

钢结构高等分析的 二阶非弹性理论与应用

Second-Order Inelastic Theory and Application for
Advanced Analysis of Steel Structure

刘 坚/著



科学出版社

钢结构高等分析的二阶非弹性 理论与应用

刘 坚 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

高等分析是基于结构极限承载力的设计方法的理论基础,本书系统地论述了钢结构高等分析的二阶非弹性计算理论及其设计应用。全书共13章,内容包括绪论、影响钢结构高等分析的主要因素、钢结构高等分析的关键技术、弯剪与翘扭稳定函数、三维梁柱单元与三维支撑杆元二阶非线性刚度方程、基于弯剪与翘扭稳定插值函数的三维梁柱单元与三维支撑杆元二阶非弹性刚度方程、基于弯剪稳定函数的钢结构二维高等分析、基于弯剪与翘扭稳定函数的钢结构三维高等分析、基于纤维模型的钢结构高等分析、钢结构梁柱节点半刚性连接智能计算模型、半刚性连接钢结构的二阶非弹性分析、钢结构二阶非弹性分析算例分析和高等分析的设计方法应用、基于遗传算法与高等分析的钢结构优化等。

本书可供从事土木工程研究、设计与施工的人员参考,也可作为高等院校土木工程专业及相关专业博士、硕士研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构高等分析的二阶非弹性理论与应用/刘坚著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-032271-5

I. ①钢… II. ①刘… III. ①钢结构-高等分析:非弹性分析-研究 IV. ①TU391

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第180229号

责任编辑:童安齐/责任校对:耿耘
责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2012年6月第一次印刷 印张:31

字数:717 000

定价:95.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303



序

钢结构具有强度高、自重轻、塑性韧性好、抗震性能好、施工速度快、工业化程度高、符合环保与可持续发展要求、技术含量高和综合经济指标好等优点，与其他材料的结构相比，是一种技术比较理想和成熟的结构体系。改革开放后，我国钢产量逐年增长和适合工程应用的型材大量生产，钢结构已在土木等工程领域中得到广泛应用。我国已建成和在建的多高层建筑钢结构和钢与混凝土组（混）合结构已应用于商住、办公等建筑中。

但是，我们也应该看到，与其他材料的结构相比，钢结构的稳定性问题也比较突出，如失稳使钢结构的几何形状急剧改变，将导致结构丧失抵抗能力。因此，丧失稳定性一直是钢结构破坏的主要原因之一。随着科技的发展和工程实践的进步，结构设计方法也在不断地发展。现行设计方法存在着结构整体弹性内力分析方法与构件极限状态承载力验算方法不一致的问题。现在越来越多的国家在制订规范时开始重视钢结构高等分析与设计研究，如澳大利亚极限状态设计标准、美国钢结构协会的荷载与抗力系数规范等已开始在实际工程中实施和应用。随着计算机软硬件技术发展和进步，结构非线性计算应用到工程设计中成为可能。

该书反映了作者近 10 年来在钢结构高等分析的二阶非弹性理论及其应用的研究成果，较全面地分析和论述了影响钢结构高等分析的主要因素和关键技术，系统地阐述了钢结构二阶非弹性分析、高等分析和基于结构承载力设计方法。作者率先提出了考虑轴力影响的梁柱单元翘扭稳定函数概念和计算公式，并采用翘扭稳定函数推导了开、闭口截面三维梁柱单元的翘曲扭转几何非线性刚度矩阵；采用剪切变形的弯剪稳定插值函数和考虑轴力影响的翘扭稳定插值函数，以及连续介质力学的理论方法，推导了三维空间梁柱单元二阶弹性刚度矩阵；应用修正的拉格朗日列式法和虚功方程，以及使用翘扭稳定插值函数，首次推导了有限元形式的三维梁柱单元的翘扭线弹性刚度矩阵与翘扭几何非线性刚度矩阵。为考虑结构极限承载力，作者在以上基础上，又分别研究和分析了采用有限元理论和梁柱理论的二阶非弹性和高等分析的几种方法，特别是对弯剪稳定函数和翘扭稳定函数的二阶非弹性梁柱单元及弯剪稳定插值函数和翘扭稳定插值函数的二阶非弹性梁柱单元进行了研究，并对高等分析方法的实现和应用进行了有益的探讨与研究。

梁柱节点半刚性连接的现有几个主要计算模型各有优缺点和应用范围，如人工神经网络是模仿人脑结构和功能的一种信息处理系统，对残缺不全或模糊随机的不确定信息具有较强的容错能力。作者考虑了人工神经网络

的这些优点，在分析有关试验数据的基础上，建立了梁柱节点半刚性连接的人工智能分析模型；同时，利用遗传算法搜索具有隐含的并行性、减少陷入局部最优解的可能性、具有很强的容错能力、容易形成通用算法程序等优点，将遗传算法和钢结构高等分析理论方法相结合，建立了基于遗传算法和结构极限承载力的钢结构优化分析方法，更好地解决钢结构优化设计问题。

希望作者继续努力，为钢结构技术进步和发展做出自己的贡献。同时，希望该书的出版，能使土木工程等相关专业的研究生和高年级本科生以及相关专业的研究和设计人员从中得到有益启发和收获。

中国工程院院士

2012年5月于广州

前 言

钢结构具有技术含量高、抗震性能好、高强轻质、材质均匀、塑性韧性好、工业化程度高、施工速度快和综合经济指标好等优点，且符合环保和可持续发展要求，是一种技术比较成熟的体系。因此，钢结构与其他材料（混凝土、砌体）的结构相比是一种比较理想的结构形式。另一方面，我国 30 多年来的改革开放和经济发展，为钢结构体系的应用创造了极有利的发展环境。1996 年我国成为世界上钢产量最多的国家，钢产量已超过 1 亿 t。近几年随着钢产量逐年上新台阶，2010 年已突破 6 亿 t，同时随着国家技术政策的扶持，我国已建成和在建的多高层建筑钢结构和钢-混凝土混合结构在逐年增加，主要应用在住宅、办公和旅馆等建筑结构中，此外在桥梁建筑、电力塔桅结构、海洋平台、港口建筑、水工结构和矿山建筑等工程中也得到了广泛应用。然而，与钢结构的发展不相适应的是目前钢结构分析和设计方法还不完善，有时反而限制了钢结构的发展。

钢结构高等分析方法是指对（二维或三维）钢结构计算模型直接进行整体结构二阶非弹性分析的一种全过程非线性数值计算方法。钢结构高等分析方法应能比较准确地反映影响结构极限承载能力的初始缺陷因素，包括构件的几何初始缺陷（如初弯曲）和截面上的残余应力。这种方法涉及的知识比较广泛，如连续介质力学、变分原理、非线性有限元分析技术和非线性方程组求解收敛策略技术等。对钢结构进行高等分析，需要考虑高等分析中用到的二阶非弹性分析方法是否合理、计算效率如何提高、影响结构极限承载力的主要因素有哪些。更为合理、精确的钢结构高等分析方法应该能考虑在结构达到结构极限状态时结构计算模型的一些主要特征如构件的初始缺陷、构件极限承载力和正常使用两个极限状态，以及结构的极限承载力和正常使用两个极限状态等。钢结构高等分析方法能充分考虑影响结构几何非线性（稳定性）和材料非线性（非弹性）等影响结构极限承载力的主要因素。钢结构高等分析能够比较真实地反映钢结构从开始加载一直到钢结构达到结构极限承载力的全过程分析中的结构和构件内力与变形状态，能较准确地评估结构极限承载力；钢结构高等分析和设计方法的最大优点是可以抛弃传统两阶段设计方法中需对组成结构的每个构件进行繁琐的包括构件稳定性和截面强度验算在内的构件承载力计算。通过选用恰当和合理的二阶非弹性分析方法和非线性方程组求解技术策略，从而使钢结构设计通过一次高等分析，就可以完成钢结构设计所需的各种信息。

目前，越来越多的国家开始重视钢结构高等分析与设计研究，并开始在实际工程中实施和应用。澳大利亚极限状态设计标准 AS4100 (SAA, 1990) 中已经包含了高等分析或二阶非弹性整体分析的条款，被认为是目

前国际上最为先进的钢结构设计规范,而且该规范是目前国际上唯一允许对整个结构系统进行二阶非线性分析且不需要对组成结构的各个构件再进行构件承载力验算的规范。加拿大规范 CSA-S16.1 (CSA, 1989) 和美国规范 AISC-LRFD (AISC, 1993) 推荐使用二阶非线性分析,不过仍然要对组成结构的各个构件进行构件承载力验算。另外,欧洲 EC3 规范也要求采用弹塑性整体分析后仍然需要对组成结构的各个构件进行构件承载力验算。英国钢结构设计规范 BS5950 (1990, 2000) 已经允许结构工程师在钢结构设计中采用二阶非线性分析方法进行结构设计。我国《钢结构设计规范》(GB 50017-2003) 目前还没有关于高等分析的相应条款。

本书以作者近 10 年来在钢结构高等分析的二阶非线性理论和应用的研究成果为主线,系统地阐述了钢结构二阶非线性分析、高等分析和基于结构承载力设计方法。全书共 13 章。第 1 章首先回顾了主要钢结构体系在实际工程中的应用,评述了钢结构设计方法的发展过程,分析了现行钢结构设计方法存在的问题及解决办法;述评了国内外钢结构二阶非线性非线性分析理论的发展现状和研究进展,提出了开展钢结构高等分析的进一步研究方向,阐述了基于结构极限承载力的高等分析计算方法、基于高等分析和结构可靠度的钢结构设计方法。第 2 章对影响钢结构高等分析的主要非线性因素进行了分析,探讨了考虑这些因素的方法,评述了各种因素(几何、材料非线性、残余应力、几何初始缺陷、构件截面剪切变形、节点域剪切变形、节点半刚性连接、局部屈曲、侧扭屈曲变形和翘曲变形等)对钢结构的受力变形和结构极限承载力的影响。第 3 章介绍了钢结构高等分析方法对初弯曲和残余应力的考虑、二阶弹性分析的描述方法、二阶弹性分析方法、材料非线性问题、屈服面选用、二阶非线性分析方法和非线性方程组的求解技术等钢结构高等分析的关键技术问题,提出在钢结构高等分析中使用超级单元法并行计算等提高非线性求解效率新技术。第 4 章首先分析了考虑轴力和剪切变形影响的开、闭口截面弯剪稳定函数,归纳了弯剪稳定插值函数的一般表达式;首次提出了考虑轴力影响的开、闭口截面梁柱单元翘扭稳定函数概念和计算公式,推导了基于翘扭稳定函数的开、闭口截面三维梁柱单元翘曲扭转二阶弹性非线性刚度矩阵,并给出了相应的变换关系。第 5 章利用考虑剪切变形的弯剪位移场和考虑轴力的翘扭位移场,分别推导了考虑剪切变形的弯剪稳定插值函数和考虑轴力影响的翘扭稳定插值函数,之后,根据连续介质力学的理论方法,利用修正的拉格朗日列式法,基于增量虚功方程的严格形式,推导了基于梁柱理论的空间梁柱单元二阶弹性分析的刚度矩阵;利用修正的拉格朗日列式法,基于虚功方程的严格形式,首次推导了基于翘扭稳定插值函数的有限元形式的三维梁柱单元的翘扭线弹性刚度矩阵与翘扭几何非线性刚度矩阵;同时推导了基于翘扭稳定函数和梁柱理论的三维梁柱单元翘扭二阶弹性刚度矩阵,提出了三

维梁柱单元侧扭几何非线性刚度矩阵,把有限元法与梁柱法相结合,建立了一种新的考虑剪切变形、侧扭屈曲变形影响的二阶弹性非线性分析方法。第6章在第5章介绍的采用有限变形理论推导的考虑剪切变形和轴力影响的剪弯及翘扭稳定插值函数的二阶弹性梁柱单元基础上,主要探讨基于集中塑性铰的三维空间二阶非弹性梁柱单元及三维二阶非弹性非线性支撑杆元,可采用这两种单元分别对纯钢框架结构、钢框架-支撑结构进行比较精确的高等分析。第7章介绍基于弯剪稳定函数的钢结构二维高等分析方法,主要包括二维二阶非弹性非线性梁柱单元、二维二阶非弹性非线性支撑杆元,可采用这两种单元分别对规则的纯钢框架结构、钢框架-支撑结构或者是可以化为二维计算模型的钢结构进行比较精确的高等分析。第8章在现有二维二阶精化塑性铰模型的基础上,对基于考虑剪切变形的稳定函数的二阶精化塑性铰法及其应用进行了分析,其中着重分析了残余应力和弯曲引起的渐进屈服的影响,增加了弯扭耦合项,以有效地考虑空间构件弯扭作用的影响;对基于刚性楼板假设的钢结构的三维二阶非弹性分析方法、基于超级单元法的钢结构的三维二阶非弹性分析方法进行了探讨,主要是为了提高钢结构二阶非弹性非线性分析的计算效率;另外,还对二阶非弹性三维支撑杆元进行了分析,主要是为了结合二阶非弹性三维梁柱单元对钢框架-支撑结构进行高等分析。第9章对基于杆元纤维模型的二阶非弹性分析、基于梁柱纤维模型的三维二阶非弹性分析、基于梁柱纤维模型和柔度法的钢结构三维二阶非弹性分析等三种基于纤维模型二阶非弹性分析方法进行了探讨和发展。第10章对人工智能分析模型选用、BP算法人工神经网络模型进行了述评,还对梁柱节点连接的分类、受力性能和现有节点连接数据库进行了分析,比较了现有半刚性连接计算模型,分析了国外半刚性连接试验数据库中带双腹板顶底角钢半刚性连接、端板半刚性连接的影响因素,提出和建立了梁柱节点半刚性连接的人工智能分析模型;利用现有国外半刚性连接试验数据库,建立了腹板角钢半刚性连接、顶底角钢半刚性连接、双腹板顶底角钢半刚性连接和端板半刚性连接的人工智能分析模型,可用于半刚性连接钢结构的高等分析中;开发和研制了BP人工神经网络智能分析模型的预测软件。第11章对半刚性钢结构计算模型选用进行了详细的分析,述评了半刚性连接节点的滞回模型,探讨了半刚性连接钢结构计算方法选用,在前述关于刚性连接钢结构的三维二阶非弹性分析方法基础上推导了梁端带有半刚性连接的三维梁柱单元二阶非弹性刚度矩阵,探讨了半刚性连接钢结构的三维二阶非弹性分析方法,提出了半刚性连接钢结构的基本自振周期简化计算方法,可供初步设计时参考,之后分析了半刚性连接钢结构二阶非弹性时程分析方法。第12章通过一些算例分析,对刚性和半刚性连接钢结构的二维、三维高等分析进行了研究,说明实际钢结构工程中应用高等分析是可行的;然后通过钢结构工程算例分析比较了钢结构

高等分析与现行钢结构两阶段设计方法的不同, 阐述高等分析特点和工程应用优势, 最后对两个典型钢结构工程实例进行了分析, 为这种方法的工程应用提供了参考。第 13 章建立了钢结构遗传算法优化的数学模型, 将遗传算法和钢结构高等分析理论方法相结合, 提出了基于遗传算法和结构极限承载力的钢结构优化分析方法, 研制了基于遗传算法的钢结构优化分析程序, 在钢结构设计中实现了遗传算法优化, 并用算例对程序和方法进行了验证。

本书得到了广州大学周福霖院士, 西安建筑科技大学郝际平教授, 重庆大学李开禧教授、白绍良教授, 广州大学禹奇才教授、周云教授、张俊平教授、崔杰教授的鼓励、支持和帮助, 以及浙江东南网架有限公司周观根教授级高工、章启新高工, 广州市设计院韩建强教授级高工, 广东省建筑设计研究院周敏辉教授级高工的帮助和支持, 作者在此表示由衷的感谢! 感谢美籍华人科学家陈惠发 (W. F. Chen) 院士提供了有关半刚性连接数据库资料。感谢西安建筑科技大学博士后流动站及浙江东南网架有限公司博士后流动站在作者博士后研究期间所提供的良好的科研条件, 本书部分研究内容就是在那一期间完成的。

本书研究工作得到建设部科技攻关项目、住房和城乡建设部科技计划项目 (项目批准号: 10-K3-33、08-K2-36、06-K3-02、04-165), 国家自然科学基金项目 (项目批准号: 50378078) 和广州市教育局科技计划项目 (项目批准号: 08C056) 的资助, 在此表示诚挚的谢意。书中部分内容和图表参考了相关文献, 在此对原作者表示衷心的感谢。

作者指导的研究生易凌、陈德磊、汪齐备、皮海平、吴昭慧、何林和张鸿雁等参加了书中部分算例的分析计算工作, 陈娟、彭登峰、邢增林、李慧和高玥等协助完成了部分图文的编辑处理工作, 特在此一并表示感谢。

本书的出版得到了广州大学学术著作出版基金和结构工程市级重点学科建设经费的资助, 在此表示衷心感谢。

由于钢结构二阶非弹性分析、高等分析和基于结构承载力设计方法内容十分丰富, 且处在不断发展中, 书中不足之处在所难免, 衷心希望有关专家和同行批评指正。

刘 坚

2011 年 6 月于广州大学城

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钢结构的工程应用及发展	1
1.1.1 多高层钢结构的发展及结构体系简介	3
1.1.2 轻型钢结构在我国的发展及结构体系简介	6
1.1.3 大跨度与空间钢结构在我国的发展及结构体系简介	9
1.2 钢结构设计方法发展概况及存在问题	10
1.2.1 钢结构设计方法的发展概况	10
1.2.2 钢结构设计中的稳定问题	17
1.2.3 现有基于构件极限承载力的两阶段设计方法及存在的问题	21
1.2.4 基于结构极限承载力的高等分析设计方法	23
1.3 基于结构极限承载力的高等分析设计方法研究进展	23
1.3.1 钢结构二阶非线性分析与高等分析方法的研究进展	23
1.3.2 以二阶非线性为基础的钢结构高等分析方法	28
1.3.3 高等分析方法需进一步完善的问题	32
1.3.4 钢结构高等分析的主要研究方向	33
1.3.5 基于高等分析和结构可靠度的钢结构设计方法	33
1.3.6 基于结构极限承载力的高等分析设计方法应用设想	34
1.4 小结	35
第 2 章 影响钢结构高等分析的主要因素	37
2.1 引言	37
2.2 影响钢结构高等分析的初始缺陷因素	37
2.2.1 几何初始缺陷	37
2.2.2 力学初始缺陷	39
2.3 几何非线性因素	43
2.4 材料非线性因素	45
2.5 半刚性连接非线性因素	49
2.6 侧扭屈曲非线性因素	51
2.7 翘曲变形非线性因素	52
2.8 局部屈曲非线性因素	53
2.9 弯曲缩短非线性因素	54
2.10 剪切变形非线性因素	54
2.10.1 构件截面剪切变形	55
2.10.2 梁柱节点域剪切变形	60
2.11 小结	61
第 3 章 钢结构高等分析的关键技术	63
3.1 引言	63

3.2	高等分析方法对初弯曲和残余应力的考虑	64
3.2.1	几何初始缺陷考虑方法	64
3.2.2	残余应力考虑方法	64
3.3	几何非线性描述	64
3.4	二阶非线性分析中构形变化时的转换矩阵	67
3.5	二阶非线性分析方法	72
3.5.1	有限元方法	74
3.5.2	梁柱理论法	78
3.6	材料非线性分析方法	81
3.6.1	材料非线性分析方法	81
3.6.2	塑性铰对部分结构的要求	83
3.7	屈服面选用	85
3.7.1	Orbison 屈服面	85
3.7.2	相关方程屈服面	86
3.7.3	Chan 单方程屈服面	88
3.7.4	Duan - Chan 屈服面	88
3.7.5	Ren - Zeng 数值拟合的屈服面	89
3.7.6	本书建议的屈服面	89
3.8	二阶非弹性非线性分析方法	91
3.8.1	插值函数法	91
3.8.2	稳定函数法	92
3.9	梁柱半刚性连接分析方法	94
3.10	非线性方程组求解技术	96
3.10.1	荷载增量控制法	99
3.10.2	位移增量控制法	101
3.10.3	弧长控制法	103
3.10.4	收敛准则	105
3.11	提高非线性求解效率新技术	106
3.11.1	超级单元技术	106
3.11.2	并行计算新技术	107
3.12	小结	109
第4章	弯剪与翘扭稳定函数	110
4.1	引言	110
4.2	考虑剪切变形的二维弯剪稳定函数	111
4.3	考虑初弯曲和剪切变形的二维弯剪稳定函数	114
4.3.1	压弯梁柱单元	114
4.3.2	拉弯梁柱单元	116
4.4	考虑剪切变形的三维弯剪稳定函数	118
4.5	基于梁柱理论的弯剪稳定函数统一形式	121
4.6	基于梁柱理论的弓形效应系数	123
4.7	三维梁柱单元的翘曲与扭转方程	124
4.7.1	自由扭转方程	125

4.7.2 约束扭转方程	126
4.8 开口截面梁柱单元的翘扭稳定函数	127
4.8.1 开口截面梁柱单元约束扭转的微分方程	127
4.8.2 开口截面梁柱单元的翘扭稳定函数	128
4.8.3 翘扭刚度矩阵变换	131
4.9 闭口截面梁柱单元的翘扭稳定函数	132
4.9.1 闭口截面梁柱单元约束扭转的微分方程	132
4.9.2 闭口截面梁柱单元的翘扭稳定函数	133
4.10 小结	134
第5章 三维梁柱单元与三维支撑杆元二阶弹性非线性刚度方程	135
5.1 引言	135
5.2 基于弯剪与翘扭稳定插值函数的三维单元二阶弹性刚度方程	136
5.2.1 基本假定	138
5.2.2 三维二阶非线性弹性梁柱单元位移场	139
5.2.3 三维梁柱单元的弯剪与翘扭稳定插值函数	142
5.2.4 三维梁柱单元增量形式的虚功方程	150
5.2.5 基于弯剪与翘扭稳定插值函数的二阶弹性刚度矩阵	155
5.2.6 基于稳定插值函数的梁柱单元侧扭几何非线性刚度矩阵	158
5.2.7 基于弯剪稳定插值函数的三维梁柱单元几何刚度矩阵	160
5.2.8 基于翘扭稳定插值函数的梁柱单元二阶弹性翘扭刚度矩阵	160
5.3 基于弯剪与翘扭稳定函数的三维梁柱单元二阶弹性方程	161
5.3.1 基本假定	162
5.3.2 基于弯剪稳定函数的三维梁柱单元二阶弹性方程	162
5.3.3 基于弯剪、翘扭稳定函数的三维梁柱单元二阶弹性方程	165
5.3.4 整体坐标下三维梁柱单元二阶弹性刚度方程	169
5.3.5 梁柱理论与有限元法相结合的三维梁柱单元二阶弹性刚度方程	172
5.3.6 考虑初弯曲的三维梁柱单元二阶弹性刚度方程	174
5.4 三维支撑杆元的二阶弹性刚度方程	178
5.5 小结	180
第6章 基于弯剪与翘扭稳定插值函数的三维梁柱单元与三维支撑杆元二阶非弹性刚度方程	182
6.1 引言	182
6.2 基于弯剪和翘扭稳定插值函数的三维二阶非弹性分析	182
6.2.1 基本假定	182
6.2.2 三维梁柱单元二阶非弹性刚度方程	183
6.2.3 截面内力状态偏离屈服面的修正方法	185
6.2.4 三维二阶非弹性梁柱单元的坐标变换	186
6.3 三维支撑杆元的二阶非弹性刚度方程	188
6.4 小结	189
第7章 基于弯剪稳定函数的钢结构二维高等分析	190
7.1 引言	190
7.2 基于弯剪稳定函数的二阶弹性刚度方程	190

7.3	基于弯剪稳定函数的钢结构二维高等分析	193
7.3.1	基本假定	194
7.3.2	二维梁柱单元的基本刚度方程	194
7.3.3	二维梁柱单元的二阶非线性增量刚度方程	196
7.4	二阶非线性二维支撑杆元	197
7.4.1	支撑单元的假定	198
7.4.2	二维支撑杆元的二阶弹性刚度方程	198
7.4.3	二维支撑杆元铰接时的非线性刚度方程	199
7.4.4	二维支撑杆元的二阶非线性刚度方程	199
7.5	小结	200
第8章	基于弯剪与翘扭稳定函数的钢结构三维高等分析	201
8.1	引言	201
8.2	基于弯剪稳定函数的三维梁柱单元的二阶非线性刚度方程	201
8.2.1	基本假定	201
8.2.2	三维梁柱单元的二阶弹性基本刚度方程	202
8.2.3	三维梁柱单元的二阶非线性刚度方程	204
8.2.4	整体坐标系下三维梁柱单元的二阶非线性刚度方程	207
8.3	考虑侧扭变形的三维梁柱单元二阶非线性刚度方程	208
8.4	考虑节点域剪切变形的三维梁柱单元二阶非线性刚度方程	209
8.4.1	基本假设	209
8.4.2	梁、柱单元与节点域之间的变形关系	209
8.4.3	考虑节点域剪切变形的三维梁单元二阶非线性刚度方程	210
8.4.4	考虑节点域剪切变形的三维柱单元二阶非线性刚度方程	211
8.4.5	节点域的弹性及弹塑性刚度矩阵	212
8.4.6	考虑节点域剪切变形的钢结构三维二阶非线性刚度矩阵	213
8.5	基于弯剪与翘扭稳定函数的钢结构三维二阶非线性分析	214
8.5.1	基本假设	214
8.5.2	三维梁柱单元的二阶非线性基本刚度方程	214
8.5.3	三维梁柱单元的二阶非线性弯剪与翘扭刚度方程	215
8.6	采用刚性楼板假设的三维梁柱单元的二阶非线性刚度方程	219
8.7	基于超级单元法的三维梁柱单元的二阶非线性刚度方程	220
8.7.1	基于超级单元法的三维梁柱单元二阶非线性刚度方程	220
8.7.2	基于超级单元的三维二阶非线性刚度矩阵	222
8.8	三维支撑杆元的二阶非线性刚度方程	223
8.9	小结	224
第9章	基于纤维模型的钢结构高等分析	226
9.1	引言	226
9.2	基于杆元纤维模型的二阶非线性分析	227
9.2.1	二维杆元二阶非线性刚度方程	227
9.2.2	三维杆元二阶非线性刚度方程	232
9.3	基于纤维模型和刚度法的三维梁柱单元二阶非线性刚度方程	236
9.3.1	梁柱纤维模型的材料非线性	236

9.3.2	三维梁柱单元的二阶非弹性刚度方程	238
9.4	基于纤维模型和柔度法的三维梁柱单元二阶非弹性刚度方程	243
9.4.1	三维梁柱单元的非弹性刚度方程	243
9.4.2	三维梁柱单元的二阶非弹性刚度方程	249
9.5	小结	253
第 10 章	钢结构梁柱节点半刚性连接智能计算模型	255
10.1	引言	255
10.2	梁柱节点半刚性连接的受力性能	256
10.3	梁柱节点半刚性连接性能的确定和研究方法	258
10.4	梁柱节点连接的分类方法	262
10.5	梁柱节点半刚性连接现有计算模型简介	264
10.5.1	半刚性连接现有模型(强轴)	265
10.5.2	弱轴半刚性连接现有模型研究进展	268
10.6	人工智能分析模型选用	270
10.6.1	人工智能分析模型简介	270
10.6.2	神经网络数学模型	273
10.6.3	神经网络的拓扑结构	274
10.6.4	神经网络的运行过程	274
10.6.5	BP 神经网络简介	275
10.7	BP 人工神经网络	275
10.7.1	BP 人工神经网络的结构	275
10.7.2	BP 人工神经网络的学习算法	276
10.7.3	BP 网络存在的问题	279
10.7.4	BP 算法的改进措施	280
10.7.5	BP 人工神经网络实现	281
10.8	梁柱节点连接数据库介绍	284
10.8.1	梁柱节点连接数据库简介	284
10.8.2	半刚性连接数据库介绍	285
10.9	半刚性连接智能分析模型建立	289
10.9.1	带双腹板角钢的顶底角钢半刚性连接性能影响因素分析	289
10.9.2	端板半刚性连接性能影响因素分析	295
10.9.3	半刚性连接智能分析模型建立及定义神经网络训练样本参数	297
10.10	半刚性连接智能模型的仿真预测分析	303
10.10.1	BP 人工神经网络预测的半刚性连接弯矩-转角 ($M-\theta_r$) 曲线分析	304
10.10.2	BP 人工神经网络模型预测的弯矩-转角 ($M-\theta_r$) 曲线与其他模型对比	306
10.10.3	BP 人工神经网络模型预测半刚性连接初始刚度	308
10.10.4	BP 人工神经网络模型预测的半刚性连接节点极限弯矩承载力	308
10.11	开发的半刚性连接智能模型仿真预测工具	308
10.12	小结	310
第 11 章	半刚性连接钢结构的二阶非弹性分析	311
11.1	引言	311

11.2	半刚性钢结构计算模型选用	311
11.2.1	梁柱节点半刚性连接分类	311
11.2.2	半刚性连接构造类型	314
11.2.3	节点半刚性连接计算模型选用	315
11.3	半刚性连接钢结构计算方法选用	322
11.4	半刚性连接钢结构二维二阶非线性分析	326
11.5	半刚性连接钢结构三维二阶非线性分析	328
11.6	半刚性连接钢结构二阶非线性时程分析	332
11.6.1	半刚性连接钢结构的基本自振周期	335
11.6.2	半刚性连接钢结构二阶弹性时程分析	336
11.6.3	半刚性连接钢结构二阶非线性时程分析	339
11.7	小结	343
第 12 章	钢结构二阶非线性分析算例分析和高等分析的设计方法应用	344
12.1	引言	344
12.2	基于结构极限承载力的高等分析设计方法与特点	344
12.2.1	基于结构极限承载力的高等分析设计方法	344
12.2.2	基于结构极限承载力的高等分析设计方法特点	346
12.3	基于结构极限承载力的钢结构设计步骤	347
12.4	高等分析中二阶非线性方法选用	349
12.5	高等分析中二阶非线性程序或软件的实现方案	350
12.5.1	基于 OpenSees 开发源代码平台的高等分析程序开发介绍	350
12.5.2	基于 FEAP 系列源代码的高等分析程序开发介绍	358
12.5.3	钢结构高等分析的商用专业软件介绍	364
12.5.4	二阶非线性分析的通用软件及二次开发介绍	368
12.5.5	钢结构二阶非线性分析的并行计算介绍	379
12.5.6	开发的钢结构二阶非线性和高等分析部分程序介绍	382
12.6	钢结构二阶非线性分析与高等分析算例	386
12.6.1	Vogel 门式刚架校准算例	386
12.6.2	六层 Vogel 钢框架结构校准算例	387
12.6.3	某二层四跨半刚性连接钢框架算例	388
12.6.4	某双向压弯悬臂柱算例	390
12.6.5	某单层单跨空间钢框架算例	391
12.6.6	某三层单跨空间钢框架模型试验算例	391
12.6.7	Orbison 六层空间钢框架校准算例	393
12.6.8	柔度法与刚度法的比较算例	394
12.6.9	某十层两跨钢框架结构算例	396
12.6.10	某六层单跨钢框架偏心支撑结构算例	397
12.6.11	某单跨四层钢结构	398
12.6.12	某钢框架偏心支撑结构算例	399
12.6.13	某四层双跨半刚性连接钢框架结构算例	400
12.6.14	某双层单跨半刚性连接支撑钢框架算例	401

12.6.15	不同半刚性连接参数对钢结构性能影响算例	401
12.6.16	某三层单跨三维钢框架结构	403
12.6.17	某两层单跨三维钢框架结构算例	403
12.6.18	某两层两跨三维框架算例	404
12.6.19	20 层三维钢框架结构校准算例	405
12.6.20	某两层单跨三维框架结构算例	406
12.6.21	六角星穹顶结构校准算例	407
12.6.22	某单层球面网壳的二阶非弹性分析算例	408
12.6.23	某半刚性连接钢结构时程分析算例	409
12.7	基于结构极限承载力的钢结构设计与现两阶段设计法的比较	413
12.7.1	现行基于构件极限承载力的两阶段设计方法	414
12.7.2	基于结构极限承载力的高等分析设计方法	418
12.8	基于结构极限承载力计算的工程算例分析	425
12.8.1	某非规则单层折板式大跨度空间钢网壳结构工程算例	425
12.8.2	某斗拱型网壳结构算例	434
12.9	小结	440
第 13 章	基于遗传算法与高等分析的钢结构优化	441
13.1	引言	441
13.2	结构优化方法	442
13.2.1	简述	442
13.2.2	结构优化的一般数学模型	442
13.2.3	现有结构优化方法存在的问题及解决办法	443
13.3	遗传算法优化	444
13.3.1	遗传算法简述	444
13.3.2	遗传算法优化的优点	447
13.3.3	遗传算法优化的实现	448
13.3.4	遗传算法优化应用的关键	449
13.3.5	全局最优收敛	451
13.4	基于遗传算法与高等分析的钢结构优化的数学模型与方法	451
13.4.1	基于遗传算法与高等分析的数学模型	451
13.4.2	基于遗传算法与高等分析的钢结构优化分析步骤	453
13.4.3	基于遗传算法与高等分析的钢结构优化程序简介	454
13.5	遗传算法优化算例	455
13.5.1	三杆桁架校准算例	455
13.5.2	某二层空间钢框架结构优化算例	457
13.6	小结	458
附录 1	基于剪弯稳定插值函数的三维梁柱单元二阶弹性刚度矩阵系数	460
附录 2	基于翘扭稳定函数的三维梁柱单元翘扭刚度矩阵系数	462
附录 3	半刚性连接智能模型的部分训练样本	466
参考文献		469

第 1 章 绪 论

1.1 钢结构的工程应用及发展

钢结构因为所用钢材的材质均匀与工程力学的基本假定符合较好，钢结构实际受力和变形情况与工程力学的计算结果符合也较好，具有强度高、塑性韧性好、抗震性能好、环保、自重轻、施工速度快、工业化程度高、综合经济指标好、符合可持续发展要求和技术含量高等优点，且是一种技术比较成熟的体系^[1-4]，因此钢结构与其他材料（混凝土、砌体）的结构相比是一种比较理想的结构形式，我国已建成和在建的多高层建筑钢结构和钢-混凝土混（组）合结构已广泛应用于住宅、办公、旅馆等建筑中^[1-8]，如图 1.1 所示。

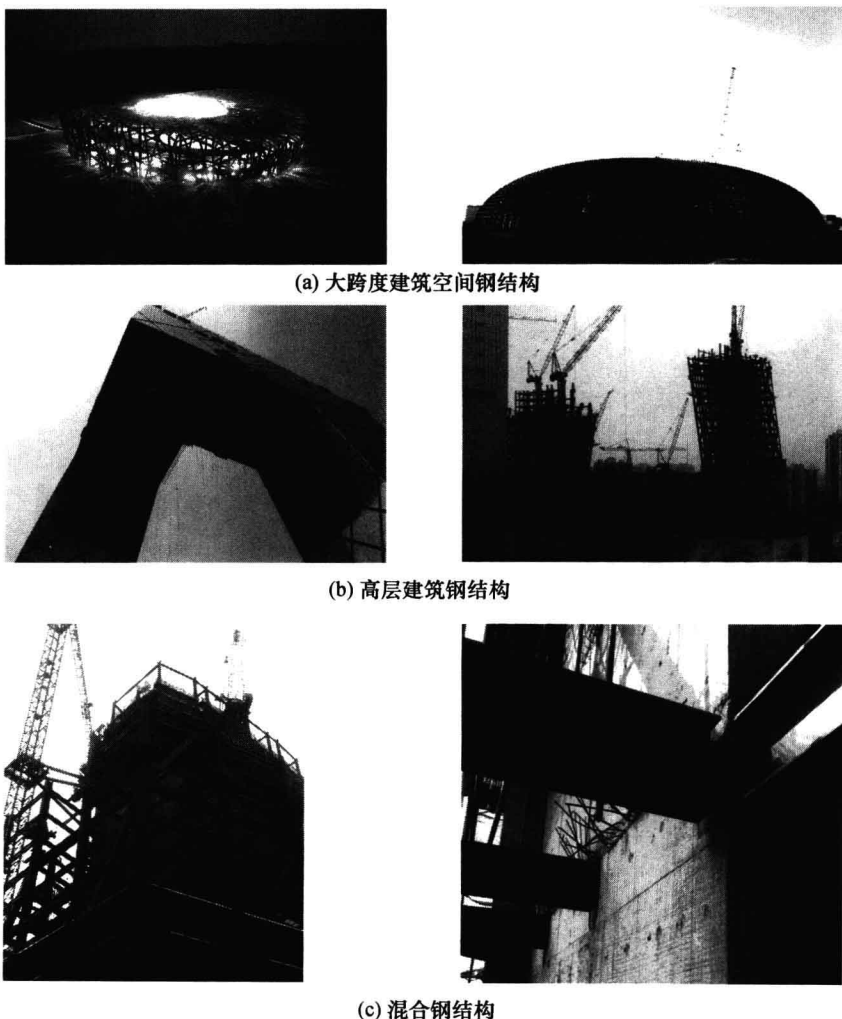


图 1.1 钢结构在工程中的应用（图片来源：中华钢结构论坛）