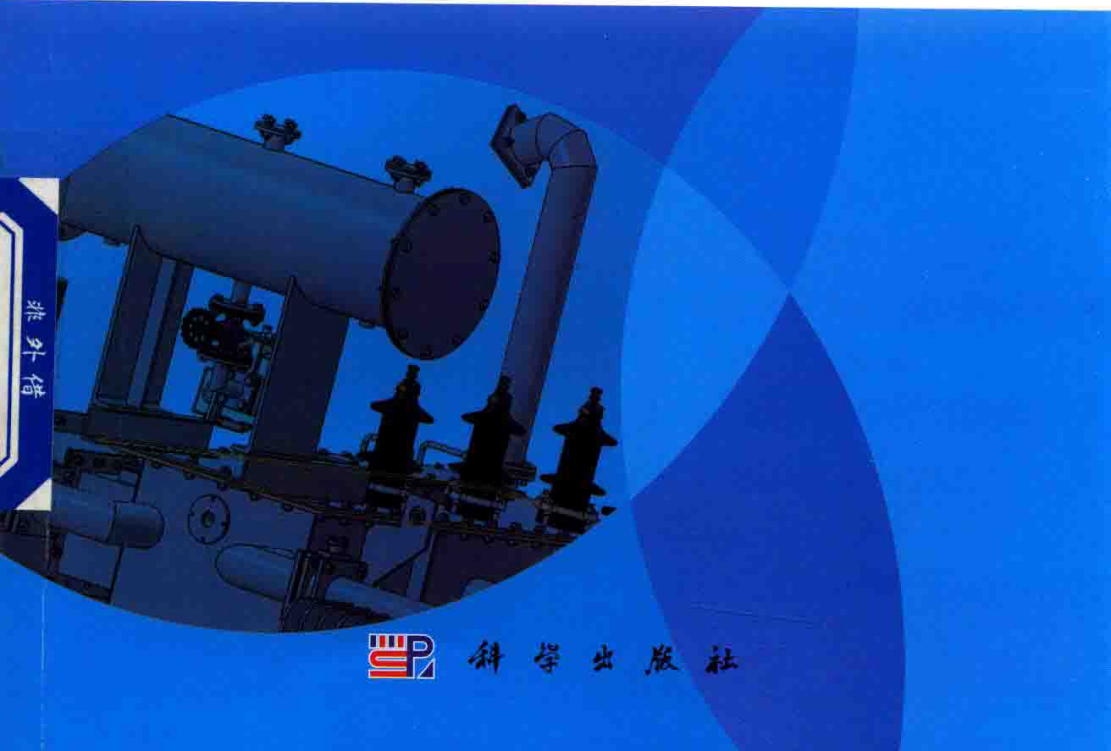


# 电力变压器 机械振动测试技术

Mechanical Vibration Testing Technology of Power Transformer

钱国超 王丰华 邹德旭 江天炎 等 著



非外借

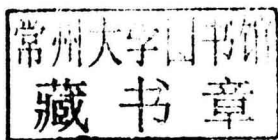


科学出版社

# 电力变压器机械振动 测试技术

Mechanical Vibration Testing Technology of  
Power Transformer

钱国超 王丰华 邹德旭 江天炎 等 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是一本系统介绍电力变压器机械振动测试技术的专著。本书结合电力变压器事故发生的过程、现象及解体检查综合分析的情况,系统综合地介绍了变压器振动的原理、绕组振动模态仿真测试,在线和离线振动测试原理及其实例以及隐患变压器的现场检修方案。

本书分为六章,包括电力变压器的结构及其故障、振动机理及特性分析、振动模态仿真及离线振动试验研究、在线振动检测技术及应用和隐患变压器的检修处理方法。本书通过典型故障的试验、仿真计算等系统介绍了电力变压器振动的机理、测试方法以及检修方案,基本涵盖了电力变压器振动测试技术的研究与应用现状及发展方向。

本书可供发(供)电部门和电气设备生产单位从事电气设备运维的技术人员以及电力科学研究院技术人员使用,同时可供高等院校、中专有关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力变压器机械振动测试技术=Mechanical Vibration Testing Technology of Power Transformer/钱国超等著. —北京:科学出版社,2017.9  
ISBN 978-7-03-054662-3

I. ①电… II. ①钱… III. ①电力变压器—机械振动—测试技术 IV. ①TM41

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第238417号

责任编辑:范运年/责任校对:桂伟利  
责任印制:张克忠/封面设计:正典设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年10月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:235 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

变压器是电力系统中最为重要的设备之一，其运行的稳定性和可靠性对于保证电力系统的安全意义重大。随着我国电网容量的日益增大，短路容量亦随之不断增大，作为电力系统核心设备的电力变压器的运行可靠性就显得越发重要，一旦出现事故，将会导致大面积停电及巨大的经济损失，后果较为严重。

从最近几年全国大型变压器发生事故的过程、现象及其解体检查综合分析，变压器绕组抗短路能力不足已成为变压器事故最主要的原因，严重影响着大型变压器运行的安全稳定。

然而电力变压器在运送和装配过程中不可避免会受到摩擦力的作用和机械碰撞，这些碰撞和摩擦会导致绕组变形（如轴向、径向尺寸变化、位移、扭曲、鼓包等）；此外运行中的变压器在遭受突发短路后，其绕组可能首先发生松动或轻微变形。

大量的试验研究结果和现场运行经验表明，变压器绕组的变形具有累积效应。对于运行中的变压器，如果其绕组的松动和变形不能被及时发现和有效修复，在累积到一定程度后会导致变压器绕组的机械稳定性受到很大影响，其抗短路能力大幅下降，在遭受较小的冲击电流下也会引发较大事故。此外，运行中变压器油纸绝缘的老化也会使绕组发生渐进性的松散失稳现象，从而导致变压器的抗短路能力下降而使变压器存在潜在的事故隐患。因此，运行中的变压器在经历外部短路事故或运行一段时间后的例行试验与检修维护中，如何有效地检测变压器绕组的松动和变形现象，进而判断是否需要检修处理就显得尤为重要。

目前针对变压器绕组变形检测的方法主要有频响分析法与短路阻抗法，这两种方法都是采用电测方法，对变压器绕组发生较明显的变形情况较为适宜，但对绕组发生轻微变形，尤其是当变压器运行中受到短路冲击或长期自身振动而发生轴向压紧力减小松动时的情形并不敏感。变压器的绕组松动与变形等早期故障隐患的及时检测可有效避免变压器事故的发生。

本书系统综合地介绍了变压器振动的机理、绕组机械振动模态仿真测试，在线和离线振动测试原理及其实例以及绕组隐患变压器的现场检修方案。全书分为5章，第1章由钱国超、马仪、金之俭、王丰华、于虹、周仿荣、潘浩编写，第2章由钱国超、王科、陈伟根、邹德旭、彭庆军、彭兆裕、彭晶编写，第3章由钱国超、李剑、颜冰、江天炎、谭向宇、马宏民、丁薇编写，第4章由钱国超、汲胜昌、刘光祺、刘红文、姜益明、项恩新编写，第5章由钱国超、郭晟鋈、邹德旭、徐肖伟、程志万、王山、黄然编写。

全书由重庆大学陈伟根、李剑教授，西安交通大学汲胜昌教授，上海交通大学金之俭教授，华东电网公司姜益明高工审阅，他们对本书的初稿提出许多宝贵意见，在此一并表示致谢！

本书可供发（供）电部门和电气设备生产单位从事电气设备运维的技术人员以及电力科学研究院技术人员使用，同时可供高等院校、中专有关专业师生参考。

本书在编写过程中，查阅了大量资料，参考和引用了有关书籍（含硕博论文）的部分内容，谨向本书的参考文献的作者表示衷心的感谢。由于变压器机械振动测试技术属于高新检测技术，涉及的理论和处理方法较为广泛，加之编者水平有限，书中论述不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作者

2017年5月1日

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章</b>	<b>电力变压器结构及其故障</b> .....	1
1.1	概述 .....	1
1.2	电力变压器的基本结构 .....	2
1.3	电力变压器的典型故障类型 .....	4
1.3.1	变压器短路故障 .....	5
1.3.2	变压器内部放电故障 .....	5
1.3.3	变压器绕组故障 .....	6
1.3.4	变压器铁芯故障 .....	7
1.3.5	变压器分接开关故障 .....	8
1.4	电力变压器故障检测技术 .....	8
1.4.1	短路阻抗法 .....	9
1.4.2	低压脉冲法 .....	10
1.4.3	频率响应分析法 .....	10
1.4.4	电容量变化法 .....	12
1.4.5	超声波检测法 .....	12
1.4.6	振动检测法 .....	12
<b>第 2 章</b>	<b>电力变压器振动机理及特性分析</b> .....	15
2.1	电力变压器振动及传递途径 .....	15
2.1.1	变压器振动来源 .....	15
2.1.2	变压器振动传递途径 .....	16
2.2	变压器铁芯振动机理 .....	17
2.3	变压器绕组振动机理 .....	20
2.3.1	变压器绕组辐向振动特性分析 .....	20
2.3.2	变压器绕组轴向振动特性分析 .....	22
2.3.3	变压器绕组振动仿真分析 .....	26
2.4	变压器绕组及铁芯振动合成特性 .....	43
2.4.1	负载电流的影响 .....	44
2.4.2	功率因数的影响 .....	44

2.4.3	温度的影响	46
<b>第 3 章</b>	<b>电力变压器振动模态仿真及离线振动试验研究</b>	<b>50</b>
3.1	变压器机械振动模态仿真计算	50
3.1.1	变压器绕组模态参数的有限元求解	50
3.1.2	变压器模态分析基本原理	51
3.1.3	谐响应分析基本原理	52
3.1.4	变压器绕组的有限元分析	57
3.1.5	典型故障下绕组机械动力学特性分析	61
3.2	电力变压器离线振动检测	66
3.2.1	变压器绕组振动频响法的原理	66
3.2.2	变压器绕组振动频响测试系统	67
3.3	变压器绕组扫频激振试验	69
3.3.1	试验内容	69
3.3.2	试验结果	71
3.4	变压器绕组扫频曲线特性分析	74
3.4.1	变压器绕组扫频试验重复性分析	74
3.4.2	变压器绕组扫频曲线特性分析	75
3.4.3	变压器绕组状态评估方法	77
3.5	电力变压器离线振动检测实例分析	81
3.5.1	建水 3#主变振动频响测试	81
3.5.2	松柯 1#主变振动频响测试	89
<b>第 4 章</b>	<b>电力变压器在线振动检测技术及应用</b>	<b>102</b>
4.1	变压器振动故障模拟试验及信号分析	102
4.1.1	模型变压器设计	102
4.1.2	异常振动缺陷的模拟技术	103
4.1.3	故障条件下变压器振动信号分析	106
4.2	盲源分离技术在变压器振动故障分析中的应用	116
4.2.1	盲源分离技术原理	116
4.2.2	分离效果的检验	120
4.2.3	绕组及铁芯振动仿真信号及其混合	121
4.2.4	仿真振动信号的分离效果分析	124
4.2.5	盲源分离算法在模型变压器上的应用	127
4.3	变压器异常振动故障诊断	134
4.4	电力变压器在线振动检测实例分析	136

---

4.4.1	电力变压器在线振动现场检测方案	136
4.4.2	现场测试数据	139
4.4.3	现场振动数据统计分析	166
<b>第 5 章</b>	<b>隐患变压器的检修处理方法</b>	<b>174</b>
5.1	返厂改造	174
5.2	串抗改造提高变压器抗短路能力	177
5.2.1	限流电抗器主要技术参数的选定原则	178
5.2.2	电抗百分值的选择	178
5.3	现场改造提高变压器抗短路能力	180
5.3.1	增加绝缘副压板方法	180
5.3.2	增加相间钎板方法	182
<b>参考文献</b>		<b>184</b>



# 第1章 电力变压器结构及其故障

## 1.1 概 述

电力变压器承担着电力系统中电压变换、电能分配和传输等任务，是电力系统中最关键的设备之一，其正常运行是电力系统安全、可靠、优质、经济运行的重要保证<sup>[1-3]</sup>。因此，必须最大限度地防止和减少变压器故障和事故的发生。但电力变压器在长期运行过程中故障和事故总是无法完全避免，而引发故障和事故又出于众多方面的原因，如外力的破坏和影响，不可抗拒的自然灾害，安装、检修、维护过程中存在的问题以及制造过程中遗留的设备缺陷等<sup>[4-6]</sup>。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，已成为电力变压器故障的主要因素<sup>[7,8]</sup>。此外，部分工作人员业务素质不高、技术水平不够或违章作业等，都会造成事故或导致事故的扩大，从而危及电力系统的安全运行。

电力变压器属于静止电气设备，按照不同的使用条件，其电压等级、容量、结构及冷却方式等也不一样。目前市场上主流的电力变压器为充油式油纸绝缘、充 SF<sub>6</sub> 气体绝缘和环氧树脂干式绝缘三种绝缘方式。容量较大的充 SF<sub>6</sub> 气体和环氧树脂干式电力变压器还处于研究与开发阶段，实际上国内外的高电压、大容量电力变压器、电抗器、电流互感器等仍普遍采用充油式绝缘。根据三相绕组结构及调压方式，35~500 kV 充油电力变压器可按表 1.1 大致分类。

表 1.1 充油电力变压器的分类

电压等级/kV	绕组结构	调压方式
35	三相双绕组	无励磁调压、有载调压
110	三相双绕组	无励磁调压、有载调压
	三相三绕组	
220	三相双绕组	无励磁调压、有载调压(自耦)
	三相三绕组	
330	三相双绕组	无励磁调压、有载调压(自耦)
	三相三绕组	
	单相双绕组	
500	单相三绕组	无励磁调压、有载调压(自耦)
	三相双绕组	

一般认为，充油电力变压器容量为  $630\text{kV}\cdot\text{A}$  以下的属小型变压器， $800\sim 6300\text{kV}\cdot\text{A}$  的变压器属中型变压器， $8000\sim 63000\text{kV}\cdot\text{A}$  的变压器为大型变压器， $9000\text{kV}\cdot\text{A}$  及以上的统称为特大型变压器。国内外生产的充油电力变压器的主绝缘大多采用油-屏障绝缘结构，其绝缘结构系统如图 1.1 所示<sup>[9-11]</sup>。

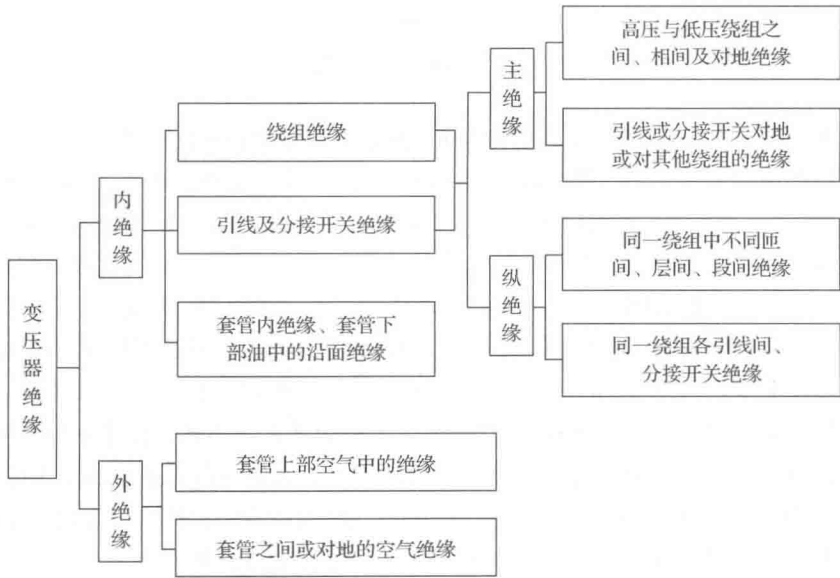


图 1.1 充油电力变压器绝缘的分类

## 1.2 电力变压器的基本结构

充油电力变压器主要由绕组(一次和二次)、铁芯、油箱、底座、高低压套管、引线、散热器(或冷却器)、净油器、储油柜、气体继电器、分接开关等组件或附件组成，如图 1.2 所示。

### 1) 绕组

绕组是电力变压器中最重要和最复杂的部件，它基本上决定了电力变压器的容量、电压、电流和使用条件。由于变压器在运行中不仅要承受运行电压的长时作用，还要受到大气过电压和操作过电压的冲击，因此在设计和制造时的电气强度必须留有足够的裕度。变压器发生短路故障时还要承受强大短路电流的冲击，因此，绕组也要能承受住强大电磁力的冲击。

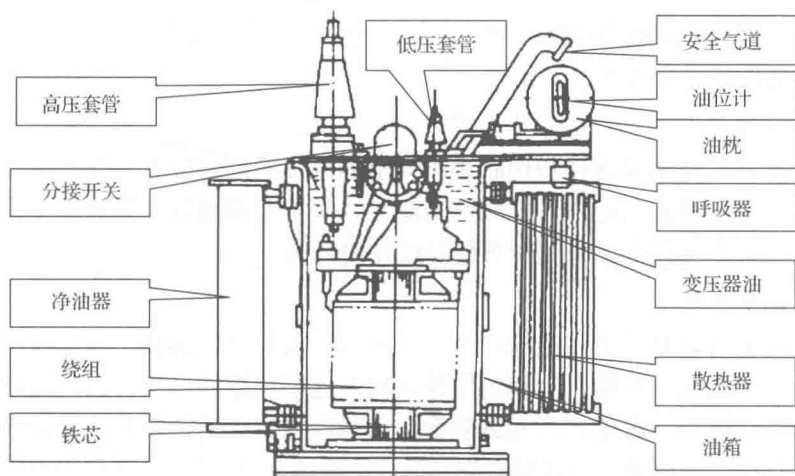


图 1.2 电力变压器基本结构

电力变压器的绕组由一、二次绕组及绕组间的绝缘、对地主绝缘和由燕尾垫块、撑条构成的油道及其高低压引线构成。根据充油电力变压器的容量及电压等级，常采用的绕组有层式绕组（圆筒式、箔式）和饼式绕组（连续式、纠结式、内屏屏蔽式、螺旋式）两大类。圆筒式绕组由于层间绝缘厚，机械强度和冷却效果差，多用在 35kV 电力变压器高压绕组中。纠结式绕组的抗冲击绝缘强度比连续式高，一般 60kV (66kV) 及以上电压等级电力变压器的高压绕组采用纠结连续式绕组，而 220kV 及以上电压等级的变压器多用全纠结式绕组。除此之外，低损耗电力变压器常用箔式和螺旋式绕组，而内屏蔽式绕组只有在 110kV 及以上的高电压大容量变压器采用。

## 2) 铁芯

变压器的铁芯由高导磁的硅钢片叠积和钢夹件夹紧而成，构成了变压器的骨架，当变压器一次绕组接入电源时，交流电压在一次绕组中产生的励磁电流将在铁芯中感应出变化的磁通，该主磁通以铁芯为闭合回路，在二次绕组中感应出交变电动势，并在负载中流过交流电流。

## 3) 引线

变压器的引线将外部电能传入到变压器中，同时又将其电能从变压器输出。因此，引线既要负载电流并满足电场要求，又要保证变压器结构的稳定性。由于引线的曲率半径小，表面电荷密度大，电场强度高，易产生局部放电，因此高压引线采用的圆导线直径不宜过小。此外因短路的持续时间极短，设计时

通常不考虑引线的散热问题，但引线有纸包绝缘，通常以长期负荷温升作为导线截面选取的主要条件。

#### 4) 分接开关

分接开关是用来连接和切断变压绕组的分接头，实现对变压器调压，使电网供给用户稳定的电压并控制电力潮流或调节负荷电流。按照调压时带负载与否可分为无载分接开关和有载分接开关两类。

#### 5) 高压套管

高压套管包括带电和绝缘两部分，它与绕组和电网连接，承担着不同电压等级之间的电能传输。套管的绝缘结构决定于绕组的电压等级，通常分为外绝缘和内绝缘。外绝缘一般为瓷套，内绝缘由绝缘油、附加绝缘和电容型绝缘等组成。带电部分包括导电杆(管)、电缆或铜排。35kV 及以下电压等级一般用纯瓷绝缘导杆式套管和纯瓷绝缘穿缆式套管，110kV 及以上电压等级采用电容绝缘式套管。

#### 6) 冷却装置

变压器在运行中因损耗产生的热量由冷却装置散发，根据变压器的结构和容量不同，常采用的冷却方式主要有：油浸自冷(oil natural air natural, ONAN)、油浸风冷(oil natural air freeze, ONAF)、强迫油循环风冷(oil force air freeze, OFAF)、强迫油循环水冷(oil force water freeze, OFWF)、强迫导向油循环风冷(oil direct air freeze, ODAF)、强迫导向油循环水冷(oil direct water freeze, ODWF)。

### 1.3 电力变压器的典型故障类型

大型充油电力变压器的故障涉及面广而复杂多样，特别是在运行中发生的故障很难以某一判据诊断出故障的类型及性质。运行变压器常见故障的划分方法通常有<sup>[12,13]</sup>：①按变压器本体可分为内部故障和外部故障，即把油箱内发生的相间短路、绕组匝间短路等称为内部故障，而油箱外部发生的套管内络、引出线间的相间短路等故障称为外部故障；②按变压器结构可分为绕组故障、铁芯故障、油质故障、附件故障；③按回路可分为电路故障、磁路故障、油路故障；④按故障发生的部位可分为绝缘故障、铁芯故障、分接开关故障、套管故障等；⑤按故障性质可分为过热故障和放电故障。因此，很难以某一标准规范划分变压器故障的类型。

### 1.3.1 变压器短路故障

变压器短路故障主要指变压器出口短路、内部引线或绕组间对地短路、及相与相之间发生的短路而导致的故障。变压器正常运行中由于受出口短路故障的影响而遭受损坏的情况较为严重。据有关资料统计,近年来一些地区110kV及以上电压等级的变压器遭受短路故障电流冲击直接导致损坏的事故,占全部事故的50%以上<sup>[14]</sup>。出口短路对变压器的影响,主要包括以下两个方面:

#### 1) 短路电流引起绝缘过热故障

变压器突发短路时,其高、低压绕组可能同时通过超过额定电流数十倍的短路电流,导致变压器绝缘材料严重受损,造成变压器击穿及损毁事故。变压器的出口短路主要包括三相短路、两相短路、单相接地短路和两相接地短路等几种类型。据资料统计表明,在中性点接地系统中,单相接地短路约占全部短路故障的65%,两相短路占10%~15%,两相接地短路占15%~20%,三相短路占5%,其中以三相短路时的短路电流值最大<sup>[15]</sup>。

#### 2) 短路电动力引起绕组变形故障

变压器受短路冲击时,绕组产生轻微变形,如果不及时检修,恢复垫块位置,紧固绕组的压钉及铁轭的拉板、拉杆,加强引线的夹紧力,在多次短路冲击后,由于累积效应也会导致变压器绕组失稳损坏。

### 1.3.2 变压器内部放电故障

变压器内部的放电故障通常按放电的能量密度分为局部放电、火花放电和电弧放电三类,其中局部放电故障是引起火花放电或电弧放电故障的前兆。

#### 1) 局部放电故障

局部放电故障是指运行电压作用下,变压器绝缘结构内部发生非贯穿性局部放电现象。放电的部位通常在固体绝缘内的空穴、电极尖端、油角间隙、油与绝缘纸板中的油隙或油中沿固体绝缘的表面等处。局部放电的能量密度不大,但一旦发展将会形成高能量放电,并导致绝缘击穿或损坏。

局部放电的能量密度可通过放电产生的油中溶解特征气体组分含量来辨识,能量密度在 $10^{-9}$ C以下时,总烃不高,主要气体组分有 $H_2$ ,并占总烃含量的80%~90%,其次是 $CH_4$ ;能量密度在 $10^{-8}$ ~ $10^{-7}$ C时, $H_2$ 含量相应降低,出现 $C_2H_2$ ,但 $C_2H_2$ 在总烃中占比不到2%。

## 2) 火花放电故障

火花放电故障是指当变压器内部某一金属部件接触不良并处于高、低压电极之间的部位时,因阻抗分压而在该金属部件上产生对地的悬浮电位导致放电的现象。调压绕组在分接开关转换极性时的短暂瞬间,套管均压球和无载分接开关拨插等高电位处,铁芯叠片磁屏蔽及紧固螺栓与地连接松动脱落等低电位处,以及高压套管端部接触不良等均会形成悬浮电位而引起火花放电。此外,变压器油中的水分、受潮的纤维等也会由于形成杂质“小桥”而引起火花放电。

火花放电的能量密度一般大于  $10^{-6}\text{C}$ ,不会引起绝缘的快速击穿,其油中溶解的故障特征气体主要组分为  $\text{H}_2$  和  $\text{C}_2\text{H}_2$ 。

## 3) 电弧放电故障

变压器绕组匝间绝缘击穿、引线断裂或对地内络、分接开关飞弧等,将引起电弧放电故障。电弧放电属高能放电,放电能量密度大、产气急剧,可使绝缘纸穿孔、烧焦、碳化、金属材料变形或熔化。

电弧放电故障具有突发性,往往会造成变压器或部件烧损,甚至发生爆炸事故。出现电弧放电故障后,油中溶解特征气体的主要组分为  $\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ ,其次是  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$  和  $\text{C}_2\text{H}_6$ ;若电弧放电故障波及固体绝缘时,油中溶解气体还有  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  组分。

### 1.3.3 变压器绕组故障

绕组故障包含绕组受潮,绕组层间、匝间、股间、相间、高低压绕组间发生接地、断路、短路、击穿或烧毁,系统短路和冲击电流造成绕组机械损伤或绕组内部组件变形等<sup>[16,17]</sup>。从大量的事故统计来看,纠结式绕组的故障最多,连续式和螺旋式绕组次之;普通导线发生的故障最多,组合导线、换位导线、多股导线次之。

#### 1) 匝间短路故障

近几年来随着绕组形式的改进和绝缘的加厚,绕组的匝间(股间)短路故障在运行中得到了一定抑制,但在变压器绕组短路故障中仍以匝间短路最多。主要表现为:绕圈制作时操作不当,造成匝间绝缘损伤;导线的匝绝缘不够,匝间工作场强增高,耐受不住长期工作电压或短时冲击电压作用,长期运行使绝缘老化、变形、酥脆;局部高温造成流油死角或油道堵塞而加速绝缘老化;电动力的作用使部分线匝发生轴向或辐向位移,导致绝缘磨损而形成穿

越性短路，长期过载运行下绕组导线过热而使绝缘变脆；各种过电压和过电流作用下，绝缘性能劣化；绕组发生局部放电等电气故障而引发绕组匝间短路；箱体内油少而使绕组露出油面，导致冷却变差而过热也会形成绕组短路。

### 2) 相间短路故障

在中小型变压器中，两相线圈引线上的软铜接线卡相碰引起相间短路较多；在大型变压器内，若偶然有金属丝之类的导体，也会将两相线匝绝缘划破而构成短路；当分接开关错位严重时，也将导致两相分接开关短路而烧坏，引起两相绕组相间短路。

### 3) 绕组股间短路故障

在用多股导线并绕的绕组中，常发生股间短路，其主要原因有：因导线质量问题导致外绝缘层包绕不均，甚至导线裸露；在绕制过程中因弯曲、毛刺等使匝间绝缘受损伤，卡线过紧或换位不当导致线拧绞或刮伤导线绝缘；在压装及整形过程中，挤伤并绕导线间的绝缘层。

### 4) 绕组变形故障

致使绕组变形的原因，主要是绕组机械结构强度不足、绕制工艺粗糙、承受正常容许的短路电流冲击能力和外部机械冲击能力差。此外电力变压器在运输、装配或是运行过程中肯定会受到摩擦力或电动力的作用和机械碰撞，这些碰撞和摩擦会导致绕组发生轻微变形(如轴向、径向尺寸变化、位移等)使得变压器绕组在遭受短路冲击流过较大短路电路时，由于电磁力等效效应使得绕组发生扭曲或是鼓包等其他变形现象。

通过检查发生故障或事故的变压器和进行事后分析，发现电力变压器绕组变形是诱发多种故障和事故的直接原因。一旦变压器绕组已轻微变形而未被诊断出来仍继续运行，由于累积效应则极有可能导致事故的发生，造成主变停电或烧毁变压器。

## 1.3.4 变压器铁芯故障

大量的事故分析表明导致铁芯故障的主要原因有：铁芯组件中铁质夹件松动或损伤而碰接铁芯、压铁松动引起铁芯振动和噪声、铁芯接地不良或夹心烧坏、铁芯片间绝缘老化、铁芯安装不正或不齐造成空洞以及铁芯片叠装不良造成铁损增大而使铁芯发热等<sup>[13,18]</sup>。

### 1) 铁芯多点接地故障

变压器处于运行状态时，铁芯和夹件等金属构件在绕组周围强磁场中产

生感应电势，因铁芯距绕组的距离不等而形成电位差。绕组与油箱间的电场中因电容分布不均而使电场强度各异，使得铁芯对地电位较高。因此，为了防止铁芯产生断续的充放电现象，铁芯必须有一点可靠接地。若在运行中出现铁芯两点或多点接地，将导致铁芯及变压器产生一系列故障。

此外，一些制造过程中的人为因素也会造成铁芯多点接地故障，如油箱中留有铁钉、焊条头、短钢丝甚至工具等金属异物使铁芯叠片与箱体连通，变压器安装完后未将油箱顶盖上，用于运输的定位销翻过来或去掉等都曾引起过多起铁芯多点接地故障。

#### 2) 铁芯过热故障

通常变压器绕组短路、过载运行、油循环不畅或箱内油量少、油劣化、铁芯本身接地不良及异常接地、铁芯片间短路或铁芯局部短路、铁轭螺杆接地、铁芯漏磁等都会引起变压器铁芯过热故障。

铁芯局部过热故障部位基本上都在铁芯和夹件上。如果运行中的变压器出现铁芯过热，特别是发生局部过热故障时，将产生特征气体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 。

### 1.3.5 变压器分接开关故障

充油变压器有载开关的故障主要有：因密封不严使潮气侵入而导致绝缘性能降低，过渡电抗或电阻在切换过程中被击穿或烧断，导致触头间的电弧引发故障，因滚轮卡死使分接开关停在过渡位置而造成相向短路，切换开关油室密封不严而造成变压器本体渗漏，选择开关分接引线与静触头的固定绝缘杆变形等<sup>[18,19]</sup>。

真空式有载分接开关切换开关内的转换触头不具备熄弧能力，一旦真空管因漏气等发生失效，极易造成级间短路的情况，造成分接开关损坏，并引起变压器重瓦斯跳闸事故。

## 1.4 电力变压器故障检测技术

国内有关变压器历年统计资料以及 CIGRE 工作小组关于大型电力变压器故障的统计报告表明<sup>[20,21]</sup>，因绕组变形、绕组和铁芯压紧松动等引起的机械故障是变压器故障的主要组成部分。特别是突发短路事故时，短路冲击电流会引起强大的电动力从而破坏变压器绕组的机械强度和动稳定性。因此变



压器绕组状态的检测与故障诊断对保证电网的安全、优质、稳定及经济运行具有十分重要的意义。

变压器故障的检测技术是准确诊断故障的主要手段。根据相关试验规程主要包括以下几个项目：油中溶解气体分析、直流电阻检测、绝缘电阻及吸收比和极化指数检测、绝缘介质损耗等<sup>[22]</sup>。

当电力变压器绕组因承受短路电流而出现故障后，电力部门往往会用先进行常规的直流电阻、绝缘电阻及吸收比和极化指数检测、绝缘介质损耗检测，并结合油中溶解气体的色谱分析(dissolved gas analysis, DGA)来判断电力变压器的绝缘情况。

常规电气试验项目以及 DGA 并不能准确地检测和判断电力变压器绕组的变形性缺陷。对于吊罩检查，虽然较为直观，但需要耗费大量时间和人力，且有时仍然不能判断较为微小的绕组变形。为了增加电网运行的可靠性要求，国内外学者和研究机构对变压器绕组变形的检测开展了大量理论和试验研究，逐步形成了以下几种检测方法<sup>[23]</sup>。

#### 1.4.1 短路阻抗法

短路阻抗值可以理解为当变压器的所带负荷为零时绕组高压侧的等效阻抗。短路阻抗反映了绕组与油箱之间、绕组与绕组之间由漏磁通构成的感应磁势。短路阻抗由两部分组成：电阻分量和电抗分量。对于大型电力变压器(110kV 及其以上电压等级)，短路阻抗中的电阻分量很小，电抗分量占短路阻抗的绝大部分。此时的短路电抗分量，实际上就是变压器高压绕组的漏电抗。变压器绕组的物理尺寸决定了其漏电抗(短路电抗)，当频率一定时，变压器短路阻抗值随着绕组物理结构的改变而改变，因此可以从短路阻抗的变化研究绕组的变形状况。其测试原理如图 1.3 所示<sup>[24,25]</sup>。

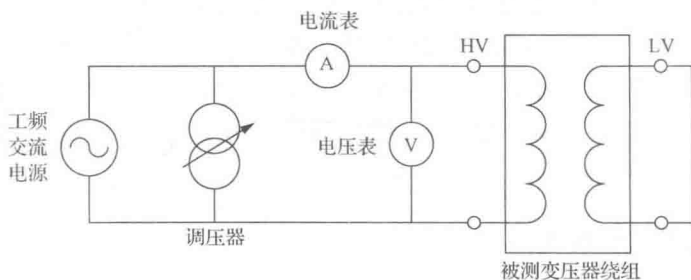


图 1.3 短路阻抗法测试接线图