

高等学校教材

仪表结构设计基础

(修订本)

哈尔滨工业大学 初允绵 主编

机械工业出版社

高等学校教材

仪表结构设计基础

(修订本)

哈尔滨工业大学 初允绵 主编



机械工业出版社

内 容 提 要

本书是根据仪表的特点和设计要求,讲述常用机械元器件和传动机构的原理、理论计算和结构设计。

全书共分十三章。第一章讲述仪表设计的基础知识;第二章讲述弹性元件;第三、四章讲述连杆机构;第五、六、七、八章讲述摩擦传动、齿轮传动、凸轮与间歇以及螺旋传动等机构;第九、十章讲述支承与示数装置;第十一、十二章讲述轴与联轴器、阻尼器与减震器;第十三章讲述壳体。

本书是高等工业学校仪器仪表类专业的教材,也可供有关人员自学和工程技术人员参考。

仪表结构设计基础

(修 订 本)

哈尔滨工业大学 初允绵 主编

*

责任编辑:邱锦来 版式设计:霍永明

责任印制:王国光 责任校对:熊天荣

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $22 \frac{1}{2}$ · 字数 549 千字

1979 年 11 月北京第一版

1990 年 5 月北京第二版·1990 年 5 月北京第七次印刷

印数 44,781—47,280 · 定价:4.50 元

*

ISBN 7-111-02064-2/TH·344(课)

前 言

本书是根据 1983 年 12 月在天津召开的工业自动化仪表专业教材编委会制定的《仪表结构设计基础》教学大纲和对 1979 年版试用教材的评审意见进行修订编写的。参加教学大纲制定和评审的有天津大学、浙江大学、上海工业大学、上海机械学院、重庆大学、华中理工大学和哈尔滨工业大学等七所院校。

根据教学大纲和评审意见,本书在修订中增加了仪表设计基础、机构的组成和分析方法、螺旋传动和阻尼器等章节,并对原书的章节编排顺序及内容作了调整和补充,对于以结构为主要内容的导轨和联接方法等部分则在与本书配套的辅助教材《仪表结构设计图册》中介绍。

本书根据仪表的特点和使用要求论述仪器仪表零、部件和机构的原理及设计计算方法,同时介绍了某些精密机械中应用的传动机构。全书除绪论外共有十三章,可分为三部分:第一部分为第一章及第二章,讲述仪表设计的基础知识和仪表的典型元件——弹性元件;第二部分从第三章到第八章,讲述仪表和精密机械中通用的各种传动机构,包括连杆机构、摩擦和挠性传动机构、齿轮传动、凸轮与间歇传动、螺旋传动等的原理和结构参数的计算方法;第三部分从第九章到第十三章,讲述仪器仪表常用的零、部件和装置,包括轴与联轴器、阻尼器与减震器、示数装置与外壳等的设计与计算方法。

为了适应以电为主,并有一定机械结构设计能力的专业培养目标,本书对重点内容的理论和计算作了必要的阐述,对一般内容则从结构特点和选用方面作了分析。结合辅助教材《仪表结构设计图册》,对当前设计中的新结构和新材料以及常用国家标准等都作了介绍。

本书可作为高等学校工业自动化仪表专业及其它相近的仪器仪表类专业的教材,亦可供工程技术人员作为设计和自学的参考书。

本书由哈尔滨工业大学初允绵主编,参加编写的有初允绵(绪论、第一、五、十三章),王丕增(第二章),竺培国(第三、四、八章),陈文贤(第六章),付继盈(第七章),徐国东(第九、十二章),洪沅芷(第十、十一章)。天津大学张弼光同志(现任中国计量学院副院长)担任主审。

在编写和审稿过程中,大纲制定小组诸同志提出许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。由于我们的水平有限,书中难免有不当和错误之处,希望读者提出批评和意见。

编 者

1989年2月

目 录

前言		习题	108
主要符号表		第五章 摩擦传动与挠性联接传动	110
绪论	1	§ 5-1 概述	110
第一章 仪表设计的基础知识	2	§ 5-2 摩擦轮传动	111
§ 1-1 概述	2	§ 5-3 摩擦型与固定型挠性传动	118
§ 1-2 仪表的基本性能及其影响因素	4	§ 5-4 啮合型挠性传动	124
§ 1-3 零件的工作能力	5	习题	132
§ 1-4 仪表常用材料及其选择	9	第六章 齿轮传动	133
§ 1-5 仪表结构和传动机构设计的步骤	13	§ 6-1 概述	133
第二章 弹性元件	14	§ 6-2 齿廓啮合的基本定律	134
§ 2-1 概述	14	§ 6-3 渐开线齿形和渐开线齿轮传动特点	135
§ 2-2 弹性元件的材料	18	§ 6-4 齿轮各部分名称、符号及标准渐开线齿轮的几何尺寸计算	137
§ 2-3 片弹簧	19	§ 6-5 渐开线齿轮连续正确啮合条件	141
§ 2-4 弹性环	23	§ 6-6 圆柱直齿轮传动的受力分析	143
§ 2-5 螺旋弹簧	26	§ 6-7 齿轮加工原理和根切现象	144
§ 2-6 游丝	32	§ 6-8 变位齿轮	147
§ 2-7 张丝	35	§ 6-9 齿轮传动的使用要求和精度规定	153
§ 2-8 膜片和膜盒	38	§ 6-10 斜齿圆柱齿轮传动	156
§ 2-9 波纹管	52	§ 6-11 螺旋齿轮传动	159
§ 2-10 弹簧管	59	§ 6-12 圆锥齿轮传动	161
§ 2-11 弹性筒	63	§ 6-13 蜗杆传动	164
§ 2-12 热双金属弹簧	65	§ 6-14 轮系	168
习题	71	§ 6-15 精密齿轮传动设计	175
第三章 机构的组成及其基本分析方法	73	§ 6-16 齿轮传动链的性能和误差分析	190
§ 3-1 机构的基本概念	73	§ 6-17 齿轮传动效率与卡滞分析	194
§ 3-2 平面机构的自由度	77	§ 6-18 修正摆线齿形啮合的基本概念及其几何参数	196
习题	81	§ 6-19 谐波齿轮传动	201
第四章 平面连杆机构	83	习题	207
§ 4-1 连杆机构的分类及应用	83	第七章 凸轮与间歇运动机构	209
§ 4-2 四连杆机构的一些特性	90	§ 7-1 凸轮机构	209
§ 4-3 四连杆机构的传动特性	92	§ 7-2 间歇运动机构	224
§ 4-4 铰链四连杆机构的设计	95	习题	235
§ 4-5 曲柄滑块机构的图谱设计法	99	第八章 螺旋传动	245
§ 4-6 拨杆机构	105	§ 8-1 螺旋传动的特点、类型及参数	246
§ 4-7 连杆机构结构设计中的几个问题	107		

§ 8-2 影响螺旋传动精度的因素及提高传动精度的措施.....	240	习题	301
§ 8-3 滚动螺旋传动简介	243	第十一章 示数装置.....	302
习题	245	§ 11-1 标尺指针示数装置	302
第九章 轴、联轴器和离合器.....	247	§ 11-2 标尺指针示数装置的误差	309
§ 9-1 概述.....	247	§ 11-3 记录装置	312
§ 9-2 轴.....	247	§ 11-4 数字显示装置	315
§ 9-3 联轴器.....	253	习题	317
§ 9-4 离合器.....	259	第十二章 阻尼器和减震器.....	318
习题	265	§ 12-1 阻尼与阻尼原理	318
第十章 仪表支承.....	266	§ 12-2 常用阻尼器	320
§ 10-1 支承及其分类	266	§ 12-3 阻尼器设计	325
§ 10-2 圆柱支承	267	§ 12-4 减震与减震原理	327
§ 10-3 圆锥支承和顶尖支承	272	§ 12-5 减震器的类型、选用及布置	330
§ 10-4 轴尖支承和球支承	274	习题	341
§ 10-5 滚动支承	280	第十三章 外壳	342
§ 10-6 刀口支承	291	§ 13-1 概述	342
§ 10-7 弹性支承	293	§ 13-2 仪器仪表外壳的防护性能与造型要求	343
§ 10-8 支承的润滑	294	§ 13-3 机柜及骨架	348
§ 10-9 液体、气体支承简介	296	参考文献.....	352
§ 10-10 各种支承的比较.....	299		

主要符号表

A ——面积、精度等级	n ——转数
a ——中心距	O ——中心
b, B ——宽度	P ——功率
C ——滚动轴承额定动载荷、系数	p ——压强、节距、周节
c ——间隙	Q ——载荷
D, d ——直径	q ——单位线长上的载荷, 蜗杆特性系数
E ——拉、压弹性模量	R, r ——半径
e ——偏心距、齿间距	S ——安全系数
F ——力、载荷	s ——位移、弧长、导程
F_a ——轴向力	T ——周期
F_f ——摩擦力	t ——时间
F_n ——法向力、正压力	u ——应变能
F_r ——径向力	V ——体积
F_t ——圆周力、切向力	v ——线速度
f ——摩擦系数、频率	W ——功、抗弯断面系数
G ——重力、剪切弹性模量	z ——齿数、螺纹头数
H, h ——高度	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi, \psi, \lambda$ ——角度
h ——厚度	α ——压力角、啮合角、皮带包角、衰减系数
I ——转动惯量	β ——螺旋角
I_a ——轴惯性矩	λ ——螺旋升角
I_p ——极惯性矩	α_t ——线胀系数
i ——传动比	δ ——角度、较薄的厚度
L, l ——长度	e ——重合度、寿命系数
M ——力矩	ρ ——曲率半径、动半径
M_a ——作用力矩	η ——效率
M_r ——反作用力矩	ω ——角速度
M_x ——阻尼力矩	σ ——正应力
M_b ——弯矩	σ_b ——弯曲应力
M_t ——扭矩	σ_H ——接触应力
m ——模数、质量	τ ——剪应力

绪 论

随着生产过程自动化的发展,工业自动化仪表已广泛应用于石油化工、冶金、动力等生产部门。它已成为检测、计量、记录和控制生产过程不可缺少的工具。近年来,由于微电子技术、光电技术及计算技术的发展和运用,又为自动化仪表的提高和完善开创了新的领域,使它成为实现工业现代化的重要组成部分之一。

用于生产和科研部门的各种仪器和仪表,如温度、压力、流量及其它机械量测量的仪器和仪表,其性能和原理有很大的差异。因此,仪器和仪表作为一门学科,它包括了机、电、光、热等多科的理论基础和基本知识。仪表结构设计基础这门课程主要是研究仪表机械结构中常用的零部件和传动机构的知识及设计理论,同时,机械结构和传动机构是仪表的重要组成部分,它将直接影响仪表的性能和质量。

仪表的机械结构和传动机构与一般机械的概念基本上是相同的,但由于其功能的差异,在设计原则上则有不同的要求。其差别在于一般机械的结构承受载荷较大,其传动机构主要是传递力和功率,它是作功的设备,因此,设计中其承载能力的计算是非常重要的内容。而仪表的结构承受载荷较小,其传动机构主要是传递运动和小功率,它是测量、指示和控制的装置及设备,因此,实现和保持其精确的性能是设计的主要内容。

通常人们把仪器仪表的机械部分划归精密机械领域。精密机械有其广泛的概念。“精密”一词可以理解为制造精度较高和性能精确。一台精密制造和性能精确的设备,尺寸可能很大,也可能很小,正如一台汽轮机和一只压力表,不进行分析,很难断定压力表和汽轮机哪一个的精密程度高。因为它们各自满足工作的特点和要求,都有自己的标准。如普通压力表中的齿轮,其精度等级低于一般精密机床中的齿轮,但由于尺寸较小和满足压力表的传动要求,对齿轮的结构参数、工艺和材料又有较高的要求。所以仪表的零部件和传动机构,主要是根据仪表的工作特点和性能要求来考虑它的设计原则和设计方法的。

本课程的内容是根据一般仪表和控制系统中的要求,研究其常用的机械零部件、元件和传动机构的理论计算和结构的设计原则。结合本课程的课程设计,使学生初步掌握有关仪表结构和传动机构的设计计算方法,以及进行结构分析和设计的能力。

在工业自动化仪表专业的教学计划中,仪表结构设计基础是本专业机械设计方面重要的一门技术基础课,它将运用机械制图、理论力学和金工实习等课程中的有关知识,通过本课程的学习,初步掌握仪表结构和传动的的设计。同时,本课程又为学习专业课程和专业生产实习准备了条件。它不仅在基础与专业培养中起了承上启下的作用,也为今后的设计工作打下了机械结构设计的基础。

第一章 仪表设计的基础知识

§ 1-1 概 述

仪表是生产过程和科学实验中信息的检测、传递、显示、记录和控制的工具，所以人们常把仪表比作是生产过程和科学实验中的耳目和神经。根据仪表的构造和组成，它可以是一个具有检测、传递和显示功能的小型测量仪表，如图 1-1 所示的膜盒式高度表。它的敏感元件是具有一定弹性的真空膜盒，由于大气压力随高度 H 不同而变化，所以当高度 H 改变时，膜盒感受大气压力 P 的变化而产生一定的变形位移，膜盒中心的变形位移 s 通过杠杆、齿轮传动放大，使指针指示出大气压力的大小（即相应的高度）；也可以是一种或两种功能构成的单元和其它功能的仪表通过线路联接起来，构成一个测量、记录和控制的成套仪表，用于自动检测与控制 and 遥控遥测中。如利用热电偶测量炉温，热电偶是一个热电转换器件，并设有显示和记录的功能。在应用中通常把热电偶与高温毫伏计或电位差计联接组成热电高温计，后者起着显示和记录的作用。如果与控制器相联，则可构成测量控制系统。图 1-2 a 所示为一种应变式压力传感器。在悬臂片簧 7 的上下表面分别贴有应变片 1、2 和 3、4。当压力变化时，带顶杆 6 的膜片 5 感受压力而产生变化位移，把压力转换为集中力作用在悬臂片簧 7 上。悬臂片簧向上弯曲，上表面受压缩，下表面受拉伸，从而使应变片 1、2 的电阻减小，3、4 的电阻增加。将传感器的应变电阻接成如图 1-2 b 所示的桥路，通过传感器将被测压力 P 转换成输出电压 ΔU 。输出电压 ΔU 经过放大器输送给记录仪和指示仪。所以，仪表的构造和功能是根据生产和设计的要求来确定的，它可以是一个器件、一个仪表、或各种器件与仪表构成一个测量系统。

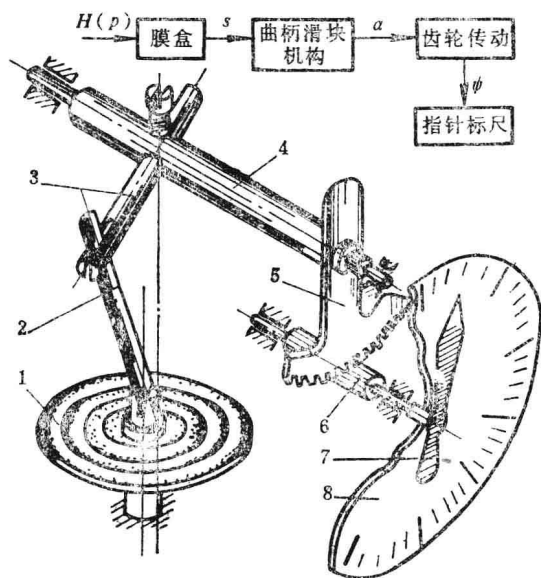


图1-1 膜盒式高度表传动简图

- 1—真空膜盒 2—连杆 3—曲柄 4—轴 5—扇形齿轮
6—小齿轮 7—指针 8—刻度盘

仪表结构和传动机构的设计是各种器件和仪表的重要基础。对机械式测量仪器和仪表来说，传动和结构是保证仪器和仪表的性能，实现测量、传动和指示的全部功能。对电子或光电仪器仪表来说，机械结构是构成仪器的主要部分。机械结构设计的合理与否，对仪器仪表的整体和性能起着非常重要的作用。因此，仪表结构和传动机构的设计，必须根据仪表性能和整体来考虑。概括的讲，仪表的性能和整体可归纳为使用和经济两方面的要求。

一、使用方面的要求

使用要求主要指基本性能,如测量范围(工作范围)、精确度、稳定性、动态特性,在使用期限内和规定的工作条件下工作的可靠性,以及调整、操作和维修方便。对机械式测量仪表来说,必须正确地选用测量元件和拟定传动系统,根据仪表的性能和总体的要求,合理地确定元件和机构的参数及结构尺寸;同时对元件与机构的精度进行必要的分析和验算;对配合件的性质和精度以及零件的制造误差要提出必要的技术要求。为使工作灵敏、准确和动态误差较小,应尽可能减小机构本身的重量和惯性以及活动件之间的摩擦。

所谓可靠性是指在一定时间和条件下,仪器或仪表保持规定范围内的性能和精度。任何一个零件的偶然失效,都可能造成整个产品失去原有的性能和精度,以致造成事故。为此,在设计时力求结构简单,

零件数目少,对联接部分必须有防松的措施;对承受较大载荷的零件,或对精度有影响的零件,必须保证其强度和刚度的安全系数并要留有余地。一般仪表零件所承受的载荷不大,故强度问题并不突出,但相对交变应力循环次数较多和局部应力较大时,对承受载荷的零件也需进行强度的验算,以保证零件有足够的抗损坏能力。零件的刚度是承受载荷零件抗弹性变形的能力。弹性变形是影响仪表精度的重要因素,所以,一个零件和由零件组成的构件、部件都必须保证有足够的刚度。诚然,弹性变形是材料固有的性质,但合理地设计结构和尺寸,可使微小的弹性变形忽略不计,或使弹性变形不超过仪表精度所允许的范围。对于机架、壳体及紧固件,更应具有足够的刚度,以保证仪表整体有稳定可靠的结构。

对于在振动和冲击载荷条件下工作的仪表,除在强度和刚度方面加强外,还必须考虑仪表的抗震和安装时的隔震措施。

对于使用条件提出的特殊要求,如航空仪表要求重量特别轻;在低温条件下工作的仪表,要求温度补偿等,在设计时都必须考虑。另外,在保证使用方便的条件下,使外观造型美观大方。

二、经济方面的要求

为使产品设计方案能够实现,在满足使用要求的前提下,还要满足经济性的要求。经济性表现在设计、制造和使用的全过程中。设计和制造的经济性,主要体现在结构设计尽可能简单、工艺性好、材料费用少、成本低。经济方面的要求是一个涉及面很广的问题。现就工艺性和结构设计的要求概括归纳如下:

1. 结构简单,工艺性好 良好的工艺性,就是要求零件和组合结构在可能的条件下,用最简便的加工方法,最短的时间和最少的劳动量制造出来。为此,在结构设计时,应将复杂的整体结构分成若干简单的组件。各组件之间的联接和相互位置应保证准确,而且装拆方便,

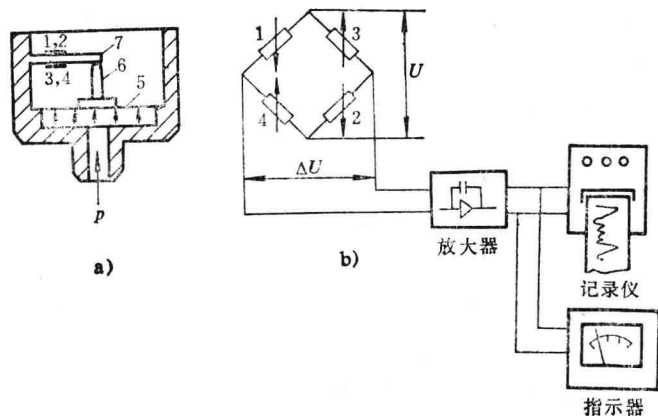


图1-2 压力测量系统示意图

a) 应变式压力传感器 b) 测量系统

易于调整；零件的形状应尽可能简单，便于加工；仪表中的零部件力求统一规格，减小不同规格的零件数。

2. 合理地制定技术要求和选择材料 零件加工的技术要求(如尺寸公差和表面粗糙度)，应在满足零件工作要求条件下尽量放宽，以免增加机械加工的劳动量和制造成本。零件材料的选择应根据零件的工作要求，不仅考虑选用材料的机械物理性能，还应注意材料的加工性能，使零件的材料同加工方法及技术要求相适应。在满足技术要求的前提下，避免采用国内稀缺和贵重的材料。

3. 广泛采用标准件、通用件和外购件 标准件就是把常用零件的型式和尺寸归并为有限的几种，由国家订为标准，适用于全国有关部门和行业。这些标准件可以在工厂的专门车间内用专用设备生产，也可以由专业化生产厂生产。采用标准化的零件，不仅可以保证质量，降低生产的成本，也为维修时更换零件提供了方便。目前国际上已形成各种国际标准，我国的标准和国际标准都是相近的。如果零件涉及的面不广，仅适用某一部门和工厂，则可在一定范围内实现规格化，称为行业标准，它相当某一范围内的标准。通用件就是在系列产品中，一些产品的零件可以互相通用，以减小零件的品种和规格。外购件多是指由专业化厂生产的元件、器件和标准件，无须本厂设计和制造。随着仪表的发展，各种功能的元器件亦逐渐实现标准化。所以设计中广泛地采用标准件，既有利于提高质量，降低成本，也可以大大缩短设计时间。

上述仪表结构设计的要求，概括起来就是性能精确、稳定可靠、效率高、寿命长、成本低、使用维修方便。这些要求是统一的，但在具体处理上又可能有矛盾，如精度高和稳定可靠都可能使工艺费用和材料费用提高。因此设计过程要分清主次，着眼于总的效益，不断改进以提高设计质量。在确定设计方案时，要有正确的分析和设计指导思想，全面了解使用要求和发展的需要，充分掌握国内外现有情况，虚心听取有关方面的意见，使设计方案能制造出高质量、低成本的产品。

§ 1-2 仪表的基本性能及其影响因素

评价仪表品质的指标是多方面的，但其基本性能主要指仪表的测量范围、精度、稳定性和动态特性等。由于动态特性在检测技术中专有论述，故本节主要介绍仪表的精度和稳定性的基本概念。

一、精度

通常仪表的精度含有精密度和准确度两个指标。所谓精密度，是指仪表连续测量多次，其测量结果(示值)的分散程度。准确度是指仪表示值有规则偏离真值大小的程度。而仪表的精度，在一般场合下是取两者的代数和。精度最终是以测量误差的相对值来表示的，即最大绝对误差相对仪表测量范围的百分数。它可以用下式表示

$$A = \frac{\Delta_g}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 Δ_g ——仪表在测量范围内的最大绝对误差；

$x_{\max}, x_{\min}$ ——仪表测量的上限和下限；

A ——仪表的精度。

按国家规定仪表精度等级的要求,如精度 A 的数值不超过允许数值 0.5% ,则该表称为 0.5 级的仪表。按 A 的允许数值,仪表精度等级以一系列标准百分比数值即 0.1% , 0.2% , 0.5% , 1% , 1.5% , 2.5% , 4% 等进行精度分档定级。因此,当设计仪表和其零部件时,必须根据仪表的精度要求,来分析产生误差的因素,以便在设计、制造和使用中保证精度的要求。

影响仪表精度的误差,包括仪表各组成环节的设计、制造和使用中产生的误差,对机械结构和传动机构来说,其产生的因素主要有如下三个方面:

1. 设计误差 设计误差产生在机构和零件的设计过程中。例如,在拟定设计方案时,由于以近似的机构代替理想机构,以及采用了近似的假设,使所设计的机构和零件在原理上就有了误差,这种误差也称为原理误差,它是影响仪表示值偏差——仪表准确度的主要因素。

2. 工艺误差 这类误差产生在制造和装配过程中,它是由零件的加工误差和装配误差造成的。例如,零件加工中的尺寸和形位误差,运动副中的间隙以及装配调整不够准确和牢固可靠,都将影响仪表的准确度和精密度。

3. 使用误差 这类误差产生在使用过程中,如零件在相对运动中的摩擦和承受载荷下的变形,环境温度变化而引起零件性能或尺寸的改变,这些都将影响仪表的精度。其次,使用中零件的磨损将产生间隙,从而使仪表的精度逐步降低。减小摩擦、磨损的方法是选用耐磨性好的材料和采用工艺表面处理,提高零件表面耐磨性,以及采用良好的润滑条件等。为了减小环境温度变化对零件性能或尺寸的影响,对重要的零件,可根据对性能的要求,采用恒弹性材料或选用与其相配零件线胀系数一致的材料,必要时在结构设计中应设计温度补偿装置。

另外,在使用中,由于各运动件的惯性和外界冲击振动引起仪表示值反应滞后和失真,都给仪表造成使用上的误差。为此,要减小使用中的动态误差,应尽量减小运动件的惯性,采取适当的阻尼和减震措施。

二、稳定性

所谓稳定性通常有两个指标,一是时间上的稳定性,二是外部环境和条件变化所引起示值的不稳定。对于机械结构和传动机构来说都反映到仪表示值的重复性差和随时间而产生示值的漂移。这种示值的误差,在前面使用误差中已经提到,除适当的选择材料和设计措施外,还应对不同零件和机构采取如下相应的措施:

- (1) 保证联接零件、部件和整个仪表装配的稳定可靠,防止松动和变形;
- (2) 对于易变形的零件,在保证刚度的条件下,应进行必要的时效处理;
- (3) 对于有正反运动的传动机构,必须采取消除间隙影响的结构;
- (4) 对于利用弹性工作的零件,尤其是弹性敏感元件,除考虑到温度对材料弹性模量的影响外,在制造这类零件的工艺中,都必须进行其性能稳定处理和性能试验,以确保其性能稳定;
- (5) 对防腐材料和防结膜的光学玻璃,须使用可靠的保护涂料敷盖金属零件和光学玻璃。

§ 1-3 零件的工作能力

零件的工作能力,通常是指零件在承受载荷条件下抵抗破坏、变形、磨损和振动的能

力。表示以上各种能力的有强度、刚度和耐振性。

一、强度

强度是零件抵抗破坏的能力。根据材料力学可知零件承受载荷时，材料内部和表面产生一定的应力。如最大应力超过材料的许用应力，则零件的工作失效。失效的形式有三种：

- (1) 零件产生超过许用限度的塑性变形；
- (2) 在规定的使用期限内发生断裂；
- (3) 零件相对运动的表面很快磨损和出现伤痕。

由于塑性变形和断裂常常是发生在零件的某一危险截面上，也就是材料的内部，所以这种强度称为截面强度，也叫着体积强度。磨损和表面损伤常常发生在零件表层，故称为表面强度。通常，仪表承受载荷不大，一般按结构条件设计的零件尺寸和常用材料，不易出现塑性变形和破坏的情况。故本章对体积强度不作叙述，必须计算时可参考机械零件教材。下面我们对表面强度的概念和影响进行讨论。表面强度可分为表面接触强度和表面抗磨损强度。

(一) 表面接触强度及其计算

表面接触强度是指两个零件在接触处为点或线接触时承受载荷的强度。接触处为点或线接触的零件，在承受载荷时，由于接触处的弹性变形扩展成为微小接触面积，如图 1-3 a 所示，原为点接触的两球，加载后接触点扩展成直径为 $2a$ 的小圆面积；图 1-3 b 所示则是原为线接触的两圆柱体，加载后接触线扩展为 $2a \times b$ 的小矩形面积。扩展后的微小面积称为有限面积，工作载荷作用在有限面积上，在此面积上产生的局部应力称为接触应力。

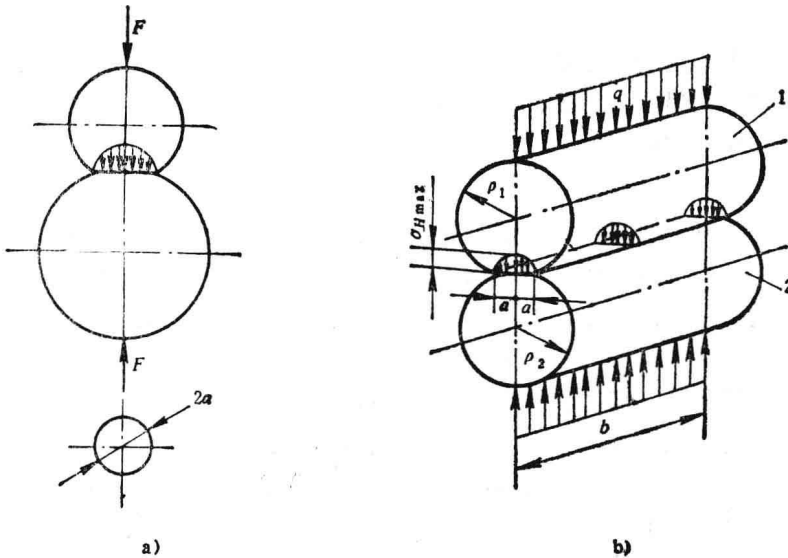


图1-3 有限接触面积和接触应力

根据赫兹公式，两个圆柱体相压时，其最大接触应力可按下式计算

$$\sigma_{H \max} = \sqrt{\frac{q}{\rho} \cdot \frac{E}{2\pi(1-\mu^2)}} \quad (1-2)$$

式中 $\sigma_{H \max}$ ——最大接触应力；

q ——接触线单位长度上的载荷；

E ——两圆柱体材料的综合弹性模量, 设 E_1 、 E_2 分别代表两接触零件材料的弹性

模量, 则
$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2};$$

ρ ——两圆柱体在接触处的综合曲率半径, 设 ρ_1 、 ρ_2 分别代表两圆柱体的在接触处

的曲率半径, 则
$$\rho = \frac{\rho_1\rho_2}{\rho_2 \pm \rho_1},$$
 其中正号用于外接触, 负号用于内接触;

μ ——材料的泊松比, 对钢制零件的材料 $\mu = 0.3$ 。

相互滚压的零件(齿轮、滚动轴承)的接触表面上的接触应力, 属于交变应力。此时零件失效的形式, 可能是由于接触应力过大, 经过一次承载, 即把零件表面压碎或压出塑性变形; 也可能是经过多次的应力循环出现疲劳损坏。疲劳损坏是在接触表面出现很多小疲坑, 这种失效形式叫做疲劳点蚀, 疲劳点蚀属于磨损类型。形成疲劳点蚀的原因是两个接触面之间有润滑油。没有润滑油时, 磨损的速度远远超过疲劳点蚀的速度, 使之来不及扩展成疲坑就被磨损。所以表层损坏的形式是磨损。

影响零件表面接触疲劳强度的因素很多。其中主要有润滑油的粘度、工作表面的加工精度、粗糙度以及表面硬度等。润滑油的粘度越高, 则愈不易渗入零件表面疲劳的裂纹, 从而减弱了油的楔裂作用。此外, 油膜有扩大承压面积、减小接触应力的作用。但是, 润滑油的粘度将增加液体摩擦阻力, 影响仪表的灵敏度, 故承载不大的接触表面不宜采用粘度较大的润滑油。表面加工精度较低和粗糙的表面, 接触区内载荷集中现象严重, 在载荷集中的地方愈易出现疲坑。

为了防止疲劳点蚀的出现, 除适当的确定加工精度和表面粗糙度, 以及采用表面处理提高表面硬度外, 设计中应使接触应力不超过许用接触应力, 即 $\sigma_{Hmax} \leq [\sigma_H]$

(二) 表面抗磨损强度及其计算

零件表面的磨损主要是由两接触面在相对运动中相互刮削而引起的。

从零件开始工作到磨损量超过允许值而失效的整个工作期间, 可分为三个阶段, 如图 1-4 a 所示。第一阶段为跑合阶段, 在这个阶段里, 机械加工后在零件表面上遗留下来的锯齿面(图 1-4 b), 有的被刮削掉, 有的发生塑性变形, 填充了锯齿体的波谷, 因而增大了实际接触的平滑表面, 直到平滑表面的宽度超过了残余波谷的宽度时(图 1-4 c), 跑合阶段结束。第二阶段称为稳定磨损阶段, 在该阶段里磨损速度较慢, 零件进入正常工作阶段。第三阶段称为崩溃磨损阶段, 在这个阶段里, 通常由于零件在磨损后, 两接触表面的间隙增加到不允许的数值, 使零件在工作中出现冲击, 结果使零件接触表面出现冷作脆化而剥落, 加剧磨损, 以致零件很快失效。由上述可知, 跑合阶段的磨损是有益的磨损, 人们可利用它来改善工作表面的性质, 提高摩擦副的使用寿命。稳定阶段的磨损发展很慢, 在工作期间并不影响零件使用, 这样的磨损是设计所允许的。但崩溃磨损, 由于接触面间落入磨粒, 毁坏工作表面, 影响仪表功能, 是危害性的磨损, 必须尽快维修。

由于影响磨损的因素很多, 磨损的形式有多种, 如粘着磨损、腐蚀磨损、磨料磨损和接触疲劳磨损等, 各种形式磨损的机理各有不同, 所以很难建立具有充分理论的抗磨损强度计算方法。一般根据压强 P (单位接触面积上所受的力) 和与发热量成正比的摩擦功率 Pv 值 (v 为两接触表面的相对滑动速度), 近似地判断零件的抗磨损强度。设计时应使计算的 P 和 Pv 值小于许用值, 即 $P \leq [P]$ 和 $Pv \leq [Pv]$ 。 $[P]$ 和 $[Pv]$ 的数值, 按不同材料可查阅机

械零件设计手册。

应该提出的是,由于仪表中承受载荷不大,速度不高,应用上述 p 与 pv 值来判断抗磨损的强度,其值远远小于许用数值。但实际磨损,却往往是由于尺寸较小,装配中的相对误差较大,或由于落入微小金属粉末而引起的磨损,其磨损强度超过计算的磨损强度。所以,即使计算了抗磨损强度,亦应尽可能考虑减小磨损的措施,以保持仪表的精度和长期稳定性。

要降低磨损,除使接触表面得到充分的润滑外,为防止磨损过程中产生的微小金属粉末和落入接触面的尘埃及磨粒,应定期检修清洗,更换润滑油。另外,装配仪表的环境亦应保持清洁,在装配过程中应检查活动部分的灵活性。最后,设计适当的密封装置和壳体也是防止磨损的有效措施。

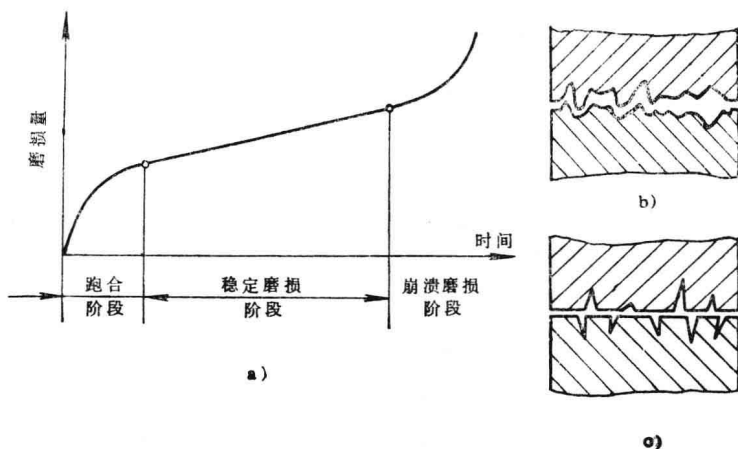


图1-4 零件表面磨损阶段

对于一对相互摩擦的零件,为了避免其中比较重要的零件过早磨损,另一零件的摩擦表面常选用减摩材料制造。常用的减摩材料有巴氏合金、青铜等。用热处理和化学处理提高表面硬度或采用硬度较高的人造宝石 (Al_2O_3) 做耐磨衬套和轴承,都可以提高接触表面的耐磨性,降低磨损。

二、刚度和振动稳定性

如前所述,刚度是零件抵抗弹性变形的能力,刚度的数值是零件产生单位变形量时,所需施加的载荷量。所以,零件变形所需的载荷愈大则刚度愈大。由几个零件组成的部件,则称为部件的组合刚度。在仪表中,根据零件的不同作用,对刚度有不同的要求。

在工作中,某些零件如轴和杠杆、机架等,其弹性变形将直接影响仪表的精度,因此,需要有足够的刚度。由材料力学可知,零件的刚度与材料的强度无关,而与材料的弹性模量、零件的截面形状和几何尺寸有关。复杂形状的零件和部件的组合刚度,计算比较困难,通常可根据提高刚度的原则和参考类比法进行设计。提高刚度的原则有以下几种:

(1) 按材料力学计算刚度的理论公式,简化零件结构进行近似计算和估算,给予较大的余量。

(2) 按理论公式指导,减小轴的跨度和杆件的长度,对抗弯零件应采用截面系数较大的截面形状,对抗扭零件应采用截面轴惯性矩较大的截面形状。

(3) 在允许的条件下,增大紧固联接的接触面并采用可靠的定位结构。

(4) 对薄壁件和薄壁壳体应采用成型工艺,改变截面形状,增大截面抗弯系数。

(5) 对抗弯零件应采用弹性模量 E 较大的材料,对抗扭零件应采用剪切弹性模量 G 较大的材料。

(6) 参考工作条件近似的产品和零件, 用类比法进行改进设计。

在仪表中, 对于利用刚度这一特性实现一定力与变形量转换功能的零件, 如弹簧、游丝、弹簧片等, 统称为弹性元件。这类元件的刚度很低, 但有一定的要求。其中用于测量的弹性敏感元件, 其刚度有严格的要求。本节所指零件工作能力所要求的刚度, 主要是指刚性零件。对于弹性元件刚度是属于元件本身的特性, 对于这种刚度特殊的要求将在第二章弹性元件中专门论述。

振动稳定性是要求零部件在交变载荷和外界振动影响下, 不产生自振, 更不能产生共振。因为振动影响精度、产生噪声, 严重的还会使工作失效。

任何零件, 从本质上看都具有一定的弹性, 同时又有一定的质量, 激振后都产生一定频率的振动, 这种频率为零件固有的频率。一般零件由于刚度较大, 其固有频率很高, 产生共振的可能性很小, 自振的影响也微乎其微。对于一些悬臂的杆件和片簧(如触点片簧), 以及薄壁壳体等, 由于结构和重量所限, 却往往刚度较低而容易产生自振甚至共振。所以在结构设计上应考虑附加结构来提高刚度以降低振动的影响。对于有剧烈振动的工作条件, 可将零部件安装在减震垫或由减震器组成的隔振系统上, 或将仪表直接安装在减震器上。

§ 1-4 仪表常用材料及其选择

仪表中常用的材料有金属材料和非金属材料两大类:

一、仪表中常用的金属材料

(一) 钢

钢的品种很多, 仪表中常用的为轧制碳钢。轧制碳钢中有低碳钢(含碳低于0.2%)、高碳钢(含碳高于0.6%)、易切削钢以及优质碳钢等。低碳钢用于强度不高的冷加工零件(如用于辗压螺纹和压制钉头槽的螺钉), 由于它具有较低的剩余磁性, 亦可用于磁路系统的元件; 高碳钢用于要求强度较高的零件, 进行热处理后有较高的硬度, 但高碳钢加工时刀具磨损较加工低碳钢要快。如果对零件表面硬度要求较高时, 亦可采用低碳钢, 但加工后要进行表面渗碳或氧化处理; 易切削钢属于低碳钢, 供应的材料多为直棒料, 它的直径经过精密轧制, 切削性较好, 适于机械加工, 尤其适合在自动车床上加工。用于仪表中的优质碳钢, 一般用含碳量较高的(含碳1%), 通常称为高碳银亮钢, 这种材料的耐磨性较好, 故可用做轴尖, 轴齿轮和其它要求具有长期耐磨的零件。

另外, 仪表中还常用轧制合金钢, 如铬和铬镍合金钢是在各种低碳或高碳钢中加入百分之几的合金成分。加入合金成分是为了提高材料的硬度和抗腐蚀性, 以及在热处理过程中变形较小, 这对精密的小零件来说是非常重要的。

含铬在12~14%之间的马氏体型不锈钢, 适于在潮湿和热带气候条件下工作, 具有一定的抗腐蚀作用, 在仪表中多用于较重要的零件, 如小齿轮或照相机快门的零件。但是, 当采用不锈钢时, 应该知道, 不锈钢加工比碳钢要困难得多。另外, 不锈钢并非永不生锈。不锈钢的防锈性能与零件表面质量有一定关系。因此, 不锈钢零件表面最好进行磨光, 这又会提高加工成本, 特别是尺寸较小, 形状复杂的零件更是如此。

奥氏体型不锈钢是一种抗酸性腐蚀的材料, 延展性较好, 适用于制造波纹形状和拉伸的零件。

（二）有色金属

有色金属包括铜、铝、锌及其合金。

黄铜 黄铜的种类很多，其中含铜 58%~75%，含铅 0.6%~3%，其余成分为锡的是铅黄铜。铅黄铜的强度较高，易于加工，是仪表零件的常用材料，齿轮及齿轮传动的夹板就采用这种材料。因为铅黄铜是一种很好的轴承材料，所以可在夹板上直接加工出轴承孔。

青铜 青铜中用于仪表零件较多的是含锡 7%，含磷 0.1%~0.3%的锡青铜。由于锡青铜的弹性模量比钢低得多，而其弹性极限却很高，所以锡青铜很适合需要变形的弹性元件，如仪表的游丝、弹性膜片等。

承受载荷较大而变形量亦要求较大的弹性元件，需要采用价格较贵的含铍 2%的铍青铜。另外，磷青铜和铍青铜有良好的导电性，故常用它们来制造触点弹簧片和电测仪表中的游丝等导电元件。

铸造青铜（含铜 85%，锡 5%，铅 5%，锌 5%）是一种较好的轴承合金，可以用来制造滑动件，如轴承衬套、导轨等。

镍和镍合金 工业用纯镍质地较硬并耐腐蚀，可用于电真空仪器零件及在强腐蚀条件下工作的仪表零件（如在热水表中的轴尖、齿轮）。但是，镍的价格较贵，质地较硬难以加工。

镍铜合金强度较高，为无磁性材料，常做波纹管和高耐腐蚀和高强度的零件。

因瓦合金（含镍 36%和少量其它元素，其余成分为铁）是一种热膨胀系数非常低的合金，这种材料可用来制造各种仪表中要求尺寸不受温度影响的零件，如精密摆杆，测量长度的精密标尺，热双金属片的从动层等。因瓦合金的加工很困难，在它上面钻孔必须精心慢速，因为它的导热性很差，稍快即因温度升高而体积膨胀，造成卡钻和折损。

爱林合金是弹性模量温度系数非常低的一种镍铬铁合金。这种材料可用来制造要求刚度对温度变化不敏感的弹性敏感元件。但这种材料的弹性极限较低，对载荷较大的弹性元件应采用多种成分的恒弹性材料，如制造游丝的Cr18Ni9Ti。

铝和铝合金 利用冷加工可把铝和铝合金制成重量很轻的零件，如数字鼓轮、屏蔽件、刻度盘和指针等。铝和绝大多数铝合金都要经过表面氧化处理，使金属表面形成一层坚硬的氧化层，以提高耐磨性和耐腐蚀性，同时，还可以形成各种令人爽心悦目的颜色。

铸铝合金 赋予铸铝合金良好铸造性能的主要成分是硅。铸铝合金可用来制造壳体、机架机座等。

锻铝合金 在仪表中主要应用经过热处理的铝合金。这些材料的机械性能是经过热处理并在室温条件下放置一定时间后获得的。弯制件和压制件可以在热处理后立即加工成型。这样，加工后就不会变形。这类铝合金中有些材料的强度和钢相差无几，但其弹性模量却比钢低得多，由于其质量较轻，故常用于承受较大载荷而要求质量较轻和有一定弹性的零件，如叶轮叶片等。

锌合金 在精密铸造中锌合金具有良好的可铸性，可用于压模铸造，其铸造精度较高，表面光滑，能铸造出形状复杂的铸件或薄壁工件。这种材料不仅便宜，而且浇铸的温度较低，可以延长铸模的使用寿命。但是，这种铸件性脆，强度较低，质量较铝合金重。锌合金的缺点是抗腐蚀性能较差。因此，采用锌合金制造的零件，表面必须进行覆盖处理。

二、仪表中常用的塑料

塑料是以高分子合成树脂为基础，加入或不加入填料，在一定工艺条件下（温度、压