

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2015.02.012

结构动力学课程多元化教学方法探讨

陈清军,李文婷

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘要:探讨了结构动力学课程的多元化教学方法。以三维框架结构的 ANSYS 数值试验、典型地震动加速度时程的获取与处理、结构动力特性的现场测试为例,介绍了改善课堂效果、开展课外实践的有效方法。结果表明,采用丰富的课堂教学形式并结合现场测试实践的多元化教学法,能有效激发学生的学习热情,帮助学生理解结构动力学概念,提高学生的创新能力。

关键词:结构动力学;教学方法;多元化;理论与实践;教学研究

中图分类号:TV311

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2015)02-0047-06

结构动力学着重研究结构对动力载荷的响应,它不仅是结构抗震、抗风、抗爆分析以及结构振动控制、健康监测等课题研究的基础,也是土木工程从业人员需要掌握的重要专业知识,结构动力学已成为土木工程专业的一门重要课程。随着超限及重要建筑的大规模建设,工程界对动力问题越来越重视,结构动力学知识逐渐成为评价土木工程技术人员专业能力的重要指标。

结构动力学分析在弹性抗力之外附加了与时间相关的惯性力和阻尼力,因此其求解过程比相应静力问题复杂得多^[1]。结构动力学涉及动力及随机问题,具有概念多抽象、公式冗长、求解多繁琐的特点,传统的以“课堂”“教师”“书本”为中心的“三中心”教学方式,往往不利于学生对理论知识的理解和掌握,达不到令人满意的教学效果。如何帮助学生从本质上理解工程问题、从而创新解决工程问题成为结构动力学课程教学中亟需解决的问题。

其他学科的实践表明,走出“教师控制课堂”教学模式,采用理论结合实践的方法,对帮助学生理解力学概念、激发学生的自主学习兴趣有很大促进作用。结构动力学不仅理论抽象难懂,在应用方面也涉及测试技术、数学建模和数值模拟等技术性较强的工作。将结构动力学理论与实践相结合,变静态封闭的教学为动态开放的教学,运用“多元化”教学方法引导学生“主动参与、乐于探究、勤于动手”成为结构动力学课程教师面临的巨大挑战。同济大学土木工程学院在多年的结构动力学课程教学中,做了许多有益的尝试。本文从课堂形式、仿真试验、现场实践等方面对结构动力学课程的“多元化”教学方法做了探讨。

收稿日期:2014-10-21

作者简介:陈清军(1963-),男,同济大学土木工程防灾国家重点实验室教授,博导,主要从事结构抗震、工程力学研究,(E-mail)chengj@tongji.edu.cn;(通讯作者)李文婷(1990-),女,同济大学土木工程防灾国家重点实验室博士研究生,主要从事工程结构抗震方面的研究,(E-mail)wen_ting_li@163.com。

一、丰富课堂教学形式

(一)合理安排教学内容

结构动力学与工程实际有着十分密切的联系,它在结构工程、防灾减灾工程及防护工程、地震工程、风工程等领域都有十分广泛的应用。该课程在教学内容上重视基础理论和基本概念,同时也注重理论和概念的工程应用,以土木工程动力问题为依托讲授结构动力学。例如,通过单自由度体系、多

自由度体系和分布参数体系的系列介绍,使学生系统掌握结构动力学的基本理论和分析方法;通过结构动力问题分析中的数值分析方法、离散化分析的系列介绍,使学生初步具备分析和解决理论和实际工程问题的能力;通过介绍若干重要的前沿研究成果,使学生能及时了解到结构动力学研究领域的前沿信息。同济大学土木工程学院的结构动力学课程共计34学时,教学进度见表1。

表1 结构动力学课程教学进度表

序号	计划教学内容	学时安排	序号	计划教学内容	学时安排
1	结构动力学的科学与技巧	2	9	梁的偏微分运动方程以及自振频率和振型求解	2
2	结构动力学基础与运动方程的建立	2	10	分布参数结构的动力分析	2
3	单自由度体系动力问题回顾:自由振动、对简谐荷载、周期荷载和任意荷载的反应,自振频率、振型、阻尼比等	2	11	结构动力反应数值分析的显式方法和隐式方法	2
4	结构动力学中的能量与阻尼问题	2	12	数值算法中的基本问题	2
5	复频响应与隔振(震)原理	3	13	结构实用振动分析方法	2
6	多自由度体系的特征方程和频率方程	2	14	结构动力分析的离散化方法概述	2
7	振型的正交性与振型叠加法	3	15	专题介绍	4
8	阻尼矩阵的构造与振型加速度方法	2			

(二)采用多样化教学形式

教与学是矛盾对立统一的双方,教师在教学中起主导作用,但教学目标的实现是要通过学生来完成。在课堂上采用更为合理的“研究性学习法”,可以促进矛盾双方的转化,将学生的被动学习转化为主动求教,被动接受转为主动探索,对培养学生创新思维和宏观把握问题的能力十分有益。

多媒体教学具有独特的优势,好的课件可以达到事半功倍的效果。教师课件应简洁明了,条理清楚,重点突出,同时图、文、声、像并茂,以吸引学生兴趣,激发学生学习热情。另外,还可适当开展一些师生互动的教学活动,比如学生分小组讨论、PPT汇报等。让学生走上讲台,不仅能开阔学生的专业视野、活跃课堂气氛,也能使学生掌握讲稿课件的制作方法,锻炼语言表达能力,为以后课题及专业汇报奠定基础^[2]。

(三)结合计算机仿真技术

在当今时代,掌握计算机编程技术及专业软件分析和评估数值模拟结果尤为重要。结构动力学课程中,学生对大型工程的动力分析往往难以理解,实验条件的不足和较高的实验费用,又使得学生难以通过实验直观地了解结构在动力荷载作用下的反应。课堂上向学生展示计算机仿真试验,一方面可以帮助学生更好地理解动力学概念,从宏观上把握问题,另一方面也能为学生应用结构动力学有关公式和方法编写计算机程序、设计和分析动力问题奠定基础。

ANSYS是一种大型通用有限元软件,其界面直观,前后处理功能强大,可以对房屋建筑、桥梁、隧道以及地下建筑物等工程结构在各种外荷载条件下的受力、变形、稳定性及各种动力特性做出全面分析。^[3]其直观形象的图形显示和快捷的建模功能可以将抽象的数据转化为形象生动的图形,结构的变形、位移及应力分布结果都能通过图像和图表表达出来,可视化效果优越。在课堂上向学生展示计算机仿真试验的分析结果及响应动画,可使学生对结构动力特性及动力响应有直观的认识,对结构动力学的工程应用有切身的体会。

本文以八层框架结构的模态分析和时程分析为例进行介绍,结构的ANSYS有限元模型如图1所示。在结构动力学理论中,多自由度体系的无阻尼自由振动运动方程可写成为:

$$[M][\ddot{u}] + [K][u] = \{0\} \quad (1)$$

其中, $[M]$ 为总体质量矩阵, $[K]$ 为总体刚度矩阵^[4]。

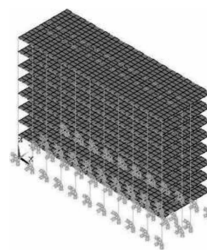


图1 框架结构有限元模型

对实际工程问题,一般难以采用手算对上述方

程进行求解,借助计算机软件是最有效的手段。在 ANSYS 提供的模态分析方法中,一般情况下可使用 Block Lanczos 法、Subspace 法、Power Dynamic 法及 Reduced 法等。本例采取 Block Lanczos 法进行结构动力特性分析,得到结构自振频率如表 2 所示,各阶振型如图 2~4 所示。

表 2 结构的前十阶自振频率(Hz)

阶数	自振频率(Hz)	自振周期(s)	阶数	自振频率(Hz)	自振周期(s)
1	0.643	1.555	6	4.586	0.218
2	0.937	1.067	7	5.126	0.195
3	1.657	0.604	8	5.796	0.173
4	2.213	0.452	9	8.021	0.125
5	3.306	0.302	10	9.084	0.110

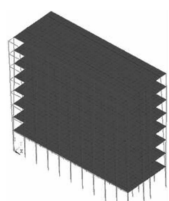


图 2 第一阶振型图

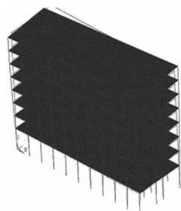


图 3 第二阶振型图

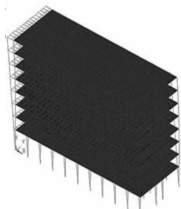


图 4 第三阶振型图

时程分析方法是一种直接动力方法,它加速度时程直接输入到结构中,采用逐步积分的方法进行结构的动力分析,可以得到各个时刻结构的内力、位移、速度和加速度等反应。通过时程分析,得到结构顶层加速度时程和层间位移包络图,分别如图 5 和图 6 所示。

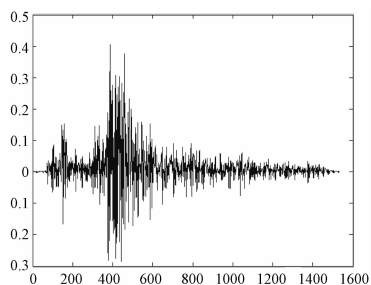


图 5 结构顶层加速度时程

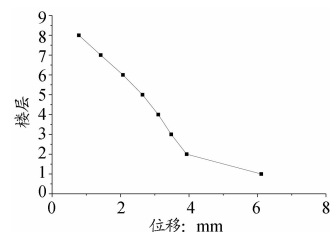


图 6 结构层间位移包络

通过在课堂教学中演示上述案例,可使学生对结构振型的概念有较清晰的认识,对结构在地震作用下的时程响应有较宏观的把握,对应用结构动力学知识解决实际工程问题有直观的认识。

二、引入开放性的研究课题

在课堂上引入具有一定开放度的研究课题,不仅给学生提供活学活用的空间,有利于学生加深理论知识,而且能提高学生实际提炼问题、分析问题、解决问题的能力,有利于培养学生的创新思维,对其将来从事工程设计工作和理论研究工作都有很大的帮助。

在教学中,教师应引导学生围绕一个共同的任务进行探索,通过查阅多方面资料,进行积极主动的学习。该方法能充分发挥学生的主体作用,引导学生在完成既定任务的同时进行自主实践。本文以“由 El centro - NS 地震波原始加速度时程记录求相应速度及位移时程”的任务为例作综合介绍。

教师应提前布置任务,并给出适当的背景知识和建议。如:搜集地震动记录并进行数据的仿真处理是结构抗震分析工作者的基本能力。El Centro 波是 1940 年 5 月 18 日在美国 El Centro 台站记录的加速度时程,是第一次使用强震仪记录到的强震记录。El Centro 波的记录位置在地表,主要强震部分持续时间为 26 秒左右,记录全部波形长为 54 秒;原始记录离散加速度时间间隔为 0.02 秒,N - S 分量、E - W 分量和 U - D 分量加速度峰值分别为 341.7gal、210.1gal 和 206.3gal。

学生课后参阅相关文献,自主完成任务。从强震数据库中可获得原始 El Centro - NS 加速度时程,如图 7 所示。通过参阅文献,可知目前地震动采集的数据大都是以加速度时程的形式给出,而速度和位移时程通常由加速度积分获得。由于受到采集仪器低频噪声、环境背景信号、人为处理误差及初始加速度等的影响,由积分得到的速度和位移时程常会发生基线漂移现象,因此加速度记录一般要先进行校正。目前加速度记录基线校正大致有基线初始化、调整加速度记录和滤波等方法。加速度时程校正完成后,即可对其进行数值积分,得到速度和位移时程曲线。

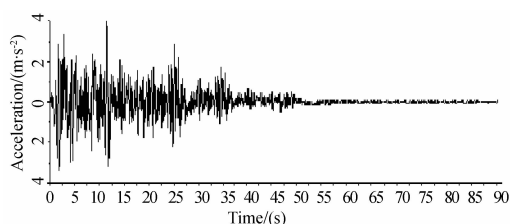


图7 El Centro - NS 加速度时程曲线

利用 SeismoSignal 软件对 El Centro - NS 原始地震记录进行滤波处理,并进行积分运算,求得 El Centro - NS 地震波速度和位移时程,分别如图 8 和图 9 所示。可见,基线校正后,在地震动末尾部分,地面运动的速度时程曲线趋于零,位移时程曲线也趋于零,即速度和位移的基线漂移现象基本消除。

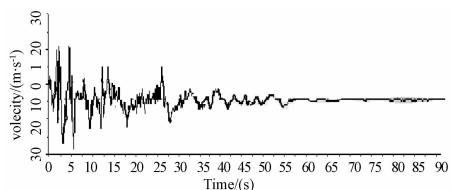


图8 El Centro - NS 速度时程曲线

通过完成本次任务,学生对地震动加速度时程

的搜集和处理有了更深入的认识,对基线漂移等概念也有了初步了解。

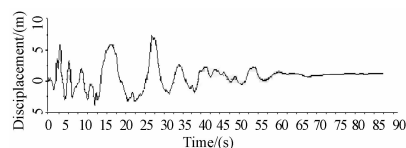


图9 El Centro - NS 位移时程曲线

三、课堂教学与现场测试相结合

结构动力学是一门综合性和系统性很强的课程,在强调基本理论的同时,有必要重视实际应用技能的培养,建立与课程相配套的实践环节。现场振动测试是与科研和工程密切相关的一种专业技能。在教学过程中,通过现场振动测试,既能锻炼学生使用仪器的技能,又能提高学生搜集数据、处理数据和撰写报告的能力。从教学时间、上课人数、成本费用及教学效果等多方面因素综合考虑来看,现场振动测试是结构动力学课程教学中切实可行的实践方法。现场振动测试应具备功能先进、使用方便、价格合理的测试仪器。几种相关测试仪器见表 3。

表3 相关测试仪器

名称	实物图片	主要特点
Kine Basalt 4X 型振动测试系统		<ul style="list-style-type: none"> (1) 3 + 1 传感器通道的数字记录器,具有内置三分向 EpiSensor 传感器舱 (2) 每通道均配置 24 位 Delta Sigma 模数转换器 (3) 内置 GPS (4) 多种记录采样率和通信传输率 (5) 多种数据格式和远程控制协议 (6) 具有超低功率运行的电源管理功能 (7) 坚固的铝质外壳,能经受 1m 高度的坠落及 1m 水深的短时浸泡 (8) 所有连接器都具备瞬变冲击和 EMI/RFI 防护
DEWESoft 数据采集分析系统		<ul style="list-style-type: none"> (1) 任意的信号,任意的传感器 (2) 通道可扩展范围广,从 8 到 1 000 通道 (3) 没有任何的通道使用限制 (4) 抗混滤波器 (5) 采样率可达 200kS/s (6) 可编程的模拟输出 (7) 智能实时计数器(同步)
HEAD BHSI 6 通道双耳采集前端		<ul style="list-style-type: none"> (1) 内置电源,携带方便 (2) 与笔记本电脑连接灵活 (3) 低功耗,工作稳定 (4) 高精度,能够达到 150dB 的信噪比 (5) 物理连接电路连接及其方便 (6) 可随用户需求增长进行功能扩展

本文以一项结构动力特性现场测试实例为背景作相关介绍^[5]。结构物的自振频率、振型、阻尼比是表征结构动力特性的基本参数,确定这些动力特性参数,是进行地震反应分析的一个基本条件。本振动测试中,首先获取一幢钢框架结构连廊的脉冲响应,然后对信号进行分析处理,以估计结构的自振频率。本实践活动可使学生参与现场振动测试,提高其振动信号采集及信号处理的能力,加深学生对真实结构动力特性的认识。

现场测试仪器为美国凯尼公司生产的 Basalt 型数字记录器。该仪器适用范围广,可以用于自由场、强震台网、公路铁路、水库电站等多通道监测。测试对象为同济大学某幢教学楼的钢结构连廊。连廊实物如图 10 所示。



图 10 钢结构连廊实物图

在实践教学中,学生首先在教师的指导下制定测试方案,然后在预定的测点放置强震仪进行信号采集。本次测试设置仪器的采样频率为 200Hz,采样时间为 100s。由学生查阅文献书籍自主完成对测试信号的数据处理。本测试考虑到仪器在测试过程中会受到电压及环境温度的影响而产生“趋势项”(即信号幅值不在零线附近波动),故通过三次多项式拟合的方式对原始信号做了处理,以去除趋势项。原始信号与处理后的信号如图 11 和图 12 所示。测试过程中常会受到人员走动等环境干扰,故在分析过程中对信号做了滤波处理。对去噪处理后的信号进行傅里叶变换得到傅里叶幅值谱,如图 13 所示。通过傅里叶幅值谱,可以初步判定结构的前三阶频率分别为 6.75Hz、10Hz、13Hz。

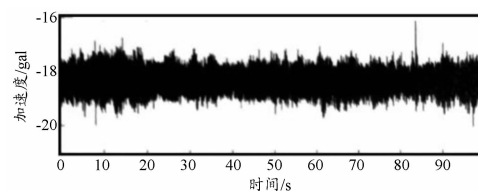


图 11 测得的原始信号

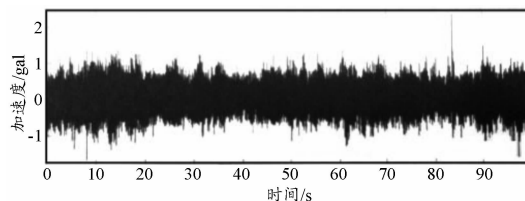


图 12 去趋势项后的信号

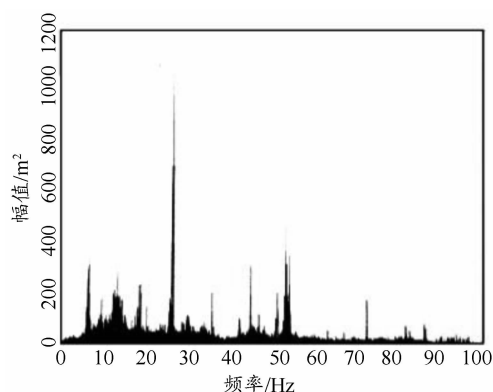


图 13 傅里叶幅值谱

通过该实践教学,学生对振动测试仪器的使用有了一定掌握,对滤波、FFT 变换等信号处理方法有了初步的了解,对结构动力特性和频域分析方法有了更全面的认识。

四、结语

本文探讨了结构动力学课程打破传统模式、开展多元化教学的方法。结构动力学课程课堂教学仍是主体部分,教师应合理安排课程内容及进度,结合多媒体课件、PPT 汇报、计算机仿真实验等方法,引导学生深入理解和掌握理论知识,改善课堂教学效果。同时,在课程教学中应引入开放性课题,培养学生独立思考和解决问题的能力,引导学生由被动学习变为主动求教。另外,在课程实践中应制定切实可行的实施方案。本文探索了一种将课堂理论教学与现场测试相结合的实践方式,并对具体环节做了介绍。即以三维框架结构的 ANSYS 数值试验、地震动加速度时程的获取与处理、结构动力特性的现场测试为例,从课堂教学、研究性学习、课外实践等方

面探讨了结构动力学课程的多元化教学方法。

参考文献:

[1] R·克拉夫, J·彭津. 结构动力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2010.

[2] 赵红华, 陈丽华. 将加强学生能力培养的要求贯穿于教学环节中[J]. 中国林业教育, 2011, 29(1): 60-62.

[3] 王德玲, 沈疆海, 张系斌. ANSYS 在结构动力学和工程抗震教学中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(1): 39-41.

[4] Roy R. Craig Jr. 结构动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.

[5] 周成杰, 陈清军, 张帅. 基于小波变换的钢结构连廊损伤识别[J]. 力学季刊, 2013, 34(2): 302-309.

A diversified teaching method used in structural dynamics course

CHEN Qingjun, LI Wenting

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: We discussed a diversified teaching method in structural dynamics course. By introducing the ANSYS numerical experiment applied on a three-dimensional frame structure, the process method of ground motion acceleration records and the field test of obtaining structure's dynamic characteristics, we presented a method of improving the classroom effect and practice activities. The research shows that the diversified teaching method, in which a series of classroom teaching methods are used and a field test is practiced, can effectively motivate students, help them understand the corresponding theory concepts, and improve their innovation ability simultaneously.

Keywords: structural dynamics; teaching methods; diversity; theory and practice; teaching research

(编辑 王 宣)