DOI: 10.3901/JME.2020.05.100

可展收抛物柱面天线机构的设计及分析*

秦 波 吕胜男 刘 全 丁希仑

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘要: 可展收抛物柱面天线可用于卫星系统中, 实现无线通信、深空探测以及空间目标搜索等功能。近年来随着航天事业的迅猛发展, 对空间可展天线的成形精度要求越来越高。提出并设计了一种可展收抛物柱面天线机构, 该机构主要由网面支撑机构、柔索、金属丝网、轴向驱动与锁定装置、径向驱动与定位锁定装置组成。其中, 网面支撑机构包括径向和轴向展收机构。研究中提出了一种新型平面可展收机构作为径向展收机构的组成单元实现天线的径向展开收拢。对可展收机构的等效机构进行了优化设计。利用剪式单元可展机构实现了轴向展收机构的设计。完成了可展收抛物柱面天线机构的驱动组件设计, 在 Solidworks 中完成建模, 对天线机构进行了运动学仿真。

关键词: 可展天线机构; 构型设计; 摇杆滑块机构; 运动学分析; 抛物柱面

中图分类号: TN823

Structural Design and Analysis of a Deployable Parabolic-cylinder Antenna

QIN Bo LÜ Shengnan LIU Quan DING Xilun

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: A deployable parabolic-cylinder antenna can be used in satellite systems to realize functions such as wireless communication, deep space exploration, and space target search. In recent years, with the rapid development of the aerospace industry, the requirements of surface accuracy for space antennas are getting higher and higher. A deployable mesh parabolic cylindrical antenna mechanism is proposed and designed. The mechanism consists of a mesh support mechanism, a cable, a wire mesh, an axial drive and locking device, a radial drive and a positioning and locking device. The mesh support mechanism is constructed by linking radial and axial deployable mechanisms. In the research, a novel type of planar deployable mechanism is proposed as the component of the radial deployable mechanism to realize the radial expansion. The equivalent mechanism of the expandable mechanism is optimized. The design of the axial display mechanism is realized by linking the scissor linkages. The drive component design of the deployable mesh parabolic cylindrical antenna is performed. The CAD model of the proposed mechanism is built in Solidworks, and the model of the support mechanism is kinematically simulated.

Key words: deployable antenna; configuration design; rocker-slider mechanism; kinematic analysis; parabolic cylinder

0 前言

随着航空宇航事业的深入发展及日益增长地通信手段快捷化、信息大量化的需求, 安装于卫星上的空间可展收天线正逐步向着高精度化、轻质化方向发展。可展抛物柱面天线作为可展天线的一种, 较多地使用于工作频率高、口径要求小的卫星上。由于其具有方向性强、增益高、易于光束自动扫描等特点, 柱面天线已经成为可展天线的一个重要的

发展方向。近些年, 国内外研究机构针对柱面天线开展了诸多研究, 并提出了多种抛物柱面天线反射面的成型方法。

1979 年 MILAZZO 等^[1]提出了一种低旁瓣抛物柱面天线, 这种天线早期应用于战术警戒雷达上。2005 年 RAHMAT-SAMIT 等研究了一种用于热带测雨的可展收抛物柱面天线^[2], 其利用刚性链杆扭簧实现展收。2003 年 LIN 等^[3]设计并制作了半尺度的 PRA-2 反射膜测试装置和支撑测试夹具, 完成了形面精度测试, 证明了抛物柱面反射器的可行性, 并确定了需要进一步发展和研究的方向。2003 年 LEE 等^[4]提出了一种通过充气形成抛物柱面反射面的充气式抛物柱面天线, 充气圆管既作为天线反射面的

* 国家自然科学基金(51635002, 51605011)、中央高校基本科研业务费专项资金(KG12112201)和机器人技术与系统国家重点实验室开放研究资助项目。20190318 收到初稿, 20190704 收到修改稿

支撑结构,又可维持天线的稳定性。2004 年英国剑桥大学的 SOYKASAP 等^[5]研制了一种双向可展收弹性薄壳抛物柱面天线,这种天线的支撑结构是由弯曲碳纤维复合薄板形成的空心体组成的。通过对 0.3 mm 厚 CFRP 薄板半尺度物理样机的设计、搭建和测试,验证了该方案的可行性。2007 年 IM 等^[6]设计了半尺寸的 PR-2 抛物柱面天线原理样机,该天线机构通过控制铰链实现天线抛物柱面成型,并且铰链完全展开时实现天线展开。

2012 年北京理工大学和中国电子科技集团公司第五十四研究所合作研制了一种 Ku 波段抛物柱面天线,通过研究证明抛物柱面具有良好的扫描范围^[7]。西安电子科技大学在空间可展天线理论^[8-9]设计等方面和可展收抛物柱面天线机构也展开了深入的研究^[10-11],在 2013 年设计了一种可展收网状抛物柱面天线,其优点是收纳体积小、表面精度高,因此可用于空中搜索目标和测定目标方位角;并于 2017 年设计了一种基于张拉结构的抛物柱面天线,其主要优点是面密度小,展开口径大。我国启动的天籁计划中采用了抛物柱形天线阵,建造约 100 m×100 m 接收面积的柱形天线阵。通过柱形抛物反射面^[12]将电波汇聚,以增大每个接收单元的接收面积。浙江大学的研究团队以周边桁架式可展天线和四面体构架式可展天线等几种比较典型的可展天线为研究对象进行了设计和控制的多方面的研究,取得了一定的成果,提出了一种利用拉伸弹簧构造的可展伸缩杆六棱柱单元,利用该伸缩杆单元设计出一个大型构架式星载抛物面天线^[13-14]。哈尔滨工业大学的研究团队^[15-17]对抛物柱面天线展开了深入研究和探索,研究了充气式抛物柱面天线的反射面和反射面展开定型机构。并采取模块化思想,对抛物柱面天线进行了设计与分析,主要解决天线结构存在整体刚度差、型面精度低的问题。刘荣强等^[18]设计出一种剪叉联动式折展抛物柱面天线机构,其展开运动为两个一维运动顺次叠加,从而可以进行两个方向上的控速。该设计使折展抛物柱面天线机构的展开驱动可靠,运行平稳,同时可实现高刚度锁紧,容易保证高形面精度,并具有高收拢率,大大提高了大型折展抛物柱面天线机构的性能。

可展收网状抛物柱面天线的主要组成结构有金属反射面、可展收机构、索网结构及驱动装置等。前文所介绍的柱面天线大多结构复杂,从而对柱面天线的结构可靠性会产生一定的影响。作为骨架,可展收机构占据天线的主要质量,决定着天线的刚度,直接影响天线的固有频率,是卫星展开天线设计的关键内容^[19]。诸多研究人员对可展机构进行了

深入的研究^[20-21],目前柱面天线的可展收机构多以平面机构为基本单元,单元间的连接以共用连杆的方式为主,单元间的运动传递方式较为单一。为了适应当前可展收机构的大尺度、高刚度、模块化、轻量化的发展趋势,本研究中提出了一种新型的可展收机构,其可应用于可展收抛物柱面天线。该机构具有较大的展收比,能有效实现机构单元之间的运动传递。基于这种新型展收机构提出的可展收抛物柱面天线机构通过较少的驱动实现展收,并且其具有较好的稳定性。

1 整体机构设计

基于所提出的可展收抛物柱面机构的天线整体模型如图 1 所示,其主要由网面支撑机构、柔索、金属丝网、轴向驱动与锁定装置、径向驱动与定位锁定装置组成。网面支撑机构,即可展收抛物柱面天线机构,由径向展收机构与轴向展收机构两大部分组成。径向展收机构有三组相同的可展收机构,分别为位于中间的主径向展收机构和位于两端的两个副径向展收机构,三组径向展收机构通过轴向展收机构实现连接,驱动主径向展收机构带动副径向展收机构进行同步运动,从而实现整体网面支撑机构的径向展开。轴向展收机构的基本可展单元为剪式机构单元,该机构单自由度的特点能够保证通过单一驱动可以实现天线机构的轴向展开。抛物柱面天线的金属丝网通过柔索与可展收支撑机构连接。柔索交错地分布在网面支撑机构上,径向与轴向展收机构进行展开运动时,牵动柔索并使金属丝网逐渐张开形成抛物柱面的型面。

图 1 可展收抛物柱面天线三维模型图

2 径向展收机构设计及优化

2.1 径向展收机构设计

本文提出了一种新型的基于平面连杆机构的径向可展收机构,该机构由一个主径向展收机构和两

个副径向展收机构构成。主、副径向展收机构可实现联动以完成天线的径向展收。

所设计的可展收机构单元如图2所示,该机构是由两个相同的平面五杆机构连接组成的对称机构。机构的运动副均为转动副。该可展收机构的主要组成构件有:一个基座、两个径向杆、两个柔索支撑杆、两个短连接杆、两个长连接杆、两个同步轮和一条同步带。两根径向杆分别通过转动副与基座相连,其另一端与柔索支撑杆铰接。通过径向杆的摆动可实现柔索的张开与收拢。两根短连接杆的一端与两根柔索支撑杆铰接在同一处,另一端分别与两根长连接杆铰接,两根长连接杆与基座铰接于同一处。因此,长连接杆与短连接杆的闭环连接构成了一个四杆机构,而基座、长连接杆、短连接杆、柔索支撑杆和径向杆首尾相连则构成了一个平面五杆机构。

图2 径向展收机构

由图2可知,径向展收机构关于长连接杆和基座的铰接点与柔索支撑杆和短连接杆的铰接点之间的连线对称。在两根径向杆的底端分别固连同步轮,通过电动机驱动同步轮即可带动两根径向杆摆动,从而实现径向展收机构的展开与收拢。为了避免由长连接杆和短连接杆构成的四杆机构发生运动奇异,在长、短连接杆的相互铰接处设计了限位块,进而限制了它们的相对转动角度不超过 180° 。

2.2 径向展收机构等效机构设计

如上文所述,径向展收机构可看作由两个相同的平面五杆机构对称组成,根据 Chebychev-Grübler-Kutzbach 公式可得该展收机构的自由度

$$F = 3(n-1) - 2m = 3 \times (9-1) - 2 \times 11 = 2 \quad (1)$$

由于在设计中引入了同步轮,因此仅需要一个驱动作用于同步轮,即可实现机构的展开收拢。

考虑到该径向展收机构的对称特征,下述研究中仅针对其半边的等效机构进行了设计分析,如图3所示。由于对称性的存在,该机构中存在一个虚拟约束可保证图3a中的转动副C始终沿着竖直方向移

动。基于此,我们可以采用转动副与滑块的组合对运动支链CDE进行等价替换,进而获得了该机构的等效机构,即为一个偏置滑块摇杆机构,如图3b所示。图中,摇杆AB杆与竖直方向的夹角为 φ ,BC杆与竖直方向的夹角为 θ ,A点到滑块轨道中心线的距离为 e 。径向展收机构完全收拢与展开时分别对应于等效机构的两个构型:①当滑块位于 C_1 处时,摇杆位于 AB_1 处,此时径向杆竖直,为径向展收机构收拢构型,设此时 θ 的值为 $\theta_{\min}$;②当滑块位于 C_2 处时,摇杆位于 AB_2 处,为径向展收机构展开状态,设此时 θ 的值为 $\theta_{\max}$,摇杆的展开角度为 $\varphi_{\max}$ 。

(a) 展开机构单元原理图

(b) 等效机构

图3 可展收机构单元原理图及等效机构

设摇杆AB的长度为 l_1 ,连杆BC的长度为 l_2 ,通过几何关系可得

$$\sin \theta_{\min} = \frac{e}{l_2} \quad (2)$$

$$e = l_2 \sin \theta_{\max} - l_1 \sin \varphi_{\max} \quad (3)$$

联立式(2)、(3)可得

$$\sin \theta_{\min} = \frac{l_2 \sin \theta_{\max} - l_1 \sin \varphi_{\max}}{l_2} \quad (4)$$

滑块C的行程S为

$$S = l_2 \cos \theta_{\min} - l_2 \cos \theta_{\max} - l_1 (1 - \cos \varphi_{\max}) \quad (5)$$

2.3 等效机构优化设计的数学模型建立

2.3.1 设计变量

在可展收机构的实际设计中,设计约束为摇杆AB的最大摆角 $\varphi_{\max}$ 等于 45° 。从上述公式可以看出, $\theta_{\min}$ 由变量 l_1 , l_2 , $\theta_{\max}$ 决定,以这些机构参数为设计变量,可表示为: $X=[l_1, l_2, \theta_{\max}]=[x_1, x_2, x_3]$ 。根据设计要求,限制柔索支撑杆和径向杆的长度范围在100 mm到150 mm之间,限制其展开时 $\theta_{\max}$ 的范围在 60° 到 80° 之间。因此,其中各变量的取值范围分别为: $x_1 \in [100, 150]$, $x_2 \in [100, 150]$, $x_3 \in [60^\circ, 80^\circ]$ 。

2.3.2 目标函数

在对等效机构进行优化时,需要保证收拢状态下机构尽可能紧凑。滑块摇杆机构的 $\theta_{\min}$ 越小,其

收拢效果越好。对于整个滑块摇杆机构, 各个连杆长度越小, 整体机构质量越小。因此以 $\theta_{\min}$ 以及两摇杆之和最小为优化目标函数, 即

$$f_1(\mathbf{X}) = \sin \theta_{\min} = \frac{x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ}{x_2} \quad (6)$$

$$f_2(\mathbf{X}) = l_1 + l_2 = x_1 + x_2 \quad (7)$$

2.3.3 参数优化设计约束条件

针对上述设计目标, 优化过程中存在以下 4 项约束条件。

(1) 四杆机构不存在曲柄的条件

$$l_1 + e > l_2$$

(2) 滑块摇杆机构保证能运动的条件

$$e < l_1 + l_2$$

(3) 为确保在展开、收拢过程中机构杆件之间不发生干涉, 要求在 y 方向滑块的 C_1 位置距离 A 的水平位置不低于 15, 即

$$l_1 - l_2 \cos \theta_{\min} \geq 15$$

(4) 为保证杆件安装不存在干涉, 约束偏距的最小值

$$e \geq 10$$

由上分析可得出该滑块摇杆机构优化设计的数学模型, 如下

$$\begin{aligned} & \text{Find } \mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3] \\ & \min f_1(\mathbf{X}) = \frac{x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ}{x_2} \\ & \min f_2(\mathbf{X}) = x_1 + x_2 \\ & \text{s.t. } x_1 + x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ > x_2 \\ & \quad x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ < x_1 + x_2 \\ & \quad x_1 - x_2 \cos \left(\arcsin \frac{x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ}{x_2} \right) \geq 15 \\ & \quad x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ \geq 10 \end{aligned}$$

2.4 优化分析及结果

利用理想点法进行求解。首先, 分别对两个单目标进行求解。

目标 1

$$\begin{aligned} & \min f_1(\mathbf{X}) = \frac{x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ}{x_2} \\ & \text{s.t. } x_1 + x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ > x_2 \\ & \quad x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ < x_1 + x_2 \\ & \quad x_1 - x_2 \cos \left(\arcsin \frac{x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ}{x_2} \right) \geq 15 \\ & \quad x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ \geq 10 \end{aligned}$$

结果为

$$l_1 = 150.00 \text{ mm} \quad l_2 = 134.02 \text{ mm} \quad \theta_{\max} = 60.00^\circ \quad f_1^* = 0.0746$$

目标 2

$$\begin{aligned} & \min f_2(\mathbf{X}) = x_1 + x_2 \\ & \text{s.t. } x_1 + x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ > x_2 \\ & \quad x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ < x_1 + x_2 \\ & \quad x_1 - x_2 \cos \left(\arcsin \frac{x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ}{x_2} \right) \geq 15 \\ & \quad x_2 \sin x_3 - x_1 \sin 45^\circ \geq 10 \end{aligned}$$

求得结果为

$$l_1 = 113.30 \text{ mm} \quad l_2 = 100.00 \text{ mm} \quad \theta_{\max} = 80^\circ \quad f_2^* = 213.30$$

由上述两个单目标非线性规划的求解结果可知两个解不相同, 因此 $(f_1^*, f_2^*) = (0.0746, 213.30)$ 是一个不可能达到的理想点, 因此我们构造如下评价函数

$$\min h(f(\mathbf{X})) = \sqrt{\left(\frac{f_1(\mathbf{X}) - 0.0746}{0.0746} \right)^2 + \left(\frac{f_2(\mathbf{X}) - 213.30}{213.30} \right)^2}$$

利用 Matlab 软件编写程序, 由运行结果可知在上述评价函数标准之下, 等效机构优化设计问题的最优解为: $l_1 = 130.97 \text{ mm}$, $l_2 = 116.40 \text{ mm}$, $\theta_{\max} = 61.83^\circ$, $f_1 = 0.0859$, $f_2 = 247.37$ 。由此优化得, 行程 $S = 22.65 \text{ mm}$ 。当机构完全收拢时, 滑块距基座的竖直距离等于 15.00 mm 。

2.5 径向展收机构长短杆的设计

滑块摇杆机构的滑块行程取决于短连接杆和长连接杆的长度。设短连接杆 CD 的长度为 l_3 , 长连接杆 DE 的长度为 l_4 。当可展收机构收拢时, 短连接杆 CD 和长连接杆 DE 重合; 可展收机构张开时, 长连接杆与竖直方向的夹角为 α_1 , 短连接杆与竖直方向的夹角为 α_2

$$S = l_3(1 + \cos \alpha_2) + l_4(\cos \alpha_1 - 1) \quad (8)$$

$$\frac{l_3}{\sin \alpha_1} = \frac{l_4}{\sin \alpha_2} \quad (9)$$

为了避免长、短连接杆之间出现运动死点, 限制短连接杆和长连接杆的相对转动角度不超过 180° 。约束条件: $\alpha_1 > 0^\circ$, $\alpha_2 > 0^\circ$ 。因此, 设计令 $\alpha_1 = 5^\circ$, $\alpha_2 = 10^\circ$, 可解得 $l_3 = 11.46 \text{ mm}$, $l_4 = 22.82 \text{ mm}$ 。

2.6 抛物柱面的设计

为了便于分析, 以柔索支撑杆的铰接处为原点建立直角坐标系, 以径向展收机构对称线为 y 轴, 如图 4 所示。由上文可得当径向展收机构完全展开时, 两径向杆夹角为 90° , 两柔索支撑杆夹角为 123.66° , 柔索支撑杆长为 116.40 mm 。根据机构设计参数, $x_{B_{22}} = -l_2 \sin \theta_{\max}$, $y_{B_{22}} = l_2 \cos \theta_{\max}$, $B_{22} = (-102.61, 54.95)$, $B_{21} = (102.61, 54.95)$ 。因此, 所

设计的抛物柱面横截面的方程为

$$y = px^2 + h \quad (10)$$

式中, $10\,528.8121p + h = 54.95$, p 和 h 的关系由 B_{21} 和 B_{22} 的坐标所决定。

图 4 抛物柱面横截面简图

金属丝网固定在柔索上, 柔索交错布置在网面支撑机构上, 控制调整柔索的长度可辅助柔索上的金属丝网形成所需要的抛物柱面。将调整柔索分别固定在两个柔索支撑杆的中点位置以及两柔索支撑杆的铰接位位置, 通过计算可得, 当径向展收机构完全展开时, 各调整柔索长度分别为

$$h_0 = h \quad (11)$$

$$h_1 = h_2 = 51.305^2 p + h - 27.475 \quad (12)$$

图 4 给出了基于上述的结构设计得到的抛物柱面横截面简图。径向可展收机构既可收拢成束, 又可有效展开并牵动金属丝网形成抛物柱面。

3 轴向展收机构设计

3.1 剪式机构单元

剪式机构单元是一种在可展收机构中采用较多的基本机构单元, 其特点是每对连杆通过一个铰链连接, 且每对连杆仅能绕垂直于该对连杆所在平面的轴线做相对转动, 而其他的运动完全受到了限制。利用剪式机构单元可构造多种形式的可展收机构, 如平面伸展臂、三角形截面伸展臂、四边形截面伸展臂、球面网格体系、平面网格体系^[22-23], 以及由这些基本形式或其他机构单元构成的复杂可展空间机构体系^[24]。剪式单元由两根杆件构成包括 4 个可铰接端点和 1 个中心铰接点。

根据各段杆长以及转动副位置分布的不同, 多个剪式单元经过首尾端点的铰接会形成不同形式的可展收机构。如图 5 所示, 当剪式单元各个杆长相同, 即 $f=g=i=k$, 剪式单元线性分布形成的可展收机构能够单自由度伸展并紧凑折叠。利用该特点, 在轴向展收机构的设计中, 将采用线性分布构成的剪式单元可展机构。

图 5 剪式单元可展机构

3.2 轴向展收机构

轴向展收机构主要由剪式单元可展机构、滑动铰座、固定铰座以及直线滑轨组成。考虑到剪式机构两末端之间的距离随着机构的展收运动不断发生变化, 因此, 在径向展收机构的径向杆上安装有直线滑轨, 固定铰座位于径向展收机构的径向杆靠近于基座的一端, 而滑动铰座可以沿着直线导轨做滑动, 如图 6 所示。通过转动副将每个剪式可展机构的一端与固定铰座连接, 另一端铰接于滑动铰座, 通过滑动铰座沿直线滑轨做直线往复运动, 以实现剪式可展机构的展收运动, 进而完成天线的轴向展开与收拢。位于中间的径向展收机构的径向杆的两面均设置有直线滑轨, 两侧的径向展收机构的径向杆仅对应中间径向展收机构的一面设置有直线滑轨。

图 6 直线滑轨及铰座设计

4 驱动组件设计

可展收抛物柱面机构的驱动主要包括径向驱动以及轴向驱动。

径向展收机构的驱动部分由一个径向展开电动机和四个定位锁定装置构成。其中, 径向展开电动机安装在主动径向驱动机构的基座上, 通过驱动主径向展收机构的径向杆转动带动副径向展收机构转动, 实现径向展收机构的展开。当主径向展收机构的两根径向杆相互垂直时, 定位锁定装置工作, 实现主径向展收机构的锁定。

轴向展收机构的驱动部分主要由轴向展开电动机、四根展开绳、两个绕线轮以及多个锁盒、簧片锁钩和被锁件构成(图 7)。此处选用双轴电动机作为轴向

展开电动机, 固接在主径向展收机构的基座上。将绕线轮固定安装在电动机的两轴上, 每根展开绳的一端缠绕于对应的绕线轮, 每根展开绳的另一端穿过固定铰座和锁盒上设置的通孔进而与滑动铰座连接。每个锁固定在直线滑轨靠近于固定铰座的端部, 锁盒设置在滑动铰座和固定铰座之间。每个锁盒上安装有一个簧片锁钩, 被锁件分别安装在相对应的滑动铰座上, 且每个簧片锁钩均可以与相对应的一个被锁件挂接。

图 7 驱动组件示意图

通过电动机转动可以带动展开绳实现轴向展收机构滑动。当到达展开或收拢位置时, 利用锁定机构完成位置锁定, 以实现天线机构的展开及收拢。

5 仿真模型建立及驱动分析

基于优化设计得到的结果, 在软件中建立样机模型。每个轴向展收机构由 4 个剪式机构单元组成。该可展收抛物柱面天线样机展开时拟合的抛物柱面方程为: $y = 0.005x^2 + 2.31$ 。样机模型完全展开时, 径向长度为 342 mm, 轴向机构完全展开时, 其口径约为 204.52 mm。

该可展收抛物柱面天线共含有两个驱动: 径向展开驱动以及轴向展开驱动。基于该模型, 应用 Solidworks 软件对其进行运动学仿真, 该天线机构可顺利完成展开运动, 并在完全展开时能够拟合目标抛物柱面(图 8、9)。

图 8 网面支撑机构收拢状态

图 9 网面支撑机构展开状态

6 结论

(1) 提出了一种可展收抛物柱面天线, 该机构展开状态下可以拟合抛物柱面, 收拢状态时可紧凑的折叠成一束。

(2) 设计了基于一新型平面可展收机构的径向展收机构。针对径向展收机构等效机构, 进行了以 $\theta_{\min}$ 以及两摇杆之和最小为目标的优化设计, 在连杆运动几何约束条件下得到了最优的杆件参数。

(3) 通过组合连接剪式机构单元构成轴向展收机构, 通过轴向展收机构和径向展收机构组合构成网面支撑机构。

(4) 设计了可展收抛物柱面天线的驱动部分, 进而完成了整个天线机构的设计。

(5) 根据优化的设计参数进行了机构三维模型的建立, 并进行了仿真分析, 仿真结果验证了所提出设计的正确性。

参 考 文 献

- [1] MILAZZO S, STANGEL J. Low sidelobe parabolic cylinder antenna for surveillance radars[C]// Proceedings of the Antenna Applications Symposium, September 26-28, 1979, University of Illinois, Robert Allerton Park. Proceedings of the Antenna Applications Symposium, 1979: 294-304.
- [2] RAHMAT-SAMII Y, HUANG J, LOPEI B, et al. Advanced precipitation radar antenna: Array-fed offset membrane cylindrical reflector antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2005, 53(8): 2503-2515.
- [3] LIN J K, SAPNA III G, SCARBOROUGH S, et al. Advanced precipitation radar antenna singly curved parabolic antenna reflector development[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials

- Conference, April 7-10, 2003, Norfolk, VA. AIAA, 2003: 2003-1651.
- [4] LEE J J, DERBES W, GORDON J D. Inflatable reflector antenna for space based radars: US, US6650304[P]. 2003-11-18.
- [5] SOYKASAP O, WATT M, PELLEGRINO S. New deployable reflector concept[C]// 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 19-22, 2004, Palm Springs, California. AIAA, 2004: 683-693.
- [6] IM E, DURDEN S. Next-generation spaceborne precipitation radar instrument concepts and technologies[C]// 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 8-11, 2007, Reno, Nevada. AIAA, 2007: 2007-1105.
- [7] LU Zhiyong. The design on the antenna array with high gain and scanning beam[C]// 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, May 5-8, 2012. Shenzhen, China. IEEE, 2012: 2012.6230155.
- [8] 张逸群, 段宝岩, 李团结. 空间可展开天线展开过程轨迹与控制系统集成设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 21-28.
ZHANG Yiqun, DUAN Baoyan, LI Tuanjie. Integrated design of deployment trajectory and control system for deployable space antennas[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 21-28.
- [9] 马亚静, 杜敬利, 段宝岩, 等. 考虑支撑桁架变形的星载索网反射面天线形态设计方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 114-119.
MA Yajing, DU Jinli, DUAN Baoyan, et al. A method to design the initial equilibrium state of spaceborne cable-net antenna considering the flexibility of supporting trusses[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 114-119.
- [10] 郝佳, 张树新, 段宝岩, 等. 可展开网状抛物柱面天线: 中国, CN103354303A[P]. 2013-10-16.
HAO Jia, ZHANG Shuxin, DUAN Baoyan, et al. Deployable parabolic cylinder antenna[P]: China, 201310234093[P]. 2013-10-16.
- [11] 张顺吉, 张树新, 段宝岩, 等. 一种基于张拉结构的可展开抛物柱面天线: 中国, CN107482322A[P]. 2017-12-15.
ZHANG Shunji, ZHANG Shuxin, DUAN Baoyan, et al. Expandable parabolic cylindrical antenna based on tension structure: China, CN107482322A[P]. 2017-12-15.
- [12] 朱加炉, 陈志平, 陈学雷, 等. 天籁实验抛物柱面天线阵结构设计与力学分析[J]. 天文研究与技术, 2015, 12(1): 14-22.
ZHU Jialu, CHEN Zhiping, CHEN Xuelei, et al. A structural design and a dynamical analysis of an experimental parabolic-cylinder radio antenna at Tianlai [J]. Astronomical Research & Technology, 2015, 12(1): 14-22.
- [13] 陈向阳, 关富玲, 岳建如. 可展星载抛物面天线结构设计[J]. 空间结构, 2000, 35(4): 41-46.
CHEN Xiangyang, GUAN Fuling, YUE Jianru. A Large deployment hexapod paraboloid antenna[J]. Spatial Structures, 2000, 35(4): 41-46.
- [14] 关富玲, 侯国勇, 赵孟良. 构架式可展开天线结构设计的程序实现[J]. 工程设计学报, 2006, 13(2): 108-113.
GUAN Fuling, HOU Guoyong, ZHAO Mengliang. Program implementation of structure design for deployable truss antenna[J]. Journal of Engineering Design, 2006, 13(2): 108-113.
- [15] 刘荣强, 邓宗全, 李冰岩, 等. 一种剪叉联动式折展抛物柱面天线机构: 中国, CN104201481A[P]. 2014-12-10.
LIU Rongqiang, DENG Zongquan, LI Binyan, et al. A scissor-fork linkage type deployable parabolic antenna mechanism: China, CN104201481A[P]. 2014-12-10.
- [16] 谭惠丰, 林国昌, 卫剑征, 等. 一种充气展开抛物柱面天线反射面: 中国, CN103779666A[P]. 2014-05-07.
TAN Huifeng, LIN Guochang, WEI Jianzheng, et al. A inflatable deployable parabolic cylindrical antenna reflecting surface: China, CN103779666A[P]. 2014-05-07.
- [17] 郭宏伟, 刘荣强, 史创, 等. 基于肋机构的模块化空间曲面折展天线机构: 中国, CN104022337A[P]. 2014-09-03.
Guo hongwei, LIU Rongqiang, SHI Chuang, et al. Modular space curved deployable antenna mechanism based on rib mechanism: China, CN104022337A[P]. 2014-09-03.
- [18] 郭宏伟, 刘荣强, 邓宗全. 一种模块化空间抛物柱面折展天线机构: 中国, CN104009278B[P]. 2016-08-24.
Guo Hongwei, LIU Rongqiang, DENG Zongquan. Modular space parabolic cylindrical deployable antenna mechanism: China, CN104009278B[P]. 2016-08-24.
- [19] 杨萍萍. 星载可展开结构的结构与参数化[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
YANG Pingping. Design and parameteriaztion of space-borne deployable structure[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [20] WANG Yan, DENG Zongquan, LIU Rongqiang, 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.
- [21] SUN Yuantao, WANG Sanmin, JAMES K M, et al. Kinematics and dynamics of deployable structures with

- scissor-like-elements based on screw theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 655-662.
- [22] 纪斌. 剪式可展桁架展开过程动力学分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- Ji Bin. Dynamic analysis for deployment process of scissor deployable truss structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [23] LU S, ZLATANOV D, DING X, et al. Novel deployable mechanisms with decoupled degrees-of-freedom[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2015, 8(2): 021008.
- [24] LU S, ZLATANOV D, DING X. Approximation of cylindrical surfaces with deployable Bennett networks [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2017, 9(2): 021001.
-
- 作者简介: 秦波, 女, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为折纸机构。
E-mail: by1707130@buaa.edu.cn
- 丁希仑(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构学、机器人学。
E-mail: xlding@buaa.edu.cn