

Intelligent Diagnosing of Transformer Faults
Based on Data of Multiple Detecting Devices

变压器故障的 多参数智能诊断方法

朱永利 王艳 李莉 黄建才 著



科学出版社

变压器故障的多参数 智能诊断方法

**Intelligent Diagnosing of Transformer Faults Based on
Data of Multiple Detecting Devices**

朱永利 王艳 李莉 黄建才 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

变压器故障引发的系统事故和停电后果十分严重。目前,大型变压器通常都配有油色谱在线监测手段,并辅以多种离线检测手段,电力企业迫切需要针对不同手段所测得的数据进行综合分析和智能诊断。本书是作者多年来对变压器故障智能诊断方法研究的理论和技术的总结。本书首先介绍变压器的常见故障及常用监测/检测手段,以及基于多监测参量融合诊断的诊断框架;然后讲述非平稳信号的典型分析与处理方法;接下来分别论述基于油色谱数据、振动信号、宽频带脉冲电流信号以及超声信号等单一手段的变压器故障智能诊断方法;最后阐述变压器多检测手段的融合诊断方法,并给出变压器故障诊断系统的实现方法。

本书既适合从事智能诊断研究和教学的科研工作者参考,也适合从事变压器检修和运行的人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

变压器故障的多参数智能诊断方法= Intelligent Diagnosing of Transformer Faults Based on Data of Multiple Detecting Devices /朱永利等著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056636-2

I. ①变… II. ①朱… III. ①变压器故障—故障诊断 IV. ①TM407

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第038167号

责任编辑:范运年 王楠楠 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.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

*

2018年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年3月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:257 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着电网规模的扩大,大型变压器日益增多。另外,大型变压器故障引发的系统事故和停电的后果更为严重,所以对其进行在线监测和离线检测更为重要。大型变压器一般配有多种在线监测和离线检测手段,不同的监测/检测手段所测得的数据或信号可以从不同方面反映变压器的状态特征。变压器的故障原因和现象复杂,信息特征的局限性及诊断知识的不完备性等都会导致基于单一监测手段的诊断的结论存在一定的片面性乃至错误。因此,有必要开展基于多种监测/检测手段的综合诊断,从多个角度对变压器状态进行综合分析,必要时对多个独立监测/检测装置提供的相互矛盾的诊断结果进行甄别,以提高诊断的正确率。

作者所在课题组多年来一直在对变压器故障的智能诊断方法进行坚持不懈的研究,本书主要内容是作者对已完成的国家电网公司浙北-福州特高压交流输电工程第一批变电专项研究课题——“基于多监测参数的特高压变压器故障综合诊断系统研究”(SGZJ0000JJJS1400482)的理论和技术的总结。为让不熟悉非平稳信号特征提取方法的读者读懂此书,本书首先讲述非平稳信号的典型分析与处理方法,然后论述基于油色谱数据、振动信号、宽频带脉冲电流信号以及超声信号等单一手段的变压器故障诊断方法,最后阐述变压器多检测手段的融合诊断方法,并给出变压器故障诊断系统的实现方法。希望本书能对相关人员有所帮助。

本书共7章。第1章介绍变压器的常见故障及常用监测/检测手段,以及基于多监测参量融合诊断的意义与诊断框架;第2章介绍连续型非平稳监测信号的典型分析和处理方法;第3章针对变压器油色谱分析,提出基于相关向量机的油色谱变压器智能故障诊断方法;第4章阐述变压器振动信号的特征提取和故障诊断方法;第5章提出变压器宽频带脉冲电流信号的特征提取和放电类型识别新方法;第6章介绍基于超声信号的变压器绝缘放电故障诊断方法;第7章在前面单监测/检测参量诊断基础上,论述变压器多监测/检测手段的融合诊断方法,介绍融合诊断系统的构建。

本书第1章由朱永利和王艳撰写,第2章由黄建才撰写,第3章和第7章由王艳撰写,第4章由李莉撰写,第5章和第6章由朱永利撰写。

本书得到了保定天威新域科技发展有限公司的大力帮助,该公司提供了若干现场案例实测数据。国网浙江省电力公司检修分公司对本书作者研发的变压器故障诊断系统提出了一些宝贵的改进意见和建议。本书撰写过程中,作者课题组的

博士研究生王刘旺和贾亚飞等撰写了第 5 章和第 6 章的初稿，为课题研究和本书撰写作出了重要贡献。在此，作者对他们表示衷心的感谢。

本书的相关研究和出版还得益于国家自然科学基金(项目编号：51677072)的资助，特表感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者与专家批评指正。

朱永利

2017 年 10 月于华北电力大学

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 变压器常见故障类型	2
1.3 变压器常用监测/检测手段	4
1.4 基于多监测参量融合诊断的意义与诊断框架	6
1.5 本书的内容安排	8
参考文献	8
第 2 章 非平稳信号的典型处理方法及其在去噪中的应用	10
2.1 非平稳信号的特点和处理用途	10
2.2 基于小波变换的非平稳信号分析方法及其在去噪中的应用	11
2.2.1 连续小波变换	11
2.2.2 离散小波变换	12
2.2.3 基于小波变换的多分辨率分析	13
2.2.4 小波变换在信号处理中的应用	17
2.2.5 小波应用的总结	29
2.3 基于 EEMD 的非平稳信号分析方法及其在去噪中的应用	29
2.3.1 EMD 方法简介	29
2.3.2 EEMD 方法简介	33
2.3.3 EEMD 方法在非平稳信号去噪中的应用	34
2.3.4 结论	39
2.4 基于 ITD 的非平稳信号分析方法及其在去噪中的应用	40
2.4.1 ITD 方法简介	40
2.4.2 ITD 方法的改进及其在去噪中的应用	45
2.4.3 结论	54
2.5 变分模态分解分析方法及其在去噪中的应用	54
2.5.1 变分模态分解算法	54
2.5.2 基于双阈值筛选法的 VMD 算法分解模态数 K 的确定	57
2.5.3 VMD 算法在去噪中的应用	61
2.5.4 结论	66

2.6 非平稳信号的模式识别方法概述	66
参考文献	67
第3章 基于油色谱数据的变压器故障诊断	70
3.1 变压器油中溶解气体含量与变压器状态的对应关系	70
3.1.1 油中溶解气体的组分	70
3.1.2 正常运行变压器的油中气体含量	70
3.1.3 变压器内部故障与特征气体含量对应关系	71
3.2 油色谱故障诊断研究现状	73
3.2.1 油中气体色谱分析方法	73
3.2.2 故障诊断研究现状	74
3.3 相关向量机算法介绍	76
3.3.1 相关向量机理论简介	76
3.3.2 RVM 分类模型	80
3.4 MKL-RVM 算法及其改进	80
3.4.1 MKL-RVM 算法介绍	81
3.4.2 MKL-RVM 算法核函数参数获取	82
3.5 基于 MKL-RVM 的变压器故障诊断分析	87
3.5.1 变压器故障类型的划分及其表示方法	87
3.5.2 MKL-RVM 融合诊断模型特征变量的确定	87
3.5.3 核函数选取和核函数参数优化	88
3.5.4 诊断输出	89
3.5.5 基于 MKL-RVM 的变压器故障诊断过程	90
3.6 MKL-RVM 算法的实现	91
3.7 变压器故障诊断方法的测试和比较分析	92
参考文献	97
第4章 变压器振动信号的特征提取和故障诊断方法	99
4.1 变压器振动信号研究意义及现状	99
4.2 变压器本体振动分析	100
4.2.1 变压器铁心振动机理及其与振动信号的关系	100
4.2.2 变压器绕组振动机理及其与振动信号的关系	101
4.2.3 变压器振动信号分析	102
4.3 基于傅里叶变换和小波包分析的振动信号特征提取	104
4.3.1 傅里叶变换与小波包算法	104
4.3.2 基于傅里叶和小波包分析的信号特征提取方法	106
4.4 基于 EEMD 的振动信号特征提取	107

4.4.1 EEMD 方法概述	107
4.4.2 基于 EEMD 的振动信号特征提取方法	108
4.5 变压器铁心和绕组故障诊断实例	108
4.5.1 试验环境与条件	108
4.5.2 基于 FFT 和小波包的特征提取和诊断	109
4.5.3 基于 EEMD 的特征提取和诊断	117
4.5.4 实例分析和比较	123
4.6 本章小结	125
参考文献	126
第 5 章 宽频带脉冲电流特征提取和放电类型识别	128
5.1 研究背景及意义	128
5.2 国内外研究现状	128
5.2.1 脉冲电流法研究现状	128
5.2.2 局部放电脉冲电流特征提取的研究现状	129
5.2.3 局部放电类型识别的研究现状	130
5.3 油纸绝缘放电试验	131
5.3.1 局部放电试验环境	131
5.3.2 局部放电波形初步分析	133
5.4 基于 PRPD 的局部放电信号统计特征提取	136
5.4.1 局部放电相位分布分析	136
5.4.2 基础放电参数提取	137
5.4.3 局部极值点双阈值过滤法	138
5.4.4 自适应阈值选取方案	140
5.4.5 阈值方案的优化	144
5.4.6 基础参数自适应提取流程	144
5.4.7 谱图绘制与谱图特征提取	145
5.5 基于变分模态分解和多尺度熵的局部放电信号特征提取与类型识别	147
5.5.1 MSE 理论	148
5.5.2 基于 VMD-MSE 特征提取	150
5.5.3 局部放电实验数据分析	151
5.6 基于变量预测模型模式识别方法的局部放电信号类型识别	154
5.6.1 变量预测模型模式识别方法基本原理	154
5.6.2 VPMCD 方法存在的问题	157
5.6.3 VPMCD 方法的改进	158
5.6.4 基于 PLS-VPMCD 方法的局部放电信号类型识别	160
参考文献	162

第 6 章 基于超声信号的变压器绝缘放电故障诊断	164
6.1 变压器放电的超声信号检测现状	164
6.2 超声波检测法原理	165
6.3 基于超声信号的变压器绝缘放电判别方法	166
6.3.1 局部放电超声信号频谱分析	166
6.3.2 基于超声信号频域内累计超限次数的放电判别方法	168
6.4 超声信号放电故障判别案例	168
6.4.1 实验室超声信号的判别	168
6.4.2 现场实测超声信号的判别	171
参考文献	173
第 7 章 变压器多检测手段的融合诊断及系统开发	174
7.1 融合诊断研究现状	174
7.2 变压器融合诊断	175
7.2.1 多专家协同诊断结构	175
7.2.2 协同诊断规则	176
7.3 基于可信度的变压器综合状态的多监测参量的融合确定	178
7.3.1 基于可信度的变压器综合诊断不确定性的表示	178
7.3.2 基于可信度的变压器综合诊断的推理算法	181
7.4 基于多监测参数的变压器融合诊断系统开发	184
7.4.1 系统开发模式	184
7.4.2 变压器监测/检测数据的设计与管理	186
7.4.3 变压器综合诊断系统的功能设计	190
7.5 故障诊断案例分析	191
参考文献	194

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着我国电力系统向基于特高压的全国互联电网方向迈进,特高压和超高压变压器的数量和容量不断提升,2011年我国在世界上首次研制成功特高压100万千伏安双柱变压器^[1]。变压器是电网中最重要且昂贵的电气设备,其健康状况直接对电力系统具有重大影响。

为确保电力系统的安全稳定运行,对电力变压器进行合适的维修维护是必不可少的,电力变压器的维修包括事故后维修、定期维修和状态维修^[2,3]。以状态监测为基础、状态评估方法为辅助的状态维修是电力变压器运行维修的发展方向。

目前,变压器大多安装了油色谱在线监测装置,检修部门还配备了多种带电或停电检测装置,如脉冲电流(常规和宽频带)、超高频、振动、超声波和其他局部放电检测等,但各种监测/检测装置仅能利用自身的监测/检测结果给出变压器的初步状态判断,甚至有些装置尚不具备这种诊断功能。我国电网正处于输变电设备状态监测数据中心的建设和完善阶段,监测中心积累的变压器监测数据越来越多,基于这些监测数据对于变压器开展较准确的故障诊断,有利于及时发现变压器的早期缺陷或故障,防止故障发展为严重的电网事故。基于这一电力企业需求,有必要对变压器的多种监测/检测装置所测数据进行智能分析。

变压器运行涉及机械、电气、化学、热力学等多种现象,其故障特征信息具有不精确和多样化等特征,且故障与故障、故障与特征量之间存在较为复杂的联系,导致最终故障类型的准确判定不易实现。基于单个参量监测/检测的故障诊断很难得到准确的结果,例如,油色谱监测数据是目前对油浸式变压器进行故障监测最方便和应用最广泛的手段,但这种监测/检测不能发现放电微弱的早期绝缘放电故障,且不能区分尖端、金属悬浮等放电类型,因此仅依靠油中气体提供的信息进行故障诊断具有一定的局限性。局部放电监测/检测和变压器振动信号等往往也只反映变压器的某种局部状态,因此急需开展基于多种监测/检测参量的综合诊断的研究和应用。作为一个复杂的综合体,变压器出现异常状况时,会出现一些故障征兆,充分地将变压器的故障征兆信息加以利用,并将多层次、多方位的故障特征包含的信息进行互补融合,可以从多个角度对变压器状态进行诊断分析,提高诊断的正确率,同时减少现有独立监测/检测装置有时提供相互矛盾的诊断结果的现象。

1.2 变压器常见故障类型

当变压器发生故障时,无论是内部故障还是外部故障,其产生的异常现象都会通过声音、气味、变压器油箱外壳发热程度(触觉)和变压器外部保护装置等形式表现出来。变压器的故障类型是多种多样的,引起故障的原因也是极为复杂的。概括而言,制造缺陷、现场安装质量缺陷、维护管理不善或不充分等都可能引起变压器内部故障甚至事故。按故障性质一般分为热故障和电故障;按变压器本体可以分为内部故障和外部故障;按回路可以分为电路故障、磁路故障和油路故障。

1) 磁路故障

通常变压器磁路中的故障由如下原因引起。

(1)穿芯螺栓的绝缘管太短或者被击穿、破损、位移,可能引起铁心硅钢片局部短路,从而产生较大的局部涡流;如果两个以上穿芯螺栓出现这种情况,则将通过螺杆形成短路匝,并将通过几乎从芯柱到铁轭的全部主磁通而发生严重过热,甚至可以烧毁整个铁心。这种过热也可能烧焦线段的绝缘,并导致相邻绕组匝间短路。

(2)铁心硅钢片间的绝缘老化、损坏,会产生循环涡流,并因此而过热,也将危及铁心和绕组的安全。

(3)在加工过程中,铁心和铁轭叠片边缘存在毛刺,可以使铁心叠片产生局部短路;铁心叠片夹有金属杂质或叠片产生微小弯折,会形成局部涡流;运行过程中,某些原因使铁心油道局部堵塞。所有这些情况,都会使铁心引起局部过热。

(4)当铁心上的铁轭采取对接结构时,若铁心柱与铁轭之间的接缝不良,则可能会产生严重的涡流而导致过热。

(5)铁心内部接地片太长,易搭接在铁心硅钢片上,使之局部短路,引起局部过热,严重时甚至熔断接地铜片,继而形成悬浮电位放电。

(6)当变压器的金属开口压板钉之间的绝缘破损或位移时,两侧压钉与压板之间会形成金属性连接回路,产生很大的短路环流,造成严重过热现象。

(7)由于变压器内部铁心屏蔽,低压套管尾部磁屏蔽板和油箱内壁磁屏蔽等屏蔽措施不当,从而可能使某些金属结构处于漏磁场中,造成严重的局部过热故障。

(8)铁心多点接地故障。这是变压器中最常见的故障,在变压器各类故障中占相当大的比例。

2) 绕组故障损坏

绕组故障损坏的原因是极其复杂的，而且各种原因是相互影响的。最常见的故障损坏原因归结如下。

(1) 现代大型变压器普遍采用纠结式或纠连式绕组结构。这种结构焊接头多，如果连线和段间纠结线接头接触不良，则会造成局部过热故障，并使其匝绝缘遭受热破坏，引起匝间或段间短路故障。

(2) 当变压器受到外部短路冲击，特别是近区出口短路冲击，绕组某一段的一匝或多匝导线可能发生错位，即使这种错位不一定马上发生击穿事故，但在变压器运行中电磁力产生的振动也会使铁心螺栓松动；当变压器反复遭受严重电磁力冲击时，相邻错位线匝间的绝缘被磨损也可能导致击穿，从而发生绕组错位，进而变形损坏。

(3) 绕组导线质量不良，导致相邻匝直接接触，从而造成匝间短路。这种损坏多见于高压绕组。

(4) 变压器绕组是以绝缘垫块隔开线段而构成的整体结构，如果大型变压器绕组的轴向压紧力的裕度不足，绝缘垫的弹性作用会削弱，严重影响绕组的整体性。这时在变压器带负荷期间，电磁力所产生的振动，将可能使绕组的某些导线错位，随之可能发生匝间短路。

(5) 当变压器受到电应力或磁应力的强烈冲击，如变压器遭受某种程度的强烈负荷波动时，绕组是极容易发生损坏的。

(6) 变压器持续过负荷会引起变压器整体温度过高，从而加速绝缘劣化、变脆，最终可能导致绝缘龟裂、脱落，造成匝间短路，引起匝绝缘损坏。

(7) 在变压器需要改变电压而进行分接切换时，若外部操动机构的分接指示与内部接线不一致，造成分接错位，或者操作时分接调整不到位，将会产生绕组对地短路或绕组分接区大匝短路故障，从而导致绕组匝间损坏。

(8) 由于上部组件或联管有砂眼、储油柜或套管密封不良、吸湿器内的硅胶失效、油泵密封不良等原因而渗入水分或潮气，如果水分浸入绕组绝缘中但没有及时处理，会发生匝间短路而造成变压器损坏。

(9) 大型变压器由于绝缘结构上有薄弱环节和绝缘系统中存在气泡以及运行中绝缘受潮，可能发生围屏树枝状放电故障，最终导致绕组匝间短路，某些线段局部损坏。

3) 绝缘系统的故障损坏

绝缘系统的故障损坏的形式、部位和原因也是非常复杂的，通常有如下几种情况。

(1) 绝缘受潮是变压器绝缘系统损坏的重要原因。

(2)当变压器过负荷时间很长,且对绝缘油缺乏维护时,极易引起绝缘油老化,结果不仅加速变压器固体绝缘的老化,而且可以使油泥附着于线匝上,易于造成电气击穿。

(3)在变压器绝缘结构设计时,相间绝缘如果裕度不足,可能引起相间短路,从而造成绝缘系统故障。

(4)在变压器制造过程中,有时可能使绝缘成型件表面污染或者在其中吸附有气泡。表面污染会引起表面放电而使绝缘件失效。绝缘件吸附气泡,往往导致气体游离而使介质产生过热,导致绝缘击穿。

(5)在制造或现场更换绕组引线木支架及线夹、垫块时,若未对其进行充分的干燥和浸渍,水分的存在将导致分接引线与接地部分或分接引线之间的电气击穿。

4) 变压器渗漏油原因

变压器渗漏油是一个长期和普遍存在的故障现象。据统计,在变压器故障中,产品渗漏油约占四分之一。变压器渗漏油危害极大,应引起足够的重视。引起渗漏油的原因包括以下几方面。

- (1)变压器密封结构不良引起渗漏油。
- (2)生产过程中焊接缺陷造成渗漏油。
- (3)密封面瑕疵引起渗漏油。
- (4)环境温度的影响、振动频率的加剧以及材料的热膨胀系数不同造成渗漏油。

1.3 变压器常用监测/检测手段

变压器通常采用矿物油(变压器油)作为绝缘和散热的媒质,采用绝缘纸和绝缘纸板来绝缘。变压器油为烃类化合物的混合物,绝缘纸及绝缘纸板为植物纤维素,它们均为碳氢化合物。在长时间运行中,这些化合物由于受电场、水分、温度、机械力的作用,会逐渐劣化,引起故障,并最终导致变压器寿命终结。

在绝缘结构局部场强集中的部位出现局部缺陷,如生长气泡时,就会出现局部放电。例如,在变压器高压绝缘中部,在导线和垫块缝隙中或导线与撑条的绝缘中靠近导线的表面上容易产生局部放电。局部放电会使绝缘逐渐受到侵蚀和损伤,发生局部放电时会伴生电流脉冲。在局部放电和过热作用下,油、纸绝缘会发生分解,产生CO、CO₂及各种烃类气体。伴随局部放电还可能产生特高频电磁波以及超声脉冲。

大型电力变压器发生故障时,在绝缘缺陷逐步发展至介质击穿,引发事故之前,都会出现不同程度的局部放电,因此局部放电的检测很重要,其检测分为在线监测和停电检测。利用这些检测手段可以取得与放电对应的信号,对信号进行处理和分析可以诊断出局部放电类型或对放电进行定位。在线监测手段主要包括

超声波、特高频、常规脉冲电流法和宽频带脉冲电流检测法。

超声波通过检测电力设备局部放电产生的超声波信号来测量局部放电的大小和位置。在实际检测中,超声传感器主要是通过贴在电气设备外壳上以体外检测的方式进行的。超声波方法用于在线监测局部放电的监测频带一般均为 $20\sim 230\text{kHz}$ 。超声波法检测变压器局部放电具有以下优点:①易于实现在线监测;②便于空间定位;③有望实现利用超声波法进行模式识别和定量分析;④超声波法的进一步研究有望得到一些新的放电信息。目前,利用超声波进行局部放电的放电量的大小确定和模式识别方面的工作做得很少,有效的成果也不多,究其原因,超声波法测量局部放电目前主要存在以下三个方面的问题:①局部放电产生超声波机理问题;②超声波的传播路径问题;③对声信号的处理方法问题。

特高频(*ultra-high frequency*, UHF)法是目前局部放电检测的一种新方法。研究认为,每一次局部放电过程都伴随着正负电荷的中和,沿放电通道将会有过程极短、陡度很大的脉冲电流产生,辐射的电磁波信号的特高频分量比较丰富。目前,实验已经证明,变压器(油中放电脉冲的上升沿很陡,一般在 1ns 以内)能够激发出很高频率的电磁波,最高可达数GHz。通过天线传感器接收局部放电过程辐射的特高频电磁波,可以实现局部放电的检测。该技术的特点在于:检测频段较高,可以有效地避开常规局部放电测量中的电晕、开关操作等多种电气干扰;检测频带宽,所以其检测灵敏度很高;可以识别故障类型并进行定位。同时特高频方法采取天线空间耦合射频信号的方式使监测系统与被检测对象之间没有电气连接,对操作人员及监测设备都具有更高的安全性。但特高频法的测量机理与脉冲电流法不同,因此无法进行视在放电量的标定,而且一般外置式传感器灵敏度明显低于内置式传感器,所以一般需要对现场变压器的结构进行一些改动,通常是变压器预埋传感器开孔或利用放油阀将特高频传感器伸进变压器箱体,这对于今后在变压器出厂前就嵌入箱体内是可行的,但是对于已投运的变压器进行改造时难免引起变压器油受潮或漏油的问题。电力企业难以接受对运行中的变压器进行超高频传感器改造的建议,所以这种检测方法的推广还存在一定的障碍。

常规脉冲电流法是研究最早、应用最广泛的一种检测方法,IEC-60270为国际电工委员会(International Electrotechnical Committee, IEC)正式公布的局部放电测量标准。该方法通过测量放电时回路电荷变化所引起的脉冲电流来实现对高压电力设备局部放电的检测。常规脉冲电流法采用的传感器为耦合电容(如变压器套管末屏)或电流传感器,其测量频带一般为脉冲电流信号的低频段部分,通常为数kHz至数百kHz(最多为数MHz)。目前,常规脉冲电流法广泛用于变压器、预防和交接试验与变压器局部放电实验等,其特点是测量灵敏度高,可以获得一些局部放电的基本量(如视在电量、放电次数以及放电相位等)。

宽频带脉冲电流检测法是在足够宽的检测频带范围内检测局部放电产生的脉

冲电流信号,局部放电信号一般通过安装在被测设备接地线上的穿芯式电流传感器或钳型电流传感器来获得,在实验室条件下也可以在放电模型接地回路中串入无感电阻来获得真实的局部放电信号。利用罗戈夫斯基线圈检测变压器中性点、外壳接地电缆处的脉冲电流,这种宽频带脉冲电流检测法的优点是检测频带宽(上限可达 30MHz,甚至更高)、包含的信息量大、可用于局部放电波形的详细分析。意大利 TechImp 公司在这种基于超宽带的电力设备局部放电检测的应用方面取得了显著成效,研发的局部放电检测装置能对放电电流脉冲信号进行高速(100MS/s)采样,并对获取的完整时域波形进行去噪,在此基础上对不同特征的脉冲信号进行分类统计,可以实现现场抗干扰和多放电模式的区分,进而诊断设备绝缘状态。然而,该公司的技术细节一直处于保密状态。

变压器内部存在局部过热、放电等故障点,会加快 H_2 、 CO_2 、 CO 及各种低分子烃类气体的分解,这些气体在油中对流、扩散,大部分溶解在油中。变压器油中溶解气体分析(dissolved gas-in-oil analysis, DGA)技术是基于油中溶解气体类型与内部故障的对应关系,采用气相色谱仪分析溶解于油中的气体含量,根据油中气体的组分和各种气体的含量判断变压器有无异常情况,诊断其故障类型、大概部位、严重程度和发展趋势的技术^[4-7]。国家标准 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》^[8]和 DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》^[9]指出,分析油中溶解气体的组分和含量是监视充油电气设备安全运行的最有效措施之一,是保证电力系统安全运行的有效手段。实践证明,运用 DGA 技术,检测诊断充油电气设备内部潜伏性故障,已经成为变压器类充油电气设备绝缘监督的一个重要手段,其特点是能发现电气试验不易发现的潜伏性故障,对变压器内部潜伏性故障进行早期和实时的诊断识别非常有效。

1.4 基于多监测参量融合诊断的意义与诊断框架

油中溶解气体分析法是变压器状态评估和故障诊断工作最常用的方法,该方法实质上是通过测取油中气体的组分和各种气体的含量判断变压器有无异常情况及故障的类型。无论是在线监测还是现场取油样后的实验室测量,这些变压器油色谱数据(也称为油中溶解气体分析数据)的测取基本不受各种电磁干扰的影响,数据的可靠性高。许多专家据此提出了很多较实用的算法,如阈值与产气速率判断法、电气实验法、比值法及其衍生法、特征气体判断法、人工智能方法等^[10-12]。

此外,国内外理论研究结果和实际运行经验表明,电力变压器器身表面的振动与其绕组及铁心的压紧状况、绕组的位移及变形密切相关。当变压器运行时,硅钢片的磁致伸缩使得变压器铁心随着励磁磁通的变化而周期性地振动,同时绕组中的负载电流产生漏磁引起绕组的振动。变压器箱体内的振动通过变压器绝缘

油和支撑组件传递到箱体表面，同时以声波的形式向四周扩散。通过监测和分析变压器箱体表面的噪声信号或振动信号可以获知变压器内部组件的运行状况。振动分析法^[13, 14]利用贴在变压器器身上的振动传感器获取变压器在线运行过程中的振动信号，提取信号的时域、频域等特征信息，评估诊断绕组、铁心当前的运行状态，预测可能发生的故障。整个过程中，振动分析法最大的优点是能够在线监测，简单易行，与整个电力系统没有电气连接，对整个电力系统的正常运行无任何影响，具有较强的灵敏度，能识别变压器绕组和铁心的细微故障，具有良好的应用前景。

当变压器异常时，有的表现为多种监测/检测手段数据的异常，有的表现为单种或少数几种监测/检测手段数据的异常。虽然油色谱监测是目前油浸式变压器配备最为广泛的监测装置，但仅依靠油色谱数据进行故障诊断具有一定的局限性，因为仅当变压器故障发展到一定程度时这些数据才有显著变化。超声波和常规脉冲电流法等检测也被认为是电气设备有效的绝缘故障检测方法，它们与油色谱监测相比在发现变压器初期绝缘故障方面一般更有效，但若根据油色谱数据也能判断出放电故障，则绝缘故障的诊断结论就更加确定了。而振动分析法对监测变压器绕组和铁心状况更为有效。变压器故障表征涉及机械、电气、化学、热学等多种物理现象，故障原因、现象复杂，再加上信息特征的局限性、诊断模型和知识的不完备性等，上述因素会导致基于单一监测/检测手段的诊断结论存在着一定的片面性。不同的监测/检测手段所测得的数据或特征信号从不同方面反映了变压器的状态。因此，充分利用多种监测/检测手段数据构建融合故障诊断框架是有必要的，可以从多个角度对变压器状态进行综合分析，提高诊断的正确率，同时避免现有独立监测/检测装置有时提供相互矛盾的诊断结果的现象。基于多种监测/检测手段的变压器融合故障诊断框架如图 1-1 所示。

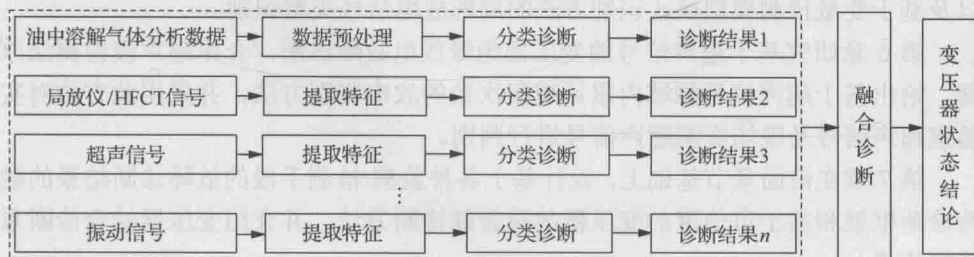


图 1-1 基于多种监测/检测手段的变压器融合故障诊断框架

目前，同一电压等级的变压器在线监测装置的配备尚不统一，不同电压等级的变压器的在线监测装置配备的差别更大，并且，在运行过程中检修人员会根据变压器状态情况增加相应指标的临时检测，这就决定了不同的变压器所具有的监测/检测数据的种类差别较大，且使用不同检测手段所得的数据在时间上有一定差

异, 这些因素导致变压器诊断很难采用数据层融合和特征层融合, 而只能采用如图 1-1 所示的决策层融合, 也就是在各信息源分别诊断的基础上, 融合各信息源的诊断结论, 给出综合评判。

1.5 本书的内容安排

第 1 章介绍变压器常见故障及常用监测/检测手段, 以及基于多监测参量融合诊断的意义与框架。

第 2 章介绍连续型非平稳监测信号的典型处理方法及其在去噪中的应用, 包括小波变换、集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)、固有时间尺度分解、变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)等方法。

第 3 章给出基于油色谱数据的变压器故障诊断方法。首先对油中溶解气体的产生机理进行分析, 然后对相关向量机(relevance vector machine, RVM)算法、组合核相关向量机(multi-kernel learning relevance vector machine, MKL-RVM)进行研究改进, 并给出基于 MKL-RVM 的变压器故障诊断方法。

第 4 章对振动信号的特征提取及故障诊断方法进行研究。分别给出基于快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)和小波包的特征提取方法与基于 EEMD 的特征提取方法, 在此基础上, 采用 Fisher 判别分析方法、K 邻近(K-nearest neighbor, KNN)和相关向量机等智能方法进行变压器的故障诊断。

第 5 章研究宽频带脉冲电流的特征提取和放电类型识别。首先介绍脉冲电流法研究现状, 给出局部放电信号的实验室获取方法, 然后分别研究基于局部放电相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)的局部放电信号统计特征提取与类型识别、基于变分模态分解和多尺度熵的局部放电信号特征提取与类型识别, 以及基于变量预测模型模式识别方法的局部放电信号类型识别。

第 6 章研究基于超声信号的变压器绝缘放电故障诊断, 介绍超声波检测法原理, 给出基于超声信号频域内累计超限次数的放电判别方法, 并采用此方法对实验室超声信号及现场实测超声信号进行判别。

第 7 章在前面章节基础上, 设计基于各种监测/检测手段的故障诊断结果的融合诊断框架和基于可信度的变压器故障智能诊断方法, 并介绍变压器综合诊断系统的构建。

参 考 文 献

- [1] 国家电网公司. 2011 年社会责任报告[EB/OL]. [http://www.indaa.com.cn/ztszrbzg\[2012-2-20\]](http://www.indaa.com.cn/ztszrbzg[2012-2-20]).
- [2] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 保定天威保变电力股份有限公司. 变压器实验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.