



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电气设备局部放电 超声阵列定位

Ultrasonic Array Location of Partial Discharge
in Electrical Equipment

律方成 谢庆 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电气设备局部放电 超声阵列定位

Ultrasonic Array Location of Partial Discharge
in Electrical Equipment

律方成 谢庆 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电气设备局部放电超声阵列定位是高压电气设备故障检测的重要手段。采用超声阵列传感器接收局部放电所产生的超声信号,对接收到的信号采用阵列处理技术可以实现对局部放电超声信号的去噪、聚焦、局部放电源个数估计、信号波达方向估计以及局部放电源的定位。该方法的检测成功率和定位精度较高,具有很好的发展前景。本书共分为 6 章,主要内容包括单局部放电源的测向与定位、多局部放电源的测向与定位、超声阵列信号的去噪、实验研究、传感器阵列的优化设计等。本书全面介绍局部放电超声阵列定位经典理论的同时,引入了最新的科研成果(如 FastDOA 测向方法、基追踪去噪等),同时介绍了阵列传感器的研制及阵列的稀疏优化设计等内容。

本书可供电力行业或其他行业的动力部门从事电力设备、运行、维护及试验人员阅读,也可作为高等学校电气工程及其自动化等专业本科生和研究生的选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

电气设备局部放电超声阵列定位 / 律方成等编著. —北京:中国电力出版社, 2016.6

ISBN 978-7-5123-8927-4

I. ①电… II. ①律… III. ①电气设备—局部放电—研究 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 030501 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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12 印张 209 千字

印数 0001—2000 册 定价 72.00 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

前 言

局部放电是造成电气设备绝缘劣化的主要原因。绝缘劣化程度不仅取决于局部放电类型、放电源个数、放电能量大小,而且还与放电位置密切相关,因此十分有必要对其内部的放电源位置进行检测。电气设备局部放电定位可以有效防止因设备停电而造成的巨大损失,具有重大理论意义与工程实用价值。

局部放电超声阵列定位检测方法是将阵列传感器与阵列信号处理技术应用于局部放电超声检测中的一种新方法,其基本原理是利用阵列传感器接收电气设备局部放电超声信号,采用阵列信号处理技术实现波达方向估计和空间定位,该方法的检测成功率和定位精度较高,具有很好的发展前景。

本书作者从事电气设备局部放电超声检测的研究有二十余年,从事电气设备局部放电超声阵列检测的研究有十余年,全书内容是多年来研究工作的总结与提升。

本书较为全面、系统地介绍了电气设备局部放电超声阵列检测的相关理论和方法,详细介绍了当前领域的研究现状及典型算法,给出了大量的定性分析及定量计算。全书分为6章,第1章概述,回顾了传统局部放电定位的主要方法,在此基础上引出了超声阵列定位方法,并详细介绍了超声阵列定位的原理与算法。第2章侧重于单个局部放电源的定位方法研究。首先介绍了传统窄带阵列信号测向原理及基本算法(如MUSIC算法、FastDOA算法等),并基于圆环阵采用改进FastDOA算法对窄带信号进行测向的仿真研究。然后介绍了宽带信号的聚焦必要性及常用的聚焦方法,最后详细给出了几种超声阵列几何定位方法并进行了仿真分析。第3章将局部放电源的超声阵列定位从单局部放电源延伸到多局部放电源。首先介绍了多种局部放电超声阵列信号个数辨识的方法,然后开展了多局部放电源的测向及定位研究。第4章介绍了局部放电超声阵列信号的去噪方法。首先简述了超声阵列信号去噪方法的研究现状,然后介绍了多种去噪性能定量评价指标。最后具体介绍了基于独立分量分析和基于稀疏分解理论的两种去噪方法,并进行了仿真分析。第5章介绍了电气设备局部放电超声阵列定位实验平台并对定位方法进行了实验研究。首先研制了圆环形超声阵列传感器用于接收局部放电超声信号,然后分别对单局部放电源和多局部放

电源的情况进行了定位实验研究。第6章是局放超声阵列传感器的优化设计。简述了稀疏设计的必要性及可行性,同时提出了局放阵列传感器的声学性能评价方法,研究了稀疏优化设计的方法并开展了相应的实验研究。

本书集中介绍了电气设备局部放电超声阵列定位研究有关成果,汇集了目前该领域内最新的研究成果与最新进展。书中的许多理论及方法仅散见于各类文献,是编著者近年的科研成果,在公开出版的书籍中较少提及。此外,本书紧紧围绕局部放电超声阵列检测所涉及的领域进行了详细的理论分析和仿真与实验研究,文中所述方法都经过实验考证,可直接用于工程实践。

本书主要由律方成教授、谢庆副教授负责撰写,李燕青教授、刘云鹏教授参与了部分工作,具体分工如下:律方成教授主要撰写了第1、6章,谢庆副教授主要撰写了第2、5章,李燕青教授主要撰写了第4章,刘云鹏教授主要撰写了第3章。本书出版得到了国家自然科学基金资助项目(51307060)、河北省自然科学基金项目(E2010001703)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(09MG09、2014MS84)、新能源电力系统国家重点实验室开放基金资助项目(LAPS14011)、国家电网公司科技项目(kj2013-065)的资助,特此致谢。

另外本书从构思到成稿的整个过程得到了中国电力科学研究院教授级高工阎春雨,保定天威集团有限公司教授级高工张喜乐的帮助与指导,在此表示由衷的感谢。感谢华北电力大学高压研究所的各位同仁对课题研究提供的支持与帮助。同时感谢华北电力大学程述一博士,李通、陶珺函、刘丹等研究生在相关研究以及书稿的整理中做出的努力。书中吸纳了课题组的最新研究成果,并参考了诸多专家学者的成果,不能一一列举,在此一并致谢。由于超声阵列定位检测技术发展迅速,加上作者水平有限,书中难免存在不妥与不足之处,敬请各位读者批评指正!

编著者

2016年5月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 电气设备局部放电定位检测的重要意义	1
1.2 电气设备局部放电定位的主要方法	2
1.2.1 电气定位法	2
1.2.2 光定位法	3
1.2.3 X 射线激励定位法	3
1.2.4 红外检测法	3
1.2.5 无线电干扰电压法	4
1.2.6 化学检测法	4
1.2.7 超高频定位法	4
1.2.8 超声波定位法	5
1.3 阵列信号处理技术	7
1.3.1 阵列信号处理技术的兴起与发展	7
1.3.2 阵列信号的数学模型	8
1.3.3 阵列传感器简介	10
1.3.4 阵列信号处理算法	14
第 2 章 单局放源的超声阵列测向与定位方法	16
2.1 窄带阵列信号测向原理及基本算法	16
2.1.1 测向原理	16
2.1.2 延迟—相加法	17
2.1.3 Capon 最小方差法	18
2.1.4 MUSIC 算法	19
2.1.5 求根 MUSIC 算法	20
2.1.6 ESPRIT 算法	21

2.1.7	基于稀疏分解的 DOA 估计算法	22
2.1.8	FastDOA 算法	24
2.1.9	改进 FastDOA 算法	25
2.2	基于圆阵的窄带局放超声阵列信号测向	26
2.2.1	相位模式激励算法的原理	26
2.2.2	基于改进 FastDOA 的圆阵局放超声信号测向仿真研究	27
2.3	宽带局放超声阵列信号聚焦	30
2.3.1	聚焦的必要性分析	30
2.3.2	聚焦处理的原理及算法	30
2.3.3	RSS 算法应用于宽带局放超声阵列信号测向研究	38
2.3.4	CF 算法应用于宽带局放超声阵列信号测向研究	40
2.4	单局放源的超声阵列定位方法	42
2.4.1	基于双平台测向线交叉原理的局放超声几何定位算法	42
2.4.2	基于双平台异面直线公垂线中点原理的局放超声几何定位算法	45
2.4.3	基于多平台全局搜索原理的局放超声几何定位算法	46
2.4.4	基于测向线最小切球球心原理的局放超声几何定位算法	48
2.4.5	仿真研究	49
第 3 章	多局放源的超声阵列测向定位方法	51
3.1	局放源的个数辨识方法	51
3.1.1	必要性分析	51
3.1.2	信号源个数辨识方法	51
3.1.3	仿真研究	57
3.2	多局放源定位方法	59
3.2.1	定位原理	59
3.2.2	仿真研究	60
第 4 章	局部放电超声阵列信号去噪方法	62
4.1	局部放电信号去噪的研究现状	62
4.1.1	单通道局部放电超声信号的去噪方法研究现状	62
4.1.2	局部放电超声阵列信号的去噪方法研究现状	63
4.2	局部放电超声波信号的去噪性能评价	64
4.2.1	基于源信号波形相似性的评价方法	64

4.2.2 基于阵列流型相位差畸变的评价方法	65
4.2.3 基于阵列观测信号信噪比的评价方法	66
4.3 基于独立分量分析的局部放电超声阵列信号去噪方法	67
4.3.1 独立分量分析的基本理论	67
4.3.2 基于快速独立分量分析的去噪仿真研究	69
4.3.3 基于参考独立分量分析的去噪仿真研究	76
4.4 基于稀疏分解理论的局部放电超声阵列信号去噪方法	82
4.4.1 稀疏分解理论基本知识	82
4.4.2 过完备原子库	84
4.4.3 基于基追踪算法的去噪仿真研究	85
4.4.4 基于匹配追踪算法的去噪仿真研究	90
4.5 分析比较	95

第5章 基于圆环形超声阵列的局放定位实验系统及实验研究

5.1 圆环形超声阵列传感器阵元的设计、研制与性能测试	97
5.1.1 圆环形局部放电超声阵列传感器阵元的设计与研制	97
5.1.2 局部放电超声阵列传感器阵元的性能测试	102
5.2 超声阵列传感器装配体的设计与研制	105
5.2.1 超声阵列传感器装配体的原理及优点	106
5.2.2 圆环形超声阵列传感器装配体的设计与研制	106
5.3 圆环形超声阵列传感器	108
5.4 实验系统简介	108
5.4.1 硬件系统	108
5.4.2 软件系统	111
5.5 实验研究	114
5.5.1 单局部放电电源超声阵列定位实验	114
5.5.2 多局部放电电源超声阵列定位实验	124
5.5.3 误差分析	131

第6章 局部放电超声阵列传感器的优化设计

6.1 简介	132
6.1.1 局部放电超声阵列传感器优化设计的目的及意义	132
6.1.2 局部放电超声阵列传感器稀疏设计的可行性分析	133

6.2 局部放电超声阵列传感器声学性能定量评价方法	134
6.2.1 多类型阵列传感器指向性函数的推导	134
6.2.2 三维指向性图的定性分析	137
6.2.3 局部放电超声阵列传感器声学性能的定量评价	139
6.2.4 仿真研究	143
6.2.5 实验验证	146
6.3 基于声学性能定量评价的局部放电超声阵列传感器稀疏设计	154
6.3.1 各种阵列传感器在不同稀疏结构下的指向性函数表达式	154
6.3.2 混沌猴群算法原理简介	155
6.3.3 局部放电超声阵列传感器的稀疏设计方法步骤	157
6.3.4 不同阵列结构相同阵元个数下最优稀疏结构的确定	157
6.3.5 仿真研究	159
6.3.6 实验验证	163
参考文献	169
索引	181

第 1 章

概 述

1.1 电气设备局部放电定位检测的重要意义

目前中国正处于电力建设的高峰期和关键期,围绕国家正在实施的“西电东送、南北互供、全国联网”战略,迫切需要研究和发展相应的特高压输变电关键技术,为创建“统一、坚强、可靠”的智能电网奠定坚实基础^[1]。

电气设备的各类故障(导体故障、绝缘故障以及机械故障等)对电网的可靠经济运行有着重大影响,故障检测在电网中的作用也更加举足轻重。从各类电气设备历年的故障统计来讲,由绝缘材料长期工作在高压、高温、雷电等各类恶劣的环境所造成的绝缘故障在各类故障中的比例占 80%左右,而局部放电是电气设备绝缘劣化的主要原因^[2]。

在电气设备中,绝缘体各区域所承受的电场一般是不均匀的,而且电介质也是不均匀的,有的是由不同材料组成的复合绝缘体,如气体—固体复合绝缘,液体—固体复合绝缘,以及固体—固体复合绝缘等。有的虽然是单一的材料,但在制造或使用过程中会残留一些气泡或其他杂质,于是在绝缘体内部或表面就会出现某些区域的电场强度高于平均电场强度,某些区域的击穿场强低于平均击穿场强,因此在这些区域就会首先发生放电,而其他区域仍然保持绝缘特性,这就形成了局部放电(简称局放)^[3]。通常造成局部放电的是绝缘体内部或表面存在的气泡,因为气泡的介电常数总是小于液体或固体材料的介电常数。在交变电场中,电场强度的分布反比于介电常数,所以,气泡中的电场强度要比周围介质中的要高得多;同时,气体的击穿场强一般都比液体和固体材料的要低得多,因而很容易在气泡中首先发生局部放电。另外,如果绝缘体中存在导电杂质,则在此杂质边缘电场较集中,也会出现局部放电。

对于电气设备而言,由于其绝缘内部或表面发生局部放电而造成的放电电老化是不容忽视的。局部放电^[4~5]引起介质劣化和损伤的机理是多方面的,主要包括三种效应:①带电质点(电子和正、负离子)对介质表面的撞击,切断

分子构造；②由于带电质点撞击介质，在放电点引起介质局部温度上升，使介质加速氧化，导致材料的机械、电气性能下降；③局部放电产生的活性生成物对介质的氧化作用使介质逐渐劣化。目前无论是研究机构、制造厂商，还是电力系统运行部门，都越来越关心局部放电检测技术的发展，并广泛地把局部放电测量作为质量监控的重要指标。

国际电工委员会（IEC）及各个国家对局部放电都制定了相应的测量与评定标准，建立了多种描述其对绝缘损害程度的参数^[6~8]，如视在放电电荷量、放电能量等。同时，众多研究表明，对于结构复杂的电气设备而言，绝缘劣化程度不仅取决于局部放电类型、放电源个数、放电能量大小，而且还与放电位置密切相关，因此十分有必要对其内部的放电源位置进行检测^[9~10]，以便分析判断其内部故障的严重程度。另外，对于制造厂家和现场监护人员而言，需要及时、准确地掌握电气设备的绝缘状况，在放电性故障检修时，也需要快速准确地对局部放电源进行定位，以便缩短检修周期，提高检修效率。电气设备局部放电定位在国内外已研究了40余年，但至今无法实现准确、可靠的故障定位，是电力系统多年来的一个难题。因此，开展电气设备的局部放电故障定位研究，可以有效防止因设备停电而造成的巨大损失，具有重大理论意义与工程实用价值。

1.2 电气设备局部放电定位的主要方法

1.2.1 电气定位法

电气定位法^[11~13]是根据局部放电产生的电脉冲传播到测量端的特性来确定放电源的空间位置。电气法确定的位置为局部放电发生的电气位置。

当电气设备内部某一点发生局部放电时，将会在这一点产生一个陡脉冲向两端传播，一般可以从各个出线套管的末屏接地线、外壳接地引下线以及中性点接地线等少数几个测量端获得局部放电信号。由于大部分电气设备可近似等效成一个电容梯形网络，因此在放电开始的瞬间，设备内部介质的两端就会出现局部放电陡脉冲的电容传递分量，该放电脉冲包含了局部放电定位所需的有效信息，具体表现为信号能量和幅值的衰减，波形的畸变和延时等，通过测量这个分量，并找到两个电容分量与设备内部介质上位置的一一对应关系，以确定局部放电的位置。根据以上电气传播特性原理建立起来的电气定位方法有许多种，传统的电气定位法有起始电压法、多端测量定位法、极性法、行波法、电容分量法等几种。随着对电脉冲在电气设备内部介质中的传输特性研究的深入以及数字滤波技术的发展，又出现了改进的电容分量法（与数字滤波技术相

结合)和端点电流脉冲频谱分析法。

尽管目前对电气定位法的研究较多,但到目前为止,实际中很少采用。其主要原因在于:①对电气设备内部介质的精确建模难度较大,工作烦琐,通用性差;②由于局部放电发生部位不同,传播到测量端的电脉冲规律性不强,其定位准确性不高。而且由于现场强烈的电磁干扰的影响,电气定位法难以有效地在线应用。

1.2.2 光定位法

光定位法^[14~16]是通过检测局部放电产生的光波实现放电信号的检测。该方法测量时,光信号不受电磁干扰,灵敏度高,可以方便地确定局部放电位置。目前众多学者采用光测法在局部放电特征和介质老化机理等方面进行了大量的研究,但该检测方法要求传感器必须侵入设备,而且设备的透光性能不好将会导致信号无法检测,因此在现场环境下很少直接应用光测法。随着光纤技术的发展,将光纤技术和声测法相结合,提出了声—光检测法。该方法通过提取局部放电超声信号传播到光纤上时光纤的形变信号来检测局部放电。**Black Burn**^[17]等人将光纤传感器放置在变压器内部测量放电信号,当变压器内部发生局部放电时,超声波在油中进行传播,这种机械压力波挤压光纤,引起光纤变形,导致光的折射率和光纤长度发生变化,从而光波被调制,通过适当的解调器就可以测量出超声波信号,实现局部放电的定位。

1.2.3 X射线激励定位法

X射线^[18~19]是一种高能辐射线,具有能量大、穿透力强等特点,当射线穿透试品外壳并照射到绝缘介质中的缺陷部位(如气隙等)就会与之发生作用,即X射线照射绝缘介质中的气隙可使间隙中的气体电离,产生间隙放电所必需的初始电子,从而加强了介质中的局部放电。其效果表现为局部放电的重复率、放电脉冲的幅值增加。另外,X射线照射到金属导体表面,尤其是场强集中的尖状金属表面时,可加强金属导体表面电子的逸出,这些电子也可加强介质中的局部放电。调整X射线照射被试品的方位,并检测这种因X射线照射作用产生的局部放电信号,便可进行局部放电的定位。加拿大的J.M.Braun等人用X射线辅助激励研究了固体介质中气隙放电的现象,检测GIS中数百个138kV盆式绝缘子的局部放电,发现了很多通常局部放电检测方法所难以发现的缺陷。

1.2.4 红外检测法

红外检测法通过红外线测量仪器对变压器局部放电产生的电热能量进行转换,来检测局部放电区域的温度变化,从而达到信号检测的目的^[20~21]。该方法的主要优点是红外线仪器操作简便,测量出的结果直观准确。但由于变压

器结构和传热过程的复杂性,目前变压器红外检测针对于一些变压器外部故障(包括导体连接不良、漏磁引起的箱体涡流、冷却装置故障和变压器套管故障等)^[22]。

1.2.5 无线电干扰电压法

无线电干扰电压法(radio interference voltage, RIV)通过无线电干扰电压表检测局部放电信号^[23],主要包括射频检测法。射频检测法^[24]采用射频传感器检测局部放电信号。常用的射频传感器有电容传感器、Rogowski 线圈电流传感器和射频天线传感器等。该方法能够定性检测局部放电是否发生,甚至可以根据电磁信号的强弱对无屏蔽层的长电缆进行局部放电定位,采用 Rogowski 线圈传感器能够定量检测放电强度。该方法测量频带较宽(1~30MHz),抗电磁波干扰能力强,灵敏度较高。

1.2.6 化学检测法

化学检测法^[25]又叫做变压器油气相色谱分析法。局部放电可导致绝缘材料分解产生新的生成物,通过检测生成物的组成和浓度,可以判断局部放电的状态。局部放电产生的生成物主要包括 C_2H_4 , CH_4 , H_2 , CO_2 , C_2H_2 等,放电产生的气体与放电能量是紧密相关的。离线化学检测方法,即实验室油色谱分析可定期进行油中的气体分析,此方法可以根据局部放电所分解的气体成分和浓度判断局部放电的模式,但所获得的信息为长期异常现象产生气体的累加值,对于突发性故障感知能力低。化学方法的在线检测正逐步推广,包括变压器油色谱在线检测、变压器油中氢气浓度在线检测、变压器油中乙炔在线检测等,它们可以反映不同气体的动态特性,具有更好的展现变压器内部变化的潜能,但是这个知识体系是随现场经验的增多而逐渐积累起来的,需要时间、精力、资金和创造力。化学检测是一种定性检测法,不能反映突发性的早期潜伏性故障,如围屏放电、主绝缘放电这类对变压器绝缘造成极大危害的流注型放电。

1.2.7 超高频定位法

超高频定位法^[26~28]是通过检测电气设备局部放电的超高频电磁波信号来获得局部放电信息,并利用时延关系实现定位的。

超高频定位法在进行局部放电检测时,现场干扰信号的频谱范围一般小于 300MHz,且在空气中传播,衰减很大。若检测局部放电产生的数百兆赫兹以上的电磁波信号,则可有效避开电晕等干扰,提高信噪比。

英国 Strathclyde 大学的 L.Yang 和 M.D.Judd 在 2003 年提出了基于“最短光程原理”、采用 UHF 法对电气设备局放进行定位的思想^[29]。L.Yang 和 M.D.Judd

在屏蔽实验室内通过圆柱体、长方体等多种简单几何形体的金属障碍物验证了“最短光程原理”的正确性，其试验误差仅为数厘米。同时，Judd 还用时域有限差分（FDTD）方法仿真研究了存在导电圆柱情况下电磁波绕射传播过程，从理论角度深入探索了根据“最短光程原理”进行局部放电定位的可行性。

中国西安交通大学王国利、李彦明^[30~32]等在变压器的局部放电 UHF 检测方面做了许多研究。他们基于混频技术建立了频带可调的窄带检测系统，通过神经网络方法实现了局部放电类型的自动识别；华北电力大学李成榕等人则采用检波技术对原始 UHF 信号进行调理^[33]，并研制了基于检波技术的电力变压器在线监测装置。该装置已经于 2003 年 10 月底通过变压器事故放油阀在河南某 220kV 主变压器上进行了在线安装和运行，并成功地检测到局部放电信号。之后又发明了 UHF 人孔、手孔等传感器安装方式^[34~35]，在将该技术实用化方面做出了一些成绩；清华大学则试图通过在变压器内部引出线的附近安置 UHF 天线的方法来测量变压器的内部放电，在实验室内和现场都进行了探索。近年来，国内外还出现了通过射频和超声波进行联合来检测局部放电的方法。罗勇芬等^[36]提出了基于超高频和超声波相控接收原理的局部放电定位法，该定位法能有效地对油中局部放电进行几何位置的定位，而且对于多个空间位置不同的局部放电源，其产生的最大信号所处的对应于空间角度的波束阵列位置不同，相对于采样起始点的时间基准和时间间隔也不同，因而也可解决多局放点的定位问题。联合检测有利于发挥两种方法的优势来保证局部放电检测的可靠性，而且可替代电气脉冲—超声波法进行定位^[24]。如澳大利亚的西门子研究机构研制了射频和超声波复合探头，并通过变压器油箱上的油孔或观察窗以内部安装的方式进行放电检测^[37]。

综上，利用 UHF 检测方法进行电气设备局部放电定位的研究发展迅猛，但还不完善，仍然存在一些问题：①由于局部放电发生在电气设备内部，绝缘结构极其复杂，电磁波传播时会发生多次折、反射及衰减，又由于电磁波的传播速度极快，仅稍低于真空中的光速，获得直达波并对时延精确测量十分困难；②电气设备外壁也会对电磁波的传播带来不利影响，这就增加了超高频电磁波检测的难度，使得超高频传感器必须放置在电气设备内部才能有效接收局放电磁波信号，增加了实际运行时局放检测的难度。

1.2.8 超声波定位法

传统超声波定位法^[38~40]是根据局部放电产生的超声波传播的方向和时间来确定放电源的空间位置。当电气设备内部发生局部放电时，会伴随有超声波发射，超声波在不同介质（油纸、隔板、绕组、油等）中向外传播，到达固定

在箱壁上的超声波传感器，传感器将超声波信号转换成电信号，再经放大即可测量。

传统超声波定位法包括“电一声”法和“声一声”法两大类^[41~43]，“电一声”法是指利用放电脉冲信号作为基准，获取超声波的传播时间，再根据超声波的传播速度计算出放电源与传感器的距离。“声一声”法根据多个超声传感器距离放电源的距离，经过各种计算方法，即可确定局部放电源的具体几何位置。超声波定位方法是20世纪80年代开始发展，90年代趋于成熟的一种局部放电定位方法，目前这种方法已得到比较广泛的应用。国内外超声定位法包括三角定位法（球面方程法）、V形曲线法、顺序定位法、双曲面定位法和模式识别法等，其中以三角定位法（球面方程法）和双曲面法研究最多。三角定位法（球面方程法）是以局部放电产生的电信号作为触发基准，通过3个（及以上）传感器测量超声波信号与电信号的时间差，并以此作为超声信号传播时间，由此建立球面方程求解局部放电点。但是，现场试验难以有效获取局部放电的电信号，此时即可采用双曲面法来进行定位。双曲面定位法是在设备外壳上放置4个（及以上）超声传感器，以最先接收到的超声脉冲为时间基准，测量其他超声信号的时延，并由此建立双曲面方程组求解局部放电点。另外，文献[41]还给出了几种基于最小二乘原理的改进方法，在一定程度上可以提高定位精度。

超声波法检测^[44~48]电气设备局部放电具有的特点为：①原理简单，直接利用各超声信号的时延进行定位，计算简单，便于掌握；②抗电磁干扰能力强，超声波传感器及检测系统通过声音媒质进行检测，与设备本体之间没有直接的电磁关系；③检测装置成本低，电气设备局放超声信号频率为50~400kHz，相比较特高频电磁波信号数吉赫兹而言，信号频率很低，所需检测装置的采样频率要求容易满足，而且，超声波传感器技术发展成熟，价格低廉；④能直接实现空间定位，超声波定位法直接获得局放源的空间几何坐标，可以更加客观的指导现场检修；⑤易于实现在线检测。因此，超声波定位法受到了现场电力运行管理部门的普遍欢迎，众多科研院所均配备了局部放电超声检测装置。

尽管人们对超声波定位方法作了大量研究，发展了多种定位方法，并对其进行了许多改进，但仍然难以进行准确和有效的定位。主要原因有以下两点：第一，单个超声波传感器的灵敏度较低。由于多层介质阻挡，导致超声波信号衰减严重，难以有效地检测电气设备的局放超声信号，造成定位不准。第二，基于“时延估计”的定位算法性能不高。由于电气设备结构复杂、现场环境的背景噪声干扰、超声波的多径传输以及折、反射等问题，会导致时延的误差较大，造成定位不准。因此，还需要从传感器和定位算法等方面加以改进。

1.3 阵列信号处理技术

1.3.1 阵列信号处理技术的兴起与发展

经过上一节的分析可以看出,超声波检测电气设备局部放电具有很多优点,但其也存在诸如“单个传感器灵敏度不高”和“常规定位算法性能不好”等问题,文献[24, 33, 49]提出了一种基于特高频和超声波相控接收阵的局放阵列定位方法。该方法通过采集局部放电产生的 UHF 和超声波信号,运用阵列信号处理技术进行局放源的定位。仿真与实验研究表明,该方法可以对油中局放进行较准确的定位。虽然文献中未考虑信号的传播衰减和噪声影响等对局放定位的误差影响,但其开创了将阵列信号处理技术应用于电气设备局放检测定位领域的先河。

阵列信号处理的理论研究自 20 世纪 60 年代开始,至今已有五十多年的历史,主要经历了三个阶段:60 年代主要集中在自适应波束控制上,诸如自适应相控阵天线、自适应波束操纵天线等;70 年代主要集中在自适应零点控制上,诸如自适应滤波、自适应置零技术、自适应副瓣对消等;80 年代主要集中在空间谱估计上,诸如特征空间正交谱估计、最大似然谱估计等。从阵列信号处理的发展来看,自 80 年代以来,宽带阵列信号处理成为阵列信号处理的发展方向,其应用涉及雷达、通信、声纳、地震、勘探、射电天文以及生物医学工程等众多军事及国民经济领域^[50]。

对所有检测系统和空间传输系统,空域信号的分析 and 处理是其基本任务。对于超声阵列传感器,是将一组阵元按一定方式布置在空间不同位置上,形成阵列。用超声阵列传感器接收空间信号,相当于对空间分布的场信号采样,得到信号源的空间离散观测数据。阵列信号处理的目的是通过对阵列接收的信号进行处理,增强所需要的有用信号,抑制无用的干扰和噪声,提取有用的信号特征以及信号所包含的信息。与传统的单个传感器相比,阵列具有灵活的波束控制、高的信号增益、极强的干扰抑制能力以及高的空间分辨能力等优点,这也是阵列信号处理理论近几十年来得以蓬勃发展的根本原因^[51~53]。

阵列信号处理与一般的信号处理方式不同,它主要是利用信号的空域特性来增强信号及有效提取信号的空域信息。因此,阵列信号处理也常称为空域信号处理。其主要研究方向包括波达方向估计、信源个数估计以及宽带阵列信号聚焦等,其目的是研究空间阵列所构成的处理系统对特定空间信号的多种参数进行准确估计。实际上,利用具有某种空间分布的阵列同时接收某物体所发出的信号,继而提取出信号的特征参数,在自然界及生物界早有广泛的应用。譬

如人的两只耳朵就是一个高性能的二元阵，根据耳朵对声源感觉上的差异（时间、频率），人的大脑（相当于信号处理器）就可以正确判断出声源的方位。当然，在实际应用环境，二元阵的检测和估计精度是远远不够的，还需要空间某种几何形状组合成多元阵列，再配以合适的信号处理算法，组成完整的阵列信号处理系统，从而实现对空间信号的个数、位置等多个参数进行准确估计。这就是阵列信号处理所要研究的主要内容。

1.3.2 阵列信号的数学模型

1. 窄带信号模型

所谓窄带信号，就是信号的带宽远小于信号的中心频率^[54]。窄带信号与宽带信号是相对而言的，一般来讲，满足相对带宽条件的称为窄带信号，而不满足时称为宽带信号。

相对带宽条件

$$\frac{f_0}{B} > 10 \quad (1-1)$$

式中： f_0 为信号的中心频率； B 为信号的有效带宽。

考虑 N 个远场的窄带信号入射到空间某阵列上，其中阵列由 M 个阵元组成，这里假设阵元数等于通道数，即各阵元接收到信号后经各自的传输信道送到处理器。

在信号源是窄带的假设下，信号可由式（1-2）的复包络形式表示

$$\begin{cases} s_i(t) = u_i(t)e^{j[\omega_0 t + \varphi(t)]} \\ s_i(t - \tau) = u_i(t - \tau)e^{j[\omega_0 (t - \tau) + \varphi(t - \tau)]} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中： $u_i(t)$ 为接收信号的幅度； $\varphi(t)$ 为接收信号的相位； ω_0 为接收信号的频率； τ 为时延； i 为第 i 个阵元。

在窄带远场信号源的假设下，有

$$\begin{cases} u_i(t - \tau) \approx u_i(t) \\ \varphi(t - \tau) \approx \varphi(t) \end{cases} \quad (1-3)$$

根据式（1-2）和式（1-3），显然有下式成立

$$s_i(t - \tau) \approx s_i(t)e^{-j\omega_0 \tau} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1-4)$$

则可以得到第 l 个阵元接收信号为

$$x_l(t) = \sum_{i=1}^N g_{li}s_i(t - \tau_{li}) + n_l(t) \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (1-5)$$

式中： g_{li} 为第 l 个阵元对第 i 个信号的增益； $n_l(t)$ 为第 l 个阵元在 t 时刻的噪