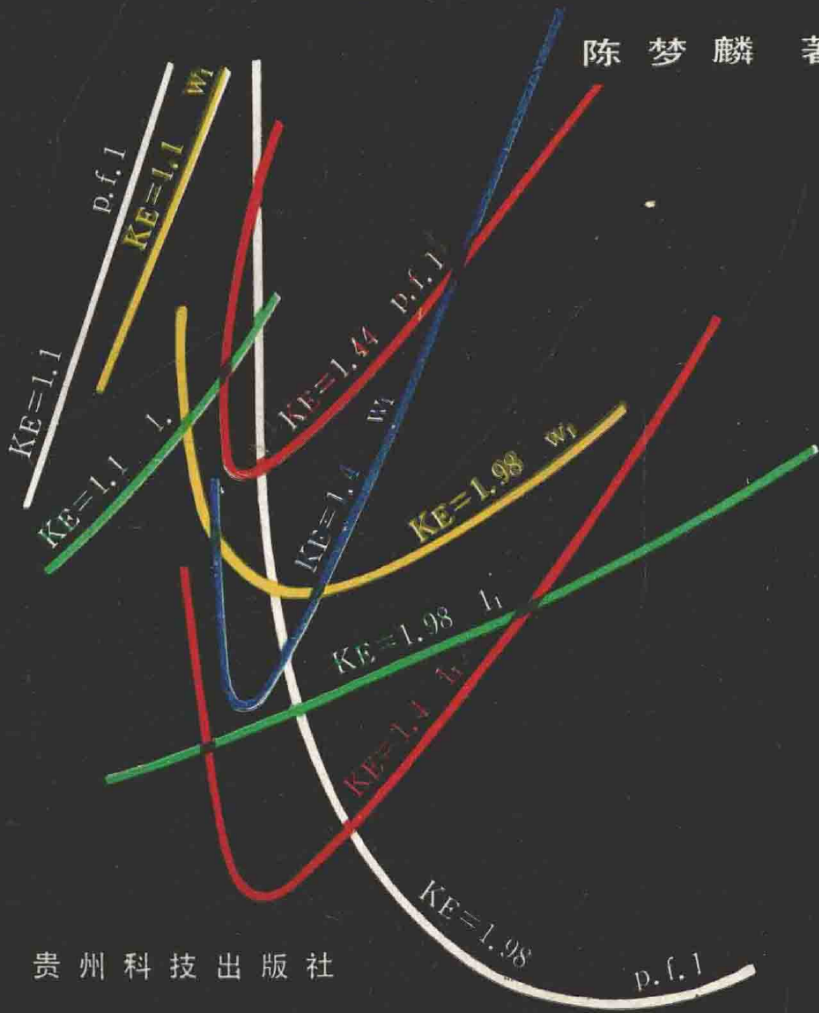


# 交流无级变速电动机的理论与行为

陈梦麟 著



贵州科技出版社

# 交流无级变速电动机 的理论行为

陈梦麟 著

贵州科技出版社

本书受贵州省1991年度出版基金资助

**黔新登(90)03号**

**交流无级变速电动机的理论与行为**

陈梦麟 著

---

贵州科技出版社出版发行

(贵阳市中华北路289号 邮政编码550001)

贵州省图书馆印刷厂印刷 贵州省新华书店经销

787×1092毫米 32开本 7印张 150千字

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数1——1000

---

ISBN 7-80584-280-9/TM·C02 定价：4.5元

# 目 录

<b>第一章 电机概述</b> .....	(1)
§1-1 电机结构.....	(1)
§1-2 磁通变化规律.....	(2)
§1-3 互感关系.....	(10)
§1-4 磁阻与磁势.....	(18)
§1-5 感应系数.....	(32)
§1-6 转速方程.....	(39)
§1-7 电机推论.....	(42)
附录1 $\theta = 0^\circ$ 时共励的磁阻与磁势 .....	(46)
附录2 $\theta = 90^\circ$ 时共励的磁阻与磁势 .....	(49)
附录3 $\theta = 45^\circ$ 时共励的磁阻与磁势 .....	(51)
附录4 分支磁通.....	(53)
附录5 磁阻.....	(56)
附录6 互感系数与电流方向、绕线 方向的关系.....	(57)
<b>第二章 电机的方程</b> .....	(60)
§2-1 第一绕组电路.....	(62)
§2-2 第二绕组电路.....	(66)
§2-3 按第二绕组情况进一步分析 第一绕组电路.....	(139)
§2-4 旋转力矩.....	(179)

§ 2-5	转子	(188)
<b>第三章</b>	<b>电机的电流、功率、效率</b>	<b>(194)</b>
§ 3-1	电机的平均转矩	(196)
§ 3-2	旋转力矩变化曲线的计算	(198)
§ 3-3	参数 $R$ 、 $X$ 、 $P$ 、 $Q$ 的计算	(206)
(§ 3-4)	电机的出力	(213)
<b>第四章</b>	<b>电机的特征</b>	<b>(213)</b>
(2)	.....	.....
(01)	.....	.....
(18)	.....	.....
(28)	.....	.....
(29)	.....	.....
(31)	.....	.....
(34)	.....	.....
(34)	.....	.....
(31)	.....	.....
(32)	.....	.....
(32)	.....	.....
(76)	.....	.....
(80)	.....	.....
(82)	.....	.....
(88)	.....	.....
(821)	.....	.....
(874)	.....	.....

# 第一章 电机概述

## § 1-1 电机结构

交流无级变速电机的“未变换坐标轴系统”包括静止正交定子坐标轴系统 ( $\bar{\alpha}_s$  和  $\bar{\beta}_s$ ) 和随转子旋转的正交转子坐标轴系统 ( $\bar{d}$  和  $\bar{q}$ )，如图 1-1 所示。定子的压装圆周上具有四个按电机的纵、横轴线布置的凸极。纵轴 ( $\bar{\alpha}_s$ ) 的两个磁极①、③组成一磁极对，磁极线圈之间可以串联或并联，称第一绕组，工作时接交流电源。横轴 ( $\bar{\beta}_s$ ) 的两个磁极④、②组成另一磁极对，磁极线圈之间也可串联或并联，称第二

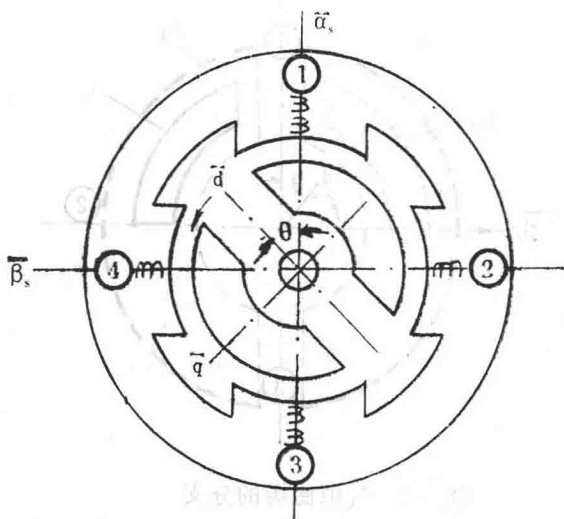


图1-1 电机的结构概念

绕组，经可调（变）电容器而成闭合回路，与第一绕组没有电的联系。这种电机没有电刷、滑环和永久磁铁；转子上没有绕组和导体，压装的扇形磁路由非磁性材料间隔分开。

## § 1-2 磁通变化规律

为了易于理解，可将每一磁极的气隙磁通看成是由四个各自按所连系的磁路而循环闭路的分量所组成，例如将磁极①的气隙磁通 $\Phi_s$ 看成是由分量 $\Phi_I$ 、 $\Phi_{II}$ 、 $\Phi_{III}$ 和 $\Phi_{IV}$ 所组成（图1-2）。

$$\Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III} + \Phi_{IV} = \Phi_s \quad (1-1)$$

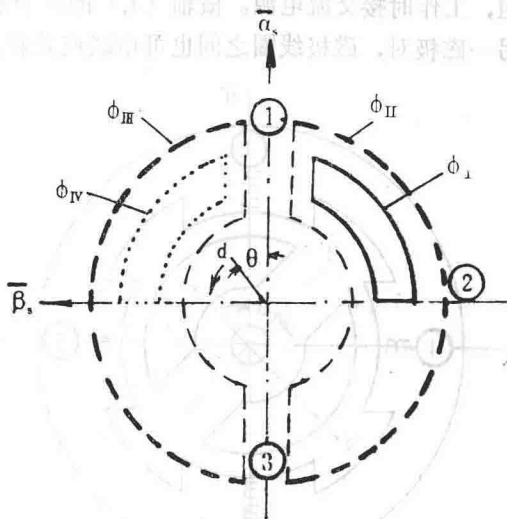


图1-2 气隙磁场的分支

设转子 $\bar{a}$ 轴与定子 $\bar{\alpha}_s$ 轴之间的夹角称为转子旋转角，以 $\theta$ 表示，则当转子旋转时，以转子旋转角 $\theta$ 为函数的分支磁

通的变化规律，可以富利哀方程表示如下：

$$f_x(\theta) = a_0 + a_1 \sin \theta + a_2 \sin 2\theta + a_3 \sin 3\theta + a_4 \sin 4\theta \\ + \dots + b_1 \cos \theta + b_2 \cos 2\theta + b_3 \cos 3\theta + b_4 \cos 4\theta \\ + \dots$$

将转子  $\bar{a}$  轴与定子纵轴 ( $\bar{a}_s$ ) 重合时作为转子旋转角的起点，根据各个磁极距离旋转起点的不同，下面对各磁极的分支磁通的变化规律分别加以分析。

### 一、纵轴①极

$$\theta_{①} = \theta$$

$$f_{①}(\theta) = a_0 + a_1 \sin \theta + a_2 \sin 2\theta + a_3 \sin 3\theta + a_4 \sin 4\theta + \dots \\ + b_1 \cos \theta + b_2 \cos 2\theta + b_3 \cos 3\theta + b_4 \cos 4\theta + \dots$$

对磁通  $\Phi_I$  分量，令  $\Phi_I^0$ 、 $\Phi_I^{45}$ 、 $\Phi_I^{90}$  和  $\Phi_I^{135}$  分别代表分支磁通分量  $\Phi_I$  在  $\theta$  为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$ （机械角度）时的值，则在转子旋转一周的过程中：

$$\Phi_I^0 = a_0 + b_2 + b_4 = \Phi_I^{180}$$

$$\Phi_I^{45} = a_0 + a_2 - b_4 = \Phi_I^{225}$$

$$\Phi_I^{90} = a_0 - b_2 + b_4 = \Phi_I^{270}$$

$$\Phi_I^{135} = a_0 - a_2 - b_4 = \Phi_I^{315}$$

$$a_1 = a_3 = 0$$

$$b_1 = -b_3 = 0$$

磁通  $\Phi_I$  分量的变化规律，依据

$$a_0 = \frac{1}{4} (\Phi_I^0 + \Phi_I^{90} + \Phi_I^{180} + \Phi_I^{270})$$

$$a_2 = \frac{1}{2} (\Phi_I^{45} - \Phi_I^{135})$$



$$b_2 = \frac{1}{2} (\Phi_I^0 - \Phi_I^{90})$$

$$b_4 = \frac{1}{4} [(\Phi_I^0 + \Phi_I^{90}) - (\Phi_I^{45} + \Phi_I^{135})]$$

可得

$$\Phi_{\text{I}}(\theta) = a_0 + a_2 \sin 2\theta + b_2 \cos 2\theta + b_4 \cos 4\theta + \dots \quad (1-2)$$

假定  $\Phi_I^0 > \Phi_I^{90}$ ，则磁通  $\Phi_N$  分量可得

$$\Phi_N^0 = a_0 + b_2 + b_4 = \Phi_I^0$$

$$\Phi_N^{45} = a_0 + a_2 - b_4 = \Phi_I^{135}$$

$$\Phi_N^{90} = a_0 - b_2 + b_4 = \Phi_I^{90}$$

$$\Phi_N^{135} = a_0 - a_2 - b_4 = \Phi_I^{45}$$

$$a_1 = a_3 = 0$$

$$b_1 = -b_3 = 0$$

$$a_0 = \frac{1}{4} (\Phi_N^0 + \Phi_N^{45} + \Phi_N^{90} + \Phi_N^{135})$$

$$= \frac{1}{4} (\Phi_I^0 + \Phi_I^{135} + \Phi_I^{90} + \Phi_I^{45})$$

$$a_2 = \frac{1}{2} (\Phi_N^{45} - \Phi_N^{135})$$

$$= \frac{1}{2} (\Phi_I^{135} - \Phi_I^{45})$$

$$= -\frac{1}{2} (\Phi_I^{45} - \Phi_I^{135})$$

$$b_2 = \frac{1}{2} (\Phi_N^0 - \Phi_N^{90})$$

$$= \frac{1}{2} (\Phi_I^0 - \Phi_I^{90})$$

$$b_4 = \frac{1}{4} [\Phi_{IV}^0 + \Phi_{IV}^{90} - (\Phi_{IV}^{45} + \Phi_{IV}^{135})]$$

$$= \frac{1}{4} [\Phi_I^0 + \Phi_I^{90} - (\Phi_I^{45} + \Phi_I^{135})]$$

于是

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{IV}}(\theta) = & a_0 - a_2 \sin 2\theta + b_2 \cos 2\theta + b_4 \cos 4\theta \\ & + \dots \end{aligned} \quad (1-3)$$

在  $\theta = 0^\circ$  场合

$$\Phi_{\text{II}} = \Phi_{\text{III}}$$

$$\Phi_{\text{II}}(\theta) + \Phi_{\text{III}}(\theta) = \Phi_\delta - \Phi_I(\theta) - \Phi_{IV}(\theta)$$

$$= \Phi_\delta - \frac{1}{2} (\Phi_I^0 + \Phi_I^{90} + \Phi_I^{45} + \Phi_I^{135})$$

$$- (\Phi_I^0 - \Phi_I^{90}) \cos 2\theta$$

$$- \frac{1}{2} [(\Phi_I^0 + \Phi_I^{90}) - (\Phi_I^{45} + \Phi_I^{135})] \cos 4\theta$$

- ...

$$= \Phi_\delta - 2(a_0 + b_2 \cos 2\theta + b_4 \cos 4\theta + \dots) \quad (1-4)$$

下面作三点说明：

1. 分支磁通分量  $\Phi_x$ ，按逆时针旋转方向，依磁极轴线由后向前顺序命名为  $\Phi_I$ 、 $\Phi_{II}$ 、 $\Phi_{III}$ 、 $\Phi_{IV}$ 。电机其它磁极分支磁通分量的命名同上。分支磁通分量的正方向取为坐标轴的正方向。

2. 分支磁通分量  $\Phi_I$  和  $\Phi_{IV}$  为纵轴①极励磁所产生并经横轴 ( $\beta_s$ ) 磁极回归的气隙磁通分量, 在励磁的横轴方向上, 以彼此相反的方向穿越横轴, 使横轴磁极从励磁极获得磁能。在  $\theta = 0^\circ$  时,  $\Phi_I = \Phi_{IV}$ 。为便于识别, 以下称之为互感磁通。

3. 分支磁通分量  $\Phi_{II}$  和  $\Phi_{III}$  为纵轴①极励磁所产生并经同轴共轭磁极 (同轴异性磁极) 回归的气隙磁通分量。在共轭极中, 流向相同, 且和共轭极同源共励时所产生的磁通方向一致, 从而对共轭极起着正向互感作用, 并加强了共轭极中的磁通密度。以下称之为自互感磁通。

## 二、纵轴③极

纵轴③极与纵轴①极为共轭关系:

$$\theta_{\text{③}} = \theta - 180^\circ$$

$$f_{\text{③}}(\theta) = f(\theta - 180^\circ)$$

$$\begin{aligned} &= a_0 - a_1 \sin \theta + a_2 \sin 2\theta - a_3 \sin 3\theta + a_4 \sin 4\theta \\ &- \dots - b_1 \cos \theta + b_2 \cos 2\theta - b_3 \cos 3\theta + b_4 \cos 4\theta \\ &+ \dots \end{aligned}$$

类似于对纵轴①极的分析, 可得③极气隙磁通  $\varphi_1$  分量的变化规律。

$$\text{因: } \varphi_1^0 = a_0 + b_2 + b_4 = \phi_1^0$$

$$\varphi_1^{90} = a_0 - b_2 + b_4 = \phi_1^{90}$$

$$\varphi_1^{45} = a_0 + a_2 - b_4 = \phi_1^{45}$$

$$\varphi_1^{135} = a_0 - a_2 - b_4 = \phi_1^{135}$$

$$a_1 = a_3 = 0$$

$$b_1 = -b_3 = 0$$

$$a_0 = \frac{1}{4} (\varphi_1^0 + \varphi_1^{90} + \varphi_1^{45} + \varphi_1^{135})$$

$$= \frac{1}{4} (\phi_1^0 + \phi_1^{90} + \phi_1^{45} + \phi_1^{135})$$

$$a_2 = \frac{1}{2} (\varphi_1^{45} - \varphi_1^{135}) = \frac{1}{2} (\phi_1^{45} - \phi_1^{135})$$

$$b_2 = \frac{1}{2} (\varphi_1^0 - \varphi_1^{90}) = \frac{1}{2} (\phi_1^0 - \phi_1^{90})$$

$$b_4 = \frac{1}{4} [\varphi_1^0 + \varphi_1^{90} - (\varphi_1^{45} + \varphi_1^{135})]$$

$$= \frac{1}{4} [\phi_1^0 + \phi_1^{90} - (\phi_1^{45} + \phi_1^{135})]$$

故:

$$\varphi_{\textcircled{3}1}(\theta) = a_0 + a_2 \sin 2\theta + b_2 \cos 2\theta + b_4 \cos 4\theta + \dots \quad (1-5)$$

同理可得:

$$\varphi_{\textcircled{3}4}(\theta) = a_0 - a_2 \sin 2\theta + b_2 \cos 2\theta + b_4 \cos 4\theta + \dots \quad (1-6)$$

比较式(1-2)、(1-3)与(1-5)、(1-6)可得

$$\phi_{\textcircled{1}1}(\theta) = \varphi_{\textcircled{3}1}(\theta)$$

$$\phi_{\textcircled{1}4}(\theta) = \varphi_{\textcircled{3}4}(\theta)$$

由此可见,纵轴两个磁极具有相同的磁通变化规律。

### 三、横轴④极

$$\theta_{\textcircled{4}} = \theta - 90^\circ$$

$$f_{\textcircled{4}}(\theta) = f(\theta - 90^\circ)$$

$$\begin{aligned}
&= c_0 - c_1 \cos \theta - c_2 \sin 2\theta + c_3 \cos 3\theta + c_4 \sin 4\theta \\
&\quad + \cdots + d_1 \sin \theta - d_2 \cos 2\theta - d_3 \sin 3\theta \\
&\quad + d_4 \cos 4\theta + \cdots \cdots
\end{aligned}$$

在转子旋转一周的过程中:

$$\mu_1^0 = c_0 - d_2 + d_4$$

$$\mu_1^{45} = c_0 - c_2 - d_4$$

$$\mu_1^{90} = c_0 + d_2 + d_4$$

$$\mu_1^{135} = c_0 + c_2 - d_4$$

$$c_1 = c_3 = 0$$

$$d_1 = d_3 = 0$$

$$c_0 = \frac{1}{4} (\mu_1^0 + \mu_1^{45} + \mu_1^{90} + \mu_1^{135})$$

$$c_2 = \frac{1}{2} (\mu_1^{135} - \mu_1^{45})$$

$$d_2 = \frac{1}{2} (\mu_1^{90} - \mu_1^0)$$

$$d_4 = \frac{1}{4} [\mu_1^0 + \mu_1^{90} - (\mu_1^{45} + \mu_1^{135})]$$

磁通 $\mu_1$ 分量的变化规律可表示为:

$$\begin{aligned}
\mu_{\text{①}}(\theta) &= c_0 - c_2 \sin 2\theta - d_2 \cos 2\theta + d_4 \cos 4\theta \\
&\quad + \cdots \cdots
\end{aligned} \tag{1-7}$$

假定 $\mu_1^{90} > \mu_1^0$ , 比较纵、横轴磁极气隙磁通分量的富利衰方程, 在横轴采用和纵轴相同电流标定方向和绕线方向的前提下, 可得表1-1所示的对应关系。

表1-1

纵、横轴气隙磁通分量的对应

项 目	$\sin 2\theta$	$\cos 2\theta$	$\cos 4\theta$
$\phi_1^0$	$a_0 -$	$+ b_2$	$+ b_4$
$\mu_I^{90}$	$c_0 -$	$+ d_2$	$+ d_4$
$\phi_I^{45}$	$a_0 +$	$a_2$	$- b_4$
$\mu_I^{135}$	$c_0 +$	$c_2$	$- d_4$
$\phi_I^{90}$	$a_0$	$- b_2$	$+ b_4$
$\mu_I^0$	$c_0$	$- d_2$	$+ d_4$
$\phi_I^{135}$	$a_0 -$	$a_2$	$- b_4$
$\mu_I^{45}$	$c_0 -$	$c_2$	$- d_4$

按表 1-1 中的对应关系, 可写出

$$\mu_{\text{④}1}(\theta) = c_0 + c_2 \sin 2\theta - d_2 \cos 2\theta + d_4 \cos 4\theta + \dots \quad (1-8)$$

$$\mu_{\text{④}2}(\theta) + \mu_{\text{④}3}(\theta) = \mu_s - 2c_0 + 2d_2 \cos 2\theta - 2d_4 \cos 4\theta - \dots \quad (1-9)$$

#### 四、横轴②极

$$\theta_{\text{②}} = \theta + 90^\circ$$

$$f_{\text{②}}(\theta) = c_0 + c_1 \cos \theta - c_2 \sin 2\theta - c_3 \cos 3\theta + c_4 \sin 4\theta + \dots - d_1 \sin \theta - d_2 \cos 2\theta + d_3 \sin 3\theta + d_4 \cos 4\theta + \dots$$

在转子旋转一周的过程中:

$$\mu_1^0 = c_0 - d_2 + d_4 = \mu_1^0$$

$$\mu_1^{45} c = 0 - c_2 \quad -d_4 = \mu_1^{45}$$

$$\mu_1^{90} = c_0 \quad +d_2 + d_4 = \mu_1^{90}$$

$$\mu_1^{135} = c_0 + c_2 \quad -d_4 = \mu_1^{135}$$

$$c_1 = c_3 = 0$$

$$d_1 = d_3 = 0$$

$$c_0 = \frac{1}{4} (\mu_1^0 + \mu_1^{45} + \mu_1^{90} + \mu_1^{135})$$

$$c_2 = \frac{1}{2} (\mu_1^{135} - \mu_1^{45})$$

$$d_2 = \frac{1}{2} (\mu_1^{90} - \mu_1^0)$$

$$d_4 = \frac{1}{4} [\mu_1^0 + \mu_1^{90} - (\mu_1^{45} + \mu_1^{135})]$$

可得:

$$\mu_{\textcircled{2}1}(\theta) = c_0 - c_2 \sin 2\theta - d_2 \cos 2\theta + d_4 \cos 4\theta + \dots \quad (1-10)$$

比较式 (1-7) 和 (1-10), 可得:

$$\mu_{\textcircled{4}1}(\theta) = \mu_{\textcircled{2}1}(\theta)$$

由此可知, 同轴共轭磁极 (④、②极) 的磁通分量随转子旋转而变化的规律也是相同的。

### § 1-3 互感关系

#### 一、纵轴 ( $\bar{\alpha}_s$ ) 两极的同源共励

由于选择了相同的磁极线圈绕制方向和电流方向, 同轴

两极异性极，互为共轭关系（图 1-3），故：

$$\phi_{\text{I}} = \varphi_1$$

$$\phi_{\text{IV}} = \varphi_4$$

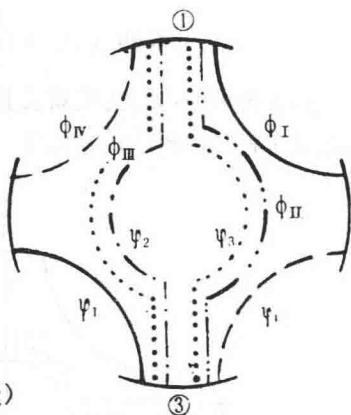
$$\phi_{\text{II}} = \phi_{\text{III}} = \varphi_2 = \varphi_3$$

$$\begin{aligned} (\phi_{\text{I}} + \phi_{\text{II}} + \phi_{\text{III}} + \phi_{\text{IV}}) + (\varphi_2 + \varphi_3) &= \phi_{\delta} + 2\varphi_2 \\ &= (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) + (\phi_{\text{II}} + \phi_{\text{III}}) \\ &= \varphi_{\delta} + 2\phi_{\text{II}} \end{aligned}$$

图 1-3 表明两纵轴磁极对横轴回归的磁通分量（即对横轴磁极的互感磁通）为：

$$\begin{aligned} &|\phi_{\text{I}} - \varphi_4| \text{ 和 } |\varphi_1 - \phi_{\text{IV}}| \\ &|\phi_{\text{I}} - \varphi_4| = |\varphi_1 - \phi_{\text{IV}}| \\ &= |\phi_{\text{I}} - \phi_{\text{IV}}| \\ &= |\phi_{\text{I}1}(\theta) - \phi_{\text{IV}1}(\theta)| \\ &= 2a_2 \sin 2\theta \\ &= (\phi_{\text{I}}^{45} - \phi_{\text{IV}}^{135}) \sin 2\theta \text{ (每极)} \end{aligned}$$

(1-11)



此式表明：在有不均匀 图1-3 纵轴两极共励

气隙的电机中，定子两相垂直的磁极线圈之间，存在着互感关系。这种互感作用，当转子旋转时，和两倍转子的旋转频率的正弦变数分量成正比。

此外，同轴磁极对之间也存在着互感作用：磁极 ① 的  $\phi_{\text{II}}$ 、 $\phi_{\text{III}}$  经磁极 ③ 的磁路回归；磁极 ③ 的  $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$  经磁极 ① 的磁路回归，从而和各相应磁极线圈交链，产生互感电势。由于这些磁通分量在共轭极中的方向和该共轭极线圈所产生的磁



通的方向一致，因而这种互感加强了磁场，并由式(1-4)可看出含有高次谐波分量。

根据电机结构的特点，横轴 ( $\bar{\beta}_s$ ) 上磁极对的励磁有赖于转子扇形磁路，在定子两相互垂直的磁极线圈之间，组成变压器式的耦合，从纵轴 ( $\bar{\alpha}_s$ ) 励磁的磁极对获得磁能  $|\phi_I - \phi_A|$  和  $|\phi_1 - \phi_N|$ ，因而这种电机具有横轴串励的特性，可提供横向磁场，有利于调速。

## 二、横轴 ( $\bar{\beta}_s$ ) 两极的同源共励

由于选择了相同的线圈绕制方向和电流方向，横轴 ( $\bar{\beta}_s$ ) 的磁极对将是异极性的。图 1-4 中，以纵轴 ( $\bar{\alpha}_s$ ) 磁路回

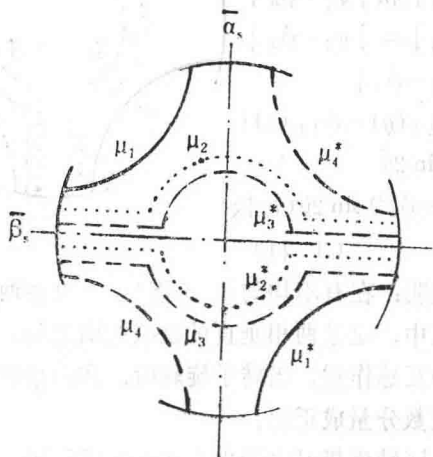


图1-4 横轴两极共励

归的磁通分量为  $|\mu_1 - \mu_4|$  和  $|\mu_1 - \mu_3|$ ，表现为对纵轴 ( $\bar{\alpha}_s$ ) 磁极反应性的互感磁通；穿越同轴互为共轭的磁极间的磁通