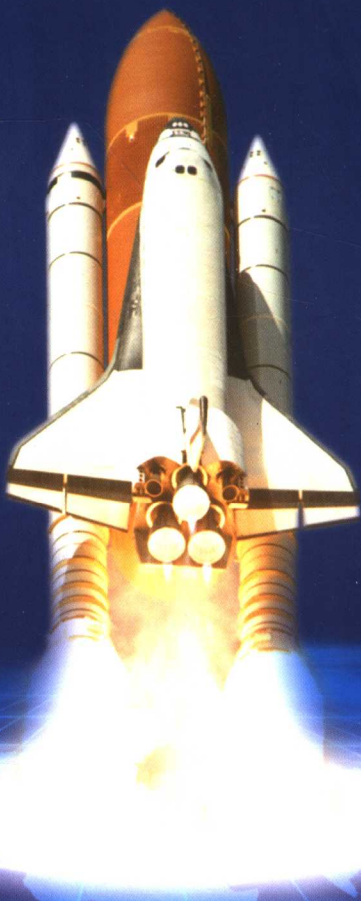




普通高等教育“十五”国家级规划教材

工程力学实验

范钦珊 王杏根 陈巨兵 鲁 阳 编著



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十五”国家级规划教材

工程力学实验

范钦珊 王杏根 陈巨兵 鲁 阳 编著

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学实验 / 范钦珊等编著. —北京: 高等教育出版社, 2006. 5

ISBN 7-04-019385-X

I. 工... II. 范... III. 工程力学-实验-高等学校-教材 IV. TB12-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 059574 号

策划编辑 黄毅 责任编辑 张玉海 封面设计 张楠 责任绘图 朱静
版式设计 张岚 责任校对 杨凤玲 责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landrac.com
印 刷	国防工业出版社印刷厂		http://www.landrac.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2006 年 5 月第 1 版
印 张	13.25	印 次	2006 年 5 月第 1 次印刷
字 数	240 000	定 价	15.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19385-00

内容提要

为了适应我国高等学校教育教学改革的要求,特别是为了创建“国家力学实验教学示范中心”,全国建有“国家工科基础课程(力学)教学基地”的部分院校联合编写了这本“工程力学实验”教材。

书中素材的选取基于两部分:一部分是“面向 21 世纪课程教学内容与体系改革”成果及“国家工科基础课程(力学)教学基地”成果;另一部分则是著者们的科研成果。

本书内容包括以下几部分:一是基本实验,包括理论力学实验(单自由度振动实验,科氏加速度与科氏惯性力演示实验,动反力与动平衡实验,转动惯量实验等);材料力学性能实验(金属材料拉伸、压缩、扭转力学性能测试,冲击实验,金属疲劳实验等);电测应力分析实验(应变电测技术基础,弯曲正应力实验,薄壁圆筒弯、扭组合变形实验,偏心拉伸或压缩实验,压杆稳定性实验等)。二是光测实验,包括光弹性基本实验,云纹干涉技术实验,电子散斑干涉技术实验,激光全息干涉实验简介。三是提高性实验,即综合性、设计性和研究性实验,包括组合梁应力分析实验,预应力梁实验,复合受力薄壁筒内力分离实验,用振动法测定压杆临界力实验,异型钢在偏心载荷作用下的应力测试实验,单向增强复合材料弹性常数测定实验,残余应力测定实验等。

本书可以作为“工程力学实验”独立设课的教材,其中的基本实验部分及部分综合性和研究性实验也可以供“工程力学实验”非独立设课教学使用。

序

“工程力学”所涵盖的内容比较广泛,根据我国普通高等学校所开设的基础力学课程系列,“工程力学”课程仅仅涉及“理论力学”和“材料力学”课程。相应地,“工程力学实验”也只涉及“理论力学实验”和“材料力学实验”。

工程力学实验不仅可以帮助学生深入掌握课程的理论内容,更重要的是可以帮助学生提高动手能力,培养创新精神。而且,由于工程力学具有很强的工程背景,工程力学实验又是解决很多工程问题的重要方法之一。因此,通过工程力学实验,还可以提高学生解决工程实际问题的能力。

2000年,教育部高等教育司主持制定“十五”普通高等学校教材建设规划时,考虑到即将进行的“全国实验教学示范中心”立项建设工作需要,将“工程力学实验”教材列入“十五”国家教材建设的重点项目。

为了适应我国高等学校教育教学改革的要求,特别是为了创建“国家力学实验教学示范中心”,全国建有“国家工科基础课程(力学)教学基地”的部分院校——哈尔滨工业大学、浙江大学、南京航空航天大学、清华大学及正在筹建备案基地的院校——华中科技大学和北京工业大学联合编写了这本“工程力学实验”教材。

书中素材的选取基于两部分:一部分是“面向21世纪课程教学内容与体系改革”成果及“国家工科基础课程(力学)教学基地”成果;另一部分则是著者们的科研成果。

本书内容可以划分为基本实验和提高(扩展)性实验两大部分。第1章至第5章是基本实验,包括理论力学实验和材料力学实验;第6章和第7章是提高(扩展)性实验,包括光测力学实验和综合性、设计性、研究性实验。

上述实验内容,可以作为“工程力学实验”独立设课的内容;其中的基本部分及部分综合性和研究性实验也可以作为非独立设课的实验教学内容。

鉴于不同院校、不同专业所开设的“工程力学实验”课程教学时数不尽相同,所需要的实验内容也不可能完全相同,因此,在内容的选择方面留有比较大的空间,力求使不同院校、不同专业具有一定的选用余地。

本书的写作分工如下:华中科技大学王杏根编写第4章4.1~4.4节、第5章、第7章的7.3节、附录A;上海交通大学陈巨兵编写第6章、第7章的7.8节和7.10节;南京航空航天大学邓宗白编写第2章2.3节,并与徐鹿麟合写第7章的7.11节;哈尔滨工业大学赵书山编写第3章、第7章的7.4节和7.13节;

清华大学范钦珊编写第1章;浙江大学鲁阳编写第4章的4.5节、第7章的7.2节;清华大学付朝华编写第7章的7.1节、7.5节、7.6节和7.9节;北京工业大学张亦良编写第7章的7.7节和7.12节。上海交通大学余征跃编写第2章的2.1节和2.5节。南京航空航天大学陈建平和周克印分别编写第2章的2.2节和2.4节。

本书由天津大学亢一澜教授审稿。深圳新三思材料检测有限公司、四川拓普数字设备有限公司、北戴河电气自动化研究所、红山试验机有限公司为本书提供了部分仪器设备资料,在此表示衷心感谢。

由于各参编院校所提供的“工程力学实验”素材非常丰富,故在统稿中取舍具有一定的难度,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

著者

2006年4月

目 录

第1章 绪论	1
第2章 理论力学实验	5
2.1 单自由度振动实验	5
2.2 科氏加速度与科氏惯性力演示实验	18
2.3 动反力与动平衡实验	20
2.4 安全带锁紧演示实验	27
2.5 转动惯量实验	29
第3章 材料力学实验 I——力学性能实验	34
3.1 拉伸和压缩实验	34
3.2 扭转实验	50
3.3 冲击实验	57
3.4 金属疲劳实验	61
第4章 材料力学实验 II——应变电测技术基础	66
4.1 概述	66
4.2 电阻应变片	67
4.3 应变测量电路与测试技术	70
4.4 实际测量数据的修正	83
4.5 应变测量仪器	86
第5章 材料力学实验 III——电测应力分析实验	94
5.1 梁的弯曲正应力实验	94
5.2 弹性模量 E 、泊松比 μ 的测定	97
5.3 偏心拉伸(拉、弯或压、弯组合)内力素测定实验	101
5.4 薄壁圆筒的弯扭组合变形实验	104
5.5 等强度梁电测综合训练实验	110
5.6 压杆稳定性实验	116
第6章 光测力学实验	121
6.1 物理光学基础	121
6.2 平面光弹性原理	123
6.3 光弹性基本实验	134
6.4 云纹干涉技术	138

6.5	电子散斑干涉技术实验——物体离面位移测量	145
6.6	激光全息干涉实验简介	148
第7章	综合性、设计性、研究性实验	155
7.1	组合梁应力分析实验	155
7.2	预应力梁实验	157
7.3	薄壁圆筒受内压、弯、扭组合载荷作用时内力素及 主应力的测定	158
7.4	测定压杆临界力的振动法	160
7.5	大挠度压杆稳定性实验	163
7.6	单向增强复合材料弹性常数测定实验	166
7.7	表面残余应力测定实验	169
7.8	薄壁构件拉伸实验	173
7.9	开口薄壁杆件应力测试实验	174
7.10	不同截面结构的扭转	176
7.11	称重传感器原理综合设计性实验	178
7.12	弹塑性应力及电测法的综合实验	183
7.13	悬臂梁的模态实验	184
附录 A	实验误差分析与数据处理	186
附录 B	与工程力学实验有关的部分国家标准	201
参考文献	202

绪 论

力学是研究物质宏观机械运动的学科。所谓“机械运动”是指物体空间位置的改变,如物体的移动和变形、气体和液体的流动,等等。所谓“宏观”是指与人的尺寸相差不大的空间范围。自然界及工程技术过程都包含着这种最基本的运动。

工程力学是研究自然界及各种工程中各种机械运动最普遍、最基本的规律,以指导人类认识自然界,科学地从事工程技术工作。

作为大学的主要技术基础课程的工程力学,其所研究的机械运动主要有两大类:其一是,研究物体的刚体运动,即研究作用在物体上的力和运动之间的关系;其二是,研究物体的变形,即研究作用在物体上的力与物体变形之间的关系。将这些应用于工程,可以解决工程结构和构件的运动学和动力学问题,以及强度、刚度和稳定性问题。

传统的工程力学研究方法包括理论分析方法和实验分析方法。随着现代计算机技术的飞速发展与广泛应用,现在又增加了新的方法,即计算机分析方法。三种方法各司其职,相辅相成。实验分析与实验研究方法在工程力学领域占有十分重要的地位。

工程力学实验的基本原理与基本方法几乎应用于包括航空航天、交通运输、电力电气、土木水利、机械、动力、石油化工、地质勘探等所有工程领域。工程力学实验方法可以用于检验理论分析的正确性,检验工程结构设计的合理性、安全性和可靠性。例如,新型号飞行器产品在试飞前需要进行静载力学实验(图 1.1),测试各主要部位的应力和变形,以评价其强度、刚度和稳定性。

对于已经投入运行的工程结构,例如,核反应堆、高层建筑、大型桥梁等,为了确保安全,需要对这些结构的动力学响应、动态的应力和位移进行实时监测,这些实时测试都是以工程力学实验技术为基础的。图 1.2 所示为大型桥梁进行实时力学监测。

工程力学实验与现代计算机相结合,还可以为发展新理论、设计新型号结构及研制新材料提供充分、可靠的依据。有效地解决许多理论上尚不能解决的工程难题。图 1.3 所示为大型构件双向应力分析实验。图 1.4 所示为我国新型超高压紧凑型输电线路中的相间间隔棒的稳定性实验。

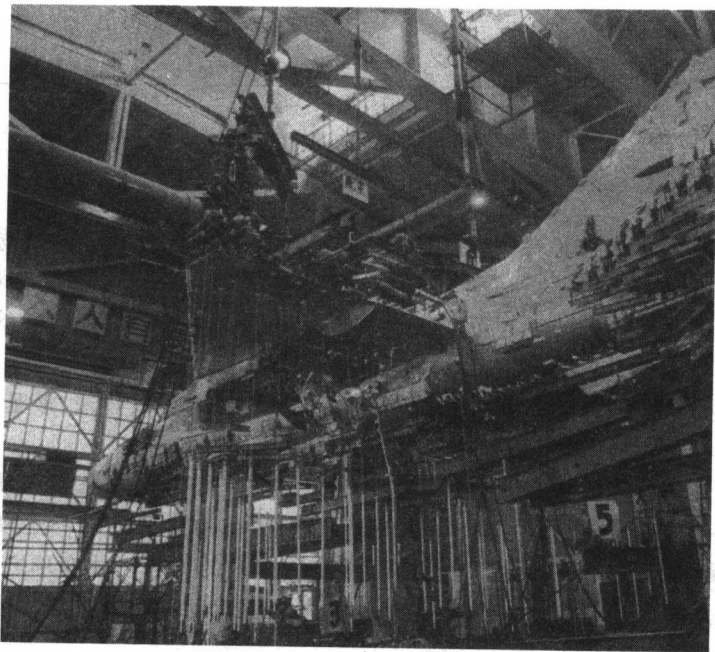


图 1.1 飞机的静载力学实验

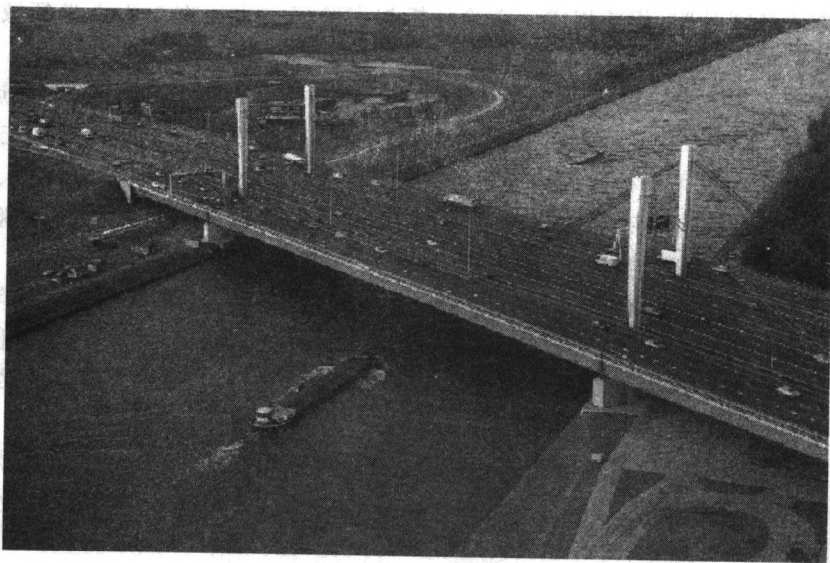


图 1.2 大型桥梁进行实时力学监测

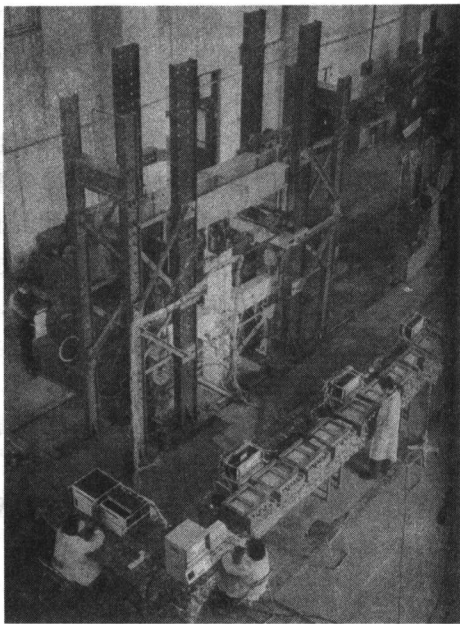


图 1.3 大型构件双向应力分析实验

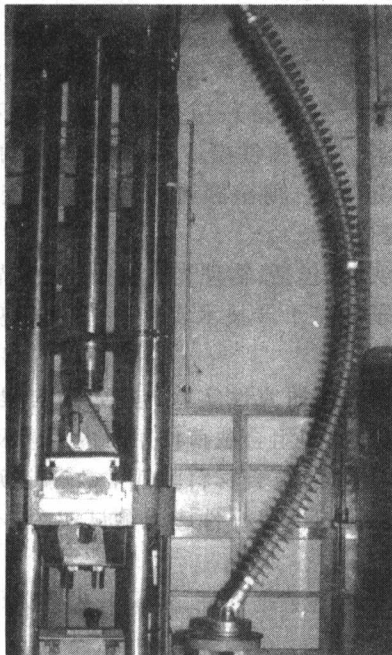


图 1.4 超高压紧凑型输电线路相间间隔棒的稳定性实验

作为大学本科的课程,“工程力学实验”不仅可以帮助学生深入掌握课程的理论知识,更重要的是可以让学生锻炼动手能力、培养创新精神及分析和解决工程实际问题的综合能力。

为此,1996年以来,全国很多高等学校在进行面向21世纪基础力学课程内容与体系改革时,都将工程力学(理论力学和材料力学)实验改革放在很重要的位置,在基础力学教学第一线工作的广大教师,根据新世纪国家建设对于人才的需要,对工程力学实验的教学内容、体系与方法大力进行改革,取得了一系列很有价值的成果。这些成果大致包含两方面的内容:第一是,改革基本实验,加强启发性,激发学生动脑、动手且着力提高学生的实验操作能力;第二是,坚持教学与科研结合,努力将自己的科研成果转化为实验教学资源,开发出一大批综合性、研究性和设计性实验,并成功研制了许多基础力学实验设备与装置。

这些改革成果大大地推动了工程力学课程整体改革。

编撰本书之初,编者力图采撷这几年工程力学实验方面的全部成果,但是,限于篇幅,收入本书的只是其中的一部分。

全书共有7章和2个附录。

第1章为绪论。

第2章为理论力学实验,包括:单自由度振动实验,科氏加速度与科氏惯性力演示实验,动反力与动平衡实验,安全带锁紧演示实验和转动惯量实验。

第3、4、5章为材料力学实验,包括:力学性能实验(含:拉伸和压缩实验,扭转实验、冲击实验和金属疲劳实验);应变电测技术基础;电测应力分析实验(含:梁的弯曲正应力实验,材料弹性模量 E 、泊松比 μ 的测定,偏心拉伸(拉、弯或压、弯组合)内力素测定实验,薄壁圆筒的弯扭组合变形实验、等强度梁电测综合训练实验、压杆稳定性实验)。

第6章为光测力学实验,包括:物理光学基础,平面光弹性原理,光弹性基本实验,云纹干涉技术,电子散斑干涉技术实验——物体离面位移测量,激光全息干涉实验简介。

第7章为综合性、设计性、研究性实验,包括:组合梁应力分析实验,预应力梁实验,薄壁圆筒受内压、弯、扭组合载荷作用时内力素及主应力的测定实验,大挠度压杆稳定性实验,单向增强复合材料弹性常数测定实验,表面残余应力测定实验,薄壁构件拉伸实验,开口薄壁杆件应力测试实验,不同截面结构的扭转实验等。

附录A为实验误差分析与数据处理,附录B中收入了与工程力学实验有关的部分国家标准。

理论力学实验

2.1 单自由度振动实验

2.1.1 自由振动

一、实验目的

1. 理解与掌握单自由度系统自由衰减振动的基本知识。
2. 记录单自由度系统的自由衰减振动曲线,通过动态分析仪测量系统的固有频率 ω_0 、阻尼比 ζ 、等效质量 m_{eq} 和等效刚度 k 等振动参数。
3. 初步了解振动测试的仪器设备和工程实验建模方法。

二、仪器、设备及试样

1. 简支梁系统,如图 2.1 所示。

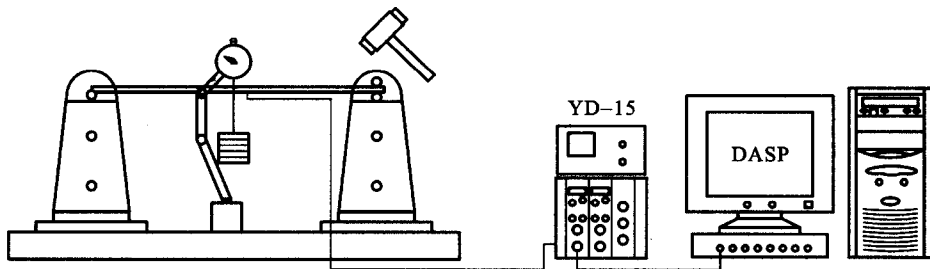


图 2.1

2. 动态电阻应变仪 YD-15。
3. 动态分析仪 DASP。
4. 砝码,百分表,橡皮锤。

三、实验原理与方法

1. 理论知识

工程中经常使用简化,把复杂结构简化成简单模型,从而解决实际问题。现将简支梁可以看成是一个单自由度系统,由质量、弹簧和阻尼器组成,相应的参数为质量 m 、刚度 k 和阻尼 c ,如图 2.2 所示。

以静平衡位置为原点建立坐标,由牛顿定律得到运动方程:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

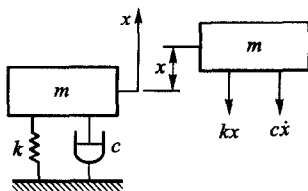


图 2.2

令

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad 2\delta = \frac{c}{m} \quad (2.2)$$

式中 δ 称为阻尼系数; ω_0 是相应的无阻尼固有频率,式(2.1)可以得出

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (2.3)$$

再令

$$\zeta = \frac{\delta}{\omega_0} \quad (2.4)$$

式中 ζ 称为相对阻尼系数,或者称阻尼比,由式(2.3)可得出

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (2.5)$$

在 $\zeta < 1$, 即处于欠阻尼状态时,系统为振幅按指数规律衰减的简谐振动,也称为衰减振动,可令

$$x = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_d t + \alpha) \quad (2.6)$$

如图 2.3 所示。其中 ω_d 为有阻尼固有频率,有

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.7)$$

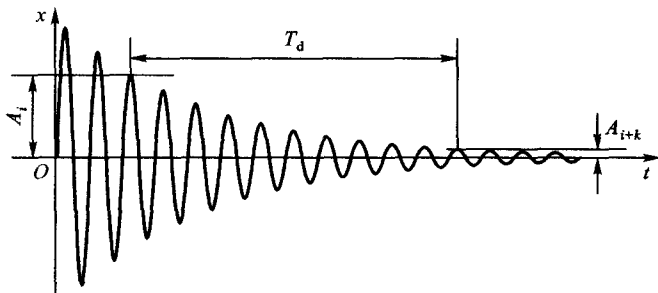


图 2.3

减缩因数 η :

$$\eta = \frac{A_i}{A_{i+1}} = \frac{Ae^{-\delta t_i}}{Ae^{-\delta(t_i+T_d)}} = e^{\delta T_d} \quad (2.8)$$

有阻尼时的振动周期 T_d 和固有频率 ω_d ：

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{1}{f_d} \quad (2.9)$$

$$\omega_d = 2\pi f_d \quad (2.10)$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi f_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.11)$$

对数减缩 Λ ：

$$\Lambda = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} = \delta T_d \quad (2.12)$$

进行 K 次平均后，得

$$\Lambda = \frac{1}{K} \ln \frac{A_i}{A_{i+k}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.13)$$

即

$$\Lambda = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.14)$$

当 $\zeta < 0.2$ 时，式(2.13)可近似为

$$\zeta = \frac{\Lambda}{2\pi} \quad (2.15)$$

从而由式(2.10)和式(2.15)得到系统的有阻尼固有频率 ω_d 和阻尼比 ζ 。

2. 实验方法

(1) 等效刚度的测定

由于梁在弹性范围内的挠度与梁所受载荷成正比，因此只要在简支梁的跨中点加载，同时用百分表读出该点的挠度值，即可测出简支梁跨中的等效刚度。

(2) 自由衰减曲线记录与系统频率和阻尼比等参数分析

在简支梁跨度中点贴应变片的作用是使梁在振动时的应变变化转化成电阻量的变化，再将应变片按半桥接法接到动态应变仪上，把电阻量的变化信号放大，并转化成电压量的变化信号，输出到示波器或分析仪，这样即可观察和记录振动的波形。测试系统框图如图 2.4 所示。

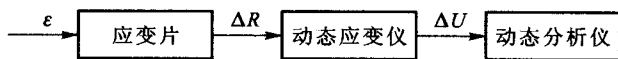


图 2.4 测试系统框图

应变振动信号 $\varepsilon(t)$ 也反映了系统的振动 $x(t)$ 的规律, 所以实验中直接用 $\varepsilon(t)$ 来代替 $x(t)$ 的测量来研究系统的振动规律。

(3) 等效质量的测定

在原来的简支梁上附加一个已知质量 Δm , 假定附加前后简支梁系统的刚度不变, 即

$$k = m\omega_0^2 = (m + \Delta m)\omega_{0\Delta m}^2 \quad (2.16)$$

式中: m ——附加前系统的等效质量;

ω_0 ——附加前系统的固有频率;

$m + \Delta m$ ——附加后系统的等效质量;

$\omega_{0\Delta m}$ ——附加后系统的固有频率。

在小阻尼情况下 $\zeta \ll 1$, 则

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \approx \omega_0 \quad (2.17)$$

$$\omega_{d\Delta m} = \omega_{0\Delta m} \sqrt{1 - \zeta^2} \approx \omega_{0\Delta m} \quad (2.18)$$

将式(2.17)、式(2.18)代入式(2.16)可得

$$m\omega_d^2 = (m + \Delta m)\omega_{d\Delta m}^2 \quad (2.19)$$

$$\frac{\omega_d^2}{\omega_{d\Delta m}^2} = \frac{m + \Delta m}{m} = 1 + \frac{\Delta m}{m} \quad (2.20)$$

$$\frac{(2\pi f_d)^2}{(2\pi f_{d\Delta m})^2} = \frac{f_d^2}{f_{d\Delta m}^2} = 1 + \frac{\Delta m}{m} \quad (2.21)$$

由式(2.21)可得, 简支梁的等效质量 m 为

$$m = \frac{\Delta m}{\frac{f_d^2}{f_{d\Delta m}^2} - 1} \quad (2.22)$$

四、实验步骤

1. 等效刚度 k_{eq} 测量步骤

在简支梁跨中点处用砝码加载 ($i = 1, 2, \dots, 5$), 同时用百分表读出该点对应的挠度值, 在表 2.1 中记录下数据, 并计算出等效刚度 k_{eq} (单位为 N/m)。

2. 自由衰减振动曲线记录与系统频率和阻尼等参数分析

(1) 启动动态分析仪

打开计算机电源, 进入 Windows XP 系统, 点击分析桌面图标 Coinv Dasp 2005

标准版, 选择虚拟仪器库, 点击 单通道, 分析仪进入采集与分析状态。

(2) 进入分析仪主窗口

进入分析仪主窗口后,选择 **波谱双显**,分析窗口同时显示时域波形和频谱图。

(3) 屏幕参数设置

采样通道:1;

平均方式:单次不平均;

纵轴尺度:固定;

频谱形式:幅值谱 peak;

加窗函数:矩形窗;

频谱坐标:线性。

(4) 示波与调零

a. 点击 **采样参数** 按钮后,设置采样参数如下:采样频率为 1 kHz;采样点数为 1 k;程控倍数为 1;采样方式为自由触发。

b. 点击 **开始** 按钮,开始示波。

c. 对动态电阻应变仪进行调零:拨动按钮放置 **予** 挡,调节 **C**,使指针尽量靠近 0,然后拨动按钮放置 **静** 挡,调节电位器 **R**,使指针尽量靠近 0,同时观察分析仪时域波形靠近 0 线,调零结束。

d. 用橡皮锤轻轻敲击简支梁跨中,屏幕上显示振动曲线,调节敲击力,确保曲线幅度大小

(5) 曲线记录与数据保存

a. 整采样参数,点击 **采样参数** 按钮,改变采样方式为触发方式,触发电平为 100 mV,滞后点数为 32。

b. 点击 **开始** 按钮,等待触发采样,轻敲简支梁跨中,振动曲线显示在屏幕上。

c. 点击 **保存** 按钮,保存数据文件。

(6) 数据分析与报告输出

a. 调用已保存的数据文件或分析当前振动曲线,并显示在屏幕上。

b. 求阻尼比和阻尼系数

先进行波形收数,收取 11 个极值数据操作。把 **自动收取极值** 项选中,将时域波形的读数光标定位到要收取的位置,然后按 **收数** 按钮,自动收取距离当前光标位置最近的极值点。依次收取 11 个极值数据,按 **列表** 按钮,屏幕上显示所有列表数据,在表 2.2 中记录下所有的极值数据,使用给定公式得出系统的固有