

# 钢结构 稳定设计

■ 郭耀杰 编著



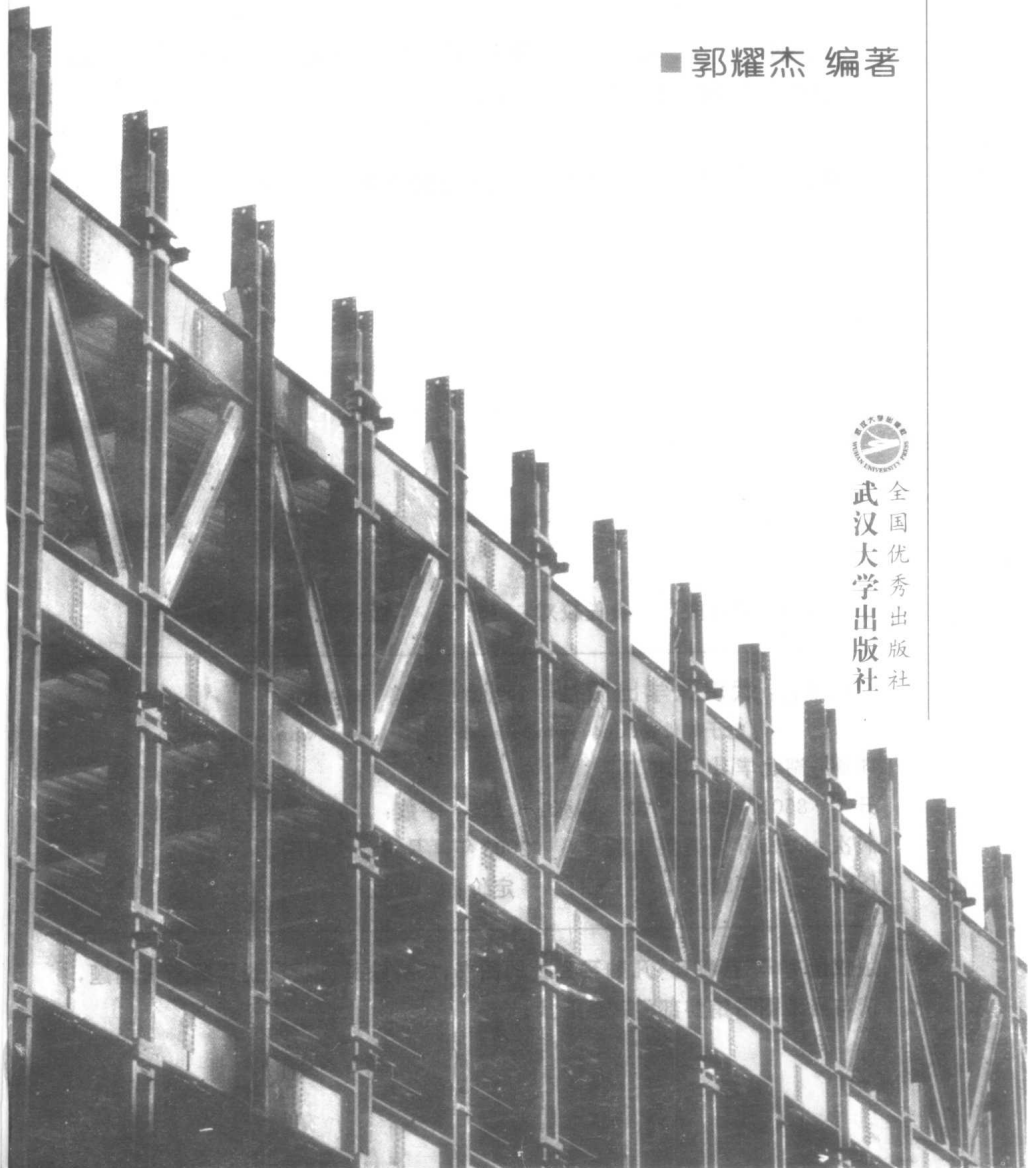
全国  
优秀出版社  
武汉大学出版社

# 钢结构 稳定设计

■ 郭耀杰 编著



全国优秀出版社  
武汉大学出版社



## 图书在版编目(CIP)数据

钢结构稳定设计/郭耀杰编著. —武汉: 武汉大学出版社,  
2003. 4  
ISBN 7-307-03885-4

I. 钢… II. 郭… III. 钢结构—结构稳定性—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(2003)第 008044 号

责任编辑: 史新奎 责任校对: 王 健 版式设计: 支 笛

---

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 湖北毕昇印刷总厂

开本: 850×1168 1/32 印张: 6.125 字数: 148千字

版次: 2003年4月第1版 2003年4月第1次印刷

ISBN 7-307-03885-4/TU·41 定价: 9.00元

---

版权所有, 不得翻印; 凡购买我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

## 内 容 提 要

本书全面阐述了钢结构设计中有关稳定设计问题。全书共 5 章,先系统介绍钢结构稳定问题的特点和基本概念,然后分别讨论轴心受压构件、受弯构件、压弯构件以及框架、桁架、单层厂房结构的稳定问题。讨论内容包括钢结构存在的各种稳定问题的现象及分类,结构和构件稳定承载力计算的力学背景,稳定承载力的影响因素,稳定设计的原则及实用公式的推导,稳定设计的实例。

本书可作为土木工程、水利工程等专业的本科生教材和参考书,也可作为从事钢结构设计、制作、施工和研究等方面工程技术人员的参考书籍。

## 序

防止结构失稳,是钢结构设计中应充分注意的问题。然而,许多工程技术人员和土木工程专业的学生仍把结构稳定问题看成是一门很高深的学问,以致对结构失稳的力学背景以及《钢结构设计规范》中结构稳定设计条文未能深入理解。钢结构及其梁、柱、板件的承载能力在很大程度上取决于它们的稳定性。因此,充分理解结构稳定的力学本质和掌握结构稳定设计方法,对做好钢结构设计至关重要。

因此,本书的任务是:详细阐述钢结构设计中可能遇到的稳定问题的基本理论,重点论述如何从基本理论得出《钢结构设计规范》中的稳定设计实用公式,以及如何应用这些公式做好稳定设计。

本书首先阐述结构稳定的基本概念和结构失稳破坏的种类,以期从整体上了解钢结构稳定问题所涉及的方方面面;接着,按不同的构件和结构形式分章进行详细讨论。每章讨论内容包括稳定计算的种类划分,每一类稳定问题的现象、稳定承载力的求解及其主要影响因素的分析、提高稳定承载力的措施、钢结构设计规范稳定设计公式的理论演变。通过分章专题讨论,使读者全面理解轴心受压构件、受弯构件、压弯构件和框架、桁架、单层厂房结构的稳定问题,并掌握其设计方法,使读者对设计规范中稳定设计条文规定不仅知其然而且知其所以然。书中针对不同的稳定问题有大量的计算和设计例题,以此来全面说明设计方法的具体应用。

本书除可用作大学本科土木工程和水利工程等专业学生的教

材和参考书外,还可供从事钢结构设计、制造、施工、管理和研究等方面的工程技术人员作为参考书籍。希望本书能对读者有所裨益。

本书由郭耀杰统一编写。第一章由郭耀杰完成;第三、四、五章由郭盛提出初稿,第二章由李昆提出初稿,最后由郭耀杰统一补充修改定稿。

方山峰教授对本书进行了全面审阅并提出了宝贵意见,谨致谢意。

书中存在的缺点和错误,请读者批评指正。

作 者

2002年8月于武昌珞珈山

# 目 录

序	1
引言	1
<b>第一章 钢结构稳定问题总论</b>	<b>3</b>
1.1 平衡状态的稳定性概念及临界状态	3
1.2 临界荷载和临界应力	3
1.3 失稳破坏及稳定设计的思想	4
1.4 稳定问题的类型	5
1.5 结构稳定分析的原则	9
1.6 稳定分析水准	10
1.7 高水准分析对二阶水准分析结论的支持	11
1.8 钢结构和构件的整体失稳破坏	12
1.9 钢结构和构件的局部失稳破坏	12
1.10 钢结构稳定设计应注意的问题	13
<b>第二章 轴心受压构件稳定计算</b>	<b>15</b>
2.1 轴心受压构件分类及存在的稳定问题	15
2.2 实腹式轴心受压构件整体稳定的基本理论 及其设计方法	20
2.3 实腹式轴心受压构件局部稳定的基本理论 及其设计方法	44

2.4	实腹式轴心受压构件稳定设计实例	50
2.5	格构式轴心受压构件整体稳定的理论及其设计方法	56
2.6	格构式轴心受压构件稳定设计实例	65
<b>第三章</b>	<b>受弯构件稳定计算</b>	<b>69</b>
3.1	受弯构件存在的稳定问题	69
3.2	受弯构件整体稳定计算及其设计方法	73
3.3	受弯构件整体稳定设计实例	81
3.4	受弯构件局部稳定计算和腹板加劲肋设计	87
3.5	受弯构件局部稳定设计实例	98
<b>第四章</b>	<b>压弯构件稳定计算</b>	<b>108</b>
4.1	压弯构件的类型及存在的稳定问题	108
4.2	实腹式压弯构件整体稳定的基本理论及其设计方法	111
4.3	实腹式压弯构件局部稳定的基本理论及其设计方法	120
4.4	实腹式压弯构件稳定设计实例	124
4.5	格构式压弯构件稳定设计方法	133
4.6	格构式压弯构件稳定设计实例	137
<b>第五章</b>	<b>结构稳定计算方法</b>	<b>145</b>
5.1	结构稳定问题及其等价计算	145
5.2	框架稳定计算	148
5.3	桁架稳定计算	154
5.4	单层厂房结构稳定计算	160
<b>附录</b>		<b>168</b>
	附录1 轴心受压构件的稳定系数	168



---

附录 2 梁的整体稳定系数 .....	173
附录 3 柱的计算长度系数 .....	178
<b>参考文献</b> .....	<b>182</b>

## 引 言

进行工程结构设计,需要考察其强度条件、刚度条件、稳定性条件等是否满足。钢材具有高强、质轻、力学性能良好的优点,是工程结构的一种极好的建筑材料。在钢结构工程设计中,其稳定问题与强度问题同样重要。其原因在于钢材的强度高,用它制造的结构构件质轻、形长而壁薄,因而它们在压(应)力或剪(应)力作用下就有可能失稳。

钢结构因失稳而破坏的情况在国内外都发生过。例如,1907年加拿大圣劳伦斯河上的魁北克桥,在用悬臂法架设桥的中跨桥架时,因桥桁架中受压最大的下弦杆丧失稳定,致使桥梁倒塌,75人遇难,9 000 t 钢构体变成一大堆废铁。1922年美国华盛顿镍克尔卜克尔剧院,在一场大雪中,由于屋顶结构中一根梁超载失稳,引起柱和其它结构发生移动,导致建筑物倒塌,死亡 98 人。我国辽宁某楼房建成后又新增加了一层会议室,设计人员在计算桁架受压腹杆时,未区分绕截面两个不同弯曲方向的稳定性,误用了计算长度系数,1990年因一根受压腹杆在桁架平面外首先失稳而导致屋盖迅速塌落,造成 42 人死亡。

并非所有失稳事故都是由于设计失误造成的,制造和安装或使用不当也可能导致失稳事故。1957年前苏联某房屋的七榀钢桁架连同 1 200 m<sup>2</sup> 屋盖突然塌落,原因是长度相同的一对拉杆和压杆安装时弄反了,拉杆当做压杆使用,压杆的承载力降低过大,从而出现失稳,引发了整体提前破坏。

近十年来,我国轻型和高层房屋以及桥梁等钢结构得到了长

足的发展,如果对其性能了解不够,或设计经验不足,或对一些次要细部设计未予以足够重视,都可能引发失稳事故。

有鉴于此,本书将系统地介绍钢结构设计中的稳定问题,阐述各种情况下失稳的机理及其影响因素,着重说明为满足各类稳定要求所进行相应计算的理论依据和应遵循的方法,以期帮助读者做好钢结构稳定设计,避免失稳事故发生。

## 第一章 钢结构稳定问题总论

在钢结构的可能破坏形式中,属于失稳破坏的形式包括:结构和构件的整体失稳;结构和构件的局部失稳。结构的稳定分析必须根据结构的变形状态即微变形平衡状态来进行。研究结构稳定问题的主要目的,就是要防止不稳定平衡状态的发生。

### 1.1 平衡状态的稳定性概念及临界状态

工程结构或构件在荷载作用下,往往处于某种静力平衡状态。例如,两端简支桁架,在节点荷载作用下,上弦杆处于轴向受压的平衡状态;工作平台结构中柱子处于压弯平衡状态;实腹式工字形截面梁在横向荷载作用下处于平面弯曲的平衡状态等。处于静力平衡状态的结构或构件,在任意微小外界扰动作用下,将偏离其平衡位置,当外界扰动除去后,如果仍能自动回复到原来的平衡位置,则原来的平衡状态是稳定的;如果外界扰动除去后不能回复到原来的平衡位置,则原来的平衡状态是不稳定的;如果外界扰动除去后不能回复到原来的平衡位置,但仍能停留在新的平衡位置,则为中性平衡,也称随遇平衡。中性平衡状态就是从稳定平衡状态过渡到不稳定平衡状态的临界状态。

### 1.2 临界荷载和临界应力

结构或构件保持其原来的稳定平衡状态所能承载的最大荷

载,或者说丧失其原来稳定平衡状态所需要的最大荷载,亦即使结构或构件处于临界状态的荷载,称之为临界荷载(或极限荷载),常用  $N_{cr}$ 、 $M_{cr}$  等表示。例如,分支点失稳中的分支点荷载,极值点失稳中的极限承载力等。

临界荷载是结构本身所固有的能力,对一具体结构而言,它是定值,通过数学和力学等方法,可求解得到。

临界荷载除以截面的相应几何特征所得的应力值,称为临界应力(稳定应力),用  $\sigma_{cr}$  表示。

### 1.3 失稳破坏及稳定设计的思想

当荷载小于一定的临界荷载时,在外界扰动除去后,结构或构件仍能恢复到原来的平衡状态,这时结构处于稳定平衡。当荷载增加至临界荷载时,结构发生偏离原来平衡状态的变形,即使外界扰动除去后,结构也不能恢复到原来的平衡状态,这时结构处于极其短暂的中性平衡状态,并迅速转变为不稳定平衡,最终因变形急剧增大而遭致破坏。这种结构在外荷载作用下丧失了保持其原来的稳定平衡状态的能力而破坏的现象,就是结构整体失稳破坏。这时的外荷载尚未达到按强度计算得到的结构强度破坏荷载。

进行结构稳定分析的最终目的,就是求得具体结构的临界荷载(或稳定极限荷载)。进行结构稳定设计的最终目标,就是使设计出来的工程结构在使用荷载作用下,构件、部件及整个结构体系都不发生失稳。那么,稳定设计是如何达到这一目标的呢?

实现工程结构不发生失稳的稳定设计方法主要有两种。

第一种方法,就是先求出已按强度和刚度等条件设计出的结构本身的稳定能力即临界荷载值,再让外荷载不超过临界荷载值,自然此时的平衡状态是稳定的。这就是通常所说的结构稳定性验算问题。

第二种方法,就是在已知外荷载大小的前提下,按稳定设计方

法设计出结构的形式和尺寸等。此时所设计出的结构的稳定能力不能小于外荷载,自然此时的结构是稳定的。这就是通常所说的结构稳定设计问题。当然结构的强度和刚度等条件也应得到满足。

另外,在稳定设计中,常采用在构件中段增加支撑点、在结构中增加支撑、在构件端部加强节点约束等措施,这些措施都是提高结构稳定性(亦提高临界荷载)的有效方法。

## 1.4 稳定问题的类型

钢结构的失稳现象是多种多样的,但就其性质而言,主要分为两大类。

### 1.4.1 第一类稳定问题——分支点失稳

第一类稳定问题的特征是:当荷载逐渐增加时,结构原有的平衡形式被破坏了,并出现了与原平衡形式有本质区别的新的平衡形式,由稳定平衡转变为不稳定平衡,出现了稳定性的转变。

图 1-1 为轴心受压柱丧失稳定的例子。其直线平衡状态的稳定性与轴压荷载  $N$  的大小有关。当荷载  $N$  小于某值 ( $N < N_{cr}$ ) 时,柱仍然是直的,如图 1-1(a) 所示,直线平衡状态是稳定的。当荷载  $N$  达到某一值 ( $N = N_{cr}$ ) 时,直线平衡状态不再是惟一的,还可能出现微弯平衡形式,如图 1-1(b) 所示,此时的平衡状态称为轴心受压柱的临界状态,对应的荷载称为轴压柱的临界荷载,也称为欧拉荷载或欧拉临界力(用  $N_E$  表示)。当荷载  $N$  大于该值 ( $N > N_{cr}$ ) 时,需要用大挠度理论进行分析。分析结果表明,此时柱既可以具有直线平衡状态,如图 1-1(c) 中  $AB$  路径(见下文),又可以具有弯曲的平衡形式,如图 1-1(c) 中的  $AC$  路径。必须说明的是,大挠度理论给出的  $AB$  路径对应的直线平衡状态是不稳定的,而且  $AC$  路径对应的弯曲平衡形式只有在出现相当大的弯曲变形后,荷载才会有所增加,这是对  $N_{cr}$  结论的肯定;此时轴向应力和弯曲应力

的组合将超过材料的比例极限,使杆件处在非弹性工作阶段。因此,在弹性范围内大挠度理论得出的结果决不会使  $N_{cr}$  失去任何意义。

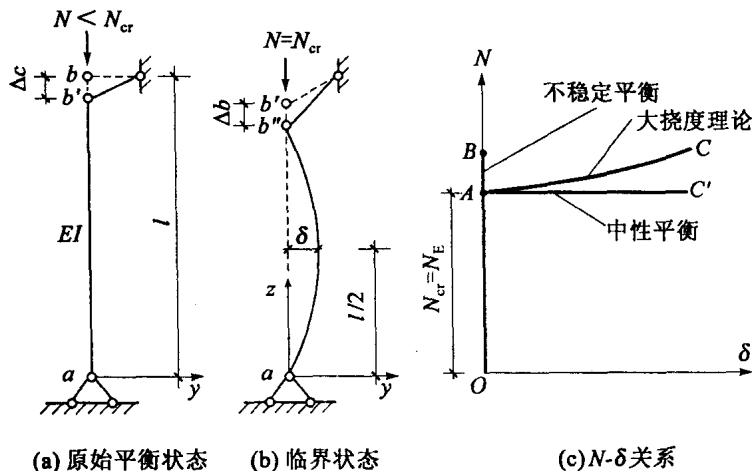


图 1-1 受压构件失稳

设中心受压直杆中点的挠度为  $\delta$ , 如图 1-1(b) 所示。如果为稳定平衡,  $\delta=0$ ; 如果平衡状态不稳定, 则必出现弯曲平衡状态, 这时  $\delta \neq 0$ 。轴向荷载  $N$  与挠度  $\delta$  的关系曲线(由大挠度理论给出)如图 1-1(c) 所示。图中,  $OA$ 、 $OB$  表示直线平衡,  $AC'$  表示弯曲平衡。表示中心受压直杆随荷载  $N$  的增加而取不同的平衡形式的  $OA$ 、 $AB$ 、 $AC'$  线段, 称为平衡路径。平衡路径在  $A$  点发生分支,  $A$  点称为分支点, 该点的荷载值称为分支点荷载, 记为  $N_{cr}$ 。

平衡路径  $OA$  上的中心受压直杆处于稳定的直线平衡状态;  $AB$  是不稳定的直线平衡状态;  $AC'$  是中性的弯曲平衡状态。分支点是直线平衡状态从稳定转变为不稳定的分界点。直线平衡失稳时, 将存在轴心受压和弯曲两种不同受力性质的平衡状态的可能,

即发生平衡路径的分支。具有上述特征的失稳,称为分支点失稳,也就是第一类稳定问题。

图 1-2(a)所示对称刚架丧失稳定,图 1-2(b)所示梁平面弯曲平衡状态的失稳等,都属于分支点失稳问题。

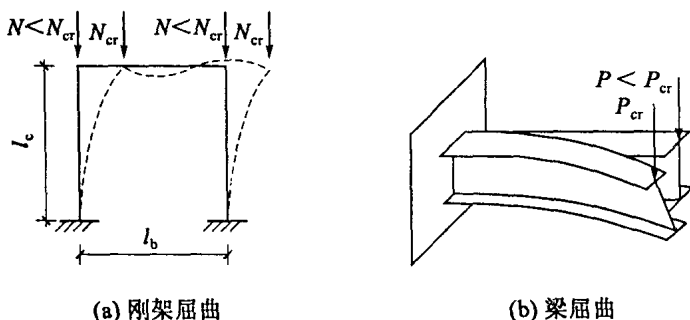


图 1-2 结构和受弯构件失稳

#### 1.4.2 第二类稳定问题——极值点失稳

第二类稳定问题的特征是:原来的变形大大地发展,但不出现新的变形形式,即结构的平衡形式不出现分支现象。随着荷载的增加,平衡状态由稳定平衡状态达到极限平衡状态,即临界状态;随后荷载不增加甚至减小,变形仍在加大,平衡状态已为不稳定平衡状态,结构不能继续承受荷载,丧失了稳定的承载能力,继而发生破坏。

图 1-3(a)所示偏心受压直杆处于压弯平衡状态,杆件中点的挠度  $\delta$  与荷载  $N$  的关系曲线如图 1-3(b)所示。平衡路径分为  $OA$  和  $AB$  两段。上升段  $OA$  上的平衡状态是稳定的;下降段  $AB$  上的平衡状态是不稳定的。这类失稳没有平衡分支现象。随着荷载的增加,结构变形也增加,而且愈来愈快,直到结构不能承受外荷载,甚至减小荷载时变形也能增加。事实上,当荷载增加至  $A$  点时,杆



件由于平衡的不稳定性而立即破坏,故难以给出下降段  $AB$  曲线。

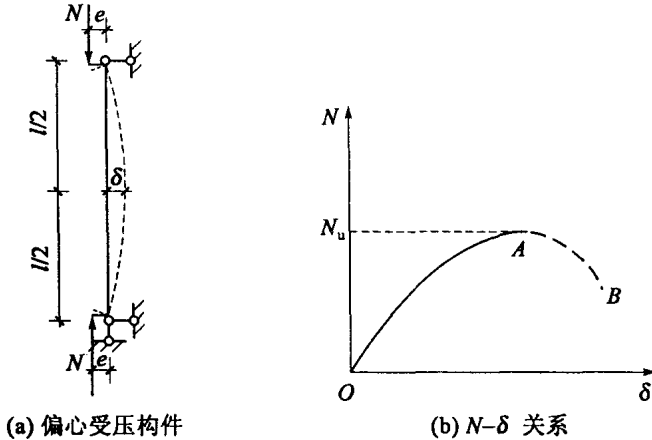


图 1-3 偏心受压构件失稳

$A$  点称为极值点,与  $A$  点相应的  $N$  值称为稳定极限荷载,也称为压溃荷载,用  $N_u$  表示。偏心受压构件失稳时,不会出现平衡形式的分支,自始至终都处于压弯平衡状态之中。构件在失稳之前受压一侧一般已存在塑性变形,失稳的发生是塑性发展到一定程度时杆件丧失承载力的结果。这种失稳称为极值点失稳,也称为第二类稳定问题。

#### 1.4.3 第一类稳定问题与第二类稳定问题的关系

有平衡分支的稳定问题,只在理想情况下即无各种初始缺陷的情况下才能出现。工程中存在的稳定问题大多数属于极值点失稳,但这并不意味着第一类稳定问题没有实际意义。通过对第一类稳定问题的分析,可得出临界荷载解析解,而解析解能直接反映出各种因素对结构或构件稳定能力的影响形式和程度。第二类稳定问题常用计算机进行数值分析,同时考虑材料和几何非线性性能,