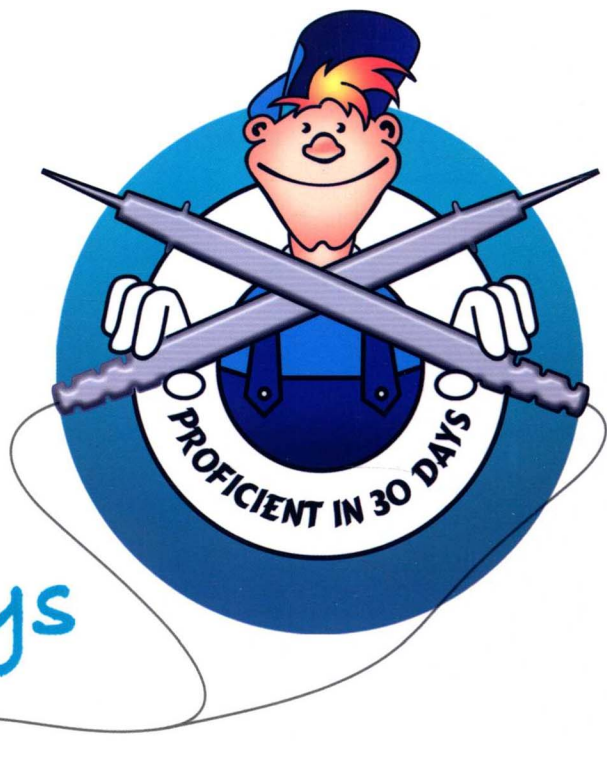




电子电工技术入门
一月通



30 Days

电工技术应用

一月通

◎ 孙唯真 王忠诚 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子电工技术入门一月通

电工技术应用一月通

孙唯真 王忠诚 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 提 要

本书是作者在长期的教学实践基础上，专门针对初学者的心理特点和学习要求而编写的，讲述了电工技术基础知识和电工技术在照明电路安装、家用电器、低压电器、电动机控制等方面的应用。

本书注重理论联系实践，讲求实用，图文并茂，在师徒对话中，深入浅出地讲解了电工技术基础知识及其应用，大大降低了初学者的入门难度。特别适合想快速学好电工技术，而又基础薄弱的人员学习，也适合中职类学校电子类专业学生学习。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电工技术应用一月通 / 孙唯真，王忠诚编著. —北京：电子工业出版社，2016.1

（电子电工技术入门一月通）

ISBN 978-7-121-27603-3

I. ①电… II. ①孙… ②王… III. ①电工技术—基本知识 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 277618 号

策划编辑：张 榕

责任编辑：张 榕

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市京南印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1092 1/16 印张：13.25 字数：340 千字

版 次：2016 年 1 月第 1 版

印 次：2016 年 1 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

丛书序言

教育部在《面向 21 世纪深化职业教育教学改革的原则意见》中指出：“职业教育要培养同 21 世纪我国社会主义建设要求相适应的，具有综合职业能力和全面素质的，直接在生产、服务、技术和管理一线工作的应用型人才。”这不仅是我国职业教育改革的核心指导思想，也为我国中等职业学校教材研发指明了方向。

目前，我国大部分中等职业学校都在采用国家规划教材，这对于规范全国的中等职业教育内容，提高整体教学质量有很大的促进作用，但同时也面临着一个很现实的问题：国家规划教材具有很强的系统性和阶段性，更新周期较长，缺乏灵活性、针对性和时效性。这就需要工作在职业教育一线上，具有丰富教学经验的教师们，积极研发新教材，作为国家规划教材的有力补充。新教材应把“学以致用”，培养“一线工作的应用型人才”作为研发目的，注重培养学生的学习兴趣，充分发挥学生的学习潜能，真正让学生学而不厌，即学即用。本着这一初衷，我们向电子工业出版社申报了《中职电子专业对话式、图话式教材探究与开发》大型课题研究项目，并获准立项。

近年来，由于国家对职业教育发展的高度重视和大力推动，中职教育也得到了迅猛发展，但毋庸置疑，我国的中职教育仍存在学生厌学，毕业后不能很好地适应社会需要的现状。如何让中职学生“好学，学好；好就业，就业好”，这是摆在我们每个职教工作者面前的难题。要想攻克此难题，就得从改革职业教育的教学内容和教学方法入手，而新教材的研发正是教学内容、教学方法改革的源头。

我们通过对现有的中职电子专业主干课程教材的研究，发现普遍存在以下一些现象：

1. 强调理论的完整性和系统性，忽视知识的实用性。由于专业课教材过多地注重理论的完整性和系统性，难度大，且实用性不强，不符合中职学生的认知水平，忽视了中职学生在接受知识时对课程实用性的要求，从而助长了学生的厌学情绪，容易使学生滋生学习无用的思想。

2. 教材版面呆板，缺乏趣味性。很多教材大篇幅地采用文字表述，问题描述不直观。由于缺少图片的支持，尤其是实物图片的支持，教材内容显得呆板，缺乏趣味，学生学习倍感单调和难以理解。而且这样的教材使理论与实践严重脱节，学生学过以后，仍然无法把理论与实际联系起来。

3. 教材内容更新缓慢，严重滞后于应用电子技术的发展步伐。比如某些关于电视技术的教材，“黑白电视机原理”仍然占有较大的篇幅。新设备、新工艺、新材料、新技术没有及时反映到教材中。学生毕业后当然无法适应电子企业的需要。

4. 知识点不够精炼，不利于循序渐进地展开教学。中职教育的学制一般为 2~3 年，理论教学与实践教学的比例要求为 1:1。这就要求专业课程的理论教学做到少而精。加之电子专业的知识具有前后连贯性，大部分课程不能同时讲授，如果教材的知识点太杂，在循序渐进地展开教学时，就无法在有限的课时内完成教学任务。

针对以上现象，我们通过《中职电子专业对话式、图话式教材探究与开发》课题研究项目，开发了《电子维修技术图文对话一月通》丛书。该套丛书共 4 本，分别是《电子元器件

与电路一月通》、《彩色电视机维修一月通》、《液晶显示器与液晶电视机维修一月通》、《电冰箱与空调器维修一月通》。该套丛书出版后，得到了业内各相关学校师生的肯定，好评不断。时隔4年，我们根据读者回馈信息及教学培训实践，增加、删改、整合了一些内容，使之与时俱进，更贴合当今初学者需求。现改名为《电子电工技术入门一月通》丛书，增加了呼声较高的《电工技术应用一月通》和《电子电路制作与工艺一月通》，使该套丛书适合更广泛的需求。本套丛书共6本，分别是《电子元器件与电路一月通（第2版）》、《彩色电视机维修一月通（第2版）》、《液晶显示器与液晶电视机维修一月通（第2版）》、《电冰箱与空调器维修一月通（第2版）》、《电工技术应用一月通》、《电子电路制作与工艺一月通》。本套教材着重从以下几个方面进行了大胆的尝试：

1. 以易学够用为原则，打破理论完整性和系统性的约束，做到即学即用。通过多年的电子专业教学摸索，我们总结了电子专业相关行业对该专业理论与实践的要求，加大了教材中实用知识的篇幅，压缩甚至删减了中职毕业生在实际工作中极少涉及或无须涉及的理论知识。降低了学生入门的难度，并能在实际工作中快速上手。

2. 改变以文字表述为主的编写模式，完全采用图话、对话的讲述模式。图话、对话模式使教材版面耳目一新，让学生又找回了类似孩童时看连环画的浓厚兴趣。图片具有简明、直观、形象等特点。学生通过大量的实物和示意图片，非常轻松地把理论与实践联系起来，甚至在实习时可以做到按图索骥，无师自通。教材以中职学生的认知水平设置情境对话，既激发了学生的学习兴趣，又避免了他们对大段大段枯燥文字的畏惧和厌烦。

3. 精炼和整合多门专业主干课程，更加适合电子专业的教学规律，使课程能在较少的课时内循序渐进地完成教学。若每天学习3~4课时，每本教材均可在一个月内学完。

总之，随着我国职业教育在国民教育体系中地位的提升和社会对职业人才需求的增长，中职电子专业教育对专业主干课程教材的标准也在提高。中职电子专业主干课程教材的研发必须与学术研究联系起来，紧跟时代步伐，不断地调整思路与模式，力求同时适应学生、企业 and 市场三方面的需求。我们也相信这套教材一定能够调动学生的学习兴趣，达到学有所获的目的，也一定能够减轻教师的教学压力，收到寓教于乐的效果。

编著者

前 言

这是一本讲述电工技术的专业图书，全书按日安排学习内容，力求在 30 日内让读者轻松掌握电工技术的基本内容。全书共由 9 部分内容构成：第 1~5 日主要讲述电路基础，内容涵盖电路基础知识、简单直流电阻电路、复杂直流电阻电路、电阻的识别，以及电阻、电压和电流的测量；第 6~8 日主要讲述照明电路的安装，内容涵盖导线的选择与加工、配电箱的安装、照明电路的安装；第 9~11 日主要讲述电流热效应的应用，内容涵盖电取暖器、电饭锅、电热水器的结构与原理；第 12~13 日主要讲述电场与电容器，内容涵盖电场的特性、电容器电路的特点、电容的识别；第 14~17 日主要讲述磁场、电感器与电磁感应，内容涵盖磁场的特性、电磁感应与电感、电感的识别、电磁感应的应用；第 18~21 日主要讲述交流电，内容涵盖正弦交流电和周期性非正弦交流电、示波器的使用、正弦交流电路及其谐振、三相正弦交流电；第 22~24 日主要讲述铁磁性物质及其应用，内容涵盖电磁铁及其应用、变压器；第 25~29 日主要讲述电机，内容涵盖直流电机、交流电机、电机的应用、三相交流电机的控制；第 30 日主要讲述用电安全，内容涵盖电流对人体的伤害、防止触电的技术措施。

该书与同类图书相比，具有以下几个特点：

1. 趣味性强，吸引力大。此书的版面设计非常活跃，采用图话式讲解，通过师徒对话，逐步引出知识精髓，轻松做到让初学者在 30 日内掌握电工基础知识和电工技术。翻开此书，很容易被书中的页面风格和讲解方式所吸引。阅读此书，就如同阅读连环画一样，引人入胜，让人欲罢不能，并在不知不觉之中掌握书中内容。可以毫不夸张地说，只要你拥有此书，你就会告别学习的痛苦，享受到学习的乐趣。

2. 图文同页，阅读方便。每一幅图片与它的对应文字都位于同一页中，阅读时，无需翻页，更不会产生视觉疲劳和眼花缭乱之感。

3. 篇幅小，节省学习时间。全书按 30 日安排学习内容，能让初学者充分明白自己每日的学习任务和学习目标。

4. 突出知识的够用性和实用性，学习起点低。编写此书时，理论讲解不追求深，只追求够用，对于那些在实践中用不到或很少用到的知识，基本不谈；对于那些复杂的分析计算也基本不谈，而将重点放在对实用知识的讲解上，读者只要具有初中以上的文化程度就能学好此书的主体内容。尤其是本书结合了一些常见家用电器的讲解，把枯燥的电工基础知识与它们在实际生活当中的应用有机地联系起来，增强了本书的实用价值。

该书适合大学、高职院校、中职学校电子专业学生使用，也适合电子专业短期培训班学员使用。作为教科书时，可按 120 课时教学。

参加本书编写的还有罗纲要、杨建红、陈兴祥、钟燕梅、王逸轩、宋兵等。

编著者

目 录

第 1 日	电路基础知识	(1)
一、	电路与电路图	(1)
二、	电流	(3)
三、	电阻	(4)
四、	电压和电位	(5)
五、	电源与电动势	(6)
六、	欧姆定律	(6)
七、	电功和电功率	(7)
八、	电流的热效应	(8)
九、	全电路中负载获得最大功率的条件	(8)
第 2 日	简单直流电阻电路	(9)
一、	电阻串联电路	(9)
二、	电阻并联电路	(10)
三、	电阻混联电路	(11)
第 3 日	复杂直流电阻电路	(14)
一、	描述电路结构的基本概念	(14)
二、	基尔霍夫定律	(14)
三、	应用基尔霍夫定律分析计算电路的基本步骤	(15)
四、	电路中各点电位的计算	(18)
第 4 日	电阻的识别	(20)
一、	电阻的种类	(20)
二、	电阻的主要性能参数及其标注方法	(25)
第 5 日	电阻、电压和电流的测量	(28)
一、	使用万用表测量电阻、电压	(28)
二、	使用钳形表测量交流电流	(31)
第 6 日	照明电路的安装(一)	(33)
一、	导线的选择	(33)
二、	导线加工工具	(35)
三、	导线的剥削	(36)
四、	导线的连接	(37)
第 7 日	照明电路的安装(二)	(39)
一、	电度表的安装	(39)
二、	配电箱的安装	(40)
第 8 日	照明电路的安装(三)	(43)
一、	布线	(43)

二、插座的安装	(46)
三、开关的安装	(46)
四、电灯的安装	(47)
第9日 电流热效应的应用——电取暖器	(49)
一、远红外线取暖器	(49)
二、暖风机	(51)
三、充油电取暖器	(54)
第10日 电流热效应的应用——电饭锅	(56)
一、电饭锅的分类	(56)
二、普通电饭锅	(57)
三、压力电饭锅	(61)
第11日 电流热效应的应用——电热水器	(64)
一、电热水器的分类	(64)
二、储水式电热水器	(66)
三、即热式电热水器	(71)
第12日 电场和电容器	(73)
一、电场	(73)
二、电容器	(75)
第13日 电容器的识别	(79)
一、电容的种类	(79)
二、电容主要性能参数	(84)
三、电容主要性能参数的标注方法	(84)
四、电容好坏的检测方法	(86)
第14日 磁场和电感	(87)
一、磁场的特性	(87)
二、电磁感应现象	(90)
第15日 电感器的识别	(95)
一、电感的种类	(95)
二、电感主要性能参数	(100)
三、电感主要性能参数的标注方法	(100)
第16日 电磁感应的应用——微波炉	(101)
一、微波加热原理	(101)
二、微波炉基本结构	(102)
第17日 电磁感应的应用——电磁炉	(107)
一、电磁炉的工作原理	(107)
二、电磁炉的结构	(110)
第18日 正弦与周期性非正弦交流电	(116)
一、正弦交流电	(116)
二、周期性非正弦交流电	(119)
第19日 交流电波形的测量	(121)

一、MOS-620CH 型示波器面板介绍	(121)
二、信号输入线及其使用方法	(127)
三、示波器测量的操作步骤	(128)
第 20 日 正弦交流电路及其谐振	(130)
一、正弦交流电路	(130)
二、正弦交流电路的谐振	(137)
第 21 日 三相正弦交流电	(140)
一、三相正弦交流电的特点	(140)
二、三相正弦交流电的连接	(141)
第 22 日 铁磁性物质和电磁铁	(144)
一、铁磁性物质的磁化及分类	(144)
二、电磁铁	(145)
第 23 日 电磁铁的应用	(149)
一、电磁继电器	(149)
二、接触器	(151)
三、断路器	(153)
四、漏电断路器	(154)
第 24 日 变压器	(157)
一、变压器的结构及电气特性	(157)
二、变压器的功率和效率	(161)
三、变压器的种类	(161)
第 25 日 直流电动机	(164)
一、直流电动机的结构	(164)
二、直流电动机的工作原理	(166)
三、直流电动机的励磁方式	(167)
四、直流电动机的主要性能参数	(168)
第 26 日 交流电动机	(169)
一、交流电动机的基本工作原理	(169)
二、交流电动机的分类	(170)
三、单相交流电动机	(171)
四、三相交流电动机	(176)
第 27 日 直流电动机的应用——电吹风	(177)
一、电吹风的结构	(177)
二、电吹风的电路结构	(179)
第 28 日 单相交流电动机的应用——电风扇	(181)
一、家用电风扇的种类和结构	(181)
二、电风扇的调速方法	(185)
第 29 日 三相交流电动机的控制	(187)
一、几种常用的电气器件	(187)
二、三相交流电动机的起动控制	(189)

三、三相交流电动机的运行控制	(192)
第 30 日 用电安全	(194)
一、电流对人体产生的伤害	(194)
二、与电流对人体产生伤害程度有关的因素	(195)
三、人体触电的方式	(196)
四、防止人体触电的技术措施	(198)

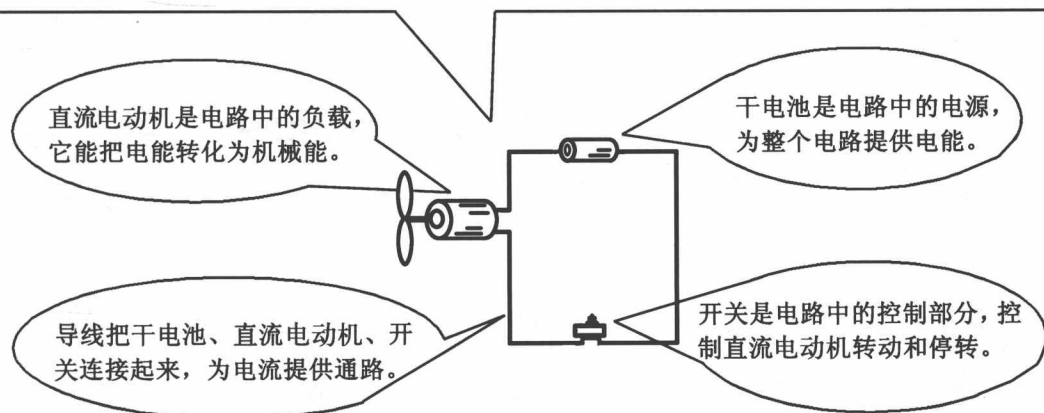
第1日 电路基础知识

一、 电路与电路图

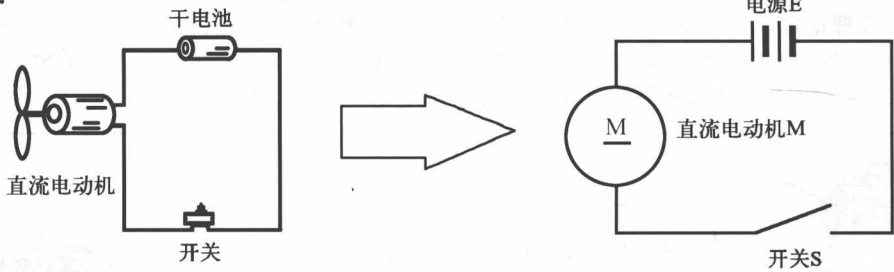
师傅：《电工技术》是应用电子技术相关专业人员必须熟练掌握的一门基础课程，但这门课程理论知识比重较大，学起来比较枯燥，不易掌握。为了让大家能在一个月的时间里，轻松地学习和掌握它，我将在接下来的讲解中，尽可能多地把电工理论知识与它在实际中的应用联系起来，真正做到学有所用，学有所获。



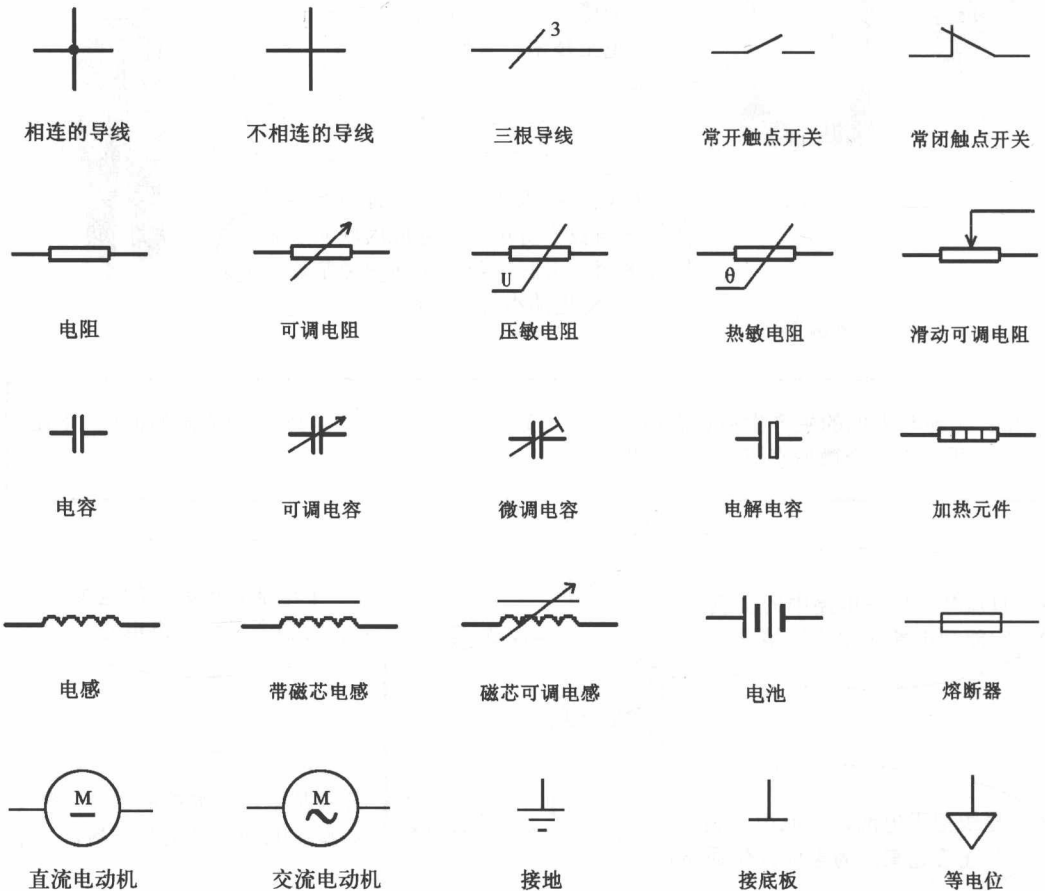
师傅：电路与人们的生产生活息息相关，它一般由电源、负载、导线和控制部分组成。下图所示为一个微型直流电风扇电路。



师傅：电路有通路、断路、短路三种基本状态。电路连通，有电流流过，称为通路状态，又称通路状态。电路断开，无电流流过，称为断路状态，又称开路状态。电路中的电源、负载或负载内部的元器件的端脚，直接连通，称为短路状态。大多数情况下，短路状态会损坏电源或负载，造成电路故障，所以一般电路应避免出现这种状态。实际电路可以用统一规定的图形符号表示，称为电路图。比如，下图左边的实际电路可以用右边的电路图来表示。

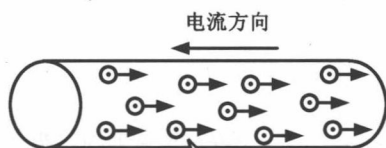


这里再列举一些常用的电路符号。

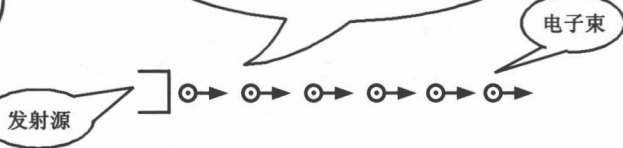


二、电流

师傅：电荷的定向移动形成电流，并且规定正电荷移动方向为电流方向。下图所示的金属导体中的电流，是由带负电荷的自由电子定向移动形成的，所以电流方向与自由电子移动方向相反。



注意：在空间中向前发射的电子束也能形成电流，如电视机显像管中发射的电子束，就是流过显像管的电流。



师傅：电流不仅有方向，而且有大小。电流的大小用电流强度表示。电流强度等于单位时间内通过导体横截面的电量。如果在时间 t 内通过导体横截面的电量为 q ，则通过导体的电流强度 I 为：

$$I = \frac{q}{t}$$

式中，电流强度的单位为安培 (A)；电量的单位为库仑 (C)；时间的单位为秒 (s)。常用的电流强度的单位和它们之间的换算关系如下：

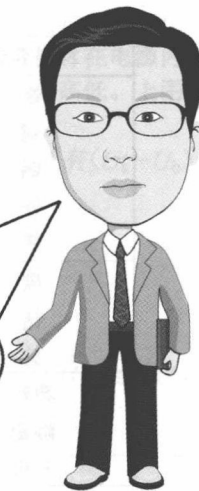
$$1\text{A} = 10^3 \text{mA} (\text{毫安})$$

$$1\text{mA} = 10^3 \mu\text{A} (\text{微安})$$

我经常听到直流、交流、稳恒电流等说法，到底有什么区别啊？

电流根据其大小、方向随时间变化情况的不同，可以分为以下几种：

- (1) 方向不随时间变化的电流称为直流电流。
- (2) 大小、方向都不随时间变化的电流称为稳恒直流电流。
- (3) 大小随时间变化，方向不随时间变化的电流称为脉动直流电流。
- (4) 大小、方向都随时间变化的电流称为交流电流。



三、电阻

师傅：电流流过导体时会受到阻碍作用，这种阻碍作用用电阻来表示。电阻的单位为欧姆(Ω)，常用的单位如下：

$$1\text{k}\Omega (\text{千欧}) = 10^3\Omega \quad 1\text{M}\Omega (\text{兆欧}) = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega$$

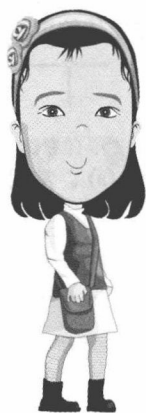
一般来说，导体都有一定的电阻。相同形状，不同材料的导体，电阻不相等；相同材料，不同形状的导体，电阻也不相等。实验证明，在温度不变时，横截面积均匀的导体的电阻与导体的长度成正比，与导体的横截面积成反比，并与导体材料的电阻率有关，它们之间的关系为：

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

式中， R 表示电阻，单位为(Ω)； l 表示长度，单位为(m)； S 表示横截面积，单位为(m^2)； ρ 表示电阻率，单位为欧米($\Omega \cdot \text{m}$)。

师傅，电阻率是什么含义啊？

电阻率是衡量材料导电能力的物理量。电阻率越大的材料，其导电能力越弱；电阻率越小的材料，其导电能力越强。不同材料具有不同的电阻率，相同材料在不同温度下，电阻率也不一样。一般情况下，绝大部分金属材料的电阻率随温度升高而增大，如：钨、铝、铜等；半导体材料的电阻率随温度升高而降低，如：碳、硅、锗等。

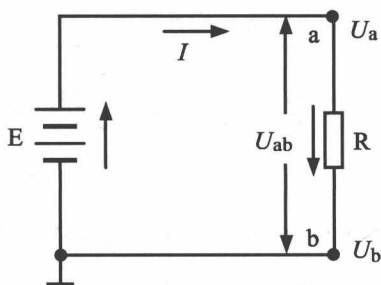


材料名称	电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)	备注
银	1.6×10^{-8}	导电能力很强，称为导体
铜	1.7×10^{-8}	
铝	2.8×10^{-8}	
铁	9.8×10^{-8}	
锡	1.14×10^{-7}	
碳	3.5×10^{-5}	导电能力介于导体和绝缘体之间，称为半导体
锗	0.60	
硅	2300	
塑料	$10^{15} \sim 10^{16}$	导电能力极弱，称为绝缘体
陶瓷	$10^{12} \sim 10^{13}$	
云母	$10^{11} \sim 10^{15}$	

这个表中列举了部分常见材料在 20°C 时的电阻率。

四、电压和电位

师傅：电压和电位是两个紧密关联的物理量。电路中不同的点有不同的电位，任意两点之间的电压等于这两点电位的差。如下图所示，表明了电压与两点电位差的关系。



U_{ab} 表示a、b两点之间的电压， U_a 、 U_b 分别表示a、b两点的电位，则a、b两点之间的电压为：

$$U_{ab} = U_a - U_b$$

在分析计算电路中各点的电位时，一般先选择电路中某一点作为参考点，并规定参考点电位为0V，然后其他各点的电位在数值上就等于该点和参考点之间的电压。现在仍以上图为例，来计算a点的电位。先选择b点为参考点，所以b点电位为0V。

将 $U_{ab} = U_a - U_b$ 变形，可得a点电位为：

$$\begin{aligned} U_a &= U_{ab} + U_b \\ &= U_{ab} + 0 \\ &= U_{ab} \end{aligned}$$

式中，电压和电位的单位都是伏特 (V)。比伏特更大的单位有千伏 (kV)。常用的电压和电位的单位及它们之间的换算关系如下：

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} \quad 1\text{V} = 10^3\text{mV}(\text{毫伏}) \quad 1\text{mV} = 10^3\mu\text{V}(\text{微伏})$$

和电流一样，电压也是有方向的，电压的方向规定为从高电位指向低电位，即电位降低的方向，因此电压又称为电压降。电流在电源外部从高电位流向低电位，在电源内部从低电位流向高电位。因此，可以用电流的方向来判定电路中各点电位的高低。上图中，电流在电源外部从a点流向b点，所以a点电位高于b点电位。

电路中，任意两点之间的电位差有两个。上图中，a、b两点之间的电位差有 $(U_a - U_b)$ 和电位差 $(U_b - U_a)$ ，由电压降和电位的关系可知：

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_a - U_b \\ U_{ba} &= U_b - U_a \end{aligned}$$

因为a点电位高于b点电位，所以电压降 U_{ab} 为正值，记为 $+U_{ab}$ ，电压降 U_{ba} 为负值，记为 $-U_{ab}$ 。

五、电源与电动势

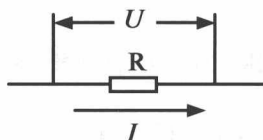
师傅：电源是一种把非电能转化为电能的设备，为整个电路提供电能。电源有正极和负极两个端子，电位高的一端为正极，电位低的一端为负极。

电动势是衡量电源把非电能转化为电能的本领的物理量。它的单位和电压的单位一样，也是伏特（V）。如一节五号干电池的电动势是1.5V。和电压一样，电动势也有方向，它的方向规定为从电源的负极经内部指向正极。

六、欧姆定律

1. 部分欧姆定律

当电路中有电流流过电阻时，电阻两端就会产生电压，如下图所示。



实验证明，流过电阻的电流与电阻两端产生的电压成正比，与电阻的阻值成反比，这个规律称为部分欧姆定律，它的表达式为：

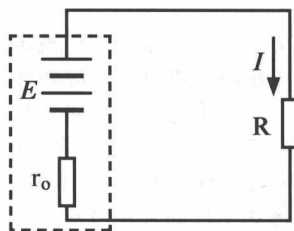
$$I = \frac{U}{R}$$

式中，电流的单位为安培（A）；电压的单位为伏特（V）；电阻的单位为欧姆（ Ω ）。

2. 全电路欧姆定律

部分欧姆定律只揭示了电路中电阻两端的电压，与流过它的电流之间的关系，没有涉及电源电动势。那么在包含有电源的全电路中，电源电动势、电阻两端的电压、流过电阻的电流三者之间的关系又是怎样的呢？

全电路中，电源不仅为整个电路提供了电动势，而且也会对流过它自身的电流产生阻碍作用，即电源内部也有电阻，称为内阻。如下图所示，E为电源电动势， r_0 为内阻，R为电源外接电路的电阻，称为外电路电阻，虚线框内的电路是电源的等效电路。



实验证明，全电路中电流与电源电动势成正比，与外电路电阻、内阻之和成反比。这个规律称为全电路欧姆定律，它的表达式为：

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

式中，电流的单位为安培（A）；电压的单位为伏特（V）；外电路电阻、内阻的单位都为欧姆（ Ω ）。

3. 路端电压及电源外特性

在上图所示的全电路中，电流在电源内阻和外电路电阻上都要产生电压，内阻上产生的电压为：

$$U_0 = I r_0$$

外电路电阻上产生的电压为：

$$U = IR$$

外电路电阻上产生的电压 U 被称为路端电压。

将 $I = \frac{E}{R+r_0}$ 式变形可得：

$$E = IR + I r_0 = U + U_0$$

所以路端电压为：

$$U = E - U_0 = E - I r_0$$

上式反映了路端电压与电源输出电流之间的关系，也称为电源的外特性：随着电源输出电流增大，加在外电路电阻两端的路端电压会降低。

七、电功和电功率

电流流过负载时要做功，称为电功，等于负载工作时消耗的电能。对于电阻性负载来说，加在负载两端的电压越高，流过负载的电流强度越大，通电时间越长，电流所作的电功就越多，负载消耗的电能也越多，电功与电压、电流强度、通电时间之间的关系为：

$$W = UI t$$

式中，电功用 W 表示，单位为焦耳(J)；电压的单位为伏特(V)；电流的单位为安培(A)；时间的单位为秒(s)。

在实际生产生活中，常用的电功、电能的单位是“度”。

$$1\text{度} = 1\text{千瓦时} = 1\text{kW} \times 1\text{h} = 1000\text{ W} \times 3600\text{ s} = 3.6 \times 10^6\text{ J}$$

电流流过不同的负载作同样的电功，所花的时间并不一样。电功率就是衡量在单位时间里，电流所做电功多少的物理量。如果在 t 时间内，电流所做电功为 W ，那么电功率为：

$$P = \frac{W}{t}$$

将 $W = UI t$ 代入 $P = \frac{W}{t}$ 可得：

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

式中， P 表示电功率，单位为瓦特(W)；电功的单位为焦耳(J)；时间的单位为秒(s)；电压的单位为伏特(V)；电流的单位为安培(A)。

例：一台家用300W的电热取暖器，连续正常工作4个小时，消耗电能是多少焦耳？折合多少度电？

解：电热取暖器消耗的电能等于电流所做的电功，而电功由 $P = \frac{W}{t}$ 变形可得：

$$W = P t = 300 \times 4 \times 3600 = 4320000\text{ J}$$

$$\text{因} 1\text{度} = 3.6 \times 10^6\text{ J}, \text{ 所以} 43200\text{ J 合: } \frac{4320000}{3.6 \times 10^6} = 1.2\text{度}$$