

化学工人自学丛书

仪 表 电 路 基 础

吕砚山 编

化 工 部 出 版 社

本书根据初学者的需要,较全面而系统地阐述学习和掌握电动仪表的电路所必需的知识。内容包括电工技术基础知识、电子电路基本知识以及常用电动仪表的电路分析三个部分。对于各种物理现象及其规律的阐述以及对各种电路的分析,侧重物理概念,避开复杂的数学推演,并力求理论密切联系实际。书中附有一些例题,有助于加深对各种电路的了解,初步掌握对一般仪表电路的分析方法。

本书适合具有中等文化程度的仪表工人阅读,并可作为有关技工学校和职工业余教育的参考书。

化学工人自学丛书

仪表电路基础

吕砚山 编

化学工业出版社出版

(北京和平门七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $9^{1/8}$ 插页1字数200千字印数1-27,110

1983年4月北京第1版1983年4月北京第1次印刷

统一书号15063·3500定价0.76元

前 言

根据化学工业出版社的规划，本书是《化学工人自学丛书》之一。读者对象为具有初中以上文化程度的仪表工人。此外，本书也可作为对具有相当文化程度的职工进行业余教育时的参考教材。

大家知道，在现代化的工业生产中广泛地使用着各种形式的电动仪表。为了掌握这些仪表的工作原理并会正确地选择与使用，必须具备一定的有关仪表电路等方面的知识。本书就是为了帮助读者克服在学习和掌握仪表电路时存在的困难而编写的。内容分为三个部分。第一篇《电工技术基础知识》，介绍了直流电路、电磁关系与磁路以及交流电路最基本的知识，并且根据仪表的需要，介绍了直流电量的测量以及仪表中常用的电机和电器的工作原理。第二篇《电子电路基本知识》，结合仪表中的电子线路，着重介绍了晶体二极管与常用的整流、滤波、稳压电路以及晶体三极管与放大、振荡电路，此外也简要介绍了其他类型电子器件（场效应管、电子管、集成电路等）及其应用。第三篇《常用电动仪表电路分析》，作为前两篇基本原理的综合应用，通过典型例子，分析了动圈式仪表、自动平衡记录仪、差压变送器以及调节器的电路。

从读者对象的实际情况出发，书中对于各种物理现象及其规律尽量避免采用复杂的数学推演，力求从物理概念上给以扼要明确的说明。在各种电路的分析中，除了对一些最基本的和常用的电路，作了一些定量计算之外，其余电路着重

定性分析。书中给出一些例题，其主要目的在于帮助理论联系实际，以便读者加深对电路的了解。

最后应当说明，限于本书的宗旨和篇幅，不能指望依靠这本小册子来解决属于电动仪表的各种实际问题。本书仅仅是从电路上提供了解仪表的必要基础，是学习电动仪表的入门书，掌握了这些基础就有助于读者去进一步学习和使用电动仪表。

本书初稿承北京市电工学会理事长沈世锐副教授审阅，提出了宝贵的意见，在此深致谢意。同时向在本书的编写过程中给予其他帮助的北京工业学院化工自动化及仪表教研室薛锦诚同志，北京化工学院仪表教研室张永德、苏兆棠同志，电子工程教研室张诚庆同志，以及张晏春、陈谊同志等表示谢意。

限于时间和水平，书中错误或不妥之处难免，敬希读者批评指正。

编者

1981年5月于

北京化工学院

《化学工人自学丛书》

出 版 说 明

为了普及化工生产技术知识及理论知识，提高我国化工企业广大工人的科学技术水平，以适应加速实现化学工业现代化的需要，特组织编写出版这套《化学工人自学丛书》。

这套丛书的内容包括化学、化工技术，基础理论以及化工生产工艺和设备，并反映当代新技术、新工艺、新设备、新材料。叙述力求深入浅出，理论联系化工生产实际，便于自学。根据化学工业多行业、多工种的特点，本丛书除分册出版无机化学、有机化学、化工生产原理等基础理论和基础技术读物外，还将陆续出版主要化工生产的工艺操作、主要化工设备机器的安装和检修、生产分析、化工仪表及自动化等方面的图书。

本丛书主要供化工企业具有初中以上文化程度的工人和其他有关人员自学。通过自学，达到或接近中等专业学校毕业的水平。也可作为各化工企业的技工学校教学参考书和考工评级的参考读物；还可供化工中等专科学校教师和学生学习参考。

37297

目 录

第一篇 电工技术基础知识

第一章 直流电路	1
§ 1-1 电路及其基本物理量	1
§ 1-2 电阻及其温度特性	4
§ 1-3 电路的基本定律	7
§ 1-4 电阻的串联、并联和混联	14
§ 1-5 叠加原理与戴维南定理	18
§ 1-6 电桥电路	24
第二章 电磁关系与磁路	28
§ 2-1 磁场及其基本物理量	28
§ 2-2 电磁机械效应与一掌两掌法则	30
§ 2-3 电磁感应	34
§ 2-4 磁路与铁磁材料	38
第三章 正弦交流电路	44
§ 3-1 正弦交流电及其产生	44
§ 3-2 正弦交流电的三要素、相位差和有效值	48
§ 3-3 正弦交流电的矢量表示法	53
§ 3-4 纯电阻、电容、电感电路	58
§ 3-5 电阻、电感、电容的串并联电路	65
§ 3-6 关于三相交流电的概念	73
第四章 直流电量的测量	77
§ 4-1 概述	77
§ 4-2 磁电式电表的工作原理与电流电压的测量	78
§ 4-3 万用表的工作原理与实际线路介绍	85
§ 4-4 比较法测量的原理、特点与应用	91

第五章 仪表中常用的电机与电器	95
§ 5-1 变压器	95
§ 5-2 两相异步电动机	100
§ 5-3 直流伺服电动机	107
§ 5-4 测速发电机	110
§ 5-5 单相同步电动机	113
§ 5-6 继电器	117

第二篇 电子电路基本知识

第六章 晶体二极管与整流电路	121
§ 6-1 晶体二极管	121
§ 6-2 整流电路	125
§ 6-3 滤波与稳压电路	133
第七章 晶体三极管及放大与振荡电路	139
§ 7-1 晶体三极管	139
§ 7-2 基本放大电路	146
§ 7-3 负反馈与放大器工作性能的稳定	154
§ 7-4 多级放大的概念	162
§ 7-5 调制式直流放大器	165
§ 7-6 功率放大器	171
§ 7-7 正弦波振荡器	175
第八章 其他类型电子器件及应用概述	180
§ 8-1 场效应管	180
§ 8-2 电子管	185
§ 8-3 集成电路	194

第三篇 常用电动仪表的电路分析

第九章 动圈式仪表的电路	201
§ 9-1 动圈式显示仪表的工作原理	201

§ 9-2 动圈式显示仪表的测量电路	202
§ 9-3 动圈式调节仪表的电路	211
第十章 自动平衡记录仪的电路	217
§ 10-1 自动平衡电子电位差计的工作原理	217
§ 10-2 自动平衡电子电位差计的测量桥路	221
§ 10-3 JF-12型放大器	226
§ 10-4 自动平衡电子电桥的电路	234
第十一章 电动差压变送器的电路	238
§ 11-1 力平衡式电动差压变送器的工作原理	238
§ 11-2 高频位移检测放大器	240
§ 11-3 电源	249
第十二章 电动调节器的电路	254
§ 12-1 电动调节器的基本工作原理	254
§ 12-2 输入电路	259
§ 12-3 自激调制式直流放大器	261
§ 12-4 PID反馈电路	267
§ 12-5 关于DDZ-III型电动调节器电路的简介	269
附录 电动仪表的型号命名介绍	280

第一篇 电工技术基础知识

第一章 直流电路

§ 1-1 电路及其基本物理量

一、电路和电路图

电流流通的回路称为电路。在实际的电气设备（例如电机、电器、电动仪表等）中都存在着各种不同的电路。因此，了解电路的作用及其性质对于学习和使用这些设备是十分重要的。

电路是由电源、用电设备即负载和连接部分（导线、开关等）三者组成的。例如常见的手电筒，即由电池（电源）、灯泡（负载）和导电金属（导线）等构成简单电路，如图1-1（a）所示。

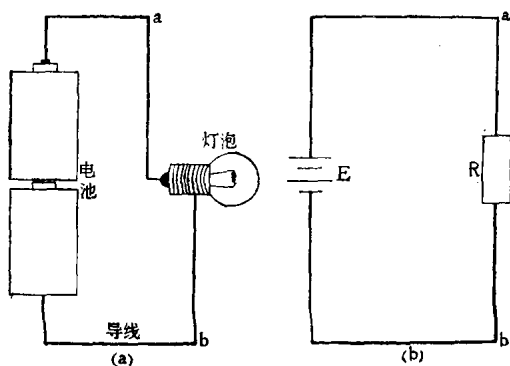


图 1-1

电源是向负载供给电能的装置，它依靠一种外力不断地把其他形式的能量转变为电能。例如电池通过化学反应将化学能变成电能；发电机通过电磁感应把机械能变成电能等。在仪表装置中，还会遇到一种特殊的电源——信号源，其主要作用不是供给电能，而是供给检测信号。例如热电偶通过热电效应把温度转变为电动势作为检测信号。上述化学反应、电磁感应、热电效应等在电源内部具有使正、负电荷分别向正、负两极集中的能力，称之为局外力或电源力。

负载是把电能转变为其他形式能量的装置。例如电灯把电能变成光能；电炉把电能变成热能；电动机把电能变成机械能等。在直流电路中最常见的是将电能变成热能的负载。这种作用是由于电荷或带电质点在导体中运动时相互碰撞或与其他原子发生碰撞，阻碍电流通过所导致的结果。在电路中可将负载中这种阻碍电流通过的作用，以电阻 R 来表示。

用图1-1 (a) 所表示的形式来画电路很不方便。在电工上为了方便起见，规定用若干简单的图形符号来表示电路的元件，如用符号 $\frac{E}{| |}$ 表示直流电源；用符号 $\text{---} \boxed{R} \text{---}$ 表示电阻等。利用这些规定的符号表示的电路图形，称为电路图。例如，图1-1 (b) 就是图1-1 (a) 所示电路的电路图。

二、电路的基本物理量

为了分析和研究在电路中所发生的物理过程，必须了解电路的基本物理量。这就是电流、电压、电位和电动势。

电流 I 电荷或带电质点在导体中有规则的运动，就形成了电流。其大小以单位时间内通过导体截面的电荷数量来表示，如1安培（简称安以A表示）就表示1秒内通过1库仑的电荷。更小些的单位为毫安（mA）即 10^{-3} 安、微安

(μA) 即 10^{-6} 安等。

电压 U 电场力使单位正电荷在电源外部由某一点运动到另一点所做的功, 就称为此两点间的电压 U 。其单位是伏特 (简称伏以 V 表示)。如果把 1 库仑的电荷由一点运动到另一点所做的功是 1 焦耳, 就称此两点间电压为 1 伏。 U 的较小单位为毫伏 (mV) 即 10^{-3} 伏、微伏 (μV) 即 10^{-6} 伏等。

电位 φ 上述电压是针对电路中两点而言的。在电路分析中常常需要知道某一点的做功能力如何。为此, 可在电路中任选一点 (通常是选公共点如接地点等) 作为参考点, 而把其他各点相对此参考点的电压称为各点的电位。例如在图 1-1 (b) 中, 如令 b 点为参考点, 则 a 点的电位就是

$$\varphi_a = U_{ab}$$

而 b 点的电位则是

$$\varphi_b = U_{bb} = 0$$

即参考点本身的电位为零。由此不难了解, 电压可以用电位差来表示, 即

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

电位的单位与电压相同。

电动势 E 局外力使单位正电荷在电源内部从负极运动到正极所做的功, 称作电源的电动势。其单位与电压、电位的单位相同。为了使电路能够正常工作, 电源必须具有电动势 E 。因此, E 是表征电源特性的一个重要参数。

必须指出, 上述 I 、 U 、 E 这三个物理量虽然都是标量, 但在电路中还具有一定的方向。我们规定 U 的方向是由高电位指向低电位; E 的方向由低电位指向高电位; 而 I 的方向在电源外部则与 U 的方向一致。通常, 在电路图中可用箭头来表示这些方向。在本章中所讨论的直流电路, 指的是

其 I 、 U 、 E 的大小与方向都不随时间 t 变化的电路，这种特性可用图 1-2 表示。

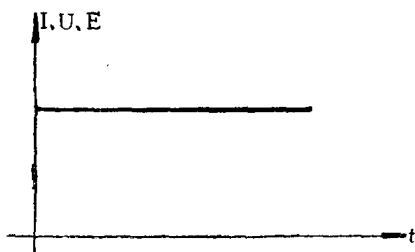


图 1-2

最后要说明在分析电路时，假定 I 、 U 、 E 正方向的必要性。因为不论 I 、 U 或是 E 的实际方向都有两种可能，在分析和计算电路时，往往事先不可能预知它们

的实际方向。为了能够运用电路的基本定律来进行计算，必须先假定一个 I 、 U 或 E 的方向作为其正方向，并标在电路图中。如果算出的结果为正值 (I 、 U 或 $E > 0$)，就表明所设物理量的方向与其实际方向一致；如果算出的结果为负值 (I 、 U 或 $E < 0$)，则表明所设物理量的方向与其实际方向相反。

§ 1-2 电阻及其温度特性

电阻是电路的重要参数之一。各种电阻元件在仪表电路中得到广泛应用。因此，了解电阻的意义及其温度特性是十分重要的。

一、电阻

根据物质的导电能力大小，可分为导体（如银、铜、铝等）、半导体（如锗、硅等）和绝缘体（如橡皮、塑料、石英等）三类。物质的这种导电能力，可用电阻来表示。导电能力越强，其电阻就越小。这里，着重讨论金属材料的电阻

R。实验表明，R的大小与金属材料的性质及其尺寸有关。例如如图1-3所示的一段金属，其电阻数值为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-1)$$

式中 ρ 是材料的电阻系数，又称电阻率，由材料性质决定，其意义为在20℃时，长1米、截面积为1平方毫米的金属材料的电阻值。 l 是此金属材料的长度，单位为米。S是其截面积，单位是平方毫米。电阻值R的单位为欧姆（简称欧，

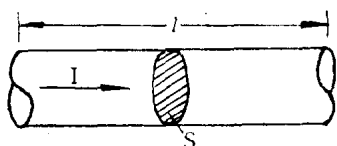


图 1-3

以 Ω 表示)。在实用中，R更大些的单位为千欧（以 $k\Omega$ 表示，有时在电路图中还简单地标记以K）即 10^3 欧，或兆欧（以 $M\Omega$ 表示，有时在电路图中还简单地标记以M）即 10^6 欧。

在电工计算上，为了方便起见，还引入了电导G和电导率 γ 这两个参数。其意义分别为电阻R和电阻率 ρ 的倒数，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

其中电导的单位为1/欧，称西门子（以S表示）。

二、电阻的温度特性

当温度变化时，不同金属材料的电阻数值将产生不同的变化。设 R_0 为其在温度 t_0 时的电阻值， R_t 为其在温度 t 时的电阻值，则二者有下列关系：

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (1-4)$$

其中 α 称为电阻的温度系数，表示当温度变化 1°C 时电阻的相对变化量。不同材料的 α 值是不一样的。表 1-1 给出了若干材料的电阻率 ρ 和电阻温度系数 α 的数值。从表中可知，除银之外，铜、铝的 ρ 均较小，故为电的良导体。 ρ 值较高的材料主要用于制造电阻元件，例如常见的线绕电阻、金属膜电阻多用镍铬合金制造，碳膜电阻用碳制造。锰铜、康铜还具有 α 较小的特点，可用作阻值较稳定的标准电阻。而铂、铜等 α 值较大的材料则可在测量仪表中用作测温电阻体。

式 (1-4) 表明，如果已知材料的电阻温度系数 α 及其在 t_0 时的电阻 R_0 ，那么此材料在任意温度时的电阻 R_t 将唯一与该温度 t 有关，即可表为 $R_t = f(t)$ 的形式。利用这种关系，就能对温度进行测量。即将温度的变化（非电量）转变

表 1-1

用途	材料	电阻率 $\rho(20^\circ\text{C})$ 欧·毫米 ² /米	平均电阻温度系数 α ($0\sim 100^\circ\text{C}$), $1/^\circ\text{C}$
导电材料	碳	10.0	-0.0005 ^①
	银	0.0165	0.0036
	铜	0.0175	0.004
	铝	0.0283	0.004
	低碳钢	0.13	0.006
电阻材料	锰 铜	0.42	0.000005
	康 铜	0.44	0.000005
	镍铬铁	1.0	0.00013
	铝铬铁	1.2	0.00008
	铂	0.106	0.00389

① 碳的 α 值为负，表示其阻值随温度升高而降低。

为电阻体的阻值变化（电量），然后用电表加以测量。这种方法在化工测量中应用甚广。

例题1-1 从表1-1中可见，铂的 ρ 及 α 值均较大（且耐高温），故在测量仪表中被用作测温电阻体。假设插在某测温点的铂电阻体在 20°C 时，阻值是 49.5Ω ，当温度变化后测得其阻值变为 60.9Ω 。问这时测温点的温度是多少？

解 由表1-1查知铂的平均电阻温度系数为 $\alpha = 0.00389\text{ }1/^{\circ}\text{C}$ ，令 $R_0 = 49.5\Omega$ ， $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ， $R_t = 60.9\Omega$ ，将以上数据代入式（1-4），得到

$$60.9 = 49.5[1 + 0.00389(t - 20)]$$

算出 $t = 80^{\circ}\text{C}$

即此时测温点的温度为 80°C 。

§ 1-3 电路的基本定律

电路分析的目的，一是要找出其中电流与电压的关系，二是要确定电能或电功率的分配或转换关系。为此，必须以电路的基本定律为依据。这些定律主要是欧姆定律、克希荷夫定律（或称基尔霍夫定律）以及焦耳-楞次定律。前两个定律用以说明电流、电压及其关系，后一个定律则说明电功或电功率与电流、电压的关系。

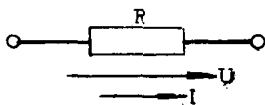


图 1-4

一、欧姆定律

如图1-4所示，当有电流 I 通过导体时，在很多情况下，此电流 I 与导体两端的电压 U 成正比，比例系数就等于导体的电阻 R 。即它们之间的关系为

$$\frac{U}{I} = R \quad (1-5)$$

此关系式称为欧姆定律。式中 U 的单位为伏， I 的单位为安， R 的单位为欧。式 (1-5) 还可表示为

$$I = UG \quad (1-6)$$

根据欧姆定律，还可将上述电阻 R 的电压电流关系用其伏安特性 $U=f(I)$ 来表示，如图 1-5 所示为一条过 0 点的直线。

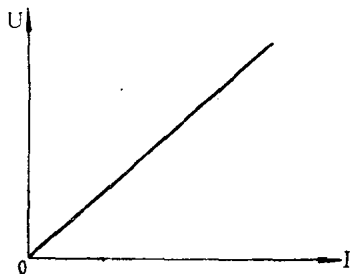


图 1-5

这种电阻称为线性电阻，即阻值 R 的大小是常数，不随 U 、 I 的数值而改变。

值得注意的是，在自动化仪表装置中有些电阻（例如晶体二极管也可以作为特殊电阻使用），其端电压与通过电流的大小是不成正比的，故不能用欧

姆定律来表达其电压电流关系。对于这种情况，仍可用伏安特性来表示，如图 1-6 所示是一条曲线。这样的电阻称为非线性电阻。

在直流电路中，当所有的电阻均为线性时，称作线性电路，而包含非线性电阻的电路则是非线性电路。后者在自动化仪表中有较多的应用。本篇主要研究线性电路。

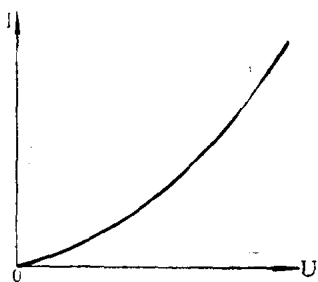


图 1-6

二、克希荷夫定律

克希荷夫定律又分为第一定律（电流定律）与第二定律（电压定律）。它们均适用于一般电路（包括线性或非线性等）。

1. 克希荷夫第一定律

设电路中具有三条或三条以上的支路，其交点称为节点。则流入和流出节点的电流代数数和为零。这就是克希荷夫第一定律。以数学形式表示可写为

$$\sum I = 0 \quad (1-7)$$

式中符号 $\sum$ 表示若干电流 I 的代数数和。这里所谓代数数和，就是要计及 I 的正负。一般可设流出节点的电流为正，流入节点的电流为负。反之亦然。以图 1-7 所示电路为例，根据克希荷夫第一定律，对于节点

A 则有

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

2. 克希荷夫第二定律

设电路中具有闭合回路，则当沿任一闭合回路循行一周时，此回路各部分上电压的代数数和等于零。这就是克希荷夫第二定律。以数学形式表示可写为

$$\sum U = 0 \quad (1-8)$$

这里计算电压的代数数和时，视各电压方向与循行方向一致者取为正，相反者为负。循行方向可取为顺时针方向也可取为逆时针方向。以图 1-8 所示回路为例，取顺时针方向为循行方向，根据克希荷夫第二定律则有

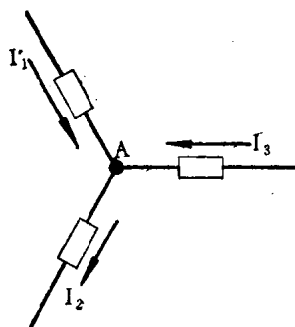


图 1-7