DOI: 10.3901/JME.2020.05.218

双圈六面体环形桁架式可展开天线结构设计*

吴新燕¹ 关富玲²

(1. 浙江农林大学暨阳学院 诸暨 311800;
2. 浙江大学建筑工程学院 杭州 310058)

摘要: 分析双圈六面体环形桁架可展开结构的展开原理, 计算完全展开状态下结构振动频率, 说明结构具有较好的刚度。进行展开过程动力学计算, 优化展开驱动机构、节点、驱动方式及连杆等结构模型的设计, 制作缩比模型, 试验证明结构能顺利展开, 从而验证模型设计的有效性。计算分析和试验结果表明: 双圈六面体环形桁架式可展开天线结构形式简单, 收缩比小, 具有较好的刚度, 在扭簧和电动机拉索力驱动下, 能顺利展开, 可作为可展开天线结构的有效支撑形式。

关键词: 环形桁架; 空间可展开结构; 动力学计算; 同步齿轮; 节点

中图分类号: TU31

Design of Deployable Antenna of Double-loop Hexahedron Truss

WU Xinyan¹ GUAN Fuling²

(1. Jiyang College, Zhejiang A&F University, Zhuji 311800;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: Deployable principle of the double-loop deployable truss antenna is analyzed. The vibrated frequency of the fully deployable structure is calculated. It is illustrated that this structure had strong stiffness. The dynamic analysis of the deployable process is built. In additional, it is optimal designed that driving devices of the deployment, node, driving style and link bar, etc. The model is established. The experiment results indicate that the models can deployable frequently, thus the feasibility of the device is verified. On the basis of the contrast tests of the analysis, deployable antenna of the double-loop truss antenna possesses the property of the simple form, higher shrinkage ratio and strong stiffness. It is verified the structure can deploy smoothly under driving of torsional spring and motor cable force, and it can be used as an effective support of deployable antenna.

Key words: loop-ring truss; space deployment; dynamic simulation; synchronous gear; node

0 前言

可展开结构是由预制单元集成的, 能够从初始的紧密构形展开到预先确定的展开构形的工作形态, 从而成为具有承载能力的稳定的结构体系^[1], 已在土木工程、航天航空工程、汽车制造、玩具工艺、甚至日常生活等许多领域较为广泛的应用。这类结构折叠展开自如的能力, 展现了一个崭新的应用前景^[2]。

空间可展开结构初始收拢于运载工具的有效荷载仓内, 当它被发射进入其运行轨道后, 根据控制指令逐步展开并工作, 可以有效解决运载工具的空间的狭小问题, 对构件主要材料、构形、可靠性等要求较高^[3], 这种结构形式的出现极大提高了航天

器的运载能力^[1], 同时也使得人类对太空的探索有了进一步的发展。由各种形式杆件通过活动关节组成的桁架式可展开结构, 可构造出不同形式的平面或三维可展开结构, 由于具有收缩体积小、刚度高及形状构造灵活等优点^[4], 可以作为桁架式网状抛物面天线反射器的一种有效支撑结构。已吸引 NASA 和欧空局等各国多年来致力于其应用于大型空间可展开天线的研究^[5]。日本 MIURA 提出八面体单元组成的可伸展/折叠臂式桁架^[6], 俄罗斯发射的 RESURS-O 卫星上的 SAR 天线, 在和平号空间站的自然号的双波段 SAR(L、S 波段)天线^[7], 为一类构架式可展开天线; 美国 Northrop Grumman Astro Aerospace 公司先后研发了的三种 Astromesh 环形桁架式可展开天线^[8], LI 等^[9]设计分析、提出了一类全弹性铰链驱动的连杆机构单环形桁架式可展开天线, 浙江大学关富玲等设计、制作了扭簧桁

* 浙江省自然科学基金(GF18E080016)和浙江农林大学暨阳学院人才启动资助项目。20190402 收到初稿, 20190830 收到修改稿

架式展开结构^[10]和环形桁架式可展开结构^[11-12]。但是随着天线口径的进一步增加, 纯弹性铰链驱动和单圈环形桁架天线的刚度、稳定性、形面精度等方面, 难以满足要求。一些研究提出了不同形态的双环桁架结构, SHI 等^[13]提出了双环形可展开结构的概念, 此种类型环形天线展开原理与上下两层展开式环形天线相同。航天航空工程中的可展结构展开后承受较小的外载, 但展开过程要求实现自动化、驱动系统简单、可靠, 还需要考虑展开过程中相连航天器振动所引起的共振问题。ESCRIG 等^[14-17]提出了多种不同的可展结构概念, 研究了相应的理论分析方法, 并逐步将其投入工程应用。

为设计出满足多种技术指标(如大口径、网面精度、结构频率、强度等)的天线, 对天线结构的尺寸参数、节点驱动方式进行优化设计、计算, 目标是得到一个既能满足天线折叠尺寸, 各项静、动力性能要求, 结构重量比较轻, 又能保证天线可靠展开和反射网面的初始精度的方案。本文通过单元构型优选, 提出一种双圈六面体环形可展开桁架结构, 其运动约束简单, 由几何一致的六面体桁架式单元组成, 能较好改善单圈环形桁架天线的刚度、稳定性、形面精度等问题。且随着口径增大, 天线折叠高度和重量不会成比例增加, 在驱动装置中配置带扭簧的同步齿轮, 克服展开过程中不同步现象, 适合于较大口径, 较高刚度等要求的可展开天线。

1 展开过程及折叠高度分析

1.1 展开过程

双圈六面体环形桁架式可展开天线由内、外两圈的 n 边形组成的环形桁架式结构, 完全展开/折叠状态, 如图 1 所示, 外圈主要由上弦杆、下弦杆、竖杆及对角套筒杆通过节点连接, 内圈由上、下弦杆和竖杆通过节点连接, 内外圈之间通过连杆和节点连接而成, 结构展开过程涉及解锁、展开、定位三个阶段。

(b) 部分折叠状态

图 1 双圈六面体环形桁架式可展开天线完全展开/折叠过程状态

其中相邻两个单元如图 2 所示, 六支杆节点 A 与杆 1~6 相连, 在电动机驱动力作用下, 斜腹杆套筒内杆向套筒外杆收缩, 齿轮节点 B 在扭簧和同步齿轮作用下, 从而实现结构整体展开, 具体展开过程可分为以下三个阶段。

(a) 折叠状态图

(b) 展开状态图

图 2 相邻单元折叠、展开图

(1) 解锁阶段, 首先, 天线的外圈的捆绑绳索解开, 由于天线收拢时, 相邻两单元弦杆与竖杆之间几乎成竖直状态, 如图 2a 所示, 在齿轮节点上安装扭簧, 当折叠时捆绑天线外圈的绳索解开后, 扭簧稍微弹开一个角度以摆脱自锁位置, 带动扭簧上的同步齿轮及桁架的弦杆, 使得桁架结构随着扭簧的弹开微微展开一个角度, 防止初始展开出现锁止现象。

(2) 展开阶段, 电动机启动, 将穿过桁架外圈对角杆的牵引拉绳收紧, 滑动套筒式对角伸缩杆的套筒外管向内管收缩; 在电动机拉动绳索作用下, 滑动套筒式对角伸缩杆的套筒外管进一步向内管收缩, 桁架单元由细长菱形逐渐展开变为矩形, 在同步齿轮驱动作用下, 使得天线外圈平稳展开, 同时, 通过内、外圈之间连杆带动内圈展开, 实现天线的内、外圈同时展开。

(3) 定位阶段, 电动机停止转动, 拉索拉紧, 驱动外圈对角斜腹套筒外管向内管收缩到位, 稳定天线最终展开状态, 防止其发生反向收拢运动。同时, 当天线展开到弦杆与竖杆成 90° 时, 在齿轮节点上的限位块和对角套筒杆内的顶紧装置的作用下, 阻止天线发生反向运动, 结构锁定, 环形桁架式天线完成展开过程。齿轮节点内的扭簧完全展开后, 辅助结构展开到位后的锁定作用。

1.2 折叠高度分析

天线支撑结构采用双圈环桁架, 内外环边数相等, 设天线环向等分数为 n , 外环半径为 R , 内环半径为 r , 按正多边形弦长计算公式可得

$$s_1 = 2r \sin(\pi/n) \quad (1)$$

$$s_2 = 2R \sin(\pi/n) \quad (2)$$

式中, s_1 、 s_2 分别为内、外圈桁架弦杆长。

由以上折叠/展开过程分析可见, 影响天线最小折叠高度的主要因素是外圈弦杆长和连杆长, 最大折叠高度为竖杆长与外圈弦杆长或连杆长之最大值。即天线结构折叠高度

$$H_1 = \max(h + s_1, h + L) \quad (3)$$

式中, h 为竖杆长; L 为内外圈之间连杆长。

外圈弦杆和连杆的长度主要受制于天线边数和天线口径, 随着天线口径的增大和天线多边形边数的增加, 结构总折叠高度增幅呈减小趋势, 且随着天线口径的增大, 这种趋势更明显。所以采用双圈六面体环形桁架式可展开天线, 总的折叠高度不会随着天线口径的增大而成正比增大, 是一种较理想的可展开结构形式。

2 固有频率和模态分析

天线在展开过程中承受较大的振动, 其动力特性将直接影响到和它连接的卫星的振动情况。模态特征能够从质量和刚度特性上反映天线的力学性能, 它不但直接影响天线的工作性能, 而且影响天线控制系统的设计^[18]。

用有限元软件 ABAQUS 建立了完全展开状态外直径为 50 m 的 36 边双圈六面体环形桁架式天线的数学模型, 进行算例分析。边界条件是在外圈的一根竖杆上施加固定约束, 即约束该杆的三个方向的位移和转角的自由度。碳纤维复合材料管、凯芙拉绳索和铝合金节点的几何参数选择如表 1 所示^[19-20], 杆单元采用三维三次梁单元(B33)。图 3 为双圈环形桁架天线完全展开时的前二阶的振型放大示意图, 第一阶振型表现为面外横向的摆动, 第二阶振型表现为绕 Z 轴的整体转动。

表 1 材料的几何参数

材料	弹性模量/($\times 10^{11}$ N/m ²)	密度/($\times 10^3$ kg/m ³)	临界阻尼(%)	屈服应力/MPa	外管直径/mm	壁厚/mm
碳纤维管	2.4	1.8	6	2 000	38	5
凯芙拉绳索	124	1.45	2	6 300	—	—
铝合金节点	0.72	2.72~2.82	5	200	—	—

计算双圈环形桁架式天线完全展开时的前十阶振型, 一阶振型表现为以固定杆为基点一边摆动、二阶振型表现为以固定杆为基点二边摆动; 三阶至七阶振型表现为 OXY 平面内收缩或拉伸或转动; 八阶振型表现为以约束点为基点扭曲; 十阶振型表现为以约束点为基点向中间挠曲。其中前二阶振型放

大示意图, 如图 3 所示。

同时计算了相同直径的单圈环形桁架结构的前十阶振型, 比较如表 2 所示, 由表 2 可见, 双圈环型桁架式结构的振动频率明显高于单圈环形式天线, 说明大口径双圈环形桁架式天线结构的刚度大, 提高了结构的整体稳定性。

表 2 单圈与双圈环形桁架天线完全展开时的前十阶频率(Hz)

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
单圈频率	0.18	0.27	0.51	1.01	1.08	1.84	2.58	2.78	3.88	5.14
双圈频率	0.47	0.50	1.86	3.04	4.87	5.34	8.21	10.13	10.72	13.58
双圈实测频率	0.55	0.53	1.87	—	—	—	—	—	—	—

图 3 双圈环形桁架天线完全展开状态时的前二阶的振型图

3 展开过程动力学仿真计算

利用 ADAMS 软件计算十八边双圈六面体环形桁架天线展开过程, 在建模过程中, 主要考虑模型的质量分布、几何特征和主要尺寸, 其收拢状态三维模型如图 4a 所示, 通过坐标变换, 将局部坐标调整到桁架结构不同边的各个不同平面, 对模型施加边界条件、约束、力、运动副, 连接杆件采用碳纤维复合材料, 其具有质轻、高强的优点, 其材料属性见表 1, 双圈六面体环形桁架式可展开天

线的主要约束形式及其对应采用的约束副有以下几种情况。

- (1) 旋转铰链约束采用旋转副。
- (2) 同步齿轮约束采用齿轮副。
- (3) 套筒约束采用滑移副。
- (4) 固定杆约束采用固定副。

双环形桁架可展开天线结构施加的驱动力包括二部分: ① 扭簧产生的扭簧力矩; ② 对角斜腹杆的拉索作用产生的驱动力。

添加了相应的约束、驱动力、自定义的用户子程序后, 进行展开过程仿真分析计算, 展开过程中的几个状态如图 4 所示。

图 4 展开过程示意图

分析结果说明, 此天线结构可以顺利展开到预定位置, 完全展开时间为 750 s。可展开天线展开过程, 杆件对节点产生较大的作用力, 分别计算图 4a 中所示的六支杆节点 A 和齿轮节点 B 在展开过程承受的作用力如图 5 所示。

图 5 不同铰链处承受作用力

由图 5 可见, 在展开未了时, 节点承受较大的作用力曲线在结构锁定时出现跳跃, 说明在锁定时节点承受的作用力有明显的波动。齿轮节点 B 上受到的最大作用力 1510 N, 六支杆节点 A 受到的最大作用为 489 N, 所以, 齿轮节点上较六支杆节

点承受更大的作用力。分析原因是齿轮节点中限位块和扭簧在完全展开时锁定结构造成较大的作用力。本文仿真计算中的锁紧采用的用户子程序强制停止铰链运动, 所以造成展开终了时, 对节点铰链形成较大的冲击作用力。

4 模型的结构设计

4.1 同步齿轮设计

在本案设计中, 采用较大直径的分度圆齿轮, 切割成对展开过程起作用的 1/4 轮齿, 可以减轻结构的整体重量, 如图 6 所示, 并将齿轮端焊接出一段连杆套管, 与弦杆铆接相连。这样齿轮与弦杆实现整体连接, 使的齿轮运动过程中能充分起到同步作用。

图 7 为外圈齿轮节点三维示意图, 同步啮合的齿轮能保证相邻两个弦杆在运动过程中转过的角度是相同的, 以达到同步展开效果。当天线桁架结构的弦杆与竖杆之间的夹角由初始时接近竖直的 180° , 展开到 90° , 需要设置限位装置, 防止天线发生反向运动。扭簧安装在弦杆和竖杆之间, 在展开过程中通过扭簧挡杆能够提供初始展开力矩。节点扭簧驱动在展

开初始阶段提供启动力矩,便于天线结构顺利展开。

图6 齿轮与弦杆连接方式

图7 整体式节点设计

主要通过以下方式将齿轮节点设计成整体式:

- ① 节点外挡板采用线切割式整体加工;
- ② 限制弦杆和连杆继续发生反向运动的作用的限位块,同时可加强节点整体性连接;
- ③ 竖杆连接件与节点焊接,增加了节点与杆件的约束作用。

采用了整体式设计,主要作用有:① 有效保证同步齿轮的同步作用;② 保证相邻单元在一定夹角内运动;③ 减小装配应力。

4.2 节点设计

双圈桁架式可展开天线的主要节点样式有:外圈六支杆节点,外圈齿轮节点,内圈四支杆节点,内圈齿轮节点,由于展开过程相邻单元要严格保持在同一

平面内,所以在节点设计中,首先考虑了整体性设计原则。如图8所示为六支杆节点三维图,节点主要采用线切割和焊接方式加工。节点通过斜拉安装件与对角斜腹杆相连,通过横杆连接件与弦杆相连,通过连杆套上的活动关节与内外圈连杆相连。

图8 外圈六支杆节点三维示意图

外圈六支杆节点的相对较大,根据折叠、展开过程分析图2及式(1)、(2),可以计算六支杆节点长边尺寸

$$l_1 = 2 \sin \left(\pi - \frac{\pi}{n} \right) \left(\frac{c}{2} + d_1 + \frac{d_2}{2} + e \right) \quad (4)$$

式中, c 为齿轮节点尺寸; n 为环形桁架天线的多边形边数; d_1 为斜腹杆外管横截面的直径; d_2 为弦杆横截面的直径; e 为杆件间的间隙。

4.3 驱动结构

双圈桁架式可展开天线若在结构的节点或杆件中点处按特定的要求设置扭簧,折叠时扭簧受预应力存储变形能,结构解锁后,扭簧释放弹性能量,可驱动结构自动展开;然后通过杆件中间穿过拉索,在通过电动机带动结构展开。其驱动装置主要有以下两部分。

(1) 扭簧。由于天线收拢时,相邻两单元弦杆与竖杆之间几乎成竖直状态,初始展开时,可能出现展开锁止现象,在齿轮节点上安装扭簧,如图9所示,当收拢时捆绑天线外圈的绳索解开后,扭簧产生的扭簧力矩使其稍微弹开一个角度以摆脱自锁位置,带动扭簧上的同步齿轮及桁架的弦杆展开,使得桁架结构随着扭簧的弹开微微展开一个角度。

(a) 初始状态

(b) 展开过程

(c) 完全展开

图9 同步齿轮上扭簧驱动

(2) 穿过对角斜腹杆的拉索。随着桁架的展开,扭簧作用力减弱,外圈滑动套筒式对角可伸缩斜腹杆内的拉索在电动机作用下,将穿过桁架外圈对角杆的牵引拉绳收紧,使得滑动套筒式伸缩杆的套筒外管向内管收缩,桁架单元由细长菱形逐渐变为矩形,实现天线外圈相邻单元对称同步平稳展开,同时,通过内、外圈之间连杆带动内圈展开,辅以内、外圈之间的拉力弹簧作用,实现桁架天线的内、外圈同时展开。

4.4 展开试验

制作加工出一套完全展开直径为 4.2 m 双圈十八边形桁架式可展开天线模型,结构总质量为 9 kg,采用一根杆固定的约束方式,当外圈的约束绳索解开后,天线微微弹开一个角度,然后依靠电动机拉动对角斜腹杆内的绳索带动天线展开。展开过程如图 10

(a) 收拢状态

(b) 展开过程

(c) 完全展开

图10 双圈环形桁架式可展开天线展开过程试验

所示,试验结果证明双圈环形桁架式可展开天线在扭簧和电动机驱动下能顺利展开,结构设计合理。

采用悬挂锤击法,通过加速度传感器、力传感器,利用南京安正软件工程有限公司的振动及动态信号采集分析系统 CRAS V6.2 分析软件进行数据记录和处理。测得直径为 4.2 m 双圈十八边形双环可展桁架的基频为 0.55 Hz,略高于有限元计算结构 0.47 Hz。究其原因是,由于试验中抵消重力采用了多点悬挂法测试,略增加了结构刚度。

5 结论

根据周边可展桁架的结构设计与展开收纳机理,分析了双环可展桁架结构的展开原理、折叠高度和运动方式;应用 ADAMS 仿真软件计算了结构展开与收纳过程;设计并制作双环六面体可展桁架结构模型,试验证明了双环可展桁架的可展性。

双圈六面体环形桁架天线是由内、外两圈正多边形组成的对称的闭环结构,完全展开后结构的整体刚度高,具有较大跨度,可折叠,运输方便,可重复使用,且收缩体积小、刚度高及形状构造简单灵活等优点,可以作为网状抛物面反射器的一种有效支撑结构。

参考文献

- [1] 吴明儿,关富玲.可展结构的展开分析[J].杭州电子工业学院学报,1993,13(2):13-21.
WU Minger, GUAN Fuling. Analytical shape finding for deployable structures[J]. Journal of Hangzhou Institute of Electronic Engineering, 1993, 13(2): 13-21.
- [2] HIROAKI T. Design optimization studies for large-scale contoured beam deployable satellite antennas[J]. Acta Astronautica, 2006, 58: 443-451.
- [3] LIU Zhiquan, QIU Hui, LI Xiao, et al. Review of large spacecraft deployable membrane antenna structures[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017(30): 1447-1459.
- [4] 吴新燕.双圈环形桁架式可展天线结构设计与分析[D].杭州:浙江大学,2011.
WU Xinyan. Design and analysis of double-loop truss deployable antennas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [5] GUNNAR T. Deployment tensegrity structure for space applications[M]. Royal institute of Technology Department of Mechanics, 2002.
- [6] TIBERT A G, PELLEGRINO S. Deployable tensegrity masts[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures,

- Structural Dynamics, and Materials Confere, April 7-10, 2003, Norfolk, Virginia. AIAA, 2003: 1-10.
- [7] YOU Z, PELLEGRINO S. Cable-stiffened pantographic deployable structures part 2: Mesh reflector[J]. AIAA Journal, 1997, 8(35): 1348-1355.
- [8] GAYRARD J D, CAILLE G. A very large patch receiving antenna for mobile communication satellites[C]// 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit, 2004, May 9-12, Monterey, California. AIAA, 2004: 3195.
- [9] LI Bing, QI Xiaozhi. Modeling and analysis of deployment dynamics for a novel ring mechanism[J]. Acta Astronautica, 2016, 120: 59-74.
- [10] 侯国勇. 桁架式展开结构设计、分析及试验[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- HOU Guoyong. Design, analysis and experience of truss deployable structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [11] 张京街. 弹簧驱动空间可展桁架结构设计与分析理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- ZHANG Jingjie. Design and analysis researches for truss structure driven by spring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [12] 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 Mengliang, GUAN Fuling. Deployment dynamic analysis of circular truss deployable antenna with friction[J]. Chin. J. Space Sci., 2006, 26(3): 220-226.
- [13] SHI Chuang, GUO Hongwei, LI Meng. Conceptual configuration synthesis of line-foldable type quadrangular prismatic deployable unit based on graph theory[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018(121): 563-582.
- [14] ESCRIG F, VALCARCEL J P. Geometry of expandable space structures[J]. International Journal of Space Structures, 1993, 8(1-2): 71-84.
- [15] 张逸群, 段宝岩, 李团结. 空间可展开天线展开过程轨迹与控制系统集成设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 21-28.
- ZHANG Yiqun, DUAN Baoyan, LI Tuanjie. Integrated design of deployment trajectory and control system for deployable space antennas[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 21-28.
- [16] YAO Yanan, YAN Hongsen, ZOU Huijun. Dynamic design of variable speed planar linkages[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 18(1): 51-54.
- [17] WANG Yan, DENG Zongquan, LIU Rongqiang, et al. Topology structure synthesis and analysis of spatial pyramid deployable truss structures for satellite SAR antenna[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 683-692.
- [18] RAHMAT-SAMII Y. An efficient computational method for characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1983(31): 92-98.
- [19] RAHMAT-SAMII Y, LEE S W. Vector diffraction analysis of reflector antennas with mesh surfaces[J]. IEEE Tran. on Antennas and Propagation, 1985, 33(1): 76-90.
- [20] 王莉. 几种铝合金的力学性能及阻尼特性[J]. 轻合金加工技术, 2005, 12(33): 48-50.
- WANG Li. Influence of aging on mechanical properties and damping behavior of several aluminium alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2005, 12(33): 48-50.

作者简介: 吴新燕, 女, 1976 年出生, 博士。主要研究方向为空间结构、可展开结构、钢结构。

E-mail: xinyan@zju.edu.cn

关富玲(通信作者), 女, 1945 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为空间可展开结构、大跨空间结构。

E-mail: ciegtf@zju.edu.cn