



高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

Stability of Steel Structure

钢结构稳定性

· 研究生课程 ·

■ 韩庆华 赵秋红 芦 燕 编著
■ 刘锡良 任庆英 主审



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

钢结构稳定性

韩庆华 赵秋红 芦 燕 编著
刘锡良 任庆英 主审



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢结构稳定性/韩庆华,赵秋红,芦燕编著. —武汉:武汉大学出版社,2014.11

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

ISBN 978-7-307-14452-1

I. 钢… II. ①韩… ②赵… ③芦… III. 钢结构—结构稳定性—高等学校—教材
IV. TU391.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 230076 号

责任编辑:王亚明 孙 丽

责任校对:刘小娟

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉科源印刷设计有限公司

开本:880×1230 1/16 印张:18.25 字数:585 千字

版次:2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-14452-1

定价:38.00 元

主要编写及审稿人员简介



■ **韩庆华**，1971年生。教授，博士生导师，天津大学建筑工程学院土木工程系主任。现为中国钢结构协会理事、中国钢结构协会空间结构分会常务理事、天津市钢结构学会常务副理事长。

多年来一直从事钢结构基本理论及空间钢结构的的教学、科研及设计开发工作。主持国家自然科学基金项目3项，省部级项目5项，人才基金项目2项，重点工程委托项目30余项。授权发明专利2项，实用新型专利2项。编写著作1部，教材3部。参与编写规范、规程共4部。近年来，在国内外重要期刊上发表论文50余篇。获国家科技进步奖1项，省部级科技进步奖6项。2011年入选天津市131创新型人才培养工程第一层次，2010年入选教育部新世纪优秀人才支持计划，2009年获天津市第十届青年科技奖。



■ **赵秋红**，1975年生。教授，天津大学建筑工程学院院长助理。现为美国结构稳定研究会钢桥委员会副主席，美国钢铁学会钢桥专家组成员等。

多年来一直从事钢结构、组合结构及钢桥的教学和科研工作。主持国家、教育部、天津市及美国交通部等各类基金项目10余项。参与编写《矩形钢管混凝土结构技术规程》（CECS 159—2004）。在国外重要学术期刊上发表SCI检索论文13篇，EI检索论文1篇。2008年获美国橡树岭大学联盟Ralf E. Powe青年教授提升奖。2012年入选天津市首批青年千人计划，2013年入选教育部新世纪优秀人才支持计划。



■ **芦燕**，1986年生。工学博士，天津大学建筑工程学院土木工程系讲师。2012年6月，获天津大学建筑工程学院工学博士学位。主要从事钢结构及大跨度建筑结构领域的教学和科研工作。主持国家自然科学基金项目1项，省部级纵向项目1项。参与国家级及省部级纵向项目3项，企业委托项目7项。发表论文10余篇，其中SCI检索4篇，EI检索5篇，核心期刊1篇。



■ **刘锡良**，1928年生，教授。1951年毕业于津沽大学，1955年获清华大学钢结构方向硕士学位，1982年赴德国做高级访问学者1年。曾任天津大学博士生导师，钢结构研究室主任，兼任中国土木工程学会理事、中国钢结构协会空间结构分会副理事长等职。

1958年，参与了南京长江大桥的设计；1962年，在全国范围内率先针对双曲抛物面马鞍形悬索屋顶结构进行了系统研究，并成功应用于天津大学体育馆；1966年，首次研制成功焊接空心球节点网架并应用于天津市科学技术委员会礼堂。1979年，出版我国第一本网架专著《平板网架设计》，对推广网架结构起到了重大作用。指导开发3个空间结构设计软件，主持和设计、施工近千项工程。共著书10余部，发表论文近200篇。曾获得国家科学技术奖2项。



■ **任庆英**，1962年生，教授。1982年毕业于天津大学土木工程系建筑结构专业，现任中国建筑设计研究院总工程师兼任任庆英结构设计工作室主持人、《建筑结构》编委会副主任委员、中国建筑学会建筑结构分会理事等。主持或参与设计的有2008年北京奥运会国家体育场（鸟巢）、首都博物馆新馆、北京梅地亚中心、深圳京金融中心、海南国际会展中心、北京奥林匹克中心区瞭望塔、海南大厦、中国国际展览中心、南京青奥中心会议中心等诸多国际知名项目。2005年被批准为享受国家政府特殊津贴专家；2008年12月，被中华人民共和国住房和城乡建设部授予全国工程勘察设计大师称号。

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方 志 叶列平 何若全 沙爱民 范 峰 周铁军 魏庆朝
委 员:王 辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉
周 云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程 桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高 波
委 员:丁克伟 丁建国 马昆林 王 成 王 湛 王 媛 王 薇
王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒
王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方 俊
龙广成 申爱国 付 钢 付厚利 白晓红 冯 鹏 曲成平
吕 平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅
刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁 皑 许 伟 许程洁 许婷华
阮 波 杜 咏 李 波 李 斌 李东平 李远富 李炎锋
李耀庄 杨 杨 杨志勇 杨淑娟 吴 昊 吴 明 吴 轶
吴 涛 何亚伯 何旭辉 余 锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全
张 红 张 纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元
张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰
胡世阳 侯建国 姜清辉 娄 平 袁广林 桂国庆 贾连光
夏元友 夏军武 钱晓倩 高 飞 高 玮 郭东军 唐柏鉴
黄 华 黄声享 曹平周 康 明 阎奇武 董 军 蒋 刚
韩 峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾 珂 雷宏刚
廖 莎 廖海黎 缪宇宁 黎 冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王 睿 白立华 曲生伟 蔡 巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。

 本书基本数字教学资源及读者信息反馈表请登录 www.stmpress.cn 下载,欢迎您对本书提出宝贵意见。

丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有500余所大学开设土木工程专业,在校生达40余万人。

2010年6月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

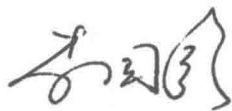
2011年9月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是为序。



2014年3月于同济大学四平路校区

前 言

近 30 年来,随着我国国民经济和基础设施建设的快速发展,钢结构被大量应用于工业、民用建筑和桥梁工程中,很多宏伟而新颖的钢结构建筑物已成为各地区的标志。现代钢结构的跨度和规模越来越大,结构体系和形式越来越复杂,同时采用了许多新型材料和施工技术。这为钢结构的发展创造了机遇,但同时也提出了挑战。

在钢结构不断发展的同时,工程事故时有发生。这些事故造成了巨大的生命、财产损失,产生了不良的社会影响。目前,针对大型钢结构工程事故的研究调查表明,导致事故发生的原因并不是钢材的质量问题,而是设计、施工和使用不当,且破坏形式表现为结构构件、板件的失稳破坏或者结构的失稳破坏。根据当前钢结构的发展趋势,高强优质钢材得到了广泛应用,钢结构构件越来越纤细,结构整体变得相对较柔。因此,钢结构的稳定问题变得尤为突出,稳定破坏成为大型钢结构破坏的主要原因。针对钢结构整体失稳的分析,需在常规设计之外进行必要的分析研究,因此深入理解和掌握结构整体稳定性的概念和分析方法是保证钢结构整体稳定性的基础。本书系统地讲解了钢结构稳定性的理论知识,列举了大量的工程实例和研究成果,有助于学生尽快理解和掌握钢结构稳定性的概念和设计理论。

本书共分为 9 章:第 1 章介绍了稳定问题的基本概念、类型及在钢结构中的应用;第 2 章阐述了稳定问题的各种理论计算方法及应用;第 3 章和第 4 章详细讲述了钢结构中构件和板件的稳定性分析理论和设计方法;第 5~9 章分别就目前应用最为广泛的几种钢结构体系的稳定性进行了讲解,包括不同结构体系的稳定性分析、评判标准和提高稳定性的措施等内容,涉及的结构体系包括多高层钢框架结构、钢拱结构、钢网壳结构、弦支结构和钢桥结构。

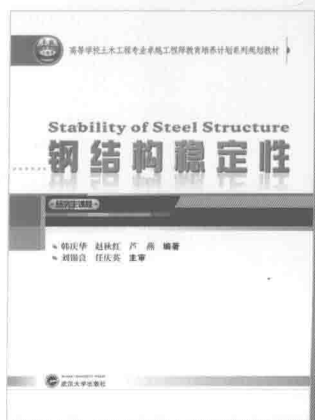
本书的具体编写分工如下:第 2、3、4、7 章及附录由韩庆华教授编写;第 1、9 章由赵秋红教授编写;第 5、6、8 章由芦燕讲师编写。研究生王力晨、王一泓、徐颖、郭琪、刘铭劼、刘斌及罗杰等参与了部分文字和图表的整理、绘制工作,全书由韩庆华教授统稿。本书在编写过程中,引用了大量国内外高等院校、科研机构和施工单位的文献资料,在此谨致谢意。

本书承蒙天津大学刘锡良教授和中国建筑设计研究院任庆英教授级高级工程师审阅,并提出了许多修改意见,在此一并致谢。

由于编著者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编著者

2014 年 7 月



Stability of Steel Structure 钢结构稳定性

内 容 简 介

本书为满足钢结构稳定性分析的工程应用而编写。全书共分9章：第1章绪论介绍了稳定问题的基本概念、类型及在钢结构中的应用；第2章介绍了稳定问题的分析方法；第3、4章分别论述了构件和板件的稳定性分析及其设计应用；第5~9章分别就目前应用最为广泛的几种钢结构体系（包括钢框架结构、钢拱结构、钢网壳结构、弦支结构和钢桥结构）的稳定性进行了论述，结合工程实例和研究成果给出了各自稳定性的分析和设计方法，以及提高稳定性的措施。

本书注重理论和实践相结合，系统介绍了稳定问题的基本概念和理论，结合大量的工程实例，详细阐述了不同钢结构体系稳定性的特点和分析方法，可作为土木工程及相关专业本科生、研究生教材，亦可供钢结构工程设计人员参考使用。

目 录

1 绪论	(2)	2.3 有限元法	(27)
1.1 稳定问题的基本概念	(1)	2.3.1 结构整体稳定临界点的计算	(27)
1.1.1 平衡与稳定	(1)	2.3.2 结构非线性屈曲平衡路径全过程跟踪的数值计算方法	(31)
1.1.2 稳定问题的研究对象	(2)	2.3.3 结构稳定性分析中对于初始缺陷的考虑	(36)
1.1.3 稳定问题的多样性	(2)	参考文献	(41)
1.1.4 结构的整体稳定性	(2)	3 构件的稳定性	(42)
1.2 稳定问题的类型	(2)	3.1 轴心受压构件的稳定性	(42)
1.2.1 钢结构的分岔失稳、极值点失稳、跃越失稳	(2)	3.1.1 轴心受压构件的弯曲失稳	(42)
1.2.2 钢结构的弹性失稳和弹塑性失稳	(4)	3.1.2 轴心受压构件的扭转失稳	(50)
1.2.3 钢结构的整体失稳和局部失稳	(4)	3.1.3 轴心受压构件的弯扭失稳	(58)
1.2.4 结构失稳的传播	(5)	3.1.4 轴心受压构件稳定理论在设计中的应用	(61)
1.3 钢材的性能与钢构件内截面的残余应力分布	(6)	3.2 受弯构件的稳定性	(64)
1.3.1 钢材的性能	(6)	3.2.1 受弯构件的侧扭失稳	(65)
1.3.2 钢构件内截面的残余应力分布	(7)	3.2.2 受弯构件的稳定理论在设计中的应用	(72)
1.4 稳定理论在钢结构设计中的应用	(8)	3.3 压弯构件的稳定性	(75)
1.4.1 稳定理论的发展及现状	(8)	3.3.1 压弯构件的平面内弯曲失稳	(76)
1.4.2 稳定问题的工程事故	(9)	3.3.2 压弯构件的平面外弯扭失稳	(82)
参考文献	(12)	3.3.3 压弯构件的稳定理论在设计中的应用	(89)
2 稳定问题的分析方法	(13)	参考文献	(91)
2.1 静力法	(13)	4 板件的稳定性	(92)
2.1.1 静力法的计算过程	(13)	4.1 采用小挠度理论时薄板的弹性曲面微分方程	(92)
2.1.2 理想轴心压杆的临界荷载	(13)	4.1.1 采用小挠度理论的基本假定	(93)
2.1.3 弹性支承轴心压杆的稳定计算	(14)	4.1.2 弹性曲面微分方程	(93)
2.2 能量法	(17)	4.1.3 单向均匀受压简支板的弹性失稳荷载	(95)
2.2.1 能量守恒原理	(17)	4.2 能量法计算板的弹性失稳荷载	(97)
2.2.2 势能驻值原理	(18)	4.2.1 板屈曲问题的总势能	(97)
2.2.3 瑞利-里兹法(R-R法)	(18)		
2.2.4 铁摩辛柯-里兹法(T-R法)	(19)		
2.2.5 伽辽金法	(21)		
2.2.6 逐步近似法和组合法	(22)		
2.2.7 结构整体稳定临界点的解析理论计算方法	(22)		

4.2.2 瑞利-里兹法	(98)	5.4 保证钢框架结构稳定性的措施	(149)
4.2.3 伽辽金法	(99)	5.4.1 保证地基基础的稳定性和承载力	(149)
4.3 不同面内荷载作用下板的弹性失稳 ..	(101)	5.4.2 提高钢框架结构的整体抗弯刚度	(149)
4.3.1 单向非均匀受压板的弹性失稳 ..	(101)	5.4.3 提高构件和节点的承载力	(150)
4.3.2 均匀受剪板的弹性失稳	(102)	5.4.4 减小施工误差	(150)
4.3.3 一个边缘受压四边简支板的临界应力	(103)	5.4.5 减小 $P-\Delta$ 效应的影响	(152)
4.4 薄板稳定理论在钢构件设计中的应用	(104)	参考文献	(153)
4.4.1 轴心受压构件中板件的局部稳定设计	(104)	6 钢拱结构的稳定性	(156)
4.4.2 受弯构件中板件的局部稳定设计	(105)	6.1 钢拱结构的分类及应用	(156)
4.4.3 压弯构件中板件的局部稳定设计	(110)	6.1.1 钢拱结构的分类	(156)
4.5 焊接工字钢梁腹板考虑屈曲后强度的计算	(113)	6.1.2 钢拱结构的应用	(157)
4.5.1 焊接工字钢梁抗剪承载力计算 ..	(113)	6.2 钢拱结构整体稳定性分析方法	(158)
4.5.2 焊接工字钢梁抗弯承载力计算 ..	(114)	6.3 钢拱结构的屈曲形式	(159)
4.5.3 弯矩和剪力共同作用下焊接工字钢梁承载力的计算	(115)	6.3.1 平面内屈曲	(159)
4.5.4 考虑腹板屈曲后强度的加劲肋设计	(116)	6.3.2 平面外屈曲	(160)
4.6 板的弹塑性屈曲	(117)	6.4 实腹式钢拱的稳定性能	(161)
4.6.1 板件弹塑性屈曲的基本假定 ..	(117)	6.4.1 纯压拱的弹性稳定	(161)
4.6.2 材料的应力-应变关系	(117)	6.4.2 纯压拱的弹塑性稳定	(165)
4.6.3 板件弹塑性屈曲的平衡方程和屈曲荷载	(118)	6.4.3 有弯矩拱的稳定性	(166)
4.6.4 板件弹塑性屈曲荷载的近似计算法	(119)	6.4.4 实腹式圆弧形拱在均布径向荷载作用下的平面外稳定	(167)
4.6.5 残余应力和初弯曲对板屈曲的影响	(120)	6.5 实腹式钢拱稳定性设计	(168)
参考文献	(123)	6.5.1 平面内整体稳定性设计	(168)
5 多高层钢框架结构的稳定性	(124)	6.5.2 平面外整体稳定性设计	(169)
5.1 国内外多高层钢结构的发展	(124)	6.6 钢管桁架拱结构的稳定性能	(169)
5.2 多高层钢框架结构的分类及特点 ..	(127)	6.6.1 钢管桁架拱结构的屈曲形式 ..	(169)
5.3 钢框架结构分析方法的发展、整体稳定性计算方法及现行规范推荐的分析法	(128)	6.6.2 钢管桁架拱结构的弹性稳定性 ..	(170)
5.3.1 钢框架结构分析方法的发展 ..	(128)	6.6.3 钢管桁架拱结构的弹塑性稳定性	(173)
5.3.2 钢框架结构整体稳定性计算方法	(130)	6.7 钢管桁架拱结构的稳定性设计	(176)
5.3.3 现行规范推荐的分析法	(146)	6.8 提高钢拱结构稳定性的措施	(177)
		6.8.1 提高钢拱结构平面内稳定性的措施	(177)
		6.8.2 提高钢拱结构平面外稳定性的措施	(178)
		参考文献	(178)
		7 网壳结构的稳定性	(180)
		7.1 网壳结构稳定性的特点及应用 ..	(180)
		7.1.1 网壳结构稳定性的特点	(180)
		7.1.2 网壳结构稳定性的应用	(182)

7.2 钢网壳结构的形态与整体稳定性的关系	(183)	8.2.4 提高平面弦支结构稳定性的措施	(222)
7.2.1 钢网壳结构的曲面形状与整体稳定性的关系	(183)	8.3 空间弦支结构的整体稳定性	(223)
7.2.2 钢网壳结构曲面扁率与整体稳定性的关系	(183)	8.3.1 分析方法	(223)
7.2.3 钢网壳结构网格体系与整体稳定性的关系	(185)	8.3.2 空间弦支结构的整体稳定性评判标准	(223)
7.3 钢网壳结构整体稳定性分析与评判标准	(186)	8.3.3 算例分析	(224)
7.3.1 钢网壳结构整体稳定性分析方法——连续的拟壳法	(186)	8.3.4 提高弦支穹顶结构稳定性的措施	(226)
7.3.2 钢网壳结构整体稳定性分析方法——离散化有限元法	(191)	参考文献	(229)
7.3.3 钢网壳结构整体稳定性的评判标准	(193)	9 钢桥的稳定性	(230)
7.3.4 网壳结构整体稳定性分析的内容与步骤	(197)	9.1 概述	(230)
7.4 工程实例分析	(197)	9.1.1 钢桥的发展历史	(230)
7.4.1 单层球面浅网壳的整体稳定性	(197)	9.1.2 钢桥的结构形式及其受力特点	(234)
7.4.2 大矢跨比单层球面网壳结构的整体稳定性	(200)	9.1.3 钢桥的材料	(237)
7.4.3 单层柱面网壳结构的整体稳定性	(202)	9.1.4 钢桥失稳工程实例分析	(237)
7.5 影响网壳结构整体稳定性的主要因素及提高网壳结构整体稳定性的措施	(207)	9.2 钢桥的稳定性分析	(239)
7.5.1 影响网壳结构整体稳定性的主要因素	(207)	9.2.1 钢桥稳定问题的分类和基本计算方程	(239)
7.5.2 提高网壳结构整体稳定性的措施	(209)	9.2.2 钢桥构件稳定的设计方法	(240)
参考文献	(209)	9.3 不同形式钢桥结构的稳定性	(243)
8 弦支结构的稳定性	(211)	9.3.1 拱桥的稳定性	(243)
8.1 弦支结构的分类和工程应用	(211)	9.3.2 斜拉桥的稳定性	(244)
8.1.1 弦支结构的分类	(211)	9.3.3 悬索桥的稳定性	(247)
8.1.2 弦支结构的工程应用	(215)	9.4 钢桥施工过程中的稳定性	(252)
8.2 平面弦支结构的整体稳定性	(218)	9.4.1 施工阶段的稳定安全系数	(252)
8.2.1 概述	(218)	9.4.2 钢桥施工过程及稳定性分析	(252)
8.2.2 平面弦支结构的构件稳定性分析	(218)	9.4.3 钢桥施工过程中稳定性的影响因素	(254)
8.2.3 平面弦支结构的整体稳定性分析	(220)	9.5 提高钢桥稳定性的措施	(255)
		参考文献	(256)
		附录	(258)
		附录 1 轴心受压构件的稳定系数	(258)
		附录 2 无侧移框架柱的计算长度系数 μ	(261)
		附录 3 有侧移框架柱的计算长度系数 μ	(262)
		附录 4 实腹截面钢拱平面内稳定系数	(263)
		附录 5 圆弧形两铰钢管桁架拱的平面内稳定系数	(275)
		附录 6 轴心受压构件的纵向弯曲系数	(280)

1 绪 论

稳定性问题是钢结构的一个突出问题,也是钢结构设计的重要组成部分。在各类钢结构的分析和设计中,都会遇到稳定性问题。钢结构稳定设计需进行合理的选材、正确的内力分析、完善的稳定验算和可靠度保证等。正确理解和应用钢结构稳定性的基本概念、研究对象、稳定类型以及分析方法等是进行钢结构稳定设计的基础。

1.1 稳定问题的基本概念 >>>

1.1.1 平衡与稳定

结构稳定理论中的平衡概念与物理学中的稳定平衡、不稳定平衡和随遇平衡三种状态具有相同的内涵。材料力学和结构力学主要研究结构处于平衡状态(一般是弹性阶段)时的应力、内力和相应变形之间的关系。平衡的性质就是指结构的平衡状态能否长期保持。平衡具有稳定和不稳定两种不同的性质。如果处于平衡位置的结构或者构件在外界的作用下偏离其原来的平衡位置,当外界作用撤除后,结构或者构件能自动回复到原来的平衡位置,则称初始平衡状态为稳定平衡或平衡稳定状态[图 1-1(a)];当外界作用撤除后,结构或构件不能回复到原来的初始平衡位置,则称初始平衡状态为不稳定平衡状态[图 1-1(b)]。维持在这两种状态之间的平衡叫作随遇平衡状态[图 1-1(c)]。结构或构件由于具有不稳定性,从初始平衡状态过渡到另一种位置或者状态时,出现了不能维持原有的变形或者受力能力的现象,称为屈曲或者失稳。稳定问题就是研究结构或构件的状态是否稳定的问题。

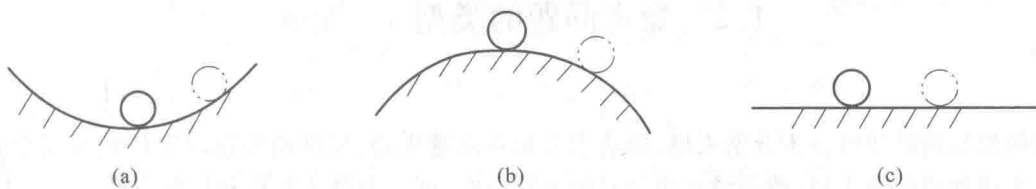


图 1-1 平衡状态的分类

(a) 稳定平衡状态; (b) 不稳定平衡状态; (c) 随遇平衡状态

稳定问题是要找出外界作用与结构内部抵抗力之间的不稳定平衡状态,即变形开始急剧增长的状态,所以稳定问题是一个变形问题。

稳定问题也是一个刚度问题。要理解稳定是一个刚度问题,就必须明确强度、刚度和失稳的概念。强度表示结构中的材料或截面能够承受的最大应力或最大内力,刚度表示结构抵抗变形的能力,失稳表示结构不能够再以原来的平衡形式继续承受附加荷载。在临界状态,如果构件上的荷载有微小的增加,则平衡的性质就会发生转变——失稳,甚至平衡的形状都会发生变化——屈曲。对于一个超静定结构,如果某个截面处形成塑性铰,则结构还有继续承受附加荷载的能力;直至结构中形成足够多的塑性铰,结构变成了构件,结构达到了强度极限状态,此时结构或构件的刚度为 0。失稳也表现了结构或构件的极限状态,即体现出了结构不能够再继续承受荷载、抵抗进一步变形的能力,此时其刚度为 0,所以稳定问题也是一个刚度问题。

1.1.2 稳定问题的研究对象

在经典线弹性分析中,常假设结构或构件的变形非常微小,甚至可以忽略不计,所以平衡方程按变形前的几何状态建立,结构的荷载-位移关系为线性关系。由于失稳体现了结构或构件的几何形状发生的明显改变,故在进行结构分析时必须考虑变形对结构内力的影响,平衡方程必须按变形后的位置建立,即考虑二阶效应。这时结构的荷载-位移关系为非线性关系,因此结构或构件在屈曲前和屈曲后都必须采用非线性分析的方法,这是稳定分析与结构线弹性分析的最大区别。可以从非线性的荷载-位移曲线中得到完整的结构的稳定性概念。曲线上的每一个点都代表相应的平衡状态,每一个点都满足平衡方程、协调方程和本构方程。除此之外,还应该注意计算简图要与实际构造相符合。只有这样,才能使稳定分析理论与实际保持一致,保证分析正确无误。

1.1.3 稳定问题的多样性

钢结构的失稳在形式上具有多样化的特点。例如,对于轴心受压构件,常见的失稳形式是弯曲失稳,但这不是唯一的失稳形式,还可能发生扭转失稳和弯扭失稳;压弯构件存在弯矩作用平面内的弯曲失稳和在弯矩作用平面外的弯扭失稳;刚架表现出无侧移的对称失稳和有侧移的反对称失稳;拱结构表现出对称形式的失稳和反对称形式的失稳;薄板有受压失稳和剪切失稳。失稳还可表现为局部失稳和整体失稳等。这些都是稳定问题多样性的表现。

1.1.4 结构的整体稳定性

结构是由各个构件组成的一个受力整体。当结构中的一个构件或者多个构件发生失稳时,必然会影响和它连接的其他构件。因此,对于构件的稳定性,不能就某一个构件进行孤立的分析,而应当考虑其他构件对它的约束作用。这种约束作用要从结构的整体分析中确定,这就是结构稳定的整体性或者结构的整体稳定性。结构的整体稳定性在钢结构的稳定分析中表现得十分明显。

结构的整体稳定性不仅表现为构件之间的相互约束,也表现为围护结构对承重结构的约束作用,只是这种约束作用在目前设计中常常被忽略。结构的整体稳定性要求稳定分析应该从整体结构着眼。

1.2 稳定问题的类型 >>>

钢结构的失稳按性质可分为分岔失稳、极值点失稳和跃越失稳;按结构失稳时构件是否发生塑性变形,可分为弹性失稳和弹塑性失稳;按钢结构失稳时的变形范围,可分为整体失稳和局部失稳。

1.2.1 钢结构的分岔失稳、极值点失稳、跃越失稳

1.2.1.1 分岔失稳

分岔失稳是指当荷载达到某一值时原有的平衡形式开始破坏,出现了与原平衡形式有本质区别的新平衡形式,即结构或构件的变形产生了根本的突然性变化,所以也称之为第一类稳定。分岔失稳分为稳定的分岔失稳和不稳定的分岔失稳。

如图 1-2(a)所示,当压力 $N < N_{cr}$ 时,构件变形处于垂直直线形式的平衡状态,称为原始平衡状态。这时,荷载-变形曲线可用 OA 表示。如果构件受到轻微的横向干扰而偏离原始平衡位置,则当干扰消除后构件将会回到原来的直线状态。可见,此时的原始平衡形式是唯一的稳定平衡形式。当 $N = N_{cr}$ 时,原始平衡形式不再唯一,压杆的平衡形式既可以是直线形式的,也可以是曲线形式的,此时的荷载-变形曲线可用图 1-2(a)中的 AB 曲线表示。

如图 1-2(a)所示,构件屈曲后,荷载-位移曲线是 AB 或 AB' 。这种平衡状态是稳定的,称为稳定的分岔失稳。从设计角度考虑,这类构件具有屈曲后强度,屈曲破坏是有预兆的延性破坏。不过大挠度理论分析表明,构件屈曲后,荷载的增量非常小而挠度的增量却很大,构件因有弯曲变形而产生弯矩。在压力和弯矩的共同作用下,中央截面边缘纤维先开始屈服,随着塑性的发展,构件很快就达到极限状态,所以轴心受压构件屈曲以后的强度不能被利用。实际的轴心受压构件并非是直的,它在受力之前可能存在微小的弯曲变形。这种初始缺陷使得其极限承载力降低,平衡路径如图 1-2(a)中虚线所示。薄板的屈曲形式与轴心受压构件相似。但是,对于具有稳定分岔失稳性质的构件来说,初始缺陷影响较小;对于薄板,即使有初始缺陷的影响,其极限承载力仍可能高于屈曲荷载。

结构或构件发生分岔失稳后,如只能在远比临界荷载低的条件下维持平衡状态,则称此类稳定为不稳定的分岔失稳,也称有限干扰屈曲,如图 1-2(b)所示。这类结构一旦屈曲,其刚度迅速下降且产生很大的变形,没有屈曲后强度,不具有承担大于屈曲荷载的能力。初始缺陷对这类结构的影响很大,使实际极限荷载远小于理论屈曲荷载。承受均匀压力圆柱壳的失稳、大矢跨比高拱的失稳和薄壁方管压杆的失稳等均属此类失稳。

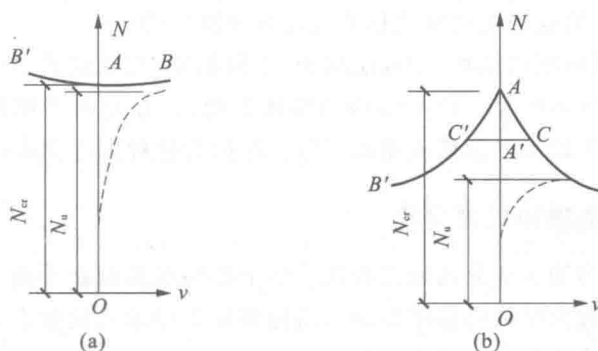


图 1-2 分岔失稳荷载-变形曲线

(a) 稳定的分岔失稳; (b) 不稳定的分岔失稳

1.2.1.2 极值点失稳

极值点失稳是指结构的弯曲变形在极值点后将大大发展,而不出现新的平衡形式,即结构的平衡形式不出现分岔现象。其失稳过程的荷载-变形曲线如图 1-3 所示。随着荷载的增加,变形随之增长,形成曲线的上升段 OAB ,这时结构处于稳定平衡状态。变形发展至 A 点时构件中点截面的边缘纤维开始屈服;当荷载继续增加时,由于塑性向内扩展,弯曲变形加快,出现了下降段 BC ,此时构件处于不稳定平衡状态。曲线的最高点 B 标志着此偏心受压构件在弯矩作用平面内达到极限状态,构件的抵抗力开始小于外力作用,并开始丧失整体稳定性。最高点 B 为结构承载力的极限点,对应的荷载 N_u 为构件的极限荷载。极值点失稳是十分普遍的,如双向受弯构件和双向弯曲压弯构件发生弹塑性弯扭失稳都属于极值点失稳。

1.2.1.3 跃越失稳

如图 1-4 所示,两端铰接的平坦拱结构在均布荷载作用下产生挠度。其荷载-挠度曲线有稳定的上升段,但是到达曲线的最高点时会突然跳跃到一个具有很大变形的点,即由向上拱起的位置突然跳到下垂的位置,与 A 点对应的荷载 q_{cr} 为拱的临界荷载。下降段 AB 不稳定, BC 段虽然稳定上升,但是由于结构已经被破坏而不能继续承受力的作用。这种结构由一个平衡位形突然跳到另一个非临近平衡位形的失稳,称为跃越失稳。跃越失稳既无平衡分岔点,又无极值点,但与不稳定的分岔失稳有相似之处,即都是在丧失稳定平衡后经历了一段不稳定平衡,然后达到另一个稳定平衡状态。对于带有缓坡的有侧移大跨度门式刚架,当刚架横梁的刚度很小而侧移刚度很大时,有可能发生跃越失稳。

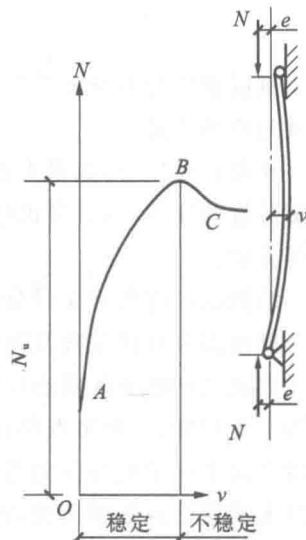


图 1-3 极值点失稳

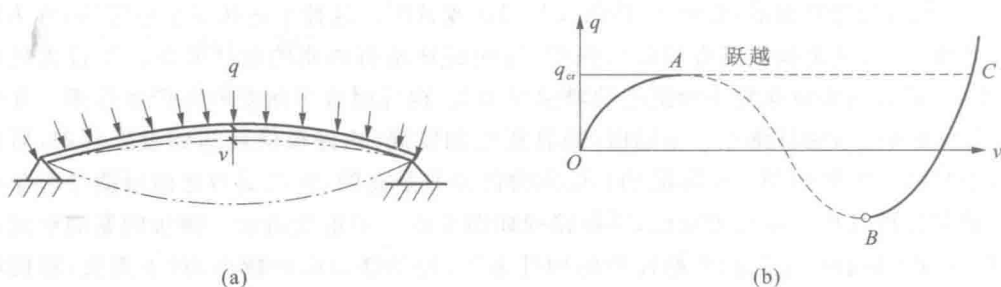


图 1-4 跃越失稳

(a)平坦拱的失稳;(b)荷载-挠度曲线

1.2.2 钢结构的弹性失稳和弹塑性失稳

对于整体刚度相对较小或较柔的结构,如单层网壳、拱支网壳、张弦梁、弦支穹顶等结构,在荷载作用下变形明显,几何非线性特征很强,具有显著的大位移特征。这类结构整体失稳时,结构构件往往仍处于弹性变形阶段而未出现屈服。结构的这种失稳模式称为大位移弹性失稳。

对于整体刚度相对较大或较刚的结构,如双层网壳、空间桁架、树状结构、巨型拱等结构,在荷载作用下相对变形较小,几何非线性特征不明显。这类结构的整体失稳,往往是由于结构中的部分构件出现屈服后使结构发生内力重分布,且产生较大的位移或变形所致。结构的这种失稳模式称为大位移弹塑性失稳。

1.2.3 钢结构的整体失稳和局部失稳

在荷载作用下,如果钢结构的大部分区域或者几乎整个结构偏离初始平衡位置而发生大的几何变形或变位,则这样的屈曲失稳现象称为结构的整体失稳。结构整体失稳的几何模态通常表现为结构大面积凹陷或凸起变形,或者出现波浪状或条状起伏变形,如图 1-5 所示。

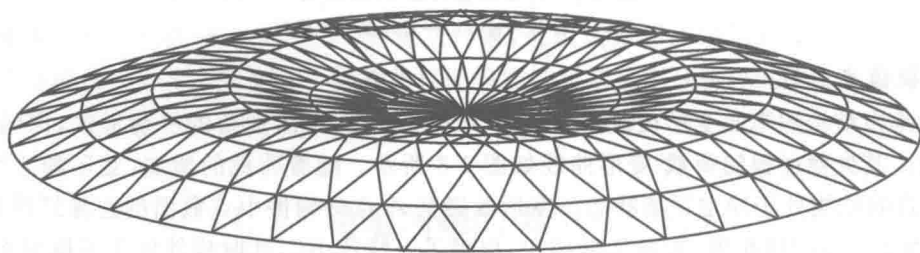


图 1-5 钢结构的整体失稳现象

刚度整体分布比较均匀或没有明显的薄弱区域,同时没有过大的局部或集中荷载结构的失稳形式通常表现为整体失稳。

在荷载作用下,如果失稳变形仅限于结构的某个或某些局部区域,而其他区域几乎未发生偏离其初始平衡位置的变形,也就是说结构的几何外形总体上未发生明显的变化,则这样的屈曲失稳现象称为结构的局部失稳。

结构的局部失稳又可分为局部杆件失稳和局部节点失稳(图 1-6)。局部杆件失稳表现为结构局部区域的个别或部分杆件偏离其初始平衡状态位形[图 1-6(a)],局部节点失稳表现为结构局部区域的个别或部分节点偏离其初始平衡状态位形[图 1-6(b)]。节点偏离其初始平衡状态位形的形式有两种:一是节点偏离其初始平衡位置;二是节点仍在其初始平衡位置,但节点出现绕某条自身轴的转动变形,这种转动变形可能会造成连接于该节点杆件的弯曲变形。如果结构整体刚度分布不均匀,存在明显的薄弱区域,或者在结构上有过大的局部或集中荷载,则这种结构易发生局部失稳。

结构的整体稳定性与局部稳定性有着密切联系,但也有本质区别。若结构发生整体失稳,则结构开始丧失承载能力;若结构仅发生局部失稳,并不意味着结构此时开始丧失承载能力。发生局部失稳的结构是

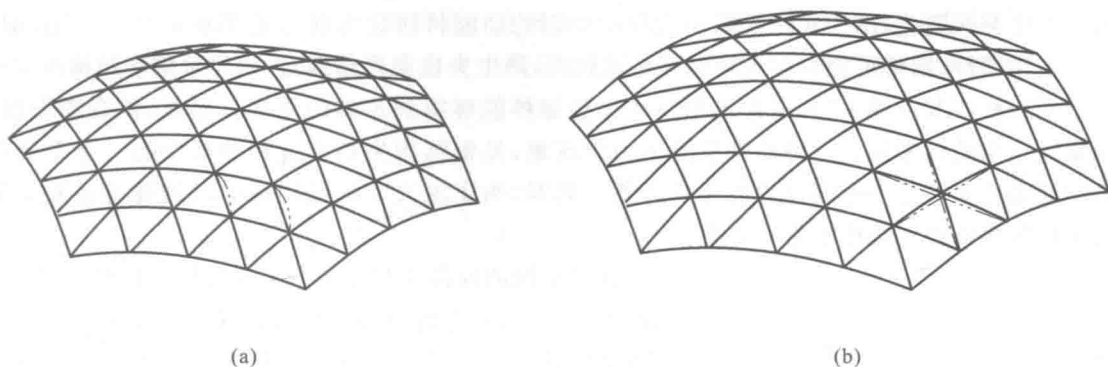


图 1-6 结构的局部失稳现象
(a)局部杆件失稳;(b)局部节点失稳

否可继续承载或是否有屈曲后承载能力,与局部失稳的性质直接相关,需要通过局部失稳的性质、发展或传播趋势进行判定。

1.2.4 结构失稳的传播

结构失稳是一个处于高位能的结构随着能量的释放由平衡临界状态向低位能稳定平衡状态运动的过程。当结构的局部构件或节点失稳时,失稳构件的应力将急剧下降,与其相邻的构件必然要承担本该由失稳构件承担的荷载,从而使结构内力发生重分布。这种由于屈曲失稳构件的卸载而使在结构中产生的内力重分布过程以及节点的失稳变形(跳跃)过程均可能产生较强的动力效应,且可能导致结构中失稳变形的进一步扩散,即失稳变形幅值增大和变形区域扩大,以致引起大部分或整个结构的失稳变形甚至失效、破坏。这种失稳变形扩散的现象称为失稳传播。

结构从临界状态的稳定平衡过渡到另一种新的平衡状态,或结构的失稳变形从局部扩散到整体,经历了一个不稳定平衡的运动过程,且通常经历的时间是短暂的,因而结构的失稳传播是一个动态过程,进行失稳传播分析时必须考虑传播过程中的动力效应。

由于屈曲失稳构件的失效或节点的失稳变形导致结构产生内力重分布后,若相邻构件能够承担重分布后的内力,则结构变形将不再发展或传播,结构体系仍然是稳定的,否则结构变形将进一步发展或传播,结构体系将是不稳定的。

结构中的杆件或节点发生局部失稳之后,通常有以下三种可能的力学现象:

- ① 局部失稳的同时引起结构整体失稳的现象[图 1-7(a)];
- ② 伴有动态跳跃的局部失稳现象[图 1-7(b)];
- ③ 没有动态跳跃的局部失稳现象[图 1-7(c)]。

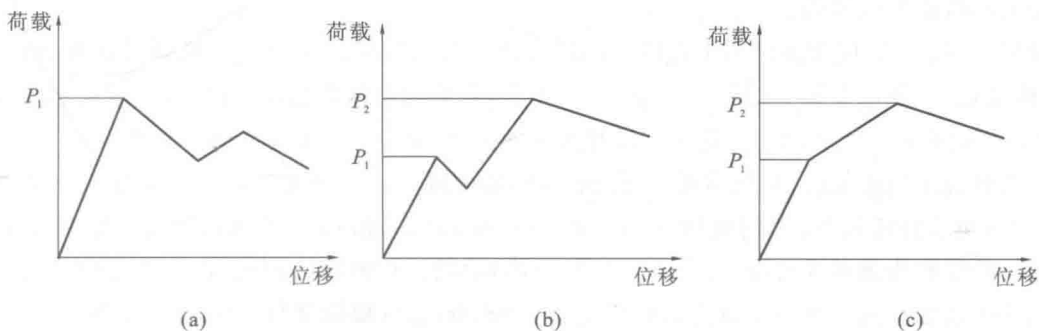


图 1-7 结构失稳的力学现象

(a)局部失稳的同时引起整体失稳;(b)伴有动态跳跃的局部失稳;(c)没有动态跳跃的局部失稳