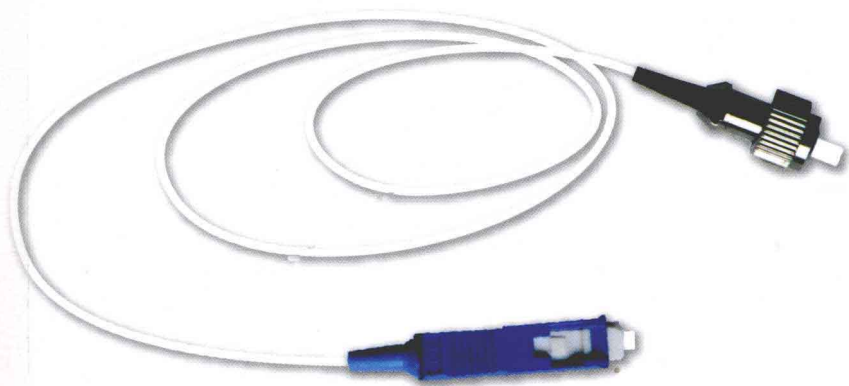


Guangxian Chuanganqi Jishu

光纤传感器技术

李川 主编



 科学出版社

光纤传感器技术

李 川 主 编
李英娜 万 舟 姬志屏
吴永红 陈 焰 许江淳 编著
许晓平 欧阳鑫

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书共 21 章,分为三篇,分层次介绍了光纤传感器技术的基础、原理和应用。

第一篇是基础,主要包括:基础光学(第二章)、光纤和光缆(第三章)、光波导和集成光路(第四章)、光纤器件(第五章)。

第二篇是原理,主要涉及:强度调制型光纤传感器(第六章)、波长调制型光纤传感器(第七章)、频率调制型光纤传感器(第八章)、相位调制型光纤传感器(第九章)、偏振调制型光纤传感器(第十章)、光栅调制型光纤传感器(第十一章)、分布式光纤传感器(第十二章)、特种光纤(第十三章)、光集成传感器(第十四章)、光纤传感器网络与数据融合(第十五章)。

第三篇应用,主要涉及:光纤机械传感器(第十六章)、光纤热工传感器(第十七章)、光纤电磁传感器(第十八章)、光纤化学传感器(第十九章)、光纤生物传感器(第二十章)、光纤传感器的产业化发展(第二十一章)。

本书可供从事光纤、光纤传感、检测、仪器、仪表等理论和应用研究的科研人员、工程技术人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤传感器技术/李川等编著. —北京:科学出版社,
2012.6
ISBN 978-7-03-034723-7

I. ①光… II. ①李… III. ①光纤传感器 IV.
①TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 121799 号

责任编辑:刘鹏飞 / 责任校对:林青艳
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

化学工业出版社印刷厂印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 6 月第一次印刷 印张:27

字数:723000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

20 世纪 70 年代,人们已认识到光纤不但具有良好的传光特性,而且可用来进行信息传递,无需任何中间介质就能把待测量与光纤中的光特性联系起来。与传统的传感技术相比,光纤传感器的优势是其自身的物理特性而不是功能特性,即光纤质轻、径细、抗电磁干扰能力强、耐辐射、信号衰减小、集信息传感与传输于一体等。

早在“七五”规划时期,我国提出 15 项光纤传感器项目,包括光纤放射线探测仪,光纤位移、位置及角度传感器,光纤压力(水声)传感器,光纤振动、速度、加速度计,光纤温度传感器及温度测量系统,光纤陀螺,光纤磁场传感器,光纤电流、电压传感器,医用光纤传感器,分析用光纤传感器,集成光学传感器,光纤传感器应用系统,光纤传感系统及元器件的计量测试方法和标准,光纤传感用的有源、无源器件的研制等。这些项目极大地推动了我国光纤传感器技术的发展。

20 世纪 90 年代后期,光通信带动下的光子产业取得了整体进步,光纤传感器呈产业化发展,形成五大应用领域:智能结构、工业、生物医学、自然生态和人居环境。1997 年,“光子学与光子技术发展战略报告”指出:在 21 世纪的光子产业,光纤传感将与光纤通信平分市场,并逐步超过后者。为全面反映支撑光纤传感器领域的技术,本书从光纤传感器技术的基础、原理和应用三个层面展开讨论。

第一篇,基础。给出光纤传感器的理论基础和器件基础,其中,理论基础主要介绍光的基本理论、光纤的光线理论、光纤的模式理论、光纤的模式耦合理论、单模光纤的非线性传输特性等,重在物理概念,为光纤器件的分析提供理论方法,包括解析解和数值解;器件基础主要介绍光纤和光缆、光波导和集成光学、光纤器件等,提供实现光的激发、传播、交换、分配、控制和探测等环节的光无源和有源器件。

第二篇,原理。主要介绍光纤传感器工作的物理机理,即传感器的调制原理,对光波模式进行调制的各类光纤传感器,如强度调制型光纤传感器、波长调制型光纤传感器、频率调制型光纤传感器、相位调制型光纤传感器、偏振调制型光纤传感器、光栅调制型光纤传感器,利用光纤外形上的一维特性与光纤的敏感特性构成的分布式传感器和特种光纤,以及集成光学传感器;复杂条件下多光纤传感器网络与数据融合的多源信息综合技术;重点是光纤传感器的设计提供传感器件的传感基础。

第三篇,应用。提供重要的测量对象及其常见的光纤传感器测量方法,按光纤传感器的测量量分类,包括机械量传感器、热工量传感器、电磁量传感器、化学量传感器和生物量传感器等;重点是根据测量对象应用相关的光纤传感器。在物联网产业的带动下,光纤传感器逐步形成五大应用领域:智能结构、工业、生物医学、自然生态和人居环境等。

40 年的发展使光纤传感器已从实验室走向应用,正在获取应有的市场地位。为满足光纤传感器技术蓬勃发展的现状及其对人才的需求,本书力图系统展现光纤传感器技术领域所涉及的支撑技术,可供不同层次的人员使用,如从事光纤传感器研制的人员,可偏重于基础篇中的理论

基础和原理篇；从事光纤传感器应用的人员，可偏重于基础篇中的器件基础、原理篇和应用篇。

经过 10 年的发展，光纤传感器技术已成为昆明理工大学信息检测与处理创新团队的核心研究方向。按照教学与科研相互促进的原则，团队从 2003 年起就一直为研究生讲授“光纤传感器技术”课程，该课程现已成为昆明理工大学百门研究生核心课程建设项目。

李 川
2012 年于昆明理工大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 光纤传感技术的发展	1
1.3 光纤传感器系统	2
1.4 光纤传感器系统的性能指标.....	12
1.5 小结.....	24
参考文献	25

第一篇 基 础

第二章 基础光学	28
2.1 引言.....	28
2.2 光的基本理论.....	28
2.3 光波在各向同性介质中的传播.....	40
2.4 光纤的光线理论.....	47
2.5 光纤的模式理论.....	52
2.6 光纤的模式耦合理论.....	63
2.7 单模光纤的非线性传输特性.....	73
参考文献	75
第三章 光纤和光缆	78
3.1 引言.....	78
3.2 光纤制造.....	78
3.3 光纤测量的基本条件.....	79
3.4 光纤结构参数的测量.....	80
3.5 多模光纤和单模光纤的衰减与测量.....	84
3.6 光纤的物理化学特性.....	88
3.7 光缆.....	93
参考文献	102
第四章 光波导和集成光路	107
4.1 引言	107

4.2 集成光无源器件	107
4.3 半导体光有源器件	113
4.4 光源与光纤的耦合	122
4.5 光电检测器与光纤的耦合	122
参考文献	123
第五章 光纤器件	125
5.1 引言	125
5.2 光纤无源器件	125
5.3 光纤有源器件	138
参考文献	150

第二篇 原 理

第六章 强度调制型光纤传感器	154
6.1 引言	154
6.2 强度调制型光纤传感器系统的一般传感模型	154
6.3 强度调制的限制	155
6.4 强度调制的原理	156
6.5 强度检测	163
6.6 混合型光纤传感器	163
参考文献	165
第七章 波长调制型光纤传感器	167
7.1 引言	167
7.2 波长调制的原理	167
7.3 波长检测	175
参考文献	176
第八章 频率调制型光纤传感器	177
8.1 引言	177
8.2 光学 Doppler 效应	177
8.3 频率检测	179
参考文献	181
第九章 相位调制型光纤传感器	182
9.1 引言	182
9.2 光纤干涉仪	182
9.3 光学层析成像	191
9.4 干涉仪的灵敏度	192
9.5 双光束干涉的检测方法	193
9.6 多光束干涉的检测方法	200
参考文献	205

第十章 偏振调制型光纤传感器	208
10.1 引言.....	208
10.2 光纤的偏振调制.....	208
10.3 双折射对光纤传感器的影响.....	209
10.4 单模光纤双折射的测量.....	213
参考文献	216
第十一章 光栅调制型光纤传感器	219
11.1 引言.....	219
11.2 光纤 Bragg 光栅传感器	219
11.3 光纤 Bragg 光栅传感信号的检测	224
11.4 长周期光纤光栅传感器.....	227
11.5 光纤光栅干涉传感器.....	228
参考文献	230
第十二章 分布式光纤传感器	234
12.1 引言.....	234
12.2 光纤系统的光学测距技术.....	234
12.3 背向散射法的调制原理.....	241
12.4 前向散射法的调制原理.....	243
12.5 频域中非线性散射法的调制原理.....	244
12.6 分布式光纤传感器的工程约束.....	246
参考文献	246
第十三章 特种光纤	250
13.1 引言.....	250
13.2 自聚焦透镜.....	250
13.3 传像光纤.....	250
13.4 倏逝场光纤.....	251
13.5 增敏和去敏光纤.....	252
13.6 传输 THz 频段的光纤	253
13.7 红外光纤.....	253
13.8 可见光光纤.....	257
13.9 紫外光纤.....	258
13.10 光子晶体	259
参考文献	264
第十四章 光集成传感器	268
14.1 引言.....	268
14.2 倏逝场传感器.....	268
14.3 光学陀螺仪.....	270
14.4 其他干涉传感器.....	271
14.5 光波导 Bragg 光栅传感器	273
14.6 微光机电系统传感器.....	274

14.7 纳米测量技术·····	275
参考文献 ·····	276
第十五章 光纤传感器网络与数据融合 ·····	279
15.1 引言·····	279
15.2 光纤传感器网络与数据融合模型·····	279
15.3 光纤 Bragg 光栅传感器的复用技术 ·····	282
15.4 光纤中温度和应变的灵敏性·····	285
参考文献 ·····	293

第三篇 应 用

第十六章 光纤机械传感器 ·····	298
16.1 引言·····	298
16.2 运动和尺寸·····	298
16.3 力学量·····	308
16.4 声学量·····	314
参考文献 ·····	317
第十七章 光纤热工传感器 ·····	319
17.1 引言·····	319
17.2 温度·····	319
17.3 压力·····	325
17.4 流量和流速·····	328
17.5 密度·····	337
17.6 液位·····	338
17.7 粘度·····	340
参考文献 ·····	342
第十八章 光纤电磁传感器 ·····	344
18.1 引言·····	344
18.2 电压·····	344
18.3 电流·····	346
18.4 磁场·····	351
18.5 电功率·····	354
18.6 电磁场·····	355
18.7 射线·····	356
参考文献 ·····	356
第十九章 光纤化学传感器 ·····	359
19.1 引言·····	359
19.2 光纤化学传感器的特点·····	359
19.3 气体·····	363

19.4 湿度·····	368
19.5 离子·····	369
参考文献 ·····	372
第二十章 光纤生物传感器 ·····	374
20.1 引言·····	374
20.2 生理量·····	374
20.3 生化量·····	381
20.4 生物量·····	383
参考文献 ·····	386
第二十一章 光纤传感器的产业化发展 ·····	389
21.1 引言·····	389
21.2 智能结构·····	389
21.3 工业·····	394
21.4 生物医学·····	405
21.5 自然生态·····	408
21.6 人居环境·····	412
参考文献 ·····	416

第一章 绪 论

1.1 引言

1865年, J. C. Maxwell 提出光是一种电磁波^[1~4], 参见图 1-1。光纤通信使用的波长在近红外区 800~1700 nm, 频率为 $10^{14} \sim 10^{16}$ Hz, 比常用的微波高 $10^4 \sim 10^5$ 量级, 以光子为信息载体的光纤通信提供了一种重要的信息交换与传输手段^[5, 6]。光纤传感器主要研究的是光的模拟信号在光波导中传感与传输, 利用敏感元件感受规定的被测量, 通过转换元件按照一定规律转换成适于在光波导中传输的光信号。

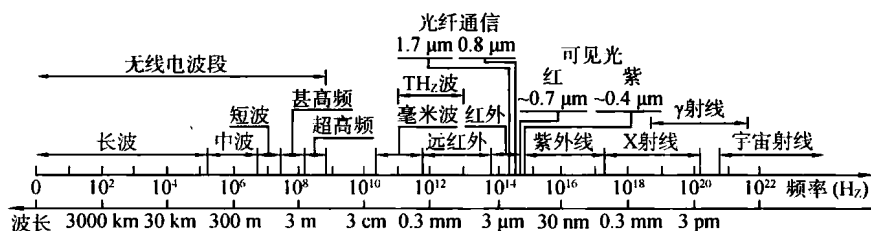


图 1-1 电磁波波谱图

1.2 光纤传感技术的发展

光纤传感器是以光纤作传感材料的传感器。光纤具有良好的传光特性, 可用于信息传递, 无需其他中间介质就能把待测量值与光纤内的光特性变化联系起来^[7, 8]。光纤质轻、径细、抗电磁干扰能力强、电绝缘、耐高温、信号衰减小、集信息传感与传输于一体, 自 20 世纪 70 年代出现以来, 光纤传感技术的发展可划分为三个主要阶段

第一阶段, 传输型光纤传感器。20 世纪 70 年代中后期, 光纤作为一种信息交换的基础, 通过光学器件把待测量和光纤内的导光联系起来。1977 年, 美国海军研究所(NRL)开始了光纤传感器系统(FOSS)计划^[9]。C. D. Kissinger 等人利用光纤和透镜改善非接触的位移测量^[10]; W. F. Jacobsen 等人利用光纤和光传感器检测液位^[11]; L. Reynolds 等人利用光纤传输研究血液的漫反射系数^[12]; G. Pircher 等人研究了基于 Sagnac 效应的光纤旋转传感器^[13]; C. D. Butter 等人研制出光纤应变仪^[14]等。

第二阶段, 单模光纤调制技术。单模光纤的深入应用, 形成了强度^[15]、相位^[16]、波长^[17]、偏振^[18]、时分^[19]、频率^[20]、光栅^[21]等光纤传感技术。20 世纪 80 年代中后期, 光纤传感器近百种, 主要研究计划包括: 现代数字光纤控制系统(ADOSS, NASA)^[22]、光纤陀螺仪(FOG, NASA)^[23]、核辐射监控(NRM)^[24]、飞机发动机监控(AEM, NASA)^[25]和其他民用研究计划(CRP)^[26]等。光纤传感仪器开始投入实际应用。

第三阶段, 20 世纪 90 年代中后期, 光纤传感技术逐步形成了五个主要应用领域: 智能结构, 工业, 生物医学, 自然生态和人居环境。

1.3 光纤传感器系统

输入、输出和被测量均可分为六个信号域^[27~29],其中,电磁信号覆盖了整个电磁谱;机械信号包括力、位置、物理尺度、速度、声波和超声波等;热信号通常可定义为温度及其衍生量,比如:热容和热阻等;电信号包括电压、电流和电场等;磁场信号由磁场定义;化学信号定义了物质的成分和参量。

光纤中的光(电磁信号中的近红外波段)受被测量调制,光纤传感器系统主要包括:光源、光纤、光纤器件、传感元件、探测器和信号处理等。

1.3.1 光源

表征光源的基本参数有:中心工作波长、波长的传输;光功率随波长的变化,光功率与光负载(反射)的变化以及这些参数随工作温度、偏置和时间变化。典型的光纤传感器光源包括:发光二极管和半导体激光器,白炽灯也可用于某些化学传感器^[30~34]。

1.3.2 光纤

光纤主要包括将光纤预制棒或放入坩埚中的芯皮玻璃料在拉丝机上拉制成一定长度的导线式光纤和采用沉积、溅射、离子交换等方法或将多根光纤熔压成一体的芯片式光纤。根据光纤对周围环境的敏感,可研制出传感器用特殊光纤^[35~38]。

1.3.3 光纤器件

光纤器件构成了光纤传感器系统的器件基础^[39~43],利用全光纤器件来组成光路,使信号被限制在纤芯范围内传输,可提高稳定性。

1.3.4 传感元件

光源发出的光经光纤送入传感元件的调制区,与被测参数产生相互作用,使光的强度、相位、偏振、频率、波长等光学性质发生变化而成为被调制的信号光;最后由光纤送入光探测器,检测技术从被调制的光信号中还原(解调)出调制信号,参见图 1-2。

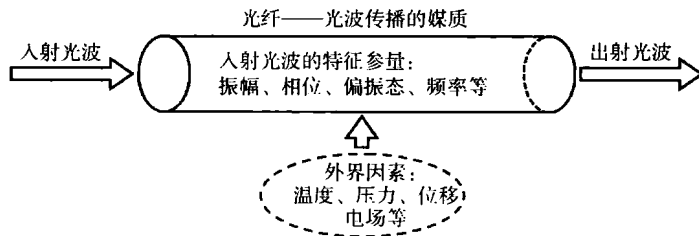


图 1-2 光纤传感器的传感原理图

光纤传感器的传感原理是传感元件内光与外场的相互作用规律。尽管光的强度、频率、波长、相位、偏振态等都可被调制,但光电探测器只能响应光的强度,因此,任何对调制光信号的检测都应转化为光强响应。按传感类型,光纤传感器可分为三类。

(1) 在传光型(非功能型)光纤传感器中,光纤仅是光的传播介质,光纤往往不连续,其间接入了对外界信息敏感的其他材料制成的或传统的传感元件。

(2)在传感型(功能型)光纤传感器中,光纤不仅传光,在外界因素作用下,传输光的强度、相位、偏振、频率、波长等光学特性会发生变化。

(3)在倏逝场光纤传感器中,当环境折射率低于纤芯折射率,光纤中的导模满足全反射,就在环境侧出现倏逝场,比如:抛磨光纤、拉伸光纤、D形光纤和空心光纤等。

1.3.5 敏感元件

弹性(敏感)元件把各种形式的测量参量转换成应变变量或位移量等,配合传感元件,把测量参量转换成调制光,从而制作出不同种性能传感器,实现相关参量的测量^[44~46]。

1. 弹性元件的基本特性

(1)弹性元件的固有频率(无阻尼自由振动频率)决定了弹性元件的动态特性。

(2)非弹性效应是指弹性元件在加、卸载同一数值时,位移量之间存在差值,构成了弹性滞后环,参见图 1-3,一般用相对滞后表示:

$$\delta_n = \left(\frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_{\max}} \right) \times 100\% \quad (1.3-1)$$

式中, $\Delta\omega_{\max}$ 是最大的位移滞后; ω_{\max} 是最大工作载荷下的总位移。

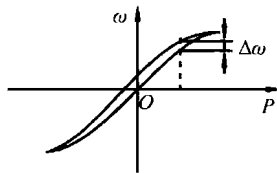


图 1-3 弹性滞后环

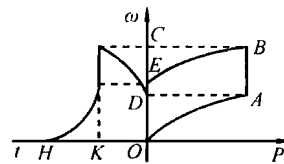


图 1-4 弹性后效

弹性元件材料的变形也是时间的函数,参见图 1-4。当载荷停止增加时,元件产生位移 OD ; 位移 CD 是载荷不变时,在 OK 时间内产生的正弹性后效(弹性蠕变)。卸载完毕后,元件产生位移 CE ; 位移 EO 是在 KH 时间内缓慢释放的后弹性后效。弹性后效使传感器出现负的测量误差、零点漂移等,这应尽量避免。

弹性模量温度系数 β_t 是因环境温度变化 ΔT 引起材料弹性模量变化 ΔE 的量度,表示为

$$\beta_t = \frac{1}{E_0} \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{1}{E_0} \frac{E - E_0}{T - T_0} \quad (1.3-2)$$

式中, E_0 和 E 分别是温度为 T_0 和 T 时的弹性模量,弹性模量随温度变化。在相同载荷的作用下,弹性元件的输出量发生变化,由此引起的误差被称为温度误差。

(3)刚度 k 是弹性元件在外力 F 作用下变形 ω 的量度,表示为

$$k = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta\omega} \right) = \frac{dF}{d\omega} \quad (1.3-3)$$

选择弹性元件许用弯曲应力的理由是:形状简单的梁在单应力的作用下为保证 $>10^7$ 次的寿命,许用弯曲应力 $[\sigma]$ 应小于弹性极限的 $2/3$; 形状较复杂的弹性元件,如膜盒、波纹管等,在多应力的作用下,为减小滞后, $[\sigma]$ 应小于弹性极限的 $1/3$; 对于长期受载和测量用弹簧,应取小于弹性极限的 $1/5$; 承受静载荷的弹性元件, $[\sigma]$ 允许接近弹性极限。

(4)灵敏度 s 是作用于弹性元件上单位力或压力所产生的变形量度,表示为

$$s = \frac{d\omega}{dF} = \frac{1}{k} \quad (1.3-4)$$

组合式弹性元件应用 n 个弹性敏感元件。弹性元件并联时,灵敏度为

$$s = \left(\sum_{i=1}^n s_i^{-1} \right)^{-1} \quad (1.3-5)$$

弹性元件串联时,灵敏度为

$$s = \sum_{i=1}^n s_i \quad (1.3-6)$$

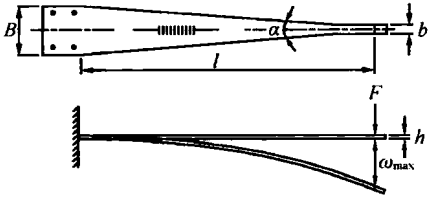


图 1-5 等强度梁

2. 常用的弹性元件

(1)等强度梁弹性元件应使当集中力作用在自由端时,距离力作用点任何距离截面上的应力相等,参见图 1-5。沿等强度梁的长度方向上的截面抗弯模量的变化与弯矩的变化成正比。若梁的固定端宽度为 B ,梁长为 l ,梁厚为 h ,沿梁长度方向上某一截面到力 F 的作用点的距离为 x ,则截面最大应力为

$$\sigma_{\max} = 6Fl / (Bh^2) \leq [\sigma] \quad (1.3-7)$$

式中, $[\sigma]$ 是材料的许用应力。由式(1.3-7)可得 x 处的梁宽为

$$b_x = 6Fx / (h^2 [\sigma]) \quad (1.3-8)$$

等强度梁各点的应变为

$$\epsilon = 6Fx / b_x h^2 E \quad (1.3-9)$$

式中, E 是弹性模量。等强度梁自由端的最大挠度为

$$\omega_{\max} = 6Fl^3 / (EBh^3) \quad (1.3-10)$$

根据式(1.3-10)可得刚度 k 即

$$k = EBh^3 / (4l^3) \quad (1.3-11)$$

等强度梁最低自振频率 f_0 为

$$f_0 = [3.5^2 / (2\pi l^2)] \sqrt{EJ / (A\rho)} = (0.316h / l^2) \sqrt{E/\rho} \quad (1.3-12)$$

式中, A 是等强度梁的截面积; ρ 是梁的密度; J 是等强度梁的截面惯性矩。

(2)等截面梁的宽度为 B ,厚度为 h ,长度为 l ,参见图 1-6。当力 F 作用在自由端时,固定端的最大应力 σ_{\max} 为

$$\sigma_{\max} = 6Fl / Bh^2 \leq [\sigma] \quad (1.3-13)$$

因此,梁宽为

$$B = 6Fl / (h^2 [\sigma]) \quad (1.3-14)$$

自由端的最大挠度 ω_{\max} 为

$$\omega_{\max} = 4Fl^3 / (EBh^3) \quad (1.3-15)$$

最低固有频率 f_0 为

$$f_0 = [1.875^2 / (2\pi l^2)] \sqrt{EJ / (A\rho)} = (0.162h / l^2) \sqrt{E/\rho} \quad (1.3-16)$$

式中, J 是等截面梁的截面惯性矩。

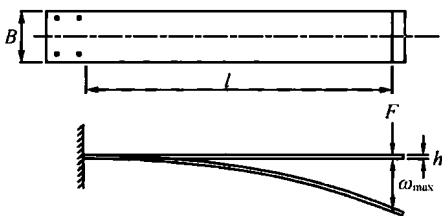


图 1-6 等截面梁

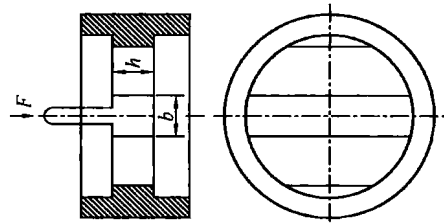


图 1-7 两端固定梁

(3) 两端固定梁参见图 1-7, 力 F 作用在梁的跨中, 跨中断面的应力为

$$\sigma = 3Fl / (4bh^2) \quad (1.3-17)$$

跨中的应变 ϵ 为

$$\epsilon = 3Fl / (4bh^2 E) \quad (1.3-18)$$

跨中的最大挠度 ω_{\max} 为

$$\omega_{\max} = Fl^3 / 192EJ \quad (1.3-19)$$

最低自振频率 f_0 为

$$f_0 = 22.37 / (2\pi l^2) \sqrt{EJ / (A\rho)} \quad (1.3-20)$$

(4) 集中载荷 F 加在环式弹性元件的顶部, 参见图 1-8, 则圆环 A 和 B 的应力 σ 和应变 ϵ 分别为

$$\sigma = 54Fd / 100bh^2 \quad (1.3-21)$$

$$\epsilon = 54Fd / (100bh^2 E) \quad (1.3-22)$$

式中, b 、 h 和 d 分别是圆环的纵向宽度、厚度和平均直径。力作用点的相对挠度 ω 为

$$\omega = 18Fd^3 / (1000EJ) \quad (1.3-23)$$

最低自振频率为

$$f_0 = 10.72 / (2\pi d^2) \sqrt{EJ / (A\rho)} \quad (1.3-24)$$

垂直力 F 和水平力 H 作用于扁环的中部, 参见图 1-9, 两边的弯矩可表示为

$$\begin{cases} M_\varphi = (FR/2)(2/\pi - \sin\varphi) - (HR/2)\cos\varphi & (0 < \varphi < \pi) \\ M_\varphi = (FR/2)(2/\pi + \sin\varphi) + (HR/2)\cos\varphi & (\pi < \varphi < 2\pi) \end{cases} \quad (1.3-25)$$

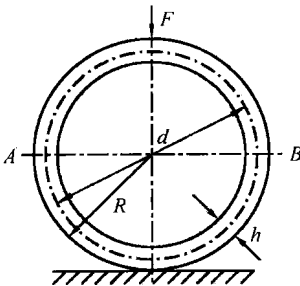


图 1-8 圆环

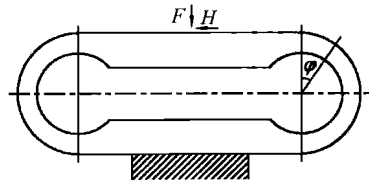


图 1-9 扁环

(5) 外径为 D_R 的波纹膜片是压有环状同心波纹的圆形薄膜, 参见图 1-10。为了便于与其他零件连接, 膜片中央是内径为 d 的光滑部分或中心熔接一块金属的硬心。当膜片两面受不同的压力作用时, 膜片弯向压力低的一面。为增加膜片中心位移, 可把数个膜片焊在一起制成膜盒,

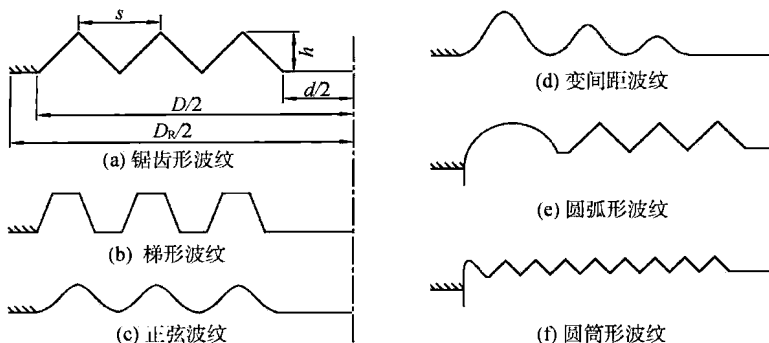


图 1-10 波纹膜片

其位移为单个膜片的 n 倍。膜片的弹性模量 E 、厚度 h 和工作直径 D 主要影响膜片的中心位移,膜片厚度 h 是调节中心位移(灵敏度)的主要参数。位移在 $\omega/D=0.02$ 的范围内, E 、 h 、 D 、膜片材料的 Poisson 比 μ 和 ω 之间的关系为

$$\omega E/[pD(1-\mu^2)]=2.25 \times 10^5 (10^3 h/D)^{-1.52} \quad (1.3-26)$$

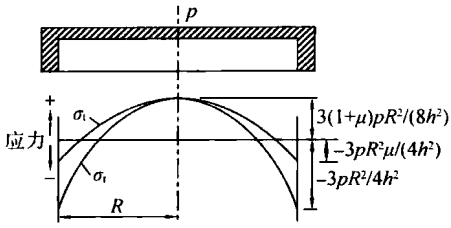


图 1-11 周边固支圆形平膜片

(6) 周边固支圆形平膜片,参见图 1-11。平膜片的最大挠度不大于 $1/3$ 膜厚时满足小挠度理论;当压力均匀作用于平膜片表面时,则平膜片的径向应力 σ_r 、切向应力 σ_t 及径向应变 ϵ_r 和切向应变 ϵ_t 分布关系为

$$\begin{cases} \sigma_r = [3p/(8h^2)][R^2(1+\mu) - r^2(3+\mu)] \\ \sigma_t = [3p/(8h^2)][R^2(1+\mu) - r^2(1+3\mu)] \\ \epsilon_r = (\sigma_r - \mu\sigma_t)/E = [3p(1-\mu^2)/(8Eh^2)](R^2 - 3r^2) \\ \epsilon_t = (\sigma_t - \mu\sigma_r)/E = [3p(1-\mu^2)/(8Eh^2)](R^2 - r^2) \end{cases} \quad (1.3-27)$$

膜片中心 $r=0$,切向应力等于径向应力,切向应变等于径向应变,有正的最大值,即

$$\begin{cases} \sigma_{r0} = \sigma_{t0} = [3pR^2/(8h^2)](1+\mu) \\ \epsilon_{r0} = \epsilon_{t0} = [3pR^2/(8Eh^2)](1-\mu^2) \end{cases} \quad (1.3-28)$$

膜片边缘 $r=R$,切向应力、径向应力和径向应变达到负的最大值,切向应变为零,即

$$\begin{cases} \sigma_r = 3pR^2/(4h^2) \\ \sigma_t = 3pR^2\mu/(4h^2) \\ \epsilon_{rR} = -[3pR^2/(4Eh^2)](1-\mu^2) \\ \epsilon_{tR} = 0 \end{cases} \quad (1.3-29)$$

平膜片的挠度为

$$\omega = [3p(1-\mu^2)/(16Eh^3)](R^2 - r^2)^2 \quad (1.3-30)$$

中心 $r=0$ 的挠度最大,即

$$\omega_0 = \omega_{\max} = 3p(1-\mu^2)R^4/(16Eh^3) \quad (1.3-31)$$

平膜片的最低自振频率为

$$f_0 = 10.17h/(2\pi R^2) \sqrt{E/[12(1-\mu^2)\rho]} \quad (1.3-32)$$

式(1.3-30)~(1.3-32)中, p 为均匀分布的压力; h 为膜片厚度; R 为膜片半径; r 为膜片任意部位的半径; μ 是膜片材料的 Poisson 比; E 是膜片材料的弹性模量; ρ 是膜片材料的密度。

承受均布载荷 p 的周边简支的平膜片,参见图 1-12。中心 $r=0$ 有最大挠度,即

$$\omega_{\max} = [3pR^4/(16Eh^3)](5+\mu)(1-\mu) \quad (1.3-33)$$

在周边简支的情况下,径向和切向应力为

$$\begin{cases} \sigma_r = [3pz/(4h^3)](3+\mu)(R^2 - r^2) \\ \sigma_t = [3pz/(4h^3)][(3+\mu)R^2 - (1+3\mu)r^2] \end{cases} \quad (1.3-34)$$

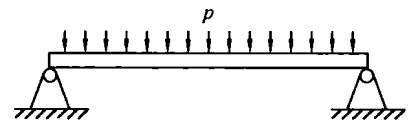


图 1-12 周边简支的平膜片

式中,中心点 $z=h/2$ 的最大应力为

$$(\sigma_r)_{\max} = (\sigma_t)_{\max} = [3(3+\mu)pR^2/(8h^2)] \quad (1.3-35)$$

支承处倾角为

$$\varphi = \arcsin[3(1-\mu)pR^2/(2Eh^3)] \quad (1.3-36)$$

周边简支在半径为 r_0 的同心圆内承受均匀分布载荷的平膜片参见图 1-13,作用力为 $F = p\pi r_0^2$ 。中心挠度 ω_{\max} 和中心应力 σ_{\max} 为

$$\omega_{\max} = [3F(1-\mu^2)/(16\pi Eh^3)] [4(3+\mu)R^2/(1+\mu) - 4r_0^2 \ln(R/r_0) - (7+3\mu)r_0/(1+\mu)] \quad (1.3-37)$$

$$\sigma_{\max} = [3F/(2\pi h^2)] [1 + (1+\mu) \ln(R/r_0) - (1-\mu)r_0^2/(4R^2)] \quad (1.3-38)$$

当 r_0 极小(集中力)时,中心挠度为

$$\omega = 3F(1-\mu)(3+\mu)R^2/(4\pi Eh^3) \quad (1.3-39)$$

支座处的倾角为

$$\varphi = \arcsin [3F(1-\mu)R/(\pi Eh^3)] \quad (1.3-40)$$

当 $r_0 > 0.55R$ 时,固定边上的中心应力为

$$\sigma = [3F/(2\pi h^2)] [1 - r_0^2/(2R^2)] \quad (1.3-41)$$

当 $r_0 < 0.588R$ 时,中心的应力为

$$\sigma = [3F/(2\pi h^2)] [(1+\mu) \ln(R/r_0) + (1+\mu)r_0^2/(4R^2)] \quad (1.3-42)$$

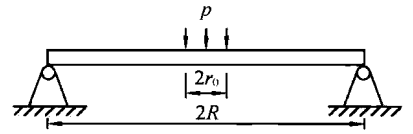


图 1-13 在半径为 r_0 的同心圆内承受均匀分布载荷的平膜片

中心挠度为

$$\omega = [3F(1-\mu^2)/(16\pi Eh^3)] (4R^2 - 4r_0^2 \ln(R/r_0) - 3r_0^2) \quad (1.3-43)$$

圆孔膜片沿外周边固定并承受均匀分布荷载,参见图 1-14,沿外周边应力为

$$\sigma_{\max} = 3p/(4h^2) \{ R^2 - 2r_1^2 + [b^4(1-\mu) - 4r_1^4(1+\mu) \ln(R/r_1) + R^2 r_1^2(1+\mu)] [R^2(1-\mu) + r_1^2(1+\mu)]^{-1} \} \quad (1.3-44)$$

沿内周边应力为

$$\sigma_{\max} = 3p(1-\mu^2)(4h^2)^{-1} [R^4 - r_1^4 - (1/2)R^2 r_1^2 \ln(R/r_1)] [R^2(1-\mu) + r_1^2(1+\mu)]^{-1} \quad (1.3-45)$$

最大挠度为

$$\begin{aligned} \omega_{\max} = & 3p(1-\mu^2)(16Eh^2)^{-1} [R^2(1-\mu) + r_1^2(1+\mu)]^{-1} \times \\ & \{ [R^4 + 5r_1^4 + 2R^2 r_1^2 + 8r_1^4 \ln(R/R)] [R^2(1-\mu) + r_1^2(1+\mu)] + \\ & [8r_1^6(1+\mu) - 4R^2 r_1^4(1+3\mu) + R^4 r_1^2(1+\mu)] \ln(R/r_1) - \\ & 16R^2 r_1^4(1+\mu) [\ln(R/r_1)]^2 - 4\mu R^2 r_1^4 + 2R^4 r_1^2(1+\mu) - 2r_1^6(1-\mu) \} \end{aligned} \quad (1.3-46)$$

有硬中心的平膜片在流体压力作用下,参见图 1-15,硬中心的最大挠度为

$$\omega_{\max} = [3(1-\mu^2)pR^4/(16Eh^3)] [1 - r_0^4 R^{-4} + 4r_0^2 R^{-2} \ln(r_0/R)] \quad (1.3-47)$$

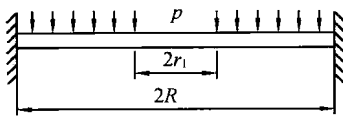


图 1-14 具有圆孔的膜片沿外周边固定

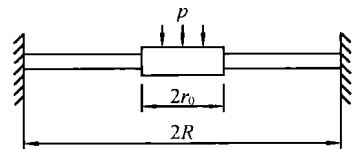


图 1-15 带硬中心的平膜片

在 $r=R$ 和 $r=r_0$ 处,上表面的应力为

$$(\sigma_r)_{r=R} = -(\sigma_r)_{r=r_0} = [3pR^2/(4h^2)] (1 - r_0^2 R^{-2}) \quad (1.3-48)$$

平膜片在集中力作用下,参见图 1-16,中心最大挠度为

$$\omega_{\max} = [3(1-\mu^2)/(4\pi)] [4R^2/(4h^3)] \quad (1.3-49)$$

与式(1.3-31)相比,平膜片的有效面积仅为膜片面积的1/4。集中力作用时的应力为