



测绘科技专著出版基金资助

CEHUI KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

MEASURING THEORY, TECHNIQUE AND
APPLICATION OF ANTENNA

李宗春 李广云 著

天线几何量测量 理论及其应用



测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

天线几何量测量理论及其应用

Measuring Theory, Technique and Application of Antenna

李宗春 李广云 著

测绘出版社

• 北京 •

内容提要

本书针对天线测量参考资料匮乏这一现状,总结多年从事天线测量研究的经验,构建了天线测量的理论和技术体系。全书共分 8 章,前 4 章分析了天线测量技术的现状,理清了天线行业对测量技术的要求,系统介绍并首次提出了多种天线测量方法,在此基础上构建了天线测量数据处理的基本体系。最后 4 章介绍了世界上最大的抛物环面天线测量、探月工程 50 m 天线测量、国际知名天线测量实践,以及 FAST 工程和上海天文台 65 m 天线的设计情况,以期对天线测量从业人员有所帮助。

本书的读者对象包括精密工程测量技术人员,天线结构设计、工艺等方面技术人员,大中专院校在校学生,以及相关工程和研究人員。

图书在版编目(CIP)数据

天线几何量测量理论及其应用/李宗春,李广云著.

北京:测绘出版社,2009.12

ISBN 978-7-5030-1967-8

I. 天… II. ①李…②李… III. 天线—测量 IV. TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 198265 号

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

责任编辑	贾晓林	封面设计	李 伟	责任校对	阅微旭
出版发行	测绘出版社				
社 址	北京市西城区三里河路 50 号	邮政编码	100045		
电 话	010-68531160(市场营销)	010-83543974	68512386(发行部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.sinomaps.com		
印 刷	北京华正印刷有限公司	经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm				
印 张	12.50	字 数	240 千字		
版 次	2009 年 12 月第 1 版	印 次	2009 年 12 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1500	定 价	29.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-1967-8/P·451

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

序

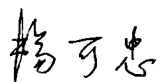
这是一本关于面天线几何量测量技术的专著,全面系统地研究了各种测量系统的原理、组成和技术特点,并分析了其测量精度,讨论了各种测量系统的应用前景和发展趋势。

本书有下述特点:第一,系统性强。书中不但介绍了传统的测量方法,并且也深入讨论了诸如全息法、三坐标测量机和非正交坐标测量系统等近些年来涌现的现代测量技术,从而可以看出天线几何量测量技术进步和发展的轨迹。第二,完备性好。书中不但介绍了各种测量方法的基本原理,测试系统的组成,并且也研究了数学模型的建立,测试数据的处理过程,更进一步地分析了各种测试方法的约束条件和适用范围,从而给读者提供了每种测试方法的清晰概貌。第三,创新性高。例如对于面天线面形测量,作者提出了三种方法,曲面自由拟合法、公共点转换法和CAD面型转换法,具有相当的新颖性;又如作者针对大型抛物环面天线测量问题,建立了一套比较科学和完整的技术方案和工程实施措施,具有独创性。第四,实践性强。本书用相当的篇幅介绍了各种具体天线的实测方案、测试过程、模型分析、测试中所碰到的技术问题的解决方法、测试结果、电气性能的实测佐证等。第五,实用性强。本书给出了各种测试系统的详细组成、具体的测试步骤、测试中的技术要素、数据处理模型的建立等等,因此本书所介绍的系统和方法拿来即可用。

高性能的面天线首先要有先进和科学的设计,但是面天线的电气性能是通过机械结构载体来实现的。在某种意义上讲,天线的电性能是通过调整而达到最佳的。特别是大型面天线,天线面形的调整,机械轴系的校准调整,对天线的电性能最佳化起到很重要的作用。众所周知,上述的调整和校准都基于高精度的几何量测量。因此天线几何量的测量有两重意义:其一,对初装的天线进行测量,基于初测结果对天线实施进一步的精调。其二,对于精调后的天线进行最终鉴定性测试。并且这种过程往往经过几个循环才能完成。况且,随着天线口径的变大和技术要求的提高,天线几何量的测量已经变成天线制作、加工、装架的一个重要环节。例如加工过程中对部件和组件精度的测量、加工工艺程序中重要技术指标的监测,都是天线几何量测量的重要技术环节。因此,天线几何量测量技术同天线电性能测量技术一样,都是天线技术的重要组成部分,与天线分析和设计技术同等重要。这就要求从事天线电性能设计的技术人员,应当对天线的几何量测量技术和系统有所了解,同样从事天线几何量测量的技术人员,也应当对天线的电气性能和工作原理有所了解。本书在讨论各种天线几何量测量时,对天线的基本工作原理、主要技

术要素都进行了详细的介绍,这对从事天线研制和测量的人员有很大帮助。

随着天线技术的发展,天线测量技术,包括电参数测量技术和几何量测量技术都有了新的进步,特别是大型面天线技术的发展,更促进了天线测量技术的发展,例如大型深空探测天线和大型天文望远镜天线所涉及的天线测量技术都属于高科技技术。本书的出版必将对我国面天线技术的进步起到一定的推动作用。



2009 年 6 月

前言

“怀瑾握瑜，迤邐而行”，切实掌握先进的天线几何量测量(以下简称“天线测量”)技术并服务社会，是天线测量技术人员的不懈追求。作者在从事天线测量研究的过程中，一直为缺少必要的参考资料而倍感苦恼。限于保密及测量实践较少的现实，我国的天线测量技术远远落后于世界先进水平。为改变这一窘境，作者不揣冒昧，顺应天线行业对精密工程测量新技术的迫切需求，努力构建起天线测量的理论和技术体系。

精密工程测量技术是工程测量技术中最具活力的部分，天线技术是国家高科技实力的重要体现，精密工程测量技术和天线技术交叉融合，正在产生新的学科分支——天线测量技术，学术意义明显。依靠天线测量新技术，科研人员必能研制出更大口径、更高频率的天线，从而推动我国在卫星通信、射电天文和深空探测等领域的大发展，有助于提高我国的科技实力和综合国力。

全书共分8章。第1章介绍了国外天线的先进制造水平，分析了我国天线测量技术的现状，明确了研究内容和思路。第2章讨论了抛物面天线的基础设计、制造与测量理论，正本清源，理清了天线行业对测量技术的需求。第3章探讨了天线测量技术。将其划分为传统测量方法、射电全息法、三坐标测量机和非正交系坐标测量系统。全面研究了各系统的原理、方法、组成、测量精度及提高的途径、系统的特点。可以看出，射电全息法和非正交系坐标测量系统应用前景光明。第4章构建了天线测量数据处理的基本体系。在坐标转换方面，探讨了三种方法，其中CAD面型转换法为首次提出。研究了各类天线表面精度的计算方法，其中余割天线表面精度的计算方法为首次提出，赋形旋转抛物面天线、余割天线和抛物环面天线的形状参数计算方法为首次提出。第5章针对世界最大的抛物环面通信天线，创新性地采用三台高精度电子经纬仪构成的前方交会测量系统施测，优化建立了一套比较科学和完整的测量解决方案，应用效果良好。第6章以探月工程50 m测控天线的研制为工程背景，针对天线模胎、单元面板、轨道、滚轮、下框架、座架、俯仰大齿轮组合、背架、天线面等组件，综合应用经纬仪测量系统、全站仪测量系统和摄影测量系统施测，获得了高性能的天线。第7章研究了国际上知名天线的测量问题，他们的智慧和成果对我们有很好的借鉴作用。第8章简要介绍了我国FAST工程和上海天文台65 m天线的设计情况。

本书的读者对象包括精密工程测量技术人员、天线结构设计、工艺等方面技术人员，大中专院校在校学生，以及相关工程和研究人員。

在书稿完成之际,作者特别感谢中国电子科技集团公司第 54 所总工杨可忠研究员和金超研究员,本书的部分成果,获益于与二位先生的项目合作,得到了二位先生的大力关注和热情指导,尤其是杨可忠研究员为本书作序,对研究成果作了高度评价,特此致谢。作者还要特别感谢课题组的张冠宇、薛志宏、范百兴、汤廷松、卫建东、贺磊、储鹄、冯其强、高宏、许文学、郭福生、马国元、高云飞、翟晓峰、王保丰、范生宏等同志,他们都不同程度地参与了抛物环面天线和探月工程 50 m 天线的测量任务,他们的智慧也凝结在本书中。

由于天线测量技术的相关著述甚少,加之作者的水平有限,书中的论点难免有偏颇之处,恳请读者不吝赐教。

作 者

2009 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
§ 1.1 研究背景	(1)
§ 1.2 国内外研究现状	(2)
§ 1.3 本书主要内容	(6)
第 2 章 天线设计、制造与测量基础理论	(9)
§ 2.1 天线几何特性	(9)
§ 2.2 天线的数学模型与结构	(10)
§ 2.3 天线设计对测量精度的要求	(18)
§ 2.4 天线制造对测量精度的要求	(21)
§ 2.5 测点布设方案	(25)
§ 2.6 主动反射面技术简述	(29)
§ 2.7 小结	(31)
第 3 章 天线测量技术与方法	(32)
§ 3.1 传统测量方法	(32)
§ 3.2 射电全息法	(35)
§ 3.3 正交坐标系测量机	(36)
§ 3.4 非正交坐标系测量系统	(39)
§ 3.5 小结	(61)
第 4 章 天线测量数据处理理论和方法	(63)
§ 4.1 坐标转换	(63)
§ 4.2 表面精度	(74)
§ 4.3 顾及形状参数的坐标转换与表面精度	(80)
§ 4.4 天线变形观测数据处理及预测	(88)
§ 4.5 数据处理可视化	(91)
§ 4.6 小结	(92)

第 5 章 大型抛物环面天线测量实践	(93)
§ 5.1 基本设计理论及坐标系	(93)
§ 5.2 测量方案论证	(101)
§ 5.3 测量控制网	(109)
§ 5.4 背架拼装与测量	(116)
§ 5.5 面板水平拼装	(121)
§ 5.6 座架测量与调整	(125)
§ 5.7 工作姿态下的测量与调整	(129)
§ 5.8 馈源轨道的安装放样	(132)
§ 5.9 电测结果	(133)
§ 5.10 小结	(134)
第 6 章 50 m 天线测量实践	(136)
§ 6.1 工程概况	(136)
§ 6.2 测量方案论证	(137)
§ 6.3 座架支撑系统安装与调整	(144)
§ 6.4 俯仰组合系统安装与调整	(150)
§ 6.5 天线系统安装与检测	(154)
§ 6.6 电测结果	(165)
§ 6.7 小结	(165)
第 7 章 国外天线测量实践	(167)
§ 7.1 Arecibo 天线	(167)
§ 7.2 GBT 天线	(169)
§ 7.3 LMT 天线	(173)
第 8 章 新的挑战	(178)
§ 8.1 FAST 工程	(178)
§ 8.2 上海天文台 65 m 天线	(181)
参考文献	(183)

Contents

Chapter 1	Introduction	(1)
§ 1.1	Background	(1)
§ 1.2	Actuality of Antenna Measuring Theory	(2)
§ 1.3	Contents of This Book	(6)
Chapter 2	Basic Theory of Antenna's Design, Manufacture and Measurement	(9)
§ 2.1	Antenna's Geometric Characters	(9)
§ 2.2	Antenna's Mathematic Models and Structures	(10)
§ 2.3	Measuring Requirement of Antenna's Design	(18)
§ 2.4	Measuring Requirement of Antenna's Manufacture	(21)
§ 2.5	Solution of Antenna's Measuring Targets Distributed	(25)
§ 2.6	Brief Introduction of Active Surface	(29)
§ 2.7	Summary	(31)
Chapter 3	Antenna's Measuring Technique and Methodology	(32)
§ 3.1	Traditonal Methods	(32)
§ 3.2	Radio Holography	(35)
§ 3.3	CMM	(36)
§ 3.4	Non-orthogonal Coordinate Measuring Systems	(39)
§ 3.5	Summary	(61)
Chapter 4	Antenna's Data Processing Theory and Methodology	(63)
§ 4.1	Coordinate Transformation	(63)
§ 4.2	Surface Accuracy	(74)
§ 4.3	Coordinate Transformation and Surface Accuracy Considering Antenna's Shape Parameters	(80)
§ 4.4	Data Processing and Predication Model for Antenna's Deformation Monitoring Data	(88)
§ 4.5	Visualization of Antenna's Data Processing	(91)

§ 4.6	Summary	(92)
Chapter 5	Measuring Application of Large Multi-beam Parabolic Torus Antenna	(93)
§ 5.1	Basic Design Theory and Its Coordinate Systems	(93)
§ 5.2	Argumentation for Measuring Scheme	(101)
§ 5.3	Measuring Control Network	(109)
§ 5.4	Measurement for Back Structure Assembly	(116)
§ 5.5	Antenna's Assembly in Horizontal Position	(121)
§ 5.6	Measurement for Seat Structure Assembly	(125)
§ 5.7	Measurement and Adjustment in Working Position	(129)
§ 5.8	Setting-out for Feed Source Track	(132)
§ 5.9	Result of Electronic Testing	(133)
§ 5.10	Summary	(134)
Chapter 6	Measuring Application for $\phi 50$ m Antenna	(136)
§ 6.1	General Situation	(136)
§ 6.2	Argumentation for Measuring Scheme	(137)
§ 6.3	Measurement and Adjustment for Back Structure	(144)
§ 6.4	Measurement and Adjustment for Elevation Gear Structure	(150)
§ 6.5	Measurement and Adjustment for Primary Surface	(154)
§ 6.6	Result of Electronic Testing	(165)
§ 6.7	Summary	(165)
Chapter 7	Practical Experience of Overseas Antenna	(167)
§ 7.1	Arecibo Telescope	(167)
§ 7.2	Green Bank Telescope	(169)
§ 7.3	Large Millimeter Telescope	(173)
Chapter 8	New Challenges	(178)
§ 8.1	FAST Project	(178)
§ 8.2	$\phi 65$ m Telescope of SHAO	(181)
References		(183)

第 1 章 绪 论

§ 1.1 研究背景

近代电磁学经历了 300 多年的发展历程,特别是 20 世纪,马可尼越洋通信试验的成功,开创了无线电技术的新纪元。天线作为无线电应用的关键设备,随着通信、广播、雷达、制导和射电天文等无线电应用系统的需要不断地发展,突出出“线天线”、“面天线”和“阵列天线”三条平行的发展轨迹。本书以面天线为研究对象,深入探讨其表面精度测量的相关理论、方法和应用问题。

首先让我们了解国际上天线制造业的发展水平。美国康奈尔大学国家天文和电离层研究中心(NAIC)研制的世界最大单口径射电天文望远镜 Arecibo(Goldsmith, 2001)如图 1.1.1 所示,主反射面为球形, $\phi 305\text{ m}$,由 38 788 块铝板拼接而成,天线全重 900 t,占地 18 英亩($1\text{ 英亩}=4\,047\text{ m}^2$),表面精度优于 $\pm 2\text{ mm}$ 。美国国立射电天文台(NARO)建成的世界最大整体可驱动式反射面天线 GBT(Green Bank Telescope)如图 1.1.2 所示,主反射面为偏置式赋形格里高利型,口径面积为 $100\text{ m}\times 110\text{ m}$,由 2 004 块铝板拼接而成,天线全重 6 800 t,表面精度为 $\pm 0.23\text{ mm}$ 。美国麻省理工学院与墨西哥合建的大型毫米波射电天文望远镜 LMT(Large Millimeter Telescope)采用了 $\phi 50\text{ m}$ 卡塞格伦反射面天线,表面精度预计达 $\pm 0.069\text{ mm}$ 。意大利的 SRT(Sardinia Radio Telescope)天线,采用了 $\phi 64\text{ m}$ 赋形格里高利反射面天线,表面精度预计达 $\pm 0.17\text{ mm}$ 。目前亚洲最精密的天线是日本的 Nobeyama 天线(Nobuharu Ukita, et al, 1994), $\phi 45\text{ m}$,表面精度为 $\pm 0.065\text{ mm}$ 。由此可见,国际天线业的需求很广,发展迅速。



图 1.1.1 Arecibo 天线

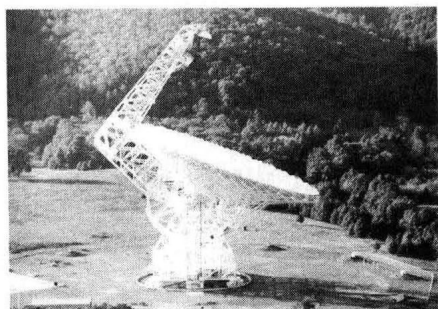


图 1.1.2 GBT 天线

与国际知名天线相比,国内天线无论在口径还是在表面精度方面相差都较大。中国电子科技集团公司(以下简称中国电科)54 所研制的某大型天线,口径面积为 $18\text{ m} \times 36\text{ m}$,表面精度为 $\pm 0.66\text{ mm}$,其安装测量难题将在第 5 章中详细介绍。中国电科 54 所为探月工程研制的 $\phi 50\text{ m}$ 天线(图 1.1.3),表面精度为 $\pm 0.7\text{ mm}$,是目前中国乃至亚洲最大口径天线,其安装测量难题将在第 6 章中详细介绍。中国电科 39 所为国家天文台昆明站制造的 $\phi 40\text{ m}$ 射电天文望远镜(图 1.1.4),也是探月工程测控系统重要的设备。中国电科 39 所为上海天文台和国家天文台乌鲁木齐南山站制造的 $\phi 25\text{ m}$ 卡塞格伦式射电天文望远镜,最短工作波长 26 mm ,表面精度要求 $\pm 0.8\text{ mm}$ 左右。紫金山天文台与美国合作研制的 $\phi 13.7\text{ m}$ 天线,最短工作波长 2.6 mm ,表面精度要求 $\pm 0.13\text{ mm}$ 左右。某研究所研制的口径面积为 $13\text{ m} \times 25\text{ m}$ 天线,表面精度优于 $\pm 1.0\text{ mm}$ 。中国电科 54 所制造的用于对流层散射通信的 $\phi 20\text{ m}$ “广告牌”天线,表面精度优于 $\pm 2.0\text{ mm}$ 。

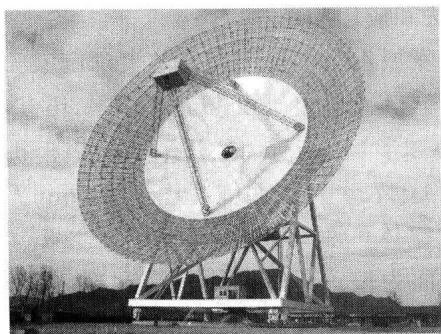


图 1.1.3 北京 $\phi 50\text{ m}$ 天线



图 1.1.4 昆明 $\phi 40\text{ m}$ 天线

从上述资料可以看出,国内外在该领域的差距非常明显。需要注意的是,我国天线制造水平的提高,主要受探月工程的驱动,新技术的应用仅仅 5 年左右,发展空间很大。

类似的天线还有很多,上述天线的共同特点是表面精度高,面积大,结构复杂,对精密工程测量的要求很高。这些大型天线和特种天线的设计制造,已经不是传统测量方法所能保障和解决的。天线的测量方法正在发生着深刻的变化,必须采用精密工程测量学和计量学中的新技术和新方法来解决大型天线制造中的测量难题。

§ 1.2 国内外研究现状

1.2.1 测量方法

天线的表面精度是衡量、评价天线质量的重要指标,它不仅直接影响天线的口

面效率,决定天线可工作的最短波长,还影响天线方向图的主瓣宽度和旁瓣结构。对天线进行测量,确定其表面精度,由此可推算出它对天线电气性能的影响。反射面的表面精度要求与工作频率有关系,工作频率越高,对表面精度的要求就越高。一般要求表面精度是天线工作波长的 $1/16 \sim 1/32$,而测量精度要达到表面精度的 $1/3 \sim 1/5$ 。工作波长越短,例如毫米波和亚毫米波,对测量提出的要求就越高。

综观天线表面精度测量方法的发展历程,大致可以分成以下三种方法。

1. 传统测量方法

传统方法主要有机械、光学和电等方法。

机械测量法是用机械的方法对反射面进行检测,不仅在过去是主要方法,现在还在使用。主要有样板法和数控机床法两种。样板法(屈永欣等,1996)对中、小型天线比较有效,只适合天线朝天状态下的测量,测量精度为 $\pm(0.1 \sim 0.2)$ mm。数控机床实际上是一台精度比较低的三坐标测量机,该法只适合测量小型天线(直径不大于 4 m),测量精度可达 $\pm(0.02 \sim 0.1)$ mm。

经纬仪带尺法是一种广泛应用的光学测量方法,测量精度在 ± 0.2 mm 以内;双五棱镜法可以测量抛物面在不同仰角时的表面精度,测量精度为 $\pm(0.15 \sim 0.66)$ mm。

电测量方法包括激光测距法和微波测距法等。

上述测量方法属于比较经典的传统的方法,为早期的国内外天线制造业普遍采用。传统测量方法的主要特点是:量程比较小、测量速度慢、自动化程度低、劳动强度大、对天线的姿态有限制等。

2. 工业测量系统方法

从 20 世纪 80 年代开始,精密工程测量在天线测量中的应用主要表现为工业测量系统的应用。工业测量系统可分为正交坐标系和非正交坐标系测量系统。正交坐标系测量系统以三坐标测量机为代表(张国雄,1999),它的测量精度高,可达微米级,但测量范围小,不易移动,对环境要求高,只能在室内完成中、小天线的测量。非正交坐标系测量系统(李广云等,1994;李广云,2000)与正交坐标系相比有较大的灵活性,测量范围大,对环境条件要求不高,测量方法多样,精度能满足要求,可移动性好,可以完成不同口径、精度和工作条件下的天线安装和检测。按传感器的不同可分为经纬仪测量系统、全站仪测量系统、激光跟踪测量系统、摄影测量系统和激光雷达测量系统等多个子系统。

经纬仪测量系统以两台及以上的高精度电子经纬仪为传感器,结合其他附件和系统软件,以角度前方交会的测量原理对被测物(天线)无接触测量,测量速度快,测量范围在几米到几十米,测量精度为 $\pm(0.05 \sim 0.2)$ mm。由于该系统的突出优点,故在天线制造业中应用广泛。信息工程大学测绘学院用该系统对中国电

科 54 所的天线夹具、模胎进行了检测,测量精度为 $\pm(0.02\sim0.05)$ mm(李广云等,1997);对 6.2 m 试验天线进行了安装测量,测量精度为 ±0.15 mm,天线表面精度为 ±0.7 mm(金超等,1999);对 $\phi 15$ m 天线进行自重变形观测,测量精度为 ±0.6 mm(付子傲,1989);对 $\phi 25$ m 赋形卡塞格伦天线进行自重变形观测,测量精度为 ±0.5 mm(徐忠阳,1990)。

全站仪测量系统以单台高精度全站仪为传感器,配以反射片或球棱镜等距离测量标志,以极坐标的测量原理对被测物(天线)实施测量,测量范围为 2~200 m,测量精度为 $\pm(0.2\sim0.5)$ mm。单台全站仪测量系统相对于经纬仪测量系统而言,成本低,操作方便,系统建立快,易维持。美国 EMS 公司将该系统用于 $\phi 15$ m 卡式毫米波射电天文望远镜、10 m $\times$ 7 m 紧缩场天线以及 $\phi 26$ m 厘米波跟踪雷达天线的安装测量和变形测量,效果良好(Brenner, 1995);美国国立射电天文台(NARO)的 GBT,用全站仪进行安装测量,得到的表面精度为 ±1.1 mm;美国国家导弹防御系统中 $\phi 14$ m GBR-P 雷达,采用 TDA5005 全站仪进行安装测量及重力变形观测,测量精度为 ±0.5 mm(Muench, 1998)。

激光跟踪测量系统以单台激光跟踪仪为传感器,以极坐标的测量原理进行快速跟踪测量,坐标重复测量精度达到 $5\times 10^{-5}D$ 。只要将反射装置(猫眼反射器、角隅反射器和工具球反射器)在被测物的表面移动,就可实现该表面的快速数字化,尤其适合于天线模胎及单块面板的测量及质量评定。

摄影测量系统以单台或多台高精度量测相机为传感器,以交会的测量原理进行快速无接触测量,测量范围大,速度快,特别适合于动态测量场合。美国 Arecibo 望远镜的升级(工作频率由 600 MHz 提高到 10 GHz),全站仪的测量精度已经不能满足要求,为此专门采用了摄影测量方法,坐标分量的测量精度为 ±0.25 mm,调整后的表面精度优于 ±2 mm(Goldsmith, 2001);信息工程大学测绘学院对 $\phi 15$ m 天线进行了变形测量的试验,测量精度为 $\pm(0.2\sim0.5)$ mm(邵锡惠,1991)。

激光雷达测量系统相当于一台高速高精度无合作目标测距全站仪,真正实现了无需人工合作目标的无接触测量,测量速度快,坐标测量精度为 $1\times 10^{-5}D$ (10 m 距离上的精度为 ±0.1 mm),在天线测量中有一定的应用空间。

工业测量系统与传统方法相比突出的特点是:量程大、精度高、测量速度快、自动化程度高、劳动强度小、对天线的姿态无特殊要求。由于具有上述优点,该系统在现代面天线的安装、检测中有着广泛的应用,上述事例仅是窥其一斑。就该方法的应用而言,国内外差距较大,主要表现为国内的应用比较单一,测量经验少,尤其缺乏大型和精密天线的制造和测量实践。在全站仪测量大型天线、摄影测量系统的深入应用及激光跟踪和激光雷达系统的应用等方面还有很多的理论和应用问题亟待解决。

3. 射电全息法

从20世纪80年代开始,一批大中型毫米波、亚毫米波射电天文望远镜相继问世,天线口径与表面精度之比已达 10^5 以上,前述测量方法的精度已基本达到极限,射电全息法得到了越来越多的应用。该法在国际上应用广泛,如美国的GBT天线,通过射电全息法测量,表面精度从 $\pm 1.1\text{ mm}$ 提高到 $\pm 0.46\text{ mm}$;德国的Effelsberg天线,用该法进行了升级,表面精度提高到 $\pm 0.5\text{ mm}$ (Godwin et al, 1986);法国的IRAM $\phi 30\text{ m}$ 天线用该法进行了升级,测量精度为 $\pm 0.035\text{ mm}$,表面精度提高到 $\pm 0.08\text{ mm}$ (Baars et al, 1994)。国内紫金山天文台有一些初步的研究,紫金山天文台对 $\phi 13.7\text{ m}$ 射电天文望远镜进行了射电全息法试验,测量精度为 $\pm 0.16\text{ mm}$,表面精度为 $\pm 0.248\text{ mm}$ 。总体而言,国内的水平较低,应用很少。

射电全息法的特点是:量程无限制、精度高、实时测量、自动化程度高、对天线的姿态无特殊要求。由于具有这些特点,该法的应用前景非常广阔,是毫米波、亚毫米波天线精调最重要的方法。

综上所述,测量系统与天线制造的结合体现在多个方面,简而言之,主要应满足三个需求:一是几何质量检测的需求,二是安装测量的需求,三是变形测量的需求。从这一角度看,国外的天线测量水平总体高于国内,表现为方法多样、理论严密、装备先进、经验丰富。这一方面预示着我们精密工程测量专业有着很大的发展空间,另一方面也说明精密工程测量和天线测量相结合还有一个艰辛探索、渐进前行的过程。

1.2.2 数据处理方法

数据处理要解决的问题是提高数据处理的速度、可靠性和科学性。数据处理方法与测量方法联系密切。传统的测量方法一般是将测量系统建立在天线的设计坐标系中,数据处理相对比较简单。应用工业测量系统进行天线测量时,一般情况下测量坐标系和设计坐标系并不一致,因而数据处理的首要问题是解决两坐标系之间的转换。目前主要的方法是曲面自由拟合法(李广云等,1997)和公共点转换法(马世锋,1998),它们都有一定的缺陷需要克服,要研究更加科学合理的转换方法。当测量数据转换到天线的设计坐标后,法向偏差及表面精度的统计就成为主要工作,而该问题在各类文献中很少提及,尤其对于数学模型比较复杂的天线,需要深入地研究。另外为了体现测量数据对天线的指导作用,需要研究最优主面精度和馈源微小调整量的计算方法。为增加处理结果的表达方式,还需要解决天线数据处理过程及结果可视化表达问题。

1.2.3 现状分析

和国际上天线学科飞速发展的现状相比,国内在天线制造方面比较落后。究

其原因,主要有如下几点(章文勋,2000):“缺乏原版书刊及时提供第一手信息和计算机网上检索受高价位的限制;缺乏先进的商品化软件,且已有的软件未被充分利用;测试手段普遍落后于国外的同类单位。”此处的测试手段包括几何量的测试手段和电信号的测试手段,本书所关心的是几何量测试手段。一般而言,由于大型天线的军事用途或者是国家重大科学工程项目而涉及保密问题,因此难以获取国外第一手资料。我国缺乏制造大型天线的实践,是造成几何量测试手段落后的根本原因。国内天线学科和测量学科的沟通不密切,也导致了几何量测试手段的落后。测量手段是工艺的重要组成部分,其保密性是不言而喻的,因此国内各研制单位之间同样存在缺乏沟通问题。由此不难发现我国天线工业落后于世界先进水平的某些痼疾。“凡事预则立,不预则废。”为了提高几何量测试水平,需要加紧研究工作,为将来大型及特种天线的研制做好技术储备。

如何为我国自行设计的大型天线制造提供精确、可靠的测量保障,我们可以借鉴的经验不多,必须将其工程实际与精密工程测量技术紧密结合,创造出自己的方法。近些年来精密工程测量的方法和仪器设备有了长足的发展,绝对精度达到微米量级,为其应用于大型天线测量奠定了坚实的基础。

§ 1.3 本书主要内容

本书对面天线的几何量测量理论与方法进行了较全面的探讨,涉及各类天线及天线制造的各个环节,并以某大型抛物环面天线和探月工程 50 m 天线的安装测量为工程背景,综合运用大地测量、工程测量及精密工程测量的技术,紧密结合天线的设计与施工,研制了一套较全面的解决方案。

第 1 章综述了国内外天线制造及测量技术现状,分析了我国天线测量技术面临的困境,指出了需要解决的问题,并介绍了本书的主要内容。

第 2 章探讨了抛物面天线的基础设计、制造与测量理论。天线的数学模型与结构是天线测量与数据处理的基础,为此本书将散落在诸文献中的各类天线的数学模型与结构进行了整理;明确了天线表面误差的确定依据;归纳了表面误差的一种分配原则——“1/2 原则”;综述了天线模具及面板的成形工艺;研究了天线模具及面板的测量点布设问题,提出了测点布设应与天线的数学模型及成形方法密切相关的论点,并制定了一套可行的天线测量布点方案。

第 3 章系统地研究了天线测量技术与方法,将其划分为传统测量方法、射电全息法、三坐标测量机和非正交坐标系测量系统。简明扼要而又系统地给出了各种测量系统的原理、方法、组成、特点、测量精度及提高的措施,并重点讨论了其在天线测量中的具体应用问题。可以看出,射电全息法和非正交坐标系测量系统应用前景光明。