

西安交通大学
硕士学位论文
变电设备绝缘在线监测数据的分析及处理
姓名：郭宗军
申请学位级别：硕士
专业：电气工程
指导教师：严璋
2002. 3. 11

## 变电设备绝缘在线监测数据的分析及处理

### 摘 要

研究电力设备绝缘在线监测技术是及早发现绝缘缺陷,确定设备绝缘状态、提高系统运行可靠性的重要手段。实现在线监测除了需要通过仪器测量监测参数外,还需要对大量的测量数据进行处理。为了从这些测得的数据中获得设备的绝缘状态,论文提出了分析处理在线监测数据的方法,其主要内容如下:

1. 现场测得的在线数据中含有大量的干扰噪声,只有将这些噪声数据进行滤除后,才能更好地获得反映绝缘状态的有效数据。本文引入了防脉冲干扰的滑动平均算法,对其信噪比以及对信号的延迟性作了分析。研究表明,与其它方法比较,这种在线数据预处理方法能较有效地消除各种干扰。
2. 研究了基于浏览器/服务器的在线监测与诊断系统的基本结构以及面向对象的知识的表达方式。
3. 通过分析设备绝缘故障的类型,提出了将在线测值的绝对值、变化率以及同母线下同类设备在线测值的相似度作为特征量,并对特征量阈值的设定作了分析。
4. 对设备的绝缘变化趋势进行预测能够更合理地安排设备的维修,以便充分发挥设备的潜力。作者通过引入 ARIMA 时间序列模型,实现了对绝缘趋势的预测。

**关 键 词:** 变电设备 故障诊断 时间序列

在线监测 浏览器/服务器 面向对象

**论文类型:** 应用研究

## The Analysis and Processing of On-line insulation Monitoring Data for Substation Equipment

### Abstract

The on-line insulation monitoring for power equipment is of great importance to the fault detection of the equipment and the safe operation of the power system. In order to realize the on-line monitoring, it is needed to measure many parameters with sensors and to process the large numbers of data. To find the insulation condition of equipment from the data, a method for analysing and processing the on-line monitoring data is given. The main contents are as following:

1. There are many noises in the on-line data measured on site, in order to find the better result of insulation monitoring, the noise must be filtered. A moving average method for preventing the interference of impulse is studied in this paper, and both the signal/noise ratio and the delay due to the treatment are analyzed. It is shown that the pretreatment can wipe off some noises effectively.
2. The structure design of on-line monitoring system based on B/S and the mode of knowledge with oriented-object expression are studied.
3. By analysing the fault mode of insulation, several characteristic parameters for insulation diagnosis are put forward, which include the absolute value and change rate of on-line data, and the relativity of on-line data among the same kind of equipment under the same bus. The choice of threshold of characteristic parameters is also analysed.
4. The trend forecast of insulation may help to make the plan of maintenance more reasonable and exert the potential of equipment. The time series method ARIMA is introduced, so the trend forecast of insulation will be gotten effectively.

**Key words:** substation equipment      fault diagnosis      time series  
on-line monitoring      browser/server      oriented-object

## 1 绪 论

综述了变电设备绝缘在线监测技术的发展历程、基本原理以及目前存在的一些问题，最后介绍了本文的主要研究工作。

### 1.1 引言

我国开展电力设备绝缘在线监测技术的开发应用已有十几年了，此项工作对提高电力设备的运行维护水平，及时发现事故隐患，减少停电事故的发生起到了积极作用<sup>[1]</sup>。

我国从 50 年代开始，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。虽然这种试验方式能在一定程度上发现设备缺陷，减少事故发生，但也存在着明显的不足：

- (1) 停电预试周期规定过死，有时不能及时发现设备绝缘的劣化。
- (2) 对高压电力设备的试验电压低，难以真实反映运行电压下的设备绝缘状况。
- (3) “到期必修”没有充分考虑到设备的实际状态，超量维修不少，以致出现不必要的停电维修，造成大量人力、物力的浪费。
- (4) 随着经济的发展，停电检修的代价越来越大，严重影响经济效益。
- (5) 不能适应无人值班变电站自动化的要求。

随着电力系统朝着高电压、大容量的方向发展，保证电力设备的安全运行越来越重要，停电事故给生产和生活带来的影响及损失也越来越大。自六十年代以来，国内的某些大型电力网络出现了一些大的停电事故，给国民经济造成了巨大的损失<sup>[2]</sup>。“八五”期间，我国主要电网中由于设备故障而直接引发的电网事故约占事故总量的 26.3%<sup>[3]</sup>，可见提高设备的运行可靠性是保证电力系统安全运行的关键。及时了解电力设备的工作情况，对电力系统的故障作出先兆判断是十分重要的。尤其是在电力设备的运行过程中通过必要的监测和试验手段有效地判断其运行状态，将会对提高设备运行可靠性、减少事故发生具有重要的意义。

进入 80 年代以来，电力设备在线监测技术发展很快，有些变电站设备开始有绝缘在线监测项目。而随着电子技术的进步和传感器技术、光纤技术、计算机技术、信息处理技术等的发展和向各领域的渗透，系统监控技术中广泛应用了这些先进的科研成果，使在线监测技术逐步走向实用化阶段。与过

去几乎全靠停电后的预防性试验相比,绝缘在线监测系统采用更高灵敏度的传感器以采集运行中设备绝缘劣化的信息,信息的处理和识别也依赖于有丰富软件支持的计算机网络,不仅可以把某些预试项目在线化,而且还可以引进一些新的更真实反映设备运行状态的特征量,从而为实现对设备运行状态的综合诊断,促进电力设备由定期维修向状态维修过渡的进程打下了基础。

## 1.2 绝缘在线监测技术的发展概况

我国对在线监测的重要性认识比较早,60年代时就提出过不少带电试验的方法但行之有效的不多。近年来,国内外对变电设备绝缘状况的在线监测进行了大量的研究,取得了很大进展,也有不少形成了产品和系统。其发展大体经历了以下三个阶段<sup>[4]</sup>:

(1) 带电测试阶段。这一阶段起始于70年代左右。当时人们仅仅是为了不停电而对电气设备的某些绝缘参数(主要是泄漏电流)进行直接测量。其结构简单,测试项目极少,而且要求被试设备对地绝缘,测试的灵敏度较差,所以应用范围较小,未能得到普及应用。

(2) 从80年代开始,出现各种专用的带电测试仪器,使在线监测技术开始从传统的模拟量测试走向数字化测量,摆脱了将测试仪器直接接入测试回路中的传统测量模式,而代之以利用传感器将被测量转换成数字仪器可直接测量的电气信号。同时还出现了一些其它通过非电量测量来反映绝缘状况的测试仪器,如红外装置、超声装置等。

(3) 从90年代开始,出现以数字波形采集和处理技术为核心的微机多功能绝缘在线监测系统。利用先进的传感器技术,计算机技术和数字波形采集与处理等技术,实现更多的绝缘状态参数(如介质损耗角正切  $\tan \delta$ 、试品电容  $C_x$ 、泄漏电流、局部放电、色谱等)在线监测。这种监测系统可以实时连续地巡回监测各被测量,监测内容丰富,信息量大,处理速度快,实现了绝缘监测的自动化。

## 1.3 在线监测原理

绝缘在线监测的基本原理是在电气设备处于运行状态中、在工作电压下监测设备绝缘的各种特征参数。因此,在线监测可以比较有效地反映绝缘的实际情况,从而对绝缘状况作出比较准确的判断。

目前我国运行的绝缘在线监测装置大体可分为两大类:集中式微机在

线监测系统和分布式在线检测系统。前者是将被测信号通过电缆或光缆引入设在中央控制室的微机进行集中监测，并迅速完成对监测数据的处理与分析。其突出优点是可以对所有被测设备实施定时或巡回自动监测，运行方式灵活、易于扩展、监测容量大、便于建立专家诊断系统，实现变电站的综合自动化。后者则是利用专用的便携式测试仪器，从固定安装在电气设备附近的专用传感器上取信号，就地进行测量。其优点是结构简单，价格较低，易于更新，便于推广；缺点是测试工作需人工参与，很难纳入变电站的整个自动化系统。

由于电气设备种类繁多，结构各异，其绝缘在线监测的项目各有不同。目前我国变电设备绝缘在线监测的主要项目如表 1-1 所列。

表 1-1 变电设备绝缘在线监测项目

变电设备	在线监测项目
油浸电力变压器	油中溶解气体、铁芯接地电流、局部放电
高压套管	介质损耗角正切、电容量
电流互感器 (CT)	介质损耗角正切、电容量
电容式电压互感器 (CVT)	介质损耗角正切、电容量
耦合电容器	介质损耗角正切、电容量
金属氧化物避雷器	全电流、阻性电流

### 1.3.1 电力变压器在线监测

#### 1. 变压器油中溶解气体监测

110kV 及以上电压等级电力变压器的绝缘材料主要为油-纸结构，在电、热、机械等应力的联合作用下，绝缘油、纸和纸板等绝缘材料将会逐渐老化、分解而产生各种气体。对这些气体进行定量测试，即可对故障的类型及严重程度进行判断，这就是油中溶解气体分析法 (Dissolved Gases Analysis, 简称 DGA)，或油色谱分析法。它作为目前电力系统对油浸电力设备常规使用的重要检测手段之一，在诊断变压器内部潜伏性故障及其发展程度上效果显著。

油中溶解气体在线监测的两个关键技术难题是现场脱气技术和定量检测技术。目前现场常用的脱气技术是利用有机合成的半透膜脱气法。而实用的现场定量检测方法，有的将实验室用的色谱仪适当简化，有的利用半导体

传感器,但这些方法在测量结果的灵敏度、稳定性和精度方面目前还不能完全满足现场的需要<sup>[5]</sup>。再加之价格比较昂贵,因此至今为止多种气体的在线监测设备的性价比还没有能达到令人满意的要求。

变压器在运行过程中所发生的绝缘故障,通常可分为过热性故障和放电性故障两大类型。过热性故障主要表现为铁芯多点接地、局部短路和接触不良等形式,放电性故障主要表现为电弧放电、火花放电和局部放电等形式。研究表明,任何一种变压器故障都会引起油中氢气含量的变化<sup>[6]</sup>。表 1-2 为不同故障类型所产生的较主要的几种特征气体,其中氢气是主要组成成份。如果油中氢气含量显著增加,通常可认为变压器内部可能出现异常。可见,理论上氢气是反映变压器可能有故障的有效特征气体之一。而在以前的测试中,氢气还没有引起足够的重视,主要是由于氢气的分子量很小,在取样和保存期间有逸散,使得测试结果可能没有真实反映油中的氢气含量。而在线油中氢气检测有利于减少传统测试中氢气的逸散问题,因而也有助于反映变压器内部缺陷。目前广泛采用的监测设备主要是透气薄膜型传感器(如加拿大 Syprotec 公司生产的 HYDRAN201 等)。

表 1-2 不同故障类型所产生的气体

故障类型	主要的气体成分	次要的气体成分
油过热	CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油及纸过热	CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、CO、CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油纸中局部放电	H <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 、CO	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、CO <sub>2</sub>
油中火花放电	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub>	
油中电弧	H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油纸中电弧	H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 、CO、CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
受潮或油有气泡	H <sub>2</sub>	

## 2. 变压器铁芯接地电流监测

为防止铁芯悬浮电位引起的放电,运行中变压器铁芯接地线常经套管引出。正常运行条件下,铁芯接地电流极小,一般不大于毫安级,当铁芯发生多点接地而导致铁芯过热故障时,铁芯接地电流会明显增加。根据经验,如果铁芯接地电流增加到 0.1A 时应采取措施。因此通过对铁芯接地电流的在线监测,可有效地发现铁芯发生多点接地故障。

### 1.3.2 电容型设备在线监测

电容型设备泛指绝缘层中含有极板或插有电容屏的电气设备，主要包括电容型的套管、电流互感器（CT）、电容式电压互感器（CVT）以及耦合电容器等，其数量约占变电站电气设备的 40%，其绝缘状态的好坏将直接影响整个变电站的安全运行<sup>[7]</sup>。电力部门每年需要花费大量的人力物力对其进行预防性试验，迫切需要开展绝缘在线监测工作。

电容型设备绝缘在线监测是电力系统中开展较早的项目之一，国外在这方面的研究始于六十年代初，国内也于同时期展开了早期研究工作<sup>[8]</sup>。由于通过带电测量介质损耗角正切（ $\tan \delta$ ）及电容量（ $C_x$ ），可较为灵敏地发现电容型设备的绝缘缺陷，目前几乎所有的在线监测系统均把该项目作为重点测量的对象之一。

目前，电容型设备的介损在线监测基本原理如图 1-1 所示。要实现电容型设备  $\tan \delta$  的在线监测，关键技术是如何准确求取反映试品性能的电流信号  $i$  和电压信号  $u$  基波的相位差。这方面的研究形成两大分支：一是主要靠“硬件”实现的监测方法，以过零点的相位比较法（也称脉冲计数法）、电压比较器法等为代表<sup>[9-14]</sup>，此外还有一些其它方法，如改进的西林电桥法<sup>[15,16]</sup>等；二是主要靠“软件”实现的监测方法，其典型代表是谐波分析法<sup>[17]</sup>。由于硬件法的抗干扰性低，硬件电路复杂，谐波对测量的影响很大，难以保证测量精度和长期稳定性。因此目前的变电设备绝缘在线监测系统大多采用软件法，利用快速傅里叶变换，求取被测电流信号与电压信号基波分量的相位差。

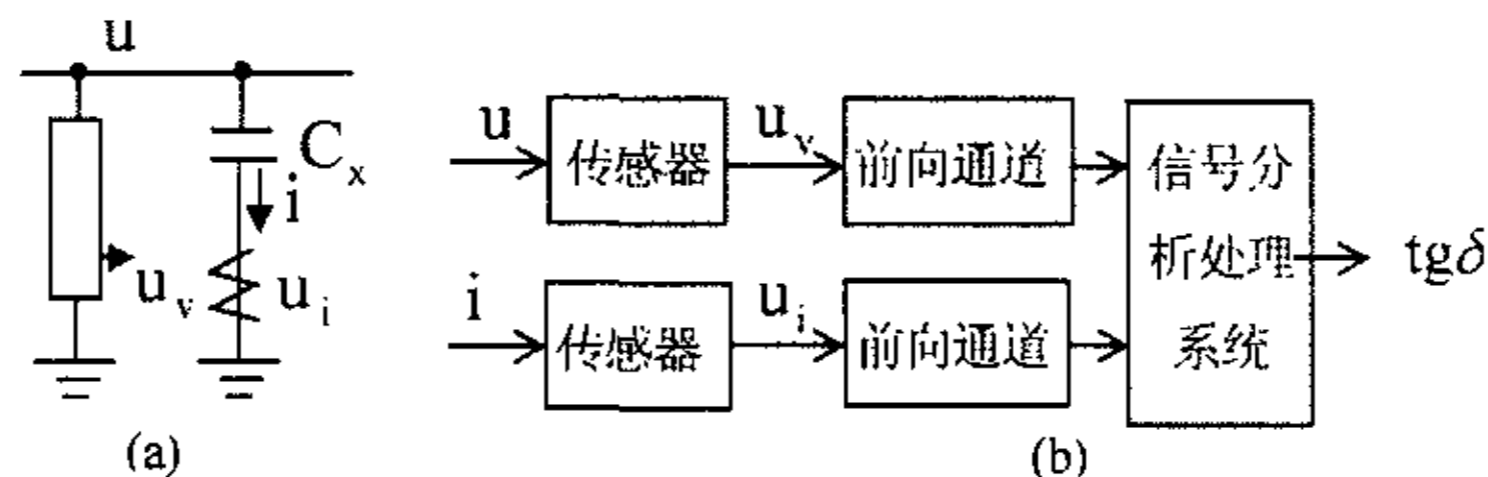


图 1-1  $\tan \delta$  在线检测的原理图  
(a) 信号的采集 (b) 检测过程框图

### 1.3.3 金属氧化物避雷器在线监测

金属氧化物避雷器（简称 MOA）是近十年来广泛使用的一种新型过电压保护设备，具有非常好的非线性特性。但由于目前采用的 MOA 常不带串联间隙，阀片的特性很可能会因长期有电流通过等而加速劣化。此外，MOA

密封结构不良造成的内部元件受潮或污秽，也是危害安全运行的重要因素。因此，监测运行中 MOA 的工作状况，准确判断其劣化或受潮程度，也是运行部门十分关心的问题。

在线监测 MOA 的全电流是发现其受潮故障的较简便而有效的方法，由于正常情况下阻性电流分量占其全电流比例较小，因此仅测全电流对检测 MOA 的早期劣化很不灵敏。在运行状态下同时监测 MOA 阻性电流的变化，是判定阀片劣化和受潮程度的更为有效和灵敏的方法。

对 MOA 阻性电流基波分量的监测，通常采用与测电容型设备  $\tan \delta$  和  $C_x$  类似的方法，如前图 1-1。如果不考虑避雷器相间的电磁干扰问题及瓷套表面泄漏电流等的影响，则可方便地计算得到阻性电流的基波峰值  $I_r$  等参数。

#### 1.3.4 运行环境及污秽在线监测

对环境温度、湿度等常规气候参数的监测，以及通过对 MOA 瓷套表面泄漏电流的监测以判断设备外部绝缘的污秽状况，这都有助于提高诊断结果的可靠性。为此，在线监测系统一般都配备了环境温湿度的测量元件。也有的装以表面泄漏电流的测量单元。其中通过 MOA 瓷套根部处所安装的金属屏蔽环来监测瓷套表面泄漏电流的大小，它既有利于对表面脏污状况进行监测，又可分析其对 MOA 阻性电流等监测结果的影响程度。如果测得瓷套表面的泄漏电流较大，则认为 MOA 阻性电流及全电流的变化很可能是由外部环境变化引起。

### 1.4 绝缘在线监测目前存在的问题

电气设备绝缘在线监测技术经过多年的发展，已逐渐得到运行部门的认可，该项技术的应用已深入到各种类型的发电厂、变电站中，但由于技术的复杂性和变电设备的多样性，使其目前还未达到十分成熟的程度，尚存在许多问题有待进一步研究解决<sup>[1]</sup>。

(1) 测试精度及其稳定性校验是在线监测系统面临的一个重要技术问题。由于现场情况的复杂性，使监测的准确度无法进行校准，更难以与停电试验结果进行对比。

(2) 传感器的特性是在线监测的关键之一。现在用量最大的传感器是罗可夫斯基线圈，为了追求对小信号的灵敏度大多采用软磁芯，其磁性易受外界条件（如温度、压力、冲击）的影响，甚至被测信号的大小不同也会影响传感器自身的角差。

(3) 基准电压的特性将影响监测结果的分析。目前抽取基准电压的方法大多是从 PT 的二次侧抽取, 实践证明, 其误差较大, 同时也增加了现场安装的复杂性。曾经有人提出从耦合电容器 (OY) 抽取基准电压的方法, 但当耦合电容器本身的损耗角较大时, 也会出现较大的误差。

(4) 由于在线监测的实时连续性, 干扰问题一直是影响在线监测系统安全可靠运行的重要因素。而且变电站处于复杂的电磁干扰环境中, 使微弱信号的监测难度增加。

(5) 在线监测会得到大量数据, 这些数据的存储、处理和识别需要一个完善的管理和诊断系统的支持, 这个系统设计的成败将会直接影响在线监测的效果。作者在本文中就这一问题进行了分析。

(6) 在线监测数据受到设备工作电压、运行方式以及环境因素的影响, 因此, 即使同样的设备其绝缘在线监测数据也会有较大的差别, 这样就很难像停电预防性试验那样规定一个统一的标准。如何通过大量的在线监测数据获得设备的运行状态是一个能否实现状态监测的又一个瓶颈。本文将着重就这一问题进行分析。

## 1.5 本文的主要工作

变电设备绝缘在线监测技术是变电设备由传统的“计划检修”向先进的“状态维修”过渡的重要技术手段, 具有巨大的社会效益和广阔的发展前景。经过多年的研究、开发, 变电设备绝缘监测技术已取得一定的进步, 但尚有许多技术问题, 如传感器技术、抗干扰技术、数据处理技术以及管理和诊断系统的结构设计等, 有待进一步研究。

本文主要研究了在线监测数据的处理及分析方法。在线数据高效的传输、存储是处理与分析在线监测数据的基础, 因而论文首先介绍了在线监测与诊断系统的基本结构。通过分析由监测系统所提供的在线监测数据, 研究了在线数据预处理的方法, 提出了基于在线数据的设备故障诊断方法, 最后建立了一个在线数据变化趋势的预测模型。本文的结构如图 1-2 所示:

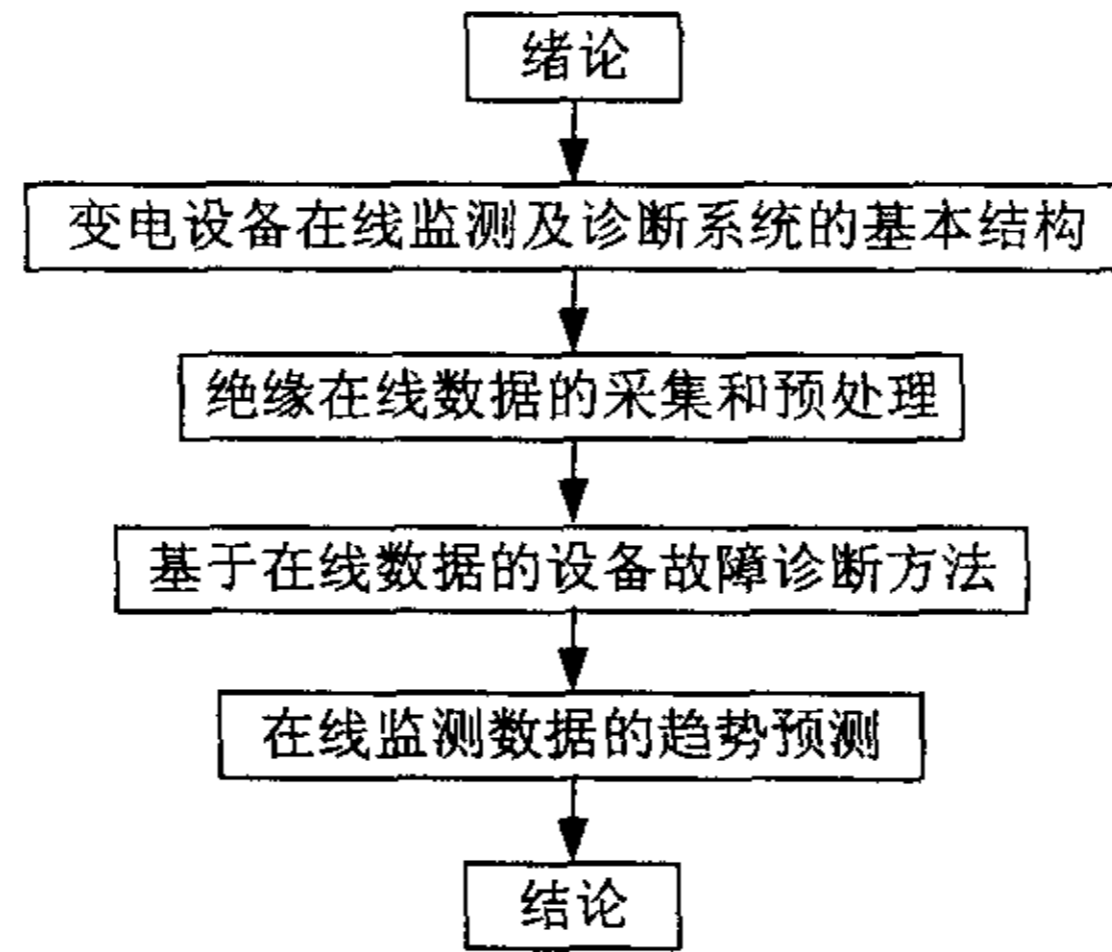


图 1-2 论文结构图

## 2 变电设备在线监测及诊断系统的基本结构

### 2.1 引言

变电设备在线监测及诊断系统需要管理及分析大量监测得到的数据,由于在线监测获得的信号往往更加及时、灵敏和真实,因而在线监测系统对于实现变电设备的状态维修十分重要,其性能直接影响状态监测及诊断的效果。因此,不论是从网络结构、知识表达技术及数据库结构等方面都对此系统提出了新的要求,本章就将对这一问题进行分析。

目前,各地供电局都纷纷建成了内部数据网络<sup>[18]</sup>,这大大改善了电力系统各种资料及信息的生存环境,有助于电力系统的管理水平上升到一个新台阶,同时也对变电设备在线监测及绝缘诊断专家系统提出了新的要求<sup>[19]</sup>。过去,专家系统多为单机版,很难实现资料的共享,这与电力系统自动化的要求很不适应。同时,现有的网络版专家系统大多采用 Client/Server 结构,它把集中管理模式转化为一种服务器与客户机负荷均衡的分布式计算模式,解决了执行效率及容量不足的问题,但在 Client/Server 模式下开发的应用系统也有一些不够完善方面,不能适应不断增长的多方面需求,主要体现以下几点:

1. 封闭式系统,不同系统之间无法交流;
2. 用户接口风格不一,使用繁杂,不利于推广使用;
3. 系统开发和维护复杂,移植及升级困难;
4. 无法包容已有系统,造成重复投资;
5. 不能接纳新技术,限制了扩展性;
6. 缺乏系统性和具有前瞻性的结构框架。

而建立在 Intranet 构架上,基于 Browser/Server 结构的变电设备监测及诊断系统却有效地克服了这些缺点,在异构分布式环境下实现了信息的集成,接口风格采用统一的浏览器样式,便于掌握,利于推广,满足了现有的电力工业发展的需要。

在专家系统的实现过程中,如何适当表达专家知识,使系统快速地进行推理,一直是开发专家系统的瓶颈。如果将面向对象技术及决策属性编码方案引入专家系统,就会使专家知识的表达更加容易、推理过程更加迅速。这种方案已应用于为上海电力局所开发的专家系统中,从调试结果来看,此方

案是比较有效的。

## 2.2 系统的结构设计

Internet 在全球的迅速普及标志着一场新的技术革命的开始，WWW（World Wide Web）方式的服务成为其中发展最为迅猛的部分，它采用跨平台的标准接口（浏览器 Browser）与标准协议 HTTP（Hypertext Transfer Protocol）来浏览与连接文本、图像、动画、声音、视频等多媒体信息，操作极为简单，且无须培训，这使得很多基于大型数据库的信息管理系统正在采用一种全新的技术模式：Browser / Server 模式。而 Web 技术与数据库技术互相渗透、融合，形成了又一新领域——分布式数据库系统。

### 2.2.1 系统网络结构

该系统由数据库服务器、Web 服务器、客户机以及网络四部分组成。其网络结构示意图如图 2-1 所示。

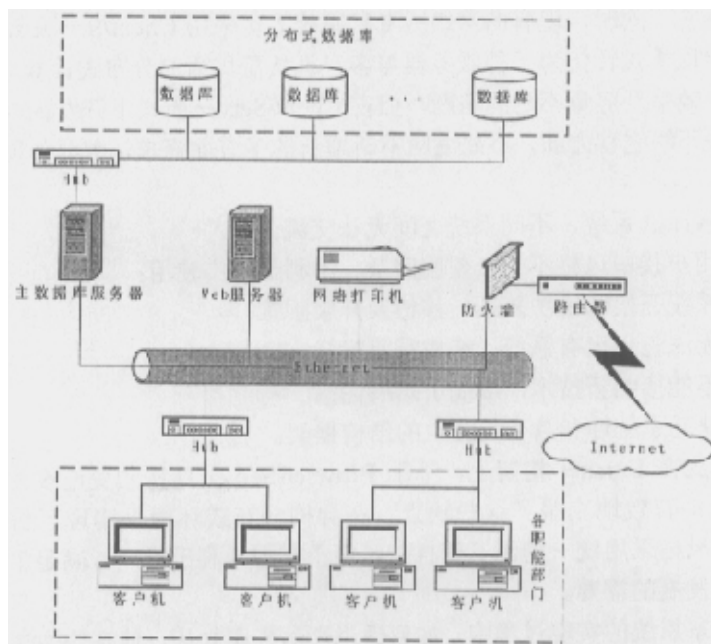


图 2-1 系统网络结构图

目前，各电力局内部大多已组成一个相对独立的局域网。数据库服务器、Web 服务器位于局内的计算机中心，由网络管理人员及开发人员集中管理，

由于应用程序、数据库以及其他一些组件全部位于服务器端，就可以直接在服务器上进行程序的升级和维护，避免了维护大量客户机烦琐工作，节约了大量的人力，物力。各职能部门只要通过客户机端的浏览器就能操作所需的数据，而无须安装其他软件。因此实现了开发环境和应用环境的分离，使开发环境独立于用户前台应用环境，避免了为多种不同操作系统开发同一应用系统的麻烦，也便于用户的使用、培训以及软件安装和升级，使开发人员可以将注意力转移到如何组织信息并提供给用户服务上来。

### 2.2.2 系统数据库结构

随着计算机网络的迅速发展，人们对实现数据充分共享的要求越来越迫切。过去的集中式数据库系统越来越不能满足这种需要，在这种背景下，产生了更利于实用的分布式数据库系统，因为它可实现对分散的、各自独立而又有共享要求的数据进行集中统一的管理，并完成统一的描述，使分散在各处的应用数据在物理上或逻辑上相对集中到一个数据库中<sup>[20]</sup>。

在电力部门，要实现不同单位之间的数据共享需要分布式数据库，即使在一个单位内部，随着电力系统自动化的推进，今后大量的变电设备安装了在线监测系统，这样就会产生大量的数据需要存储和处理，如果采用集中式数据库系统会使网络数据流量、数据库服务器的负担大大增加，甚至会使系统不能正常工作。为解决上述矛盾，采用了分布式数据库及分布式计算的方案，也就是把一个变电站的在线数据存储于一台数据库服务器上，它将数据经过预处理后得到可以反映设备运行状态的有价值的数字序列，并将其存储于设备状态表中；再通过网络将数据传送到监控室，这有效减少了网络流量。

在设计时，每一个服务器上都建有一张表，上面记录了与它相连的其它服务器的地址，每一个服务器的直接客户机可以向其服务器发出数据库访问申请，服务器首先到自己节点的数据库去查询，如果存在相应信息，则将它返回给客户机，否则，就按照地址表向其它服务器发送查询请求；如果其它服务器上有相应信息，也把它们返回给客户机，否则，告知客户机查询失败。因此，所有的客户机都能够透明地访问所有服务器上的数据库。因而就可实现一个 Web 环境下的分布式数据库应用。其结构示意图如图 2-2 所示。

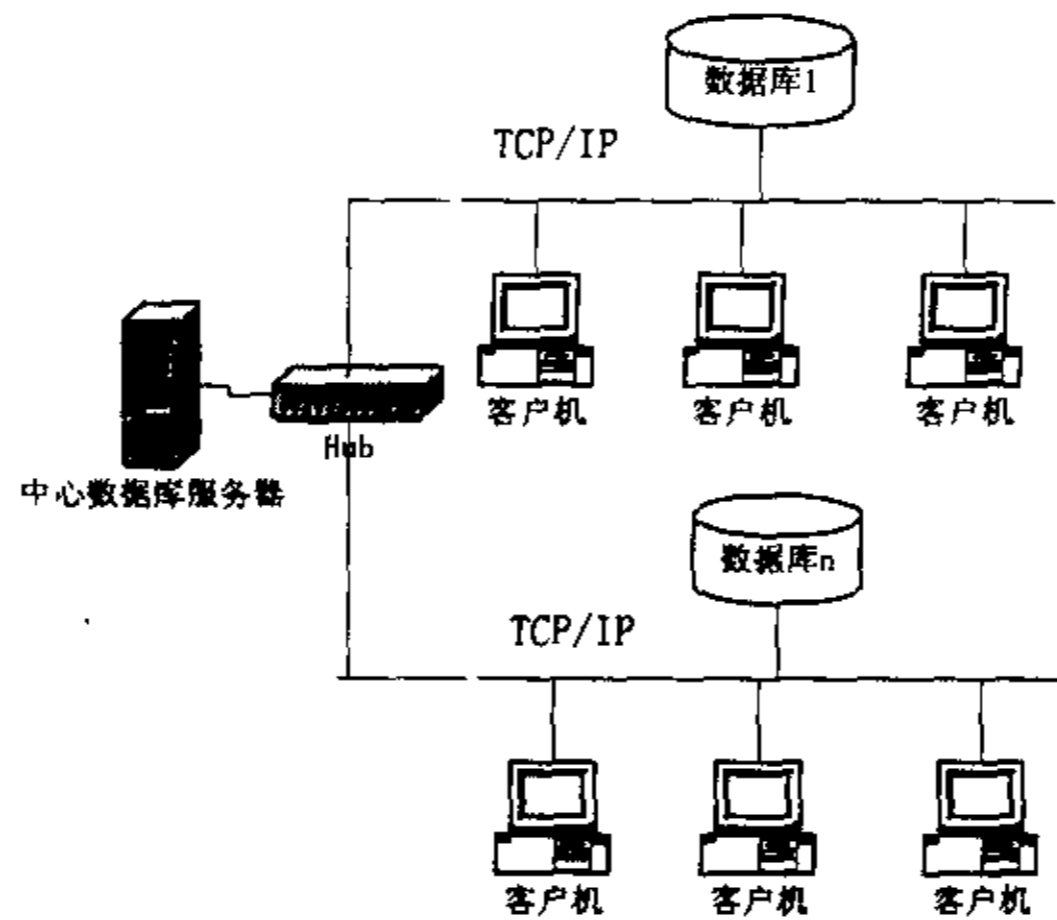


图 2-2 系统分布式数据库结构

### 2.2.3 系统功能模块结构

变电设备在线监测及绝缘诊断系统的功能模块结构框图可如图 2-3。包括台帐管理、在线监测数据管理、设备绝缘诊断、权限管理等 5 个模块。

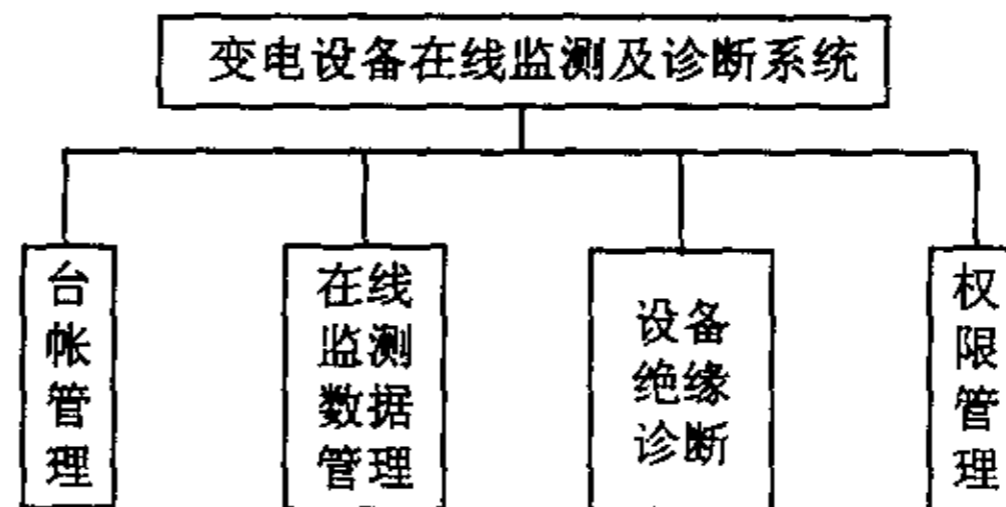


图 2-3 系统功能模块结构

台帐管理模块负责台帐数据的输入、检索、删除、修改、设备统计以及打印报表等功能。在线监测数据管理模块负责在线数据的预处理与检索功能。

设备绝缘诊断模块是这些模块中最复杂的一个模块，负责根据设备的在线检测数据和运行数据来判断设备的状态；诊断的标准中除了规程已规定的以外，还引入了纵向比较及横向比较等方法，十分重视由试验数据的变化趋势来判断设备所处的状态。对于变电设备中主要的设备，如变压器，除了应用以上的方法以外，对色谱数据分析等还引入了人工神经网络、援例推理等方法来协助诊断。全部诊断结果以报表的形式输出，有关专家的建议等也可对结果进行修正，并通过检修的结果以及反馈系统反映到知识库中，使系统的知识库不断扩充和修正。

权限管理模块负责为操作人员分配操作权限，这能有效地防止非法操作对数据造成破坏。系统管理员可为其他人员分配权限和初始密码，用户进入

系统后可随便更改自己的密码，以防别人盗用。用户对于权限范围内的数据具有读写权限，而对于其它数据仅有只读权限。如油务班人员对油务数据具有读写权限，而对其它数据仅具有只读权限。另外，系统对数据的操作进行纪录，将操作人员、操作日期以及操作内容写入到日志文件中，系统对日志文件循环更新。这样，如果出现误操作能够迅速地更正，同时也能做到责任明确。

## 2.3 面向对象的知识表达

知识表达是专家系统最重要的部分之一，它直接影响专家系统的质量。为了有效地解决这一问题，该系统引入了面向对象技术及决策属性编码方案，使开发难度大大降低并提高了推理效率。

### 2.3.1 对象的层次

任何事物都是对象，而任何复杂对象都可以由相对简单的对象层层组合而成。面向对象的知识表达方法就是以对象为中心，将任一层次的对象与一个知识框架相对应，而每个知识框架中包含有与对象相关的完成特定任务的所有知识<sup>[21]</sup>。如以油浸大型电力变压器为例介绍对象层次的划分，其结构层次划分如图 2-4 所示。

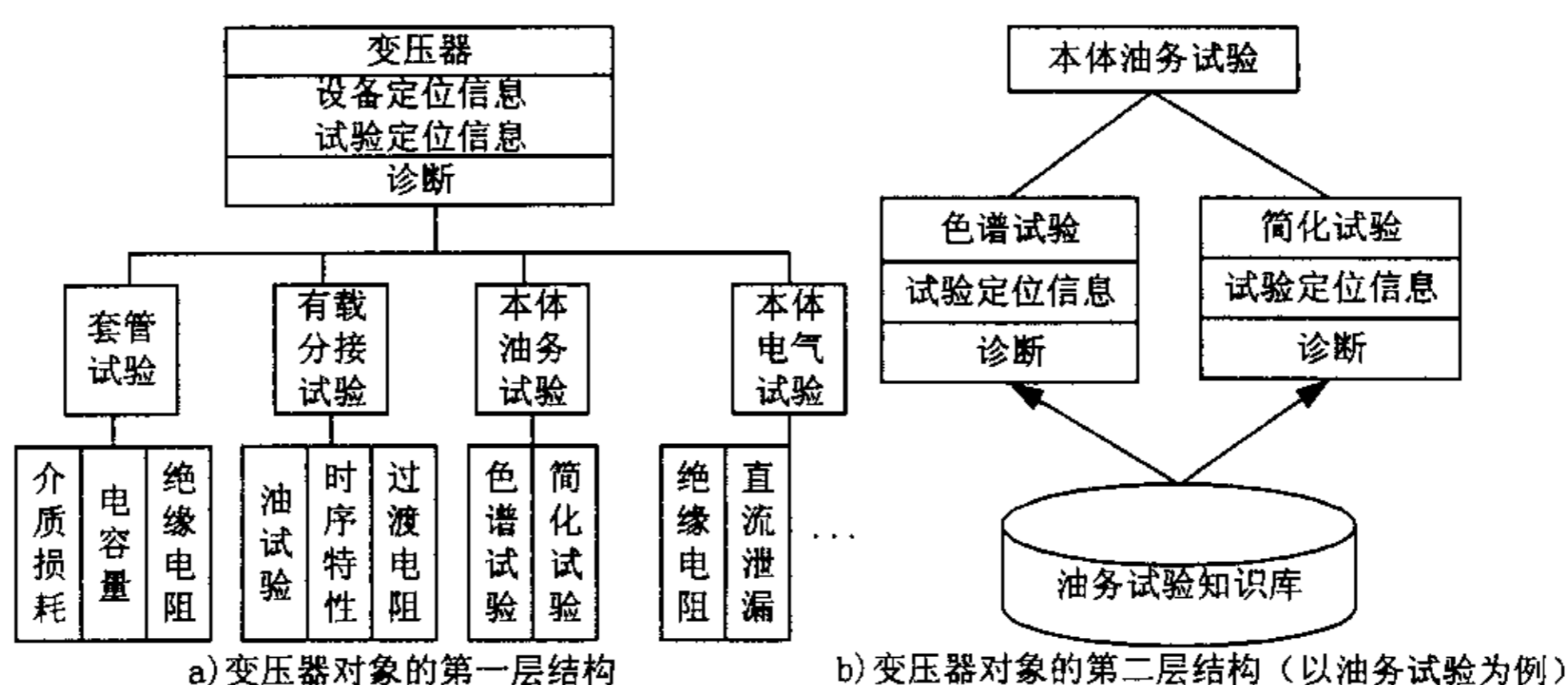


图 2-4 以变压器为对象的层次结构

### 2.3.2 知识的表达

为了让每一个知识单元包含的知识规模尽可能小，必须将专家知识作适当的表达。这样能够使推理搜索空间变小，大大提高推理效率。

对于变压器这样的大型设备来说，试验项目、故障类型都比较多，若仅

使用一个知识库，其搜索速度将会十分缓慢，构造其知识库也将是项较大的工程。该系统在设计时，将知识库分成几个相对独立的部分：套管试验、有载分接开关、本体油务以及本体电气试验等四个知识库。对于本体油务试验先广泛采用神经网络、援例推理等方法，而对于其它三个知识库则在未掌握足够范例前先采用决策属性编码的方案<sup>[22]</sup>。

首先选择条件属性，也就是所进行的试验项目，可设为  $T_1$  到  $T_n$ ；然后选择决策属性，以变压器套管的各类故障类型为例，决策属性可表示为  $D_1$  到  $D_m$ 。完成以上步骤后，就可对决策属性进行编码，编码方案有以下两种：

1. 用一个字段表示全部故障类型的组合。例如可以用一个  $n$  位的字符串对所有故障类型组合进行编码。

2. 每一种故障类型是一个决策属性，这样共有  $n$  个决策属性。

第一种方案的优点是信息表生成过程的思路比较简明。缺点是当对象具有多决策属性（同时出现多种故障类型）时，决策属性的值域空间将急剧增大，需要大量的训练样本才能覆盖决策属性的值域空间。例如对于  $n$  个故障类型，需要  $2n$  个编码。

第二种方案的优点是可以从具有多种故障特征的对象中提取出关于每一种故障的知识（与故障相关的试验项目）。

从以上两种编码方案的优缺点可以看出当故障类型较少，即  $n$  较小时以采用第一种方案比较简单；反之，宜用第二种方案。决策属性编码方案示意图如图 2-5 所示。

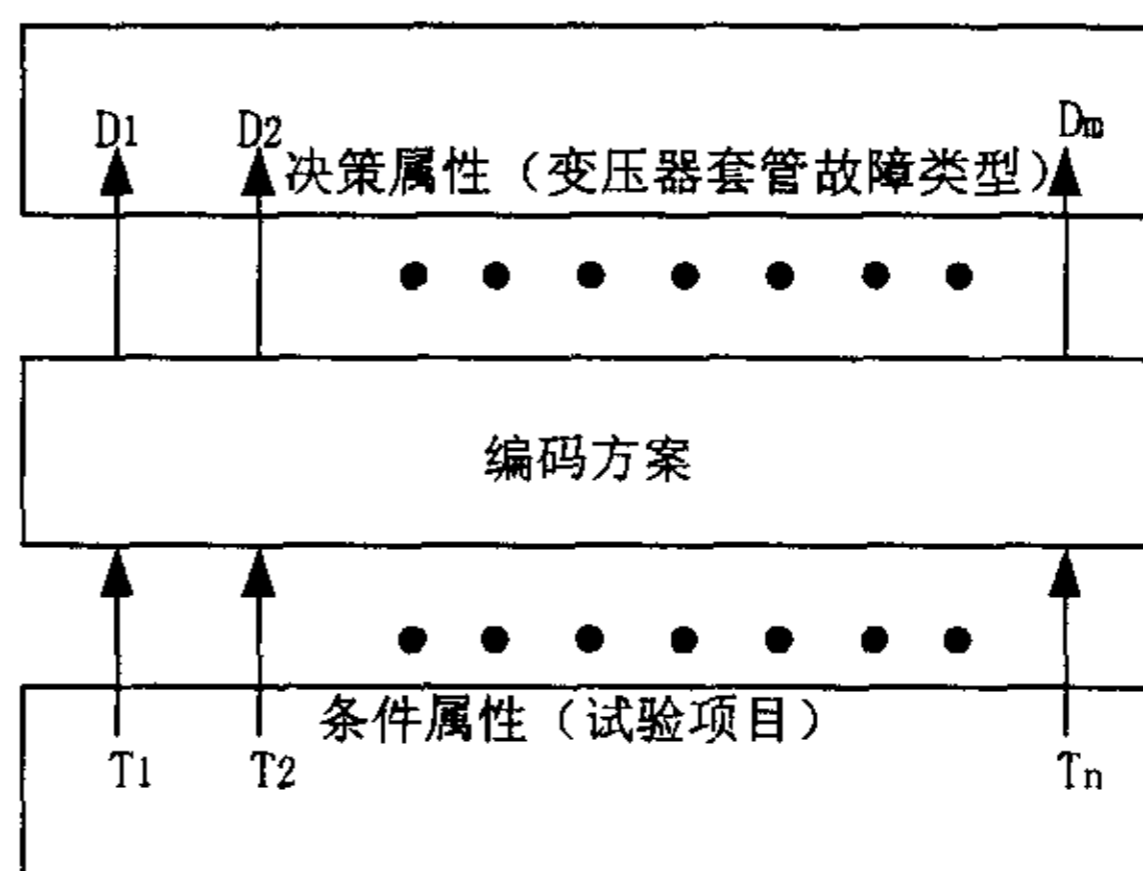


图 2-5 决策属性编码结构示意图

## 2.4 本章小结

基于 Browser / Server 模式构造变电设备在线监测及诊断系统代表着发展的必然趋势，开发的系统很容易进行扩展和维护。分布式数据库结构的采用实现了对异种数据库进行透明访问，能够使不同单位之间进行充分数据共享。本章的主要结论如下：

1. 浏览器/服务器体系与分布式数据库的引入能够较好地解决在线监测数据

量大、数据分散的问题。

2. 设备对象化以及属性编码方案的采用使系统的开发难度大大降低并提高了推理效率。

### 3 绝缘在线监测数据的采集和预处理

绝缘在线监测系统获得的大量数据是一些有序的序列，它们反映了运行电压下设备的绝缘状况。如何确定合适的采样时间间隔以正确获得监测量中所蕴含的信息是数据采集阶段必须解决的问题。由于监测仪器与被监测设备处于强干扰的环境中，在线数据很容易受到现场运行环境及一些不确定因素等的影响，另外，在数据的传输过程中也可能会出现失真。为准确判别数据，必须对在线数据进行预处理，其目的就在于剔除数据中可能出现的短时干扰脉冲信号、无意义的孤立野点以及不感兴趣的杂散信号。本章主要讨论了在线数据的采集以及预处理，为下一步准确判断绝缘状况奠定基础。

#### 3.1 在线监测数据的分类与采集

##### 3.1.1 在线数据的分类

电力设备绝缘故障按其发生、发展的进程可分为以下两种类型<sup>[23]</sup>：

1. 突发性故障 出现故障前无明显征兆，难以靠早期试验来预测，这类故障发生时间很短暂，一般带有破坏性，如系统过电压造成设备绝缘的破坏，人员误操作引起设备的损毁等属于这一故障；

2. 渐发性故障 电力设备在使用过程中绝缘因老化、受潮等使性能逐渐下降，最终形成故障，这类故障占有相当大的比重，具有一定的规律性。

绝缘在线监测主要用于对设备进行长期监测，能有效地发现渐发性故障，而对于突发性故障往往还难以起到很好预警的作用。根据实际运行的经验，可以将绝缘在线监测的信号分为以下几种类型：

1. 设备绝缘正常时，监测得的信号存在一定波动（如 CT 等的介损），如图 3-1（a）；
2. 设备绝缘正常时，监测得的信号相对稳定（如套管等的电容量），如图 3-1（b）；
3. 设备绝缘出现缓慢变化时，监测得的信号持续而缓慢的变化（如 MOA 缓慢老化时阻性电流的变化），如图 3-1（c）；
4. 设备绝缘受到短时冲击，设备未立即损坏、不致立刻退出运行的情况下，监测得的信号发生阶跃变化（如变压器短时过电压下，绕组短时放电等所造成油中溶解气体的变化），如图 3-1（d）。

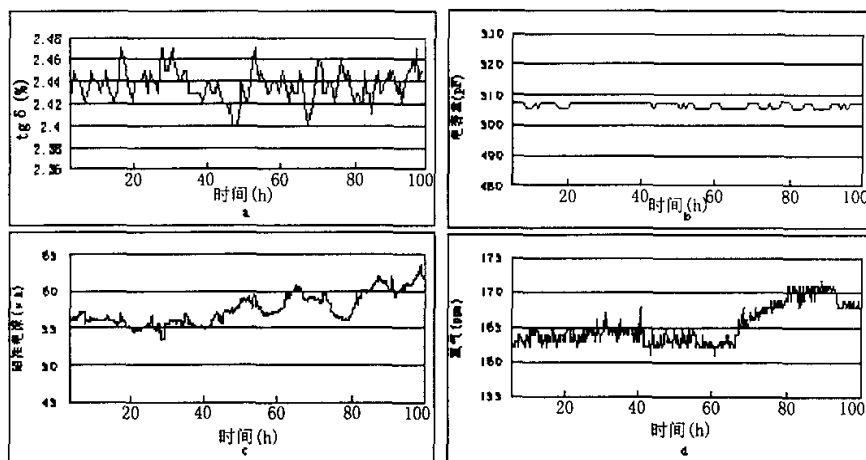


图 3-1 绝缘在线监测信号的分类

(a)信号有一定波动；(b)信号相对稳定；(c)信号缓慢变化；(d)信号阶跃变化

### 3.1.2 采样时间间隔 $\Delta$ 的确定

数据采集时采样时间间隔  $\Delta$  的确定，主要关系到被监测连续信号  $x(t)$  经离散采样成为  $\{x_i\}$  后， $\{x_i\}$  的频谱在频域中发生了变化，可能出现高、低频成分的频率混迭（简称为频混）问题。

任何一个连续信号  $x(t)$  都可分解成为不同频率的谐波的叠加<sup>[24]</sup>。设  $x(t)$  中所感兴趣的频率成分的频带范围为  $-f_h \sim f_h$ ，此  $f_h$  为  $\{x_i\}$  中感兴趣的最高频率。按等时间间隔  $\Delta$  在时域中对  $x(t)$  采样得到  $\{x_i\}$ ，此  $\{x_i\}$  在频域中的频谱是一个周期性的谱图  $X_s(\omega)$ ，其频率为  $f_s$ ，当  $f_s > 2f_h$  时，周期谱图互相分离，如图 3-2 (c) 所示；当  $f_s < 2f_h$ ，周期谱图的高频与低频部分相互重迭，如图 3-2 (d) 所示，从而使信号复原时发生频混，因此，不发生频混的条件是：

$$f_s > 2f_h \quad (3-1)$$

上式即为 Shannon 采样定理，还可以表示为：

$$\Delta \leq \frac{1}{2f_h} \quad (3-2)$$

为了可靠地防止混频常取  $\Delta = \frac{1}{2.5f_{\max}}$  进行采样。

另外，在确定绝缘在线监测数据的采样间隔时，不但要考虑采样定理，还要考虑监测设备的经济性、网络的容量以及数据存储容量等问题。

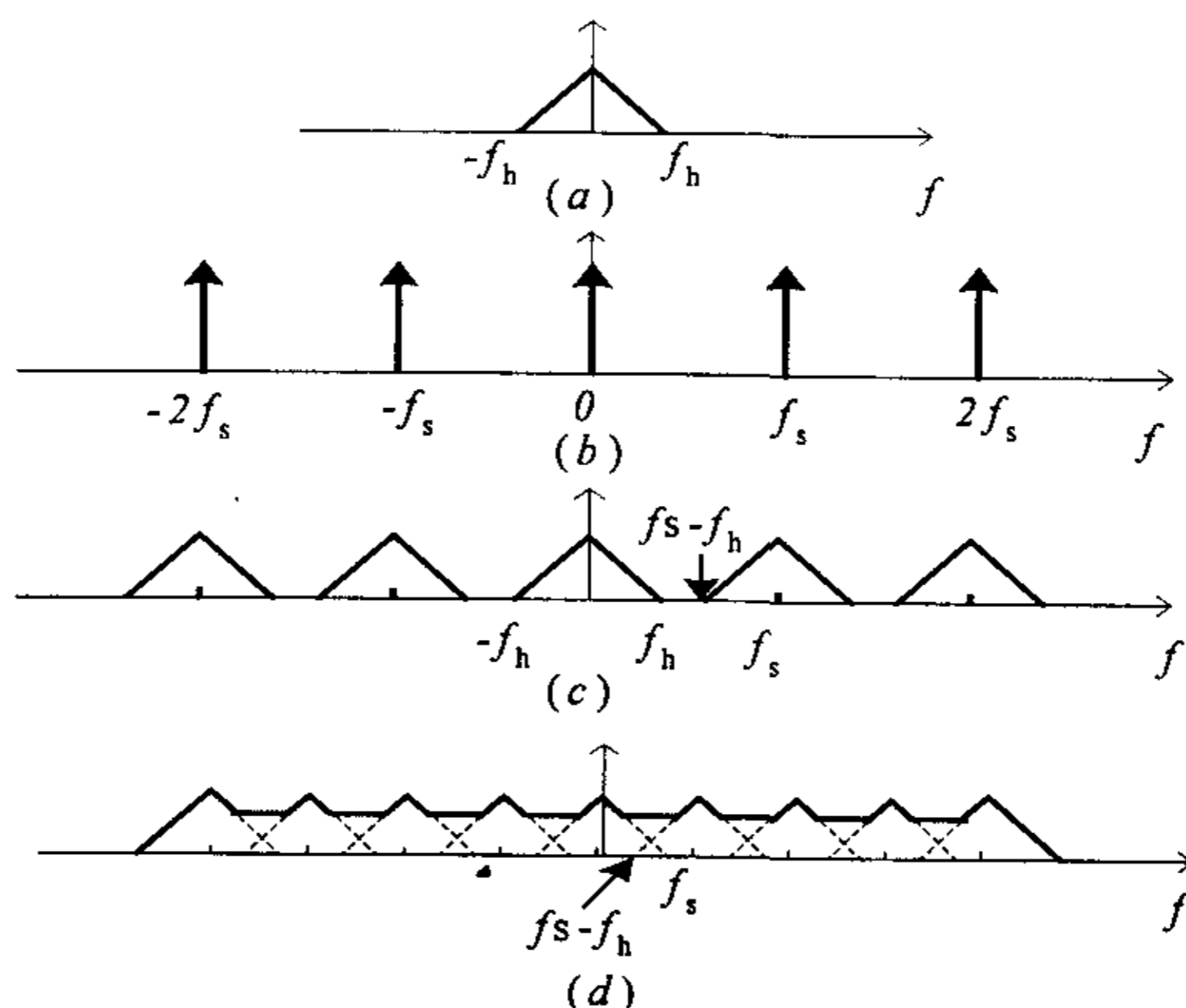


图 3-2 时域采样在频域中的效果

a)原始信号频谱; b)采样函数频谱;  
c) $f_s > 2f_h$  时采样后信号的频谱; d) $f_s < 2f_h$  时采样后信号的频谱

### 3.2 野点的剔除

在采集信号和传输数据的过程中,由于噪声干扰、数据丢失、传感器瞬时失灵等原因,造成个别数据过高或者过低,这些点是应当剔除的,称为野点,因野点会提高噪声水平,使功率谱产生偏离或产生虚假的频率成分,剔除野点的目的就是检测并排除这些过高或过低的异常数据,以提高信噪比。

绝缘在线监测数据的野点可归纳为如下几种类型:(1)孤立野点:一般在时间序列中是一个很大的尖峰,而野点邻近的数据都远小于(或大于)野点值,如图 3-3 (a);(2)孤立的连续野点:该类型野点一般在时间序列中也是一个很大的尖峰,且连续出现的几个野点的左邻和右邻的数据都远小于(或大于)野点值,如图 3-3 (b);(3)阵发噪音型野点:这种野点类似噪音,在时间序列里也像是有些规律,然而在每组野点内部却起伏很大,远离真实值的程度也大小不一,如果这样的野点很多,时间序列将会变得难以应用,如图 3-3 (c)。

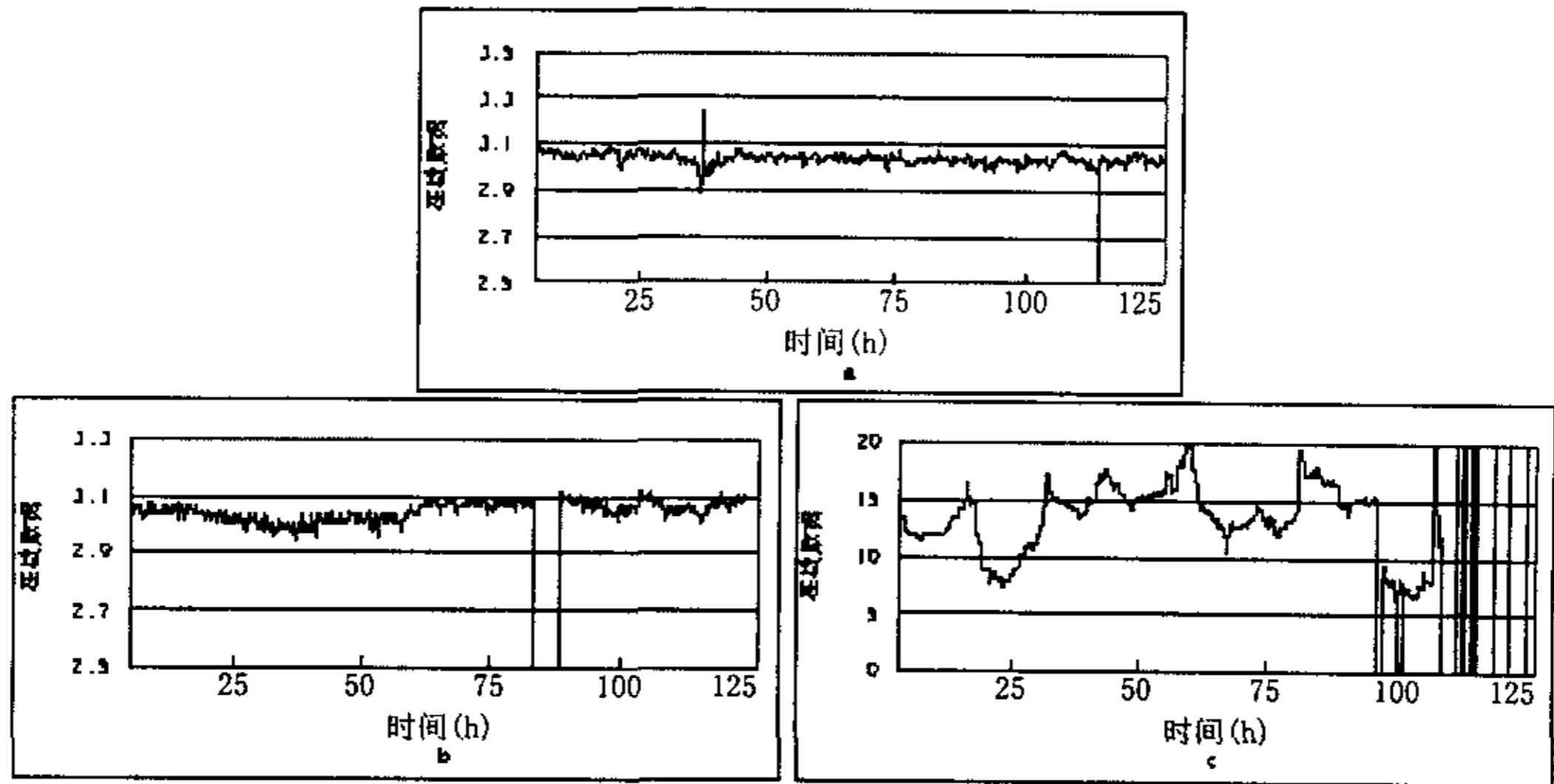


图 3-3 在线监测数据中野点的几种类型  
(a)孤立野点; (b)孤立的连续野点; (c)阵发噪音型野点

对于 1、2 两类野点, 常用差分的方法滤掉: 构造一个新的时间序列  $s_n = a_n - a_{n-1}$ , 因为在野点的左邻和右邻各有一个很大的跳跃点并且方向是相反的, 用这样的方法很容易滤掉这两类野点。而第 3 类野点不太容易滤除, 但由于这类情况往往发生在测量仪器的启动过程中, 遇到此类情况时也可以将混有野点的这段数据舍弃。

另外, 53H 算法以及改进的 53H 算法<sup>[25]</sup> 也可有效地剔除在线数据中的野点。其基本思想是根据正常状态下的在线数据确定其变化规律, 考察最新实测值的变化规律, 如果不符合则认为它是野点, 并用相应的内插值代替。改进的 53H 算法对处理少量数据效果较好, 它可处理好序列两端的数据。对于在线监测得到的数据, 数据量极大, 对两端数据的处理要求不是很高, 甚至可以舍去两端的少量数据。

分析表明, 差分法去除野点计算量较小, 53H 算法计算量相对较大。从处理效果来看, 差分法较 53H 算法差一些。因此, 对于有实时性要求的在线监测来说, 在能够满足实时性要求的前提下, 选择 53H 算法能够更好地去除野点。但是, 差分法计算量小, 易于编程实现, 在实际应用中也是一种实用的方法。

### 3.3 影响监测数据的外部因素

绝缘在线监测系统处在复杂的运行环境之中,其测得的某些参数,如电容型设备的  $\text{tg}\delta$ 、MOA 的阻性电流等,即使在设备绝缘状况良好的情况下,在线监测值仍然有一定的波动。分析认为,这些参数的波动主要是由于以下因素造成的。

#### 1. 母线电压

有些电容型设备的  $\text{tg}\delta$  与施加电压的大小有关,运行电压下的监测数据与常规预防性试验中停电后加较低的试验电压时的数据往往是不完全等效的;例如有些有局部缺陷的电容型试品其  $\text{tg}\delta$  随外施电压升高而升高,但有些含有离子型杂质的却可能相反,因此对于在线监测,当电网电压在 90-110% $U_n$  范围中波动时,电压也可能影响监测结果。

#### 2. 电压基准

测量电容型设备的  $\text{tg}\delta$ ,通常需要使用基准电压。严格地讲,基准电压应是施加在试品两端的电压,或与其同相位的某个电压向量。在停电后外施电压进行试验时,基准电压通常取自损耗极小的标准高压电容器的低压侧;而在绝缘在线监测时,只能利用现场所具备的条件,一般是从现场已有的电压互感器(P.T 或 C.V.T)的二次侧获取。对于目前现场广泛使用的 0.5 级互感器,容许的固有角差为  $\pm 20'$ ,如果用于测  $\text{tg}\delta$ ,则可能导致  $\pm 0.58\%$  的测量误差,这对于实际  $\text{tg}\delta$  值通常不大于 1%或 0.5%的电容型设备来说,影响是相当严重的。何况,PT 角差的稳定性还与二次侧负荷、环境温度、电网电压相关,以致角差不是一个恒值,因而在测量中难以消除。但是,通过分析可知,对于同一母线下的同相电容型设备,由于 PT 而引入的误差在同一时刻是相同的。

#### 3. 运行方式

运行方式的变化会改变被测设备周围的电磁场分布,如邻近线路的投运或停运将对监测结果造成影响,使得该组设备的监测数据同时发生变化。例如:a.正运行的邻相金属氧化物避雷器会通过空间杂散电容向被测避雷器提供额外的电容电流,使得通过被测相的地线侧传感器中电流的相位发生偏移,造成阻性电流在线监测结果失真,如往往表现出 A 相偏大、C 相偏小、B 相监测结果基本正常的异常现象;b.当线路处于

热备用状态时，由于隔离开关没有打开，该线路上的电容型设备（如 CT）有可能承受来自另外一个系统的电压，如果仍然使用原先设定的母线 PT 作为  $\tan \delta$  的测量基准，也会导致监测结果失真。

#### 4. 环境因素

现场经验表明，避雷器瓷套表面的泄漏电流会严重影响 MOA 阻性电流监测结果，而有些  $\tan \delta$  的在线监测值还与环境温度、湿度有较强的相关性。而避雷器的电导电流信号通常是通过传感器从底部的接地线中检测的，由于一般没有加屏蔽，因此瓷套外表面的泄漏电流不可避免地也会进入到检测回路；当瓷套表面污秽且环境潮湿或淋雨时，瓷套表面流过的阻性电流增加，导致监测得到的阻性电流明显偏大。从测量结果可见，电容型设备的  $C_x$ 、 $\tan \delta$ ，避雷器的阻性电流和全电流在每一天往往都有周期性的变化，这是由于环境的温、湿度在每一天都有周期性的波动，监测参数与环境温、湿度显示出一定的相关性。

### 3.4 绝缘监测数据的随机变化

在母线电压、运行方式、环境因素等外界条件确定的情况下，绝缘的监测参数的变化基本上就是一个确定的过程。但是由于外界影响因素的随机性，监测参数的变化也可视为一随机过程。这里的随机过程意指包含着随机成分，此外，这一随机过程中还包含着趋势成分和周期成分，用数学表达式表示即为：

$$Y_t = G_t + Z_t + E_t \quad (3-3)$$

其中， $Y_t$  为  $t$  时刻在线测值的观测值， $G_t$  为观测值的趋势分量， $Z_t$  为观测值的周期性分量， $E_t$  为均值为零的随机噪声，包括测量噪声和模型误差。如将式（3-3）表示成差分形式则为：

$$\Delta Y = \Delta G + \Delta Z + \Delta E \quad (3-4)$$

对于设备的绝缘在线监测参数来说，非突发性故障时，其趋势成分的时间变化率要远小于随机成分和周期成分的时间变化率。例如电容性设备电容量的趋势变化很小，而随机变化及周期变化很大。所以对于较短的差分时段  $\Delta t$  而言，式（3-4）中的  $\Delta G$  可以忽略，即：

$$|\Delta G| \ll |\Delta Z + \Delta E| \quad (3-5)$$

$$\Delta Y \approx \Delta Z + \Delta E \quad (3-6)$$

因此，对于较短的时段  $\Delta t$ （例如几天或几星期），对于非突发性故障，其在

线监测值的变化值  $\Delta Y$  更主要的反映了周期变化成分与随机变化成分，而几乎反映不出趋势变化。

随着差分时间段  $\Delta t$  的延长，趋势成分的累积作用会越来越明显，即式 (3-4) 中的  $\Delta G$  不能忽略，以至在  $\Delta t$  足够长时反而可以忽略式 (3-4) 中的  $\Delta Z$  和  $\Delta E$ 。但对于绝缘在线监测数据而言，计算时段也不可能太长（因为要求实时处理），一般情况下，趋势成分的时间变化率远小于随机成分，这样计算出的在线数据的变化不一定能反映出绝缘性能的趋势变化。基于以上原因，在判断设备绝缘的性能前，必须对获得的在线数据进行相应处理。

由于在线数据的变化是一随机过程，我们可根据随机过程的特点，用统计量表示其变化特征。

### 3.5 监测数据的平滑处理

为了正确识别出在线监测量的变化趋势，可以用数值滤波的方法滤掉信号中的高频背景噪声。常用的数字滤波方法有以下几种<sup>[26][27]</sup>：

(1) 中值滤波：连续输入  $N$  个监测信号，从中选择一个中间值作为有效信号，中值滤波方法简单，对脉冲噪声抑制作用很强，但不能有效地消除随机干扰；

(2) 滑动平均法：采用队列作为监测数据存储器，队列的长度固定为  $N$ ，每进行一次新的测量，把测量结果放入队尾，而丢弃队首的一个数据，同时计算队列中  $N$  个数据的算术平均值作为有效信号。滑动平均法不但具备较高的信号平滑度而且具有很高的灵敏度，因为每进行一次采样都有一次有效信号值输出，但它不能消除由于脉冲干扰而引起的采样值偏差。

上述的各种滤波算法各有所长，但对绝缘在线监测数据进行处理的结果表明，效果都不是很理想，为此作者引入了防脉冲干扰的滑动平均算法。

#### 3.5.1 防脉冲干扰滑动平均的原理

首先，采用队列作为监测数据的存储器，队列的长度固定为  $N$ ，每进行一次测量，将测量结果放入队尾，而丢弃原来队首的一个数据，这样队列中始终有  $N$  个“最新”的数据。然后根据对大量监测数据进行统计得到的极小与极大脉冲所占的比例（设为  $a\%$  与  $b\%$ ），将  $N$  个“最新”的数据从小到大排序后，从两侧分别去掉  $N \times a\%$  与  $N \times b\%$  个数据，设  $M = N \times a\% + N \times b\%$ 。最后将余下的  $N - M$  个数据的算术平均值作为信号有效输出值。防脉冲干扰滑动平均算法的框图如图 3-4 所示。

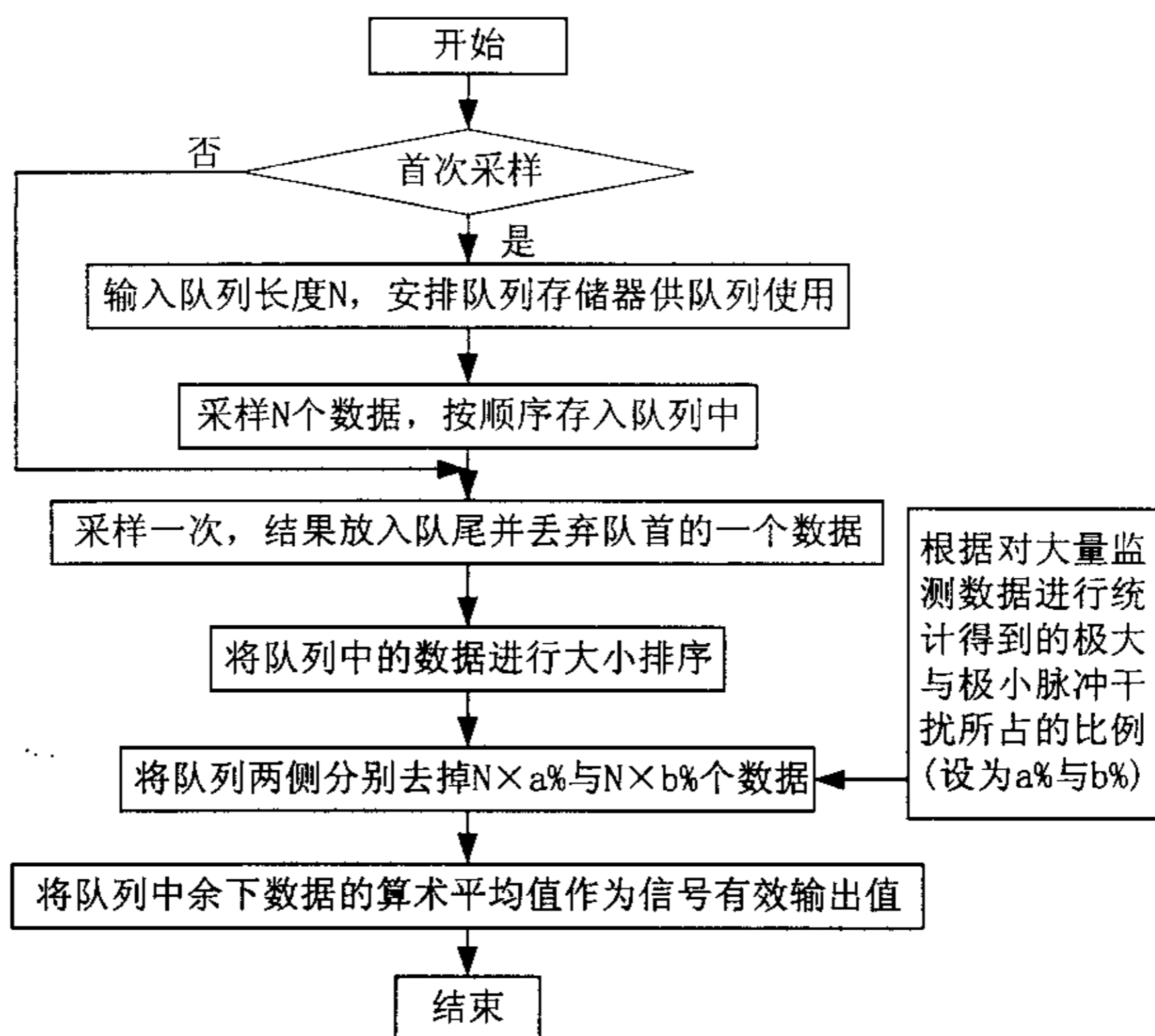


图 3-4 防脉冲干扰滑动平均算法框图

### 3.5.2 滑动窗宽度的选择

为了识别在线监测信号中的趋势成分,可对其进行滑动平均处理,滤除短历时干扰,提取长历时趋势成分。对于等时段离散随机过程,有下列形式的滑动平均分式:

$$\bar{Z}_i = \sum_{j=i-k}^{i+k} a_j Z_j \quad (3-7)$$

其中,  $\bar{Z}_i$  为对应  $T_i$  时的滑动平均值,  $a_j$  为权重系数。对于线性趋势变化有:

$$a_j = \frac{1}{2k+1} \quad (3-8)$$

$(2k+1)$  为滑动平均时间长度,我们称之为滑动窗宽度。

根据前面的分析,当  $(2k+1)$  较大时,随机成分和周期成分的累积平均会趋于零,趋势成分会显示出来。用信息处理的术语来说,就是滑动平均具有阻止短波通过、而允许长波通过的作用,其幅频特性示意图如图 3-5 所示。

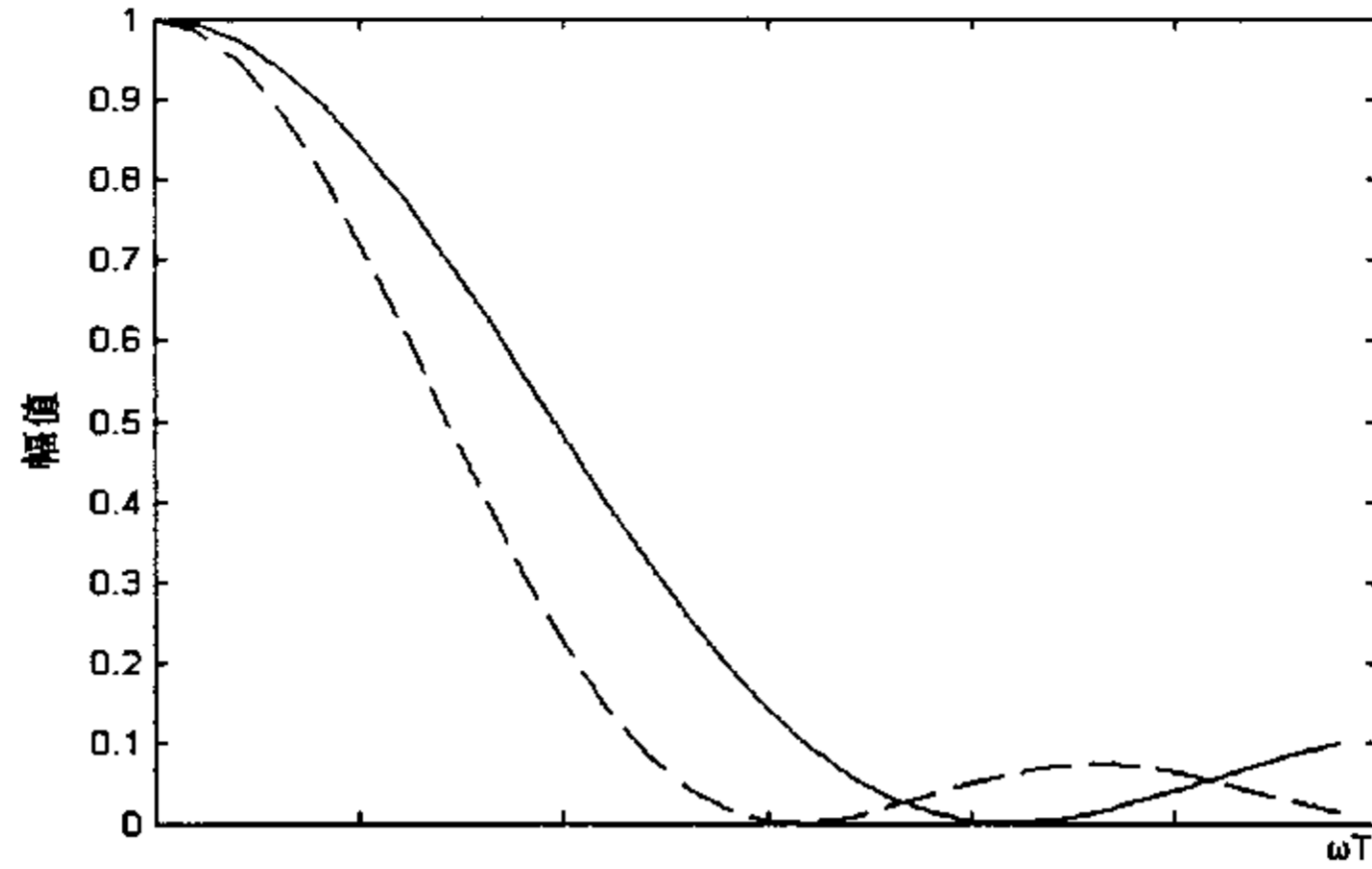


图 3-5 滑动平均在不同滑动窗宽度时频谱特性示意图  
虚线：滑动窗较宽；实线：滑动窗较窄

对于变电设备的在线监测数据，在选择滑动窗宽度时要充分考虑以下两个方面：

#### 1. 信号的信噪比

设队列中  $N$  个数据进行防脉冲干扰滑动平均处理后剩下的  $N-M$  个测量信号为  $X_i (i=1 \sim N-M)$ ，每一个测量值  $X_i$  包含信号成分  $S_i$  和噪声成分  $C_i$ ，则  $N-M$  个测量值的信号成分之和为

$$\sum_{i=1}^{N-M} S_i = (N-M)S \quad (3-9)$$

噪声的强度是用均方根来衡量的，当噪声为随机信号时， $N-M$  个测量值的噪声强度之和为

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{N-M} C_i^2} = \sqrt{N-M}C \quad (3-10)$$

上两式中， $S$ 、 $C$  分别表示  $N-M$  个测量数据的信号和噪声的平均强度。这样对  $N-M$  个测量数据进行算术平均后的信噪比为

$$\frac{(N-M)S}{\sqrt{N-M}C} = \sqrt{N-M} \frac{S}{C} \quad (3-11)$$

式中的  $S/C$  为信号处理前的信噪比，因此采用防脉冲干扰滑动平均算法处理后，信号的信噪比提高了  $\sqrt{N-M}$  倍。滑动窗的宽度越大，信噪比越大。

#### 2. 信号的时间延迟

经过滑动平均方法处理过的信号与原始信号比较有一定的时间延迟。通过严格的数学推导可以得出以下结论：滑动移动窗的宽度愈宽，信号的时间

延迟就愈长。因此对于实时性信号的处理滑动窗的选择就不能太宽，否则，信号的实时性就会失去意义。因此在选择滑动窗的宽度时，要使信号的信噪比与时间延迟这两个相互矛盾的方面尽可能满足需要：对信号的实时性要求较高的场合，在处理后的信号的信噪比满足要求的情况下，滑动窗的宽度尽量选得窄一些；而对信号的准确性要求较高的场合，在实时性得到满足要求的情况下，滑动窗的宽度尽量宽一些。

### 3.5.3 数字仿真与实例分析

我们先采用仿真技术验证防脉冲干扰滑动平均算法的有效性。首先对一个时间序列加入随机脉冲干扰，然后采用防脉冲干扰滑动平均算法与其它算法分别对其进行处理，如图 3-6 所示，其中图 a 为原始时间序列，图 b 为加入干扰后的时间序列，图 c 为经过防脉冲干扰滑动平均算法处理后的信号，图 d 为采用滑动平均算法进行处理后的结果，图 e 为采用中值滤波算法处理后的结果。通过比较分析，可以看出防脉冲干扰滑动平均算法（图 c）能够比较有效地去除信号中的干扰，而对有用信号的影响比较小。

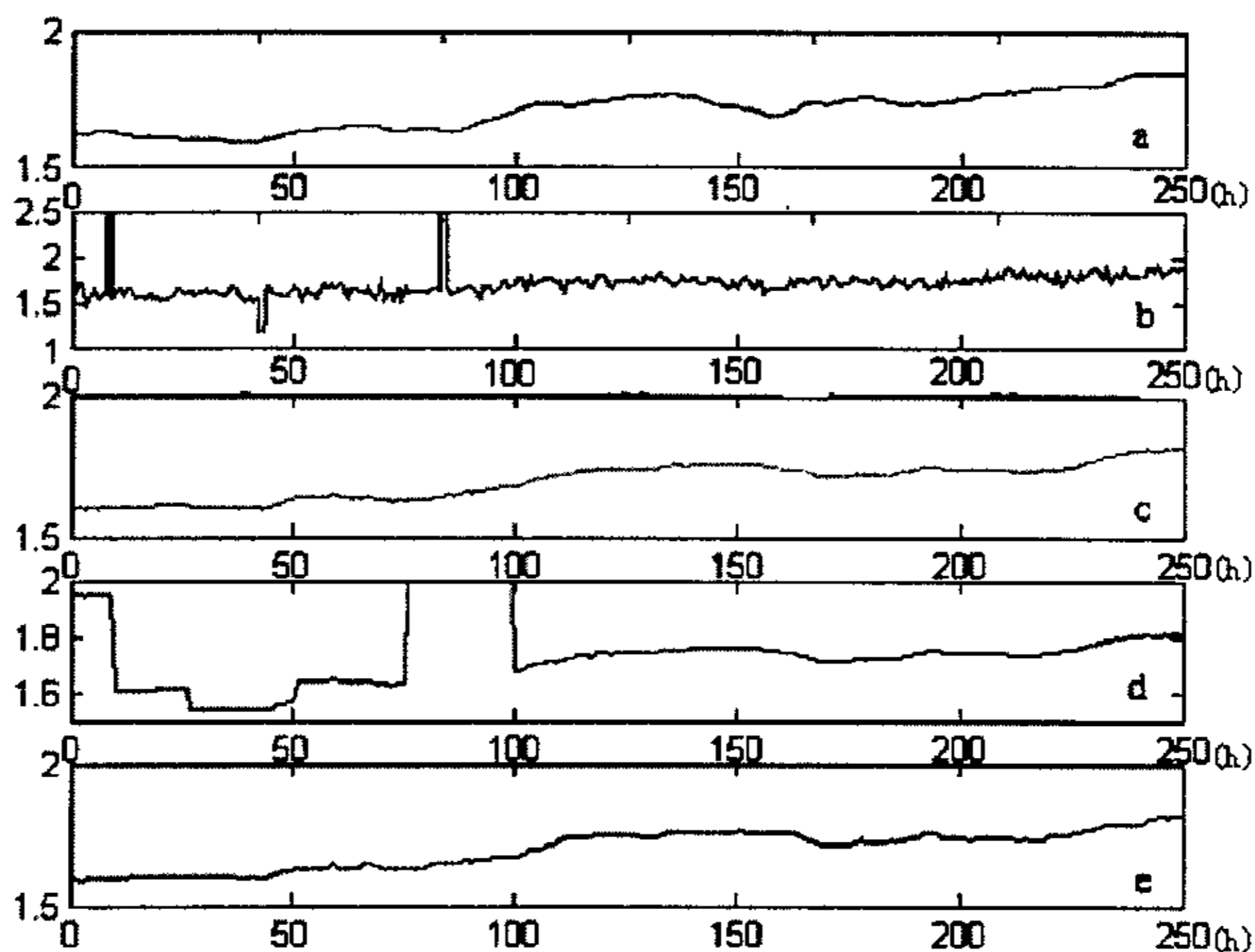


图 3-6 防脉冲干扰滑动平均算法的仿真效果

下面通过一个实例来验证防脉冲干扰滑动平均算法的实用性，图 3-7(a)

为某 CT 介损在一周内的  $\tan \delta$  的在线监测数据, 可见信号中含有大量的噪声和脉冲干扰信号。下面将采用防脉冲干扰滑动平均算法对其处理, 并与前述的各种滤波方法进行比较, 处理结果如图 3-7 中 b~d 所示。

图 b 是采用防脉冲干扰滑动平均算法进行信号处理的结果, 显然, 它不但改善了信号的平滑度, 而且有效地滤除了信号中的脉冲干扰。

图 c 是采用滑动平均算法进行处理后的结果, 信号的平滑度有所改善, 但未能抑制脉冲干扰。

图 d 是用中值滤波法对图 a 中的信号处理后的结果, 可见中值滤波算法可有效的滤除信号中的随机脉冲干扰, 但信号中的波动幅度以及信号中的随机干扰成分仍然很大。

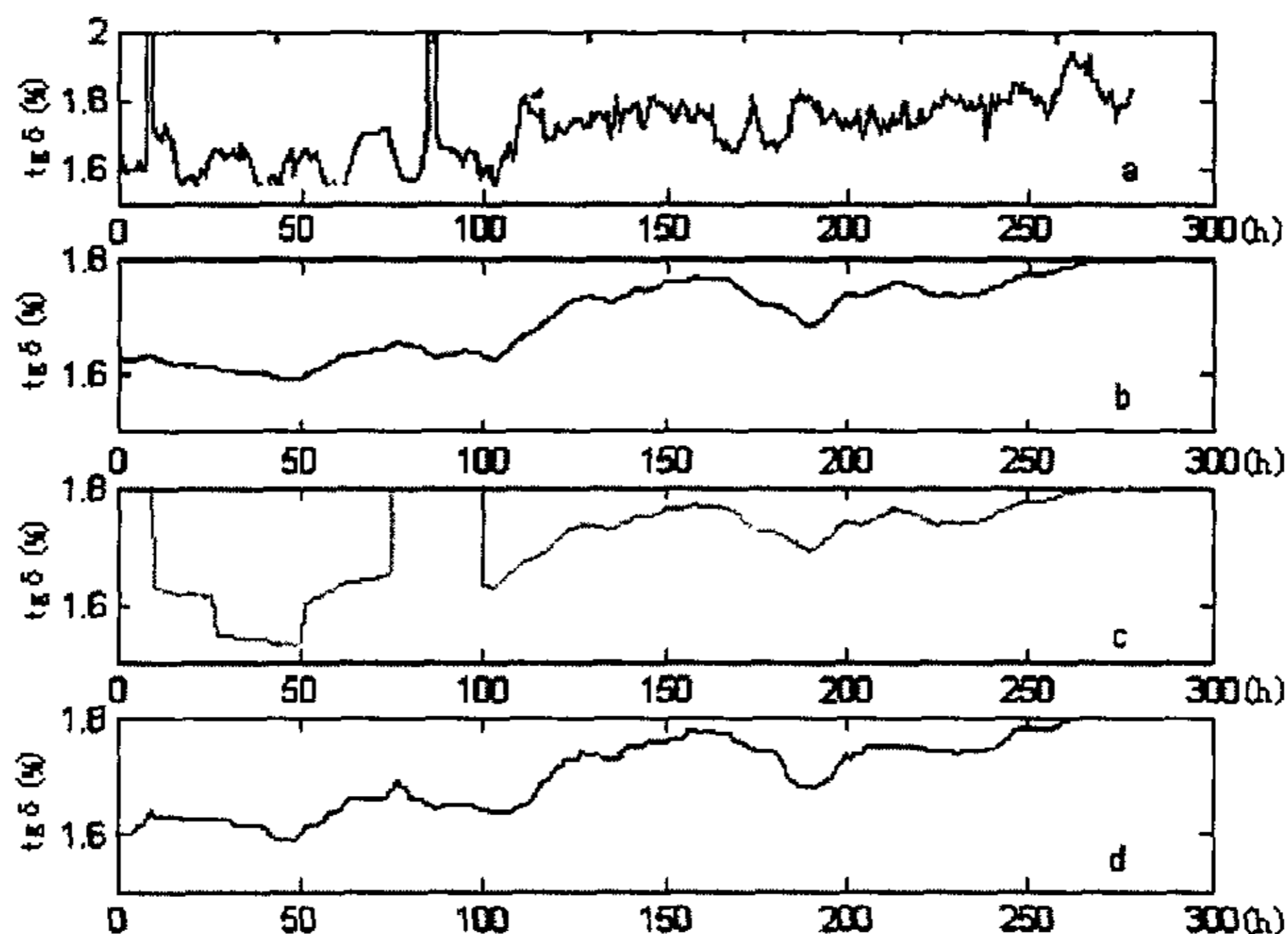


图 3-7 几种不同滤波方法的结果比较

a 现场测得的介损信号; b 防脉冲干扰滑动平均算法处理结果;  
c 滑动平均算法处理结果; d 中值滤波算法处理结果

### 3.6 本章小结

由于监测仪器与被监测设备处于强干扰的环境中, 在线数据很容易受到现场运行环境及一些不确定因素等的影响。通过分析可知, 绝缘在线监测数据的变化是一随机过程, 为了从现场测得的在线数据中获得反映绝缘状态的

要结论如下：

1. 防脉冲滑动平均算法与其它几种算法相比，不但能够改善信号的平滑度，较有效地滤除信号中的脉冲干扰，而且对有用信号的损失较小。

2. 滑动窗宽度的选择既要考虑对信号信噪比的影响，又要考虑对信号时间延迟的影响，使处理后的信号能有效反映设备的绝缘状态，并适应实时性的要求。

## 4 基于在线数据的设备故障诊断方法

设备中不同部位、不同类型的故障，引起设备功能的变化可能不同，导致设备整体几个部位状态和运行参数的变化也不同。故障诊断的任务，就是当设备中某一部位出现某种故障时，从这些状态及其参数的变化推断出导致这些变化的故障。由于状态参数的数量很多，必须找出其中的特征信息，提取特征量，这才便于对故障进行诊断。由某一故障引起的设备状态的变化称为故障的征兆（Symptom）。故障诊断的过程就是从已知征兆以判定设备上存在的故障类型的过程。

在线监测得到的数据为一连续的数据流，其中包含了设备绝缘状态的许多特征信息。从这些数据中提取设备的绝缘征兆，进而判断出设备的绝缘状态，是实现设备在线监测的一个关键。本章的内容就是研究如何根据在线数据判断设备绝缘的状态。

### 4.1 设备的故障类型与故障征兆

故障类型与故障征兆之间并不存在简单的一一对应的关系：一种故障类型可能对应多种征兆，而一种征兆也可能对应着多种故障。因此要根据在线数据对设备进行故障诊断，就必须先确定不同的故障类型对在线监测数据的影响。目前，变压器、电容性设备及金属氧化物避雷器这几类设备已安装在线监测设备的比较多，下面分别讨论这几类设备的故障类型与故障征兆的关系。

#### 1. 电力变压器

如前表 1-1，目前变压器的在线监测项目主要是油中氢气含量、接地电流等。引起油中氢气含量增长的可能因素是变压器油受潮、油中水份对金属的锈蚀反应、环己烷的脱氢反应、油的低温热解或局部放电等。理论分析可知，如果出现短时电弧放电等突发性故障，氢气含量在短时间有一个急剧的增长；而当电弧放电停止后，这一增长趋势变得缓慢甚至消失，此类故障的征兆为监测量有一个明显的阶跃变化。而对于变压器中的低能量放电和过热性故障而言，氢气含量的增长趋势并不像高能量放电那样急剧，这种增长一般是持续不断的，这类故障征兆为监测量的持续单调变化。

铁芯接地电流的增长可能是由于箱中存在异物、铁芯碰到外壳或夹件以及底座纸板受潮等因素使铁芯多点接地造成的，其故障征兆也可分为阶跃变

化与持续单调变化两种类型。

## 2. 电容型设备

电容型设备中的监测项目主要有电容量与介质损耗角正切。当其出现严重的局部放电、层间击穿等故障时，监测量一般会出现一个快速的变化，而对于受潮、老化等潜伏性故障，监测量一般是一个缓慢而持续变化的过程。

## 3. 金属氧化物避雷器

由于目前采用的 MOA 大多不再串有间隙，这样在运行期间总有电导电流通过 MOA 阀片，但在正常情况下，阻性电流分量仅占其全电流的 5-10%。MOA 的事故统计表明，绝大多数的 MOA 事故是由于受潮或阀片老化引起的，其它因素引起的故障极少。当 MOA 严重受潮时会引起全电流的变化，而在故障产生的初始阶段，全电流的变化并不明显。因此，如仅测全电流对反映 MOA 的早期缺陷不够灵敏，而 MOA 的阻性电流分量则包含了反映 MOA 绝缘状况的更为灵敏和有效的信息。

## 4.2 在线与离线测值的区别

在线监测仪与离线测试设备不太相同，测量时设备所处的状态、周围环境的影响也不尽相同，这就造成在线与离线测值存在一定的区别。对于油中气体的监测，目前应用较广泛的简易型油中气体在线监测仪仅测氢气、或是仅测得以氢为主的几种气体的综合读数，都不可能像色谱仪那样获得多种气体各自的含量。因考虑到无论是局部过热还是电弧放电，虽然形成的烃类中各气体的数量及比值有很大差异，但氢气往往总是有增加的，因而对重要的变压器采用以测量氢气为主的在线监测仪器作为“初测”还是有意义的。表 4-1 为几种在线油中气体监测器的主要特性。

表 4-1 几种在线油中气体监测器的特性

监测器	主要特性
Hydran	要脱气，读数为 $100\%H_2+18\%CO+8\%C_2H_2+1\%C_2H_4$ 的综合值
Alert	不脱气，可测 0~1200ppm 的含氢量，分四档
H2000	要脱气，读数为 $100\%H_2+5\%CO+4\%C_2H_2+8\%C_2H_4$ 的综合值

电容型设备的电容量、介质损耗角正切，MOA 的阻性电流、全电流等电气量与设备的运行方式、运行状态有很大关系，因此在线测值与离线测值也存在一定差异。下面以 MOA 的阻性电流为例加以说明，如对高压 MOA

在线监测中, 已发现即使是同一批的三相 MOA, 在安装后这三相 MOA 的在线监测读数并不相同, 如表 4-2 为一例。

表 4-2 在线监测仪的在线实测例

相序	$U_s$ (V, 有效值)	$I_0$ (mA, 有效值)	$I_R$ ( $\mu A$ , 峰-峰值)
A	54.5	1.85	390
B	54.9	1.80	250
C	54.5	1.85	110

在线监测所得的三相 MOA 的全电流  $I_0$  相差不大, 而阻性电流  $I_R$  相差较大, 而且往往是 A 相最大, C 相最小, 如表 4-2 中那样, 即  $I_{RA} > I_{RB} > I_{RC}$ 。这主要是相间耦合所引起的: 当以三相 MOA 成一直线布置时, 如以 A 相为例, 由于相邻的 B 相对此 A 相的电容耦合电流  $\dot{I}_b$  也经 A 相, 将叠加于原来流过 A 相底部的电流 (阻性  $\dot{I}_{a,r}$ ) 上, 其向量图如图 4-1 所示。于是带电监测所得的 A 相阻性电流测值显著增大成  $\dot{I}'_{a,r}$ , 同理 C 相变小, 但 B 相因左右耦合的对称而基本不变。

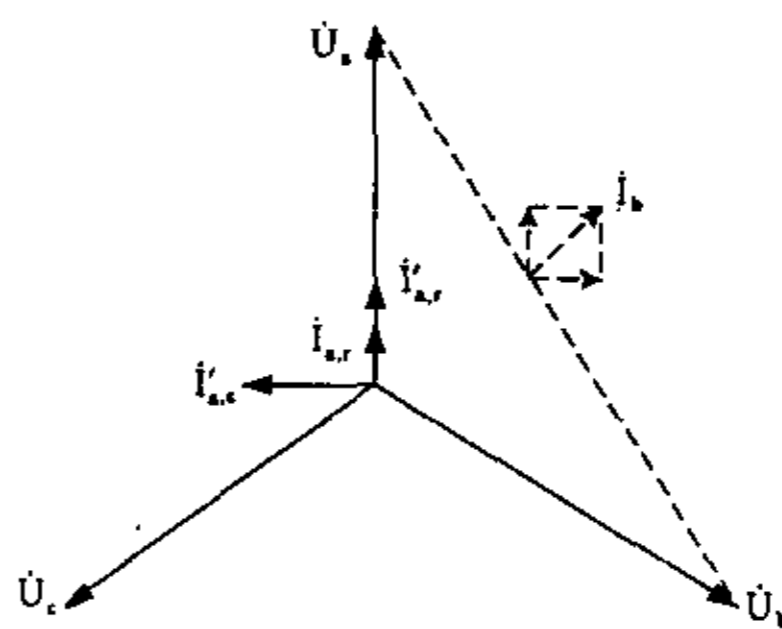


图 4-1 相间耦合使 A 相底部测得电流变化示意图

在线测值与离线测值之间存在着一定差异, 这就造成不能完全利用现有的停电预试的规程所规定的标准来分析诊断测得的在线数据, 而需要寻找一种新的判断方法对设备的状态进行衡量, 以下就将对这一问题进行讨论。

### 4.3 设备的故障诊断

当设备的绝缘状态发生变化时, 相关参数的在线测值也会发生相应的改变。如何根据在线测值的变化来判断设备的绝缘状态, 是设备故障诊断的关键所在。当设备正常工作时, 在线测值与其变化率基本保持不变, 且同一母线下的同类设备的在线测值具有很大的相似性。但当某一设备存在缺陷或潜伏性故障时, 无论故障征兆为阶跃变化还是持续单调变化, 在线测值的绝对值和其变化率都会有所变化, 同一母线下同类设备的在线测值的相似性也会有所丧失。因此本文将以下三类数据作为故障诊断时的特征量: (1) 在线测值

的绝对值；(2)在线测值的变化率；(3)同母线下同类设备在线测值的相似度。

#### 4.3.1 诊断判据的设定

在确立了特征量的前提下，根据设备在正常运行情况下监测参数序列的特性，本文尝试其诊断判据的确定方法。但从目前的状况来看，由于缺乏在线诊断的经验尤其是缺少在设备出现故障前后的在线监测数据，因而目前还难以提出完全符合实际情况的规则。本文认为通过找寻正常状态下的规律，提出了诊断的参考判据，随着数据的不断积累可进一步对参考判据加以校正与改进。

对于一般的随机过程，要刻画其本质，需要研究其高阶矩函数，因此我们总希望所研究的工程问题可看作正态的随机过程，这样可以应用  $3\sigma$  理论来确定在线数据判据，使处理简化。下面将对一正常运行情况下的参数序列的特征进行分析，看其是否为正态的随机过程。

如将某变电站某 CT 的  $\text{tg}\delta$  作为特征量，并利用其在 2000 年 6 月 10 日至 30 日间的在线数据。这些数据与其预处理后的数据如图 4-2 所示。

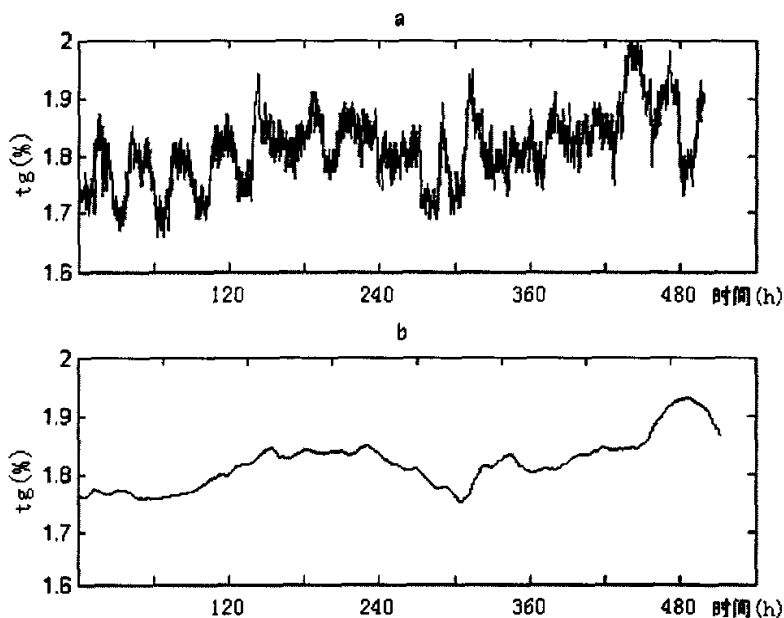


图 4-2 某 CT 的  $\text{tg}\delta$  在线测值  
a: 处理前; b: 处理后

本文利用 K 检验方法（柯尔莫哥洛夫检验）检验此在线数据是否符合正态分布<sup>[28]</sup>，表 4-3 为其统计参数及置信概率为 0.05 时接近正态分布的显著性水平。

表 4-3 数据处理前后的统计参数

	处理前	处理后
平均值 (%)	1.82	1.82
标准方差	0.061	0.043
显著性水平	0.00	0.00

从表中的数据可以看出，此在线数据不符合正态分布，这可能是由于在线数据的一些特点造成的：在线数据中含有大量的趋势及周期性分量，而且在经过预处理后，周期性分量及随机分量基本已被滤除，但还存在趋势分量。作者对从上海电力局沪南所得到的在线数据进行了校验，这些在线数据一般不符合正态分布。对于在线数据的变化率，利用同样的方法对其进行检验发现，一般也不符合正态分布。

在进行统计分析时，必须选择一种概率分布模型，当符合某种过去证明有效的分布时，可以直接利用，当没有一种模型合适时，可以用绘制直方图的方法，如图 4-3 所示。下面是建立直方图的具体步骤：

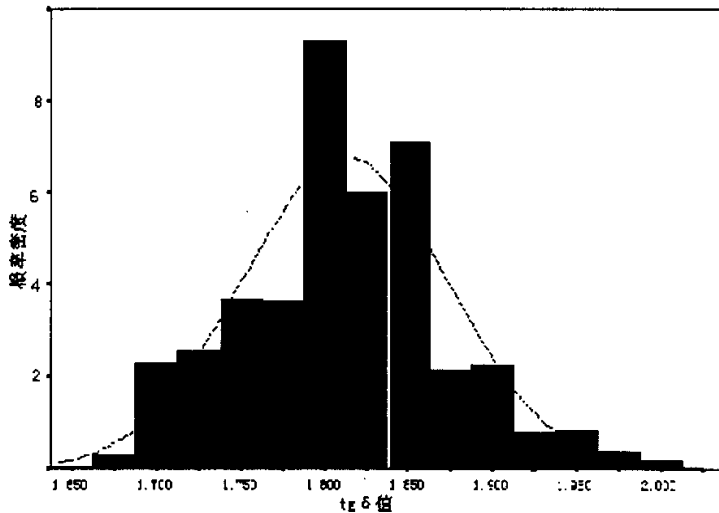


图 4-3 某 CT 的  $\text{tg}\delta$  的分布直方图

首先找出数据的范围（即数据的最大值及最小值），然后选择一个间隔

宽度,使得数据能分成  $N$  组。但为了搜集尽可能多的关于分布性质的信息,数据分组的数目  $N$  必须合理,如果所分的间隔数太少,则分布的性质由于缺乏清晰度而变得模糊不清。如果间隔数太多,则巨大的频数波动将掩盖了分布的性质。式 (4-1) 为合理间隔宽度  $\Delta$  的估算公式<sup>[29]</sup>

$$\Delta = r[1 + 3.3 \log_{10}(N)]^{-1} \quad (4-1)$$

其中  $N$  为数据点的数目,  $r$  为数据的范围。设  $n_1, n_2, \dots$  是实际数据出现在各不同间隔中的频数,且  $\sum_i n_i = N$ 。用  $f_i$  来表示第  $i$  个间隔的概率密度,经过

推理可得

$$f_i = \frac{1}{\Delta} \frac{n_i}{N} \quad (4-2)$$

根据计算所得  $f_i$  绘制出近似逼近此在线数据的概率密度分布曲线,当新在线数据对应的概率密度小于某一数值时,应该对该设备加强监视。

而同相且同类设备的所处环境、运行方式基本相同,因此其在线测量数据具有很大的相似性。在同类比较时,有人直接采集两组设备的差值,即观察其相对变化的方法;但目前监测设备不少仍采用依次测量的方法,没有实现同步测量,这就造成相对变化值受周围干扰影响较大,没有充分发挥抑制周围干扰的作用。本文提出用最大相关系数的方法进行设备间的相对比较,它有利于分析两个信号之间的相似程度。

对于数字信号  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$ , 它们的互相关公式为:

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) x_2(n+j) = r_{12}(-j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) x_2(n-j) \quad (4-3)$$

但是当两信号仅仅幅值发生变化时,计算得到的相关值也不同。因而,如要达到使相关运算的结果真正反映信号之间的相似性,排除信号幅值的影响,可利用式 (4-4) 对相关运算作归一化处理:

$$\rho_{12}(j) = \frac{r_{12}(j)}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (4-4)$$

其中  $\sigma_1 = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) \right]^{\frac{1}{2}}$ ,  $\sigma_2 = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_2^2(n) \right]^{\frac{1}{2}}$ 。

$\rho_{12}(j)$  称为相关系数,它的取值区间为  $[-1, +1]$ : 如  $\rho_{12}(j)$  为  $+1$ , 表示两个信号 100% 相关; 如为  $-1$ , 表示它们 100% 负相关, 即形状完全一样, 但相位正好相反; 如为  $0$ , 表示两个信号完全独立, 毫无关系。

本文取同相两 CT 的介损信号作为研究对象，其平滑处理前后的波形如图 4-4 所示。

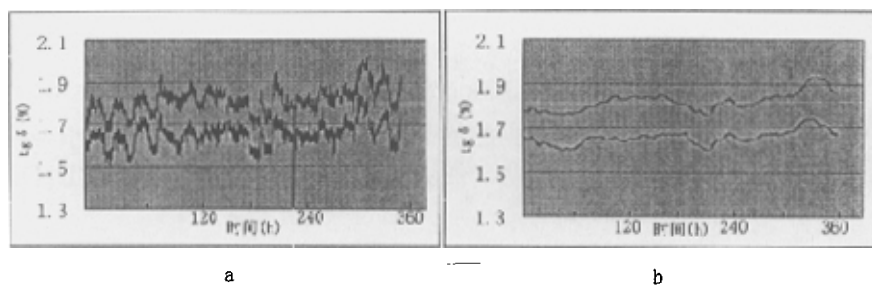


图 4-4 同相两 CT 的介损信号

a: 处理前      b: 处理后

根据式 (4-3) 计算出两组信号的相关系数，可以看出对信号处理后作相关分析得到的结果波动变小，相关系数变大，如图 4-5，因此一般取平滑处理后的数据进行相关分析。

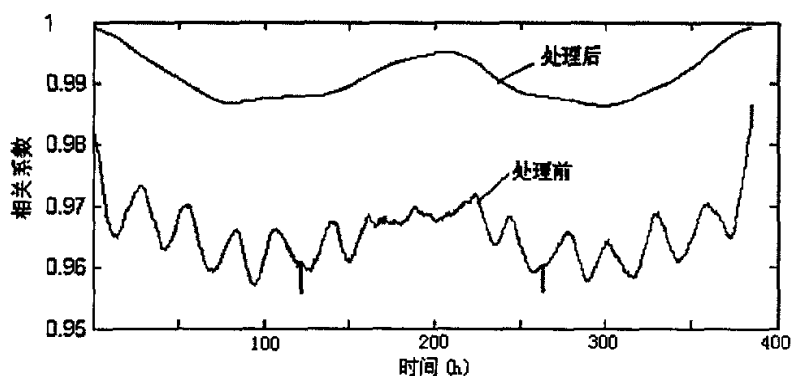


图 4-5 同相两 CT 的介损信号的相关系数

在运行过程中，当一个设备的绝缘出现异常时，在线测值的规律就会与正常时有所不同，与同相同类设备在线测值的相关系数也会相应发生变化，根据这种变化就可判断设备的绝缘是否存在故障。例如当图 4-4 中的一个 CT 的介损发生阶跃变化后，两 CT 在线信号的相关系数就发生了变化，如图 4-6 所示。

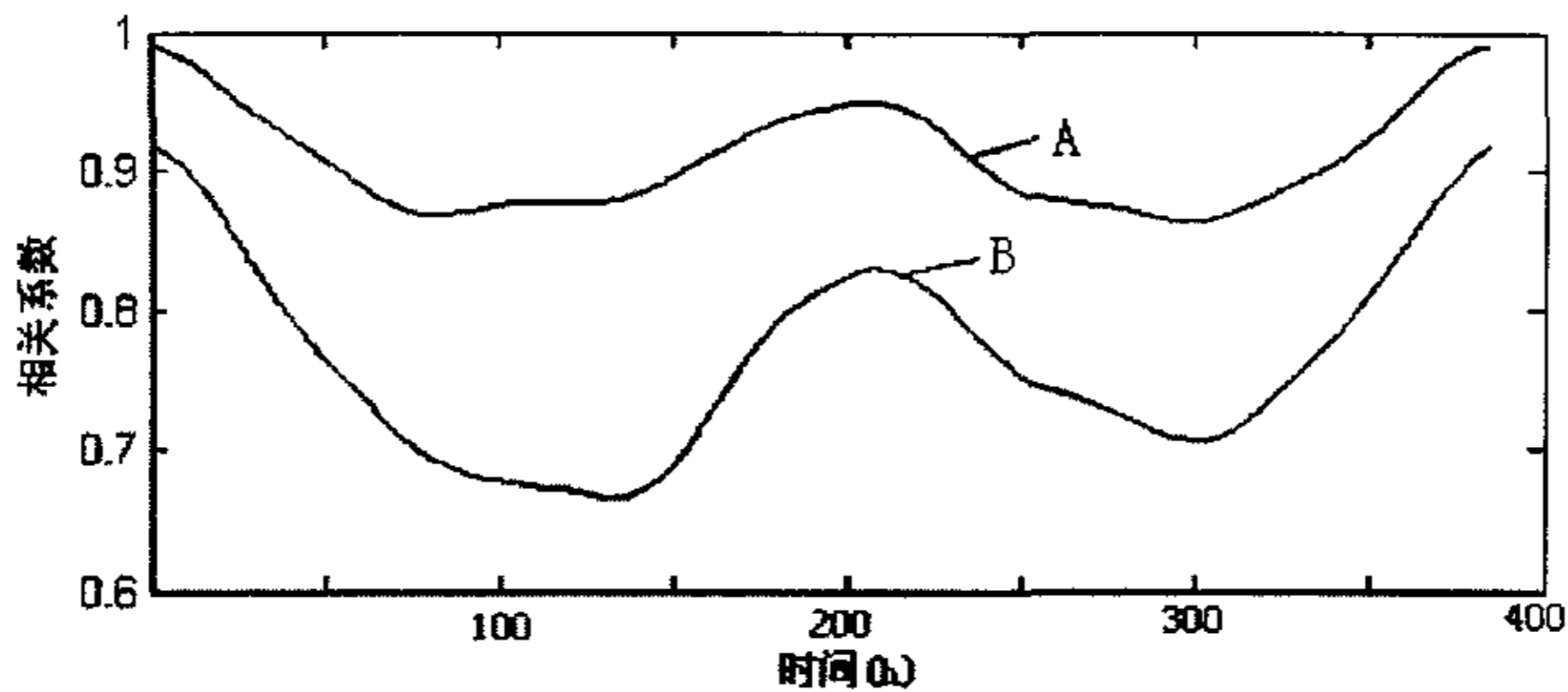


图 4-6 同相两 CT 介损信号的相关系数  
A-两 CT 均正常时；B-其中一 CT 发生故障时

#### 4.3.2 变电设备在线诊断流程

基于在线监测数据进行故障诊断时，如果仅仅依据监测参数的绝对值，则对于阶跃变化模式可能适用，而对于持续单调变化模式就不太适用了。因此本文提出了用绝对值、变化率、同类设备的相对比较这三类参量作为故障诊断特征量。根据 4.3.1 节中提出的特征量阈值的确定方法，并结合现场的实际运行经验，设定出特征量的阈值的大小，将测到的在线值与其相应的阈值进行比较。在运行经验不太丰富的情况下，这三类特征量的权系数暂且设为相等，即当这三类特征量中有一个超过阈值时，就表明监测量超标；今后随着运行经验的丰富，可以根据实际情况调节特征量的权系数，使其更符合实际运行的需要。根据以上的分析，提出了在线诊断系统中变电设备的诊断流程，如图 4-7 所示。

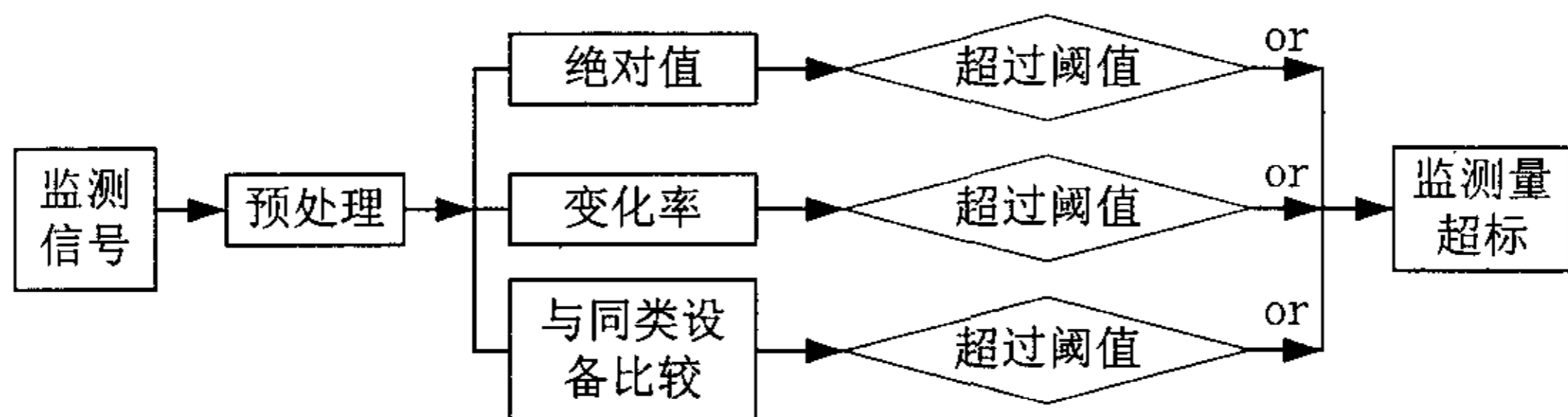


图 4-7 变电设备的诊断流程

#### 4.4 本章小结

故障诊断的过程就是从已知征兆判定设备中存在的故障类型的过程。本章通过分析变电设备的故障类型与其征兆之间的关系，将故障征兆分为阶跃变化与持续单调变化两种类型。由于在线数据与离线试验数据存在较大区别，原停电后预试规程中规定的标准值不适合作为在线数据的判据，因此本章对在线数据判据的设定作了一些研究，主要结论如下：

1. 经过检验，所得的一些在线监测数据的分布一般不符合正态性分布，因此  $3\sigma$  理论不能适用于在线数据判据的设定。
2. 为了更有效地判断设备的故障，作者建议将下列三类数据作为故障诊断时的特征量：(1)在线测值的绝对值；(2)在线测值的变化率；(3)同母线下同类设备在线测值的相似度。
3. 提出了在线诊断系统中变电设备诊断流程的建议。

## 5 在线监测信号的趋势预测

趋势分析主要是在信号监测的基础上,估计设备状态的发展趋势,对设备的优劣趋势作出预测。技术人员根据预测的结果,合理地安排设备的维修,这可以充分发挥设备的工作潜力。因此,趋势预测是故障诊断中的一个重要环节,是合理安排生产的主要依据之一<sup>[30]</sup>。

监测信号的趋势预测是根据监测信号过去和现在的状况,科学的预测和推断其未来的发展趋势和方向。预测的精度很大程度上取决于所采用的预测方法是否适合于预测对象。预测方法一般以时间序列进行数据建模。考虑现场的实际需要,本文提出采用自回归和滑动平均 (ARIMA) 模型进行趋势预测,计算简单,易于满足现场对实时性的要求。

### 5.1 趋势分量的提取

前已述及,变电设备绝缘状态的在线测值受到周围环境、系统负荷等具有周期变化特性因素的影响,而且绝缘状态随着时间推移也会发生缓慢的变化,因此在线测值的变化具有趋势性与周期性。如前面 3.4 节已讨论过,在线测值可以看作一包含趋势和周期性分量的随机过程,因此可用如下模型表示:

$$Y_t = G_t + Z_t + E_t \quad (5-1)$$

设在线测值序列为  $Y_1, Y_2, \dots, Y_T$ , 其中  $T$  为序列长度,若能够确定序列的周期,即可利用滑动平均法提取序列中的趋势分量:

$$G_t = \frac{1}{m} \left[ \sum_{i=-m+2}^{-1} Y_{t+i} + \frac{1}{2} (Y_t + Y_{t-m+1}) \right] \quad (t = m, m+1, \dots, T) \quad (5-2)$$

式 (5-2) 是以  $m$  为周期、2 阶滑动平均数字滤波。经数字滤波后,  $G_t$  基本上已不再含周期分量,从观测数据序列中分解出趋势项后,就可对它进行描述、建模。下面采用自相关来提取周期信号的周期:

周期信号的自相关函数会呈现周期性,而随机信号的自相关函数随着时差  $\tau$  的增大迅速下降,依据这一事实,我们可以用自相关来提取含噪声周期信号的周期。图 5-1 为一在线测值序列及其自相关实例图。图中 a 为某金属氧化物避雷器在线监测系统所提供的 2000 年 6 月 2 日至 2000 年 6 月 15 日的 325 个阻性电流数据序列,数据间隔为一小时。而 b 为对 a 序列的自相关图。由图可见,在线测值的周期  $m$  大约为 24h。

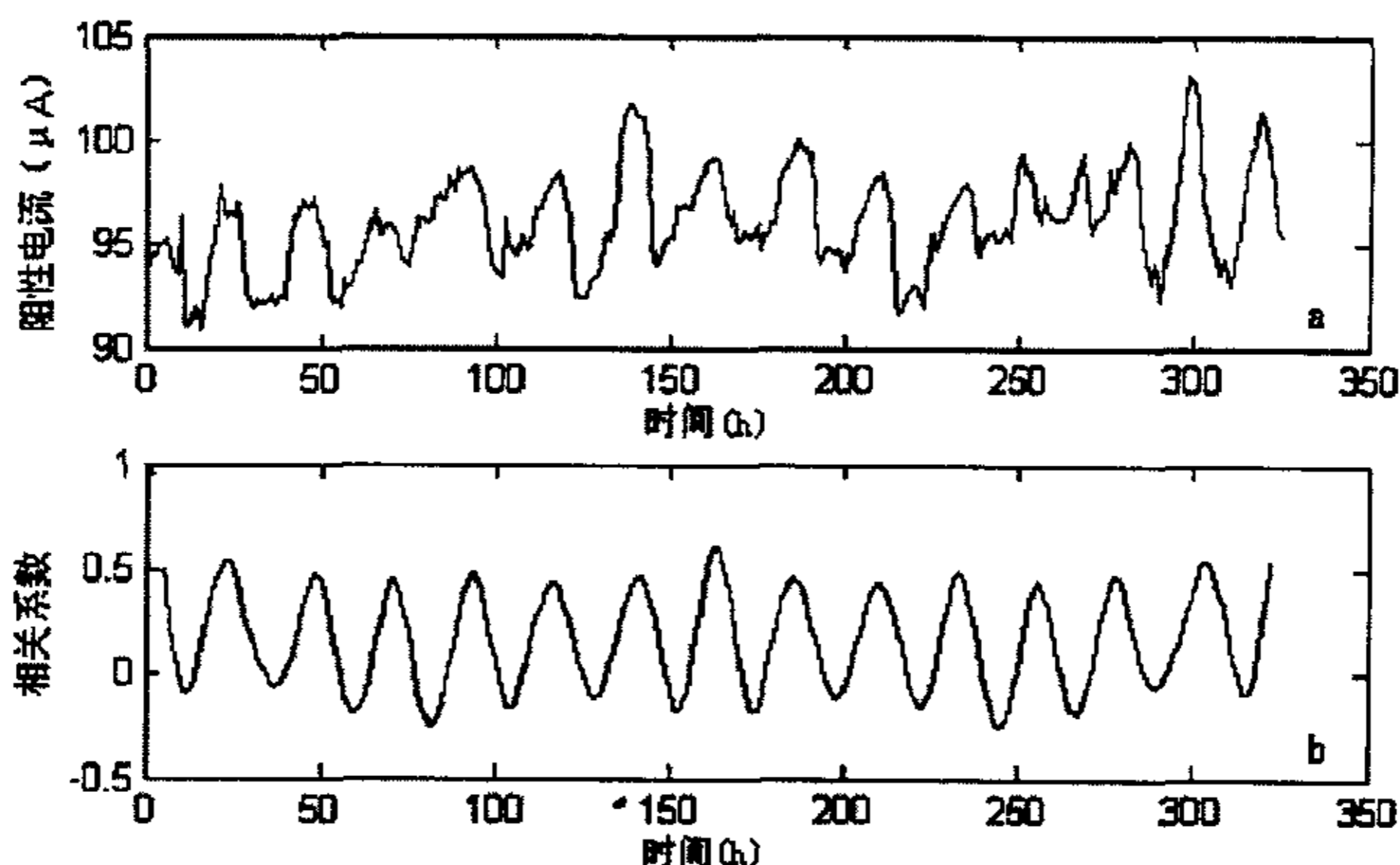


图 5-1 某在线测值及其自相关实例图

a: 在线测值序列 b: 自相关图

## 5.2 趋势预测模型

根据 5.1 节所提出的趋势提取方法得到在线测值的趋势后, 就可根据历史趋势对将来的趋势进行预测。对于现场监测数据, 其趋势项大多不是平稳的时间序列, 这种情况下, 不能直接利用 AR 模型进行建模, 必须经过适当的变换获得平稳的时间序列后, 才能进行建模。为了建立一个能够适合对非平稳时间序列进行趋势预测的模型, 作者引入了 ARIMA 模型。

### 5.2.1 平稳性检验

一个平稳序列具有两个基本特点: 其均值  $\mu_x$  和方差  $\sigma_x^2$  为常数; 自协方差函数  $R_k$  只与时间间隔  $k$  有关, 而不依赖于时间  $t$ 。因此对序列  $\{x_t\}$  的平稳性检验, 最根本就是检验其是否具有以上两个性质。而平稳性检验方法较多, 可分为参数检验法 (如分段检验法) 与非参数检验法 (逆序检验法和  $R_k$  检验法)。由于在线数据较多, 本文所用的方法是分段检验法。该方法描述如下:

当时间序列  $\{x_t\}$  ( $t=1, 2, \dots, N$ ) 的样本长度  $N$  较大时, 将  $\{x_t\}$  均匀地分成  $k$  段子序列  $\{x_{1t}\}, \{x_{2t}\}, \dots, \{x_{kt}\}$ , 每段子序列的长度为  $M$ ,  $N = kM$ , 第  $j$  段子序列的形式为:

$$\{x_{jt}\} = \{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jM}\},$$

对于各子序列 $\{x_{jt}\}$ ，可以计算出其均值、方差和自协方差函数的估计值：

$$\left. \begin{aligned} \mu_j &= \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M x_{jt} \\ \sigma_j^2 &= \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M (x_{jt} - \mu_j)^2 \\ R_{j,k} &= \frac{1}{(M-k)} \sum_{t=k+1}^M (x_{jt} - \mu_j)(x_{j,t-k} - \mu_j) \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

如果 $\{x_t\}$ 是平稳序列，则按式(5-3)算出的各子序列的 $\mu_j$ 、 $\sigma_j^2$ 和 $R_{j,k}$ 不应有显著性差异。这样，可采用数理统计中的假设检验来检验这种差异。可以证明，当取显著性水平为 0.05 时，若任意两个子序列 $\{x_{it}\}$ 、 $\{x_{jt}\}$ 间的统计特性满足下述关系，

$$\left. \begin{aligned} |\mu_i - \mu_j| &\leq 2.77\sigma(\mu_j) \\ |\sigma_i^2 - \sigma_j^2| &\leq 2.77\sigma(\sigma_j^2) \\ |R_{i,k} - R_{j,k}| &\leq 2.77\sigma(R_{j,k}) \end{aligned} \right\} \quad (5-4)$$

则 $\mu_j$ 与 $\mu_i$ 、 $\sigma_j^2$ 与 $\sigma_i^2$ 和 $R_{j,k}$ 与 $R_{i,k}$ 之间没有显著差异， $\{x_t\}$ 满足平稳性假设。式(5-4)中， $\sigma(\mu_j)$ 、 $\sigma(\sigma_j^2)$ 、 $\sigma(R_{j,k})$ 分别是 $\mu_j$ 、 $\sigma_j^2$ 、 $R_{j,k}$ 的理论均方差。

### 5.2.2 时间序列模型

对于非平稳序列经过适当的变换可以得到平稳时间序列<sup>[31]</sup>，进行 AR 建模，再反变换得到原有序列的模型<sup>[32]</sup>，即可将一个非平稳序列经过差分处理之后得到一个平稳时序。

设 $\{z_t\}$ 是非平稳序列，存在正整数  $d$ ，使得

$$\nabla^d z_t = x_t \quad t > d \quad (5-5)$$

其中 $\nabla^d = (1-B)^d$ 的  $d$  阶差分算子， $B$  为后移算子， $x_t$ 时刻进行 AR 建模的平稳时间序列。符合上述条件的 $\{z_t\}$ 称为 ARIMA 序列。

当  $d=1$  时，

$$\nabla z_t = (1-B)z_t = z_t - z_{t-1} = x_t \quad t > 1, \quad (5-6)$$

$$z_t = z_t - z_{t-1} + z_{t-1} - z_{t-2} + \dots + z_2 - z_1 + z_1 =$$

$$\sum_{i=1}^{t-1} (z_{i+1} - z_i) + z_1 = \sum_{i=1}^{t-1} x_i + z_1 \quad (5-7)$$

由式(5-7)可以看出，序列 $\{z_t\}$ 可以由其初值和 AR 序列 $\{x_t\}$ 来描述，序

列  $\{z_t\}$  的建模和预测实际上就是其对应的  $\{x_t\}$  的建模和预测，然后经过相应的处理转化为  $\{z_t\}$ 。对于平稳时间序列  $\{x_t\}$  可对它拟合成如下形式：

$$x_t - \sum_{i=1}^m \varphi_i x_{t-i} = \alpha_t \quad (5-8)$$

即 AR 模型，记为 AR(m)，利用式 (5-8) 的外延性即可对系统的动态数据进行预测。

令  $t = m+k$  ( $k=1,2,\dots,n-m$ )，由式 (5-8) 得

$$x_{m+k} - \sum_{i=1}^m \varphi_i x_{m+k-i} = \alpha_{m+k} \quad (5-9)$$

令

$$\begin{aligned} \phi &= [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m]^T \\ A &= [\alpha_{m+1}, \alpha_{m+2}, \dots, \alpha_N]^T \\ Y &= [x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_N]^T \\ X &= \begin{bmatrix} x_m & x_{m-1} & \cdots & x_1 \\ x_{m+1} & x_m & \cdots & x_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-2} & \cdots & x_{N-m} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式 (5-9) 可表达成矩阵形式：

$$Y = X\phi + A \quad (5-10)$$

其中，误差矢量 A 是待定量，Y 由 Xφ 决定，用其建模时包含两个内容：模型阶数 m 的确定与自回归系数  $\{\varphi_m\}$  的估计。

目前，确定最佳阶数尚无可靠的理论依据可循，在实际计算中可先设定最高阶次为 M，由低到高估计模型参数，采用 AIC 准则判断最优阶次。

AIC 准则 (an information criterion) 又称为信息准则，1973 年由赤池弘治提出，该准则适用于 AR 模型的检验。AIC 准则的计算公式定义为

$$C(k) = N \ln \sigma_a^2 + 2k \quad (5-11)$$

其中

$$\sigma_a^2 = \frac{S}{N-k}, \quad S = \sum_{i=k+1}^N (x_i - \varphi_1 x_{i-1} - \varphi_2 x_{i-2} - \dots - \varphi_k x_{i-k})^2 \quad (5-12)$$

C 为 AIC(k) 准则，k 为模型阶次，N 为数据个数， $\sigma_a^2$  为残差方差，S 为残差平方和。

自回归系数  $\{\phi_m\}$  的估计是在阶数  $m$  确定的情况下进行的, 由

$$\phi = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5-13)$$

求出其最小二乘解。由于事先无法判断模型的阶次, 因此在建模过程中先给出给定模型的阶次, 根据式 (5-11) 估计 AR 模型的参数, 得到各阶模型, 最后取  $C(k)$  值最小的阶次作为模型的最佳阶次, 这样就最终确定了所需的 AR 模型。

### 5.3 实例分析

通过计算得到图 5-1 (a) 中所示在线测值的趋势项, 如图 5-2 所示, 经检验此序列不是平稳序列。

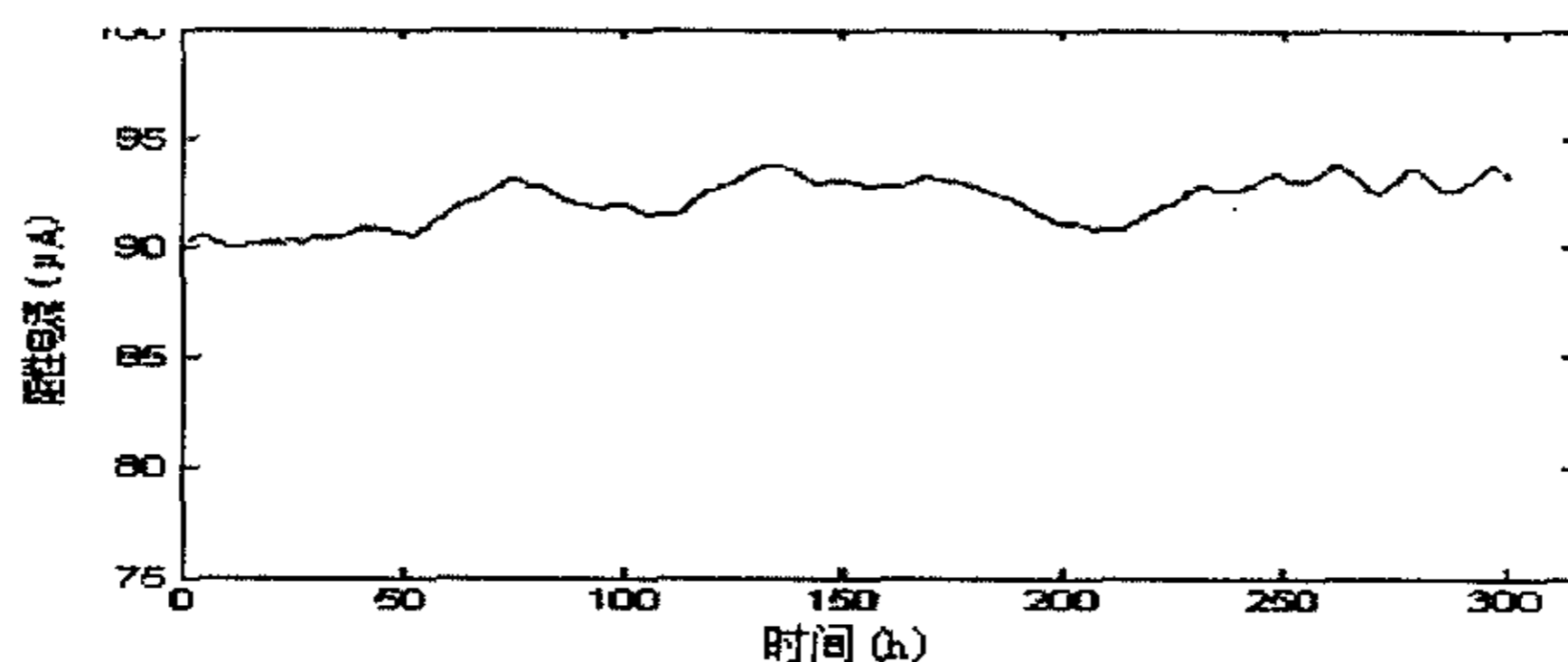


图 5-2 某在线测值的趋势图

经过一阶差分之后序列称为序列  $\{x_t\}$ , 如图 5-3 所示。对数据进行平稳性校验, 可以证明  $\{x_t\}$  确实是平稳时间序列, 可以采用 AR 模型建模。

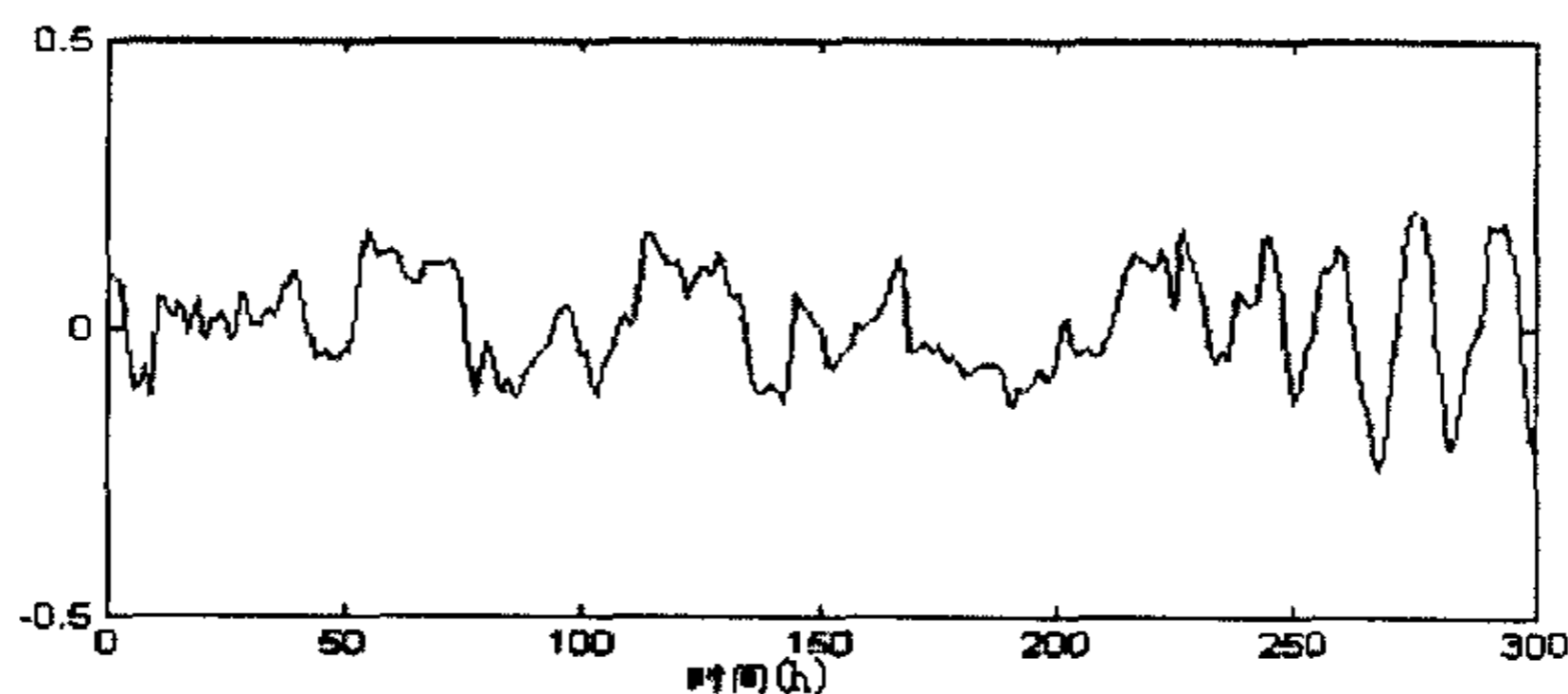


图 5-3 趋势项一阶差分后的序列

计算过程中设定 AR 模型的最高阶次为 10 阶, 使用最小二乘参数法估计出各阶参数, 然后计算出相应的  $C(k)$  值如表 5-1 所示:

表 5-1 模型阶次及其对应的  $C(k)$ 

阶次 $k$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C(k)$	-645.3	-652.3	-683.7	-679.3	-663.1	-644.9	-639.2	-638.5	-671.7

由表 5-1 可得, 当  $k=4$  时,  $C(k)$  值最小, 即最佳模型阶次为 4 阶, 此时相应得到的参数估计值分别为  $\phi_1=1.4436$ ,  $\phi_2=-0.9553$ ,  $\phi_3=0.7733$ ,  $\phi_4=-0.3786$ 。由此确定该模型为 AR(4) 模型, 预测公式为:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \phi_3 y_{t-3} + \phi_4 y_{t-4} \quad (5-14)$$

以前一段数据作为模型拟合点, 估算出信号  $\{y_t\}$  的估计值, 然后经过相应的反变换得到在线测值趋势的拟合模型, 并以后一段数据作为样本进行预测。由表 5-2 可以看出所建立的模型能够比较准确地拟合实测数据。采用同样的方法也可以对月、季和年趋势进行预测。

表 5-2 在线测值趋势(天)预测结果

序 号	预测值	实测值	绝对误差	相对误差(%)
1	92.1	92.3	0.2	0.22
2	90.5	93.0	2.5	2.60
3	90.2	92.9	2.7	2.90
4	89.7	92.7	1.0	1.08
5	96.4	93.1	3.3	3.54
6	97.6	93.4	4.2	4.50

## 5.4 本章小结

对变电设备的绝缘状况进行预测, 能够使技术人员根据预测的结果合理地安排设备的维修, 这可以充分发挥设备的工作潜力。本章通过分析在线数据的特点, 建立了绝缘变化趋势的预测模型, 其主要内容如下:

1. 在线测值的变化为一随机过程, 通过滤除其中的随机分量和周期性分量可获得其趋势变化。
2. 绝缘的趋势变化一般不符合平稳性的要求, 为了对其进行预测, 作者引入了 ARIMA 时间序列模型。实例分析证明, 此模型能够较好地对绝缘趋势进行预测。

## 6 结论

本文首先介绍了基于浏览器/服务器的变电设备监测及诊断系统,重点分析了变电设备绝缘在线监测数据的预处理、特征量的提取以及判据的设定,最后研究了绝缘趋势的预测。通过本文的工作得到以下主要结论:

1. 目前已采用的对油中气体、 $C$ 、 $\tan \delta$  等的在线监测能有效地发现非突发性故障,而对于突发性故障难以起到及时预警的作用。在线数据的变化为一随机过程,其中包含趋势和周期分量。为了正确识别出在线监测量的变化趋势,作者采用差分法去除信号中的野点,并引入防脉冲滑动平均法对数据进行平滑处理。研究表明,文中采用的方法能较有效地消除多种干扰,提取出绝缘监测中所需要的趋势量。
2. 分析了变电设备监测及诊断系统的结构及知识的表达方式。采用了一个以分布式数据库为核心,基于浏览器/服务器结构以及面向对象与属性编码技术的变电设备监测及诊断专家系统的方案。实践证明,该方案能够明显地减少实现过程中的难度与复杂度。
3. 完善了基于在线监测数据的设备故障诊断方法。变电设备各种内部潜伏性故障会引起某些监测参数的变化,通过对这些参数变化机理的分析,作者将设备的故障征兆划分为持续单调变化和阶跃变化两种类型。由于在线与离线数据存在较大的区别,不能完全利用现有停电预试规程所规定的标准来分析在线数据。因此,本文建议将在线测值的绝对值、变化率以及同母线下同类设备在线测值的相似度三种参数作为诊断特征量,并对其阈值的设定作出了分析。在此基础上,提出了对变电设备在线诊断流程。
4. 建立了在线监测信号趋势的预测模型。首先提取出绝缘的变化趋势,通过分析,证明了此变化趋势为非平稳性序列。为此,本文引入了 ARIMA 时间序列算法。最后实例分析证明此预测模型能够较好地对绝缘的变化趋势进行预测。

## 致 谢

本论文是在严璋教授的悉心指导下完成的。在这两年多的硕士学习期间，作者在学习、生活等各个方面都得到了导师的关怀、爱护和帮助。导师渊博的知识、敏锐的思想、严谨的治学态度、诲人不倦的长者风范以及崇高的敬业精神都给学生以深刻的启迪与影响，这将使学生受益终生。在此论文完成之际，谨向严老师表示衷心的感谢。

承蒙高压教研室董连文老师和张冠军老师对本文初稿进行了仔细审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，在此谨向他们表示最诚挚的谢意。作者也感谢高压教研室的各位老师、同学两年多来对我的关心和支持。

在二年多的学习期间，作者有幸结识了王晓蓉博士、尚勇博士生、杨敏中硕士、胡龙龙硕士生、刘少宇硕士生、董明硕士生、赵文彬硕士生、李辉硕士生、周海洋硕士生、闫春江硕士生等一批志同道合、同舟共济的同学，在这个学术气氛活跃、团结友爱的课题组里，大家互相帮助，彼此探讨，共同提高，结下了深厚的友谊，作者将永远铭记在心。

二年多的学习生涯使我学到了很多，我会永远珍视这段难忘的岁月。回首这二年多走过的路，有欢乐，也有辛酸，但我无悔。感谢生活，感谢她给予我的一切。

谨以此文献给我的家人。

## 参考文献

1. 郭碧红、杨晓洪. 我国电力设备在线检测技术的开发应用状况分析. 电网技术, 1999, 23(8): 65-68
2. 韩祯祥. 电力系统自动监视与控制. 北京: 水利电力出版社, 1989
3. 郭剑波. “八五”期间电网事故统计分析. 电网技术, 1998, 22(2): 72~74
4. 严璋. 电气绝缘在线检测技术. 北京: 中国电力出版社, 1995
5. D. Xiao, H. Li and X. Li. New Apparatus for Detecting Transformer Faults Online. ICPADM 2000, Xi'an, China, 2000: 310~313
6. 高文胜, 钱政, 杨莉, 严璋. 充油电力变压器氢气主导型故障的相关分析方法. 电网技术, 1998, 22 (12): 55 ~ 58.
7. 黄新红, 严璋. 高压电容型设备在线检测方法的研究. 高压电器, 1996, 32(4): 41~45
8. 董其国. 电力设备绝缘在线监测技术专题综述. 江苏: 常州供电局, 江苏省电力试验研究所, 中国电力工业设备诊断技术专业委员会, 1996
9. D. Allan, M. Blundell, K. Boyd et al. New Techniques for Monitoring the Insulation Quality of In-service HV Apparatus. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1992, 27(3): 578~585
10. G. Cai, et al. The On-line Dielectric Loss Measurement by Voltage Comparator Method. Proceeding of 1994 International Joint Conference, Osaka, Japan, 1994: 127~130
11. 马为民, 吴维韩.  $\text{tg}\delta$  数字测量中过零比较法的应用. 高压电器, 1996, 32(1): 25~28
12. X. L. Wei, S. Ma, J. L. Zhu, et al. The Zero-Crossing Time Difference Method for Measurement of Loss Tangent. Proceedings of 1996 Asian International Conference on Dielectrics & Electrical Insulation and 4th Japan-China Conference on Electrical Insulation Diagnosis, Xi'an, China, 1996: 441~444
13. 贺景亮, 关根志. 绝缘在线监测中若干问题的探讨. 高电压技术, 1998,

- 24(4): 38~40
- 14.赵殿全,韩宝银. 500kV 变电所绝缘在线监测系统运行数据分析. 高电压技术, 1998, 24(1): 33~35
- 15.张平. 变电站设备绝缘在线检测结果分析. 高电压技术, 1998, 24(1): 36~37
- 16.J.H. Wang, et al. On-line Measurement of  $C_x$  and  $\tan\delta$  on the Type of Capacitive Electric Equipment. Proceeding of 1994 International Joint Conference, Osaka, Japan, 1994: 447~450
- 17.黄新红. 高压电容型设备  $\tan\delta$  在线检测技术的研究: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1998
- 18.刘少宇,郭宗军等. 专家系统在变电站设备诊断中的应用. 高电压技术, 2001; 27(5): 17-19
- 19.杨莉,刘杰等. 基于客户/服务器的绝缘诊断及专家系统的开发. 电网技术, 1998; 22(10): 5-7
- 20.郑振楣,于戈,郭敏. 分布式数据库. 北京: 科学出版社, 1999
- 21.刘杰. 面向对象技术在变电设备绝缘诊断专家系统中的应用. [硕士论文], 西安: 西安交通大学, 1998
- 22.E.D.Goldberg. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989: 148~214
- 23.黄文虎、夏松波、刘瑞岩等. 设备故障诊断原理、技术及应用. 北京: 科学出版社, 1996
- 24.杨敏中. 正交滤波算法在电容型设备介损在线检测中的应用: [硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2001
- 25.杨莉. 知识发现在变电设备状态监测及诊断专家系统中的应用: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2001
- 26.涂时亮、陈章龙、张友德. 单片微机软件设计技术. 科学技术出版社重庆分社, 1998
- 27.沈德金、陈粤初等. MCS-51 系列单片机接口电路与应用程序实例. 北京航

空航天出版社, 1990

28. 盛骤、谢式千、潘承毅. 概率论与数理统计. 高等教育出版社, 1990
29. 数理统计编写组. 数理统计. 西北工业大学出版社, 1999
30. 杨叔子、吴雅、王治藩等. 时间序列分析的工程应用. 华中理工大学出版社, 1991
31. 杨位钦、顾岚. 时间序列分析与动态数据建模. :北京工业学院出版, 1986
32. D.Graupe. Time Series Analysis. Identification and Adaptive filtering. Florida:R E Krieger Pub Co, 1989