

|                 |
|-----------------|
| 武汉理工大学          |
| 硕士学位论文          |
| 光纤布拉格光栅振动传感技术研究 |
| 姓名：周雪芳          |
| 申请学位级别：硕士       |
| 专业：通信与信息系统      |
| 指导教师：姜德生        |
| 2003. 5. 1      |

## 摘 要

随着航空、航天、石油、海洋工程等大型结构系统技术的发展，其日益复杂的动力学问题，必须通过对振动高质量的测试和分析来解决，以确保工程安全和经济合理。研究、开发以加速度为主的新型振动传感技术具有十分重要的地位和意义。

本文提出了新型的光纤光栅振动传感技术，开展光纤光栅动态测试技术的研究；并结合实际工程需要，对新型光纤光栅振动传感器进行了研究和开发。

1. 基于振动传感器设计方法和光纤光栅传感原理，本文通过理论分析、推导和大量的实验研究，确定了光纤光栅振动传感器的设计要素，创新性地提出光纤光栅振动传感器的一般设计方法，并采用有限元法进行了验证。

2. 基于光纤光栅振动传感器的一般设计方法，详细分析和解决了影响振动传感器性能的因素，设计具有较高灵敏度系数、较小横向效应、有效克服温度漂移的新型光纤光栅振动传感器。

3. 提出了用解调光栅进行温度补偿和双光栅测量增加传感器灵敏度系数的新思想，适用于光纤光栅加速度传感器，具有指导意义。

4. 基于新型光纤光栅传感器的设计思想，通过结构参数的优化设计，实验研究了光纤光栅地震检波器和运用于大型工程结构健康监测的加速度传感器，显示出良好的应用前景。

本文将为新型光纤光栅动态测试技术的研究奠定一定基础。

**关键词：**光纤 Bragg 光栅振动传感器 地震检波器 加速度传感器

本文为教育部博士点基金项目（20010497003）资助

## Abstract

With the development of technology in the aviation, aeronautics and oceanics, more and more complex dynamics problems come forth, it is exigent to improve the vibration testing technology and analysis technology to assure the project safety and economy rationalization, so researching and developing a new type vibration sensing technology has very important status and meaning.

The paper brings forward new fiber optic Bragg vibration sensing technology and develops the research on the fiber optic Bragg dynamic test . Considering the need for practical engineering, new fiber optic Bragg vibration sensor is studied and developed.

1. Based on the theory of fiber optic Bragg and the design way of vibration sensor, the design factors are assured by theory analyzed and repetitious experiments, then the common method to design the fiber optic Bragg vibration sensor is put forward and validated by using finite element method.

2. Based on the common method to design the fiber optic Bragg vibration sensor, the character factors of vibration sensor is analyzed and solved, then the new type fiber optic Bragg vibration sensor is designed, the new sensors are of higher sensitivity, less transverse response and less temperature excursion.

3. The new idea is put forward, which is that by using demodulation fiber optic Bragg to compensate temperature and using two fiber optic Bragg to improve sensor's sensitivity, the way is suitable to apply in the acceleration.

4. Based on design idea of the new fiber optic Bragg vibration sensor, we study the fiber optic Bragg geophone and accelerometer applied in the large engineer structure health inspecting by many experiments. The sensors have wide application prospect.

The paper will contribute to the foundation of the research on the fiber

optic Bragg dynamic testing technology.

**Keywords:** Fiber optical Bragg vibration sensor, Geophone, Accelerometer

## 第1章 绪 论

### 1.1 振动传感测试的背景

一个振动系统，从外界输入一定形式的激励就呈现一定形式的输出，该输入通常称为激励，输出称为响应。而输出特性不仅取决于输入特性，还取决于振动系统的振动特性。激励、响应和系统的振动特性这三者之间的关系如图 1-1 所示。

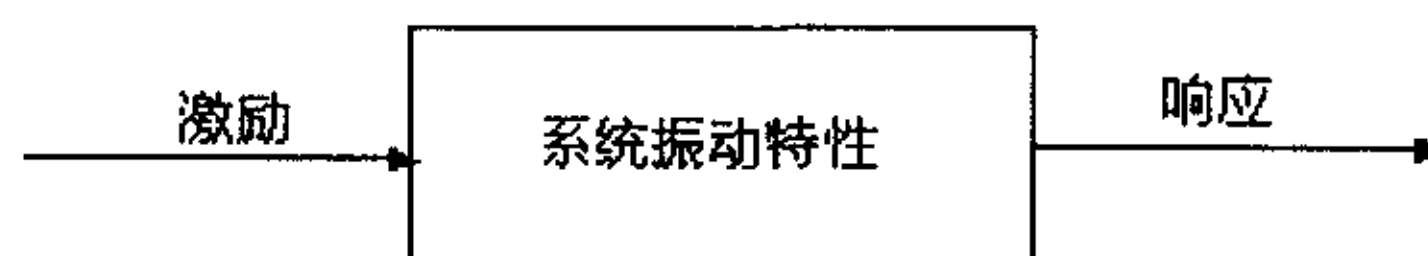


图 1-1 振动系统原理框图

在工程技术当中，研究振动问题就是在激励、响应和系统特性这三者中知道其二求其三的问题。在已知激励条件和系统振动特性的情况下，求系统的响应，这就是所谓的振动分析问题。在已知系统振动特性和系统响应的情况下，求系统的激励状态，这就是所谓的振动环境预测问题。在已知系统激励和系统响应的情况下，确定系统的振动特性，这就是所谓的振动特性测试或系统识别问题。正是由于振动测试在近代工程领域中有着极重要的地位，所以受到普遍重视，很多部门和单位在进行实践、探索和研究。振动测试的主要用途为<sup>[1.2.3.4.5.6.7]</sup>：

(1) 各种工程机械、建筑结构、车辆船舶、飞机导弹、能源设备、仪器仪表等系统由于在自身运转过程中质量不平衡等原因而产生振动（自振）；或者受到周围环境的激励而产生受迫振动。对正在设计或大批生产的产品进行各种振动试验以考核产品承受振动能力已成

为很多工厂的常规任务。测试了解机器运转时振动大小以确定其性能优劣已成为验收往复式、旋转式机械的一个重要环节。

(2) 各种利用振动工作的机械如振动给料机、振动打夯机、振动压路机、振动筛、振动输送机、动平衡机和各种激振设备因其高效率低能耗在国民经济各部门得到日益广泛的应用。为了研究其工作机理以提高生产效率，必须进行大量的振动测试。

(3) 实际系统往往零部件繁多，结合面形状复杂，理论计算（如有限元）要做大量简化假设，只能建立粗略的力学模型，某些重要参数（如阻尼系数）至今仍无完善的计算方法。用振动测试可以求得系统的动态特性参数，进而建立或修正力学模型，为今后的“响应预估”或“环境预估（载荷识别）”创造先决条件。这就是结构动力学中所谓“系统识别”或“参数识别”问题。

(4) 效益巨大但造价昂贵的现代化大型系统（如海上平台、大型汽轮发电机组、航天飞机等）经常在高转速、大负荷、高温、高压或高真空等恶劣条件下工作，他们的破坏会造成十分严重的后果。国外统计重要产品的故障中有百分之六十以上来自环境因素（包括温度、振动、冲击、沙尘等），而在各环境因素中振动引起的故障几乎占百分之三十，利用振动测试手段对运行设备进行在线的状态监控或故障诊断是保证机组安全、及时消除隐患的重要措施之一。

(5) 在一些情况下，振动是一种公害，它能损伤人体器官、损害健康、降低劳动效率，甚至产生“振动病”或“运动病”，如常见的晕车、晕船现象就是由于小于 1Hz 的极低频振动引起的。研究人体各器官的振动传递特性，设计能减振隔振的座椅、驾驶舱、手持工具的把手等也必须依赖于振动测试。目前市场上已有用于人体振动测量的传感器和测试仪出售。

(6) 任何机械振动系统往往同时又是声波辐射源。噪声中很大一部分来自振动物体。减少振动的同时往往也意味着降低噪声（相反地也可从噪声分析中找到振源）。只要有声电传感器（如话筒）和适调放大器，振动分析和声学分析就可以共用同一分析仪器。

因此，振动测量一直是工程技术界十分重视的课题，振动测试

与动态分析在最近二十多年里发展十分迅速，其主要内容包括三个部分，即振动测量与数据采集，动态信号分析，以及机械、结构动态特性试验。

## 1.2 振动传感测试技术国内外发展现状

振动测试技术从 20 世纪初发展到今天，经过几代科学工作者的探索工作，正逐步走向完善，而传感测试方法也在不断发展和成熟。振动测量通常包括振动的位移、速度、加速度，噪声的声压、声强、和激振力的测量，这些参数通常称为动态参数。动态测量是指由传感器测得这些非电物理量并转换为电信号，然后经过放大、滤波等适调环节，对信号进行适当调节，并对测量结果进行记录、分析、显示的全过程。因此振动测量属于动态测量范围。

随着振动测试技术理论的发展和生产中对测试需求的与日俱增，高质量的测试仪器、设备和现代化的测试方法不断出现，从最初的机械式测振仪，发展到今天，各种应用物理学原理制成的传感器、FFT 分析仪、结构动力学分析软件已在广泛使用。20 世纪 20 年代，由于汽轮发电机组等设备的发展，机械式测振仪已不能满足要求，于是磁电式传感器应运而生，实现了非电量信号向电信号转换的电测量。二次大战后出现了压电式传感器，由于它具有体积小、重量轻、频率范围宽、动态量程大等特点，且既可测量振动，又可用于冲击测量，直到今天仍在广泛应用。近些年随着微电子技术的发展，又出现了可在各种恶劣环境下使用的压电传感器和内装阻抗变换器、放大器、滤波器的集成电路式压电传感器，简化了测试系统，大大地拓宽了这种传感器的应用范围，提高了抗干扰能力和测量的精度。而压阻传感器的出现和使用进一步拓宽了低频率的测量范围，与此同时，还陆续发展了各种换能原理的传感器和配套仪器。如变电容传感器、光纤传感器、电涡流传感器等，以便用于不同的场合。

测试的核心内容是对信号的感知、采集和分析，计算机的发展



大大促进了信息处理技术，对数据的采集和分析已经达到了成熟化的阶段。目前仪器的动态范围已经达到 100 多分贝，可以满足记录微弱的振动信号，提高仪器的记录能力。但是目前振动测试技术主要是以传统的机械振动测试为基础，绝大多数采用的是电磁类传感器组成一套振动测试系统，其使用的振动传感器灵敏度只能达到 50-60 分贝，远远不能满足许多工程需要，严重制约振动测试技术的发展。其主要表现在以下几个方面：

1. 传感器有效输出来自于被测能量的一部分，制成的传感器内阻高，输出能量小，灵敏度低。
2. 部分传感器在测量之前必须调零，长期稳定性差。
3. 抗干扰能力太差：对随机干扰波，如：50 Hz 工业电、天磁电干扰、空间射频干扰、突发性的单脉冲强信号等，不具有抑制作用或屏蔽作用。
- 4 传感器的频率范围狭窄，不能进行高、低频提升。
5. 在传感器上不能直接实现数字化、
6. 不能实现智能化。不能根据谐振频率、信号的强弱、按振动测试数据采集的特点和要求进行线性放大或压制，而适用于各种振动源的匹配。

因此，研究和开发新型的振动传感技术是改善现有振动测试系统的核心所在。

### 1.3 光纤光栅振动传感技术

随着振动测试技术的发展和高精度测试的需要，研制高性能的振动传感器势在必行。光纤传感技术的出现，给传感器的发展带来了前所未有的生命力。国内外研制了多种光纤振动加速度传感器，它与传统加速度传感器相比，不但能抗电磁干扰，而且体小、质轻、动态范围宽、精度高、能在恶劣环境下工作，因此受到各先进国家军事与商业领域的极大重视。各种实用的光纤加速度传感器不断涌现，主要有光强调制型和相位调制型两大类<sup>[8,13,16,17,18,10,9]</sup>；光强调制式有



反射式、透射式和偏振式等等；相位调制式有 Mach-Zender 干涉仪、Michelson 干涉仪和 Fabry-Perot 干涉仪，有一维的，也有二维的；有与水听器组合在一起的，也有与光纤陀螺仪组合的光纤加速度传感器，最小的已经做到 2.5cm 长，直径仅 0.25mm，测量精度已能达到  $1\mu\text{g}$ ，共振频率可达到 10kHz。为了克服温度不稳定性对测量精度的影响，人们采用了  $3\times 3$  耦合器解调法，双光路法，由单臂式改成推拉式等。由于上述传感器都是光强调制型和相位调制型加速度传感器，易受光源波动、光纤扰动的影响，在走向实用化方面存在问题。

光纤光栅传感技术是在光纤传感技术的基础上发展起来的，从原理上分析，光纤光栅加速度传感器不仅具有一般光纤加速度传感器的优点，同时克服了一般光纤加速度传感器的不足之处，它能实现实时在线、绝对数字式测量、具有测量范围广、精度高、抗干扰能力强、无需调零、长期稳定性好等优点，为实现振动传感的高分辨能力、高信噪比、高保真度、高清晰度、高精确度和高可信度提供了理想的技术手段，在航空、航天、海洋工程、石油、土木建筑、机械等领域中具有广阔的应用前景。

## 1.4 课题的产生与主要研究内容

### 1.4.1 课题的确立

如何实现对振动的高精度、远距离、分布式和长期性的绝对测量一直是工程界孜孜不倦追求的目标。光纤光栅传感技术作为一种先进的数字式测量技术，无可厚非的为当前振动传感技术发展提供了良好的技术手段。在此基础上研究开发新型光纤光栅加速度传感器，进而开发出新型光纤光栅振动测试系统，具有明显的社会效益。

本课题在教育部博士点基金资助项目(20010497003)的资助下，依托武汉理工大学光纤传感技术研究中心雄厚的研究实力，对光纤光栅振动传感技术的基本原理、实现方式和技术进行研究，并以此为基础，探讨和研制了多种应用背景下的光纤光栅振动传感器。

### 1.4.2 课题的主要研究内容和创新点

本论文以研究新型光纤光栅振动传感技术为线索，确立光纤光栅振动传感器的一般设计方法，研制多种应用背景下的新型光纤光栅振动传感器。其主要研究内容有：

1. 基于光纤光栅传感原理和振动传感器设计方法的研究，进行理论分析、推导和实验研究，确定光纤光栅振动传感器的设计要素，提出光纤光栅振动传感器的一般设计方法。

2. 研究有限元法进行传感器动态特性分析的方法，验证光纤光栅振动传感器的一般设计方法。

3. 基于光纤光栅振动传感器的一般设计方法，分析和解决了影响振动传感器性能的因素，设计具有较高灵敏度系数、较小横向效应、有效克服温度漂移的新型光纤光栅振动传感器。

4. 研究光纤光栅动态解调技术，从解调技术的角度分析提高振动传感器灵敏度，克服温度漂移的方法和途径。

5. 基于新型光纤光栅传感器的设计思想，通过结构参数的优化设计，实验研究光纤光栅地震检波器和应用于大型工程结构健康监测的振动传感器的性能。

本论文的主要创新点表现在以下几个方面：

1. 光纤光栅振动传感器在国内研究还处于起步阶段，尚无系统完整的研究，它属于全新的研究领域。

2. 提出光纤光栅振动传感器的一般设计方法，适用于光纤光栅振动传感器，具有指导意义。

3. 提出了用解调光栅进行温度补偿和双光栅测量增加传感器灵敏度系数的新思想。

4. 光纤光栅地震检波器的研究在国内外研究领域都属于空白，本文研究出一种新型的光纤光栅地震检波器。

## 第2章 光纤Bragg光栅传感原理

本章通过对光纤光栅传感技术的系统研究，建立光纤光栅应变、温度传感模型，在对光纤光栅解调技术详细分析的基础上，论证了光纤光栅传感技术应用振动测量的可行性和优越性。

### 2.1 光纤 Bragg 光栅的基本原理

光纤光栅是最近几年发展最为迅速的光纤无源器件之一。自从1978年 K.O.Kill 等首次在掺锗光纤中采用驻波写入法研制出世界上第一只光纤光栅以来，它在光纤通信、光纤传感等领域的广阔应用前景迅速引起国内外专家学者的高度重视。随着光纤光栅制造技术的不断完善，应用成果的日益增多，光纤光栅已成为最有发展前途、最具有代表性的光纤无源器件之一。由于光纤光栅的出现，使许多复杂的全光纤通信和传感网成为可能，极大地拓宽了光纤技术的应用范围。

光纤光栅传感器是利用 Bragg 波长对温度、应力的敏感特性而制成的一种新型的光纤传感器。根据光纤耦合模理论，当宽带光在光纤光栅中传输时，产生模式耦合，满足 Bragg 条件的光被反射 [8,9,10]；

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2-1)$$

式中：  $n_{eff}$  — 光纤芯区有效折射率  $\Lambda$  — Bragg 光栅的周期

$\Lambda$  和  $n_{eff}$  受到外界环境的影响(温度、应力、压力)而发生变化  $\Delta n_{eff}$  和  $\Delta\Lambda$ ，导致符合 Bragg 条件的波长发生移位  $\Delta\lambda_B$ ，由 Bragg 条件可得：

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{eff}\Lambda + 2n_{eff}\Delta\Lambda \quad (2-2)$$

从 2-1 式中可以看出，当  $n_{eff}$  或  $\Lambda$  改变时，中心反射波长会相应的改变，如图 2-1 所示。因此通过测量 FBG 的中心反射波长栅距和折射率的变化，可以探知外界条件的变化。

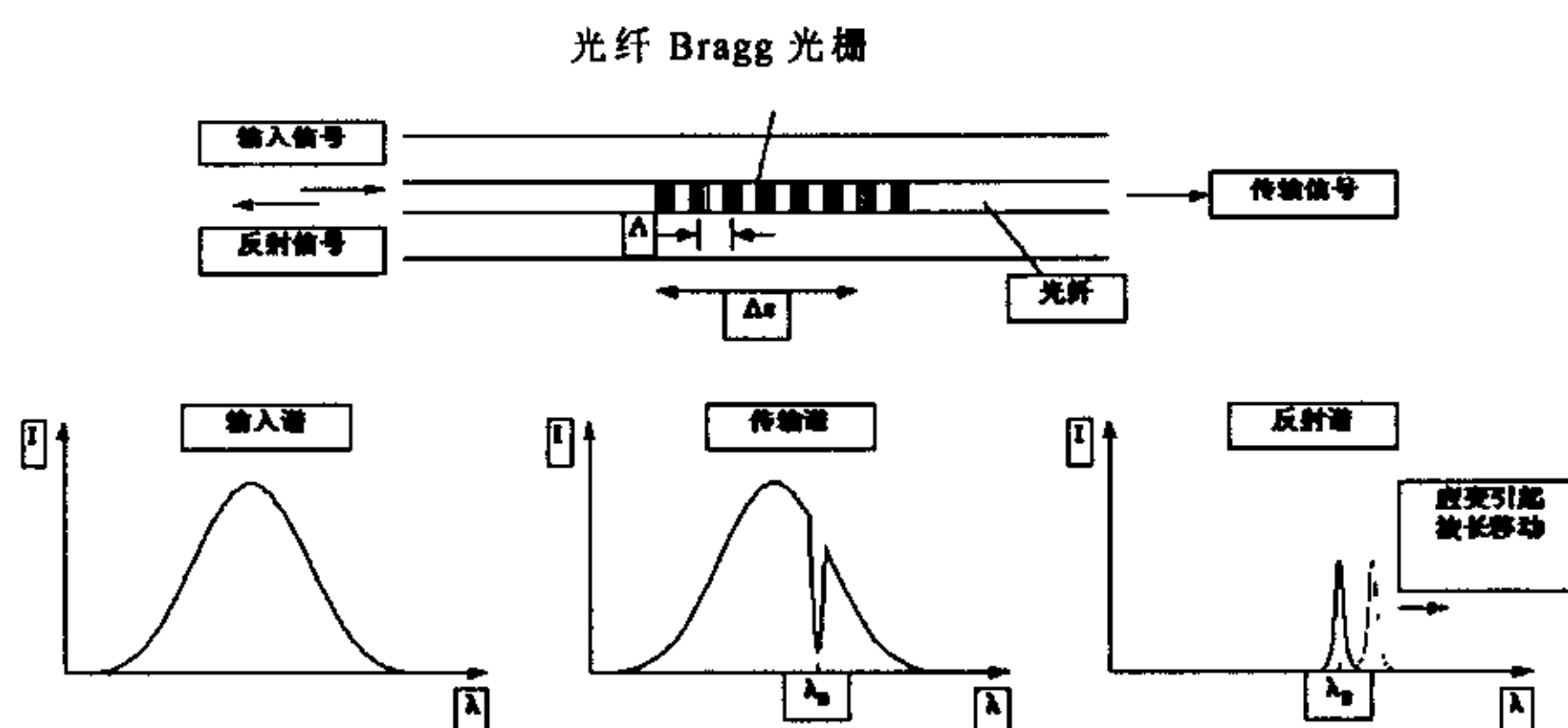


图 2-1 光纤布喇格光栅传感原理

### 2.1.1 光纤光栅的温度特性

当温度发生变化 ( $\Delta T$ ) 时，一方面由于热胀效应使光纤光栅伸长而改变其光栅周期，可以表示成<sup>[11]</sup>：

$$\frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} = \alpha \Delta T \quad (2-3)$$

式中  $\alpha$  为材料的膨胀系数。对于掺铈石英光纤， $\alpha$  取值  $5.5 \times 10^{-7} \text{C}^{-1}$ 。

另一方面由于热光效应使光栅区域的折射率发生变化，可以表示成：

$$\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} = -\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dV} \frac{dV}{dT} \Delta T \quad (2-4)$$

式中  $V$  为光纤的归一化频率。温度变化引起的光纤光栅波长漂移主要取决于热光效应，它占热漂移的 95% 左右，可以表示成：

$$\xi = -\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dV} \frac{dV}{dT} \quad (2-5)$$

$\xi$ 称之为热光系数。硅纤中 $\xi=6.67 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ 。所以温度对光纤光栅波长漂移总的影响为：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (2-6)$$

### 2.1.2 光纤光栅的轴向应力特性

当外界轴向应力作用于光纤光栅上时，一方面使光纤光栅被机械性的拉长而改变其光栅常数，可以表示为<sup>[11]</sup>：

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \varepsilon_x \quad (2-7)$$

其中 $\varepsilon_x$ 为考察点处轴向应变，同时弹光效应使得光纤光栅折射率发生变化：

$$\Delta n_{eff} = \frac{n_{eff}^3 [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]}{2} \varepsilon_x \quad (2-8)$$

对式 2-8 两端同时除以 $n_{eff}$ 可得：

$$\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} = \frac{n_{eff}^2 [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]}{2} \varepsilon_x \quad (2-9)$$

其中 $P_{1j}$ ( $j=1, 2$ )为 pockel 系数， $\nu$ 是 poisson 比，定义有效弹光系数 $Pe$ ：

$$Pe = \frac{n_{eff}^2 [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]}{2} \quad (2-10)$$

硅纤中 $Pe=0.22$ 。所以式 2-10 可以表示为：

$$\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} = -Pe \varepsilon_x \quad (2-11)$$

这两种作用的总贡献为：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - Pe)\varepsilon_x \quad (2-12)$$

对于石英光纤，可取

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 0.78\varepsilon_x \quad (2-13)$$

由 $\Delta\lambda_B$ 可很方便地求出外界轴向应变 $\varepsilon_x$ 。实际应用中， $\varepsilon_x$ 是很小的

量，可以引入应变量的  $1 \times 10^{-6}$  即  $\mu \varepsilon$ ，作为应变量的度量单位。

### 2.1.3 光纤光栅的横向应力特性

当横向应力变化 ( $\Delta P$ ) 时，光纤光栅的反射波长也会发生变化，可表示成<sup>[11]</sup>：

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial P} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} \right] \Delta P \quad (2-14)$$

又因为

$$\frac{\partial \Lambda}{\Lambda \partial P} = -\frac{(1-2\nu)}{E} \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial n_{eff}}{n_{eff} \partial P} = \frac{n_{eff}^2}{2E} (1-2\nu)(2P_{12} + P_{11}) \quad (2-16)$$

将式 2-15，2-16 代入式 2-14 得：

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left[ -\frac{1-2\nu}{E} + \frac{n_{eff}^2}{2E} (1-2\nu)(2P_{12} + P_{11}) \right] \Delta P \quad (2-17)$$

当光纤光栅受温度、轴向应力和横向应力这三个物理量同时作用时，总漂移量可表示为：

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_\varepsilon) \varepsilon_x + (\alpha + \xi) \Delta T + \left[ -\frac{1-2\nu}{E} + \frac{n_{eff}^2}{2E} (1-2\nu)(2P_{12} + P_{11}) \right] \Delta P \quad (2-18)$$

1.55  $\mu m$  时应变和温度引起光纤光栅反射波长漂移的典型值分别为 1.15 pm/ $\mu \varepsilon$  和大约 13 pm/ $^{\circ}C$ ，而横向压力引起的波长漂移典型值为 3.13 pm/Mpa。可见光纤光栅传感器对横向压力不太敏感，除非用来测高压或者波长分辨率极高的装置，或者借助某种装置将横向压力转化为对光纤光栅作用的应力。

## 2.2 光纤 Bragg 光栅传感系统和传感网络基本构成

### 2.2.1 传感系统

光纤光栅传感器以及系统的基本构成由两大部分组成<sup>[10]</sup>：传感光栅、解调仪，传感器示意图如图 2-2 所示。待测量加在传感光栅上，光源出射的光在 FBG 中传输时，Bragg 反射光波的中心波长产

生漂移，经耦合器导入解调仪，在分析仪中可检测出，从而确定待测量。

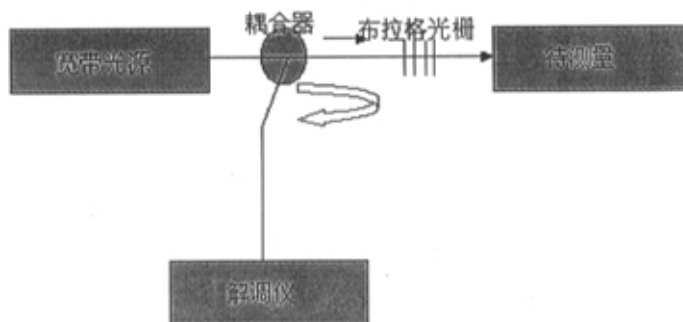


图 2-2 光纤光栅传感器示意图

各种复杂的精确度高的传感器都是在此基础上，对各单元进行改进、优化而实现各自的功能。

### 2.2.2 传感网络

能够方便地实现分布式传感是光纤光栅传感技术得以推广的一大优点。它是利用波长的不同来识别网络中各点的变化状况，图 2-3

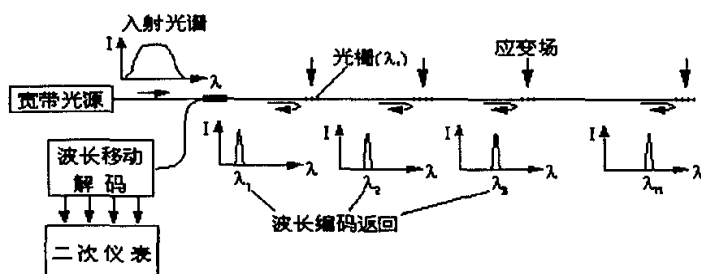


图 2-3 光纤 Bragg 光栅分布传感系统的原理图

是 FBG 分布传感系统原理图<sup>[1]</sup>。一根光纤上准分布的多个光纤 Bragg 光栅，可通过不同 FBG 的反射光波长（ $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ），与待测结构沿程各测量点（1, ..., n）相对应，分别感受待测结构沿线分布各点的应力应变，使其反射光的波长发生改变，改变的反射光经传输光纤从测



量现场传出；通过 FBG 解调器探测其波长改变量的大小，并转换成电信号，由二次仪表计算出待测结构的各个测点的应力应变的大小及在整个待测结构的分布状态。

## 2.3 光纤 Bragg 光栅解调技术

光纤 Bragg 光栅传感的关键技术之一就是所谓的解调技术，即精确测量波长漂移的技术。对 Bragg 波长编码的解调过程，传统手段为使用光谱仪、单色仪等仪器，但是这些仪器昂贵且不容易携带。为此，人们发展了多种用于波长编码的解调。

### 2.3.1 常用的解调方法

常用的方法有：非平衡 M-Z 干涉检测、可调光纤 F-P 滤波器和匹配光纤 Bragg 光栅滤波解调。

#### 一、非平衡 M-Z 干涉检测

非平衡 M-Z 干涉仪解调光纤 Bragg 光栅传感系统如图 2-4 所示(A. D. Kersey, et al, 1992)。宽带光源经耦合器入射到光纤光栅传感器，可设计为测量不同物理量的传感元件。光纤 Bragg 光栅反射光经两个耦合器进入不等臂长的 M-Z 干涉仪，两臂光程差为  $nd$ 。此时，可认为光纤 Bragg 光栅反射光为干涉仪的光源，由于干涉仪原理可知，当输入光波长变化  $\Delta\lambda$  时，其输出相位变化为：

$$\Delta\phi(\lambda) = 2\pi nd \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (2-19)$$

通过检测  $\Delta\lambda$  的值可知应变的大小。考虑到直流分量产生的漂移对测量的结果影响相对较大，所以在干涉仪中引入一相移补偿反馈系统，驱动 PZT 膨胀，从

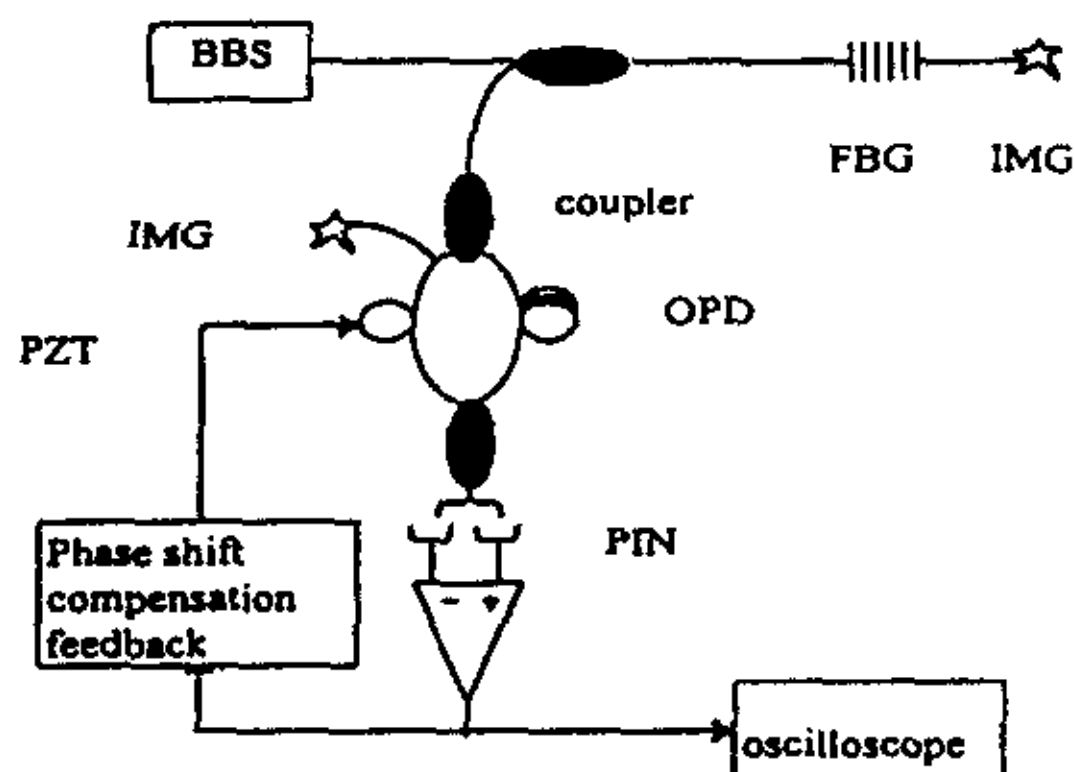


图 2-4 非平衡 M-Z 干涉检测

而使缠绕于其上的光纤伸长，抵消直流零漂。

该方法的优点：能够提供宽带宽、高解析度的解调能力。缺点：不适用于对绝对应变的测量。

## 二、 可调光纤 F-P 滤波器(A. D. Kersey, et al, 1993)

图 2-5 为可调光纤 F-P 滤波器解调系统。可见光源经隔离器进入传感器阵列，反射光信

号经耦合器到可调谐 F-P 滤波器，当锯齿波驱动 F-P 滤波器使其透射波峰与光纤 Bragg 光栅反射峰重合时，即可有此时的 F-P 滤波器驱动电压-透射波长关系测得光纤 Bragg 光栅反射峰位置。但由于透射谱是反射谱

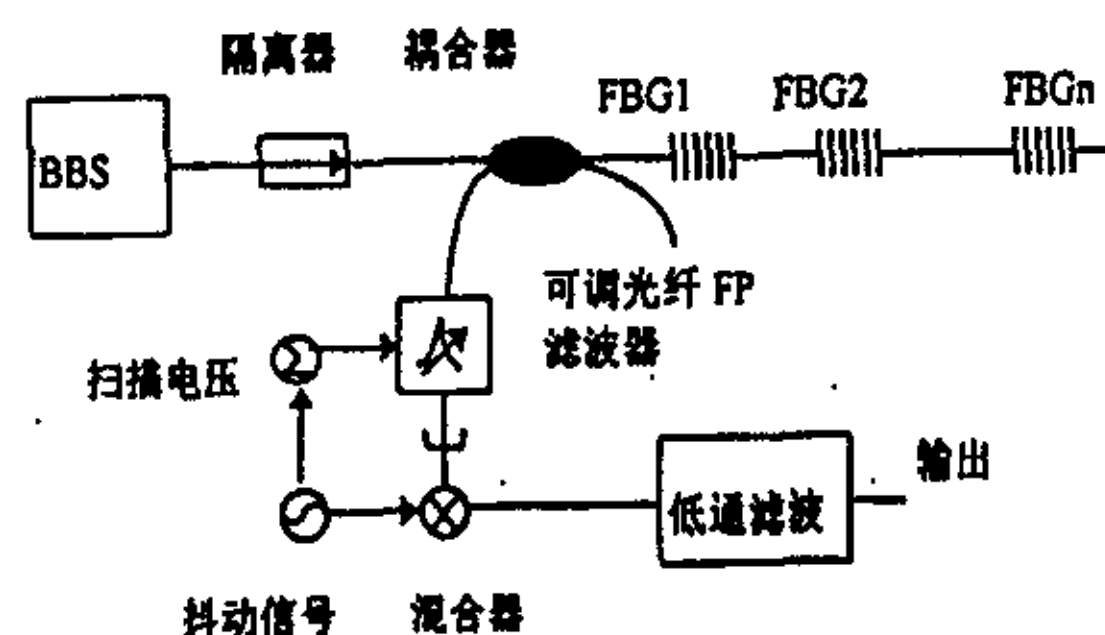


图 2-5 可调光纤 F-P 滤波器

与 F-P 滤波器透射谱的卷积，会使带宽增加，减小分辨率。为此，在扫描电压上加一小的抖动电压，输出经混频和低通滤波器，测量抖动频率，在信号为零时，所测即为光栅的反射峰值波长，此时可抖动提高系统的分辨率。在四个光栅组成的阵列探测中，可得  $3\mu\text{strain}$  的应变分辨率。在只有一个光栅时，其最小分辨率小于  $0.3\mu\text{strain}$ 。

该方法的优点：很高信噪比和分辨率。缺点：它的稳定性和可调谐的范围尚不够理想，在一定程度上限制了光栅的个数和使用范围，并且解调频率不够高，目前美国 Micro Optics 公司研制的最高工作频率在 100Hz 左右。

## 三、 匹配光纤 Bragg 光栅滤波解调(D. A. Jackson, et al, 1993), (M. A. Davis and A. D. Kersy), (L.A. Ferreira, et al, 1997)

如图 2-6 所示，匹配光纤 Bragg 光栅滤波法的基本思想为使用两对相同的光纤 Bragg 光栅，每对光栅其一作为传感元件，另一作为解调应用，解调光纤 Bragg 光栅在压电陶瓷 PZT 的作用下，其反射

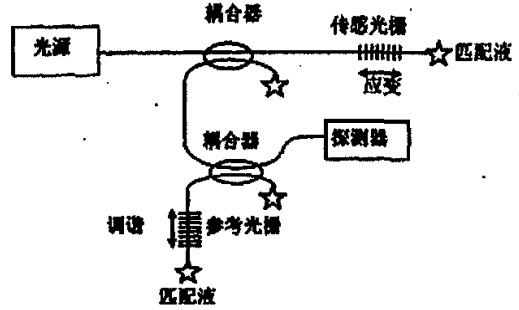


图 2-6 匹配光栅解调示意图

波长将在一定范围内来回移动，光谱移动范围涵盖了传感光栅的反射谱，当二光纤 Bragg 光栅波峰重合时，光信号强烈反射，通过 PZT 的电压-波长调谐关系即可测得作用于传感光栅的物理量。

该方法的分辨率取决于所使用的光纤 Bragg 光栅带宽，对于一对带宽为  $0.2\text{nm}$  的光栅，分辨率为  $4.12\mu\text{strain}$ ，而对于带宽  $0.05\text{nm}$  的光栅，分辨率为  $1\mu\text{strain}$ 。该系统结构简单，造价低廉，不足之处为：由于信号光经过许多耦合器到达解调光栅，最终导致系统信噪比下降，而且响应频率也不够高。

### 2.3.2 本文的解调方法

振动测量属于动态测量，对解调器有其特殊的要求：从其原理上要实现动态测量，必须采用同步采样的光纤 Bragg 光栅解调技术；从其应用上，要满足振动测量精度、频率响应的要求，达到实用化的目的，必须研究适合动态监测要求的光纤解调方法和器件。本文用到的解调方法从形式上是匹配光栅解调方法，但从原理上是不一样的，光纤光栅反射谱如图 2-7 所示，解调仪的性能就是以解调光栅反射谱的倾斜程度，即反射谱上某点位置的斜率大小来表示，斜率越大则反映越灵敏，那么解调仪的灵敏度就越大，但解调范围却越小。

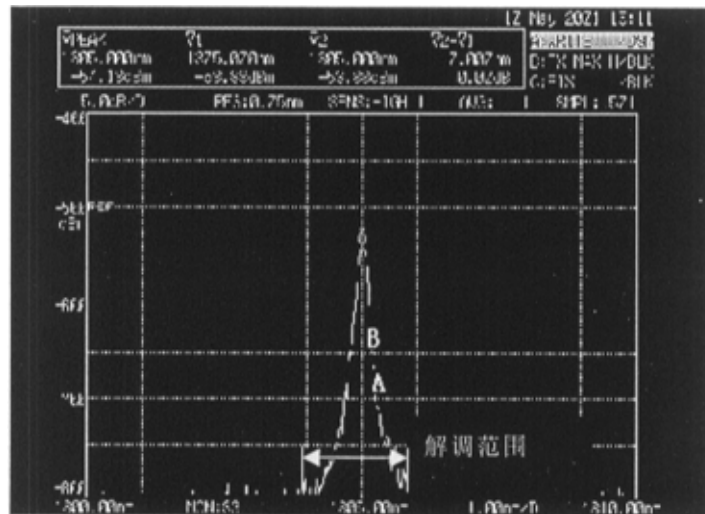


图 2-7 光纤 Bragg 光栅反射谱

当没有振动信号过来时候，尽量让被测光栅的波长处于解调光栅的中心位置（图 2-7 中 A 点位置），当振动信号作用在被测光栅上时，被测光栅的波长就发生变化，它在 A 点位置上下振动，假如它运动到 B 点时，检测 B 点波长的大小就反映出振动信号的大小。当振动信号比较剧烈时，它很可能漂移到解调光栅的波长范围之外去，这样就无法解调出所测量的振动量。

因此在本文中用到的解调方法要综合考虑以下因素：（1）解调光栅反射谱的两个边缘线性要好；（2）解调光栅的解调范围要宽；（3）解调光栅的两边斜率要大，确保解调仪的灵敏度系数大；（4）解调光栅的温度漂移也不容忽视。前面三个因素可以从选取解调光栅的角度来解决，对于第四个因素文中创新性地提出将测量光栅与解调光栅放置在同一环境下来克服温度漂移。

在进行光纤光栅动态解调仪的设计过程中，作者考虑上面的综合因素，同时也与其他解调方法进行了对比实验，结果表明：这种匹配光栅动态解调的方法完全可以满足本文研究的振动测量的需要，到目前为止，该解调方法所能达到的最高频率为 7000Hz。

### 第3章 光纤光栅振动传感器设计方法的研究

先进光纤光栅传感技术为振动传感的高分辨能力、高信噪比、高保真度、高清晰度、高精度度和高可信度提供了理想的技术手段。本章基于振动传感器设计方法和光纤光栅传感原理,通过理论分析、推导和实验研究,确定光纤光栅振动传感器的设计要素,提出光纤光栅振动传感器的一般设计方法,并采用有限元法进行了验证。

#### 3.1 加速度传感器设计方法

加速度传感器应用领域很广泛。根据其不同领域的应用要求,出现了多种型号的加速度传感器,到了本世纪初已经出现了硅电容、硅压阻、压电、厚膜应变、力平衡、电子隧道和热传导等多种加速度传感器,广泛应用于航空、航天、机械、自动控制等多领域。

尽管加速度传感器种类很多,但在结构上它们大都是由检测质量(也称悬挂质量或振动质量)、支撑载体(基座)和检测电路三部分组成:工作原理是根据牛顿第二运动定律,在加速度传感器随被测对象运动时候,其加速度  $a$  在检测质量  $m$  上产生相反的惯性力  $F$ ,  $m$  线性位移量的大小与  $F$  成正比,也就与  $a$  成正比,测量这个位移量就可获得加速度。

##### 3.1.1 力学模型和特性方程

一般加速度传感器的力学模型如图 2-1 所示,是由惯性质量  $M$ 、弹性元件  $K$  和阻尼器  $C$  组成的一个单自由度的二阶系统<sup>[5,6,7]</sup>。由牛顿第二定律可知,作用在传感器惯性

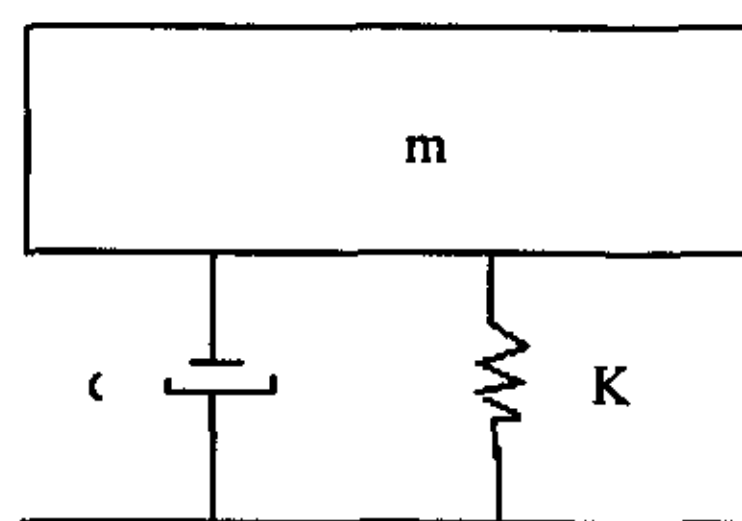


图 3-1 加速度计的力学模型

元件 M 上的各力——惯性力、阻压力、弹性力以及外力之和为零。  
这种传感器在外界振动的强迫力  $f(t)$  作用下，系统的运动方程为：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (3-1)$$

式中：  $m$ —惯性敏感质量；  $c$ —阻尼系数；  
  $k$ —弹性元件刚度；  $x$ —敏感质量块的位移

式 3-1 进行转换便可得系统的传递函数：

$$H(s) = \frac{k}{s^2 / \omega_0^2 + 2\xi s / \omega_0 + 1} \quad (3-2)$$

式中：  $\omega_0$ —为系统的固有频率  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

$\xi$ —为系统的阻尼比  $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c}{m}}$

根据传递函数得，系统的频率响应函数为：

$$H(j\omega) = \frac{k}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\xi j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (3-3)$$

频幅响应函数为：

$$|H(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (3-4)$$

相位响应函数为：

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (3-5)$$

根据式 (3-4) (3-5) 可以得到系统的幅频和相频响应曲线族，  
如图 3-2 所示。

### 3.1.2 加速度传感器动态特性的分析

加速度传感器的动态特性好是指输出量随时间的变化规律将能再现输入量随时间的变化规律。由于加速度计是多单元组成得一个

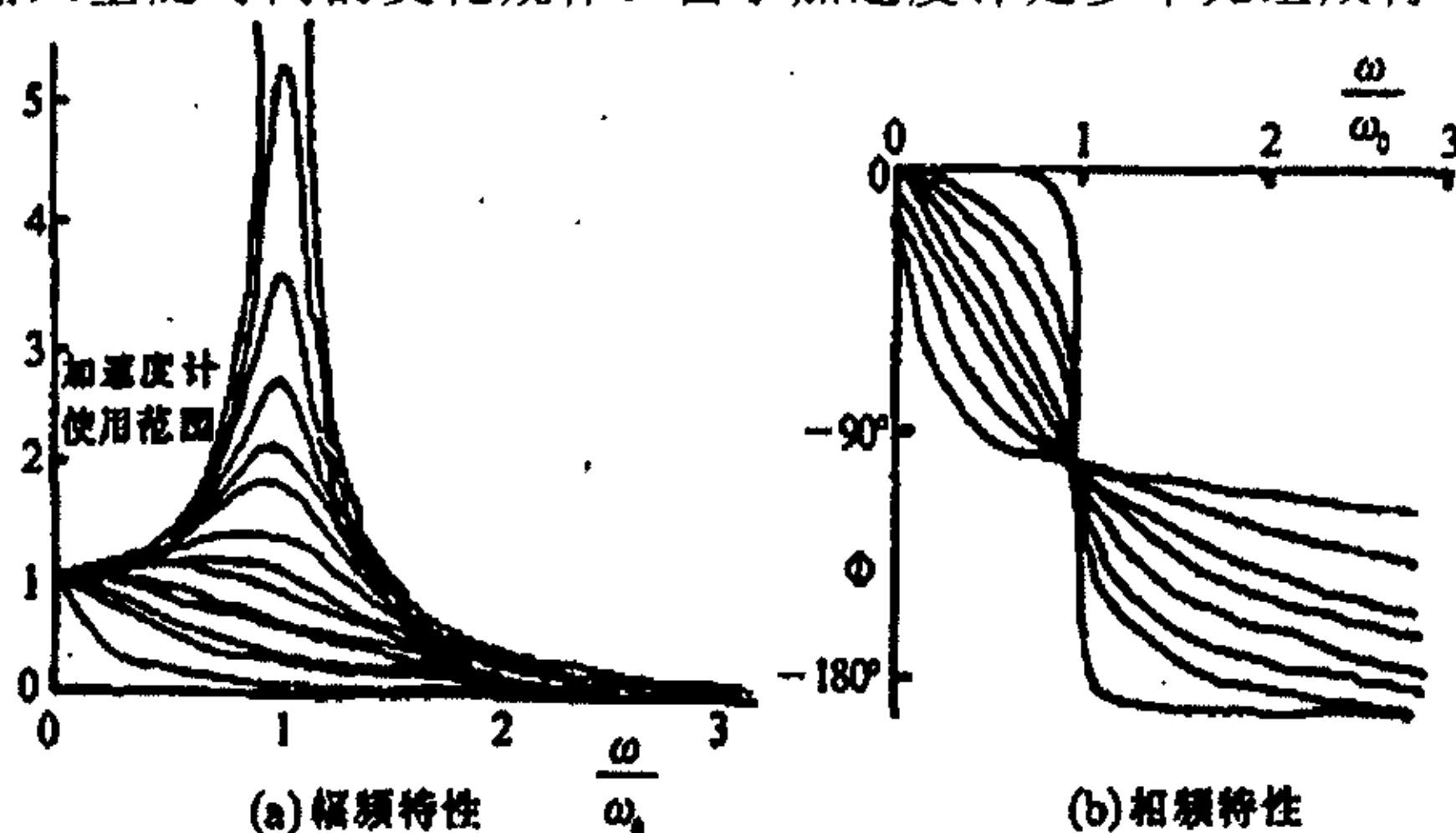


图 3-2 加速度计的幅频、相频曲线

整体，输出信号与输入信号之间不会具有相同的时间函数，传感器将会产生动态误差，所以分析动态特性及相关因素是消除传感误差，设计和提高传感器动态特性的必要方法。

图 3-2(a)是加速度传感器的幅频特性曲线簇

◆ 3-2(a)幅频曲线中，实际曲线偏离纵轴  $y=1$  的程度，决定了传感器幅值的误差大小。而传感器的这个误差与传感器系统内的阻尼比  $\xi$  以及频率比  $\frac{\omega}{\omega_0}$  有关，它是引起频率误差的主要来源之一。并且阻尼比和频率比又与系统的结构参数有关。因此在设计时，合理地选择结构参数大小减小幅值误差，是扩大工作频率范围的重要措施；

◆ 频率比越低时，曲线越接近于 1，其幅值误差也越小。如传感器的固有频率越高，其工作的频率范围也就越宽。从测量结果不失真的角度看，固有频率也是越高越好。因此设计传感器的固有频率应远远大于输入信号的最高工作频率；

◆ 阻尼比不同时，幅频特性曲线的平坦区差别较大，而且谐振的峰值的差别也很大。当阻尼比过大 ( $\xi \gg 0.707$ ) 时，随  $\omega$  的增加



幅频特性曲线下降很快，而阻尼比过小（ $\xi \ll 0.707$ ）时，随 $\omega$ 的增加幅频特性曲线将上升，且在 $\frac{\omega}{\omega_n}=1$ 附近出现谐振峰，阻尼比越小谐振峰越高，当频率比大于1以后幅值很快下降。在上述两种阻尼情况下，幅频特性平坦区都狭窄，而当阻尼比为临界阻尼或欠阻尼即 $\xi=0.6-0.7$ 之间时，传感器具有较宽的工作频率范围。因此振动传感器的阻尼系统决定了传感器的工作范围。当 $\xi=0.6-0.7$ 时将具有较宽的工作频率范围；

◆当输入为正弦信号时，输出的相位偏移对测量结果无影响，当输入为非正弦周期信号时，为保证输出波形不畸变，则希望传感器具有线性相频特性，而在 $\xi=0.7$ 的附近具有近似的线性相移特性。

对于测量加速度的振动传感器来说，它的动态特性除了其输出信号大小与振幅和频率的关系外，还存在着一个相位和频率之间的关系问题，如图3-2(b)所示。式(3-5)表明了传感器的输出信号与输入加速度相位差之间的关系，而且 $\phi$ 是频率比与阻尼比的函数，对于一个具体的传感器来说固有频率和阻尼比是确定的，因此 $\phi$ 只是被测频率的函数。但是在实际工程中， $\phi$ 的特性直接影响到传感器测得的结果，也同时反映传感器特性的好坏。如果传感器用来测量一个稳定的无畸变的单一频率的正弦振动，那么它的相位是无关紧要的，没有涉及到频率合成的问题，但是对于一个非正弦的周期振动来说，它包含有多次谐波分量，传感器的输出对各次谐波的相位差各不相同，使输入信号中的各项谐波间的相位关系不能在输出信号中保持不变，致使波形发生畸变，从而产生测量误差，使传感器输出的波形与被测波形之间产生较大的失真。

综上所述，加速度传感器的频率特性可用两个特征参数 $\xi$ 和 $\omega_n$ 来评估，在相同的 $\xi$ 下， $\omega_n$ 越大则输出特性平坦区越宽，动态特性也越好；在确定固有频率下，当 $\xi=0.707$ 时，具有最宽的幅频特性平坦区，同时因有较好的线性相移特性，而使输出波形失真也小。

在实际应用中，大多数情况下的输入信号为非正弦周期信号，在设计和分析传感器可以工作的最高信号频率时，同时也必须考虑信号中的高次谐波的影响，这时候可工作的最高信号的基频要降低。

但是在一般情况下由于高次谐波的幅值比基波小得多，因此它对频率误差要比对基波的频率误差要求低一些。

## 3.2 光纤光栅振动传感器的理论设计

### 3.2.1 结构

依据光纤光栅传感特性方程和上述的加速度计的测量方法，初步提出了图 3-3 所示的结构。图中质量块选用的材料是铜，从材料的性能上讲因为铜的刚度大，相比于其它金属材料更合适些。

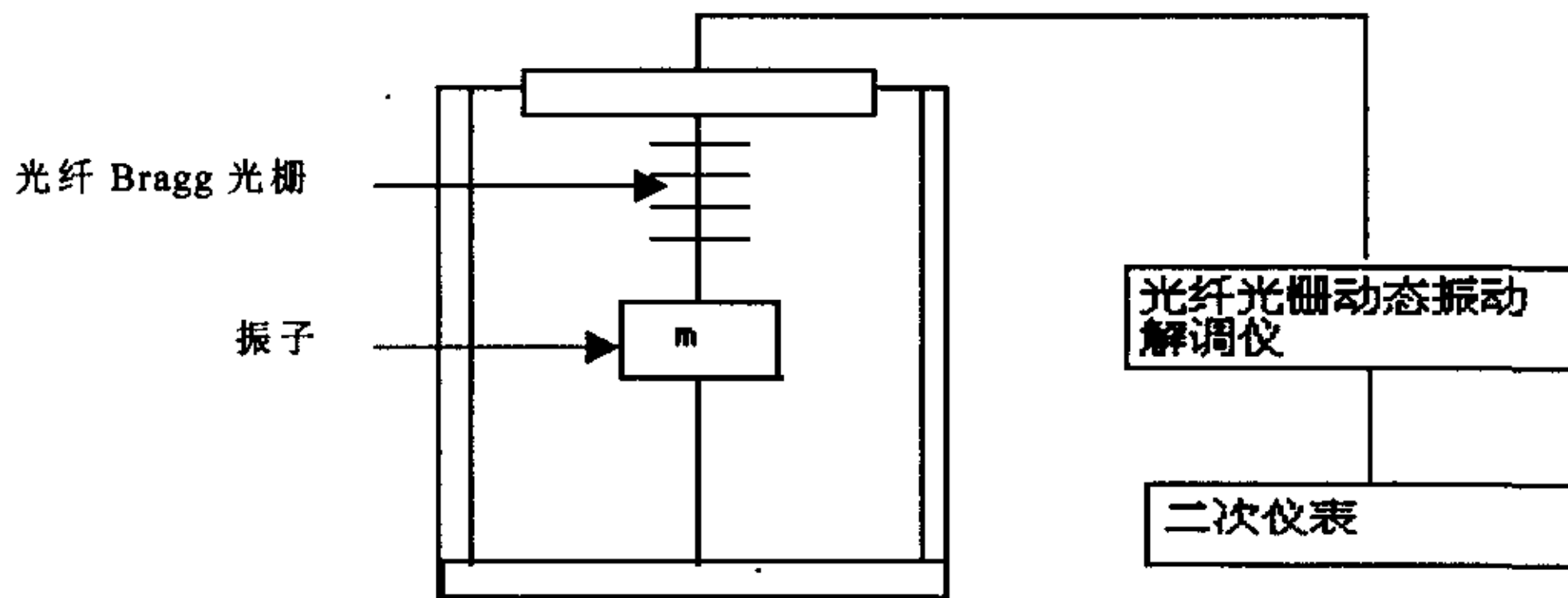


图 3-3 光纤 Bragg 光栅振动传感器示意图

### 3.2.2 传感特性分析

传感器的特性一般是指静态特性和动态特性，通过实验观察得传光纤光栅传感器的静态特性较好，在此不再介绍，将重点分析传感器的动态特性。为了便于分析和处理光纤 Bragg 光栅传感器的动态特性，文中通过建立相应的数学模型，把传感器看作一个独立的线性系统，对于它的动态响应特性，采用常系数线性非分方程的数学模型进

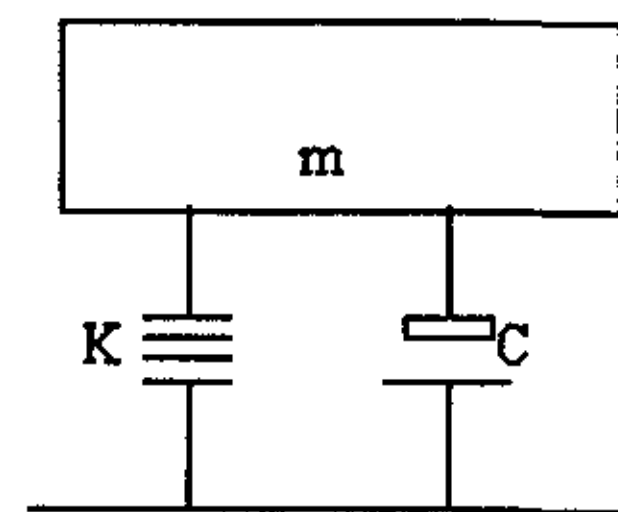


图 3-4 光栅传感器力学模型

行研究。又因为传感器的输出量与输入量之间的关系是一个时间的函数，随输入信号的变化而变化，则引用“传递函数”这一概念来描述其输入与输出之间的关系。

对比一般加速度传感器的力学模型，光纤光栅振动传感器是由惯性质量  $m$ 、弹性元件  $K$ （光纤光栅）和阻尼器  $c$  组成的一个单自由度的二阶系统。如图 3-4 所示， $K$  为光纤 Bragg 光栅的弹性系数， $m$  为振子的质量， $c$  为整个系统的阻尼<sup>[2,4,10,9]</sup>。

当外壳振动量为  $x_1$  时候，光纤 Bragg 光栅长度变化量为  $x_2$ ，则由牛顿第二运动定律得到光纤 Bragg 光栅振动传感器系统的微分方程为：

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c \frac{dx_2}{dt} + \frac{EA}{L} x_2 = \frac{EA}{L} x_1 \quad (3-6)$$

将 (3-6) 式的两边对  $t$  进行傅立叶变换，得：

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} m \frac{d^2 x_2}{dt^2} \exp(-i2\pi\omega t) dt + \int_0^{\infty} c \frac{dx_2}{dt} \exp(-i2\pi\omega t) dt + \int_0^{\infty} \frac{EA}{L} x_2 \exp(-i2\pi\omega t) dt \\ &= \int_0^{\infty} \frac{EA}{L} x_1 \exp(-i2\pi\omega t) dt \end{aligned} \quad (3-7)$$

式中： $\omega$  是角频率。

$$\text{设 } X_2(\omega) = \int_0^{\infty} x_2 \exp(-i2\pi\omega t) dt, \quad X_1(\omega) = \int_0^{\infty} x_1 \exp(-i2\pi\omega t) dt$$

则由傅立叶变换的性质，得：

$$\int_0^{\infty} \frac{d^2 x_2}{dt^2} \exp(-i2\pi\omega t) dt = (i\omega)^2 X_2(\omega)$$

因此，(3-7) 式可改写为：

$$m(i\omega)^2 X_2(\omega) + C(i\omega)X_2(\omega) + \frac{EA}{L} X_2(\omega) = \frac{EA}{L} X_1(\omega) \quad (3-8)$$

整理 (3-8) 式，便得到系统的频率响应为：

$$H(\omega) = \frac{X_2(\omega)}{X_1(\omega)} = \frac{\frac{EA}{L}}{\frac{EA}{L} + ci\omega - m\omega^2} = \frac{1}{1 + i\frac{cL}{EA}\omega - \frac{mL}{EA}\omega^2} \quad (3-9)$$

而：  $\omega_n = \sqrt{\frac{EA}{mL}}$  为系统的固有频率，  $\xi = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{L}{EA m}}$  为阻尼比，它由系统本身确定，因此该传感器的传递函数可写为：

$$H(s) = \frac{1}{1 + 2\xi s + s^2} \quad (3-10)$$

频响特性为：

$$H(i\omega) = \frac{1}{1 + 2\xi i \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right) - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (3-11)$$

幅频特性为：

$$|H(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + \left( \xi \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \quad (3-12)$$

相频特性为：

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (3-13)$$

对比发现，式 3-12 和 3-13 与 3-4 和 3-5 在特性上是一样的，因此一般加速度传感器的动态特性分析同样也适用于光纤光栅振动传感器的动态特性分析。因此，对于光纤光栅振动传感器的动态特性来说，最关键的参数仍然是：固有频率和阻尼比。

综合上述分析知道： $\xi = 0.707$  时，传感器才能有最好的动态输出特性，传感器能正常工作必须满足： $\xi \leq 0.707$ 。

### 3.2.3 灵敏度分析

根据图 3-4 中光纤 Bragg 光栅振动传感器的力学模型，对其灵敏度进行分析。如图 3-5 所示，依次是整个传感系统处于静止、向上运动以及向下运动的状态，质量块  $m$  和光纤 Bragg 光栅的受力分析图。

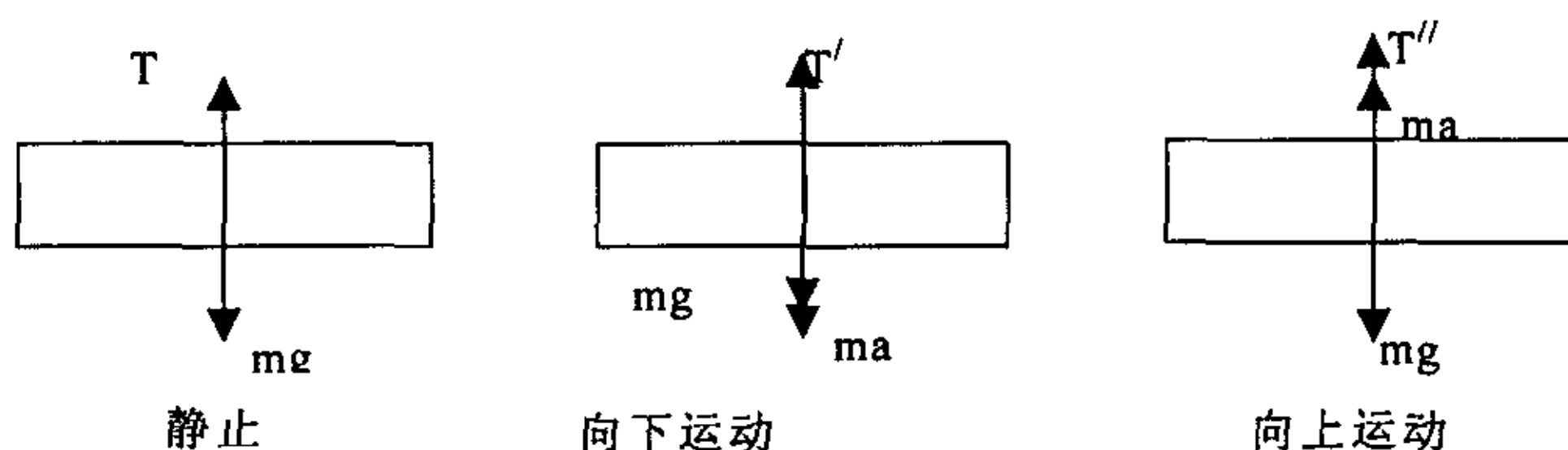


图 3-5 质量块  $m$  和光纤 Bragg 光栅的受力示意图

当振子作加速度运动时候，质量块  $m$  将受到与运动方向相反的惯性力  $f = ma$  的作用，此时光纤 Bragg 光栅长度发生变化，光纤 Bragg 光栅的固定端与质量块之间的光纤 Bragg 光栅长度变化量  $\Delta L$  与相应的应力关系为<sup>[10,8,12,19]</sup>：

$$ma = EA \frac{\Delta L}{L} \quad (3-14)$$

式中： $A$ -光纤的横截面积， $L$ -光纤 Bragg 光栅的长度，

$E$ -杨氏模量。

依据前面章节中介绍的光纤 Bragg 光栅的传感原理有：

$$\Delta \lambda_B = 0.78 \varepsilon \lambda_B \quad (3-15)$$

式中： $\lambda_B$ -光纤 Bragg 光栅反射波长

$\Delta \lambda_B$ -光纤 Bragg 光栅波长的改变量

$\varepsilon$  - 光纤 Bragg 光栅的轴向应变，且  $\varepsilon = \Delta L / L$

则综合 (3-14) (3-15) 式有：

$$ma = EA \frac{\Delta \lambda_B}{0.78 \lambda_B} \quad (3-16)$$

$$\frac{\Delta \lambda_B}{a} = \frac{0.78 \lambda_B m}{EA} \quad (3-17)$$

式 (3-17) 表示的是单位加速度上光纤 Bragg 光栅波长的变化, 亦即系统的灵敏度系数  $S$ , 它与振子质量块  $m$  的大小成正比, 质量块  $m$  越大, 系统的灵敏度就越高。又根据固有频率的计算公式得光纤 Bragg 光栅振动传感器的固有频率 (自然频率) 表达式为:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{EA}{mL}} \quad (3-18)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EA}{mL}} \quad (3-19)$$

式 (3-17) 和式 (3-19) 可以看出, 光纤 Bragg 光栅振动传感器的两个重要指标: 灵敏度系数  $S$  和固有频率  $f_n$ , 它们与振子质量块  $m$  和光栅的长度  $L$  的乘积所对应的关系是矛盾的, 当灵敏度系数  $S$  越大时候, 其固有频率  $f_n$  将越小。

综上所述, 设计传感器时, 在确定传感器的结构形状的前提下, 在静态特性上, 由于光栅栅距的变化与外界作用力成正比例变化, 所以传感器输出信号呈线性变化。从动态性能上要考虑到阻尼比和固有频率, 阻尼比确定了传感器的动态特性, 而从传感器的性能指标上要考虑灵敏度系数和固有频率。传感器工作的稳定性主要由传感器温度漂移的特性决定。阻尼比与光栅变化的长度  $L$  有关, 固有频率的大小与振子质量  $m$  和光栅的长度  $L$  都有关, 灵敏度系数与振子的质量有关, 下面将围绕阻尼比、灵敏度、固有频率、质量块和光栅的长度  $L$  展开实验。

### 3.2.4 结构参数取值范围

#### 1. 阻尼系数

传感器的阻尼比为:

$$\xi = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{L}{EAm}}$$

阻尼系数  $c$  由系统的结构和运动形式以及阻尼材料特性决定，据资料查得，阻尼系数为<sup>[44,45,46,47,48]</sup>：

$$c = \frac{3\mu s^2}{2\pi d_0^3} [N \cdot s/m] \quad (3-20)$$

式中： $\mu$ —介质（气体）的粘滞度（20°C 时空气的粘滞度为  $18 \times 10^{-6} \text{kg/ms}$ ）

$s$ —固定端面与动端面的正对面积

$d_0$ —端面之间的平均间距

通过实验还是以空气阻尼来设计下面的传感器，本结构中  $d_0 = 50 \mu\text{m}$ ， $s = 255 \text{mm}^2$ ，则阻尼系数为  $4.471 N \cdot s/m$ 。

对于一个确定的系统而言，其  $m$  和  $K$  是确定值，所以可以调节系统的结构来控制阻尼系数  $c$  以满足所需要的阻尼比  $\xi$ 。

## 2. $m$ 、 $L$ 参数的确定

在确定和优化结构参数时候，需要同时考虑工艺条件的限制。光纤光栅的长度  $L$  主要由制作光栅本身的条件所决定，在通常使用到的光栅长度一般为 12mm，考虑到光纤与光栅有同样的弹性模量以及实验的需要，在下面的实验中  $L$  取值超过了 12mm。

在实际参数选择时候，要综合考虑灵敏度和频率特性的要求，在设计中采用灵敏度与频率的乘积  $s \cdot \omega_n$  的优值来确定实际设计参数。质量块  $m$  和光栅长度  $L$  的关系为：

$$\begin{cases} f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EA}{mL}} \\ s = \frac{\Delta\lambda}{a} = \frac{0.78\lambda_B m}{2n_{\text{eff}} EA} \end{cases}$$

可得到：

$$s \cdot \omega_n \propto \sqrt{\frac{m}{L}} \quad (3-21)$$

又前面的理论推导得阻尼比必须小于等于 0.707，而

$\xi = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{L}{EA m}}$ ，即光纤 Bragg 光栅的长度  $L$ 、质量块  $m$  满足下列关系：



$$\frac{L}{m} \leq \frac{1791.148}{c^2}, \quad (3-22)$$

c 为系统结构的阻尼，取值为  $4.471 N \cdot s/m$ ，则可推出：

$$\frac{L}{m} \leq 89.6 \quad (3-23)$$

### 3.3 实验装置及结果

实验装置如图 3-6 (a)、3-6(b)，实验所用的信号发生装置来自丹麦其型号分别是：Heterodyne Analyzer Type 2010、Power Amplifier Type 2712、Precision Conditioning Amplifier Type 2650、Vibration Exciter Type 4808；解调仪是武汉理工大学光纤中心自行研制的，数据采集仪是采用东方噪声和振动研究所生产的 INV303B 智能信号自动采集分析仪。



Power Amplifier

图 3-6 (a) 振动传感器实验发生装置

根据式 (3-22) 和 (3-23)，在实验过程中对  $m$ 、 $L$  的取值做了大量的摸索工作，见附录-2。最后选择理论结构尺寸如表 3-1：

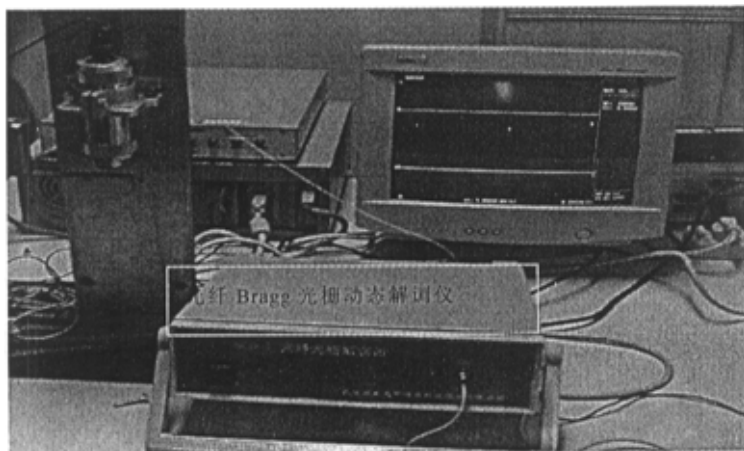


图 3-6 (b) 振动传感器实验接收装置

表 3-1 结构设计尺寸

| 类型    | m(g) | L(mm) | S(nm/ms <sup>-2</sup> ) | $f_n$ (Hz) |
|-------|------|-------|-------------------------|------------|
| 传感器 1 | 39.1 | 12    | 0.04429                 | 220        |
| 传感器 2 | 45   | 24    | 0.05097                 | 144.8      |

### 3.4 结构的有限元分析

上面从数学解析法角度对光纤 Bragg 光栅振动传感器系统动态特性进行分析和结构设计, 下面将从数值分析法的角度对光纤光栅振动传感器的结构进行有限元分析, 以此来验证数理分析的正确性。

在对由铜块和光纤光栅组成的振动传感器结构进行有限元分析时, 首先建立力学分析几何模型, 然后对几何模型施加载荷并求解; 最后对求解结果进行分析并评价。

#### (1) 几何模型的建立<sup>[3,15,34]</sup>

根据传感器的结构尺寸, 所建立的有限元分析几何模型如图 3-7 所示。为了便于进行模态分析, 模型中把质量块  $m$  当成一个点。

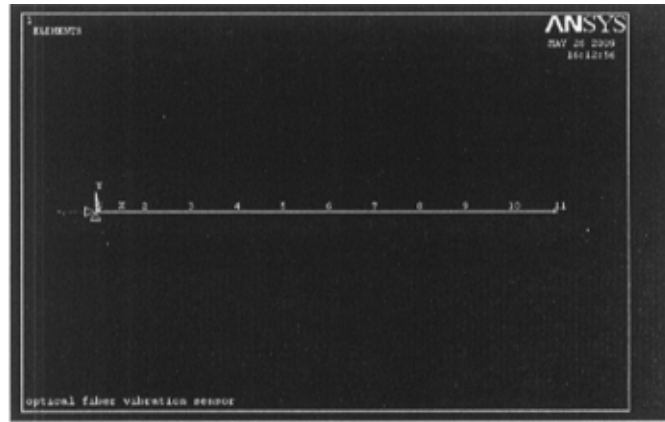
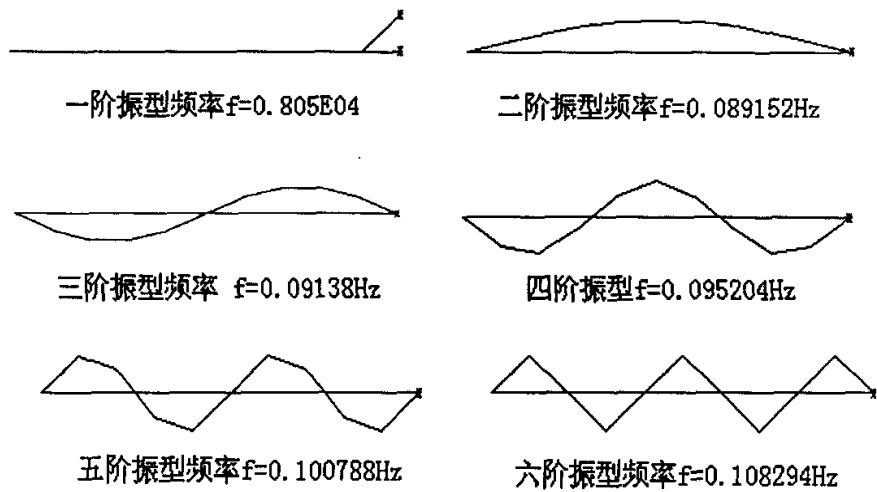


图 3-7 光纤光栅振动传感器有限元模型

### (2) 参数确定和模态分析

依据第三章的传感器结构设计，在此选取如下参数： $m=39.1\text{g}$ ， $L=12\text{mm}$ 。在  $0\sim 50000\text{Hz}$  对此结构模型进行模态分析得到 11 阶振型，如图 3-8 所示。



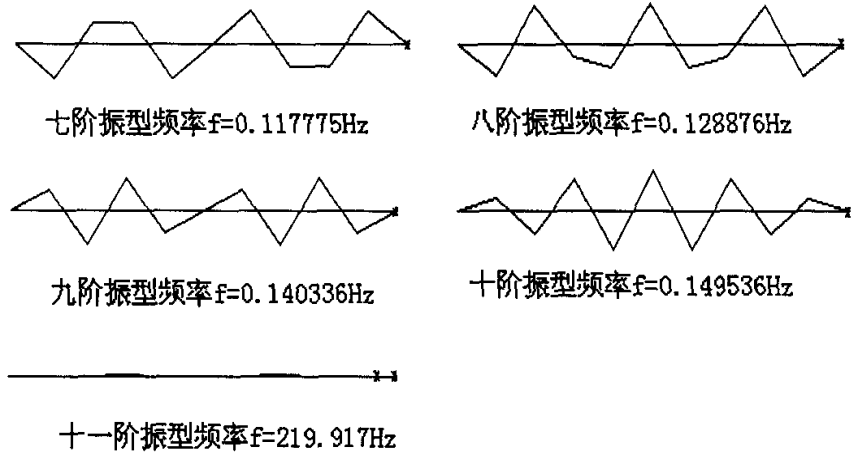


图 3-8 光纤光栅模型的各阶模态振型

### (3) 施加载荷、计算分析

利用有限元法确定传感器的灵敏度，对 3-1 的模型给以一个  $g$  的加速度，计算得其产生的应变为  $0.427725\mu\varepsilon$ 。

又依据光纤光栅的传感理论： $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 0.78\varepsilon$  可得波长的变化量为  $0.43337\text{nm/g}$ 。

实验结果为：

| 类型    | $m(\text{g})$ | $L(\text{mm})$ | $S(\text{nm/ms}^{-2})$ | $f_n(\text{Hz})$ |
|-------|---------------|----------------|------------------------|------------------|
| 传感器 1 | 39.1          | 12             | 0.04429                | 220              |

有限元分析的结果为：

固有频率： $f_n=219.917\text{Hz}$

灵敏度系数： $S=0.43337\text{nm/g}$

对比上述两种方法下的结果，固有频率保持严格的一致，灵敏度系数误差为 2.1%，在误差允许的范围之内。因此这两种设计方法是基本上吻合的。

### 3.5 其它因素的综合考虑

在结构设计中, 要求设计出易加工、力学性能、光学性能合理的结构。力学性能主要有刚度、强度、应力等, 光学性能有温度漂移、光强、信噪比、色散等, 综合工艺、材料机械特性、电学特性、光学特性。从传感器的实用性和工艺性能上考虑, 对上述结构进行反复的实验, 发现以下几点有待改进和克服:

1. 传感器的温度特性, 即温度漂移对波长移动的影响。由于光纤光栅对温度的变化特别敏感, 只要周围的环境有微小的变化就会使得光纤光栅的波长有较大的漂移, 那么与之匹配的参考光纤光栅的波长将要有一个很大的动态范围, 但是仅靠光纤光栅本身的范围是远远不够的, 但从结构本身上实现温度补偿是比较困难的。

2. 传感器的横向响应。上面的实验显示的加速度作用方向都是平行于传感器的基准面。但是在实际测量中, 并不能保证被测加速度在横向没有分量。如果传感器的横向响应相当大, 实用中传感器的输出不确定度会很大, 从而就降低了传感器的可信度。

3. 传感器的灵敏度系数和频响范围。通过上面的实验得到光纤光栅振动传感器比一般的加速度传感器有更高的灵敏度系数和更宽的频率响应范围。解调技术是光纤光栅传感的关键技术, 在上面的实验中, 只是通过结构参数的改变来提高传感器性能指标, 从而忽略了解调技术的作用。

4. 空气压力阻尼会对输入频率起限制作用。质量块(动板)向上运动时候, 质量块和上封装盖(固定板)之间的气体被挤出间隙, 与此同时, 质量块与下封装盖之间吸进气体, 由于气体的粘滞性, 质量块的运动受到阻碍。分析可知: 当频率较低时, 两板间的气体能够从间隙溢出, 由于气体的粘滞性使气膜主要表现为阻尼特性; 而当频率较高时, 板间的气体被压缩而不能从间隙溢出, 气膜主要表现为弹性特性, 因为气膜的主要作用是给传感器提供阻尼, 所以气膜的弹性应该回避。

5. 不易加工和保护, 可靠性能不高, 不宜在野外使用。

## 第4章 新型光纤光栅振动传感器

基于光纤光栅振动传感器的一般设计方法，本章通过分析和解决影响振动传感器性能的因素，设计了具有较高灵敏度系数、较小横向效应、有效克服温度漂移的新型光纤光栅振动传感器。

### 4.1 悬臂梁式光纤光栅振动传感器的结构

悬臂梁式光纤光栅振动传感器原理框图如图 4-1 所示 [12,16,17,5,18]，结构剖面图如 4-2 所示。传感器由三部分组成：核心是梁中间上下对应粘贴的两个光栅（被测光栅）、梁自由端上的质量块  $M$  和悬空置于壳体上方的光栅（解调光栅）。其壳体固结于被测运动体上，质量块则紧固于等强度梁的自由端，此装置中的等效动力模型可简化为一个二阶系统，如图 4-2 所示。其中  $X_r(t)$  是质量块相对于壳体的位移， $X_a(t)$  是质量块的绝对位移， $X_0(t)$  则是质量块的牵连位移，即壳体的绝对位移。

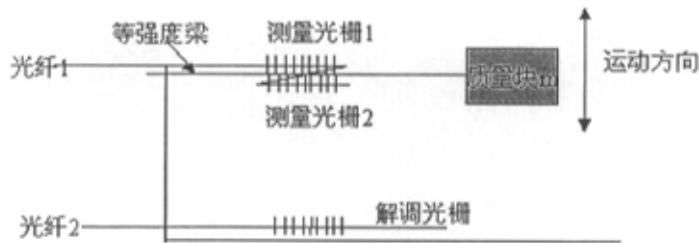


图 4-1 悬臂梁式光纤光栅振动传感器原理框图

### 4.2 工作原理

该传感器的工作原理是：质量块  $M$  受到外界的振动，在悬臂梁

上产生一个挠度，梁上则会有对应的应变作用于被测光纤光栅上，引起光纤光栅波长的变化，检测变化的波长则可以得到作用在质量块 M 上的加速度大小。

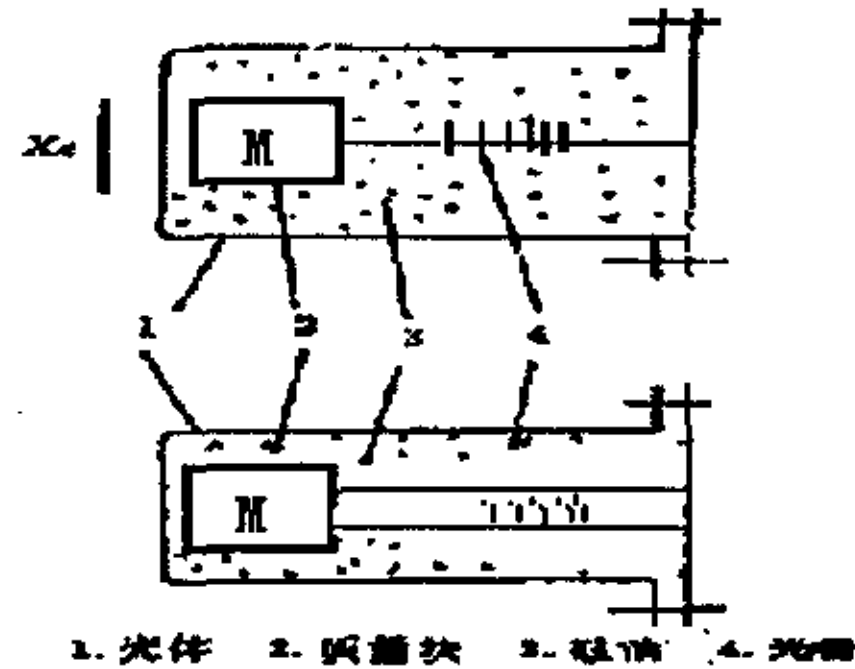


图 4-2 悬臂梁式光栅振动传感器结构

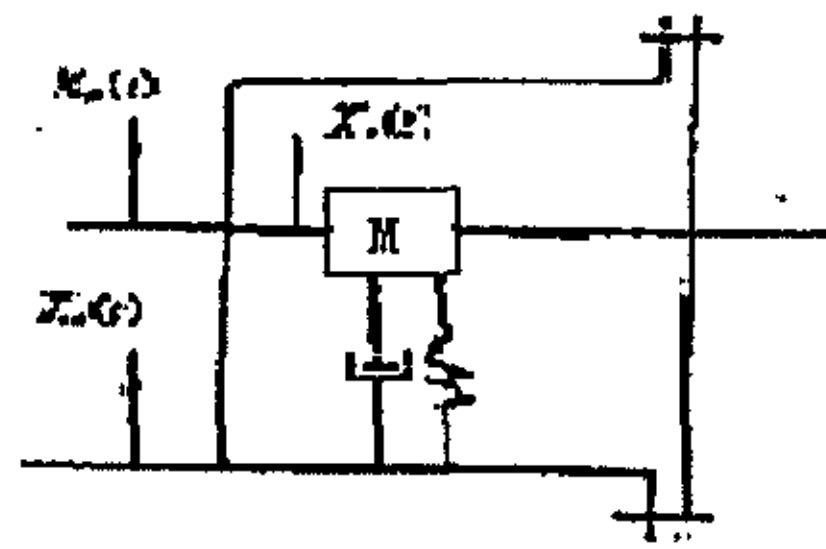


图 4-3 动力模型

#### 4.2.1 悬臂梁应变理论计算

由于等强度梁表面各点的应变处处相等，为了便于光栅粘贴不受位置的影响，悬臂梁采用等强度梁。为了便于推导传感器的灵敏度和固有频率，先对等强度梁的应变理论进行计算。图 4-4 为等强度梁悬臂梁示意图。

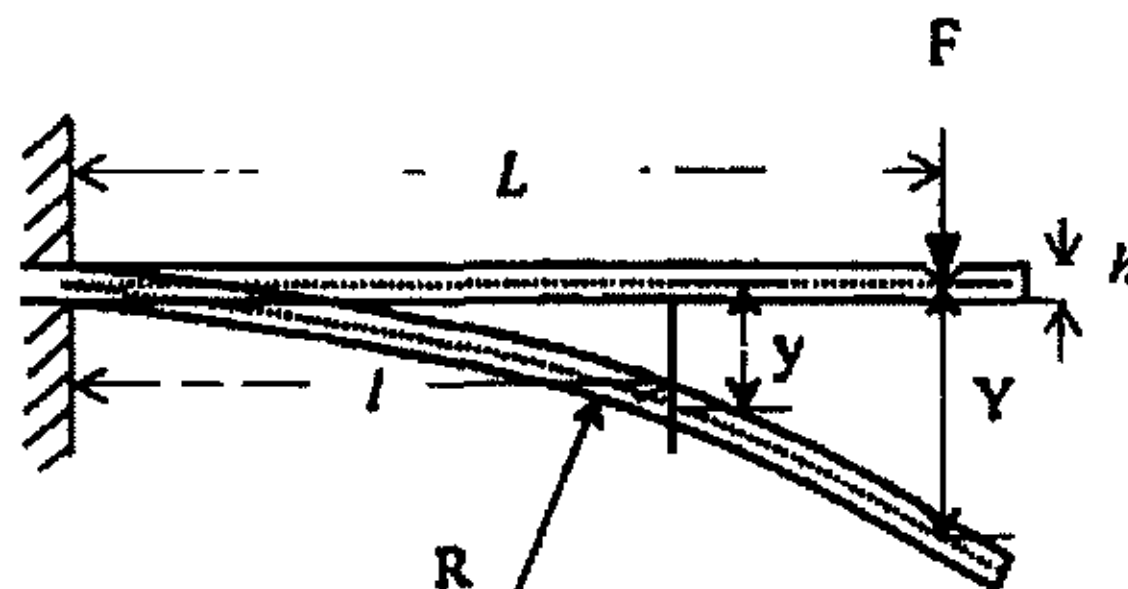


图 4-4 等强度梁应变分析示意图

设  $L$ 、 $b$ 、 $h$  分别为梁长、梁宽和厚度。根据力学知识，由应力  $F$  和梁的几何尺寸 ( $L$ 、 $b$ 、 $h$ ) 与梁的弹性模量  $E$ ，可得等强度梁上各点的应变为<sup>[29]</sup>：

$$\varepsilon = \frac{6L}{Eb^2h^2} F \quad (4-1)$$



从式 4-1 可以看出, 应变不仅与梁的几何尺寸有关, 而且与材料的杨氏模量  $E$  有关, 在材料学中通常用挠度来表示应变:

$$\varepsilon = \frac{h}{L^2} \Upsilon \quad (4-2)$$

式中  $\Upsilon$  是梁末端  $L$  处的挠度值, 应用千分表不容易测出。由于受力弯曲的等强度梁表面的曲率处处相等, 通过分析几何关系, 等强度梁的应变可由梁上任意位置( $l$ )的挠度  $\gamma$  来求得:

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2 + \Upsilon^2} \Upsilon \quad (4-3)$$

式 4-3 中  $l$  是测量点距离等强度梁(无受力时)固定端的距离。在等强度梁使用范围内, 挠度  $\gamma$  远小于  $l$ 。于是有

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2} \Upsilon = KF \quad (4-4)$$

式中  $K$  为等强度梁的应变-应力灵敏度。它正好弥补了等强度梁弹性模量  $E$  很难确定这一缺点, 我们可以通过实验对各种等强度梁实验从而标定  $K$  值的大小。

等强度梁的应变可以表征被测运动加速度的大小, 光纤光栅振动传感器的原理就是把运动体的加速度引起等强度梁应变转换成光栅波长的变化来进行测量的。

#### 4.2.2 光纤光栅传感器输出灵敏度

第二章介绍光纤光栅受到轴向应力作用产生应变:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 0.78\varepsilon_x \quad (4-5)$$

此结构中两个被测波长相同的光栅粘贴在悬臂梁上, 一个受压一个受拉, 由于两个光栅选取的波长一致, 则它们在同一个应变下解调仪探测到的波长变化为单个光栅作用时波长变化的两倍。

综合 4-1 和 4-5 可得:

$$\frac{6l}{Ebh^2} F = \frac{\Delta\lambda_B}{0.78\lambda_B} \quad (4-6)$$

又  $F = ma$

式中：M—等强度梁上振子的质量大小

则

$$\frac{\Delta\lambda_B}{a} = \frac{4.68\lambda_B ml}{Ebh^2} \quad (4-7)$$

等强度梁的光纤光栅振动传感器的灵敏度表示为：

$$S = \frac{\Delta\lambda_B'}{a} = 2 * \frac{4.68\lambda_B Ml}{Ebh^2} \quad (4-8)$$

由于悬臂梁的挠度正比于质量块所响应的加速度，所以在测量光栅输出端的信号也为线性。

### 4.3 传感器的频率响应

#### 4.3.1 梁固有频率的计算

质量块质心位移  $y_m$  由两部分构成，包括梁远端的平动和绕远端的转动可表示为：

$$y_m = y(a_1) + y'(a_1) \frac{a_2}{2} \quad (4-9)$$

式中：  $a_1$ 、  $a_2$  分别为梁和质量块的长，又挠度表示式

$$y''(x) = -\frac{Ma_2}{EI} [x - a_1 - \frac{a_2}{2}] \quad (4-10)$$

$y(x)$ 、  $y'(x)$  为式 4-10 的二次、一次积分

$$y_m = \frac{a_1(2a_1^2 + 6a_1a_2 + 3a_2^2)}{Eb_1h_1^3} F \Rightarrow F = \frac{Eb_1h_1^3}{a_1(2a_1^2 + 6a_1a_2 + 3a_2^2)} y_m = Ky_m \quad (4-11)$$

所以刚度系数  $K = \frac{Eb_1h_1^3}{a_1(2a_1^2 + 6a_1a_2 + 3a_2^2)}$

此结构的固有频率  $\omega_0$  可以表示为：

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} = \sqrt{\frac{Eb_1h_1^3}{a_1(2a_1^2 + 6a_1a_2 + 3a_2^2)M}} \quad (4-12)$$

式中  $b_1$ 、 $h_1$  分别为梁的高和宽。

#### 4.3.2 等强度梁固有频率的范围

对于图 4-2 所示的传感器悬臂梁-质量块结构，梁的质量可以忽略不计。依据牛顿第二运动定律，由图 4-3 的动力学模型可写出二阶系统的数学微分方程式<sup>[29]</sup>：

$$M[X''_r(t) + X_a(t)] + C \cdot X'_r(t) + K \cdot X_r(t) = 0 \quad (4-13)$$

$$\text{令： } c/M = 2\xi\omega_n, \quad K/M = \omega_n^2$$

$$\text{则 } X''_r(t) + 2\xi\omega_n X'_r(t) + \omega_n^2 \cdot X_r(t) = -X'_r(t) \quad (4-14)$$

式中：M—质量块的质量(kg) C——粘性阻尼材料(Ns/m)

K—等强度梁刚度系数(N/m)  $\xi$ —阻尼比(无量纲)

$\omega_n$ —等强度梁无阻尼振动固有频率(rad/s)

假定被测运动是简谐运动，即：  $X_r(t) = A \cos \omega t$   $X'_r(t) = -A\omega^2 \cos \omega t$ ，  
将其代入上式得：

$$X''_r(t) + 2\xi\omega_n X'_r(t) + \omega_n^2 \cdot X_r(t) = A\omega^2 \cos \omega t \quad (4-15)$$

当小阻尼 ( $\xi < 0.1$ )，此微分方程的解为：

$$X_r(t) = \frac{V_0}{\omega_d} \cdot e^{\xi\omega_d t} \cdot \sin \omega_d t + K \cdot A \cdot \cos(\omega t + \varphi) \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \quad (4-16)$$

式 4-16 中第一项为瞬态解，即衰减振动，它随时间很快就消失，可以忽略，第二项则为稳态解，即：

$$X_r(t) = \kappa A \cdot \cos(\omega t + \varphi) \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \quad (4-17)$$

式中  $\kappa = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + (2\xi \frac{\omega}{\omega_n})^2}}$   $\kappa$  为系统的幅频特性

$$\text{若 } \frac{\omega}{\omega_n} \sim 0, \kappa \sim 1, \text{ 则 } X_r(t) \approx \frac{-X_0''(t)}{\omega_n^2} \quad (4-18)$$

式 4-18 表明被测运动体加速度  $X_0''(t)$  正比于质量块相对于壳体的位移  $X_r(t)$ ,  $X_r(t)$  就是等强度梁自由端在质量块  $M$  惯性力作用下产生的挠度, 由材料力学可以知道, 等强度梁挠度  $X_r(t)$  与等强度梁的应力应变都成正比例关系。

从理论上知道, 当  $\frac{\omega}{\omega_n} \sim 0$ , 即  $\omega_n \gg \omega$ ,  $\omega$  相对于  $\omega_n$  足够低时,  $\kappa \rightarrow 1$ , 在阻尼系数  $\xi = (0 \sim 1)$  范围内, 取不同的  $\xi$ , 绘制  $\kappa = f(\omega/\omega_n)$  特性曲线, 如图 4-4 所示。

讨论:

(1) 当  $\xi$  约等于零时, 即微小阻尼时, 要满足  $\kappa = 1$ ,  $\omega/\omega_n$  的取值范围很小。

(2) 当  $\xi = (0.65 \sim 0.7)$  时, 要满足  $\kappa = 1$ ,  $\omega/\omega_n$  的取值范围较大, 由图 3-12 可知,  $\omega/\omega_n$  小于等于 0.4 时,  $\kappa \approx 1$ 。

(3) 若  $\omega/\omega_n$  趋近零, 固有频率  $\omega_n$  必然很大, 导致灵敏度下降, 所以要限制固有频率  $\omega_n$ , 一般取  $(\omega/\omega_n)_{\min} = 0.2$ 。

(4) 在  $\omega/\omega_n$  小于等于 0.4 的范围内, 从图上可以看出,  $\omega/\omega_n$  越大,  $\kappa \approx 1$  的误差也越大, 为减小修正测量值, 最佳取  $(\omega/\omega_n)_{\max} = 0.2$

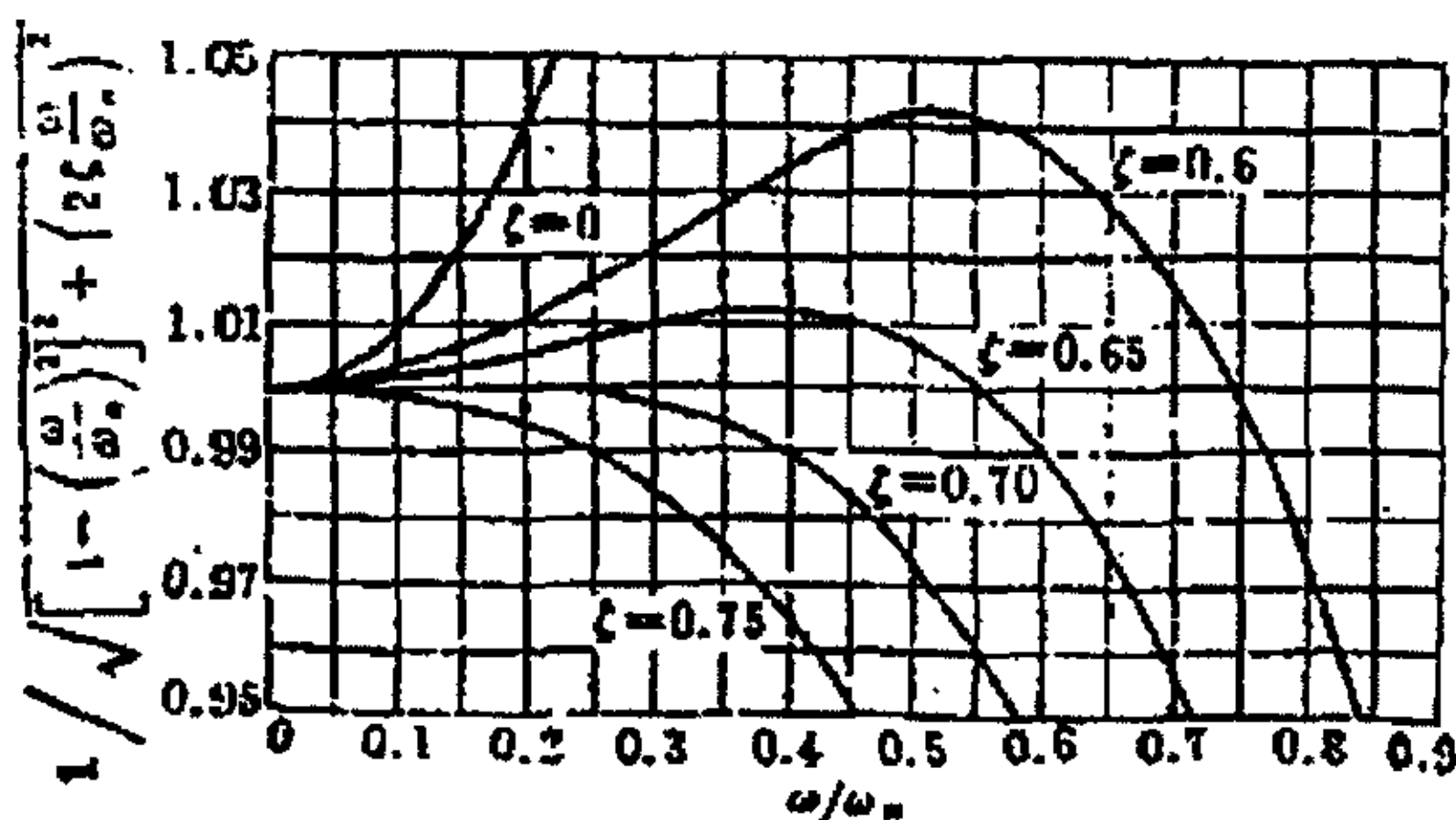


图 4-4  $\kappa = f(\omega/\omega_n)$  曲线

从上述讨论可得结论: 对此类传感器的设计, 要使阻尼系数  $\xi =$

(0.65~0.7); 等强度梁的固有频率  $\omega_n$  要按  $\omega/\omega_n = (0.01\sim0.2)$  的范围选择。

## 4.4 传感器的阻尼分析

阻尼是决定传感器动态特性的一个重要参数。对于传感器来说其阻尼的组成形式有两种：结构本身的空气阻尼和传感器的空气阻尼。

### 4.4.1 结构的空气阻尼

传感器的结构可近似表示成一对平行板状结构，如图 4-5 所示。一对相对做微小振动的平行板的流体的运动可用雷诺方程表示<sup>[29]</sup>：

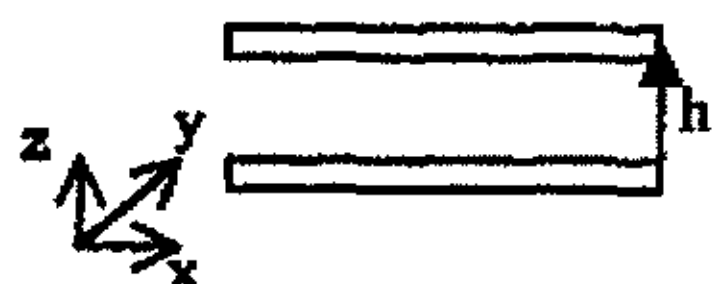


图 4-5 平行板结构

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{12\mu}{h^3} \frac{d^2 h}{dt^2} \quad (4-19)$$

式中坐标方向见图 4-5， $P$  为气体的压强， $\mu$  为空气粘滞力系数，板  $X$  方向长度为  $B$ ， $Y$  向长度为  $L$ ，假设长条板  $Y$  向压力梯度为零，式 4-19 可简化为：

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{12\mu}{h^3} \frac{d^2 h}{dt^2} \quad (4-20)$$

又板间的运动速度可以分为两个部分，即：

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dh_1}{dt} + \theta' x \quad (4-21)$$

将式 4-21 代入式 4-20，且对  $x$  进行二次积分得：

$$\Delta P = \frac{12\mu}{h^3} \left[ \frac{1}{6} \theta' x^3 + \frac{1}{2} \frac{dh_1}{dt} x^2 + C_1 x + C_2 \right] \quad (4-22)$$

边界条件：在板边缘压力梯度应为零  $\Delta P|_{x=0} = 0, \Delta P|_{x=B} = 0$

$$C_1 = 0$$

即：

$$C_2 = -\frac{1}{6} \theta' B^2 - \frac{1}{2} \frac{dh_1}{dt} B$$

得全部长条板所受到的阻尼力为：

$$F_L = L \int_0^B \Delta P dx = \frac{L\mu B^3}{h^3} \left[ \frac{1}{2} \theta' B + \frac{dh_1}{dt} \right] \quad (4-23)$$

可得长条板的阻尼系数  $c$ ：

$$c = \frac{L\mu B^3}{h^3} \quad (4-24)$$

#### 4.4.2 传感器的空气阻尼

实际上，传感器的质量块是不符合一维长条板假设的，用式 4-24 的结果会引起较大的误差。在矩形板的条件下雷诺方程的边界条件为<sup>[29]</sup>：

$$\begin{cases} P(x, \pm \frac{L}{2}) = 0 \\ P(\pm \frac{B}{2}, y) = 0 \end{cases} \quad (4-25)$$

解二元微分方程：

$$Fd = \beta(B/L) \frac{\mu B^3 L}{h^3} \frac{dh}{dt} \quad (4-26)$$

由式 4-25，4-26 矩形板的阻尼力可以看作将长条板假设结果通过乘一个修正系数  $\beta(B/L)$  得到的。

$$\beta(B/L) = 1 - \frac{19^2}{\pi^2} \left( \frac{B}{L} \right) + 0.16 \left( \frac{B}{L} \right)^2 \quad (4-27)$$

对于任意比例的  $B/L$ ，由于此级数收敛很快，可取前三项：

$$\beta = 1 - 0.76 \frac{B}{L} + 0.16 \left( \frac{B}{L} \right)^2 \quad (4-28)$$

则可以将系统的阻尼力表示为：

$$F_L = \beta(B/L) L \mu B^3 \left( \frac{1}{2} \theta' B + \dot{y}_1 \right) \left( \frac{1}{h_1^3} + \frac{1}{h_2^3} \right) \quad (4-29)$$

查阅资料可得不同的  $B/L$  情况下对应的  $\beta$  值。

综合上述推导和查阅有关资料,可以进一步得到  $\xi$  的表达式。前面的特性讨论得到当  $\xi$  等于 0.7 时,系统处于临界阻尼状态,有最大的工作带宽,可通过调节  $h_1, h_2$  来调节  $\xi$ , 以获得需要的传感器动态性能。

#### 4.5 传感器的温度特性

温度漂移是光纤光栅传感器在使用过程中务必考虑的事项,本结构中将解调光栅与被测光栅同时置于外壳里,解调光栅悬空不受任何力的作用,其作用就是温度补偿。无论外界的气温如何变化均不影响传感器的解调范围,这一点同时也解决了解调性能受波长范围限制这一难点。

#### 4.6 传感器的横向效应

上述传感器的输出灵敏度显示的加速度作用方向垂直于传感器的

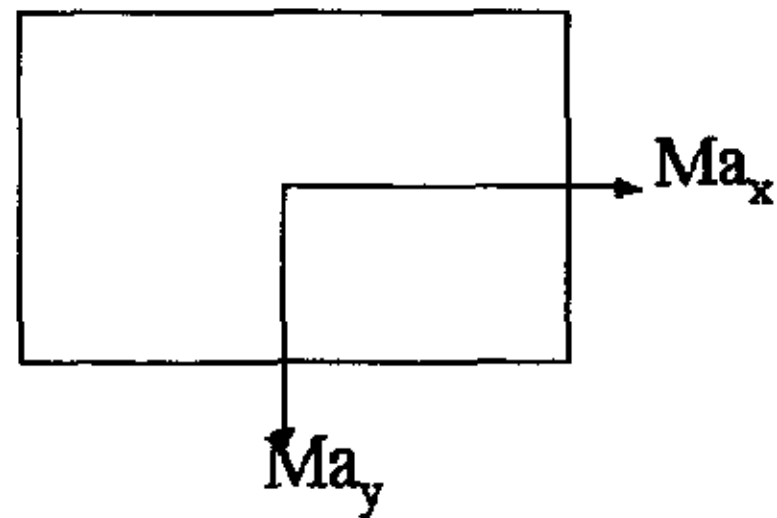


图 4-6 横向加速度分量

的。但是在实际测量中,并不能保证被测加速度在横向没有分量。对于悬臂梁结构,这种影响应当考虑。为此做了横向响应的实验。图 4-6 为采用中平面作为基准面的传感器在受到任意一个方向加速度的情况,将加速度分解到三个方向:  $a_z$  为敏感方向上的加速度,  $a_y$ 、 $a_x$  分别为  $y$  和  $x$  方向上的分量<sup>[29]</sup>。输出信号可以表示近似为:

$$\lambda_{out} = S_z a_z + S_x a_x + S_y a_y \quad (4-30)$$

针对本结构,  $S_x, S_y$  主要反映的是横向加速度在光栅上产生的应变的情况,  $a_x$  产生的横向效应包含两个部分: 横向拉伸或者压缩的应变  $\epsilon_a$ ; 质量块的质心偏离梁的中平面, 惯性力产生弯矩造成的应变  $\epsilon_b$ ;

$a_y$  方向产生侧向弯距，造成应变  $\varepsilon_c$ ；下面计算每种横向效应在光栅中产生的应变：

$$\varepsilon_a = \frac{Ma_x}{2b_1h_1} \cdot K \quad (4-31)$$

$$\varepsilon_b = \frac{3Ma_x(h_2 - h_1)}{b_1h_1^2} \cdot K \quad (4-32)$$

$$\varepsilon_c = \frac{Ma_y(a_1 + \frac{a_2}{2})}{\frac{1}{2}h_1(b_1^2 + b_2h_1 + 2b_2^2)} \cdot K \quad (4-33)$$

式中：K 为材料的应力应变灵敏度系数。

为了方便比较三种横向效应的大小，取  $a_x = a_y = a_z$ ，经过多次实验取数据，结果证明  $\varepsilon_a$   $\varepsilon_c$  的数值很小，分别约为  $\varepsilon_z$  的 0.0001 和 0.00000063，可以忽略。只有  $\varepsilon_b$  比较大，是  $\varepsilon_z$  的 0.0878。因此主要就是减小  $\varepsilon_b$ 。

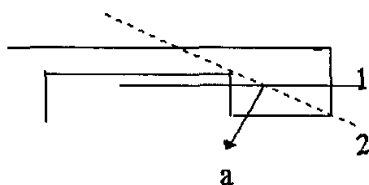


图 4-7 封装基准面的选择

$\varepsilon_b$  是质量块的质心偏离梁的中平面，惯性力产生弯矩造成的应变，要减少它，可以从传感器的基准面考虑。如图 4-7 所示，在封装的时候以线 1 表示的平面取向作为传感器的封装基准面很方便，但是上面的分析得到会造成很大的横向效应，封装时采用以线 2 表示的面作为封装基准面，若传感器受到横向加速度作用，产生的惯性力在线 2 与梁根部确定的平面内，消除了第二种效应。

## 4.7 信号系统组成

图 4-8 是新型光纤光栅振动传感器的信号处理原理框图。由激光器 LD 发出 1300nm 的激光注入到 3dB 的方向耦合器中，图中下一束光由于质量块 m 对光栅的挤压和拉伸，使得经过全反射面反射的光谱中含有加速度信息；两路光在耦合器重新汇聚。重新耦合后的



信息经过光电探测器 PIN 转换为电信号，由于光强很弱，大约在几十微瓦，PIN 的光电流也只有几十微安，所以加了一级前置转换放大，输出电压信号，经过隔直电容取出交流成分再放大；计算机对放大后的信号进行采集、A/D 转换，最后输出传感器对结构振动信号的响应并进行分析。



图 4-8 光纤光栅振动传感器信息流程图

## 第5章 光纤Bragg光栅振动传感器的应用

基于新型光纤光栅传感器的设计思想，本章通过结构参数的优化设计，实验研究了光纤光栅地震检波器和运用于大型工程结构健康监测的加速度传感器，显示出良好的应用前景。

### 5.1 光纤光栅振动传感器结构尺寸确定

从第四章分析得：

$$\begin{cases} S = \frac{9.36\lambda_p Ma_1}{Eb_1 h_1^2} \\ \omega_0 = \sqrt{\frac{Eb_1 h_1^3}{a_1(2a_1^2 + 6a_1 a_2 + 3a_2^2)M}} \end{cases} \quad (5-1)$$

式 5-1 显示：灵敏度  $S$  与梁厚的平方成倒数关系，所以主要通过改变悬臂梁的厚度来改变传感器的灵敏度。

在实际参数的选择时候，要综合考虑灵敏度和频率特性的要求，在设计中采用灵敏度、频率的乘积的优值来确定实际设计参数。由 5-1 可得：

$$S \cdot \omega_0 \propto \frac{a_1}{b_1 h_1 (2a_1^2 + 6a_1 a_2 + 3a_2^2)} \quad (5-2)$$

式 5-2 可以看出，减小梁的长度可以提高传感器的频响而对灵敏度的影响较小，在方便加工的前提下，选取最小尺寸以提高频响，而不影响灵敏度；减小梁宽和厚度可以提高灵敏度，同时使频响下降。在设计时使梁的宽度符合光栅粘贴和加工的最小尺寸，通过调整梁厚来获得所需要的灵敏度和频率值。因此，依据光栅的长度初步确定梁长  $X$  宽  $=60 \times 20 \text{mm}^2$ ，质量块  $M$  取  $20 \times 20 \times 10 \text{mm}^3$ ，得到如下估计数据。

从表 5-1 的数据可以看出,随着梁厚度的增加,传感器的灵敏度系数在减小,要提高传感器的灵敏度系数要通过改变梁的长度和

表格 5-1 传感器估计数据

| 悬臂梁厚度 $h_1(\text{mm})$ | 理想灵敏度 $S(\text{nm}/\text{ms}^{-2})$ | 固有频率(Hz) |
|------------------------|-------------------------------------|----------|
| 1.5                    | 0.701                               | 68.49    |
| 2                      | 0.395                               | 105.44   |
| 2.5                    | 0.255                               | 147.36   |
| 2.8                    | 0.225                               | 219.71   |
| 3.5                    | 0.129                               | 244.11   |
| 4                      | 0.099                               | 298.24   |
| 5                      | 0.0631                              | 416.81   |

宽度以及质量块的参数,本课题中研究的光纤光栅振动传感器的应用是在石油勘探和结构的健康监测方面,根据实际情况,选择如下结构尺寸。

表格 5-2 传感器结构尺寸

| 传感器 | 梁 长<br>(mm) | 梁 宽<br>(mm) | 梁 厚<br>(mm) | 质量块<br>长(mm) | 质量块<br>宽(mm) | 质量块<br>厚(mm) |
|-----|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 1   | 60          | 20          | 2.8         | 20           | 20           | 10           |
| 2   | 60          | 20          | 1           | 20           | 20           | 5            |

## 5.2 光纤 Bragg 光栅振动传感器的应用

### 5.2.1 用于石油勘探领域

#### 一、地震检波器的发展现状和发展方向

随着油气勘探从找构造油气藏向岩性油气藏、从间接找油气向直接预测油气藏方向发展,对地震勘探的要求也越来越高。特别是对地震的分辨率要求,利用地震属性对油气藏进行检测,更为强烈。目前,地震仪器性能有了大幅度的提高,它的等效输入噪声已达到 UF 级,地震激发、观测方式也取得了较大的发展,使地震勘探技术

也有了长足的进步。但是，用于接收地震信号的检波器（即传感器）却没有大的突破，仍然沿用传统的机电转换模式和模拟信号传输，在性能上存在严重的不足，当前检波器存在的问题如下<sup>[19]</sup>：

(1)、检波器灵敏度太低：随着仪器数字化的发展，仪器的动态范围已经达到 100 多分贝，可以满足记录微弱的地下反射信号，提高仪器的记录能力。但是，我们使用的检波器灵敏度只能达到 50-60 分贝，浪费了仪器的记录能力，作为地震波接收的第一道工序，就把地下微弱的反射信号拒之门外，显然这是不可行的。

(2)、检波器抗干扰能力太差：

(3)、检波器不能进行高频提升

(4)、检波器与地面耦合性差：

(5)、检波器不具备自动跟踪地层反射波能量衰减：

(6)、现场施工检波器组合图形复杂，组合个数太多：

针对上述问题，国内外对检波器的改造方面已经作了大量的研究工作，为适应地震勘探新技术发展的需要，出现了涡流检波器、高灵敏度检波器和加速度检波器，为适应岩性勘探需要出现了三分量检波器，为适应滩海、极浅海和深海地震勘探需要出现了高性能压电检波器，这些新型的检波器在提高灵敏度和频率响应等方面，都比常规的检波器优越的多，但始终没有脱离常规检波器所存在的弊病。因此，检波器的发展目标，应从勘探的精度与地质任务要求和生产实践中的需要出发，综合考虑：既要满足不同勘探精度与地质任务要求，又要克服常规检波器存在的不适应性，对改造的新型检波器应具备以下条件<sup>[19]</sup>：

(1)、要求高灵敏度和大动态范围。特别是从 12 H z — 200 H z 范围的灵敏度要达到 100 d b — 120 d b 。

(2)、要有较强的抗干扰能力和具有一定的智能作用。对规则干扰波，如：面波、声波、浅层折射波等干扰，直接不允许进入仪器。对随机干扰波，如：50 H z 工业电、天磁电干扰、空间射频干扰、突发性的单脉冲强信号等，具有抑制作用或屏蔽作用。

(3)、具有补偿功能。一个是高频信号能量补偿，另一个是深层

能量衰减补偿。

(4)、提高与大地最佳耦合作用。

(5)、谐波失真小。

(6)、在检波器上直接实现数字化。

当前,国内外努力推出的检波器新产品还称不上是新一代检波器,因为还未摆脱动圈式机电转换的原理,其性能和指标也未能以数量级的突破。近年来的地震检波器的发展主要集中在光纤、微机械电子传感元件和陆用压电材料上。综上所述,检波器的发展趋势主要为:高分辨率、大动态范围、抗干扰、最佳阻尼、高灵敏度、谐波失真小、体积小、重量轻、数字化、高采样率、耦合性好、适应领域广。目前,I/O公司推出的超低噪声的MST加速度传感器,它属于微机械电子传感元件。国内正着手研制压电检波器和光纤数字检波器。到目前为止,还没有应用于地震勘探现有的这种高灵敏度、高分辨率、抗干扰能力强的光纤数字地震检波器。因此本文的研究将开拓地震勘探领域的新局面,具有国内外领先的科学技术和巨大的市场需求,将产生良好的经济效益。

## 二、光纤 Bragg 光栅地震勘探系统的总体设计思路

通过对现有检波器的工作原理、性能及参数的分析和认识,对新型光纤 Bragg 光栅地震勘探系统的总体设计思路从以下几个条件考虑<sup>[42]</sup>:

(1)、在检波器中(或采集站中),应具备模/数转换系统,具有线性放大、高、低截频、滤波、去噪特性的功能。

(2)、实现信号传输过程数字化的功能。

(3)、提高单个检波器的灵敏度和动态范围,克服现场大面积组合的弊病。

(4)、具有自动跟踪高频信号能量补偿和深层能量衰减补偿功能,作到浅、中、深能量基本平衡。

(5)、具有对有效信号和干扰信号初步判断的智能功能、最大限度抑制平干扰,突出有效信号。

(6)、具有自动平衡或检测检波器与大地耦合特性功能。

(7)、具有自动检测检波器工作状态的功能。

(8)、拟定新型检波器的频宽重点在 200Hz 以内。因为地震勘探的分辨能力，主要在 200Hz 以内，太高了既增加了施工难度，提高了勘探成本，也给处理和解释带来难度，实现检波器改造也很困难。

针对上述要求，文中研制了传感器 1，并进行了与常规压电检波器的对比实验。

### 三、 光纤 Bragg 光栅地震检波器与压电检波器的对比实验

压电式检波器在海洋地震勘探中广泛使用。这种检波器是根据某些物质的压电效应制成的。当沿一定方向对某些电介质施力而使其变形时，介质内部就产生极化现象。压电检波器正是利用这种压电效应，将地震波引起的水压变效应转变为电信号的一种机电转换装置。很多物质都具有压电效应，如天然石英晶体，人造压电陶瓷，锆钛酸铅等。本实验中选取的压电检波器是用人造压电陶瓷做成的，其性能参数指标如下所示：自然频率  $10\text{Hz} \pm 15\%$ ，灵敏度  $6.76\text{volts/bar} \pm 1.5\%$ ，灵敏度在工作深度内变化小于 2dB，阻尼系数  $0.70 \pm 2\%$ ，电阻  $3677 \pm 4\%$ 。

其实验结果如图 5-1 所示，图中光纤 Bragg 光栅地震检波器的信号是从解调仪里 A/D 转换后的电信号直接取出接到数字信号采集装置中，所以它对应的变化量为电压 mv。

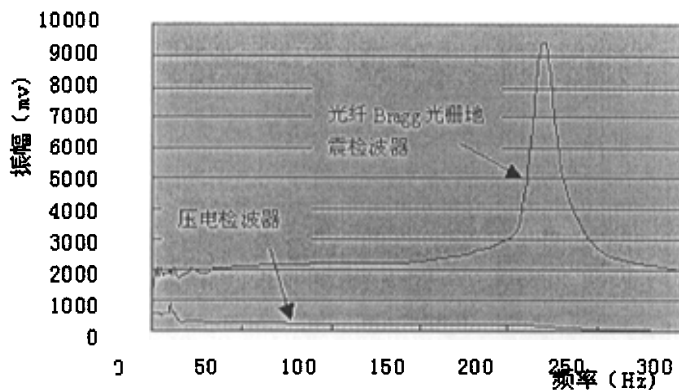


图 5-1 光纤光栅振动传感器与压电传感器对比

从上述对比结果可以看出, 光纤 Bragg 光栅地震检波器比压电检波器不仅具有高的灵敏度系数, 并且动态范围也足以实现地震勘探领域的不同频率段的需求, 在地质石油勘探领域具有广阔的应用前景。

### 5.2.2 用于桥梁结构健康监测的光纤 Bragg 光栅振动传感器

#### 一、 基于振动测试的结构健康监测概况<sup>[20,21,22,23,24,25,26,27,28]</sup>

早在第二次世界大战以前, 人们久考虑到了桥梁的修复和检测, 但是没有完好的标准和系统的规程, 由于不断发生桥梁的失效和倒塌事故, 从五十年代开始美国和其它一些国家建立了桥梁检测的一些标准, 于是产生了第一代的桥梁安全检测。近几十年来, 针对不同类型的桥梁损伤, 如: 钢材腐蚀、疲劳裂纹、预应力松弛、桥梁整体倾斜或变形等等, 国内外桥梁、土木、机械等各领域研究人员提出了各种各样的检测方法。传统的检测手段可以对桥梁的外观以及某些结构特性进行监测, 检测的结果一般也能部分地反映结构的当前状态, 但是却难以全面的反映桥梁的健康状况, 尤其是难以对桥梁的安全储备以及退化的途径作出系统的评估。此外常规的检测技术也难以发现隐秘构件的损伤。于是近十年来, 国内外学者一直在寻找一种能适用于复杂结构得整体探伤评估方法。目前得到普遍认同得一种最有前途的方法是结合系统识别、振动理论、振动测试技术、信号采集与分析等跨学科技术的试验模态分析法。这种方法在发达国家已被广泛用于航空、航天、精密机床等领域的故障诊断、何载识别和动力学修改等问题之中。

基于振动试验进行结构安全检测是属于整体的评估方法, 其基本思路是首先探测出结构振动响应或结构动态特性的变化, 然后利用结构固有频率的特性如特征方程, 振型的正交性等建立结构动态特性变化于结构参数变化的关系, 进而判定结构损伤的位置和程度。利用结构的振动测量信号进行结构损伤检测是目前国内外研究的热点, 虽然该方法已在工程中得到应用, 并且取得了长足的进步, 但是要用于象建筑和桥梁等复杂结构的损伤检测, 仍有不少问题有待

解决。主要问题有：测量噪声，模型误差，环境条件的不确定性，测量数据的不完整等。

国内一些单位开发的高灵敏度低频振动速度传感器能给出较满意的测量结果，但是由于是电类传感器容易受到外界严重的干扰，使得给出信号的信噪比相当大，因此开发出新型的光纤 Bragg 光栅振动加速度传感器来进行结构健康监测是具有广泛的现实意义。

## 二、光纤 Bragg 光栅振动加速度传感器的设计思想

结合重大工程结构中的实际应用需求，要在现场、在重大工程结构的原型上做微小的振动测量，首先应有高性能的传感器。对传感器的基本要求是：

- ◆ 其工作频率的低端应低于机械的低阶固有频率；突发性极端事件发生后，能从桥梁的损伤中迅速识别出非结构损伤、非关键性结构损伤以及严重的结构损伤；

- ◆ 有足够高的灵敏度；能够在低频段测量出结构上小至微米、亚微米级微振幅的能力；在长期的健康监测和状态评估中，能通过定时开启系统，利用交通、风或者其它低幅值振动输入进行结构动力测试，为维修加固工作明确指出结构的损伤位置、程度、性质以及进行承载能力评估，同时记录结构变化情况，逐渐更新桥梁健康数据库；

- ◆ 坚固耐用，抗冲击，便于运输，能在现场恶劣的环境下工作；
- ◆ 便于在结构上安装，在使用时不需要额外调整（调零）；
- ◆ 传感器和测量系统的价格较低。

## 三、光纤 Bragg 光栅振动加速度传感器的实验

由于实验条件和时间上的限制，没有与传统的加速度传感器进行对比实验，对自行研制的光纤光栅振动加速度传感器只进行了简单的试验。

实验装置仍然采用第三章介绍的图 3-6 (a) 3-6(b)。将研制的光纤光栅振动加速度传感器置于实验台上，用人说话的频率来模拟结构在使用过程中产生的低频信号。实验时人站在距离振动台 5 米以外的位置说话，发出的声音信号通过空气的传播到达传感器的质量



块上，使得测量光栅的波长发生变化。采集到的信号如图 5-2 所示。

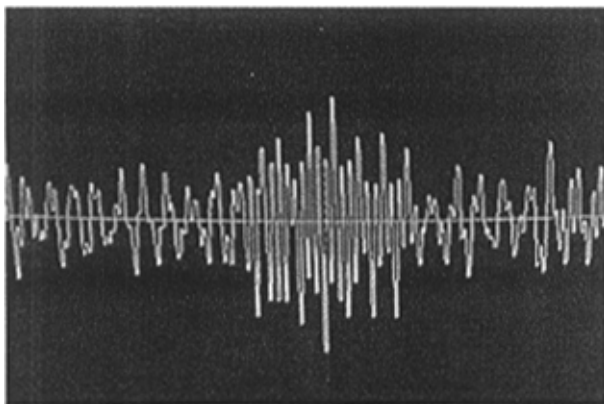


图 5-2 光纤光栅振动加速度传感器实验结果

### 5.2.3 其它领域的应用

随着海洋开发事业的发展，解决水下目标的感知和传递的问题越来越受到人们的重视。水声学就是解决海洋中信息的传递和处理的学科，它主要研究声波在水下的辐射、传播与接收，用以解决与水下目标探测和信息传输过程有关的各种声学问题<sup>[43]</sup>。作为信息载体的声波，在海洋中形成的声学的时空结构，成为近代水声学的基础研究内容，而提取海洋中声场信息的结构是我们用来进行水下探测、识别、通讯以及环境监测等的手段。例如，远距离目标的探测，海洋资源开发以及鱼群探测等等。不言而喻，这些军事领域的研究对于国民经济、国防建设和科学研究等方面都具有重要的意义。

光纤传感技术的出现使水声器的发展取得了前所未有的进步，相对于传统的水声器而言，光纤具有以下明显的优点：没有运动部件，不存在磨损，寿命长，启动快；构造简单，可靠性高；耗电小；动态范围宽，但是由于光纤自身的解调方式制约了光纤水声器的发展。光纤光栅是在光纤的基础上发展起来的，它不仅具有光纤的优点，而且克服了光纤的缺点，因此光纤光栅水声器将具有更广泛的

现实意义。

## 第6章 总结与展望

### 6.1 本文的主要结论

光纤 Bragg 光栅振动传感技术的研究具有积极的探索意义。本文通过对现有加速度传感器和振动传感测试技术方法的分析和对比,系统地研究光纤 Bragg 光栅传感技术和振动传感技术,提出了光纤 Bragg 光栅振动传感技术及其振动传感器的设计方法,并设计了一种新型的光纤光栅振动传感器。有关实验研究表明设计的传感器具有较高灵敏度系数,较小横向效应,有效克服温度漂移等优点,说明光纤 Bragg 光栅振动传感技术具有广阔的应用前景。

本文的主要结论有以下几个方面:

1. 光纤光栅传感技术用于振动传感具有明显的技术优势。

本文在分析现有的加速度传感器的基础上,通过对光纤 Bragg 光栅传感技术和解调技术的深入研究,论证了光纤光栅振动传感器技术的可行性。

2. 有关的实验研究和有限元方法的分析表明:本文提出的光纤光栅振动传感器的一般设计方法是完全可行的,具有指导意义。

3. 有关的理论分析说明:用解调光栅进行温度补偿和双光栅测量是有效克服温度漂移、增加灵敏度系数的理想技术途径,普遍适用于光纤光栅加速度传感器。

3. 有关的实验研究和分析论证了本文新型的光纤光栅振动传感器具有灵敏度系数高,较小横向效应,能有效克服温度漂移等优异传感性能。

4. 新型光纤光栅振动传感技术极其传感器具有广阔的应用前景。基于这种新型光纤光栅传感器的设计思想,通过结构参数的优化设计,实验研究了光纤光栅地震检波器和运用于大型工程结构健

康监测的加速度传感器，显示了良好的传感性能，具有较高的学术研究意义和很好的应用价值。

## 6.2 待进一步研究的工作

由于受实验条件以及时间的限制，本课题的某些方面还需要进一步的研究：

1. 基于这种新型光纤光栅振动传感器的设计思想，进一步进行结构参数的优化，开发出系列的光纤光栅振动传感器。
2. 采用有限元方法对传感结构的动力学特性分析，缩短研制时间优化、传感结构、提高传感性能。
3. 在对光纤光栅振动传感器的低频扩展中，还有待于继续研究，用信号恢复技术的方法可以进行深入的研究和应用，使研制的新型光纤光栅振动传感器能够根据谐振频率、信号的强弱、振动测试仪采集数据的特点和要求进行线性放大或压制，这样可适用于多种振动源的匹配。

## 参考文献

- [1]高飞. 振动测量与信号分析. 西北: 西北工业大学出版社, 1989. 1-16
- [2]陈涛. 虚拟振动测试系统的研究. 河北工业大学硕士学位论文.2002.3
- [3]张思. 振动测试与分析技术. 北京:清华大学出版社,1992. 292-305
- [4]李德葆, 张元润. 振动测量与试验分析. 北京:机械工业出版社,1992. 200-225.
- [5]孙玉声. 振动传感器. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.11
- [6]候国章, 赵学曾. 测试与传感技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社. 1998,12. 56-100
- [7]蒋瑞. 振动、噪声信号处理系统. 大连理工大学硕士学位论文.2000.3
- [8][英]B.卡尔肖. 光纤 Bragg 光栅传感及信号处理. 成都: 成都电讯工程出版社,1999.8. 10-16
- [9]廖延彪. 光纤光学. 北京: 清华大学出版社,2000.197-224
- [10]姜德生. 智能材料与结构、器件. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000.
- [11]李浩, 小量程悬臂梁结构的微机械压阻式加速度传感器研究 中国科学院上海冶金研究所 2001. 3
- [12]盛秋琴、施可彬、高立模等, 光纤光栅振动传感匹配检测方法的研究, 光学学报 2002.07.
- [13]刘瑞复, 史锦珊. 光纤传感器及其应用. 北京: 机械出版社, 1987.8 21-140
- [14]靳伟, 廖延标, 张志鹏. 波导光学传感器: 原理与技术, 科学出版社, 1998.
- [15]方远羽, 陈安宁, 董卫平. 振动模态分析技术. 长沙:国防工业出版社,1993
- [16]张伟刚, 开桂云, 盛秋琴, 冯德军. 光纤光栅谐振传感器的理论与实验分析. 广西工学院院报, 2000.12. No.4 Vol.11
- [17]王育, 胡敏强. 强磁场高电压环境下使用的光纤振动传感器设计. 东南大学学报(自然科学版), 2000.9. No.5 Vol.30
- [18] K O Hill, G Meltz. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. Journal of Lighwave Technology, 1997,15. 1263-1274
- [19]孙传友, 番正良. 地震勘探仪器原理. 山东:石油大学出版社,1996.12 .54-120
- [20]Nellen, M.,et al. "Optical fiber Bragg grating for structural monitoring in civil engineering".16th Congress of IABSE on Structural Engineering for

- Meeting Urban Transportation Challenges, 2000.
- [21]周智, 欧进萍. 土木工程智能健康监测与诊断系统. 传感器技术, 2001, 20(11): 1-4
- [22]郑蕊, 李兆霞. 基于结构健康监测系统的桥梁疲劳寿命可靠性评估. 东南大学学报, 2001, 31(6): 71-73
- [23]Measures R.M., et al. "Fiber-optic Bragg gratings for bridge monitoring". Cement Concrete Composites 1997,9. 21-23
- [24]秦权. 桥梁结构的健康监测. 中国公路学报, 2000, Vol.13, No.2. 37-42
- [25]张启伟. 大型结构健康检测概念与检测系统设计, 同济大学学报 2001 年 1 月 29 卷 1 期.
- [26]SergeMMelle,KexingLiu,RaymondMMeasures.Apassivewavelengthdemodulationsystemforguided-wavBragggratingsensors[J].IEEEPhoto.Tech.Lett.1992,4(5):516-518.
- [27]MADavis,ADkersey.All-fiberBragggratingstrain-sensordemodulationtechniqueusingawave-lengthdivisioncoupler[J].Electron.Lett.,1994.30(1):75-77.
- [28]David T.LAU,M.S.CHEUNG and W.C.LI, Dynamic Monitoring of the Confederation Bridge, 12WCEE,2000.
- [29]路德明. 水声换能器原理, 青岛海洋大学出版社 2001, 3
- [30]R Maaskant, T Alavie, R Measures etal. Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring[J]. Cement and Concrete Composites, 1997,19(1):21-33
- [31]刘迎春. 传感器原理设计与应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999. 745-200
- [32]龙驭球. 有限元法概论(第 1 版). 北京: 清华大学出版社, 1978. 182-224
- [33]A D Kersey, M A Davis, H J Patrick. Fiber Grating Sensors Journal of Lightwave Technology. 1997, 15 1442-1463
- [34]苑立波. 光纤光栅原理和应用. 光通信技术, 1998: 22(1). 70
- [35]冯丹琴, 盛秋琴, 赵启大. 提高光纤光栅应变传感和振动传感测量精度的一种方法. 传感技术学报, 2001: 6 (2)
- [36]Anderse E Y, Pedersen. Structure monitoring of the Great Belt east Bridge . In: Jon Krokeborg, ed. Proceedings of the Third Symposium on Strait Crossing . Rotterdam: Balke ma . 1994. 54-62
- [37]Myroll F. Dibiagio E. Instrumentation for monitoring the Skarmsunder Cable-stayed Bridge. In: Krokeborg, ed. Proceedings of the Third Symposium on Strait Crossing . Rotterdam: Balke ma . 1994. 207-215

- [38]Ferdinand P. "Mine operating accurate stability control with optical fiber sensing and Bragg grating technology". The BRITE-EURAM STABILOS project.J. Light wave Technology: 1995,13. 303-313
- [39]Fisher N. "Probe for measuring ultrasound fields using in-fibre Bragg grating". Proc. SPIE: 1998, 3555, 451-456
- [40]Vohra S.T. "Sixteen channel WDM fiber Bragg grating dynamic strain sensing system for compsite panel slamming tests". Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12), Williamsburg, VA, USA, 1997, 662-665
- [41]Rao Y.J. "In-fiber Bragg grating flow-directed the modulation catheter for cardiac monitoring". Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12), Williamsburg, VA, USA,1997. 354-357
- [42]梁磊, 周雪芳. 新型光纤 Bragg 光栅地震检波器的研究, 承德石油高等专科学校学报 Vol.5 No.1 2002.3.
- [43]孙圣和, 王廷云, 徐影. 光纤测量与传感技术, 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [44]陈宏, 鲍敏杭. 硅微机构加速度传感器空气阻尼的研究. 半导体学报, 1995, 16 (12)
- [45]杨大智. 智能材料与智能系统. 天津: 天津大学出版社, 2000.12
- [46]关铁梁. 智能材料中特种光纤的研究进展. 光通信技术 1994.18 (4): 329~333
- [47]关铁梁. 智能材料中光纤传感技术的研究进展. 光通信技术 1995.19 (1): 50~55
- [48]关铁梁. 光纤传感技术在物理测量中的应用.物理 1984.13 (8): 477~481
- [49]关铁梁. 智能材料中光纤传感检测技术. 传感技术学报 1995.8 (3)
- [50]季馨. 电子设备振动分析与试验. 南京: 东南大学出版社, 1972, 10
- [51]Morey W W. et al. Fiber optic Bragg grating sensors[A]. Proc SPIE[C]. 1989,1169:98-107
- [52] L.K. Cheng, B.W. Oostdijck. High-speed structural monitoring using a Fiber Bragg Grating sensor system. IEEE. 2002, (1): 215-218.
- [53] Slowik V,et al. Fibre Bragg Grating Sensors in Concrete Technology[J]. LACER,1998,3:109-119.
- [54] Venkat Yenkatasubrananian,King Chan. A Neural Network Methodology for Process Fault Diagnosis. Journal of AIChE, 1989,35(12): 1993-2002.
- [55] Xiangkai Zeng, Yunjiang Rao, Yiping Wang and etl. Transverse Load,Static Strain,Temperature and Vibration Measurement Using A Cascaded

- FBG/LPFG Sensor System. IEEE. 2002, (1): 199-202.
- [56]王龙甫. 弹性理论. 科学出版社. 1984, PP: 384-402.
- [57]杨绪灿, 金建三. 弹性力学. 1986, PP: 222-244.
- [58]吴家龙. 弹性力学. 高等教育出版社. 2001, PP: 54-141.



## 附录一：石英光纤光栅的光学参数

|                 |                                 |
|-----------------|---------------------------------|
| ◆ 衰减            | $\leq 0.40\text{dB/km}$         |
| ◆ 色散            | $\leq 3.5\text{Ps/km.nm}$       |
| ◆ 模场直径          | $9.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$       |
| ◆ 包层直径          | $125 \pm 2 \mu\text{m}$         |
| ◆ 截止波长          | $1250 \pm 70 \text{ nm}$        |
| ◆ 涂层直径          | $245 \pm 10 \mu\text{m}$        |
| ◆ 杨氏模量          | $7.3 \times 10^{10} \text{N/m}$ |
| ◆ 泊松比           | 0.17                            |
| ◆ 光弹系数 $P_{11}$ | 0.126                           |
| ◆ 光弹系数 $P_{12}$ | 0.27                            |
| ◆ 折射率 $n$       | 1.458                           |

## 附录二：光纤光栅振动传感器参数实验结果

$$1. m=10g \quad L=12mm \quad \lambda_B=1300.560nm$$

$$\text{则由 (3-17) 得: } \frac{\Delta\lambda_B}{a} = 8.707 \times 10^{-4} m\lambda_B = 0.01132nm/m \cdot s^{-2}$$

而光纤 FBG 解调仪可检测小至 0.1pm 的波长, 故可测量的最小加速度为:

$$a_{\min} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{0.01132} = 0.00883m/s^2$$

由式 (3-19) 得系统的固有频率为:

$$f_n = \frac{4.76}{\sqrt{mL}} = \frac{4.76}{\sqrt{10 \times 12 \times 10^{-6}}} = 434.5Hz$$

从而得到系统的工作频率是: 0~130.5 Hz 和 564.85~651.75 Hz。

$$2. m=10g \quad L=24mm \quad \lambda_B=1300.560nm$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{a} = 8.707 \times 10^{-4} m\lambda_B = 0.01132nm/m \cdot s^{-2}$$

$$a_{\min} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{0.01132} = 0.00883m/s^2$$

$$f_n = \frac{4.76}{\sqrt{mL}} = \frac{4.76}{\sqrt{10 \times 24 \times 10^{-6}}} = 307.25Hz$$

系统的工作频率是: 0~92.18 Hz 和 399.4~460.9 Hz。

下面是对上述两组结构的传感器进行实验所得到的频率特性图 1 和图 2。

$$3. m=12g \quad L=24mm \quad \lambda_B=1300.732nm$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{a} = 8.707 \times 10^{-4} m\lambda_B = 0.01359nm/g$$

$$a_{\min} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{0.01132} = 0.007358g$$

$$f_n = \frac{4.76}{\sqrt{mL}} = \frac{4.76}{\sqrt{12 \times 24 \times 10^{-6}}} = 280.5Hz$$

系统的工作频率是：0~84.15 Hz 和 364.65~420.75 Hz。

$$4. \quad m=39.1\text{g} \quad L=24\text{mm} \quad \lambda_B=1301.001\text{nm}$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{a} = 8.707 \times 10^{-4} m \lambda_B = 0.04429 \text{nm} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$a_{\min} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{0.04429} = 0.002258 \text{m} / \text{s}^{-2}$$

$$f_n = \frac{4.76}{\sqrt{mL}} = \frac{4.76}{\sqrt{39.1 \times 24 \times 10^{-6}}} = 155.39 \text{Hz}$$

系统的工作频率是：0~46.62 Hz 和 202.01~233.09 Hz。

图 3 和图 3 是上述两组传感器的频率特性图。

$$5. \quad m=45\text{g} \quad L=24\text{mm} \quad \lambda_B=1300.968\text{nm}$$

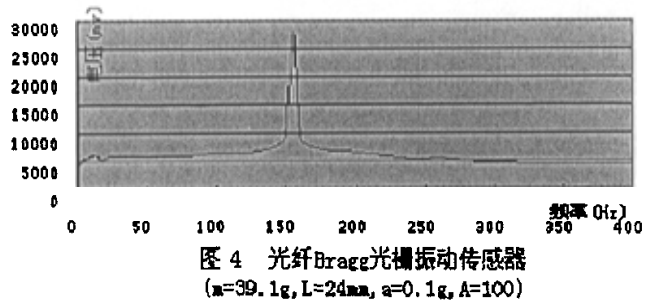
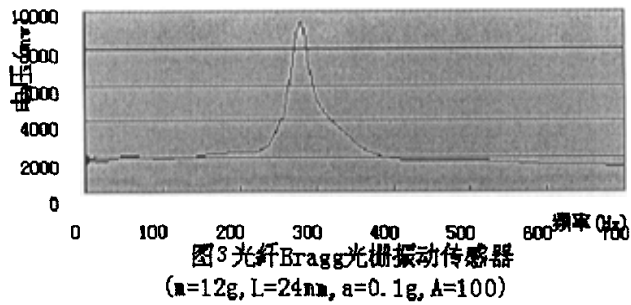
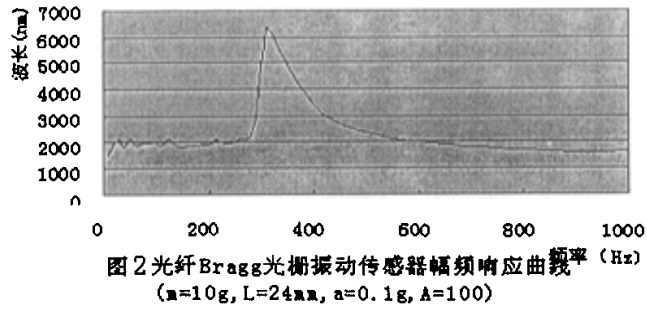
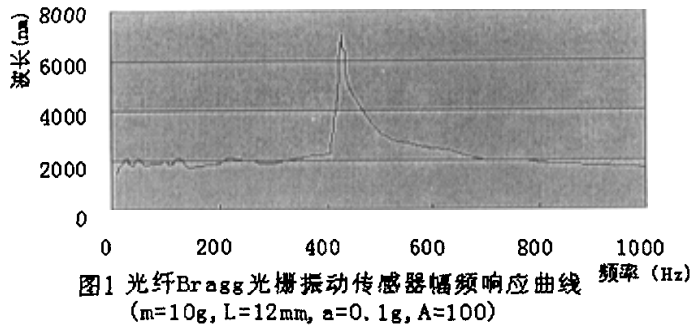
$$\frac{\Delta\lambda_B}{a} = 8.707 \times 10^{-4} m \lambda_B = 0.05097 \text{nm} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$a_{\min} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{0.05097} = 0.00196 \text{m} / \text{s}^2$$

$$f_n = \frac{4.76}{\sqrt{mL}} = \frac{4.76}{\sqrt{45 \times 24 \times 10^{-6}}} = 144.8 \text{Hz}$$

系统的工作频率是：0~43.45 Hz 和 188.25~217.21 Hz。

上述几组传感器的实验都是在同一个加速度下测量到的频率特性图，为了验证传感器的稳定性，对这个传感器进行的是不同加速度下的实验，由于受到实验仪器精确度的限制，只能给出最小值为 0.1g，所以对该传感器分别施加了 0.1g、0.5g、1g 的加速度，其实验结果如图 5、图 6 和图 7 所示。



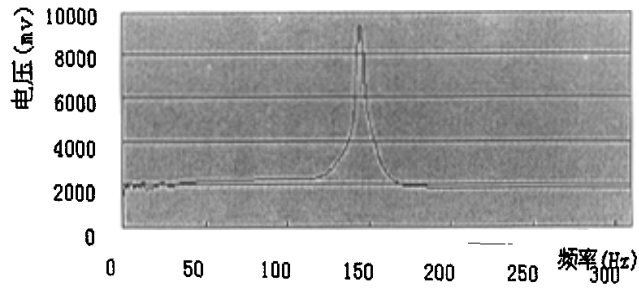


图5 光纤Bragg光栅振动传感器  
( $m=45\text{g}$ ,  $L=24\text{mm}$ ,  $a=0.1\text{g}$ ,  $A=40$ )

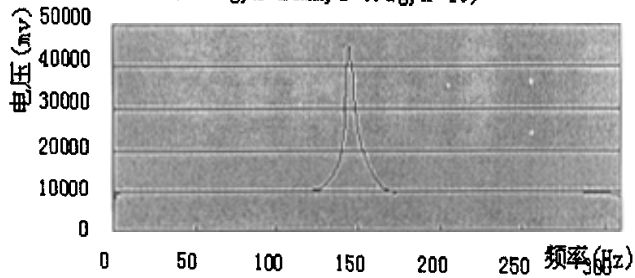


图6 光纤Bragg光栅振动传感器  
( $m=45\text{g}$ ,  $L=24\text{mm}$ ,  $a=0.5\text{g}$ ,  $A=40$ )

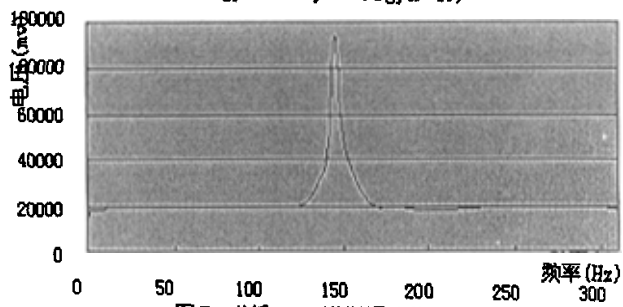


图7 光纤Bragg光栅振动传感器  
( $m=45\text{g}$ ,  $L=24\text{mm}$ ,  $a=1\text{g}$ ,  $A=40$ )

## 攻读硕士学位期间发表的论文

- 1 姜德生, 梁磊, 周雪芳, “重大工程结构健康监测和诊断的光纤光栅振动传感技术” 中日结构减振与健康监测学术研讨会暨第三届中国结构抗振控制年会, 中国上海 2002.12.10。
- 2 姜德生, 梁磊, 周雪芳, “光纤光栅机敏混凝土的研究” 硅酸盐通报, 2003.6
- 3 Jiang DeSheng, Liang Lei, Zhou Xuefang, “The Compatibility in Optic Fiber Smart Concrete and structure” Journal of WuHan university of technology, 2003.1
- 4 姜德生, 梁磊, 周雪芳, “FBG 传感技术在工程结构监测中的应用” 传感器技术 2003.6
- 5 姜德生, 梁磊, 周雪芳, “光纤光栅技术在实验力学中的应用” 南昌大学学报 2003.6
- 6 姜德生, 梁磊, 周雪芳, “光纤 Bragg 光栅传感器在冷饭盒大桥的应用” 世界桥梁 2003.6
- 7 姜德生, 梁磊, 南秋明, 周雪芳, “新型光纤 Bragg 光栅锚索预应力监测系统的研究” 武汉理工大学学报 2003.7
- 8 姜德生, 梁磊, 周雪芳, “FBG 传感技术在大坝安全监测中的应用研究” 水利学报 (已录用)
- 9 梁磊, 姜德生, 周雪芳, “光纤 Bragg 光栅传感技术在桥梁预应力监测中的应用研究” 北京工商大学学报 2003.6
- 10 梁磊, 姜德生, 周雪芳, “光纤 Bragg 光栅传感器在土木工程中的应用” 洛阳工学院学报 2003.6
- 11 梁磊, 姜德生, 周雪芳, “光纤 Bragg 光栅传感器在国内外桥梁工程中的应用现状” 光学与光电子技术 2003.6
- 12 梁磊, 周雪芳, 陈大雄, “基于大型水泥磨机振动监测的光纤 Bragg 光栅振动传感器的研究” 中国水泥 2003.

- 13 梁磊, 周雪芳, 信思金, “新型光纤 Bragg 光栅振动传感技术”  
武汉理工大学学报 2003. 6
- 14 梁磊, 周雪芳, 信思金, “小波分析法在光纤光栅振动传感器标定中的应用” 湖北工学院学报 2003. 6
- 15 梁磊, 周雪芳, “新型光纤 Bragg 光栅地震检波器的研究” 承德石油高等专科学校学报 2003. 1
- 16 梁磊, 罗裴, 周雪芳, “光纤 Bragg 光栅传感技术用于应变模态检测的研究” 洛阳工学院学报 2003. 6
- 17 梁磊, 罗裴, 周雪芳, “粘贴式光纤光栅应变传感器动态特性的实验研究” 武汉工学院学报 2003. 6

## 研究生期间参与的工程项目

- 1 上海宝钢一炼钢厂 450 吨吊车梁加固检测
- 2 长沙步行街好又多超市加固检测
- 3 海口世纪大桥安全健康监测系统
- 4 贵州冷饭盒大桥安全健康监测系统
- 5 巴东长江大桥安全健康监测系统
- 6 襄樊汉江四桥锚索预应力监测系统
- 7 深圳市民中心大型屋盖安全监测系统



## 致 谢

本文是在导师姜德生教授、梁磊博士的悉心指导和热情鼓励下完成的，在作者攻读硕士学位期间，不论学习、科研、还是日常生活无不得到恩师极大的帮助和关怀，使我不仅学到了丰富系统的专业知识和独立进行科学工作研究的方法，而且，导师姜教授渊博的知识、严谨的治学态度、求实的工作作风、勇于探索的精神以及对科学孜孜不倦的追求，使我受益匪浅。尤其是恩师敏锐的学术眼光、严肃认真的科学态度和一丝不苟的工作作风，都是学生学习和效仿的楷模。学生再次对恩师多年的培养和教育表示衷心的感谢。

感谢梁磊老师三年来对我的教育、帮助和鼓励，尤其是梁老师兢兢业业精神令我受到极大的鼓舞，他将一直影响和指导我以后的事业和学业。在本文即将完成之际，学生衷心的感谢老师的培养和鼓励。

在完成硕士学业期间，感谢光纤中心王立新、何伟、李维来等老师给我提供的帮助。同时也得到了机电学院黄之初教授、龚文老师、贾宏宇同学，理学院刘奕清老师、孙明清老师的大力帮助，在此对他们表示衷心的感谢。

感谢我的家人，特别要感谢我的父母，感谢他们不辞辛劳，用自己的心血抚养和教育了我，并为我提供了来之不易的求学机会。

感谢实验室的南秋明、汪术文、罗裴、陈大雄、赵申，在三年的学习和工作中给予了我支持和帮助，我将深深难忘。

感谢我的好友刘文亮、樊冰、林华珍、张青枝、许建凤同学，三年来他们给予了我一个开心的学习生活环境，并与我进行了许多有益的讨论，使我受益非浅。

最后，谨以此文感谢关心和支持我的所有人。