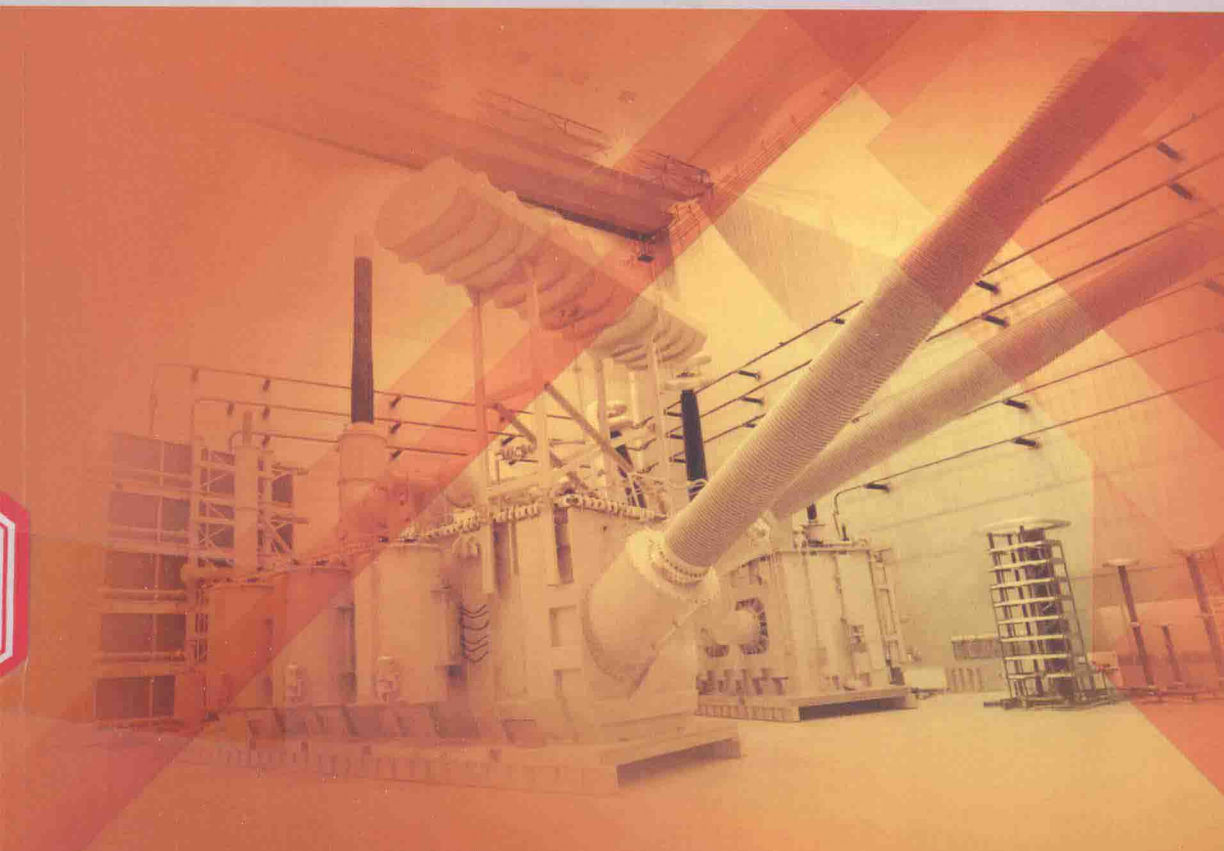


特高压直流输电工程换流站设备监造指南

换流变压器

刘泽洪 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压直流输电工程换流站设备监造指南

换流变压器

刘泽洪 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

根据特高压直流输电工程换流站主设备的特点,依据特高压最新的标准和规范,为进一步指导特高压换流站主设备的监造工作,在《特高压直流输电工程换流站主设备监造手册》的基础上重新编写了《特高压直流输电工程换流站设备监造指南》(简称《指南》)。

《指南》涵盖《晶闸管换流阀》《平波电抗器》《换流变压器》三个分册。本书为《换流变压器》分册,包括换流变压器的基本结构及特点、换流变压器的主要组部件、换流变压器的主要原材料、换流变压器的主要制造工艺及特点、监造工作实施以及典型案例共6章。

本书主要适用于从事特高压直流输电工程换流站主设备监造的技术人员和管理人员,也可供相关专业的技术和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

换流变压器 / 刘泽洪主编. —北京:中国电力出版社, 2016.11

(特高压直流输电工程换流站设备监造指南)

ISBN 978-7-5123-9661-6

I. ①换… II. ①刘… III. ①换流变压器
IV. ①TM422

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第192609号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年11月第一版 2016年11月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 30.5印张 491千字

印数0001—1000册 定价239.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《特高压直流输电工程换流站设备监造指南》

编写人员名单

主 编 刘泽洪

副主编 张福轩 刘开俊 常 浩 文卫兵

编写组 石 岩 李 明 聂定珍 曹燕明 杨 勇
吴克建 韩海银 王海涛 王德庆 刘 娜
金 玲 程镇宝 邱 斌 李满元 李大广
李 禾 刘福喜 范文峰 李卜欣 张 宇

大力开发西部水电、火电资源，实施西电东送，电力南北互供、全国联网，实现全国范围内的能源优化供给，是 21 世纪中国能源和电力工业建设的基本战略。直流输电具有远距离、大容量输电和电力系统联网的显著优点，在我国西电东送和全国联网工程发挥了举足轻重的作用。我国从 20 世纪 50 年代开始进行高压直流输电的技术研发和工程应用。1977 年在上海建成了 31kV、150A、4.65MW 直流输电实验工程。1989 年 9 月建成了成套引进技术和设备的 500kV、1200MW、1.2kA，1045km 葛洲坝—南桥直流输电工程，这是我国第一个跨大区、跨系统、超高压、大容量、远距离直流输电工程。2010 年 6 月 18 日，云南—广州 ± 800 kV 特高压直流输电工程作为世界首个 ± 800 kV、3125A 高压直流输电工程实现单极投运。2010 年 7 月 8 日，向家坝—上海 ± 800 kV 特高压输电试验示范工程建成，这是世界上首条 ± 800 kV、6400MW、4000A 的特高压直流示范工程，工程线路长达 1907km，这标志着我国电力技术、装备制造达到国际先进水平。截至 2015 年底，国家电网公司已有向家坝—上海、锦屏—苏南、哈密—郑州、溪洛渡—浙江金华四条 ± 800 kV 特高压直流输电工程投入运行，灵州—绍兴、酒泉—南湖、晋北—南京、锡盟—泰州、上海庙—山东、扎鲁特—青州 ± 800 kV 特高压直流输电工程和准东—华东 ± 1100 kV 特高压直流输电工程都正在建设之中。我国的高压直流输电技术蓬勃发展，已经成为直流大国、强国，引领直流技术的发展，处于世界领先水平。

特高压直流输电工程是一项庞大的系统工程，工程所涉及的设备品种繁多、数量巨大，其中换流阀、换流变压器和平波电抗器是构成直流输电回路的最关键、最核心、最重要的一次主设备。由于其交直流整流及逆变换流的功能要求和耐受直流电压等特点，所以其技术要求与交流输电工程的主设备

相比差异很大，甚至完全不同。因此研发、设计、制造出优良品质的换流阀、换流变压器和平波电抗器设备是发展特高压直流技术的重中之重。

随着我国特高压直流输电工程的快速发展，换流变压器的电压等级、容量在不断提高，生产方式也发生较大变化，从技术引进到自行设计、从少数几家生产到多家竞争介入，从原材料（组附件）进口到逐步国产化，换流变压器的质量风险正在不断上升，监造难度不断加大。

换流变压器制造成本高、工艺复杂，工序作业多为手工操作，前道工序质量往往被后道工序所覆盖，质量控制具有较大难度。换流变压器所使用的原材料和组部件的质量也具有一定的分散性，作业过程中若及时发现和处理，将给产品留下质量隐患。甚至产生非常严重的后果，导致产品不合格。随着多个特高压直流工程的建成，国内换流变压器在设计、制造方面也积累了许多宝贵的经验和教训。

《特高压直流输电工程换流站设备监造指南》共分三个分册，分别为《晶闸管换流阀》、《平波电抗器》、《换流变压器》。本书为《换流变压器》分册，主要内容包括换流变压器的基本结构及特点、换流变压器的主要组部件、换流变压器的主要原材料、换流变压器的主要制造工艺及特点、监造工作实施、典型案例。

由于时间仓促，疏漏和不足之处在所难免，恳请专家和读者批评指正，以便对书中内容不断完善。

编者

2016年2月

前言

1	换流变压器的基本结构及特点	1
1.1	换流变压器的作用和特点	1
1.2	换流变压器的基本结构	4
2	换流变压器的主要组部件	33
2.1	储油柜	33
2.2	套管	35
2.3	分接开关	40
2.4	冷却装置	48
2.5	非电量保护及测量装置	55
3	换流变压器的主要原材料	67
3.1	硅钢片	67
3.2	导线	70
3.3	绝缘材料及成型件	72
3.4	钢材	76
3.5	绝缘油	76
4	换流变压器的主要制造工艺及特点	78
4.1	铁芯制作	78
4.2	绕组制作	82

4.3	油箱制作	101
4.4	器身装配	108
4.5	引线装配	111
4.6	器身干燥	115
4.7	总装配	121
4.8	换流变压器试验	128
4.9	包装和发运准备	180
5	监造工作实施	186
5.1	工程及设备概况	186
5.2	监造依据和监造方式	192
5.3	监造前期工作	196
5.4	生产过程监造	219
5.5	监造信息	256
5.6	监造后期工作	258
6	典型案例	259
6.1	工艺管控类故障	259
6.2	原材料/组部件类故障	281
6.3	产品设计类问题	305
6.4	其他类故障	312
附录 A	换流变压器原材料/组部件见证项目及方式	316
附录 B	换流变压器生产过程见证项目及方式	323
附录 C	监造资料编号及参考模板	333
附录 D	换流变压器监造信息记录参考表格	427
附录 E	术语和定义	475

换流变压器的基本 结构及特点

1.1 换流变压器的作用和特点

1.1.1 换流变压器的主要作用

直流输电系统由整流站、直流线路和逆变站三部分组成，换流变压器是直流输电系统中的关键设备，它和交流输电系统中的电力变压器一样，其主要作用是改变电压，传输电能。但在直流输电系统中，换流变压器和换流阀共同作为交流和直流系统的接口设备，其网侧绕组连接交流电力系统，阀侧绕组连接整流装置，经平波电抗器与直流输电线路相连，在整流和逆变侧实现直流和交流的转换。概括起来换流变压器的主要作用有：

- (1) 隔离，通过换流变压器实现交、直流系统的电气隔离，避免直流电压进入交流系统；
- (2) 提供电源，通过换流变压器向换流阀提供所需的不接地三相可控交流电压；
- (3) 交直流转换，换流变压器参与 AC/DC 变换；
- (4) 限制过电压，换流变压器的隔离作用可以削弱交流系统入侵到直流系统的过电压；
- (5) 减少注入交流系统的谐波，用于对 12 脉动换流阀的两个串联 6 脉动阀桥提供相差 30° 电气角的电源，去除低次的 5 次及 7 次特征谐波；
- (6) 抑制直流故障电流，换流变压器的高阻抗可以限制故障时的短路电流和控制换相期间换流阀电流的上升陡度。

1.1.2 换流变压器的基本特点

由于换流变压器的特殊作用，它与一般的交流变压器相比，具有以下几方面的特点：

(1) 运行环境。换流变压器的网侧与交流系统连接，承受交流系统的运行环境。其阀侧与换流阀连接，承受交流电压与直流电压的共同作用。换流变压器的本体和网侧套管布置在户外，经受户外运行环境，而它的阀侧套管伸入阀厅，为户内运行环境。

(2) 绝缘及电场分布。换流变压器阀侧绕组既要承受交流电压产生的应力，又要承受直流电压产生的应力，还必须考虑极性反转的应力作用，这使换流变压器的绝缘结构比交流变压器更为复杂。

1) 交流变压器的主绝缘设计是基于薄纸板（筒）、小油隙理论，即在交流电场中纸板主要起分隔油隙的作用，电场主要集中在油隙中，纸板基本上不具备单独耐压的功能，所以，纸板厚度比较薄，重量也比较轻。

2) 在换流变压器中，由于存在直流电场，主绝缘中需要更多的绝缘纸板来承担大部分的直流电场强度。所以，阀侧绕组要被多层纸板和角环所包绕，主绝缘中纸板的厚度和用量远大于交流变压器。同样，阀侧引线处的绝缘数量也有所增加，出线装置要综合考虑交流场、直流场、极性反转场等因素，比交流变压器更复杂。

3) 变压器中主要绝缘材料为变压器油和绝缘纸，交流电场按照容性分布规律分布在这两种介质中，介电常数大的绝缘介质中承受较小的交流电场强度，而介电常数小的绝缘介质中承受较大的交流电场强度。变压器油的介电常数约为绝缘纸板的一半，所以变压器油隙中的交流电场强度约为绝缘纸板中的一倍。因此，变压器中交流电场的分布比较均匀。

4) 直流电场遵循与交流电场完全不同的分布规律，它是按照阻性分布规律分布在两种绝缘介质中。也就是说电导率小的绝缘介质中承受较大的直流电场强度，电导率大的绝缘介质中承受较小的直流电场强度。在室温条件下，变压器油的电导率约为绝缘纸板的 100 倍，也就是绝缘纸板中的直流电场强度约为变压器油中的 100 倍。由此可见，变压器中直流电场的分布非常不均匀。因此，虽然都是油纸绝缘结构，在交流变压器中绝缘油起主要作用，但换流变压器的主绝缘结构中却是绝缘纸板起主要作用。

5) 换流变压器在长时直流电压作用下, 绝缘中的电场为静态直流电场。电场分布只取决于介质的电导率和几何形状。因为油和纸的电导率相差悬殊, 故电场集中在纸和不连续的纸板端部油中。动态直流电场的分布既取决于介电系数, 也取决于电导率。由于静态和动态直流电场的分布都与电导率密切相关, 而电导率受温度、杂质、原材料和作用场强等因素影响而在很大范围内变化, 使直流绝缘的设计存在很大的不确定性。故直流绝缘设计的安全系数取值必须大大高于交流设计的取值。因而换流变压器的设计制造, 也比普通交流变压器更加复杂和困难。

(3) 短路阻抗。换流变压器属于高阻抗变压器, 即其阻抗通常高于普通的交流变压器, 这不仅是为了把短路电流限制在换流阀的承受能力范围内, 也是为了限制换相期间阀电流的上升率。但短路阻抗太大会增加无功损耗和无功补偿设备, 并导致换相压降过大。目前换流变压器的短路阻抗一般选择 15%~19%。随着直流输电系统电压的提高, 单台换流变压器容量进一步增大, 综合考虑制造原因以及大件运输的限制, 短路阻抗可能会上升到 23% 左右。

(4) 短路电流耐受能力。由于故障电流中存在直流分量, 换流变压器所承受的最大不对称短路电流不会迅速下降, 而是保持在比较高的水平直到保护动作。因此, 换流变压器应能承受较大的短路应力。而换流阀的换相失败也会使换流变压器遭受更多的电动力冲击。

(5) 谐波电流耐受能力。换流系统在运行中产生大量的特征谐波和非特征谐波电流, 使换流变压器的杂散损耗增大, 噪声升高, 容易引起金属部件和油箱产生局部过热等。

(6) 直流偏磁电流耐受能力。换流变压器中存在直流偏磁电流, 使其损耗、温升及噪声都有所增加。特高压换流变压器设计时直流偏磁电流一般按 10A 考虑。

(7) 有载调压范围。换流变压器有载调压范围大, 以保证电压变化及触发角运行在适当范围内。尤其是直流降压运行时, 正分接位置最高达 20 个以上。目前换流变压器调压范围较多为 $(+23/-5) \times 1.25\%$, 也有选 $(+25/-5) \times 1.25\%$ 等其他调压范围的换流变压器。

1.2 换流变压器的基本结构

1.2.1 铁芯结构

铁芯的基本结构包括铁芯柱、铁轭、旁轭和夹件及结构件等。

铁芯柱：铁芯中套有绕组的部分。

铁轭：铁芯中不套绕组的铁磁部分，它与铁芯柱垂直并与芯柱构成闭合的磁路。换流变压器的铁轭一般采用 D 型截面结构，铁轭分为上铁轭和下铁轭。

旁轭：铁芯中不套绕组的铁磁部分，它与铁芯柱平行并与芯柱构成闭合的磁路。

夹件：加紧铁轭使铁芯稳固并可用来压紧绕组，以及通过与油箱配合达到对器身定位的结构件，同时也是承受器身起吊重量的重要组件。

目前换流变压器采用的铁芯结构型式主要有单相二柱旁轭式铁芯和单相三柱旁轭式铁芯两种。

单相二柱旁轭式铁芯三维图、结构图分别见图 1-1 和图 1-2 所示。

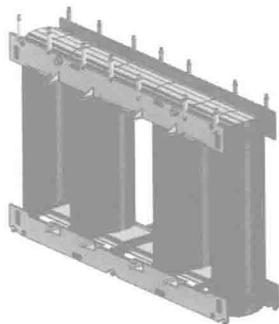


图 1-1 单相二柱旁轭式铁芯三维图



图 1-2 单相二柱旁轭式铁芯结构图

单相三柱旁轭式铁芯如图 1-3 所示。

1.2.1.1 芯柱结构

换流变压器铁芯材料一般采用 0.23~0.30mm 厚度的高导磁晶粒取向冷轧硅钢片，高端换流变压器多采用性能更优的激光刻痕晶粒取向冷轧硅钢片，可以有效降低铁芯材料的磁滞损耗，减小换流变压器的空载电流和空载损耗。

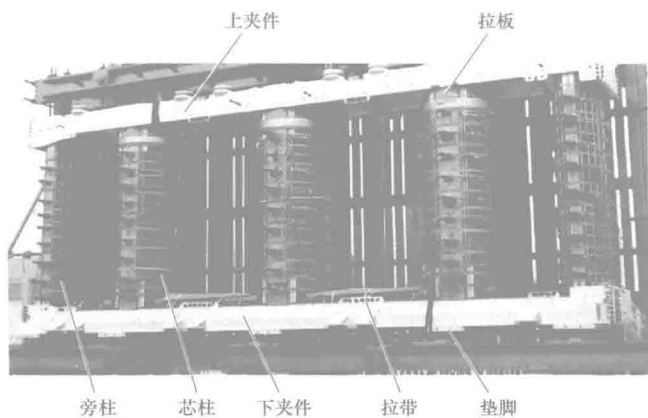


图 1-3 单相三柱旁轭式铁芯

随着硅钢片厚度的减小,可以降低换流变压器的空载损耗,但硅钢片太薄会使铁芯叠片系数降低并带来工艺的不便。

铁芯叠片系数是指由于硅钢片表面的平整度、绝缘涂层厚度以及铁芯夹紧方式和绑扎紧度等影响,使硅钢片实际通过磁力线的净截面(有效截面)与其几何截面(毛截面)并不相等,净截面与几何截面之比称为铁芯叠片系数,用以表示二者的关系。

换流变压器铁芯的芯柱采用多级阶梯圆形截面、旁轭采用多级椭圆形截面、上下铁轭为“D”形截面。铁芯柱级数的选择与换流变压器的容量、铁芯直径、硅钢片规格、铁芯绑扎方式等因素有关。级数的多少影响铁芯的填充系数 K_{SF} ,由于铁芯是由硅钢片叠成的圆内接多级矩形截面,矩形截面愈多其截面越接近圆截面。通常把多级矩形的几何截面积与其对应的铁芯柱外接圆面积之比,称为铁芯的填充系数或利用系数。级数越多时,利用系数越高,漏磁也愈少。但随着级数的增加,铁芯片的规格增多,铁芯冲剪和叠片等工作量也随之增加,况且级数达到一定数量后对利用系数的提高并不明显。因此,铁芯级数的选择是根据其直径的不同而合理确定的。换流变压器铁芯一般采用24~36级。

铁芯内部一般设置3~10条由橡胶材料特制的防振垫层,用以削减冲击力对铁芯的影响,减小铁芯振动,降低运行噪声。防震层数量的多少根据铁芯柱直径的大小和铁芯整体结构由设计计算确定,并不限于上述范围。防震层的

设置如图 1-4 所示。



图 1-4 铁芯油道及防震层

1.2.1.2 接缝结构

换流变压器铁芯一般采用不叠上铁轭的叠积工艺，有效地减少了晶粒取向硅钢片受外力的影响，有利于降低换流变压器的空载损耗。同时也节省了铁芯叠装的工时，减少了操作者的重复劳动，提高了工效。

铁芯叠积是沿其厚度方向由晶粒取向一致的硅钢片一层一层叠积而成的。每层是一片硅钢片时，磁性能最好，但增加了叠积的工作量，一般情况下是用两片或三片硅钢片分层叠积。换流变压器铁芯较多采用两片硅钢片分层叠积方法。

叠积式铁芯分为搭接和对接两种结构方式，它是按芯柱和铁轭的接缝是否在一个平面进行分类的。各个结合处的接缝在同一垂直平面内，称为对接；接缝在多个垂直平面内，称为搭接。换流变压器铁芯采用搭接式叠积方式，一般采用 5~7 级全斜步进接缝，接缝图如图 1-5 所示。由于冷轧硅钢片具有沿碾压方向磁阻小、导磁率高、损耗最小的特点。因此，采用直角接缝时，转角处的损耗要高出 4~4.5 倍。如果采用 45° 斜角接缝，磁力线在铁芯中的转角处将按 0°~45°~0° 的角度流动，可以有效减小磁阻，同时由于斜角接缝较直角接缝的接触面积大 1.414 倍，转角处的磁通密度相对较小，可使空载损耗下降 15% 以上，还能降低噪声 3%~4%。

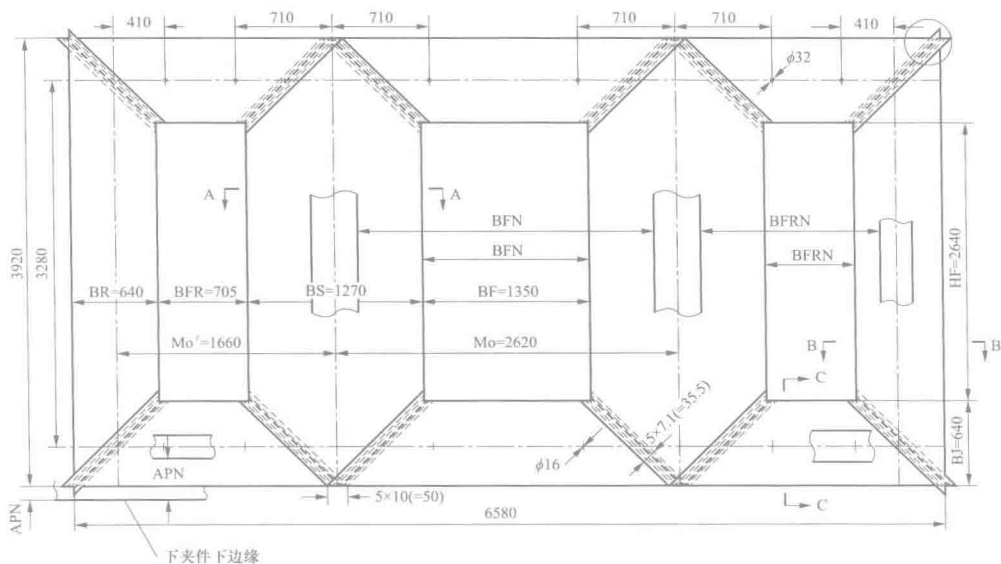


图 1-5 换流变压器铁芯全斜步进接缝图

1.2.1.3 铁芯绑扎结构

换流变压器的铁芯采用无孔高强度绑带绑扎工艺，不仅避免了冲孔加工对硅钢片导磁性能造成的不利影响和铁芯有效截面的减小，简化了制造工艺，同时也改善了空载性能，可降低空载损耗 5%~10%，还增加了铁芯的整体性和机械强度。

换流变压器的铁芯柱和旁轭一般采用高强度绑带或热缩带两种绑扎方式。

(1) 高强带绑扎，芯柱和旁轭都采用高强度的聚酯树脂浸渍玻璃纤维网状无纬绑带（高强带，下同）绑扎。采用该种绑扎结构的铁芯外形如图 1-6 所示。

(2) 热缩带绑扎，芯柱及旁轭采用高强度热缩带绑捆扎后经加温处理使其形成稳固的整体。热缩带固化的方法有两种：① 在铁芯绑扎结束后将铁芯单独进烘房加热固化；② 不对铁芯进行单独进炉加热，而是在进行器身干燥的同时实现对

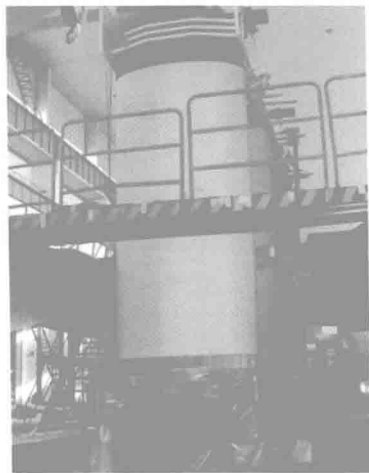


图 1-6 采用高强带绑扎的铁芯

铁芯热缩带加热固化的目的。采用该种绑扎工艺的铁芯如图 1-7 所示。



图 1-7 采用热缩带绑扎的铁芯

换流变压器铁芯的上下铁轭一般采用由高强度结构钢或无磁钢制成的金属拉带绑扎，拉带通过绝缘材料与铁芯绝缘。拉带与夹件的连接方式分为两种：① 拉带、拉板的一端与夹件直接连接，且应接触良好，否则会引起发热或局部放电，另一端与夹件绝缘；② 拉带、拉板的两端均与夹件绝缘。采用金属拉带绑扎结构的铁芯外形如图 1-8 所示。



图 1-8 铁轭拉带和导油槽

1.2.1.4 铁芯夹紧结构

由铁芯、绕组和引线等组成变压器的器身必须形成刚性的整体结构，以承

受产品在制造、运输和运行中可能受到的各种作用力，铁芯作为器身的骨架，必须能够承受包括换流变压器出口短路冲击力在内的各种作用力。

铁芯由整体为框架结构的夹件、拉板、拉带等组件组成的夹紧装置固定，必须具有足够的机械强度和稳定性。换流变压器一般采用由高强度结构钢制成板式夹件，其作用是夹紧铁芯片并能可靠地压紧绕组、支撑引线、布置器身绝缘。对于强迫导向油循环的换流变压器，下夹件还兼有主油道和导向作用。

铁芯底部装有梯型垫块防止铁芯片串片移位，上下夹件设有三维强力定位装置，总装配时分别固定在油箱底和箱盖上，防止器身位移。

1.2.1.5 铁芯散热结构

换流变压器运行时，铁芯损耗产生的热量使铁芯发热，因此，铁芯是换流变压器的主要热源之一。铁损是交变的主磁通在铁芯中产生的磁滞损耗和涡流损耗之和，又称为固定损耗，它与变压器的负载无关。为了使铁芯内部的热量及时向外散发，防止铁芯局部过热，在换流变压器铁芯的内部设有 3~7 条冷却油道，通过油流循环将热量散发出去，保证其温升不超过允许值。

换流变压器的漏磁通在铁芯结构件中会产生杂散损耗，为了减小这些损耗，一般将拉板、上夹件的下肢板和下夹件的上肢板开槽做成细条状，铁芯拉带也做成条状，以减小涡流损耗，降低结构件温度。

1.2.1.6 铁芯屏蔽结构

(1) 半导体屏蔽。

无论铁芯柱和旁柱采用何种绑扎方式，如果没有装设芯柱地屏，就应在多层绑扎带之间加入数层半导体绑扎带，用以消除铁芯柱阶梯棱角和尖端影响，均匀芯柱及旁轭与绕组间的场强分布，防止产生局部放电。有些高强度带本身也是半导体性质的，就不需再加半导体绑带。

如果芯柱或旁轭装设有芯柱地屏时，就不再使用半导体绑带，二者的作用是相同的。

(2) 芯柱地屏。

铁芯地屏是用以屏蔽芯柱和旁轭的多级圆棱角和尖端，起着均匀电场防止局部放电的作用。铁芯地屏是在电缆纸或较薄的绝缘纸板之间均匀粘接铜箔带（箔复合纸、铝箔复合纸等），为了减小涡流损耗，金属箔带不能太厚，也不能太宽。金属箔带边沿一定要光滑，避免发生尖端放电，并将所有金属箔带用铜