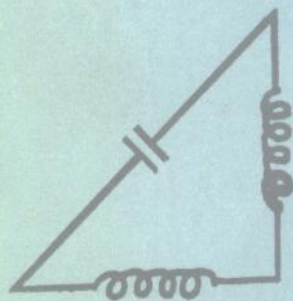


单相电机原理与设计

李隆年等

单相电机原理与设计

李隆年 朱东起 胡元德



清

TM343

版社

清华大学出版社

207972

单相电机原理与设计

李隆辛 朱东起 胡元德



清华大学出版社

内 容 提 要

本书共分五章。第一章介绍单相电动机运行原理。第二章介绍单相电机设计问题并列出设计程序及计算举例。第三章介绍单相电机常用的几种调速方法，并有计算举例。第四章介绍产生电机噪声的原因，噪音的实验分析及其控制措施。第五章讲单相电机的实验数据处理。并对实验值与计算值出现较大偏差的原因进行了分析。

在讲解原理及设计公式时，着重强调物理概念。对一些重要概念，结合思考题进行了较深入的讨论。调速方法介绍较全面，并进行了理论推证。噪声及实验数据分析中，介绍了作者在这方面作过的一些实际工作。

此书可作为工科大学及中等专科学校电机专业的教学参考书。可供从事电机工业的工程技术人员及技术工人参考，也可供具有一定文化程度的家用电器电机爱好者自学参考。

单 相 电 机 原 理 与 设 计

李隆年 朱东起 胡元德

★

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京景山学校印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

★

开本：787×1092 1/16 印张：13 3/4 字数：343千字

1984年0月第一版 1984年0月第一次印刷

印数：1~25000

统一书号：15235·112 定价：1.75元

序 言

随着国民经济的发展、工农业生产稳步上升、人民生活水平逐年提高，人们对家用电器及其维修知识的需要越来越迫切。本书就是对家用电器的动力——单相电机作一个全面的分析，以促进我国单相电机生产及研究工作的发展。

家用电器的动力大多是单相电动机。为了更快的发展家用电器，必须更快地增加单相电机的产量并进一步提高质量。在单相电机的技术性能指标已达到国家标准的基础上，还要进一步减少电机的噪声；提高电机的效率；节约能源；尽可能节约原材料；降低产品价格。要达到这一步，首先必需合理的设计单相电机并在电机制成后认真地进行试验分析以便进一步改进。

本书从单相电机的运行原理、设计计算、调速方法、试验数据处理、噪声分析几个方面作了详细的介绍。其中第一章由朱东起编写；第四章由胡元德编写；第二、三、五章由李隆年编写。由于作者水平有限，书中肯定会有不少缺点，希望读者批评指正。

李发海副教授担任了此书的审定工作。郑逢时副教授为本书提供了参考资料，在此表示感谢。

在写书的过程中，很多工厂提供了样机、设计程序等，衷心地感谢他们的大力支持。

作 者

目 录

序 言

第一章 单相异步电动机运行原理	(1)
§1-1 单相异步电动机的基本类型	(1)
§1-2 单相异步电动机的绕组	(6)
§1-3 单相异步电动机的磁势	(10)
§1-4 绕组的感应电势	(23)
§1-5 单相异步电动机的运行分析	(26)
第二章 单相电机设计	(45)
§2-1 电机体积与容量的关系	(45)
§2-2 定、转子槽数槽形的确定	(49)
§2-3 定、转子电阻电抗的计算	(53)
§2-4 磁路计算	(60)
§2-5 副绕组设计	(66)
§2-6 起动计算	(70)
§2-7 单相电机运行性能	(74)
§2-8 电容运转电动机性能计算	(78)
§2-9 温升及方案调整方法	(81)
§2-10 计算方法	(84)
§2-11 计算例题	(85)
§2-12 电阻分相及电容起动电机之性能计算举例	(115)
第三章 单相异步电动机调速方法	(118)
§3-1 L 接法调速	(118)
§3-2 T 接法调速	(126)
§3-3 并联电容调速	(131)
§3-4 变极调速	(135)
§3-5 串电抗器调速及可控硅调压调速	(145)
第四章 电机的噪声及其控制	(149)
§4-1 概述	(149)
§4-2 声音的物理概念及量度	(149)
§4-3 噪声的评价	(153)
§4-4 电机振动源及噪声源	(155)
§4-5 电磁噪声及其控制	(159)
§4-6 通风噪声及其控制	(167)
§4-7 机械噪声及其控制	(171)
§4-8 电机噪声测试	(175)
第五章 单相电动机实验方法	(188)
§5-1 无载实验	(188)
§5-2 性能实验方法	(191)

§5-3	机械测功器原理; 电机起动性能的测定及最大转矩的测定。	(194)
§5-4	温升试验及温度折合系数	(199)
§5-5	实验数据举例	(200)

附录

1	附图 1 极弧计算系数 α_s 、波形系数 K_s	(204)
2	附图 2 平底槽下部单位漏磁导 λ_L	(204)
3	附图 3 圆底槽下部单位漏磁导 λ_L	(205)
4	附图 4 梨形槽下部单位漏磁导 λ_L	(205)
5	附图 5	(206)
6	附图 6 转子最大转差率 S_m	(206)
7	附图 7 起动时漏抗饱和系数 K_z	(207)
8	附表 1 漆包圆铜线常用数据表	(208)
9	附表 2 正弦绕组线圈分配表	(210)
10	附表 3 磁化曲线	(212)
11	附表 4 损耗曲线	(213)
12	附表 5 串联电容器等效阻抗值	(214)

参考书目

第一章 单相异步电动机运行原理

§ 1-1 单相异步电动机的基本类型

一、概述

单相异步电动机具有结构简单、成本低廉、噪声小等优点。由于它只需要单相电源供电且使用方便，因此被广泛应用于工业和人民日常生活的各个领域，尤其以电动工具、医疗器械、家用电器等使用的更多。与同容量的三相异步电动机相比，它的体积较大、运行性能较差，因此一般只能做成小容量的，功率从零点几瓦到几百瓦。

单相电机在定子绕组接上电源后，转子为什么能够转动起来呢？下面我们来简单的介绍一下它的基本原理。单相电机接上电源后，要使转子受到转矩从静止状态转动起来，一般来说，定子上必需有两套绕组。图 1-1 中表示了一个最简单的两相绕组：定子上有四个槽，均匀放置两个线圈 mm' 和 aa' ，它们在空间的位置互相垂直。如果两个线圈的匝数相等，接上一个两相交流电源 $\dot{U}_m$ 和 $\dot{U}_a$ ，它们的有效值相等，相位上 $\dot{U}_m$ 落后 $\dot{U}_a$ 90° 。因为两个线圈均流过正弦交流电流，为此电流的有效值相等，但是 mm' 中的电流 i_m 在相位上落后 aa' 中的电流 i_a 90° 电角度，

即
$$i_m = I_{ym} \cos \omega t$$

$$i_a = I_{ym} \cos (\omega t + 90^\circ)$$

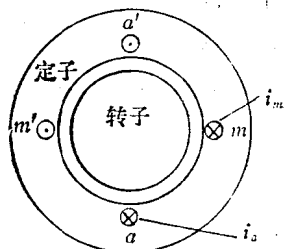


图 1-1

式中 I_{ym} 是正弦交流电流的最大值， ω 为角频率。我们来分析几个特定的时间里，两个线圈中电流的大小以及它们在电机内产生磁力线的情况。在图 1-1 中标出了电流 i_m 和 i_a 的正方向。在某一个瞬时，如果电流是正值，则表示该瞬时实际电流的方向与正方向一致；如果电流是负值，则表示该瞬时实际电流的方向与正反向相反。当 $\omega t = 0$ 时，从 i_m 和 i_a 的公式可知 $i_m = I_{ym}$ ， $i_a = 0$ ，即线圈 mm' 中电流为正的极大值而线圈 aa' 中的电流为零，如图 1-2(a)

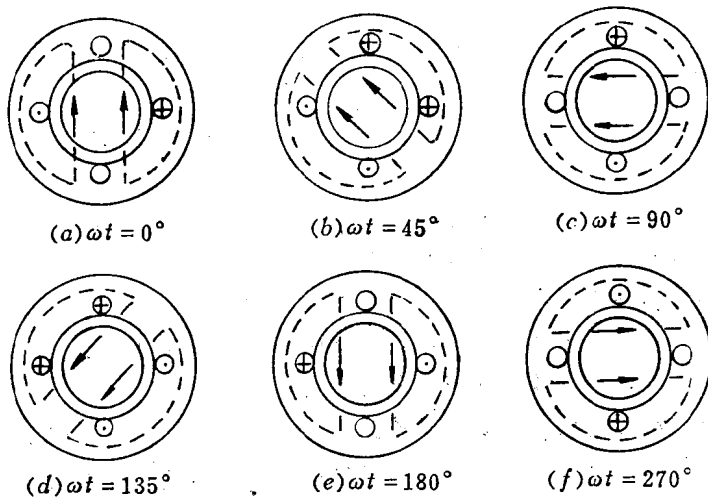


图 1-2

所示(图1-2中所画的方向为电流的实际瞬时方向)。根据电流线圈产生磁场的右手螺旋定则我们可以确定电机内磁力线的方向。这时磁力线是从下而上,由定子经气隙穿过转子再经气隙回到定子。从图1-2(a)看出,此时定子产生两个磁极,下部为N极,上部为S极。用同样的方法可以画出 $\omega t = 45^\circ$, $\omega t = 90^\circ$, $\omega t = 135^\circ$, $\omega t = 180^\circ$, $\omega t = 270^\circ$ 时的线圈电流的实际方向和电机中磁力线的方向,已分别表示在图1-2(b)、(c)、(d)、(e)、(f)中。当 $\omega t = 360^\circ$ 时,又回到了图1-2(a)的情况。由图中我们可以得到下述结论:

(1) 通两相电的两相绕组在电机内产生了一个两极的逆时针旋转磁场。用 p 表示极数,这里 $p = 2$ 。

(2) 电流在时间上经过 45° ,磁场逆时针在空间转过 45° ,电流变化一周期 360° ,磁场在空间转了一周,电流每秒变 f 次,磁场旋转 f 圈。所以每分钟旋转磁场的转速为 $n_1 = 60f = 3000$ 转/分。

(3) 磁场的转向与两个线圈在空间的位置以及通电流的相位有关。如果某相绕组接至电源的两个端点互换,这时两绕组中的电流相位就变为 a 相落后 m 相 90° 电角度。若用上述的办法画出几个特定瞬时的磁场图形就可以知道,此时旋转磁场的方向已变为顺时针旋转了。

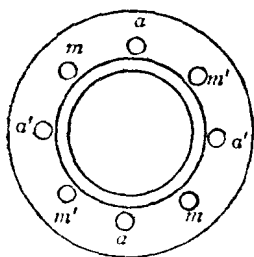


图 1-3

如果把线圈两个边之间的空间距离(一般叫线圈节距)缩短为原来的一半,在定子半个圆周上均匀放上两个线圈,在另外半个圆周上再重复放上两个线圈,两相绕组排列如图1-3所示。

每个线圈匝数相等,两相电流有效值相等,但通电流的相位仍是 i_m 落后 i_a 90° 电角度。用上面的办法同样可以画出几个特定瞬时的磁力线分布图。这时我们便得到一个四极的旋转磁场。另外当电流在时间上变化一周 $\omega t = 360^\circ$,旋转磁场在电机圆周上只转了半圈,亦即旋转磁场的转速此时为 $n_1 = 1500$ 转/分。

由上述可知,由于线圈的节距不同,不仅将产生不同极数的旋转磁场,而且旋转磁场的转速也不一样。

单相电机的转子一般是鼠笼式结构,如图1-4。如果定子的两相绕组产生了一个二极的

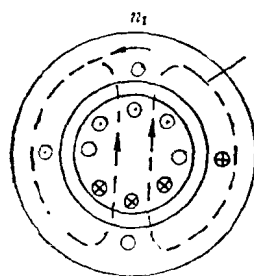


图 1-4

逆时针旋转磁场,图中表示某个瞬时旋转磁场的位置,转子处于静止状态,这时转子的导条就会切割磁力线从而感应电势。在图中表示了各导条中瞬时电势的方向。由于各鼠笼导条经端环互相接通,导体中就会有电流流过。假定电流与电势同相位(实际上要落后些),则图1-4所示方向也就代表了电流的瞬时方向。同时每个载流导体又与磁场作用产生电磁力,我们根据左手定则可以知道各个电磁力的方向,这些电磁力将产生逆时针方向的转矩。若这个转矩能克服转子的

静摩擦,转子就会跟着磁场逆时针方向旋转起来。

转子转动起来,转速将会愈来愈高。但是,转子的转速不能等于旋转磁场的转速而只能低于它,这是因为当转子转速等于旋转磁场转速时,转子与旋转磁场之间就没有相对运动,因而转子上导条就不可能切割磁力线感应电势从而产生感应电流,同时转子导条也就不可能产生电磁力,当然也就没有电磁转矩则不能拖动转子旋转了。所以一般来说转子总是低于旋转磁场的速度下运行,即称做异步运行。如果把旋转磁场的转速称为同步转速并用 n_1 来表示,

转子的转速为 n ，则 $s = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\%$ 叫做电机的转差率。

如果定子上只有一相绕组，如图 1-5。在绕组中通入正弦交流电流，尽管电流大小随时变化，电机内磁通的大小也会随之变化，但是磁通的方向却不会改变，不能产生一个旋转磁场。转子静止时转子导条内虽然也会感应电势从而产生感应电流，但感应电流的方向却与图 1-4 不同。图 1-5 中画出了某一瞬时转子导条中电流的方向，这些电流与电机内磁场作用也会产生电磁力，但因电磁力产生的转矩互相抵消了，转子上没有转矩，所以转子就转不起来，仍处于静止状态。

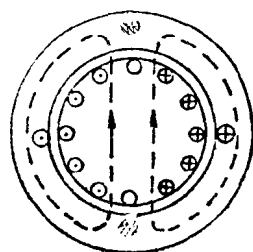


图 1-5

因此，一般来说，只有在定子上存在两相绕组同时通入两相电流，才能在电机的气隙中产生旋转的磁场，转子才有可能从静止状态启动起来。但是，当转子已经转动起来以后，定子上即使只有一相绕组通入交流电流，转子上仍能产生一定的转矩使转子以一定的转速旋转，这一点我们将在以后的章节再作说明。

单相异步电动机首先要解决的问题就是产生启动转矩的问题。根据启动方法的不同以及启动性能、运行性能上的差别就产生了不同类型的单相异步电动机。国产的单相异步电动机一般可以分为以下几种类型：

- 单相电阻启动异步电动机；
- 单相电容启动异步电动机；
- 单相电容运转异步电动机；
- 单相电容启动与运转异步电动机；
- 单相罩极式异步电动机。

二、单相电阻启动异步电动机

单相电阻启动异步电动机也叫单相分相启动异步电动机。它的定子铁心上有两套绕组，一套是主绕组，也叫工作绕组或运行绕组；一套是副绕组，也叫启动绕组，如图 1-6。它们在定子中的位置，在空间上相差 90° 电角度（空间电角度的概念在下一节介绍），副绕组通过一个启动开关和主绕组并联接到单相电源上。启动开关的作用是，当转子转速上升到一定大小（一般为同步速度的 $75\% - 80\%$ ）时，断开副绕组电路，使电机在运行时只有主绕组供电。常用的启动开关一种是离心开关，将离心开关装在电机轴上，跟着转子一起旋转。当转子转速转到同步速的 $75\% - 80\%$ 时，依靠离心块的离心力克服弹簧的拉力（或压力），使动触头与静触头脱离接触，切断了副绕组电路。另一种启动开关是启动继电器，常用的有电流型启动继电器。电流型启动继电器的吸引线圈串联在主绕组中，启动时主绕组的启动电流较大，使继电器动作。电机的副绕组通过触头接到电源上，随着转速升高，主绕组中的电流减小，减小到一定程度时，继电器复位，副绕组中的触头断开，使副绕组脱离电源，如图 1-7。

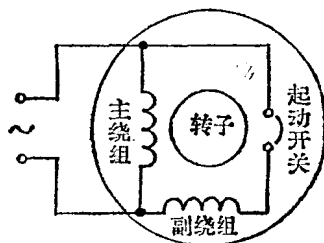


图 1-6

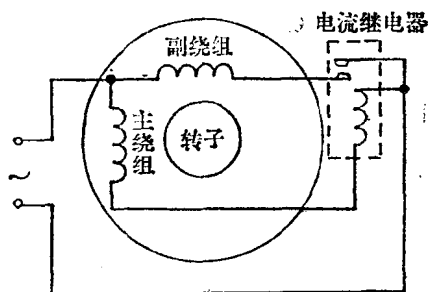


图 1-7

为了使副绕组中的启动电流与主绕组中的启动电流

在时间上有相位差，通常让副绕组的匝数比主绕组要少，副绕组导线的截面积比主绕组要小得多，这样就能使得副绕组的电抗比主绕组小，而电阻却比主绕组大，因而使副绕组的起动电流在相位上领先主绕组的起动电流，如图1-8。图中，主绕组电流用 I_m 表示，副绕组电

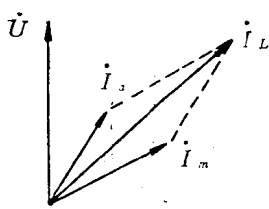


图 1-8

流用 I_a 表示，从电源来的线电流用 I_L 表示，电源电压用 U 表示。由于副绕组只在起动时使用，一般按短时运行状态来设计，将导线用得细些，这样既可节省铜线，又可增大副绕组的电阻。有时为了增加副绕组的电阻但不增加它的电抗，还可以将副绕组的线圈正绕若干匝后再反绕若干匝，这样做有效匝数没增加，电抗不变，电阻却增大了。

单相电阻起动异步电动机可以改变其转向，只要将主绕组或副绕组接至电源的两个端点对调即可。但是若两个绕组同时改换接到电源的端点，则转向不变。

三、单相电容起动异步电动机

单相电容起动异步电动机的接线如图1-9所示，它的定子铁心上也有一套主绕组和一套

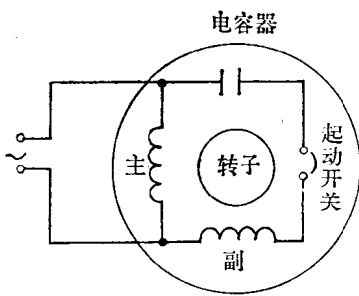


图 1-9

副绕组并在空间相差 90° 电角度。副绕组与一个电容器串联，再与起动开关串联后和主绕组并联一起接到电源上。电容器的作用是使副绕组回路的阻抗呈容性，从而使副绕组在起动时的电流领先电源电压一个相位角。由于主绕组的阻抗是感性的，它的起动电流落后电源电压一个相位角，因此副绕组的起动电流在时间上就能够领先主绕组起动电流一个较大的角度，如图1-10所示。与分相电动机比较，电容起动电机有一定的优点。第一，如果电容器的电容容量配得合适，则能够做到副绕组的电流 I_a 差不多领先主绕组的电流 I_m 90° 电角度。

第二，由于副绕组回路串入电容，电容可以抵消副绕组回路的电抗值，所以副绕组的匝数可以多一些，不象分相电动机那样受限制，从而使副绕组的磁势增大。

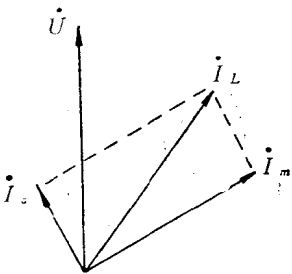


图 1-10

以上两点使得电机在起动时，在空气隙内可以产生一个较强的旋转磁场，从而得到较大的起动转矩。第三，由于 I_a 与 I_m 接近 90° 电角度，合成的线电流 I_L 在数值上比 I_m 大不了多少，即不象分相电动机中 I_a 与 I_m 夹角很小，使 I_L 比 I_m 大很多。也就是说电容起动电动机的起动电流较小，但起动转矩却是比较大的。

由于副绕组中也串入一个起动开关，当转子速度达到同步转速的75%—80%时，起动开关动作，使副绕组脱离电源。在电容起动电动机中，由于副绕组中串联电容，当转子速度上升且向同步速靠近时，副绕组感抗加大，总阻抗减小（容抗与感抗是抵消的），副绕组电流加大，电容器上端电压升高。如起动开关及时

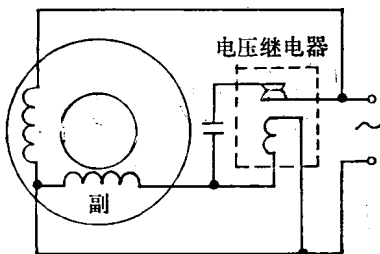


图 1-11

动作，则可以降低对电容器的耐压要求。起动开关的型式，一种是离心开关，它的原理在分相电动机中已叙述了。一种是电流型起动继电器，其原理性线路和图1-7一样。另一种是电压型起动继电器，如图1-11。继电器的励磁线圈与副绕组的两端并联，继电器为常闭触头，当转子转速升高时，副绕组两端的电压很快升高，使继电器励磁线圈上电压升高，转速升至一定值时，励磁线圈吸引衔铁，使触

头打开，副绕组回路与电源脱离。电压继电器的优点是当转子转速上升时副绕组上电压升高显著，衔铁动作灵敏，动作速度的偏差小。其缺点是在电动机运行时励磁线圈一直通电。考虑到电网电压和周波数不够稳定，为了使起动继电器在指定速度下准确动作增加可靠性，还有一种差动型起动继电器，它的原理线路如图 1-12。继电器的电流线圈串入主绕组回路，电压线圈与副绕组两端并联。电动机加上电源后，由于主绕组起动电流很大，电流线圈对衔铁的吸引保证继电器触头可靠闭合，副绕组回路接通。当转子转速到达一定值后，由于电压线圈电压的增大，电压线圈对衔铁的吸引保证继电器触头可靠打开（电压线圈对衔铁吸引力的方向与电流线圈对衔铁吸引力方向正好相反）。

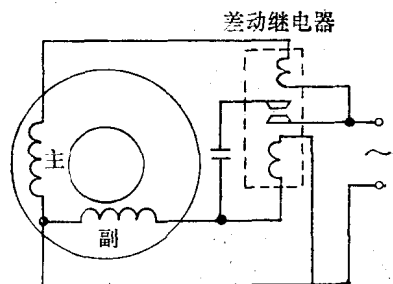


图 1-12

电容起动电动机中所使用的电容器，由于只在电机起动时使用，且通电时间不长，而一般要求电容量较大，所以人们常选用电解电容器。

要改变电容起动电动机的转向，办法和电阻起动电动机一样，即将主绕组或副绕组中的任一方接至电源的两个端点对调再接到电源上就可以了。

四、单相电容运转异步电动机

在单相电容运转的异步电动机中，副绕组不仅在起动时起作用，而且在电动机运转时长期处于工作状态，其接线如图 1-13 所示。这种电动机不仅在起动时、而且在运行时也是一个两相电机，所以运行时在电机的气隙中可以产生较强的旋转磁场，提高了运行性能，因而它的功率因数、效率、过载能力都要比电阻起动和电容起动的单相电动机好。由于副绕组需要长期运行，所以绕组的电流密度不能象电阻起动电动机那样取得较高，而应和主绕组的电密差不多。副绕组中串入的电容器，也应该考虑到长期工作的要求，一般不用电解电容器，应当选用密封蜡浸、油浸或金属膜纸介电容器。一般在电容运转电动机中电容器电容量的选配，主要是考虑运行时在电机气隙中产生接近圆形的旋转磁场以提高电机运行时的性能，这样在起动时电机气隙中的磁场就是一个椭圆磁场（关于圆磁场和椭圆磁场的概念，将在下边磁势分析中阐述）。所以它的起动性能就不如电容起动的单相电动机，它的起动转矩较低，起动电流较大。

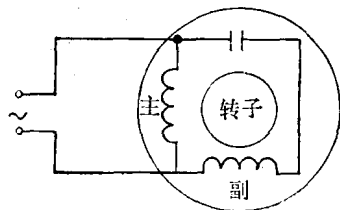


图 1-13

若要改变电容运转电动机的转向，办法和上述两种电机相同。

五、单相电容起动与运转异步电动机

为了使电动机在起动时和运转时都能得到比较好的性能，在副绕组中采用了两个并联的电容器，如图 1-14 所示。电容器 C 是运转时长期使用的电容，电容器 C_s 在电机起动时与电容器 C 并联使用，它和一个起动开关串联后与电容 C 并联起来。这种电动机和电容起动的单相电动机相比较特点是，最大转矩可以增加，功率因数和效率可以提高，起动转矩也比较大，电机噪音较小，所以它是单相电机中最理想的电机。起动时，串联在副绕组回路中的总电容量比较大，可以使电机气隙中产生接近圆形的

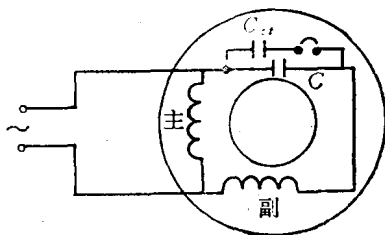


图 1-14

磁场。当电机在运转时转速比同步速稍低，副绕组电抗增大，为了在电机气隙中得到接近圆形的磁场，则必须减小副绕组的电容量，所以当转速上升到一定值时，起动开关动作，将起动电容器切离副绕组回路。起动电容器 C_s 因为是短时工作，所以可采用电解电容器；运转电容器 C 是长期工作，应采用油浸或金属膜纸介电容器。

这种电动机也可以改变转向，办法仍同上所述。

六、单相罩极式异步电动机

单相罩极式异步电动机的结构分为凸极式和隐极式两种，其原理完全相同。凸极式结构

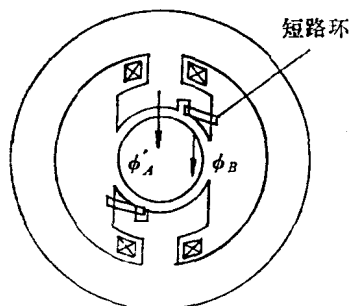


图 1-15

简单，如图 1-15 所示。隐极式是分布绕组，其绕组联接方法将在下一节中叙述。凸极式电机的定子也是由硅钢片迭压而成，每个极上有集中绕组，即为主绕组。极面的一边约 $\frac{1}{3}$ 处开有小槽，小槽中放着短路的铜环，叫短路环。铜环把部分磁极罩了起来，故有罩极电动机之称。罩极电机产生旋转磁场的原理如下：

当把磁极上的集中绕组接上交流电后，将在磁极中产生交变磁通 ϕ_A 。 ϕ_A 可分为下述两部分：当短路环开路时，穿过短路环部分的磁通为 ϕ_A'' ，其余部分为 ϕ_A' ， $\phi_A = \phi_A' + \phi_A''$ ， ϕ_A' 与 ϕ_A'' 同相位。当短路环短路时，短路环中要流过电流产生磁

势，这个磁势与主绕组的磁势合成后产生穿过短路环内的磁通为 ϕ_B 。 ϕ_B 和 ϕ_A 不再同相了。为表示各物理量在时间上的相位。我们画出向量图，如图 1-16。

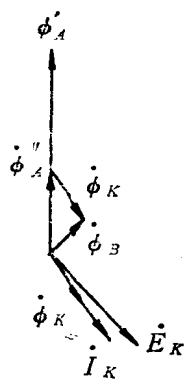


图 1-16

落后 $\phi_B 90^\circ$ 相位，考虑到短路环漏电感的影响， $\dot{I}_K$ 比 $\dot{E}_K$ 要落后一个角度， ϕ_K 由 $\dot{I}_K$ 产生，忽略涡流的影响，它们则同相位。将 ϕ_A'' 与 ϕ_K 合成一个 ϕ_B ，它当然比另一部分磁通 ϕ_A' 要落后一个相位。由于 ϕ_A' 的轴线和 ϕ_B 的轴线在空间有一个位置差， ϕ_A' 、 ϕ_B 在时间上也有一个相位差，所以能在电机空气隙中产生一个椭圆磁场，旋转的方向将由 ϕ_A' 轴线转向 ϕ_B 轴线。于是电机转子上的导条将受感应而产生旋转转矩，转子的转向也是由 ϕ_A' 轴线转向 ϕ_B 轴线。罩极电机由于 ϕ_A' 与 ϕ_B 相差的相位角较小且 ϕ_B 本身又小，因而产生的起动转矩很小（隐极式的也一样），它只能使用在轻载起动即起动转矩小于额定转矩 0.5 倍的情况。但因它的结构简单、制造方便所以常用在小型风扇、电唱机等要求起动转矩小的场合。

罩极电动机中，由于 ϕ_B 总是落后于 ϕ_A' ，磁场的转向总是，由 ϕ_A' 转到 ϕ_B ，所以当主绕组和短路环的位置一定时，电机的转向就一定了。我们即使改变接到电源的两个端点，电机转向也不能改变。

§ 1-2 单相异步电动机的绕组

一、概述

本节主要讨论单相异步电动机定子绕组的构成方式，首先让我们来介绍几个与绕组有关的常用术语。

1. 极距 电机气隙中的磁通形成一定数目的磁极。每个磁极在定子铁心内圆所占有的圆周方向的距离叫极距，它既可以用空间距离来表示。也可以用每极占有的定子槽数来表示。

如果定子铁心内径为 D_{i1} , 定子槽数为 N_1 , 磁极个数为 p , 极距用 τ 表示。则

$$\tau = \frac{\pi D_{i1}}{p} \quad (\text{厘米})$$

或

$$\tau = \frac{N_1}{p} \quad (\text{槽数})$$

2. 线圈节距 线圈的两边在定子圆周上跨过的距离, 一般以两边之间跨过的槽数来表示, 人们习惯把它写成 y_1 。它经常等于或小于极距, 等于极距的线圈, $y_1 = \tau$ 叫做整距线圈, 小于极距的线圈, $y_1 < \tau$ 叫做短距线圈。

3. 空间电角度 从几何角度来看, 定子内圆或转子外圆每一个圆周均占有 360° (叫机械角度)。但是从电机中磁场的分布来看, 一对磁极就是磁通分布沿圆周变化了一个周期, 习惯上把一个周期看成 360° 电角度 (或叫 2π 弧度), 把整个圆周看成 $\frac{p}{2} \times 360^\circ$ 电角度。

如果已知定子内圆上的机械角度为 β , 则可以换算成电角度 α , $\alpha = \frac{p}{2} \beta$ 。

4. 单层绕组及双层绕组 单层绕组是指一个定子槽中只安放一个线圈边, 这样线圈的总数应该等于定子槽数的一半。双层绕组是指一个槽中安放两个线圈边, 分为上、下二层, 中间用绝缘隔开, 这样线圈的总数将等于定子槽数。下面介绍几种常见的定子绕组构成型式。

二、单层同心式绕组

在前面介绍单相异步电动机的基本原理时已经知道, 定子铁心槽中一般放置两相绕组: 主绕组和副绕组, 两个绕组在定子内圆空间要互差 90° 电角度。下面举例说明单层同心式绕组的连接方法。如已知定子槽数 $N_1 = 16$, 极数 $p = 2$, 画出绕组展开图形。

1 计算每个磁极每相占有的槽数 q

先根据极数 p 把定子槽数 N_1 分为 p 份, 得到每个磁极占有的槽数 $\frac{N_1}{p}$, 它将在定子圆周上占有 180° 电角度。再把每极槽数分为均匀的两份, 以备两相绕组放置线圈用, 这就是每极每

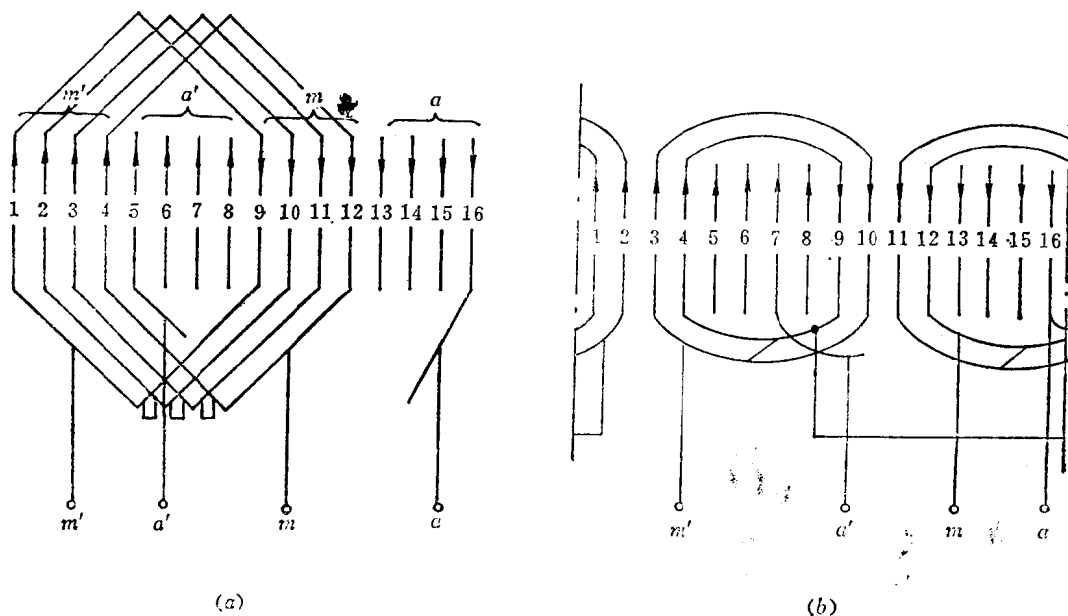


图 1-17(a, b)

相占有的槽数，一般用符号 q 表示。在本例中， $q = \frac{N_1}{pm_1} = \frac{16}{2 \times 2} = 4$ （式中的 m_1 是定子绕组相数）。常把 q 个槽占有的空间范围叫相带，每个相带在空间占有 90° 电角度，相邻两个相带中心线之间也是隔开 90° 电角度。

2. 分相带

将定子内圆展开成一个平面，把每个槽编上号，如图 1-17(a)，将 q 个槽组成一个相带，依次命名为 m' 、 a' 、 m 、 a 相带。由于在不同的极下的槽中导体感应电势的方向正好相反，（可以在图中用箭头表示某瞬时电势的方向。）可以看到，由于 m' 相带和 m 相带中心线在圆周上相隔 180° 电角度，所以在 m' 相带内的导体感应电势是和 m 相带内的导体感应电势方向相反的。

3. 将槽中导体连接成绕组

以 $m'm$ 相绕组为例，将槽中导体先连接成一个个线圈后再组成绕组。由于 m' 相带内的导体电势方向和 m 相带内导体电势的方向相反，所以将它们构成线圈是合适的。办法有两种。一种如图 1-17(a)，将 m' 相带内的 1 槽的导体和 m 相带内的 9 槽的导体联成线圈，同样将 2 和 10、3 和 11、4 和 12 分别联成线圈，把这四个线圈串联起来，引出两个端点 m 和 m' ，这样就组成了一相绕组。另一相绕组 $a'a$ 也可以用同样方法得到。图中仅画出了两个引出线。这种连接方法由于每个线圈的节距正好等于极距，所以叫做整距线圈。另一种方法如图 1-17(b)。为了节省线圈端接部分的连接线，将 4 槽的导体和 9 槽的导体连成小线圈，3 槽的导体和 10 槽的导体连成大线圈串联在一起，同样把 12 和 1 以及 11 和 2 分别组成大小线圈，把这两组大小线圈连接起来组成了绕组，引出两个端点 m' 和 m 。 a 相绕组也用同样方法连接，不过图中只画出了两个引出线端点 a' 和 a 。两图进行比较可以看出显然图 1-17(b) 中线圈的端接连线比 (a) 的要省。由于大小线圈同心，所以这种绕组称做同心式绕组，在实际应用中一般常采用同心式绕组而不采用图 1-17(a) 那样的绕组。同心式绕组从每个单独线圈看起来好象不是整距线圈，但是从一相绕组感应的电势来看，它与图 1-17(a) 中整距线圈组成绕组所感应电势的大小完全一样，它们的差别仅在于线圈端部连接的次序不同罢了。 m 相的一个线圈组与相邻的 a 相线圈组在空间相差 90° 电角度。

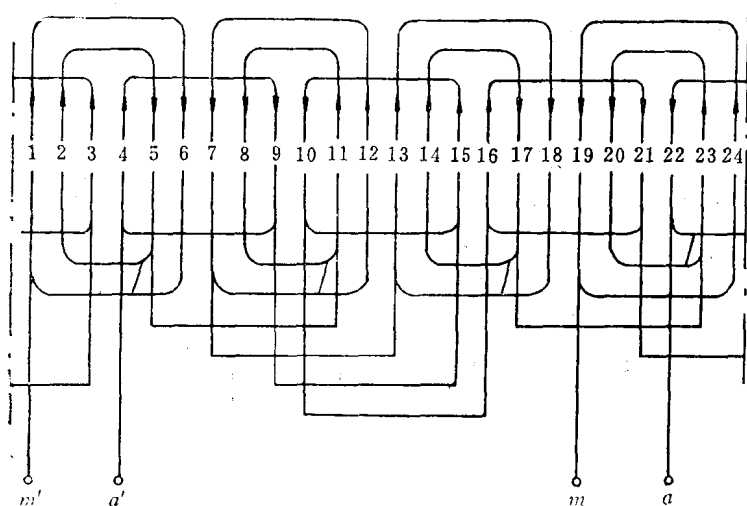


图 1-18

在某些电阻起动和电容起动的单相异步电机内,副绕组可做成占总槽数的 $\frac{1}{3}$,这是因为副绕组只是在起动时使用,主绕组可以占总槽数的 $\frac{2}{3}$ 。举例说明:电机定子槽数 $N_1 = 24$,极数 $p = 4$,计算每极槽数为 $\frac{N_1}{p} = \frac{24}{4} = 6$ 。其中主绕组 m 相占 $\frac{2}{3}$,等于4槽;副绕组 a 相占 $\frac{1}{3}$,等于2槽。绕组展开图画在图1-18中。图中 m 相每极两个同心线圈组成了线圈组, a 相每极只有一个线圈, m 相的一个线圈组与相邻的 a 相线圈在空间上仍然相差 90° 电角度。

三、双层绕组

双层绕组是把定子每个槽分为上、下二层,上层放一个线圈的一个边,下层放另一个线圈的一个边。举例说明:已知定子槽数 $N_1 = 8$,极数 $p = 4$,试画出两相绕组的展开图。先计算每极每相槽数 $q = \frac{N_1}{pm_1} = \frac{8}{4 \times 2} = 1$,计算极距 $\tau = \frac{N_1}{p} = \frac{8}{4} = 2$,取线圈的节距为整距 $y_1 = 2$ 。

画出绕组展开图如图1-19。图中实线代表槽中上层的线圈边,虚线代表槽中下层的线圈边。例如第一个线圈的一个边在1槽上层,因为 $y_1 = 2$,所以另一边在3槽的下层,这样可以连接成一个线圈。同理可连出其它线圈,其中1,3,5,7四个线圈属 m 相,2,4,6,8线圈属 a 相。图中把属于同一相的线圈串联在一起,为了不使各线圈中感应的电势相互抵消,连接时必须将第一线圈的尾部端接线和第三线圈的尾部端接线相连,第三线圈的头部端接线和第五线圈的头部端接线相连,即称做头头相连,尾尾相连。

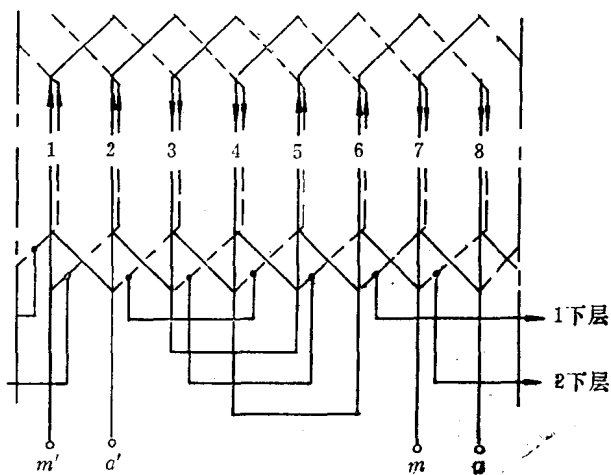


图 1-19

双层绕组由于在槽中分为上下两层,线圈节距的选取比较灵活,既可以是整距,也可以是短距。因为短距线圈常可削弱感应电势中的谐波电势及磁势中的谐波磁势(参见后面章节),因此一般双层绕组经常取短距。图1-20

是一个双层短距绕组的例子,其中定子槽数 $N_1 = 12$, $p = 2$, $\tau = 6$,选取线圈节距 $y_1 = 4$,即采用缩短 $\frac{1}{3}$ 极距的短距绕组。因为 $q = \frac{N_1}{pm_1} = \frac{12}{2 \times 2} = 3$,所以可将

相邻的三个线圈串联成一个线圈组。 m 相有两个线圈组,可以串联也可以并联,视需要而定。若并联则 m 相绕组的支路数 $a = 2$,若串联, $a = 1$ 。图中画出了串联的情况。为清楚起见,图中仅画出了 m 相绕组的连接线, a 相绕组只画出了绕组的两个引出线。

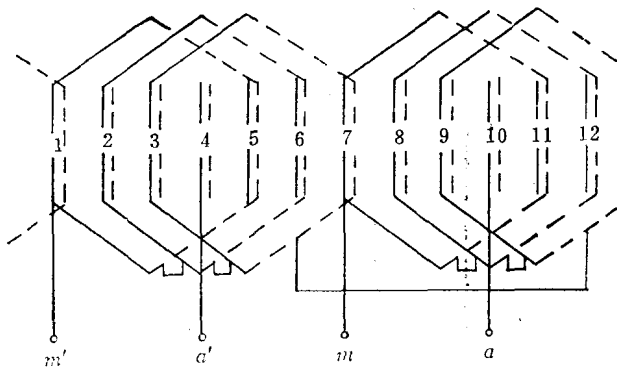


图 1-20

在单相电机中,还经常用到一种正弦绕组,它的原理和绕组构成将在下面分析了磁势以

后再作介绍。

§ 1-3 单相异步电动机的磁势

一、电机内一个整距线圈产生的磁势

如图 1-21 所示电机定子槽内有一个整距线圈 AX ，匝数为 W_y ，通入电流为 i_y ，它将在

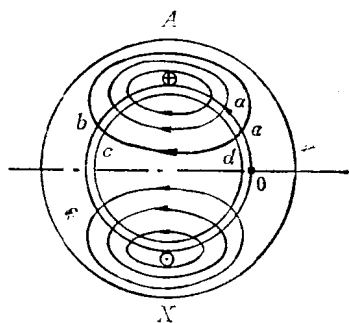


图 1-21

电机内产生一个两极磁场。设某一时间，线圈中电流方向如图中所示，可以画出电机中磁力线的分布。线圈的匝数 W_y 愈多，电流 i_y 愈大，电机内每极磁通量也就愈大。在电机内任取一个磁力线回路来分析，如图中 $abcd$ 回路，这个磁回路是由一段定子磁路 ab ，一段转子磁路 cd ，二段空气隙磁路 bc 和 da 组成。根据磁路的全电流定律，沿任一磁回路，各段磁路的磁位降之和应等于该磁路包围的全部安匝数，可用公式表示为

$$\sum H L = W_y i_y$$

式中： H 为各段磁路的平均磁场强度；

L 为各段磁路的平均长度。

可以看到，在上图中定子内圆周上各处都有磁力线回路，对于任何一个磁力线回路，它们都象 $abcd$ 回路那样，每个回路包围一定的安匝数即磁动势，每个回路都经过两次气隙，一次定子铁心，一次转子铁心。因为铁心的导磁率 μ 比空气隙的导磁率 μ_0 大得多，即 $\mu \gg \mu_0$ ，所以一段空气隙磁路的磁阻 R_{m0} 比一段铁心磁路的磁阻 R_m 要大得多，即 $R_{m0} \gg R_m$ 。为了简化问题，我们可以忽略铁心磁路的磁阻 R_m ，可以认为磁动势 $W_y i_y$ 全部消耗在两个空气隙磁路中，这时每个空气隙磁路消耗的磁势，即磁位降为

$$H_s L_s = \frac{1}{2} W_y i_y$$

式中： H_s 为空气隙磁路的磁场强度；

L_s 为空气隙磁路的长度。

对应于各个磁回路，可以计算出各个空气隙磁路所消耗的磁势，它们有可能相同，有可能不同，视该回路包围的安匝数大小来确定。为了把通过定子内圆圆周上不同点的磁力线回路中所包围的安匝数，即气隙磁路所消耗的磁势形象地表示出来，我们可画出如图 1-22 所示

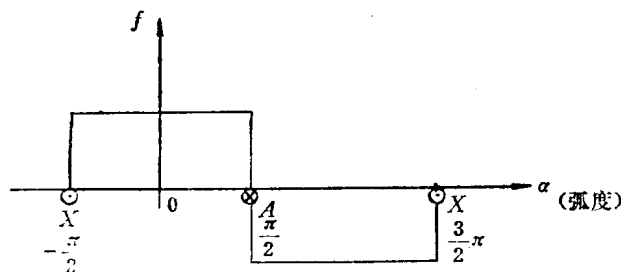


图 1-22

的磁势分布图。我们在定子内圆上先选一个坐标原点 0 (见图 1-21)，经常把它设在线圈 AX 的轴线处，横坐标为 α ，它的正方向也表示在图中，它是指定子圆周上离开原点 0 的距离，可以用空间电角度[弧度]表示。纵坐标为 f ，它是指一个气隙磁路上所消耗的磁势，单位用[安匝/极]，并且规定磁力线出定子

到转子时，磁势为正，反之为负。图 1-22 是将定子内圆展开成一直线后，内圆各处气隙磁路上磁势 f 的分布图。由于在此例中各磁回路包围磁势一样，各气隙磁路磁势一样，所以是

一个矩形波。图中 XO 段和 OA 段的圆周上各处的气隙磁势均为 $+\frac{1}{2}W_y i_y$, AX 段气隙磁势为 $-\frac{1}{2}W_y i_y$ 。严格说来, 这个磁势分布图中各处的磁势不仅是各处空气磁路上消耗的磁势, 也包含了铁磁路上消耗的磁势应为半个磁回路消耗的磁势。

当线圈中通入的电流 i_y 随时间作正弦交变时, $i_y = I_{ym} \cos \omega t$, 则沿内圆圆周气隙磁势的分布仍为一个矩形波。但是 i_y 大小作正弦交变, 磁势 $f = \frac{1}{2}W_y i_y = \frac{1}{2}W_y I_{ym} \cos \omega t$ 亦是正弦交变, 所以矩形波的幅值是随时间交变的, 叫做脉振磁势。

二、矩形波磁势的谐波分析

一个周期性变化的矩形波可以分解为各个不同周期的正弦波, 在数学上可应用富里哀级数来进行计算。由于图 1-22 所示的矩形波磁势的对称性, 分解出来的波只有奇次的, 而且只有余弦函数项, 如图 1-23 所示。其中波长最长的叫一次波。也叫基波。在一次波变化一个周期的空间范围内, 变化三个周期的波就叫三次波。另外还有五次波, 七次波等等, 基波以外的波统称谐波。

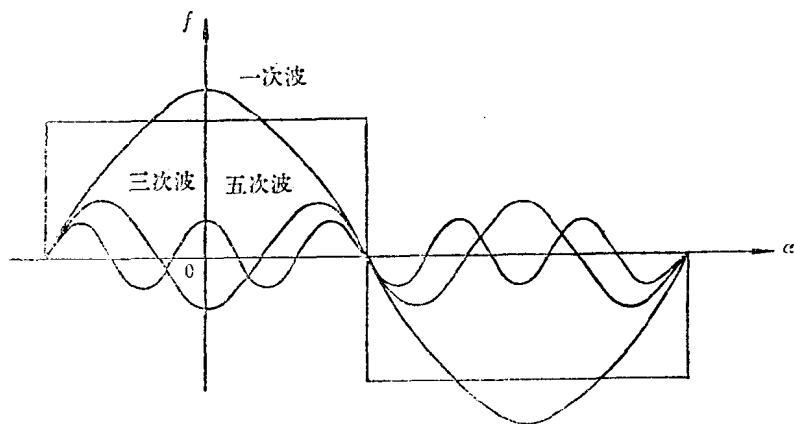


图 1-23

用富里哀级数分析上述磁势沿定子内圆周分布的表示式为

$$f(\alpha) = C_1 \cos \alpha + C_3 \cos 3\alpha + C_5 \cos 5\alpha + \dots C_\nu \cos \nu \alpha$$

其中: α 为定子内圆上某一点离开坐标原点的电角度;

$C_1, C_3, C_5, \dots, C_\nu$ 为一系列常数, 可用下式计算,

$$C_\nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} W_y i_y \cdot \frac{1}{\nu} \sin \nu \frac{\pi}{2} = \frac{2}{\pi} W_y i_y \cdot \frac{1}{\nu} \sin \nu \frac{\pi}{2}$$

可以看到随着谐波次数 ν 的升高, 谐波幅值的大小是减小的。基波幅值为 $\frac{2}{\pi} W_y i_y$, 三次波幅值为 $\frac{2}{3\pi} W_y i_y$, 五次波幅值为 $\frac{2}{5\pi} W_y i_y$ 等等。很高次数的谐波可以忽略不计。

当电流 i_y 正弦交变时, 基波和各次谐波的大小都在交变, 当电流达到最大时, 各次波的幅值均为最大; 电流为零时, 各次波幅值均为零。由此可知各次磁势波也均为脉振波, 磁势亦分别称为基波脉振磁势和谐波脉振磁势。