

六棱柱单元可展天线结构设计*

陈向阳

(浙江省交通设计院 杭州 310007)

关富玲

(浙江大学土木工程系)

摘 要

提出了一个利用伸缩杆驱动的六棱柱展开单元,该单元可动机构数较少,展开可靠度高,结构刚度好,具有广泛的应用前景.利用伸缩杆六棱柱单元,文中设计了一大型构架式切割抛物面天线,并简要介绍了天线的可展节点细部设计.该天线的形面精度较高,质量轻,造价低.

关键词 可展结构—可展天线—六棱柱单元

1 引 言

由于受有效载荷仓的容积限制,大量的大型航天器采用了可展结构.本文利用拉伸弹簧构造了一个可展伸缩杆六棱柱单元,和国内外类似的可展结构单元相比,该单元的所有展开机构均不需锁定,展开可靠度较高,且具有良好的几何适应性.利用该伸缩杆单元,文中设计了一个大型构架式星载抛物面天线,并详细地介绍了主要可动节点的细部构造.

2 伸缩杆六棱柱单元结构分析

图1所示为利用弹簧伸缩杆驱动的正六棱柱展开单元,上下表面的12根杆件和6根竖杆及中心杆均是普通铰接构件,不可改变长度,6根斜腹杆相交于一点,腹杆内设计有伸缩弹簧,可以伸缩而改变斜腹杆的长度,单元边上的虚线表示索单元.完全折叠状态时,结构折叠成捆状,杆件紧密相依.展开时,由于处于拉伸状态的弹簧的收缩,驱动该六棱柱单元展开.当弹簧收缩至预定位置,由于受套管限制而结束展开过程.

空间可展结构的主要指标是收纳率、质量和展开可靠度.高收纳率保证结构能折叠

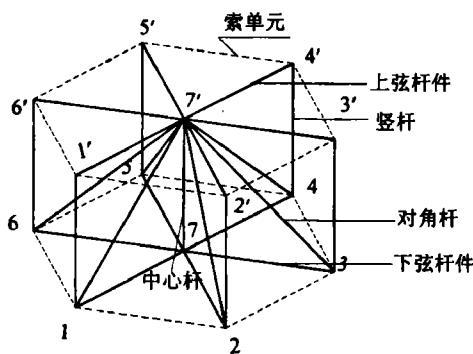


图1 正六棱柱单元
Fig.1 Hexapod unit

* 国家自然科学基金 (69982009) 和国家 863 高技术项目 (863-2-2-1-12) 资助课题
2000-05-18 收到原稿, 2000-11-15 收到修定稿

成较小的体积而置于有效载荷仓中; 质量轻, 能降低发射成本; 展开可靠度高, 尽可能地降低发射风险; 刚度较高, 能避开姿态控制的敏感频率段。

保证较高的展开可靠度, 主要是减少可展结构机构数, 特别是完全展开后需要锁定的机构。一个六棱柱单元共含 6 根伸缩杆, 没有其他可动机构, 完全展开时, 受弹簧套管的限制而停止展开运动, 不需利用其他装置锁定, 因而具有很高的展开可靠度。文献 [1] 提出的另一种六棱柱展开单元 Hexapod 利用套筒作为可动机构, 具有较少的机构数, 但几何适应性较差, 设计成抛物面时, 节点结构复杂, 且套筒滑动容易卡死。文献 [2] 提出的 Packtruss 也是一种较有名的六棱柱展开单元, 其他可用于构造二维可展结构的非六棱柱单元, 主要还有 VLD 和 SHDF truss^[3], 各模型的具体机构数如表 1 所示, 说明本文所提出的可展单元具有最小的机构数, 且不需锁定, 展开可靠度最高。

表 1 各种展开单元比较

单元	需锁定机构数	不需锁定机构数	收纳率
Hexapod A	3	6	0.0781
Packtruss	12	0	0.0625
VLD	12	0	0.0625
SHDF	1.5	0	0.0625
本文单元	0	6	0.0625

收纳率是可展结构的一个基本技术指标。为简单起见, 研究正六棱柱单元的收纳率时, 假设单元的所有刚性杆件的管径为 d , 六棱柱的边长为 l 。展开后六棱柱单元的高度为 h , 完全折叠的六棱柱平面投影面积减少约 $(4.0d/l)^2$ 倍, 高度则从完全展开状态的 h 变为 $l+h$, 因而伸缩杆六棱柱单元的收纳率为

$$\frac{l^2 h}{(4.0d)^2 (l+h)} = 0.0625 \frac{l^2 h}{d^2 (l+h)}. \quad (1)$$

式 (1) 的值越大, 说明单元的收纳率越高。收纳率和杆件管径密切相关, 若能采用更细的构件, 收纳体积会有显著减少。几种展开单元的收纳率系数如表 1 所示, 说明各种展开单元的收纳率大体相同。

伸缩杆六棱柱单元虽然机构数很少, 但具有很广的适用性, 能方便地形成各种复杂结构, 如图 1 所示。六棱柱单元的可折叠条件为

$$l_{ii'} + l_{i'7'} = l_{i7} + l_{77'}, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (2)$$

若各单元的下表面是由上表面竖直向下平移一定距离而成, 则有

$$l_{i7} = l_{i'7'} \text{ 和 } l_{ii'} = l_{77'}, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (3)$$

即单元的可折叠条件能自然满足, 没有因为折叠约束条件而引入的数值误差。

3 可展抛物面天线几何分析和可动构件设计

利用本文提出的六棱柱展开单元,设计了一个 $5.0\text{ m} \times 2.8\text{ m}$ 的切割抛物面天线,焦距为 4.0 m . 天线设计需要满足的条件有: (1) 可折叠几何约束条件; (2) 上表面(反射面)位于给定的抛物面上; (3) 保证结构具有一定的刚度; (4) 较轻的质量; (5) 造价较低廉,尽量使节点和杆件的类型统一. 其中前两个条件必须严格满足,后两项条件是设计的优化指标,不一定严格满足,第三项条件主要和结构的厚度及约束条件相关. 在平面上按正六边形划分网格,并将平面点投影至抛物面,使其满足条件 (2),即

$$z_j - \frac{1}{2f}(x_j^2 + y_j^2) = 0, \quad (4)$$

其中 f 为抛物面的焦距. 背架的下表面可由上表面竖直向下平移求得,即

$$z_j - \frac{1}{2f}(x_j^2 + y_j^2) + h = 0. \quad (5)$$

h 为上下表面的竖直距离,由结构的刚度要求确定. 若反射面节点和杆长的精度为 0.01 mm ,则天线反射面的形面精度可以利用下式计算:

$$\text{rms}[E_6] = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{6i}^2 \right)^{1/2} = 9.5 \times 10^{-7}. \quad (6)$$

其中 E_{6i} 表示用节点 i 坐标代入等式 (4) 左端项的值, n 为天线上表面节点总数. 说明这类构架式可展天线反射面较容易保持很高的精度,而可折叠条件可以精确满足,不需利用杆件的小变形去协调,不会引入误差.

对角杆的构造比较复杂,如图 2 所示,主要由两根弹簧、两根弹簧套管、一根细杆和两个接头组成. 弹簧两头分别连接于接头和细杆,接头和套管在安装完毕后利用销钉固定. 弹簧套管用于在完全展开后结构的定位. 展开过程中,弹簧始终在套管内运动,不会受外界因素干扰,展开可靠度较高.



图 2 对角杆细部结构设计
Fig.2 The details of diagonal bar

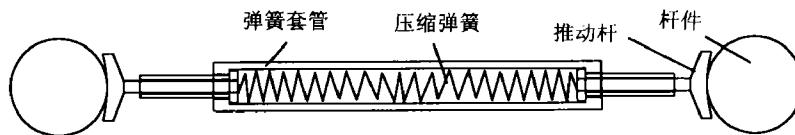


图 3 初始扰动装置
Fig.3 Construction of initial perturbation

由于结构在完全折叠时处于自应力状态, 合适的初始扰动装置是保证结构顺利展开所必不可少的措施, 因而在中心竖杆设计了 3 个互成 120° 的通孔, 并在孔内设置了压缩弹簧. 初始扰动装置如图 3 所示, 由一根压缩弹簧及套管和两根“弯月”形推动杆组成. 完全折叠时, 杆件通过推动杆使弹簧压缩, 存储了预应力. 被压缩的弹簧利用连接的推动杆推动杆件展开到 5° 左右, 然后对角杆内的拉伸弹簧逐渐发挥作用, 驱动整个结构展开. 图 4 是天线铝合金模型的照片.

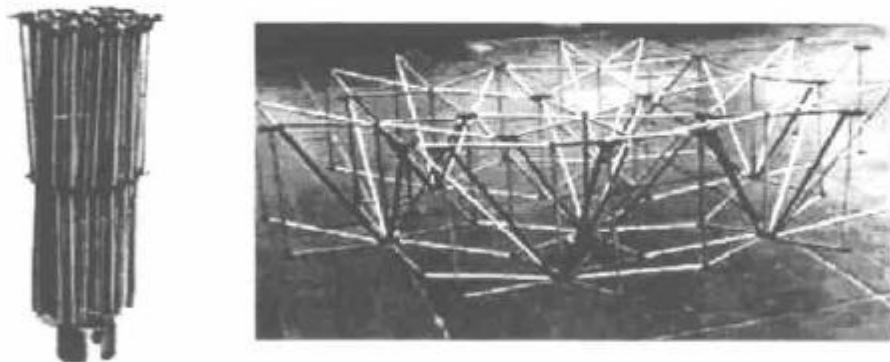


图 4 模型照片

Fig.4 The photo of the aluminum alloy model

5 结 语

1) 本文提出了一个利用伸缩杆驱动的六棱柱展开单元, 该单元没有展开后需要锁定的机构, 可动机构较少, 因而展开可靠度高, 且具有很广泛的几何适应性, 能方便地构造复杂二维可展结构.

2) 利用伸缩杆六棱柱单元, 文中设计了一大型构架式切割抛物面天线, 该天线的形面精度较高, 质量轻, 造价低. 文中详细地介绍了天线模型的对角杆和初始扰动装置等主要可动构件的细部构造.

3) 利用通用有限元分析软件 Ansys 对天线进行静力、瞬态响应和频率响应分析, 分析结果说明天线具有很好的结构刚度, 自振频率能控制在 2 Hz 以上, 并具有很好的抗冲击能力.

参 考 文 献

- [1] Junjiro Onoda, Fu Danying, Kenji Minesugi. Two-dimensional deployable hexapod truss. *J. Spacecraft Rockets*, 1999, 33(3):416—421.
- [2] Hedgepeth J M, Miller R K. Structural concepts for large solar concentrators. *Acta Astron.*, 1988, 17(11):79—89.
- [3] Onoda J. Two-dimensionally deployable truss structures for space application. *J. Spacecraft Rockets*, 1988, 25(2):109—116.

A LARGE DEPLOYABLE HEXAPOD PARABOLOID ANTENNA

CHEN Xiangyang¹ GUAN Fuling²

¹(*Zhejiang Provincial Design Institute of Communication, Hangzhou 310007*)

²(*Civil Engineering Department, Zhejiang University*)

Abstract

Deployable structures are increasingly interested for engineers in the aerospace field. A deployable hexapod truss is developed for space application in this paper. The most significant feature is no mechanism to be locked during the deployment, compared with previous varied deployable units. It's packaging ratio is shown to be good too. A large paraboloid truss antenna is designed by using the deployable hexapod truss, the geometric condition and structural precision are also studied. An aluminium alloy model is made in the last two years. The details of the movable parts, such as diagonal retractable bars and initial perturbation constructions are introduced in detail in this paper. It is proved by numerical results of structure analysis that the stiffness of antenna is high enough for space application.

Key words Deployable structure, Deployable antenna, Structure design