

高等学校工科力学实验系列教材

动力学实验

刘礼华 欧珠光 编著

武汉大学出版社

高等学校工科力学实验系列教材编委会

主任委员 :朱以文

副主任委员 :侯建国 彭 华

委 员 :(以姓氏笔画为序)

陈思作 徐远杰 梁枢果 傅旭东 曾又林

内 容 简 介

本书讨论动力学实验的目的、方法、原理及数据的分析处理,包括简谐振动频率、相位、体系的质量、刚度、固有频率、阻尼、主振型及体系的动力响应等测试的十个动力学基础实验;弹性体系的模态、动力响应、振动能量、动平衡、疲劳等测试与仪器的标定,共十一个动力学选择实验;例举了碾压混凝土层动态特性的实验研究、某水电站机组增容振动检测及影响分析研究、关于 BW—200 振动碾工作时对人体的影响实验及某水电站工程泄洪孔闸门的振动检测实验等动力学综合性创新应用实验,并推荐高层建筑原形模态测试等 8 个综合性实验的课题。此外还对动力学常用实验仪器及其测试系统作了简单介绍。

本书内容具有较强的系统性、理论性、实用性和可操作性。既能使学生对动力学知识增强感性认识,又能使学生及相关工程技术人员提高对动力学实验的动手能力和创新能力。

本书可以作为高等院校工程力学、土木、水利、机械等专业的实验教材及参考书,也可以供从事土木、水利电力、机械、冶金、铁道、煤炭、采矿等行业的工程科技人员参阅。

序

力学课程是工科专业的重要技术基础课,实验力学课程是其重要的组成部分。任何科学技术的发展,都伴随着科学实验而共同存在。未经过实验或实践检验过的理论,有可能是不正确的理论。世界上许多重大科技发明、创造,大都是大量科学实验的结果。

以力学实验而言,其重要性更为直接。设计一个构件或结构,必须考虑其强度、刚度、稳定性,动态结构还需研究其动力特性,以求得在安全条件下的最大经济效益。为此,已经形成了理论力学、材料力学、结构力学、岩土力学、断裂力学、弹塑性力学等一系列理论及相应计算方法,这些学科在解决实际问题中起着重要的作用。但是这些学科的基本理论,许多是建立在若干简化的假定上的,都来自大量实验资料的归纳和总结,而判断理论及计算的结果正确与否,也需要实验或实践来检验。

虽然如今科学计算已经与理论分析和实验技术相并列,成为第三种科学方法,并被提到一个重要的高度。但是力学实验技术无论是作为认识和检验真理的最终的标准,还是作为直接解决实际工程中的力学问题的重要手段,仍然有着不可替代的地位。

对于已经有了数学模型的力学问题,从理论上讲可以用分析手段求解,但除了个别简单问题外,实际上是难以求得理论解的;随着计算机技术的发展,使科学计算方法,如有限元法、边界元法等方法能解决大量以前无法用理论分析方法解决的问题。但是数值计算方法仍然来自于理论模型,仍然是在理论模型的基本假定下进行数值计算的。对于新型或复杂结构形式、采用新材料的结构以及复杂工作条件下的力学问题,理论分析和数值计算所引入的假设和简化的合理性还未得到证实之前,往往首先需要用实验的结果进行校核和验证。

广义地讲,若把科学计算和数值仿真视为一种数值实验,实验力学的范围也可以涵盖数值计算技术。实际上实验力学已经与计算机技术和现代测试技术日益紧密结合,使实验力学有了很大的发展。这个发展已体现在两个方面,其一是应用计算机技术对实验数据进行采集和处理;其二是实验方法和数值计算方法相结合而产生的实验和数值分析杂交技术。该技术综合了两者的优势,在减少实验工作量和计算机工作时间的同时,还提高了实验成果的精度和可靠度,这已经成为现代实验力学的概念。

基于对实验力学以上的认识,我们组织编写了这套实验力学教材,力图在让学生学到基本实验技能的同时,也让他们开拓视野,并认识到实验力学新发展的前景。

在本系列教材中,实验内容的选取,实验方法和设备的介绍与阐述,既与力学的理论教学相呼应,尽可能达到力学课程的基本要求,又具有一定的独立性,并尽量体现教学改革和创新思维的成果。

我们相信,通过对本系列教材的学习和实践,可以使学生掌握力学实验的基本知识、基本技能和基本方法,同时也可以对学生的创新能力、实践能力进行一定的培养,从而对养成学生的科学习惯,提高科学素质起到重要作用。

参加编写本系列教材的教师为：

《材料力学实验》：朱铨庆，彭华，林树，曹定胜，乐运国，陈士纯；

《结构力学实验》：刘礼华，欧珠光；

《动力学实验》：刘礼华，欧珠光；

《岩土力学实验》：侍倩，曾亚武。

本系列材料所述内容的形成和不断完善是这些老师多年教学实践的积累，字里行间闪现着老师们辛勤的汗水与智慧。同时得到各位同事、同学和校内外同行的启发和帮助，武汉大学教务部和武汉大学土木建筑工程学院的领导也给予了很大的支持，特向他们表示敬意。谨此为序。

朱以文

2006 年 3 月

前 言

为适应国家教育部《面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划》中“力学系列教程教学内容和课程体系改革”的要求,配合《力学课程教学基本要求》所规定内容的具体教学,创建国家力学实验教学示范中心,作者根据多年从事理论力学、结构动力学和工程振动的实验教学体会以及对现场工程结构的振动测试分析的体会,将有关动力学实验的内容进行筛选、拓宽、汇编成这本动力学实验教材。

动力学主要解决结构或机器在振动与冲击作用下,其动力响应问题。具体要求:

- (1) 结构或机器的自由振动的主要振动参数,如自振频率、振动模态、振动幅值、阻尼及振动相位差等;
- (2) 结构的振动响应、振动应力及振动位移等;
- (3) 机器中转动部件的振动响应;
- (4) 结构或机器的隔震、防震与消震问题。

要解决这些问题,就要从动力学理论和动力学实验两方面展开研究,两者紧密结合,相辅相成,相互促进。而且,在很多情况下,实验工作更具有特殊意义。动力学理论比较成熟,且具有较有效的数值计算方法,但由于诸多因素的影响,其计算结果也必须用实验加以验证。此外有些问题甚至只能用实验的方法进行研究,如结构的阻尼,必须通过实验才能求得。所以动力学实验非常重要,一定要开好这门实验课。

本书对动力学作专门的介绍,内容上系统、简洁、创新。全书分五章。

第 1 章,介绍动力学实验的目的和意义,动力学实验的内容,动力学实验使用的仪器及其主要功能指标,动力学实验的误差分析等。

第 2 章,介绍 10 个动力学基础实验,实验内容包括简谐振动频率、相位的测试,振动系统固有频率、阻尼系数、相对阻尼系数、质量和刚度的测试,多自由度系统的固有频率、阻尼和主振型的测试。

第 3 章,介绍 11 个动力学选择实验,实验内容有弹性体系(结构)的模态实验、动力响应实验、振动能量实验,回转体系的动平衡实验,结构体系的疲劳实验,测试仪器的标定实验。

第 4 章,介绍动力学综合性创新应用实验,主要有碾压混凝土层动态特性的实验研究、某水电站机组增容振动检测及影响分析研究、关于 BW—200 振动碾工作时对人体影响的研究和某水电站工程泄洪孔闸门的振动检测实验研究等 4 个工程检测的典型例子,此外还推荐了 8 个综合性实验项目。

第 5 章,介绍动力学实验常用仪器及其测试系统的工作原理、结构组成、性能特点和使用方法等。

本书在实验方法上严谨,同时介绍传统的实验和现代的实验两种方法,以传统的实验方

法为基础,推广运用现代的实验方法。

本书在编写过程中,查阅了许多相关书刊、学术报告和其他资料,并适当地引用了部分资料,在此一并向相关学者致谢!

动力学实验为一门新组成的实验课程,由于作者的水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请专家、同行和读者批评指正。

作 者

2006 年 3 月

目 录

第 1 章	动力学实验概论	1
§ 1.1	动力学实验的目的和意义	1
§ 1.2	动力学实验的基本参数	2
§ 1.3	动力学实验仪器及其主要功能简介	5
§ 1.4	动力学实验的误差及精度	6
第 2 章	动力学基础实验	8
§ 2.1	简谐振动频率、相位的测试	8
§ 2.2	振动系统固有频率的测试	12
§ 2.3	振动系统的阻尼系数和相对阻尼系数的测试	23
§ 2.4	振动系统的等效质量及等效刚度的测试	34
§ 2.5	多自由度系统的固有频率、阻尼及主振型的测试	36
第 3 章	动力学选择实验	45
§ 3.1	弹性(结构)体系的模态实验	45
§ 3.2	结构体系的动力响应实验	77
§ 3.3	结构体系的振动能量实验	81
§ 3.4	回转体系的动平衡实验	94
§ 3.5	结构体系的疲劳实验	99
§ 3.6	测试仪器的标定实验	103
第 4 章	动力学综合性创新应用实验	108
§ 4.1	碾压混凝土层动态特性的实验研究	108
§ 4.2	某水电站机组增容的振动检测及影响分析研究	125
§ 4.3	关于 BW—200 振动碾工作时对人体影响的实验研究	165
§ 4.4	某水电站工程泄洪孔闸门的振动检测实验研究	174
§ 4.5	综合性实验的课题推荐	193
第 5 章	动力学常用实验仪器及其测试系统	196
§ 5.1	动力学实验的测试系统	196
§ 5.2	传 感 器	196
§ 5.3	速度传感器及其测试系统	202

§ 5.4	加速度传感器及其测试系统	207
§ 5.5	电阻应变计及其测试系统	221

参考文献.....	236
-----------	-----

第1章 动力学实验概论

§ 1.1 动力学实验的目的和意义

工程中的结构与机器的动力学问题,主要是由振动引起的,所以研究动力学问题主要是研究振动问题。要解决振动问题,就要同时展开振动的理论和实验研究工作。而且在很多情况下实验工作更具有特殊的重要性,因为很多理论计算结果也要通过实验加以验证,而且有些问题只能用实验方法进行研究。所以,要研究和解决振动问题,一定要进行动力学实验。

动力学实验的目的如下:

1. 测量量级

按照国家相关规定进行振动测试时,对振动量级进行检测,以确定机电产品是否达到质量要求。

2. 分析和判断振源

环境振动来源于多种多样的原因,如机器本身的不平衡力产生的干扰力引起的振动、冲击引起的振动、摩擦引起的振动、外加力产生的振动等,总之,由传感器得到的信号是各种振源产生的合成。在这种错综复杂的现象中,利用实验与分析技术可以判断主要振源,以便采用有效措施进行减震和隔振。

3. 验证并发展振动理论

工程中某些复杂的结构或机器的动力学问题,例如,高层建筑或舰船的某些振动,并非可用一般理论研究清楚,这时只有借助于动力学实验进行研究,从多次实验中找出其规律性从而推动动力学理论的研究。

4. 模态分析

工程中的结构和某些大型设备,例如,高层建筑、水工中的闸门结构、石油钻井平台上的钻井架等,可以通过动力学实验确定这类结构或设备振动的各阶模态参数、振型和节点位置等,这对解决这类结构或设备的优化设计和减震、防震非常重要。

5. 作为机械设备在运转中的监控和故障诊断

通过对正在运转的机器设备进行监控并测量机器外部的振动信号或者对非工作状态的机器进行激振试验,通过分析得到相关信息,从而判断机器内部的故障原因及其故障的性质。

§ 1.2 动力学实验的基本参数

在动力学实验中最简单的振动形式是简谐振动,而其幅值、频率和相位是简谐振动的基本参数,也是研究复杂振动的基础。

1.2.1 振动幅值

幅值是振动烈度大小的度量,通常有三种表示振动幅值大小的方法,即用峰值、有效值及平均值来度量。

峰值是指波形图上与零线的瞬时最大偏离值,可以用 x_p 来表示,对于正弦振动, $x_p = x_m$ 。 x_m 是正弦振动的波峰幅值,也叫做正弦振动的峰值。

假定被测物体作简谐振动,其运动方程为

$$x = x_m \sin \omega t = x_m \sin 2\pi ft \quad (1-1)$$

其速度、加速度方程分别为

$$\dot{x} = 2\pi f x_m \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-2)$$

$$\ddot{x} = 4\pi^2 f^2 x_m \sin(2\pi ft + \pi) \quad (1-3)$$

可以看出,对于简谐振动来说,振动的位移、速度、加速度的峰值与振动频率 f 有下面简单的数学关系

$$x_m = 2\pi f x_m \quad (1-4)$$

$$\ddot{x}_m = 4\pi^2 f^2 x_m = 2\pi f \dot{x}_m \quad (1-5)$$

正是由于这种数学关系,便可以用速度传感器或压电式加速度计,并通过微分或积分的转换装置,测出所有这三种参数。上述四个参数 x_m 、 $\dot{x}_m$ 、 $\ddot{x}_m$ 和 f ,只要知道其中任意两个便可以计算出其余两个。

峰值在实用中有其自己的价值,如结构的强度性破坏,受空间限制的零部件的振动都直接与峰值有关。

对于周期相同的几种振动,尽管峰值相同但振动的波形、性质和效果均不一致。图1-1为三种周期振动的振动波形。为弥补峰值指示的不足,在动力学实验中另引入“有效值”和“平均值”两种指示值。

有效值也叫均方根值,是振动的时间历程的一个重要描述量,该描述量与振动能量的含量有关。用 x_{rms} 来表示。

对于一个任意波形,该描述量的有效值为

$$x_{rms} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1-6)$$

若是周期振动的波形,则

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1-7)$$

若是简谐振动

此为试读,需要完整PDF请访问: $x = x_m \sin(\omega t + \alpha)$ www.ertongbook.com

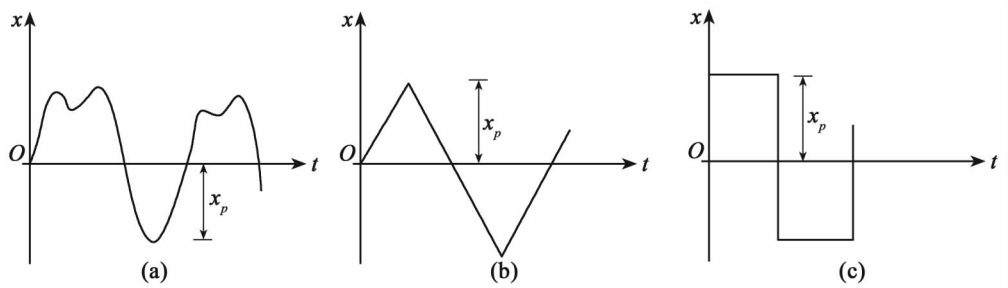


图 1—1 三种周期振动的波形

那么

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x_m^2 \sin^2(\omega t + \alpha) dt} = \frac{1}{2} \sqrt{2} x_m \tag{1—8}$$

当然 ,振动波形可以是位移波形 ,也可以是速度、加速度波形。有效值是度量振动波形的一个较好的指标 ,该指标兼顾了整个振动过程的时间历程。同时 ,位移的有效值代表了振动系统的势能含量 ,速度的有效值代表了振动系统的动能含量。

平均值又称绝对平均值 ,用 x_{av} 来表示。

对于任意波形 ,其平均值为

$$x_{av} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \tag{1—9}$$

若是周期振动的波形 ,则

$$x_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \tag{1—10}$$

若是简谐振动的波形 ,则

$$x_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |x_m \sin(\omega t + \alpha)| dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{1}{2}T} x_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} x_m = 0.637 x_m \tag{1—11}$$

显然 ,对于简谐振动 x_p 、 x_{av} 和 x_{rms} 三者有以下关系

$$x_{rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} x_{av} = \frac{1}{\sqrt{2}} x_p \tag{1—12}$$

一般情况下 ,则有

$$x_{rms} = F_f x_{av} = \frac{1}{F_c} x_p \tag{1—13}$$

式中 F_f 称为波形系数 F_c 称为波峰系数。 F_f 、 F_c 在一定程度上反映了振动波的形状差异。

正弦波

$$F_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$$

$$F_c = \sqrt{2} = 1.414$$

三角波

$$F_f = 1.156$$

$$F_c = 1.732$$

矩形波

$$F_f = 1$$

$$F_c = 1$$

1.2.2 振动频率

振动频率是振动的重要参数之一。分两个方面来表述,一方面是系统本身的振动频率,即系统固有频率;另一方面是系统受到干扰的激振频率,即所谓强迫振动频率。

系统固有频率的测定方法很多,如自由激振法、共振激励法、脉动分析法等。在这些方法中激励是关键,共振是原理。

自由激振法是通过突加荷载使系统产生初速度,或突卸荷载使系统产生初位移,使系统产生一个有衰减的自由振动,分析其自由振动曲线得到周期,从而判断其固有频率。

共振激励法是用专门的激励设备,对结构体系施加振动荷载,使其产生强迫振动,由共振现象判别结构体系的动态特性。由于弹性体系本身有一个像“滤波器”那样所谓“滤波”的特点,即只有在结构体系的固有频率附近的频带内的振动才能传到结构体系上。也就是说,激励频率与结构体系固有频率相近或相同时,结构体系才出现共振现象,其振幅才会凸显出来,而共振频率以外的振动,其振幅是不明显的。因此,弹性体系就像一个可以“过滤”振动频率的“滤波器”。共振激励法就是利用这一特点测试其动态特性的。这一方法又包括简谐激励法、随机激励法和脉冲激励法等。

脉动分析法是利用大地晃动、空气流动、机动车辆、机器等环境随机激励,引起结构体系的强迫振动,亦是通过共振现象判别结构体系动态特性。其测试原理与共振激励相同,但在激励和分析方法上有差异。这一方法包括主谐量法、统计法、谐量分析法和功率谱分析法等。其中谐量分析法是采用傅立叶级数分析将脉动时程图分解后,作出其频谱图,利用频谱图上的峰值点判别结构体系的固有频率。而功率谱分析法和随机激励法一样,根据数理统计理论,将脉动响应记录图,进行概率分布函数和概率密度函数分析,找出记录图随机过程的总体平均值和对总体平均的自相关函数和互相关函数,再通过傅立叶变换,把脉动响应信号分析处理后得到一系列的相关函数,即功率谱函数、传递函数和相干函数等,然后根据功率谱图的峰值及其相关性质来识别结构体系的动态特性参数。

干扰力的激振频率可以通过频响分析法测定。简谐振动的频率只有一个;周期振动的频率有若干个,该频率可以分解为若干个不同频率的谐波的叠加,其频谱图是离散频谱图,该频谱图表示各阶谐波的幅值和相应频率的分布情况;与此相应,非周期的随机振动波形的频谱图则是连续频谱图,该频谱图需要用功率谱密度函数 $G(f)$ 来表示。动力学实验中,频率分析通常要用频率分析仪或频谱仪来测试。

1.2.3 振动相位

振动信号的相位信息常常被作为次要问题而被忽视。但在某些情况下,相位测量显得十分重要。如:

(1)在振型的测量中,分析结构、机器的振型时,需要知道各测点的振动信号相位角的大小,找出振动节点、确定振型;

(2)在判断共振点时,共振点前后,不仅振动幅值有变化,而且相位也有突变;

(3)在动平衡实验中,振动相位的测量将成为主要内容,而且对相位的测量还要求有较

高的精度。

相位测试时,一般可以用相位计直接读数,也可以用录波比较法来确定。

§ 1.3 动力学实验仪器及其主要功能简介

动力学实验就是借助于专门的仪器和设备,通过恰当的实验方法和必要的数学处理与分析,求得所研究对象的相关信息的量值。动力学实验的内容包括:研究对象的自由振动的主要参数(自振频率、周期、振动位移、速度和加速度的幅值、阻尼及相位等)和研究对象的模态(振型及相应的固有频率)的测试;强迫振动的响应(研究对象的动应变、动挠度及其动力系数等);共振条件及阻尼对振动响应影响的测试;研究对象的防震、隔震与消震的实验。主要实验仪器如下:

1.3.1 激振设备

激振设备种类很多,按其使用方式可以分为脉冲锤、激振器和振动台等。其主要功能是激发被测试对象,使之处于强迫振动状态,以达到某些动力实验的目的。

脉冲锤又称力锤。力锤是模态实验中常用的一种激励设备。力锤的工作原理是给试件施加一种局部的冲击激励,并给出冲击力的时域信号,以便与试件上各点测得的响应信号一起进行频响函数分析,从而确定试件的模态。力锤的质量从几克到几千克都有。力锤的冲击力最大可以达几万牛顿。由于其结构简单,使用方便,便于携带,因此工程实验中使用广泛。

激振器是安装在被测试件或其他固定物体上对试件直接激振的设备。常用的激振器有离心惯性式和电磁式两种。激振器的原理是其产生的激励力直接作用在试件上产生强迫振动。

振动台是一种具有振动平台的激振器,试件安装在振动平台台面上,受到一个牵连运动的激振,此时试件上各质点均受到力的激励,激励力是分布力系。因此,振动台的工作原理与激振器相同。常用的振动台有机械式、电磁式和电液式等类型。武汉大学工学部力学试验中心于20世纪80年代末从日本鹭宫制作所进口一台振动台就属于电液式振动台。该振动台的台面尺寸,水平振动时为 $2 \times 2 \text{ m}^2$,垂直振动时为 $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$;最大激励力为5t;水平激振时,最大装载重量为2.5t($a_{\max} = 1.0 \text{ g}$);垂直激振时,最大装载重量为1.0t($a_{\max} = 3.0 \text{ g}$);频率范围为0.5~100Hz;最大位移为 $\pm 100 \text{ mm}$;最大速度为60cm/s;可以完成建筑与结构物模型的抗震实验,共振与耐久实验,动态特性实验,防震与隔振实验,仪器标定实验等。

1.3.2 传感器设备

传感器设备包括:电阻应变片、应变盒、磁电式速度传感器、压电式加速度传感器、压电式力传感器、压阻式加速度传感器、伺服式加速度传感器、非接触涡流式位移传感器、阻抗头等。

传感器设备的主要功能是把被测试对象的机械振动物理量转换为电信号,供二次仪表放大及进一步记录、显示分析与处理。

1.3.3 信号放大设备

常见的信号放大设备有:电压放大器、电荷放大器、测震仪、动态电阻应变仪等。

信号放大设备的主要功能是将传感器输出的电信号进行放大,以便示波器显示,记录设备记录,分析设备进行数据处理和信号分析。

1.3.4 显示与记录设备

常见的显示与记录设备有:光线示波器、电子示波器、磁带记录仪等。

该设备的主要功能是将信号放大设备所放大的电信号显示和记录,以备分析和处理。

1.3.5 分析设备

常见的分析设备有:频谱分析仪、动态信号处理仪,以及以电子计算机为主体的数据处理与分析系统。

该设备的主要功能是对所测点信号进行分析、处理。

由上述可见,从振动信号的拾取开始,经过许多环节才能获取相关的信息量。只要有一个环节出现问题,则测量结果和被测量的真实值就会不一致,即会出现测量误差。

§ 1.4 动力学实验的误差及精度

动力学实验是动态测量,也称过程测量,即被测的量是随时间的变化而变化的。一般情况下,测量结果与被测量的真值总是不一致的,它们的差值称为测量误差,又称为实验误差。这种误差是测量仪器本身、环境条件、测量方法、操作技术等共同作用的结果。在动力实验过程中,除了正确地进行计算和测量,合理地选用仪器和测量方法外,还需对所测数据进行合理地分析和正确地处理,就可以减少或消除这些误差,从而得到最为接近实际的真实值。

误差按其性质和产生的原因可以分为偶然误差、系统误差和过失误差。偶然误差是指由不易控制的随机因素引起的误差,亦称随机误差。这种误差是在相同条件下重复测试同一量值,每次测量结果都不相同,但总是在某一值的上、下起伏变化。在大量的测试中,偶然误差具有某种特定的分布规律,呈现出某种统计特征,即其分布具有对称性。偶然误差是由测试过程中一系列随机因素所造成的,在一定条件下,其绝对值不超过某一限度,该限度可以用统计方法估算,且经过多次测量时,误差(绝对值)小的测量结果出现的次数多,误差大的测量结果出现的次数少。对偶然误差的研究可以利用概率论给出其数学模型,进而估计出测量结果、误差范围以及在一定范围内可以信赖的程度。在误差分析理论中,常用精密度来反映偶然误差的大小,例如在相同条件下,经多次重复测量,如果测量结果互相接近,互相密集的程度高,则表明偶然误差小;若测试结果分散,精密程度低,则表明偶然误差大。

综上所述,增加测量次数可以减少或消除偶然误差,因为次数增加,其算术平均值将趋近于零。

系统误差是指在重复测试同一量值时,呈现出固定不变或有确定性规律变化的那一部分测量误差。对于固定不变的误差又称为恒定误差,对于按一定规律变化的误差,则称为变

值误差。系统误差是由某种固定不变的因素引起的 ,其原因大多是仪器问题、环境因素改变或 个人不正常的习惯等造成的。系统误差表明测量结果偏离真值或实际值的程度 ,一般用 准确度反映系统误差的大小。这些问题可以通过对测量值进行修正的办法予以校正和 消除。

过失误差是指明显歪曲真实值的误差 ,是由于实验人员量测错误、读错刻度值、操作不 当、记录错误等人为过失造成的。只要细心操作 ,加强校对 ,加以注意 ,是可以避免的。对于 包含过失误差的实验数据应当舍弃。

测量精度是表示测量结果与被测量真实值的接近程度 ,测量精度是反映测量总误差的 一个重要指标。若真实值为 A_0 ,某一次的测量值为 A_1 ,多次测量的平均值为 $\bar{A}$,则

$$\text{总误差} = \Delta A = A_1 - A_0 \tag{1—14}$$

$$\text{偶然误差} = \Delta A_1 = A_1 - \bar{A} \tag{1—15}$$

$$\text{系统误差} = \Delta A_2 = \bar{A} - A_0 \tag{1—16}$$

故

$$\text{总误差} = \text{偶然误差} + \text{系统误差}$$

即
$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 \tag{1—17}$$

总误差又称绝对误差。由于绝对误差往往不能说明计量、测量的精度 ,故采用相对误差 来表示 ,相对误差有以下几种形式 :

(1)实际相对误差 δ_A

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \tag{1—18}$$

(2)示值相对误差 δ_{A_i}

$$\delta_{A_i} = \frac{\Delta A}{A_i} \times 100\% \tag{1—19}$$

(3)满度相对误差 δ_m

$$\delta_m = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \tag{1—20}$$

A_m ——仪器的满度值(仪器示值的上限)。

第2章 动力学基础实验

动力学基础实验主要解决振动基本参数的测试问题。振动的基本参数包括两个方面：一方面是激励的振幅、频率与相位；另一方面是振动系统的固有频率、振幅（振型）、阻尼及广义质量、广义刚度等振动特性参数。

本章主要介绍用常规的、传统的仪器测量振动参数的基本方法。其步骤如下：

1. 明确所测参数及实验目的。
2. 明确测试原理、确定测试方法。依其测量性质和具体情况合理选择。
3. 制定具体的实验方案。为此，要综合考虑各方面的因素并注意以下几点：

(1) 对振动体的振动特性要有一初步了解，从而能准确选择测点。同时要考虑传感器的质量对被测振动体运动的影响，一般可以用下式来估计

$$a_r = a_s \frac{m_s}{m_s + m_a}, \quad f_s = f_r \sqrt{\frac{m_s + m_a}{m_s}} \quad (2-1)$$

式中 a_r ——附有传感器后，振动体的加速度响应；

a_s ——没有附传感器时，振动体的加速度响应；

m_s ——振动体的有效质量；

m_a ——传感器的质量；

f_s ——没有附传感器时，振动体的固有频率；

f_r ——附有传感器后，振动体的固有频率。

(2) 选择传感器及恰当的测试系统的仪器设备。对传感器的选择除考虑其尺寸、机电性能、运行环境、辅助设备外，主要取决于振动体的振动性能。同时，要考虑传感器对仪器设备的特殊要求。

(3) 绘出实验仪器设备的连接方框图。

(4) 选择传感器的安装方式。

(5) 弄清各仪器的灵敏度系数，并做测试系统的标定工作。

4. 对测量数据进行处理与实验成果分析。
5. 问题与思考。

§ 2.1 简谐振动频率、相位的测试

2.1.1 简谐振动频率的测量

简谐振动频率测量的方法很多，这里介绍几种。