

文章编号: 1674-8190(2023)02-114-07

# 一种星载伞天线展开机构研究

刘婷婷, 华岳, 陈国辉, 师甜

(西安空间无线电技术研究所 天线所, 西安 710100)

**摘要:** 天线展开机构使用动力绳在天线展开和收拢过程中易出现动力绳松弛、脱槽现象。以星载高精度伞状天线展开机构为研究对象, 分析天线展开机构的工作原理; 利用解析法获得展开机构的运动方程, 结合天线展开机构运动部件结构参数, 得到天线展开过程中展开机构动力绳的松弛规律; 建立以展开机构结构参数为设计变量, 以动力绳松弛量最小为目标的展开机构结构优化模型, 通过模拟退火法进行求解, 得到优化的展开机构结构参数; 通过优化前后的展开机构展开、收拢功能试验, 对机构工作时动力绳的松弛量进行测试, 并对优化的展开机构正确性进行验证。结果表明: 优化后的展开机构动力绳松弛量较优化前降低了90%, 优化效果显著。

**关键词:** 伞状天线展开机构; 工作原理; 运动方程; 结构优化; 模拟退火法

**中图分类号:** V443.4

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.02.13

## Study on deployment mechanism of the satellite umbrella antenna

LIU Tingting, HUA Yue, CHEN Guohui, SHI Tian

(Antenna Institute, Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The relaxation and jumping from slot of the power rope of the antenna deployment mechanism are likely to occur in the process of antenna deployment and folding. The deployment mechanism of the high precision satellite umbrella antenna is taken as the research object, and the working principle of the antenna deployment mechanism is analyzed. The equation of motion of the deployment mechanism is obtained by analytical method. Combined with the structural parameters of the parts of the antenna deployment mechanism, the relaxation law of the power rope of the deployment mechanism is obtained. Taking the structural parameters of the deployment mechanism as the design variable and minimum relaxation of the power rope as the goal, the structure optimization model of the deployment mechanism is obtained. The structural parameters of the optimized deployment mechanism are obtained by simulated annealing algorithm. The relaxation and receiving functions of the antenna deployment mechanism before and after optimization are performed with experiment, and the relaxation variable of the power rope is tested when the mechanism is working. The results show that the relaxation variable of the power rope of the optimized deployment mechanism is reduced by 90% compared with that before optimization, and the optimization effect is remarkable.

**Key words:** deployment mechanism of umbrella antenna; working principle; equation of motion; structure optimization; simulated annealing algorithm

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-06-22

通信作者: 刘婷婷, 18092040449@189.cn

引用格式: 刘婷婷, 华岳, 陈国辉, 等. 一种星载伞天线展开机构研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 114-120.

LIU Tingting, HUA Yue, CHEN Guohui, et al. Study on deployment mechanism of the satellite umbrella antenna[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 114-120. (in Chinese)

## 0 引言

天线展开机构作为星载伞状可展开天线的关键组成部分,实现了天线的展开、收拢功能<sup>[1-2]</sup>。天线展开过程中由于动力绳发生松弛、脱槽现象,存在展开机构发生卡死和破坏、天线无法正常在轨展开的风险。

国内外研究者针对天线展开机构开展了诸多研究,并取得了丰硕的成果。国外,J. Patel等<sup>[3]</sup>对剪刀变形机构运动轨迹进行求解,提出了一种平面放射可展开机构的运动学分析方法;G. Kiper<sup>[4]</sup>基于万向接头对多面体可展开机构进行了综合,得到一些新型多面体可展开机构,并用单自由度平面连杆机构,构造出一系列的多边形和多面体可展开机构<sup>[5]</sup>;W. W. Gan等<sup>[6]</sup>提出了一种单闭环可展开机构数值运动分析方法;J. E. Baker<sup>[7]</sup>提出了多种空间六杆可展开机构,并对Bennett连杆进行了深入的运动学性能的探讨<sup>[8]</sup>;A. D. Viquerat<sup>[9]</sup>基于Bricard机构设计了一种单自由度六杆平面可展开机构,对其机构原理进行了分析。国内,张建波等<sup>[10]</sup>对空间天线弹簧展开机构在轨展开热分析进行研究;韩晓童等<sup>[11]</sup>对卡塞格伦伞状天线的主副面同步展开机构进行了设计及分析;Qi Xiaozhi等<sup>[12-13]</sup>基于平面的Bricard机构研究了环形的桁架机构,并对其性能进行了研究;Song Xiaoke等<sup>[14-15]</sup>设计了Bennett机构与其他平面机构复合的具有双层结构的可展开机构,能够拟合出平面、抛物面等各种不同的天线形面;冯蕴雯等<sup>[16]</sup>设计了一种铰链式下垂前缘机构,并对该机构进行了动力学仿真研究。综上所述,现有研究内容多集中于天线展开机构整体结构设计、运动原理、运动学、动力学、热分析方面,针对降低展开机构动力绳松弛量而进行展开机构结构尺寸优化方面的研究鲜有报道。

本文介绍天线展开机构的工作原理,利用解析法获得展开机构的运动方程,结合天线展开机构运动部件结构参数,得到天线展开过程中展开机构动力绳的松弛规律;建立以展开机构结构参数为设计变量,以动力绳松弛量最小为目标的展开机构优化模型,通过模拟退火法进行求解,得到优化的展开机构结构参数;通过优化前后的展开机构展开、收拢功能试验,测试机构工作时动力绳的松弛量,验证展开机构优化的正确性。

## 1 展开机构结构及工作原理

伞状可展开天线反射器主要由天线肋、展开机构等组成,如图1所示。天线展开机构主要由圆轮、展开绳、收拢绳、扇形件、连杆和反射面骨架等组成,如图2所示。展开机构中 $n$ 个圆轮沿环向均匀分布,相邻两个圆轮采用动力传递绳连接,如图3所示,天线展开过程中圆轮2顺时针转动,驱动圆轮1等其余圆轮沿同一个方向转动,所有圆轮顺时针转动时,展开绳通过圆轮大径端处于收绳状态,收拢绳通过圆轮小径端处于放绳状态,展开绳拉动反射面骨架往天线展开方向(顺时针)运动,实现天线的展开;天线收拢过程中圆轮1逆时针转动,驱动圆轮2等其余圆轮沿同一个方向转动,所有圆轮逆时针转动,展开绳通过圆轮大径端处于放绳状态,收拢绳通过圆轮小径端处于收绳状态,收拢绳拉动扇形件逆时针转动,通过连杆作用,使得反射面骨架往天线收拢方向(逆时针)运动,实现天线的收拢。该机构目前已完成原理样机的研制,下一步将进入工程样机的研制阶段。

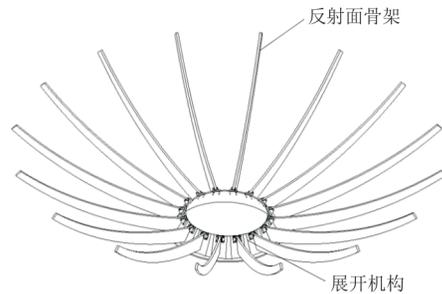


图1 伞天线反射器示意图

Fig. 1 Diagram of umbrella antenna reflector

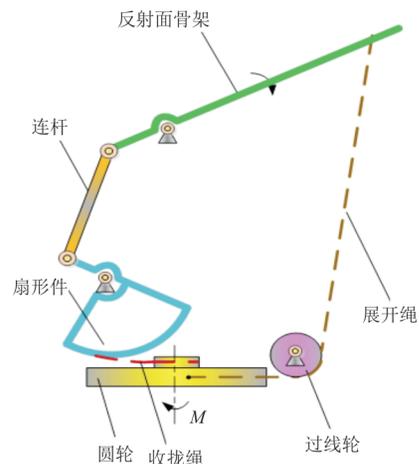


图2 展开机构原理图

Fig. 2 Schematic diagram of deployment mechanism

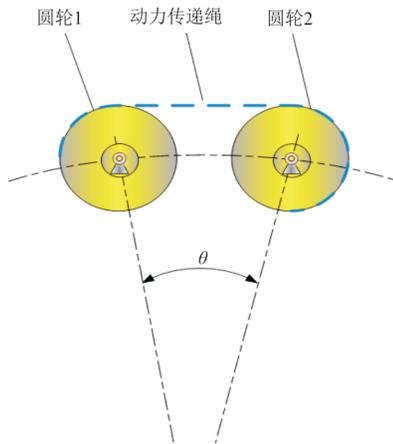


图3 展开机构动力传递示意图

Fig. 3 Diagram of power transmission of deployment mechanism

## 2 展开机构运动特性分析

天线展开机构各部件间的位置及角度关系如图4所示,其中,点 $O$ 为反射面骨架的固定转动点;点 $P$ 为展开绳与反射面骨架的连接点;点 $E$ 为过线轮的固定转动点;点 $N$ 和点 $Q$ 分别为展开绳与过线轮的切点; $r_1$ 为圆轮大径端半径; $r_2$ 为圆轮小径端半径; $r_3$ 为扇形件半径; $r_4$ 为过线轮半径; $L_1$ 为扇形件杆长, $L_2$ 为连杆长度; $L_3$ 为反射面骨架左端点到点 $O$ 的距离; $d$ 为点 $O$ 到点 $P$ 的距离; $e_1$ 为沿点 $P$ 到点 $E$ 方向的单位向量; $e_2$ 为沿点 $P$ 到点 $Q$ 方向的单位向量; $\alpha$ 为 $e_1$ 和 $e_2$ 的夹角; $\theta$ 为 $EQ$ 与水平方向的夹角。

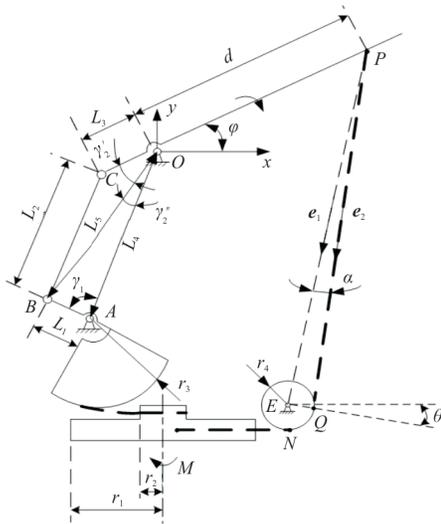


图4 展开机构各零部件尺寸图

Fig. 4 Dimensions of parts of deployment mechanism

对展开绳驱动反射面骨架转动的运动特性进行分析,点 $P$ 在坐标系下的坐标为

$$x_P = d \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

$$y_P = d \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

定义点 $E$ 坐标为 $(x_E, y_E)$ ,点 $E$ 到点 $P$ 的距离为

$$L_{PE} = \sqrt{(x_P - x_E)^2 + (y_P - y_E)^2} \quad (3)$$

点 $P$ 到点 $Q$ 的距离为

$$L_{PQ} = \sqrt{(x_P - x_E)^2 + (y_P - y_E)^2 - r_4^2} \quad (4)$$

向量 $e_1$ 与 $e_2$ 的夹角为

$$\alpha = \arcsin \frac{r_4}{L_{PE}} \quad (5)$$

向量 $e_1$ 为

$$e_1 = \begin{bmatrix} \frac{x_E - x_P}{L_{PE}} \\ \frac{y_E - y_P}{L_{PE}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

向量 $e_2$ 为

$$e_2 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot e_1 \quad (7)$$

$Q$ 点坐标为

$$\begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \end{bmatrix} + L_{PQ} \cdot e_2 \quad (8)$$

$\theta$ 值为

$$\theta = \arctan \left( \frac{y_Q - y_E}{x_Q - x_E} \right) \quad (9)$$

点 $N$ 到点 $Q$ 绳长为

$$L_{NQ} = \left( \frac{\pi}{2} + \theta \right) \cdot r_4 \quad (10)$$

点 $N$ 到点 $P$ 绳长为

$$L_{NP} = L_{NQ} + L_{PQ} \quad (11)$$

当圆轮转动 $\beta$ 角度时,绳长 $L_{NP}$ 的变化量为

$$\Delta L_{NP} = \beta \cdot r_1 \quad (12)$$

根据式(1)~式(12),即可获得圆轮转动角度 $\beta$ 与反射面骨架转动角度 $\varphi$ 之间的位置关系:

$$\beta = g_1(\varphi) \quad (13)$$

对收拢绳驱动反射面骨架转动的运动特性进行分析,三角形 $ABO$ 根据余弦定理有:

$$L_5^2 = L_1^2 + L_4^2 - 2L_1L_4 \cos \gamma_1 \quad (14)$$

$$L_1^2 = L_4^2 + L_5^2 - 2L_4L_5 \cos \gamma_2'' \quad (15)$$

三角形 BCO 根据余弦定理有:

$$L_2^2 = L_3^2 + L_5^2 - 2L_3L_5 \cos \gamma_2' \quad (16)$$

定义角  $\gamma_2$  为角  $\gamma_2'$  与角  $\gamma_2''$  之和,  $\gamma_2$  值为

$$\gamma_2 = \gamma_2' + \gamma_2'' \quad (17)$$

当圆轮转动  $\beta$  角度时, 扇形件转动的角度为

$$\Delta\gamma_1 = \frac{r_2}{r_3} \beta \quad (18)$$

根据式(14)~式(18), 即可获得圆轮转动角度  $\beta$  与反射面骨架转动角度  $\varphi$  之间的位置关系:

$$\beta = g_2(\varphi) \quad (19)$$

式中:  $g_2(\varphi)$  为隐函数关系。

给定一组机构参数时,  $g_1(\varphi)$ 、 $g_2(\varphi)$  均可通过数值算法求解。机构参数如表 1 所示, 数值求解结果如图 5 所示。

表 1 展开机构零部件尺寸

Table 1 Dimensions of parts of deployment mechanism

参数	数值/mm	参数	数值/mm
$r_1$	50	$L_3$	24
$r_2$	20	$x_A$	-30
$r_3$	50	$y_A$	-80
$r_4$	12	$x_E$	114
$L_1$	28	$y_E$	-138
$L_2$	76		

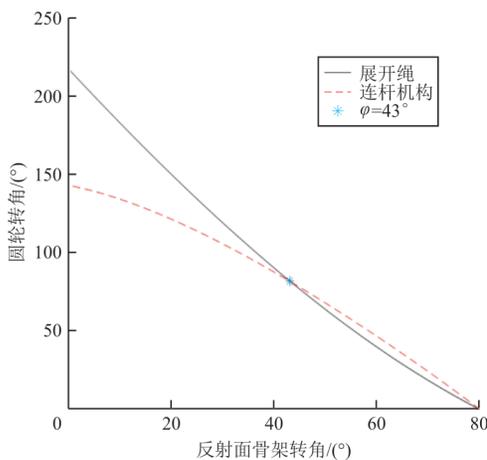


图 5 展开机构运动特性曲线

Fig. 5 Curve of kinematic characteristics of deployment mechanism

天线从收拢状态( $\varphi = 80^\circ$ )开始展开过程中, 圆轮顺时针转动, 展开绳处于收绳状态, 收拢绳处

于放绳状态。天线从  $\varphi = 80^\circ$  展开到  $\varphi = 43^\circ$  过程中, 圆轮转动时, 收拢绳释放的绳长使得反射面骨架展开的角度小于展开绳拉动反射面骨架展开的角度, 由于天线收拢到位时收拢绳处于张紧状态, 可以分析出天线收拢到位时展开绳处于松弛状态, 因此圆轮顺时针转动时, 展开绳松弛量逐渐减小, 收拢绳从张紧状态向松弛状态转变, 反射面骨架处于静止状态, 如图 6 中过程①所示; 当展开绳的松弛量减小到 0 时, 天线开始展开, 天线从  $\varphi = 80^\circ$  展开到  $\varphi = 0^\circ$  过程中展开绳处于张紧状态, 收拢绳的松弛量先减小后增大, 如图 6 中过程②所示, 天线展开到位时展开绳张紧, 收拢绳松弛。

天线从展开状态( $\varphi = 0^\circ$ )开始收拢过程中, 圆轮逆时针转动, 展开绳处于放绳状态, 收拢绳处于收绳状态, 收拢绳松弛量逐渐减小, 展开绳松弛量逐渐增加, 反射面骨架处于静止状态, 如图 6 中过程③所示; 当收拢绳的松弛量减小到 0 时, 天线开始收拢, 收拢过程中收拢绳处于张紧状态, 展开绳的松弛量先增大后减小, 如图 6 中过程④所示。

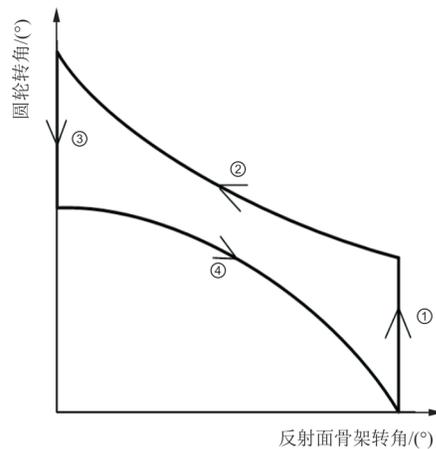


图 6 展开机构运动特性说明

Fig. 6 Description of kinematic characteristics of deployment mechanism

### 3 展开机构优化设计

本文以降低展开机构展开过程动力绳松弛量为目标, 通过展开机构优化确定展开机构的最优尺寸。

#### 3.1 优化数学模型

(1) 设计变量

在优化过程中, 保持反射面骨架固定转动点

$O$ , 扇形件固定转动点  $A$  的位置参数固定不变, 过线轮半径  $r_4$  的参数固定不变, 则该优化问题的设计变量为

$$\mathbf{X} = [d, r_1, r_2, r_3, L_1, L_2, L_3]^T \quad (20)$$

### (2) 约束条件

根据展开机构空间条件的限制, 规定设计变量的上下界, 取值范围分别为

$$\text{s.t.} \begin{cases} 180 \leq d \leq 250 \\ 40 \leq r_1 \leq 60 \\ 10 \leq r_2 \leq 30 \\ 40 \leq r_3 \leq 60 \\ 20 \leq L_1 \leq 40 \\ 60 \leq L_2 \leq 90 \\ 20 \leq L_3 \leq 40 \end{cases}$$

### (3) 目标函数

目标函数的选取主要考虑以展开机构展开过程中动力绳松弛量最小为目标。因此选取展开机构展开过程中两条动力传递路径所需圆轮转动角度的差值最小为目标函数, 定义:

$$g(\mathbf{X}, \varphi) = g_1(\mathbf{X}, \varphi) - g_2(\mathbf{X}, \varphi) \quad (21)$$

目标函数为

$\min F(\mathbf{X}) =$

$$\begin{cases} |\min g(\mathbf{X}, \varphi)| & (g \leq 0, \forall \varphi) \\ |\max g(\mathbf{X}, \varphi)| & (g > 0, \forall \varphi) \\ |\min g(\mathbf{X}, \varphi)| + |\max g(\mathbf{X}, \varphi)| & (\text{其他}) \end{cases} \quad (22)$$

式(22)中, 公式右边根据  $g$  的符号分布情况(恒正、恒负, 异号)对  $\varphi$  取极值。

## 3.2 优化计算及结果分析

本文将展开机构动力绳松弛量最小的优化问题, 转化为单目标优化函数。由于模拟退火法具有计算过程简单、通用、鲁棒性强、可用于求解复杂的非线性优化问题等优点, 因此采用模拟退火法求解此模型。展开机构优化前后结构参数及结果如表 2 所示, 优化方法的计算收敛过程如图 7 所示, 优化后展开机构运动特性曲线如图 8 所示。

表 2 展开机构优化结果

Table 2 Optimization results of deployment mechanism

参数	优化前	优化后
$d/\text{mm}$	196.0	206.5
$r_1/\text{mm}$	50.0	53.6
$r_2/\text{mm}$	20.0	20.5
$r_3/\text{mm}$	50.0	50.0
$L_1/\text{mm}$	28.0	26.5
$L_2/\text{mm}$	76.0	89.7
$L_3/\text{mm}$	24.0	24.4
$F(\mathbf{X})/(\circ)$	80.8	8.1
$\Delta F(\mathbf{X})/(\circ)$	—	72.7
$[\Delta F(\mathbf{X})/F(\mathbf{X})]/\%$	—	90.0

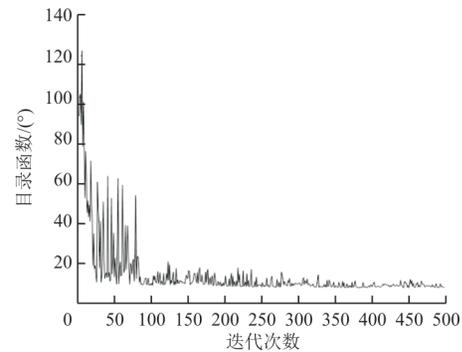


图 7 模拟退火法计算收敛过程

Fig. 7 Convergence process of simulated annealing algorithm

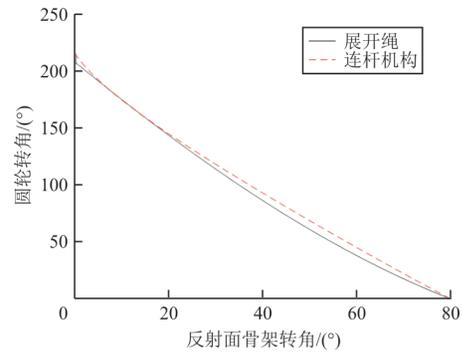


图 8 优化后展开机构运动特性曲线

Fig. 8 Curve of kinematic characteristics of deployment mechanism after optimization

从表 2 可以看出: 展开机构结构参数优化后绳索松弛量降低了 90% 左右, 优化效果较为理想, 对比优化前后的参数, 参数  $L_2$  变化较大, 其余参数变化较小, 说明展开机构初始设计中参数  $L_2$  设计不合理, 是造成展开机构绳索松弛量大的关键因素, 在后续展开机构改进设计时结构参数尺寸需尽量逼近优化后的结果。

## 4 试验验证

优化前后的天线展开机构先后在实验室完成展开、收拢功能测试,天线展开机构成功展开和收拢,天线展开(收拢)过程中展开绳处于张紧(松弛)状态,收拢绳处于松弛(张紧)状态,天线展开机构展开、收拢过程中的绳索松弛量如表3~表4所示。

表3 展开机构展开过程收拢绳松弛量  
Table 3 The amount of rope relaxation in the process of antenna deployment

反射面骨架转动角度/(°)	收拢绳松弛量/mm	
	优化前	优化后
0	2.5	3.0
10	0.5	1.5
20	0	0.5
30	1.0	0
40	3.5	0.5
50	7.0	1.5
60	12.5	2.5
70	19.5	3.0
80	28.5	0.5
max	28.5	3.0
$\Delta_{\max}$	—	25.5

表4 展开机构收拢过程展开绳松弛量  
Table 4 The amount of rope relaxation in the process of antenna folding

反射面骨架转动角度/(°)	收拢绳松弛量/mm	
	优化前	优化后
0	71.0	1.5
10	49.0	7.5
20	31.0	6.5
30	17.5	4.0
40	9.0	1.5
50	2.5	0
60	0	1.5
70	1.0	4.0
80	6.0	7.5
max	71.0	7.5
$\Delta_{\max}$	—	63.5

从表3~表4可以看出:展开机构优化后较优化前绳索松弛量降低了89.5%左右,试验结果和仿真分析结果基本吻合,验证了展开机构结构参数优化的正确性。

## 5 结论

(1) 本文建立了天线展开机构的运动方程,结合展开机构运动部件结构参数,得到了天线展开机构运动特性曲线,发现天线展开过程中展开机构动力绳会出现松弛现象。

(2) 通过模拟退火法对展开机构结构尺寸进行优化,优化后展开机构绳索松弛量降低了90%左右,优化效果较为理想。

(3) 对比优化前后的参数发现,连杆长度变化较大,其余参数变化较小,展开机构初始设计中连杆长度设计不合理,是造成展开机构绳索松弛量大的关键因素。

(4) 通过对展开机构结构尺寸进行优化,可有效解决展开机构尺寸设计不合理的问题,为后续天线展开机构的优化设计提供参考和依据。

## 参考文献

- [1] 刘荣强, 史创, 郭宏伟, 等. 空间可展开天线机构研究与展望[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 1-12.  
LIU Rongqiang, SHI Chuang, GUO Hongwei, et al. Review of space deployable antenna mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 1-12. (in Chinese)
- [2] 张伟峰. 空间天线展开机构的设计及热变形分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.  
ZHANG Weifeng. Design and thermal deformation analysis of space antenna deployment mechanism [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [3] PATEL J, ANANTHASURESH G K. A kinematic theory for radially foldable planar linkages[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(18/19): 6279-6298.
- [4] KIPER G. Polyhedral linkages synthesized using Cardan motion along radial axes [C]// The 12th World Congress on Theory of Machine Mechanic. France: [s. n.], 2007: 471-477.
- [5] KIPER G. A family of deployable polygons and polyhedral [J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(5): 627-640.
- [6] GAN W W, PELLEGRIN S. Numerical approach to the

- kinematic analysis of deployable structures forming a closed loop[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(7): 1045-1056.
- [7] BAKER J E. On generating a class of foldable six-bar spatial linkages[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(2): 374-383.
- [8] BAKER J E. Kinematic investigation of the deployable Bennett loop[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(6): 602-610.
- [9] VIQUERAT A D. A plane symmetric 6R foldable ring[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 63: 73-88.
- [10] 张建波, 王波, 徐向阳, 等. 空间天线弹簧展开机构在轨展开热分析研究[J]. 空间电子技术, 2020, 17(6): 28-32. (in Chinese)  
ZHANG Jianbo, WANG Bo, XU Xiangyang, et al. Thermal analysis for spring deployment mechanism of spaceborne antenna[J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(6): 28-32. (in Chinese)
- [11] 韩晓童, 王晓凯, 邢永涛, 等. 面向卡塞格伦伞状天线的主副面同步展开机构设计及分析[J]. 上海航天, 2020, 37(5): 10-18.  
HAN Xiaotong, WANG Xiaokai, XING Yongtao, et al. Design and analysis of the synchronous deployment mechanism for Cassegrain umbrella-type antenna[J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(5): 10-18. (in Chinese)
- [12] QI Xiaozhi, LI Bing, MIAO Zhihui, et al. Design and mobility analysis of large deployable mechanisms based on plane-symmetric bricard linkage[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(2): 1476-1482.
- [13] QI Xiaozhi, HUANG Hailin, LI Bing, et al. A large ring deployable mechanism for space satellite antenna[J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 58: 498-510.
- [14] SONG Xiaoke, DENG Zongquan, GUO Hongwei, et al. Networking of Bennett linkages and its application on deployable parabolic cylindrical antenna[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 109: 95-125.
- [15] GUO Hongwei, SONG Xiaoke, LI Lifang, et al. Type synthesis of deployable single-loop over constrained linkages based on Bennett linkages [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 120: 1-29.
- [16] 冯蕴雯, 蔡昂, 何智宇, 等. 铰链式下垂前缘机构设计与动力学仿真研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 93-100.  
FENG Yunwen, CAI Ang, HE Zhiyu, et al. Research on design and dynamics simulation of hinged drooping leading edge mechanism[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 93-100. (in Chinese)

#### 作者简介:

刘婷婷(1990—),女,硕士,工程师。主要研究方向:航天器天线及电子设备结构设计技术。

华岳(1980—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航天器天线及电子设备结构设计技术。

陈国辉(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航天器天线及电子设备结构设计技术。

师甜(1987—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航天器天线及电子设备结构设计技术。

(编辑:丛艳娟)