

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2017.03.017

欢迎按以下格式引用:张如林,程旭东,杨文东,等.数值模拟课程中培养学生创新能力的教学探索[J].高等建筑教育,2017,26(3):69-72.

# 数值模拟课程中培养学生创新能力的教学探索

张如林,程旭东,杨文东,张艳美

(中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院,山东 青岛 266580)

**摘要:**数值模拟技术是土木工程专业学生开展学术研究的基本技能,通过开设数值模拟课程,在教学实践中提出“软件超市”的教学模式,满足了学生的多样化及个性化需求。以结构设计竞赛题目和工程案例为训练任务,锻炼学生团队协作能力,激发学生学习兴趣,培养学生创新意识和解决实际问题的能力。经过土木工程分析软件与应用课程的三年教学实践,教学效果良好,提高了学生的科研水平。

**关键词:**数值模拟;软件超市;课程改革;创新能力

**中图分类号:**G642.0      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2909(2017)03-0069-04

目前我国社会经济快速发展,为提升核心竞争力,获得竞争优势,需要大批素质全面的具有综合职业能力,直接服务于生产一线,从事技术和管理的应用型卓越工程人才<sup>[1-3]</sup>。高等学校的根本任务是培养具有创新精神和实践能力的高素质创新人才,而开展教学改革、创新教学方法则是培养创新人才的重要举措。

随着计算机技术的发展,计算机辅助教学手段逐步完善,数值模拟以其适用性强,便于处理非均质、非线性、复杂边界诸多问题等优点,已成为分析工程实际问题不可替代的手段<sup>[4-5]</sup>。数值模拟技术作为解决工程实际问题的有效手段,已成为土木工程研究生学术研究的重要工具,因此,让学生快速掌握数值模拟方法,更好地开展科研工作是一项重要任务。土木工程学科实践性强,如何针对学科特点制定合理的数值模拟课程,培养具备较强数值计算分析和创新能力的人才,是目前土木工程专业研究生教育的重要内容。

为使学生更好地掌握数值分析软件,提高其科研水平和创新能力,我们结合实际,专门为研究生开设了土木工程分析软件与应用课程,从该课程近几年的教学实践和反馈来看,取得了较好的教学效果。

## 一、课程教学现状

土木工程分析软件与应用课程目前主要存在着两大问题。

收稿日期:2016-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51408609);中国石油大学(华东)学术硕士点建设项目(XWS130005);山东省研究生教育创新计划(SDYC13043);山东省重点教学改革项目(2012017)

作者简介:张如林(1983-),男,中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院讲师,博士,主要从事土木工程与教学研究,(E-mail)zhangrulin@upc.edu.cn.

### (一) 课时少,任务重

该课程面临讲授课时少,讲解内容多的矛盾。目前该课程共有 32 学时,包括上机和理论课时,如果按照每个数值分析软件安排 8 学时讲授来算,那么整门课程最多能讲授 4 个软件。而目前学生的研究方向和研究深度各有不同,为满足学生的最大化需求,需要尽可能选择多个软件进行讲解,因此就要做好课程讲授软件的选择。

同时,教学中难以做到像本科学习 PKPM 或 Auto CAD 之类的软件,课堂上教师带领学生一步一步地操作,所以必须对课程内容进行精简和合理编排,给学生设置有效作业任务,发挥学生主动性,提高上课效率。

### (二) 教学手段不够丰富

同时该课程教学手段单一,教师讲台上讲解,学生下面练习的教学方法过于落后,难以满足学生的实际科研需要,也无法快速有效地运用所学的数值软件知识辅助科研。学生学习积极性不高,在其进

行课题研究和科研工作过程中,存在概念不清,软件不会用的问题。

基于上述问题,我们将采取以学生为中心,以教师为引导的教学方式,教师通过教学激活知识,引起学生学习的兴趣,调动学生学习的主动性和积极性,从而将外在的知识内化为自己的知识结构,增强分析问题的能力,提高其创新意识。

## 二、数值模拟软件的选择与特点

目前中国石油大学(华东)土木工程专业研究生主要分为结构工程方向和岩土工程方向。根据专业特点和学生自身需求,每学期课程开始之前先对学生的研究方向和拟用数值软件进行广泛调查,在此基础上,结合近年来土木工程领域数值模拟的发展趋势,遴选土木工程中应用广泛的几种数值软件作为主要教学内容。

经过多年的教学实践,我们选择的几种数值分析软件的主要特点和适用范围如表 1 所示。

表 1 各数值软件的特点及适用范围

软件名称	特点	适用范围
ANSYS	建模功能强大,可智能网格划分;求解功能强大,提供多种求解器;非线性分析功能强;良好的优化功能和用户开发环境	适用于建筑结构、桥梁结构等安全性分析,地震工程,液体-结构动力相互作用,运输容器设计,超高速碰撞模拟分析等
ABAQUS	采用 CAD 方式建模和可视化视窗系统,强大的模型管理和载荷管理手段。单独设置了连接(interaction)模块,可以精确模拟实际工程中存在的多种接触问题,采用参数化建模方法,为实际工程结构的参数设计与优化提供了有力工具	模拟典型工程材料的性能包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩超弹性泡沫材料以及土壤和岩石等地质材料,结构应力、位移问题,可模拟如热传导、质量扩散、热电耦合分析、声学分析、岩土力学分析(流体渗透/应力耦合分析)及压电介质分析
FLAC <sup>3D</sup>	采用混合离散法模拟塑性破坏和塑性流动;采用动态运动方程模拟静态系统,在模拟物理上的不稳定过程不存在数值上的障碍;采用显式算法,无需存储刚度矩阵,即采用中等容量的内存可以求解多单元结构	地质材料和岩石工程的力学行为,特别是材料达到屈服极限后产生的塑性流动。岩土类材料的高度非线性、不可逆剪切破坏和压密、粘弹、孔隙介质的固-流耦合、热-力耦合以及动力学行为,还可用于锚杆、锚索、桩等的模拟边坡加固及支护效果
SAP2000	集成化的视图环境;强大的分析功能;一体化的设计功能,可输出结构体系分析的设计整体结果和构件设计详细信息	适用于较复杂的结构,如桥梁、体育场、大坝、海洋平台、工业建筑、发电站、输电塔、网架等结构以及高层等民用建筑
ADINA	可直接创建模型的几何图形,或从多种 CAD 系统中引入;物理特性、载荷和边界条件可直接分配到模型的几何图形上;有全自动网格和映射网格划分	适于求解复杂的非线性问题(如接触、塑性及破坏等),快速易于收敛,且具有稳定的自动参数计算,用户无需调整各项参数,有源代码,可以对程序进行改造,满足特殊需求
COMSOL	架构完全开放,可选择或自定义不同专业的偏微分方程进行任意组合,实现多物理场直接耦合分析;任意独立函数控制的求解参数;专业的计算模型库,内置各种常用物理模型;支持移动网格	模拟科学和工程领域的各种物理过程,范围涵盖静力学、流体动力学、生物工艺学、化学工程、电子学、传热学、微机电、结构力学、电磁波、半导体器件、传播学、微流体学等多种物理场

## 三、教学改革探索与实践

一门课程能取得良好的教学效果,与教学内容的合理组织和安排,以及恰当的教学方法有密不可分的关系。为此我们从以下四个方面进行教学改革。

### (一) 构建“软件超市”,满足学生需要

为拓宽学生视野,尽可能满足学生的科研需求,适时选择多种土木工程常用分析软件,为研究生构建了内容丰富的“软件超市”,软件超市包括 ANSYS, FLAC, ABAQUS, SAP, ADINA, COMSOL 等工程数值

软件,学生可结合自己的兴趣特长、研究方向及论文课题等进行针对性学习。为了提高学习效率,要求学生在上课之前对所讲软件有基本的了解。给学生讲述各种软件的特点、适用范围以及优缺点,以方便学生结合自己的课题需求选择合适的软件。

数值软件主要是计算理论的运用和数值算法的实现,要想完全掌握并熟练应用软件,必须要清楚该软件所运用的计算理论和数值算法,了解同一个问题用不同数值软件求解结果异同的原因。如 ANSYS 属于有限元软件,有限元法是用较简单的问题代替复杂问题后再求解,将求解域分成有限元互连子域,对每一单元假定一个合适的近似解,利用变分原理和最小势能原理推导求解该域总的满足条件(如结构的平衡条件),从而得到问题的解。而 FLAC<sup>3D</sup> 属于有限差分软件,其本质是在每个节点处建立差分格式的近似方程求解。数值解不是准确解,而是近似解。许多工程问题都归结于求解偏微分方程,不同软件采用不同的方法而已,但殊途同归,最终都要收敛于精确解,这也是各种软件计算结果可以比较的基础。学生在学习过程中,可汲取各种软件的学习经验,举一反三,融会贯通。

## (二)由浅入深,以基本理论为本

具备扎实的专业知识和良好的专业素养是培养高水平研究生的主要目的。研究生在学习软件过程中往往存在基本概念模糊,理论一知半解,好高骛远、急于求成等问题,教学中应强调基本概念的重要性。

在教学实践中,我们结合简单算例介绍基本理论,并注意提高学生手算的能力,通过手算和机算对比,一方面巩固学生的基本力学知识,另一方面还可以检验学生的学习效果。比如,以简单桁架结构为例对手工计算方法予以说明,进而归纳总结出计算步骤。这样一方面回顾了前面所学基础知识理论,另一方面掌握了数值软件的基本操作。从简单问题开始,由浅入深,等掌握了基本的操作命令,打好基础后,再给学生安排一定的课下操作练习进行强化。

不断强调课下实践的重要性,告诫学生不要好高骛远。切勿一开始就建立复杂模型,因为复杂模型难免出现大量错误而挫伤其学习积极性。因此,要从简单模型开始,如力学教材中的例题和课后习题,先熟悉各个操作命令,简单的问题更容易进行程序的查错和调试。只有简单模型没有问题之后,才能进行复杂模型的训练。虽然在前期可能耽误一些时间,但最终会产生事半功倍的效果。通过给学生布置任务,让学生带着问题自主学习,培养学生分析问题、解决问题的自学能力。

## (三)真实赛题训练,提高团队协作能力

学习数值分析软件的目的在于应用,尤其是实

践性很强的土木工程应用学科,应改变过去教师讲,学生听,师生互动少、学习效果不佳的状况。在教学过程中,我们鼓励学生以小组讨论形式,共同完成一个问题的数值模拟。每次讨论,我们都遵循“问题→建模→计算→分析→评价”的分析过程。为了激发学生的学习兴趣 and 主动性,做到学以致用,我们曾以山东省大学生结构设计大赛的真实赛题为任务,该赛题需要设计并制作一双竹结构高跷模型进行加载测试。在教学过程中,将学生分成若干设计小组,由每个小组设计模型方案,然后运用一到两个不同的数值分析软件完成模型建模及加载分析等内容,要求在规定的时间内完成设计作品和数值分析,并由各小组的组长在全班面前进行作品展示。期间其他各小组成员对该组作品进行打分,设计作品的成绩由学生评价与教师评价相结合给出。此项措施加深了学生对软件的认识和掌握程度,同时也提高了学生的团队协作能力,取得了不错效果。在教学实践中,我们还鼓励学生运用多个软件分析同一个问题,加深其对数值分析理论和方法的理解。

## (四)案例教学,提高解决工程问题能力

本课程的主要内容是软件的学与用,其中“学”是手段,“用”是目的。课程教学要与工程实践相结合,否则学生感觉基础理论知识太过抽象,难以理解和掌握。要使学生清楚知道为什么学习本课程,习得知识可解决哪些实际问题,如何利用课程知识分析、解决工程实际问题。同时,针对个别软件前处理的不便,我们专门开发了 FLAC<sup>3D</sup> 前处理分析程序<sup>[6]</sup>,介绍了复杂地质建模前处理方法在岩石力学数值实验教学中的应用。

对于工科研究生来讲,学习数值分析软件最重要的就是解决工程实际问题。授课教师可结合自己的研究课题、科研项目,在教学中适当讲解一些具体工程实例,介绍自己的科研过程以及心得体会。下面简单列举几个工程实例的数值模拟教学内容。

### 1. 大型储油罐抗震及隔震分析

储油罐是石油和天然气资源利用、再生产和供给的重要基础性设施,我们针对其抗震问题进行数值模拟的讲解。比如几何模型的建立方法、有限元网格的剖分技巧、土体与结构动力相互作用/人工边界的设置、地基材料的本构模型选择、地震波的选择与输入、罐底和基础之间的非线性接触效应等。在隔震方面,以大型 LNG 储罐为例,介绍预应力钢筋的建模方法、隔震夹层橡胶支座的数值建模技巧和其参数的合理选取。

### 2. 大型土-海底沉管隧道体系的地震响应

通过此案例,介绍土-隧道摩擦接触面的单元选择,弹簧单元的施加,多层非均匀软土地基的建模,行波激励的数值模拟实现,以及动水压力的简化

分析方法等。不仅让学生了解软件的应用情况,而且还穿插介绍相关的理论知识,拓宽了其知识面。

### 3. 大型 LNG 储罐抗爆分析

储罐的抗爆问题难以用物理实验完成,而数值模拟则可解决该问题。以董家口港大型 LNG 为例,给学生讲解如何采用 ANSYS 软件进行建模前处理,如何利用 LS-DYNA 软件分析后处理方法,研究爆炸冲击荷载作用下 LNG 储罐的动力响应特点,并分析多种工况下罐体的变形规律和应力响应分布。

### 4. LNG 储罐球形混凝土穹顶的热应力及裂缝分布

以山东某 LNG 接收站的一个 16 万  $\text{m}^3$  大型 LNG 储罐钢筋混凝土穹顶为例进行数值计算。采用 ADINA 有限元软件建立精细化的有限元模型,模拟 LNG 储罐穹顶分段浇筑过程中的早期温度场分布,并将数值计算结果与现场测试结果进行对比。数值分析时考虑了混凝土徐变及龄期效应,对混凝土穹顶的温度场和应力场进行耦合计算,得到穹顶的热应力分布及裂缝发展情况。

可见数值模拟技术在替代物理实验方面具有较强的优越性,掌握好数值软件是十分必要的。在教学过程中,考虑到石油大学的特色,有侧重地讲解了特种结构的数值模拟试验技术和模拟过程。通过实际工程案例教学,让学生切实感受到数值软件强大的求解能力和成功解决问题的全过程,进而激发学习的兴趣和主动性,锻炼学生利用数值分析工具解决实际工程问题的能力。

## 四、教学效果

为了保证教学质量,土木工程分析软件与应用课程均由具有博士学位,数学和力学知识基础扎实,亦对数值分析软件有丰富应用经验的青年教师主讲,至今已经进行了 3 年的教学实践。由于教学实践效果良好,土木工程分析软件与应用课程已纳入

中国石油大学核心课程建设和土木工程学术硕士点建设项目。学生结课论文选题广泛,如《盐穴储气库密封性数值模拟研究》《LNG 储罐内罐地震响应分析》《大型 LNG 储罐在泄漏状态下的静力分析》《断层错动下埋地管线响应计算分析》《地震作用下碎石桩(单桩)复合地基加固机理分析》《钢结构楼梯主结构的弹塑性分析》《地震作用下预应力钢筋混凝土悬臂梁的两种单元模拟分析》等,类型多样,同时也体现了中国石油大学的特色,其中石油工业方面的数值仿真实验题目比例较大。

上课学生普遍反映,通过课程学习,提高了科研能力和研究效率。据统计,上课学生中多人成功申请了中国石油大学(华东)自主创新科研计划研究生基金项目,并以第一作者身份在 EI 期刊发表多篇论文。同时,该课程教学效果也得到研究生导师们的一致肯定,提高了研究生的创新能力和培养质量,增强了其就业竞争力。

## 参考文献:

- [1]朱正国,朱桃杏,王道远.工科院校实施创新教育的几点思考[J].教育探索,2014(1):22-23.
- [2]董倩,刘东燕,黄林青.卓越土木工程师实践教学体系构建[J].中国大学教学,2012(2):77-80.
- [3]张敏,鞠春华.大学生创新能力培养的研究[J].教育探索,2013(9):5-6.
- [4]李连崇,马天辉,梁正召,等.基于数值仿真的土木工程实验教学改进与实践[J].实验技术与管理,2013,30(7):83-86.
- [5]杨勇,郭子雄.数值模拟试验在土木工程专业课程教学中的应用[J].高等建筑教育,2005,14(3):65-67.
- [6]杨文东,张艳美,俞然刚,等.复杂地质建模前处理方法在岩石力学数值实验教学中的应用[J].实验技术与管理,2014,31(9):179-182.

## Teaching exploration of cultivating students' creative ability in the course of numerical simulation

ZHANG Rulin, CHENG Xudong, YANG Wendong, ZHANG Yanmei

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, P. R. China)

**Abstract:** Numerical simulation technology is a basic skill for civil engineering students to carry out academic research. Through the course of numerical simulation, the teaching mode of "software supermarket" was proposed in teaching practice, which can well meet the needs of students' diversification and individuation. The structure design contest titles and the engineering cases were taken as training task to cultivate students' team cooperation ability, stimulate students' study interest, and improve students' innovative consciousness and ability of solving practical problems. After three years' teaching practice of the core construction course of civil engineering software analysis and application, teaching effect was proved to be good, and the students' level of scientific research was raised.

**Keywords:** numerical simulation; software supermarket; curriculum reform; innovative ability