GIS设备状态非电量检测新技术

国网宁夏电力有限公司电力科学研究院　编

吴旭涛　主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

GIS设备状态非电量检测新技术

国网宁夏电力有限公司电力科学研究院　编

吴旭涛　主编

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分四章，阐述了气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）振动检测、温度检测、声学成像检测、气体分解产物检测等设备状态非电量测试的技术原理，介绍了四类检测技术的测试方法，并提供了应用案例。

本书适用于从事高压电气设备试验、检修、运行人员及相关管理人员，也可作为制造部门、科研单位相关人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

GIS设备状态非电量检测新技术/吴旭涛主编；国网宁夏电力有限公司电力科学研究院编．—北京：中国电力出版社，2018.11

ISBN 978-7-5198-2735-9

Ⅰ.①G… Ⅱ.①吴… ②国… Ⅲ.①非电量测量 Ⅳ.①TM938.8

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第276519号

出版发行：中国电力出版社
地　　址：北京市东城区北京站西街19号（邮政编码100005）
网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn
责任编辑：陈　丽（010-63412348）　陈　倩（010-63412512）
责任校对：黄　蓓　太兴华
装帧设计：赵丽媛　赵姗姗
责任印制：石　雷

印　　刷：三河市万龙印装有限公司
版　　次：2018年11月第一版
印　　次：2018年11月北京第一次印刷
开　　本：710毫米×980毫米　16开本
印　　张：9
字　　数：124千字
印　　数：0001—1000册
定　　价：55.00元

版 权 专 有　侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

编　委　会

主　　编　吴旭涛

副 主 编　钟理鹏　李秀广　李军浩　汲胜昌

参编人员　周　秀　叶逢春　丁　培　赵晋飞

马　波　朱洪波　张庆平　何宁辉

倪　辉　孙善源

前　言

由于占地面积省、安装运行维护相对简单等优点，气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）在电网中得到了越来越广泛的应用。随着GIS设备的大规模应用，运行中也暴露出一些问题，如绝缘击穿、内部连接松动、支撑件破裂、连接件变形以及局部发热等，这些问题往往会酿成事故的发生。GIS设备结构紧凑，一旦发生事故，不仅恢复难度大，还会对电网安全运行构成极大威胁。

GIS设备状态的现场检测，早期主要通过交流耐压试验进行。随着技术进步和装备水平提升，GIS设备的现场冲击耐压试验及特高频局部放电检测逐步得到推广应用。这些方法均属于电气检测法，其应用具有一定的局限性，主要包括：交流及冲击耐压试验都需要在设备停电状态下进行；当GIS盆式绝缘子采用屏蔽结构时，特高频局部放电检测无法开展；若缺陷未涉及绝缘，或者缺陷未达到一定程度，无论交流耐压试验，还是冲击耐压试验，或是特高频局部放电检测都无法检出。实际上，GIS设备存在不同类型缺陷时，会导致设备及设备内部充入的SF_6气体发生一些物理的、化学的变化，对能够表征变化的参数进行检测与分析，可及时发现设备内部的缺陷，并对缺陷程度进行诊断。振动检测、声学成像检测是近年来出现的检测新技术，通过检测分析GIS设备振动、声音等参数的变化，能够发现内部连接松动、支撑件破裂、连接件变形等机械性缺陷。局部过热是严重威胁GIS设备安全运行的缺陷之一，目前电气设备温度检测的方法很多，尤其是红外热成像检测已经发展成熟，但针对GIS设备特点，温度检测需要通过筒壁温度反映内部导电部件温

度，从而确定热点位置和缺陷程度，才能真正发挥 GIS 设备温度检测的作用。此外，GIS 内部存在放电性缺陷时，根据放电能量的差异及放电部位固体绝缘材料的不同，在 SF_6 气体中会出现放电分解特征产物，因此气体分解产物检测是发现设备内部放电的有效手段。振动检测、声学成像检测、温度检测、气体分解产物检测均为非电量检测，可在 GIS 设备运行状态下进行，不需要在设备内部安装传感器，也几乎不受设备结构和安装方式的影响。通过上述非电量检测方法，可及时掌握 GIS 设备状态，有效避免事故的发生。近年来，国网宁夏电科院与西安交通大学等单位合作，开展了一系列研究，并取得了一批成果。本书就是对这些成果的归纳和总结。

本书阐述了 GIS 振动检测、温度检测、声学成像检测、气体分解产物检测等设备状态非电量测试的技术原理，介绍了四类检测技术的测试方法，并提供了应用案例。通过本书，期望能够推动 GIS 设备状态非电量检测技术的现场应用，并为基于非电量检测技术的状态评价、设备缺陷、故障分析诊断奠定基础。

本书的编写得到了西安交通大学汲胜昌老师、李军浩老师、赵晋飞硕士研究生、孙善源硕士研究生，以及湖南大学钟理鹏老师的大力支持和帮助，借此表示感谢。

限于作者水平，书中不妥和错误之处在所难免，恳请专家、同行和读者给予批评指正。

作　者

2018 年 8 月

目　　录

前言

第一章　GIS 振动检测技术 …… 1

第一节　GIS 振动检测原理 …… 1

第二节　基于 GIS 振动检测技术介绍 …… 5

第三节　GIS 振动检测应用案例 …… 9

第二章　GIS 温度检测技术 …… 21

第一节　GIS 温度检测原理 …… 21

第二节　基于 GIS 温度检测技术介绍 …… 26

第三节　GIS 温升检测技术应用案例 …… 29

第三章　GIS 声学成像检测技术 …… 39

第一节　GIS 声学成像检测原理 …… 39

第二节　基于 GIS 声学成像检测技术介绍 …… 51

第三节　GIS 声学成像检测应用案例 …… 58

第四章　GIS 气体分解产物检测技术 …… 79

第一节　GIS 气体分解产物检测原理 …… 80

第二节　基于 GIS 气体分解产物检测技术介绍 …… 105

第三节　GIS 气体分解产物检测应用案例 …… 129

参考文献 …… 132

第一章



GIS 振动检测技术

机械设备的零部件、整机在工作过程中均有不同程度的振动，其不仅会影响设备工作精度、加剧机器的磨损、加速疲劳破坏，而且随着磨损的增加和疲劳损伤的产生，机械设备的振动将更加剧烈，恶性循环，直至设备发生故障、破坏。由此可见，振动加剧是伴随着机器部件工作状态异常，乃至失效而发生的一种物理现象。据统计，有60%以上的机械故障通过振动反映。因此，在运行状态下通过对机械振动信号的测量和分析，就可对设备劣化程度和故障性质有所了解。目前，基于机械设备振动的理论和方法较为成熟，并在状态监测和故障诊断技术得到了广泛应用，成为一种普遍被采用的基本方法。

第一节 GIS 振动检测原理

一、振动信号的分类

振动问题研究过程中，通常将研究对象称为系统；把外界对系统的作用或机器自身运动产生的力，称为激励；把机器或结构在激励作用下产生的动态行为，称为响应或输出。振动分析（理论或实验分析）就是研究这三者间的相互

关系。

所谓振动诊断，就是对正在运行的机械设备进行振动测量，并将采集到的各种信号进行分析处理，通过与初始制定的某种标准进行比较，进而判断系统内部结构的破坏、裂纹、开焊、磨损、松脱及老化等影响系统正常运行的故障，依此采取相应的对策来消除故障、保证系统安全运行。振动诊断还包含对其工作环境的预测，即通过系统的输出、参数（质量、刚度、阻尼等）来确定系统的输入，以判断系统环境的特性，如寻找振源等问题的研究。

振动是物体的一种运动形式，它是指物体在平衡位置上作往复运动的现象，图 1-1 为弹簧质量系统中重物随时间变化的运动过程。

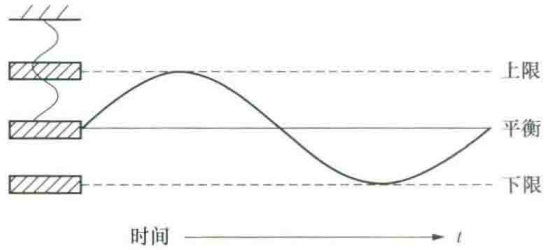


图 1-1　重物随时间变化的运动图

图 1-1 中，重物从平衡位置运动到上极限位置，后经过静平衡位置移动到下极限位置，最终返回到静平衡位置的过程，为一个运动循环，即往复振动一次。这个运动循环连续不断重复的过程即该重物的振动。

图 1-1 右侧是重物振动位移随时间变化的运动图，为一条正弦曲线，因此该种振动又被称之为“简谐振动”，是一种最简单的振动。

各种机械设备是由许多零部件和各种各样的安装基础所组成，均可认为是一个弹性系统。由于外界环境的变化，导致这些物体在其平衡位置附近做微小的往复运动，这种每隔一定时间的往复性机械运动，称为机械振动。

由于系统的结构、参数不同，其所受的激励不同，所产生的振动规律也各

不相同。根据振动规律的性质及其研究方法的不同，振动可分为确定性振动和随机性振动两大类。确定性振动的规律可以用某个确定的数学表达式描述，其振动位移是时间 t 的函数，可用简单的数学解析式表示为 $x=x(t)$。与确定性振动相反，随机性振动不能通过确定的数学表达式进行描述，振动波形呈不规则的变化，只能用概率统计的方法来描述。

在机械设备的状态监测和故障诊断过程中，振动主要为周期振动、准周期振动、窄频带随机振动和宽频带随机振动等，以及其中几种振动的组合。其中，周期振动与准周期振动属确定性振动范围，由简谐振动及简谐振动的叠加构成。

简谐振动是机械振动中最基本的振动形式，理解其特性对掌握其他振动特性及振动监测诊断技术十分重要，其相应的简谐振动数学表达式为

$$x=A\sin(\omega t+\varphi) \tag{1-1}$$

式中　x——物体相对平衡位置的位移；

A——振幅，表示物体偏离平衡位置的最大距离，mm；

ω——振动的角频率，表示 2π 秒内的振动次数或称圆频率；

φ——振动的初相位角，用以表示振动物体的初始位置，rad。

简谐振动过程中，振幅 A 表示振动的大小，而角频率 ω 表示振动的快慢。如果已知某物体作简谐振动，且已知 A、ω 及 φ，就可以完全确定该物体在任何瞬时的位移 x。简谐振动是确定性振动，其特性取决于 A、ω、φ，这三个参数在设备诊断过程中有着重要的意义，因此，A、ω 及 φ 称为简谐振动的三要素。

若振动波形按周期 T 重复出现，即

$$x(t)=x(t+nT)\quad(n=0,1,2,\cdots\cdots) \tag{1-2}$$

若式（1-2）成立，则称为周期振动，相对于简谐振动，周期振动的振动过程较为复杂，是由一个静态分量 X_0 和无限个谐波余弦分量组成，实践中产生复杂周期振动的情况远多于产生简谐振动的情况。事实上，简谐振动往往是

复杂周期振动的一种近似表示。

所谓准周期振动，也是由一些不同周期的简谐振动合成的振动。这一点与复杂周期振动相类似，但准周期振动没有周期性，组成它的简谐分量中总会有一个分量与另一个分量的频率之比值为无理数。而复杂周期振动的各简谐分量中任何两个分量的频率之比是有理数。准周期振动是一种非周期振动，可用函数描述为

$$x(t) = \sum_{n=1}^{M} X_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) \tag{1-3}$$

随机振动不能用精确的数学关系式描述，是一种非确定性振动。

随机振动过程虽不能预知，也不能重复，但具有一定的统计规律，因此可以采用概率统计的方法对随机振动进行研究，即用统计特征参数对随机振动的特性进行描述。

二、振动参数及其选择

表征振动响应的三个参数分别是位移、速度和加速度。

振动位移是质量块运动的总距离，即质量块振动时，其上、下运动的幅度，单位可以用微米（μm）表示。通过对振动过程中角位移、线位移等动态位移量时间波形的分析，可以推导出振动的速度和加速度值。其中，振动速度为质量块振荡过程中运动快慢的度量，单位可以用毫米/秒（mm/s）来表示，而振动加速度为振动速度的变化率，其单位用米/秒^2（m/s^2）表示，或用重力加速度 g 来计量。

物体简谐振动过程中，振幅分别用振动位移、振动速度、振动加速度值加以描述、度量，三者相互之间可以通过微分或积分进行换算，相应的简谐振动时域图像如图 1-2 所示。

通过图 1-2 时域图像的描述，振动频率低意味着振动体在单位时间内振动的次数少，速度、加速度的数值相对较小，因此振动位移能够更清晰地反映

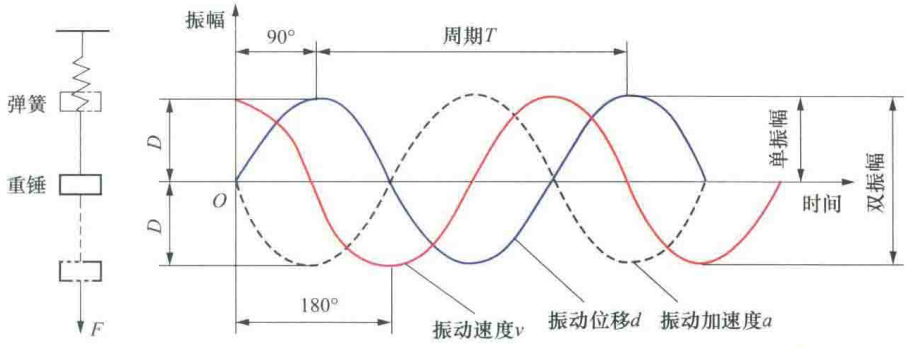


图 1-2　简谐振动时的时域图像

出振动强度的大小；而频率高，意味着振动次数多、过程短，速度、加速度的数值变化量大，即振动强度与振动加速度成正比。振动位移反映了振动距离的大小，振动速度反映了振动能量的大小，振动加速度反映了振动冲击力的大小，如 GIS 在运行过程中触头接触不良，主要是振动冲击力较大，因此检测中采用振动加速度传感器的方式进行加速度的测量。

第二节　基于 GIS 振动检测技术介绍

一、振动检测系统

GIS 振动检测系统由传感器、信号处理单元、信号采集单元及上位机组成，整体结构如图 1-3 所示。

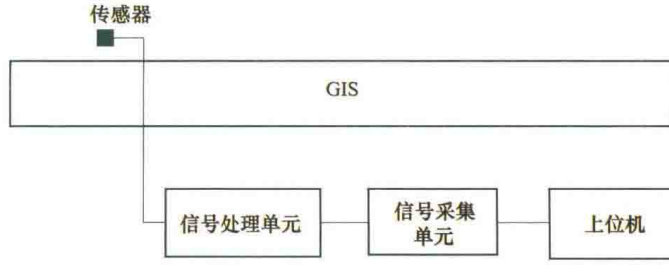


图 1-3　GIS 振动检测系统整体结构图

二、传感器的选择

GIS 外壳表面的振动信号为电气机械振动信号，经过分析，其振动频宽与振幅分别为 10～2000Hz、0.5～50μm，相应的振动传感器有加速度传感器、速度传感器和位移传感器，表 1-1 列出了三种振动传感器的性能比较。

表 1-1　　各种振动传感器的性能比较

特点	位移传感器	速度传感器	加速度传感器
频率响应	0～10kHz	10Hz～1kHz	0.3Hz～10kHz
温度范围（℃）	−40～177	−40～120	−50～120
优点	灵敏度高、结构简单、不受油污等介质的影响，可进行非接触测量	灵敏度高、输出阻抗低，便于测量	体积小、质量轻、稳定性高、工作频率范围宽，可在强磁场、大电流、潮湿恶劣环境下工作

位移传感器主要为电涡流式位移传感器，其采用电磁感应原理设计，可以在电磁干扰较弱的环境下有效使用。本书中测试对象为变电站现场运行的 GIS，电磁干扰非常严重，且电涡流式位移传感器一般采取非接触的方式测量振动信号，不适合直接粘贴在 GIS 的外表面，从而测量系统中不能选用位移传感器来测量 GIS 外壳的振动信号。

速度传感器主要为电动式速度传感器，其检测过程中输出电压信号，使后续的放大器设计比较容易，具有较高的灵敏度，但该传感器的带宽主要集中在 1000Hz 以内，不能满足测量 GIS 外壳振动的要求。

加速度传感器从大类上分为压电式、应变式和伺服加速度传感器，其中，伺服加速度传感器低频响应非常好，但带宽小于 500Hz，不适用于变压器油箱表面的振动测量。与应变式相比，压电式加速度传感器安装谐振频率比较高，有足够的频宽，使用者可以根据测量要求合理选择。

综合对位移传感器、振动传感器、加速度传感器的性能分析，GIS 振动测量系统中的振动传感器采用压电式加速度传感器。

压电式加速度传感器的基本工作原理是压电效应。石英晶体、压电陶瓷和一些塑料等材料，当沿着一定方向对其施力而使它变形时，内部将产生极化现象，同时在它的两个表面上产生相反的电荷；当外力去掉后，又会重新恢复不带电的状态，这种现象称为压电效应。

压电式加速度传感器结构一般有纵向效应型、横向效应型和剪切效应型三种。纵向效应为最常见的一种结构，如图 1－4 所示。

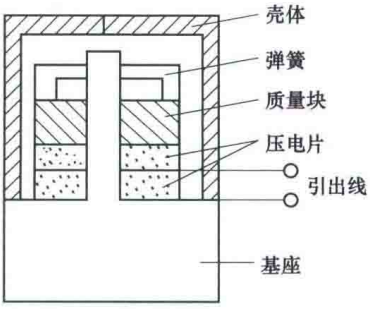


图 1－4　纵向效应型加速度传感器的截面图

图 1－4 中压电片与质量块为环形结构，通过弹簧对质量块预先加载，使之与压电片处于压紧状态。测量前将传感器基座与被测对象牢牢地紧固在一起，输出信号由连接电极的引出线引出。当检测过程中传感器感受振动时，因为质量块相对被测体质量较小，因此质量块感受与传感器基座相同的振动，并受到与加速度方向相反的惯性力，惯性力作用在压电片上产生的电荷为

$$q=d_{33}F=d_{33}ma \tag{1-4}$$

式中　d_{33}——压电片的压电系数。

式（1－4）表明电荷量直接反映加速度大小，灵敏度与压电材料的压电系数和质量块质量有关。为了提高传感器灵敏度，一般选择压电系数大的压电陶瓷片。若增加质量块质量，不仅会影响被测振动信号，同时会降低振动系统的固有频率，因此工程应用中一般不用增加质量的办法来提高传感器灵敏度。该传感器外形如图 1－5 所示，参数如表 1－2 所示。

三、信号处理及采集单元

信号处理单元主要对检测信号进行滤波和放大，根据传感器的测量频率范围，滤波器采用 1～4kHz 的低通滤波器，放大器可进行 160 倍放大。采集单

元采用采样率为 250kHz 的模块进行采集，并通过 USB 模块将数据送入上位机进行进一步的分析和处理。为防止现场的电磁干扰对检测信号的干扰，整个信号处理和采集单元需密封在金属外壳内。

表 1-2　　传 感 器 参 数

灵敏度（mV/ms^{-2}）	300
分辨率	0.0001
测量范围（m/s^2）	16.7
对地绝缘电阻（Ω）	1×10^8
频率范围（Hz）	1～4000
谐振频率（kHz）	16
工作温度（℃）	−40～120
质量（g）	95



图 1-5　所选用加速度传感器外形

四、上位机软件

上位机软件为 GVTS，相应的软件功能示意如图 1-6 所示。根据图 1-6，可知 GVTS 软件功能包括以下 10 个区域：

1——波形显示区域，实时显示传感器采集到的时域波形；

2——频谱分析区域，实时将时域波形进行处理和计算，并对频域分布进行实时显示；

3——量程调节区域，进行 1、5、10V 三个量程的调节；

4——文件路径显示区域，在离线查看数据时，该区域可将文件的路径进行显示；

5——注释显示区域，保存文件时，可插入对文件的描述，并可在离线查看时进行显示；

6——文件操作区域，完成文件的打开、保存等操作；

7——幅值显示区域，实时显示 0～1kHz 的峰值和均方根值；

8——文件保存路径区域，设置文件的保存路径；

9——累加幅值显示区域，在测试时，实时将 100Hz 和 300Hz 分量 100 次

的值累计显示，测试检测的稳定性；

10——Logo 及连接示意图区域，通过对该区域左侧矩形显示状态判断设备是否连接。

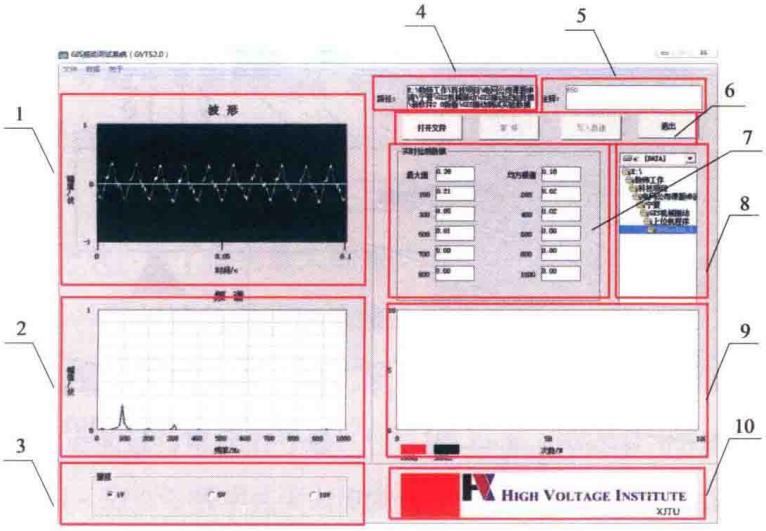


图 1-6　GVTS 软件功能示意图

第三节　GIS 振动检测应用案例

一、试验室试验

1. 试验设备及接线

在试验室的一台 252kV 带有隔离开关的 GIS 上进行实体试验，试验接线如图 1-7 所示。试验中电流源采用 FCG-3000/5 数字式大电流发生器，该发生器采用数控技术，抗干扰能力强，采用低功耗、大容量的自耦线圈和高导磁率铁芯制作的变流器，其基本原理与电流互感器相似，仅仅是将电流互感器的线圈反过来用。该发生器最高输出电流可达 3000A。本次试验加压到 1000A 左右。试验电压可调，面板自带数显电流表。

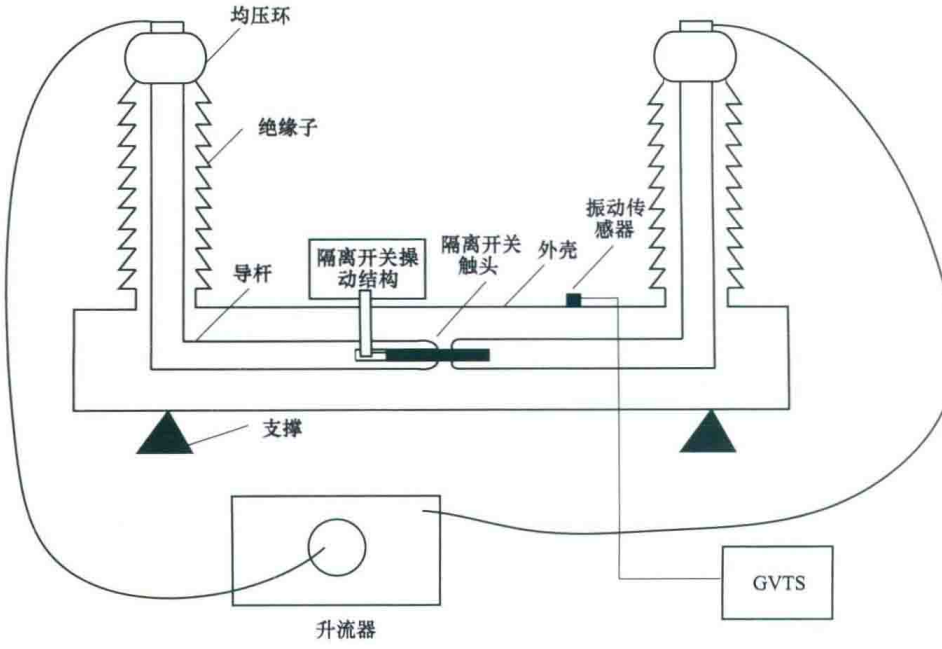


图 1-7　试验接线图

试验中，通过手动调节装置将隔离开关触头从微接触到紧密接触之间的距离分成三种情况，即微接触、中度接触和紧密接触。微接触状态为隔离开关拉开一点即电流施加不上，中度接触为动触头行至紧密接触一般时的状态，紧密接触为隔离开关触头正常闭合状态。隔离开关不同触头状态的示意图如图 1-8 所示。

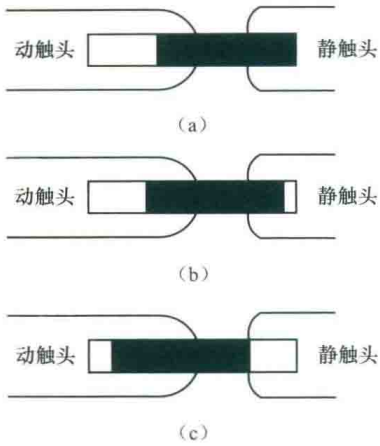


图 1-8　隔离开关触头不同接触状态示意图

(a) 状态 1（紧密接触）；(b) 状态 2（中度接触）；(c) 状态 3（微微接触）

通过对不同隔离开关触头状态下的大电流试验，252kV GIS 的两个套管分别为电流的进线与出线，由于通过电流过大，因此导线的通流能力值得注意。试验中采用 FCG-3000/5 数字式大电