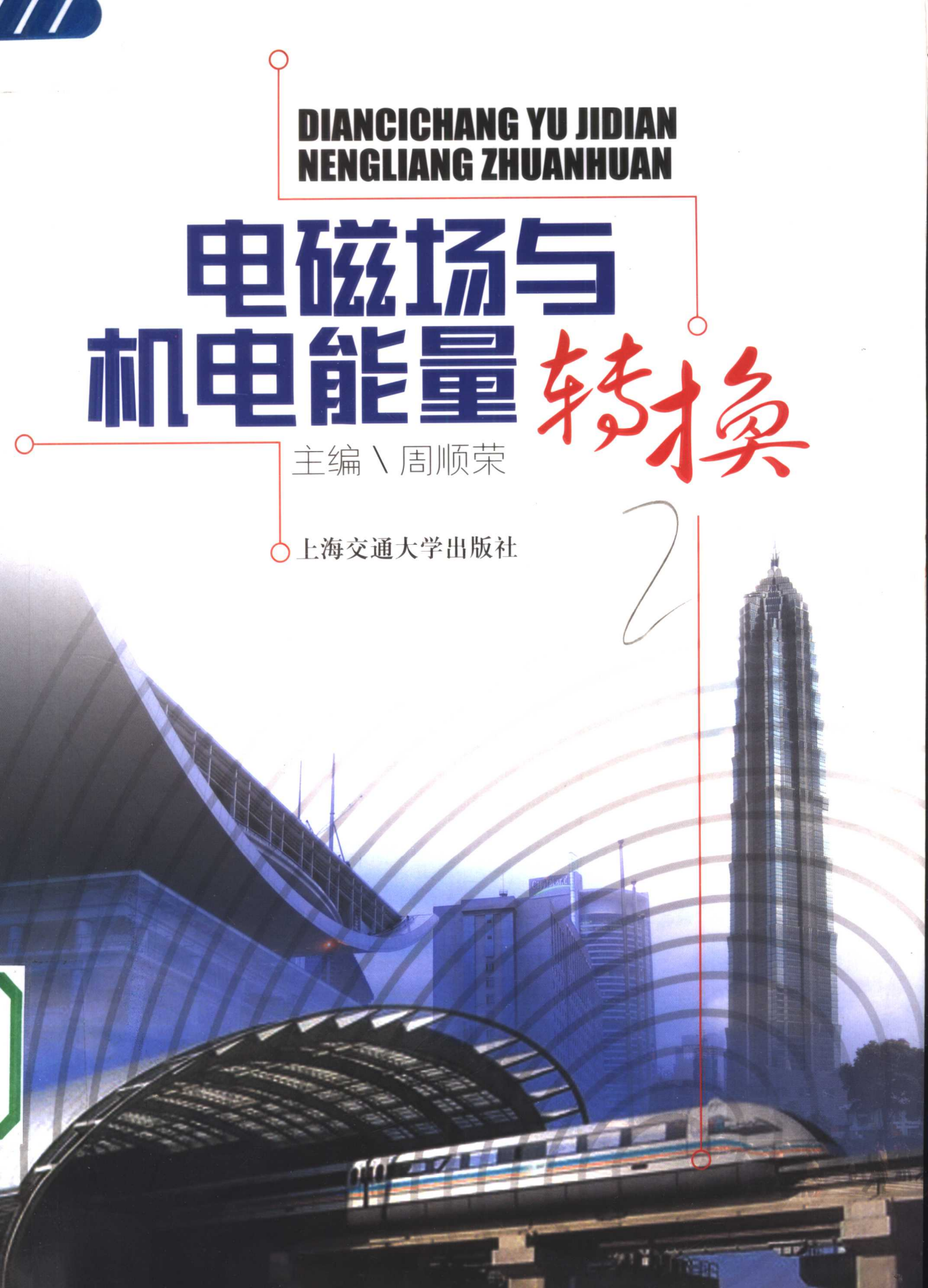


DIANCICHANG YU JIDIAN
NENGLIANG ZHUANHUAN

电磁场与 机电能量转换

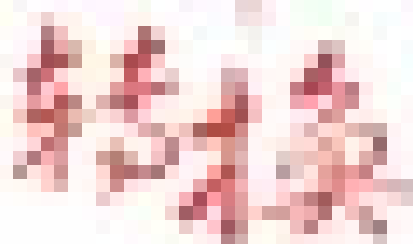
主编 \ 周顺荣

上海交通大学出版社



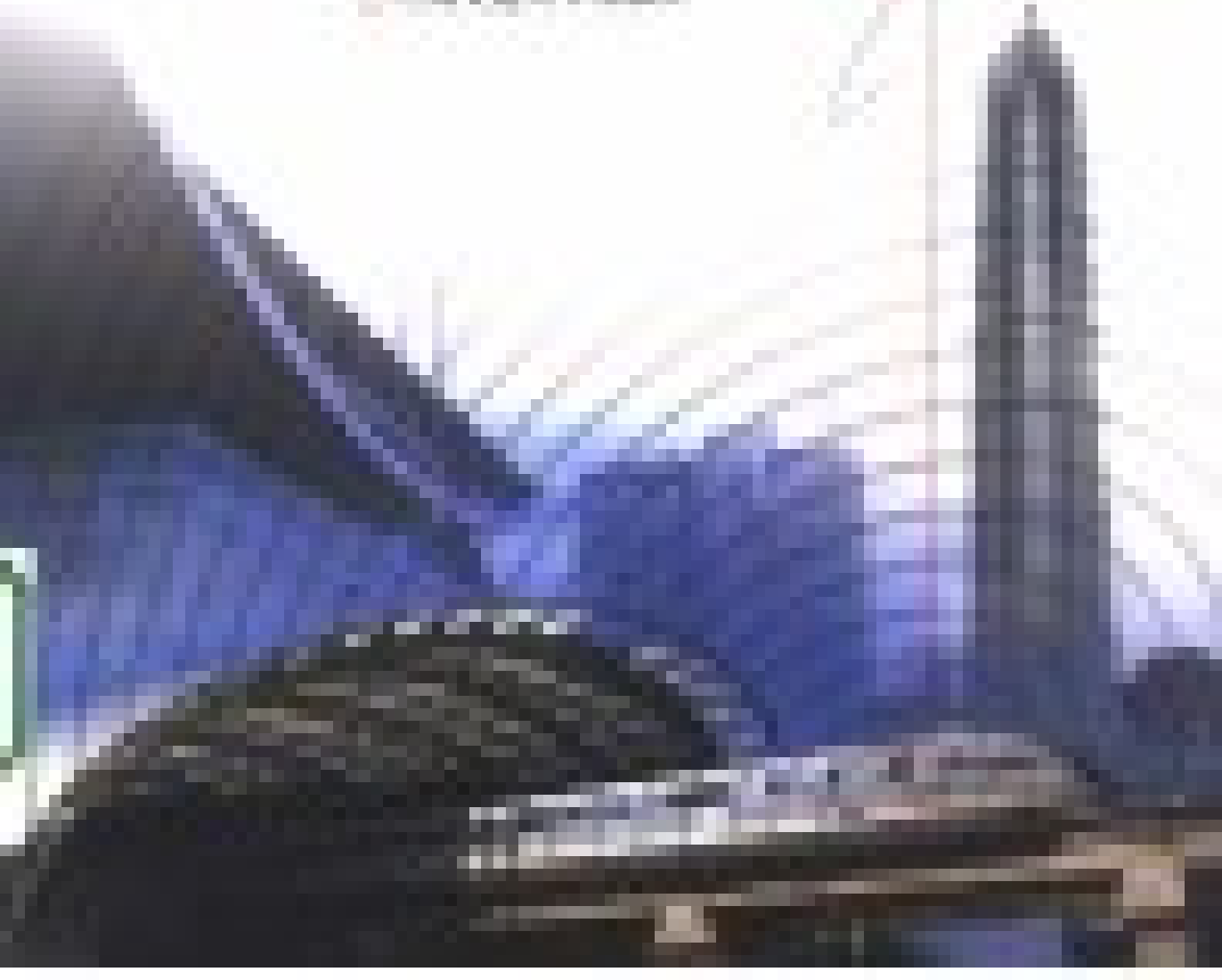
EMERSON POWER MANAGEMENT
SOLUTIONS GROUP

电磁场与 机电能源



EMERSON POWER MANAGEMENT
SOLUTIONS GROUP

EMERSON POWER MANAGEMENT
SOLUTIONS GROUP



21 世纪高等学校教材

电磁场与机电能量转换

主 编 周顺荣
参 编 王建辉
 周 洁
主 审 谭茱娃

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书阐述电磁场及机电能量转换的基本原理和方法。全书共分十章,前六章为电磁场部分,在矢量分析和场论知识的基础上,分别论述静电场、恒定电场、恒定磁场、边值问题和时变电磁场、电磁波的基本概念、基本定理及基本方程。后四章为机电能量转换部分,在电磁场理论的基础上,详尽论述机电能量转换的基本原理、机电系统模型及其运动方程、机电能量转换方式、机电能量转换动力学和机电能量转换新技术。全书理论联系实际,反映了国际国内电磁场和机电能量转换领域的新技术和最新研究成果,阐述清晰,理论推导严谨,文字通顺,力求提高高等院校电工类专业基础课的教学质量和水平。

本书可作为电子信息与电气工程专业大平台本科生教学用书,也可供有关科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与机电能量转换 / 周顺荣主编. —上海:上海交通大学出版社,2006
21世纪高等学校教材
ISBN 7-313-04317-1

I. 电… II. 周… III. ①电磁场-高等学校-教材
②机电-能量转换-高等学校-教材
IV. O441.4②TM301.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 139446 号

电磁场与机电能量转换

周顺荣 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

上海崇明裕安印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:12.25 字数:294千字

2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

印数:1-3050

ISBN7-313-04317-1/O·192 定价:20.00元

版权所有 侵权必究

前 言

本书是作为电子信息与电气工程大平台基础课程教材而编写的。

本书共分十章。前六章为电磁场及其分析的理论基础,后四章为机电能量转换的基础理论,包括:机电系统模型及其运动方程、机电能量转换方式;机电能量转换动力学;机电能量转换新技术。本书力求反映国际国内机电能量转换领域的新技术和新的研究成果,理论联系实际,力求提高电工类大平台基础课程的教学质量和水平,使学生的专业知识赶上时代的脉搏。

本书阐述清楚、理论推导严格、文字通顺、可供本科学生学习,也可供电子信息与电气工程人员参考使用。

本书由周顺荣担任主编。编写具体分工如下:周顺荣编写第八章、第九章的第一、二、三、五、六、七节、第十章的第一、三节,并负责制订全书大纲及对全书作了统一和定稿。周洁编写绪论、第七章、第九章的第四节、第十章的第二、四、五节;王建辉编写第一章、第二章、第三章、第四章、第五章、第六章。

本书由上海交通大学谭蒹娃教授担任主审。上海交通大学金荣洪教授、李格教授、刘长红副教授对书稿也同时进行了认真的审阅。在本书的编写过程中,还得到了上海交通大学张焰教授、陈陈教授、郁惟镛教授、朱子述教授、姚若萍教授、金如麟教授、黄成军副教授、赵继敏副教授、谢宝昌副教授的关心和支持。张焰教授、金荣洪教授对本书的大纲及编写提出了许多宝贵的意见。编者在此表示真诚的感谢。

由于编者的经验和水平有限,加之时间紧迫,书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005年5月

本书主要符号表

- a_n ——法向单位矢量
 A ——矢量磁位
 B ——导体所处位置的磁通密度
 \mathbf{B} ——磁感应强度矢量
 C ——电容
 C_E ——电势常数
 C_T ——转矩常数
 D ——电位移矢量
 D_a ——转子外直径
 E ——电场强度矢量
 E_1, E_2 ——一次侧、二次侧绕组内感应电动势的有效值
 E_{1m}, E_{2m} ——一次侧、二次侧绕组内感应电动势的最大值
 e ——线圈中的感应电动势
 e_1, e_2 ——一次侧、二次侧线圈中感应的主电动势
 $e_{1\sigma}, e_{2\sigma}$ ——一次侧、二次侧线圈中感应的漏电动势
 F ——线圈磁动势
 F_{em} ——电磁力
 \dot{F}_m ——合成磁势
 F_0 ——空载磁势
 \dot{F}_1, \dot{F}_2 ——一次侧、二次侧磁势
 f ——力
 f_m ——磁场吸引力
 G ——电导
 H ——磁场强度矢量
 I ——电流; 交变电流的每相有效值; 直流电机的负载电流
 I_a ——电枢电流
 I_f ——直流电机的励磁电流
 I_m ——交变电流的每相最大值; 励磁电流
 \dot{I}_m ——电流的励磁分量(励磁电流)
 \dot{I}_1, \dot{I}_2 ——一次侧、二次侧电流
 \dot{I}_{1L} ——一次侧电流的负载分量
 J ——转动惯量

J —— 电流密度矢量
 l —— 导体切割磁力线的有效长度
 L —— 电感;自感
 m —— 磁偶极矩
 m_1 —— 定子相数
 M —— 互感
 \mathbf{M} —— 磁化强度矢量
 N_1, N_2 —— 一次、二次绕组匝数
 P_{em} —— 电磁功率
 P_1 —— 输入功率
 P_2 —— 输出功率
 p_{ad} —— 电机的杂散损耗(附加损耗)
 p_{cua} —— 电枢回路电阻的铜损耗
 p_{cul} —— 励磁回路电阻的铜损耗
 p_{Fe} —— 铁损耗
 p_{mech} —— 机械损耗
 p_0 —— 空载损耗
 p —— 电偶极矩
 \mathbf{P} —— 极化强度矢量
 R_a —— 电枢回路的内电阻
 q —— 电荷量
 r_a —— 电枢绕组的电阻
 R_f —— 励磁回路的总电阻
 r_1, r_2 —— 一次、二次绕组的电阻
 S —— 面积;异步电机的转差率
 \mathbf{S} —— 有向面;坡印亭矢量
 T_{em} —— 电磁转矩
 T_0 —— 空载转矩
 T_1 —— 输入转矩
 T_2 —— 输出转矩
 U —— 电压;交流电压的每相有效值
 U_m —— 交流电压的每相最大值
 v —— 导体相对磁场垂直运动的线速度
 V —— 体积;位能电位
 V_m —— 标量磁位
 W —— 能量
 W_e —— 电能
 W_{mech} —— 机械能
 W_ϕ —— 磁场中的储能

χ_e ——电介质的极化率
 χ_m ——磁化率
 $x_{1\sigma}, x_{2\sigma}$ ——一次、二次绕组的漏电抗
 Z_L ——负载阻抗
 Z_1, Z_2 ——一次、二次绕组的漏阻抗
 η ——机电能量转换装置的效率
 ϕ ——标量位
 Φ ——线圈所匝链的磁通;主磁通
 Φ_m ——铁芯中磁通的最大值
 $\Phi_{1\sigma}, \Phi_{2\sigma}$ ——一次侧、二次侧漏磁通
 φ ——标量位;功率因数角
 Ψ ——线圈所匝链的磁链
 Ω ——电机的机械角速度
 ρ ——电荷密度
 ϵ_r ——相对介电常数
 ϵ ——绝对介电常数
 ϵ_0 ——真空中的介电常数
 μ ——磁导率
 μ_r ——相对磁导率
 μ_0 ——真空中的磁导率
 γ ——导电媒质的电导率

目 录

绪论	1
第一节 机电能量转换的物理基础	1
第二节 机电能量转换过程中的能量关系	3
第三节 保守系统与状态函数	4
第一章 矢量分析	6
第一节 标量和矢量	6
第二节 矢量的代数运算	7
第三节 矢量的标积	7
第四节 矢量的矢积	9
第五节 标量场的方向导数与梯度	10
第六节 矢量场的通量、散度与高斯定理	12
第七节 矢量场的环量、旋度与斯托克斯定理	17
第八节 无散场与无旋场	21
第九节 格林定理	22
第十节 矢量场的唯一性定理	23
第十一节 亥姆霍兹定理	25
第十二节 正交曲面坐标系	27
第二章 静电场	35
第一节 静电场的基本方程	35
第二节 电位方程和唯一性定理	37
第三节 导体和电介质	39
第四节 电轴法	43
第五节 镜像法	48
第六节 电容和部分电容	53
第七节 静电能量和力	54
第三章 恒定电场	59
第一节 恒定电场的基本方程	59
第二节 恒定电场和静电场的比拟	60
第三节 电导和接地电阻	61

第四章 恒定磁场	64
第一节 恒定磁场的基本方程	64
第二节 标量磁位和矢量磁位	65
第三节 媒质的磁化	67
第四节 恒定磁场中的镜像法	69
第五节 电感	71
第六节 磁场能量和力	72
第七节 磁路的基础知识	75
第五章 边值问题和时变电磁场	82
第一节 边界条件和边值问题	82
第二节 电磁场的基本方程组	83
第三节 洛仑兹力公式	87
第四节 电磁能量和坡印亭矢量	88
第六章 电磁波	91
第一节 波动方程	91
第二节 理想介质中的均匀平面波	92
第三节 波的极化	97
第七章 机电系统模型及其运动方程	101
第一节 机电类比	101
第二节 机电系统的能量和拉格朗日函数	109
第三节 汉密尔顿原理与拉格朗日方程	113
第四节 用拉格朗日方程导出机电系统运动方程的步骤与举例	117
第八章 机电能量转换方式	120
第一节 不同电压的电转换装置	120
第二节 直流电能与机械能转换装置	122
第三节 交流电能与机械能转换装置	125
第九章 机电能量转换动力学	130
第一节 变压电能转换的方程	130
第二节 电磁装置中的能量平衡	131
第三节 电磁装置中的机械力	133
第四节 单边及多边励磁的电磁装置的动力学	138
第五节 直流机电能量转换装置的方程	152
第六节 异步机电能量转换装置的方程	157

第七节 同步机电能量转换装置的方程·····	160
第十章 机电能量转换新技术·····	165
第一节 磁悬浮技术·····	165
第二节 磁流体发电和推进技术·····	170
第三节 电磁炮·····	173
第四节 纳米技术·····	176
第五节 超导技术·····	179
参考文献·····	182

绪 论

在人们的生产实践和科学实验中,有许多将其他形式的能量转换成电能或将电能转换成其他便于利用的能量形式的装置。其中,将机械能转换成电能或将电能转换成机械能的装置,称为机电能量转换装置或机电换能器。

机电能量转换装置可分为三类:

(1) 机电信号变换器(简称变换器) 它们的功能是实现机电信号的转换,是在小信号下工作的传感器,用于测量和控制装置中,例如扩音器、扬声器、测速发电机和伺服电动机等。

(2) 动铁换能器 它们的功能是产生机械力,使装置的可动部分在小范围内移动,主要用于对电气设备或机械装置的切换、控制、传送和保护等,例如接触器、继电器、螺管传动机构和电磁吸力装置等。

(3) 连续机电能量转换装置 它们将机电能量连续地进行转换,例如发电机和电动机。

各种机电能量转换装置的作用和结构各有差别,但其基本原理却是类似的,之所以能发生机电能量的转换都是由于电磁场和运动的载电物体(通常为载流导体)相互作用的结果。在这里,发生“运动”是机电能量转换过程的主要特征。而所指的运动包括两个方面:机械的和电的。机械运动是指一个回路(电的、磁的或电磁的)对另一个回路在位置上发生的变化;电的运动是指回路内的电流、电压和磁链发生的变化。描述这些(机械的和电的)运动的数学方程为机电系统的运动方程。

绪论主要研究机电能量转换的基本原理,着重介绍机电能量转换过程和耦合场的作用以及实现机电能量转换的条件等。通过绪论的学习,希望能对各种机电能量转换装置中能量转换的规律有一个较系统和完整的了解。

第一节 机电能量转换的物理基础

目前,绝大多数机电能量转换装置都是以磁场作为耦合场的电磁式装置,这类机电能量转换装置的工作原理基于:电磁感应定律、电磁力定律和能量守恒定律。

一、电磁感应定律

设有一线圈位于磁场中,且有磁力线穿过线圈并与之匝链,则当该线圈中的磁链 Ψ 发生变化时,便将在线圈中产生感应电动势。当感应电动势的参考方向与磁通的参考方向符合右手螺旋定则时,用数学公式表达,电磁感应定律可写为

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (0-1)$$

如所有的磁通都匝链于线圈的全部匝数,则式(0-1)化为

$$e = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-2)$$

式中： N ——线圈串联匝数；

Φ ——磁通。

线圈中磁链的变化，可能有两种不同的方式：① 磁通本身就是由交流电流所产生，也就是说，磁通本身在变化着；② 磁通本身虽不变化，但由于线圈与磁场间有相对运动而使线圈中的磁链变化。这样，普遍说来，任何磁链总的微增量 $d\Psi$ 必为

$$d\Psi = \frac{\partial\Psi}{\partial t}dt + \frac{\partial\Psi}{\partial x}dx \quad (0-3)$$

由此可得感应电动势为

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - \frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{dx}{dt} \\ &= -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - v\frac{\partial\Psi}{\partial x} = e_t + e_r \end{aligned} \quad (0-4)$$

式中： v ——导体与磁场间的相对速度， $v = \frac{dx}{dt}$ 。

由此可知，感应电动势 e 可分为两部分：

$$e_t = -\frac{\partial\Psi}{\partial t}, \text{称为变压器电动势；}$$

$$e_r = -v\frac{\partial\Psi}{\partial x}, \text{称为速率电动势或运动电动势(旋转电动势)。}$$

二、电磁力定律

设有一载流导体处于磁通密度为 B 的磁场中，则该载流导体要受到电磁力的作用。若磁场与导体相互垂直，则电磁力定律的数学表达式为

$$F = B l i \quad (0-5)$$

式中： B ——导体所在处的磁通密度；

l ——导体在磁场中的长度；

i ——导体电流。

电磁力的方向由左手定则确定。

多数电机作旋转运动，设所研究的导体位于电机的转子上，如把导体上所受到的切向电磁力乘以从导体到旋转轴心的距离 r ，便得到电磁转矩 T ，即

$$T = B l r i \quad (0-6)$$

三、能量守恒定律

在质量守恒的物理系统中，能量既不能产生，也不能消灭，而只能改变其存在的形态，这就是能量守恒定律。

在机电系统中，无论是起着将电能转换为机械能作用的机电装置(电动机)，还是将机械能转换成电能的机电装置(发电机)，它们在能量转换过程中，都必须遵守能量守恒定律。

上述电磁感应定律、电磁力定律和能量守恒定律是机电能量转换装置运行的物理基础。



第二节 机电能量转换过程中的能量关系

如前所述,任何机电装置都由电系统、机械系统和联系两者的耦合电磁场组成。由于通常机电系统的频率和运动速度较低,于是电磁辐射可以忽略不计,此时,根据能量守恒定律,可以写出机电装置的能量方程式

$$\text{输入的电能} = \text{耦合场中储能的增量} + \text{能量损耗} + \text{输出的机械能} \quad (0-7)$$

式(0-7)是针对电动机作用写出的,对于发电机作用,输入的电能和输出的机械能两者皆取负值。

式(0-7)中的能量损耗,通常分为三类:一类是电系统(绕组)内部的电阻损耗;另一类是机械部分的摩擦损耗和通风损耗,统称为机械损耗;还有一类是磁场或电场在介质内产生的损耗,例如时变磁场在铁心内产生的磁滞和涡流损耗、电场在绝缘材料内产生的介质损耗等。所有这些损耗,大都变为热能而散出。

如果将以上三类损耗分别归并到相应的能量项中去,式(0-7)可改写成如下形式:

$$\begin{aligned} (\text{输入的电能} - \text{电阻损耗}) = & (\text{耦合场中磁能的增量} + \text{介质损耗}) \\ & + (\text{输出的机械能} + \text{机械损耗}) \end{aligned} \quad (0-8)$$

式(0-8)左端为扣除电阻损耗后输入耦合场的净电能;等式右边第一项为耦合场吸收的总能量,包括耦合场中储能的增量和介质中的能量损耗,第二项则为转换成机械能的全部能量,包括输出的有效机械能和系统内部的机械损耗。

将各项能量写成时间 dt 的微分形式时,式(0-8)可改写为

$$dW_e = dW_f + dW_{\text{mech}} \quad (0-9)$$

式中: dW_e ——在时间 dt 内输入耦合场的净电能;

dW_f ——在时间 dt 内耦合场吸收的总能量;

dW_{mech} ——在时间 dt 内转换成机械能的总能量。

与式(0-9)相对应的能量图示于图 0-1。

应当指出,虽然在能量转换过程中总有损耗伴随产生,但是损耗并不影响能量转换的基本过程。能量转换过程是由耦合场的变化对电系统和机械系统的反应所引起的。前面将损耗分类并进行相应的归并和扣除,即使式(0-7)化为式(0-9),实质上相当于把损耗移出,使装置抽象成无损耗的机电系统,这既突出了问题的核心——耦合场对电系统和机械系统的反应,并导出相应的机电耦合项,又使过程成为单值、可逆和便于定义系统的状态函数,给分析工作带来很大方便。

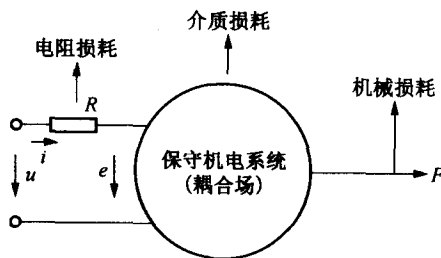


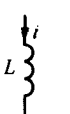
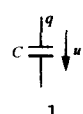
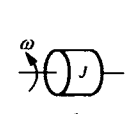
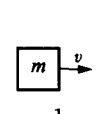
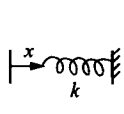
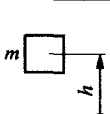
图 0-1 时间 dt 内的能量关系



第三节 保守系统与状态函数

在理想的物理系统中,有许多无损耗、可储能的元件,如表 0-1 所示。例如,在电系统中,线圈通电流时会产生磁场来储存一定的磁能,而电容器充电时会产生电场来储存一定的电场能。在机械系统中,旋转体或平移运动的物体会储存一定的动能,如弹簧被外力 F 压缩 x 长度时,所加的能量 Fx 会以位能形式储存起来;被升高的静物储存着位能等等。以上这些元件在一定的条件下可以储存能量,当条件变化时又可以部分或全部释放所储存的能量,它自身并不消耗能量,故称之为储能元件。全部由储能元件所组成的,与周围系统没有能量交换的自守物理系统称为保守系统。

表 0-1 储能元件及其储能

电 系 统		机 械 系 统			
空心线圈	电容器	旋转体	平移运动	弹 簧	静 物
 $W = \frac{1}{2} Li^2$ L : 电感 i : 电流	 $W = \frac{1}{2} Cu^2$ C : 电容 u : 电压 q : 电荷	 $W = \frac{1}{2} J\omega^2$ J : 转动惯量 ω : 旋转角速度	 $W = \frac{1}{2} mv^2$ m : 质量 v : 速度	 $W = \frac{1}{2} kx^2$ k : 刚性常数 x : 伸缩长	 $W = mgh$ h : 高度 g : 重力加速度

当把决定储能元件储能大小的变量全部用 x 表示时,如表 0-1 中的磁能改写为 $W = \frac{1}{2} Lx^2$, 电场能量改写成 $W = \frac{1}{2} \frac{x^2}{C}$ 等等,这样,整个保守系统的能量 W 可表示为

$$W = W(x_1, x_2, \dots) \quad (0-10)$$

可见,保守系统的全部储能 W 是 $x_i (i=1, 2, \dots)$ 的函数,它仅与 x_i 的当前状态有关,与达到 x_i 状态的经过无关。描述系统当前状态的一组独立变量 x_i 称为状态变量。由一组状态变量所确定的、描述系统当前状态的单值函数,例如储能 W , 称为系统的状态函数。

正如磁场对铁磁物质或载流导体有力的作用,使其运动做功以显示磁场具有储能那样,储能元件处于储能状态时,对外会表现出力或电压(广义的力)的作用。

凡是与储能有关,并能以储能的函数表达的力或电压,都称为保守力,与式(0-10)相似,保守力可表示为

$$F = F(x_1, x_2, \dots) \quad (0-11)$$

它也是状态函数。

保守系统的特点是:其储能以及与储能相联系的保守力都是状态函数,两者都仅与系统的当前状态有关,而与系统的历史以及达到当前状态的路径无关。这是下面分析磁场储能和电磁力的依据之一。

前面提及的无损耗机电系统,若割断它与周围的联系就是一个保守系统。若考虑到系统的损耗以及与周围的能量交换,则实际机电系统都是非保守系统,并且除保守力外,还有与状



态变量无关的力,此力称为非保守力,如电源电压、外施机械力以及摩擦力等。

习 题

- 0-1 什么叫保守系统? 保守系统有什么特点?
- 0-2 什么叫状态函数? 在机电系统中哪些量是状态函数?

第一章 矢量分析

电磁场是矢量场,因此,矢量分析是研究电磁场特性的基本数学工具之一。本章将系统地叙述有关矢量分析的主要内容。我们首先在直角坐标系中讨论矢量的定义、矢量的代数运算以及矢量的微分与积分运算,然后根据圆柱坐标系及球坐标系与直角坐标系的变量之间的关系,推导出圆柱坐标系及球坐标系中的矢量表示及其运算规则。在这一章中,还要介绍矢量分析中的几个重要定理,即高斯定理、斯托克斯定理、格林定理、唯一性定理及亥姆霍兹定理。

第一节 标量和矢量

仅具有大小特征的量成为标量。例如长度、面积、体积、温度等物理量都是标量。不仅具有大小而且具有方向特征的量称为矢量。例如:力、位移、速度、加速度、电场强度及磁场强度等物理量都是矢量。本书以黑斜体表示矢量。标量的空间分布构成标量场、矢量的空间分布构成矢量场。

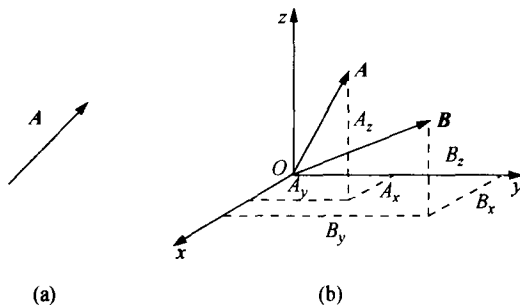


图 1-1 矢量的表示

矢量 A 的几何表示是一条有向线段,如图 1-1(a)所示,线段的长度表示矢量 A 的大小,其指向表示矢量 A 的方向。在直角坐标中,若把代表矢量 A 和 B 的有向线段的始端坐标放在坐标系的原点,如图 1-1(b)所示,则不同的矢量,其终端坐标不同。矢量 A 的终端坐标为 (A_x, A_y, A_z) ; 矢量 B 的终端坐标为 (B_x, B_y, B_z) ; 通常, A_x, A_y, A_z 称为矢量 A 的三个相应的坐标分量; B_x, B_y, B_z 称为矢量 B 的三个相应的坐标分量。由此可见,在三维空间中,一个矢量可用其三个坐标分量来表示。反之,三个标量可用一个矢量来代替。这正是矢量运算比标量运算简洁的原因。当然,表示一个矢量的三个标量并不是任意的,他们必须是矢量的三个坐标分量。用三个坐标分量表示一个矢量称为三维空间矢量的代数表示。可以推知,在二维空间中,一个矢量仅需要两个坐标分量来表示;而在一维空间中,一个矢量仅需要一个坐标分量。

通常,矢量的大小及方向均随空间坐标而变化,若矢量的大小和方向均与空间坐标无关,这种矢量成为常矢量。