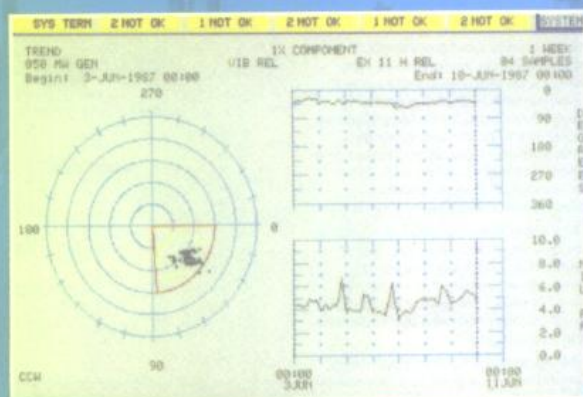


机械设备振动监测与故障诊断

主编 陈 进



上海交通大学出版社

TH113.1

C44

445483

机械设备振动监测与故障诊断

陈 进 主编

上海交通大学出版社

机械设备振动监测与故障诊断

陈 进 主 编

上海交通大学出版社出版发行

上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030

电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

立信会计常熟市印刷联营厂·印刷

开本:787×1092(mm)1/16 印张:16.5 字数:403 千字

版次:1999 年 4 月 第 1 版

印次:1999 年 4 月 第 1 次

ISBN 7-313-02174-7/TH·071

定价:20.50 元

本书任何部分文字及图片,如未获得本社书面同意,
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误,请寄回本社更换。)

内 容 简 介

这是一本以振动信号测试和分析为基础，系统介绍机械设备状态监测与故障诊断基本理论、主要技术和方法的学术著作。

本书分为三个篇。第一篇简要介绍振动与测试的基本概念，包括传感器及测量方法的选择；第二篇着重描述了基于快速傅立叶变换(FFT)的信号处理基础知识，有机地、简明扼要地阐述了数字信号处理中的几个重要概念；第三篇是全书的核心，分别介绍了机械零部件的故障诊断原理和方法、故障树分析方法、模糊分析方法、故障诊断专家系统以及实用系统等内容。

本书内容系统、完整，较好地反映了基于振动信号处理的故障诊断技术最新进展与成果。本书初稿已作为研究生教材使用多次，可作为高校、研究生教材和参考书，也适合于机械、电力、石化、车辆、钢铁、冶金等专业中从事设备故障诊断的研究和工程技术人员阅读参考。

前 言

机械设备状态监测与故障诊断技术初步形成于 20 世纪 60 年代末, 迅速发展在 70~80 年代, 集大成于 80~90 年代, 它是一项年轻的技术, 是一门既有基础理论, 又有广泛应用背景的正在不断完善和发展的交叉型工程应用性学科。

随着现代化工业大生产的不断发展和科学技术的日益进步, 为了最大限度地提高生产效率和产品质量, 作为主要生产工具的机械设备不断朝大型、高速、强载、连续运转以及结构复杂的方向发展。这样, 在满足生产要求的同时, 设备发生故障的潜在可能性和方式也在相应增加, 并且设备一旦发生故障, 就可能破坏整台设备甚至影响整个生产过程, 造成巨大经济损失, 还可能导致灾难性的人员伤亡和社会影响。于是, 如何确保机械设备的安全正常运行, 就成为现代设备运行维护和管理的一大课题。实践证明, 坚持开展机械设备状态监测、有效地实施故障诊断技术是保障机械设备安全正常运行的重要措施。事实上, 状态监测与故障诊断技术已经逐步成为工业企业中保证生产有秩序正常进行的必不可少的重要环节。另一方面, 广泛推行状态监测与故障诊断技术有利于从根本上改变我国现行的“定期维修”体制, 并逐步走向科学的基于状态监测的“视性维修”或“状态维修”体制。我国目前已将设备诊断技术、修复技术和润滑技术列为设备管理和维修工作的三项基本技术, 可见设备诊断技术在推进设备管理现代化中具有举足轻重的地位。国务院颁布的《全民所有制工业交通企业设备管理条例》明确提出: “要根据生产需要, 逐步采用现代化故障诊断和状态监测技术, 发展以状态监测为基础的预防维修体制”, 指出了设备诊断技术要为维修体制改革服务这一方向。

机械设备状态监测与故障诊断技术是一项与现代化工业生产密切相关的技术, 其重点是研究故障诊断及故障预报的理论、方法以及实施技术。机械设备故障诊断是一个相当复杂的过程, 在多数情况下, 仅依靠单一的方法往往无法有效地解决问题, 因此, 必须从各种相关学科中, 广泛探求有利于故障诊断的原理、方法和手段, 这样就使得故障诊断技术呈现多学科交叉融合这一鲜明的特点。该学科的基础主要包括: 数学、物理、力学、传感器与测试技术、信号处理、电子技术、计算机科学与技术以及机械、转子动力学、磨擦学等, 同时包括了信息科学、人工智能和专家系统等边缘学科。

机械设备状态监测与故障诊断技术的形成与发展过程, 可以大致分为三个阶段: 早期主要是依靠人的感觉(听觉、触觉、视觉)来直接进行状态分析, 或者利用物理或化学的原理和手段, 通过伴随故障出现的各种物理或化学现象来直接检测故障; 在传感器技术、和测试、处理分析技术进步后, 逐步形成了依靠传统的信号分析手段来完成监测与诊断的发展阶段; 再经过前几年的快速发展和学科的深层次交叉渗透, 到今天已经突破了传统的分析方法限制, 在大量吸收相关学科知识的基础上, 形成了以现代信号处理理论、软计算、智能化信息处理以及计算机网络应用为核心的现代机械设备故障诊断技术, 并产生了许多新的研究热点和前沿。

本书共分为三个篇, 比较系统、全面地介绍了基于振动信号测试与分析的机械设备状态监测与故障诊断的基本原理及理论、主要应用技术及方法。第一篇分为两个章节, 简要介绍了振动的基本概念和常用的传感器原理及测试方法; 第二篇由五个章节组成, 有侧重

地、有机地描述了数字信号处理的基础知识,包括信号处理方法分类、信号的各种数字特征计算方法、数字信号处理的基本原理、采样定理以及快速傅立叶变换(FFT)与应用等内容;第三篇是全书的重心,共划分为十个章节,分别介绍了机械设备状态监测与故障诊断技术的发展过程与现状、故障诊断的基本原理及方法、旋转机械常见振动故障分析、轴承与齿轮等机械的故障分析、故障树分析方法、模糊分析方法、故障诊断专家系统的原理和实现技术以及典型故障实用系统等内容。

本书诊断是长期开展机械设备状态监测与故障诊断科研工作、推广和发展故障诊断技术的基础上,在研究生培养和教学以及过去编写的机械故障诊断学研究生讲义的基础上,通过整理、汇编、扩充、提炼以及系统化之后编写完成的。衷心希望本书能对机械设备状态监测与故障诊断学科的发展和技术的应用起到增砖添瓦的作用。但由于作者水平所限,本书中难免存在不当之处和不尽之处,恳请广大读者给予批评指正。

作 者

1999年1月

目 录

第一篇	振动与测试	1
第一章	振动的基本概念	1
第二章	振动测量	4
2.1	传感器	4
2.2	振动参数的测量	9
第二篇	信号处理基础	14
第一章	信号分类	14
1.1	确定性信号	15
1.2	随机信号	16
第二章	随机信号的数字特征	17
2.1	数学期望(均值函数)	17
2.2	均方值	17
2.3	方差(均方差值)	18
2.4	相关函数	18
2.5	均值和方差的计算	19
第三章	信号处理方法分类	21
3.1	按分析域划分	21
3.2	按任务划分	22
3.3	按处理方式划分	22
3.4	按分析手段划分	23
第四章	数学信号处理中的几个重要概念	24
4.1	数字信号处理的基本流程	24
4.2	常用信号分析函数间的关系	25
4.3	采样与采样定理	26
4.4	混叠误差	27
4.5	截断与泄漏	28
4.6	加窗处理	29
4.7	量化与量化误差	31
第五章	快速傅立叶变换(FFT)	33
5.1	离散傅立叶变换(DFT)	33

5.2	快速傅立叶变换(FFT)·····	34
5.3	基于傅立叶变换的重要分析·····	36
第三篇	旋转机械故障诊断方法·····	41
第一章	绪论·····	41
1.1	发展背景·····	41
1.2	故障诊断技术的发展概况·····	46
1.3	故障诊断的由来·····	50
第二章	机械设备故障诊断的基本概念·····	52
2.1	故障的定义和分类·····	52
2.2	故障诊断的定义和知识结构·····	55
2.3	故障诊断的基本过程·····	56
2.4	机械设备故障诊断方法的分类·····	59
2.5	故障诊断中常见的基本参数·····	61
第三章	旋转机械常见振动故障分析·····	64
3.1	引言·····	64
3.2	转子不平衡·····	65
3.3	轴系不对中·····	67
3.4	转子裂纹·····	69
3.5	油膜涡动与油膜振荡·····	71
3.6	转子碰摩·····	75
3.7	旋转失速与喘振·····	76
3.8	振动分析与故障征兆的关系·····	78
第四章	动平衡技术·····	82
4.1	引言·····	82
4.2	刚性转子的动平衡·····	83
4.3	挠性转子的动平衡·····	92
第五章	滚动轴承故障诊断·····	96
5.1	引言·····	96
5.2	滚动轴承的主要故障·····	97
5.3	滚动轴承振动信号的特征·····	98
5.4	滚动轴承故障诊断方法·····	109
5.5	精密轴承故障的光纤诊断技术·····	115
5.6	声发射监测技术·····	116
第六章	齿轮故障诊断·····	119

6.1	引言	119
6.2	齿轮的常见故障	120
6.3	齿轮的振动机理	122
6.4	齿轮故障诊断方法	131
第七章	故障树分析方法	145
7.1	故障树分析的基本概念	145
7.2	故障树的建造	149
7.3	故障树的定性分析	156
7.4	故障树的定量分析	160
第八章	模糊诊断方法	170
8.1	模糊数学的基本知识	170
8.2	模糊诊断矩阵的建立	175
8.3	模糊模式识别故障诊断方法	182
8.4	模糊聚类故障诊断方法	186
第九章	故障诊断专家系统	191
9.1	引言	191
9.2	专家系统的发展概况	194
9.3	专家系统的理想模型	195
9.4	专家系统的基本结构	196
9.5	专家系统的知识表示	199
9.6	专家系统的知识获取	207
9.7	基于知识的推理	212
9.8	专家系统的黑板结构	216
9.9	专家系统的开发工具	220
第十章	状态监测与故障诊断系统	228
10.1	概述	228
10.2	状态监测与故障诊断系统分类	229
10.3	监测与诊断系统的基本构成	231
10.4	定期监测与诊断系统	233
10.5	连续监测与诊断系统	240
	参考文献	251

第一篇 振动与测试

第一章 振动的基本概念

振动是我们日常生活中的一种常见现象。例如，当我们乘坐在开动的汽车上、行进中的火车上或骑在自行车上，就会感觉到振动；工厂中的机器、家里的家用电器(如洗衣机、脱排油烟机等)工作时也会产生振动，并使我们听到嗡嗡的声音。

从力学的角度来看，振动可以定义为：物体围绕某一固定位置来回摆动并随时间变化的一种运动。

图 1-1-1 所示弹簧质量系统中质量块的运动就是一个典型的振动例子。

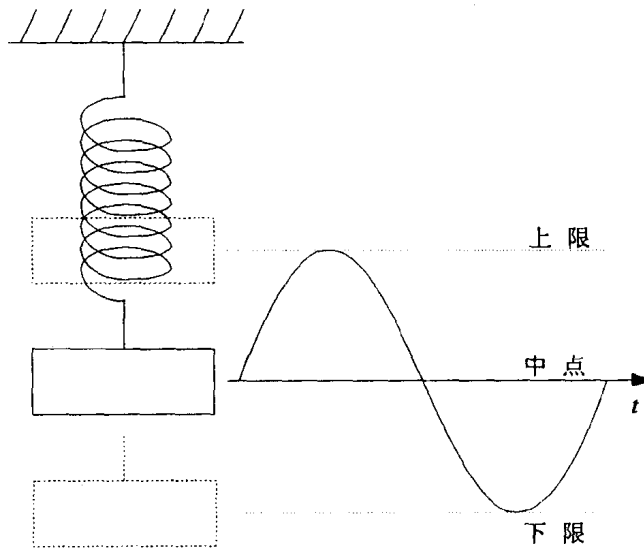


图 1-1-1 质量块运动随时间变化的轨迹

当我们在质量块上作用一个力(例如作用一个向上的力)，让其偏离平衡位置，到达上限位置后，将作用力撤除，于是质量块便会因重力而向下运动，并穿过平衡位置到达某个下限位置，之后又会在弹簧拉力作用下向上运动。这种周而复始的运动就是振动。

根据这样的力学模型，心脏的跳动、肺部的呼吸、潮汐的涨落、柴油机排气管的噪声等都可归到振动学研究的范畴。当然，在这里我们只讨论机械振动问题，尤其是旋转机械振动问题。

引起机械振动的原因有很多种，概括起来主要有：

- (1) 转动部件不平衡；
- (2) 联轴器和轴承安装不对中；
- (3) 轴弯曲；
- (4) 齿轮磨损、偏心或损坏；

- (5) 传动带或传动链损坏;
- (6) 轴承损坏;
- (7) 扭矩变化;
- (8) 电磁力;
- (9) 空气动力;
- (10) 水动力;
- (11) 松动;
- (12) 摩擦;
- (13) 油膜涡动和油膜振荡。

任何振动工程问题都可以用图 1-1-2 来概括说明。这里的输入是指作用在系统上的激励或干扰, 输出也称为响应。对于机械振动而言, 激励大多为力, 而常用的响应物理量一般分为位移、速度和加速度。

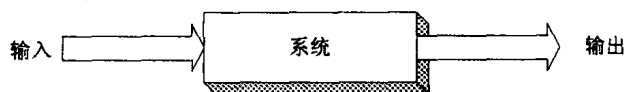


图 1-1-2 振动问题简化系统模型

要引起振动, 必须要有干扰(力)。例如, 我们坐在开动的汽车中感到振动是由于汽车发动机转动和车轮通过不平的路面而产生的干扰力所致。这种有输入的振动称为强迫振动或受迫振动。当我们上船经过跳板时也会感到振动, 这种振动也属于受迫振动之列。但是当我们走过之后, 跳板仍在振动, 这种现象在跳板较薄时更为显著。这种在外界干扰力撤去之后依然存在的振动称为自由振动或固有振动。从理论上讲, 若无阻力存在, 跳板会永远地振动下去。事实上, 阻力总是存在, 在一定的时间之后, 振动便会感觉不到了, 这就是自由衰减振动。

为了方便、有效地研究振动, 我们引入如下基本特征量(见图 1-1-3)。

1. 振幅(A)

距离平衡位置的最大响应值称为振幅 A 。根据测量形式的不同, 分为位移幅值、速度幅值和加速度幅值。在实际测量时, 平衡位置的坐标往往不易确定, 因此也使用响应正负

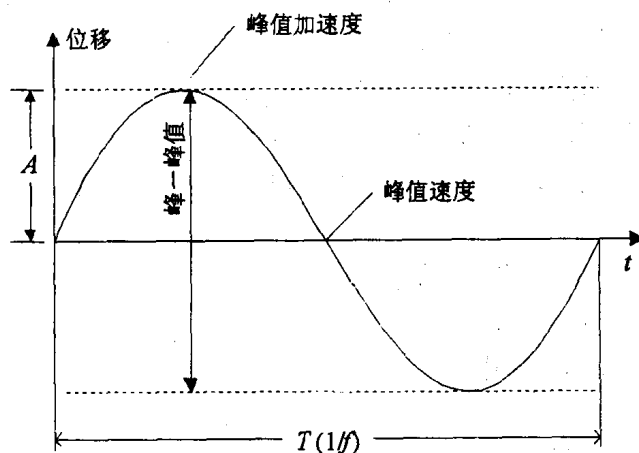


图 1-1-3 振动(信号)的特征值

幅值和加速度幅值。在实际测量时,平衡位置的坐标往往不易确定,因此也使用响应正负最大峰值差的量值作为振幅,称为峰-峰值($P-P$)。当振幅为位移时,单位常用微米(μm)或密耳(mil)表示,对于速度则用毫米/秒(mm/s)或英寸/秒(IPS)表示,对于加速度一般用 g 表示。

2. 周期(T)

周期振动中一个循环所需要的时间称为周期 T 。

3. 频率(f)

单位时间内的振动循环次数称为频率 f 。频率与周期是倒数关系,即

$$f = \frac{1}{T}$$

频率的单位是次/秒,也称为赫兹,写作 Hz,有时也使用 CPM。

4. 相位(φ)

相位表示在给定时刻振动部件被测点相对于某一固定参考点或其他振动部件的位置。在实际应用中相位主要用于比较不同振动运动之间的关系,或确定一个部件相对于另一个部件的振动状况。例如,在图 1-1-4 中给出了 A 和 B 两个弹簧质量系统。假设 A、B 两质量块的振幅和频率相同,但 A 位于上限位置,而 B 则位于其下限位置。在给定的起始时刻位移峰值相差 180° ,也就是说这两个振动 180° 异相。在图 1-1-5 中质量 A 和 B 在同一时刻分别位于上限位置和平衡位置(向下),于是我们说质量 A 和 B 的振动相位差为 90° 。而在图 1-1-6 中质量 A、B 在同一时刻位于同一位置,因此其振动同步,或者说它们的振动相位差为 0° 。

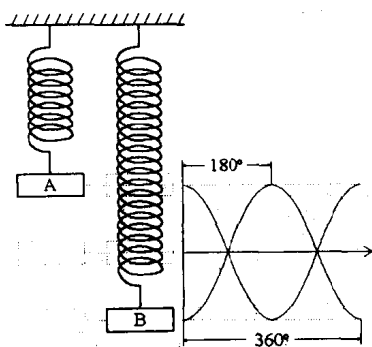


图 1-1-4 两质量块振动 180° 异相

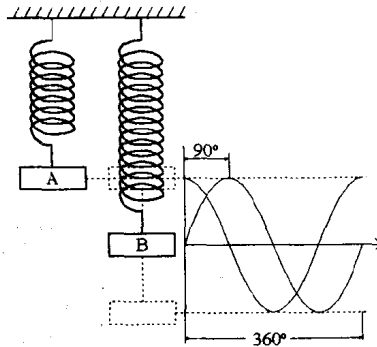


图 1-1-5 两质量块振动 90° 异相

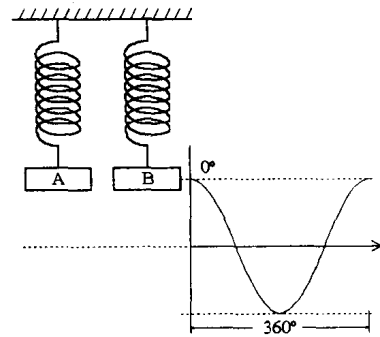


图 1-1-6 两质量块振动同步

第二章 振动测量

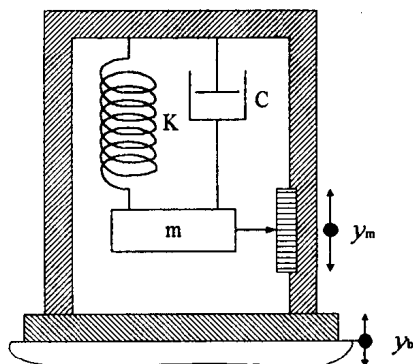
2.1 传感器

传感器是能够感受物体运动并将物体的运动转换成模拟电信号的一种灵敏的换能元件。传感器的种类很多,且有不同的分类方法,按参考坐标的不同可分为绝对式与相对式传感器;按工作方式的不同可分为接触式和非接触式传感器;按工作原理的不同可分为惯性式和参数式传感器。按测量参数的不同又可分为位移、速度和加速度传感器。这里我们仅简要讨论机械振动测量中常用的惯性式速度传感器、压电式加速度传感器和电涡流式位移传感器。

1. 速度传感器

以振动体的振动速度为测量目标的传感器称为速度传感器。速度传感器为接触式传感器,适用于测量壳体的振动、轴的绝对振动等。常用的速度传感器为(具有弹簧—质量系统的)磁电式传感器,它测量的信号是被测振动物体相对于大地或惯性空间的绝对运动。因此称之为惯性式传感器或地震式传感器。

速度式传感器的力学模型和结构简图分别如图 1-2-1 和图 1-2-2 所示。根据图 1-2-2 结构简图可知,传感器中工作线圈 7、蕊杆 5、阻尼环 3 组成了质量元件,弹簧片 1 与 8 将质量元件固定在壳体上,它们组成了一个弹簧—质量系统。阻尼环 3 是一个紫铜基的镍铬环,2 为永久磁铁,4 为铝架,9 为输出头。工作时阻尼环在磁场中切割磁力线而感生电流,该电流又随同阻尼环在磁场中运动,由此产生了与可动篇方向相反的阻尼力。此力的大小与可动篇的相对速度成正比。



$$y_m = Y_m \sin(\omega t - \varphi), \quad y_b = Y_b \sin \omega t$$

图 1-2-1 磁电式速度传感器的力学模式

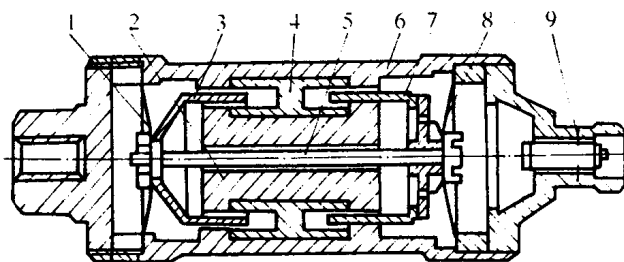


图 1-2-2 速度传感器的结构简图

传感器工作时,工作线圈的输出电压与被测振动体的速度成正比,因此经过换算便可求得振动物体的速度。

图 1-2-3 和图 1-2-4 分别为速度传感器的幅频特性曲线及相频特性曲线。可见,当 $\omega/\omega_0 \gg 1$ 时, Y_b/Y_m 趋于 1。即当传感器的固有频率比被测物体的振动频率低得多时,传感器中质量块与振动体之间的相对振动就接近于振动体的绝对振动,不过相位相差 180° 。

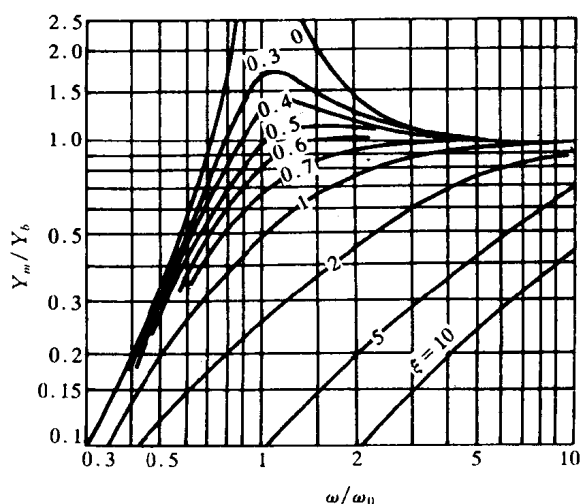


图 1-2-3 速度传感器的幅频特性曲线图

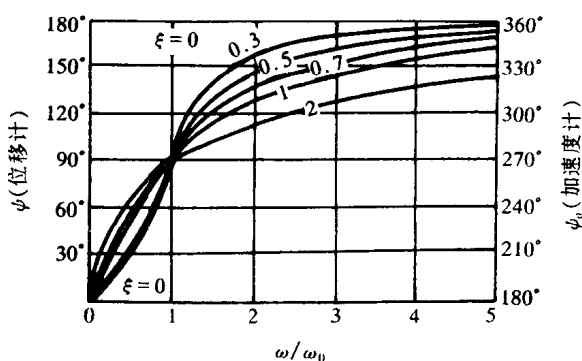


图 1-2-4 速度传感器的相频特性曲线

磁电式速度传感器的特点是：灵敏度高，输出信号大，输出阻抗低，电气性能稳定性好，不易受外部噪声干扰，使用简单方便，不需外加电源，对后接电路也无特殊要求。缺点是动态范围有限，尺寸和重量较大，弹簧片容易疲劳损坏。

2. 加速度传感器

加速度传感器主要用于测量振动体的加速度。压电式加速度传感器，由于其具有体积小，重量轻，灵敏度高和频率范围宽等优点，在实际测量中应用最为普遍。

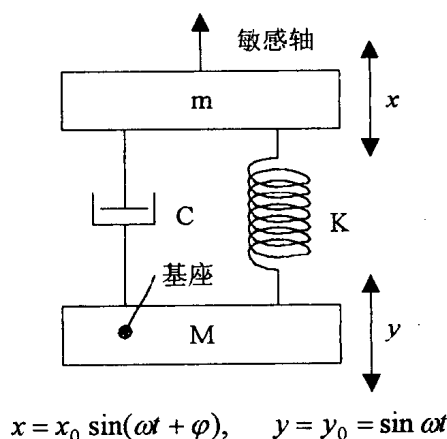


图 1-2-5 加速度传感器的力学模型

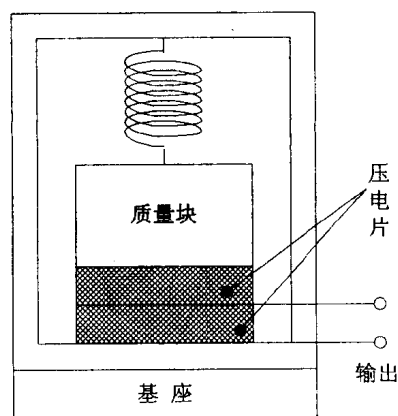


图 1-2-6 加速度传感器的结构模型

加速度传感器的力学模型及工作原理图见图 1-2-5 和图 1-2-6。这是一个单自由度二阶弹簧—质量—阻尼系统。当传感器测量振动时，振动加速度使压电片受质量块产生的惯性力作用而产生电荷，所产生的电荷与外力成正比，因而压电式传感器输出的电荷量与被测振动体的加速度成正比。

压电式加速度传感器的幅频特性如图 1-2-7 所示。可见，当 $\omega/\omega_0 \ll 1$ 时，即传感器固有频率远大于被测振动体的振动频率时，质量块的相对振动幅值 x_0 与被测振动体的加速度 $y_0\omega^2$ 成正比。

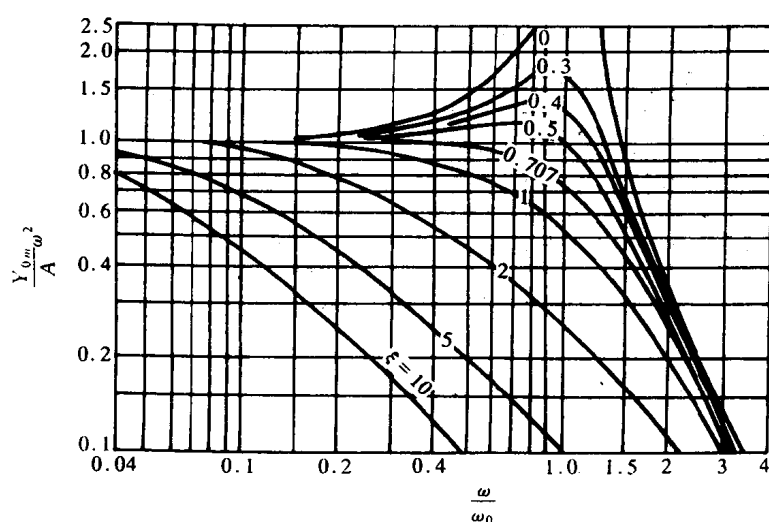


图 1-2-7 压电式加速度传感器的幅频特性曲线

根据不同的使用条件和环境,合理选择安装方式是很重要的。图 1-2-8 给出了 6 种常用的加速度传感器安装方式。

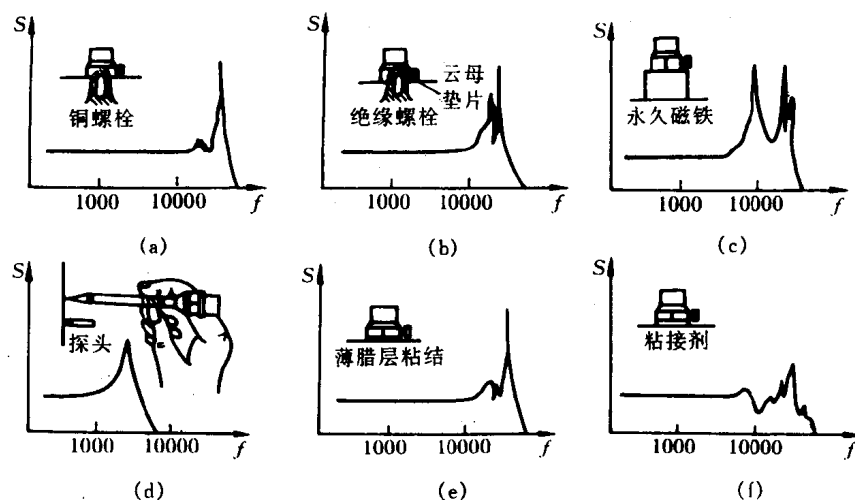


图 1-2-8 加速度传感器的几种安装方式

其中:

(a)为用双头钢制螺栓固定,这是最理想的安装方式,具有很宽的影响范围并可承受很大的加速度,甚至可用于冲击测量。

(b)为用绝缘螺栓固定,在需要电气绝缘时使用,能承受较大的加速度,但频率范围略低。

(c)靠磁铁固定,这种方式便于装拆和现场使用,频率范围和能够承受的加速度负荷中等。

(d)可采用手持传感器方式进行测量,这时测量频率范围低于 1000Hz,负荷加速度也较小,但特点是使用方便。

(e)用渗蜡层粘结方式, 该方式有效频率范围较宽, 但能承受的加速度较小, 且不宜在高温下使用。

(f)是用粘结剂固定方式, 粘结剂一般为 502 胶或环氧树脂, 其测量频率范围较低 (<5000Hz), 能承受的加速度负荷也较小。

表 1-2-1 压电加速度计的各种安装方式的性能比较

安装方式	钢螺栓	绝缘螺栓 加云母垫片	永久磁铁	手持探针	薄蜡层 粘结	粘结剂
性 能	见图 1-2-8(a)	见图 1-2-8(b)	见图 1-2-8(c)	见图 1-2-8(d)	见图 1-2-8(e)	见图 1-2-8(f)
频率范围	最高	较高	中	最低 (<1000Hz)	较高	低 (<5000Hz)
负 荷 加 速 度	最大	大	中 (<200Hz)	小	小	小
其 他	适合冲击测量	需绝缘时使用	<150°	方便	温度升高较差	

3. 电涡流(位移)传感器

电涡流传感器是一种非接触式的位移传感器, 具有灵敏度高、线性范围大、频率范围宽(DC—10kHz)、结构尺寸小、抗干扰能力强和不受介质影响等优点。与接触式传感器相比, 能够更准确地测量出转子振动状况的各种参数, 尤其适用于旋转机械轴振动、轴位移及轴的轨迹测量等。

图 1-2-9 是电涡流传感器的工作原理图。当高频电流通过线圈时将产生一高频电磁场, 此交变磁场通过金属板时会在金属板表面内产生感应电流, 即电涡流。根据楞次定律, 该电涡流也产生一个与原线圈磁场方向相反的交变磁场, 这两个磁场相互作用的结果改变了线圈的阻抗。

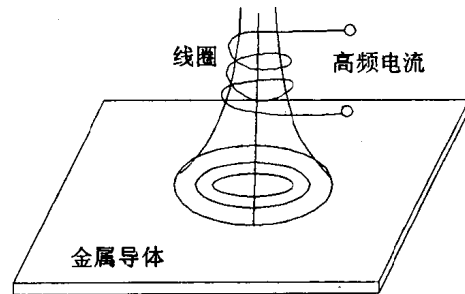


图 1-2-9 电涡流作用原理图

线圈阻抗的变化既与电涡流效应有关, 又与静磁学效应有关, 即与金属的电导率(σ)、磁导率(μ)、几何形状、线圈几何参数(r)、激励电流频率(ω)和强度(I)以及线圈到金属导体表面的距离(h)等参数有关。当金属导体的性能为线性各向同性时, 线圈阻抗可表示成如下函数关系:

$$Z = F(\mu, \sigma, r, h, I, \omega)$$

如果控制 μ , σ , r , h , I , ω 等参数恒定不变, 那么阻抗 Z 就成为 h 的单值函数了。电涡流传感器就是根据这个原理来测量振动体的位移的。

电涡流传感器由头部 1、壳体 2、固定电缆 3 和接头 4 等四篇组成, 如图 1-2-10 所示。在实际测量时, 传感器与其相匹配的延长电缆、前置器组成传感器系统, 如图 1-2-11 所示。其中前置器内部装有电阻、电容、晶体管等元件, 并与探头线圈 L 并联形成一个如图 1-2-12 所示的振荡器及测量电路。

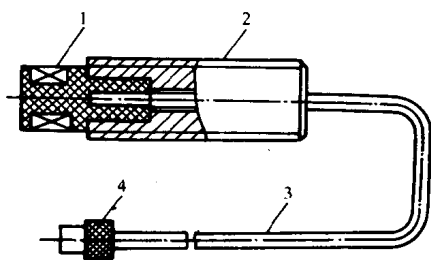


图 1-2-10 电涡流传感器结构图

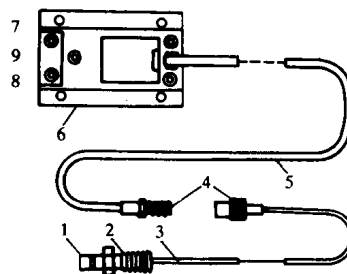


图 1-2-11 电涡流传感器系统

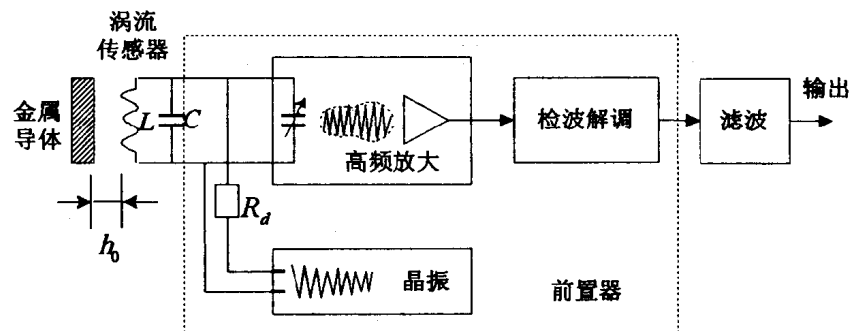


图 1-2-12 稳频调幅波式线路原理图

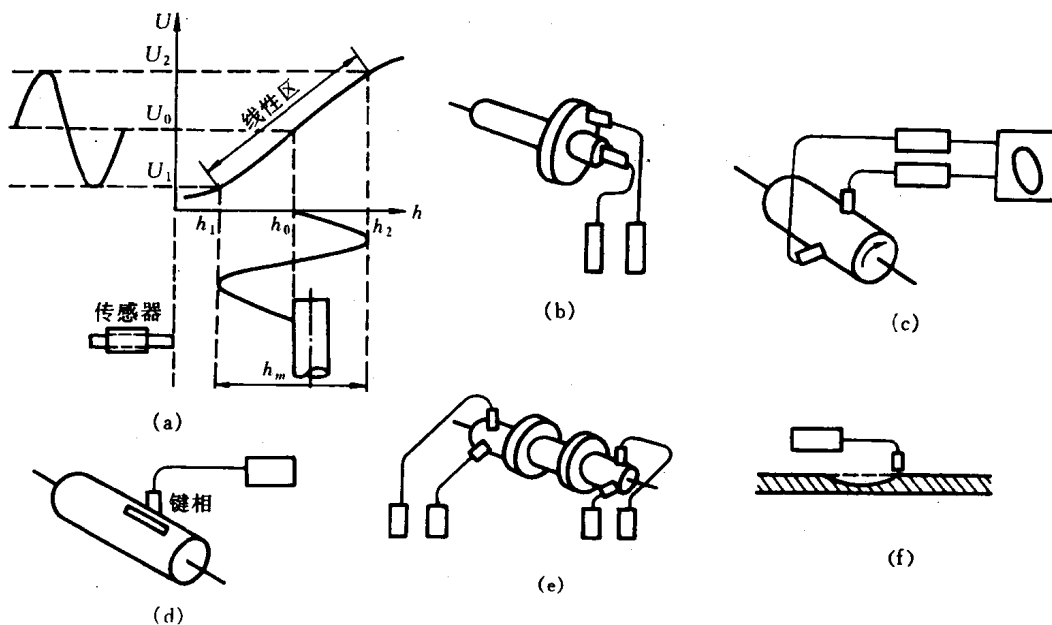


图 1-2-13 电涡流传感器的用途

(a) 振动 (b) 转轴轴向位移 (c) 轴心轨迹 (d) 轴转速及相位
(e) 转子平衡 (f) 金属材料不平度及材料厚度

电涡流传感器的用途十分广泛，可用于 测量振动、位移、差胀、偏心、轴心轨迹、轴转速与相位等。主要应用如图 1-2-13 所示。