

广东节能培训教材之三

合理用电 基础与技术

广东省节能培训教材编写组 编

Guangdong
Energy Efficiency
Training Series



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

广东节能培训教材之三

合理用电 基础与技术

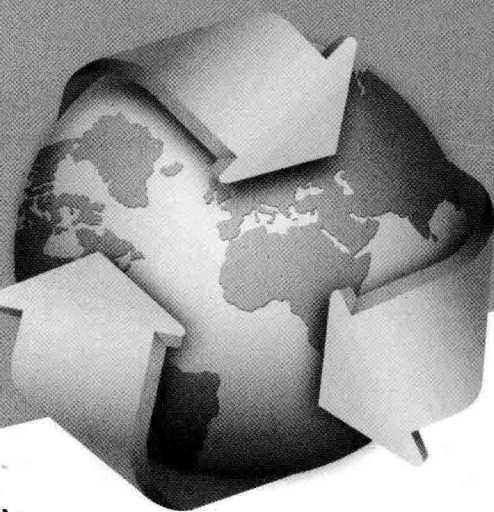
广东省节能培训教材编写组 编

Guangdong
Energy Efficiency
Training Series

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



内 容 提 要

《合理用电基础与技术》是《广东省节能培训教材》第三分册，全书分两篇，第一篇为基础篇，包括电工基础、电气技术基础、变压器与电机原理等主要的电工基础；第二篇为应用篇，包括企业供电合理化及其管理、电机系统节能技术、电能转换为热能的合理化、电能转换为化学能的合理化、照明技术与节能、企业用电合理化及管理。

本书可供用电单位能源管理负责人学习使用，也可作为节能服务机构技术人员的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

合理用电基础与技术/《广东省节能培训教材》编写组编. —北京：
中国电力出版社，2013.3

广东省节能培训教材

ISBN 978-7-5123-4095-4

I. ①合… II. ①广… III. ①用电管理-技术培训-教材
IV. ①TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 032215 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 5 月第一版 2013 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.5 印张 491 千字

印数 0001—3000 册 定价 60.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

广东省节能培训教材编委会

主 任 林位超

副主任 谢时超 陈 健

委 员 曹海滨 凌志超 马晓茜 刘永强 张益民

田中华 许葆青 文 娟 陈仁珂 徐新鹏

洪蒙纳 易国刚 姚 涛 邓慧华 肖明威

廖艳芬 曹江华 刘金华 梁 梅

能源短缺已经成为当前制约经济社会可持续发展的突出问题和矛盾。节约能源、提高能效是解决能源问题的有效途径。在 2007 年修订的《中华人民共和国节约能源法》里，将节约资源确定为基本国策，明确国家实施节约与开发并举、把节约放在首位的能源发展战略，国家实行节能目标责任制和节能考核评价制度，将节能目标完成情况作为地方人民政府及其负责人考核评价的一项内容。在《中华人民共和国“十二五”规划》中，确定了科学发展的主题和加快转变经济发展方式的主线，明确要求把建设资源节约型、环境友好型社会作为加快转变经济发展方式的重要着力点。党的“十八大”提出，要把资源消耗等纳入经济社会发展评价体系，建立体现生态文明要求的目标体系、考核办法和奖惩机制；要求加强生态文明宣传教育，增强全民节约意识、环保意识、生态意识，形成合理消费的社会风尚，营造爱护生态环境的良好风气。节能减排作为转变发展方式、调整经济结构的重要抓手，作为落实科学发展观的重要标志，摆在了更加突出的位置。

《中华人民共和国节约能源法》规定，重点用能单位应当设立能源管理岗位，并对能源管理负责人的任职条件和负责的工作提出了明确要求：需具有节能专业知识、实际经验以及中级以上技术职称；负责组织本单位用能状况的分析、评价，组织编写能源利用状况报告，提出节能工作的改进措施并组织实施，并接受节能培训。《广东省节约能源条例》也对重点用能单位的管理作出了明确规定，并要求节能行政主管部门定期免费组织重点用能单位能源

管理人员参加节能培训。

广东省从 2008 年开始组织开展重点用能单位能源管理人员节能培训。参照上述要求，同时也为促进节能服务单位的健康发展，广东省组织开展了节能服务单位技术人员节能培训。广东省节能监察中心按照主管部门的要求，做了卓有成效的工作，并在总结近几年节能培训经验的基础上，借鉴国外和兄弟省份节能培训经验，结合广东省的实际情况，组织有关专家学者成立了广东省节能教材编写组，编写了本套节能培训教材，分别为《节能管理》《合理用热基础与技术》《合理用电基础与技术》。

本套教材的出版，将有利于广东省节能培训工作的进一步规范，帮助广大节能管理工作者和服务机构人员系统掌握节能基础知识、基本技术和相关政策，为确保完成节能目标任务做出贡献。

广东省经济和信息化委员会副主任

林位超

2013 年 4 月 28 日

为帮助重点用能单位能源管理负责人、节能服务机构技术人员以及广大从事节能工作的读者学习掌握节能基础理论和相关知识,广东省节能监察中心在总结近几年节能培训经验的基础上,借鉴国外和兄弟省份的节能培训经验,按照主管部门的要求,结合广东省的实际情况,组织有关专家学者成立了广东省节能教材编写组,编写了这套《广东省节能培训教材》。本套培训教材共三册,第一册为《节能管理》,第二册为《合理用热基础与技术》,第三册为《合理用电基础与技术》。

本套培训教材的主要编写思路 and 原则:一是注重提高基础素质和业务能力;二是注重培训教材的系统性,既要重视基础理论知识,也要重视实际工程技术应用;三是立足广东,体现广东特色。为帮助读者更好地理解掌握教材内容,书中对重点内容还列举了实例和思考题。

本套培训教材是广东省重点用能单位能源管理负责人、节能服务机构技术人员培训考试教材,亦可作为政府节能管理人员、企业能源管理人员的培训教材,可根据不同对象和用途适当选取内容,也可供广大从事节能工作的读者学习参考。

《合理用电基础与技术》为《广东省节能培训教材》第三分册,主要参照 GB/T 3485—1998《评价企业合理用电导则》规定的评价企业合理用电的技术管理原则,介绍企业合理利用电能的基础知识和技术。本书分为两篇,第一篇为基础篇,包括电工基础、电气技术基础和变压器与电机原理;第二篇为应用篇,包括企业供电合理化及其管理、电机系统节能技术、电能转换为热能和化学能的合理化、照明技术与节能以及企业用电合理化及管理。

《合理用电基础与技术》分册的编写人员分工为:第一章至第三章、第五章由曹江华编写,第四章由刘金华编写,第六章至第八章由刘永强编写,第

九章由梁梅编写，由刘永强负责统稿。

教材编写过程中，得到部分高等院校、节能监察机构、重点耗能行业协会、节能服务公司和重点耗能企业有关专家的鼎力支持，在此衷心地感谢李继庚、谢运祥、陈渊睿（华南理工大学），陈清林（中山大学），陈颖（广东工业大学），仝兆丰（中科院广州能源所），冯炳文（广东省钢铁工业协会），李文光（广东省石油化工协会），许日昌（广东省水泥行业协会），王静（广州绿能环保技术咨询有限公司），林知亮（广东卡特能源科技有限公司），余宇航（广东中钰科技有限公司），丁毅（广东绿维能源科技有限公司），吴疑（韶关钢铁股份有限公司），刘忠（中国石油化工股份有限公司广州分公司），陈峰（广东蒙娜丽莎陶瓷有限公司），陶贤（莎米特陶瓷有限公司），朱良发（英德海螺水泥有限公司），梁朝晖（佛山市经信局），许春才（佛山市技术标准研究院），何雄（肇庆市节能监察中心），陈伟军（中山市节能监察中心）给予的大力支持。

由于水平和能力所限，书中难免会有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 4 月

丛书序

前言

第一篇 基础篇

第一章 电工基础	3
第一节 电路的概念与基本定律	3
第二节 电路的分析方法	10
第三节 交流电路分析	12
第四节 磁路与铁芯线圈	29
思考题	34
第二章 电气技术基础	35
第一节 电气测量基础	35
第二节 电力电子技术	49
第三节 供电可靠性与电能质量	64
思考题	75
第三章 变压器与电机原理	77
第一节 变压器工作原理	77
第二节 变压器运行	91
第三节 三相感应电动机	94
第四节 永磁电动机与无刷直流电动机	101
第五节 其他新型高效电动机简介	113
第六节 电动机的选型与节能	115
思考题	120

第二篇 应用篇

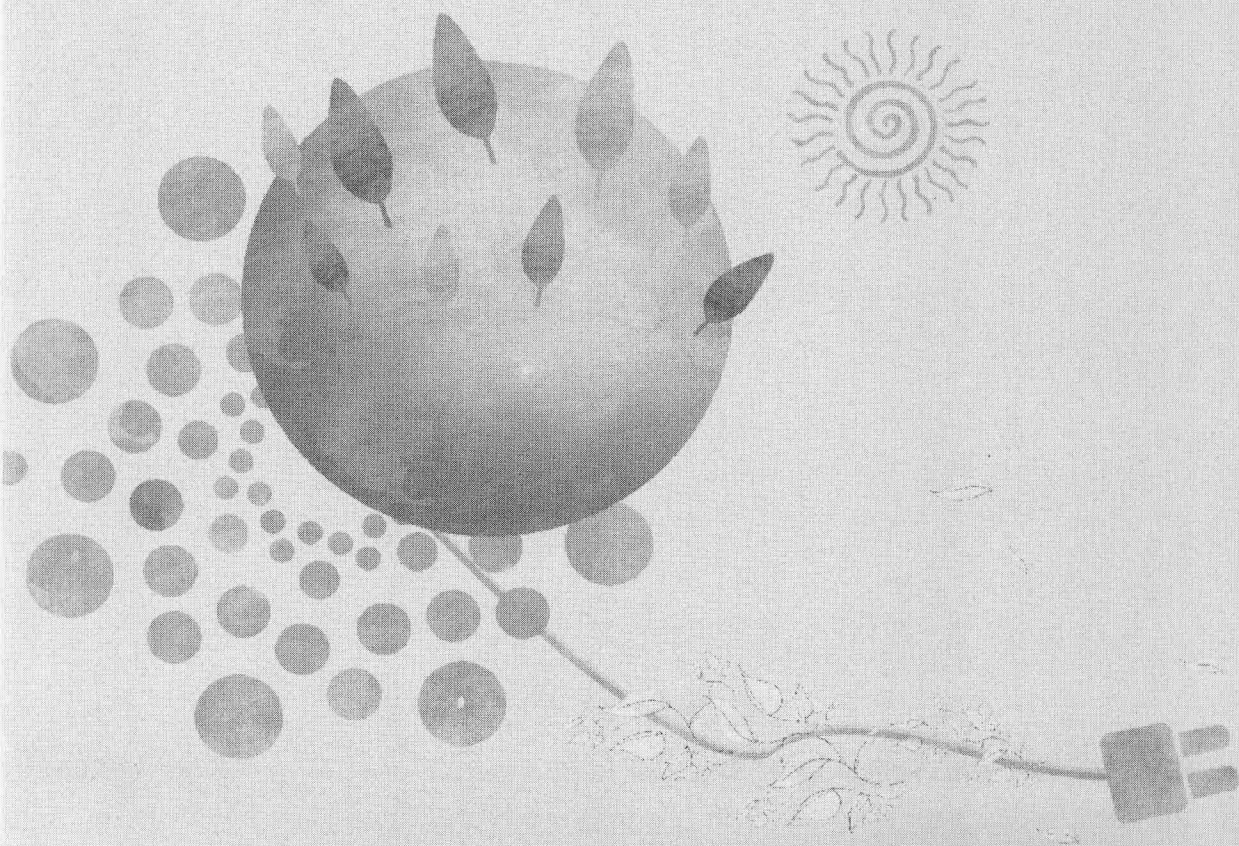
第四章 企业供电合理化及其管理	125
第一节 企业电力负荷	125
第二节 企业供电系统的损耗与供需平衡	134
第三节 供电方案确定	145
第四节 电力变压器损耗与能效评价	148
第五节 削峰、填谷与移峰填谷技术	155
第六节 无功补偿	158
思考题	166
第五章 电机系统节能技术	167
第一节 电机系统的软启动节能	167
第二节 变频调速技术基本原理	171
第三节 变频调速技术应用	177
第四节 风机与泵的节能	186
第五节 空气压缩机与制冷压缩机的节能技术	199
第六节 电机系统节能与能效标准	209
思考题	230
第六章 电能转换为热能的合理化	231
第一节 常用电加热设备	231
第二节 感应加热电源	232
第三节 电弧炉用电源	236
第四节 矿热炉无功补偿	247
第五节 电加热设备的功率选择	254
第六节 常用冶金熔炼与热处理电源选型	255
思考题	257
第七章 电能转换为化学能的合理化	259
第一节 电能转化为化学能理论概述	259
第二节 电解电源技术	262
第三节 电镀电源技术	267
第四节 常用电解、电镀电源保护系统	276

第五节 电化电源选择	279
思考题	286
第八章 照明技术与节能	287
第一节 照明的基本概念与常见光源	287
第二节 灯具的选用	296
第三节 现代照明技术与应用	299
第四节 企业照明	303
第五节 工业照明节能设计	312
第九章 企业用电合理化及管理	315
第一节 合理用电管理	315
第二节 合理用电的目标化管理	338
第三节 分析与整改	345
思考题	363
参考文献	364

广东省节能培训教材之三

第一篇

基础篇



第一章

电工基础

第一节 电路的概念与基本定律

一、电路与参考方向

1. 电路和电路模型

电路是电流的通路,是为了某种需要由电工设备或电路元件按一定方式组合而成的。其结构形式和功能是多种多样的,如最典型的电力系统,其示意图如图 1-1 所示,它的作用是实现电能的传输、分配与转换,其中包括电源、负载和中间环节三个组成部分。发电机把其他形式的能量转换成电能;负载(即用电设备),把电能转换为其他形式的能量;中间环节(图中为升/降压变压器和输电线)连接电源和负载,起到传输和分配电能的作用。



图 1-1 电力系统示意图

电路的另一个作用是传递和处理信号,常见的如扩音器,其电路示意图如图 1-2 所示。

为了便于用数学方法分析电路,一般要将实际电路模型化,用足以反映其电磁性质的理想电路元件(电阻、电容元件和电源元件等)或其组合来模拟实际电路中的器件,从而构成与实际电路相对应的电路模型。在电路图中,各种电路元件都用规定的图形符号表示。例如,常用的手电筒其实际电路原件有干电池、电灯、开关和筒体,电路模型如图 1-3 所示。



图 1-2 扩音器电路示意图

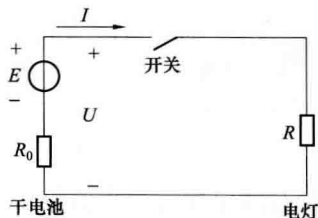


图 1-3 手电筒的电路模型

2. 电流和电压的参考方向

图 1-3 是最简单的直流电阻电路，其中 E 、 U 和 R_0 分别为电源的电动势、端电压和内电阻， R 为负载电阻。当开关闭合后，电路中有电流 I 。电流 I 、电压 U 和电动势 E 是电路中的基本物理量，它们的规定方向见表 1-1。

表 1-1 物理中对基本物理量规定的方向

物 理 量	实 际 方 向	单 位
电流 I	正电荷运动的方向	kA、A、mA、 μ A
电压 U	高电位→低电位 (电位降低的方向)	kV、V、mV、 μ V
电动势 E	低电位→高电位 (电位升高的方向)	kV、V、mV、 μ V

在电路分析中，当涉及某个元件或部分电路的电流或电压时，有必要指定电流或电压的参考方向，或称为正方向。当实际方向与参考方向一致时，电流（或电压）值为正值；当实际方向与参考方向相反时，电流（或电压）值为负值。

电流和电压的参考方向各有如下两种表示方法：

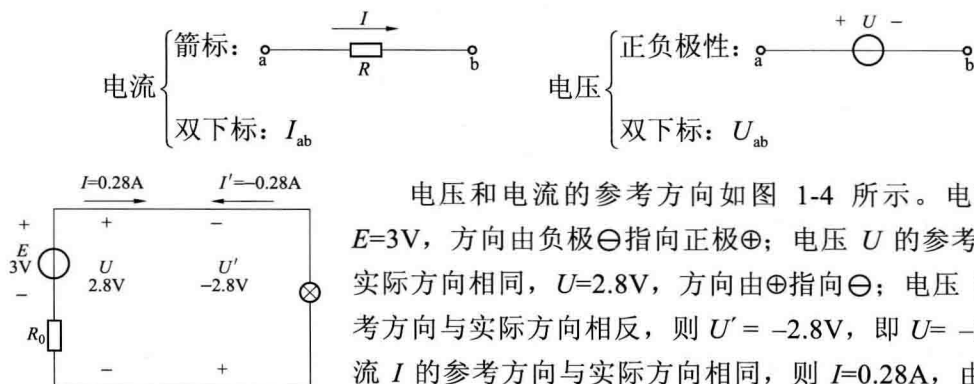


图 1-4 电压和电流的参考方向

3. 电功率和能量

$t_0 \sim t$ 的时间内，元件吸收的电能 W 可根据电压 $u = \frac{dW}{dq}$ 求得，具体为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

由于 $i = \frac{dq}{dt}$ ，因此

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi$$

能量是功率对时间的积分，因此元件吸收的电功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-1)$$

在指定电压和电流的参考方向后,应用式(1-1)求功率时需注意:当 u 和 i 参考方向一致时, $p=ui$ 表示元件吸收的功率; $p>0$ 表明元件确实吸收功率;反之,表明元件发出功率。当 u 和 i 参考方向相反时, $p=ui$ 表示元件发出的功率; $p>0$ 表明元件确实发出功率;反之,表明元件吸收功率。对某完整的电路,应满足功率平衡,即发出的功率应等于消耗的功率。

二、电路基本元件与电路定律

1. 电路元件

电路元件是电路中最基本的组成单元。元件的特性通过与端子有关的物理量描述。每一种元件反映某种确定的电磁性质。

(1) 电阻元件。在图 1-5 中, R 为线性电阻, u 和 i 参考方向一致,根据欧姆定律得出电阻元件的参数

$$R = \frac{u}{i}$$

其中, R 称为元件的电阻,是一个正实常数,因此线性电阻元件的伏安特性是通过原点的一条直线。

电阻元件从 t_0 到 t 的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t u i dt = \int_{t_0}^t R i^2 dt \geq 0$$

表明电能全部消耗在电阻上,转换为热能散发,因此电阻元件是耗能元件。

如果电阻元件的伏安特性不是一条通过原点的直线,则称为非线性电阻元件;如果电阻的 u 与 i 仍是比例关系,但比例系数 R 是随时间变化的,称为时变电阻元件;如果一个线性电阻的伏安特性位于第二、四象限,则此元件的电阻为负值,称为线性负电阻,它实际上是一种发出电能的元件。

(2) 电感元件。电感元件是表征产生磁场、储存磁场能量的元件。图 1-6 是某电感元件(线圈),其上的电压为 u ,当通过电流 i 时,将产生磁通 Φ ,如果线圈有 N 匝,则电感元件的参数为

$$L = \frac{N\Phi}{i}$$

L 称为电感或自感。对于线性电感, L 为常数;非线性电感 L 不为常数。

当电感元件中磁通 Φ 或电流 i 发生变化时,则在电感元件中产生的感应电动势为

$$e_L = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

习惯上规定: i 与 Φ , Φ 与 e_L 的方向均符合右手螺旋定则,因此 i 与 e_L 的参考方向一致,如图

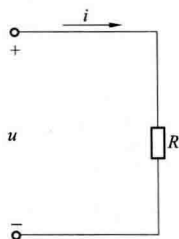
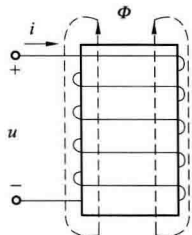
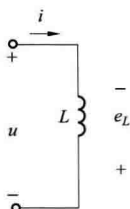


图 1-5 电阻元件



(a)



(b)

图 1-6 电感元件

(a) 示意图; (b) 电路图

1-6 (b) 所示, 则

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-2)$$

由式 (1-2) 可知, 当 i 为常数 (直流) 时, $u=0$, 电感相当于短路; 电感电压 u 的大小取决于 i 的变化率, 与 i 的大小无关, 电感是动态元件, 且因为实际电路中电感的电压 u 为有限值, 则电感电流 i 不能跃变。

由式 (1-2) 写出电流 i 的定积分形式, 得

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi$$

可以看出, 电感元件既是动态元件, 也是记忆元件。

当 u 与 i 参考方向一致时, 电感元件吸收的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

因此当 $i > 0$, $di/dt > 0$ 即电流增大时, $p > 0$, 电感吸收功率; 当 $i > 0$, $di/dt < 0$ 即电流减小时, $p < 0$, 电感发出功率。表明电感在一段时间内将吸收的外部能量转化为磁场能量储存起来, 在另一段时间内又把能量释放回电路, 因此电感元件是无源元件、储能元件, 它本身不消耗能量。

由于在 $t = -\infty$ 时, $i(-\infty) = 0$, 因此从 $-\infty$ 到 t 的时间段内电感吸收的磁场能量为

$$W_L = \int_{-\infty}^t p d\xi = \int_{-\infty}^t Li \frac{di}{d\xi} d\xi = \int_0^{i(t)} L i di = \frac{1}{2} L i^2(t)$$

可以看出, 电感的储能只与当时的电流值有关, 电感电流不能跃变, 反映了储能不能跃变; 电感储存的能量一定大于或等于零。

(3) 电容元件。电容元件是表征产生电场、储存电场能量的元件。

图 1-7 是某电容元件, 其参数为

$$C = \frac{q}{u}$$

C 称为电容。对于线性电容, C 为常数; 对于非线性电容, C 不为常数。

当 u 和 i 参考方向一致时, 电容元件上的电荷 q 或电压 u 发生变化会在电路中引起电流

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知, 当 u 为常数 (直流) 时, $i=0$, 电容相当于开路; 电容电流 i 的大小取决于 u 的变化率, 与 u 的大小无关, 电容是动态元件, 且因为实际电路中电容的电流 i 为有限值, 所以电容电压 u 不能跃变。

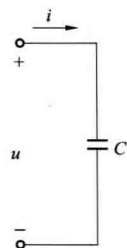


图 1-7 电容元件