



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# DESIGN

# 测控仪器设计

哈尔滨工业大学 浦昭邦 天津大学 刘庆纲 主编

第3版



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 测控仪器设计

第3版

主编 浦昭邦 刘庆纲  
参编 刘文文 赵辉 庄志涛 刘炳国  
主审 张国雄



机械工业出版社

本书为高等工科院校“测控技术与仪器”专业“十一五”国家级规划教材。本书从总体设计出发,用创新设计思想组织光、机、电、算相结合的测控仪器设计内容。

本书首先系统地论述了测控仪器的精度理论、总体设计的理论与方法,然后分析了在总体设计时如何考虑测控仪器的精密机械系统、电路与软件系统、光电系统设计的主要问题和方法。

本书内容荟萃了近代仪器设计的有关资料和科研成果,体系新颖,具有相当的深度和广度。适用于仪器、机械、电子、光电类专业师生和从事仪器仪表科研、计量、生产开发的工程技术人员学习和参考。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

测控仪器设计/浦昭邦,刘庆纲主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2014.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-48144-7

I. ①测… II. ①浦…②刘… III. ①电子测量设备-高等学校-教材  
IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 227524 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:贡克勤 责任编辑:贡克勤 王小东

版式设计:赵颖喆 责任校对:刘怡丹

封面设计:张静 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2015 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21.25 印张·513 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48144-7

定价:42.00 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

## 第3版前言

自从2007年第2版出版以来,经过了7次重印,许多高校反映该书内容丰富,结构清晰,创新设计思想突出,同时也提出一些宝贵的修改意见。特此本书再次修订。

随着计算机技术、智能仪器和网络化测试技术的发展,测控仪器的设计内容和设计方法有了很大变化,因此本书在内容上做了相应的增删。如第二章仪器精度理论增加了仪器误差分析的蒙特卡洛法,该方法已比较广泛地应用于测量不确定度评定、误差综合和精度分配之中;在测控仪器总体设计中增加了仪器系统总线设计与选择;在机械系统设计和电路系统设计中增加了模块化设计选用实例和工程应用实例等。第3版还将原书使用过程中发现的错误和不当之处进行了修正。

本书为高等学校“测控技术与仪器”专业主修课程教材之一,并可作为相关专业的参考书或研究生用书,也可供从事仪器仪表、光学工程、机械工程的计量和研究工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学浦昭邦教授和天津大学刘庆纲教授主编,本书第2版主编王宝光教授由于年龄关系提出不再担任该书主编工作,在此对王宝光教授对本书做出的贡献表示感谢。参加编写的教师有:哈尔滨工业大学浦昭邦(第一章),合肥工业大学刘文文(第二章),天津大学刘庆纲(第三章),哈尔滨工业大学刘炳国、庄志涛(第四章),上海交通大学赵辉(第五章),哈尔滨工业大学浦昭邦、庄志涛(第六章)。全书由天津大学张国雄教授主审,哈尔滨工业大学马晶月完成本书的电子编辑工作。感谢本书第1版和第2版参加编写的施涌潮和王代华老师对本书做出的贡献。还要特别感谢本书第1版和第2版的主审**陈林才**教授对本书做出的贡献,他的严谨治学态度和科学求实的学风使本书的编者永志难忘。

本书编写中参考了许多文献,在此谨向参考文献的作者们表示衷心感谢。

由于编者水平有限,难免有疏漏和错误。恳请广大读者提出批评,以便进一步修订和完善。

编者

## 第2版前言

本书是根据全国普通高等学校仪器仪表类教学指导委员会审定的“测控仪器设计”编写大纲编写的。自从2001年第一次印刷以后，已经先后印刷了5次，许多高等学校使用该书后反映良好。作为“十一五”国家级规划教材，并根据各高校使用该书的诚恳建议，为使其在“测控技术及仪器”专业教学中发挥更好的作用，特进行修订。

修订后的“测控仪器设计”全书共分六章，分别为测控仪器设计概论、仪器精度理论、测控仪器的总体设计、精密机械系统设计、电路与软件系统设计和光电系统设计。全书从总体设计出发，以创新思想组织光、机电、计算机相结合的测控仪器设计内容，力求使该书做到具有创新性、实用性和先进性，并且通俗易懂、深入浅出。通过学习使读者掌握测控仪器总体设计基础理论知识，学会总体设计方法和具有一定的精度设计能力。

本书为高等学校“测控技术与仪器”专业主修课程教材之一，并可作为相关专业的参考书或研究生用书，也可供从事仪器仪表、光学工程、机械工程的计量和研究工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学浦昭邦教授和天津大学王宝光教授主编，参加编写的教师有：第一章浦昭邦、王代华，第二章刘文文，第三章王宝光，第四章庄志涛、浦昭邦，第五章赵辉，第六章浦昭邦、施涌潮。全书由陈林才教授、张国雄教授主审。参加审稿的还有安志勇、李东升、祝连庆、张琳、杨鹏、吴培峰等。

本书参阅了孙祖宝主编的《量仪设计》，陈林才、张鄂主编的《精密仪器设计》，薛实福编著的《精密仪器设计》共50余部著作和论文，在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。感谢对书稿提供热情帮助的叶会英、杨春兰、陈世哲、马晶月等同志。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不当之处，恳请广大读者提出批评，以便进一步修订和完善。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：

Edmond Yan@sina.com

Edmond Yan@hotmail.com

编者



# 第1版前言

本书是根据全国高等学校仪器仪表类教学指导委员会制订的“测控仪器设计”编写大纲编写的。

“测控仪器设计”是专业面拓宽后的“测控技术与仪器”专业以设计为主的专业课程。本书从总体设计出发，以创新设计思想组织光、机、电、计算机相结合的测控仪器设计内容。

全书共分七章，分别为测控仪器设计概论、精度设计、总体设计、机械系统设计、电路系统设计、光电系统设计和现代设计方法。力求使读者掌握光、机、电、计算机相结合的仪器总体设计基础理论知识，学会如何从设计任务出发进行总体设计的方法和具有一定的精度设计能力。

本书为高等学校测控技术与仪器专业主修课程教材之一，并可作为有关专业参考书，也可供从事精密仪器、光学仪器、热工仪器、电磁测量仪器及电子测量仪器的设计、科研、计量、生产单位工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学浦昭邦教授与天津大学王宝光教授主编。第一章、第四章由浦昭邦执笔，第二章由刘文文执笔，第三章由王宝光执笔，第五章由赵辉执笔，第六章由施涌潮执笔，第七章由王代华执笔。全书由陈林才教授主审。

本书参阅了薛实福、李庆祥编著的《精密仪器设计》，陈林才、张鄂主编的《精密仪器设计》，殷纯永主编的《光电精密仪器设计》等共47部著作和论文，在此对文献作者表示衷心感谢。感谢对本书提供宝贵意见的“测控仪器设计”大纲审定会的代表及对书稿工作提供热情帮助的叶会英、杨春兰同志。

# 目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
第一章 测控仪器设计概论	1
第一节 测控仪器的概念和组成	1
一、测控仪器的概念	1
二、测控仪器的组成	3
第二节 测控仪器及其设计的发展状况与趋势	5
一、测控仪器的发展状况和发展趋势	6
二、测控仪器设计的发展概况	7
第三节 测量仪器通用术语及定义	15
第四节 对测控仪器设计的要求和设计程序	17
一、设计要求	17
二、设计程序	19
思考题	19
第二章 仪器精度理论	21
第一节 仪器精度理论中的若干基本概念	21
一、测量误差	21
二、精度	23
三、仪器的静态特性与常用精度指标	23
四、仪器的动态特性与其精度指标	24
第二节 仪器误差的来源与性质	27
一、原理误差	27
二、制造误差	31
三、运行误差	32
第三节 仪器误差的分析	35
一、误差独立作用原理	35
二、微分法	36
三、几何法	38
四、作用线与瞬时臂法	39
五、数学逼近法	45
六、控制系统的误差分析法	46
七、蒙特卡洛方法	48
八、其他方法	53
第四节 仪器误差的综合	53
一、随机误差的综合	54
二、系统误差的综合	55
三、仪器总体误差的合成	55
第五节 仪器误差的分析合成举例	56
一、数字显示式立式光学计原理与结构	56
二、数字显示式立式光学计精度分析	57
第六节 仪器精度设计	61
一、仪器精度指标的确定	62
二、误差分配方法	64
思考题	67
第三章 测控仪器总体设计	69
第一节 设计任务分析	69
第二节 创新性设计	70
一、创新设计思维能力的培养	71
二、创新设计方法	72
第三节 测控仪器设计原则	73
一、阿贝 (Abbe) 原则及其扩展	73
二、变形最小原则及减小变形影响的措施	79
三、测量链最短原则	85
四、坐标系基准统一原则	86
五、精度匹配原则	89
六、经济原则	89
第四节 测控仪器设计原理	90
一、平均读数原理	90
二、比较测量原理	95
三、补偿原理	99
第五节 测控仪器工作原理的选择和系统设计	101
一、传感器的选择与设计	101
二、标准量及其细分方法的选用	107
三、数据处理与显示装置的选取	109
四、运动方式与控制方式的确定	112
五、测控仪器的智能化设计与总线方式的选择	112

第六节 测控仪器主要结构参数与技术指标的确定	118	四、气体静压轴承轴系结构及设计	185
一、从精度要求出发来确定仪器参数——光学灵敏杠杆的杠杆比的确定	119	五、液体静压轴承轴系及设计	187
二、从测量范围要求出发确定仪器参数——小模数渐开线齿廓偏差检查仪的结构参数的确定	120	六、液体动压轴承轴系	189
三、从误差补偿要求来确定参数——电容压力传感器的结构参数确定	122	七、设计时轴系选择要点	191
四、从仪器精度和分辨力要求出发确定仪器参数——光栅式刀具预调仪光电部分结构参数的选择	123	第五节 伺服机械系统设计	193
第七节 测控仪器的造型设计	124	一、伺服系统的分类	193
一、外形设计	124	二、伺服驱动装置	195
二、人机工程	126	三、机械传动装置	195
思考题	127	四、伺服系统的精度	196
第四章 精密机械系统的设计	129	五、伺服系统的误差校正	196
第一节 精密机械系统现代设计方法	129	第六节 微调与微位移机构及设计	197
一、精密机械系统的计算机辅助设计	129	一、微调机构	197
二、模块化设计	131	二、微位移机构及设计	199
三、反求工程设计	132	思考题	208
第二节 仪器的支承件设计	133	第五章 电路与软件系统设计	210
一、基座与立柱等支承件的结构特点和设计要求	133	第一节 电路与软件系统概述	210
二、基座与立柱等支承件的结构设计	136	一、电路与软件系统的作用	210
第三节 仪器的导轨及设计	141	二、电路与软件系统的组成	210
一、导轨的功用与分类	141	三、电路与软件系统的设计要求	212
二、导轨部件设计的基本要求	141	四、电路与软件系统的设计准则	216
三、导轨设计应遵守的原理和准则	146	第二节 测控电路设计方法	217
四、滑动摩擦导轨及设计	148	一、测量电路的设计	217
五、滚动摩擦导轨及设计	151	二、中央处理系统设计	227
六、静压导轨及设计要点	157	三、控制电路设计	236
七、设计导轨时选择的要点	164	四、电源设计	242
第四节 主轴系统与设计	168	五、电路系统的抗干扰技术	246
一、主轴系统设计的基本要求	168	第三节 测控仪器的软件设计	258
二、精密油膜滑动轴承轴系结构及设计	176	一、软件系统的作用与特点	258
三、滚动摩擦轴系及设计	178	二、软件设计的原则	259
		三、软件设计的方法与过程	259
		四、常用应用软件	260
		第四节 可靠性与故障诊断技术	263
		一、可靠性设计的作用、原则与方法	263
		二、电路系统的可靠性	264
		三、软件系统的可靠性	266
		四、故障诊断技术	269
		思考题	269
		第六章 光电系统设计	271
		第一节 测控仪器光电系统的组成和类型	271
		一、光电系统的组成	271
		二、光电系统的类型	272
		第二节 光电系统的特性	273



281	一、光电特性	273	二、光功率直接检测光电系统的	289
281	二、光谱特性及光谱匹配	273	设计	289
281	三、光电灵敏度特性(光谱响	273	三、距离检测光电系统的设计	295
281	应率)	273	四、几何中心与几何位置光电检测	301
281	四、频率响应特性	274	系统设计	301
281	五、光电系统的探测率 $D$ 和比探	274	五、直接检测光电系统中的光学参数	304
281	测率 $D^*$	274	的确定	304
281	第三节 光电系统的设计原则	274	第六节 相干变换与检测系统设计	307
281	一、匹配原则	275	一、光学干涉测量基本公式	308
281	二、干扰光最小原则	275	二、干涉条纹光强检测法及其设计	309
281	三、共光路原则	276	三、干涉条纹相位检测法及其设计	313
281	第四节 光电测量系统中的光源及照明	277	四、干涉条纹的外差检测系统	314
281	系统	277	第七节 光电系统设计举例——激光干	318
281	一、光源的基本参数	277	涉仪的设计	318
281	二、光电测量中的常用光源	279	一、干涉仪的一般特性及设计要点	318
281	三、照明系统	284	二、激光干涉测长仪设计	319
281	四、光源及照明系统的选择	286	思考题	327
281	第五节 直接检测系统的设计	288	参考文献	328
281	一、直接检测光电系统的工作	288		
281	原理	288		

# 第一章 测控仪器设计概论

## 第一节 测控仪器的概念和组成

### 一、测控仪器的概念

按照系统工程的技术观点,可以将产品生产的技术结构分为能量流、材料流和信息流三大部分。能量流是以能量和能量变换为主的技术系统,如锅炉、冷凝器、热交换器、发动机等;材料流是以材料和材料变换为主的技术系统,如机床、液压机械、农业机械、纺织机械等;信息流则包含信息获取、变换、控制、测量、监视、处理、存储、显示等技术系统,如仪器仪表、计算机、通信装置、自动控制系统等。用信息流可以控制能量流和材料流。

仪器仪表是信息流的核心装备,是人们对物质及其属性进行观察、测定、监视、验证、分析计算、传输、控制、记忆与显示的器具总称,它是人类认识物质世界的工具。

仪器仪表的作用主要体现在测量与控制两大方面。测量是以确定量值为目的的一组操作,它用于表达物质的数量特征;控制是对信息获取、传送、执行过程的一种干预,使过程优化或更简便易行,并使结果更准确地操作。现代仪器中测量与控制功能已密不可分,如在纳米测量技术中,精密工作台的纳米级精密定位则必须使用带有检测装置的闭环控制系统,才能达到预定的高精度、高效率和高可靠性。将测量与控制组合为一体的测控系统常简称为测控仪器。

测控仪器应用是十分广泛的,它深入到国民经济的各个部门和人们生活的各个角落。如机械制造和仪器制造业中产品的静态与动态性能测试,加工过程的监测和控制,故障诊断与消除都需要用各种尺寸测量仪器、机械量测量仪器、温度测量仪器等。工业、电力、化工、石油等领域的自动化生产中为保证生产过程正常、高效运行,要对工业参数,如尺寸、温度、压力、电流、电压、流量等进行适时检测与控制;在航空、航天领域则要求更加严格,如对发动机转速、转矩、振动、噪声、动力特性等进行测量,对管道进行流量、压力测量;对工件尺寸、结构应力、强度、刚度进行静态或动态测量或无损检测;对电流、电压、绝缘强度以及对控制性能进行测量等。

测控仪器的水平是科学技术现代化的重要标志,没有现代化的测控仪器,国民经济是无法发展的。

测控仪器大致包括以下几个方面:

#### 1. 计量测试仪器

计量测试仪器的主要测量对象是各种物理量,它是先进制造业中保证产品质量和提高产品创新能力的重要手段。

(1) 几何量计量仪器 用于先进制造业和微电子制造业中各种工件的长度、角度、形

貌、相互位置、位移距离等参数的测量,如坐标测量机、扫描仪、跟踪仪等。

(2) 机械量计量仪器 如各种测力仪、硬度仪、力矩仪、振动测量仪、速度与加速度测量仪。

(3) 热工量计量仪器 包括温度、湿度、流量、压力等计量仪器和仪表,如各种测温仪器及仪表、流量计、气压计、真空计等。

(4) 时间频率计量仪器 如各种计时仪器与钟表、铯原子钟、时间频率测量仪等。

(5) 电磁计量仪器 用于测量各种电量和磁量的仪器,如各种交流、直流电流表、电压表、功率表、电阻测量仪、电容测量仪、静电仪、磁参数测量仪等。

(6) 无线电参数测量仪器 如示波器、信号发生器、相位测量仪、频率发生器、动态信号分析仪以及微波测量技术等。

(7) 光学与声学参数测量仪器 如光度计、光谱仪、色度计、激光参数测量仪、光学传递函数测量仪等。

(8) 电离辐射计量仪器 如各种放射性、核素计量, X、 $\gamma$  射线及中子计量仪器等。

以上 8 大类计量仪器在技术上是融会贯通的,有许多共性的东西,这就是计量测试仪器的设计理论和测试理论,还要研究计量基准、基准仪器、基准的传递和传递过程中的标准仪器和标准器件。

## 2. 工业自动化仪器及仪表

在石油、化工、钢铁、电力、交通、轻工、航空航天等领域使用着大量过程控制仪器仪表、智能仪器仪表以及采用现场总线技术的检测仪表及控制系统等。

## 3. 科学仪器

生命科学、材料科学、环境监测、地震监测、河流海洋监测、能源计量、农业产品品质、食品营养成分、农药及其残留量检测等关系到人类生存和发展的计量和监测仪器。

## 4. 医疗仪器

在更加关心人们身体健康的今天,医疗仪器的市场越来越广阔。医用光学仪器、医用电子仪器、医用光电仪器已经普遍应用于临床。如 X 射线影像系统、黑白与彩色超声仪器、核磁共振影像系统、内窥镜、手术显微镜及各种化验分析显微镜、激光诊疗设备等。

## 5. 自动化与网络化测试系统

在机械制造与电子信息行业中,在线自动检测系统是必不可少的。各种精密数字测量仪、无线电参数测量仪、集成电路测量仪及由它们组成的自动化测试系统被广泛地应用着。这种在线自动检测系统、加工装置与机器人构成的无人车间已经越来越多。随着网络化测试系统的发展,资源共享与远程控制已经在广泛应用。因此自动化与网络化测量仪器与通信及计算机相结合构成的自动化与网络化测量系统也是测控仪器的重要部分。

## 6. 各种传感器

传感器是测控仪器中感受与拾取被测量的重要器件,在智能化与自动化测控系统中各种原理的传感器创新性设计是测控系统创新的核心之一,各种测量长度、距离、压力、温度、流量、液位、光学、声学、电磁、电子的新型传感器以及环保、海洋、河流、生物、航空航天等领域的新原理、微型化、智能化传感器的设计与制造是国民经济发展的新兴产业。

可以看出测控仪器内容十分广泛,应用极为普遍。从科学的角度可以认为测控仪器是利用测量与控制的理论,采用机械、电子、光学的各种计量测试原理及控制系统与计算机相结

合的一种范围广泛的测量仪器。

“测控仪器设计”是“测控技术与仪器”专业的一门主修课程，是一门综合性的专业课。本课程力求从总体设计角度出发，对测控仪器的精度设计、总体设计、机械系统设计、电子系统设计和光电系统设计进行总体分析与论述，使学生学会如何从设计任务出发进行测控仪器的设计分析、计算与综合。本课程的要求是：①掌握机、电、光、计算机技术相结合的仪器总体设计的基础理论知识；②学会如何从设计任务出发，进行总体设计的方法；③具有进行仪器精度设计的能力。本门课程力求使学生在测控仪器设计中具有勇于探索、有创新思维的设计能力。

## 二、测控仪器的组成

测控仪器种类繁多，其组成也多种多样，但仍可按其各部分的功能来分成若干组成部分。为了说明测控仪器的组成，以“微电子产品视觉检测仪”为例加以说明。

图 1-1 所示是该仪器的三维外观图。从图中可以看出仪器由底座支承，在底座上装有精密工作台和立柱。精密工作台是一个具有 X、Y 两个方向位移的二维直线运动装置，在其上面安放被检测的印制电路板或者 IC 芯片。X 和 Y 方向的位移由各自的精密驱动系统驱动，两个方向的位移值由各自的光栅系统检测，由计算机进行驱动控制。在立柱上装有 Z 向运动导轨、Z 向光栅系统、可变焦的显微光学镜头及 CCD 摄像器件。Z 向运动也是由计算机控制驱动器来控制的。Z 向运动还具有自动调焦功能，通过计算机对 CCD 摄像器件摄取图像的不断分析，用调焦评价函数来判断调焦质量。被检测的印制电路板或 IC 芯片的瞄准用可变焦的光学显微镜和 CCD 摄像器件来完成。摄像机的输出经图像采集卡送到计算机进行图像处理，实现精密定位和图像识别与计算，并给出被检测件的尺寸值、误差值及缺陷状况。

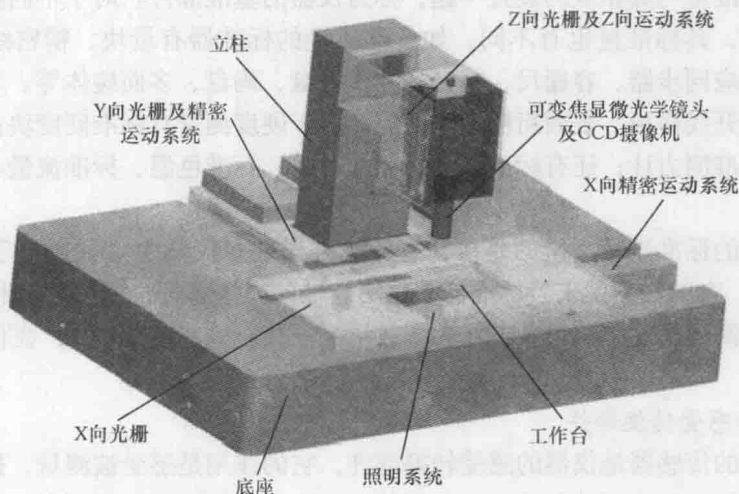


图 1-1 微电子产品视觉检测仪外观图

以上原理还可用图 1-2 所示的框图更深入地加以说明。它包括 4 个闭环控制模块。第一是检测模块，它由变焦显微镜、CCD 摄像机、图像采集卡、计算机、驱动控制和自动调焦装置组成，用于感受、拾取信号和信号变换与处理，测量过程可由监视器监测，测量结果

由计算机显示。第二个是 X、Y 向位移的运动模块，它由计算机、驱动控制、X、Y 向精密工作台和 X、Y 向光栅系统组成，用于将被测件在 X、Y 向工作台上精密定位。瞄准由第一个和第二个模块协调完成。第三个模块由计算机、照明系统、摄像机、图像采集卡组成的自适应照明控制模块，保证测量过程中照明始终均匀一致。

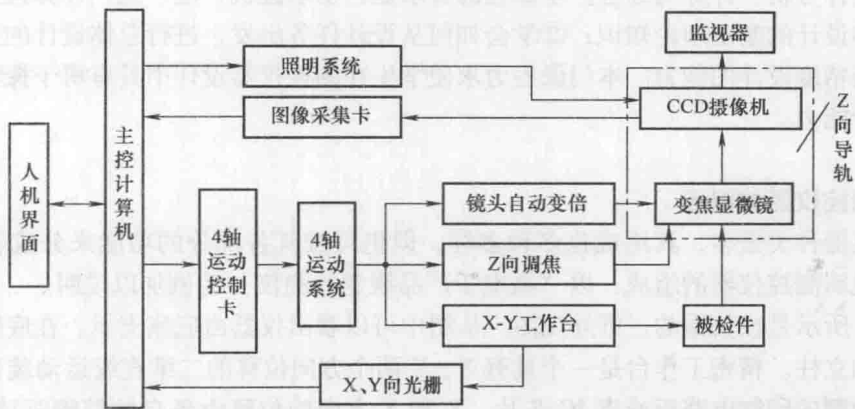


图 1-2 微电子产品视觉检测仪组成框图

对以上举例加以概括，并考虑许多典型仪器的工作原理，可以按功能将仪器分成以下几个组成部分：

### 1. 基准部件

测量的过程是一个被测量与标准量比较的过程，因此，在许多仪器中都有与被测量相比较的标准量，标准量与其相应的装置一起，称为仪器的基准部件。对于不同测量原理和不同测量对象的仪器，其标准量也有不同，如位移测量的标准器有量块、精密线纹尺、激光波长、光栅尺、感应同步器、容栅尺、精密丝杠、度盘、码盘、多面棱体等。对于复杂参数测量其标准量有渐开线样板、表面粗糙度样板等。对于硬度测量有标准硬度块；对于力学计量有标准砝码、标准测力计；还有标准频率、标准时间、标准色温、标准流量、标准色度、标准照度等。

测控仪器中的标准量是测量的基准，有的标准器装在仪器中（如微电子产品视觉检测仪中的光栅尺），有的仪器中未装标准器而是用校准的方法将标准量复现到仪器中。标准量的精度对仪器的测量精度影响很大，在大多数情况下其影响程度是 1:1，在仪器设计时必须予以重视。

### 2. 传感器与感受转换部件

测控仪器中的传感器是仪器的感受转换部件，它的作用是感受被测量，拾取原始信号并将它转换为易于放大或处理的信号。在很多情况下，感受原始信号的同时，也起信号转换的作用。它的精度对仪器的测量精度影响很大。

不同测量对象可以用不同测量原理的传感器进行感受与转换，即使是同一种测量对象也可以用不同工作原理的传感器实现信号的感受与转换，这时正确选用和设计传感器是十分重要的，通常要遵守仪器设计的精度原则和经济原则等。

常用的传感器有机械式、电子式、光电式、光学式、声学式、压电式等，其数量可多达



数千种,选用时一定要分析清楚其工作原理、精度指标、测量范围、使用场合、特点和成本。同时一定要注意按照被测参数的定义来选用和设计传感器。

### 3. 放大部件

仪器中常用的放大部件有机械式,如齿轮放大、杠杆放大、弹性及刚度放大等;有光学式,如光准直式、显微镜式、投影放大、摄影放大、莫尔条纹、光干涉等;还有电子放大、光电放大等。放大的过程中可能还伴有二次转换,最终的目的是提供进一步加工处理和显示的信号。采用电子放大和信号处理的系统称为电子信息处理系统;采用光电转换和光电放大的系统称为光电系统,如莫尔条纹系统、光干涉条纹细分放大系统等。

### 4. 瞄准部件

在有些仪器中把传感器与转换放大装置一起做成瞄准部件,用来确定被测量的位置(或零位),如图 1-2 中的瞄准和检测模块。用作瞄准时,它一般不作读数用,因此不要求有准确的灵敏度,但要求瞄准的重复性精度要好。在有些仪器中没有固定的瞄准部件,而把瞄准部件与读数部分合二为一。

### 5. 信息处理与运算装置

信息处理与运算装置主要用于数据加工、处理、运算和校正等。根据不同测量要求可以用硬件电路、单片机或微机来完成,用工业控制机则有较好的环境适应能力。由于信息处理与运算大都采用电子学方法,因此在测控系统中,把电子放大和信息处理系统归为电子系统。

### 6. 显示部件

显示部件是用指针与表盘、记录器、数字显示器、打印机、监视器等将测量结果显示出来。

### 7. 驱动控制部件

驱动控制部件用来驱动测控系统中的运动部件,如驱动测头运动、工作台运动、标准器运动、补偿与校正运动等。在测控仪器中常用步进电动机、交直流伺服电动机、力矩电动机、测速电动机、压电陶瓷等实现驱动。控制一般用计算机或单片机来实现,这时要将一个控制接口卡插入到计算机的插槽中。

### 8. 机械结构部件

仪器中的机械结构部件用于对被测件、标准器、传感器的定位、支承和运动。如精密直线运动需要高精度导轨,精度转角运动需要有精密轴系,有时还需要微调、锁紧、限位等保护机构。所有的零部件还要装到仪器的基座或支架上。这些都是测控仪器必不可少的部件,其精度对仪器总精度影响起决定作用。

## 第二节 测控仪器及其设计的发展状况与趋势

人类社会进入了信息时代,作为信息获取、测量、控制、监视、存储与显示的测控仪器,无疑是一种极其重要的信息测量与控制工具,受到广泛重视。近 20 年来,世界上工业发达国家都十分重视仪器仪表的发展,其发展速度已远远超过国民经济其他部门。我国已将信息产业作为优先发展的产业。因此,作为信息产业重要组成部分的仪器仪表必将得到加速发展。尤其是计算机与测控仪器相组合,使测控仪器精度提高、功能扩展、可靠性增加,从

而使测控仪器发展到一个新阶段。

### 一、测控仪器的发展状况和发展趋势

测控仪器的发展与生产力的发展相适应,与科学技术的发展密切相关。中国人在很早以前就对仪器的发展作出卓越的贡献,如计里鼓车、指南针、浑天仪、地动仪等都是当时的世界著名创造。蒸汽机时代世界的发明中心移到了欧洲,与蒸汽机相关的机械加工水平相适应相继出现了卡尺、千分尺、百分表、米尼表、扭簧表等机械式量仪、光学比较仪、阿贝测长仪、测量显微镜等光学仪器以及电感测微仪等电动仪器。20世纪60年代新型光源激光器的问世和电子技术的发展使仪器发展进入新的阶段,尤其是计算机技术的飞速发展使其与仪器的测量与控制相结合,实现测量自动化、测量与控制的智能化,使仪器的发展进入了测控结合的智能化阶段。该类测控仪器种类繁多,最具代表性的是三坐标测量机,它产生于20世纪60年代,它的发展鼎盛时期是1970~1990年间,目前世界上的生产厂商已超过50家,品种规格达300种以上。它由主机、测头、控制系统和计算机组成。3个坐标的测量与控制都是闭环测控系统,瞄准用的测头有机械、光学、电子、光电等各种原理的触测和扫描测头,全部控制由计算机来发出指令。目前三坐标测量机在进一步提高其测量精度和测量效率的同时正在发展非接触测量、效率更高的光学坐标测量机和使用更加方便的无导轨激光扫描跟踪测量系统。

由于机械加工水平的不断提高,尤其是微芯片的线宽已达到 $0.1\mu\text{m}$ ,因此美国测试技术委员会将纳米技术列为政府重点支持的22项关键技术之一,最近美国又将纳米科学与技术列为21世纪优先发展的重中之重的3项科技之一。日本和欧盟也都把纳米技术列为优先研究和发展的科技项目,斥巨资资助这方面的研究。作为测控仪器发展的又一新阶段,向纳米测试技术进军是测控仪器的一个重要发展方向之一。1982年G. Binnig和H. Rohrer发明了扫描隧道显微镜(STM),实现了纳米尺度的测量,其横向分辨力达到 $0.1\text{nm}$ ,纵向分辨力达到 $0.01\text{nm}$ ,并于1986年获得诺贝尔物理学奖。此后1986年研制成功的原子力显微镜(AFM)以及相继研究成功的光子扫描隧道显微镜(PSTM)、扫描近场光学显微镜(SNOM)、差分干涉显微镜(1989年)等在测量参数、测量对象、测量结果溯源等方面又有新的进展。纳米测量技术的实现和发展使人们认识自然从宏观领域进入到微观领域,从微米层次深入到分子、原子级的纳米层次(介观),同时把研究领域拓展到生物、生命技术,从而产生新的物质处理技术、新的材料和新的工艺,是一个更深层次的信息革命。纳米技术是认识和改造客观世界的一门崭新的综合性科学技术,纳米测量技术是完美测量与完美控制相结合的产物,是新型的测控技术的范例。

随着航空、航天、海洋和生物、生命技术的发展对微机电系统提出越来越多的要求,不仅要求体积小、重量轻,还要求功能多。现在卫星上用的加速度计、集成化压力传感器、微型陀螺平台、微型机器人都已研究成功。目前人们已在致力于研究将微型机械、微型传感器、微电子、微光学器件集一体的微光机电系统,这种微光机电系统的核心就是微型测控仪器。

现今的时代是信息的时代,是商品经济社会,商品活动都是快节奏的,因此对产品的加工和检测要求高效率。传统的静态测量已远远满足不了快速的生产节拍要求,因此必须发展非接触、在线快速测量技术以适应市场的要求。

通过以上对测控仪器发展历史和状况简要分析,可将其发展趋势概括为高精度、高效

率、高可靠性及智能化、多样化与多维化。

(1) 高精度、高可靠性 随着科学技术的发展,对测控仪器的精度提出更高的要求,如几何量纳米(nm)精度测量,质量的纳克(ng)精度测量等。同时对仪器的可靠性要求也日益增高,尤其是航空、航天用的测控仪器,其可靠性尤为重要。

(2) 高效率 产品生产的快节奏,必然要求测量仪器具有高效率,因此非接触测量、在线检测、自适应控制、模糊控制、操作与控制的自动化、多点检测、光机电算一体化是必然的趋势。

(3) 高智能化 新一代测控仪器在信息拾取与转换、信息测量、判断和处理及控制方面大量采用微处理器和微计算机,显示与控制系统向三维形象化发展,测量与操作向自动化发展,并且具有多种人工智能,各种各样的人工智能机将会越来越普遍。

(4) 多维化、多功能化 多维的测量空间,要求我们研究多维的测量仪器,但是多维空间是丰富多彩的,测量内容是多变的,因此要发展新型的多维测量仪器,如原子尺度的三维测量,军事侦察的空间搜索测量与空间扫描对准等。在许多场合,希望通过测量反映被测全貌,除了三维测量外还需要多参数同时测量,如同时测出某点温度、湿度和应变,这就要求一台仪器多功能化。如利用钛酸钡-钛酸锶组成的多孔陶瓷,其电容量与温度有关,电阻量则与湿度呈函数关系,这样从测得的电容和电阻就可测得温度和湿度。由集成传感器组成的测量系统,可以同时测得力、速度、振动、应变等多种参数,尤其是由微光机电系统组成的多参数融合测量仪器也是发展的重要方向。使现有仪器系列化、多样化,以满足不同用户的要求,也是势在必行的。

(5) 研究新原理的新型仪器 随着科学技术的发展,需要测量的极端参数(超高压、超高温、超低温、超大尺寸、原子空间)和特种参数(识别颜色、气味)也在增加,要求也更奇特,因此要不断研究新原理、新仪器。如仿生仪器就是仿照生物的功能、特点来开发未来的新型仪器,例如研究狗鼻的结构来探索嗅觉测量仪,研究人体功能制成相应的医疗仪器等。将光学、电学、微机械、微计算机相结合的各种军用仪器、生物仪器、监测仪器将会得到更大的发展。

(6) 研究多学科融合的新的测控技术 如研究将测量技术、控制技术、网络与通信技术、计算机技术、现代化制造技术相结合的网络化系统集成技术;结合生物技术、光学技术、电子技术、化学技术开发新的生物检测技术等。

(7) 拓宽探测的新领域 如研究原子的价态、分子结构和聚集态、固态的结晶形态、生命化学物理进程的激发态的现场检测新技术及微分析传感技术;深空探测及生命起源研究的新仪器;深海探测及海洋生物的检测新技术。

(8) 基于量子物理的计量基准研究 基于量子物理的计量基准是以量子理论为基础,研究实物基准向量子计量基准转变,因为量子计量基准比实物基准精度更高,复现性更好。如长度量子基准、物质的量的量子基准、光辐射基准、电子隧道效应电流基准、量子化霍尔电阻基准等。量子计量基准所需量子计量基准器件,如交、直流量子化电学计量基准器件,温度量子校准器件,超导量子干涉器件等的研制也是迫切需要的。

## 二、测控仪器设计的发展概况

随着科学技术的进步以及现代制造业的飞速发展,对测控仪器产品的设计提出了更高的

要求。一方面，市场竞争日趋激烈，要求提供质高、价廉且具有创新性的产品；另一方面，要求产品的设计、开发及生产周期短，及时抢占市场。如果采用直觉法、类比法以及半经验设计方法，很难满足上述要求。因此，用科学的设计方法代替经验的、类比的设计方法势在必行。

20世纪70年代以后，随着计算方法、控制理论、系统工程、价值工程、创造工程等学科理论的发展以及计算机的广泛应用，促使许多跨学科的现代设计方法出现，使工程设计进入创新、高质量、高效率的新阶段。

现代设计方法是研究设计领域内用现代科学方法进行设计的一门科学。它包括一切先进的设计理论、设计技术和设计方法，是一切先进而行之有效的设计思想的集成与统一。

现代设计方法是以设计产品为目标的一个总的知识群体的总称，它运用系统工程思想实行人—机—环境系统一体化设计，使设计思想、设计进程、设计组织更合理化、现代化；采用动态分析方法使问题分析动态化；设计管理和战略、设计方案和数据的选择广义优化；计算、绘图等计算机化。因此，有人以动态、优化、计算机化来概括其核心。

现代设计方法有如下特点：

(1) 程式性 现代设计方法研究设计的全过程，强调设计、生产与销售的一体化。设计不是单纯的科学技术问题，要把市场需求、社会效益、经济成本、加工工艺、生产管理等问题统一考虑，最终反映到质高价廉的产品上。

(2) 创造性 现代设计方法突出人的创造性，要求充分发挥设计者的创造性能力及集体智慧，力求探寻更多的突破性方案，开发创新性产品。

(3) 系统性 现代设计方法强调用系统工程思想处理技术系统问题。设计时要求分析各部分的有机联系，力求系统整体最优，同时要考虑系统与外界的联系，即人—机—环境的大系统关系。

(4) 优化性 通过优化理论及技术，对技术系统进行方案优选、参数优化及结构优化，争取使技术系统整体最优，以获得功能全、性能良好、成本低、性能价格比高的产品。

(5) 计算机辅助设计 计算机将更全面地引入到设计全过程，通过设计者和计算机的密切配合，采用先进的设计方法提高设计质量和设计速度。计算机辅助设计不仅用于计算和绘图，在信息储存、评价决策、动态模拟、人工智能等方面将发挥更大作用。

从表1-1可以看出：现代设计方法已渗透到测控仪器产品设计的各个环节。

表1-1 测控仪器产品设计过程中的方法和理论

设计阶段	设计方法	理 论
明确设计任务 (产品规则)	预测技术与方法	技术预测理论 市场学 信息学
方案设计	系统化设计法 创造性方法 评价与决策方法	系统工程学，工程图学，形态学 创造学，思维心理学 决策论，模糊学
技术设计	构形法 价值设计 优化设计 可靠性设计 宜人性设计 产品造型设计 系列产品设计	系统工程学，计算机图形学 价值工程学，力学，制造工程学 优化理论 可靠性理论 人机工程学 工业美学 相似理论