

表2 八节点等参单元给出之梁端挠度^[5](mm)
(理论解为: ~ 1.01591 mm)

	阶数 $N = 2$	阶数 $N = 3$
网格 C	0.954 02	0.775 72
网格 D	0.983 49	0.945 13
网格 E	0.996 19	0.984 76

由于八节点单元有边中节点,能较好地适应弯曲变形,故单元数目很少已能给出较好的解答.由表2可见积分阶数 N 取为3后解的精度反而下降了(注意此时刚度矩阵 $[K]$ 比 $N=2$ 时是更准确的).因此有限元解精度不一定总是正比于高斯积分的阶数 N 的(但对刚度矩阵而言,其精度的确是正比于 N 的).盲目地采用很高的积分阶数除增加运算时间外,可能减少解的精度.因此是不可取的.

对于更高阶的高斯积分反而给出较差的解答,本文认为原因如下:物体的自由度原本是无限的,但当我们选择了插值函数并划分好单元后,便相当于使物体的自由度变为有限.也即加大了物体的刚度.因此有限元模型的刚度要比实际构件的刚度为大.而用较低阶的积分算出的“较不准确的”刚度矩阵,却好像是使有限元模型的刚度稍为降低,这样反而使得有限元模型更接近于实际构件.故较低阶的积分形式有时反而可能给出更好的解答(如表2).这里需要强调的是,笔者决不是说用一个不准确的刚度矩阵反而就可以得出较好的解,只是指出切不可认为 N 越大越好.

3 讨论及结论

编程时究竟怎样决定 N 呢?下面是笔者的一些体会:

(1)当单元形状比较规则且各边为直线时(正方形及长

方形), $|J|$ 会为常数,且此时四节点和八节点单元 $[Ke]$ 中的各项一般分别为不高于二次和四次的多项式.鉴于 N 阶高斯积分有 $(2N-1)$ 次代数精度,取 N 分别为2和3已可精确算出四节点及八节点单元的 $[Ke]$,取更大的 N 只会浪费机时.以上结论对单元有少许变形时仍成立.

(2)对于比较规则的八节点单元,由 $N=3$ 算出的有限元解不一定总比由 $N=2$ 算出的好(仅管 $N=3$ 的 $[Ke]$ 比 $N=2$ 的 $[Ke]$ 准确).至于由数学上较准的方法得出力学上较差之解答,原因已论述.可是,一般情形下这个差别是不大的(见表2).

(3)对于八节点单元,当单元形状十分不规则(例如单元边的曲率十分大)时,由 $N=2$ 和 $N=3$ 得出的 $[Ke]$ 差别就比较大.此时,不应取 $N=2$.但由 N 分别为3,4,5算出的 $[Ke]$ 差别并不大,为减少机时及难度,可取 $N=3$ ^[6].

参 考 文 献

- 1 李人宪.有限元法基础.北京:国防工业出版社,2002
- 2 李瑞遐.有限元法与边界元法.上海:上海科技教育出版社,1993
- 3 蒋孝煜.有限元法基础.北京:清华大学出版社,1995
- 4 刘以烈,祖恩第,徐振铎.有限元法及其程序设计.天津:天津大学出版社,1999
- 5 Nam Sua Lee, Klaus-Jurgen Bathe. Effects of element distortions on the performance of isoparametric elements. *Int J Numerical Methods in Engineering*, 1993, 36
- 6 Bickford WB. A First Course in the Finite Element Method. 2nd Edition. IRWIN, Inc., 1994

动态特性与动应力综合性实验的研究与实践

王晓光 饶秋华 李社国

(中南大学土木建筑学院力学系,长沙 410075)

摘要 介绍了等强度梁动态特性与动应力综合测定实验,该实验有机综合了理论力学和材料力学相关的实验知识,并有较好的工程实用背景,通过实验课教学实践,收到了良好的教学效果.

关键词 等强度梁,实验课,综合性

随着教学改革的进一步深化,如何对低年级本科生开好综合性、设计性实验课是大家所关注的课题.尤其是开好多学科综合性实验,提高实验教学质量,是培养21世纪高素质复合型人才的需要.

动态测试技术已广泛应用于土木、机械、交通运输、能源等工程中,动态测试是学生进行力学实验训练不可缺少的内容之一.本项目通过研制开发等强度梁动态特性与动应力

综合测定教学实验,实现了理论力学、材料力学和多种实验方法的综合,利用两大力学的交叉点将两门力学课程的相关知识有机地结合在一起,引入一定的工程测试背景,对全面培养学生的实验技能、综合分析、解决问题的能力具有十分重要的意义.

1 实验研究的基本内容

1.1 建立了一套科学合理、适应性强的实验教学体系.如制定了教学改革方案;修改了教学计划和教学大纲;新编并出版了实验教程,在材料力学实验中引入了动力学测试技术.

1.2 设计并制作了较为精密的等强度梁振动实验台.该种悬臂梁各截面应力相等,适用于动应力精确测量;且承受

动载荷时二阶、三阶谐波振幅较小,适用于测定一阶振动性能。该实验系统采用了高灵敏度的加速度传感器和先进的数字百分表,可较准确地测定梁的加速度振幅或动挠度,据此可从另一条途径计算出梁的动应力。该教学实验的主要内容有:静态应力、应变测量;动态应力、应变测量;动挠度(机械法、加速度法)测量;连续弹性体悬臂梁固有频率测量;单自由度系统自由衰减振动及固有频率、阻尼比测量。由多种方法测得的动应力值基本吻合,相对误差在 6% 以内,实验结果较为精确可靠,克服了以往动应力实验得到的实验结果无理论值比较,教学效果差的不足。

1.3 与测试仪器厂商合作,采用了较为先进的动态数据采集系统和数据处理程序,编制了教学版的数据采集软件,该软件有利于学生自我训练及掌握基本的数据处理技术。

2 实验装置

2.1 等强度梁:等强度梁用不锈钢制成,梁长为 L ,宽为 b ,厚度为 h 。如图 1 所示,该梁为等高变截面梁。

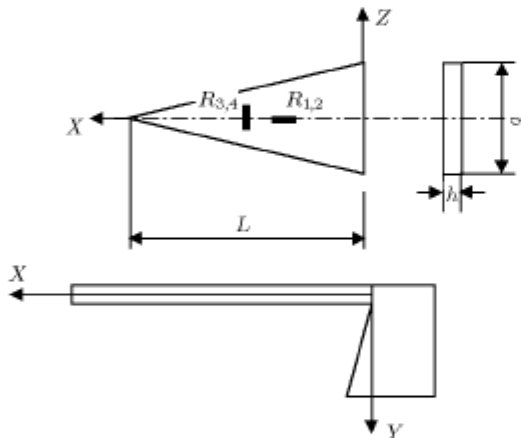


图 1 等强度梁结构图

2.2 数显百分表、加速度传感器:数显百分表为模拟 6 位显示;可自动记录、存储最大值、最小值等,加速度传感器为剪切型高灵敏传感器。

2.3 动态数据采集系统:动态数据采集系统是由两个相对独立的应变系统和振动测量系统组成的,它们可在同一个电脑工作平台上进行数据采集和数据处理。根据教学需要软件具有幅值、时域、频域分析,以及振动波形连续存储、缩放、再现等基本功能。

2.4 梁的激振系统:振动激振系统有两种形式,一种是在等强度梁上安装一个带偏心小锤的电动机,当电机转动时,偏心锤旋转,产生正(余)弦激振力。电动机在梁的端部,该附加质量增加了梁的惯性,有利于自由衰减振动测量。第二种是利用扫频信号发生器、功率放大器推动电磁激振器工作,使等强度梁产生正(余)弦振动。

3 实验原理

3.1 动应力的测量:在等强度梁上贴有 4 枚电阻应变片,即上、下表面各一纵一横,接成全桥如图 2 所示,在激

振力的作用下,电阻应变片可测量出梁的动应变变化值,梁在振动时的正应力振幅实测值为

$$\sigma_{ds} = E\varepsilon_d$$

式中 E 为梁的弹性模量, ε_d 为梁振动时的应变振幅值,如图 3 所示。

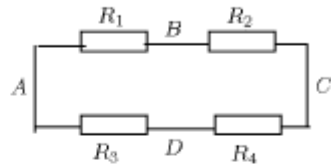


图 2 电桥原理图

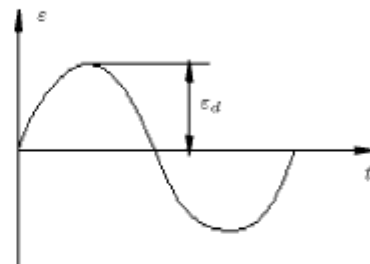


图 3 应变波形图

3.2 动挠度测量:动挠度是梁在振动时横截面的形心沿 Y 方向的位移。所测点离支座距离为 L_c 。依据材料力学的知识,等强度梁在垂直静态荷载作用下,梁的最大弯曲正应力

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6FL}{bh^2}$$

等强度梁在 C 点处的挠曲线方程

$$\Delta_c = \frac{6FLL_c^2}{Ebh^3}$$

由上两式可计算出梁的最大应力

$$\sigma = \frac{E\Delta_ch}{L_c^2}$$

在通常情况下,可认为梁的动挠度与动应力的函数关系与它在静载情况下应力与挠度的函数关系相同,因此,可使用上式计算梁的动应力

$$\sigma_d = \frac{E\Delta_{cd}h}{L_c^2}$$

式中 Δ_{cd} 为梁的动挠度,该动挠度可采用两种测量方法,即百分表法 (Δ_b) 和加速度传感器法 (Δ_a)。

用数显百分表测挠度:在等强度梁上表面离支座 L_c 处安装数显百分表一块,将百分表的功能设置在测量最大值档位上,在梁振动时,百分表可自动记录该点振动的幅值 Δ_b 。

用加速度传感器测挠度:在等强度梁下表面离支座 L_c 处安装加速度传感器一个,可测到动挠度的幅值 Δ_a 。等强度梁可分别在上述两种激振作用下,做简谐振动。设简谐振

动位移、速度、加速度分别为 x, v, a ，其幅值分别为 X, V, A

$$x = B \sin(\omega t - \phi)$$

$$v = \dot{x} = \omega B \cos(\omega t - \phi)$$

$$a = \ddot{x} = -\omega^2 B \sin(\omega t - \phi)$$

式中： B 为位移振幅； ω 为振动角频率； ϕ 为初相位。故 $X = B, V = \omega B = 2\pi f B, A = \omega^2 B = (2\pi f)^2 B$ 。

由上式可以看出，只要测到加速度的振幅 A 和该点的振动频率 f ，便可计算出该点的位移振幅 B

$$B = A / (2\pi f)^2 = \Delta_a$$

4 实验数据

下面列出 4 套实验装置的实验数据，表 1 为电测动应力与百分表测量法得到的动应力相比较的结果。

表 1 电测动应力与百分表测量法

台号	激振方法	电测动应力 σ_{ds}/MPa	百分表读数 /mm	百分表法 σ_d/MPa	误差 /%	加速度 a / $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	加速度法 σ_d /MPa	误差 /%
1	电磁激振	30.86	4.65	29.22	5.3	13.420	30.48	1.2
2	电磁激振	36.59	5.85	36.76	0.5	16.755	37.46	2.4
3	偏心电机	41.94	6.62	41.60	0.8	18.805	41.35	1.4
4	偏心电机	45.80	7.27	45.69	0.2	20.970	46.88	2.4

5 实践效果

我们已在三届本科生中开出了该项教学实验，通过 3 年的教学实践，实验装置和教材得到不断改进和提高，实验中所涉及的理论基础和实验技能较好地适应第 4 学期学生的能力和水平，学生对所开设的综合性实验表现出极大的兴趣和学习热情，这不仅加深了学生对基础理论的感性认识和对现代测试技术的了解，而且培养了学生的实验技能、综合分析问题和解决问题的能力，对后续专业课程的学习打下了良好

的基础。

参 考 文 献

- 1 李国强. 工程结构动力检测理论与应用. 北京: 科学出版社, 2001
- 2 刘习军. 工程振动与测试技术. 天津: 天津大学出版社, 1999
- 3 王杏根. 工程力学实验. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002

加强实验教学以培养学生的工程素质

李洪升 张小鹏 刘增利

(大连理工大学工程力学系, 大连 116023)

摘要 对基础力学实验教学进行改革, 通过增设工程模拟实验和转化工程课题为实验项目等措施, 培养学生的工程意识和工程概念, 增强学生的动手能力和解决问题的能力, 达到对学生的知识、能力和品质的综合培养, 收到很好的效果。

关键词 基础力学, 实验教学, 工程素质

1 引 言

基础力学实验是为全校一二年级本科生开设的量大面广的力学实验课, 其教学改革影响面广且意义重大。早在 1997 年作为学校重点系列课程改革项目, 开展了基础力学实验教学, 得到了学校和兄弟院系的大力支持和帮助。中科院院士钱令希先生非常支持和重视基础力学教学改革, 亲自参加教学改革研讨会, 不仅耐心地听取各位老师发言, 还用亲身经历说明基础力学改革的重要性并提出改革的具体想法, 大大推动了我校基础力学实验教学改革的进程。

基础力学实验教学改革的目的是, 旨在加强学生的感性认识, 提高动手能力, 树立工程意识和工程概念, 培养创新能力, 让学生学会使用实验方法和技能去研究和解决实际工程问题^[1]。本文是我们在实验教学改革, 培养学生现代工程素质方面的几点做法和体会。

2 开设工程模拟实验, 培养工程意识和工程概念

在工科院校的教学过程中, 实验教学在培养学生素质和能力方面更为重要。为了改变实验课只是理论课的“附属”地位, 树立起用实验知识和实验方法解决实际工程问题的能力和信心, 激发学生学好力学实验的积极性, 增加了全新的工程模拟实验。这些模拟实验来自工程实际, 经过简化, 在实验室内模拟完成。让学生进行这样一次结合实际的实验, 使他们亲身感受了用实验方法解决工程问题的全过程, 感受知识产生和发展的过程, 养成科学精神和创新思维的良好习惯。