]. 宇航学报, 2017, 38(04): 344-351.
- LIU Zhiquan, QIU Hui, LI Xiao, et al. Optimum design and antenna structure modal analysis of planar thin film antenna tensioning system[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38 (04): 344-351.
- [8] FANG H, LOU M, HUANG J. Development of a three-meter ka-band reflectarray antenna[C]// 43rd AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, April 22-25, 2002, Denver, Colorado. AIAA-2002-1706.
- [9] GUAN F, WANG Y, YANG C. Design and fabrication of new type reflect array antenna[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(6): 466-471.
- [10] 汪有伟, 关富玲, 韩克良, 等. 内外悬索联合张拉膜结构的设计与分析[J]. 浙江大学学报, 2010, 44(06): 1213-1219.
- WANG Youwei, GUAN Fuling, HAN Kelian, et al. Design and analysis of internal and external suspension combined tension membrane structure[J]. Journal of Zhejiang University, 2010, 44 (06): 1213-1219.
- [11] 刘充, 李玉宇, 保宏, 等. 边界几何参数对空间平面张拉膜结构固有频率影响研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(20): 198-202.
- LIU Chong, LI Yuyu, BAO Hong, et al. Study on the influence of boundary geometric parameters on the natural frequencies of space plane tensioned membrane structures[J]. Vibration and Impact, 2015, 34 (20): 198-202.
- [12] LIN J K H, CADOGAN D P, FERIA V A, et al. An inflatable microstrip reflectarray concept for Ka-band applications[C]// 41st AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, April 3-6, 2000, Atlanta, Georgia. AIAA-2000-1831.
- [13] FANG H, LOU M, HSIA L M, et al. Catenary systems for membrane structures[C]// 42nd AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, April 16-19, 2001, Seattle, Washington. AIAA-2001-1342.
- [14] KOLESNIKOV A M. Tension of a cylindrical membrane partially stretched over a rigid cylinder[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2017, 97(12): 41-47.
- [15] 张杨, 张毅刚, 刘莎莎, 等. 不同膜面张力下索膜间摩擦接触对谷索拉力的静力影响分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(06): 138-140+41.
- ZHANG Yang, ZHANG Yigang, LIU Shasha, et al. Static effect of friction contact between cables and membranes under different membrane tensions on the tension of valley cables[J]. Building Structure, 2011, 41 (06): 138-140+41.
- [16] 李忠静, 张杨, 张毅刚, 等. 索与膜材间摩擦系数试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(3): 107-110.
- LI Zhongjing, ZHANG Yang, ZHANG Yigang, et al. Experimental study on friction coefficient between cable and membrane[J]. Building Structure, 2010, 40(3): 107-110.
- [17] 丁潇, 项平, 吴明儿, 等. 平面薄膜天线张拉系统数值对比分析[C]// 第十八届全国现代结构工程学术研讨会论文集 二: 空间结构, 7月21日-7月22日, 2018, 沧州, 河北. 北京: 工业建筑, 2018: 155-159.
- DING Xiao, XIANG Ping, WU Minger, et al. Numerical comparison study on tensile systems of planar membrane antenna[C]// Proceedings of the 18th National Symposium on Modern Structural Engineering II: Spatial Structures, July 21-22, 2018, Cangzhou, Hebei. Beijing: Industrial Construction, 2018: 155-159.

作者简介: 项平, 女, 1984 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为可展开结构、结构振动控制。
E-mail: p.xiang@tongji.edu.cn
吴明儿(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为可展开结构、索膜结构。
E-mail: wuminger@tongji.edu.cn