

水 力 量 测 技 术

(上 册)

张 训 时

清 华 大 学 水 利 工 程 系

一 九 八 〇 年 八 月

第一章 绪论.

§1-1	水力测功器工作的任务	1
§1-2	水力测功器系统的组成	3
§1-3	测功器的静态特性	10

第二章 传感器的动态响应

§2-1	传感器的力学模型	17
§2-2	传递函数	20
§2-3	相似系统	24
§2-4	瞬态响应	30
§2-5	频率响应	50

第三章 测压电路

§3-1	测压电桥	63
§3-2	微分电路和积分电路	83
§3-3	误差放大器	93

第四章 电阻式传感器

§4-1	应变式传感器	117
§4-2	热电阻传感器	123

第五章 电阻应变片(电阻式传感器的一种)

§5-1	工作原理	136
§5-2	电阻应变片的制造及材料	139
§5-3	电阻应变片的灵敏度系数和横向效应	153
§5-4	粘贴剂和电阻应变片的粘贴工艺	161
§5-5	影响电阻应变电测的因素及改进措施	169
§5-6	电阻应变片的应用	182
§5-7	电阻应变仪	213

第一章，绪论

§1-1 水力量测技术的任务：

水力量测技术的任务是通过测量手段（传感器或装置）对被测对象中的感兴趣的某些物理量（一般指非电量）进行客观的、比较准确的描述，以求人们对被测对象在质和量两方面有一个比较准确、全面的认识，从而对客观世界的运动过程能进一步控制和改造。

随着近代水利工程和科学技术的发展，要求人们更深刻地探求它们的内在规律，因而对测量技术的要求也就越来越高，用传统的一般量测仪表来测量是无法满足这种要求的。大坝、洄流闸门的振动和水流的脉动特性有关，要求对水流脉动流速和压力进行测量。新坝型的出现，要求在结构模型中进行结构应变的多点测量和了解破坏时的应力状态。地震区水工建筑物的动态特性的观测及试验等，均需应用现代测量技术——主要是非电量的电测技术某些新技术。

随着“电子时代”的到来，电子技术在各个领域占有愈来愈重要的地位，在测量技术中也得到广泛的应用，促进了水力量测技术的极大发展。

概括起来，水力量测技术有如下优点：

1. 可以进行连续测量和自动记录下被测量随时间变化的历时过程，如水流脉动流速和压力，水工结构物的振动加速等。并可进行多点测量和对缓慢变化的参量作巡回测量。
2. 可以进行远距离测量和遥测。
3. 测量具有一定的精度和较高的灵敏度，没有显著的惯性。
4. 测量的数值范围很广，所测的最大值和最小值之比可达10000或更高。
5. 和自动控制系统相联接，可进行自动控制和自动测量。

图 1-1 示流量自动控制系统，管道中的流量经流量变换器（测

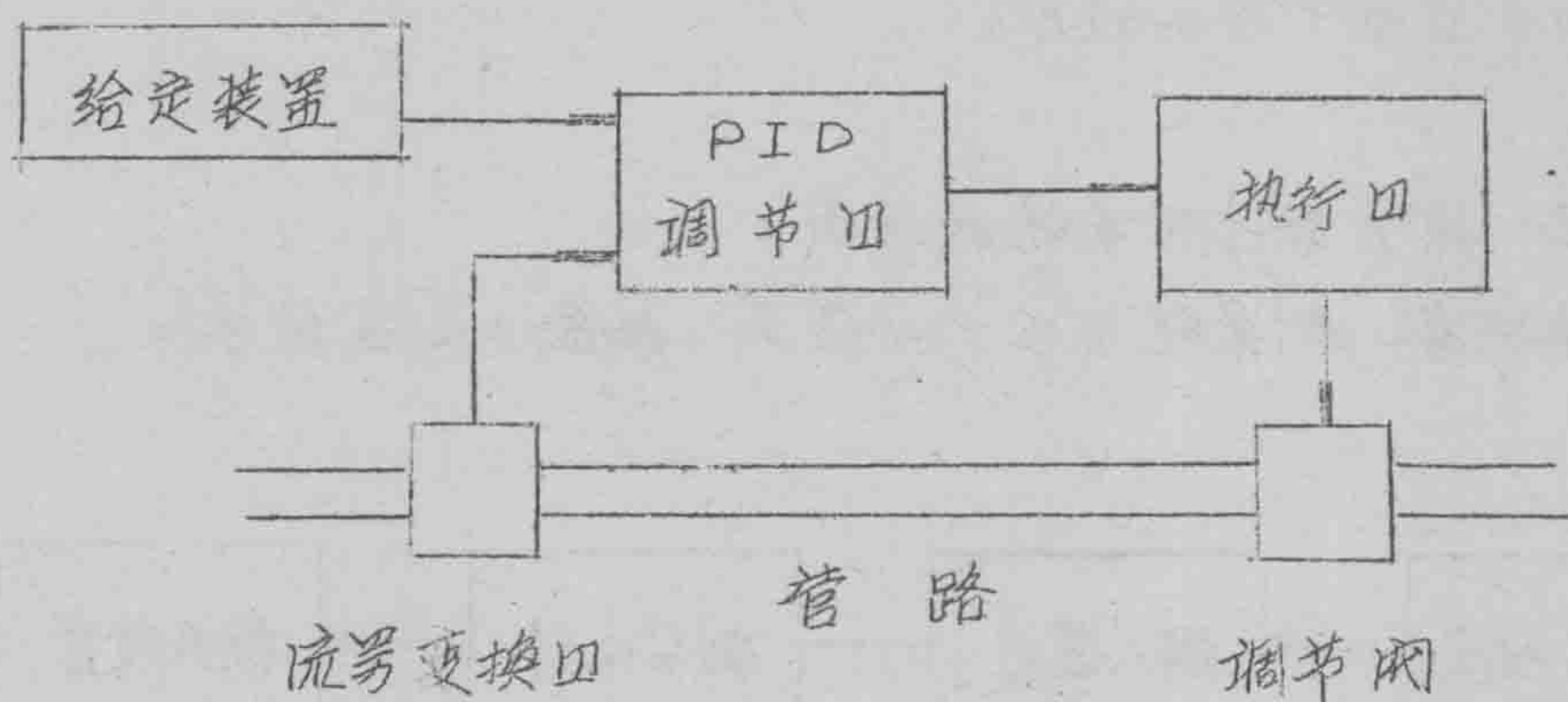


图 1-1 流量自动控制系统

流仪器)，将流量按比例转换成电信号，与给定装置输出的电信号一起输入到 PID 调节器，在其中对此两信号差值进行比例，微分和积分调节，输出一个电信号到执行机构（直行程器或角行程器），去控制调节阀的开度，使管道中的流量自动稳定在给定装置所选定的流量上。当给定装置的输出是一个随时间变化的模拟量时，则经上述控制系统的控制作用，在管道中流过的流量也是一个与模拟量相应的随时间变化的流量，如图 1-2 所示，这样可在水力学实验室中进行不稳定流的试验了。

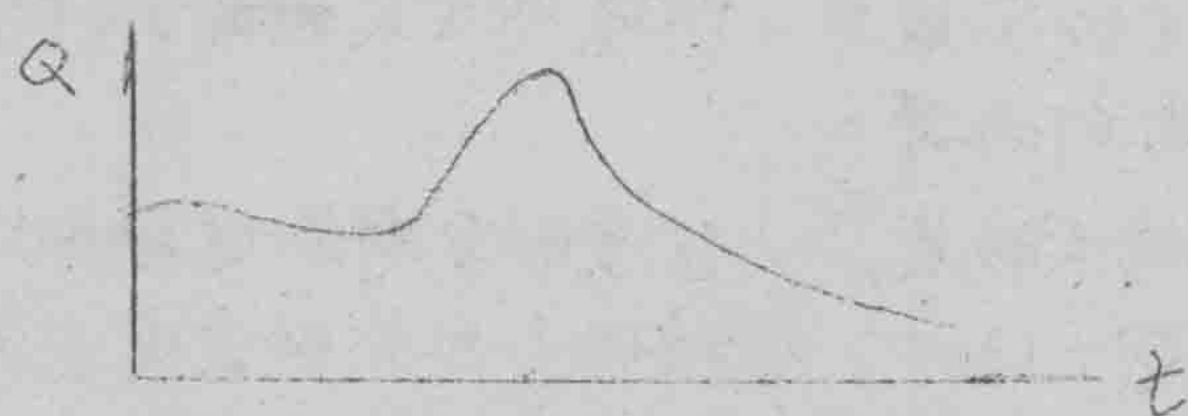


图 1-2 流量历时过程曲线

6. 在某些场合, 还可进行无接触测量, 如激光测速仪, 这样就避免了对被测对象运动状态的扰动。

正是由于上述优点, 非电量测量技术在水利工程和科学研究中获得了日益广泛的应用。

3-1-2. 非电量测量系统的组成:

非电量测量系统由三个部分组成, 如表 1-3 所示。

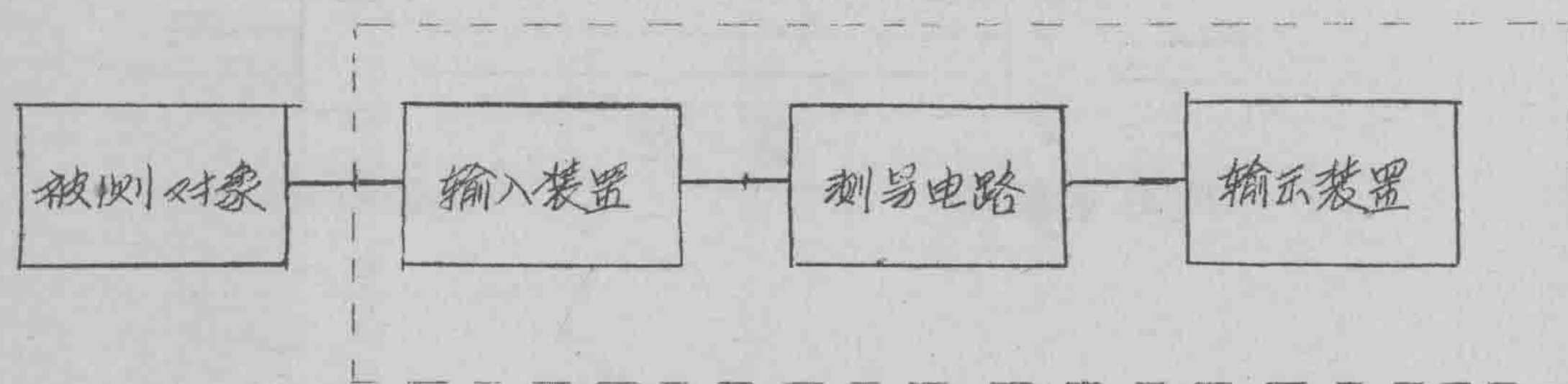


表 1-3 非电量测量系统的组成。

输入装置: 用于接收或敏感被测对象中感兴趣的物理量, 并转换成一个与该物理量成比例的电信号输送给测量电路。输入装置通常是一个传感器。

测量电路: 它是将输入装置送来的电信号根据输出装置的要求进行加工, 例如衰减或放大, 进行各种调制和解调, 桥波, 数/模和模/数的转换等。

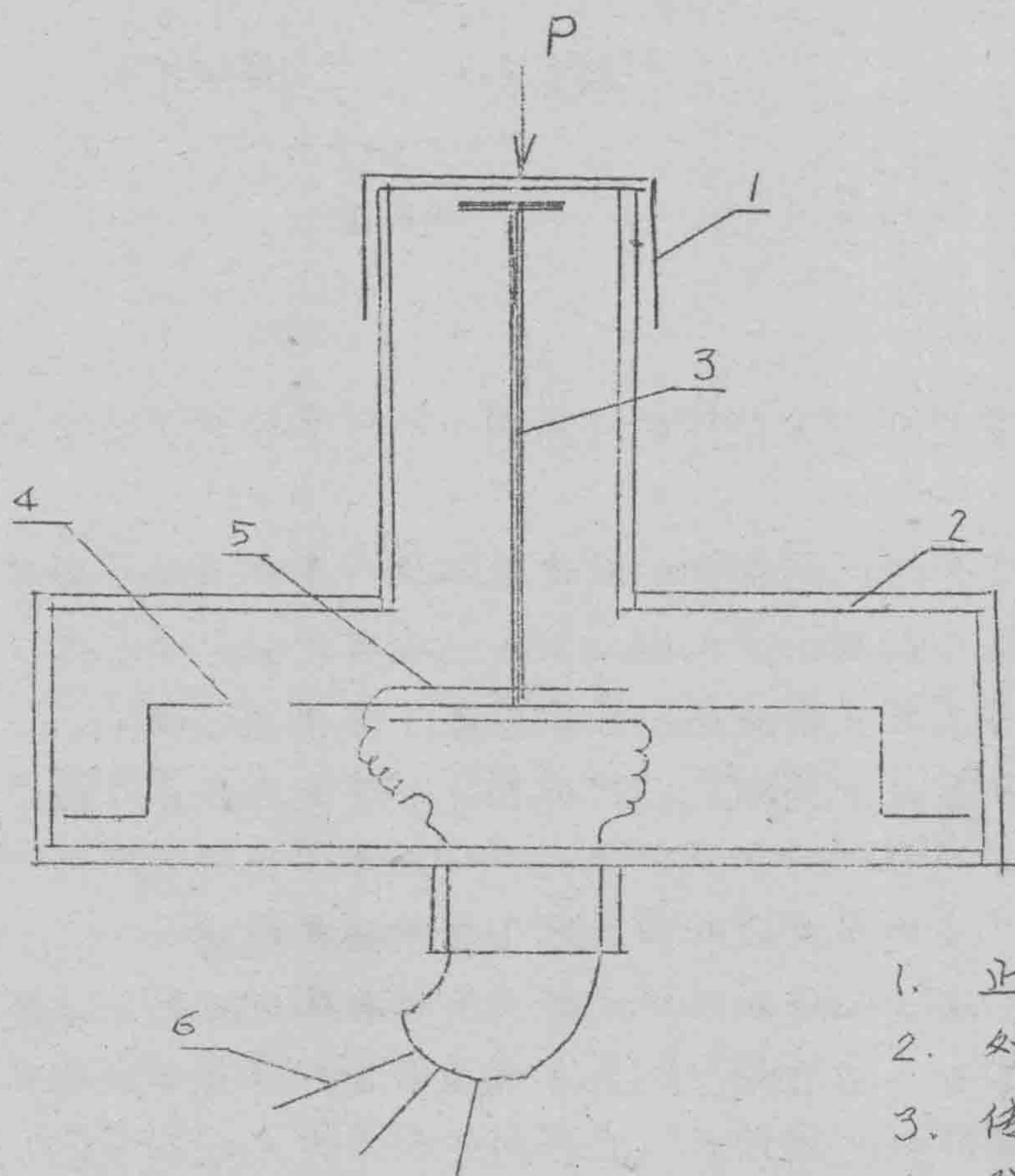
输出装置: 按输出装置要求的形式输出信号, 它可以是电表指针或光点的偏转, 数码的显示和打印等。作为输出装置有简单的指示电表, 光线示波图, 阴极射线示波图, 磁带贮存器、数字显示器和数字打印机等。

随着电子技术的发展, 信号的分析 and 数据的处理在测量系统中的应用越来越广泛了, 它将传感器获得的信号进行整理分析, 给出了更具有规律性的成果, 加深了人们对被测物理量内在运动规

律的认识。例如频谱分析仪, 实时分析仪, 微处理机和计算机等, 下面对有关部分作一简单讨论。

传感器 (又叫变换器, 换能器) 是把被测物理量激励流信号转换成与激励流信号大小成比例的电信号的一种装置, 它是将一种能量转换成另一种能量 (如电能) 的元件, 一个理想传感器是一种尽可能把信号流的功率最大限度地传递给负载的传感器。

图 1-4 示常用的水流脉动压力计, 把它安装在水槽的底下。

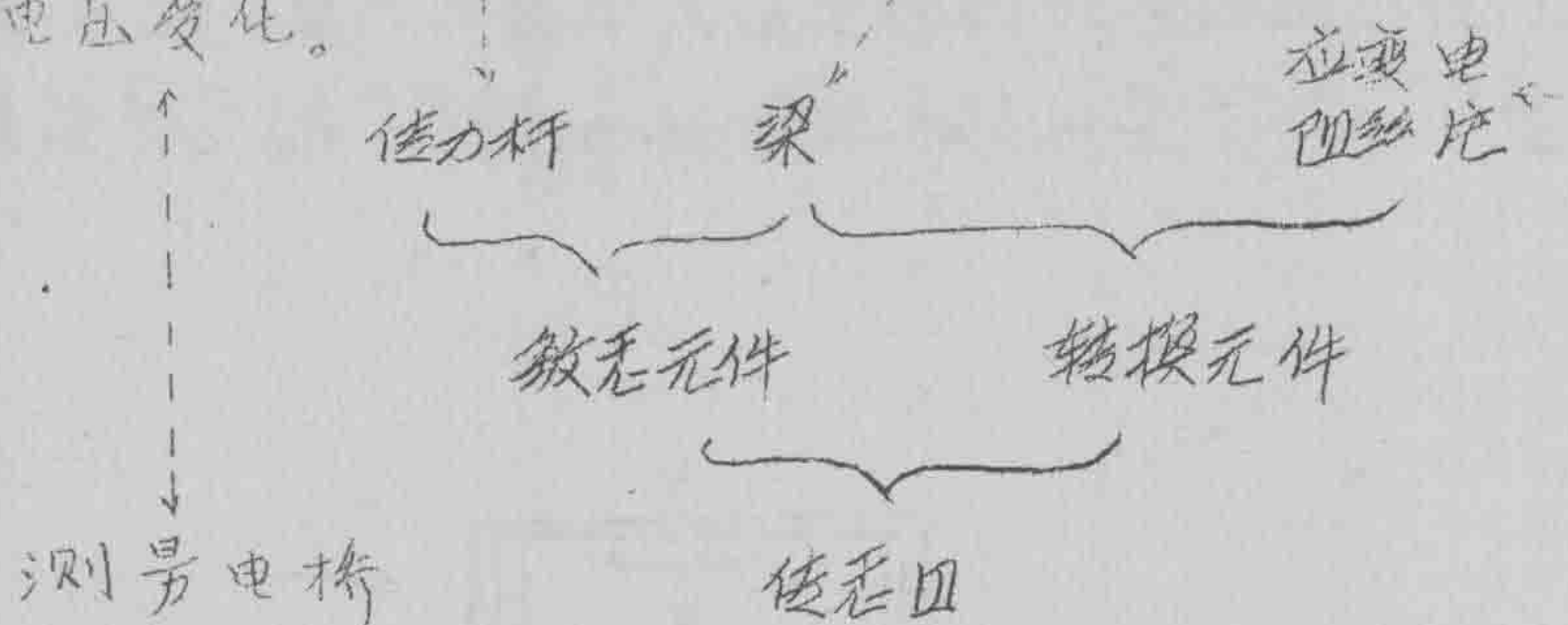


- 1. 止水胶膜
- 2. 外壳
- 3. 传力杆
- 4. 弹性探
- 5. 电阻应变片
- 6. 导线

图 1-4 脉动压力计

当测放水流时，就有一个水流脉动压力 P 作用在传力杆上，使传力杆产生一个位移，导致下端简支梁发生弯曲变形，把应变电阻片粘贴在梁上，于是就产生一个正比于梁变形的电压信号送到测量电路，这个过程可表示如下：

水流脉动压力 P 变化 $\rightarrow$ 传力杆位移 $\rightarrow$ 梁的弯曲变形 $\rightarrow$ 应变电阻丝电阻变化 $\rightarrow$ 电压变化。



通过上述测量过程的分析，可以看到一个传感器是由两部分形成的。

1. 敏感元件 = 将被测的非电量转换为某种易于直接转换为电量的非电量，如将水流的脉动压力转换为梁的弯曲变形，它是由传力杆和简支梁来实现的（这里忽略了防水用的胶膜）。

2. 转换元件 = 将敏感元件所转换的非电量再直接转换为电量，如经应变电阻丝片把梁的变形转换成电阻值的改变而传输给测量电路，它是由简支梁和应变电阻丝片来完成的。

实际上，敏感元件和转换元件是很难机械分开的。上述说明作为一个传感器，乃至整个测量系统是由各式各样的转换元件所组成，被测量作为一种信息，在各种转换元件之间被传递、转换、变换和特征提取，最后被分类、判别，作为人们所需要的信息，而被输出识别和记录。

结构复杂的传感器往往由许多变换环节（包括了机械 $\rightarrow$

机械、机械→电，光→电，电→电，电→机械等）所组成，作为测量电路或输出装置的信号流。在自动化仪表中，常把传感器称为一次仪表，其他部分则叫做二次仪表。

传感器的分类：在物质世界中，信息千千万万，而为获取这些信息的信息也是各式各样、因之，对传感器作科学的分类是十分必要的，一般说来，传感器有两种分类方法。

1. 按输入量分类：即按被测物理量分类，如温度传感器，压力传感器，流量传感器等，不一而足，这对于使用者是比较方便的，可以根据被测对象而选用合适的传感器，但这种分类势必种类繁多，而在讨论各种传感器的工作机理时也难以重复，缺乏系统性，科学性。

2. 按工作原理分类：即按传感器所依据转换的物理效应和电气输出特性来分类，这样，被测的物理量可能是性质完全不同的非电量，但完全可依据同一的物理效应而获得电气特性相同的输出量。基本上可将种类繁多的传感器按其工作原理分成若干类，这种分类法比较合理、科学。

按上述，传感器可分成两大类。

i) 参量式传感器 = 所测的非电量在传感器中被转换成电阻、电容或电感等电参量，这类传感器的电量测定必须备有一外加电源。故又叫做被动式传感器。

ii) 发电式传感器 = 所测非电量在传感器中被转换为一电动势，它不用外加电源而可进行测定。故又叫做主动式传感器。

传感器的分类如下表：

传感器的分类

表 1-1

输出特性	工作原理	典型应用
	参量式传感器 (被动式传感器, 需外加电源)	电阻

电阻式:

变阻式

在外力作用下移动 动触点的位置以改变电位器的阻值

直线位移、
角位移

电阻应变计

在外加应力作用下使应变计发生拉伸或压缩变形,从而改变其电阻值的变化。

应变,力,

热丝计

一加热元件的电阻在等流体对流冷却作用下,发生阻值的变化

气流和水
流的速度

热阻效应

在温度作用下,由于电阻温度系数的变化所引起的金属(具有正温度系数)和半导体(具有负温度系数)的电阻值发生变化

温度

光电效应 =

许多半导体物质,如硒、硒化物、碲化物和锗在入射光的照射下,其导电性有显著的增加。

光强、料位
液位、泥
砂浓度

电容式:

$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$, 通过改变极板间的距离 d , 改变极板间的面积 A 或改变电介质的常数 ϵ 从而可改变电容值

位移, 压
力、厚度、
水位,

电势式

$L = W \frac{d\Phi}{dI}$ ，它可以是线圈中铁心位置的改变或衔铁位置的改变、导致磁路中磁阻变化改变电势。也可以是磁路中磁阻变化，导致付线圈所链磁通量的变化，使付线圈的感生电动势而发生变化。

力位移，

霍尔效应

一块半导体，在垂直于磁场和电流方向上导体两侧会发生一个相应的电动势。

压力、位移

射线的吸收和散射效应。

放射性同位素放射的射线(α 射线)经物质吸收或散射，其强度发生变化，利用射线对晶体的闪光，气体电离等效应探知强度的变化。

泥沙浓度、颗粒级配。

多普勒效应：

观察者以某一速度走向或离开声源时，他听到声音的频率是不同的，走向声源时高。离开声源时低，利用此多普勒效应可测流体速度。

激光风速计。

发电式传感器 (主动式传感器, 不需外加电源)

热电偶	两种不同金属或半导体的 结集, 在不同温度作用下产 生电动势	温度
霍尔式	在磁场中运动的线圈切割磁 力线而产生电动势	速度、水的 流速, 振动。
压电式	力作用在石英或压电陶瓷 (如锆钛酸铅等) 上, 从而 产生电荷	力、加速度
光电池	在辐射能的作用下, 光电 池产生电压	

测量电路 = 它是用来联接传感器和电气测量仪表的, 最简单的是两根导线, 用以传输电信号, 在一般情况下, 为了提高测量的灵敏度和精度, 大多采用桥式电路, 积分和微分电路, 放大和

衰减电路，振荡电路，滤波电路和数/模与模/数转换电路等，也可以是这些电路的组合，从而实现了对电信号的加工处理。

显示与记录仪表 = 将被测的非电参量的参量指示或记录下来，最简单的是电表指针的偏转。用于静态或变化缓慢的参量观测，对于变化迅速的动态参量，可用阴极射线示波图或光线示波图观测与记录参量历时变化的波形。随着数字式仪表的发展，则可采用数字显示，这样读数迅速而精确，对动态参量则予以采样显示，数字式仪表的输出可与数字打印机连接，实现数字记录。当前，计算机日益广泛应用，对参量采用磁带贮存或穿孔机记录，则可直接输入计算机处理。

§1-3、量测仪表的静态特性：

被测的物理量有的是静态或变化极缓慢的量，有的是迅速变化的量。因之，量测仪表的特性也有两方面，即静态特性和动态特性，对量测仪表要进行静态校准和动态校准。当被测量是静态时，量测仪表只要作静态校准即可，对于量测仪表的自振频率极大的大于被测量的变化频率时，也可用静态校准来代替动态校准。

量测仪表的静态特性主要有：

1. 准确度 = 表示仪表读数接近于真值的程度，可以用百分数：

$$\frac{\text{真值} - \text{实测值}}{\text{真值}} \times 100\%$$

表示之，它是整个量测系统所用仪表各百分误差的总和。真值则由其它更准确的仪表和计量标准来决定（注意：这个真值也只能是一个近似真值）。这些标准的准确度最后要参照国家的或国际

的一些物理基本量（如长度、质量、时间、温度、电流强度和光强）的标准确定之。

有些量则仪必须在国家计量局^局进行准确度校准。

2. 精确度或重复性：在稳定状态下，重复输入一个恒定的被测量时，仪由输出信号所产生的变化。这要求输入信号和输出信号的数值大致在量测仪表满刻度的60%—80%范围内。

根据高斯误差分布定律

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} \quad (1-1)$$

绘制高斯正态曲线如图1—5所示。

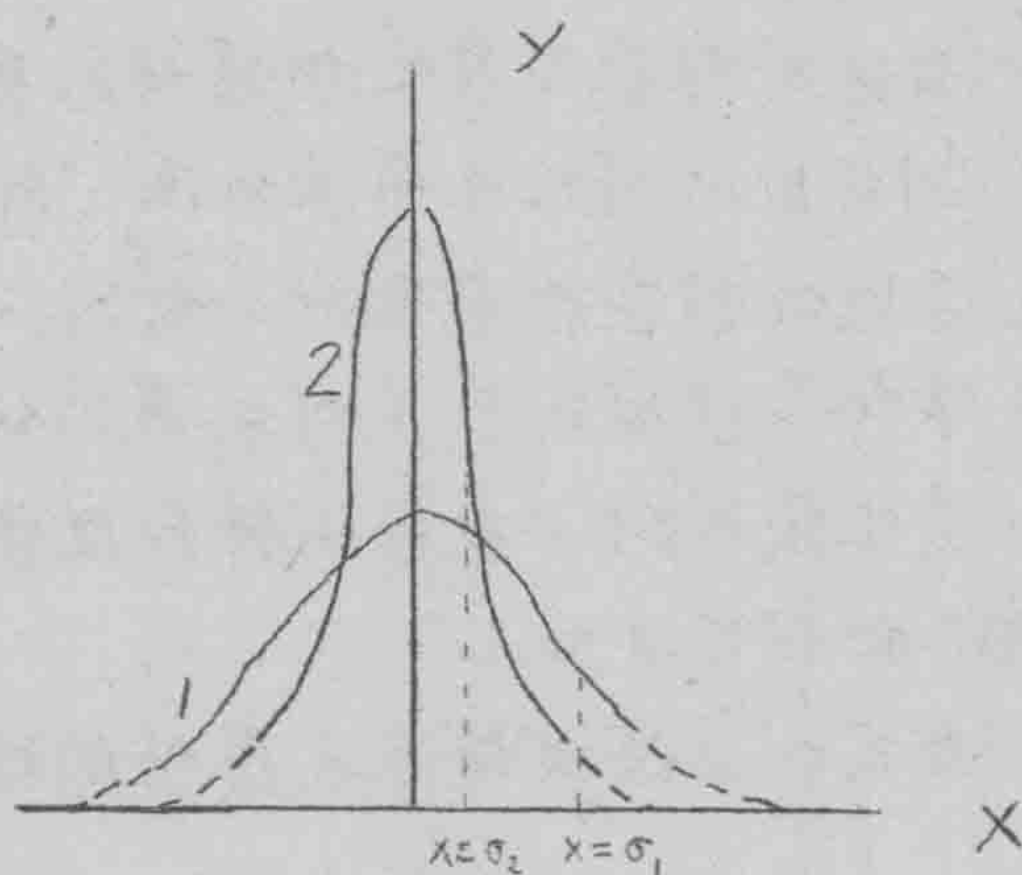


图1—5 高斯正态曲线

其中 σ — 标准误差

h — 精确度指数，

h 与 σ 的关系如为

$$h = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma}$$

显然， σ 越大， h 值越小； σ 越小， h 值越大，当 $x=0$ 时，

$$g = g_0 = \frac{h}{\sqrt{\pi}}$$

(1-2)

g_0 为正态曲线的最大值。当 h 越大，曲线中 $\uparrow$ 升 $\downarrow$ 降越快，两旁下降越快；当 h 越小，曲线变得扁平，故 h 值大小，表示了输出信号值在其平均值附近分布的疏密程度，诚然， h 值大，输出信号值在平均值近旁密集。否则仪表的重复性好、精确度也高。

测量仪表的短期重复性主要受制于传输齿轮间的间隙，元件的非完全弹性，周围环境温度微小变化等。

长期的重复性则主要决定于漂移，这指的是元件材料物理的和化学的性能缓慢变化。

3. 灵敏度 = 灵敏度常指一个测量系统而言，其意义为输出装置的指示值（或记录值）变动 Δx 与引起此项变动的被测量必须变动 ΔF 之比值，可以表示为 =

$$S = \frac{\Delta x}{\Delta F} \quad (1-3)$$

设 T 表示传感器的电参数、 Q 表示推动指示值（或记录值）变动的电参数，则上式可改写为

$$S = \frac{\Delta x}{\Delta F} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta Q} = \frac{\Delta x}{\Delta Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta F}$$

$$= S_{\text{指}} \cdot S_{\text{测}} \cdot S_{\text{传}}$$

式中 $S_{\text{指}} = \frac{\Delta x}{\Delta Q}$ —— 指示值（或记录值）的灵敏度。

$S_{\text{测}} = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$ —— 测量电路的灵敏度

$S_{\text{传}} = \frac{\Delta T}{\Delta F}$ —— 传感器的灵敏度

由上式可知，测量系统的灵敏度是由该系统各组成部分的灵

灵敏度所决定的，因此，在满足测量系统总的灵敏度的要求下，要适当地分配系统中各组成部分的灵敏度，使它们相互间最佳的灵敏度的最佳配合。

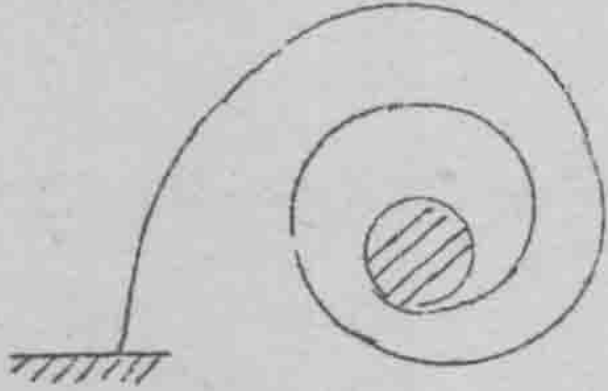
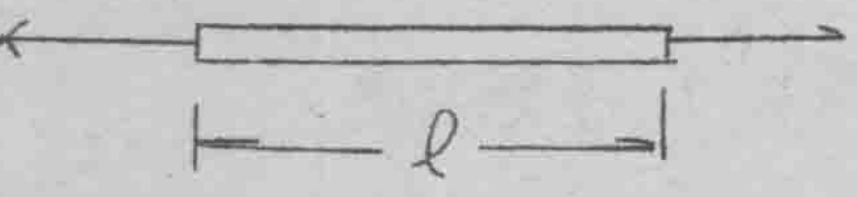
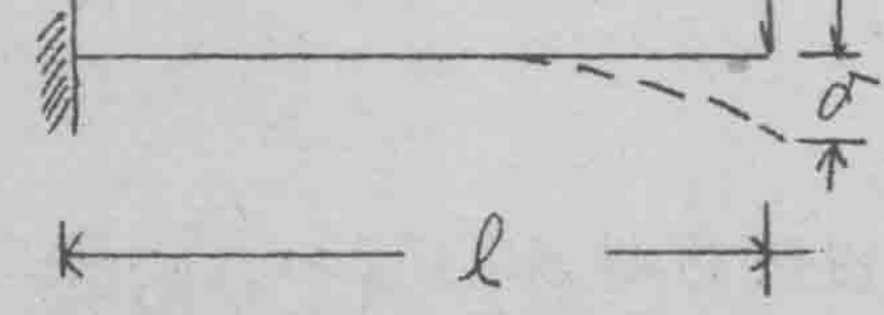
对于指示器，它的变化要求有一定的功率，故 $\Delta\alpha$ 与测量电路的输出功率的平方根成比例。

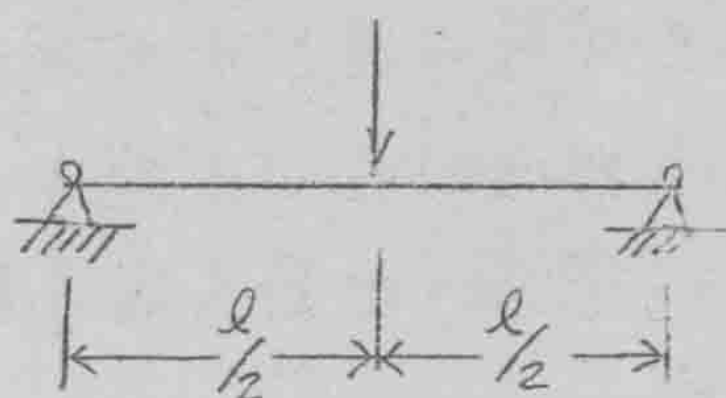
对于测量电路，当其中包含有电压放大器时，将极大地提高灵敏度，但应非常注意放大倍数的稳定性等。

对于传感器，如前所述，它包含敏感元件和转换元件两部分。转换元件的灵敏度将在传感器的变换原理中讨论。而在水工测量仪中敏感元件则大都是一些筒支梁、弹性膜片等，它的灵敏度则和这些元件的刚度——即由于单位位移所引起的作用力有关，下我列举了水工测量仪中常用敏感元件的受力状况刚度

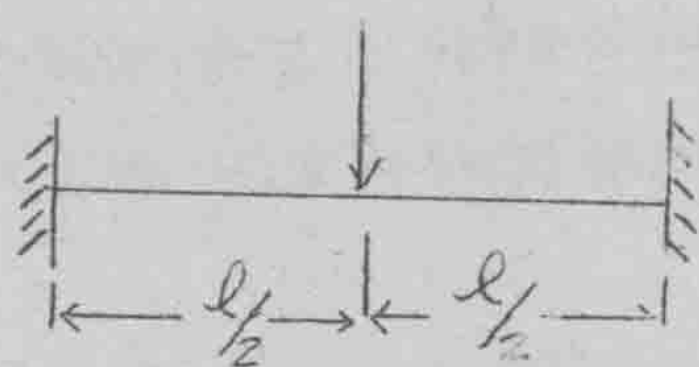
简 支

刚 度

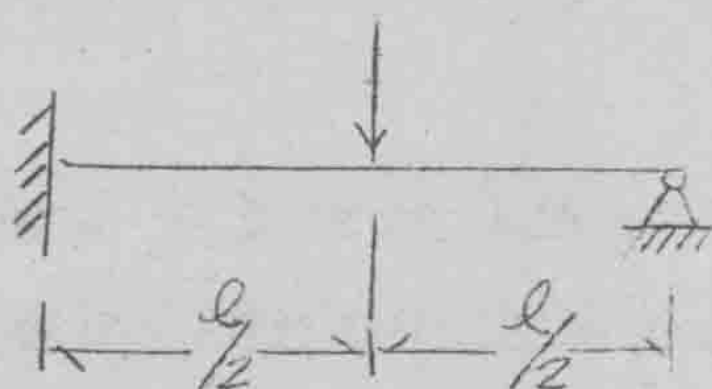
	$K = \frac{EJ}{l}$ E — 材料弹性模量 J — 横断面惯性矩 l — 梁长度
	$K = \frac{EA}{l}$ A — 截面积
	$K = \frac{3EJ}{l^3}$



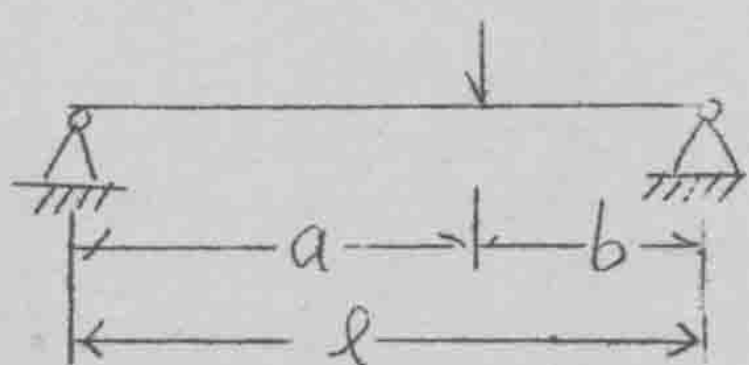
$$K = \frac{48ET}{l^3}$$



$$K = \frac{192ET}{l^3}$$



$$K = \frac{768ET}{7l^3}$$



$$K = \frac{3EJl}{a^2 b^2}$$

4. 分辨率 = 在输出端产生可以观察到的改变量时，所对应的输入被测量的最小变化值，它反映了量测系统的输出端，以输出量的变化表现出所能辨别被测物理量微小变化的能力。显然，它与量测仪口的灵敏度有关，愈灵敏则分辨率越高。

5. 线性度 = 表示测量系统的输出量与被测物理量之间的关系曲线偏离理想直线的程度，而理想直线可以是过所有校准点的最佳直线，也可采用零点和满刻度输入时所对应的校准点之间的连线。一般非线性度用全量程内偏离理想直线的最大偏差值与该理想直线的满值之间的百分比表示之。

6. 零点漂移 = 当输入的被测量为零时，而输出量不为零，且随时间缓慢的变化量，它大多是由于测量仪口受周围温度、湿度等变化所引起的。故测量仪口应采取温度补偿和防潮（对水工测量仪表是重要的）等措施。

7. 蠕变 = 当输入一个被测量后，测量仪口输出某一个值，但该值随时间而发生极其缓慢的变化，除去有上述的零点漂移的因素，另一个原因是敏感元件材料发生的弹塑性或塑料变形，以及其它物理化学变化等。

8. 阈值 = 又叫死区，在仪口输出量无变化的情况下输入的被测量最大改变值，它由库仑摩擦及元件装配的间隙等引起的。

9. 滞后：在校准时，输入的被测量从小到大某一值时的输出量比从大减小到同一值时的输出量小，如图 1—6 所示，这是

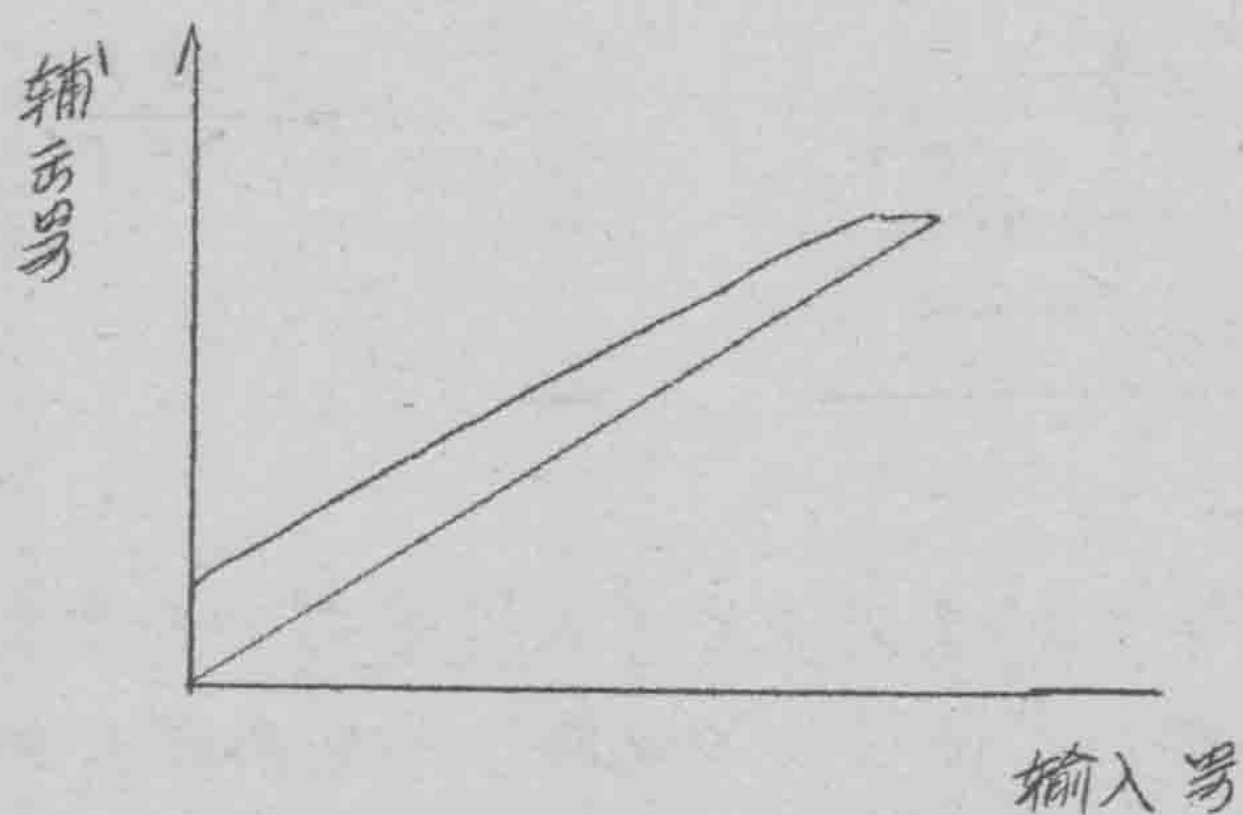


图 1—6 滞后现象