



程小华 著

交流电机绕组的 变极理论



科学出版社

TM340.31
4

交流电机绕组的变极理论

程小华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书共 9 章:第 1 章,交流电机绕组的元绕组;第 2 章,交流电机绕组槽号相位图的画法;第 3 章,交流电机绕组槽号相位图的性质;第 4 章,交流电机绕组槽号分布类型的判别;第 5 章,交流电机绕组非正规方案存在性的判别;第 6 章,交流电机变极绕组的统一设计法;第 7 章,交流电机绕组 p_1/p_2 相带最佳取值的理论分析;第 8 章,感应电动机的动态变极绕组;第 9 章,交流电机绕组变极理论的发展和展望。

本书可作为高等院校电机与电器专业研究生的教材,也可供高等院校电气工程专业高年级本科生和教师参考,还可供从事电机尤其是电机绕组设计和研究的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

交流电机绕组的变极理论/程小华著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-039752-2

I. ①交… II. ①程… III. ①交流电机-绕组 IV. ①TM340.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 025890 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:彭 涛

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 7 月第三次印刷 印张:9 1/2

字数:189 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

目前,专门论述交流电机绕组变极理论的著作,国内外尚付阙如。作者于 1991~1994 年师从我国著名电机工程学家许实章教授和张城生教授,攻读博士学位,研究交流电机绕组的变极理论。1992 年至今,已发表变极理论方面的学术论文十余篇,其中多篇发表于《中国电机工程学报》,多篇被 EI 收录。作者研究变极理论所取得的相关学术成果,在 1999 年通过了广东省高教厅主持的鉴定,鉴定结论为,该学术成果达到了国际先进水平。本书旨在展示作者多年来研究交流电机绕组变极理论的学术成果,以期填补空白。

书中对交流电机绕组变极理论的各个方面进行了详细的论述。第 1 章论述交流电机元绕组的概念、参数、模型和原理,包括单元绕组和作者提出的双元绕组等。交流电机元绕组在整个交流电机理论中起着基础性作用。第 2 章论述交流电机绕组槽号相位图的画法,主要论述作者提出的新画法。交流电机绕组的槽号相位图,无论对常极绕组和变极绕组,还是对绕组的工程设计和理论研究,都是一个非常重要的工具。第 3 章论述交流电机绕组槽号相位图的性质。作者研究了交流电机绕组槽号相位图的性质,提出了槽号相位图的区域槽号不重复选用定理和异种槽号重叠定理。第 4 章论述交流电机绕组槽号分布类型的判别,主要论述作者提出的最大公约数判别法。第 5 章论述交流电机非正规方案存在性的判别,主要论述作者提出的 t 参数条件。第 6 章论述作者提出的交流电机变极绕组的统一设计法。第 7 章论述作者提出的交流电机变极绕组 p_1/p_2 相带最佳取值的理论分析。第 8 章论述作者提出的感应电动机的动态变极绕组。第 9 章对交流电机绕组理论的发展进行了综述和展望。

在本书付梓之际,作者首先感谢导师许实章教授和张城生教授;其次感谢岳母曹茶红和妻子刘波涛;最后感谢华南理工大学电力学院,尤其是作者所指导的研究生,包括:程声烽、黄瑞艺、张勇、傅森木、王国平、白晋川、钟运平、林显军、焦卫星、龙洪宇、李涛、吴聂根、刘增磊、吴

筱辉、余志伟、童树文、邱烜、温俊栋、林道明等。

由于作者水平有限,书中的疏漏与不妥之处在所难免,诚望读者批评指正,共谋学术进步。

程小华

epxhc@scut.edu.cn

2013年10月

目 录

前言

第 1 章 交流电机绕组的元绕组	1
1.1 引言	1
1.2 元绕组的物理概念和参数	1
1.2.1 常极绕组的单元绕组	1
1.2.2 变极绕组的双元绕组	2
1.2.3 双元绕组与单元绕组的关系	3
1.2.4 交流电机绕组的元绕组	4
1.3 元绕组的数学模型	4
1.3.1 两种表示槽号矢量相位的方法	4
1.3.2 单元绕组的数学模型	5
1.3.3 双元绕组的数学模型	6
1.3.4 元绕组的数学模型	8
1.4 元绕组原理	8
1.5 小结	9
第 2 章 交流电机绕组槽号相位图的画法	10
2.1 引言	10
2.2 槽号相位图的传统画法	10
2.2.1 一维槽号相位图的传统画法	10
2.2.2 二维槽号相位图的传统画法	12
2.3 槽号相位图的新画法——单元绕组参数法	14
2.3.1 一维槽号相位图的情形	14
2.3.2 二维槽号相位图的情形	17
2.4 槽号相位图两种画法之间的联系	18

2.5 单元绕组参数法的应用·····	20
2.5.1 一维槽号相位图的情形·····	20
2.5.2 二维槽号相位图的情形·····	22
2.6 小结·····	24
第3章 交流电机绕组槽号相位图的性质 ·····	26
3.1 引言·····	26
3.2 槽号相位图的循环性·····	26
3.2.1 一维槽号相位图的圆柱面性·····	26
3.2.2 二维槽号相位图的圆环胎面性·····	26
3.3 槽号相位图上区域选用槽号的重复性·····	27
3.3.1 槽号重复选用的含义·····	27
3.3.2 一维槽号相位图的区域槽号不重复选用定理·····	28
3.3.3 二维槽号相位图的区域槽号不重复选用定理·····	30
3.4 槽号相位图上异种槽号的重叠性·····	32
3.4.1 槽号相位图上异种槽号重叠的含义·····	33
3.4.2 槽号相位图上异种槽号重叠的充要条件·····	34
3.5 小结·····	38
第4章 交流电机绕组槽号分布类型的判别 ·····	39
4.1 引言·····	39
4.2 两种已有的槽号分布类型判别法·····	40
4.2.1 表格法·····	40
4.2.2 最小相位差法·····	41
4.3 新的槽号分布类型判别法——最大公约数判别法·····	43
4.3.1 槽号分布类型的最大公约数判别法·····	43
4.3.2 新判别法的证明·····	45
4.4 最大公约数判别法的应用·····	51
4.4.1 应用步骤·····	51
4.4.2 应用举例·····	51
4.5 三种槽号分布类型判别法的比较·····	52

4.5.1 表格法与最大公约数法的比较	52
4.5.2 最小相位差法与表格法和最大公约数法的比较	54
4.6 小结	59
第5章 交流电机绕组非正规方案存在性的判别	61
5.1 引言	61
5.2 p_2 为 3 的倍数时非正规变极绕组方案的存在条件: N 参数 条件	63
5.2.1 最小对称槽号组的概念	63
5.2.2 非正规变极绕组方案的存在条件: N 参数条件	64
5.3 p_2 为 3 的倍数时非正规变极绕组方案的存在条件: t 参数条件 ...	64
5.3.1 对称槽号组和最小对称槽号组的定义及性质	64
5.3.2 最小对称槽号组的槽数	66
5.3.3 p_2 为 3 的倍数时非正规变极绕组方案的存在条件:形式和本质	75
5.4 t 参数条件的应用	78
5.4.1 应用步骤	78
5.4.2 应用实例	79
5.5 两个比较	80
5.5.1 最小对称槽号组概念两种定义的比较	80
5.5.2 非正规方案两种存在条件的比较	81
5.6 小结	88
第6章 交流电机变极绕组的统一设计法	89
6.1 引言	89
6.2 用统一设计法设计变极绕组正规方案	96
6.2.1 用统一设计法设计变极绕组正规方案的步骤	96
6.2.2 用统一设计法设计变极绕组正规方案的实例	96
6.3 用统一设计法设计变极绕组非正规方案	98
6.3.1 变极绕组非正规方案的优选	98
6.3.2 用统一设计法设计变极绕组非正规方案的步骤	99
6.3.3 用统一设计法设计变极绕组非正规方案的实例	100

6.4 小结	105
第7章 交流电机绕组 p_1/p_2 相带最佳取值的理论分析	106
7.1 引言	106
7.2 非正规方案 p_1/p_2 相带理想的最佳取值	107
7.2.1 p_2 为 3 的倍数时非正规方案 p_1/p_2 相带理想的最佳取值	107
7.2.2 p_1, p_2 均非 3 的倍数时非正规方案 p_1/p_2 相带理想的最佳取值	111
7.3 非正规方案 p_1/p_2 相带实际的最佳取值	113
7.3.1 p_2 为 3 的倍数时非正规方案 p_1/p_2 相带实际的最佳取值	113
7.3.2 p_1, p_2 均非 3 的倍数时非正规方案 p_1/p_2 相带实际的最佳取值	118
7.4 正规方案 p_1/p_2 相带的最佳取值	119
7.5 一些比较	120
7.5.1 采用非正规方案时 p_2 为 3 的倍数和 p_1, p_2 均非 3 的倍数的 本质区别	120
7.5.2 非正规方案 p_1, p_2 均非 3 的倍数时 p_1/p_2 相带最佳取值与正规方案 p_2 为 3 的倍数时 p_1/p_2 相带最佳取值的对称	120
7.5.3 接线方式的对称	121
7.5.4 方案的比较和选优	121
7.6 小结	121
第8章 感应电动机的动态变极绕组	123
8.1 引言	123
8.2 交流电动机绕组的动态变极	123
8.3 交流电动机的动态变极调速及其与其他调速方式的比较	125
8.3.1 交流电动机的动态变极调速	125
8.3.2 交流电动机动态变极调速与其他调速方式的比较	126
8.4 动态变极绕组的设计特点	127
8.5 动态变极绕组的变极结构和接线方式	128
8.6 动态变极绕组的槽数和极数	130
8.7 动态变极绕组的设计实例	130
8.8 小结	133

第 9 章 交流电机绕组变极理论的发展和展望	135
9.1 引言	135
9.2 交流电机变极绕组设计的两种基本结构	135
9.3 交流电机变极绕组正规方案设计方法和原理的发展	136
9.4 交流电机变极绕组设计工具的发展	138
9.5 交流电机变极绕组非正规方案设计方法的发展	138
9.6 交流电机绕组变极理论的展望	139
参考文献	140

第 1 章 交流电机绕组的元绕组

1.1 引言

交流电机绕组从极数的角度可分为：常极绕组和变极绕组。常极绕组是指任何情形下(包括起动、运行等)都只呈现出一种极数的绕组。变极绕组则是指可以在某种情形(起动情形或运行情形)下表现出不同极数的绕组。变极绕组极数的种数可以是两种、三种或更多种。本书仅讨论最常见的有两种极数的变极绕组。

无论是研究常极绕组还是变极绕组,如果有一个普遍适用的原理来指导,都是十分有益的。无论从理论还是实践的角度来看,都是这样。文献[1]中提到指导常极绕组理论分析和实践操作(设计)的单元电机概念。这个概念是十分有用的。本章以这个概念为基础,提出单元绕组和双元绕组的概念,并进而发展出具有普适意义的元绕组原理(元绕组概念参见文献[2]和[3])。

本书后续有关各章,都将在元绕组原理的指导下展开。

交流电机绕组有定子绕组与转子绕组之分,除非特别说明,本书中的交流电机绕组都是指交流电机定子绕组。此外,本书所讨论的变极绕组一律是指单绕组变极绕组。

1.2 元绕组的物理概念和参数

1.2.1 常极绕组的单元绕组

常极绕组的设计可以通过画“槽号矢量相位星形辐射图”(通称“槽矢量星形图”,参见文献[1])进行。该图上的槽号有正、负之分。负槽号所代表的矢量与正槽号所代表的矢量大小相等、方向相反,即相位相差 180° 。槽矢量星形图由一个或几个重叠的槽矢量星形构成。当只考

虑正槽号时,我们说每一个槽矢量星形代表一个单元绕组,有几个重叠的槽矢量星形就表明实际绕组含有几个单元绕组。

精确地说,单元绕组是指:对一种极数的绕组而言,构成一个其正槽号的矢量星形与实际绕组的完全重合而槽数和极数都最少的绕组。

由上述定义可知,一个实际绕组所含单元绕组的数,应由其槽数和极数两者共同决定,且为两者的最大公约数。以 z 、 p 、 t_0 分别记实际绕组的槽数、极对数和单元绕组数, z_{t_0} 、 p_{t_0} 分别记单元绕组的槽数和极对数,则有

$$t_0 = \text{GCD}(z, p) \quad (1-1)$$

$$z_{t_0} = z/t_0 \quad (1-2)$$

$$p_{t_0} = p/t_0 \quad (1-3)$$

式中, GCD 表示最大公约数(greatest common divisor); t_0 、 z_{t_0} 和 p_{t_0} 称为单元绕组的参数。

例如, $z=30$, $2p=4$, 则 $t_0 = \text{GCD}(z, p) = \text{GCD}(30, 2) = 2$, $z_{t_0} = z/t_0 = 30/2 = 15$, $p_{t_0} = p/t_0 = 2/2 = 1$, 即实际绕组含有两个单元绕组, 单元绕组的槽数为 15, 极对数为 1。

这里要指出, 上述定义中, 正槽号矢量相位也可以换成负槽号矢量相位。事实上, 负槽号矢量相位可由正槽号矢量相位反相而得到。但是, 不能同时考虑正、负槽号矢量相位。这是因为, 如果同时考虑正、负槽号矢量相位, 可能由于出现正、负槽号矢量相位相重叠而引出矛盾。例如, 一个 36 槽 2 极的绕组, 如果同时考虑正、负槽号的矢量相位, 则该绕组的槽矢量星形图将含有两个相重叠的槽矢量星形, 即该绕组含有两个单元绕组。事实上, 它仅含有一个单元绕组。

1.2.2 变极绕组的双元绕组

一个其变前极、变后极的正槽号矢量相位同时与实际绕组的完全重合而槽数和变前极、变后极的极对数都最少的绕组称为变极绕组的双极对单元绕组, 简称双元绕组。

与单元绕组的定义相仿, 双元绕组的定义中也不能同时考虑正、负槽号的矢量相位, 道理是类似的。例如, 一个 36 槽 2/4 极绕组, 如果同

时考虑正、负槽号的矢量相位,则变前极绕组为 36 槽 2 极,含 2 个相重叠的槽矢量星形;变后极绕组为 36 槽 4 极,含 4 个相重叠的槽矢量星形。现在考虑 1~18 号槽。对变前极而言,1~18 号槽的正、负槽号矢量相位构成的槽矢量星形与实际绕组的重合,对变后极而言亦然。这样,似乎 18 槽 2/4 极绕组构成实际绕组的一个元绕组。事实上,实际绕组的元绕组就是其自身,而不是 18 槽 2/4 极的绕组。

此外,双元绕组的定义中必须强调“同时”二字,否则得到的不是双元绕组,而是两个单元绕组。

从上述定义可知,一个实际变极绕组所包含双元绕组的数目应由其槽数、变前极极对数和变后极极对数三者共同决定,且为三者之间的最大公约数。以 z 、 p_1 、 p_2 和 t 分别记实际变极绕组的槽数、变前极极对数、变后极极对数和双元绕组数; z_t 、 p_{t1} 和 p_{t2} 分别记双元绕组的槽数、变前极极对数、变后极极对数,则有

$$t = \text{GCD}(z, p_1, p_2) \quad (1-4)$$

$$z_t = z/t \quad (1-5)$$

$$p_{t1} = p_1/t \quad (1-6)$$

$$p_{t2} = p_2/t \quad (1-7)$$

式中, z_t 、 p_{t1} 和 p_{t2} 称为双元绕组的参数。

例如, $z=36$, $2p_1=4$, $2p_2=20$, 则 $t = \text{GCD}(36, 2, 10) = 2$, $z_t = z/t = 36/2 = 18$, $p_{t1} = p_1/t = 2/2 = 1$, $p_{t2} = p_2/t = 10/2 = 5$, 即实际变极绕组由 2 个双元绕组构成,双元绕组是一个槽数为 18,变前极极对数为 1,变后极极对数为 5 的变极绕组。

1.2.3 双元绕组与单元绕组的关系

双元绕组对变前极、变后极而言都至少包含一个单元绕组,而且其所包含的单元绕组数不相等。设双元绕组对变前极、变后极而言分别包含 t_{01} 和 t_{02} 个单元绕组,则 $t_{01} \neq t_{02}$; 否则,如果 $t_{01} = t_{02}$,将导致 $p_1 = p_2$,就不是变极绕组而是常极绕组了。

不仅如此,双元绕组对变前极、变后极而言所包含的单元绕组数都必须是最少的,即 t_{01} 和 t_{02} 之间的最大公约数为 1。否则,该双元绕组的

槽数和变前极极数、变后极极数就不都是最少的。

由上述讨论可知,一个变极绕组所包含的双元绕组数 t 和该变极绕组对变前极、变后极而言所包含的单元绕组数 t_1 、 t_2 之间具有如下关系:

$$t = \text{GCD}(t_1, t_2) \quad (1-8)$$

例如,有一个 72 槽 8/12 极的变极绕组,变前极单元绕组数 $t_1 = \text{GCD}(72, 4) = 4$, 变后极单元绕组数 $t_2 = \text{GCD}(72, 6) = 6$, 双元绕组数 $t = \text{GCD}(72, 4, 6) = 2$ 。显然,有: $t = \text{GCD}(t_1, t_2) = \text{GCD}(4, 6) = 2$ 。双元绕组的参数为 $z_t = z/t = 72/2 = 36$, $p_{t1} = p_1/t = 4/2 = 2$, $p_{t2} = p_2/t = 6/2 = 3$ 。每一个双元绕组对变前极、变后极而言所包含的单元绕组数分别为 $t_{01} = 2$ 和 $t_{02} = 3$ 。

1.2.4 交流电机绕组的元绕组

类似地,如果考虑的是变三种极数的绕组,则可定义三元绕组。理论上讲,这种做法可推广到更多种极数的变极绕组。双元绕组、三元绕组等可以合称为多元绕组。

交流电机常极绕组的单元绕组和变极绕组的双元绕组、三元绕组等多元绕组合称为交流电机绕组的元绕组。

1.3 元绕组的数学模型

1.3.1 两种表示槽号矢量相位的方法

交流电机绕组因其槽号矢量相位表示方法的不同而有不同的数学模型,但其本质是一致的。有两种表示槽号矢量相位的方法:一种是槽矢量星形图,另一种是槽号相位图。槽号相位图是槽号矢量相位图的简称,它包括一维槽号相位图和二维槽号相位图。一维槽号相位图也称单极对(数)槽号相位图;二维槽号相位图也称双极对(数)槽号相位图。

元绕组的数学模型与其所属绕组的类似,不同的只是:其所属绕组的槽矢量星形图可能有多个重叠的槽矢量星形,而元绕组的只有一个

槽矢量星形;其所属绕组的槽号相位图的格子中可能有多个槽号,而元绕组的只有一个槽号。可见,元绕组的数学模型最为简单明了,体现了其“元”的特性。

槽矢量星形图分正、负槽矢量星形图和正槽矢量星形图。前者同时画有正、负槽号的矢量,后者仅画有正槽号的矢量。

槽号相位图与槽矢量星形图类似,也分为正、负槽号相位图和正槽号相位图。其中,正、负槽号相位图上画有正、负槽号,正槽号相位图上仅画有正槽号。

设计交流电机绕组时,经常采用正、负槽号相位图和正、负槽矢量星形图。本书仅对正、负槽号相位图和正、负槽矢量星形图进行讨论。

1.3.2 单元绕组的数学模型

当用正、负槽矢量星形图来表示单元绕组的槽号矢量相位时,仅含正槽号的矢量星形称为单元绕组的正槽号矢量相位模型(简称正槽号矢量模型);仅含负槽号的矢量星形称为单元绕组的负槽号矢量相位模型(简称负槽号矢量模型);既含正槽号又含负槽号的矢量星形称为单元绕组的正、负槽号矢量相位模型(有时简称槽矢量模型)。单元绕组的正槽号矢量模型与负槽号矢量模型刚好是重合的。

当用一维槽号相位图来表示单元绕组的槽号相位时,仅含正槽号的一维槽号相位图称为单元绕组的正槽号格子相位模型(简称正槽号相位模型);仅含负槽号的一维槽号相位图称为单元绕组的负槽号格子相位模型(简称负槽号相位模型);既含正槽号又含负槽号的一维槽号相位图,称为单元绕组的正负槽号格子相位模型(简称槽号相位模型)。

图 1-1(a)为一个 24 槽 4 极绕组的一维槽号相位图。该绕组的单元绕组为 12 槽 2 极,其一维槽号相位图如图 1-1(b)所示。由图可见,该单元绕组的正槽号相位与负槽号相位是相同的。

单元绕组的槽矢量模型和槽号相位模型合称为单元绕组的数学模型。

0°				180°				360°			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
-19	-20	-21	-22	-23	-24	-1	-2	-3	-4	-5	-6
-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18

(a) 24 槽 4 极绕组的一维槽号相位模型

0°				180°				360°			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-7	-8	-9	-10	-11	-12	-1	-2	-3	-4	-5	-6

(b) 12 槽 2 极绕组的一维槽号相位模型

图 1-1 一维槽号相位模型

1.3.3 双元绕组的数学模型

当用槽矢量星形图来表示双元绕组的槽号矢量相位时,需要画两个槽矢量星形图。这两个按双元绕组参数(z_t, p_{l1}, p_{l2})画的变前极和变后极的槽矢量星形图合称为双元绕组的槽矢量模型。双元绕组的槽矢量模型也有正、负之分,其意义与单元绕组的相仿。

当用二维槽号相位图来表示双元绕组的槽号相位时,仅含正槽号的二维槽号相位图称为双元绕组的正槽号相位模型;仅含负槽号的二维槽号相位图称为双元绕组的负槽号相位模型;既含正槽号又含负槽号的二维槽号相位图,称为双元绕组的正负槽号相位模型。

显然,双元绕组的槽号相位模型是一个没有同种槽号(即同为正槽号或同为负槽号)相重叠的二维槽号相位图。所谓重叠,是指二维槽号相位图的同一个格子中有多于一个的槽号出现。

图 1-2 为一个 12 槽 4/2 极双元绕组的槽号相位模型。由图可见,它是一个格中没有同种槽号重叠的二维槽号相位图。

然而,双元绕组的槽号相位模型有时是一个格中有异种槽号(即一为正槽号、另一为负槽号)重叠的二维槽号相位图。如图 1-3 所示,12 槽 2/6 极双元绕组的二维槽号相位图呈现出正、负槽号相重合状。这种情况表明,此时双元绕组的正负槽号相位对变前极、变后极而言同时重合。

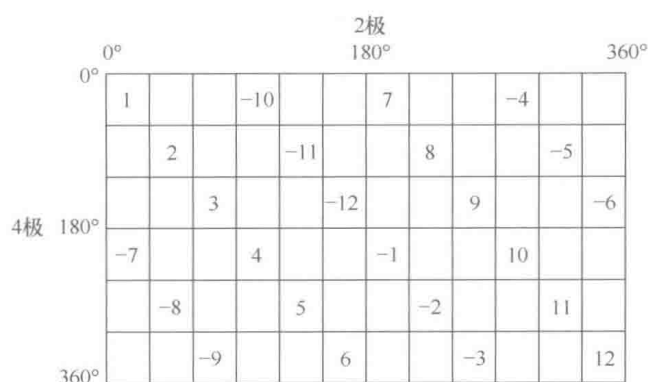


图 1-2 12 槽 4/2 极双元绕组的二维槽号相位模型

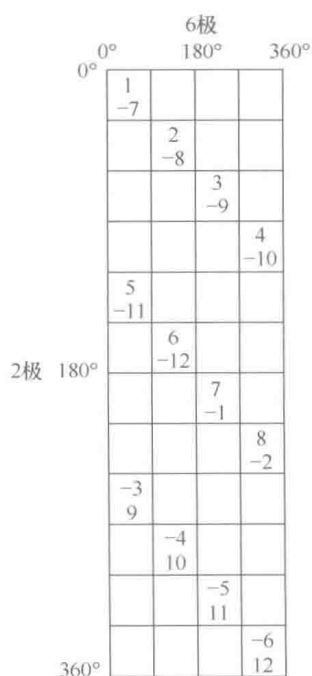


图 1-3 12 槽 2/6 极双元绕组的二维槽号相位模型

一般地,用二维槽号相位图来表示双元绕组的槽号矢量相位,即作为数学模型,而不用两个槽矢量星形图。因为用二维槽号相位图来表示只要画一个图,而用槽矢量星形图来表示则要画两个图。二维槽号相位图之所以能以一当二,是因为在二维槽号相位图上,一个槽号利用它的纵、横两个坐标分别表示了其处于变前极和变后极下的两种不同