

测量机器人 开发与应用

梅文胜 杨 红 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

测量机器人 开发与应用

梅文胜 杨 红 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

测量机器人开发与应用/梅文胜,杨红著. —武汉:武汉大学出版社,
2011.11

ISBN 978-7-307-09324-9

I. 测… II. ①梅… ②杨… III. 测量—专用机器人—研究
IV. TP242.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 229121 号

责任编辑:黄汉平 责任校对:刘欣 版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:湖北金海印务有限公司

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 13.75 字数: 313 千字 插页: 1

版次: 2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-09324-9/TP · 418 定价: 30.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

当今世界正处于数字化与信息化时代，科学技术的突飞猛进给工程测量学科的发展也带来了新的机遇和挑战。工程测量的发展从简单到复杂，从常规精度到高精度，从手工操作到测量一体化、自动化，从周期观测到持续测量，从现场测量到远程控制、遥测，从常规测绘拓展到大型工业制造等其他领域。测量机器人正是充分体现现代工程测量发展趋势和促进工程测量发展的典型仪器。

目前国内还不具备生产高新技术产品——测量机器人的能力，但为满足飞速发展的国家经济建设的需要，从国外进口了大量不同厂家的测量机器人。测量机器人需与软件配合才能充分发挥其自动化测量的潜能，国外软件昂贵且不符合我国国家规范及行业标准，国内相关开发研究又起步较晚，目前还没有测量机器人方面的书籍出版。笔者十多年来一直从事测量机器人软件开发及其应用方面的研究，开发了具有自主知识产权的测量机器人通用系列化软件，并进行了大量的相关工程应用实践，积累了丰富的开发与应用经验，本书以梅文胜的博士论文为基础，吸收了近年来测量机器人发展的最新成果，从杨红完成的大量工程应用实践中提炼出典型案例，力争联系工程实际，期望为广大测量机器人相关科研及工程技术人员提供有益的参考。

本书以突出测量机器人不同特点的典型应用及其技术方法为主线，全书共分7章。第1章主要介绍国内、外测量机器人研究的现状与发展趋势。第2章阐述了测量机器人的坐标系统、操纵系统、换能器、控制器、闭环控制传感器、集成传感器等概念，陈述了测量机器人的自动目标搜寻和照准的基本原理，介绍了代表性的 Leica TCA/TS30/TM30 系列、Trimble S6/S8 和 Sokkia NET 系列测量机器人的技术特点。第3章以 Leica TCA/TS30/TM30 系列和 Sokkia NET 系列测量机器人为例，系统地阐述了其二次开发的技术与方法。第4章设计和开发了测量机器人移动式自动化网观测内置软件和外置 PDA 软件，实现了工程控制网外业观测、记录和观测成果质量控制的自动化，设计开发的自动化网观测后处理软件，实现了工程控制网观测成果数据的检查、改正、原始数据报表输出、观测成果文件生成等一体化、自动化的后处理，针对某水利枢纽工程坝区安全监测网进行了软件的实际应用试验，试验表明软件实用可靠，观测精度达到甚至超过人工观测的精度，观测效率得到显著提高，实现了外业数据采集和内业数据处理的一体化、自动化，对工程控制网自动观测中有关问题进行了探讨，在水平角自动测量方面，对测角精度与测回数的关系和大气水平折光的影响与对策等方面进行了深入的探讨，得出了有益结论和建议，对工程生产有指导意义，在测距三角高程测量方面，对大气垂直折光的影响及规律进行了分析和总结，提出了顾及 K 值变化规律的三角高程测量方法，可实现水平位移监测网和垂直位移监测网同时施测，实验计算表明该方法可以达到二等水

准的精度。第5章给出了测量机器人自动极坐标变形监测系统的结构与组成,设计和开发了自动化监测和远程监控软件,给出了多基站测量机器人变形监测系统结构,给出了GPS+Georobot集成变形监测系统的基本组成与结构,提出了监测数据的差分处理方法,有效地提高了观测距离和高差的精度,实现了极坐标系统的毫米级变形监测,并在桥梁、滑坡和地铁变形监测的实例中得到了验证,提出了顾及大气折光和坐标参照系变化的数据处理补偿模型,成功地解决了变化的坐标参照系的统一问题,在基站测量机器人处于微颤状态下的桥梁持续变形监测实验中,得到了毫米级监测成果,在滑坡监测中进行了两基站的极坐标系统的应用试验,成功地实现了毫米级(三维坐标)的持续滑坡监测,系统稳定,成果可靠,效果显著,在地铁监测中采用了改进的持续极坐标系统,成功地实现了亚毫米级的盾构下穿地铁结构自动化实时变形监测,为安全下穿提供了有力保障。第6章结合储罐容积测量自动化的需求,设计并开发了卧式罐、立式罐和球罐的容积自动化测量系统,实现了储罐容积测量及容积计算的自动化。第7章设计研制了测量机器人船舱自动测量系统,实现了多传感器的集成,将测量机器人、CCD摄像机、三维移动测量平台、无线通信设备等有机集成,形成协调运转的容积测量系统,研究实现了测量系统的无线遥控及自动控制,解决了屏蔽状态下船舱内、外无线通信的难题,提出了基于公共点的多站三维坐标转换方法,解决了船体浮动状态下无法整平全站仪,又要进行精密快速测量的难题,提出并实现了基于参考面的多站船舱自动扫描测量方法,加快了测量速度,增加的测量密度,提高了容积计量精度,进行了系统试验和精度分析,证明系统的技术指标达到了设计要求。

本书由武汉大学测绘学院梅文胜和长江三峡勘测研究院有限公司(武汉)杨红共同完成,第1章,第2章的2.1节至2.4节、2.6节,第3章,第4章的4.1节至4.3节、4.6节、4.7节,第5章的5.1节、至5.3节、5.7节,第6章,第7章由梅文胜执笔,第2章的2.5节,第4章的4.4节、4.5节,第5章的5.5节、5.6节由杨红执笔。

本书的完成离不开作者(梅文胜)的博士生导师张正禄教授的精心指导和大力帮助,在此表示衷心的感谢!同时,清华大学黄全义教授,武汉大学测绘学院郭际明教授、罗年学教授、巢佰崇教授、陈雪丰副教授在相关系统的开发研究中也提供了大量的帮助,上海船舶研究设计院国家船舶舱大容积计量站孙庆文主任在容积测量方法及试验方面给予了大力指导和支持,师弟罗长林、邓勇博士在攻博期间,学生周俊、周燕芳、侯金波硕士在攻硕期间参与了相关软件开发工作,在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2011年8月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 测量机器人的研究现状及趋势	2
1.3 本书研究的主要内容	5
2 测量机器人基本原理	9
2.1 机器人	9
2.2 全站仪与测量机器人	10
2.3 测量机器人的发展	11
2.4 测量机器人基本原理	12
2.4.1 测量机器人的坐标系统	12
2.4.2 测量机器人的基本概念	12
2.4.3 测量机器人传感器集成	15
2.4.4 测量机器人的目标搜寻和精确照准	20
2.5 典型测量机器人	23
2.5.1 Leica TCA 系列测量机器人	24
2.5.2 Trimble S6/S8 测量机器人	34
2.5.3 Sokkia NET05 测量机器人	40
2.6 本章小结	42
3 测量机器人二次开发	43
3.1 Leica TCA 系列二次开发	43
3.1.1 “开放测量世界”概念	43
3.1.2 内置应用程序开发	44
3.1.3 外部控制接口	55
3.2 Sokkia NET 系列二次开发	61
3.2.1 内置应用程序开发	61
3.2.2 外部控制接口	64
3.3 外部串行控制软件开发方法	72
3.3.1 基于 VB/VC 的二次开发	72
3.3.2 基于 .NET 的开发技术	74

3.4	本章小结	79
4	控制网观测自动化	80
4.1	网观测内置软件开发	80
4.1.1	软件流程	80
4.1.2	软件实现	80
4.2	基于 PDA 的网观测软件开发	82
4.2.1	开发环境	83
4.2.2	软件实现	83
4.3	网观测后处理软件开发	84
4.3.1	软件流程	85
4.3.2	软件实现	85
4.4	内置自动化网观测应用	87
4.4.1	网的布设及施测方案	87
4.4.2	外业观测质量评价	88
4.4.3	数据处理及网的精度评价	88
4.5	PDA 自动化网观测应用	90
4.5.1	网的布设及施测方案	90
4.5.2	数据处理及网的精度评价	91
4.6	网观测自动化中的关键问题探讨	91
4.6.1	水平角测量精度探讨	91
4.6.2	水平大气折光影响	96
4.6.3	精密三角高程测量	100
4.7	本章小结	105
5	变形监测自动化	106
5.1	极坐标法变形监测系统	106
5.1.1	结构与组成	106
5.1.2	设计目标	107
5.1.3	功能与实现	107
5.1.4	基站、参考点和目标点布设	109
5.1.5	稳定性分析	111
5.1.6	差分技术	113
5.1.7	仪器补偿模型	115
5.2	多基站测量机器人变形监测系统	118
5.2.1	结构与组成	118
5.2.2	动态基准问题	119
5.3	GPS+Georobot 集成变形监测系统	120

5.4 监测系统的远程控制	121
5.4.1 动态域名解析服务	122
5.4.2 工控机模式	123
5.4.3 无线 DTU 模式	125
5.5 桥梁监测应用	126
5.5.1 差分处理方法	127
5.5.2 顾及大气折光的三维坐标转换模型	130
5.6 滑坡监测应用	134
5.6.1 滑坡简介	134
5.6.2 变形监测网的布设与观测	135
5.6.3 II 区滑坡体的变形监测	137
5.6.4 II 区滑坡体变形统计分析	138
5.7 地铁监测应用	142
5.7.1 工程概况及其变形监控	143
5.7.2 自动监测系统及其布设	144
5.7.3 监测精度及成果分析	147
5.7.4 结论	150
5.8 本章小结	151
6 储罐容量测量自动化	153
6.1 储罐自动化测量及其系统构成	153
6.2 卧式罐自动化测量	154
6.2.1 罐体引导模型求解	154
6.2.2 罐体自动测量	158
6.2.3 卧式罐自动测量软件	159
6.2.4 卧式罐自动测量试验	161
6.3 立式罐自动化测量	162
6.3.1 立式罐引导模型求解	163
6.3.2 圈板半径及圆心拟合	163
6.3.3 立式罐自动测量软件	163
6.4 球罐自动化测量	169
6.4.1 球罐引导模型求解	169
6.4.2 球罐自动测量软件	169
6.5 罐体容积计算	171
6.5.1 NURBS 曲面建模	171
6.5.2 NURBS 三角网格生成	174
6.5.3 容积计算	175
6.5.4 卧式罐计算实例	175

6.6 本章小结	177
7 测量机器人舱室测量自动化	178
7.1 问题的提出	178
7.1.1 技术指标	179
7.1.2 技术难点	179
7.2 总体设计	180
7.2.1 设计原则	180
7.2.2 测量自动化系统组成	181
7.3 测量机械平台	182
7.3.1 平台总体方案	182
7.3.2 平台技术指标	183
7.4 自动控制系统	183
7.4.1 控制系统的要求	183
7.4.2 控制系统的结构	184
7.4.3 舱内局域网络	184
7.4.4 平台驱动	186
7.4.5 CCD 监控	186
7.4.6 无线网络	187
7.5 系统软件设计	188
7.5.1 软件组成	188
7.5.2 功能及实现	189
7.6 测量自动化的若干关键技术	190
7.6.1 断面自动扫描技术	190
7.6.2 多站观测时的舱室三维坐标转换	194
7.7 系统试验与精度分析	197
7.7.1 试验设计	197
7.7.2 试验分析	198
7.7.3 实测验证	202
7.8 本章小结	203
参考文献	205

1 绪 论

1.1 概述

工程测量学的发展趋势和特点可高度概括为“六化”和“十六字”(张正禄, 2003)。“六化”是:测量内外业作业的一体化;数据获取及处理的自动化;测量过程控制和系统行为的智能化;测量成果和产品的数字化;测量信息管理的可视化;信息共享和传播的网络化。“十六字”是:精确、可靠、快速、简便、实时、持续、动态、遥测。

工程测量学的发展,主要表现在从一维、二维到三维乃至四维,从点信息到面信息获取,从静态到动态,从后处理到实时处理,从人眼观测操作到机器人自动寻标观测,从人工测量到无接触遥测,从周期观测到持续测量,从常规测绘拓展到大型工业制造等其他领域。

工程测量学科的发展与测量仪器设备的发展息息相关,互相制约,互相促进。现代化的工程测量需求势必对测量仪器设备提出更高的要求,反过来测量仪器的进步必定会大大促进工程测量学科的发展。在众多的测绘仪器中全站仪和 GPS 脱颖而出成为充分体现现代工程测量发展趋势和促进工程测量发展的典型仪器设备。

特别是 21 世纪以来,在全站仪的基础上发展而来的智能型全站仪——测量机器人已发展到实际应用阶段,国内外测量机器人的各种应用和开发系统,都充分体现了现代工程测量的“六化”和“十六字”的特点。

测量机器人(measurement robot, Georobot)是一种能代替人进行自动搜索、跟踪、辨识和精确照准目标并获取角度、距离、三维坐标以及影像等信息的电子全站仪,也称测地机器人。它是在全站仪基础上集成步进马达、CCD 影像传感器构成的视频成像系统,并配置智能化的控制及应用软件而发展形成的 TPS(total station position system)系统。用测量机器人可实现数据获取及处理的自动化和测量过程的自动化即无人观测。测量过程控制及其行为的智能化主要指通过程序实现对自动化观测仪器的智能化控制、管理,能模拟人脑的思维方式判断和处理测量过程中遇到的各种问题。

测量机器人是全站仪中的极品。它给常规测量领域注入了新的活力,在工程测量的自动化、智能化、实时性和信息化方面带来了革命性的变化,它标志着常规工程测量的一个全新时代的来临。

国内测量机器人的引进方面几乎与国际同步,但由于经济和缺乏前期研究等方面的

原因,其工程应用略落后于国外,随着国内经济的飞速发展以及大规模工程建设需要,近年来,购买测量机器人的单位日益增多,但其应用状况和使用效果却不尽如人意。

一方面,测量机器人国外配套软件价格昂贵,且不符合中国国家规范或行业作业标准的要求,因此很多单位购买测量机器人,却没有购买相应软件,没有软件的支持,测量机器人就不能发挥其自动化、高效的特点,只能当作普通全站仪使用,因此研究开发符合中国国情的测量机器人通用系列化自主软件是目前国内的迫切需要,且有广阔的应用前景和发展空间。

另一方面,虽然测量机器人工程应用日益广泛,应用领域也在不断扩展,但由于测量机器人的出现也就十来年的时间,因此现行的国家规范或行业标准中都没有有关测量机器人应用的参照条款,如在进行自动化的精密三角测量时,自动测量的精度如何?测回数取多少合适?多测回过程中是否还需要配置度盘?极坐标系统自动监测的精度如何?等等,所有这些都困惑着测量工程师们,最终往往还是参照现行的国家或行业测量规范来进行。因此对测量机器人自动化测量的作业方法、流程、质量控制、成果管理、精度分析等方面进行系统性的研究,得出的有益结论,对工程生产有重要的指导意义,对相关测量规范的修正也有参考意义。

再者,随着无反射目标直接测距精度的提高,测量机器人中已普遍采用该技术,该技术与测量机器人中的马达及电子测角系统相结合,使得自动化获取特定曲面上任意表面点的三维坐标变得非常简单,因此测量机器人在封闭曲面的自动化断面扫描方面将得到越来越多的应用,本书最后将针对船舱容积测量,研发一套舱外遥控的全自动容积测量系统,实现大型舱室容积的现场无人操作的自动化遥控测量,在测量机器人的集成系统应用开发上有所创新,也希望能对相似的自动化工业及工程测量项目起到抛砖引玉的作用。

1.2 测量机器人的研究现状及趋势

测量机器人是在电子经纬仪和红外测距仪的基础上发展而来的,其研究与发展大致可以分为三个阶段:基础实验研究的早期;从测量机器人原型研制试验成功到以成熟的商业测量机器人的出现为结束标志的逐步发展期;从商业测量机器人出现到现今的全面应用与发展期。

20世纪70年代中期到80年代中期是以红外测距仪为代表的光电测距技术蓬勃发展的年代,电子经纬仪和红外测距仪已走向成熟,并得到迅速推广和应用。电子经纬仪和红外测距仪使用了方向、距离传感器及微电脑数据自动记录控制器,它实现了方向测量、距离测量和数据管理的自动化,此时已迈出了自动化测量进程的重要一步,然而,电子经纬仪的旋转仍然要手工操作,寻找目标工作仍然必须由操作员进行,为提高生产力,降低生产成本和劳动强度,提高观测质量,采用机器人技术来实现自动化地完成测量中的重复性的工作是可行和迫切需要的。20世纪70年代末80年代初,欧洲的一些

研究机构和仪器生产厂家进行了大量的基础性的研究和实验,由 H. Kahmen 教授领导的课题组,于 1983 年成功研制的由视觉经纬仪改制而成的组合式的测量机器人(Kahmen, Suhre, 1983),成功应用于煤矿的边坡监测,用于自动监测几百个变形目标点,但其集成度不高,精度较低。

从 20 世纪 80 年代中期到 90 年代中期是测量机器人的逐步发展期。1986 年 Leica 公司成功推出了商品化的 TM3000 视觉经纬仪, TM3000 望远镜内有同轴的规标灯,它发射出波长为 $0.85\mu\text{m}$ 的红外光,利用该光束和伺服马达,仪器可自动跟踪被测目标,望远镜以绝对线性扫描和数字调节方式利用伺服马达自动调焦, TM3000 若装上带 CCD 摄像机的望远镜就构成 TM3000V, CCD 摄像机可扫描 $8.8\text{mm}\times 6.6\text{mm}$ 的范围,通过高精度图像处理软件可测定出目标的三维坐标。20 世纪 90 年代初推出的由多台 TM3000V 构成的自动化经纬仪测量系统,被普遍用于工业测量中,也应用于全自动的工程变形监测中,如在新加坡地铁变形监测中就有成功的应用,实现了车辆营运状态下地铁变形 24 小时全自动化监测(李广云, 2001)。到 20 世纪 90 年代中期, Leica 公司首先推出了 TPS1000 系列(TCA2003、TCA1800)测量机器人(智能型全站仪),它除集成了电子经纬仪、红外测距仪、步进马达、CCD 传感器、微处理器和存储器以外,最主要的是采用了自动目标识别(ATR)技术,实现了普通棱镜的长距离的自动识别与精确照准,使测量机器人迅速从室内的工业测量走向了野外工程测量。

20 世纪 90 年代中期以来则是测量机器人全面应用与发展的年代。Leica 公司在推出 TPS1000 系列测量机器人后,迅速推出了其配套自动化极坐标测量软件系统(APSWin),并提供全面的二次开发工具和方法,因此,基于测量机器人的各种应用与开发在世界范围内得到了迅速的发展与推广。

瑞士的费尔艾那(Vereina)隧道是一座穿越阿尔卑斯山脉的隧道,长达 19km,隧道最大埋深达 1500m,地质条件复杂,隧道于 1991 年开工,1999 年开通,在隧道长达八年的施工期间,每年须进行三次基准控制网的复测,在施工前期采用 Leica 的 TC2002 全站仪和 NA200 数字水准仪观测, TCA1000 系列推出后,立即采用 TCA2003 进行自动化观测,从施工期间的观测成果来看,自动精度与手工相当,但效率提高了三分之二。在该隧道的掘进机施工方向控制中也使用了基于 TCA 系列的自动测量指向系统。

1997 年, TCA2003 成功用于意大利北部阿尔卑斯山脉峡谷中的大坝坝区高边坡的稳定性监测, TCA2003 测站布设在右岸稳定的斜坡上,用来监测位于左岸高边坡上的 16 个棱镜监测点,在 Leica APSWin(极坐标自动测量系统)软件的控制下,实现了自动化、无人值守的持续高边坡变形监测。

瑞士纳尔普斯(Nalps)大坝位于从瑞士阿尔卑斯山脉(Swiss Alps)中间穿过的哥达基线隧道(Gothard Base Tunnel)的上方,该隧道长 57km,规模空前,地质条件复杂。经计算分析和调查认为该隧道的开挖和建设将导致隧道上部几个厘米的地面沉降,为保证大坝的安全,于 2000 年在该大坝上建立了由两台 TCA2003 组成的自动化的持续变形监测系统(Mario 等, 2004),该系统在每天夜间观测,观测间隔为 1 小时,监测精度可达 1mm 左右。

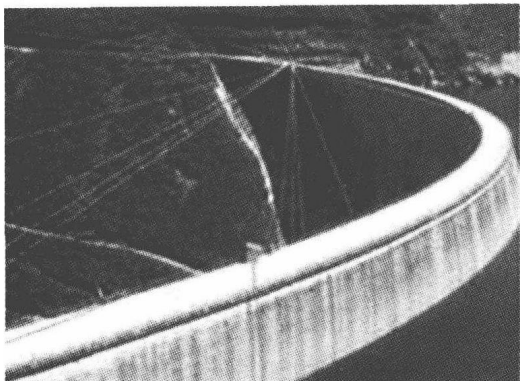


图 1-1 Nalps 大坝测量机器人监测系统

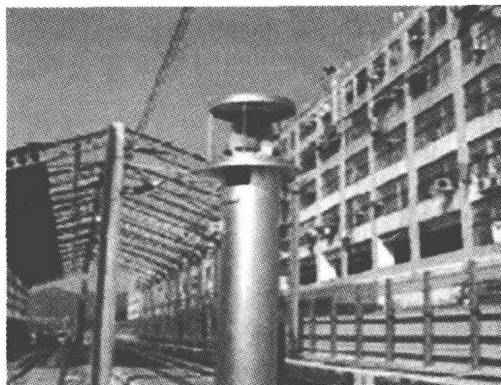


图 1-2 九广铁路测量机器人变形监测系统

香港的九广铁路公司(简称 KCRC)2005 年 12 月在新九龙南线工程中构造了一个庞大的测量机器人全自动化的变形监测系统(Eric TANG 等, 2006; 王文科, 2006), 用于施工期间对现有的机场快速铁路的 1.2km 长的某区段进行 24 小时连续的沉降与位移变形观测。整个系统集成包括了包括 18 台全自动高精度的测量机器人——TCA2003, 5 套 GeoMos 监测软件, 560 多个棱镜和数台计算机工作站。系统每两个小时就自动测量位于参考控制点和监测点的所有棱镜, 然后将观测数据发送回控制中心的 GeoMos 软件, 控制中心的任务是根据监测数据进行常规自动沉降和变形分析、图形输出、生成报告和沉降值达到临界值时发出警报信号等。另外, 每天早晨在第一辆机场快车开出之前, 要将一份综合报告自动发送给工程师做检查, 并且工程师还可以在任何时候通过网络获得铁路变形的全部信息。

美国加州 Diamond Valley 水库使用了加拿大 NewBrunswick 大学开发的 GPS、Georobot 等多传感器的集成系统进行自动化监测(Duffy MA 等, 2001), 该水库包括 3 个坝, 采用了 5 台 GPS 和 8 台 TCA 全站仪, 坝体上共设 228 个棱镜。

国内测量机器人的引进与应用略落后于国外, 近年来其应用研究逐渐增多, 大部分研究应用都是在精密工程测量方面。

1997 年 10 月在五强溪水力发电站大坝, 进行了测量机器人自动变形监测系统(SMDAMS)的现场实验(张学庄等, 1999), 用三台 TCA2003 做距离交会测量, 其距离经过自校准高精度频率校准仪施加改正后可达 $\pm 0.3\text{mm} + 0.3\text{ppm}$, 系统监测精度可达到亚毫米级。

1999 年 11 月在新疆三屯河水库大坝(马伟明, 2004), 2000 年 6 月在小浪底大坝(渠守尚等, 2001)的外部变形监测中分别采用了由 TCA2003、TCA1800 和 APSWin 组成的极坐标自动变形监测系统, 实现了大坝的无人值守全自动监测, 为大坝的科学管理提供了依据。为提高自动极坐标监测系统的高程精度, 进行了统计分析和灰关联分析, 建立大气折光改正模型(华锡生等, 2001)等有益的探索。

2001 年在二滩大坝外部变形监测中(赵景瞻, 2002), 使用了两台 TCA2003 配合仪

器内置软件,对平面控制基准网进行了两个测次的观测,经平差计算,两个测次的最终结果相差很小,且与传统的人工观测结果相比精度相当。在测量机器人控制网自动测角精度方面,也进行了一些试验研究(黄腾等,2004),比较了传统的人工测角与 ATR 测角的精度。

2001 年 8 月在广州地铁陈家祠地铁站(包欢等,2003),进行了地铁运行时的持续自动化极坐标变形监测试验,与其他传感器监测的结果相比取得了较好的效果。

2004 年在广州地铁陈黄沙站(卫建东等,2005),基于 6 台测量机器人建立了监测网络系统,运行取得了较好的效果。

1999 年至今,武汉大学测绘学院在测量机器人的自动化应用研究方面,做了全面、系统的研究(梅文胜,张正禄等,2000—2011),研制出了系列化的测量机器人软件系统(已进行软件登记)和作业模式,并都经过了工程实例的检验与验证。

在工业测量方面,Leica 的 Axyz 和解放军信息工程大学测绘学院开发的 MetroIn 工业大尺寸柔性三坐标测量系统中都可以采用测量机器人(李广云,2001),三坐标测量系统主要用于大尺寸工业设备高精度安装、检测等。近年来随着测量机器人中普遍采用无反射目标直接测距技术,在立式罐的计量测量中已采用 Leica TCRA 系列测量机器人进行自动化容量标定测量(徐忠阳等,2002)。随着测量机器人仪器设备的普及,其在毫米级精度的工业测量自动化中将得到越来越广泛的应用。

从以上的陈述可看出,测量机器人自进入全面应用与发展期以来,其应用研究已比较深入和成熟,但各厂家和科研机构对测量机器人的基础研究并没有停止,生产厂家对测量机器人产品也在不断进行改进和革新,如 Leica 公司推出的新的 TS30(TM30),作为 TCA100 系列的替代产品,增加了很多新的功能,整体性能也提高到一个新的层次;Trimble 公司则在收购了光谱精仪后,集成磁悬浮技术推出了新的 S6(S8)测量机器人;Sokkia 公司推出了新的 NET 系列自动化高精度工业测量机器人;Topcon 公司也推出了 GPT-9000A 测量机器人和 MS05 高精度工业测量机器人。

未来新一代的测量机器人的概念已经提出(H. Kahmen, 1998),未来的测量机器人不需合作目标,将根据物体的特征点、轮廓线和纹理,用影像处理的方法自动识别、匹配和照准目标,采用空间前方交会的原理获取物体的三维坐标及形状,并且将在人工智能方面得到进一步发展,其应用范围将进一步扩大。

1.3 本书研究的主要内容

本书将以突出测量机器人不同特点的典型应用及其技术方法为主线,围绕测量机器人的基本原理、二次开发方法、测量机器人的工程应用模式、应用软件系统设计与开发、应用中的关键技术与方法等几个方面展开系统全面的研究。论文研究的主要内容包括以下几个方面:

1) 测量机器人的基本原理

着重分析、研究测量机器人的八大技术构成,包括坐标参考系统、操纵系统、换能器、计算机和控制器、闭环控制传感器、目标判定、目标搜寻和集成传感器等。介绍

Leica、Trimble、Sokkia 三家公司的典型测量机器人的系统特点及相关技术原理。

2) 测量机器人的二次开发

测量机器人最大的优势在于能够代替人自动地完成一些测量任务，自动化测量时，控制软件必不可少，一般仪器中都固化一些共性的应用软件，但需要解决的往往是各行各业不同背景下自动化测量的个性问题，因此测量机器人的二次开发技术对用户来说尤其重要。本书以 Leica 和 Sokkia 系列机器人为例，给出了其二次开发的三种技术方法：内置应用程序的开发技术与方法；基于串行控制的外部程序开发技术与方法；基于串行控制技术设计并开发了 .NET 通用通信控制函数类库，实现了移动智能设备（PDA 等）和计算机对 Leica 和 Sokkia 系列测量机器人的灵活控制。

3) 控制网测量自动化软件开发与应用

高精度的工程控制网通常需要多测回的重复观测，充分利用测量机器人马达驱动、自动搜索、精确照准目标的特点，可在人工干预下实现一体化的工程控制网自动测量。该方法采用与传统方法完全一致的观测量，同时具有自动观测、一体化内外业数据处理的特点，比传统方式具有一致的精度和更高的效率，应迅速推广应用。

设计和开发了测量机器人移动式自动化网观测内置软件和外置 PDA 软件，实现了工程控制网外业观测、记录和观测成果质量控制的自动化。设计和开发了运行于微机上的自动化网观测后处理软件，实现了工程控制网观测成果数据的检查、改正、原始数据报表输出、观测成果文件生成等一体化、自动化的后处理。

针对某水利枢纽工程坝区安全监测网进行了软件的实际应用试验，试验表明软件实用可靠，观测精度达到甚至超过人工观测的精度，观测效率提高二分之一以上，实现了外业数据采集和内业数据处理的一体化、自动化。

对水平角自动测量中的共性问题进行了系统的研究分析，着重对测角精度与测回数的大气水平折光的影响与对策两方面进行了深入的探讨分析，得出了有益结论和建议，对工程生产有指导意义，对相关测量规范的修正有参考意义。

对三角高程自动测量大气垂直折光的影响及规律进行了分析和总结，提出了顾及 K 值变化规律的三角高程测量方法，可实现水平位移监测网和垂直位移监测网同时施测，实验计算表明该方法可以达到二等精密水准的精度，可望解决山区精密水准施测困难的难题，且效率大大提高。

4) 变形监测自动化软件开发与应用

现代化的工程对测量的实时性、持续性、自动化等方面提出了更高的要求，持续、自动化的实时监测系统是解决此类需求的最佳选择，测量机器人在持续形变监测中将更能发挥其潜能。本书从测量机器人持续变形监测系统的设计与开发、系统数据处理方法和系统工程的应用等几个方面，系统地研究测量机器人自动化持续监测的技术与方法。

给出了测量机器人自动极坐标变形监测系统的结构及布设原则，设计并开发了系统监测软件和远程监控软件，阐述了极坐标系统中参考基准和测站基准的稳定性分析方法，给出了多基站测量机器人变形监测系统结构，并讨论了系统的动态基准及多台测量机器人的协同控制问题；给出了 GPS+Georobot 集成变形监测系统的组成与结构。

提出了差分数据处理方法,有效地提高了观测距离和高差的精度,实现了极坐标系统的毫米级变形监测,并在桥梁变形监测的实例中得到了验证。

提出了顾及大气折光和坐标参照系变化的变形分析模型,成功地解决了变化的坐标参照系的统一问题,在基站测量机器人处于微颤状态下的桥梁持续变形监测实验中,得到了毫米级监测成果。

在滑坡监测中进行了两基站的极坐标系统实际应用试验,从约7个月130余期的监测成果来看,本书提出的自动化的监测技术与方法成功地实现了毫米级(三维坐标)的持续滑坡监测,系统稳定,成果可靠,效益显著。

5) 储罐容积自动化测量方法与软件开发

储罐作为计量和储物的重要器具在商业、军事、交通,特别是石油化工行业中有广泛的应用,储罐按照形体特征可分为立式罐、球罐与卧式罐,目前储罐主要采用几何方法计量。传统储罐容量计量采用钢卷尺、水准仪、径向偏差仪或垂准仪等设备,需花费大量的人力、时间,作业过程安全性差,效率低。随着电磁波直接测距技术的发展和精度的提高,无反射直接测距技术已集成到测量机器人中,测量机器人也逐渐应用到工业结构的三维坐标测量中,无反射直接测距测量机器人非常适合内测法储罐自动化测量,较之于传统方法,其作业效率、精度及安全性都得到了革命性的改变。

研究了立式罐、球罐与卧式罐自动化测量和容积计算方法,开发了相应软件系统,主要包括:①卧式罐容积自动化测量方法及软件;②立式罐容积自动化测量方法及软件;③球罐容积自动化测量方法及软件;④基于NUBRS曲面的容积计算方法及软件。

6) 船舱容积自动测量系统

系统研究的目的是研制一套自动化、智能化的测量机器人船舱测量软、硬件,以实现船舶舱室的容积测量自动化。测量机器人舱室容积自动测量系统,采用远程遥控操作,将三维移动平台置于需要测量的船舱中,在舱外通过计算控制移动平台的上下、前后移动及测量机器人的旋转与测量,可自动完成对船舱的水平、垂直断面扫描,在CCD的监视下,也可完成船舱特殊特征点遥控测量。由于采用遥控遥测技术,不需要作业人员长时间在现场作业,解决了在恶劣环境下的快速、精确、自动化测量问题,使得作业人员更加安全可靠。系统研究的关键技术内容如下:

实现了系统多传感器的集成,将测量机器人、CCD摄像机、三维移动平台、无线通信设备等有机集成,形成协调运转的容积测量系统,以实现船舱容积的自动、快速、精密测量。

研制了三维移动观测平台,该平台是一套由计算机控制的具有水平和垂直方向移动及转向能力的遥控移动系统,它能承载测量机器人移动到预定的位置。

实现了系统的无线遥控及自动控制,由于船舱一般都是封闭的金属容器,对无线电信号存在屏蔽现象,光滑的金属舱室壁也会强烈反射无线电信号,产生信号严重的干扰和衰落,导致舱内、舱外无线通信的困难。遥控状态下系统的自动控制也尤其重要,直接关系到整个系统的安全性、可靠性和实用性。

提出了公共点法，通过建立船舱内多站测量的统一基准，解决了船体浮动状态下无法整平全站仪，又要进行精密快速测量的难题。

提出了基于参考面的多站船舱自动扫描测量方法，加快了测量速度，增加了测量密度，提高了容积计量精度。