

普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

精密机械 结构设计

蒋秀珍 主编

Jiang Xiuzhen

**Precision Machinery
Structural Design**

清华大学出版社

普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

精密机械结构设计

Precision Machinery Structural Design

蒋秀珍 主编
Jiang Xiuzhen

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书将精密机械设计与现代工业生产技术相结合,用案例的方法推进了理论与实践的结合,系统地阐述了精密机械中各种常用机构,零部件的结构设计与工作原理及计算方法。内容包括:平面连杆机构的原理与设计,齿轮机构的原理与结构设计,同步带传动原理与结构设计,零件的连接,轴系零、部件,直线运动机构,凸轮与槽轮机构,弹性元件,微机电系统基础。

本书适用于测控技术与仪器专业、自动化专业、电气工程及自动化专业、光电信息工程专业、电子信息、探测制导与控制技术、工程力学等专业作为必修课教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

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

精密机械结构设计/蒋秀珍主编.--北京:清华大学出版社,2011.4

(普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材)

ISBN 978-7-302-24287-1

I. ①精… II. ①蒋… III. ①机械设计:结构设计—高等学校—教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 252125 号

责任编辑:张占奎

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

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 刷 者:北京季蜂印刷有限公司

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:17.75 字 数:428 千字

版 次:2011 年 4 月第 1 版 印 次:2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:33.00 元

产品编号:034642-01

普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

编 委 会

主 任 丁天怀

副 主 任 陈祥光 张 玘

委 员 (按姓氏笔划排列)

王跃科 王光明 邓 焱

安志勇 张文娜 李东升

赵 军 蒋秀珍 魏 彪

责任编辑 张占奎

序

PREFACE

在高技术迅速发展的信息时代,我国仪器科学与技术学科在理论研究、计量基准、产品制造技术、新器件、新材料、新工艺的研究和应用等方面已日趋完善,并形成门类品种比较齐全、布局较为合理、具有相当技术基础和生产规模的仪器仪表产业体系。作为仪器科学与技术学科唯一的本科专业——测控技术与仪器专业的发展速度很快,在近 10 年的时间内,其办学规模大约翻了两番,呈现出招生和分配两头热的良好状态,顺应了信息技术蓬勃发展的趋势。

在学科的建设和发展中,教材建设始终是关注的焦点。鉴于此,2008 年,经清华大学出版社建议,由清华大学牵头组织国内一些在本领域有丰富教学科研经验的专家学者编写一套体系合理、知识实用、内容涵盖面较广的仪器科学与技术学科本科专业系列教材,以满足各兄弟院校本科专业人才培养的需求。

2008 年 7 月,在广泛征求意见的基础上,清华大学、北京理工大学、国防科技大学联合召开会议,讨论仪器科学与技术专业教材的编写思路,并参考“高等学校仪器科学与技术学科本科专业教学规范”初步确定教材定位与结构。为使教材具有代表性并保证更高的编写质量,决定邀请重庆大学、哈尔滨工业大学、中国计量大学、长春理工大学等高校的老师共同组成“普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材”编委会,一起完成教材的组织和编写工作。

2008 年 11 月,编委会正式成立,并在北京召开编委会第 1 次工作会议,进一步明确了本系列教材的具体编写任务和计划。

本系列教材旨在为普通高等学校仪器科学与技术学科本科专业以及其他相关专业的本科生提供一套教学参考书,希望突破传统编写思维的束缚,建立一个新体系。教材内容注重新理论、新技术的应用。每本教材拟采取一校为主、多校合作的方式编写,以保证“新颖性、前沿性和实用性”。

经过编委会认真讨论,本系列共设 15 本教材,分别是《仪器科学与技术概论》、《信号分析与处理》、《自动控制原理及应用》、《误差及不确定度理论与数据处理》、《计量技术》、《测量原理》、《传感器技术》、《工程光学基础及应用》、《测量技术基础》、《精密机械结构设计》、《仪器嵌入式系统技术》、《精密测控仪器设计》、《测控系统工程技术》、《仪器测控电路设计》、《测控系统集成技术》。在内容的组织和编排上,与学生已学过的专业基础课程的内容成先后关系,一般要求学生在进入本系列的专业课程学习之前,应先修诸如“电路原理”、“电子技术”等课程。

2009 年 7 月,编委会第 2 次会议在北京召开,对各教材大纲逐一进行了审查,并明确了编写进度以及编写过程中需要注意的问题,整个教材编写工作进展顺利。

这套教材基本涵盖了仪器科学与技术学科本科专业的主要知识领域,同时也反映了仪器科学与技术学科的发展趋势,不仅适用于普通高等学校测控技术与仪器、机电工程、信息技术、自动化等专业的本科生使用,对研究生、高职学生以及相关专业的工程技术人员也有很好的参考价值。

因水平所限,加之仪器科学与技术学科发展迅速,教材中不妥之处在所难免,欢迎批评指正,以便再版时修改、完善。

编委会

2010年12月于北京

前言

FOREWORD

本书是根据教育部仪器科学与技术教学指导委员会 2007 年 7 月通过的高等学校仪器科学与技术学科测控技术与仪器专业教学规范的核心知识点编写的。

本书作者根据长期的教学改革、教学实践经验,考虑到学生认知规律,结合工业技术的最新发展,将科研成果、工业技术及科学的设计理念、设计方法融入本书中,以案例教学、理论教学、大作业、课程设计、同步训练的方式,组织编写了本教材。

本书将精密机械设计理论与现代化工业生产技术相结合,在传统设计理论的基础上,融进了大量的在线生产的国家标准机构与选型设计方法,以案例的形式推进了理论与实践的联系,便于学生理解及提升应用能力。

本书最突出的特色是实用性、时效性和创新性。每章后面都有案例,所有案例都来自科研成果和工业在线产品,是作者长期在教学、科研第一线的心血结晶。内容新,与现代工业结合紧密。知识点全面、精练。

学生通过案例容易掌握每章内容的精髓,熟悉当前工业中应用的最新设计理念与方法。易于提高学生的创新能力。

使用本教材教学时,最好采用精讲多练的教学方法,以工程实例训练提高学生的设计能力。

本书以较新的视觉,系统的阐述了现代工业生产中常用机构的结构设计、原理设计与思路创新方法。为培养学生对精密机械结构的分析与设计能力,本书还配有配套教材《机械学基础综合训练图册》,可供课内上课课后大作业、课程设计、毕业设计时使用。

本书由仪器科学与技术教学指导委员会委员哈尔滨工业大学蒋秀珍教授主编,参编人员有蒋秀珍(第 1、2、5、6 章),马惠萍(第 3、7 章),刘丽华(第 8 章),叶东(第 4 章),张晓光(第 9 章)。本书插图由张晓光制作。

本书配有电子课件,欢迎选用本书做教材的老师索取,索取信箱: zhangzhk@tup.tsinghus.edu.cn

作者
2010 年 8 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 平面连杆机构的原理与设计	1
1.1 机构的结构分析	1
1.1.1 机构的组成	1
1.1.2 平面机构的运动简图	2
1.1.3 平面机构的自由度	4
1.1.4 应用实例分析	8
1.2 铰链四杆机构的类型和应用	9
1.2.1 铰链四杆机构的基本形式	9
1.2.2 铰链四杆机构的曲柄存在条件	11
1.2.3 铰链四杆机构的演化	12
1.3 铰链四杆机构的主要特性	14
1.4 平面连杆机构的设计	17
1.4.1 按照给定的行程速比系数设计四杆机构	17
1.4.2 按照给定连杆位置设计四杆机构	17
1.4.3 按给定两连架杆间对应位置设计四杆机构	18
1.4.4 按给定的轨迹设计平面四杆机构	19
1.4.5 按传动特性设计连杆机构	20
1.5 应用实例——遥控板仪表综合设计	24
习题	28
第 2 章 齿轮机构的原理与结构设计	31
2.1 概述	31
2.2 渐开线齿轮基本参数与尺寸计算	33
2.2.1 渐开线齿廓及方程式	33
2.2.2 渐开线齿轮各部分名称、代号及基本参数	34
2.2.3 渐开线标准圆柱齿轮传动几何尺寸	36
2.2.4 渐开线齿轮正确连续啮合的条件	38
2.3 齿轮加工原理和根切现象	41

2.3.1	成形法	41
2.3.2	范成法	41
2.3.3	根切现象	43
2.4	变位齿轮传动	45
2.4.1	变位齿轮的形成和特点	46
2.4.2	变位系数的确定	46
2.4.3	变位齿轮传动的分类及其应用	47
2.5	斜齿圆柱齿轮传动	49
2.5.1	斜齿圆柱齿轮的形成及传动特点	49
2.5.2	斜齿圆柱齿轮几何尺寸计算	50
2.5.3	斜齿轮的当量齿数	51
2.6	直齿圆锥齿轮传动	52
2.7	蜗杆传动	53
2.7.1	蜗杆传动原理和特点	53
2.7.2	蜗杆传动的主要参数及转动方向	54
2.7.3	蜗杆传动的几何尺寸计算	56
2.8	轮系	57
2.8.1	定轴轮系传动比计算	58
2.8.2	周转轮系传动比计算	59
2.8.3	复合轮系的传动比计算	61
2.8.4	谐波齿轮传动	62
2.9	按强度条件设计齿轮传动	63
2.9.1	轮齿的破坏形式、设计准则和材料	63
2.9.2	直齿圆柱齿轮传动的作用力及计算载荷	65
2.9.3	直齿圆柱齿轮传动的强度计算	67
2.9.4	齿轮传动链的设计	72
2.10	应用实例	79
2.10.1	转子流量计器差补偿器分析和计算	79
2.10.2	航空开锁器齿轮传动机构设计	81
	习题	85

第3章	同步带传动原理与结构设计	89
3.1	同步带传动原理与结构设计	89
3.1.1	同步带的特点与应用	89
3.1.2	同步带传动的结构原理与张紧方法	90
3.1.3	梯形齿同步带轮的设计	92

3.1.4 梯形齿同步带传动的设计步骤	95
3.2 机械传动总论	98
3.2.1 机械传动的功能	98
3.2.2 机械传动的效率、功率和转矩的计算	101
3.3 应用实例	103
3.3.1 梯形齿同步带传动	103
3.3.2 机械传动方案设计	104
习题	107

第4章 零件的连接	108
4.1 概述	108
4.2 可拆连接	108
4.2.1 螺纹连接	108
4.2.2 螺钉连接的结构设计	110
4.2.3 螺栓组连接的结构设计	111
4.2.4 螺栓组连接的受力分析及强度计算	112
4.2.5 保证被连接零件的位置精度及防松方法	115
4.2.6 销钉连接	117
4.2.7 键连接	118
4.3 不可拆连接	120
4.3.1 焊接	120
4.3.2 胶接	123
4.3.3 铆接	124
4.3.4 过盈连接	125
4.4 机械零件与光学零件的连接	125
4.4.1 圆形光学零件的机械固定结构	126
4.4.2 非圆形光学零件的机械固定结构	128
4.5 应用实例——棱镜分光多波长高温计目镜部件连接设计	129
习题	131

第5章 轴系零、部件	134
5.1 轴的设计	134
5.1.1 轴的结构设计	134
5.1.2 轴的尺寸设计	138
5.1.3 轴的材料选择	139

5.1.4 轴的尺寸、几何公差选用与标注实例	140
5.2 轴承的类型与选择、设计方法	141
5.2.1 滚动轴承的选择与结构设计	141
5.2.2 滑动轴承的类型与结构设计	153
5.2.3 空气静压轴承	158
5.2.4 弹性支承	159
5.3 联轴器的类型与选型方法	164
5.4 应用实例	166
5.4.1 轴的设计	166
5.4.2 轴系的组合结构设计	168
习题	172

第6章 直线运动机构	175
6.1 滚珠丝杠机构(滚动螺旋副)	175
6.1.1 滚珠丝杠机构的结构形式与选型计算	176
6.1.2 消除轴向间隙的调整方法	179
6.2 螺纹丝杠机构	180
6.2.1 螺纹丝杠机构的类型与结构	180
6.2.2 螺纹丝杠机构的设计计算	182
6.2.3 螺纹丝杠传动的回差及消除措施	183
6.3 直线滚珠导轨机构(直线导轨)	185
6.3.1 直线导轨的结构与工作原理	185
6.3.2 直线导轨的选型与设计	186
6.4 直线轴承	190
6.4.1 直线轴承的结构与工作原理	190
6.4.2 直线轴承的选型步骤	192
6.5 柔性铰链微位移工作台	193
6.5.1 柔性铰链微位移工作台的结构与原理	194
6.5.2 柔性铰链微位移工作台的分析与设计	196
6.6 应用实例	197
6.6.1 实例分析	197
6.6.2 探照灯结构设计	198
6.6.3 直线导轨选型实例	198
6.6.4 柔性铰链微位移工作台设计实例	200
习题	201

第 7 章 凸轮与槽轮机构	203
7.1 凸轮机构的原理与设计	203
7.1.1 凸轮机构的工作原理与类型	203
7.1.2 凸轮机构运动与注意事项	205
7.1.3 凸轮轮廓设计	209
7.2 槽轮机构的原理与设计	212
7.2.1 槽轮机构的工作原理、类型及应用	212
7.2.2 槽轮机构的设计方法	214
7.3 应用实例——精压机中送料凸轮机构	216
习题	217
第 8 章 弹性元件	219
8.1 概述	219
8.1.1 弹性元件分类及其用途	219
8.1.2 弹性元件的性能	221
8.1.3 弹性元件的弹性缺陷	222
8.1.4 温度对弹性元件工作的影响	223
8.2 弹性元件的材料	223
8.3 片弹簧	224
8.3.1 片弹簧的应用、结构和材料	224
8.3.2 片弹簧的计算	225
8.4 螺旋弹簧	229
8.4.1 概述	229
8.4.2 圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的设计	233
8.4.3 圆柱螺旋扭转弹簧的设计计算	236
8.5 膜片和膜盒	239
8.5.1 膜片膜盒的结构及用途	239
8.5.2 膜片的计算	240
8.5.3 橡胶膜片	243
8.5.4 膜片的有效面积	243
8.5.5 金属膜片简介	244
8.6 波纹管	246
8.6.1 概述	246
8.6.2 波纹管的计算	248
8.7 常用电动机	250
8.7.1 伺服电动机	250
8.7.2 变频电机	251
8.7.3 步进电机	252

8.7.4 直线电机	253
8.8 应用实例——航空开伞器动力弹簧设计	254
习题	257

第9章 微机电系统基础	259
9.1 概述	259
9.2 MEMS 的材料与加工技术	260
9.2.1 MEMS 的材料	260
9.2.2 MEMS 的加工技术	260
9.3 MEMS 典型器件及系统	261
9.3.1 微传感器	261
9.3.2 微致动器	262
9.3.3 微型光机电器件和系统	262
9.3.4 微型生物化学芯片	262
9.3.5 微型机器人	263
9.3.6 微飞行器	263
9.4 MEMS 器件——微压力传感器的机械设计	264
9.4.1 压阻式压力传感器的典型结构	264
9.4.2 压阻式压力传感器的分析与设计	265
9.5 微机电系统研究中存在的主要问题	267
习题	268

参考文献	269
-------------------	-----

平面连杆机构的原理与设计

1.1 机构的结构分析

任何机器和仪器一般均由许多部分组成,如机械结构部分、电路及控制部分、光学部分等。简单的机器和仪器不一定包含上述所有部分,但机械结构部分是必不可少的。在机械结构中,有一部分在工作中要实现某种确定的运动(如移动、转动或者更为复杂的运动),从而实现某些功能。例如,车床的主轴带动被加工零件转动,刀尖沿主轴轴线方向移动,从而完成车削加工。具有运动部分的机械结构一般都是由机构组成。机构性能的好坏决定了机器或仪器的性能。因此,对机构进行分析是进行机械结构设计的基础。

1.1.1 机构的组成

1. 零件

零件是单独加工制造的实体,是构成机械结构的最小单元。螺钉、螺母、单个齿轮等都是零件。

2. 构件

把若干个零件刚性地连接在一起,彼此不做任何相对运动,作为一个刚性整体进行工作,这种刚性组合体称为构件。

3. 运动副

两个构件直接接触组成的可动连接称为运动副。例如,轴与轴承的连接,活塞与汽缸的连接等都构成运动副。两构件组成的运动副不外乎通过点、线、面的接触来实现。按照接触特性,通常把运动副分为低副和高副两类。

1) 低副

两构件通过面接触组成的运动副称为低副。平面机构中的低副有回转副和移动副两

种。若组成运动副的两构件只能在一个平面内相对转动,这种运动副称为回转副,或称铰链,如图 1-1 所示。若组成运动副的两个构件只能沿某一轴线相对移动,这种运动副称为移动副,如图 1-2 所示。

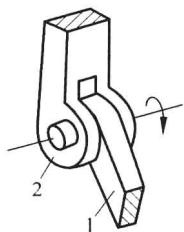


图 1-1 回转副
1、2—构件

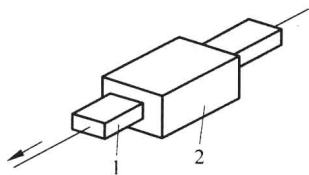


图 1-2 移动副
1、2—构件

2) 高副

两构件通过点或线接触组成的运动副称为高副。图 1-3(a)中的车轮 1 与钢轨 2,图 1-3(b)中的凸轮 1 与从动件 2,图 1-3(c)中的轮齿 1 与轮齿 2 分别在接触处 A 组成高副。平面高副二构件间的相对运动是由沿接触处切线 tt 方面的相对移动和在平面内的相对转动组成。

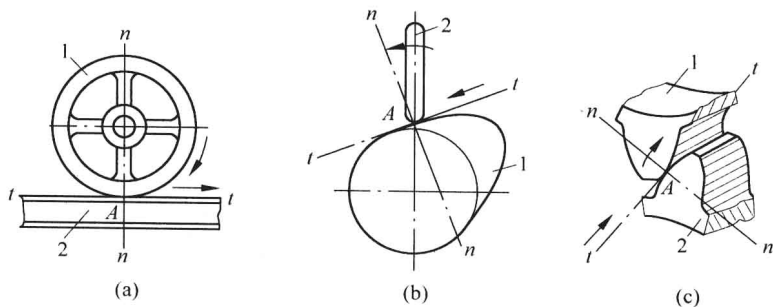


图 1-3 平面高副举例

4. 机构

由若干构件和运动副组成,各构件之间具有确定的相对运动关系的组合体称为机构。机构是机械结构中需要实现某种确定运动的部分。图 1-4 所示的活塞泵就是由连杆机构和齿轮齿条机构组成的。

1.1.2 平面机构的运动简图

所有构件都在相互平行的平面内运动的机构称为平面机构。平面机构中,实际构件的外形和结构往往很复杂,在研究机构运动时,为了使问题简化,有必要撇开那些与运动无关的构件外形和运动副具体构造,仅用简单线条和符号来表示构件和运动副,并按比例定出各运动副的位置。这种说明机构各构件间相对运动关系的简化图形,称为机构运动简图。

机构运动简图中的常用符号见表 1-1。

表 1-1 机构运动简图中的常用符号

名称	符 号	名称	符 号
活动构件		齿轮传动	圆柱 齿轮
固定构件			锥 齿轮
回转副			齿 轮 齿 条
移动副			蜗 轮 与 圆 柱 蜗 杆
球面副			向 心 轴 承
螺旋副			推 力 轴 承
零件与轴连接		轴 承	向 心 推 力 轴 承
凸轮与从动件			槽 轮 传 动

机构中的构件可分为三类：

(1) 固定件(机架)，是用来支承活动构件的构件。研究机构中活动构件的运动时，常以固定件作为参考坐标系。

(2) 原动件，是运动规律已知的活动构件。它的运动是由外界输入的，故又称输入构件。

(3) 从动件，是机构中随着原动件的运动而运动的其余活动构件。其中输出机构预期运动的从动件称为输出构件，其他从动件则起传递运动的作用。

任何一个机构中，必有一个构件被相对地看作固定件。在活动构件中必须有一个或几个原动件，其余的都是从动件。

下面举例说明机构运动简图的绘制方法。

例 1-1 绘制图 1-4(a)所示活塞泵的机构运动简图。

解 活塞泵由曲柄 1、连杆 2、齿扇 3、齿条活塞 4 和机架 5 共五个构件所组成。曲柄 1 是原动件，2、3、4 为从动件。当原动作 1 回转时，活塞在汽缸中往复运动。

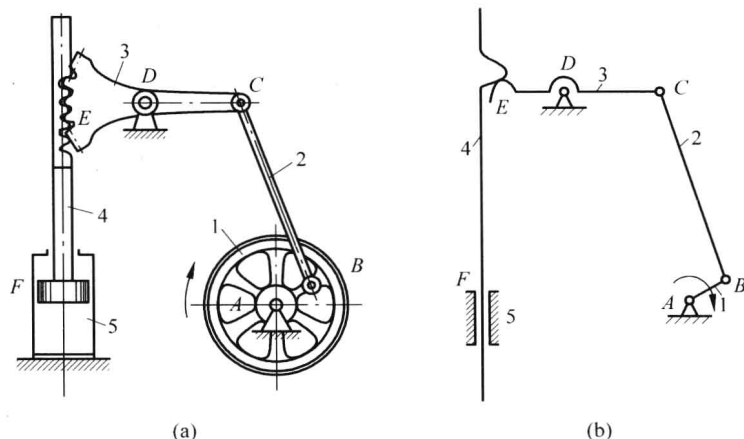


图 1-4 活塞泵及其机构运动简图

各构件之间的连接如下: 构件 1 和 5, 2 和 1, 3 和 2, 3 和 5 之间为相对转动, 分别构成转动副 A、B、C、D。构件 3 的轮齿与构件 4 的轮齿构成平面高副 E。构件 4 与构件 5 之间为相对移动, 构成移动副 F。

选取适当比例, 按图 1-4(a) 中的尺寸, 用构件和运动副的规定符号, 从主动件开始, 按运动传递顺序, 画出机构运动简图, 如图 1-4(b) 所示。

1.1.3 平面机构的自由度

任何一个机构工作时, 在原动件的驱动下各个从动件都按一定规律运动, 但并不是随意拼凑的构件组合都能具有确定运动而成为机构。下面讨论机构自由度和机构具有确定运动的条件。

1. 平面机构自由度计算公式

在平面机构中, 各构件只做平面运动。一个做平面运动的自由构件具有三个自由度, 即沿 x 轴和 y 轴的移动, 以及在 xOy 平面内的转动。当两个构件组成运动副之后, 它们的相对运动就受到约束, 自由度数随之减少。在平面机构中, 每个低副引入两个约束, 保留一个自由度。如转动副约束了两个构件的相对移动, 保留两构件间的相对转动。每个高副引入一个约束, 保留两个自由度。

设平面机构共有 K 个构件。除去固定件, 则机构中的活动构件数 $n = K - 1$ 。在未用运动副连接之前, 这些活动构件的自由度总数应为 $3n$ 。当用运动副将构件连接起来组成机构之后, 机构中各构件具有的自由度数就减少了。若机构中低副的数目为 P_L 个, 高副数目为 P_H 个, 则机构中全部运动副所引入的约束总数为 $2P_L + P_H$ 。因此活动构件的自由度总数减去运动副引入的约束总数就是该机构的自由度(又称机构活动度), 以 W 表示, 即

$$W = 3n - 2P_L - P_H \quad (1-1)$$

机构的自由度即机构所具有的独立运动的个数。由前述可知, 从动件是不能独立运动的, 只有原动件才能独立运动。通常每个原动件只具有一个独立运动(如电动机转子具有一个独立转动, 内燃机活塞具有一个独立移动), 因此, 机构自由度必定与原动件的数目相等。