

706691

55143
7/9011
T. 9

9

〔日〕小西一郎 编

钢 桥



143
9011
9

中国铁道出版社

国 数
，规 办商
用不授
阅读到
乙方
提起诉
官网站
字

钢 桥

第九分册

〔日〕小西一郎 编

徐文焕 李霄萍 马洪奎 王湘筠 译
李富文 韩 毅 伏魁先 校

中 国 铁 道 出 版 社

1983年·北京

钢 桥

第九分册

〔日〕小西一郎 编

徐文焕 李霄萍 马洪奎 王湘筠 译
李富文 韩 毅 伏魁先 校

中 国 铁 道 出 版 社

1983年·北京

钢 桥

第九分册

〔日〕小西一郎 编

徐文焕等 译

中国铁道出版社出版

责任编辑 王能远

封面设计 赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{4}$ 印张：11.5 字数：266 千

1983年6月第1版 1983年6月第1次印刷

印数：0001—2,500 册 定价：1.80 元

出 版 说 明

本书是一部详细阐述现代桥梁设计理论及设计方法的巨幅著作。原书为日本丸善株式会社 1976 年版共四册，分为设计篇及基础篇。前者阐述各式桥梁的设计方法及介绍结构实例，后者着重介绍桥梁设计所用的基础理论及基本资料。

虽然本书是针对钢桥写的，但本书中所述设计原则及力学分析也适用于同样结构型式的钢筋混凝土桥及预应力混凝土桥。我们深信本书的翻译出版，将有助于我国桥梁事业的发展。

为了及早与读者见面，我们将全书分为11个分册陆续出版。

全书主要内容及分册划分如下：

原 书	内 容	译 本
设计篇 I	第一章 桥面系构造	第一分册
	第二章 板梁桥	第二分册
	第三章 桁架桥	第三分册
设计篇 II	第四章 拱 桥	第四分册
	第五章 斜拉桥	
	第六章 悬索桥	第五分册
	第七章 曲线桥、斜桥	第六分册
	第八章 纵向联结系、横向联结系、桥门架	
	第九章 支 座	
基础篇 I	第一章 绪 论	第七分册
	第二章 荷 载	
	第三章 结构材料	
	第四章 安全系数、安全度、可靠度	
	第五章 强度设计法	
	第六章 构件连接法	第八分册
	第七章 平板理论	
基础篇 II	第八章 格子梁理论	第九分册
	第九章 屈曲理论	
	第十章 构件设计	
	第十一章 抗风设计	第十分册
	第十二章 抗震设计	
基础篇 II	第十三章 钢结构的安全性、可靠性的统计学方法	第十一分册
	第十四章 电子计算机的应用	
	第十五章 特大桥的架设	

内 容 简 介

本分册讲述屈曲理论及杆件设计。前者包括中心压杆的屈曲，侧向屈曲，压弯杆的侧扭屈曲，板的屈曲，拱、刚架的整体屈曲，桁架杆件的屈曲，半穿式桁架的屈曲，组合杆件的屈曲，钢管杆的屈曲；后者介绍拉杆，受弯杆，压弯杆，压杆，缆索及管杆的设计方法。

本书可供高等院校桥梁专业师生和有关工程技术人员参考。

本 分 册 讲 述 屈 曲 理 论 及 杆 件 设 计

前 者 包 括 中 心 压 杆 的 屈 曲 ， 侧 向 屈 曲 ， 压 弯 杆 的 侧 扭 屈 曲 ， 板 的 屈 曲 ， 拱 、 刚 架 的 整 体 屈 曲 ， 桁 架 杆 件 的 屈 曲 ， 半 穿 式 桁 架 的 屈 曲 ， 组 合 杆 件 的 屈 曲 ， 钢 管 杆 的 屈 曲 ； 后 者 介 绍 拉 杆 ， 受 弯 杆 ， 压 弯 杆 ， 压 杆 ， 缆 索 及 管 杆 的 设 计 方 法 。

编 者 王 德 明 等

校 对 王 德 明 等

目 录

第九章 屈曲理论	1
9.1 屈曲理论的基础	1
9.1.1 概 述	1
9.1.2 稳定平衡	1
9.1.3 不稳定平衡	4
9.1.4 随遇平衡和弹性稳定的临界荷载	5
9.2 中心压杆的屈曲	7
9.3 侧向屈曲	12
9.3.1 板梁的侧向屈曲强度及翼缘的弯压强度	13
9.3.2 纵向联结系及横向联结系的横向加劲效果及固定点间的距离	16
9.3.3 荷载状态和屈曲强度	17
9.3.4 U形截面梁的整体屈曲	19
9.3.5 箱形、Π形截面梁的侧向屈曲强度	20
9.4 承受轴向压力和弯矩的杆件	20
9.4.1 侧扭屈曲强度	21
9.4.2 侧扭屈曲时的基本设计公式	24
9.5 板的屈曲	24
9.5.1 板元的局部屈曲	24
9.5.2 板屈曲的基本公式	25
9.5.3 应力状态和屈曲系数	27
9.5.4 有效宽的概念	28
9.5.5 板的非弹性屈曲	29
9.5.6 有加劲肋的板	31
9.5.7 按Merrison 报告验算加劲板的安全度	35
9.6 板梁腹板的屈曲和承载力	38
9.6.1 腹板的屈曲	38
9.6.2 板梁在腹板屈曲后的表现	39
9.6.3 板梁的极限强度公式	61
9.6.4 加劲肋的必需刚度	61
9.7 拱的整体屈曲	62
9.7.1 概 述	62
9.7.2 面内弹性屈曲	63
9.7.3 面外弹性屈曲	64
9.7.4 拱的承载力	65
9.8 刚架的整体屈曲	66

9.8.1	概 述	66
9.8.2	刚架杆件的有效屈曲长度	67
9.9	桁架的屈曲	77
9.9.1	概 述	77
9.9.2	桁架压杆的屈曲	78
9.9.3	桁架弦杆的有效屈曲长度	79
9.9.4	腹杆的有效屈曲长度	80
9.9.5	特殊的桁架杆件	82
9.9.6	桁架压杆的设计算例	85
9.10	半穿式桁架的屈曲	86
9.10.1	概 述	86
9.10.2	屈曲强度的计算方法	87
9.10.3	考虑初始缺陷时上弦杆的设计法	90
9.11	组合压杆的屈曲	91
9.11.1	概 述	91
9.11.2	缀条组合压杆的临界屈曲荷载	92
9.11.3	缀板组合压杆	93
9.11.4	各种截面的组合压杆	95
9.11.5	数值算例	95
9.12	钢管杆的屈曲	97
9.12.1	概 述	97
9.12.2	钢管杆的力学性质	98
9.12.3	钢管杆的整体屈曲	99
9.12.4	钢管杆的局部屈曲	101
文 献		102
第十章	杆件设计	110
10.1	概 论	110
10.2	残余应力分布和截面性能	110
10.2.1	轧制H形钢	111
10.2.2	焊接残余应力	112
10.2.3	热轧宽翼缘I形钢的截面性能	113
10.3	拉 杆	120
10.3.1	概 述	120
10.3.2	轴向力产生的应力	120
10.3.3	伴有弯曲的拉杆	123
10.3.4	拉杆设计	125
10.4	受弯杆件	131
10.4.1	梁的弯曲	131
10.4.2	梁的双轴弯曲	137
10.4.3	弯曲引起的剪应力	139

10.4.4	梁的扭转	141
10.5	压弯杆件	143
10.5.1	概 述	143
10.5.2	压弯杆件的弹性基本公式	144
10.5.3	弯矩、轴向力与曲率之间的关系	147
10.5.4	最大强度	151
10.6	压 杆	154
10.6.1	概 述	154
10.6.2	柱子强度	154
10.6.3	柱子的弹性屈曲荷载	154
10.6.4	柱子的非弹性屈曲	155
10.6.5	组合压杆	155
10.6.6	受压柱的设计计算顺序	159
10.7	钢 缆	159
10.7.1	概 述	159
10.7.2	钢丝绳的机械性能	159
10.7.3	平行线钢丝绳	162
10.8	管 杆	166
10.8.1	管杆截面性能	166
10.8.2	管杆的弯曲	168
10.8.3	杆件的节点构造	169
文 献		172

第九章 屈曲理论

9.1 屈曲理论的基础

9.1.1 概 述

随着高级钢材的出现和制造加工技术的进步, 钢结构正在迅速地向轻型化、大型化的方向发展。上部结构静荷载的减轻, 不仅节省钢材、便于搬运和架设, 同时也节省下部结构工程费用。但随着向薄壁轻型化的发展, 在抗风稳定性、抗腐蚀性等问题上却出现了一些不利的方面, 特别是对于承受压力的情况, 对屈曲问题进行深入分析的任务, 已经突出地摆在设计工作者的面前。钢结构越向前发展, 充分研究屈曲问题显然逐渐变得更为必要了。

钢结构的屈曲现象, 可按图9.1分类。如果大致区分的话, 可分为结构的整体屈曲和结构杆件的屈曲。前者为结构的整体同时达到不稳定, 从而丧失承载能力, 造成结构的崩溃。后者为结构的局部屈曲, 但无论是静定结构或者是超静定结构, 在构件屈曲的连锁反应下, 有可能成为导致整个结构破坏的直接原因。

当在主要构件中所产生的压应力超过某一临界值时, 就会使结构发生屈曲。对于实际的钢结构来说, 能用线弹性屈曲理论处理的那种理想状态从来是没有的。由于不可避免的存在着初始缺陷, 一般地在屈曲前就存在着几何学的以及材料的非线性性质, 因而对于屈曲的承载力, 较之线弹性的屈曲荷载大为降低; 不能指望其屈后剩有的承载能力, 也就是说对能量的吸收几乎没有可能了。一般说来, 即使是对于拉应力能发挥其较大韧性的钢材, 在屈曲现象中也多不能发挥其抗拉性能的特长, 故对此应特别加以重视。

构件的屈曲又可分为构件的整体屈曲和组成构件的板的屈曲(局部屈曲)。

按照构件的应力状态来分, 可分为受压构件、受弯构件、同时受压又受弯的构件、受剪构件、受剪兼受压或受剪兼受弯的构件、受扭构件等等。根据这些应力状态的不同, 屈曲现象的形式也各不相同, 对于各种屈曲现象的理论和实验研究均在进行。

无论采用什么样的薄壁构件, 为了不使构件的局部屈曲发生于整体屈曲之前, 一种作法是根据钢材种类, 令板的宽厚比不超过临界值, 或者是设计具有足够刚度的加劲肋。由此可以看出具有加劲肋的板的屈曲问题的重要性。在结构上作用有荷载并处于某种平衡状态时, 荷载和变形之间的关系可以按照结构的形式和荷载的状态分为若干种类型。

9.1.2 稳 定 平 衡

如图9.2(a-1)所示, 在两端铰支的矩形薄板梁上作用有横向荷载, 图(a-2)为与荷载变化相对应的跨中挠度的变化曲线。对于这种情况, 无论荷载的大小如何, 常为稳定平衡状态, 荷载与挠度之间存在着——对应的关系, 所谓Kirchhoff的唯一性定理是有效的。最初, 当荷载较小时荷载与挠度之间存在着线性关系, 但由于在荷载增加的同时还产生轴向力, 如图(a-2)所示, 逐渐地几何非线性变得很明显, 挠度的增加率变得缓慢起来。

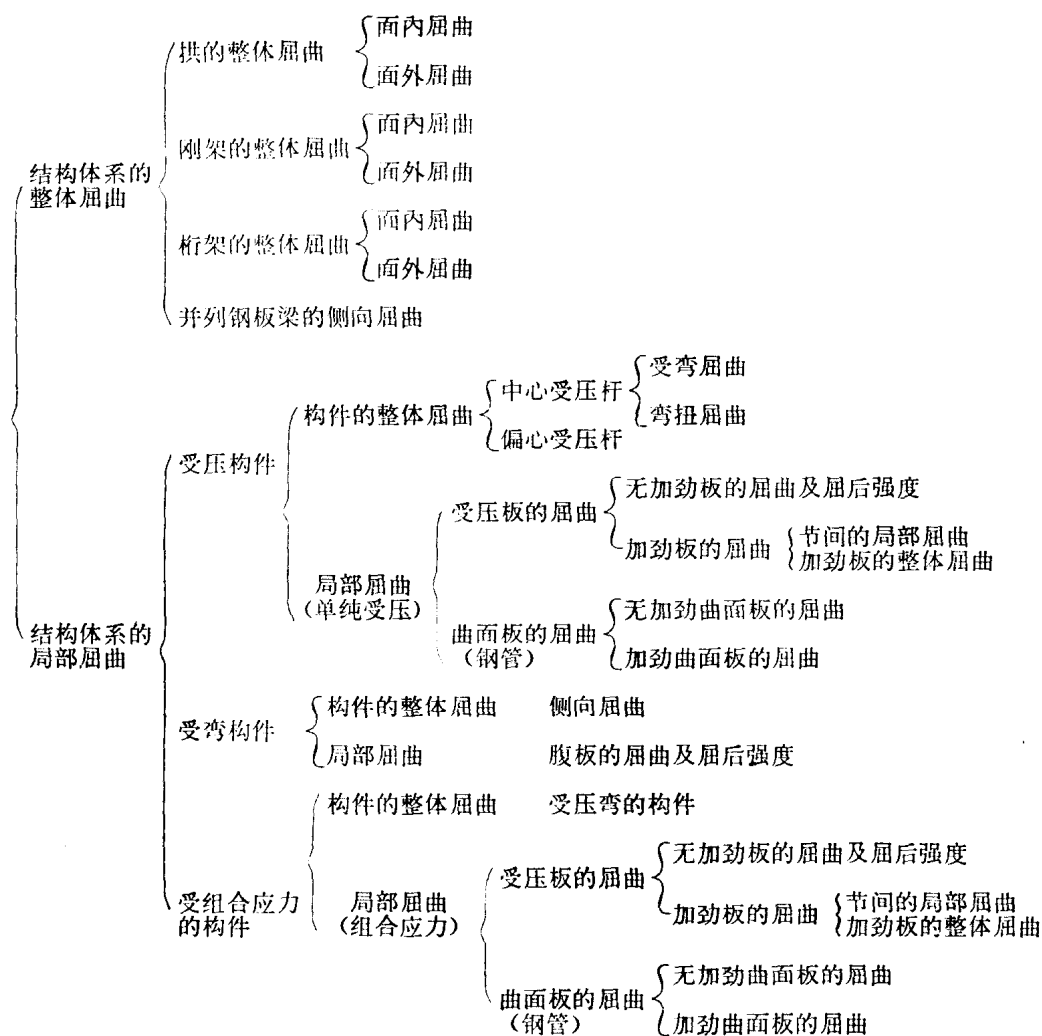


图9.1 结构体系的屈曲形式

图9.2(b)所示的薄板，在横向荷载作用下同样也呈现稳定平衡状态，荷载-挠度曲线具有类似的形状。在此情况下，由于发生薄膜力因而呈现出非线性性质。

在这种情况下，作为未知量的变位 v ，可取为从无荷载状态时算起的增量。对于如图9.2(a)所示的梁的问题，可以按照如下的方式进行讨论。

平衡条件式

$$M = \frac{P}{2}x - Nv \quad (9.1)$$

变形和截面内力的关系（或与材料的关系）

$$M = -EI \frac{d^2v}{dx^2} \quad (9.2)$$

由式(9.1)，(9.2)得如下的基本微分方程式：

$$\frac{d^2v}{dx^2} - \frac{N}{EI}v = -\frac{P}{2EI}x \quad \left(0 \leq x \leq \frac{l}{2}\right) \quad (9.3)$$

边界条件为：在 $x=0$ 处 $v=0$ ，于 $x=\frac{l}{2}$ 处 $\frac{dv}{dx}=0$ 。特解为

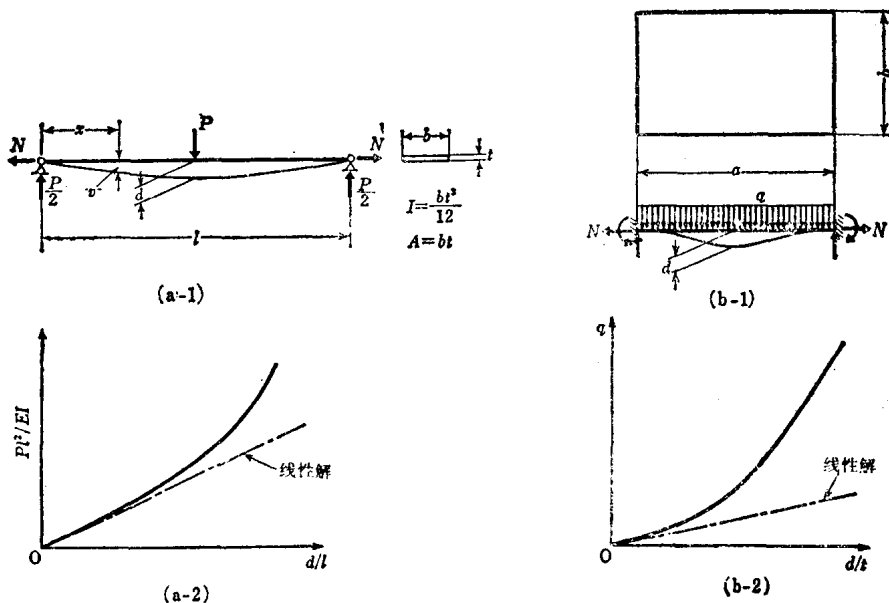


图9.2 稳定平衡

$$v = -\frac{P}{2N} \left(\frac{\sinh \alpha x}{\alpha \cosh \frac{\alpha l}{2}} - x \right) \quad (9.4)$$

这里 $\alpha = \sqrt{\frac{N}{EI}}$

梁在轴向的伸长的协调条件式为

$$\int_0^{l/2} \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 dx = \frac{NI}{EA} \quad (9.5)$$

将式 (9.4) 代入式 (9.5)，得到轴向力 N 的方程式。最后 v 的解显然是作为集中荷载 P 的连续函数而变化的。

如果用能量理论研究图9.2(a)所示的梁，则将如下所述。

整个体系的位能 Π 为

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l N \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 dx - P \delta \left(x - \frac{l}{2} \right) v \quad (9.6)$$

这里 $\delta \left(x - \frac{l}{2} \right)$: Dirac的 δ 函数。

由变位的变分 δv 求变分 $\delta \Pi$ ，并根据位能的极值原理得

$$\begin{aligned} \delta \Pi = 0 = & \int_0^l \left\{ EI \frac{d^4 v}{dx^4} - N \frac{d^2 v}{dx^2} - P \delta \left(x - \frac{l}{2} \right) \right\} \delta v dx + \left[EI \frac{d^2 v}{dx^2} \delta \left(\frac{dv}{dx} \right) \right]' \\ & - \left[EI \frac{d^3 v}{dx^3} \delta v \right]' + \left[N \frac{dv}{dx} \delta v \right]' \end{aligned} \quad (9.7)$$

因为由边界条件可消去上式中右端第二项以后的各项，所以作为欧拉微分方程表示平衡状态的式子如下：

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} - N \frac{d^2 v}{dx^2} = P \delta \left(x - \frac{l}{2} \right) \quad (9.8)$$

微分方程式 (9.8) 实质上和微分方程式 (9.3) 相同。

再计算二次变分 $\delta^2 \Pi$ 得

$$\delta^2 \Pi = \int_0^l EI (\delta v'')^2 dx + \int_0^l N (\delta v')^2 dx > 0 \quad (9.9)$$

显然该体系为稳定平衡状态。

9.1.3 不稳定平衡

现以图9.3(a)所示的对称桁架在中央节点上作用有竖直荷载 P 的情况进行论述, 该桁架由两根具有较小倾斜角的杆件所组成。

整个体系的位能 Π 可由下式给出:

$$\Pi = \frac{EA}{l} (\sqrt{l^2 - 2hv + v^2} - l)^2 - Pv \quad (9.10)$$

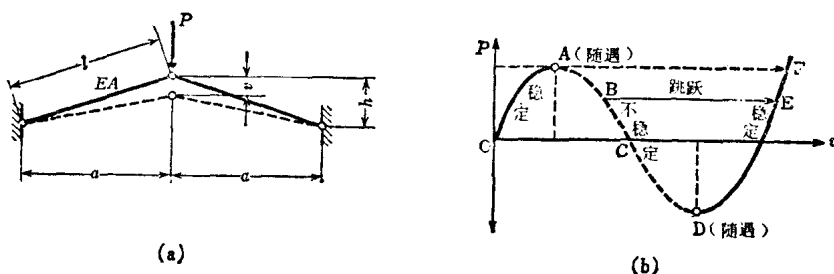


图9.3 不稳定平衡

若应用平衡条件 $\delta \Pi = 0$, 可得荷载 P 与挠度 v 的下列关系式:

$$P = \frac{2EA}{l} (h-v) \left(\frac{l}{\sqrt{l^2 - 2hv + v^2}} - 1 \right) \quad (9.11)$$

按式 (9.11) 的关系画出 $P-v$ 曲线如图9.3(b)所示。由该图可明显看出, 荷载 P 和挠度 v 之间为非线性关系, 而且并不是一一对应的。即对这类系统 Kirchhoff 的唯一性定理是不成立的。

取二次变分得

$$\delta^2 \Pi = \frac{2EA}{l} \left\{ 1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 - 2hv + v^2}} + \frac{(h-v)^2 l}{(l^2 - 2hv + v^2)^{3/2}} \right\} (\delta v)^2 = \frac{\partial P}{\partial v} (\delta v)^2 \quad (9.12)$$

由式 (9.12) 显然可以看出, $\delta^2 \Pi$ 的符号与 $\partial P / \partial v$ 的符号是一致的, 因而根据 $P-v$ 曲线的坡度, 存在着三种平衡状态, 即

在区间 OA 或 DF $\frac{\partial P}{\partial v} > 0$ 稳定平衡

在点 A 或点 D $\frac{\partial P}{\partial v} = 0$ 随遇平衡

在区间 AD $\frac{\partial P}{\partial v} < 0$ 不稳定平衡

若加以某种约束, 则在区间 AD 之间的 B 点虽能保持平衡状态, 但由于 B 点原本处于不稳定平衡的位置, 故一旦撤除了约束, 则将立即向平衡状态 E 飞跃。因此, 在自由状态下,

这样不稳定的平衡状态实际上是不存在的。实际上，随着荷载 P 的增加，将逐渐由稳定平衡移到随遇点A，若无约束，再增加荷载时，则将立即发生飞跃现象，并移至区间DF上的稳定平衡状态上去。

9.1.4 随遇平衡和弹性稳定的临界荷载

现分析如图9.4(a)所示的两端铰支的中心受压杆件。一般地由压力 P 产生轴向压应变 ε_0 ，同时假定产生的挠度为 v 。整个体系的位能 Π 可用下式表示：

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^l \left[EA\varepsilon_0^2 + EI \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)^2 \right] dx - Pf \quad (9.13)$$

式中， f 为受压杆件两端A、B的相对位移，由下式给出：

$$f = l - \int_0^l (1 + \varepsilon_0) \cos \varphi dx \quad (9.14)$$

φ 为任意点的转角。

由平衡条件 $\delta\Pi = 0$ ，得出如下的欧拉微分方程式：

$$EA\varepsilon_0 + P \cos \varphi = 0 \quad (9.15a)$$

$$EI \frac{d^2\varphi}{dx^2} + P(1 + \varepsilon_0) \sin \varphi = 0 \quad (9.15b)$$

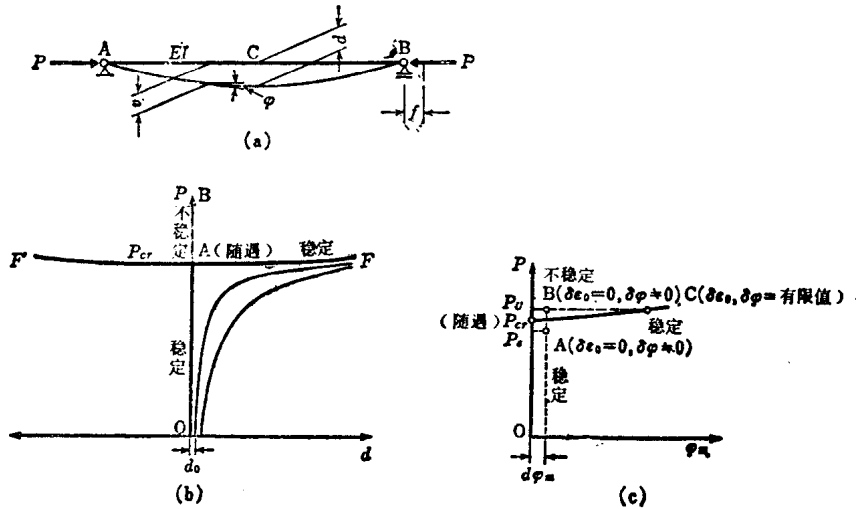


图9.4 具有分支点的体系

进而计算二次变分 $\delta^2\Pi$ 得

$$\begin{aligned} \delta^2\Pi = \int_0^l \left\{ EA(\delta\varepsilon_0)^2 + EI \left[\delta \left(\frac{d\varphi}{dx} \right) \right]^2 \right\} dx - P \int_0^l \left\{ 2 \sin \varphi \delta\varphi \delta\varepsilon_0 \right. \\ \left. + (1 + \varepsilon_0) \cos \varphi (\delta\varphi)^2 \right\} dx \end{aligned} \quad (9.16)$$

根据轴向应变 ε_0 和转角 φ 的值，存在着如下的三种平衡状态。

首先考虑受压杆件仍保持直线形平衡状态的情况。在这种情况下，因 $\varphi = 0$ ，自动满足基本方程式(9.15b)。另外由式(9.15a)得

$$\varepsilon_0 = -\frac{P}{EA} \quad (9.17)$$

ε_0 为众所周知的轴向应变。

选用满足两端边界条件的变分如下：

$$\delta \varepsilon_0 = 0, \quad \delta \varphi = d\varphi_m \cos \frac{\pi}{l} x \quad (9.18)$$

将式 (9.18) 代入式 (9.16)，二次变分 $\delta^2 \Pi$ 如下：

$$\delta^2 \Pi = \frac{l}{2} (d\varphi_m)^2 \left[EI \frac{\pi^2}{l^2} - P \left(1 - \frac{P}{EA} \right) \right] \quad (9.19)$$

a. 稳定平衡范围

$$P < \frac{\pi^2 EI}{l^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{P}{EA}} \text{ 的情况, } \delta^2 \Pi > 0 \quad (9.20a)$$

荷载 P 满足不等式 (9.20a) 的情况为稳定平衡，例如，当图 9.4 (c) 的 P_u 点处于平衡状态时，若有由于式 (9.18) 的微小干扰而移至附近的平衡状态 A ($\delta \varepsilon_0 = 0, \delta \varphi \neq 0$)，则基本方程 (9.15b) 式的左边变为下式：

$$\left\{ -EI \frac{\pi^2}{l^2} + P \left(1 - \frac{P}{EA} \right) \right\} d\varphi_m \cos \frac{\pi}{l} x - \{d\varphi_m \text{ 三次以上的项} \} \quad (9.21)$$

为了满足式 (9.15b)，必需令 $d\varphi_m = 0$ 。即从点 A 的状态立即又回到原来的稳定平衡状态，保持稳定性。

b. 不稳定平衡范围

$$P > \frac{\pi^2 EI}{l^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{P}{EA}} \text{ 的情况, } \delta^2 \Pi < 0 \quad (9.20b)$$

荷载 P 满足不等式 (9.20b) 的情况为不稳定平衡，例如，当在图 9.4 (c) 的 P_u 点的平衡状态时，若由于有如式 (9.18) 的微小干扰，就移动到附近的平衡状态 B ($\delta \varepsilon_0 = 0, \delta \varphi \neq 0$)。此时基本方程式 (9.15b) 的左边仍为式 (9.21) 的形式。而且一直到满足

$$\{d\varphi_m \text{ 二次以上的项} \} = \left\{ P \left(1 - \frac{P}{EA} \right) - EI \frac{\pi^2}{l^2} \right\} \text{ 的阶的量} = \text{正的有限值} \quad (9.22)$$

的 $d\varphi_m$ 是正的有限值之前，变位急剧增加。即从 P_u 的不稳定状态给一任意微小的变位而变到状态 B，因为在 $d\varphi_m$ 微小值时并不能保持平衡，变位将急剧增加，变位 $d\varphi_m$ 达到了由式 (9.22) 所给出的有限值之后，到了 C 点的状态才开始落到了稳定的平衡状态。在这种状态下，结构产生了不适宜使用的非常大的变形，或者结构将超过材料的弹性极限而发生破坏，故点 C 即使为稳定平衡状态，在使用上也是不好的。显然，当荷载 P 增大到接近于满足不等式 (9.20b) 的程度是不好的。

c. 随遇平衡

$$P = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{P}{EA}} (= P_{cr}) \text{ 的情况, } \delta^2 \Pi = 0 \quad (9.23)$$

如图 9.4 (c) 所示，在稳定与不稳定范围的分界点处， $P = P_{cr}$ 的状态称为随遇平衡状态。一般地因 $P/EA \ll 1$ ，式 (9.23) 可简化为

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (9.24)$$

由式 (9.24) 所给出的压缩荷载 P_{cr} ，它是保持稳定平衡的临界荷载。 P_{cr} 为众所周知的欧拉屈曲荷载。求 P_{cr} 的问题称为分支问题。

从以上的分析可知，由 $\delta^2 \Pi = 0$ 所给出的随遇平衡条件显然是在弹性稳定问题中求临界荷载的重要条件。

9.2 中心压杆的屈曲

Schulz^{1) 2)} 计算了关于有残余应力的受压杆件当其具有初弯曲和不可避免的偏心时在稳定问题方面的极限应力 $\sigma_{0, \max}$ 。方法的主要内容如下。

首先，如图 9.5 所示，在具有初始挠度 y_0 的受压杆的两端作用有偏心为 e 的压力 P ，其弹性方程式为

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{P(e + y_0 + y)}{B} = 0 \quad (9.25)$$

上式中， B 为抗弯刚度，它由荷载状态、截面形状、截面塑性化的程度、材料的力学性质以及残余应力等等所决定。

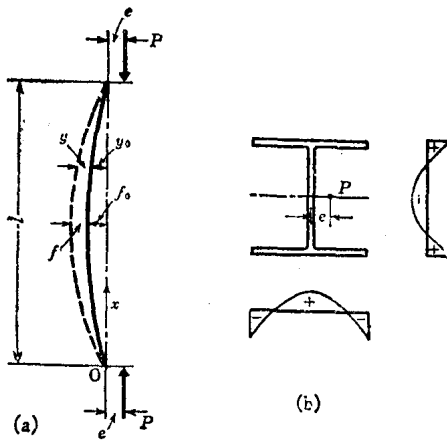


图 9.5

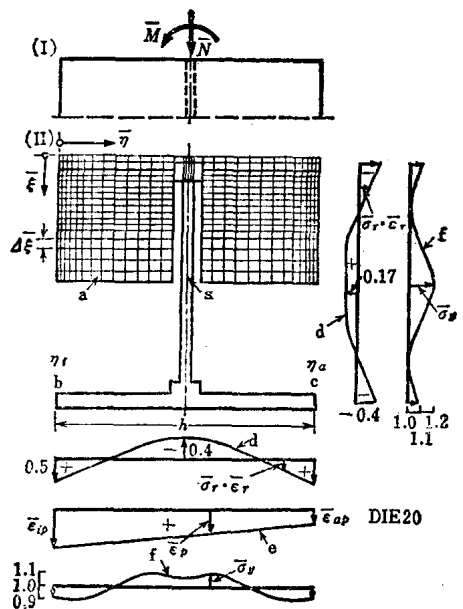


图 9.6

曲率半径 ρ 和弯曲力矩 M 的关系由下式给出：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{B} \quad (9.26)$$

另外取 ϵ_{ip} 、 ϵ_{ap} 分别为最内和最外边缘纤维的应变，取 h 为截面在弯曲方向的高度，则

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_{ip} - \epsilon_{ap}}{h} \quad (9.27)$$

从而抗弯刚度可用下式表示：

$$B = \frac{M}{\epsilon_{ip} - \epsilon_{ap}} \cdot h \quad (9.28)$$

现在，如图 9.6 所示，在横截面上取直角坐标 (ξ, η) ，将截面用如图所示的等间距的