

高等学校教学用书

自动显示技术

高等学校教学用书

自动显示技术

东北工学院 宫贤令 主编

2/16/21

冶金工业出版社



543242

高等学校教学用书
自动显示技术
东北工学院 官贤令 主编

冶金工业出版社出版

(北京王府井大街51号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 14 1/2 字数 345 千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷

印数00,001~4,700册

ISBN 7-5024-0378-X

TH-36 (课) 定价2.90元

前 言

本书是根据冶金部1988~1990年高等院校教材出版计划编写的,作为工业自动化仪表专业本科生“自动显示技术”课的基本教材。

本书是在东北工学院自动化仪表教研室编写的《电动显示技术及仪表》和北京钢铁学院(现为北京大学)自动化仪表教研室编写的《显示技术及仪表》两本教材的基础上,经过多年的教学实践,吸取了其他院校有关教材的长处,并结合国内显示技术发展现状,重新组织编写的。近年来微型计算机在显示技术领域中的应用日趋广泛,计算机图形显示装置日益增多,为适应新时期新技术的需要,在本书中,增加了计算机图形显示技术的内容。

全书按信息显示方式归类,共分三篇。第一篇模拟显示技术由王玲生(东北工学院)编写,第二篇数字显示技术由鹿崇发(北京大学)编写,第三篇计算机图形显示技术由官贤令(东北工学院)编写,并任本书主编。

本书编写过程中力求做到从我国显示技术的实际情况出发,注意当今世界显示技术发展的动向,选材上注重介绍显示技术基本理论和基本技术,在此基础上突出实际应用,由浅入深,深入浅出。

本书第一篇较深入地分析了模拟显示仪表的测量原理及结构特点,线路设计计算侧重于仪表量程的修改以及仪表的检定技术和选用。第二篇较全面地阐述了模拟—数字转换技术。在此基础上,突出分析了过程参数数字显示的特殊问题——线性化。同时简要介绍了几种通用型集成A/D转换器特性及其在数字显示技术中的应用实例。第三篇在必要的理论基础上,从实际应用出发,强调物理概念,重点放在计算机图形显示的硬件组成、工作原理和软件设计方法;对APPLE-Ⅱ机的图形显示系统也作了简要的介绍。

吴训一教授(天津理工学院)、高魁明教授(东北工学院)、庄树兴副教授(华东冶金学院)、刘国俊副教授(北京大学)和谭作信副教授(本溪冶金专科学校)等详细审阅了全部书稿,提出了宝贵意见,在此致以诚挚的谢意。

本书作为工业自动化仪表专业或其相关专业大学本科生用书,还可供从事工业自动化仪表和过程控制方面的工程技术人员参考。

由于时间仓促,编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1988年7月

目 录

第一篇 模拟显示技术	
第一章 动圆式温度指示仪 1	第三节 时间的数字化测量79
第一节 动圆式指示仪表的原理	第六章 数字—模拟 (D/A) 转换
与结构..... 2	技术.....82
第二节 动圆仪表的测量线路..... 5	第一节 概述.....82
第二章 自动平衡式显示仪表14	第二节 并行 D/A 转换.....82
第一节 自动平衡式显示仪表的	第三节 串行 D/A 转换.....86
构成原理.....14	第四节 集成 D/A 转换器简介.....89
第二节 自动电子电位差计的	第五节 数—模转换器的主要技术
测量桥路.....16	指标.....91
第三节 电子自动平衡电桥的	第七章 模拟—数字 (A/D) 转换技术93
测量线路.....23	第一节 直接比较型 A/D 转换.....93
第四节 可逆电机和同步电机简介.....31	第二节 电压—时间 ($V-T$) 型
第五节 晶体管放大器.....35	A/D 转换.....99
第六节 走纸机构和打印间歇机构.....44	第三节 电压—频率 ($V-F$) 型
第七节 动态特性试验分析.....45	A/D 转换..... 110
第八节 干扰及仪表的抗干扰措施.....47	第四节 复合型 A/D 转换..... 114
第三章 显示仪表的检定及选用52	第五节 高速 A/D 转换..... 119
第一节 直流电位差计及其	第六节 积分型 A/D 转换抗串模
配套仪器.....52	干扰性能..... 121
第二节 动圆式指示仪的检定方法.....56	第七节 集成电路 A/D 转换器
第三节 自动平衡式显示仪表的	介绍..... 123
检定.....57	第八节 A/D 转换器的主要性能
第四节 测温仪表的成套检定方法.....59	指标..... 131
第五节 显示仪表的选用.....61	第八章 数字仪表的线性化 133
第二篇 数字显示技术	第一节 概述..... 133
第四章 数字显示仪表的一般问题64	第二节 模拟线性化..... 133
第一节 概述.....64	第三节 模—数转换线性化..... 136
第二节 采样过程及采样定理.....66	第四节 数字线性化..... 138
第三节 量化及量化误差.....67	第五节 数字显示仪表实例..... 140
第四节 数字仪表的标度变换.....69	第三篇 计算机图形显示技术
第五节 数字显示仪表的主要部件.....69	第九章 概 述 148
第五章 频率型数字仪表原理78	第一节 计算机图形显示系统的
第一节 频率型数字仪表结构.....78	分类..... 148
第二节 频率的数字化测量.....78	第二节 计算机图形显示的应用
	范围..... 150

第十章 图形显示器的组成及

工作原理..... 153

第一节 阴极射线管 (CRT) 的结构 及其工作原理..... 153

第二节 电子束的偏转及主偏 系统..... 156

第三节 CRT 辉亮度控制..... 160

第四节 矢量产生器 (线产生部件) 161

第五节 字符产生器 (字符产生部件) 165

第十一章 数据输入装置和部件..... 169

第一节 光笔..... 169

第二节 键盘..... 174

第十二章 图形显示器处理部件..... 178

第一节 缓冲存储器..... 178

第二节 显示接口..... 180

第三节 显示总控制器..... 183

第十三章 图形显示软件..... 185

第一节 图形显示系统的软件 结构..... 185

第二节 应用程序的组织与执行... 186

第三节 图形显示指令..... 189

第四节 图形显示档案设计..... 192

第五节 子图形显示档案设计..... 196

第六节 汉字显示档案设计..... 199

第十四章 APPLE—I 机图形显示

系统简介..... 204

第一节 监视器的工作方式..... 204

第二节 CRT 监视器的组成 207

第三节 字符图形显示缓冲区..... 208

第四节 字符产生电路..... 214

第五节 图形信号产生电路..... 219

第六节 信号输出选择及混合 电路..... 222

主要参考文献..... 226

第一篇 模拟显示技术

本篇介绍目前工业生产普遍应用的模拟式显示仪表。这类仪表的任务是与其前面的传感器或变送器配套使用,以显示被测量的大小。它们通常设计成直接与热电偶、热电阻配套使用以显示温度量的仪表,也有时设计成与DDZ各类变送器配套使用,以显示温度、压力、流量、物位、成份以及机械量的显示仪表,甚至只要稍加改变就可以做成与一切非标准型敏感元件配套应用的显示仪表。这类显示仪表应用面广,品种也较多。本部分着重分析与热电偶、热电阻配套应用的显示仪表。

第一章 动圈式温度指示仪

动圈式指示仪表是一种磁电式仪表,与我们通常见到的电工仪表,如磁电式电压表和电流表同属一类。它利用磁电系测量机构测量直流电流、电压和电阻的原理,制成了用于测量非电量的仪表。六十年代进行了全国统一设计,成为XC系列产品。XC系列动圈式仪表不仅可与热电偶、热电阻配合用以显示温度,而且还可以与其它变送器配合,用以显示压力、流量、成份、物位等参数;如果再加上电子调节电路和执行机构,则不仅能指示被测参数,还能对被测参数进行调节。表1-1列出XC系列动圈仪表型号命名,熟悉各类动圈仪表的功能,这对选用仪表是有帮助的。例如XCZ-101型表示配接热电偶的动圈式温度指示仪。这种仪表有指示型(XCZ型)和调节型(XCT型)两种类型。

表 1-1 动圈式仪表的型号及意义

第 一 节			第 二 节		
第一位	第二位	第三位	第一位	第二位	第三位
代号	意义	代号	意义	代号	意义
X	显示仪表	C	动圈式 磁电系	Z	指示仪 指示调节仪
			1 单标尺 表示设计序号或种类,	0 无附加装置 表示调节方式, 二位调节	1 配接热电偶
			1 高频振荡固定参数	1 三位调节(狭中间带)	2 配接热电阻
			2 高频振荡可变参数	2 三位调节(宽中间带)	3 配接霍尔变送器
			3 时间程序式高频振荡 固定参数	3 时间比例调节(脉冲式)	4 配接压力变送器
				4 时间比例加二位调节	
				6 比例调节(连续输出式)	
				9 比例积分微分调节 (连续输出式)	

第一节 动圈式指示仪表的原理与结构

一、测量原理

动圈式指示仪表的测量机构工作原理如图1-1所示。它是由动圈1、张丝2、铁芯3、永久磁铁4、指针5、刻度标尺6组成的一个磁电系测量机构。动圈用绝缘铜线绕成矩形框，借张丝的作用悬吊在永久磁铁和圆柱形磁芯之间的均匀磁场中。当测量信号（直流毫伏信号如热电偶、各种变送器）输入到仪表测量回路时，便有电流流过动圈，动圈的两个与磁场方向垂直的边受到大小相等方向相反的力 F （见图1-1b），其大小为

$$F = nBLI \quad (\text{N}) \quad (1-1)$$

式中 n ——动圈匝数；
 B ——磁感应强度（T）；
 L ——动圈有效边长度（m）；
 I ——流过动圈的电流（A）。

动圈在磁场中产生偏转，力矩为

$$M = F \cdot 2r \cdot \cos\varphi = nBAI \cos\varphi = C_1 I \cos\varphi \quad (1-2)$$

式中 $2r$ ——动圈的宽度；
 φ ——磁力线与动圈平面的夹角；
 A ——动圈的面积（ $A = 2rL$ ）；
 $C_1 = nBA = \text{常数}$ 。

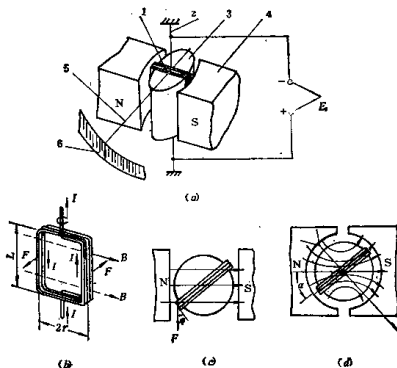


图 1-1 动圈仪表测量机构工作原理

1—动圈；2—张丝；3—铁芯；4—永久磁铁；5—指针；6—刻度标尺

该力矩迫使动圈沿逆时针方向偏转，与此同时弹性张丝被扭转，于是又产生一个反作用力矩 M_f ，且 M_f 与弹性张丝的扭转角有关，扭转角愈大， M_f 也愈大。当 $M=M_f$ 时动圈停止下来，指示该瞬时被测量的大小。

由(1-2)式看出，偏转力矩不仅与电流 I 有关，而且还与夹角 φ 有关，如图1-1c所示。由于夹角 φ 的变化会使仪表的刻度不均匀。因此，必须消除 φ 变化的影响，以保证仪表为均匀刻度，为此将动圈仪表的永久磁铁的极靴做成同心圆形，如图1-1d所示。这样做之后，磁力线在空气隙内以径向呈辐射状射出和射入，从而保证动圈平面与磁力线的夹角 φ 在一个不太大的范围内(52.5°)保持基本不变($\varphi=0$)，则(1-2)式可写成

$$M=C_1 I \quad (1-3)$$

又根据前面介绍过的 M_f 正比于动圈偏转角 α ，即

$$M_f = \left(\frac{bh^3 E}{3l} + \frac{b^2 p}{12l} \right) \alpha = C_2 \alpha$$

式中 E ——张丝材料的剪切弹性模数 (N/m²)；

α ——动圈的偏转角 (rad)；

p ——张丝的工作张力 (N)；

l ——张丝的工作长度 (m)；

b, h ——张丝的宽度和厚度 (m)；

C_2 ——张丝的反作用力矩系数。

当 $M=M_f$ 时

$$\alpha = \frac{C_1}{C_2} I = C I \quad (1-4)$$

上式清楚表明，动圈的偏转角 α 与流过动圈的电流成正比。当动圈仪表测量回路输入热电偶热电势 $E(t, 0)$ ，并设测量回路总电阻 R_x 固定不变时，则

$$\alpha = C \frac{E(t, 0)}{R_x} \quad (1-5)$$

可见，动圈的偏转角度与热电偶产生的热电势成正比，从而对这类仪表可直接按温度量刻度。

如果测温元件为热电阻，可通过一个不平衡电桥转变成不平衡电压 U_{ed} ，再送入动圈测量机构，把(1-5)式中的 $E(t, 0)$ 换成 U_{ed} 即可，二者的测量机构是共同的。

二、仪表的结构

动圈式指示仪表，正面是刻度盘，后面有接线板，卸除外壳，即可见到装在底板上的动圈测量机构。整个测量机构包括电磁部分和电路部分。

(一) 电磁部分

1. 磁路系统 仪表采用立式外磁钢结构，如图1-2所示。它有两块圆弧形永久磁铁3，夹在极靴2和接铁4中间，两块极靴用非磁性材料铜或铝经压铸结合在一起。这种结构使极靴加工方便，底部接铁可起到磁通回路的作用。另外，永久磁铁被夹在中间，提高了磁能利用率。采用铝镍钴系永久磁铁，增强了空气隙中的磁感应强度，提高了测量机构的灵敏度。磁分路调节片6可调整空气隙中的磁感应强度，在仪表调校和维修时可作微量程用。

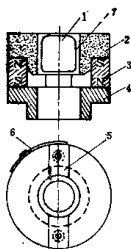


图 1-2 磁路系统示意图

1—铁芯；2—弹簧；3—永久磁铁；4—接铁；5—非磁性隔离物；6—磁分路调节片；7—空气隙

统一的动圈测量机构能测量更大的信号，同时保证测量的准确性，就要在仪表内动圈回路中配置必要的电阻元件，这些电阻元件包括温度补偿电阻 R_t 及与之并联的电阻 R_{s1} ，量程电阻 R_A ，改善阻尼特性的电阻 R_{s2} ，图 1-3 所示为动圈测量机构的电路图。

1. 温度补偿电阻 R_t 和 R_{s1} 当仪表环境温度改变后会造温度附加误差，主要有下列三个方面：

第一，弹性张丝的弹性随温度升高而减弱，因为由它产生反作用力矩，所以弹性减弱反而会造成仪表灵敏度升高。温度每升高 10°C 时，弹性约减弱 $0.3\sim 0.4\%$ 。

第二，磁铁的磁性随温度升高而减弱，所以在温度升高时会引起仪表灵敏度降低。温度每升高 10°C ，永久磁铁的磁通减弱约 $0.2\sim 0.3\%$ 。

显然第一、二两方面有互补作用，可以互相抵消一部分。剩余部分的影响使仪表灵敏度偏高。

第三，即动圈电阻值随温度升高而加大，所以在温度升高时会引起仪表灵敏度降低。一般每上升 10°C ，铜电阻值约增大 4% ，是三者中的主要影响因素，因此，在温度升高时整台仪表的灵敏度是降低的，必须采取补偿措施。

动圈仪表的温度补偿是采用热补偿器进行的。在动圈电阻 R_D 回路中串联一个由热敏电阻 R_t 和锰铜电阻 R_{s1} 组成的并联电路，如图 1-3 所示。热敏电阻具有负温度系数，其电阻值随温度上升而减小。它的热惯性小，安装在动圈附近，可以感受和动圈相同的温度。当环境温度增高后，动圈电阻 R_D 增大，但热敏电阻 R_t 减小，考虑到 R_t 温度系数太大，会造成过补偿，同时温度系数又是非线性的，因此在 R_t 上又并联一个锰铜电阻 R_{s1} ，使并联后的总电阻适合于动圈电阻 R_D 的温度系数而且接近于线性变化规律。总电阻 R 为

$$R = R_D + \frac{R_{s1} \cdot R_t}{R_{s1} + R_t}$$

如果适当选取 R_t 和 R_{s1} ，则可使温度在 $0\sim 50^\circ\text{C}$ 的范围内电阻值 R 保持基本不变，得到满意的补偿效果，见图 1-4 所示。

2. 测量程电阻 R_A 前面已经提到过动圈测量机构的电磁部分是通用的，在统一的电

2. 动圈 动圈采用无框架结构，用 $44^\#$ ($\phi 0.08\text{mm}$) 漆包铜线绕制，共 292 匝，直流电阻在 20°C 时约 80Ω 。

3. 支承系统 采用张丝支承，其转动部分无摩擦，灵敏度高，抗震，使用寿命长。

张丝支承除支承整个活动部件外，还用来产生反作用力矩，同时又作电流的引入引出线用。

4. 平衡重锤 指针杆用铝管制成，粘贴在动圈上，指针杆尾部配燕尾状平衡丝杠。丝杠上装有小平衡锤，可在丝杠上旋转移动，用来调节可动部分的重心位置，使其与转轴中心重合，保证活动系统处于平衡状态。

(二) 电路部分

国产 XC 系列动圈仪表采用的是统一的动圈测量机构。而

且是按照最小毫伏信号所需要的灵敏度进行设计的 (S 型： $0\sim 1600^\circ\text{C}$ 热电偶在满度时的热电动势为 16.771mV)。为了使

磁部分下仪表的满度电流为同一固定值。为了使统一的动圈测量机构能测量更大的信号，就要在仪表内动圈回路中串联一个电阻 R_A ，使流过动圈的电流减小。适当选择 R_A 的大小，

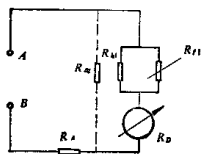


图 1-3 动圈测量机构电路图

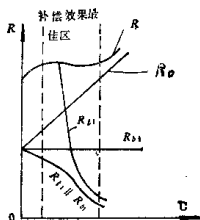


图 1-4 温度补偿曲线

就可测量不同大小的被测信号。电阻 R_A 称为量程电阻。 R_A 是在仪表出厂前标定时确定的，其数值因仪表的量程而不同，一般 R_A 在200~1000 Ω 之间。

3. 改善阻尼特性的电阻 R_{D1} 。动圈在磁场中偏转时，因切割磁力线而产生感应电势，此感应电势在动圈闭合回路中又形成感应电流。由于感应电流所产生的力矩总是阻碍动圈继续偏转的，因此它将形成阻尼力矩，此阻尼力矩的大小与感应电势的数值成正比，与动圈闭合回路的电阻成反比，即动圈闭合回路电阻愈大，感应电流愈小，阻尼力矩也愈小。因此，为了保证动圈仪表有良好的阻尼特性，就必须保证动圈闭合回路有适当的电阻值。该值主要靠并联在动圈两端的锰铜电阻 R_{D1} 来实现。

未并联电阻 R_{D1} 时，阻尼电阻 R_x 为

$$R_x = R_M \parallel R_{D1} + R_D + R_A$$

在并联电阻 R_{D1} 以后，阻尼电阻 R'_x 为

$$R'_x = R_M \parallel R_{D1} + R_D + R_A \parallel R_{D1}$$

很明显 $R'_x < R_x$ ，这就使得在测量大信号时，既保证了测量机构的灵敏度，又不会出现因阻尼电阻过大而发生欠阻尼状态。上述分析中略去了外线路电阻。

第二节 动圈仪表的测量线路

XC系列动圈测量机构的电路部分，在选定测温元件和确定量程范围之后，总电阻随着确定下来，因此保证了测量的准确性。此外，动圈仪表的整个测量线路还包括外线路电阻，外线路电阻变化同样会影响动圈仪表测量的准确性。

下面讨论配接热电偶和热电阻时，动圈仪表的外部测量线路，如图1-5所示。

一、动圈式热电偶温度计的测量线路

根据动圈仪表的测量原理，由公式(1-5)得知：

$$\alpha = C \frac{E(t, 0)}{R_x} = C \frac{E(t, 0)}{R_y + R_n} \quad (1-6)$$

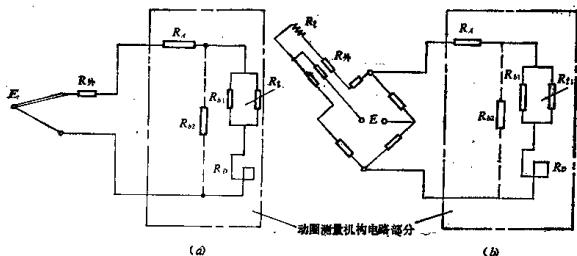


图 1-5 动圈仪表外部线路图

式中 R_g ——动圈测量机构电路部分的电阻；

R_N ——动圈仪表的外部线路电阻。

动圈式温度仪表就是在 (1-6) 式所限定的条件下进行刻度的，也就是说，动圈仪表的温度刻度值是在某一恒定的 R_g 和 R_N 值时与热电偶的毫伏值相对应的。

(一) 完整的测量线路

按照技术规定， $R_N = 15\Omega$

$$\text{则} \quad R_N = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 15\Omega \quad (1-7)$$

式中 R_1 ——热电偶电阻；

R_2 ——补偿导线电阻；

R_3 ——冷端温度补偿器内电阻；

R_4 ——锰铜丝绕制的外线路调整电阻。

R_1 、 R_2 、 R_3 在现场布线之后，数值已定，其不足之 15Ω 由调整电阻 R_4 调整之，这一点要特别注意，因为动圈仪表实质上是测电流的，制造厂家在仪表的接线柱上都装有一只 15Ω 的锰铜电阻，在出厂前对仪表进行刻度，而在实际使用仪表时，由于用户选用热电偶的规格、补偿导线长度以及其他因素，使回路电阻与仪表刻度时的电阻值不符，就会造成误差，因此布线或校验此类仪表时，应严格保证 R_N 的数值为规定值，一般 R_N 的数值标记在仪表的表盘上。

(二) R_N 的环境温度影响

因为 R_N 中所包含的各种导线都有一定的温度系数，因此环境温度变化后， R_N 也随之变化，从而会引起一定的读数误差。

因为

$$I = \frac{E_T}{R_N + R_g}$$

而指针偏角：

$$\alpha_0 = CI$$

所以

$$\alpha_0 = C \frac{E_T}{R_N + R_g}$$

当环境温度变化引起 R_N 变化为 R_N' 时，则

$$\alpha = C \frac{E_T}{R'_s + R_v}$$

故 R_s 的变化所引起的相对误差等于

$$\frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha} \times 100\% = \frac{R'_s - R_s}{R'_s + R_v} \times 100\% \quad (1-8)$$

比如仪表内阻 $R_v = 300 \Omega$, $R'_s = 19 \Omega$, 因此而带来的附加误差为 $\frac{19-15}{19+300} \times 100\% = 1.3\%$ 。可见, 只是因为外线路电阻不符合技术规定, 就已经使仪表超差了。

另外在现场布线时, 往往忽视热电阻值 R_t 随温度的变化。例如, 一支 1 米长的铂铑-铂热电阻, 在 0°C 时为 $R_1 = 1 \Omega$, 当插入深度为 0.5m , 温度上升到 1300°C 时, R_1 增加到 5Ω 左右, 由此而引起的误差可达 1.3% 。为避免这一误差, 可预先计算或实测热电阻在常用温度下的 R_1 值, 并按此值调整 R_4 , 使 $R_s = 15 \Omega$ 。

二、动圈式热电阻温度计的测量线路

动圈仪表要求输入的信号为毫伏信号, 因此必须将随温度变化的电阻值转换为毫伏值。下面首先介绍实现这种转换的线路——不平衡电桥。

(一) 不平衡电桥

如图 1-6a 所示, 三个臂 R_1 、 R_2 、 R_3 是锰铜线电阻, 第四个臂是热电阻 R_t 。另外在电桥的一个对角线 cd (又称电源对角线) 接上电源 E , 另一对角线 ab 上 (又称测量对角线) 接上电流计 A 。

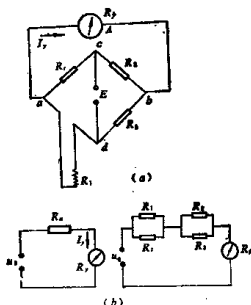


图 1-6 不平衡电桥的原理图

根据不平衡电桥的工作原理, 当被测温度为下限值 $t_{\min}$ (相应于 $R_t^{\min}$) 时, 电桥恰好处于平衡状态, 测量对角线的电流 $I_y = 0$ 。那么, 当 $t \neq t_{\min}$ 时, ($R_t \neq R_t^{\min}$) 电桥平衡被破坏, $I_y \neq 0$, 且随着 t 与 $t_{\min}$ 的偏差加大, I_y 的值也愈大。这样, 只要能推导出 $R_t - I_y$ 的关系, 就可以根据 I_y 的大小来判断被测温度值。

根据戴文宁定理, 电路中任意部分 R_y 上的电流, 等于电桥 ($R_y = \infty$ 时) 与 I_y 两端的

空载电压 U_0 除以电阻 $R_v + R_u$ 。其中 R_v 是测量机构的内阻， R_u 是电桥的等效内阻。在此

$$\begin{cases} U_0 = E \frac{R_l}{R_1 + R} - E \frac{R_3}{R_2 + R_3} \\ R_u = \frac{R_1 \cdot R_l}{R_1 + R_l} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \end{cases} \quad (1-9)$$

$$\begin{aligned} U_v &= I_v \cdot R_v = \frac{U_0}{R_v + R_u} \cdot R_v = E \frac{\frac{R_l}{R_1 + R_l} - \frac{R_3}{R_2 + R_3}}{R_v + \frac{R_1 \cdot R_l}{R_1 + R_l} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} \cdot R_v \\ &= \frac{E \cdot (R_2 \cdot R_l - R_1 \cdot R_3) \cdot R_v}{R_v \cdot (R_1 + R_l) \cdot (R_2 + R_3) + R_1 \cdot R_l (R_2 + R_3) + R_2 \cdot R_3 (R_1 + R_l)} \end{aligned} \quad (1-10)$$

由(1-10)式看出， U_v 与 R_l 呈非线性关系，也就是说不平衡电桥的转换规律 $U_v = f(R)$ 是非线性的，且电源电压 E 的数值和稳定性对 U_v 有影响。为了消除电源的影响，不平衡电桥多采用稳压电源供电。

(二) 典型不平衡电桥的设计

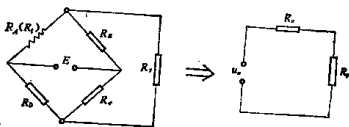


图 1-7 典型电桥及其等效电路

图中的 R_l 为热电阻，当温度为 0°C 时，初始值为 R_{l_0} ； E 为稳压电源的电压； R_B 、 R_C 、 R_D 为锰铜丝固定电阻。

桥臂电阻存在如下关系

$$\begin{cases} R_A = R_D = R_0 \\ R_B = R_C = n R_0 \end{cases} \quad (1-11)$$

称此种电桥为典型电桥。当 $R_l = R_{l_0}$ 时，有

$$\begin{cases} R_{l_0} = R_D = R_0 \\ R_B = R_C = n R_0 \end{cases} \quad (1-12)$$

即在初始状态下，四个桥臂电阻两两相等。由公式看出它们之间的电阻匹配相差 n 倍。

1. 不平衡电桥的设计要点 不平衡电桥是一个电阻型转换器，既是转换器，设计时必须首先考虑以下几个问题：

(1) 电桥的线性度问题。为了保证电桥的输出能如实的反映被转换量，要求它的转换规律是线性或尽可能接近线性。

(2) 电桥的灵敏度问题。为了能如实的反映被转换量的微小变化，要求它的转换灵敏度。也就是说，当被转换量有微小变化时，电桥的输出就有较大的反映。

(3) 为了如实反映被转换量，还应力图消除或减弱某些附加因素的影响。例如：电

源稳定性带来的影响,这对不平衡电桥来说是十分重要的,因此目前动圈式电阻温度计中的电桥采用稳压电源供电;环境温度通过铜连接导线电阻 R_s 引入的影响,采用三线补偿法予以减小,这个问题将在第二章中讨论。由于热电阻“自温升”带来的影响,要限制通过热电阻的电流不超过6mA,对于非标准型的电阻敏感元件所允许通过的电流视具体元件不同另定。

上述三项设计要点是基本的,下面只讨论前两项。

2. 桥臂电阻匹配 为了保证必要的转换线性和灵敏度,就需要进行桥臂电阻的适当匹配。

设 ΔR_t ——热电阻的增量;

$\epsilon = \frac{\Delta R_t}{R_{t_0}}$ ——热电阻的相对增量;

R_{t_0} ——初始状态下,敏感元件的电阻值。此时流过的电流为 I_{t_0} 。

桥路的空载电压输出为

$$\begin{aligned} U_0 &= E \left(\frac{R_{t_0} + \Delta R_t}{R_{t_0} + \Delta R_t + R_s} - \frac{R_D}{R_C + R_D} \right) \\ &= E \left(\frac{R_0 + \Delta R_t}{R_0 + \Delta R_t + n R_0} - \frac{R_s}{n R_0 + R_s} \right) \\ &= E \left(\frac{1 + \epsilon}{n + 1 + \epsilon} - \frac{1}{n + 1} \right) \\ &= \frac{E n \epsilon}{(n + 1)(n + 1 + \epsilon)} = \frac{I_{t_0} \cdot R_0 \cdot n \cdot \epsilon}{n + 1 + \epsilon} \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中 $E = I_{t_0} R_0 (1 + n)$ 。

分析 (1-13) 式可得出下列几点重要结论:

(1) 因为分母上有变量 ϵ ,所以电桥输出是非线性的。为了改善非线性,可用加大 n 值的办法来实现,比如当 $n+1 \gg \epsilon$ 后,分母上的 ϵ 可忽略不计,此时电桥的输出近于线性。

不过 n 值总不能取得过大。否则 $R_s = R_C$ 的阻值太大,会给生产带来困难。所以不平衡电桥总是有一定的非线性误差。非线性误差的大小可用(1-13)式推求。

(2) 如果在工作范围内电阻敏感元件的变化率 ϵ 极小,或是对电桥的线性度要求不高时就不需加大 n 值,不妨采用等臂电桥($n=1$),像热电偶冷端温度补偿电桥就是一个例子,也可以得到足够高的线性度。

(3) 从提高电桥输出电压 U_0 ,即提高灵敏度的角度看,提高电源电压 E 或提高 I_{t_0} 都可以提高灵敏度。但在任何情况下都应该保证,流过热电阻的电流小于允许值,以避免热电阻“自温升”的影响。除此而外,适当匹配 n 值也能收到一定的效果。

动圈仪表的 R_D 为有限值,并为已知量时,由于 R_D 与 R_s 相差不大,此时已不能视为开路,也就是说, R_s 对电桥的输出电压有明显影响,已不能忽视,此时非线性误差要严重一些。

3. 全国统一设计的动圈式电阻温度计用电桥 如果将(1-10)式用 ϵ 、 n 、 R_0 、 I_{t_0} 代入可写成:

$$U_v = \frac{U_0}{R_v + R_0} \cdot R_0$$

$$= \frac{I_{t_0} \cdot \varepsilon \cdot R_0 \cdot R_v \cdot n(n+1)}{(n+1+\varepsilon)[(n+1)R_v - 2nR_0] + n^2 \varepsilon R_0} \quad (1-14)$$

(1-14) 式给我们提供了一条改善非线性误差和提高灵敏度的途径, 用该式计算电桥输出太繁了, 所以仍然先假定一个 U_0 值, 计算出桥臂阻值, 使其达到 U_0 要求的值即可。

图1-8中:

r —— 固定电阻;

$R_{t_0} + r = R_A = R_0$;

$k = \frac{R_0}{R_{t_0}}$;

当 $k=1$ 时, $r=0$, 即为图1-7所表示的典型电桥。符合公式 (1-12) 的关系。在设计电桥时, 如果 I_{t_0} 和 E 都首先选好, 那么, 桥路上支路电阻将 成为定值, n 也成为定值, 即

$$R_{\perp} = R_{t_0} + R_s = (n+1)R_0 = \frac{E}{I_{t_0}} \quad (1-15)$$

$$n = \frac{R_{\perp} - R_0}{R_0} \quad (1-16)$$

由于 $R_{\perp}$ 和 n 成为定值, 所以输出电压 U_0 也成为定值, 见 (1-13) 式。在这种情况下为了控制输出电压为某一允许值 U_0 , 采用图1-8所示的电桥结构。这时

$$U_0 = E \left(\frac{R_{t_0} + \Delta R_t + r}{R_{t_0} + \Delta R_t + r + R_s} - \frac{R_D}{R_C + R_D} \right)$$

$$= \frac{I_{t_0} (R_{\perp} - k \cdot R_{t_0}) \cdot \varepsilon}{\frac{R_{\perp}}{R_{t_0}} + \varepsilon} \quad (1-17)$$

由公式看出, 当 I_{t_0} 、 $R_{\perp}$ 选定之后, k 愈大则 U_0 愈小。

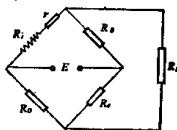


图 1-8 动圈式电阻温度计用电桥原理图

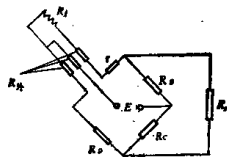


图 1-9 全国统一设计的动圈式电阻温度计用电桥

为了保证输出电压为 U_0 ，所需要的 k 值为

$$k = \frac{(I_{t0} \cdot R_{\pm} - U_0) \cdot \Delta R_{tm} - U_0 \cdot R_{\pm}}{I_{t0} \cdot R_{t0} \cdot \Delta R_{tm}} \quad (1-18)$$

根据(1-18)式，计算动圈式电阻温度计用电桥，如图1-9。

(1) 技术要求：

a. 要有足够高的灵敏度，以满足下一级动圈测量机构的要求。对非线性误差无特殊要求。量程电阻 $\Delta R_{tm} \geq 28 \Omega$ 时，电桥输出的空载电压 $U_0 \geq 16 \text{ mV}$ 。

b. 能方便地与分度号为Cu50、Cu100、Pt50、Pt100的热电阻配套应用。

c. 采用稳压电源供电， $E = 4 \text{ V}$ 。

d. 热电阻“自温升”引起的误差要小，故取 $I_{t0} = 5 \text{ mA}$ 。

e. 采用三线补偿以适应环境温度变化的要求，并规定 $R_{\text{中}} = 5 \Omega$ 。

(2) 计算：

a. 因为 E 、 I_{t0} 已选定，所以 $R_{\pm}$ 为定值，按公式(1-15)计算 $R_{\pm}$ 得

$$R_{\pm} = \frac{E}{I_{t0}} = \frac{4 \times 10^3}{5} = 800 \Omega$$

b. 为了保证 $U_0 \geq 16 \text{ mV}$ ，按公式(1-18)计算 k 值

$$k \leq \frac{(E - U_0) \cdot \Delta R_{tm} - U_0 \cdot R_{\pm}}{I_{t0} \cdot R_{t0} \cdot \Delta R_{tm}}$$

对于分度号为Cu50、 $R_{t0} = 50 \Omega$ ，代入上式，计算得

$$k_{50} \leq 14.11$$

而 $R_0 = R_{t0} + r + R_{\text{中}} = k_{50} \cdot R_{t0} = 14.11 \times 50 = 705 \Omega$

对于分度号为Pt100、 $R_{t0} = 100 \Omega$ 代入上式，计算得

$$k_{100} \leq 7.05$$

而 $R_0 = k_{100} \cdot R_{t0} = 7.05 \times 100 = 705 \Omega$ ，这样可求得起始电阻 r 如表1-2。

表 1-2

分 度 号	初始电阻 R_{t0}	起始电阻 r	$R_{\text{中}}$
Cu 50	50 Ω	650 Ω	5 Ω
Pt 100	100 Ω	600 Ω	5 Ω

c. 分配各桥臂电阻

$$R_D = R_{t0} + r = 700 \Omega$$

$$R_B = R_C = R_{\pm} - (R_{t0} + r + R_{\text{中}}) = 800 - 705 = 95 \Omega$$

为便于统一组织生产，取

$$R_B = R_C = 100 \Omega$$

此时 $R_{\pm}$ 变为 $R_{\pm} = R_0 + R_B = R_{t0} + r + R_{\text{中}} + R_B = 705 \Omega + 100 \Omega = 805 \Omega$

$$I_{t0} \text{ 变为 } I_{t0} = \frac{E}{R_{\pm}} = \frac{4 \text{ V}}{805 \Omega} = 4.97 \text{ mA}$$

d. 验算

$$U_0 = \frac{I_{t0}(R_{\pm} - k R_{t0}) \cdot \Delta R_{tm}}{R_{\pm} + \Delta R_{tm}}$$