

电 工 学 基 础

电气检修工人中级技术培训教材

牛玉山 吴龙一

成都科技大学出版社

内 容 提 要

本书内容,共分六章,有电荷与电场、直流电路、电磁关系、单相交流电路、三相交流电路、电气安全知识。教材起点是在完成初级技术培训的基础上,进一步掌握电工基础的基 本理论。具有初中毕业文化即可接受。本教材具有通俗易懂,紧密结合生产实际,适合 成人学习的特点,书中所举的例题,大多是生产中常遇到的,每章后有小结和习 题,以供复习之用。

电 工 学 基 础

牛玉山 吴龙一 编著

成都科技大学出版社出版、发行

四川省新华书店经销

华西医科大学印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/32 印张 11

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数: 1—15000册 字数: 235千

ISBN7-5616-0150-6/TM·5 (课) 定价: 3.10元

前 言

1981年,原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》,确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三阶段进行技术培训。为此,组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲(试行)》,编写了相应的教材,有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作,初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况,取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准(通用部分)》进行了全面修订,原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求,而且缺少高级部分;编写的教材,由于时间仓促、经验不足,在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此,原机械工业部根据新《标准》,重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》(初、中、高级),于1987年3月由国家机械工业委员会颁发,并根据培训计划、大纲的要求,编写了配套教材148种。

这套新教材的编写,体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神,坚持了文化课为技术基础课服务,技术基础课为专业课服务,专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上,力求以

基本概念和原理为主,突出针对性和实用性,着重讲授基本知识,注重能力培养,并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发,努力做到理论联系实际,通俗易懂,具有工人培训教材的特色,同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接,便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位,组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人,在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际,谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员,各地的组织领导者,以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意!

编好、出好这套教材不容易;教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误,我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题,及时提出批评和指正,以便再版时修订,使其更完善,更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会
技工培训教材编审组

1987年11月

目 录

第一章 电荷和电场	(1)
第一节 电荷和电场	(1)
第二节 电场中的导体	(15)
小结	(20)
习题	(23)
第二章 直流电路	(25)
第一节 电路及其几个基本物理量	(25)
第二节 电阻	(31)
第三节 欧姆定律	(34)
第四节 克希荷夫定律	(40)
第五节 电流做功和功率	(47)
第六节 电流的热效应	(51)
第七节 电阻的串联、并联、混联	(52)
第八节 直流电路中电位的计算	(62)
第九节 直流电路功率的计算	(67)
第十节 复杂直流电路计算	(70)
小结	(88)
习题	(97)
第三章 电和磁	(101)
第一节 电流的磁场	(101)
第二节 电磁感应	(125)
第三节 简单磁路与交流励磁线圈	(144)
小结	(164)
习题	(171)
第四章 单相交流电路	(175)

第一节	交流电的概述	(175)
第二节	正弦电动势的产生	(177)
第三节	相位、初相位和相位差	(180)
第四节	正弦电流的有效值	(183)
第五节	正弦量的相量表示法	(185)
第六节	正弦交流电加减	(188)
第七节	纯电阻电路	(192)
第八节	纯电感电路	(198)
第九节	电阻与电感串联交流电路	(205)
第十节	电容器	(215)
第十一节	纯电容电路	(227)
第十二节	电阻和电容串联的交流电路	(233)
第十三节	电阻、电感、电容串联电路	(238)
第十四节	线圈与电容器并联电路	(245)
第十五节	并联谐振电路	(248)
第十六节	功率因数的提高	(251)
	小结	(255)
	习题	(265)
第五章	三相交流电路	(268)
第一节	概述	(268)
第二节	三相交流电动势的产生	(268)
第三节	发电机绕组的连接	(271)
第四节	负载的星形连接	(275)
第五节	三相电功率	(285)
	小结	(289)
	习题	(292)
第六章	电气安全知识	(295)

第一节	化工厂的供电	(295)
第二节	电工安全技术	(300)
	小结	(336)
	习题	(341)

第一章 电荷和电场

第一节 电荷和电场

一、电荷

究竟什么是电？还得从物质的结构谈起。

物质都是由许多肉眼看不见的基本粒子构成的。也就是说，物质由分子构成，分子由原子构成。

原子是由带正电的原子核和核外带负电的电子所组成。一般，原子作为一个整体不显电性，呈中性状态。中性的原子若失去电子，就带正电荷，成为正离子；中性的原子若获得电子，就带负电荷，成为负离子。

可以通过两个不同质料的物体，例如丝绸和玻璃棒，互相摩擦后，都能吸引羽毛、纸片等轻微物体，这时，我们说这两个物体已处于带电状态中，也就是说它们分别带了电。这是由于在摩擦过程中，温度升高增强了物体内分子、原子的热运动，使一种物体（如玻璃棒）失去了电子，使另一个物体得到电子。从而，它们分别带有正电荷和负电荷，处于带电状态。处于带电状态的物体称为带电体。实验证明，物体所带的电有两种，而且只有两种，称为正电和负电。带同号电的物体互相排斥，带异号电的物体互相吸引。这种相互作用称为电性力。电性力与万有引力有些相似。但万有引力总是互相吸引的，而电性力却随异号电或同号电而有吸引与排

斥之分。根据带电体之间的相互作用力，我们能够确定物体所带电荷的多少。表示物体所带电荷多少程度的物理量称为电量，亦称电荷量，用符号 Q 或 q 表示。国际单位制中，电量的单位是库仑，单位符号 C 。每一个电子所带的电量和每一个质子（即原子核中唯一带正电荷的基本粒子）所带的电量相等，为 $1.602 \times 10^{-19} C$ 。 $1C$ 约等于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量。

实验证明，无论是摩擦起电过程，还是其他使物体带电的过程中，正负电荷总是同时出现的，而且这两种电荷的量值也一定相等。当两种异号电荷相遇时，能互相中和，如果原来两种异号电荷的量值相等，经中和后物体就不带电了。由此可见，当一种电荷出现时，必然有相等量值的异号电荷同时出现；一种电荷消失时，也必然有相等量值的异号电荷同时消失。在一隔离的系统内，无论进行怎样的物理过程，系统内电量的代数和总是保持不变。这个由实验总结出来的定律称为电量守恒定律。

二、库仑定律

在研究静电现象的过程中，我们经常用到点电荷这个概念。点电荷是带电体的理想模型。只有在具体问题中，当带电体的形状和大小可以忽略不计时，才可把带电体看作点电荷。在实际运用中，如果带电体本身的大小，相对于带电体之间的距离为很小时，带电体就可以看作点电荷。

1785年，库仑从实验结果总结出点电荷之间相互作用的基本规律，称为库仑定律。库仑定律叙述如下：在真空中， q_1 和 q_2 两个点电荷之间的相互作用力的方向沿着这两个点电荷的连线，作用力的大小与电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比，

而与这两个点电荷之间的距离 r 的平方成反比，即

$$f = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

式中 k 是比例系数，等于 $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 。

必须注意，在一般情况下，不能任意地把带电体都当作点电荷，直接应用库仑定律计算带电体之间的作用力。

为了进一步叙述在一般电介质中带电体之间相互作用的情况，我们首先引入真空情况下的介电系数 ϵ_0 。真空的介电系数 ϵ_0 ，同比例系数 k 有如下关系，即

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

在一般电介质中，带电体之间相互作用的情况是相当复杂的。现在，我们只介绍一种最简单的情况，这就是在“无限大”（即电介质的边缘离开点电荷很远）的均匀电介质中两个距离为 r 的点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力。实验证明，这时，这两个点电荷之间的相互作用力要比在真空中时小 ϵ_r 倍。所以，在无限大的均匀电介质中的库仑定律表达式为

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{q_1q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_1q_2}{r^2}$$

式中 ϵ_r ——电介质的相对介电系数。

$\epsilon_r\epsilon_0 = \epsilon$ 称为电介质的介电系数。

在国际单位制（SI）中上式各物理量的单位：

q ——库仑（C）；

r —— 米 (m);

F —— 牛顿 (N)。

当式中点电荷 q_1 、 q_2 为同种电荷时,两者间的作用力为斥力;当点电荷 q_1 、 q_2 为异种电荷时,两者间的作用力为引力。参看图1-1-1。

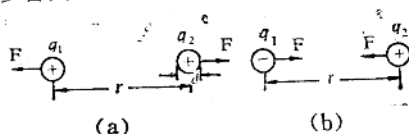


图1-1-1 两个点电荷之间的作用力

我们也可以把带电的正负作为 q_1 、 q_2 的代数符号代入库仑定律的公式中,那么计算结果当 F 为正时,就表示两电荷间的相互作用力是斥力;当 F 为负时,就表示两电荷间的相互作用力是引力。因此由库仑定律得出电荷之间的相互作用力常称为库仑力或静电力。

除真空的 ϵ_r 规定为1外,各种电介质的 ϵ_r 都大于1(参看表1-1-1)。

表1-1-1 电介质的相对介电系数

电 介 质	相对介电系数
真空	1
空气 (1大气压)	1.000585
氢 (1大气压)	1.000264
玻璃	5~10
云母	6~8
硬橡胶	4.3
硫	4.2
乙醇 (液体 C_2H_5H)	25.7
纯水	81.5

在电介质中电荷之间的相互作用力较在真空中为小这一事实，可以用束缚电荷来解释。因为电介质极化后，在点电荷周围所出现的束缚电荷总是与点电荷异号的（参看图1-1-2），束缚电荷的作用就相当于减少点电荷的电量，因而在电介质中点电荷之间的相互作用力就显得小一些。



图1-1-2 电介质对
电荷间相互作用
的影响

〔例题1〕 计算氢原子内电子和原子核之间的静电作用力与万有引力的比值。

〔解〕 已知在氢原子内，电子和原子核之间的距离为

$$\begin{aligned} r &= 0.529 \times 10^{-8} \text{ [米]} \\ &= 0.529 \times 10^{-10} \text{ [厘米]} \end{aligned}$$

电子的质量为

$$\begin{aligned} m &= 9.11 \times 10^{-28} \text{ [克]} \\ &= 9.11 \times 10^{-31} \text{ [千克]} \end{aligned}$$

氢原子核的质量为

$$\begin{aligned} M &= 1.67 \times 10^{-24} \text{ [克]} \\ &= 1.67 \times 10^{-27} \text{ [千克]} \end{aligned}$$

电子和原子核所带的电量相等，为

$$q_1 = q_2 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ [库伦]}$$

万有引力恒量为

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ [牛顿] [米]}^2 \text{ [千克]}^{-2}$$

电子和原子核之间的静电力为

$$\begin{aligned} f_e &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \\ &= \frac{1}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12}} \cdot \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \\ &= 8.23 \times 10^{-8} \text{ [牛顿]} \end{aligned}$$

电子和原子核之间的万有引力的比值为

$$\frac{f_e}{f_m} = 2.27 \times 10^{39}$$

可见在原子内，电子和原子核之间的静电力远比万有引力为大，因此，在处理电子和原子核之间相互作用时，只需考虑静电力，万有引力可以忽略不计。

〔例题2〕 小球A和B各带正电荷Q库仑，相距r时，相互间的斥力为F，求：（1）当A球与B球相距为2r时，相互间的斥力为多少？（2）若A球带电量增为2Q，则它们之间的斥力为多少？（3）如电量、距离都没有改变，但把它们放在相对介电系数为 ϵ_r 的电介质中，它们之间的斥力又是多少？

〔解〕（1）当小球的带电量没有变化而距离从r变化到2r时，从库仑定律可以知道，它们之间的斥力与距离的平方成反比，即

$$\frac{F_1}{F} = \frac{r^2}{(2r)^2} = \frac{1}{4},$$

式中 F_1 为当距离变为2r时，它们之间的斥力，

$$F_1 = \frac{1}{4}F。$$

(2) 当距离 r 不变时, 由库仑定律知道, 斥力与电量的乘积成正比, 即

$$\frac{F_2}{F} = \frac{2Q \cdot Q}{Q \cdot Q} = 2,$$

式中 F_2 为当 A 球的带电量变为 $2Q$ 时, 它们之间的斥力

$$F_2 = 2F。$$

(3) 放在电介质中的点电荷间相互作用力为在其他条件相同情况下的作用 F 力的 $1/\epsilon_r$ 倍, 即

$$F_3 = \frac{1}{\epsilon_r} F。$$

式中 F_3 为点电荷放在相对介电常数为 ϵ_r 的电介质中时, 它们之间的斥力。

【例题3】 两个带有等量同种电荷的小球, 质量各为 1.0×10^{-4} 千克, 各用 0.5 米长的细线挂在同一点上, 在空气中两球因彼此相斥而张开, 平衡时, 两球相距 0.2 米, 求每个小球所带的电量, 参看图 1-1-3。如果把这两个小球浸在 $\epsilon_r = 4$ 的煤油中而仍相距 0.2 米时, 小球所带电量又应是多少?

【解】 取 A 球研究。设 A 球带电量为 q , 小球在重力 $\vec{mg}$ 、细绳张力 $\vec{T}$ 和库仑力 $\vec{F}$ 作用下处于平衡状态。从受力图可知

$$\frac{F}{mg} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{AC}{OC} = \frac{0.1}{\sqrt{0.5^2 - 0.1^2}}。$$

在空气中, $F = k \frac{q^2}{r^2}$; 在煤油中, 如果小球所受浮力与其他力相比

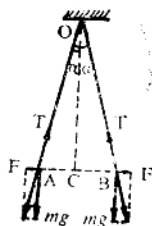


图 1-1-3

可忽略不计，库仑力 $F' = k \frac{q'^2}{\epsilon_r r^2}$ ，式中 ϵ_r 为煤油的相对介电常数。

那么在空气中

$$\begin{aligned} q &= r \sqrt[3]{\frac{F}{k}} = r \sqrt[3]{\frac{mg \operatorname{tg} \alpha}{k}} \\ &= 0.2 \sqrt[3]{\frac{1.0 \times 10^{-4} \times 9.8}{9 \times 10^9}} \times \frac{0.1}{\sqrt{0.5^2 - 0.1^2}} \\ &= 3.0 \times 10^{-8} \text{ (库) }。 \end{aligned}$$

在煤油中

$$\begin{aligned} q' &= r \sqrt[3]{\frac{\epsilon_r F'}{k}} = \sqrt{\epsilon_r} \cdot r \sqrt[3]{\frac{mg \operatorname{tg} \alpha}{k}} \\ &= \sqrt{\epsilon_r} q = \sqrt{4} \times 3.0 \times 10^{-8} \text{ (库) }。 \end{aligned}$$

三、电场、电场强度、电力线

在点电荷之间，在点电荷与带电体之间或者在带电体之间具有一段距离，然而它们相互之间确实存在相互作用，那么它们之间的作用是怎样发生的呢？上世纪初，法拉第提出，在带电体周围存在电场，其他带电体所受到的电性力（即电场力）是由电场给予的。这种作用可表示如下：

$$\text{电荷} \longleftrightarrow \text{电场} \longleftrightarrow \text{电荷}。$$

近代物理也证明了这一点。人们认识到：凡是有电荷，它的周围就存在一种特殊物质叫做电场。电场对于处在它中间的其他电荷都有力的作用，因此电荷之间是通过电场发生相互作用的。

场与分子、原子等实物一样，都具有能量、动量和质量。所以我们说，场也是物质的一种形态。

相对于观察者为静止的带电体周围所存在的电场，称为静电场。静电场的重要对外表现有：

(1) 引入电场中的任何带电体都将受到电场所作用的力；

(2) 电场能使引入电场中的导体或电介质分别产生静电感应现象或极化现象；

(3) 当带电体在电场中移动时，电场所作的力将对带电体做功，这表示电场具有能量。

实验告诉我们，电场是分布在一定范围空间中的，因此，要描述电场的性质，就必须研究电场中每一点的情况。

电场中任一点处电场的性质，可利用试验正电荷 q 来进行研究。试验电荷是一个足够微小的点电荷。首先，试验电荷所带的电量必须很小，即当引入电场后，在实验精确度的范围内，不会对原有电场有任何显著的影响。其次，试验电荷所占据的空间必须很小，即当放在电场中时，占有确定的位置。

我们做一个如图1-1-4所示的实验，在带电体 Q 电场中，把检验电荷先后放在 a 、 b 、 c 、 d 各位置，观察电场对它们

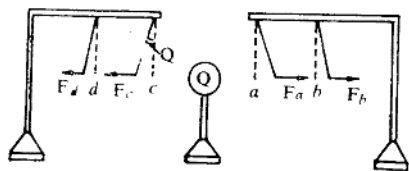


图1-1-1 用检验电荷测场强

的作用力 $\vec{F}_a$ 、 $\vec{F}_b$ 、 $\vec{F}_c$ 、 $\vec{F}_d$ ($\vec{F}$ 的大小可以从丝线对铅垂线

偏角的大小确定)。可以看出，在电场中不同点处所受电场力的大小一般是不相同的，而且方向也可能是不同的。这说明电场中不同的点，电场强弱、方向是不同的。

现在我们研究电场中任一点a的性质，根据库仑定律，q在a点所受的库仑力设为 $\vec{F}_a$ 。如果把检验电荷的电量先后增大为 $2q, 3q, \dots, nq$ 时，则它所受的电场力将增大为 $2\vec{F}_a, 3\vec{F}_a, \dots, n\vec{F}_a$ ，而力的方向不变。因此，对于电场中固定的某一点来说，比值 $\frac{\vec{F}_a}{q} = \frac{2\vec{F}_a}{2q} = \frac{n\vec{F}_a}{nq} =$ 恒量，它不随检验电荷的电量改变而改变。同理，在电场中的一系列不同点b、c、d的 $\frac{\vec{F}_b}{q}, \frac{\vec{F}_c}{q}, \frac{\vec{F}_d}{q}$ 分别也都是恒量。但是应该注意到，一般情况下，不同点的 $\frac{\vec{F}_i}{q}$ （ $i = a, b, \dots, n$ ）比值是不相等的。如果检验电荷相同，在比值大的点，检验电荷所受的电场力就大，表明该点的电场强，所以比值 F/q 反映了电场本身的性质。 $\frac{F}{q}$ 比值在电场任意位置均为恒量这一事实也表明与检验电荷的电量无关。所以，在电场中某一点放与不放检验电荷，电场是客观存在的。为了表征电场的性质，我们把检验电荷所受的电场力 $\vec{F}$ 跟它的电量 q 之比，称为该点的电场强度，简称场强，用符号E表示。写成公式

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

因为力 $\vec{F}$ 是矢量，所以电场强度也是矢量，其方向规定为正电荷在该点所受电场力的方向。