0254-6124/2010/30(1)-000–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Cheng Liang, Guan Fuling, Zhang Huifeng. Deployment experiment of deployable truss antenna. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(1): 79-84

构架式可展开天线的展开试验研究 *

程 亮 关富玲 张惠峰

(浙江大学土木工程系空间结构研究中心 杭州 310058)

摘 要 对构架式可展开天线结构的缩比试验样机进行了展开试验, 设计了试验方案, 采集了运动过程中测点的展开加速度; 然后用基于 Moore-Penrose 广义逆矩阵理论编制的程序的分析结果与试验进行了对比, 试验结果与理论分析结果较吻合, 可证明广义逆矩阵理论分析此类结构的可行性.

关键词 可展天线; 试验方案; 展开试验; 广义逆

中图法分类号 V 414

Deployment Experiment of Deployable Truss Antenna

CHENG Liang GUAN Fuling ZHANG Huifeng

(*Space Structures Research Center, Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou* 310027)

Abstract Experimental study of a proportional deployable truss antenna model is presented. The experimental scheme was discussed. The motioning acceleration of measuring nodes was gathered during movement. Then the experimental result was compared with the analytical result using the program based on the Moore-Penrose generalized inverse matrix theory. The reliability of the generalized inverse matrix theory to analyze this kind of structures was proved.

Key words Deployable antenna, Experiment schemes, Deployment experiment, Generalized inverse matrix

1 引言

当前, 国内外构架式可展开天线的研究主要集中于对展开过程的分析, 这是因为结构能否顺利展开关系到航天器发射的成败. 目前已有研究主要是采用多刚体动力学及广义逆矩阵方法进行展开过程分析. 早在 20 世纪 60 年代, 有学者就开始了以航天器为背景的多体系统动力学研究, 广义逆矩阵理论在空间可展开结构的展开过程分析中也不断得以运用. 在中国构架式可展开天线已经从理论研究进入工程实际研究阶段, 相应的测量和加工技术得到了较大发展. 大型可展开天线在装配前完成需进行多次展开试验, 以保证展开的可靠性. 这种展开试验必须在零重力环境模拟设备的条件下进行. 对于不同结构形式及不同展开方式的天线, 需要根据其结构、展开方式和运动轨迹研制相应的零重力设备 [1].

* 国家自然科学基金项目资助 (69982009)

2009-02-20 收到原稿, 2009-06-11 收到修定稿

E-mail: chltumu@163.com

2 可展天线的试验样机

为了进行展开过程试验, 根据扭簧驱动四面体构架式天线结构设计方案, 加工制作了两圈构架式天线结构的试验样机. 此样机整体模型及节点如图 1 和图 2 所示.

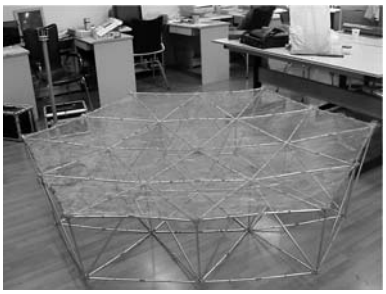


图 1 天线试验样机的展开状态

Fig. 1 Deployed state of truss antenna model

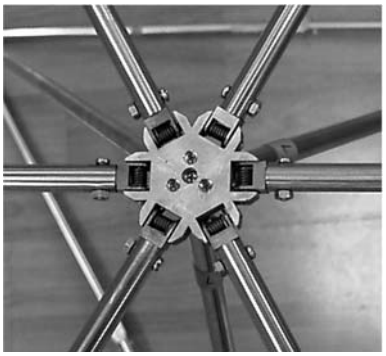


图 2 模型节点

Fig. 2 Node in model

可展开天线样机的主要几何尺寸为: 天线口径 2070 mm, 天线高 579 mm, 抛物面焦距 2170 mm, 天线面型精度 2 mm (rms) (S 波段). 杆件材料采用不锈钢, 节点采用铝合金, 反射面网采用铜丝网.

3 试验方案研究

天线的结构形式、展开方式和展开运动轨迹是确定零重力模拟设备形式的重要依据, 设计的零重力模拟设备需以最简单和最可靠的方式来满足特定天线结构展开过程的卸载需求. 考虑到本试验样机仅为两圈, 天线尺寸和质量均不大, 设计了以下三种试验方案.

3.1 设计方案一

将天线第一圈上的 6 个节点悬挂, 收拢状态时索对节点拉力由里向外倾斜, 展开状态时索对节点拉力由外向里倾斜, 如图 3 所示.

3.2 设计方案二

由下部中心立柱对天线反射面中心节点进行支撑, 此外, 仍如方案一将天线第一圈上的 6 个节点悬挂, 在天线收拢时绳索处于松弛状态, 当天线完全展开或在展开过程中该 6 个节点到索上端固定点距离大于或等于索长度时索才会张紧, 如图 4 所示.

3.3 设计方案三

由上部中心立柱对天线反射面中心节点进行悬挂支撑, 此外, 从中心立柱上伸出三根支杆对天线第一圈上 6 个节点中的 3 个进行悬挂支撑, 并将三根支杆通过三小段柔软的绳索连接到立柱上. 在展开过程中绳索逐渐张紧, 而天线收拢时绳索处于松弛状态, 在此条件下天线能够顺利展开, 如图 5 所示.

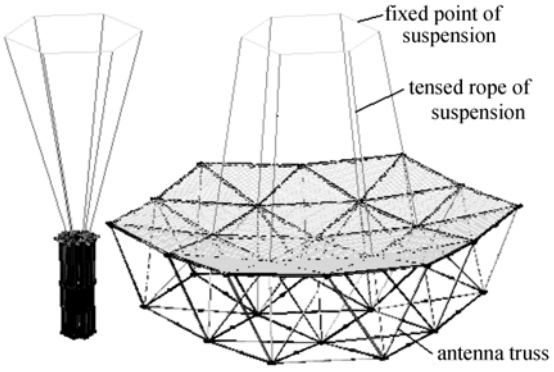


图 3 天线的展开试验方案一

Fig. 3 First deployment experiment scheme of antenna

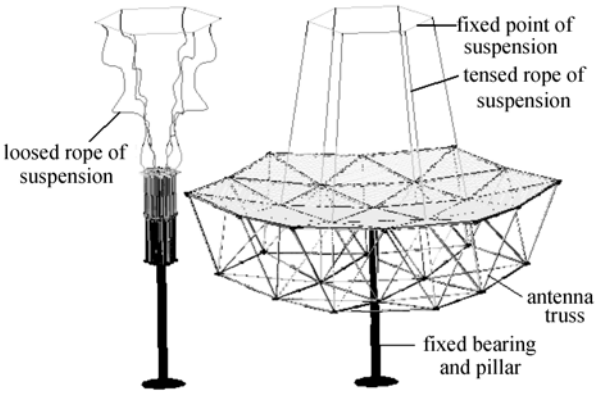


图 4 天线的展开试验方案二

Fig. 4 Second deployment experiment scheme of antenna

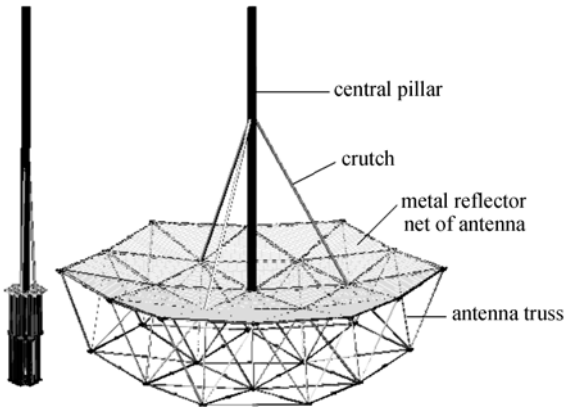


图 5　天线的展开试验悬挂方案三

Fig. 5　Third deployment experiment scheme of antenna

3.4　试验方案的比选

方案一的优点是悬挂简单可靠, 缺点是悬挂的索在整个试验过程中都处于张紧状态, 而天线试验模型本身较小, 张紧索牵引可能会引起较大的误差.

方案二的优点是天线展开过程中大部分时间处于中心支撑下的自由运动状态, 缺点是运动过程中上部悬挂支撑、下部立柱支撑, 高度调整起来比较繁琐, 并且没有消除重力影响.

相比前两种试验方案, 方案三容易操作, 且对天线自由展开误差的影响小, 所以最终采用方案三进行展开过程试验测试.

4　展开试验

通过加速度传感器, 测量构架式天线在展开运动过程中特征节点的加速度. 本试验的主要试验设备有: 计算机、CRAS 采集分析仪 (8 通道)、电荷放大器、加速度传感器 (单向和三向)、PCB 手持激振器、输出线、低噪声电缆、电源线、输出转换接口. 采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软件 CRAS V6.2 进行数据记录和处理.

展开过程试验时, 测量天线反射面上节点的加速度, 两圈天线反射面节点标号如图 6 所示. x, y 坐标轴位于水平面上, 而 z 轴按右手规则竖直向上.

将三根支杆分别连在 4, 7, 14 三节点上, 分别在 1, 8, 19 三节点布置加速度传感器, 测点方向与加速度传感器方向之间的对应关系如表 1 所示. 展开试验如图 7 所示. 共进行了 4 次有效测量.

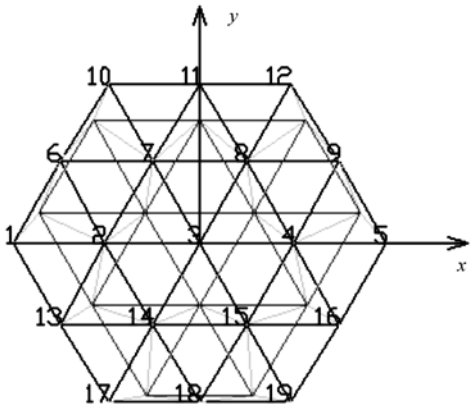


图 6　节点布置标号

Fig. 6　Assigned node number

表 1　传感器方向与测点方向对应关系

Table 1　Corresponding relationship of the sensor direction and measuring node direction

传感器	方向	测点	方向
053	x	1	x
053	y	1	z
056	x	19	x
056	z	19	y
064	x	8	x
064	z	8	y



图 7　天线展开试验的收拢和展开状态

Fig. 7　Furled and deployed state of deployable antenna experiment

5 试验结果及与理论分析结果的比较

5.1 实验结果

用加速度传感器测量每次展开时测点的展开加速度, 试验中测量了 1 号节点、8 号节点、19 号节点在展开过程中的最大加速度, 如表 2 所示.

表 2 试验测试的最大加速度值

Table 2 Maximum acceleration of experimental result

节点	坐标	试验测试		
编号	方向	试验次数	测量值/($\mathrm{m\cdot s^{-2}}$)	平均值 ($\mathrm{m\cdot s^{-2}}$)
1	x	1	213.932	193.155
		2	174.187	
		3	175.432	
		4	209.068	
	z	1	204.171	204.759
		2	236.709	
		3	191.268	
		4	186.889	
8	x	1	111.189	119.266
		2	143.106	
		3	107.483	
		4	115.285	
	y	1	170.428	204.664
		2	235.664	
		3	226.497	
		4	186.066	
19	x	1	191.256	134.890
		2	106.676	
		3	131.170	
		4	110.456	
	y	1	313.591	283.051
		2	309.818	
		3	290.318	
		4	218.478	

5.2 理论分析

为了将试验结果与理论分析结果进行对比, 用基于广义逆理论编制的程序对相同几何及材料参数的两圈天线结构模型进行仿真分析. 根据应用于刚体的第一类 Lagrange 方程 [2]:

$$\sum_{i=1}^{3n}\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i}-\frac{\partial T}{\partial x_i}-\boldsymbol{Q}\right)\Delta x_i = (\Delta \boldsymbol{X})^{\mathrm{T}}\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial T}{\partial \dot{\boldsymbol{X}}}-\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{X}}-\boldsymbol{Q}\right)=0, \quad (1)$$

应用广义逆矩阵理论可推导出

$$\begin{cases}\phi(x,t)=0,\\ \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{H}\ddot{\alpha}+\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(-\boldsymbol{M}\boldsymbol{A}^{+}\dot{\boldsymbol{A}})\boldsymbol{H}\dot{\alpha}-\\ \quad \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{x},\dot{\boldsymbol{x}})=0.\end{cases} \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{Q}$ 分别为多体系统的广义质量阵、约束方程的雅可比矩阵及广义驱动力矩阵; $\boldsymbol{H}$ 为由约束方程雅可比矩阵的零空间基组成的矢量, 可由式 $[\boldsymbol{I}_n-\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}]=\boldsymbol{H}$ 求得, $\boldsymbol{\alpha}$ 为与运动有关的列矢量, 其对应一组独立准运动坐标矢量, $\dot{\boldsymbol{\alpha}}$ 对应一组独立准速率矢量, $\ddot{\boldsymbol{\alpha}}$ 对应一组独立准加速度矢量. $\phi(x,t)=0$ 为约束方程. 具体计算方法见文献 [4–6].

5.3 实验结果与理论分析结果比较

(1) 重力对展开影响的比较

对于方案三, 在地面试验重力作用下, 若仅对中心节点进行悬挂支撑, 则天线将会出现整体下垂, 不能完全展开, 如图 8 所示.

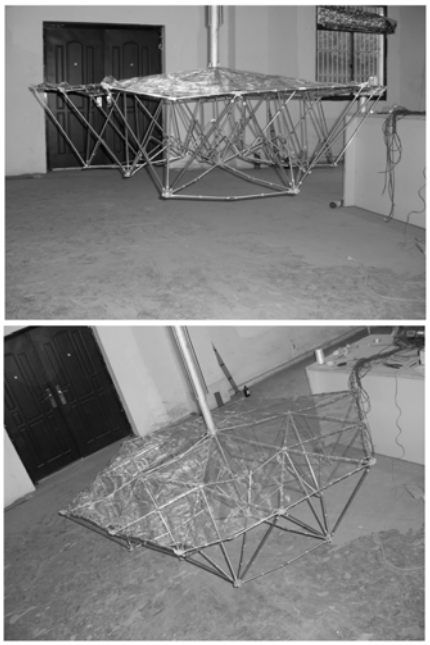


图 8 无三支杆悬挂时天线的展开状态

Fig. 8 Deployed state of antenna without the three crutches suspending

利用程序模拟这一试验环境, 天线仅在中心节点支撑而无三支杆悬挂. 有重力作用时的展开分析结果如图 9 所示, 天线整体绕中心支撑点下垂.

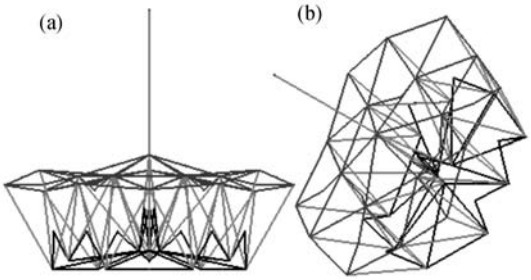


图 9　无三支杆悬挂时天线的展开状态程序模拟

Fig. 9　Program simulation of deployed state without the three crutches suspending

用方案三的支撑方式, 即在中心支撑上伸出三根支杆将天线第一圈上 6 个节点中的 3 个悬挂支撑, 且考虑到这 3 个节点到悬挂支撑点的距离在展开过程中是变化的, 将三根支杆通过三小段柔软的绳索连接到支杆上, 天线展开过程中绳索张紧, 而天线收拢时绳索处于松弛状态. 通过计算, 预测天线能够顺利展开, 与试验情况一样, 如图 10 所示.

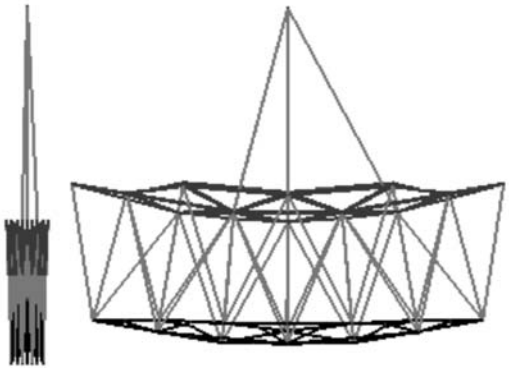


图 10　有三支杆悬挂后天线展开状态程序模拟

Fig. 10　Program simulation of deployed state with three crutches suspending

通过程序仿真分析与试验对比可知, 试验结果与程序分析结果吻合, 地面试验重力对展开过程有一定的影响, 同时也证明了方案三的可行性.

(2) 节点加速度值比较及分析

试验中测量了 1 号节点、8 号节点、19 号节点展开过程中的最大加速度, 取 1 号节点试验测试值与仿真计算值进行比较, 结果列于表 3, 同时对 4 次测量值取平均值. 从表 3 可以看出, 节点 1 加速度幅值的试验测试值与仿真结果计算值存在偏差.

表 3　节点 1 试验测试和仿真计算的最大加速度值

Table 3　Maximum acceleration of experimental result and simulation analysis of node 1

坐标方向	试验测试			仿真计算/ ($m\cdot s^{-2}$)
	试验次数	测量值/ ($m\cdot s^{-2}$)	平均值/ ($m\cdot s^{-2}$)	
x	1	213.932	193.155	264.248
	2	174.187		
	3	175.432		
	4	209.068		
z	1	204.171	204.759	277.46
	2	236.709		
	3	191.268		
	4	186.889		

5.4　试验误差分析

运动过程中加速度的试验测试值与理论计算值有些偏差, 有些加速度变化较大的情况试验没有测到. 产生误差的可能原因如下.

①程序仿真分析时模型较为理想, 在实际中物体之间的接触非常复杂, 程序还不足以完全模拟实际的接触情况.

②试验测试时加速度传感器只能测量其与节点连接平面平行或垂直方向的加速度, 而节点伞盘在展开过程中会有一些转动, 使得测到的加速度不是一直沿 x, y, z 的某一方向.

③由于方案三的结构展开过程属于瞬间过程, 不同位置的杆件旋转展开时不完全同步, 相互有干扰. 在试验测试时, 测试环境的干扰过大或者测试频率的选择不够恰当, 可能会造成个别短时间段内出现的加速度变化无法测到.

对结果进行分析. 图 11 和 12 分别为节点 1 的 x 和 z 方向加速度随时间的变化曲线, 图 13 和 14 分别为节点 1 的 x 和 z 方向坐标随时间的变化曲线, 图 15 为可展结构运动自由度数随时间的变化曲线. 由加速度变化曲线可见, 在展开过程中有两处加速度变化较大, 而这两处对应到坐标变化曲线中, 第一处是节点 1 的 z 坐标开始向上, 即整个结构在开始一

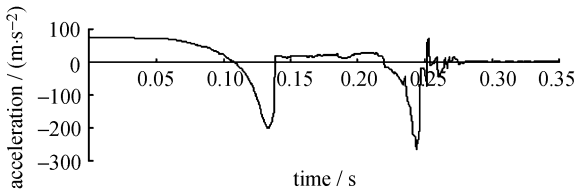


图 11 节点 1 的 x 方向加速度随时间变化曲线

Fig. 11 x axial acceleration with time of node 1

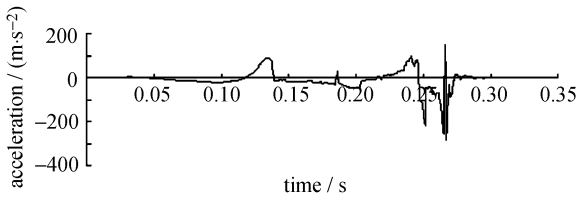


图 12 节点 1 的 z 方向加速度随时间变化曲线

Fig. 12 z axial acceleration with time of node 1

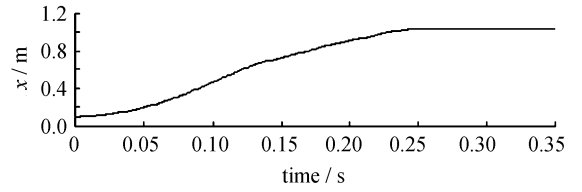


图 13 节点 1 的 x 方向坐标随时间变化曲线

Fig. 13 x axial coordinate with time of node 1

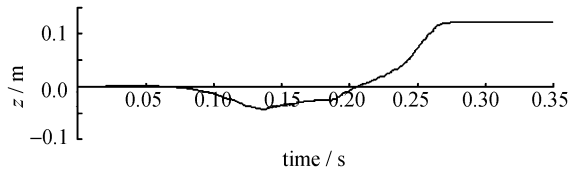


图 14 节点 1 的 z 方向坐标随时间变化曲线

Fig. 14 z axial coordinate with time of node 1

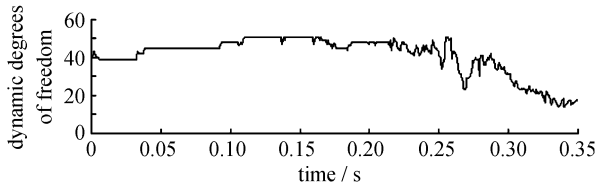


图 15 可展结构运动自由度数随时间变化曲线

Fig. 15 Dynamic degrees of freedom with time of deployable structure

段时间平行展开后突然向上运动, 第二处是节点 1 的 x 坐标基本不变, z 坐标大幅向上运动, 而图 15 中的自由度数下降明显, 很多折叠杆完成展开. 这两处加速度曲线的突变在展开试验时没有明显测到, 从而会影响摩擦阻尼因数的确定.

综上所述, 试验样机不可避免地存在加工和装配上的误差, 与理论模型有一定出入.

6 结论

通过对构架式可展开天线结构的缩比试验样机进行展开试验, 验证了此结构展开的可靠性, 为大型可展开天线的制作提供了试验基础; 采集运动过程中测点的展开加速度, 将试验结果与基于 Moore-Penrose 广义逆矩阵理论编制的程序分析结果进行对比, 试验结果与理论值较吻合, 从而证明了广义逆矩阵理论分析此类结构的有效性, 同时也为此程序的进一步优化设计提供了必要的依据.

参考文献

[1] Wei Juanfang. Dynamic Interaction Analysis of Space 4∼10 m Deployable Antenna and Its Test Technics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. in Chinese (韦娟芳. 空间 4∼10 米可展天线的动力耦合分析及试验技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002)

[2] Hong Shantao. Advanced Dynamics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996. in Chinese (洪善桃. 高等动力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1996)

[3] Pradeep K. Agrawal, Melvin S, *et al.* Preliminary Design of Large Reflectors with Flat Facets [J]. *IEEE Trans. Anten. Propag.*, 1981, **29**(4):688-694

[4] Wu Minger, Guan Fuling. Analytical shape finding for deployable structures [J]. *J. Hangzhou Ins. Elec. Eng.*, 1993, **13**(2):13-21. in Chinese (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)

[5] Zhao Mengliang, Wu Kaicheng, Guan Fuling. Dynamic analysis of deployable space truss structures [J]. *J. Zhejiang Univ.: Eng. Sci.*, 2005, **39**(11):1669-1674. in Chinese (赵孟良, 吴开成, 关富玲. 空间可展桁架结构动力学分析 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, **39**(11):1669-1674)

[6] Zhao Mengliang, Guan Fuling. Deployment dynamic analysis of circular truss deployable antenna with friction [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, **26**(3): 220-226. in Chinese (赵孟良, 关富玲. 考虑摩擦的周边桁架式展开天线动力学分析 [J]. 空间科学学报, 2006, **26**(3):220-226)