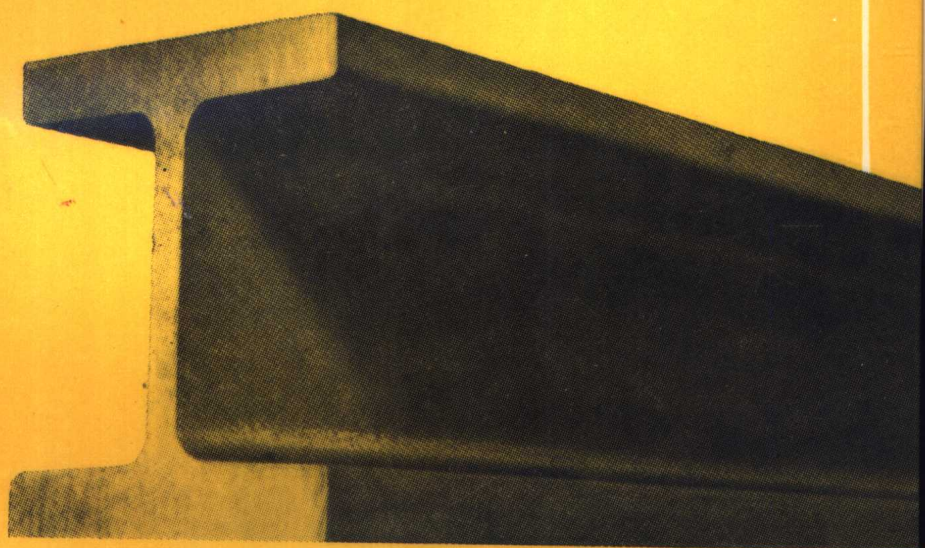


钢结构构件 的稳定

孙绍文 主编



冶金工业出版社

钢 结 构 构 件 的 稳 定

孙绍文 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

内 容 简 介

本书主要介绍钢结构构件的整体稳定和局部稳定的知识,其主要内容包括轴心受压构件的整体稳定、梁的整体稳定、压弯构件的整体稳定以及钢结构构件的局部稳定。

钢结构构件的稳定

孙绍文 主编

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

河北省香河县第二印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张9 字数236千字
1993年12月第一版 1993年12月第一次印刷
印数1~1000册

ISBN 7-5024-1180-1

TU·93 定价12.90元

前 言

在现代工程建设中钢结构以壁薄、构造轻巧获得广泛地应用。钢结构的承载能力除轴心、偏心受拉构件外，绝大多数为稳定所控制。为了确保钢结构的安全可靠和尽可能地节省钢材，钢结构的稳定问题就日渐重要。为了满足高等院校土建专业师生系统学习钢结构稳定理论的需要，为了给从事土建工程的技术人员提供一本系统而完整的钢结构参考书，笔者编写了钢结构构件的稳定这本书。

本书以新颁布的钢结构设计规范GBJ17—88为基础，以国内外学者在钢结构稳定理论领域中被用作制订该规范条款的理论所依据的科研成果为准绳，对钢结构构件的整体稳定和局部稳定问题进行了较全面、系统的阐述。

本书由吉林建筑工程学院孙绍文副教授任主编，吉林省松江河林业局建筑工程公司雷建章工程师任副主编。参加编写工作的（按章先后为序）有：孙绍文（第一、二章），刘殿忠（第三章），刘伟（第四章）。参加本书编写工作的还有徐孝均同志。

本书在编写过程中，张毅刚教授曾给予多方面热情支持，并在审稿中提出很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于时间仓促，加之我们水平所限，书中难免有不当之处，恳请专家学者指正。

编 者

1991年5月于长春

目 录

绪论	1
第一章 轴心受压构件的整体稳定	6
第一节 压杆的概念	6
第二节 理想轴心压杆的屈曲形式	7
第三节 理想轴心压杆的弯曲屈曲	9
第四节 理想轴心压杆的扭转屈曲	23
第五节 理想轴心压杆的弯扭屈曲	39
第六节 理想轴心压杆的缺陷及其对理想轴心压杆稳定承载能力的影响	47
第七节 轴心压杆稳定承载能力的计算	68
思考题	85
第二章 梁的整体稳定	87
第一节 梁的工作表现	87
第二节 双轴对称工字形截面简支梁在纯弯矩作用下临界弯矩的计算	87
第三节 双轴对称工字形截面简支梁在各种荷载作用下临界弯矩的计算	91
第四节 单轴对称工字形截面简支梁在各种荷载作用下临界弯矩的计算	96
第五节 梁的整体稳定计算	101
思考题	138
第三章 压弯构件的整体稳定	139
第一节 压弯构件的工作表现	139
第二节 压弯构件弯矩作用平面内的弹性稳定计算	140
第三节 压弯构件弯矩作用平面内的弹塑性稳定计算	154
第四节 压弯构件弯矩作用平面内整体稳定的实用计算公式	161
第五节 压弯构件弯矩作用平面外的弹性稳定计算	165

第六节	压弯构件弯矩作用平面外的弹塑性稳定计算	174
第七节	压弯构件弯矩作用平面外整体稳定的实用计算 公式	176
第八节	双向压弯构件的整体稳定计算	177
第九节	压弯构件的计算长度	181
思考题	202
第四章	钢构件的局部稳定	203
第一节	薄板的屈曲	204
第二节	轴心受压构件的局部稳定	230
第三节	压弯构件的局部稳定	240
第四节	梁的局部稳定	251
思考题	280
参考文献	280

绪 论

在高强度钢材不断出现及结构计算技术蓬勃发展的今天，越来越重视设计中的结构稳定问题，特别是钢结构，除了轴心、偏心受拉构件及极少数由刚度起控制作用的构件外，绝大多数构件的承载能力都是稳定性起控制作用。

所谓结构的稳定问题是指在荷载作用下结构保持其原来的稳定平衡状态的能力，这是结构本身所固有的能力。在荷载作用下，当结构有这种能力时，我们说结构是稳定的；当荷载作用下结构丧失了这种能力时，则称之为失稳，即结构丧失稳定或破坏。结构维持其原来的稳定平衡状态所能承受的最大荷载，或者说使结构丧失其原来的稳定平衡状态所需要s的最小荷载，若属于第一类失稳问题则称之为临界荷载或临界力，也叫屈曲荷载或分枝（岔）荷载；若属于第二类失稳问题，一般则称之为极限荷载或极限承载能力，就压弯构件而言，也叫压溃荷载。无论是临界荷载还是极限荷载都是结构处在介于稳定和不稳定平衡状态之间的承载能力，它是判别结构是否破坏的重要依据。临界荷载或极限荷载除以截面的相应几何特性所得的应力值称为临界应力。

自1774年欧拉第一个求得了理想轴心压杆的临界荷载之后，结构稳定这门科学就应运而生了。迄今为止，已经历两个世纪之久。结构的稳定问题通常被分为两大类，其中，不计初弯曲、初偏心和残余应力这一结构缺陷的轴心压杆、静水压力下的圆环、节点荷载作用下的框架、水平均布荷载作用下的抛物线两铰拱（合理拱轴）等都属于第一类失稳问题。其特点是：平衡状态有分枝现象，既有原来的稳定平衡状态，又有其任一微小变形状态下的随遇平衡状态；稳定平衡状态下和非稳定平衡状态下结构的受力形式发生本质的变化。如无缺陷的理想轴心压杆，在其原来的直线状态下的稳定平衡状态下仅受轴心压力作用，当其处于微弯的

随遇平衡状态下时，不仅受力形式由原来的轴心受压改变为轴心压力与弯矩的共同作用，就是其杆轴也由原来的直线状态变为微弯状态，其不稳定平衡状态也是如此。另一类失稳问题如压弯构件，当其一受力杆件就弯曲（不考虑缺陷），从杆件受力后的形状看，从加荷到破坏的全过程中，杆件始终处于弯曲状态，随着荷载的增加，杆轴的弯曲程度也随之增加，但只是弯曲程度有差异并不改变结构的受力状态；就其受力形式而言，从加荷到破坏过程中，杆件一直受轴心压力和弯矩作用，受力只有数值的变化并无质的改变，这就是第二类失稳问题。第一、二类失稳问题分别见图1、2。严格地说，工程结构中，由于受各种因素的干扰，真

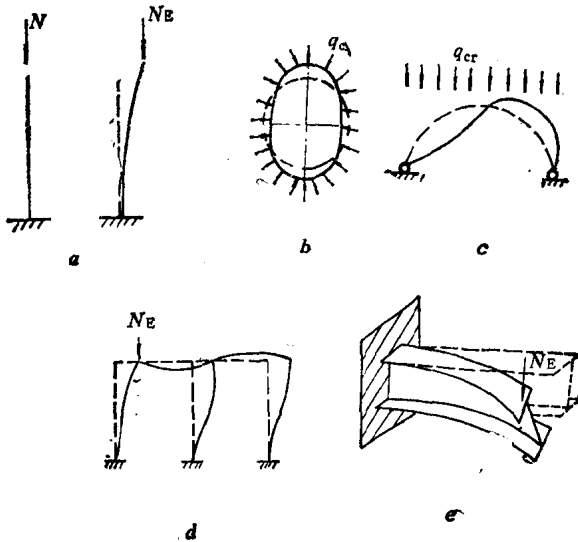


图 1 第一类失稳问题

正的理想状态（如理想轴心压杆、合理拱轴等）并不存在。这就是说第一类失稳问题只是理想化了的问题而已，事实上不存在，在一定条件下只能被近似地视做第一类失稳问题罢了。但这并不意味着第一类失稳问题没有实际意义，因为在计算机未出现之前及数值算法未被广泛应用的时候，只能按理想状态下的力学模型

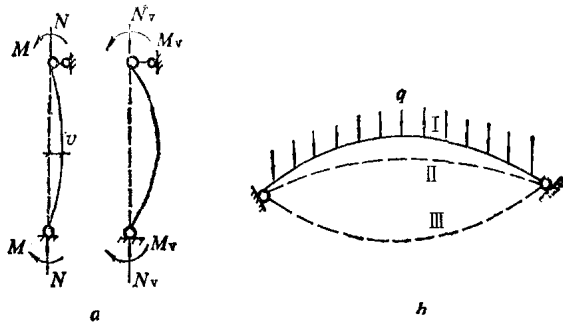


图 2 第二类失稳问题

a—压弯杆(N_v , M_v 为极限荷载); b—坦拱

去求解结构的稳定承载能力, 用于工程实践时再适当考虑安全系数。即使在计算技术高度发展的今天, 这些力学模式仍有一定的使用价值。

上述第一、二类失稳问题的示例对研究钢结构的稳定已足够。还有一种四边简支或三边简支一边自由的矩形薄板在板面内周边受力(如图3所示), 原则上属于第一类失稳问题, 是研究板件失稳即构件局部失稳的核心。这种板屈曲后还有相当大的承载能力可供利用, 故其屈曲承载能力和屈曲后承载能力大不一样, 在

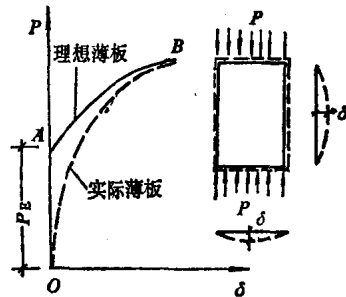


图 3 荷载下矩形薄板的失稳

P_E —理想薄板的临界荷载;
 AB —理想薄板的屈曲后性能

考虑充分利用薄板屈曲后强度的结构中, 这一概念是非常重要的。

对于承受纵向压力的筒壳或静水压力的薄壁圆球, 在理想状态下本属于第一类失稳问题, 但在实际情况下由于其对缺陷过于敏感, 故其实验承载能力远小于其理论屈曲荷载。称为缺陷敏感型失稳(或有限干扰)型屈曲(如图4所示)。

受横向荷载作用的球面扁壳或双铰坦拱的失稳又另具特色。随着荷载 q 的增加, 拱轴或中面由原来的位置 I 移到位置 II 或再

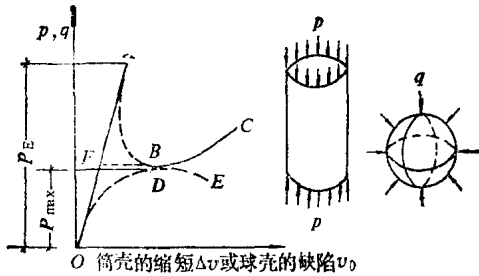


图 4 缺陷敏感（或有限干扰）型屈曲

- ODE——实际构件的平衡状态曲线；
- OABC——理想构件的平衡状态曲线；
- OFBC——理想构件受力过程中受任一干扰后的平衡状态曲线，
表明 P_E 实际无法达到；
- P_E ——理想构件的临界荷载；
- P_{max} ——实际构件的极限荷载

下移，当 q 达到某一定值时，拱轴或壳面会突然跳跃到位置Ⅱ的平衡状态，被称为跳跃型失稳（如图2b或图5所示）。其平衡形式不发生分枝现象，可归属于第二类失稳问题。薄板的屈曲后强度、缺陷敏感型失稳及跳跃型失稳不在本书研究范围之内。

临界力或极限荷载的求法很多，方法不一。但就其稳定判别

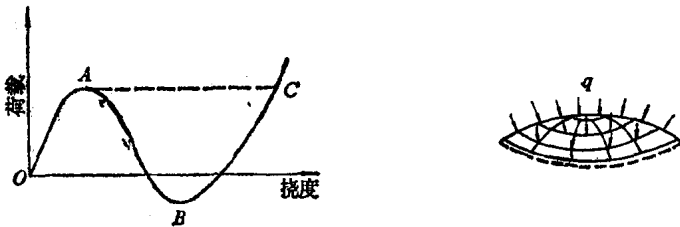


图 5 跳跃型失稳的球面扁壳

- OA、BC为稳定平衡状态，
- AB为不稳定平衡状态

准则而言，可分为静力法、能量法、运动法以及为解决屈曲后强度而提出的尚不算成熟的柯以特理论等。就本书所讨论的钢结构构件而言，一般只使用静力法和解析法就够了。但就其微分方程

的求解手段而言，又可以分为解析法和数值法两大类。所谓解析法，就是通过微分方程的直接积分求解临界力或极限荷载，但当微分方程的系数为变数时，就无法得到解析解。因此，大多数条件下，还是借助于数值法求解。数值法也分两大类，其中的一类是用数值积分法、差分法、加权残数法、伽辽金法等对微分方程直接求解；另一类则是采用由能量法导出的李兹法、有限元法等求解。这些求解方法在本书中也有一定应用，但以静力法、解析法居多。

上述诸多求解临界力或极限承载能力的方法在结构力学、数值分析方法等相关书籍中多有论述，读者结合这些所学内容去学习本书的稳定理论及其临界力或极限承载能力的求解不仅容易理解书中内容，尚可进一步认识各学科间的有机联系。

结构失稳实则由构件失稳所致，欲保证结构稳定必先保证其构件的稳定，这就是本书题名之因。

第一章 轴心受压构件的整体稳定

第一节 压杆的概念

所谓压杆系指工程结构中主要用来承受压力的杆件的统称。如桁架中的受压腹杆、无节间荷载的上弦杆、车间工作平台柱、厂房的排架柱及网架结构中的受压腹杆、受压弦杆等。在工程结构设计中，压杆又被分成两大类，即轴心压杆和偏心压杆或称压弯杆。其中，轴心压杆指压力作用线与杆轴绝对重合的杆件即理想轴心压杆。但严格地说，在工程实践中，由于杆件在制造时各截面尺寸总有正负偏差存在。甚至在运输、安装中也难免造成杆件的微弯，这就导致杆件轴线或多或少有所弯曲，即杆轴事实上不是一条几何直线，而是一条挠曲程度不一的微弯曲线。据统计资料分析，轴心压杆的杆轴中点挠度值通常在 $\frac{l}{500} \sim \frac{l}{2000}$ 之间

(l 为杆长)，这就是通常所说的初弯曲；如果杆轴是一条几何直线，由于构造原因，作用在杆端的压力（如支承在柱顶的梁的支座压力）也不可能和杆轴完全重合，也会有偏心，更何况在工业与民用建筑中的梁柱体系里，梁支座压力的作用点通常也难以准确断定，这个集中荷载的作用点与杆轴间的偏离称为初偏心。资料研究表明，其相对初偏心率一般在5%以内；由于残余应力的存在，使钢结构在受力工作之前在其截面内部就已经有了自相平衡的初始拉、压应力，且截面上各点的残余应力值不等。因此，即使没有初弯曲和初偏心存在，外加荷载也能以均布压应力的形式施加于压杆的各截面，当此压应力与残余应力叠加之后，截面上各点的应力显然就不再均匀分布了。就从截面上各点应力值不相等这一点而论此杆也不是轴心受压构件了。总之，工程实践中不存在那种压力作用线与杆轴完全重合的真正处于理想状态下的

理想轴心压杆，而是只存在着具有初弯曲、初偏心和残余应力这一缺陷的实用轴心压杆。按我国钢结构设计规范GBJ17—88规定，只有当初弯曲小于或等于杆长 l 的 $\frac{1}{1000}$ 、初偏心的相对偏心率不大于0.05时，因它们对压杆的稳定承载能力影响较小。为方便计算，适应人们的习惯观念，在结构计算时就把这种压杆称之为轴心压杆，即实用轴心压杆。

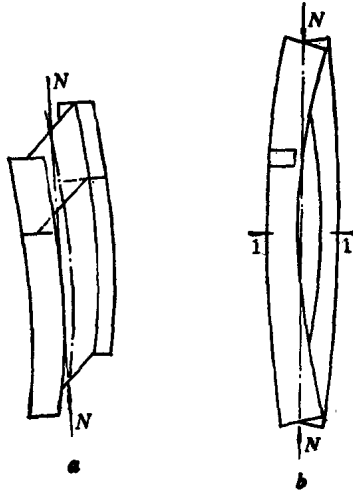
实用轴心压杆实际上是小偏心受压杆，本应按偏心压杆来确定其稳定承载能力。但以前由于科学技术水平所限，人们对残余应力的存在及其影响尚无认识或认识不足，工程设计时无法在初弯曲、初偏心和残余应力共同存在条件下较准确地算出实用轴心压杆的稳定承载能力，不得不寻求计算比较简单、又具有一定精度的压力作用线与杆轴绝对重合的理想轴心压杆这一力学模式来计算实用轴心压杆的稳定承载能力，然后再用加大安全系数的办法来估算初弯曲、初偏心和残余应力对理想轴心压杆稳定承载能力的影响，以确保压杆的安全可靠。如钢结构设计规范GBJ17—88的前身TJ17—74就是用这种办法计算实用轴心压杆的稳定承载能力的。本章所研究的对象就是有缺陷的理想轴心压杆，即实用轴心压杆。由于理想轴心压杆是研究实用轴心压杆的基础，况且已有了近200年的历史，并已积累了丰富的理论与试验资料可供参考，当然应在研究之列。至于受有轴心压力和弯矩共同作用的或者是在偏心压力作用下的压弯杆，由于其弯矩作用已超出了具有千分之一杆长的初弯曲或相对初偏心率为0.05时对理想轴心压杆稳定承载能力的影响，不可能再按轴心压杆计算了，这是本书第三章所研究的内容。

第二节 理想轴心压杆的屈曲形式

钢结构中常用的轴心压杆就其截面形式而言有任意对称轴的圆管，有双轴对称的方管、轧制或焊接工字钢、箱型截面，有单轴对称的槽型截面、T型截面、等边角钢及无对称轴的不等边角

钢等。当其受力超过某一特定荷载即临界荷载时，杆件则不能继续维持其原来的稳定平衡状态和随遇平衡状态而破坏，这就是理想轴心压杆的失稳，也叫丧失整体稳定或屈曲。理想轴心压杆的屈曲形式以其截面形式、尺寸大小、杆件长度及杆端约束而不同。一般说来，工程中常用的具有任意对称轴的圆管及双轴对称截面杆件，当轴心压力超过临界荷载后，除抗扭承载能力小于抗弯承载能力的十字型截面外，都是因弯曲变形越来越大而导致破坏，这就是理想轴心压杆的弯曲屈曲（见图1-1a）。对于抗扭承载能力小于抗弯承载能力的双轴对称十字型薄壁杆件，当荷载超过其临界力时，会因发生截面扭转变形而导致杆件破坏，这就是理想轴心压杆的扭转屈曲（见图1-1b）。单轴对称截面或无对称轴的杆件，因弯心（剪心）与形心不重合，在轴心压力作用下失稳时，扭转变形将伴随弯曲变形同时发生，这就是理想轴心压杆的弯扭屈曲（见图1-1c）。但单轴对称截面当其绕非对称轴屈曲时只发生弯曲屈曲。

上述弯曲屈曲、扭转屈曲及弯扭屈曲为理想轴心压杆的三种典型屈曲形式。钢结构中出现最多的是弯曲屈曲，因此，弯曲屈



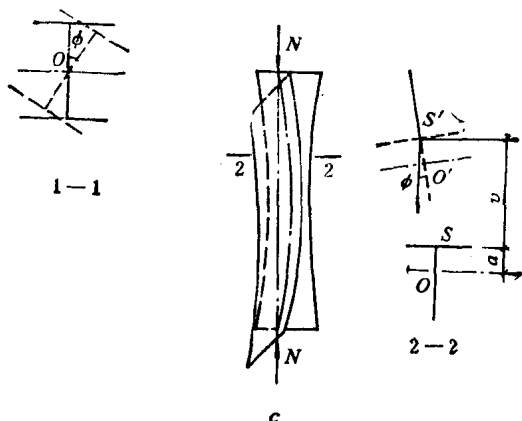


图 1-1 理想轴心压杆的屈曲形式
 a—弯曲屈曲；b—扭转屈曲；c—弯扭屈曲

曲将作为确定轴心压杆稳定承载能力的基础。

第三节 理想轴心压杆的弯曲屈曲

抗扭承载能力较大的双轴对称截面理想轴心压杆，当轴心压力 N 大于其临界力时，杆件将由弯曲变形的不断增大而破坏，这就是理想轴心压杆的弯曲屈曲。这种屈曲可以在弹性工作阶段发生，也可以在弹塑性工作阶段发生。前者称为理想轴心压杆的弹性屈曲，后者称为理想轴心压杆的非弹性屈曲。二者的分界线是其临界应力等于钢材的比例极限 f_p ，即当临界应力 $\sigma_{cr} \leq f_p$ 时，为弹性屈曲； $\sigma_{cr} > f_p$ 时为非弹性屈曲。两种屈曲临界力的求法也不同。

一、理想轴心压杆的弹性屈曲

最先求得理想轴心压杆稳定承载能力即临界力的学者是欧拉。其基本假定如下：

- (1) 压杆为等截面，且杆轴为一几何直线；
- (2) 材料为均质弹性体，各向同性，完全符合虎克定律，即应力与应变呈线性关系；

(3) 杆件两端铰接，柱顶压力 N 的作用线与杆轴完全重合；

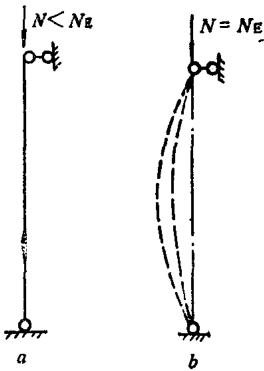


图 1-2 理想轴心压杆的弯曲屈曲
a—稳定平衡状态；b—随遇平衡状态

(4) 杆件只发生弯曲小变形，忽略杆长的变化（伸长或缩短）且无任何初应力，屈曲时杆轴挠曲成正弦半波曲线。

(一) 理想轴心压杆的工作表现

取一符合上述基本假定的理想轴心压杆（如图1-2a所示）。

当轴心压力 N 小于其临界力 N_E 时，杆件仍处于直线状态，当其受到某一干扰时，此杆可能偏离原来的直线位置而微微弯曲，一旦干扰取消此杆立刻恢复到原来的直线平衡位置；当 N 等于 N_E 时，杆件的直线平衡状态不是它的唯一稳定平衡状态，在任一微小干扰下，杆件可能在较小刚度平面内微微弯曲变形（如图1-2b所示）。此时，即使干扰取消，杆件也不能恢复到其原来的直线平衡位置，而是继续留在微弯的虚线位置上不动，这种现象称为随遇平衡。 N_E 为使理想轴心压杆丧失其稳定平衡状态所需要的最小荷载或使该构件在维持其原来的稳定平衡状态时所能承受的最大荷载，即理想轴心压杆的临界荷载或临界力。并把既有直线状态下稳定平衡位置又有微弯状态下的随遇平衡位置的这种现象称为平衡的分枝或分岔。由于临界力 N_E 又是欧拉首先求得的，故人们把这一两端铰接的理想轴心压杆称为欧拉柱，将其临界荷载称为欧拉临界力或分枝荷载、分岔荷载；当 N 超过 N_E 时，杆件将继续弯曲变形，如不及时减少 N ，杆件最终将因弯曲后压力 N 产生的外弯矩大于杆件截面的内弯矩（抵抗弯矩）而破坏，这就是理想轴心压杆的弯曲屈曲。轴心压力 N 大于 N_E 时杆件所处的状态称为不稳定平衡状态，轴心压力 N 等于 N_E 时杆件所处的状态为随遇平衡状

态, N 小于 N_E 时杆件所处的状态为稳定平衡状态。随遇平衡状态即为其临界状态, 是稳定平衡与不稳定平衡的分界线。

(二) 理想轴心压杆弹性屈曲临界力的求得

如图1-2所示的理想轴心压杆, 若杆件比较细长, 则压杆将在弹性工作阶段失稳, 其临界力的求法很多, 其中最古老的方法就是在杆件微小弯曲变形状态下建立平衡微分方程的随遇平衡法, 也叫静力法, 这是理想轴心压杆在弹性阶段失稳时求临界力的精确算法。现用人们熟悉的静力法求欧拉柱的临界力如下:

一欧拉柱如图 1-3a 所示:

当轴心压力 N 小于 N_E 时杆处于挺直状态; 当杆上轴心压力 N 等于 N_E 时, 杆件处于微弯的随遇平衡状态。此时, 取分离体如图 1-3b 所示。并建立平衡微分方程:

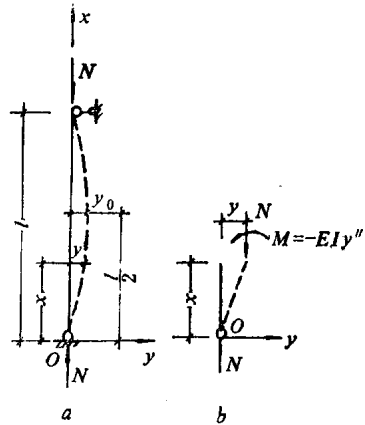


图 1-3 欧拉柱的弹性屈曲

$$\Sigma M_0 = 0$$

$$Ny - M = 0 \quad (1-1)$$

即 $Ny - (-EIy'') = 0$

$$Ny + EIy'' = 0 \quad (1-2)$$

式中的 $M = -EIy''$, 是因图 1-3b 中挠曲线的曲率半径正方向与 y 轴正向相反的缘故。

由式1-2得:

$$y'' + \frac{N}{EI} y = 0$$

令

$$K^2 = \frac{N}{EI}$$

则

$$y'' + K^2 y = 0 \quad (1-3)$$

式1-3为常系数二阶齐次线性微分方程, 其通解为: