

# 一种新型可展组合单元的自由度与运动学分析

许允斗<sup>1</sup>, 刘文兰<sup>1</sup>, 陈亮亮<sup>1</sup>, 姚建涛<sup>1</sup>, 赵永生<sup>1\*</sup>, 朱佳龙<sup>2</sup>

(1. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100)

**摘要:** 提出了一种新型多自由度可展机构9RR-12URU, 可作为大口径构架式可展天线支撑机构的最小组合单元。该机构包含3个3RR-3URU四面体可展单元, 基于螺旋理论分析了单个四面体可展单元的自由度, 进而采用拆杆组法得到了9RR-12URU组合单元机构的自由度。基于节点的空间几何位置和坐标变换矩阵推导了可展组合单元机构在收拢/展开过程中各节点位置和速度的解析表达式, 并采用RPY角描述了各节点相对于定节点的姿态变化。基于Adams软件对9RR-12URU组合单元机构的自由度和运动学理论分析进行了仿真验证, 结果表明该机构具有收拢和调姿两种自由度, 使机构达到最大折叠比。该新型多自由度可展组合单元机构结构简单、折叠比大, 可用于曲面构架式可展开反射器中。

**关键词:** 自由度; 可展机构; 运动学; 螺旋理论

**中图分类号:** V19; TH112

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2017)04-0333-07

**DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2017.04.004

**引用格式:** 许允斗, 刘文兰, 陈亮亮, 等. 一种新型可展组合单元的自由度与运动学分析[J]. 深空探测学报, 2017, 4 (4): 333-339.

**Reference format:** Xu Y D, Liu W L, Chen L L, et al. Mobility and kinematic analyses of a novel deployable composite element[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4 (4): 333-339.

## 0 引言

单元构架式可展开天线采用模块化设计思想, 可以通过改变模块的大小和数量满足不同口径的需求<sup>[1-2]</sup>, 常用的模块有四面体或六棱柱形式。在国外, 日本的ETS-VIII、俄罗斯四面体单元构架式(Tetrahedral Truss)天线已得到了在轨应用, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) Langley研究中心、Harris公司、General Dynamic Space System也都研制出了四面体单元构成的大型可展天线<sup>[3-4]</sup>; 在国内, 构架式可展开天线的起步较晚, 目前主要集中在结构设计、构型综合等方面, 浙江大学空间结构中心设计了四面体式<sup>[5-6]</sup>、六棱柱式<sup>[7]</sup>和环形桁架式<sup>[8]</sup>等可展天线, 哈尔滨工业大学宇航空间机构及控制研究中心对可展天线基本单元进行了构型综合<sup>[9-10]</sup>, 中国空间技术研究院西安分院研制了6 m × 2.8 m构架式可展开天线样机<sup>[11]</sup>, 西北工业大学也对可展开天线展开了研究<sup>[12]</sup>, 此外, 孙宏图等<sup>[13]</sup>提出了一种新型平面阵列可展机构——正方形可展机构, 李瑞玲等<sup>[14]</sup>提出了球面剪叉可展机构, 杨毅等<sup>[15]</sup>基于7杆闭

环机构提出了一种新型四棱锥单元, 可组合成大型平面可展机构。

现有单元构架式可展开天线在收拢过程中存在两个问题:

- 1) 机构收拢末态反射面花盘仍呈现抛物面状且姿态不可调, 影响机构的收拢比;
- 2) 主要依靠杆件弹性变形和铰链间隙实现机构的紧密收拢。

针对上述问题, 本文提出了一种新型多自由度组合可展单元机构, 具有良好的应用前景。

## 1 新型组合单元机构结构组成及特征

本文提出的新型组合可展单元机构由3个3RR-3URU四面体可展单元共用一个反射面花盘, 且两两之间通过URU约束链连接而成, 如图1所示。

第一个3RR-3URU四面体可展单元包含: 4个连接节点A、B、E和H, 3根等长的腹杆AH、BH和EH, 3根同步折叠杆AB、BE和AE, 9个转动副(R), 6个虎克铰(U), 如图2所示。

收稿日期: 2017-05-17 修回日期: 2017-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675458); 河北省自然科学基金重点项目(E2017203335); 河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2017060)

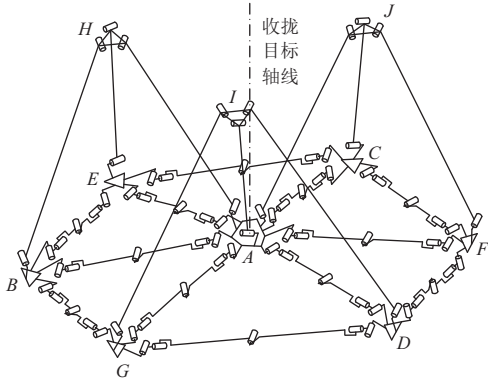


图1 9RR-12URU新型可展组合单元机构简图

Fig. 1 Schematic of a novel deployable composite element 9RR-12URU

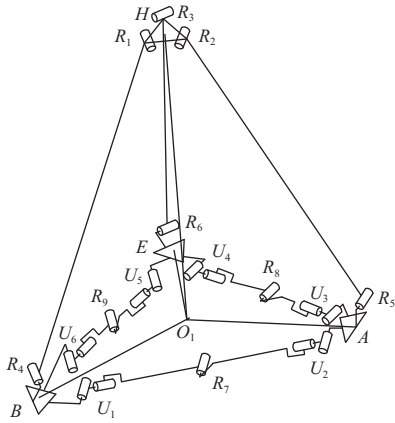


图2 3RR-3URU四面体可展单元机构简图

Fig. 2 Schematic of 3RR-3URU tetrahedron deployable unit

记节点 $A$ 、 $B$ 和 $E$ 组成的三角形的外心为 $O_1$ ，转动副 $R_1$ 和 $R_4$ 的轴线相互平行且垂直于平面 $HO_1B$ ，转动副 $R_2$ 和 $R_5$ 的轴线相互平行且垂直于平面 $HO_1A$ ，转动副 $R_3$ 和 $R_6$ 的轴线相互平行且垂直于平面 $HO_1E$ ，每根同步折叠杆中的两个连杆等长。其余两个四面体单元与单元 $H-ABE$ 具有相同的结构。

## 2 自由度分析

### 2.1 3RR-3URU四面体单元的自由度分析

3RR-3URU四面体可展单元属于空间多闭环机构，采用现有自由度分析方法很难得出该单元的自由度。本文首先将四面体单元机构拆分为一个基本并联机构和一条串联运动链，然后基于螺旋理论分析并联机构的自由度，得到与串联运动链相连的两个构件在并联机构中的自由度数目的性质，最后分析串联运动链添加到基本并联机构上引入的约束性质，得到整个机构的自由度。

将3RR-3URU单元机构拆分为3RR-2URU并联机构和URU串联运动链，其中，3RR-2URU并联机构如

图3所示，选取节点 $A$ 作为定平台，节点 $B$ 为动平台，则连接动平台和定平台之间的支链分别为分支 $AB$ 和分支 $(AEH)-B$ 。

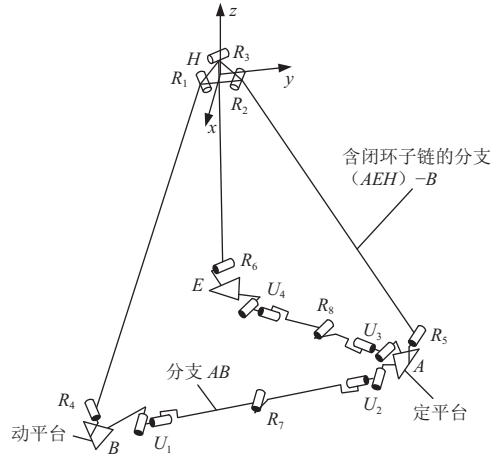


图3 3RR-2URU并联机构简图

Fig. 3 Schematic of 3RR-2URU parallel mechanism

分支 $(AEH)-B$ 含闭环子链，为得到闭环子链 $(AEH)$ 的广义运动副，在该闭环子链中将节点 $H$ 视为动平台，其通过分支 $R_2R_5$ 和分支 $U_3R_8U_4R_6R_3$ 与定平台 $A$ 相连，分支 $U_3R_8U_4R_6R_3$ 为7自由度运动链，对节点 $H$ 不提供约束，则节点 $H$ 的运动由分支 $R_2R_5$ 决定，因此，含闭环子链的分支 $(AEH)-B$ 可等效为分支 $AHB$ 。在节点 $H$ 中心建立参考坐标系 $H-xyz$ ， $z$ 轴沿转动副 $R_1$ 和 $R_2$ 的轴线确定平面的法线方向， $x$ 轴平行于转动副 $R_7$ 的轴线， $y$ 轴根据右手定则确定。记转动副 $R_5$ 和 $R_2$ 轴线的方向矢量为 $(a_1 \ b_1 \ 0)$ ，由于转动副 $R_4$ 和 $R_1$ 关于 $x$ 轴对称，故 $R_4$ 和 $R_1$ 的方向矢量为 $(a_1 \ -b_1 \ 0)$ ，记转动副 $R_5$ 和 $R_2$ 中心的位置矢量为 $(x_j \ y_j \ z_j)$ ， $j = 5, 2$ ，则转动副 $R_4$ 和 $R_1$ 中心的位置矢量为 $(x_j \ -y_j \ z_j)$ 。

根据反螺旋理论可得分支 $AHB$ 提供给节点 $B$ 的约束螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{r1}^1 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_{r2}^1 = (x_2 - x_5 - f \ 0 \ -z_5 \ 0 \ z_5 e \ 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中： $f = (y_2 - y_5)a_1/b_1$ ； $e = x_2 - y_2a_1/b_1$ ； $\mathcal{S}_{r1}^1$ 表示与分支 $AHB$ 中所有转动副轴线均垂直的约束力偶； $\mathcal{S}_{r2}^1$ 表示过转动副 $R_5$ 和 $R_4$ 轴线交点和转动副 $R_2$ 和 $R_1$ 轴线交点的约束力。

分支 $AB$ 提供给节点 $B$ 的约束螺旋为

$$\mathcal{S}_{r1}^2 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ z_7 \ 0)^T \quad (2)$$

其中： $z_7$ 表示转动副 $R_7$ 中心点的 $z$ 坐标； $\mathcal{S}_{r1}^2$ 表示与转动副 $R_7$ 轴线重合的约束力。

式(1)和式(2)的并集为节点B受到的总约束螺旋, 求其反螺旋可得节点B相对于节点A的运动螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{m1} = (0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0) \\ \mathcal{S}_{m2} = (0 & 1 & 0 & -z_7 & 0 & g) \\ \mathcal{S}_{m3} = (1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $g = x_2 - y_2 a_1 / b_1 + (x_5 - x_2 - (y_5 - y_2) a_1 / b_1) z_7 / z_5$ ;  $\mathcal{S}_{m1}$ 表示沿y轴的移动;  $\mathcal{S}_{m2}$ 表示绕y轴的转动;  $\mathcal{S}_{m3}$ 表示绕x轴的转动。

式(3)表明3RR-2URU并联机构中节点B具有3个自由度: 2个轴线位于与 $xHy$ 面平行的平面内的转动自由度和1个沿节点A、B连线方向的移动自由度。另外, 闭环子链(AEH)中存在1个局部自由度。因此, 整个3RR-2URU机构具有4个自由度。

在3RR-2URU机构中, 若以节点E为动平台, 同理可得其相对于节点A具有2个轴线位于与 $xHy$ 面平行的平面内的转动自由度和1个沿节点A、E连线方向的移动自由度。由于3RR-2URU机构具有4个自由度, 且节点B和E的转轴均位于与 $xHy$ 面平行的平面内, 故节点B和E的4个转动自由度中只有2个是独立的, 其相对于节点A的两个移动自由度是独立的。

$U_5R_9U_6$ 运动链为5自由度串联链, 根据螺旋理论可知该运动链提供1个与转动副 $R_9$ 轴线重合的约束力, 因此, 在图3所示3RR-2URU机构的节点B和E之间添加 $U_5R_9U_6$ 运动链后, 引入1个实约束使节点B和E的两个移动自由度变得相关, 最终得到3自由度机构3RR-3URU, 也可以根据修正的G-K公式计算3RR-3URU单元机构的自由度<sup>[16]</sup>

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \xi = 6 \times (13 - 15 - 1) + 21 = 3 \quad (4)$$

其中:  $M$ 表示机构的自由度数;  $d$ 表示机构的阶数,  $d = 6 - \lambda$ ,  $\lambda$ 表示机构中的公共约束数;  $n$ 为组成机构的包括机架的构件数;  $g$ 为机构所含运动副数;  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, g$ )表示第*i*个运动副所具有的单自由度数;  $v$ 为机构中除公共约束外的冗余约束数;  $\xi$ 为机构中的局部自由度数, 局部自由度不影响机构输出件的自由度。

## 2.2 组合单元的自由度分析

为便于分析图1所示的组合可展机构的自由度, 将其视作是在四面体可展单元H-ABE的基础上, 依次添加四面体可展单元J-AFC、四面体可展单元I-ADG、约束链EC、约束链DF、约束链BG得到的, 其中节点A为机架。

根据前述对单个3RR-3URU四面体单元机构的自由度分析可知, 在四面体可展单元H-ABE的机架A上, 依次添加四面体可展单元J-AFC和I-ADG得到的机构中, 节点B和E的两个移动自由度是相关的, 节点C和F的两个移动自由度是相关的, 节点D和G的两个移动自由度是相关的。由于约束链EC、DF和BG均为5自由度约束链URU, 其提供1个约束限制两端U副连接的构件在R副轴线方向的相对移动, 因此, 在单元机构H-ABE的节点E和单元机构J-AFC的节点C之间添加约束链EC后, 节点B、E、C和F的移动变得相关; 在单元机构J-AFC的节点F和单元机构I-ADG的节点D之间添加约束链DF后, 节点B、E、C、F、D和G的移动变得相关; 此时在单元机构I-ADG的节点G和单元机构H-ABE的节点B之间添加约束链BG后, 引入1个冗余约束。根据修正的G-K公式可得9RR-12URU组合可展机构的自由度为

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{k=1}^g f_k + v - \xi = 6 \times (43 - 54 - 1) + 78 + 1 = 7 \quad (5)$$

综上, 9RR-12URU可展组合单元机构具有7个自由度。根据各节点的运动性质可以将这7个自由度分为两类: 收拢自由度和调姿自由度。其中, 收拢自由度指各节点向目标收拢轴线的移动自由度, 调姿自由度指各节点绕其与对应腹杆连接的转动副转动的自由度。

## 3 9RR-12URU组合单元运动学分析

### 3.1 可展组合单元的运动学分析

9RR-12URU可展组合单元机构的运动学简图如图4所示, 节点A为机架, 在节点A上建立参考坐标系A-xyz, z轴竖直向上, x轴是沿水平面与z轴和直线AO<sub>1</sub>确定平面的交线, y轴根据右手定则确定。在O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>点分别建立局部坐标系O<sub>1</sub>-x<sub>1</sub>y<sub>1</sub>z<sub>1</sub>、O<sub>2</sub>-x<sub>2</sub>y<sub>2</sub>z<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>-x<sub>3</sub>y<sub>3</sub>z<sub>3</sub>, z<sub>1</sub>、z<sub>2</sub>和z<sub>3</sub>轴分别与直线O<sub>1</sub>H、O<sub>2</sub>J和O<sub>3</sub>L重合, x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub>和x<sub>3</sub>轴分别与直线O<sub>1</sub>A、O<sub>2</sub>A和O<sub>3</sub>A重合, y<sub>1</sub>、y<sub>2</sub>和y<sub>3</sub>轴根据右手定则确定。设腹杆长度均为L, 折叠杆AB、AE、AC、AF、AD和AG中每根连杆的长度为l<sub>1</sub>, 折叠杆BE、CF和DG中每根连杆的长度为l<sub>2</sub>, 初始状态下x<sub>1</sub>轴与x轴之间的夹角为γ<sub>0</sub>。根据本文第2节的分析可知, 9RR-12URU可展组合单元有7个自由度, 要使机构具有确定的运动, 需要添加至少7个驱动。为便于实现各节点向定节点A的同步收拢和同步调姿, 所有收拢驱动副的转角相同, 记为α, 所有

调姿驱动副的转角相同, 记为 $\gamma$ ,  $\alpha$ 和 $\gamma$ 为关于时间 $t$ 的函数。

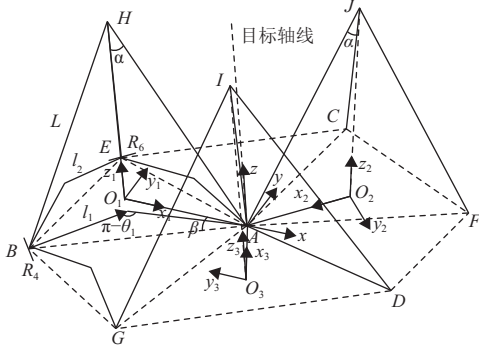


图4 可展组合单元的运动简图

Fig. 4 Kinematic diagram of the deployable composition element

根据3RR-3URU单元机构的几何关系可得, 节点B、E、H在坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 中的位置矢量为

$$\begin{cases} {}^{O1}P_B = (-\cos(2\beta)L\sin\alpha & -\sin(2\beta)L\sin\alpha & 0) \\ {}^{O1}P_E = (-\cos(2\beta)L\sin\alpha & \sin(2\beta)L\sin\alpha & 0) \\ {}^{O1}P_H = (0 & 0 & L\cos\alpha) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\beta = \arcsin(l_2/(2l_1))$ 。

根据坐标变换可得节点B、E、H在坐标系 $A-xyz$ 下的位置矢量为

$$\begin{cases} {}^AP_B = {}^{A_{O1}}R^{O1}P_B + {}^AP_{O1} \\ {}^AP_E = {}^{A_{O1}}R^{O1}P_E + {}^AP_{O1} \\ {}^AP_H = {}^{A_{O1}}R^{O1}P_H + {}^AP_{O1} \end{cases} \quad (7)$$

其中:  ${}^{A_{O1}}R = \text{Rot}(y, \gamma)$ ;  ${}^{A_{O1}}P = (-L\sin\alpha\cos\gamma \ 0 \ L\sin\alpha\sin\gamma)^T$ ;  ${}^{A_{O1}}R$ 表示坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 相对于参考坐标系 $A-xyz$ 的旋转矩阵;  ${}^{A_{O1}}P$ 表示原点 $O_1$ 在坐标系 $A-xyz$ 中的坐标矢量。

根据9RR-12URU组合单元的几何关系可得其他节点的位置矢量为

$$\begin{aligned} {}^AR_B &= \text{Rot}(z, \gamma_z)\text{Rot}(y, \gamma_y)\text{Rot}(x, \gamma_x) = \\ &\begin{pmatrix} \cos\gamma_z\cos\gamma_y & \cos\gamma_z\sin\gamma_y\sin\gamma_x - \sin\gamma_z\cos\gamma_x & \cos\gamma_z\sin\gamma_y\cos\gamma_x + \sin\gamma_z\sin\gamma_x \\ \sin\gamma_z\cos\gamma_y & \sin\gamma_z\sin\gamma_y\sin\gamma_x + \cos\gamma_z\cos\gamma_x & \sin\gamma_z\sin\gamma_y\cos\gamma_x - \cos\gamma_z\sin\gamma_x \\ -\sin\gamma_y & \cos\gamma_y\sin\gamma_x & \cos\gamma_y\cos\gamma_x \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

其中:  $\gamma_x$ 、 $\gamma_y$ 和 $\gamma_z$ 分别表示绕 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的转角。

由式(11)和式(12)可得

$$\gamma_x = \arctan\left(\frac{r_{32}}{r_{33}}\right), \gamma_y = \arctan\left(-\frac{r_{31}}{\sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}}\right), \gamma_z = \arctan\left(\frac{r_{21}}{r_{11}}\right) \quad (13)$$

同理, 可得其他节点质心坐标系相对于坐标系 $A-xyz$ 的姿态变化角。

### 3.2 可展组合单元的运动学验证

基于Adams软件建立9RR-12URU可展组合单元

$$\begin{cases} {}^AP_C = \text{Rot}(z, -2\pi/3){}^AP_B \\ {}^AP_F = \text{Rot}(z, -2\pi/3){}^AP_E \\ {}^AP_J = \text{Rot}(z, -2\pi/3){}^AP_H \\ {}^AP_D = \text{Rot}(z, 2\pi/3){}^AP_B \\ {}^AP_G = \text{Rot}(z, 2\pi/3){}^AP_E \\ {}^AP_I = \text{Rot}(z, 2\pi/3){}^AP_H \end{cases} \quad (8)$$

对式(7)和式(8)关于时间求导即可得在机构收拢/展开过程中所有节点的速度大小。

记节点B和E的质心坐标系相对于坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 的初始旋转矩阵分别为 ${}^{O1}_{B0}R$ 和 ${}^{O1}_{E0}R$ , 则在机构运动过程中节点B和E的质心坐标系相对于参考坐标系 $A-xyz$ 的旋转变换矩阵为

$$\begin{cases} {}^ABR = {}^{A_{O1}}R^{O1}_{B0}R = {}^{A_{O1}}R\text{Rot}({}^{O1}S_4, \gamma - \gamma_0){}^{O1}_{B0}R \\ {}^AER = {}^{A_{O1}}R^{O1}_{E0}R = {}^{A_{O1}}R\text{Rot}({}^{O1}S_6, \gamma - \gamma_0){}^{O1}_{E0}R \end{cases} \quad (9)$$

其中:  ${}^{O1}S_4 = (\sin(2\beta) \ -\cos(2\beta) \ 0)$ , 表示转动副 $R_4$ 的轴线在局部坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 下的方向矢量;  ${}^{O1}S_6 = (\sin(2\beta) \ \cos(2\beta) \ 0)$ , 表示转动副 $R_6$ 的轴线在局部坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 下的方向矢量;  $\text{Rot}({}^{O1}S_4, \gamma - \gamma_0)$ 可由下式计算

$$\text{Rot}({}^{O1}S_4, \gamma') = \begin{pmatrix} k_x k_x \text{versy}' + c\gamma' & k_x k_y \text{versy}' & k_y s\gamma' \\ k_x k_y \text{versy}' & k_y k_y \text{versy}' + c\gamma' & -k_x s\gamma' \\ -k_y s\gamma' & k_x s\gamma' & c\gamma' \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中:  $\gamma' = \gamma - \gamma_0$ ;  $\text{versy}' = 1 - \cos\gamma'$ ;  $k_x = \sin(2\beta)$ ;  $k_y = -\cos(2\beta)$ 。同理, 可得 $\text{Rot}({}^{O1}S_6, \gamma - \gamma_0)$ 。

记式(9)中 ${}^ABR$ 为

$${}^ABR = {}^{A_{O1}}R^{O1}_B R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (11)$$

采用RPY角描述节点B的质心坐标系相对于参考坐标系 $A-xyz$ 的姿态, 则 ${}^ABR$ 也可由下式得到

的仿真模型, 如图5所示, 其中,  $L = 0.590 \text{ m}$ ,  $l_1 = 0.2504 \text{ m}$ ,  $l_2 = 0.250 \text{ m}$ 。初始位形下,  $\gamma_0 = -3.571^\circ$ ,  ${}^{O1}_{B0}R = \text{Rot}(x_1, -92.12^\circ)(y_1, 29.56^\circ)(z_1, -92.03^\circ)$ ,  ${}^{O1}_{E0}R = \text{Rot}(x_1, -87.09^\circ)(y_1, -24.42^\circ)(z_1, -91.59^\circ)$ 。选取腹杆AH、AI、AJ与节点H、I、J连接的转动副施加收拢驱动, 为保证所有节点向节点A同步移动, 令 $\alpha = \arcsin(0.490\cos(0.25^\circ t + 23.171^\circ))$ 。选取节点B、E、F、G与腹杆BH、EH、FJ、GI连接的转动副施加调姿驱动, 为保证所有节点同步调姿, 令 $\gamma = \arccos(0.267c\xi c\varsigma + \sqrt{(0.172c^2\xi - 0.718)(0.413c^2\varsigma - 1.392)})$ , 其



中 $\xi = 0.25^\circ t + 23.171^\circ$ ,  $\zeta = 0.15^\circ t + 21.574^\circ$ 。仿真200 s, 9RR-12URU可展组合单元机构达到完全收拢状态, 如图6所示。

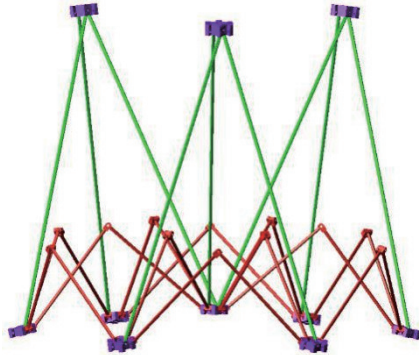


图5 可展组合单元的仿真模型

Fig. 5 Simulation model of the deployable composition element



图6 可展组合单元的收拢末态

Fig. 6 Folded configuration of the deployable composition element

选取节点B、F和I为例, 节点F质心位置的理论值和仿真值如图7所示, 节点I质心线速度的理论值和仿真值如图8所示, 描述节点B姿态变化的 $\gamma_x$ 、 $\gamma_y$ 、 $\gamma_z$ 角的理论值和仿真值如图9所示。

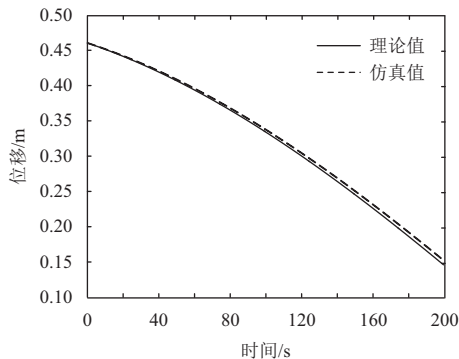


图7 节点F质心的位置变化曲线

Fig. 7 Position of the centroid of the node F

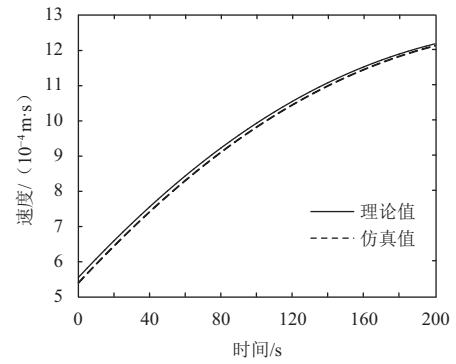
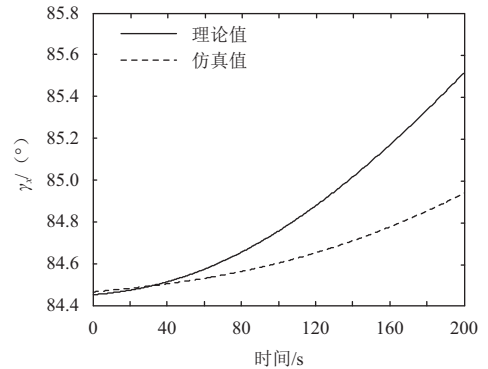
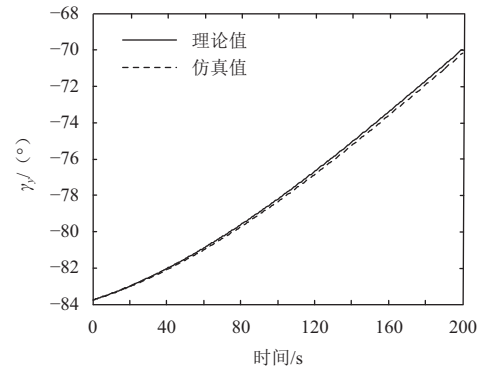


图8 节点I质心的速度变化曲线

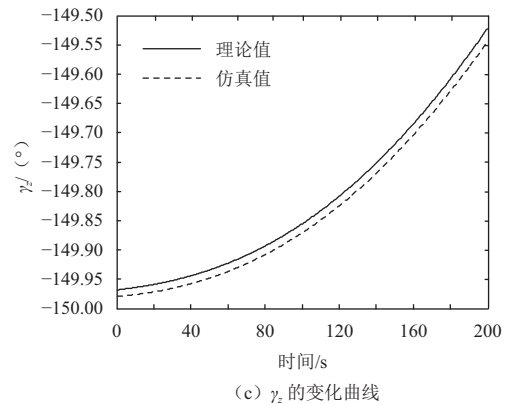
Fig. 8 Linear speed of the centroid of the node I



(a)  $\gamma_x$  的变化曲线



(b)  $\gamma_y$  的变化曲线



(c)  $\gamma_z$  的变化曲线

图9 描述节点B姿态变化的RPY角

Fig. 9 RPY angular which is used to describe the orientation of the node B

从图7~9可以看到各理论曲线与仿真曲线基本吻合,验证了前述对9RR-12URU组合可展单元运动学分析的正确性,其中,图9(a)中,在 $t=200\text{ s}$ ,组合单元机构已实现完全收拢,此时 $\gamma_x$ 的理论值为 $85.5133^\circ$ ,仿真值为 $84.9368^\circ$ ,则 $\gamma_x$ 的最大误差为 $0.679\%$ 。仿真结果表明该组合单元机构具有收拢和调姿两种自由度,可实现大折叠比。

## 4 结 论

本文提出了一种新型的多自由度可展组合单元机构9RR-12URU,其具有大折叠比,可用于构造抛物面或球面等其他曲面构架式可展天线的支撑机构;对9RR-12URU可展组合单元机构的自由度和运动学进行了分析,为后续结构设计与展开控制奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] 刘荣强,田大可,邓宗全. 空间可展开天线结构的研究现状与展望[J]. 机械设计,2010,27(9):1-10.  
Liu R Q, Tian D K, Deng Z Q. Research actuality and prospect of structure for space deployable antenna [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(9): 1-10.
- [2] Herr R W, Horner G C. Deployment tests of a 36-element tetrahedral truss module[C]//Large Space Systems Technology. [S. l.]: Large Space Systems Technology, 1980: 59-69.
- [3] Bush H G, Herstrom C L, Stein P A, et al. Synchronously deployable tetrahedral truss reflector[DB/OL]. [2017-05-17]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19850015516.pdf>.
- [4] Rogers C A, Stutzman W L. Large deployable antenna program. Phase 1: Technology assessment and mission architecture[DB/OL]. (1991) [2017-05-17]. [https://www.researchgate.net/publication/24317836\\_Large\\_deployable\\_antenna\\_program\\_Phase\\_1\\_Technology\\_assessment\\_and\\_mission\\_architecture](https://www.researchgate.net/publication/24317836_Large_deployable_antenna_program_Phase_1_Technology_assessment_and_mission_architecture).
- [5] 张京街,关富玲,胡其彪,等. 带弹簧节点的大型构架式展开天线结构的设计和研究[J]. 空间结构,2000,6(2):30-37.  
Zhang J J, Guan F L, Hu Q B, et al. Design and study of large deployable truss antenna with spring joints [J]. Spatial Structures, 2000, 6(2): 30-37.
- [6] Guan F L, Shou J J, Hou G Y, et al. Static analysis of synchronism deployable antenna [J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2006, 7(8): 1365-1371.
- [7] 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,2000,6(4):41-46.  
Chen X Y, Guan F L, Yue J R. A large deployable hexapod paraboloid antenna [J]. Spatial Structures, 2000, 6(4): 41-46.
- [8] 赵孟良,关富玲. 考虑摩擦的周边桁架式可展天线展开动力学分析[J]. 空间科学学报,2006,26(3):220-226.  
Zhao M L, Guan F L. Deployment dynamic analysis of circular truss deployable antenna with friction [J]. Chinese Journal of Space Science, 2006, 26(3): 220-226.
- [9] 刘荣强,田大可,邓宗全,等. 基于图论的可展开天线基本单元的构型综合[C]//中国空间机械工程技术高峰论坛. 北京:[s. n.],2011: 148-155.
- [10] Song X, Guo H, Liu R, et al. Structure synthesis and optimization of feed support mechanisms for a deployable parabolic antenna[J]. Journal of Aerospace Technology & Management, 2016, 8(1): 73-81.
- [11] 黄志荣,宋燕平,郑士昆,等. 偏馈式构架反射器构型设计与展开协调性分析[J]. 机械科学与技术,2016(11):1791-1796.  
Huang Z R, Song Y P, Zheng S K, et al. Configuration Design and Deployable Coordination Analysis of Offset-fed Truss Reflector [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016(11): 1791-1796.
- [12] 李洲洋,陈国定,王三民,等. 大型可展开卫星天线的展开过程仿真研究[J]. 机械设计与制造,2006(7):67-69.  
Li Z Y, Chen G D, Wang S M, et al. Simulation of deploy process of hoop truss deployable satellite antenna [J]. Machinery Design and Manufacture, 2006(7): 67-69.
- [13] 孙宏图,袁茹,王三民. 正方形可展机构的运动学与动力学特性研究[J]. 西北工业大学学报,2013,31(4):620-623.  
Sun H T, Yuan R, Wang S M. Kinematics and dynamics characteristics of square developable structure [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(4): 620-623.
- [14] 李端玲,张忠海,于振. 球面剪叉可展机构的运动特性分析[J]. 机械工程学报,2013,49(13):1-7.  
Li D L, Zhang Z H, Yu Z. Kinematic Characteristic Analysis of Spherical Scissors Deployable Mechanisms [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 1-7.
- [15] 杨毅,丁希仑. 四棱锥单元平板式可展开收拢机构的运动特性分析[J]. 航空学报,2010,31(6):1257-1265.  
Yang Y, Ding X L. Kinematic Analysis of a Plane Deployable Mechanism Assembled by Four Pyramid Cells [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(6): 1257-1265.
- [16] 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,2006:118-119.

作者简介:

**许允斗**(1985—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向:并联机器人机构学理论及其应用、锻造操作机技术、可展天线机构理论及其应用技术。

通信地址:河北省秦皇岛市燕山大学机械工程学院机电系(066004)

电话:(0335)8078704

E-mail: ydxu@ysu.edu.cn

**赵永生**(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:并联机器人理论及其应用、传感器技术、可展天线机构理论及其应用技术。本文通讯作者。

通信地址:河北省秦皇岛市燕山大学校长办公室(066004)

电话:(0335)8074581

E-mail: yszhao@ysu.edu.cn

## Mobility and Kinematic Analyses of a Novel Deployable Composite Element

XU Yundou<sup>1</sup>, LIU Wenlan<sup>1</sup>, CHEN Liangliang<sup>1</sup>, YAO Jiantao<sup>1</sup>, ZHAO Yongsheng<sup>1\*</sup>, ZHU Jialong<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

**Abstract:** A novel deployable mechanism 9RR-12URU with multiple degrees of freedom (DoFs) is proposed, which can be used as the minimum composite element of the supporting mechanism of large-diameter truss antennas. This deployable mechanism consists of three 3RR-3URU tetrahedral units. The DoF of a tetrahedral unit is analyzed based on the screw theory, and then the DoF of the 9RR-12URU mechanism is obtained by using the method of splitting rod groups. According to the geometric positions and coordinate transformation matrices of the nodes, the analytic expressions of the position and velocity of each node in the folding/deploying process of the mechanism are derived. Furthermore, the RPY angle is adopted to describe the orientation of each node with respect to the fixed node. The theoretical analyses on the DoF and kinematics of the 9RR-12URU mechanism are verified by Adams software. The results show that the mechanism has two kinds of DoFs: translational and rotational DoFs, which contribute to achieving the maximum folding ratio of the mechanism. The 9RR-12URU deployable mechanism has a simple structure and a large folding ratio, that can be applied to truss deployable reflectors with a bent surface.

**Key words:** degree of freedom; deployable mechanism; kinematics; screw theory

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]