

电子经纬仪交会测量系统在大型天线精密安装测量中的应用

李宗春, 李广云, 汤廷松, 张冠宇

(解放军信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 由于某卫星通信天线面积大、结构非圆对称, 对测量精度要求高(测点精度要求为 $\pm 0.3\text{mm}$), 决定采用大尺寸工业测量系统方法中的电子经纬仪测量系统。系统由 3 台 T3000A 电子经纬仪组成。控制网由 6 个 9~16m 高的测量墩构成。采用 T3000A 测角、TC2003 测边, 数据处理后边角网的点位精度在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内。3 台仪器建立系统的尺度精度优于 10^{-5} 。测量 772 点用时 4h 以内, 交会精度优于 0.3mm (RMS)。经过几次反复的调整, 主面的表面精度优于 0.5mm (RMS), 满足了电气测试的要求。

关键词: 工程测量; 大尺寸工业测量系统; 多经纬仪交会测量系统; 虚拟基准尺; 天线; 表面精度

中图分类号: TB22 **文献标识码:** B **文章编号:** 1671-3044(2005)01-0026-05

1 测量系统

某大型天线具有面积大(600m^2)、面板数量多(196 块)、结构非圆对称以及对测量精度要求高(单点测量精度在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内)等特点, 而天线安装测量的经典方法如样板法^[1]和经纬仪带尺法都是基于圆抛物面天线的, 根本无法用于该天线的安装测量。经过充分调研论证后认为, 最可行的办法是采用大尺寸工业测量系统新技术。工业测量系统^[2,3]是指以电子经纬仪、全站仪、数字相机、激光干涉仪以及激光扫描仪等作为传感器, 在计算机的控制下, 完成工件的非接触和实时三维坐标测量, 并在现场进行测量数据的处理、分析和管理的测量系统。经过理论分析论证, 此项工程采用了电子经纬仪交会测量系统。

电子经纬仪测量系统是由多台高精度电子经纬仪构成的空间角度前方交会测量系统。该系统可实现无接触测量, 在几米到十几米的范围内测量精度可达到 $\pm 0.02\text{~}0.1\text{mm}$, 有光学照准装置, 可以很方便地指示目标, 特别适合于天线的调整工作。系统测量精度高、价格适中, 而且可以实时指导调整, 因此可以应用于该天线的安装检测。但是当测量范围大、测量点数较多时, 需要多台仪器测量, 测量时间相对延长, 因而大尺寸多台仪器系统建立和长时间维持是一个技术关键点也是难点, 需要深入研究和试验。

经过可行性分析, 摄影测量系统、激光跟踪系统

和激光扫描系统的测量方案, 均因不适用于现场指导安装而被淘汰, 全站仪测量系统的测量精度较低, 只有电子经纬仪测量系统能满足该天线安装测量的需要。

2 测量方案

选定了电子经纬仪测量系统后, 需要根据天线的尺寸、现场布局等因素制定详细的测量方案, 主要是仪器的台数及布设方式。提出了三种测量方案。

2.1 两台仪器测量方案

采用两台 T3000A 电子经纬仪构成测量系统, 仪器布设见图 1。1、2 表示电子经纬仪的位置, 两台电子经纬仪建立测量坐标系后, 将天线面板的 772 点全部测完, 需要 5~6h。

2.2 三台仪器测量方案

将天线面板分为 3 个区, 见图 2, 分别占总面积的 $1/3$, 用三台 T3000A 电子经纬仪施测。三台电子经纬仪建立测量坐标系后, 1 和 2 组合测 1 区, 1 和 3 组合测 2 区, 2 和 3 组合测 3 区, 与方案 1 比较可减少 $1/3$ 的观测量, 整个天线可在 4h 内观测完毕。

2.3 四台仪器测量方案

将天线面板分为 2 个区, 见图 3, 分别占总面积的 $1/2$, 用四台 T3000A 电子经纬仪施测。四台经纬仪建立测量坐标系后, 1 和 2 组合测 1 区, 3 和 4 组合测 2 区, 与方案 1 比较可减少 $1/2$ 的观测量, 与方案 2 比较仅减少 $1/6$ 的观测量, 整个天线测完在 3h 左右。

各方案在垂直方向上的布设见图 4, 为尽可能

减小垂直角,测站距天线约20m。考虑到天线在工作姿态下的实际情况,测量墩的高度略有不同,实际高度为9~16m。各方案所用测量时间(包括建立系统的时间)的情况见表1。

表1中“测点时间”一栏中的数据按每分钟测2.5个点的速度(人工手动测量)计算。从实际情况看,整个天线的测量时间不超过4h,同时外界条件的影响也可以较好地得到控制,而过高地追求测量速度会带来大量的人力物力的浪费,故选择3台仪器的测量方案。

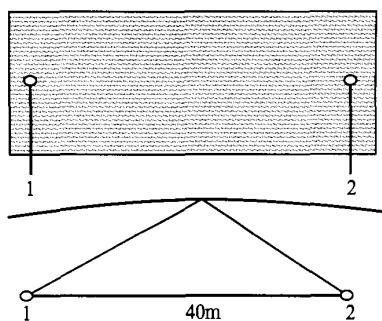


图1 方案1仪器位置设计图

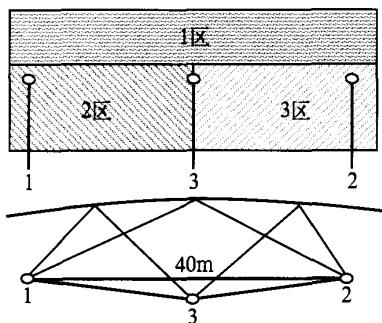


图2 方案2仪器位置设计图

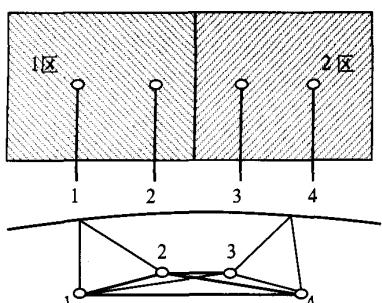


图3 方案3仪器位置设计图

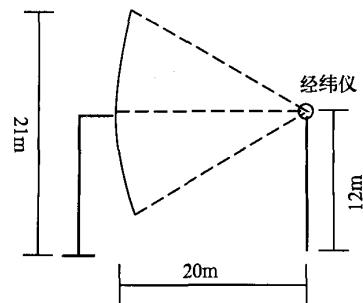


图4 各方案垂直方向布设图

表1 三种测量方案的比较

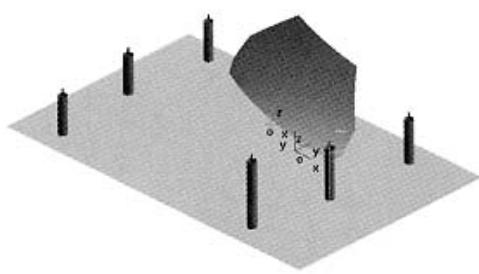
方案	仪器和观测员	最少测量墩	每台仪器的测点数	系统建立时间(h)	测点时间(h)	总时间(h)
1	2	2	772	0.2	5.1	5.3
2	3	3	514	0.3	3.4	3.7
3	4	4	386	0.5	2.6	3.1

3 测量控制网的建立及数据处理

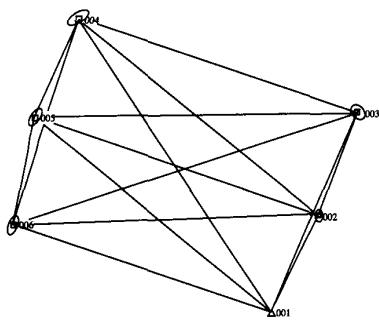
确定了仪器的布设方案,就可在实地建立测量墩及控制网。考虑到天线水平拼装和工作姿态下的调整,在天线前后共建造了6个测量墩,用于天线在工作姿态下安装的测量墩基础建于基岩上,所有测量墩外衬防风隔热层,使外界环境对测量墩的影响降至最低。控制网的网形经过了精心的设计。如图5所示,由三个独立的大地四边形构成,而且每一个点都有其他几个点近似垂直交会,可以确保即使是单独的测边网或测角网亦有很好的交会测量精度,这从表2的实测结果中可以看出。测量墩建成后经过半年以上的稳定后再施测,实测时测量了全部角度和边长,测角采用T3000A电子经纬仪,测距采用TC2003全站仪加精密棱镜,构成了一个高精度、高可靠的边角控制网。

数据处理时分别按测角网、测边网和边角网三种方案进行了计算。图5是各种方案计算后的点位误差椭圆,计算结果统计列于表2。可以看出,三种方案的边长和方向误差计算结果基本上是一致的,这说明边和角测量结果可靠,网形坚强,而且边角网的精度最高,基本上接近了野外观测的极限精度。

高精度施工控制网的建立,为天线各部件(背架、面板、背架连接点、座架基础、座架连接点和工作姿态下的天线等)精确几何关系的测量和调整提供了可靠的保证,可以高精度地恢复天线的设计坐标系,并且能确保天线的指向。



(a) 控制网图形



(b) 边角网点位误差椭圆

图 5 控制网图形及点位误差椭圆

表 2 控制网计算结果一览

平差方案	多余观测个数	边长误差 (mm)	方向误差 ("")	最大点位误差 (mm)	最大点间误差 (mm)	最大边长相对误差
测角网	14	0.3	0.77	0.5	0.54	1/96700
测边网	5	0.2	0.89	0.45	0.55	1/100300
边角网	29	0.3	0.78	0.32	0.35	1/144800

4 交会测量实施方案及测量结果

4.1 交会测量实施方案

选择了三台电子经纬仪进行交会测量,还需确定具体的观测方案。有两种观测方案:其一是固定各测量墩坐标(用施工坐标),三台电子经纬仪安置完毕后仅做相对定向,确定各水平度盘与起始方位的夹角;其二是仅固定最长边的方位角和第一台仪器的坐标,用作独立坐标系和施工坐标系之间的转换,建立系统时需做相对定向和绝对定向。相比较而言,方案二中测量墩的施工坐标仅起到传递测量基准而不是精度约束的作用,使独立坐标系的精度更高,而且考虑到了测量墩的现势性(可能有微小的变动),因而更合理一些。故实际测量时采用方案二。

系统建立的过程包括相对定向和绝对定向,相对定向采用互瞄内视标的方法,其定向精度可达万方数据

$\pm 1''$ 左右。该方案的难点在于绝对定向,因为测站的基线长度有 40m,根据最佳的观测条件(见图 6),需要 20m 的基准尺,且与仪器基本同高(12m),实现起来比较困难。

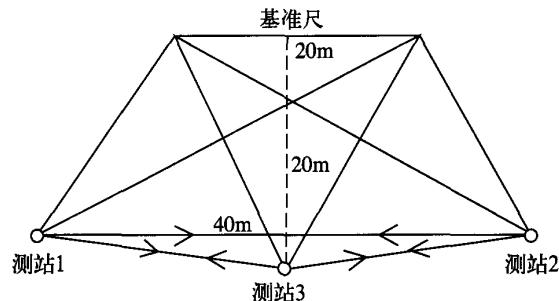


图 6 三台仪器基线测量最佳图

4.2 测量调整结果

工程中按最佳观测条件在天线面板上选择两点生成一“虚拟基准尺”,假定其理论长度(因为随着天线的调整其距离是不断变化的),通过测量该基准尺可以获得测站间的假定水平距离,然后用测站间的正确水平距离来改正,可获得优于 10^{-5} 的尺度精度。对于该测量图形及当前采用的 T3000A 电子经纬仪而言,单点测量如用双面观测点位精度在 ± 0.2 mm 左右,单面观测也可达到此精度,但要注意现场调校仪器的各种误差并且选取最佳观测时间段。

在水平姿态下,天线面板全部装完后只经过 1 次调整就使表面精度达到 1mm 左右;将天线从水平姿态吊装到垂直姿态(工作状态)后,表面精度变差,主要是受自重变形的影响。经过几次的调整,表面精度已优于 0.5mm,满足了电气测试的要求,表 3 为整个调整过程中的表面精度情况^[4]。

表 3 表面精度统计 单位:mm

测量序号	测点精度 (RMS)	表面精度 (RMS)	正向最大偏差	负向最大偏差	备注
1	0.29	5.69	8.9	-14.5	水平 拼装
2	0.19	1.15	3.0	-5.6	
3	0.25	2.31	12.6	-4.1	
4	0.21	1.37	10.1	-6.6	
5	0.20	0.77	4.0	-5.8	
6	0.23	0.66	3.9	-1.8	
7	0.24	0.44	2.4	-1.3	

4.3 电测结果

天线安装完毕后,经测试 Ku 频率的接收效率在 85% ~ 95% 之间,C 频率的接收效率在 80% 左右,详见表 4。图 7 是某频率的方向图。

表4

电测结果比较

位置	频率(MHz)	HPW(°)		G(dB)	η(%)	XPI(dB)
		AZ	EL			
1	4198.5	0.212	0.271	57.031	80.59	44.00
	12500	0.063	0.082	67.440	99.90	
2	3950	0.221	0.287	56.601	82.40	39.00
	11198	0.072	0.105	65.839	86.10	
3	3950	0.222	0.290	56.536	81.20	38.00
	11198	0.072	0.104	65.880	86.93	
4	12500	0.058	0.083	67.725	99.67	
	11121	0.082	0.089	65.990	90.43	
技术要求					C: ≥65% Ku: ≥60%	XPD ≥35dB

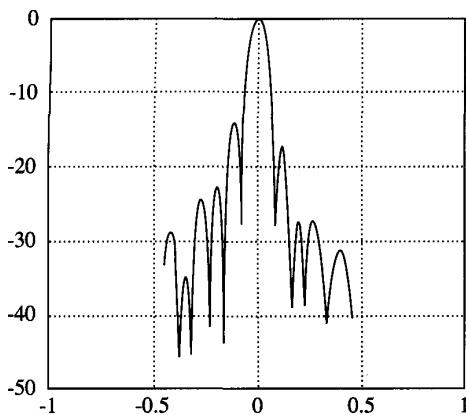


图7 某频率的方向图

从表4中可以看出,各频率接收效率显著优于设计指标,不但表明天线的理论设计是正确的,而且说明制造、施工和安装调整等诸环节是准确无误的。由于获得了指向和主面精度俱优的天线,说明天线测量方案是正确可行的,而且为整个工程提供了准确无误的测量成果。测试频率为:11.198GHz;AZ HPW(0.5)为:0.072(Deg)。表明由三台电子经纬仪构成的交会测量系统在天线测量的应用是非常成功的。

5 结束语

经过理论分析和测量实践,可以得到如下几点结论:

(1)在全面、准确把握各种大尺寸工业测量系统特点的基础上,逐一论证其应用于该天线测量的可行性,最终选定的多台经纬仪交会测量系统是最

合理的;

(2)对电子经纬仪测量系统的布网形式进行了深入的讨论,提出了三种测量方案,经过充分论证最终采用三台电子经纬仪组成交会测量系统,在保证精度、可靠性、提高效率和注重经济性等几方面做到了最佳结合;

(3)为确保整个天线系统几何关系的统一和精确对应,建立了高精度的施工控制网,从测量墩的建立到测量仪器等都作了特殊的考虑,控制网的精度已接近野外测量的极限精度;

(4)解决了长基线(40m)多台电子经纬仪交会测量的技术关键点——系统的绝对定向,确保了建立高精度的交会测量系统,从而为最终得到高精度主面提供了保证;

(5)电测结果验证了几何量调整的正确性;

(6)该测量实践的成功,为大中口径和非圆对称天线的安装测量提供了新思路,开辟了新途径。

参考文献:

- [1] 陈宏辉. 旋转样板测量装置的误差分析[J]. 无线电通信技术, 1996, 22(4): 58~64.
- [2] 李广云, 倪 涵, 徐忠阳. 工业测量系统[M]. 北京: 解放军出版社, 1994.
- [3] 李广云. 工业测量系统进展[M]. 北京: 解放军出版社, 2000.
- [4] 李宗春. 天线测量理论、方法及应用研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2003.

Electronic Multi-theodolite Measuring System Applied in the Precision Installation of a Large Antenna

LI Zong-chun, LI Guang-yun, TANG Ting-song, ZHANG Guan-yu

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan, 450052)

Abstract: A large radio communication antenna needed a high measuring precision ($\pm 0.3\text{mm}$, point deviation), so a multi-theodolite measuring system was chosen to satisfy it. Three preliminary schemes were brought forward according to the size and the construction area of the antenna. After throughout consideration of precision, reliability, efficiency and economy factors, the three-T3000A theodolite-scheme was selected. In order to ensure the high surface accuracy and good geometry relationship among its parts, a construction network was established with six measuring pillars whose height varied from 9m to 16m. These pillars were constructed in the rock in order to ensure their stability. The angles and sides of the network were measured by T3000 and TC2003. The network got a high precision and which the point deviation was less than $\pm 0.3\text{mm}$. The key difficulty of the scheme was that a long (20m) and high accuracy scale bar couldn't be found. So a scale bar with assumed distance was measured to ensure the correct relative relationship among the stations, the true distance was then used to correct the scale factor of the system. In fact the relative distance accuracy reached at 10^{-5} . Only 4 hours were spent to finish 772 points within $\pm 0.3\text{mm}$ intersection accuracy. So the efficiency of the system was very high. The final surface accuracy was $0.5\text{mm}(\text{r. m. s})$ after six adjustments, which was a satisfied result. The testing result in electric capability was perfect.

Key words: engineering survey; large scale industrial measuring system; multi-theodolite intersection measuring system; virtual scale bar; antenna; surface accuracy

征文通知

根据中国测绘学会 2005 年学术交流活动计划安排,中国测绘学会海洋测绘专业委员会拟定于 2005 年 8 月在吉林省召开“中国测绘学会第七届海洋测绘专业委员会第一次全体委员会议暨第十七届海洋测绘综合性学术研讨会”。为了达到增进学术交流、提高学术水平和加强技术合作的目的,本专业委员会将编辑出版《第十七届海洋测绘综合性学术研讨会论文集》,欢迎大家踊跃投稿。

论文撰写的具体要求如下:

(1)论文应是反映海洋、江河、湖泊测绘领域内的有关理论研究、新技术和新方法应用、教学探讨、科研管理、测绘生产、测绘仪器等方面的内容,要求论点明确、论据可靠、具有一定创新性和学术技术水平,字数在 8000 字以内(含插图和表格)。若是基金项目支持的论文,应注明项目名称和项目序号。

(2)论文一律使用 A4 纸格式,正文内容用五号宋体字,文中的公式、表格、图形和图像等必须清晰准确,参考文献著录齐全,同时注明作者简介、从事工作或研究方向、单位、邮编和联系电话等信息。论文格式可参照 2004 年的《海洋测绘》。

(3)作者务必在 2005 年 6 月 30 日以前,将论文打印稿和拷贝软盘(或以电子邮件方式)报送到海洋测绘专业委员会秘书处。

届时将邀请论文作者参加会议交流,会议的具体时间和地点将另行通知。

联系地址:天津市河西区友谊路 40 号 中国测绘学会海洋测绘专业委员会秘书处 300061

联系人:王克平 申家双 联系电话:022-84685080,84685008

E-mail: tjhcxh@163.com

中国测绘学会海洋测绘专业委员会
二〇〇五年一月十日

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>