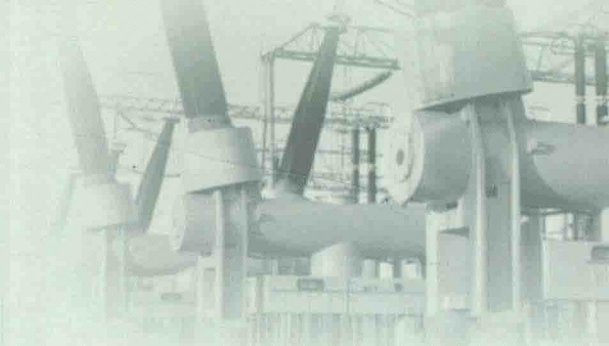
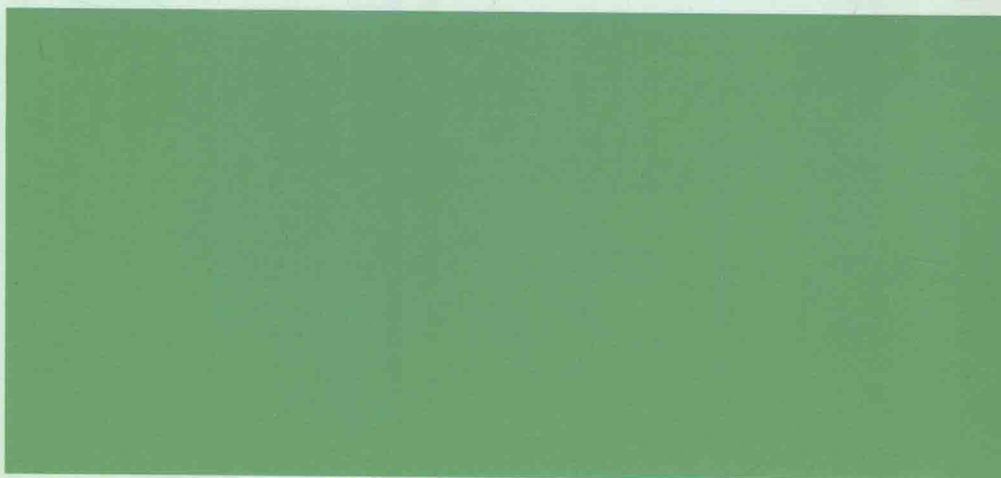




# 光谱分析技术 在GIS绝缘故障诊断中的应用

王先培 黄云光 著



科学出版社

# 光谱分析技术在 GIS 绝缘故障诊断中的应用

王先培 黄云光 著

科学出版社

北 京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

### 内 容 简 介

本书首先介绍基于分解物分析的 GIS 绝缘故障检测方法和存在的关键技术问题,然后通过模拟实验验证局部放电和高温环境下  $\text{SF}_6$  分解物生成特性,论述  $\text{SF}_6$  分解产物的光谱信号预处理技术、光谱分析与多元校正算法、GIS 绝缘故障诊断算法、持续放电情况下 GIS 故障趋势估计,最后以现场应用实例论述光谱分析技术在 GIS 绝缘故障诊断中的应用。本书系统性强,内容新颖,反映了光谱技术在 GIS 电气设备故障诊断中应用的最新进展。

本书可供电气工程、仪器仪表工程、信息技术与工程等领域的技术人员参考使用,也可以作为相关专业的研究生教材、参考书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

光谱分析技术在 GIS 绝缘故障诊断中的应用/王先培,黄云光著. —北京:科学出版社,2017.6

ISBN 978-7-03-053924-3

I. ①光… II. ①王… ②黄… III. ①光谱分析-应用-地理信息系统-故障诊断 IV. ①P208.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 145404 号

责任编辑:王雨舸 黄彩霞 / 责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16

2017 年 6 月第 一 版 印张:12

2017 年 6 月第一次印刷 字数:282 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)指电力系统中应用六氟化硫( $\text{SF}_6$ )气体为绝缘介质的金属封闭式电气设备。随着 GIS 设备使用程度的日益广泛,其在电力系统中的重要地位已不言而喻。GIS 一旦发生故障,小则影响供电的质量以及稳定性,重则诱发大规模区域性停电,对社会稳定造成非常不利的影响。因此必须对 GIS 的健康状况予以高度重视,并开展 GIS 设备内部故障的预警监测、有效诊断等关键技术的研究。2012 年 11 月,武汉大学电子信息学院与中国南方电网有限责任公司广西电网公司电力科学研究院联合成立“GIS 电气设备故障诊断联合实验室”,旨在联合双方的技术力量对 GIS 电气设备的故障诊断关键问题展开研究。

由于 GIS 设备自身结构的封闭性,内部故障难以被及时发现。局部放电(partial discharge, PD)是公认的 GIS 发生电气故障的特征现象。目前的 PD 检测方法主要包括脉冲电流法、声测法、光测法、超高频法和化学分析法等。过热性故障作为 GIS 内母线、触头部位常见的故障种类,早期多表现为低温或中温的局部过热。现有的监测方法除接触电阻测量法外,大多基于测温技术,如红外测温法、光纤光栅测温法等。化学分析法是通过研究 GIS 内部各气体的组分来表征 GIS 的健康状态的,该方法的重点不是 GIS 放电瞬间的物理变化,而是 PD 后的  $\text{SF}_6$  及其分解物的累积状态。IEC 60480 标准所推荐的分解物检测方法主要有检测管、电子传感器、气相色谱、光谱分析等。其中,前两种主要用于现场分析,后两种是实验室分析方法。以 FTIR 为代表的光谱技术开始逐步应用于  $\text{SF}_6$  分解物的定性/定量检测,并受到国内外学者的关注。为此,联合实验室就光谱技术在 GIS 电气设备故障诊断中的应用课题进行了深入的研究,取得了许多重要的研究成果。本书便是联合实验室在该课题领域研究的阶段性成果之一。

全书共 7 章。第 1 章简单介绍 GIS 的基础知识,包括 GIS 的绝缘故障及检测方法,基于分解物分析的 GIS 绝缘故障检测方法和存在的关键技术问题。第 2 章通过模拟实验验证局部放电和高温环境下  $\text{SF}_6$  分解生成特性,包括局部放电条件下  $\text{SF}_6$  的分解机理,不同 PD 类型、不同电压等级、不同气压等级下的  $\text{SF}_6$  分解物生成特性,以及不同温度等级下局部过热时的  $\text{SF}_6$  的分解机理。第 3 章论述  $\text{SF}_6$  分解产物的光谱信号预处理技术,包括  $\text{SF}_6$  光谱信号的去噪、连续谱的去除算法、重叠峰分离算法等。第 4 章论述光谱分析与多元校正算法,包括主成分分析法、因子分析法、多元线性校正算法等。第 5 章针对 GIS 绝缘故障展开研究,包括特征参量的提取、基于径向基神经网络的故障诊断算法、决策树算法和支持向量机算法等。第 6 章研究持续放电情况下 GIS 故障趋势,引入隐 Markov 模型的思想,采用连续隐 Markov 模型对持续性放电故障分解物生成特性的趋势建模。第 7 章则以一个现场应用实例论述光谱分析技术在 GIS 绝缘故障诊断中的应用;光谱仪采用紫外微型光谱仪,分解物则选择  $\text{SO}_2$ ,用于 GIS 故障现场在线预警;重点研究不同组分紫外

光谱定性检测、不同浓度  $\text{SO}_2$  紫外光谱检测、基于奇异谱分析的现场光谱数据处理、 $\text{SO}_2$  识别及定量建模以及实际故障检测实验等。

本书参考了国内外许多学者的论著,吸收了同行们的辛勤劳动成果,从中得到了很多的教益和启发,在此谨向各位同行和专家表示衷心的感谢!同时,本书是多人研究成果的累积。他们有当时在读的武汉大学博士研究生陶维亮、蔡涛、彭玺、杜双育、赵宇、张其林、田猛、代荡荡等以及硕士研究生张爱菊、李晨、肖伟和胡明宇等,也有广西电网公司电力科学研究院的朱立平高级工程师、刘陈瑶工程师等。全书由王先培和黄云光统稿,研究生代荡荡、肖伟和代婷荣在本书的编写过程中做了大量的工作。由于 GIS 绝缘故障诊断问题所涉及内容的广泛性以及作者学术水平和能力的局限性,书中可能出现一些纰漏,恳请同行专家和读者给予批评指正。

感谢中国南方电网有限责任公司广西电网公司电力科学研究院领导对联合实验室的大力支持,感谢湖北省光谱与成像仪器工程技术研究中心、GIS 电气设备故障诊断联合实验室全体成员的支持。特别感谢谢伟山、汪丽川、王凯、陈立、尹立群和张洁明等多位专家对联合实验室及作者的持久关爱。感谢南方电网公司多项科技项目的支持,感谢湖北省科技支撑计划的支持,感谢中国高校“双一流”建设项目的支持。

作 者

2016 年 12 月

# 目 录

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 概论 .....                                     | 1  |
| 1.1 气体绝缘组合电器概述 .....                               | 1  |
| 1.2 GIS 内部绝缘故障 .....                               | 2  |
| 1.3 GIS 绝缘故障检测方法 .....                             | 4  |
| 1.3.1 局部放电故障检测 .....                               | 4  |
| 1.3.2 局部过热故障检测 .....                               | 7  |
| 1.3.3 基于 SF <sub>6</sub> 分解物分析的 GIS 绝缘故障检测 .....   | 8  |
| 1.4 基于 SF <sub>6</sub> 分解物诊断技术存在的问题 .....          | 9  |
| 第 2 章 SF <sub>6</sub> 分解模拟实验及分解生成特性分析 .....        | 11 |
| 2.1 SF <sub>6</sub> 局部放电分解物生成特性 .....              | 11 |
| 2.2 SF <sub>6</sub> 高温分解产物生成特性 .....               | 14 |
| 2.3 局部放电条件下 SF <sub>6</sub> 分解模拟实验 .....           | 16 |
| 2.3.1 模拟放电实验平台 .....                               | 16 |
| 2.3.2 缺陷模型 .....                                   | 19 |
| 2.3.3 实验设计 .....                                   | 21 |
| 2.4 局部放电分解物生成特性分析 .....                            | 22 |
| 2.4.1 SF <sub>6</sub> 局部放电分解机理 .....               | 22 |
| 2.4.2 不同 PD 类型下分解物生成特性 .....                       | 25 |
| 2.4.3 不同电压等级下的分解物生成特性 .....                        | 32 |
| 2.4.4 不同气压等级下的分解物生成特性 .....                        | 38 |
| 2.5 局部过热条件下的 SF <sub>6</sub> 分解模拟实验 .....          | 42 |
| 2.5.1 模拟过热实验平台 .....                               | 42 |
| 2.5.2 实验设计 .....                                   | 44 |
| 2.6 局部过热分解物生成特性分析 .....                            | 45 |
| 2.6.1 分解产物生成特性 .....                               | 45 |
| 2.6.2 不同温度等级下分解物生成特性 .....                         | 46 |
| 第 3 章 SF <sub>6</sub> 分解产物的光谱信号预处理技术 .....         | 50 |
| 3.1 光谱信号去噪 .....                                   | 50 |
| 3.1.1 基于小波阈值的光谱去噪算法研究 .....                        | 50 |
| 3.1.2 基于小波模极大值的 SF <sub>6</sub> 混合气体光谱去噪算法研究 ..... | 53 |

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 3.1.3 | 算法实例分析                               | 61  |
| 3.2   | SF <sub>6</sub> 混合气体光谱的连续谱去除算法       | 63  |
| 3.2.1 | 连续谱去除算法研究概况                          | 63  |
| 3.2.2 | 迭代小波连续谱去除算法                          | 65  |
| 3.2.3 | SF <sub>6</sub> 混合气体光谱的模极大值拟合连续谱去除算法 | 69  |
| 3.2.4 | SF <sub>6</sub> 混合气体光谱的最佳小波基连续谱去除算法  | 71  |
| 3.3   | SF <sub>6</sub> 混合气体光谱的重叠峰分离算法       | 74  |
| 3.3.1 | 重叠峰分离算法研究概况                          | 74  |
| 3.3.2 | SF <sub>6</sub> 混合气体光谱的重叠峰分离的分形算法    | 77  |
| 3.3.3 | 结果与讨论                                | 83  |
| 第4章   | 光谱分析与多元校正算法                          | 87  |
| 4.1   | 主成分分析法                               | 87  |
| 4.1.1 | 数学模型                                 | 87  |
| 4.1.2 | 主成分分析计算过程                            | 88  |
| 4.2   | 因子分析法                                | 89  |
| 4.2.1 | 数学模型                                 | 89  |
| 4.2.2 | 因子分析计算过程                             | 90  |
| 4.3   | 多元线性校正算法                             | 91  |
| 4.3.1 | 多元校正的研究概况                            | 91  |
| 4.3.2 | 多元校正原理及实现                            | 92  |
| 4.3.3 | SF <sub>6</sub> 混合气体光谱多元校正算法实现       | 94  |
| 4.3.4 | 结果与讨论                                | 98  |
| 第5章   | 局部放电故障诊断方法                           | 102 |
| 5.1   | 特征参量提取                               | 102 |
| 5.1.1 | 谱图数据解读                               | 102 |
| 5.1.2 | 谱图的定量分析                              | 103 |
| 5.2   | 基于径向基神经网络的诊断模型实验                     | 107 |
| 5.3   | 决策树算法                                | 109 |
| 5.3.1 | 决策树算法适用的问题                           | 109 |
| 5.3.2 | 决策树的生成                               | 110 |
| 5.3.3 | 决策树测试属性的选择                           | 110 |
| 5.3.4 | 决策树修剪                                | 111 |
| 5.3.5 | 基于决策树的诊断模型实验结果                       | 113 |
| 5.4   | SVM 算法                               | 115 |
| 5.4.1 | 支持向量机原理                              | 115 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 5.4.2 基于 SVM 的 GIS 绝缘故障类型辨识 .....         | 120 |
| 第 6 章 持续放电下故障趋势估计模型 .....                 | 124 |
| 6.1 隐 Markov 模型用于分解物分析技术 .....            | 124 |
| 6.1.1 可行性分析 .....                         | 124 |
| 6.1.2 HMM 基本思想与数学模型 .....                 | 125 |
| 6.1.3 HMM 基本算法描述 .....                    | 127 |
| 6.1.4 HMM 类型划分 .....                      | 131 |
| 6.2 连续 HMM .....                          | 132 |
| 6.2.1 模型描述 .....                          | 132 |
| 6.2.2 算法修改 .....                          | 133 |
| 6.2.3 多观测样本训练 .....                       | 134 |
| 6.3 持续性放电故障下分解物生成特性的趋势建模 .....            | 135 |
| 6.3.1 持续性放电条件下 $\text{SF}_6$ 分解模拟实验 ..... | 135 |
| 6.3.2 基于 CHMM 的分解物生成特性趋势建模 .....          | 139 |
| 第 7 章 基于紫外光谱技术的故障现场预警 .....               | 142 |
| 7.1 现有分解物检测方法比较 .....                     | 142 |
| 7.2 基于紫外吸收光谱的故障统一预警技术 .....               | 144 |
| 7.2.1 GIS 故障的现场预警 .....                   | 144 |
| 7.2.2 预警特征分解物选择 .....                     | 145 |
| 7.2.3 紫外吸收光谱技术原理 .....                    | 146 |
| 7.3 主要分解物的紫外光谱特性研究 .....                  | 148 |
| 7.3.1 不同组分紫外定性光谱检测实验 .....                | 148 |
| 7.3.2 不同浓度 $\text{SO}_2$ 紫外光谱检测实验 .....   | 152 |
| 7.4 基于奇异谱分析的现场光谱数据处理 .....                | 154 |
| 7.4.1 奇异值分解 .....                         | 155 |
| 7.4.2 奇异谱分析 .....                         | 156 |
| 7.4.3 自适应光谱数据处理方法 .....                   | 159 |
| 7.5 谱图处理算法性能验证实验 .....                    | 162 |
| 7.5.1 去噪性能仿真实验 .....                      | 162 |
| 7.5.2 $\text{SO}_2$ 识别及定量建模实验 .....       | 167 |
| 7.6 GIS 绝缘故障的紫外预警实验 .....                 | 169 |
| 7.6.1 模拟故障检测实验 .....                      | 169 |
| 7.6.2 实际故障检测实验 .....                      | 172 |
| 参考文献 .....                                | 175 |



# 第 1 章 概 论

## 1.1 气体绝缘组合电器概述

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)指电力系统中应用六氟化硫( $\text{SF}_6$ )气体为绝缘介质的金属封闭式电气设备<sup>[1]</sup>。断路器、隔离开关、母线、接地开关、互感器、连接件等设备被封装于接地金属腔体中,腔内充有气态  $\text{SF}_6$  用于绝缘和灭弧介质,以达到导体对外壳间、相间、断口间有效绝缘的目的,因此 GIS 也被称为全封闭式  $\text{SF}_6$  绝缘组合电器。

气态  $\text{SF}_6$  的介电强度较高,因而其灭弧性能、冷却特性优异。20 世纪 50 年代开始用于断路器的绝缘和灭弧介质。20 世纪 60 年代, GIS 设备开始在美国、日本等国家出现并迅速普及<sup>[2]</sup>。较之传统敞开式高压输变电设备, GIS 凭借其占地面积小、绝缘强度高、无火灾危险、安全性能好、维护周期长等特点,经半个多世纪的不断研发和完善,正逐渐成为现代变电站设备的代表<sup>[1]</sup>。此外,随着现代化城市规模不断扩大,用地越来越紧张,建筑群呈现高密度集中化的趋势,建设传统的变电站越来越困难,而 GIS 因其可有效减少用地,较好地适应了电力建设规模高速发展的需求,更是受到使用者的青睐。例如,500 kV 变电站若采用 GIS 设备,占地面积只有传统敞开式变电站的 5%<sup>[1]</sup>。因此,随着电力系统对设备高可靠性和紧凑性的日益重视, GIS 设备取代敞开式设备逐渐成为工程应用的主要方向<sup>[3]</sup>。

随着我国国民经济的发展,电力工业已成为基础性产业,其超常规跨越式发展也使得电力设备规模持续增加<sup>[4]</sup>。在新增电力设备中,  $\text{SF}_6$  电气设备的比重越来越大。据统计,截至 2011 年底,仅广东电网公司投运的  $\text{SF}_6$  GIS 间隔就已超过 5500 个,自 2008 年以来基本保持年均 20% 左右的增长,除 GIS 以外的其他  $\text{SF}_6$  电气设备也呈现迅猛增长的态势<sup>[5]</sup>。

由于 GIS 设备自身结构的全封闭性,也使得其内部早期故障难以被及时发现、检修,进而诱发更严重的绝缘事故。过去普遍认为, GIS 设备属于低维护(甚至免维护)、高可靠性、高安全性的电气设备。但近 60 年的运行经验表明, GIS 内的故障缺陷仍无法完全杜绝,且会随投运时间的增加而逐渐恶化,最终影响其可靠性<sup>[6]</sup>。根据国际大电网委员会(CIGRE)1998 年的统计,1967 ~ 1992 年投运的 GIS 设备故障率超过 0.1 次/(百间隔·年),且随着电压等级的升高,故障率明显增大<sup>[7]</sup>。其中,145 kV 电压级别 GIS 的故障率约 0.26 次/(百间隔·年);245 kV 电压级别的 GIS 设备故障率约 0.67 次/(百间隔·年);420 kV 以上电压等级的故障率约 3.9 次/(百间隔·年),故障率均远高于国际电工委员会(IEC)所推荐水平。

在我国,2005 ~ 2008 年间, GIS 在 110 kV 及以上电压级别的电力设备中所占的比例已由 9.7% 提升为 17.2%。至 2008 年底,国网公司的 72.5 ~ 800 kV GIS 设备装用量已达

13 984 个间隔<sup>[8]</sup>。但与此同时设备内部缺陷、故障日益频繁化的问题也随之而来。仅 2011 年一年间,国家电网公司累计发现 GIS 相关的缺陷 2026(间隔·次),占总间隔数35 340 的 5.73%;南方电网公司组合电器事故率也达到 0.2 次/(100 间隔·年),重大缺陷率甚至达到 1.58 次/(100 间隔·年)<sup>[5]</sup>。

随着 GIS 设备使用程度的日益广泛,其在电力系统中的重要地位已不言而喻。GIS 一旦发生故障,不但威胁电网安全,还会影响供电的质量以及稳定性,轻则造成经济损失,重则可能诱发大规模区域停电,甚至会对社会稳定造成非常不利的影响。因此必须对 GIS 的运行状况予以高度重视,并逐步开展 GIS 设备内部故障的预警监测、有效诊断等关键技术的研究<sup>[9]</sup>。

### 1.2 GIS 内部绝缘故障

GIS 设备在生产、加工、装配、日常维护过程中,其内部会不可避免地遗留一些潜伏性缺陷。这些缺陷最初可能是无害的,在常规试验中也较难被发现,但会随着运行时间的累积而不断恶化,造成设备绝缘性能逐渐下降,直至最终诱发电气故障<sup>[10]</sup>。可见,GIS 绝缘故障一般都是由各类绝缘缺陷逐渐累积、发展而来,从带缺陷运行到最终的绝缘击穿会有一个较长的发展过程,这就为故障的提前发现、及时处理提供了条件。

GIS 内部可能出现的故障种类很多,从诱发原因角度分析,常见的类型有绝缘类故障、机械类故障和其他因素(如设计不当、误操作、外力破坏)等<sup>[8,11]</sup>。

根据国际大电网委员会 1998 年的统计,各类绝缘缺陷所占的具体比例如图 1.1 所示<sup>[9]</sup>。由图可知,GIS 的故障诱因很大程度上都可归结为绝缘问题。实际中,绝缘类故障的具体表现多为设备内部的异常放电和过热等<sup>[12-14]</sup>,虽然两者的产生机理、表现形式有所不同,但都会加速设备的绝缘劣化过程,实际中若未能及时发现都将诱发严重的电气事故。

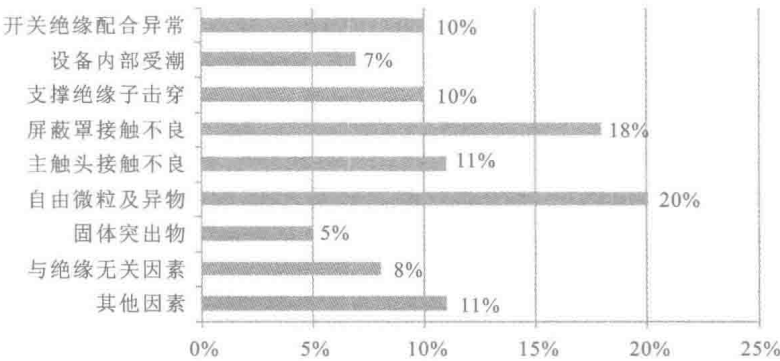


图 1.1 不同缺陷对应 GIS 设备内部故障的统计比例

放电性故障是 GIS 最常见的故障形式,多由 GIS 内部的各种绝缘缺陷造成,如制造中残留的金属微粒和粉末,安装过程中的刮痕,日常维护时侵入设备内的杂物、水分等<sup>[15]</sup>。

这些都会造成其周围的电场的畸变,使得某些部位电场被显著增强,以致超过绝缘介质的击穿场强,从而导致放电性故障的发生。若任其长期发展,就可能会导致严重的绝缘故障。国外学者在对  $\text{SF}_6$  气体放电机理展开研究的基础上,依据放电消耗的能量由强到弱,将其分为电弧放电、火花放电和电晕放电(局部放电)三类<sup>[16]</sup>。

目前对 GIS 放电故障的研究大都是针对局部放电(partial discharge,PD)的监测、诊断而开展的。作为一种导体间的绝缘介质仅被部分桥接的电气放电,PD 大都是由电气设备内部电场异常增强(畸变)所导致的局部绝缘击穿<sup>[17]</sup>。多年的运行经验已经证明, $\text{SF}_6$  电气设备在完全击穿或闪络前通常会出现 PD,它既是多种绝缘故障的诱因,又是早期绝缘缺陷的有效表征<sup>[18]</sup>。通过对 PD 的有效检测,可以一定程度上推断出 GIS 的故障类型、程度乃至绝缘状况,预防严重事故发生,并为检修提供参考依据<sup>[19]</sup>,因此 PD 监测对确保 GIS 可靠运行极具实际意义。

过热性故障常见于气体绝缘组合电器(GIS)、气体绝缘断路器(GCB)等  $\text{SF}_6$  电气设备内部数量众多的刀闸触头处<sup>[20]</sup>,早期大都表现为局部过热。可能造成过热的诱因主要包括短路/过载、接触不良、散热不良、磁饱和<sup>[21-22]</sup>。其中,触头间接触不良是诱发过热故障的主要原因之一<sup>[23-25]</sup>,由图 1.1 可知其发生概率在各类绝缘缺陷中也占有相当大的比例。通常正常运行的  $\text{SF}_6$  电气设备内部也会产生一定热量,如导体在通电过程中的焦耳热,铁芯发生磁滞损耗、绝缘部件因泄漏电流而发热等。但当 GIS 内的触头存在镀银不均、脱落或者形成氧化层等问题时<sup>[26]</sup>,会导致其有效接触面积减小(接触不良)、回路接触电阻增大,并最终诱发局部温度异常升高。若温升超过设备允许极限且长期持续,GIS 内的固体绝缘材料就会因高温而逐渐劣化,这会大大加速 GIS 绝缘性能的恶化过程,并可能导致更严重的绝缘故障<sup>[27]</sup>。研究表明,过热点温度大于  $700^\circ\text{C}$  时,可能造成 GIS 设备内的动、静触头或导电杆连接处梅花触头的包箍发生蠕变断裂<sup>[14]</sup>。事实上,接头局部过热失效已成为母线接触退化的最直接原因<sup>[21]</sup>。

图 1.2 为 2008 年 3 月 21 日北京电网 220 kV 草桥变电站停电事故设备的内部拆解照片,经事后排査,确定故障的直接原因为:GIS 气室内滑动触头与导体接触不良,造成局部严重过热灼烧并引发电弧,最终造成绝缘破坏<sup>[27]</sup>。因此,对 GIS 局部过热故障的机理进行理论和试验研究,深入了解其失效过程、温升变化规律,研究切实有效的故障检测方法,也具有十分重要的理论及工程价值。

在实际应用中,由于 GIS 设备内绝缘故障种类繁多、诱因复杂,目前关于缺陷的物理模型、故障的发生机理、劣化过程、监测手段乃至诊断方法等都有待进一步完善。根据作者的实地调研,发现目前在 GIS 等  $\text{SF}_6$  电气设备的绝缘故障诊断中还存在以下常见问题:

(1) 故障早期检测、预警技术仍有待改进。早期绝缘故障多表现为间歇性发生的特点,但目前设备维护工作中定期检修方式仍占有很大比例,因而可能无法有效发现故障。此外,故障在线监测及定位技术在实用化中也存在诸多问题。

(2) 诊断结论常与设备实际状况相悖,具体表现在诊断的可靠性不足,即漏报和虚警。有时 GIS 设备已发生绝缘崩溃,但监测设备仍未发现异常;有时诊断结论认为设备内

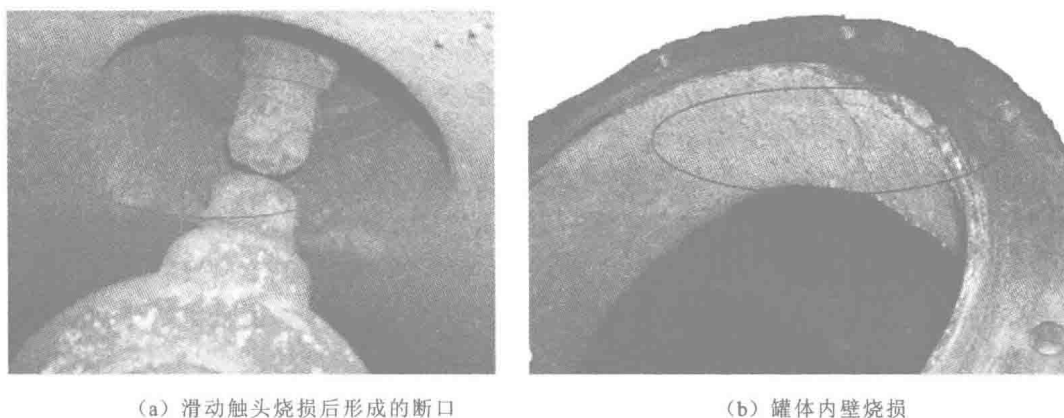


图 1.2 GIS 内部过热性故障实例照片

已出现严重故障,但解体后却找不到明显的痕迹。

(3) 目前设备现场应用的故障诊断技术多停留在“确认故障发生”阶段,而在故障类型辨识、程度估计和恶化趋势建模等方面仍处于实验室研究水平。从视情维修的角度考虑,各类故障对 GIS 的危害程度亦可能不尽相同,因此需要对不同类型(程度)的故障予以区分,以便采取相应的处理措施。这不仅要求能对故障的早期征兆做出有效预警,还需要诊断出故障的类型、程度甚至恶化趋势等,以便进行有目的的检修。

综上所述,有效的绝缘故障预警、诊断方法对于 GIS 设备维护的意义重大,不但能有效防止潜伏性绝缘故障的进一步恶化,还可以据此实施更有针对性的生产、维护指导<sup>[28]</sup>,如减少不必要的停电维修、提高设备利用率、延长设备有效生命周期等,以取得更大的经济效益。鉴于现有研究仍有很多亟待解决之处,因此需要对故障的机制机理展开充分研究,并探索有效的现场预警技术、完善现有的故障诊断方法,为最终实现 GIS 的视情维修提供理论基础和技术支持。

## 1.3 GIS 绝缘故障检测方法

### 1.3.1 局部放电故障检测

局部放电(PD)时常伴随着电、光、声、热和化学反应等多种理化现象,这些都可作为 PD 故障检测与诊断的依据<sup>[29]</sup>。目前主要的 PD 检测方法包括:脉冲电流(电学测量)法、光学测量法、超声测量法、超高频测量法和  $\text{SF}_6$  分解物组分分析法等<sup>[30]</sup>,此外还有学者尝试将多种方法所得的特征参量进行融合,以提高诊断精度、估计故障程度<sup>[31]</sup>。

#### 1. 脉冲电流法

脉冲电流法是 IEC 60270 标准所推荐的测量方法<sup>[17]</sup>,也是目前最常用、最成熟的 PD 检测方法之一,可用于交、直流条件下的 PD 检测。由于原标准不但规定了脉冲电流法的检测回路,还明确了 PD 视在放电量的标定方法和试验程序,测试中可直接通过检测回路中

的检测阻抗接收 PD 产生的脉冲电流信号,并采用标定后的比例系数得到视在放电量,以此反映 PD 的故障程度。

脉冲电流法应用技术比较成熟,对放电量的校准相对较为方便,但由于其易受到外电路的电磁干扰,特别是在现场环境下,灵敏度会受到严重影响,因此大多用于 PD 相关的(实验室内)机理研究以及离线测试方面<sup>[32]</sup>,以及设备的出厂试验、交接试验和预防性试验等。

## 2. 光测法

光测法针对伴随 PD 的光辐射进行检测。PD 会造成  $\text{SF}_6$  分子的离解,但大部分离子又会在短时间内重新复合为分子,而  $\text{SF}_6$  分子从离子态到分子复合态会释放出能量,并以光子的形式辐射出来<sup>[33]</sup>。根据 Grum 和 Costa 对放电辐射光谱的研究<sup>[34]</sup>,PD 源会辐射出多种不同频率成分的光谱,例如,电晕放电辐射谱大都位于 200 ~ 400 nm 段,火花放电辐射谱大都集中在 400 ~ 700 nm 段,通过对放电辐射谱的检测即可实现对 GIS 腔体中的 PD 检测。

国内外学者应用光测法对 PD 测量、定位以及绝缘老化机理等方面已进行了大量研究<sup>[35]</sup>,特别是在荧光光纤传感器的研发方面<sup>[36,37]</sup>。但是,在采用光测法进行 PD 检测时,需要在 GIS 腔体内部安装侵入式的光电倍增管等光电传感器,且 PD 所辐射的光信号在 GIS 内部传播时还可能存在内壁多次反射、易被  $\text{SF}_6$  气体吸收等问题,因此该方法尚处于研究阶段,现场实际应用极少<sup>[38]</sup>。

## 3. 声测法

声测法针对伴随 PD 而生的振动信号进行检测。PD 发生时的能量会将其中心区域介质加热、蒸发,这时 PD 源就类似于一个振动源(声源)。PD 极短的放电时间导致其声波谱相对较宽,最高可达兆赫兹数量级<sup>[39]</sup>。由于声波本质上来说是一种机械振动,声测法检测的是 PD 产生的机械振动(压力波),所以该方法不会受到周围环境中强烈电磁干扰的影响。

声测法的特点是可实现 PD 源定位,但鉴于声波传播中可能存在衰减、畸变等问题,故其性能会受到信号传播路径的影响。一般而言,其灵敏度低于传统的脉冲电流法,且抗机械振动干扰能力差,可以检测到 50 pC 及以上数量级的放电<sup>[38]</sup>。同时,声信号与视在(或实际)放电量间的标定还有待研究,因此很难凭借声信号直接推断 PD 的严重程度。此外,超声信号衰减较快,所以单一传感器的有效检测范围较小,实际中往往需要在现场安置较多测点。因此,该方法常作为一种辅助测量手段,如声测法和超高频法结合<sup>[40]</sup>等。

## 4. 超高频法

基于超高频(ultra-high frequency, UHF,亦有文献译为特高频)原理的 PD 检测系统最早由 Boggs 和 Stone 在 1982 年提出<sup>[41]</sup>。该方法利用 GIS 内 PD 辐射出的电磁波信号进行检测。这种电磁波具有丰富的频率成分,覆盖了低频到微波频段的信息。虽然电力系统

在正常运行时也可能产生电晕放电并向外辐射出电磁波,但较之 PD 的电磁波信号,这种放电脉冲的持续时间较长,其包含的频率范围也更低(通常不超过 150 MHz)。因此,UHF 技术选取的观测频段一般为 0.3 ~ 3 GHz,这样可以有效避开设备现场各种干扰源的频带范围,获得很高的信噪比<sup>[42]</sup>,PD 检测极限很高(甚至可达 pC 级)。在现场使用中,可将 UHF 传感器置于 GIS 设备的盆式绝缘子外表面(外置式)或检修手孔出口处(介质窗口式)。

采用 UHF 技术还可对 PD 源进行定位,在 GIS 上布置多个 UHF 传感器。由于电磁波波速已知,记录并计算 PD 时各传感器接收到 PD 信号的时间差,即可计算出 PD 源的大致位置。鉴于 PD 的 UHF 信号具有很陡的上升沿,较之声测法更易于分辨信号序列的起始时刻,因此其定位精度也优于声测法<sup>[39]</sup>。

除了可定位 PD 故障外,UHF 技术的优点还体现在其较高的灵敏度和优异的抗干扰能力上<sup>[43]</sup>,这使得其十分适于电磁环境复杂的设备现场带电监测。目前,UHF 的局限性主要在于放电量标定和放电类型的模式识别问题<sup>[42]</sup>。特别是对于放电量标定问题,由于不同类型 PD 的 UHF 频段信号能量占整个电磁波信号能量的比例尚难以确定,虽有文献定性指出 UHF 能量与脉冲电流法放电量平方呈近似线性关系<sup>[44]</sup>,但现有研究大都针对某类人工缺陷电极进行实验分析,且并未给出严谨的理论证明,因此一直都是学术研究的热点。此外,对于户外安装的罐式 SF<sub>6</sub> 断路器等设备,由于没有外露的盆式绝缘子,只能将 UHF 传感器放置在套管处进行测量,无疑大大降低了检测灵敏度。总而言之,UHF 技术虽然极具潜力,且已取得了很多研究成果,但还无法完全满足工程应用的需求。

## 5. SF<sub>6</sub> 分解物分析法(也称化学法)

SF<sub>6</sub> 气体分子会在电弧、火花或局部放电条件下分解,随即与 GIS 内的微水、微氧反应并生成多种分解产物。这些分解物可能腐蚀设备内部的导体及绝缘材料,加速绝缘劣化过程。目前已确定的主要气态分解产物包括 SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、SOF<sub>4</sub>、SF<sub>4</sub>、S<sub>2</sub>OF<sub>10</sub>、CF<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CS<sub>2</sub>、SiF<sub>4</sub>、HF 等<sup>[10,45]</sup>。通过分析这些 SF<sub>6</sub> 分解物组分的生成特性,如组分种类、浓度(浓度比)、生成速率等,不但可以判断是否有 PD 发生,甚至可以初步推断出缺陷类型、放电程度与劣化趋势<sup>[9]</sup>,但总的说来其辨识精度不及前几种检测方法。

根据分解物化学组分特性推断电气设备运行状态的技术研究由来已久,例如油中溶解气分析法(dissolved gas analysis,DGA)就被认为是变压器等设备内部故障检测的重要手段之一,并已形成了相对成熟的国际行业标准<sup>[46]</sup>。由于该方法较高的诊断可靠性、不受变电站内电磁环境和机械噪音干扰的特点,是在线监测变压器故障的最可靠的方法之一。鉴于 DGA 技术在变压器类设备故障诊断应用中的成功,利用 SF<sub>6</sub> 气态分解物组分诊断 GIS 设备内部放电故障的思想,已引发国内外相关技术人员及学者的普遍关注,该方法具有以下优点:

首先,该技术本质上属于化学法,一旦确定有特征分解物生成,则必然可以推断 GIS 内部发生了异常放电,诊断直观、物理意义明确,同时还兼具良好的抗电磁干扰、抗振动噪声能力。

其次,与其他监测手段不同,该技术不针对放电瞬间的物理变化(如脉冲电流、电磁辐

射等),而基于非电学特征(分解物生成)随时间的累积特性,在测试时并不要求有放电发生,因而适宜监测长期存在但间歇性发生的低能量 PD,并可快速确定发生故障的 GIS 间隔。鉴于目前“定期计划检修”仍在 GIS 故障检修工作中占有重要的比例,因此  $\text{SF}_6$  分解物分析法目前在设备现场使用也较为广泛。

再者,现有的分解物组分检测技术发展已日益成熟,可以达到很高的灵敏度:目前现场快速检测可以实现低至  $10^{-6}$  级体积分数( $\mu\text{L}/\text{L}$ )的多种气体组分测量,而实验室条件下应用气相色谱、质谱等技术的检测极限可达亚( $\mu\text{L}/\text{L}$ )级甚至到更高的精度。同时,国内外学者也在积极探索兼具高灵敏度、低成本、便于商业化的在线分解物组分监测技术及系统<sup>[12,47,48]</sup>,如基于傅里叶红外光谱技术、光声光谱技术、离子迁移光谱技术等。

最后,由于  $\text{SF}_6$  分解物种类很多,有些理化性质相对较为稳定,会长时间存在于 GIS 间隔内,其浓度亦会随故障的持续而增加,因此该方法对于 PD 故障的“检测能力”会随其持续时间的增加而增加<sup>[12]</sup>。此外,由于分解物生成特性与故障持续时间、累积放电量相关,因此更适宜描述设备随故障的逐步发展而造成的绝缘性能状态退化。

综上可知, $\text{SF}_6$  分解物组分分析法作为一种重要的 PD 故障检测 / 诊断方法被广泛普及。 $\text{SF}_6$  放电分解机理、分解物生成特性的研究是该方法的重要理论基础,完善上述理论并据此开展现场故障预警技术、PD 类型识别、故障程度估计等方面的研究,极具研究价值和应用前景。

### 1.3.2 局部过热故障检测

过热性故障按程度又可细分为轻度过热故障(不超过  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、低温过热故障( $150\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、中温过热故障( $300\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和高温过热故障(超过  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。作为 GIS 内母线、触头部位常见的故障种类,过热故障的早期多表现为低温或中温的局部过热。若未能得到及时处理,长时间的(局部)高温环境将使发热点周围的绝缘材质因灼烧、分解物腐蚀等原因发生劣化,从而大大加速设备绝缘性能的恶化过程。由于局部过热本质上是由接触电阻升高造成的,过热点周围并不一定会出现 PD,因此现有的监测方法除接触电阻测量法外,大多基于测温技术,如红外测温法、光纤光栅测温法等<sup>[20]</sup>。

接触电阻测量法具有成熟的行业标准<sup>[49]</sup>。实际中使用的 GIS 回路电阻测试仪,其工作原理为直流压降法<sup>[26,50]</sup>。测量需要将待测 GIS 设备停电分离,对被测回路阻施加额定的直流电流,根据其两端的压降计算出回路的电阻值。其缺点是该方法需离线测量,只能在停电计划检修的时候进行,无法及时发现故障。

红外测温法通过测量 GIS 的温度信息判断相应的故障位置、严重程度,具有非接触、无损检测、适合于大面积检测等优点<sup>[51]</sup>,实际中多使用红外测温仪、红外热像仪对 GIS 外表面的温度分布进行测量。根据普朗克辐射定律,即任何高于绝对零度(约  $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的物体都会以电磁波的形式向外发射出能量,其中红外线短波部分电磁波热效应最明显,因此理论上说凡是伴随有热效应的设备故障都可应用红外方法做出诊断。但根据现场使用效果来看,该技术仍存在诸多不足:首先,测量结果很容易受到环境因素影响,如天气、粉尘、阳光及周围的低温物体等;其次,红外辐射对于固体的穿透力不佳,因此仅凭 GIS 外



表面温度信息无法精确推断其内部温度场分布,只能依据主观经验进行定性判断故障情况。此外,早期过热故障发生时,GIS 内部的局部过热通常不会造成设备外壁整体温度的改变,因此红外巡检很难发现此类故障。近年来,有学者提出将点式红外测温元件制成探头侵入 GIS 内部<sup>[52]</sup>,可以直接测量出间隔内部的局部温度,且不影响设备的正常运行,但红外测温法仍处于研究阶段,且受限于 SF<sub>6</sub> 气体红外光能的强吸收性、触头材料红外光低发射率,以及 GIS 内部连接构件的复杂结构、温度场热传导模型构建等问题<sup>[22]</sup>,可能无法准确获取触头的真实温度。

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)技术的测温原理是“温度差异性会导致光纤光栅反射的中心波长出现变化”<sup>[53]</sup>。相比传统分布式光纤测温精度较低且定位精度较差等不足,该技术依据入射波长与反射波长的变化解调温度信号,具有尺寸小巧、耐腐蚀、抗电磁噪声、可定点测量等优点。但光纤光栅测温法需要在 GIS 内部铺设光纤,可能存在绝缘隐患,且对于已在运行的设备现场安装成本过高,故虽然目前在技术上已日趋成熟但仍无法广泛普及。

值得注意的是,国内外对于 SF<sub>6</sub> 的热稳定性研究的不断进展,使得基于分解物组分的过热故障诊断成为可能。早在 20 世纪 60 年代 Camilli 就发现:虽然 SF<sub>6</sub> 气体在常温下化学性质稳定,但其化学活性会随温度的升高逐渐增强,在 600 °C 时会发生热分解<sup>[54]</sup>。但后续多项研究成果都指出:SF<sub>6</sub> 在 200 ~ 300 °C 便会与铜、铝、不锈钢等多种金属反应生成多种气体产物,如 SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub> 和 HF,以及金属硫化物、金属氟化物等固体粉末<sup>[55]</sup>。不同于 DGA 技术在变压器过热故障诊断领域的成功,目前国内外学者对 SF<sub>6</sub> 高温条件下的分解物的形成机制尚未形成统一认识,亦无相关国际标准可供参考。但是,大量实验研究结果都已证明:GIS 内的 SF<sub>6</sub> 气体会在故热性故障的(局部)高温环境下分解,其分解产物的生成特性与过热温度、热源附近的材料等因素有关,但通过分析 SF<sub>6</sub> 分解物的生成特性以实现 GIS 过热故障监测的可行性、实用性还有待研究。

### 1.3.3 基于 SF<sub>6</sub> 分解物分析的 GIS 绝缘故障检测

鉴于过热、放电故障的特性差异,实际中其检测系统通常需要分别安装配置,尚难以实现统一监测。而 GIS 内 SF<sub>6</sub> 气体在两类绝缘故障下的都会发生分解并生成多种气态分解产物,因此较之其他故障检测方法,SF<sub>6</sub> 分解物分析技术(化学法)在实现过热、放电故障的统一识别、预警甚至诊断方面显示出巨大潜力。

较之 SF<sub>6</sub> 的 PD 分解特性,目前对于其热分解特性方面的研究还有待深入。鉴于分解物生成会受放电能量、PD 缺陷类型、过热温度等多种因素影响<sup>[55]</sup>,仅凭 SF<sub>6</sub> 在单一 PD 类型下的分解特性实现多类 GIS 绝缘故障的预警与诊断显然是片面的<sup>[22]</sup>。为避免出现误报误判,有必要对现有的化学法进行扩充与完善。

综上所述,开展 SF<sub>6</sub> 在高温及 PD 条件下的分解特性和反应机理的对比研究,不但可以有效完善现有的 PD 分解物组分分析理论、提高 PD 诊断可靠性,还能在研究基于分解物分析的过热性故障检测方法的基础上,最终为利用 SF<sub>6</sub> 分解物特性实现多类 GIS 绝缘故障统一检测、诊断奠定理论基础。



## 1.4 基于 SF<sub>6</sub> 分解物诊断技术存在的问题

根据前文所述的研究现状,基于分解物分析的 SF<sub>6</sub> 电气设备绝缘故障诊断思路已被深入研究和广泛采用。但也可以看出,很多研究成果仍有待进一步完善,在工程应用中得出的一些经验性结论也缺乏严谨科学论证。具体说来,该项技术目前存在的问题主要表现在以下几点。

### 1. 分解物组分现场检测的技术水平仍有待提高

近年来, SF<sub>6</sub> 气体分解物检测技术得到较大发展,除传统的检测管<sup>[56]</sup>、气相色谱<sup>[10]</sup>、气体传感器<sup>[57]</sup>、红外吸收光谱技术<sup>[47,58]</sup>外,诸如离子迁移光谱<sup>[48]</sup>、光声光谱<sup>[59,60]</sup>、碳纳米管传感器<sup>[61]</sup>等新技术也被逐步用于分解物气体检测。

但是,由于 GIS 设备内 SF<sub>6</sub> 气体在放电、高温条件下的分解过程非常复杂,致使气体分解物种类繁多、成分复杂,因此在分析测定时往往存在相互干扰,有时甚至会对检测结果造成较大影响。同时,由于待测的分解物组分浓度相对低,其体积浓度一般处于  $\mu\text{L}/\text{L}$  数量级,而背景 SF<sub>6</sub> 的纯度通常在 99.5% 以上,这种痕量气体组分的定性定量检测无疑具有很大难度。此外,设备现场环境条件相对较为复杂,因此从实用性角度考虑,还要求检测系统具备量程范围大、操作简便、分析快速、抗噪性好、布置方便、低需维护等特点,力求能及时准确地发现 GIS 设备的早期异常。

显然,要实现 GIS 绝缘故障诊断,首先必须具备一定的切实有效的 SF<sub>6</sub> 分解物现场检测方法。虽然现有的分解物检测手段较多,但检测管法和气体传感器法都存在抗交叉干扰能力不足的问题;而气相色谱、光声光谱、红外吸收光谱技术则因设备自身运行环境、维护成本等限制,更适用于实验室内的精确定量分析,难以在现场普及;离子迁移光谱和碳纳米管传感器技术则还尚处于研究阶段。因此,亟待寻求一种适用于 GIS 设备现场故障早期发现的检测技术。

### 2. 绝缘故障下分解物生成特性研究还不够完善

近年来,有关 SF<sub>6</sub> 分解的研究多集中在局部放电(PD)条件下分解物生成特性统计<sup>[10,57]</sup>、微水微氧等影响因素讨论<sup>[62]</sup>以及基于实验数据的机理分析等方面,少有文献将放电、过热故障下的 SF<sub>6</sub> 分解物生成特性进行统一的比对研究。特别是对于高温条件下的分解物生成规律、影响因素研究缺乏系统的框架体系,已有的部分研究结论甚至存在争议之处<sup>[9]</sup>。正如前文所述,局部放电和局部过热是 GIS 内部两类常见的绝缘故障。因此,为减小诊断中因样本数据不足造成误判的概率,更加不能仅依据单一故障的分解物特性进行故障诊断,需要尽可能地完善分解物组分信息与绝缘故障间的关联数据库,并据此对该条件下的 SF<sub>6</sub> 分解机理给出合理的分析与解释。

众所周知, GIS 绝缘故障程度会随其持续时间的增加而逐步恶化<sup>[31]</sup>,但目前对于持续性故障中由于故障程度逐渐恶化而导致的分解物生成特性变化的研究还相对较少。因此,