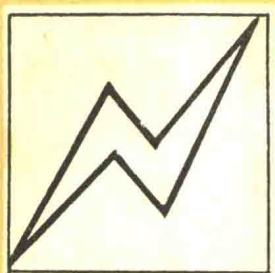


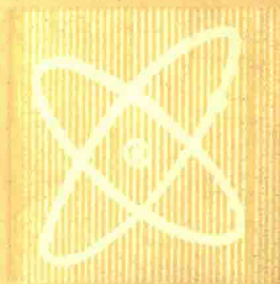
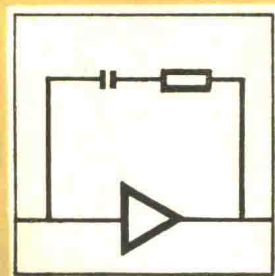
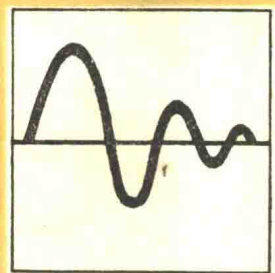
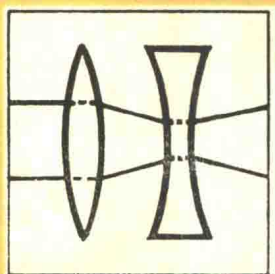
高等学校试用教材



自动检测技术

下 册

哈尔滨工业大学陈守仁 主编



机械工业出版社

45
3

高等学校试用教材

自动检测技术

下 册

哈尔滨工业大学陈守仁 主编



机械工业出版社

自动检测技术

(下册)

哈尔滨工业大学陈守仁 主编

*

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)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092 1/16·印张26³/₄·字数395千字

1982年6月重庆第一版·1983年5月重庆第二次印刷

印数9,001—14,600·定价 1.70 元

*

统一书号: 15033 5137

前 言

本书是根据第一机械工业部一九七八年四月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会确定的计划，以及一九七八年七月和十月分别在哈尔滨和上海召开的工业自动化仪表教材会议制定的《自动检测技术》教材编写大纲编写的。

本书按检测技术的基本理论、被测信息的采集、变换、传输、处理，以及检测系统设计的体系加以介绍。重点讨论检测技术的基本概念、基本理论、变换元件的原理、检测仪表和检测系统及其设计的基本原理。

本书共四篇，分上、中、下三册出版。上册介绍检测技术的基本理论和检测变换元件的原理和设计；中册介绍信息的传输和处理；下册介绍自动检测系统的设计。下册的主要内容为：自动检测系统的设计原则和方法；温度、压力、流量、机械量、物位测量的一般方法，并列举了一些实例说明了具体设计方法、步骤。同时考虑到电子计算技术的迅速发展及微处理器在自动检测系统中的应用不断地扩大，本书最后一章对微处理器在自动检测系统中的应用也作了简要地介绍。本书编写内容除着重分析仪表的原理和设计外，还对仪表的静态、动态标定以及标准传递都作了相应地介绍。

本书可作为工业自动化仪表专业试用教材，也可作为有关专业的教学参考。

本书由哈尔滨工业大学陈守仁副教授主编，上海机械学院秦永烈副教授主审。第二十四章至第二十八章由陈守仁同志编写，第二十九章由秦永烈同志编写，第三十章由哈尔滨工业大学吴训一、陈宏磐同志编写。

本书初稿曾由上海机械学院等十几个院校会审，编者根据会审意见作了相应地修改和补充。在本书的编写及审稿过程中上海机械学院黄海滨同志、王靖同志、上海工业大学姜宝之同志、重庆大学朱麟章同志、华中工学院黄曰怀同志、上海业余工业大学李忠德同志以及上海工业自动化仪表研究所的有关同志，都给予了热情支持，提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于我们水平有限，时间短促，无论从体系、内容和编写方法都一定存在着许多缺点和错误，希望读者批评指正。

一九八一年十月

目 录

前言	
第四篇 自动检测系统的设计	1
第二十四章 概述	1
§ 24-1 自动检测系统的组成	1
§ 24-2 自动检测系统的设计原则	3
§ 24-3 自动检测系统的设计方法	6
第二十五章 温度测量	8
§ 25-1 温标及其传递	8
§ 25-2 温度测量方法及仪器的分类	13
一、接触式测温仪表	13
二、非接触式测温仪表	16
§ 25-3 高速气流的温度测量	25
§ 25-4 运动物体表面温度的测量	31
第二十六章 压力测量	40
§ 26-1 压力的概念及压力标准的传递	40
§ 26-2 压力测量的一般方法	42
§ 26-3 压力测量仪表的动态特性	46
一、检测仪表的频率特性	46
二、频率特性的求取	48
三、动态校准装置	51
四、参数检测中的动态误差	54
§ 26-4 高温气体快变压力的测量	55
§ 26-5 压力测量的展望	65
第二十七章 流量测量	68
§ 27-1 流量的概念和流量标准的传递及其装置	68
§ 27-2 流量测量仪表的分类	76
一、计量表	77
二、流量计	79
§ 27-3 标准节流装置的设计	86
一、标准节流装置的组成和类型	86
(一) 标准节流装置的组成	86
(二) 标准节流装置的类型	87
(三) 其它几种暂未定国际的标准节流装置	90
(四) 标准取压装置	92
(五) 测量管	94
(六) 节流装置用的其它辅件	95
二、标准节流装置的适用范围及安装要求	95
三、标准节流装置的压力损失 δ_p	96
四、标准节流装置有关系数的确定	96
(一) 角接取压标准孔板 α_0 和 ϵ 的确定	97
(二) 法兰取压标准孔板 α 和 ϵ 的确定	97
(三) 角接取压标准喷嘴 α 和 ϵ 的确定	98
(四) 其它几种标准节流装置 α_0 和 ϵ 的确定	99
五、用标准节流装置测量流量误差的计算	109
(一) 流量系数和膨胀修正系数 α 、 ϵ 的基本相对误差	109
(二) 直径 D 和 d 的误差	111
(三) 差压 ΔP 的测量误差	112
(四) 被测流体密度 ρ_1 的计算误差	112
六、标准节流装置在制造、安装、使用中不符合要求时的处理及附加误差	113
(一) 节流装置不符合标准要求时的修正	114
(二) 节流装置中流体的流动情况不符合要求时的处理	118
七、标准节流装置的设计计算	120
(一) 命题形式	120
(二) 差压上限的确定方法	121
(三) 标准节流装置设计计算的给定数据	124
(四) 标准节流装置设计计算程序	125
八、计算例题	128
§ 27-4 大粘度液体流量测量装置设计举例	138
一、任务要求	138
二、对任务的分析	138
三、靶式流量变送器的设计	139

四、仪表的分度及流量系数的测定	145	(二) 电容物位计的测量电路	191
五、流量测量误差	148	四、电容物位计的防爆	193
§ 27-5 流量测量的展望	149	§ 29-5 声波式物位仪表	196
第二十八章 机械量测量	151	一、多换能器气介式超声液位计原理	196
§ 28-1 位移测量	151	二、超声波液位仪表的最佳频率值计算	198
§ 28-2 厚度测量	153	三、超声波液位计换能器的主要特性	199
§ 28-3 力的测量	155	§ 29-6 其它物位仪表	199
§ 28-4 转矩测量	156	第三十章 微处理器在自动检测系统中	
§ 28-5 转速测量	158	的应用	200
§ 28-6 振动测量	159	§ 30-1 微处理器应用简介	200
一、理论基础	159	§ 30-2 微处理器在测量流量中的应用	202
二、加速度传感器	162	一、质量流量计算机概述	202
三、速度传感器	164	二、质流计算机使用的计算公式	203
四、位移传感器	165	(一)密度测量	204
§ 28-7 电子皮带秤	165	(二)流量测量	208
一、称量原理	165	(三)温度计算	213
二、传感器及秤架结构	167	(四)模拟量计算和输出选择	213
三、电子皮带秤的信号处理	170	三、仪器的报警和状态输出	213
四、仪表的标定	173	四、控制字选取和仪器的校正	214
第二十九章 物位测量	176	§ 30-3 微处理机在数据集录中的应用	217
§ 29-1 概述	176	一、概述	217
§ 29-2 浮力式液位仪表	176	二、数据集录装置的硬件	219
一、浮子式液位计	177	三、数据集录装置的软件	227
二、浮筒式液位计	179	附录	
§ 29-3 差压式物位仪表	182	1. 角接取压孔板 $\alpha_0=f(\alpha_0\beta^2, Re_D, \beta)$	
§ 29-4 电容式物位仪表的设计	184	关系表	236
一、系列设计的准备工作	184	2. 法兰取压孔板 $\alpha_0=f(\alpha_0\beta^2, Re_D, \beta, D)$	
二、确定总体设计方案	185	关系表	242
三、各组成环节的设计	186	3. 喷嘴 $\alpha_0=f(\alpha_0\beta^2, Re_D, \beta,)$	
(一) 电容物位计检测部分	186	表	248

第四篇 自动检测系统的设计

第二十四章 概 述

§ 24-1 自动检测系统的组成

在科学实验和生产过程中,自动检测的任务一般有两种,一是把参数直接测量并显示出来,以告诉人们参数变化的实际情况;另一种其主要目的在于对过程实现自动控制,所以检测得到的信号直接被送入控制装置,在这里显示则不是主要目的。

一个完整的测量系统应包括以下几部分:被测参数的检测部分、信号放大、变换部分、参数显示部分。有时还有一些附加装置。测量系统的检测部分一般是直接与被测对象发生关系(接触或非接触)。因为它直接感受被测参数的变化,所以又常称这部分为传感器。当把被测参数经传感器变换到一般比较便于测量、放大的参数后,接着就把变换后的信息送入放大、变换装置,以实现信号的放大、选择、运算、变换、比较、补偿等功能。在一个具体的测量装置中,则根据原理和需要决定所必须的环节。测量系统最后部分是参数的显示装置,目前常用的显示装置有模拟显示、数字显示和屏幕显示等几种,另外显示装置又有直读式和自动记录式、打印式之分。

有些时候对测量结果除需要显示或用于过程的自动控制以外,还对测量系统提出一些附加的要求。例如要求越限报警、信号远传、多点程序测量、自动或手动测量、遥控测量等等。或为其它显示、控制的需要,给出标准输出信号,如 $0\sim 10$ 毫安和 $0\sim 10$ 毫伏的输出。对于测量系统所具有的上述功能也需根据要求,设计出相应的附加装置。

对于检测系统中传感器的有关设计在本书第二篇中已作了介绍,而测量的放大、变换部分则需根据环节的特性、要求利用机械变换、电工、电子学以及电子计算技术的基础知识来进行具体设计。显示装置在《自动显示技术和装置》课程中已有详细论述。

下边以一个典型的例子来说明系统的构成和它们的作用。图24-1所示是一个光电温度计的原理示意图。由被测对象1辐射来的光线 Φ_s 经光学系统2进入仪表中。经过由电机5和调制圆盘4组成的光调制系统,将 Φ_s 与从标准光源3射来的光线 Φ_N 交替地照射到光敏元件6上,这个交变信号经前置放大7送入后边的放大变换电路。当上述两个辐射强度有差值存在时,前置级将输出一个不平衡信号,经过放大、相敏整流器10、功率放大器11将推动可逆电机12转动。可逆电机输出轴与滑线电阻 R_p 的滑动触点相联,因而它将根据输入差值的大小、方向来改变 R_p 的阻值,与此同时也改变了标准光源回路中电流的大小,使标准灯的亮度也发生变化,由于采用稳压电源 U_w 供电,所以标准光源的电流大小仅决定于 R_p 滑动触点的位置。对 R_p 的调整一直到 Φ_s 与 Φ_N 相同时为止。此时标准光源中通过的电流大小就对应了一定的温度。仪表的输出直接在 R_p 上取出,为了得到标准信号输出,再经放大器14放大,信号送给磁

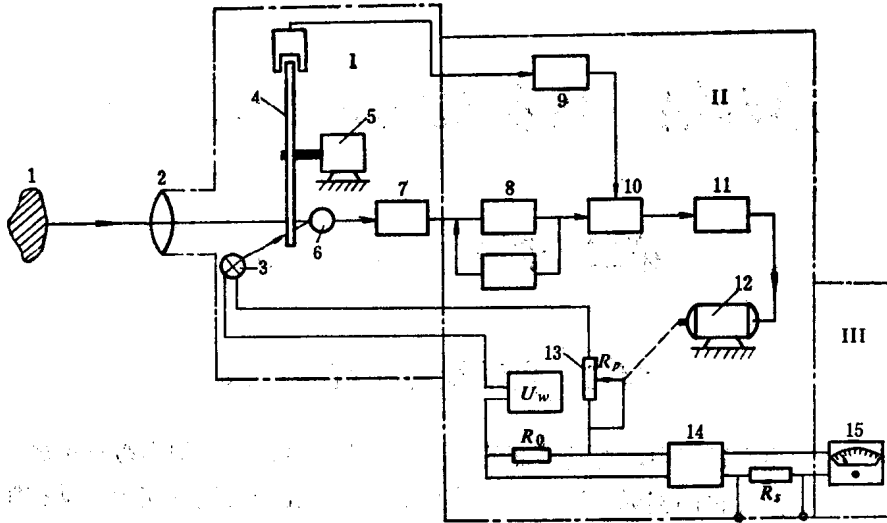


图 24-1 光电温度计原理示意图

- 1—被测对象 2—光学系统 3—标准光源 4—调制圆盘 5—电机 6—光敏元件 7—前置放大器 8—选频放大器 9—同步信号放大器 10—相敏整流器 11—功率放大器 12—可逆电机 13—滑线电阻 14—功率放大器 15—磁电式显示仪表

电式指示仪表15，在必要时还可以从 R_s 上取出标准输出信号。

全部测量系统可分成三个部分：传感器部分 I（见图24-1），放大变换部分 II 和显示部分 III。

上述光电式温度计的构成方块图示于图24-2中。从方块图及上册第五章 § 5-3 中很明显可以看出该测量系统由于采用可逆电机作积分元件，它属于一个闭环无差检测系统。由比较

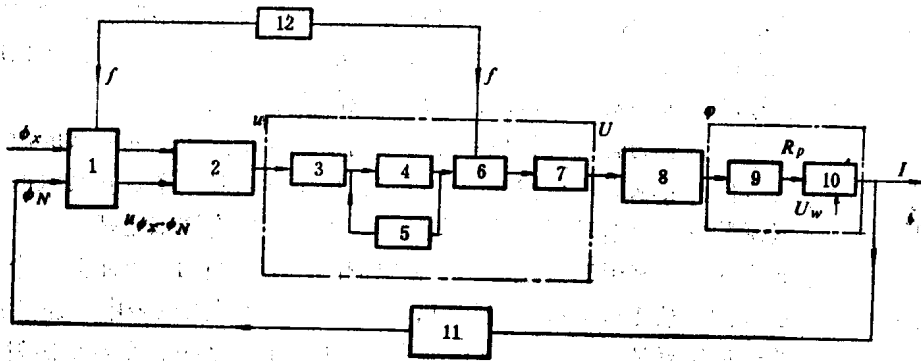


图 24-2 光电温度计的构成方块图

- 1—调制挡板 2—比较变换元件 3—前置放大器 4—选频放大器 5—自动增益反馈 6—相敏整流器 7—功率放大器 8—可逆电机 9—转角-位移（电阻）变换器 10—电阻-电流变换器 11—电流-亮度变换器（标准光源） 12—调制系统

变换元件开始一直到电阻-电流变换器的各个环节都属正向顺联环节，而反馈环节只有电流-亮度变换器($I-\Phi_N$)，所以在正确选择系统参数时，测量系统的精度仅决定于 $\Phi_N=f(I)$ 的变换精度，其它因素影响甚小。

从构成方块图中可以见到，根据原理需要，整个系统中包括了多个变换、放大环节。对

于自动检测系统的设计就是要正确地选择系统的构成方块，并且再根据各环节的作用对各环节分别进行设计。构成仪表的原理方块图是设计仪表或测量系统关键的一步。

在测量系统中有时还包括有比较、标定装置，在设计时要根据不同需要加以考虑，尤其是对那些在每次测量之前都必须进行标定的装置更为必要。

§ 24-2 自动检测系统的设计原则

任何一个自动检测系统都是为完成某一个具体的测试任务而设计的，因此设计要随时考虑使用的要求。对于能很好完成某一测试任务的测量系统，在另外一些不同的条件下就可能完全不适用。

一个好的仪表设计者不仅应懂得仪表本身应如何设计，还必须懂得仪表的制造工艺性及运行条件，其中包括操作者的水平及使用环境等。

一般情况下，在开始设计之前要对如下一些有关的使用要求作具体了解和分析：

- (1) 被测参数的极限变化范围及常用范围；
- (2) 测量所要求的精度；
- (3) 输出要求：输出形式(模拟还是数字显示，指示、记录、远传或报警等)，信号标准化要求等；
- (4) 被测参数变化情况，动态精度要求如何；
- (5) 安装条件、被测对象的尺寸大小，允许安装的地点高低、安装方法及要求；
- (6) 被测对象(介质)的性质：有否腐蚀、剧毒、爆炸、高粘度、是单相、双相还是多相等；
- (7) 使用环境：温度、湿度、气压、腐蚀、爆炸气体、电磁场、振动强度等；
- (8) 运行条件：固定式、运动式(速度、加速度)；
- (9) 数据读出条件：观测距离及照明等。

除上述使用要求外，在设计时还要考虑到仪表的生产工艺要求，这主要是指：

- (1) 生产批量，对不同批量的生产有不同的考虑，以便得到最佳的经济效果和最短的生产周期；
- (2) 生产厂的生产能力、设备条件，在设计中尽量采用已有的标准零部件，对新设计的零部件也要考虑到以后可能在其它方面使用的通用性问题；
- (3) 结构的工艺性；
- (4) 制造成本，设计要考虑经济效益，应对材料、元件工艺提出合理的要求，有时不适宜地要求质量或精度，会使最后产品的成本成倍地增加，造成经济上的得不偿失。

以上述基本原则为出发点，可以对测量方案进行初步比较和选择。本书的第二篇所介绍的内容就是为这个目的服务的。为了便于对测量原理的选择，对测同一参数介绍了很多不同的可能采用的原理。就原理本身来讲很难说哪个好坏，但一经与使用条件相联系，就有优劣之分了。

当测量原理选定之后，就要根据最后输出要求把构成仪表的各中间环节画成方块图。在第一篇中已经简要地介绍了构成方块图的原则，大家知道对于测量系统精度的提高除需在工艺上采取必要措施之外，合理地选择系统构成方块图也是极为重要的，因为它可以减小单独

环节误差对输出信号的影响，用不太高精度的元件建立起高精度的测量系统。在实际设计中可以在测量系统中加入各种校正环节、调制、选频、相敏以及自动与标准比对等环节，以提高系统的稳定性和精度。随着微电子技术的发展，微处理器已逐渐开始应用于自动检测系统，它将对仪表和测量系统的设计起着变革性的影响。例如过去对某些测量原理认为由于存在着干扰因素而很难实现，或由于许多因素影响使该测量方法的精度很难提高等等，当应用了微处理器后就可以根本改变这种状态。在本篇的最后一章里将以实例说明它的使用及优越性。

在测量仪表的设计中，一个很重要的问题就是要求的精度与仪表的成本之间的矛盾。前边已从仪表的构成型式上作了分析，以期用合理的结构型式降低对环节（元件）的要求。但采用何种结构型式还要作经济分析。另外很重要的一个问题就是设计中对已选定的结构型式还要正确的进行各环节的灵敏度分配和误差分配。

如图24-3所示的开环系统，其系统总的灵敏度为

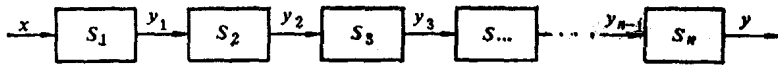


图 24-3 开环测量系统

$$S = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdots S_n = \prod_{i=1}^n S_i \quad (24-1)$$

式中 $S_1, S_2 \cdots S_n$ —— 各个环节的灵敏度；

$$S_1 = \frac{dy_1}{dx}, \quad S_2 = \frac{dy_2}{dy_1} \cdots$$

$y_1 \cdots y_{n-1}$ —— 前一环节的输，同时又是下一环节的输入。

显然各环节的灵敏度对仪表总的灵敏度影响都是一样的。在这种情况下看来对各环节灵敏度的最佳分配似乎没有什么价值，因为任何一个环节灵敏度的提高都将使总的测量灵敏度提高。但实际上在设计时一般都在满足总的灵敏度要求下，使其中一些环节灵敏度尽量高一些，而适当地降低另一些环节的灵敏度。这样就可以对灵敏度难于提高的环节降低一些要求，而对于易于提高灵敏度、易于制造的环节则可以适当增加一些灵敏度。

对于开环系统的误差分配问题，其原则与灵敏度分配原则有所不同。由图24-3可见，每个环节的误差都将会影响总的输出，假如以 δy_1 表示环节 1 的误差 Δy_1 在输出端引起的误差，则

$$\left. \begin{aligned} \delta y_1 &= \Delta y_1 \frac{dy}{dy_1} = \Delta y_1 S_2 \cdot S_3 \cdots S_n \\ \delta y_2 &= \Delta y_2 S_3 \cdot S_4 \cdots S_n \\ &\vdots \\ \delta y_n &= \Delta y_n \end{aligned} \right\} \quad (24-2)$$

上述误差一般常以均方误差方法处理，即

$$\delta_y = \pm \sqrt{\delta y_1^2 + \delta y_2^2 + \cdots + \delta y_n^2} \quad (24-3)$$

由于各环节的误差都是以均方根形式影响总误差，所以为了降低总误差必须使其均方值为最小。显然在设计中，无根据地仅对个别元件、环节提高精度是没有价值的，这样只会提高仪

器的成本或增加制造上的困难。而应当改进所有环节中误差最大的环节，因为它将对总误差起着决定的作用；在设计中如果这个环节误差不能降低，则提高其它环节的精度将收效甚微。为了保证精度，必须对上述环节重新选择设计，否则只好降低仪表精度等级，与此同时为了降低成本，还可以相应地放宽一些对其它环节的要求。

对于带有负反馈的闭环系统，它的构成方块图如图 24-4 所示。其中有 n 个正向顺联环节

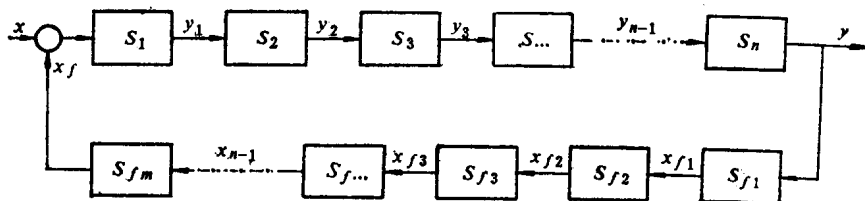


图 24-4 带负反馈的闭环测量系统

和 m 个反馈环节，对于上述系统当 $S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdots S_n$ 足够大时，系统总的灵敏度可近似写成

$$S \approx \frac{1}{S_{f1} \cdot S_{f2} \cdots S_{fm}} \quad (24-4)$$

式中 $S_{f1} \cdots S_{fm}$ ——各反馈环节的灵敏度。

由式(24-4)可见，该系统的总灵敏度主要决定于反馈环节的灵敏度，而且反馈环节灵敏度与系统总的灵敏度成反比，当反馈灵敏度提高时，系统灵敏度下降。一般根据系统补偿要求来确定总的反馈灵敏度。总反馈灵敏度确定以后，每个反馈环节灵敏度的选择与处理和开环系统一样，因为每个环节的灵敏度都将同样地影响反馈回路的总输出。在仪表设计中，在能实现测量原理的前提下，应尽量选用较少的环节，尤其是在闭路系统中，应尽量减少反馈环节的数量。另外取出输出量的地点也很重要例如图 24-1 中所举的例子，若把输出值由滑线电阻 R 的活动触点位置给出，显然这样将使反馈回路中又把位移-电阻 ($l-R$) 变换环节算在其中了，滑线电阻的稳定性、均匀性、触点接触电阻变化等因素将直接影响输出值，而如图中之方案，输出值直接取自回路的电流 (I)，输出仅决定于 $\Phi_p = f(I)$ 的变换精度。

具有反馈环节的闭环系统，误差分配问题主要是反馈回路的误差，与开环系统相似，只是这里输入值为 y 而输出值是 x_f 。各环节误差对 x_f 的影响分别为

$$\left. \begin{aligned} \delta x_1 &= \Delta x_1 \cdot S_{f2} \cdot S_{f3} \cdots S_{fm} \\ \delta x_2 &= \Delta x_2 \cdot S_{f3} \cdot S_{f4} \cdots S_{fm} \\ &\vdots \\ \delta x_m &= \Delta x_m \end{aligned} \right\} \quad (24-5)$$

式中 $\delta x_1, \delta x_2, \cdots, \delta x_m$ ——各环节误差 $\Delta x_1, \Delta x_2, \cdots, \Delta x_m$ 折算到反馈环节输出端的误差。

各环节的误差同样可以用均方根方法处理，即

$$\delta x_f = \pm \sqrt{\delta^2 x_1 + \delta^2 x_2 + \cdots + \delta^2 x_m} \quad (24-6)$$

应指出，这里是反馈输出的误差，如果要以输出量表示，还必须折算到输出端，即有

$$\delta_y = \delta x_f \cdot S = \frac{\delta x_f}{S_{f1} \cdot S_{f2} \cdots S_{fm}} \quad (24-7)$$

在反馈回路中各环节的误差分配原则与开路系统相似。

§ 24-3 自动检测系统的设计方法

一、两类检测系统

自动检测系统的设计常有两种情况：一种是根据生产工艺要求设计专用的测量仪器；另一种是根据科学实验的要求，设计一些参数的实验测试系统。前者多为现场（或流程）用的工业仪表或专用装置；而后者是为了完成某一任务而专门设计的测试系统。由于用途的不同，则设计方法和指导思想也各有不同。

对于生产流程上使用的仪表，设计中要尽量考虑使用简单、可靠、稳定性好；由于使用量大，故要求通用性强，结构紧凑，能适于各种恶劣环境下使用，并最好能以标准信号输出，以便于与其它装置配套使用。

对于主要用于科学实验的测量系统，有很大一部分是为了某一实验任务组成的专用测试系统，这类系统通用性差，往往要求精度高、反应速度快，量程范围变化大等。

上述两种类型仪器的设计，显然应采取不同的方法。工业流程中的测量仪表要求标准化，系列化程度比较高；而科研测试装置往往是非标准设计，装置成本要求不是主要的，但要求可调参数较多，如更换量程，更换显示装置等。有时为了缩短设计、制造周期，可以选用较多的通用装置、环节（如稳压电源、信号发生器、频率计和数据放大器等）来凑成科研测试装置，但由于采用了一些高精度的通用装置，构成的系统虽可以达到很高的精度，但装置繁杂、成本高，而且对使用人员水平要求也较高。

上述两类测量系统的设计将在以下几章中以实例加以说明，如靶式流量计的设计方法就属于第一类的流程仪表设计，而快变压力测量系统就属于第二类科学实验仪器的设计。

流程中自动检测仪表的设计目前还没有一个典型的，通用的方法，因此就给仪表设计者带来了困难。这是由于仪表的种类繁多，几乎应用了物理、化学、力学、电子学、计算技术等所有基础科学和技术科学的成果，由于这些科学技术在不断地前进，也促使了自动检测仪表频繁地更新换代，不断提高它的精度和使用性能。

二、两类设计方法——实验归纳法和实验分析法

对于一些较成熟的测量仪表，人们已作了大量分析、研究工作，有些已拟定出了通用的设计计算方法，如标准节流装置的设计。它的设计实质上是建立在大量实验数据积累的基础之上，归纳了一些曲线、数表以及用这些数据又找出了具有一定精度的数学表达式，所以在设计时，只要实际的使用条件、选择的参数、结构尺寸与原取得数据的实验条件、装置相符，则用这些数据计算设计的仪表就可以保证一定的精度。由于这些仪表分度是通过计算得到的，毋需单独标定所以要严格保证设计各元件，环节符合标准规定，否则误差就很大，有时甚至难于估量。由于它的计算顺序比较固定，比较成熟，具有很大优点。不过在自动化仪表中，能达到这种设计水平的还不多。大多数仪表由于测量变换原理的特点所限，如在第二篇中介绍的一些变换方法虽有一些理论计算方程，但应用于实际仅起到协助分析的作用，以便提出合理的设计方案，而要直接用理论分度则尚不可能，因此上述节流装置的实验归纳法，还是一些常用原理设计的一个方向。

目前应用比较多的设计方法还是实验分析方法。这是由于材料的物理、化学性能的复现性和复制性不能很好的保证，设计出的元件不能以理论计算结果为准的缘故；又如流体场的

分布、阻力、热量的传导、温度场、电磁场的分布,强度都与很多因素有关,很难计算确定,而这些又恰恰是设计仪表的物理基础。由于这些原因仪表的设计就只能用理论计算与实验分析相结合的方法。下边把这种设计方法概要地介绍一下。

1. 方案选择

为了设计一个符合要求的测量仪表,一般首先是选择一个理想的方案,这里主要是指检测变换原理。为此在设计仪表之前,要从使用要求出发,比较各类可用的变换原理,最后选定最佳方案。必要时要在大量调查研究的基础上,进行方案论证,以保证正确的起点,因为以后要实现这个原理、方案作大量的工作,对设计的成败有重要作用。有时对于一些复杂的测量系统还要作一些原理性的模拟实验,为方案的选定提供依据。

2. 仪表构成方块图的确定

当方案选定之后,就要对仪表构成块图进行设计,一般可以找一些参考方案,不要以为任何时候采用闭环系统都有优越性,一定要综合工作原理,精度要求及元件、材料、工艺的可能来确定。在方块图确定以后,随之就要确定对各环节的要求,包括变换特性、参数指标等。

3. 环节的设计及制造

在上边方案确定的基础上,可以分别对各环节进行设计,包括机械、电气线路等设计,对于一般仪表主要困难在于传感器设计而在个别情况下也有信号放大或前置放大器的设计。有时传感器本身的设计就要经过几个阶段,例如,开始时作一些必要的模拟设计,通过简单的模型制造,测取一些基本特性,分析一下误差因素,对最后样机设计提出要求,这段工作往往要经过数次反复。对传感器的分析应走在其它环节之前,很可能经过原理实验以后又对测量系统的构成提出修改意见。在上述工作基础上就可以进行传感器最后样机的设计及各环节的设计、制造。对各环节的制造要经过调试,以达到设计指标为止。

4. 总装调试及实验分析

在各环节分别制造、调试完毕之后,可以进行总装,构成需要的系统进行联试。一般实验要与模拟的被测对象相联系。如果前边各阶段工作很成功,这阶段可能很顺利,但大多数是在总装调试中会出现一些问题,以前的一些设计不合理,选择错误都将在这个阶段暴露出来,而需要加以修改。一个有经验的设计者,在这阶段出现的问题就会少的多。

5. 基本特性、指标的测试及性能考核

在完成所有的必要的修改及调试工作以后,就可以对仪器进行基本性能测试。这里包括:仪表精度分析,基本误差测定,附加误差测定,外界使用条件的性能试验(如电源波动,温度、湿度、气压、振动、磁场、电场等)。通过测试分析给出各种误差的大小。为了确定仪表的基本误差还要对检定测试条件、手段进行误差分析,最后给出误差的综合指标。

为了保证仪表长期可靠工作,常需进行各种寿命试验和环境试验,其中包括寿命试验,加速寿命试验,湿热试验,高低温、振动等环境试验。

经过上述一些步骤以后,基本完成了仪表的设计试制工作,在设计的同时也完成了样机的试制,这也是自动检测仪表设计的一个特点。

对于一个具体测量系统的设计还有一些不同特点,这里只能原则地作一介绍。由于大多数检测仪表要实验标定,所以标定装置的设计也很重要,在以后的章节中也将作相应的介绍。

第二十五章 温度测量

§ 25-1 温标及其传递

温度是一个很重要的物理参数，自然界任何物理、化学过程都紧密地与温度相联系。很早以前人们就开始了温度测量的研究。人们发现，很多物质的物理特性都与温度有关，如物体的尺寸、体积、密度、硬度、粘度、弹性模量、破坏强度、导电率、导热率、热容量、热电势、光辐射强度等等都是随温度的不同而改变。因而人们就想到用这些物质的某些特性作为测量温度的依据，作成温度计，用所选用参量变化的程度来衡量温度的高低。这样就出现了一个问题，用不同物质的物理性质测量温度，这些参量的变化并非一致。例如，基于某物质体膨胀随温度线性变化做出的温度计所测出的温度就将与利用某物质电阻随温度变化是线性的原理所做出的温度计，测出的温度数值是互不相同的。因而就产生了建立一个统一的温度标尺问题。开始人们建立了一些经验温标，后来又发展了热力学温标，今天已建立了世界各国通用的国际实用温标。

一、经验温标

早期温标的建立大多是人为地给一个规定，很不客观，因此后来称这些温标为经验温标，这些温标有：

1. 摄氏温标 这种温标选用的物理基础是认为：测温物质水银的体膨胀随温度变化是线性的。采用的分度方法是规定水的冰点为零度，而标准大气压下水的沸点为 100 度，这两个固定点间将水银体膨胀均匀分成 100 分，每分为一度，表示为摄氏一度。

2. 华氏温标 华氏温标选用的测温物质也是水银，认为水银的体膨胀随温度的变化是线性的。分度方法与摄氏不同，当时他认为可以得到比冰点更低的稳定温度，即将氯化铵和冰的混合物温度定为零点。这样，标准大气压下水的冰点就变成了 32 度，而水的沸点为 212 度。冰点和水沸点间水银的体膨胀等分 180 分，每分为华氏一度。

3. 列氏温标 列氏温标与以上两种温标不同，他选定测温物质为酒精和水的混合物，分度方法是将该混合物在水的冰点时配成 1000 厘米³，此时为零点，当该混合物达到水沸点温度时体膨胀达到 1080 厘米³，则称水的沸点温度为列氏 80 度，体膨胀每增加 1 厘米³称温度增加为列氏一度。

应该指出，用上述方法人为地规定某一温标，假定了某一物质的特性与温度呈线性关系后，另一测温物质的温度特性就不一定与温度呈线性关系。因此使用不同的方法建立起温标之间的温度不会完全符合。这些温标都依赖于所选用的测温物质，这是它们的缺点，因而必须找出一个不决定于测温物质的更为理想的温标。

二、热力学温标

为了找到一个理想温标，人们在卡诺循环的基础上建立了热力学温标。通过卡诺定理可以导出如下公式

$$T = \frac{Q}{Q_{\text{沸}} - Q_{\text{冰}}} \times 100^{\circ}\text{K} \quad (25-1)$$

这里是一个理想的卡诺机使其在温度为水的沸点 $\tau_{\text{沸}}$ 的热源及未知温度 τ 的冷源间工作，然后再把这个热机放在温度为 τ 的热源与冰点温度的冷源间作功。使前一种情况卡诺热机放给冷源的热量 Q ，等于后一种情况未知热源（温度为 τ ）供给卡诺机的热量 Q ，并测出此值。再测出在热源 $\tau_{\text{沸}}$ 中吸收的热量 $Q_{\text{沸}}$ 及放给冷源的热量 $Q_{\text{冰}}$ 。将这些数值代入 (25-1) 式，就可以导出未知温度 τ 。这个温标是建立在热力学基础之上的，它与热机所用工质无关，是一个理想温标。但是应指出，实际上能够实现卡诺循环的热机是造不出来的，所以我们说热力学温标是一个理想的而又不能实现的温标。

三、绝对气体温标

由波义耳定律知，当在温度一定时，理想气体的体积 V 和压力 P 存在如下关系

$$PV = C \quad (25-2)$$

常数 C 只与介质温度有关。在压力不太低及温度不太高时，任何气体都相当严格地遵守这个定律。因为 C 只与温度有关，故可以把 (25-2) 式写成

$$PV = f(\theta) \quad (25-3)$$

式中 θ 表示温度。显然保持压力 P 是一个常数时，另一个参数体积 V 就是温度的单一函数了，如果保持 V 是常数，则 P 将是温度的函数。用这个理论建立起的温度计叫作气体温度计。由于保持压力或体积不变，气体温度计又分为定压式或定容式气体温度计两种。

对定压式气体温度计有

$$\frac{V - V_{\text{冰}}}{\theta - \theta_{\text{冰}}} = \frac{V_{\text{沸}} - V_{\text{冰}}}{\theta_{\text{沸}} - \theta_{\text{冰}}} \quad (25-4)$$

若这里也采用摄氏分度法，即在水沸点和冰点间分100格，则 (25-4) 式可变为

$$\frac{V - V_{\text{冰}}}{\theta - \theta_{\text{冰}}} = \frac{V_{\text{沸}} - V_{\text{冰}}}{100} \quad (25-5)$$

对定容式气体温度计同样可写出

$$\frac{P - P_{\text{冰}}}{\theta} = \frac{P_{\text{沸}} - P_{\text{冰}}}{100} \quad (25-6)$$

通过上述关系式就可以把温度的测量转化为体积或压力的测量了，这是较容易实现的。

由查理定律和盖·吕萨克定律又知

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0(1 + \beta\theta) \\ V &= V_0(1 + \alpha\theta) \end{aligned} \right\} \quad (25-7)$$

式中 $P_0 = P_{\text{冰}}$, $V_0 = V_{\text{冰}}$;

β ——气体的压力系数;

α ——气体的膨胀系数。

可以证明

$$\beta = \alpha = \frac{1}{273.15} 1/^\circ\text{C} \quad (25-8)$$

即一定质量的气体，在体积不变或压力不变时，温度每升高 1°C 它的压力或体积的增加将等于 0°C 时压力或体积的 $\frac{1}{273.15}$ 。

根据上述定律可知, 温度 θ 将随压力 P 或体积 V 的减小而降低, 到极限情况即 $V=0$ 或 $P=0$ 时, 则可求出此时对应的温度为 -273.15°C , 也就是说这个温度要比冰点温度低很多。为了使温标具有连续性, 取始点不是冰点, 而是 -273.15°C , 这就是后来的绝对温标, 它的分度法与摄氏分度法相同, 以 $^{\circ}\text{K}$ 表示 (这里仍用 $^{\circ}\text{K}$ 表示, 以区别于现在国际实用温标中温度单位开尔文)。通过上述分析建立起的绝对气体温标与摄氏温标的区别在于

$$\theta=0^{\circ}\text{C} \text{ 时, } T_0=273.15^{\circ}\text{K},$$

$$\text{或 } T=T_0+\theta=(273.15+\theta)^{\circ}\text{K}$$

引入绝对温标后就可以把 (25-7) 式改为

$$T=\frac{P}{P_0}T_0, \text{ 或 } T=\frac{V}{V_0}T_0 \quad (25-9)$$

由 (25-9) 式可见, 用气体温度计定标, 如果零点选在绝对零度 (0°K) 则只要一个固定点就够了。

以上分析了建立几个温标的过程, 认为热力学温标最为理想, 不依赖于所选定的测温物质, 但是它实际上是不能实现的。后来又找出一个绝对气体温标, 这个温标是有可能实现的, 可制造出气体温度计直接用于测量。应当指出, 同样也可以象绝对气体温标那样, 导出绝对热力学温标的概念。后来人们又研究了绝对热力学温标与绝对气体温标之间的关系, 并证明了两个温标是完全一致的。这样问题就得到了解决, 可以用绝对气体温标复现理想的绝对热力学温标。

四、国际实用温标 (IPTS)

用气体温度计可以复现理想的绝对热力学温标, 但是气体温度计要做到很高的精度, 则装置是很复杂的, 而且使用极为不便, 用它来直接统一国际上温度测量标准是有困难的。为了解决国际上温度标准的统一问题, 而且又要保证一定的精度, 1927年制定了第一个国际协议性温标。建立这个温标的指导思想是这个温标应尽量与理想的绝对热力学温标靠近, 温度复现性要高, 以保证国际上量值传递的统一。当时的国际温标为了接近热力学温标, 是采用了气体温度计测出一系列标准固定点 (相平衡点) 的温度, 以它为依据, 在固定点中间规定传递的仪器及温度值的内插公式。这个建立温标的指导思想及方法一直到现在还在使用, 只是随科学技术的发展, 测量精度在不断的提高, 所以曾经经过了几次修改 (1968, 1960)。最近又于1968年又作了一次较大修改, 制定了国际实用温标 IPTS-1968。实际现在使用的 IPTS-1968温标, 是在1975年第十五届国际计量大会修订后的温标, 即所谓1968年国际实用温标——1975年修订版。因为修订版在温度数值上无变化, 而只有几处作了修改, 所以一般习惯上仍简称为1968年温标。

(一) 国际实用温标 IPTS-1968简介

1968年实用温标中规定, 热力学温度是基本温度, 用符号 T 表示, 单位是开尔文 [K],

1K等于水三相点温度的 $\frac{1}{273.16}$ 。同时还可以使用摄氏温度, 以 t 表示

$$t=(T-T_0)^{\circ}\text{C} \quad (25-10)$$

这里摄氏温度的分度值与开氏温度分度值相同, 即温度间隔1K等于 1°C 。 T_0 是在标准大气压下冰的溶化温度 $T_0=273.15\text{K}$, 而水三相点的温度比冰点高 0.01°C , 所以水三相点温度 $T_{\text{三相点}}=273.16\text{K}$ 。由于水三相点温度易于复现, 复现精度高, 而且保存方便, 这些均优于

冰点；所以1968年温标规定，建立这个温标的唯一基准点选用水三相点，而不是冰点。

国际实用温标IPTS-1968对不同温度范围有不同的规定，其具体规定如下：

1. 13.81K~630.74℃的标准仪器是铂电阻温度计，其所应用的铂丝应是无应变的退了火的纯铂丝，其电阻比 $W(T_{98})$ 规定为

$$W(T_{98}) = R_{T_{98}}/R_{273.15K} \quad (25-11)$$

纯度应保证 $W(373.15K) \geq 1.39256$ 。在这段温度范围内分成两段，即0℃以上为一段，0℃以下为另一段。

(1) 13.81K~0℃，在这段中温度可由下式计算

$$W(T_{98}) = W_{CCT_{98}}(T_{98}) + \Delta W(T_{98}) \quad (25-12)$$

式中 $W_{CCT_{98}}(T_{98})$ ——为标准参考函数，可查表确定。实际上它是某一特定的温度计具有的特性（即 $W-T$ 的关系值）；

$\Delta W(T_{98})$ ——偏差函数，它是所用温度计在所测温度下的 $W(T_{98})$ 与同一温度下的 $W_{CCT_{98}}(T)$ 值之差。

偏差函数 $\Delta W(T_{98})$ 在不同的温度范围有不同的形式：

1) 13.81~20.28K范围

$$\Delta W(T_{98}) = A_1 + B_1 T + C_1 T^2 + D_1 T^3 \quad (25-13)$$

2) 20.28~54.361K范围

$$\Delta W(T_{98}) = A_2 + B_2 T + C_2 T^2 + D_2 T^3 \quad (25-14)$$

3) 54.361~90.188K范围

$$\Delta W(T_{98}) = A_3 + B_3 T + C_3 T^2 \quad (25-15)$$

4) 90.188~273.15K范围内

$$\Delta W(T_{98}) = A_4 t_{98} + C_4 t_{98}^3 (t_{98} - 100) \quad (25-16)$$

式中各系数 $A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots$ 等都是用该温度计对各固定点的温度实测值求出的。每一段中都规定了固定点及其温度值。

(2) 0~630.74℃范围内，基准仪器还是铂电阻温度计，其温度可由下式确定

$$t_{98} = t' + 0.045 \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \cdot \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t'}{419.58^\circ\text{C}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t'}{630.74^\circ\text{C}} - 1 \right) \quad (25-17)$$

式中 $t' = \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right)$;

t' ——是中间变量；

α, δ ——温度计常数，由定点温度数值求出。

2. 630.74~1064.43℃，这段区间使用的标准仪器是铂铑(10%)-铂热电偶，它的热电势与温度之间的关系可由一个二次方程式计算

$$E(t_{98}) = a + b t_{98} + c t_{98}^2 \quad (25-18)$$

式中 $E(t_{98})$ ——热电偶一端为0℃，另一端温度为 t_{98} 时的热电势；

a, b, c ——常数，它们可由直接测量固定点温度的电势计算求得。

热电偶的材料应经退火处理，铂极的纯度应保证 $W_{100^\circ\text{C}} \geq 1.3920$ ；铂铑极名义应含10%