•可展开结构及其在航天工程中的应用•

DOI:10.12454/j.jsuese.202401013

本刊网刊

星载仿生树状可展开天线机构运动学建模与分析

田大可[1,2],张逸凡[1,2],李　明[2,3],周　鑫[2,3],刘荣强[4],金　路[5*],林　浩[1,2],邵海麒[1,2]

(1.沈阳建筑大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110168;2.宇航空间机构全国重点实验室,上海 201108;3.上海宇航系统工程研究所,上海 201108;4.哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;5.沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘　要:星载可展开天线是空间技术快速发展产生的一种新型空间结构。针对可展开天线大口径、高精度、轻量化的迫切发展需求,提出一种仿生树状可展开天线机构新构型,并对其运动学特性开展研究。首先,开展了树木分枝结构仿生机理解析,提出可展开天线结构设计准则,进行了构型总体方案设计,并通过研制初代样机,验证了其展开原理的可行性;其次,采用闭环矢量法等理论,建立了可展开天线关键节点的空间几何模型和多级多闭环式肋单元及天线整体的运动学参数化模型;再次,通过分析不同初始条件下分枝外杆运动特性,建立了“外旋平行,内旋归零”的驱动策略模型;最后,采用MATLAB、ADAMS数值仿真软件对天线运动学模型和分枝外杆驱动策略模型进行了验证及分析。仿真结果表明:所提出的机构能够顺利由收拢态运动至完全展开态,且运动过程流畅无干涉,验证了机构原理和设计方案的正确性,以及分枝外杆驱动策略的可行性,为后续该型天线的工程应用提供了理论基础。

关键词:空间可展开天线;结构设计;运动学分析;空间几何建模;数值仿真分析

中图分类号:V443　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0035-13

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》、党的二十大系列会议精神、《2021中国的航天》白皮书等国家级顶层规划强调,推动空间科学、空间技术、空间应用的全面发展是建设航天强国的重要内容[1]。星载可展开天线作为空间技术的典型代表之一,是随着航天科技的快速发展而产生的一种新型空间结构[2]。此结构能以较小的姿态折叠收拢于火箭整流罩内,到达太空预定轨道后展开成大型的空间结构[3],在移动通信、卫星导航、对地遥感和深空探测等诸多重大航天工程中扮演着重要角色,是国际宇航界研究的前沿与热点之一[4]。

但可展开天线大型化的发展存在以下问题,一方面,天线与火箭整流罩内部有限搭载空间之间不匹配的问题逐渐突出[5];另一方面,大型化设计时,现有肋式、环形桁架式、构架式等天线构型在结构轻量化、形面精度等方面存在一定的局限性[6]。例如:中国鹊桥中继卫星上展开口径近5 m的肋式天线,该天线具有结构质量轻、刚度高等优点,但由于在收拢高度方向上不具备较高的收纳率[7],故不适合开展大型化设计;美国Thuraya卫星上展开口径为12.25 m的Astromesh环形桁架式天线,收拢时直径和高度分别为1.3 m、3.8 m,结构质量为55 kg,该天线的优点是支撑结构重量小、收纳率高,但由于天线中心柔性面积大,缺乏刚性支撑,故形面精度不易控制[8];俄罗斯Kondor–E卫星上的构架式天线由若干个四面体基本单元组装,天线展开后口径达6.0 m,收拢口径约0.5 m,该天线优点是刚度大、形面精度高,但结构复杂、质量大[9]。所以,亟需开展兼顾大口径、轻量化、高精度等多项指标需求的可展开天线机构创新设计。

对于可展开机构而言,开展运动学特性分析是验证机构创新设计可行性的重要手段,也是进行机构动力学特性分析前的关键环节。目前在可展开机构运动学特性分析理论研究方面,Xu等[10]基于螺旋理论,对单自由度四面体基本单元和由该单元构成的构架式

收稿日期:2024 – 12 – 04　　**修回日期:**2025 – 06 – 19　　**网络出版日期:**2025 – 11 – 24

基金项目:宇航空间机构全国重点实验室开放课题;国家自然科学基金项目(U2341237);辽宁省教育厅基本科研项目(LJ222410153096;JYTMS20231592)

作者简介:田大可(1981—),男,教授,博士. 研究方向:宇航空间折展机构;空天变体飞行器;变胞折纸机构. E-mail:tiandake@sjzu.edu.cn

* **通信作者:**金　路,教授,E-mail:jinlu@sjzu.edu.cn

天线分别进行了自由度、运动特性分析。杨慧等[11]采用位移坐标分析法，分别建立抛物柱面天线折展机构横向、纵向上力和位移的映射关系，仿真结果验证了机构展开轨迹的正确性。Sun 等[12]先将双层环形天线的六面体基本单元分成内、外两个平面基本子单元，再采用几何法建立各关键点的空间几何模型，进而得到各点运动轨迹。Han 等[13]采用螺旋理论，对由五面体为基本单元构成的单自由度环形天线建立关键角的角速度、角加速度运动学模型。Zhang 等[14]围绕对称布置的 Miura–Ori 厚板折纸构型，根据空间几何关系，对其 Bennett 连杆展收机构进行运动学建模与验证。胡飞等[15]采用螺旋理论对一种四面体构架式可展开机构进行了自由度分析及奇异性分析。姚鹏飞等[16]将等腰梯形 Bricard 机构等效为两支链并联机构，根据指数积公式，建立运动学分析模型，从而得到各关节处运动轨迹。范小东等[17]通过闭环矢量法，将平面单自由度的肋单元机构拆分为多个闭环回路，建立了位移、速度、加速度模型。

综上所述，目前可展开天线运动学建模主要采用几何法（适用平面机构）、闭环矢量法（适用平面机构）、位移坐标分析法（适用空间机构）、螺旋理论（适用空间机构）等方法。国内外学者对于空间特征较强的可展开天线机构，一般采用几何法、螺旋理论等直接进行运动学建模与分析，而对可转化为平面机构的空间可展开天线运动学建模研究相对较少。同时，虽有少数学者基于几何法和闭环矢量法，对平面可展开天线机构进行拆分，从而开展运动特性研究工作，但机构中闭环回路个数较少，且缺乏对空间多级折展单元串联时机构运动学特性的深入研究。

为此，本文从树木分枝几何形态学的角度，提出一种 30 m 级大口径星载肋式可展开天线构型方案。首先，提出基于树木分枝结构特征的仿生设计准则，并对可展开天线新构型进行总体结构设计；其次，基于坐标变换等理论，建立了多级折展单元串联、多个闭环回路嵌套的肋单元及天线整体运动学模型，并通过分析分枝外杆的运动特性建立了相应的驱动策略模型；最后，利用 MATLAB、ADAMS 等数值仿真软件对所建立的天线运动学模型和分枝外杆驱动策略模型进行验证与分析。

1 可展开天线机构设计

1.1 树木分枝结构仿生机理解析

在历经自然界“物竞天择，适者生存”的进化和淘汰后，树木以其千变万化的空间分枝结构成功抵御各种外界载荷，形成了别具特色的结构形态。在空间中，树木“多级分枝、三维伸展”的分枝结构形态特征使其由单点承载演变为多点承载，即通过扩大载荷作用范围，使承载更加均匀，从而实现以较小的枝干支撑较大空间[18]，其几何形态解析如图 1 所示。图 1 中，D 为天线外接圆直径。这一结构原理在建筑领域已应用于实际工程中，具有传力路径短、承载能力强、支撑范围广等诸多优点，实现形与力的协调统一[19–20]。

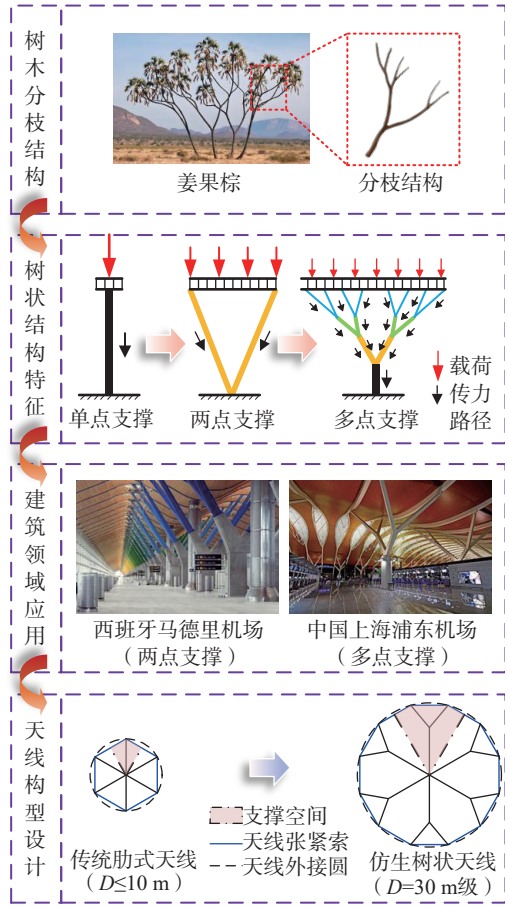


图 1 树木分枝结构几何形态解析

Fig. 1 Analysis of the geometric pattern for tree branching structure

由图 1 可知，与传统肋式天线相比，该结构形态与大口径可展开天线的设计需求具有更高的契合度。对于传统肋式天线而言，由于自身肋单元可看作单点承载，其有效支撑范围较为有限；此外，由于传统肋式天线收拢后的高度较高，不适用于展开口径 10 m 以上的空间可展开天线[21]。为此，结合多折肋式天线设计[22]，以树木分枝为仿生对象，通过对其几何结构形态进行解析，总结适用于可展开天线创新机构的设计准则，提出一种展开口径为 30 m 级的仿生树状可展开天线新构型。

对于树木而言，分枝的夹角、级数和长度是决定其支撑空间大小的关键因素。通常，树木按高度可分为小乔木（6～10 m）、中乔木（11～20 m）、大乔木（21～

30 m）及伟乔木（31 m以上）[23]。考虑到文中天线新构型所涉及的展开口径为30 m级（半径为15 m级），故选取国内外较为常见的中乔木为仿生对象，其分枝角度分布范围如图2所示。通过对图2中的分枝角度分析发现：其分枝夹角多集中分布在40°～80°（图2中的虚线框内范围），且随着分枝级数增大而逐级递减。

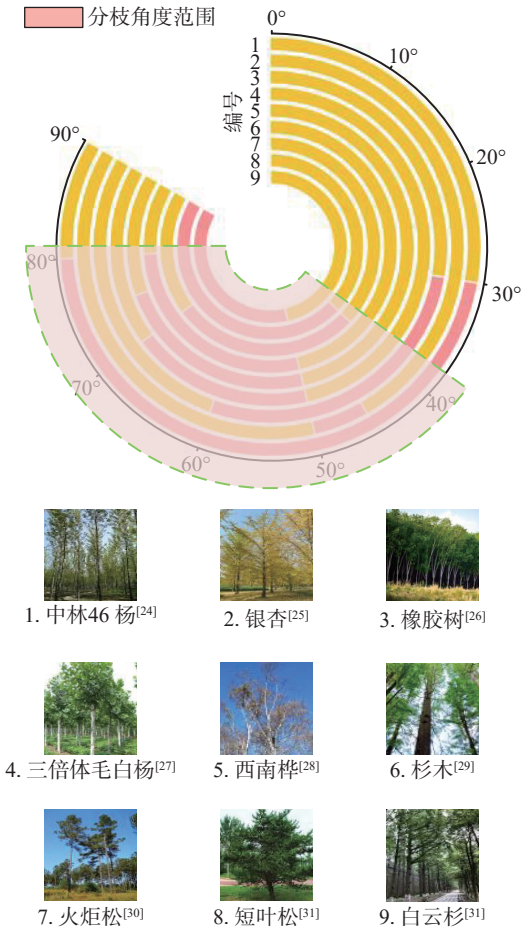


图2　部分常见中乔木的分枝角度范围

Fig. 2　Range of branching angle for common arbors

此外，理论上树木分枝的级数可以无限增长，但是分级过多会导致结构复杂、空间利用率低。因此，树木分枝级数通常不超过4级，这一点在建筑领域中大跨度树状支撑结构设计时也同样被认同[33]。通过对自然界树木分枝结构形态分析，结合可展开天线机构实际设计要求[34]，总结仿生树状可展开天线设计准则如下：

1）分枝级数不超过4级；

2）分枝角度分布在40°～80°之间，逐级递减且同级分枝夹角相等；

3）每个分枝节点衍生枝数为2，且均拟合在球面上；

4）除树干部分以外，其他各级分枝长度相等；

5）天线由偶数个树状肋单元周向均布排列组成，其自上而下投影呈正多边形。

1.2　天线结构设计与展开原理

基于由树木分枝结构仿生机理解析得到的设计原则，提出一种仿生树状可展开天线机构创新设计方案，总体结构设计如图3所示。天线总体结构由索网结构和支撑结构两个核心部分组成：索网结构作为天线的工作区域，由前、后索网和金属反射面等多层柔性绳索结构组成，负责天线的信号传输功能；支撑结构是天线的骨架，由支撑机构和张紧索组成，对索网结构起到展开、支撑及定位的作用，保证形面精度要求。

根据天线总体结构设计方案，课题组研制了天线缩比原理样机[35]，其展开原理及机构组成如图4所示。图4中，箭头为杆件运动方向。天线支撑机构由6组呈辐射状均匀排布的树状可展开肋单元构成，每个肋单元又包括树干折展单元和分枝折展单元两部分。在收拢状态时，树干滑块位于中心杆下极限位置，此时弹簧处于被压缩状态，储存一定弹性势能；在展开过程中，弹簧驱动树干滑块向上移动，从而带动树干折展单元逐渐展开，同时通过联动件的主、从动杆件与分枝折展单元实现同步展开；当树干滑块到达中心杆的极限位置时，小斜腹杆和大斜腹杆轴线重合形成死点，整个肋单元实现锁定，成为稳定的结构体系。

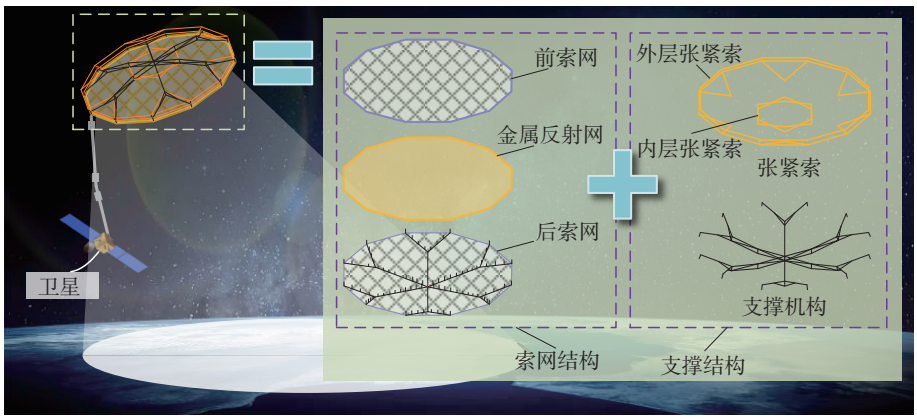


图3　仿生树状空间可展开天线总体结构设计

Fig. 3　Overall structural design of bionic tree space deployable antenna

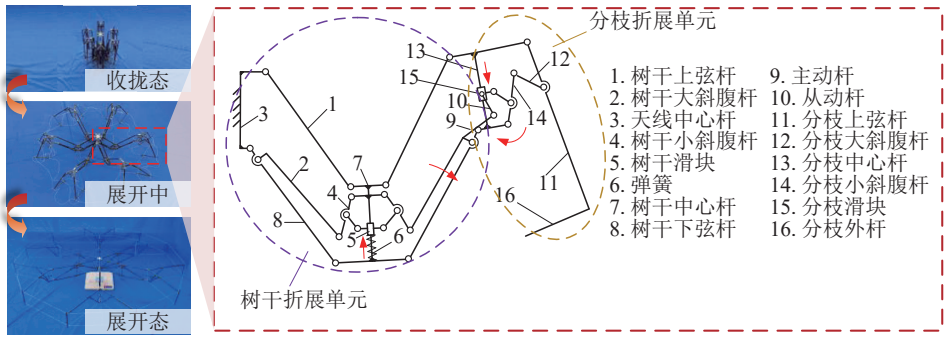


图4 天线展开原理及机构组成

Fig. 4 Deployment principle and mechanical composition of the antenna

在进行样机展收实验时发现：当分枝外杆16与分枝上弦杆11之间固定且共面时，样机完全展开后，分枝外杆辅助天线外层绳索张紧，天线稳定性得到提高；但若保持分枝外杆与分枝上弦杆之间刚性连接，则会在天线收拢状态下产生干涉，干涉情况如图5所示。

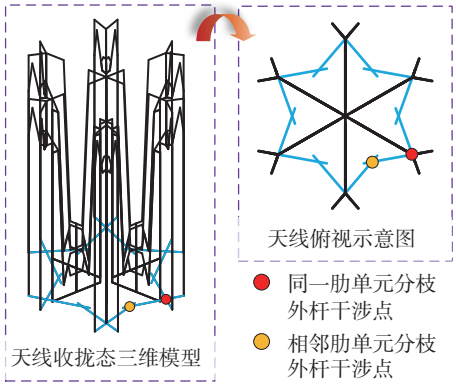


图5 分枝外杆刚性连接干涉情况

Fig. 5 Interference in rigid connection of branching outer beam

若分枝外杆和分枝上弦杆之间采用转动副连接，考虑到天线在无重力状态下工作，索网结构会因分枝外杆碰撞而无序转动，造成索网钩挂导致天线无法展开。为此，在安装转动副的基础上，需对分枝外杆添加单独驱动，并对天线整体运动学特性进行深入了解。在上述分析中，发生干涉的关键杆件为分枝外杆。所以，在肋单元中，先对除分枝外杆以外的部分进行运动学建模，再对分枝外杆进行运动学建模。

2 肋单元运动学模型

由于肋单元是整个天线支撑机构中最基本的展开单元，为了解整个天线支撑机构的运动学特性，须从仿生树状肋单元开始分析。考虑到肋单元杆件较多，整体分析较复杂，为方便后期计算，将肋单元拆分为单元Ⅰ至Ⅲ逐一进行运动学分析，局部坐标系建立及关键点示意图如图6所示。首先，根据右手定则建立局部坐标系：单元Ⅰ、Ⅱ建立共同的局部坐标系$\{O_1\}$，原点O_1位于树干中心杆下端点处，z_1轴方向为由点O_1指向点A，y_1轴方向为由点O_1指向点G_2；因为分枝折展单元为空间对称结构，故取其一半结构为单元Ⅲ建立局部坐标系$\{O_2\}$，原点O_2位于分枝中心杆下端点，且与点E_2重合，z_2轴方向为由点O_2指向点E_3（由于实物中，单元Ⅲ中点E_3与单元Ⅱ中点D_2重合，故图6中写作点$E_3(D_2)$）。图6中，单元Ⅲ为空间投影至平面$O_1y_1z_1$上示意图。再定义展开过程中各杆件与坐标轴正向所成夹角：在单元Ⅱ中，γ_1为树干小斜腹杆I_2J_2绕点I_2转动与y_1轴夹角，γ_2为树干小支撑杆Q_2P_2绕点P_2轴转动与y_1轴夹角，γ_3为树干大斜腹杆J_2K_2绕点J_2转动与y_1轴夹角，γ_4为树干下弦杆F_2G_2绕点G_2转动与y_1轴夹角，γ_5为树干上弦杆B_2C_2绕

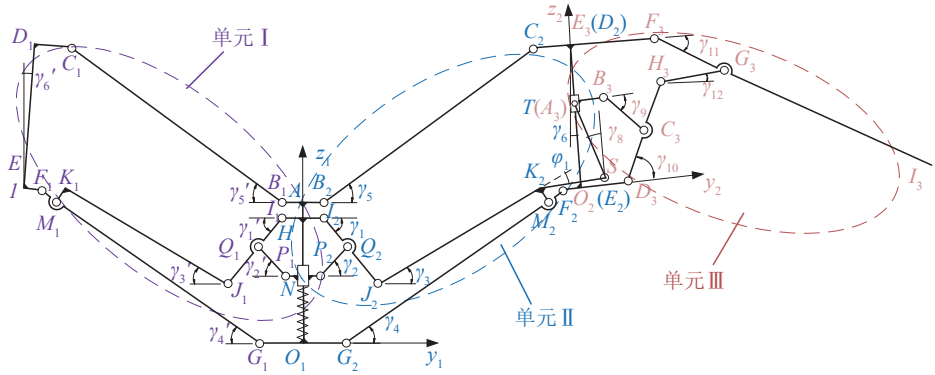


图6 肋单元局部坐标系建立及关键点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of local coordinate system and key points for the rib unit

点B_2转动与y_1轴夹角，γ_6为分枝中心杆O_2E_3与z_1轴夹角，φ_1为联动件主动杆K_2S与树干大斜腹杆J_2K_2延长线之间夹角，γ_8为联动件从动杆ST绕点S转动与z_1夹角；在单元Ⅲ中，γ_9为分枝支撑杆B_3C_3绕点B_3转动与y_2轴夹角，γ_{10}为分枝大斜腹杆H_3D_3绕点D_3转动与y_2轴夹角，γ_{11}为分枝上弦杆F_3I_3绕点F_3转动与y_2轴夹角，γ_{12}为分枝小斜腹杆G_3H_3绕点H_3转动与y_2轴夹角；由于单位Ⅰ和Ⅱ对称，在单位Ⅰ中，γ_1'～γ_6'与单位Ⅱ中的γ_1～γ_6对应。

2.1　单元Ⅱ运动学建模

由于树干折展单元拆分出的单元Ⅰ和Ⅱ在局部坐标系$O_1x_1z_1$面内关于z_1轴平面内对称，且单元Ⅱ在单元Ⅰ的基础上，包含串联空间分枝折展单元的联动件，杆件关系更为复杂。所以以单元Ⅱ为研究对象进一步拆分机构，单元Ⅰ可看作由单元Ⅱ上部分关键点经坐标变换得到。图7为单元Ⅱ拆解示意图，图7中，φ_6为杆件J_2K与主动件KS所夹锐角。

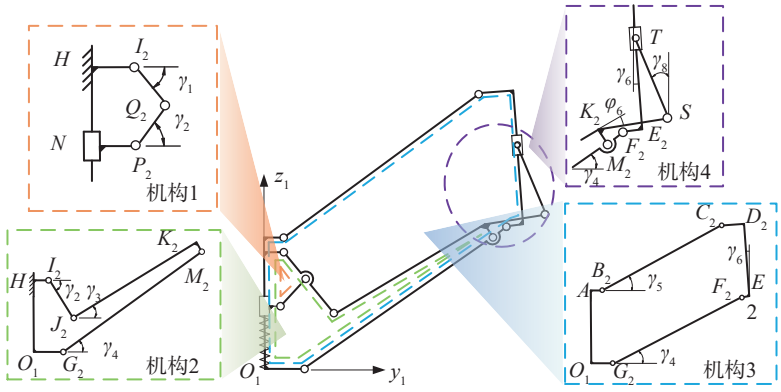


图7　单元Ⅱ机构示意图

Fig. 7　Schematic diagram of Unit Ⅱ mechanism

根据闭环矢量法，将单元Ⅱ拆解为包含4个闭环回路的四杆机构，分别沿y_1、z_1方向建立位移矢量方程组并联立，表达式如式(1)所示。式(1)中：l_{Q_2I}为杆件Q_2I长度，其他以此类推；γ_7为中间变量，$\gamma_7=\gamma_3-\varphi_1$。由式(1)得到分枝折展单元滑块位移$l_{TE_2}$表达式如式(2)所示。式(2)中，$a_5$，$a_6$为中间变量。

$$\begin{cases} l_{Q_2I}\cos\gamma_1-l_{P_2Q_2}\cos\gamma_2=0,\\ l_{HN}-l_{Q_2I}\sin\gamma_1-l_{P_2Q_2}\sin\gamma_2=0,\\ l_{IH}+l_{J_2I}\cos\gamma_1+l_{K_2J_1}\cos\gamma_3-l_{M_2K_2}\sin\gamma_3-l_{G_2M_2}\cos\gamma_4-l_{O_1G_2}=0,\\ l_{HO_1}-l_{J_2I}\sin\gamma_1-l_{K_2J_1}\sin\gamma_3-l_{M_2K_2}\cos\gamma_3-l_{G_2M_2}\sin\gamma_4=0,\\ l_{B_2A}+l_{C_2B_2}\cos\gamma_5+l_{D_2C_2}\cos\gamma_6+l_{E_2D_2}\sin\gamma_6-l_{F_2E_2}\cos\gamma_6-l_{G_2F_2}\cos\gamma_4-l_{O_1G_2}=0,\\ l_{AO_1}+l_{C_2B_2}\sin\gamma_5+l_{D_2C_2}\sin\gamma_6-l_{E_2D_2}\cos\gamma_6-l_{F_2E_2}\sin\gamma_6-l_{G_2F_2}\sin\gamma_4=0,\\ l_{K_2S}\cos\gamma_7+l_{ST}\cos\gamma_8+l_{TE_2}\sin\gamma_6-l_{F_2E_2}\cos\gamma_6-l_{M_2F_2}\cos\gamma_4-l_{M_2K_2}\sin(-\gamma_3)=0,\\ l_{K_2S}\sin\gamma_7+l_{ST}\sin\gamma_8-l_{TE_2}\cos\gamma_6-l_{F_2E_2}\sin\gamma_6-l_{M_2F_2}\sin\gamma_4+l_{M_2K_2}\cos\gamma_3=0 \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} l_{TE_2}=a_6\cos\gamma_6-a_5\sin\gamma_6+\sqrt{(\sin^2\gamma_6(l_{ST}^2-\gamma_6^2-2a_5a_6\cot\gamma_6+(l_{ST}-a_5)(l_{ST}+a_5)\cot^2\gamma_6))},\\ a_5=l_{K_2S}\cos\gamma_7-l_{F_2E_2}\cos\gamma_6-l_{M_2F_2}\cos\gamma_4+l_{M_2K_2}\sin\gamma_3),\\ a_6=l_{K_2S}\sin\gamma_7-l_{F_2E_2}\sin\gamma_6-l_{M_2F_2}\sin\gamma_4+l_{M_2K_2}\cos\gamma_3) \end{cases} \tag{2}$$

2.2　单元Ⅲ运动学建模

图8为单元Ⅲ机构示意图。根据闭环矢量法将单元Ⅲ同理拆解为2个闭环回路的四杆机构，分别建立位移矢量方程组，如式(3)所示。

$$\begin{cases} l_{B_3A_3}+l_{C_3B_3}\cos\gamma_9-l_{DC_3}\cos\gamma_{10}-l_{O_2D}=0,\\ l_{A_3O_2}-l_{C_3B_3}\sin\gamma_9-l_{DC_3}\sin\gamma_{10}=0,\\ l_{F_3E_3}+l_{F_3G_3}\cos\gamma_{11}-l_{H_3G_3}\cos\gamma_{12}-l_{D_3H_3}\cos\gamma_{10}-l_{O_2D_2}=0,\\ l_{E_3O_2}-l_{F_3G_3}\sin\gamma_{11}+l_{H_3G_3}\cos\gamma_{12}-l_{D_3H_3}\sin\gamma_{10}=0 \end{cases} \tag{3}$$

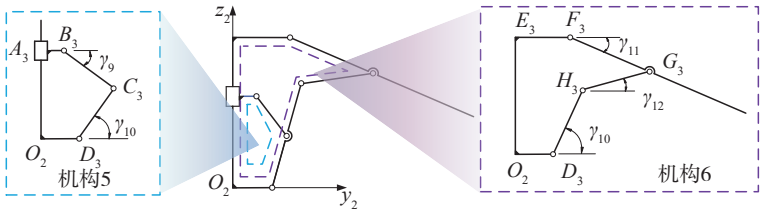


图8　单元Ⅲ机构示意图

Fig. 8　Schematic diagram of Unit Ⅲ organization

因为角位移γ_{11}影响着关键点I_3、J_3的空间坐标运动变化，所以将式(2)分枝折展单元滑块位移l_{TE_2}代入式(3)进行求解，分别得到角位移γ_{11}、关键点I_3表达式如式(4)和(5)所示。

$$\gamma_{11}=\arctan\frac{a_{10}^4 l_{F_2G_2}+a_{10}^2 l_{F_2G_2}\left(a_9^2+l_{F_2G_2}^2-l_{H_2G_2}^2\right)+a_9\sqrt{a_{10}^2 l_{F_2G_2}^2\left(2\left(a_{10}{}^2+a_9^2+l_{F_2G_2}^2\right)l_{H_2G_2}^2-\left(a_{10}^2+a_9^2-l_{F_2G_2}^2\right)^2-l_{H_2G_2}^4\right)}}{a_{10}\left(-a_9 l_{F_2G_2}\left(a_{10}^2+a_9^2+l_{F_2G_2}^2-l_{H_2G_2}^2\right)+\sqrt{a_{10}^2 l_{F_2G_2}^2\left(2\left(a_{10}{}^2+a_9^2+l_{F_2G_2}^2\right)l_{H_2G_2}^2-\left(a_{10}^2+a_9^2-l_{F_2G_2}^2\right)^2-l_{H_2G_2}^4\right)}\right)} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix}x_{I_3}\\y_{I_3}\\z_{I_3}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_{F_3}+l_{FI_3}\cos\gamma_{11}\sin\alpha\\y_{F_3}+l_{FI_3}\cos\gamma_{11}\cos\alpha\\z_{F_3}-l_{FI_3}\sin\gamma_{11}\end{bmatrix} \tag{5}$$

式(4)、(5)中，a_9、a_{10}为中间变量，$a_9=l_{F_2E_2}-l_{D_2H_2}\cos\gamma_{10}-l_{O_2D_2}$，$a_{10}=l_{E_2O_2}-l_{D_2H_2}\sin\gamma_{10}$。至此除外杆$I_3J_3$外，整个肋单元在各自局部坐标系下的运动学建模部分全部完成。

2.3 肋单元运动学建模

由于肋单元关键点较多，为了方便后期的计算，将肋单元Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ中关键点坐标矩阵分别表示为矩阵$\boldsymbol{U}_1$、$\boldsymbol{U}_2$、$\boldsymbol{U}_3$。在局部坐标系$\{O_2\}$中单元Ⅲ关键点坐标矩阵$\boldsymbol{U}_3$包括关键点O_2、A_3、B_3、C_3、D_3、E_3、F_3、G_3、I_3、J_3。而单元Ⅰ中所有关键点和单元Ⅱ中部分关键点关于局部坐标系$\{O_1\}$中y轴对称，故单元Ⅰ、Ⅱ的关键点坐标矩阵，$\boldsymbol{U}_1$、$\boldsymbol{U}_2$表示如下：

$$\boldsymbol{U}_2=[\boldsymbol{U}_0\quad\boldsymbol{S}\quad\boldsymbol{T}] \tag{6}$$

$$\boldsymbol{U}_1=\boldsymbol{R}(z_1,\pi)\boldsymbol{U}_0 \tag{7}$$

式(6)、(7)中：$\boldsymbol{U}_0$为基础坐标矩阵，包括关键点O_1、A、B_2、C_2、D_2、E_2、F_2、G_2、H、I_2、J_2、K_2、M_2、N、P_2、Q_2；$\boldsymbol{S}$、$\boldsymbol{T}$分别为关键点S、T的坐标矩阵；$\boldsymbol{R}(z_1,\pi)$为旋转轴为z_1、旋转角度为π的坐标变换矩阵，表达式如下：

$$\boldsymbol{R}(z_1,\pi)=\begin{bmatrix}\cos\pi&-\sin\pi&0\\\sin\pi&\cos\pi&0\\0&0&1\end{bmatrix} \tag{8}$$

为了建立全局坐标系$\{O\}$下肋单元运动学模型，基于右手定则，在球面半径为R的球心O处建立全局坐标系$\{O\}$(图8)。图9为肋单元位置变换示意图。图9中，β_1、β_2、β_3分别为单元Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ对应的拟合圆的圆角心。图9(a)为局部坐标系下单元Ⅰ、Ⅱ与全局坐标系$\{O\}$的空间几何关系，全局坐标系下单元Ⅰ、Ⅱ的空间坐标模型为$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Ⅰ-Ⅱ}}$，即：

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Ⅰ-Ⅱ}}=\boldsymbol{R}(x,\beta_1)[\boldsymbol{U}_1\quad\boldsymbol{U}_2] \tag{9}$$

式中，x为全局坐标系下的x坐标轴。

图9(b)为局部坐标系下单元Ⅲ与全局坐标系$\{O\}$的空间几何关系。考虑分枝折展单元在全局坐标系$\{O\}$中是关于平面Oyz空间对称，所以分枝折展单元关键点坐标矩阵$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Ⅲ}}$表示如下：

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Ⅲ}}=\boldsymbol{R}(x,\beta_1+\beta_2)\left[\boldsymbol{R}(z_2,\alpha)\boldsymbol{U}_3\quad\boldsymbol{R}(z_2,-\alpha)\boldsymbol{U}_3\right] \tag{10}$$

式中，z_2为局部坐标系下的z坐标轴，α为分枝折展单元的分枝角度，对应坐标变换矩阵$\boldsymbol{R}(z_2,\alpha)$表达式如下：

$$\boldsymbol{R}(z_2,\alpha)=\begin{bmatrix}\cos\alpha&-\sin\alpha&0\\\sin\alpha&\cos\alpha&0\\0&0&1\end{bmatrix} \tag{11}$$

至此，在全局坐标系下肋单元关键点坐标矩阵$\boldsymbol{L}$可以表示为：

$$\boldsymbol{L}=[\boldsymbol{U}_{\mathrm{Ⅰ}}\quad\boldsymbol{U}_{\mathrm{Ⅱ}}\quad\boldsymbol{U}_{\mathrm{Ⅲ}}] \tag{12}$$

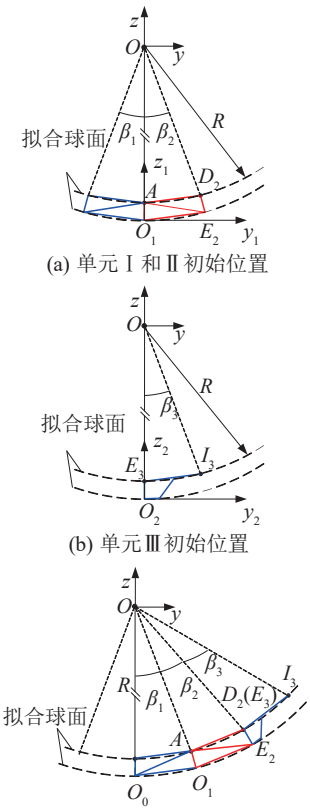


图9 肋单元位置变换示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the position transformation for the rib unit

3 天线整体运动学建模及数值仿真

3.1 分枝外杆运动特性分析

针对第2.2节发现的问题，以分枝折展单元中一侧的分枝外杆为研究对象(另一侧与其情况相似)，对其在刚性连接下的运动特性开展进一步分析，分析过程如图10所示。在局部坐标系$\{O_2\}$下外杆I_3J_3空间几

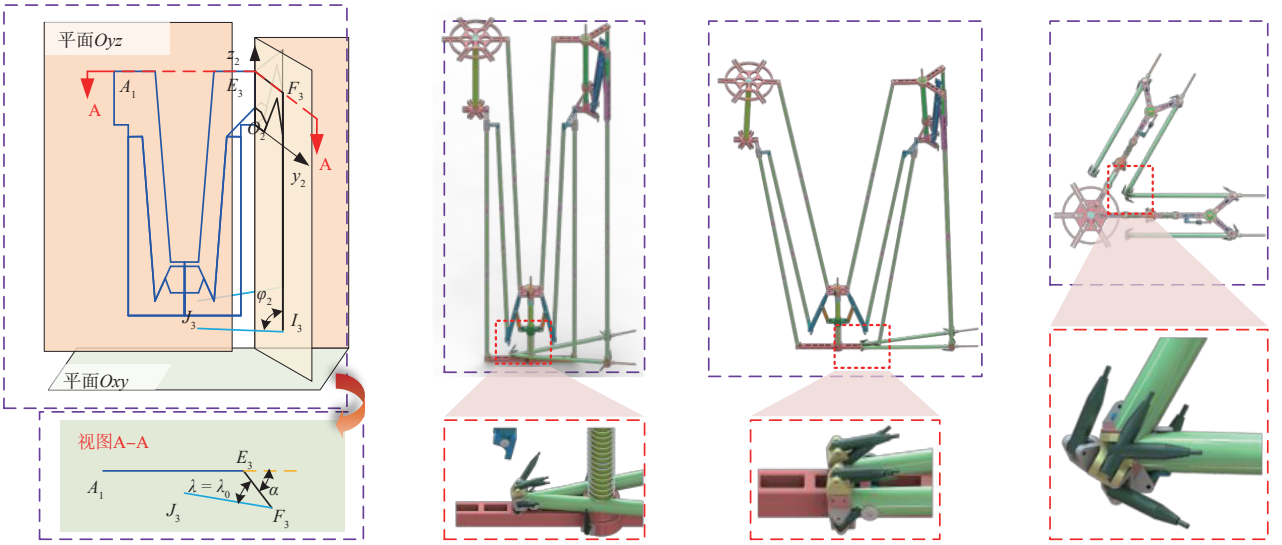
何关系的相关参数定义如下：T为天线从收拢态到完全展开态所需总时间，λ为在该过程中外杆I_3J_3相对于平面$O_2y_2z_2$转动的角位移，当天线处于收拢状态，即当时间t=0时，外杆I_3J_3初始角位移为λ_0，即$\lambda=\lambda_0$；φ_2为外杆I_3J_3与分枝上弦杆E_3F_3的夹角。通过分析收拢状态下初始角位移λ_0对外杆I_3J_3运动特性的影响，制定合理的外杆驱动策略，相关情况如下：

1）若$0\le\lambda_0\le\lambda_1$，在收拢状态下关键点$J_3$和平面$Oyz$存在干涉（$\lambda_1$为关键点$J_3$在平面$Oyz$上时外杆与平面$Oyz$夹角），图10(b)为$\lambda_0=\lambda_1$时外杆$I_3J_3$的干涉情况。$\lambda_1$表达式如下：

$$\lambda_1=\arccos\frac{l_{E_3F_3}\sin\alpha}{l_{I_3J_3}\cos\varphi_2}-\frac{\pi}{2}+\alpha \tag{13}$$

2）若$\lambda_1<\lambda_0<\alpha$，则虽然在收拢状态下肋单元外杆$I_3J_3$与平面$Oyz$无干涉，但在展开过程中依然会发生干涉（图10(c)）。

3）若$\lambda_0=\alpha$，则在收拢状态下，外杆I_3J_3与平面Oyz平行，未发生干涉。但会与相邻肋单元外杆存在干涉（图10(d)）。同时在展开试验时发现，分枝外杆I_3J_3在展开过程中不能始终与平面Oyz保持平行。



(a) 收拢状态下分枝外杆I_3J_3空间几何关系示意图　(b) $\lambda_0=\lambda_1$时分枝外杆干涉　(c) $\lambda_1<\lambda_0<\alpha$时分枝外杆干涉　(d) $\lambda_0=\alpha$时分枝外杆干涉

图10　分枝外杆I_3J_3干涉情况深入分析

Fig. 10　Further analysis of the interference situation for branching outer bean I_3J_3

基于上述分析，为了避免天线在整个展开过程中外杆发生干涉，同时在完全展开后保证外杆辅助外层绳索张紧，建立“外旋平行，内旋归零”的分枝外杆驱动策略模型：在天线展开过程中，当t=0时，外杆I_3J_3与平面Oyz之间夹角满足$\lambda_1\le\lambda_0<\alpha$；当$0<t\le t_1$时，在$x$方向上外杆$I_3J_3$处于危险区域内，须与平面$Oyz$始终保持平行，即基于右手定则，拇指由$I_3$指向$F_3$，外杆$I_3J_3$持续外旋，$t_1$为外旋结束时间；当$t_1<t\le t_2$时，外杆$I_3J_3$脱离危险区域且天线尚未完全展开，外杆反方向内旋回到λ=0°时的位置，保证天线绳索结构索顺利张紧，t_2为内旋的结束时间。分枝外杆驱动策略模型表达式如下：

$$\lambda=\begin{cases}\lambda_0,\lambda_1<\lambda_0<\alpha,t=0;\\ \lambda_0+\omega_1,0<t\le t_1;\\ \alpha-\omega_2,t_1<t<t_2\le T;\\ 0,t=t_2\le T\end{cases} \tag{14}$$

式中，ω_1、ω_2分别为外杆外旋、内旋的角位移。为避免外杆内旋过程中发生较大冲击，将ω_2设定为匀角速度运动；通过求解式(16)所示的约束条件得到t_1，t_2只要不超过总时间T即可。

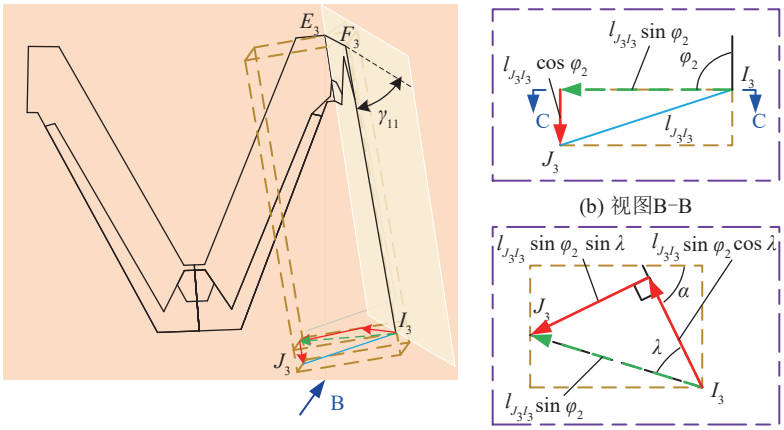
$$\omega_2=\frac{\alpha}{T-t_1} \tag{15}$$

$$y_{J_3}(t)\ge y_{B_2}(t) \tag{16}$$

式(16)中，$y_{J_3}(t)$、$y_{B_2}(t)$为点J_3、B_2在全局坐标系下随时间t在y轴方向上的位移。

3.2　天线运动学建模

图11为分枝外杆外旋运动过程中空间几何关系示意图。图11(a)为关键点J_3局部坐标系$\{O_2\}$下的空间几何关系。考虑到关键点J_3自身绕杆件F_3I_3转动，且与杆件F_3I_3不垂直，故先将关键点J_3分别沿杆件F_3I_3的轴向和径向投影（图11(b)），再分别向垂直平面$E_3F_3I_3$和平面$E_3F_3I_3$内投影（图11(c)）。基于闭环矢量法，建立外杆关键点J_3运动学模型，如式(17)所示。为保证分枝外杆平行，点J_3、I_3在全局坐标系下的x轴上的坐标值须相等，由此求得分枝外杆外旋角位移ω_1，如式(18)所示。



(a) 分枝外杆运动过程中空间几何关系　(b) 视图B–B　(c) 视图C–C

图 11　分枝外杆外旋运动过程中空间几何关系示意图

Fig. 11　Schematic diagram of spatial geometric relations for the branching outer beam

$$\begin{bmatrix} x_{J_3} \\ y_{J_3} \\ z_{J_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{I_3} - l_{J_3I_3}\cos\varphi_2\cos\gamma_{11}\sin\alpha + l_{J_3I_3}\sin\varphi_2\sin\lambda\cos\alpha - l_{J_3I_3}\sin\varphi_2\cos\lambda\sin\gamma_{11}\sin\alpha \\ y_{I_3} - l_{J_3I_3}\cos\varphi_2\cos\gamma_{11}\cos\alpha - l_{J_3I_3}\sin\varphi_2\sin\lambda\sin\alpha - l_{J_3I_3}\sin\varphi_2\cos\lambda\sin\gamma_{11}\cos\alpha \\ z_{I_3} + l_{J_3I_3}\cos\varphi_2\sin\gamma_{11} - l_{J_3I_3}\sin\varphi_2\cos\lambda\cos\gamma_{11} \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\omega_1 = -\lambda_0 - \arctan\frac{\cos\alpha\cos\gamma_{11}\cos\varphi_2\sin\alpha + \csc\varphi_2\sin\gamma_{11}\tan\alpha\sqrt{\cos^2\alpha\sin^2\varphi_{11}(-\cos^2\gamma_{11}\sin^2\alpha+\sin^2\varphi_2)}}{\cos\gamma_{11}\cos\varphi_2\sin^2\alpha\sin\gamma_{11} - \csc\varphi_2\sqrt{\cos^2\alpha\sin^2\varphi_2(-\cos^2\gamma_{11}\sin^2\alpha+\sin^2\varphi_2)}} \tag{18}$$

式(17)、(18)中，φ_2为分枝外杆I_3J_3和分枝上弦杆F_3J_3之间的夹角。$(x_{J_3}、y_{J_3}、z_{J_3})$和$(x_{I_3}、y_{I_3}、z_{I_3})$分别为点$J_3$和$I_3$在局部坐标系下的坐标。

至此，天线肋单元上所有关键点均已求出，定义相邻两个肋单元之间的夹角为θ，则天线各肋单元关键点空间坐标矩阵$\boldsymbol{L}_1$～$\boldsymbol{L}_6$可由肋单元关键点坐标矩阵$\boldsymbol{L}$在全局坐标系下经坐标变换获得：

$$\boldsymbol{L}_n = \boldsymbol{R}(z,(n-1)\theta)\boldsymbol{L}, n = 1,2,\cdots,6 \tag{19}$$

式中，n为肋单元个数，坐标变换矩阵$\boldsymbol{R}(z,(n-1)\theta)$如下：

$$\boldsymbol{R}(z,(n-1)\theta) = \begin{bmatrix} \cos(n-1)\theta & -\sin(n-1)\theta & 0 \\ \sin(n-1)\theta & \cos(n-1)\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{20}$$

将肋单元矩阵$\boldsymbol{L}_1$～$\boldsymbol{L}_6$合并可得到天线所有关键点坐标矩阵$\boldsymbol{V}$：

$$\boldsymbol{V} = [\boldsymbol{L}_1 \quad \boldsymbol{L}_2 \quad \cdots \quad \boldsymbol{L}_6] \tag{21}$$

至此，天线整体运动学模型已完成建立。因其具有参数化特征，故可以根据不同的天线结构参数，实现快速设计和运动学建模及数值仿真。

3.3　数值仿真验证

为了验证上文运动学建模和理论分析的正确性，建立了展开口径为30 m级的仿生树状可展开天线数值验证模型，采用MATLAB数值仿真软件对运动学模型和外杆驱动策略模型进行仿真模拟验证，天线相关参数见表1。此外，为了进一步验证原文中MATLAB数值软件仿真结果的正确性，将建立的30 m级全尺寸样机三维模型，导入ADAMS软件进行运动学仿真分析，与MATLAB数值软件仿真结果对比。天线展开全程所需总时间T=100 s，树干滑块匀速运动，分别取天线机构在t=0、$t=t_1$=6 s(外旋运动结束时刻，由式(16)求解向上取整得到)、t=50 s、$t=t_2$=100 s等4个时刻的展开状态，如图12所示。图12中，在x方向上以树干折展单元中关键点B_2的运动轨迹为边界，y方向上以树干底端连接块的实际宽度为边界，划定危险区域(即易发生干涉的区域)范围，观察初始角位移λ_0=36°时，分枝外杆在固定式(即外杆刚性连接)和驱动式(即外杆按照驱动策略模型有序转动)两种不同情况下关键点J_3的运动轨迹，若其运动至危险区域边界上即认为发生干涉。

表 1　天线机构主要参数

Tab. 1　Main parameters of antenna mechanism

树干折展单元	R/mm	$l_{A_2O_1}$/mm	$l_{O_1G_2}$/mm	$l_{M_2F_2}$/mm	$l_{F_2E_2}$/mm	$l_{D_2C_2}$/mm	φ_2/(°)	$l_{B_2A_2}$/mm	$l_{M_3K_2}$/mm	$l_{J_2I_2}$/mm	$l_{A_2H_2}$/mm	$l_{P_2Q_2}$/mm	$l_{K_2S_2}$/mm	φ_2/(°)
	45 000	1 350	601.29	300	151.29	438.707 5	20.50	148.71	150	890.32	108.19	371.52	450	20.50
分枝折展单元	$l_{O_2D_3}$/mm	$l_{D_3C_3}$/mm	$l_{B_3A_3}$/mm	l_{DH_3}/mm	$l_{H_3G_3}$/mm	l_{FG_3}/mm	$l_{F_3E_3}$/mm	$l_{F_3I_3}$/mm	$l_{J_3I_3}$/mm	φ_1/(°)	α/(°)	λ_0/(°)		
	127.79	239.51	86.21	1 108.70	826.71	1 078.80	389.12	5 982.8	1 355.60	95.58	40.27	36		

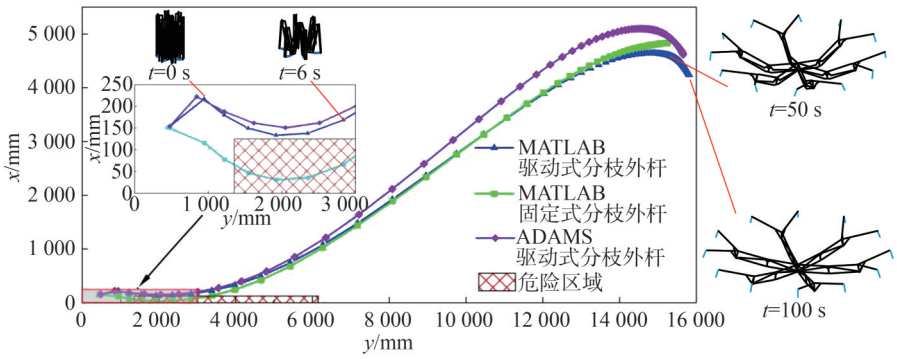


图 12　天线机构展开过程示意图

Fig. 12　Schematic diagram of the deploying process of the antenna mechanism

由图 12 可以看出：

1）对于驱动式分枝外杆而言，关键点 J_3 运动轨迹的 ADAMS 仿真结果相对 MATLAB 仿真结果在 x、y 方向上有一定偏移，但运动趋势相同，验证了建模的正确性。造成上述结果的原因，一方面是在处理空间坐标变换的理论计算过程中存在角度误差，另一方面是天线自身尺寸较大而对误差的不利影响起到了放大作用（下文以 MATLAB 中两种不同驱动方式仿真结果对比分析）。

2）当 t=0 时，两种情况下天线机构都呈完全收拢状态，肋单元之间无干涉，符合预期效果。

3）当 $t\in$[1,6] s 时，天线整个机构逐渐展开，固定式分枝外杆关键点 J_3 在第 2 s 后进入危险区域发生干涉；驱动式分枝外杆通过持续外旋与树干折展单元所在平面保持平行，关键点 J_3 未进入危险区域，证明了前文所提出的分枝外杆驱动策略的可行性。

4）当 t=50 s 时，驱动式分枝外杆已远离危险区域，处于内旋状态，天线整体已经接近于完全展开状态，完成了大部分的位移，说明虽然树干滑块匀速运动，但分枝折展单元同步展开多集中在前 50 s，并非匀速运动，这对多级可展开天线机构同步驱动规律的研究具有一定参考意义。

5）当 t=100 s 时，天线处于完全展开状态，固定式分枝外杆因缺少内旋运动抵消初始角位移 λ_0 和外旋运动产生的角位移，导致其在 y 方向上未抵达预设位置，并在 x 方向上更加远离预设位置；驱动式分枝外杆通过内旋到达预设位置，此时分枝外杆与分枝折展单元共面，保证外层绳索顺利张紧，上述两种情况与理论分析相符。

此外，对于图 12 中两种不同方式连接的分枝外杆来说，当 $t\in$[1,6]时，关键点 J_3 的运动轨迹均为先靠近 y 轴，再逐渐远离 y 轴，且当 t=4 时，J_3 在整个展开过程中距离 y 轴最近。上述运动趋势一方面说明分枝外杆在外旋阶段是天线展开过程中极易发生干涉的时间区间，需要重点关注；另一方面说明该区间内，分枝折展单元各杆件较 t=0 时先进一步收拢，再逐渐展开。图 13、14 分别为分枝滑块位移 l_{TE} 和角位移 γ_{11} 随时间变化。由图 13、14 可知，二者在 $t\in$[1,6]时先逐渐增大，再逐渐减小，其曲线变化趋势与关键点 J_3 的运动轨迹相吻合。因此，在对天线分枝折展单元进行结构设计时，其顶端连接块长度取值应考虑天线展开过程伊始天线分枝折展单元各杆件进一步收拢的影响，并为外杆预留相应的运动空间，避免与树干折展单元发生干涉。

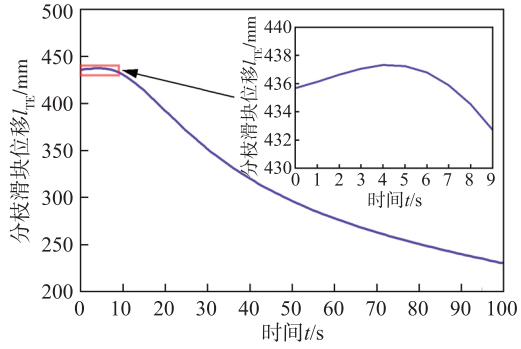


图 13　分枝滑块位移随时间 t 的变化

Fig. 13　Displacement variation of branching slider with time t

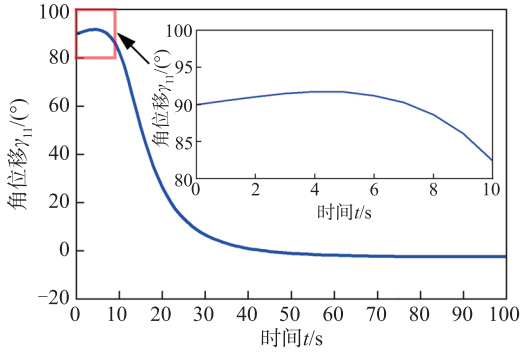


图 14　分枝滑块角位移 γ_{11} 随时间 t 的变化

Fig. 14　Displacement variation of γ_{11} with time t

4　结　论

本文针对可展开天线大型化发展的迫切需求，以树木分枝结构为仿生对象，提出了一种大口径仿生树

状可展开天线机构新构型，并开展了运动学建模、运动特性分析以及数值仿真等工作，通过研究得到如下主要结论：

1）通过对树木分枝几何形态的仿生机理解析，提炼出适用于可展开天线的仿生设计准则，并基于该准则进行了天线结构设计和样机研制，该构型具有成为大口径天线的潜力，为天线构型系列化设计提供了理论参考。

2）针对空间仿生树状可展开天线机构，建立了多级折展单元串联、多闭环回路嵌套的可展开天线运动学参数化模型，明确了天线结构参数之间的相互耦合关系，为后续天线结构尺寸设计优化提供了依据。

3）通过分析天线分枝外杆在展开过程中的运动学特性，建立了“外旋平行，内旋归零”的驱动策略模型，有效避免了分枝外杆在展开过程中干涉问题的产生。数值仿真分析验证了这一策略的有效性，也表明所提出方案原理的正确性。

参考文献：

[1] Ma Xiaofei,Li Tuanjie,Ma Jingya,et al.Recent advances in space-deployable structures in China[J].Engineering,2022,17:207–219.

[2] Li Ming,Jiang Yanda,Cui Qifeng,et al.Immature state-of-the-art review on origami-inspired spaceborne deployable structures[J].Journal of Mechanical Engineering,2021,57(23):53–65.[李明,蒋延达,崔琦峰,等.折纸衍生空间可展结构研究回顾与展望刍议[J].机械工程学报,2021,57(23):53–65.]

[3] Tian Dake,Fan Xiaodong,Zheng Xijian,et al.Research status and prospect of micro-gravity environment simulation for space deployable antenna[J].Journal of Mechanical Engineering,2021,57(3):11–25.[田大可,范小东,郑夕健,等.空间可展开天线微重力环境模拟研究现状与展望[J].机械工程学报,2021,57(3):11–25.]

[4] Russo A,Barakali B,Kitsu K I,et al.Origami-inspired self-deployable reflectarray antenna[J].Acta Astronautica,2023,213:240–251.

[5] Liu Tianwei,Bai Jiangbo,Fantuzzi N,et al.Thin-walled deployable composite structures:A review[J].Progress in Aerospace Sciences,2024,146:100985.

[6] Chen Chuanzhi,Dong Jiayu,Chen Jinbao,et al.Large spaceborne parabolic antenna:Researchp progress[J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2021,42(1):126–146.[陈传志,董家宇,陈金宝,等.空间大型星载抛物面天线研究进展[J].航空学报,2021,42(1):126–146.]

[7] Chen Guohui,Hua Yue,Wang Bo,et al.Design and verification for umbrella-type deployable antenna of Chang'e-4 lunar relay satellite[J].Journal of Deep Space Exploration,2018,5(6):524–530.[陈国辉,华岳,王波,等.“嫦娥4号”中继星伞状可展开天线设计与验证[J].深空探测学报,2018,5(6):524–530.]

[8] Zhao Jiang, Yang Jungang, Xiao Yong, et al. Deployment strategy and dynamic analysis of large ring truss antenna[J]. International Journal of Aerospace Engineering,2022,2022(1):4725423.

[9] Han Bo,Yuan Zhantu, Zhang Jiachuan, et al.Design and analysis of modular deployable antenna mechanism based on a class of self-limiting position units[J].Mechanism and Machine Theory,2024,191:105509.

[10] Xu Yundou,Guo Jinwei,Guo Luyao,et al.Design and analysis of a truss deployable antenna mechanism based on a 3UU-3URU unit[J].Chinese Journal of Aeronautics,2019,32(12):2743–2754.

[11] Yang Hui, Feng Jian, Liu Yongbin, et al. Design and kinematic analysis of a large deployable mechanism of the parabolic cylindrical antenna with multi tape-spring hinges[J]. Journal of Mechanical Engineering,2022,58(3):75–83.[杨慧,冯健,刘永斌,等.百米级多超弹性铰链抛物柱面天线折展机构设计与运动学分析[J].机械工程学报,2022,58(3):75–83.]

[12] Sun Zihan,Hu Naigang,Fan Guanheng,et al.Structural design and model fabrication of a novel double-ring deployable mesh antenna[J].Aerospace Science and Technology,2025,164:110351.

[13] Han Bo,Yuan Zhantu,Hu Xiaoyu,et al.Design and analysis of a hoop truss deployable antenna mechanism based on convex pentagon polyhedron unit[J].Mechanism and Machine Theory,2023,186:105365.

[14] Zhang Yuehao,Li Ming,Chen Yan,et al.Thick-panel origami-based parabolic cylindrical antenna[J]. Mechanism and Machine Theory,2023,182:105233.

[15] Hu Fei,Song Yanping,Huang Zhirong,et al.Degree of freedom and singularityanalysis of the deployable truss antenna reflector[J].Chinese Space Science and Technology,2018,38(3):24–32.[胡飞,宋燕平,黄志荣,等.构架式可展开天线自由度与奇异性分析[J].中国空间科学技术,2018,38(3):24–32.]

[16] Yao Pengfei,Lyu Shengnan,Zhang Wuxiang,et al.Double-ring deployable antenna mechanism based on square frustum-shaped bricard units[J]. Journal of Mechanical Engineering,2023,59(21):147–156.[姚鹏飞,吕胜男,张武翔,等.基于正四棱台Bricard单元的双环可展开天线机构构型设

计[J]. 机械工程学报,2023,59(21):147–156.]

[17] Fan Xiaodong, Zheng Xijian, Tian Dake, et al. Kinematic modeling and analysis of support mechanism for modular deployable antenna[J]. Chinese Space Science and Technology,2021,41(5):37–49.[范小东,郑夕健,田大可,等. 模块化可展开天线支撑机构运动学建模与分析[J]. 中国空间科学技术,2021,41(5):37–49.]

[18] Zhao Zhongwei, Yu Duo, Zhang Tongrui, et al. Form-finding and optimization for free form grid structures supported by branching columns based on updated force density method[J].Structures,2022,44:1190–1203.

[19] Peng Xirong.Morphogenesis of dendriforms based on continuum structural topology optimization[J].Journal of Building Structures,2018,39(3):26–31.[彭细荣. 基于连续体结构拓扑优化的树状结构拓扑创构[J]. 建筑结构学报,2018,39(3):26–31.]

[20] Zhao Yannan,Du Wenfeng,Wang Hui,et al.New shape optimization method for tree structures based on BP neural network[J].Journal of Constructional Steel Research,2024,223:109059.

[21] Qiu Hui, Liu Zhiquan, Zeng Huizhong, et al. Review of deployable SAR antenna structures of spacecraft[J]. Journal of Astronautics,2021,42(10):1197–1206.[邱慧,刘志全,曾惠忠,等. 航天器可展 SAR 天线结构综述[J]. 宇航学报,2021,42(10):1197–1206.]

[22] Tian Dake, Gao Haiming, Jin Lu, et al. Design and analysis of multi-configuration combined modular deployable antenna mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023,59(13):36–48.[田大可,高海明,金路,等. 多构型组合式模块化可展开天线机构设计与分析[J]. 机械工程学报,2023,59(13):36–48.]

[23] 陈有民. 园林树木学[M].2 版. 北京:中国林业出版社,2011.

[24] Wang Ningning, Yin Wenguang, Huang Qinjun, et al. Application of 3D scanner technology to analysis the crown architecture parameters of poplar plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae,2015,51(5):108–116.[王宁宁,尹文广,黄秦军,等. 三维扫描技术在获取杨树树冠结构特征参数上的应用[J]. 林业科学,2015,51(5):108–116.]

[25] Liu Shaoxuan. Study of crown structure feacture in the timber ginkgo[D].Nanjing:Nanjing Forestry University, 2014.[刘少轩. 材用银杏树冠结构特征研究[D]. 南京:南京林业大学,2014.]

[26] Hu Yunfan, Zhang Huaiqing, An Feng, et al. Hevea brasiliensis property retrieval and construction of digital twin based on laser scanning data[J].Journal of Northwest Forestry University,2024,39(2):1–12.[胡云帆,张怀清,安锋,等. 基于激光点云的橡胶树参数反演与数字孪生构建[J]. 西北林学院学报,2024,39(2):1–12.]

[27] Zhang Yaxiong, Wang Ye, Li Guangde, et al. Response of branching pattern of triploid populus tomentosa to variation soil water regime[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(3):145–151.[张亚雄,王烨,李广德,等. 三倍体毛白杨分枝格局对不同土壤供水水平的响应[J]. 林业科学,2021,57(3):145–151.]

[28] Liu Kaili, Wang Chunsheng, Chen Boyao, et al. Branch development in monoculture and mixed-species plantations of Betula alnoides, Erythrophleum fordii and Pinus kesiya var. langbianensis in southwestern China[J]. Forest Ecology and Management,2023,528:120643.

[29] Lu Kangning. The research of visual simulation of morphological structure change of cunninghamia lanceolata based on physiological and ecological model[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2012.[卢康宁. 基于生理生态模型的杉木形态结构变化可视化模拟研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2012.]

[30] Niknejad N, Bidese–Puhl R, Bao Yin, et al. Phenotyping of architecture traits of loblolly pine trees using stereo machine vision and deep learning:Stem diameter,branch angle, and branch diameter[J].Computers and Electronics in Agriculture,2023,211:107999.

[31] Beaulieu E, Schneider R, Berninger F, et al. Modeling jack pine branch characteristics in Eastern Canada[J].Forest Ecology and Management,2011,262(9):1748–1757.

[32] Sattler D F, Comeau P G, Achim A. Branch models for white spruce(Picea glauca(Moench) Voss) in naturally regenerated stands[J]. Forest Ecology and Management, 2014,325:74–89.

[33] Wu Yue,Zhang Jianliang,Cao Zhenggang.Form-finding analysis and engineering application of branching structures[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 162–168.[武岳,张建亮,曹正罡. 树状结构找形分析及工程应用[J]. 建筑结构学报,2011,32(11):162–168.]

[34] Tian Dake, Guo Zhenwei, Jin Lu, et al. Design and mechanical characteristics of support structure for modular deployable antenna[J].Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2023,40(1):80–97.

[35] Tian Dake,Song Yuqun,Jin Lu,et al.Design and analysis of radiating rib space deployable antenna mechanism[J].Chinese Space Science and Technology,2024,44(2):40–50.[田大可,宋玉群,金路,等. 辐射肋式空间可展开天线机构设计与分析[J]. 中国空间科学技术,2024,44(2):40–50.]

Kinematic Modeling and Analysis of a Space Bionic Tree Deployable Antenna Mechanism

TIAN Dake[1,2], *ZHANG Yifan*[1,2], *LI Ming*[2,3], *ZHOU Xin*[2,3], *LIU Rongqiang*[4], *JIN Lu*[5*], *LIN Hao*[1,2], *SHAO Haiqi*[1,2]

(1.School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;
2.National Key Laboratory of Aerospace Mechanism, Shanghai 201108, China;
3.Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201108, China;
4.School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
5.School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract:

Objective Space deployable antennas are a new type of space structure developed with the rapid advancement of aerospace technology. In recent years, with China's increasing frequency of space exploration activities, ranging from the Earth–Moon system to interplanetary space, subsequent aerospace engineering projects have raised urgent demands for deployable antennas that must balance comprehensive performance indicators, including large aperture, lightweight design, and high precision. Meanwhile, kinematic characteristic analysis serves as a crucial approach to validate the feasibility of innovative mechanism designs. Nevertheless, there are relatively few studies on the kinematic modeling of complex space deployable antennas that can be transformed into planar mechanisms. Accordingly, this paper proposes a new configuration of a bionic tree-like deployable antenna mechanism and investigates its kinematic characteristics as a multi-stage, multi-closed-loop mechanism.

Methods First, by analyzing the bionic mechanisms of tree branching structures and large-span tree-like support structures and considering the practical design requirements of deployable antennas, design principles for bionic tree-like deployable antenna mechanisms are proposed. Based on the proposed antenna configuration, the overall design and deployment principle are introduced. Second, based on the closed-loop vector method and coordinate transformation method, the rib units are divided into sub-units, and the internal closed-loop circuits within these sub-units are decomposed. Accordingly, the kinematic models of the rib unit and the entire antenna structure are established, which consist of multi-level deployable units connected in series and nested closed-loop circuits. By analyzing the motion characteristics of the outer branching beam and its spatial geometric relationships, spatial coordinate models of key nodes are established. In addition, a driving strategy of "outer rotation parallel, inner rotation zeroing" is formulated, and a corresponding driving strategy model is established for the branching outer beam to avoid interference during the deployment process. Finally, the antenna kinematic model and the branching outer beam driving strategy model are simulated and analyzed using numerical software such as MATLAB, while the branch slider displacements and the key angular displacements during the deployment process are selected for validation. The 30 m-class antenna scaled model is imported into ADAMS for further comparative validation and analysis.

Results and Discussions The simulation results indicate that, for the driven branching outer beam, there are displacement deviations between the two simulation results obtained using ADAMS and MATLAB. However, the motion trends are consistent, thereby verifying the correctness of the modeling. The primary cause of the error appears to be inaccuracies in the calculation of the spatial coordinate transformation angles. Additionally, the larger size of the antenna appears to amplify the error. At time t = 0 s, the antenna mechanisms are in a fully retracted state, and there is no interference between the rib units. In the initial phase (t = 1～6 s), the antenna mechanism undergoes a gradual deployment process. The key point J3 of the fixed branching outer beam enters the danger zone after t = 2 s, thereby causing interference. Concurrently, the driven branching outer beam maintains parallel alignment with the plane of the trunk deployable unit through continuous external rotation. Notably, the key point does not enter the danger zone during this period. At t = 50 s, the driven branching outer beam has moved away from the danger zone and is in a state of internal rotation. At this time, the antenna has nearly completed deployment, with most of the displacement achieved. This indicates that, although the trunk slider moves at a uniform speed, the synchronized deployment of the branching deployable unit is mainly concentrated within the first 50 s and is therefore not a uniform-speed motion. At t = 100 s, the antenna is fully deployed. The fixed branching outer beam does not reach its preset position due to the absence of internal rotation to offset both the initial angular displacement and that generated by external rotation. In contrast, the driven branching outer beam reaches the preset position through internal rotation. At this stage, the branching outer beam is coplanar with the branching deployable unit, ensuring that the outer layer of the rope is smoothly tensioned. The branching slider displacement

and angular displacement first gradually increase and then gradually decrease during t = 1～6 s, and the trend of the curves is consistent with the motion trajectory of the key point.

Conclusions In this paper, to address the urgent requirements of future large-scale development, a novel configuration of a large-aperture bionic tree-like deployable antenna mechanism is proposed. The antenna mechanism takes the tree branching structure as the bionic prototype, and kinematic modeling, motion characteristic analysis, and numerical simulation are conducted to investigate its performance. By analyzing the bionic mechanism of tree branching geometry, design criteria applicable to deployable antennas are extracted, thereby providing a theoretical reference for the systematic design of antenna configurations. On this basis, a kinematic parametric model of a deployable antenna with multilevel deployable units connected in series and multiple nested closed-loop mechanisms is established, and the mutual coupling relationships between the antenna structural parameters are clarified, which provides a basis for subsequent optimization of antenna structural design. Furthermore, by analyzing the kinematic characteristics of the antenna branching outer beam during the deployment process, a driving strategy of “parallel external rotation and zero internal rotation” is proposed. This strategy has been shown to be effective in avoiding interference during the deployment process of the branching outer beam. The validity and correctness of this strategy are verified through numerical simulation analysis.

Key words: space deployable antenna; structural design; kinematic analysis; spatial geometry modeling; numerical simulation analysis

（编辑　吴芝明）

引用格式: Tian Dake,Zhang Yifan,Li Ming,et al.Kinematic modeling and analysis of a space bionic tree deployable antenna mechanism[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(3):35–47.[田大可,张逸凡,李明,等.星载仿生树状可展开天线机构运动学建模与分析[J].工程科学与技术,2026,58(3):35–47.]