DOI: 10.3901/JME.2019.12.009

基于四面体单元的新型可展机构自由度分析*

郭金伟¹ 许允斗^{1,2} 刘文兰¹ 姚建涛^{1,2} 赵永生^{1,2}

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要: 基于 3RR-3URU 四面体单元构造对称和非对称两种可展组合单元机构, 提出 3UU-3URU 四面体单元机构, 并基于此单元构造可展组合单元机构, 对这三种可展机构进行自由度分析。首先, 基于拆杆等效法分析 3RR-3URU 四面体单元的自由度数目及性质, 进一步将基本单元组合成对称组合单元和非对称组合单元两种形式, 定义这两种组合单元的结构及需要满足的几何约束条件, 并应用螺旋理论和 G-K 公式分析两种组合单元的自由度。其次, 针对基于 3RR-3URU 构成的组合单元无法组网成大型可展天线机构的问题, 提出 3UU-3URU 四面体单元及其组合单元机构, 根据 G-K 公式得到其自由度数。最后, 应用 ADAMS 仿真软件建立三种组合单元机构的仿真模型, 对三种组合单元进行运动仿真, 仿真结果验证其自由度分析的正确性。研究结果为四面体可展天线机构的设计与分析提供重要理论依据。

关键词: 四面体单元; 组合单元; 可展机构; 自由度分析; 螺旋理论

中图分类号: V243; TH112

Mobility Analysis of Novel Deployable Mechanism Based on Tetrahedral Element

GUO Jinwei¹ XU Yundou^{1,2} LIU Wenlan¹ YAO Jiantao^{1,2} ZHAO Yongsheng^{1,2}

(1. Parallel Robot and Mechatronic System Laboratory of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of Ministry of National Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: The DOF (degree of freedom) analysis is carried out for the symmetrical and asymmetrical composite unit mechanism based on the 3RR-3URU tetrahedral element and the deployable composite unit structure based on the 3UU-3URU tetrahedral basic element. Firstly, the DOF and properties of 3RR-3URU tetrahedral basic element are analyzed based on the link-demolishing and equivalent method. The basic elements are combined into symmetric 3RR-3URU composite unit and asymmetric 3RR-3URU composite unit. Then, the structures and the geometric constraints of the two composite units are analyzed, and the screw theory and G-K formula are applied to analyze the DOF of the two composite units. Secondly, in view of the problem that the composite unit based on 3RR-3URU cannot satisfy the large deployable antenna mechanism, the 3UU-3URU basic element and its composite unit are proposed, and the DOF of which are obtained according to G-K formula. Finally, the simulation models of three composite units are established, and the ADAMS simulation software is used to simulate the motion of the three combined units. The simulation results verify the correctness of the DOF analysis. The results provide an important theoretical basis for the design and analysis of tetrahedral deployable antenna mechanism.

Key words: tetrahedral element; composite unit; deployable structures; mobility analysis; screw theory

0 前言

近年来, 随着航天事业的高速发展, 对执行航

天任务的机构需求更加迫切, 并提出了越来越高的要求, 例如应用在卫星通信、遥感测量及空间探测等领域的空间可展开天线, 其支撑机构不仅要求具有口径大、刚度高、结构稳定、精度高等特点, 而且具有大的折叠比^[1-2]。因此, 探索具有诸多优点的空间可展开结构越来越多地受到各国航天机构与研究者的重视。与其他形式的大型可展开天线结构相

* 国家自然科学基金(51675458)、河北省自然科学基金重点(E2017203335)和河北省高等学校青年拔尖人才计划(BJ2017060)资助项目。20180707收到初稿, 20181126收到修改稿

比, 构架式可展开天线^[3]具有折叠比高、刚度大、展开特性好、型面精度高及热稳定性好等特点, 少数此类可展天线机构已得到在轨应用^[4-5], 具有良好的发展应用前景。

构架式可展机构由大量的可展开基本单元通过一定的连接方式组合而成, 大大增加机构的复杂性和分析研究的难度。针对该类型天线机构的构型综合、自由度分析与运动分析等方面的研究文献尚少。XU 等^[6]研究一种四面体可展结构的构架式天线, 提出构-电综合设计方法对该类型天线的性能进行分析。陈向阳等^[7-8]提出一种六棱柱可展单元应用于可展天线的结构设计。杨毅等^[9]设计单自由度四棱锥平板式可展单元并分析其收拢特性。DING 等^[10]提出一种新型的三棱柱可展机构, 在航空领域具有潜在应用。李端玲等^[11]研究一种基于剪叉机构的球面可展结构及其运动特性。此外, 具有少自由度、大折叠比的模块化结构^[12-14]也成为大型可展天线结构的重要实现方法。虽然现有文献提出多种基本单元构型, 但目前得到在轨应用的构架式可展天线机构大部分是基于四面体基本单元机构进行的设计研究^[15-16], 且上述文献提出的可展结构大部分为单自由度机构, 并不能实现理想的完全收拢状态, 即收拢后机构整体包络体积最小。

针对现有机构问题, 文献[17]提出了一种 3R-3URU 四面体可展单元机构, 应用在构架式可展天线上, 能够实现完全收拢, 但该文献并未系统地分析基本组合单元实现预期运动需要满足的约束条件, 这里拟分析基于此四面体单元机构构造的对称和非对称组合单元机构的自由度, 并研究其能否组网成大型可展天线机构。并针对其存在的问题, 提出能够组网成大型可展天线机构的新型基本单元及组合单元机构。

1 3RR-3URU 四面体单元自由度分析

3RR-3URU 可展单元机构由 4 个花盘、3 根腹杆、6 根同步连杆、9 个转动副(R)和 6 个虎克铰(U)组成, 如图 1 所示。其中, 4 个花盘的中心节点分别用 A、B、C、P 表示, U 副等效为两个轴线垂直相交的转动副表示, 例如 U_{11} 可表示为 $R_{11,1}$ 和 $R_{11,2}$ 。三根腹杆 L_1 、 L_2 、 L_3 长度相同, 其上端分别通过转动副 R_7 、 R_8 和 R_9 与顶花盘连接, 下端分别通过转动副 R_4 、 R_5 和 R_6 与 3 个底花盘连接, 3 个底花盘中心位于同一平面上; 底花盘 A 分别通过虎克铰 U_{11} 和 U_{32} 与连杆 L_{11} 和连杆 L_{32} 相连, 底花盘 B 分别通过虎克铰 U_{12} 和 U_{21} 与连杆 L_{12} 和连杆 L_{21} 相连,

底花盘 C 分别通过虎克铰 U_{31} 和 U_{22} 与连杆 L_{31} 和连杆 L_{22} 相连; 连杆 L_{11} 和连杆 L_{12} 等长且通过转动副 R_1 相连, 连杆 L_{21} 和连杆 L_{22} 等长且通过转动副 R_2 相连, 连杆 L_{31} 和连杆 L_{32} 等长且通过转动副 R_3 相连。

图 1 3RR-3URU 单元结构简图

记三根腹杆的轴线相交于点 H, 点 O 为三角形 ABC 的外心, 则图 1 中各转动副的方向矢量满足的几何关系为: $S_{R4} // S_{R7} \perp$ 平面 AOH, $S_{R5} // S_{R8} \perp$ 平面 BOH, $S_{R6} // S_{R9} \perp$ 平面 COH, $S_{R11,1} // S_{R1} // S_{R12,1} \perp$ 平面 $U_{11}R_1U_{12}$, $S_{R21,1} // S_{R2} // S_{R22,1} \perp$ 平面 $U_{21}R_2U_{22}$, $S_{R31,1} // S_{R3} // S_{R32,1} \perp$ 平面 $U_{31}R_3U_{32}$, 虎克铰 U_{i1} 和 $U_{i2}(i=1,2,3)$ 靠近连杆的转轴沿各自连杆轴线方向, 转动副 R_7 、 R_8 和 R_9 的轴线共面。不失一般性, S_{R1} 、 S_{R2} 、 S_{R3} 与底面 ABC 不平行。特别的, 在完全展开状态下, 连杆 L_{i1} 和 $L_{i2}(i=1,2,3)$ 共线, 即处于边界奇异位形, 本文分析该机构在一般位形下的自由度, 此时, 连杆 L_{i1} 和 L_{i2} 不共线。

3RR-3URU 四面体可展单元属于空间多环耦合机构, 文献[17]和文献[18]分别采用了等效法和拆杆组法对其自由度进行分析, 得到 3RR-3URU 基本单元具有 3 个自由度, 这里将采用拆杆等效法^[19]对其自由度进行分析。该机构的 4 个花盘为耦合构件, 连接任意 2 个花盘之间的支链为耦合支链, 可选择其中任意一条支链进行拆除, 选择拆除花盘 B 和 C 之间的 URU 支链进行分析, 拆除耦合支链后的机构如图 2 所示。为便于分析, 以花盘节点 A 为机架, 在其上建立参考坐标系 O_A-XYZ , 坐标原点 O_A 与 R_4 中心重合, X 轴平行于 BA 连线方向, Z 轴垂直于平面 ABC, Y 轴则根据右手螺旋定则确定。

接下来分析被拆除的耦合支链两端连接的耦合构件 B 和 C 相对于机架 A 的运动关系。根据螺旋理论^[20], 首先以 B 为动平台, 其通过两条分支与机架连接, 分支 1 为 $U_{12}R_1U_{11}$ 支链, 分支 2 为 $R_5R_8-R_7R_4U_{32}R_3U_{31}R_6R_9$, 其中 $R_7R_4U_{32}R_3U_{31}R_6R_9$ 为单闭

图2 拆杆后的单元结构简图

环运动链,在该闭环链中,支链 $U_{32}R_3U_{31}R_6R_9$ 为 7 自由度串联运动链,对花盘 P 不产生约束作用,因此图 2 所示机构可进一步等效为图 3 所示的并联机构。此时,动平台 B 通过支链 $U_{12}R_1U_{11}$ 和支链 $R_5R_8R_7R_4$ 与机架 A 连接。

图3 图2所示机构的等效机构

根据螺旋理论,支链 $U_{12}R_1U_{11}$ 和支链 $R_5R_8R_7R_4$ 的运动螺旋系在坐标系 O_A-XYZ 下分别表示为

$$\begin{cases} {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R11,1} = (0 \quad Z_1 \quad -Y_1 \quad 0 \quad X_{11}Y_1 \quad X_{11}Z_1)^T / l_2 \\ {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R11,2} = \left(\frac{X_{12}-X_{11}}{2} \quad Y_1 \quad Z_1 \quad 0 \quad -X_{11}Z_1 \quad X_{11}Y_1 \right)^T / l_1 \\ {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R1} = (0 \quad Z_1 \quad -Y_1 \quad -(Y_1^2+Z_1^2) \quad X_1Y_1 \quad X_1Z_1)^T / l_2 \\ {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R12,1} = (0 \quad Z_1 \quad -Y_1 \quad 0 \quad X_{12}Y_1 \quad X_{12}Z_1)^T / l_2 \\ {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R12,2} = \left(\frac{X_{11}-X_{12}}{2} \quad Y_1 \quad Z_1 \quad 0 \quad -X_{12}Z_1 \quad X_{12}Y_1 \right)^T / l_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R4} = (a_4 \quad b_4 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \\ {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R7} = (a_4 \quad b_4 \quad 0 \quad -b_4Z \quad a_4Z \quad b_4X_7 - a_4Y_7)^T \\ {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R8} = (a_5 \quad b_5 \quad 0 \quad -b_5Z \quad a_5Z \quad b_5X_8 - a_5Y_8)^T \\ {}^{OA}\hat{\mathbf{S}}_{R5} = (a_5 \quad b_5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \end{cases} \quad (2)$$

式中, l_1 和 l_2 分别表示腹杆 L_1 和 L_2 长度, $l_1 = \sqrt{(X_{12}-X_{11})^2 + 4Y_1^2 + 4Z_1^2} / 2$, $l_2 = \sqrt{Y_1^2 + Z_1^2}$; $(X_{11}, 0, 0)$ 、 (X_1, Y_1, Z_1) 和 $(X_{12}, 0, 0)$ 分别表示运动副 U_{11} 、

R_1 和 U_{12} 的中心在 O_A-XYZ 中的坐标; $(a_4 \quad b_4 \quad 0)$ 和 $(a_5 \quad b_5 \quad 0)$ 分别表示转动副 $R_4(R_7)$ 和 $R_5(R_8)$ 轴线的方向矢量; (X_7, Y_7, Z_7) 和 (X_8, Y_8, Z_8) 分别表示转动副 R_7 和 R_8 的中心在 O_A-XYZ 中的坐标。

分别对式(1)和式(2)求反螺旋得到花盘 B 受到的约束螺旋表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{S}}_{B,1}^r = (0 \quad Z_1 \quad -Y_1 \quad -(Y_1^2+Z_1^2) \quad X_1Y_1 \quad X_1Z_1)^T / l_2 \\ \hat{\mathbf{S}}_{B,2}^r = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T \\ \hat{\mathbf{S}}_{B,3}^r = \left(0 \quad b \quad Z \quad \frac{X_1Zb_5}{a_5} \quad -X_1Z \quad X_1b \right)^T / \sqrt{b^2 + Z^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $b = Y_8 - X_8b_5 / a_5$ 。

再对式(3)求反螺旋可得到花盘 B 的运动螺旋表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{S}}_{B,1}^m = \left(1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{Y_1^2+Z_1^2-X_1Y_1Zb_5/a_5}{bY_1+ZZ_1} \quad -\frac{Y_1^2+Z_1^2-s_1Z_1}{Y_1} \right)^T \\ \hat{\mathbf{S}}_{B,2}^m = \left(0 \quad 1 \quad 0 \quad -\frac{Y_1^2+Z_1^2-X_1Y_1Zb_5/a_5}{bY_1+ZZ_1} \quad 0 \quad X_1 \right)^T \\ \hat{\mathbf{S}}_{B,3}^m = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0)^T \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4),花盘 B 相对于机架 A 具有与 X 轴和 Y 轴平行的两个转动自由度、一个沿 X 轴的移动自由度。同理,花盘 C 相对于机架 A 也具有与 X 轴和 Y 轴平行的两个转动自由度、一个沿 CA 连线方向上的移动自由度。因此,得到了拆杆后单元机构的等效机构,并将拆除的耦合支链复原,如图 4 所示。

图4 3RR-3URU 单元机构的等效机构

图 4 中, R_X 和 R_Y 分别表示 $B(C)$ 相对于 A 绕 X 和 Y 轴的 2 个转动自由度, P_{BA} 和 P_{CA} 分别表示 B 和 C 相对于 A 移动自由度。支链 $U_{21}R_2U_{22}$ 提供了一个沿 R_2 轴线方向上的约束力,限制了 B 和 C 之间沿该方向的相对移动,使 B 和 C 相对于 A 的移动自由度相关,而 4 个转动自由度中只有 2 个 R_X 和 R_Y 是相互独立的,因此,该 3RR-3URU 机构只有 3 个自由度,即 B 和 C 相对于 A 既具有同步移动自由度,

也具有同步转动自由度, 能够实现姿态改变。

2 基于 3RR-3URU 四面体单元的組合单元自由度分析

基于 3RR-3URU 四面体基本单元, 提出以下对称和非对称两种組合单元形式, 系统地分析其自由度数目和性质, 并研究其能否组网形成大型可展天线机构。

2.1 基于 3RR-3URU 单元的对称組合单元机构自由度分析

由三个 3RR-3URU 基本单元组成的对称組合单元机构如图 5 所示, 四面体 $H-ABE$ 、 $I-ADG$ 和 $J-ACF$ 共用中心花盘节点 A , 两两之间通过 URU 支链连接, 该机构满足的几何关系为 $AB=AC=AD=AE=AF=AG$, $BE=EC=CF=FD=DG=GB$, $IH=HJ=JI$, 节点 $BECFDG$ 处于同一平面且与节点 A 不共面, 底面各花盘所在平面可拟合形成对称球面反射面。为增加机构的整体刚度, 在顶部节点 HIJ 之间添加 3 条 URU 支链。

图 5 基于 3RR-3URU 单元的对称組合单元机构简图

仅考虑底面花盘之间的连接时, 整体机构可等效为图 6 所示机构。根据第 1 节对基本单元的自由度分析可知, 3RR-3URU 基本单元具有 3 个自由度, 当 3 个基本单元通过共用花盘节点 A 连接时, 以 A 为机架, 则 3 个基本单元运动独立, 整个机构自由度为 9 个。当添加支链 EC 、 FD 和 GB 时, 每条 URU 支链提供一个沿中间转动副轴线方向的约束力, 限制了其两端构件沿该方向的移动, 即 E 和 C 的移动相关, F 和 D 的移动相关, G 和 B 的移动相关, 且在 3 个基本单元机构中, B 和 E 的移动相关, C 和 F 的移动相关, D 和 G 的移动相关, 因此, 添加的 3 条 URU 支链其中任意一条提供了一个冗余约束, 即去掉该支链, 其两端构件自由度并不受影响。在

顶部节点 HIJ 之间添加 3 条 URU 支链后, 其通过 3 根腹杆与花盘 A 构成一个倒置的四面体单元, 其满足的几何关系和其他基本单元完全一致, 因此, 倒置四面体单元的运动随着其他 3 个基本单元的运动而随动完成, 上层的 3 条 URU 支链只起增加机构刚度的作用, 并不影响机构的整体自由度。

图 6 基于 3RR-3URU 单元的对称組合单元等效机构简图

在基于 3RR-3URU 单元的对称組合单元可展机构中, 存在 4 个冗余约束, 不存在公共约束和局部自由度, 根据修正的 G-K 公式^[21-22]可计算该机构的自由度数为

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \xi = 6 \times (49 - 63 - 1) + 93 + 4 = 7 \quad (5)$$

式中, M 为机构的自由度数; d 为机构的阶数, 且 $d=6-\lambda$, λ 表示机构的公共约束数; n 为包含机架在内的构件数; g 为机构所含运动副个数; f_i 表示第 i 个运动副具有的单自由度数; v 表示冗余约束数; ξ 表示局部自由度数。

综上, 基于 3RR-3URU 单元的对称組合单元可展机构具有 7 个自由度, 反射面花盘既具有向机架 A 的移动自由度实现收拢运动, 还具有相对机架 A 的转动自由度, 实现调姿运动。最终实现整体机构的完全收拢。然而, 该对称組合单元机构需要满足对称的几何条件时, 才能实现花盘姿态的调整。因此, 在组网形成大型曲面可展机构时会存在一定局限性, 不能形成任意大型曲面可展天线支撑机构。

2.2 基于 3RR-3URU 单元的非对称組合单元机构自由度分析

与基于 3RR-3URU 单元的对称組合单元相比, 基于 3RR-3URU 单元的非对称組合单元机构同样可表示为图 7 所示, 其满足的几何关系为 AB 、 AC 、 AD 、 AE 、 AF 、 AG 不完全相等, BE 、 EC 、 CF 、 FD 、 DG 、 GB 不完全相等, IH 、 HJ 、 JI 不完全相等, 即相邻两花盘中心的距离不存在特殊几何关系。当在

三个基本单元底面花盘之间添加 URU 支链时, 如图 8 所示。整个组合单元机构可等效为一个四面体单元机构 $A-LMN$, L 、 M 、 N 分别为 EC 和 BG 、 EC 和 DF 、 BG 和 DF 所在直线的交点。 $R'_1 // R_1$, $R'_2 // R_2$, $R'_3 // R_3$ 。

图 7 基于 3RR-3URU 单元的非对称组合单元机构简图

图 8 基本单元之间添加 URU 支链

根据对 3RR-3URU 基本单元的自由度分析, 3RR-3URU 机构实现花盘的同步调姿运动需要满足的几何约束条件为各节点与固定平台连接的转动副轴线垂直于该节点与三个花盘节点形成的三角形外接圆中心连线。而在图 8 所示三角形 LMN 中, 并不满足该几何约束条件。又根据螺旋理论, 以轴线 R'_1 为机架, EC 和 BG 之间添加的 URU 约束支链分别提供一个沿中间转动副轴线的约束力, 限制了 L 绕 R'_1 转动。因此, 各花盘之间不能实现同步转动, 只存在同步移动自由度。在基于 3RR-3URU 单元的非对称组合单元机构中, 不存在公共约束和冗余约束, 根据 G-K 公式可计算该机构的自由度数为

$$M = 6(n-1) - \sum_{i=1}^g u_i = 6 \times (49-1) - 282 = 6 \quad (6)$$

式中, n 为包含机架在内的构件数; g 为机构所含运动副个数; u_i 表示第 i 个运动副引入的约束数。

综上, 基于 3RR-3URU 单元的非对称组合单元可展机构具有 6 个自由度, 只能实现机构的收拢运动。若组网成大型曲面可展天线机构, 当反射面花盘收拢到位, 背面花盘间距仍较大, 并不能实现完全收拢。

3 基于 3UU-3URU 四面体单元的组合单元自由度分析

根据上述分析, 基于多个组合单元机构组网成大型曲面可展机构时, 基于 3RR-3URU 单元的对称和非对称组合单元机构均不能满足要求, 因此, 提出了 3UU-3URU 四面体基本单元及其组合单元机构。与 3RR-3URU 单元机构相比, 3UU-3URU 单元机构的腹杆两端通过 U 副与花盘相连, 如图 9 所示, 其中, U 副用两个轴线相交的 R 副表示。 U_1 、 U_3 和 U_5 副中靠近顶花盘的三根轴线分别垂直于平面 AOH 、 BOH 、和 COH , 另三根轴线分别和对应腹杆轴线和已有轴线均垂直; U_2 副中靠近底花盘的轴线和 U_1 中靠近顶花盘的轴线平行, 另一根转轴沿腹杆轴线方向; U_4 副中靠近底花盘的轴线和 U_3 中靠近顶花盘的轴线平行, 另一根转轴沿腹杆轴线方向; U_6 副中靠近底花盘的轴线和 U_5 中靠近顶花盘的轴线平行, 另一根转轴沿腹杆轴线方向。

图 9 3UU-3URU 四面体单元机构简图

由于空间三条相交于一点的轴线可等效为一个球副(S), 根据 3UU-3URU 可展单元机构中轴线的位置关系, 虎克铰 U_{i1} 和 U_{i2} 靠近连杆的转轴以及转动副 R_i 可由一个 S 副代替; 连接腹杆和底花盘的 U 副与顶花盘上 U 副的其中一条轴线可由一个 S 副代替, 得到 3UU-3URU 可展单元机构的等效机构 3RS-3RSR, 如图 10 所示。

图 10 3UU-3URU 基本可展单元的等效机构

在 3UU-3URU 基本可展单元机构中不存在公共约束和局部自由度, 根据 G-K 公式可得 3UU-3URU 单元机构的自由度为

$$M = 6(n-1) - \sum_{i=1}^g u_i = 6 \times (13-1) - 63 = 9 \quad (7)$$

式(7)表明 3UU-3URU 单元机构在非边界奇异位形具有 9 个自由度, 以顶花盘 P 为机架时, 花盘 A 、 B 和 C 既能够实现各自分别向中心 O 移动, 还各自具有转动自由度, 能够实现姿态的调整。

由三个 3UU-3URU 基本单元形成的组合单元机构如图 11 所示。三个基本单元共用一个中心花盘, 两两之间通过 URU 支链连接, 三个顶花盘之间同样选用 URU 支链连接。根据基本单元自由度分析, 每个花盘的移动和转动自由度均不相关, 而组合单元中每条 URU 支链提供一个约束力, 限制了相邻两个花盘的两个移动自由度的独立, 所以该基本组合单元的自由度为 $3 \times 9 - 6 = 21$ 。

图 11 基于 3UU-3URU 单元的组合单元机构

由于基于 3UU-3URU 单元的组合单元中每个花盘的运动相互独立, 为非过约束机构, 可以将多个组合单元通过共用花盘组合成大型的可展机构, 如图 12 所示为 7 个基于 3UU-3URU 单元的组合单元构成的大型曲面可展机构。

图 12 7 个基于 3UU-3URU 单元的组合单元组网成的大型可展机构

综上, 基于 3UU-3URU 单元的组合单元能够实现收拢与调姿运动, 且多个组合单元可组网成任意曲面、任意口径的大型可展天线机构。

4 仿真验证

为了进一步验证对三种基本组合单元自由度分析的正确性, 分别建立三种基本组合单元机构在非边界奇异位形(非完全展开状态)的仿真模型, 应用 ADAMS 动力学仿真软件进行运动仿真分析。根据上述自由度分析, 基于 3RR-3URU 单元的对称和非对称组合单元机构及基于 3UU-3URU 单元的组合单元机构分别具有的自由度数目为 7、6、21, 因此, 在仿真模型中添加的驱动数目应至少等于自由度数, 选取 ZXZ 欧拉角表示各花盘相对中心花盘的姿态。

基于 3RR-3URU 单元的对称组合单元仿真模型及添加驱动的方式如图 13 所示。以图 5 中花盘 B 、 C 、 D 为例, 其相对于 A 的距离变化如图 14 所示。以花盘 B 为例, 其相对于 A 的欧拉角变化如图 15 所示。

图 13 基于 3RR-3URU 单元的对称组合单元仿真模型与收

图14 图5中花盘B、C、D相对于A的距离

(a) 欧拉角- α (b) 欧拉角- β (c) 欧拉角- γ

图15 图5中花盘B相对于A的欧拉角

根据图13~15, 机构在0~34 s内实现同步收拢运动, 花盘姿态不变, 花盘间距离变小。在34~49 s内花盘实现调姿运动。在完全收拢末态时各杆件基本折叠收拢到位, 下层花盘姿态调平, 上层花盘也紧密靠拢并姿态调平, 整体为最小包络体积。验证了基于3RR-3URU单元的对称组合单元机构具有7个自由度, 能够实现收拢与调姿运动。

基于3RR-3URU单元的非对称组合单元仿真模型及添加驱动的方式如图16所示。以图7中花盘B、C、D为例, 其相对于A的距离变化如图17所示。以花盘B为例, 其相对于A的欧拉角变化如图18所示。

图16 基于3RR-3URU单元的非对称组合单元仿真模型与收拢末态

图17 图7中花盘B、C、D相对于A的距离

图18 图7中花盘B相对于A的欧拉角

根据图16~18, 机构在0~82 s内实现同步收拢运动, 花盘姿态不变, 花盘间距离变小。在收拢末态腹杆和上层花盘均未实现完全收拢。

基于3UU-3URU单元的对称组合单元仿真模型及添加驱动的方式如图19所示。以图11中花盘B、D、F为例, 其相对于A的距离变化如图20所示。以花盘B为例, 其相对于A的欧拉角变化如图21所示。由7个基于3UU-3URU单元的组合单元组成的大型可展机构如图22所示。

图 19 基于 3UU-3URU 单元的组合单元
仿真模型与收拢末态

图 20 图 11 中花盘 B、D、F 相对于 A 的距离

根据图 19~22, 机构在 0~34 s 内实现收拢运动, 花盘姿态不变。在 34~49 s 内花盘实现调姿运动, 49 s 末实现完全收拢。机构的收拢末态与图 13 所示机构收拢末态基本一致, 与图 16 所示机构相比, 实现了整体机构的完全收拢。

图 21 图 11 中花盘 B 相对于 A 的欧拉角

(a) 半收拢状态

(b) 收拢末态

(c) 调姿末态

图 22 7 个基于 3UU-3URU 单元的组合单元
组成的大型可展机构

规定机构在完全展开状态和完全收拢末态所占空间体积的比值为机构的收拢率, 则从完全展开状态到图 16 所示的仅实现收拢运动的收拢末态, 经计算该机构的收拢率为 17.1; 而从完全展开状态到图 13 或图 19 所示的完全收拢末态, 经计算该机构的收拢率为 43.9。因此, 基于 3UU-3URU 单元的组合单元机构不仅具有较大的收拢率, 且多个组合单元机构可组网成任意曲面、任意口径的大型可展机构, 并且能够实现收拢与调姿运动。

5 结论

(1) 基于 3RR-3URU 四面体基本单元, 提出了对称和非对称两种组合单元机构; 提出了 3UU-3URU 四面体基本单元及其组合单元机构。

(2) 应用螺旋理论和 G-K 公式得到了三种组合单元机构的自由度数分别为 7、6 和 21, 并得到前两种组合单元机构不能组网形成大型曲面可展天线机构, 而第三种组合单元机构能实现大型曲面可展天线机构的组网。

(3) 仿真分析验证了基于 3RR-3URU 单元的对称、非对称组合单元机构以及基于 3UU-3URU 单元的组合单元机构自由度分析的正确性。在组网形成大型可展曲面机构时, 基于 3UU-3URU 单元的组合单元机构既能实现收拢与调姿运动, 且具有较大的收拢率, 具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] MURPHEY T W. Historical perspectives on the development of deployable reflectors[C]// 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Palm Springs, 2009: 146-151.
- [2] PUIG L, BARTON A, RANDO N. A review on large deployable structures for astrophysics missions[J]. Acta Astronaut, 2010, 67(1-2): 12-26.
- [3] ZIMIN V N, KOLOSKOV I M, MESHKOVSKY V E, et al. Investigation of natural oscillations for self-deployable truss space antennae[C]// Tenth International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements, CMEM X, Alicante, Spain, 2001: 497-504.
- [4] HEDGEPEETH J M. Accuracy potential for large space antenna reflectors with passive structure[J]. Journal of Spacecraft, 1982, 19(3): 211-217.
- [5] 张润宁, 姜秀鹏. 环境一号 C 卫星系统总体设计及其在轨验证[J]. 雷达学报, 2014, 3(3): 249-255.
ZHANG Running, JIANG Xiupeng. System design and in-orbit verification of the HJ-1-C SAR satellite[J]. Journal of Radars, 2014, 3(3): 249-255.
- [6] XU Y, GUAN F L. Structure-electronic synthesis design of deployable truss antenna[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 26(1): 259-267.
- [7] 陈向阳, 关富玲. 六棱柱单元可展天线结构设计[J]. 空间科学学报, 2001, 21(1): 68-72.
CHEN Xiangyang, GUAN Fuling. A large deployable hexapod paraboloid antenna[J]. Chinese Journal of Space Science, 2001, 21(1): 68-72.
- [8] 陈向阳, 关富玲. 六棱柱单元可展抛物面天线结构设计[J]. 宇航学报, 2001, 22(1): 75-78.
CHEN Xiangyang, GUAN Fuling. A large deployable hexapod paraboloid antenna[J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(1): 75-78.
- [9] 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 Yi, DING Xilun. Kinematic analysis of a plane deployable mechanism assembled by four pyramid cells[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2010, 31(6): 1257-1265.
- [10] DING X L, YANG Y, DAI J S. Design and kinematic analysis of a novel prism deployable mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013(63): 35-49.
- [11] 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 Duanling, ZHANG Zhonghai, YU Zhen. Kinematic characteristic analysis of spherical scissors deployable mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 1-7.
- [12] CHU Z R, DENG Z Q, QI X Z, et al. Modeling and analysis of a large deployable antenna structure[J]. Acta Astronautica, 2014, 95(1): 51-60.
- [13] WANG Y, LIU R Q, YANG H, et al. Design and deployment analysis of modular deployable structure for large antennas[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 52(4): 1101-1111.
- [14] 田大可. 模块化空间可展开天线支撑桁架设计与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
TIAN Dake. Design and experimental research on truss structure for modular space deployable antenna[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [15] CHEBOTAREV A S, PANTELEEV V A, FEYZULLAN M. Truss-type deployable reflector antenna systems for synthetic aperture radar mounted on a small spacecraft[C]// 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2014. Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2014: 521-522.
- [16] FANG H, SHOOK L, LIN J, et al. A large and high radio frequency deployable reflector[C]// 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. April 23-26, 2012, Honolulu, Hawaii. United States: AIAA, 2012: 175-183.
- [17] 刘文兰, 许允斗, 姚建涛, 等. 3R-3URU 可展单元机构及其在构架式可展天线中的应用[J]. 航空学报, 2017, 38(11): 313-323.

- LIU Wenlan, XU Yundou, YAO Jiantao, et al. Research on the deployable unit 3R-3URU and its application in the deployable truss antenna[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2017, 38(11): 313-323.
- [18] 许允斗, 刘玉兰, 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.
- XU Yundou, LIU Wenlan, CHEN Liangliang, et al. Mobility and kinematic analyses of a novel deployable composite element[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(4): 333-339.
- [19] 许允斗, 刘玉兰, 陈亮亮, 等. 构架式可展天线机构自由度分析——拆杆等效法[J]. *航空学报*, 2017, 38(9): 321-332.
- XU Yundou, LIU Wenlan, CHEN Liangliang, et al. Mobility analysis of a deployable truss-antenna mechanism: Method based on link-demolishing and equivalent idea[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2017, 38(9): 321-332.
- [20] ARROYAVE-TOBON S, TEISSANDIER D, DELOS V. Applying screw theory for summing sets of constraints in geometric tolerancing[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017(112): 255-271.
- [21] 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, 2014.
- HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. *Advanced spatial mechanism*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [22] 刘靖芳, 黄晓欧, 余跃庆, 等. 多环耦合机构末端件自由度计算的等效法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(23): 13-19.
- LIU Jingfang, HUANG Xiaou, YU Yueqing, et al. Equivalent method of output mobility calculation for a novel multi-loop coupled mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(23): 13-19.
-
- 作者简介: 郭金伟, 女, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为并联机构学理论及空间可展天线技术。
E-mail: 1473733099@qq.com
- 赵永生(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机器人理论及其应用、传感器技术、空间可展天线技术。
E-mail: yszhao@ysu.edu.cn