

THEORY OF SPACE DISCRETE FOURIER TRANSFORM AND
THE HOLOSPECTRUM ANALYSIS OF
WINDINGS IN AC ELECTRICAL MACHINES

交流电机 空间离散傅里叶变换理论和 绕组的全息谱分析

侯新贵 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

交流电机 空间离散傅里叶变换理论和 绕组的全息谱分析

侯新贵 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是关于交流电机分析理论和交流电机绕组的专著。书中建立了交流电机绕组完整的空间域和频率域数学模型,重点论述作者提出的交流电机空间离散傅里叶变换理论(Theory of Space Discrete Fourier Transform, TSDFT)和交流绕组的全息谱分析(The Holospectrum Analysis of Windings, HAW),并给出了 TSDFT 和 HAW 理论的应用实例。全书共分 7 章:第 1 章为交流电机绕组引论;第 2 章为交流电机绕组的基本理论;第 3 章为交流电机空间离散傅里叶变换理论和绕组的全息谱分析;第 4 章为三相交流整数槽绕组的全息谱分析;第 5 章为三相交流分数槽绕组的全息谱分析;第 6 章为单相交流电机绕组的全息谱分析;第 7 章为交流电机绕组全息谱分析理论的应用。

本书可供从事交流电机理论研究、理论教学、电机设计和制造,尤其是电机绕组设计和研究的工程技术人员和教师参阅;也可作为高等院校电机及其控制专业研究生的教材及电气工程专业高年级本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

交流电机空间离散傅里叶变换理论和绕组的全息谱分析 / 侯新贵著. — 北京:中国水利水电出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5170-6166-3

I. ①交… II. ①侯… III. ①交流电机—快速傅里叶变换②交流电机—绕组 IV. ①TM340.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第326736号

书 名	交流电机空间离散傅里叶变换理论和绕组的全息谱分析 JIAOLIU DIANJI KONGJIAN LISAN FULIYE BIANHUAN LILUN HE RAOZU DE QUANXIPU FENXI
作 者	侯新贵 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 17.25 印张 409 千字
版 次	2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷
定 价	69.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

交流电机是电能生产及应用的基本设备。交流电机绕组是交流电机的主要部件。交流电机性能分析的基础是交流绕组的分析。交流电机绕组及绕组的磁动势和电动势是交流电机分析的三大基本问题。

交流电机分析的基本方法有对称分量法、相坐标法、坐标变换法、场路耦合法、多回路分析法、绕组函数法等。采用这些方法，可分析交流电机的稳态性能和暂态性能。其中，电机参数是电机数学模型建立的基础。而计算绕组的自感、互感等参数则常常是问题处理的关键。

交流电机绕组的基本分析方法有合成磁动势波形图法、槽矢量图法、槽号相位表法、复数分析法等。这些方法主要用于分析常规绕组及绕组基本问题。绕组分析的目标是：一为绕组的设计，即在已知电机槽数、极数、相数、技术要求的情况下设计合理的绕组；二为绕组及性能分析，即在已知绕组形式的基础上分析绕组及电机的参数，包括绕组因数计算、绕组谐波分析、绕组的自感系数、互感系数、谐波漏抗系数和节距漏抗系数的计算等。

随着科技的发展，出现了许多新型绕组和与绕组分析相关的新需求，如低谐波绕组设计分析、真分数槽集中绕组设计分析、多相电机（High-phase-order Machines）分析、故障时电机电感系数计算等，这些问题采用传统绕组理论不能很好地解决。本书旨在传统的交流电机绕组理论基础上，按照数学原理和现代数字信号处理技术，采用作者提出的交流电机空间离散傅里叶变换理论（Theory of Space Discrete Fourier Transform, TSDFT）和交流电机绕组的全息谱分析（The Holospectrum Analysis of Windings, HAW），研究交流电机及交流绕组。对具有多相对称绕组的交流电机，应用 TSDFT，即在空间域对各相的电压、电流、磁链等物理量进行离散傅里叶变换，将电机性能分析由空间域变换到频率域，建立交流电机分析的频率域数学模型。TSDFT 应用于三相正弦交流系统即为对称分量法。TSDFT 在交流电机坐标变换理论之上，发展了坐标变换并为坐标变换理论提供了坚实的数学基础。HAW 方法是将交流绕组离散序列在空间域进行分解与合成，通过空间傅里叶变换

(SDFT), 得到交流绕组在频率域的全息谱。交流电机绕组的全息谱为交流绕组在频率域的完备表示。书中提出并定义了连续绕组、散布绕组和量化散布绕组等绕组概念; 提出并定义了复绕组因数的概念, 修正、完善了传统绕组理论分析中绕组因数的计算方法, 特别是分数槽绕组的各次谐波绕组因数计算方法, 为绕组的磁动势和感应电动势分析奠定了基础; 采用数论和 HAW 理论进行交流电机绕组的谐波分析, 导出了忽略槽口影响和计入槽口影响时绕组全息谱分析下的磁动势波形解析计算公式, 给出了谐波感应电动势的全息谱计算方法。

本书系统地给出了绕组的空间域表示方法和频率域表示方法, 建立了完整的交流电机绕组数学模型。HAW 方法将绕组分析的基本单元由传统方法中的单根导体或单个线圈替代为现代方法中的正弦规律散布绕组 (非量化散布绕组), 同时将绕组由空间域分析变换到频率域分析, 从另一个视点研究和分析交流电机绕组问题。

书中应用 HAW 方法, 分析了三相交流电机常规的 60° 相带、大小相带、 120° 相带整数槽和分数槽绕组及单相交流电机常规的正弦绕组。就目前已在此类永磁无刷直流电动机和永磁同步电动机中广泛使用的分数槽集中绕组进行了专门研究, 按数论理论系统地分析了此类绕组的槽极组合关系及槽数和极对数选择问题, 给出了此类绕组的全息谱计算方法, 导出了谐波绕组因数的解析公式。书中还将 HAW 方法应用在交流绕组的优化设计中。可以看到, 采用 HAW 方法设计非正规的三相合成正弦绕组和低谐波绕组时, 可以根据目标要求准确得出绕组的分布。

正像傅里叶分析之于数学和工程应用一样, 建立在严密数学基础上的交流电机空间离散傅里叶变换理论和交流绕组的全息谱分析理论, 可广泛应用于交流电机性能分析和交流绕组分析。第 3 章, 给出了交流电机空间离散傅里叶变换理论在多相交流电机分析中的应用; 第 4~6 章, 分析了常用绕组的全息谱; 第 7 章, 仅就交流绕组的全息谱分析理论在交流电机三相合成正弦绕组和低谐波绕组的设计、绕组谐波漏抗的计算、绕组自感系数和互感系数的计算等方面的应用进行了详细论述。关于交流电机空间离散傅里叶变换理论和交流绕组的全息谱分析理论在交流电机其他方面的应用, 本书暂未提及, 如单绕组变极绕组设计、电机故障分析、故障诊断、多相 (五相、双三相、九相、十二相等) 电机绕组分析和数学建模及多相电机矢量控制等方面的应用。

在本书的写作过程中，作者参阅了大量已有的书籍和论文，其中主要的书籍和论文已经列入了本书的参考文献，以供读者查阅，同时也对这些书籍、论文的作者表示感谢。如有遗漏，请与作者或出版社联系，以便及时更正。另外，非常感谢中国水利水电出版社的编辑及同事们为本书付出的辛勤工作，也感谢家人，特别是爸爸、姐姐、姐夫、弟弟、爱妻钟岚和女儿对本书的支持和帮助！

限于作者水平，书中难免存在不妥和错误，恳切希望读者批评指正。电子邮箱：flower12875@163.com。

本书是专门论述交流电机分析理论和交流电机绕组的著作，是作者多年研究总结而成。三十余年前，我在西安交通大学师从有着深厚电机造诣的汪国梁教授，学习、研究交流电机及绕组理论。承蒙先生教诲，受益终生。付梓前，希先生指教已不可得。谨以此书作为对先生的纪念！

谨以此书纪念我敬爱的母亲甘志玉女士！

侯新贵

2017年8月30日于南京

目 录

前言

第1章 交流电机绕组引论	1
1.1 交流电机绕组的构成要求	1
1.2 交流电机绕组的分类	1
1.3 交流电机绕组的基本术语	3
1.4 交流电机散布绕组的数学模型	4
1.5 交流电机绕组理论的研究内容	14
1.6 交流电机绕组的分析方法	14
第2章 交流电机绕组的基本理论	24
2.1 单根载流导体的磁动势	24
2.2 单个载流线圈的磁动势	28
2.3 槽磁动势星形图及槽电动势星形图	31
2.4 一相绕组产生的磁动势	40
2.5 节距因数、分布因数及绕组因数的特征	42
2.6 多相对称绕组的合成磁动势	51
2.7 绕组中的感应电动势	56
第3章 交流电机空间离散傅里叶变换理论和绕组的全息谱分析	58
3.1 连续傅里叶变换	58
3.2 离散傅里叶变换	68
3.3 交流电机绕组的空间域离散序列	74
3.4 交流电机空间离散傅里叶变换理论和交流绕组的全息谱分析	79
3.5 交流电机标准正弦散布绕组的全息谱分析	87
3.6 交流绕组全息谱的性质	94
3.7 交流绕组谐波分析的全息谱方法	96
3.8 交流绕组磁动势的全息谱分析方法	96
3.9 交流绕组感应电动势的全息谱分析方法	101
3.10 多相交流电机的空间离散傅里叶变换理论	102
第4章 三相交流整数槽绕组的全息谱分析	123
4.1 三相 60° 相带整数槽绕组	123

4.2	三相大小相带整数槽绕组	130
4.3	三相 120° 相带整数槽绕组	131
4.4	三相交流整数槽绕组的全息谱和磁动势	132
4.5	三相交流绕组相序全息谱和合成磁动势	144
第5章	三相交流分数槽绕组的全息谱分析	149
5.1	分数槽绕组的构成原理	149
5.2	三相 60° 相带分数槽绕组	152
5.3	三相大小相带分数槽绕组	160
5.4	三相 120° 相带分数槽绕组	162
5.5	$q < 1$ 的三相分数槽集中绕组	162
5.6	三相交流分数槽绕组的全息谱	174
5.7	三相正规交流绕组分相及全息谱分析的通用计算机程序	190
第6章	单相交流电机绕组的全息谱分析	194
6.1	单相等匝数绕组	194
6.2	单相标准正弦绕组	200
6.3	单相正弦绕组空间域分析	203
6.4	单相正弦绕组的全息谱分析	207
第7章	交流电机绕组全息谱分析理论的应用	212
7.1	三相合成正弦绕组和三相低谐波绕组设计	212
7.2	交流电机绕组的谐波漏抗计算	227
7.3	交流电机绕组自感系数和互感系数的全息谱分析法	240
附录		253
附表1	单相正弦 A 类、B 类绕组的每槽槽线数分配、基波绕组因数、 平均节距和 ΣS 表	253
附表2	单相正弦 A 类、B 类绕组的谐波绕组因数表	255
附表3	单相正弦 A 类、B 类绕组的谐波强度表	258
参考文献		260

第1章 交流电机绕组引论^[1-11]

绕组是电机的主要和关键部件，是电机电气结构的核心，直接影响电机的运行性能和可靠性。一方面，绕组通以电流，产生磁场；另一方面，当绕组交链的磁链发生变化时，如磁场变化或磁场与绕组有相对运动等，便在其中产生感应电动势。从而在电机中产生电磁功率和电磁转矩，以实现机电能量之间的转换。在能量转换过程中，无论电机运行于发电机状态还是电动机状态，能量转换都是通过绕组中的感应电动势及绕组中的电流与磁场产生的电磁转矩完成。绕组理论是电机设计和分析的重要理论。交流电机的绕组及绕组的磁动势和电动势是交流电机分析的三大基本问题。

本书仅分析交流电机绕组。

1.1 交流电机绕组的构成要求

研究电机绕组，需要理论与实践并重。从技术性和经济性方面考虑，设计交流电机绕组时，绕组构成的原则如下：

(1) 经济性地获得技术上满足要求的感应电动势和磁动势，包括感应电动势和磁动势的波形接近正弦波，并使其基波分量尽可能大，而其谐波分量尽可能小。

(2) 对多相交流电机的绕组，各相绕组应对称分布、匝数及有效匝数相等。如对三相交流电机，各相绕组相同且各相绕组空间上互差 120° 电角度。而对单相交流电机，其主绕组的轴线和辅助绕组的轴线在空间上通常相差 90° 电角度。主绕组和辅助绕组的槽数分配、绕组型式、绕组匝数等可以相同（如单相电容运转电动机中），也可以不同（如单相分相启动电动机中）。

(3) 工艺上结构简单，线圈数目少，有合适的槽满率。绕组的制造、嵌线及检修方便。

(4) 尽量缩短连接部分，节约材料用量。绕组电阻小，损耗小。

(5) 绕组的绝缘和机械强度可靠，散热条件好。

1.2 交流电机绕组的分类

交流电机绕组型式很多，从不同的角度，交流绕组可以分为不同的类型。传统的分类方法如下：

(1) 按相数分类，交流绕组可分为单相绕组、三相绕组及多相绕组。

(2) 按每极每相槽数分类，交流绕组可分为整数槽绕组和分数槽绕组。

(3) 按节距分类，交流绕组可分为短距绕组、整距绕组和长距绕组。

(4) 按槽内线圈边的层数分类, 交流绕组可分为单层绕组、双层绕组和单双层绕组等。其中单层绕组按线圈绕法分为同心式、链式、交叉式、交叉同心式等; 双层绕组按线圈端部连接的形状分为叠绕组和波绕组。多于两层的绕组较少应用。而单双层绕组是在铁芯的一部分槽中嵌入单层线圈边, 另一部分槽中嵌有双层线圈边。这种既有单层又有双层的绕组是由双层短距绕组演变过来的^[108]。

(5) 按相带分类, 交流绕组可分为 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 180° 及大小相带等绕组。

(6) 按线圈组数目与磁极数目的关系分类, 交流绕组可分为显极式 (Whole Coiled) 绕组和庶极式 (Half Coiled) 绕组。显极式绕组中, 每个线圈组形成一个磁极, 绕组的线圈组数与磁极数相等。在庶极式绕组中, 每个线圈组形成两个磁极, 绕组的线圈组数为磁极数的一半^{[107][108]}。

此外, 交流电机绕组还有变极绕组、三相 Y- Δ 混合连接的正弦绕组、单相正弦绕组、低谐波绕组等特殊绕组。

本书根据交流电机绕组的全息谱分析 (HAW) 需要, 按绕组在空间的分布方式, 将交流电机绕组分为连续绕组、非量化散布绕组和量化散布绕组。

1.2.1 连续绕组 (Continuous Winding)

连续绕组是指绕组导体在空间一定范围内除了有限个间断点以外连续存在的绕组。常见的连续绕组有实心电机中的实心转子、某些控制电机中使用的空心杯转子、考虑阻尼作用时的隐极同步电机转子本体等。特别地, 计及导体在槽中分布影响的槽口因数, 对它进行分析时, 绕组是作为连续绕组 (可称为伪连续绕组以区别于连续绕组) 考虑的。

1.2.2 非量化散布绕组 (Non-quantized Discrete Winding)

散布绕组是指绕组导体仅在空间上一些离散的位置处存在的绕组, 包括非量化散布绕组和量化散布绕组。

通常, 交流电机绕组导体嵌放在圆周上均匀开槽的铁芯槽内, 即绕组在空间上离散化分布。对应于连续绕组, 称这类绕组为散布绕组。分析散布绕组时不考虑绕组导体几何形状和集肤效应等的影响。绕组在槽中的导体数量称为槽线匝数, 简称槽线数。非量化散布绕组是指各槽中的槽线数可连续变化, 即连续取值的绕组。本书采用交流电机绕组的全息谱分析, 所分解后的绕组即属于这种性质的绕组。非量化散布绕组是理论化的抽象绕组而非实际应用的绕组, 因为实际绕组槽线数必须为整数。

1.2.3 量化散布绕组 (Quantized Discrete Winding)

量化散布绕组是指绕组在空间上离散嵌放在电机槽内, 并且各槽中的槽线匝数已量化为整数或进一步量化成其他一些特定要求的整数分布形式散布绕组, 如要求各槽中导体数相同等。实际使用的散布绕组必须是经过量化处理后的绕组。也只有通过量化, 散布绕组才能应用于工程实践中。

本书除分析槽口因数时使用连续绕组外, 仅以非量化散布绕组和量化散布绕组作为绕组研究的对象。

需要特别说明的是：电机学等电机的理论中，将安装在凸形磁极铁芯上的绕组，如直流电机定子上的主磁极绕组、换向极绕组、凸极同步电机中的励磁绕组等，称为集中式绕组（Concentrated Winding）。对于多相电机而言，若每相绕组在每个磁极下只占有一个槽或少于一个槽时，绕组也认为是集中式绕组。目前在永磁无刷直流电动机和永磁同步电动机中常使用这种集中式绕组。相对于集中式绕组，将分散布置于铁芯槽内的绕组，如直流电机电枢绕组，同步电机的电枢绕组，三相异步电机的定子、转子绕组等，称为分布式绕组（Distributed Winding）。本书定义的散布绕组与传统意义的分布绕组，定义相近，但含义有明显差异，应注意其区别。散布绕组与连续绕组相对应，分布式绕组则与集中式绕组相对应。

1.3 交流电机绕组的基本术语

各种交流电机散布绕组均是由沿电机气隙圆周分布的导电体构成。本小节简单说明有关绕组的基本术语。

1.3.1 线圈与导体

线圈是组成绕组的基本元件，可由一匝或多匝构成。它是按一定形状、用相应绝缘等级的电磁线或线棒制成的。线圈的直线部分嵌放在电机铁芯槽内，因其在能量转换过程中所起的重要作用而被称为有效边；而在槽外的、被称为线圈端部的部分，其作用仅是把线圈的两个有效边连接起来。

位于线圈平面上的对称轴，将该线圈分成两半，每一半线圈称为线圈边；或将一匝线圈分成两半，每一半称为导体。

一个线圈中的各个线匝间串联连接，内部没有结点，所以线圈中所有线匝流过相同的电流。

线圈的参数有导电体材料、线规、线圈的形状、线圈匝数、节距等。在绕组的基本分析理论中，线圈的基本要素为线圈匝数和节距。

1.3.2 线圈组、绕组段与绕组支路

普通的交流电机绕组构成时，每相先由一个极下或一对极下同一相带的多个线圈串联，组成一单元，称为线圈组或极相组。区别于线圈组，在变极绕组及其他非正规的绕组中，更一般地，把若干个相关线圈串联在一起构成的部分，称为绕组段。若干个线圈组或绕组段串联在一起，形成的一条支路，称为绕组支路。在交流电机性能分析时，尤其是不对称运行分析、电机故障分析等时，各绕组支路是建立电机数学模型的基本单元。绕组支路也是绕组谐波分析的基本单元。

1.3.3 一相绕组和多相绕组

一相绕组由多个线圈组、绕组段或绕组支路经并联或串并联组成。联合多个相绕组便得到多相绕组，它们按一定规律嵌在电机铁芯槽内，并按一定规律连接。

1.3.4 绕组的基本参数

绕组的基本参数有槽数 Q 、相数 m 、极数 $2p$ 、极距 τ 、每极每相槽数 q 、槽距角 α 、节距 y 、并联支路数 a 、线圈匝数 N_c 、每相串联匝数 N 及相带等。请参阅《电机学》^{[7][8]}。

对常规的多相对称交流绕组，有关系式

$$\tau = \frac{Q}{2p} \text{ (槽数)} \quad (1-1)$$

$$q = \frac{Q}{2pm} \quad (1-2)$$

$$\alpha = p \frac{360^\circ}{Q} \text{ (电角度)} \quad (1-3)$$

$$N = \begin{cases} \frac{pqN_c}{a}, & \text{单层整数槽绕组} \\ \frac{2pqN_c}{a}, & \text{双层整数槽绕组} \end{cases} \quad (1-4)$$

或

$$N = \begin{cases} \frac{QN_c}{2ma}, & \text{单层多相对称绕组} \\ \frac{QN_c}{ma}, & \text{双层多相对称绕组} \end{cases} \quad (1-5)$$

当 q 为整数时，交流电机绕组可构成整数槽绕组； q 为分数时，绕组可构成分数槽绕组。而对应 $y < \tau$ 的绕组称为短距绕组； $y = \tau$ 时称为整距绕组； $y > \tau$ 时称为长距绕组。除单绕组多速交流电动机中会有长距绕组外，一般不采用长距绕组。

1.4 交流电机散布绕组的数学模型

交流电机散布绕组的表示有空间域表示和频率域表示两类。本节论述散布绕组的空间域表示方法，频率域的表示方法在第 3 章中讨论。

交流电机绕组常用绕组展开图表示。绕组展开图是绕组在空间域中最直接、最直观的表达方法。绕组展开图在电机学中有较为详尽的描述，它可以用来表示绕组中各个线圈的连接关系。下面 [例 1-1] 和 [例 1-2] 的绕组，其绕组展开图如图 1-1 和图 1-2 所示。但若采用计算机来分析交流电机绕组以及电机性能时，并不能直接使用绕组展开图。为此，必须建立绕组的计算机分析数学模型。

为建立绕组的数学模型，首先对电机铁芯中的槽编号，并选取槽中导体电流的参考方向。将槽数为 Q 的交流电机的槽，顺着电机磁场相对于绕组的运动方向，依次编号为 1, 2, 3, ..., Q 。选取槽中导体电流从电机的一个端面到另一端面为电流的参考方向。槽中导体的电流若以与参考方向相同的方向流通，电流为正值；若以与参考方向相反的方向流通，电流为负值。通常取从绕组出线端的首端流入绕组第一个线圈边的电流方向为槽中电流的参考方向。

下面分别论述散布绕组的槽号表示法、相带表示法、槽线数表示法及组合表示法等空

间域中的绕组表示法。

1.4.1 槽号表示法

绕组的槽号表示法指采用有向槽号来表示绕组的方法。它是对某相绕组或绕组中的某条支路,用线圈有效边所处的槽号及槽号的正负属性代表组成绕组或绕组支路的线圈边位置及线圈边的连接情况,按绕组连接的顺序,依次将其列出形成一个矩阵,用此矩阵表示绕组或绕组支路的方法。

使用槽号表示法表示绕组时,若一相绕组或一条绕组支路,当其线圈连接顺序对分析绕组没有影响时,此时可以改变槽号表示法中各线圈槽号的前后次序,以方便绕组表示。

在空间域中对绕组分析时,所分析的绕组基本单元是流过相同电流的相绕组,或者相绕组中的某条支路。当一相绕组中各支路电流不同时,对绕组的各支路必须分开处理。而对流过相同电流的各绕组支路,可以将它们合并,作为一个绕组分析。以下将合并后的这种绕组分析单元也简称为绕组,以方便叙述。应注意区别。

绕组的槽号表示法具体的数学表示形式有单行矩阵槽号表示法、双行矩阵槽号表示法以及双层绕组的双行扩展矩阵槽号表示法。

1. 单行矩阵槽号表示法

绕组的单行矩阵槽号表示法采用行矩阵表示绕组,矩阵中的各元素为线圈有效边所处的槽号,并用槽号的正负属性代表绕组的连接方法。正槽号表示正向连接,即连接成绕组时,槽中导体流过的电流与槽电流参考方向相同;槽号表示法中的负槽号表示反向连接,即连接成绕组时,槽中导体流过的电流与参考方向相反,也即与正槽号中导体流过的电流方向相反。

对交流电机中常用的单层绕组和双层绕组,均可使用单行矩阵槽号表示法表示。一般情况,用槽号来表示线圈边,一个槽号代表一个线圈边。但是对线圈节距相同的双层绕组,因节距相同,此时可以用槽号表示线圈,某一个槽号就是指上层边嵌于该槽号的线圈,一个槽号代表一个线圈。注意,采用槽号代表线圈的方法描述双层绕组,还需要同时给出线圈的节距。

【例 1-1】 槽数为 24 的三相 4 极交流电机,绕组为 60° 相带单层链式绕组,并联支路数 $\alpha=1$,用槽号表示法表示该绕组。

解: 由电机学,该绕组的展开图如图 1-1 所示。

(1) 由图 1-1 可见, A 相绕组占有 1、2、7、8、13、14、19、20 槽。根据绕组连接,并选取槽 2 中的导体电流方向为槽电流的参考方向,按绕组中线圈的连接顺序, A 相绕组的槽号表示法表示是

A 相: 2, -7, 13, -8, 14, -19, 1, -20。

同理, B 相和 C 相绕组为

B 相: 6, -11, 17, -12, 18, -23, 5, -24;

C 相: 10, -15, 21, -16, 22, -3, 9, -4。

(2) 当不考虑线圈的连接次序时,将绕组按槽号的顺序排列,并按行矩阵格式,分别用矩阵 **A**、**B**、**C** 表示三相绕组,各相绕组的槽号表示法表示为

$$\mathbf{A} = [1 \quad 2 \quad -7 \quad -8 \quad 13 \quad 14 \quad -19 \quad -20]$$

$$B=[5 \ 6 \ -11 \ -12 \ 17 \ 18 \ -23 \ -24]$$

$$C=[9 \ 10 \ -15 \ -16 \ 21 \ 22 \ -3 \ -4] \text{ 或 } C=[-3 \ -4 \ 9 \ 10 \ -15 \ -16 \ 21 \ 22]$$

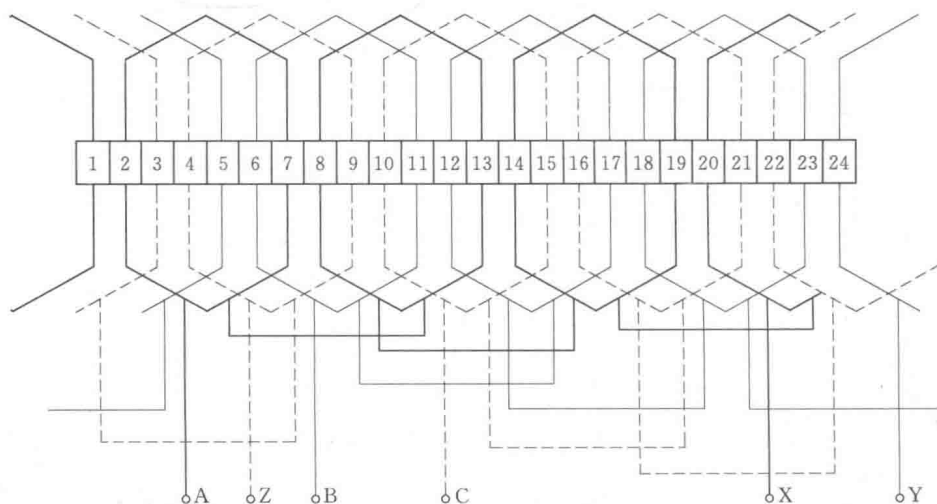


图 1-1 三相 4 极 24 槽、 $a=1$ 、单层 60° 相带链式绕组展开图

一般没有特别说明，常采用 (2) 中的方法表示，因其表示比较简便，且多数电机分析情况与绕组内部的排列顺序无关。

当绕组行矩阵 A 、 B 、 C 的长度相同时，可将 A 、 B 、 C 合并，形成三相绕组的槽号法表示。绕组用矩阵 W 表示，为

$$W=\begin{bmatrix} 1 & 2 & -7 & -8 & 13 & 14 & -19 & -20 \\ 5 & 6 & -11 & -12 & 17 & 18 & -23 & -24 \\ 9 & 10 & -15 & -16 & 21 & 22 & -3 & -4 \end{bmatrix}$$

其中，矩阵的一行表示一相绕组。

【例 1-2】 槽数为 36 的三相 4 极交流电机，绕组为 60° 相带双层叠绕组，节距 $y=7$ ，并联支路数 $a=1$ ，用槽号表示法表示该绕组。

解：由电机学，该绕组的展开图如图 1-2 所示。

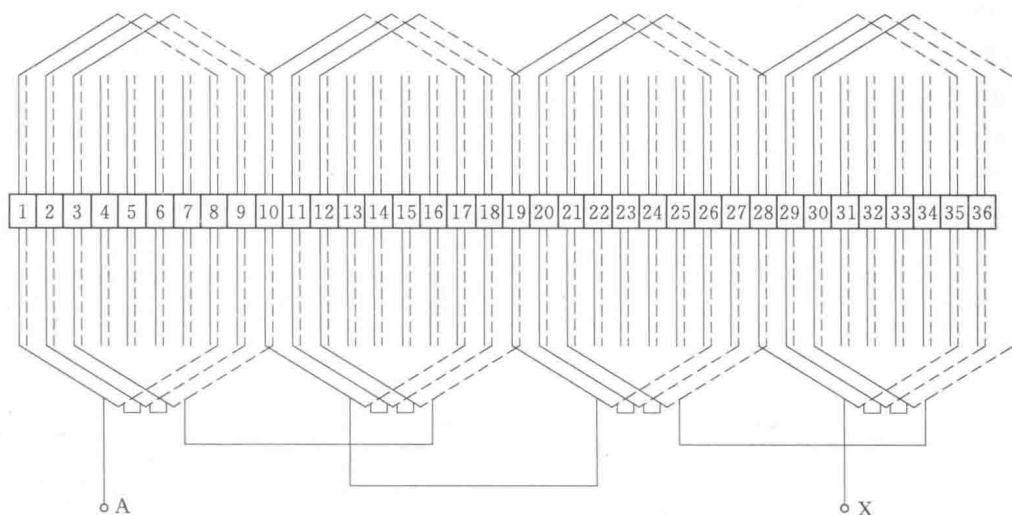
(1) 根据绕组展开图，并选取槽 1 中的上层导体电流方向为槽中电流的参考方向，按绕组中线圈的连接顺序，各相绕组的槽号表示法表示是

A 相：1，-8，2，-9，3，-10，19，-12，18，-11，17，-10，19，-26，20，-27，21，-28，1，-30，36，-29，35，-28；

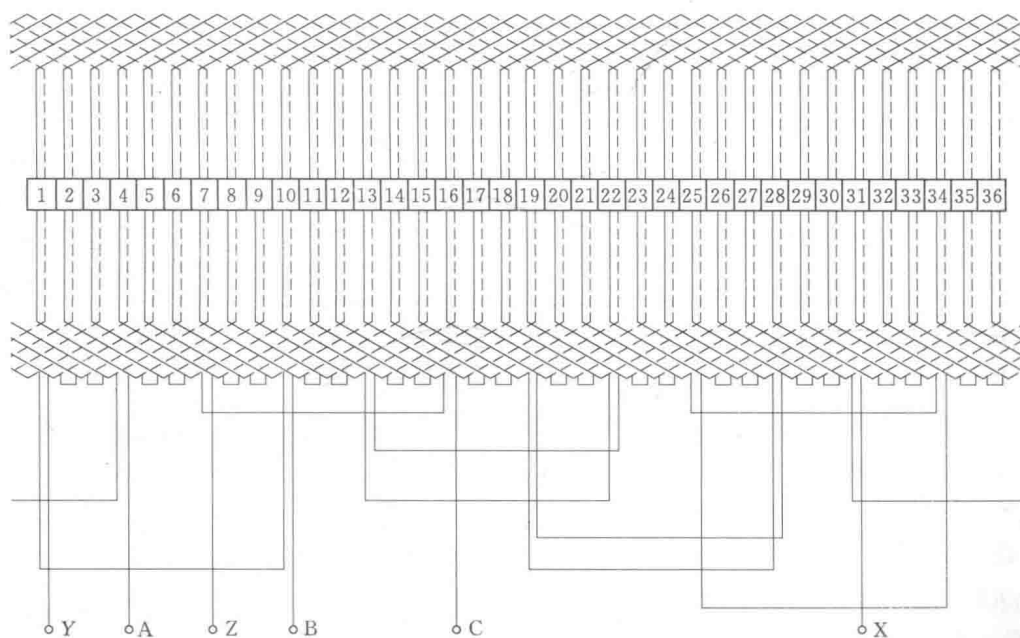
B 相：7，-14，8，-15，9，-16，25，-18，24，-17，23，-16，25，-32，26，-33，27，-34，7，-36，6，-35，5，-34；

C 相：13，-20，14，-21，15，-22，31，-24，30，-23，29，-22，31，-2，32，-3，33，-4，13，-6，12，-5，11，-4。

(2) 当不考虑线圈连接次序时，将绕组按槽号的大小顺序排列，各相绕组的槽号表示法表示为



(a)



(b)

图 1-2 三相 4 极 36 槽、 $y=7$ 、 $a=1$ 、双层 60° 相带叠绕组展开图

(a) A 相绕组展开图；(b) 三相绕组展开图

A 相：1, 2, 3, -8, -9, -10, -10, -11, -12, 17, 18, 19, 19, 20, 21, -26, -27, -28, -28, -29, -30, 35, 36, 1；

B 相：7, 8, 9, -14, -15, -16, -16, -17, -18, 23, 24, 25, 25, 26, 27, -32, -33, -34, -34, -35, -36, 5, 6, 7；

C 相：13, 14, 15, -20, -21, -22, -22, -23, -24, 29, 30, 31, 31, 32,

33, -2, -3, -4, -4, -5, -6, 11, 12, 13。

(3) 根据节距 y , 按绕组连接规律, 将绕组的槽号分成上层、下层两部分, 各相绕组的槽号表示法表示为

A 相: 上层边 1, 2, 3, -10, -11, -12, 19, 20, 21, -28, -29, -30,

下层边 -8, -9, -10, 17, 18, 19, -26, -27, -28, 35, 36, 1;

B 相: 上层边 7, 8, 9, -16, -17, -18, 25, 26, 27, -34, -35, -36,

下层边 -14, -15, -16, 23, 24, 25, -32, -33, -34, 5, 6, 7;

C 相: 上层边 13, 14, 15, -22, -23, -24, 31, 32, 33, -4, -5, -6,

下层边 -20, -21, -22, 29, 30, 31, -2, -3, -4, 11, 12, 13。

(4) 因各线圈节距相同, 可用槽号来表示线圈, 但需说明线圈节距大小。若按行矩阵格式分别用矩阵 **A**、**B**、**C** 表示 A 相、B 相、C 相的绕组, 各相绕组的槽号表示法表示为

$$\mathbf{A} = [1 \quad 2 \quad 3 \quad -10 \quad -11 \quad -12 \quad 19 \quad 20 \quad 21 \quad -28 \quad -29 \quad -30]$$

$$\mathbf{B} = [7 \quad 8 \quad 9 \quad -16 \quad -17 \quad -18 \quad 25 \quad 26 \quad 27 \quad -34 \quad -35 \quad -36]$$

$$\mathbf{C} = [13 \quad 14 \quad 15 \quad -22 \quad -23 \quad -24 \quad 31 \quad 32 \quad 33 \quad -4 \quad -5 \quad -6]$$

且节距 $y=7$ 。

当绕组行矩阵 **A**、**B**、**C** 的长度相同时, 可将 **A**、**B**、**C** 合并, 形成三相绕组的槽号表示。绕组用矩阵 **W** 表示为

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & -10 & -11 & -12 & 19 & 20 & 21 & -28 & -29 & -30 \\ 7 & 8 & 9 & -16 & -17 & -18 & 25 & 26 & 27 & -34 & -35 & -36 \\ 13 & 14 & 15 & -22 & -23 & -24 & 31 & 32 & 33 & -4 & -5 & -6 \end{bmatrix}$$

其中, 矩阵的一行表示一相绕组。

上述双层绕组的 4 种方法中, 一般没有特别说明, 常采用第 4 种方法表示绕组。注意, 方法 (4) 中需要给出线圈的节距。对于单层绕组, 如果令 $y=0$ 来表示单层绕组, 从而可将单层绕组和双层绕组的槽号表示法统一起来, 以方便计算机分析的编程处理。单层绕组和双层绕组的槽号表示法均可按方法 (4) 表示。

2. 双行矩阵槽号表示法

绕组单行矩阵槽号表示法中, 矩阵的每个元素是线圈边。绕组双行矩阵槽号表示法中, 矩阵的每列是一个线圈, 即将每个线圈的两个边作为一个单元考虑。

如, [例 1-1] 中的绕组, A 相绕组共有 4 个线圈, 分别由槽 2 和槽 7、槽 8 和槽 13、槽 14 和槽 19、槽 20 和槽 1 中的线圈边构成。A 相绕组用双行矩阵槽号表示法可表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2 & 13 & 14 & 1 \\ -7 & -8 & -19 & -20 \end{bmatrix}$$

或

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2 & -8 & 14 & -20 \\ -7 & 13 & -19 & 1 \end{bmatrix}$$

此矩阵中的每一列为一个线圈单元。

同样, B 相和 C 相绕组表示为

$$B = \begin{bmatrix} 6 & 17 & 18 & 5 \\ -11 & -12 & -23 & -24 \end{bmatrix}$$

或

$$B = \begin{bmatrix} 6 & -12 & 18 & -24 \\ -11 & 17 & -23 & 5 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 10 & 21 & 22 & 9 \\ -15 & -16 & -3 & -4 \end{bmatrix}$$

或

$$C = \begin{bmatrix} 10 & -16 & 22 & -4 \\ -15 & 21 & -3 & 9 \end{bmatrix}$$

而对 [例 1-2] 中的绕组, 如用双行矩阵槽号表示法, 绕组可表示为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 19 & 18 & 17 & 19 & 20 & 21 & 1 & 36 & 35 \\ -8 & -9 & -10 & -12 & -11 & -10 & -26 & -27 & -28 & -30 & -29 & -28 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & 25 & 24 & 23 & 25 & 26 & 27 & 7 & 6 & 5 \\ -14 & -15 & -16 & -18 & -17 & -16 & -32 & -33 & -34 & -36 & -35 & -34 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & 31 & 30 & 29 & 31 & 32 & 33 & 13 & 12 & 11 \\ -20 & -21 & -22 & -24 & -23 & -22 & -2 & -3 & -4 & -6 & -5 & -4 \end{bmatrix}$$

或

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & -12 & -11 & -10 & 19 & 20 & 21 & -30 & -29 & -28 \\ -8 & -9 & -10 & 19 & 18 & 17 & -26 & -27 & -28 & 1 & 36 & 35 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 & -18 & -17 & -16 & 25 & 26 & 27 & -36 & -35 & -34 \\ -14 & -15 & -16 & 25 & 24 & 23 & -32 & -33 & -34 & 7 & 6 & 5 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 13 & 14 & 15 & -24 & -23 & -22 & 31 & 32 & 33 & -6 & -5 & -6 \\ -20 & -21 & -22 & 31 & 30 & 29 & -2 & -3 & -4 & 13 & 12 & 11 \end{bmatrix}$$

这些矩阵中的每一列均为一个线圈单元。

3. 双层绕组的双行扩展矩阵槽号表示法

从双行矩阵槽号表示法给出的例子中可以看出, 矩阵中的每列, 两个槽号为一正、一负。若从绕组首端到末端严格按线圈边排列槽号, 第一行总为正槽号, 第二行总为负槽号。即, 这种表现方式中, 因为槽号在矩阵的连接顺序体现了绕组的连接关系, 因此再使用槽号的正负表示连接方式, 信息出现冗余。现将槽号的正负属性改为表示线圈在槽中的上下层。对于双层绕组, 如果用正槽号表示上层线圈边, 负槽号表示下层线圈边, 此种双行矩阵槽号表示法可表示双层绕组每一支路连接的全部信息, 它与双层绕组展开图完全对应。这种槽号表示法称为双行扩展矩阵槽号表示法。

【例 1-3】 用双行扩展矩阵槽号表示法表示 [例 1-2] 中的绕组。

解: 根据绕组展开图, [例 1-2] 中的绕组, 用双行扩展矩阵槽号表示法, 三相绕组可分别表示为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & -19 & -18 & -17 & 19 & 20 & 21 & -1 & -36 & -35 \\ -8 & -9 & -10 & 12 & 11 & 10 & -26 & -27 & -28 & 30 & 29 & 28 \end{bmatrix}$$