

# 机电能量转换

[美] V.高里辛卡 著  
D.H.凯利

沈富根 向树雄 译  
蒋公惠 王泰钟 校

国防工业出版社

# 机电能量转换

〔美〕V.高里辛卡 D.H.凯利 著

沈富根 向树雄 译

蒋公惠 王泰钟 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书系根据原书第二版译出。

本书较系统地阐明了机电能量转换的基本原理、分析方法和运行性能。全书共分九章：磁路概念、铁磁材料的性质、铁磁结构的磁路分析、变压器、机电装置中的机械力、机电换能器的模拟和分析、直流电机和一般化电机、感应电机、同步电机。每章均有例题及习题；结合内容，书末附录还简述了矢量分析、傅里叶级数、拉普拉斯变换、行列式和矩阵、方框图和信号流程图、模拟计算装置等基础知识，以供备考。

本书可供高等工业院校电机、电器、自动控制、电力系统各专业师生作为教学参考书，也可供有关科技人员参考。

### ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERSION (SECOND EDITION)

Vembu Gourishankar/Donald H. Kelly  
INTEXT EDUCATIONAL PUBLISHERS

1973

\*

### 机 电 能 量 转 换

[美] V. 高里辛卡 D.H. 凯利 著

沈富根 向树雄 译

蒋公惠 王泰钟 校

\*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168  $1/32$  印张 18 $1/4$  465 千字

1982年10月第一版 1982年10月第一次印刷 印数：0,001—7,800册

统一书号：15034·2356 定价：2.25元

## 译者序

机电能量转换是研究分析机电换能器和机电装置中能量转换基本原理和运行性能的一门学科。所有的机电换能器和机电装置都由含有能流的电系统和机械系统两个方面组成，磁场或电场是机、电系统之间进行能量转换的耦合媒介。机电能量转换的过程始终伴随着电能、磁能和机械能的储存和相互之间的转换。由于耦合场的介质往往是非线性的，且场的分布是三维空间的，所以要确定磁场或电场与电压、电流以及力(转矩)、速度(角速度)之间的相互关系通常是非常困难的。然而，对于大多数的机电换能器和机电装置可通过适当的假定和近似的方法将问题进行简化。本书主要讨论以磁场为耦合媒介的机电能量转换装置，所得的基本关系式经相应的符号变换后，同样适用于以电场为耦合媒介的机电装置。

电磁场理论、电路理论和系统理论是电气工程和自动化技术的主要理论基础，学习《机电能量转换》要求具备这方面的基础。用系统理论的观点来分析机电系统是本书的主要特点。在这种新的分析方法中，线性分析和数学模型显得十分重要。建立数学模型有两种方法：动态电路法和变分原理法。本书所采用的是动态电路法，即应用法拉第电磁感应定律、基尔霍夫定律、达兰贝尔原理、虚位移原理和能量守恒定律建立系统的数学模型，它的优点是物理概念清楚，易于理解和掌握。

网络分析除了应用回路法和节点法以外，本书重点应用了状态变量法。根据机电系统所含的储能元件确定状态变量，从而列出描述系统的状态方程，它可以比较容易地直接在模拟计算装置上进行电路模拟。随着大型通用数字计算机的出现，用状态变量

法研究线性系统理论比之传统的方法有着显著的优点。此外，用拉氏变换表示状态方程和用信号流程图描绘机电系统是本书的一大特色。

变压器是一种静止的电磁装置，在其中不发生机电能量转换，但在书中所叙述的有关变压器内容仍然是重要的，因为它与机电系统的能量转换过程紧密相关。

绝大多数的旋转电机是一种非线性的机电能量转换装置。迄今为止，还没有分析非线性系统的统一的数学方法。在旋转电机的稳态分析中，为了考虑非线性效应，一般都采用数值解法或图解法。可是，为了进行暂态分析，则必须作线性近似。随着大电力系统的迅速发展以及自动控制的广泛应用，电机的暂态行为已显得更加重要。因此必须提出新的方法，以便导出能够获得旋转电机稳态和暂态两种特性的线性等值电路和数学模型。近代研究旋转电机的方法实质上是线性分析方法，如有需要可以考虑非线性的影响；近代研究方法的另一个方面是强调所有旋转电机的基本统一，尽管它们的结构和用途各不相同，但都可以从同一的一般化电机模型，按不同的电源性质和激磁方式派生出来。本书就是遵循一般化电机的理论阐明直流电机、感应电机和同步电机能量转换的基本原理，推导它们的转矩、功率等表达式，以及讨论它们的运行性能和暂态分析等问题。

译者对原著中存在的错误作了必要的修改，但由于水平有限，译文中难免有错误和不妥之处，敬希读者批评指正。

译 者

## 目 录

<b>第一章 磁路概念</b> .....	1
1-1 引言.....	1
1-2 机电换能器.....	1
1-3 电磁场的基本定律.....	3
1-4 环形线圈磁场——磁路概念.....	16
1-5 时变磁场——法拉第电磁感应定律.....	19
1-6 周期性感应电压和由单一电源激磁的铁心磁通之间的关系.....	22
1-7 单位.....	26
1-8 提要.....	27
习题.....	28
<b>第二章 铁磁材料的性质</b> .....	29
2-1 引言.....	29
2-2 铁磁材料的性质.....	29
2-3 铁磁材料的基本磁化曲线.....	34
2-4 单一电源激磁时铁心中的磁储能.....	36
2-5 铁心中的能量损耗.....	41
2-6 涡流对磁滞回线的影响.....	51
2-7 铁磁结构中周期性激磁电流和磁通的波形.....	53
2-8 铁磁材料的交流磁化曲线和损耗曲线.....	57
2-9 铁磁材料的增量导磁系数.....	59
2-10 铁心线圈的视在电感或增量电感.....	64
习题.....	65
<b>第三章 铁磁结构的磁路分析</b> .....	70
3-1 引言.....	70
3-2 电磁装置的磁路近似法.....	70
3-3 铁磁结构的分析方法.....	73

3-4	铁磁结构中的气隙	77
3-5	具有多个激磁绕组的铁磁结构	81
3-6	试凑法与图解法	83
3-7	铁磁结构的交流激磁	93
3-8	铁心电抗器等值电路的参数测定	98
3-9	铁心电抗器的气隙	102
3-10	饱和电抗器	105
	习题	113
<b>第四章</b>	<b>变压器</b>	<b>121</b>
4-1	引言	121
4-2	变压器的分类	121
4-3	变压器的磁心	122
4-4	理想变压器	123
4-5	非理想线性变压器	127
4-6	应用漏磁概念的线性变压器的等值电路	128
4-7	应用自感和互感概念的线性变压器的等值电路	133
4-8	用自感和互感表示漏感——耦合系数	135
4-9	线性变压器等值电路的修正形式	137
4-10	线性变压器参数的测量	140
4-11	储存在线性变压器磁场中的能量	143
4-12	铁心变压器的等值电路	145
4-13	铁心变压器参数的测量	148
4-14	电力变压器的工作特性	154
4-15	自耦变压器	162
4-16	单相变压器的三相连接	169
4-17	音频变压器——输出变压器	176
	习题	183
<b>第五章</b>	<b>机电装置中的机械力</b>	<b>188</b>
5-1	引言	188
5-2	电磁装置中的能量平衡	188
5-3	电磁装置中的机械力	192
5-4	单一电源激磁的线性电磁装置	199
5-5	双电源激磁的线性电磁装置	204

5-6	作用在磁场中载流导体上的力 .....	208
5-7	在磁场中运动的导体的感应电压 .....	210
	习题 .....	212
<b>第六章</b>	<b>机电换能器的模拟和分析 .....</b>	<b>215</b>
6-1	引言 .....	215
6-2	网络的模拟和分析——回路法和节点法 .....	217
6-3	网络的状态方程 .....	229
6-4	网络的积分器信号流图 .....	231
6-5	平移机械系统的模拟和分析 .....	233
6-6	平移机械系统的电模拟 .....	248
6-7	平移机械系统的状态方程 .....	251
6-8	旋转机械系统 .....	253
6-9	旋转机械系统的齿轮和耦合 .....	264
6-10	机电换能器的模拟和分析 .....	278
	习题 .....	299
<b>第七章</b>	<b>旋转的机电能量转换装置——</b>	
	<b>直流电机和一般化电机 .....</b>	<b>306</b>
7-1	引言 .....	306
7-2	作为具有均匀气隙的旋转电机的双激磁换能器 .....	308
7-3	单元发电机 .....	309
7-4	直流发电机 .....	313
7-5	实际电机的结构特征 .....	316
7-6	换向 .....	319
7-7	电枢反应 .....	322
7-8	实际的直流电机的电动势表达式 .....	326
7-9	他激直流发电机的磁化特性 .....	327
7-10	作为双激磁换能器的直流电机 .....	330
7-11	直流电动机的线性分析 .....	334
7-12	不同连接方式的直流电动机的稳态特性 .....	344
7-13	直流电动机的应用 .....	353
7-14	直流发电机的联接与特性 .....	359
7-15	直流电机在反馈控制系统中的应用 .....	361
7-16	一般化电机 .....	367



	习题	377
<b>第八章</b>	<b>旋转的机电能量转换装置</b>	
	<b>感应电机</b>	382
8-1	引言	382
8-2	感应电机的一般结构特征	383
8-3	多相交流电机的旋转磁场	386
8-4	感应电动机运行的定性讨论	391
8-5	二相感应电机的能量转换	393
8-6	二相感应电机——在对称正弦稳态条件下运行	397
8-7	三相对称运行	401
8-8	对称条件下的稳态转矩-滑差率特性	403
8-9	多相电动机的起动	410
8-10	感应电机等值电路参数的确定	412
8-11	二相感应电动机的不对称运行	422
8-12	二相感应电动机的暂态分析	428
8-13	单相感应电动机	437
8-14	谐波	445
8-15	调速	446
8-16	整步机	448
	习题	457
<b>第九章</b>	<b>同步电机</b>	460
9-1	引言	460
9-2	同步电机的结构特征	460
9-3	同步电机分析	462
9-4	对称稳态运行	465
9-5	同步电动机的运行特性	475
9-6	同步电动机的起动	480
9-7	标么值	481
9-8	同步电机的暂态分析	485
9-9	同步电机的控制分析	493
9-10	转子附加绕组	497
9-11	暂态功角特性	499
9-12	同步电机的参数	500

9-13	单激磁的同步电动机	502
	习题	504
附录 A 矢量分析		507
A-1	引言	507
A-2	矢量的加法	507
A-3	矢量的减法	508
A-4	标量与矢量的乘法	508
A-5	矢量与矢量的乘法	509
A-6	面积的矢量表示法	510
A-7	矢量的散度	510
A-8	矢量的旋度	511
附录 B 单位及其换算系数		512
附录 C 傅里叶级数		513
C-1	引言	513
C-2	函数 $f(t)$ 的傅里叶级数表达式	514
C-3	傅里叶级数的一些性质	516
C-4	周期函数的有效值或均方根值	518
附录 D 拉普拉斯变换		519
D-1	引言	519
D-2	关于复变量理论的一些定义	520
D-3	拉氏变换	524
D-4	拉氏变换的性质	527
D-5	反拉氏变换	529
附录 E 对数比例		539
E-1	引言	539
E-2	数值比例	540
E-3	频率比例	540
附录 F 行列式和矩阵		541
F-1	行列式	541
F-2	用克莱姆法则求解线性方程组	544
F-3	矩阵	546
F-4	线性方程组的矩阵表示法	549

附录G 物理系统的方框图和信号流图 .....	550
G-1 物理系统的方框图 .....	550
G-2 方框图的变换 .....	551
G-3 物理系统的信号流图 .....	552
G-4 关于信号流图的一些定义 .....	556
G-5 计算信号流图增益的梅森公式 .....	560
G-6 信号流图和初始条件 .....	563
附录H 模拟计算装置 .....	564
H-1 动态系统的模拟计算装置表示法 .....	564
H-2 模拟计算装置的元件 .....	565
部分习题答案 .....	570

# 第一章 磁路概念

## 1-1 引言

在当今的自动化时代和工业化的社会中,由于从电动剃刀、电话机到洗衣机、高速电梯以及喷气式飞机等种种设备的应用,使人们的日常生活变得更加舒适,工作效率更为提高。一个社会的状况是以人们可能获得这些设备的程度来评价的,而许多这种设备是根据机、电相互作用的某种方式运行的。通常采用的方式是将电能转换成机械能,或者反之。在这种转换过程中,电场和磁场起着重要的作用。在家用器具(如电风扇和电冰箱)中所用的电动机是将电能变为机械能;电话从一个地方传输消息到另一个地方是通过声波产生的机械能变换成电信号,然后在接收端再由电信号重新转换成声波。许多科学家和工程师正在从事用于机电效应的压电材料和压磁材料的研究。另一个大有潜力的研究领域是应用磁流体动力学的原理进行发电,许多工程师正在从事这方面的研究活动。

有关机电能量转换的应用不胜枚举,我们仅列举这些。本书的目的在于讨论机电能量转换过程的基本原理,以及介绍一些分析机电装置和系统的特性的方法。

## 1-2 机电换能器

“换能器”这个术语是用来描述从一种能量形式变换成另一种能量形式的装置。在本节中,我们将扼要地讨论机电换能器的一般结构。

实际上,所有机电换能器都可看作是由一些电的和那些被归入为机械的两个部分组成,磁场和(或)电场是电和机械这两部

分之间的耦合媒介。必须着重指出，这种分法在换能器中实际上不一定存在，然而，这种想象有利于机电换能器的研究。

图 1-1 表示机电换能器的方框图。为了说明这种方法，让我们考虑一种继电器，图 1-2 表示这种常用继电器的原理图。只要激磁线圈中通有足够的电流，触头 A 和 B 就保持互相接触。触头 A 和 B 在别的电路（图中未表示）中通常作开关使用。当激磁线圈中的电流中断时，弹簧就拉回衔铁，减震器用来缓冲振荡。在这装置中，电和机械部分以及作为耦合媒介的磁场的作用是显而易见的。

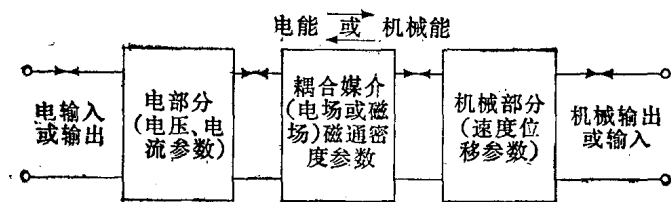


图1-1 表示机电换能器的方框图

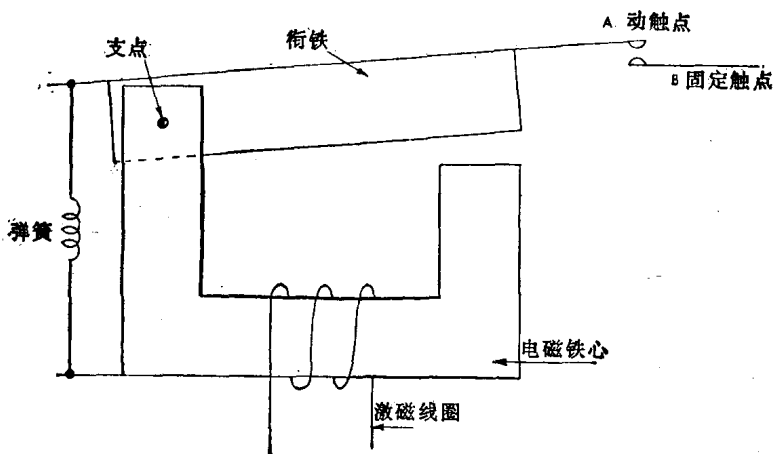


图1-2 继电器的简图

为了达到上述目的，即提出一些分析机电换能器的方法，必须理解图 1-1 所示的三个方框中每一个方框的输入输出关系。例如需要计算磁场或电场强度以及建立换能器中电、磁场与电参数（即电压和电流）和机械参数（即位移和速度）之间的关系。在很多场合下，机电能量转换的过程也包含着电能的储存和传递，因而，也需要理解这两个过程的基本原理。上述的一些问题一经理解，就可以推导出换能器的数学模型。读者细读目录和前言将会明了本书用来推导机电换能器数学模型的方法，因而这里不再重复。现在我们着手讨论本章剩下部分的内容。

在本章的其余部分中，首先，我们将复习有关电、磁场的基本定律，我们打算充分讨论这些问题，而只想引用那些与本书主要目的——研究机电能量转换有关的结论，然后讨论磁路概念。在这方面，值得提出的是，要确定介质中磁（或电）场强度与电压、电流之间的关系通常是非常困难的，因为介质往往是非线性的，且所有的计算必须在三维空间中进行。然而，幸运的是，对于大多数机电换能器，可以用适当的假定和近似的方法，使三维场问题简化为一维的磁路问题。所以，在机电能量转换的研究中磁路概念极其有用。

### 1-3 电磁场的基本定律

#### 静电学

**库仑定律** 电是物质的特性，而电荷是这个特性的一种量度。众所周知，电荷有正电和负电两种。与实验证明相一致的基本公理之一是电荷守恒定律。根据这个定律，在任何独立的系统中，所有电荷的代数和是恒定的。实验也表明，电荷与电荷之间或带电体与带电体之间互相有作用力，这些力叫做电场力。1785年库仑用带电体进行了许多实验，得出两个点电荷之间的电场力的表达式。这个定律叫做库仑定律，它可以表示如下：

$$F = K \frac{q_1 q_2}{R^2} \tag{1-1}$$

式中  $q_1$  和  $q_2$  是电荷量， $R$  是它们之间的距离，而  $K$  是与实验引入的介质以及所采用的单位制有关的一个比例常数。库仑发现同性电荷相斥，而异性电荷相吸。

上式对任何一致的单位制都能适用。有理化 MKS 制深受工程师们的欢迎，它被采用于 1935 年，于 1948 年得到国际承认。在有理化 MKS 制中，米、公斤、秒和库仑分别为长度、质量、时间和电荷的单位，常数  $K$  为  $1/4\pi\epsilon_0$ 。符号  $\epsilon$  是介质的介电常数（也叫做电容率），对于自由空间或真空，这个常数值为  $1/(36\pi \times 10^9)$ ，它通常以  $\epsilon_0$  表示之。

假定介质为自由空间，即  $\epsilon = \epsilon_0$ ，则在采用有理化 MKS 制时，不难写出式 (1-1) 的矢量形式 (见图 1-3)，即

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{r}_0 \tag{1-2}$$

(矢量用黑体符号表示)。矢量  $\mathbf{F}$  的方向在两个电荷间的连接线段上。

在列出上述方程时，假定带电体在空间是静止的，且认为是点电荷。 $\mathbf{r}_0$  为力线方向上的单位矢量。图 1-3 中所示的力线方向表明两个电荷假定是同性的。

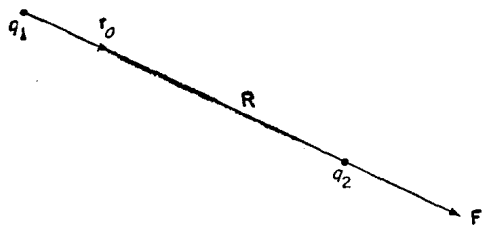


图1-3 式 (1-1) 和式 (1-2) 的图示说明

- 此值的意义将在本章后面解释。
- 关于矢量的简要讨论参见附录 A。

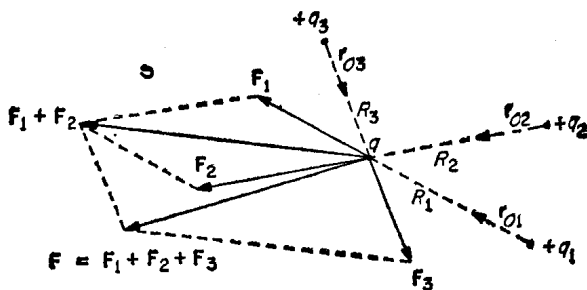


图1-4 其他一些电荷作用于一个电荷上的力

当存在两个以上电荷时，可用线性叠加求它们作用于邻近一个试验电荷上的总力，这个总力等于这些电荷中的各个电荷对试验电荷作用力的矢量和，如图 1-4 所示。作用于电荷  $q$  的总力由下面的关系式确定：

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{qq_1}{R_1^2} \mathbf{r}_{01} + \frac{qq_2}{R_2^2} \mathbf{r}_{02} + \frac{qq_3}{R_3^2} \mathbf{r}_{03} \right) \quad (1-3)$$

或一般写成

$$\mathbf{F} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{R_j^2} \mathbf{r}_{0j} \quad (1-4)$$

式中  $N$  是使  $q$  受力的电荷总数，而  $\Sigma$  表示总和。

电场 在上面的讨论中，因为实际上这些电荷是独立的，所以可以设想每一个电荷  $q_j$  将产生一个电场，该电场对于在它影响范围内的其它电荷在受力方面起着媒介作用。亦即假定电场本身可以对其它电荷产生作用力，假定电场中心就在电荷所在的位置。如果这种假定成立，且试验电荷  $q$  足够小，而不致于使其它电荷所产生的电场发生畸变，则电场强度可用电场强度矢量  $\mathbf{E}$  来描述。定义

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (1-5)$$

或按式 (1-4)，可写成



$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{R_j^2} \mathbf{r}_{0j} \quad (1-6)$$

在有理化MKS单位制中， $\mathbf{F}$ 的单位是牛顿， $q$ 的单位是库仑， $\mathbf{E}$ 的单位是牛顿/库仑。另一种用电位表示 $\mathbf{E}$ 的方法将在本节后面提到。

对于位在自由空间中的一个简单带电体，其电场强度

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho}{R^2} \mathbf{r}_0 dv \quad (1-7)$$

式中 $\rho$ 是电荷的体密度， $V$ 是对整个带电体进行积分的体积。当电荷分布在表面上时，可以写出类似的表达式。

电位 现考虑电荷 $q_j$  ( $N$ 个电荷系统中的一个)产生的电场，见图1-5。假定要将一个正电荷从 $A$ 点沿着某条路径移动到

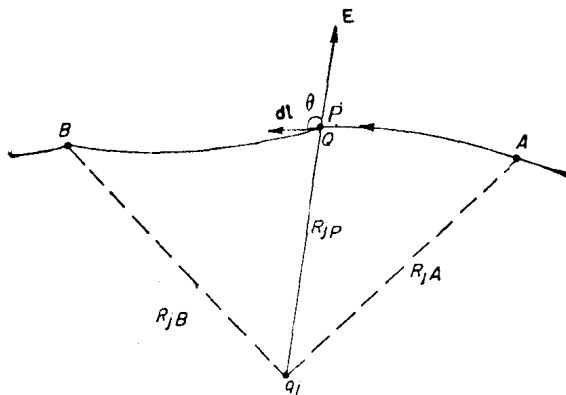


图1-5 在自由空间的电场中移动电荷

$B$ 点，因为由 $q_j$ 产生的电场对电荷 $Q$ 有作用力，因此，将电荷 $Q$ 从 $A$ 移动到 $B$ 必须做功且要耗费能量。在 $AB$ 路径上的 $P$ 点处，由 $q_j$ 产生的电场强度 $\mathbf{E}$ 为

$$\mathbf{E} = \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0 R_{jP}^2} \mathbf{r}_0 \quad (1-8)$$

式中 $\mathbf{r}_0$ 是单位矢量， $R_{jP}$ 为 $P$ 点离 $q_j$ 的距离，这里，假定介质是自