

苏. И. Б. 诺维茨基 主编

电量的电测量

机械工业出版社

本书是在A. M. 屠利庆所著《非电量的电测量》基础上,按照新的“测量-信息系统”观点改编的。全书共分三篇:第一篇为测量技术的理论基础;第二篇为测量技术的物理基础;第三篇为各种物理量的测量方法。特点是理论归纳较全面,系统性强,内容丰富,是一本良好的基础读物。

本书主要读者对象为从事非电量的电测技术、自动控制、科学实验等方面的工程技术人员,也可供大专院校有关专业师生参考。

**Электрические измерения
неэлектрических величин**

П. В. Новицкий

издательство

«Энергия»

1975年

* * *

非电量的电测量

[苏]П. В. 诺维茨基 主编

(第五版)

《非电量的电测量》翻译组 译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $20^{3/4}$ · 字数 547 千字

1983年12月北京第一版·1983年12月北京第一次印刷

印数 0,001—8,700 · 定价 3.05 元

*

统一书号: 15033·5547

译 序

苏联学者 A. M. 屠利庆所著“非电量的电测量”一书是我国读者所熟知的，这里译出的是由 И. B. 诺维茨基主编的第五版，原书在作者名单里仍将 A. M. 屠利庆列在第一位（虽然他已于 1961 年去世），以表示是在他的著作基础上的发展。

非电量的电测量技术内容非常广泛，因此长期以来难以归纳出共同的理论基础，本书的重大贡献正是在这一方面有所创建；其次，本书几乎全部采用苏联本国文献资料，相当充分地反映了苏联在这一领域中的成就和水平，特别是以信息论观点处理误差问题，这在国内目前还是较少被人了解的；此外，本书还是一本教学参考书，在叙述方式上适宜于大学教学之用，也易于自学阅读。因此，本书值得推荐，相信对于广大读者来说将是很有裨益的。

本书是 1975 年出版的，因而书中某些内容已显得陈旧（尤其是若干电子线路），此外印刷错误也较多，虽在翻译过程中作了更正，估计还是难免有疏漏之处。

本书由哈尔滨工业大学电测技术教研室“非电量的电测量”翻译组译，其中尤德斐译第一章至第五章，段尚枢译第六章及第七章，郭振芹译第八章至第十二章，张荣祥译第十三章至第十五章，张玉忠译第十六章至第二十一章，白俊山译第二十二章至第二十四章。由尤德斐校对及统一全稿，并补充编写了附录“熵和信息的基本概念，误差之信息论研究方法的出发点”。

鉴于某些俄文的名词、术语不为读者所常见，因此将若干名词、术语列成中、俄文对照表，供读者参考。

由于译、校者的水平有限，译文中的错误与缺点可能很多，敬希广大读者批评指正，以便更正。

译者

1981年10月

前 言

《非电量的电测量》原为 A. M. 屠利庆所著, 并在 1951 年、1954 年及 1959 年出版三次, 每版的变化不多。由于本书涉及面甚广, 因而不仅成了高等院校各仪器制造专业学生的基本教学用书, 而且也是从事各种物理测量的工程师及科研人员的重要读物。各个版本在国内畅销, 也被许多国家译成外文。但自作者 1961 年去世后本书就停止了再版。

1966 年的第四版基本上是由前两版的审稿人 И. B. 诺维茨基为主编的作者集体重写的。可是从 1966 年以来, 苏联及其它一些国家培养仪器制造工程师的教学计划发生了根本的变革。以前仅在非电量测量仪器中应用的那种测量装置的组成方法 (即认为仪表是由一系列测量变换器串接而成的), 由于它的先进性而很快被推广应用于其它仪器制造领域。在这种形势下, 人们想到了在培养仪表制造方面的学生时, 也应将所要学习的全部测量装置按照过去仅在非电测量仪器课程中那样安排的次序编入教学计划。此外, 理论问题过去分散在各门课程中叙述, 现在则集中在“测量技术的理论基础”中, 其中叙述了过去曾由“测量变换器”及“物理测量方法”等课程所讲的内容。

同时, 本书在那些希望着重对非电量电测量的一般理论基础有所了解的工程技术人员及科学工作者中间也找到了大量的读者。

在一本书中写进去全部最重要的理论问题, 或者全部先进的仪表及测量方法是不可能的, 也是不可取的。所以本书致力于将那些用于研制基本测量变换器、传感器及仪器的理论问题及物理现象进行系统化。从这点出发, 本书第一篇为“测量技术的理论基础”, 讲述仪表及传感器的误差、测量电路及仪表动力学的基本理论。第二篇为“仪器制造的理论基础”, 讲述按物理作用原理分类的各种测量变换器的基本类型。最后, 在第三篇中给出了测量常见被测量的各种仪器的构成方法。

目 录

译序 前言

第一篇 测量技术的理论基础

第一章	测量技术的基本概念	1
§ 1-1	非电量的电测量	1
§ 1-2	基本概念及定义	2
§ 1-3	传递信息的一般原理——被传递信息的调制	6
§ 1-4	测量变换器的共同特征及分类	9
§ 1-5	测量变换方法	13
第二章	误差理论的共同问题	15
§ 2-1	误差的分类	15
§ 2-2	测量设备的量程及精度的数字描述方法	22
§ 2-3	提高测量设备精度的一般方法	32
§ 2-4	线性度误差及测量设备工作范围的扩展方法	37
第三章	误差的概率理论与信息理论	44
§ 3-1	对测量设备误差估计的决断接近及概率接近	44
§ 3-2	关于概率论的若干基本知识	46
§ 3-3	有关信息论的若干必需知识	57
§ 3-4	按实验数据计算误差分布律数字特征的实用方法(有关统计学的必需知识)	66
§ 3-5	测量设备总误差的分布律的分类	72
§ 3-6	测量设备各个误差分量的分布律	79
§ 3-7	误差合成的理论基础	83
§ 3-8	合成误差时确定分布律总的熵系数及总的误差熵值的方法	86
第四章	测量电路的信息-能量理论基础	93
§ 4-1	反熵原理, 它揭示了在空间与时间内传输信息的机制	93

§ 4-2	在各种调制形式下能量与由它传送的信息之间的关系	97
§ 4-3	测量设备的信息-能量效率系数及价值学	101
§ 4-4	信息-能量分析及测量变换器输入、输出电阻的匹配原则	104
§ 4-5	作为无源四端网络的测量变换器的质量特性及其变换效率同阻抗匹配的关系	111
第五章	直接变换式测量回路的理论	118
§ 5-1	直接变换式测量回路的分类	118
§ 5-2	用于发电式变换器工作的测量电路理论	119
§ 5-3	参数式变换器的串接测量电路的理论	123
§ 5-4	具有分压器形式的参数式变换器测量电路的理论	125
§ 5-5	不平衡电桥型参数式变换器测量电路的理论	128
§ 5-6	交流不平衡电桥的特点	139
第六章	平衡测量电路的理论基础	144
§ 6-1	随动有差平衡测量电路的理论基础	144
§ 6-2	随动无差平衡测量电路的理论基础	150
§ 6-3	程序平衡测量电路的理论基础	156
§ 6-4	平衡测量电路最佳平衡深度的选择	162
第七章	测量设备的动态特性	165
§ 7-1	测量设备动态特性的描述方法	165
§ 7-2	电气的和机械的非周期环节的动态特性	174
§ 7-3	热惯性环节的动态特性	181
§ 7-4	振荡环节的微分方程、固有频率概念和衰减指数	189
§ 7-5	振荡环节的频率特性	193
§ 7-6	振荡环节的相位特性	201
§ 7-7	振荡环节的过渡特性	203
§ 7-8	机电变换器的等效电路图	207
§ 7-9	气动与液压环节的动态特性	211
§ 7-10	具有集中和分布参数的机械和声学环节频率特性的计算	216
§ 7-11	调制和解调的测量通道部分的动态特性	220
§ 7-12	直接变换式仪表的频率特性和频率误差的校正方法	232
§ 7-13	随动平衡仪表的频率特性	238
§ 7-14	程序平衡仪表和数字仪表的动态特性	242

第二篇 测量技术的物理基础

(测量变换器单元的构成原理和型式)

第八章	电量变电量的变换器	252
§ 8-1	输入分压器和变压器	252
§ 8-2	交流测量放大器	255
§ 8-3	高输入阻抗测量放大器	263
§ 8-4	直流测量放大器	266
§ 8-5	运算放大器的某些应用	271
§ 8-6	振幅调制器	276
§ 8-7	解调器	282
第九章	机械弹性测量变换器	294
§ 9-1	机械弹性测量变换器的种类	294
§ 9-2	用于计算机弹性变换器的基本关系	296
§ 9-3	用于制造弹性测量变换器的材料	299
第十章	机械量的电阻式变换器	302
§ 10-1	触点式变换器	302
§ 10-2	变阻器式变换器	302
§ 10-3	应变电阻器 (电阻应变片)	304
第十一章	压电式变换器	316
§ 11-1	压电变换器的物理基础和应用范围	316
§ 11-2	在正、反压电效应情况下, 表面电荷、变形和机械应力的计算方法	320
§ 11-3	力、压力和加速度的压电变换器	324
§ 11-4	关于提高压电变换器效率的方法的分析	329
第十二章	静电式变换器	334
§ 12-1	静电式变换器的作用原理和应用范围	334
§ 12-2	电容式变换器	339
第十三章	电磁式变换器	348
§ 13-1	电磁式变换器的类别和作用原理	348
§ 13-2	计算电磁式变换器的理论基础	350
§ 13-3	电感式变换器	355

§ 13-4	变压器式 (互感式) 变换器	361
§ 13-5	感应式变换器	364
§ 13-6	磁弹性变换器	366
第十四章	热变换器	374
§ 14-1	计算热变换器的理论基础	374
§ 14-2	热电变换器及其作用原理和所用材料	382
§ 14-3	加长热电极、测量电路、热偶的误差	385
§ 14-4	热逆变换器	388
§ 14-5	热电阻的类型、所用材料以及计算基础	389
§ 14-6	工业用热电偶和热电阻	398
§ 14-7	测量流速的热变换器	403
§ 14-8	测量气体密度及作成分分析的热变换器	406
§ 14-9	用热电阻测量机械位移	410
第十五章	电化学变换器	412
§ 15-1	电化学变换器的共同理论基础	412
§ 15-2	电解式电阻变换器	422
§ 15-3	电池型测量变换器	428
§ 15-4	极谱变换器	439
第十六章	热和光辐射变换器 (光学变换器)	444
§ 16-1	作用原理及理论基础	444
§ 16-2	热和光的辐射源	448
§ 16-3	光辐射接收器	451
§ 16-4	光学变换器的测量回路	462
第十七章	电离辐射变换器	465
§ 17-1	电离辐射变换器的作用原理及辐射源	465
§ 17-2	电离辐射接收器	472
§ 17-3	电离辐射仪器的误差	478
§ 17-4	电离变换器的测量电路	480
第十八章	电动机械式逆变换器及其在平衡式仪表中 的应用	482
§ 18-1	测力平衡式仪表的作用原理、不平衡变换器及其结构	482
§ 18-2	磁电式及磁电液式逆变换器	485

§ 18-3	电磁式和静电式逆变换器	493
§ 18-4	测量位移的平衡式仪表	498
§ 18-5	电气机械平衡式仪表的动特性分析	501
第十九章	热和光学逆变换器及其在平衡式仪表中的应用	508
§ 19-1	具有热逆变换器的平衡式仪表	508
§ 19-2	具有光逆变换器的平衡式仪表	511

第三篇 各种物理量的测量方法

第二十章	长度和角度的测量	514
§ 20-1	概论	514
§ 20-2	角度尺寸的测量	515
§ 20-3	机器制造业中尺寸的测量	517
§ 20-4	液位的测量	520
§ 20-5	距离的测量	523
第二十一章	机械力、扭矩、压力和应力的测量方法	526
§ 21-1	概论	526
§ 21-2	应变及机械应力的测量方法	527
§ 21-3	集中力、压力及扭矩的测量方法	530
§ 21-4	具有前置变换为位移的力、压力和扭矩的测量	536
§ 21-5	用平衡法测量力、压力和转矩	542
第二十二章	运动参数的测量方法	546
§ 22-1	概论	546
§ 22-2	运动参数的接触测量法	548
§ 22-3	液体和气体物质运动参数的测量	552
§ 22-4	惯性仪表频率误差的校正方法	558
§ 22-5	测量运动参数用的惯性式仪表	565
第二十三章	温度的测量	577
§ 23-1	概述	577
§ 23-2	超低温的测量	579
§ 23-3	低温的测量	580
§ 23-4	用热电偶测量中温和高温的方法	585
§ 23-5	无接触光学测温法	586

§ 23-6 超高温度的测量方法	592
第二十四章 物质浓度的测量方法	594
§ 24-1 概述	594
§ 24-2 电化学方法	595
§ 24-3 电物理方法	603
§ 24-4 电离法	609
§ 24-5 光谱测定法	611
§ 24-6 综合法	617
附录 熵和信息的基本概念, 误差之信息论研究方法的出 发点	622
中俄译名对照表	638
参考文献	640

第一篇 测量技术的理论基础

第一章 测量技术的基本概念

§ 1-1 非电量的电测量

测量是取得表征各种物理现象或其过程的量的数值信息之唯一方法，因而在现代工业中，凡是新的机器、机械与设备的研制，以及复杂生产工艺流程的具体实现，都必须测量许许多多的物理量。

在这种情况下，为科学研究及生产感到兴趣而需测量的所谓“非电量”，其中包括了机械的、热的、化学的、光的、声的各种量的数目，超过了电量与磁量的总数很多倍。因此，目前非电量的测量已获得了高度的发展，成为近代测量技术的一个大的分支，而各种物理量测量仪器的生产已构成了仪器制造工业的基本部分。

在自动控制装置及电子计算机问世以前，对于测量仪表输出的测量信息来说，需要者只是人而已（实验工作者，调度员，飞行员等等）。但现在从仪表输出的测量信息则常常被直接送往自动控制装置。因此，在测量任何物理量的方法中，电的测量方法居于极其重要的地位，因为它们具有以下特点：

（一）可在极宽的被测量值范围内十分简单地调整灵敏度，即具有很宽的幅域。利用电子技术能把电信号成千倍地放大，也就是能将仪器的灵敏度提高同样的倍数，因而可用电的方法去测量那些用其它方法一般说来不易测量的量。

（二）电测仪器具有极小的惯性，即很宽的频域，因而既能测量慢变化的，也能测量随时间作快速变化的量，还可利用光线示

波器及电子示波器记录下来。

(三) 能够对不能达到的地点作远距离测量; 能够集中地同时测量许多不同物理属性的量, 即能够组成复杂的测量-信息系统; 能够将测量结果进行远距离传送、数学处理以及利用它们实行控制 (组成控制系统)。

(四) 最后, 但并不是最不重要的一点, 是能够用单元电气部件来装配成套, 组成测量装置及服务于它们的自动系统。这一点对于为科研及工业应用提供测量-信息系统来说具有重大的意义。

§ 1-2 基本概念及定义

按照苏联国家标准 ГОСТ 16263-70 (《计量学、术语及定义》), 测量应理解为使用技术装备通过实验方法求得物理量的值, 该值选自被采用的物理量值标尺, 即选自同一物理量的不同大小的序列。

这样, 在最一般的情况下, 测量就是将: 被测量与用某种方法建立起来的该物理量所可能具有的尺寸的标尺进行比较, 从这个标尺的为数极多的全部区间内选出一个作为测量的结果, 并用数码表示之。因此, 测量总是一方面伴随着数码化, 另一方面伴随着量子化的实施过程, 因为所能知道的总不是被测量的无限精确值, 而仅是其可能值的一个或宽或窄的区间而已。

一、关于测量变换的概念 M. Л. 楚坎尔曼教授最先在测量技术理论中引进了测量变换的概念并用之于遥测系统的理论中。到 1948 年, 这一概念又被 Ф. Е. 杰姆尼柯夫及 P. P. 哈尔钦柯推广应用于非电量的电测量领域 (这与 K. 欣农发表其关于信息论的第一篇论文差不多在同一时期)。在以后的岁月中, 这一概念更被无例外地应用于测量技术的一切领域, 成为测量技术理论的根本出发点之一。

所谓测量变换就是将一个物理量的大小去反映另一个与之有函数关系的物理量的大小。

事实上，任何测量装置的唯一构成方法就是应用测量变换技术，因为任何测量设备总是利用了输出量与输入量之间的某种函数关系（简单的或相当复杂的关系）。

这一事实在比较复杂的测量装置中是十分明显的（在非电量的电测仪器中、在遥测系统中，等等〔250〕）。但是，若将函数的变换及尺寸的变换理解为只不过是乘以某个常系数（包括等于1的系数），则这种变换即使在最简单的测量装置中也是存在的。例如，在千分表中，被测长度根据千分表的表头转角进行读数，在游标卡尺中，以相应的标尺代替卡钳间的距离进行读数。

二、测量变换器及测量装置的结构 测量变换器是根据一定的物理动作原理制成的技术装置，用它可以实现部分的测量变换。

在同一个物理动作原理基础上不仅能实行测量的变换，往往也能实现动力的变换，用以变换能量流。这类变换器有别于测量变换器而被称为力能变换器（如电力变压器、电力整流器，等等）。对于力能变换器的首位要求是动力效率值要高，即在传输能量时损耗应小。而对测量变换器的要求则是信息的传递要准确，即最小的信息损失。换言之，要有最小的误差。

“测量变换器”的概念要比“测量变换”的概念窄得多，但也具体得多。因为同一个测量变换是可以由一系列在动作原理上完全不同的变换器来实现的。

例如，将温度转变为机械位移 Δl 的测量变换可由图 1-1 所

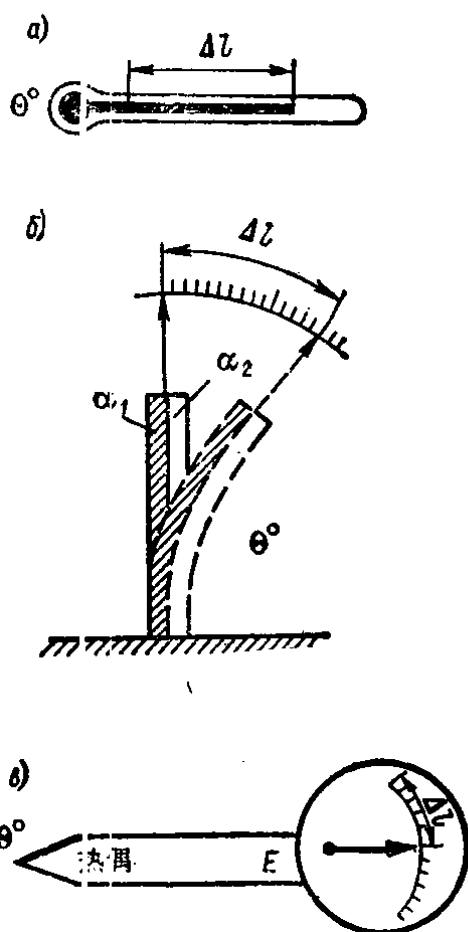


图 1-1

示的各种不同的具体测量变换器来完成。可用水银温度计（图 1-1 a），也可用双金属元件（图 1-1 b），后者是由两种温度线胀系数 α_1 与 α_2 不同的材料焊压而成的薄片，温度变化时会产生弯曲。最后，还可用电偶 $T\Pi$ 及毫伏表来完成 $\theta \rightarrow \Delta l$ 的变换。热电偶将温度 θ 变为电动势 E ，毫伏表再把 E 变成 Δl （图 1-1 c）。因此，测量变换的含义仅是说明应将什么变换成什么，即仅是提出了变换的任务，而具体的测量变换器的含义却正是去说明在物理上将如何实现这一变换。

测量方法是各个测量变换的集合。这种测量变换是为接收关于被测量大小的信息及将之转变为接受者，即人或机器能够接受的形式所必需的。若用测量装置的结构框图来表达测量方法，也就是说，用起着所需测量变换作用的测量变换器的组合框图来表达它，则将十分简单明瞭。

图 1-2 所示为测量仪器组合结构图的一个例子。它是测量汽

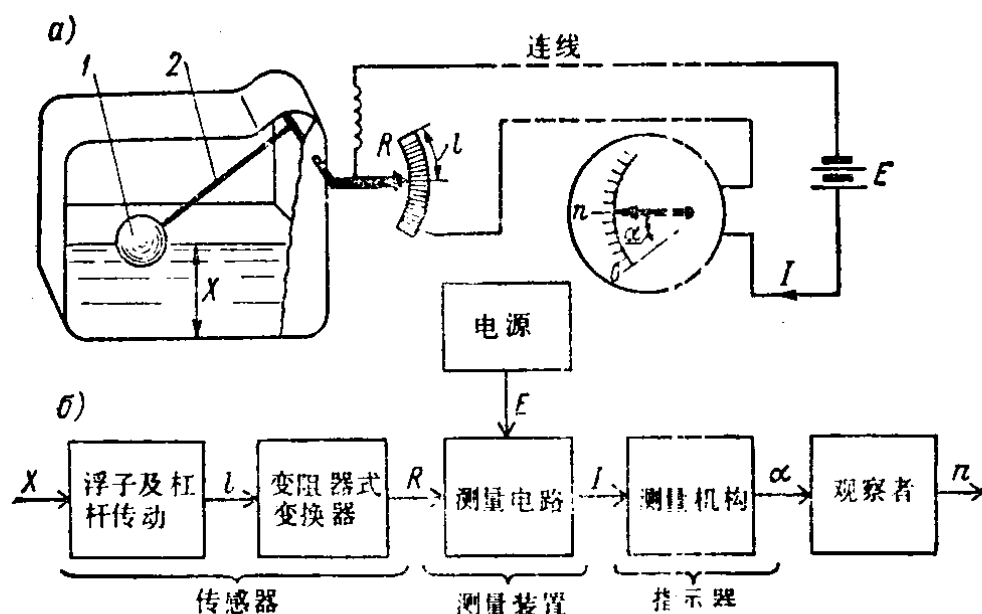


图 1-2

车油箱内汽油液位的电气仪表。被测液位的高度 X 先由浮子 1 接收到，然后靠杠杆 2 的帮助去推动电阻器 R 的滑动触头，因此装置的这一部分保证了位移 l 与被测量 X 之间函数关系的单值性。均匀绕制的可变电阻器（电阻式测量变换器）也提供了单值关系

$R = \varphi(I)$ 。至于测量电路（当电源电压 E 及电路内除可变电阻外的其它电阻均为常数时）同样也实现了电流 I 与电阻 R 之间的单值关系。因此，供我们读出指示值 n 的电测仪表（指示仪表）的刻度尺就可直接用被测液位值进行分度。这样，液位计内的全部测量变换可以用一个变换链来表示：

$$X \rightarrow I \rightarrow R \rightarrow I \rightarrow \alpha \rightarrow n$$

或者可以用图 1-26 所示的结构框图来表示。这里 $\alpha \rightarrow n$ 的变换是指在使用目视指示仪表时由观测人员进行读数以及在自动记录仪表中无人参预地自动记录指示值。

无论是测量电量的还是非电量的仪器在结构上常可分解成三个独立的环节：传感器、测量装置及指示仪表（或记录仪表）。它们可以互相分离地安装，并仅仅通过电缆或其它连线连接起来。

测量各种量的仪用传感器是一系列直接装在被测对象上的测量变换器的结构性组合。

通常，在被测对象处的工作条件及提出的要求比之在读数或记录处的要苛刻得多（更高的温度、振动以及场地不足等等）。因此，在那些必须进行测量的具体的测量点上，应尽可能少地直接置放测量变换器，后者的任务是接收关于被测量大小的信息并将之变换成适于传送的形式，即使传送距离不到几米也好。

至于被称为测量装置的测量设备的其它部分（测量电路、放大器、电源等等）可做成单个的部件形式，利用远距离传输的可能性而放置在良好得多的环境中，并且不必去和测量对象挤在一起。

对于测量仪器最后的一个部件，即信息显示装置或测量结果指示仪表，同样也存在着放置它们的特殊要求。显然，例如汽油液位指示器必须装在驾驶员的仪表面板上，而飞机上测量速度、高度、航向、燃料储存量等的指示器必须集中在驾驶仪表盘上。然而这些仪表的测量装置却允许安放在各种空格位置内，至于传感器则分装在需要进行测量的各点上。

由于在结构上分别制造了传感器、测量装置及指示器，从而

保证了极大的灵活性、互换性、能够快速检修以及电气设备的通用性。

再看一下图 1-26 所示的仪表结构框图，可以看到直接装在测量对象上的传感器是由框图内最前面的两个变换器组合而成的。一个叫预置变换器，它是感受被测量液位的具有杠杆的浮子；另一个叫基本变换器，它是可变电阻式测量变换器。至于在测量装置中则包含了结构框图中余下的各环节，并且仅仅通过连线与传感器及指示仪表相连接。

当然，其它测量仪器的结构框图可能会比图 1-26 所示的最简型式复杂得多，但是，一个基本的原理却仍保持其正确性，即任何测量仪器总是一个能够接收及变换被测量大小的信息的通道，后者又由一连串简单的或复杂的测量变换器所组成。

§ 1-3 传递信息的一般原理——被传递信息的调制

在上述仪表的例子中（图 1-2），框图内各环节间关于被测量 X 的信息传递是通过若干具体的信息载荷者实现的，它们是 l 、 R 、 I 、 α 诸量，形成了变换链 $X \rightarrow l \rightarrow R \rightarrow I \rightarrow \alpha$ 。所有这些量均可用一个术语，即“载有 X 值信息的信号”来统称之。

为了阐明通过这些信号传递信息的原理，可设想 $x(t)$ 按照图 1-3a 曲线的规律随时间而变化。于是线路内电流 $i(t)$ 的值也将按照图 1-3b 变化，即电流 $i(t)$ 随时间的变化将重复 $x(t)$ 的时间变化曲线。

但仪表的电路（图 1-2）也可用交流供电，则线路电流 i 的瞬时值将按图 1-3c 的曲线变化，那么，交流电流将如何来反映被传递的 X 值呢？它随时间的变化是按 $i = I_m \sin \omega t$ 的规律进行的，但 I_m 并不保持为常数，而将按 $I_m = f(X)$ 变化，因而在这种情况下 X 的全部变化将被信号 i 的幅值 I_m 所反映。

当变换器的输出过程中有一个参数是其输入过程的某一参数的函数时，这种变换称为调制。

输出过程（在我们的例子中是直流或交流电流）若以其自身

的参数之一去承载有关输入过程某一参数的信息时称之为“承载过程”，或承载信号（在我们这里是液位高度 X ）；输入过程的变化参数称为“调制参数”，而承载过程中能复现调制参数变化的参数则称为“被调制参数”。

例如，若上述仪器以 50 赫频率的交流电供电，则可以这样说：50 赫频率的承载电流被燃料箱的液面高度按幅值进行调制。

任何正弦振动过程（电的、机械的、声的，等等）均可用 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 予以描述，也就是说，用 I_m 、 φ 及 ω 三个参数来表征。三者中的任一个都可被调制并被用于信息的传递，这就提供了利用各种不同调制方式传递信息的可能性。其中最常用的有：调幅（即传递幅值）；调相及调时（即传递相位或时间段）；调频及数字脉冲调制（即传递频率的变化或脉冲数字）。

例如，在应用调频方法时，被传递的信号 $i = I_m \sin \omega t$ 将具有恒定的振幅（ $I_m = \text{常数}$ ），而它的频率则为 $\omega = f(x)$ 。这种频率被调制的信号（当 X 值大时相应地信号的频率 ω 也高， x 小时 ω 也小）示于图 1-3 中。

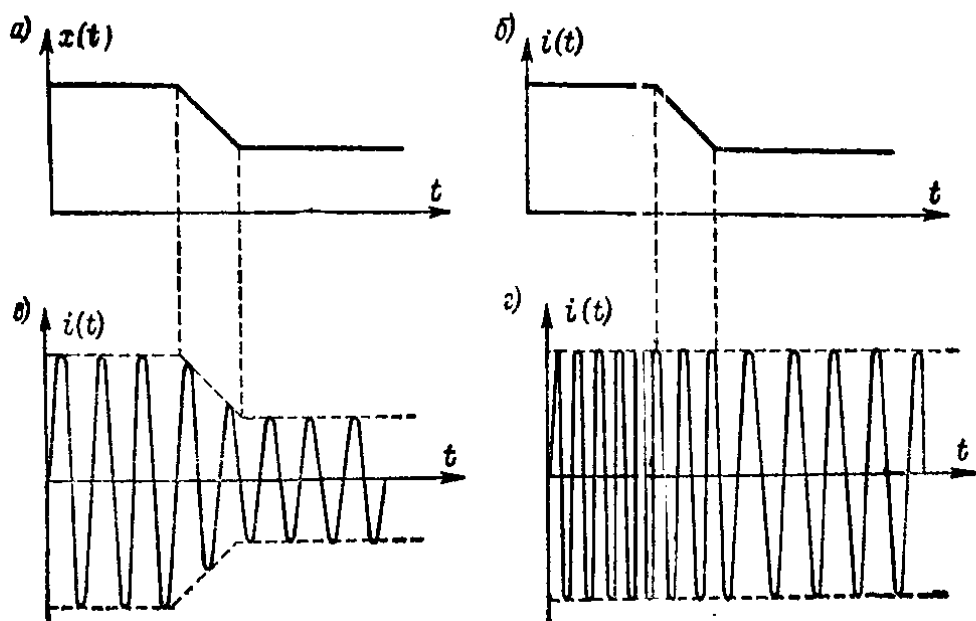


图 1-3