

空间一维可展开桁架精度测量方法

郭宏伟¹, 程 刚², 吴秋爽³, 刘荣强¹, 邓宗全¹, 丁 锋²

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 150080 哈尔滨, guohw@hit.edu.cn;
2. 中国空间技术研究院总体部, 100094 北京, 3 沈阳机床(集团)有限责任公司, 110142 沈阳)

摘 要: 结合空间一维可展开桁架结构特点, 基于四象限探测器光斑中心位置检测原理, 提出以准直激光束为测量基准的空间一维可展开桁架结构精度测量方法. 应用该方法可以实现对空间一维可展开桁架各构架单元的扭转角、横向偏移量、纵向偏移量及桁架直线度装配精度的测量. 提出四象限探测器二维平面标定方法, 将探测器的工作范围扩大到 3 mm × 3 mm, 探测器的测量精度提高到 0.05 mm. 运用设计的基于四象限探测器的激光准直测量方法对空间一维可展开桁架进行了精度测量实验, 得到桁架各刚性框架的最大扭转角为 0.133 3°, 最大横向偏移量为 1.200 8 mm, 最大纵向偏移量为 1.299 3 mm, 桁架的直线度误差为 1.090 6 mm, 验证了所提出的空间一维可展开桁架精度测量方法的有效性.

关键词: 空间一维可展开桁架; 四象限探测器; 精度测量

中图分类号: TB96 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)01-0078-05

Precision measurement method of space one-dimensional deployable truss

GUO Hong-wei¹, CHENG Gang², WU Qiu-shuang³, LIU Rong-qiang¹, DENG Zong-quan¹, DING Feng²

(1. State Key Lab of Robotics and System Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China guohw@hit.edu.cn;
2. Institute of Space System Engineering, CAST, 100094 Beijing, China; 3. Shenyang Machine Tool (Group) Co., Ltd, 110142 Shenyang, China)

Abstract: Considering the structural characteristics of space one-dimensional deployable truss, a precision measurement method for the space one-dimensional deployable truss structure is presented. The measurement method is based on spot center position detection principle of quadrant detector, and collimated laser beam is used as Measuring Datum. Using this method, the torsional angle, lateral deviation, vertical deviation of each truss bay in the truss and the truss straightness can be measured. Two-dimensional plane calibration method of the quadrant detector is presented, and working range of the quadrant detector is enlarged to 3 mm × 3 mm, measuring accuracy of the quadrant detector is improved to 0.05 mm. Precision of the space one-dimensional deployable truss is measured based on quadrant detector. The maximal torsional angle of the truss bay is measured to be 0.133 3°, the maximal lateral deviation and vertical deviation of the truss bay are 1.200 8 mm and 1.099 3 mm respectively, and the truss straightness is measured to be 1.090 6 mm. The precision measurement test of the space one-dimensional deployable truss verifies the effectiveness of the method presented.

Key words: space one-dimensional deployable truss; quadrant detector; precision measurement

近十几年来,随着载人航天、月球探测、对地

观测、太空探索、空间站建设等航天事业的迅猛发展,对超大尺度、高刚度、超高精度、高稳定性的空间可展开桁架机构的需求变得愈加迫切,空间可展开桁架机构的实际需要尺寸越来越大^[1-2]. 大尺度、高精度空间一维可展开桁架具有结构简单、质量轻、折叠比大等特点,广泛用作柔性太阳能帆板、合成孔径雷达以及太空望远镜的展开和支撑

收稿日期: 2011-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11002039 & 50935002);
高等学校学科创新引智计划资助项目(B07018).

作者简介: 郭宏伟(1980—), 男, 讲师;
刘荣强(1965—), 男, 教授, 博士生导师;
邓宗全(1956—), 男, 教授, 博士生导师.

结构、重力梯度杆、磁强针等结构以及作为分离机构以减少电子设备间的相互干扰^[3-4]. 作为合成孔径雷达、太空望远镜等高精度探测仪器设备时, 要求展开支撑机构具有足够高的展开定位精度^[5]. 精度是影响这些结构发展的关键因素, 同时也是未来空间展开机构发展的难点所在. 随着空间可展开结构展开形式的多样化、展开结构尺寸的大型化以及展开结构的高精度化, 对地面模拟试验方法和设备提出了更高的要求, 也对精密测量方法提出了新的要求. 尤其是大尺度、高精度的空间可展开结构的精度测量方法和手段需要不断的创新和改进.

本文以空间一维可展开桁架为研究对象, 研究一维大尺度空间可展开桁架精度测量方法以及地面精度测量实验方案, 提出对其空间位置、形位误差、直线度误差等精度进行精确测量的方法, 并将所研究的精度测量方法推广到类似的空间展开机构的精度测量中.

1 空间一维可展开桁架结构特点

空间一维可展开桁架主要应用于支撑和分离高精度探测仪器或设备, 如太空望远镜、高精度展开天线等. 图 1 所示为对地球表面进行三维数字测绘的空间一维可伸展桁架支撑合成孔径雷达. 该桁架的完全展开总长度可达 60 m, 其前端支撑重约 360 kg 的天线、200 kg 的钢索以及同轴电缆和光纤等^[6]. 由于数字测绘时雷达必须具有确定的空间位置, 这就要求桁架展开后具有较高的角度、绝对长度、直线度以及空间位置高精度.

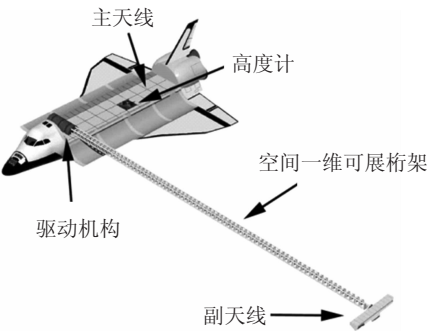


图 1 空间一维可展开桁架支撑雷达

空间一维可展开桁架一般由多个可折展桁架单元铰接在一起构成, 如图 2 所示. 每个桁架单元又由角块、横杆、纵杆、球铰接头、斜拉索组成, 4 根横杆通过角块固连构成刚性框架, 4 根纵杆通过球铰分别与相邻刚性框架 4 个角点铰接, 4 个侧面连有带张紧力的斜拉索组件. 通过每个桁架单元的展收运动实现整个桁架的展开与收拢^[7].

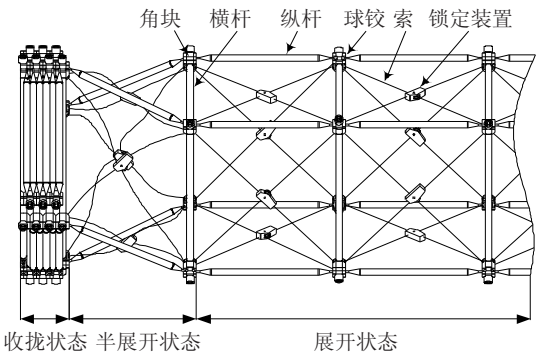


图 2 空间一维可展开桁架结构形式

此类索杆式可展开桁架结构简单, 质量轻, 折叠比大, 应用广泛; 然而结构中包含大量节点, 杆件及柔性索, 基准面小而少, 展开尺寸大, 这给结构精度的测量带来了很大难度, 无法采用通用的测量设备对其进行精度测量. 杆件长度的加工误差、斜拉索预紧力大小的差异及装配误差使得可展开桁架每跨构架单元相对位置存在一定偏差, 导致可展开桁架直线度误差, 如图 3 所示. 空间一维可展开桁架作为高精度探测设备的展开定位结构, 必须保证具有足够高的结构精度, 需对其结构精度进行测量.

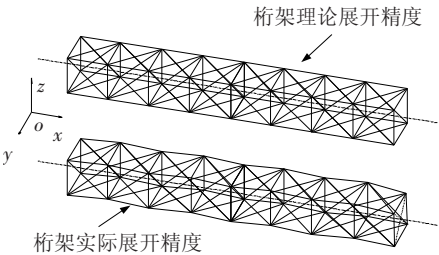


图 3 空间一维可展开桁架装配偏差

2 桁架精度测量方法

2.1 测量原理

四象限探测器是基于内光电效应原理而制作的光电探测器件, 能够探测光斑中心在四象限工作平面的位置, 因此被广泛应用于跟踪、制导、定位和准直测量等方面^[8-9]. 基于四象限探测器光斑中心位置检测原理, 提出一种以准直激光束为测量基准的空间一维可展开桁架直线度测量方法.

基于四象限探测器的激光准直测量系统原理如图 4 所示, 主要由激光器、四象限探测器、信号运算电路、放大电路、滤波电路、A/D 转换、数据采集装置以及计算机组成.

激光器发出准直激光束, 激光打在四象限探测器的工作面上, 通过探测器的内光电效应原理, 光斑中心在探测器工作表面的不同位置输出不同的电压信号. 对输出电压信号进行运算、放大、滤

波、A/D 转换、数据采集到计算机内,然后与四象限探测器预先标定的电压 - 坐标值进行比对和选取,便可得到光斑中心相对于四象限探测器中心的坐标值,实现光斑中心位置的检测。

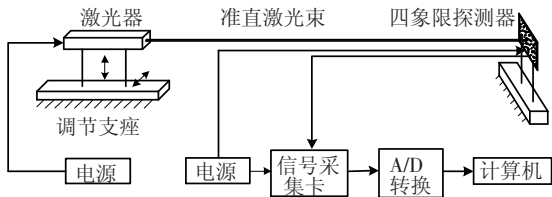


图 4 基于四象限探测器的激光准直测量原理

2.2 桁架精度测量方案

如图 5 所示,以基准墙为测量基准,将展开后的桁架根部与基准墙相固定,运用悬挂法平衡桁架自身重力,以固定的激光器发出的准直激光束为基准,通过将四象限探测器定位安装到桁架不同角点位置接收并测量激光束光斑中心位置,这样可以得到各个角点的空间位置,与基准位置进行对比得到角点相对于基准位置的水平和竖直偏差。

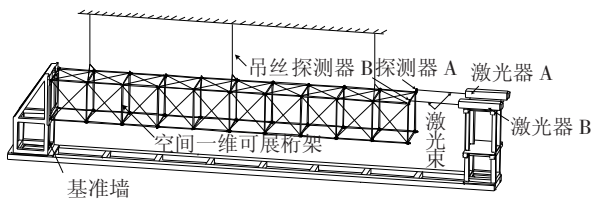


图 5 空间一维可展开桁架激光准直测量系统

由于截面上的 4 个角点通过横杆构成一个封闭框架,刚度较大,认为 4 个角点在一个平面上并且相对位置固定不变。如图 6 所示,只要测量第 i 个构架单元前后两个刚性框架(第 i 个刚性框架和第 $i+1$ 个刚性框架)上相应两个角点在探测器上的坐标位置 (x_{A_i}, y_{A_i}) 、 (x_{B_i}, y_{B_i}) 、 $(x_{A_{i+1}}, y_{A_{i+1}})$ 、 $(x_{B_{i+1}}, y_{B_{i+1}})$,就可以解算第 i 个构架单元的扭转角度 $\Delta\theta$ 、水平方向偏移量 Δx 及竖直方向偏移量 Δy 。

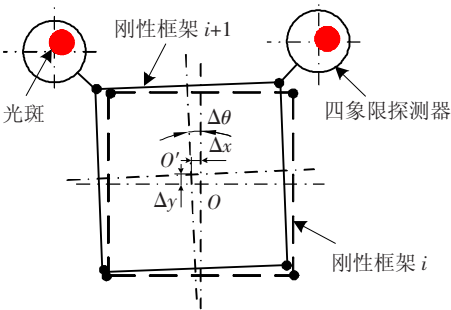


图 6 桁架单元装配精度

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{x_{A_{i+1}} - x_{B_{i+1}}}{\sqrt{(x_{A_i} - x_{B_i})^2 + (y_{A_i} - y_{B_i})^2}}\right) -$$

$$\arcsin\left(\frac{x_{A_i} - x_{B_i}}{\sqrt{(x_{A_i} - x_{B_i})^2 + (y_{A_i} - y_{B_i})^2}}\right),$$

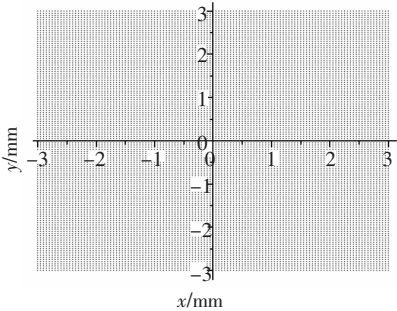
$$\Delta x = x_{A_{i+1}} - x_{A_i} \cos \Delta\theta + y_{A_i} \sin \Delta\theta,$$

$$\Delta y = y_{A_{i+1}} - x_{A_i} \sin \Delta\theta - y_{A_i} \cos \Delta\theta.$$

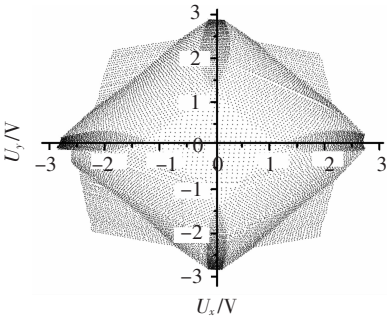
3 四象限探测器的标定

由于四象限探测器的光敏面积小,并且线性范围局限在 $\pm 1\text{ mm}$ 之内,而桁架结构尺寸大,光斑中心在探测器上的位置具有随机性,探测器的线性范围无法满足桁架结构精度测量的需要,因此必须扩展探测器的工作范围^[10]。采用精密二维电动位移台对探测器进行二维平面标定,确定探测器标定平面内标定点的输出电压信号 (U_x, U_y) 与实际标定点坐标 (S_x, S_y) 的对应关系。在探测器前加装滤光片消除背景光对探测器测量的影响。如图 7(a)所示,在探测器平面上以 0.05 mm 为间距取若干个标定点,然后将探测器安装在位移台上,以 0.05 mm 为步长控制二维位移台使探测器平面上标定点与光斑中心重合,记录探测器输出的电压值如图 7(b)所示,则探测器标定平面内标定点的输出电压信号 (U_x, U_y) 与标定点坐标 (S_x, S_y) 一一对应。假设在测量时探测器实际输出电压值为 (U'_x, U'_y) ,通过将探测器实际输出电压值与标定电压值进行比对得出均方根值,即

$$\sqrt{(U'_x - U_{xi})^2 + (U'_y - U_{yi})^2} = \min,$$
$$i = 1, 2, 3, \dots, N.$$



(a) 平面标定点坐标



(b) 标定点对应的电压值
图 7 探测器平面标定

由于标定步长取得足够小,则认为均方根值最小的标定电压值(U_{xi}, U_{yi}) 对应的坐标值(S_{xi}, S_{yi}) 即为实测电压(U'_x, U'_y) 下的光斑坐标值. 运用此标定方法,将探测器工作范围扩大到 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的平面区域,标定精度为 0.05 mm .

由于探测器要在与激光器不同的距离处进行测量,还要验证距离对探测器测量的影响. 如图 8 所示,在不同距离处对探测器进行了二维平面标定并进行了对比. 测量距离对探测器的影响小于 0.05 mm . 由此可知,通过探测器二维平面标定可

使探测器测量精度达到 0.05 mm . 若激光器具有足够大的功率和较小的发散角,可以保证在远距离处光斑具有很好的一致性和稳定性,则此方法可以适用于长距离的空间桁架结构精度测量.

4 空间一维可展开桁架精度测量实验

空间一维可展开桁架激光准直测量实验如图 9 所示. 进行测量实验前,首先要将激光器进行扩束、准直调节,保证激光束与空间一维可展开桁架根部连接的基准墙相垂直. 将两个四象限探测器逐次安装到一维可展开桁架各个刚性框架的相应两个角点位置,接收由两台激光器发出的准直激光束,测量并记录光斑在探测器上的位置坐标,测量数据见表 1 所示.

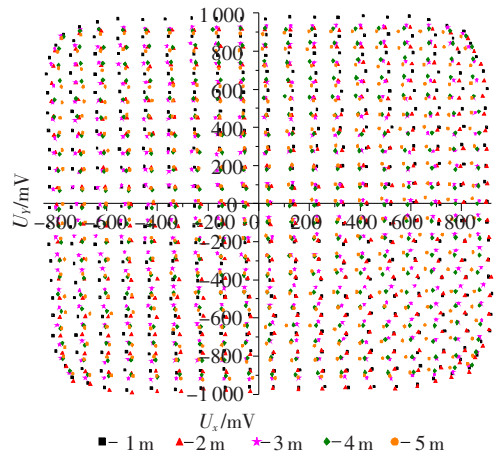


图 8 测量距离对探测器的影响



图 9 空间一维可展开桁架精度测量实验

表 1 空间一维可展开桁架精度测量实验数据

框架位置	x_A/mm	y_A/mm	x_B/mm	y_B/mm	z/mm	$\Delta\theta/(\text{^\circ})$	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$
1	-0.40	-0.50	-0.20	-0.40	0	0.016 7	-0.471 2	-0.450 0
2	-0.60	-0.35	0.15	-0.10	364	0.041 6	-0.778 1	-0.225 1
3	-0.45	-0.40	-0.10	-0.05	728	0.058 3	-0.699 4	-0.225 1
4	-0.65	0.15	0.35	0.20	1 092	0.008 3	-0.685 6	0.175 0
5	-0.55	0.25	-0.50	0.45	1 456	0.033 3	-0.692 5	0.350 0
6	-0.45	0.65	-0.45	0.30	1 820	-0.058 3	-0.200 8	0.474 9
7	-0.85	0.80	-0.65	0.35	2 184	-0.075 0	-0.529 7	0.574 8
8	-0.35	1.00	0.35	0.40	2 548	-0.099 9	0.077 1	0.699 6
9	-1.45	1.10	-0.65	0.75	2 912	-0.058 3	-1.200 8	0.924 9
10	-1.66	1.75	-0.40	0.90	3 276	-0.133 3	-1.080 7	1.299 3

由表 1 可知,空间一维可展开桁架刚性框架的最大扭转角为 $\Delta\theta_{\max} = -0.133\text{ 3}^\circ$, 发生在第 10 个刚性框架; 构架单元水平方向的最大偏移量为 $\Delta x_{\max} = 1.200\text{ 8 mm}$, 发生在第 9 个刚性框架; 构架单元竖直方向最大偏移量 $\Delta y_{\max} = 1.299\text{ 3 mm}$, 发生在第 10 个刚性框架.

根据测量的各个构架单元刚性框架的位置精

度,将各个刚性框架中心相连即为整个可展开桁架的实际轴线. 空间可展开桁架的空间直线方程可以表示为

$$\frac{x-x_0}{a}=\frac{y-y_0}{b}=z.$$

采用最小二乘法对空间桁架直线度进行拟合计算,即

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 \sum_{i=1}^n \Delta x_i - \sum_{i=1}^n \Delta x_i z_i \sum_{i=1}^n z_i}{(n+1) \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2},$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 \sum_{i=1}^n \Delta y_i - \sum_{i=1}^n \Delta y_i z_i \sum_{i=1}^n z_i}{(n+1) \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2},$$

$$a = \frac{(n+1) \sum_{i=1}^n \Delta x_i z_i - \sum_{i=1}^n \Delta x_i \sum_{i=1}^n z_i}{(n+1) \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2},$$

$$b = \frac{(n+1) \sum_{i=1}^n \Delta y_i z_i - \sum_{i=1}^n \Delta y_i \sum_{i=1}^n z_i}{(n+1) \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2}.$$

式中: Δx_i 、 Δy_i 为各刚性框架的偏差; z_i 为各个刚性框架的长度坐标; n 为被测刚性框架数目. 拟合的空间一维可展开桁架直线方程为

$$\frac{x + 0.141\ 7}{-0.000\ 294} = \frac{y + 0.365\ 8}{0.000\ 564} = z.$$

空间一维可展开桁架的直线度误差为

$$2h_{\max} = 1.090\ 6\ \text{mm}.$$

5 结 论

1) 基于四象限探测器光斑中心位置检测原理, 提出一种以准直激光束为测量基准的空间一维可展开桁架直线度测量方法.

2) 提出了四象限探测器二维平面标定方法, 采用该方法对四象限探测器进行了标定, 将探测器工作范围扩大到 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$, 探测器的测量精度提高到 $0.05\ \text{mm}$.

3) 运用所提出的基于四象限探测器的激光准直测量方法对空间一维可展开桁架进行了精度测量实验, 测量得到构架单元的最大扭转角为 $0.133\ 3^\circ$, 横向最大偏移量为 $1.200\ 8\ \text{mm}$, 纵向最大偏移量为 $1.299\ 3\ \text{mm}$, 桁架的直线度误差为 $1.090\ 6\ \text{mm}$, 验证了本文提出测量方法的有效性.

参考文献:

- [1] HEALD J C, PETERSON L D. Sensitivity of the deployment repeatability of a precision telescope Mechanism [C]//43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Denver, Colorado:[s. n.], 2002: 22-25.
- [2] CAMELO V, BRONOWICKI A, SIMONIANN S. Damping and isolation concepts for vibration suppression and pointing performance [C]//50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Palm Springs, California:[s. n.], 2009: 4-7.
- [3] TANAKA H. Design optimization studies for large-scale contoured beam deployable satellite antennas [J]. Acta Astronautica, 2006, 58(9): 443-451.
- [4] TIBERT G. Deployable tensegrity structures for space applications [D]. [S. l.]: Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002.
- [5] HEALDJ C, PETERSON L D. Load perturbation design approach for repeatable precision deployable structures [C]//44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk, Virginia:[s. n.], 2003: 7-10.
- [6] BROWN C G JR, SARABANDI K, PIERCE L E. Validation of the shuttle radar topography mission height Data [J]. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 2005, 43(8): 1707-1715.
- [7] 郭宏伟, 邓宗全, 刘荣强. 空间索杆铰接式伸展臂参数设计与精度测量 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1105-1111.
- [8] 林志琦, 李会杰, 郎永辉, 等. 用四象限光电探测器获得光斑参数 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 764-770.
- [9] 赵馨, 佟首峰, 刘云清, 等. 四象限探测器在空间激光通信中的应用 [J]. 光子·激光, 2010, 21(1): 46-49.
- [10] 杨翠, 邹建, 刘得志. 四象限光电探测器定位误差分析 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5): 49-51.

(编辑 杨 波)