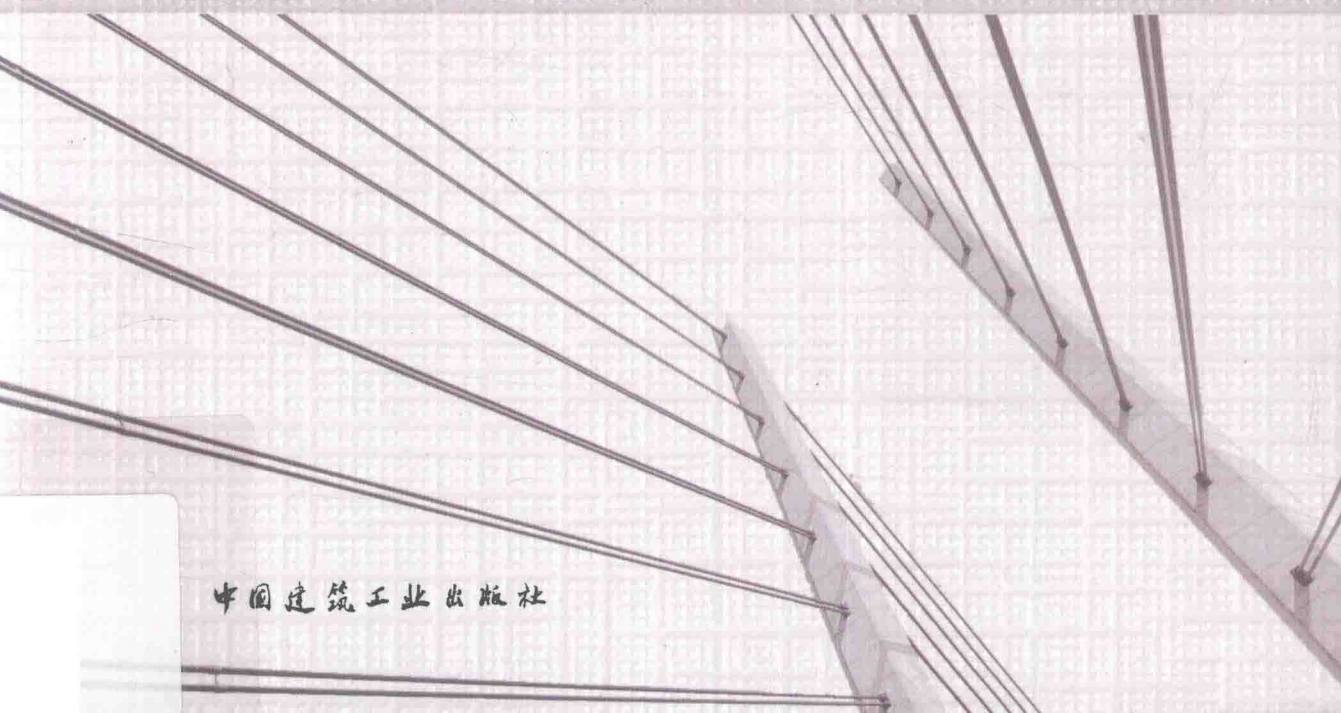




基于变形性能的 钢结构 直接分析 与设计方法

Direct Analysis and Design Method of Steel Structure
Based on Deformation Performance

金 路 张耀春 贾连光 著



中国建筑工业出版社

基于变形性能的钢结构 直接分析与设计方法

金 路 张耀春 贾连光 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于变形性能的钢结构直接分析与设计方法/金路, 张耀春, 贾连光著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-112-21221-7

I. ①基… II. ①金…②张…③贾… III. ①钢结构-结构设计-研究 IV. ①TU391. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 223061 号

本书共 7 章, 分别是绪论、现行钢结构设计方法对比研究、考虑随机初始几何缺陷的分析方法研究、考虑初始几何缺陷的钢结构体系试验研究、多高层钢框架结构的变形性能研究、多高层钢框架支撑结构变形性能研究、实用钢结构直接分析与设计方法研究。本书从实际工程设计的常规思路出发, 对大量国内外研究现状进行了系统的归纳和评述, 在承载力极限状态的基础上, 研究了一种基于变形性能的钢结构高等直接分析设计法, 研究内容准确且有创新特点。

本书适用于钢结构工程教学、科研和工程技术人员参考使用, 也可供结构工程方向研究生学习参考。

责任编辑: 万 李

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 关 健

基于变形性能的钢结构直接分析与设计方法

金 路 张耀春 贾连光 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 字数: 368 千字

2017 年 9 月第一版 2017 年 9 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-21221-7

(30855)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

钢结构由于自重轻、抗震性能好、施工速度快、符合可持续发展等优点,在我国多高层建筑中得到了越来越广泛的应用。关于钢结构体系的直接分析与设计方法,是目前国内外研究的热点之一,也是前沿性课题。目前我国设计规范在应用直接分析设计法时欠缺研究依据,在直接分析法的研究现状中,以结构整体承载能力为目标的全过程分析方法虽然是一种比较精确的结构分析方法,但要将其应用于实际工程的设计中仍存在一定的困难。

本书从实际工程设计的常规思路出发,对大量国内外研究现状进行了系统地归纳和评述,在承载力极限状态的基础上,研究一种基于变形性能的钢结构高等直接分析设计法,研究内容充实,准确且有创新特点。高等分析法是考虑了结构的非线性响应、各种缺陷以及其他影响结构承载能力的因素,通过对结构进行一次全过程的整体分析研究结构的响应。与传统的计算长度法相比,采用高等分析方法进行结构设计明确和统一了结构整体可靠度,大大简化了设计过程,提高了设计的安全性和效率。尤其针对高层钢结构体系,本书具有很好的工程应用价值和创新性,使高层钢结构设计做到更加“安全、经济,合理”。

本书共分为7章。第1章系统地介绍了钢结构的设计方法、钢框架体系非线性分析方法及影响因素、国内外高等分析方法的研究现状。第2章分别采用一阶弹性分析方法、假想水平力法及高等分析方法设计3跨20层钢框架-支撑结构,并比较采用几种设计方法计算的结构构件内力及结构变形等工作性能。第3章通过对已建钢结构工程施工质量验收的原始资料和记录进行分析,重点对不同结构体系的多高层钢柱安装的初始偏差和结构各层垂直度的平均偏差进行统计和整理。采用蒙特卡罗法拉丁超立方抽样技术模拟结构构件的随机缺陷,并编写程序实现了考虑随机初始几何缺陷的分析方法。第4章对两组钢框架和框架-支撑结构进行试验研究,并对比分析试验与有限元模拟的数据,验证了有限元模型正确性。后3章主要针对高层钢结构体系性能及应用方面进行分析研究。第5章对6~30层不同跨度的钢框架模型进行全过程分析,重点研究了添加随机缺陷多高层钢框架结构的变形性能,围绕不同框架的结构高宽比、纵横荷载位移比、框架柱长细比以及梁柱总线刚度比展开参数分析并确定结构柱顶位移和梁跨中挠度,对比其他现行规范分析方法考虑不同初始缺陷时对结构变形的影响。第6章对32~50层不同跨度的钢框架-支撑结构进行高等分析。围绕参数分析确定结构的柱顶侧移和梁跨中挠度,对比各国规范中考虑不同初始几何缺陷方法对结构变形性能的影响。第7章提出了实际缺陷在钢结构直接分析与设计法中的考虑建议、直接设计中变形限值的判别标准、基于变形性能钢结构直接设计方法。最后通过对国内外规范设计的算例应用,验证该实用设计方法的可行性。

钢结构高等直接分析与设计方法是一种正在逐渐兴起和发展的直接分析方法,并终将代替计算长度法,成为建筑钢结构设计的主要分析方法。本书开展多高层钢结构体系直接分析与设计方法研究,考虑承载能力和正常使用两种极限状态下的多种非线性影响因素,为使钢结构的分析方法更加直接、精确和实用,提高结构设计效率和精度,同时也为钢结

构设计规范的修订提供参考，令直接分析与设计方法更好地为工程设计服务。

作者近年来紧跟国内外研究最新进展，又针对我国钢结构工程的发展需要，通过本书研究，为在直接分析设计法中非线性因素的量化计算提供依据，为实现简单高效的直接分析设计法创造条件。通过按国内外规范设计的算例证实，基于性能的直接分析与设计方法简单有效，可供土木工程领域特别是结构工程方向研究生学习，以及为教学、科研和工程技术的人员参考，并为钢结构规范的修订提供参考。

在本书的编写过程中，作者参阅和引用了大量国内外学者的研究内容和学术论著，在此，谨向所有引用文献的作者表示衷心的感谢。感谢研究生张鸣一、朱永伟、陈立平、马云思、周满、刘丹、司汉、蔡子宪对本书的研究内容做出的大量理论分析、试验研究、有限元模拟以及文字排版校验工作，通过大家共同的努力，才有了本书的成稿。许多前辈和同行专家也给本书提出了宝贵的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平和经验有限，书中难免有不足或不当之处，敬请各位专家同仁和广大读者批评指正，并提出宝贵意见。同时，我们也将继续完善其他方面的研究，以加快钢结构直接分析方法在我国的应用和发展。

金 路

沈阳建筑大学土木工程学院

2017年8月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 钢结构设计方法的发展与评价	2
1.1.1 容许应力设计法	2
1.1.2 塑性设计法	3
1.1.3 基于结构构件的极限状态设计法	3
1.1.4 基于结构整体的系统可靠度设计法	4
1.2 钢框架体系非线性分析方法综述	5
1.2.1 塑性区模型	5
1.2.2 塑性铰模型	5
1.2.3 非线性集成设计与分析	6
1.3 影响钢框架结构极限承载力的非线性因素及处理	7
1.3.1 几何非线性	7
1.3.2 塑性扩展	7
1.3.3 残余应力	8
1.3.4 初始几何缺陷	8
1.3.5 节点的半刚性连接	10
1.3.6 局部屈曲	11
1.3.7 弯扭屈曲	11
1.3.8 节点域剪切变形	11
1.4 国内外高等分析方法的研究现状	11
1.4.1 高等分析与设计方法概述	11
1.4.2 高等分析方法的研究现状	12
1.4.3 钢结构高等设计中存在的问题	13
第2章 现行钢结构设计方法对比研究	14
2.1 引言	14
2.2 一阶弹性分析与二阶弹性分析	14
2.3 单层单跨框架设计	16
2.3.1 设计资料与荷载汇集	16
2.3.2 一阶弹性分析	17
2.3.3 近似二阶弹性分析	18
2.3.4 高等分析与设计方法	20

2.4	6层单跨框架设计	24
2.4.1	设计基本条件	24
2.4.2	一阶弹性分析	26
2.4.3	近似二阶弹性分析	27
2.4.4	高等分析与设计方法	29
2.5	三跨 20 层框架支撑结构设计	35
2.5.1	设计基本条件	35
2.5.2	一阶弹性分析	37
2.5.3	二阶弹性分析	40
2.5.4	高等分析	42
第3章	考虑随机初始几何缺陷的分析方法研究	46
3.1	引言	46
3.2	现有工程结构中初始几何缺陷的实测统计	46
3.2.1	钢框架和巨型框架结构	46
3.2.2	钢框架—支撑结构	47
3.2.3	钢框架—混凝土核心筒混合结构	50
3.2.4	统计结果分析	53
3.3	考虑随机缺陷的分析方法	54
3.3.1	蒙特卡罗法	54
3.3.2	拉丁超立方抽样	56
3.3.3	考虑随机缺陷方法的程序实现	57
第4章	考虑初始几何缺陷的钢结构体系试验研究	60
4.1	概述	60
4.2	试件设计	60
4.2.1	构件尺寸和荷载大小的选择	60
4.2.2	主体设计	62
4.2.3	细节设计	62
4.3	加载装置和加载制度	64
4.3.1	加载装置	64
4.3.2	加载制度	65
4.4	测点布置	66
4.5	材性试验	67
4.6	初始几何缺陷的测量	68
4.7	试验现象	69
4.7.1	试验模型 I	69
4.7.2	试验模型 II	71
4.8	有限元分析结果与试验结果比较	73

4.8.1	有限元模型	74
4.8.2	初始几何缺陷和材料属性	74
4.8.3	有限元与试验比较	74
第5章	多高层钢框架结构的变形性能研究	78
5.1	引言	78
5.2	多高层钢框架结构的计算模型	78
5.2.1	结构选型	78
5.2.2	荷载汇集	78
5.3	参数设计及截面尺寸确定	80
5.3.1	框架高宽比	80
5.3.2	二阶效应参数	81
5.3.3	框架柱长细比	82
5.3.4	梁柱总线刚度比	85
5.3.5	参数组合和工况编号	87
5.4	单跨框架全过程高等分析	88
5.4.1	有限元模型	88
5.4.2	极限荷载因子	89
5.4.3	变形性能的概率统计	90
5.4.4	与规范分析方法比较	96
5.5	双跨框架全过程高等分析	101
5.5.1	有限元模型	101
5.5.2	极限荷载因子	102
5.5.3	变形性能的概率统计	102
5.5.4	与规范分析方法比较	106
5.6	三跨框架全过程高等分析	110
5.6.1	有限元模型	110
5.6.2	变形性能的概率统计	111
5.6.3	与规范分析方法比较	114
第6章	多高层钢框架支撑结构变形性能研究	118
6.1	引言	118
6.2	考虑随机初始几何缺陷的分析方法	118
6.2.1	现行规范方法	118
6.2.2	蒙特卡罗法	119
6.2.3	拉丁超立方抽样技术	120
6.2.4	考虑随机初始几何缺陷建模方法	120
6.3	多高层钢框架支撑结构的计算模型	121
6.3.1	结构选型	121

6.3.2	荷载汇集	121
6.4	参数设计及截面尺寸确定	123
6.4.1	框架高宽比	123
6.4.2	二阶效应参数	124
6.4.3	框架柱长细比	125
6.4.4	梁柱总线刚度比	126
6.4.5	参数组合和工况编号	127
6.5	双跨框架支撑结构全过程高等设计分析	127
6.5.1	有限元模型	127
6.5.2	极限荷载因子	129
6.5.3	变形性能的概率统计	129
6.5.4	与规范分析方法比较	133
6.6	三跨框架支撑结构全过程高等设计分析	137
6.6.1	有限元模型	137
6.6.2	极限荷载因子	138
6.6.3	变形性能的概率统计	138
6.6.4	与规范分析方法比较	141
6.7	四跨框架支撑结构全过程高等设计分析	145
6.7.1	有限元模型	145
6.7.2	变形性能的概率统计	146
6.7.3	与规范分析方法比较	149
第7章	实用钢结构直接分析与设计方法研究	153
7.1	引言	153
7.2	实际缺陷在高等设计中的考虑建议	153
7.3	高等设计中变形限值的判别标准	154
7.3.1	结构的适用性	154
7.3.2	适用性验算的判别标准	154
7.3.3	高层框架结构二阶侧移的实用计算	156
7.4	基于变形性能的实用高等设计方法	159
7.4.1	结构变形计算的加载过程	159
7.4.2	实用高等设计方法过程	160
7.4.3	适用范围和设计建议	161
7.4.4	设计方法的不足	162
7.5	算例应用及验证	163
7.5.1	6层单跨框架	163
7.5.2	16层双跨框架	163
7.5.3	4层三跨框架	165
7.5.4	20层三跨框架	166

附录 A 单层单跨框架计算过程 168

附录 B 六层单跨框架计算过程 173

附录 C 荷载汇集 177

附表 D 框架结构参数设计 182

附录 E 单跨框架变形性能的概率统计 188

附录 F 双跨框架的全过程分析 191

附录 G 三跨框架的全过程分析 197

附录 H 集中风荷载标准值 202

附录 I 框架-支撑结构参数设计 206

附录 J 框架的全过程分析 212

附录 K 二阶侧移实用计算公式与有限元结果比较 218

参考文献 221

第 1 章 绪 论

钢结构由于自重轻、抗震性能好、构件易于工业化生产、施工速度快、符合可持续发展等优点,在我国多高层建筑中得到了越来越广泛的应用。虽然目前基于构件可靠度的钢结构设计方法已经较为成熟,但由于钢构件截面经济,板件较薄,在非线性因素影响下的钢结构整体稳定问题仍然突出。因此,钢结构高等分析方法研究其基于结构整体可靠度分析不仅理论意义非常重要,而且具有实际应用价值,使钢结构设计做到更加“安全、经济、合理”。

目前大多数国家的钢结构设计规范都采用以计算长度法考虑结构构件的稳定,该方法由整体结构体系的弹性分析和单个构件的非弹性设计两部分组成,即先按弹性设计方法确定各种荷载效应及组合下的构件内力,然后再单独验算结构中各构件的强度和稳定,在验算中考虑了残余应力、弹塑性和初始几何缺陷等非线性影响。计算长度法的最大特点是以计算长度系数近似考虑结构体系对单个构件的影响,是整体与构件之间的联系纽带。该方法计算简单,适合采用叠加法,但同时也存在着以下几方面的缺陷:

(1) 整体结构与单个构件的计算模型不协调。结构整体内力分析采用弹性分析方法,没有考虑几何非线性和材料非线性;而单个构件进行极限承载力验算时,一般已经达到非弹性状态,并考虑了几何非线性的影响。

(2) 计算长度系数不能准确考虑整体结构对单个构件的影响。计算长度法是将结构整体的稳定问题转化为计算单个构件稳定问题的简化方法,因此只能近似保证整体结构的稳定性。

(3) 无法准确预测结构整体的承载能力,特别对于大型复杂结构,由于计算长度法不能考虑结构弹塑性内力重分布,计算的结构整体极限承载力通常较为保守。

(4) 单个构件的可靠度水平不能代表结构整体的可靠度。计算长度系数法实质上是基于构件极限承载状态,它仅代表了构件承载能力极限状态的可靠度估计,并没有结构整体可靠度的意义。在大多数情况下,构件的实际可靠度大于整体设计的目标可靠度。

由于计算长度设计法存在的缺陷,很多学者在弹性范围内对现行设计方法加以改进,包括改进计算长度、采用名义荷载模型或降低结构构件的弹性模量等,这些方法都是以弹性分析来代替非弹性分析,仍然存在局限性。随着计算机技术和有限元分析方法的飞速发展,二阶非线性分析理论也开始进入实用阶段,很多国家的钢结构设计规范也已经开始体现出二阶分析理论的条文。欧洲钢结构规范 EC3 和澳大利亚钢结构标准 AS 4100 在以计算长度法为主的同时也规定了高等分析的条款;英国钢结构规范 BS 5950 规定,当准确考虑非线性因素时,可以采用二阶分析方法;美国规范 AISC (2005) 规定了直接分析法可以用于结构内力分析;而我国《钢结构设计规范》GB 50017—2003 规定侧移刚度较小的框架结构宜采用二阶弹性分析,同时还对无支撑纯框架提出了近似二阶分析方法。

实际上,要彻底克服计算长度设计法的缺陷,就需要充分考虑残余应力、初始几何缺

陷以及材料的弹塑性等各种非线性因素,建立以结构整体极限承载力为目标分析方法,即高等分析与设计方法。高等分析的实质就是精确的二阶弹塑性设计过程,在结构分析中充分考虑影响结构性能的各种非线性因素,直接预测结构体系及其各组件的破坏模式与极限荷载,从而不需要验算单个构件的承载力,彻底免除了构件计算长度及相关方程的概念。与传统的计算长度法相比,采用高等分析方法进行结构设计明确和统一了结构整体可靠度,大大简化了设计过程,提高了设计的安全性和效率。

综上所述,随着非线性理论的不断成熟和发展,钢结构设计方法的发展趋势已经从以构件极限承载力为目标的一阶弹性设计转向基于性能的以结构整体承载力为目标的二阶弹塑性设计。而高等分析与设计方法是一种正在逐渐兴起和发展的直接分析方法,十分符合钢结构设计发展的趋势,在近期内将与计算长度法并用。随着今后的设计理论和计算机技术的不断进步,高等分析设计法终将代替计算长度法,成为建筑钢结构设计的主要分析方法。

目前,各国规范关于考虑非线性影响的全过程高等分析方法的应用不尽相同,将高等设计方法真正应用于实际工程结构设计中还有待于进一步研究和发展;另一方面,计算机运算能力和图形处理功能的普遍提高,让完整直接的二阶弹塑性分析越来越成为可能。一旦建立了可靠的计算理论及完成相应的程序设计,精确的全过程分析将更严格地考虑单个构件性能和整体结构之间的相互作用和依赖关系,更全面地考虑结构的实际破坏模式和最大强度,而不再需要现行烦琐的单个构件的设计和验算。

1.1 钢结构设计方法的发展与评价

技术先进、经济合理、安全适用、确保质量是钢结构设计中遵循的基本原则。建筑设计的主要目的是力求以较经济的手段设计并建造出安全可靠的结构,使之在预定使用期间内以适当的可靠度满足各种预定功能的要求。在结构设计中应主要考虑结构分析和可靠性分析两个方面的问题,而结构设计也应基于结构分析和结构可靠度评价,二者相辅相成缺一不可,只有寻求经济性与可靠性之间的最佳平衡点,才能使结构设计方法臻于完善。

结构的可靠性是结构安全性、适用性和耐久性的统称。结构的可靠度是结构可靠性的概率度量,即结构在规定的时间内、规定的条件下,完成预定功能的概率。钢结构设计方法按可靠度意义的发展演变过程可分为,确定性设计法、基于结构构件极限状态设计法和基于结构整体极限状态设计法。

1.1.1 容许应力设计法

容许应力设计法(Allowable Stress Design,简称ASD)是在结构分析理论建立后最早提出的设计方法,该方法从20世纪初到20世纪50年代都在采用。该方法规定了结构构件的计算应力应该小于规范给定的容许应力,即

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{R_u}{k_e} \quad (1-1)$$

式中 σ ——结构构件的计算应力,按标准荷载以一阶弹性计算;

R_u ——材料的屈服应力或极限应力的标准值;

k_e ——容许应力的安全系数。

容许应力设计法基于线弹性理论, 保证结构处于弹性, 因而结构分析与设计十分简单。但容许应力设计法也存在一些缺点:

- (1) 对塑性发展能提高承载力的结构设计非常保守, 具有较大的安全储备;
- (2) 不能考虑结构构件几何非线性的影响;
- (3) 单一的安全系数衡量不同类型荷载和结构中构件的安全水平相差很大;
- (4) 经验性的安全系数对结构设计无明确的可靠度意义。

1.1.2 塑性设计法

塑性设计法 (Plastic Design, 简称 PD) 的通用表达式如下, 即结构构件的塑性极限承载力应大于考虑安全系数的构件内力。

$$k_p \cdot \sum S_m \leq R_p \quad (1-2)$$

式中 R_p ——考虑材料塑性确定的极限承载力;

k_p ——塑性设计安全系数;

S_m ——在某一工况下由荷载标准值求得的结构构件计算应力。

在塑性设计中, 通常采用一阶塑性分析或刚塑性分析方法, 考虑了不同结构塑性发展的非线性影响, 允许结构在进入塑性后进行内力重分布, 因而设计更加合理。但不能考虑构件材料的屈服扩展及稳定性, 并且塑性设计的安全系数仍然由经验性取值而确定。

1.1.3 基于结构构件的极限状态设计法

由于荷载的作用, 结构在使用周期内可能达到各种极限状态, 《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001 将极限状态分为承载能力和正常使用极限状态两大类。因此结构按极限状态设计应符合下列要求:

$$G(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0 \quad (1-3)$$

式中 $G(\cdot)$ ——结构的功能函数;

$X_i (i=1, 2, \dots, n)$ ——影响结构或构件可靠度的基本变量, 指结构上的各种作用、材料性能和几何参数等。

在经历了确定性方法 (容许应力法和塑性设计法的统称) 之后, 现行钢结构设计大多采用带荷载和抗力分项系数的基于结构构件的极限状态设计法 (Load & Resistance Factor Design, 简称 LRFD)。该方法按照一定的概率统计确定荷载或材料的代表值, 并给出结构构件的功能函数, 用失效概率或可靠指标度量结构构件的可靠性, 其承载能力极限状态的设计表达式为:

$$\frac{R}{\gamma_R} \geq \gamma_0 \sum \gamma_i S_m \quad (1-4)$$

式中 R ——结构构件抗力标准值, 由构件材料和几何尺寸标准值, 按构件的受力形式 (受弯、轴心受压、偏心受压等) 分析确定, 一般取为构件的极限承载力;

S_m ——构件在第 i 种荷载下的效应 (内力) 标准值;

γ_0 ——结构重要性系数;

γ_R 、 γ_i ——分别为结构抗力分项系数和荷载效应分项系数, 根据结构功能函数中基本变量的统计参数和概率分布类型通过概率分析和可靠度校核并考虑工程经验确

定，具有明确的可靠度意义。

基于结构构件极限状态设计是结构设计从经验设计向概念设计的飞跃，该方法可进行二阶分析，从而克服确定性设计法不能考虑几何非线性的缺陷。由于采用不同的荷载分项系数，使结构构件具有比较一致的可靠度水平。但该方法的不足之处在于仅考虑了某些构件或截面的可靠度，而不是整个结构体系的可靠度，这样就有可能低估结构整体的可靠度，造成结构设计的浪费。

1.1.4 基于结构整体的系统可靠度设计法

由于问题的复杂性以及缺乏基于结构整体的抗力和荷载效应的统计参数及分布模型的统计资料，考虑结构体系的可靠度设计方法尚在探索研究之中。有些学者对钢框架体系的合理设计方法开展了研究工作，将钢结构高等分析与结构体系可靠度计算相结合，提出了基于结构系统可靠度的钢结构高等设计方法（Reliability-based Advanced Design，简称 RAD），其设计表达式为：

$$\phi R_n \geq \gamma_0 \sum \gamma_i S_{mi} \tag{1-5}$$

式中 R_n 、 S_{mi} ——分别为结构整体抗力和荷载效应标准值；
 ϕ 、 γ_i ——分别为结构整体抗力和荷载效应分项系数；
 γ_0 ——结构重要性系数。

基于整体承载极限状态的钢结构可靠度设计方法是建立在钢结构整体非线性分析基础上的新方法，该方法既比传统的基于构件可靠度的设计方法经济，又能保证结构整体具有一致的体系而非构件的可靠度水平，并使结构整体的实际可靠度水平尽可能接近设计的目标值。虽然该方法还处于初步探索阶段，还需要随着结构系统可靠度的深入研究不断发展和完善，但计算机技术的飞速发展以及结构分析和结构系统可靠度计算领域取得的研究进展，将为这种结构整体设计方法提供现实条件和理论基础。

经过上述分析，目前钢结构设计分析方法的发展如图 1-1 所示。但必须指出，目前基于结构体系可靠度的高等设计方法，仅重点探索了结构承载能力的极限状态，尚很少涉及正常使用极限状态，这是一个很大的缺憾。

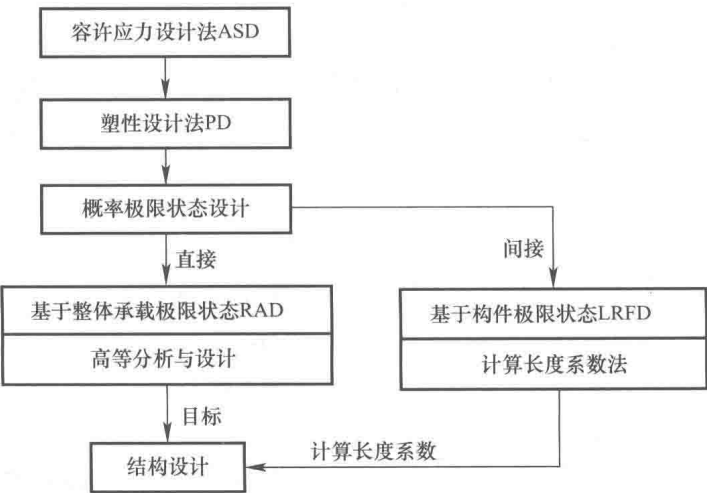


图 1-1 钢结构设计分析方法

1.2 钢框架体系非线性分析方法综述

根据结构分析时采用的大小位移以及材料性质划分,结构内力分析方法有一阶弹性分析、二阶弹性分析、一阶弹塑性分析和二阶弹塑性分析等。一阶是指在结构分析中平衡方程和变形协调关系按结构未变形(或原有)的轴线建立,即不考虑变形对外力效应的影响;二阶是指平衡方程和变形协调关系按结构变形后的轴线建立,也称几何非线性。随着概率极限状态设计法的广泛使用,钢框架设计对非线性分析的需要日益增长,结构稳定与极限承载力分析已经从单独构件的分析发展到整体结构的分析、从简单的线性分析发展到非线性分析。

采用非线性分析的目的是为了在高等设计中充分考虑各种非线性因素,直接准确地得到结构体系的破坏模式和极限荷载,从而避免了单独构件的验算,大大简化了结构设计的过程。近几年来,很多研究者在考虑非线性分析方法方面提出了多种有限元数值模型,主要可以归纳为塑性区模型和塑性铰模型。

1.2.1 塑性区模型

塑性区模型是在沿构件长度和截面划分精细的单元和网格,通过跟踪截面任意积分点的应力、应变来直接描述构件的塑性发展及非线性影响,主要包括以下两种模型。

1. 壳单元塑性区模型

壳单元塑性区模型基于塑性变形理论,被公认为真正精确的弹塑性分析模型。该模型能够充分考虑结构构件的初始缺陷包括残余应力以及板件的局部失稳等影响,可以准确模拟构件截面和沿杆长方向的塑性发展,但同时需要在沿构件长度和截面方向划分大量的单元,因此计算量巨大,只适用小规模的结构分析或构件细部特性设计。

2. 梁单元塑性区模型

梁单元塑性区模型基于梁柱理论,将构件沿杆长划分为若干单元,将截面也划分为多个网格,因此其计算量也很大。该模型可以考虑结构整体的初始几何缺陷、残余应力的分布以及塑性扩展,但不能考虑构件局部缺陷及板件局部失稳的影响。

综上所述,塑性区模型虽然可以充分考虑多种非线性因素的影响,得到精确解,但由于划分单元网格数量巨大,计算时间几乎是塑性铰模型分析的百倍以上,因此塑性区模型很少应用于实际的结构分析。

1.2.2 塑性铰模型

针对塑性区模型不能满足结构分析简单、高效的缺点,很多学者提出了一系列简化的塑性铰模型,也能近似考虑各种非线性因素的影响。

1. 简单塑性铰模型

简单塑性铰模型假定塑性集中在长度为零的塑性铰上,而其他部分均为弹性。该模型包括一阶和二阶塑性铰法,其中二阶塑性铰模型能够考虑材料非线性和几何非线性。该方法计算简单,但不能考虑塑性在截面上的扩展及残余应力引起的沿杆长方向的塑性分布,不适合精确的钢结构高等分析。

2. 准塑性铰模型

准塑性铰模型只需在构件长度方向划分单元,而在截面上无需划分网格。该模型可以通过拟合 $M-\varphi-N$ 关系考虑截面的塑性发展,推导单元柔度系数得到单元增量刚度矩阵;或者利用 $M-\varphi$ 关系得到 EI 表达式考虑塑性分布发展的影响,通过变换柔度矩阵得到单元的切线刚度矩阵。准塑性铰模型的计算结果与塑性区非常接近,但很难应用到三维单元计算,计算效率也不高。

3. 名义荷载塑性铰模型

为了考虑初始几何缺陷等非线性因素的影响,Liew 等人提出了名义荷载塑性铰法。该方法是在结构各层柱顶施加与楼层总竖向荷载或构件轴力成正比的等效名义横向荷载,从而间接考虑残余应力、初始几何缺陷、截面塑性等非线性因素影响。该方法使用意义明确,目前已经列入很多钢结构规范的高等分析条文,但在确定无侧移框架名义荷载的大小和方向时也会有些困难。

4. 精炼塑性铰模型

精炼塑性铰模型采用抛物线刚度退化函数描述塑性铰形成过程中的截面渐进屈服,采用切线模量考虑轴力较大时残余应力引起的沿杆长方向的塑性。切线模量可通过精确的 CRC 或 LRFD 柱子强度公式得到。该方法计算简捷,预测结构构件的极限承载力与塑性区法精确的分析结果接近,因此这种高效、精确的分析模型已经广泛应用在平面内钢框架结构的高等分析中。

5. 改进塑性铰模型

最近十几年来,很多学者在塑性铰法基础上提出了一些实用的改进塑性铰模型。例如,Chen 和 King 等在计算模型中考虑了二阶效应、塑性扩展、构件缺陷等非线性影响因素,其计算效率和精度都很满意;强化塑性铰模型通过降低截面初始屈服后的切线刚度来近似考虑单元两端的塑性分布和逐步发展;Chen 和李国强等考虑截面的逐渐屈服通过控制端部虚拟弹簧模型中的弹簧转动刚度来实现,或在此基础上采用弹塑性铰参数 ρ 考虑,这样将更方便地应用于钢框架分析;简化塑性区模型采用标准化切线模量考虑塑性变形沿杆件截面高度逐渐发展引起的截面刚度折减,并通过刚度影响系数和塑性变形影响系数考虑塑性变形对单元刚度的影响。

6. 伪塑性区模型

根据对非紧凑截面构件进行三维壳单元塑性区分析的计算结果,在精炼的塑性铰模型基础上提出了伪塑性区模型。该方法弥补了精炼塑性铰模型适用于紧凑截面的局限性,可以考虑板件局部失稳的影响并可利用截面局部失稳后的屈曲后强度,具有良好的经济性和实用性。

1.2.3 非线性集成设计与分析

尽管目前有些规范已经提倡塑性设计,但在设计荷载作用下形成第一个塑性铰后的塑性分析却很少使用。考虑到当前设计规范一般基于极限状态设计,Chan 等人首次提出用点平衡插值单元代替稳定函数,实现一根结构杆件采用一个计算单元的实用高等分析方法,即非线性集成设计与分析 (Non-linear Integrated Design and Analysis, 简称 NIDA)。该方法的思路是在考虑各种非线性因素的同时,要求构件的截面最大应力小于屈服应力,

或结构的设计荷载小于形成第一个塑性铰时的荷载，这样结构的安全性可以自动满足。NIDA 采用计算单元能够考虑初始弯曲缺陷，具有更好的计算效率和收敛性，并且计算精度也很高。此外，在此基础上联合开发的非线性计算设计程序（NIDA-NAF）也已经在多个工程实践中运用并通过了国家鉴定。

1.3 影响钢框架结构极限承载力的非线性因素及处理

上文分析的塑性区模型和塑性铰模型其实都是在不同方面考虑了影响钢结构整体稳定和承载能力的非线性因素，主要包括残余应力引起塑性在截面和杆长方向的扩展、二阶效应、初始几何缺陷、半刚性连接、板件的局部屈曲和弯扭屈曲以及节点域的剪切变形等。

1.3.1 几何非线性

图 1-2 显示了结构中常见的两种分别由杆端位移 Δ 引起的 $P-\Delta$ 效应和杆件本身侧移引起的 $P-\delta$ 效应。在多高层钢框架结构的高等分析中，几何非线性的影响会导致结构构件的承载力大大降低，因此在分析中必须考虑。

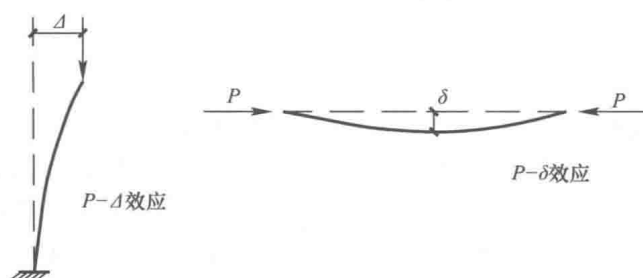


图 1-2 二阶效应

上述两种几何非线性效应可通过建立单元和结构的非线性方程分别考虑，主要方法有基于梁柱理论的稳定函数法，通过求解梁柱微分方程直接得到结构单元刚度矩阵，由稳定函数考虑二阶效应的影响；或采用有限单元法，在每个划分的有限单元区域内根据插值函数来描述单元特性，由单元几何刚度矩阵考虑轴力和弯矩等影响，该方法能够模拟构件的弯扭屈曲，与稳定函数法具有一定的互补性。此外，Liew 等综合上述两种单元的优点，还发展出基于混合单元的分析方法，并取得很好的效果。

1.3.2 塑性扩展

考虑塑性扩展的方法主要有塑性区模型和塑性铰模型两大类。塑性区模型虽然可以准确地模拟塑性沿截面和单元方向上的扩展，但因为单元和网格划分巨大，计算相当耗时，因此很少在实际工程中应用；而采用塑性铰模型的计算过程非常简捷，并且计算的精度也令人满意，目前在钢框架结构高等分析中应用最广，例如可以采用弹塑性铰模型和强化塑性铰模型塑性沿截面的扩展，采用精细塑性铰模型和准塑性铰模型还可以考虑塑性沿杆长方向的扩展；此外非迭代柔度法可以考虑材料的分布塑性，是一种只需逐步加载而无需迭代的直接分析方法。