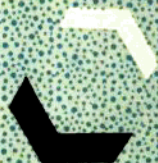


化工工人技术理论培训教材



电工基础

化学工业部人事教育司
化学工业部教育培训中心 组织编写

化学工业出版社

前 言

为了适应化工系统工人技术等级培训的需要,提高工人的技术理论水平和实际操作技能,我们依据《中华人民共和国工人技术等级标准》和《化工系统工人技术理论培训教学计划和教学大纲》的要求,组织有关人员编写了这套培训教材。

在教材编审过程中,遵循了“坚持标准,结合实际,立足现状,着眼发展,体现特点,突出技能,结构合理,内容精炼,深浅适度”的指导思想,以“等级标准”为依据,以“计划和大纲”为蓝图,从有利于教师教学和方便工人自学出发,力求教材内容能适应化工生产技术的发展 and 现代化生产工人培训的要求。

按照“中华人民共和国工人技术等级标准”规定的化工行业 168 个生产工种的有关内容,在编制教学计划和划定大纲时,在充分理解等级标准的基础上,吸取了国外职业教育的成功经验,对不同工种、不同等级工人围绕技能所要求掌握的技术理论知识进行分析和分解,作为理论教学的基本单位,称之为“单元”。在计划和大纲中,168 个工种按五个专业大类(及公共课)将不同等级的全部理论教学内容分解为 301 个教学单元。为了方便各单位开展培训教学活动,把教学计划中一些联系较为密切的“单元”合在一起,分成 112 册出版。合订后的全套教材包括以下六部分。

无机化工类单元教材共 25 册:《流体力学基础》、《管路的布置与计算》、《物料输送》、《气相非均一系分离》、《液相非均一系分离》、《物料混合》、《固体流态化与应用》、《加热与冷却》、《蒸发》、《结晶》、《浸取与干燥》、《制冷》、《焙烧与工业炉》、《粉碎与筛分》、《电渗析》、《吸附分离》、《离子交换》、《常见的无机化学反应》、《电解及其设备》、《物料衡算与热量衡算》、《合成氨造气》、《合成氨变换》、《合成氨净化》、《合成氨压缩》和《氨的合成》。

有机化工类单元教材共7册：《吸收》、《蒸馏》、《萃取》、《有机化学反应（一）》、《有机化学反应（二）》、《有机化学反应（三）》和《化学反应器》。

化工检修类单元教材共43册：《电镀》、《腐蚀与防护》、《机械传动及零件》、《液压传动与气动》、《金属材料热处理知识》、《机械制造工艺基础》、《化工检修常用机具》、《工程力学基础》、《测量与误差》、《公差与配合》、《化工机器与设备安装》、《化工压力容器》、《展开与放样》、《化工管路安装与维修》、《钳工操作技术》、《装配和修理》、《钢材矫正与成型》、《电工材料及工具》、《焊工操作技术》、《焊接工艺》、《阀门》、《化工用泵》、《风机》、《压缩机》、《化工分析仪表（一）》、《化工分析仪表（二）》、《化工测量仪表》、《电动单元组合仪表》、《化工自动化》、《集散系统》、《仪表维修识图与制图》、《仪表常见故障分析与处理》、《过程分析仪表》、《化工检修钳工工艺学》、《化工检修铆工工艺学》、《化工检修管工工艺学》、《化工检修焊工工艺学》、《化工防腐橡胶衬里》、《化工防腐金属喷涂》、《化工防腐金属铅焊》、《化工防腐砖板衬里》、《化工防腐塑料》以及《化工防腐玻璃钢》。

化工分析类单元教材6册：《化学分析的一般知识及基本操作》、《化学分析》、《电化学分析》、《仪器分析》、《化验室基本知识》和《有机定量分析》。

橡胶加工类单元教材共11册：《橡胶、配合剂与胶料配方知识》、《再生胶制作机理、工艺及质量检验》、《橡胶加工基本工艺》、《轮胎制造工艺方法》、《力车胎制造工艺方法》、《胶管制造工艺方法》、《胶带制造工艺方法》、《橡胶工业制品制造工艺方法》、《胶鞋制造工艺方法》、《胶乳制品制造工艺方法》和《炭黑制造工艺方法》。

另外还有公共课及管理课类单元教材共20册：《电工常识》、《电工基础》、《电子学一般常识》、《电子技术基础》、《机械识图》、《机械制图》、《化工管路识图》、《工艺流程与装备布置图》、《工厂照明与动力线路》、《电气识图与控制》、《电机基础及维修》、《工厂电气设备》、《工厂电气技术》、《安全与防护》、《三废处理与环境保护》、《化工计量常识》、《计算机应用基础知识》、《化工应用文书写》、《标准化基础知

识》和《化工生产管理知识》。

按照“单元”体系组织编写工人培训教材，尚是一种尝试，由于我们经验不足和教材编审时间的限制，部分教材在体系的合理性、内容的先进性、知识的连贯性和深广度的准确性等方面还不尽如人意，为此建议：

一、各单位在组织教学过程中，应按不同等级的培训对象，根据相应的教学计划和教学大纲的具体要求，以“单元”为单位安排教学。

二、工人技术理论的教学应与操作技能的培训结合起来。技术理论的教学活动除应联系本单位生产实际外，还应联系培训对象的文化基础、工作经历等实际情况，制订相应的教学方案，确定相应的教学内容，以提高教学的针对性和教学效率。

三、在教学过程中发现教材中存在的问题，可及时与我们联系，也可与教材的编者或出版单位联系，使教材中的问题得到及时更正，以利教学。

本套教材的组织编写，得到全国化工职工教育战线各方面同志的积极支持和帮助，在此谨向他们表示感谢。

化学工业部人事教育司
化学工业部教育培训中心

1996年3月

目 录

电工基础 (公 002)	1
第一章 直流电路	2
第一节 电路基本概念	2
第二节 电阻和欧姆定律	5
第三节 克希荷夫定律	8
第四节 电阻的连接	11
第五节 迭加原理	15
第六节 等效电源定理	16
第七节 电压源与电流源等效互换	19
第八节 电位计算	23
第二章 电和磁	26
第一节 电流的磁效应及磁场物理量	26
第二节 磁场对载流导体的作用	36
第三节 电磁感应定律及电感	40
第四节 自感、互感电动势和涡流	47
第三章 恒定磁通磁路	62
第一节 铁磁物质磁化	62
第二节 全电流定律	67
第三节 磁路与磁路定律	69
第四节 恒定磁通磁路计算	77
第四章 单相交流电路	84
第一节 交流电的基本概念	84
第二节 正弦量的相量表示法及相加减	93
第三节 纯电阻电路	98
第四节 纯电感电路	102
第五节 电阻与电感串联交流电路	108
第六节 电容器	115

第七节 纯电容电路	123
第八节 电阻和电容串联电路	128
第九节 电阻、电感、电容串联电路	131
第十节 线圈与电容器并联电路	136
第十一节 并联谐振电路	139
第五章 三相交流电路	148
第一节 三相电动势产生	148
第二节 发电机绕组连接	150
第三节 负载连接	152
第四节 对称三相电路计算	154
第五节 不对称三相电路计算	158
第六章 符号法	161
第一节 复数	161
第二节 复数形式欧姆定律	163
第三节 复阻抗	166
第四节 交流电路计算	168
第七章 非正弦电路	171

电 工 基 础
(公 002)

吉林化学工业公司化肥厂	袁莉文	编
	关龙一	
吉林化学工业公司化肥厂	苗继阳	
		审

第一章 直流电路

第一节 电路基本概念

电路是电流通过的路径。电路有直流、交流之分，如果在电路里流动的是直流电，这种电路叫直流电路。

一、电路的组成

一个简单的直流电路由一个小灯泡、一个电池、导线和开关组成。开关闭合时灯泡就发光。见图 1-1。

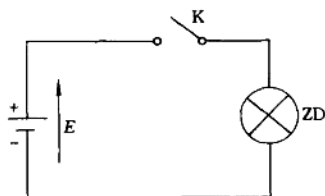


图 1-1 简单直流电路

电源是电路中电能的来源，是将非电能转变为电能的设备。负载就是电路中的各种用电设备。连接导线能把电源和负载连接成一个电路，用于输送电能。开关可根据用电需要关闭或打开。

电源、负载、连接导线及开关是构成电路的四个基本部分。

二、电动势

由图 1-1 组成的电路中，合上开关时，灯泡就会亮，这是因为有电流通过灯泡，是电源的作用。在电源内部存在着电源力，电源力能把正电荷从电源负极，经内部移动到正极而做功。衡量电源力作功能力的物理量叫作电源的电动势。用符号 E 表示。它的大小等于电源力把单位正电荷从电源负极经电源内部移动到正极所做的功。即

$$E = \frac{A_{ba}}{q} \quad (1-1)$$

式中 A ——电源力所做功，J；

q ——移动的电量，C；

E ——电动势，V。

电动势的正方向规定由负极指向正极。

三、电压和电位

在电源外部，是电场力推动电荷做功。衡量电场力作功能力的物理量为电压。电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功叫这两点间电压。即

$$V_{ab} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-2)$$

电压的单位与电动势相同，为 V，它的正方向规定由正极指向负极。电压的正方向与电动势正方向相反。

电压辅助单位还有 kV、mV、 μ V。

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}; 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}; 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

当正电荷经过灯泡时，灯泡发光，此时电能转换成热能和光能。这一过程消耗了电能，那么电荷在 a 点比 b 点具有的能量高。电路中不同的各点具有不同能量。各点能量用电位表示，电位高低是相对的，规定电路中某一点作参考点。所谓参考点就是电位为零的点。电路中某点的电位在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移动到参考点所做的功。即

$$V_a = \frac{A_{a0}}{q} = V_{a0} \quad (1-3)$$

由上式可知，某点的电位就是这点到参考点的电压。电位单位同电压单位。

由数字推导可知两点间的电位差就是这两点间的电压。即 $V_{ab} = V_a - V_b$ 。

四、电流

电荷的有规则定向移动就形成电流。电流正方向习惯上以正电荷移动的方向为正方向。负电荷运动相反方向也是电流正方向。

衡量电流强弱的物理量叫电流强度，简称电流，用 I 表示。

电流的大小等于单位时间内通过导体某一截面的电量。即

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-4)$$

电流的单位是 A。如果每秒钟有 1C 的电量通过导线的某一截面，这时的电流为 1A。

辅助单位有 kA, mA、 μ A。

$$1\text{kA}=10^3\text{A}; 1\text{mA}=10^{-3}\text{A}; 1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$$

在实际电路中很难事先知道电流的真实方向，因而常任意假定一个方向，如果电流为正；则表示电流方向与假定方向一致，反之则相反。如果不标出假定正方向，电流正负就无从谈起。

五、电功率

单位时间内所做的功叫功率。电源力或电场力在单位时间内所做的功叫电功率。简称功率。

1. 电源的功率

由电动势定义可知，电源力所做的功应为 $A_{\text{电源}} = Eq$ 。电源的功率应为：

$$P_{\text{电源}} = \frac{A_{\text{电源}}}{t} = \frac{Eq}{t}$$

由电流定义 $I = \frac{q}{t}$ 代入上式得：

$$P_{\text{电源}} = EI \quad (1-5)$$

由此可知电源的功率等于电源的电动势与通过电源电流的乘积。

2. 负载的功率

由电压定义知 $V = \frac{A}{q}$ ，则 $A_{\text{负载}} = Vq$ ，那么功率应为

$$P_{\text{负载}} = \frac{A_{\text{负载}}}{t} = \frac{Vq}{t}$$

$$P_{\text{负载}} = VI \quad (1-6)$$

负载消耗的功率等于负载两端的电压和通过负载的电流的乘积。

电源存在着内阻，它消耗功率用 $P_{\text{损失}}$ 表示。

$$P_{\text{损失}} = V_0 I \quad (1-7)$$

式中 V_0 为电源内部电压降。

功率单位为 J/s，或为 W，辅助单位有 kW。

$$1\text{kW}=10^3\text{W}$$

当功率为 1kW ，工作 1h 后，消耗的电能为 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ ，称为 1 度电。是计算电能常用的单位。

第二节 电阻和欧姆定律

一、电阻

实验表明，任何导体对电流都有一定的阻碍作用，导体的电阻就是表明导体对电流阻碍作用的物理量。金属导体的电阻是由于自由电子定向运动时与导体中的正离子发生碰撞而形成的。

电阻用 R 表示。单位是 Ω ，较大的电阻用 $\text{k}\Omega$ 、 $\text{M}\Omega$ 表表示。

$$1\text{k}\Omega = 10^3\Omega; 1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$$

1. 均匀长导体的电阻

实验证明，在一定温度下同一材料粗细均匀的长导体电阻 R ，跟它的长度 l 成正比，跟横截面积 S 成反比，并且还和材料性质有关，即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-8)$$

式中 l ——导体长度， m ；

S ——导体截面积， mm^2 ；

ρ ——导体电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

2. 电阻率

电阻率 ρ 是表示导体材料阻碍电流传导能力的物理量。在数值上等于长 1m ，横截面积为 1mm^2 的导体的电阻。一般情况下，电阻率可认为是常数。表 1-1 给出一些常用金属材料在 20°C 时的电阻率和电阻温度系数。

电阻率小的材料是良导体，如银、铜、铝。电阻常被忽略；电阻率比较高的，用来制造各种电阻元件，如锰铜、康铜、镍铬合金等；电阻率很大的材料叫绝缘体，如云母、橡皮、陶瓷等。

3. 电阻温度系数

当导体的温度发生变化时，其电阻也发生变化。一般金属导体的电阻随温度升高而增加，而炭的电阻却随温度升高而减小，还有一些随温度变化极微，如锰铜、康铜等，见表 1-1。

表 1-1 一些常用金属材料的电阻率和电阻温度系数

材料名称	电阻率 (20℃) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数 (20℃) $1/^\circ\text{C}$
银	0.0165	0.0038
铜	0.0175	0.0040
铝	0.0283	0.0042
钨	0.0551	0.0045
低碳钢	0.12	0.0042
铸铁	0.5	0.001
铂	0.105	0.00389
镍锌铜	0.34	0.00031
锰铜	0.42	0.000005
康铜	0.49	0.000005
镍铬合金	1.08	0.00013
铁铬铝	1.35	0.00005
炭	10	-0.0005

为计算导电材料在不同温度下的电阻值，我们把导体的温度每升高 1°C 时，它的电阻值增大的百分数叫做电阻的温度系数。用符号 α 表示，其单位是 $1/^\circ\text{C}$ 。

一般金属导体的电阻在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ ，可认为电阻的相对增量与温度变化成正比。即

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} = \alpha (t_2 - t_1)$$

$$\text{或} \quad R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (1-9)$$

利用金属导体的电阻随温度变化的性质，可制成电阻温度计。将其放到电气设备中，通过测量电阻变化就可以知道设备的工作温度。

【例 1-1】 在发电机内部常装有铂丝制成的电阻温度计，在 20°C 时测得它的电阻是 49.5Ω ，在发电机运行后，测得电阻是 60.9Ω ，问这时发电机的温度是多少？

解：由表 1-1 查得铂丝的平均电阻温度系数 $\alpha = 0.00389 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ 将已

知数据代入式 1-9 得

$$60.9 = 49.5 [1 + 0.00389 (t_2 - 20)]$$

解得: $t_2 = 80^\circ\text{C}$

此时发电机温度为 80°C , 发电机允许温度为 105°C , 所以发电机可以安全运行。

二、欧姆定律

欧姆定律是研究电阻、电压、电流相互关系的一条很重要的基本定律, 应用非常广泛。

一段电路欧姆定律

如图 1-2 所示电路, 由实验得出, 在一般情况下, 通过这段电路的电流 I 与这段电路两端的电压 V 成正比, 而与电阻阻值 R 成反比。即

$$I = \frac{V}{R}$$

$$\text{或} \quad V = IR; R = \frac{V}{I} \quad (1-10)$$

这就是一段电路的欧姆定律。可叙述为: 通过一段无电源电路的电流与该段电路两端之间的电压成正比, 与该段电路的电阻成反比。

应用这一定律时应注意:

- (1) 这是一段不含电源的电路。
- (2) 电阻阻值应是常数, 即是线性电阻。
- (3) 电压和电流参考正方向一致。

由线性电阻组成的电路叫线性电路。

三、全电路欧姆定律

如图 1-3 是最简单的一个完整的电路。只含有一个电源, 它的电动势为 E , r_0 为电源内阻, R 为外电路电阻。

在全电路中, 电流 I 与电源电动势 E 成正比, 与外电路的电阻和内阻之和成反比。即

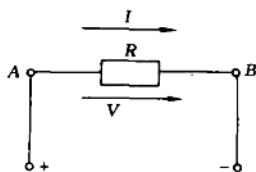


图 1-2 一段电路

$$I = \frac{E}{R + r_0}$$

或

$$E = V + Ir_0; V = E - Ir_0 \quad (1-11)$$

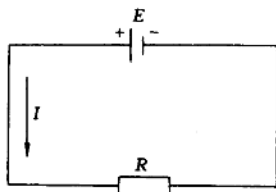


图 1-3 含一个电源的电路

V 是电源的端电压, Ir_0 是电源内部压降。电源的端电压等于电源的电动势减去内部压降。当外电阻 R 增大(或减少)时, 电流 I 及内部压降 $V_0 = Ir_0$ 随之增大(或减少)。

当 R 为无穷大时, 称作开路状态。此时电流和内部压降均为零, 电路的端电压等于电源的电动势。即

$$I = 0; V_0 = 0; V = E$$

当 R 变为零时, 就是电源两端用电阻等于零的导线连接, 称作短路状态。电流 $I_0 = \frac{E}{r_0}$ 称为短路电流。电源内阻一般都很小, 因此短路电流很大, 会造成设备损坏和人身事故, 必须防止。

应用全电路欧姆定律时应注意:

(1) 只适用于简单电路的计算。

(2) 电源电动势和内电阻是常数, 且内电阻一般不能忽略。

(3) 若有多个电动势, 须选一个电流方向, 电动势与电流方向一致时取正, 否则取负。

第三节 克希荷夫定律

克希荷夫定律像欧姆定律一样, 也是电路最基本的定律。克希荷夫定律有两条。第一定律是说明电路各部电流之间的相互关系, 第二定律是说明电路各部分电压之间的相互关系。为讲述这两个定律首先介绍几个名词。

(1) 支路 在电路中每一个分支叫支路。一个支路流过一个电流。如图 1-4 中 $CABD$ 、 CD 、 $CGFD$ 都是支路。

(2) 节点 电路中三条或三条以上支路相交的点叫节点。如图 1-4 中 C 、 D 都是节点。

(3) 回路 电路中任意一闭合路径叫回路。如图 1-4 中 $ACDBA$ 、 $CGFDC$ 、 $ACGFDBA$ 都是回路。

一、克希荷夫第一定律

按图 1-5 三个支路分别接入电流表 A_1 、 A_2 、 A_3 。 $E_1 = 40V$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 25\Omega$, $E_2 = 35V$ 。测得表 A_1 读数为 $I_1 = 7A$, A_2 的读数为 $I_2 = 4A$, A_3 读数为 $I_3 = 3A$ 。根据安培表实际接法极性, 电流实际方向见图 1-5。

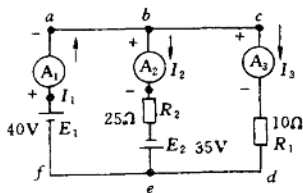


图 1-5 分析节点电流关系的电路

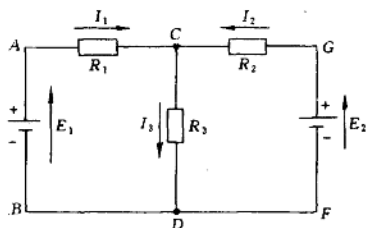


图 1-4 复杂电路

I_1 是流入节点 b , I_2 、 I_3 是流出节点 b , 且有

$$I_1 = I_2 + I_3$$

可得出结论: 流入节点的电流等于从该点流出的电流。这就是克希荷夫第一定律。

把上式改写成

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

把流入节点电流看作正的, 流出节点电流看作负的。上式可说成, 在电路的任一节点上电流的代数和等于零。即

$$\sum I = 0 \quad (1-12)$$

式中符号 $\sum$ 是“和”的意思。代数和就是相加各项有正有负。这个定律说的是节点电流相互关系又称节点电流定律。

二、克希荷夫第二定律

按图 1-6 电路接入元件, 各表的极性已标出, 测得 $V_1 = 2V$, $V_2 = 6V$, $V_3 = 28V$, $V_4 = 20V$ 。选回路为顺时针方向绕行, 即从 a 点出发绕行一周。其中电位升有: $V_3 = E_2 = 28V$, 电位降有: $V_1 = 2V$, $V_2 = 6V$,

$V_4 = 20\text{V}$, 电位降和为 $V_1 + V_2 + V_4 = 28\text{V}$ 。可以得出结论: 从回路任意

一点出发, 沿回路循环一周, 电位升的和应该等于电位降的和, 这就是克希荷夫第二定律。

对图 1-6 回路

$$V_3 = V_1 + V_2 + V_4$$

$$V_3 = E_2, V_1 = IR_1, V_2 = IR_2, V_4 = E_1, \text{ 代入上式得}$$

$$E_2 = IR_1 + IR_2 + E_1$$

移项得

$$E_2 - E_1 = IR_1 + IR_2$$

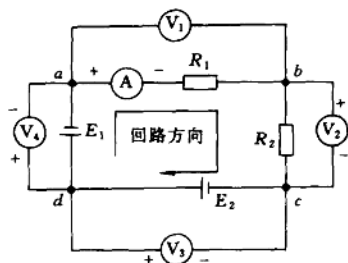


图 1-6 分析回路电压关系电路

从而得出

$$\sum E = \sum IR \quad (1-13)$$

克希荷夫第二定律可叙述为: 回路中电动势 (电位升) 的代数和等于电阻上电压降 (电位降) 的代数和。

应用克希荷夫第二定律的步骤:

- (1) 假定回路绕行方向 (顺时针或逆时针)。
- (2) 标出各支路电流正方向。
- (3) 列电动势代数与时, 电动势正方向与回路绕行方向一致时取正, 反之取负。
- (4) 列电压降代数与时, 支路电流方向与回路绕行方向一致时取正, 反之取负。

第二定律说的是回路电压之间的相互关系, 因此又称回路电压定律。

三、克希荷夫定律的应用 (支路电流法)

欧姆定律只适于单一回路的简单电路的分析计算。对于多回路即复杂电路则应用克希荷夫定律。

【例 1-2】 以图 1-4 为例说明, 已知 $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 5\Omega$, $R_3 = 6\Omega$, $E_1 = 140\text{V}$, $E_2 = 90\text{V}$ 。求各支路电流。

解：先假定各支路电流正方向，根据第一定律列出节点电流方程。两个节点，只能列出一个独立方程，

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1)$$

根据第二定律列出二个独立回路电压方程。沿 $ACDBA$ 及 $GCDFG$ 列电压方程。

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 \quad (2)$$

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3 \quad (3)$$

将已知数据代入式 (2)、式 (3) 得式 (4)、式 (5)

$$140 = 20I_1 + 6I_3 \quad (4)$$

$$90 = 5I_2 + 6I_3 \quad (5)$$

解 (1)、(4)、(5) 联立方程组得：

$$I_1 = 4A; I_2 = 6A; I_3 = 10A$$

用克希荷夫定律解复杂电路的方法是：

- (1) 标出各支路电流正方向。
- (2) 根据第一定律列节点电流方程。
- (3) 根据第二定律列出不足的电压方程。
- (4) 解联立方程组求出未知量。

此种方法是以各支路电流为未知量，求解复杂电路的，因而又叫支路电流法。支路电流法是解复杂电路最基本的方法。但对于超过三条支路的复杂电路要解多元方程组，计算起来很麻烦，可选其他方法。

第四节 电阻的连接

一、电阻的串联

如果把几个电阻首尾相接，流过同一电流，这种连接方式叫串联。见图 1-7。

电阻串联电量关系为：

- (1) 各电阻流过同一电流，即 $I = I_1 = I_2$ 。
- (2) 总电阻等于各电阻之和，即 $R = R_1 + R_2$ 。
- (3) 总电压等于各电阻的电压之和，即 $V = V_1 + V_2$ 。
- (4) 分压公式，即电压分配与电阻成正比，电阻大的电阻分配的