

摘 要

振动的研究与测试在工程应用和科学测量中占有非常重要的地位。当代工程中各种机械系统,如大型发电设备,电动机,重型机械,汽车,船舶,航空航天设备,等,都不断向着高速、高准确度方向开展。为保证其良好的性能以及可靠的寿命,振动问题已成为必须认真研究和解决的重要课题。以压电式、电磁式以及半导体式为代表的传统振动测试装置以其原理简单、本钱低等优点而广泛应用于各个领域。

振动测量技术是利用各种方法测量振动信号从而检测出系统的振动特性,本文主要介绍了基于电测法和光学法对振动的测量,根据这两种方法例举了一些振动测量的实例。

关键字: 振动测量; 电测法; 光学法

Abstract

Vibration research and testing in the engineering and scientific measurement plays a very important position. Contemporary works of various mechanical systems such as large-scale power generation equipment, motors, heavy machinery, automobiles, ships, aerospace equipment, etc have been toward the high-speed, high accuracy direction. In order to ensure their good performance and reliable service life, vibration has become must seriously study and solve important issues. By piezoelectric, electromagnetic and semiconductor type as the representative of the traditional principle of vibration test equipment for its simple, low cost and widely used in various fields.

Vibration measurement technology is the use of measured vibration signals to detect the vibration characteristics of the system, this paper introduces the measurement method based on electrical and optical vibration measurement method, according to two methods of measuring vibration cite some examples.

Keywords: Vibration measurement; electric method; optical method

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	I
第 1 章 绪论.....	- 1 -

1.1 什么是振动	1 -
1.2 振动测量目的	1 -
1.3 振动测量技术简介	2 -
1.3.1 振动测量分类	2 -
1.3.2 振动参量的测量	3 -
1.3.3 机械阻抗测量	4 -
1.3.4 振动信号的频谱分析	4 -
1.4 振动测量的意义	4 -
第2章 振动测量技术	5 -
2.1 电测法振动测量	5 -
2.1.1 压电式加速度传感器在振动测量	5 -
2.1.2 基于电磁感应的扭转振动测量	7 -
2.1.3 电阻式应变传感器振动测量	9 -
2.1.4 电感式传感器振动测量	11 -
2.1.5 微变电容式传感器振动测量	12 -
2.1.6 无源伺服传感器的振动测量	13 -
2.2 光学法振动测量	14 -
2.2.1 激光干涉原理在振动测量中的应用	14 -
2.2.2 PSD 在弦振动测量中的应用	16 -
2.2.3 全光纤传感器振动测量	19 -
2.2.4 激光光栅多普勒效应微小振动测量	21 -
结 论	21 -
参考文献	22 -

第1章 绪论

1.1 什么是振动

振动是指一个状态改变的过程。即物体的往复运动。

从广义上说振动是指描述系统状态的参量在其基准值上下交替变化的过程。狭义的指机械振动，即力学系统中的振动。电磁振动习惯上称为振荡。力学系统能维持振动，必须具有弹性和惯性。由于弹性，系统偏离其平衡位置时，会产生回复力，促使系统返回原来位置；由于惯性，系统在返回平衡位置的过程中积累了动能，从而使系统越过平衡位置向另一侧运动。正是由于弹性和惯性的相互影响，才造成系统的振动。按系统运动自由度分，有单自由度系统振动和多自由度系统振动。有限多自由度系统与离散系统相对应，其振动由常微分方程描述；无限多自由度系统与连续系统相对应，其振动由偏微分方程描述。方程中不显含时间的系统称自治系统；显含时间的称非自治系统。按系统受力情况分，有自由振动、衰减振动和受迫振动。按弹性力和阻尼力性质分，有线性振动和非线性振动。振动又可分为确定性振动和随机振动，后者无确定性规律，如车辆行进中的颠簸。振动是自然界和工程界常见的现象。振动的消极方面是：影响仪器设备功能，降低机械设备的工作精度，加剧构件磨损，甚至引起结构疲劳破坏；振动的积极方面是：有许多需利用振动的设备和工艺。振动分析的根本任务是讨论系统的激励、响应和系统动态特性三者之间的关系。20 世纪 60 年代以后，计算机和振动测试技术的重大进展，为综合利用分析、实验和计算方法解决振动问题开拓了广阔的前景。

1.2 振动测量目的

振动是工程技术和日常生活中常见的物理现象，在大多数情况下，振动是有害的，它对仪器设备的精度，寿命和可靠性都会产生影响。当然，振动也有可以被利用的一面，如输送、清洗、磨削、监测等，无论是利用振动还是防止振动，都必须确定其量值。在长期的科学研究和工程实践中，已逐步形成了一门较完整的振动工程学科，可供进行理论计算和分析。但这些毕竟还是建立在简化和近似的数学模型上，还必须用试验和测量技术进行验证。随着现代工业和现代科学技术的开展，对各种仪器设备提出了低振级和低噪声的要求，以及对主要生产过程或重要设备进行监测、诊断，对工作环境进行控制等等。这些都离不开振动的测量。

1.3 振动测量技术简介

1.3.1 振动测量分类

1) 振动信号分类

振动信号按时间历程的分类可分为确定性振动和随机振动两大类。

确定性振动可分为周期性振动和非周期性振动。周期性振动包括简谐振动和复杂周期振动。非周期性振动包括准周期振动和瞬态振动。准周期振动由一些不同频率的简谐振动合成，在这些不同频率的简谐分量中，总会有一个分量与另一个分量的频率之比为无理数，因而是非周期振动。

随机振动是一种非确定性振动，它只服从一定的统计规律性。可分为平稳随机振动和非平稳随机振动。平稳随机振动又包括各态历经的平稳随机振动和非各态历经的平稳随机振动。

一般来说，仪器设备的振动信号中既包含有确定性的振动，又包含有随机振动，但对于一个线性振动系统来说，振动信号可用谱分析技术化作许多谐振动的叠加。因此简谐振动是最根本也是最简单的振动。

2) 振动测量方法分类

振动测量方法按振动信号转换的方式可分为电测法、机械法和光学法。

电测法：将被测对象的振动量转换成电量，然后用电量测试仪器进行测量，灵敏度高，频率范围及动态、线性范围宽，便于分析和遥测，但易受电磁场干扰。是目前最广泛采用的方法。

机械法：利用杠杆原理将振动量放大后直接记录下来，抗干扰能力强，频率范围及动态、线性范围窄、测试时会给工件加上一定的负荷，影响测试结果，用于低频大振幅振动及扭振的测量。

光学法：利用光杠杆原理、读数显微镜、光波干预原理，激光多普勒效应等进行测量，不受电磁场干扰，测量精度高，适于对质量小及不易安装传感器的试件作非接触测量。在精密测量和传感器、测振仪标定中用得较多。

根据测量传感器类型，可分为发电型、电参数变化型、伺服型。其中发电型可分为压电式、电动式、电磁式，电参数变化型可分为电容式、电感式、电阻式。

3) 测振传感器分类

拾振局部是振动测量仪器的最根本局部，它的性能往往决定了整个仪器或系统的性能。根据测量传感器类型，可分为发电型、电参数变化型、伺服型。其中发电型可分为压电式、电动式、电磁式，电参数变化型可分为电容式、电感式、电阻式。

1.3.2 振动参量的测量

振动参量是指振幅、频率、相位角和阻尼比等物理量。

1) 振幅的测量

振动量的幅值是时间的函数，常用峰值、峰峰值、有效值和平均绝对值来表示。峰值是从振动波形的基线位置到波峰的距离，峰峰值是正峰值到负峰值之间的距离。在考虑时间过程时常用有效（均方根）值和平均绝对值表示。有效值和平均绝对值分别定义为

$$z_{\text{有效}}=z_{\text{rms}}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T z^2(t)dt}$$

$$z_{\text{平均}} = Z = \frac{1}{T} \int_0^T |z(t)| dt$$

对于谐振动而言，峰值、有效值和平均绝对值之间的关系为

$$z_{rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} z = \frac{1}{\sqrt{2}} z_f$$

式中， z_f 为振动峰值。

2) 谐振动频率的测量

谐振动的频率是单一频率，测量方法分直接法和比拟法两种。直接法是将拾振器的输出信号送到各种频率计或频谱分析仪直接读出被测谐振动的频率。在缺少直接测量频率仪器的条件下，可用示波器通过比拟测得频率。常用的比拟法有录波比拟法和李沙育图形法。录波比拟法是将被测振动信号和时标信号一起送入示波器或记录仪中同时显示，根据它们在波形图上的周期或频率比，算出振动信号的周期或频率。李沙育图形法那么是将被测信号和由信号发生器发出的标准频率正弦波信号分别送到双轴示波器的 y 轴及 x 轴，根据荧光屏上呈现出的李沙育图形来判断被测信号的频率。

3) 相位角的测量

相位差角只有在频率相同的振动之间才有意义。测定同频两个振动之间的相位差也常用直读法和比拟法。直读法是利用各种相位计直接测定。比拟法常用录波比拟法和李沙育图形法两种。录波比拟法利用记录在同一坐标纸上的被测信号与参考信号之间的时间差 τ 求出相位差。

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ$$

李沙育图测相位法那么是根据被测信号与同频的标准信号之间的李沙育图形来判别相位差。

4) 阻尼比测量

阻尼比是导出参数，可以通过测量振动的某些根本参数，再用公式算出。常用的方法有振动波形图法、共振法、半功率点法和李沙育图法四种。

1.3.3 机械阻抗测量

振动测量从本质上说属动态测量，测振传感器检测的信号是被测对象在某种鼓励下的输出响应信号。振动测量的一个主要目的就是通过对鼓励 and 响应信号的测试分析，找出系统的动态特性参数，包括固有频率、固有振型、模态质量、模态刚度、模态阻尼比等。振动测量是结构模态分析和设备故障诊断的根底。

1.3.4 振动信号的频谱分析

在振动测量中，由测振传感器接收的信号通常是复杂的时间函数。利用信号处理技术，通过傅里叶变换，将时域信号转换成频域信号加以分析的方法就称为频谱分析。频谱分析技术包括幅值谱分析、自功率谱密度函数分析、互功率谱密度函数分析、相干函数分析、倒频谱分析等。振动信号经过频谱分析，可以求得信号的频率成分和结构，并进而分析系统的传递特性；通过频谱分析，还可以对被测对象进行振动监测和故障诊断。

机器故障诊断学是识别机器或机组运行状态的科学，它研究的是机器或机组运行状态的变化在诊断信息中的反映。机器故障诊断技术很复杂，方法也很多。可用作诊断的信息包括温度、应力、变形、排放气体和液体以及润滑油的物理化学参数等。利用振动和噪声的响应信号，并对其进行频谱分析那么是常采用的主要诊断手段。

1.4 振动测量的意义

振动的研究与测试在工程应用和科学测量中占有非常重要的地位。振动可以传播到人体的振动车辆，机械，结构件，在与人体，或通过声音宛如外表接触辐射领域^[1]。当代工程中各种机械系统，如大型发电设备、电动机、重型机械、汽车、船舶、航空航天设备、等，都不断向着高速、高准确度方向开展。随着工业技术的飞速开展，各种机械结构向高速度、高精度、小型化方向开展，这就对物体的振动特性控制提出了越来越高的要求^[2]。为保证其良好的性能以及可靠的寿命，振动问题已成为必须认真研究和解决的重要课题。

第2章 振动测量技术

根据振动测量方法分类，振动测量按振动信号转换的方式可分为电测法、机械法和光学法。下面重点介绍电测法和光学法振动测量技术。

2.1 电测法振动测量

2.1.1 压电式加速度传感器在振动测量

压电式传感器是基于压电效应的传感器。是一种自发电式和机电转换式传感器。它的敏感元件由压电材料制成。压电材料受力后外表产生电荷。此电荷经电荷放大器和测量电路放大和变换阻抗后就成为正比于所受外力的电量输出。压电式传感器用于测量力和能变换为力的非电物理量，如压力、加速度等。

压电效应可分为正压电效应和逆压电效应。正压电效应是指：当晶体受到某固定方向外力的作用时，内部就产生电极化现象，同时在其两个外表上产生符号相反的电荷；当外力撤去后，晶体又恢复到不带电的状态；当外力作用方向改变时，电荷的极性也随之改变；晶体受力所产生的电荷量与外力的大小成正比。

压电式传感器大多是利用正压电效应制成的。

压电式加速计的测振原理

压电式传感器是一种机电换能器,所用的压电材料(如天然石英、人工极化陶瓷等)在受到一定的机械荷载时,会在压电材料的极化面上产生电荷,其电荷量与所受的载荷成正比。当压电晶体片受力时,晶体的两外表上聚集等量的正、负电荷,由于晶体片的绝缘电阻很高,因此压电晶体片相当于一只平行板电容器,如图 2-1-1 所示。

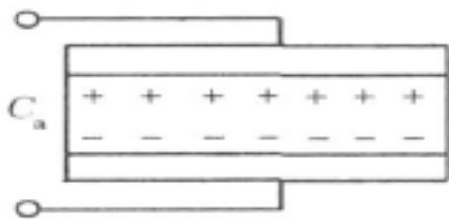


图 2-1-1 压电晶体内部等效图

其电容量为 $C_a = \frac{\epsilon A}{d}$

晶体片上产生的电压量与作用力的关系

$$e_a = \frac{q}{C_a} = \frac{d_{33}d}{\epsilon A} F = \frac{d_{33}d}{\epsilon A} F_m \sin \omega t \quad (1)$$

式中: ϵ 为压电晶体的介电常数; A 为晶体片(构成极板)的面积; d 为晶体片的厚度; d_{33} 为压电系数; F 为沿晶轴施加的力。

压电式加速度计的晶体片确定后, d_{33} 、 d 、 ϵ 、 A 都是常数,那么晶体片上产生的电压量与作用力成正比。测量时,将压电式加速度计基座与试件刚性固定在一起(安装基面粗糙度不超过 $0.41 \mu\text{m}$)。当加速度计受振动时,由于压电片具有的压电效应,它的 2 个外表上就会产生交变电荷(电压)。而此交变电荷(电压)又与作用力成正比,因此交变电荷(电压)与试件的加速度成正比。这就是压电式加速度计能够将振动加速度转变成电量进行测振的原理。 [3]

系统组成

(1)压电式加速度计

测试系统中,压电式加速度计的作用是把振动量转换成相应的电信号。

(2)电荷放大器

压电加速度计产生的电荷量很小,输出阻抗很高,因此与它相连的仪器输入阻抗的大小将对测量系统的性能产生重大影响。高输入阻抗的前置放大器就是以此为目的而设置的。

压电加速度计与电荷放大器相连后的等效电路如图 2-1-2 所示。其中, q 为传感器产生的电荷; A 为电荷放大器开环放大倍数; R_a 为传感器内部电阻; R_i 为电荷放大器的输入电阻; C_a 为传感器内部固有电容; C_c 为连接电缆的分布电容; C_i 为放大器的等效电容; C_f 为电荷转换级的反应电容; U_i 与 U_o 分别为电荷放大器的输入与输出电压。

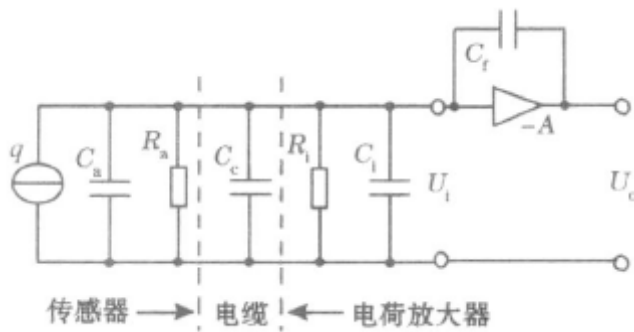


图 2-1-2 电荷放大器等效电路

电荷放大器实际上是具有负反应电容、输入阻抗极高的高增益运算放大器。它将压电加速度计看成电荷源,并输出与之成正比的低输入阻抗的电信号。其作用是:变压电加速度计的高输出阻抗为前置放大器的低输出阻抗,以便同测试仪相匹配;放大从传感器输出的微弱信号,或者把它的电荷变成电压信号;输出电压归一化。即它与不同灵敏度的传感器相配合时,在相同的信号输入下,到达相同的输出电压。

(3)动态数据采集测试仪

动态数据采集测试仪是振动测试系统最重要的一环。其实质是一种带通讯接口和程序控制的多功能智能仪表,具有内置调理功能,可直接对加速度信号进行测量,也可以通过相应的控制模块对外控制输出,通过其自带的 RS-232、RS-485/422、GPIB 或 Ethernet 等通讯接口,能与加速度传感器、前置处理器、计算机等设备组成适用于各种领域的振动测量数据测试分析系统。^[3]

压电式传感器应用特点:

- (1) 灵敏度和分辨率高,线性范围大,结构简单、牢固,可靠性好,寿命长;
- (2) 体积小重量轻,刚度强度、承载能力和测量范围大,频带宽,动态误差小;
- (3) 易于大量生产,便于选用,使用和校准方便,并适用于近测、遥测。

2.1.2 基于电磁感应的扭转振动测量

在回转机械中,轴的扭转振动是一种振动形式,它是由于作用在轴上的扭矩随时间变化而产生的旋转振动。对于大型回转机械,这种振动的破坏性很强,极易引起机械结构疲劳破坏,尤其是当振动频率接近机械结构的固有频率时,破坏性将会更严重。因此对扭转振动进行测量具有重大意义。

本文研究基于电磁感应的扭转振动测量及相应的信号提取方法,根本思路是使线圈与永磁体做相对运动,根据线圈切割磁感应线的速度与感应电动势正相关的原理,由线圈两端的电压变化量计算各点的瞬时速度变化量,再由瞬时速度变化量积分求出扭振信息。与其他方法相比,该方法有以下优点:a)对硬件性能要求不高;b)利用信号的幅值提取扭振,算法较简单;c)能较好地消除轴向振动和局部横振的影响。

There are two methods commonly used in torsional vibration measurement. One is to fit sensitive strain gauges to the shaft journal. The torsional deformation will be estimated by analysing the shear strain.^[4]

测量原理

电磁感应现象即闭合导体的一局部在磁场中做切割磁感线的运动时,导体中就会产生电流,如果不是闭合回路,那么导体中自由电子的定向移动使断开处两端积累正、负电荷而产生电势差——感应电动势。

当导体 L 在磁场中运动时,导体内的自由电子受到的洛伦兹力为

$$\vec{f} = -e(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (1)$$

其中, $-e$ 为电子所带电量; $\vec{f}$ 为洛伦兹力; $\vec{V}$ 是线元 $d\vec{L}$ 处导体的速度; $\vec{B}$ 是线元 $d\vec{L}$ 处的磁场强度。

由(1)式可得作用在单位正电荷上的洛伦兹力为:

$$k = \frac{\vec{f}}{-e} = \vec{V} \times \vec{B} \quad (2)$$

于是得动生电动势:

$$\varepsilon = \int_{-}^{+} k \cdot d\vec{L} = \int_L (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} \quad (3)$$

不管导体是否闭合,只要作切割磁感应线的运动,导体中都会产生动生电动势。

可以看出,假设在每一时刻, $\vec{B}$ 和 $d\vec{L}$ 是定值,且 $\vec{V}$ 与 $\vec{B}$ 垂直的话,那么感应电动势的大小与线圈在磁场中的相对运动速度成正比。由此可以设计感应电路,使随轴转动的磁体不断通过固定的线圈,当轴平稳旋转时,感应电动势是稳定且规那么的波形;当有扭振发生时,速度的变化就会以与之成正比的量在电动势上表达出来,而速度的变化表征了扭振信息,通过一定的算法,即可得出扭振。^[5]

结论

通过设计的扭振测量装置,可将微弱的转子扭振信号转化为较大幅值的电磁感应信号来进行提取和分析,方法本身方便易行,和其他方法相比主要的优缺点如下:

优点:

- (1) 采用调幅波的方式减少了数据采集量和处理难度;
- (2) 采用半周期细分以及对应点比拟的算法在准确提取瞬时速度变化量的同时很好地消除了装置制造和安装过程中磁体分布不均等系统精度问题的影响;
- (3) 使用相对安装的方法较好地消除了轴向振动和局部横振的影响;
- (4) 整个装置结构简单,搭建容易,本钱低廉。

缺点:

- (1) 测量装置可能会改变被测对象的扭振特性;
- (2) 由于采用电磁感应的方式,信号容易受周围电磁环境的影响。可以安装相应的电磁屏蔽设备,但这样会使测量装置复杂化,应用场合受到限制。

总体来说,理论分析和实验结果都说明,该方法是一种行之有效的转子扭振测量方法。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/547062000015006055>