

doi: 10.11835/j.issn.1005-2909.2019.02.013

欢迎按以下格式引用:陈清军,李文婷.理论与应用并重的工程结构随机振动课程综合教学模式[J].高等建筑教育,2019,28(2):76-84.

# 理论与应用并重的工程结构随机 振动课程综合教学模式

陈清军<sup>1</sup>,李文婷<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;2. 上海师范大学 建筑工程学院,上海 201418)

**摘要:**在我国经济快速发展和整体经济结构升级过程中,卓越工程师培养计划的开展对提高我国自主创新能力、增强国家核心竞争力具有重要意义。土木工程是一门实践性很强的应用型学科,加强土木工程实践教学环节的改革和建设对培养综合职业能力强、创新意识高、能够服务于生产一线的工程师具有重要意义。工程结构随机振动是一门用概率与统计方法研究承受随机荷载的结构系统稳定性、响应及可靠性的技术科学,掌握或至少了解工程结构随机振动知识是当今社会对受过良好教育的土木工程师的基本要求。然而,该课程具有抽象概念多、公式推导繁琐和数学描述复杂的学科特点,实践教学开展难度大。文章结合同济大学土木工程学院在工程结构随机振动课程建设中的丰富经验,从立足基础理论教育、兼顾学科前沿动态、以提高学生的应用技能为落脚点和建立灵活的评价标准四个方面,系统阐述和全面总结了工程结构随机振动课程建设的指导思路和具体做法。文章中的综合教学模式能有效引导学生理解工程结构随机振动的概念,激发学生的学习热情,培养学生自我学习和实践创新的能力,在实践教学中取得了良好的教学效果。

**关键词:**工程结构随机振动;教学方法;课程建设;理论与实践;教学研究;土木工程

**中图分类号:**TU; G643

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2909(2019)02-0076-11

我国目前正处于经济快速发展阶段,迫切需要一批综合素质优秀、开拓创新能力强、实践应用技能高的卓越工程师,以提升我国自主创新能力,促进我国由工程教育大国向工程教育强国迈进。随着产学研一体化的推进和国家重大工程项目设计管理的规范化,卓越土木工程技术人员的需求量持续旺盛。在土木工程领域,传统的确定性结构抗震设计方法很难满足日益发展的社会需要,基于概率可靠度的随机振动法可以考虑地震动的随机性,得到的结构响应也具有统计概率特性,在科研工程领域越来越受重视。

修回日期:2017-12-16

基金项目:同济大学研究生教育改革与研究项目;科技部国家重点实验室基础研究项目(SLDRCE14A-02)

作者简介:陈清军(1963—),男,同济大学土木工程学院教授,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,上海师范大学建筑工程学院,讲师,主要从事结构抗震研究,(E-mail)1410002@tongji.edu.cn。

工程结构随机振动是一门用概率与统计方法研究承受随机荷载的结构系统的稳定性、响应及可靠性的技术科学<sup>[1]</sup>。工程结构随机振动由工程实践的需要而产生,又为工程实践服务。目前,随机振动已经成为一种较为合理的分析工具,许多工程问题均要进行随机分析。例如:土木工程结构受地震激励的振动、海洋平台结构受波浪荷载及地震荷载作用的振动、高耸结构受强风压作用的振动、飞机的机身受大气湍流的颤振等。随着社会的发展,一个受过良好教育的土木工程师应该能够掌握或至少了解工程结构随机振动的基本概念和应用方法。加强对土木工程专业学生掌握工程结构随机振动知识的教育,不仅是提高学生科研素养的重要途径,更是培养具有国际竞争力的土木工程专业人才的有效方法。

工程结构随机振动课程涉及的概念多,要求学生具备概率论和随机过程等基础知识。与结构动力学确定性理论不同,工程结构随机振动研究的对象不能用确定的时间与(或)空间坐标函数进行描述,只能用概率或统计的方法来描述,为此,课程难度增加,对学生数学知识储备要求更高。同时,与土木工程学科的其他基础力学(如理论力学、材料力学和结构力学等)理论不同,工程结构随机振动的分析对象受概率法则支配,其分析结果是反应量的概率分布特征;因此,工程结构随机振动课程的教学试验开展难度大,试验过程复杂。此外,应用工程结构随机振动知识求解实际工程问题时,往往会遇到数学求解困难、计算工作量大等问题。如何引导学生从理论走向实践,真正成为卓越工程人才,建立基础理论与实践应用并重的工程结构随机振动课程综合教学模式,是工程结构随机振动课程教学的重要任务。

同济大学土木工程学院常年开设研究生工程结构随机振动课程,通过在教学中不断探索,不断提高,逐渐形成了较为科学的培养方案和较为系统的教学方法。课程教学目标是让学生系统学习和掌握结构随机振动基本理论及其分析方法,以完善振动分析的知识体系。课程以较严谨的方式,简明扼要地介绍概率论、随机过程和随机微分方程的基本内容,夯实学生随机振动分析的数学基础;通过对地震动的随机作用模型、线性单自由度体系和多自由度体系,以及非线性体系的系列介绍,使学生具备理论研究和解决实际工程问题的能力。通过对结构破坏准则、累积损伤模型以及动力可靠度分析方法的系列介绍,使学生具备理论研究和解决实际工程问题的能力;通过介绍若干重要的前沿研究成果,使学生能较迅速接触到结构随机振动研究领域的前沿。文中探讨的基础理论与实践应用并重的工程结构随机振动课程综合教学模式,能在传授工程结构随机振动基本理论的同时,有效提高学生的创新能力和实践技能,在实践教学中也取得了良好的教学效果。

## 一、立足基础理论教育

在工程结构随机振动课程的教学过程中,首先要立足基础理论,循序渐进地帮助学生建立起工程结构随机振动的基本概念,引导学生熟悉随机振动的数学描述形式,掌握随机振动的研究方法,为后续培养学生运用工程结构随机振动知识解决实际工程问题、开展自主学习打下基础。其中,恰当选择教学用书、合理安排教学内容、优化课堂教学形式是优化教学效果、保证教学质量的重要方面。

### (一)恰当选择教学用书

工程结构随机振动是一门概念抽象、描述复杂的学科,在教学中如何将学生引进门,帮助学生掌握学习方法、建立清晰的知识体系,成为工程结构随机振动课程在教学中首要解决的问题。一本好的教材,可以大大提高学生对课程的兴趣,帮助学生更好地梳理学习思路、更好地理解课程内容。多年的教学经验表明,为学生提供内容恰当、编排合理、详略得当的教材是取得良好教学效果的第一步。

工程结构随机振动的应用领域广泛,除地震工程外,在机械工程、航天工程、船舶工程等领域也有较多的应用。各类关于工程结构随机振动的教材都基于其行业特点,在内容编排和选择上,或多或少

有所调整。在课程教学中,教师应选择与本专业侧重点一致的教材,结合普适于本专业的工程实例进行讲解。一本好的教材,应做到由浅入深、思路清晰明确、内容循序渐进、编排详略得当。

同济大学工程结构随机振动课程,主要使用俞载道和曹国教主编的《随机振动理论及其应用》,以及欧进萍和王光远主编的《结构随机振动》<sup>[3]</sup>。其中,《随机振动理论及其应用》<sup>[2]</sup>一书结合了俞载道先生和曹国教先生多年教学实践和体会,注重对随机振动基本概念、基本理论和方法的阐述,在内容编排上由浅入深,语言朴实,力求做到简明易懂,对公式有比较详尽的推导和描述,是地震工程领域随机振动理论入门较为适用的教材。此外,该教材将随机振动理论与地震工程学的特点相结合,在随机振动理论的基础上,增写了地震荷载作用下结构响应的概率分析方法,更适用于地震工程领域的教学。《结构随机振动》一书介绍了结构随机振动的基本内容,阐述了结构随机振动的基本理论和分析方法,内容丰富、系统,紧密联系工程实际,是作者多年科研和教学成果的结晶。

除了主要推荐教材以外,授课教师还应该客观、全面地向学生介绍适合于不同学习层次、具有不同讲解重点和编写风格的优秀参考书,以便学生可以按需所取。如:朱位秋主编的《随机振动》<sup>[1]</sup>, Nigam, N.C.主编的《Introduction to Random Vibrations》<sup>[4]</sup>, R. 克拉夫和 J. 彭津[美]主编、王光远等译的《结构动力学(第二版)》<sup>[5]</sup>,以及林家浩和张亚辉主编的《随机振动的虚拟激励法》<sup>[6]</sup>。此外,《随机振动与谱分析概论》<sup>[7]</sup>由 D. E. 纽兰撰写,方同等译。该书除了在选材和编写方面注意深入浅出、重点突出、基本信息清楚外,在随机振动的基本理论和应用方面结合较好,对谱分析方法做了较全面的讲解,介绍了随机振动的测量和分析方法。《随机振动理论及应用新进展》<sup>[8]</sup>一书,分为专题进展综述、研究进展和工程应用三部分,对近年来我国在随机振动领域的成果做了归纳,对虚拟激励法、复模态理论和非线性随机系统的密度演化理论等以论文的形式做了介绍。该书较全面地反映了工程结构随机振动领域理论与应用的新进展,可以作为学生开阔视野、活跃思维的参考用书。

## (二) 合理安排教学内容

教学内容的安排应与课程自身的特点相匹配。工程结构随机振动课程概念多抽象、公示多冗长、求解多繁琐,因此,在教学内容安排上,应做到思路清晰、松弛有度、详略得当。一般而言,工程结构随机振动课程的教学对象应为具备一定力学基础的硕士或博士研究生,建议预修工程力学和结构力学课程。同济大学土木工程学院的工程结构随机振动课程共计 34 学时,主要包括:结构随机振动理论的数学基础,结构随机干扰的数学模型,线性单自由度、多自由度体系随机振动的反应分析方法和非线性体系随机反应分析的一般方法,结构的破坏准则与动力可靠度的分析方法,结构随机振动的若干前沿研究课题。同济大学土木工程学院工程结构随机振动教学的课程内容与学时分配见表 1。

工程结构随机振动课程的教学过程大致可分为前期、中期和后期三个阶段,每个阶段对应不同的教学任务,采取不同的教学方法。在前期教学中,以帮助学生建立起工程结构随机振动知识的基本框架,理解随机振动的数学描述方法,为后续授课和学生自主学习奠定理论基础。在这一阶段,教师应做好教学设计,尽量做到讲解循序渐进、深入浅出。比如:从最简单的单自由度系统随机响应分析开始,掌握并理解单自由度系统的随机振动响应分析方法,为研究更为复杂的结构系统(如多自由度系统)的随机响应分析提供必要的基础。在中期教学中,学生具备了一定的工程结构随机振动相关书籍文献的阅读和初步自主学习能力,因此,在这一阶段,教师除了继续做好工程结构随机振动课程基础教学外,还应兼顾扮演好“引导者”的角色。在教学中适当介绍工程结构随机振动的前沿问题和应用实践,以激发学生的学习兴趣,提高学生主动参与的热情。在后期教学中,学生已经具备了较为扎实的理论基础,具备了阅读大部分文献资料、开展自主学习的能力,因此,在这一阶段,教师应扩展教学内容的广度,将较为前沿的随机振动方法和较为深入的随机振动知识引入课堂教学,注意理论与应用的结合,适

时给学生提供用理论解决实际问题的思路和案例,逐渐将学生从“理论”引导到“实践”。

表 1 课程内容与学时分配

序号	内 容	学时安排
1	概率论的基本知识	2
2	随机过程	4
3	随机过程的传输	3
4	随机激励模型	3
5	单自由度线性体系的随机响应分析	4
6	多自由度线性体系的随机响应分析	5
7	线性连续体系的随机响应分析	3
8	非线性随机振动问题	2
9	土木工程中的随机振动问题	2
10	结构动力可靠度分析	4
11	随机振动理论的国内外研究进展介绍	2

### (三) 优化课堂教学形式

课堂教学形式应为教学内容服务,结合工程结构随机振动在不同教学阶段的教学内容,课堂教学形式也应作出相应调整,以达到更好的教学效果。

在前期,应以打好理论基础为主,因此,这一阶段的教学应以教师课堂授课为主,其他形式为辅。教学形式可以采取传统板书与现代多媒体教学相结合的方式。板书以凝练的文字语言或形象的图表传递教学信息,有助于引导学生参与到知识结构的建构中来,能够调节学生的听课节奏,强化对关键信息的接收。而多媒体教学直观形象,可承载的信息量大,能够提高课堂教学的效率,形象生动地展示教学内容。

在中期,可逐渐引入“任务驱动式”的教学方式,激发起学生的求知欲,满足学生的好奇心,提高学生主动参与学习的热情。在这一阶段,教师可以给学生布置具有一定难度的任务,要求学生在一定期限内完成,并组织学生交流、讨论,给学生提供自我学习的机会,提高学生运用知识解决问题的能力。比如:现有的地震地面运动随机模型有很多,如平稳脉冲随机过程、白噪声随机过程、过滤白噪声随机过程,一般的平稳 Gauss 随机过程、非平稳 Gauss 过程地震模型、Shinozuka 地震模型等,不同的模型有各自的适应范围。教师可适时向学生介绍不同模型的优缺点,给学生 1~2 周的时间搜集资料,然后组织课堂讨论,向学生充分讲解地震时地面运动的随机模型。

在课程教学后期,学生的理论水平和对知识的接受吸收能力已经得到了提升,具备了自我学习和解决简单问题的能力,因此,这一阶段的教学形式可以灵活多样,可以适当让学生“变客为主”,主动投入到知识的拓展学习上来。另外,在帮助学生拓展知识面、提高学习能动性的同时,还可以培养学生主动归纳和实践工程结构随机振动知识的意识,让学生逐渐从知识的“吸收者”转换成为知识的“拥有者”和“实践者”。

总之,不同的教学阶段有着不同的教学特点和教学任务,相应的课堂教学形式也应有所变化。但是,无论在哪一个阶段,课堂教学形式都应以提高教学效果和更好地完成教学任务为目标,真正做到服务于教学内容,服务于学生主体,而不能简单地追求浮华,流于形式。

## 二、兼顾学科前沿动态

在研究生阶段开设工程结构随机振动课程的目的,归根到底是为了提高研究生运用工程结构随机振动知识解决实际问题的能力,提高研究生的创新能力和国际竞争力,为学生在以后的工作中可以更好地从事科学研究和工程技术活动奠定基础。因此,在课程教学中,应当保持教学内容的与时俱进,适当向学生介绍工程结构随机振动领域的最新进展,向学生展示应用工程结构随机振动知识解决实际问题的先进方法。可以在课堂上介绍工程结构随机振动理论与应用的前沿动态,亦可以将其作为学生“任务驱动式”学习的“任务”,让学生在课后查阅文献书籍,开展自主学习。这种学习方法可以发挥学生的能动性,调动学生学习的积极性,引导学生在完成任务的同时拓展专业知识面。学生的学习成果可以根据实际情况采取读书报告、课堂讨论或者 PPT 展示等形式,教师进行穿插讲解、点评和归纳。

为此,以“任务驱动式”教学方法为例进行说明。教师在课程进行到一定阶段时,在课堂上布置任务,给出相应的背景信息。如:在地震工程领域,工程结构随机振动理论经过半个多世纪的发展,已经成为地震工程领域一种较为先进合理的抗震分析工具,被一些国家的抗震规范所采用。然而,经典随机振动理论的局限性也很明显。比如:在线性随机振动分析范围内,关于多自由度分析计算工作量巨大;在非线性分析范围内,难以求得结构响应的解析解或数值解,很难获取精确的结构动力可靠度。因此,各国学者提出了许多分析方法,我国学者林家浩<sup>[6]</sup>提出的虚拟激励法,李杰等<sup>[8]</sup>提出的概率密度演化理论等。请学生查阅文献资料,对工程结构随机振动理论的先进应用方法做介绍。学生课后参阅相关文献,借助学校图书馆、中国知网、万方数据库等途径查找相关书籍文献,自主完成任务。之后,教师随堂就学生完成任务的情况进行讲解、点评和归纳。比如:对于虚拟激励法,教师可以介绍虚拟激励法的基本理论和参考用书《随机振动的虚拟激励法》<sup>[6]</sup>。虚拟激励法的最大特点是将随机振动分析转化为确定性的振动分析,从而简化计算,并且保持了理论上的精确性。经过近 20 年的发展,虚拟激励法已广泛应用于平稳与非平稳、均匀一致与多点随机地面激励问题。线性系统受到自谱密度为  $S_{xx}(\omega)$  的单点平稳随机激励  $x(t)$  时,其响应  $y$  的自功率谱  $S_{yy}(\omega)$  应为

$$S_{yy} = |H|^2 S_{xx} \quad (1)$$

此关系如图 1(a)所示。其中,频率响应函数  $H$  的意义如图 1(b)所示。若在激励  $e^{i\omega t}$  之前乘以常数  $\sqrt{S_{xx}}$ ,即构造一虚拟激励

$$\check{x}(t) = \sqrt{S_{xx}} e^{i\omega t} \quad (2)$$

则其响应量亦应乘以同一常数,如图 1(c)所示。如果考虑二个虚拟响应量  $y_1$  与  $y_2$ ,则如图 1(d)所示。

对于感兴趣的某一内力、应力、应变等,求得虚拟简谐响应后即可直接得到它们的自谱密度或任意的互谱密度。

$$\begin{aligned} (a) \quad S_{xx} &\rightarrow \overline{H(\omega)} \rightarrow S_{yy} = |H|^2 S_{xx} \\ (b) \quad x &= e^{i\omega t} \rightarrow H(\omega) \rightarrow y = H e^{i\omega t} \\ (c) \quad \check{x} &= \sqrt{S_{xx}} e^{i\omega t} \rightarrow H(\omega) \rightarrow \check{y} = \sqrt{S_{xx}} H e^{i\omega t} \\ (d) \quad \check{x} &= \sqrt{S_{xx}} e^{i\omega t} \rightarrow H(\omega) \begin{cases} \rightarrow y_1 = \sqrt{S_{xx}} H_1 e^{i\omega t} \\ \rightarrow y_2 = \sqrt{S_{xx}} H_2 e^{i\omega t} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

图 1 虚拟激励法的基本原理

### 三、以提高学生的应用技能为落脚点

开设工程结构随机振动课程,归根到底是为了提高学生应用随机振动知识解决或研究实际问题的能力。工程结构随机振动课程是一门理论与应用并重的课程,作为一种技术科学,它的发展来源于实践,也应当回到实践中去。该课程虽然理论复杂、概念抽象,在教学中应注重对学生理论基础的培养,但也不能顾此失彼,忽略了对学生实践能力的教育。工程结构随机振动课程的授课工作应从基础理论教育出发,落脚于提高学生的应用技能。

工程结构随机振动的发展和研究与现代科学技术的发展有着密切关系,在信号分析测试技术、环境减振降噪技术、工程可靠性分析等方面都有应用。在教学过程中,应结合案例对应用工程结构随机振动知识解决实际问题的方法作介绍。比如:目前国内外已经建设或正在建设的大型水利枢纽工程,为了保证船舶的正常航行,有很多工程采用了升船机。升船机结构形式复杂,是建筑规模巨大的特种结构,其抗震问题十分重要。由于地震地面运动具有明显的随机过程性,大型升船机建筑结构的抗震设计将向动力可靠度设计的发展方向发展,从而使结构的抗震设计建立在更合理的概率基础上。《升船机结构抗震可靠度分析中若干问题的探讨》<sup>[9]</sup>一文,采用三维有限元方法,进行了基于结构随机振动理论和首次超越破坏机制的升船机建筑结构随机地震反应分析。文章首先确定了输入地震动模型及其参数。目前在地震工程界被广为使用的地震动模型是日本学者金井清提出的平稳高斯过滤白噪声模型,但是,该模型不能够求出地面位移、地面速度及加速度过程导数的有限值,因此,有学者提出如下修正模型

$$S_{u_g}(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_g^2}\right)^2 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}} \cdot \frac{1}{1 + (D\omega)^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega^2 + \omega_0^2)^2} S_0 \quad (4)$$

式中,  $D$  和  $\omega_0$  为与震源机制有关的参数,其中  $f = 1/(2\pi D)$  为高频衰减的拐角频率,  $\omega_0 = 2\pi c_s/3r$ ,  $r$  为假定圆形断裂面半径,  $c_s$  为岩体剪切波速。文中采用了这一功率谱模型,设结构体系的失效由特定位置的响应首次超越给定限值来控制,确定基于首次超越破坏机制的结构动力可靠度。设材料的抗拉强度服从正态分布,则具有随机界限的动力可靠度公式为

(1) 对于 Poisson 过程假定

$$P_r = \exp\left[-\nu\tau \exp\left(-\frac{(\lambda - u)^2}{2(\sigma_s^2 + \sigma_t^2)}\right)\right] \quad (5)$$

其中,

$$\nu = \frac{\sigma_s}{2\pi\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_t^2}} \quad (6)$$

(2) 对于 Markov 过程假定

$$P_r = \exp\left[-\nu\tau \exp\left(-\frac{(\lambda - \omega)^2}{2(\sigma_s^2 + \sigma_t^2)}\right) \frac{1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{2}} e \frac{(\lambda - \mu)}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_t^2}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{(\lambda - \mu)}{2(\sigma_s^2 + \sigma_t^2)}\right)}\right] \quad (7)$$

式中,  $\sigma_t$  为材料抗拉强度标准差,  $\mu$  为材料抗拉强度的均值。文章建立了大型升船机建筑结构的有限元模型(如图2),进行了升船机建筑结构随机地震反应分析。在此基础上,进行了不同地震烈度

下的结构抗震可靠度分析,探讨基于 Piosson 过程假定和基于 Maekvo 过程假定的可靠度在不同地震烈度下的适用性,以及确定性界限和随机性界限对可靠度结果的影响。结构某一节点的应力反应功率谱密度函数如图 3 所示。在课堂上借助该案例,可以较为系统地为学生讲解结构抗震可靠度分析的基本思路 and 具体方法,使学生在回顾所学知识的同时,提高了灵活运用工程结构随机振动知识解决实际问题的能力。同时,结合案例进行授课的教学方式,活跃了课堂气氛,有效地激发了学生的学习热情,在实践教学中取得了良好的课堂效果。

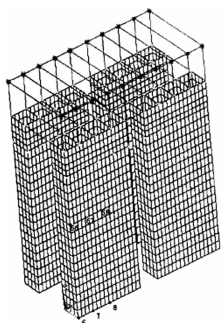


图2 升船机建筑结构三维有限元模型

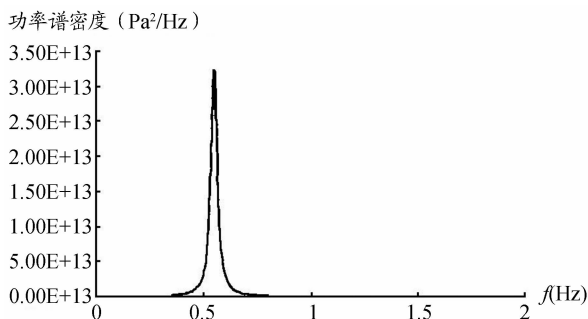


图3 结构某一节点的应力反应功率谱密度

在提高学生应用技能的过程中,除了教师在课堂上结合工程结构随机振动的应用案例进行讲解外,也可以通过课后大作业的形式,培养学生独立解决实际问题的能力。可以要求学生完成一项随机地震动模拟或结构随机动力分析的大作业。教师可以指定大作业的具体细节,也可以让学生根据兴趣自行选择。如:可以让学生进行基于目标反应谱的某结构随机地震反应分析。借助大作业的形式,让学生切实实践了工程结构随机地震反应的分析方法,更深入、更全面地理解了工程结构随机振动的理论知识。在此过程中,学生熟悉了分析报告的写作要求和方法。具体实施过程如下:教师在课程进入一定阶段后布置大作业,要求学生用两周的时间完成对某一特定结构的随机动力分析,并撰写分析报告。结构物受地震荷载作用的动力分析方法可以分为两类:一类是确定性分析方法,是指地震时地面运动的加速度  $\ddot{x}_g(t)$  是时间  $t$  的已知的确定性函数,在  $\ddot{x}_g(t)$  的作用下,求出结构物的动力响应  $y(t)$ ,也是时间  $t$  的确定性函数;另一类是概率论(非确定性)分析方法,是指地震时地面运动的加速度  $\ddot{x}_g(t)$  不是时间  $t$  的确定性函数,对于任意一个固定的时间  $t$ ,加速度  $\ddot{x}_g(t)$  被看成是一个随机变量,或者说把加速度  $\ddot{x}_g(t)$  看成是一个随机过程,因此,必须用工程结构随机振动知识来分析结构的动力响应。在进行结构的随机地震反应分析时,首先应确定输入的功率谱密度函数,可以采用 Clough-Penzien 随机地震动模型拟合功率谱密度函数,作为超高层结构随机地震反应分析输入。Clough-Penzien 随机地震动模型由 Clough 和 Penzien 于 1975 年提出<sup>[10]</sup>,是在日本学者 Kanai-Tajimi 过滤白噪声模型基础上提出的一种削弱低频的改进模型。Clough-Penzien 随机地震动模型可以表示为

$$G(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_g^2}\right)^2 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}} \times \frac{\frac{\omega^4}{\omega_1^4}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right)^2 + 4\xi_1^2 \frac{\omega^2}{\omega_1^2}} \times G_0 \quad (8)$$

式中,  $\omega_g$  为地基土层圆频率,  $\xi_g$  为地基土层的阻尼比,频率参数  $\omega_1$  与阻尼参数  $\xi_1$  为调整低频部分的参数,  $G_0$  为白噪声功率谱密度。采用 ANSYS、ABAQUS 等进行有限元建模。之后,将拟合的地震动功率谱密度作为输入,利用建立的结构有限元模型,对目标结构进行平稳随机地震反应分析,得到结构响应的功率谱密度,进而进行结构动力可靠度计算。

## 四、建立灵活的评价标准

教学是一种有目的、有计划、连续而循序渐进的、讲求效率并要达到一定任务要求与目的的活动。因此,需要对这一活动进行必要的关注、观察、考核和测评。建立灵活的评价标准是监控与调节教学活动的必要机制,是对完成教学任务并达到一定教学效益和质量的重要保障,也是督促学生积极学习的重要手段。

工程结构随机振动课程具有自身的课程特点,求解过程常需借助计算机软件实现,因此,传统的试题考试方式不利于考查学生对工程结构随机振动基本概念的掌握情况,更不利于评价学生灵活运用工程结构随机振动知识解决实际问题的能力。为了更好地评判学生对基本概念和重要知识点的理解程度,进一步启发学生的创新思维,同济大学土木工程学院工程结构随机振动课程以读书报告作为课程的考核方式,要求学生独立完成一份有关结构随机干扰模型和一份结构随机振动分析的详细读书报告。这种考核方式在考查学生综合能力的同时,更能激发学生的学习热情,促进学生自主学习,强化学生的理论功底和实践能力。学生在撰写读书报告的过程中,提高了搜集文献、梳理文献、消化吸收文献的能力,开阔了视野,扩展了思路,主动关注了学科前沿动态。同时,读书报告的撰写过程,也是学生对所学知识进行自我归纳的过程,是学生灵活运用理论知识解决实际问题的自我培养和自主实践过程。

此外,工程结构随机振动课程教学活动不是简单而短促的,其宗旨是希望在教师的引导下,培养学生能动地进行数年乃至更长时间的自我学习、研究与实践的能力。对于卓越工程人员而言,优秀的理论知识掌握能力、完善的自我学习能力和灵活的应用实践能力缺一不可。因此,必须进行系统而深入的评价活动,才能保障教学活动积极、正常而有效地运行。教师在授课过程中,应注重对课堂秩序和氛围的调节,应与学生开展有效互动,及时发现教学中存在的不足并加以改进。教师还应在教学过程中对学生的理解能力作出判断,对学生的课堂表现进行考核。

## 五、结语

结合同济大学土木工程学院在工程结构随机振动课程建设中的丰富经验,探讨了在工程结构随机振动课程建设中理论与实践并重、基础与应用同修的综合教学模式。笔者认为,工程结构随机振动课程的教学应立足基础理论教育,通过恰当选择教学用书、合理安排教学内容和优化课堂教学形式等方法,循序渐进地引导学生建立工程结构随机振动知识体系的基本概念,掌握随机振动的研究方法,为后续培养学生的自主学习能力和应用工程结构随机振动知识解决实际工程问题的能力打下基础。此外,工程结构随机振动课程的教学还应该兼顾学科前沿动态,提高研究生的创新能力和国际竞争力,提高研究生运用工程结构随机振动知识解决实际问题的能力。教师应在课堂上穿插讲解工程结构随机振动理论与应用的前沿动态,也可以采取“任务驱动式”的教学方法。不仅如此,工程结构随机振动作为一种技术科学,它的发展来源于实践,也应回到实践中去,因此,在整个工程结构随机振动课程的教学过程中,应以提高学生的应用技能为落脚点。在注重对学生理论基础培养的同时,也应强化学生独立应用工程结构随机振动知识解决实际问题的能力。除此之外,建立灵活的评价标准是监控与调节教学活动的必要手段。工程结构随机振动课程具有自身的课程特点,以读书报告作为本课程的成绩考核方式更有利于考查学生在工程结构随机振动方面的综合能力,激发学生自主学习的积极性,强化学生的理论功底和实践能力。

### 参考文献:

- [1]朱位秋. 随机振动[M]. 北京:科学出版社, 1992.



- [2] 俞载道, 曹国教. 随机振动理论及其应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [3] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [4] Nigam N C. Introduction to Random Vibrations. Cambridge (United States) [M]. Cambridge: The MIT Press, 1983.
- [5] 克拉夫 R., 彭津 J. 结构动力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 纽兰(D E Newland). 随机振动与谱分析概论[M]. 方同, 译. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [8] 李杰, 陈建兵. 随机振动理论与应用新进展[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- [9] 陈清军, 王汉东. 升船机结构抗震可靠度分析中若干问题的探讨[J]. 力学季刊, 2003, 24(3): 313-318.
- [10] Clough R W, Penzien J. Dynamics of Structures[M]. New York: McGraw-Hill, 1975.

## Integrated teaching mode of random vibration of engineering structures course with considering both basic study and practical ability

CHEN Qingjun<sup>1</sup>, LI Wenting<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, P. R. China)

**Abstract:** At the rapid improve time of China's society-economy and economical structure, the progress of excellent engineers training program improves the country's self-dependent innovation ability and core competitiveness enormously. Civil engineering is a practical discipline, enhancing the practical teaching reform plays a crucial role in cultivating excellent engineers who can hold high comprehensive vocation ability, advanced innovative awareness and practical skills. Random vibration of engineering structures is an application course which studies the stability, responses and reliability of structural systems using probability and statistics methods. Now, handling or at least acquainting the random vibration methods in engineering structure's design is a basic requirement for a well-educated civil engineer. A well-educated civil engineer is expected to understand the basic concepts and practical methods of random vibration. In this paper, the course characteristics are focused squarely such as confusing conceptions, complicated formulas and abstract mathematical descriptions. By summing and discussing the teaching activities of random vibration of engineering structures course in the College of Civil Engineering, Tongji University, this paper systematic illustrates and overall reviews the guidance and appropriate practice methods in the teaching activities of random vibration of engineering structures. The illustration and review are dissected from the following four aspects: basing on the theoretical education, introducing the course developing trend, focusing on students' practical skills and developing the flexible evaluation criterion. The methods in this paper are believed efficient and reliable to guide students mastering theoretical concepts, to motivate students, and to develop the students' practical abilities. It has shown the satisfied teaching effect in the practice teaching.

**Key words:** random vibration of engineering structures; teaching method; course construction; theory and practice; teaching research; civil engineering

(责任编辑 梁远华)