

陈伯时 李发海 王 岩 合编

电机与拖动

(下 册)

中央广播电视大学出版社

电机与拖动

下 册

陈伯时 李发海 王 岩 编

*

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

陕西省印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.5 千字 355

1983年12月第1版 1984年5月第1次印刷

印数 1—75,000

书号 15300·3 定价 1.40 元



前 言

本书可作为自动化专业的教学用书,可供有关科技人员参考。

全书分为上、下两册,上册包括直流电机原理、直流电机的电力拖动和变压器,共三章。下册包括交流异步电机原理、交流异步电动机的电力拖动、电机的容量选择和微、控电机,共四章。

下册主要阐述了交流电机的绕组、绕组感应电势和绕组产生的磁势;三相异步电动机运行原理、机械特性、运行状态及其起动和调速方法;电动机的发热和冷却,不同工作方式下电动机容量选择的方法;单相异步电动机、微型同步电动机、以及各种控制电机的原理。各章后面均附有思考题与习题,供参考。

目 录

第四章 交流异步电动机原理	1
§ 4-1 概述	1
§ 4-2 交流电机的电枢绕组和感应电势	7
§ 4-3 交流电机电枢绕组产生的磁势	26
§ 4-4 三相异步电动机的运行原理	46
§ 4-5 三相异步电动机的工作特性及其测试方法	74
§ 4-6 异步电动机的参数测定	76
思考题	78
习题	81
第五章 三相交流异步电动机的电力拖动	83
§ 5-1 三相异步电动机的机械特性	83
§ 5-2 三相异步电动机的各种运行状态	95
§ 5-3 三相异步电动机的起动方法	110
§ 5-4 三相异步电动机的调速方法	135
思考题	151
习题	153
第六章 电动机容量选择	155
§ 6-1 概述	155
§ 6-2 决定电机容量的主要因素	155
§ 6-3 电机的发热和冷却	156
§ 6-4 电机的工作方式	159
§ 6-5 连续工作方式电动机容量选择	161
§ 6-6 短时工作方式电动机容量选择	172
§ 6-7 周期性断续工作方式电动机容量选择	175
思考题	178
习题	178
第七章 微控电机	181
§ 7-1 单相异步电动机	181
§ 7-2 伺服电动机	193
§ 7-3 微型同步电动机	205
§ 7-4 步进电动机	211
§ 7-5 旋转变压器	219
§ 7-6 自整角机	226
§ 7-7 测速发电机	234
思考题	238
习题	240
参考书目	242

第四章 交流异步电动机原理

§ 4-1 概述

一、异步电动机的用途

交流电机中主要有同步电机与异步电机两种。如果电机转子的转速 n 与定子电流的频率 f_1 满足方程式

$$n = \frac{60f_1}{p}$$

的关系, 这种电机就叫同步电机。式中 p 是电机的极对数。如果不满足上式的关系, 就叫异步电机。

同步电机主要用作发电机。现代各国电力系统的电能几乎都是由同步发电机产生的。当然, 同步电机也可作为电动机运行, 或者作为调相机使用。

由上式看出, 当电源的频率 f_1 大小一定时, 同步电动机的转速 n 就是个固定的常数, 不随负载的波动而发生变化。对有些本身不要求调速的大中型生产机械, 如空气压缩机、球磨机、送风机以及电动发电机组等, 可以采用同步电动机拖动。

不带任何机械负载的同步电动机就叫同步调相机。这种电机专门用作为改善电网功率因数的。

有关同步电机的原理, 本章不作分析。

异步电机主要用作为电动机, 去拖动各种生产机械。例如: 在工业方面, 用于拖动中小型轧钢设备、各种金属切削机床、轻工机械、矿山机械等; 在农业方面, 用于拖动水泵、脱粒机、粉碎机以及其他农副产品的加工机械等; 在民用电器的电扇、洗衣机、电冰箱、空调机等也都是用异步电动机拖动的。

异步电动机的特点是结构简单、容易制造、价格低廉、运行可靠、坚固耐用、运行效率较高和具有适用的工作特性。缺点是调速特性和功率因数较差。异步电动机运行时, 必须从电网里吸收落后性的无功功率, 它的功率因数总是小于 1。由于电网的功率因数可以用别的办法进行补偿, 这一点并不妨碍异步电动机的广泛使用。

前面已经说过, 对那些单机容量较大、转速又恒定的生产机械, 一般采用同步电动机拖动为好, 因为同步电动机的功率因数是可调的 (可使 $\cos \varphi = 1$ 或领先)。但并不是说, 异步电动机就不能拖动这类生产机械, 而是要根据具体情况进行分析比较, 以确定采用哪种电机。对于那些调速要求不高的生产机械, 采用异步电动机, 再辅以机械变速装置就能满足要求。如果生产机械本身对调速有很高的要求, 如连续调速或调速范围很大等, 还得采用直流电动机拖动。

异步电机运行时, 定子绕组接到交流电源上, 转子绕组自身短路, 由于电磁感应的关系, 在转

子绕组中产生电势、电流,从而产生电磁转矩。所以,异步电机又叫感应电机。

异步电动机的种类很多,从不同的角度看,有不同的分类法。例如:

(一) 按定子相数分有:

1. 单相异步电动机;
2. 两相异步电动机;
3. 三相异步电动机。

(二) 按转子结构分有:

1. 绕线式异步电动机;
2. 鼠笼式异步电动机。其中又包括:

- (1) 单鼠笼异步电动机;
- (2) 双鼠笼异步电动机;
- (3) 深槽式异步电动机。

(三) 按有无换向器分有:

1. 无换向器异步电动机;
2. 换向器异步电动机。

此外,根据电机定子绕组上加的电压大小,有高压异步电机、低压异步电机。从其他角度看,还有高起动转矩异步电机、高转差异步电机、高转速异步电机等等。

异步电机也可作异步发电机使用。单机使用时,常用于电网尚未到达的地区,又找不到同步发电机的情况,或用于风力发电等特殊场合上。在异步电动机的电力拖动中,有时利用异步电机回馈制动,即运行在异步发电机状态。

下面我们针对无换向器的三相异步电动机进行分析。

二、三相异步电动机的结构

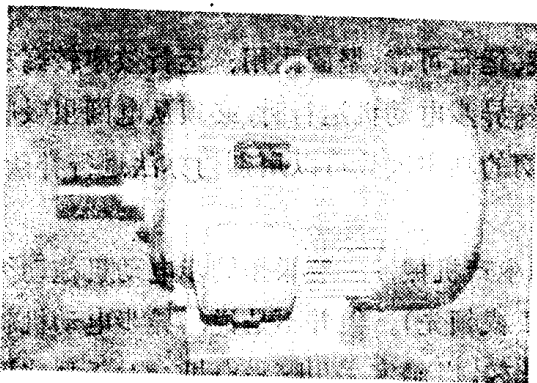


图 4-1 JO₂ 系列鼠笼式三相异步电动机

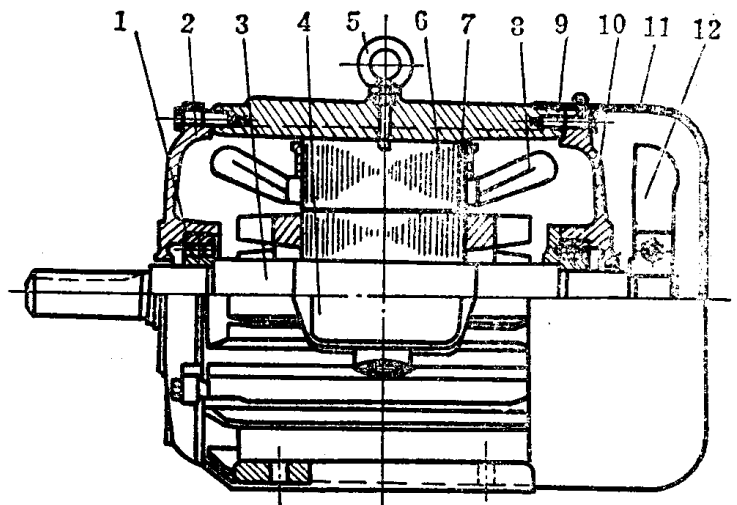


图 4-2 鼠笼式三相异步电动机的结构图

1—轴承 2—后端盖 3—转轴 4—出线盒 5—吊钩 6—定子铁心
7—转子 8—定子绕组 9—机座 10—前端盖 11—风罩 12—风扇

图 4-1 是一台国产 JO₂ 系列鼠笼式三相异步电动机的外形图。图 4-2 是它的结构图。它主要是由定子和转子两大部分组成的。定、转子中间是空气隙。此外,还有端盖、轴承、机座、风扇等部件,分别简述如下。

1. 异步电动机的定子

异步电动机的定子是由机座、定子铁心和定子绕组三个部分组成的。

定子铁心是电动机磁路的一部分,装在机座里。为了降低定子铁心里的铁损耗,定子铁心用 0.5 毫米厚的硅钢片叠压而成,在硅钢片的两面还应涂上绝缘漆。图 4-3 是异步电动机定子铁心。当铁心直径小于 1 米时,用整圆的硅钢片叠成,如图 4-4 所示;大于 1 米时,用扇形硅钢片。

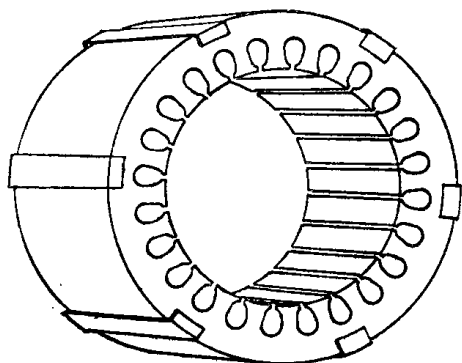


图 4-3 定子铁心

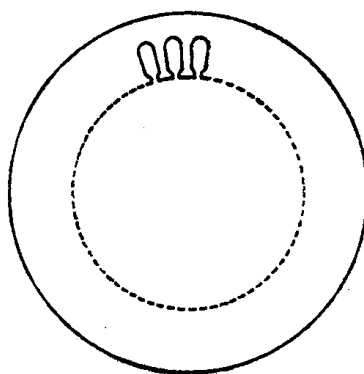


图 4-4 定子冲片

在定子铁心内圆上开有槽,槽内放置定子绕组(也叫电枢绕组)。图 4-5 是定子铁心上的槽形图,其中(a)是开口槽,用于大、中容量的高压异步电动机中;(b)是半开口槽,用于中型 500 伏以下的异步电动机中;(c)是半闭口槽,用于低压小型异步电动机中。

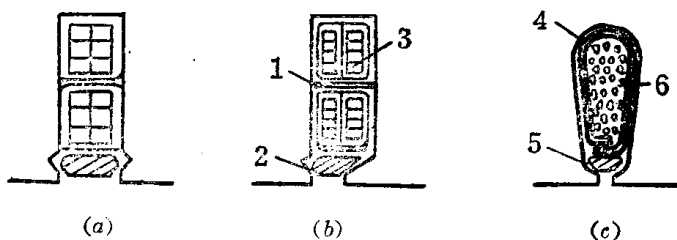


图 4-5 定子槽形

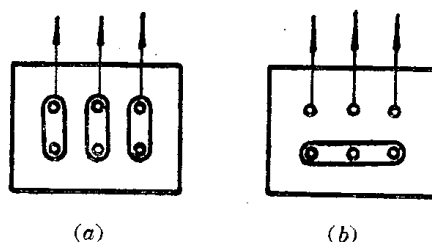


图 4-6 异步电动机的引出线

1—层间绝缘 2—槽楔 3—扁铜线 4—槽绝缘 5—槽楔 6—圆导体

高压大、中型容量的异步电动机定子绕组常采用 Y 接,只有三根引出线,如图 4-6(a) 所示。对中、小容量低压异步电动机,通常把定子三相绕组的六根出线头都引出来,根据需要可接成 Y 形或 Δ 形,如图 4-6(b) 所示。定子绕组用绝缘的铜(或铝)导线绕成,嵌在定子槽内。绕组与槽壁间用绝缘隔开。

机座的作用主要是为了固定与支撑定子铁心。如果是端盖轴承式电机(见图 4-2), 还要支撑电机的转子部分。因此, 机座应有足够的机械强度和刚度。对中、小型异步电动机通常用铸铁机座。对大型电机一般采用钢板焊接的机座, 整个机座和座式轴承都固定在同一个底板上, 见图 4-7。

2. 气隙

异步电动机的气隙比同容量直流电动机的气隙小得多, 在中、小型异步电动机中, 气隙一般为 $0.2 \sim 1.5$ 毫米左右。

异步电动机的励磁电流是由定子电源供给的。气隙大时, 要求的励磁电流也就大了, 从而影响电动机的功率因数。为了提高功率因数, 尽量让气隙小些。但是也不应太小, 否则运行时定、转子有可能发生摩擦或碰撞。如果从减小附加损耗以及减少高次谐波磁势产生的磁通来看, 气隙大点当然又有好处。

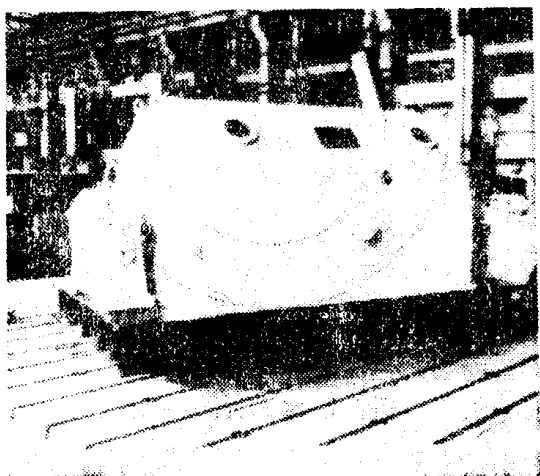


图 4-7 座式轴承电机

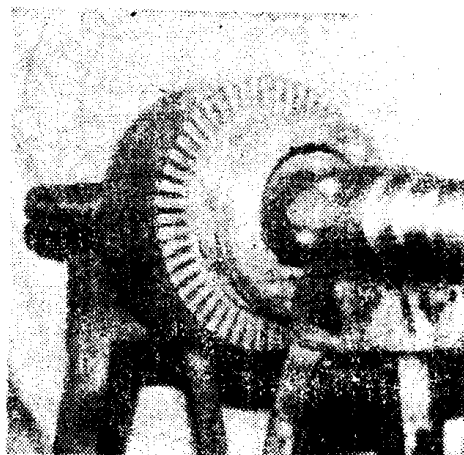


图 4-8 转子铁心

3. 异步电动机的转子

异步电动机的转子是由转子铁心、转子绕组和转轴组成的。转子铁心也是电动机磁路的一部分, 它用 0.5 毫米厚的硅钢片叠压而成, 如图 4-8 所示。图 4-9 是转子槽形图, 其中(a)是绕线式异步电动机转子槽形, (b)是单鼠笼转子槽形, (c)是双鼠笼转子槽形。整个转子铁心固定在转轴上, 或固定在转子支架上, 转子支架再套在转轴上。

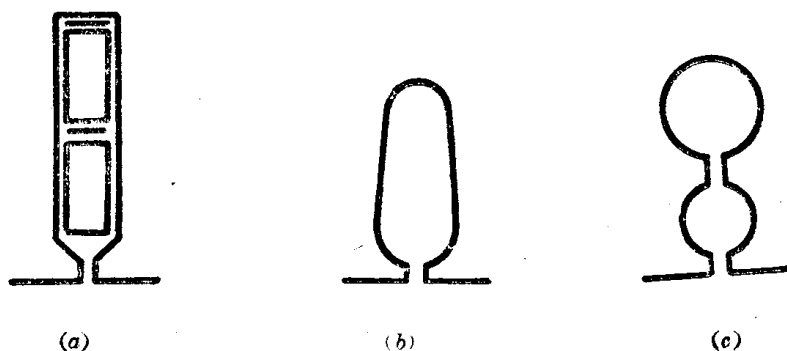


图 4-9 异步电机转子槽形

如果是绕线式异步电动机,则转子绕组也是三相绕组,它可以联接成Y形或 Δ 形。一般小容量电动机联接成 Δ 形,中、大容量电动机都联接成Y形。转子绕组的三条引线分别接到三个滑环上,用一套电刷装置引出来,如图4-10所示。这就可以把外接电阻串联到转子绕组回路里去。串电阻的目的是为了改善电动机的特性或者为了调速,以后再详细介绍。

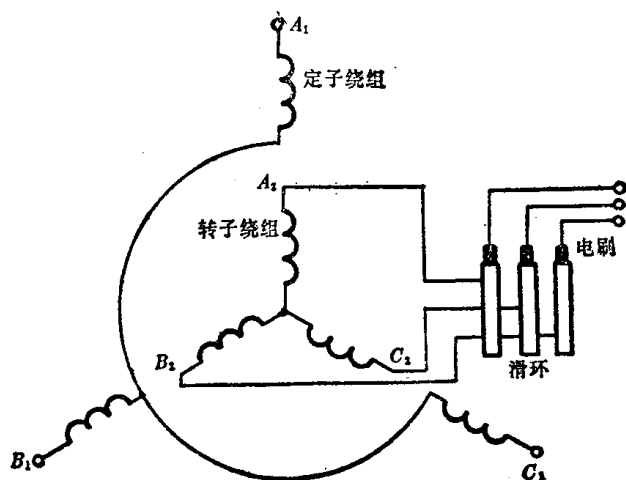
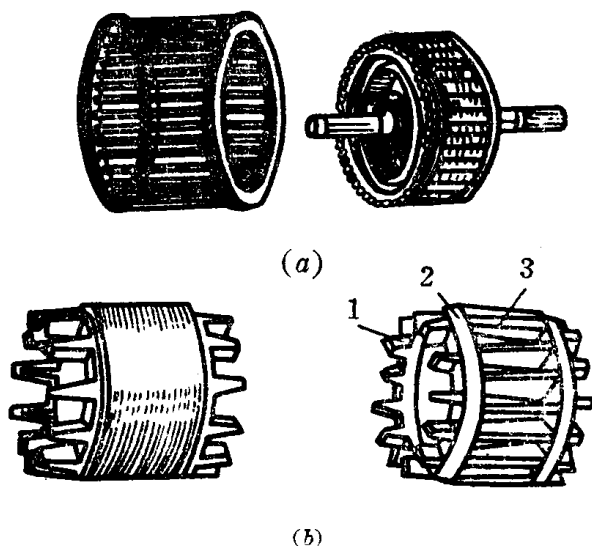


图 4-10 绕线式异步电动机定、转子绕组接线方式



1—风扇叶片 2—端环 3—导条

图 4-11 鼠笼式转子

鼠笼转子绕组与定子绕组大不相同,它是一个自己短路的绕组。在转子每个槽里放上一根导体,每根导体都比铁心长,在铁心的两端用两个端环把所有的导条都短路,形成了一个自己短路的绕组。如果把转子铁心去掉,则可看出,剩下的绕组形状像个松鼠笼子,如图4-11所示,因此叫鼠笼转子。导条的材料有铜的,也有铝的。如果用的是铜料,就需要把事先作好的裸铜条插入转子铁心上的槽里,再用铜端环套在伸出两端的铜条上,最后焊在一起,如图4-11(a)所示。如果用的是铝料,就用熔化了的铝液直接浇铸在转子铁心上的槽里,连同端环、风扇一次铸成,如图4-11(b)所示。

4. 端盖

端盖固定在机座的两端。端盖上的轴承室里安装了轴承来支撑转子,以使定子和转子得到较好的同心度,保证转子在定子内膛里正常运转。端盖除了起支撑作用外,还起保护定、转子绕组的作用。在大容量电机里,多采用座式轴承直接固定在电机的底座上,支撑转动部分的重量。在这种情况下,端盖的作用仅是为了保护定、转子绕组,或者是作为通风的风路。

三、异步电动机的结构型式

根据不同的冷却方式和保护方式,异步电动机有开启式、防护式、封闭式和防爆式几种。

防护式异步电动机能够防止外界的杂物落入电机内部,并能在与垂直线成 45° 角的任何方向防止水滴、铁屑等掉入电机内部。这种电动机的冷却方式是在电动机的转轴上装有风扇,冷空气从端盖的两端进入电动机,冷却了定、转子以后再从机座旁边出去。

封闭式异步电动机是电动机内部的空气和机壳外面的空气彼此相互隔开。电动机内部的热

量通过机壳的外表面散出去。为了提高散热效果,在电动机外面的转轴上装上风扇和风罩,并在机座的外表面铸出许多冷却片。这种电动机用在灰尘较多的场所。

防爆式异步电动机是一种全封闭的电动机,它把电动机内部和外界的易燃、易爆的气体隔开。多用于有汽油、酒精、天然气、煤气等易爆性气体的场所。

四、异步电动机的铭牌和额定数据

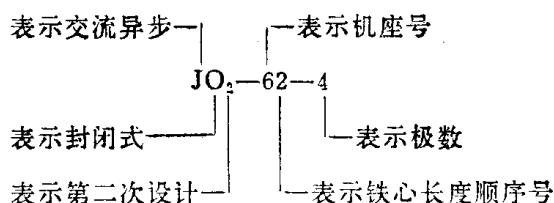
异步电动机的铭牌包含下列内容:

1. 额定功率 P 。指电动机在额定运行时轴上输出的机械功率,单位是千瓦。
2. 额定电压 U 。指额定运行状态下加在定子绕组上的线电压,单位为伏。
3. 额定电流 I 。指电动机在定子绕组上加额定电压、轴上输出额定功率时,定子绕组中的线电流,单位为安。
4. 额定频率 f_1 。我国规定工业用电的频率是 50 周/秒。
5. 额定转速 n 。指电动机定子加额定频率的额定电压,且轴端输出额定功率时电机的转速,单位为转/分。

此外,铭牌上还标明定子绕组的相数、绕组的接法、功率因数、效率、温升(或绝缘等级)。对绕线式异步电动机还要标明转子绕组的接法、转子绕组额定电压(指定子绕组加额定电压、转子绕组开路时滑环之间的电压)和转子的额定电流。

五、国产三相异步电动机的系列及型号

电机产品的型号一般采用大写印刷体的汉语拼音字母和阿拉伯数字组成。其中汉语拼音字母是根据电机的全名称选择有代表意义的汉字,再用该汉字的第一个拼音字母组成。例如,对 JO₂-62-4 有:



我国生产的异步电动机种类很多,下面列出一些常见的产品系列。

J₂、JO₂、和 JO₂-L 系列是一般用途的小型三相鼠笼异步电动机。J₂ 系列是防护式的, JO₂、JO₂-L(铝线)是封闭式的。

JQ₂ 和 JQO₂ 系列是高起动转矩异步电动机,用在起动静止负载或惯性负载较大的机械上。JQ₂ 是防护式, JQO₂ 是封闭式。

JS 系列是中型防护式三相鼠笼异步电动机。

JR 系列是防护式三相绕线异步电动机。用在电源容量小,不能用同容量鼠笼电动机起动的生产机械上。

JSL₂ 和 JRL₂ 系列是中型立式水泵用的三相异步电动机,其中 JSL₂ 是鼠笼式, JRL₂ 是绕线式。

JZ₂ 和 JZR₂ 系列是起重和冶金用的三相异步电动机, JZ₂ 是鼠笼式, JZR₂ 是绕线式。

JD₂和JDO₂系列是防护式和封闭式多速异步电动机。

BJO₂系列是防爆式鼠笼异步电动机。

JPZ系列是旁磁式制动异步电动机。

JZZ系列是锥形转子制动异步电动机。

JZT系列是电磁调速异步电动机。

其他类型的异步电动机可参阅产品目录。

§ 4-2 交流电机的电枢绕组和感应电势

交流电机的电枢绕组与直流电机的电枢绕组就其功能来说,是完全一样的,它们都是电机中能量转换必不可少的关键部分。但在绕组的具体联接上,二者有同有异。

交流电机的绕组种类很多:有单层绕组、双层绕组、单双层绕组、正弦绕组、变极绕组、分数槽绕组、延边三角形绕组等等。限于篇幅,本章主要介绍异步电动机常用的单层绕组和双层绕组。最后还介绍一下用于小型单相异步电动机中的正弦绕组,以及延边三角形绕组的接法。

对交流电机绕组的要求,首先是能感应出一定大小的电势。对三相电机来说,还要求三相电势是对称的。所谓对称,是指三相电势的有效值大小相等,相位上互差 120° 电角度。为了满足这个要求,除了使绕组中的每个线圈有一定的串联匝数外,还应把各个线圈在定子内圆空间按一定规律分布开。其次,不管是交流发电机还是电动机,当加上负载后,电枢绕组里都要有电流通过。这就要求线圈中的导体具有一定大小的截面积。此外,还要求绕组有一定的机械强度和可靠的绝缘性能。

总之,上述对交流电机电枢绕组的要求,从原理上来看,可以归纳为对绕组感应电势的要求。即要求能感应出波形接近正弦、有一定数值的三相对称电势(对交流电动机来说,要求当三相绕组中通入三相对称交流电流时,能产生圆形旋转磁势。安排绕组时,如果能满足电势的要求,对磁势的要求也一定能满足)。下面根据这些要求,来安排电枢绕组。

交流电机电枢绕组和感应电势的问题,对同步电机或异步电机都适用。为了容易理解,在下面的分析中,用了一台交流发电机来进行分析,所得结论都能用到异步电机上。

一、绕组的基波电势

在讨论三相单层绕组之前,为了简单,我们先从导体电势、线圈电势入手,使问题变得容易些。然后再找出画三相绕组的规律来。

1. 导体电势

图 4-12(a)是一台交流发电机的模型,图中 N 、 S 是主磁极,它可以是永久磁铁,也可以是电磁铁(也可以是§ 4-3 中由交流电机电枢绕组产生的基波磁势)。用原动机拖着主磁极以恒定转速 n_0 逆时针方向旋转。在图 4-12(a)所示的电机定子上放了一根导体 A ,由于导体 A 与主磁极之间有相对运动,根据电磁感应定律知道,导体 A 中就会感应电势。

在分析之前,把图 4-12(a)中转子的表面上放上直角坐标,坐标原点任选在两个主磁极的中

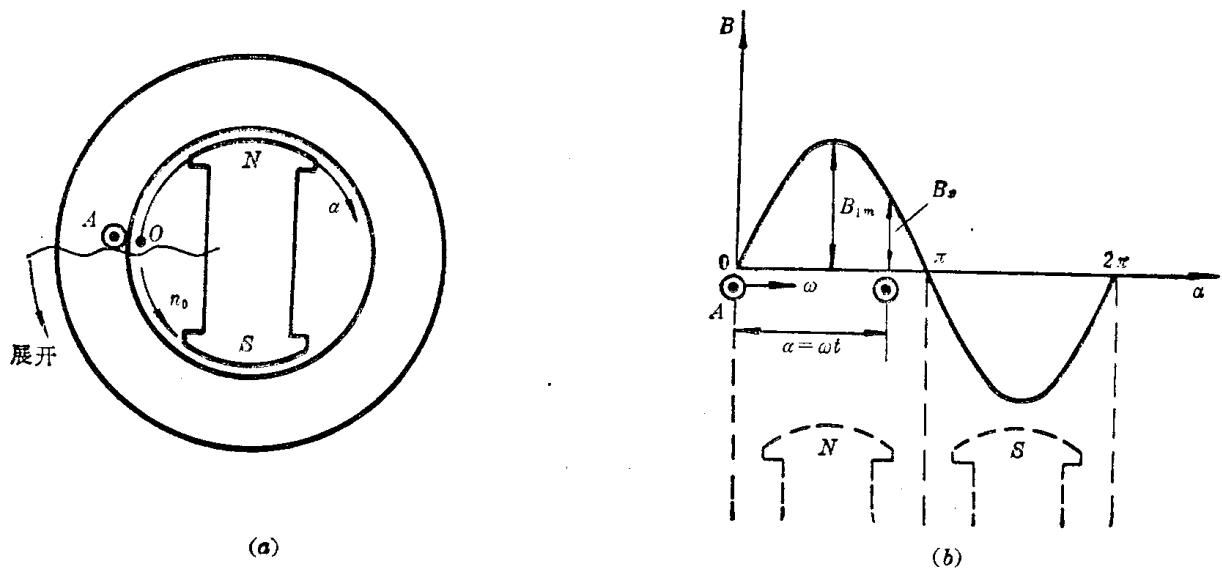


图 4-12 导体 A 的基波感应电势

间, 纵坐标代表气隙磁密大小。横坐标上距坐标原点的距离用角度 α 衡量。整个坐标随着转子一道旋转。图 4-12(b) 是在导体 A 处沿轴向剖开并展成直线的图。由于角度 α 是衡量转子表面的空间距离, 所以是空间角度。在电机里, 我们把一对主磁极表面在空间占的距离用空间角度表示时为 $360^\circ (2\pi \text{ 弧度})$, 它与电机整个转子占的空间几何角度是有区别的。前者叫空间电角度, 后者叫机械角度。如果电机只有一对主磁极(两个磁极算一对), 空间电角度与机械角度二者相等。如果电机有 p 对主磁极, 对应的总空间电角度为 $p \times 360^\circ$, 而机械角度永远为 360° , 它们之间的关系为

$$\alpha = p \times \beta$$

式中 β 是电机的机械角度。

为了用公式或曲线表达气隙磁密以及导体中的感应电势, 还应规定它们的正方向。我们假设气隙磁通从磁极到定子为正, 对应的磁密也为正, 反之为负。规定图 4-12(a) 中导体 A 的感应电势出纸面为正, 用 $\odot$ 表示。

电机气隙磁通是由转子励磁电流产生的。当主磁极逆时针方向旋转时, 气隙磁密也随之一道旋转。

假设电机的气隙中只有波长等于一对主磁极极距、沿气隙圆周方向分布为正弦形的磁密波, 称为基波磁密, 如图 4-12(b) 所示。用公式表示为

$$B_x = B_{1m} \sin \alpha$$

式中 B_{1m} 是气隙磁密的最大值。

根据电磁感应定律知道, 导体切割磁力线所产生感应电势的大小用公式

$$e = B_x l v$$

确定, 感应电势的瞬时实际方向, 用右手定则确定。式中 B_x 是导体所在处气隙磁密; l 是切割磁力线的导体长度; v 是导体垂直切割磁力线的相对线速度。

已知转子逆时针方向旋转的转速为 n_0 转/分, 用角速度表示为

$$\omega = 2\pi p \frac{n_0}{60} \quad \text{弧度/秒}$$

在求导体中的感应电势时，显然可以看成转子不动而导体 A 以角速度 ω 朝相反方向旋转。在图 4-12(b) 直角坐标上，就是沿着 $+\alpha$ 的方向以 ω 角速度移动。此外我们规定，当导体 A 最初正好位于图 4-12(b) 坐标原点的瞬间，作为时间的起点，即 $t=0$ 。

当时间过了 t 秒后，导体 A 移到 α 处，这时 $\alpha = \omega t$ ，所切割的磁密为

$$B_x = B_{1m} \sin \alpha = B_{1m} \sin \omega t$$

导体 A 中感应的基波电势瞬时值为

$$\begin{aligned} e_1 &= B_x l v = B_{1m} l v \sin \omega t \\ &= E_{1m} \sin \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t \end{aligned}$$

式中 $E_{1m} = B_{1m} l v$ 是导体中感应电势的最大值；

E_1 是它的有效值。

可见，导体中感应基波电势随时间变化的波形决定于气隙中磁密的分布波形，即随时间按正弦规律变化，如图 4-13(a) 所示。如果用电角度 ωt 作为衡量电势变化的时间，则图 4-12(b) 中，

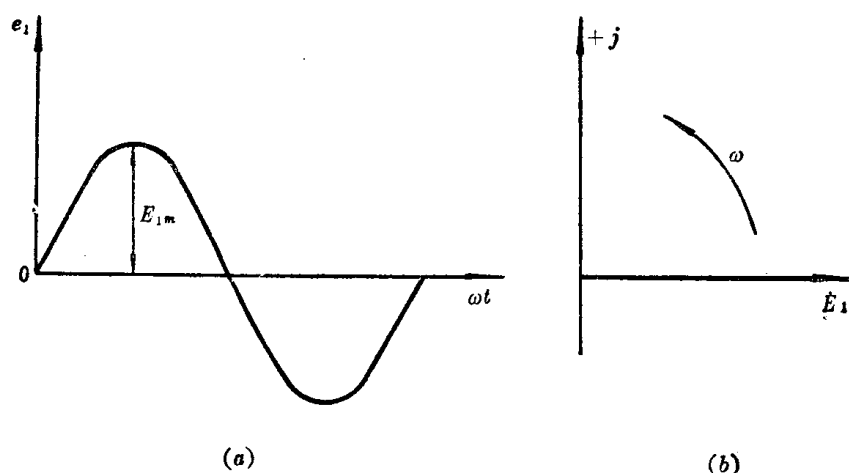


图 4-13 导体 A 感应的基波电势波形及向量表示法

导体从坐标原点位移到 α 空间电角度处所需的时间就是 ωt 时间电角度。已知二者的数值相当，即在空间上所位移的电角度等于所经历的时间电角度。此外，从图 4-12(b) 看出，导体 A 每经过一对主磁极，其中感应电势也经历了一个周期。因此，导体中感应基波电势的频率（即每秒周数），等于每秒钟内所经过的磁极对数，用公式表示为

$$f_1 = \frac{pn_0}{60}$$

又知道角速度 $\omega = \frac{2\pi pn_0}{60} = 2\pi f_1$ ，考虑到这个关系，则 ω 也是基波电势变化的角频率。

导体中感应基波电势的最大值为

$$\begin{aligned} E_{1m} &= B_{1m} l v = \frac{\pi}{2} \left(\frac{2}{\pi} B_{1m} \right) l (2\pi f_1) \\ &= \pi f_1 B_{1av} l \tau = \pi f_1 \Phi_1 \end{aligned}$$

式中 $B_{1av} = \frac{2}{\pi} B_{1m}$ 是气隙磁密的平均值;

$\Phi_1 = B_{1av} l \tau$ 是每极基波磁通量;

$v = 2p\tau \frac{n_0}{60} = 2\tau f_1$, 其中 τ 是定子表面用长度表示的极距。

导体基波电势的有效值为

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi f_1 \Phi_1 = 2.22 f_1 \Phi_1$$

式中 Φ_1 的单位是韦;

E_1 的单位是伏。

已知随时间按正弦变化的交流电势可以用旋转向量表示, 如图 4-13(b) 所示。图中 $+j$ 是时间参考轴。向量的长短代表电势的有效值。

例 4-1 在电机的定子上放了相距 150° 空间电角度的两根导体 A 与 X, 转子绕组通入直流励磁电流产生一对极性的气隙磁密, 并规定导体电势出纸面为正, 如图 4-14 所示。已知原动机拖动电机转子逆时针方向以 n_0 的转速恒速旋转时, 在每根导体中感应的基波电势有效值都是 10 伏。画出图 4-14 所示瞬间两根导体 A 与 X 感应基波电势向量在 $+j$ 轴上的位置。

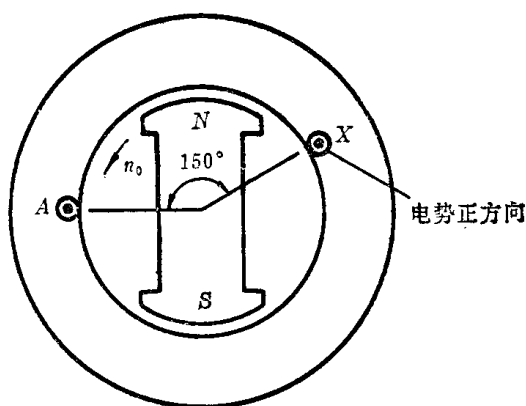


图 4-14 在定子上相距 150° 空间电角度的导体 A 与 X

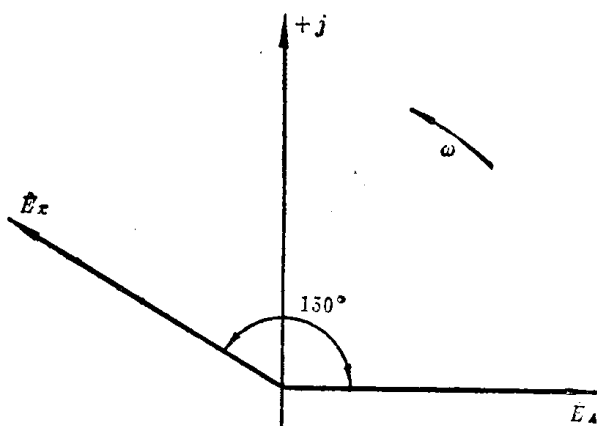


图 4-15 用向量表示的 A、X 两根导体基本电势

解 从图 4-14 中看出, 顺着电机转动方向看, 导体 A 在导体 X 的前面 150° 空间电角度, 用向量表示的导体基波电势, 导体 A 的基波电势向量应落后于导体 X 的向量 150° 时间电角度。图 4-15 画出了图 4-14 所示瞬间对应的导体基波电势向量图。每根向量的长短代表 10 伏大小的有效值。

2. 整距线匝电势

在图 4-16(a) 中相距一个极距 (180° 空间电角度或 π 弧度) 的位置上放了两根导体 A 与 X, 这两根导体构成了一个整距线匝, 如图 4-16(b) 所示。分别把线匝的两个引出线叫做头和尾。在电机里, 只有放在铁心里的导体才能感应电势, 两根导体之间的连接线 (叫端接线) 不感应电势。我们规定导体电势及线匝电势的正方向如图 4-16(b) 所示。则线匝基波电势 e_{T1} 为

$$e_{T1} = e_{A1} - e_{X1}$$

由于两根导体在空间位置上相距一个极距, 当一根导体处于 N 极中心下, 另一根导体必定处于 S

极中心下。它们的感应电势总是大小相等方向相反,即在时间相位上彼此相差 180° 时间电角度 (π 弧度)。用向量表示每根导体的基波电势,如图 4-16(c) 所示。两根导体的基波电势向量之差用 $\dot{E}_{T1}$ 表示。

$$\dot{E}_{T1} = \dot{E}_{A1} - \dot{E}_{X1} = 2\dot{E}_{A1}$$

即为整距线匝的基波电势向量,如图 4-16(c) 所示。整距线匝基波电势的有效值为

$$E_{T1} = 2E_{A1} = 2 \times 2.22f_1\Phi_1 = 4.44f_1\Phi_1$$

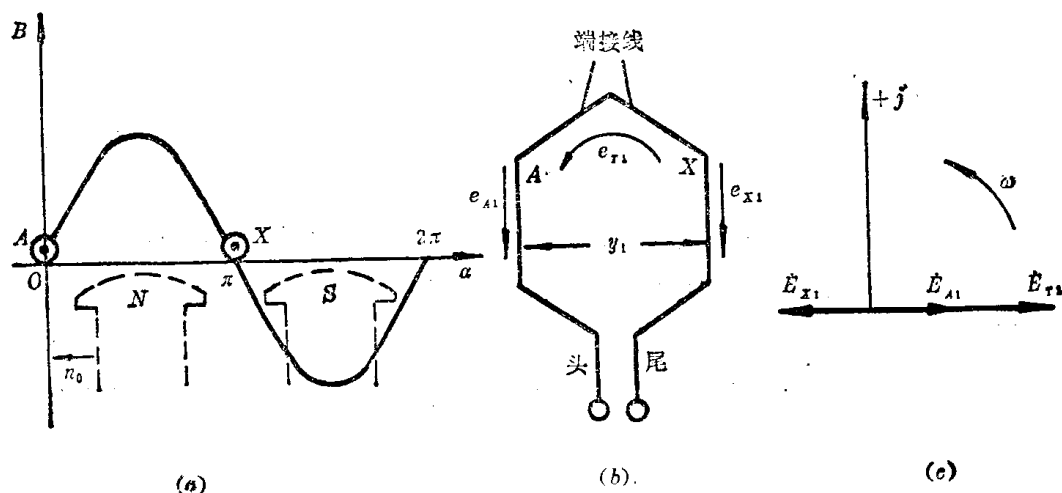


图 4-16 整距线匝感应基波电势

3. 整距线圈电势

如果图 4-16(b) 中的线匝不止一匝,而是 W_y 匝,就叫线圈。显然不管线圈中有多少线匝串联,引出线仍为两根,一根叫做头,一根叫做尾。一个线圈有两个圈边,它们之间的距离叫节距,用 y_1 表示,如图 4-16(b) 所示。 $y_1 = \pi$ 的线圈就是整距线圈,当 $y_1 < \pi$ 时叫短距线圈,当 $y_1 > \pi$ 时叫长距线圈。在电机中,一般不用长距线圈。

整距线圈基波电势的有效值为

$$E_{y1} = 4.44f_1W_y\Phi_1$$

4. 短距线圈电势

当图 4-17(a) 里的线圈是一个短距线圈时,线圈的节距 $y_1 = y\pi$, 其中 y 是一个大于 0 小于 1 的数,如图 4-17(b) 所示。图 4-17(c) 是在这个瞬间短距线圈感应基波电势的向量图。根据规定的正方向,短距线圈的基波电势向量为

$$\dot{E}_{y1(y_1 < \pi)} = \dot{E}_{A1} - \dot{E}_{X'1} = E_{A1} \angle 0^\circ - E_{X'1} \angle y\pi$$

短距线圈基波电势的有效值为

$$\begin{aligned} E_{y1(y_1 < \pi)} &= 2E_{A1} \sin y \frac{\pi}{2} = 4.44f_1W_y\Phi_1 \sin y \frac{\pi}{2} \\ &= 4.44f_1W_yk_{y1}\Phi_1 \end{aligned}$$

式中 $k_{y1} = \sin y \frac{\pi}{2}$ 叫做基波短距系数。如果 $y = 1$, 就是整距, 即 $k_{y1} = 1$ 。

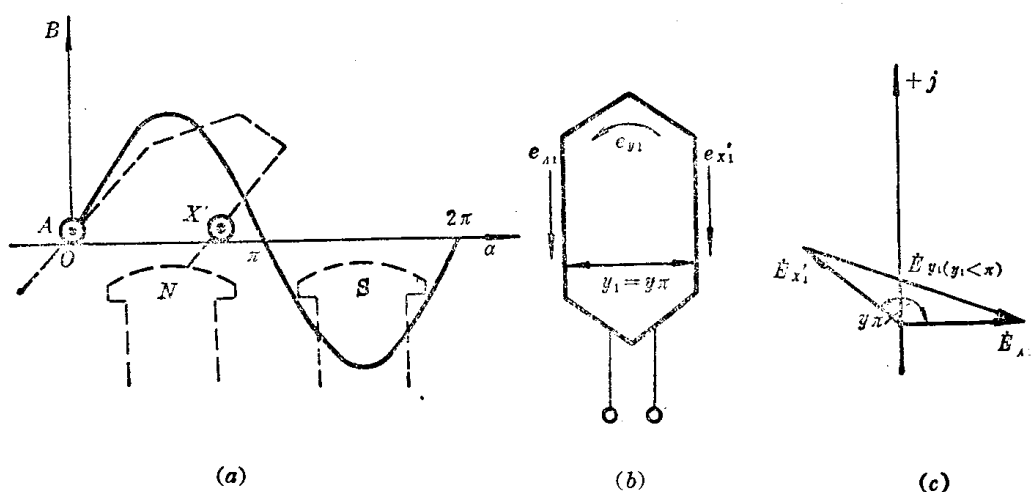


图 4-17 短距线圈感应基波电势

当线圈短距后,两个圈边中感应基波电势的相角不是相差 180° 时间电角度,所以短距线圈的基波电势(有效值)不是每个圈边电势(有效值)的两倍,而是相当于把线圈看成是整距线圈所得电势再乘上一个小于 1 的基波短距系数。

我们也可以这样来理解,把图 4-17 中的短距线圈硬看成是整距线圈,不过它的匝数不是 W_y ,而是 $W_y k_{y1}$,从线圈感应电势的大小来看,完全是等效的。

例 4-2 如果把图 4-14 中 A、X 两根导体组成线匝,求该线匝的基波感应电势有效值是多少(已知线匝基波感应电势 $\dot{E}_{T1} = \dot{E}_A - \dot{E}_X$)?

解 用画向量的方法可以求出线匝基波感应电势的有效值, $E_{T1} = 19.3$ 伏(见图 4-18)。

还可以用计算基波短距系数 k_{y1} 的办法求 E_{T1} 。图 4-14 中 A、X 两根导体在空间相距 150° 空间电角度,即短距线圈的节距

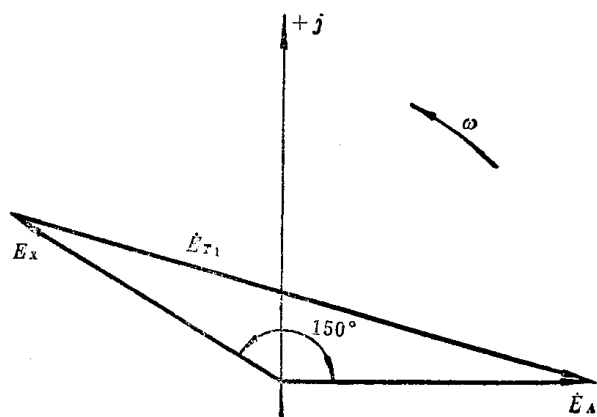


图 4-18 图 14 线匝电势

$$y_1 = y\pi = 150^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ}$$

所以

$$y = \frac{150^\circ}{180^\circ} = 0.833$$

基波短距系数

$$k_{y1} = \sin y \frac{\pi}{2} = \sin 0.833 \times 90^\circ = 0.965$$

短距线圈基波感应电势有效值为

$$E_{T1} = 2 \times 10 \times 0.965 = 19.3 \text{ 伏}$$

5. 整距分布线圈组的电势

为了充分利用电机定子内圆空间,定子上不止放一个整距线圈,而是放上几个线圈,并均匀地分布在定子内表面的槽里。

图 4-19(a)画的是在电机的定子槽里放上三个均匀分布的整距线圈,即 1-1'、2-2'、3-3', 它们的匝数彼此相等,按头和尾连接,即互相串联起来,叫线圈组,如图 4-19(b)所示。相邻线圈的

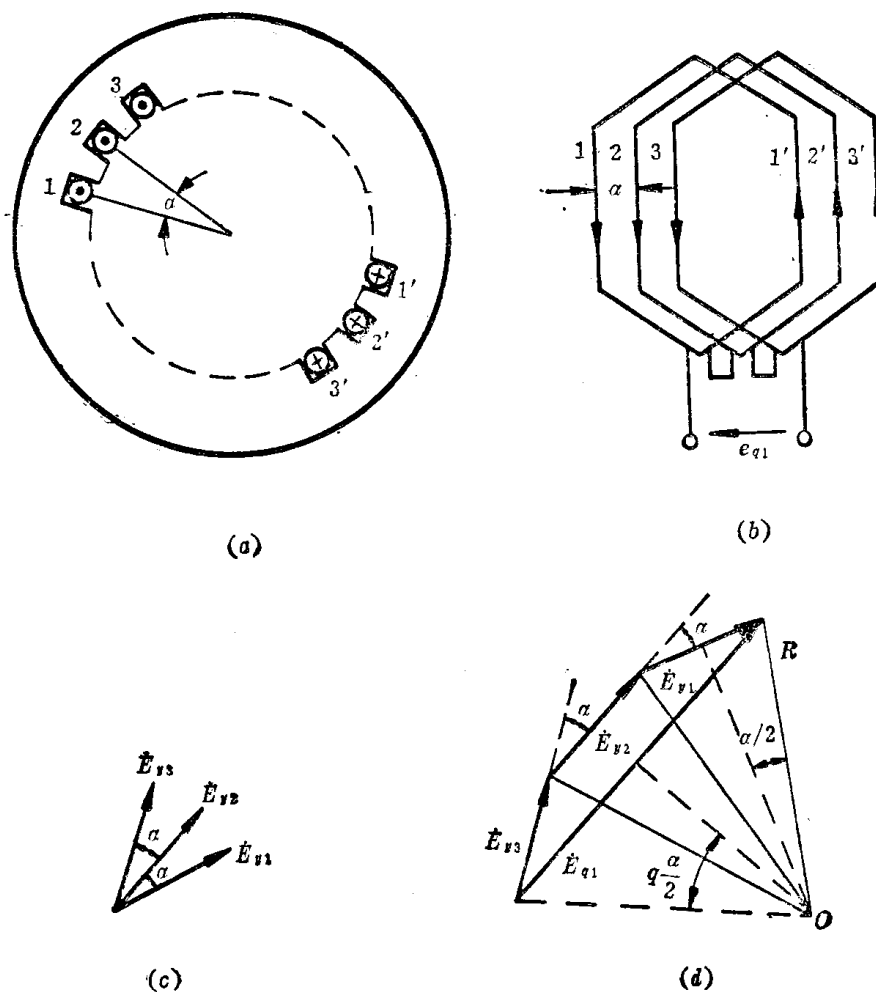


图 4-19 分布线圈组基波感应电势

槽距角为 α 。关于一个整距线圈的基波电势,前面已经分析过了。现在是空间分布的三个整距线圈,就每一个整距线圈来说,显然它们的基波电势有效值彼此应一样大,但是三个线圈已经分布开,当然它们在切割同一磁力线时,就有先有后。也就是说,三个分布线圈的基波感应电势在时间相位上彼此不同相了。图 4-19(c) 所示是在这种情况下三个整距线圈基波电势的向量图,三个整距线圈基波电势之间彼此相差 α 时间电角度。由三个分布的整距线圈组成的线圈组基波电势向量用 $\dot{E}_{q1}$ 表示,为

$$\dot{E}_{q1} = \dot{E}_{y1} + \dot{E}_{y2} + \dot{E}_{y3}$$

图 4-19(d)画出了 $\dot{E}_{y1}$ 、 $\dot{E}_{y2}$ 、 $\dot{E}_{y3}$ 及总电势 $\dot{E}_{q1}$ 的向量。为了更一般起见,下面我们认为不止是三个整距线圈的分布问题,而是有 q 个整距线圈在定子上依次分布。根据几何学,可作出它们的外接圆,如图 4-19(d)所示。设外接圆的半径为 R ,则