

大型天线装配测量与实时反馈调整技术

李云 张加波 韩建超 蔡子慧 鲁利刚 赵琳娜

(北京卫星制造厂有限公司,北京,100094)

摘要: 针对大型天线在装配过程中共轴铰链空间位置难以准确定位和测量、传统测量方法容易受到天线杆件的干涉影响测量精度等问题,通过搭建大型天线装配测量与实时反馈调整系统,采用数字摄影测量技术对天线的面板、铰链和杆件的装配精度进行了测量,并将测量结果实时反馈给六自由度自动执行机构调整共轴铰链的空间位置,实现大型天线的柔性化、自动化和精准化装配。试验结果表明数字摄影测量相机的精度与激光跟踪仪的精度偏差不大于 0.01 mm;六自由度自动执行机构对共轴铰链的位姿调整位移精度优于 0.02 mm,角度精度优于 0.01°,能够满足大型天线的装配和测量要求,该方法可以提高大型天线装配效率和自动化技术水平,为尺寸更大和结构更复杂的天线集成装配奠定技术基础。

关键词: 大型天线;自动执行机构;摄影测量;反馈调整

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)S-0088-06

Assembly Measurement and Real-Time Feedback Adjustment Technology of Large Antenna

LI Yun, ZHANG Jiabo, HAN Jianchao, CAI Zihui, LU Ligang, ZHAO Linna

(Beijing Spacecrafts Manufactory, Beijing, 100094, China)

Abstract: Aiming at the problems in the assembly process of large antenna, for example, the spatial location of coaxial hinge is difficult to adjustment accurately, and the measurement accuracy of traditional measurement methods is affected by the interference of antenna poles. The paper builds the system of assembly measurement and real-time feedback adjustment for large antenna. The assembly accuracy of antenna hinges and poles are measured by digital photogrammetry. The measured results are feedback to the 6-DOF automatic actuator to adjust the spatial location of coaxial hinge, thus the automatic assembly of large antenna can be realized. Experimental results show that the measurement accuracy between the digital photogrammetry and laser tracker is no more than 0.01 mm; the displacement accuracy of the 6-DOF automatic actuator to adjust the spatial location of coaxial hinge is better than 0.02 mm, and angle accuracy is better than 0.01°. It can meet the assembly and measurement requirements of large antenna. The method can improve the assembly efficiency and automation level of large antenna. It lays technology foundation for antenna assembly with larger size and more complex structure.

Key words: large antenna; automatic actuator; photogrammetry; feedback adjustment

大型展开天线是卫星的重要组成部分,是直接执行卫星功能的重要物理平台,是近年来随着航天科技快速发展而产生的一种新型空间结构,广泛应

用于通信、测控、深空探测、对地观测和军事侦察等许多领域^[1-2]。卫星天线展开系统是卫星的关键部件,天线展开系统由一套复杂可展开空间桁架机构

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2016203B081)资助项目。

收稿日期: 2019-04-09; **修订日期:** 2019-06-20

通信作者: 李云,男,博士,高级工程师,E-mail:handanliyun@126.com。

引用格式: 李云,张加波,韩建超,等. 大型天线装配测量与实时反馈调整技术[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(增刊):88-93. LI Yun, ZHANG Jiabo, HAN Jianchao, et al. Assembly Measurement and Real-Time Feedback Adjustment Technology of Large Antenna[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 88-93.

组成,各个天线杆系的尺寸耦合度高,天线杆系和天线铰链的接口匹配度高。天线铰链的锁定角度、转轴间隙、杆件长度和天线铰链与接头空间位置等因素都会影响天线装配精度,进而影响卫星的观测精度和性能。随着空间任务的不断发展,卫星天线的尺寸越来越大,导致展开系统的天线杆系尺寸增加,数量增多,各天线杆系之间相互影响,天线杆系结构更加复杂。为了保证天线的装配精度,需要在天线展开系统装配过程中对天线共轴铰链的空间位置进行精测和调整^[3-4]。目前,大型卫星天线的装调以人工操作为主,需要大量的工装来保证杆系、铰链及天线面板的空间尺寸位置,装配工装的精度及装调水平直接决定了天线的装配精度,且装配工装不具有可扩展性及通用性,不能适应大尺寸天线的装配需求。大型卫星天线展开系统的测量采用经纬仪测量系统或激光跟踪仪测量系统,经纬仪测量系统测量精度低,速度慢;激光跟踪仪测量系统测量范围有限,在测量过程中天线杆系对激光路径有干涉,影响测量效果,对于具有复杂杆系的大型天线展开系统测量具有一定局限性^[5-7]。

本文提出一种大型卫星天线展开系统装配的精测方法与实时反馈调整技术,采用摄影测量技术对大型天线展开系统面板位置、铰链位置和杆系位置进行自动化测量;采用六自由度自动执行系统对天线的共轴铰链进行自动调整,提高大型天线展开系统装配效率和自动化技术水平,实现高性能复杂大型天线展开系统的柔性化、自动化和精准化装配,满足大型天线展开系统集成装配的安全性和可靠性,适应未来大型天线的发展趋势。

1 大型天线装配系统的构建

大型天线装配测量与实时反馈调整系统如图1所示,该系统由高精度数字摄影测量系统和六自由度自动执行系统组成。在装配测量过程中,数字摄影测量系统和六自由度自动执行系统可以实时

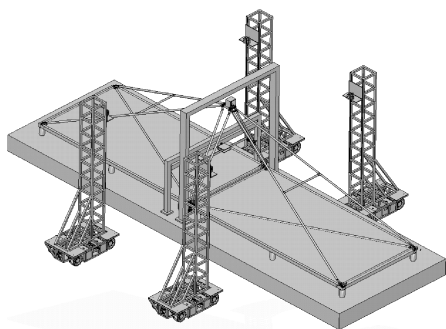


图1 大型天线装配系统
Fig. 1 Assembly system of large antenna

通讯。数字摄影测量系统用于大型天线装配过程中的实时测量,并将装配精度测量结果反馈给六自由度自动执行系统,六自由度自动执行系统根据测量结果计算工件的位置偏差,并对工件位置进行调整,然后数字摄影测量系统再对工件装配位置进行测量,从而形成装配测量与调整的闭环控制,实现大型天线的自动化装配。

1.1 六自由度自动执行系统

六自由度自动执行系统能够根据反馈信号进行动作,实现空间复杂位姿调整,对微小位移和角度进行精确控制,提高装配效率^[8]。六自由度自动执行系统主要由自动执行机构(如图2所示)、控制系统(工控机、控制器和控制软件)组成。自动执行机构的主要功能是与产品工件连接,实现产品工件的6个自由度的调姿。控制系统的主要功能为接收测量系统的测量数据并转换成控制指令,控制自动执行机构实现空间位姿的高精度调整。

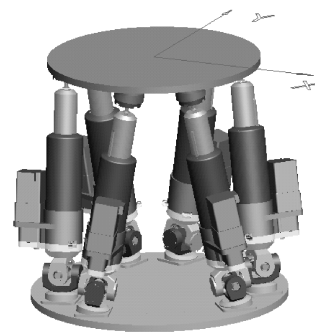


图2 六自由度自动执行机构
Fig. 2 6-DOF automatic actuator

自动执行机构控制系统如图3所示,运动控制模块根据测量系统反馈的参数,计算出运动控制信号发送至步进电机驱动器,步进电机驱动器根据控制信号发送相应的脉冲至步进电机,控制步进电机转动的一定角度,从而控制自动执行机构的位姿状态。交互模块选择基于Win7系统的工控机,完成除运动控制之外的运动管理、通讯和状态显示等功能。运动控制模块选择ARM芯片,采用ARM芯片作为主控芯片完成系统管理和控制。主要功能

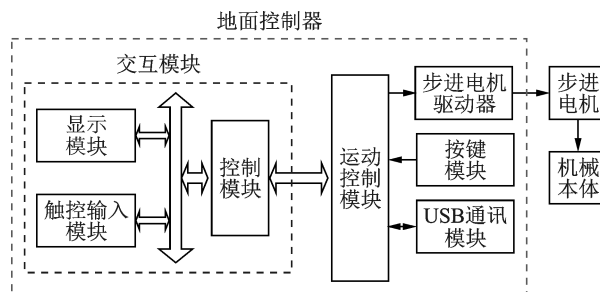


图3 自动执行机构控制系统
Fig. 3 Control system of automatic actuator

包括运动管理、通讯、安全保护、性能检测、故障诊断和数据处理等。

1.2 数字摄影测量系统

数字摄影测量系统由高精度工业相机、云台、同步控制器、摄影测量软件和控制系统等组成。

云台是安装、固定相机的支撑设备,适用于对大范围进行扫描,它可以扩大相机的视场范围。电动云台高速姿态是由两台执行电动机来实现,电动机接受来自控制器的信号精确地运行定位。在控制信号的作用下,云台上的相机既可自动扫描区域,也可在技术人员的操纵下跟踪监视对象。

同步控制器主要用于为多路相机及光源供电,并控制多台相机同步进行拍照,将照片进行图像处理后再传送给上位机进行解算。控制器提供了多个高速接口用于连接相机系统及上位机系统。本方案需要采用4台相机同时对被测物进行成像进而获得实时位置和姿态参数。测量时需要同步控制器对相机系统进行快速的同步触发,以保证多台相机拍摄同步。

摄影测量软件对采集的图像进行数据处理,并完成变形量分析等相关功能(如图4所示)。利用高分辨率测量专用相机,在不同位置和方向获取被测物体件两幅以上数字图像,经图像扫描处理、标志识别、图像匹配、空间三角交会和光束平差后得到待测物体的三维坐标,处理后被测对象的三维数据将会进入到坐标系统中,并及时反馈给自动执行系统等进行调整。

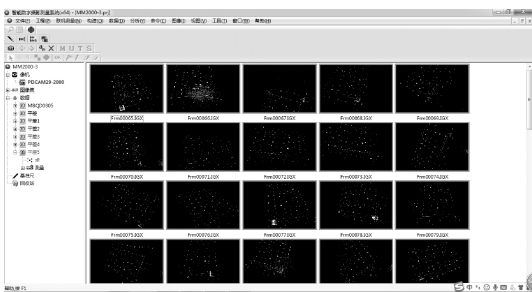


图4 摄影测量软件

Fig. 4 Software of photogrammetry

2 系统精度误差建模分析

2.1 自动执行系统精度误差建模分析

自动执行机构的基本构型参数如图5所示,其中 $A_1A_2A_3$ 为动平台, $B_1B_2B_3$ 为静平台。定义静平台坐标系(世界坐标系) $S-X_SY_SZ_S$,原点 S 与静平台中心重合, Z_S 轴方向垂直于静平台向上,静平台外接圆半径为 R ;定义动平台的零位坐标系为 $O-X_OY_OZ_O$,原点 O 与动平台中心重合, Z_O 轴方向

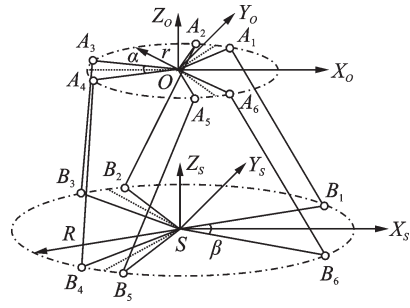


图5 自动执行机构参数图

Fig. 5 Parameter drawing of automatic actuator

垂直于动平台向上,动平台外接圆半径为 r ^[9-10]。

设动平台坐标轴 X_O 相对于静平台坐标轴 X_S 的姿态角 α ,动平台坐标轴 Y_O 相对于静平台坐标轴 Y_S 的姿态角 β ,动平台坐标轴 Z_O 相对于静平台坐标轴 Z_S 的姿态角 γ ,则分别绕坐标轴的基本旋转矩阵为

$$R_X(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_Y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

动平台坐标系 $O-X_OY_OZ_O$ 到静平台坐标系 $S-X_SY_SZ_S$ 的旋转矩阵为 R ,则

$$R = R_Z(\gamma)R_Y(\beta)R_X(\alpha) \quad (4)$$

设动平台坐标系的原点 O 在静平台坐标系的绝对坐标为 $P = [x_P \ y_P \ z_P]^T$,动平台第 i 个铰链点 A_i 在坐标系 $O-X_OY_OZ_O$ 中的相对坐标为 a_i ,静平台第 i 个铰链点 B_i 在坐标系 $S-X_SY_SZ_S$ 中的相对坐标为 b_i ,则铰链点 B_i 指向动平台铰链点 A_i 的矢量为

$$L_i = Ra_i + P - b_i \quad (5)$$

对式(5)微分,可以得到自动执行机构的误差模型为

$$dL_i = dP + a_i dR + Rda_i - db_i \quad (6)$$

设 u_i 是 L_i 的单位方向矢量, l_i 是其系数,则 L_i 可以表示为

$$dL_i = u_i dl_i + l_i du_i \quad (7)$$

即

$$u_i dl_i + l_i du_i = dP + a_i dR + Rda_i - db_i \quad (8)$$

整理可得

$$dl_i = \left[\mathbf{u}_i^T \left((\mathbf{R}\mathbf{a}_i) \times \mathbf{u}_i \right)^T \right] \begin{bmatrix} dP \\ d\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i^T \mathbf{R} & -\mathbf{u}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} da_i \\ db_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $d\omega = [d\alpha \ d\beta \ d\gamma]^T$ 为旋转矩阵 \mathbf{R} 各姿态角的误差矢量, $i=1,2,3,4,5,6$ 。

可以得到自动执行机构位姿误差模型为

$$\begin{bmatrix} dP \\ d\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i^T \left((\mathbf{R}\mathbf{a}_i) \times \mathbf{u}_i \right)^T \end{bmatrix}^{-1} \left\{ dl_i - \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i^T \mathbf{R} & -\mathbf{u}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} da_i \\ db_i \end{bmatrix} \right\} \quad (10)$$

各支链的直线精度误差为 $8 \mu\text{m}$, 通过计算可以得到, $\delta x = 0.01984 \text{ mm}$, $\delta y = 0.01944 \text{ mm}$, $\delta z = 0.00832 \text{ mm}$, $\delta\alpha = 0.00304^\circ$, $\delta\beta = 0.00312^\circ$, $\delta\gamma = 0.0088^\circ$ 。因此, 自动执行机构的位移精度 $\leq 0.02 \text{ mm}$, 转角精度 $\leq 0.01^\circ$, 满足大型天线的装配精度要求。

2.2 数字摄影测量系统误差建模分析

在正直摄影条件下, 某点的物方空间坐标 (X, Y, Z) 与其相应像点坐标 (x, y) 左右视差 P 、基线长度 B 和摄影距离 D 之间的关系为

$$\begin{cases} X = \frac{B}{P}x = \frac{D}{f}x \\ Y = \frac{B}{P}y = \frac{D}{f}y \\ Z = \frac{B}{P}f \end{cases} \quad (11)$$

左右视差 P 、基线长度 B 、摄影距离 D 和相机焦距 f 的关系为

$$DP = Bf \quad (12)$$

对式(11)微分得

$$\begin{cases} dX = -\frac{D}{B} \frac{D}{f} \frac{x}{f} dp + \frac{D}{f} dx \\ dY = -\frac{D}{B} \frac{D}{f} \frac{y}{f} dp + \frac{D}{f} dy \\ dZ = -\frac{Bf}{P^2} dp \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)转换为误差表示, 则

$$\begin{cases} m_x = \pm \frac{D}{f} \sqrt{\left(\frac{D}{B} \frac{x}{f}\right)^2 m_p^2 + m_x^2} \\ m_y = \pm \frac{D}{f} \sqrt{\left(\frac{D}{B} \frac{y}{f}\right)^2 m_p^2 + m_y^2} \\ m_z = \pm \frac{D}{B} \frac{D}{f} m_p \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可以看出, 所测物体的位置误差, 除

与像点的测量误差 m_x, m_y, m_p 相关外, 与基线长度 B 、摄影距离 D 和相机焦距 f 也相关。像点的测量误差为常数, 而 D/B 与目标点同名光线间的夹角有关, 即基线越大, 目标点越近, 精度越高; D/f 是目标点的成像比例尺分母, 即相机主距越大, 目标点越近, 精度越高^[11-12]。因此, 系统的精度为

$$m = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} = \pm \frac{D}{f} \sqrt{\left(\frac{D}{B}\right)^2 \left[\left(\frac{x}{f}\right)^2 + \left(\frac{y}{f}\right)^2 + 1\right] m_p^2 + m_x^2 + m_y^2} \quad (15)$$

测量中采用工业相机 CCD 尺寸为 $36 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$, 单个像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$, 摄影距离为 3 m , 则相机焦距设计为 24 mm , 摄影测量基线设计为 2.5 m , 像点中心的定位精度为 $1/30$ 像素。通过计算可以得到 $m = 7.2756 \mu\text{m}$, 满足大型天线的装配测量的精度要求。

3 系统精度试验验证

3.1 数字摄影测量系统精度验证

由于数字测量相机在制造过程中存在误差, 导致各个像素点在像平面上的位置与理论位置存在偏差。为了保证测量精度, 需要对数字测量相机的内部参数进行标定^[13-15]。通过数字测量相机对不同位置和方向上的编码标志进行拍照, 将获取的图像利用软件处理, 得到数字测量相机的标定参数。相机内参的标定结果如图 6 所示。采用激光跟踪仪检测数字摄影测量相机的精度(如图 7 所示)建立数字摄影测量场, 在测量场中放置 6 个靶球作为

传感器	
传感器分辨率:	6576 x 4384
像素尺寸:	0.0055 x 0.0055
标定参数	
C:	24.5755 0.0007674
XP:	-0.1134 0.0005164
YP:	-0.1221 0.0005453
K1:	1.3053 1.457e-007
K2:	-0.7902 8.149e-010
K3:	0.0178 1.424e-012
KT:	0.5329 0.0004042
P1:	0.0055 2.958e-007
P2:	0.0315 2.909e-007
AP1:	-0.0006 3.029e-006
AP2:	-0.0009 3.218e-006
半径:	19.9041

图 6 相机内参的标定

Fig. 6 Inside parameter calibration of camera

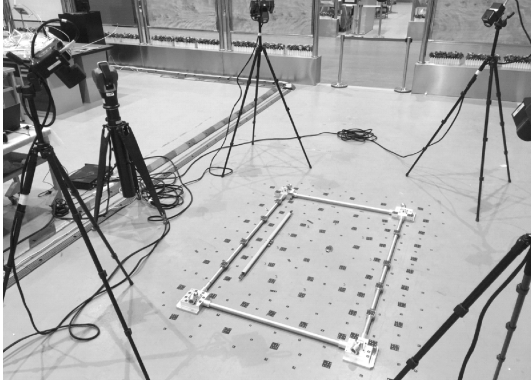


图7 相机精度验证

Fig. 7 Precision validate of camera

测量点,通过对比激光跟踪仪和数字摄影测量相机的测量结果验证测量相机的精度。

激光跟踪仪和数字摄影测量相机的测量6个靶球的坐标位置如表1和表2所示。数字摄影测量相机和激光跟踪仪的差值对比如表3所示。由表3可以看出,数字摄影测量相机的精度与激光跟踪仪的精度偏差不大于0.01 mm,满足精度要求。

表1 激光跟踪仪的测量数据

Tab. 1 Measured data of laser tracker				mm
靶球	X坐标	Y坐标	Z坐标	
1	0	0	0	
2	659.236	0	0	
3	637.056	563.702	0	
4	572.776	1 025.784	-5.519	
5	-3.582	1 053.006	-3.791	
6	-123.952	501.514	-4.432	

表2 数字摄影相机的测量数据

Tab. 2 Measured data of digital camera				mm
靶球	X坐标	Y坐标	Z坐标	
1	-0.007	0.004	0.002	
2	659.24	0.007	-0.004	
3	637.051	563.701	0.009	
4	572.784	1 025.787	-5.526	
5	-3.578	1 053.013	-3.787	
6	-123.955	501.506	-4.437	

表3 测量结果对比

Tab. 3 Contrast of measured result					mm
靶球	X坐标	Y坐标	Z坐标	均方差	
1	-0.007	0.004	0.002	0.004 8	
2	0.004	0.007	-0.004	0.005 2	
3	-0.005	-0.001	0.009	0.006 0	
4	0.008	0.003	-0.007	0.006 4	
5	0.004	0.007	0.004	0.005 2	
6	-0.003	-0.008	-0.005	0.005 7	

3.2 装配系统的试验验证

对大型天线装配测量与实时反馈调整系统进行原理验证(如图8所示),将大型天线在装配过程中最难以调整的共轴铰链安装在六自由度自动执行机构上(如图9所示),在共轴铰链上安装测量工装,测量工装上粘贴点状编码标志。每个测量工装上点状编码标志坐标与共轴铰链轴线中心坐标之间的相对位置关系事先标定好。

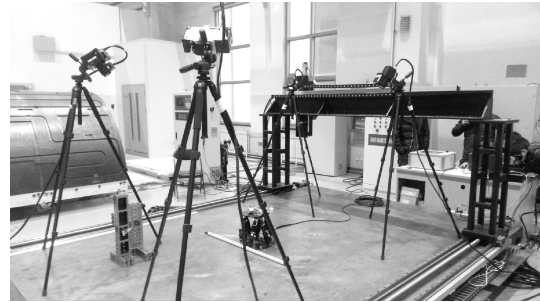


图8 装配系统的原理验证试验

Fig. 8 Principle verification experiment of assembly system

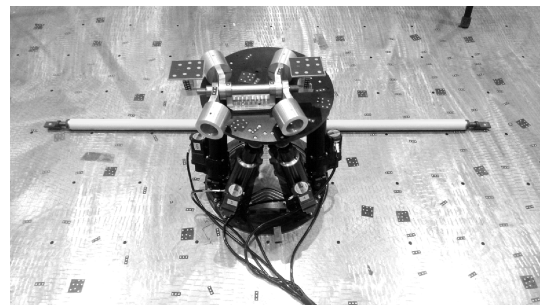


图9 共轴铰链和自动执行机构的位置标定

Fig. 9 Position calibration of coaxial hinge and automatic actuator

用其中一台数字相机测量共轴铰链上的指定点状编码标志,通过公共点转换,确定测量坐标系和产品坐标系之间的关系。用4台数字相机同时测量共轴铰链上的指定点状编码标志,通过后方交会,计算出4个相机的外参数,确定4台数字相机在产品坐标系中的位置和姿态。设定共轴铰链的空间理论位置,用数字摄影测量系统测量共轴铰链的位置,控制系统计算共轴铰链的实际位置和理论位置的差值,通过控制软件反馈给六自由度自动执行机构控制系统,控制六自由度自动执行机构进行调整,直到达到理论位置为止。原理验证试验的测量数据如表4所示。可以看出调整位移精度 ≤ 0.02 mm,角度精度 $\leq 0.01^\circ$,满足使用要求。

4 结 论

大型天线装配测量与实时反馈调整技术可实现大尺寸天线的装配精度测量和共轴铰链位姿的

表 4 测量结果
Tab. 4 Measured result

状态	理论位置	调整前位置	调整后位置	调整精度
X/mm	800	815.45	800.02	0.02
Y/mm	800	793.32	799.99	0.01
Z/mm	300	304.53	300.02	0.02
$\alpha/(\circ)$	0	3.118	0.008	0.008
$\beta/(\circ)$	0	4.262	0.009	0.009
$\gamma/(\circ)$	0	2.728	0.007	0.007

自动调整。采用数字摄影测量技术对天线的面板、铰链和杆件进行测量,数字摄影测量相机的精度与激光跟踪仪的精度偏差不大于0.01 mm;采用六自由度自动执行机构对共轴铰链的位姿进行调整,调整位移精度 ≤ 0.02 mm,角度精度 $\leq 0.01^\circ$,能够满足大型天线的装配和测量要求。该项技术解决了大型天线共轴铰链空间位置难以准确定位,以及经纬仪和激光跟踪仪对大型天线测量的精度难以保证和干涉测量路径等难题。提高大型天线装配效率和自动化技术水平,实现高性能复杂大型天线展开系统的柔性化、自动化和精准化装配,为尺寸更大和结构更复杂的大型天线集成装配奠定技术基础。

参考文献:

- [1] CUI N G, LIU J F, RONG S Y. Solar sail spacecraft dynamic modeling and solving[J]. Acta Aeronautica, 2010, 31(8): 1565-1571.
- [2] MACDONALD M, MCINNES C, HUGHES G. Technology requirements of exploration beyond neptune by solar sail propulsion[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2010, 47(3): 472-483.
- [3] 田大可. 模块化空间可展开天线支撑桁架设计与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
TIAN Dake. Design and experimental research on truss structure for modular space deployable antenna [D]. Harbin: Harbin Institute of University, 2011.
- [4] LIER E. Study of deployed and modular active phased-array multi-beam satellite antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 45(5): 34-45.
- [5] TIBERT G. Deployable tensegrity structures for space applications[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002: 17-18.
- [6] CHRISTOPHER G M, WILLIAM G D, MICHAEL L P, et al. Experimental characterization and finite element analysis of inflated fabric beams[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 2027-2034.
- [7] MEGURO A, ISHIKAWA H, TSUJIHATA A. Study on ground verification for large deployable modular structures[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(4): 780-787.
- [8] 王浩. 六自由度并联调整装置运动学标定研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
WANG Hao. Study on kinematic calibration of the 6-DOF parallel adjustment device[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [9] 谢章. 下装六自由度位置姿态动态调整装置的设计与研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
XIE Zhang. Design and research of six degrees of freedom position and posture dynamic adjustment bottom-loading equipment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [10] 李典, 郭盛, 黄冠宇, 等. 新型2-2PRUR并联机构运动学分析及工作空间优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(10): 2011-2020.
LI Dian, GUO Sheng, HUANG Guanyu, et al. Kinematic analysis and workspace optimization of a novel 2-2PRUR parallel mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(10): 2011-2020.
- [11] 范生宏. 基于数字摄影测量的轨道板快速检测关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
FAN Shenghong. Research on the key thchnologies of track slab quick detection based on digital photogrammetry [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014.
- [12] 李占利, 刘梅, 孙瑜. 摄影测量中圆形目标中心像点计算方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2235-2241.
LI Zhanli, LIU Mei, SUN Yu. Research on calculation method for the projection of circular target center in photogrammetry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2235-2241.
- [13] 张新盼. 应用数字工业摄影测量实现天线反射体姿态恢复[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(6): 16-21.
ZHANG Xinpan. Application of digital industrial photogrammetry to realize antenna reflector pose recovery [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(6): 16-21.
- [14] 王保丰, 李广云, 李宗春, 等. 高精度数字摄影测量技术在50 m大型天线中的应用[J]. 测绘工程, 2007, 16(1): 42-46.
WANG Baofeng, LI Guangyun, LI Zongchun, et al. Application of high accuracy digital photogrammetry technology in a 50-meter large antenna[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 16(1): 42-46.
- [15] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2005.
HUANG Guiping. Study on the key technologies of digital close range industrial photogrammetry and applications [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.