

模型试验量测技术

华东水利学院

水利电力出版社



模 型 试 验 量 测 技 术

华 东 水 利 学 院

水 利 电 力 出 版 社

模型试验量测技术

华东水利学院

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20印张 452千字

1984年11月第一版 1984年11月北京第一次印刷

印数0001—5630册 定价4.00元

书号 15143·5456

内 容 提 要

全书分为两篇共十六章，阐述了模型试验中测量流速、压力、水位和浪高、流量、掺气、空穴、泥沙、水下地形、应力和应变、振动等十个参数的传感器、测量电路、记录和分析仪器。此外，对测量系统的自动化、测量数据的处理和误差分析，以及电子计算机在模型试验中的应用也作了简要的介绍。

本书可作大专院校水利、土建及其他有关工程专业的教学参考书，也可供有关科研单位和工程部门技术人员阅读参考。

31271/24

22

前 言

现代工程技术问题的研究常需借助模型试验。试验成果的质量在很大程度上取决于量测技术的水平。模型试验中的量测技术，既是一门实用的技术，也是一门新兴的边缘学科。

目前，我国还缺少模型试验量测技术方面的专门著作，这门学科本身也还未形成比较成熟的体系。这类专著的编写方法可有两类：一类是以传感器的工作原理来分章；另一类是以被测物理量来分章，讲述其测量方法和仪器，两者各有特点。为了结合实际问题，便于查阅参考，本书选择了以被测物理量来分章。

本书第一篇介绍水利水电模型试验中最主要的十个物理参量的测试技术，包括所用传感器和测量电路，重点放在目前广泛采用而今后又有发展前途的某些方法上。第二篇叙述模型试验电子量测系统、模拟量和数字量的转换、信息传输和数据采集，并从静态和动态的角度出发，介绍记录、分析仪器和系统的类型、原理。最后简要介绍误差分析和数据处理的基本方法和电子计算机在模型试验中的应用。

本书力求系统和完整地介绍国内水利水电工程模型试验中的先进量测技术。在阐述基础理论时，避免繁琐的数学推导，着重说清有关公式的物理意义；在介绍测量方法和仪器时，着重说明基本原理、特性及在量测中的应用，而省略对仪器具体装置的详细描述。

本书编著大纲及初稿曾送至武汉水利电力学院、长江流域规划办公室长江水利水电科学研究院、黄河水利委员会水利水电科学研究所、铁道部科学研究院、水利电力部水利水电科学研究院、清华大学、广东省水利科学研究所、成都科技大学等三十余个单位征求意见。根据所收到的宝贵意见，对书稿进行了修改。在编写过程中得到了郦凤山和陈绍炯同志的关心。

本书的编写是在左东启教授的主持下，由李正（第一、十二、十三章）、刘祖唐（第二章）、过达（第三章）、张文德（第四章）、郭来骏（第五章）、董履平（第六章）、夏维洪（第七章）、卢永生（第八章）、徐和兴（第九章）、徐道远（第十章）、林友樵（第十一章）、沈懋如（第十四、十五章）、伍贻祥（第十六章）等同志编写。全书由沈懋如统稿。本书曾经武汉水利电力学院和水利电力部水利水电科学研究院审阅。

因水平和时间有限，书中难免有错误之处，恳请同志们批评指正。

华东水利学院《模型试验量测技术》编写组

1983年3月

目 录

前 言

第一篇 模型试验参数测量

第一章 引论	1
第一节 概述	1
第二节 测量仪器的构成	2
第三节 测量仪器的基本性能	4
第四节 传感器	8
第二章 流速与流向的测量	15
第一节 毕托管	15
第二节 微型旋桨流速仪	17
第三节 热线流速仪	21
第四节 激光流速仪	26
第五节 其他流速测量方法	33
第六节 流向测量	35
第三章 动水压力的测量	39
第一节 概述	39
第二节 电阻应变式压力传感器的特性	40
第三节 硅膜压力传感器的特性	50
第四节 流体总压力的测量	53
第五节 动水压力的测量实例	55
第四章 水位和浪高的测量	59
第一节 概述	59
第二节 电阻式水位和浪高仪	60
第三节 自动跟踪式水位仪	61
第四节 电容式水位和浪高仪	65
第五节 传感器的率定	74
第五章 流量的测量	76
第一节 概述	76
第二节 流量测量的基本原理	76
第三节 电磁流量计	79
第四节 超声式流量计	86
第五节 堰板的使用规则	92
第六章 掺气水流的测量	98

第一节	概述	98
第二节	掺气浓度测量仪器的分类	99
第三节	取样浓度仪	100
第四节	电阻式浓度仪	103
第五节	同位素掺气浓度仪	106
第七章	空化水流的测量	110
第一节	概述	110
第二节	测量水中空气含量的仪器和方法	110
第三节	测量水中气核尺寸及其分布	113
第四节	空穴检测	120
第八章	泥沙的测量	126
第一节	概述	126
第二节	含沙量的光电测量法	128
第三节	泥沙颗粒分析	132
第四节	粗沙粒径级配的测量	139
第九章	水下地形测量	145
第一节	概述	145
第二节	光电式地形仪	146
第三节	电阻式地形仪及测淤自控装置	148
第四节	超声波地形仪	152
第五节	跟踪式地形仪简介	156
第十章	应力和应变的测量	158
第一节	概述	158
第二节	电阻应变片	160
第三节	电阻应变仪桥路分析	163
第四节	电阻应变仪	169
第五节	平面电阻应变测量	173
第六节	电阻片应变测量中的几个特殊问题	175
第七节	钢弦应变仪	180
第十一章	振动的测量	184
第一节	概述	184
第二节	振动测量传感器	186
第三节	周期振动和冲击振动的测量	194
第四节	随机振动的测量	199
第五节	模型对激励的响应	205

第二篇 电子测量系统在模型试验中的应用

第十二章	电子测量系统简介	208
第一节	测量系统的组成	208

第二节	测量系统的设计概要	211
第三节	系统的连接和抗干扰技术	213
第十三章	数据采集	221
第一节	模拟和数字的转换	221
第二节	数据采集装置	234
第三节	遥测技术	238
第十四章	试验数据的显示、记录和分析仪器	245
第一节	静态试验数据显示和记录仪器	245
第二节	动态试验数据显示和记录仪器	249
第三节	随机试验数据分析仪器和系统	258
第十五章	误差分析和数据处理简介	265
第一节	误差概念	265
第二节	测量系统误差分析	268
第三节	试验数据处理	273
第十六章	电子计算机在模型试验中的应用	284
第一节	电子计算机在模型试验中的作用	284
第二节	数据处理系统	286
第三节	综合测试系统	297
第四节	微处理器及其应用	300
参考文献		310

第一篇 模型试验参数测量

第一章 引 论

第一节 概 述

科学技术的发展与测量技术的发展有很密切的联系，测量技术的发展是人类对自然界的客观事物取得数量概念的一种认识过程。测量是借助专门的设备和方法对不同现象和不同的规律在质和量两方面作出认识的过程。测量技术达到的水平愈高，使获得的科学技术成就愈为深广；另一方面现代科学技术的发展又为测量技术的发展创立了新的途径和新的可能性。

模型试验是一门新的技术科学，它通过试验来研究和改善被模拟物体的布置、型式和构造等。试验是科学研究的基础，是检验理论的主要途径，通过试验对所发生的各种运动现象进行研究。将各种试验得到的资料积累总结，人们就能更进一步掌握客观的规律。由于非电量电测法，具有灵敏度高、准确度高、测量量程范围广、频率范围宽，可进行模拟和数字多路测量，可实现远距离传输和遥测，可对测量数据进行自动处理等优点，因此，此法在国内外的模型试验中得到了广泛的采用。

在模型试验中往往要对很多参量进行严格的测量和控制，遇到的大都是连续变化的物理量（如水位、流速、压力、位移、振动以及泥沙的运动等等）。传感器可以测量这些参量的幅度和极性，其输出通常为模拟电压（电流）。对模拟电压一般采用模拟控制或模拟计算电路（元件）。多年来，在电气测量技术领域，指针式仪表，电位差计以及电桥等测量设备一直占统治地位。但二十多年来，尤其是近十年来，随着科学技术迅速的发展及电子数字计算机的广泛使用，在生产和科学试验领域中不断地对测量技术提出了更高的要求，如高精度、高灵敏度、高速度以及多参数的自动测量与控制等等。数字式仪表可以把测量结果直接用数字显示，读数方便而且精确，所以数字化的测量发展很快，数字式仪器已广泛应用。在数字测量仪器中，最基本的应为数字频率计（电子计数器），数字电压表等。其它各种测量如电阻、电容、压力、温度、电流等均可以利用传感器转换成相应的直流电压后进行测量。所以，直流电压的测量在数字测量技术中占了相当重要的地位。数字式测量仪器的精度比指针式仪器已有较大的提高，但精度的进一步提高却不容易，其中模-数转换器和传感器的误差等是主要的障碍。

随着科学技术的发展，测量的概念也在变化，自动化是目前电子测量发展的主要方向。为了提高测量精度，测量不能只是停留在比较数量的大小，而应愈来愈与计算紧密结合起来。对被测量的表示已不是简单的数值和符号，而是要求配有必要的文字、曲线和图

表，以表示被测量的物理属性。例如，对温度场的测量，最好有一幅该温度场的图象，全面地显示该场各处的温度。对某变量的现在值和过去值进行测量和运算分析，从而预计将来值的预测技术也是一种测量。某些场合被测量的变化范围很宽，要求仪器量程很宽，且要求能自动切换量程等等。因此，应不断研究出各种新的测量方法和测量工作原理。这一方面要依靠寻找新的物理定律、原理作为新型测量仪器的物理基础。另一方面应充分利用各种新技术来扩大仪器的测量功能，把数字测量仪器的高精度和模拟测量仪器的连续直观性结合起来，把参数的定量和定性的测量技术与信息处理技术结合起来。

自从1971年世界上第一台微处理器出现以来，如今已有成千上万产品，应用日益广泛。一方面，它代替了用TTL电路需经繁杂逻辑设计才能完成的许多功能；另一方面，由于微处理器具有体积小、重量轻、功耗小、价格便宜，兼有必备的信息存储和数据运算等特点，就有可能将它直接用于一台仪器之中，成为自动测量仪器，即所谓“智能”仪器。微处理器不仅能控制测量的进行，以及对测量数据进行运算和处理，而且还能改进测量的方法，自动选量程、自动调节、自动校准，甚至自动诊断故障，具有对外接口功能，便于在自动测试系统中使用等。这样使仪器功能扩大、测量精度提高、结构简化、采用母线结构、不少硬件被软件代替，从而具有更大的灵活性。因微处理器本身价格低廉，可靠性高，可能从根本上改变电子测量仪器的传统面貌，“智能”仪器将越来越多地取代相当多的传统仪器，这是电子测量仪器自动化的必然趋势。

应当指出，微处理器运算速度较低，仪器中有些关键部件特别是高速部件不但不能淘汰，而且由于仪器性能提高，这些部件也必须进行相应的改进。

目前我国在水电模型试验方面，水力量（如水位、流速、压力……等）的电测法已普遍应用。很多新的测量仪器试制成功并已在应用。有的单位应用小型电子计算机和微型机在模型试验实现自动测量和数据处理方面作了不少工作，但总的说来还处在试验和研制阶段，传感器的研制水平不高，技术上落后，不能满足水电科学研究和生产上的需要。因此，必须针对我国的具体情况，加倍努力学习先进技术，迅速改造现有模型试验研究装置，研制新型的传感器，提高测试技术水平。采用先进的科学试验手段，建设一批现代化的实验基地，使人们能够在实验室中更深入准确地了解自然现象的规律，以便进一步掌握和控制这些自然规律来为人类造福，为我国实现四个现代化做出贡献。

第二节 测量仪器的构成

测量的关键在于被测量和标准量比较，但是被测量能直接与标准量比较的场合不多，大多数的被测量和标准量都要变换到双方便于比较的某个中间量。所谓变换是指被测量按一定规律转变成便于传输或处理的另一种物理量的过程。变换元件以一定的物理定律为基础完成一个特定的变换任务，多个变换元件的有机组合可构成变换器或测量仪器。

根据不同的联接方式，仪器主要有两种结构：直接变换型结构和平衡变换型结构。不同的联接方式对仪器的性能影响较大。

直接变换型结构的特点是，全部信息变换只沿一个方向进行（图 1-1），它是一个开

环系统。在这种系统中，每个环节传递系数（如图 1-1 中 $K_1, K_2, \dots, K_n$ 等）的变化以及作用于每个环节上的干扰（如图 1-1 中 $u_0, u_1, u_2, \dots, u_n$ ）都会影响输出量 y 。因此，这种结构的仪器对每个变换环节的要求都很高。例如，电容式水位仪和波高仪。

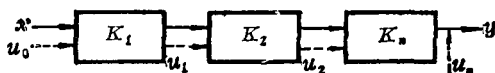


图 1-1 直接变换型结构

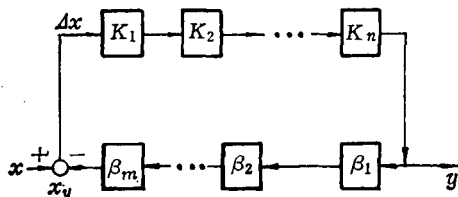


图 1-2 平衡变换型结构

平衡变换型结构如图 1-2 所示，存在着两个变换回路：一个为正向变换回路，它的组成环节的传递系数为 $K_1, K_2, \dots, K_n$ ；另一个为反向变换回路，它的组成环节的传递系数为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 。反向回路的输出为 x_y ，它与输入量 x 进行比较，它们的偏差 Δx 加到正向回路的输入端。当正向回路总的传递系数 $K = \prod_{i=1}^n K_i$ 相当大时， Δx 仅是输入量 x 的很小一部分，因而正向回路成为只是发现和接收偏差 Δx 的环节。

平衡变换型结构的特点是整个仪器形成一个负反馈闭环系统，如果 $(K_1, K_2, \dots, K_n) (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m) \gg 1$ ，即 $K\beta \gg 1$ 时，可得

$$y = \frac{K}{1 + K\beta} x \approx \frac{1}{\beta} \cdot x \quad (1-1)$$

由此可见，正向回路中各环节性能的变化不会影响仪器的输出 y ，只要细心制作反向回路就可以保证较高的精度。例如，自动跟踪式水位仪，自动平衡记录仪等。

在模型试验中，广泛应用非电量电测法解决各种各样的测量任务。图 1-3 示出对非电量进行电测量的测量仪器方框图。

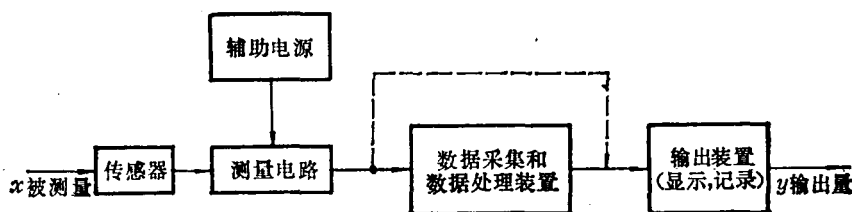


图 1-3 非电量电测仪器框图

现将非电量电测仪器的组成部分说明如下：

传感器：直接与被测对象发生联系，将被测参数的变化直接或间接地转换成电信号。

测量电路：或称信号调节器，将传感器输出的信号，根据输出装置或数据采集和数据处理装置的需要进行变换。例如衰减、放大（斩波放大器、载波放大器、电荷放大器、交流电压放大器等）、阻抗变换、相敏电路和数字逻辑电路（门电路、数字显示电路、模-数转换、数-模转换等）。

测量电路根据传感器要求不同而异，最常用的有桥型电路。例如不平衡电桥，它是在电桥不平衡状态下直接读数，可用于静态和动态测量，测量精度不超过 0.5%。运算放大

器也常用于测量仪器中，它可以把传感器微弱的信号放大到足够的电平。被测的信号大多数是缓变或直流信号，因此需要高增益的直流放大器。集成运算放大器具有输入阻抗高、增益高、输出阻抗低、性能稳定、调整方便、体积小、重量轻的优点，因此得到广泛的应用。

输出装置：在测量静态和动态的被测量时，根据不同的测量任务选用适当的模拟或数字显示输出装置。

记录装置：可以采用机械、光学、磁性和电子存储原理进行模拟和数字记录。

数据采集装置：主要用于模拟和数字多路测量，对测量值可实现远距离传输和遥测等。

数据处理装置：根据不同的测量任务，用在测量期间或测量之后对测量数据进行自动处理。

为了解决多方面的测量问题，应根据不同的条件，将测量仪器中各单元按多种形式组合成仪器。为了获得最佳的组合，必须注意下列匹配条件。

直接变换型（开环）测量仪器的总灵敏度 S 是由传感器灵敏度 S_{AS} ，测量电路灵敏度 S_{AM} 和输出装置灵敏度 S_{AO} 三者组成，即

$$S = S_{AS} \cdot S_{AM} \cdot S_{AO} \quad (1-2)$$

显然，各环节的灵敏度对仪器总的灵敏度影响都是一样的。这时应考虑在满足总的灵敏度要求下，使仪器中一些易于提高灵敏度、易于制造的前置单元灵敏度尽量高一些，而对灵敏度难于提高的单元降低一些要求。测量仪器中各单元的测量范围必须与测量目的相适应。

输入电阻或输出电阻决定了匹配形式，当测量仪器下一单元的输入电阻 R_a 较大（ $R_a \gg 1$ 千欧）时，则应与输入电压实现电压匹配。当输入电阻较小（ $R_a \ll 1$ 千欧）时，则应与输入电流实现电流匹配。在仪器两个单元之间的输出电阻和输入电阻相同时，则取功率匹配。

测量信号源（在测量仪器中，传感器可看作信号源）的电位、接线数目、测量电路和仪器各单元的接地情况以及常模干扰抑制和共模干扰抑制都必须加以考虑。

第三节 测量仪器的基本性能

评价仪器品质的指标是多方面的，但作为仪器的基本性能，主要是衡量仪器测量能力的那些指标，如精确度、稳定性、测量范围、动态特性、可靠性等，下面简要地介绍仪器的性能指标。

一、精确度

简称精度，它是精密度和准确度的综合反映。

（1）精密度 它说明在同一条件下进行重复测量时，仪器指示值的分散性。随机误差的大小是精密度的标志。精密度高，意味着随机误差小，但精密不一定准确。

（2）准确度 它说明仪器指示值与真值的偏离程度，系统误差的大小是准确度的标志。准确度高，意味着系统误差小，但准确不一定精密。

精度高，意味着随机误差和系统误差都很小。精度最终是以测量误差的相对值来表示的，相对误差便于评价测量精度。绝对误差宜于用来校正测量的结果。误差越大，说明精度越低；误差越小，精度越高。例如，某传感器或仪器的相对误差为1%，则可说其精度为 10^{-2} 。如果主要是随机误差引起，则是指精密度为 10^{-2} ，反映多次测量结果的离散程度。如果主要由系统误差引起，则是指准确度为 10^{-2} ，反映与真值偏离程度。

在工程应用中，为了简单表示仪器测量结果的可靠程度，引入一个仪器精度等级的概念，用A来表示。精度等级A以一系列标准百分比数值（0.001；0.005；0.02；0.05；…1.5；2.5；4.0；6.0；等）进行分档，它可以用下式表示

$$A = \frac{\text{仪器在全刻度范围内的最大允许误差}}{(\text{仪器刻度盘的上限值}) - (\text{仪器刻度盘的下限值})} \times 100\% \quad (1-3)$$

二、稳定性

说明仪器示值稳定性的有两个指标：一是时间上的稳定性，以稳定度表示；二是仪器外部和工作条件变化所引起示值的不稳定，用各种影响系数表示。

（一）稳定度

它是由于仪器中随机性变动、周期性变动，飘移等引起示值的变化，一般它以精密度的数值和时间长短共同表示。例如，电压波动引起每8小时变化1.3毫伏，则写成稳定度 $\delta_s = 1.3 \text{毫伏}/8 \text{小时}$ 。

（1）零点飘移 在一定环境和工作条件下，被测量为零时的输出变化值。

（2）满量程飘移 在一定环境和工作条件下，经过一定时间后，满量程输出的变化值与满量程输出之比值。

通常是用固定不变的输入量长时间地作用于仪器时，输出量所产生的变化（即波动）来反映仪器的飘移大小。很明显，输出波动越小，说明飘移越小。

（二）环境影响

室温、大气压、振动等外部状态变化对于仪器表示值的影响，以及电源电压、频率等仪器工作条件变化对示值的影响统称环境影响，用影响系数来表示。例如温度误差即当仪器从室温（一般指 20°C ）变化到极限工作温度时，在仪器量程范围内任意一点上产生的输出的最大变化。

三、仪器的输入输出特性

（一）测量范围

（1）输入范围 任何一种仪器都对它的输入范围有一定的要求。超过这个范围，要么使测量精度由于线性变坏而大大下降，要么可能导致仪器的损坏。

（2）输出范围 仪器的输出范围往往受到最大和最小电参量变化的限制，而这些电参量又与输入物理量的最大值和最小值相对应。

（二）灵敏度

仪器在稳态下，输出(y)变化对输入(x)变化的比值称为灵敏度，用s表示， $s = \frac{dy}{dx}$ ，它是仪器静态特性曲线上各点的斜率。在线性特性的仪器中，s是常数。在非线性

特性的仪器中， s 在量程范围内不是常数。

仪器的静态特性表示在稳定状态下，输出量 y 与输入量 x 之间的关系。一般是在静态标准条件下进行校准的，所谓静态标准条件是指没有加速度和振动冲击（除非这些参数本身就是被测物理量），环境温度一般为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ，相对湿度不大于 85%，大气压力为 760 ± 60 毫米汞柱的情况。在这种工作条件下，利用一定等级的校准设备，对仪器进行往复循环测试，得到的输出和输入数据一般用表格列出或画出曲线。

（三）分辨率

指仪器可能检出被测参量的最小变化值。分辨率可分为绝对分辨率和相对分辨率，下面利用电压 U 举例予以说明：

绝对分辨率 U_0 是可对被测量进行检测或加以区别的最小间隔数值。 U_0 不仅适用于模拟测量仪器，而且也适用于数字测量仪器。进行数字测量时， U_0 也称为最低有效数字位（LSD）或最低有效位（LSB）。

相对分辨率 Q_U 与它的测量范围 U_M 有关，可由下式定义

$$Q_U = \frac{U_0}{U_M} \quad (1-4)$$

相对分辨率越高，则可测的被测量数值越小。一般分辨率较高的测量仪器的误差相应地也要小一些。

（四）线性度

或称非线性误差，表示仪器的输出量与输入量的实际关系曲线偏离拟合直线的程度。一般线性度用全量程内偏离拟合直线的最大偏差值与满量程输出平均值之间的百分比表示之。

所谓拟合直线是通过计算或图解得出的一条校准直线，计算方法有最小二乘法、平均选点法、端点法等。

无论是模拟式的仪器，还是数字式仪器都希望它们的特性是线性关系。

（五）迟滞

它说明一个仪器正向（输入量增大）特性和反向（输入量减小）特性不一致的程度。迟滞大小一般由实验确定，其值以整个测量范围内产生的最大迟滞误差与最大的被测示值的百分比值表示。

（六）重复性

在同一工作条件下，输入按同一方向作全量程连续变动多次时，输入输出特性曲线的一致性称为重复性。特性曲线一致，重复性好，误差也小，它可以用输入输出特性曲线间的最大偏差与满量程输出的百分比来表示。

（七）动态特性

当测量随时间而变化的参数时，必须研究仪器及被测对象的动态特性。大部分模拟式仪器的动态特性可以用微分方程或传递函数来完整地描述，但它们的直观性很差，也很难用实验的方法求得，所以常用典型输入信号和给定初始条件下的特解作为仪器动态特性的描述。常用的有过渡函数 $h(t)$ 和脉冲过渡函数 $\omega(t)$ 。 $h(t)$ 是当输入 $x(t)$ 为单位阶

跃变化, 初始条件为零时仪器输出 y 随时间而变化的曲线 (称时间历程)。由于过渡函数的测试和分析比较方便, 所以用得较多。

一般测量仪器的动态特性能用二阶常微分方程来描述, 则称它为二阶系统。从物理上来讲, 二阶系统总包含有两个储能元件, 如电感、电容等, 由于常有往复振荡的特性, 因此又称振荡环节。

当理想的阶跃信号输入到二阶系统, 输出可以依系统参数的不同而得到不同的波形, 包括单调、衰减振荡和等幅振荡等过程, 因此二阶系统具有相当的代表性。另一方面二阶系统从数学上来分析计算和设计比较容易, 仪器的频率特性和动态特性参数之间的关系容易求得。因此, 目前仪器设计中最简便有效的方法是将仪器先进行近似处理, 设法把它化为二阶系统, 然后再进行设计计算。

图 1-4 (a) 是理想的阶跃输入曲线 $x(t)$, 图 1-4 (b) 就是仪器的过渡函数曲线 $y(t)$ (衰减振荡)。一般情况下 $y(t)$ 用上升时间 t_{rs} 、响应时间 (稳定时间) t_{st} 和过冲量 (调调量) c 等参数来综合描述, 这些参数的意义如下:

上升时间 t_{rs} 是指仪器示值从稳定值 y_{∞} 的 $a\%$ 变化到稳定值 y_{∞} 的 $b\%$ 所需的时间。 $a\%$ 值常采用 5% 或 10% ; $b\%$ 值常采用 95% 或 90% 。

响应时间 t_{st} 又称过渡过程时间, 是指从输入量 x 开始变化到仪器输出表示值 $y(t)$ 进入稳定值的规定范围内所需的时间。稳定值的规定范围 (ε) 常取仪器允许的误差值 (容许误差一般为 5%)。

过冲量 (超调量) c 是指输出最大振幅与稳定值 y_{∞} 之间的差值, 常用对稳定值的百分数表示。很明显, 响应时间 t_{st} 和过冲量 c 数值越小, 说明仪器的动态特性较好。

图 1-4 (a) 是理想的单位阶跃输入, 实现很困难, 实际上只要输入上升段的时间与测量仪器动态特性的过渡函数曲线的上升段时间相比可以忽略即可。在输入单位阶跃量后, 如果输出量能够在相应的数值 (稳定值 y_{∞}) 上逐渐稳定下来, 则说明仪器工作是稳定的。仪器的稳态输出值愈快达到, 则仪器的惯性愈小。如果输出量偏离稳定值越来越大, 则说明仪器工作是不稳定的。当然, 仪器在正常工作的情况下, 总是希望既要稳定, 又要尽可能快速。

每种仪器只能在一定的频率范围内工作, 在其范围内仪器对输入信号的响应是相同的, 而且输出信号仅仅同输入信号的大小有关。仪器的频率特性说明仪器在某个频率的正弦输入信号作用下, 稳态输出信号在幅值和相角上的比值和差值, 频率特性常用波德图 (对数幅频特性曲线和对数相频特性曲线) 表示。幅频波德图上的频宽是一个描述动态特性的重要指标。频宽就是输入信号的频率使增益变化不超过 $\pm k$ 分贝的频率区间。例如, 某仪器在输入信号频率从 80 赫到 250 赫内增益变化不超过 ± 3 分贝, 则仪器的频宽可写成 $4f = 80 \sim 250$ 赫 (± 3 分贝)。一般测量静态值和缓慢变化量的仪器要求其频宽为 $0 \sim 2$ 赫,

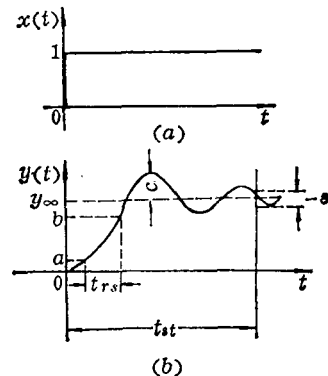


图 1-4 仪器的过渡函数

测动态量时仪器应有频宽为 $0 \sim 10^4$ 赫或以上。

从研究动态特性来说，常用的测量仪器可看成由放大环节、非周期环节和振荡环节等组合而成。若希望测量没有延迟和失真，即要求仪器在相当宽的频带内是一个放大环节。非周期环节可近似地以一个滞后环节和一个指数环节来代表，这时希望滞后时间和时间常数都尽可能地小。振荡环节则常以二阶振荡环节来近似，后者的两个重要参数是阻尼系数 ζ 和响应时间 t_{sr} 。要使仪器有较宽的频带，则阻尼系数 ζ 宜控制在0.5附近（当 $\zeta \geq 1$ 时，过阻尼，单调上升很缓慢； $\zeta = 0$ ，临界振荡； $0 < \zeta < 1$ ，衰减振荡）。

在被测量随时间变化的过程中进行测量所产生的附加误差叫动态误差。动态误差是由于测量仪器对输入信号的变化来不及响应（由于元件往往具有一定的惯量），或者仪器不能让输入信号的所有成分全部通过，或者输入信号中不同频率成分通过仪器时受到不同的衰减和延迟而造成的误差，使测量信号在输出端失去原形。测量仪器的动态误差是动态中和静态中测量误差的差值。

四、可靠性

可靠性是指仪器性能特性的时间稳定性，或者说是构成仪器的部件及构成部件的元件等功能随着时间保持稳定性的程度。

仪器的可靠性通常可定义为：仪器在规定的条件下（满足规定的技术指标，包括环境、使用、维护等），并在给定误差极限内连续工作的可能性。这具有概率特性，因此必须进行统计处理，一般均要求测量仪器具有较高的可靠性。

第四节 传 感 器

在模型试验中，为了研究某些物理现象，测量和控制某些过程的进行以及探索某些未知的变化规律都离不开要测量一系列表示它们特征的参数，而这些参数通常是一些非电量。例如：水位、压力、流速、流量、渗气、应力、位移、振动、温度以及其它与各种过程有关的一些参量等等。为适应测量系统的需要，应用电测法测量非电量已经非常普遍。

传感器就是用来将非电量转换为电量或电参量（R、L、C）的装置。因此，传感器至少应具有以下两方面的功能：①能感受非电量；②将非电量转换为电量或电参量。

传感器是测量系统的第一个环节（在工业自动化装置中，通常称它为“一次仪表”）即处于复杂的测量、控制系统的入口处。近代电子技术和电子计算机为信息的转换和处理提供了极其完善的手段，但是如果没有各种传感器去测量大量可靠的原始数据并提供信息，那么，电子计算机也无法发挥其应有的作用。因此，传感器的性能、可靠性及选用是否恰当将对整个测量系统起着决定性的作用。

在研制测量仪器或组成测量系统的过程中，除对仪器的性能指标有许多要求之外，对传感器也提出了相应的性能指标要求，传感器的性能指标和测量仪器的性能指标相类似，可参照本章第三节。在实际应用中对这些性能指标要求总是有所侧重的，我们必须根据具体情况加以选择和应用。

一、传感器的组成

传感器是一个完整的测量装置，它能把被测物理量转换为与之有确定对应关系的电量输出，以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制等要求。

传感器一般由敏感元件、传感元件和测量电路三部分组成，有时还加上辅助电源，可用方框图来表示，见图1-5。传感器的组成将依不同情况而有所差异。

敏感元件——直接感受被测量（一般为非电量），并输出与被测量成确定关系的其它量（包括电量）的元件。

传感元件——又称变换器，是传感器的重要组成元件，可以直接感受被测量（一般为非电量）而输出与被测量成确定关系的电量，如热电偶和热敏电阻；

但也可以不直接感受被测量，而只感受与被测量成确定关系的其它非电量，例如差动变压器式压力传感器，并不直接感受压力，只是感受与被测压力成确定关系的衔铁位移量，然后输出电量。在一般情况下使用的都是这种传感元件。

测量电路——能把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录、控制和处理的有用电信号的电路。测量电路视传感元件的类型而定。使用较多的是电桥电路和放大器等。

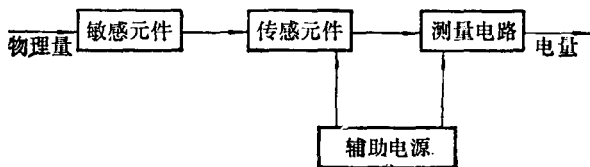


图 1-5 传感器的组成方框图

二、传感器的分类

随着科学技术的发展，根据生产、科学实验的需要，利用许多物理现象设计和制造了各种的传感器。为了不同的目的可以有不同的分类方法。这里着重介绍按结构、作用原理、用途进行的分类。

（一）按结构分类

（1）串联转换式传感器 这种传感器能完成一系列的转换，传感器的灵敏度是各串联环节灵敏度的乘积，所以只要提高各环节的灵敏度即可提高整个传感器的灵敏度，但对于外界的影响（如温度变化）所引起的误差不能消除。

（2）差接式传感器 这种传感器在结构上把两个同类型传感器的输出环节差接起来，做到使干扰信号相减，而有用信号则尽可能相加在一起。这种传感器可以用来补偿温度产生的误差和其它作用的影响。

（3）补偿式传感器 其结构是由一个闭环的反馈系统所组成。它可以实现自动地对被测量与反馈量进行比较。当被测量与反馈量不平衡时，系统就自动开始工作，直到出现新的平衡为止。此时传感器输出的信号便是与新的被测量相对应的量。此类传感器在结构上比较复杂，但在性能上却有很多优点：具有方向性；可以补偿外界作用的影响所引起的误差；输出端可以获得大功率的信号；可以带动较多的输出机构；可以使输入量和输出量之间成任意可能的函数关系。

（二）按作用原理分类

（1）参量式传感器 这种传感器是先把各种被测物理量的变化转换成各种电参量（例如电阻、电感、电容等），然后通过外加电源和测量电路将它们转换为相应的电量。