

中等专业学校教材

电工基础



黑龙江科学技术出版社

中等专业学校教材

电 工 基 础

李 树 燕 主编

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区建设街35号)

哈尔滨印刷二厂印刷·黑龙江省新华书店发行

开本787×1092毫米1/16·印张26.75/·字数600千

1985年3月第一版·1985年3月第一次印刷

印数 1—26,000

书号: 15217·151 定价: 4.95元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划。列入规划的教材、教学参考书、实践指导书等共217种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社，西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由电子工业部中专电子类教材编审委员会无线电技术编审小组审定，并统一安排出版。

本教材由南京无线电工业学校李树燕担任主编，南京电力学校熊晔担任主审。编审者均依据无线电技术编审小组审定的教材编写大纲进行编写和审阅。

本教材的参考教学时数为156学时，其中带*号的章节为选学内容，可视教学情况进行安排。本教材主要内容为交直流电路的分析和计算，电场和磁场的基本物理量，以及电磁现象的基本规律。使用本教材时，学生应具备中专数学与中专物理的基础知识。本教材注意与数学中的微积分、傅里叶级数和二阶常系数线性微分方程等内容的配合。

本教材第一章至十一章由李树燕编写，第十二章由吴祖耀编写，张文明编写了附录，并由李树燕统编全稿。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

本书主要符号

(GB1434—78)

A	功
B	磁感应强度
b	电纳
b_L	感纳
b_c	容纳
C	电容
D	电位移
E	电动势
e	电子电荷, 瞬时电动势
$\mathcal{E}$	电场强度
F	力
f	频率
G	电导
g	电导
H	磁场强度
I	电流
I_{av}	电流平均值
I_L	线电流
I_ϕ	相电流
i	瞬时电流
j	虚单位
K	耦合系数, 开关
K_f	波形因数
K_c	波顶因数
k	耦合度
L	自感系数
l	路径, 长度
M	互感
N	绕组匝数
n	变压比 (变换系数)
P	功率, 有功功率
p	极对数
Q	电量, 无功功率, 品质因数, 热量

q	电荷电量	ψ	磁链, 电通量
R	电阻	ω	角频率
S	视在功率, 面积	$\cos\varphi$	功率因数
T	周期	x_e	电极化率
t	时间		
U	电压		
U_L	线电压		
U_ϕ	相电压		
u	瞬时电压		
V	体积		
v	速度		
W	能量		
W_C	电场能量		
W_L	磁场能量		
X	电抗		
x_L	感抗		
x_c	容抗		
Y	复导纳		
y	导纳 (复导纳的模)		
Z	复阻抗		
z	阻抗 (复阻抗的模)		
α	电阻温度系数		
β	角度		
γ	电导系数		
δ	电流密度, 介质损耗角		
ϵ	介电系数		
ϵ_0	真空介电系数		
ϵ_r	相对介电系数		
η	效率		
λ	波长		
μ	导磁系数		
μ_0	真空导磁系数		
μ_r	相对导磁系数		
ρ	电阻系数, 电荷体密度		
σ	电荷面密度		
τ	时间常数, 电荷线密度		
Φ	磁通		
φ	阻抗角, 相位差		

目 录

本书主要符号一览表

第一章 直流电路的分析与计算

§1-1 电路的基本知识	1
§1-2 电阻元件	5
§1-3 电压源与电流源	8
§1-4 基尔霍夫定律	13
§1-5 电路中各点电位的分析与计算	18
§1-6 回路电流法	23
§1-7 节点电压法	27
§1-8 Y形网络与 Δ 形网络的等效变换	31
§1-9 叠加定理	35
§1-10 戴维南定理与诺顿定理	38
§1-11 受控源	46
*§1-12 负载获得最大功率的条件	51

习题

第二章 交流电路的基本概念

§2-1 交流电的基本概念	61
§2-2 正弦交流电	64
§2-3 交流电的有效值和平均值	71
§2-4 正弦量的旋转矢量表示法	73
§2-5 纯电阻的交流电路	77
§2-6 电感	79
§2-7 纯电感的交流电路	84
§2-8 电容	87
§2-9 纯电容的交流电路	92

习题

第三章 正弦交流电路的分析与计算

§3-1 正弦量的复数表示法	100
§3-2 电阻电路、电感电路和电容电路的相量关系式	105
§3-3 用符号法计算R—L串联电路	108
§3-4 用符号法计算R—C串联电路	113
§3-5 用符号法计算R—L—C串联电路。多阻抗的串联	118
§3-6 用符号法计算并联电路	123

§3—7 复数阻抗与复数导纳的等效变换	132
§3—8 复杂的交流电路	134
§3—9 功率因数的提高	140
§3—10 交流电路的实际元件	142
*§3—11 正弦交流电路负载获得最大功率的条件	144

习题

第四章 谐振电路

§4—1 串联电路的谐振	155
§4—2 串联谐振电路的谐振曲线和选择性	161
§4—3 并联电路的谐振	165
*§4—4 并联谐振回路在失谐时的阻抗	171

习题

第五章 互感耦合电路

§5—1 互感	177
§5—2 互感线圈的串联	184
§5—3 互感线圈的并联	188
§5—4 空芯变压器	191

习题

第六章 正弦三相电路

§6—1 三相交流电	202
§6—2 三相电源的连接	204
§6—3 三相负载的连接	207
§6—4 三相电路的功率	213
§6—5 三相电流的旋转磁场	215
§6—6 保护接地与保护接零	220

习题

第七章 非正弦电路

§7—1 非正弦周期波的产生	225
§7—2 谐波分析法	226
§7—3 周期性非正弦量的最大值、平均值和有效值	235
§7—4 非正弦周期性线性电路的分析与计算	237
§7—5 周期性非正弦电路的功率	244
§7—6 滤波器的概念	247

习题

第八章 线性电路中的过渡过程

§8—1 电路的过渡过程与换路定律	253
§8—2 $R-C$ 电路短接时的过渡过程	257
§8—3 $R-C$ 串联电路接通直流电压后的过渡过程	260

§8-4	R—L串联电路中的过渡过程	269
§8-5	三要素法	275
§8-6	L—C电路中的自由振荡	282
§8-7	零输入时的R—L—C串联电路	284
习题		
第九章 静电场		
§9-1	电场强度与电位	294
§9-2	电介质与介质的极化	305
§9-3	高斯定理	308
§9-4	电容的计算	313
*§9-5	静电场的边界条件	316
§9-6	电场能量及能量密度	321
习题		
*第十章 恒定电场		
§10-1	电流与电流密度	326
§10-2	导电媒质中恒定电场的基本方程	329
§10-3	分界面上的边界条件	331
习题		
第十一章 恒定磁场		
§11-1	磁场与磁感应强度	337
§11-2	磁通	340
§11-3	比奥—沙伐定律	341
§11-4	安培环路定律	346
*§11-5	磁场的边界条件	352
§11-6	电感的计算	352
§11-7	磁场能量	358
*§11-8	电磁铁的电磁吸力	361
习题		
第十二章 磁路及变压器		
§12-1	铁磁性物质	365
§12-2	磁路和磁路定律	369
§12-3	交流铁芯线圈	373
§12-4	理想变压器	378
§12-5	实际变压器	381
*§12-6	全耦合变压器	385
习题		
附录 I 电工测量		
§附1-1	电工仪表与测量的基本知识	390

§附1—2 磁电系仪表及整流系仪表	394
§附1—3 电磁系仪表	399
§附1—4 电动系仪表	401
§附1—5 万用表	405
§附1—6 单臂电桥	411
附录 II 电动机	
§附2—1 三相异步电动机	413
§附2—2 单相异步电动机	415

第一章 直流电路的分析与计算

§1-1 电路的基本知识

一、电路和电路模型

人们在日常生活、生产和科学研究中广泛地使用着种类繁多的电路，例如家庭中使用的照明电路；收音机和电视机中，有将微弱信号进行放大的放大电路，有从各种不同信号中选择所需信号的输入调谐电路；计算机中有存储信息的记忆电路；交通运输中有各种信号的控制电路；自动化生产线上有各种专门用途的电子线路等等。

实际电路是由电工设备和元器件等组成的。我们把电路中供给电能的设备和器件称为电源，而把用电设备和器件称为负载。手电筒电路就是一个简单的实用电路。这个电路是由一个电源（干电池）、一个负载（小灯泡）、一个开关和连接导体（手电筒壳）所组成（图1-1）。

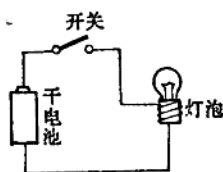


图1-1 手电筒电路

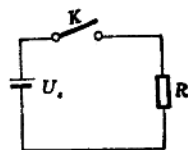


图1-2 图1-1 的电路图

实际电路中的元件虽然种类繁多，但在电磁现象方面却有共同之处。只不过有的元件主要消耗电能，如各种电阻器、电灯、电铬铁等；有的元件主要储存磁场能量，如各种电感线圈；有的元件主要储存电场能量，如各种类型的电容器；有的元件主要供给电能，如电池和发电机。为了便于对电路进行分析和计算，我们常把实际的元件加以近似化、理想化，在一定的条件下用足以表征其主要特征的“模型”来表示。例如，我们用“电阻元件”这样一个理想电路元件来反映消耗电能的特征，因为当电流通过电阻元件时，在它内部进行着把电能转换成热能等不可逆的过程。这样，在电源频率不十分高的电路中，所有的电阻器、电灯、电铬铁等实际电路元件，都可以用“电阻元件”这个模型来近似的表示。同样，电感线圈可以用“电感元件”来近似的表示，电容器可以用“电容元件”来近似的表示。干电池、蓄电池等直流电源则可用一个“电压源元件”来近似的表示。

电路中的实际元件用其模型表示后，就可绘出只由理想元件组成的电路图。这种由理想元件构成的电路，就称为实际电路的“电路模型”。今后本书中未加特殊说明时，我们所说的电路均为这种抽象的电路模型，所说元件均指理想元件。

为了简便起见，一般电路都不画出实物图，而是画出电路模型。各种理想元件都采用了一定的符号，常用电路元件模型的符号见表1—1。

表1—1 常见电路元件的符号

元 件 名 称	符 号	元 件 名 称	符 号
电 池		可 变 电 容	
电 压 源		导 线	
电 流 源		相连接的交叉导线	
电 阻		不相连接的交叉导线	
电 位 器		开 关	
可 变 电 阻		熔 丝	
电 灯		接 地	
无铁芯的电感		电 流 表	
有铁芯的电感		电 压 表	
电 容			

二、单位制

本书采用国际单位制 (SI)。在国际单位制中长度以米 (m) 为单位；质量以千克 (kg) 为单位；时间以秒 (s) 为单位；电流强度以安培 (A) 为单位；热力学温度以开尔文 (K) 为单位；物质的量以摩尔 (mol) 为单位；发光强度以坎德拉 (cd) 为单位。其它物理量的单位则根据其定义从这些基本单位导出。例如，电量的单位是库仑，1 库仑 = 1 安培·秒；电压的单位是伏特，1 伏特 = $1 \frac{\text{焦耳}}{\text{库仑}}$ ；力的单位是牛顿，1 牛顿 = $1 \frac{\text{千克} \cdot \text{米}}{\text{秒}^2}$ ……等。

三、电流和电压的参考方向

在初等物理学中已经学过，电荷的定向移动就叫做电流。电流的实际方向习惯上指正电荷运动的方向。单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度，用以衡量电流的大小。电流强度简称为电流，用符号 i 表示。大小和方向均不随时间改变的电流叫做恒定电流，简称直流，其强度用符号 I 表示。

在分析电路时，对复杂电路中某一段电路里电流的实际方向有时很难立即判定，有时电流的实际方向还在不断地改变，因此在电路中很难标明电流的实际方向。由于这些原因，引入了电流“参考方向”这一概念。

在一段电路中事先任意选定一个方向作为电流的方向，这个选定的电流方向就叫做

电流的参考方向。当然所选定的电流参考方向并不一定是电流的实际方向。参看图 1—3，若电流的实际方向与任意选定的电流参考方向一致，则电流值为正，即 $i > 0$ ；反之，若电流的实际方向与选定的参考方向相反，则电流值为负，即 $i < 0$ 。这样，电流便成为一个代数量，其值有正有负。于是在选定的电流参考方向下，根据电流值的正和负，就可以确定出某一时刻电流的实际方向。

如图 1—3 所示，本书中电流的参考方向用实线箭头表示，电流的实际方向用虚线箭头表示。有时电流的参考方向也用双下标表示，如 i_{AB} ，其参考方向是由 A 指向 B。

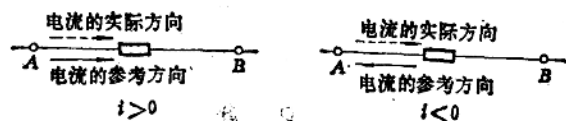


图 1—3 电流的参考方向与实际方向

电路分析中用到的另一个重要物理量是电压。电路中 a、b 两点间电压的大小等于电场力由 a 点移动单位正电荷到 b 点所作的功，用符号 u 表示。a、b 间的电压也就是 a 点的电位与 b 点的电位之差。

两点之间电压的实际方向是由高电位点指向低电位点。与前面所述理由相同，对元件或电路两端可以任意选定一个方向为电压的参考方向，同时，把电压看成代数量。当电压的实际方向与它的参考方向一致时，电压值为正，即 $u > 0$ ；反之，当电压的实际方向与它的参考方向相反时，电压值为负，即 $u < 0$ 。

另外，对电压也采用规定参考极性的方法。其参考极性是在元件或电路两端用“+”、“-”符号来表示：“+”号表示高电位端叫正极，“-”号表示低电位端，叫负极。当电压值为正时，该电压的真实极性与所标的参考极性相同；当电压值为负时，该电压的真实极性与所标的参考极性相反。电压由正极指向负极的方向就是电压的参考方向。

在电路中（图 1—4），电压的参考方向可以用一个实线箭头来表示；也可以用正（+）、负（-）极性来表示；还可以用双下标来表示，如 U_{AB} 表示这电压的参考方向由 A 指向 B。

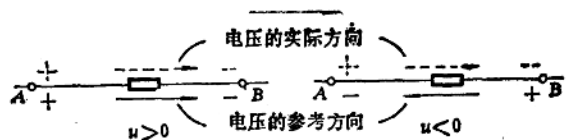


图 1—4 电压的参考方向和它的实际方向

对任何电路进行分析时，都应先选定各处的电压和电流的参考方向。在未选定参考方向的情况下，电流或电压的正负都是毫无意义的。参考方向在电路分析中起着十分重要的作用。

对于一段电路或一个元件上电压的参考方向和电流的参考方向可以单独地加以选定。如果选定电流的参考方向与电压的参考方向一致，即选定电流从标以电压“+”极性的一端流入，从标以“-”极性的另一端流出，则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向，简称为关联方向，见图1—5。

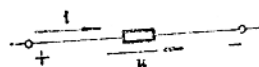


图1—5 电压和电流的关联参考方向

四、功率

电路分析中还常用到的一个物理量是功率。当正电荷从电路元件的电压“+”极，经元件移到电压的“-”极，即从高电位端移到低电位端，是电场力对电荷做功，这时元件吸取能量。相反地，正电荷从元件的电压“-”极经元件移到电压“+”极，是外力克服电场力对电荷做功，这时元件向外放出能量。

设在 dt 时间内，当正电荷 dq 从电路元件的电压“+”极经元件移到电压“-”极，如元件上电压降为 u ，则电场力对电荷做功为

$$dW = u dq$$

也就是说，在 dt 时间内，电路元件吸取（或消耗）了电能 dW 。

电能量对时间的变化率就是电功率。在电工中，电功率常简称为功率，用符号 P 表示。

$$P = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt}$$

$$\text{由于 } i = \frac{dq}{dt}$$

$$\text{所以 } P = ui$$

$$(1-1)$$

在电压和电流的关联参考方向下，功率 P 是元件吸取的功率。当计算出功率值为正即 $P > 0$ 时，表示元件实际吸取或消耗功率；当计算出功率值为负即 $P < 0$ 时，表示元件实际发出功率。

如果电压的参考方向与电流的参考方向相反，表示正电荷是从低电位端移往高电位端，则 $P = ui$ 是元件发出的功率。在这种情况下，计算出 $P > 0$ 时，表示元件实际发出功率，计算出 $P < 0$ 时，表示元件实际吸取功率，见图1—6。

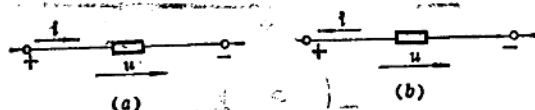


图1—6 功率

(a) $P > 0$ 元件吸收电能， $P < 0$ 元件发出电能

(b) $P > 0$ 元件发出电能， $P < 0$ 元件吸收电能

在国际单位制中，电压单位为伏，电流的单位为安，则功率的单位为瓦特，简称瓦(W)，1千瓦(KW) = 10^3 瓦(W)。

以上有关功率的讨论同样适用于一段电路。

§1-2 电 阻 元 件

一、电阻与电导

电阻元件是一种对电流呈现阻碍作用的元件。由于电阻元件有阻碍电流流动的作用，所以电流流过电阻元件就要消耗电能。因此沿电流流动方向必然会出现电压降。在电压和电流的关联方向下(图1-7)，欧姆定律可写为

$$u = Ri \quad (1-2)$$

式中R为元件的电阻。电阻元件可以用它的电阻R来表征它的特性，因此R是一个电路参数。当电压u的单位为伏(V)，电流i的单位为安(A)时，R的单位为欧姆，简称欧(Ω)。

线性电阻元件是二端理想元件，即在任何时刻，它两端的电压与其电流的关系都服从欧姆定律。

如果把电阻元件的电压取为纵坐标，电流取为横坐标，画出电压和电流的关系曲线，则这条曲线称为该电阻元件的伏安特性。线性电阻元件的伏安特性是通过坐标原点的一条直线，如图1-8所示。

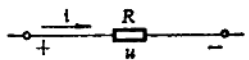


图 1-7 线性电阻

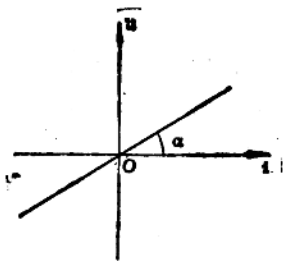


图 1-8 线性电阻元件的伏安特性

电阻的倒数称为电导，用符号G表示，则

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-3)$$

电导的单位是西门子(S)，也可用姆欧($\mathcal{S}$)表示。用电导表征电阻元件时，欧姆定律为

$$i = Gu \quad (1-4)$$

如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相反，则欧姆定律写为

$$u = -Ri$$

或

$$i = -Gu$$

所以公式必须与参考方向配套使用。

在电压和电流的关联方向下，任何时刻线性电阻元件吸取的功率

$$p = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-5)$$

电阻 R 和电导 G 是正实常数，故功率 p 恒为正值。这说明，任何时刻电阻元件绝不可能发出电能，而是从电路中吸取电能，所以线性电阻元件是耗能元件。

与线性电阻元件不同，非线性电阻元件的伏安特性不再是一条通过原点的直线，而是一条曲线。所以元件上电压和通过元件的电流不服从欧姆定律，它们不成正比。图 1-9 给出某二极管的伏安特性。

严格来说，所有电阻器、电灯、电炉等实际电路元件的电阻都或多或少是非线性的。但是，对于金属膜电阻、炭膜电阻、线绕电阻等实际元件，在一定范围内，它们的阻值基本不变。若当作线性电阻来处理，可以得出满足实际需要的结果。

今后，为了叙述方便，把线性电阻元件简称为电阻。这样“电阻”一方面表示一个电阻元件，另一方面也表示这个元件的参数。

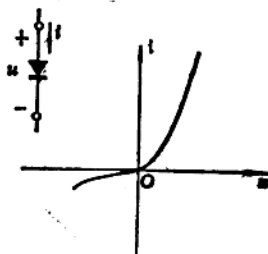


图 1-9 二极管的伏安特性

二、电阻的温度系数

导体的电阻与温度有关。当温度升高时，导体内的自由电子（或离子）在定向运动的过程中与导体中的晶体点阵（或分子）碰撞的次数增多，其平均速度降低，所以电流减小，电阻增加；另一方面，温度升高又会使导体的自由电子浓度（或离子浓度）增加，使电流变大，电阻减小。这两种相反的作用同时存在，使电阻与温度之间的关系出现三种不同情况。在第一类导体（如金属）中，当温度升高时，自由电子的碰撞加剧占优势，因此电阻随温度的升高而增加。在第二类导体（如电解液、碳素）中，当温度升高时，自由电子浓度（或离子浓度）增加占优势，因而电阻随温度升高而减小。在第三类导体（如康铜、锰铜等某些合金）中，两种相反的作用接近相互抵消，以致温度升高或降低时，电阻几乎没有变化。

设 R_1 为某导体在温度 t_1 时的电阻， R_2 为温度 t_2 时的电阻。那么电阻的相对增量为 $\frac{R_2 - R_1}{R_1}$ 。在大量实验的基础上发现：在 0°C 至 100°C 的范围内，金属导体电阻的相对增量与温度变化成正比，即

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

或

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

那么

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-6)$$

其中 α 为一比例常数，称为电阻温度系数。它的物理意义是：升高单位温度时导体电阻的增加率（相对增量）。 α 的单位是 $1/^\circ\text{C}$ （或 $1/^\circ\text{C}$ ）。

各种金属的电阻温度系数不同，它们的数值由实验测定，见表1—2。

表1—2 常见金属的电阻温度系数

材 料	平均电阻温度系数 ($0^\circ\sim 100^\circ\text{C}$) α ($1/^\circ\text{C}$)
银	0.0035
铜	0.0041
铝	0.0042
黄铜（铜锌合金）	0.002
铁	0.001
铄	0.0052
铂	0.00389
康铜	0.000005
锰铜	0.00005
镍铬合金	0.000013
炭	-0.0005

锰铜、康铜的电阻温度系数很小，用它们制成的电阻差不多不随温度变化，所以常用来制作标准电阻、电阻箱以及电工仪表中的分流电阻和附加电阻。

有些半导体材料的电阻温度系数特别大，而且是负值。这是由于随着温度增高半导体内载流子大量增加的缘故。热敏电阻就是由这样的半导体材料制成的，在电子线路中常用来补偿其它元件的电阻随温度的变化。

现代科学正在研究超导现象。实验证明：在温度接近于绝对零度时，某些金属的电阻趋向于零。这样的材料被称为超导电材料。在用超导电材料做成的闭合电路中，电流一经激发，就毋需电源便能持续几个星期之久，并不发热。若用超导电材料去作一些设备，便可以避免发热，省去冷却装置，减小体积。

最后介绍一下电器设备的额定值。电器设备的额定值是制造厂给用户提供的，它是考虑设备安全运行的限额值，也是设备经济运行的使用值。设备在额定运行情况下能保证设备的一定寿命。通常制造厂规定了在一定的工作条件下电器产品的额定电压、额定电流、额定功率等等。确定产品额定值要考虑很多因素，其中最主要的因素就是考虑绝缘的可靠性。

如果外加电压大大高于额定电压，电器设备的绝缘材料将被击穿，造成短路事故。如果通过设备的电流超过额定值，设备温度过高，不仅影响寿命，有些材料甚至会出现碳化，造成设备和人身事故。如果外加电压或工作电流比额定值小得多，那么有些电器设备就会处于工作不良状态，有的不能工作甚至引起事故。例如额定电压为220伏，额定功率为40瓦的灯泡，若接到电压300伏上，灯泡寿命将大大缩短；若接到110伏的电压上，则灯光昏暗。又如一单位只需用电20千瓦，却安装一200千伏安的变压器，显然是不经济的。