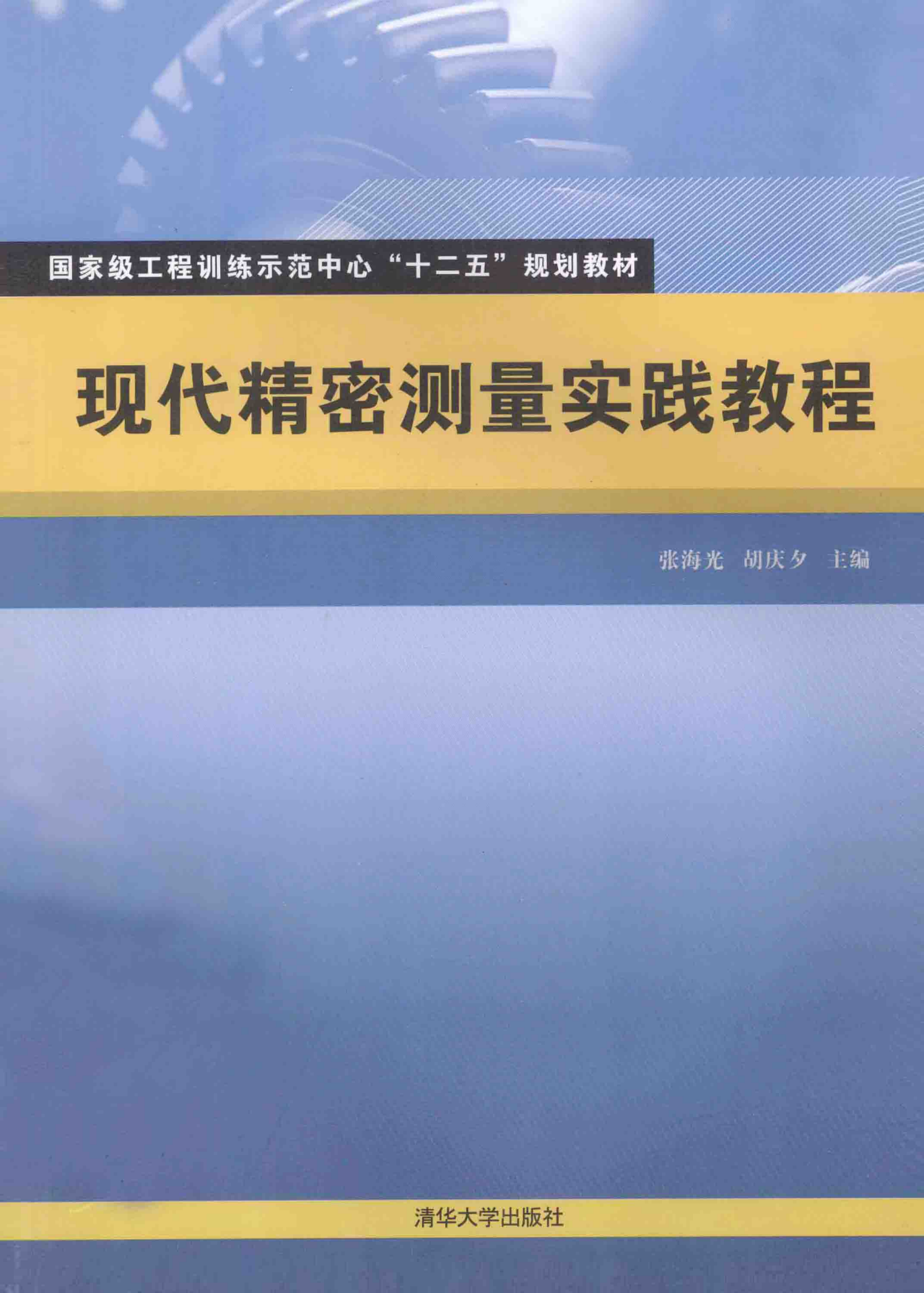




国家级工程训练示范中心“十二五”规划教材

现代精密测量实践教程

张海光 胡庆夕 主编

清华大学出版社

国家级工程训练示范中心“十二五”规划教材

现代精密测量实践教程

张海光 胡庆夕 主编

清华大学出版社

内 容 简 介

本教材简要总结了现代精密测量技术的基本原理、种类、特点和应用,根据测量对象分别介绍了尺寸、形位误差、表面粗糙度、校准、螺纹及齿轮、硬度、逆向等测量,并结合测量对象及测量案例详细介绍了常见现代精密测量仪器的结构、工作原理、测量步骤及数据处理方法和手段。本教材汇集了近几年工程应用的经验,以实用为宗旨,强调系统性、层次性、实例丰富性、项目多样性,突出理论教学与工程实践一体化,注重人才工程应用能力和理论素质的综合培养。

本书是为高等学校、专科学校及职业学校的机械工程、工业工程、工业设计、测量技术等相关专业学生,以及从事质量检验的企业人员等编写的实践教材,同时可供其他专业的人员借鉴。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

现代精密测量实践教程/张海光,胡庆夕主编.--北京:清华大学出版社,2014

国家级工程训练示范中心“十二五”规划教材

ISBN 978-7-302-37123-6

I. ①现… II. ①张… ②胡… III. ①精密测试—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 146077 号

责任编辑:庄红权

封面设计:何凤霞

责任校对:赵丽敏

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.75 字 数:358 千字

版 次:2014 年 10 月第 1 版 印 次:2014 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:32.00 元

产品编号:051175-01

国家级工程训练示范中心“十二五”规划教材

编审委员会

顾问

傅水根

主任

梁延德 孙康宁

委员(以姓氏首字母为序)

陈君若 贾建援 李双寿 刘胜青 刘舜尧

邢忠文 严绍华 杨玉虎 朱华炳 张远明

秘书

庄红权

序 言



PREFACE

自国家的“十五”规划开始,我国高等学校的教材建设就出现了生机蓬勃的局面,工程训练领域也是如此。面对高等学校高素质、复合型和创新型的人才培养目标,工程训练领域的教材建设需要在体系、内涵以及教学方法上深化改革。

以上情况的出现,是在国家相应政策的主导下,源于两个方面的努力:一是教师在教学过程中,深深感到教材建设对人才培养的重要性和必要性,以及教材深化改革的客观可能性;二是出版界对工程训练类教材建设的积极配合。在国家“十五”期间,工程训练领域有 5 部教材列入国家级教材建设规划;在国家“十一五”期间,约有 60 部教材列入国家级“十一五”教材建设规划。此外,还有更多的尚未列入国家规划的教材已正式出版。对于国家“十二五”规划,我国工程训练领域的同仁,对教材建设有着更多的追求与期盼。

随着世界银行贷款高等教育发展项目的实施,自 1997 年开始,在我国重点高校建设 11 个工程训练中心的项目得到了很好的落实,从而使我国的工程实践教学有机会大步跳出金工实习的原有圈子。训练中心的实践教学资源逐渐由原来热加工的铸造、锻压、焊接和冷加工的车、铣、刨、磨、钳等常规机械制造资源,逐步向具有丰富优质实践教学资源的现代工业培训的方向发展。全国同仁紧紧抓住这百年难得的机遇,经过 10 多年的不懈努力,终于使我国工程实践教学基地的建设取得了突破性进展。在 2006—2009 年期间,国家在工程训练领域共评选出 33 个国家级工程训练示范中心或建设单位,以及一大批省市级工程训练示范中心,这不仅标志着我国工程训练中心的发展水平,也反映出教育部对我国工程实践教学的创造性成果给予了充分肯定。

经过多年的改革与发展,以国家级工程训练示范中心为代表的我国工程实践教学发生了以下 10 个方面的重要进展:

(1) 课程教学目标和工程实践教学理念发生重大转变。在课程教学目标方面,将金工实习阶段的课程教学目标“学习工艺知识,提高动手能力,转变思想作风”转变为“学习工艺知识,增强工程实践能力,提高综合素质,培养创新精神和创新能力”;凝练出“以学生为主体,教师为主导,实验技术人员和实习指导人员为主力,理工与人文社会学科相贯通,知识、素质和能力协调发展,着重培养学生的工程实践能力、综合素质和创新意识”的工程实践教学理念。

(2) 将机械和电子领域常规的工艺实习转变为在大工程背景下,包括机械、电子、计算机、控制、环境和管理等综合性训练的现代工程实践教学。

(3) 将以单机为主体的常规技术训练转变为部分实现局域网络条件下,拥有先进铸造技术、先进焊接技术和先进钣金成形技术,以及数控加工技术、特种加工技术、快速原型技术和柔性制造技术等先进制造技术为一体的集成技术训练。

(4) 将学习技术技能和转变思想作风为主体的训练模式转变为集知识、素质、能力和创

新实践为一体的综合训练模式,并进而实现模块式的选课方案,创新实践教学在工程实践教学中学中逐步形成独有的体系和规模,并发展出得到广泛认可的全国工程训练综合能力竞赛。

(5) 将基本面向理工类学生转变为除理工外,同时面向经济管理、工业工程、工艺美术、医学、建筑、新闻、外语、商学等尽可能多学科的学生。使工程实践教学成为理工与人文社会学科交叉与融合的重要结合点,使众多的人文社会学科的学生增强了工程技术素养,不仅成为我国高校工程实践教学改革的重要方向,并开始纳入我国高校通识教育和素质教育的范畴,使愈来愈多的学生受益。

(6) 将面向低年级学生的工程训练转变为本科4年不断线的工程训练和研究训练,开始发展针对本科毕业设计,乃至硕士研究生、博士研究生的高层人才培养,为将基础性的工程训练向高层发展奠定了基础条件。

(7) 由单纯重视完成实践教学任务转变为同时重视教育教学研究和科研开发,用教学研究来提升软实力和促进实践教学改革,用科研成果的转化辅助实现实验技术与实验方法的升级。

(8) 实践教学对象由针对本校逐渐发展到立足本校、服务地区、面向全国,实现优质教学资源共享,并取得良好的教学效益和社会效益。

(9) 建立了基于校园网络的中心网站,不仅方便学生选课,有利于信息交流与动态刷新,而且实现了校际间的资源共享。

(10) 卓有成效地建立了国际国内两个层面的学术交流平台。在国际,自1985年在华南理工大学创办首届国际现代工业培训学术会议开始,规范地实现了每3年举办一届。在国内,自1996年开始,由教育部工程材料及机械制造基础课指组牵头的学术扩大会议(邀请各大区金工研究会理事长参加)每年举办一次,全国性的学术会议每5年一次;自2007年开始,国家级实验教学示范中心联席会工程训练学科组牵头的学术会议每年两次;各省市级金工研究会牵头举办的学术会议每年一次,跨省市的金工研究会学术会议每两年一次。

丰富而优质的实践教学资源,给工程训练领域的系列课程建设带来极大的活力,而系列课程建设的成功同样积极推动着教材建设的进步伐。

面对目前工程训练领域已有的系列教材,本规划教材究竟希望达到怎样的目标?又可能具备哪些合理的内涵呢?个人认为,应尽可能将工程实践教学领域所取得的重大进展,全面反映和落实在具有下列内涵的教材建设上,以适应大面积的不同学科、不同专业的人才培养要求。

(1) 在通识教育与素质教育方面。面对少学时的工程类和人文社会学科类的学生,需要比较简明、通俗的“工程认知”或“实践认知”方面的教材,使学生在比较短时间的实践过程中,有可能完成课程教学基本要求。应该看到,学生对这类教材的要求是比较迫切的。

(2) 在创新实践教学方面。目前,我们在工程实践教学领域,已建成“面上创新、重点创新和综合创新”的分层次创新实践教学体系。虽然不同类型学校所开创的创新实践教学体系的基本思路大体相同,但其核心内涵必然会有较大的差异,这就需要通过内涵和风格各异的教材充分展现出来。

(3) 在先进技术训练方面。正如我们所看到的那样,机械制造技术中的数控加工技术、特种加工技术、快速原型技术、柔性制造技术和新型的材料成形技术,以及电子设计和工艺中的电子设计自动化技术(EDA)、表面贴装技术和自动焊接技术等已经深入到工程训练的



许多教学环节。这些处于发展中的新型机电制造技术,如何用教材的方式全面展现出来,仍然需要我们付出艰苦的努力。

(4) 在以项目为驱动的训练方面。在世界范围的工程教育领域,以项目为驱动的教学组织方法已经显示出强大的生命力,并逐渐深入到工程训练领域。但是,项目训练法是一种综合性很强的教学组织法,不仅对教师的要求高,而且对经费的要求多。如何克服项目训练中的诸多困难,将处于探索中的项目驱动教学法继续深入发展,并推广开去,使更多的学生受益,同样需要教材作为一种重要的媒介。

(5) 在全国大学生工程训练综合能力竞赛方面。2009 年和 2011 年在大连理工大学举办的两届全国大学生工程训练综合能力竞赛,开创了工程训练领域无全国性赛事的新局面。赛事所取得的一系列成功,不仅昭示了综合性工程训练在我国工程教育领域的重要性,同时也昭示了综合性工程训练所具有的创造性。从赛事的命题,直到组织校级、省市级竞赛,最后到组织全国大赛,不仅吸引了数量众多的学生,而且提升了参与赛事的众多教师的指导水平,真正实现了我们所长期企盼的教学相长。这项重要赛事,不仅使我们看到了学生的创造潜力,教师的创造潜力,而且看到了工程训练的巨大潜力。以这两届赛事为牵引,可以总结归纳出一系列有价值的东西,来推进我国的高等工程教育深化改革,来推进复合型和创造型人才的培养。

总之,只要我们主动实践、积极探索、深入研究,就会发现,可以纳入本规划教材编写视野的内容,很可能远远超出本序言所囊括的上述 5 个方面。教育部工程材料及机械制造基础课程教学指导组经过近 10 年努力,所制定的课程教学基本要求,也只能反映出我国工程实践教学的主要进展,而不能反映出全部进展。

我国工程训练中心建设所取得的创造性成果,使其成为我国高等工程教育改革不可或缺的重要组成部分。而其中的教材建设,则是将这些重要成果进一步落实到与学生学习过程紧密结合的层面。让我们共同努力,为编写出工程训练领域高质量、高水平的系列新教材而努力奋斗!

清华大学 傅水根

2011 年 6 月 26 日

前言



FOREWORD

现今工程教育的大背景是大工程、大制造,先进技术的实践教学越来越重要。随着当今科学技术的飞速发展、加工速度和精度的提高、各种成形模具和零部件精度的大幅度提高,制造也由原来的粗放型加工转变为现今的精细加工,相应的先进测量技术得到迅速发展,对应的测量设备更是广泛应用于各个制造领域。本书希望通过对学生进行先进测量实践的训练,增强学生掌握现代精密测量仪器设备的能力,巩固测量方面的理论知识,培养现代企业所需要的复合型人才。

本书结合国内高校实践教学改革经验,在机械制造基础实习教材的基础上,进一步加大改革实践教材体系的力度而编写,力求提高起点、加强创新、拓展知识面,适应宽口径机械类和近机类学生的实践教学要求,体现“实践为重、创新为魂”的理念,培养适合我国制造业紧缺的高新技术的创造性高级人才。本书涉及的实验设备均为当前广泛使用的先进测量仪器。本书使用案例和项目教学模式,其体系和内容适应当前和今后对复合型人才的需求,并将现代测量技术的教学工程化、实践化,同时强调共性规律,避免穷举式地列举教学内容,将理论教学充分融合在实践教学当中,重视工程应用教育,使得学生能够学以致用。

本书在内容、结构形式、实验项目设置等方面都体现了独特性、先进性、实用性和指导性,使之成为一本理论水平和实用价值都较高的现代测量实践教材。本书共分 11 章,主要介绍了现代精密测量技术的发展历程,介绍了尺寸、形位误差、表面粗糙度、校准、螺纹及齿轮、硬度及逆向等测量相关的概念和基本理论,并针对典型案例介绍了几种常见的现代精密测量仪器,对其仪器结构、工作原理、测量步骤及数据处理方法进行了详细描述。

本书由上海大学工程技术训练中心张海光和胡庆夕主编,参与编写的教师还有李宏、宋晨霞、何岚岚。所有编者均是长期从事测量工程实践教学的教师,具有丰富的实践教学工作经验。在本书编写过程中,上海大学方明伦教授提出了中肯的建议,并对本书进行了润色,在此致以衷心的感谢。本书参阅并引用了有关的教材、手册及相关文献,并得到瑞士 TESA 公司、苏州怡信光电科技有限公司、上海泰明光学仪器有限公司、贵阳新天光电科技有限公司、德国 Thome 公司、英国 Renishaw 公司等企业的大力支持,在此致以诚挚的谢意。

本书涉及的专业面较广,对编者的理论水平和实际经验要求较高,同时在撰写时没有可以参照的模式,难免有错误和不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2014.4 上海大学

目 录

CONTENTS

第 1 章 现代精密测量实践安全须知	1
1.1 工程训练中心安全注意事项	1
1.2 操作仪器设备安全须知	1
第 2 章 现代精密测量技术概述	3
2.1 测量技术的发展历程	3
2.2 测量技术的发展趋势	5
2.3 测量技术的基本知识	6
2.3.1 测量基本概念	6
2.3.2 测量方法分类及选择原则	7
2.3.3 测量技术的基本原则	9
2.3.4 常用计量器具	10
2.3.5 现代测量仪器的应用	12
2.4 测量误差及数据处理	13
2.4.1 测量误差	13
2.4.2 测量误差产生的主要原因	13
2.4.3 测量误差分类及特性	14
2.4.4 测量数据处理	14
2.5 思考题	16
第 3 章 高度厚度测量	17
3.1 实践目的	17
3.2 测高仪结构及工作原理	17
3.2.1 测高仪结构	17
3.2.2 测高仪基本性能指标	17
3.2.3 测高仪工作原理	19
3.3 测高仪测量方法及步骤	19
3.3.1 实践案例及分析	19



3.3.2	测高仪基本测量流程	20
3.3.3	实践案例测量方法及步骤	22
3.3.4	测量数据处理与分析	27
3.4	测高仪的维护与保养	27
3.5	测高仪使用注意事项	28
3.6	思考题	28
第4章	轴孔测量	29
4.1	实践目的	29
4.2	万能测长仪结构及工作原理	29
4.2.1	万能测长仪结构	29
4.2.2	万能测长仪基本性能指标	33
4.2.3	万能测长仪工作原理	33
4.3	万能测长仪测量方法及步骤	34
4.3.1	实践案例及分析	34
4.3.2	万能测长仪基本测量流程	36
4.3.3	塞规实践案例测量方法及步骤	37
4.3.4	光滑环规实践案例测量方法及步骤	38
4.3.5	测量数据处理与分析	40
4.4	测长仪的维护与保养	40
4.5	测长仪使用注意事项	40
4.6	思考题	41
第5章	角度及小尺寸测量	42
5.1	实践目的	42
5.2	投影仪结构及工作原理	42
5.2.1	投影仪结构	42
5.2.2	投影仪基本性能指标	44
5.2.3	投影仪工作原理	44
5.3	投影仪测量方法及步骤	44
5.3.1	实践案例及分析	44
5.3.2	投影仪基本测量流程	45
5.3.3	实践案例测量方法及步骤	46
5.3.4	测量数据处理与分析	52
5.4	投影仪的维护与保养	53
5.5	投影仪使用注意事项	53
5.6	影像仪结构及工作原理	53
5.6.1	影像仪结构	53
5.6.2	影像仪基本性能指标	53

5.6.3	影像仪工作原理	54
5.7	影像仪测量方法及步骤	54
5.7.1	实践案例及分析	54
5.7.2	影像仪基本测量流程	55
5.7.3	实践案例测量方法及步骤	58
5.7.4	测量数据处理与分析	65
5.8	影像仪的维护与保养	66
5.9	影像仪使用注意事项	66
5.10	思考题	67
第 6 章	形位误差测量	68
6.1	实践目的	68
6.2	形位误差基本概念及检测原则	68
6.2.1	形位误差基本概念	68
6.2.2	形位误差检测原则	80
6.3	三坐标测量机结构及工作原理	82
6.3.1	三坐标测量机结构	82
6.3.2	三坐标测量机基本性能指标	86
6.3.3	三坐标测量机工作原理	86
6.4	三坐标测量机测量方法及步骤	86
6.4.1	实践案例及分析	86
6.4.2	三坐标测量机基本测量流程	88
6.4.3	实践案例测量方法及步骤	89
6.4.4	测量数据处理与分析	96
6.5	三坐标测量机的维护与保养	96
6.6	三坐标测量机使用注意事项	97
6.7	思考题	98
第 7 章	表面粗糙度测量	99
7.1	实践目的	99
7.2	表面粗糙度评定参数及检验原则	99
7.2.1	表面粗糙度概念	99
7.2.2	表面粗糙度评定参数	99
7.2.3	表面粗糙度检验原则	102
7.3	表面粗糙度仪结构及工作原理	104
7.3.1	表面粗糙度仪结构	104
7.3.2	表面粗糙度仪基本性能指标	105
7.3.3	表面粗糙度仪工作原理	105
7.4	表面粗糙度仪测量方法及步骤	105

7.4.1	实践案例及分析	105
7.4.2	表面粗糙度仪基本测量流程	106
7.4.3	实践案例测量方法及步骤	106
7.4.4	测量数据处理与分析	109
7.5	表面粗糙度仪的维护与保养	109
7.6	表面粗糙度仪使用注意事项	110
7.7	思考题	110
第8章	螺紋及齒輪測量	111
8.1	实践目的	111
8.2	万能工具显微镜结构及工作原理	111
8.2.1	万能工具显微镜结构	111
8.2.2	万能工具显微镜基本性能指标	113
8.2.3	万能工具显微镜工作原理	113
8.3	万能工具显微镜基本测量流程	114
8.4	万能工具显微镜螺紋測量方法及步驟	115
8.4.1	螺紋幾何參數	115
8.4.2	普通螺紋測量方法及步驟	116
8.4.3	滾珠絲杠測量方法及步驟	120
8.5	万能工具显微镜齒輪測量方法及步驟	124
8.5.1	齒輪參數及誤差	125
8.5.2	直齒圓柱齒輪測量方法及步驟	128
8.5.3	斜齒圓柱齒輪測量方法及步驟	132
8.6	万能工具显微镜的维护与保养	135
8.7	万能工具显微镜使用注意事项	135
8.8	思考题	135
第9章	校準測量	136
9.1	实践目的	136
9.2	校准准则和常用评定参数	136
9.2.1	机床检验准则	136
9.2.2	三坐标校准准则	138
9.3	激光干涉仪结构及工作原理	138
9.3.1	激光干涉仪结构	139
9.3.2	激光干涉仪基本性能指标	140
9.3.3	激光干涉仪工作原理	141
9.4	数控铣床线性定位校准测量	142
9.4.1	线性测量原理及基本测量流程	142
9.4.2	X轴线性定位校准测量方法及步骤	144

9.5	三坐标测量机 X 轴和 Y 轴垂直度校准测量	157
9.5.1	垂直度校准测量原理及基本测量流程	157
9.5.2	垂直度校准测量方法及步骤	160
9.5.3	测量数据处理与分析	164
9.6	激光干涉仪的维护与保养	166
9.7	激光干涉仪使用注意事项	167
9.8	思考题	167
第 10 章	硬度测量	168
10.1	实践目的	168
10.2	硬度测量的基本概念及测量方法	168
10.3	显微硬度计结构及工作原理	169
10.3.1	显微硬度计结构	170
10.3.2	显微硬度计基本性能指标	172
10.3.3	显微硬度计工作原理	172
10.4	显微硬度计测量方法及步骤	172
10.4.1	实践案例及分析	172
10.4.2	显微硬度计基本测量流程	173
10.4.3	实践案例测量方法及步骤	174
10.4.4	测量数据处理与分析	178
10.5	硬度计的维护与保养	178
10.6	硬度计使用注意事项	179
10.7	思考题	179
第 11 章	逆向测量	180
11.1	实践目的	180
11.2	逆向工程概述及测量方法	180
11.2.1	逆向工程概述	180
11.2.2	逆向测量方法	182
11.3	三维数据采集系统结构及工作原理	184
11.3.1	三维数据采集系统结构	184
11.3.2	三维数据采集仪基本性能指标	186
11.3.3	三维数据采集仪工作原理	186
11.4	三维数据采集仪测量方法及步骤	187
11.4.1	实践案例及分析	187
11.4.2	三维数据采集仪基本测量流程	187
11.4.3	实践案例测量方法及步骤	195
11.4.4	点云数据处理	197
11.5	三维数据采集仪的维护与保养	201



11.6 三维数据采集仪使用注意事项	201
11.7 思考题	201
参考文献	202
附录 A 实习报告	205



现代精密测量实践安全须知

1.1 工程训练中心安全注意事项

工程训练是学校培养具有工程意识、创新意识和工程实践综合能力的高素质人才的重要实践教学环节。作为主动实践、开阔视野的重要环节,学生必须亲自动手操作各种设备和仪器来提高动手能力。为了保障学生实践操作中自身和设备安全,防范事故发生,切实有效降低和控制事故危害,要求学生进入工程训练中心后,必须遵守以下安全规则:

- (1) 禁止携带危险品进入实验室,实验室内禁止吸烟、乱扔杂物;
- (2) 初次进入工程训练场所的人员,应首先学习实验室的安全规章制度,对于不遵守实验室安全规则,明知故犯,造成人身、设备事故者,要严肃处理;
- (3) 进入工程训练场所,不能大声喧哗和打闹,不能戴耳机、听音乐及做其他与实践教学无关的事情;
- (4) 不得将食物带入工程训练场所;
- (5) 工程训练时,不得穿拖鞋、凉鞋、高跟鞋、短裤、背心、裙子等,不得戴保暖厚手套;
- (6) 出现触电或漏电情况时,应先切断电源或拔下电源插头,若来不及切断电源,可用绝缘物体挑开电线。若触电者出现休克现象,应立即进行人工呼吸,同时,拨打“120”急救电话;
- (7) 一旦发生火灾,首先切断火源或电源,尽快使用有效的灭火设施灭火;迅速从安全通道撤离,同时,拨打“119”火灾报警电话;
- (8) 电器插座板切勿接太多插头,以免超负荷引起火灾。

1.2 操作仪器设备安全须知

现代精密测量设备是学生进行工程训练必须操作的对象,操作不当会造成设备损坏甚至导致人身事故。因此,要求参加工程训练的学生务必牢记以下规定:

- (1) 在教师讲解设备操作方法时,或在设备处于待运行状态以及运行过程中,不得随意触摸设备上的任何按键,不得使用或关闭控制设备的计算机;



- (2) 设备运行时,严禁搬动、移动或振动,不得断开电源;
- (3) 操作设备时,不能用湿手接触电器;
- (4) 设备运行过程中,发现设备有异常声音或出现异味等故障时,应及时报告教师或立即停机并切断电源,严禁带故障操作和擅自处理;
- (5) 工作结束时,关掉成形系统电源,关闭计算机,最后关闭设备总电源。



现代精密测量技术概述

2.1 测量技术的发展历程

制造和测量是现代工业不可缺少的部分,尤其在这个越来越追求质量的年代,不能仅会加工产品,更要保证质量,那么如何检测产品质量就成为一项必不可少的技能。近年来,精密测量技术越来越引起企业的密切关注。在高精度加工和质量管理过程中,随着光机电一体化、系统化、集成化技术的快速发展,以及计算机、数字控制、光学影像等技术的应用,精密测量技术得到了迅速发展,相应的各种现代精密测量仪器大量涌现。

1. 古代测量技术

在古代,人类为了测量田地等就已经开始进行长度测量,最初是以手、足等作为长度的单位,但人的手、足大小不一,由于测量单位的随机性造成了测量的不准确,于是便出现了以物体作为测量单位,如公元前 2400 年出现的古埃及腕尺、中国商朝出现的象牙尺和公元 9 年制造的新莽铜卡尺等,如图 2.1 所示。

2. 长度基准

长度单位经历了多次演变后,英国在 1496 年和 1760 年分别开始采用端面和线纹的码基准尺作为长度基准;1789 年法国提出建立米制,1799 年制成阿希夫米尺,如图 2.2 所示。

3. 机械原理的测量技术

在机械制造业中最早应用的是机械原理测量技术。1631 年开始应用游标细分原理;18 世纪中叶,开始应用螺纹放大原理,常见的机械原理测量工具如图 2.3 所示。机械测长技术迄今仍是工业测量中的基本测量技术之一,且能达到很高的精确度。

4. 光学原理的测量技术

应用光学原理的测量技术也出现得较早,19 世纪末就出现了立式测长仪,20 世纪 20 年