

# 变压器故障诊断与维修

王越明 王朋 杨莹 编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了变压器的各种故障产生的原因、故障诊断与分析方法以及现场运行维护。主要内容有变压器的工作原理和故障分类、铁芯故障、绝缘故障、组件故障、短路故障、放电故障、保护误动故障、渗漏油及油流带电故障、雷击及进水事故等，按各自故障的成因、影响、判断方法及应采取的相应技术措施等分别进行描述并附有典型故障案例分析，最后对变压器故障综合诊断方法及在线监测进行了简要介绍。

本书适合从事变压器运行维护、检修调试、试验安装和修理改装的人员使用，也可供有关专业大专院校师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

变压器故障诊断与维修/王越明, 王朋, 杨莹编. —北京: 化学工业出版社, 2008.6  
ISBN 978-7-122-02946-1

I. 变… II. ①王…②王…③杨… III. ①变压器-故障诊断②变压器-维修 IV. TM407

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 073654 号

---

责任编辑: 高墨荣  
责任校对: 徐贞珍

装帧设计: 韩 飞

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 北京市彩桥印刷有限责任公司  
850mm×1168mm 1/32 印张 7½ 字数 198 千字  
2008 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 19.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

随着我国国民经济的快速稳定发展，对电能需求的迅速增长，我国电网的规模日益扩大。在电力系统向超高压、大容量、大电网、自动化方向发展的同时，提高电力设备的运行可靠性和稳定性更为重要。根据国内外电力运行的经验，电压等级越高、容量越大，电气设备的故障发生率一般也越高，修复时间也越长，因此也给社会各行各业的经济运行及群众的生活造成巨大的损失和不便。

电力变压器是电力系统中最关键的设备之一，它承担着电压变换、电能分配和传输的任务，并提供各种电力服务。因此，变压器的正常运行是对电力系统安全、可靠、优质、经济运行的重要保证，必须最大限度地防止和减少变压器故障和事故的发生。但由于变压器长期运行，故障和事故不可能完全避免。引发故障和事故的原因又是多方面的，如外力的破坏和影响，不可抗拒的自然灾害，安装、检修、维护中存在的问题及制造过程中遗留的设备缺陷等事故隐患。特别是电力变压器长期运行后造成的绝缘老化、材质劣化及预期寿命的影响，已成为发生故障的主要因素。故障诊断及维修涉及到变压器的运行机理、故障发生发展的机制、装置维护的现状、运行条件等诸方面因素，因而是一项复杂的技术性工作，具有非常重要的现实意义。本书就是为了帮助广大工程技术人员和电力技术工人了解和掌握变压器故障的诊断及变压器故障的检修、维修技术而编写的。

本书共 10 章，第 1~3 章由杨莹编写，第 4~6 章由王朋编写，第 7~10 章由王越明编写。全书由郭玉、庄绍君、乔长君、刘勃安、刘鹏审核。

本书适合广大从事变压器运行维护、检修调试、试验安装和修理改装的工程技术人员及操作人员使用，也可供中、高等院校相关专业的广大师生参考。

由于编者水平有限，时间仓促，对于书中的疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

<b>第 1 章 变压器基础知识</b> .....	1
1.1 变压器的分类与工作原理 .....	1
1.1.1 变压器的用途 .....	1
1.1.2 变压器的分类 .....	1
1.1.3 变压器的工作原理 .....	2
1.2 变压器的主要结构部件 .....	4
1.2.1 铁芯 .....	5
1.2.2 绕组 .....	5
1.2.3 其他结构部件 .....	14
1.3 变压器的额定数据 .....	19
1.4 变压器故障的分类 .....	21
<b>第 2 章 变压器铁芯故障</b> .....	23
2.1 铁芯的种类与结构 .....	23
2.1.1 铁芯的种类 .....	23
2.1.2 铁芯的结构 .....	27
2.1.3 铁芯的接地 .....	32
2.2 变压器铁芯故障诊断与维修 .....	34
2.2.1 铁芯多点接地故障及检修 .....	34
2.2.2 铁芯过热故障及检修 .....	39
2.2.3 铁芯松动及噪声故障及检修 .....	40

2.2.4	铁芯片短路故障及检修	41
2.2.5	铁芯故障典型案例分	43
<b>第3章</b>	<b>变压器绝缘故障</b>	50
3.1	变压器的绝缘结构	50
3.1.1	变压器的绝缘水平	50
3.1.2	变压器绝缘结构分类	50
3.1.3	绕组的主绝缘	53
3.1.4	绕组的纵绝缘	55
3.1.5	引线绝缘	57
3.2	绝缘故障分析	63
3.2.1	固体纸绝缘故障	63
3.2.2	液体油绝缘故障	65
3.2.3	影响变压器绝缘故障的主要因素	66
3.3	绝缘故障的诊断及预防措施	68
3.3.1	绝缘故障的诊断	68
3.3.2	预防绝缘老化的措施	72
3.4	绝缘故障典型案例分	74
<b>第4章</b>	<b>变压器组件故障</b>	77
4.1	分接开关故障	77
4.1.1	无励磁分接开关的故障及检修	77
4.1.2	有载分接开关的故障及检修	80
4.2	套管故障	84
4.2.1	变压器套管的作用和分类	84
4.2.2	变压器套管的常见故障	85
4.2.3	变压器套管的检修	87
4.2.4	变压器套管故障案例	90
4.3	变压器油箱及冷却装置故障	92

4.3.1	油箱故障及检修	92
4.3.2	冷却装置故障及检修	95
4.4	变压器储油柜故障	99
4.4.1	储油柜的结构	99
4.4.2	储油柜的常见故障	102
4.5	净油器和吸湿器的故障	103
4.5.1	净油器的故障及检修	103
4.5.2	吸湿器的故障及检修	105
4.6	油位计和温度计的故障	106
4.6.1	油位计的故障及检修	106
4.6.2	温度计的故障及检修	108
4.7	安全气道的故障	110

<b>第5章</b>	<b>变压器放电故障</b>	113
5.1	放电故障对变压器绝缘的影响	113
5.2	放电故障的类型与特征	114
5.2.1	变压器局部放电故障	114
5.2.2	变压器火花放电故障	116
5.2.3	变压器电弧放电故障	118
5.3	局部放电的测量方法	119

<b>第6章</b>	<b>变压器短路故障</b>	123
6.1	变压器短路故障的分类	123
6.1.1	短路电流引起的绝缘过热故障	123
6.1.2	短路电磁力引起的绕组故障	126
6.2	变压器短路故障的特点及检测方法	132
6.2.1	短路故障的特点	133
6.2.2	绕组变形的危害	134
6.2.3	绕组变形的诊断	135

6.3	提高变压器抗短路故障能力的措施	138
6.3.1	设计方面的技术改进措施	138
6.3.2	工艺和材料方面的技术改进措施	140
6.3.3	对运行维护方面的建议	142
6.4	典型短路故障案例分析	144
6.4.1	短路故障案例 1	144
6.4.2	短路故障案例 2	146

<b>第 7 章</b>	<b>变压器保护及误动故障</b>	149
7.1	变压器主保护	149
7.1.1	瓦斯保护	149
7.1.2	差动保护	153
7.2	变压器的后备保护和过负荷保护	158
7.2.1	变压器的过电流保护	158
7.2.2	变压器的零序保护	163
7.2.3	变压器的过负荷保护	167
7.3	变压器保护误动故障	168
7.3.1	主保护误动	168
7.3.2	后备保护误动	172

<b>第 8 章</b>	<b>变压器渗漏油及油流带电故障</b>	176
8.1	变压器渗漏油故障	176
8.1.1	变压器渗漏油的原因	176
8.1.2	变压器渗漏油点的查找	180
8.1.3	变压器渗漏油的处理措施	181
8.2	变压器油流带电故障	188
8.2.1	油流带电的现象和机理	188
8.2.2	影响油流带电的主要因素	189
8.2.3	油流带电的抑制方法	192

<b>第 9 章 变压器事故处理</b>	194
9.1 变压器雷击损坏事故	194
9.1.1 防雷保护措施	194
9.1.2 变压器防雷保护措施的应用	196
9.2 变压器进水受潮事故	197
9.2.1 变压器进水受潮的原因	197
9.2.2 变压器进水受潮的诊断	200
9.2.3 变压器进水受潮的处理方法	201
9.3 变压器着火事故	203
9.3.1 变压器着火的原因	203
9.3.2 变压器火灾事故各种形式及其对策	204
9.3.3 变压器防火保护的几种灭火系统	208
<b>第 10 章 变压器故障综合诊断及在线监测</b>	210
10.1 变压器运行中有故障的特征	210
10.2 变压器故障的离线综合诊断方法	213
10.2.1 变压器绝缘预防性试验	213
10.2.2 故障综合诊断的针对性检测方法	215
10.2.3 变压器故障综合诊断的基本原则	217
10.2.4 变压器故障综合诊断的步骤及注意事项	218
10.3 变压器的在线监测	219
10.3.1 变压器在线监测概述	219
10.3.2 变压器油中溶解气体的在线检测技术	221
10.3.3 变压器微水的在线检测技术	223
10.3.4 变压器油温的在线检测技术	224
10.3.5 变压器在线监测的现状和发展	224
参考文献	226

# 第 1 章 变压器基础知识

## 1.1 变压器的分类与工作原理

### 1.1.1 变压器的用途

变压器是利用电磁感应，以相同的频率，在两个或更多的绕组之间变换交换电压或电流的一种静止电气设备。

各种不同的用电设备常常需要不同电压的电源。我们日常生活用的电灯、电器的工作电压为 220V；安全照明用灯的电压为 36V、24V 或 12V；三相交流电动机一般用 380V 电压，而发电厂的发电机发出的电压一般为 6~10kV。通常电能要经过输电线路输送给远距离的用户，为了减少电能的损耗，节省材料，就需要将发电机发出的电压升高到 10kV、35kV、110kV、220kV、330kV 等高压或超高压进行远距离输电，这就需要用变压器将电压升高；当电能送到用户区，又必须用变压器将电压降低，以保证用户安全用电。从电力系统的角度来看，一个电力网将许多发电厂和用户联系在一起，分成主系统和若干个分系统。各个分系统的电压并不一定相同，而主系统必须是统一的一种电压等级，这也需要各种规格和容量的变压器来连接各个系统。所以说电力变压器是电力系统中不可缺少的一种电气设备。

在实际工作中，变压器除了用来变换交流电压外，还用它来变换交流电流（例如电流互感器、大电流发生器等）、变换阻抗（例如电子线路中的输入、输出变压器）、改变相位（改变接线和极性）等。

### 1.1.2 变压器的分类

变压器有不同的使用条件、安装场所，有不同的电压等级和容量级别，有不同的结构形式和冷却方式，所以应按不同原则进行分类。

### (1) 按用途不同

变压器分为电力变压器（又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、厂用变压器等）、特种变压器（电炉变压器、整流变压器、电焊变压器等）、仪用互感器（电压互感器、电流互感器）、试验用的高压变压器和调压器等。

### (2) 按绕组构成不同

变压器分为双绕组、三绕组、多绕组变压器和自耦变压器。

### (3) 按铁芯结构不同

变压器分为芯式变压器和壳式变压器。

### (4) 按相数的不同

变压器分为单相、三相、多相（如整流用的六相）变压器。

### (5) 按调压方式不同

变压器分为无励磁调压变压器、有载调压变压器。

### (6) 按冷却方式不同

变压器分为干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环变压器、强迫循环导向冷却变压器、充气式变压器等。

### (7) 按线圈结构不同

变压器分为单线圈变压器、双线圈变压器、三线圈变压器及多线圈变压器。

### (8) 按中心点绝缘不同

变压器分为全绝缘变压器和半绝缘变压器。

## 1.1.3 变压器的工作原理

虽然变压器有不同的种类和结构形式，但它们的基本工作原理是相同的，都是根据“动电生磁”和“磁动生电”的电磁感应原理工作的，现以最简单的单相变压器为例说明。

图 1-1 所示的单相变压器，它有两个线圈，其中接交流电源的线圈称为原线圈或原绕组，也叫一次线圈、原边或初级。接负载的线圈称为副线圈或副绕组，也叫二次线圈、副边或次级。原线圈中的电压、电流及电动势各物理量分别用  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{I}_1$  和  $\dot{E}_1$  表示。副线圈

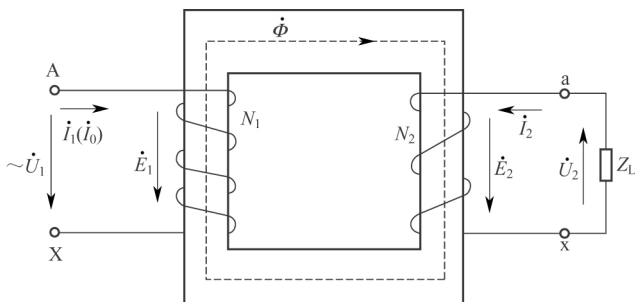


图 1-1 单相变压器工作原理

中各相应的物理量分别用  $\dot{U}_2$ 、 $\dot{I}_2$  和  $\dot{E}_2$  表示。 $N_1$  和  $N_2$  分别表示原、副线圈的匝数。图中标出的是各物理量的正方向。

如果在原线圈两端外加一正弦交流电压  $\dot{U}_1$ ，则原线圈中将有交变电流  $\dot{I}_1$  通过，因而在铁芯中将激励一交变磁通。由于磁场分布的复杂性，磁通的分布也是较复杂的，为了便于分析问题，将总磁通分成等效的两部分磁通，其中一部分磁通  $\Phi$  沿铁芯闭合，同时与原、副线圈相交链，称为主磁通或互感磁通；另一部分磁通主要沿非铁磁材料（沿变压器油或空气闭合）仅与原线圈相交链，称为原线圈漏磁通，用  $\Phi_{11}$  来表示，仅与副线圈相交链的称为副线圈漏磁通，用  $\Phi_{12}$  来表示。主磁通占总磁通的绝大部分，而漏磁通只占很小的一部分，约 0.1%~0.2%。

根据电磁感应定律，交变磁通  $\Phi$  将在原线圈中产生自感电动势  $\dot{E}_1$ ，同时在副线圈中产生互感电动势  $\dot{E}_2$ ，漏磁通  $\Phi_{11}$ 、 $\Phi_{12}$  分别原线圈、副线圈中产生漏感电动势  $\dot{E}_{11}$ 、 $\dot{E}_{12}$ 。在忽略  $\dot{E}_{11}$  和  $\dot{E}_{12}$  的情况下，副线圈中的电动势  $\dot{E}_2$  对负载来说就相当于电源电动势，因而在副线圈与负载连接的回路中产生了电流  $\dot{I}_2$ ，将电能转换为其他形式的能量。

由上分析可知，负载所消耗的电能是通过变压器铁芯中的交变磁通，从原线圈传递到副线圈的。能量由交流电源供给，铁芯中的磁通是传递能量的桥梁。即变压器能量的传递是按“电—磁—电”

的途径进行的。这就是变压器的基本工作原理。

值得注意，变压器只能传递电能而不能产生电能，它只能改变交流电的电压和电流。遵循能量转换和守恒的原理，如果变压器副边有一定的能量输出，那么，原边就必须有相应的能量输入。如果忽略变压器内部的能量损耗，则变压器输入功率和输出功率必定相等。

## 1.2 变压器的主要结构部件

变压器的主要部件为一闭合磁路（铁芯）以及环绕着磁路的原边电路和副边电路（线圈）。图 1-2 是三相油浸式电力变压器外形。

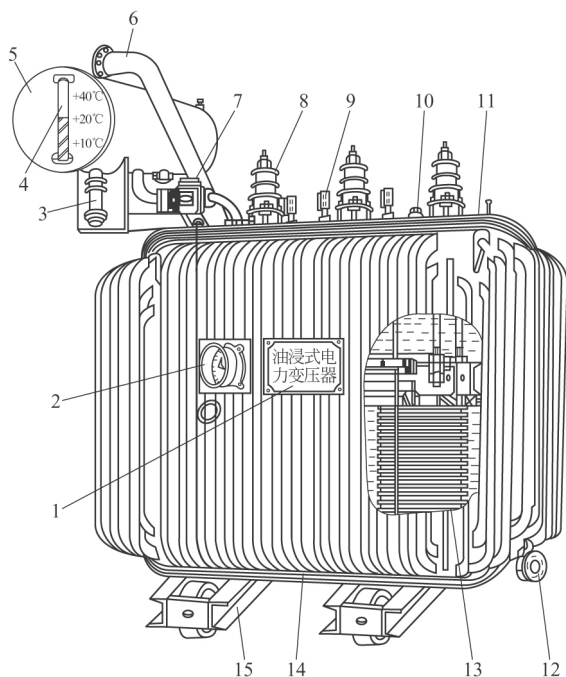


图 1-2 三相油浸式电力变压器外形

- 1—铭牌；2—信号式温度计；3—吸湿器；4—油表；5—储油柜；6—安全气道；7—气体继电器；8—高压套管；9—低压套管；10—分接开关；11—油箱；12—放油阀门；13—器身；14—接地板；15—小车

铁芯和线圈是变压器进行电磁感应的基本部分，称为器身；此外，还有起机械支撑、冷却散热和保护作用的油箱；起绝缘作用的套管；起冷却和绝缘作用的油等。概括地说，变压器的主要构成部分有：铁芯、线圈、油箱、附件和变压器油。

### 1.2.1 铁芯

铁芯是变压器的主要部件之一，它构成变压器的磁路。只有绕组不用铁芯的变压器也能变压，但是由于空气的磁阻很大，漏磁十分严重，要求有很大的励磁电流，所以实际变压器必须用铁芯，它是变压器的磁路部分。由于变压器的工作原理是根据电磁感应来的，一、二次绕组间并没有电的直接联系，只有通过铁芯形成磁的联系。利用变压器铁芯可获得强磁场，增强一、二次绕组间的电磁联系，减少励磁电流。为了提高导磁系数和降低铁芯涡流损耗，铁芯用表面涂漆（或经处理）的硅钢片叠成。电工硅钢片很薄，变压器上目前一般用厚度为  $0.23\sim 0.35\text{mm}$  的硅钢片。铁芯是能量转换的媒介，把一次电路的电能为磁能，又由此磁能转变为二次电路的电能。

在结构上，铁芯的夹紧装置使磁导体成为一个机械上完整的结构，而且在其上面套有带绝缘的绕组，支持着引线，并几乎安装了变压器内部的所有部件。

铁芯的质量在配电变压器各部件中最大，在干式变压器中铁芯的质量占总质量的 50% 左右；在油浸式变压器中，由于有变压器油和油箱，质量的比例稍有下降，约为 30%。

变压器的铁芯（即磁导体）是框形闭合结构。其中套绕组的部分称为芯柱，不套绕组只起闭合磁路作用的部分称为铁轭。现代铁芯的芯柱和铁轭在一个平面内，即为平面式铁芯，新式的立体铁芯呈三角形立体排列。

### 1.2.2 绕组

我国生产的电力变压器，基本上只有一种结构形式，即芯式变压器，所以它的绕组也都是采用同心绕组。所谓同心绕组，就是在

铁芯柱的任一横断面上，绕组都是以同一圆心的圆筒形线圈套在铁芯柱的外面。在一般情况下总是将低压线组放在里面靠近铁芯处，将高压绕组放在外面。高压绕组与低压绕组之间，以及低压绕组与铁芯柱之间都必须留有一定的绝缘间隙和散热通道（油道），并用绝缘纸板筒隔开。绝缘距离的大小，决定于绕组的电压等级和散热通道所需要的间隙。当低压绕组放在里面靠近铁芯柱时，因它和铁芯柱之间所需的绝缘距离比较小，所以绕组的尺寸就可以减小，整个变压器的外形尺寸也同时减小了。

同心绕组按其结构不同可以分为下列几种基本形式。

### (1) 圆筒形绕组

它是一个圆筒形螺旋体，其线匝是用扁线彼此紧靠着绕成的，如图 1-3 所示。圆筒形绕组可以绕成单层，如图 1-3(a) 所示；也可以绕成双层，如图 1-3(b) 所示。通常总是尽量避免用单层圆筒，而是绕成双层圆筒。因为绕成单层时，导线受到弹性变形的影响，线匝容易松开，使端部线匝彼此靠得不够紧，而绕成双层后，松开的倾向就小得多了。当电流较大时，也采用每一线匝由数根导线沿轴向并联起来绕成，但并联导线数通常不多于 4~5 根。

圆筒形绕组，其两端的两匝作为螺旋体的一部分，是处在一个与轴线成一定倾斜角的平面内，也就是说两端的两匝是斜的，为了

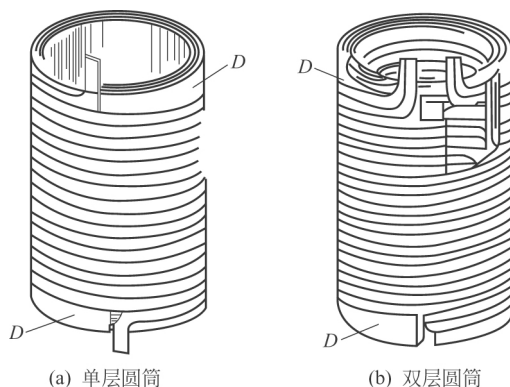


图 1-3 圆筒形绕组

使绕组能在平面上垂直竖立，在每层的起始一匝和最后一匝都放上一个用胶木或纸板条做成的端圈，如图 1-3 中  $D$  所示。圆筒形绕组与冷却介质的接触面积最大，因此冷却条件较好，但这种绕组的机械强度较弱，一般适用于小容量变压器的低压绕组。

## (2) 螺旋形绕组

容量稍大些的变压器的低压线组匝数很少（20~30 匝以下），但电流却很大，所以要求线匝的横截面很大，因此要用很多根导线（6 根或更多）并联起来绕。在圆筒形绕组里是不能用很多根导线并联起来绕的，因为这些导线要在同一层里一根靠着一根排列着绕，结果使线匝内螺距太大，这样的线圈很不稳固，而且它的高度也没有很好地利用，所以在并联导线的数目较多时，仍采用圆筒形绕组是不适宜的，于是就有所谓螺旋形绕组出现，如图 1-4 所示。圆筒形绕组实际上也是螺旋形的，不过这里所讲的螺旋形绕组每匝并联导线的数量比较多，而且是沿径向一根压着一根地叠起来绕。图 1-4(b) 所示的，是螺旋形绕组导线匝间排列的一部分（只拿出其中 4 匝），每匝有 6 根导线并联，把 6 根并联的导线绕成一个螺旋，各个螺旋不是像圆筒形绕组那样彼此紧靠着，而是中间隔着一个空的沟道。图 1-4(a) 为螺旋形绕组绕成后的外形。

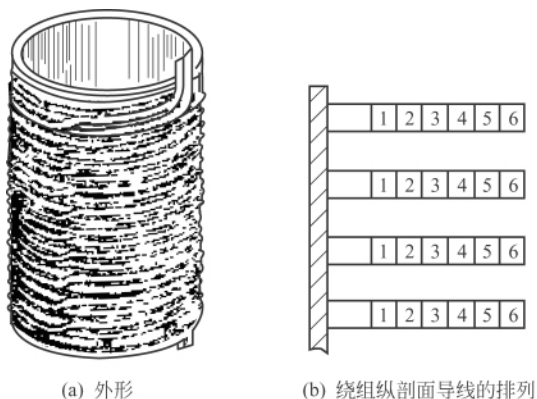


图 1-4 螺旋形绕组

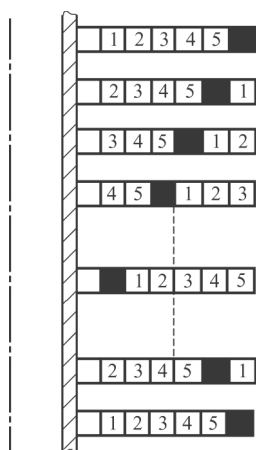


图 1-5 螺旋形绕组换位时导线的位置

螺旋形绕组当并联导线更多时（例如 12 根），就把并联导线分成两组并排起来绕，这样就绕成了双层螺旋，图 1-4(a) 所示的即为双层螺旋。由于导线会产生附加损耗，导线的截面越大，附加损耗也就越迅速地增加，为了减少这些附加损耗，螺旋形绕组的并联导线要进行换位。换位是要使并联的每根导线不像图 1-4(b) 所示的那样保持它在径向不变的位置，例如在没有换位时，第 6 根导线在整个线圈高度里永远是在最外层，而利用换位就可以使外层导线依次序占据所有可能的径向位置，如图 1-5 中涂黑的导线所示。这样的换位叫做完全换位，因为每一根导线换位，都

需要多余的地方，以致过分地增加了线圈的轴向尺寸，实用中多采用半数线匝换位，如图 1-6 所示。螺旋形绕组的内径较大，都在 300mm 以上，如内径小于 300mm 左右，绕弯时就比较困难，所以

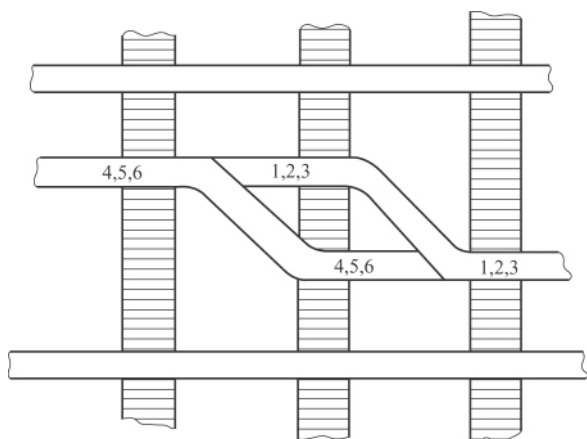


图 1-6 螺旋形绕组的半数线匝换位