

电气设备故障试验诊断 **攻略**

电力变压器

丛书主编 包玉树
本册主编 衡思坤

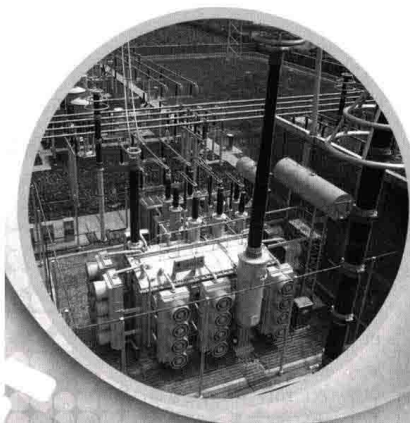


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电气设备故障试验诊断 **攻略**

电力变压器

丛书主编 包玉树
本册主编 衡思坤



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为加强对电气设备的检查维护及故障诊断力度,确保电气设备安全稳定运行,特编写《电气设备故障试验诊断攻略》丛书。本丛书以生动的案例介绍、真实的场景再现,将基于电气试验的设备故障诊断案例加以剖析。

本书是《电力变压器》分册,共分五章,分别为变压器的基本知识、变压器的故障类型、变压器故障分析及诊断、变压器典型故障案例分析、变压器故障诊断新技术展望。

本丛书可供电力系统从事电气设备试验的工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业师生的学习参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电力变压器 / 衡思坤主编. —北京: 中国电力出版社, 2017. 7

(电气设备故障试验诊断攻略 / 包玉树主编)

ISBN 978-7-5198-0295-0

I. ①电… II. ①衡… III. ①电力变压器—故障诊断 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 319788 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘 丹 (dan-liu@sgcc.com.cn) 安 鸿

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 郝晓燕 赵姗姗

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2017 年 5 月第一版

印 次: 2017 年 5 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 10.25

字 数: 216 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 78.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

《电气设备故障试验诊断攻略》丛书编委会 审定委员会

主 任 黄志高

副主任 陈 晟 卞康麟

委 员 (按姓氏笔画排序)

马生坤 王丽峰 水为涟 吉 宏 许焕清 杜 森
李 杰 李瑶红 吴 俊 张红光 祝和明 徐建军
翟学锋

编写委员会

丛书主编 包玉树

丛书参编 (按姓氏笔画排序)

马生坤 马君鹏 王成亮 王伟津 王庆胜 王丽峰
王泽仁 王建刚 卞康麟 甘 强 叶加星 付 慧
司增彦 朱孟周 刘 洋 孙和泰 杜 森 杨小平
杨世海 杨景刚 李夕强 李 军 李瑶红 吴 俊
吴 剑 张兴沛 陈华桂 陈志勇 陈 杰 陈明光
范 忠 周 源 孟 嘉 赵 胤 胡永建 钟子娟
钟永和 祝和明 秦嘉喜 贾勇勇 徐敏锐 殷 峰
高 山 高 嵩 黄亚龙 黄 芬 黄 磊 衡思坤

本册编写人员

主 编 衡思坤

参 编 伏祥运 李瑶虹 马生坤 王丽峰 崔建胜 衡 星

目前,国家电网公司立足自主创新,大力发展特高压和智能电网并取得了重大突破,实现了“中国创造”和“中国引领”,电力事业日新月异,蓬勃向前。国网江苏省电力公司的广大员工随潮而动,逐梦而飞。在此背景下,经过近四年的筹划、组织、立项、编撰、审核、修改,《电气设备故障试验诊断攻略》丛书与读者见面了。

本套丛书按照一次设备的种类分别成册,内容涵盖设备结构、针对性试验、典型故障、诊断攻略等方面,重点放在具有可操作性的故障诊断上。丛书中所列故障案例,既有作者的亲身经历,也有收集借鉴的他山之石,经过筛选、加工一一呈现在读者面前,期望这套丛书能给读者带去不一样的收获。本套丛书各分册内容安排主要以故障描述、缺陷排查、综合分析、诊断攻略的形式呈现,另外对专业领域的试验与诊断新技术做了前瞻性叙述。

《电力变压器》分册共分五章,第一章是变压器基础知识的介绍。第二章介绍了变压器的故障类型及故障原因分析。第三章是从故障检测的角度介绍了电气试验,变压器油物理、化学及电气试验,在线监测,带电检测等常用故障检测及诊断手段。第四章是本分册的重点,对绕组、铁芯、绝缘组件、绝缘油、油箱等部件进行了简单介绍,并通过典型故障案例分析加深技术人员的理解。第五章为变压器故障诊断新技术展望。

在本套丛书的编写过程中,得到了国网江苏省电力公司领导的大力支持,书中参考了其他省市电力公司的事故案例,引用了一些研究成果及试验数据,在此对相关单位的领导和专家表示衷心的感谢。

本套丛书可供电力系统从事电气设备试验的工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业师生的学习参考资料。

由于各分册作者均为在职电力系统专家,利用工作之余的时间编写,时间仓促,书中仍有疏漏与不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2017年5月

前言

第一章 变压器的基本知识	1
第一节 变压器的分类	1
第二节 电力变压器的类型和参数	3
第三节 变压器的主要结构部件	9
第二章 变压器的故障类型	12
第一节 变压器故障的一般规律及统计	12
第二节 变压器运行中的常见异常现象	13
第三节 变压器的故障类型分析	14
第三章 变压器故障分析及诊断	22
第一节 变压器故障检测、诊断的常用手段	22
第二节 变压器故障的诊断流程	26
第三节 变压器典型故障的分析和诊断	28
第四节 变压器油中气体含量 (DGA) 分析	30
第五节 红外热成像用于变压器故障诊断分析	36
第六节 建立完备的变压器历史资料库	38
第四章 变压器典型故障案例分析	39
第一节 变压器绕组典型故障	39
第二节 变压器铁芯典型故障	66
第三节 变压器绝缘组件典型故障	78
第四节 绝缘油典型故障	104
第五节 变压器油箱典型故障	118
第六节 变压器其他典型故障	127
第五章 变压器故障诊断新技术展望	147
第一节 人工智能理论在变压器故障诊断中的应用	147
第二节 基于人工智能技术的变压器综合故障诊断专家系统	150
参考文献	155

变压器的基本知识

变压器是电力系统的重要设备之一，在整个发、输、配、用电过程中起着升、降电压、传递电能的作用，在直流输电的交、直流变换过程中起着重要作用。变压器的安全运行关系着广大人民群众的生活、工矿企业的生产、政府行政机关、学校的运行、社会秩序的稳定等。因此了解掌握变压器的性能，正确运行、维护变压器，准确诊断变压器的健康状况具有十分重要的意义。

第一节 变压器的分类

变压器的种类很多，一般分为电力变压器和特种变压器两类。电力变压器是电力系统中输配电的主要设备（见图 1-1），容量从几十千伏安到几百万千伏安，电压等级从几百伏到 1000kV 以上。特种变压器是根据冶金、矿山、化工、交通及铁道部门的具体要求设计制造的专用变压器。

1. 电力变压器

(1) 按变压器的用途分主要有：

- 1) 升压变压器。
- 2) 降压变压器。
- 3) 配电变压器。
- 4) 箱式变压器（欧式箱式变压器、美式箱式变压器等）。
- 5) 换流（整流）变压器（用于直流输电）。



图 1-1 运行中的电力变压器

6) 联络变压器（连接几个不同电压等级的电力系统）。

7) 厂用电变压器（供发电厂本身用电）。

(2) 按变压器的结构主要分为两种：

- 1) 芯式变压器。
- 2) 壳式变压器。

我国和国外绝大多数变压器厂均生产芯式变压器，只有少数的变压器厂生产壳式变压器，目前电力系统中运行的绝大多数变压器为芯式结构。

(3) 按变压器的绕组数可以分为:

- 1) 双绕组变压器。
- 2) 三绕组变压器。
- 3) 多绕组变压器。
- 4) 自耦变压器。

电力系统中用的最多的是双绕组变压器, 其次是三绕组变压器和自耦变压器, 至于多绕组变压器, 一般用作特种用途的变压器。

(4) 按变压器的相数分有:

- 1) 单相变压器。
- 2) 三相变压器。
- 3) 多相变压器。

目前电力系统中运行的绝大多数为三相变压器和极少量的单相变压器, 多相变压器多为特殊用途变压器。

(5) 按变压器的冷却条件分有:

- 1) 油浸自冷变压器。
- 2) 油浸风冷变压器。
- 3) 油浸水冷变压器。
- 4) 强迫油循环风冷变压器。
- 5) 强迫油循环水冷变压器。
- 6) 干式变压器 (多用于 35kV 及以下配电变压器)。
- 7) SF₆ 气体绝缘变压器。

油浸水冷变压器和强迫油循环水冷变压器, 因为其有致命缺点, 目前已逐渐淘汰。

(6) 按绕组使用的金属材料来分有:

- 1) 铜线变压器。
- 2) 铝线变压器。
- 3) 电缆变压器。

(7) 按调压方式来分有:

- 1) 无励磁调压变压器。
- 2) 有载调压变压器。

(8) 按中性点绝缘水平分有:

- 1) 全绝缘变压器。
- 2) 半绝缘 (分级绝缘) 变压器。

2. 特种变压器

特种变压器大致有以下几种:

- (1) 牵引变压器。专门为铁路牵引线路供电。
- (2) 整流变压器。常用于冶金行业, 把交流电能变换为直流电能的场合。

- (3) 电炉变压器。用于把电能转换为热能的场合。
- (4) 试验变压器。供高压试验用。
- (5) 矿用变压器。供矿井下配电用。
- (6) 船用变压器。供船舶用。
- (7) 中频变压器。供 1000~8000Hz 交流系统用。
- (8) 大电流变压器。

第二节 电力变压器的类型和参数

电力变压器的型号组成按 JB/T 3837—2010《变压器类产品型号编制方法》的规定，采用汉语拼音大写字母，或其他合适字母来表示产品的主要特征，用阿拉伯数字表示产品性能水平代号或设计序号和规格代号，如图 1-2 和图 1-3 所示。

注：从本书开始均以电力变压器为对象，介绍其故障案例，后文变压器均指电力变压器。



图 1-2 变压器铭牌（局部）

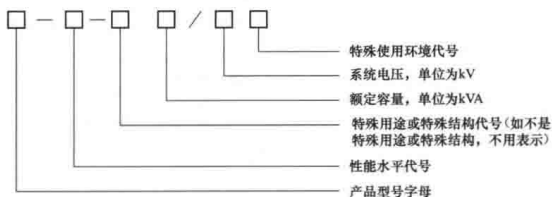


图 1-3 电力变压器型号组成

1. 变压器产品型号的组成形式

图 1-3 中的第一个方块表示产品型号，电力变压器产品型号字母排列顺序及含义按表 1-1 的规定。

表 1-1 电力变压器产品型号字母排列顺序及含义

序号	分类	含义	代表字母
1	绕组耦合方式	独立	O
		自耦	

续表

序号	分类	含义	代表字母	
2	相数	单相	D	
		三相	S	
3	绕组外绝缘介质	变压器油		
		空气(干式)	G	
		气体	Q	
		成型固体	浇注式	C
			包绕式	CR
		高燃点油	R	
植物油	W			
4	绝缘耐热等级 ^①	油浸式	A级(105℃)	
			E级(120℃)	E
			B级(130℃)	B
			F级(155℃)	F
			H级(180℃)	H
			绝缘系统温度为200℃	D
		绝缘系统温度为220℃	C	
		干式	E级	E
			B级	B
			F级	
			H级	H
			绝缘系统温度为200℃	D
绝缘系统温度为220℃	C			
5	冷却装置种类	自然循环冷却装置		
		风冷却器	F	
		水冷却器	S	
6	油循环方式	自然循环		
		强迫油循环	P	
7	绕组数	双绕组		
		三绕组	S	
		分裂绕组	F	
8	调压方式	无励磁调压		
		有载调压	Z	
9	绕组导线材质 ^②	铜线		
		铜箔	B	
		铝线	L	
		铝箔	LB	
		铜铝复合 ^③	TL	
		电缆	DL	
10	铁心材质	电工钢片		
		非晶合金	H	

续表

序号	分类	含义	代表字母	
11	特殊用途或特殊结构 ^④	密封式 ^⑤	M	
		起动用	Q	
		防雷保护作用	B	
		调容用	T	
		电缆引出	L	
		隔离用	G	
		电容补偿用	RB	
		油田动力照明用	Y	
		发电厂和变电站用	CY	
		全绝缘 ^⑥	J	
		同步电机防磁用	LC	
		地下用	D	
		风力发电用	F	
		三相组合式 ^⑦	H	
		解体运输	JT	
		卷(绕)铁心	一般结构	R
			立体结构	RL

注 ① 绝缘耐热等级的字母表示应用括号上(混合绝缘用字母 M 连同所采用的最高绝缘耐热等级所对应的字母共同表示)。

② 如果调压绕组采用铜线,其他导线材质为铝时表示铝。

③ 铜铝复合是指采用铜铝复合导线或采用铜铝复合绕组(如:高压绕组或低压绕组采用铜包铝复合导线;高压绕组采用铜线,低压绕组采用铝线或低压绕组采用铜线,高压绕组采用铝线)的产品。

④ 对于同时具有两种及两种以上特殊用途或特殊结构的产品,其字母之间用“.”隔开。

⑤ 密封式只适用于标称系统电压为 35kV 及以下的产品。

⑥ 全绝缘只适用于标称系统电压为 110kV 及以上的产品。

⑦ “三相组合”式只适用于标称系统电压为 110kV 以上的三相产品。

☉【示例 1】SF9-20000/110

表示一台三相、油浸、风冷、双绕组、无励磁调压、铜导线、20000kVA、110kV 级电力变压器(其产品损耗水平符合 GB/T 6451—2015《油浸式电力变压器技术参数和要求》)。

☉【示例 2】SSPZ9-36000/220

表示一台三相、油浸、水冷、强迫油循环、双绕组、有载调压、铜导线、36000kVA、220kV 级电力变压器(其产品损耗水平符合 GB/ 6451—2015)。

☉【示例 3】S10-M。R-200/10

表示一台三相、油浸、自冷、双绕组、无励磁调压、铜导线、一般卷心结构、损耗水平代号“10”,200kVA、10kV 级密封式电力变压器。

☉【示例 4】S11-500/100

表示一台三相、浇注式、自冷、双绕组、无励磁调压、铜导线、损耗水平代号“11”,500kVA、10kV 级干式电力变压器(其产品损耗水平符合 GB/T 10228—2015《干式电力变压器技术参数和要求》)。

2. 变压器的损耗水平

图 1-3 中第二个方块表示变压器的损耗水平，电力变压器产品的性能水平代号的规定见表 1-2。

表 1-2 三相油浸式电力变压器损耗水平代号

损耗水平代号	标称系统电压 kV	空载损耗	负载损耗
9	6、10、35、66、110、220	符合 GB/T 6451—2015	
10	6、10 (无励磁调压配电变压器)	符合 GB/T 6451—2015 表 B.2	
	6、10 (有载调压配电变压器及 无励磁调压电力变压器)	比 GB/T 6451—2015 下降 10%	比 GB/T 6451—2015 下降 5%
35、66、110、220			
11	6、10 (无励磁调压配电变压器)	符合 GB/T 6451—2015 表 B.3	
	6、10 (有载调压配电变压器及 无励磁调压电力变压器)	比 GB/T 6451—2015 下降 20%	比 GB/T 6451—2015 下降 5%
	35、66、110、220		
12	6、10 (无励磁调压配电变压器)	符合 GB/T 6451—2015 表 B.4	
13	6、10 (无励磁调压配电变压器)	符合 GB/T 6451—2015 表 B.5	
15	6、10 (无励磁调压配电变压器)	符合 GB/T 25446—2010《油浸式非晶合金铁心配电变压器技术参数和要求》	

注 1. 确定产品损耗水平代号时，其损耗值与规定值的偏差应符合《变压器类产品型号注册管理办法》规定。
2. 损耗水平代号“15”只适用于非晶合金铁芯无励磁调压配电变压器。

3. 分接开关产品型号的组成形式

(1) 有载分接开关型号的组成形式如图 1-4 所示。

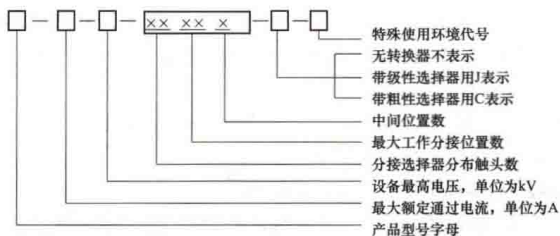


图 1-4 有载分接开关型号的组成形式

有载分接开关产品型号字母排列顺序及含义见表 1-3。

表 1-3 有载分接开关产品型号字母排列顺序及含义

序号	分类	含义		代表符号
1	结构型式	组合式	圆筒型	Z
			箱型	ZX
		复合式		F
2	绝缘介质	变压器油		
		空气		K
		SF ₆ 气体绝缘		S
3	切换电流方式	无消弧室		
		真空触点切换		V
		晶闸管切换		G
4	调压部位	中性点调压		
		中部线端调压		D
		中部跨接式调压		J
5	安装方式	装在吊器身的箱盖上		
		装在不吊器身的箱盖上		B
		装在器身的支架上		Q
6	相数	一相		I
		二相		II
		三相		III

☉【示例 1】ZQⅢ-300/126-10193J

表示一台有三相中性点调压、组合式圆筒型、油绝缘，最大额定通过电流为 300A，设备最高电压为 126kV，带极性选择器和 19 个分接位置且有三个中间位置，在器身上安装的有载分接开关。

☉【示例 2】FDⅢ-120/12-07070

表示一台有三相中部线端调压、复合式、油绝缘，最大额定通过电流为 120A，设备最高电压为 12kV，无转换选择器和 7 个分接位置，在吊器身的箱盖上安装的有载分接开关。

☉【示例 3】ZVⅢ-250/40.5-08151C

表示一台有三相中性点调压、组合式圆筒型、真空触点切换、油绝缘，最大额定通过电流为 250A，设备最高电压为 40.5kV，带一个中间位置粗调选择器和 15 个分接位置，在不吊器身的箱盖上安装的有载分接开关。

☉【示例 4】ZXKVDⅢ-120/12-09090

表示一台有三相中部线端调压、组合式箱型、真空触点切换、空气绝缘，最大额定通过电流为 120A，设备最高电压为 12kV 和 9 个分接位置的有载分接开关。

(2) 无励磁分接开关型号的组成形式如图 1-5 所示。

无载分接开关产品型号字母排列顺序及含义见表 1-4。

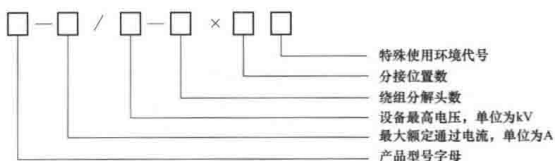


图 1-5 无载分接开关型号的组成形式

表 1-4 无载分接开关产品型号字母排列顺序及含义

序号	分类	含义	代表符号
1	调压型式	“无”励磁调压	W
2	相数	一相	D
		两相	E
		三相	S
		一相、二相组合	Z
3	结构型式	鼓形	G
		笼形	L
		条形	T
		盘形	P
		楔形	X
4	调压方式	线性调压 (Y 联结)	I
		线性调压 (D 联结)	Δ I
		单桥跨接	II
		中性点调压	III
		Y-D 转换	IV
		双桥跨接	V
		正反调 (Y 联结)	VI
		正反调 (D 联结)	Δ VI
5	操作方式	串-并联	VII
		手动立式	L
		手动卧式	W
		电动立式	DL
		电动卧式	DW

⑤ 【示例 1】WSP III L-250/12-3×3

表示一台三相、无励磁调压、盘形结构、中性点手动立式调压、最大额定通过电流为 250A、设备最高电压为 12kV、带 3 个分接头、分接位置数为 3 的无励磁分接开关。

⑥ 【示例 2】WSTLLDL-400/12-4×3

表示一台三相、无励磁调压、条形结构、单桥跨接电动立式调压、最大额定通过电流为 400A、设备最高电压为 12kV、带 4 个分接头、分接位置数为 3 的无励磁分接开关。

⑦ 【示例 3】WDGIL-250/125-6×5

表示一台一相、无励磁调压、鼓形结构、线性 (Y 联结) 手动立式调压、最大额定

通过电流为 250A、设备最高电压为 126kV、带 6 个分接头、分接位置数为 5 的无励磁分接开关。

4. 特殊使用环境代号

(1) 热带地区用代表符号按下列规定：

- 1) 热带地区“TA”。
 - 2) 湿热带地区为“TH”。
 - 3) 干、湿热带地区通用为“T”。
- (2) 高原地区用代表符号为“GY”。
- (3) 污秽地区用代表符号按表 1-5 的规定。
- (4) 防腐蚀地区用代表符号按表 1-6 规定。

表 1-5 污秽地区用代表符号

污秽等级	代表符号	污秽等级	代表符号
0 (无)		Ⅲ (重)	W2
I (轻)		Ⅳ (严重)	W3
Ⅱ (中)	W1		

表 1-6 防腐蚀地区用代表符号

防护类型	户外型			户内型	
	防轻腐蚀	防中腐蚀	防强腐蚀	防中腐蚀	防强腐蚀
代表符号	W	WF1	WF2	F1	F2

第三节 变压器的主要结构部件

油浸式电力变压器的结构较为复杂，部件众多，其主要结构部件可分为：

1. 变压器器身

包括铁芯、绕组、绝缘结构、引线和分接开关等，其器身实物图如图 1-6 所示。

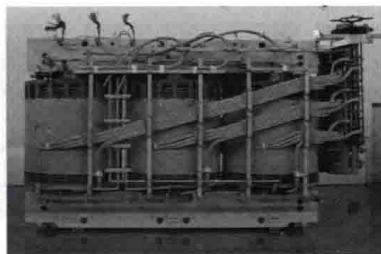


图 1-6 电力变压器器身实物图

2. 变压器油箱

包括油箱本体（箱盖、箱壁和箱底）和一些附件（放油阀门、小车、油样活门、接地螺栓、铭牌等），变压器油箱实物图如图 1-7 所示。

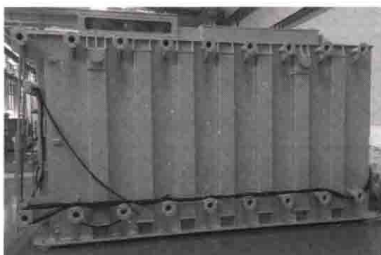


图 1-7 变压器油箱实物图

3. 变压器冷却装置

包括散热器或冷却器，如图 1-8 所示。

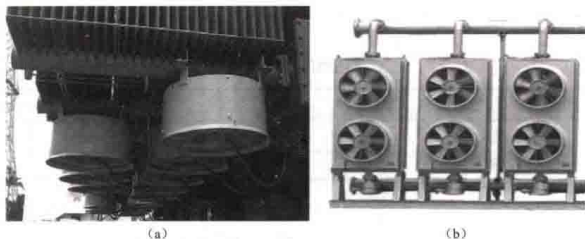


图 1-8 变压器冷却器

(a) 风冷冷却器；(b) 强油风冷冷却器

4. 变压器非电气量保护装置

包括储油柜、压力释放阀、油表、吸湿器、测温原件、气体继电器等，变压器非电气量保护装置如图 1-9 所示。

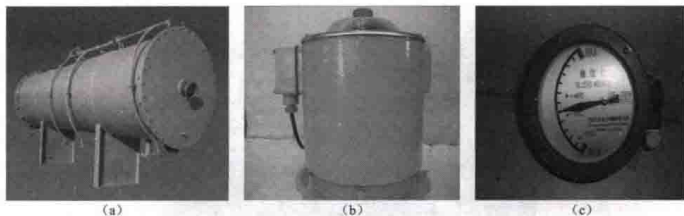


图 1-9 变压器非电气量保护装置（一）

(a) 储油柜；(b) 压力释放阀；(c) 油表

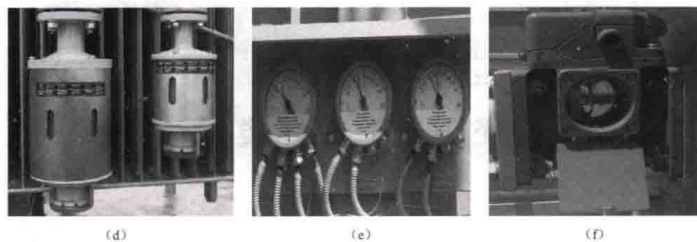


图 1-9 变压器非电气量保护装置 (二)
 (d) 吸湿器; (e) 测温原件; (f) 气体继电器

5. 变压器出线装置

包括高压套管、低压套管等, 变压器出线装置如图 1-10 所示。

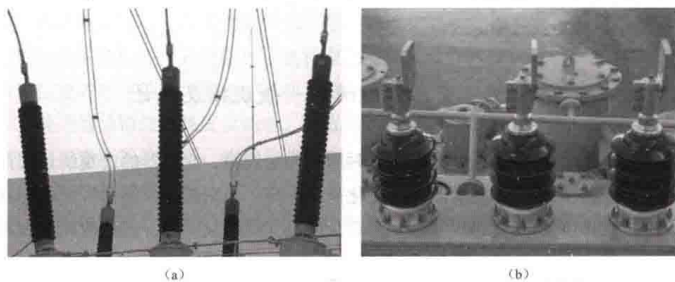


图 1-10 变压器出线装置
 (a) 高压套管; (b) 低压套管