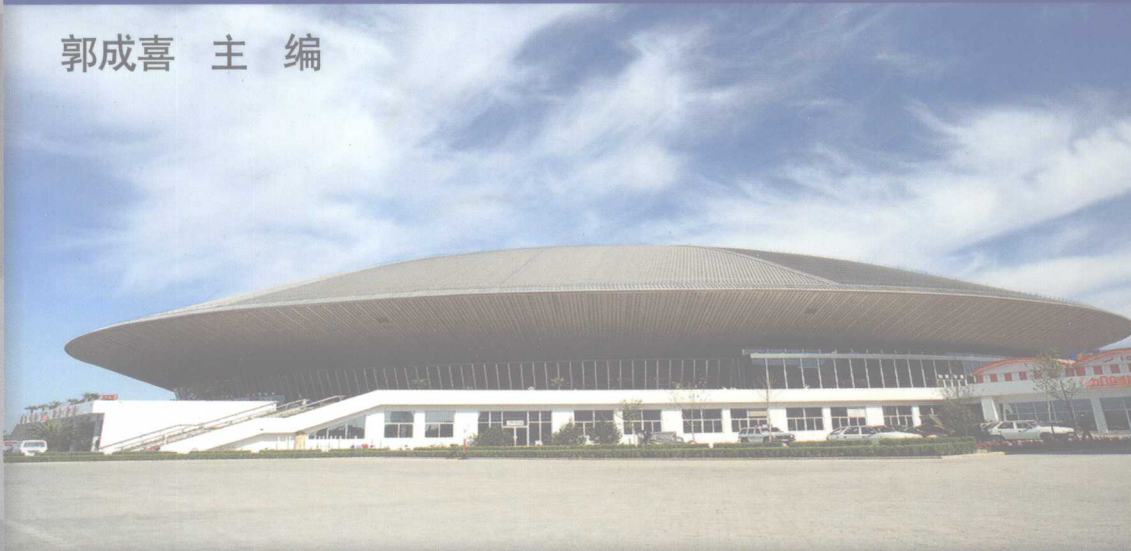




全国高等院校土木工程类系列教材

钢结构设计原理

郭成喜 主 编



科学出版社
www.sciencep.com

全国高等院校土木工程类系列教材

清华大学“面向21世纪教育振兴行动计划”重点出版项目
教育部“九五”重点图书出版项目
ISBN 7-302-02452-2
定价：38.00元

钢结构设计原理

郭成喜 主编

责任编辑：王晶晶

北京：科学出版社 (2008) 第08873号

(全国高等院校土木工程类系列教材)

ISBN 7-302-02452-2

I. 钢... II. 郭... III. 钢结构设计原理—高等学校—教材
IV. TU301.04

科学出版社 (2008) 第08873号



责任编辑：王晶晶
封面设计：吕敬人

科学出版社

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100071

http://www.sciencep.com

印刷：北京印刷厂

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年2月第1次印刷

2008年5月第1次印刷 印张：17.125

字数：418,000

定价：38.00元

(如有印装质量问题，本社负责调换)

科学出版社

版权所有 侵权必究

北京

举报电话：010-64030257 4034312 13501121303

林卷匠系类 内 容 简 介 学高国全

本书按照土木工程专业现行本科“钢结构设计原理”教学大纲和最新修订的国家标准编写。主要内容包括：导论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件和拉弯、压弯构件。每章末均附有思考题和习题，并且给出了大部分习题的参考答案。

本书可作为高等院校土木工程专业本科生教学用书，做适当取舍后亦可作为大专院校相关专业专科生的教学用书，还可供从事钢结构工程的工程技术人员参考。

编 者 郭成喜

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构设计原理/郭成喜主编. —北京：科学出版社，2009

(全国高等院校土木工程类系列教材)

ISBN 978-7-03-024518-2

I. 钢… II. 郭… III. 钢结构-结构设计-高等学校-教材
IV. TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 065873 号

责任编辑：童安齐 王晶晶 / 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>

骏 杰 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 5 月 第 一 版 开本：787×1092 1/16

2009 年 5 月 第一次印刷 印张：17 1/2

印数：1—2 500

字数：415 000

定价：28.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈环伟〉)

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

全国高等院校土木工程类系列教材 编委会

主 任 白国良

副 主 任(以姓氏笔画为序)

马建勋 刘伯权 何明胜 邵生俊 陈宗平

杨 勇 童安齐

秘 书 长 贾风云

副秘书长 任加林 陈 迅

委 员(以姓氏笔画为序)

马 斌 马建勋 王士川 王志骞 王泽军

史庆轩 白国良 冯志焱 任加林 刘伯权

苏明周 杜高潮 李 进 李青宁 李建峰

李惠民 余梁蜀 何明胜 何廷树 邵生俊

张 荫 张 倩 张志政 陈 迅 陈宗平

杨 勇 赵 平 赵树德 赵鸿铁 姚继涛

贾风云 徐 雷 袁伟宁 郭成喜 梁兴文

韩晓雷 童安齐 曾 珂 廖红建 熊仲明

薛建阳

前 言

“钢结构设计原理”是土木工程专业的一门专业基础课。其前承数学和力学等多门基础课程，后继“钢结构设计”专业课程。这种角色和地位既凸显了“钢结构设计原理”的重要性，又明确地规定了其教学格局。本书撰写者均是多年从事“钢结构设计原理”专业课教学的一线教师，对本课程的教学感触良多。作者殷切希望本教材能在以下几个方面体现出特色。

“钢结构设计原理”涉及密集的力学基础知识，其中相当一部分内容是前承力学课程所未提供的，如构件的扭转屈曲、弯扭屈曲等。编者本着既提供足够份量力学内容，又力求避免教材力学化的初衷，在导论中精心选取了构件的约束扭转、轴力的 Wagner 效应、弯扭变形状态上的内力分量计算、构件弹性屈曲分析等内容，并进行简洁而系统的论述。

本书特别关注了构件承载力基本研究方法的理性梳理，如在第 1 章分别设置了结构（构件）的破坏模式和构件承载力的表达准则，这对于正确理解构件承载力计算公式和培养正确处理问题的能力或许是至关重要的。第 1 章因为承载了比通常的一般性说明更多的内容，因此命名为导论，而不称其为绪论。除此之外，在篇幅允许的情况下，尽可能多地能介绍一些更一般性的理论和处理方法，例如框架柱的计算长度系数的一般确定方法及其注意事项等。

导论的设置的一个目的，就是将教材中涉及的共性知识点，适当地进行集中处理，如构件的扭转屈曲、弯扭屈曲、构件承载力表达准则等，以有效地避免重复叙述。

本书是以构件和连接的计算和构造设计为编写宗旨的，因此特别强调了计算细节和构造细节的论述，尽量杜绝粗线框式的描述。所有的例题都逐步给出了详尽的说明，除了便于阅读之外，还冀希培养严谨的敬业精神。

课后习题是巩固掌握课堂教学内容的重要手段，本书遴选了大量思考题和习题附于各章之后，并给出了部分习题的参考答案。

参与本书编写工作的有郭成喜（第 1 章、第 6 章和附录）、陈向荣（第 2 章）、李峰（第 3 章）、何远宾（第 4 章）和周天华（第 5 章）。

本书的编写工作得到了科学出版社的鼎力支持，谨致献意。

限于作者水平，加之成稿仓促，书中不妥之处在所难免，万望读者不吝赐教。

编者

2009 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 导论	1
1.1 概述	1
1.2 作用(荷载)效应分析	4
1.2.1 概率极限状态设计法	4
1.2.2 作用(荷载)效应分析方法	5
1.2.3 构件的约束扭转	8
1.3 构件二阶分析	9
1.3.1 轴力的 Wagner 效应	10
1.3.2 弯扭变形状态上的内力分量计算	10
1.3.3 构件弹性屈曲分析	12
1.4 结构(构件)的破坏模式	13
1.4.1 强度破坏	14
1.4.2 整体失稳	14
1.4.3 局部失稳	14
1.4.4 疲劳破坏	14
1.5 构件承载力的表达准则	14
1.5.1 边缘屈服准则	15
1.5.2 全截面屈服准则	16
1.5.3 部分截面屈服准则	16
1.6 构件的屈曲后性能	16
1.7 小结	19
第 2 章 钢结构的材料	20
2.1 钢材的主要性能	20
2.1.1 屈服点和屈服强度	20
2.1.2 抗拉强度	21
2.1.3 伸长率	21
2.1.4 冲击韧性	22
2.1.5 冷弯性能	22
2.1.6 可焊性	23
2.2 影响钢材性能的因素	23
2.2.1 化学成分	23
2.2.2 成材过程	25

2.2.3	冷加工硬化	27
2.2.4	温度	28
2.2.5	环境	29
2.2.6	应力状态	29
2.2.7	反复荷载作用	31
2.2.8	应变速率	35
2.3	钢结构对钢材的要求	36
2.3.1	塑性破坏和脆性破坏	36
2.3.2	钢结构对钢材的要求	37
2.4	结构钢材类别及其选择	37
2.4.1	结构钢材的种类	38
2.4.2	结构钢材的选用	39
2.4.3	结构钢材的规格	41
2.5	小结	43
	思考题	44
	习题	44
第3章	钢结构的连接	45
3.1	钢结构连接的方法	45
3.1.1	焊接连接	45
3.1.2	铆钉连接	49
3.1.3	螺栓连接	49
3.2	焊接连接特性	50
3.2.1	焊缝的连接形式	50
3.2.2	焊缝代号及标注方法	51
3.3	对接焊缝的构造与计算	52
3.3.1	对接焊缝的构造要求	52
3.3.2	对接焊缝的计算	53
3.4	角接焊缝的构造与计算	56
3.4.1	角焊缝的构造	56
3.4.2	角焊缝计算的基本公式	59
3.4.3	角焊缝的连接计算	62
3.5	焊接残余应力和焊接残余变形	69
3.5.1	焊接残余应力的分类和产生的原因	69
3.5.2	焊接残余应力的测量	71
3.5.3	焊接残余应力的影响	73
3.5.4	焊接残余变形的产生和防止	74
3.6	螺栓的排列和构造要求	76
3.6.1	螺栓在构件上的排列要求	76

081	3.6.2 螺栓的表示方法	77
081	3.6.3 螺栓连接的应用	78
081	3.7 普通螺栓连接的构造和计算	78
141	3.7.1 抗剪螺栓连接	78
141	3.7.2 抗拉螺栓连接	80
141	3.7.3 螺栓群抗剪连接的计算	81
141	3.7.4 螺栓群抗拉连接的计算	85
081	3.7.5 剪力和拉力共同作用的螺栓群连接计算	86
081	3.8 高强度螺栓连接的性能和计算	88
081	3.8.1 高强度螺栓连接的性能	88
081	3.8.2 高强度螺栓摩擦型连接计算	90
081	3.8.3 高强度螺栓承压型连接计算	92
081	3.9 小结	96
081	思考题	97
081	习题	97
	第4章 轴心受力构件	99
131	4.1 截面形式及构造要求	99
081	4.2 轴心受力构件的强度	100
081	4.3 轴心受压构件的整体稳定性	101
081	4.3.1 轴心受压构件的弯曲屈曲	101
081	4.3.2 缺陷对轴心受压构件整体稳定的影响	103
181	4.3.3 轴心受压构件的稳定系数	108
181	4.3.4 轴心受压构件的整体稳定计算	112
081	4.4 轴心受力构件的刚度	116
181	4.5 格构式轴心受压构件	118
081	4.5.1 格构式轴心受压构件绕实轴的整体稳定	118
081	4.5.2 格构式轴心受压构件绕虚轴的整体稳定	118
081	4.5.3 格构式轴心受压构件的缀件设计	120
108	4.6 板件的局部屈曲	123
108	4.6.1 板件失稳的临界应力	123
108	4.6.2 板件宽(高)厚比	124
108	4.7 轴心受力构件的设计	126
081	4.7.1 实腹式轴心受力构件	126
081	4.7.2 格构式轴心受压构件	130
081	4.8 冷弯薄壁型钢构件设计	135
081	4.8.1 冷弯薄壁型钢结构的特点	135
081	4.8.2 冷弯薄壁型钢构件的有效宽度设计法	135
081	4.8.3 冷弯薄壁型钢轴心受压构件的设计	137

4.9	小结	139
	思考题	139
	习题	140
第5章	受弯构件	144
5.1	截面形式及构造要求	144
5.1.1	梁的截面形式和应用	144
5.1.2	梁的构造要求	145
5.2	强度及挠度控制	149
5.2.1	梁的强度	149
5.2.2	梁的刚度	158
5.3	梁的整体稳定性计算	159
5.3.1	梁的临界弯矩	159
5.3.2	梁整体稳定性校核方法	162
5.4	梁的局部稳定性计算	165
5.4.1	各种荷载条件下的腹板屈曲	166
5.4.2	多种荷载共同作用下的腹板屈曲	169
5.4.3	梁受压翼缘的局部稳定	171
5.4.4	梁腹板加劲肋设计	172
5.5	薄腹板梁设计特点	176
5.5.1	梁腹板的屈曲后强度计算	176
5.5.2	考虑腹板屈曲后强度的加劲肋设计特点	180
5.6	梁截面的设计	181
5.6.1	梁的截面选择	181
5.6.2	梁截面验算概要	183
5.6.3	焊接组合梁截面沿长度的改变	184
5.6.4	焊接梁翼缘与腹板连接焊缝的计算	186
5.6.5	梁设计实例	187
5.7	小结	200
	思考题	201
	习题	201
第6章	拉弯和压弯构件	204
6.1	类型和截面选择	204
6.2	强度计算和刚度要求	205
6.3	压弯构件平面内的稳定性计算	208
6.3.1	压弯构件平面内稳定承载力	208
6.3.2	等效弯矩系数	209
6.3.3	实腹式压弯构件平面内稳定承载力计算	210
6.4	压弯构件平面外的稳定性计算	213

6.5 格构式压弯构件的计算	215
6.5.1 弯矩绕实轴作用	216
6.5.2 弯矩绕虚轴作用	216
6.5.3 缀材计算	217
6.6 压弯构件的板件稳定	220
6.6.1 翼缘板的稳定	220
6.6.2 腹板的稳定	221
6.7 压弯构件计算长度	222
6.7.1 一般概念	222
6.7.2 框架柱计算长度系数	223
6.7.3 变截面柱计算长度系数	227
6.8 小结	228
思考题	229
习题	229
附录	234
1 钢材的化学成分和机械性能	234
2 强度设计值	235
3 工字形截面简支梁等效弯矩系数和轧制工字钢梁的稳定系数	237
4 轴心受压构件的稳定系数	238
5 框架柱计算长度系数	241
6 疲劳计算的结构和连接分类	245
7 型钢规格表	247
8 螺栓和锚栓规格	258
9 各种截面回转半径的近似值	259
部分习题参考答案	261
主要参考文献	266

第 1 章 导 论

1.1 概 述

在我国古代史上,金属在结构工程中的应用,最瞩目的当属造型古朴的铁塔,例如:湖北荆州的北宋 13 层玉泉寺铁塔,山东济宁的铁塔寺铁塔以及江苏镇江的甘露寺铁塔。实际上金属在结构工程中的应用最早可追溯到公元前 2 世纪的秦代铁桥墩。公元 60 年(东汉明帝)前后,在与西域各国交往中,铁索桥作为跨越峡谷的承重结构开始出现,这种以锻铁环衔接成链状的铁索是世界公认的最古老铁桥。其著名者有明代建造的云南沅江桥,清代建造的贵州盘江桥以及大渡河上的泸定桥。

12 世纪到 15 世纪期间,欧洲的砖石宫殿和教堂(如俄罗斯的伏拉基米尔圣母升天节教堂)中出现了熟铁锻造的金属拉条和夹板,在瓦西里升天寺院的过道天棚出现了金属结构(1560 年)。17、18 世纪在教堂中出现了锻制金属杆件和锁件构成的穹隆结构(如列宁格勒的喀山大教堂),从 19 世纪 30 年代开始,现代意义上的钢结构才开始逐渐取代铸铁和锻铁结构。这种现代意义上的钢结构通常是指由热轧型材、冷弯薄壁型材或钢板(参见第 2 章)通过焊接、铆钉连接或螺栓连接(参见第 3 章)所构建成的结构。

尽管我国古代在冶金和金属结构技术方面创造过举世公认的成就,但近百余年来,我国的钢结构发展相对滞后。20 世纪 50 年代前,为数不多的一些钢结构工程,几乎全是外国人包揽设计和施工的。尽管一些杰出的中国工程技术人员在极其困难的条件下也完成了一些出色的工程,如 1927 年建成的沈阳皇姑屯机车厂钢结构厂房,1931 年建成的广州中山纪念堂,以及 1937 年建成的杭州钱塘江大桥。20 世纪 50 年代后,尤其是 20 世纪 80 年代后,随着我国跃升为世界产钢大国,钢结构工程呈飞速发展态势。

与广泛应用于建筑结构中的其他材料相比,钢材具有强度高、塑性和韧性好、材质均匀、制造安装方便、施工周期短等一系列特点。这些特点决定了钢结构特别适合于下列类型的结构。

1. 重型厂房结构(图 1.1)

在许多行业(如冶金、机械制造、造船等)的厂房中,由于加工处理的工件质量大,体积大,致使这些厂房具有跨度大、高度大、吨位大的特点,例如,冶金行业的转炉车间,装配 3 个容积 400m³的转炉时,其跨度可达 30m,多层部分的高度可达 80m,整个厂房占地面积达 30000m²,吊车的起重量可达 450t;在机械制造行业,有高度 60m,吊车起重量高达 1200t 的重型厂房。综合分析可靠性、耐久性和经济性表明,这种重型工业厂房最适宜采用全钢结构建造。这是钢结构应用的传统领域。当

然，一些传统做法也在发生变化，例如现在越来越多的厂房结构选择压型钢板作围护结构和屋面防水材料。



图 1.1 单层厂房结构

2. 大跨度结构 (图 1.2)

尽管钢材的质量密度远高于钢筋混凝土，但由于钢材的强度也远高于后者，因此在相同跨度和荷载条件下，钢构件的截面尺寸远小于后者，从这个意义上说，钢结构是所谓的轻质建材。这种特性使得钢材特别适合于各式各样的大跨度结构，众多的公共性建筑（体育场馆、展览馆、影剧院、集贸市场等）和某些生产性建筑（飞机装配车间、飞机库等）都属于这种结构。这是钢结构应用中最引人注目的领域。

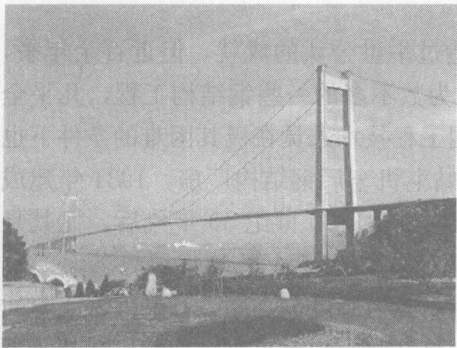


图 1.2 大跨度结构

3. 高耸结构 (图 1.3)

这类结构通常包含高层建筑和高耸构筑物。水平荷载的效应具有举足轻重的影响是其主要特征。钢材的轻质高强，使得高耸钢结构在减轻竖向自重荷载效应的同时，也可有效增强水平强度。这就是高层建筑（尤其是超高层建筑）经常采用全钢结构的原因。就人类对空间的占有欲和对高空的征服欲来看，这也许是钢结构应用最具挑战力的领域。

4. 轻型钢结构 (图 1.4)

如果说上述几类结构均是钢材在抵抗重大荷载效应方面的应用，那么在结构负载很小，减轻结构自重具有重要意义的情况下，采用钢结构通常也具有显著的效果。这就是内涵和外延都极其广泛的轻钢结构。以冷弯薄壁型钢为材料的构件和结构，由于采用了

考虑屈曲后强度利用（参见 1.6 节）的计算方法，其轻型化效果非常明显（在相同跨度和荷载条件下，冷弯薄壁型钢屋架的用钢量甚至可以小于钢筋混凝土屋架的用钢量）。同样由于考虑了屈曲后强度利用而设计的轻型门式刚架，以其轻便和施工快捷而迅猛发展。这是钢结构应用最活跃的领域。

除此之外，一些需要多次拆卸的结构也是钢结构的重要应用领域；地价昂贵的地段，由于钢结构占地面积小亦可能成为首选；在地基承载力差的场地，高度不大的多层建筑亦可能选择钢结构；甚至急迫的工期要求也可能促使采用钢结构方案；随着建筑物的智能化发展，要求敷设更多的电气管线，钢结构由于容易满足这些要求而具有明显的优势。

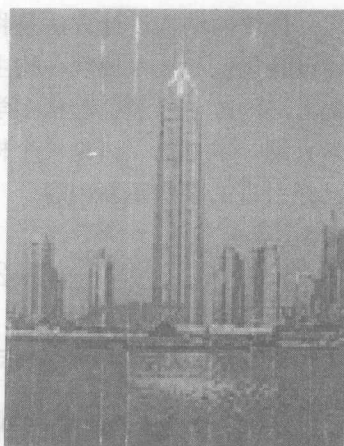


图 1.3 高层建筑



图 1.4 轻型钢结构

一般钢材易被腐蚀，这是钢结构的弱点。不过，在无侵蚀性化学介质的环境中服役，钢构件通过严格的除锈和周期性喷涂油漆，问题并不严重。随着多品种的耐候钢材的出现，钢结构的抗腐蚀性能会越来越好。虽然在高温条件下，钢材的力学性能会发生严重退化（参见 2.2 节），但钢材具有相当的耐热性能，在不超过 100°C 的辐射热环境中服役，一般无需做特别的防护。在可能遭受火灾的环境下服役的钢结构，或者一些与燃烧介质直接接触的构筑物（如冶炼炉），必须做防火设计。防火措施通常有两种，其一是采用耐火材料（如石膏板、蛭石板等）将钢构件与火源隔离，其二是在钢构件表面喷涂防火涂料。除了这些传统的钢结构防火措施外，一些具有耐火性能的钢材也陆续面市。

传统的结构设计方法是将结构分解为单个构件逐一进行设计计算，现行的大多数结构设计规范和技术规程，均主要论述单个构件承载力。随着计算技术的发展和普及，传统方法的改革已经引起很多学者的注意，一些颇具价值的方法已初见端倪。按照现行教学大纲，本书仍以讨论单个构件承载力为主要内容，只是在适当的章节提及现行规范中已经引进的某些革新内容。

1.2 作用（荷载）效应分析

1.2.1 概率极限状态设计法

现行《建筑结构可靠度设计统一标准》（GB 50068—2001）采用的概率极限状态设计法，是建立在建筑结构设计使用年限和安全等级的基础之上的。建筑结构设计使用年限分为表 1.1 所示的四个类别。

表 1.1 设计使用年限分类

类别	设计使用年限/年	示例
1	5	临时性结构
2	25	易于替换的结构构件
3	50	普通房屋和构筑物
4	100	纪念性建筑和特别重要的建筑结构

建筑结构设计的安全等级则分为表 1.2 所示的三级。

表 1.2 建筑结构设计的安全等级

安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要的房屋
二级	严重	一般的房屋
三级	不严重	次要的房屋

概率极限状态设计法的基本表达式为

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1.1)$$

式中， S ——作用（荷载）效应的设计值；

R ——抗力的设计值；

γ_0 ——结构重要性系数，依据设计使用年限和安全等级由表 1.3 取值，一般工业与民用建筑钢结构的安全等级应取为二级。

表 1.3 结构重要性系数 γ_0

安全等级或设计使用年限	γ_0
一级或设计使用年限 ≥ 100 年的结构构件	≥ 1.1
二级或设计使用年限 50 年的结构构件	≥ 1.0
三级或设计使用年限 5 年的结构构件	≥ 0.9
设计使用年限 25 年的结构构件	≥ 0.95

一般而言,与混凝土材料相比,钢材更接近于匀质各向同性材料,但并非理想的匀质各向同性材料,而是具有一些与生俱来的力学缺陷(参见2.2节)。钢结构的建造包含工厂加工与现场安装两个过程,即便是每个过程都严格按照《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001)进行了质量控制,从力学意义上讲,钢结构还是不可避免地存在初偏心、初弯曲、残余应力等几何缺陷和力学缺陷。钢结构设计必须计入力学缺陷和几何缺陷对抗力 R 的影响。这种计入实际缺陷的结构常称为非完善结构。钢结构设计理论就是研究非完善结构的承载力。

按承载力极限状态设计钢结构时,应考虑荷载效应的基本组合,必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合。按正常使用极限状态设计钢结构时,应考虑荷载效应的标准组合,对钢与混凝土组合梁,尚应考虑准永久组合。在这些荷载效应设计值的组合计算中,必须注意钢结构具有的特点。例如,相应于可变荷载效应控制的基本组合,式(1.1)中荷载效应的设计值 S 为

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1.2)$$

式中, S_{Gk} , γ_G ——永久荷载效应的标准值及其分项系数;

S_{Qik} , γ_{Qi} ——第 i 个可变荷载效应的标准值及其分项系数, $i=1, 2, \dots, n$ 。

如果按照上式作轻型屋面檩条的设计,则除了 γ_G 取1.2的情形外,由于檩条和屋面结构的轻质,风荷载的吸力作用会造成永久荷载对檩条的有利效应,因此还应当取 $\gamma_G=1.0$ 来考虑风吸力的这种作用,当然,檩条与屋盖构件的连接亦必须考虑之。

1.2.2 作用(荷载)效应分析方法

作用(荷载)效应标准值的计算,是将实际结构抽象为力学模型并选择恰当的结构分析方法来完成的。实际结构都是位于三维空间的。如果可以将实际结构抽象为一个二维结构力学模型来进行分析,则称这种结构为平面结构。结构能否抽象为平面结构,不仅和结构的几何构型有关,还和其受力特性有关,甚至可能涉及到其建造过程。一个几何构型为平面的广告牌,在风荷载作用下可能呈现复杂的空间变形。单层工业厂房(图1.5)在传统上常作为平面结构,无论从它的建造过程或受力特性看,将这种结构简

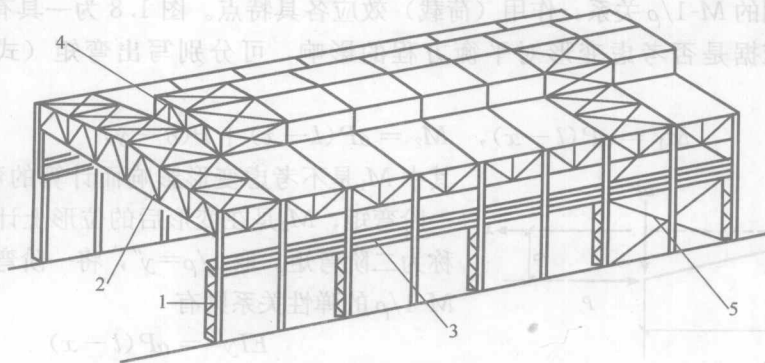


图1.5 单层厂房结构

1. 柱; 2. 屋架; 3. 吊车梁; 4. 天窗架; 5. 柱间支撑

化为平面门式刚（排）架都是可行的，当然，如果要考虑空间效应则另当别论。不能抽象为平面结构进行分析的结构称为空间结构。以众多杆件构成空间曲面为其特征的网络壳（图 1.6）就是典型的空间结构。必须指出，对于空间结构而言，除了其结构分析通常要比平面结构复杂外，将结构分割为构件的传统设计方法（尤其是涉及到稳定承载力的设计方法）一般不再适用 [参见《网壳结构技术规程》(JGJ61—2003)]。

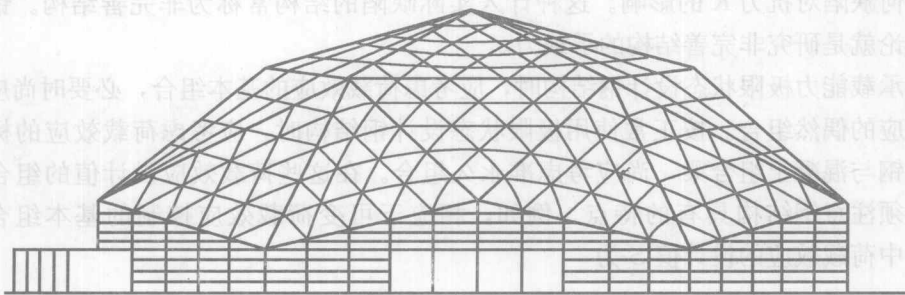


图 1.6 网壳结构

类似于应力-应变关系的简化，在作用（荷载）效应的基本分析中，弯矩（ M ）-曲率（ $1/\rho$ ）关系通常也有如图 1.7 所示的弹性、弹塑性和刚塑性三种简化关系，其中 E 、 I 和 M_p 分别代表构件的弹性模量、惯性矩和截面塑性极限弯矩（参见 5.2 节）。

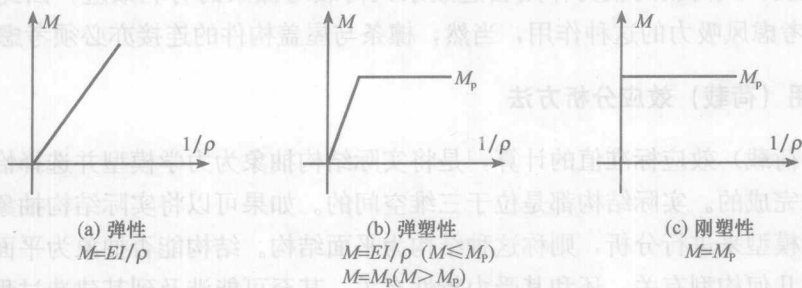
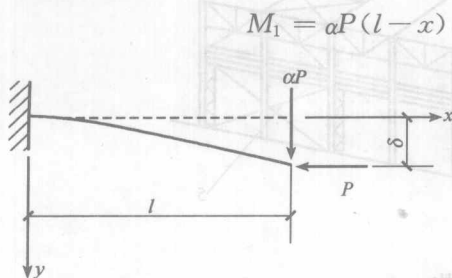


图 1.7 $M-1/\rho$ 关系

对于不同的 $M-1/\rho$ 关系，作用（荷载）效应各具特点。图 1.8 为一具有轴力 P 的悬臂构件，依据是否考虑变形对平衡方程的影响，可分别写出弯矩（式中 y 代表挠度）为



$$M_1 = \alpha P(l - x), \quad M_2 = \alpha P(l - x) + P(\delta - y)$$

其中 M_1 是不考虑变形影响而计算的弯矩，称为一阶弯矩； M_2 是在变形后的位形上计算弯矩的，称为二阶弯矩。取 $1/\rho = y''$ ，将一阶弯矩 M_1 代入 $M-1/\rho$ 的弹性关系则有

$$EIy'' = \alpha P(l - x)$$

注意边界条件 $y(0) = y'(0) = 0$ 和 $y(l) = \delta$ ，将

图 1.8 悬臂构件

上式积分，有

$$\delta = \frac{\alpha Pl^3}{3EI} \quad (1.3)$$

这是一阶弹性分析的结果。如果取二阶弯矩 M_2 代入 $M-1/\rho$ 的弹性关系, 则相应的结果为

$$EIy'' = \alpha P(l-x) + P(\delta-y)$$

$$\delta = \frac{\alpha Pl^3}{3EI} \frac{3(\tan kl - kl)}{(kl)^3} \quad (1.4)$$

其中 $k^2 = P/EI$, 不难看出

$$\lim_{kl \rightarrow \pi/2} \frac{\tan kl - kl}{(kl)^3} = \infty$$

且

$$P \rightarrow P_E = \frac{\pi^2 EI}{4l^2}$$

亦即 P 以临界荷载 P_E 为渐近线。式 (1.4) 是二阶弹性分析的结果。

在 $M-1/\rho$ 的刚塑性关系中, 引用一阶弯矩 M_1 和二阶弯矩 M_2 则分别得到一阶刚塑性分析的结果 (1.5) 和二阶刚塑性分析的结果 (1.6)

$$\alpha Pl = M_P, \quad P = M_P/(\alpha l) \quad (1.5)$$

$$\alpha Pl + P\delta = M_P, \quad P = M_P/(\alpha l + \delta) \quad (1.6)$$

经常以荷载-位移曲线的方式表达结构的作用(荷载)效应, 图 1.9 就是图 1.8 所示构件作用(荷载)效应的各种分析结果, 它是式 (1.3) ~ 式 (1.6) 表达的荷载 P 与位移 δ 的关系的几何表示。

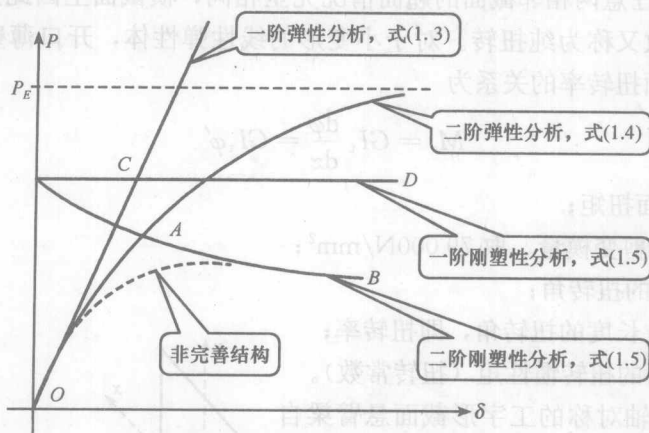


图 1.9 荷载-位移曲线

显然, 在图 1.9 中 OCD 曲线为一阶弹塑性分析的结果, OAB 曲线为二阶弹塑性分析的结果。由于缺陷的存在, 非完善结构的荷载-位移曲线将如图中的虚线所示。图 1.9 虽然是就图 1.8 所示构件作出的, 但它显示的各项曲线具有典型意义, 因此频繁出现在各种文献中。

按照钢结构设计规范 (GB50017—2003) (以下简称《钢结构设计规范》) 规范的要