



21世纪普通高等教育规划教材

电 工 学

上册

电工技术

哈尔滨工业大学电工学教研室

王 卫 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育规划教材

电 工 学

上 册

电 工 技 术

哈尔滨工业大学电工学教研室

王 卫 主 编



机 械 工 业 出 版 社

MHZ40/03

本书是 21 世纪普通高等教育规划教材,是面向“机械设计制造及其自动化”专业以及其他相关专业的多学时电工学系列教材中的第一部分。

本书主要包括:电路的基本概念和基本定律,电路的基本分析方法,正弦交流电路,三相交流电路及安全用电常识,非正弦周期电流的电路,电路的暂态分析,二端口网络,磁路与变压器,另有 PSpice 电路仿真软件简介等附录。本书内容全面,在突出电路的基本理论、基本分析方法的同时,注意理论的应用,并将电路的计算机辅助分析的方法介绍给读者,主要章节末特增加了 PSpice 例题分析一节。全书内容叙述上力求简明扼要,重点突出,每章配有针对性的思考题、习题,书末附有部分习题答案,便于自学。

图书在版编目(CIP)数据

电工学.上册,电工技术/王卫主编.—北京:机械工业出版社,2003.7

21 世纪普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-12381-6

I.电... II.王... III.①电工学—高等学校—教材②电工技术—高等学校—教材 IV.TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 047135 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:贡克勤 王小东

责任编辑:贡克勤 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:张静 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·8.75 印张·291 千字

定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

电工学课程是机械设计制造及其自动化专业及其他相关专业本科学生的一门重要的技术基础课，其目的是培养学生掌握和运用电工技术、电子技术和现代电气传动及其控制技术的基本理论、基本知识和基本技能。要求学生在学完本课程后，具备一定的分析和处理与电工、电子和电气传动及其控制等相关技术的实际能力，了解这些技术的最新发展和应用情况。

近年来，我国高等教育为主动适应教育要面向现代化、面向世界、面向未来的需要，积极致力于培养机械技术与电子技术有机结合的机电一体化人才，改造相关专业，修订教学计划，教育部决定将原机电一体化领域内相关专业整合为“机械设计制造及其自动化”专业。机械设计制造及其自动化专业培养的学生主要面向机电一体化、机械电子工程等学科方向，其特点是将机械、电子、计算机信息处理及自动控制等多种技术融为一体并综合运用作为研究对象。所以在对电工学教学内容和深度等方面要求更高，属多学时电工学课程（140~200学时）。

目前国内尚没有一套合适的、用以满足机电类学科人才培养需要的多学时电工学教材。为此哈尔滨工业大学电工学教研室决定在改革原校内使用教材的基础上，重新编写一套面向“机械设计制造及其自动化”专业以及其他相关专业的一套多

IV 前 言

学时电工学教材。这套教材由吴建强教授总体策划，分为三册，即：《**电工技术**》、《**电子技术**》和《**现代传动及其控制技术**》。这三册组合在一起即可成为“机械设计制造及其自动化”专业以及其他相关专业的配套电工学教材，其中的每一册又自成体系，可以成为其他专业电工学的参考教材和机电一体化领域内有关工程科技人员的参考书。

本书为《**电工技术**》。根据“机械设计制造及其自动化”专业及其他相关专业的需要，参照原国家教委电工学课程指导小组最新修订的电工技术课程基本要求，确立了本书的体系与内容。在保留原电工技术的基本内容基础上，吸收并增加了电路理论方面的有关内容（如：二端口网络、置换定理、最大功率传输定理等）。在突出基本理论、基本分析方法的同时，特别增加了运用计算机辅助分析的方法进行电路分析与计算的章节。本书在内容构成上注重新技术的引入和理论与实践的结合，内容叙述上力求简明扼要。每章有大量的且有针对性的例题、思考题、习题，方便自学、易于教学。书中打*号的章节是供选用的内容。

本书第1、2、6章由赵彩凤编写，第3、4、5章由于志编写，第7、8章及附录由王卫编写，全书由王卫统稿。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 实际电路的组成和作用	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路的基本物理量	3
1.2.1 电流及其参考方向	3
1.2.2 电压及其参考方向	4
1.2.3 功率	5
1.3 欧姆定律	7
1.4 理想电源	10
1.4.1 理想电压源	10
1.4.2 理想电流源	10
1.5 受控电源	11
1.6 基尔霍夫定律	13
1.6.1 几个术语	13
1.6.2 基尔霍夫电流定律	14
1.6.3 基尔霍夫电压定律	14
1.7 电位的计算	17
1.8 电阻的连接及其等效变换	18
1.8.1 电路等效的概念	18
1.8.2 电阻的串联和并联	18
1.8.3 电阻星形联结和三角形联结的等效变换	20

本章习题	25
第2章 电路的基本分析方法	28
2.1 电压源与电流源及其等效变换	28
2.2 支路电流法	32
2.3 节点电压法	34
2.4 叠加原理	36
2.5 置换定理	39
2.6 等效电源定理	40
2.6.1 戴维南定理	41
2.6.2 诺顿定理	45
2.7 最大功率传输定理	47
2.8 非线性电阻电路	48
2.9 PSpice 例题分析	52
本章习题	54
第3章 正弦交流电路	61
3.1 正弦电压和电流	61
3.2 相量法的基本概念	64
3.2.1 相量与正弦量	65
3.2.2 正弦量的相量表示法	66
3.3 电阻、电感和电容元件的正弦交流电路	69
3.3.1 电阻元件的正弦交流电路	69
3.3.2 电感元件的正弦交流电路	70
3.3.3 电容元件的正弦交流电路	74
3.4 电阻、电感与电容元件的串联电路	77
3.5 阻抗的串、并联	84
3.6 复杂正弦交流电路的分析	88
3.7 电路中的谐振	91
3.7.1 串联谐振	92
3.7.2 并联谐振	95
3.8 RC 电路的频率特性	98
3.8.1 低通滤波电路	98
3.8.2 高通滤波电路	100
3.8.3 带通滤波电路	101

3.9 功率因数的提高	102
3.10 PSpice 例题分析	104
本章习题	109
第4章 三相交流电路及安全用电常识	115
4.1 三相电动势的产生	115
4.2 三相电源的连接	117
4.2.1 三相电源的星形联结	117
4.2.2 三相电源的三角形联结	118
4.3 三相电路的分析与计算	120
4.3.1 三相负载的连接	120
4.3.2 星形联结的三相负载及中性线的作用	121
4.3.3 三角形联结的三相负载	126
4.4 三相电路的功率	127
4.5 PSpice 例题分析	130
* 4.6 安全用电常识	131
4.6.1 触电时的人体电流和安全电压	131
4.6.2 触电方式	132
4.6.3 接地和接零	133
本章习题	134
第5章 非正弦周期电流的电路	137
5.1 非正弦周期信号的分解	137
5.2 非正弦周期电流电路的有效值、平均值和功率	141
5.2.1 非正弦周期量的有效值	141
5.2.2 非正弦周期量的平均值	143
5.2.3 非正弦周期电流电路的功率	144
5.3 非正弦周期电流电路的计算	145
5.4 PSpice 例题分析	147
本章习题	149
第6章 电路的暂态分析	152
6.1 换路及其初始值的确定	152
6.1.1 换路	152
6.1.2 换路定则	153

6.2 一阶电路的零输入响应	156
6.2.1 RC 电路的零输入响应	157
6.2.2 RL 电路的零输入响应	160
6.3 一阶电路的零状态响应	162
6.3.1 RC 电路的零状态响应	162
6.3.2 RL 电路的零状态响应	164
6.4 一阶电路的全响应	166
6.5 一阶电路的单位阶跃响应	169
6.5.1 单位阶跃函数	169
6.5.2 延迟单位阶跃函数	170
6.6 一阶电路暂态分析的三要素法	171
* 6.7 二阶电路的暂态分析	175
6.7.1 过阻尼状态	177
6.7.2 临界阻尼状态	177
6.7.3 欠阻尼状态	178
6.8 PSpice 例题分析	180
本章习题	182

第 7 章 二端口网络 188

7.1 二端口网络的基本概念	188
7.2 二端口网络的方程和参数矩阵	190
7.2.1 二端口网络的导纳矩阵和阻抗矩阵	190
7.2.2 二端口网络的传输矩阵和混合参数矩阵	196
7.3 二端口网络的等效电路	201
* 7.4 有载二端口网络的特性阻抗与匹配	203
7.4.1 输入阻抗、输出阻抗	203
7.4.2 特性阻抗与匹配	204
7.5 二端口网络的互联	206
7.5.1 二端口网络的互联方式	206
7.5.2 二端口网络的串联与并联	206
7.5.3 二端口网络的级联	208
7.6 理想变压器	210
本章习题	212

第 8 章 磁路与变压器 216

8.1 磁路的基本概念与基本定律	216
8.1.1 磁路的基本物理量	217
8.1.2 磁性材料的磁性能	218
8.1.3 磁路的基本定律	221
8.2 交流铁心线圈工作分析	222
8.2.1 磁通与电压、电流的关系	222
8.2.2 功率损耗	224
8.2.3 交流铁心线圈的等效电路及相量图	225
8.3 变压器	227
8.3.1 变压器的基本结构与工作原理	227
8.3.2 变压器的外特性与效率	231
8.3.3 三相变压器与绕组连接	232
8.3.4 变压器额定值与铭牌型号	234
8.3.5 特殊用途的变压器	234
本章习题	238
附录	241
附录 A PSpice 电路仿真软件简介	241
A.1 OrCAD PSpice 电路仿真软件	241
A.1.1 OrCAD PSpice 的功能特点	242
A.1.2 OrCAD PSpice 支持的元件类型	242
A.1.3 OrCAD PSpice 可分析的电路特性	243
A.2 PSpice A/D V9 集成环境及仿真过程	244
A.2.1 电路图生成	244
A.2.2 PSpice 仿真参数设置	249
A.2.3 PSpice 仿真分析及输出观测	250
A.3 基本电路特性仿真分析	251
A.3.1 直流分析	251
A.3.2 交流扫描分析	254
A.3.3 暂态分析	259
附录 B 国际单位制及常用导电材料的电阻率和电阻温度 系数	261
部分习题答案	263
参考文献	269

第1章 电路的基本概念和基本定律

电路理论是电工技术和电子技术的基本理论。本章将介绍电路中的基本物理量、基本概念和基本定律。着重讨论电流和电压的参考方向、基尔霍夫定律及电路等效原理等。通过本章内容的学习可了解和掌握电路中的基本概念和定律，为后续分析复杂电路打下一个基础。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 实际电路的组成和作用

人们在生产和生活中使用的电器设备如：电动机、电视机、计算机等都由实际电路构成。实际电路的结构组成包括：电源、负载和中间环节。其中电源的作用是为电路提供能量，如发电机利用机械能或核能转化为电能，蓄电池利用化学能转化为电能，光电池利用光能转化为电能等；负载则将电能转化为其他形式的能量加以利用，如电动机将电能转化为机械能，电炉将电能转化为热能等；中间环节用作电源和负载的连接体，包括导线、开关、控制电路中的保护设备等。图 1-1 所示的照明电路中，电池作电源，灯作负载，导线和开关作为中间环节将灯和电池连接起来。

在电力系统、电子通信、自动控制、计算机以及其他各类系统中，电路有着不同的功能和作用。电路的作用可以概括为以下两个方面：①实现电能的传输和转换。如图 1-1 中，电池通过导线将电能传递给灯，灯将电能转化为光能和热能。②实现信号的传递和处理。如图 1-2 是一个扩音机的工作过程。传声器将声音的振动信号转换为电信号即相应的

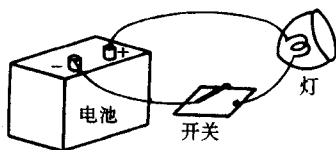


图 1-1 照明电路

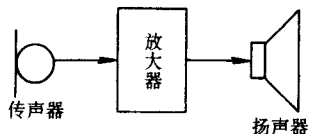


图 1-2 扩音机的工作过程

电压和电流，经过放大处理后，通过电路传递给扬声器，再由扬声器还原为声音。

1.1.2 电路模型

实际电路由各种作用不同的电路元件或器件所组成。实际电路元件种类繁多，且电磁性质较为复杂。如图 1-1 中的白炽灯，它除了具有消耗电能的性质外，当电流通过时，还具有电感性。为便于对实际电路进行分析和数学描述，需将实际电路元件用能够代表其主要电磁特性的理想元件（ideal element）或它们的组合来表示，称为实际电路元件的模型。反映具有单一电磁性质的实际器件的模型称为理想元件，包括电阻、电感、电容、电源等。图 1-3 是我们在电工技术中经常用到的几种理想元件的电路符号。

由理想元件所组成的电路称为实际电路的电路模型（circuit model），简称电路。将实际电路模型化是研究电路问题的常用方法。图 1-1 中，电池对外提供电压的同时，内部也有电阻消耗能量，所以电池用其电动势 E 和内阻 R_0 的串联表示；灯除了具有消耗电能的性质（电阻性）外，通电时还会产生磁场，具有电感性。但电感微弱，可忽略不计，于是可认为灯是一电阻元件，用 R 表示。图 1-4 是图 1-1 的电路模型。

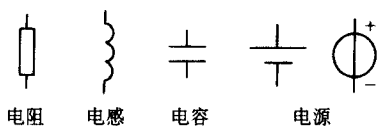


图 1-3 理想元件的电路符号

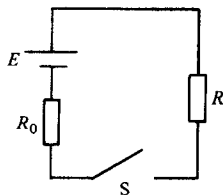


图 1-4 图 1-1 的电路模型

将实际电路元件抽象为一种或几种理想元件的组合，需要丰富的电路知识和专业知识。一个实际电路在不同条件下可化为若干个从简单到复杂的模型，如一个电感线圈，在直流电路中，可看作一个小电阻；在低频交流情况下，可看作一个电感和这个电阻的串联；在高频交流情况下，还需要考虑线圈的匝间分布电容和层间分布电容。所建立的电路模型应能反映电路的真实情况，即采用电路模型计算的结果与实际电路的

测量结果的误差应在允许范围之内。

1.2 电路的基本物理量

在分析各种电路之前,我们先来介绍电路中的基本物理量包括电流、电压和功率及其相关的概念。

1.2.1 电流及其参考方向

图 1-1 中,当开关合上时,会有电荷移动形成电流。在电场的作用下,正电荷与负电荷向不同的方向移动,习惯上规定正电荷的移动方向为电流的方向(事实上,金属导体内的电流是由带负电的电子的定向移动产生的)。

电流的大小为单位时间内通过导体横截面的电量,用公式表示即

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

式中 i 表示电流, q 表示电量或电荷量。国际单位制中, q 的单位为库仑 (C)。电流的单位为安培 (A), 规定 1 秒内通过导体横截面的电量为 1 库仑时的电流为 1 安培。常用的电流单位还有毫安 (mA)、微安 (μA)。

如果电流不随时间改变,称其为**直流电流** (Direct Current—DC) 如图 1-5 所示。前面提到的电池提供的就是直流电流。通常直流电流用大写字母 I 表示,而随时间变化的电流用小写字母 i 表示。

分析简单电路时,可由电源的极性判断电路中电流的实际方向,但分析复杂电路时,一般不能直接判断出电流的实际方向,而是先任意假定一个方向作为电路分析和计算时的参考,我们称之为电流的**参考方向** (reference direction)。在参考方向下,通过电路定律或定理理解的电流如果为正值,表明电流的实际方向与参考方向相同,如果为负值,则与之相反。

电路中用箭头表示电流的参考方向。图 1-6a 中参考方向下,通过元件 A 的电流为 3A,说明实际电流的大小为 3A,方向(如虚箭头所示)与参考方向相同。图 1-6b 中参考方向下,通过元件 B 的电流为 -2A,说明实际电流的大小为 2A,方向与参考方向相反。此外也可用双下标表示电流的方向(参考方向),如 I_{ab} 表示电流方向由 a 到 b 。

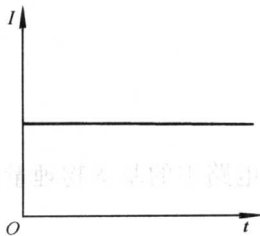


图 1-5 直流电流

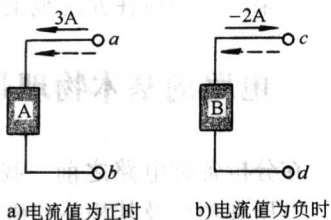


图 1-6 参考方向下的电流

1.2.2 电压及其参考方向

电压也称电位差（或电势差）。电路中 a 、 b 两点间的电压用 u_{ab} 表示，为将单位正电荷由点 a 移动到点 b 所需要的能量，即

$$u_{ab} = V_a - V_b = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中 V_a 表示 a 点电位， V_b 表示 b 点电位， W 表示能量。国际单位制中， W 的单位为焦耳（J）。电压的单位是伏特（V），规定电场力把 1 库仑的正电荷从一点移到另一点所做的功为 1 焦耳时，该两点间的电压为 1V。常用的电压单位还有千伏（kV）、毫伏（mV）和微伏（ μV ）。通常直流电压用大写字母 U 表示。

电路中的电流和电压由电源电动势维持。电源电动势定义为电源内部把单位正电荷从低电位移动到高电位电源力所做的功。电源电压在数值上与电源电动势相等。

电路中，电压的实际方向定义为电位降低或称电压降的方向，可用极性“+”和“-”表示，其中“+”表示高电位，“-”表示低电位；也可用双下标表示，如 U_{ab} 表示电压的方向由 a 到 b 。电源电动势的实际方向，规定为从电源内部的“-”极指向“+”极，即电位升高的方向。

同理，分析电路时需先假定电压的参考方向。选定电压的参考方向后，经分析计算得到的电压值也成为有正、负的代数量。图

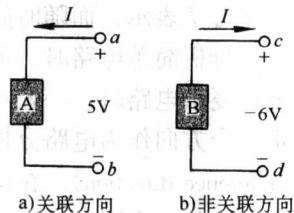


图 1-7 参考方向下的电压

1-7a 中参考方向下，元件 A 两端的电压为 5V，表示元件 A 两端实际电压的大小为 5V，方向由 a 到 b ，与参考方向相同。图 1-7b 中参考方向下，元件 B 两端的电压为 -6V，表示元件 B 两端实际电压的大小为 6V，方向由 d 到 c ，与参考方向相反。

如果不特别指出, 书中电路图上所标明的电流和电压方向都为参考方向。当电流、电压的参考方向一致时, 称为关联方向, 见图 1-7a; 否则为非关联方向, 见图 1-7b。

1.2.3 功率

除了电压和电流两个基本物理量外, 还需要知道电路元件的功率。电路中, 单位时间内电路元件的能量变化用功率表示, 即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-3)$$

式中 p 表示功率。国际单位制中, 功率的单位是瓦特 (W), 规定元件 1 秒钟内提供或消耗 1 焦耳能量时的功率为 1W。常用的功率单位还有千瓦 (kW)。

将式 (1-3) 等号右边分子、分母同乘以 dq 后, 变为

$$p = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt}$$

将式 (1-1)、式 (1-2) 代入上式得

$$p = ui \quad (1-4)$$

所以, 元件吸收或发出的功率等于元件上的电压乘以元件上的电流。直流电路里这一公式写为

$$P = UI$$

关联方向下, 如果 $P > 0$, 表明元件吸收或消耗功率, 称该元件为负载; 如果 $P < 0$, 表明元件发出功率, 称该元件为电源。非关联方向下的结论与此相反。下面我们通过图 1-8 所示电路中的四种情况来具体讨论。

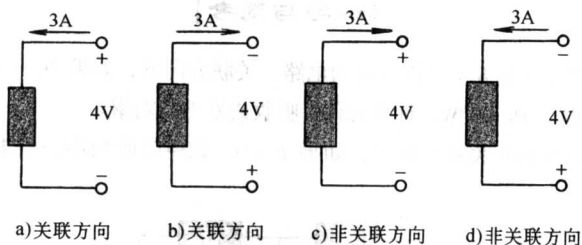


图 1-8 功率的计算

图 1-8a、b 中, 关联方向下:

$$P = 4 \times 3\text{W} = 12\text{W} > 0$$

元件分别吸收 12W 的功率, 均为负载。

图 1-8c、d 中, 非关联方向下:

$$P = 4 \times 3\text{W} = 12\text{W} > 0$$

元件分别发出 12W 的功率, 均为电源。如取关联方向

$$P = 4 \times (-3)\text{W} = -12\text{W} < 0$$

结论不变。

任何电路都遵守能量守恒定律, 因此无论是关联方向还是非关联方向, 电路中元件的功率之和为 0, 即

$$\sum p = 0 \quad (1-5)$$

或者说, 电路中所发出的功率等于所吸收的功率。

电路元件在 $t_0 \sim t$ 时间内消耗或提供的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-6)$$

通常电业部门用千瓦时测量用户消耗的电能。1 千瓦时 (俗称 1 度电) 是功率为 1 千瓦的元件在 1 小时内消耗的电能。

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 3\,600\,000\text{J}$$

如果通过实际元件的电流过大, 会由于温度升高使元件的绝缘材料损坏, 甚至使导体熔化; 如果电压过大, 会使绝缘击穿, 所以必须加以限制。电气设备或元件长期正常运行的电流容许值称为**额定电流** (rated current), 其长期正常运行的电压容许值称为**额定电压** (rated voltage); 额定电压和额定电流的乘积为**额定功率** (rated power)。通常电气设备或元件的额定值标在产品的铭牌上。如一白炽灯标有 220V40W, 表示它的额定电压为 220V, 额定功率为 40W。

【练习与思考】

1.2.1 图 1-9 是五个元件组成的电路, 关联方向下, 如果 $P_1 = -205\text{W}$, $P_2 = 60\text{W}$, $P_4 = 45\text{W}$, $P_5 = 30\text{W}$, 计算元件 3 吸收或发出的功率。

1.2.2 试解释在关联方向下, 如果 $P > 0$, 元件吸收功率; 如果 $P < 0$, 元件发出功率。

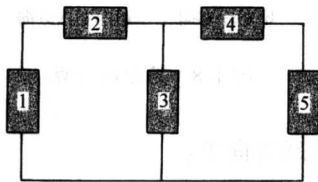


图 1-9 练习与思考 1.2.1 的图

1.3 欧姆定律

通常电路中的物质都会阻碍电荷的移动, 这种物理特性称为电阻特性, 用 R 表示。具有这种物理特性的元件称为**电阻器 (resistor)**。对于长度为 l , 横截面积为 s 的均匀介质, 其电阻为

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1-7)$$

式中 ρ 是导体的电阻率, 单位为欧姆/米 (Ω/m)。在国际单位制中, 电阻的单位是欧姆 (Ω), 规定当电阻电压为 1V、电流为 1A 时的电阻值为 1Ω 。此外电阻的单位还有千欧 ($\text{k}\Omega$)、兆欧 ($\text{M}\Omega$)。

电阻器分固定式和可调式两种, 大多数电阻器是固定式的, 如图 1-10a 所示, 其电阻值为常数。固定式电阻器一般分为绕线式和化合物式, 其中化合物式一般用于大电阻的制造。电阻的符号如图 1-10b 所示。



图 1-10 固定式电阻器的外形及符号

可调式电阻器也称电位器, 如图 1-11a 所示。电位器为三端元件, 可通过滑动一端来改变电阻值。电位器的符号如图 1-11b 所示。



图 1-11 电位器的外形及电路符号

欧姆定律 (Ohm's law) 指出: 通常电阻两端电压与电流的比值是一常数。在直流电路里, 欧姆定律用公式表示为