



测·绘·科·学·与·技·术 著作系列

船舶建造

工业测量系统

岳建平 魏叶青 张永超 著



科学出版社

测绘科学与技术著作系列

船舶建造工业测量系统

岳建平 魏叶青 张永超 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在总结工业测量技术发展过程、存在问题及发展趋势的基础上,结合现代工业测量的特点和现代数字化造船的要求,对船舶建造过程中的测控技术进行了全面深入的研究。书中重点研究了基于全站仪和PDA的数据采集系统,分析了测量坐标系转换的方法和精度,探讨了三维模型重构的理论和方法,采用 OpenGL 技术实现了测控数据的可视化,研制了一套适用于船舶建造精度控制的工业测量系统,为我国的数字化造船技术提供帮助。

本书可作为高等院校测绘工程专业本科生及研究生的参考书,也可供该领域专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

船舶建造工业测量系统/岳建平,魏叶青,张永超著. —北京:科学出版社,2011

(测绘科学与技术著作系列)

ISBN 978-7-03-030849-8

I. ①船… II. ①岳…②魏…③张… III. ①造船工业-测量系统
IV. ①U66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 070524 号

责任编辑:童安齐 王 钰 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011年6月第一次印刷 印张: 8 1/2

印数: 1—1 500 字数: 155 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BZ08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

以数字制造为核心的先进制造技术对大尺寸空间坐标测量的精度、速度和效率提出了非常高的要求。正是基于这种需求，自20世纪80年代以来，出现了一大类“非正交系坐标测量系统”，亦称为“工业测量系统”，如经纬仪/全站仪测量系统、激光跟踪/扫描测量系统、摄影测量系统、室内GPS测量系统及关节式坐标测量机等，并在制造业中得到了广泛的应用。非正交系坐标测量系统主要采用测绘学中的理论和方法，并已经成为测绘工程专业精密工程测量领域的一个重要发展方向。本书作者以测绘工程专业的视角来分析和讨论工业测量系统的理论和方法，可谓独具匠心。

本书系统总结了7大类工业测量系统的特点、软硬件组成和应用领域，指出了工业测量系统的发展趋势；结合船舶建造中的精度控制理论和方法，重点研究了基于全站仪和PDA的便携式全站仪工业测量系统；介绍了坐标系转换的方法；阐述了三维模型重构和坐标测量成果可视化等关键技术问题；详细介绍了工业测量系统软件，该软件是作者结合船舶测量实际需求而开发的专用软件，解决了船舶制造中三维坐标测量研制的急需。

本书紧紧围绕船舶建造需求，对船舶建造精度控制的内容、特点和方法做了独到的总结和分析。本书是测绘工程领域首部关于“船舶建造工业测量系统”方面的论著，对测绘工程专业的学生、教师及船舶行业的专业技术人员都是一部很好的参考书。

本书的完成得益于作者及其科研团队多年来在这一领域的积累和耕耘，也反映了我国测绘工程学者宽广的视野和宝贵的开拓精神。一分辛苦，一分收获，希望本书的出版能为我国船舶建造工业的发展做出应有的贡献，并进一步推动我国工业测量系统技术的应用和发展。

中国测绘学会工程测量分会副理事长
中国人民解放军信息工程大学测绘学院教授

2010.12.20

前 言

随着现代高新技术的发展,尤其是以数字制造为核心的先进制造技术的飞速发展,人们对形状尺寸和空间位置检测的精度、速度和效益提出了越来越高的要求,这必然对工业生产中的检测方法和精度提出相应的要求。为此,必须对工业测量的相关理论和技术做广泛深入的研究,提高现代工业测量的技术水平,以适应现代制造业发展的需要。工业测量作为测量技术的一个新的应用领域,以其高精度、实时性、非接触性和机动性等特点,正日渐受到业界人士的普遍关注,并成为测绘领域的一个重要研究方向。

本书总结了工业测量技术的发展过程、存在问题及发展趋势,对常用工业测量系统进行了深入、全面的分析研究。在此基础上,书中重点介绍了基于全站仪和 PDA 的数据采集系统;根据工业测量的特点和要求,深入阐述了测量坐标系转换、三维模型重构及成果可视化等关键技术;另外,详细介绍了适用于船舶建造精度控制的工业测量系统,该系统是依据现代数字化造船的特点和要求而研究开发的,为我国造船工业的现代化提供了技术支撑。

本书可作为高等院校测绘工程专业本科生及研究生的参考书,也可供该行业专业技术人员参考。

本书是作者及其科研团队多年来研究成果的总结。在课题的研究以及撰写本书过程中,参阅了大量的技术文献,在此,对这些文献的作者表示衷心的感谢。限于作者理论和技术水平,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2009年12月 于南京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的目的与意义	1
1.2 工业测量系统的研究进展	2
1.3 船舶建造测控技术的研究进展	4
1.4 数据可视化理论与技术的研究进展	5
1.5 存在的主要问题及解决途径	7
1.6 主要研究内容及技术路线	8
第 2 章 常用工业测量系统分析	10
2.1 三坐标测量机.....	10
2.2 关节式坐标测量机.....	11
2.3 经纬仪测量系统.....	13
2.4 全站仪测量系统.....	14
2.5 摄影测量系统.....	15
2.6 激光跟踪测量系统.....	17
2.7 激光扫描测量系统.....	19
2.8 室内 GPS 测量系统	21
第 3 章 船舶建造精度控制理论和方法	23
3.1 船舶建造精度控制内容及特点.....	23
3.1.1 船舶建造精度控制内容	23
3.1.2 船舶建造精度控制特点	25
3.2 精度控制标准.....	26
3.2.1 基本概念介绍	26
3.2.2 精度控制标准	26
3.3 精度控制常用方法.....	29
3.3.1 船舶建造中的变形	29
3.3.2 造船测量的特殊性 & 常用测量技术	30
3.3.3 精度控制技术	31

3.4	精度补偿技术	33
3.4.1	精度补偿的原则	33
3.4.2	精度补偿量的确定	34
第4章	坐标转换模型及应用	39
4.1	概述	39
4.2	分步转换模型	39
4.2.1	平面坐标转换	39
4.2.2	高程转换	40
4.2.3	坐标转换	41
4.3	三维整体转换模型	41
4.3.1	三维坐标转换模型	41
4.3.2	基于高斯-牛顿迭代法的改进	42
4.3.3	粗差探测	43
4.4	坐标转换模型的应用	44
4.4.1	平面物方基准	44
4.4.2	空间物方基准	44
第5章	三维模型重构理论与技术	46
5.1	平面模型重构及精度评定	46
5.2	球面模型重构及精度评定	47
5.3	圆柱面模型重构及精度评定	48
5.4	圆锥面模型重构及精度评定	49
5.5	抛物面模型重构及精度评定	51
5.5.1	抛物面拟合	52
5.5.2	法向校准量计算	53
5.6	不规则曲面重构方法研究	54
5.6.1	NURBS 曲线、曲面的定义	54
5.6.2	NURBS 曲线插值	55
5.6.3	NURBS 曲面重构	59
第6章	三维图形绘制与交互可视化技术	61
6.1	OpenGL 概述	61
6.1.1	OpenGL 体系结构	61
6.1.2	OpenGL 工作流程	62
6.1.3	OpenGL 的基本图形功能	63
6.2	OpenGL 读取 DXF 文件技术	63
6.2.1	DXF 文件分析	64

6.2.2	DXF 文件的读取与显示	67
6.3	OpenGL 绘制 NURBS 曲线曲面	70
6.4	OpenGL 交互技术	71
6.4.1	平移、旋转、缩放	71
6.4.2	选择、拾取、反馈	72
第 7 章	船舶建造工业测量系统总体设计	75
7.1	开发目标与原则	75
7.1.1	系统开发目标	75
7.1.2	系统开发原则	75
7.2	系统总体结构及主要功能模块	76
7.2.1	系统总体结构	76
7.2.2	系统功能概要	76
7.3	开发的软硬件环境	78
7.3.1	Windows CE、PocketPC 2002	78
7.3.2	C#	80
第 8 章	数据采集子系统设计与开发	81
8.1	系统结构与主要功能	81
8.1.1	系统结构	81
8.1.2	功能概要	82
8.2	子系统详细设计	83
8.2.1	设置模块	83
8.2.2	数据采集模块	85
8.2.3	数据计算模块	86
8.2.4	数据管理模块	86
8.3	系统开发的关键技术	87
8.3.1	串口通信	88
8.3.2	多线程技术	91
8.3.3	超时设置	91
8.4	系统开发与应用	92
8.4.1	参数设置	92
8.4.2	数据采集	93
8.4.3	数据变换与编辑	94
第 9 章	数据分析子系统设计与开发	96
9.1	系统结构与主要功能	96
9.1.1	系统总体结构	96

9.1.2	系统主要功能	96
9.1.3	系统菜单设计	97
9.2	系统详细设计	98
9.2.1	设计数据模块	98
9.2.2	数据管理模块	98
9.2.3	坐标转换模块	101
9.2.4	断面分析模块	101
9.2.5	形体分析模块	102
9.3	系统开发的关键技术	102
9.3.1	VBOpenGL type library (Vbogl.tlb) 的使用	103
9.3.2	VB 环境下 OpenGL 程序框架的构建	103
9.4	系统的实现与应用	106
9.4.1	系统总体实现情况	106
9.4.2	系统各模块实现情况	106
9.4.3	系统的应用	114
第 10 章	总结与展望	117
10.1	主要研究内容与结论	117
10.2	需进一步研究的问题	118
10.3	发展展望	119
主要参考文献		120

第 1 章 绪 论

1.1 研究的目的是与意义

随着现代高新技术的发展，尤其是以数字制造为核心的先进制造技术的飞速发展，人们对形状尺寸和空间位置检测的精度、速度和效益提出了越来越高的要求。这些发展同时对精密测量技术也提出了相应的要求，即工业测量一方面要为先进制造技术担负起质量保证的重任，另一方面又不能单纯为检测而检测，还要为产品生产效益的提高贡献力量。在很多行业（如飞机制造业），测量已深入到生产过程中，即进行在线检测；在逆向工程（reverse engineering）中，测量不再仅仅是“服务”行业，它已成为整个先进闭环制造过程中不可或缺的一个关键环节。制造工艺的发展和变化对工业生产中的检测手段和精度提出了新的更高的要求，因此，必须进行广泛深入的研究，才能适应现代制造业发展的需要。

工业测量（industrial measurement）是在工业生产和科研各环节中，为产品的设计、模拟、测量、放样、仿制、仿真、质量控制和运动状态提供测量技术支持的一门学科。工业测量也称为工业计量、大尺寸空间计量、工程计量等，其目的是根据设计图纸和规范的要求，高精度地对三维部件、工件、整机或结构进行装配、安装、检核、调整和维护，包括为了获取三维坐标、几何形状拟合、质量保证审核、静态或动态变形监测等而进行的精密测量。

传统的工业测量方法一般采用高分辨率的三维坐标测量机、气动测长仪、比长仪、激光干涉仪和测量显微镜等仪器进行。然而，这些仪器及其测量方法大多被局限于接触测量和量测尺寸较小的物件。随着现代建造工业技术的迅速发展，设备的尺寸越来越大，结构越来越复杂，自动化程度也越来越高，这对工业测量精度和技术的要求也越来越高。现代电子经纬仪、全站仪、数码相机、激光扫描仪的发展和应用，改变了以接触方式为主的传统工业测量方法，出现了以空间前方交会原理为基础，以电子经纬仪、全站仪、数码相机等为传感器的光学三维坐标无接触工业测量系统，为工业测量技术的发展奠定了基础。

工业测量系统（industrial measurement system，简称 IMS）是指以电子经纬仪、全站仪、数码相机等为传感器，在计算机的控制下，完成对部件、产品或构筑物的非接触、实时三维坐标测量，并在现场进行测量数据的处理、分析和管理的系统。它具有非接触性、实时性和机动性等特点，是测量技术的一个新

应用领域，正日渐受到业界人士的关注。工业测量系统的优点主要有：其装备组成灵活，定向、测量精度高，所需检校时间很短，可通过交会的方式解算得到高精度点位坐标。测角仪器组成的工业测量系统适用于不利于或无法使用专用传感器或摄影测量方法的场合，即适用于目标庞大、结构复杂但待测点稀疏且精度要求较高的场合。结合相关工业测量系统软件，可快速实现以被测物体为参照系进行坐标转换及任意坐标系间的转换；对直线、圆、平面、球面、圆柱面及抛物面等几何元素进行专门计算和处理；可将实际测量值与设计值或早期测量值进行比较；解算各种元素的交会问题。

在工业测量领域中，由于测量对象的千差万别，离散的测量数据很难进行描述和分析，而可视化技术能克服这一缺点。因而，测量数据可视化成为研究的热门课题。有效的可视化能够浏览、操纵、观察、研究、探索、过滤、理解大量离散数据，从而可以有效地发现隐藏在信息内部的特征和规律。数据可视化是指运用计算机图形学和图像处理技术，将数据转换为图形或图像在计算机屏幕上显示出来并进行交互处理的理论、方法和技术。它将图形生成技术、图像处理技术和人机交互技术组合在一起，其主要功能是从复杂的多维数据中产生图形，也可以分析和处理输入计算机的图像数据，涉及计算机图形学、图像处理、计算机视觉、人机交互技术及计算机辅助设计等多个领域。

测量数据可视化技术的发展，可以最终使测量完全与工业产品的设计、制造、检测一体化接轨。实现数据可视化具有多方面的重要意义：它可以大大加快数据的处理速度，使庞大的数据得到有效的利用；它可以在人与人、人与数据之间实现图像通信，而不仅仅是目前的数字通信或文字通信，从而可使人们观察到在传统的数据处理中发生了什么现象，使之成为发现和理解数据处理过程中各种现象的有力工具；它还可以使人们对计算过程实施引导和控制，通过交互手段改变计算所依据的条件，并观察其对结果的影响。而且由于计算可视化可以将计算结果用图形或图像形象、直观地显示出来，所以许多抽象的、难以理解的原理和规律变得容易理解，许多繁冗又枯燥的数据变得生动有趣。总之，数据可视化将极大地提高数据处理的效率，它可以使科学研究工作的面貌发生根本性的变化。随着计算机技术的发展，尤其 3D 图形可视化和虚拟现实技术的快速发展，使得在计算机上进行三维图形显示成为现实。因而，为离散的测量数据增加 3D 显示和分析功能成为迫切需求，以便能够更好地完成测量任务和更方便地服务于工程。

1.2 工业测量系统的研究进展

20 世纪 80 年代以来，光学经纬仪作为大地测量的传统外业观测仪器得到了飞速的发展，出现了高精度、自动化的电子经纬仪。其作为一种高精度的角度传

感器再加上电子计算机应用的广泛深入,为工业检验与装配的高精度和自动化需求提供了一种切实可行和有效的手段,为大地测量渗透到工业测量领域奠定了坚实的基础。

1980年,美国的 Johnson 首次介绍和应用了经纬仪工业测量系统,他最先采用 K&E 公司生产的 DT-1 型电子经纬仪,进行双站系统的工业测量,引起了工业界的注意和仪器厂家的竞争。随着现代电子经纬仪、全站仪及非地形摄影测量技术的发展和应用,以接触方式为主的传统工业三维坐标测量方法得到了改变,出现了以空间前方交会原理为基础,以电子经纬仪、全站仪及数码相机为传感器的光学三维坐标无接触工业测量系统。

世界上一些传统测量仪器生产厂家纷纷将电子经纬仪、全站仪、数码相机及激光跟踪仪等应用到工业测量领域,推出了一大批商品化的工业测量系统,逐步形成了对传统工业测量产生深刻影响和变革的新型“工业测量系统”。如瑞士 Leica 公司的电子坐标测量系统 ECDS3、自动经纬仪测量系统 ATMS、瑞士 Wild 的遥测系统 RMS、美国 K&E 公司的解析工业测量系统 AIMS、德国 Zeiss 公司的工业测量系统 IMS、日本 Sokkia 的三维测量流动工作站 MONMOS 等,都是比较成熟的商品化三坐标测量系统。尤其是瑞士的 Leica 公司,将各种工业测量系统都集成到最新的 Axyz 软件中,由一个共同的数据管理平台 CDM 进行统一管理,而经纬仪测量系统 (MTM)、全站仪极坐标测量系统 (STM)、数字摄影测量系统 (VGM) 及激光跟踪测量系统 (LTM) 都作为 CDM 下的一个数据采集模块。这样将各个分散的 IMS 软、硬件集成到一个系统中,可统一管理各种数据采集硬件,而且测量软件的界面一致,操作灵活方便,它代表了工业三维坐标测量系统的最新进展。

目前,工业测量系统已广泛地应用于制造业、工程建筑业等领域。如汽车、飞机、船舶制造中的质量检验及安装都用工业测量系统来完成。世界上著名的飞机制造商,如波音 (Boeing)、空中客车 (AirBus); 以及知名汽车生产商,如德国的宝马 (BMW)、奔驰 (Benz)、奥迪 (Audi), 瑞典的萨博 (Saab), 英国的戴姆勒 (Daimler) 以及日本的马自达 (Mazda)、本田 (Honda) 等,都已用工业测量系统成功地保证了质量,提高了生产效率。此外,日本采用三维流动测量工作站 MONMOS 系统,对船舶制造过程中船体合拢装配进行实时测量; 欧洲空间研究与技术中心曾于 1986 年使用 RMS2000 系统成功地对卫星通讯地面天线的精度及其性能进行了测量; 德国为保证水泥转炉滚筒圆心位于同一直线上,曾采用“Zeiss IMS”工业测量系统进行定线测量等。

我国对经纬仪、全站仪工业测量系统的研究最早开始于 20 世纪 80 年代末。解放军信息工程大学测绘学院在这方面研究起步较早,1994 年成功研制出了 TSST 经纬仪三维坐标测量系统。近年来又推出了基于多台传感器的经纬仪/全

站仪大尺寸柔性坐标三坐标测量系统 MetroIn, 在国内也得到了广泛的应用; 同时在工业测量系统的应用实践方面取得了大量成功的经验, 如卫星推进及控制装置精度检测、大型多波束天线的安装检测、三峡大坝一号机组座环检测、北京长河闸门的安装与检测及首钢大板坯连铸机曲面测量等。

此外, 中国五冶工程技术部、航天第一计量测试研究所、天津大学、武汉大学、山东大学等多家单位也先后投入到了该领域的研究与开发中。

武汉大学的冯文灏教授在工业测量系统方面做了大量的理论研究, 并取得了许多卓著的研究成果。其中主要有: 提出了立体视觉系统检校中引入约束条件的基本理论, 改善了标称精度; 提出了建立车间内特高精度联机工业控制网的理论与方法, 以用于批量大型工业部件的检测与放样; 提出了三旋转自由度扫描传感器的数学模型, 以适用于任何形态工业目标的结构光工业测量和传感器设计; 系统地分析了工业测量目标的多样性及十余种工业测量方法, 并给出了选用各种工业测量方法的基本原则; 提出了构建“积木式三维工业测量系统”的理论与方法等。他先后发表相关论文数十篇, 并于 2004 年 10 月出版了专著《工业测量》(武汉大学出版社)。

1.3 船舶建造测控技术的研究进展

我国的造船企业众多, 大型造船企业也都拥有现代化的加工、运输设备, 每年的船舶制造总量位居世界前列, 但船舶的设计和制造水平仍较落后, 大多数的造船企业还在沿用传统的测控技术, 特别是在精密造船方面, 其理论和技术与世界先进水平有明显的差距。中国的造船技术与国外先进水平相比, 至少相差 10 年。此外中国的船用设备几乎 80% 都需要进口, 日本、韩国的自给率则高达 85% 以上。中国造船业规模虽大, 但利润较低。因此, 中国是一个造船大国, 却不是造船强国。

现代造船专家(日本、韩国、欧洲等一些一流的船舶制造企业)已广泛接受船体分段建造的概念, 并意识到了分段测量的重要性。建立准确的分段, 可以避免传统的架设过程中多余材料和工时的浪费, 从而极大地提高生产力, 并节约成本。因此, 在当代世界船舶工业格局下, 研究与开发船舶建造测控理论与技术显得尤为重要, 其理论和现实意义主要体现在以下几个方面:

(1) 船舶建造测控理论与技术的研究和开发, 是提高造船质量、缩短造船周期、降低造船成本的重要突破口。在船舶建造过程中, 钢料经过预处理, 随后根据放样结果切割或加工成零件, 再组装成各种部件, 小组立成平面、曲面等分段, 大组立成总段, 最后在船台或船坞进行焊接装配, 直至形成整艘船体。对其中间产品——分段, 进行测量分析, 可有效提高其制造精度, 确保最后拼装效率。

(2) 船舶建造测控理论与技术的研究和开发是转换造船模式, 实现“数字化造船”的有效方式。受制于技术、经济、政策等因素的影响, 目前国内大部分船厂还在沿袭传统造船工艺, 其测量工作主要选用角尺、钢板尺、钢卷尺、水平软管、吊锤、光学水平仪等, 这不仅影响到精度造船的深入, 而且大大限制了其他相关造船技术的应用, 无法体现整体的造船效益。由此可见, 先进的测控理论与技术在壮大我国造船工业中起着关键性的作用。

(3) 船舶建造测控理论与技术的研究和开发可以拓宽我国的船舶市场。船舶建造精度控制技术是制约我国船舶市场发展的主要因素之一, 如我国承接的新船订单中, 主要是散货船、集装箱船等利润相对低的船种, 而日韩欧大型船企则以建造豪华游船、客货两用船和休闲类船艇等利润空间大、技术要求高的船种为主。船舶建造测量分析系统可有效确保装配工序和分段合拢的精度, 有利于提高本国造船工业在国际市场中的竞争力。

基于“数字化造船”理念, 以现代船舶设计、建造理论和工艺要求为依据, 针对船舶建造精度控制进行相关理论与技术的研究, 不仅可以满足造船企业对于船舶建造测控的需求, 提高船舶建造质量, 而且可以弥补我国在数字造船理论和技术方面的不足, 从而提升我国造船企业的地位和形象。

1.4 数据可视化理论与技术的研究进展

1987年2月, 美国国家科学基金会在华盛顿召开了有关科学计算可视化的首次会议。会议认为“将计算机图形学和图像技术应用于科学计算将是一个全新的领域”, 并指出“科学家们在进行科学计算时不仅需要分析由计算机得出的计算数据, 而且需要了解在计算过程中数据发生的变化, 这些都需要借助于计算机图形学及图像处理技术才能实现”。会议将这一涉及到多个学科领域定名为“科学计算可视化 (visualization in scientific computing)”。由此开始了这一新兴技术的研究, 并成为计算机图形学中的一个重要研究领域。

随着技术的发展, 科学计算可视化的含义已经大大扩展。它不仅包括科学计算数据的可视化; 而且包括工程计算数据的可视化; 还包括测量数据的可视化, 如用于医疗领域的计算机断层扫描 (CT) 数据的可视化以及本书将要研究的工业测量数据的可视化等。它还涉及到三维数据场可视化、计算过程的交互控制和引导、图形生成和图像处理的并行算法、面向图形的程序设计环境以及虚拟现实技术等。

测量数据的可视化就是对测量得到的数据进行拟合或插值, 形成曲线或曲面并用图形或图像表示出来的技术。数据点的曲面重构技术一直以来都是函数逼近论的一个重要研究内容。近几年来, 随着图形学与计算机辅助设计的发展, 数据

点的曲面重构技术得到了深入研究和广泛应用,如医学成像数据的可视化、基于测距技术的几何模型自动生成等,该技术的发展有力地促进了造型和可视化等技术的高速发展。

数据点的曲线曲面拟合或插值是指用一个光滑的曲线或曲面来逼近或通过这一系列不规则的数据点。早在 20 世纪 60 年代,数据的插值问题就已经引起了人们的注意,虽然在过去的几十年中提出了许多方法,但是很难用一种简单的方法来满足所有的测量目标。NURBS (non-uniform rational B-spline) 方法很好地解决了这一问题,其最大优点是:它不仅表示自由曲线曲面,而且还能精确地表示二次规则曲线曲面,从而能用统一的数学形式表示自由曲面与规则曲面。NURBS 方法的研究与应用经历了很长的时间。

1963 年,为了解决自由曲线、曲面无法用画法几何与机械制图表达的难题,美国波音飞机公司的 Ferguson 首先提出了将曲线、曲面表示为参数的矢量函数方法,并引入三次参数曲线,构造了组合曲线和由四角点的位置矢量及两个方向的切向矢量定义的 Ferguson 双三次曲面片。Ferguson 所采用的曲线、曲面的参数形式从此成为形状数学描述的标准形式。

1964 年,美国麻省理工学院的 Coons 发表了一种具有一般性的曲面描述方法,给定围成封闭曲线的四条边界就可定义一块曲面。1967 年 Coons 进一步推广了他的这一思想。在 CAGD (computer aided geometric design) 实践中广泛应用的只是它的特殊形式——Coons 双三次曲面片,它与 Ferguson 双三次曲面片的区别仅在于将角点扭矢由零矢量改为非零矢量,两者都存在着形状控制与连接问题。

法国雷诺汽车公司的 Bezier 于 1971 年提出了一种由控制多边形定义曲线的新方法。设计员只要移动控制顶点就可方便地修改曲线的形状,而且形状的变化完全在预料之中。这种方法不仅简单易用,而且漂亮地解决了整体形状控制问题,把曲线曲面的设计向前推进了一大步。它是雷诺公司 UNISURF CAD 系统的数学基础。Bezier 方法在 CAGD 学科中占有重要的地位,它为 CAGD 的进一步发展奠定了坚实基础,但是该方法仍存在连接问题和局部修改问题。

1972 年,deBoor 给出了关于 B 样条的一套标准算法。美国通用汽车公司的 Gordon 和 Riesenfeld 于 1974 年又将 B 样条理论应用于形状描述,提出了 B 样条曲线曲面。它几乎继承了 Bezier 法的一切优点,又克服了 Bezier 法存在的缺点,不但较成功地解决了局部控制问题,而且轻而易举地在参数连续性基础上解决了连接问题,从而较成功地解决了自由曲线、曲面形状的描述问题。

随着生产的发展,B 样条方法显示出明显不足,它不能精确表示圆锥截线及初等解析曲面,只能给出近似表示,这就造成了产品几何定义的不惟一,使曲线曲面的表达没有统一的数学描述形式,容易造成生产管理上的混乱。为了解决这一问题,1975 年美国 Syracuse 大学的 Versprille 在他的博士论文中首次提出了

有理 B 样条方法。至 20 世纪 80 年代后期, Tiller 论述了有理 B 样条曲线曲面的具体应用, Piegl 等人系统地探索了有理 B 样条曲线曲面的构造和形状调整问题, 并系统地论述了非均匀有理 B 样条 (NURBS) 方法, 终于使 NURBS 方法成为现代曲面造型中最广为流行的技术。

在国内, 对 B 样条方法的研究始于 20 世纪 70 年代末。北京航空航天大学对非均匀 B 样条与 NURBS 方法做了系统的研究, 并且发表了大量论著; 施法中与朱心雄撰写了有关 NURBS 的专著。与此同时, 南京航空航天大学 and 西北工业大学也深入探索研究了 NURBS 的理论和应用, 并取得了许多重要的成果。

随着计算机硬件性能完善, 数据可视化技术有了突飞猛进的发展, 三维显示技术不断提高, 高性能图形工作站随之建立, 虚拟现实技术日益成熟, 使得测量数据可视化应用成为可能。

在工业测量领域, 瑞士 Leica 公司是最早提出并实现数据可视化的先驱之一。他们开发的工业测量软件 Axyz 是世界上第一套为大中型工业对象实施光电测量的一体化、智能化工业测量系统。该软件提供了一个 View 模块, 专用于测量数据的可视化处理。使用 View 模块, 可以方便、直观地在三维环境中进行数据分析, 能够准确显示测量设备的位置, 快速了解特定点的点号及其测量值, 进行简单的形态分析和处理, 快速地进行误差分析。

法国 Mensi 三维激光扫描系统的后处理软件 3Dipsos 在点云数据处理、三维显示、辅助建模、CAD 接口等方面功能强大, 是目前功能最强的三维测量数据处理软件之一。

此外, 我国台湾智泰科技公司为 LSH 系列激光扫描仪开发的 DigiSurf 也是一款功能很强的三维测量数据处理软件。它在点云数据处理、曲线曲面构建、修编、分析及 CAD 接口等方面功能都很完备。

1.5 存在的主要问题及解决途径

虽然国外已研发了多种工业测量系统产品, 但它们的价格过于昂贵, 不可能大批量地进口。国内也有多家单位正在从事工业测量系统方面的研究与开发, 但应用领域比较狭窄, 难以推广和普及。而随着我国现代工业的迅猛发展, 许多工程项目和工业部件的安装检测都需要进行特高精度的测量。因此, 如何利用现有的技术手段和仪器设备, 组建一套价格低廉且测量精度和性能均可与国外成熟的商品化产品相媲美的工业测量系统, 并开发配套的数据处理系统软件, 以满足多种工业测量的精度要求, 成为摆在我国工业测量领域研究者面前的一道急需解决的问题。

基于国内工业测量领域研究者已取得的成果, 要成功研制出一套拥有自主知

识产权、物美价廉的工业测量系统产品，还存在以下几个关键问题有待解决：

(1) 坐标系转换模型问题。进行工业测量时，由于现场条件的限制，测站坐标系的选取具有一定的随意性，而且经常需要换站测量，各测站之间坐标系通常不统一，测量坐标系与工件的设计坐标系一般也不一致。因此，为了对测量数据进行后续分析，首先就必须将各种坐标系下的坐标数据转换到同一坐标系中。这就需要进一步深入研究适用于工业测量系统的关于测量坐标系之间的转换以及测量坐标系与工件的设计坐标系之间的转换数学模型。

(2) 不规则曲面三维模型重构问题。在工业测量以及逆向工程中，由于规则实物的形状通常有严格的数学公式描述，所以，通过采集其表面点的三维坐标，便可以很容易拟合出该实物表面在空间三维坐标系中的几何方程；然而，针对不规则曲面的三维模型重构问题相对复杂得多，目前应用较多的是基于 NURBS 曲面重构方法，但是该方法还存在一系列问题有待解决。由于 NURBS 的数学描述式中分式有理式及权值的出现，使得 NURBS 方法遇到了非有理方法中从未出现的一系列新问题，计算变得更加复杂，特别是参数化与权因子问题至今仍然没有完全解决。此外，迄今仍罕见有关于 NURBS 曲线与曲面的几何连续性问题的文献。

(3) NURBS 理论研究成果向现实生产力转化研究。目前，CAD 商用软件系统纷纷开发并推出 NURBS 功能，但是它们一般都局限在建模应用上。这些系统仍然难以直接建立自由型曲面（如汽车外型面）和器官形状（如人脸）。市场上流行的商用 CAD/CAM 系统相继推出各自的反求工程模块。但是，由于理论和方法上的限制，它们都没有达到理想的使用性能。各种商用软件也或多或少存在着以下不足：一般很难达到理想的曲面拟合精度；处理时需要的交互太多；对具有重叠特性的多视数据或补测数据无法自动处理；适用的数据范围不广等。

(4) 工业测量数据处理软件开发。目前，与工业测量系统相辅助的数据处理软件的开发还比较少。在此类软件的开发过程中，需要深入研究三维模型的显示与交互操作技术，增强通用三维图形模块的功能，真正实现误差三维分析。此外，如何将三维显示模块与 CAD/CAM 系统进行连接也需要进一步研究。通过这方面的工作，一是可以弥补此类软件在这方面的欠缺；二是在此基础上进一步开发，补充可视化部分使其成为一个完整的工业测量数据处理软件。

1.6 主要研究内容及技术路线

本书将着重介绍以下几个方面的分析研究内容。

1) 常用工业测量方法及系统分析

目前，在工业测量中应用的测量方法多达 10 余种，其原理自然也各不相同。