



普通高等教育 光电信息科学与工程 规划教材

光电仪器原理与设计

◎ 主编 郝 群

GUANGDIAN YIQI YUANLI YU SHEJI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013066714

TH89
08

普通高等教育光电信息科学与工程规划教材

光电仪器原理与设计

主 编 郝 群
参 编 胡 摇 赵跃进 朱秋东
主 审 李达成



机械工业出版社



北航

C1674566

TH 89
08

本书从光电仪器总体设计出发,结合现代设计理念,系统、全面地阐述了光电仪器的基本理论和设计方法,详细介绍了仪器的主要部件和关键技术,并结合应用实例讲解了光电仪器设计的思路 and 过程。

本书分为9章,内容包括:光电仪器设计概论,现代仪器设计方法,仪器精度分析与设计,光源与照明系统,光学元件的选择与调整,光电探测器,标准量与标准器,运动与对准,典型仪器的原理与分析。

本书适用于光电信息科学与工程、测控技术与仪器等高等学校光电类专业的师生,以及光学工程、仪器科学与技术相关学科专业的高年级学生及研究生,还可供从事光电仪器的研究、设计、科研、生产的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光电仪器原理与设计/郝群主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 7
普通高等教育光电信息科学与工程规划教材
ISBN 978-7-111-42802-2

I. ①光… II. ①郝… III. ①光电仪器 IV. ①TH89

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 165584 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王保家 责任编辑:王保家 王小东

版式设计:常天培 责任校对:杜雨霏

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13.25 印张·321 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-42802-2

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

序

六十年前，当我到北京工业学院（现称北京理工大学）仪器系上学时，“光学仪器理论”和“仪器设计”是（军用）光学仪器专业的重点课程，前者主要讲授几何光学的内容，由马士修教授主讲；后者主要是应用光学的内容，包括仪器设计方法、精度分析及典型光学仪器（如地面和航空瞄准具等）的原理与设计，由连铜淑、樊大钧、李德熊等先生讲授。20 世纪 50 年代，北京工业学院光学仪器专业的师生研制成功的大型天象仪与长春光机所研制成功的光学“八大件”成为当时中国光学工程代表性的成就与贡献。我校毕业的学生分配到各大光学厂和光学研究所大都成为仪器结构设计的主力 and 行家里手，担任主任设计师、总设计师、总工程师和技术部门的负责人，为我国光学工程事业作出了自己的贡献。

当然，在 20 世纪五六十年代，“光学仪器”作为一门传统课程，历史悠久，基础理论体系严密，但大都是单纯的光学与精密机械的组合。今天，传统光学仪器发展到现代光电仪器的阶段，其结构具有“光（光学、光子学）、机（机械、精密机械）、电（电子、微电子）、算（计算机、微处理器）、材（材料、理化）、生（生物）”一体化的特征，它实际是当代高技术的综合体。作为仪器仪表和光学工程学科的主干课程的“现代光电仪器”是一门主要以机械学、光学、电子学、计算机和材料科学等学科为基础而形成的相互融合和渗透的综合课程。近年来，自然科学领域的发现、工程技术的发明不断充实和扩展着光电仪器的内涵和外延，使其成为知识高度密集、高度综合的重要的科学和技术分支。

我深深感到，现在学“现代光电仪器”的学生比我那时辛苦多了，也全面多了。学生们需要掌握光电仪器的原理和设计，具有较为全面的机械学、光学、电子学、计算机、物理化学、材料科学、生物学的知识以及熟练使用各种软件的技能，并能把自动传感、微机控制、CCD 摄像、智能操作、图像处理等功能融合在一起。但学习条件比我们那时好多了，有各种各样的软件，如光学设计、机械制图、优化设计、有限元等软件支持，能很快实现自己的创意。年轻时，我在工厂搞扁平线圈绕线机的设计，当看到自己的设计的产品由图样变为现实，提高了工作效率时，其喜悦之情难于言表。我很遗憾，大学毕业后转行，没有从事我十分喜爱仪器仪表设计。但我深深感到，对于喜爱仪器设计的人员来说，仪器结构上的新意和设计思想上的创新，确是一项极有魅力的挑战。

由机械工业出版社出版、北京理工大学郝群教授主编的《光电仪器原理与设计》一书，是该书作者们多年来从事光电仪器设计、技术光学等领域的教学实践与科学研究积累的丰富经验与成果的总结，也是他们密切关注光电仪器领域的科技发展，博采众长的优秀成果。

该书的内容与体系翔实丰富，系统完整。其内容不但涉及仪器设计方法学和人机工程学以及优化设计、仪器精度分析等，而且对光电仪器的重要部件——从光源和照明系统、获取信息的光学系统、转换信息的光电探测器或传感器，直到信息的输出，都有详尽的叙述，使学习者能打下坚实、牢固的理论基础。此外，作者十分重视跟踪现代光电领域科技发展的最新动态，全面介绍最具代表性一些典型光电仪器的设计原理以及最新发展与应用。该书在内容的选择上，非常重视培养学生分析与解决问题能力和工程设计实践的能力。在全书的表述

上,也注意从初学者的学习规律与效果出发,理论与实际联系,理性与感性结合,重视思维逻辑,深入浅出,循序渐进,图文并茂,例证充实,具有很好的可读性。

我深信,《光电仪器原理与设计》的出版,将为我国高校的仪器仪表、光学工程、光电信息科学与工程、测控技术与仪器等学科(专业)提供一本以本科生为主兼顾研究生教学需求的、方便施教的高质量的光电仪器教材;它也必将成为仪器仪表和光学工程领域从事仪器研发的广大科技工作者的一本内容丰富的实用参考书。

周立伟

2013年8月

前言

光是信息的载体,也是能量的载体,人类在认识世界过程中约有80%的信息是通过视觉获取的。然而人眼作为图像探测器的能力有限,除了受时间、地点的限制外,主要有察觉图像细节能力的限制,以及受入射光的波长和能量大小的限制。因此,人们需要借助各类光电仪器以提高信息获取的能力和效率。自18世纪开始,随着科学的发展,早期的一些传统光学仪器如望远镜、显微镜、干涉仪等应运而生。显微镜促进了近代生物学的发展,望远镜促进了现代天文学的发展,干涉仪促进了光谱学的发展。尽管这些仪器仅是利用可见光波段与精密机械的简单结合,但由此扩展了人类的视野,初步窥探了大自然以及物质世界的面貌。

今天,世界正从工业化、机械化时代进入信息化时代。这个时代的特征是以计算机为核心延伸人的大脑功能,起着扩展人脑力劳动的作用,使人类逐渐走出机械化过程,进入以物质手段扩展人的感官神经系统及脑力智力的时代。这时,仪器仪表的作用主要是获取信息,作为智能行动的依据。仪器仪表是一种信息工具,起着不可或缺的信息源的作用。由于信息源必须准确无误或最大限度地减少失误,因此现代稍具复杂性的光电仪器都无保留地采用多种技术形式综合集成,平常称为光、机、电、算、材等,更是离不了微电子学集成,并且往往与计算机相连。

20世纪是光学大发展的年代,这一百年来,我们可以清晰地看到传统光学仪器向现代光电仪器的演变和转化。随着现代光学的进展,现代光电仪器不但在波段的采用上(由紫外、可见、红外,直至太赫兹波)和光源的应用上(不仅是应用自然光,而是具有高相干性的激光)突飞猛进了,而且在研究内容上(激光、光探测、光测量、光集成)以及应用功能上(技术手段的自动化,数字化、智能化),都大大地扩展了传统光学仪器的内涵。其应用范围也遍及科学技术、国民经济和国防军事的各个领域。

我国光学工程事业的奠基人和开拓者王大珩院士高度评价仪器仪表在当今社会所具有的重要作用和地位。他认为,仪器仪表起着扩展和延伸人的感官神经系统的作用,增强认识世界的能力,而机器则替代和延伸人的体力劳动。重要的是,改造世界是以认识世界为前提的。他精辟地描述仪器仪表是“工业生产的‘倍增器’,科学研究的‘先行官’,军事上的‘战斗力’和社会生活中的‘物化法官’”。

作为仪器仪表最具代表性的现代光电仪器在扩展和延伸人的感官神经系统的作用,增强认识世界的能力,有着不可替代的作用。这是由于现代化所促成的必然趋势,因为认识世界已成为有意识的或自然的生活活动的普遍需求。

编写本书的目的旨在使具备光、机、电、算、材、物等知识基础的青年学人,综合利用已有知识,上升提高,掌握现代光电仪器设计的基本原理和普遍规律以及通用的技术。

本书采用总一分一总的结构,从总体设计、现代设计方法、精度设计等光电仪器共

性问题出发,给读者一个全局的认识;然后依次介绍信息产生、获取、转换及处理过程中的关键部件和技术,让读者从理论和技术两方面了解光电仪器的单元技术;最后以常见的典型光电仪器为载体,融会贯通地分析了上述共性技术和单元技术如何协同工作、形成丰富多彩的现代光电仪器,并介绍了现代光电仪器在各个领域中不可或缺的功能作用。本书共有九章,分别为光电仪器设计概论、现代仪器设计方法、仪器精度分析与设计、光源与照明系统、光学元件的选择与调整、光电探测器、标准量与标准器、运动与对准、典型仪器原理与分析。

本书由北京理工大学郝群教授主编,第一~三章由郝群执笔,第四章由朱秋东执笔,第五章由赵跃进执笔,第六~九章由胡摇执笔。全书由清华大学李达成教授主审。

本书编写过程中,北京理工大学沙定国教授、王涌天教授、李林教授、赵维谦教授、清华大学张书练教授、曾理江教授、浙江理工大学陈本永教授、中国计量科学研究院徐英莹副研究员等提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。

作者对李达成教授主审,周立伟教授作序表示深深的感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者在使用过程中批评指正。

郝群

目 录

序	1	三、仪器误差的来源	27
前言	1	第二节 仪器误差的分析与计算	28
第一章 光电仪器设计概论	1	一、微分法	28
第一节 光电仪器的发展与特点	1	二、几何法	29
一、光电仪器的发展历程	1	三、逐步投影法	30
二、光电仪器的特点	3	四、其他方法	30
第二节 光电仪器的分类与组成	3	第三节 仪器误差的合成	31
一、光电仪器的分类	3	一、随机误差的合成	31
二、光电仪器的组成	4	二、系统误差的合成	31
三、光电仪器设计的研究对象	5	三、不同性质误差的合成	32
第三节 总体设计的基本观点及设计步骤	6	四、仪器误差合成实例	32
一、总体设计方法	6	第四节 仪器精度的分配	37
二、新仪器的设计步骤	6	一、仪器精度的分配方法	37
三、光电仪器设计的研究方法	9	二、仪器精度分配实例	37
参考文献	9	第五节 提高精度的基本设计原则	39
第二章 现代仪器设计方法	10	一、阿贝原则及其扩展	39
第一节 设计方法学	10	二、光学自适应原则	42
一、设计方法学的发展历程	10	三、圆周封闭原则	44
二、设计方法学的研究对象和方法	11	四、其他相关原则	44
第二节 人机工程学	12	第六节 仪器误差的补偿方法	45
一、仪器参数的设计	13	参考文献	47
二、仪器性能的提高	14	第四章 光源与照明系统	48
三、操作者主观感受的改善	15	第一节 光源的基本特性参数	48
第三节 优化设计方法	15	一、有关光源的几个基本概念	48
一、优化设计方法及步骤	15	二、选择光源时要注意的几个问题	51
二、优化设计实例	16	第二节 光电仪器中常用的光源	52
第四节 有限元分析	18	一、热辐射光源	53
一、有限元分析概述	18	二、气体光源	54
二、有限元分析实例	19	三、发光二极管	59
第五节 可靠性设计	20	四、激光光源	61
一、可靠性的评价指标	20	第三节 目标类型	64
二、可靠性的分配方法	21	一、点光源	64
参考文献	22	二、线光源	66
第三章 仪器精度分析与设计	23	三、面光源	67
第一节 仪器的误差与精度	23	第四节 照明系统	68
一、误差的基本概念	23	一、对照明系统的要求	68
二、精度的含义和仪器的精度指标	25	二、设计照明系统时要遵循的原则	68

三、照明方式及其结构尺寸	69	三、度盘及其误差	136
四、对照明系统像差的考虑	72	四、度盘参数的选择	137
参考文献	73	第三节 计量光栅	138
第五章 光学元件的选择与调整	74	一、计量光栅及分类	138
第一节 几何光学元件	75	二、莫尔条纹的形成原理	139
一、透镜	75	三、莫尔条纹的种类和特点	142
二、反射镜	80	四、莫尔条纹的读数原理与绝对测量	144
三、棱镜	83	五、计量光栅参数的选择	148
第二节 物理光学元件	89	六、计量光栅误差分析	149
一、光栅	89	第四节 光学编码度盘	150
二、偏振器与波片	91	一、光学编码度盘与编码	150
第三节 新型光学元件	93	二、光学编码度盘的参数选择	152
一、光纤	93	第五节 光波长	152
二、微小光学元件	97	参考文献	154
第四节 光学元件的误差分配与装配		第八章 运动与对准	155
校正	103	第一节 结构设计的基本原则	155
一、光学元件的误差分配	103	一、运动学原则	155
二、光学元件的装配校正	104	二、变形最小原则	156
参考文献	107	第二节 微位移机构	157
第六章 光电探测器	108	一、微位移技术简介	157
第一节 光电探测器的性能参数	108	二、机械式微位移机构	158
一、光学特性参数	109	三、压电、电致伸缩器件	159
二、光电转换特性参数	109	第三节 光学与光电瞄准	162
三、电学特性参数	112	一、光学瞄准	163
第二节 光电探测器的工作原理与分类	112	二、光电显微镜	166
一、光电探测器的物理效应	112	三、光电自动对准系统	169
二、光电子发射探测器	114	第四节 轴向对准	174
三、光电导探测器	116	一、像散法	174
四、光伏探测器	119	二、斜光束法	175
五、热探测器	124	三、偏心光束法	176
第三节 光电探测器应用实例	125	四、临界角法	177
一、三维坐标测量——PSD	126	五、精密自动定位器设计实例	178
二、光强检测——光敏二极管	128	参考文献	180
三、光谱分析——线阵 CCD	129	第九章 典型仪器的原理与分析	181
参考文献	130	第一节 激光干涉仪	181
第七章 标准量与标准器	131	一、干涉测长的基本原理	181
第一节 计量标准概述	131	二、单元部件分析	182
一、国际单位制 (SI)	132	三、干涉仪的发展及应用领域	183
二、量值的传递方法	134	第二节 光学轮廓仪	184
第二节 标尺与度盘	134	一、光学轮廓仪的基本原理	185
一、标尺的分类和特点	134	二、单元部件分析	187
二、标尺的误差和精度等级	135	三、光学轮廓仪的发展及应用领域	187
		第三节 共焦显微镜	187

一、基本原理	188	三、投影仪的发展趋势	194
二、单元部件分析	189	第五节 光谱仪	195
三、共焦显微镜的应用领域	190	一、光谱仪的基本组成	195
第四节 投影仪	191	二、光谱仪的评价指标	196
一、计量投影仪的基本原理	191	三、光谱仪的发展及应用领域	198
二、单元部件分析	193	参考文献	199

第一章 光电仪器设计概论

仪器是用于科学研究或技术测量的设备或装置，是人类认识世界的工具，其作用是信息的获取、信息的处理以及信息的利用。仪器不仅能改善、扩展及补充人类的官能，更能超过人类的能力去记录、计数和计算。工业革命和现代化大规模生产以来，现代化仪器已经成为测量、控制和实现自动化必不可少的技术工具，是知识创新和技术创新的前提，其整体发展水平标志着国家的综合国力。

第一节 光电仪器的发展与特点

一、光电仪器的发展历程

广义来说，光电仪器涵盖所有基于光学原理、采用光电转换技术的仪器。光电仪器最早的功能是辅助提高视觉。人类在认识世界的过程中大约有 80% 的信息是通过视觉获取的。不过人眼能力有限，其极限分辨力约为 $1'$ ，最小能看清 0.1mm 左右的物体，最远能分辨数千米外的光点。为了进一步分辨物体细节，早在公元前 1 世纪，人们就已发现通过球形透明物体去观察微小物体时可以使其放大成像，并逐渐对球形玻璃表面能使物体放大成像的规律有了认识。直到 17 世纪初，荷兰的眼镜店主利伯希在检验磨制的透镜的质量时，无意中发​​现凸镜和凹镜共线时能拉近远处的景物，进而发明了望远镜。之后，意大利的伽利略和德国的开普勒在研究望远镜的同时，改变物镜和目镜之间的距离，得出了合理的显微镜光路。望远镜和显微镜作为最早的光电仪器，将人类的视觉范围大大扩展，大至星际的距离，小至生物细胞的尺寸。

光电仪器的发明往往伴随着物理原理的发现，虽然存在偶然的成分，但其发展却是依照人们的需求逐步进行的。

这里仍以传统的望远镜和显微镜为例。早期的望远镜使用透镜做物镜（折射望远镜），透镜所用玻璃材料的色差对成像会造成影响，即使加长透镜镜筒、精密加工透镜也不能消除。牛顿认为色差问题难以解决，于 17 世纪中叶发明了反射望远镜，有效避免了透镜色差的影响。除了无色差的优点，反射望远镜造价低廉且反射镜可以造得很大。二战后，天文观测领域发展很快，人们为了进一步提高望远镜的集光率和信噪比，使用米量级的反射镜，并引入了拼接技术进一步增大了反射镜的口径。例如，著名的哈勃望远镜主镜口径达到 2.4m，当前各国筹建的望远镜口径已达数十米。在显微镜方面，为了方便调焦和对标本的移动，17 世纪中叶，胡克在显微镜中加入粗动和微动调焦机构、照明系统和承载标本片的工作台，这些部件经过不断改进，成为现代显微镜的基本组成部分。为了兼顾高分辨率与大视场范围，人们利用光学或机械扫描的方法制成了扫描显微镜，使成像光束相对于物面在较大视场范围内进行扫描，并用信息处理技术来获得合成的大面积图像信息，这样的扫描显微镜在许多领域得到应用。然而，受到科技水平和制造技术的限制，传统的光电仪器发展缓慢，大多数仪

器只是光学零件和精密机械的组合,依靠人眼作为接收器来观察信息,需要手动调节。

直至产业革命以后,特别是20世纪以来,伴随着工业生产自动化程度和制造技术的提高,机械、电子、激光等技术的发展,光电仪器的发展进入了新阶段。新器件、新技术的应用,使光电仪器在保持传统功能的基础上,工作能力得到了提高,功能得到了扩展。例如,新器件的出现是光电仪器发展的有力支持。高质量消色差浸液物镜的出现使显微镜观察微细结构的能力大为提高。为了方便记录和保存显微镜提供的信息,人们在显微镜中加入了摄影装置,初期使用感光胶片、现代普遍采用电视摄像管和电荷耦合器件(CCD)等作为显微镜的接收器,配以计算机构成完整的图像采集、处理系统,提高了信息记录的准确性和实时性。新物理原理的应用更能从质的方面提高光电仪器的工作能力。以显微观察技术为例,除了使用可见光作为照明光源,利用紫外线激发荧光可显示生物标本的结构细节,利用红外线能探查物质的内部结构或缺陷,得到可见光无法获取的信息。利用低相干光的干涉(光学相干层析技术),可提高图像的信噪比,获得生物表面二维或三维的结构图像。利用偏振光原理则可以观测晶体双折射、晶轴方向和偏振面旋转等。

光学显微镜的组成及发展趋势如图1-1所示。

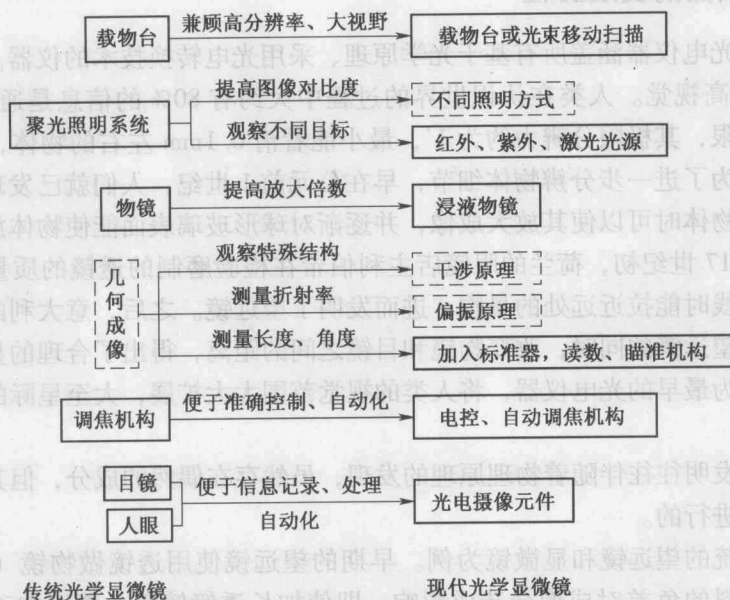


图1-1 光学显微镜的组成及发展趋势

光电仪器发展至今,随着光电探测优势的凸显以及激光优良特性的应用等,许多传统的、以机械或电气手段实现功能的传统仪器逐步被现代光电仪器取代。例如,由于光电探测具有非破坏、精度高的特点,传统使用机械手段实现的长度、距离、表面形貌测量大都能用光电仪器实现;便携式激光测距仪可在室内、建筑工地、野外等多场合测距或丈量;光学三维测量系统可在反求工程中快速而精确地完成形貌测量等。光纤通信较传统电通信具有容量大、保密性能好、抗干扰性强等优点,已被广泛应用于电信、电视、网络信号的传输。光盘存储更是因其存储量大、成本低、不怕磁和热以及寿命长等优点成为与磁存储并存的重要信息存储手段。

综上所述,人类在科学研究和生产生活中的需求是光电仪器发展的直接动力,而新器

件、新技术的应用则是光电仪器发展的有效手段。光电仪器的发展与相关学科的发展相辅相成,互相促进。现代光电仪器已经从最初辅助观察的简单工具,逐步发展成人们科研、生产及社会生活中不可或缺的重要仪器,成为人类认识世界、改造世界的有力助手。

二、光电仪器的特点

在人们各方面需求的驱动和科技水平发展的支持下,光电仪器发展到现代,已具有多功能、高精度、高速度等特点。

由于光信号本身具有波长、振幅、相位、偏振态等属性,能够充分反映被测物的几何形状、位置、温度、化学成分或其他性质,因此,利用光电仪器能完成多参量测量。例如,现代光学显微镜不仅可以用于生物组织的形貌观察,还可以用于金属组织的金相测量、工件内部探伤、长度测量等;各种类型的激光干涉仪更是能完成长度、位移、面形、粗糙度等多种几何量的测量,以及折射率、波面分布等光学量的测量等;红外体温测量仪、测温仪能够实现对人体温或工件温度的测量。

光探测具有非接触、非破坏等传统机械探测方法所不具备的优势,适用于远距离、物质内部以及危险、环境恶劣的场合。医学上的眼底检查、胸腔透视,天文学的星体观测,地质学的遥感与测绘等,离开了光学的方法根本无法实现。除了探测,通过光信号与其他元件的相互作用,光电仪器还能进行加工、控制、信息存储等多功能操作。

从测量的精度来看,传统的、基于机械接触的测量方法往往以实物为基准,其精度有限;而光电测量可以光波长为基准、并直接与时间测量挂钩,通过光电信号的转换,可达到纳米量级的长度测量精度。以位移测量为例,机械接触式的精密螺旋测微仪依靠精密螺旋传动,测量精度为 $10\mu\text{m}$ 左右,测量范围仅几厘米;电感测微仪结合电学参量测量,精度为 $0.1\mu\text{m}$ 左右,测量范围仅数十微米;而双频激光干涉仪能在数十米的测量范围内达到 10^{-7} 量级的相对精度,对应测量 1cm 位移时,精度可达 1nm 。光电仪器的测量精度很高,对环境的相应要求也比机械测量手段要高,更适用于相对洁净,温度稳定,无气流、无振动的场合。

在测量和处理速度方面,无论光的传播速度、光电转换速度还是现代大规模集成电路的处理速度,都使得实时测量和控制成为可能。

光电仪器的优良工作性能一方面由光波的特殊属性决定,另一方面是光电探测技术与其他技术紧密结合的结果。现代光电仪器是光学、机械、电子、计算机、材料、化学、生物等先进技术高度结合的产物,除了传统的工业、国防等领域,光电仪器在医疗、信息、文教、家庭生活的各方面也发挥着越来越重要的作用。

第二节 光电仪器的分类与组成

一、光电仪器的分类

光电仪器种类繁多,按照其工作原理可以分为利用几何成像原理的望远、投影、显微、照相类仪器,利用物理光学原理的干涉、衍射、偏振类仪器,利用多普勒效应的流速仪、激光陀螺和基于导波光学原理的光纤光学类仪器等。按照光电仪器的功能,可以分为观测记录

仪器,包括各类显微镜、摄像机、光盘驱动器等(见图1-2a);控制分析仪器,包括生物芯片、手持光谱仪(见图1-2b)、色谱仪等;计量仪器,包括测距仪、万能工具显微镜(见图1-2c)等。



图1-2 常用光电仪器

a) 光盘驱动器 b) 手持光谱仪 c) 万能工具显微镜

计量是光电仪器的重要应用领域。所谓计量,是计量学(Metrology)的简称。计量不同于测量(Measurement),后者是以确定量值为目的的操作,而计量包括基准(标准)的建立、复现、保存和传递,测量方法及其精度估计,测量仪器精度检验等。计量涵盖与测量有关的一切理论实际问题,是实现单位统一、量值准确可靠的活动;计量本身就是科学研究的重要领域,其水平高低直接影响人们认识世界的深度和准确性。同时,计量也是现代化工业生产的基础,是产品质量的保证。由于计量类光电仪器能实现非接触、非破坏、高精度、多参数的测量,在计量领域有着广泛的应用,因此,本书对光电仪器的许多分析,大部分将围绕计量类光电仪器展开。

二、光电仪器的组成

无论光电仪器使用怎样的原理,功能如何,其主体部分都包括信息获取、信息处理显示和控制等单元。下面以计量类光电仪器——万能工具显微镜为例进行具体说明。

万能工具显微镜(以下简称万工显)主要用于精确测量各种工件尺寸、角度、形状和位置等几何量,以及螺纹制件的各种参数等。其主要结构是在目视光学显微镜的基础上加入各种几何量测量用的标准器、瞄准机构等,通过对标准器与待测工件的比较进行测量。万工显是一种传统的计量类光电仪器,其结构较为完整和典型,框图如图1-3所示。

1. 信息获取单元

万工显可以测量不同的几何量,其待测信息一般是标准器与待测工件比较产生的图像或光强分布信号,如标尺的像、莫尔条纹等。所谓标准器是指测量的基准,常用的标准器包括标尺、计量光栅、角度编码器、精密螺纹等。关于标准器与标准量本书第七章有详细说明。万工显的待测信息可由人眼直接目视观察,或者投在投影屏上以减轻人眼观察的疲劳,也可以由光敏元件接收,或者利用CCD探测器进行拍摄。

万工显的信息获取单元一般由待测工件、标准器、显微成像光路(包括照明光源、棱

镜、透镜、偏振片等光学元件)和光电转换探测器(包括光敏元件、CCD 探测器等)或目视观察(包括双筒目视观察口、投影屏等)系统组成。信息获取单元往往涉及仪器的工作原理和光电转换方案,是光电仪器设计较核心的部分。

2. 信息处理显示单元

信息处理显示单元一般包括信号处理电路、信号采集设备、计算机或微处理器和显示元件等。根据万工显测量的目标量不同,获得的测量信号各不相同,其中图像信息可以通过图像采集卡送入计算机进行进一步的存储、处理、分析,光电信号可以通过信号处理电路送入计算机或微处理器进行计算求解。最终测量结果或图像通过显示器或机械表头等显示元件展示出来。信息处理显示单元涉及图像及信号处理技术,关系到最终测量信号的获得、存储或显示,其处理速度和质量同样影响仪器最终能达到的功能指标。

3. 控制单元

万工显的控制单元的主要功能是依照操作人员的设定完成工件台的精密移动、显微镜的调焦等。一般自动控制的万工显是由计算机发出控制信号,通过控制电路驱动工件夹持及驱动装置或调焦机构完成上述功能。控制单元一般包括粗动、微动、扫描等功能对应的定位和驱动机械结构,以及计算机或微处理器、控制电路等电气控制部分。控制单元功能的完成主要依靠控制技术,是光电仪器正常工作的基础,有时移动的分辨率等指标也会影响到最终的测量精度。

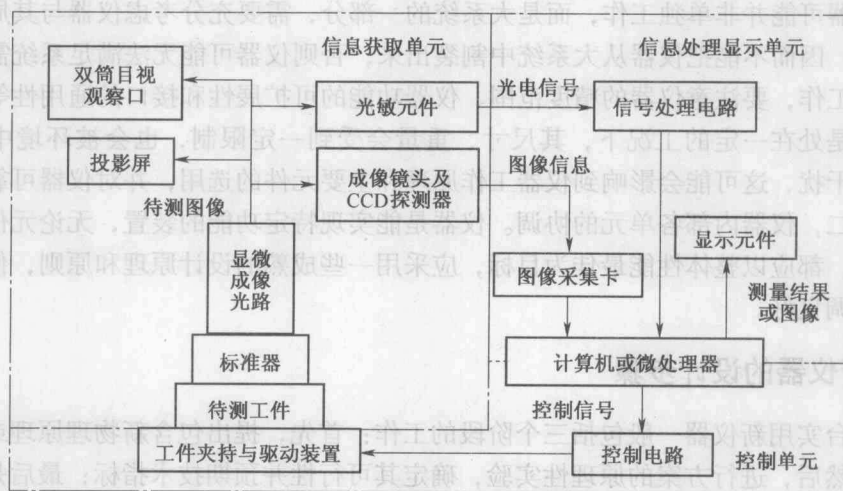


图 1-3 万工显一般组成结构框图

除了以上功能单元外,光电仪器还应包括机械支撑等基本部件。

以上单元在光电仪器中的有机结合,将使仪器的复杂功能得以实现。依照仪器的功能、结构、自动化水平的不同,其组成及各单元之间的关系可能稍有差异,具体仪器的组成应根据其功能需求细心选取和设计。

三、光电仪器设计的研究对象

光电仪器种类繁多,结构复杂,因此,想要完成光电仪器的设计工作,设计人员需要在一定使用需求的基础上,掌握光电仪器的工作原理,了解仪器当前发展水平,并参考相关技

术的发展状况。光电仪器设计的研究对象涵盖基于所有光学原理、采用光电转换技术的仪器,其研究内容既包括仪器的总体设计原则和方法,也涵盖单一元件的功能、性质,以及元件间相互作用的原理和元件组合的基本原则。具体来说,总体设计以仪器能满足应用需求为目标,包括光学系统原理、机械结构、光电探测系统、信息处理系统原理设计,以及精度分析、可靠性经济性评价等内容。而元件设计主要包括元件的选型等内容。

第三节 总体设计的基本观点及设计步骤

一、总体设计方法

光电仪器设计的首要工作是总体设计。所谓总体设计,是指在进行仪器具体单元设计或者元件的选型之前,从使用功能、技术指标、检测与控制系统框架及仪器应用的环境和条件等总体角度出发,对仪器设计中的全局问题进行全面设想和规划,使仪器的原理、技术指标建立在科学基础上,以便寻求经济高效的最佳方案。另外,总体设计也是贯穿仪器设计始终的理念,它要求仪器设计全过程都能从整体的角度分析和解决问题,是单元设计和元件选型的基本出发点。

总体设计需要考虑两个层面的问题。其一,仪器与大工作环境的关系。从信息传递的角度来说,仪器可能并非单独工作,而是大系统的一部分,需要充分考虑仪器与其周边设备的协调和通信,因而不能把仪器从大系统中割裂出来,否则仪器可能无法满足系统需求或无法与系统兼容工作,要注意仪器的精度范围、仪器功能的可扩展性和接口的通用性等问题。另外,仪器总是处在一定的工况下,其尺寸、重量会受到一定限制,也会被环境中的电磁辐射、振动等干扰,这可能会影响到仪器工作原理和主要元件的选用,并对仪器可靠性提出一定要求。其二,仪器内部各单元的协调。仪器是能实现特定功能的装置,无论元件选择、还是布局设计,都应以整体性能最佳为目标,应采用一些成熟的设计原理和原则,使各元件性能均衡、协调良好。

二、新仪器的设计步骤

设计一台实用新仪器一般包括三个阶段的工作:首先,提出包含新物理原理或新型元件的新方案;然后,进行方案的原理性实验,确定其可行性并预期技术指标;最后是复杂而实际的仪器化工作。从总体设计的角度出发,新仪器的设计工作往往分设计任务分析、原理方案制定、原理性实验、仪器化设计及仪器性能检测等几个步骤进行。

1. 设计任务分析

为了设计好仪器,首先必须对设计任务有详细的了解和分析,以便确定仪器设计的要求和限制。通常,设计任务分析包括:了解仪器的功能要求、使用条件;了解被测参数的特点;了解国内外同类产品的类型、原理、技术水平和特点;了解国内有关方面的加工工艺水平和关键元件销售情况等。

2. 原理方案制定

在明确了设计任务之后,需要选定适当的工作原理,制定相应的原理方案。工作原理的选定主要由仪器精度指标、工作环境和生产成本等因素决定。光电仪器主要的工作原理有以

下几类:

(1) 几何成像原理

利用透镜组等成像元件,将被测物的几何像成在探测器上,便于后续分析处理或记录。该原理主要应用于投影成像类光电仪器及计量类光电仪器的瞄准读数机构中。典型的投影成像类光电仪器包括投影仪、照相机、各类成像分析用显微镜、夜视仪等。典型的计量类光电仪器有工具显微镜、测长机、水准仪等。

也可以利用光线的直线传播和简单的反射来进行微小角度、位移测量。

微小角度测量用到的原理称为自准直原理。简单来说,自准直设置的人射光经光学元件反射将由原路返回,当光学元件发生 θ 的角度偏转时,反射光的出射方向会偏转 2θ ,如果利用焦距为 f 的透镜则能把该偏转转化为 $2\theta f$ 的线性位移。如果光学元件A的角度偏转是由于另一元件B的微小位移引起的,那么这一机构就能将B的微小位移转化为A出射光点的位移并进行放大。这一原理也称为光学杠杆原理。

运用自准直原理的自准直仪可测量微小角度、直线度或平面度;运用光学杠杆的各类光学比较仪(光学计)可结合量块进行长度测量。

还可以利用几何成像时离焦造成的像点光能下降、形状变化等现象,进行光轴方向的定位或高度提取,典型的仪器有共焦显微镜。本书第九章将对投影仪和共焦显微镜作详细说明。

(2) 物理光学原理

光电仪器中使用较多的物理光学原理包括干涉原理、衍射原理和偏振原理。

利用相干光之间的干涉,可以将几何光程、折射率等的变化转换为光波振幅的变化,该原理在计量类仪器中被广泛应用。如果从探测测量范围划分,单点探测常用于长度测量、折射率测量,而多点或者面探测可用于角度、变形以及平面度、粗糙度测量等。从干涉原理来看,基本的单频光干涉因其对环境要求高、长度测量存在周期不确定性等局限,应用场合已不多;在其基础上发展起来的双频干涉、外差干涉、低相干光干涉等方法,能有效扩大测量范围,提高测量信号的信噪比,具有更加广泛的应用前景。利用干涉原理还能有效提取弱信号,用于显微镜系统中提高信噪比和图像对比度,典型仪器有光学相干层析显微镜等。本书第九章将给出典型干涉仪的原理和设计方法。

小孔或单缝衍射原理能直接应用于孔径、细丝直径等方面的测量。巴俾特(Babinet)原理,即互补衍射原理表明,形状相同的细丝(颗粒)或狭缝(小孔)具有相同的衍射光强图样。因此,通过比较待测细丝(颗粒)与标准狭缝(小孔)的衍射光强图像(一般为远场夫琅和费衍射),可方便地测定待测物的直径。使用衍射原理最重要的光学元件是衍射光栅,该元件被广泛应用于长度、角度测量,以及光谱分析等领域。本书第九章将就光谱仪的原理和 design 方法给出说明。

偏振光的偏振态在经薄膜反射、晶体透射后会发生改变,利用这一原理可以测量薄膜的厚度、折射率,以及晶体的双折射、光轴方向、偏振面旋转等性质,也可以测量某些微小周期结构(如光栅、光盘)的面形参数等。典型仪器有椭圆偏振光谱仪(椭偏仪)、偏光显微镜等。

(3) 多普勒效应

多普勒效应指出,波在波源相对移向观察者时接收频率变高,而在波源相对远离观察者