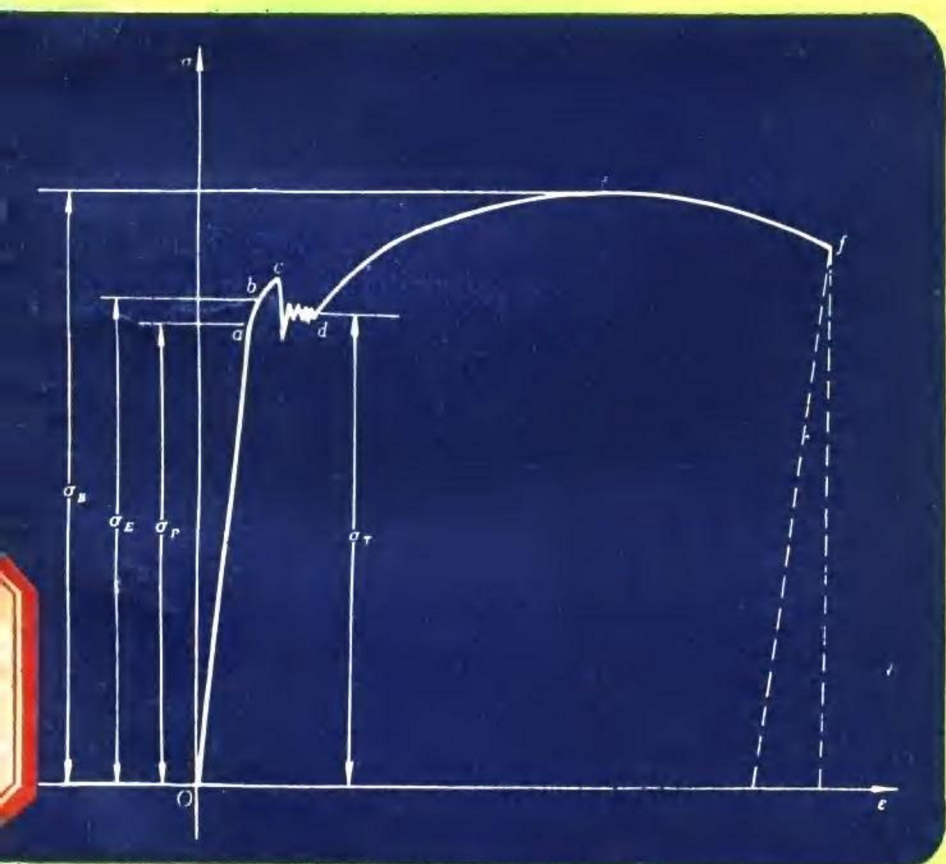


高等学校试用教材

力学实验

下册 固体力学部分

苏先基 王廷栋 陈康元 编



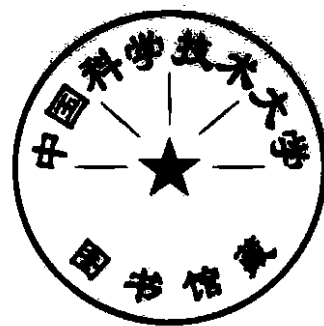
高等教育出版社

高等学校试用教材

力学实验

下册 固体力学部分

苏先基 王廷栋 陈康元 编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书分上、下两册出版。上册为包括量纲分析和相似律、误差理论及实验数据的处理方法在内的基础部分和流体力学部分；下册为固体力学部分，包括材料力学实验，实验应力分析和振动测试基础三大部分。

本书内容有实验仪器设备及其发展情况的介绍，实验原理，实验结果分析和讨论，误差分析；并配有实验指导的内容，讲解实验的目的、设备及试件，实验步骤和报告要求。本书插图丰富，有助于理解实验及实验课课前预习。

本书可作为力学专业“力学实验”课程的教材，也可供工程技术人员及科研人员参考。

高等学校试用教材

力 学 实 验

下册 固体力学部分

苏先基 王廷栋 陈康元 编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 10.375 插页 2 字数 247,000

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

印数 0001—1,800

ISBN 7-04-000706-1/O·109

定价 2.90 元

目 录

第一部分 材料力学实验

第一章 材料试验机和测量变形的仪器	1
§ 1.1 材料试验机	1
1.1.1 机械式万能材料试验机	2
1.1.2 油压式万能材料试验机	5
1.1.3 DY-200 型油压式压力试验机	10
1.1.4 50 型扭力试验机	11
§ 1.2 测量变形的仪器	14
1.2.1 杠杆变形仪	15
1.2.2 千分表	18
1.2.3 千分表式引伸仪	20
1.2.4 镜式引伸仪	21
§ 1.3 基本量具	24
1.3.1 游标卡尺	24
1.3.2 外径千分尺	26
第二章 拉伸实验介绍	28
§ 2.1 载荷-变形(或应力-应变)曲线	28
2.1.1 Ob ——弹性变形阶段	29
2.1.2 cd ——屈服变形(非连续式的、跳跃式的变形)阶段	29
2.1.3 de ——均匀塑性变形(强化)阶段	30
2.1.4 ef ——局部塑性变形(颈缩)阶段	30
§ 2.2 几个弹性指标的测定	33
2.2.1 比例极限 σ_P	33
2.2.2 弹性模量 E	34
2.2.3 弹性极限 σ_B 和屈服极限 σ_T	34

§ 2.3	影响塑性指标的几个因素	36
2.3.1	试件的尺寸对 δ_K 的影响	36
2.3.2	断口位置对条件延伸率 δ_K 的影响	37
第三章	实验指导	39
实验一	金属材料的拉伸试验(一)	39
实验二	金属材料的拉伸试验(二)	42
实验三	金属材料的压缩试验	45
实验四	金属材料的扭转试验	50
实验五	金属材料的硬度试验	54
实验六	金属材料的冲击韧度试验	58
实验七	矩形截面纯弯梁中应力分布的测定	61

第二部分 实验应力分析

第四章	应变量的电测法	65
§ 4.1	电阻应变片	65
4.1.1	电阻应变片的工作原理	65
4.1.2	电阻应变片的构造和种类	66
4.1.3	电阻应变片的测量性能和非工作因素的影响	69
4.1.4	电阻应变片的粘贴、检验与防护	71
§ 4.2	电桥线路原理和应变仪	76
4.2.1	直流电桥原理简介	78
4.2.2	调零式直流电桥	80
4.2.3	调零式直流双电桥	82
4.2.4	交流电桥及相敏检波器	85
4.2.5	电桥灵敏度的讨论	91
4.2.6	电阻应变仪简介	93
§ 4.3	静态应变测量	98
4.3.1	简单应力状态下的应变测量	98
4.3.2	复合抗力下某应变成分的测量	101
4.3.3	平面应力状态时的应变测量	103

4.3.4	多点测量	106
4.3.5	静态应变测量时应变仪校准等	107
§ 4.4	动态应变测量简介	110
4.4.1	应变片和应变仪的频率响应	110
4.4.2	动态应变的记录仪器	112
4.4.3	动态应变测量时的标定和防干扰	118
§ 4.5	特殊条件下的应变测量简介	120
4.5.1	高、低温条件下的应变测量	121
4.5.2	高压液下的应变测量	122
4.5.3	旋转体应变测量	124
4.5.4	残余应力的测量	125
4.5.5	非金属材料的应变测量	125
第五章	光测弹性力学	132
§ 5.1	与光弹性实验有关的光学知识简介	132
5.1.1	自然光与偏振光	132
5.1.2	光的反射和折射	133
5.1.3	光的干涉	136
5.1.4	偏振片和 1/4 波片	137
§ 5.2	平面光弹性的基本原理	140
5.2.1	平面应力-光性定律	140
5.2.2	平面受力模型在平面偏振光场中的光学效应	142
5.2.3	平面受力模型在圆偏振光场中的光学效应	147
§ 5.3	光弹性仪和光弹性材料	151
5.3.1	光弹性仪	151
5.3.2	光弹性材料	153
§ 5.4	光弹性条纹的确定与补偿	159
5.4.1	等差线条纹级数的确定	159
5.4.2	等差线分数条纹的补偿	162
5.4.3	等倾线条纹图的描绘	165
5.4.4	主应力迹线	168
§ 5.5	光弹性实验资料分析	172

§ 5.6	三维光弹性及其它光弹性方法简介	175
6.6.1	冻结切片法	175
5.6.2	散光法	182
5.6.3	光弹性贴片法	183
5.6.4	全息光弹性法	186
第六章	实验指导	192
实验一	应变片粘贴	192
实验二	拉伸试件测取低碳钢弹性模量	193
实验三	复合抗力下的应变测量	200
实验四	应变花应用	202
实验五	动态应变测量	204
实验六	光测弹性力学仪的调整与材料条纹值的测定	210
实验七	等差线和等倾线的描绘	213
实验八	拉伸孔板应力集中系数的测定	216

第三部分 振动测试基础

第七章	振动测试概述	220
§ 7.1	振动测试的意义和内容	220
§ 7.2	机械振动分类及其表示方法	220
§ 7.3	振动测量方法和测量仪器分类	224
第八章	振动测量传感器	228
§ 8.1	相对式传感器的力学原理	228
§ 8.2	涡流式位移计及其测量系统	230
§ 8.3	相对式速度传感器及微分积分电路	233
§ 8.4	惯性式(绝对式)测振仪的工作原理	237
§ 8.5	惯性式速度传感器及其性能指标	241
§ 8.6	压电晶体加速度计及其测量系统	245

§ 8.7	其它型式的传感器	261
第九章	激振设备	264
§ 9.1	激振设备的用途与分类	264
§ 9.2	电动式振动台的原理及性能	265
§ 9.3	电动式激振器的原理与计算模型	268
§ 9.4	激振器的主要性能、安装与应用	276
第十章	机械振动的基本参量及机械振动系统的特性参数的 测试方法	285
§ 10.1	简谐振动的振幅、频率及相位的测量	285
*§ 10.2	周期振动频谱的测量	294
§ 10.3	机械振动系统固有频率与阻尼比的测定	298
§ 10.4	机械振动系统振型的测定	309
第十一章	实验指导	312
实验一	单自由度系统及弹性体固有振动试验	312
实验二	减震试验	315
实验三	自由-自由梁的振动试验	319
实验四	自由振动法测定系统的固有频率与阻尼比	321

第一部分 材料力学实验

第一章 材料试验机和测量变形的仪器

§ 1.1 材料试验机

材料力学试验的基本方法是对试件施加一定形式的载荷,例如拉力、压力、扭矩等等,同时将试件上所受到的载荷大小和试件的变形大小测量出来。从这些测量结果进而求出材料的应力-应变关系,和代表材料力学性能的各种参量,如 E 、 μ 、 G 、 σ_T …。在这一节里先讲材料试验机,它的主要功能是对试件施加载荷,并测出所加载荷的大小,测量变形的仪器将放在下一节里。

由于需要施加不同形式的载荷,所以有不同类型的材料试验机。例如:拉伸试验机、压缩试验机、万能材料试验机(拉伸、压缩和弯曲都可以实现),扭转试验机、硬度试验机、冲击试验机、反复加载的疲劳试验机、蠕变试验机等等。

试验机的形式和种类虽然多种多样,但其核心部分大都由一个加载装置和一个平衡与测力的装置组成。此外,为了支持这些装置和安装试件,必须有一个支座和机身部分。有的试验机还附有将载荷和加力点的位移变化过程自动记录下来的绘图装置。

加载装置的最简单的形式是直接加挂砝码,但这要获得较大的载荷是很困难的。通常是利用机械系统或液压系统将一个小的力变成大的载荷。例如,一个砝码通过杠杆可以产生大许多倍的力。不过由于构造上的限制,这个放大倍数不可能很高,单个杠杆一般可以放大十倍,采用双重杠杆就可以放大一百倍。利用齿轮或蜗

轮蜗杆可以获得较高的放大倍数。液压加载系统是利用帕斯卡原理，在一根很细的管子内产生一定的压强，在与之相连的一个很粗的活塞上就能产生很大的载荷。

下面将结合我们课程中要用到的几种类型的材料试验机进行详细介绍。

1.1.1 机械式万能材料试验机

以 ZDM-5T 万能材料试验机为例，这种试验机的构造如图 1-1 所示(见书末插页)。它可以用来进行拉伸、压缩和弯曲试验，所能施加的最大载荷为 5 吨。

加载装置：如图 1-1a)所示为机械式的。机座边上的电动机开动后，它通过一套变速装置(图上未画出)再带动机座下的蜗杆，进而驱动蜗轮和螺母，并迫使丝杠带着下夹头在滑轨中上下滑动。变速装置可以通过装在立柱边上的调速手轮来控制，它可以使下夹头的移动速度在 6—20 mm/min 之间连续改变。手动的加载手柄装在下夹头附近，它通过一套蜗轮蜗杆使得丝杠绕铅垂轴转动，并在机座上的螺母中沿铅垂方向移动。手柄转动一圈，下夹头移动 1/100 mm，这在需要进行较精确的试验时是非常有利的。“快速调节”不是用手摇加载手柄，而是通过装在下夹头背面的小电动机来带动蜗轮蜗杆使丝杠绕铅垂轴转动。当使用“快速调节”时，实际上是小电动机与机座旁的大电动机同时工作，螺母和丝杠按相反的方向旋转，于是，可以很快地将下夹头调到所需的位置。“手动”、“电动”和“快速调节”三种功能是通过离合器手柄来控制的。应当注意：这三种功能的变换，应在停车的情况进行。“快速”档只是为安装试件时调节下夹头的位置用的，千万不能用来对试件施加载荷，否则，小电动机将因超过负载而烧掉。

平衡装置：如图 1-1b)所示。当进行拉伸试验时，下夹头往下运行，给试件和上夹头一个向下的拉力。这时，上夹头也给杠杆 1

一个向下的拉力，则杠杆1与刀口B脱开，而绕刀口A沿顺时针方向转动。于是，连杆1就拉着杠杆2向下绕刀口C转动，从而使连杆2拉着曲杆绕支点D转动，迫使摆锤向左偏转，直到平衡为止。当做压缩或弯曲(需要换上相应的垫块或支座)试验时，下夹头往上运行给试件一个向上的推力，这推力也通过上夹头传给杠杆1。这时，杠杆1将与刀口A脱开而绕刀口B转动，转动的方向仍是顺时针的，于是连杆1还是拉着杠杆2向下绕刀口C转动，连杆2也就向下拉着曲杆绕支点D转动，摆锤仍然是向左偏转。所以，只要合理布置刀口A和B的位置，则用一个度盘既可用来测定所加的拉力，也可用来测定所加的压力。

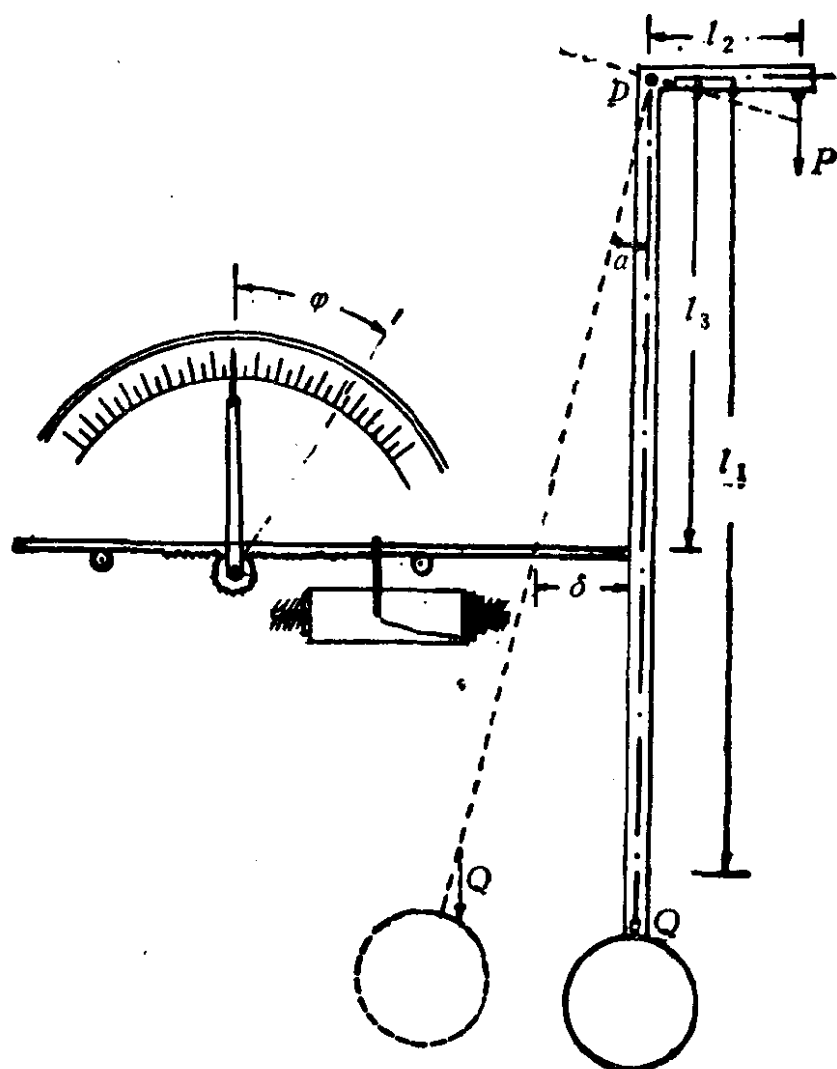


图 1-2

测力装置:如图 1-2 所示。当摆锤向左偏转时,就推动一根小杆在滑轮的槽中作水平移动,小杆下表面的齿条就带动齿轮转过相应的角度。于是,与齿轮相连的指针也随之转过一个角度,而在载荷度盘上指出了载荷的数值。

如曲杆和摆锤的总重量为 Q , 它们的重心与支点 D 的距离为 l_1 ; 曲杆与连杆 2 的铰接点到支点 D 的距离为 l_2 , 则根据曲杆和摆锤与载荷 P 的平衡条件为:

$$Pl_2 = Ql_1 \operatorname{tg} \alpha \quad (1-1)$$

或者

$$\operatorname{tg} \alpha = Pl_2 / Ql_1 \quad (1-2)$$

另一方面,如小杆的水平位移为 δ , 齿轮的有效半径为 r , 转过的角度为 φ , 则

$$\delta = l_3 \operatorname{tg} \alpha, \quad \varphi = \frac{\delta}{r},$$

所以

$$\varphi = \frac{l_3}{r} \operatorname{tg} \alpha$$

或者

$$\operatorname{tg} \alpha = \varphi r / l_3, \quad (1-3)$$

于是,由(1-2)式和(1-3)式有

$$Pl_2 / Ql_1 = \varphi r / l_3,$$

即

$$P = \left(\frac{Ql_1 r}{l_2 l_3} \right) \varphi. \quad (1-4)$$

可见,载荷 P 与指针的偏转角 φ 和摆锤的重量 Q 成正比关系。只要度盘分度适当,就可以从度盘上直接读出对试件所施加的载荷值。

本试验机的载荷度盘有三个测量范围:0—1 吨,最小分度为 2kg; 0—2500 kg, 最小分度为 5kg; 0—5000 kg, 最小分度为 10kg。试验前应根据所需的最大载荷选用不同的度盘,配好相应的摆

锤。一般应使最大载荷达到该度盘的 80% 左右, 太小了会影响测量精度。但千万别让最大载荷超过该度盘的量程。

自动绘图装置: 见图 1-2。图中的弦线通过一个齿轮和齿条与加载装置的下夹头相连(参见图 1-1)。当下夹头上下移动时, 弦线通过棘轮带动装在滚筒上的图纸沿铅垂方向移动。图纸的移动量与试件变形的大小成比例, 它还可以通过变换棘轮半径的大小来改变变形的放大倍数。另一方面, 在测力装置的齿条上还带着一支绘图笔, 它随载荷的增减而作水平移动, 移动的大小是与载荷成正比的。这样, 在试验机对试件进行加载和试件受载变形的过程中, 就自动绘出了载荷-变形的曲线。应当指出的是: 这个图形上所给出的变形值只是近似的, 它包含试件标距内和标距外的变形, 以及试件与夹头间的相对滑动。严格地说, 它实际上是下夹头的位移, 而不是试件标距长度内的变形。所以, 为了得到试件标距长度内的变形值, 还需在试件标距长度上装上测量变形的仪器进行测量。

1.1.2 油压式万能材料试验机

图 1-3 所示为 WE-10B 型油压式万能材料试验机。它所能施加的最大载荷为 10 吨。可用于拉伸、压缩和弯曲试验。

主体由机座(包括工作油缸和活塞)、试验台、两根光杠、两根丝杠、动横梁、上横梁(又称反向器)以及夹持机构(图中未画出)等组成。工作油缸固定在机座的中央, 试验台固定在活塞上, 光杠的下端与试验台固定连接, 上端与上横梁固定连接。动横梁通过传动螺母支持在丝杠上, 它将试验空间分成上下两个部分, 上面部分为拉伸试验空间, 下面部分为压缩和弯曲试验空间。丝杠下端支持在机座上, 小电动机开动后, 通过减速器带动链条使丝杠旋转, 丝杠正向或反向旋转, 通过螺母迫使动横梁上升或下降。拉伸试验用的试件夹持机构装在上横梁和动横梁的中央(图中未画出)。试

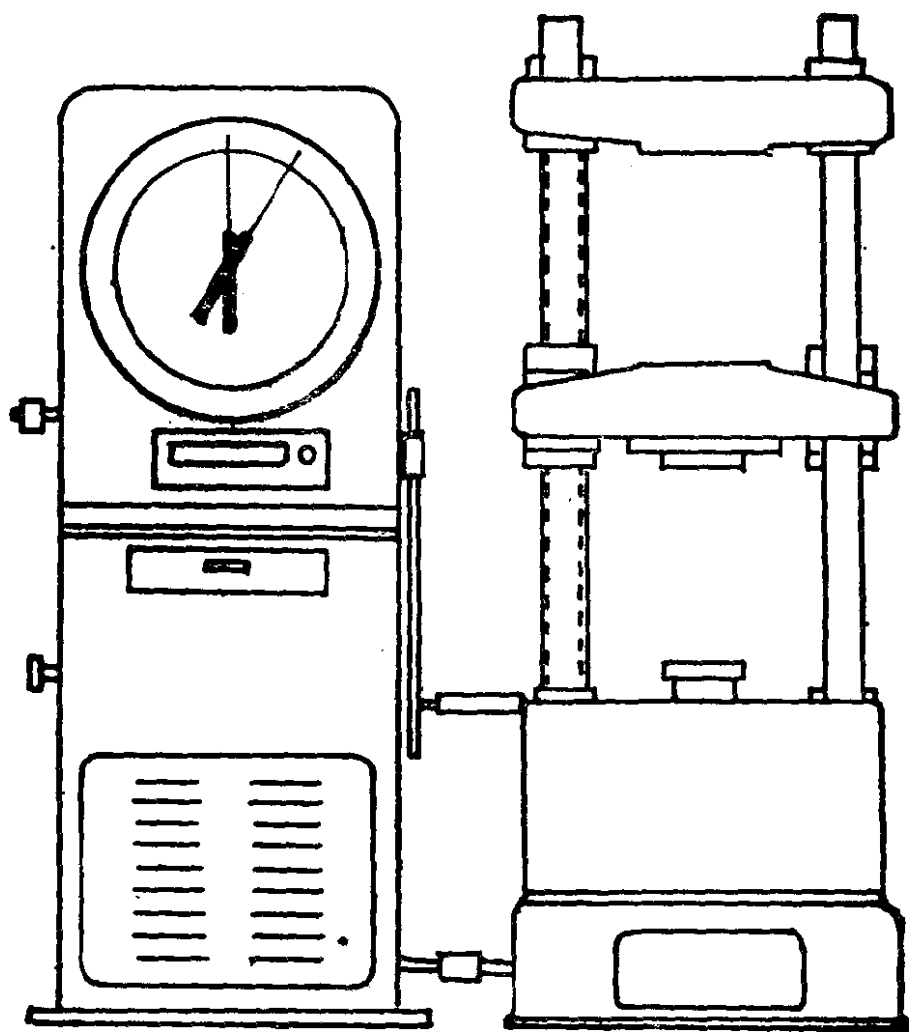


图1-3 WE-10B型液压式万能试验机简图

验时，由活塞通过试验台和光杠使上横梁向上移动，而使试件受拉。做压缩(或弯曲)试验时，试件装在动横梁与试验台之间，由活塞将试验台顶起而使试件受压(或弯曲)。

液压加载和测力系统的原理如图1-4所示。油泵起动后，就将机油从油箱中泵入油管1，然后通过控制阀输入油缸。控制阀是用来控制油缸进油量的大小，当将控制阀的旋钮向“加荷”方向旋转时，进入油缸的油逐渐增多，则活塞逐渐升起。当有试件时，由于试件限制了活塞的上升，如继续进油，则油压逐渐上升而使试件受载；当将控制阀的旋钮指向“0”时，从油泵来的油全部由油管3流回到油箱中，使油缸中的油压稳定在一值，也就是使载荷保持在一

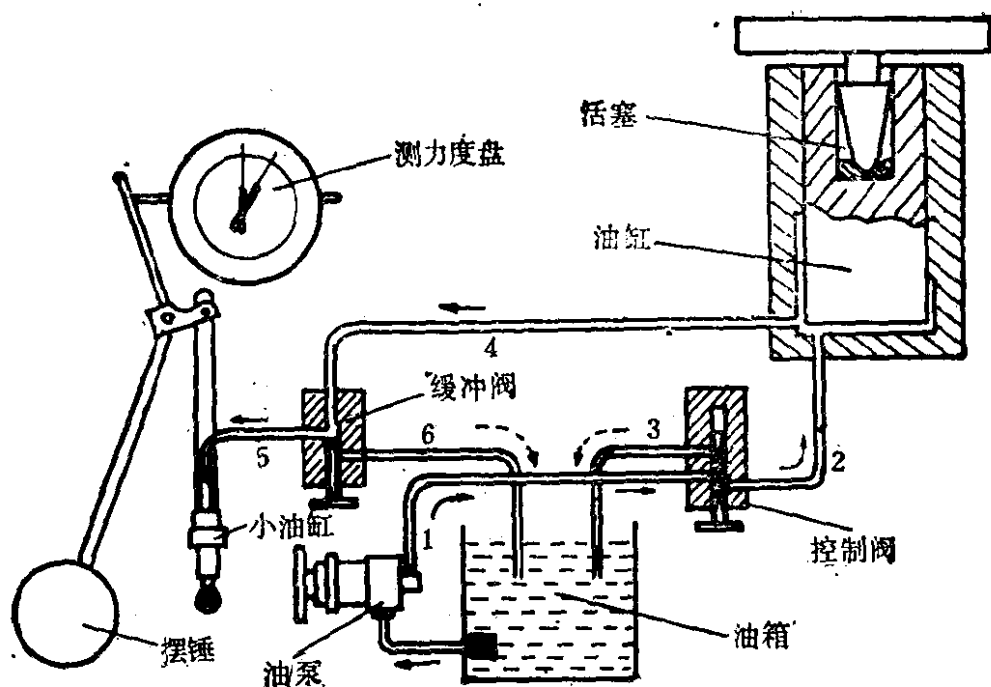


图 1-4 液压式万能材料试验机的加载和测力系统原理图

定值；当将控制阀的旋钮指向“卸荷”方向时，不仅从油泵来的油全部流回油箱，而且油缸中的油也部分流回油箱，从而使油缸中的油逐渐减少，而达到卸载的目的。

测力系统是经油管 4、缓冲阀、油管 5 将加载大油缸与测力小油缸连通，这样，大小油缸中的油压相等。利用油压将小油缸中的活塞向下推，从而带动曲杆使摆锤向左偏转，直到平衡为止。曲杆还推动小杆、齿条、齿轮带动指针在度盘上指出载荷值。本试验机有四个测量范围，根据所需的最大载荷选用不同的测力度盘并相应地增减摆锤。

摆 锤	A	A+B	A+B+C	A+B+C+D
测量范围(kg)	0—1000	0—2000	0—5000	0—10,000
最小分度(kg)	2	4	10	20

缓冲阀是用来降低摆锤降落的速度，避免当试件断裂时，载荷突然降至零，扬起的摆锤骤然下降的冲击而使机器损坏。所以，当

做破坏性试验时,应按规定调好缓冲阀。

自动绘图装置的原理与机械式万能试验机类似,只是具体结构稍有不同而已。

操作注意事项:

(1) 绝不能用动横梁的升降来加载或卸载,否则会烧坏小电机;

(2) 开始试验时,应先将控制阀旋钮拧向“0”左边的“卸荷”位

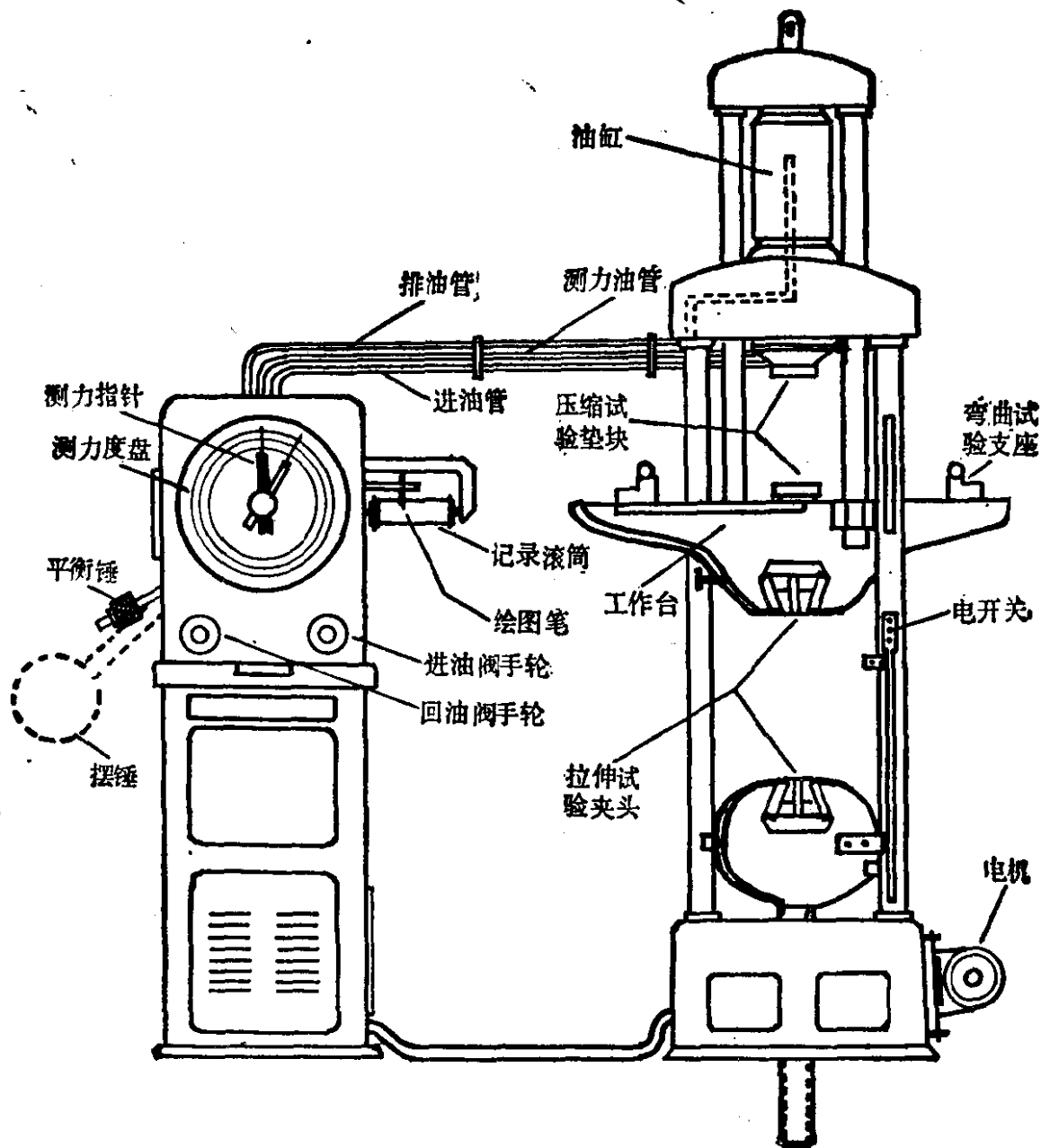


图 1-5 WE-30 型液压式万能材料试验机简图

置,再按油泵的起动按钮。油泵起动后,再慢慢将控制阀旋钮调到“0”右边的“加荷”位置。千万注意别将油门开得过大,以免载荷突然猛增而使试件或测量仪器遭到破坏。

图 1-5 所示为 WE-30 型油压式万能材料试验机的构造简图。它所能施加的最大载荷是 30 吨。挂摆锤 A 为 0—6 吨, $A+B$ 为 0—15 吨。 $A+B+C$ 为 0—30 吨。它可以用来做拉伸、压缩、弯曲及剪切试验。

1	电源开关	11	油缸
2	指示灯	12	活塞
3	控制按钮	13	压板
4	小电动机	14	测力度盘
5	手轮	15	回油阀
6	立柱	16	回油管
7	送油阀	17	安全油管
8	油箱	18	绘图装置
9	油泵	19	弦线
10	进油管		

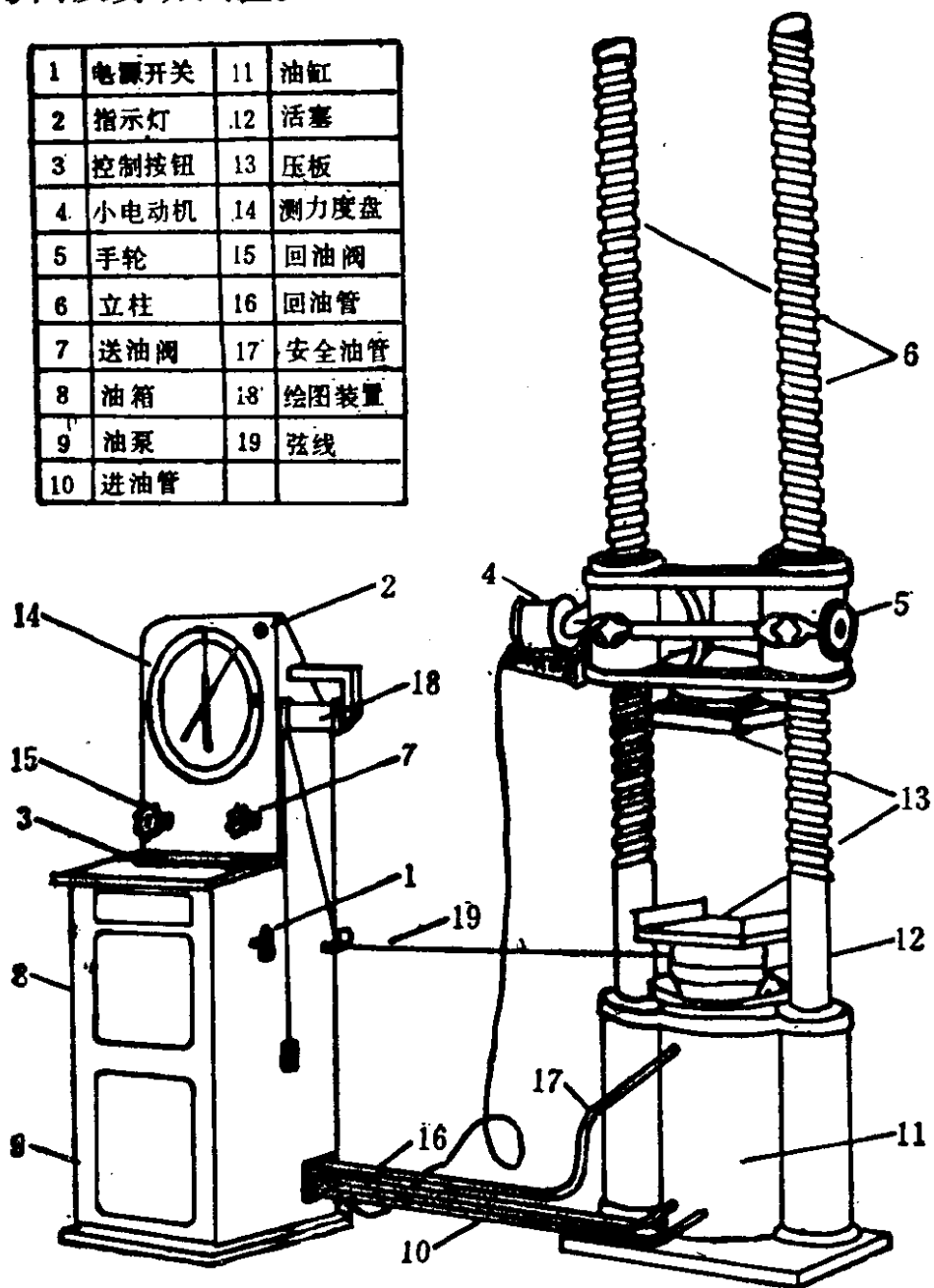


图 1-6 DY-200 型压力试验机简图