

仪器仪表学术专著

金属膜片的设计

樊大钧 著

机械工业出版社

仪器仪表学术专著

金属膜片的设计

樊大钧 著



机械工业出版社

本书主要是讨论金属波纹膜片的设计方法，是著者长期研究工作的初步总结。全书共4章：第一章膜片的特性和应用；第二章计算膜片的一些力学基础理论；第三章波纹膜片的设计计算；第四章几种焊接波纹管的设计计算。

本书内容丰富、叙述简要、文字通顺、便于实用。可供各大院校仪表、化工自动化专业师生，固体力学专业师生及有关工程技术人员阅读或参考。

金属膜片的设计

樊大钧 著

责任编辑：李 敬

封面设计：方 芬

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（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 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $7^{1/2}$ · 字数 192 千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001—2,200 · 定价：2.35 元

科技新书目：154-124

统一书号：15033·7034

引 言

为了开展仪表学科的学术活动,1980年创刊了《仪器仪表学报》,到目前已先后刊载400多篇学术论文,汇集了我国仪表学科的科研、理论探讨和应用的精华。每篇论文都具有一定创新与独立的见解,这对仪表工业的发展与繁荣起到了很好的促进作用,也受到国内外的好评。

关于组织出版仪器仪表专著的问题,我们认为:建国三十多年,特别是近几年来,我国仪器仪表科学技术和工业生产得到了很大的发展,取得了许多重要的科研成果,其中不少成果具有我国自己的特色,有的达到国际先进水平。为了总结和交流科技成果,提供和保存科技文献,促进仪器仪表科技事业的发展,不仅有必要,也有可能出版一批仪器仪表专门著作。专著是《学报》的扩展和延伸,反映著者在仪器仪表某一学科领域或某个专门课题上创造性的工作所取得的研究成果,具有较高的学术水平和指导意义。专著是由《仪器仪表学报》编委会推荐选题和组织审稿,机械工业出版社审定选题和编辑出版。

1983年,1984年先后推荐组织了六个专著选题:《黑体辐射源特性计算及应用》、《白度理论及计测》、《振动传感器的绝对校准(装置)》、《滞后过程的预估与控制》、《金属膜片的设计》、《实用建模方法》。

经过各方面两年多来的共同努力,这批专著即将陆续出版。在此我们应对仪器仪表学报各位编委、审阅稿件的专家以及机械工业出版社表示感谢。仪器仪表专著出版确实是仪表行业的一件大事,它标志着我国仪表学科已经走向国际,进入科学技术先进行列。

我们深信,这批专著的出版一定会受到国内外仪表学术界与仪表行业的欢迎,并对此表示祝贺。

IV

这批专著是初次组织，一定还存在一些问题，希望读者关心、提意见，以便今后改进提高。

《仪器仪表学报》主编

王良楣

1986年5月

序

这是一本论述金属膜片设计的专著，是著者若干年研究工作的初步总结。全书主要内容有三部分。第一部分介绍膜片特性、制造和应用；第二部分系统而简要论述设计金属膜片所涉及的板壳弹性理论；第三部分详细讨论如何把板和壳的理论用于设计金属膜片和设计方法。全书十几万字，内容丰富、叙述简要、文理通顺、便于实用。它是设计金属膜片的重要科技参考书，不但对从事金属膜片设计的科技人员，而且对固体力学一般工作者都有参考价值。

钱伟长

1985年10月于上海工业大学

前 言

这本书讨论金属波纹膜片的设计方法，简述与设计膜片有关的板壳弹性理论。它不是为从事固体力学工作的同志编写的，是为膜片设计工作者而编写的。因此，本书的重点是讨论设计膜片的公式和设计方法。但由于设计膜片必须涉及板壳理论，所以简要论述了有关的基本板壳弹性理论，考虑到设计工作者的日常工作情况，尽可能从应用的角度，论述这些力学内容，这些力学内容还是必要的。本书对板壳的非线性问题不作进一步的介绍，但可利用本书所提到的非线性波纹膜片设计程序。若设计工作者对板壳非线性力学问题有兴趣，可参考有关书籍。由于金属波纹膜片的技术要求严格，影响其特性的工艺、材料性能和尺寸、几何参数等因素很多，因此，仅由理论不可能得出完全与膜片实际情况相吻合的结果。理论能给出满足工程设计要求的结果，指导设计者提出膜片的尺寸和几何参数。利用所编程序和计算机计算，修改设计，达到节省人力、物力，提高经济效益的目的。设计者可引用书中所介绍的设计公式和程序，进行设计。较大设计程序可由著者提供。

本书由王冗和范硕二位同志作了整理、抄写、核算、校对、绘图等大量工作，笔者非常感谢他们在业余和假期的辛勤劳动。

笔者水平有限，书中会有错误，欢迎批评指正。

著者

1985年8月

目 录

第一章 膜片的特性和应用	1
一、概论	1
1. 膜片的定义	1
2. 膜片的结构特性术语	1
3. 膜片的一般术语	3
二、膜片的分类应用	4
1. 均布压力变为膜片中心位移	6
2. 位移变为压力变化的情况	7
3. 均布压力变为集中力	9
4. 不同压力的转变	10
5. 不同位移的转变	10
三、膜片波纹的几种形状和它的结构	11
1. 几种膜片波纹的形状	11
2. 膜片和膜盒的结构	12
四、膜片的材料和制造	15
五、膜片的焊接与焊接结构	19
1. 钎焊	19
2. 熔焊	20
第二章 计算膜片的一些力学基础理论	22
一、圆板线性和非线性理论	23
1. 受均布载荷的等厚圆薄板	23
2. 受集中载荷的等厚圆薄板	28
二、正交异性圆薄板理论	32
1. 正交异性平膜片的基本方程	36
2. 正交异性平膜片的近似解析解	39
三、旋转壳对称加载的线性弹性理论	45
1. 旋转壳对称加载的基本方程	45
2. 基本微分方程的积分与边界条件	49
四、圆柱薄壳对称加载时的基本方程	54

1. 薄壁长圆柱壳的解	55
2. 薄壁短圆柱壳的解	58
五、圆锥薄壳对称加载时的基本方程及解	63
六、圆环薄壳对称加载时的基本方程及解	78
七、轴对称壳大挠度问题	89
1. 无量纲振动微分方程	89
2. 初参数解法	93
第三章 波纹膜片的设计计算	95
一、无外波纹的波纹膜片设计计算	96
1. 线性特性膜片	96
2. 非线性特性膜片	98
3. 膜片波纹形状及尺寸与 a 和 b 的关系	98
二、有外波纹的波纹膜片设计计算	101
1. 圆柱外波纹波纹膜片的近似计算	102
2. 圆弧外波纹波纹膜片的近似计算	109
3. 圆弧外波纹波纹膜片的精确计算	118
4. 圆弧外波纹波纹膜片的初参数法	128
三、几种外圆弧波纹膜片的拟合公式	129
1. NBS-1型圆弧波纹膜片的设计	130
2. 三圆弧波纹膜片的设计	136
3. 任意外圆弧波纹中心角 φ 的三圆弧波纹膜片的设计	139
4. 两圆弧波纹膜片的设计公式	141
5. 四圆弧波纹膜片的设计公式	142
6. 五圆弧波纹膜片的设计公式	143
7. E型膜片的设计公式	144
第四章 几种焊接波纹管的设计计算	148
一、皂角形焊接波纹管	148
二、单圆弧焊接波纹管	161
三、锥形焊接波纹管	166
四、翼形焊接波纹管	170
五、大变形圆弧波纹焊接波纹管	177
附录	187

附录一	利用环壳方程的渐近解, 求解波纹管的工程计算	187
附录二	圆弧形波纹膜片和圆弧形波纹焊接波纹管的计算程序	222
附录三	三角形波纹膜片设计资料数据	226
参考文献		227

第一章 膜片的特性和应用

一、概 论

1. 膜片的定义

膜片是少具有挠性的薄片，它的周边固定，受到不平衡的力后，其中心沿大致垂直于膜片的方向移动。

膜片的挠性面或制成各式各样的波纹，或是近似平面。按其型面可分为：

型面平坦无波纹（或有少数很浅的波纹）的平膜片（或近似平膜片）。

型面具有同心环状波纹的波纹膜片。波纹截面形状有圆弧形、正弦形、三角形（锯齿形）、梯形等。

型面上的波纹不是同心环状，而是沿半径方向上有凸起的波纹，这叫星形膜片。

将两个膜片沿外周边密封焊接而制成一个膜盒。

将许多个膜片内外周边密封焊接而制成一串内腔互通的膜盒串（膜盒组）。膜盒串的内外径比值较大的，可以称之为焊接波纹管。

膜片也可以与衬盘密封固紧在一起。膜片的中心部分多有一刚性零件，此刚性零件习惯上称为**硬芯**（硬心）。这些结构如图1-1所示。

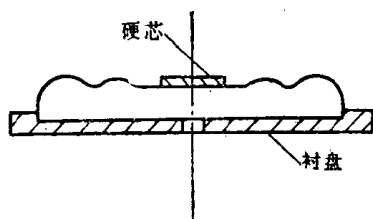


图1-1 膜片衬盘固紧简图

2. 膜片的结构特性术语

膜片（或膜盒）可以产生变形的最大直径叫作工作直径。

膜片（或膜盒）的最大直径叫作外径。一般是外径比工作直

径大。

波纹膜片中心无波纹的平坦部分叫作平中心。平中心上可以焊接一个直径和它一样大或小些的刚性零件。平中心部分的直径叫作平中心直径。若刚性零件的直径小于平中心直径，平中心部分在刚性零件外的那部分圆环平膜片还有变形的能力。

波纹膜片最外的一个波纹（一般大于其它波纹）叫**边缘波**（外波纹）。

膜片波纹中性层最高点与最低点在平行于轴线方向上的距离叫**波高**（波纹深度）。

圆弧波纹膜片中，圆弧波的半径叫**波纹半径**。

圆弧波纹膜片中，圆弧波部分所对应的中心角叫**弧角**。

波纹膜片两个相邻波纹顶点在轴向截面内，沿半径方向间的距离叫**径向间距**。

波纹膜片两个相邻波纹顶点在轴向截面内，沿轴向的距离叫**轴向间距**。

间隔宽度是膜片工作直径与平中心直径差的一半距离。

波纹膜片的倾斜波在轴向截面内，倾斜面与半径的夹角（锐角）叫**倾角**。

波纹膜片两个相邻波纹顶点连线与顶点水平线的夹角（锐角、叫**间距倾角**（简称**间距角**）。

对应于膜片工作直径的面积叫作**工作面积**。

在任一位移时，膜片（膜盒）所受集中力的改变量与同它相平衡所需的均布压力变化量之比叫作膜片的**压力有效面积**。

与压力有效面积对应的某个直径叫作**压力有效直径**。

压力有效面积与工作面积之比叫作**压力有效面积系数**，它是无量纲的数。

由膜片中心位移引起的膜片（膜盒）内腔容积变化量与位移变化量之比叫作**容积有效面积**。

对应容积有效面积的直径叫作**容积有效直径**。

由一些因素所确定的膜片中心的最大位移量叫作**允许位移**。

对应允许位移的均布压力叫作允许均布压力。

3. 膜片的一般术语

在材料的弹性范围内，膜片（膜盒）所承受的载荷与相应产生的中心位移的相互关系叫作膜片的**弹性特性**。以曲线形式表示的弹性特性叫特性曲线。这里所说的弹性特性是膜片的一种静态特性。膜片制造出经稳定处理后，若干次测量所得弹性特性的平均值可以代表此膜片的弹性特性。由于材料和工艺因素，不可能一批制造出的每一个膜片有完全相同的形状和尺寸。因此，每个膜片的弹性特性严格说只是它自己的弹性特性。实测出膜片弹性特性的数据都要进行统计数学的处理。理论分析所得某膜片的弹性特性与该膜片实际弹性特性做验证比较时，要有统计观点，要有误差分析。

在测量膜片的特性时，用常用设备和测量方法，都是取一些测量点进行间断测量，这样作把加载时间对弹性特性的影响混卷在所测结果中，这就不是（严格说）膜片的真正弹性特性。从这个意义上讲，我们测不出膜片的真正弹性特性。

在材料的弹性范围内，卸载后一段时间内，膜片中心位移不能恢复到原来位移的现象叫弹性后效现象。

在材料的弹性范围内，同一载荷在膜片上加载与卸载过程中，膜片变形不一致的现象叫滞后现象（迟滞现象）。加载与卸载过程中，膜片变形的差值是滞后差值。要在多次重复测试中，取膜片变形的平均差值代表它的滞后差值。取其中的最大平均差值（最大滞后差值）与膜片最大测量位移之比作为滞后误差。这是以变形表示的滞后误差。若以膜片的均布压力和位移特性曲线表示滞后现象如图 1-2 所示。

由于有滞后现象，所以在

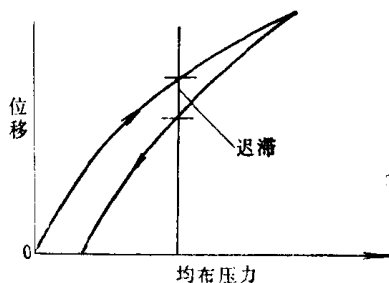


图1-2 滞后曲线

膜片特性曲线上形成滞后曲线（加载和卸载过程中，形成的特性曲线不重合）。滞后曲线内的面积表示能量的损失。

因为特性曲线是由两个坐标表示的，所以固定其中任一坐标值，都可以在滞后曲线上得出另一坐标差值，以此差值与最大的固定坐标值相比，可得此特性曲线的滞后误差。这可以认为是广义的滞后误差。这样可以说除位移滞后误差外，还可以有压强滞后误差，集中力滞后误差等。通常所说滞后误差就是位移滞后误差。在膜片设计中，对滞后误差有具体要求。

在恒定载荷的作用下，膜片中心位移随时间而产生的变化叫作漂移。漂移方向与载荷作用下所产生的位移同方向时为正漂移，反之为负漂移。

膜片完全卸载后，经过特定长时间的静置后，不能恢复的变形量叫零点移动。它是由材料的塑性特性和膜片的受力等因素所形成的。

由于有以上诸误差因素，所以膜片的实测特性曲线（或若干测点值）与它正常应有的真实特性曲线（或真实若干测点值）是不一致的。不一致的量是膜片的弹性误差。

弹性膜片用于测量时，其载荷或位移的测量值与按它们的直线关系求得的计算值之差与最大载荷或位移的比值叫线性度。此直线关系可用不同方法选得。如作通过坐标零点和膜片最大位移点的直线，或作回归直线。由不同方法得到的直线，相应的线性度也不同。所说线性度是指最大线性度。

作用在弹性膜片上的载荷变化量与由它引起的位移变化量之比值叫膜片的刚度。膜片的弹性特性是线性的，其刚度是常量。反之一是变的。

刚度的倒数是灵敏度。

二、膜片的分类应用

膜片（膜盒）应用，是把 F 、 P 、 w 和 ΔV （集中力、均布压力、位移和容积变化）等的某一个量转换到其余的一个量或几

个量。最常应用的是转换 F 、 p 和 w 的关系。一般说来，其中一个量（输出量）以第二个量输入的线性或近似线性函数而变化，此时第三个量是常量或是零，也有时第三个量是某个量的函数。如图 1-3、图 1-4 和图 1-5 所示。

图 1-5 表示膜片与线性弹簧并联使用时的情况。

膜片与非线性弹簧并联使用时的情况，如图 1-6 所示。

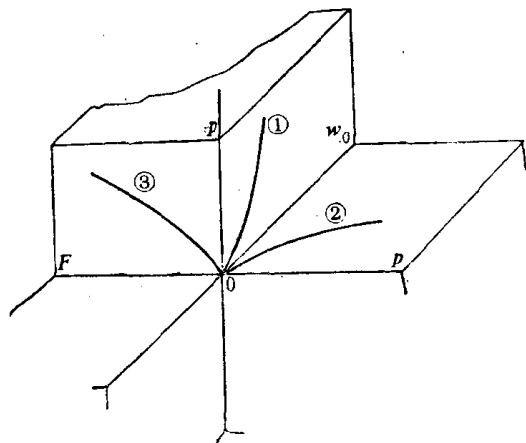


图 1-3 某一量为零时的关系

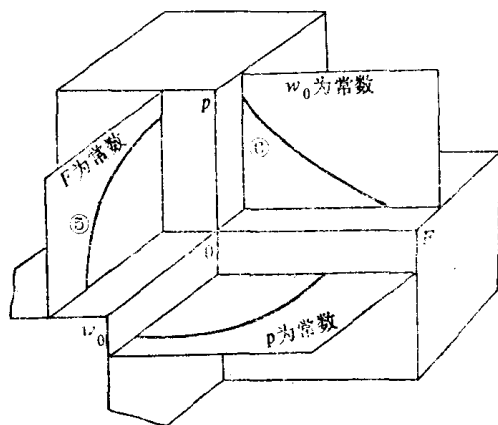


图 1-4 某一量为常量时的关系

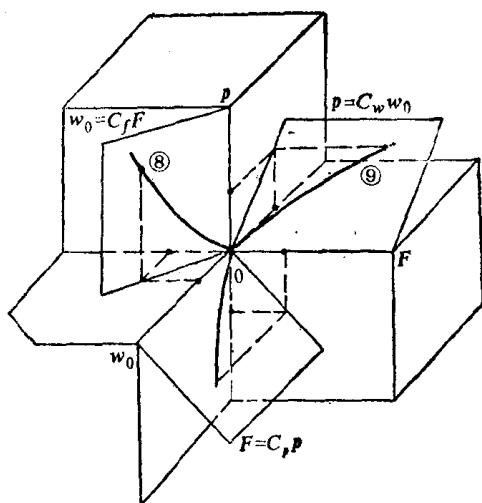


图1-5 某一量为其余两个量的线性函数时的关系

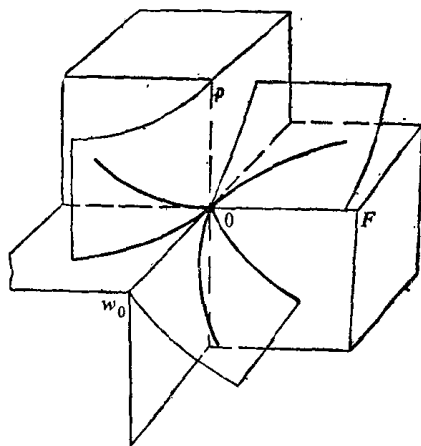


图1-6 某一量为其余两个量的非线性函数时的关系

1. 均布压力变为膜片中心位移

这是最普通的一种应用。由膜片中心位移 w_0 的大小来反映膜片受均布压力的大小。

图 1-7 表示在膜片上无集中外力作用的情况，如压力表中的膜片的应用。若是线性弹性特性的膜片，均布压力与中心位移的关系如下。

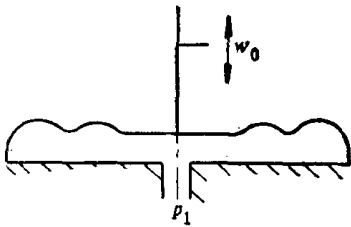


图1-7 压力变位移

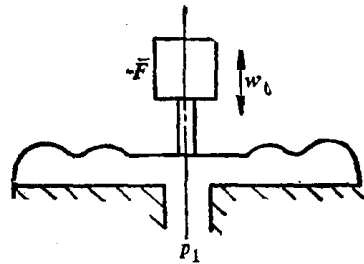


图1-8 恒定外力下压力变位移

$$w_0 = p_1 / C_p$$

膜片的弹性特性（特性曲线）如图 1-3①所示。

图 1-8 表示在膜片上有一恒定外力作用的情况。若膜片是线性特性的，则均布压力与中心位移的关系是

$$w_0 = p_1 / C_p - \bar{F} / C_f$$

膜片的一般特性曲线如图 1-4⑤所示。

图 1-9 表示膜片与片弹簧联合应用的情况。这样应用可以改变膜片输出特性。若膜片特性是线性的，则均布压力与中心位移的关系是

$$w_0 = p_1 A_s / (C_f + C_s)$$

膜片的一般特性曲线如图 1-5⑧所示。

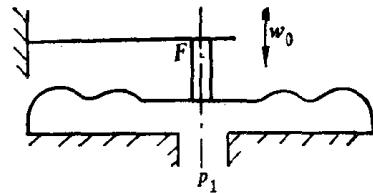


图1-9 与弹簧联用的情况

2. 位移变为压力变化的情况

在喷嘴-挡板组合的随动系统中，喷嘴不动，膜片与挡板相连。由气管向膜片输入一定压力的气体，在挡板离开喷嘴之前，膜片所受压力是渐增的。挡板离开喷嘴后，膜片所受压力有了变化。这个变化是由于膜片中心产生了位移。

图 1-10 表示在膜片上无外力的情况。若膜片的特性是线性的，则有如下关系

$$p_2 = w_0 C_p$$