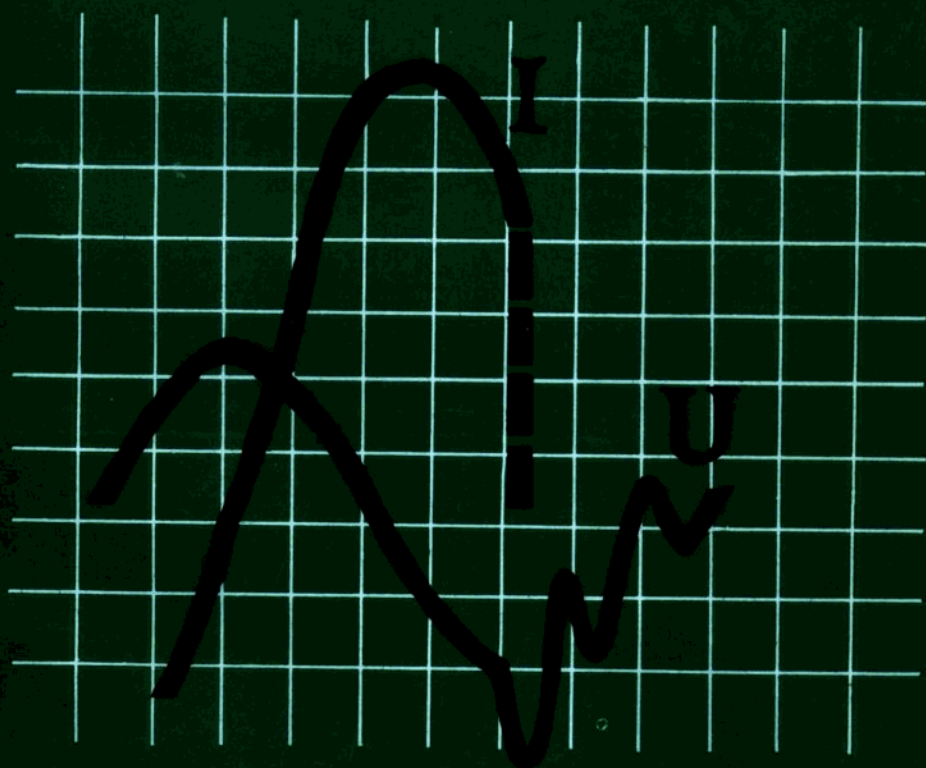


电气设备绝缘诊断技术 研究班讲义



水电部生产司组编

前 言

自50年代以来，我国一直坚持电气设备预防性试验，通过试验检查出许多威胁安全运行的不正常或潜伏性故障，并及时进行了处理，从而对电力系统的安全运行，发挥了很大的有效监督作用。

经过几十年的实践，试验监测技术有了很大的发展和提高，并积累了大量宝贵经验。为了全面系统的总结经验，进一步提高电气设备故障诊断的及时性、有效性和准确性，经研究确定，以举办电气设备绝缘诊断技术研究班的方式，在充分交流经验的基础上，总结提高监测诊断技术水平。为此，我司组织了一些有经验的技术人员，对几种重要电气设备，结合实践经验，编写了故障诊断技术讲义，以便进行交流。该讲义可供从事电气专业的技术人员在工作中参考。

研究班的筹备和讲义编写，是委托华中电力试验研究所和东北电力研究院主办的，他们做了许多编辑、整理、出版以及班务等工作，在此，对主办单位和编写、审稿的同志表示感谢。讲义中如有不当之处，请指正。

水电部生产司

一九八七年七月

目 录

前 言

第一篇 基础部分

第一章 国外绝缘诊断技术的进展

..... (1)

一、需要与可能

二、电气设备的带电监测

三、试验项目及判断标准

第二章 绝缘测试中的概率统计方法

..... (17)

一、基本概念

二、概率的性质

三、随机变量的分布规律

四、二项分布与泊松分布

五、正态分布

六、数据处理

七、大样本试验结果的统计推断法

八、小样本试验结果的分析

九、总体方差的显著性检验和区间估计

十、相关与回归分析

第三章 可靠性技术的应用

..... (57)

一、概论

二、可靠性函数及故障率

- 三、系统的可靠性
- 四、常用的可靠性技术分析方法简介
- 五、维修技术简述

第四章 电气设备绝缘监督的科学管理

..... (74)

- 一、加强绝缘监督工作的组织管理
- 二、试验中应注意环境气象的影响
- 三、加强对试验结果的综合分析和判断
- 四、改进设备结构提高安全运行水平

第二篇 现场测试技术

第一章 超低频耐压和谐振耐压试验

..... (85)

- 一、发电机超低频耐压试验及其介质特性分析
- 二、交流谐振耐压试验

第二章 大型变压器的操作波试验

..... (102)

- 一、概述
- 二、操作波试验电压的波形、幅值、极性
- 三、试验结线的选择
- 四、变压器操作波感应耐压试验回路及有关参数选定
- 五、操作波试验波形和效率估算
- 六、变压器等效电容 C_2 的简化估算
- 七、电容电流的计算及示伤电阻选定
- 八、操作波试验中的故障判断
- 九、操作波试验的有效性
- 十、操作波试验的注意事项

十一、操作波试验的步骤

第三章 局部放电的现场测试

..... (119)

- 一、局部放电的探测或测量
- 二、电机定子绝缘的局部放电试验
- 三、变压器的局部放电试验
- 四、互感器的局部放电试验
- 五、直流电压下局部放电测量
- 六、结语

第四章 变电设备的带电测试

..... (141)

- 一、绝缘子防性监测
 - 二、变电设备的带电测试
 - 三、变电设备绝缘的在线监测
 - 四、工作电压下变电设备绝缘可靠性诊断系统
- 第三篇 故障诊断技术

第一章 发电机故障的分析及诊断

..... (174)

- 一、发电机定子绝缘异常诊断方法及其判断标准
- 二、发电机定子绝缘新的检测方法研究及应用
- 三、发电机故障的在线检测及其诊断

第二章 电容型套管及电流互感器故障的分析及诊断

..... (211)

- 一、电容型绝缘结构特点及其运行分析
- 二、常见的绝缘故障形式
- 三、绝缘诊断

第三章 大型变压器故障的分析及诊断

(226)

- 一、电力变压器的绝缘结构
- 二、电力变压器绝缘的检测方法
- 三、其他常见故障的检测

第四章 串级式电压互感器故障的分析及诊断

(271)

- 一、结构简介
- 二、主要缺陷
- 三、检测缺陷的方法
- 四、检测缺陷的一般过程

第一篇 基础部分

第一章 国外绝缘诊断技术的进展

西安交通大学 严璋

一、需要与可能

随着系统电压的提高,单台容量的增大以及全封闭组合电器(GIS)等的出现,更需要加强绝缘的检查与保养,以减少事故、确保安全运行。

国外运行经验已指出,就以变压器为例,电压愈高、容量愈大者,其故障率一般也愈高,修复时间愈长,这可参看表1-1-1⁽⁴⁾。

表 1—1—1 大型变压器的一些统计数字

电压等级 (千伏)	平均年故障率(%)	平均修复 时间(月)
<300	~2	1~2
300~500	~2.9	1~4
700	~6.3	7.9

再如全封闭组合电器,一旦发生事故,其危害性要比分立敞开式设备严重得多,要修复起来也更加费事。因而这些都要求最好能开展在线(On line)监督,以消灭事故于萌芽状态。

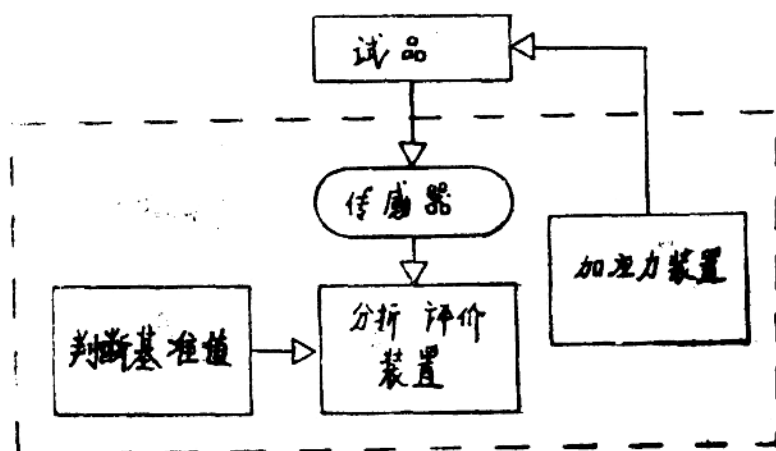


图 1—1—1 硬件的基本构成

而这些年来, 微电子技术、电子计算机、光纤通讯、传感器技术等的高速发展, 使得绝缘诊断技术也出现了一些划时代的进展。有人是这样描述绝缘诊断技术的发展历史的⁽⁷⁾: 认为七十年代时虽然研究出了一些诊断方法, 但还是要用人手来进行操作, 而且设备不会自动进行评价; 而进入八十年代后, 诊断自动化的方法逐渐出现, 其硬件构成如图1-1-1所示。由于还可以在线诊断, 因此就有可能对全过程作出正确的诊断了。

例如1986年8~9月份举行的国际大电网会议(CIGRE)上, 变压器学术委员会(SC12)所优先讨论的三个中心议题之一就是运行中变压器的诊断问题⁽⁸⁾, 其中包括: 局部放电的测量及定位, 油和气体的检测分析, 机械变形的探测, 热点温度的测量, 利用微机系统进行监测等。

也有的指出⁽⁹⁾, 过去那样的巡视检查方法缺点较多, 例如: 各人的判断水平不同, 巡视时情报虽多, 但定量的很少; 一般每日巡视几次, 其内容及次数都受限制; 有些地方(如高处、地下、过窄处等)难以巡视到。这些显然已不能满足现在设备容量更大, 可靠性要求更高等的需要了。

还有的指出⁽⁵⁾, 电力系统的保护装置现已发展到了第三代, 已由过去的硬线联结的集中式继电保护系统发展到以软件编程为主的计算机分级监控保护系统了, 即电力设备本身附带有各自的微机监测和控制装置, 而电网又有统一的监控装置。这种多级监控系统SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 已在国外逐步推广应用。

实际上, 这些诊断系统已带有一些人工智能(Artificial Intelligence)的功能⁽¹⁷⁾, 如图1-1-2中所示的那样: 根据设备的绝缘特性和运行经验, 以及所采用的传感器的性能等, 已经编制了各种规则, 并以软件形式存储在计算机里了。当各种传感器的信号送来后, 要首先进行处理, 由“传感器诊断规则”进行分析处理, 去伪存真, 甚至要求重新读数或重新整定传感器系统; 根据这些经过筛选和数据处理后的信息, 才显示出“传感器状况”, 并输入到更高级的规则里去, 以便进一步综合分析判断, 最后才作出正确的诊断。

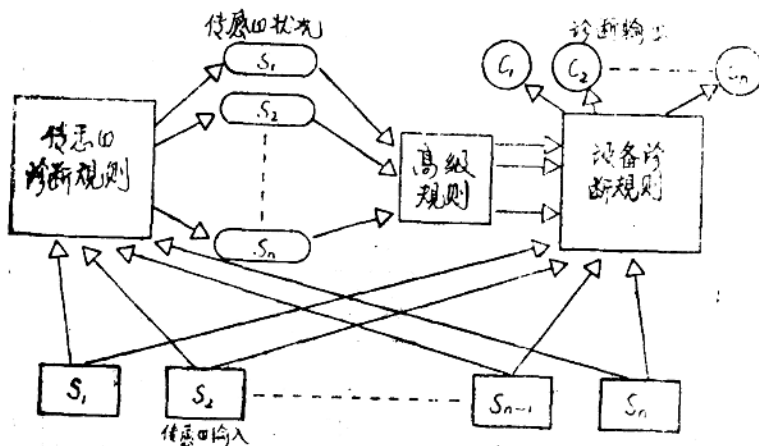


图 1-1-2 用传感器来诊断的框图

显然, 要达到这样的微机在线监控, 并自动作出正确的判断, 那就需要进一步研究解决以下这几方面的问题:

(一) 各种传感器或测量元件的研究, 现在已有了一些传感器, 可以用来测电压、电场、

磁场、电流、温度、加速度等参数，一方面怎样正确地使用它们，另一方面积极研究更灵敏，又能抗干扰的合适的测量元件。

(二)要进一步深入研究电气设备的绝缘损坏的全过程，究竟还有哪些参数能比较准确而又灵敏地反映出绝缘老化，性能下降过程？这些性能参数又受到哪些因素的影响？怎样正确地测定？其损坏判据又如何确定？

(三)计算机系统的研究，因为总的来说，在线监控的是一些高压，大容量的设备，而现场又存在着各种干扰；要在这种情况下去监视一些微小的机电量的变化过程，其高灵敏度与抗干扰能力往往就有很大的矛盾，怎样辨明真伪，去粗取精，利用这些微小的信号变化，经过传输，放大及计算机系统以作出正确的判断。

当然，对于电力系统来说，首先要求的是安全，因此，这些新技术的推广应用也必须谨慎从事，但是，这个新动向已经是很明确的了。

这也就是说，从过去主要是靠定期停运检修制将有可能发展到一定程度的预警式的检修制。由于带电监控的推广应用，可大大减少检修、试验等的盲目性，可按照设备出现的异常予兆，或者当设备接近予期寿命时，才进行更换或检修，这样系统的安全水平及经济效益都可以大大提高。

电力系统中设备繁多，且大小不一，不可能采用同一种模式来进行监控，有最大设备可采用本身附带的微机监控系统，而另外一些小设备仍可有计划地进行检查，甚至用是非接触式监测，下面将分别举例加以说明。

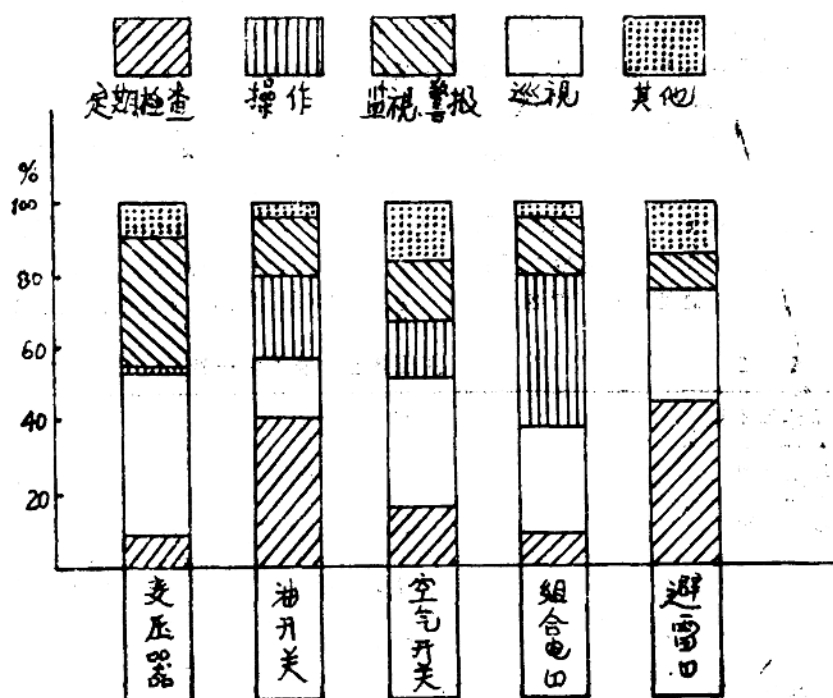


图 1-1-3

过去的运行经验也已证明, 对于不同的设备, 为发现其早期故障, 各种方法的敏感程度也相差很大, 如图1-1-3所示。因此有的提出, 无论是检查或巡视, 也要区别对待, 例如检查就应分这样几类:

- (一) 一般检查 主要是进行外观检查, 这当然易于进行;
- (二) 仔细检查 应分解检查有无损伤等, 且可卸下已老化的部件等, 或进行有关的调试;
- (三) 临时检查 当认为设备有异常或有可能要发生事故进行, 而且是有针对性的检查;
- (四) 初期检查 对于新投运的或刚修复的设备, 在开始阶段 (如一年里) 要加强检查。

二、电气设备的带电监测

(一) 大型电力变压器

如1985年日本刚投运的北松山变电站里, 197/66KV、300MV A变压器就装有可燃性气体 (TCG) 及超声波测量局部放电的自动监视装置⁽¹¹⁾, 其主要参数如表1-1-2所示。

变压器油中气体自动分析装置的原理图如图1-1-4所示。因为如表1-1-2所叙述的, 自动装置主要是检查可燃性气体总量及其增长率, 如发现异常的予兆, 将自动缩短周期, 不断地进行追踪; 由于各变压器的结构、材料等的不同, 更重要的是显示其增长率, 如图1-1-5⁽⁹⁾, 国内外都已有不少这方面的成功经验了。也有的单位⁽¹⁵⁾, 已制成手提式的气体自动分析仪, 其尺寸与常用的电桥相似, 所采用的聚合膜具有很高的透气度, 可自动从油中将气体分离开, 在一小时内分析完通常最感兴趣的6种气体 (H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 及 CO)。图1-1-6给出另一种可测三种气体 (H_2 、 CO 、 CH_4) 的便携式异常诊断装置的示意图⁽²⁾。

至于变压器局部放电的自动监测, 其原理图如图1-1-7所示。这是因为在现场带电检测局部放电, 所遇到的困难要比实验室里多得多, 因此在图1-1-7中安排了电气法与超声波法同时并举, 而且是多通道测量, 想通过脉冲的同步检测以提高其抗干扰能力, 也便于估计局

表 1-1-2

变压器自动监测的一例

传感器类别		可燃性气体	超声波
检出周期		1次/1~99天	1次/10分
检出范围		0~5000 ppm	1~250 PPS
输出	内容	总量及判断	脉冲数及判断
	方式	测定时	异常时
机器异常的 设定值		TCG700 ppm 增加率1.6倍	100 PPS

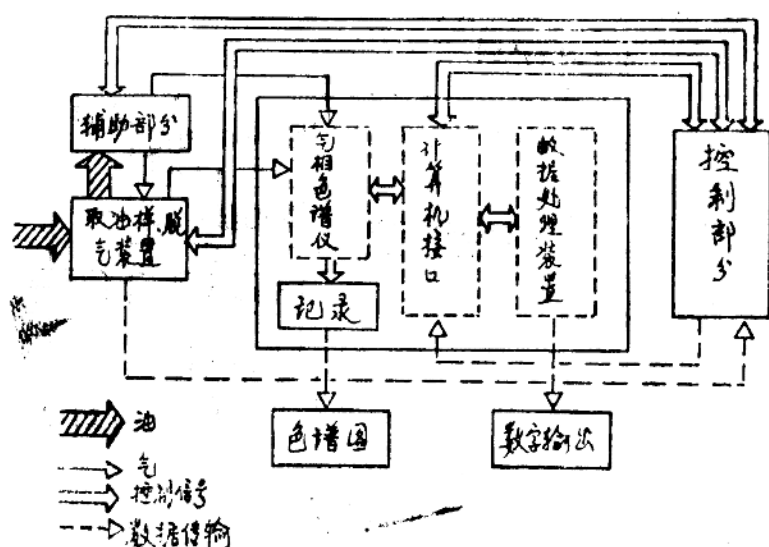


图 1-1-4 气体自动分析的框图

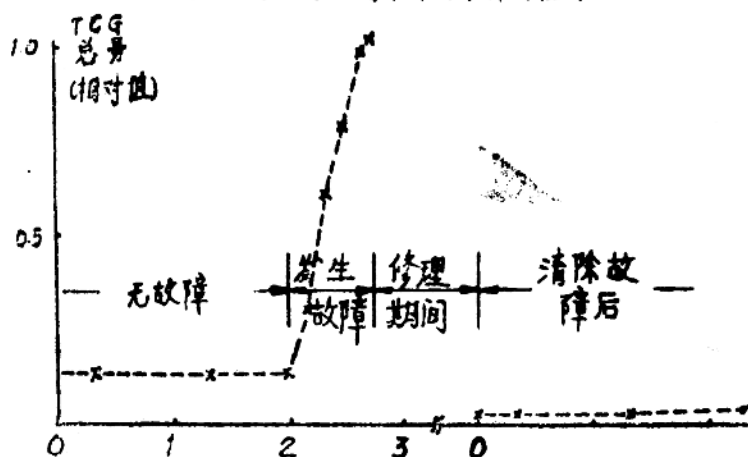


图 1-1-5 TCG增长的实例

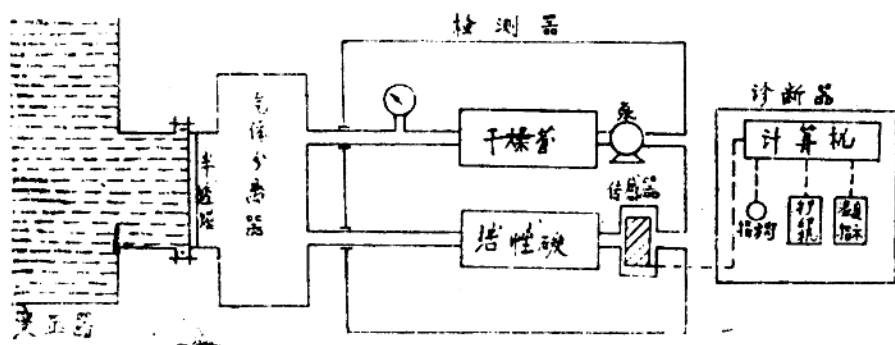


图 1-1-6 便携式诊断装置

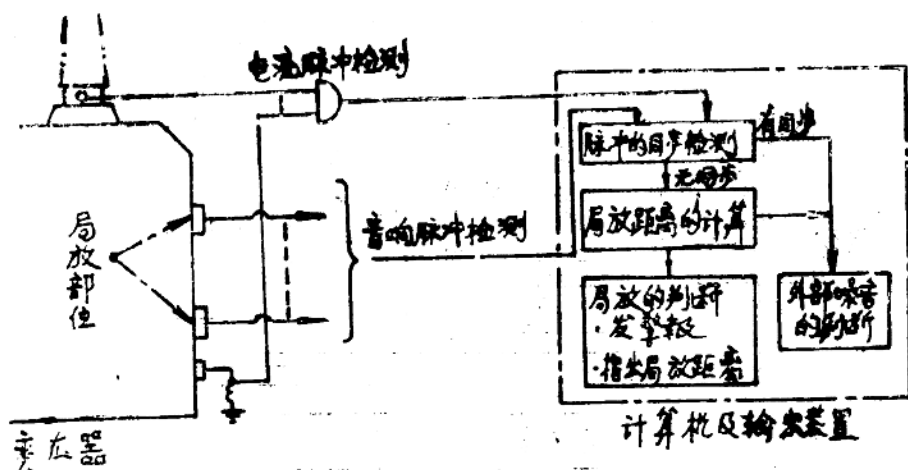


图 1—1—7 局放自动监测原理图

部放电发生的部位⁽¹⁾⁽²⁾。

但也有的认为在现场测量时电气法的电磁干扰问题很严重，例如有人指出，现场的背景干扰可能在5000PC到30000PC左右，因而更需采用复杂的信号处理技术⁽³⁾；于是有的认为与非电量的振动测量等相比较，由于电气法干扰问题大，现在还难以很好地用于在线检测，例如日本1985年新投入的北松山变电站的变压器局部放电的带电自动检测，也还只用了超声波法（如前表1-1-2所示）。

(二) 避雷器

阀型避雷器的泄漏电流带电监测等，国内外都已采用了多年；而新型氧化锌避雷器的大量投运，又给带电监测带来了新课题。因为这种无间隙的非线性避雷器，在初期时，阻性电流（电流的电阻性分量）很小，一般在几十微安以下，但长期运行后，其非线性常发生变化，阻性电流增大。所以在带电检测时，要从通过避雷器的总电流里将阻性电流分出来，为此国外常采用图1-1-8这样的线路。

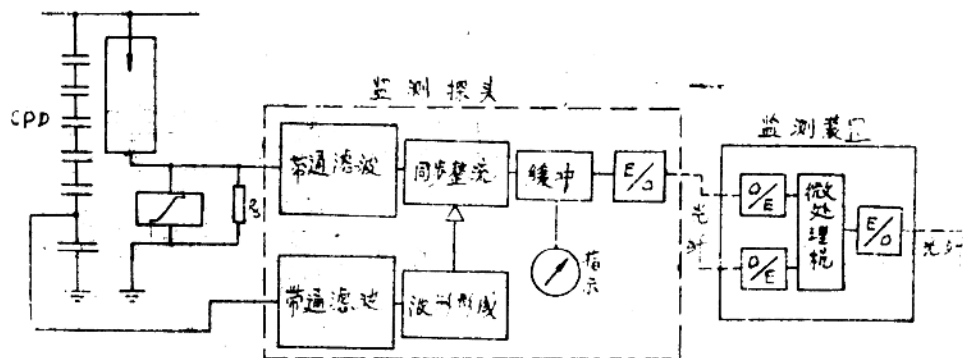


图 1—1—8 ZnO避雷器阻性电流监测

表 1—1—3

检测缺陷避雷器的方法比较

类 别	无线电干 扰(RIV)法 $\geq 250\mu V$	局放法 $75\%U_n$ 下 $\geq 250PC$	泄漏电流 法, U_n 下 $\geq 600\mu A$	工频放 电电压 $1.5U_n$	超声波法 测局放, U_n 下 ≥ 1000	电磁辐射法, 宽带测量 $5 \sim 200/MHz$
新产品台数	0	1	0	0	0	0
注水及老化 后, 台数	42	51	59	33	33	64
发现缺陷 率, %	65	78	91	51	51	98



图 1—1—9 电磁辐射测量仪

化锌的可能有1000微安；而且测泄漏电流的仪器不象电磁辐射仪那样轻小（如图1-1-9，约2公斤）。因此为检出有缺陷的避雷器用电磁辐射测量仪将更有意义了。

测量时，经 R_s 取出反映流过避雷器的总电流的信号，经带通滤波器后取出其工频部分；而另外由电容式分压器（CPD）来获得电压信号。然后取出与此电压同相的那部分电流信号，例如可采用同步整流的办法；再将此阻性电流经 E/O 变换为光信号后，经光纤送到计算机系统去，以减少干扰^(5·9)。

至于低压避雷器，无论是碳化硅（有间隙）的，还是氧化锌（无间隙）的，由于本身小而数量多，美国电力研究协会（EPRI）推荐用携带式的电磁辐射仪来遥测^(1·8)。据介绍，它比常用的其他几种方法都更能发现避雷器的缺陷。例如，曾取65台新的10KV及18KV避雷器，分别在注水及老化过程前后，用多种监测方法进行测量，得到表1-1-3的各项数据。

在常用的监测方法中，只有泄漏电流法的检出率（91%）稍低于电磁辐射法（98%）；但是避雷器的泄漏电流标准将因避雷器的类型而异，例如碳化硅的一般不大于600微安，而氧化

（三）全封闭组合电器（GIS）

由于GIS的带电部分都密封在容器之中，因此其在线监测大多是在容器以外装以各种传感器（或者象图1-1-12将它装在靠近接地处），分别检出各种相应的信号的变化情况是否超出正常范围。表1-1-4列出日本北松山变电站内测量加速度、开关动作时间以及对地闪络的实例。

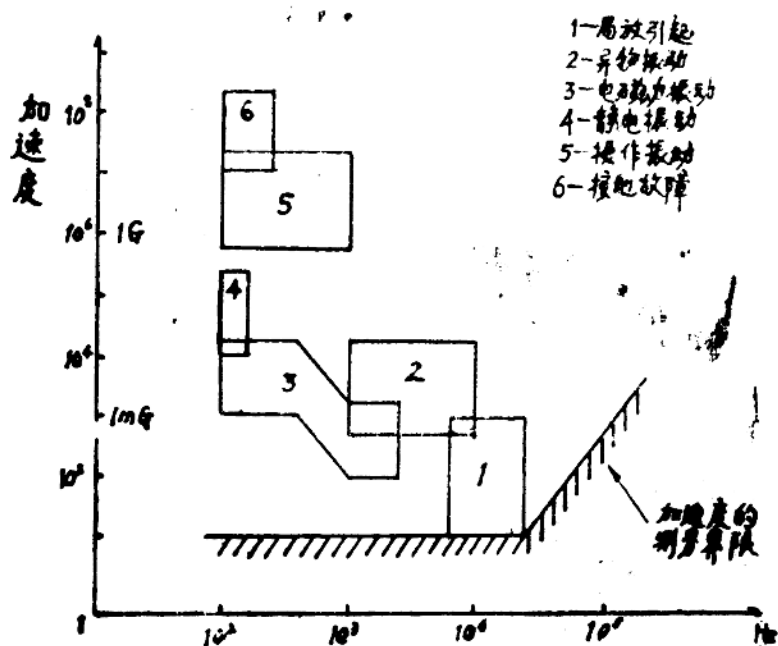


图 1-1-10 各种振动频谱

表 1-1-4

GIS 监测系统的一例

传 感 器	测 量	加 速 度	开 关 动 作 时 间	对 地 闪 络
	类 别	压 电 元 件	磁 性 元 件	光 传 感 器
检 出 周 期		1 次 / 20 ~ 30 分	动 作 时	动 作 时
检 出 范 围		20 ~ 2500 μG	0.5 ~ 20 A; 5 ms	> 0.2 K A
输 出	内 容	加 速 度 及 判 断	动 作 时 间 及 判 断	检 出 次 序
	方 式	异 常 时	测 定 时	异 常 时
异 常 的 设 定 值		200 μG	+ 4 ms, - 3 ms 以外	—

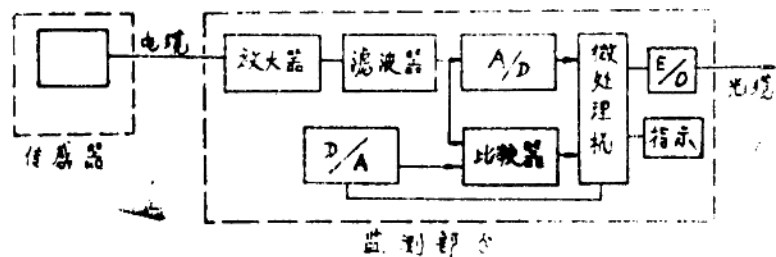


图 1-1-11 压电加速度传感器原理图

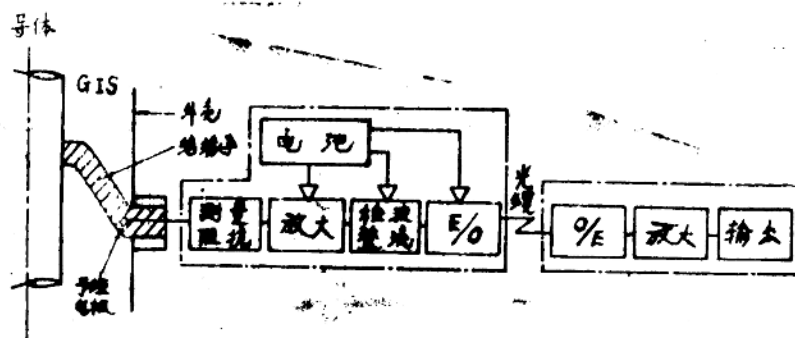


图1-1-12 局放测量装置原理图

利用测加速度的方法来监测局部放电时,要注意到也有很多因素会引起机械振动的。然而分析已指出,它们的强度与频谱范围各有差异,如图1-1-10所示^(9.18),其中因局部放电所引起的振动,频率较高(几到几十千赫),而强度较弱($10 \sim 10^4 \mu G$)。因而通常是将从传感器测得的振动信号,先经过滤波器除去低频部分(常由于机器的正常振动所引起),然后取出其与电源同期的、短时间内的信号多次,经过全波整流后取其平均值,以进一步除去与电源周期无关的振动信号。如果得到的信号超过设定值,则自动进行重复测量及处理,以便判别是否确属异常,其测量线路图见1-1-11。

如用电气法测量GIS中的局部放电,则探头可用事先埋在支撑绝缘子近接地处的接头,如图1-1-12所示⁽¹⁴⁾。

(四) 大型电机

据报导⁽²¹⁾,目前在加拿大,已在大型水轮发电机上装有永久性的测量局部放电的电容

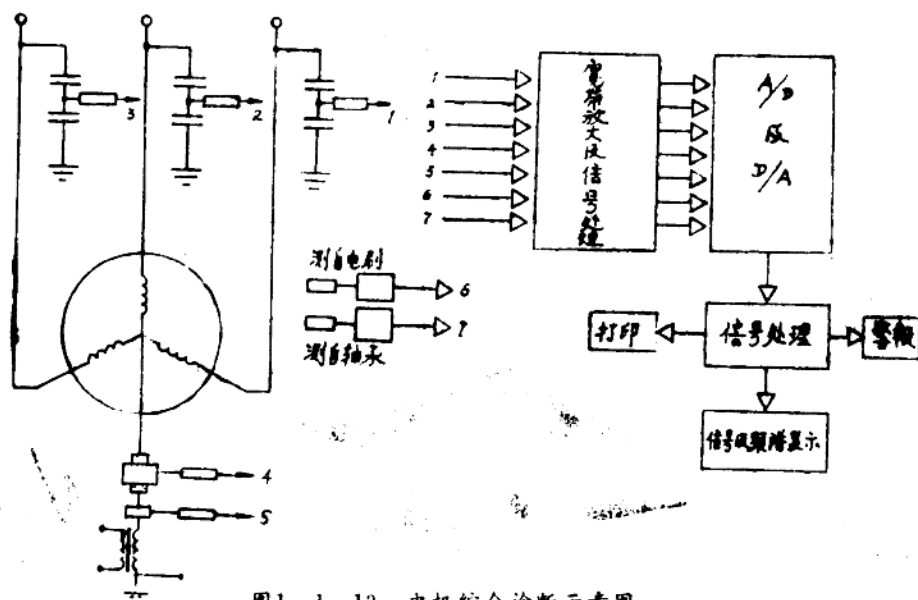


图1-1-13 电机综合诊断示意图

式探头的就有一百四十多套；而在美国，约五十台大型汽轮发电机，在中性点处装有测量无线电频率（RF）电流或电压的仪器，以监测电机内部有无电弧放电。

有的还综合了几种方法，提出了图1-1-13所示的用计算机进行单机监测的原理图，其中1~3采用的是电容耦合的方法，4~5为中性点测量法，而6、7分别为监测在电刷及轴承上可能出现的火花，这些不同部位的传感器从同一机组上得来的信号，再经过计算机处理：有的需要进行对比分析，有的需要其频谱特性等，然后才作出合理的判断。

因为有的指出，在中性点带电监测无线电频率（RF）信号的方法，往往是相当灵敏的，只要定子导体产生微小的电弧，则测得的信号水平就改变约20分贝，如图1-1-14所示⁽¹²⁾。

这是由于定子绕组的电感 L 、对地电容 C ，以及中性点接地装置的 L' 、 C' 原来形成的谐振回路中，其流过的电流信号很小。当发电机里绝缘损伤等而引起微小的放电时，由于含有高频分量，使中性点电流的信号水平显著增大，当超过某设定值时，监测装置将自动发出警报。

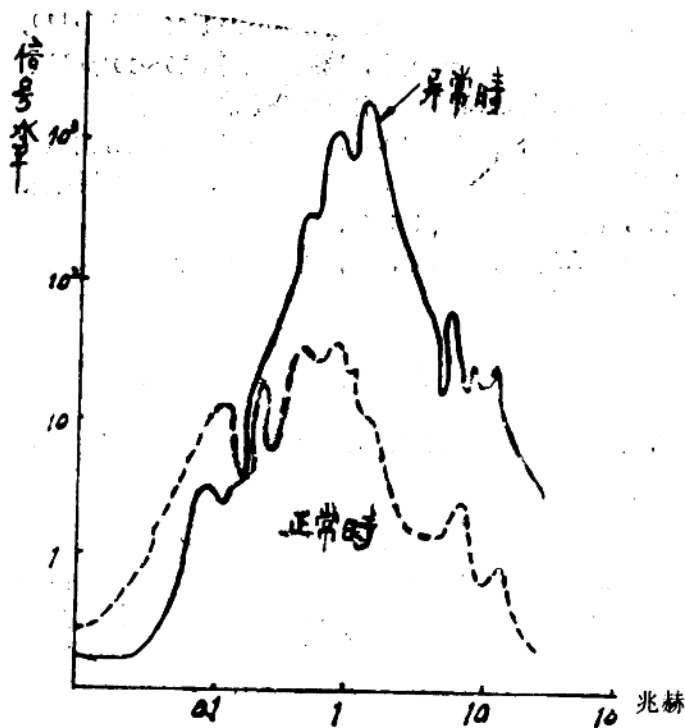


图1-1-14 RF测量值

有人曾做过这样的估算⁽²⁰⁾：某单位每年因发电机放电所引起的停电事故40次，386小时，停电损失约2.5兆美元，而装此RF检测系统只需花2.5万美元就够了。

三、 试验项目及判断标准

带电监测，特别是利用微机等自动监测的方案，将为减少人力，提高可靠性，减少事故等带来很大的好处。然而，究竟测试哪几个项目，事故的判据又是什么等等，那还得在设计设备、编制程序之前事先加以研究确定。

如前已指出的那样⁽¹⁾，现存的试验方法对有些缺陷可能还比较有效，而对另外一些缺陷就不够敏感了；而且随着电压等级的提高或设备容量的增大，某些“经典式”的试验方法的有效性更将使人发生怀疑。例如近年来很受欢迎的气相色谱分析法，它对发现局部过热或电弧等故障相当灵敏，但对早期的局部放电就不够灵敏，如果要用它来定位那更会遇到困难了。

(一) 怎样根据数据作判断

对于传统的介质损耗角正切($\tan\delta$)试验，有的已明确指出^(2,3)：有时， $\tan\delta$ 虽已达到标准允许值的二、三倍，仍不至于形成绝缘的损坏；特别是当绝缘结构的厚度较小，而且油的循环良好，即散热条件较好时，例如电力变压器及非电容式的油浸电流互感器等，但是，在工作场强高、散热困难的绝缘结构中，则如油的 $\tan\delta$ 也达到允许值的三、四倍时，则就可能引起绝缘损坏，例如330kV及以上的高压电容式套管，电容式电流互感器，高压电缆等。因此，对于后者，进行 $\tan\delta$ 的定期监测，并据此作判断才是有价值的。

另外，在实际测量时，测量的数据往往可能有相当大的波动，例如表1-1-5列出对同一台330千伏电容式电流互感器中油样的近二十年的测量数据。

表 1-1-5 油样历年的试验数据

试验年份	1962	1966	1968	1970	1972	1975	1978	1979	1981
$\tan\delta$ 测值(%)	2.8	4.0	2.9	3.8	2.9	3.8	2.3	3.2	2.8

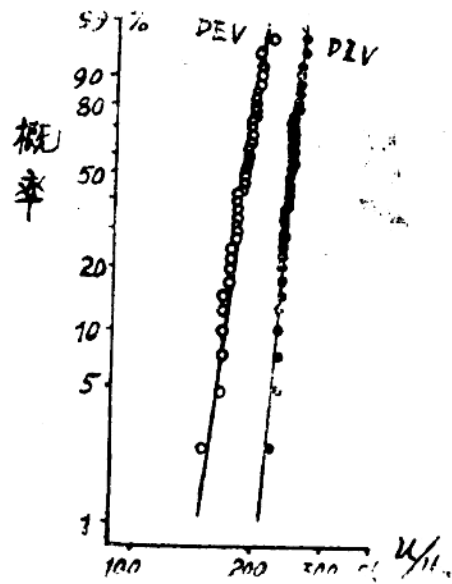


图1-1-15 DIV, DEV概率分布

可见测值有很大的分散性，但这不一定全是测量误差所引起，还包括从套管中取油样的差异，或者随机落入的水份或异物等等。因此不能仅仅根据一、二个测值就作出结论，而宜采用数据处理等科学方法来分析。

其他绝缘特性，如击穿场强或局部放电场强（或电压），则分散性通常可能更大，如图1-1-15绘有100千乏全膜电容器的起始游离电压(DIV)及熄灭游离电压(DEV)的概率分布曲线^(1,2)，同样说明要用概率统计的原理来进行试验数据的分析。

既然绝缘特性的分布符合统计规律，有的进一步提出可根据 3σ 法来预测绝缘的可靠性（ σ 为标准偏差）^(3,4)，显然愈接近寿命予测值时，试验周期也应选择得更短了。

例如，研究得出采用不饱和聚酯制成的汽轮发电机绝缘，其平均的绝缘寿命(BDV)与发电机的开停次数的关系曲线如图1-1-15所示，图中A~J为一些实测值。为考虑到实际数据的分散性，图1-1-17考虑了在置信率为90%时，对平均残余击穿电压X的偏差，以及用最