



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANQIGONGCHENG GAILUN

# 电气工程概论

熊信银 主编  
唐巍 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

TM/159

2008

DIANQIGONGCHENG GAILUN

# 电气工程概论

主 编 熊信银  
副主编 唐 巍  
编 写 吴耀武 娄素华  
主 审 尹项根 朱永利



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electrical Engineering

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书共分十章，主要介绍电气工程的基础知识，内容包括能量转换原理与基本概念，电气设备的原理与功能，电气设备的分类与系统，设备工作接地与保护接地，电压、功率及电能损耗的计算，短路故障分析与计算，电气设备的控制与保护，过电压及其防护，电气设计与设备选择，电气设备的运行。本书除了注重内容先进、选材合理和教学适用外，还有以下特点：围绕一个“电”过程，既讲强电，又讲弱电，但以强电为主；遵循一个“规律”，这就是人们认识、掌握、分析、设计与运行，进而创新的规律；强调“系统”作用，既讲设备，又讲系统，但以系统为主。在叙述电气设备及其组成系统（子系统）的原理与功能时，强调要发挥系统的整体作用，同时强调电气设备要在一定的系统中才能发挥其作用。

本书主要作为高等学校电气工程及其自动化及相关专业的教材，也可作为电气工程技术人员参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气工程概论/熊信银主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7325 - 6

I. 电… II. 熊… III. 电气工程—高等学校—教材  
IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 077305 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2008 年 7 月第一版 2008 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23 印张 564 千字

定价 36.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
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

# 前 言

近 10 年来,随着科学技术的进步和高等教育改革的深入,电气工程及其自动化专业的教学体系与内容发生了很大变化,调整专业结构,加强学科基础,拓宽专业口径,增强适应性已经成为各个高校的共识。在这种情况下,为满足教学的需要,作者结合多年教学实践尝试编写了本书。

本书共分十章,主要介绍电气工程的基础知识,内容包括能量转换原理与基本概念,电气设备的原理与功能,电气设备的分类与系统,设备工作接地与保护接地,电压、功率及电能损耗的计算,短路故障分析与计算,电气设备的控制与保护,过电压及其防护,电气设计与设备选择,同步发电机、电力变压器、高压断路器和电动机的运行。

本书除了注重内容先进、选材合理和教学适用外,还有以下特点:

(1) 围绕一个“电”过程,既讲强电,又讲弱电,但以强电为主。在叙述能量转换基本原理的基础上,介绍了发电、输变电、配电、用电(电力系统负荷)各个方面的基本知识,电能从生产到使用整个过程中各个环节的基本原理,建立电力系统整体概念。由此给出一个“电”过程全貌,即电能从生产、变换、传输、分配到使用这一完整过程。

(2) 遵循一个“规律”,这就是人们认识、掌握、分析、设计与运行,进而创新的规律。本书介绍了电气设备的原理与功能,基本计算与分析,设备的控制与保护,电气设计与设备的选择,同步发电机、电力变压器、高压断路器和电动机的运行,这是认识、掌握、分析、设计与运行的过程,又是一个完整过程,进而为后续学习、创新奠定基础。

(3) 强调“系统”作用,既讲设备,又讲系统,但以系统为主。在叙述电气设备及其组成系统(又称子系统)的原理与功能时,强调要发挥系统的整体作用,同时强调设备要在一定的系统中才能发挥其作用。例如,发电机在原动机(汽轮机或水轮机)的驱动下就能发出电,说明发电机具有发电的功能,能在系统中发挥作用;若发电机没有原动机的驱动,能发电吗?能在系统中发挥作用吗?答案是:不能。这就说明,电气设备尽管具有一定的功能,但要在一定的系统中才能发挥作用,可见系统的重要。

本书第一章和第三章由华中科技大学熊信银教授编写,第二章、第七章和第十章由娄素华博士编写,第四章和第八章由吴耀武副教授编写,第五章、第六章和第九章由中国农业大学唐巍教授编写。熊信银任主编,唐巍任副主编,全书由熊信银统稿。

本书在编写过程中,得到了教育部教学指导委员会电气工程及其自动化分委会给予的支持,特别是分委会副主任、华中科技大学教授尹项根自始至终对书的结构体系和内容等给予了具体指导,并主审了全书;华北电力大学朱永利教授也主审了本书;以及国内电气工程领域同仁提供的相关教材、参考书和宝贵经验,编者在此一并表示深切的谢意。

限于编者的能力和学术水平,书中有不尽如人意的地方,欢迎批评指正和提出宝贵意见。

编 者

2008年3月

## 目 录

181	.....	181
87	.....	87
881	.....	881
181	.....	181
034	.....	034
前言	.....	
<b>第一章 绪论</b>	.....	<b>1</b>
第一节 概述	.....	1
第二节 能量转换原理	.....	2
第三节 电力系统	.....	13
第四节 电能的质量指标	.....	22
第五节 电压等级与选择	.....	26
思考题	.....	29
<b>第二章 电气设备的原理与功能</b>	.....	<b>31</b>
第一节 概述	.....	31
第二节 同步发电机	.....	31
第三节 电力变压器	.....	35
第四节 电动机	.....	41
第五节 高压断路器	.....	49
第六节 互感器	.....	52
思考题	.....	60
<b>第三章 电气设备的分类与系统</b>	.....	<b>61</b>
第一节 发电系统	.....	61
第二节 输变电系统	.....	80
第三节 配电系统	.....	92
第四节 电力系统负荷	.....	97
思考题	.....	105
<b>第四章 设备工作接地与保护接地</b>	.....	<b>107</b>
第一节 概述	.....	107
第二节 工作接地	.....	108
第三节 保护接地	.....	115
第四节 保护接零	.....	120
思考题	.....	124
<b>第五章 电压、功率及电能损耗的计算</b>	.....	<b>125</b>
第一节 输电线路的参数计算与等值电路	.....	125
第二节 变压器的参数计算与等值电路	.....	129
第三节 电压和功率分布计算	.....	138
第四节 无功功率与电压的调整	.....	148
第五节 电能损耗的计算及降损措施	.....	157

思考题和习题 .....	161
<b>第六章 短路故障分析与计算</b> .....	163
第一节 概述 .....	163
第二节 标幺制 .....	164
第三节 无限大功率电源供电网络的三相短路计算 .....	170
第四节 有限容量电源供电网络的三相短路计算 .....	175
第五节 简单不对称短路计算 .....	182
思考题和习题 .....	196
<b>第七章 电气设备的控制与保护</b> .....	199
第一节 概述 .....	199
第二节 操作电源 .....	199
第三节 高压断路器的控制 .....	201
第四节 电气设备的保护 .....	207
思考题 .....	226
<b>第八章 过电压及其防护</b> .....	228
第一节 概述 .....	228
第二节 内部过电压及其防护 .....	228
第三节 电力系统防雷保护 .....	244
第四节 电力系统绝缘配合 .....	261
思考题和习题 .....	268
<b>第九章 电气设计与设备选择</b> .....	270
第一节 载流导体的发热和电动力 .....	270
第二节 主变压器选择 .....	277
第三节 电气主接线选择 .....	279
第四节 电气设备选择 .....	284
第五节 变电站电气设计举例 .....	302
思考题和习题 .....	306
<b>第十章 电气设备的运行</b> .....	307
第一节 同步发电机的运行 .....	307
第二节 电力变压器的运行 .....	325
第三节 高压断路器的运行 .....	336
第四节 电动机的运行 .....	343
思考题 .....	350
<b>附录</b> .....	351
附录 I 各种常用架空线路导线的规格 .....	351
附录 II 架空线路导线的电抗和电纳 .....	353
附录 III 短路电流周期分量计算曲线数字表 .....	354
附录 IV 导体及电气设备技术数据 .....	358
<b>参考文献</b> .....	361



## 第一章 绪 论

### 第一节 概 述

电的发现是个神奇的开始，它是一种看不见、摸不着又无形体的能量。

电能的开发和利用，是人类征服自然过程中所取得的具有划时代意义的光辉成就。它消除了黑夜对人类生活和生产劳动的限制，大大延长了人类用于创造财富的劳动时间，改善了劳动条件，丰富了人们的生活。在现代文明中，电被视为与空气和水一样重要，这不仅仅是因为电可以使家庭晚餐愉快、和谐，使电视机成为生活中不可缺少的部分，而且还因为它可使电力火车奔驰，让机器轰隆隆转动和实现电气化。

电能是社会发展的主要能源和动力，广泛用于人民生活、国民经济各行各业，对促进社会经济发展，加速实现现代化，提高人民物质文化生活水平，促进社会和谐进步，都起着极其重要的作用。

电能与国民经济发展的关系极为密切。国民经济发展越快，现代化水平越高，对电能的需求量也就越大。电力的使用范围不断扩大，电能消耗量不断上升。世界能源消耗变化总趋势是电能将成为主要能源。世界各国都把电能消费占总能源消费的比重和电力工业的发展速度，作为衡量国家经济发展和现代化水平的标志，所以发展电力是当今世界每个国家的重点。电力工业已经成为国民经济中具有社会公益性和发展先行性的国民经济基础行业，关系着国家工业生产的命脉，是实现国家经济发展现代化的战略重点。可以说，电气化就是现代化的象征，没有电气化就没有现代化。

电能为二次能源，是由一次能源经加工转换而成的能源，如由煤炭、石油、天然气和水能等形态的能源经加工转换而成。

电能与其他形态的能源相比，其主要特点有：

(1) 电能可以大规模生产。用于生产电能的一次能源广泛，如可以由煤炭、石油、水能和核能等多种形态的能源转换而成，便于大规模生产。基本上大部分的一次能源都在为电力行业服务。

(2) 电能运输简单，便于大容量、远距离传输和分配。输送电能时的损耗比输送机械能和热能都小得多。

(3) 电能方便转换和易于控制。电能可方便地转换成其他形态的能，如将电能转换成机械能、热能、光能、声能、化学能和粒子的动能等，同时使用方便，易于实现有效而精确的控制。

(4) 电能代替其他能源可以提高能源利用效率，被称为“节约的能源”。例如，使用电力作为动力比蒸汽机效率提高4倍以上；以电力机车代替蒸汽机车不仅节约煤炭，还可提高运输量和行车速度；用电弧炉加热的温度可达 $13000^{\circ}\text{C}$ ，并可直接作用于原料、部件，而用燃烧火焰加热的温度仅为 $2000^{\circ}\text{C}$ ，且不能直接传导于加工原料或部件，其效率只有20%左右。所以，钢铁和有色金属的冶炼，水泥和玻璃等建筑材料的热加工行业的生产工艺，都由

应用其他能源转向使用电力，不仅节约燃料，还可提高产品的质量和寿命。

(5) 电能在使用时没有污染，噪声小。如电瓶车代替汽车、柴油车和蒸汽机车等，成为“无公害车”，因此电能被称为“清洁能源”。

电能的生产、传输、分配和使用是通过电力系统同时完成的，不能大量储存。因此，为了满足国民经济发展和人民生活对电能的需求，不间断地供给充足、优质而又价廉的电能，做好电能的生产、传输、分配和使用工作，就必须达到以下基本要求：

(1) 安全。在电能的生产、传输、分配和使用过程中，要树立“安全第一”的思想，采用科学管理方法，不应发生人身和设备事故。

(2) 可靠。要保持足够的备用容量和备用能源，对用户的用电方式进行监视，以保证电能用户对供电可靠性的要求。

(3) 优质。要树立“质量第一”的思想，落实全面质量管理，保证电能的良好质量，以满足电能用户对电压、频率和波形的质量要求。

(4) 经济。建设投资要省，运行费用要低，并尽可能减少能源消耗以及网损等。

此外，在电能的生产、传输、分配和使用工作中，应合理处理局部和全局、当前和长远等关系，既要考虑局部和当前利益，又要有全局观念，能顾全大局，长远发展。

## 第二节 能量转换原理

### 一、能量的基本形式

世界是由物质构成的，是客观存在的；能量是物质的属性，是一切物质运动的动力；能源是指人类取得能量的来源。没有运动的物质正如没有物质的运动一样是不可思议的，能量则是物质运动的度量。物质存在着各种不同的运动形态，能量也具有不同形式。各种运动形态是可以相互转化的，各种形式的能量之间也能够相互转换。正是不同形式的能量利用和转换促进了人类的文明。

宇宙间一切运动着的物体（由物质构成的、占有一定空间的个体）都有能量的存在和转换。物质是某种既定的东西，既不能被创造也不能被消灭，因此作为物质属性的能量也一样不能被创造和被消灭。能量守恒定律反映了客观世界中运动不灭这一事实。这个定律告诉我们：“自然界一切物质都具有能量。能量不可能被创造，也不可能被消灭，而只能在一定条件下从一种形式转变为另一种形式，在转换中能量总是恒定不变的。”

人类的一切活动都与能量及其使用紧密相关。各种形式的能量相互转换是人类在实践活动中最伟大的发现之一。例如，水力发电就是利用水从高处流往低处的这一自发过程，使水的势能转换为动能，推动水轮机转动，水轮机又推动发电机，最后通过发电机将机械能转换成电能供人类利用。

到目前为止，人类所认识的能量有机械能、热能、化学能、辐射能、电能和核能等基本形式。

#### 1. 机械能

机械能是与物体宏观机械运动或空间状态有关的能量，前者称为动能，后者称为势能。它们都是人类最早认识的能量形式。动能是指物体（或系统）由于机械运动而具有的做功能力。如果质量为  $m$  的物体的运动速度为  $v$ ，则该物体的动能  $W_k$  的计算式为



$$W_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-1)$$

式中,  $W_k$  为物体的动能, J;  $m$  为物体的质量, kg;  $v$  为物体的运动速度, m/s。

由发电机组的动力学原理可知, 转子动能的时间变化率与加速转矩是平衡的, 这种存在于发电机转子中的动能可表示为

$$W_{kf} = \frac{1}{2}J\Omega^2 \quad (1-2)$$

式中,  $W_{kf}$  为发电机组转子动能, J;  $\Omega$  为发电机转子的机械角速度, rad/s;  $J$  为发电机组转子的转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

势能(又称位能)是指与物体空间状态有关而具有的做功能力。除了受重力作用的物体因其位置高度不同而具有所谓重力势能外, 还有弹性势能, 即物体由于弹性变形而具有的做功能力; 以及表面能, 即不同类物质或同类物质不同相的分界面上, 由于表面张力的存在而具有的做功能力。其中, 重力势能  $W_p$  的计算式为

$$W_p = mgH \quad (1-3)$$

式中,  $W_p$  为重力势能, J;  $m$  为物体的质量, kg;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $H$  为高度, m。

## 2. 热能

热能是能量的一种基本形式, 所有其他形式的能量都可以完全转换为热能, 而且绝大多数的一次能源都是首先经过热能形式而被利用的, 因此热能在能量利用中有重要意义。热能被认为是一种分子运动的能量。构成物质的微观分子运动的动能和势能的总和称为热能。这种能量的宏观表现是温度的高低, 它反映了分子运动的激烈程度。热能既可以显热形式储存, 也可以潜热形式储存。若系统的熵的变化为  $ds$ , 则热能  $W_q$  可表述成

$$W_q = \int Tds \quad (1-4)$$

式中,  $W_q$  为系统的热能, J;  $T$  为热力学温度, K;  $s$  为系统的熵, J/K。

在电力系统中, 当电流流经电阻介质时产生的能量将散逸为热能。在许多情况下, 这种热能是一种有用的能量, 如电炉、电热器等, 但在电机、输电线路等中则是一种损耗电能。这种损耗电能(又称耗散能)的计算式为

$$W_s = \int_0^t R[i(t)]^2 dt \quad (1-5)$$

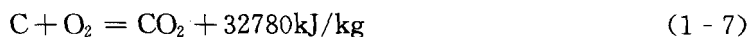
式中,  $W_s$  为损耗电能,  $\text{W} \cdot \text{h}$ ;  $R$  为电路中的电阻,  $\Omega$ ;  $i$  为回路中的电流, A;  $t$  为时间, h。

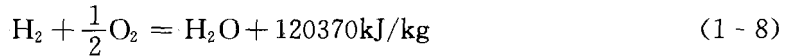
当电流恒定时, 则有

$$W_s = Ri^2 t \quad (1-6)$$

## 3. 化学能

化学能是物质结构能的一种, 即原子核外进行化学变化时放出的能量。根据化学热力学定义, 物质或物系在化学反应过程中以热能形式释放的内能称为化学能。这种能量形式的转变可以发生在化学能与热能之间, 也可以发生在化学能与电能之间, 前者如燃烧反应, 后者如燃料电池。目前最为常见的是燃烧反应。人类利用最普遍的化学能为燃烧碳和燃烧氢两大类, 其化学反应及放出的能量为





式中，C为碳，O为氧，32780为1kg碳完全燃烧时能放出32780kJ的热量；H为氢，120370为1kg氢完全燃烧时能放出120370kJ的热量。

煤炭、石油、天然气和薪柴等燃料中的主要可燃元素是碳和氢。氢是燃料中一种有利的元素，燃料含氢越多，越容易着火，燃料性能越好。由反应生成物可知，氢是一种清洁能源，因此它赢得了人们的青睐。

单位重量（对固体、液体燃料）或体积（气体燃料）完全燃烧，且燃烧产物冷却到燃烧前的温度时所放出的热量称为燃料的发热量（发热值或热值），单位为kJ/kg或kJ/m<sup>3</sup>。应用上又将发热量分为高位发热量和低位发热量。高位发热量是燃料完全燃烧，且燃烧产物中的水蒸气全部凝结成水时所放出的热量；低位发热量是燃料完全燃烧，而燃烧产物中的水蒸气仍以气态存在时所放出的热量。显然，低位发热量在数值上等于高位发热量减去水的汽化潜热。由于燃烧设备（如锅炉）中的燃料燃烧时，燃料中原有的水分及氢燃烧后生成的水均呈蒸汽状态随烟气排出，因此低位发热量接近实际可利用的燃料发热量，所以在热力计算中均以低位发热量作为计算依据。表1-1为各种不同燃料低位发热量的概略值。

表 1-1 各种不同燃料低位发热量的概略值

固体燃料	天然固体燃料 ( $\times 10^3\text{kJ/kg}$ )	木材	13.8
		泥煤	15.89
		褐煤	18.82
		烟煤	27.18
	加工的固体燃料 ( $\times 10^3\text{kJ/kg}$ )	木炭	29.27
		焦炭	28.43
液体燃料	天然液体燃料 ( $\times 10^3\text{kJ/m}^3$ )	石油 (原油)	41.82
		汽油	45.99
	加工成的液体燃料 ( $\times 10^3\text{kJ/kg}$ )	液化石油气	50.18
		煤油	45.15
		重油	43.91
		酒精	26.76
气体燃料	天然气体燃料 ( $\times 10^3\text{kJ/m}^3$ )	天然气	37.63
		焦炉煤气	18.82
	加工成的气体燃料 ( $\times 10^3\text{kJ/m}^3$ )	高炉煤气	3.76
		发生炉煤气	5.85
		水煤气	10.45
		丁烷气	125.45

#### 4. 辐射能

物体以电磁波的形式发射出的能量，称为辐射能。物体会因各种原因发出辐射能，其中从能量利用的角度而言，因热的原因而发出的辐射能（又称热辐射能）是最有意义的。热辐射是一种由原子振动而产生的电磁能。温度为  $T$  的任何物体所发射出的能量的关系式为

$$W_r = \epsilon\sigma T^4 \quad (1-9)$$

式中,  $W_r$  为物体发射出的能量, J;  $\epsilon$  为物体表面的热发射率;  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $T$  为热力学温度, K。

太阳是最大的辐射源, 地球表面所接受的太阳能就是最重要的热辐射能。此外, 还有裂变物质所发射的电磁波射线, 如  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  等。

### 5. 电能

电能是与电子流动和积累有关的一种能量, 通常由电池中的化学能转换而来, 或通过发电机将机械能转换得到; 反之, 电能也可通过电灯泡转换为光能, 或通过电动机转换为机械能, 从而显示出电做功的本领。如果驱动电子流动的电动势为  $E$ , 电流强度为  $I$ , 则其电能  $W_e$  可表示为

$$W_e = EI \quad (1-10)$$

式中,  $W_e$  为电能, J;  $E$  为电动势, V;  $I$  为电流, A。

电能既能以电场能被储存, 也能以磁场能被储存。电容器充电时, 会产生电场来储存一定的电场能。线圈通过电流时, 会产生磁场来储存一定的磁场能。磁场能储存于具有磁场存在的空间内。在电力系统中, 发电机的定子及转子绕组、变压器绕组、输电线路以及感应电动机的定子及转子绕组都存在磁场, 因而都储存磁场能。磁场能的计算式为

$$W_{mF} = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-11)$$

式中,  $W_{mF}$  为磁场能, J;  $L$  为电路的电感, H;  $i$  为流过回路的电流, A。

当存在两个线圈时, 则磁场能的计算式为

$$W_{mF} = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2 \quad (1-12)$$

式中,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为两个线圈的自感, H;  $M$  为两个线圈间的互感, H。

电场能储存于具有电场存在的空间内, 如电容器的极板间、输电线路间以及输电线路对地之间。电场能的计算式为

$$W_{eF} = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-13)$$

式中,  $W_{eF}$  为电场能, J;  $C$  为电路的电容, F;  $u$  为导体间的电位差, V。

### 6. 核能

核能是由于物质原子核内结构发生变化而释放出来的巨大能量, 又称原子核能。与前述的 5 种能量不同的是, 核能不遵守质量守恒和能量守恒定律, 它所遵守的是阿伯特·爱因斯坦 (Albert Einstein) 于 1922 年提出的能量和物质质量之间的关系, 即

$$W = mc^2 \quad (1-14)$$

式中,  $W$  为物质释放的能量, J;  $m$  为转变成能量的物质的质量, kg;  $C$  为光速,  $C = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

核能可以从以下两种不同的反应中得到:

(1) 核裂变反应。它是原子核反应堆的主要反应过程。这是当一个重量的原子核吸收了一个中子, 然后激发与这个中子结合在一起的原子核, 使它分裂为两个或两个以上的原子核, 并释放出能量的过程。例如, 中子被铀-235 核吸收进行裂变反应, 吸收中子后分裂为两个碎片, 同时放出 2~3 个中子 (一般定为 2.5 个中子), 并释放出裂变能。其典型的反应式为



式中,  ${}_{92}^{235}\text{U}$  为铀-235;  $x$  和  $y$  为裂变产物,  $x$  为氙 ${}_{54}^{140}\text{Xe}$ ,  $y$  为锶 ${}_{38}^{94}\text{Sr}$ ;  ${}_0^1\text{n}$  为中子; MeV 为能量单位兆电子伏特 (或百万电子伏特)。

每克 ${}_{92}^{235}\text{U}$  有  $2.6 \times 10^{21}$  个原子, 每千克 ${}_{92}^{235}\text{U}$  完全反应后释放出的能量为

$$\begin{aligned} W &= 2.6 \times 10^{21} \times 200 \times 1.602 \times 10^3 \\ &= 8.33 \times 10^{10} \text{ (kJ/kg)} \end{aligned}$$

约相当于 2800t 标准煤完全燃烧后释放出来的能量。例如, 一个功率为 600MW 的燃煤发电厂, 每小时耗煤约 220t, 每年耗煤约  $2 \times 10^6$ t, 而一个功率为 600MW 的核电厂, 每年仅耗 1t 燃料铀。

(2) 核聚变反应。在聚变反应中, 两个轻质量的原子核结合, 产生更稳定的结构并释放出能量。目前世界上所用的核聚变反应的原料为氢的两种同位素, 即氘和氚; 主要有两种聚变反应, 即氘-氘反应和氘-氚反应。前者的点火温度为  $2 \times 10^8$ °C, 维持运行温度为  $5 \times 10^8$ °C; 后者的点火温度为  $4.4 \times 10^7$ °C, 维持运行温度为  $1 \times 10^8$ °C。

我国 1952 年的氢弹爆炸试验, 先是发生裂变反应, 其反应时间为几百万分之一秒, 产生巨大的热能, 使之达到聚变反应所需的温度, 从而引发聚变反应。其反应式为



式中,  ${}_1^2\text{D}$  为氘;  ${}_2^4\text{He}$  为氦; P 为质子。

聚变反应所释放出的能量  $W_J$  和裂变反应所释放出的能量  $W_L$  相比为

$$\frac{W_J}{W_L} = \frac{43.1}{200} \times \frac{235}{12} \approx 4.22$$

这说明, 消耗同样质量的原料, 核聚变反应所释放的能量为核裂变反应的 4.22 倍。即每消耗 1kg 核聚变原料, 产生约相当于 11816t 标准煤完全燃烧后所释放出的热能。

## 二、能量的来源

能源, 顾名思义是指能量的来源或泉源, 即指人类取得能量的来源, 包括已经开发可供直接使用的自然资源和经过加工或转换得到的能量来源, 而尚未开发的能量资源称为自然资源。

由于能源形态多样, 有多种不同的分类方法, 下面按相对比较的方法进行分类。

### 1. 常规能源与新能源

在当前的科学技术水平下, 已经被人类在相当长的历史时期中广泛利用的能源, 不但为人们所熟悉, 而且也是当前应用范围很广泛的主要能源, 称为常规能源, 如煤炭、石油、天然气、薪柴、水能和电力等。而有一些虽属古老的能源, 但只有在采用当前先进的方法时才能加以利用, 或采用最新的科学技术才能开发利用的能源, 以及有些仅仅是最近才被人们重视而研究开发的能源, 称为新能源, 如太阳能、地热能、潮汐能和生物质能等。核能通常也被看作新能源, 尽管核燃料提供的核能在世界一次能源的消费中已占 15%, 但从被利用的程度看还不能和已有的常规能源相比; 另外, 核能利用的技术非常复杂, 可控核聚变反应至今未能实现, 这也是将核能仍视为新能源的主要原因之一。不过也有不少学者认为应将核裂变作为常规能源, 而核聚变作为新能源。新能源有时又称为非常规能源或替代能源。

### 2. 再生能源与非再生能源

在自然界中可以不断再生而得到补充的能源, 称为再生能源。如太阳能、水能、风能、潮汐能和生物质能等, 它们都可以在短期内再生, 不会因长期使用而减少。而经过几亿年形成的、短期内无法补充的能源, 称为非再生能源, 如煤炭、石油、天然气和核燃料等, 随着

大规模的开采和利用，其储量越来越少，总有枯竭之时。

### 3. 一次能源与二次能源

由自然界中直接取得而又不改变其基本形态的能源，称为一次能源。煤炭、石油、天然气、水能、风能和地热能等为一次能源。由一次能源经过加工转换成另一种形态的能源产品叫做二次能源。二次能源有电力、蒸汽、煤气、氢及各种石油制品等，它们使用方便，易于利用，是高品质的能源。

大部分一次能源都转换成容易输送、分配和使用的二次能源，以适应消费者的需要。二次能源经过输送和分配，在各种设备中使用，故称为终端能源。终端能源最后变成有效能源为人类所利用。

按能源利用过程中对环境污染的大小，又把对环境无污染或污染较小的能源称为清洁能源，如太阳能、水能、海洋能和氢能等；把对环境污染较大的能源称为非清洁能源，如煤炭、石油等。通过技术进步使非清洁能源在能量转换中尽可能减少对环境产生污染，也是能源与电力工作者的研究目的，如洁净煤燃烧技术等。

### 三、能量的转换

能量转换是能量最重要的属性，也是能量利用中最重要的一环。人们通常所说的能量转换是指能量形态上的转换。比如，矿物燃料通过燃烧将化学能转变成热能，然后通过汽轮机将热能转换成机械能，再通过发电机将机械能转换成电能等。

除了形态上的转换外，能量还有空间上的转换，即能量的输送。能量的输送大多是通过输送载体进行的。如石油的输送可通过火车、轮船、输油管道，达到转换化学能的空间位置的目的；煤炭、天然气等也是如此。电能是通过输电线路来实现电能的空间转换的。

此外，能量还有时间上的转换，即能量的储存。例如，矿物燃料是将若干亿年前的太阳能储存起来，供今天的人类来开发利用。目前，最难处理的是电能的储存。所用电能的绝大部分来自火力发电，而人们用电有高峰和低谷，在白天用电量，在夜间用电量小，如果满足了白天用电的需要，则夜间的电会有多余，用不完，必然会造成火力发电厂锅炉压火、少发电，这样就会大大降低发电的效率，浪费能源。

目前，世界上储存电能的方法主要有使用改进的铅电池（500MW·h），新型电池（500MW·h），飞轮、压缩空气和抽水蓄能电厂使用飞轮储电，是指在用电低谷时用多余的电能带动电动机转动巨大的飞轮，将电能转换成机械能，到用电高峰时再将机械能通过发电机转换成电能，预计一次可储电能 1000MW·h。利用压缩空气储能，即利用废弃的矿井，将进出口堵住，在用电低谷时，开动空气压缩机，将空气压缩到废矿井中，将电能转换成势能，到用电高峰时，再用压缩空气推动汽轮机发电机组，将势能转换成电能，一次可储存电能 1000MW·h。储存容量最大的是抽水蓄能电厂，即建造两个有一定高度差的大水库，用电低谷时以电带动抽水机，将低水位水库的水抽到高水位的水库中储存起来，到用电高峰时再将高水位水库的水通过水力发电机发电后储存在低水位的水库中，如此周而复始，达到储存电能的目的。这种抽水蓄能电厂的系统效率为 65%~75%，其储能的容量可以很大。

任何能量转换过程都必须遵守自然界的普遍规律——能量守恒定律，即

$$\text{输入能量} - \text{输出能量} = \text{储存能量的变化}$$

在国民经济和日常生活中用得最多、最普遍的能量形式是热能、机械能和电能。它们可以由其他形态的能量转换而来；它们之间也可以互相转换。但是，任何能量转换过程都需

要一定的转换条件，并在一定的设备或系统中实现。表 1-2 给出了能量形态转换过程及实现转换所需的设备或系统。不同能源与热能、机械能和电能的转换以及热能、机械能和电能之间的相互转换，如图 1-1 所示。

表 1-2 能量形态转换过程及实现转换所需的设备或系统

能源	能量形态转换过程	转换设备或系统
煤炭、石油、天然气等矿物燃料	化学能→热能 化学能→热能→机械能 化学能→热能→机械能→电能	燃烧炉，工业热装置 各种热力发动机 热机，发电机，磁流体发电，压电效应
氢和酒精等二次能源	化学能→热能→电能 化学能→电能	热力发电，热电子发电 燃料电池
水能，风能，潮汐能，海流能，波浪能	机械能→机械能 机械能→机械能→电能	水车，风车 水轮发电机组，风力发电机组，潮汐发电装置，海流能发电装置，波浪能发电装置
海洋热能	热能→机械能→电能	海洋温度差发电（热力发动机）
核能	核裂变→热能→机械能→电能 核裂变→热能 核裂变→热能→电能 核裂变→电磁能→电能 核聚变→热能→机械能→电能	核发电，磁流体发电 核能炼钢 热力发电，热电子发电 光电池 核聚变发电
太阳能	辐射能→热能 辐射能→热能→机械能 辐射能→热能→机械能→电能 辐射能→热能→电能 辐射能→电能 辐射能→化学能 辐射能→生物能	热水器，采暖，制冷，太阳灶，光化学反应 太阳能发动机 太阳能发电 热力发电，热电子发电 太阳电池，光化学电池 光化学反应（水分解） 光合成

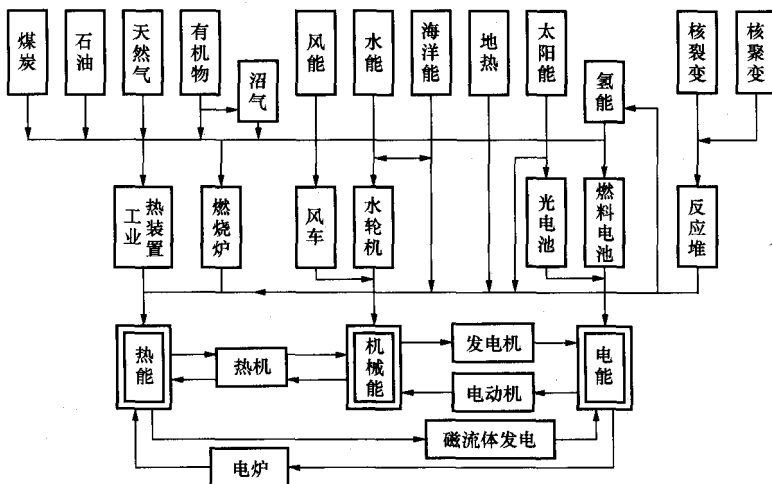


图 1-1 不同能源与热能、机械能和电能的转换以及热能、机械能和电能之间的相互转换



由表 1-2 和图 1-1 可见, 能源在一定条件下能够转换成人们所需要的各种形式的能量。例如, 煤炭、石油和天然气等矿物的化学能经过燃烧转换成为热能。人们可以直接用热取暖, 也可用热生产热水或蒸汽, 进而用蒸汽推动蒸汽机(热机)转变为机械能, 或者推动汽轮发电机转换为电能。电能通过电动机、电灯或电炉等设备转换为机械能、光能或热能。由此可见, 人类利用的各种形式的能量都是由一次能源转换而来的。

#### 四、旋转电机中的能量转换

##### 1. 电磁感应定律

电磁感应定律是法拉第于 1831 年发现的。将一个匝数为  $N$  的线圈置于磁场中, 与线圈交链的磁链为  $\Psi$ , 则不论什么原因(如线圈与磁场发生相对运动或磁场本身发生变化等), 只要磁链  $\Psi$  发生了变化, 线圈内就会产生感应电动势, 这种现象称为电磁感应。该电动势的方向, 将倾向于在线圈内产生一个电流, 而电流的磁化作用将阻止线圈磁链  $\Psi$  发生变化。设电流的正方向与电动势的正方向一致, 即正电动势产生正电流, 而电流又产生正磁通, 即电流方向与磁通方向符合右手螺旋法则, 如图 1-2 所示。则电磁感应定律的数学描述为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1-17)$$

式中,  $e$  为感应电动势, V;  $\psi$  为磁链, Wb;  $t$  为时间, s。

必须指出, 在建立式 (1-17) 时, 各电量、磁量的正方向十分重要, 其基本物理概念是: 线圈中的感应电动势倾向于阻止线圈中磁链的变化。如当磁通增加时,  $d\psi/dt$  为正, 而  $e$  为负值, 将企图减少磁通; 而当磁通减少时,  $d\psi/dt$  为负, 而  $e$  为正值, 它企图增加磁通, 这个规律称为楞次定律。

若  $N$  匝线圈中通过的磁通均为  $\Phi$ , 即磁链

$$\Psi = N\Phi \quad (1-18)$$

则式 (1-17) 可改写为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-19)$$

引起磁通变化的原因可归纳为两类: 一类是磁通由时变电流产生, 即磁通是时间  $t$  的函数; 另一类是线圈与磁场间有相对运动, 即磁通是位移变量  $x$  的函数。综合起来, 磁通的全增量为

$$d\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial t}dt + \frac{\partial\Phi}{\partial x}dx \quad (1-20)$$

从而有

$$e = -N \frac{\partial\Phi}{\partial t} - Nv \frac{\partial\Phi}{\partial x} = e_T + e_v \quad (1-21)$$

式中,  $v$  为线圈与磁场间相对运动的速度,  $v = dx/dt$ ;  $e_T$  为变压器电动势,  $e_T = -N\partial\Phi/\partial t$ , 它是线圈与磁场相对静止时, 仅由磁通随时间变化而在线圈中产生的感应电动势, 与变压器工作时的情况一样, 并由此而得名;  $e_v$  为运动电动势, 在电机学中也叫速度电动势,  $e_v = -Nv\partial\Phi/\partial x$ , 它是磁场恒定时, 仅由线圈(或导体)与磁场之间的相对运动所产生的。

虽然普遍说来, 任一线圈中都可能同时存在上述两种电动势, 但为了简化分析, 同时也

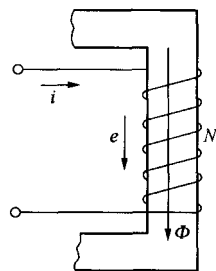


图 1-2 电流、电动势和磁通的正方向

利于突出主要特点,下面将两种电动势分别予以讨论。

(1) 变压器电动势。磁通本身是由交流电流励磁产生的,也就是说磁通本身随着时间在变化。设线圈与磁场相对静止,与线圈交链的磁通随时间变化,并设磁通  $\Phi$  按正弦规律变化,即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-22)$$

式中,  $\Phi_m$  为磁通幅值, Wb;  $\omega$  为磁通交变角频率,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $f$  为频率, Hz。

于是可得

$$e = e_T = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -N\omega \Phi_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-23)$$

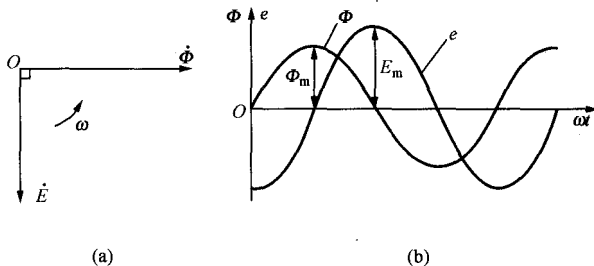


图 1-3 电动势与磁通的相位关系

(a) 相量图; (b) 波形图

式中,  $E_m$  为感应电动势幅值,  $E_m = N\omega \Phi_m$ , V。

式(1-23)表明,当磁通随时间按正弦规律变化时,线圈内感应电动势的变化规律与磁通变化规律相同,但电动势在相位上滞后磁通  $90^\circ$ ,如图 1-3 所示。

在交流正弦分析中,相量的大小用有效值表示。当  $e$ 、 $\Phi$  均为正弦波时,感应电动势的有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f N \Phi_m = 4.44 f N \Phi_m \quad (1-24)$$

这种纯粹由于磁通本身随时间变化而产生的感应电动势,称为变压器电动势,这是计算变压器电动势的基本公式。

(2) 运动电动势。磁通本身不随时间变化,但由于线圈与磁场间有相对运动而引起线圈磁链的变化,这样产生的电动势称为运动电动势或速度电动势。

如图 1-4 所示,设匝数为  $N$  的线圈在恒定磁场 [即  $B$  不随时间变化,仅在长度  $l$  范围内沿  $\zeta$  方向按一定规律分布,即为  $\zeta$  的函数  $B(\zeta)$ ,正方向  $n$  为垂直进入纸面] 中以速度  $v$  沿  $\zeta$  方向运动,线圈两边平行,但与  $\zeta$  垂直,宽度为  $b$ ,有效长度亦为  $l$ ,距原点距离为  $x$ ,则任意时刻穿过线圈的磁通为

$$\Phi = l \int_x^{x+b} B_n(\zeta) d\zeta \quad (1-25)$$

线圈内产生的感应电动势即运动电动势为

$$e = e_v = -Nv \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -Nvl [B_n(x) - B_n(x+b)] = N\Delta B_n lv \quad (1-26)$$

式中,  $B_n$  为磁通密度, T;  $l$  为导体长度, m;  $v$  为运动速度, m/s;  $e$  为运动电动势, V。

磁通密度  $B_n$ 、线圈运动速度  $v$  和感应电动势  $e$  之间的方向关系,可用图 1-5 所示的右手定则来确定。右手定则是:伸开右手手掌,使大拇指和其他四指相互垂直,以手心对准磁

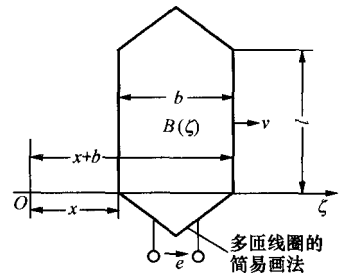


图 1-4 线圈切割磁场  
感应电动势

力线的北极 (N 极), 使大拇指指着导体运动方向, 则其他四指的指向即为感应电动势的方向。右手定则又称为发电机定则。

由式 (1-26) 可见, 电机的导体  $l$  及其速度  $v$  是常数, 则运动电动势  $e$  正比于磁通密度  $\Delta B_n$ 。电动势随时间的变化与磁通在空间的分布有相同的波形。若希望磁场得以最充分利用, 则磁场应只有垂直于线圈平面的分量, 即  $B(\zeta) \equiv B_n(\zeta)$ ; 若进一步希望在线圈中得到最大感应电动势, 还应要求  $B(x) \equiv -B(x+b)$ , 即线圈一侧边与另一侧边处的磁场大小恒相等, 但方向 (极性) 恒相反。

对于单根导体, 在  $B$ 、 $v$  及  $l$  相互垂直的假设条件下, 由式 (1-26) 可得  $|e| = Blv$ , 这与物理学中的结果是一致的。

## 2. 电磁力定律

(1) 电磁力。载流导体位于磁场中时, 导体上将受到电磁力  $F$ , 它的表达式为

$$F = Bli \quad (1-27)$$

式中,  $B$  为磁通密度, T;  $l$  为导体在磁场中的长度, m;  $i$  为流过导体的电流, A;  $F$  为电磁力, N。

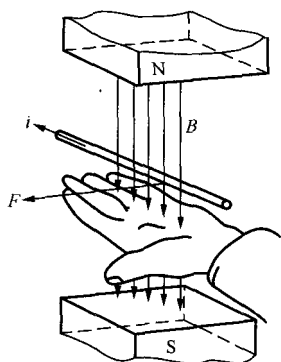


图 1-6 左手定则

式 (1-27) 就是通常所说的电磁力定律, 也叫毕奥-萨伐电磁力定律。其中,  $B$ 、 $l$  和  $F$  的方向关系, 可用图 1-6 所示的左手定则来确定。左手定则是: 伸开左手手掌, 使大拇指和其他四指相互垂直, 以手心对准磁力线的北极 (N 极), 使四指指向电流的方向, 则大拇指的指向即为导体受力的方向。左手定则又称为电动机定则。

(2) 电磁转矩。由电磁力定律可知, 当磁场与载流导体相互垂直时, 由式 (1-27) 计算得到的电磁力有最大值。普通电机中,  $l$  通常沿轴线方向, 而  $B$  在径向方向, 这种考虑与产生最大感应电动势的基本设计准则完全一致, 实际上隐含了电机的可逆性原理。由左手定则可知, 电磁力作用在电机转子的切线方向, 因而就会在转子上产生转矩。由电磁力产生的转矩称为电磁转矩。

设电机转子半径为  $r$ , 单根导体产生的电磁转矩  $T_s$  为

$$T_s = Fr = Bli r \quad (1-28)$$

式中,  $r$  为半径, m;  $T_s$  为电磁转矩,  $N \cdot m$ 。

对匝数为  $N$  的线圈, 仿运动电动势分析过程, 设线圈两侧边所在处的磁通密度分别为  $B_1$  和  $B_2$ , 则所产生的电磁转矩  $T_{em}$  为

$$T_{em} = Nlir(B_1 - B_2) \quad (1-29)$$

同理, 若希望获得最大电磁转矩,  $B_2 \equiv -B_1$  是期望的。也就是说, 线圈两侧边处的磁场大小恒相等、极性恒相反, 这也是产生最大电磁转矩的需要。对于一台沿圆周均匀布置线圈的电机来说, 这种需要就上升为要求气隙磁场尽可能均匀, 即  $B$  的大小处处都比较接近。这样, 电机的最大可能电磁转矩  $T_{em}$  为

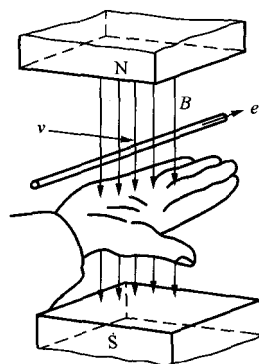


图 1-5 右手定则