

第二版

电动机调速的原理及系统

杨兴瑞 编著

中国电力出版社

电动机调速的原理及系统

第 二 版

杨兴瑶 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书1979年第一版受到广大读者的欢迎。在本版中对15年来电机调速领域的最新发展,特别是直流电动机脉宽调速、继电(变结构)调速和数字调速、异步电动机晶闸管调压调速、变频调速和串级调速以及同步电动机自控式变频调速(直流和交流无换向器电动机调速)、开关磁阻电机调速等,都作了较详细和系统的分析,对晶闸管控制直流电动机调速、异步电动机变极调速和电磁转差离合器调速以及步进电动机开环和闭环调速等也作了较深入的介绍。

全书共分十五章,叙述分析深入浅出,内容新颖、全面,适于从事工业控制的广大技术工人、科技人员以及大专院校自动控制专业和电气技术专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电动机调速的原理及系统/杨兴瑶编著. —2版. —北京:中国电力出版社,1995. 5(1998重印)

ISBN 7-80125-572-0

I. 电… II. 杨… III. 电机-调速 IV. TM306

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 25635 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1979年8月第一版

1995年5月第二版 1998年2月北京第四次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 27.25印张 620千字

印数41651—44790册 定价32.30元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

如果说15年前电动机调速是一个刚刚兴起的科学技术领域的话,那么当今电动机调速已成为高新技术产业的一个重要组成部分,是实现高效节能、优质高产的现代化生产的重要手段。伴随着微电子技术和电力电子技术的发展,电动机调速发生了根本性的变化。从普通的晶闸管整流器-直流电动机调速到直流脉宽调速,从普通异步电动机定子调压调速、变极调速、电磁转差离合器调速到异步电动机变频调速和串级调速、自控式同步电动机调速(直流和交流无换向器电机调速)、开关磁阻电机调速等等,电动机调速真正形成了内容丰富的工程技术范畴。

尽管在15年前作者编写此书时对上述内容都作过介绍,并且其中很多原理和分析至今仍然适用,但是由于下述很多重要方面的突破性发展,使得作者有必要重新改写此书。这些突破性进展主要表现在:①各种性能优越的新型电力半导体器件的出现,如既能控制导通又能控制关断的门极可关断晶闸管(GTO)、具有良好功率转换效率和适于在高频大功率情况下工作的场效应功率晶体管(MOSFET)、既有MOS管栅极驱动电压功率小和有驱动线路简单的优点,又有双极性功率晶体管导通饱和压降小优点的绝缘栅双极型大功率管(IGBT)以及内部既有大功率开关器件,又有各种驱动电路和过压、过流、过热等保护电路的智能型功率模块(IPM)等等器件的推广应用,不仅使得调速系统控制装置体积小、效率高,而且还更容易实现各种功能复杂但在结构上是简单的控制方案,更加充实和推动了电动机调速理论的进一步发展;②能完成各种复杂信号和信息处理的集成芯片的出现,如能产生脉宽调制(PWM)信号的专用集成电路以及各种单板机、单片机和计算机系统用的微处理器和接口芯片的大量问世,为我们实现高质量的控制创造了良好的条件;③建立在电机统一理论和机电一体化理论基础之上的各种先进控制方案的出现,如利用坐标变换把异步电动机改造为类似直流电动机的矢量控制方案、通过快速检测电流实现PWM控制的变频技术、通过直接控制转矩来快速控制转速的转矩自调整技术以及具有很强抗干扰能力的变结构控制系统等等,都极大地丰富了电动机调速领域的内容。

本书第二版目的在于反映上述有关内容。编写时主要遵循下列原则:①尽可能以较浅显的叙述来说明各种电动机调速的原理,特别着重于物理概念的解释。在数学工具应用上,没有采用如矩阵和状态空间等较高深的理论。这样可能为更多的读者所接受。②尽可能用统一的分析方法叙述形式各异的系统,争取做到由此及彼,举一反三。③尽可能较全面地介绍当前电动机调速领域的各种最新发展,以期能在这一领域发展进程中起到推动作用。

作者在很多方面力求用自己的分析方法阐明问题,用自己掌握和应用的线路和系统充实内容。书中如有不妥之处,欢迎读者批评指导。

目 录

前 言

第 1 章 电动机模型.....	1
1.1 电机理论中的两个基本定律及其联系.....	1
1.2 电机电动势、磁场和转矩的普遍物理概念和公式.....	5
1.3 一般化电机的数学模型.....	24
1.4 直流电动机的数学模型.....	37
1.5 异步电动机的数学模型.....	39
1.6 同步电动机的数学模型.....	42
第 2 章 电动机调速系统的构成原理.....	44
2.1 电动机调速的基本原理和性能指标.....	44
2.2 电动机调速系统的基本结构.....	47
2.3 电动机的稳定运行条件及其与负载的配合.....	48
2.4 电动机控制的基本规律.....	49
2.5 变流装置的基本结构.....	53
2.6 电动机调速系统设计的一般化方法.....	58
第 3 章 晶闸管整流器-直流电动机调速系统.....	65
3.1 基本整流电路.....	65
3.2 有源逆变的概念.....	70
3.3 可逆整流电路及电动机的可逆运行.....	74
3.4 晶闸管整流器-直流电动机系统的传递函数和动态特性.....	76
3.5 晶闸管整流器-直流电动机调速系统的基本结构和设计.....	78
3.6 电枢反向的晶闸管整流器-直流电动机可逆调速系统.....	91
3.7 电流源-直流电动机系统.....	95
第 4 章 直流电动机脉冲调速系统.....	99
4.1 脉冲调速的原理和分类.....	99
4.2 零式直流脉冲调速系统.....	103
4.3 具有制动状态的不可逆脉冲变流器.....	112
4.4 半桥可逆脉冲变流器.....	119
4.5 桥式可逆脉冲变流器.....	122
4.6 直接由交流电网供电的脉冲变流器.....	129
第 5 章 晶体管线性放大器-直流电动机调速系统.....	138
5.1 电压控制系统和电流控制系统.....	138
5.2 不可逆线性放大器电路.....	140
5.3 半桥可逆电路.....	145
5.4 桥式可逆电路.....	146
第 6 章 直流电动机继电控制调速系统.....	149

6.1	继电系统的特性.....	149
6.2	双位继电调速系统	154
6.3	准连续继电调速系统.....	158
6.4	具有瞬时值反馈的继电系统.....	158
6.5	滑模控制变结构继电系统.....	166
第7章	直流电动机的数字调速和锁相调速系统.....	178
7.1	速度的频率及数字测量原理和性能指标.....	178
7.2	主要的数字测速方法及调速系统的典型结构.....	180
7.3	直接数字控制系统的数字调节器设计.....	190
7.4	微机控制直流电动机调速系统.....	191
7.5	频率-相位调速系统.....	193
第8章	异步电动机的参数调节.....	199
8.1	单相异步电动机晶闸管交流调压调速系统.....	199
8.2	三相异步电动机晶闸管交流调压调速系统	205
8.3	定子调压下异步电动机的反转电路和制动电路.....	213
8.4	定子调压的晶闸管触发电路.....	215
8.5	异步电动机的定子脉冲调压调速.....	216
8.6	三相异步电动机转子电路移相控制.....	220
8.7	三相异步电动机的转子脉冲控制.....	222
8.8	异步电动机参数调节时的能量指标.....	224
8.9	异步电动机速度负反馈闭环调压调速系统.....	227
第9章	异步电动机的变极调速.....	229
9.1	变极调速的基本原理及特性.....	229
9.2	单绕组变极多速电动机.....	232
9.3	变极调压调速.....	235
第10章	异步电动机-电磁转差离合器调速系统.....	238
10.1	电磁转差离合器的构造和原理.....	238
10.2	电磁转差离合器的机械特性.....	239
10.3	异步电动机-电磁转差离合器调速系统的组成和动态特性.....	240
10.4	微机控制同步传动系统.....	242
10.5	变极异步电动机-电磁转差离合器调速系统.....	243
10.6	电磁转差离合器调速系统的适用领域.....	244
第11章	异步电动机的变频调速.....	247
11.1	变频调速的原理、特性和分类.....	247
11.2	电压源供电时定子电压 U_1 和频率 f_1 协调调节的方式.....	264
11.3	电压型方波逆变器变频调速系统.....	265
11.4	电压型脉宽调制逆变器变频调速系统.....	273
11.5	电流源控制变频调速系统的构成方式.....	287
11.6	电流型方波逆变器变频调速系统	288
11.7	电流型脉宽调制逆变器变频调速系统.....	298

11.8	转差频率控制变频调速系统.....	306
11.9	电流瞬时值控制(电流跟踪)变频调速系统.....	313
11.10	矢量控制变频调速系统.....	315
11.11	转矩直接自调整变频调速系统.....	326
11.12	异步电动机的滑模变结构控制.....	330
11.13	交-交变频调速系统.....	332
第12章	绕线转子异步电动机的串级调速.....	340
12.1	串级调速的原理.....	340
12.2	串级调速时的机械特性.....	342
12.3	次同步串级调速装置和系统.....	347
12.4	次同步晶闸管串级双闭环调速系统.....	362
12.5	双馈调速系统.....	363
第13章	同步电动机调速系统.....	372
13.1	他控式同步电动机变频调速系统.....	372
13.2	自控式同步电动机变频调速系统.....	373
13.3	直流无换向器电动机.....	377
13.4	交流无换向器电动机.....	387
13.5	无刷直流电动机.....	388
第14章	开关磁阻电动机调速系统.....	392
14.1	磁阻电动机的工作原理和磁阻转矩的产生.....	392
14.2	开关磁阻电动机系统中的功率变换装置.....	395
14.3	开关磁阻电动机系统的组成及其控制方式.....	399
14.4	开关磁阻电动机调速系统的特点和应用.....	402
第15章	步进电动机及其系统.....	404
15.1	步进电动机的类型和原理.....	405
15.2	步进电动机的基本特性.....	411
15.3	步进电动机开环控制中的基本环节.....	414
15.4	步进电动机的闭环控制系统.....	421
参考文献		427

第 1 章 电动机模型

电机是进行电能与机械能变换的机器。这种变换与其它机器的能量变换方式不同，它还必须借助一种叫做“场”的特殊物质来实现。场有磁场和电场，在电机中主要应用的场是磁场^①。因此，我们所研究的电机应当理解为电磁机，在分析和研究电机调速问题时也就必须注意电、磁、机这三种能量方面的问题。电机中电、磁、机三种物理量通过一些基本定律相互联系，通过一些方程式相互制约和转换。

下面先简要叙述一下电机理论中的两个基本定律及其联系，随后在电机通用理论的基础上建立电动机的数学和物理模型，并导出各种电动机的静态和动态特性。

1.1 电机理论中的两个基本定律及其联系

1.1.1 电磁感应定律和电磁力定律

电磁感应定律和电磁力定律是电机理论中最基本的两个定律。

(1) 电磁感应定律。当与某一线圈 ax [图1-1(a)]交链的磁通 Φ 发生变化时，在该线圈中将产生感应电动势，其大小与磁通的变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ 成比例。线圈匝数为 w 时，磁链 $\psi = w\Phi$ ，这里小写字母 ψ 、 Φ 表示瞬时值，于是感应电动势为

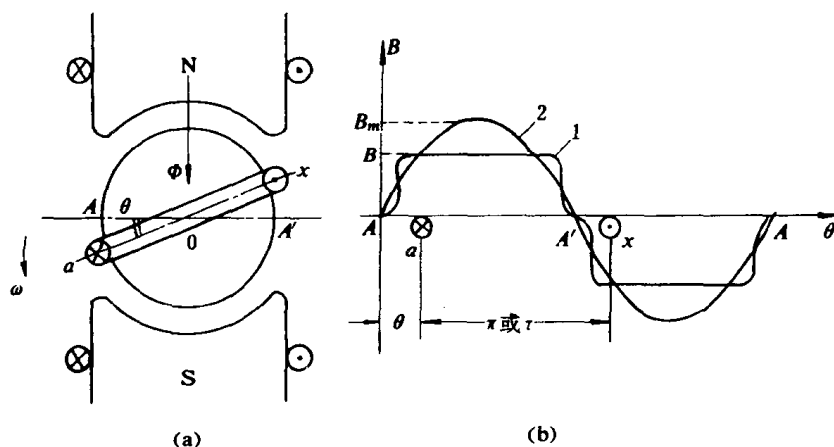


图 1-1 线圈感应电动势的产生

(a) 简单电机示意图；(b) 电机展开后的磁通密度分布图

① 由于目前还没有找到象磁场材料这样具有高能量密度的电场材料，因此利用电场作媒介的电动机还仅限于在驻极体仪表或静电电容电机等小功率场合下应用。

$$e = -w \frac{d\varphi}{dt} = - \frac{dw\varphi}{dt} = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1-1)$$

式中负号表明，感应电动势有反抗磁通变化的趋势。一般 φ 或 ψ 是时间 t 和线圈与磁场相对位移角 θ 的函数，即 $\psi(t, \theta)$ ，因此可以将式(1-1)展开为

$$e = - \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \times \frac{d\theta}{dt} \right) = - \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta_f} \times \frac{d\theta_f}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta_c} \times \frac{d\theta_c}{dt} \right) \quad (1-2)$$

式中 $\theta = \theta_f + \theta_c$ ， θ_f 为磁场位移转角， θ_c 为线圈位移转角。由于是相对运动，故线圈转角取逆时针方向为正，而磁场转角则应取顺时针方向为正。由式(1-2)可以看出，有三种能使线圈产生感应电动势的方法：

1) $e_T = - \frac{\partial \psi}{\partial t}$ ，为由磁通随时间变化产生的变压器电动势或称脉动电动势；

2) $e_{\omega_f} = - \frac{\partial \psi}{\partial \theta_f} \times \frac{d\theta_f}{dt} = - \frac{\partial \psi}{\partial \theta_f} \times \omega_f$ ，为由磁场运动产生的旋转电动势或称磁场运动

电动势，这里 θ_f 、 ω_f 分别是磁场运动的转角和角速度；

3) $e_{\omega_c} = - \frac{\partial \psi}{\partial \theta_c} \times \frac{d\theta_c}{dt} = - \frac{\partial \psi}{\partial \theta_c} \times \omega_c$ ，为由导体运动产生的旋转电动势或称导体运

动电动势，这里 θ_c 、 ω_c 分别是导体运动的转角和角速度。

一般的变压器主要就是利用上述第一种即脉动电动势来工作的，而一般的电机在稳态运行时主要是利用上述第二种和第三种即旋转电动势来工作的。根据线圈与磁场相对运动的形式和配合方式不同，可将一般工业中最常见的电机分成下列三种基本类型：

直流电机——主磁场由定子产生，磁通密度 B 近似为矩形分布 [图1-1(b)中曲线1]，其大小及空间指向不变，线圈（电枢）转动，故是利用上述第三种电动势工作的；

异步电机——主磁场也是由定子产生的，但磁通密度 B 的分布近似为正弦形 [图1-2(b)中曲线2]，并且在空间上是旋转的，线圈也旋转，但二者速度不同，故主要是利用上述第二种和第三种电动势工作的；

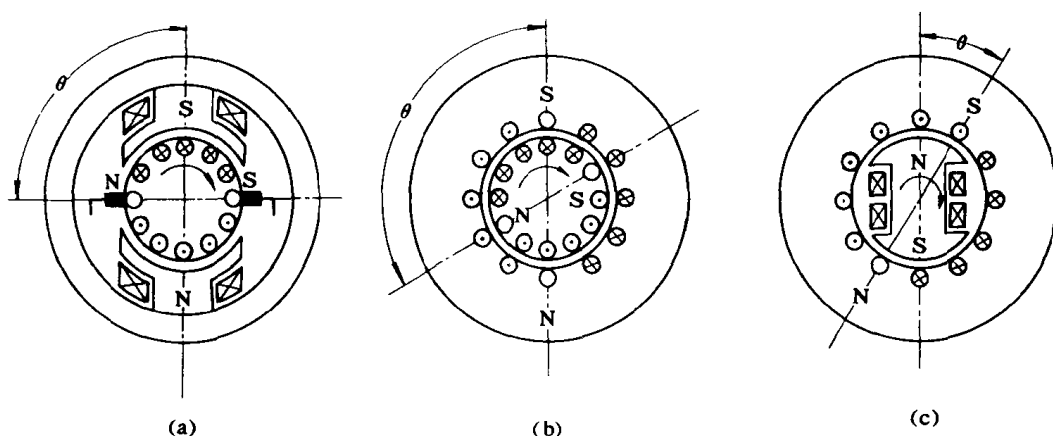


图 1-2 三种基本类型电机

(a) 直流电机； (b) 异步电机； (c) 同步电机

同步电机——主磁场由转子产生，磁通密度 B 的分布近似为矩形（凸极式）或正弦形（隐极式），其大小或幅值不变，但在空间上转动，线圈（电枢）在定子上不动，故主要是利用上述第二种或兼有（比如带异步绕组的同步电机）第三种电动势工作的。

具体地说，可以把上述三种基本类型电机表示成如图1-2所示的结构形式。

为了计算方便，常用一根导体来代替图1-1中的线圈，此时感应电动势 e 的标量可用磁通密度矢量 $\vec{B}$ 、导线长度矢量 $\vec{l}$ 和速度矢量 $\vec{v}$ 的积来表示：

$$e = \vec{B} \cdot (\vec{l} \times \vec{v}) = Blv \cos \alpha \sin \beta \quad (1-3)$$

式中 α 是由 $\vec{B}$ 到 $\vec{l} - \vec{v}$ 平面法线的转角， β 是由 $\vec{l}$ 到 $\vec{v}$ 的转角。为使感应电动势最大，显然应使 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\beta = 90^\circ$ ，即有

$$e = Blv$$

(2) 电磁力定律。一根长度 l 的导体通以电流 i ，在磁通密度 B 的磁场中，将受到的电磁力 f 可表示为

$$\vec{f} = i \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (1-4)$$

其大小为

$$f = Bli \sin \gamma$$

式中 γ 为由矢量 $\vec{l}$ 到 $\vec{B}$ 的转角。当 $\gamma = 90^\circ$ 时导体受力最大，即有

$$f = Bli$$

电磁感应定律中 e 、 B 、 v 的方向按右手定则确定，电磁力中 f 、 B 、 i 的方向按左手定则确定。如图1-3所示，机械量 $\vec{f}$ 和 $\vec{v}$ 的方向用拇指取向，磁场 $\vec{B}$ 的方向用食指取向，电气量 $\vec{e}$ 和 $\vec{i}$ 的方向用中指取向，三指相互垂直，构成三维空间。当然，电动势 $\vec{e}$ 和力 $\vec{f}$ 的方向也可按式(1-3)和式(1-4)由矢量积的乘法规则确定。

1.1.2 机电能量变换的可逆性

电磁感应定律和电磁力定律是联系机械能量与电磁能量间关系的两个最基本的定律，它们共存于机电能量变换过程中，互相联系，互相转换。

当电动机输入电功率时，有效导体所具有的瞬时电功率为

$$p = e \cdot i = Blv \cdot i = Bli \cdot v = f \cdot v = p_m$$

即等于该导体所具有的瞬时机械功率 p_m 。同样，当发电机输入机械功率时，其导体所具有的瞬时机械功率为

$$p_m = f \cdot v = Bli \cdot v = Blv \cdot i = e \cdot i = p$$

即等于该导体所具有的瞬时电功率。实际上，任何瞬间电机内的电功率与机械功率都是平衡的，功率流动的方向取决于外作用，亦即取决于由电输入端还是由机械输入端哪一方面来承担其损耗。上面研究的无损耗电机没有考虑损耗，但这只能是超导电机所追求的目标。

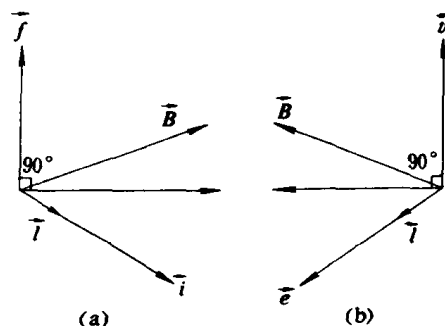


图 1-3 两个基本定律中各矢量方向的确定

- (a) 电磁力定律 (由 $\vec{i}$ 、 $\vec{B}$ 确定 $\vec{f}$)；
(b) 电磁感应定律 (由 $\vec{v}$ 、 $\vec{B}$ 确定 $\vec{e}$)

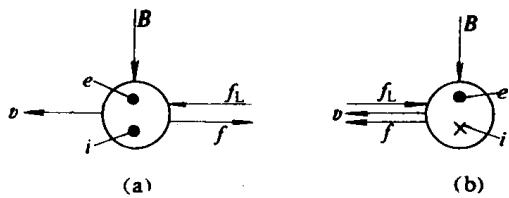


图 1-4 电机导体电动势与电流方向的确定

(a) 发电机导体; (b) 电动机导体

实际发电机中的一根导体〔在图1-4(a)中用大圆表示〕在外力 f_L 作用下以速度 v 向左方移动时,若磁场 B 的方向由上而下,则按右手定则可知感应电动势 e 的方向穿出纸面(用 $\cdot$ 号表示),如果闭路,则有与导体电动势方向相同的电流 i 流出。与此同时,载流导体在磁场中又受到电磁力 f 的作用,根据左手定则可判出此力的方向自左向右,即与外力 f_L 方向相反,是反抗运动的,故称为反力或制动力。若外加电压迫使电流反向〔图1-4(b)中电流 i 流入,用 $\times$ 号表示〕,则电机将产生电磁力 f 克服外力 f_L 负载使导体以速度 v 向左方运动,从电磁感应定律中可知,此时在导体中产生感应电动势 e ,其方向与电流 i 的方向相反,故称为反电动势。这样,发电机就成为电动机了。

由此可见,原则上发电机可作为电动机运行。同样,电动机也可作为发电机运行。这一原理称为电机可逆性原理。

不仅电机能够可逆使用,而且任何电机都同时存在发电机和电动机两种作用,所不同的是看哪一种作用处于主导地位。在发电机运行时,发电机作用(实箭头)是主导的,见图1-5(a),而电动机作用(虚箭头)是起阻碍或制动作用的;电动机运行的情况恰好相反,这时电动力(实箭头)起驱动作用,而电动势却是阻碍电流流动的(虚箭头),

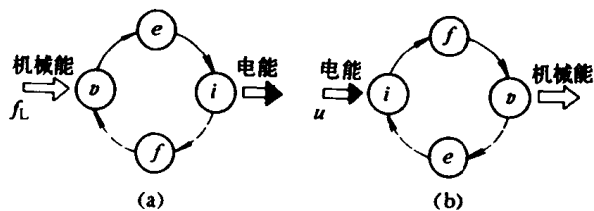


图 1-5 电机中的两种作用

(a) 发电机中的作用; (b) 电动机中的作用

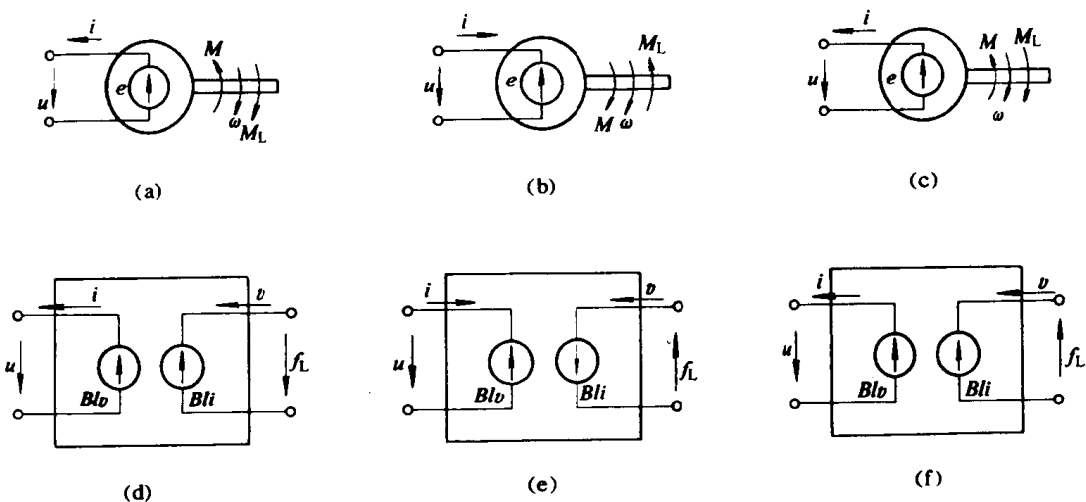


图 1-6 电机的三种基本运行状态

(a)、(d) 发电状态; (b)、(e) 电动状态; (c)、(f) 制动状态

见图1-5(b)。

通过上面分析,可进一步把电机的运行分成三种基本运行状态,即发电、电动和制动运行状态,每种状态都取决于外加电压 u 和内部电动势 e 、外力 f_L (或外转矩 M_L)和内力 f (或内转矩 M)的相互作用和制约。图1-6(a)、(b)、(c)分别示出这三种状态下各主要物理量的方向,图(d)、(e)、(f)分别示出与图(a)、(b)、(c)对应的电路模型。电路模型中机械量力用电源电压表示,速度用电流表示。从这些图中不难看出在不同运行状态下能量的转换关系,即发电状态吸收机械能,发出电能;电动状态吸收电能,发出机械能;制动状态则将电机具有的机械能转换为电能送回电源(再生发电制动)或消耗在回路的电阻发热上面(能耗制动或反接制动)。

1.2 电机电动势、磁场和转矩的 普遍物理概念和公式

1.2.1 电机电动势通用公式的推导

现回到图1-1所示一个整距线圈在两极磁场中运动的情况。当线圈 ax 在水平位置 AA' 时,它和磁极的总磁通 Φ 相交链。当它在垂直位置时,磁链是零。当线圈又反过来在水平位置时,总磁通 Φ 在相反方向上交链线圈。因此,在半转中磁通变化 2Φ 。若电机转速为 $n(\text{r/min})$,而半转的时间是 $\Delta t = 30/n(\text{s})$,则根据电磁感应定律,线圈中产生感应电动势的平均值为

$$E_{a1} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{2\Phi n}{30} = 4\Phi \times \frac{n}{60} \quad (1-5)$$

上式表明,当转速不变时,平均电动势 E_{a1} 只决定于每极下的总磁通 Φ ,而与磁通沿转子圆周表面的分布方式无关,亦即与磁通密度 B 的分布无关。在直流电机中磁通密度分布近似为矩形,在极中心线处 B 为零,在极靴区段几何中性线处 B 最大。设线圈的宽度为一个极距 τ ,则线圈中感应电动势的瞬时值为

$$e = 2Blv$$

即当 $v = \text{常数}$ 时, e 正比于 B , e 的变化波形也就是 B 的分布波形。因为线圈有两个有效边,故上式中有系数2。

如果磁通密度沿转子表面正弦形分布,则线圈电动势波形也是正弦形的,正弦波电动势的幅值 E_{m1} 和平均值 E_{a1} 之比为

$$\frac{E_{m1}}{E_{a1}} = \frac{\pi}{2} \quad (1-6)$$

因此,一个线圈中的感应电动势幅值按式(1-5)和式(1-6)有

$$E_{m1} = 2\pi\Phi \frac{n}{60}$$

对有 p 对磁极电机而言,磁通变化率应为一对磁极时的 p 倍,故线圈感应电动势的幅值为

$$E_{m2} = 2\pi\Phi \frac{pn}{60} \quad (1-7)$$

实际电机转速为每分钟 n 转, p 对磁极电机旋转一周, 磁通密度 B 和感应电动势 e 每分钟变化 pn 个周期, 故感应电动势的频率为

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1-8)$$

将式(1-8)代入式(1-7)可得电动势幅值为

$$E_{m2} = 2\pi f\Phi \quad (1-9)$$

电动势有效值为

$$E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f\Phi = 4.44 f\Phi \quad (1-10)$$

若磁通是非正弦分布的, 则根据式(1-6)和式(1-9), 电动势平均值为

$$E_{a2} = 4f\Phi \quad (1-11)$$

设波形系数 k_ϕ 为有效值与平均值之比, 即

$$k_\phi = \frac{E_2}{E_{a2}}$$

则电动势有效值又可写成

$$E_2 = k_\phi E_{a2} = 4k_\phi f\Phi \quad (1-12)$$

正弦电动势的波形系数为 $\pi/(2\sqrt{2}) = 1.11$, 故可由上式直接得式(1-10)。

上面假定线圈是由两根导体即一匝所组成的。若线圈的串联匝数为 w , 并认为各匝线圈在任一瞬间均交链同样数量的磁通, 则 w 匝线圈的电动势平均值和有效值分别为

$$E_a = 4wf\Phi \quad (1-13)$$

$$E = 4k_\phi wf\Phi \quad (1-14)$$

从电机学中知道, 直流电机本质上是交流电机, 电枢绕组中的感应电动势是交变的。如果假定磁通为正弦形分布, 则感应电动势的有效值按式(1-14)为

$$E = \sqrt{2} \pi wf\Phi = 4.44 wf\Phi \quad (1-15)$$

而感应电动势的平均值按式(1-13)为

$$E_a = 4wf\Phi = 4w \frac{pn}{60} \cdot \Phi \quad (1-16)$$

式中 $w = \frac{N}{2.2a}$ 为一条并联支路中的串联匝数 (N 为有效导体数, a 为并联支路数)。在式

(1-13)和式(1-14)中均假定线圈在任何瞬间都链及同样大小的磁通, 这在实际直流电机中是不存在的。因为一条支路中的各匝线圈是互相错开分布的, 并且其中感应电动势不是同相的。从电动势多边形中可以知道, 电刷上的电压相当于电动势圆周的直径, 为各支路元件电动势的矢量和, 而电刷间所有绕组元件电动势的代数和近似等于半个圆周长度。这样一

来, 由于绕组 $\frac{N}{2.2a}$ 个元件彼此分布在不同位置上, 电刷间的电动势要减小一个比例系数:

$$\frac{\text{各支路元件电动势矢量和}}{\text{各支路元件电动势代数和}} = \frac{\text{直径}}{\text{半圆周}} = \frac{2}{\pi}$$

因此必须在式(1-15)和式(1-16)基础上进一步考虑这个系数。此外还要考虑到,电刷安放的位置是能得到最大电动势的位置,所以在式(1-15)中还要乘以 $\sqrt{2}$,在式(1-16)中要乘以 $\frac{\pi}{2}$ 。

这样,我们用 $\frac{N}{2.2a}$ 代替 w ,并在式(1-15)中乘以 $\frac{2}{\pi}$ 和 $\sqrt{2}$,则得异性电刷之间的电动势为

$$E = \frac{pn}{60a} \Phi n = C_e \Phi n = C \Phi \Omega \quad (1-17)$$

式中 $C_e = \frac{pn}{60a}$ 和 $C = \frac{pn}{2\pi a}$ 为电动势常数。上式即是熟知的直流电机电枢电动势的公式。

如果线圈是短距的,则两电刷间的感应电动势要比由式(1-17)求出的小,因为一个短距线圈并不链及总磁通 Φ 。但是电枢绕组的节距通常只是全距的或略为短些,并且在极间区域内磁极磁场是很弱的,节距略短些也并不显著影响由式(1-17)确定 E 的数值。

在交流异步电机和同步电机中,如果绕组是集中和全距的,则感应电动势仍可按式(1-14)计算,如果考虑到绕组的分布和短距,则还要乘上绕组系数 k_w 。

通过上面讨论,可得各种电机的通用感应电动势的公式为

$$E = 4k_\phi k_w p w f \Phi = k_e f \Phi \quad (1-18)$$

式中 Φ ——每极磁通, Wb;
 k_ϕ ——磁场曲线的波形系数, 正弦曲线为1.11, 矩形曲线为1;
 k_w ——绕组系数, 直流电机为1, 交流电机略小于1;
 w ——每相匝数或直流电机每并联支路串联匝数;
 $k_e = 4k_\phi k_w p w$ ——常数;
 f ——频率, $f = pn/60$, Hz;
 p ——磁极对数;
 n ——转速, r/min。

当不考虑磁饱和时, 主磁通 Φ 的大小与励磁电流 I_f 成正比, 即 $\Phi = k_f I_f$, 而 $f = p\Omega/2\pi$ (Ω 为机械角速度, 单位rad/s), 故式(1-18)又可写成

$$E = G_{af} I_f \Omega \quad (1-19)$$

式中 $G_{af} = \frac{p}{2\pi} k_e k_f$ 也为常数。

由通用电动势公式(1-18)或式(1-19)可知, 感应电动势同磁极磁通和线圈切割频率(或励磁电流和转子角速度)二者乘积成比例。当其中一个量为常数时, 感应电动势与另一个量成线性关系, 否则就是非线性关系。

上面讨论的是线圈的稳态电动势, 具体应用就是直流电机电枢绕组的直流电动势或交流电机相绕组交流有效值电动势。对于动态问题则应以电动势瞬时值为基础讨论。

由电磁感应定律可写出磁场内第 i 个绕组回路内产生的感应电动势为

$$e_i = \frac{\partial \psi_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^n L_{ij} i_j \quad (1-20)$$

式中 $\psi_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} i_j$ ——所有电流在第 i 个回路内产生的磁链之和；

L_{ij} ——第 j 个绕组与第 i 个绕组之间的电感。显然，当 $j=i$ 时 $L_{ii} = L_i$ 为自感，当 $j \neq i$ 时 L_{ij} 为互感。

一般， L_{ij} 是第 i 和第 j 个绕组轴线间夹角 θ_m 的函数，因而也是时间 t 的函数，故有

$$e_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} \frac{di_j}{dt} + \Omega \sum_{j=1}^n \frac{\partial L_{ij}}{\partial \theta_m} i_j \quad (1-21)$$

式中 $\Omega = d\theta_m/dt$ ——两绕组相对运动的角速度，亦即转子运动的角速度。

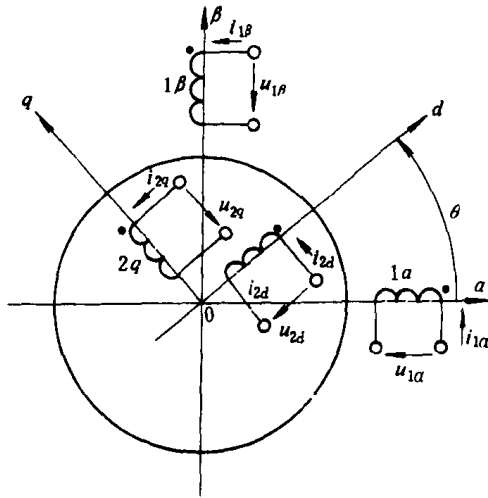


图 1-7 包含四个绕组的电机

上式第一项为变压器电动势，为由彼此静止的绕组间因电流变化引起的感应电动势，在动态下它引起电磁过渡过程；第二项为运动或旋转电动势，与转子运动速度有关，电机中利用这种电动势实现机电能量变换，在动态下它引起机电过渡过程。

图1-7示出的电机定子有两个垂直且对称的绕组 $1a, 1\beta$ ，转子也有两个垂直且对称的绕组 $2d, 2q$ 。若定子和转子表面均为隐极式，则定子和转子绕组的自感量与转子位置无关，即 $L_{1a, 1a} = L_{1\beta, 1\beta} = L_1 = \text{常数}$ ， $L_{2d, 2d} = L_{2q, 2q} = L_2 = \text{常数}$ ，而两定子绕组间或两转子绕组间的互感

$L_{1a, 1\beta} = L_{1\beta, 1a} = L_{2d, 2q} = L_{2q, 2d} = 0$ ，因为定子或转子上的两个绕组在空间上相互垂直，磁通不交链。至于定子和转子绕组间的互感，则由图1-7不难看出，每经过 $\theta = 2\pi$ 角度，其大小循环变化一次，在图示规定的各绕组电流正方向和转子绕组旋转正方向的情况下四个绕组中一个定子绕组和一个转子绕组间的互感分别为

$$\begin{aligned} L_{1a, 2d} &= L_{2d, 1a} = L_{12} \cos \theta; & L_{1a, 2q} &= L_{2q, 1a} = L_{12} \cos (\theta + 90^\circ) = -L_{12} \sin \theta; \\ L_{1\beta, 2q} &= L_{2q, 1\beta} = L_{12} \cos \theta; & L_{1\beta, 2d} &= L_{2d, 1\beta} = L_{12} \sin \theta \end{aligned} \quad (1-22)$$

若定子为凸极式，则由于 α 轴和 β 轴方向的磁阻 $R_{m\alpha}$ 和 $R_{m\beta}$ 或电感 L_α 和 L_β 不相等，故定子绕组的自感应写成

$$L_{1a, 1a} = L_1 + \Delta L_1; \quad L_{1\beta, 1\beta} = L_1 - \Delta L_1 \quad (1-23)$$

而转子绕组的自感与转子转角有关，故可写成

$$\left. \begin{aligned} L_{2d, 2d} &= \frac{1}{2}(L_\alpha + L_\beta) + \frac{1}{2}(L_\alpha - L_\beta) \cos 2\theta = L_2 + \Delta L_2 \cos 2\theta \\ L_{2q, 2q} &= \frac{1}{2}(L_\alpha + L_\beta) - \frac{1}{2}(L_\alpha - L_\beta) \cos 2\theta = L_2 - \Delta L_2 \cos 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

其沿圆周展开的分布曲线如图1-8所示，图中 $R_{m\alpha}$ 、 $R_{m\beta}$ 分别为与 L_α 、 L_β 对应的磁阻。

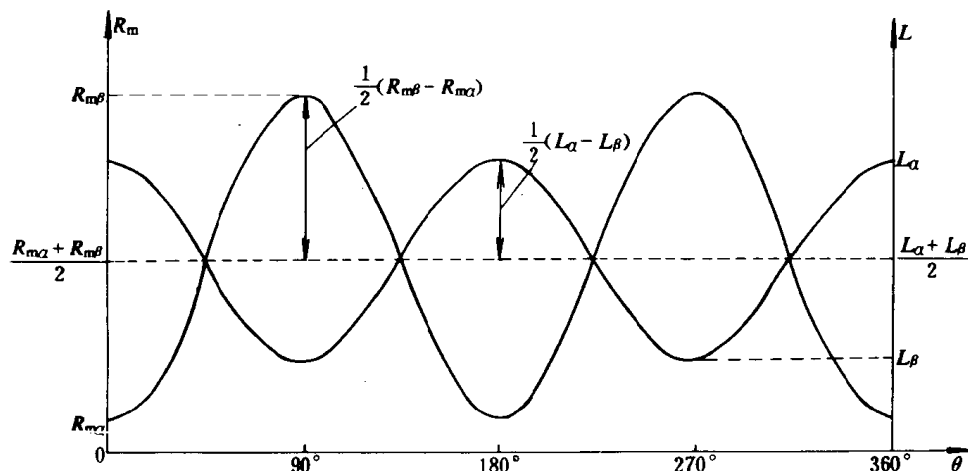


图 1-8 凸极式电机磁阻 R_m 和电感 L 的变化曲线

依上同样可求得四个绕组两两绕组间的互感为

$$\left. \begin{aligned} L_{1a,1\beta} &= L_{1\beta,1a} = 0; \quad L_{2d,2q} = L_{2q,2d} = -\Delta L_2 \sin 2\theta \\ L_{1a,2d} &= L_{2d,1a} = (L_{12} + \Delta L_{12}) \cos \theta; \quad L_{1a,2q} = L_{2q,1a} = -(L_{12} + \Delta L_{12}) \sin \theta \\ L_{1\beta,2d} &= L_{2d,1\beta} = (L_{12} - \Delta L_{12}) \sin \theta; \quad L_{1\beta,2q} = L_{2q,1\beta} = (L_{12} - \Delta L_{12}) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

对于某种具体类型的电机，要根据其绕组结构和磁极形式，选取上面各电感公式的某一种形式来计算其电感量。

1.2.2 电机磁场在机电能量变换中的作用

电机是机电能量变换装置，它们都是以电磁感应定律和电磁力定律为基础工作的。而从磁场观点上看，电机的运行可以看成是两种磁场——主磁场和电枢磁场相互作用的结果。

在直流电机中，主磁场在空间是静止的，不随时间变化，而电枢磁场在空间也是静止的 [见图1-2(a)]，原理上电枢磁场的轴线就是电刷的轴线。当电刷位置固定不动时（实际上也如此），电枢磁场在空间的位置也固定不变，并且当电刷在几何中性线上时，主磁场和电枢磁场轴线相互错开 90° （电角度），即相互垂直和保持相互位置不变。当电刷稍稍移动（如为了改善换向）后，两者相差就不是 90° ，但两种磁场的相互位置仍然保持不变。因此，从磁场之间的作用（相吸与相斥）上看，电动机始终保持在最大或接近最大的转矩下运转。

交流电机的磁场比较复杂。当一相绕组通以单相交流电流 $i = I_m \sin \omega t$ 时，将在该绕组轴线方向上产生脉动磁场。设脉动磁场的磁动势幅值为 F_m ，则在与水平轴成 θ 角度的气隙处（见图1-1），其磁动势为

$$F(t, \theta) = F_m \sin \omega t \sin \theta$$

即同时间和空间位置有关。利用化积为和差的三角公式有

$$\begin{aligned} F(t, \theta) &= \frac{F_m}{2} [\cos(\omega t - \theta) - \cos(\omega t + \theta)] \\ &= -\frac{F_m}{2} \cos(\omega t + \theta) + \frac{F_m}{2} \cos(\omega t - \theta) = F_f + F_b \end{aligned} \quad (1-26)$$

即可把脉动磁动势分解为前向旋转分量 F_f 和后向旋转分量 F_b ，它们二者幅值相等，为脉动磁动势幅值的一半，但旋转方向相反。

若在空间成对称分布的 m 相绕组（各相绕组相距 $2\pi/m$ 电角度）中通以 m 相对称电流，即

$$i_1 = I_m \sin \omega t, i_2 = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right), \dots, i_m = I_m \sin \left[\omega t - \frac{2\pi}{m}(m-1) \right]$$

则各相绕组分别产生各自的脉动磁场，按式(1-26)得

$$F_1(t, \theta) = \frac{F_m}{2} [\cos(\omega t - \theta) - \cos(\omega t + \theta)]$$

$$F_2(t, \theta) = \frac{F_m}{2} \left[\cos(\omega t - \theta) - \cos \left(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{m} \right) \right]$$

.....

$$F_m(t, \theta) = \frac{F_m}{2} \left\{ \cos(\omega t - \theta) - \cos \left[\omega t + \theta - \frac{2\pi}{m}(m-1) \right] \right\}$$

将其相加得合成磁场

$$F(t, \theta) = \frac{m}{2} F_m \cos(\omega t - \theta) \quad (1-27)$$

这是一个旋转磁动势，其幅值为 $\frac{m}{2}F_m$ ， F_m 为单相脉动磁动势的幅值，旋转电角速度为 ω 。可见，对于有对称两相绕组的两相电机，旋转磁动势幅值与一相脉动磁动势的幅值 F_m 相等；而三相电机，旋转磁动势幅值为 $\frac{3}{2}F_m$ 。

在同步电动机里，定子绕组通以三相电流，产生如上所述的电气旋转磁场，而磁极(转子)由直流电流励磁产生转子磁场。当稳定运行时转子磁场随着转子旋转，磁极的转速即为旋转磁场的转速(同步角速度 Ω_1)，可以把它称为机械旋转磁场。很明显，在稳定运行时，电气的和机械的旋转磁场是相对静止的，两磁场轴线间相夹 θ 角。随着负载的变化， θ 角也相应变化，但稳定后 θ 角就保持不变。起动时，由于没有恒定的 θ 角，所以就没有起动转矩。

与上述同步电机相同，异步电机定子绕组也产生电气旋转磁场；不同的是，异步电机转子的转速不是同步转速。尽管如此，转子磁场与定子磁场仍然是同步的。因为转子的机械角速度 Ω 与定子磁场的角速度 Ω_1 二者之差 $\Omega_2 = \Omega_1 - \Omega$ 才使转子绕组产生感应电动势和电流，其频率为

$$f_2 = \frac{\Omega_2}{2\pi p} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{2\pi p}$$

此电流也要在转子绕组中产生自己的旋转磁场，转子旋转磁场相对于定子的角速度恰为 $\Omega_2 + \Omega = \Omega_1$ 。可见，定子磁场与转子磁场是相对静止的，两磁场间的间隔角度 θ 在稳定时也保持不变。但转子的机械角速度却随负载改变而改变，所以能产生起动转矩。

同步电机中由转子产生的机械旋转磁场和异步电机中由定子产生的电气旋转磁场是励