

民用微电机 原理与设计

陈景华 著

微特电机编辑部

民用微电机原理与设计

陈景华 著

微特电机编辑部

内 容 提 要

本书共分四章,在第二、第三和第四章中,分别介绍了微型永磁直流电动机、单相串励电动机和单相异步电动机的基本原理、工作特性、设计原理和设计特点,列出了这三类电机比较实用的设计程序、设计数据和计算例题。

在阐述基本原理和设计方法时,本书着重强调物理概念和力求实用的特点。

本书可供从事微特电机设计、制造和应用的工程技术人员参考,可作大、专院校电机专业师生的教学参考书,也可供具有一定文化程度的家用电器、电动工具和音响视听等电气设备爱好者参考。

前 言

微型永磁直流电动机、单相串励电动机和单相异步电动机是家用电器、电动工具、小型机床、医疗器械和音响视听等电气设备中的驱动元件。其产销量占国内外小功率驱动电机的绝大部份。近几年来,国内生产厂家激增,仅江、浙、粤三省就有几百家。因此编写一本阐述这三类电机原理和设计的书籍是很急需的。

本书共分四章,对微型永磁直流电动机、单相串励电动机和单相异步电动机的基本原理、工作特性、设计原理和设计特点作了比较系统的阐述,列出了这三类电机比较实用的设计程序、设计数据和计算例题。

本书是在《微特电机实用设计技术》讲义的基础上编写而成的,该讲义曾在1989年度机械电子工业部微特电机专业情报网举办的“微特电机设计和制造实用技术学习班”上使用过。现经作者根据教学中学员的接受能力和实用的要求,重新增删了部分内容,并得到陈忠高级工程师的支持和帮助,由《微特电机》杂志编辑部整理出版,经编辑部副主编陆大栋、编辑洪晓星两同志审校编辑。由于受编者水平和使用范围所限,难免挂一漏万,敬请读者批评指正。

编 者

星

目 次

第一章 绪 论	(1)
第一节 电机的基本定律和原理	(1)
§ 1-1 法拉第电磁感应定律	(1)
§ 1-2 安培全电流定律	(4)
§ 1-3 基尔霍夫定律	(11)
§ 1-4 毕——萨电磁力定律	(14)
§ 1-5 能量守恒原理	(15)
第二节 电机设计的基本内容和要求	(16)
§ 2-1 电机设计的任务和给定设计数据	(16)
§ 2-2 电机设计的过程和内容简介	(16)
§ 2-3 国家标准	(17)
第二章 永磁直流电动机	(18)
第一节 基本原理和特性	(18)
§ 1-1 概述	(18)
§ 1-2 电枢绕组	(21)
§ 1-3 基本原理	(25)
§ 1-4 稳定运行特性	(27)
§ 1-5 电枢反应	(29)
第二节 磁钢及其磁路	(31)
§ 2-1 磁钢特性	(31)
§ 2-2 磁钢磁路及磁铁工作图	(35)
§ 2-3 永磁直流电动机常用磁钢的特点及结构类型	(39)
§ 2-4 电枢反应对磁钢工作的影响	(44)
§ 2-5 磁钢的充磁	(48)
§ 2-6 磁钢的稳磁	(51)
第三节 换向	(53)
§ 3-1 换向的电磁原理	(54)
§ 3-2 火花及其产生原因	(57)
第四节 少槽永磁直流电动机的特点	(58)
第五节 永磁直流电动机设计	(60)
§ 5-1 主要尺寸确定	(61)
§ 5-2 定子主要尺寸	(66)
§ 5-3 电枢冲片尺寸	(69)
§ 5-4 磁路计算	(71)
§ 5-5 电枢绕组计算	(76)
§ 5-6 换向计算	(77)
§ 5-7 电枢反应去磁磁势和磁铁工作图	(80)

§ 5-8 损耗和效率	(84)
§ 5-9 工作特性计算	(87)
§ 5-10 温升	(88)
第六节 设计程序及计算例题	(89)
第三章 交流换向器电动机	(106)
第一节 概述	(106)
第二节 基本工作原理和特性	(107)
§ 2-1 直流供电的交直流两用电 动机	(107)
§ 2-2 单相串励电 动机	(110)
§ 2-3 交直流两用 电动机	(117)
第三节 电枢绕组和换向	(119)
3-1 换向元件电 势	(120)
3-2 电枢 绕组	(124)
3-3 换 向	(127)
3-4 干扰及其 抑制	(133)
第四节 单相串励电动机设计	(134)
§ 4-1 主要尺寸确定	(134)
§ 4-2 定子和转子冲片尺 寸	(140)
§ 4-3 磁路计算	(143)
§ 4-4 电枢绕组 计算	(146)
§ 4-5 电刷换向器尺寸和换向检 查	(148)
§ 4-6 激磁绕组 计算	(150)
§ 4-7 损耗、效率和功率 因数	(153)
第五节 设计程序和计算例题	(156)
第四章 单相异步电动机	(175)
第一节 概述	(175)
第二节 绕组和磁势	(179)
§ 2-1 绕组 特点	(179)
§ 2-2 磁 势	(181)
§ 2-3 正弦绕组及其磁势	(188)
第三节 两相对称异步电动机	(196)
§ 3-1 基本方程式	(197)
§ 3-2 等值电路图和相量图	(199)
§ 3-3 功率、损耗、转矩和机 械特性	(203)
第四节 单相电容运转异步电动机	(207)
§ 4-1 对称分量法	(208)
§ 4-2 正序等值电路和反序等值 电路	(210)
§ 4-3 运行性能 分析	(212)
§ 4-4 获得圆形旋转磁势的条 件	(216)
§ 4-5 起动性能 分析	(218)
第五节 单相电阻起动和电容起动异步电动机	(220)
§ 5-1 运行状态 分析	(221)

§ 5-2 单相电阻起动异步电动机的起动性能	(225)
§ 5-3 单相电容起动异步电动机的起动性能	(227)
第六节 单相异步电动机设计	(228)
§ 6-1 基本关系式及主要尺寸	(229)
§ 6-2 定子和转子冲片	(233)
§ 6-3 主相绕组	(236)
§ 6-4 转子鼠笼绕组	(242)
§ 6-5 磁路计算	(245)
§ 6-6 副相绕组	(248)
第七节 单相电容运转异步电动机的设计程序和计算例题	(250)
第八节 单相电阻起动和电容起动异步电动机设计程序	(272)
附录	(276)
附表 1 铜电磁线规格表	(276)
附表 2 D_{21} 0.5 毫米 50 赫磁化曲线	(277)
附表 3 D_{23} 0.5 毫米 50 赫磁化曲线	(277)
附表 4 D_{24} 0.5 毫米 50 赫磁化曲线	(278)
附表 5 D_{21} 0.5 毫米 50 赫损耗曲线	(278)
附表 6 D_{23} 、 D_{24} 0.5 毫米 50 赫损耗曲线	(279)
附表 7 单相异步电动机机座号对应的定子冲片外径	(279)
附表 8 单相异步电动机铁心主要尺寸	(279)
附表 9 JZ 系列单相电阻起动异步电动机技术数据	(280)
附表 10 JY 系列单相电容起动异步电动机技术数据	(281)
附表 11 JX 系列单相电容运转异步电动机技术数据	(282)
附表 12 BO 系列单相电阻起动异步电动机技术数据	(283)
附表 13 CO 系列单相电容起动异步电动机技术数据	(284)
附表 14 DO 系列单相电容运转异步电动机技术数据	(285)
附表 15 新系列微型单相异步电动机电磁设计主要数据汇总表	(286)
附表 16 DT 系列电动工具用串励电动机技术数据 (1986 年设计)	(288)
附表 17 电动工具用交直流两用串励电动机技术数据 (1974 年设计)	(289)
附表 18 G 型单相串励电动机技术数据	(290)
附表 19 SU 型交直流两用串励电动机技术数据	(290)
附表 20 G 系列单相串励电动机主要性能	(291)
附表 21 G 系列单相串励电动机技术数据	(292)
附表 22 M 系列微型永磁直流电动机技术数据	(293)
参考文献	(295)

第一章 绪 论

第一节 电机的基本定律和原理

永磁直流电动机、单相异步电动机和单相串励电动机等，都是将电能转换成机械能的电气机械，是家用电器、电动工具、小型机床和医疗器械的关键部件。其主要零件为定子、转子、机壳和端盖等。电能从电网输入电动机后，通过电动机内部的电磁作用，转变为机械能，带动机械负载旋转做功。作用在转轴和负载上的转矩，是由转子线圈中的电流和气隙中的磁场相互作用产生的，而磁场是由定子产生的。在电能转换为机械能的过程中，电机内部必伴随感应电势的产生和作用。因此，感应电势、电流、磁场、电磁力（电磁转矩）等是机电能量转换过程中必然发生在电动机内部的重要物理现象。它们分别建立在下述几条基本定律和原理基础上的。

1. 法拉第电磁感应定律。该定律阐述了感应电势是怎样产生的。
2. 安培全电流定律（亦称安培环路定律）。它阐述了磁场是怎样产生的。
3. 毕——萨电磁力定律。它阐述了电磁力和电磁转矩是怎样产生的。
4. 基尔霍夫定律。它阐述了电路参数间应遵循的规律。
5. 能量守恒原理。它阐述了能量转换过程中应遵循的原则。

§ 1-1 法拉第电磁感应定律

1. 变化磁通产生的感应电势。

法拉第电磁感应定律认为，当通过一个闭合电路中的磁通量 ϕ 随时间 t 发生变化时，电路内就产生感应电势 e ，它等于通过该电路的磁通随时间变化率的负值，即

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1-1)$$

规定电势 e 与磁通 ϕ 的正方向符合右手螺旋规则，如图1-1所示。负号表示感应电势在电路中产生的感应电流所产生的磁通，力图反对引起该电流的磁通 ϕ 的变化。在实用制单位中，这几个物理量的单位分别为：

ϕ ——韦伯（Wb），1韦伯 = 10^8 麦克斯韦（Mx）

e ——伏（V）

t ——秒（S）

在电机学中 $e = - \frac{d\phi}{dt}$ 亦称变压器电势。

图1-2为单相串励电动机原理图。当在定子激磁绕组两端加上单相交流电压 u 后，在激磁绕组内就产生交流电流 i ，同时产生交变磁通 ϕ 通过激磁线圈 W 。根据法拉第电磁感应定律，该交变磁通将在线圈 W 内感应出变压器电势。

设线圈的匝数为 W ，通过该线圈的磁通随时间作余弦变化：

$$\phi = \phi_m \cos \omega t = \phi_m \cos 2\pi f t$$

则在线圈中感应的电势为：

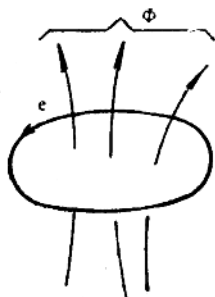


图1-1

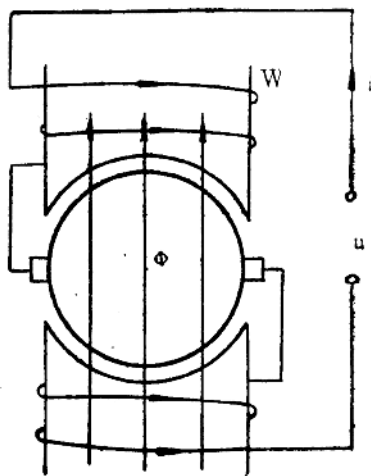


图1-2

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d}{dt} (\phi_m \cos \omega t)$$

$$= W \omega \phi_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t = \sqrt{2} E \sin \omega t$$

式中 ψ ——线圈的磁链

$$\psi = W \phi$$

E_m ——电势幅值

$$E_m = W \omega \phi_m$$

E ——电势有效值

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

由上式可见，当通过线圈内的磁通随时间作余弦变化时，线圈内感应电势随时间正弦变化，且滞后磁通 90° 相角。

线圈感应电势有效值为：

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{W \omega \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{W 2\pi f \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f W \phi_m$$

用相量表示为：

$$\dot{E} = -j 4.44 f W \dot{\phi}_m \quad (1-2)$$

图1-3为其相量图。

2. 导体在磁场内运动感应的电势

在一均匀磁场中，导体作切割磁力线运动时，若磁场、导体长度和导体运动方向三者相互垂直，则由法拉第定律可导出导体内的感应电势为：

$$e = B l v \quad (\text{伏}) \quad (1-3)$$

式中 B ——磁场的磁感应强度，特斯拉

$$1 \text{ 特斯拉} = 1 \text{ 韦/米}^2 = 10^4 \text{ 高斯}$$

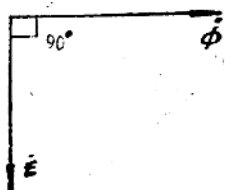


图1-3

l —— 导体在磁场范围内的长度，米
 v —— 导体在磁场中的运动速度，米/秒
 该电势的方向用右手法则确定，如图1-4所示。

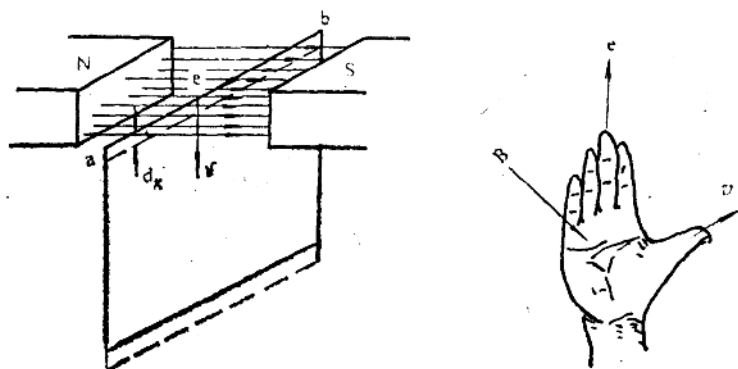


图1-4

在电机学中， $e = Blv$ 亦称运动电势、切割电势或旋转电势。设图 1-5 中电机转子上装有一个线圈 ax ，其匝数为 W ；气隙中的磁场沿转子表面正弦分布，即

$$B(\alpha) = B_m \sin \alpha$$

式中 α —— 线圈平面与水平面的夹角

若转子转速用角速度 ω (弧度/秒) 表示，则 $\alpha = \omega t$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

τ —— 极距，即一个极在转子表面所占的距离

D —— 转子直径

p —— 电机极对数

图1-5所示电机为一对极，即 $p = 1$ 。

当导体转动时，在不同瞬间将切割不同大小的气隙磁密 B ，感应出不同大小的电势。当

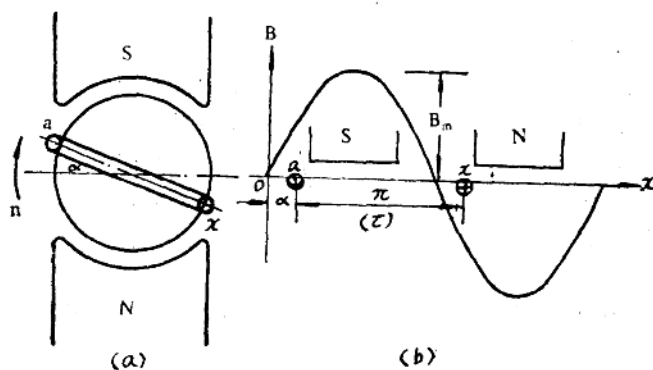


图1-5

导体切割 N 极磁场时,根据右手法则,电势方向进入纸面,用 $\otimes$ 表示;当导体切割 S 极磁场时,电势方向出纸面,用 $\odot$ 表示。当导体连续不断切割交替排列的 N 极和 S 极磁场时,导体内感应电势为交流电势,如图1-6所示。对图1-5所示的一对极电机,转子旋转一周,导体内电势交变一次。若转子每分钟转数为 n ,则电势频率为

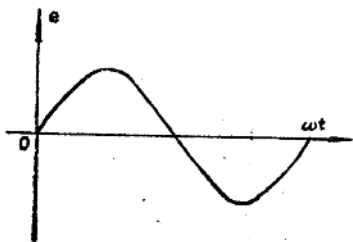


图1-6

$$f = \frac{n}{60} \text{ (赫)}$$

若电机为 p 对极,则转子每旋转一周,导体中的感应电势就交变 p 次,则电势频率为

$$f = \frac{pn}{60} \text{ (赫)}$$

于是

$$v = 2p\tau \frac{n}{60} = 2\pi f$$

一个极下的磁通 ϕ 等于平均磁密乘以每极下的面积,即

$$\phi = \frac{2}{\pi} B_m \tau l$$

一个导体内的感应电势为

$$\begin{aligned} e_1 &= Blv = B_m \sin \omega t \cdot l \cdot 2\pi f = \pi \phi f \sin \omega t \\ &= E_{1m} \sin \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t \end{aligned}$$

有效值

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} f \phi = 2.22 f \phi$$

一匝线圈的电势有效值

$$E = 2E_1 = 4.44 f \phi$$

匝数为 H 的整个线圈的感应电势有效值

$$E = 4.44 f H \phi$$

用相量表示

$$\dot{E} = -j 4.44 f H \dot{\phi} \quad (1-4)$$

在研究交流电机时,这是常用的公式。

§ 1-2 安培全电流定律

电动机是将电能转换成机械能的器械。这种能量的转换是利用电磁感应原理在磁场中进行的。磁场在能量转换中起媒介作用,它在一定条件下从电源吸取能量,在一定条件下向机械系统释放能量。因此,形成相当集中的磁场,并储有所需的磁场能量,是电机必备的条件。这就要求有磁源(即激磁系统)产生激磁磁势,有良好的导磁导体,把磁场集中起来,形成闭合的磁路。电机内的磁路由磁源、铁心(导磁体)和气隙等组成。气隙很小,但磁场能量却主要集中在气隙内。

安培全电流定律阐明了磁场是由电流产生的。本小节的其余内容则阐述了与磁场有关的定律和现象。

1. 安培全电流定律

磁场强度向量 $\vec{H}$ 沿某封闭回线 L 的闭合线积分 $\oint_L \vec{H} d\vec{l}$,等于贯穿该封闭回线所围成的面

的电流之代数和 $\sum i = i_1 + i_2 + \dots$,

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i$$

(1-5)

这一规律称为安培全电流定律, 由此可知磁场是由电流产生的。

式中 l —— 封闭回线 L 的长度

在式 (1-5) 中, 若电流与回线 L 所选方向之间符合右螺旋法则就取正, 反之则取负, 如图1-7所示。

磁场强度 $\vec{H}$ 与磁感应强度 $\vec{B}$ 的关系为:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

式中 μ —— 介质的导磁系数

若 B 单位为特斯拉, H 单位为安/米, 则 μ 单位为亨/米。

真空、空气和一般非磁性物质(如铜、铝、橡皮等)的导磁系数 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米, 在电机设计中, B 单位常用高斯、 H 单位安/厘米, 则 $\mu_0 = 1.25$ 高斯·厘米/安。铁磁物质的导磁系数比 μ_0 大得多, 为 μ_0 的几千倍。称此倍数为相对导磁系数 μ_r , 即

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

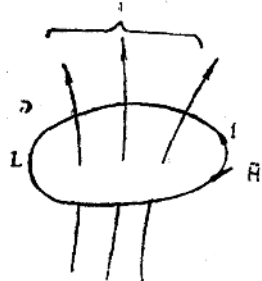


图1-7

2. 磁路诸定律

磁路概念的建立, 基于铁磁物质的导磁系数大大超过非磁性物质的导磁系数, 使磁通集中在铁磁物质中流通。与电路相比, 有三点不同之处:

① 磁通的连续性, 使磁通能穿过气隙, 经转子和定子铁心而闭合。

② 磁路中的漏磁现象比电路中的漏电现象大为显著, 往往不能忽略。导电体的电阻率与绝缘体的电阻率相差约 10^{18} 倍以上, 所以在空间泄漏的电流极微小, 可略去。但在磁路中一般导磁体的导磁率只有空气的 $10^2 \sim 10^3$ 倍, 最多 10^6 倍, 当导磁体饱和后, 导磁率大大下降与空气接近, 所以在空间泄漏的磁通很可观。

③ 铁磁物质的磁路是非线性的。

(1) 磁路的基尔霍夫定律

图1-8为带激磁线圈的铁心原理图。设激磁线圈中通有电流 I , 线圈匝数为 W 。按右螺旋法则确定的磁通方向如图中箭头所示。A和A'点为磁路结点。

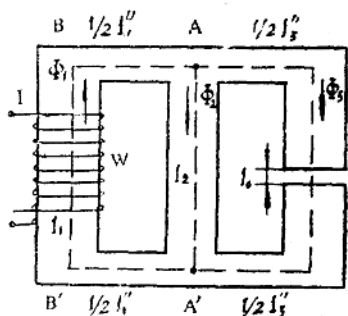


图1-8

磁路基尔霍夫第一定律认为, 磁路结点所联结着的各个磁路支路中的磁通代数恒为零, 即

$$\sum \phi = 0$$

对应图1-8, 设进入结点A的磁通为正, 离开结点A的磁通为负, 则

$$\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 = 0$$

磁路基尔霍夫第二定律认为, 磁路中沿任意闭合回路磁压降的代数和等于沿该回路磁势的代数和, 即

$$\sum Hl = \sum IW$$

(1-6)

式中 IW —— 磁势, 是磁路中产生磁通的根源, 安匝

$$IW = F$$

HI ——磁路中各支路上的磁压降

对应图1-8中闭合回路 $BAA'B'B$, 则有

$$H_1 l_1' + H_1'' l_1'' + H_2 l_2 = IW$$

磁路基尔霍夫第一、第二定律是建立在磁通连续性和安培全电流定律基础之上的, 是电机设计中常用的公式。

(2) 磁路欧姆定律

对于一段均匀磁路, 有

$$\phi = BS = \mu HS = \mu \cdot \frac{IW}{l} \cdot S = \mu \frac{S}{l} F = \frac{F}{R_m}$$

式中 R_m ——磁路的磁阻, 安匝/韦

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$$\lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l}$$

λ ——磁路的磁导, 韦/安匝

它们取决于该段磁路的长度、截面积和材料。

$$\phi = \frac{F}{R_m} = \frac{IW}{R_m} \quad (1-7)$$

称为磁路的欧姆定律。它表明磁路中的磁通等于作用在磁路上的磁势除以磁路的磁阻, 这是电机计算中常用的定律。由于磁阻的非线性, 常用图解法计算。

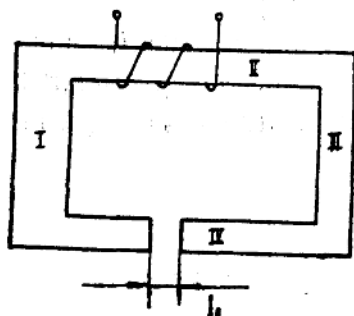


图1-9

例: 图1-9为绕有线圈的铁心, 已知 $W = 2000$ 匝, $l_1 = l_3 = 15$ 厘米, $l_0 = 0.5$ 厘米, $l_4 = 19.5$ 厘米, $l_2 = 20$ 厘米, $s_1 = 30$ 厘米², $s_2 = 15$ 厘米², $s_3 = 10$ 厘米², $s_4 = 20$ 厘米², $s_0 = 20$ 厘米², $\phi = 180000$ 麦, 求: 线圈中电流 I 应为多大。

解:

由磁路基尔霍夫第二定律得

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_0 l_0 = IW$$

$$B_1 = \frac{\phi}{S_1} = \frac{180000}{30} = 6000 \text{ (高斯)}$$

$$B_2 = \frac{\phi}{S_2} = \frac{180000}{15} = 12000 \text{ (高斯)}$$

$$B_3 = \frac{\phi}{S_3} = \frac{180000}{10} = 18000 \text{ (高斯)}$$

$$B_4 = B_0 = \frac{\phi}{S_4} = \frac{180000}{20} = 9000 \text{ (高斯)}$$

由铁心磁化曲线, 查得对应的磁场强度为

$H_1 = 1.11$ (安/厘米), $H_2 = 5.40$ (安/厘米), $H_3 = 30$ (安/厘米), $H_4 = 2.35$ (安/厘米)

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{1.25} = 0.8 B_0$$

$$= 0.8 \times 9000 = 7200 \text{ (安/厘米)}$$

$$\begin{aligned} \text{于是 } H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_0 l_0 \\ = 16.65 + 108 + 450 + 45.83 + 3600 \approx 4220 \text{ (安匝)} \end{aligned}$$

$$I = \frac{\Sigma HI}{W} = \frac{4220}{2000} = 2.11 \text{ (安)}$$

由本例的计算可知, 空气隙中的磁压降占了磁势的绝大部分(85%), 铁心饱和的磁路段磁压降也占用了较大磁势部分(13%), 铁心不饱和的磁路段磁压降只占用 1% 的磁势。磁场能量大部分集中在气隙中。

3. 磁路饱和对交变磁通与电流波形的影响。

当磁路不饱和时, 铁磁物质磁场中任何一点的磁感应强度与产生此磁场的电流可以看成是线性关系, 对交流磁通与电流的波形没有影响。当磁路饱和时, 上述磁感应强度与电流之间呈非线性关系。饱和程度愈高非线性程度愈严重, 电流的波形与磁通的波形畸变愈大。

图 1-10 画出了忽略铁磁物质中磁滞和涡流现象的 $\phi = f(i)$ 曲线。设磁路中需建立一个正弦磁通

$$\phi = \phi_m \sin \omega t$$

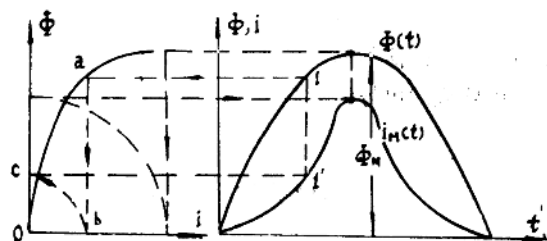


图1-10

通过逐点作图, 求出电流曲线 $i = f(t)$ 。可见, 当磁通的波形为正弦波时, 由于磁路饱和的影响, 使电流波形畸变为尖顶波。

如果磁化电流的波形为正弦波, 采用同样的作图方法, 可得到平顶的磁通波形, 如图 1-11 所示。

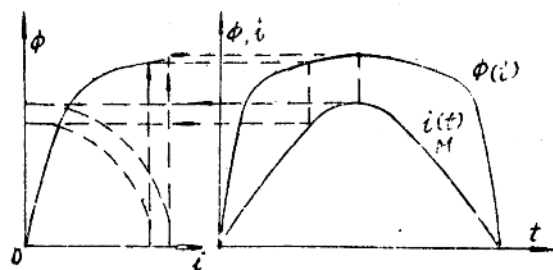


图1-11

无论是电流的尖顶波还是磁通的平顶波, 都含有时间高次谐波, 对电机性能产生影响。

4. 铁磁物质中的交变磁化功率

在磁路中维持一个恒定磁通是不需要功率的。但当磁路中的磁通交变时，因磁路实质上是磁场集中的处所，磁路中磁通的交变也就是磁场的变化。伴随磁场能量的增减，会吸收或放出一定的功率。这种吸收或放出的功率是通过与该磁路相耦合的电路传送的。由于磁通的变化在这些耦合线圈中感应电势，因此这些感应电势便是电路中电能与磁能转换的标志。磁路的功率可通过这些感应电势来探求。

(1) 忽略磁滞与涡流效应

图1-12(a)为一铁心线圈，感应电势 e 、激磁电流 i 和磁通 ϕ 的正方向如图中箭头所示。

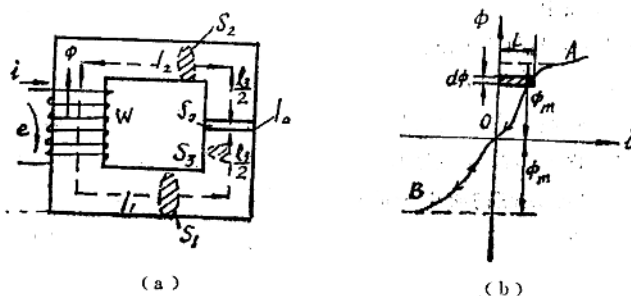


图1-12

图1-12(b)画出了忽略铁心磁滞与涡流条件下，磁通 ϕ 与激磁电流 i 的关系曲线 $\phi = f(i)$ 。交变磁通 ϕ 在线圈中感应的电势为

$$e = -W \frac{d\phi}{dt}$$

磁路转换到电路中的功率为 ei ，或者磁路所需的功率为

$$p = -ci = Wi \frac{d\phi}{dt}$$

在周期交变磁化下，磁路所需平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{W}{T} \oint i d\phi = 0$$

式中 T ——磁通交变周期，或称磁化周期

$i d\phi$ ——为图1-12(b)中影线所示面积

当磁路中磁通周期交变时，工作点在曲线A、B两点间往复移动。由于曲线上下对称，闭合积分 $\oint i d\phi$ 为零。因此，不论磁通波形如何，当忽略磁滞与涡流时，交变磁通磁路所需瞬时功率虽不为零，但所需平均功率为零。

(2) 磁滞损耗

铁磁物质在交变磁化下由于内部的不可逆过程而造成的损失，称为磁滞损失。磁滞损失的能量转换成热能而使铁磁物质发热。

$$P = \frac{W}{T} \oint i d\phi$$

将 $i = \frac{Hl}{W}$ ， $\phi = BS$ 代入，得

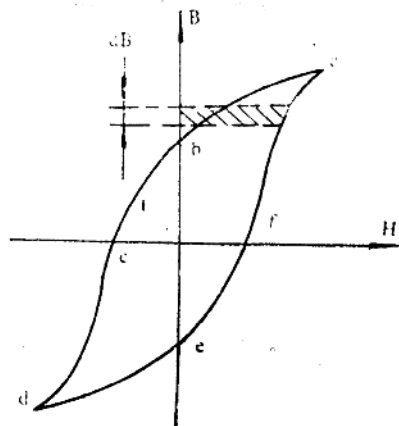


图1-13

$$P = \frac{V}{T} \oint H dB$$

式中 V ——铁磁物质体积

$$V = l s$$

$$\oint H dB = \int_a^b H dB + \int_b^c H dB + \int_c^d H dB + \int_d^a H dB$$

正比于磁滞回线面积，如图1-13所示。

磁滞铁心损耗可采用下述经验公式：

$$p_h = \frac{V}{T} \oint H dB \approx \sigma_h f B_m^n V$$

式中 σ_h ——与材料性质有关的系数，可由实验确定或从手册中查到

n ——当 $B_m < 10000$ 高斯时取1.6，当 $B_m > 10000$ 高斯时取2

f ——磁化频率

(3) 涡流损失

当变化的磁通穿过导电物质时，一方面在外部导电回路中产生感应电流，另一方面在磁通所穿过的导电物质内部也会产生感应电流。后一种感应电流称为涡流。铁磁物质都是导电的，当通过交变磁通时，其内部总有涡流存在，如图1-14所示。由于涡流的存在造成了铁心内部的功率损失，这种损失称为涡流损失，它使铁心发热，温度上升。为了减小涡流损失，交变磁路都用铁片迭成，且片间一般涂有绝缘层，以减小涡流损耗，如图1-15所示。

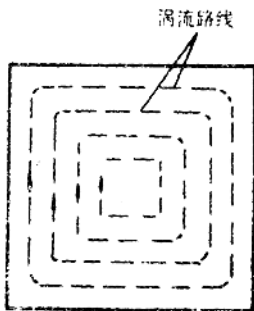


图1-14

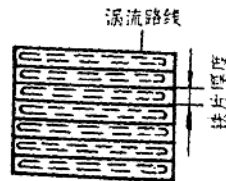


图1-15

涡流损耗一般采用下述经验公式

$$p_e = \sigma_e f^2 B_m^2 V$$

式中 σ_e ——与铁心导电系数及铁片厚度有关的系数

f ——磁化频率

V ——铁心体积

铁心损耗为磁滞损耗和涡流损耗之和：

$$p_{Fe} = p_h + p_e = (\sigma_h f B_m^n + \sigma_e f^2 B_m^2) V$$

p_h 和 p_e 都随铁心内磁通密度 B_m 的增大而显著上升，在设计电机时不可选取过大的 B_m ，一般 B_m 取值为10000~18000高斯。

5. 电机磁势的几种类型

(1) 恒定磁势

直流电机的激磁磁势是恒定磁势。电磁式直流电机中由磁极和通有直流电流的磁极线圈产生恒定磁势；永磁直流电机中由永久磁钢产生恒定磁势。这种磁势的幅值不随时间而变，在电机内沿气隙圆周，这种磁势的空间分布也是固定不变的。

(2) 脉振磁势

单相串励电动机和单相异步电动机一相激磁时的激磁磁势为脉振磁势。在图 1-16 中的线圈内通以电流 $i = I_m \cos \omega t$ 所产生的磁势，其幅值大小不断从正最大值到负最大值随时间作余弦的变化、在空间沿气隙圆周的分布规律固定不变，为矩形分布磁势。这种磁势称为脉振磁势，如图 1-16(b) 所示。在实际电机中，一般为接近正弦分布的磁势。脉振磁场在和它相联结的线圈中产生变压器电势。

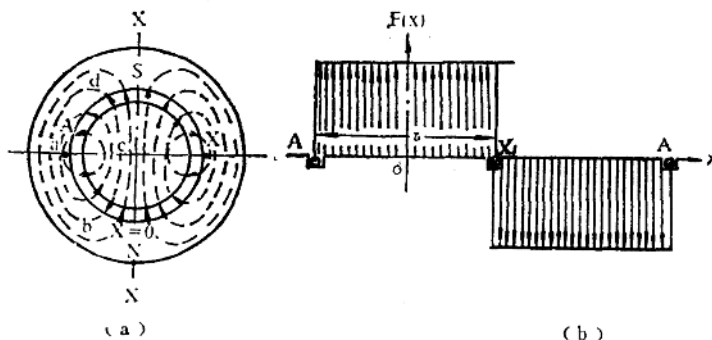


图 1-16

设脉振磁势的空间分布为余弦波形，幅值大小随时间作余弦变化，则其表达式为

$$f = F_m \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t$$

(3) 旋转磁势

单相异步电动机定子上有主相绕组和副相绕组，当通入两相电流后，分别产生两相脉振磁势。设两相绕组有效匝数相等，在空间互成 90° 电角；两相电流大小相等，相位差为 90° 。则两相电流为：

$$\begin{aligned} i_1 &= \sqrt{2} I \cos \omega t \\ i_2 &= \sqrt{2} I \cos (\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

两相脉振磁势为：

$$\begin{aligned} f_1(x, t) &= F \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t \\ f_2(x, t) &= F \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - 90^\circ \right) \cos (\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

由它们合成的磁势为：

$$\begin{aligned} f(x, t) &= f_1(x, t) + f_2(x, t) \\ &= F \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t + F \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - 90^\circ \right) \cos (\omega t - 90^\circ) \\ &= F \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) \end{aligned}$$

图 1-17 画出了不同 ωt 值时，该合成磁势的波形。由图可见，随着 ωt 的增加，合成磁势波