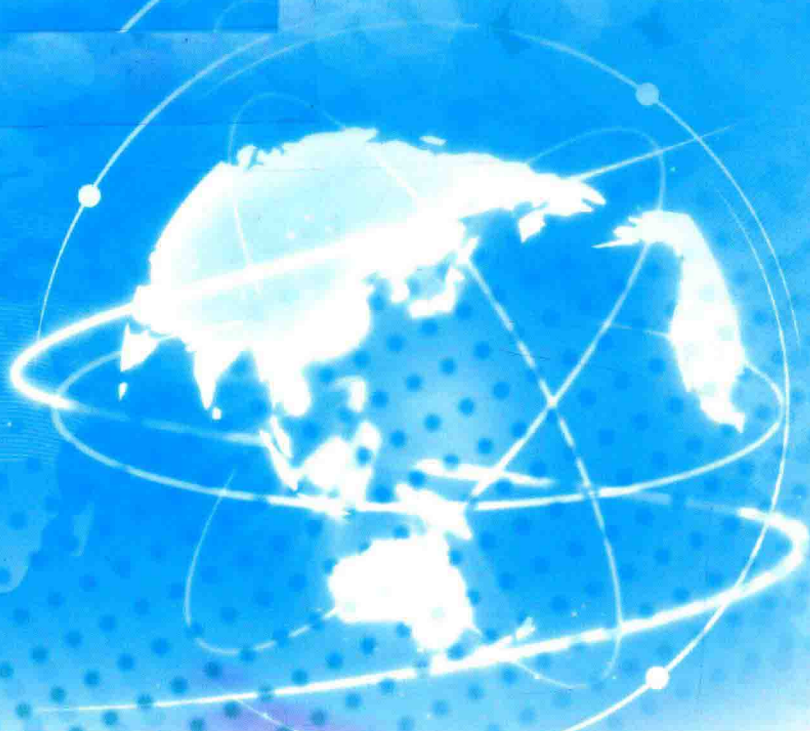




大型电力变压器故障诊断中 人工智能算法与应用

DAXING DIANLI BIANYAQI
GUZHANG ZHENDUAN ZHONG
RENGONG ZHINENG SUANFA YU YINGYONG

熊浩清 主编



 郑州大学出版社

大型电力变压器故障诊断中 人工智能算法与应用

DAXING DIANLI BIANYAQI
GUZHANG ZHENDUAN ZHONG
RENGONG ZHINENG SUANFA YU YINGYONG

熊浩清 主编

 郑州大学出版社

郑州

图书在版编目(CIP)数据

大型电力变压器故障诊断中的人工智能算法与应用/
熊浩清主编. —郑州:郑州大学出版社,2017.6

ISBN 978-7-5645-4385-3

I. ①大… II. ①熊… III. ①人工智能-应用-电力
变压器-故障诊断-研究 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 109794 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:张功员

全国新华书店经销

虎彩印艺股份有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:8.5

字数:168 千字

版次:2017 年 6 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2017 年 6 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-4385-3

定价:18.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

作者名单

主 编 熊浩清
副主编 畅广辉 张建立
编 委 薛盖超 高 峰 赵 娟 崔召辉 王 丹
刘 华 姚 峰 樊东峰 李志恒 白梁军

基于溶解气体分析的手段,结合其他电气测量手段,实现了故障诊断结果的信息融合。提出了一种改进的三比值变压器故障诊断方法。以模糊粗糙集为数学基础建立信息决策系统,采用数据挖掘技术解决这一建立过程中的若干问题。考虑到信息源的连续取值对模糊粗糙推理的影响,利用模糊集方法处理连续取值型属性。利用数据库知识发现(KDD)技术挖掘数据库中隐含的聚类信息,设置属性的模糊取值并确定隶属函数,并在此基础上基于包含度对模糊规则进行约简和剔除。设计了适用于模糊粗糙规则提取的数据挖掘算法,从数据库中提取规则,按属性集建立多表决策库的拓扑结构。诊断结果表明,该决策库故障正判率较高,模糊判断规则适应了现场条件。

溶解气体分析(DGA)是判断电力变压器内部潜伏性故障的有效手段之一。其中,采用“气体比率表”作为判断单一的潜伏性故障依据的方法是一种经验型的判断方法,来自于众多专家经验的汇总。IEC 共颁布了三种标准气体比率表(IEC 599—1978, IEC 60567—1991 和 IEC 60599—1999),被世界各国广泛采用。基于气体比值诊断方法已出现了多种方法,如 Doernenburg、Rogers 和 Modified-Rogers。另外,国内外有些单位采用了多种更切合本地实际的判断方法,如美国俄亥俄州的 CSUS 法。我国也有许多学者综合 DGA 和电气绝缘试验参数提出了多种综合评判方法。

考虑到“不完备信息情况下的判断缺陷”和“属性取值边界过于苛刻”是众多研究者一直在努力解决的两个问题。粗糙集理论和模糊集理论分别单方面地为两者提供了解决方法。然而,粗糙集方法要求输入数据必须是离散量,而模糊集方法却不能解决不完备信息情况下的判断。如何将两者的优点融合成一套完备的数学理论也是近年来数学界的研究热点之一。模糊粗糙集理论(FRS)试图在数理上实现这两种理论的统一,并且,基于该理论,可以设计高效的数据挖掘算法进而对海量数据信息进行处理。因此,将模糊粗糙集理论引入 DGA 故障诊断表的建立,有一定的尝试意义。

针对基于聚、分类技术的 DGA 数据表诊断方法在预处理方面的若干问题,提出了密度聚类方法实现了 DGA 样本分析的无监督型分析:①利用非参数密度估计方法建立概率密度函数,并以概率密度函数作为统计学角度的聚类依据。

②利用非参数估计方法直接估计出概率密度函数的梯度场。③依据样本空间概率密度函数的梯度分布确定聚类原型。④依据临近数(NDD)确定差异标度(dissimilarity metric)。⑤依据标度差异和聚类原型运用峡谷搜索法思想建立聚类函数。试验结果表明,该方法对所搜集的DGA在无专家参与的情况下实现基于密度的自然值域划分,能够比现有的人工划分方式做到更加细致的划分,为实现对DGA样本表特性的更加仔细的研究提供了一种新的可行途径。

在综合了多种优良算法的基础上,将基于模糊粗糙集理论的决策表形成方法应用于DGA故障诊断表建立;又由于实际应用中需要较大的数据存储和处理工作,本书设计了相应的数据挖掘算法,实现了这一形成过程。具体步骤如下:①采用KDD技术直接从数据库中挖掘隐含的聚类信息,并依据聚类信息确定属性模糊词和模糊隶属函数。②在模糊集表达的决策表中,依包含度进行规则约简。③利用数据挖掘算法依包含度阈值进行规则剔除和分配,最终形成多表决策库(即决策系统)。

针对变压器故障综合诊断的问题,提出了一种基于证据理论的故障综合诊断方法。首先,为实现合成规则中冲突信息在合成后基本概率分配函数中的合理赋值,基于不同证据体对同一假设的紊乱度分配冲突信息,改进了传统的合成规则。然后,将这一合成规则应用到基于粗糙集、模糊聚类、神经网络、贝叶斯理论等技术所形成证据体的合成之中。最后,用实例验证所提方法。试验表明,所提判断方法的适应性,在多种判断结果出现明显分歧的情况下合理地处理了证据体之间的冲突信息,从而有效地综合各种不同方法的判断结果。

目 录

1 绪论	1
1.1 变压器潜伏性故障诊断的意义	1
1.1.1 电力系统中变压器故障诊断的意义	1
1.1.2 电力设备维修体制的发展与现状	2
1.1.3 状态维修	4
1.2 基于 DGA 的变压器故障诊断方法	5
1.2.1 故障的种类	5
1.2.2 故障诊断方法研究历史、发展和现状	6
1.2.3 数据分析方法在 DGA 数据表分析中的应用	7
1.2.4 方法学角度的故障诊断的基础问题	7
1.2.5 数据分析的智能阶段探讨	7
1.3 本书的主要研究内容	9
1.3.1 基于聚类理论的故障类型识别	9
1.3.2 基于粗糙集的样本循环采样,以实现规则求精	9
1.3.3 基于模糊粗糙集的规则约简	9
1.3.4 基于证据理论的结论综合	10
1.4 章节安排	10
2 基于 DGA 的变压器潜伏性故障诊断及其发展	11
2.1 概述	11
2.2 变压器的故障特性与溶解气体之间的关系	12

2.2.1	产气机制介绍 ^[2,4,5]	12
2.2.2	气体的溶解	13
2.3	变压器潜伏性故障与气体的比值问题	14
2.3.1	热性故障	15
2.3.2	放电性故障	16
2.3.3	受潮	17
2.4	基于 DGA 的故障诊断方法	17
2.4.1	三比值法	18
2.4.2	影响比值法的因素	18
2.4.3	三比值法的不足	19
2.5	小结	20
3	基于聚类分析的故障类型的确定	21
3.1	概述	21
3.2	问题的提出及本章聚类的作用	22
3.3	聚类问题的背景知识	23
3.3.1	聚类问题的本质	23
3.3.2	聚类的基本步骤	24
3.3.3	三类主要的聚类算法	25
3.3.4	面向 DGA 的变压器故障样本的分析	27
3.4	基于最优聚类的分析	27
3.4.1	FCM 的模型构造	27
3.4.2	FCM 算法步骤	29
3.4.3	G-K 方法的模型构造和算法步骤	29
3.5	密度分析方法	30
3.5.1	基于概率密度的聚类分析方法	31
3.5.2	构造样本特性空间	33
3.5.3	聚类分析与故障类别确定	33
3.6	DGA 问题的聚类分析流程	35
3.6.1	诊断表制作流程及原理	35
3.6.2	试验分析	36

3.7 小结	44
4 基于循环样本采样的诊断规则求精	45
4.1 数据完备化问题	45
4.1.1 问题的提出	45
4.1.2 知识求精	46
4.1.3 数据完备化的使用范围	48
4.2 粗糙集的背景知识	49
4.2.1 利用粗糙集构建的信息系统	50
4.2.2 经典粗糙集理论	51
4.2.3 属性约简	52
4.3 样本循环采样算法	53
4.3.1 算法流程	53
4.3.2 粗糙集理论及基于约简的样本循环采样	54
4.3.3 循环采样算法的步骤	56
4.4 实验分析	57
4.5 小结	60
5 基于模糊粗糙集的规则约简	61
5.1 概述	61
5.2 简介	61
5.2.1 模糊粗糙集发展历史	61
5.2.2 我国粗糙集应用的评价	62
5.3 Bojanova 类型模糊粗糙集简介 ^[59]	64
5.4 KDD 聚类及模糊粗糙逻辑在决策表建立中的应用	65
5.4.1 基于 KDD 聚类的属性取值模糊化(V_a, f 的确定)	65
5.4.2 包含度计算和规则提取	66
5.5 基于模糊粗糙集理论的数据挖掘算法	68
5.5.1 算法构造	68
5.5.2 包含度阈值的选取	68
5.6 DGA 决策系统的建立	69

5.6.1	气体比值类型选取(条件属性的选取)	69
5.6.2	故障类型选取(决策属性选取及其形成)	70
5.6.3	决策系统形成	71
5.6.4	实例	72
5.7	不同诊断方法的统计对比	73
5.8	小结	74
6	DGA 故障诊断的各种理论方法的讨论	75
6.1	总论	75
6.1.1	算法对比的发展历史和简介	75
6.1.2	诊断效果评价上的复杂性	77
6.1.3	诊断结果表达方式的人机交互适应性	77
6.1.4	诊断知识表达方式的人机交互适应性	77
6.1.5	系统自动更新能力	78
6.1.6	以算法复杂度来进行测量	78
6.2	基于以上指标的若干分析说明	79
6.2.1	基于概率函数的分类方法	79
6.2.2	基于线性或非线性判别函数 ^[10,11] 的分类方法	81
6.2.3	模糊聚类	82
6.2.4	模糊综合评判	82
6.2.5	粗糙集理论	82
6.2.6	Petri 网络	82
6.2.7	灰色理论	83
6.3	存在的问题	83
6.3.1	样本表达方式的不统一和知识表达方式的不统一	83
6.3.2	诊断结果表达方式的不统一	84
6.4	小结	84
7	证据理论及其改进公式	85
7.1	概述	85
7.2	证据理论在变压器故障诊断中的应用介绍	85

7.3	D-S 证据理论的基本原理	88
7.3.1	证据理论数学表达	88
7.3.2	Dempster 合成法则	92
7.4	证据理论合成规则的发展及分析	93
7.4.1	合成规则问题的介绍	93
7.4.2	Lefevre(2001) 框架 ^[82]	95
7.4.3	冲突信息分布的分析和权重因子的计算	96
7.4.4	面向变压器故障综合诊断的合成规则研究	96
7.5	改进的合成规则	97
7.6	通用案例	98
7.7	小结	103
8	基于改进证据理论的故障诊断	104
8.1	概述	104
8.2	关于证据理论在变压器故障诊断中的框架的分析	104
8.2.1	第一种模型 ^[92]	105
8.2.2	第二种模型 ^[69,75]	105
8.2.3	第三种模型 ^[76-78]	105
8.3	基于变压器综合故障诊断的推理模型	106
8.4	辨识框架融合(故障类型选取)	107
8.4.1	故障类型选取的综述	107
8.4.2	本书采取的方法	107
8.5	多种方法的 BPA 构造研究	108
8.5.1	基于粗糙集的 BPA 构造 ^[93,94]	108
8.5.2	基于最优聚类的 BPA 构造	109
8.5.3	基于神经网络的构造 ^[69,75]	110
8.5.4	基于贝叶斯理论的 BPA 构造 ^[7,8,22,96]	110
8.6	证据合成	110
8.7	实例分析	112
8.7.1	采用气体三比值法判断	112
8.7.2	本书采用的方法	113

8.7.3 吊罩后发现	114
8.8 小结	114
第9章 全书总结与展望	115
9.1 全书总结	115
9.2 未来的发展	117
参考文献	119



1 绪 论

本章综述了油浸式电力变压器故障诊断及维修技术的发展状况,对以可靠性为中心的维修体制及存在的问题进行了评述,并在此基础上提出了本书的主要研究内容:以大型油浸式电力变压器为研究对象,研究与其维修特点相适应的状态诊断技术及以可靠性、经济性为中心的优化维修策略。

1.1 变压器潜伏性故障诊断的意义

1.1.1 电力系统中变压器故障诊断的意义

电力变压器是电力系统最为重要的电气设备之一,它的运行状况直接关系到电力系统的安全经济运行,变压器发生故障将导致大面积停电,致使国民经济遭到重大损失。随着对高压电网运行可靠性要求的不断提高,对大型高压电气设备运行安全性的要求也越来越高。

随着超高压和特高压输变技术的迅速发展,电网容量大,覆盖面广,它的故障可能对电力系统和用户造成重大的危害和影响。因此,减少和预防变压器故障具有重要意义。

大型电力变压器是电力系统最主要和最昂贵的设备之一,因而外有避雷器等保护,内有气体、差动、接地等多重保护,与发电机等设备相比,由于基本上没有可动元件,是比较可靠的。但由于设计不合理、制造质量不良、运输安装缺陷、运行人员的失误、检修人员的过失、绝缘老化、保护失灵、套管密封不良、雷击和内过电压、自然灾害、小动物事故等种种原因,变压器故障时有发生,事故率仍相当高。以我国 110 kV 及以上变压器的事故来看,1994 年 110 ~ 500 kV 变压器事故率 0.76 次/(百台·年),1995 年为 0.65 次/(百台·年),1996 年为 0.56 次/(百台·年)。据统计,在 2000 ~ 2003 年,高压电气设备故障占全国电网事故的 45%^[1],而且绝缘故障是影响高压电气设备正常运行的主要



原因。因此,加强对高压电气设备绝缘状况的监督是保障电力系统安全稳定运行的重要手段。

变压器故障的成因多种多样,面向多种故障的技术水平也参差不齐。在故障变压器中,多数故障是绝缘性故障,其原因不仅是电应力作用引起绝缘劣化而导致绝缘故障,而且机械力或热的作用或者与电场的相互作用最终也会发展为绝缘性故障。例如变压器短路故障产生的巨大电磁力会引起绕组变形,使绝缘受损伤而发生匝间击穿;变压器内局部过热可导致油温上升,使绝缘过热而发生裂解,最后发展为放电性绝缘故障。因此,变压器故障维修体制也正在经历一个缓慢的演化阶段。

运行中的变压器发生不同程度的故障时,会产生异常现象或信息。故障分析就是搜集变压器的异常现象或信息,根据这些现象或信息进行分析,从而判断故障的类型、严重程度和故障部位。因此,变压器绝缘状态监测与故障诊断的作用是:

(1) 准确判断运行设备当前处于正常状态还是异常状态。

(2) 若有故障,则判断故障的性质、类型和原因。例如是绝缘故障还是过热故障或机械故障,若是绝缘故障,是绝缘老化还是受潮;若是放电性故障,又是哪种类型的放电等。

(3) 根据故障信息或根据信息处理结果,预测故障的可能发展,即对故障的严重程度、发展趋势做出诊断。

(4) 提出控制故障的措施,防止和消除故障。

(5) 提出设备维修的合理方法和相应的反事故措施。

(6) 对设备的设计、制造、装配等提出改进意见,为设备全寿命现代化管理提供科学依据和建议。

因此,无论是从电力系统运行的安全性还是经济性上来考虑,实现人工经验总结与故障判断的综合自动化,及时发现潜在的故障可能,实现电气设备及时、可靠的维修都是一个必然的趋势。

1.1.2 电力设备维修体制的发展与现状

从目前运行设备维护思想上来说,对电气设备的维修体制分为三种递进的发展阶段,这三种阶段也是逐渐递进的趋势。

电力设备的维修方式大致可划分为事后维修、定期维修和状态维修这三个阶段。

第一阶段是在电力系统发展的初始阶段,普遍采用事后维修(breakdown maintenance, BM),即设备一直运行到出故障才停下来检修,检修工作是非计划的,维修的目的是消除故障。



第二阶段是预防性计划检修,即定期维修制(time based maintenance, TBM),它是以一定的时间为周期,有计划地安排维修活动,维修的目的是预防事故的发生。它是根据设备磨损的统计规律或经验,从而确定检修类别、检修周期、检修工作内容、检修配件及材料等不同的检修方式。定期维修制的推行,对发现和消除故障、保证设备的可靠运行发挥了重要作用。但是,人们在长期的实践中发现,TBM 似乎主要强调维护设备的安全性,较少考虑维修活动的经济性,无法高效利用检修资源,并且统一的规定更易造成维修过度 and 维修不足的问题。

计划检修体制:长期以来,为确保电力系统安全运行,电力行业一直根据电力设备预防性试验规程的规定,对电力设备进行定期的停电试验、检修和维护。这种“计划检修”体系无疑在电气设备绝缘故障诊断、防止设备事故发生、保证安全可靠地供电方面起着很好的作用。但“计划检修”是按照预试规程所规定的试验周期,到期必修,而不顾电气设备绝缘的实际状况,具有很大的盲目性和强制性,因而造成设备的“过度检修”,浪费了大量的人力物力。同时,这种过度检修,或者由于检修的不慎所造成,或者由于频繁的拆装所造成,还有可能引起新的绝缘隐患。更多的是,对一台大容量高压电力变压器来说,定期对它施加低于其运行电压的试验电压来测量(无论是绝缘电阻,还是泄漏电流),其发现缺陷的灵敏度较差,难以发现潜伏性缺陷,同时它不能顾及绝缘劣化、缺陷发生的潜伏和发展时间,而不能及时准确地发现故障。现有的预防性实验方法不能有效地发现变压器在运行条件下的内部潜伏性故障^[2]。

第三阶段是以设备状态监测和故障诊断为基础的状态检修(condition based maintenance, CBM)体制。状态检修是一种以设备状态为基础、以预测设备状态发展为依据的检修方式。它根据对设备的日常检查、定期重点检查、在线状态监测和故障诊断所提供的信息,经过分析处理,判断设备的状况与发展趋势,并在设备故障发生前有计划地安排检修。这种检修方式的目的是实现按需检修,更具有针对性,因而,在提高设备可用率的同时,可以减少不必要的检修费用。随着全球电力体制改革的推进,电力设备维修活动的经济性因素越来越受到关注。分析表明,设备维修成本已经占到电力企业运行总成本的相当比例,且存在很大的节约空间,其中大型电力变压器更为显著。以可靠性为中心的维修(reliability-centered maintenance, RCM)就是在这样的背景下提出来的,它力求在确保设备运行可靠性的同时,最大限度地降低设备的维修费用。RCM 的实质是在状态分析的基础上,对设备在系统中的重要性进行评估,从而制定相应的检修策略。

状态维修:随着电力系统朝着超高压、大容量方向发展,以及社会和生活对供电可能性的提高,迫切需要对电力设备运行状态进行实时或定时的在线监测,及时发现电气设备早期绝缘缺陷,防止突发事故发生,同时可以减少不必要的停电检修,避免传统试验对



电气设备由于“过度检修”所造成的巨大损失,有效地延长设备的使用寿命,使设备检修达到优化配置。采取状态监测与故障诊断技术后,可以使预防性维修向预知性维修即“状态维修”过渡,从“到期必修”过渡到“该修则修”。同时,也为变电站“无人化”创造了条件。

目前我国电力设备的维修体制仍处于从计划维修向以可靠性为中心状态维修过渡的阶段,并且已经在设备状态监测和故障诊断方法上取得了众多的成果,但必须指出的是,技术及费用等因素使维修体制的推行受阻。另外需要提及的是,虽然目前诊断技术在变压器的维修实践中取得了显著成果和经济效益,但进一步的理论研究与应用结果表明,仍存在以下局限性:

- (1) 割裂和静止地看待故障;
- (2) 综合诊断中各种方法的堆积;
- (3) 缺乏辩证思维和符号处理能力;
- (4) 人-机接口柔性差。

本书将对大型电力变压器的可靠性、经济性的优化维修策略做较深入探讨。

1.1.3 状态维修

广义的状态维修(Condition based maintenance, CBM)是针对目标状态的实时监测的一种维修机制,前提是状态检测,利用实时取得的数据对设备运行的当前状态进行判断,并依据判断的结果确定维修策略。为实现在正确的时间对电力设备进行有效的维护,状态维修被引入。CBM 采用在线监测得到的实时数据优化运行资源。状态监测即观察被监测设备的状态。这样的系统能够确定设备的健康状态,以及何时对设备进行必要的维修。

近年来,已经出现了许多在线监测装置能够在线分析状态数据,维修人员能够方便地决定对特定设备进行维修的时间。

理想条件下的维修,应该不仅使维修仅仅在恰当的时间,并且能够最小化维修费用、减少系统停运和维修时间。

随着电力系统本身变得越来越复杂,自动化程度逐渐增高,以及电力系统企业性质转换,各种电力运行设备的定期性停电维修将造成越来越昂贵的经济损失。而监测仪器实用化使得监测仪器趋向于便宜和可靠,同时信息系统作为基础性的环境依托,使得CBM 成为一个重要的体制逐渐成为可能。

然而,状态维修依然存在一些值得讨论的问题:



首先,最重要的是 CBM 设备一般仍然比较昂贵。它要求采用的都是较为先进的仪器。通常来说,充足的仪器的消费非常大,尤其是在那些已经安装成功的设备上面。因此,用于状态监测的设备是否足以重要到以致于应该筹集一笔资金,这本身是一个重要的问题。

其次,引入 CBM 将在维护方式、规程上引起一个较大的变化,而且潜在的,以至于影响整个单位的组织和管理。组织上的管理,一般来说在短期内是很难变化的。我们查阅的资料上,美国的年度报告,只是要求实现预警方案。

再者,从技术层面来说,即使一些类型的设备能够被很容易的观察到,也不见得值得去测量这些数据。例如,我们查阅到的 PD 法的问题,实际上也面临着解释的问题,目前的 PD 法技术主要在于如何准确的滤波,从而得到比较唯一的针对局部放电的型号。而对于所得到的波形,依然存在一个依靠有经验的人员来进行解释的过程。

1.2 基于 DGA 的变压器故障诊断方法

1.2.1 故障的种类

IEEE 1991 年发布的导则对变压器的故障有一个笼统的分法^[3]。此处的故障划分是十分粗糙的,我们只能借用一些定义,在大体上进行介绍。变压器的故障主要包括:热故障(不发生任何放电行为);电气故障(局部放电,低能放电,高能放电)。

大型充油电力变压器的故障涉及面广而复杂多样^[2],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:按变压器本体可分为内部故障和外部故障,即把油箱内发生的各相绕组间的相间短路、绕组的匝间短路、绕组或引线与箱体接地等称为内部故障,而油箱外部发生的套管闪络、引出线间的相间短路等故障称为外部故障;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;按回路可分为电路故障、磁路故障、油路故障;从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。实际上,变压器的各种故障都可能危及内绝缘的安全,因此,各种外部及内部原因引发或直接造成的变压器内部故障,按性质又可分为热故障和放电故障。由于绝缘故障造成的事故在变压器总事故中占 85% 以上,因此,近几年来,国内外都在研究能反映运行中变压器故障的各种特征量和采集故障特征量信息的各种传感器,研究并开发变