



普通高等教育“十五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学测控技术与仪器系列教材

Design of Modern Precision Instruments

现代精密仪器设计

李庆祥 王东生 李玉和 编著

Li Qingxiang Wang Dongsheng Li Yuhe

清华大学出版社



普通高等教育“十五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学测控技术与仪器系列教材

Design of Modern Precision Instruments

现代精密仪器设计

李庆祥 王东生 李玉和 编著

Li Qingxiang Wang Dongsheng Li Yuhe

清华大学出版社
北京

MAI 11/10

内 容 简 介

本书为高等工科院校“精密仪器设计”课教材,对与精密仪器设计有关的基本理论和方法及微型机电系统作了较全面系统的论述,荟萃了现代精密仪器设计的有关资料和科研成果,反映了该学科领域的当代发展水平。

全书共分 11 章,包括现代精密仪器设计概论、精密仪器总体设计、精密仪器设计的精度理论、精密机械系统、微位移技术、光学系统设计、定位与测量系统、瞄准与对准系统、自动调焦系统、精密机械伺服系统设计、微型机电系统。

本书适用于测控技术与仪器、光学工程及机电类专业大专院校师生和从事仪器科学与技术及机电类研究、设计、制造、调修的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代精密仪器设计/李庆祥,王东生,李玉和编著. —北京:清华大学出版社,2003
(清华大学测控技术与仪器系列教材)

普通高等教育“十五”国家级规划教材.北京市高等教育精品教材立项项目
ISBN 7-302-07478-X

I. 现… II. ①李… ②王… ③李… III. 仪器—设计—高等学校—教材 IV. TH702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 096172 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 张秋玲

印 刷 者: 北京牛山世兴印刷厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印 张: 35.25 字 数: 724 千字

版 次: 2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷


书 号: ISBN 7-302-07478-X/TH·118

印 数: 1~3000

定 价: 50.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

序言



近年来,我国的科教事业突飞猛进,教育与科研的投入使全国各地的高校如雨后春笋般蓬勃发展。大学的根本使命是培养人才,而要培养高水平、高素质的人才,优秀教师和高质量教材是不可或缺的两个关键因素。

回顾清华大学近 50 年的教材情况,1952 年院系调整,全面学习前苏联,所用教材几乎都源自前苏联。“文革”期间,教育事业遭到了空前的摧残,教材是“各科一本”的油印讲义。由于学生入学质量差,加之其他各种因素的干扰,导致学生只认得自己这本“讲义”,见了别的书也不知道如何去读。1978 年改革开放以后,在教育领导部门组织下,曾编写了部分统编教材。应该说统编教材集许多教师之智慧,搜集、整理、吸收了一些国内外教材的精华。但也应看到它们参差不齐。更为遗憾的是,科学技术发展日新月异,而我们的教材建设却总是滞后。

最近,我系组织教师编写本科生系列教材,总结我系教学改革成果,配合新教学计划的落实,创出新课程体系系列教材。跟上教学改革步伐,与时俱进,是值得称赞的。我感到作为大学的教材应具有科学性、可读性和新颖性。教材的内容必须科学严谨,是科学技术规律的总结,深入浅出,符合认识规律,适时新颖,适应时代的要求,反映当代科学技术的发展前沿。我系将最新的科研成果转化到教材中,融入最新的教学和科研成果,全面提升教材质量,并符合教学规律和特点。

测控技术与仪器系列教材主要涉及光学工程、仪器科学与技术两个学科本科生课程中的基础课、专业课和实践课,内容新颖,实用性强;微机电系统工程是当代学科前沿,该系列教材则几乎囊括了微机电系统的原理、器件的设计与加工等内容,立论科学,内容新颖,引人入胜。

II 现代精密仪器设计

当然,任何一本教材都需要经过教师反复使用,不断更新改进,才能成为一本优秀教材。在此,谨希望作者们在教学中多多实践,听取学生的良好意见,不断提高质量,使之成为一套优秀系列丛书。

不断提高教学和教材质量,培养高水平的学生永远是我们教师的追求。

清华大学机械学院首任院长

中国工程院院士

Handwritten signature of Qian Xuesen in black ink.

2003年2月27日于清华园

“测控技术与仪器”系列教材编委会

顾 问 (按姓氏笔画序)

金国藩(中国工程院院士)

温诗铸(中国科学院院士)

主 任 李庆祥

副主任 丁天怀 贾惠波 申永胜

委 员 刘朝儒 陈 愚 王东生 王伯雄

毛文炜 郁鼎文 郝智秀 季林红

秘 书 冯 涓 陆体军

前言

仪器仪表是认识世界的工具，是人们用来对物质(自然界)实体及其属性进行观察、监视、测定、验证、记录、传输、变换、显示、分析处理与控制的各种器具与系统的总称。它的研究内容是信息的获取、信息的处理以及信息的利用。仪器仪表发展至今已成为一门独立的学科即仪器科学与技术，而现代精密仪器则是仪器学科与技术的一个重要组成部分。

当今仪器科学技术最引人注目的发展是在生物、医学、材料、航天、环保、国防等直接关系到人类生存和发展的诸多领域中，研究的尺度深入到介观(纳米)和微观；仪器的研制和生产趋向智能化、微型化、集成化、芯片化和系统工程化；利用现代微制造技术(光、机、电)、纳米技术、计算机技术、仿生学原理、新材料等高新技术发展新式的科学仪器已成为主流，为精密仪器设计提出了新的研究课题。

随着科学技术的进步，特别是微电子技术、宇航工业、材料科学、生物工程等领域的发展，为精密仪器提供了广泛的研究领域，精密仪器已进入亚微米、纳米级的新时代。为适应科技发展的需要，赶上世界科技进步的步伐，提高我国精密仪器的水平，本书从实际出发，参照全国精密仪器设计的教学大纲编写而成。书中总结了编著者长期的教学经验与科研工作成果，荟萃了有关现代精密仪器设计理论和成果，着力反映这一学科领域的当代发展水平，能使学生充分了解和掌握精密仪器的学术动态和最新成就。同时力图做到概念清楚、深入浅出，对与精密仪器设计有关的共同性理论和方法，进行了系统地、全面地阐述。每章都有设计实例和习题，目的是便于学生自学并启发学生的创造性。

“现代精密仪器设计”是以设计为主的专业课程。其目的是使学生综合运用基础理论知识，掌握光、机、电、算相结合的现代仪器仪表设计理论和方法，以培养学生独立设计与研究现代精密仪器及微纳米系统的能力。

本书共分 11 章：

第 1 章 现代精密仪器设计概论。阐述了仪器仪表学科的重要性和我国以及国际上

这一学科当代的发展水平与发展趋势,还介绍了仪器仪表组成设计与原则。

第2章 总体设计。总体设计是“战略”性的、方向性的、把握全局性的设计。总体设计是一个战略性的工作,它的优劣直接影响到精密仪器的性能和使用。同时,总体设计又是创造性的工作,特别是现代精密仪器,是光、机、电、算技术的综合。在进行总体设计时,设计者要有创新的理念,要充分运用科学原理和设计理论。本章介绍了几种设计方法,对总体设计原则、方法及总体方案制定内容通过实例进行了讨论。

第3章 精密仪器设计的精度理论。精度(不确定度)是精密仪器及精密机械设备的核心技术指标。随着科学技术的发展,对于精密机械仪器的精度也提出了愈来愈高的要求。本章介绍了精度概念、精度评价方法、误差的来源及计算与分析方法、误差的综合及动态精度,为精密仪器的设计打下基础。

第4章 精密机械系统。精密机械系统是实现精密仪器高精度的基础,特别是当代科技发展已进入纳米时代,对仪器的功能和精度提出了更高的要求,因此对机械系统的设计与制造应给予高度的重视。本章将对精密机械系统整体设计进行阐述,着重讨论那些对系统的精度和性能影响较大部件的设计要求及提高精度的措施,具体设计原理及方法请参阅有关精密机械设计等书籍。

第5章 微位移技术。微位移技术是实现精密仪器亚微米、纳米级精度的关键技术。本章阐述了各种微位移器件的原理、特点及其应用,分析了各种微位移系统设计方法的优缺点、适用范围及达到的精度,特别是对柔性铰链微位移系统作了全面的论述,同时还介绍了目前世界上各种先进的、实用的微位移机构,供设计者参考。

第6章 光学系统设计。光学系统从本质上讲是一种传递信息的工具,是现代精密仪器的重要组成部分。本章对光学系统整体设计进行了阐述,包括光辐射源及特征、光学系统基本参数的确定、光电系统中参数的确定等并给出了光谱仪设计实例。

第7章 定位与测量系统。精密仪器精度的高低,除精密机械部分的运动精度外,很大程度上还取决于它的定位与测量系统。因此,定位与测量系统是精密仪器中的一个重要组成部分,特别是对高精度的仪器尤为重要。定位与测量系统包括激光干涉仪、光栅、线纹尺、感应同步器、磁栅及码盘等,本章重点论述了目前大量应用的高精度的光栅及干涉定位系统,并对该系统的设计和特点等问题进行了详细地分析与讨论。

第8章 瞄准与对准系统。瞄准与对准系统是精密机械与仪器中的一个重要组成部分。精密机械与仪器的核心问题是精度问题,瞄准与对准是精密机械与仪器的基准,瞄准与对准精度将直接影响仪器的精度,特别是对高精度的仪器影响更大。在设计精密机械与仪器时,寻求新的瞄准与对准方法以提高总体精度,是设计者的重要任务之一。本章介绍了瞄准与对准系统的用途与性能。对目前通用的接触式和非接触式(包括机械、光学、电学及光电子学)的瞄准方法进行了比较全面的论述,介绍了实现仪器自动化的关键技术——光电自动对准系统,包括各种对准方法及其特点、应用范围和达到的精度。

第9章 自动调焦系统。自动调焦与调平技术在精密仪器中有着广泛的应用,由于精密仪器向高精度、自动化发展,因而自动调焦、调平技术不断完善,应用范围迅速扩大,在自动化、快速化、高精度及高稳定性等方面取得了很大的进展,成为精密仪器中的一项重要技术。本章阐述了实现自动调焦的各种方案,特别对图像处理方法进行了详细阐述。

第10章 精密机械伺服系统设计。精密机械中的伺服系统是实现精密仪器智能化、自动化的基础。为了实现精密机械系统高效率、高精度、稳定运动的要求,伺服机械系统必须具有很好的快速响应性,能灵敏地跟踪指令,以达到运动精度及稳定性要求。本章介绍了伺服系统的分类、组成、设计要求及性能指标,阐述了精密机电传动系统静态参数设计与动态分析、开环与闭环伺服系统设计原理,并给出了应用实例。

第11章 微型机电系统。微型机电系统是20世纪末新兴的“微、纳米级的制造”技术领域。微电子机械系统作为21世纪重点发展的学科之一,将引起精密仪器设计与制造的革命,导致精密仪器向智能化、微型化、集成化、芯片化和系统工程化方向发展,为精密仪器设计提供新的途径与方法,应引起设计者的高度重视与密切关注,使仪器赶上“纳米”时代的步伐。目前,“微、纳米级的制造”理论尚不成熟,有待发展。本章介绍了微型机电系统国内外发展概况,阐述了微型机械物性基础、新型微型器件与系统。

本书是在《精密仪器设计》(清华大学出版社1989年出版,1996年获机械工业部优秀教材一等奖)一书的基础上,依据科学进步与教学经验进行改编的。其中第1,3,5,7,8,9章由李庆祥教授编写;第6章由王东生教授编写;第2章由薛实福教授编写;第10章由曾艳阳博士后编写;第4章和第11章由李玉和博士编写;全书由李庆祥教授统稿。

本书可供高等工科院校测控技术与仪器、电子精密机械、机电一体化及光学仪器等专业师生使用,同时也可供从事精密仪器与机械及微纳米机电系统的研究、设计、制造、使用和调修的工程技术人员学习和参考。

由于编著者水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,殷切希望读者提出宝贵意见。

编著者

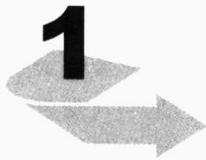
2003年3月于清华园

目录

1	现代精密仪器设计概论	1
1.1	概述	1
1.2	现代精密仪器的基本组成	7
1.3	现代精密仪器设计的指导思想、原则与程序	11
	思考题	14
2	精密仪器总体设计	15
2.1	设计方法概述	15
2.2	设计任务分析	23
2.3	主要参数与技术指标	24
2.4	总体方案的制定	34
	思考题	58
3	精密仪器设计的精度理论	60
3.1	仪器精度理论中的若干基本概念	60
3.2	仪器误差的来源与分析	76
3.3	仪器误差的计算分析方法	82
3.4	仪器误差的综合	89
3.5	仪器精度设计与误差分配	95
3.6	仪器的动态精度	98
	思考题与习题	105

4	精密机械系统	111
4.1	基座与支承件	111
4.2	精密 x - y 工作台	115
4.3	主轴系统	125
	思考题与习题	138
5	微位移技术	139
5.1	概述	139
5.2	压电、电致伸缩器件	151
5.3	电磁控制的微动工作台	158
5.4	柔性铰链	163
5.5	精密微动工作台的设计及其特性分析	172
5.6	其他类型的微位移机构	184
	思考题与习题	189
6	光学系统设计	192
6.1	概述	192
6.2	光辐射源及特征	193
6.3	信噪比的计算方法	201
6.4	光学系统基本参数的确定	205
6.5	光电系统中参数的确定	235
6.6	总体设计举例	241
	思考题与习题	247
7	定位与测量系统	249
7.1	概述	249
7.2	光栅定位测量系统	251
7.3	激光干涉定位测量系统	290
7.4	其他编码器	324
	思考题与习题	338
8	瞄准与对准系统	341
8.1	接触式瞄准方法	342
8.2	非接触式瞄准方法	353

8.3	光电自动对准系统	367
	思考题与习题	388
9	自动调焦系统	392
9.1	概述	392
9.2	图像处理自动调焦方法	395
9.3	图像清晰度判据函数的选取	399
9.4	气动调焦方法	404
9.5	其他自动调焦方法	411
9.6	自动调焦系统设计实践	424
	思考题与习题	431
10	精密机械伺服系统设计	434
10.1	概述	434
10.2	精密机电传动系统的静态参数设计与动态分析	442
10.3	开环与闭环伺服系统的设计原理	453
10.4	应用实例——高精度低速伺服转台设计	484
	思考题与习题	492
11	微型机电系统	495
11.1	概述	495
11.2	微机械的机械物性基础	500
11.3	微驱动器	517
11.4	微型传感器	526
11.5	微型机电系统	534
11.6	微型机械设计实践	539
	思考题	547
	参考文献	548



现代精密仪器设计概论

1.1 概 述

1.1.1 仪器仪表是信息的源头

仪器是认识世界的工具,是人们用来对物质(自然界)实体及其属性进行观察、监视、测定、验证、记录、传输、变换、显示、分析处理与控制的各种器具与系统的总称。仪器的功能在于用物理、化学或生物的方法,获取被检测对象运动或变化的信息,通过信息转换的处理,使其成为人们易于阅读和识别表达(信息显示、转换和运用)的量化形式,或进一步信号化、图像化。通过显示系统,以利观测、入库存档,或直接进入自动化、智能运转控制系统。它的研究内容是信息的获取、信息的处理以及信息的利用。仪器仪表发展至今已成为一门独立的学科即仪器科学与技术,而现代精密仪器则是仪器学科与技术的一个重要组成部分,其研究的对象不仅是测量各种物理量所用的仪器仪表,而且已发展成高科技具有多种功能的系统设备。

认识世界往往是改造世界的先导,所以仪器与机器也同等重要,在现代条件下,仪器往往还是生产的物质先导,历史上许多重要仪器的科研成果常常会带来生产力水平的飞跃。

1. 仪器及检测技术已成为促进当代生产的主流环节,仪器整体发展水平是国家综合国力的重要标志之一

在现代化的国民经济活动中,仪器有着比以前更为广泛的用途,涉及人类各种活动的需求,在国民经济建设中仪器的作用意义重大,在工业生产中起着把关和指导者的作用。它从生产现场获取各种参数,运用科学规律和系统工程,综合有效地利用各种先进技术,通过自控手段和装备,使每个生产环节得到优化,进而保证生产规范化,提高产品质量,降低成本,满足需求,保证安全生产。

2 现代精密仪器设计

目前,仪器及检测技术广泛应用于炼油、化工、冶金、电力、电子、轻工、纺织等行业。据悉,现代化宝山钢铁总厂的技术装备投资,1/3 经费用于购置仪器和自控系统。即使原来认为可以土法生产的制酒工业,今天也需通过精密的仪器仪表严格控制温度和生产流程才能创出名牌。

据美国国家标准技术研究院(NIST)的统计,美国为了质量认证和控制、自动化及流程分析,每天要完成 2.5 亿个检测任务,占国民生产总值(GNP)的 3.5%。要完成这些检测任务,需要大量的种类繁多的分析和检测仪器。仪器与测试技术已是当代促进生产的一个主流环节。美国商业部国家标准局(NBS)在 20 世纪 90 年代初评估仪器仪表工业对美国国民生产总值(GNP)的影响作用时,提出的调查报告中称:仪器仪表工业总产值只占工业总产值的 4%,但它对国民经济(GNP)的影响达至 66%。

仪器仪表对国民经济有巨大的“倍增器”和拉动作用。应用仪器仪表是现代生产从粗放型经营转变为集约型经营必须采取的措施,是改造传统工业必备的手段,也是产品具备竞争能力、进入市场经济的必由之路。

仪器在产品质量评估及计量等有关国家法制实施中起着技术监督的“物质法官”的作用。在国防建设和国家可持续发展战略的诸多方面,都有至关重要的作用。现代仪器已逐渐走进千家万户,与人们的健康、日常生活、工作和娱乐活动休戚相关。

2. 先进的科学仪器设备是知识创新和技术创新的前提

科学仪器是从事科学研究的物质手段。科研之成败决定于实验方法及探测仪器。有些科研工作可以用现成的商品仪器来完成,这时对仪器的配置,可以认为是科研上技术条件的后勤工作;但是当需靠仪器装备的创新开发来解决科研和生产中的关键问题时,则探索研究实验方法和仪器设备的研制,就应该是科研工作的重要组成部分,也是当前所提倡的知识创新、技术创新研究的主体内容之一和创新成就的重要体现形式。科学技术欲转化为生产力,首先要靠科学仪器仪表去认识世界。

仪器的进展代表着科技的前沿,是科学发展的支柱。能不能创造高水平的新式科学仪器和设备,体现了一个民族、一个国家的创新能力。例如电子显微镜、质谱技术、CT 断层扫描仪、X 射线物质结构分析仪、光学相衬显微镜、扫描隧道显微镜等新式科学仪器的发明,说明科学技术重大成就的获得和科学研究新领域的开辟,往往是以检测仪器和技术方法上的突破为先导的。为此,有些科学仪器越来越复杂、功能越来越多、性能越来越先进、规模也越来越大。

3. 仪器是信息的源头技术

仪器又是国家高科技发展水平的标志。特别是在今天的信息时代,仪器具有多学科综合的特点,因此仪器科技在学科上也应具有适应时代发展的独立的学术地位。只有对仪器的地位和作用树立了正确的观念,才有利于仪器事业的发展。

今天,世界正在从工业化时代进入信息化时代,向知识经济时代迈进。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,使人类正在走出机械化,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,仪器的作用主要是获取信息,作为智能行动的依据。

仪器是一种获取信息的工具,起着不可缺少的信息源的作用。仪器是信息时代的信息获取-处理-利用的源头技术。如果没有仪器,就不能获取生产、科研、环境、社会等领域中全方位的信息,进入信息时代将是不可能的。新技术革命的关键技术是信息技术。信息技术由测试技术、计算机技术、通信技术 3 部分组成。测试技术则是关键和基础。

仪器不是单纯的精密仪器,也不是单纯的精密机械加光学,而是机、电、光、计算机、材料科学、物理、化学、生物学等先进技术的高度综合的高技术。

仪器又是国家高科技发展水平的标志。特别是在今天的信息时代,仪器具有多学科综合的特点。

1.1.2 我国现代精密仪器发展的状况

我国古代就已发明创造了各种仪器,如算盘、指南针、记里鼓车、地动仪等。但是由于长期处于封建统治之下,社会生产力始终停留在较低的水平上,因而其发展远远地落后于世界水平。

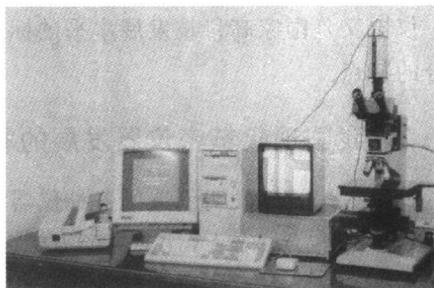
解放前,我国长期遭受帝国主义的掠夺和反动派的残酷统治,根本谈不到有仪器工业,仅有的几家小型企业,技术落后、设备陈旧,只能生产一些教学仪器、电工测试仪表以及温度计、压力表等产品。解放后我国的仪器工业几乎是从零开始发展起来的。1955 年制定的 12 年科技远景规划,发展仪器仪表工业是其中的第 54 项,在国家科委设立了专家组,成立了仪表总局,建设了一批门类比较齐全的仪器仪表的生产和科研基地,为钢铁、煤炭、电力、石油、化工、轻纺、交通等国家经济建设各行业,为国防建设、“两弹一星”及科学研究做出过积极而有成效的贡献。仪器仪表工业也得到了相应的重视和发展,针对我国仪器工业出现的上述情况,1995 年,20 位院士联名向国务院递交了“关于振兴仪器仪表工业的建议”,得到了国家多方面的重视和支持。国家计委、经委、科技部、科学院、自然科学基金委等部门为科学仪器的发展做了一定的安排。科技部颁发了“关于九五期间科学仪器发展的若干意见”,并将科学仪器研究开发列为“九五”国家科技攻关计划。这些措施的实施对振兴我国的科学仪器事业正在产生积极的影响。近年来我国科学仪器研究工作有了很大发展,在生物、医学、材料、航天、环保、国防等直接关系到人类生存和发展的诸多领域中取得了可喜成果,部分科研已达到或接近世界先进水平,例如中国科学院的原子力显微镜、清华大学的大型检测集装箱系统、微纳米检测仪器(如图 1-1、图 1-2)等等,尺度深入到介观(纳米)和微观领域。在国家基金委和“985”,“973”,“863”计划支持下,在

智能化、微型化、集成化、芯片化和系统工程化及微型元器件(例如图 1-3、图 1-4、图 1-5、图 1-6)都取得了可喜的进步,但是尚未形成批量生产。同时,还应该看到,现在我国科学仪器事业还处在十分被动的局面,与世界先进水平的差距还在不断扩大而不是逐年接近,大量高档的仪器和重大设备,主要依赖进口。1995 年仪器仪表进口为机械工业进口设备的第一位。据有关部门对分析仪器的调查统计表明,目前国外分析仪器占据我国市场的份额仍然高达 70% 以上!全自动生化仪器、高档医疗仪器和科学仪器几乎全部是进口的。在工程建设配套中,过去还常使用国产仪器,而现在则以配套进口仪器作为现代化的象征。



测量范围: 10nm~2000nm
测量精度: 1nm

图 1-1 表面形貌测量系统



测量分辨率: 0.01 μm
测量精度: $\pm 0.05\mu\text{m}$

图 1-2 线宽测量仪器系统图

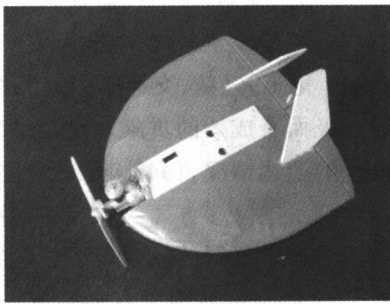
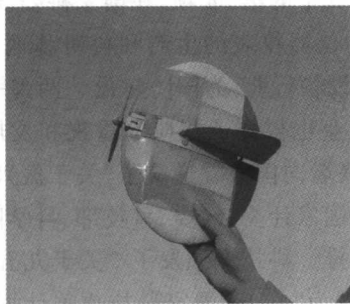


图 1-3 微型飞行器

仪器工业应是我国的支柱产业,尽管现在处在弱势,但代表着国家的科技发展水平,一定要使我国支柱性的民族仪器工业成长起来。

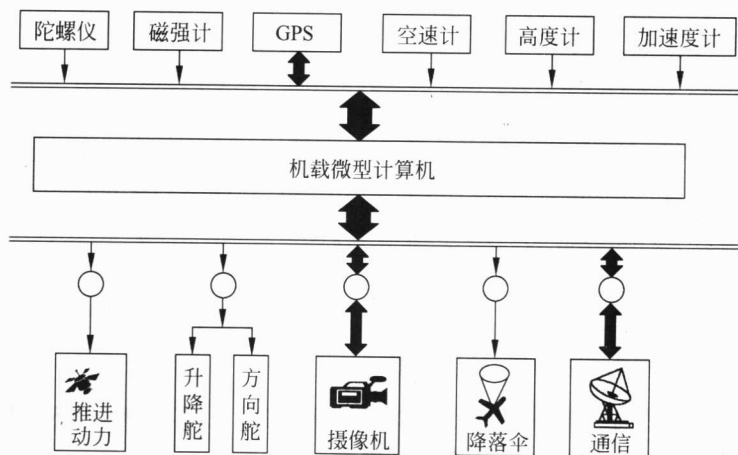


图 1-4 微型飞行器测控组合

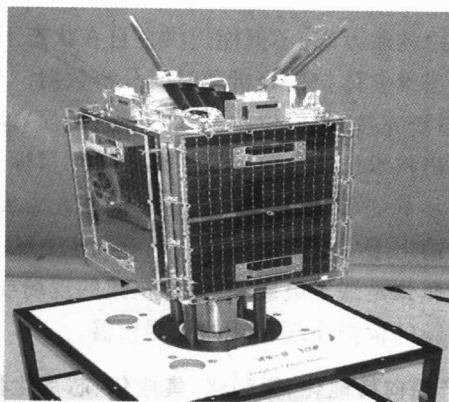


图 1-5 航天清华一号

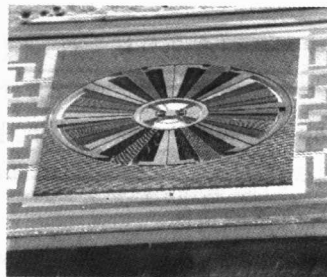
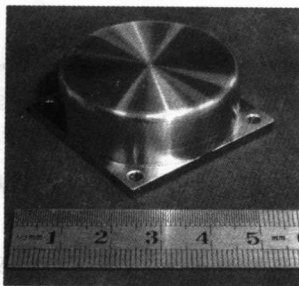


图 1-6 微机械陀螺仪