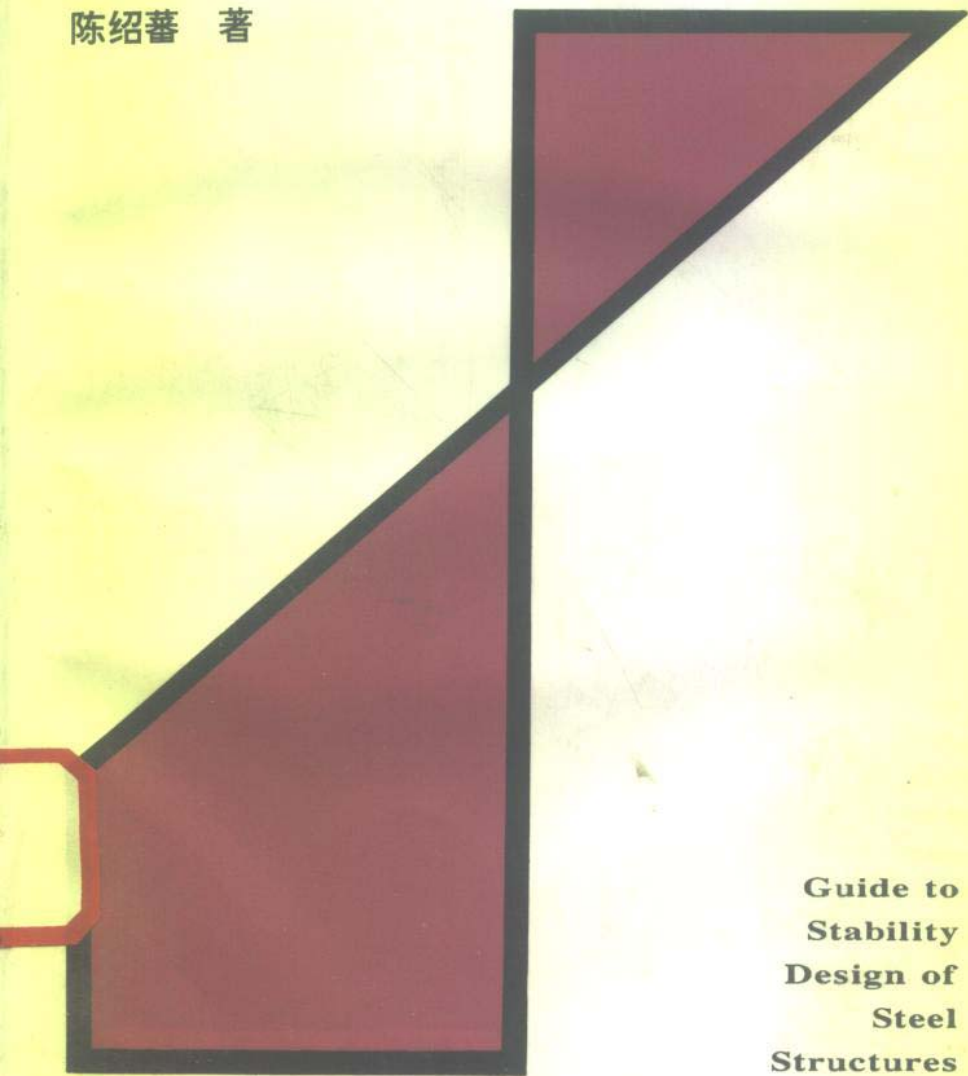


● 中国建筑工业出版社

# 钢结构 稳定设计 指南

陈绍蕃 著



**Guide to  
Stability  
Design of  
Steel  
Structures**

T 311.1  
C 14

# 钢结构稳定设计指南

陈绍蕃 著

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书全面论述钢结构设计中遇到的稳定问题,包括稳定问题的特点和基本概念,各类构件、板件和框架、环、拱、壳体的稳定计算和有关构造与施工质量问题,还论述了支撑的作用和计算以及塑性设计和抗震设计中的稳定问题。全书共12章,书中不仅阐明钢结构设计规范中有关稳定条文的背景知识,还介绍了规范未包括的稳定问题的实用计算方法。

本书除作为钢结构设计和施工人员的参考资料外,也可供建筑工程专业高年级学生和结构工程研究生学习参考。

### 钢结构稳定设计指南

陈绍蕃 著

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市顺义板桥印刷厂印刷

\*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 9 1/2 字数: 260千字

1996年9月第一版 1996年9月第一次印刷

印数: 1-3,600册 定价: 15.00元

ISBN 7-112-02915-5

TU·2223 (8030)

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)

## 序

著者应中国钢结构协会主办的《钢结构》编辑部之约，于1991年开始为该刊撰写《钢结构稳定设计讲座》。历时三年，先后刊出12讲，内容涉及稳定设计的各个方面：不仅包括经常遇到的各类杆件和板件，也包括支撑、框架、拱、环、壳体的稳定及塑性设计和抗震设计的特殊稳定问题，这次把12讲的内容汇集成册，又作了一次全面修改，使其更加充实和符合实际设计需要，并更名为《钢结构稳定设计指南》。

本书以从事钢结构工程的技术人员为读者对象。书中首先阐述稳定设计的基本概念和特点，以期建立稳定设计的整体概念。其次，对《钢结构设计规范》有关稳定计算的规定提供了背景知识，并指出一些条文的适用条件和应用限制，使读者能在理解的基础上正确运用规范。再次，对于规范尚未包括的稳定设计问题，则在解释原理的同时尽量提供实用的计算方法，使设计工作者遇到这类问题时资料可以参考。稳定设计不单纯是计算问题，它还涉及到结构布置、构造细部和施工质量等各个方面。这些问题在书中也都有所陈述。限于著者的水平和所掌握的资料，书中难免有不妥之处，敬希读者指正。

在即将付梓之际，著者谨向《钢结构》编辑部张锡云主编表示谢忱；没有他的约稿，不会有今天这本书。还要向中国建筑工业出版社的领导和有关同志致谢；没有他们的支持和协助，本书不会这么快得以出版。

著者

1995年12月于西安

# 目 录

概述 .....	1
第一章 钢结构稳定问题的特点 .....	2
第一节 稳定问题的多样性、整体性和相关性 .....	2
第二节 稳定计算的特点 .....	4
第三节 非弹性稳定、极限承载力和脆性特征 .....	11
第四节 稳定设计需要注意的问题 .....	16
第五节 本章小结 .....	17
第二章 轴心压杆的稳定计算 .....	19
第一节 $\varphi$ 曲线的制定和应用 .....	19
第二节 多种失稳形态的考虑 .....	25
第三节 格构式压杆的特点 .....	31
第四节 压杆截面选择 .....	37
第五节 本章小结 .....	41
第三章 轴心压杆的计算长度和桁架 的极限承载力 .....	42
第一节 轴心压杆的计算长度 .....	42
第二节 平面桁架中压杆的计算长度 .....	45
第三节 空间桁架中压杆的计算长度 .....	54
第四节 桁架的极限承载力 .....	60
第五节 本章小结 .....	62
第四章 受弯构件的整体稳定 .....	64
第一节 受弯构件整体稳定的计算 .....	64
第二节 支承条件对梁整体稳定的影响 .....	74
第三节 铺板和支撑防止梁失稳的作用 .....	82
第四节 次梁对主梁稳定的影响 .....	87
第五节 本章小结 .....	89

第五章	兼承轴力和弯矩的构件稳定 .....	90
第一节	压弯构件平面内失稳的计算 .....	90
第二节	压弯构件的空间失稳 .....	98
第三节	框架柱的计算长度 .....	102
第四节	拉弯构件的弹性稳定 .....	115
第五节	本章小结 .....	116
第六章	框架稳定 .....	117
第一节	框架的弹性稳定 .....	117
第二节	有侧移框架的非弹性稳定 .....	125
第三节	二阶效应的其他影响 .....	138
第四节	山形门式框架的特点 .....	143
第五节	本章小结 .....	144
第七章	板件的稳定 .....	145
第一节	单板的稳定 .....	145
第二节	板件间的相互约束 .....	151
第三节	板件宽厚比限值 .....	156
第四节	加劲肋设计 .....	159
第五节	连接构造中的板件稳定 .....	163
第六节	方管桁架中的节点 .....	170
第七节	本章小结 .....	171
第八章	板件屈曲后的强度与利用 .....	172
第一节	板件屈曲后的性态 .....	172
第二节	板件的有效截面 .....	175
第三节	板件和杆件的相关屈曲 .....	181
第四节	梁腹板屈曲后强度 .....	186
第五节	本章小结 .....	197
第九章	稳定设计中的支撑 .....	198
第一节	压杆的支撑 .....	198
第二节	梁的支撑 .....	214
第三节	框架的支撑 .....	221
第四节	本章小结 .....	224
第十章	环和拱的稳定 .....	225

第一节	圆环的稳定 .....	225
第二节	拱的平面内稳定 .....	231
第三节	拱的平面外稳定 .....	243
第四节	本章小结 .....	249
第十一章	壳的稳定 .....	251
第一节	圆柱壳 .....	251
第二节	圆锥壳 .....	269
第三节	球壳 .....	272
第四节	本章小结 .....	277
第十二章	塑性设计和抗震设计中的稳定问题 .....	279
第一节	塑性设计中的稳定问题 .....	279
第二节	抗震设计中的稳定问题 .....	291
第三节	本章小结 .....	300
结束语	.....	301
参考文献	.....	302

## 概 述

在各类钢结构设计中，保持稳定性是经常遇到的问题。小至构件中的一块板件，大至构件集成成的结构体系，设计时莫不涉及到稳定性的考虑，这是钢结构设计中的一个显著特点。其原因在于钢材的强度高，用它制成的构件往往比较细长，组成构件的板件又比较纤薄，因而它们在压力作用下就有可能失稳。对待钢结构中失稳的可能性，通常是采取加以防止的对策，使结构、构件和零件不致因失稳而丧失承载能力。少数情况下，则可以考虑允许组成构件的板件屈曲，利用其屈曲后的强度，以获取较佳的经济效益。因此，如何防止失稳和利用屈曲后强度，将是本书的主要内容，它既涉及到稳定计算，也涉及到构造处理和结构布置方案。

现代工程史上不乏钢结构失稳造成的事故。举其大者，早期有 1907 年的加拿大魁北克大桥坠毁事故，近期则有 1970 年前后多次发生的大跨度箱形钢梁桥破坏事故等。1978 年美国哈特福特体育馆网架结构破坏事故就引起了各国钢结构学者和工程界的关注与议论。可以毫不夸张地说，本世纪钢结构因失稳造成的事故时有发生。我国也未能例外，如 1988 年就在太原发生过  $13.2 \times 17.99\text{m}$  网架塌落事故<sup>[1]</sup>。

每当一种新结构或构件出现时，在应用过程中，因对其性能了解不够，或设计经验不足，或对一些次要细部设计未予重视，均有可能发生失稳事故，特别是那些盲目设计更为多发。因此，本书将致力于全面介绍钢结构设计中可能遇到的稳定问题，帮助读者了解各种情况下失稳的原理，掌握各类稳定设计的要领，以期在设计、施工和使用中能有效地避免失稳事故的发生。



# 第一章 钢结构稳定问题的特点

## 第一节 稳定问题的多样性、整体性和相关性

### 一、多样性

钢结构的稳定问题普遍存在于钢结构的设计中，凡是结构的受压部位，在设计时都必须认真考虑其稳定性。有时，某一部位从表面上看来并不受压或主要不是受压，但仍然也会出现屈曲失稳问题。例如在简支钢板梁的端部腹板处，一般情况下弯曲正应力较小，比较大的是剪应力。然而，纵横两个方向的剪应力相结合，就可能形成较大的斜向压应力，并导致腹板局部失稳。此外，结构的某些部位也有可能随结构变形由不受压变为受压而导致失稳。这种情况很容易被设计者所忽视。以图 1-1 为例，在通常设计中，对位于多跨厂房中柱上的天窗架，是把它作为附加在屋架上的次要构件单独计算的，其斜杆在节点竖向荷载作用下被认为是不受力的。截面选择由风荷载作用下产生的拉力来确定，因而所选用的截面积很小。然而屋架在重力荷载作用下会产生挠曲，这就促使 A、A' 节点向下位移，从而对接受拉设计的 BC 和 B'C 斜杆形成压力，促使这两根细长杆件失稳。这种情况在我国的一些炼钢车间中已经发生了多次<sup>(2)</sup>。虽然不致酿成重大事故，但因此而存在的问题，却不能不引起设计和使用者的重视，并予以加固。

钢结构失稳，在形式上具有多样化特点。例如，轴心受压构件的弯曲失稳是最常见的屈曲形式，但它并非唯一的失稳形式，它还有可能出现扭转失稳和既弯又扭等多种失稳的形式。在桁架结

构中除了其中受压的杆件外，连接杆件的节点板也存在防止失稳的问题；另外桁架和柱子组成的框架也有可能失稳等等，这些都是稳定问题多样化的表现。

## 二、整体性

对于结构来说，它是由各个杆件组成为一个整体的。当一个杆件发生失稳变形后，它必然牵动和它刚性连接的其他杆件。因此，杆件的稳定性不能就某一根杆件去孤立地分析，而应当考虑其他杆件对它的约束作用。这种约束作用是要从结构的整体分析来确定的，这就是结构稳定的整体性问题。

图 1-2 给出的是一个悬臂桁架模型失稳的形态，因为下弦第一个节间受压最大，当荷载增加到一定程度时就会出现第一节间杆件弯曲屈曲。这时，由于节点都是刚性的，与节点相连的杆件以至桁架各杆都会或多或少随同弯曲，这一现象显示出结构失稳的整体特性。正因为存在整体作用，所以下弦杆的屈曲临界力，将大于两端铰支时的临界力，而且，这种临界力只有通过整体分析才能计算得出。稳定问题的整体性不仅表现在构件之间的相互约束，也表现在围护结构对承重结构的约束作用，只是在目前设计中往往被忽略了。

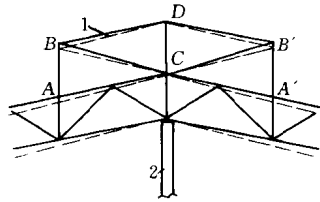


图 1-1 天窗架斜杆失稳

1—天窗架；2—柱

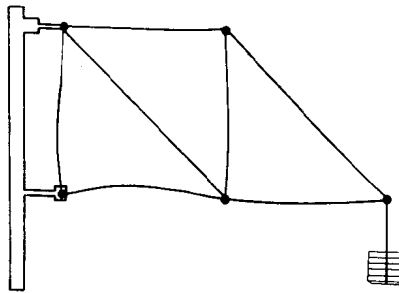


图 1-2 模型桁架的失稳变形

### 三、相关性

稳定的相关性，指的是不同失稳模式的耦合作用。例如，单轴对称的轴心受压构件，当在对称平面外失稳时，呈现既弯又扭的变形，它是弯曲和扭转的相关屈曲。另外，局部和整体稳定的相关，还常见于冷弯薄壁型钢构件。其壁板的局部屈曲一般并不立刻导致整体构件丧失承载能力，但它对整体稳定临界力却有影响。对于存在缺陷的杆件来说，局部和整体之间相互影响更具有复杂性。格构式压杆也有局部和整体稳定的相关问题，这些相关方面问题，将在第二章中再进一步论述。

组成钢构件的板件之间发生局部屈曲时的相互约束，有时也称为相关性。

## 第二节 稳定计算的特点

### 一、失稳和整体刚度

轴心压杆的强度和稳定计算公式，现行规范分别规定为：

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \leq f \quad (1-1)$$

和 
$$\frac{N}{\varphi A} \leq f \quad (1-2)$$

公式(1-1)和公式(1-2)二者在形式上区别不很大，但性质却迥然不同。强度计算是针对构件的某一个截面进行的；而稳定计算从公式形式看，虽然也像是针对个别截面，实际上它却是针对整个构件的。

轴心压杆在弹性范围内的临界力是由著名的欧拉公式给出的：

$$N_E = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (1-3)$$

在公式(1-3)的右端，不仅有材料特性 $E$ 和截面特性 $I$ ，还有杆的长度 $l$ ，这就表明它不只是个别截面的问题。那末，轴心压杆为什么在压力达到 $N_E$ 时就不能再保持原有的直线形式呢？原因就

在于压力使杆的弯曲刚度下降,而压力达到临界值  $N_E$  时,杆的弯曲刚度就消失了。请看下面的进一步分析。

任何现实中的杆件,其轴线并不可能是几何学上的理论直线,也就是并非完善直杆,而是具有微小弯曲的杆件,我们将这种弯曲称之为初始弯曲。图 1-3 给出一根具有这种几何缺陷的杆件。在它承受着逐渐加大的压力  $N$  的过程中,随着  $N$  的增大,杆的挠度也逐渐增大,假设初始弯曲的形状为正弦曲线的半个波,则初始挠度按图示坐标系为  $y_0 = v_0 \sin \pi x / l$ , 据此建立的平衡方程式为

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} + N \left( y + v_0 \sin \frac{\pi x}{l} \right) = 0 \quad (1-4)$$

解之,可得到杆中央的总挠度为

$$v_m = \frac{v_0}{1 - N/N_E} \quad (1-5)$$

显而易见,当  $N = N_E$  时,  $v_m$  将无限增大,它的物理意义就是指杆件的弯曲刚度退化为零了。杆件无法再保持稳定的平衡了。

从这一分析可以得知,杆件的弯曲刚度随其所受压力增大而不断退化;当  $N$  达到临界值  $N_E$  时,刚度退化为零。这是分析稳定问题时的一个重要概念。这个概念不仅适用于单根压杆,也适用于如框架等杆件体系。

## 二、稳定性要求整体分析

既然杆件能否保持稳定牵涉到结构的整体性问题,那么,稳定分析也就应该从整体结构着眼。然而,当前在设计单层钢框架时,并不去计算框架本身的稳定性,而是用计算柱子的稳定性来代替。因之,应当引起注意的是,这只是一种简化方法。它是把横梁对柱子的约束和柱脚所提供的约束,通过计算长度来加以体现的。这种简化只是在符合一定条件时才是精确的。

现以铰支单跨单层框架为例,加以分析说明。图 1-4 (a) 所

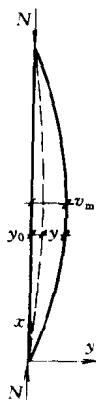


图 1-3 有初始弯曲的压杆

示的对称框架中，在柱顶有集中重力荷载  $N$  作用的条件下，将有两种可能失稳的形式发生，即无侧移的对称失稳（图 1-4 (b)）和有侧移的反对称失稳（图 1-4 (c)）。前者的临界荷载要比后者大。因此，在顶部没有侧向支点的情况下，框架即以反对称形式失稳。下面就分析出现这种失稳时的临界荷载。

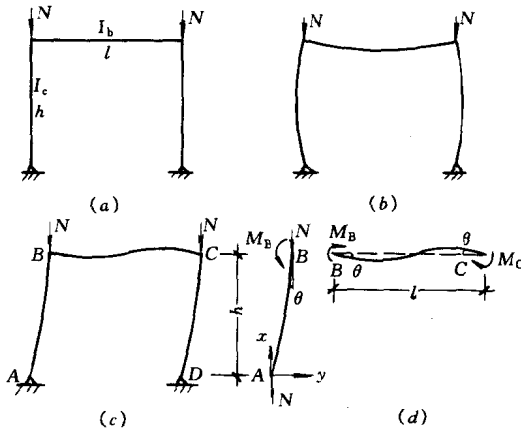


图 1-4 铰支框架的屈曲

取左柱作为分离体（图 1-4 (d)），可列出其平衡微分方程为（忽略了剪力对柱子的影响）：

$$EI_c y'' + Ny = 0 \quad (1-6)$$

现命  $k^2 = N/EI_c$ ，则公式 (1-6) 的解为

$$y = A \sin kx + B \cos kx$$

根据下端为不动铰的边界条件， $x=0$  时  $y=0$ ，可知  $B=0$ 。因此，柱轴线任意点的位移为：

$$y = A \sin kx$$

则

$$\text{柱顶位移为：} y_B = A \sin kh \quad (1-7)$$

$$\text{柱顶倾角为：} \theta = y'_B = Ak \cos kh$$

在对称结构呈反对称变形的情况下，横梁两端承受相同的弯

矩，其端部倾角为：

$$\theta = \frac{M_B l}{6EI_b} = \frac{N y_B l}{6EI_b}$$

从上述两式对等中消去  $\theta$ ，可得：

$$\frac{Nl}{6EI_b} y_B = Ak \cos kh \quad (1-8)$$

公式 (1-7) 和公式 (1-8) 所列出的方程式都是以  $y_B$  和  $A$  为未知量的方程式，并且都没有常数项。在联立方程求解时，如果要得到  $y_B$  的非零解，方程组的系数行列式必须为零。由是可得临界条件为：

$$khtgkh = 6 \frac{I_b h}{I_c l}$$

或 
$$khtgkh = 6K_2 \quad (1-9)$$

式中， $K_2 = \frac{I_b h}{I_c l}$  为梁线刚度和柱线刚度之比。

从公式 (1-9) 这一超越方程中得到的  $N$ ，就是框架的临界荷载。

当用柱的稳定计算代替框架稳定计算时；其式为

$$N_{Cr} = \frac{\pi^2 EI_c}{(\mu h)^2}$$

式中的  $\mu$  是柱子的计算长度系数。将上式代入  $N_{Cr} = k^2 EI_c$  时，即可得

$$kh = \pi / \mu$$

则公式 (1-9) 可改写成

$$\frac{\pi}{\mu} \operatorname{tg} \frac{\pi}{\mu} - 6K_2 = 0 \quad (1-10)$$

当框架的各部分尺寸给定后，由公式 (1-10) 即可计算出柱子计算长度系数  $\mu$ 。

当柱脚刚性嵌固而不是铰支时，在同样条件下， $\mu$  系数的计算公式是

$$\frac{\pi}{\mu} + 6K_2 \operatorname{tg} \frac{\pi}{\mu} = 0 \quad (1-11)$$

《钢结构设计规范》(GBJ17—88)中附表 4.2 第一行和末行的系数  $\mu$ , 就是由上列公式 (1-10) 和公式 (1-11) 二式算得的。

从以上分析表明, 按规范所给出的框架计算长度系数计算柱子稳定性, 在承受柱顶对称竖向荷载的对称框架中, 是和框架稳定计算等价的。这种方法称为计算长度法, 应用比较简便。

但是, 如果条件不同, 计算长度法就不能确切反映框架的稳定状况了。例如, 当框架不对称或荷载不对称时, 如果要比准确地解决稳定问题, 就需要将上述  $\mu$  系数加以修正。详细情况留待以后再讨论, 这里先来分析一个简单的例子。

图 1-5 给出了一个分别承受两种不同荷载作用的铰支  $\Gamma$  形框架, 其中图 1-5 (a) 的框架中在柱顶作用有重力荷载  $N$ , 在图 1-5 (b) 中, 柱顶除作用重力荷载外, 还作用有水平荷载  $H$  (量值和重力荷载相同)。GBJ17—88 规范第 5.3.3 条规定的  $\mu$  系数, 从文字上看, 似乎适用于这两种作用状态的框架中的柱子, 因为它们都属“单层框架等截面柱”。然而图 1-5 (a) 的框架虽然荷载作用在柱顶, 但与图 1-4 (a) 的条件并不相同。如果套用规范规定的  $\mu$  系数, 就必然会有误差。按 GBJ17—88 规范附表 4.1 (框架无侧移), 由  $K_1 \approx 0, K_2 = 1$  查得的  $\mu = 0.875$ , 相应的临界荷载即得  $N_{cr} = 12.89EI/l^2$ 。而由框架稳定分析得出的临界荷载, 是  $N_{cr} = 13.9EI/l^2$ , 它们之间相差达 7%, 近似值稍偏安全。

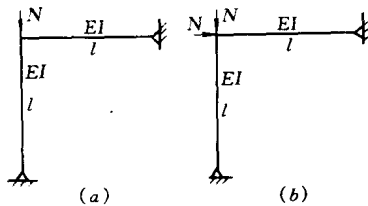


图 1-5  $\Gamma$  形框架

图 1-5 (b) 的框架若套用规范中的  $\mu$  系数计算, 其误差则更

大。由于此框架杆件中的横梁和柱子不仅尺寸相同，而且所承受的压力也相同，二者必然表现为在同等临界荷载  $N_{cr}$  作用下同时失稳，不存在相互约束作用的问题，即  $N_{cr} = \pi^2 EI / l^2$ 。若按规范  $\mu$  系数求得的  $N_{cr} = 12.89 EI / l^2$ ，则将偏大 30%。图 1-5 (b) 中柱子的压力虽然和图 1-5 (a) 相同，但因不存在横梁的约束作用，其临界力大不一样。可见，横梁的轴力对柱子稳定的影响可能达到十分显著的程度。

既然计算长度法只是在特定条件下才能给出准确的结果，设计者在应用规范中的  $\mu$  系数时，就应该细心谨慎从事，首先应在考察结构整体性的基础上，再来运用这一方法，而不是盲目地套用  $\mu$  系数。遇到比较特殊情况时，最好从框架的稳定来进行分析。在第五章中还将详细讨论这方面的问题。

### 三、弹性稳定计算的其他特点

在弹性稳定计算中，除了需要考虑结构的整体性外，还有一些其他特点也需要引起重视。首先是稳定计算要求作二阶分析。二阶分析是针对已变形的结构来分析它的平衡的；通常把不考虑变形对外力效应的影响称为一阶分析。一阶分析是针对未变形的结构来分析它的平衡，如应力问题（通常所说的强度计算）即用的是一阶分析，只有少数特殊的结构如悬索屋盖、拉牵桅杆和悬索桥之类的强度计算，才需要用二阶分析。因为悬索是柔性构件，使用中有很大的变形，这对结构内力的影响是不能忽视的。

稳定问题的二阶分析，如本文对图 1-4 框架稳定的分析中，由框架失稳变形后的位形为依据，来建立平衡方程就是一例。其他稳定问题的二阶分析也是如此。

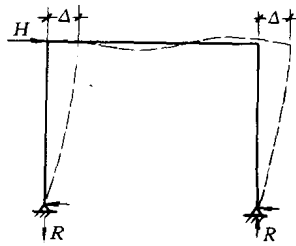


图 1-6 框架内力计算

在一般解算超静定结构的强度问题中，虽然要考虑结构变形协调关系，但并不需要去考虑变形对外力效应的影响，如图 1-6 中



承受水平荷载作用的框架节点,虽然产生了水平位移  $\Delta$ ,但在作弯矩图时,并不要把这一位移与竖向反力  $R$  所产生的弯矩  $R\Delta$  考虑进去。

结构水平位移对竖力的效应称为二阶效应。除前面论述到的轴向压力使杆件弯曲刚度降低的例子外,杆件伸长或缩短产生的效应,弯曲使弦长减小和初始弯曲、初始倾斜产生的效应等,也都是二阶效应的表现。本文图 1-1 中的天窗架斜杆失稳,就是二阶效应引起作用的结果。格构柱柱肢压缩变形后,使双斜杆缀条中产生了附加压力,这种二阶效应也有可能使缀条失稳。

既然分析稳定问题时,必须从已变形的位形出发,在计算内力时所作的静定和超静定结构的划分在这里就失去了它的意义。如一根两端简支的杆和一根两端嵌固的杆,在承受横向荷载时,其内力计算有很大区别。简支梁的弯矩图,只需用静力平衡关系就可以求得;而固端梁却需要在静力平衡之外加上变形协调关系才能求解。然而,当这两种杆件承受轴向压力,解其临界值时,却可以同用一个微分方程来计算,只不过边界条件有所不同,此方程为:

$$EIy^{(4)} + Ny'' = 0 \quad (1-12)$$

其次,普遍用于应力问题的迭加原理,在稳定计算中不能应用。迭加原理的应用应以满足下列两个条件为前提:

- (1) 材料服从虎克定律,亦即应力与应变成正比;
- (2) 结构的变形很小,可以用一阶分析来计算。

概括地说,运用迭加原理的杆件或结构,既不存在物理的非线性,也不存在几何的非线性。而弹性稳定计算并不符合第二个前提,非弹性稳定计算则两个前提都不符合。因此,迭加原理对稳定计算都不适用。

如求图 1-7 杆长  $2l$  的三根悬臂杆的临界力,当压力  $N$  作用在顶点  $B$  时为:

$$N_{cr_1} = \frac{\pi^2 EI}{(4l)^2} = \frac{0.617EI}{l^2} \quad (1-13)$$