

电工实用技术丛书

交流电机绕组的嵌装与接线

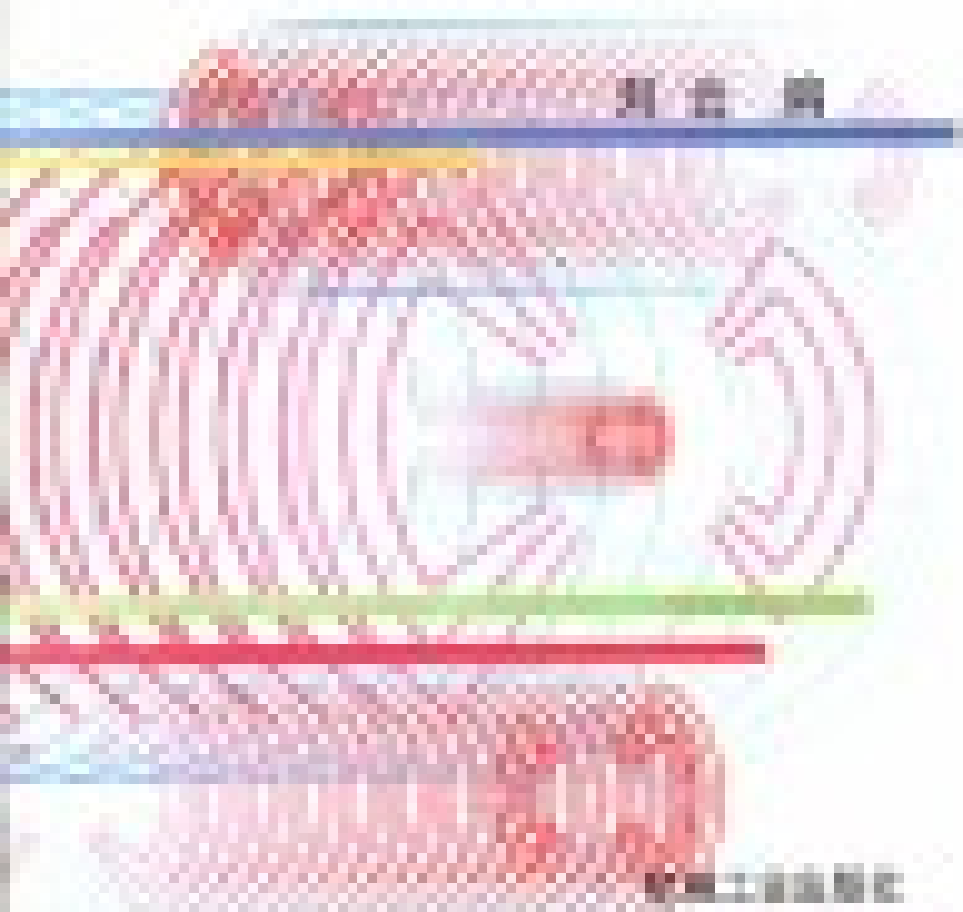
刘云 编

机械工业出版社

电工实用技术丛书

交流电机绕组的嵌装与接线

刘吉成 编



机械工业出版社

电工实用技术丛书

交流电机绕组的嵌装与接线

刘 云 编



机械工业出版社

本书着重对中小型交流电机绕组的嵌装与接线作了系统的、全面的、较详细的介绍,对电机线圈的制造、绕组故障的检修及空壳电机重绕绕组的计算也作了简要的介绍。本书取材于现场实践经验,内容联系生产实际,以帮助解决实际问题为主,介绍了现场实用的简便方法与计算。文字通俗易懂,表达形式新颖,易于广大工人学习,是电机厂制造线圈和嵌线的工人以及工矿企业电机修理工人必需的读物。同时可供有关工程技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

交流电机绕组的嵌装与接线/刘云编. —北京:机械工业出版社,1998.1

(电工实用技术丛书)

ISBN 7-111-05769-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 12314 号

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:高科 朱华 版式设计:霍永明 责任校对:罗凤书

封面设计:姚毅 责任印制:何全君

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 3 月第 1 版第 4 次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·10.5 印张·230 千字

10501—12500 册

定价:16.00 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

随着工农业的发展,交流电机的使用范围越来越广泛,数量与日俱增,因而使用电机与制造电机的人也越来越多,为此,特编写本书,以适应社会需要。

本书取材于生产现场实践经验,以帮助解决实际问题为主。全书对中小型交流电机定子广泛采用的双层叠绕组的嵌装与接线作了较详细的叙述,用了较大的篇幅对大型电机条式线棒的嵌装及波绕组接线进行了介绍,兼顾到知识的系统性,对线圈制造也作了简单的介绍。为了帮助电机检修人员做好检修工作,书中对电机绕组故障的检修及空壳电机重绕绕组作了介绍。在编写过程中,力求做到取材先进,实用性强,重点突出,内容密切联系生产实际,通俗易懂,表达形式新颖,并对有些地方作了新的探讨。

在编写过程中,得到清华大学著名教授王维俭等的大力支持,特此表示感谢。

由于本人水平有限,书中难免有错误和不当之处,希广大读者批评指正。

作 者

1996 年 8 月

目 录

前言

第一章 交流电机线圈制造	1
第一节 交流电机的绕组	1
第二节 线圈制造的技术要求	5
第三节 散嵌线圈的制造	8
第四节 成形线圈的制造	11
第二章 绕组嵌装	34
第一节 嵌装前的准备工作	34
第二节 软绕组嵌装	37
第三节 硬绕组嵌装	48
第四节 测温元件的埋设	96
第五节 绕组的绝缘处理	103
第三章 绕组接线	118
第一节 用槽电动势星形图分析绕组	118
第二节 分数槽绕组的联接法	126
第三节 分数槽绕组的对称条件和并联支路	134
第四节 线圈组循环数序及确定循环数序的实用方法	135
第五节 双层叠绕组的接线	139
第六节 双层波绕组的接线	181
第七节 单绕组双速电机的接线	262
第四章 绕组故障的检修	270
第一节 绕组接地故障的检修	270
第二节 绕组短路故障的检修	274
第三节 绕组断路故障的检修	277

第四节	绕组嵌反与接错时的检修	280
第五节	交流电机的试验	285
第五章	交流电机绕组的重绕	312
第一节	定子绕组的拆除	312
第二节	空壳电机绕组重绕计算程序	313
第三节	空壳电机绕组重绕的简易计算	324

第一章 交流电机线圈制造

第一节 交流电机的绕组

绕组是电机的“心脏”，是实现电磁能量转换的关键部件。电机的使用寿命与运行的可靠性，主要取决于绕组。由于绕组是由线圈构成的，正确掌握电机线圈的制造过程，对提高绕组的质量和延长电机的使用寿命有很重要的作用。

为了便于说明交流电机线圈的制造及联接规律，下面先介绍交流电机的几个基本概念及交流电机绕组的分类。

一、交流电机的几个基本概念

1. 线匝

导线在定子或转子的两个铁心槽中绕過一圈，称为一个线匝。平时所讲的匝间短路或叫匝间碰线，就是指线匝与线匝之间因绝缘损坏而造成的短路。

2. 线圈

由若干个几何形状相同、截面相同的线匝串绕在一起，最后留出一根线头和一根线尾（并绕时则不只一根）的组合体，称为线圈。

3. 绕组

由许多个线圈按照一定的规律通过串、并联联接起来的线圈整体。构成绕组的元件是线圈，因而绕组是由许多线圈构成的，是线圈的总称。

4. 极距

两个磁极间的跨距称为极距，用 τ 表示，即

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

式中 τ ——极距 (cm)；

D_i ——定子铁心内径 (cm)；

p ——磁极对数。

通常是以两个磁极在定子（或转子）铁心上所跨过的槽数作为极距，则极距等于槽数除以磁极个数，即

$$\tau = \frac{Z}{2p}$$

式中 Z ——定子（或转子）铁心的总槽数。

5. 节距

一个线匝的两个有效边，在定子或转子铁心上所跨过的距离（槽数），叫节距。若线匝的两个有效边所跨过的距离正好等于极距，则称为全节距。如果线匝的两个有效边所跨过的距离小于极距，则称为短节距，简称为短距。若线匝的两个有效边所跨过的距离大于极距，则称为长节距，简称长距。

6. 每极每相槽数

在三相电机的每个磁极中，都有三相互相绝缘的极相组，因此，每相绕组在每个磁极下所分配到的槽数，叫做每极每相槽数，用字母 q 表示，即

$$q = \frac{\tau}{3} = \frac{Z}{6p}$$

7. 极相组

在三相电机中，每一极距范围内有三相互相绝缘的一个或若干个线圈串在一起的线圈组，称为极相组。例如线头与线头、线尾与线尾联接的三相四极电机就有 $3 \times 4 = 12$ 个极相组，三相六极电机就有 $3 \times 6 = 18$ 个极相组。

8. 电角度

计量电磁关系的角度单位叫做电角度。在机械学中把圆等分成 360° ，而在电工学中把正弦交流电的每一周在横坐标上等分成 360° ，即经过空间一对磁极时，电磁上相应变化了 360° 。因此，电角度与机械角度的关系为

$$\text{电角度} = \text{极对数} \times \text{机械角度}$$

电机铁心上的槽和齿都是等分在定子铁心的内圆或转子铁心的外圆上。因此，我们把每个铁心槽所占的电角度，即相邻两槽所跨过的电角度叫做槽距角，用 α 表示，则

$$\alpha = \frac{360^\circ p}{Z}$$

式中 α ——每槽电角度 ($^\circ$)。

p ——磁极对数；

Z ——定子（或转子）铁心的总槽数。

9. 相带

每相每一个绕组区段的宽度称为相带。如果把处在每一对磁极下的绕组平均分成六个区段，由于槽距角 $\alpha = \frac{p360^\circ}{Z}$ ，故每相每区段的宽度为 $q\alpha = \frac{Z}{6p} \frac{p360^\circ}{Z} = 60^\circ$ 。此种绕组的绕法称为 60° 相带。若把处在每一对磁极下的绕组平均分为三个区段，则每相每区段的宽度为 $q\alpha = \frac{Z}{3p} \frac{p360^\circ}{Z} = 120^\circ$ ，此种绕组的绕法称为 120° 相带。我们从电动势星形联结的合成可以看出，具有相同数量的线圈（同样多的用铜量），绕成 60° 相带的绕组的电动势，是绕成 120° 相带的绕组的电动势的 1.16 倍。因此，现在三相绕组通常都绕成 60° 相带。

10. 电枢

在电机里，导体产生感应电动势并通过电流以进行机械能和电磁能转换的部分，通称为电枢。

二、交流电机绕组的分类

交流电机绕组，按其用途分为电枢绕组与磁极绕组。

（一）电枢绕组

电枢绕组安装在定子铁心（或电枢铁心）槽内，根据其结构和制造上的差别，分为软绕组和硬绕组两大类。

1. 软绕组

软绕组由绝缘圆导线绕成。常用于具有半闭口槽的小型电机，工作电压不超过 500V。绕组可以做成单层的或双层的。单层的每个槽内嵌放一个线圈边；双层的每个槽内则嵌放两个线圈边。从工艺方面来考虑，10kW 以下的小型交流电机宜采用单层绕组。因为它的槽内不用层间绝缘，嵌线方便，槽空间利用率高，但绕组端部相互交叠，不易整形。10kW 以上的电机，铁心内径较大，宜采用双层绕组。因为它可以选择合适的短节距，以削弱谐波磁通势，而且绕组端部排列整齐。

按嵌装方法的不同，软绕组又可分为以下几种。

（1）嵌入式软绕组 嵌入式软绕组一般为多匝散下线圈，由手工将线圈分散经槽口嵌入铁心槽内。多用于小型交流电机的定子和绕线式转子上。

（2）绕入式软绕组 绕入式软绕组一般用手工将绝缘圆导线直接绕入铁心槽内。多用于交流电机的转子上。

（3）穿入式软绕组 穿入式软绕组的导线为绝缘圆线或多股绞线，由槽的两端逐匝穿入。用于铁心为闭口槽或半闭口槽，其槽口宽度小于所嵌线径。

2. 硬绕组

硬绕组由绝缘扁导线或由导条制造的成形线圈组成。按

其不同的嵌装方法，可以分为嵌入式和插入式两种。

(1) 嵌入式硬绕组 嵌入式硬绕组元件为多匝或单匝成形线圈。用于铁心为开口槽或半开口槽时。多匝或单匝成形线圈一般在嵌入铁心槽前已包好对地绝缘，并已经绝缘处理。单匝成形线圈分为全圈式和半圈式两种。全圈式多用于中小型电机，半圈式多用于大中型汽轮发电机和水轮发电机。

(2) 插入式硬绕组 插入式硬绕组元件为半圈式线棒，用于铁心为闭口槽或半闭口槽。对于感应电动机绕线形转子，线圈导体由裸铜条弯制，先弯好一端，另一端待插入槽内后再弯制成形。

(二) 磁极绕组

磁极绕组安装在磁极铁心上。按照所用材料及绕制方法的不同，可分为由绝缘导线绕制的绕组（圆导线或扁导线）和由带状导线绕制的绕组两种。由带状导线绕制的绕组又可分为平绕（宽边弯绕）和扁绕（窄边弯绕）两种。

三、三相交流绕组的构成原则

在三相交流电机中，其三相绕组中每相线圈数（匝数）相等，布置情况相同，相与相之间的空间间隔为 120° 电角，按此原则绕成的绕组，称为三相对称绕组。只有在三相对称绕组中感应产生的电动势才是三相均衡电动势。本书中所说的三相绕组都是指三相对称绕组。

第二节 线圈制造的技术要求

绕组是电机的重要部件之一，制造费工，价格高，同时又是最容易损坏的部件。绕组制造主要包括线圈制造、绕组嵌装和绝缘处理。在绕组制造过程中，手工操作较多，劳动

强度较大，质量不易掌握稳定，是电机制造中的主要关键之一。要得到良好的线圈，除选择正确的线圈结构、尺寸和合理的绝缘材料外，由于制造和运行维护的需要，线圈制造应符合下列技术要求。

一、尺寸和形状须符合图样要求

所有线圈的尺寸和形状必须十分准确。线圈的轴向长度、宽度（或弦长）、鼻子高度、线圈角度以及每个线圈边截面的宽度和高度，都必须符合图样要求。而要达到这个目的，需要在整个线圈制造过程的各个工序中严格执行工艺规程，才能保证质量。

尺寸和形状的不准确，将使线圈无法嵌入槽内，即使嵌入槽内，也很难排列整齐，形成所需要的几何形状，有时会造成运行中发生事故的隐患。例如，如果线圈的截面尺寸过小，那么嵌入槽内以后，在运行中由于电磁力的影响，线圈将在槽内发生振动，严重时会造成绝缘的磨损。并且，由于线圈和铁心槽壁之间有空隙，空气层的存在将造成热能散出困难，导致电机温升增加。因为空气的热导率是 $0.00025 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，而云母绝缘为 $(0.0015 \sim 0.002) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，一般绝缘漆为 $0.006 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，可见从导热的角度看空气层的存在等于增加了绝缘厚度。因为 1 mm 的空气层相当于 24 mm 的绝缘漆膜。这也就是为什么有时电机的温升超过标准，可以采用多浸一次漆缩小线圈与铁心槽壁之间的空隙，达到降低电机温升的目的。因此，制造厂规定成形硬线圈边截面的尺寸与铁心槽尺寸之差，应在 $0.2 \text{ mm} \sim 0.3 \text{ mm}$ 之间。线圈尺寸过短（主要是端部过短）会造成嵌线困难，过长会影响线圈端部与挡风板或端盖的绝缘距离。

如果线圈的角度不对，则线圈嵌入槽内后，线圈和槽楔

的接触面积将减小,见图 1-1,由于线圈振动而与槽楔的摩擦会使线圈绝缘损坏,因此规定由于线圈角度不对而引起的最大间隙(也包括了线圈尺寸公差)不能超过 1mm。

二、匝数准确

电机绕组的每个线圈匝数必须准确。因为匝数错误会产生电磁不平衡,导致电机振动,甚至造成严重事故。匝数错误容易发生在匝数较多的散嵌线圈中。因此,在绕制这类线圈时,必须配备可靠的匝数指示装置和测试设备。

三、绝缘良好可靠

线圈嵌入槽内后,运行中受到电场、机械力及热的共同作用,要求它的绝缘能在复杂的工作条件下长期可靠地工作。因此,绝缘材料必须符合规定要求。线圈对地绝缘和匝间绝缘都应该良好可靠,对高压线圈还要求具有低的介质损耗和良好的耐电晕性能。在电机出厂试验中,应能保证经受得往 $(2U_N + 1000)$ V 的耐压试验 (U_N 为额定工作电压),而对于线圈绝缘质量抽查时进行破坏性击穿试验时,其击穿电压值更高。一般要求对于 6kV 级的线圈击穿电压应不低于额定值的 7 倍,而对于 10kV 级的线圈应不低于 5 倍。这种破坏性试验对于新材料、新结构、新工艺试用时应该进行。对于正常生产中的线圈,也应进行抽查。当工艺比较稳定时,可以抽查得少一些。

多匝线圈匝间绝缘是电机绝缘结构中的薄弱环节。受线

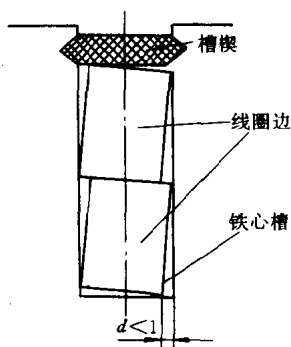


图 1-1 线圈角度不对时
下到槽内的情况

圈尺寸的限制，匝间绝缘不宜过厚，而在线圈制造、嵌线及电机运行中，匝间绝缘容易损伤。因此，在线圈制造中，必须采用正确的工艺方法，以防止匝间绝缘受损，并及时查出匝间绝缘有缺陷的线圈，加以剔除或进行修补。

一般要求电机能保证 20 年正常运行（容量较小，使用维护条件较差，运行情况又较恶劣的电机常达不到）。在正常运行情况下，在这期间绝缘应该是可靠的。因此要求绝缘层致密均匀，绝缘胶充填坚实，无空隙存在。绝缘材料的选择，应能保证在正常工作温度下长期运行，寿命超过保证期限。

第三节 散嵌线圈的制造

多匝线圈在一般中小型电机中应用最为普遍。它分为软绕组和硬绕组两类，软绕组采用散下线圈，硬绕组采用成形线圈。下面介绍散下线圈的绕制方法。散下线圈采用绝缘圆导线绕制。线圈尺寸和形状由绕线模来保证，线模必须做得大小适当。若尺寸太短，则端部长度不足，嵌线发生困难；尺寸过长，浪费电磁线，并使绕组电阻和端部漏抗增大，影响电磁性能，还可能造成电机装配困难。

绕线模尺寸尚无完善的计算公式，因各厂的工艺不同，线模尺寸略有差异。因此，应结合本单位情况，经过试绕试嵌，进行合理调整，当各方面指标达到要求后，再正式投入生产。

绕线模一般用干燥硬木制造，使其不容易变形。如果线圈是大批量生产，其绕线模宜用铝合金或层压板制造。绕线模可以根据每极每相线圈数来制作，图 1-2 为每极每相三个线圈联绕的棱形绕线模。模心 1 分成两半，分别固定在相邻的两块夹板 2 上，以便于卸模。夹板上端开有过线槽 3，两侧开有扎线槽 4。这种绕线模结构简单，但线圈绕成后，须将模

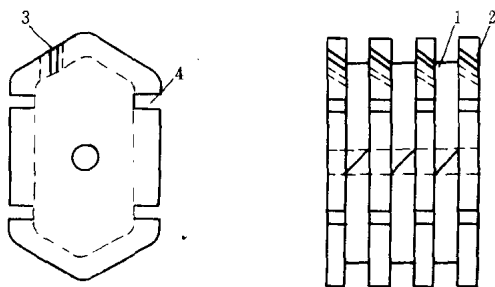


图 1-2 棱形联绕线模 ($q=3$)

1—模心 2—夹板 3—过线槽 4—扎线槽

板拆开，方能取出线圈。

为节省装拆模板时间，采用张缩式绕线模，见图 1-3。整个绕线模的上、下、左、右四块模心 1 和 3 靠链板 2 与转轴 4 相联。当四块链板在圆周上相互垂直时，四块模心所组成的尺寸正好与线圈几何尺寸（图中实线所示）相吻合时，线模则处于工作状态。当线圈绕成之后，用手柄将转轴转动一定角度，上、下、左、右四块模心同时收缩（如图中点划线所示），即可取出

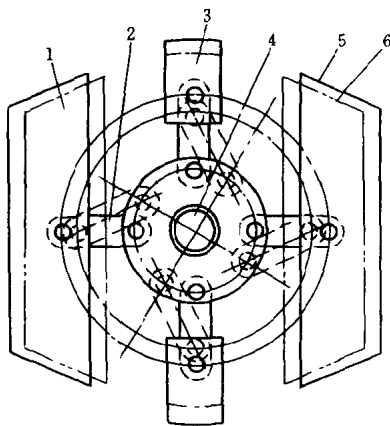


图 1-3 铰链联动结构张缩式绕线模示意图

1—左右模心 2—链板 3—上下模心
4—转轴 5—工作状态 6—卸线圈状态

线圈。取下线圈后,用手柄将转轴转回到原位,模心张开,即可重新绕线。

散下线圈的绕线,可以在简单的手绕线机上进行。一般制造工厂则用机动绕线机绕制,绕线模安装在绕线机心轴上。绕线机上必须装有可靠的转速计,以便计算匝数。为了提高工效,对于生产量较大的小型电机,有的还装有自动计匝、跳槽和停车装置。

绕线时,导线拉力应根据绕线速度、导线直径进行调整。尤其在绕制铝线时,拉力不宜超过 40N/mm^2 ,一般应控制在 $(22\sim 32)\text{N/mm}^2$ 范围内,否则会将电磁线拉细,影响线圈电阻和导线绝缘强度,绕线机速度一般为 $150\text{r/min}\sim 200\text{r/min}$ 。

导线直径大于 1mm 时,应注意导线在线模中排列整齐。不整齐的线圈会给嵌线造成困难,并且由于线圈交叉过多,容易造成匝间短路,对槽满率高的线圈,这点尤为重要。槽满率表示槽内导线的填充程度,是导线所占面积与槽有效面积之比,一般中小型电机的槽满率在 $75\%\sim 80\%$ 之间,槽满率越高,槽的利用率就越高。

铜线的最大线径不应超过 1.68mm ,最好在 1.45mm 以下。导线太粗,嵌线困难,而且槽的空间利用率不高,应改为几根导线并绕。采用多根导线并绕时,它们的拉力都要一样,必须仔细排列。每绕完一层应使这几根导线同时转入第二层,不应分散在两层之中,以保证排列整齐。

在绕线过程中,导线一般不允许有接头,在不可避免的情况下,导线若要接头,其接头也应在端部斜边部位。不允许接头在线圈直线部位(即嵌线后应在铁心槽外面),而且接头不宜太多。联绕线圈、极相组间联线应注意套上绝缘管。线