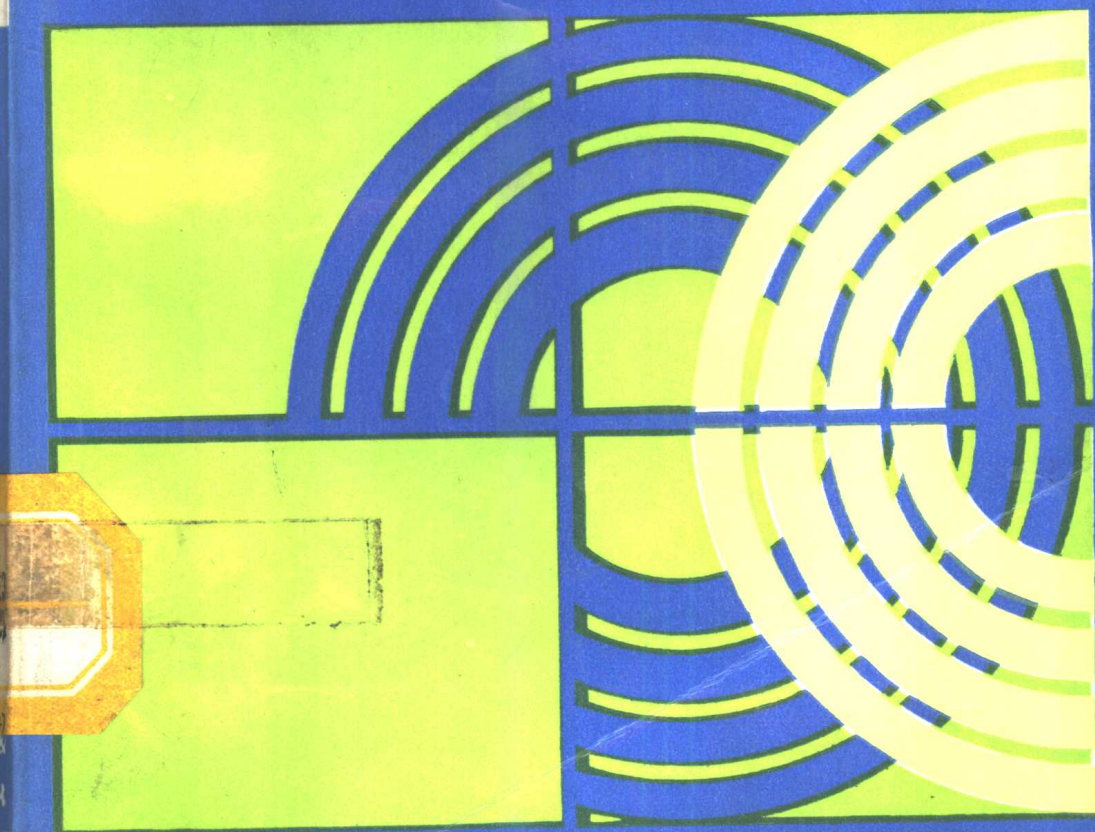


无线电高级技术工人培训教材

电 路 基 础



无线电高级技术工人培训教材

电 路 基 础

航空航天工业部教育司组织编写

宇航出版社

(京) 新登字181号

本书系航空航天工业部无线电高级技术工人培训教材之一，根据原航天工业部颁发的《工人技术等级标准》及《航天无线电类高级技工培训教学大纲（试行）》的要求编写而成。内容包括：电路的基本概念和基本定律、直流电路的分析方法、正弦交流电路、符号法、正弦电路中的谐振、互感、三相正弦电路、非正弦周期电路、简单电路中的过渡过程。每章均有小结和习题，书末附有习题答案。

本书由曾祖佑、陈纪荣、张祥宝、徐宝珍编写，曾祖佑主编；王庸松、韩宝珊主审。

电 路 基 础

航空航天工业部教育司组织编写

责任编辑：崔素言

*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京和平里滨河路1号 邮政编码100013

各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：11.875 字数：316千字

1992年7月第1版第1次印刷 印数：1—5000

ISBN 7-80034-416-9/TN·036 定价：6.65元

航空航天部高级技术 工人培训教材编审委员会

(无线电类)

主 副 委	编 主 员	靖叔平		
		李志黎	曾 寿	刘正川
		(按姓氏笔划排列)		
		王庸松	毛吉范	尹惠芬
		刘以良	任国臣	江德福
		李 波	陈震雷	沈绪榜
		宋久春	张一中	张龙元
		张宏儒	郑济民	杭长鸣
		周沛钧	姜明河	姚英杰
		柴人奇	赵增文	钱家正
		袁孝康	曹祥林	曹舜民
		黄德祥	蒋轩祥	程银海
		韩宝珊	楼维桥	穆 虹
		鄯新泰		
工 作 人 员		刘 杭	孙定富	施丽芳

2007/08

总 序

我国航天事业的发展正处在型号更新换代、人员新老交替和技术设备更新改造的历史发展时期。在有效地补充航天型号和民品开发研制队伍所需专业技术人才的同时,造就一大批高级技术工人,已成为发展我国航天事业刻不容缓的重要任务。

近几年来,各单位有领导、有组织、有计划地开展了中、高级技术工人培训,培养了一批生产骨干,他们在生产中发挥了很大作用。为使“八五”期间高级技术工人培训作制度化、规范化、科学化,推进工人技术培训工作的开展,加速技术工人队伍的建设,改变高级技术工人队伍后继乏人的局面,根据原航天工业部颁发的《工人技术等级标准》和《航天无线电类高级技术工人培训教学大纲(试行)》的要求,航空航天工业部教育司委托上海航天局主编无线电高级技术工人培训教材。在部教育司的指导下,成立了航空航天部高级技术工人培训教材编审委员会(无线电类),负责教材的组织领导工作。

本套教材包括:《实用数学》、《电路基础》、《电子工程制图及电子设备结构》、《电子测量技术》、《数字逻辑电路基础》、《模拟电子技术基础》和《电子产品装调技术》。

本套教材的适用对象主要是通过中级技术理论培训合格的学员、技工学校毕业生、职业高中毕业生(无线电工种),技能达到四~六级的无线电技术工人;也可作为高级技术工人及工人技师聘任考核的技术理论参考教材,还可作为有关技术人员、管理人员、教师及大、中学生的参考书。

本套教材的特点是:具有科学性、针对性、实用性、先进性,适当注意与中级技工培训教材的衔接以及各书之间、各章节之间的系统性,努力吸收国内外航天电子产品生产中的先进工艺、先进方法、检测手段和管理经验,体现航天特色。教材内容的深度广度力求适中,各办学单位在教学时,可根据实际情况对教学内容酌情增减。

本套教材是采用科研、生产和教学三结合的方法,由上海航天局和一、二、三、五院选派了24名高级工程师、工程师和副教授担任主编和编写工作。同时,聘请了150余名研究员、高级工程师、教授、副教授、工程师担任学科主审和参审工作,还特地聘请了有关设计、工艺专家对书稿进行技术把关,最后交由宇航出版社出版。

本套教材在编写、审定和出版过程中,部教育司、上海航天局、宇航出版社的领导始终给予大力支持和指导,并得到了一、二、三、五院、〇六一基地、〇六二基地教育处,三院200厂、210厂、北京航天工程学院,二院二部、23所、25所、706所,三院239厂、159厂、三航校,五院539厂,上海航天局上广厂、上有厂、新华厂、新江厂、新中华厂、新卫厂、新光厂、八部、803所,部直属289厂、771所、华北航天工业学院和北方交通大学、上海第二工业大学、上海纺织局职工大学等单位的大力协助和支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,经验不足,时间仓促,错误和不当

之处在所难免，敬请读者批评指正。

航空航天工业部高级技术工人培
训教材编审委员会（无线电类）

1991年6月

前 言

本书作为电路的基础知识，为“模拟电子技术”等专业技术课程和技能培训提供必要的理论基础。书中用微积分和复数等数学工具对直流电路、正弦交流电路和非正弦周期电路进行定性及定量分析。“符号法”用复数对正弦电路分析计算，是一种非常简便、有效的方法。电路按其元件性质可分为线性和非线性两类，本书只讨论线性电路。电路的状态有稳态和暂态两种，本书前八章讨论电路的稳态，第九章着重讨论电路的暂态。在第一、二、九章中还分析了含有受控源的电路。书中对各种“等值变换”方法作了介绍，其中包括互感消去法。

本书教学时数为120教时。“三相正弦电路”这一章可作为选学内容。

本书由曾祖佑主编，并编写第一、三、四章，陈纪荣编写第二、九章，张祥宝编写第五、八章，徐宝珍编写第六、七章。全书由王庸松、韩宝珊担任主审。

敬请读者对本书的缺点、错误提出批评。

编 者

1990年10月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	(1)
第一节 电流、电压、电位和电动势.....	(2)
第二节 电流、电压、电动势的参考方向.....	(7)
第三节 欧姆定律、电阻、电导和电功率.....	(10)
第四节 电压源.....	(16)
第五节 基尔霍夫定律.....	(18)
第六节 电阻的联接.....	(22)
第七节 电流源及电源的等值变换.....	(28)
第八节 受控源.....	(31)
小结	(35)
习题.....	(36)
第二章 直流电路的分析方法	(44)
第一节 支路电流法.....	(44)
第二节 回路电流法.....	(46)
第三节 节点电压法.....	(57)
第四节 迭加原理.....	(64)
第五节 戴维南定理.....	(70)
第六节 星形网络与三角形网络的等值互换.....	(80)
第七节 负载获得最大功率的条件.....	(86)
小结.....	(90)
习题.....	(91)
第三章 正弦交流电路	(100)
第一节 交流电的基本概念.....	(100)

第二节	正弦交流电	(103)
第三节	有效值和平均值	(108)
第四节	电阻元件的交流电路	(112)
第五节	电感	(116)
第六节	电感元件的交流电路	(122)
第七节	电容	(125)
第八节	电容元件的交流电路	(128)
第九节	电阻、电感、电容元件的串联交流电路	(131)
小结		(139)
习题		(141)
第四章	符号法	(145)
第一节	符号法——复数在正弦电路中的应用	(145)
第二节	用符号法计算电阻、电感、电容串联电路	(154)
第三节	用符号法计算电阻、电感、电容并联电路	(161)
第四节	复阻抗与复导纳的等值互换	(166)
第五节	用符号法计算复杂的正弦电路	(169)
第六节	功率因数的提高	(173)
第七节	正弦电路负载获得最大功率的条件	(176)
小结		(178)
习题		(179)
第五章	正弦电路中的谐振	(186)
第一节	串联电路中的谐振	(186)
第二节	串联谐振电路的频率特性和选择性	(194)
第三节	并联电路中的谐振	(202)
小结		(215)
习题		(217)
第六章	互感	(219)
第一节	互感现象	(219)
第二节	互感线圈的同名端	(224)
第三节	互感线圈的联接	(229)

第四节	互感正弦电路的计算	(239)
第五节	空心变压器	(243)
小结		(248)
习题		(249)
第七章	三相正弦电路	(253)
第一节	三相电动势	(253)
第二节	三相负载的两种联接方式及其计算	(259)
第三节	三相功率	(268)
小结		(272)
习题		(274)
第八章	非正弦周期电路	(276)
第一节	非正弦周期信号波的分解	(276)
第二节	有效值、平均值和平均功率	(292)
第三节	非正弦周期电路的计算	(295)
小结		(306)
习题		(307)
第九章	简单电路中的过渡过程	(310)
第一节	过渡过程及换路定律	(310)
第二节	经典法概述	(318)
第三节	RC 短接时的过渡过程	(321)
第四节	RC 并联电路与直流电流源接通时的过渡过程	(328)
第五节	LR 串联电路的过渡过程	(336)
第六节	三要素法	(347)
小结		(352)
习题		(354)
习题答案		(359)
参考资料		(366)

第一章 电路的基本概念和 基本定律

电路是电流通过的路径。它由各种电工设备或元件组成。电路分为电力电路和电讯电路。电力电路的作用是将其他形式的能量转换成电能，对电能传输和分配后，再将电能转换成所需要的其他形式的能量。供给电能的设备称为电源，各种用电设备和元件统称为负载。电讯电路的作用是传递和处理讯号，通过电路把输入讯号（称为激励）变换为所需的输出讯号（称为响应）。电讯电路又可分为放大、调谐、调制、解调、…等电路。

在分析研究电路时，是把实际的具体电路抽象为一些理想电路元件所构成的电路来进行的。理想的电路元件只有几个，但是无论简单的还是复杂的具体电路，都可以通过这些少量理想元件所构成的电路来充分描述。同时，依据电路基本定律就足以对它们进行分析和计算。

我国电工工程采用国际单位制SI。这种单位制，以米（m）为长度的基本单位，千克（kg）为质量的基本单位，秒（s）为时间的基本单位，安培（A）为电流强度的基本单位。

第一节 电流、电压、电位和电动势

一、电流

电荷定向运动的物理现象称为电流。在导体中，电荷在电场作用下作定向运动。在金属导体中，电荷是带负电的自由电子，它们在电场作用下逆着电场方向运动而形成电流；在电解液体中，电荷是带正电和带负电的离子，在电场作用下，正离子顺着电场方向运动，负离子逆电场方向运动，从而形成电流。导体中的这种电流称为传导电流。

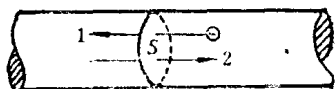


图1-1 金属导体中的电流

- 1—自由电子运动方向，
2—电流方向。

电流的方向规定为正电荷运动的方向。显然，按这规定，电流的方向与负电荷运动的方向相反。金属导体中的电流方向示于图1-1中。

用来衡量电流强弱的物理量是电流强度。电流强度

在数值上等于单位时间内穿过导体截面的电量。对随时间不断变动的电流，设在极短的时间 dt 内穿过导体某截面 S 的电量的代数和为 dq ，则电流强度

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

对直流电流，若 $t=0$ 时， $q=0$ 。则

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

如用直角坐标的横轴表示时间，纵轴表示电量或电流强度，则直流电的 $q(t)$ 为一条过原点的直线1， $i(t)$ 为一条与横轴平

行的直线2，如图1-2所示。

电流强度的基本单位是安培(A)，简称安。1秒钟内通过截面的电量为1库时，电流强度为1安。辅助单位为千安(kA)，毫安(mA)，微安(μA)，纳安(nA)。它们之间的换算关系是： $1\text{kA} = 10^3\text{A}$ ， $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$ ， $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ ， $1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$ 。

电流强度通常也简称为电流。这样，电流一词不仅代表一种物理现象，也表示一个物理量。随时间变动的电流称为变动电流，用小写英文字母*i*表示；大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流或直流电流，简称直流，用大写英文字母*I*表示。

二、电压和电位

在图1-3中画出了一个电池示意图，电池有两个电极，正

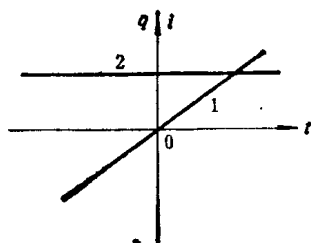


图1-2 直流电的 $q(t)$ 和 $i(t)$ 曲线

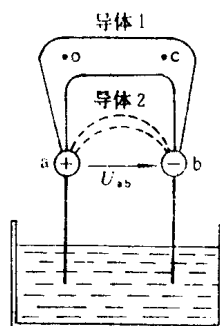


图1-3 电压和电位

极a带正电荷，负极b带负电荷，这些电荷在金属导体附近的空问产生电场。在电场力作用下，有一定数量的正电荷从正极a通过导体1移到负极b。正电荷在电场力作用下移动了一段距离，电场力就对正电荷做了功。为了衡量电场力对电荷做功的能力，引入“电压”这一物理量。a点到b点的电压在

数值上等于电场力把单位正电荷从a点移到b点所做的功。如电场力把正电荷 q 从a点移到b点所做的功为 A_{ab} ，则

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-3)$$

相反，如外力把正电荷 q 逆着电场方向从b点移到a点，则外力做了功而加强了电场能量。从电场的角度来说，即电场力把正电荷 q 从b点移到a点所做的功 A_{ba} 与 A_{ab} 大小相等而符号相反， $A_{ba} = -A_{ab}$ 。按电压定义

$$U_{ba} = \frac{A_{ba}}{q} = \frac{-A_{ab}}{q} = -U_{ab}$$

电压采用双下标记法，因为电压是指电场（包括电路）两点间的电压。前一个下标代表起点，后一个下标代表终点，电压的方向由起点指向终点，如 U_{ab} 为a点指向b点的电压， U_{ba} 为b点指向a点的电压。有时电压的记法也可不采用双下标，这时必须在该电压符号所代表的相应电路两点旁边画一个从起点指向终点的箭头。

大小和方向都不随时间变动的电压叫恒定电压或直流电压，用英文大写字母 U 来表示。大小随时间变动的电压叫变动电压，用英文小写字母 u 来表示。

电场强度的大小和方向都不随时间变动的电场称为恒定电场，在这种电场中任意两点间的电压都是直流电压。可以证明，在恒定电场中，任意两点间的电压只和这两个点的位置有关，而和电荷移动的路径无关。如图1-3，在电场作用下，无论正电荷沿导体1还是导体2从a点移到b点，a点到b点的电压都是 U_{ab} 。

为了便于分析电路的工作，在恒定电场（包括电路）中，常选一点为参考点，任意一点与参考点之间的电压称为该点

电的位 φ 。如选 o 点为电位参考点, 则 a 点的电位 $\varphi_a = U_{ao}$, b 点的电位 $\varphi_b = U_{bo}$, 而参考点 o 的电位 $\varphi_o = U_{oo} = 0$ 。参考点的选择是任意的, 选取不同的点作参考点, 电场(电路)中各点的电位就不同。但参考点一经选定, 各点的电位只能有一个数值。

电位与电压的关系如下: 如图1-3, a 点电位 $\varphi_a = U_{ao}$, b 点电位 $\varphi_b = U_{bo}$, $\varphi_a - \varphi_b = U_{ao} - U_{bo} = U_{ao} + U_{ob}$, $U_{ao} + U_{ob}$ 就是电场将单位正电荷从 a 点移到 o 点, 再从 o 点移到 b 点所做的功。因电场中两点间的电压与电荷移动的路径无关, 所以 $U_{ao} + U_{ob}$ 也就是电场将单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功 U_{ab} 。则

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-4)$$

即 a 点到 b 点的电压等于 a 点电位与 b 点电位之差。所以, 电压也称为电位差。

电压的正方向规定为从高电位点指向低电位点。在图1-3中, U_{ab} 为正电压, U_{ba} 为负电压。

电压和电位的基本单位都是伏特(V), 简称伏。如电场把1库正电荷从 a 点移到 b 点做了1焦的功, 则 U_{ab} 为1伏。辅助单位为千伏(kV), 毫伏(mV), 微伏(μ V)。它们之间的换算关系是: $1\text{kV} = 10^3\text{V}$, $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$, $1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$ 。

〔例1-1〕 图1-3中, 设 $U_{ab} = 3\text{V}$, $U_{ao} = 2\text{V}$ 。如分别取 a 点和 b 点作电位参考点, 求 a 、 b 、 c 三点的电位。

解: 1) 取 a 点为参考点, $\varphi_a = 0$;

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b, \quad \varphi_b = \varphi_a - U_{ab} = -3\text{V};$$

$$U_{ao} = \varphi_a - \varphi_o, \quad \varphi_o = \varphi_a - U_{ao} = -2\text{V}。$$

2) 取 b 点为参考点, $\varphi_b = 0$;

$$\varphi_a = U_{ab} + \varphi_b = 3\text{V}; \quad \varphi_o = \varphi_a - U_{ao} = 1\text{V}。$$

从上例可见,参考点变了,各点的电位也变了;但两点间的电压(电位差)是不随参考点的选择而改变的。还可看出,不论选哪点作参考点,因 $U_{a.0} = \varphi_a - \varphi_0 > 0$,所以 $\varphi_a > \varphi_0$ 。由此得到一个重要结论:沿着电压的正方向电位在降低。因此电压也称电位降(习惯上称电压降)。只要弄清电压和电位的概念,电压的别的名称——电位差、电位降、电压降就不难理解了。

三、电动势

正电荷在电场力作用下,总是从高电位点向低电位点移动。如果只有电场力对电荷作用,则正电荷移动的结果,必定要改变电荷的分布,如图1-3所示,电池正、负极上的正、负电荷越来越少,电场越来越弱,最后等于零。在这种情况下,导体中电流只能是短暂的,不能持久。

为了维持导体中的电流,除电场力外,必须另有一种外力不断把正电荷从低电位点移到高电位点。在电源内部就存在这种外力。如在图1-3的电池内部,由于电极和电解液的化学反应,使它们的接触处产生了这种外力。当然,在电源内部同样也存在电场和电场力。但是,外力超过了电场力,而形成了正电荷从低电位经电源内部向高电位的连续移动。在正电荷运动过程中,外力对正电荷做了功。在电源内部外力把单位正电荷从负极移到正极所做的功称为电源的电动势。电动势的基本单位也是伏特(V)。

电动势的正方向规定由电源负极(低电位点)经电源内部指向电源正极(高电位点)。也就是说,电动势的正方向是电位升高的方向,这和电压的正方向恰好相反,如图1-4所示。

直流电源的电动势的大小和方向都不随时间变动,称为