

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2022.02.017

欢迎按以下格式引用:李会军,王正中,李宗利,等.直接分析法在钢结构系列课程及实践环节中的探索与实践[J].高等建筑教育,2022,31(2):127-136.

直接分析法在钢结构系列课程及实践环节中的探索与实践

李会军,王正中,李宗利,李宝辉

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:目前国内外多本钢结构设计规范将直接分析法推荐为首选方法,但钢结构系列课程教材及教学内容相对陈旧,与现行规范及学科前沿发展脱节。基于此,围绕直接分析法,对钢结构系列课程及实践教学环节进行探索与实践。在理论教学环节,依据钢结构设计标准,采用由简入深、循序渐进的方法讲授直接分析法的原理与思路,突出该法中结构整体缺陷、构件缺陷、残余应力、节点刚度与杆件偏心等要点的基本概念及其实现方法;在实践教学环节,如本科生毕业设计/论文及大学生科创项目,精选与直接分析法相关的题目,通过实践锻炼使学生牢固掌握该法的核心思想与设计思路。通过探索与实践,学生掌握了直接分析法的设计思路,应用能力、实践能力、科学研究水平与创新能力得到了提升。

关键词:钢结构系列课程;直接分析法;教学探索;教学改革;科研反哺教学

中图分类号:G642.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2022)02-0127-10

钢结构因具有跨越能力强、自重轻、抗震性能优越、施工方便等诸多优点而广泛应用于工业厂房、多高层房屋钢结构、大跨度空间结构、塔桅结构与水工钢闸门等结构的设计中^[1-3]。目前我国高校开设的本科及研究生钢结构系列课程主要包括钢结构基本原理、钢结构设计、水工钢结构、结构稳定理论、高等钢结构、大跨度空间结构、装配式钢结构建筑、钢结构制作与安装等^[4-5]。钢结构系列课程在土木水利专业中占有非常重要的地位,是高校土木水利专业的主干课程。

目前,钢结构的设计方法正经历着巨大变革,由传统的计算长度系数法逐步向直接分析法发展。传统的线性分析方法局限于主要承受重力荷载的规则建筑框架结构,很多复杂的结构(如自由

修回日期:2021-07-28

基金项目:教育部产学研合作协同育人项目“直接分析设计法在钢结构系列课程教学中的探讨与实践”(202002116001);西北农林科技大学研究生教育教学改革研究项目“农业院校新工科力学结构系列课程体系优化与改革”(JY2102008);2021年西北农林科技大学研究生课程思政示范课程“工程结构可靠性分析”(6073009);2021年西北农林科技大学水利与建筑工程学院课程思政示范建设项目“结构稳定理论”(6072050)

作者简介:李会军(1981—),男,西北农林科技大学水利与建筑工程学院副教授,博士,主要从事结构工程研究,(E-mail)lihj@nwsuaf.edu.cn。

曲面网壳结构)无法用弹性临界系数度量,进而无法使用线性分析设计。传统的线性分析方法已难于满足现阶段钢结构设计的要求。直接分析法是基于非线性分析理论的体系整体分析方法,考虑结构 P- Δ 和构件 P- δ 效应、结构整体缺陷与构件缺陷(含残余应力),以及材料弹塑性,构件设计仅需截面承载力校验。传统的计算长度设计法已被欧洲钢结构规范(Eurocode-3 2005)^[6]、美国钢结构规范(AISC 360-16、LRFD 2010)^[7]及香港钢结构规范(HKSC 2011)^[8]等多种规范淘汰,取而代之的是二阶非线性分析方法。GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[9](下文简称《钢标》)已将直接分析法推荐为主要方法之一。

目前,钢结构系列课程教材尚未将直接分析法纳入其中,教材内容相对陈旧、滞后,与现行规范标准、学科前沿与工程技术发展脱节。在教学内容上偏重传统经典理论的介绍,而对不断出现的新成果、新理论及新方法鲜有介绍,部分内容甚至与规范不相适应。因教学内容陈旧,对大学生吸引力及挑战性不足,难以激发学生的学习兴趣、开阔学生的视野、提高学生的自主思考能力与批判性思维,与创新型人才培养目标产生较大错位。因此,亟需将现代钢结构设计的最新理念与方法引入理论与实践教学环节。笔者依托广州建研数力建筑科技有限公司 2020 年第一批教育部产学研合作协同育人项目,以直接分析法为切入点,探讨直接分析法在钢结构系列课程教学中的融入过程,以进一步完善钢结构系列课程教学内容,提高钢结构系列课程群对专业的支撑度,提高学生的学习兴趣、实践能力与创新竞争力,实现钢结构系列课程群整体教学质量的提升。

一、背景介绍

(一) 我校钢结构系列课程开设情况

目前我校开设的本科及研究生钢结构系列课程包括钢结构基本原理、钢结构设计、水工钢结构、结构稳定理论、高等钢结构、大跨度空间结构,各门课程的学时数、课程性质及对应专业详见图 1。

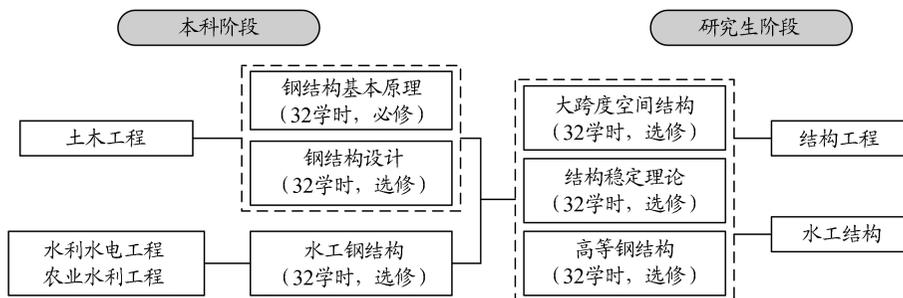


图 1 西北农林科技大学开设的钢结构系列课程

(二) 直接分析法

《钢标》中,结构内力分析方法包括一阶弹性分析法、二阶 P- Δ 弹性分析法与直接分析法。其中,直接分析法是基于非线性分析理论的体系整体分析方法,该法考虑了几何非线性及材料非线性、结构整体及构件缺陷、节点连接刚度等,构件设计仅需截面承载力校验^[10]。在直接分析法中,结构整体及构件缺陷、节点连接刚度是钢结构设计时需要考虑的重点。

结构整体初始几何缺陷《钢标》推荐按最低阶整体屈曲模态确定。对于规则的框架及支撑结构的整体初始几何缺陷,也可采用直接建模法(假想位移法)或在每层柱顶施加假想水平力进行等效。

构件的初始缺陷可按两种方法实现:一种是直接建模法,即直接建立具有半正弦波形状的缺陷构件;另一种是采用假想均布荷载进行等效。节点刚度主要指节点的弯曲刚度,按节点弯曲刚度的强弱分为铰接、半刚接及刚接。若为半刚性节点,则按实际弯矩-曲率非线性曲线取值即可。

二、直接分析法改革思路及举措

(一) 直接分析法贯穿钢结构系列理论课程

直接分析设计法融入的各门理论课程及所属章节如图 2 所示。

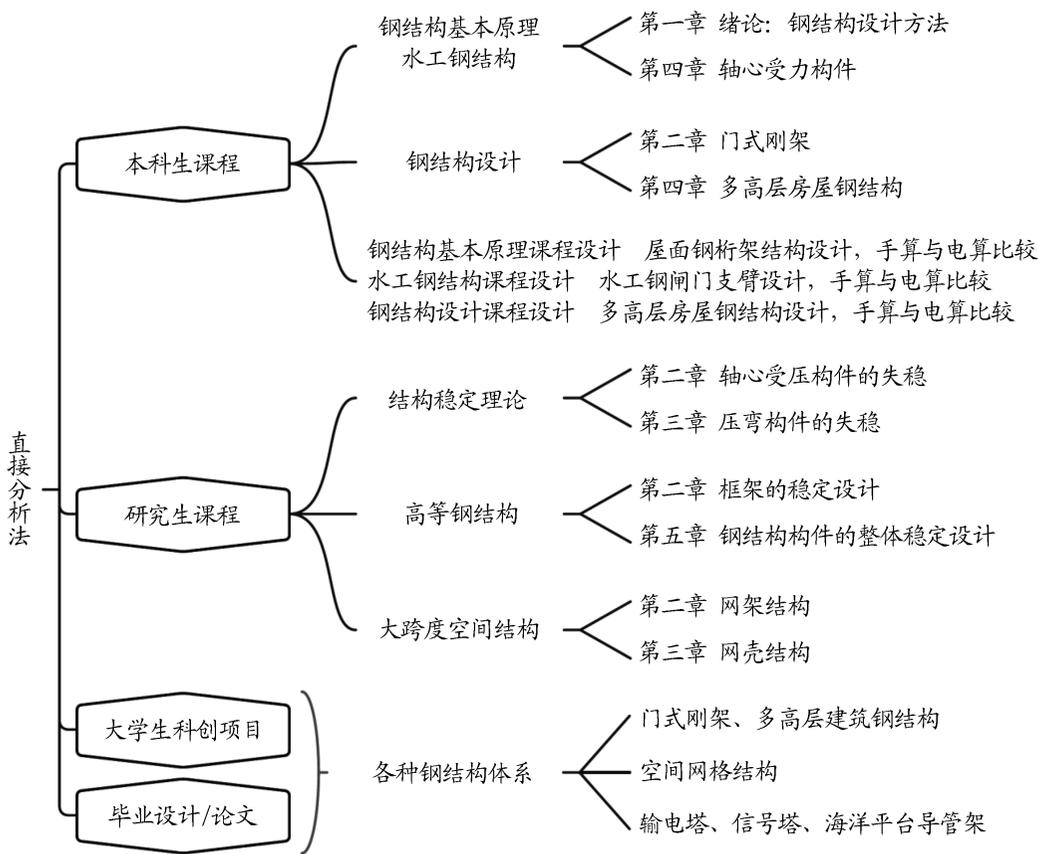


图 2 直接分析法在钢结构系列课程具体章节及实践环节中的融入

在土木工程专业本科生钢结构基本原理课程^[11-12]和水利水电工程及农业水利工程本科生水工钢结构课程钢结构设计方法(第 1 章绪论)和轴心受力构件(第四章)中融入直接分析设计法。由于这两门课程是本科生接触最早的钢结构课程,直接分析设计法的内容不宜讲解太深,否则学生无法理解。在第一章绪论的钢结构设计方法一节中,讲授计算长度系数法(一阶分析)与直接分析设计法的区别。依据《钢标》条文 5 结构分析与稳定性设计,简要阐述直接分析设计法的基本概念与原理,重点阐述该法所需要考虑的因素,即结构整体缺陷、构件缺陷及节点刚度等,如图 3 所示。在第四章的轴心受力构件部分,通过理论推导,阐述杆件初弯曲与杆件偏心对轴压构件临界荷载的影响,通过数值手段直接给出不同截面形式、不同长细比及不同构件缺陷幅值对受压构件失稳形式及稳定承载力的影响,如图 3,加深学生对钢构件失稳的理解与感性认识。通过上述手段,学生既了解了直接分析设计法的基本思路,又掌握了结构整体缺陷、构件缺陷及节点刚度等要点的基本概念,同时较深入地理解了构件缺陷对轴杆构件稳定承载能力的影响,为后续课程直接分析设计法的进

一步学习奠定了一定的基础。

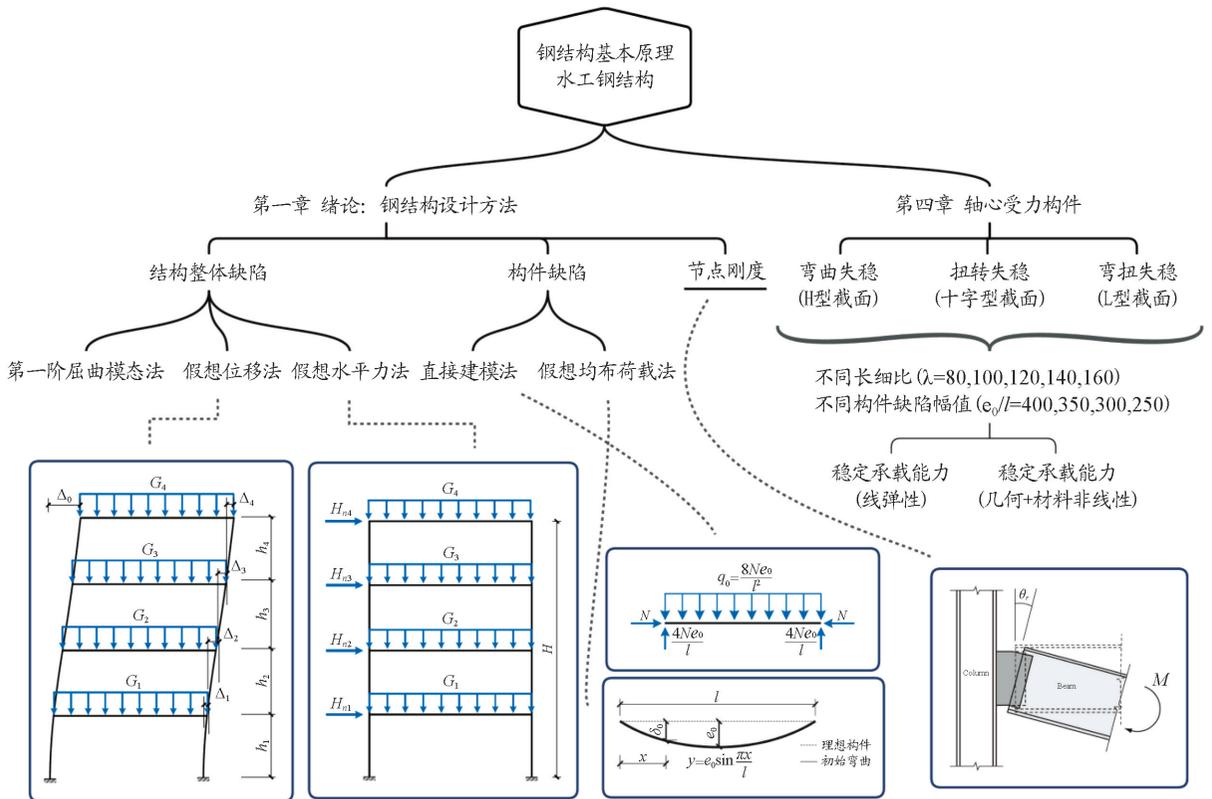


图3 直接分析法在钢结构基本原理、水工钢结构课程中的融入

在土木工程专业本科生课程钢结构设计的门式刚架(第2章)、多高层房屋钢结构(第4章)部分深入讲授钢结构设计的直接分析法。在教材及参考书中选取典型门式刚架及多高层房屋钢结构算例,采用 SAUSAGE-Delta 软件中的直接分析法对相同条件下的算例进行结构设计,对比计算长度系数法与直接分析设计法的计算结果。比如:构件截面尺寸、应力比等,使学生更加深刻地理解直接分析法与传统方法的区别,让学生掌握最新的钢结构设计方法,提升就业竞争力。此外,在课堂上详细介绍目前可以采用直接分析法设计的几款常用钢结构设计软件,如 SAUSAGE-Delta、NIDA、MIDAS、SAP2000 与 ETABS 等,从考虑结构整体缺陷、构件缺陷与节点刚度等角度对比各款软件的特点与优势,让学生尽快熟悉,为本科毕业设计/论文、大学生科创项目的顺利开展奠定基础。

在土木水利研究生课程结构稳定理论的轴心受压构件的失稳(第2章)、压弯构件的失稳(第3章)中融入“直接分析法”知识点。从理论与数值分析角度讲授杆件初弯曲、杆件偏心及残余应力对构件稳定承载能力的影响。讲授杆件初弯曲时,为了拓展学生的思路,可研究不同形状的杆件初弯曲对构件稳定承载能力的影响,将杆件初弯曲分别定义为两端铰接杆件屈曲形式(《钢标》)、两端固定端杆件屈曲形式及挠曲线形式,如图4所示。为了研究杆件偏心及初弯曲耦合作用对构件稳定承载能力的影响,采用二者不同的组合形式(如图5所示)来确定二者的最不利组合形式。对于残余应力,采用欧洲钢结构协会推荐的截面残余应力分布模式确定截面残余应力分布。对于常见的焊接 H 型或工字型截面,分别采用 Lehigh 模型和抛物线模型。对于压弯构件分别定义面内、面外缺陷,通过数值手段分析缺陷对构件稳定承载力的影响。在课堂上,通过理论推导与数值分析手段详细讲授直接分析设计法涉及的主要因素,让学生更加清晰地理解杆件初弯曲、杆件偏心与残余应力

对构件稳定承载能力的影响程度,及其在有限元软件中的实现方法。

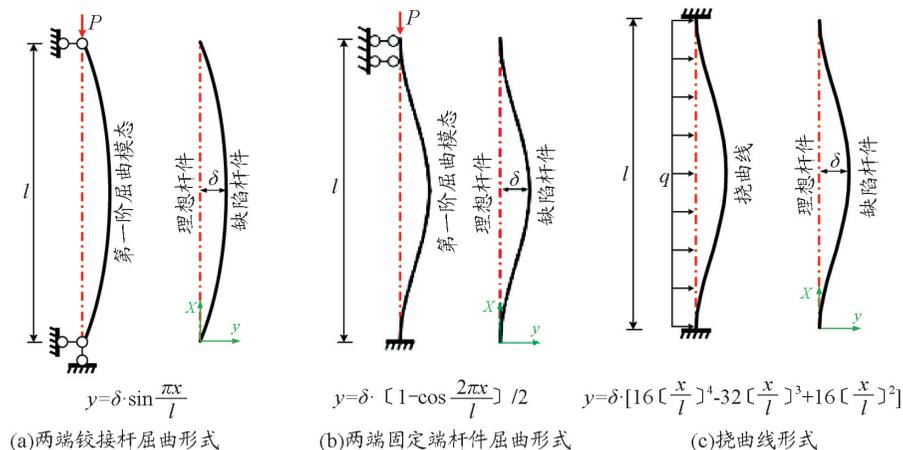


图4 三种杆件缺陷形式

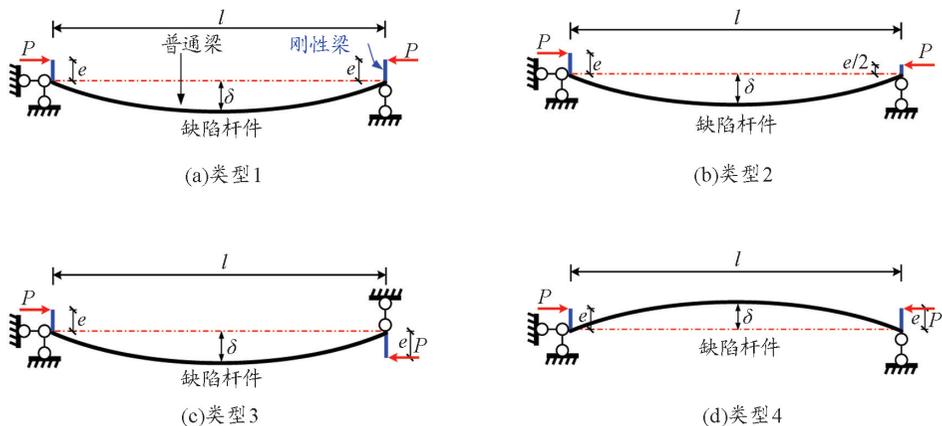


图5 杆件缺陷与杆件偏心的关系

在土木水利研究生课程高等钢结构的压弯构件和框架(第6章)、中美钢结构规范条文对比(第9章)中融入“直接分析法”知识点。讲授钢结构设计方法的区别与联系(如表1),讲解直接分析法在框架结构设计中的设计思路及所需考虑的重点因素,比如:杆件初弯曲、残余应力及节点刚度(如图3)对框架结构内力、变形及稳定承载能力的影响;讲授塑性区法与塑性铰法在数值软件中的实现方法;在中美钢结构规范条文对比部分,重点讲授缺陷考虑方法、幅值的异同及其原因。

在土木水利研究生课程大跨度空间结构的网架结构(第2章)、网壳结构(第3章)部分,讲授直接分析法在空间网格结构中的应用,讲解思路如图6。大跨度空间结构具有受力合理、自重轻、跨越能力强、形式多样与抗震性能优越等特点,广泛应用于会展中心、体育馆、候车厅和航站楼等大型公共建筑中。近年来,国内各地兴建了大量的空间结构,如南京市江宁区牛首山佛顶宫、北京大兴国际机场航站楼、杭州奥体中心游泳馆等。利用广州建研数力建筑科技有限公司研发的 SAUSAGE-Delta 软件,详细讲解大跨度空间结构中直接分析设计法的整个流程,如图7,包括空间结构整体缺陷与构件缺陷的添加方法等。对于节点刚度,目前 SAUSAGE-Delta 软件尚在研发中,故采用作者二次开发的 ANSYS 程序讲授半刚性节点的力学模型及实现方法,如图8,使学生清楚地理解节点刚度对网壳与网架结构稳定承载能力的影响机理与程度。结合最新科研热点,拓展学生的视野与研究领域,激发学生的求知欲。

表1 钢结构设计方法对比^[13]

分析设计方法	整体缺陷 $P-\Delta_0$	分析阶段				设计阶段		
		$P-\Delta$	构件缺陷 $P-\Delta_0$	$P-\delta$	材料非线性	设计弯矩	计算长度系数 μ	稳定系数 φ
一阶弹性分析法	—	—	—	—	—	分析弯矩 I	附录 E	附录 D
二阶 $P-\Delta$ 弹性分析法	内力放大法	—	—	—	—	分析弯矩 II	≤ 1.0	附录 D
	结合刚度有限元法	考虑	考虑	—	—	分析弯矩 II	≤ 1.0	附录 D
直接分析法设计法	二阶 $p-\Delta-\delta$ 弹性分析与设计	考虑	考虑	考虑	考虑	分析弯矩 II+ 假想均布荷载引起的弯矩	1.0	—
	弹塑性分析	考虑	考虑	考虑	考虑	分析弯矩 II+ 假想均布荷载引起的弯矩	1.0	—

注:附录 D、附录 E 均指 GB 50017—2017《钢结构设计标准》中的附录

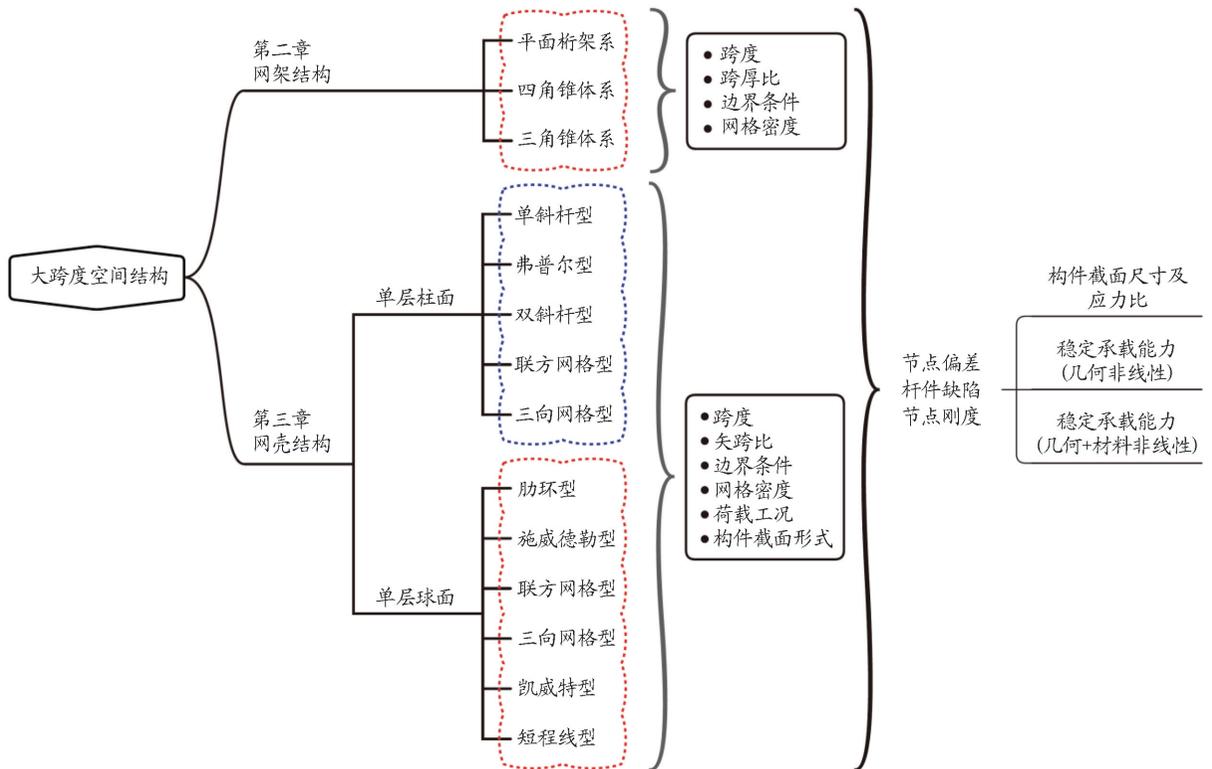


图6 直接分析法在大跨度空间结构中的融入

(二) 本科实践教学环节

将直接分析法融入钢结构基本原理课程设计、水工钢结构课程设计、本科毕业设计/论文及大学生创新创业训练计划项目等实践环节,提高学生实践能力与创新能力,如表2。

在屋面钢桁架结构设计、弧形钢闸门支臂设计、多高层建筑钢结构设计中,要求学生分别采用计算长度系数法与直接分析法对上述结构进行设计^[14],对比两种设计方法不同之处,对比计算结果(截面尺寸、应力比等),以提高学生的动手能力与实践能力。

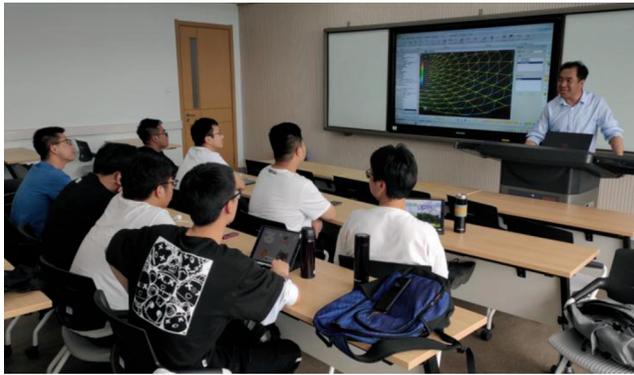
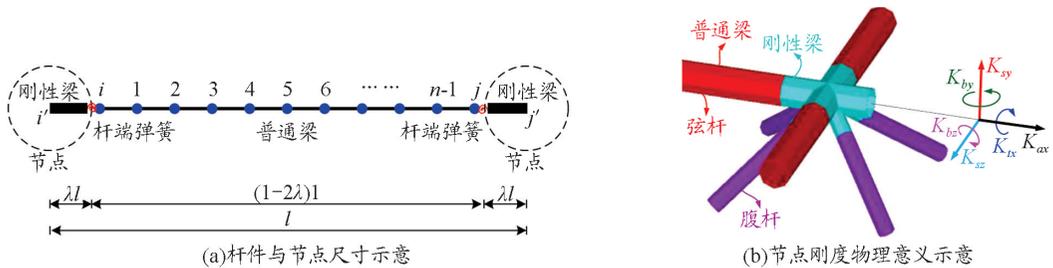


图7 直接分析法在大跨度空间结构中的讲授(SAUSAGE-Delta 软件)

图8 半刚性节点的力学模型^[14]

在本科毕业设计/论文与大学生创新创业训练计划项目中,选择与直接分析法相关的设计及研究型题目,如研究结构整体缺陷、杆件缺陷及节点刚度等因素等对门式刚架、多高层建筑钢结构及大跨度空间网格结构稳定承载能力的影响。表2列出了作者近几年指导/协助指导的部分大学生科创项目及本科生毕业论文题目。通过上述实践锻炼,提高学生的设计与研究能力,激发学生的创新能力。

表2 直接分析法在本科综合实践教学环节中的实践情况

类型	执行期	题目	负责人姓名	验收结果	取得的成果
国家级大学生科创项目	2017—2019	荷载非对称分布对网壳结构稳定性的影响研究	肖姚	优秀	在《建筑结构学报》发表论文1篇,中文核心论文4篇
省级大学生科创项目	2019—2020	节点刚度对单层铝合金网壳稳定承载能力的影响研究	余振超	良好	在《空间结构》发表论文2篇
国家级大学生科创项目	2020—2022	半刚性碗式节点单层球面网壳的稳定性研究	龙婷婷	在研	在《建筑钢结构进展》发表论文1篇,被《工程力学》录用论文1篇(已在线)
国家级大学生科创项目	2020—2021	节点刚度对钢桁架桥杆件内力及稳定承载力的影响研究	陈旭	在研	被《工程力学》录用论文1篇
国家级大学生科创项目	2021—2023	半刚接网壳结构的动力稳定性研究	李海馨	在研	2021年立项,成果凝练中
本科生毕业论文	2021届	整体及构件缺陷对建筑钢结构稳定性的影响研究	邹朕	校优	理清了结构整体、构件缺陷的影响
本科生毕业论文	2021届	初始缺陷对轴压构件稳定承载能力的影响研究	赵迪	院优	理清了杆件初弯曲、残余应力的影响

(三) 科研反哺教学

作者在研究生钢结构系列课程、本科生毕业论文及大学生科创项目中融入了直接分析设计法的理念、研究进展及尚待解决的问题^[15],以期提高学生提出问题、发现问题及解决问题的能力。

针对结构的整体缺陷,除了讲清楚《钢标》中关于整体缺陷施加方法(如图3)之外,补充随机缺陷模态法等知识点以及在有限元软件中的实现方法;针对构件缺陷,除了讲授《钢标》中的直接建模法、假想均布荷载法之外,补充近年来国内外学者提出的新方法,比如杆件缺陷的形状还可采用两端固定端杆件屈曲形式及其挠曲线形式^[16](也称“等效荷载法”,有别于《钢标》的“假想均布荷载法”),详见图4;针对节点刚度,除了讲授《钢标》中的节点抗弯刚度(强轴与弱轴)之外,还补充了节点轴向刚度、剪切刚度(强轴与弱轴)及扭转刚度知识^[17];针对杆件偏心,目前《钢标》及JGJ7—2010《空间网格结构技术规程》^[18]尚未给出如何考虑。结合作者研究成果,系统讲解杆件偏心及杆件偏心与节点偏差(结构整体缺陷)耦合作用对结构稳定承载能力的影响。

为了培养学生的批判与质疑精神,对现行《钢标》各种方法进行讨论。如:《钢标》规定结构整体缺陷分布模式按第一阶屈曲模态进行确定。对于规则结构,第一阶屈曲模态通常为结构整体缺陷的最不利分布形式,但对于不规则的复杂钢结构工程,最不利分布形式不一定是第一阶屈曲模态,也可能是第二阶、第三阶、第n阶或几种屈曲模态的叠加。课后留给学生思考题:如何一次性确定结构整体缺陷的最不利分布形式?对于二阶弹性设计方法,将杆件初弯曲、残余应力统一为构件综合缺陷代表值,是否与实际缺陷构件的失效机理及稳定承载能力一致?对于二阶弹性设计方法,《钢标》给出了构件综合缺陷代表值,那么进行弹塑性分析时,构件综合缺陷该如何取值?对于单个构件而言,残余应力比较容易通过数值方法实现,但对于大型复杂钢结构工程,往往由成千上万根杆件组成,且截面形式多样、残余应力形式及幅值不一,残余应力该如何考虑?目前个别钢结构设计软件可以考虑节点的半刚性(面内外的弯曲刚度),但如何考虑节点刚域的影响?目前尚未有钢结构设计软件能考虑节点轴向刚度、剪切刚度与扭转刚度的影响,是否值得研究?应该如何考虑?

三、教学改革成效

为了解采用上述课程改革的实施效果,针对水利水电工程专业2018级46名大三学生开展了问卷调查,调查问卷设置的问题比较简单,由7个选择题组成,如表3所示。从表3可以看出,近90%的学生基本/完全理解直接分析法的基本概念,少数学生对涉及的几何非线性不是完全理解,只对其有感性和定性的认识。经调研,原因是部分学生未选修有限元理论及软件应用课程,造成理解上的困难;因此,在选课期间,相关课程组负责人及任课教师应给予学生一定的引导,让学生必修重要的选修课,确保知识结构的完备性。学生能很好地掌握结构整体缺陷、构件缺陷与节点半刚性的概念,通过理论推导与数值仿真模拟,掌握杆件初弯曲与杆件偏心对轴压构件临界荷载的影响。通过杆件失稳的数值仿真展示,学生对有限元理论及软件有了更加浓厚的兴趣,激发了学习兴趣和动力。从上述分析可以看出,学生基本掌握了直接分析法的基本概念及其所需考虑的主要因素,可为后续深入地学习直接分析法打下了基础。

表3 本科生课程水工钢结构调查问卷

问题	完全理解/%	基本理解/%	不完全理解/%
(1)是否理解直接分析法的基本概念?	73.9	15.2	10.9
(2)是否理解结构整体缺陷的基本概念?	95.7	4.3	0.0
(3)是否理解构件缺陷的基本概念?	100.0	0.0	0.0
(4)是否理解节点半刚性的基本概念?	93.5	4.3	2.2
(5)是否理解杆件初弯曲对轴压构件临界荷载的影响?	91.3	8.7	0.0
(6)是否理解杆件偏心对轴压构件临界荷载的影响规律?	93.5	6.5	0.0
(7)数值仿真演示是否利于理解杆件失稳,是否对有限元软件感兴趣?	是,100.0	——	否,0.0

针对土木与水利 2020 级 19 名研究生开展了问卷调查,此次问卷同样由 7 个选择题组成,与本科生问卷相比,难度加大,如表 4 所示。从表 4 可以看出,学生基本/完全理解了直接分析法的基本思路,近 95% 学生很好地掌握了直接分析法与一阶弹性分析法的区别;基本掌握了结构整体缺陷、构件缺陷与节点半刚性的在数值软件中的实现方法;学生对直接分析法的科学问题兴趣浓厚,有较高的学习热情,并对直接分析法尚待解决的科学问题有较系统的认识。从上述分析可以看出,学生基本掌握了直接分析法的分析思路及其有限元实现方法,激发了学生研究的热情,可为后续开展科研工作打下一定的基础。

表4 研究生课程结构稳定理论调查问卷

问题	完全理解/%	基本理解/%	不完全理解/%
(1)是否理解直接分析法基本思路?	84.2	15.8	0.0
(2)是否理解直接分析法与一阶弹性分析法的区别?	78.9	15.8	5.3
(3)是否理解了整体缺陷在数值软件中的实现方法?	100.0	0.0	0.0
(4)是否理解了构件缺陷在数值软件中的实现方法?	100.0	0.0	0.0
(5)是否理解了半刚性节点在数值软件中的实现方法?	94.7	5.3	0.0
(6)是否对直接分析法科学问题感兴趣?	是,100.0	——	否,0.0
(7)是否了解直接分析法尚待解决的科学问题?	是,100.0	——	否,0.0

通过本科生毕业设计/论文、大学生科创项目等教学实践环节的训练,提升了本科生的设计与研究能力、有限元软件的应用能力,提高了学生对直接分析设计法中整体缺陷、构件缺陷及节点刚度的认识程度。作者指导及协助指导本科生发表多篇学术论文,其中 2 位学生的论文获校级及院级优秀论文称号。

四、结语

针对目前钢结构系列课程教材及教学内容体系滞后于与现行标准及学科发展前沿的问题,将直接分析法作为切入点,探讨了直接分析法在钢结构系列课程及实践教学环节中的融入过程,阐述了相关知识点从基本构件至整个结构、从理论课程到实践环节的融入过程,并将科研成果融入研究生钢结构系列课程及本科实践环节,提升系列课程群对专业及学科的支撑度,提高学生的设计、研究及创新能力,激发学生的探索与求知欲。

参考文献:

- [1]刘学春,白正仙,朱涛,等. 钢结构原理教学内容和教学方法的探讨与实践[J]. 高等建筑教育,2020,29(4):101-108.
- [2]刘占科,孙伟. 以教学效果为中心的钢结构连接教学研究[J]. 高等建筑教育,2019,28(1):73-82.
- [3]陈军明,谷卫敏,陈应波. 钢结构压弯构件整体稳定问题的教学探讨[J]. 高等建筑教育,2019,28(3):76-79.

- [4] 李会军, 李宗利, 李宝辉. 钢结构稳定理论教学改革初探[J]. 黑龙江教育(高教研究与评估), 2018, 1236(2): 55-57.
- [5] 李会军, 李宗利. 关于“水工钢结构”课程教学改革的思考[J]. 黑龙江教育(高教研究与评估), 2014, 1122(12): 7-9.
- [6] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN-European committee for Standardization, Brussels (Belgium), The European Standard EN 1993-1-1:2005.
- [7] ANS/AISC 360 - 16 Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois 60601-6204
- [8] PANG Paul Tat-choi. Code of Practice for the Structural Use of Steel [Z]. Hongkong: Building Authority. 2011.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [10] 张耀春, 周绪红. 钢结构设计原理[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [11] 安毅, 程欣, 章敏. 钢结构设计课程实验教学的实践与研究[J]. 大学教育, 2019(11): 54-56.
- [12] 史萍, 李忠梅, 梁晓飞. “钢结构”课程改革的探索与实践[J]. 中国建设教育, 2019(5): 51-54.
- [13] 金波. 钢结构设计及计算实例-基于《钢结构设计标准》GB 50017-2017[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [14] 杨律磊, 王慧, 张瑾, 等. 钢结构直接分析法在设计软件中的应用[J]. 2019, 49(1): 36-42.
- [15] 罗洪光. 科教融合的教学探究-以钢结构设计原理课程为例[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(5): 86-90.
- [16] HUI-JUN LI, YOSHIYA TANIGUCHI. Coupling effect of nodal deviation and member imperfection on load-carrying capacity of single-layer reticulated shell[J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(3): 919-930.
- [17] HUI-JUN LI, YOSHIYA TANIGUCHI. Effect of joint stiffness and size on stability of three-way single-layer cylindrical reticular shell[J]. International Journal of Space Structures, 2020, 35(3): 90-107.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 7-2010 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Exploration and practice of direct analysis method in steel structures serial courses and practice teaching links

LI Huijun, WANG Zhengzhong, LI Zongli, LI Baohui

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, P. R. China)

Abstract: Direct analysis design method is recommended as primary design method by several domestic and foreign steel structures design standards. However, textbooks and teaching contents of steel structures serial courses are obsolete, and are lagged behind the current standards and the discipline frontier. Based on above-mentioned issues, exploration and practice are implemented in steel structures serial courses on direct analysis design method. In theory teaching phase, the principle and idea of direct analysis method are taught step by step based on standard for design of steel structures. The basic concepts and implementation methods of the key points in the method are highlighted, such as overall structural imperfections, member imperfections, residual stress, joint stiffness and member eccentricity. In practical teaching phase, such as thesis for undergraduate and training programs of innovation and entrepreneurship for undergraduates, select topics related to direct analysis, make students more firmly grasp the core idea and design idea of the method. Through exploration and practice, the students master the design idea of direct analysis method, and the students application ability, practical ability, scientific research level and innovation ability are obviously improved.

Key words: steel structures serial courses; direct analysis method; teaching exploration; teaching reform; scientific research back feeding teaching

(责任编辑 梁远华)