

清华大学测控技术与仪器系列教材

Design of Precision Machinery

精密机械设计

徐峰 李庆祥 编著

Xu Feng Li Qingxiang

清华大学出版社

清华大学测控技术与仪器系列教材

内容简介

本书是清华大学测控技术与仪器系列教材中的一本，主要介绍精密机械的设计理论与方法。全书共分八章，第一章介绍精密机械的概述，第二章介绍精密机械的精度设计，第三章介绍精密机械的公差设计，第四章介绍精密机械的装配设计，第五章介绍精密机械的润滑设计，第六章介绍精密机械的密封设计，第七章介绍精密机械的防腐设计，第八章介绍精密机械的可靠性设计。本书可作为高等院校测控技术与仪器专业及相关专业的教材，也可供从事精密机械设计的工程技术人员参考。

Design of Precision Machinery

精密机械设计

徐峰 李庆祥 编著

Xu Feng Li Qingxiang

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书详细阐述了精密机械中常用机构和零、部件的工作原理、适用范围、设计计算方法、工程材料的选择、结构设计原则、精度分析的基础知识和误差计算的方法等。内容包括：精密机械系统设计总论，摩擦轮传动，挠性传动，精密齿轮传动，螺旋传动，杠杆传动，滑动轴承，滚动轴承，仪表特种支承，轴与精密轴系，精密机械导轨，精密机械常用装置，精密机械中的联接，弹性元件，典型精密机械设计举例。

本书是高等学校仪器科学与技术类精密机械、精密仪器、光学仪器、自动化仪表等专业学习精密机械设计的教材，亦可作为其他机电结合专业学习(精密)机械设计基础的教材，还可供有关工程技术人员参考使用。

版权所有，翻印必究。举报电话：010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

精密机械设计/徐峰,李庆祥编著. —北京:清华大学出版社,2005.12

(清华大学测控技术与仪器系列教材)

ISBN 7-302-11997-X

I. 精… II. ①徐… ②李 III. 机械设计—高等学校—教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 119605 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：清华大学印刷厂

装 订 者：三河市新茂装订有限公司

发 行 者：新华书店总店北京发行所

开 本：185×230 印 张：40.25 字 数：852 千字

版 次：2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 7-302-11997-X/TH·177

印 数：1~3000

定 价：56.00 元

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。

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



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 恩 王东生 王伯雄

毛文炜 郁鼎文 郝智秀 季林红

秘 书 冯 涓

前言

在全国高等院校中,精密机械设计是仪器科学与技术类专业,如精密机械、精密仪器、光学仪器、自动化仪表等的一门主干专业基础课程,其任务是通过课堂教学、实验和课程设计使学生掌握从事精密机械结构设计所必须具备的基础理论,培养学生独立进行精密机械设计的能力。

为了适应精密机械设计的需要,本书从设计的实际出发,将精度分析和误差计算作为编写的重点,即以精度为主,以精度概念贯穿始终。鉴于强度计算也是设计精密机械必须满足的基本要求,本书也给予了应有的重视,但在突出仪器强度计算特点的基础上,作了必要的简化。零、部件的设计最终必须以完善的结构来体现,本书将精密机械中常用典型结构的设计和工艺性等理论与实际应用相结合,并充实了结构实例。为了适应现代科技发展的需要,本书对微电子技术和精密测试设备所必需的微细加工中的精密轴系、精密工作台以及相关结构,如机械中的联接、压力弹性敏感元件等的设计和应用作了较详细的论述,在机与电结合方面指出了精密机械的发展方向。

本书在清华大学、上海机械学院(现改名为上海理工大学)和上海交通大学三校共同编写的《精密机械与仪器零部件设计》的基础上,重新进行了编写。根据精密机械的发展现状,结合多年来的教学和科研经验,并参考相关的《精密机械设计》和《机械设计》的教材,以突出重点、加强基础、逐步更新、便于学生自学为原则,编写了这本教材。全书共15章,参加编写的人员有清华大学仪器科学与技术研究所的李庆祥教授和徐毓娴教授等。

限于编者水平,错误之处在所难免,敬请读者批评指教。

编者

2005年于清华园

目录

1 精密机械设计总论	1
1.1 精密机械在现代科学技术中的地位	1
1.2 精密机械设计的研究对象、性质和特点.....	2
1.3 精密机械设计的基本要求、程序和方法.....	4
1.4 精密机械设计中的精度分析和误差计算.....	10
1.5 精密机械设计的强度问题.....	13
1.6 精密机械结构设计的基本原则.....	20
1.7 精密机械设计中材料的选用与处理.....	24
1.8 零件的几何精度.....	32
1.9 零件的表面粗糙度.....	53
1.10 机械设计中的摩擦、磨损和润滑.....	62
习题	68
2 摩擦轮传动	70
2.1 机械传动的基本概念.....	70
2.2 摩擦轮传动的基本原理和特点.....	71
2.3 摩擦轮传动中的滑动.....	76
2.4 摩擦轮传动中的强度计算.....	78
2.5 定传动比摩擦轮传动设计.....	80
2.6 变传动比摩擦轮传动简述.....	83
习题	83

3	挠性传动	85
3.1	挠性传动的工作原理和特点	85
3.2	带传动	86
3.3	同步带传动	109
3.4	其他带传动简介	118
	习题	121
4	精密齿轮传动	122
4.1	精密齿轮传动的特点、类型和设计要点	122
4.2	齿轮传动类型的选择	127
4.3	总传动比、传动级数、各级传动比的确定和分配	128
4.4	齿数和模数的确定	141
4.5	齿轮传动的失效形式和材料	144
4.6	圆柱齿轮传动的强度计算	149
4.7	圆锥齿轮传动	164
4.8	蜗杆传动	168
4.9	齿轮传动的精度分析和误差计算	181
4.10	传动链中的力矩计算	196
4.11	齿轮传动的结构设计	198
4.12	谐波齿轮传动	206
	习题	214
5	螺旋传动	216
5.1	螺旋传动的类型、特点和应用	216
5.2	滑动螺旋传动的设计	218
5.3	螺旋传动的误差分析及提高传动精度的措施	232
5.4	滚珠螺旋传动	242
5.5	静压螺纹传动简介	247
	习题	248
6	杠杆传动	249
6.1	杠杆传动的类型、特点和应用	249
6.2	曲柄滑块机构	250
6.3	正弦机构和正切机构	254
6.4	杠杆传动设计的基本原则	255

习题	264
7 滑动轴承	265
7.1 轴承的类型和要求	265
7.2 滑动轴承的特点、类型和材料	266
7.3 普通圆柱形滑动轴承的设计与计算	270
7.4 圆锥形滑动轴承的设计与计算	274
7.5 滑动轴承的润滑	276
7.6 液体动压和静压向心滑动轴承的工作原理	279
7.7 空气静压滑动轴承设计	284
习题	290
8 滚动轴承	291
8.1 滚动轴承的结构、特点和应用	291
8.2 标准滚动轴承的基本类型和选用原则	293
8.3 滚动轴承的代号	297
8.4 滚动轴承尺寸(型号)的选择计算	302
8.5 滚动轴承组合的结构设计	332
8.6 非标准滚动轴承	339
习题	341
9 仪表特种支承	343
9.1 宝石支承	343
9.2 弹性支承	354
9.3 电磁支承	359
习题	360
10 轴与精密轴系	361
10.1 轴的类型、要求和材料	361
10.2 轴的设计计算	364
10.3 轴的结构设计	371
10.4 精密轴系的基本要求和类型	377
10.5 水平精密轴系	379
10.6 垂直(竖)精密轴系	385
10.7 其他精密轴系	390

10.8	提高轴系精度的措施	391
	习题	392
11	精密机械导轨	395
11.1	精密机械导轨的作用、类型和主要质量指标	395
11.2	滑动摩擦导轨	399
11.3	滚动摩擦导轨	406
11.4	滑动、滚动导轨设计中的几个主要问题	419
11.5	弹性摩擦导轨	431
11.6	液体静压导轨	436
11.7	空气静压导轨	450
11.8	直线电磁导轨	464
11.9	微位移技术在精密导轨中的应用	472
	习题	485
12	精密机械常用装置	487
12.1	示数装置	488
12.2	记录装置和计数装置	497
12.3	锁紧装置	502
12.4	减振器	504
	习题	515
13	精密机械中的联接	516
13.1	联轴器与离合器	516
13.2	零件的联接	532
13.3	光学零件与结构零件的联接	553
13.4	精密机械中选用联接结构的基本原则	557
	习题	557
14	弹性元件	558
14.1	弹性元件的类型和应用	558
14.2	弹性元件的基本性能	559
14.3	弹簧设计	564
14.4	压力弹性敏感元件设计	581
14.5	游丝	597

习题.....	600
15 典型精密机械设计举例	602
15.1 设计要素.....	602
15.2 精密机械精度设计与误差分配.....	604
15.3 设计方案举例.....	607
参考文献	626



精密机械设计总论

1.1 精密机械在现代科学技术中的地位

精密机械是现代科学技术的基础,是仪器仪表工业的一个重要支柱。随着生产和科学技术的不断发展,精密机械的应用范围越来越广泛。国防、工业、农业、科技等国民经济部门乃至人们的日常生活都离不开它。特别是 20 世纪 80 年代以后,由于微电子技术、信息科学、能源科学、材料科学、海洋工程、生物工程、宇航工业和智能机器人等新的科学技术的兴起,对机械的精度、质量和可靠性等提出了愈来愈高的要求,精密机械作为机械领域的一个分支被突现出来。

现代精密仪器属于技术高度密集型的产品,集自动化、智能化、机械于一体,是机电一体化技术发展最为迅速的领域。精密机械是精密仪器的重要组成部分,事实上它已不再是纯机械类的精密机械元件或零部件的组装,而是精密机械技术、电子技术(包括计算机控制技术)和检测技术(包括光电检测)的结合体,也就是通常所说的机、电、光相结合。

20 世纪 80 年代,日本提出了“精密工程”,前联邦德国提出了“精密技术”的概念,有些国家还设立了“微细技术”专业。这都表明,为了适应现代科学技术发展的需要,对于从事精密机械领域工作的工程技术人员,不仅要具备精密机械技术方面的知识,而且还要掌握电子技术和其他领域的技术,并把这些技术结合起来。现代精密机械技术已经成为多学科的综合技术,只有这样才能推动现代科学技术的进步。例如,目前微电子技术已由大规模向超大规模发展,而且随着集成度的不断提高,图形线条的宽度也越来越细,其性能每过 18 个月提高 1 倍,其加工图形的特征尺寸每 3 年更新一代,体积不断地缩小。目前在深亚微米超精细微加工工艺的支持下,硅片上制作 CMOS 的图形特征尺寸已达到 $0.18\sim 0.13\mu\text{m}$,正逼近 100nm 的水平,并向 100nm 以下发展,今后的目标是 35nm。制造这样的微细线条,必须要有整套高精度的微细加工和精密测试设备。这些设备的数量,一般要占整个生产线上设备总数的 1/3 以上。集成电路超精细微加工包括光刻、刻蚀、氧

化、扩散、掺杂、溅射、CMP 等工艺,涉及近百道工序,工艺复杂,设备精度要求极高。其中实现超微图形成像的光刻技术一直是推动 IC 工艺技术水平发展的关键。这些精密设备把激光定位技术、计算机控制技术和精密机械技术结合起来,组成一个精密机械系统,其中满足上述要求的精密机械技术是基础。

我国精密机械的发展速度很快,但与国际先进水平相比,还存在着不小的差距。由于精密机械的零部件是精密机械的基础,因此在很大程度上零部件的水平决定着整机的水平,零部件的质量决定着整机的质量。为了振兴我国的仪器仪表工业,赶超世界先进水平,首先要打好基础,要把精密机械的研究与应用迅速搞上去,这是学好本课程的最最终目的。

1.2 精密机械设计的研究对象、性质和特点

1.2.1 研究对象

图 1-1 所示为用于光盘母盘刻制的刻录机系统。该系统由光学系统、精密机械和机电驱动控制 3 部分组成,包括:激光器光盘刻录光学系统;周向气浮主轴旋转及精密机械工作台以保证刻写光学头的定位、微进给;闭环伺服驱动系统、光栅检测定位系统以及总体控制系统。图 1-2 概括说明了刻录机系统的原理。

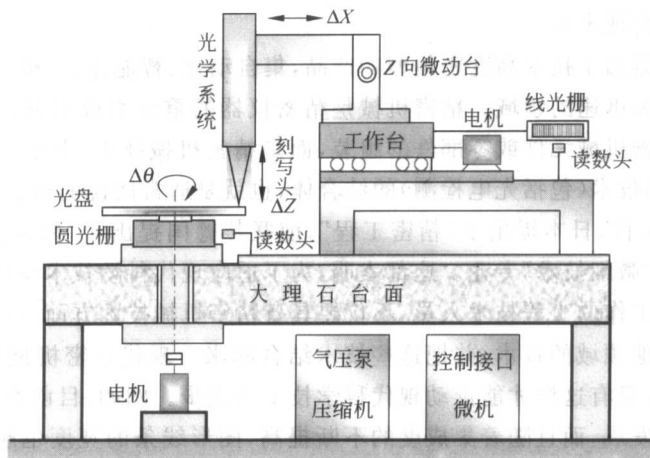


图 1-1 刻录机系统图

由图 1-1 和图 1-2 可知,该设备是一个自动跟踪控制的精密机械系统。图中光盘通过法兰盘或定位锁紧装置固定在气浮主轴上,保证周向旋转运动的精度;刻写光学头安装于精密工作台上,采用高精度滚珠-V 槽导轨结构,减速比 $i=60$ 的蜗轮蜗杆减速和螺距

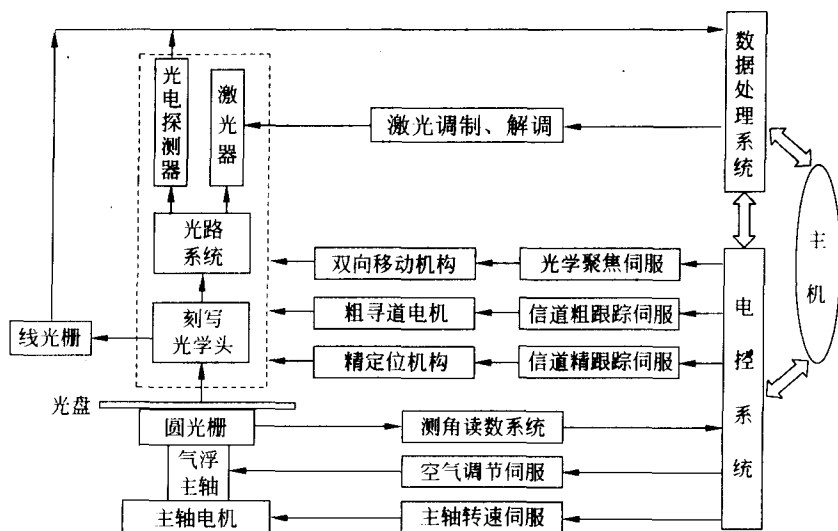


图 1-2 刻录机系统原理说明图

为 $t=0.6\text{mm}$ 的小螺距精密丝杠传动机构,分辨率 $=\frac{0.6}{360^\circ i}=0.028\mu\text{m}/(^\circ)$,可保证较高的驱动、定位以及径向的进给精度。Z向微动台,采用摩擦轮传动原理,通过蜗轮蜗杆、齿轮齿条传动机构获得优于 $0.1\mu\text{m}$ 的微动灵敏度。

图 1-3 示出精密工作台的传动原理,图 1-4 示出 Z 向微动台的结构。

以上实例表明,在光盘刻录机系统或其他精密机械系统中,机械部分所起的作用是极为重要的。任何精密机械系统的质量,首先取决于机械部分。

本课程的研究对象是精密机械中常用机械类零件和部件的工作原理和设计计算方法,涉及精密机械设计的基本要求、原理、程序和方法。其中设计计算包括结构设计、理论计算、精度分析、误差计算等。

常用的机械类零件和部件主要是以下 3 类。

- (1) 机械传动:包括摩擦轮传动、挠性传动、精密齿轮传动、螺旋传动和杠杆传动;
- (2) 轴系和导轨:包括轴与精密轴系,轴的支承——滑动轴承、滚动轴承、仪表特种支承,轴的联接——联轴器和离合器,精密仪器导轨、微位移技术;
- (3) 其他常用零部件:包括弹性元件、零件的联接,示数、记录、锁紧装置和隔振器等。

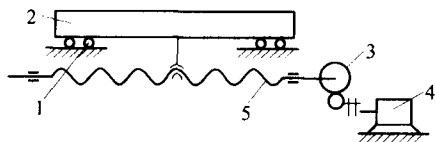


图 1-3 精密工作台的传动原理

1—滚珠导轨; 2—工作台; 3—蜗轮;
4—电机; 5—丝杠

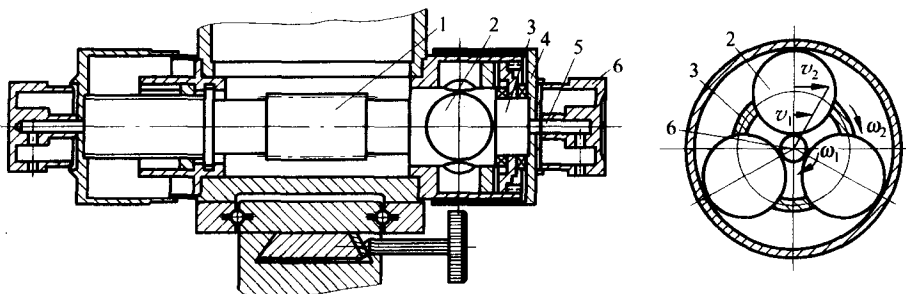


图 1-4 Z 向微动台的结构图

1—蜗杆；2—摩擦钢球；3—空心轴；4—联蜗杆轴套；5—手轮轴；6—手轮

1.2.2 本课程的性质

课程的性质由研究的对象决定,因此本课程的性质是:

(1) 它是仪器科学与技术学科各专业的一门技术基础课,介于普通技术基础课与专业课之间,为专业课服务,并称为专业技术基础课。同时它也是仪器仪表类各专业如电子技术、材料科学、自动控制等融合在一起的一门主干课程,具有承上启下的重要作用。

(2) 它是一门工程设计性质的课程。

1.2.3 本课程的特点

由于工程设计本身就是解决生产实际中的问题,而生产实际中的问题又较为复杂,因而本课程的特点是:

(1) 综合性强。在设计中要综合运用以前已学过的机械制图、工程力学、机械原理、互换性与技术测量、金属材料、精密仪器工艺等所有知识以及本课程中将要研究的知识,必要时还需自行拓宽有关的知识。

(2) 实践性强。在设计中必须从工程实际出发。零部件的好坏会在整机上体现,为此在设计中一定要坚持“以整体为出发点和归宿”的思想。此外,设计中还需运用各种设计手册、图表资料,运用优化设计、计算机仿真以及相应的实验等手段,科学地解决实际工程问题。

1.3 精密机械设计的基本要求、程序和方法

1.3.1 基本要求

在生产实际中,对精密机械设计所提出的基本要求主要有使用和经济两大类。

1. 使用要求

使用要求又称技术要求,是指使用者对设计所提出的必须满足的技术指标,一般因精密机械的用途及使用条件而提出,大体上可分为以下几个方面。

(1) 基本功能与性能:基本功能主要由用途决定,基本性能主要是指性能要求。性能要求通常用性能指标表示,例如在设计某精密 X-Y 工作台时,由使用者提出了如下要求:①工作台移动范围 (x, y) : $130\text{mm} \times 130\text{mm}$;②工作台定位精度 (x, y) : $\pm 0.6\mu\text{m}$;③工作台重复定位精度 (x, y) : $\pm 0.25\mu\text{m}$;④工作台移动速度 (x, y) : 2.5mm/s ……在这些指标中,最核心的是精度指标,这是由精密机械本身的任务所决定的。为此,在设计时一般要进行精度分析和误差计算。

(2) 可靠性与稳定性:指在一定的使用条件下和规定的使用期限内,工作要可靠、稳定,要能按规定要求完成预定的功能和实现基本性能指标。要做到这一点,精密机械的零部件应该具有足够的强度、刚度和耐磨性等。为此,在设计时应根据具体情况进行相应的强度、刚度和耐磨性等方面的计算,其中最核心的计算是刚度计算。

(3) 精度要求:精度是精密机械的一项重要指标,设计时必须保证精密机械正常工作时所要求的精度。例如轴的回转精度、导轨的导向和移动定位精度等。

(4) 其他特殊要求:指根据使用条件不同,对精密机械提出的附加设计要求。例如,产品的外形要求美观大方、色泽柔和;仪表板上的仪表要排列紧凑、合理;航空和航天仪表要求重量轻、体积小;恶劣环境中的仪表,如用于海洋船舶上的仪表,要求耐高温和低温、防腐蚀、密封性能好等。此外还要求维修简单、使用操作方便等。

2. 经济要求

这是在满足使用要求的前提下必须满足的又一基本要求。经济性好即成本低。成本包括设计成本、制造成本和使用成本。成本的高低主要取决于结构设计的好坏。任何一个设计最终都必须以完善的结构来体现。所以在设计精密机械时,结构设计(包括结构工艺性)是一个极为重要并必须妥善解决的问题。同时要求机械零部件的机构简单,材料选择合理,工艺性好,在可能的情况下,尽量采用标准设计尺寸和标准零件。

在正确处理结构、精度和强度设计时,还应充分注意产品的先进性、可行性和经济性三者之间的关系,即设计的产品首先应该是满足科学发展的时代特点,具有先进性,然后是满足生产实际的技术性能和使用要求,最后是经济性能好。

1.3.2 设计程序

明确了基本要求以后,必须按一定的程序,才能一步一步地完成设计任务。产品的设计大体上有 3 种类型:开发性设计,即利用新原理、新技术设计新产品;适应性设计,即保留原有产品的原理及方案不变,为适应市场的需要,只对个别零件或部件进行重新设计;