

文章编号 1004-924X(2018)12-2940-09

可展开固体反射面机构设计及运动学分析

王建东^{1*}, 郭宏伟², 刘荣强², 罗阿妮¹, 刘贺平¹

(1. 哈尔滨工程大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对传统固体反射面机构主反射面型面精度和收拢率较低的问题,设计了一种可展开固体反射面机构。首先,提出 4 种固体反射面机构可展单元构型并对其机构自由度进行分析,对比分析构型方案优缺点确定构型方案 4 作为可展单元基础构型,并对其结构和展开原理进行详细设计。通过 D-H 坐标变换建立该机构可展单元的运动学模型,根据几何约束条件建立机构位置矢量方程,利用向量封闭投影法解出各回转角间的关系,结合 MATLAB 软件编程对机构的位置、速度和加速度进行分析。应用 ADAMS 软件建立机构仿真模型,验证了机构运动学分析的正确性。最后根据机构中回转角的限制条件和结构尺寸关系,分析回转角和结构尺寸对可展开固体反射面机构收拢率的影响,确定 2.2 m 可展开固体反射面机构的回转角和旋转角分别为 78° 和 30° ,中心圆盘半径、铰支座一孔纵向尺寸、切换连杆横向尺寸、纵向尺寸分别为 245, 8, 40, 18 mm,收拢率为 0.326,从而为可展开固体反射面机构的设计提供参考。

关键词:固体反射面机构;可展单元;运动学分析;回转角;结构尺寸;收拢率

中图分类号: V423.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182612.2940

Mechanism design and kinematic analysis of deployable solid reflector mechanism

WANG Jian-dong^{1*}, GUO Hong-wei², LIU Rong-qiang², LUO A-ni¹, LIU He-ping¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: jdwang_heu@163.com

Abstract: To solve the problems of low accuracy and folding rate of the main reflective surface of a traditional solid reflector mechanism, a deployable solid reflector mechanism was designed in this paper. First, the configurations of four types of deployable units were proposed, and their degrees of freedom were analyzed. After comparing and analyzing the advantages and disadvantages of the configuration schemes, configuration scheme 4 was defined as the basic configuration of the deployable unit, and its structure and deployment principle were designed. Then, based on the D-H coordinate transformation, a basic deployable unit kinematic model was established. According to the geometric constraints, the position vector equation was established; the relationship between rotation angles was established by the vector closed-form projection method; and the position, velocity, and acceleration were ana-

收稿日期:2018-05-16;修订日期:2018-07-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51575119);航天先进制造技术研究联合基金资助项目(No. U1637207)

lyzed. Simultaneously, ADAMS software was used to establish the mechanism simulation model and verify the correctness of the kinematics analysis. Finally, based on the relationship between the rotation angle and the structure size of the mechanism, the effects of rotation angle and structure size on the folding rate were analyzed, and the rotation angles and of a 2.2 m deployable solid reflector mechanism are determined to be 78° and 30° , respectively. The center disk radius, the longitudinal dimension of hinge support hole, the transverse dimension, the longitudinal dimension of the switching link, and the folding rate are 245 mm, 8 mm, 40 mm, 18 mm, and 0.326 respectively, which provide a reference for the design of the deployable solid reflector mechanism.

Key words: solid reflector mechanism; deployable unit; kinematic analysis; rotation angle; structure size; folding rate

1 引言

随着人们对宇宙空间探索的深入,传统的固体反射面机构已不能满足太空能源利用的需求,大折展比和高型面精度的空间能源聚束器的研制越发迫切^[1]。固体反射面可展机构的主反射面可加工成较为理想的抛物面,拥有很高型面精度,可以极好地适应空间能源利用和军事领域对固体反射面机构高精度和高灵敏度的需求^[2-3]。另外,固体反射面可展机构可以自身收拢^[4-5],克服了运载工具对发射体积的限制。

目前,国内外对固体反射面展开机构的研究较少。最早出现的太阳花式固面展开机构^[6]由美国 TRW 公司研制,收拢时为花瓣聚拢状,展开时呈花瓣绽放姿态。DAISY 可展天线^[7]由欧空局(ESA)和多尼尔公司联合研制,其面板以中心轮毂为中心呈辐射状分布,背部采用桁架支撑,具备很好的型面精度。剑桥大学开发的 SSDA 固面展开机构^[8]结构形式非常特殊,翼板围绕中心轮毂转动,同步性较高。铰接肋式固体反射面机构^[9-10]由 Harris 公司设计,支撑肋的特殊设计使机构具有很好的刚度和型面精度。Spektr-R 可展天线^[11-12]作为太空射电望远镜,与地面射电望远镜共同对地面实施观测,拥有很高的角分辨率和工作频段。在国内哈尔滨工业大学应用空间曲面折展机构技术,成功研制出可展开薄膜聚束镜^[13]和固面折展式太阳能聚束器^[14],不过现有的固体反射面机构主要作为雷达天线和聚束器。

本文针对传统固体反射面机构收拢率和型面精度较低的问题,分析了 4 种可展单元构型的自由度和构型优缺点,设计出一种可展开固体反射

面机构,建立该机构可展单元的运动学模型,基于位置矢量方程和向量封闭形投影法对其位置、速度和加速度进行分析,应用 ADAMS 仿真验证了运动学分析的正确性。最后以机构收拢率作为设计目标,确定了 2.2 m 可展开固体反射面机构相关回转角的旋转角度和构件尺寸。

2 可展开固体反射面机构设计

2.1 可展单元构型设计

结合可展开固体反射面机构在空间光学和射电天文等领域的应用,对可展单元构型和展开原理进行分析,得出 4 种可展单元构型方案,具体如图 1 所示。

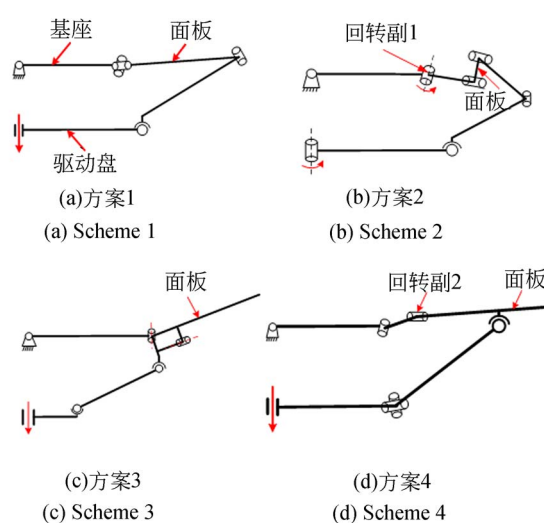


图 1 可展单元构型方案简图

Fig. 1 Configurations of basic deployable units

利用空间单闭环机构自由度计算公式^[15]分

析 4 种构型方案的自由度,从驱动器数量、结构复杂程度、展开精度、零件运动干涉的难易程度和展开同步性五方面,对比分析 4 种方案的优缺点,结果如表 1 所示。通过对比可知,方案 4 的可展单元构型展开精度较高,展开过程中不易出现运动干涉,展开同步性较好,因此确定构型方案 4 作为可展单元的基础构型。

表 1 可展单元自由度及优缺点

Tab. 1 Number of freedom degree and advantages and disadvantages of developable units

构型方案	自由度	驱动器数量	复杂程度	展开精度	运动干涉	展开同步性
一	1	较少	简单	低	极易	较好
二	2	较多	复杂	高	较难	较差
三	1	较少	复杂	低	容易	好
四	2	较少	复杂	较高	很难	较好

2.2 可展开固体反射面机构结构设计

可展单元为一单闭环空间连杆机构,结构如图 2 所示。机构处于收拢状态时,锁定释放机构对回转铰链 2 进行锁定,可展单元自由度为 1,滑盘下移使面板展开,即将展到位锁定释放机构对回转铰链 2 解锁并实现回转铰链 1 的锁定,此时机构自由度为 1,继续下移滑盘实现面板翻转,直至面板翻转到位。

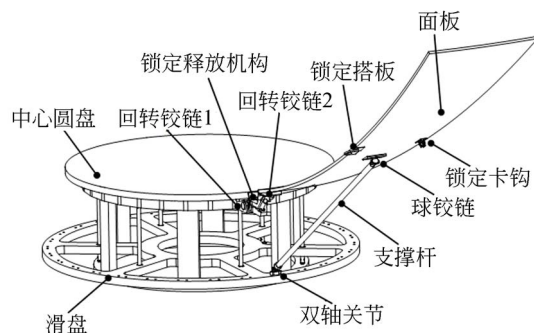


图 2 可展单元结构图

Fig. 2 Schematic diagram of basic developable unit

锁定释放机构结构如图 3 所示,面板作展开运动,锁销轴受弹簧压紧力被压入铰支座 2 锁销孔内,限制住回转铰链 2 旋转;当切换连杆和铰支座 1 限位面即将贴合,弹簧力将锁销轴压入到关节轴 1 孔内,同时锁销轴另一端立即从铰支座 2 孔内拔出,同时瞬时完成对回转铰链 2 解锁和对

回转铰链 1 处锁定。为方便进行重复试验,锁销轴上开一拉杆孔,切换连杆处开一导向槽,机构完全展开后,将拉杆拉到导向槽尾部并稍微旋转,使拉杆卡进槽内,完成对销轴解锁。

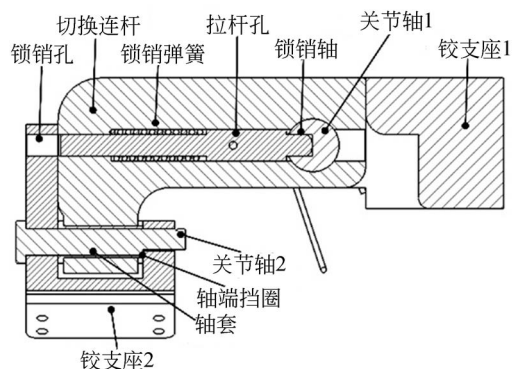


图 3 锁定释放机构剖视图

Fig. 3 Sectional view of locking and releasing mechanism

以收拢率作为设计目标,收拢态时面板全部收束到中心圆盘内作为设计原则,优选出面板数量为 30,通过电机旋转驱动丝杠丝母机构,并结合回转铰链二处锁定释放机构对它先锁定再解锁,进而实现固体反射面机构整体完全展开,展开过程如图 4 所示。

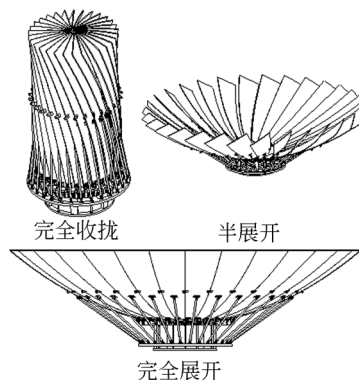


图 4 机构整体展开过程图

Fig. 4 Deployment process of deployed solid reflector mechanism

3 可展单元运动学分析

3.1 机构位置分析

在运动副中心建立 D-H 前置坐标系,运动副中心轴线定为 z 轴,相邻连杆间公法线方向定为 x 轴方向,可展单元运动学模型如图 5 所示,相关运动学参数如表 2 所示。

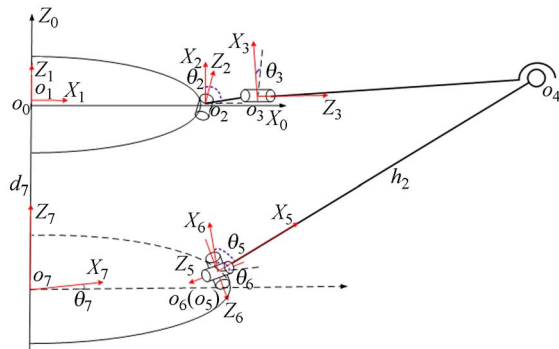


图 5 可展单元运动学模型

Fig. 5 Kinematic model of basic developable unit

表 2 可展单元运动学参数表

Tab. 2 Kinematic parameters of basic developable unit

i	θ_i	α_{i-1}	α_{i-2}	d_i	变量范围
1	0	0	0	d_1	0°
2	θ_2	$-\pi/2$	α_1	0	$-90 \sim 180^\circ$
3	θ_3	$-\pi/2$	α_2	d_3	$-26.78 \sim 63.22^\circ$
7	6°	0	0	d_7	$-120 \sim -20$ mm
6	θ_6	$\pi/2$	α_1	0	$-180 \sim 180^\circ$
5	θ_5	$-\pi/2$	0	0	$-180 \sim 180^\circ$

表 2 中 $\theta_i (i=2, 3, 5, 6)$ 为回转副 2, 3, 5 和 6 的回转角, d_7 为位移输入量, 根据各回转副的实际工况确定 θ_i 和 d_7 的变化范围, 其余 α_{i-1} 和 d_i 杆长参数已知。

根据图 5 所建的 D-H 坐标系, 该机构的位置矢量方程可按如下方法导出, 首先分析得出坐标系 O_{i-1} 到坐标系 O_i 的坐标变换矩阵通式 $T_{(i-1)i}$:

$$T_{(i-1)i} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ c\alpha_{i-1}s\theta_i & c\alpha_{i-1}c\theta_i & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\alpha_{i-1}s\theta_i & s\alpha_{i-1}c\theta_i & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $s\theta_i = \sin \theta_i$, $c\theta_i = \cos \theta_i$, $s\alpha_{i-1} = \sin \alpha_{i-1}$, $c\alpha_{i-1} = \cos \alpha_{i-1}$ 。然后, 写出球铰中心节点 O_4 和双轴关节中心节点坐标 $O_6 (O_5)$ 在基坐标系 O_0 下的坐标:

$$(P_{o4})_0 = T_{01} T_{12} T_{23} (P_{o4})_3 = \begin{bmatrix} X_{o4} \\ Y_{o4} \\ Z_{o4} \\ z \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} a_3 c_2 c_3 - (d_3 + d_4) s_2 + a_1 + a_2 c_2 \\ -a_3 s_3 \\ -a_3 c_3 s_2 - (d_3 + d_4) c_2 + d_1 - a_2 s_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$(P_{o5})_0 = T_{07} T_{76} T_{65} (P_{o5})_5 = \begin{bmatrix} X_{o5} \\ Y_{o5} \\ Z_{o5} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_5 c_7 \\ a_5 s_7 \\ d_7 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $s_i = \sin \theta_i$, $c_i = \cos \theta_i$, $(P_{o4})_3$ 和 $(P_{o5})_5$ 分别为节点 O_4 在坐标系 O_3 、节点 O_5 在坐标系 O_5 下的坐标。

根据机构运动时连杆长度不变的条件可得可展单元的位置矢量方程, 经整理得输入输出方程为:

$$[(a_3 c_3 + a_2) c_2 - (d_3 + d_4) s_2 + a_1 - a_5 c_7]^2 + (-a_3 s_3 - a_5 s_7)^2 + [- (a_3 c_3 + a_2) s_2 - (d_3 + d_4) c_2 + d_1 - d_7]^2 = h^2. \quad (4)$$

可展单元为空间向量封闭形, 沿任意轴线投影恒为零^[16], 分别向基坐标系轴 x_0, y_0 轴和 z_0 轴投影, 按照表 3 中坐标变换矩阵 $T_{01} T_{02} T_{03} T_{07} T_{06} T_{05}$ 前三行和前三列中各元素与方向余弦值的对应关系, 将矩阵各元素依次代入向量封闭投影方程组并整理得:

$$\begin{cases} (a_3 c_3 + a_2) c_2 - (d_3 + d_4) s_2 + a_1 - a_5 c_7 = h(c_5 c_6 c_7 - s_5 s_7) \\ h(c_5 c_6 s_7 + s_5 c_7) = -a_6 s_8 - a_5 s_7 \\ (a_3 c_3 + a_2) s_2 + (d_3 + d_4) c_2 - (d_1 - d_7) = -h c_5 s_8 \end{cases}. \quad (5)$$

至此, 根据式(5)和式(6)可分别求出各回转副的旋转角度。

表 3 矩阵中元素与方向余弦关系

Tab. 3 Relation of elements in matrix and direction cosine

矢量	x_j	y_j	z_j
x_i	$t_{11} = \cos(x_i, x_j)$	$t_{12} = \cos(x_i, y_j)$	$t_{13} = \cos(x_i, z_j)$
y_i	$t_{21} = \cos(y_i, x_j)$	$t_{22} = \cos(y_i, y_j)$	$t_{23} = \cos(y_i, z_j)$
z_i	$t_{31} = \cos(z_i, x_j)$	$t_{32} = \cos(z_i, y_j)$	$t_{33} = \cos(z_i, z_j)$

表 3 中, t_{ij} 代表坐标变换矩阵的前三行和前三列元素, x_i, y_i, z_i 和 x_j, y_j, z_j 对应坐标系 O_i 和 O_j 坐标轴的单位矢量。

可展单元运动过程分为面板的展开和翻转,

展开过程回转角 $\theta_3 = -26.78^\circ$, 翻转过程回转角 $\theta_2 = -90^\circ$ 。首先对面板展开过程运动进行分析, 将式(4)进行整理并简化得到:

$$(2AD-2BF)c_2 - (2BD+2AF)s_2 = G, \quad (6)$$

式中: $A = a_3 c_3 + a_2$, $B = d_3 + d_4$, $D = a_1 - a_5 c_7$, $E = -a_3 s_3 - a_5 s_7$, $F = d_1 - d_7$, $G = h^2 - A^2 - B^2 - D^2 - E^2 - F^2$ 。令:

$$\begin{cases} 2BD+2AF = \rho \cos \varphi = P_x \\ 2AD-2BF = \rho \sin \varphi = P_y \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \\ \varphi = \text{atan} 2(P_y, P_x) \end{cases}$$

解得:

$$\theta_2 = \varphi - \text{atan} 2(G/\rho - \sqrt{1-G^2/\rho^2}). \quad (8)$$

求解式(5)得回转角 θ_5 和 θ_6 为:

$$\theta_5 = \text{asin} \left[\frac{EC_7 - MS_7}{h} \right], \quad (9)$$

$$\theta_6 = \text{asin} \left[\frac{-N}{hc_5} \right], \quad (10)$$

式中: $M = h(c_5 c_6 c_7 - s_5 s_7)$, $N = -hc_5 S_6$ 。

依照同样方法分析面板翻转过程中机构的运动, 解得:

$$\theta_3 = \varphi - \text{atan} 2(g/\rho - \sqrt{1-g^2/\rho^2}), \quad (11)$$

$$\theta_5 = \text{asin} \left[\frac{bc_7 - as_7 - a_3 s_3 c_7 - a_5 c_2 c_3 s_7}{h} \right], \quad (12)$$

$$\theta_6 = \text{asin} \left[\frac{-d + a_3 s_2 c_3}{hc_5} \right], \quad (13)$$

式中: $a = a_1 - (d_3 + d_4) s_2 + a_2 c_2 - a_5 c_7$, $b = -a_5 s_7$, $d = -(d_3 + d_4) s_2 - a_2 s_2 + d_1 - d_7$, $g = h^2 - a^2 - b^2 - d^2 - a_3^2$ 。

另外, 滑盘位移的输入量 $d_7 = d_{70} - 4t$, 运用 MATLAB 软件进行编程计算, 求得机构运动过程中各回转角的变化曲线, 如图 6 所示。

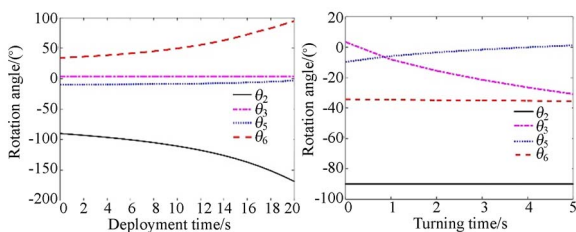
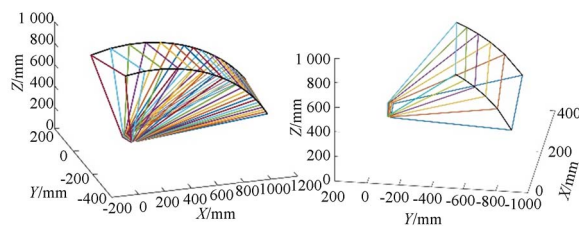


图 6 回转角旋转角度的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of rotation angle

以展开口径为 2.2 m 的固体反射面机构为

例, 对面板处相关点进行位置分析, 计算求得面板在展开和翻转运动中的扫掠轨迹, 如图 7 所示。



(a) 展开过程 (b) 翻转过程
(a) Deploying process (b) Turning process

图 7 可展单元面板的运动轨迹

Fig. 7 Trajectories of panel of developable unit

3.2 机构速度和加速度分析

对回转角依次求一次和二次导数, 得出机构在展开和翻转运动过程中各回转角角速度绝对值和角加速度绝对值随时间的变化曲线, 分别如图 8 和图 9 所示。

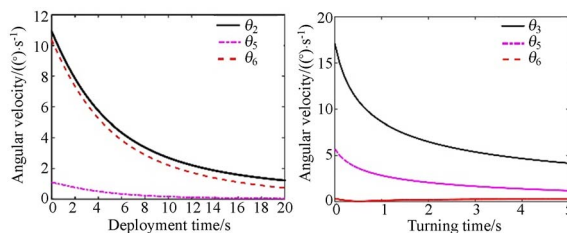


图 8 角速度绝对值变化曲线

Fig. 8 Absolute value variation of angular velocity

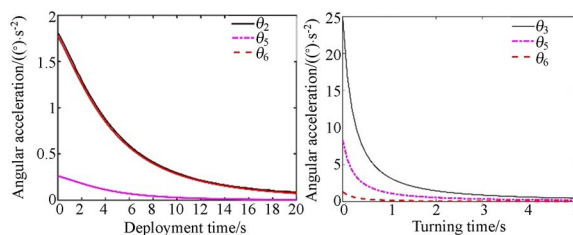


图 9 角加速度绝对值变化曲线

Fig. 9 Absolute value variation of angular acceleration

由角速度和角加速度变化趋势可知, 在展开和翻转运动中, 面板均做加速度逐渐减小的减速运动, 对于运动一开始角加速度值较大易产生剧烈振动的问题, 可采用增加机构展开时间的办法来解决。

3.3 机构 ADAMS 运动学仿真分析

利用 Creo 软件建立可展单元三维模型, 以 x_t 格式文件导入 ADAMS 软件中, 对各关节添加

连接并定义驱动,建好的 ADAMS 仿真模型如图 10 所示。

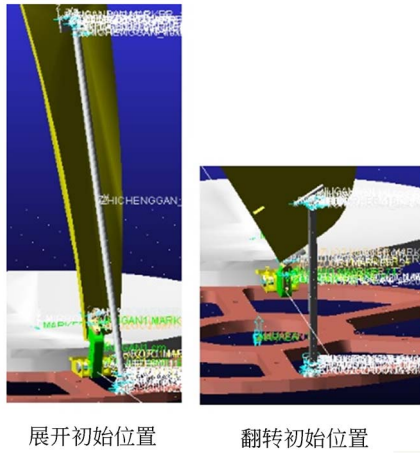
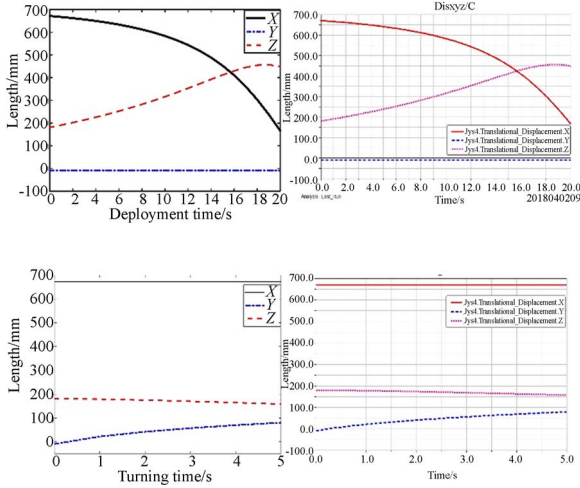


图 10 可展单元 ADAMS 仿真模型

Fig. 10 ADAMS simulation model of developable unit

对机构两种不同运动进行仿真,所得点 C 的位移分量曲线如图 11 所示,将其与 MATLAB 计算后点 C 的位移分量曲线对比,发现数据完全吻合,证明了对可展单元运动学分析的准确性。



(a)MATLAB 计算 (b)ADAMS 仿真
(a)MATLAB calculation (b)ADAMS simulation

图 11 MATLAB 计算与 ADAMS 仿真对比

Fig. 11 Comparison of MATLAB calculation and ADAMS simulation

4 收拢率影响因素分析

4.1 θ_2 和 θ_3 旋转角度

机构从收拢到完全展开经历了面板的展开和

翻转,回转角 θ_2 和 θ_3 决定着面板的展开和翻转程度。回转角 θ_2 和 θ_3 的变化范围如表 2 所示,选取面板大端部两侧端点 P 和 Q 作为面板收拢态参照点,如图 12 所示。

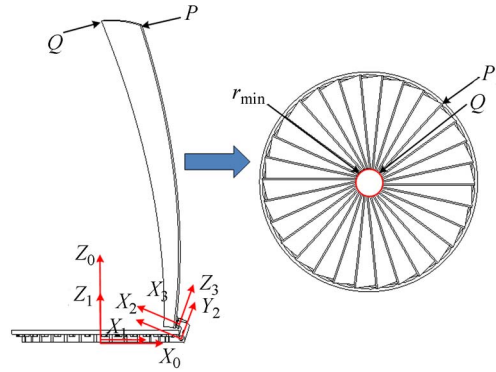


图 12 所选取参照点图

Fig. 12 Schematic of selected reference points

点 P 和 Q 在坐标系 O_3 内,根据式(14)和式(15)可求点 P 和 Q 在基坐标系 O_0 下的坐标。由于完全收拢状态 z 方向上距离对机构收拢半径的影响极小,忽略 P_z 和 Q_z ,并根据机构收拢状态点 P 和 Q 在底部基座圆盘内的投影位置和机构所需的收拢半径,列出约束条件,如式(16)所示。

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{T}_{03} \mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p c_2 c_3 - y_p c_2 s_2 - z_p s_2 + a_1 + a_2 c_2 - d_3 s_2 \\ -x_p s_3 - y_p c_3 \\ -x_p s_2 c_3 + y_p s_2 s_3 - z_p c_2 + d_1 - a_2 s_2 - d_3 c_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{Q}_0 = \mathbf{T}_{03} \mathbf{Q}_3 = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q c_2 c_3 - y_q c_2 s_2 - z_q s_2 + a_1 + a_2 c_2 - d_3 s_2 \\ -x_q s_3 - y_q c_3 \\ -x_q s_2 c_3 + y_q s_2 s_3 - z_q c_2 + d_1 - a_2 s_2 - d_3 c_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} r_{\min} \leq \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \\ \sqrt{(P_x - Q_x)^2 + (P_y - Q_y)^2} \leq r \leq r_{\max}, \\ r = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \end{cases}, \quad (16)$$

其中: Q_x 和 Q_y , P_x 和 P_y 分别为点 Q 和 P 在基坐标系 O_0 下 x, y 轴方向坐标, $r_{\min} = 30 \text{ mm}$ 、 $r_{\max} = 250 \text{ mm}$ 为机构处于收拢状态下点 Q 所允许达到的最小内圈半径和点 P 所允许达到的最大外圈半径, r 为机构收拢半径。

以收拢半径 r 作为设计目标函数, 回转角 θ_2 和 θ_3 的变化范围作为边界条件, 利用 MATLAB 编程得到 θ_2, θ_3 和收拢半径 r 之间的关系如图 13 所示(彩图见期刊电子版)。

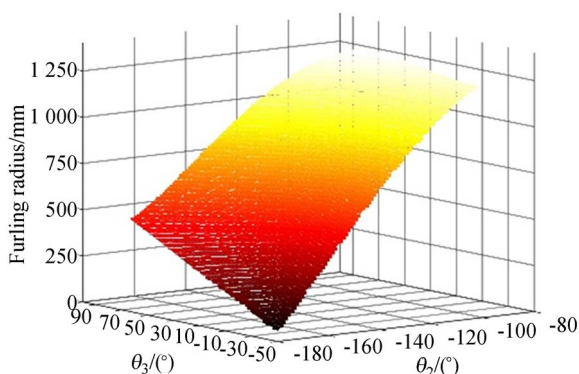


图 13 收拢半径与 θ_2 和 θ_3 关系

Fig. 13 Furling radius as a function of θ_2 and θ_3

图 13 中根据黑红黄白颜色深浅将图像分为 4 个区域, 其中黑色区域的目标值 r 小于 250, 进一步利用 MATLAB 编程以条件语句形式筛选出符合条件的目标值 r 及其所对应的 θ_2, θ_3 , 所得具体数值如图 14 所示。考虑到实际建模中, 面板及相关零件存在一定厚度, 确定 θ_2, θ_3 分别为 78° 和 30° 。

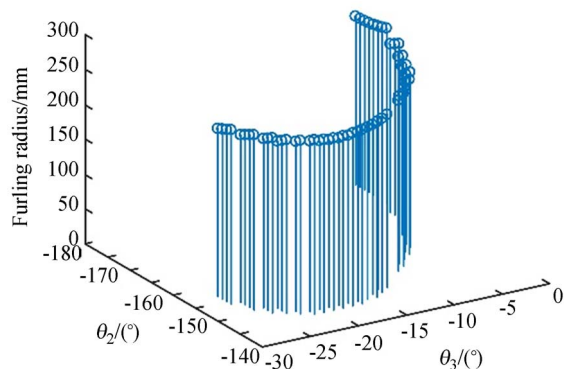


图 14 目标值 r 及对应的 θ_2 和 θ_3

Fig. 14 Target value r and corresponding θ_2 and θ_3

4.2 结构尺寸参数

考虑技术指标中收拢率和收拢体积的要求,

对可展单元中心圆盘半径 r 、铰支座一孔横向尺寸 a_1 、纵向尺寸 d_1 、切换连杆横向尺寸 d_3 、纵向尺寸 a_2 对机构的收拢率影响进行分析, 各结构的相关尺寸如图 15 所示。以面板外端点 P 在基坐标系 O_0 下的坐标 P_x, P_y 和 P_z 作为机构收拢率 S 和收拢体积 V_s 的参数, 并结合各零件横向和纵向尺寸关系建立等式:

$$\begin{cases} S = \sqrt{(P_x^2 + P_y^2)} / R \\ V_s = \pi(P_x^2 + P_y^2) P_z \end{cases}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} a_1 + d_3 + Z_p = R \\ d_1 + a_2 + X_p = H \\ a_1 = r + \Delta r \end{cases}, \quad (18)$$

其中: $R = 1100 \text{ mm}$, 为机构展开态时的半径; $\Delta r = 10 \text{ mm}$, $H = 458.3 \text{ mm}$, 通过抛物线方程求得。

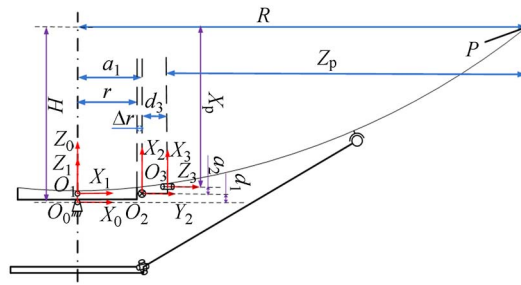


图 15 可展单元结构尺寸图

Fig. 15 Structure size of basic developable unit

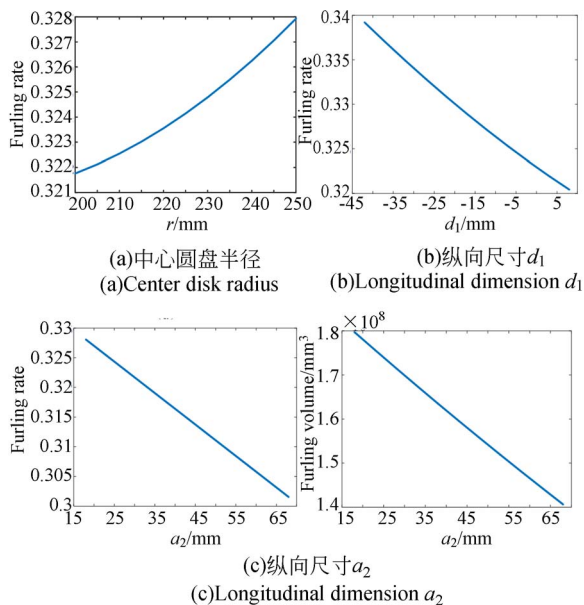


图 16 收拢体积及收拢率的影响因素

Fig. 16 Influence factors of folding volume and folding rate

在确定可展单元收拢角度的基础上,对式(14)进行分析发现仅有尺寸 d_3 改变, P_x 和 P_y 值不变,即机构收拢率与尺寸 d_3 无关。利用 MATLAB 进行编程计算,得到 r, d_1, a_2 随收拢率的变化关系曲线,分别如图 16(a)、(b)、(c)所示,分析可知机构收拢率随中心圆盘半径的增大大致呈线性增加趋势,收拢率随铰支座一孔纵向尺寸 d_1 、切换连杆纵向尺寸 a_2 的增加均呈线性减小趋势。另外,通过对比三者尺寸增加对机构收拢率变化幅度的影响,发现中心圆盘半径 r 对机构收拢率的影响较小,铰支座一孔的纵向尺寸 d_1 及切换连杆的纵向尺寸 a_2 对机构收拢率的影响较大。

图 17(d)是机构收拢体积随切换连杆纵向尺寸 a_2 的变化曲线,分析发现随尺寸 a_2 的增大,机构收拢体积呈线性减小而且变化幅度比较大。考虑机构的收拢率要尽可能小,确定 $r=245$ mm, $d_1=8$ mm, $d_3=40$ mm, $a_2=18$ mm,收拢率大致在 0.326。

参考文献:

- [1] 张兴华,侯欣宾,王立,等. 空间太阳能电站聚光模式研究[J]. 中国空间科学技术,2016,36(2):1-12.
ZHANG X H, HOU X B, WANG L, et al.. Investigation of light concentrating mode for SSPS [J]. *China Space Science and Technology*, 2016, 36(2):1-12. (in Chinese)
- [2] MIYASAKA A, HOMMAT M, TSUJIGATA A. Design and ground verification of large deployable reflector [C]. *42th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Seattle, WA, United States*, 2001:2222-2227.
- [3] MEGURO A, HARADA S, WATANABE M. Key technologies for high-accuracy large mesh antenna reflectors[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 53(11):899-908.
- [4] 崔吉. 大尺度可展开式抛物面机构机构的设计与展开性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
CUI J. *Design and Analysis of Large Volume Deployable Parabolic Antenna Mechanism* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] 罗阿妮,刘贺平,李杨,等. 花瓣式可展机构的结构分析[J]. 中国机械工程,2012,23(14):1656-1658.

5 结 论

本文根据 4 种可展开固体反射面机构可展单元构型的自由度和优缺点,提出一种可展开固体反射面机构并对其结构进行详细设计。通过 D-H 坐标变换矩阵建立了可展单元的运动学模型,利用位置矢量方程和向量封闭投影法解出各回转角间的关系,对机构的位置、速度和加速度进行了分析,应用 ADAMS 软件建立机构仿真模型,验证了机构运动学分析的正确性。实验确定了 2.2 m 可展开固体反射面机构的回转角和旋转角分别为 78° 和 30° ,中心圆盘半径 r 、铰支座孔纵向尺寸 d_1 、切换连杆横向尺寸 d_3 、纵向尺寸 a_2 为 245, 8, 40, 18 mm,收拢率为 0.326,为可展开固体反射面机构设计提供参考。

- LUO A N, LIU H P, LI Y, et al.. Structure analysis of petal deployable antenna [J]. *Journal of Mechanical Engineering of China*, 2012, 23(14): 1656-1658. (in Chinese)
- [6] PALMER W B, GIEBLER M M. Large solid deployable reflector [R]. California: TRW Defense and Space Systems Group, Redondo Beach, 1979: 380-389.
- [7] TAN L T, PELLEGRINO S. Stiffness design of spring back reflectors [C]. *43th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Denver, Colorado, AIAA*, 2002, 4: 2307-2317.
- [8] TIBERT G. *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications* [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002: 17-18.
- [9] HOLLAND H. Collapsible antenna with plurality of exible rector petals releasably retained; U. S. Patent No. 3, 176, 303[P]. 1962.
- [10] DATASHVILI L, BAIER H, WEHRLE E, et al.. Large shell-membrane space reectors [A]. *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2010.
- [11] KARDASHEV N S, KHARTOV V V, et al..

- Radio astron telescope with a size of 300000 km. Basic parameters and first results of observations [J]. *Astronomicheskii Zhurnal*, 2013, 90 (3): 179-222.
- [12] FEDORCHUK S D, ARKHIPOV M Y. On the assurance of the design accuracy of the space radiotelescope radioastron [J]. *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2014, 52(5):415-417.
- [13] 赵浩江, 闫勇. 可展开柔性薄膜聚束镜的成形与聚光实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 243:24-29.
- ZHAO H J, YAN Y. Study on forming of deployable spotlight reflector made of flexible films and concentrating solar experiment [J]. *Journal of Infrared and Laser Engineering*, 2014, 243:24-29. (in Chinese)
- [14] 李忠杰. 固面折展式太阳能聚束器设计与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- LI ZH J. *Research on Solid-surface Deployable Solar Concentrator* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- HUANG ZH, ZHAO Y SH, ZHAO T SH. *Advanced Space Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [16] 韩建友. 高等机构学[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- HAN J Y. *Advanced Mechanics* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



王建东(1994—),男,吉林四平人,硕士研究生,2016年于中北大学获得学士学位,主要从事空间可展开机构的设计及研究。E-mail: jdwang_heu@163.com



郭宏伟(1980—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士生导师,主要从事空间可展开机构与控制、可变构型结构与机构研究等方面的工作。E-mail: guohw@hit.edu.cn