

工程力学

材料力学

机械、动力类

上海交通大学

毛主席语录

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

马克思主义包含有自然科学，大家要来研究自然科学，否则世界上就有许多不懂的东西，那就不算一个最好的革命者。

学自然科学的，要学会用辩证法。

教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

要把精力集中在培养分析问题和解决问题的能力上，……。

主要符号表

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
P	集中力	kg, t 或 T
q	分布载荷	kg/cm, t/m 或 T/m
p	压强	kg/cm ²
X_A, Y_A, R_A, R_B	支反力	kg, t 或 T
N	轴向力	kg, t 或 T
N	功率(马力)	H.P.
N_K	功率(瓩)	KW
Q	剪力	kg, t 或 T
M	弯矩, 集中力偶	kg-cm, kg-m
M_n	扭矩	kg-cm, kg-m
M_y, M_z	对 y 轴、 z 轴的弯矩	kg-cm, kg-m
M_{xd}	相当弯矩	kg-cm, kg-m
σ	正应力	kg/cm ²
τ	剪应力	kg/cm ²
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力	kg/cm ²
ϵ	线应变	无
γ	剪应变	无
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	主应变	无
A	截面面积	cm ² , mm ²
S_y, S_z	静矩	cm ³
J, J_y, J_z	惯矩	cm ⁴
J_n	极惯矩	cm ⁴
i, i_y, i_z	惯性半径	cm
W, W_y, W_z	抗弯截面模数	cm ³
W_n	抗扭截面模数	cm ³
σ_p, τ_p	比例极限	kg/cm ² , kg/mm ²

σ_s, τ_s	屈服点	kg/cm ² , kg/mm ²
$\sigma_{0.2}$	屈服强度	kg/cm ² , kg/mm ²
σ_b	抗拉强度	kg/cm ² , kg/mm ²
σ_Y	抗压强度	kg/cm ² , kg/mm ²
τ_b	抗剪强度	kg/cm ² , kg/mm ²
σ°	极限应力(危险应力)	kg/cm ² , kg/mm ²
σ_{jY}	挤压应力	kg/cm ² , kg/mm ²
$[\sigma]$	许用应力	kg/cm ² , kg/mm ²
$[\tau]$	许用剪应力	kg/cm ² , kg/mm ²
$[\sigma_{jY}]$	许用挤压应力	kg/cm ² , kg/mm ²
E	拉压弹性模量	kg/cm ²
G	剪切弹性模量	kg/cm ²
μ	横向变形系数(泊松比)	无
n, n_s, n_b	安全系数	无
n	转速	转/分
$\delta, \delta_5, \delta_{10}$	延伸率	%
ψ	断面收缩率	%
Δl	绝对伸长(缩短)	cm, mm
$\theta, [\theta]$	(1) 单位长度扭转角, 许用单位长度扭转角 (2) 梁的转角, 梁的许用转角	弧度/cm, °/m 弧度
y	梁的挠度	cm, mm
φ	扭转角	弧度
σ_m, τ_m	平均应力	kg/cm ² , kg/mm ²
σ_a, τ_a	应力幅	kg/cm ² , kg/mm ²
$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$	最大应力, 最小应力	kg/cm ²
r	循环特征	无
σ_r, τ_r	材料疲劳极限	kg/cm ² , kg/mm ²
σ_{-1}, τ_{-1}	对称循环的疲劳极限	kg/cm ² , kg/mm ²

K_σ, K_τ	有效应力集中系数	无
$\varepsilon_\sigma, \varepsilon_\tau$	尺寸系数	无
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	表面加工、表面腐蚀、表面强化系数	无
n_σ, n_τ	拉压、弯曲、扭转安全系数	无
P_{lj}	临界力	kg, t
σ_{lj}	临界应力	kg/cm ²
μ	压杆长度系数	无
λ	压杆柔度	无
φ	折减系数	无
n_w	稳定安全系数	无
$[\sigma_w]$	稳定许用应力	kg/cm ² , kg/mm ²
α_K	冲击韧度	kg-m/cm ²
α	应力集中系数	无
H_B	布氏硬度	kg/mm ²
H_R	洛氏硬度	无
D, d	直径	cm, mm
R, r	半径	cm, mm
ρ	曲率半径	cm, mm
α	角度	度

注: m—米, cm—厘米, mm—毫米, t—吨, kg—公斤, °/m—度/米,
H.P.—马力, KW—瓩, max—最大, min—最小, []—许用值。

目 录

材 料 力 学

主要符号表	0—1
-------	-----

第一章 基本概念

§ 1-1 引言	1—1
§ 1-2 截面法求内力	1—1
§ 1-3 杆件的基本变形	1—5

第二章 拉压强度计算及材料的机械性质

§ 2-1 拉伸（压缩）时的应力和应变计算	2—1
§ 2-2 低碳钢材料拉伸时的机械性质	2—6
§ 2-3 其它材料拉伸时的机械性质	2—11
§ 2-4 压缩时材料的机械性质	2—13
§ 2-5 拉（压）时斜截面上的应力分析	2—15
§ 2-6 安全系数及许用应力	2—17
§ 2-7 拉伸（压缩）时的强度计算	2—19
§ 2-8 应力集中的概念	2—22
§ 2-9 二向拉伸（薄壁容器）应力计算	2—23
§ 2-10 材料的硬度和冲击韧性	2—27

第三章 弯曲的强度分析

§ 3-1 梁弯曲的概念和实例	3—1
§ 3-2 梁弯曲时的内力分析	3—3
§ 3-3 剪力、弯矩与分布载荷间的关系	3—10
§ 3-4 用叠加法作剪力图和弯矩图	3—13
§ 3-5 弯曲时横截面上正应力计算	3—16
§ 3-6 截面惯性矩 J_z 的计算	3—21
§ 3-7 梁弯曲的强度计算	3—28
§ 3-8 提高梁弯曲强度的一些途径	3—34
§ 3-9 弯曲与拉伸（压缩）组合变形的强度计算	3—40
§ 3-10 弯曲剪应力计算公式简介及校核	3—44

第四章 弯曲变形

§ 4-1	生产实践中的弯曲变形问题	4—1
§ 4-2	梁的挠曲线微分方程式	4—3
§ 4-3	挠曲线近似微分方程式的积分	4—4
§ 4-4	用叠加法求梁的变形	4—9
*§ 4-5	虚梁法求梁的变形	4—11
§ 4-6	提高梁弯曲刚度的一些讨论	4—16
§ 4-7	简单超静定梁的计算	4—18

第五章 剪切实用计算

§ 5-1	剪切构件受力及变形特点	5—1
§ 5-2	剪切实用计算	5—2

第六章 圆轴的扭转

§ 6-1	扭转实例及其受力特点	6—1
§ 6-2	扭矩的计算	6—2
§ 6-3	圆轴扭转时的强度和刚度计算	6—4
§ 6-4	扭转破坏分析	6—12
§ 6-5	非圆截面杆的扭转简介	6—14
*§ 6-6	密圈螺旋弹簧	6—16

第七章 弯扭组合强度

§ 7-1	弯扭组合变形实例	7—1
§ 7-2	弯扭组合变形时的应力状态	7—2
§ 7-3	工程上常用的强度理论	7—10
§ 7-4	弯扭组合强度计算	7—11
§ 7-5	平面应力状态的应力与应变关系	7—18

第八章 电测应力分析概论

§ 8-1	概述	8—1
§ 8-2	电测应力分析的基本原理	8—1
§ 8-3	应变及应力的测定	8—6
§ 8-4	电阻应变片的粘贴	8—14
§ 8-5	电测应力中的其它问题简介	8—15

第九章 压杆的稳定性

§ 9-1	压杆稳定性的概念	9—1
-------	----------	-----

§ 9-2	细长压杆的临界力·····	9—5
§ 9-3	压杆的临界应力·····	9—8
§ 9-4	压杆的实际计算·····	9—12
§ 9-5	提高压杆稳定性的一些方法·····	9—17

第十章 交变应力

§ 10-1	工程实例及循环特征·····	10—1
§ 10-2	“疲劳破坏”·····	10—4
§ 10-3	材料的疲劳极限及其测定方法·····	10—6
§ 10-4	影响疲劳极限的因素·····	10—9
*§ 10-5	零件在交变应力下的强度校核·····	10—15
§ 10-6	提高零件疲劳强度的措施·····	10—19
附录：型钢规格表·····		附—1

第一章 基本概念

§ 1-1 引言

我们在生活和生产实践中都可感觉和观察到：工程构件虽然它们的材料、几何形状是各种各样的，但都具有一个共同的特点，即在载荷作用下会发生变形。如受载过大甚至还会发生破坏。因此，要保证整个结构或机械的正常工作，首先要求构件在载荷作用下不致于破坏，即构件应具有足够的强度。例如：要求起重机的吊索要足够牢，才能在起吊重物时不会断，万吨水压机的立柱、横梁等要有足够的尺寸，才能保证在锻压时机架不致破坏等。另外，在某些情况下，构件不发生破坏，并不一定就能保证构件或整个机器的正常工作，例如机床的主轴在工作中受载荷作用，若发生过大的变形，就会影响加工精度，因此还要求构件在载荷作用下所产生的最大变形应在一定的允许范围内，也就是要求构件具有足够的刚度。此外还要求构件能在原有的几何状态下保持平衡，也就是还要满足稳定性的要求。

工程构件的各种材料受力作用后表现的一些性质，常称为机械性质或力学性质，它们对设计中确定构件的形状、尺寸、选取材料、确定加工工艺等都有关系，因此在这篇内还要研究材料常用的一些机械性质。

机械工程构件最常用的是金属材料，为了便于分析研究，根据金属材料的主要性质，从宏观角度出发作了如下假设：认为材料是均匀连续和各向同性的。实践证明把实际材料抽象成这样的理想材料后，能使计算过程大为简化，而所得结果足够精确。

在工程上常用的构件受载后产生的变形与构件的几何尺寸相比是极为微小的，可作微量处理，称为小变形。在小变形的情况下，对构件进行受力分析时可将这些微小变形略去不计，也就是认为变形后，作用在构件上的外力其作用点及方向不变。于是仍可采用变形前的静力平衡方程，即静力学中建立的静力平衡方程在材料力学中仍适用。

§ 1-2 截面法求内力

在静力学中我们学会了在简单的情况下，根据已给的载荷，分析出作用在构件上所有作用力，并应用静力平衡方程式求出构件上所有的支承反力。这些载荷和支承反力，都是构件以外的其他物体对构件的作用力。我们统称为“外力”。

但是，要判断构件是否安全，或者要决定构件的尺寸和材料，仅仅知道构件上的外力是不够的，我们还要知道构件截面上的力。正如伟大领袖毛主席指出的：“事实上，即使是外力推动的机械运动，也要通过事物内部的矛盾性。”事实上，构件在外力作用下要发生变形，同时又在构件内部截面上产生一种抵抗力，我们把它叫做“内力”。它是在外力作用下构件内部产生的相互作用力，并随着外力的加大而增加。对于一定的材料并具有一定的截面

形状和尺寸的构件，其内力的增加也有一定限度，超过了这个限度，构件无法承担外力的作用，就要发生破坏。因此，设计或校核某一构件时，还必须研究内力。

怎样研究内力呢？这首先要设法把内力显示出来，例如图 1-1a 所示杆件，若要求出与杆轴线垂直的截面（横截面） mn 的内力，为了显示出内力来，可以假想地用一个截面将杆件在 mn 处切开，使之分成 I、II 两部分（如图 1-1 b, c）。取 I 段进行分析，杆件原来处于平衡状态，则 I 段也要保持平衡状态，因此 I 段上除受外力作用外，截面 mn 上还必须有一个力作用，这个力就是截面 mn 上的内力，它是 II 段对 I 段的作用力。由于材料的连续性，此内力在截面上也是连续分布的，其合力用 N 表示，称为轴力。其大小可根据静力平衡条件求得，

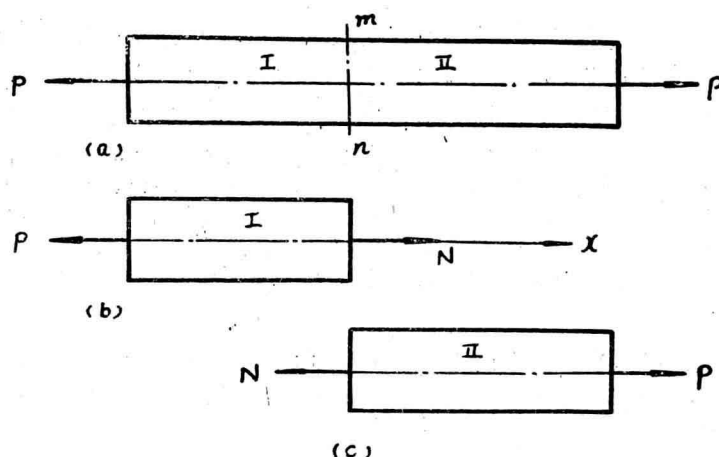


图 1-1

$$\begin{aligned}\sum X &= 0 & N - P &= 0 \\ \therefore & & N &= P\end{aligned}$$

同理，若取 II 段为对象进行研究，可得到 $N' = P$ 。可知 N' 与 N 的大小相等而方向相反。同法可求出其他各截面上的内力。以上用截面将杆件假想地切开，使内力变为外力，运用静力平衡条件求截面上内力的方法，称为截面法。它是求内力的普遍方法。其步骤可归纳为四个字，即

- 切：沿所求截面将构件假想地切开；
- 取：取出其中任意一部分作为研究对象；
- 代：以内力代替去掉部分对选取部分的作用；
- 平：对选取部分列出静力平衡方程，求出内力。

【例 1-1】图示气动夹具，在气压 $p \text{ kg/cm}^2$ 作用下，活塞杆带动压块将工件压紧，（图 1-2a），试求活塞杆横截面 mn 上的内力大小。

解：1，沿截面 mn 处假想地把活塞杆切开，分为 A、B 两部分。

2，去掉 B 部分，选取 A 部分来研究，如图 1-2 b 所示。（同样也可以取 B 部分研究。）

3，画出 A 部分的示力图。外力 p 作用在活塞上，其合力为：

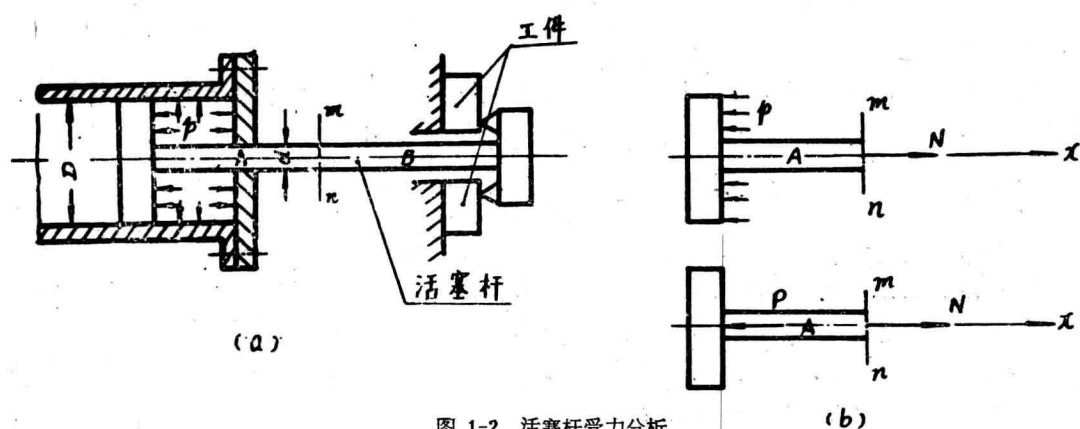


图 1-2 活塞杆受力分析

$$P = p \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

要使 A 部分仍保持平衡，截面 mn 上应作用有内力 N，N 为截面上内力的合力，通过截面形心，称为轴向内力。

4. 由静力平衡方程：

$$\sum X = 0 \quad N - P = 0$$

$$\therefore N = P = p \cdot \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}$$

[例 1-2] 设行车起吊重量为 P，小车位置如图 1-3 a 所示。试计算行车桥架 mn

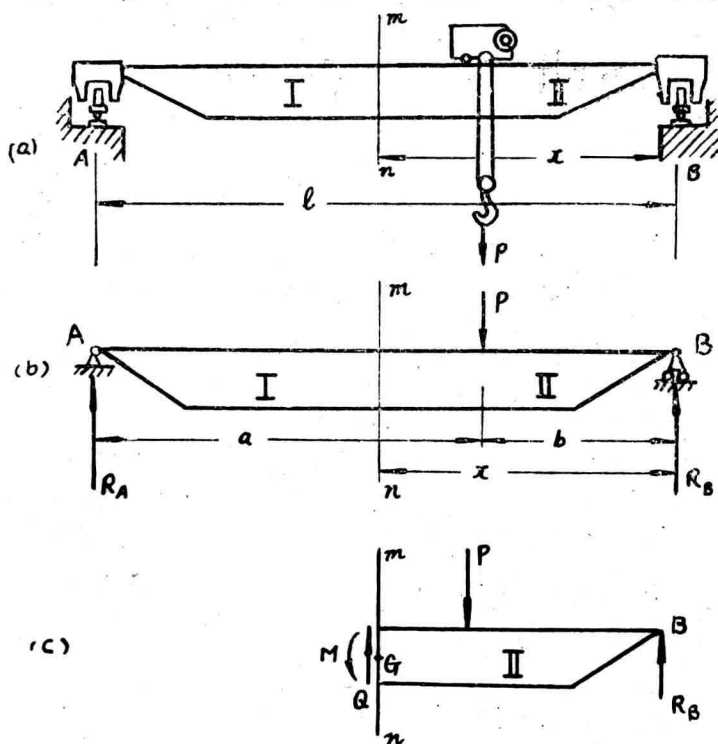


图 1-3 行车桥架的内力

截面上的内力。

解：首先分析桥架的外力： P 、 R_A 、 R_B ，作桥架的示力图，如图 1-3b，根据平衡条件求出支承反力 R_A 、 R_B 。

$$R_A = \frac{b}{l}P \quad R_B = \frac{a}{l}P$$

应用截面法求 mn 截面的内力。

1. 假想用截面沿 mn 把桥架切开成左右两段。
2. 丢去左侧的 I 段，取右侧的 II 段来研究。（也可以取 I 段来研究）
3. 分析分离体 II 段的外力和内力，画 II 段的示力图，如图 1-3c。在 II 段作用的外力有 P 和 R_B ， mn 截面处有内力作用。

mn 截面的内力也是连续分布的，分布内力总和的大小和方向可根据平衡条件确定。因为 II 段的外力 P 和 R_B 都是垂直的。所以 mn 截面的内力没有垂直于截面的分量。要使 II 段保持平衡， mn 截面必有一平行于截面的内力作用，用 Q 表示，称为剪力。另外，仅有 Q 还不能平衡外力 P 和 R_B 的作用，因为 II 段还可能转动，所以，在 mn 截面还应该有一力矩作用，用 M 表示，称为弯矩。

4. 应用静力平衡方程：

$$\Sigma Y = 0, \quad Q = P - R_B = \frac{b}{l}P$$

$$\Sigma m_G = 0 \quad M = P(x - b) - R_B x = P\left[\left(1 - \frac{a}{l}\right)x - b\right]$$

所以，在距离桥架 B 端为 x 的截面上作用的内力有：

$$Q = \frac{b}{l}P$$

$$M = P\left[\left(1 - \frac{a}{l}\right)x - b\right]$$

[例 1-3] 攻螺丝时，假定两手用力大小相等，方向相反，如图 1-4a，试计算螺丝攻上

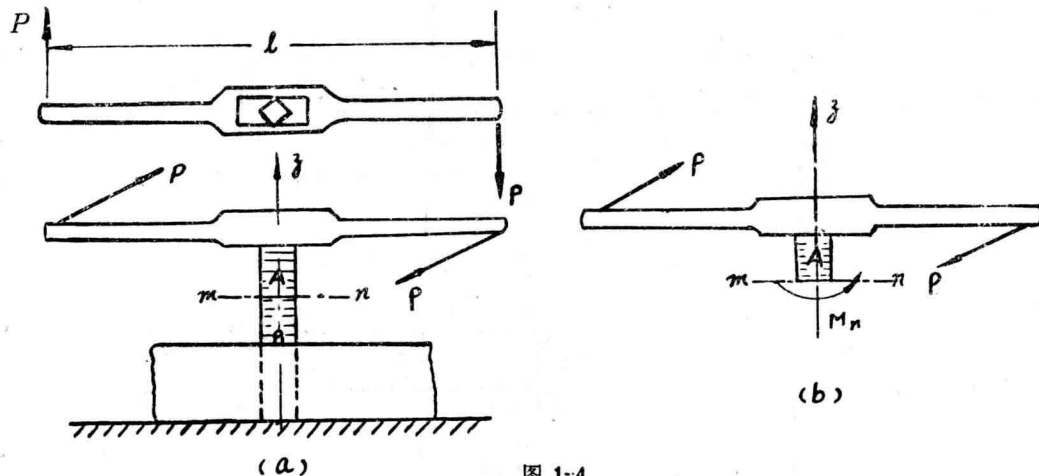


图 1-4

任一截面 mn 的内力。

解：1. 假想用截面 mn 把螺丝攻切开，分成 A 、 B 两段。

2. 丢去下段 B ，取 A 段研究。

3. 分析分离体 A 段的外力和内力，画示力图，如图 1-4b。 A 段作用的外力有力偶矩 $(P \cdot l)$ ，为了使 A 段平衡，在 mn 截面上的内力一定是一个绕 z 轴作用的力矩，用 M_n 表示，称为扭矩。

4. 应用静力平衡方程：

$$\sum m_z = 0 \quad M_n = Pl$$

(z 是螺丝攻的轴)

§ 1-3 杆件的基本变形

不管杆件受力如何复杂，作用于杆件截面上的内力总可以按照空间力系分解为四种内力分量，即轴力 N 、剪力 Q 、弯矩 M 、扭矩 M_n 。对应于四种内力分量，杆件将分别产生四种基本变形。这四种基本变形的典型情况如图 1-5 所示。

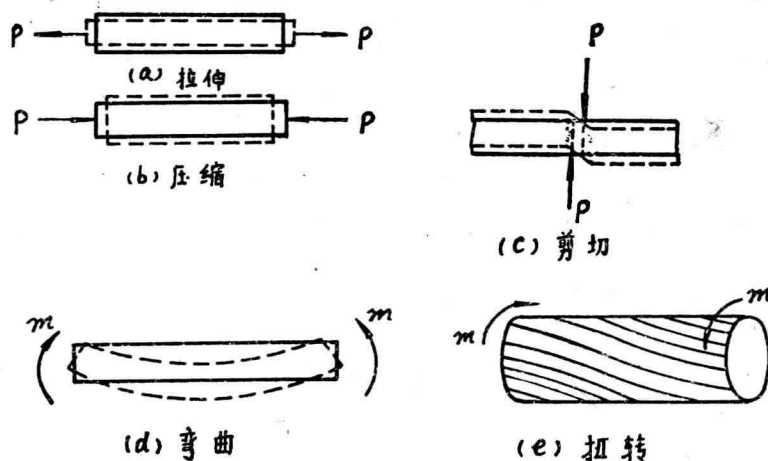


图 1-5 构件的四种基本变形

(1) 杆件受垂直于截面的轴向力作用。杆件截面的内力为轴力 N 。如果这力的指向是背离截面的，如图 1-5 a，则杆件受拉伸；如果这力的指向是指着截面的，如图 1-5 b，则杆件受压缩(如柱，千斤顶的螺杆等)。

(2) 杆件受垂直于轴线的一对相邻很近，大小相等，方向相反的 P 力作用，如图 1-5 c，截面上的内力为剪力 Q ，它使杆件发生剪切变形(如机械联接中的键、销、铆钉等)。

(3) 杆件受通过轴线平面的一对力矩作用，如图 1-5 d，截面上的内力为弯矩 M ，它使杆件发生弯曲变形(如起重机的横梁，较长的传动轴等)。

(4) 杆件受绕轴线的一对力矩作用，如图 1-5 e，截面上的内力为扭矩 M_n ，它使杆件发生扭转变形(如传动轴等)。

与上述四种内力相对应的四种变形，即拉伸(或压缩)、剪切、弯曲、扭转，称为杆件

的基本变形。

最简单的工程构件是直杆，它的基本变形也是这四种。几种变形同时存在时称为组合变形，这是工程构件在实际上常常存在的形式。

毛主席教导我们：“打仗只能一仗一仗地打……”，在下面各章里，我们先解决杆件在每一种基本变形下的问题，然后再研究组合变形时的問題。

第二章 拉压强度计算及材料的机械性质

§ 2-1 拉伸（压缩）时的应力和应变计算

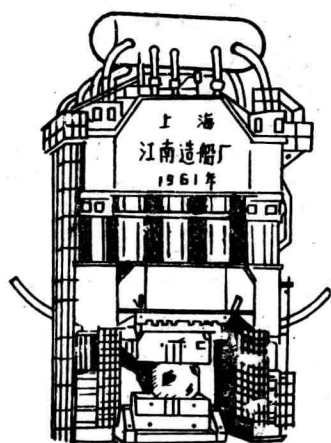


图 2-1(a) 12000 吨水压机外形图

工程上有许多受拉压的构件。例如：我国工人阶级遵照毛主席“独立自主，自力更生”的教导，自行设计制造的一万二千吨水压机，（图 2-1）。工作时，高压水自顶上的高压水罐打入柱塞缸，使柱塞向下移动，锻件受到压力，进行加工。由于锻件的反作用力，经过中间活动横梁，使柱塞受到压力作用，这个力传递到上横梁，使立柱受到拉力作用。这里水压机的立柱和柱塞，分别是受轴向拉伸和压缩的构件。其他如船上的起货杆（见图 2-2(a)）内燃机上

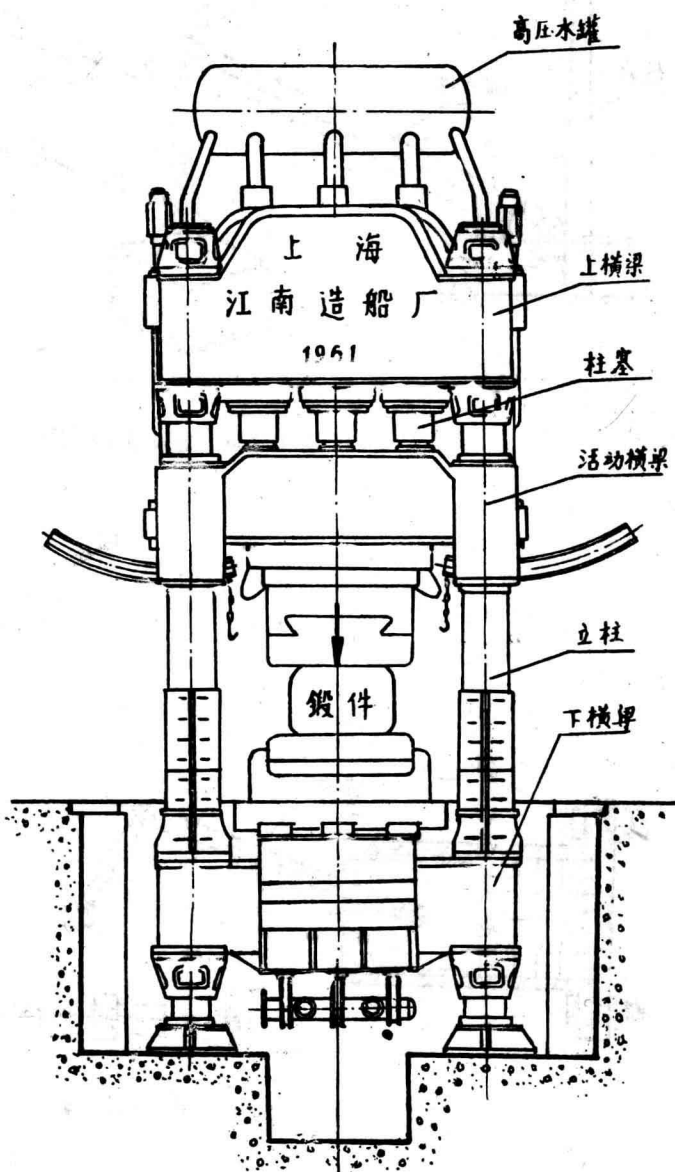


图 2-1(b) 12000 吨水压机工作简图

的连杆、汽缸螺钉（见图 2-2(b)）以及做材料试验的万能试验机的立柱（见图 2-2(c)）等都是受拉或受压的构件。

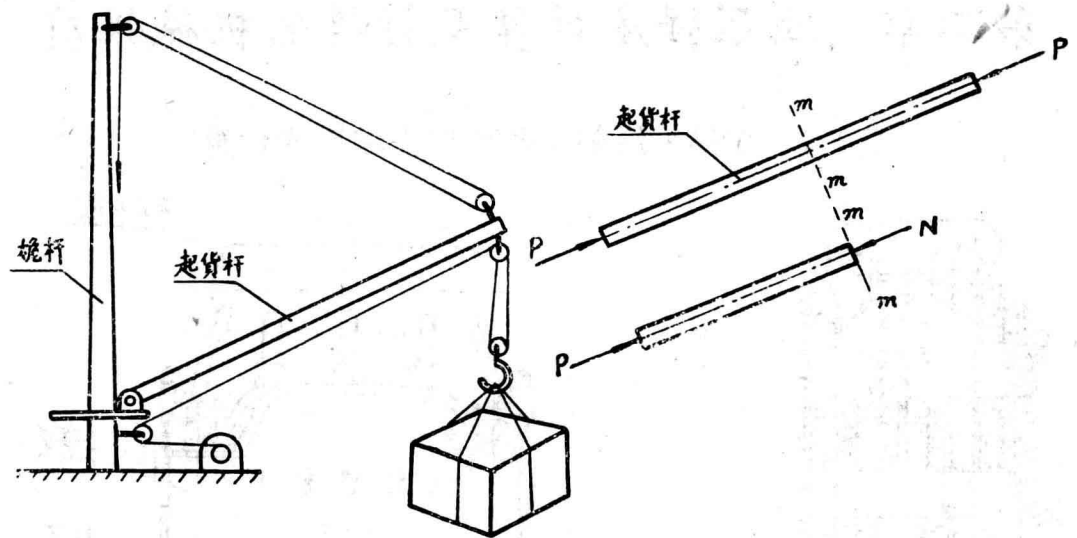


图 2-2(a) 船用起货吊杆受力分析图

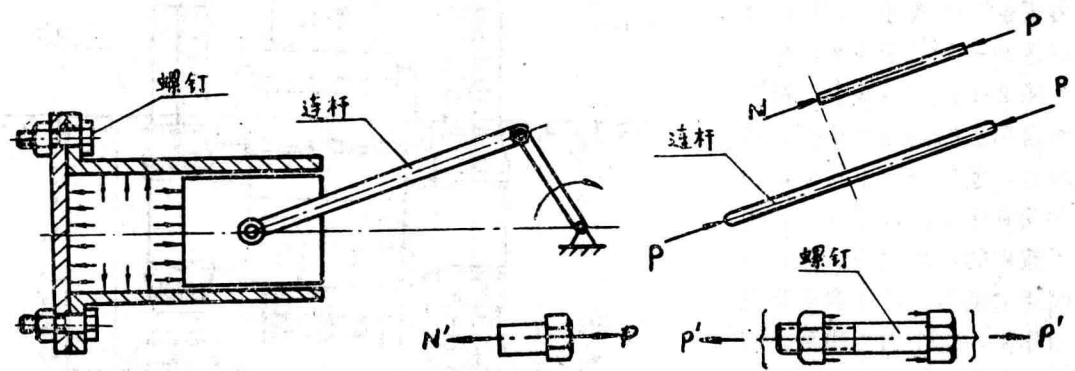


图 2-2(b) 内燃机连杆及螺钉受力分析图

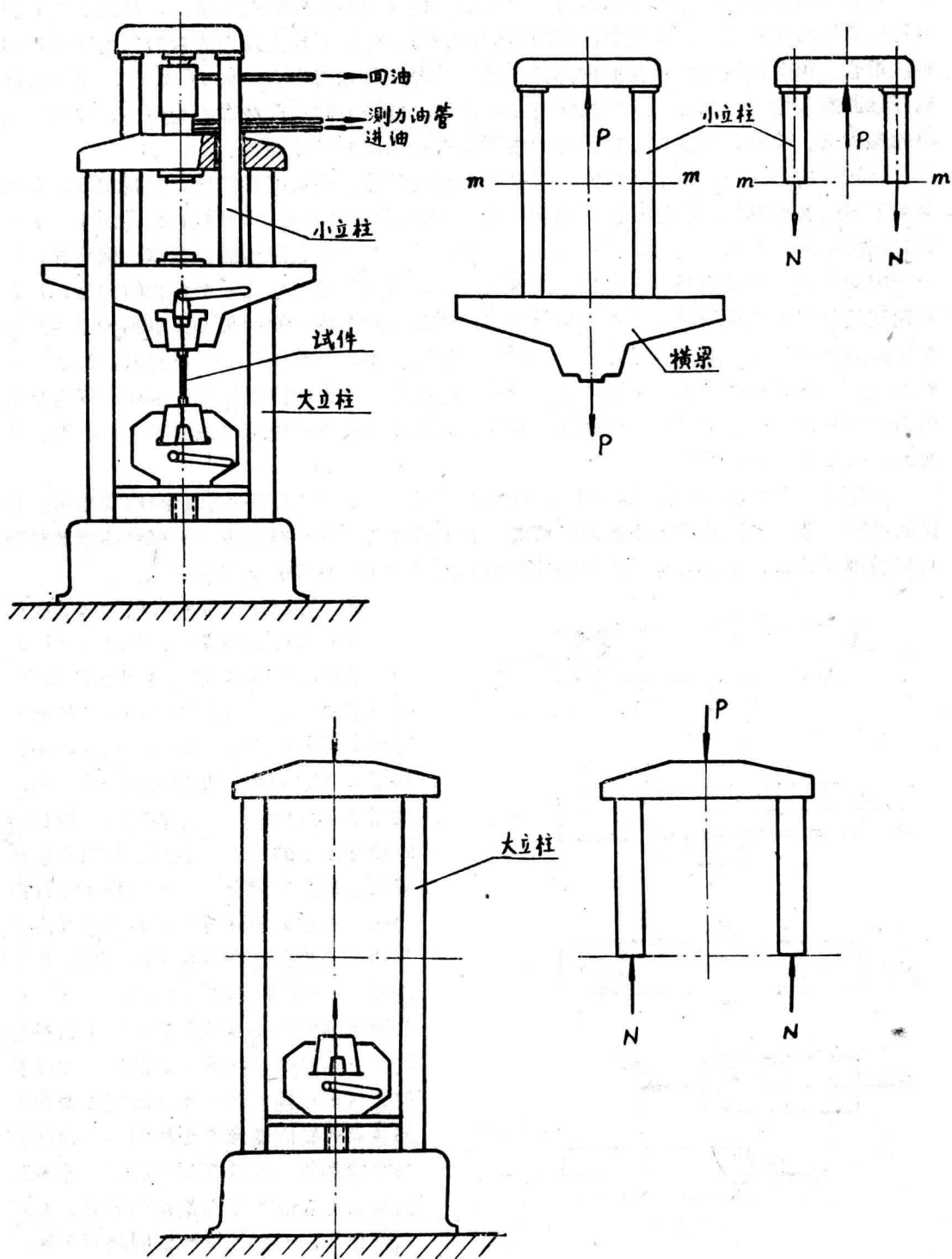


图 2-2(c) 万能材料试验机立柱受力分析图