

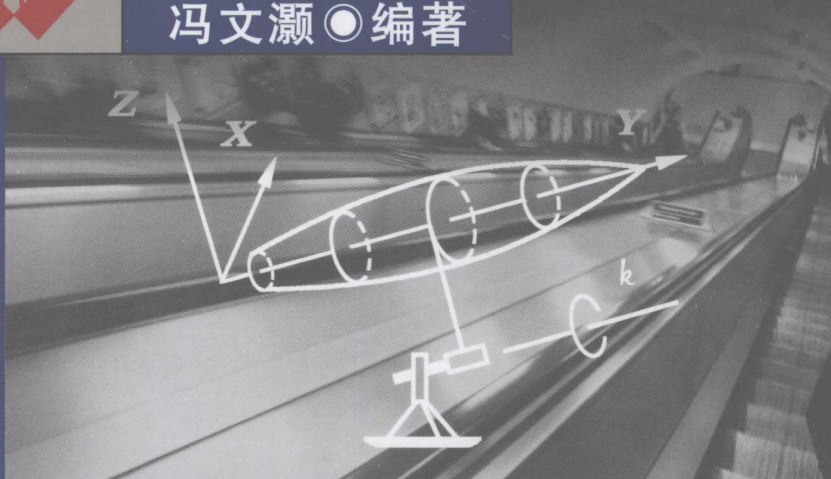


# 工业测量



武汉大学学术丛书  
WUHAN UNIVERSITY ACADEMIC LIBRARY

冯文灏◎编著



全国优秀出版社  
武汉大学出版社



武汉大学学术丛书

# 工业测量

冯文灏 编著

TB22/山

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业测量/冯文灏编著. —武汉: 武汉大学出版社, 2004. 10  
(武汉大学学术丛书)

ISBN 7-307-04252-5

I. 工… II. 冯… III. 工业—测量方法 IV. TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 049670 号

工业测量

著者 冯文灏

责任编辑: 王金龙 责任校对: 黄添生 版式设计: 支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 武汉中远印务有限公司

开本: 787×1092 1/16 印张: 23.5 字数: 564 千字 插页: 3

版次: 2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-04252-5/TB·14 定价: 36.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。



武汉大学学术丛书  
自然科学类编审委员会

- 主任委员 ▶ 刘经南
- 副主任委员 ▶ 卓仁禧 李文鑫 周创兵
- 委员 ▶ (以姓氏笔画为序)
- |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 文习山 | 石 兢 | 宁津生 | 刘经南 |
| 江建勤 | 李文鑫 | 李德仁 | 吴庆鸣 |
| 何克清 | 杨弘远 | 陈 化 | 卓仁禧 |
| 易 帆 | 周云峰 | 周创兵 | 庞代文 |
| 谈广鸣 | 蒋昌忠 | 樊明文 |     |

武汉大学学术丛书  
社会科学类编审委员会

- 主任委员 ▶ 顾海良
- 副主任委员 ▶ 胡德坤 黄 进 周茂荣
- 委员 ▶ (以姓氏笔画为序)
- |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 丁俊萍 | 马费成 | 邓大松 | 冯天瑜 |
| 江建勤 | 汪信砚 | 陈广胜 | 陈传夫 |
| 尚永亮 | 罗以澄 | 罗国祥 | 周茂荣 |
| 於可训 | 胡德坤 | 郭齐勇 | 顾海良 |
| 黄 进 | 曾令良 | 谭力文 |     |
- 秘书长 ▶ 江建勤



**冯文灏** 武汉大学遥感信息工程学院教授、博士生导师。原籍浙江省绍兴市，1937年2月17日生于天津市。1955年至1956年在北京俄语学院留苏预备部学习。1960年毕业于前苏联莫斯科测绘学院航空摄影测量系。1991年4月至10月作为高级访问学者出访美国俄亥俄州立大学，其间讲学并受聘担任该校测量系生物医学摄影测量顾问。1996年7月至9月应邀访问俄罗斯新西伯利亚测绘研究院讲学。1986年和1995年作为国家代表团成员出访加拿大和俄罗斯。1982年起至今，先后在英国、加拿大、美国、奥地利和日本等国参加国际学术会议。现任全国特种精密工程测量中心理事和多所院校的客座教授。1984~1996年曾任中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会近景摄影测量与计算机视觉组组长，1996~2000年曾任国际摄影测量与遥感学会近景摄影测量技术和机器视觉委员会世界文化遗产工作组副组长。专长于“近景摄影测量”和“工业测量”方面的教学与研究工作，在国内外发表论文110余篇，其中12篇为“三大检索”摘录，另有著作四部。

主要学术贡献是：提出了成像系统通用数字畸变模型的理论与应用；提出了三旋转自由度扫描传感器的数学模型，以用于任何姿态工业目标的结构光工业测量和传感器的设计；提出了立体视觉系统检校中引入约束条件的基本理论，改善了标定精度；提出了近景摄影测量与工业摄影测量限差的特殊性理论；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；提出了构建积木式“三维工业测量系统”的理论与方法；提出了近景框幅影像纠正点数量的理论与应用和提出了相机内方位元素检定精度要求的理论关系式。主持的项目多次荣获部委和省级奖励，近年的有：“基于激光经纬仪的工程剖面测量方法研究”获1999年国家测绘局颁发的测绘科技进步二等奖；“大型物体外形的结构光工业测量”获2000年湖北省人民政府颁发的科技进步一等奖；“基于测角仪器的联机工业测量的系统性研究与应用”获2003年中国测绘学会颁发的测绘科技进步二等奖。



- 中国当代哲学问题探索
- 中国辩证法史稿(第一卷)
- 德国古典哲学逻辑进程(修订版)
- 毛泽东哲学分支学科研究
- 哲学研究方法论
- 改革开放的社会学研究
- 邓小平哲学研究
- 社会认识方法论
- 康德黑格尔哲学研究
- 人文社会科学哲学
- 中国共产党解放和发展生产力思想研究
- 思想政治教育有效性研究
- 政治文明论
- 中国现代价值观的初生历程
- 精神动力论
- 广义政治论
- 中西文化分野的历史反思
- 国际经济法概论
- 国际私法
- 国际组织法
- 国际条约法
- 国际强行法与国际公共政策
- 比较外资法
- 比较民法学
- 犯罪通论
- 刑罚通论
- 中国刑事政策学
- 中国冲突法研究
- 中国与国际私法统一化进程(修订版)
- 比较宪法学
- 人民代表大会制度的理论与实践
- 国际民商新秩序的理论建构
- 中国涉外经济法律问题新探
- 良法论
- 国际私法(冲突法篇)(修订版)
- 比较刑法原理
- 担保物权法比较研究
- 当代西方经济学说(上、下)
- 唐代人口问题研究
- 非农化及城镇化理论与实践
- 马克思经济学手稿研究
- 西方利润理论研究
- 西方经济发展思想史
- 宏观市场营销研究
- 经济运行机制与宏观调控体系
- 三峡工程移民与库区发展研究
- 21世纪长江三峡库区的协调与可持续发展
- 经济全球化条件下的世界金融危机研究
- 中国跨世纪的改革与发展
- 中国特色的社会保障道路探索
- 发展经济学的新发展
- 跨国公司海外直接投资研究
- 利益冲突与制度变迁
- 市场营销审计研究
- 以人为本的企业文化



- 中日战争史  
中苏外交关系研究(1931~1945)  
汗简注释  
国民军史  
中国俸禄制度史  
斯坦因所获吐鲁番文书研究  
敦煌吐鲁番文书初探(二编)  
十五十六世纪东西方历史初学集(续编)  
清代军费研究  
魏晋南北朝隋唐史三论  
湖北考古发现与研究  
德国资本主义发展史  
法国文明史  
李鸿章思想体系研究  
唐长孺社会文化史论丛  
殷墟文化研究  
战时美国大战略与中国抗日战场(1941~1945年)  
古代荆楚地理新探·续集  
汉水中下游河道变迁与堤防
- 随机分析学基础  
流形的拓扑学  
环论  
近代鞅论  
鞅与Banach空间几何学  
现代偏微分方程引论  
算子函数论  
随机分形引论  
随机过程论  
平面弹性复变方法(第二版)  
光纤孤子理论基础  
Banach空间结构理论  
电磁波传播原理  
计算固体物理学  
电磁理论中的并矢格林函数  
穆斯堡尔效应与晶格动力学  
植物进化生物学  
广义遗传学的探索  
水稻雄性不育生物学  
植物逆境细胞及生理学  
输卵管生殖生理与临床  
Agent和多Agent系统的设计与应用  
因特网信息资源深层开发与利用研究  
并行计算机程序设计导论  
并行分布计算中的调度算法理论与设计  
水文非线性系统理论与方法  
拱坝CADC的理论与实践  
河流水沙灾害及其防治  
地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定  
碾压混凝土材料、结构与性能  
喷射技术理论及应用  
Dirichlet级数与随机Dirichlet级数的值分布  
地下水的可视化研究  
病毒分子生态学  
解析函数边值问题(第二版)
- 文言小说高峰的回归  
文坛是非辨  
评康殷文字学  
中国戏曲文化概论(修订版)  
法国小说论  
宋代女性文学  
《古尊宿语要》代词助词研究  
社会主义文艺学  
文言小学审美发展史  
海外汉学研究  
《文心雕龙》义疏  
选择·接受·转化  
中国早期文化意识的嬗变(第一卷)  
中国早期文化意识的嬗变(第二卷)  
中国文学流派意识的发生和发展  
汉语语义结构研究
- 中国印刷术的起源  
现代情报学理论  
信息经济学  
中国古籍编撰史  
大众媒介的政治社会化功能  
现代信息管理机制研究
- 工业测量

## 序 言

工业测量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、产品质量控制、产品运动状态,提供测量技术支持的一门学科。测量内容以产品的几何尺寸为主,但也涉及色彩、温度、速度与加速度及其他物理量。测量环境大多在室内,即在工厂车间或科研实验室中,还常伴有高精度和高频率的要求。当然室外工业目标的测量工作也是不容忽视的重要方面。

现代工业技术的快速发展为工业测量提供了众多的测量技术与手段;同样地,现代工业技术的快速发展,也需要工业测量技术的支撑。工业测量是现代工业生产不可缺少的重要生产环节。

伴随工业的发展,可选择的工业测量的手段或仪器设备名目繁多,如一、二、三维的机械型量测工具或设备,各种专用的基于光机电技术的一维传感器,基于测角的各类仪器设备,基于测距的各类光电测距仪器设备,基于各种固态摄像机的摄像设备和摄影测量系统,各种专用的一、二、三维工业摄影测量系统,光学显微摄像测量系统,电子显微摄像测量系统,基于高速影像的一、二、三维摄影测量系统,基于莫尔条纹的工业测量系统,基于光波干涉原理的测量系统,基于磁力场的三维量测系统,基于结构光的工业测量或工业摄像测量系统, Motography 自动测量技术,乃至用于空抛物体运动轨迹测定的全球定位系统。

工业测量的一个重要领域是现代工业生产流水线和传送带上工业产品的高速检测。所应用的仪器设备包括各类光电传感器(Photoelectric Sensors)、安全操作面积传感器(Area Sensors)、接触性传感器(Proximity Sensors)、压力传感器(Pressure Sensors)、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controllers)、计数器、计时器、控制设备(Control Unit)、条形码读取器(Bar Code Readers)、大量实用的二维视觉系统(Vision Systems)、静电清除系统(Static Elimination System)、各类精密的位移传感器(Displacement Sensors)、透过式量测传感器(Thumbeam Measurement Sensors)、模拟传感器(Analog Sensor)、视频显微镜(Video Microscopes)等。为适应流水线传送带上的大批量产品生产速度,这些仪器设备,大多具有轻巧、高精度与高速度三个特点。以 LK-081 型位移传感器为例,重量为 385g,作业距离为(65~95)mm,分辨率为 $\pm 3\mu\text{m}$ ,取样周期为 $1024\mu\text{s}$ ,可用于检测精密伺服马达转轴的摆动,用于检测集成电路板芯片涂层的厚度等。

工业目标可按目标尺寸、精度要求、目标表面质地、测量速度(如周期、频率)要求、目标所处环境、目标运动状态等多项指标实施分类。例如,为检测工业流水线上芯片松香的涂布质量,该目标大体属于(1~50)mm 间尺寸,精度要求为数十个 $\mu\text{m}$ 量级,是金属表面有纹理且易摄像,测量频率约为 10Hz,目标处于车间内良好环境,目标处于低速运动状态。又如,为检测精密伺服马达转轴的摆动量,则可知此目标属于(1~50)mm 尺寸,精度要求在数个 $\mu\text{m}$ ,全金属表面有亮泽,测量频率达到数 kHz,目标处于车间内良好环境,目标处于高速运



动状态。再如,当检测轿车外壳形状时,可知该目标属 1~10m 尺寸,精度要求为  $\pm 0.1\text{mm}$ ,测量频率要求不高,金属表面,测量频率要求较高,目标处于车间内相对静止的良好环境。伴随工业水平的发展,现代工业大生产和现代科研过程提出了种种越来越高的工业测量技术要求。

工业目标品种繁多,现列举几个工作方面。在大型工业目标方面:飞机及其部件的外形测量,应用于设计、仿制、改型;航天飞机测量,应用于设计、安装、调试、发射与回收过程中名目繁多的测量、检测与放样任务;轿车外形测量,应用于轿车外壳的设计、仿制或改型中所需的测量工作;船体测量,涉及船体的设计、改造、仿制、船模运动状态、油船舱体容积的测定、大型船舰推进器叶片的外形测定以及舰船主设备的安装;而“封闭构筑物”的测量,则包括如铁路或公路隧道、城市地下铁道、海底或水下隧道、矿山大型巷道和采空区、各类地下军事工程、地下防空工程、舰艇洞库、飞机洞库、油库与弹药库、水电站的排水泄水洞、排沙洞和坝内结构、大型管道、窟室及亭台楼阁的内结构、各类运输车船的内结构、装载油气化学品的仓体罐体等。

在工业生产流水线(传送带)上的产品快速检测方面,可用于高速检测光纤的直径、芯片导体部分的厚度与斑痕、光盘的厚度、不平整度与直径、标识符的印刷质量、防伪标志的遗漏、药片尺寸一致性、砂片宽度与厚度、卷烟松紧度、人造大理石色彩一致性、玻璃平整度、精密轴承加工质量等,使工业测量成为生产必需的环节。

在动态目标的工业测量方面,可用于轿车的破坏性试验、新型飞机起飞着陆运动状态测定、空抛物体运动轨迹、火箭发射状态、舰船模型运动轨迹、发动机运动、精密机床热变形、风动试验目标姿态、土石方爆炸三维记录、炮弹出膛速度、两飞船间“接轨”过程控制等。

常规工程测量与工业测量的显著区别是:常规工程测量是以土木工程等露天目标的空间坐标和其他几何尺寸为主要测量目的,以常规测角测距仪器和 GPS 全球定位系统为主要设备,是点位绝对精度较低和测量频率不高,作业距离较长,目标物尺寸较大的测量分支学科。而工业测量主要以车间或实验室内的模型、工业产品或其零部件的几何量或其他物理量(如色彩等)为测量目的,采用十余类测量理论、方法和设备,是几何点位精度高、作业距离较短,目标几何尺寸较小,测量频率较高的测量分支学科。

本著作包括静态与动态工业目标测量的诸多方面,涉及工业测量的多种手段,涵盖测量理论、方法与工艺的众多方面。重点着眼于非接触性测量手段的本书,可应用于工业测量的教育、生产与科研,可为测绘各专业师生使用,可供各领域工业生产的科研与生产人员参考。

本书涵盖了我們独创的一些理论与方法,如三旋转自由度激光经纬仪的扫描数学模型及其应用、工业测量方法的分类与其选用基本原则、积木式三维工业测量系统的建立、车间内精密联机工业控制网的建立、批量大型工业部件检测与放样的原理与方法、数字畸变模型的建立、基于数码相机的孔群定位与数控钻孔、工业摄影测量限差的特殊性、基于共线条件方程式的误差方程式的一般式、数字纠正最低控制点数量的新理论以及工业测量传感器的集成技术等。本书中,对重要专业术语的定义使用了黑体字,以提请注意。

深深地感谢王之卓教授的谆谆教诲。感谢四十余年来和我共事的同仁们的帮助,也感谢宁津生教授、刘葆樑教授、陈适教授、黄世德教授、崔炳光教授、孙护教授、张祖勋教授、陶本藻教授、朱宜萱教授、王升定教授、李毅总工程师等对我的鼓励与帮助。本书中,引用了国外的一些设备插图,在此也一并表示谢意。

工业测量实际上是一门十分古老而又发展迅速的技术学科。由于作者水平有限,无力将各种技术和各位专家的研究成果一一列于初次撰写的本书中,加之国内外无类似著作参考,本书中可能有纰漏乃至错误之处,恳请读者批评指正。

冯文灏  
2004年5月

序 言	1
<b>第一章 工业测量方法及其选用的基本原则</b>	<b>1</b>
§ 1-1 工业目标的多样性	1
§ 1-2 工业测量方法	2
§ 1-3 选用工业测量方法的基本原则	6
<b>第二章 基于测角仪器的工业测量</b>	<b>9</b>
§ 2-1 工业测量中双测角装置间起始方向线的定向方法	9
§ 2-2 标准尺在工业测量中的应用	13
§ 2-3 积木式三维工业测量系统	18
§ 2-4 用于工业部件放样与检测的特高精度工业测量三维控制网的建立	24
§ 2-5 大型工业部件检测与放样的原理与方法	29
§ 2-6 批量大型钢结构工业部件的高精度检测与放样系统	37
§ 2-7 基于铅垂基线的工业测量理论与方法	40
§ 2-8 基于 TM5100A 的工业测量系统	45
<b>第三章 结构光工业测量</b>	<b>47</b>
§ 3-1 概述	47
§ 3-2 三旋转自由度激光经纬仪的扫描数学模型	51
§ 3-3 基于三旋转自由度激光经纬仪的结构光工业测量的原理与应用	57
§ 3-4 TSS-1 型隧道工程测量系统	66
§ 3-5 结构光摄影测量在峒体工程中的应用	74
§ 3-6 几种结构光工业测量系统的实例和构想	78
<b>第四章 激光扫描系统及其应用</b>	<b>80</b>
§ 4-1 概述	80
§ 4-2 手持激光测距仪	82
§ 4-3 SMART 310 型三维激光跟踪系统	83
§ 4-4 API Tracker II 型激光跟踪仪	85
§ 4-5 Cyrax 2500 型三维激光扫描仪	87

§ 4-6	SICK 公司 LMS 型系列二维激光扫描仪	89
§ 4-7	VIVID 900 型及 910 型三维激光扫描仪	93
§ 4-8	LMS-Q140i-60/80 型激光镜面扫描仪	95
§ 4-9	ILRIS-3D 型激光雷达成像系统	99
§ 4-10	一种基于无反射镜测距仪的测量系统及其应用	101
§ 4-11	WB4 型全身彩色三维扫描仪	105
§ 4-12	激光扫描系统的应用实例	105
<b>第五章 工业摄影测量</b>		
§ 5-1	概述	113
§ 5-2	工业摄影测量的摄影设备	113
§ 5-3	工业摄影测量的摄像设备	120
§ 5-4	工业摄影测量的摄影技术	144
§ 5-5	工业摄影测量的控制	161
§ 5-6	工业摄影测量解析处理方法	166
§ 5-7	直接线性变换解法	183
§ 5-8	用于缺乏纹理目标的数字近景摄影测量系统	192
§ 5-9	近景摄影测量用于直接生成塑像施工图纸	197
§ 5-10	基于数码相机的孔群定位与数控钻孔	204
§ 5-11	工业摄影测量限差的特殊性	213
§ 5-12	普通照相机用于深水码头橡胶护舷变形测量	219
§ 5-13	数字相机的数字畸变模型	222
§ 5-14	摄影机检校的一般概念	230
§ 5-15	摄影机的光学畸变差	234
§ 5-16	基于空间后方交会的摄影机检校	239
§ 5-17	基于直接线性变换的摄影机检校	242
§ 5-18	检校光学畸变差的解析铅垂线法	242
§ 5-19	引入约束条件的立体视觉系统的检校	243
§ 5-20	基于平行线相对控制的空间后方交会解法	248
§ 5-21	ATOS 系列的三维数字化器	253
<b>第六章 现代工业传感器</b>		
§ 6-1	位移传感器概述	257
§ 6-2	EX-VO1 型感应类位移传感器	261
§ 6-3	LK 系列 CCD 激光位移传感器	261
§ 6-4	LC 系列超高精度激光位移测量仪	263
§ 6-5	UD-300 系列超声波位移传感器	265
§ 6-6	近接传感器	267
§ 6-7	光电传感器	268

§ 6-8	光纤光电传感器	269
§ 6-9	工业用影像处理系统概要	270
§ 6-10	透光式量测器	271
§ 6-11	PJ-S 系列区域传感器	272
§ 6-12	压强传感器	272
§ 6-13	色彩视觉检测系统	273
§ 6-14	条形码读取传感器	275
§ 6-15	计时器	277
<b>第七章 高速影像的摄影测量处理</b>		<b>279</b>
§ 7-1	概述	279
§ 7-2	高速摄影机与高速摄像机概述	282
§ 7-3	高速摄像机	284
§ 7-4	Mega Plus ES:310/T 型高速摄像机	285
§ 7-5	特高速摄像机	286
§ 7-6	Mega Plus ES 4.0 型亚高速摄像机	287
§ 7-7	Mega Plus:1.4i 型亚高速摄像机	289
§ 7-8	Mega Plus:16.8I 型摄像机	289
§ 7-9	Motion Scope PCI 系列高速摄像机	290
§ 7-10	Motion Meter 型高速摄像机	290
§ 7-11	Cordin Model 220-8 型高速摄像机	291
§ 7-12	高速影像的摄影测量处理	292
<b>第八章 电子显微镜影像的摄影测量处理</b>		<b>294</b>
§ 8-1	概述	294
§ 8-2	电子显微镜一般结构	295
§ 8-3	电子显微镜像片解析	300
§ 8-4	电子显微摄影测量的精度	306
<b>第九章 莫尔条纹测量</b>		<b>311</b>
§ 9-1	概述	311
§ 9-2	面内莫尔条纹法测量原理	312
§ 9-3	基于光强呈矩形分布光栅的面外莫尔条纹法原理	319
§ 9-4	光强呈正弦分布光栅的面外莫尔条纹原理	325
§ 9-5	基于光强呈任意周期分布光栅时的莫尔条纹法原理	327
§ 9-6	莫尔条纹生成方法分类	329

<b>第十章 工业测量传感器的集成技术</b> .....	332
§ 10-1 传感器的集成技术概述 .....	332
§ 10-2 现代工业几何形态传感器 .....	332
§ 10-3 现有及待研制的传感器集成系统 .....	334
§ 10-4 传感器集成系统的技术支撑 .....	335
§ 10-5 基于数字相机和低空飞行器的特大比例尺厂区影像图的制作 .....	336
§ 10-6 机床长度和直线运动的几种检测系统 .....	338
§ 10-7 检查机械转动轴偏心的测量系统 .....	339
§ 10-8 液面高度自动测量系统 .....	341
§ 10-9 液体罐仓容积测量系统 .....	342
§ 10-10 检验机器人工作正确性的测量系统 .....	342
§ 10-11 基于激光结构光的自动测绘系统 .....	344
§ 10-12 显微细貌自动测绘系统 .....	345
§ 10-13 船载矿石量的数字摄影测量系统 .....	346
§ 10-14 基于光学显微镜的简易三维测量系统 .....	348
§ 10-15 空抛物体运动状态测定系统 .....	349
§ 10-16 摄像经纬仪的构成 .....	350
§ 10-17 基于二维激光扫描仪和电子经纬仪的三维激光扫描系统的构成 .....	351
§ 10-18 电子显微镜影像的三维处理系统 .....	352
§ 10-19 X射线影像的三维处理系统 .....	353
§ 10-20 交通事故快速记录系统 .....	353
§ 10-21 犯罪现场的数字摄影测量记录系统 .....	355

<b>参考文献</b> .....	357
-------------------	-----

.....	1-8
.....	2-8
.....	3-8
.....	4-8
.....	5-8
.....	6-8
.....	7-8
.....	8-8
.....	9-8
.....	10-8
.....	11-8
.....	12-8
.....	13-8
.....	14-8
.....	15-8
.....	16-8
.....	17-8
.....	18-8
.....	19-8
.....	20-8

# 第一章 工业测量方法及其选用的基本原则

## § 1-1 工业目标的多样性

### 一、工业目标

工业测量目标繁多,可涉及工业生产与科研的众多领域。

在大型工业目标方面包括:飞机外形测量,用于设计、仿制、改型;航天飞机设计、安装、调试过程中名目繁多的测量、检测与放样任务;轿车生产中的外壳的设计、仿制或改型中所需的测量工作;船体外形测量,涉及船体的设计、改造与仿制工作,油船舱体容积的测定,船模在试验池内的性能检测,赛艇外形的设计与仿制,风帆外形动态性能测试,大型舰船推进器叶片的外形测定,舰船主设备的安装,船体靠泊时对码头总压力的间接测定等;封闭构筑物测量,即大量人工构筑物内结构测量,如铁路或公路隧道、城市地下铁道、海底或水下隧道、矿山大型巷道和采空区、各类地下军事工程、地下防空工程、舰艇洞库、飞机洞库、油库与弹药库、水电站的排水泄水洞、排沙洞和坝内结构、大型管道、窟室及亭台楼阁的内结构、各类运输车船的内结构、装载油气化学品的仓体罐体等;风洞试验室与水工试验室中运动目标的动力学参数测定等。

在工业生产流水线(传送带)上的产品快速检测方面,可用于高速检测光纤的直径、芯片导体部分的厚度与斑痕、光盘的厚度、不平整度与直径、标识符的印刷质量、防伪标志的遗漏、药片尺寸一致性,矽片宽度与厚度、卷烟松紧度、人造大理石色彩一致性、玻璃平整度、精密轴承加工质量等,使工业测量成为生产必需的环节。

在动态目标的工业测量方面,可用于轿车的破坏性试验、新型飞机起飞着陆运动状态测定、空抛物体运动轨迹、火箭发射状态、舰船模型运动轨迹、发动机运动、精密机床热变形、风动试验目标姿态、土石方爆炸三维记录、炮弹出膛速度、两飞船间“接轨”过程控制等。

### 二、目标尺寸

工业测量中各类目标的尺寸差别悬殊,目标尺寸的不同直接关系到工业测量方法的选择。对工业目标尺寸的区分,可能有不同见解,这里,暂且粗略地把工业目标的尺寸分为小于1mm,1mm~50mm,50mm~1m,1m~10m,以及大于10m共5个等次。

### 三、目标的测量精度要求

不同的精度要求显然与测量手段的选择有关,也与该测量手段对应的设备、技术力量与经济投入有关。这里,暂且把精度要求分为nm级、 $\mu\text{m}$ 级、亚亚mm级、亚mm级、mm级5

个级别。这 5 个级别涵盖了绝大多数工业目标的测量精度要求。

#### 四、目标的(表面)质地与形状

相当数量的工业目标的表面缺乏纹理(包括缺少特征点),色调近乎一致,有金属似的光泽表现、玻璃似的透明及复杂表面结构所产生的观测死角等,直接影响测量手段的选择。

#### 五、目标的测量速度要求

根据目标测量速度要求,可在数天、数小时、数分钟、数秒内,实时地(1/30s~1/25s内)提供测量成果以至更高速地提供测量成果,测量速度与测量手段的选择有极其密切的关系。

#### 六、目标所处环境

目标所处环境的优劣直接影响测量手段的选择。这些环境条件包括测量设备与目标间的距离、测量死角、目标的可见度、照明可能性、是否有震动和噪声、是否处在运动状态、是否是双介质或多介质摄影摄像以及目标是否处在高温、高压或有毒的环境等。

#### 七、目标自身状态

目标处于静止或运动状态,与测量手段的选择密切相关。处于一维、二维或三维运动状态的目标,测量手段也不同。动态目标测量可能涉及测量工具的工作频率、同步技术与计时技术。

### § 1-2 工业测量方法

工业测量方法与手段众多,现简述如下。

#### 一、基于机械量测工具或设备的方法

##### 1. 长度量具

大量的机械式金属制量具,包括各类钢尺、因瓦尺、百分表、千分表、卡规、游标卡尺和高精度卡尺、配置机械表盘或数显的卡尺、探片等,可用于长度、高度、深度、缝隙和内外径的测量。卡尺一般长度为数 cm、数十 cm,也有近 2m 者,它们的分辨率可达  $\pm 0.02\text{mm}$ ,  $\pm 0.05\text{mm}$ ,甚至  $\pm 1\mu\text{m}$ ,但行程有限。综合其他技术合理地使用它们,可达到意想不到的效果。数十米长的钢质卷尺,经检定并施以标准拉力时精度可达  $\pm 0.5\text{mm}$ 。

##### 2. 机械型二维量测设备

带坐标读数的二维量测或绘图设备,如工厂里的某类机床,测绘单位使用的绘图仪、绘图桌,某些密度足够的标准格网等,尺寸大小与分辨率不一。高质量者,面积可达到  $1\text{m}^2$  或更大,坐标分辨率达  $\pm 0.1\text{mm}$ ,有数字显示并联机作业。合理地配备第三维的量测装置,可用于小型工作部件少量点位的三维坐标量测。使用这类设备时,应注意设备垂直度与分划的检校。

##### 3. 机械型三维坐标量测设备

此类设备的核心部分是能在 3 个坐标轴(导轨)方向运动并记载三维坐标的量测头。



CHN2015 型联机坐标量测机,量测范围为  $3000\text{mm} \times 4000\text{mm} \times 5000\text{mm}$ ,分辨率为  $\pm 1.0\mu\text{m}$ ,实际精度与被测长度  $L$  有关,即  $\pm (40 + 50L/1000)\mu\text{m}$ 。此类设备精度高,其原理直观简易,可与计算机联机,后续处理方法大多规范,但设备昂贵,仅用于测量小于它的静态物体,测量速度有限,费用也较高。实际上,科研机构或企业里一些具有三维运动和相应记录的(机床)设备,也可在添加光学显微装置后,作为三维坐标的量测设备。

## 二、基于各类专用一维传感器的方法

众多工厂和科研机构有各种机械的、电子的传感器,但绝大多数仅具有一维测量功能。这类传感器种类繁多且自动化程度很高,一般仅适用于某行业、某流程的某个工序,例如油面或水面高度的实时传感器等。

## 三、光学显微三维测量方法

基于光学显微镜的有限清晰距离原理,在给显微镜附加某种高程读数附件后,光学显微镜具备三维测量功能。高程读数附件可以是普通的千分表,也可以是联机的光栅尺。使用千分表,对一长度为  $4\text{mm}$  的精密工业部件测量时,高程精度可达  $\pm 0.03\text{mm}$ 。

利用光学显微镜的摄像设备(如普通摄像机或联机的 CCD),移动标本台上的被测目标,获取目标物放大后的立体影像,通过显微摄影测量处理,得到微观目标的数字表面模型。普通光学显微摄影测量的放大倍数一般为数百倍,极限精度是可见光波的波长,目标大小一般为  $\text{mm}$  级。

## 四、电子显微三维摄影测量方法

利用高速运动的电子束代替光波,电子显微镜,因其波长仅为可见光波波长的十万分之一,故分辨率可达  $5 \times 10^{-9}\text{mm}$ 。电子显微三维摄影测量可应用于金属物理学、高分子化学等领域,用于矿石、金属表面、细胞、花粉乃至病毒和单个分子的三维测量。通过旋转样本平台,可摄得放大数十万倍以至更大倍数的交向摄影立体像对,进而得到被摄超微目标的真三维模型。因成像原理的不同,电子显微镜有多种类型,如透射电子显微镜 TEM,放大倍数 50 万以上,分辨率不低于  $0.3\text{nm}$ ;扫描电子显微镜 SEM,放大倍数 20 万以上,分辨率不低于  $3.0\text{nm}$ 。

## 五、基于莫尔条纹和牛顿环的方法

基于莫尔条纹(Moiré)的方法特别适用于动态对象的快速的连续记录,例如动物体表的形状变化、机床震动记录以及音响设计中喇叭膜的震动记录等。投影法莫尔条纹的生成更为自由,适应性更强。但是,此方法仅适应表面起伏不明显的平缓目标,而且对被测物表面色调的一致性有较高的要求。莫尔条纹的精度与光栅间距有关。

牛顿环是一种干涉条纹,常用于检验光学元件的表面加工质量。当以单色光源垂直照射光学元件和衬托它的平面玻璃时,则在其中间的空气薄层上形成以接触点为中心的中央稀疏、边缘稠密的圆环条纹——牛顿环。以显微镜量测此圆环条纹的间距后,依据相当简明的关系式,可以计算出元件不同部位的加工精度,精确到  $0.01\mu\text{m}$ 。牛顿环法精度高,设备简易,但仅适用于纵深不大的光学元件加工质量的检测。