

微电机原理

中 册

王宗培 等 编著

科学出版社

微 电 机 原 理

中 册

王宗培 等 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 9

内 容 简 介

本书是作者在哈尔滨工业大学电机系讲授的《微电机原理》的基础上编写而成的。全书分上、中、下三册出版。上册讲述微电机的若干理论问题；中册讲述异步电机、同步电机和自整角机；下册讲述直流电机和步进电机等。

中册内容主要包括：多相异步电动机，异步电动机的线性分析，交流异步测速发电机，交流伺服电动机，同步电机，同步电机的线性分析，电磁减速式同步电机，磁滞电动机，自整角机。

本书可供高等工科院校微电机专业高年级学生和研究生阅读，也可供从事微电机设计、制造和运行的技术人员参考。

微 电 机 原 理

中 册

王宗培 等 编著

责任编辑 范铁夫 刘海龄

科学出版社出版

北京市东黄城根北街 16 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1989 年 6 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1989 年 6 月 第一次印刷 印张：9 5/8

印数：0001—2,480 字数：216,000

ISBN 7-03-000959-2/TM·13

定价：6.80 元

前 言

微电机原理(中册)主要包括异步电机、同步电机和自整角机。卢道英编写了异步电机的主要部分;陆永平提供了自整角机部分的初稿;王宗培编写了其余章节并对全稿进行了整理和统一。

微电机原理(上册)是1983年出版的,由于在编写过程中不断被各种事情打断,以致经过这么长的时间才写出中册。这样,难免要影响全书的统一性和连续性,在此真诚地向广大读者表示歉意。目前,作者正在抓紧进行本书下册的编写工作,计划在本书(中册)出版后不久,即将与读者见面。

王宗培

1988年5月1日于杭州

目 录

第五章 多相异步电动机	179
§5-1 异步电动机转子开路	181
§5-2 作用原理和运行状态	186
§5-3 异步电动机的空载和负载运行	191
§5-4 异步电动机的等值电路和相量图	201
§5-5 异步电动机的转矩和功率方程式	210
§5-6 异步电动机的运行特性	216
第六章 异步电动机的线性分析	236
§6-1 二相电机的基本方程式	236
§6-2 二相电机的坐标变换(双轴法)	239
§6-3 二相电机的复数坐标系	246
§6-4 用新变量表示的转矩公式	250
§6-5 二相异步电动机对称稳态运行	252
§6-6 二相电动机加负序电压	255
§6-7 定子单相的异步电动机	258
§6-8 单相异步电动机的起动方法及电容电动机	267
第七章 交流异步测速发电机	275
§7-1 输出特性方程式	277
§7-2 输出特性及原理性误差	281
§7-3 环境条件引起的误差	285
§7-4 剩余电压	287
第八章 交流伺服电动机	291
§8-1 伺服电动机的主要性能指标	294
§8-2 交流伺服电动机的分析方法	296

§8-3 双轴等值电路的讨论及应用	307
§8-4 理想交流伺服电动机	312
§8-5 实际交流伺服电动机	316
§8-6 无自转条件	320
§8-7 始动电压	324
第九章 同步电机	326
§9-1 同步电机的空载特性	329
§9-2 同步电机的电枢反应	334
§9-3 隐极同步电动机的相量图	339
§9-4 电动机和发电机运行	341
§9-5 凸极同步电动机	345
第十章 同步电机的线性分析	351
§10-1 原始方程式及其参数	352
§10-2 各绕组的磁链方程式	356
§10-3 d 、 q 、0 变换	363
§10-4 同步稳态运行	369
§10-5 反应式同步电动机	374
第十一章 电磁减速式同步电机	380
§11-1 减速式磁阻电动机	380
§11-2 磁阻电动机的电枢磁场	384
§11-3 磁阻电动机的转矩及磁减速器	391
§11-4 感应子式同步电机	393
§11-5 感应子式电机的气隙磁场	396
§11-6 感应子式电机的同步稳态运行	401
第十二章 磁滞电动机	404
§12-1 磁滞电动机的基本结构型式	406
§12-2 磁滞电动机的基本作用原理	409
§12-3 理想磁滞电动机	411
§12-4 磁滞电动机的基本理论	418
§12-5 对转子材料的基本要求及材料的基本特性	431
第十三章 自整角机	437

§13-1 控制式自整角机	439
§13-2 力矩式自整角机	452
§13-3 差动式自整角机	467
§13-4 自整角机的静态误差和精度	470

第五章 多相异步电动机

从广义上讲，凡是转速与所接电源的频率之间无严格不变关系的交流电机都属异步电机，它可以是无换向器的，也可以是有换向器的。但通常所说的异步电机，是指无换向器的异步电机。这种电机的定子接交流电源，转子绕组不接电源，其中的电流是由电磁感应作用而产生的，所以也叫做感应电机。

根据电机的可逆原理，异步电机既可以作为电动机用，也可以作为发电机用。但因为异步发电机的力能指标较差，实际上异步电机主要作电动机用。

异步电动机结构简单、运行可靠，应用十分广泛，可用来驱动各种装置。驱动用的异步电动机，根据应用场合的电源条件不同，既可以采用多相(例如三相)的，也可以采用单相的。特殊设计的异步电动机，还可作为自动控制系统的元件，即作伺服元件的交流伺服电动机，以及输出角速度讯号的交流异步测速发电机。本章内容，主要是介绍多相异步电动机的基本原理及分析稳态运行性能。

小容量异步电动机的典型结构如图 5-1 所示，它主要由定子和转子两部分组成。通常，固定不动的部分——定子在外部，旋转的部分——转子，装在定子腔内，它们互不接触，中间有一很小的间隙(称为空气隙)隔开。另外，有两个端盖，分别装在定子两端，上面装有轴承，对转子起支撑作用。

定子由定子铁心，定子绕组及机壳三部分组成。定子铁心是电机磁路的一部分，通常用 0.5 毫米厚的硅钢片叠成。铁

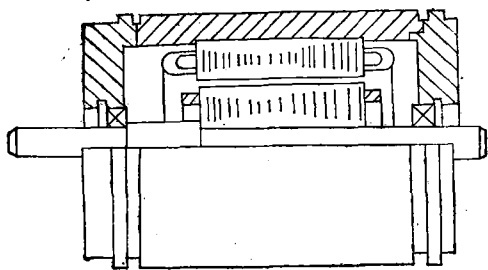


图 5-1 异步电动机的典型结构

心内圆均匀地分布着许多形状相同的槽,用以嵌放定子绕组。小容量异步电动机通常为半闭口槽,由高强度漆包线绕成的散下式线圈联成定子绕组,可以是单层或双层绕组。线圈与铁心之间垫绝缘层。机壳用来支撑定子铁心,通常采用铸铁或铝机壳。

转子由转子铁心,转子绕组及转轴组成。铁心也由硅钢片叠成。转子绕组,可以由线圈构成的和定子一样的多相绕组,但是,通常为鼠笼式结构。由于异步电机转子不由外界电源供电,而是自行闭路,因此,相数不必限定为二相或三相。图 5-2 示一个工艺上最为简单的多相闭合绕组。绕组由插入转子槽内的导条和二面的端环组成。如果去掉铁心,整个绕组的形状象一个“鼠笼”,所以叫鼠笼绕组。每根导条就是它的一

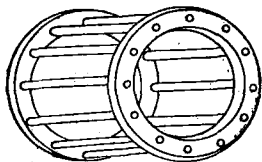


图 5-2 去掉铁心的鼠笼绕组

相,感应电势不大,而铁心叠片间接触电阻又较大,所以导条与铁心间无需专门的绝缘。为了节约用铜及提高生产率,鼠笼型异步电机常采用铸铝转子绕组。

鼠笼型异步电动机的转子上既无滑环,又无绝缘,结构简单,制造方便,既经济又耐用,所以应用极广。

§ 5-1 异步电动机转子开路

异步电动机转子开路,不是实际的运行状态,但先分析一下这种情况下电机内的物理现象,有一定的益处。定子绕组接到正相序的对称多相交流电源上,流入定子绕组的将是正相序的对称多相交流电。例如,在三相情况下,绕组内的电流将是

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} I_0 \cos \omega t \\ i_b &= \sqrt{2} I_0 \cos (\omega t - 2\pi/3) \\ i_c &= \sqrt{2} I_0 \cos (\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (5-1)$$

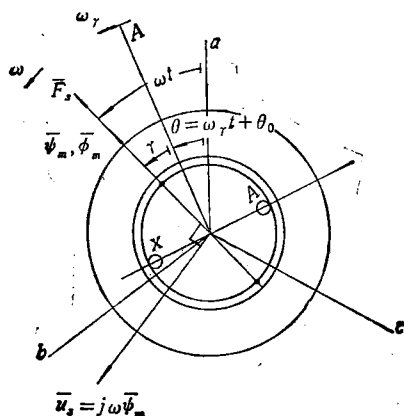


图 5-1 a, b, c ——定子三相绕组的轴线; A ——转子 A 相绕组的轴线

定子磁势相量为

$$\bar{F}_s = 1.35 \frac{N'_s}{p} I_0 e^{j\omega t} = F_m e^{j\omega t} \quad (5-2)$$

电机的合成主磁通相量

$$\bar{\phi}_m = 1.35 \frac{N'_s}{p} I_0 \Lambda_m e^{j\omega t} = \phi_m e^{j\omega t} \quad (5-3)$$

合成主磁链相量

$$\bar{\psi}_m = 1.35 \frac{N'^2_s}{p} I_0 \Lambda_m e^{j\omega t} = \psi_m e^{j\omega t} \quad (5-4)$$

即产生一个幅值不变、以角速度 ω 匀速旋转的磁势波。按所选的时间参考轴，即 $t = 0$ 时， i_a 达最大值，这时合成磁势波波幅应与 a 轴重合。所以在任意时间 t 时，合成磁势或磁通相量与 a 轴间的夹角为 ωt 。

定子 a 相绕组的磁通等于 $\bar{\phi}_m$ 在 a 轴上的投影，为

$$\varphi_a = 1.35 \frac{N'_s}{p} I_0 \Lambda_m \cos \omega t = \phi_m \cos \omega t \quad (5-5)$$

相应的感应电压为

$$\begin{aligned} u_a &= N'_s \frac{d\varphi_a}{dt} = -1.35 \frac{N'^2_s}{p} \Lambda_m \omega I_0 \sin \omega t \\ &= +1.35 \frac{N'^2_s}{p} \Lambda_m \omega I_0 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= \sqrt{2} U_1 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (5-6)$$

上式表明， φ_a 与 i_a 在时间上同相位， u_a 则引前 $\frac{\pi}{2}$ 电弧度。

可以作出如图 5-4 (a) 所示的时间相量图。

可以写成

$$\dot{U}_1 = j \dot{I}_0 x_m \quad (5-7)$$

由式 (5-6) 可知

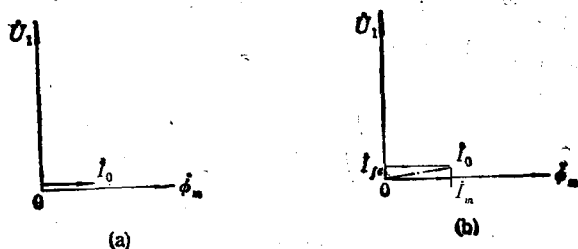


图 5-4 感应电压相量图

(a)——不计铁损耗；(b)——考虑铁损耗

$$x_m = \omega L_m = \omega \frac{3}{2} \cdot \frac{2}{\pi} \frac{N_s'^2}{p} \Lambda_m \quad (5-8)$$

其中 N_s' ——每相有效匝数；

p ——极对数；

Λ_m ——主磁导，为

$$\Lambda_m = \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l}{g} \quad (5-9)$$

x_m 称为电动机定子绕组的激磁电抗。相应地 L_m 为定子绕组的激磁电感。可以看出，它等于每相绕组主电感 (L_{sm}) 的 3/2 倍。即

$$L_m = \frac{3}{2} L_{sm} \quad (5-10)$$

它比每相主电感大，是因为主磁通由三相绕组共同产生，即考虑了另外两相互感的结果。所以它是一个等效参数。在一般情况下，若定子相数为 m_1 ，则

$$L_m = \frac{m_1}{2} L_{sm} \quad (5-11)$$

定子绕组内的电流，除了产生主磁场并在每相绕组内产

生感应电压外, 还产生漏磁场, 也在每相绕组内引起感应电压。也可以用一个相应的电抗 $x_{1\sigma}$ 来表示。 $x_{1\sigma}$ 称为定子绕组的漏抗, 漏抗上的压降即漏磁场引起的感应电压为

$$\dot{U}_{1\sigma} = j\dot{I}_0 x_{1\sigma} \quad (5-12)$$

此外, 还有电阻上的压降 $\dot{I}_0 r_1$ 。定子每相的端电压 (外加电压) 应等于以上三部分电压降的和, 即

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_0 (r_1 + jx_{1\sigma}) + \dot{U}_1 \quad (5-13)$$

如果考虑铁损耗, 则 i_a 与 φ_a 不同相位, 而是有一小的相位差, 如图 5-4 (b) 所示。相应地式 (5-7) 应改为

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 (r_m + jx_m) = \dot{I}_0 Z_m \quad (5-14)$$

其中, r_m 为对应于铁损耗的等效电阻, 称为激磁电阻; Z_m 称为激磁阻抗。图 5-5 的等值电路及相量图对应于式 (5-13)。

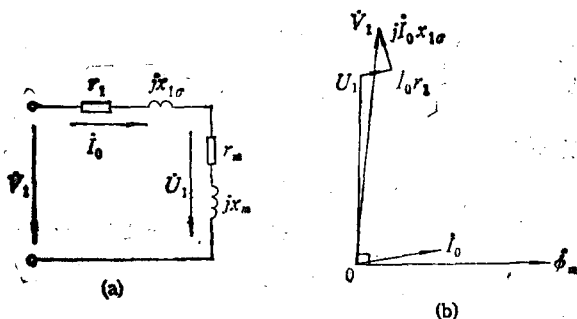


图 5-5 副方开路的等值电路及相量图

(a)——等值电路; (b)——相量图

具有均匀气隙的异步电动机, 要是转子绕组开路, 自然不会产生电磁转矩, 电动机也就不会转动。但是为了分析问题, 不妨假定转子由别的原动机带动, 以转速 n 或角速度 ω , 匀速旋转。考察一下转子绕组内的感应电势。

图 5-3 标出转子绕组的一相 AX , 它的轴线 A 轴与定子 a 轴间的夹角为

$$\theta = \omega_r t + \theta_0 \quad (5-15)$$

其中, θ_0 为 $t = 0$ 时 A 与 a 之间的夹角, 不难看出, ϕ_m 与 A 轴间的夹角为

$$\gamma = (\omega - \omega_r)t - \theta_0 = s\omega t - \theta_0 \quad (5-16)$$

于是, 与转子 A 相绕组相链的磁通量为

$$\varphi_A = \phi_m \cos(s\omega t - \theta_0) \quad (5-17)$$

A 相绕组的感应电势为

$$\begin{aligned} e_A &= -u_A = -N_r' \frac{d\varphi_A}{dt} \\ &= s\omega N_r' \phi_m \cos\left(s\omega t - \theta_0 + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (5-18)$$

转子的其他相, B 、 C 、 D 、 $\dots$ 等情况也相似, 感应电势的幅值及频率与 A 相相同, 只不过依次错开一定的相位角, 也就是说, 转子绕组内感应出正相序的对称多相电势, 它的频率为

$$f_2 = sf_1 \quad (5-19)$$

感应电势或感应电压的幅值与 s 成正比。即

$$E_2 = sE_2 \quad (5-20)$$

其中 E_2 —— $s = 1$ 时的感应电势;

s ——转差率, 它表示转子转速与同步转速的差与同步转速的比值, 即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\omega - \omega_r}{\omega} \quad (5-21)$$

其中 n_1 ——同步转速;

n ——转子转速;

ω_r ——转子角速度, 弧度/秒。

不难看出, 如若转子绕组闭路, 则将产生正相序的对称多相转子电流。频率为 $f_2 = sf_1$ 。

§ 5-2 作用原理和运行状态

上一小节的分析表明,异步电机接到正相序的对称多相电源上,流入定子绕组的正序对称多相电流,将在电机气隙内建立一个以同步转速 n_1 正向旋转的磁势波.在自行闭路的转子绕组内,将产生转差频率 (sf_1) 的正序对称多相电流,也在电机气隙内建立一个以同步转速正向旋转的磁势波.

事实上,转子对称多相电流的频率为 sf_1 , 而它产生的旋转磁场在转子坐标系内的转速为

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = s \cdot \frac{60f_1}{p} = sn_1 = n_1 - n = \Delta n \quad (5-22)$$

而对定子坐标系来说,转子以转速 n 旋转,所以在定子坐标系里看来,转子磁势波的转速为

$$n_2 + n = n_1 \quad (5-23)$$

即不论转子转速为多少,定、转子磁势波在空间的转速总是一样的,因此,也总能产生平均的电磁转矩.这是异步电机的基本特点之一.下面具体考察一下,转差率 s 为不同数值范围时电磁转矩的情况.

先考察转子转速低于同步转速, $n < n_1$ 的情况.转子导条内感应电势瞬时值的方向,如图 5-6 所示.图中 ϕ_m 表示定、转子电流共同产生的合成磁通相量,它以同步转速 n_1 沿正向旋转. ϕ_m 的位置是定、转子合成磁势波波幅位置,或者说是合成气隙磁场的磁极中心线,在图示的瞬间相当于定子内圆上半部为 S 极,下半部为 N 极.在 $n < n_1$ 的情况下,用右手定则确定主磁场在转子导条中感生的电势瞬时值的方向时可以看出,图中上半部分转子导条处在 S 极下,电势方向从纸面出来,用 $\odot$ 表示;下半部导条处在 N 极下,电势方向都进入

纸面,用 $\otimes$ 表示。转子感应电势和电压相量,如图中 $\vec{e}_r$ 和 $\vec{u}_r$ 所示。

在转子回路闭合的情况下,转子导条中就有电流。假如导条中的感应电势与电流没有时间相位差,那么电流瞬时值的方向与电势的方向一致。于是,可以画出转子电流的合成相量 $\vec{i}_r$,以及转子磁势相量 $\vec{F}_r$,它们都与 $\vec{e}_r$ 同轴,如图5-6所示。

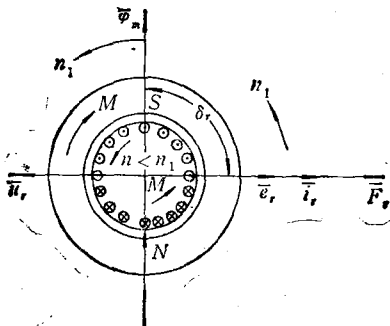


图5-6 异步电动机作用原理示意图

由于电机气隙内的合成磁势波旋转时,转子导条内感应电势瞬时值的方向随着改变,可见转子绕组产生的磁势相量 $\vec{F}_r$ 也以同步转速 n_1 与 $\vec{\phi}_m$ 一起旋转,也就是说,不论转子是否转动,转速的具体值是多少,转子绕组内电流产生的磁势波总是以同步转速旋转,因此,都产生平均的电磁互转矩。在这里,我们采用比较直观的方法,直接在定子坐标系里来考察转子导条中的电流及磁势波,看出它与 $\vec{\phi}_m$ 同速旋转。

电磁转矩的值,正比于 ϕ_m 、 F_r 和它们之间夹角 δ_r 的正弦,它的方向是促使 δ_r 减小的方向。如图5-6所示,当 $n < n_1$ 时, $\vec{F}_r$ 在空间滞后于 $\vec{\phi}_m$,所以作用在转子上的电磁转矩,其方向与旋转磁场的转向一致,与转子转动的方向一致,即加速转矩或电动机转矩。定子上则受到一个大小相等、

方向相反的电磁转矩。

如果电动机转子不转时,将定子绕组加上电源,则由于上述电磁转矩的作用,电动机的转子将加速,使转子向着旋转磁场转动的方向转起来,这称为电动机启动。如果电动机的机械负载为零,则在 $n < n_1$ 时,由于电磁转矩的作用,总使转子加速。直到 $n = n_1$ 时,转子导条内的感应电势为零、电流为零、电磁转矩也为零,转速便不再继续升高了,即达到稳定平衡状态。如果电动机的负载转矩不为零,则在 $n < n_1$, $\Delta n = n_1 - n$ 为某一个值时就达到平衡。 Δn 的值决定了转子电路的感应电势和电流,也就决定了电磁转矩的值(在给定电源条件下)。而稳态运行的条件是电磁转矩与负载转矩相平衡,即大小相等而方向相反。所以, Δn 的值取决于负载转矩的大小。也就是说,电动机空载(只有本身的机械摩擦负载)时,转子转速很接近 n_1 ;在极限情况下,即理想空载时,转子转速等于 n_1 ;有负载时,转速小于 n_1 ,而与 n_1 的差 Δn ,则随着负载转矩上升而增大。 Δn 称为转差,它与 n_1 的比值叫转差率,用 s 表示。

曾经提到过电机的可逆原理,即一台电机既可以作为电动机使用,也可以作为发电机运行,异步电机也不例外。让上述异步电动机的机械负载转矩为负值,即外加原动转矩时,则转子转速将超过同步转速, $n > n_1$ 。这时,由于转子导条“切割”旋转磁场的方向改变了,所以转子导条中感应电势及电流的方向也随着改变,如图 5-7 所示。转子磁势相量 $\vec{F}_r$ 变为在空间引前于合成磁通相量 $\vec{\varphi}_m$ 。于是,作用在转子上的电磁转矩的方向变得与旋转磁场的转向相反,与转子转动方向相反(即制动的方向)。当吸收了机械功,便成为一台发电机。这时,转差 $\Delta n = n_1 - n$ 为负值,转差率 $s < 0$ 。

以上两种运行状态包括 $n = 0 - +\infty$ 的整个区间,对