

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2023.02.017

欢迎按以下格式引用:张洁,黄宏伟.基于计算可视化的土木工程可靠度课程教学方法[J].高等建筑教育,2023,32(2):132-141.

基于计算可视化的土木工程 可靠度课程教学方法

张洁,黄宏伟

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:随着基于可靠度理论的结构设计方法的快速发展,可靠度理论已经成为土木工程专业学生需要掌握的重要知识。由于可靠度理论较为抽象、常涉及复杂的数值计算,学生常无法完成学习流程,导致学生学习兴趣匮乏,学习效果有待提高。针对上述难点,提出了一种基于计算可视化的教学方法。该教学方法基于 EXCEL 这一通用工具,可将各种可靠度算法的中间过程和结果进行直观分析和展示,消除可靠度理论学习中涉及的数值分析要求,由此精简学习流程。该方法可帮助学生从复杂的数值计算中解脱出来,将精力聚焦在可靠度分析原理上,方便和快速地理解和掌握相关知识点,并将所学知识灵活应用于自己的研究领域。基于计算可视化的教学方法可大幅提高可靠度课程的学习效率和学习获得感,为土木工程可靠度理论的教学提供一个行之有效的方法。

关键词:计算可视化;土木工程;可靠度理论;教学方法

中图分类号:TU 201.1;G642 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2023)02-0132-10

土木工程的设计、施工和运营中存在大量的不确定性因素,如地震的不确定性、风荷载的不确定性、材料的不确定性、计算模型的不确定性等^[1]。这些因素的存在导致土木工程设施的性能很难准确预测。可靠度理论采用概率方法定量模拟土木工程中的各类不确定性因素,采用失效概率刻画不确定环境中工程结构的服役性能,可定量衡量各类不确定性因素对土木工程设施服役性能的影响,是现代结构规范的理论基础^[2-4]。自1992年我国颁布《工程结构可靠度设计统一标准》第一版(GB 50153—92)以来^[5],土木工程的相关规范已经逐步从以经验为主的安全系数设计方法过渡到基于可靠度理论的极限状态设计方法^[6]。目前我国实行的最新可靠度规范为2008年颁布的《工程结构可靠性设计统一标准》修订版(GB 50153—2008)^[7]。该规范又被称为“规范的规范”或“规范之母”。在此背景下,可靠度理论已被多所国内外高校列为土木工程硕士研究生的专业基础课

修回日期:2021-06-23

基金项目:上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”资助项目(19SG19)

作者简介:张洁(1980—),男,同济大学土木工程学院教授,博士,主要从事工程风险相关的教学和科研工作,(E-mail) cezhangjie@tongji.edu.cn。

程^[8]。以同济大学为例,于2009年率先开设了研究生课程《土木工程的概率分析》,主要阐述土木工程结构可靠度的基本概念与原理、失效概率计算方法、基于可靠度的设计理论等内容,旨在使学生在深入理解可靠度原理的基础上,培养利用可靠度理论分析土木工程结构的安全性和适用性等问题的能力。应教学国际化需求,该课程于2010年转为全英文面向国内、国际学生授课,目前已开课10余年。

学习土木工程可靠度分析课程除需要土木工程相关专业课知识外,还需要较深的概率与统计、优化原理、数值计算方法、编程等知识和技巧。由于该课程教学内容涉及的数学公式多、专业背景广、理论抽象,教师与学生往往遇到教学不易、学习困难的两难困境,不但影响学生的学习热情和兴趣,还容易使学生产生畏惧感,难以达到预期的教学目的。如何提高土木工程可靠度课程的教学效果一致是学界关心的热点问题。例如,杨世浩和齐甦从教学体系和教学实践两个方面讨论了改进措施,认为可靠度教学不仅要重视教学内容方法,也要提高教师素质^[9];潘文军等认为可靠度教学的难点在于内容抽象、枯燥,建议加强教学与实践应用的结合,提高学生兴趣^[10];李会军和李宗利建议加强学生的软件使用能力及编程能力,强化典型实际工程案例的研究,从而改善教学质量^[8]。这些研究很好地分析了目前可靠度教学的挑战以及今后的主要改革方向,为土木工程可靠度课程建设积累了宝贵的经验。

为提高土木工程可靠度课程的教学效果,同济大学土木工程可靠度课程教学团队经过长期教学实践,提出了一种基于计算可视化的土木工程可靠度教学方法。多年实践表明,该方法可有效缩短学习流程,大幅降低教师教学和学生学习的难度,在帮助学生更深刻理解可靠度原理的同时,快速将所学的理论知识应用到相关研究中。本文的目的是对这一教学方法进行介绍,为促进土木工程可靠度课程的高质量建设提供新的途径。

一、土木工程可靠度课程教学中面临的关键挑战

土木工程可靠度分析课程主要存在以下三点挑战。

(1) 教学内容抽象。可靠度课程主要讲授土木工程中的各类不确定性现象及其模拟方法、不确定性条件下工程结构失效概率计算方法、基于可靠性的设计方法等内容。上述内容涉及的数学知识多,很难通过实体进行展示,内容较为抽象,教师难于讲授、学生难于理解,增加了教学难度^[11]。在此情况下,教学内容的讲授只能浅尝辄止,很少有时间安排实践课,导致学生们对可靠度理论掌握不牢,影响学生的学习积极性。

(2) 编程要求高。土木工程可靠度问题很少有解析解,各类可靠度分析方法常需采用不同数值计算算法,难以直接通过手算完成。这导致教师授课中无法直观展示计算过程,导致实例分析如同黑箱操作,示意性弱^[12]。对于学生而言,完成相应的习题也需要借助 Matlab 等平台进行编程,需要较高的编程技巧。即使对于少部分具有较好编程基础或对编程具有浓厚兴趣的同学,采用编程进行学习也会耗费相当多的学习时间。对于缺乏编程基础或编程能力较弱的同学,只能对各类可靠度分析方法“望洋兴叹”。较高的编程门槛大大增加了学生的学习难度,增加了畏难情绪。

(3) 学习获得感不高。由于内容抽象、编程要求高,采用传统教学方法将不得不花大量时间在讲授各类算法及其实现过程上^[13],导致很少有时间讲解可靠度理论在工程中的工程实例应用,以及理解和解读可靠度分析的结果。上述应用和结果解读的缺乏导致学生在学习时感觉课程偏于数学

和理论,与土木工程的关系较弱。由于对可靠度理论在土木工程应用方面缺乏认知,因此学习获得感低,这也违背了土木工程可靠度课程采用可靠度理论解决土木工程问题的初衷。

二、基于计算可视化教学方法的核心思想

以上分析表明,可靠度理论课程教学的关键挑战在于内容抽象,计算复杂,难以掌握。传统的教学方法,其学习流程共分为四个步骤:(1)学习可靠度分析原理;(2)掌握可靠度分析的算法;(3)根据算法采用手算或者编程进行计算获得结果;(4)通过敏感性分析等手段对结果进行理解。在传统教学方法中,步骤(3)的实施需要进行大量手算或编程,耗费学生大量的时间和精力。当采用手算时,步骤(4)常因为计算量过大而难以实施,导致学生对可靠度分析结果缺乏解读和理解。步骤(3)和步骤(4)的实现困难,使不少学生无法完成整个学习流程,或在学习过程中尝浅则止,或无法完成足够的练习,导致学习效果欠佳。

相比而言,EXCEL作为一种通用的办公软件,具有敏感性分析、优化分析、随机数生成等功能。针对土木工程可靠度分析中的教学难点,同济大学可靠度课程教学团队提出通过EXCEL这一通用工具,将各类可靠度分析算法在EXCEL中实现,便捷进行计算和参数敏感性分析,由此将可靠度学习流程精简为三步:(1)学习可靠度分析原理;(2)掌握可靠度分析算法;(3)通过EXCEL实现算法并对计算结果进行理解。由于基于EXCEL的可靠度分析极易实现,由此消除了传统教学方法中由于计算困难无法完成学习流程的困境。此外,在基于EXCEL的可靠度分析中,所有中间过程和结果都可以通过EXCEL单元格直观记录和表达,整个计算过程对教师和学生都是“透明”的,这对学生加深对可靠度原理和算法的理解极为有利,因此这一教学方法在本文中成为基于计算可视化的教学方法。不少学生还在基于EXCEL的计算可视化教学方法中发现了EXCEL强大的计算分析功能,并将其应用到其他课程或科研之中,极大地增加了学生学习的乐趣,将传统可靠度方法学习中的畏难情绪变成了学习兴趣。

在土木工程可靠度课程中,中心点法、验算点法、蒙特卡罗抽样以及基于可靠度的分项系数标定是几个典型的知识点和教学难点。下面以上述知识点为例,介绍计算可视化的实现过程。

三、计算可视化教学方法典型案例

(一) 中心点法的计算可视化

土木工程可靠度分析中,当功能函数为非线性时,可对该功能函数在随机变量均值点处进行线性泰勒展开,即可利用线性方程的性质获得结构性能指标(如安全系数、位移)均值和标准差的近似值。假定结构性能指标服从某一分布(如正态分布),即可根据性能指标的均值和标准差计算其结构的失效概率。由于该方法中功能函数在随机变量的均值点进行线性展开,故常被称为中心点法。中心点法是可靠度理论中的早期方法,概念简单,但精度较差,一般用于结构的初步分析,通常是结构可靠度理论中首先介绍的可靠度分析方法。

当对功能函数进行线性展开时,需要对不同随机变量求偏导数。在传统教学法中,偏导数常需通过手算完成。对于极限状态方程复杂的实例,这一过程极为繁琐。在EXCEL中,偏导数可采用有限差分法获得,由此大幅简化中心点法所需的计算工作量。为中心点法的计算可视化过程,考虑如下功能函数:

$$g(x_1, x_2) = x_1 + x_1 x_2 \quad (1)$$

其中 x_1, x_2 为随机变量。 x_1 的均值为 1、标准差为 2; x_2 的均值和标准差均为 2。设 $g(x_1, x_2) < 0$ 表示结构失效。图 1 给出了基于 EXCEL 的中心点法实现模板。由有限差分分析可知, 功能函数在中心点处的梯度矩阵为 $\{3, 0.99\}$ 。根据中心点法计算原理, 功能函数的均值(μ) 和标准差(σ) 可基于下式计算得到^[14]:

$$\mu = \mu_1 + \mu_1 \mu_2 \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{GC_x G^T} \quad (3)$$

其中 μ_1, μ_2 分别为 x_1, x_2 的均值, G 为梯度矩阵, C_x 为协方差矩阵。留意到中心点法中标准差计算需进行矩阵运算。该矩阵运算可通过 EXCEL 中矩阵运算函数 MMULT 来实现。通过上述计算模板, 即可获得该问题的可靠度指标为 0.47。在建立上述计算模板后, 通过改变第一部分单元格中对应的数字, 即可考察不同情况下可靠度指标的变化, 由此分析不同因素对可靠度指标的影响, 使用极为方便。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K											
1	第一部分: 随机变量信息																					
2	随机变量				相关系数矩阵			协方差矩阵														
3			x_1	x_2		x_1	x_2		x_1	x_2												
4	均值	1	2		1	0		4	0													
5	标准差	2	2		0	1		0	4													
6																						
7								= F5*C5*D5		= G5*D5^2												
8	第二部分: 功能函数信息																					
9	功能函数								梯度矩阵													
10	$g(x_1, x_2) = x_1 + x_1 x_2$								3				0.99									
11	$g(1, 2)$	$g(1 + 0.01, 2)$	$g(1, 2 + 0.01)$																			
12	3	3.03	3.01								= (D12-B12)/0.01											
13																						
14	第三部分: 基于中心点法的可靠度分析																					
15	功能函数均值			功能函数标准差				可靠度指标														
16	3			6.3183				0.47														
17																						
18	= C4^2+C4*D4			= SQRT(MMULT				= B16/E16														
19				(MMULT(I10:J10,I4:J5),TR																		
20				ANSPOSE(I10:J10))																		
21	 扫描左侧二维码 观看演示视频																					
22																						
23																						
24																						

图 1 基于 EXCEL 的中心点法分析

教师授课中, 在通过上述模板对中心点法的概念进行讲解后, 学生即可在 5~10 分钟内自行通过 EXCEL 操作重现计算过程。在课后作业中, 学生可方便地将其扩展到浅基础、隧道、边坡等问题的可靠度分析中。如前所述, 中心点法通常为可靠度课程中介绍的第一个可靠度分析方法。学生在通过该方法与自己研究方向相关的问题进行分析后, 可立刻体会到可靠度理论解决自身研究问

题的潜力,极大增加对可靠度课程的兴趣和信心。

(二) 验算点法的计算可视化

中心点法无法考虑随机变量分布对可靠度分析结果的影响,且对功能函数的形式具有依赖性。由于验算点法可有效克服上述方法的不足,该方法在结构可靠度分析中受到了广泛重视。以上述可靠度问题为例,其可靠度指标(β)按验算点法可按下式进行计算^[15]:

$$\beta = \min_{g(x)=0} \sqrt{nR^{-1}n^T} \quad (4)$$

其中 n 为随机变量(x) 在标准空间中的转换变量, R 为随机变量的相关系数矩阵。对于正态分布变量,其转换关系为:

$$n = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (5)$$

其中 μ_x, σ_x 分别是 x 的均值和标准差。

由式(4)可知,验算点法计算可靠度指标是一个有约束优化问题。由于优化问题的求解涉及大量的迭代计算,采用手算法求解有约束优化问题极为繁琐。在传统教学中,部分例题和练习需要学生通过手工迭代的方法求解上述有约束优化问题,耗费了教师和学生大量的时间。如要回避手算的困难,也可以采用专业的软件对有约束优化问题进行求解。但这一过程中,需对软件相关的背景知识和编程语法进行讲解,且学生掌握和熟悉编程语言也需要额外的时间,因此教学和学习过程均极为费力。EXCEL 软件有一个自带的规划求解器,可用于各种优化问题的求解,包括有约束优化。因此,采用规划求解器对上述公式进行求解时,即可绕开繁琐的编程,直接通过简单的鼠标操作获得结构的可靠度指标。作为演示,图 2 给出了采用 EXCEL 软件求解式(4)中可靠度指标的计算模板。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K																		
1	第一部分: 随机变量信息																												
2	随机变量					相关系数矩阵																							
3	<table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>x_1</td> <td>x_2</td> </tr> <tr> <td>均值</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>标准差</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </table>						x_1	x_2	均值	1	2	标准差	2	2	<table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>x_1</td> <td>x_2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>							x_1	x_2		1	0		0	1
	x_1	x_2																											
均值	1	2																											
标准差	2	2																											
	x_1	x_2																											
	1	0																											
	0	1																											
4																													
5																													
6																													
7	第二部分: 功能函数和约束条件																												
8	功能函数					约束条件																							
9	$g(x_1, x_2) = x_1 + x_1x_2$					-3E-07 → D14^2+D14*E14=0																							
10																													
11	第三部分: 基于规划求解器的一阶可靠度分析																												
13	<table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>x_1</td> <td>x_2</td> </tr> <tr> <td>验算点参数</td> <td>-1E-07</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>标准化参数</td> <td>-0.5</td> <td>2E-08</td> </tr> </table>						x_1	x_2	验算点参数	-1E-07	2	标准化参数	-0.5	2E-08	<table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>可靠度指标</td> <td>0.50</td> </tr> </table>						可靠度指标	0.50							
	x_1	x_2																											
验算点参数	-1E-07	2																											
标准化参数	-0.5	2E-08																											
可靠度指标	0.50																												
14						=SQRT(MMULT(MMULT(D15:E15, MINVERSE(H4:I5)), TRANSPOSE(D15:E15)))																							
15						=(E14-D4)/D5																							
16																													
17																													
18																													
19																													
20	扫描左侧二维码																												
21	观看演示视频																												
22																													

图 2 基于 EXCEL 的验算点法分析

在采用规划求解器时,其设置如图 3 所示。点击规划求解参数工具中的“求解”按钮,即可获得相应的可靠度指标为 0.50。这表明,通过上述 EXCEL 模板,不但可以获得可靠度指标,还可以获得

验算点的位置以及约束条件的满足程度,因此计算结果是透明、可视的。如采用传统方法进行教学,验算点法通常需要4个学时进行教学,学生能参与的练习也极为有限。采用上述方法,仅需2个学时即可完成教学,且可对大量案例进行分析和练习,大幅提高了教学和学习效率。

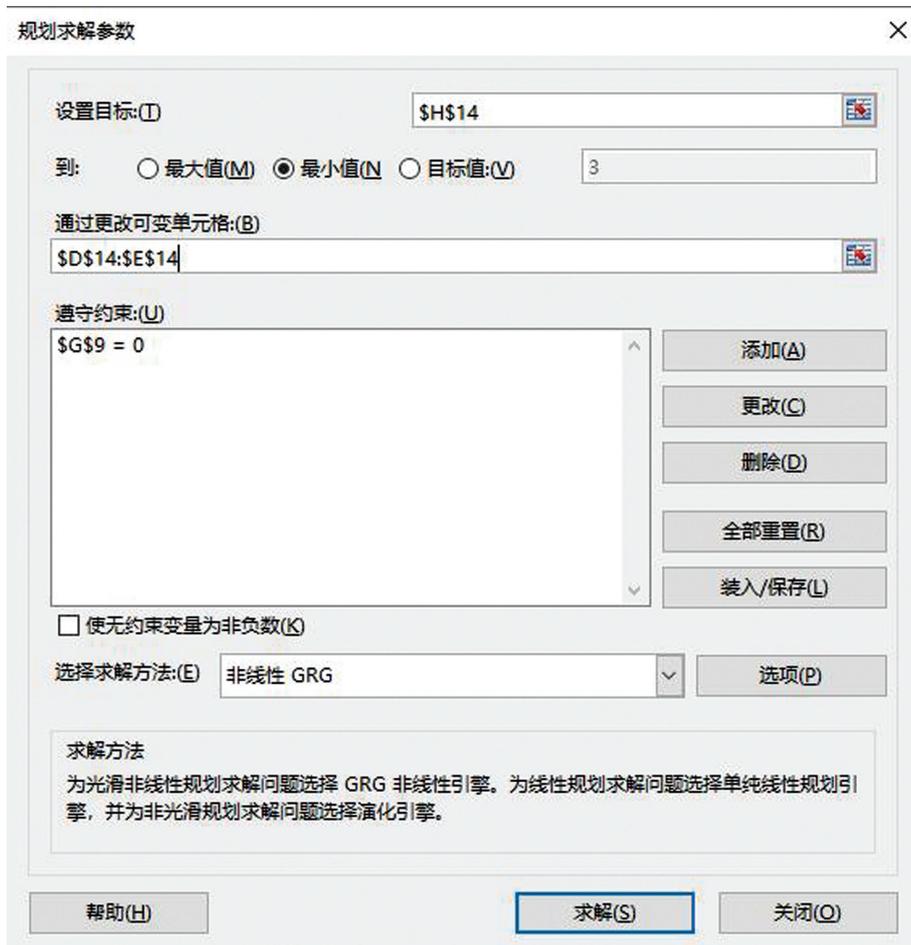


图3 EXCEL 规划求解模块

(三) 蒙特卡罗法的计算可视化

蒙特卡罗法是结构可靠度中的一种通用方法。当结构的失效概率不存在解析解时,蒙特卡罗法是验算其他可靠度方法准确度的基准方法,在可靠度理论中具有重要的地位。该方法的核心思想是,通过随机抽样获得随机变量的样本,将随机变量样本带入功能函数获得功能函数的样本,再通过对功能函数随机样本进行统计分析,获得结构失效概率。在采用蒙特卡罗法对前文中问题进行分析时,其失效概率(p_f)可按下式进行估算^[16]:

$$p_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(x_i) < 0] \quad (6)$$

其中 x_i 和 $g(x_i)$ 分别为随机变量和功能函数的第 i 个样本, N 为抽取的随机样本数量, $I[g(x_i) < 0]$ 为表征结构是否失效的指示函数,可由下式计算:

$$I[g(x_i) < 0] = \begin{cases} 1 & g(x_i) < 0 \\ 0 & g(x_i) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(6)表明,蒙特卡罗方法涉及随机数生成和功能函数的重复计算,无法通过手算实现。在传

统教学中,如果不采用专业的编程软件,学生很难完成蒙特卡罗法的练习;如果采用专业编程软件,学习效果又收到编程技巧的约束,因此学习效果常不理想。

在 EXCEL 中,IF 语句可用来计算 I 值。令 u_i 为 0 到 1 之间均匀分布的一个样本,则随机变量 x 的样本可按式(8)获得:

$$x_i = F_x^{-1}(u_i) \quad (8)$$

其中 F_x 是随机变量 x 的累计概率密度函数。在 EXCEL 中,函数 Rand 用来生成 0-1 之间均匀分布的随机数。通过式(8),即可基于随机变量 x 的累计概率密度函数的逆函数获得其样本。基于上述思路,图 4 给出了采用蒙特卡罗法求解前述可靠度问题的 EXCEL 模板。根据上述模板,该问题的失效概率为 30%,对应的可靠度指标为 0.52。通过上述模型,教师和学生不但可以获得该问题的可靠度指标,还可以同时看到所有的随机变量样本、功能函数样本以及对应的指示函数样本,由此实现了蒙特卡罗法的可视化。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	第一部分: 随机变量和功能函数信息												
2	随机变量				相关系数矩阵				功能函数				
3			x_1	x_2			x_1	x_2					
4	均值	1	2			1	0	$g(x_1, x_2) = x_1 + x_1 x_2$					
5	标准差	2	2			0	1						
6													
7	第二部分: 蒙特卡罗抽样							第三部分: 失效概率分析					
8		u_1	x_1	u_2	x_2	g	I						
9		0.738	2.276	0.331	1.123	4.833	0	失效概率					
10		0.054	-2.22	0.323	1.081	-4.62	1	0.3					
11		0.633	1.682	0.013	-2.42	-2.4	1	= AVERAGE(G9:G18)					
12		0.475	0.875	0.167	0.064	0.931	0	可靠度指标					
13		0.317	0.045	0.857	4.13	0.232	0	0.52					
14		0.414	0.568	0.102	-0.54	0.26	0	= NORMINV(1-J11,0,1)					
15		0.25	-0.35	0.922	4.842	-2.05	1						
16		0.683	1.954	0.231	0.527	2.983	0						
17		0.994	6.075	0.653	2.788	23.01	0						
18		0.864	3.201	0.941	5.119	19.59	0						
19		=Rand()	=NORMINV(B18,\$C\$4,\$C\$5)	=C18^2+C18*E18	=IF(F18<0,1,0)								
20													
21													
22													
23													
24	扫描左侧二维码												
25	观看演示视频												
26													

图 4 基于 EXCEL 的蒙特卡罗法分析

(四) 基于可靠度设计方法的可视化

规范标定是结构可靠度理论最重要的应用之一。目前,我国大量的土木工程相关规范正在由传统的容许应力设计法向分项系数法进行转变,对可靠度理论存在巨大的需求。如何确定分项系数是规范标定的关键。在可靠度理论中,分项系数可通过验算点法获得。令 x^* 为目标可靠度为 β_T 时随机变量对应的盐点,令 x_c 为随机变量的特征值,则该随机变量对应的分项系数(b_x)为:

$$b_x = \frac{x^*}{x_c} \quad (9)$$

如前所述,验算点可通过 EXCEL 中的规划求解器获得。在采用验算点法确定分项系数时,需

不断调整设计参数,使验算点法获得的可靠度指标达到目标可靠度。由于这一过程无法通过手算完成,在传统教学中,分项系数标定方法通常只能讲到概念层次,学生很难获得练习的机会和直观的体验。

在 EXCEL 中,不断调整设计参数达到目标可靠度的过程可通过数值试验获得。数值试验过程中可直观地观测到可靠度指标随设计参数的变化情况,加深学生关于不同变量对可靠度影响机理的理解。图 5 给出了浅基础分项系数标定的 EXCEL 模板。图中,内聚力(c)和摩擦角(φ)为服从正态分布的随机变量。当目标可靠度指标为 3 时, c 和 φ 对应的分项系数分别为 0.26 和 0.94。通过该方式,学生可以自己动手对分项系数进行标定,深刻理解基于可靠度理论的规范标定方法,极大地提升学习获得感。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M													
1	第一部分: 随机变量及案例信息																									
2	随机变量				相关系数矩阵				<p>浅基础承载示意图</p>																	
3	c		φ		c		φ																			
4	均值		8 25		1 0		0 1																			
5	标准差		2 3		0 1		0 1																			
6																										
7																										
8	第二部分: 确定性参数信息																									
9	N_y	N_q	N_c	γ	D	B	λ_c	λ_ϕ	q	q_u																
10	6.48	9.23	18.82	17.00	0.50	1.50	1.00	1.00	200	200																
11																										
12	第三部分: 一阶可靠度分析																									
13			c		φ																					
14	设计参数		2.071 23.62																							
15	标准化参数		-2.96 -0.46		$= (E14-D4)/D5$																					
16																										
17	约束条件		2E-07		$K10-J10 = 0$																					
18					$= \text{SQRT}(\text{MMULT}(\text{MMULT}(D15:E15, \text{MINVERSE}(F4:G5)), \text{TRANSPOSE}(D15:E15)))$																					
19																										
20	第四部分: 分项系数标定																									
21	参数特征值				分项系数																					
22	c		φ		c		φ																			
23	8		25		0.26		0.94																			
24			$= C4/H10$				$= D14/B23$																			
25																										
26	备注: $N_y = 1.8(N_q - 1)\tan\phi$, $N_q = \tan^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})e^{\sigma \tan\phi}$, $N_c = (N_q - 1)\cot\phi$																									
27	$q_u = 0.5\gamma BN_y + cN_c + \gamma DN_q$																									
28																										
29	<p>扫描左侧二维码 观看演示视频</p>																									
30																										
31																										
32																										

图 5 基于 EXCEL 的分项系数标定分析

从以上案例可以看出,基于 EXCEL 的计算可视化教学方法的关键是通过 EXCEL 这一通俗易懂的办公工具,将学生从可靠度分析涉及的复杂计算中解脱出来,精简可靠度理论的学习流程,提高教学和学习效率,使学生可以聚焦到可靠度分析原理的理解上来,从而取得更好的学习效果。基于上述思想,同济大学土木工程可靠度授课团队对可靠度课程中的重要知识点都开发了对应的可视化教学方法,形成了基于可视化的土木工程可靠度课程教学体系,对课程建设起到了重要的推动作用。

四、教学效果分析

为分析计算基于计算可视化的土木工程可靠度教学方法的教学效果,采用问卷调查的方式对同济大学学习过该课程的同学进行调研,获得有效样本数为80。图6给出了主要的调研结果。由图6可知,选课前认为可靠度课程较难或很难的同学的比例为72%,说明该课程普遍被认为是一门较难的课程。经过该门课程的学习,约92%的同学基本理解和掌握了可靠度分析方法,其中24%的同学深刻理解和掌握了相关理论,说明绝大多数同学理解了可靠度分析的原理和方法,达到了预期的教学目的。调查结果还显示,调查样本中有超过半数的学生在学完该课程后将习得的知识技能经常应用于自己的研究,并有50%的学生在发表的学术论文中应用了课堂所学知识,达到了学以致用的目标。具体访谈表明,除本门课程讲授的可靠度知识外,以规划求解器为代表的EXCEL分析工具对学生后续研究也非常有用。某毕业生在毕业论文致谢中写道,“《土木工程的概率分析》应该是我研究生阶段最受用的课程之一了。我已经记不得上课的时候多少次感叹EXCEL竟然还能这么用。感谢老师,为我后面的科研提供了很大的基础知识支撑”。综上,基于计算可视化的土木工程可靠度教学方法取得了很好的教学效果。

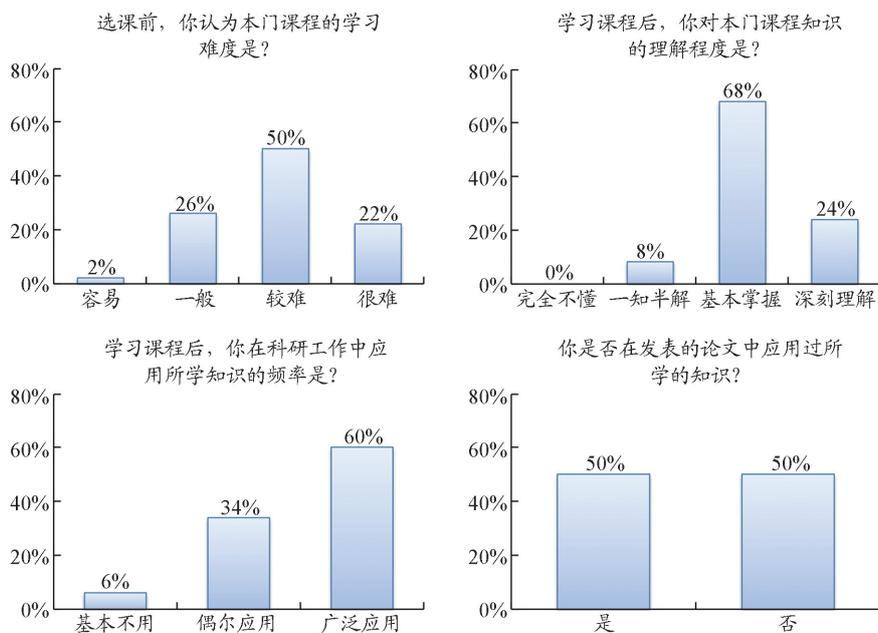


图6 问卷调查主要结果的柱状统计图

五、结语

土木工程可靠度分析是一门理论性强、概念抽象、涉及较多计算的多学科交叉课程。本文基于EXCEL这一简单通用的工具,提出了基于计算可视化的土木工程可靠度教学方法,并通过实例分析,介绍了计算可视化的思想及其在本门课程核心知识点上的实现案例。基于计算可视化的教学方法可以减少教学和学习流程,消除可靠度课程学习中的编程要求,大幅降低可靠度课程的学习门槛和学习难度。该方法还可以直观地展现可靠度分析的过程和结果,加深对可靠度理论的理解。基于计算可视化的土木工程可靠度教学方法为该课程教学效果的提升提供了有力的帮助。

参考文献:

- [1] 赵国藩, 贡金鑫, 赵尚传. 我国土木工程结构可靠性研究的一些进展[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(3): 253-258.
- [2] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 张璐璐, 张洁, 徐耀, 等. 岩土工程可靠度理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011.
- [4] 姜兴渭, 宋政吉, 王晓晨. 可靠性工程技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [5] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 工程结构可靠度设计统一标准: GB 50153—1992[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [6] 汤永净, 李国强, 刘沈如, 等. 提高工程结构荷载与可靠度设计原理题库系统设计的关联性和随机性[J]. 高等建筑教育, 2004(4): 78-80.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构可靠性设计统一标准: GB 50153—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [8] 李会军, 李宗利. 工程结构可靠度分析课堂教学的改革与实践[J]. 黑龙江教育(高教研究与评估), 2019(3): 1-3.
- [9] 杨世浩, 齐甦. 《工程结构可靠度》教学的实践与体会[J]. 教育教学论坛, 2013(35): 78-80.
- [10] 潘文军, 吴辉琴, 邹万杰. 结构可靠度理论课程教学改革与实践[J]. 大众科技, 2013, 15(12): 173-175.
- [11] 潘旦光, 丁民涛. 结构力学抽象理论实物化教学方法研究[J]. 高等建筑教育, 2018, 27(2): 57-60.
- [12] 陈涛, 孙凯, 尹文良. 可视化结构力学教学实验初探[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(5): 133-136.
- [13] 刘先珊, 许明. 研究生渗流理论与测试课程的可视化教学初探[J]. 高等建筑教育, 2021, 30(2): 42-48.
- [14] Christian J T, Ladd C C, Baecher G B. Reliability applied to slope stability analysis [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2180-2207.
- [15] Low B K, Tang W H. Reliability analysis using object-oriented constrained optimization[J]. Structural Safety, 2004, 26(1): 69-89.
- [16] Ching J, Phoon K K, Hu Y G. Efficient evaluation of reliability for slopes with circular slip surfaces using importance sampling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(6): 768-777.

Teaching method of reliability in civil engineering specialty based on computational visualization

ZHANG Jie, HUANG Hongwei

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: As structural design methods based on reliability theory develop rapidly, reliability theory has become an important knowledge for civil engineering students. Because the reliability theory seems to be abstract and complex due to the numerical algorithms involved, learning reliability theory has been a challenging task for students. In this paper, a teaching method based on visualization of computation is described, which is developed through the commonly available software EXCEL. With such a teaching method, different reliability algorithms which involve heavy numerical computations are implemented, where the intermediate results can be displayed explicitly and the programming requirements can be eliminated. As such, students can focus more on the concept and principles of the reliability theory, other than the tedious calculation details, understand and master relevant knowledge points easily, and apply the learned knowledge to their own research fields. The method of visualization of computation can significantly enhance the efficiency of learning, and improve the effectiveness of teaching. It provides a powerful tool for teaching reliability theory for civil engineering students.

Key words: visualization of computation; civil engineering; reliability theory; teaching method

(责任编辑 袁虹)