
Working Office Recommendation
Ministry of Education

Stability of Steel Structures Theory and Design

(3rd Edition)

Chen Ji

Science Press

Beijing

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐

钢结构稳定理论与设计

(第三版)

陈 骥 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了钢结构中的轴心受压、受弯和压弯构件、刚架与薄板的弹性和弹塑性稳定理论,考虑了构件的几何缺陷和截面的残余应力分布对稳定性能的影响,结合我国新修订的钢结构设计规范 GB 50017-2003 和冷弯薄壁型钢结构技术规范 GB 50018-2002 中有关钢结构稳定设计的内容,介绍了应用弹性和弹塑性稳定理论解决钢结构设计中稳定承载力的计算方法;系统地介绍了经新修订的美国国家标准钢结构规范 ANSI/AISC 360-05 LRFD 和北美冷弯薄壁型钢结构设计规范 NAS AISI 2001 关于钢结构稳定设计的理论依据和计算方法,同时还介绍了日本钢结构设计指针 AIJ 1998 中有关稳定设计的特点。本书各章均编写了较多例题和习题,再版时又补充了多种类型算例,这些都将有助于读者加深对基本理论的理解。

本书可作为工业与民用建筑工程、土建结构工程和工程力学专业的研究生教学用书,也可供有关教学、科研、设计和施工的科技人员参考。

图书在版编目()数据

钢结构稳定理论与设计/陈骥编著. —3 版. —北京:科学出版社,2006
ISBN 7-03-016596-9

I. 钢… II. 陈… III. ①钢结构-结构稳定性 ②钢结构-结构设计
IV. TU 391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 146082 号

责任编辑:彭明兰/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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2003 年 9 月第 二 版 印张:39 1/2

2006 年 1 月第 三 版 字数:877 000

2006 年 1 月第三次印刷 印数:10 001—13 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

(Third Edition)

The first and second editions of the text-book had been published at 2001 and 2003. The master research students and structural designers appreciate this book comprehensively. Before third edition, some statements and errors in this book must be revised and emended. These contents are as follows.

1. According to Chinese Code for Design of Steel Structures GB 50017-2003 and Technical Code of Design of Cold-Formed Thin-Walled Steel Members GB 50018-2002, some statements are revised, such as in GB 50017-2003 all elastic, elastic-plastic and plastic web buckling conditions of beams combined flexural bending, shearing force and local compression are considered but not only one elastic web buckling condition is considered.

2. According to American National Standard Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-05 LRFD 2005, the stability design method about axial compression members, beams, plate girders and beam-columns are changed from AISC LRFD 1999.

3. Some errors in examples must be emended, such as in Example 8.5 of Chapter 8, the flange thickness 16mm is used, but 8mm is used in previous text-books.

4. Some figures not in standardization will be reformed.

5. It is necessary to rearrange the page numbers in index.

Author hopes the revised book is more helpful for readers. This text-book used for teaching purpose also is emphasized on the basis of the fundamental principles and theory of steel structural stability, those are elastic and elastic-plastic stability theory of axial compression members, flexural members, beam-columns, unbraced frames and thin plates.

Readers of the third edition are urged to communicate with the author regarding all aspects of this look, particularly on identification of errors and suggestions for improvement.

Chen Ji

Professor of Structural Engineering

School of Civil Engineering

Xi'an University of Architecture & Technology

Xi'an China

(Second Edition)

This book is recommended by Education Ministry Working Office as a graduate student textbook. Many readers appreciate the first edition of this book comprehensively. The research advancement has been recently implemented on the steel structural stability theory and design which selected in this second edition. These contents are as follows.

1. In-plane buckling theory and design of unbraced tapered portal frames.
2. Overall in-plane buckling of single-story multi-bay pitched-roof frames——side-sway buckling and snap-through buckling.
3. Overall design method for in-plane stability of frames—— advanced analysis method.
4. Stability design of flexural members under combined bending and torsion.
5. Theoretical analysis and design method of single angle under axial compression or bending moment.
6. Design flow charts on stability capacities of centrally compressed members, beams and slender plate girders.
7. New derivation of total flexural torsional potential energy of beams and beam-columns.
8. Requirements in design earthquake—— limiting width thickness ratios for compression plate elements.
9. Interactive buckling of plate elements, section distortional buckling and overall flexural buckling or flexural-torsional buckling of an axial compression member or beam and their interactive buckling design. New design method will remove the conventional effective section design method and adopt the full section direct strength design method.
10. Behavior of beam-to-column connections and stability design of semi-rigid frames.

Besides the mentioned above, flexural-torsional buckling of open thin-walled axial compression members with battens by energy method as well as obsolete expressions of flexural-torsional equivalent slenderness ratios of axial compression member and beam-column with mono-symmetric section are rejected.

In this book, the stability design methods use Chinese GB 50017-2003 Code for Design of Steel Structures and GB 50018-2002 Technical Code of Design of Cold-formed Thin-walled Steel Structures, American AISC LRFD 1999 Specification for Structural

Steel Buildings and AISI 1996 Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members, Japanese AIJ 1998 Recommendation for Limit State Design of Steel Structures, British Standard Structural Use of Steelwork in Building BS 5950 2000 Part 1 Code of Practice for Design-rolled and Welded Sections and BS 5950 1998 Part 5 Code of Practice for Design of Cold Formed Thin Gauge Sections. This book may be used for teaching purpose as a graduate student textbook emphasizing on the basis of the fundamental principles and theory of steel structural stability, those are elastic and elastic-plastic stability theory of centrally compressed members, flexural members, beam-columns, unbraced frames and thin plates. The master research students may obtain the new information of stability theory and design from this textbook. It may also provide a fresh reference book for teachers, researchers, designers and constructional engineers.

Readers of the second edition are urged to communicate with the author regarding all aspects of this book, particularly on identification of errors and suggestions for improvement.

Chen Ji

Professor of Structural Engineering

School of Civil Engineering

Xi'an University of Architecture & Technology

Xi'an China

第三版前言

本书第一版和第二版,相继于 2001 和 2003 年出版,深受广大结构工程专业研究生和工程技术人员的欢迎。这次修订针对书中存在的问题做了若干修订和改正,主要内容包括:

(1) 根据已经公布的钢结构设计规范 GB 50017-2003 和冷弯薄壁型钢结构技术规范 GB 50018-2002 对书中稳定设计的有关部分做了修正。如在阐述弯曲应力、剪应力和局部压应力共同作用下梁腹板时计及了弹性、弹塑性和塑性三种屈曲条件,其内容与 GB 50017 早先提供的征求意见稿中只涉及弹性屈曲一种条件的计算方法有较大差别。

(2) 根据最新修订的美国国家标准钢结构规范 ANSI/AISC 360-05 LRFD 2005 对稳定设计中的有关部分,即主要是涉及轴心受压构件的强度折减系数 ϕ 值的计算方法和受弯构件弯扭屈曲承载力的计算方法以及与此有关的压弯构件的计算做了修改。

(3) 根据相关规范,修正了部分用表和例题中的计算错误,如第八章中的例题 8.5。

这本书的课堂教学仍以轴心受压、受弯、压弯构件、有侧移刚架和板的弹性与弹塑性稳定作为基本理论部分进行教学。作者希望经过这次修订后,更有助于读者阅读。本版可能还存在不足之处,恳请读者指正。

陈 骥

2005 年 7 月于西安建筑科技大学

第二版前言

本书为教育部研究生工作办公室推荐的研究生教学用书。第一版问世后,深受广大读者欢迎。现为了适应学科的发展,对第一版进行了全面修订。新版的内容充实了国内外钢结构稳定理论与设计的研究成果,主要包括:

(1) 变截面刚架平面屈曲的理论和设计。

(2) 斜梁加腋的单层多跨山形门式刚架的两种平面屈曲——侧移屈曲和跃越屈曲的设计准则。

(3) 多层多跨刚架平面稳定的整体设计法,统称高等分析法(Advanced Analysis Method)。

(4) 轴心受压和受弯单角钢弯扭屈曲的理论分析和设计方法。

(5) 受弯构件在弯矩和扭矩共同作用下的稳定设计。

(6) 轴心受压构件、普通受弯构件的稳定承载力和薄腹梁截面承载力的设计流程。

(7) 受弯和压弯构件弯扭屈曲总势能新的表达式推导。

(8) 抗震结构中截面的设计要求。

(9) 冷弯薄壁型钢结构轴心受压和受弯构件中板件的相关局部屈曲、截面的畸变屈曲和构件整体的弯曲或弯扭屈曲以及它们之间的相关屈曲设计,新的设计方法将摒弃传统的有效截面法,采用全截面的直接强度法。

(10) 半刚性连接刚架的连接特性和稳定设计。

此外,删减了用能量法求解带缀板的开口薄壁轴心受压构件的弯扭屈曲荷载,剔除了单轴对称截面轴心受压和压弯构件中确定弯扭屈曲换算长细比的一种烦琐的计算方法。

本书中涉及的稳定设计方法采用了我国新修订的钢结构设计规范 GB50017-2003、冷弯薄壁型钢结构技术规范 GB50018-2002,美国钢结构设计规范 AISC LRFD 1999、AISI 1996,日本钢结构设计指针 AIJ 1998,并参考了英国标准 BS 5950 2000 第一部分和 BS 5950 1998 第五部分。作者希望经过修订后的这本研究生教学用书仍以轴心受压、受弯和压弯构件,有侧移刚架以及板件的弹性与弹塑性稳定的基本理论部分作为课堂教学的重点,研究生可根据不同学习和研究阶段的要求从书中获得稳定理论与设计的新知识。本书为从事钢结构教学、研究、设计和施工的工程技术人员提供了更丰富的参考资料。本版可能存在谬误和欠妥之处,请读者指正。

陈 骥

2003年7月于西安建筑科技大学

第一版序

结构稳定理论就其性质而言属于结构力学的一个分支,但究其发展过程,则与金属结构工程的发展息息相关。在1936年出版的经典性著作《弹性稳定理论》一书的序言中, Timoshenko, S. P. 曾经指出:“钢和高强度合金在现代工程结构中的运用,尤其是用于桥梁、船舶和飞机,已使弹性稳定成为极重要的问题。”虽然时隔半个多世纪,但这句反映稳定理论和结构工程之间密切关系的话并没有过时,不过房屋结构已和桥梁、船舶和飞机并驾齐驱,而弹性稳定则已扩展到非弹性稳定。建筑结构所用的钢材是弹塑性材料,焊接已经成为钢结构的主要连接手段,致使残余应力成为影响钢构件稳定性能的不可忽视的因素,因此,钢结构的稳定问题有其不同于轻金属结构的特点。

陈骥教授编写的这本《钢结构稳定理论与设计》,体现了稳定理论和钢结构设计的紧密结合。本书在理论方面反映了当前学科发展的水平。近年来,稳定理论的研究已经从完善的弹性杆的临界荷载的分析扩展到有缺陷的、非弹性杆的稳定性和屈曲后性能的研究。本书在第一章的一开始就指出分岔屈曲有稳定的与不稳定的之别,并通过一系列计算模型加以分析论证,揭示出不同模型屈曲后的不同行径(包括几何缺陷的影响),使读者眼界开阔,在全面论述理论知识的同时,又注意把理论用于分析实际构件。第一章对构件进入塑性后的性能(包括强化阶段和抗剪的性能)和残余应力分布都做了充分介绍,为把稳定分析扩展到非弹性范围奠定了基础。书中对各类构件和板件的弹塑性稳定分析,都不只是简单地用应力超过钢材比例极限后的切线模量方法,而是对残余应力的效应做出具体考察,这在同类的其他书中还不多见。通常分析框架稳定时,都只限于作用在柱顶上的荷载,而实际的框架横梁上总是作用有荷载,本书对后一种情况做了比较详尽的分析,是理论紧密结合实际的又一例证。本书还用了相当篇幅论述稳定理论在工程设计中的应用,具体应用总要涉及设计规范的规定。当今世界,经济趋于一体化,涉外工程日益增多,适当介绍国外设计规范规定的特点也是本书顺应时代潮流的一个特色。

保证结构和构件的稳定性,是钢结构设计中必须予以充分注意的问题。但是,结构稳定理论这门学科尚未在工程设计人员中普及,这是当前存在的一个矛盾。这本书的出版有助于解决这一矛盾。它还为结构工程研究生提供了一本好教材。

陈绍蕃

第一版前言

钢材具有高强、质轻、力学性能良好的优点,是制造结构物的一种极好的建筑材料。钢结构与在建筑结构中应用广泛的钢筋混凝土结构相比,对于充任相同受力功能的构件,具有截面轮廓尺寸小、构件细长和板件柔薄的特点。对于因受压、受弯和受剪等存在受压区的构件或板件,如果技术上处理不当,可能使钢结构出现整体失稳或局部失稳。失稳前结构物的变形可能很微小,突然失稳使结构物的几何形状急剧改变而导致结构物完全丧失抵抗能力,以致整体塌落。因失稳而导致钢结构破坏的情况在国内外都曾发生过,有的后果还十分严重。例如在加拿大境内 1907 年首次建造的跨越 Quebec 河的三跨悬伸桥,它的两个边跨各长 152.4m,中跨长 548.64m,中跨包括了由两个边跨各悬伸出的长度为 171.45m 的杆系结构。岂料在架桥过程中,悬伸出的由 4 部分分肢组成的格构式组合截面的下弦压杆,因所设置的角钢缀条过于柔弱,4 个角钢缀条总的截面积只占构件全截面面积的 1.1%,因此缀条不能有效地将 4 部分分肢组成具有足够抗弯刚度的受压弦杆,组装好的钢桥在合龙之前,挠度的发展已经无法控制,分肢屈曲在先,随之弦杆整体失稳,9000t 重的钢桥一下子全部坠入河中,有 75 名员工遇难。该桥重建时,曾于 1916 年因施工问题又一次发生倒塌事故。1907 年首建的 Quebec 钢桥坠毁后的场景见图 0.1。

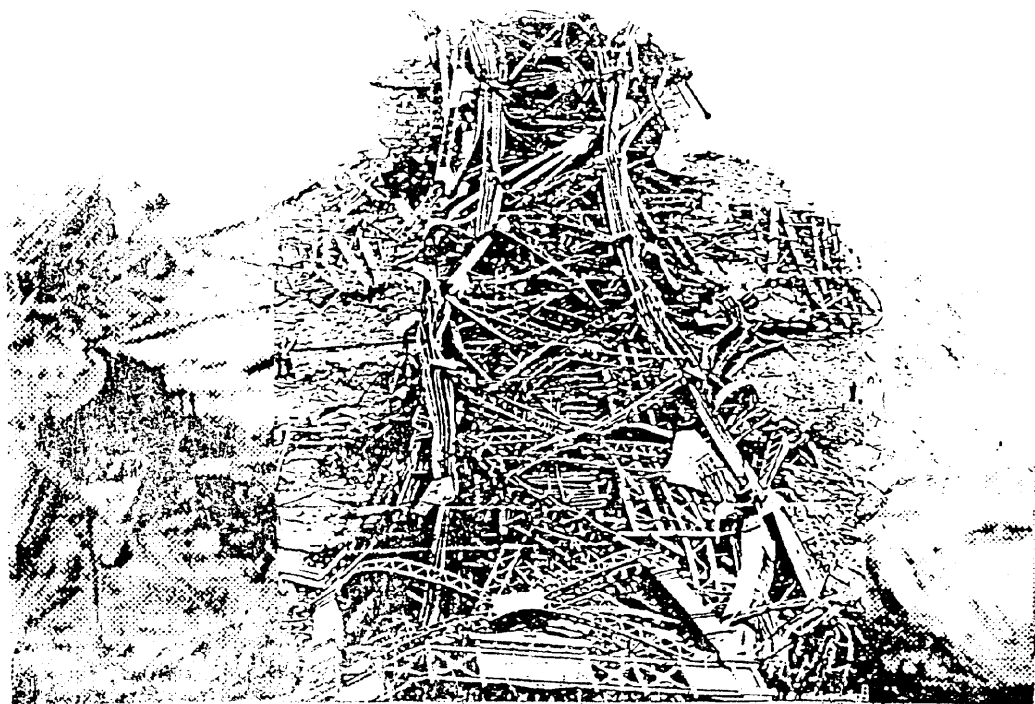


图 0.1 首建的 Quebec 钢桥坠毁后的场景

美国 Connecticut 州 Hartford 城的一座体育馆,屋盖结构采用了平面尺寸为 $91.44\text{m} \times 109.73\text{m}$ 的网架结构。受压弦杆和腹杆均采用了由 4 个等边角钢组成的十字形截面,其抗扭刚度较差。设计者只考虑了压杆的弯曲屈曲,没有考虑扭转屈曲,更没有考虑为压杆设置的支撑因存在连接偏心而发生弯扭屈曲。该体育馆建成并已交付使用,但在 1978 年 1 月 18 日的大雨雪之夜,其空间网架结构因压杆屈曲,瞬间坠毁落地(关于双轴对称截面轴心受压构件因支撑连接偏心而发生弯扭屈曲的理论分析和设计方法可见附录一中的例题)。坠地后的网架结构见图 0.2。

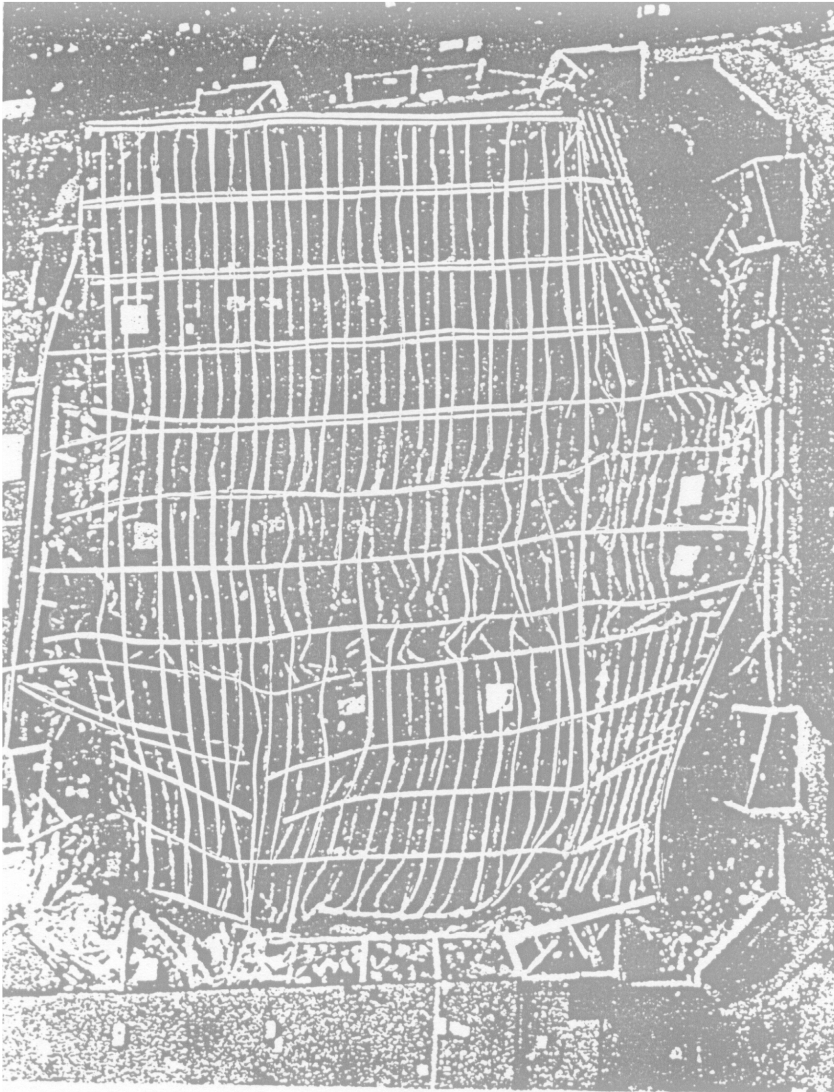


图 0.2 坠毁后的 Hartford 城体育馆网架结构

我国辽宁省某重型机械厂计量楼建成后又新增加了一层会议室。设计者误将跨长只有 14.4m 的重屋盖结构采用了梭形轻钢屋架,加之在受压腹杆的中点设置矩形钢箍支撑后在计算时未区分绕截面两个不同弯曲方向的稳定性,错用了计算长度系数,1990 年 2

月 16 日,正值有 305 人参加会议期间,因一根受压腹杆在平面外的长细比 λ_x 达到 300 而首先在平面外形成一个完全半波屈曲,导致屋盖迅速塌落,造成 42 人死亡和 179 人受伤的特大事故。图 0.3 展示了事故现场经清理后塌落的梭形轻钢屋架。关于这一问题的理论分析可见附录一,那里说明了在梭形轻钢屋架中受压腹杆在中点用矩形钢箍连系后,绕截面的不同弯曲方向计算长度系数的计算方法,并分析了引发几起同类梭形轻钢屋架失稳事故的原因。

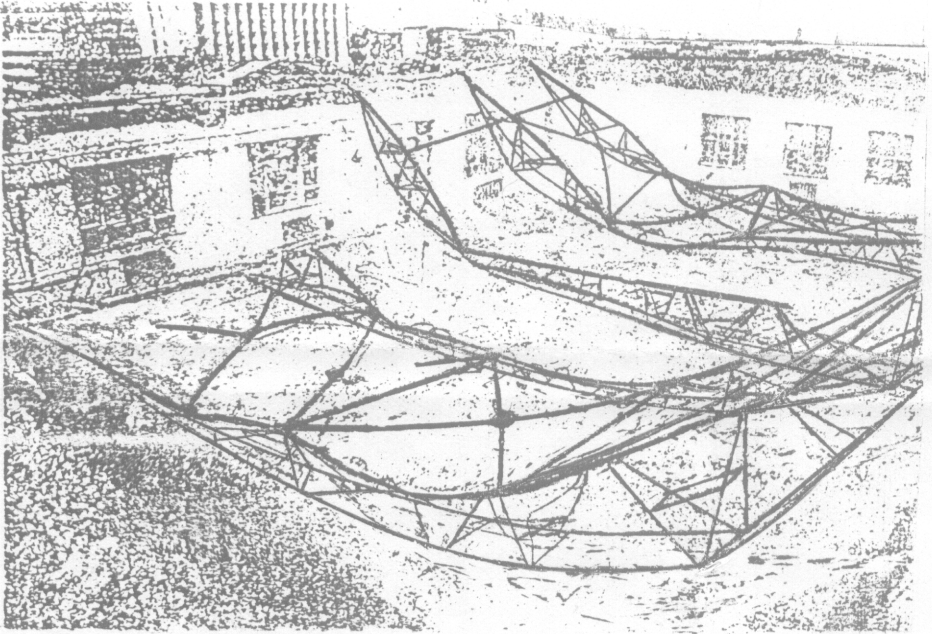


图 0.3 事故现场清理后的梭形轻钢屋架

КОНАКОВ, А. И. 和 МАХОВ, А. П. 曾分析前苏联在 1951~1977 年期间所发生的 59 起重大钢结构事故,其中占总数 29% 的 17 起事故是属于结构的整体或局部失稳。并非所有失稳事故都是由于设计错误所致,制造和安装或使用不当也可能引发失稳事故。前苏联古比雪夫列宁冶金厂锻压车间在 1957 年末有七榀钢屋架连同 1200m^2 屋盖突然塌落,原因是长度相同的一对拉杆和压杆在装配过程中搞颠倒了,压杆承载力降低的幅度超过了 30% 而提前屈曲。

钢结构的稳定性能是决定其承载力的一个特别重要的因素,稳定理论和设计方法需要完善。近几十年来,在研究发挥钢结构稳定性能的潜力和完善稳定计算的理论方面,国内外都取得了长足的进步。例如完善钢结构的弹塑性稳定理论,研究有几何缺陷和残余应力的钢结构的实际受力性能和其极限荷载,用数值法来解决这类问题等都取得了不少研究成果。在做理论分析的同时进行稳定性能的试验验证,以及将理论研究结果利用图表表示或演化为实用计算公式,从而将弹塑性稳定理论用于解决钢结构设计中的问题都取得了丰硕成果。包括我国在内的世界上许多国家,最近 10 年都相继修订了钢结构设计规范。在这些规范中均反映了新的研究成果。工程技术人员可以从 1991 年出版 Beedle, L. S. 主编的《金属结构稳定的世界观点》(Stability of Metal Structures—A World View, 2nd. Ed.) 一书中得到教益。该书编辑了 6 个国家和地区,即澳大利亚、中国、东欧、日本、北美

和西欧的钢结构设计规范关于稳定计算的方法和特点。本书则有助于认识钢结构稳定设计的理论依据。

本书系统地介绍了钢结构中基本构件的弹性和弹塑性稳定理论,概括了不同类型的稳定问题。书中内容力求反映新的研究成果。其前半部分研究的是构件发生平面变位的稳定问题,它们是轴心受压构件的弯曲屈曲,压弯构件在弯矩作用平面内的稳定和刚架屈曲;后半部分从第六章开始,研究的是构件和薄板发生空间变位的稳定问题,它们是轴心受压构件和压弯构件的扭转屈曲和弯扭屈曲,受弯构件的弯扭屈曲和薄板的凸曲等。第五章(稳定计算的近似分析法)的理论,是用于解决较复杂的弹性和弹塑性稳定问题的。其中有限差分法、有限积分法和有限单元法等,是通过解决受压构件的弹性稳定问题,用以说明其计算原理和方法步骤,目的是为后面用数值法和电子计算机解决钢结构的弹性与弹塑性稳定问题奠定基础。

本书各章在阐述构件稳定性能的基础上,结合钢结构的设计问题,按照我国钢结构设计规范 GBJ 17-88、冷弯薄壁型钢结构技术规范 GBJ 18-87 和高层民用建筑钢结构技术规程 JGJ 99-98 的有关条款,简要地说明了为满足稳定要求所列计算公式的理论依据和应遵循的方法,并给出了应用这些计算公式的算例。

为了便于读者学习基本理论,各章都编写了较多例题和习题,其目的有的是着眼于对稳定理论的理解,有的是解决稳定计算的具体应用。其中不少弹塑性稳定方面的例题和习题都是历年为研究生教学编写的。为了加深对钢结构稳定理论的理解和应用,也便于研究生今后在科学研究中做参考,另有几个涉及面较广的弹性与弹塑性稳定问题编入了附录。

钢结构稳定理论与应用一书曾于 1994 年由科学技术文献出版社出版,出版后深得读者好评,认为这是一本颇具特色的钢结构稳定的著述,可作为结构工程专业研究生技术基础课教材。鉴于此,教育部研究生工作办公室于 2000 年 6 月将此书推荐为研究生教学用书。为了进一步完善这本教材,使其较全面地反映当代钢结构稳定理论与应用的新成就,并联系涉外工程中国外钢结构设计规范有关稳定计算的规定和方法,作者对本书做了全面修改,使之成为一本内容更加充实的新书并更名为钢结构稳定理论与设计。在全面修改此书时着重在以下几个方面做了补充。

(1) 与正在修订的我国现行钢结构设计规范拟增加的稳定问题有关的理论分析和设计方法,如单角钢和双角钢等单轴对称截面轴心受压构件的弯扭屈曲,多跨多层有侧移刚架的二阶效应,带有摇摆柱的有侧移刚架屈曲,刚架横梁受压后的线刚度折减,I 形截面薄腹梁的受压翼缘在腹板平面内的竖向屈曲和腹板受剪屈曲后的拉力场作用,非均匀受压板件屈曲后的有效宽度等。

(2) 系统地介绍美国房屋钢结构设计规范 AISC LRFD 1999 中按照结构极限状态理论关于轴心受压、受弯、压弯构件和计及 $P-\Delta$ 效应后多跨多层刚架的稳定问题,板屈曲和屈曲后与构件极限承载力的相关关系等稳定计算的理论依据和设计方法,包括薄腹梁的弯扭屈曲临界弯矩以及在弯矩和剪力共同作用下极限荷载的计算方法。

(3) 美国冷弯薄壁型钢结构设计规范 AISI LRFD 1996 中关于均匀与非均匀受压板件屈曲后的有效宽厚比及其统一设计公式,板件屈曲后构件稳定承载力的计算方法。

(4) 日本房屋钢结构设计指针 AIJ 1998 在极限状态设计法中为适应抗震要求给出的结构、构件和板件分级的相关关系,受压和受弯构件中翼缘与腹板宽厚比分级的相关关

系以及对这些构件做稳定计算的方法。

(5) 双向受弯构件和双向弯曲压弯构件弯扭屈曲极限承载力的弹塑性分析和设计方法。

(6) 在附录中增加了单个弹性支承上轴心受压构件的弯曲屈曲和弯扭屈曲,用有限单元法、有限积分法和有限差分法计算受压和受弯构件弹塑性弯扭屈曲荷载,并结合工程实际详细地做了理论分析,介绍了多个稳定设计的实例。

本书可作为工业与民用建筑工程、土建结构工程和工程力学专业研究生结构稳定理论课的教材。在进行研究生教学时,应注意区分稳定问题的类型,分析不同稳定问题的方法和解决具体稳定设计问题的条件。学习的重点应是轴心受压、受弯和压弯构件,有侧移刚架以及板件的弹性与弹塑性稳定的基本理论部分。本书中的许多章节可供土建类专业高年级大学生选读。对于从事钢结构教学、研究、设计和施工的技术人员,本书也有参考价值。

本书承陈绍蕃教授全面审阅,并提供了许多极为宝贵的意见,谨致深忱谢意。对在编写过程中曾提供意见和资料的专家、教授以及协助完成几个受压和受弯构件弹塑性弯扭屈曲数值法计算例题的研究生,作者在此深表谢意。

由于水平所限,书中可能存在错误与不妥之处,希望读者提出批评和改进意见。

陈 骥

2000年10月于西安建筑科技大学

符 号

A	截面积;毛截面面积;常数
A_1	常数;刚架柱局部 P - δ 弯矩放大系数
A_2	常数;有侧移刚架整体 P - Δ 弯矩放大系数
A_e	弹性单元面积;有效截面面积
A_f	一个翼缘的截面积
A_i	单元面积
A_m	弯矩放大系数
A_w	腹板的截面积
B, B_1, B_2	常数
B_ω	约束受扭双力矩
C	压弯构件近端抗弯刚度系数
C_1, C_2, C_3, C_4, C_i	常数;系数
D	弹性柱面刚度
D_s	弹塑性柱面刚度;结构特性系数
E	弹性模量
E_r	折算模量
E_s	割线模量
E_{st}	强化模量
E_t	切线模量
F	应力函数
G	剪变模量
G_A, G_B	交于刚架柱上端和下端的柱线刚度之和与横梁线刚度之和的比值
G_{st}	强化剪变模量
G_t	弹塑性剪变模量
H	水平反力;水平荷载;假想水平力
I	截面惯性矩
I_1	一个受压翼缘对 y 轴的惯性矩
I_2	一个受拉翼缘对 y 轴的惯性矩
I_a	卷边截面有效惯性矩
I_e	弹性区面积惯性矩
I_{ef}	有效截面惯性矩
I_{et}	弹性区抗扭惯性矩
I_{ex}	弹性区截面对 x 轴的惯性矩

I_{ey}	弹性区截面对 y 轴的惯性矩
$I_{e\omega}$	弹性区翘曲惯性矩
I_{\min}	中间加劲肋截面最小惯性矩
I_{pt}	屈服区抗扭惯性矩
I_s	卷边截面惯性矩
I_t	圣维南扭转常数;抗扭惯性矩
I_x, I_y	对 x 轴和 y 轴的截面惯性矩
I_{ω}	扇性惯性矩;翘曲惯性矩
K	第一类完全椭圆积分;线刚度 $K = EI/l$;扭转刚度参数 $K = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_{\omega}}{GI_t l^2}}$
K_1, K_2	交于刚架柱上端和下端的横梁线刚度之和与柱线刚度之和的比值;约束参数;常数
\bar{K}	Wagner 效应系数, $\bar{K} = \int_A \sigma^2 dA = \int_A \sigma[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] dA$
M	弯矩
M_1, M_2	构件的端弯矩
M_{cr}	弯扭屈曲临界弯矩
M_{0cr}	纯弯构件的弹塑性临界弯矩
M_e	外弯矩;弹性弯扭屈曲临界弯矩
M_{eq}	等效弯矩
M_f	翼缘翘曲弯矩
M_{FA}, M_{FB}	固端弯矩
M_i	内弯矩
M_{\max}	最大弯矩
M_p	全截面屈服弯矩;塑性铰弯矩
M_{pc}	压力和弯矩共同作用的全截面屈服弯矩
M_s	圣维南扭矩;自由扭矩;有效塑性弯矩
M_t	外扭矩
M_u	极限弯矩
M_x, M_y	绕 x 和 y 两个主轴的弯矩;板单位长度截面的弯矩
M_{xy}	板单位长度截面的扭矩
M_y	截面边缘纤维屈服弯矩
M_z	对 z 轴的扭矩
M_{ζ}	对移动坐标轴 ζ 的扭矩
M_{ξ}, M_{η}	对移动坐标轴 ξ 和 η 的弯矩
M_{ω}	翘曲扭矩
$[N]$	积分算子
N_x, N_y	板在 x 和 y 方向单位长度截面的中面力

N_{xy}	板单位长度截面的中面剪力
N'_x, N'_y, N'_{xy}	中面的薄膜力
O	截面形心
P	荷载;轴心压力
P_{cr}	屈曲荷载
P_{crx}, P_{cry}	对 x 轴和 y 轴的弯曲屈曲荷载
P_d	荷载的设计值
P_E	欧拉荷载
P_e	截面边缘纤维屈服荷载
P_p	一阶刚塑性机构破坏荷载
P_r	双模量屈曲荷载;折算模量屈曲荷载
P_t	切线模量屈曲荷载
P_u	极限荷载
P_x, P_y	对 x 轴和 y 轴的轴心受压弹性屈曲荷载
$P_{x\omega}, P_{xy\omega}, P_{y\omega}$	弯扭屈曲荷载
P_y	全截面屈服荷载
P_ω	扭转屈曲荷载
Q	横向力
Q_i	第 i 层刚架柱端剪力
Q_x, Q_y	与 x 轴和 y 轴平行的开口薄壁构件截面的剪力;板单位长度的剪力
\underline{R}	反力;棱角外半径
R	残余应力的 Wagner 效应系数, $\bar{R} = \int_A \sigma \rho^2 dA = \int_A \sigma [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] dA$ $= \int_A \sigma (x^2 + y^2) dA$
S	压弯构件远端抗弯刚度系数;剪力中心;截面静矩;参数
S_x, S_y	对 x 轴和 y 轴的截面静矩
U	应变能
V	外力势能;剪力
W	截面抵抗矩;外力功;广义力
W_e	有效截面抵抗矩
W_{xc}	受压边缘截面抵抗矩
W_{xt}	受拉边缘截面抵抗矩
W_ω	毛截面的扇心抵抗矩
a	单元长度;分段距;荷载作用点至剪心的距离;板的长度
b	截面宽度;翼缘宽度;板的宽度;受压翼缘外伸宽度
b_f	受压翼缘宽度

b_e	有效宽度
c	弹簧常数;反力常数
c_0	弹簧常数的限值
e	偏心距
e_0	初偏心距;缺陷偏心
e_x, e_y	在 x 和 y 两个主轴线上的偏心距
f	假想水平力放大系数;板的挠度;钢材的强度设计值
f_0	板的初挠度
f_p	比例极限
f_y	屈服强度
f_{yf}	翼缘屈服强度
f_{yw}	腹板屈服强度
f_{vy}	剪切屈服强度
h	截面高度;上下翼缘中心距离;层间高度
h_0	腹板高度
h_1	形心至上翼缘的距离
h_{1s}	剪心至上翼缘的距离
h_2	形心至下翼缘的距离
h_{2s}	剪心至下翼缘的距离
i	回转半径
i_0	极回转半径, $i_0^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + x_0^2 + y_0^2$
i_r	梁截面的弯扭屈曲有效回转半径
i_x, i_y	对 x 轴和 y 轴的回转半径
k	抗移动弹簧常数;对于受压构件,参数 $k = \sqrt{\frac{P}{EI}}$;板的屈曲系数
k_1, k_2	板件屈曲系数;长宽比值
k_e	压弯剪共同作用板的弹性屈曲系数
k_p	压弯剪共同作用板的弹塑性屈曲系数
k_s	板的剪切屈曲系数
l	构件的几何长度;板的长度
l_0	构件的计算长度
l_1	受压翼缘的侧扭自由长度
l_x, l_y	对 x 轴和 y 轴的计算长度
l_ω	扭转屈曲计算长度
m	板屈曲在 x 方向的半波数;轴心压力比值
n	板屈曲在 y 方向的半波数;构件屈曲半波数
o	坐标原点

p	参数 $p = \sin \frac{\theta_0}{2}$
$p_{crx}, p_{cry}, p_{crxy}$	板的屈曲荷载
p_x, p_y	板在 x 和 y 方向的中面荷载
p_{xy}	板在中面的剪切荷载
q	单位长度荷载; 结点力
q_{cr}	均布屈曲荷载
r	抗转动弹簧常数; 棱角内半径
s	沿薄壁截面中心线的曲线坐标; 曲线的弧长
t	板厚度; 翼缘厚度
t_l	受压翼缘厚度
$t(s)$	曲线坐标为 s 处的薄壁厚度
t_w	腹板厚度
u	剪切中心在 x 方向的位移; 板任意点在 x 方向的位移
u_0	板的任意点在 x 方向的位移
u_B	截面上任意点 B 在 x 方向的位移
v	剪切中心在 y 方向的位移; 板任意点在 y 方向的位移; 构件的挠度
v_0	初弯曲的矢高; 板中面的任意点在 y 方向的位移
v_B	截面上任意点 B 在 y 方向的位移
w	板的挠度
x_0, y_0	截面剪切中心坐标; 剪心距
x_i, y_i	单元坐标
y_{\max}	最大挠度
z_{ei}	弹性单元至 y 轴的距离
z_i	单元至 y 轴的距离
α	应变梯度; 冷弯薄壁型钢受压构件翘曲约束系数; 板的长宽比; 比值; 横梁线刚度修正系数; 指数; 单角钢主轴 u 和几何轴 x 之间的夹角
ω	应力梯度; 指数
ω	受压翼缘绕 y 轴惯性矩与全截面惯性矩的比值
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_{xy}$	x 和 y 方向的正应力和剪应力与等效应力的比值
β	冷弯薄壁型钢受压构件的约束系数; 考虑屈曲前变形受弯构件临界弯矩修正系数; 比值; T 形截面梁临界弯矩系数
β_1	受弯构件临界弯矩修正系数
β_2	受弯构件荷载作用点位置修正系数
β_3	与荷载形式有关的单轴对称截面受弯构件修正系数
β_b	受弯构件弯扭失稳等效弯矩系数
β_{n_x}, β_{n_y}	压弯构件弯曲失稳等效弯矩系数
β_{t_x}, β_{t_y}	压弯构件弯扭失稳等效弯矩系数

β_x, β_y	不对称截面常数
γ	比值; 横梁抗弯刚度折减系数; 变截面受弯构件弹性临界弯矩折减系数
γ_{pg}	薄腹梁截面弯矩折减系数
γ_x, γ_y	截面塑性发展系数
γ_{xy}	比值; 剪应变
γ_{xy0}	板中面剪应变
Δ	位移
δ	挠度; 结点位移; 比值
ε	应变
ε_0	轴向应变; 相对初弯曲; 等效缺陷; 等效偏心率
ε_i	单元应变; 弹塑性板的等效应变
$\varepsilon_{min}, \varepsilon_{max}$	板边缘的最小应变和最大应变
ε_i	任意点残余应变
ε_t	强化阶段开始时的应变
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	板中面应变
ε_s	屈服应变
η	弹性模量折减系数; 折减系数
η	不对称截面影响系数
η	弹塑性板变形模量折减系数
θ	角位移; 作用于单角钢的弯矩 M 与主轴 u 之间的夹角
θ_0	初始角
λ	构件长细比; 板件宽厚比; 参数; 板的柔度系数
$\bar{\lambda}$	构件相对长细比; 板件相对宽厚比, $\bar{\lambda} = \sqrt{f_y / \sigma_{cr}}$
λ_e	弹性相对长细比限值
λ_p	塑性相对长细比限值
$\lambda_{\omega}, \lambda_{y\omega}$	弯扭屈曲换算长细比
λ_{ω}	扭转屈曲换算长细比
μ	比值; 计算长度系数; 翘曲系数
$\mu_x, \mu_y, \mu_{\omega}$	对 x, y 和 z 轴的弯曲屈曲和扭转屈曲计算长度系数
ν	泊松比
ν_p	塑性泊松比
ρ	截面的核心距; 侧移角; 剪心至截面任意点的距离; 板件宽度的折减系数
ρ_0	形心至任意点切线方向的垂直距离
ρ_s	剪心至任意点切线方向的垂直距离
σ	正应力

σ_{cr}	屈曲应力
$\bar{\sigma}_{cr}$	屈曲应力与屈服强度的比值
σ_{crr}	双模量屈曲应力;折算模量屈曲应力
σ_{crl}	切线模量屈曲应力
σ_{cs}	压弯剪共同作用板的屈曲应力
σ_l	应力的设计值
σ_E	欧拉应力
σ_e	弹性屈曲应力
σ_i	弹塑性板的等效应力
σ_p	比例极限
σ'_p	有效比例极限
σ_r	残余应力
σ_{rc}	残余压应力峰值
σ_{ri}	任意点的残余应力
σ_{rl}	残余拉应力峰值
σ_u	极限应力;抗拉强度
σ_x, σ_y	大挠度板 x 和 y 方向的中面应力
σ_y	屈服强度
σ_ω	翘曲正应力;扭转屈曲应力
$\sigma_{x\omega}, \sigma_{y\omega}, \sigma_{xy\omega}$	弯扭屈曲应力
Π	总势能
τ	剪应力;变形模量比值
τ_{cr}	剪切屈曲应力
τ_s	自由扭转剪应力
τ_y	剪切屈服强度
τ_ω	翘曲剪应力
	抗力系数
b	受弯构件抗力系数
c	受压构件抗力系数
p	受拉构件抗力系数
v	剪切抗力系数
Φ	曲率
φ	轴心受压构件稳定系数;扭转角
φ_b	受弯构件稳定系数
φ'_b	受弯构件弹塑性稳定系数
φ_{b0}	纯弯构件稳定系数

φ, φ	对 x 轴和 y 轴的稳定系数
χ	约束系数
ω	扇性坐标
ω_0	以形心为极点的扇性坐标
ω_1	主扇性坐标
ω_2	以剪心为极点的扇性坐标

目 录

第三版前言	
第二版前言	
第一版序	
第一版前言	
符号	
第一章 概论	1
1.1 稳定问题的类型	1
1.2 稳定问题的计算方法	4
1.3 完善力学模型的稳定分析	6
1.4 非完善力学模型的稳定分析	14
1.5 跃越屈曲力学模型的稳定分析	17
1.6 钢材的性能	19
1.7 钢构件内截面的残余应力分布	25
习题	27
参考文献	28
第二章 轴心受压构件的弯曲屈曲	30
2.1 概述	30
2.2 轴心受压构件的弹性弯曲屈曲	30
2.3 端部有约束的轴心受压构件	32
2.4 轴心受压构件的计算长度系数	37
2.5 轴心受压构件的大挠度弹性理论	40
2.6 初始几何缺陷对轴心受压构件的影响	44
2.7 轴心受压构件的非弹性屈曲	48
2.8 残余应力对轴心受压构件的影响	54
2.9 轴心受压构件的稳定理论在钢结构设计中的应用	60
习题	71
参考文献	72
第三章 压弯构件在弯矩作用平面内的稳定	74
3.1 概述	74
3.2 两端铰接横向荷载作用下弹性压弯构件的变形和内力	76
3.3 两端固定横向荷载作用下弹性压弯构件的变形和内力	81
3.4 端弯矩作用下弹性压弯构件的变形和内力	84
3.5 压弯构件的等效弯矩和等效弯矩系数	87
3.6 无侧移弹性压弯构件的转角位移方程	91

3.7	有侧移弹性压弯构件的转角位移方程	94
3.8	横向荷载作用下弹性压弯构件的转角位移方程	95
3.9	压弯构件在弯矩作用平面内的极限荷载	97
3.10	压弯构件在弯矩作用平面内的稳定理论在钢结构设计中的应用	108
	习题	122
	参考文献	123
第四章	刚架稳定	125
4.1	刚架的失稳形式	125
4.2	平衡法求解刚架的弹性屈曲荷载	127
4.3	位移法求解刚架的弹性屈曲荷载	130
4.4	多层多跨刚架的弹性屈曲	136
4.5	近似法求解多层多跨刚架的弹性屈曲荷载和刚架柱的计算长度系数	137
4.6	主弯矩对单层单跨刚架稳定的影响	147
4.7	刚架的弹塑性稳定	152
4.8	侧倾刚架的极限荷载	153
4.9	刚架的稳定理论在钢结构设计中的应用	167
4.10	斜梁加腋的山形门式单层多跨刚架平面屈曲	196
	习题	201
	参考文献	204
第五章	稳定计算的近似分析法	206
5.1	概述	206
5.2	能量守恒原理	206
5.3	势能驻值原理和最小势能原理	210
5.4	瑞利-里兹法	214
5.5	迦辽金法	217
5.6	有限差分法	219
5.7	有限积分法	223
5.8	有限单元法	228
5.9	有限单元法求解变截面门式刚架柱的计算长度系数	237
	习题	240
	参考文献	241
第六章	受压构件的扭转屈曲和弯扭屈曲	242
6.1	概述	242
6.2	开口薄壁构件截面的剪力中心	243
6.3	开口薄壁构件的扭转	247
6.4	轴心受压构件的弹性扭转屈曲	256
6.5	轴心受压构件的弹塑性扭转屈曲	262
6.6	轴心受压构件的弹性弯扭屈曲	265
6.7	轴心受压构件的弹塑性弯扭屈曲	273

6.8	压弯构件的弹性弯扭屈曲	277
6.9	压弯构件的弹塑性弯扭屈曲	292
6.10	受压构件的扭转屈曲和弯扭屈曲理论在钢结构设计中的应用.....	298
	习题.....	311
	参考文献.....	313
第七章	受弯构件的弯扭屈曲	314
7.1	概述	314
7.2	纯弯构件的弹性弯扭屈曲	315
7.3	不等端弯矩作用的受弯构件	322
7.4	横向荷载作用的受弯构件	323
7.5	变截面受弯构件的弹性弯扭屈曲	331
7.6	受弯构件的弹塑性弯扭屈曲	335
7.7	受弯构件弯扭屈曲理论在钢结构设计中的应用	342
7.8	双向弯曲压弯构件和双向受弯梁的极限承载力及设计方法	363
	习题.....	391
	参考文献.....	393
第八章	板的屈曲	395
8.1	概述	395
8.2	小挠度理论板的平衡方程	396
8.3	单向均匀受压简支板的弹性屈曲荷载	400
8.4	能量法计算板的弹性屈曲荷载	402
8.5	单向非均匀受压简支板的弹性屈曲	406
8.6	均匀受剪简支板的弹性屈曲	408
8.7	大挠度理论板的微分方程	410
8.8	单向均匀受压简支板的屈曲后强度	414
8.9	板的弹塑性屈曲	418
8.10	板的屈曲理论在钢结构设计中的应用.....	425
8.11	轴心受压构件中的板件.....	426
8.12	受弯构件中的腹板和薄腹梁的稳定设计.....	431
8.13	压弯构件中的板件.....	453
8.14	日本建筑协会关于钢结构极限状态设计中板件宽厚比分级和薄腹梁 弯矩承载力的规定.....	460
8.15	冷弯薄壁型钢截面中板件的有效宽度.....	467
8.16	普通钢结构具有柔薄板件轴心受压构件 ANSI/AISC 360-05 LRFD 2005 的 设计方法.....	502
	习题.....	508
	参考文献.....	509
附录	512
	一、弹性支承上轴心受压构件的屈曲荷载	512
	二、受弯和压弯构件弯扭屈曲的总势能	530

三、用有限单元法求解受压和受弯构件的弯扭屈曲荷载	536
四、用有限积分法求解受压和受弯构件的弯扭屈曲荷载	556
五、用有限差分法求解受压和受弯构件的弯扭屈曲荷载	566
六、冷弯薄壁型钢构件的直接强度法	571
参考文献	584
部分习题答案	586
索引	591

第一章 概 论

1.1 稳定问题的类型

钢结构的失稳现象是多种多样的,但是就其性质而言,可以分为以下三类^[1.1-1.4]。

1.1.1 平衡分岔失稳

完善的(即无缺陷的、挺直的)轴心受压构件和完善的在中面内受压的平板的失稳都属于平衡分岔失稳问题。属于这一类的还有理想的受弯构件以及受压的圆柱壳等的失稳。

以完善的轴心受压构件为例予以说明。当作用于图 1.1(b)所示构件端部的荷载 P 在未达到某一限值时,构件始终保持着挺直的稳定平衡状态,构件的截面只承受均匀的压应力,同时沿构件的轴线只产生相应的压缩变形 Δ 。如果在其横向施加一微小干扰,构件会呈现微小弯曲,但是一旦撤去此干扰,构件又会立即恢复到原有的直线平衡状态。如果作用于上端的荷载达到了限值 P_{cr} ,构件会突然发生弯曲,这种现象称为屈曲,或者称为丧失稳定。这时如图 1.1(c)所示,构件由原来挺直的平衡状态转变到与其相邻的伴有微小弯曲的平衡状态。荷载到达 A 点后,图 1.1(a)的荷载-挠度曲线呈现了两个可能的平衡途径,直线 AC 和水平线 AB (或 AB')在同一点 A 出现了岔道。构件所能承受的荷载限值 P_{cr} 称为屈曲荷载或临界荷载。由于在同一个荷载点出现了平衡分岔现象,所以其失稳称为平衡分岔失稳,也称第一类失稳。平衡分岔失稳还分为稳定分岔失稳和不稳定分岔失稳两种。

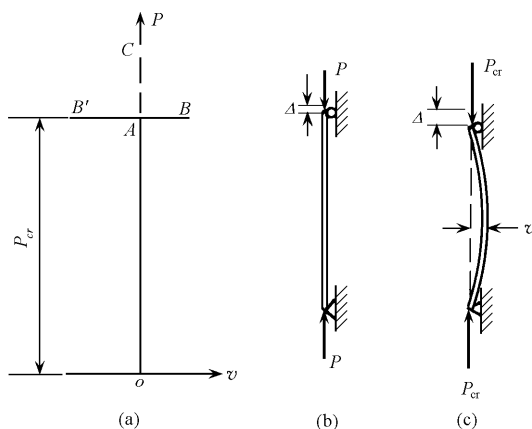


图 1.1 轴心受压构件弯曲屈曲

1. 稳定分岔失稳

图 1.1(a)的荷载-挠度曲线是按小挠度理论分析得到的。按照大挠度理论分析,轴心

受压构件屈曲后, 挠度增加时荷载还略有增加, 如图 1.2(a) 所示, 屈曲后构件的荷载-挠度曲线是 AB 或 AB' , 这时平衡状态是稳定的, 属于稳定分岔失稳。不过大挠度理论分析表明, 荷载的增加量非常小而挠度的增加却很大, 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(参看第二章 2.5 节)。

对于四边有支承的薄板, 如图 1.2(b) 所示, 其中面在均匀的压力 P 的作用下达到屈曲荷载 P_{cr} 后发生凸曲。由于其侧边同时产生薄膜力, 对薄板的变形起了牵制作用, 促使荷载还能有较大程度增加, 荷载-挠度曲线如图 1.2(b) 的 oAB 或 oAB' 所示, 屈曲以后板的平衡状态也是稳定的, 也属于稳定分岔失稳。由于板的极限荷载 P_u 可能远超过屈曲荷载 P_{cr} , 所以可以利用板的屈曲后强度(参看第八章 8.8 节)。

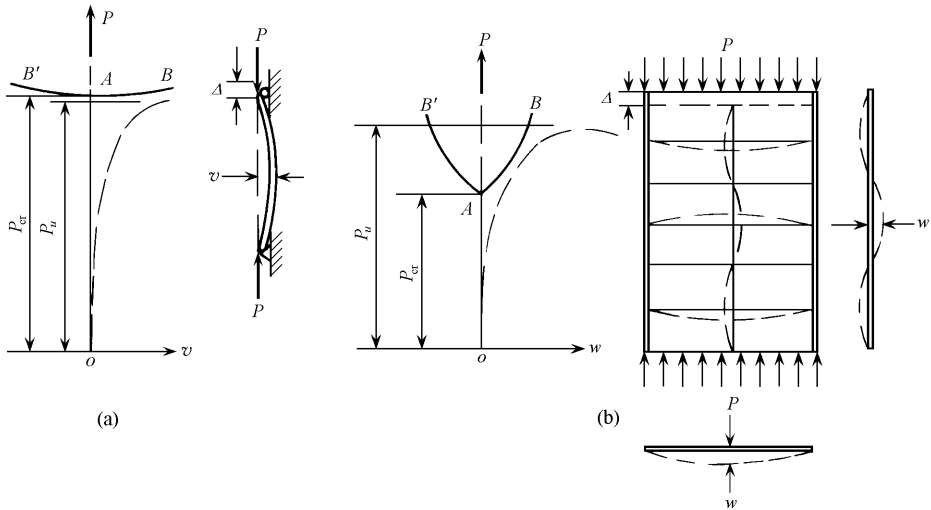


图 1.2 稳定分岔失稳

应该注意到, 上面研究的轴心受压构件和薄板的失稳现象都是在理想条件下发生的。实际的轴心受压构件和薄板并非是平直的, 它们在受力之前都可能存在微小弯曲变形(称为初弯曲或几何缺陷), 初始缺陷使构件和板的极限荷载 P_u 有所降低, 其荷载-挠度曲线不再有分岔点, 而是如图 1.2(a 和 b) 中的虚线所示。但是, 对于具有稳定分岔失稳性质的构件来说, 初始缺陷的影响较小, 对于薄板, 即使有缺陷的影响, 其极限荷载仍可能高于屈曲荷载。

2. 不稳定分岔失稳

还有一类结构, 在屈曲后只能在远比屈曲荷载低的条件下维持平衡状态。例如承受均匀压力的圆柱壳, 其荷载-挠度曲线如图 1.3(a) 所示的 oAB 或 oAB' , 这属于不稳定分岔失稳, 这种屈曲形式也称为有限干扰屈曲; 因为在极微小的不可避免的有限干扰的作用下, 圆柱壳在达到平衡分岔屈曲荷载之前, 就可能由屈曲前的稳定平衡状态跳跃到非邻近的平衡状态, 如图中的曲线 $oA'CB$, 不经过理想的分岔点 A 。缺陷对这类结构的影响很大, 使实际的极限荷载 P_u 远小于理论上的屈曲荷载 P_{cr} , 其荷载-挠度曲线如图中虚线所示。

研究这类稳定问题的目的是要探索小于屈曲荷载的安全可靠的极限荷载。

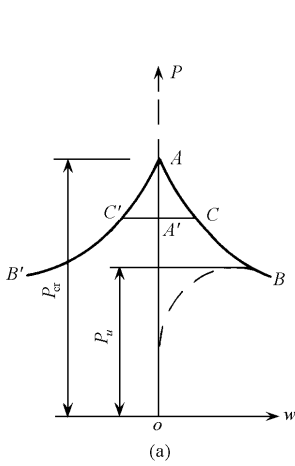


图 1.3 不稳定分岔失稳

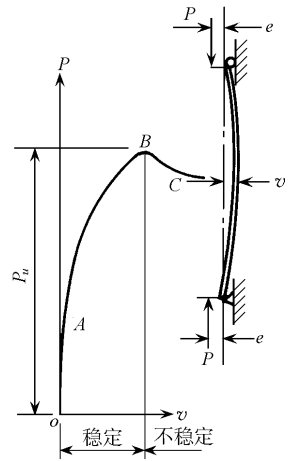


图 1.4 极值点失稳

1.1.2 极值点失稳

偏心受压构件在轴向压力作用下产生弯曲变形,其荷载-挠度曲线如图 1.4 所示,在曲线的上升段 oAB ,构件的挠度随荷载而增加,处在稳定平衡状态,而曲线上的 A 点表示构件中点截面的边缘纤维开始屈服;荷载继续增加时由于塑性向内扩展,弯曲变形加快,图中曲线出现下降段 BC ,表示维持平衡的条件是要减小构件端部的压力,因而使构件处于不稳定平衡状态;曲线的极值点 B 标志了此偏心受压构件在弯矩作用的平面内已达到了极限状态,对应的荷载 P_u 为构件的极限荷载。由图 1.4 可知,具有极值点失稳的偏心受压构件的荷载-挠度曲线只有极值点,没有出现如理想轴心受压构件那样在同一点存在两种不同变形状态的分岔点,构件弯曲变形的性质没有改变,故此失稳称为极值点失稳,也称为第二类失稳(参看第三章 3.9 节)。

实际的轴心受压构件因为都存在初始弯曲和荷载的作用点稍稍偏离构件轴线的初始偏心,因此其荷载-挠度曲线呈现如图 1.2(a)中虚线所示的极值点失稳现象;与极值点对应的荷载 P_u 才是实际的轴心受压构件的极限荷载。极值点失稳的现象是十分普遍的,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。

1.1.3 跃越失稳

如图 1.5(a)所示的两端铰接较平坦的拱结构,在均布荷载 q 的作用下其挠度 w ,其荷载-挠度曲线也有稳定的上升段 oA ,但是到达曲线的最高点 A 时会突然跳跃到一个非邻近的具有很大变形的 C 点,拱结构顷刻下垂。在荷载-挠度曲线上,虚线 AB 是不稳定的, BC 段虽然是稳定的而且一直是上升的,但是因为结构已经破坏,故不能被利用。与 A 点对应的荷载 q_{cr} 是坦拱的临界荷载。这种失稳现象称为跃越失稳,它既无平衡分岔点,又无极值点,但和不稳定分岔失稳又有某些相似的现象,都在丧失稳定平衡之后又跳跃到另一个稳定平衡状态。扁壳和扁平的网壳结构也可能发生跃越失稳。图 1.5(b)是发生局部凹陷的网壳结构的点状跃越失稳,而图 1.5(c)是整体跃越失稳。带有缓坡的有侧移大跨

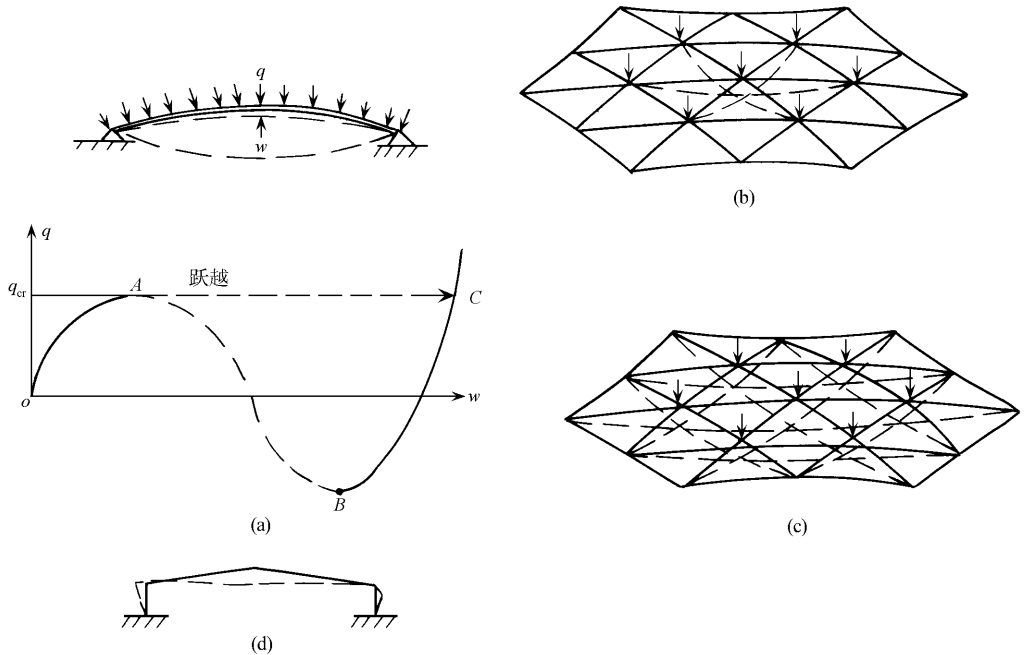


图 1.5 跃越失稳

度门式刚架,当刚架横梁的刚度很弱而侧移刚度却较强时,有可能发生如图 1.5(d)所示的跃越失稳。横梁的初始倾角即横梁的坡度对这类结构的变形影响很大,类同于有缺陷的不稳定分岔失稳。缺陷对这类结构的影响也很大。

区分结构失稳类型的性质十分重要,否则不可能正确估量结构的稳定承载力。对于具有平衡分岔失稳现象的结构,如前所述,理论上的屈曲荷载区分成三种情况,一种比较接近于实际的极限荷载,一种大于实际的极限荷载,一种远小于实际的极限荷载。大挠度理论才能揭示具有平衡分岔失稳的结构屈曲后的性能,然而用大挠度理论分析实际结构的计算过程十分复杂。从第二章轴心受压构件的大挠度弹性理论和第八章板的屈曲后强度,均可了解到分析实际问题的复杂性。为了揭示具有分岔失稳现象结构的共性,Koiter, W. T. 于 1945 年利用简单的力学模型系统地分析了分岔失稳的屈曲后性能,建立了完整的理论^[1.1,1.2]。

1.2 稳定问题的计算方法

从前面分析的几种结构的失稳现象可知,并非处在平衡状态的结构都是稳定的。为了进一步说明这一问题,可以用图 1.6 中与轴心受压构件相对应的小刚球所处的三种不同的平衡位置来说明平衡的稳定性。图中的三个小刚球都处在平衡状态,但其稳定性却并不相同。对于图 1.6(a),当给小球微小干扰后,小球虽然暂时离开了原点,但其势能增加了,一旦撤去干扰,小球又可恢复到原点,因此这种平衡状态是稳定的;图 1.6(b)则不然,小球经干扰离开原点以后,其势能减小了,撤去干扰后小球不仅不能恢复到原来的原点,反而继续向下滚动,远离原点,因此这种平衡状态是不稳定的;图 1.6(c)的小球经干扰后离