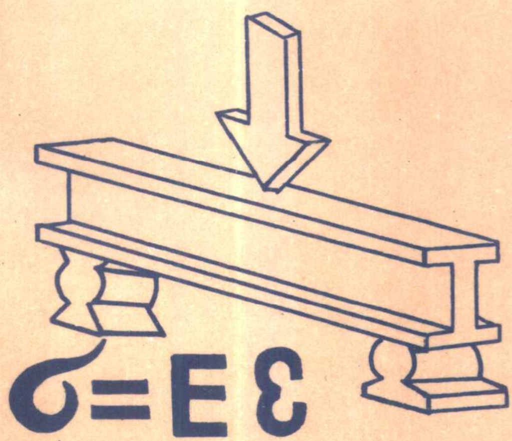
适应电子计算机时代要求的

材料力学

【日】玉手　统　阿部博之　著
杨恩德　刘乃积　王　泓　译



东北工学院出版社

适应电子计算机时代要求的

材　料　力　学

〔日〕玉手　统　阿部博之　著
杨恩德　刘乃积　王　泓　译

东北工学院出版社

内 容 简 介

本书是日本玉手 统、阿部博之所著《材料力学》(1984年修订版)的中译本，原书是日本高等工业学校的教材和参考书。

本书是适应电子计算机时代要求而编写的。除材料力学的基本内容外，还增加了薄壁截面杆的弯曲和扭转、应力强度因子、有限元素法，并考虑了塑性变形设计等。全书采用国际单位与工程单位并记的方法，适宜于机类和非机类不同专业人员学习和应用。

材 料 力 学

〔日〕玉手 统 阿部博之 著 杨[illegible]德 等译

东北工学院出版社出版 辽宁省新华书店发行
（沈阳 南湖） 东北工学院印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：[illegible]5 字数：[illegible]4[illegible] 千字
1988 年 7 月第 1 版 1988 年 7 月第 1 次印刷
印数：1～[illegible]000 册 封面设计：金 平

责任编辑 孙[illegible]台 责任校对：刘淑芳

ISBN 7-81006-059-7/O·6

定 价：1.38 元

中国语版の序文

コンピュータの発達によって、材料力学は大きく變貌をとげてきた。機械、航空、造船、土木、建築の分野で、それぞれの對象に応じて発達してきた計算手法が、コンピュータ向きの共通の計算手法に置きかわってきている。

材料力学の入門者から、コンピュータ向きの解法に親しんでくれること、材料力学の基礎をコンピュータに結びつけることを意図して企画したテキストであるが、初学者の役に立てば幸いである。

楊恩德先生の方でつくられた中国語版は原本（日本語版）より優れたテキストであることが期待される。ここに致めて感謝の意を表する。

Feb. 18. 1987

東北大学工学部

阿部博之

译 者 序

原书是日本目前广泛使用的材料力学教材。它是日本东北大学工学部玉手 统和阿部博之两位教授合著的，由于他们多年来给机械和能源等系学生讲课，在教学讲义的基础上，为适应电子计算机时代需要，而编写的教科书。

该书是原著的最新修订版，中国《教材通讯》(1986 年第 1 期) 曾介绍过此教材，题为:“评介日本几本有特色的材料力学”。该书除有较高的逻辑性、科学性、系统性之外，还具有以下特色：

1. 教材内容精炼，基本内容 32 开本只有 200 页左右；

2. 该书选材以突出适应上机要求，作为编写教材的着力点；

3. 本版在内容上不断更新和引进许多新内容：如位移法解平面桁架及立体刚架、组合应力下的屈服条件、有限单元法、用滑移线场法解平面应变问题以及薄壁杆件的弯曲和扭转等等。

在计算机辅助教学(CAE)风靡世界的今天，我国微型机也在日益普及，因此，在材料力学课程中结合 CAE 已势在必行。在我国全面改革的新形势下教材改革已提到日程上来，国家教委领导同志曾讲过：“……要研究世界各国教材的特色，要吸收他们的长处……”。译者在三十多年材料力学教学实践中，深感教材改革是教改的一个重要方面。有鉴于此，我们认为有必要翻译该书，为我国提供一本适应计算机

时代要求的材料力学教科书。

原书共9章，并附有问题及解答，采用国际单位与工程单位并记的方法。对机械系各专业的学生，在学习中要求精读全书，对其他专业的学生，可不阅读标有*号的章节内容。

翻译此书的具体分工如下：

第1、2、3、4章，问题解答，附录由杨恩德译；第5、6章由王泓译；第7、8、9章由刘乃积译。全书最后由杨恩德总校、统稿，并有幸请原著者给中译本作序，在此深表感谢。

由于译者水平有限，时间仓促，不妥之处，在所难免，请读者批评指正，谨向支持本书出版的领导及出版社的同志们致以谢意。

杨 恩 德

1986 年 12 月于沈阳

目　　录

第1章　力与变形

1.1　外力与平衡

材料力学是研究系统（System）当中传递力的固体构件（Component）的学科。构件的集合叫系统，具体指的是各种机械和结构物。构件的配置和材料的选择要符合系统工作的目的，并且要求具有适当的强度（strength）（也包含断裂韧性）、刚度（stiffness）、稳定性（stabitity）。

首先研究一下如图1.1所示的作为构件的圆杆。引入杆轴线与 x 轴一致的右手系坐标（x，y，z）。杆右端承受外力 $\boldsymbol{P}$ 和力矩 $\boldsymbol{M}$ 作用，设构成平衡状态，若用坐标轴方向的分力表示 $\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{M}$ 时则如图 1.2 所示。

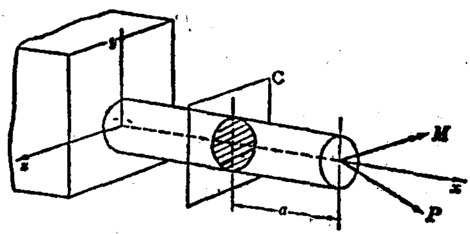


图 1.1

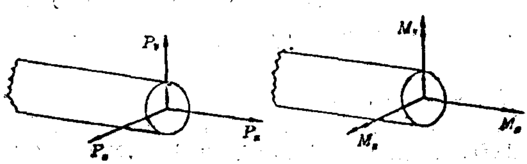


图 1.2

P_x 称为杆的轴向力（axial force），是拉力或压力。只 P_x 作用时，称为单向（uniaxial）受力状态。P_y、P_z 是横向力（transverse force），即剪力（shear force）。力矩 M_x 是扭矩（torsional moment），M_y、M_z 是弯矩（bending moment）。以下所述这些力、力矩凡是与坐标轴正向一致时为正值。

假想距离圆杆右端 a 处用面C将杆切断。为使杆长度 a 部分平衡，必须在此假想的截面处作用一定的内力 P_a，M_a。（图 1.3）

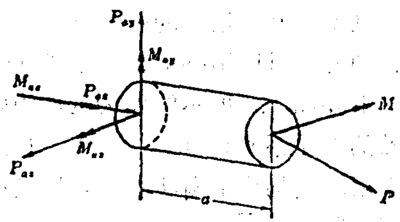


图 1.3

这些内力的大小，对于矢量 $P^T=[P_x P_y P_z]$①

$$P_a=-P,\ M_a=-M-r\times P \tag{1·1}$$

若用分力表示时，则

$$\left.\begin{aligned}[P_{ax}P_{ay}P_{az}]&=-[P_xP_yP_z]\\ [M_{ax}M_{ay}M_{az}]&=-[M_xM_yM_z]\\ &\quad-[0\quad -P_za\quad P_ya]\end{aligned}\right\} \tag{1·1'}$$

另外，$r^T=[a\ \ 0\ \ 0]$是表示大小为 a 的 x 方向的矢量，"×"表示外积。例如，只有 $P_x=1000$ kgf②，$M_x=8000$kgf·cm

① a^T 表示 a 的转置矩阵。

② kgf表示重量千克。1kg＝9.80665N。kg 在工程单位系统表示重量(≡kgf)，在国际单位系统(SI)表示质量。工程单位系统与国际单位系统的关系见附录 2，参看文献[1]。

的作用时，则 $P_{ax}=-1000\text{kgf}$，$M_{ax}=-8000\text{kgf}\cdot\text{cm}$。

问题 1.1 研究图 1.4 所示直角折杆。研究距角点 60cm 处假想截面右部分杆，在这假想截面上有什么样的内力作用？

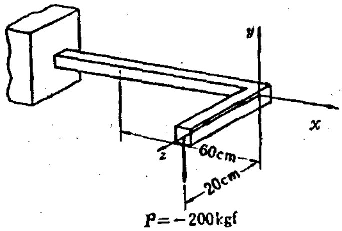


图 1.4

1.2 应 力

研究一下常截面 A 的杆单向受力问题（图 1.5(a)）。设载荷 P_A、P_B 是通过截面形心（centroid），作用在轴线方向。并且从力的平衡上为 $P_A+P_B=0$。

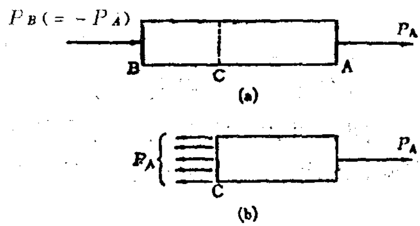


图 1.5

现在假想一个垂直于轴线的截面C，若此截面与载荷端不过于靠近，可以认为如图 1.5(b) 所示那样，力是均匀分布的①。因此，每单位面积上的力的定义为：

$$\sigma=\frac{P_A}{A} \tag{1.2}$$

① 以矩形截面为例，距载荷端为杆宽距离之处，计算的结果与平均值的差，只不过 2.7%。请参照文献〔2〕，这样的载荷点附近应力的非一致性不向整体传播称为 Saint-Venant 原理。

称之为应力（stress）①。载荷 P_A 如为正时，称为拉伸应力（tensile stress），如为负时称为压缩应力（compressive stress）。

图 1.2 所示的剪力也同样定义应力。对 P_y，P_z

$$\tau_y = \frac{P_y}{A}, \quad \tau_z = \frac{P_z}{A} \tag{1.3}$$

称这些为剪应力（shear stress）。另外，由于剪应力沿截面分布一般不均匀，式（1.3）可认为是平均值。也有时称 σ 为垂直应力（normal stress），称 τ 为切应力（tangential stress）。

在载荷端附近应力分布不均匀的地方，与式（1.2）的 σ 和式（1.3）的 τ_y，τ_z 不同。此局部地方的应力，例如以

$$\sigma_x = \frac{\Delta P_x}{\Delta A}, \quad \tau_y = \frac{\Delta P_y}{\Delta A}$$

作为定义。这里 ΔA 是截面积 A 中的微小面积，ΔP_x，ΔP_y 等是作用在此微小面积上的力。

问题 1.2 假想截面内垂直应力为均匀分布时，试证明在端部作用的集中力通过截面形心。

1.3 应变、应力-应变曲线

长度为 l 的杆，在轴线方向上作用有外力 P_A、P_B。根据力的平衡，很明显 $P_A + P_B = 0$。

A端位移与B端位移的差 δ（$= u_A - u_B$）是由于外力产生的轴向变形。杆的每单位长度的变形量

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \tag{1.4}$$

---

① 应力单位为例如 kgf/cm²，psi（$\equiv$lb/sqin），Pa（$\equiv$N/m²）。

称为应变（strain）。按照应力的命名法，$\delta>0$ 时称为拉伸应变，$\delta<0$ 称为压缩应变。

应力 σ（$=P_A/A$）与应变 ε 间关系的示例如图 1.7 所示。应力 σ 小时候，σ 与 ε 按直线变化。此直线的限界应力

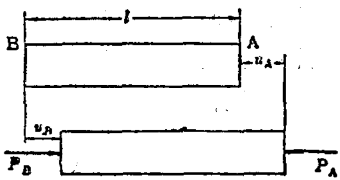


图 1.6

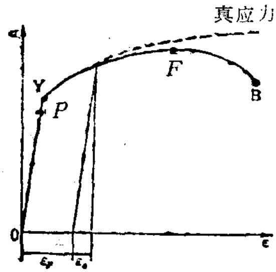


图 1.7

σ_P 称为比例极限（proportional limit）①。若再使 σ 增大，则卸载（unloading）的途径与加载（loading）途径便不相同。卸载途径与比例极限前的直线大致平行。直到 $\sigma=0$ 时的永久应变 ε_P 称为塑性应变（plastic strain），与弹性应变 ε_e 有区别。应变 ε 在刚开始急剧增加之前的应力是屈服点（yield point）σ_Y②。应力的极大值 σ_F 称为拉伸强度（tensile strength）或极限强度（ultimate strength）。B是破坏点。

应力超过 σ_F 的设计是不正确的。另外，有时也需要考虑不产生永久应变。这时应力必须比 σ_Y 小。然而，由于外力

---

① σ一返回到零时，ε 也返回到零的最大应力 σ_E（$>\sigma_P$）称做弹性极限（elastic limit）。橡胶等 σ_E 与 σ_P 的差别虽然很明确，但在一般的机械结构用材料中由于判别困难，多不加区别地进行处理。

② 软钢的屈服点是明显出现的，但硬钢、铜、铝及其合金等的屈服点不明显出现。这时，以永久应变 ε_P 达到某值（通常为 0.2%）的应力作为屈服点有时以此代用。

估算的不准确、材料不均匀、应力和应变的估计不正确等原因，如不将设计应力控制在比 σ_F 或 σ_Y 小得多，便不能保证安全。因此，作为设计上的许用应力(allowable stress)用

$$\sigma_w = \frac{\sigma_F}{n} \quad 或 \quad \sigma_w = \frac{\sigma_Y}{n'} \tag{1.5}$$

式中的 n，n' (>1)称为安全系数 (factor of safety)。

在图 1.7 上，直线 OP 的斜率为纵弹性系数(Young's modulus) E。即在这中间成立下列比例关系。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{1.6}$$

钢的 E 值为 2.1×10^6kgf/cm^2{206GPa}，铜的 E 值约为钢的 1/2，铝的 E 值约为钢的 1/3。式(1.6)的比例关系称为虎克 (Hooke) 定律。

如图 1.6 所示单向拉伸试验中，在应变 ε 增加的同时截面积 A 减少。设 Δd 为直径减少量，则 $\varepsilon_d = -\Delta d/d$ 为压缩应变。在比例极限以内，称

$$\nu = \left|\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon}\right| \tag{1.7}$$

为波桑比(Poisson's ratio)。波桑比在压缩试验上也取同值。ν 值：钢是 0.3，铝是 1/3，混凝土和软木接近于零，而橡胶接近 0.5。

超过屈服点 σ_Y，当应变增大，截面积的减少量也增大。设载荷 P_A 的各阶段截面积为 A_d 则由

$$\sigma_T = \frac{P_A}{A_d} \tag{1.8}$$

定义的应力，此应力称为真应力(true stress)。与此相对

地，用原来截面积A定义的应力 $\sigma(=P_A/A)$ 称为名义应力(conventional stress)。若用 σ_T 代替 σ 时则变为图 1.7 的虚线，不产生极大值。

应变也与式(1.4)不同，具有

$$\varepsilon_T=\int_l^{l_d}\frac{dl_d}{l_d}=\log e\frac{l_d}{l} \qquad (1.9)$$

的定义。式中 l_d 是各变形阶段的杆的长度。ε_T 称为对数应变(logarithmic strain)，与式(1.4)名义应变ε相区别。

问题 1.3 钢的比例极限约为 2×10^3 kgf/cm^2 {196 MPa}。在比例极限内变形很小，试证明 ε 和 ε_T、σ 和 σ_T 的差别是微小的。

问题 1.4 以杆的单向拉伸为例，证明波桑比 ν 是 $0\leqslant\nu\leqslant0.5$。另外 $\nu=0.5$ 的弹性体称为非压缩性(incompressible)体。

1.4 二向应力

试将处于单向受力状态的杆，用假想的斜截面切开（图 1.8(a)，(b)）。

若将载荷P分解为斜面的垂直力N和切向力S时，则 $N=P\cos\theta$，$S=-P\sin\theta$。设与此对应的应力也是

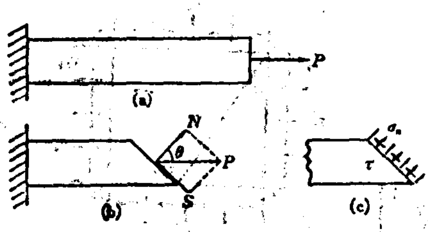


图 1.8

均布的（图 1.8(c)），若注意到斜截面积$A_\theta=A/\cos\theta$时，则可得垂直应力及切应力为：