

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2020.01.016

欢迎按以下格式引用:程斌,向升.结构力学课程“3W3E”教学法[J].高等建筑教育,2020,29(1):119-125.

结构力学课程“3W3E”教学法

程斌,向升

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘要:针对土木工程专业结构力学课程覆盖面广、理论性强、内容抽象、应用灵活的特点,探索形成了一套以模块化知识单元为主线的“3W3E”教学法。该教学法包含 Why、What、How、Evolution、Examples、Engineering 等六个教学模块,分别从目的意义、概念原理、方法步骤、发展历程、例题训练、工程应用等方面对相关知识点进行讲授,具有层次循序渐进、内容各有侧重、功能互为补充的特点。以力法为例,对“3W3E”教学法的实施过程和教案细节进行了完整介绍。实践表明,“3W3E”教学法可以有效提升学生的学习兴趣,加强学生对抽象力学知识的理解,同时帮助学生在熟练掌握相关分析方法和解题技巧的基础上,拓宽对实际工程应用的认知。

关键词:土木工程;结构力学;教学方法;创新思维;工程应用;力法

中图分类号:G642 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2020)01-0119-07

结构力学是土木工程专业的核心课程,在整个专业培养方案中属于承上启下的关键一环,是高数、物理、理论力学、材料力学等基础知识的综合应用,对于培养学生在后续专业课程学习中的兴趣和能力的发挥起着至关重要的作用。在工程专业教育认证新体系中,结构力学通常支撑着设计解决方案、职业规范、个人和团队、终身学习等多个方面的毕业要求指标点,对于土木工程专业人才培养目标的达成也极其关键。但是,结构力学作为一门经典的力学类课程,同样存在着知识覆盖面广、理论性强、内容抽象、应用灵活等显著特点,尤其在课时非常有限的情况下,如何将最基本、最重要的知识以简单、高效甚至有趣的方式传授给学生,同时通过对学生的解题技巧和创新思维的训练,实现工程应用能力的提升,始终是结构力学任课教师需要思考的问题。

近年来,高校科教人员为提升结构力学课程的教学质量,进行了多方面的探索^[1-2]。例如:在教学内容方面,提倡增强实践性和趣味性,以激发学生的学习兴趣^[3-4];探讨自主式教学、研究性教学、信息化教学的可行性,提倡构建以学生为主导的教学模式,以提高学生学习的主动性和自主学习能力^[5-8];从教学目标的角度,提倡重视概念分析能力和工程直觉的培养,以加深对工程概念的理解,提高学生的综合素养^[9-11]。

修回日期:2019-03-14

作者简介:程斌(1979—),男,上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授,博士,主要从事桥梁结构理论与设计方法研究,(E-mail)cheng_bin@sjtu.edu.cn。

上海交通大学土木工程专业结构力学教学团队在多年实践的基础上,探索出了一套以问题需求为导向、强化基本概念方法、注重创新思维训练同时兼顾工程应用的“3W3E”教学法,取得了较好的教学效果,可供兄弟院校教师同仁参考。

一、“3W3E”教学法

所谓“3W3E”教学法,是指针对结构力学中的知识点或方法,以 Why、What、How、Evolution、Examples、Engineering 六个要素(即“3W3E”)为核心模块的特色教学方法。图1为“3W3E”教学法的构成图,具体包括以下部分。

(1) Why

“Why”模块首先讲述为什么要学习这部分内容,即对相关知识或方法的必要性和意义作用进行介绍。具体通过典型案例的分析,说明已有知识或方法在解决此类问题上存在的局限性,从而引出学习该内容的意义所在。“Why”模块通过案例式引导,可有效激发学生的学习兴趣,明确其学习目标。

(2) What

“What”模块重点介绍基本概念,同时辅以重要的理论推导,从数学、物理、力学等原理上阐明相关知识或方法的适用性和先进性。“What”模块可帮助学生从宏观层面建立对所讲授内容的整体认识,并掌握其中所蕴含的原理和本质,从而为接下来的学习打下基础。

(3) How

“How”模块所关注的是如何采用该方法对具体问题进行分析,将完整介绍相关方法的实施步骤,并对整个分析过程中的关键环节及其注意事项进行重点解析。通过“How”模块的学习,学生对于“Why”模块所提出的问题已可以找到解决方案,也基本掌握了运用该方法解决问题的方法。

(4) Evolution

Evolution 意指发展历程。该模块按时间先后顺序对所讲授知识或方法的提出、修正直到完善的整个过程进行介绍,以帮助学生更好地掌握相关概念、原理、优缺点及适用范围,培养学生思考问题的能力和科学探索精神。与此同时,还将对涉及的相关历史人物的基本情况进行简要介绍,这些科学家通常是数学、物理、力学及相关领域的开创者和奠基人,学生通过课堂了解和课后查阅,可培养形成对人类未知世界的好奇心和对人类科技发展的景仰敬畏之情,提升自身的学术志趣。

(5) Examples

Examples 意指例题讲解。该模块以桁架、梁、刚架、拱等为对象,考虑常见的荷载和支座条件,设计若干典型例题对分析过程进行演示。Examples 模块兼顾总体流程和计算细节,对于提高学生的实际解题能力非常重要,但并不占据过多课时,课堂上仅对这些例题的主要分析过程、关键计算步骤以及易犯错误进行讲解,并对不同类型结构之间的差异进行讨论。对于为了提高解题速度和准确率而需要进行的大量计算训练,则留给学生课后进行。

(6) Engineering

Engineering 意指工程应用。该模块结合工程实际情况,应用所学知识和方法对工程实例开展分析,并基于分析结果对工程中的现象和常识进行归纳解释,最后再从“知其然并知其所以然”的角度对其力学本质进行揭示。必要时基于计算结果对重要参数的影响规律进行量化分析,以得到一

般性的工程结论。“Engineering”模块向学生展示所学知识和方法的工程价值所在,不仅加深了学生对书本抽象知识的理解,还可帮助学生在专业学习初期建立对土木工程结构的直观认识,并形成一些重要的工程常识,从而为后续的专业课程学习以及解决复杂工程问题打下基础。

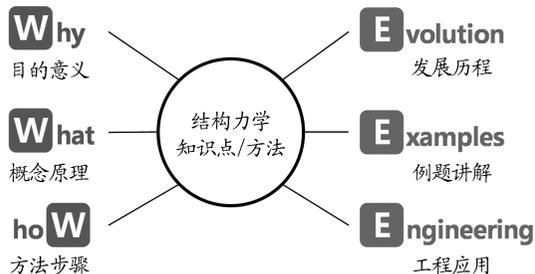


图1 结构力学“3W3E”教学法

以上六要素中,“3W”模块为“3E”模块的基础和前提,“3E”模块为“3W”模块的延伸和拓展,六大模块之间层次循序渐进、内容各有侧重、功能互为补充,共同组成了结构力学创新教学体系的主体框架。

总体而言,“3W3E”教学法很好地体现和贯彻了“讲一、做二、练三、拓四”的教学思路,即:首先对知识方法的目的意义、概念原理、方法步骤、发展历程等进行详细讲解,此为“讲一”;在此基础上结合典型例题,对相关分析方法的实施步骤和解题技巧进行详细讲解,此为“做二”;进一步要求学生完成大量的课后作业,对不同类型的结构进行计算分析,以提高解题熟练程度和正确率,此为“练三”;最后基于所学知识方法对工程实际问题进行应用分析,并进行工程规律总结,此为“拓四”。

“3W3E”教学法的各模块内容及其功能作用如表1所示。

表1 “3W3E”教学法的主要内容和功能作用

模块名称	核心要素	教学内容	功能作用
Why	目的意义	通过典型案例说明已有知识方法的局限性,引出学习的必要性	激发学习兴趣,明确学习目的
What	概念原理	介绍知识方法的基本概念,进行必要的理论推导,阐明力学原理	建立整体认识,了解本质原理
How	方法步骤	完整介绍知识方法的实施步骤、关键环节及注意事项	提出解决方案,掌握分析流程
Evolution	发展历程	对知识方法的发展过程以及相关科学家的基本情况进行介绍	培养科学精神,提升学术志趣
Examples	例题讲解	基于若干典型例题,对计算过程、关键点、易犯错误等进行讲解	丰富解题技巧,提高计算效率
Engineering	工程应用	应用所学方法对工程实例进行分析,解释典型工程现象并揭示力学本质	体现应用价值,建立工程常识

二、典型教学案例

以结构力学中最重要的力法为例,对“3W3E”教学法的实施过程进行详细介绍。

(一) Why——为什么要学力法

以图2(a)所示的两跨连续梁为典型案例,内力分析需要首先确定四个支座反力分量,但基于静

力平衡条件只能建立相互独立的三个方程,因此有无穷多组解。基于此,说明之前所学方法的局限性,并指出力法所要解决的主要问题。其中还可比拟“三个和尚抬水喝”的经典故事,将抽象内容形象化、生动化。最后,对超静定结构的基本特征进行总结。

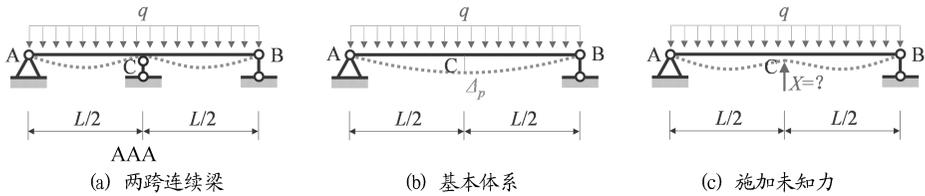


图2 力法的典型案例

(二) What——力法的基本概念和原理是什么

以双跨连续梁为例,若能确定四个未知量其中的一个(例如中间支座竖向反力 R_{CY}),那么其余三个未知量迎刃而解。为此,将连续梁的变形过程想象成由两个阶段组成,即:先将 C 支座移除,得到图 2(b) 所示的单跨简支梁结构,施加荷载 q 之后梁发生变形,C 点产生向下位移 Δ_p ;随后在 C 点处由零开始从小到大施加一个方向向上的集中力 X (见图 2(c)),使得 C 点开始从 Δ_p 位置向上运动,直至 C 点重新回到初始位移零点位置,此时所对应的集中力 X 即为初始体系的支座反力 R_{CY} 。在这虚构的两阶段变形过程中,结构始终是静定的,因此 Δ_p 很容易求得, R_{CY} 则通过求解 C 点位移协调方程 $\Delta_c = \Delta_p + X\delta = 0$ 得到,其中 δ 为单位力 $X=1$ 作用下的 C 点竖向位移,也称为柔度系数。

由此可见,力法的核心思想在于变形协调,需要以力(包括支座反力和截面内力)作为未知量,建立结点位移协调方程进行求解。至此,力法的基本概念初步建立。讲解过程中,需要对涉及的基本结构、基本体系、未知力、变形协调方程、柔度系数等重要概念,以及小位移理论、叠加原理等基本假定进行说明。

(三) How——如何采用力法进行结构分析

力法的分析流程主要包括释放多余约束、计算柔度系数和位移系数、建立变形协调方程求解未知力、求解结构内力图等四个步骤。结合“What”模块所介绍的基本概念,基于图 2(a) 双跨连续梁对力法的求解过程进行逐步讲解。与此同时,还将对以下若干要点进行强调。

- (1) 释放的多余约束数量与超静定次数相一致,但多余约束的选取方案并不唯一。
- (2) 柔度系数 δ 的求解是关键,不同的多余约束选取方案所对应的柔度系数完全不同。
- (3) 建立变形协调方程所考虑的结点自由度与所释放多余约束的方向是一致的。
- (4) 求解结构内力图既可基于叠加原理对内力图进行求和,也可将原始荷载和未知力均视为外荷载共同作用在静定基本结构上进行求解。

(四) Evolution——力法的发展历程

力法最初起源于 James Clerk Maxwell 在 1864 年提出的单位荷载法,主要用于求解超静定结构在任意位置和任意方向上的位移,后经 Otto Mohr 和 Heinrich Müller-Breslau 发展成为完善的力法,因此力法也被称为 Maxwell-Mohr 法。这三位大名鼎鼎的科学家,James Clerk Maxwell 是苏格兰物理学家,主要成就是建立了统一的电磁场理论,提出了著名的麦克斯韦方程组,被誉为是继牛顿之后的“物理学第二次大统一”;Otto Mohr 是德国材料力学家,提出了著名的应力莫尔圆理论;Heinrich Müller-Breslau 也是德国土木工程学者,对梁和刚架的结构分析做出了重要贡献。与此相关的更多信息,建议学生在课后自行查阅学习。

(五) Examples——力法的例题讲解

考虑到拱结构位移计算需要曲线积分较为麻烦,因此针对梁、刚架、桁架三类典型结构,精心设计了六个算例进行解题过程讲解,如图3所示。

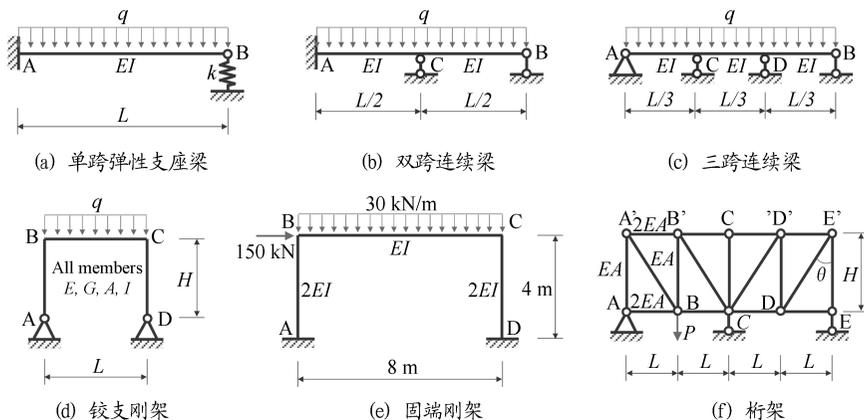


图3 力法的例题讲解

这六个不同类型的结构在采用力法进行求解时呈现出的特点也各不相同、各有侧重。例题(a)探讨带有弹性支座的结构,重点强调当以弹性支座反力作为未知约束力进行分析,其位移最后并不协调到零;例题(b)两跨连续梁含有两个多余约束,将力法拓展到两个未知力的情形,涉及相互耦合柔度系数的概念和求解方法;例题(c)三跨连续梁为二次超静定结构,将通过比较不同多余约束释放方案的计算过程,体现图乘法计算柔度系数过程复杂程度的不同,指出预先评估未知力选取方案的必要性;例题(d)为铰支门式刚架,通过定量分析杆件轴向变形、剪切变形、弯曲变形对计算结果的影响,说明杆件轴向变形和剪切变形在刚架结构分析中可以忽略;例题(e)固端刚架主要用于讲解对称结构的简化求解方法,将对未知力之间的耦合关系、半结构分析法、对称线杆件及支座处理等内容进行重点介绍;例题(f)介绍桁架结构的求解方法,重点说明直接移除杆件法和切断杆件截面法的差异性及其机理。

以上例题基本涵盖了力法可能涉及的主要方面,由于课时所限,学生还需通过大量的课后练习加以复习和巩固,提高解题能力和解题效率。

(六) Engineering——力法的工程应用

力法的工程应用将主要结合 Examples 模块的例题,分别针对梁、刚架和桁架结构展开。

首先对于例题(c)三跨连续梁,考虑不等跨情况,引入边中跨比 α 作为参数,对连续梁的支座弯矩 M_C 、中跨跨中弯矩 M_E 和边跨跨中弯矩 M_F 进行计算分析,得到图4(a)所示的规律曲线。可以发现,等截面三跨连续梁最合理的边中跨比取值范围为 $0.5 \sim 1$,其余情况将导致极不协调的跨中负弯矩受力状态。在 $0.5 < \alpha < 1$ 合理取值区间,还存在着明显的支座负弯矩大于跨中正弯矩的现象,因此实际工程中的连续梁桥通常设计成支座高、跨中矮的变截面形式,以提高支座截面的抗弯承载力,而支座附近较大的结构自重对梁体受力并不产生明显影响。

其次针对例题(d)铰支门式刚架,将梁端负弯矩 M^- 和梁跨中正弯矩 M^+ 的计算结果用图形表示,见图4(b),可以发现高跨比 H/L 对刚架的弯矩分布有显著影响。随着 H/L 的不断增大, M^- 不断减小, M^+ 则不断增大,其原因在于 H/L 越大,则意味着在梁跨度不变的情况下,柱的高度越大,柱对梁端截面转动的约束能力就越小,因此梁端负弯矩值就越小。极端情况下, $H/L \rightarrow 0$ 对应于梁两端

固定, $H/L \rightarrow \infty$ 对应于梁两端铰支。这里体现的是杆件刚度比的影响, 有助于指导学生理解工程结构受力本质。

最后结合例题(f)桁架结构, 对桁架梁的受力状态进行分析。图4(c)给出了 $H=L$ 情况下的桁架杆件轴力分布图。由图可知, 桁架上弦杆均受压、下弦杆均受拉、斜腹杆均受拉, 这与工字梁在相同竖向荷载作用下的受力状态是极其相似的, 因此上弦杆、下弦杆、斜腹杆在桁架梁中的作用类似于工字梁中的上翼缘、下翼缘和腹板, 即: 上、下弦杆(翼缘)主要用于抗弯, 斜腹杆(腹板)主要用于抗剪。这对于理解桁架结构的受力特征很有意义。

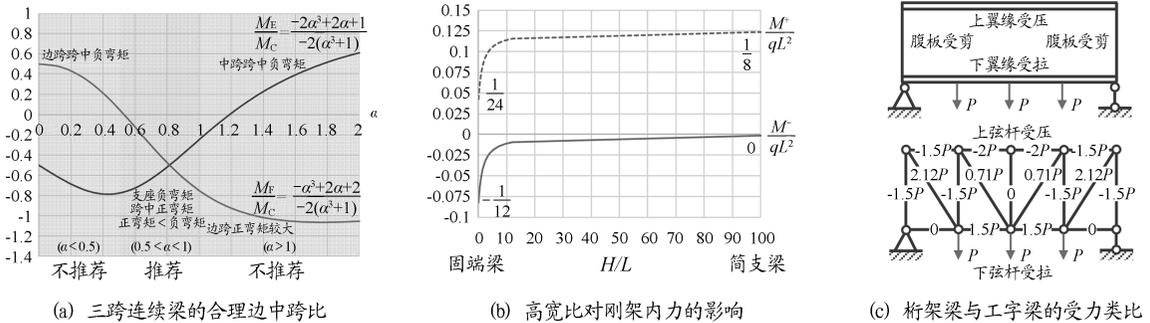


图4 力法的工程应用

三、结语

经过多年教学实践和探索, 原创性地提出了针对土木工程专业结构力学课程的“3W3E”教学法, 并以力法为例进行了完整展示。“3W3E”教学法通过设置层次循序渐进、内容各有侧重、功能互为补充的六大核心模块, 实现了以问题探讨引出目的意义、以案例讲解强化概念原理、以例题训练提高解题技能、以发展历程培养创新思维、以工程应用拓宽专业常识的教学目标, 在实际教学中取得了较好的效果, 可供结构力学课程教师参考, 也可为其他力学类课程教学改革提供借鉴。

参考文献:

- [1] 马崇武, 徐有基, 秦怀泉. 土木工程专业力学课程改革的研究与实践[J]. 高教论坛, 2007(2): 112-113.
- [2] 杨建功, 路维, 王邵臻, 等. 关于结构力学课程教学改革中的几点探讨[J]. 教育现代化, 2016, 3(27): 121-122.
- [3] 贾红英, 赵均海, 单建. “感而遂通”参与式教学法——在结构力学课程中的探索与实践[J]. 力学与实践, 2018, 40(2): 222-226.
- [4] 贾穗子, 徐能雄. 土木工程专业结构力学教学与工程实际结合的探讨[J]. 高等建筑教育, 2018, 27(4): 126-130.
- [5] 贾影, 于桂兰, 徐艳秋. 结构力学研究性教学初探[J]. 高等建筑教育, 2011, 20(3): 116-118.
- [6] 侯祥林, 郑夕健, 费焯. 结构力学课程多媒体辅助教学软件的研发和应用[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(4): 139-146.
- [7] 孙苗苗, 施广权, 张世民, 等. 基于微信公众平台的结构力学翻转课堂教学与应用[J]. 力学与实践, 2017, 39(4): 403-408.
- [8] 龙晓鸿, 李黎, 樊剑, 等. 结构力学课程自主学习教学模式构建探讨[J]. 高等建筑教育, 2017, 26(6): 64-67.
- [9] 郑玉国. 结构力学课程教学应重视工程直觉的培养[J]. 高等建筑教育, 2016, 25(1): 100-104.
- [10] 杜闯, 陈向上, 李静, 等. 重视结构力学课程力学概念的教学探讨[J]. 高等建筑教育, 2014, 23(6): 66-69.
- [11] 李会军, 李宗利, 史斌. 概念结构力学教学研究与实践[J]. 黑龙江教育(高教研究与评估), 2016(3): 8-10.

“3W3E” teaching method for structural mechanics

CHENG Bin, XIANG Sheng

(*School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China*)

Abstract: Considering the wide-ranging, abstract, theoretical, and flexible contents of structural mechanics in civil engineering, a teaching method named “3W3E” is proposed by taking the modular knowledge units as clues. In “3W3E” teaching method, six modules of why, what, how, evolution, examples, and engineering are adopted, by which the significance, basic concepts, analysis procedures, historical developments, calculation training, and engineering applications of the knowledge point or approach are respectively introduced. The proposed method has the distinct characteristics of progressive levels, emphasized contents, and complementary functions. Taking force method as an example, this paper introduces the implementation process and teaching plan details of the “3W3E” teaching method. Practices show that the “3W3E” teaching method can improve the learning initiative of students so that the abstract knowledge can be well understood, and can help students to apply the problem-solving skills more proficiently and to widen their engineering cognition.

Key words: civil engineering; structural mechanics; teaching method; innovative thinking; engineering application; force method

(责任编辑 梁远华)