



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工业测量系统 原理与应用

The Principles and Applications of
Industrial Measuring Systems

李广云 李宗春 主编



测绘出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工业测量系统原理与应用

The Principles and Applications of Industrial Measuring Systems

李广云 李宗春 主编

测绘出版社

· 北京 ·

© 李广云 李宗春 2011

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。

内 容 提 要

本书针对工业测量系统技术迅猛发展的现状,系统总结了作者近 20 年来的相关教学和科研成果,构建了工业测量系统的理论和技术体系,以期助推工业测量技术在我国的大科学工程和先进装备制造业中的应用。全书共分 7 章,第 1 章从工业测量系统的概念和特点、分类、应用及发展趋势等方面予以阐述。第 2 章至第 6 章分别讨论了经纬仪测量系统、数字工业摄影测量系统、全站仪测量系统、激光扫描测量系统、激光跟踪测量系统、关节臂式坐标测量机和 Indoor GPS 测量系统的测量原理、系统组成、关键技术和典型应用案例等。第 7 章详细介绍了工业测量系统的常用软件及其基础知识。

本书可作为测绘工程及相关专业学生的选修教材,以及测试计量技术及仪器专业学生的参考教材,也可供精密测量领域的相关工程和研究人員学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业测量系统原理与应用 / 李广云, 李宗春主编. — 北京: 测绘出版社, 2011. 1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5030-2174-9

I. ①工… II. ①李… ②李… III. ①工业仪表—工程测量—高等学校—教材 IV. ①TH7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 225573 号

责任编辑 贾晓林		封面设计 李 伟		责任校对 董玉珍 李 艳	
出版发行	测绘出版社				
地 址	北京市西城区三里河路 50 号			电 话	010—68531160(营销)
邮政编码	100045				010—68531609(门市)
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.sinomaps.com
印 刷	北京金吉士印刷有限责任公司			经 销	新华书店
成品规格	184mm×260mm				
印 张	15.25			字 数	380 千字
版 次	2011 年 1 月第 1 版			印 次	2011 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000			定 价	38.00 元
书 号	ISBN 978-7-5030-2174-9/P·507				
本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。					

前 言

“工欲善其事，必先利其器”，大尺寸空间坐标测量技术是大型装备制造及精密工程安装的基础支撑技术之一，也是精密测量技术的热点和难点问题。当前，随着我国重大基础装备工业的快速发展和大科学工程的陆续上马，大尺寸空间坐标测量技术的重要性日渐凸显，传统的工业测量技术已经不能满足实际需求，必须着力研究和发展新的仪器设备和测量方法。

当今，信息技术已成为推动科学技术和国民经济各行业高速发展的关键技术，如何利用先进的信息技术来提升、改造我国的传统装备制造业，实现跨越式发展，是装备制造业面临的一项紧迫任务。著名科学家钱学森曾指出：“信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术，测量技术是信息技术的关键和基础。”

以“3S”技术为代表的信息化测绘技术对测绘行业的发展起到了极大的推动作用，并实现了测绘行业的整体跨越式发展。在大尺寸空间坐标测量方面，信息化测绘技术同样发挥了重要的作用，并构成了与传统的正交坐标系测量系统所对应的非正交坐标系测量系统，在工业测量领域得到了很好的应用。本书主要围绕七大类非正交坐标系测量系统的原理、方法和应用展开讨论，试图反映测绘和精密测量技术在工业测量系统领域的应用现状、关键理论问题及发展趋势，为教学、科研和工程应用提供参考。

本书作者自 20 世纪 90 年代以来相继出版了《工业测量系统》和《工业测量系统进展》两本教材，最近几年作者及其研究团队在该领域又做了大量的研究和工程应用工作，取得了一批研究成果，在对这些成果总结和提炼的基础上形成本书，以期通过本书出版进一步推动我国工业测量系统技术的发展。全书共分 7 章。第 1 章从工业测量系统的概念和特点、分类及应用等方面进行阐述。第 2 章介绍了经纬仪测量系统的组成和交会测量原理，对高精度电子经纬仪测角原理、多台经纬仪测量坐标系统建立的理论和方法、系统最优设站策略、空间点位测量的精度评定方法及系统精度测试作了重点讨论。第 3 章分析了数字工业摄影测量系统涉及的关键技术，包括相机检校、人工标志及附件、像点坐标提取、像片概略定向、标志点自动匹配和自检校光束法平差等。第 4 章介绍了全站仪测距原理和自动目标识别技术，讨论了全站仪测距系统误差改正和测量坐标系的建立及应用等问题。第 5 章阐述了激光扫描测量系统的分类、原理、典型仪器、扫描观测值的性质和多站数据的拼接方法，对激光扫描数据处理、数据结构、三维建模等进行了详细的讨论。第 6 章讨论了激光跟踪测量系统、关节臂式坐标测量机和 Indoor GPS 系统的测量原理和应用。第 7 章介绍了工业测量系统的软件知识，包括坐标系的生成与转换，几何形状坐标系表达方法，几何形状拟合计算，CAD 数据处理，典型工业测量软件 MetroIn、Axyz、SA 及用户专用软件模块等。

本书由解放军信息工程大学测绘学院李广云教授、李宗春教授、范百兴讲师、张冠宇讲师、冯其强讲师、邓雪清讲师、贺磊讲师以及博士生王力等共同编写。其中，第 1 章由李广云编写，第 2 章由范百兴编写，第 3 章由冯其强编写，第 4 章由贺磊编写，第 5 章由王力编写，第 6 章由李宗春编写，第 7 章由张冠宇编写，第 3 章和第 5 章由邓雪清修改。李广云、李宗春搭建了教材的整体框架，并对全书内容进行了统稿、修改和最后的定稿。

本书的编写得到了解放军信息工程大学测绘学院领导的重视和关心,测绘学院工程测量教研室为该书的编写提供了良好的软、硬件环境。另外,本书的大部分内容已经在“工业测量系统及应用”选修课中进行了教学和应用,这为本书的正式出版打下了良好的基础。

由于工业测量技术发展迅速,涉及工业测量系统的国内外教材、参考书较少,加之作者水平有限,因此书中难免有不妥之处,欢迎使用本教材的教师和广大读者提出宝贵意见,以便再版时修改。

作 者

2010 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 工业测量系统的概念和特点	1
§ 1.2 工业测量系统的分类	2
§ 1.3 工业测量系统的应用	6
§ 1.4 工业测量系统展望	8
§ 1.5 本书的主要内容	9
第 2 章 经纬仪测量系统	10
§ 2.1 概述	10
§ 2.2 经纬仪测量系统硬件	12
§ 2.3 定向原理及其精度分析	27
§ 2.4 多台经纬仪的定向解算	36
§ 2.5 物方点测量及其精度分析	47
§ 2.6 精度测试	59
§ 2.7 应用	63
第 3 章 数字工业摄影测量系统	73
§ 3.1 概述	73
§ 3.2 数字工业摄影测量相机及其检校	76
§ 3.3 人工标志及附件	85
§ 3.4 像点坐标高精度提取	93
§ 3.5 像片概略定向	96
§ 3.6 标志点自动匹配	101
§ 3.7 自检校光束法平差	107
§ 3.8 双相机动态测量	109
§ 3.9 数字工业摄影测量系统软件设计	110
§ 3.10 应用	114
第 4 章 全站仪测量系统	120
§ 4.1 概述	120
§ 4.2 全站仪硬件介绍	120
§ 4.3 全站仪测距原理	122
§ 4.4 测距合作目标	125
§ 4.5 全站仪自动目标识别技术	130

§ 4.6	测距误差改正	131
§ 4.7	全站仪自由设站方法	139
§ 4.8	应用	141
第 5 章	激光扫描测量系统	145
§ 5.1	激光扫描测量系统分类	145
§ 5.2	激光扫描仪测量原理	150
§ 5.3	激光扫描仪数据采集	158
§ 5.4	扫描数据预处理	162
§ 5.5	三维建模与可视化	168
§ 5.6	精度测试	171
§ 5.7	应用	174
第 6 章	其他非正交坐标系测量系统	176
§ 6.1	激光跟踪测量系统	176
§ 6.2	关节臂式坐标测量机	183
§ 6.3	Indoor GPS	187
第 7 章	工业测量系统软件及其基础知识	195
§ 7.1	概述	195
§ 7.2	坐标系的生成与转换	196
§ 7.3	几何形状的坐标系表示方法	202
§ 7.4	几何形状拟合与几何要素求解	204
§ 7.5	测量数据处理	212
§ 7.6	扫描仪相关软件	218
§ 7.7	工业测量系统软件介绍	224
§ 7.8	用户专用软件模块	230
参考文献		234

第1章 绪 论

工业测量是解决工业部件设计、制造、安装、放样、检测、质量控制和动态监测中与目标的形状、尺寸及运动状态等相关的测量问题。工业测量的主要应用领域包括:航空、航天、汽车、兵器、电子、核工业及造船工业,涉及大型精密工件在制造、组装过程中的测量与定位,工业用机器人的检测,卫星接收天线的面型精度检测,生产自动化流程、生产过程控制的测量,产品质量检验与监测的动态测量,负荷试验中的形变与应变测量等。随着现代工业的发展,特别是以数字制造为核心的先进制造技术的迅猛发展,对工业测量技术提出了更高的要求,一方面要为先进制造技术担负起质量保障的重任,另一方面又不能仅为检测而检测,还要为产品生产效益的提高作出贡献。当前,在众多领域,测量已经深入到制造过程,如在线检测和实时动态测量成为制造过程中一个不可或缺的关键环节,测量不再是“服务”、“保障”行业,而是制造系统的有机组成部分。

工业测量的应用范围很广,涉及的知识面很宽,本书仅关注大尺寸几何量测量,即几米至几百米范围内被测物体的空间位置、姿态、尺寸、形状以及运动轨迹等的测量。

根据测量原理的不同,目前常用的大尺寸工业测量技术主要可分为正交坐标系测量系统和非正交坐标系测量系统两大类。三坐标测量机是正交坐标系测量系统的典型代表,在计量领域应用很广,可供读者参考的教材和专著也很多(张国雄,1999),不作为本书讨论的内容,本书主要讨论非正交坐标系测量系统的原理和方法。

非正交坐标系测量系统在测绘领域也称为工业测量系统(李广云 等,1994;李广云,2000;冯文灏,2004),是信息化测绘技术及计量技术在工业大尺寸坐标测量领域的应用,也是精密工程测量的重要组成部分。光机电一体化测绘仪器的出现和计算机技术的发展为工业测量系统的发展夯实了坚实的技术基础,工业先进制造技术特别是柔性制造的发展对大尺寸、高精度、高效率工业测量系统提出了极大的需求。工业测量系统的技术首先在国外兴起,最早出现的是经纬仪测量系统,目前已经发展为七大类非正交坐标系测量系统。

在工业测量系统及技术的研究方面,国内 20 世纪 80 年代至 90 年代基本上是跟踪国外发展并作应用,通过近 30 年的研究,目前在工业测量系统的理论技术研究及系统应用开发等方面基本上能与国际保持同步,取得了长足的发展。

§ 1.1 工业测量系统的概念和特点

工业测量系统是指利用测绘仪器和方法并结合计量仪器,构成精密三维坐标测量与分析系统,对工业部件进行精密安装、定位、检测和变形测量,也称光学三维测量技术、非正交坐标系测量系统、移动式坐标测量系统等。

图 1.1.1 所示为工业部门广泛应用的三坐标测量机,它是利用三根相互垂直的轴(导轨)通过接触方式确定被测点的坐标及其相互关系,属于正交坐标系测量系统。三坐标测量机具有通用性强、精度高等优点,但受工作平台尺寸及导轨加工精度的限制,其作业范围有限,便携

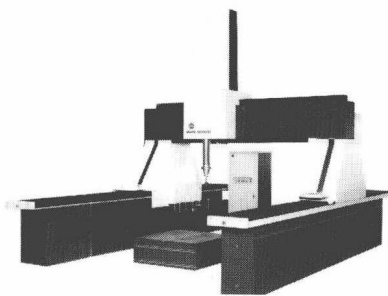


图 1.1.1 三坐标测量机

性能差,对环境条件要求高。

工业测量系统与以三坐标测量机为代表的正交坐标系测量系统相比,有四个突出的特点,即非接触,机动性强,测量范围大,可在工件现场使用等。

工业测量系统与传统的测量技术(如工业用经纬仪、水准仪等)相比较的另外一个特点是具有强大的软件分析和应用功能。如果将工业测量系统比做是“人”的话,工业测量系统软件就是“人的大脑”。因此,工业测量系统有较强的现场测量、计算和实时分析功能,能满足工业产品质量现场检测和控制的要求。

§ 1.2 工业测量系统的分类

工业测量系统按测量系统硬件可分为七类,即经纬仪测量系统、数字工业摄影测量系统、全站仪测量系统、激光扫描测量系统、激光跟踪测量系统、关节臂式坐标测量机和 Indoor GPS(简称 iGPS)测量系统。其中,坐标测量均是采用测绘领域的间接法坐标测量原理,下面分类介绍。

1.2.1 经纬仪测量系统

经纬仪测量系统由两台及两台以上高精度电子经纬仪(图 1.2.1)与计算机联机构成,根据角度空间前方交会测量原理(图 1.2.2)来获取空间点的三维坐标,系统的尺度通过对基准尺的测量来确定。经纬仪测量系统可实现高精度、无接触测量。

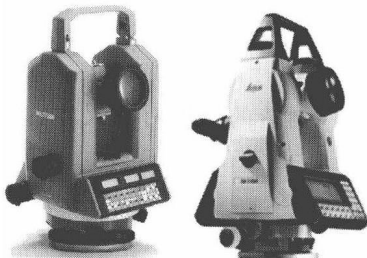


图 1.2.1 高精度电子经纬仪

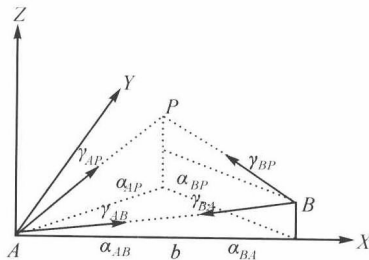


图 1.2.2 经纬仪交会测量原理

20 世纪 70 年代,美国 HP 公司首次实现了电子经纬仪与计算机的联机通信。国外先后推出了多款经纬仪测量系统,分别有:美国 K+E 公司的 AIMS,瑞士 Wild 厂的 RMS,德国 ZEISS 厂的 IMS,瑞士 Wild Leitz 厂的 ManCAT 和 ATMS,瑞士 Kern 厂的 ECDS1、ECDS2、SPACE、ECDS3,瑞士 Leica 公司的 Axyz 等。国内在 20 世纪 80 年代末 90 年代初开始引进国外的经纬仪测量系统,并开始在航空、航天工业部门应用。航空工业部 304 所推出了国内第一个 DOS 版的经纬仪测量系统软件,郑州测绘学院于 1996 年推出了国内第一个 Windows 版的 MetroIn 经纬仪测量系统软件。

经纬仪测量系统的硬件一般采用测角精度为 $\pm 0.5''$ 的电子经纬仪(如 T3000, TM5100 等),典型工作范围为几米至几十米,点位精度为 $\pm (0.05 \sim 0.1) \text{ mm}$ 。经纬仪测量系统的优点

是测量范围大,对环境的要求不高,是光学、非接触式的测量系统;缺点是人工照准目标,因而测量速度慢、自动化程度低。当前电子经纬仪已经实现马达驱动,对于重复测量可以减少一定的工作量。Leica 公司也曾推出了半自动经纬仪测量系统(李广云 等,1994)¹¹⁰⁻¹¹²,其中一台马达驱动经纬仪带激光发射装置,投射激光点作为测量目标,另一台马达驱动经纬仪带 CCD 相机,测量激光点的图像和经纬仪的角度,经图像处理得到三维坐标,实现了无需人工精确照准目标的半自动化测量。但该半自动经纬仪测量系统仅是昙花一现,应用面较窄。

1.2.2 数字工业摄影测量系统

数字工业摄影测量系统也称为计算机视觉测量系统,该系统由数码相机(量测或非量测型,见图 1.2.3)、摄像机等对被测目标摄影,通过图像和摄影测量处理,得到点的三维坐标。数字图像的获取通常采用两种方式:一种是用一台数字相机顺序获取影像,称为脱机方式;另一种是用两台及两台以上数字相机同时获取图像,称为联机方式。数字工业摄影测量系统的测量原理与经纬仪系统相同,也是三角形交会法。其基本的数学模型是共线方程(构像方程),即摄影时物点、物镜中心、像点这三点位于同一直线上。数字工业摄影测量系统可实现高精度、无接触测量。

数字工业摄影测量系统可细分为单目视觉、双目视觉(图 1.2.4)和多目视觉系统。



图 1.2.3 INCA3 相机

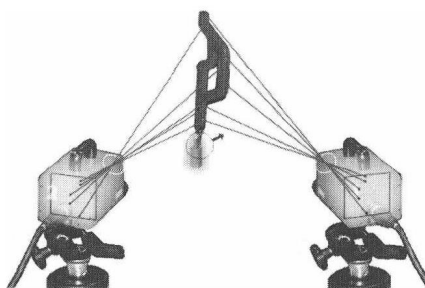


图 1.2.4 双目视觉测量系统

数字工业摄影测量中普遍使用人工标志,采用回光反射材料制作的人工测量标志,在特定位置光源(如环形闪光灯)的照射下,通过低强度曝光就可以产生高对比度的标志图像,即“准二值影像”,可大大简化被测物体成像点的辨认和识别,提高测量效率。除测量标志外,还采用编码标志。编码标志是一种自身带有数字编码信息的人工标志,可以通过图像处理等方法予以自动识别,实现工业摄影测量中人工标志的自动匹配,还可以作为不同像片之间的公共点来实现摄影测量像片的自动拼接。编码标志是实现工业摄影测量自动化的关键技术之一。

以美国为代表的西方国家在大型精密工件加工与安装、各类微波天线的加工与安装以及巨型航空航天飞行器的校准与检验方面,应用高精度工业摄影测量已有几十年的历史,并且达到了很高的精度。1988 年至 1990 年,美国人 Gustafson 对一个光学望远镜施测,获得了 1:30 万的摄影测量精度。1991 年,美国 GSI 公司对一个紧缩场反射面校准,表面测量精度达到 $\pm 0.018 \text{ mm}$,相对 22 m 的直径,相对精度达到 1:100 万。国内在工业摄影测量系统的理论研究和应用方面也做了大量工作,已成功应用于探月工程 50 m 天线的检测等项目,详见 3.10 节。目前,商业化的数字工业摄影测量系统较多,主要有美国 GSI 公司的 V-STARS 系统、挪威 MetroNor 公司的 MetroNor 系统,以及德国 AICON 公司的 DPA-Pro 系统等,其测

量范围一般为几米至几十米,典型测量精度为 $1:10$ 万。

与其他工业测量系统相比,数字工业摄影测量系统具有测量速度快、非接触,适于动态测量及恶劣条件下测量等优点。

1.2.3 全站仪测量系统

全站仪测量系统由单台高精度全站仪构成(图 1.2.5),根据极(球)坐标测量原理得到点的三维坐标。由于红外测距一般需要圆棱镜、球棱镜(图 1.2.6)、反射片(图 1.2.7)等合作目标配合,因此该系统属于接触式测量系统。具有马达驱动和自动目标识别(automatic target recognition, ATR)功能的全站仪可以自动照准棱镜等目标,实现坐标测量的自动化。反射片可粘贴到被测物上,但该系统对反射片的测量精度要低于对棱镜的测量精度。

瑞士 Leica 公司在 20 世纪 90 年代推出了商业化的全站仪测量系统,硬件为 TC2002 全站仪(测角精度为 $\pm 0.5''$,测距精度为 $1\text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \times D$),软件为 PCMS。日本 SOKKIA 公司同期也推出了 MONMOS 三坐标测量系统。目前,全站仪测量系统的主要硬件是马达驱动自动目标跟踪全站仪,如 Leica 的 TDA5005(图 1.2.5,测角精度为 $\pm 0.5''$,球棱镜测距精度为 $0.3\text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \times D$)系列,以及 SOKKIA 的 NET05(测角精度为 $\pm 0.5''$,反射片测距精度为 $0.6\text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \times D$)系列等,典型工作范围为几米至几百米,测量精度为 $\pm (0.3 \sim 1)\text{ mm}$ 。

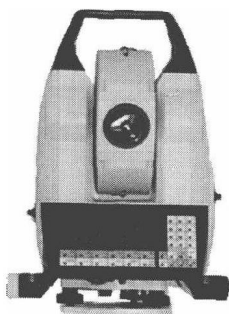


图 1.2.5 TDA5005 高精度全站仪

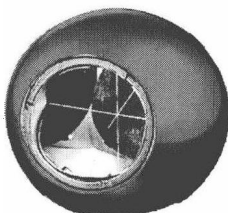


图 1.2.6 球棱镜

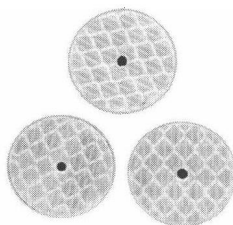


图 1.2.7 反射片

全站仪测量系统只需单台仪器即可实现坐标测量,坐标系的建立简单,操作容易,是测绘行业的通用“极(球)坐标测量机”。目前,大部分全站仪具有无棱镜测距功能(如 Leica 的 TCR 系列等),但无棱镜测距精度较低,还不能满足一些工业测量的高精度要求。

1.2.4 激光扫描测量系统

激光扫描测量系统由单台激光扫描仪(图 1.2.8)根据极坐标测量原理得到点的三维坐标,可实现高速度、无接触的扫描测量。三维激光扫描技术出现于 20 世纪 70 年代中期,但成熟的商业化成品在 20 世纪 90 年代后期出现。激光扫描仪分为测量型和计量型两大类。测量型激光扫描仪的精度一般在毫米级,测量范围一般为几米至几百米,远的可以达到几千米,主要用于地形测量、建筑物测量、文物保护、逆向三维重构、虚拟现实等领域。计量型激光扫描仪的精度能达到 $\pm (0.1 \sim 0.2)\text{ mm}$,测量范围可达几十米,主要用于工业复杂型面的快速三维成型测量与分析。

激光扫描仪无合作目标测距原理分为脉冲测距、相位测距和结构光三角法测距三类。脉冲测距即飞行时间测量方法,测程较远,但测量精度相对较低。相位测距和红外测距仪相位法

测距原理相同,主要用于中等距离测量,与脉冲型扫描仪相比较,测量精度更高,速度更快。结构光三角法测距原理如图 1.2.9 所示,它是通过激光发射点、目标点以及光点镜像 CCD 接收位置点这三点构成平面三角形,通过解三角形得到距离。解算距离需要已知固定基线,因此此类仪器的外形尺寸较大,但测量范围较小,目前测量型激光扫描仪已很少采用该种测距技术。

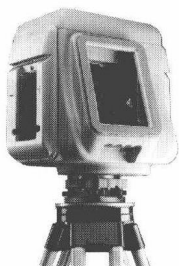


图 1.2.8 激光扫描仪

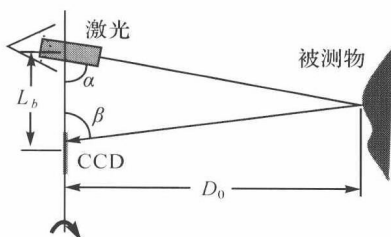


图 1.2.9 结构光三角法测距原理

激光扫描仪可以获取海量“点云”数据,特别适合于工件的三维建模、逆向工程应用等,但不足之处是不易对特征点进行测量和比较。计量型大尺寸激光扫描仪的精度高,但价格昂贵,其他工业扫描仪(如手持型)的测量范围较小,不适合大工件的测量。

1.2.5 激光跟踪测量系统

激光跟踪测量系统由单台激光跟踪仪(相当于单频干涉测距、高速光栅测角全站仪)根据极坐标测量原理得到点的三维坐标,需要球棱镜等合作目标配合,属于接触式测量系统。激光跟踪仪(图 1.2.10 和图 1.2.11)的跟踪控制部分通过位置检测器(position sensitive device, PSD)实现对目标(球棱镜)的快速跟踪,其跟踪原理不同于全站仪的 ATR 功能,而且速度更快。正因为如此,可以通过球棱镜在被测物表面的快速移动来实现物体的三维数字化扫描。

激光跟踪仪的第一代商业化产品是瑞士 Leica 公司在 20 世纪 90 年代初推出的 SMART310,目前生产激光跟踪仪的厂家还有美国 API 公司和 FARO 公司等。激光跟踪仪的距离测量精度非常高,可以达到几个微米,测量范围为几十米,因此在工业计量领域有着很广的应用。激光跟踪仪的发展趋势是与数码相机等传感器结合,实现对动态目标的定位和姿态测量。例如 Leica 公司在激光跟踪仪上方安装了 T-Cam 相机,实现了对 T-Probe 测头(图 1.2.12)、T-Scan 扫描头的动态测量,扩展了激光跟踪仪的应用领域。

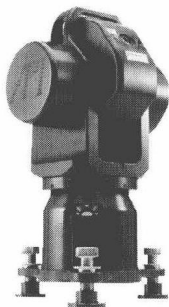


图 1.2.10 激光跟踪仪



图 1.2.11 带相机的激光跟踪仪

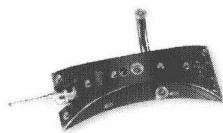


图 1.2.12 T-Probe 测头

激光跟踪仪的距离测量精度非常高,动态测量性能好,但在一些单项指标上,如测程不如全站仪长,动态测角精度也没有经纬仪高,对环境的要求也比全站仪要苛刻一些,故激光跟踪仪一般不适合在野外使用。

1.2.6 关节臂式坐标测量机

关节臂式坐标测量机也称为关节臂测量机(图 1.2.13),是一种模仿人的关节功能制成的坐标测量仪器。各关节的长度虽然是固定的,但可以实现 360° 旋转,角度用动态高精度码盘实时得到,因此,根据空间支导线测量的原理可以计算出空间点的三维坐标。该系统属于接触式测量系统,测量范围有限,测量精度一般在 $\pm 0.1\text{ mm}$ 左右。关节臂测量机的最大特点是不需要通视条件就可以实现测量,这是其他工业测量系统不可比的,另外它的测头可以和三坐标机的测头进行互换。关节臂的长度有限制,测量范围也有限,可以通过“蛙跳”的方法(公共点坐标转换)扩大量程,另外与其他系统组合(如采用专用导轨或激光跟踪仪)也可扩展其量程,实现大范围的测量。



图 1.2.13 关节臂式坐标测量机

关节臂式坐标测量机的发展趋势是测头安装激光扫描头,实现三维扫描测量功能,也称为扫描关节臂,由于关节臂很灵活,因此对小型物体的扫描非常方便。

1.2.7 Indoor GPS 测量系统

Indoor GPS(iGPS)是指在小范围内采用类似于 GPS 定位的技术来实现实时三维坐标测量。iGPS 激光发射器相当于一台无线电测角经纬仪,可同时测量水平角和垂直角。在室内固定位置安装 iGPS 激光发射器,该发射器通过旋转向四周发射红外光信号,发出的信号被 iGPS 接收器接收,从而得到发射器到接收器的角度信息。系统需由两台或两台以上 iGPS 激光发射器构成,根据角度空间前方交会测量原理获取空间点的三维坐标。该系统可实现高精度、无接触和自动化测量,测量效率高、动态性能好。

iGPS 激光发射器的位置需要通过标定的方法求出,测量范围可达几十米,测量精度为亚毫米,对于大范围的测量可以安装多个 iGPS 激光发射器。接收器的类型较多,可以安装在大型工件上,实现大型工件的动态对接、校准、定位及控制装备过程,在造船业、飞机安装(图 1.2.14)中已得到较多应用。

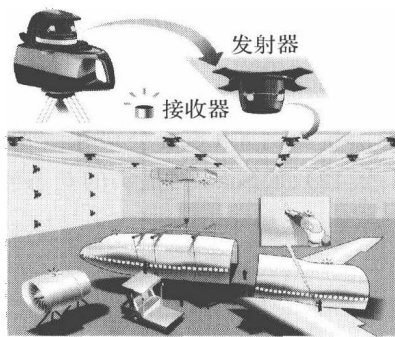


图 1.2.14 iGPS 布设示意图

§ 1.3 工业测量系统的应用

近年来随着我国国民经济的快速发展,工业测量系统已经广泛应用于各工业领域,以下简要介绍其在航空工业、航天工业、汽车工业、船舶工业、大型天线工程、加速器工程、轨道交通、

市政工程及建筑业等行业的应用情况。

1.3.1 航空、航天工业

我国众多飞机公司已有上百台套经纬仪、全站仪、激光跟踪仪等测量系统,用于在各个车间的测量和产品的质量控制在,是国内最早开展经纬仪、激光跟踪仪工业测量应用的行业。我国正在研发的大飞机工程,对工业测量系统提出了更高的要求。

在航天领域,“神舟”飞船各部件需要精密安装测量,例如对推进舱、返回舱的对接测量等。在载人航天工程的第二阶段,增加了资源舱和更多的传感器,还有“天宫”空间站,对测量系统提出了更高的要求。在航天器空间交会对接技术的研究中,信息工程大学提出了高精度摄影测量和编码标志相结合的方案,拟解决近距段(0 m~60 m)交会对接的姿态和位置测量难题。在航天领域各类卫星的精密安装制造,需要工业测量的保障。

在探月工程中,月球车的自主导航技术,需要数字工业摄影测量系统的辅助。

运载火箭的外形检测,各类中、短程火箭的外形检测,包括火箭机动发射的载车、发射筒等的检测也需要工业测量系统的保障。

1.3.2 汽车工业

汽车生产线上的自动化测量系统——白车身测量系统,作为汽车工业的重要质量检核工具之一,是数字工业摄影测量系统的典型应用,国内外都有成功的例子。例如,美国 Perceptron 公司推出了结构光与摄影测量相结合的测量系统,该设备在汽车工业的拥有量约占 70%。国内以天津大学为代表,已成功开发出此类摄影测量系统。

1.3.3 船舶工业

我国业已成为世界第一造船大国,为保持较强的竞争力,船舶工业提出了“精度造船”新理念,对测量提出了很高的要求,尤其是潜艇对外形、舱容都有极高的三维坐标测量精度要求。SOKKIA 公司和 Leica 公司的全站仪测量系统在船舶工业中有着很好的应用。

1.3.4 加速器工程

国内外高能粒子加速器工程对工业测量系统提出了很高的要求,激光跟踪仪、摄影测量系统都较早地应用在加速器工程中。北京正负电子对撞机工程准直测量、上海同步辐射光源工程准直测量、合肥超导托克马克装置安装测量,使用了高精度全站仪测量系统。

1.3.5 金属结构设备

水工金属结构设备检测是使用经纬仪测量系统和全站仪测量系统较早的行业。目前工业摄影测量系统也有较好的应用。近年来,水轮发电机组安装测量、水轮发电机叶片外形测绘、大型水库闸门变形测量、大型工业锅炉焊接变形测量、特种罐(LPG、LNG)及储备油罐容量校准等,都普遍使用了工业测量系统和技术。

1.3.6 大型天线工程

大型天线和射电天文望远镜的设计、制造与施工及运营期间都特别依赖工业测量系统。

信息工程大学已完成如下应用工作:天线模具测量,6 m×10 m 抛物环面天线测量,18 m×36 m 抛物环面天线测量,“探月工程”直径 50 m 天线安装测量,某大型紧缩场和微波暗室测量,某大型预警雷达测量,星载可展开式天线测量,机载天线测量(李宗春等,2009)⁹³⁻¹⁶⁵等。目前,直径65 m射电望远镜和世界最大的直径 500 m FAST 工程也对工业测量提出了新的要求。

1.3.7 轨道交通、市政工程

磁悬浮列车、高速列车的车身外形检测,磁悬浮轨道安装测量及变形监测,高速铁路无碴轨道安装测量及变形监测,隧道、顶管非开挖技术测量,地铁工程变形测量,对工业测量系统需求广。例如,全站仪测量系统在 CPⅢ控制网测量、轨检车控制测量以及盾构机、顶管设备引导系统中均有很好的应用。

1.3.8 建筑业

国家大剧院、国家体育场、国家游泳中心、首都机场 T3 航站楼、中央电视台新办公大楼等地标建筑的施工测量和安装测量,综合运用了全站仪测量系统、激光扫描测量系统、经纬仪测量系统等精密测量系统。

§ 1.4 工业测量系统展望

工业测量技术不但要完成工业产品几何量质量检测任务,还要为提高生产效益提供技术支持。近年来,我国的制造业尤其是重大基础装备工业得到飞速发展,工业测量系统作为工业制造中的重要环节正在发挥着越来越重要的作用。同时,先进的工业制造水平也对工业测量系统技术提出了许多新的要求,主要表现在:

(1)测量目标的尺寸越来越大。以天线测量为例,我国继建成直径 50 m 测控天线后,上海天文台直径 65 m 射电天文望远镜系统研制项目业已启动,计划于 2012 年年底建成,将在探月二期和三期工程中承担 VLBI 测轨和定位任务,并执行今后各项深空探测及射电天文研究任务。直径 500 m 球面射电天文望远镜(FAST 工程)项目已经奠基,预计将于 2013 年落成,该天线不仅能强有力地支持我国未来的载人航天、探月和深空探测计划,还能同时扫描上亿个频率,诊断微弱的空间窄带信号,在保障国家安全方面具有重要意义。众所周知,天线的性能在很大程度上取决于精密测量的技术和能力,尤其要解决大型乃至巨型天线在安装过程和工作状态下的精密测量问题。

(2)测量精度要求越来越高。仍以天线测量为例,美国 GSI 公司于 2000 年至 2001 年对直径 305 m 的 Arecibo 望远镜进行了测量,测量精度优于 ± 0.2 mm,相对精度达到 1:150 万。我国紧缩场天线测量的精度达到 ± 0.02 mm,预研的直径 35 m 深空网天线对面型检测精度要求优于 ± 0.1 mm。有些大尺寸精密测量的精度要求甚至达到 ± 0.01 mm 以上的精度。可以想象,如此高的测量精度要求,对工业测量系统技术而言是一个极大的挑战。

(3)测量目标及现场环境越来越复杂。如对大型星载网状天线的面型展开精度测量、高温锻件测量、球状核反应装置法兰面测量、主动面天线工作状态下面型检测、卫星天线在热真空环境中的变形测量等,需要在高低温、真空等恶劣环境下测量,对工业测量系统适应各种复杂环境下的测量提出了多样化的要求。

(4)动态测量越来越多。在制造现场进行产品的质量检测、对工件的震动进行测量、确定天线在工作姿态的变形等需要动态完成测量任务,并将测量结果反馈到控制系统,这对测量系统的测量速度、处理速度和反应速度均提出了新的要求。

由此可见,测量物体尺寸越来越大、精度和动态性能要求越来越高、测量环境越来越复杂,这些新需求对工业测量系统技术提出了新的挑战,单一测量技术已经越来越不能满足新的测量需求,工业测量系统正在朝着多技术集成和多传感器融合的方向发展,如跟踪系统和扫描系统、摄影系统的集成等。同时,工业测量系统也在呼唤新技术的出现,如光纤测量技术、地面 InSAR 测量技术等。

§ 1.5 本书的主要内容

本书围绕七大类非正交坐标系测量系统的原理、方法和应用进行讨论,共分 7 章。除第 1 章绪论和第 7 章工业测量系统软件及其基础知识外,七大类非正交坐标系测量系统被分为 5 章分别讨论其硬件、原理及应用。各章主要内容安排如下:

第 1 章从工业测量系统的概念和特点、工业测量系统的分类、工业测量系统的应用以及展望等方面进行介绍,并对全书的主要内容进行了介绍。

第 2 章介绍了经纬仪测量系统的组成和交会测量原理,高精度电子经纬仪测角原理,多台经纬仪测量坐标系统建立的理论和方法,系统最优设站策略,空间点位测量的精度评定方法,系统精度测试及系统的实际应用等。

第 3 章介绍了数字工业摄影测量系统涉及的部分关键技术,包括相机检校、人工标志、像点坐标提取、像片概略定向、像点自动匹配、自检校光束法平差以及双相机动态测量等。结合探月工程 50 m 测控天线变形测量以及机载 InSAR 基线动态测量模拟实验,介绍了数字工业摄影测量系统的实际应用情况。

第 4 章主要介绍了全站仪测距原理和自动目标识别原理,介绍了全站仪测量用到的各种合作目标,分析了全站仪的测距误差,对全站仪测量坐标系的建立也作了相应的讨论。最后结合探月工程 50 m 天线安装测量和首都机场 T3 航站楼金属屋顶球节点测量,介绍了全站仪测量系统的实际应用。

第 5 章讨论了激光扫描仪的分类,重点阐述了激光扫描测量的原理,激光扫描观测值的性质和多站数据的拼接方法,并对激光扫描数据处理、数据结构、三维建模等进行了详细的讨论,最后探讨了激光扫描仪的精度评定方法及工业应用。

第 6 章讨论了剩余的 3 类工业测量系统。主要讨论了激光跟踪测量系统的硬件设计原理、系统组成,以及在汽车工业的应用,介绍了关节臂式坐标测量机的测量原理和标定方法,最后介绍了 iGPS 系统的原理和应用。

第 7 章主要介绍工业测量系统的软件功能,包括坐标系的生成与转换、几何形状坐标系表达方法、几何形状拟合计算、CAD 数据处理等。最后对国内外 3 个应用面较广的工业测量系统软件以及作者开发的专用测量软件进行了介绍。

第2章 经纬仪测量系统

§ 2.1 概述

经纬仪测量系统是由两台或两台以上高精度电子经纬仪与计算机联机构成,根据角度空间前方交会测量原理来获取空间点的三维坐标,系统的尺度通过对基准尺的测量来确定,可实现高精度、无接触测量。

早在1610年,荷兰天文学家和数学家 Willebrod Snellius 就提出了三角测量原理,从而诞生了精密的间接定位法——前方交会。随着光学经纬仪和计算机工具的不断改进,这种高精度的前方交会方法对测量产生了极其重大的影响。

随着电子技术的发展,测量也从光学时代进入了电子时代。1968年,西德 Opton 厂生产出第一台全站型电子速测仪 RegEltal4,实现了电子测角。其质量为 21.5 kg,测距精度为 $\pm(5\sim10)$ mm,水平方向和垂直角观测中误差分别为 $\pm 3''$ 和 $\pm 4.5''$,并可用纸带记录观测值。这给前方交会法带来了新的生机。

20 世纪 70 年代是电子经纬仪、全站仪生产相对稳定和探索的时期。这一时期的典型产品有 1977 年美国 HP 公司生产的 HP3820A,其水平方向和垂直角观测中误差分别为 $\pm 2''$ 和 $\pm 4''$ 。1979 年,该公司用一台计算机将两台电子经纬仪连接起来,第一次组成了“实时三角测量系统”,即由两台电子经纬仪同时照准并观测被测点,并将观测值自动传输到计算机,由计算机计算出该点的空间坐标。该实时三角测量系统就是现代经纬仪测量系统的雏形,并在建筑业、机械制造及航空航天等领域得到了应用。

20 世纪 80 年代是电子经纬仪高速发展的时期,也是经纬仪测量系统快速发展的时期。1982 年瑞典 Geotronics 公司生产的 Geodimeter140 全站仪和 1983 年瑞士 Wild 厂生产的 T2000 电子经纬仪,都采用了对径扫描的动态测角原理,消除了度盘偏心差和分划误差的影响,同时轴系补偿技术不断完善,使电子测角的精度达到了 $\pm 0.5''$ 。这为经纬仪测量系统真正在工业测量方面的应用提供了有力的保证。

1980 年美国人 Johnson 首次介绍和应用了经纬仪测量系统,他在美国最先采用 K+E 厂生产的 DT-1 型电子经纬仪,建立双站系统的工业测量,从而引起工业界的注意和仪器厂家的竞争。Leica 集团公司的三大厂家,包括 Wild 厂、Kern 厂、Leitz 厂,德国 Zeiss 厂以及美国、日本的厂家等,生产出了上百套经纬仪产品供世界各国使用。国外已经发展了许多种型号的经纬仪工业测量系统,它们具有可移动、观测精度高、自动化程度高、适应性强、可观测大尺寸和非接触等优点。

自 20 世纪 80 年代中期以来,许多厂家都相继推出了多个商业化的系统,如美国 K+E 公司推出了 AIMS 系统,德国 Zeiss 公司推出了 IMS 系统,瑞士 Kern 公司推出了 ECDS 和 SPACE 系统等。其中 Leica 公司的产品精度最高、种类最全,先后推出了 RMS2000、Man-CAT、ECDS3 和 Axyz MTM 等系统。目前,已经从手动经纬仪发展到了马达驱动经纬仪,甚