

新型 电机绕组

——理论与设计

许实章 著

Windings
for Novel
Alternating
Current Machines
—Theory and
Design

新型电机绕组 ——理论与设计

Windings for Novel Alternating Current Machines—— Theory and Design

许实章 著



机械工业出版社

本书是作者 15 年来对电机绕组理论研究和设计方面的全面总结。也是作者继《交流电机的绕组理论》著作之后的第二部专著。

全书共十篇, 32 章。主要内容包括:

- (1) 谐波起动电动机从单波起动到双波起动和三波起动的发展过程。
- (2) 定、转子绕组的联结法及其作用机理。
- (3) 三波起动定子绕组的 5 种联结法及 75 个具体示例。
- (4) 用三波起动方法实现低成本、高可靠性的感应电动机的软起动。
- (5) 能自起动的抽水蓄能电站用双速凸极同步发电—电动机。
- (6) 定子用三波起动, 转子只用一套绕组而兼有起动、励磁、阻尼三种作用的隐极同步电动机, 并提供了 4、6、8、10 极电动机的具体示例。

书中附录还提供了具有实用价值的用计算机实现三相交流电机常规绕组和变极绕组的自动设计和谐波分析的通用程序。

本书可供从事电机理论研究、设计、制造和运行的工程技术人员使用; 也可供高等院校电机专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

新型电机绕组——理论与设计/许实章著. —北京: 机械工业出版社, 2001.11

ISBN 7-111-09226-0

I. 新… II. 许… III. ①电机—绕组—理论②电机—绕组—设计 IV. TM303.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 059527 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李振标 版式设计: 张世琴 责任校对: 张 佳

封面设计: 姚 毅 责任印制: 郭景龙

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·29.75 印张·2 插页·730 千字

0 001—3000 册

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010)68993821、68326677-2527

前 言

作者长期从事电机基本理论研究，特别是绕组理论和新型电机的开创性研究，取得较大成果^{〔1〕~〔3〕}，并有多项重要发明^{〔4〕~〔11〕}。1981年发明单绕组变极的“对称轴线法”^{〔15〕}。为详细论述该发明而出版了专著《交流电机的绕组理论》^{〔1〕}。该成果获1987年国家教委科技进步奖一等奖，并被选入中国科学院编的《中国基础研究百例》一书中^{〔2〕}。1985年发明谐波起动方法和谐波起动电动机^{〔4〕、〔5〕}，革掉了传统绕线型感应电动机发生事故的主要根源——集电环和电刷，在世界上首次研制成功高起动特性、高运行性能和高可靠性的绕线型感应电动机。该成果于1993年获国家发明奖二等奖和国家教委科技进步奖一等奖，并被列入国家科技成果重点推广计划。

谐波起动电动机从诞生到现在经历了三代：第一代(1985~1991年)为单波起动，采用单个谐波起动；第二代(1992~1995年)为双波起动^{〔8〕}，采用基波和一个谐波联合起动；1996年以后为第三代，采用基波和两个谐波联合起动，称为三波起动^{〔11〕}。三波起动消除了谐波起动电动机在应用中出现的问题和缺点，把谐波起动电动机提高到一个完善的地步，为其大量推广、应用创造了条件。

本书是作者15年来对该课题的理论研究和研制的全面总结。本书所指的新型电机就是获国家发明奖二等奖的谐波起动电动机，包括感应电动机和同步电动机。其中以社会上用得最多的感应电动机为主，同步电动机只有凸极电动机和隐极电动机两章。

本书包括十篇和一个附录。第一篇论述交流电机绕组的基础理论。在该篇第二章中，作者提出一个能很快判断任何复杂连接的交流电机绕组是否等效于正规60°相带绕组的“等安匝定理”。符合“等安匝定理”是所有谐波起动绕组在运行时必须满足的第一个基本要求。

本书第二篇是谐波起动感应电动机概论，分为三章论述。首先综述谐波起动感应电动机从诞生到发展、成熟的全过程。然后分两章论述定、转子绕组。对双波起动的定子绕组提出了比发明专利^{〔8〕}所述的更深入和具体的绕组方案。转子绕组结构十分巧妙，由于其结构型式独特，与传统电机相比，迥然不同，因此不易为人理解。为此，作者对该章的撰写作了特殊安排，先着重讲清楚焊接起动电阻的转子绕组的作用、机理，再过渡到采用“复合线圈”取代起动电阻^{〔12〕、〔9〕}，随之达到转子上无集电环、无电刷、无触点、无起动电阻的最理想情况。

本书第三篇为8、4、6极感应电动机的双波起动。双波起动是谐波起动发展过程中的第二代，曾产生过辉煌作用，当前已被更先进的三波起动所取代。

为使已达完善地步的三波起动电动机尽快在社会上推广、应用，本书以三波起动为重点，作了特别详细、深入、具体和完整的论述。

作者对三波起动感应电动机的定子绕组提出五种联结法，即大小双星、三星、复合多星、双星和单星-双星、单星-三星联结法。每种联结法用一篇的篇幅来撰写，可见重视程度。

在五种联结法中以大小双星联结法为最好，其接线最简单，而用途最广泛，高、低压电

动机皆适用。因此把大小双星联结法作为重中之重,用了8章(第十章至第十七章)的篇幅来论述。在第十章中,作者提出“谐波互消理论”,并由此提出一种很有实用价值的“以少代多设计法”,采用该方法能很快设计出所需的大小双星联结绕组,节省很多工作量。

在三星联结法中,对4极电动机,由于4不能被3整除,无法连接成严格对称的三星3Y/△联结,但作者经精心研究,对72槽4极电动机,采用独特的“6+2”和“4×2”的3支路结构型式,使其误差降到最小程度,而提出72槽4极电动机的3Y/△联结,并推广、应用于72槽8极电动机的3Y/△联结上。

复合多星联结法是三波起动电动机五种联结法中最复杂的一种。为充分发挥这种联结法的特点,作者提出一种很独特的“综合设计法”,使得在按起动工况设计绕组方案时,每相所占的全部槽号都列入优选对象,因此能够优选出最佳方案。

对8极和4极电动机,由于8和4都不能被3整除而难以设计出严格对称的复合多星联结。为彻底解决该难题,作者提出在1/4槽号数的线圈中采用“分裂线圈”的独特办法,而设计成功理论上严格对称的8极和4极的复合多星联结。实践证明,这种含分裂线圈的绕组方案在工艺上可行,制造出来的电动机性能很好,获得用户好评。

最后两种联结法没有什么困难。

本书对上述五种定子绕组联结法一共举出75个具体示例。对每一示例都是首先设计出绕组联结方案,分析起动时的磁动势谐波,再通过电磁计算求得应用于某一常用电动机时的起动特性和运行性能指标。约有1/3的示例还在最后绘出了起动全过程中的各种特性曲线。

显然,这75个具体示例,可用于全面了解五种联结法应用于各种电动机时所能达到的性能指标或用做试制这种新型电动机的第一手资料。

本书第九篇是用三波起动实现感应电动机的软起动。软起动在工业上很受重视,特别是对带式输送机,若能实现软起动,则所用传送带可大大减薄,从而大幅度降低成本。因为传统感应电动机用基波起动时,必须经过最大转矩点,不得不借助于调压、变频来实现软起动,这不仅提高了整套装置的成本,又大大降低了其运行可靠性。唯有三波起动,不经过最大转矩点,因此只要精心设计三波之间的既互相制约、又互相加强的作用,就能使电动机的起动转矩在起动的全过程中,始终保持软起动所需数值,不多花费分文就轻而易举地实现软起动。显然,这样的软起动将是世界上成本最低而可靠性最高的软起动装置。本书第九篇对8、6、4极电动机共提出7个实现软起动的具体方案,每个方案都绘出了起动全过程中的转矩—转速特性曲线,平坦而接近恒定的转矩曲线令人信服。

本书第十篇是新型同步电机,包括两章。第一章是能自起动的抽水蓄能电站用双速凸极同步发电-电动机^[10]。该章内容发表于《中国电机工程学报》^[28]时,受到该刊编辑部的高度重视,并为此在该刊上特地开辟一个“新设计思想”栏目。该文后来被选编入中国科学院和工程院联合主编的《中国科学技术文库》一书中,这些事实已足以说明这一章的重要意义了。本篇第二章是转子绕组为起动、励磁和阻尼三合一的隐极式同步电动机。该章对4、6、8、10极四种电动机首先提出在转子上焊接起动电阻的三合一转子绕组,然后再提出独特的“分裂法”来取消焊接起动电阻,从而设计成功“无起动电阻的起动、励磁、阻尼三合一转子绕组”,把隐极同步电动机提高到一个很理想的境界。上述两种电动机都是由于采用谐波起动而取得的成果。

本书最后提供的附录:用计算机实现交流电机常规绕组和变极绕组的自动设计和分析谐

波的通用程序。这是作者前一专著⁽¹⁾的结晶，具有很高的实用价值。

本书从 1997 年冬开始撰写，前后历时三年。在此期间，得到许多同志的支持和帮助。首先是长期与作者并肩作战，从事新型电机试验和研制的于克训博士、王雪帆博士和何传绪高工。没有他们的共同努力就不可能获得新型电机的科研成果，而本书的撰写就成为无米之炊。其中，电磁计算程序是于克训博士专为谐波起动电动机而编写的，为配合书中绘制曲线的需要还作了补充、修改。华中科技大学计算机专业研究生薛慧同志提供了绘制工程曲线的程序并指导应用，为本书插入各种起动特性曲线创造很好条件。在此谨向上述同志表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，希望读者提出宝贵意见。

许实章

2001 年 1 月 1 日于武汉

目 录

前 言

第一篇 交流电机绕组的基础理论

第一章 交流电机绕组的基本特征	和电动势	8
和分析方法	第二章 三相交流电机绕组的	
第一节 构成绕组的基本元件	基础理论	12
第二节 绕组的磁动势和电动势	第一节 三相绕组对称的意义和条件	12
第三节 绕组电流、电动势和联结法的	第二节 正规 60° 相带绕组的特征	13
方向性	第三节 判断是否等效于正规 60° 相带绕组的	
第四节 用线圈矢量星形分析绕组的	“等安匝定理”	17
磁动势	第四节 分数槽绕组的特征	19
第五节 用槽号相位表分析绕组的磁动势	第五节 串-并联绕组互相转换理论	23

第二篇 谐波起动感应电动机概论

第三章 谐波起动感应电动机的	第一节 对定子绕组的基本要求	36
诞生和发展	第二节 单波起动电动机的定子绕组	37
第一节 传统感应电动机的现状和	第三节 双波起动电动机的定子绕组	43
存在的问题	第五章 谐波起动感应电动机的	
第二节 国内外对传统感应电动机的	转子绕组	58
改进工作	第一节 对转子绕组的基本要求	58
第三节 谐波起动感应电动机的诞生	第二节 焊接起动电阻的转子绕组	59
第四节 谐波起动感应电动机的发展	第三节 采用“复合线圈”取消	
第五节 新一代谐波起动感应电动机	“起动电阻”	75
第四章 谐波起动感应电动机的	第四节 采用“复合线圈组”的	
定子绕组	转子绕组	86

第三篇 双波起动感应电动机

第六章 双波起动的八极电动机	双波起动 8 极电动机	93
第一节 采用 $3Y/\Delta_{-1/3}$ 联结的双波起动	第七章 双波起动的四极电动机	102
8 极电动机	第一节 双波起动 4 极电动机定子绕组	
第二节 采用 $3Y/(Y-\Delta)$ 联结的双波	$3Y/\Delta_{-1/3}$ 联结的设计方法	102
起动 8 极电动机	第二节 72 槽 4/4、6 极双波起动 $3Y/\Delta_{-1/3}$	
第三节 采用 $(Y-3Y)/(Y-\Delta)_{-1/4}$ 联结的	联结运行时的磁动势谐波含量	106
双波起动 8 极电动机	第三节 72 槽 4/4、6 极双波起动 $3Y/\Delta_{-1/3}$	
第四节 采用 $(Y-3Y)/(Y-Y-\Delta)$ 联结的	联结起动时的磁动势谐波含量	107

第四节	72 槽 4/4、6 极双波起动 $3 Y/\Delta_{-1/3}$ 联结的应用情况	109	第二节	双波起动 6/6、8 极 $3 Y/\Delta_{-1/3}$ 联结起动时的磁动势谐波含量	116
第八章	双波起动的六极电动机	111	第三节	72 槽 6/6、8 极双波起动 $3 Y/\Delta_{-1/3}$ 联结的应用情况	118
第一节	双波起动 6 极电动机 6/6、8 极 $3 Y/\Delta_{-1/3}$ 联结的设计方法	111			

第四篇 三波起动感应电动机的大小双星联结法

第九章 三波起动电动机的基本要求

第一节	对三波起动时定子绕组产生磁动势的谐波含量的要求	121
第二节	对起动时产生的基波磁动势的基本要求	121
第三节	对起动时产生的主谐波磁动势的基本要求	121
第四节	对起动时产生的副谐波磁动势的基本要求	122
第五节	对三波起动电动机所用转子绕组的基本要求	126

第十章 大小双星联结法概论

第一节	大小双星联结法的基本情况	128
第二节	大小双星联结法的总体设计	129
第三节	谐波互消理论和以少代多设计法	131
第四节	大小双星联结的不同结构型式	134
第五节	具体设计内容简介	135

第十一章 八极电动机的大小双星 $Y_6 Y_2/Y_6$ 联结

第一节	设计 72 槽 8 极电动机绕组所需基本数据和数列	137
第二节	72 槽 8 极电动机 $Y_6 Y_2/Y_6$ 联结的基本情况	139
第三节	72 槽 8 极电动机 $Y_6 Y_2/Y_6$ 联结的具体设计	140
第四节	72 槽 8 极电动机 $Y_6 Y_2/Y_6$ 联结起动时的磁动势谐波含量	143
第五节	72 槽 8 极电动机 $Y_6 Y_2/Y_6$ 联结的应用情况	144
第六节	反映 $Y_6 Y_2/Y_6$ 联结起动全过程的各种特性曲线	146

第十二章 八极电动机的大小双星 $Y_5 Y_3/Y_5$ 联结

第一节	72 槽 8 极电动机 $Y_5 Y_3/Y_5$ 联结的	
-----	-------------------------------	--

	基本情况	149
第二节	72 槽 8 极电动机 $Y_5 Y_3/Y_5$ 联结的具体设计	150
第三节	72 槽 8 极电动机 $Y_5 Y_3/Y_5$ 联结 起动时的磁动势谐波含量	153
第四节	72 槽 8 极电动机 $Y_5 Y_3/Y_5$ 联结的应用情况	154
第五节	反映 $Y_5 Y_3/Y_5$ 联结起动全过程的 各种特性曲线	155

第十三章 八极电动机分数槽绕组的大小双星 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结

第一节	84 槽 8 极电动机 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结的基本情况	159
第二节	设计 84 槽 8 极电动机绕组所需基本数据和数列	160
第三节	84 槽 8 极分数槽绕组 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结的具体设计	162
第四节	84 槽 8 极分数槽绕组 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结起动时的磁动势谐波含量	164
第五节	84 槽 8 极分数槽绕组 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结的应用情况	165
第六节	反映 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结起动全过程的各种特性曲线	166

第十四章 八极电动机每相等效三支路的大小双星 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结

第一节	72 槽 8 极电动机 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结的理论分析	170
第二节	72 槽 8 极电动机 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结的具体设计	173
第三节	72 槽 8 极电动机 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结起动时的磁动势谐波含量	176
第四节	72 槽 8 极电动机 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结的应用情况	177
第五节	8 极电动机采用大小双星联结可能采	

用的每相匝数	178
第十五章 四极电动机的大小双星 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结	179
第一节 设计 48 槽 4 极电动机绕组所需基本数据和数列	179
第二节 48 槽 4 极电动机 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结的基本情况	181
第三节 48 槽 4 极电动机 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结的具体设计	181
第四节 48 槽 4 极电动机 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结起动时的磁动势谐波含量	184
第五节 48 槽 4 极电动机 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结的应用情况	185
第六节 反映 4 极电动机 $Y_3 Y_1/Y_3$ 联结起动全过程的各种特性曲线	186
第十六章 四极电动机每相等效三支路的大小双星 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结	190
第一节 72 槽 4 极电动机 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结的理论分析	190
第二节 设计 72 槽 4 极电动机绕组所需基本	

数据和数列	192
第三节 72 槽 4 极电动机 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结的具体设计	194
第四节 72 槽 4 极电动机 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结起动时的磁动势谐波含量	196
第五节 72 槽 4 极电动机 $Y_{(2)} Y_{(1)}/Y_{(2)}$ 联结的应用情况	197
第六节 72 槽 4 极电动机采用大小双星联结可能采用的每相匝数	198
第十七章 六极电动机的大小双星 $Y_4 Y_2/Y_4$ 联结	200
第一节 设计 72 槽 6 极电动机绕组所需基本数据和数列	200
第二节 72 槽 6 极电动机 $Y_4 Y_2/Y_4$ 联结的具体设计	201
第三节 72 槽 6 极电动机 $Y_4 Y_2/Y_4$ 联结起动时的磁动势谐波含量	206
第四节 72 槽 6 极电动机 $Y_4 Y_2/Y_4$ 联结的应用情况	206
第五节 反映 72 槽 6 极 $Y_4 Y_2/Y_4$ 联结起动全过程的各种特性曲线	207

第五篇 三波起动电动机的三星联结法

第十八章 六极电动机的三星 $3 Y_2/\Delta_4$ 联结	211
第一节 三星联结法的通用接线图	211
第二节 72 槽 6 极电动机三星 $3 Y_2/\Delta_4$ 联结的设计方法	212
第三节 72 槽 6 极电动机 $3 Y_2/\Delta_4$ 联结起动时的磁动势谐波含量	219
第四节 72 槽 6 极电动机 $3 Y_2/\Delta_4$ 联结的应用情况	220
第五节 反映 72 槽 6 极 $3 Y_2/\Delta_4$ 联结起动全过程的各种特性曲线	221
第十九章 72 槽四极电动机的三星 $3 Y/\Delta$ 联结	224
第一节 72 槽 4 极 $3 Y/\Delta$ 联结的绕组方案	224
第二节 72 槽 4 极绕组 $3 Y/\Delta$ 联结起动时的磁动势谐波含量	230

第三节 72 槽 4 极绕组 $3 Y/\Delta$ 联结的应用情况	231
第四节 $3 Y$ 磁动势的偏差可能产生的不良后果	233
第二十章 72 槽八极电动机的三星 $3 Y/\Delta$ 联结	239
第一节 72 槽 8 极绕组 $3 Y/\Delta$ 联结方案的结构型式	239
第二节 72 槽 8 极绕组 $3 Y/\Delta$ 联结的设计方法	240
第三节 72 槽 8 极绕组 $3 Y/\Delta$ 联结起动时的磁动势谐波含量	244
第四节 72 槽 8 极绕组 $3 Y/\Delta$ 联结的应用情况	246
第五节 $3 Y$ 磁动势的偏差可能产生的不良后果	248

第六篇 三波起动电动机的复合多星联结法

第二十一章 六极电动机的复合多星

联结 251

第一节 复合多星联结的产生 251

第二节 复合多星联结的综合设计法 256

第三节 72 槽 6 极绕组复合多星联结起动时的 磁动势谐波 263

第四节 72 槽 6 极绕组复合多星联结的 应用情况 265

第二十二章 八极电动机含分裂线圈的复

合多星联结 268

第一节 8 极绕组含分裂线圈的复合多星联结 的产生 268

第二节 8 极绕组含分裂线圈的复合多星联结 的综合设计法 271

第三节 8 极绕组含分裂线圈的复合多星联

结起动时的磁动势谐波 276

第四节 8 极绕组含分裂线圈的复合多星联结

的应用情况 278

第二十三章 四极电动机含分裂线圈的复合 多星联结 280

第一节 4 极绕组含分裂线圈的复合多星联结 的基本情况 280

第二节 4 极绕组含分裂线圈的复合多星联结 的综合设计法 281

第三节 4 极绕组含分裂线圈的复合多星联结 起动时的磁动势谐波 288

第四节 4 极绕组含分裂线圈的复合多星联结 的应用情况 290

第七篇 三波起动电动机的双星和单星-双星联结法

第二十四章 八极电动机的双星和单星-双

星联结 293

第一节 双星 $2Y/\Delta$ 联结的总体设计和接线 方法 294

第二节 72 槽 8 极绕组双星 $2Y/\Delta$ 联结的 具体设计方法 296

第三节 72 槽 8 极绕组双星联结起动时的 磁动势谐波含量 301

第四节 72 槽 8 极绕组双星 $2Y/\Delta$ 联结的 应用情况 302

第五节 单星-双星 $(Y-2Y)/(\Delta-Y)$ 联结的 总体设计和接线方法 304

第六节 72 槽 8 极绕组单星-双星 $(Y-2Y)/$ $(\Delta-Y)$ 联结的具体设计方法 307

第七节 72 槽 8 极绕组单星-双星联结起动时 的磁动势谐波含量 313

第八节 72 槽 8 极绕组单星-双星 $(Y-2Y)/$ $(\Delta-Y)$ 联结的应用情况 315

第二十五章 六极电动机的双星和单星-双

星联结 317

第一节 72 槽 6 极绕组双星 $2Y/\Delta$ 联结的 具体设计方法 317

第二节 72 槽 6 极绕组双星联结起动时的 磁动势谐波含量 322

第三节 72 槽 6 极绕组双星 $2Y/\Delta$ 联结的

应用情况 324

第四节 72 槽 6 极绕组的单星-双星 $(Y-2Y)/$ $(\Delta-Y)$ 联结的具体设计方法 326

第五节 72 槽 6 极绕组单星-双星联结起动时 的磁动势谐波含量 328

第六节 72 槽 6 极绕组单星-双星 $(Y-2Y)/(\Delta-Y)$ 联结的应用情况 330

第二十六章 四极电动机的双星和单星-双 星联结 331

第一节 72 槽 4 极绕组双星 $2Y/\Delta$ 联结的具 体设计方法 331

第二节 72 槽 4 极绕组双星联结起动时的 磁动势谐波含量 336

第三节 72 槽 4 极绕组双星 $2Y/\Delta$ 联结的 应用情况 338

第四节 72 槽 4 极绕组单星-双星 $(Y-2Y)/(\Delta-Y)$ 联结的具体设计方法 339

第五节 72 槽 4 极绕组单星-双星联结起动时 的磁动势谐波含量 340

第六节 72 槽 4 极绕组单星-双星 $(Y-2Y)/(\Delta-Y)$ 联结的应用情况 342

第七节 $2Y/\Delta$ 和 $(Y-2Y)/(\Delta-Y)$ 联结可 能采用的每相匝数 344

第八篇 三波起动电动机的单星-三星联结法

第二十七章 八极电动机的单星-三星

联结	349
第一节 8 极电动机三波起动单星-三星 (Y-3 Y)/(Y-Δ) _{1/4} 联结的 设计方法	349
第二节 72 槽 8 极三波起动(Y-3 Y)/(Y- Δ) _{1/4} 联结起动时的磁动势谐 波含量	352
第三节 72 槽 8 极三波起动(Y-3 Y)/(Y- Δ) _{1/4} 联结的应用情况	353
第四节 8 极电动机三波起动单星-三星(Y- 3 Y)/(Y-Y-Δ)联结的 设计方法	354
第五节 72 槽 8 极三波起动(Y-3 Y)/(Y-Y- Δ)联结起动时的磁动势 谐波含量	356
第六节 72 槽 8 极三波起动(Y-3 Y)/(Y-Y- Δ)联结的应用情况	357

第二十八章 四极电动机的单星-三星

联结 359

第一节 4 极电动机三波起动单星-三星(Y- 3 Y)/(Y-Δ) _{1/4} 联结的 设计方法	359
第二节 72 槽 4 极三波起动(Y-3 Y)/(Y- Δ) _{1/4} 联结起动时的磁动势 谐波含量	363
第三节 72 槽 4 极三波起动(Y-3 Y)/(Y- Δ) _{1/4} 联结的应用情况	364
第四节 4 极电动机三波起动(Y-3 Y)/(Y-Y- Δ)联结的设计方法	365
第五节 72 槽 4 极三波起动(Y-3 Y)/(Y-Y- Δ)联结起动时的磁动势 谐波含量	367
第六节 72 槽 4 极三波起动(Y-3 Y)/(Y-Y- Δ)联结的应用情况	368
第七节 采用双向晶闸管使(Y-3 Y)/ (Y-Δ) _{1/4} 联结的引出线降 至三根	369

第九篇 用三波起动方法实现感应电动机的软起动

第二十九章 用三波起动实现八极电动机的 软起动 371

第一节 对电动机软起动的基本要求	371
第二节 三波起动 8 极软起动电动机的定子 绕组联结	372
第三节 8 极软起动电动机起动时的绕组联结 及其磁动势谐波含量	373
第四节 72 槽 8 极软起动电动机(Y-3 Y)/(Y- Δ)联结的应用情况	376

第三十章 用三波起动实现六极和四极电 动机的软起动 381

第一节 三波起动 6 极软起动电动机的定子 绕组联结	381
第二节 6 极软起动电动机起动时的绕组联结 及其磁动势谐波含量	382
第三节 72 槽 6 极软起动电动机(Y-2 Y)Y/(Y- Δ)联结的应用	384
第四节 三波起动 4 极软起动电动机的定子 绕组联结	387
第五节 4 极软起动电动机起动时的绕组联结 及其磁动势谐波含量	389
第六节 72 槽 4 极软起动电动机 3 Y/Δ联结 的应用	392

第十篇 新型同步电机

第三十一章 能自起动的抽水蓄能电站用双 速凸极同步发电-电动机 ... 395

第一节 现代抽水蓄能电站所用机组的现状 及其存在问题	395
-------------------------------------	-----

第二节 新型同步电机的结构特点	396
第三节 转子励磁绕组的结构和联结法	397
第四节 定子绕组的联结法	399
第五节 作电动机用时自行起动的过程	

及其特点	399	第五节 8 极隐极式同步电动机的起动、励磁、阻尼三合一的转子绕组	413
第六节 新型蓄能机组的优越性	400	第六节 10 极隐极式同步电动机的起动、励磁、阻尼三合一的转子绕组	417
第七节 用具体数字说明定子绕组的联结法及其作用	402	第七节 三合一转子绕组的直流励磁效果和起动电阻安装地点	420
第三十二章 转子绕组为起动、励磁和阻尼三合一的隐极式同步电动机	405	第八节 无起动电阻的起动、励磁、阻尼三合一的转子绕组	421
第一节 转子三合一的隐极式同步电动机的定子绕组	405	附录 用电子计算机实现三相交流电机常规绕组和变极绕组的自动设计和谐波分析通用程序	427
第二节 对起动、励磁、阻尼三合一转子绕组的基本要求	405	一、通用程序全文(BASIC 语言)	427
第三节 4 极隐极式同步电动机的起动、励磁、阻尼三合一的转子绕组	407	二、通用程序的应用说明及示例	435
第四节 6 极隐极式同步电动机的起动、励磁、阻尼三合一的转子绕组	410	参考文献	462

第一篇 交流电机绕组的基础理论

第一章 交流电机绕组的基本特征和分析方法

作者于 1985 年由机械工业出版社出版了一本专著《交流电机的绕组理论》^[1]，在其开始五章中对交流电机绕组的基础理论作了比较详细的分析和论述，这是阅读本书的基础。限于篇幅，本篇只就其中用得最多的一些概念和方法作一扼要论述，有些地方作了较多发挥。

本章首先介绍构成绕组的基本元件和绕组的磁动势和电动势。然后较详细地论述用槽号相位图(本书称“槽号相位表”)分析绕组磁动势、电动势和联结法，这是本书用得最多的一种通用分析法，用以取代传统采用的磁动势矢量图和电动势矢量图分析法。

第一节 构成绕组的基本元件

构成电机绕组的基本元件是线圈，其特征如下：线圈是由绝缘导线绕成，构成一个紧密整体，其两边称为“线圈边”，嵌于电机槽中。对常用的双层绕组，一个线圈边嵌于槽底，而另一线圈边则嵌于另一槽的上部靠近槽口处，前者称为下层边，后者称为上层边。由此可见，每个线圈都有下列基本要素：

(1) 构成线圈的导线匝数简称“线匝”。

(2) 线匝的截面积，即绕制线圈所用导线的截面积。

(3) 下层边和上层边之间的距离称为“线圈节距”，用两线圈边所嵌的两个槽的槽号之差表示，用符号 y_1 代表。

这是三个最基本的要素，是进行绕组方案设计时必须明确的参数。至于线圈端部形状、所用导线的品种和规格包括导线绝缘等级等制造工艺所需数据也很重要，但非设计绕组方案时所必需，可在绕组方案设计完成后，进行电动机整体设计时再加以考虑。

对双层绕组，绕组所有线圈的个数与电动机的槽数相同，一个槽号对应着一个线圈，因此槽号与线圈是同义词，说某一个槽号就与说上层边嵌于该槽号槽口的线圈一样。

把若干个线圈串联在一起而构成一个绕组段，再把若干段绕组按并联或串-并联方式连接在一起构成一个相绕组。于是，联合三个相绕组便得到常规采用的三相定子绕组。

对本书论述的谐波起动感应电动机，包括双波起动电动机和三波起动电动机，由于谐波起动电动机的运行和起动工况有很大差别，因此定子绕组的联结法远比常规电动机的复杂。定子绕组至少划分为 6 段，最多达到 12 段。在运行工况时，各段绕组按与常规电动机相似的方式联结。但在起动工况时则按另一种方式联结，这时多数情况是一部分绕组段被丢弃不用，但也有全部绕组段都利用而不丢弃任何绕组段的联结法。这样联结的目的在于，起动时

可产生运行时所不能产生的磁动势谐波,从而使电动机获得常规电动机所无法达到的优良起动特性。当起动完毕时,再通过开关操作使各段绕组回到运行工况的联结法。

对上述情况,构成电动机绕组的基本单元是绕组段,显然绕组段仍由线圈串联构成。

第二节 绕组的磁动势和电动势

绕组的磁动势和电动势是发生于电机绕组中的电磁过程的两个方面。电流通过绕组便产生磁动势,旋转磁场与绕组有相对运动便在绕组中感应出电动势,这是发生于电机中的两个最基本的自然规律。

单个线圈的磁动势大小与通过线圈的电流(单位为安)和线圈的匝数成正比,而用它们的相乘积表示,称为线圈的安匝数。线圈磁动势的作用点位于线圈中心线(位于上、下线圈边所嵌两个槽之间的正中)通过的一个气隙上。由此可见,绕组的磁动势是产生它的绕组所包含的线圈的空间函数。

任一瞬间,由恒速、恒幅旋转磁场感应而产生于单个线圈的电动势大小,决定于该线圈在气隙圆周上的位置。若把每个线圈都折合为整距线圈(即线圈节距 $y_1 = Z/p$,其中 Z 为电机槽数, p 为前述旋转磁场极数),则当线圈两边位于磁场波的零点时,其感应电动势为零,而当线圈两边位于磁场波的波幅处时,线圈的感应电动势达到最大值。由此可见,绕组的感应电动势也是绕组所包含线圈的空间函数。

从上述可见,绕组产生的磁动势和感应于绕组中的电动势都是绕组包含的线圈的空间函数。虽然两者的物理意义不同,但进行分析的对象相同(都是绕组),各物理量之间的关系有相同的数学形式。因此绕组的磁动势与电动势之间存在很明显的相似性,这种相似性表现于下列几个方面。

利用上述的绕组磁动势与绕组电动势的相似性,可把从磁动势观点对某一绕组进行分析所得结果直接用于电动势的情况。下面举出几个例子。

一台三相同步电动机的定子绕组已按磁动势观点设计好,其三相严格对称,绕组系数很高且谐波含量很少,今要将其改为同极数、同容量的三相同步发电机。可直接采用已设计好的绕组方案而仍保持原有的各种优良性能。

如果三相对称电流输入某一电机的三相绕组时,产生对电机基波说的三相对称磁动势,则由极数与电机基波的相同的旋转磁场感应于该绕组的电动势也必定是对电机基波说的三相对称电动势。

反之,如果基波旋转磁场感应于该绕组而产生的电动势对电机基波说是三相对称的,则三相对称电流输入该绕组时,产生的磁动势对电机基波说,也必定是三相对称的。

绕组磁动势与电动势的相似性,使各种用于分析磁动势的手段具有双重性,即可用作分析磁动势也可用作分析电动势,因此应用起来非常灵活、方便。

第三节 绕组电流、电动势和联结法的方向性

一、绕组电流和电动势的方向性

绕组电流和感应电动势各有其方向,电动势的方向由其负极点至正极点。显然,对上述

两物理量，其方向只有正、负两种，若认为电流或电动势沿绕组某一方向为正方向，则沿相反方向便是负方向。在交流电机中，这些物理量都是随时间而交变，因此它们的方向也是随时间而交变的，有时正、有时负。这样，在进行理论分析，用数学公式表示它们间的关系时，就必须明确指出以哪一个方向作为正，而哪一个方向作为负，才能使最后获得的理论分析结果具有切合实际的物理意义，这就是绕组中的电流和电动势的方向性。

二、绕组联结法的方向性

在进行绕组联结时，把任一绕组段包含的线圈串联为一支路时，存在顺着接线方向观察时，由线圈的哪一端点进入线圈而至其另一端点的问题。为解决该问题，首先应先定义每个线圈的两个出线端中，哪一个为首端而另一个为末端，然后以从首端进入线圈而从其末端出来的接线方向称为正接或顺接，而把从末端进入线圈再从首端出来的联结方向称为反接。相应地，在代表反接线圈的槽号前面加一个负号，而对顺接线圈的槽号不加什么符号，这就是绕组联结法的方向性。

三、绕组中电流、电动势和接线方法三者通用的正方向

在论述通用的正方向规定之前，先确定若干基本元件的命名和编号方法。

首先定义每个线圈的首、末端。从转子上观察定子绕组的出线端，沿顺时针方向观察每个线圈的两边，则首先看到的一个线圈边的引出线定义为线圈的首端，而后来看到的一个线圈边的引出线定义为线圈的末端。沿顺时针方向将定子槽依次编号为 1, 2, 3……。每个线圈的编号与其首端接入的线圈边所嵌一个槽的槽号编得相同。这样，线圈 1 的首端所接入的线圈边嵌于 1 号槽，线圈 2 的首端所接入的线圈边嵌于 2 号槽，……余类推。

绕组段由若干线圈以各种方式串联为一单电路。当沿某一方向进行接线时，将其所接的第一个线圈的接入端定义为该绕组段的首端，而将其最末尾的一个线圈的出来端定义为该绕组段的末端。当用数列表示上述绕组段所串联的线圈时，从绕组段的首端开始沿着电路前进，依次列出所经过的线圈号码，凡是从首端进入而从末端出来的线圈号码皆为正，而凡是从末端进入而从首端出来的线圈号码皆为负，应在号码前写上负号“-”。反之，若已知一个绕组段所串联的线圈号数列，而进行接线时，则所有正号线圈为顺接(从首端进入而从末端出来)，而负号线圈为反接(从末端进入而从首端出来)。

建立了上述各种基本概念，可得绕组的通用正方向的规定如下：

所有表征绕组联结法的接线图，图中每个绕组段的旁边都必须画一空心箭头作为正方向指示，它具有下列三重意义。

1) 从绕组联结观点看 空心箭头所指方向为该段绕组的接线正方向，沿着这个方向进行接线时，正槽号线圈为顺接(从线圈首端接入、末端接出)，负槽号线圈为反接(从线圈末端接入、首端接出)。

2) 从电流观点看 空心箭头所指方向为流经该段绕组的交变电流的瞬时值为正时的电流实际方向，当电流变为负时，则其方向与此相反。

3) 从电动势观点看 空心箭头所指方向为感应于该段绕组的交变电动势的瞬时值为正时，电动势的实际方向，当电动势变为负时，则其方向与此相反。

上述正方向规定很重要，它是从理论上分析交变量时，沟通理论值与实际值的重要桥梁。没有正方向规定，理论分析时就难以建立表征各交变量之间关系的公式，而对理论分析所得结果的实际意义也很难理解。正因为如此，正方向规定不能忽视，任何交流绕组，每个

绕组段都必须有其正方向指示。

实际应用时,正方向的表示方式可以灵活。若绕组接线并不复杂,图面较空,则应每个绕组段都标明其正方向。若绕组很复杂,图面已画得很挤,则对有些绕组段可不标明其正方向。那么,哪些绕组段可以不标明正方向呢?原则是根据图中已标明的一些正方向,可推测出其正方向应是怎样取法的一些绕组段。对这些绕组段,不标明其正方向,看图的人也知道其正方向应是怎样取的。例如,当接线图中所有绕组段都是按水平取向画出的,则可只画出一个空心箭头作为正方向指示,说明所有绕组段都取同一个正方向,在此情况下,有时甚至不标出正方向,而默认其正方向为从左向右。但若接线图中有三角形联结,则三角形的三个边都必须画出其正方向指示,否则无法推测其正方向是如何规定的。

第四节 用线圈矢量星形分析绕组的磁动势

一、绕组磁动势的矢量分析法

在交流电机中,由于电流随时间而交变,而构成绕组的线圈有各式各样的空间分布情况,因此电流通过绕组产生的磁动势是一个很复杂的时间和空间函数,直接从磁动势的实际分布情况进行分析、研究是很困难的。谐波理论的诞生,为该问题的解决开辟了一条可行道路。其基本概念是:电流通过单根导体便产生所有极对数为整数的磁动势谐波,而每个谐波都在空间上按正弦函数分布,因此可用一根空间矢量作代表,电流的大小决定矢量的长度,而导体在空间的位置表示为矢量的空间相位。于是,将绕组包含的所有导体对某一极对数谐波说的磁动势矢量用矢量法相加,便可求得整个绕组产生的该极对数谐波的磁动势。这就是绕组磁动势的矢量分析法。

二、用线圈矢量星形分析绕组磁动势

前面已指出,构成绕组的基本单元是线圈,而线圈是由多个导体构成的线匝绕成。因此每个线圈也与导体相似,当电流通过线圈时,除一小部分极对数的谐波外,产生所有极对数为整数的磁动势谐波。这里说的一小部分谐波是指那些线圈短距系数 $k_y = 0$ 的谐波,其原因是,这时线圈节距恰好等于谐波的波长,即对该谐波说,线圈两边相距 360° 电角度,其两边产生的该谐波磁动势大小相等,而一正一负(线圈两边电流方向相反),恰好互相抵消掉,因此线圈不产生该磁动势谐波。于是,除这一小部分以外的谐波都可采用前述用于分析导体磁动势的矢量分析法。

用线圈矢量分析绕组磁动势时,首先必须画出绕组所用全部线圈的线圈磁动势的矢量星形。由于通过线圈的电流有正的、有负的,为了分析方便,每个线圈的矢量必须画两根,一正一负,两者相差 180° (对所分析的谐波极数说)。这种矢量星形必须准确画,否则用以分析绕组时将出现错误。

三、线圈磁动势矢量星形的画法

用矢量法分析绕组磁动势时,只能对磁动势包含的各种极数谐波逐一进行分析。下面提出一个符合前面要求的,通用于各种谐波的线圈磁动势矢量星形的画法。该画法要解决的问题有两个,第一是矢量星形全圆周必须画出的均匀分布的矢量根数,第二是如何在各矢量上编上所属线圈的号码。

为简化理论分析,结合本书研究范围,下面研究的绕组限于三相双层绕组。

首先列出所需分析谐波的每极每相槽数

$$q_v = \frac{Z}{3(2\nu')} = \frac{Z}{6\nu'} = \frac{N_v}{D_v} \quad (1-1)$$

式中 Z ——电机槽数；

ν' ——所分析的谐波的极对数； $\nu' = \nu/2$ ，其中 ν 为极数；

N_v 、 D_v ——没有公约数的整数。

对所分析的谐波，每对极所占槽数为 Z/ν' ，在双层绕组中，每个槽对应着一个线圈，因此每对极需要 Z/ν' 根矢量，来代表线圈磁动势矢量。由于对谐波说，一对极相当于 360° 电角度，因此这 Z/ν' 根矢量的总位移应为 360° ，即 1 个圆周。

现设矢量星形圆周上均匀分布的矢量总数为 Q_v ，沿圆周按顺时针方向依次编号的 1, 2, 3, …… Q_v 称为矢量号，并设前述线圈矢量在圆周上依次的位移用上述矢量号表示时为 x_v ，即若 1 号线圈的矢量用矢量号 1 的矢量作代表，则 2 号线圈的矢量应采用矢量号为 $(1 + x_v)$ 的矢量作代表，而 3 号线圈用矢量号为 $(1 + 2x_v)$ 的矢量作代表，……余类推。

从上述定义，可得矢量星形上的矢量总数

$$Q_v = \frac{Z}{\nu'} x_v$$

再从式(1-1)，以 $Z/\nu' = 6 q_v$ 代入上式得

$$Q_v = 6 q_v x_v = 2 \left(\frac{3 N_v}{D_v} \right) x_v \quad (1-2)$$

显然， Q_v 必须是整数，并且为了便于找到负槽号的线圈磁动势矢量（与正槽号的相差 180° ）， Q_v 还必须是偶数。这样，只要找出最小的整数 x_v 使式(1-2)计算结果 Q_v 为偶数整数，问题就解决了。

若 D_v 为非 3 倍数的整数，则从式(1-2)可见，能使 Q_v 为偶数整数的最小 x_v 值为 $x_v = D_v$ ，此时 $Q_v = 6 N_v$ 。

若 D_v 为 3 的倍数的整数，则式(1-2)可写成

$$Q_v = 2 \left[\frac{N_v}{\left(\frac{D_v}{3} \right)} \right] x_v \quad (1-3)$$

式中 $D_v/3$ ——必为整数。

从式(1-3)可见，能使 Q_v 为偶数整数的最小 x_v 值为 $x_v = D_v/3$ ，此时 $Q_v = 2 N_v$ 。

总结以上分析，可得出画 ν' 对极谐波的线圈磁动势矢量星形的通用方法如下：

首先计算对 ν' 对极谐波的每极每相槽数 $q_v = Z/(6\nu') = N_v/D_v$ ，如此求得重要参数 N_v 和 D_v 。再按下列两种情况分别求得矢量星形所需的矢量总数 Q_v ，和各线圈矢量之间的位移 x_v 。

(1) 当 D_v 为非 3 倍数的整数时， $Q_v = 6 N_v$ ， $x_v = D_v$ ；

(2) 当 D_v 为 3 的倍数的整数时， $Q_v = 2 N_v$ ， $x_v = D_v/3$ 。

按求得的 Q_v 值画一包含均匀分布的 Q_v 根矢量的星形，再在星形上按位移 x_v 编写线圈磁动势矢量的号码。如此获得的是正槽号线圈的矢量，可从已得的每根矢量转 180° 便得同一号码的负槽号的线圈矢量。

四、实际绕组示例