

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 20833.1—2021/IEC 60034-27-1:2017  
代替 GB/T 20833.1—2016

## 旋转电机 绕组绝缘 第 1 部分：离线局部放电测量

Rotating electrical machines—The winding insulation—  
Part 1: Off-line partial discharge measurements

(IEC 60034-27-1:2017, Rotating electrical machines—Part 27-1:  
Off-line partial discharge measurements on the winding insulation, IDT)

杭州高电  
专业高试铸典范

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 | 电力试验工程服务

2021-03-09 发布

2021-10-01 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会

## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	V
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
4 电机中局部放电性质 .....	3
5 测量技术和仪器 .....	6
6 测量可视化 .....	8
7 试验回路 .....	10
8 测量标准化 .....	14
9 试验规程 .....	16
10 试验结果的评定 .....	19
11 试验报告 .....	23
附录 A (资料性附录) 试验频率的参数对试验过程的影响 .....	25
附录 B (资料性附录) 确定局部放电幅值的其他方法 .....	26
附录 C (资料性附录) 其他离线局部放电检测和离线定位的方法 .....	29
附录 D (资料性附录) 外部噪声、干扰和灵敏度 .....	30
附录 E (资料性附录) 噪声抑制方法 .....	33
附录 F (资料性附录) 局部放电数据和相位可辨识的局部放电图的评价 .....	38
附录 G (资料性附录) 完整绕组试验电路 .....	42
附录 H (资料性附录) 宽带和窄带测量系统 .....	48
参考文献 .....	50
图 1 不同时间常数下耦合单元与局部放电脉冲的频率响应 .....	7
图 2 局部放电量与测量电压的函数关系 $Q = f(U/U_{\max})$ .....	8
图 3 PRPD 谱图示例 .....	9
图 4 符合 IEC 60270 的基本试验回路 .....	11
图 5 完整绕组局部放电测量的试验回路 .....	12
图 6 S1.1 试验回路的标准化的 .....	15
图 7 局部放电测量期间对试品施加的电压 .....	17
图 8 局部放电源的辨识和定位示例 .....	22
图 B.1 极化效应指标示例 .....	26
图 B.2 A/D 转换精度的影响及 $Q_p$ 的计算实例 .....	28

图 D.1 多个电流分量对试品再充电 .....	30
图 E.1 无相位窗遮蔽 .....	33
图 E.2 有相位窗遮蔽 .....	33
图 E.3 通过测量装置的脉冲电流 .....	34
图 E.4 噪声抑制的示例 .....	36
图 E.5 抑制交叉噪声示例 .....	36
图 F.1 局部放电图示例 .....	38
图 G.1 星形和三角形连接的说明图,参见 7.3 .....	42
图 H.1 宽带和窄带局部放电系统的典型脉冲响应 .....	49
表 1 开路星形点连接图 S1 .....	12
表 2 闭路星形点连接图 S2 .....	12
表 3 开路星形点连接图 E1 .....	13
表 4 闭路星形点连接图 E2 .....	13
表 5 在高压测量的开路星点连接 I1 .....	14
表 6 在星点测量的开路星点连接 I2 .....	14
表 7 闭路星形点连接图 I3 .....	14
表 A.1 宜使用的最小测试时间和最大转换速率 .....	25
表 F.1 旋转电机中主要局部放电源相关的危险性 .....	40

## 前 言

GB/T 20833《旋转电机 绕组绝缘》分为4个部分：

- 第1部分：离线局部放电测量；
- 第2部分：在线局部放电测量；
- 第3部分：介质损耗因数测量；
- 第4部分：绝缘电阻和极化指数测量。

本部分为GB/T 20833的第1部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分代替GB/T 20833.1—2016《旋转电机 旋转电机定子绕组绝缘 第1部分：离线局部放电测量》，与GB/T 20833.1—2016相比主要技术变化如下：

- 修改了标准适用范围和规范性引用文件(见第1章和第2章,2016年版的第1章和第2章)；
- 增加了术语和定义(见第3章)；
- 修改了电机中局部放电性质(见第4章,2016年版的第4章)；
- 修改了测量仪器的影响(见5.4,2016年版的5.4)；
- 修改了局部放电数据表达的最小范围(见6.2,2016年版的6.2)；
- 增加了校准脉冲等级和允许误差(见7.1)；
- 修改了标准测量(见7.3.2和7.3.3,2016年版的7.3.2)；
- 增加了使用集成试验设备(见7.3.4)；
- 修改了绕组及绕组部件局部放电测量(见9.1,2016年版的9.1)；
- 删除了电磁探头(见2016年版的9.2.2)；
- 修改了试验结果的评定(见10.1、10.2.1和10.3.1,2016年版的10.1、10.2.1和10.3.1)；
- 删除了附录在线局部放电测量(见2016年版的附录A)；
- 增加了试验频率参数对试验过程的影响(见附录A)；
- 增加了确定局部放电幅值的其他方法(见附录B)；
- 修改了离线局部放电检测和离线定位的方法(见附录C,2016年版的附录B)；
- 增加了从接线端和星接中性点解释局部放电测量和感应放电/振动火花(见附录D)；
- 增加了完整绕组测量连接电路(见附录G)；
- 修改了宽带和窄带系统(见附录H,2016年版的5.4)。

本部分使用翻译法等同采用IEC 60034-27-1:2017《旋转电机 第27-1部分：绕组绝缘离线局部放电测量》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 7354—2018 高电压试验技术 局部放电测量(IEC 60270:2000,MOD)；
- GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求(IEC 60060-1:2010,MOD)；
- GB/T 16927.2—2013 高电压试验技术 第2部分：测量系统(IEC 60060-2:2010,MOD)；
- GB/T 17948.4—2016 旋转电机 绝缘结构功能性评定 成型绕组试验规程 电压耐久性评定(IEC 60034-18-32:2010,IDT)；
- GB/T 22720.2—2019 旋转电机 电压型变频器供电的旋转电机耐局部放电电气绝缘结构(Ⅱ型)的鉴定试验(IEC 60034-18-42:2017,IDT)；

GB/T 20833.1—2021/IEC 60034-27-1:2017

- GB/T 20833.2—2016 旋转电机 旋转电机定子绕组绝缘 第2部分:在线局部放电测量 (IEC/TS 60034-27-2:2012,IDT);
- GB/T 20833.4—2021 旋转电机 绕组绝缘 第4部分:绝缘电阻和极化指数测量 (IEC 60034-27-4:2018,IDT)。

本部分做了下列编辑性修改:

- 为与我国技术标准体系一致,将标准名称修改为《旋转电机 绕组绝缘 第1部分:离线局部放电测量》。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国旋转电机标准化技术委员会(SAC/TC 26)归口。

本部分起草单位:上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司、安徽省电机产品及零部件质量监督检验中心、山西电机制造有限公司、铜陵精达特种电磁线股份有限公司、卧龙电气驱动集团股份有限公司、山东华力电机集团股份有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、哈尔滨大电机研究所、上海电器设备检测所有限公司。

本部分主要起草人:张生德、赵云峰、张文和、彭春斌、王国龙、张文斌、张跃、马赫然、陈阳、汪双灿。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 20833—2007;
- GB/T 20833.1—2016。

## 引 言

多年来,局部放电(PD)测量一直是评估新绝缘结构的质量和绝缘结构老化状态的手段。它也被用作探测、定位电气绝缘绕组在运行过程中由动态应力激发的局部放电源。与其他绝缘测试方法(如介质损耗角或绝缘电阻的测量)相比,局部放电测量可识别绝缘结构内部的放电源。

在电机的维护和检修方面,局部放电的测量和分析也可提供下列信息:

- 绝缘结构是否存在老化或潜在缺陷;
- 老化进程;
- 检修方式和大修间隔。

虽然旋转电机的局部放电试验被广泛应用,但一些研究表明,不仅存在不同的测量方法,而且标准和分析方法以及测量数据的最终评估也往往不同且不具可比性。因此,对于采用局部放电测量方法评估绝缘结构状态的用户,有必要提供一些指南。

定子绕组局部放电试验可分为两大类:

- 离线测量,定子绕组与电网隔离且使用独立的电源为绕组施加电压;
- 在线测量,旋转电机接入电网且正常运行(IEC 60034-27-2)。

这两种方法各有利弊。尽管在线测量的方法在全球应用广泛且其对工业的价值已被证实,但本部分仅限于离线测量技术。考虑到该方法对于 PD 测试领域中的非专业人士的可用性,有必要对其充分简化。

局限性:

当对定子绕组进行局部放电测量时,有些外界因素不可避免地会影响测量结果。因此,只有在特定条件下,局部放电测量才具有可比性。

在生产制造或运行现场环境下,假如不采取减少噪声的措施,那么局部放电测量结果会受到影响。受测量频率带宽或降噪算法的影响,各类测量系统将 PD 信号从噪音中分离所采用的软硬件是有差异的。局部放电测量方法中将已测到的 PD 信号再转化为等效电荷的环节所采用的标准化测量校准设备也会影响测量结果。

温湿度和试样的装配对 PD 结果影响较大。对于定子绕组而言,局部放电脉冲在传播过程中的衰减和弥散,取决于绕组的设计和脉冲信号的初始值。

基于上述原因,确定电机绕组局部放电幅值的限值是很难的,例如生产或运行的验收标准。

此外,绝缘结构劣化的程度和失效的风险取决于局部放电的类型以及在定子绕组绝缘中的位置,这两者都会对测量结果产生很大影响。

测试人员宜注意,本部分局部放电测量方法的原理,不是所有定子绕组有关的绝缘问题都可通过测量局部放电检测到(例如由于绝缘中不同组分间形成导电通道而不伴随脉冲信号的绝缘失效机理)。由于电子噪声的影响和其他干扰限制了检测的灵敏度,在实际应用中脉冲信号更难被探测到。

对于单个线棒和线圈,由于测量设备和设置的差异,局部放电幅值的限值也很难规定。因此,本部分没有给出固定的限值。



# 旋转电机 绕组绝缘

## 第 1 部分:离线局部放电测量

### 1 范围

GB/T 20833 的本部分规定了旋转电机绕组绝缘离线局部放电测量的通用基础规范:

- 测量方法和仪器;
- 试验回路的布置;
- 试验规程的标准化;
- 噪声的降低;
- 试验结果文件编制;
- 试验结果评价。

本部分中描述的试验方法适用于槽部有或无防晕层电机的定子绕组,以及采用成型绕组或散绕绕组制造的电机定子绕组。在特殊情况下,本部分也适用于高压电机转子励磁绕组。测量方法适用于频率为 0.1 Hz~400 Hz 的正弦交流电压下试验。参见附录 A。

本部分给出的解释指南只有满足下述要求时适用:

- 在 50 Hz/60 Hz 工频下或在 45 Hz~65 Hz 的电源频率范围内进行测量;
- 成型绕组及绕组组件,如线棒及线圈;
- 带有槽部防晕结构的绕组,通常对额定电压 6 kV 及以上的电机有效。

对于散绕绕组电机,无槽部防晕层的成型绕组,以及非工频下的试验,解释指南不适用。本部分离线局部放电测量规程可用于评估制造质量的一致性 or 该类绕组的趋势,变频电机绕组也同样适用。

注: I 型绝缘结构低压电机测试的规定见 IEC 60034-18-41。II 型绝缘结构高压变频电机的鉴定试验规程见 IEC 60034-18-42(不包括可选测试部分)。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60034-18-32 旋转电机 第 18-32 部分:绝缘结构功能性评定 成型绕组试验规程 电压耐久性评定(Rotating electrical machines—Part 18-32: Functional evaluation of insulation systems—Test procedures for form-wound windings—Evaluation by electrical endurance)

IEC 60034-18-42 旋转电机 第 18-42 部分:电压型变频器供电的旋转电机耐局部放电电气绝缘结构(II 型) 鉴定试验[Rotating electrical machines—Part 18-42: Partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters—Qualification tests]

IEC TS 60034-27-2 旋转电机 第 27-2 部分:旋转电机定子绕组绝缘在线局部放电测量(Rotating electrical machines—Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines)

IEC 60034-27-4 旋转电机 第 27-4 部分:旋转电机绕组绝缘的绝缘电阻和极化指数测量

(Rotating electrical machines—Part 27-4: Measurement of insulation resistance and polarization index of winding insulation of rotating electrical machines)

IEC 60060-1 高电压试验技术 第1部分:一般定义和试验要求(High-voltage test techniques—Part 1: General definitions and test requirements)

IEC 60060-2 高电压试验技术 第2部分:测量系统(High-voltage test techniques—Part 2: Measuring systems)

IEC 60270:2000 高电压试验技术 局部放电测量(High-voltage test techniques—Partial discharge measurements)

### 3 术语和定义

IEC 60270 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### 局部放电 **partial discharge; PD**

导体间绝缘仅被部分桥接的电气放电,这种放电会在导体附近发生也可以不在导体附近发生。

#### 3.2

##### 离线测量 **off-line measurement**

对处于停止状态且与电源系统断开的旋转电机进行测量。

注:需要的试验电压由独立的电压源施加到绕组上。

#### 3.3

##### 在线测量 **on-line measurement**

对处于正常运行状态的旋转电机进行测量。

#### 3.4

##### 端部防晕层 **stress control coating**

在高压定子线棒和线圈中,从槽部防晕层延伸出的主绝缘表面上的漆或带,其作用是使表面电场均匀。

注:端部防晕层使绕组端部的电场强度降低至表面产生局部放电的临界值以下,端部防晕层部分重叠于槽部防晕层以提供它们之间电气接触。

#### 3.5

##### 槽部防晕层 **conductive slot coating**

在线圈或线棒的槽内部分,与主绝缘紧密接触的导电漆或带,通常称作半导体涂层。

注:该涂层与定子铁心良好的接触。

#### 3.6

##### 槽放电 **slot discharges**

线圈或线棒槽部分的外表面和接地铁心叠片之间发生的放电。

#### 3.7

##### 内部放电 **internal discharges**

绝缘结构内部发生的放电。

#### 3.8

##### 表面放电 **surface discharges**

在绕组端部或者电机绕组活动部分中绕组组分表面或者绝缘表面发生的放电。

## 3.9

**脉冲幅值分布 pulse magnitude distribution**

在预先设定的测量时间内,一系列脉冲幅值等间距窗口内的脉冲数目。

## 3.10

**脉冲相位分布 pulse phase distribution**

在预先设定的测量时间内,一系列脉冲相位等间距窗口内的脉冲数目。

## 3.11

**局部放电图谱 partial discharge pattern**

局部放电幅值与交流周期相位的脉冲矩阵图,表征在预先设定的测量时间内的局部放电现象。

注:可用另一种表示方式,例如频率和时间的关系图。

## 3.12

**耦合装置 coupling device**

通常是有源或者无源的四端网络,把输入电流转换成输出的电压信号。

注:信号通过传输系统传输到测量仪器,通常耦合装置频率响应的选择至少可以有效地阻止试验电压频率和谐波进入测量仪器。

## 3.13

**局部放电耦合单元 PD coupling unit**

一个低感高压耦合电容和一个低压耦合装置串联而成。

## 3.14

**重复出现的最大局部放电值 largest repeatedly occurring PD magnitude**

$Q_m$

与每秒 10 个脉冲的局部放电脉冲重复率相关的最大幅值,它可以直接从脉冲幅值分布中推断出来。

注:其他重复率可用于定义  $Q_m$ 。如果使用其他重复率,则需要说明,例如每秒 50 或 60 个脉冲,即  $Q_{m50}$  或  $Q_{m60}$ 。参见附录 B。

## 3.15

**加权局部放电幅值 weighted occurring PD magnitude**

$Q_{iec}$

根据 IEC 60270,由测量设备记录的具有脉冲序列响应的加权幅值。

注:在本部分中,符号  $Q$  用作定义电荷  $Q_m$  和  $Q_{iec}$  的符号。

## 3.16

**噪声 noise**

不是脉冲且不是由定子绕组产生的信号。

## 3.17

**干扰 disturbance**

不是局部放电但可能具有类似局部放电特性的脉冲信号。

**4 电机中局部放电性质****4.1 局部放电的基本原理**

通常,局部放电(PD)发生在绝缘材料介质性能不均匀的位置,在这些位置,局部电场强度会增强,由于局部电场强度过大,将导致局部击穿。该局部击穿不会导致整个绝缘结构的击穿。通常局部放电

需要一定的气体空间来发展,例如填充在绝缘体内部、临近导体或者绝缘体分界面的气体孔隙。

当一个不均匀的局部场强超过其击穿场强时,会出现局部放电,在施加电压的一个周期内会导致数个局部放电脉冲产生。在使用云母绝缘的旋转电机中,不可避免地会有许多缺陷,例如出现在绝缘材料的孔隙和绕组绝缘分层处的老化部分。因此,测量到的信号往往是多个不同放电强度的局部放电源的叠加值。

放电时转移的电荷量与相关材料的尺寸和材料特有的介电性能的不均匀特性密切相关,如表面性质、气体类型、气压等。

定子绕组绝缘结构(如 IEC 60034-18-42 中定义的 II 型电机)在运行中会有局部放电现象。因为含有无机云母组分,所以这种绝缘结构对局部放电具有天然的耐受性。然而,在电机中出现明显局部放电通常是绝缘缺陷的征兆,例如制造质量问题或者运行中的劣化,而这并非其失效的直接原因。此外,还取决于特定条件下的局部放电源及其幅值,它可能转化成为局部绝缘老化的重要因素。失效时间与局部放电水平无关,但与其他因素,例如运行温度、槽楔情况、污染程度等密切相关。

特定局部放电测量和分析可用于新绕组和绕组部件的质量控制以及绝缘缺陷的早期检测,绝缘缺陷由运行中的热、电、环境和机械应力等因素引起。可导致绝缘故障。

## 4.2 电机局部放电类型

### 4.2.1 概述

高压电机的绝缘结构中通常会出现局部放电,但局部放电的大小、数量和位置取决于电机的设计、材料、制造工艺、质量、运行环境和老化状况。对于特定的电机设计,所用绝缘材料的特性、制造方法、运行条件等能极大地影响局部放电的数量、位置、特征、发展趋势和意义。对于给定的电机,在大多数情况下,通过局部放电的特征,可鉴别和区分不同的局部放电源,也可通过附加诊断测试和目视检查来验证。

### 4.2.2 内部放电

#### 4.2.2.1 内部孔隙

虽然生产工艺的设计要使内部孔隙最小化,但是一般用于高压旋转电机的树脂浸渍云母带绝缘结构中不可避免的有孔隙存在。由于局部放电常见于高压电机中,因此绝缘结构中的云母只在规定的老化条件下确保电机的运行寿命。详细信息见 IEC 60034-18-32。

#### 4.2.2.2 内部分层

主绝缘的内部分层可能是由于生产期间树脂浸渍不当或绝缘结构不完全固化或者在运行期间机械或热应力过大导致的。绝缘老化也会导致分层,而老化引起的分层通常是一个长期过程。因此,老旧绝缘结构中的分层是绝缘老化的明显标志。大的孔隙会形成一个大的表面,该表面会引起相对能量高的放电,会严重地损坏绝缘。特别是分层会降低绝缘的热传导,导致加速老化。因此当评估局部放电时,要仔细考虑分层因素。

#### 4.2.2.3 绝缘导体和主绝缘的分离

在导体和主绝缘之间(轴向)存在的空气或气体填充的细长间隙引发了分层局部放电。过热或极端的机械应力都会导致层与层之间大范围的分层。

### 4.2.3 槽放电

在高压电机中,当部分槽部防晕层受损时,会产生槽放电。槽放电可能是由于防晕材料杂质引起的

局部电场强度增大,或是由于槽内或槽口区域线圈/线棒的移动所造成,例如由于材料沉积、侵蚀、磨损,化学侵蚀或制造缺陷而导致槽楔失去压力。当线圈/线棒松动时,电磁力将使其在槽内振动,导致槽部防晕层和绝缘磨损。在槽部防晕层已经发生局部损坏的情况下,接地金属电极(铁心槽部)与主绝缘表面之间就开始出现具有高脉冲幅值的局部放电点。这类放电主要发生在定子绕组中的线棒或线圈的端部高场强高处。局部放电通过侵蚀主绝缘导致其加速老化。严重时,线圈松动也会导致机械磨损。

高压引起的槽放电会使绝缘受到侵蚀,在高压侧附近的线圈/线棒处更严重。因此,槽放电发生时,离线局部放电测量将提供不同的局部放电强度,有时会在出线端和中性点产生。

电机在运行期间槽内线圈/线棒的振动可能是槽部防晕层损坏的最初状态,例如由于电磁力的作用导致线圈/线棒松动和线棒、线圈不紧固。在某些特定条件下,电机运行期间可能出现振动火花。这是由于电磁感应电压引发的驱动电流间歇性中断造成的。虽然它不是局部放电现象,但在测量时也可能发生。

当槽部防晕层因振动火花劣化时,槽放电可在电机停止运行后测量。振动火花是由磁场引起,这种现象主要发生在槽部出线端到中性点的线棒或线圈上,其现象可在绕组的两侧进行测量。进行比较测量时(包括图像分析)可观察到振动火花产生的现象。

#### 4.2.4 绕组端部间隙与表面放电

在绕组端部区域,电场强度高位置可能出现局部放电,这样的放电常常出现在定子绕组端部不同部分之间的界面。如果设计界面欠佳、污秽、气孔、热效应等使绕组的端部防晕层失效,造成端部不均匀的电场梯度。这将导致其表面放电的持续发展从而逐步侵蚀绝缘和表面材料。虽然由于表面的影响,局部放电会产生相对较快的变化,但通常这是慢速失效机理。局部放电可能会因受表面影响而产生相对较快的变化。

另外,由于界面不够清洁,如端部支撑结构的部件,局部放电可能出现在相间,或者在绕组端部表面产生相对地放电。

#### 4.2.5 外来导电物放电

绕组被导电性杂质污染的部分会造成局部放电强度集中。这会导致绝缘的局部损坏。较大的金属件更具有破坏性,如损坏的螺栓或螺钉和遗忘的工具。除了局部放电集中和其潜在的破坏性影响以外,它还会导致对设备的二次冲击,例如金属碎片受磁场影响造成的机械磨损。

这些可能会导致绝缘的局部损伤。

#### 4.3 绕组内脉冲传播

起初局部放电电流被认为是具有几纳秒上升时间的瞬间脉冲。对于高频谱的短时局部放电脉冲,定子绕组表现为分布参数的试品,会出现行波、复杂的电容电感耦合和谐振现象,因此,要考虑局部放电脉冲的传播现象。由于行波信号的衰减、畸变、反射和相互耦合,在绕组端部记录的局部放电信号中的波形和幅值与起始点不同,故对解释旋转电机局部放电测量有以下几点重要说明:

- 局部放电源到局部放电传感器的传输函数是未知的,它取决于定子绕组的频率响应,由电机的具体设计决定。因此,局部放电源的能量不能直接测量。
- 定子绕组的高频传输状态取决于被测电机的特性和局部放电源的位置,这会改变定子绕组接线端的局部放电脉冲特征。
- 当行波通过绕组时,局部放电信号的特高频部分开始严重衰减,这与局部放电初始状态有关,在试品端部也许无法检测到。

由于上述几点的结果,定子绕组的设计和局部放电检测系统的频率响应特性(包含耦合装置)会显著影响局部放电测量仪检测的信号。

## 5 测量技术和仪器

### 5.1 概述

因为局部放电电测法是评估旋转电机绕组绝缘最常用的方法,本章只涉及局部放电的电测法并与 IEC 60270 保持一致。其他离线局部放电检测和定位的方法参见附录 C。

局部放电测量系统可以分为几个子系统:耦合装置、传输系统(如连接电缆或者光缆)以及测量仪器。通常,除某些信号可能衰减外,传输系统不影响回路特性,因此传输系统不用考虑。

### 5.2 测量系统频率响应的影响

局部放电探测系统的频率响应,包括局部放电耦合单元,决定了能检测出多少来自绕组的局部放电信号能量。因此,系统的频率响应,特别是所使用的耦合单元的类型,对检测的整体灵敏度有相当大的影响。由于下限和上限截止频率的不同,以下定性关系对测量完整绕组基本适用:

——低频测量。不仅保证对线圈或者线棒中接近传感器的局部放电有很好的灵敏度,而且保证对源自于绕组中更远的局部放电也有很好的灵敏度。然而,低频率范围会受到噪声和干扰的影响。

——特高频测量。只能获得全部局部放电能量非常小的部分,因此仅对非常接近传感器的起始信号有较好的灵敏度,但该频率范围较少地受到噪声和干扰的影响。

为了获得来自完整绕组局部放电合适的灵敏度,对于离线局部放电测试宜使用宽带局部放电测量系统,根据 IEC 60270,下限截止频率宜在几十千赫兹范围内。

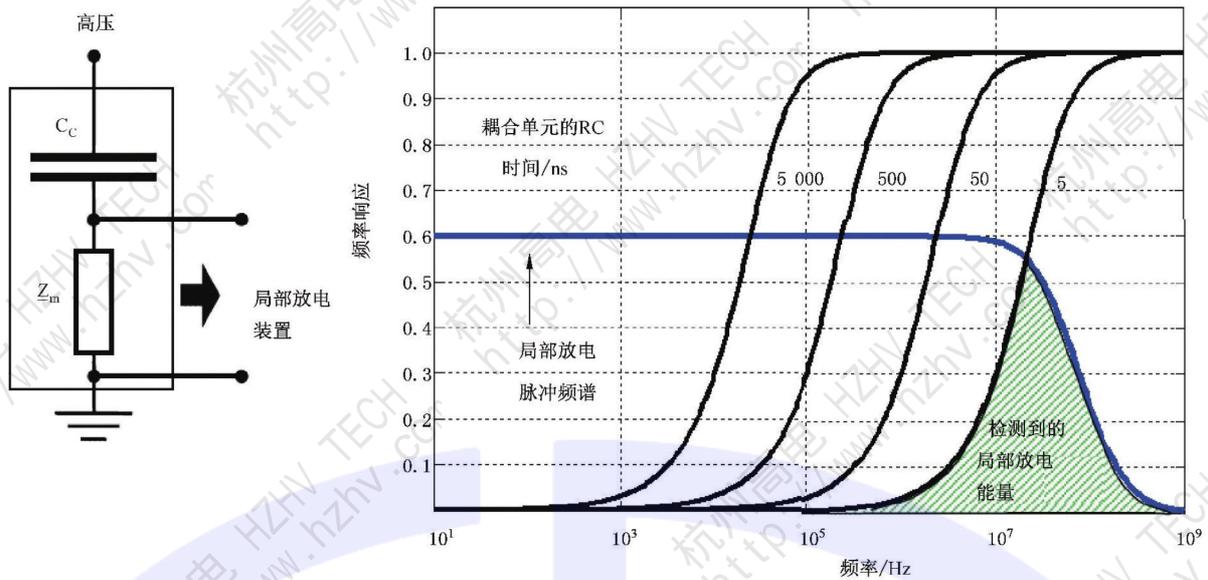
宜注意,根据绕组的设计和所用的测试配置,在局部放电测量装置的频率范围内可能会出现谐振现象,因此这也会影响局部放电测量结果。

### 5.3 局部放电耦合单元的影响

定子绕组离线局部放电测量和绕组部件局部放电测量常常使用电容性耦合单元,它由高压电容和低压耦合装置串联构成。当测量单个绕组时,耦合装置也可以与试品串联[如图 4 b)],低压耦合装置连接至传输系统。

高压电容、耦合装置、传输系统以及测量系统的输入阻抗表现为高通滤波器,因此,增加输入阻抗或者电容值会增加灵敏度。

图 1 显示了理想化局部放电脉冲的频率响应与不同局部放电耦合单元之间的传输函数,耦合单元有一个高压电容器,低压侧有电阻性测量阻抗 $Z_m=R$ 。图 1 中标出的局部放电脉冲和耦合单元频谱的重叠部分,表示 5 ns 的 RC 时间常数能测到的信号能量。实际上,由于受寄生电感 L 和电容 C 影响,该系统表现出带通滤波器的特性。



说明：

局部放电耦合单元的时间常数  $Z_m = R; \tau = RC$ ；

下限截止频率： $f_{lo} = 1/(2\pi RC)$ 。

注： $Z_m$  测量阻抗， $C_c$  耦合电容。

图 1 不同时间常数下耦合单元与局部放电脉冲的频率响应

当局部放电脉冲通过绕组传播，特别是在较高频率时，会出现衰减和弥散。因此在较低频率范围内，具有下限截止频率的测量系统，常常为整个绕组局部放电测量提供很好的灵敏度。

当测量单个绕组时，高压耦合电容连接到铜导体。耦合装置可以与耦合电容串联，如果耦合电容与地隔离，则耦合装置与测试对象的接地引线相连。对于完整绕组局部放电测量，耦合单元连接到电机端或者直接连接到机座内部的绕组导体上。

以下低压耦合器件通常与高压电容器组合使用：

——RLC 滤波器或四端网络（见 IEC 60270），其中，电感有助于抑制电源频率分量；

——高频电流互感器（RF-CT），将测量装置与高压电流回路电位隔离。

与对地电缆连接的 RF-CT 可做为独立的耦合装置。当使用光纤信号传送时，耦合装置也可安装在电容 HV 侧。

#### 5.4 测量仪器的影响

最初的局部放电测量仪器采用模拟电路，模拟设备输出的是标量值，它是局部放电脉冲序列对滤波器和检测电路的响应。因为局部放电为随机现象，该标量值随时间波动。IEC 60270 和 3.14 及 3.15 定义的局部放电幅值是处理标量值的两种方法。

通过数字化处理，可使用较复杂的方式从信号中提取更多信息。数字电路应用于很多领域，而且存在许多变化，其主要优点是分离局部放电脉冲。大多数系统中，是作为时间和幅值的分离。事实上，许多现代化的局部放电采集系统引入了两项局部放电幅值的设置：触发等级以及有限积分时间。触发器具有和示波器有同样的功能，即避免处理低电平信号。

影响测量仪器的滤波带宽的描述参见附录 H 及 IEC 60270。

## 6 测量可视化

### 6.1 概述

事实上对绝缘结构进行评估,宜对第 5 章描述的测量装置记录的局部放电数据进行适当的处理。由于绝缘结构的损害程度以及由此造成的失效,与局部放电源的特殊性质直接相关,因此有必要获得关于被测局部放电源类型的可靠信息。

### 6.2 局部放电数据表达的最小范围

为了评定局部放电情况,假定局部放电量高于噪声和干扰,则应至少使用以下典型的局部放电测量参数:

- 局部放电幅值;
- 试验电压(有效值)或  $1/\sqrt{2}$  试验电压的峰值;
- 测试电压频率。

局部放电量,即最大的重复出现的量值,能用电压(mV)或者视在电荷(pC)表示,并能按照 IEC 60270 确定其数值。原则上,用于确定局部放电量的测量单元是任意的。局部放电量( $Q$ )与施加在绕组或者绕组元件上的测量电压( $U$ )有关,从这两个参数获得的曲线中,无论升高和降低电压,二者的关系可以表示为函数  $Q=f(U)$ 。根据 9.1.5,试验电压以连续或者合适的阶梯增加至规定的最大值,然后降至最小试验电压。当获得局部放电图时,其可用于排除来自绕组外部的噪声和信号的测量。此外,局部放电图可用于定位局部放电源位置。

另外,根据 IEC 60270,从图 2 中的曲线  $Q=f(U)$ ,能测定试品局部放电起始电压  $U_i$ (PDIV)和局部放电熄灭电压  $U_e$ (PDEV)。局部放电起始电压和局部放电熄灭电压与局部放电量给定的较低阈值有关。该程序通常适用于车间和以开发为目的的单一样品线棒测试。7.1 中进一步给出了定义阈值的做法。

图 2 是  $Q=f(U)$  曲线的示例。一般以电压为横坐标、局部放电量值为纵坐标,横坐标为线性刻度,要将电压预先规定至参考值,例如最大试验电压  $U_{max}$ ,以便于比较。局部放电量对应的轴可能是线性的或者是对数的刻度。

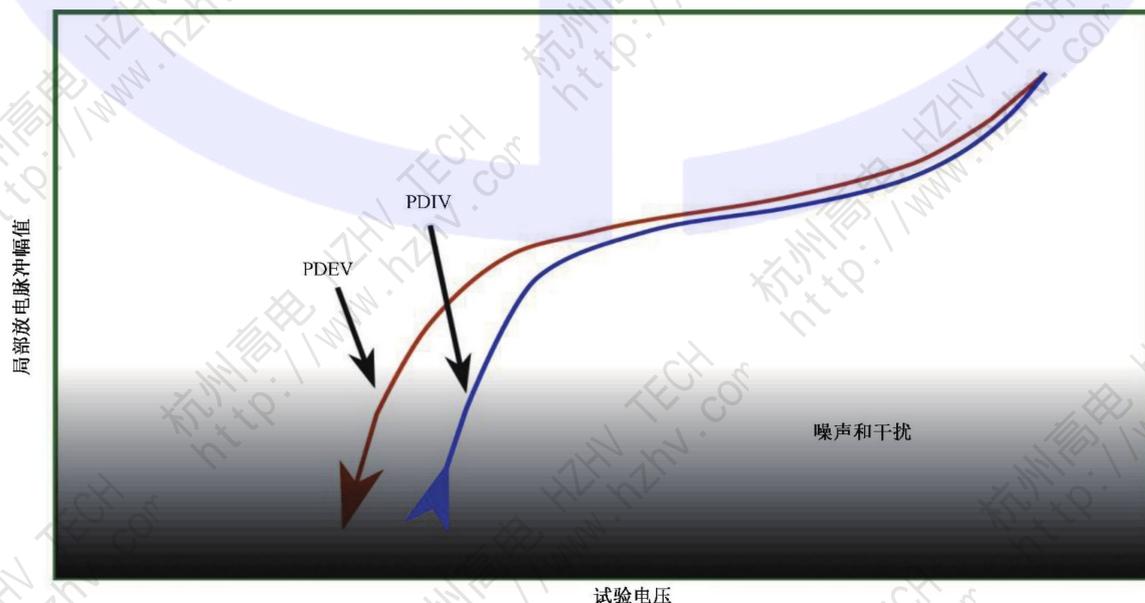


图 2 局部放电量与试验电压的函数关系  $Q=f(U/U_{max})$

### 6.3 表征局部放电数据的其他方法

#### 6.3.1 概述

当使用数字局部放电测量装置时,能捕获在测量时间内发生局部放电时一系列局部放电脉冲的视在电荷  $q_i$ 、 $t_i$  时刻的瞬时电压  $u_i$  或者工频试验电压周期对应的相位角  $\Phi_i$ 。不同情况下,使用合适的测量装置记录局部放电值并存储以便后续采用适当的方法分析。

根据 IEC 60270,还能从局部放电数据中得出其他量,如累积电荷、放电电流、平方率、放电功率和放电能量。然而,由数字系统导出的局部放电参量取决于试验期间仪器的具体设置,例如触发水平等。通过在随后的分析中采用合适的图表,能够将局部放电测量可视化,进而可以评估绝缘结构的状态。对于某次测量的局部放电参数,无论是用局部放电参数的统计分布、相位分辨或者时间分辨表示,还是所谓的特定参数的散点图(如脉冲高度分布、脉冲相位分布、离散相位脉冲高度分布、脉冲序列示波图、局部放电分布图等等),都是殊途同归的。

有关局部放电模式类型的更详细的信息和用以进一步分析的局部放电图形可参见参考文献[3]。

#### 6.3.2 局部放电图

局部放电模式能看作局部放电分布图,在图上特定局部放电参量与散点图相关联,以便于获得关于局部放电源活动的信息,一般采用二维局部放电分布图表示。

适合于鉴别定子绕组绝缘结构中局部放电起因的局部放电模式为  $\Phi$ - $q$ - $n$ ,其中对每个单独的局部放电脉冲而言,以局部放电量值  $q_i$  为纵坐标, $\Phi_i$  为横坐标,在散点图中,可以通过采用适当的颜色标记来显示每个相位/幅值窗口内的局部放电发生频率,频率尺度可在放电图旁标注。

$\Phi$ - $q$ - $n$  谱图在学术上通常被称为局部放电相位谱图(PRPD),并将在本部分多次使用。图3为  $\Phi$ - $q$ - $n$  谱图示例。

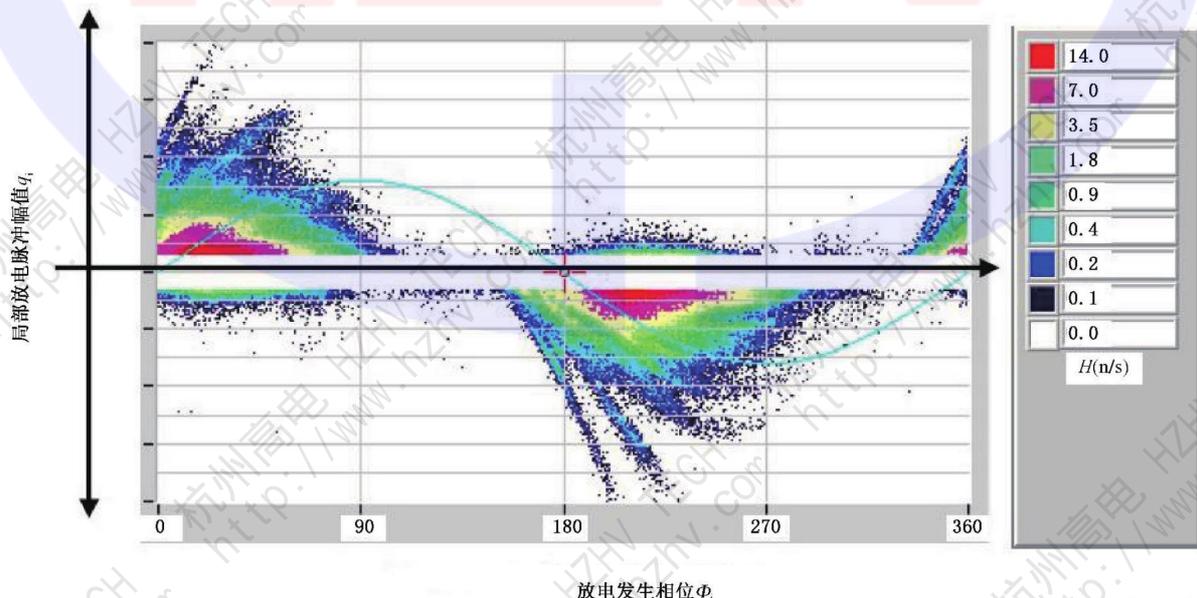


图3 PRPD 谱图示例

## 7 试验回路

### 7.1 概述

局部放电测量的试验回路基本要求是为试品局部放电的检测提供合适的条件。试验回路主要包括：

- 符合 IEC 60060-1 和 IEC 60060-2 的高压电源；
- 电压测量装置；
- 合适的局部放电耦合单元；
- 阻抗与测量装置间的连接电缆，要求其具有足够低的阻尼特性和良好的屏蔽；
- 局部放电测量系统；
- 高压连接。

为了确保试验回路不影响试品局部放电的测量，根据 9.1.6 给出的试验规程，宜先将试验回路电压升至最大试验电压而无明显放电。

对于单个绕组部件的实验室测试或工厂测试，整个测试电路在最大测试电压下产生的噪声应低于 100 pC 的校准脉冲等级。考虑到测量仪器的误差，允许极限值大于校准脉冲的 2 倍。干扰测量系统的另一个重要因素是背景噪声，见 9.1.6.1。

测试完整绕组时，测试电路在运行电压下产生的噪声等级不应超过 Q 表示的最大局部放电幅值的 50%。

注：如果没有绕组的容性负载，内置补偿的高压变压器可能无法运行。

假如试验回路不足以消除干扰，又要允许在给定的低局部放电阈值下测量，在试品和高压源之间引入阻抗或者滤波器，以减小电源的干扰，例如，来自试验变压器、高压导线或套管的局部放电，或者在测量系统的频带内或接近测量系统频带的试验电压高次谐波干扰。另外，关于外部噪声、干扰和测量灵敏度的信息可参见附录 D 和 E。

整个测量回路宜为低电感布线，特别是接地回路，应采用低电感导线作为接地连接。

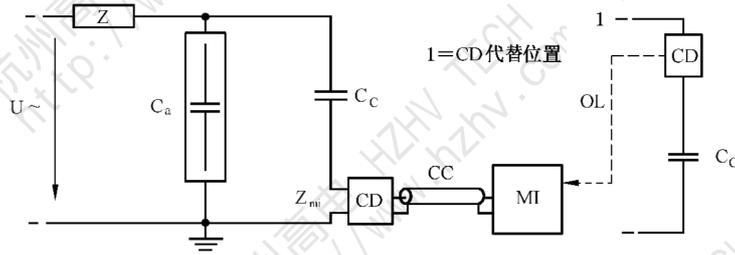
### 7.2 单个绕组部件

对于单个绕组部件(定子线棒、线圈等)的局部放电测量，宜使用符合 IEC 60270 的两个基本的试验回路(见图 4)。

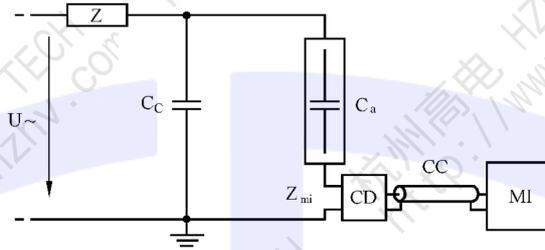
在图 4a)的回路中，低压耦合装置在耦合电容的接地侧。这种布置的优点是适合一端接地的测试对象，测试对象直接连接在高压电源与地面之间。在测试过程中发生绝缘击穿时，测量设备无遭受高压的风险。

在图 4b)的电路中，低压耦合装置放置在测试对象的接地侧。因此，测试对象的低压侧应与地隔离。与图 4a)相比，该试验回路中的低压耦合装置灵敏度可能更高。在图 4a)和图 4b)中，被测 PD 信号的极性是相反的。

在上述两种试验回路中，应设计保护电路以承受试验期间试品失效产生的击穿电流，保护电路应与耦合装置连接。



a) 耦合装置(CD)与耦合电容器串联图



b) 试品与耦合装置(CD)串联图

说明:

$U\sim$ ——高压电源;

$Z_{mi}$ ——测量系统的输入阻抗;

CC——连接电缆;

OL——光纤线路;

$C_a$ ——试品;

$C_c$ ——耦合电容;

CD——耦合装置;

MI——测量仪器;

Z——滤波器。

图4 符合 IEC 60270 的基本试验回路

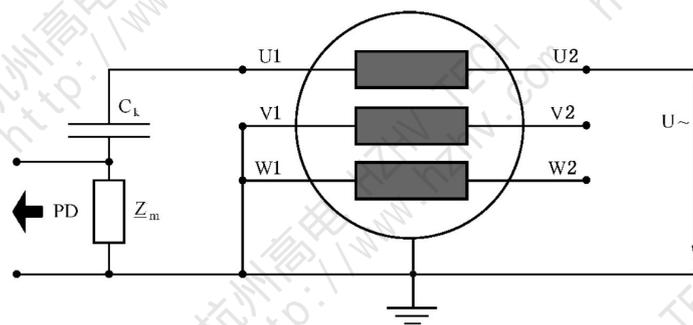
### 7.3 完整绕组

#### 7.3.1 概述

获得高压绕组局部放电测量的真实信息取决于星形点的紧密连接和测量装置所选择连接图。

高压电源和局部放电耦合单元宜分别连接至绕组两端,以便利用相绕组的阻尼效应优点来抑制来自电源传导的干扰。局部放电耦合单元应尽可能接近绕组端,对于 7.3.2、7.3.3 和 7.3.4 所述的测量,定子铁心应正常接地。

图 5 给出了对 U 相进行局部放电测量的试验回路, $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  为绕组高压端, $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  为绕组的星形侧。



说明:

U~——高压电源;

Z<sub>m</sub>——测量阻抗;

C<sub>k</sub>——耦合电容。

注 1: 7.3.2~7.3.4 中给出的所有连接配置都基于具有星形连接的电机。还有一些可用三角形连接转移到电机。

注 2: 附录 G(见图 G.1)给出星形和三角形连接完整的图示表。

图 5 完整绕组局部放电测量的试验回路

### 7.3.2 标准测量

开路星形点绕组的局部放电测量宜使用表 1 中给出连接图, 闭路可接入星形点和不可接入星形点宜使用表 2 给出连接图。为了检查制造后产品质量, 以便对局部放电结果进行比较和趋势分析, 新的和老化的绕组宜进行表 1 和表 2 中的测量。

表 1 开路星形点连接图 S1

ID 编号	高压	接地	C <sub>k</sub>
S1.1	U2	V1W1	U1
S1.2	V2	U1W1	V1
S1.3	W2	U1V1	W1
S1.4	U2V2W2	—	U1V1W1

表 2 闭路星形点连接图 S2

ID 编号	高压	接地	C <sub>c</sub>
可接入星形点			
S2.1	U2V2W2		U1V1W1
不可接入星形点			
S2.2	U1V1W1	—	U1V1W1

对于开路星形点绕组, 对比 S1.1~S1.3 与 S1.4 的测量结果, 可以监测和区分出绕组两相之间特别的局部放电源, 例如, 由于制造缺陷或者运行期间导致老化的情况(见 9.2)。

根据供电电源的容量和绕组的电容量, 对完整绕组加压可能比较困难甚至是不可行的。这时, 表 1 中对开路星形点完整绕组的对地测量 S1.4 可以忽略, 但在新绕组的情况下可以进行, 例如小型电机, 可

明确在制造后采用简单试验规程,甚至对于开路星形点只进行 S1.4 测量。然而,对于绕组将来状况的比较和趋势分析只能提供少量的信息,且不能甄别两绕组间可能的放电。

### 7.3.3 可选择的补充测量(EX.X)

除表 1 和表 2 中给出的标准的方法外,还能选择一些补充测量方法,以便对绕组绝缘的局部放电性质作更详细的研究,表 3 和表 4 列出了这些测量方法。如果标准测量方法表明局部放电源要进一步研究,应选择合适的测量方法进行。无论进行哪一种补充测量,应由用户或制造厂协商决定。

表 3 开路星形点连接图 E1

ID 编号	高压	接地	C <sub>c</sub>
E1.1	U1	V2W2	U2
E1.2	V1	U2W2	V2
E1.3	W1	U2V2	W2
E1.4	U1V1W1	—	U2V2W2

表 4 闭路星形点连接图 E2

ID 编号	高压	接地	C <sub>c</sub>
可接入星形点			
E2.1	U2V2W2	—	U1
E2.2	U2V2W2	—	V1
E2.3	U2V2W2	—	W1
E2.4	U1V1W1	—	U2V2W2
不可接入星形点			
E2.5	V1	—	U1
E2.6	W1	—	V1
E2.7	U1	—	W1

由于局部放电脉冲沿绕组传播会衰减,局部放电测量可以利用该特点,采用表 3 和表 4 所列的补充测量方法作为表 1 和表 2 标准测量方法的补充,得到定子绕组系统内主要局部放电源特定位置的更详细信息。

在排除电源传导干扰的情况下,测量 S1.1 到 S1.4 和 S2.1 时,绕组端部,即相端要和中性侧(U1U2, V1V2 W1W2)相连接,以获得绕组两边绝缘缺陷和/或制造缺陷的相同灵敏度。

### 7.3.4 使用集成试验设备(IX.X)

虽然对完整绕组进行局部放电测量没有合适的方法,如 7.3.2 和 7.3.3 所述,HV 及 PD 耦合装置的接线盒是必要的。例如对带有小型接线盒的低压电机进行测量,以及当 PD 测量设备为电源的主要部分时,接线盒不允许连接 HV 和 PD 耦合电容的不同接线端。除连接图以外,7.3.2 中的描述适用于完整绕组 PD 测试,类似于表 1 和表 2 中的连接,表 5~表 7 给出了连接方式。

表 5 在高压测量的开路星点连接 I1

ID 编号	高压	接地	C <sub>c</sub>
I1.1	U1	V1W1	U1
I1.2	V1	U1W1	V1
I1.3	W1	U1V1	W1
I1.4	U1V1W1	—	U1V1W1

表 6 在星点测量的开路星点连接 I2

ID 编号	高压	接地	C <sub>c</sub>
I2.1	U2	V2W2	U2
I2.2	V2	U2W2	V2
I2.3	W2	U2V2	W2
I2.4	U2V2W2	—	U2V2W2

表 7 闭路星形点连接图 I3

ID 编号	高压	接地	C <sub>c</sub>
I3.1	U1	—	U1
I3.2	V1	—	V1
I3.3	W1	—	W1
I3.4	U1V1W1	—	U1V1W1

注意电源和测量装置连接至同一点会受到电源的干扰,也会受到其他干扰,例如电缆的阻尼及信号反射,或对 HV 电缆的天线效应引起的具有较高灵敏度的噪声。

## 8 测量标准化

### 8.1 概述

在 4.3 中提到的电机绕组中由于脉冲传播、谐振和相互交叉耦合,校正是不可能的。标准化的目的是通过在与完整试验回路连接的电机端注入确定的参考脉冲来排除试验回路的各种影响,例如电源的连接、杂散电容、耦合电容和试品电容的影响。标准化是确保局部放电测量系统提供足够的灵敏度,使测量期间在电机端正确地测量出现的局部放电值,而且所用的局部放电探测系统可以重复响应。另外,测量回路的标准化有利于对使用相同的局部放电设备,具有相同设计的试品的测量结果进行比较。试验回路的标准化,应通过注入由标准脉冲发生器(校准器)产生的已知量的短时电流脉冲来进行,标准脉冲发生器应符合 IEC 60270 的规定。

以下几点有必要重申:

- 标准化不能确定未知的与电机有关的信号传输函数,该传输函数是绕组绝缘中实际局部放电源和固定传感器位置之间的函数,通常它是局部放电源位置与单个绕组设计之间的函数。

- 电机端的标准化不能充分表述定子绕组内某未知部位实际发生的局部放电脉冲。因此依据绝对数量,在完整绕组上进行的标准化测量过程并不能为绝缘结构的质量优劣提供依据。
- 电机端子的标准化不能充分地表示在定子绕组内未知位置实际发生的 PD 脉冲。因此,对完整绕组的标准化测量的过程,并不能以绝对放电量来衡量绝缘系统的质量。一般情况下,可以假设在大多数情况下,端子处测得的 PD 水平低于原点处。
- 标准化不能为不同电机的直接对比提供比较基准。

由于当对作为集中电容的整浸线圈、线棒或其他单个绕组部件进行试验时,不必考虑脉冲传播现象,根据 IEC 60270,局部放电值的标准化也可作为不同试品绝对比较的基础,从而给出质量优劣依据,如作为制造期间的质量保证试验进行。

## 8.2 单个绕组部件

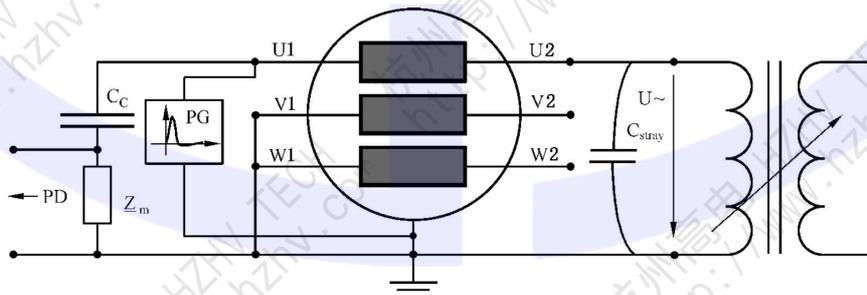
对单个绕组部件的试验,按照 IEC 60270 的校准程序,应对 7.2 中描述的试验回路进行校正。对设计的完整回路,注入规定脉冲幅值的脉冲电流进行校正,随后再进行测量。依靠在试品两端连接标准脉冲发生器完成,而高压电源连接到测量回路但不通电。

为确保测量局部放电幅值的良好精度,应使用预期相关幅值范围内的某一值进行标准化。根据 IEC 60270,单个绕组部件的局部放电值宜用视在电荷  $q$ (pC)表示。

## 8.3 完整绕组

对于完整绕组试验,是在电机端或局部放电耦合单元的位置,通过标准脉冲发生器注入规定局部放电幅值的电流脉冲,进行 7.3 中所述的测量回路的标准化。这样做是为模拟在测量期间,电机端出现的局部放电脉冲。然而应注意,用 pC 或者 mV 不能为不同电机或者所用的不同局部放电探测器提供直接比较的基准。

在开始局部放电测量前,原则上要对 7.3 中的每个测量回路进行标准化。如果局部放电试验按顺序进行(例如:S1.1、S1.2、S1.3),可以利用三相绕组的对称性,只应对第一个测量回路进行标准化。



说明:

PG ——符合 IEC 60270 的脉冲发生器;

$U\sim$  ——高压电源;

$Z_m$  ——测量阻抗;

$C_c$  ——耦合电容;

$C_{stray}$  ——杂散电容。

图 6 S1.1 试验回路的标准化

试验时根据单个电机的尺寸可以分别对每相进行标准化。对特大型电机,由于导流环连接设计的影响,三相的对称性可能不一定适用。

按照图 6,整体绕组的标准化程序如下:

- 根据要进行测量的类型,选择符合 7.3 的试验回路(见表 1~表 7)。
- 所有至相端、局部放电耦合装置和测量电源的连接导线应尽可能的短,测量回路的所有原件应合理安排并与测量电源连接,但不加电压。
- 标准脉冲发生器连接至被测的相对地之间,由于引线有电感,为避免信号畸变,引线要尽可能短。如有可能,标准脉冲发生器应直接连接到相端。
- 根据试品预期的有关幅值范围,脉冲发生器宜调节至合适脉冲值。
- 通过局部放电装置标定标准脉冲的大小,以确定随后局部放电测量的刻度系数。

从系统观点,要考虑试品、连接电缆和具有滤波器及放大器的测量装置的整体布局,整个定子绕组独立测量回路的校对仅适用于给定的电机和检测系统。有必要重申,如果新的测量回路不同于以前的测量回路,新的测量回路应重新校对,即使对称绕组也不例外。

原则上,能采用更精准的校正程序提供关于绕组中脉冲传播的交互耦合效应和脉冲阻尼的信息,然而,这些程序不在本部分考虑的范围之内。

## 9 试验规程

### 9.1 绕组及绕组部件局部放电测量

#### 9.1.1 概述

离线局部放电测量可在整体绕组、单相绕组或单个绕组部件上进行。在整体或者部分绕组的情况下,试品应与外部电源、母线、脉冲避雷器、脉冲电容器和励磁系统断开。在可能情况下,试验引线应总是连接在电机端,绝不允许通过断路器接入。在随后所有试验中,根据第 7 章,包括所有元件的总试验回路应采用与初始测量相同的方式布置,以确保测量结果的可比性。此外,为了获得可比的测量结果,如进行趋势分析,使用符合第 5 章的相同测量系统和符合第 8 章的相同标准化规程是重要的。另外,应按照第 11 章要求在试验报告中详细记录试验的实际情况。

#### 9.1.2 试验设备和安全要求

按第 7 章的要求,在试验电压范围内,试验电源和电缆应无 PD。施加电压波形应满足  $U_{pp}/U_{rms} = 2\sqrt{2} \pm 5\%$  ( $U_{pp}$  为峰峰值,  $U_{rms}$  为有效值),电源的额定视在容量(kVA)应足够大以满足 7.3 中定义的测试程序。

高压局部放电试验的安全要求应包含下列内容,但不局限于此:

- 试验回路应配备可靠的过流保护装置或者开关以便在失效或者闪络时与电源断开;
- 定子绕组端的高压连线应较短并具有牢固的连接,以避免在试验期间偶然的断开连接,应配备接地棒;
- 试品周围宜有有效遮拦防护,标识清晰;
- 试验接线和加压的过程中,宜至少有两人在场。

注:试验适用健康和安条规则。

#### 9.1.3 试品准备

在试验开始前,应检查定子是否清洁。此外,相邻相的连接之间及绕组内部电缆之间要有足够的间隙,电缆不宜互相接触,或碰触任何不同电位的表面。

为了评估测试的绕组绝缘完整性,在开始 PD 测试前宜检查绝缘电阻,一般宜超过 IEC 60034-27-4

中规定的限值。绝缘电阻的测量将显示绕组是否过于脏、潮湿或绝缘是否损坏。

在施加高压之前,单个绕组部件(例如线圈、线棒或者模拟定子的绕组部件)宜仔细准备好,宜进行清洁和干燥并采用防晕措施。宜尽可能避免部件端部的电场增强,所有股线接触良好。导电防晕层应在其全长范围内与地电位紧密接触以形成等电位表面。宜准备细的软铜线、铜绞线、金属箔或者合适的槽模型。

#### 9.1.4 预处理

在施加电压后的最初几分钟,局部放电现象明显地减弱,而预处理将确保可以检测出绕组或者绕组部件稳定的局部放电。因此,在读取局部放电前,宜预先加压几分钟对试品进行预处理。为了防止绕组过电压,施加电压宜根据绕组状态慎重地选择。对于新的和使用过的绕组,宜在最大试验电压下(见 9.1.5 和 9.1.6)预处理 5 min。对于单个绕组部件预处理也是有用的。在预处理之后,可以重新施加电压以进行局部放电测量。

对于新的单根线棒和线圈施加高压( $>U_N$ ) 进行预处理可缩短预热时间。通过此项措施,局部放电测量更便于在制造过程中实现,比如在进行局部放电测试之前,对单个线圈和线棒进行耐压试验。

#### 9.1.5 试验电压

对于局部放电试验,根据第 7 章将试品接至试验回路,采用阶梯升压(如,  $\Delta U = 0.2U_{\max}$ ) 或者匀速升压( $\leq 1 \text{ kV/s}$ ) 到最大的试验电压  $U_{\max}$ 。

在阶梯升压的情况下[见图 7a)],在每步应至少停留 10 s 以记录每步电压下包括局部放电图在内的相关参数。

在匀速升压情况下[见图 7b)],电源在升压过程中要无局部放电。

新绕组和绕组部件的最大试验电压  $U_{\max}$  宜从下列电压等级中选取:

- $U_1 = U_N / \sqrt{3}$ , 或者绝缘结构的运行电压(线对地);
- $U_2 = 1.2U_N / \sqrt{3}$ , 或者 120% 的绝缘结构的运行电压(线对地);
- $U_3 = U_N$ , 或者绝缘结构的额定线对线电压。

更高的试验电压可提供附加信息。

对于已使用的绕组,试验方和用户之间就升压速率和最大试验电压宜达成一致的意见。

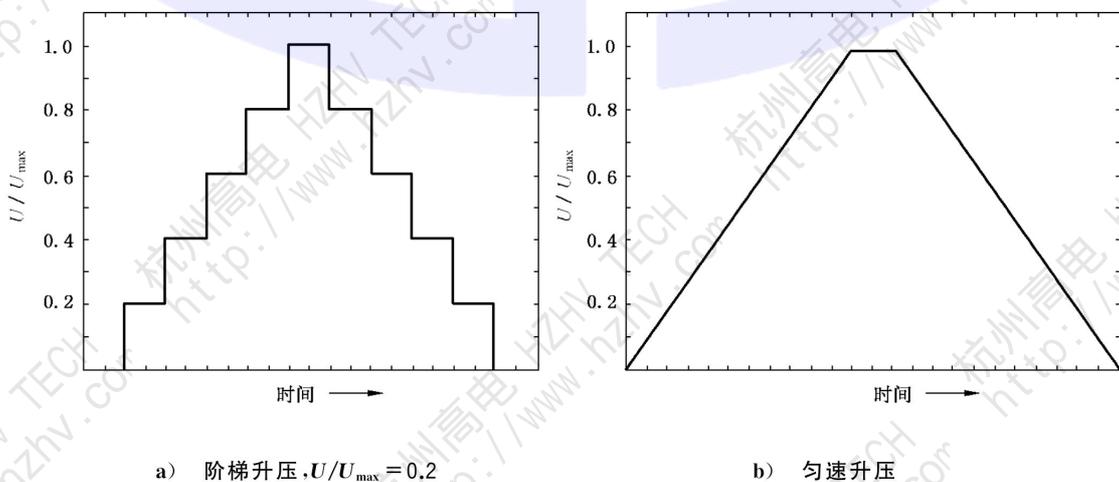


图 7 局部放电测量期间对试品施加的电压

## 9.1.6 局部放电试验规程

### 9.1.6.1 背景噪声的测量

与 IEC TS 60034-27-2 一致,噪声定义为不是由定子绕组产生或不像是脉冲的信号;而干扰是相对持续时间较短的电脉冲,具有定子绕组局部放电脉冲的许多特性,但实际上不是定子绕组局部放电。

局部放电试验前,测试与测量装置相关的背景噪声水平,以确保试验装置在升至最高试验电压时具有足够低的噪声和局部放电。背景噪声测量宜在局部放电测量回路准备好后进行,用无局部放电的电容器做试品最佳。如果没有,则空载运行全部试验回路,即接入电源局部放电耦合单元和局部放电测量装置,只断开试品,并升至最高试验电压。在空载情况下,要按空载状态分别校对试验回路,以获得准确可靠的局部放电值。如果随后的试验采用匀速升压,空载试验宜以相同的速率加压。

可调电压信号在调压过程中会产生明显的噪声。当进行阶梯升压测试时,应避免在电压调节期间进行测量。在进行匀速升压测试时,应使用满足条件的设备。

### 9.1.6.2 减少噪声和干扰的影响

测量装置内部固有噪声实际上不能完全消除,例如附录 E 的热噪声(噪声、干扰和灵敏度)。假定干扰来自外部元件,通过合适的方法能使其减小或者甚至消除。首先要定位出现的干扰信号源,然后采用合适的方法使其减小。通常,下列方法能改善和优化测量装置:

- 使用验证过的局部放电耦合单元与测量设备组合。
- 耦合单元尽可能靠近试品,以减小试品与耦合器之间的衰减。
- 根据第 7 章,将电源和局部放电耦合单元连接到相反的绕组端,以抑制来自电源的干扰。
- 测量整个定子绕组时,所有埋置式温度传感器(RTDs)的导线固定在接地定子外壳上。
- 分别校正变压器和局部放电耦合单元,以获得干扰量值的有意义信息。
- 应在每次测量前进行试验装置的标准化测量。因为测量位置和时间不同、供电的电源质量问题、变压器表面的脏污和变压器绝缘可能的老化或者其他问题等都可能影响到局部放电测量。
- 试品和测量设备要良好接地(采用大面积的导线接地)。如果可能,局部放电耦合单元、试品和测量设备要在同一点接地。
- 试验装置布置要紧凑。测量导线、接地线和回路连接尽可能短,以尽可能减小借助天线效应进入测试回路的电感和电磁耦合。
- 测量电缆阻抗要匹配以避免发生反射,同理,只有验证过的电缆才可使用。
- 某些电子装置,例如计算机和监视器,会对测量设备产生干扰,经常变换这些装置位置方向可以减小对测量的影响。

### 9.1.6.3 局部放电试验

局部放电测量回路依据第 7 章要求充分准备,试品上的试验电压按 9.1.5 所描述的方法施加,在每一步电压或者匀速升压期间,应记录和处理第 6 章所描述的局部放电数据以提供合适的局部放电数据表达方式。根据第 6 章,为了获得  $Q = f(U)$  曲线、局部放电起始电压(PDIV)和局部放电熄灭电压(PDEV),宜按图 7 所示,先升高而随后降低试验电压来进行测量。在电压升高和降低期间宜采用相同的变化速率。

当使用数字设备计算  $Q$  ( $Q_m$  或  $Q_{iec}$ )时,采集和处理这些数据需要一定的时间。在工频下,用以处理  $Q$  值的连续数据采集周期应至少为 5 s。因此,保持电压稳定的时间应更长,例如 10 s。

如果测试频率与供电频率不同,附录 A 给出了测量所需时间的指导。

如果在施加电压期间局部放电值以电子方式记录而且以测量文件存储,就可得到第 6 章所描述的图表及进行第 10 章描述的进一步评定,以评估局部放电测量结果。该结果包括在升高和降低试验电压期间,在不同电压水平下的脉冲幅值分布、相位离散分布或特定的局部放电模式(见第 6 章和第 10 章)。

试验期间宜记录观测到的任何现象或异常,以便将来查阅。根据被试电机和试验目的,宜进行第 7 章所述的适当顺序的标准测量和/或可选择的补充测量。

## 9.2 局部放电源的识别和定位

按照 6.3,当使用可以提供局部放电参数的仪器时,样品端的局部放电电气测量评定放电强度、频率以及极性。然而,要将这些参数转换为关于绕组状态有用的信息,重要的是识别局部放电源的位置。

起初,局部放电试验通常是逐相进行而其他两相接地,这为每相绕组提供了典型的局部放电分布或者局部放电图。在每相试验后,假定电源有足够的额定视在容量(kVA),在离线试验条件下,测定放电起因的首选和最基本的方法是试验电压电源同时给三相绕组加压,在这种状况下,可以消除端部绕组相与相之间的电压梯度影响。如果三相同时加压,可从局部放电源中消除在端部绕组中相与相之间的放电。相对地放电仍然明显,宜彻底研究其原因。局部放电量和脉冲数量相应的减小表明,在每相测量期间,端部绕组对获得信号有益。这是区分槽部放电和端部绕组局部放电有用的方法。

为了定位特定放电源,最好将绕组拆分进行诊断。然而,由于电机制造商会将来自同一相的极间跳线、导流环和电缆连接在一起,以至这些元件彼此互相接触,在这种情况下,一个回路接地而其余施压,会出现异常情况并记录到较高的 PD 放电水平。

注:在有必要拆分绕组的情况下,购买者和测试人员可以在开始试验之前咨询电机制造商以获得指导说明。

利用局部放电的不同物理效应,已开发了多种补充试验方法。为了确定端部绕组是否存在放电,有用的做法是在试验期间,使用可以探测电晕放电的观察镜或者相机从两端检测绕组是有用的。如需要,可在外壳和转子移除后进行检测,这是离线测量的优点。

定位局部放电源的非电气测量方法在附录 C 中有所描述。

## 10 试验结果的评定

### 10.1 概述

通常,绕组和绕组部件在工厂的局部放电试验是确保制造质量的一致性,而绕组在现场的局部放电测试是确定运行期间由各种不同的老化因子引起的老化程度。因此,在局部放电测量后,对试验结果的评定是最终、也是最重要的一步。根据试验结果,可以确定绝缘结构是否存在缺陷。如果存在缺陷,绝缘结构的性能是否需要辅助试验、是否需要制定计划和/或实行彻底的可恢复性维护。

宜注意单个电机在运行期间通常要承受特定的应力,而不同制造厂的设计特点、生产条件和绝缘结构有很大的不同,这通常会引起局部放电量的巨大变化,且取决于被试电机特有的特性。不同类型电机的试验结果采用绝对值进行直接比较是不可能的。

对于完整绕组也不能确定任何绝对限值,例如生产或者运行期间使用的验收准则,因此,本部分不会给出用于质量评估的规定限值。

为了完善对整个定子绕组局部放电测试数据的评价,宜从状态评估角度仔细分析和研究以前的检查报告,例如外观检查的结果。

绕组端部的端部防晕层结构不仅与磁场有关,而且与频率有关。频率越高,绕组表面的有效分级长度越短。这可能会在槽部防晕层和端部防晕层的重叠部分造成局部放电。例如在较低的频率(VLF)

下,端部防晕层上的电场分布变得更均匀,因此有效的分级长度也会增加,使得地电位更接近绝缘层,可能会产生局部放电。

## 10.2 PD 大小、起始电压和熄灭电压的评定

### 10.2.1 基本评定

根据 6.2,对绕组和绕组部件离线局部放电试验基本结果的评定是以试验电压升高和降低时测得的局部放电起始电压(PDIV)、局部放电熄灭电压(PDEV)以及最大重复出现的局部放电量  $Q_m$  为依据。

尽管检测到最大局部放电量的位置不一定是绕组中最危险的部位,但作为试验电压函数的局部放电量的检测和分析,可以为描述典型局部放电源的特征提供简单而有效的方法。10.3 所述的 PD 相位识别是一种更有效的识别方法。附录 F 提供了图像识别和基于 PD 的评估示例的更多详情。

整个定子绕组的评定通常是相对的,也就是说,通常不能规定一个可接受水平的  $Q_m$  或者存在严重绝缘隐患的  $Q_m$ 。这与本部分引言所述的原因有关,而且事实上局部放电常常是失效过程的表征而不是直接原因。对于完整绕组,可用以下描述的方法简单概括。要得到更详尽的解释,宜采用 PD 图来识别 PD 信号:

- 使用相同的测量方法和具有相同技术参数的测量设备,同一定子在一段时间内  $Q_m$  趋势;
- 使用相同的测量方法和具有相同技术参数的测量设备,具有相同设计的几个定子间的  $Q_m$  对比;
- 使用相同的测量方法和具有相同技术参数的测量设备,一个定子不同相之间的  $Q_m$  对比。

单个线圈或线棒的局部放电测量结果用 pC 表示,在稳定的环境条件下,使用相同的测试设备、测试电路连接和仪器设置时,PD 的大小是可以比较的。如果选择相同的脉冲发生器类型、连接电缆(类型和长度)和脉冲加载位置,则局部放电测量值可以更好的进行定量比较。可供比较不同线圈或线棒之间的局部放电大小,同时考虑引言中所述的局限性。

高压电机的线圈和绕组组件,通常是云母绝缘结构,其能够承受局部放电(本质不是自由孔隙引起的局部放电),允许更高的 PDIV 和 PDEV,这意味着在定子绕组绝缘中大的孔隙较少。然而,在使用诊断技术评估绝缘结构之前,不应仅根据 PDIV 和 PDEV 做出判断。这与无局部放电结构形成了鲜明对比,在无局部放电结构中,通过评定 PDIV 和 PDEV 的适用性证明了其价值。

单个绕组部件的局部放电起始电压(PDIV)和局部放电熄灭电压(PDEV)在最大规定的噪声背景下测得,以 pC 表示。

### 10.2.2 电机中局部放电随时间变化的趋势

不论使用哪种检测方法,对完整定子绕组,局部放电值的评定是最有效的方法。首先应获得离线局部放电的初始指纹,新绕组的初始指纹最好。如果在运行期间由于操作引起绕组的损害, $Q$  通常随时间的推移而增大。例如, $Q$  随时间的显著增加可能表明出现了显著的恶化。在合理的时间范围内,可能需要进行额外的离线测试,使用附录 C 中描述的方法进行局部放电定位,并对绕组进行可视化检查。

关于局部放电随时间变化的注意点:

- 新定子具有相对高的局部放电,通常在第一阶段运行后下降,例如由于固化。
- 为了使趋势分析有意义,趋势图应只显示在相同电压、温度和相似的湿度条件下,采用相同的局部放电检测仪得到的数据。在不同试验期间,应尽可能使试验电压变化不超过  $\pm 2.5\%$ ,试品温度变化不超过  $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 。
- 对于氢冷电机,宜在大气条件下进行测量,但是在任何情况下都应与以前试验条件相同的气体条件和压力条件下进行。

——由于试验条件不可避免地会出现变化,并且局部放电测量或多或少具有统计特点, $Q$  值变化百分之几是正常的,例如 $\pm 25\%$ 。

如果局部放电随时间变化趋势上升,或者单个读数与类似定子绕组或线圈相比较高,则对局部放电数据进一步分析以确定局部放电增强的可能原因。根据 10.3 的相位离散局部放电模式分析法(见图 3)对该种情况的局部放电源辨识是有帮助的。

### 10.2.3 绕组部件或者绕组间的对比

确定一个绕组或绕组部件与另一个绕组或绕组部件是否有差异的有效方法是对比绕组部件之间或绕组之间的局部放电量。可以进行不同的比较:

#### a) 绕组部件的工厂试验:

当在相同的设计棒或线圈上进行测量、使用相同的设备、相同的仪器设置、相同的试验方法以及相同的条件(如本部分引言中所述)时,可根据  $Q$  进行比较。如果可以排除外部放电,则此类试验的结果可用于确定部件中使用的加工或绝缘材料是否存在偏差。

#### b) 绕组的工厂试验:

类似电机间的局部放电结果的比较,最可靠的是定子相同,包括绝缘结构相同,以及根据 10.2.2 在相近的温度和湿度下,试验电压相同所测得数据进行比较。试验还应在相同的局部放电试验设备上进行,且测量设备的测试回路和频率范围相同;

当这样具有可比性的数据积累起来,并建立足够的数据进行统计评价时,可以从局部放电大小的角度对电机绕组之间的质量进行评价。

#### c) 绕组的现场试验:

对具有相同设计结构、制造商和额定电压的绕组之间进行比较,以便评估哪个绕组可能出现最严重的运行老化。在相同的试验电压下, $Q$  值较高的绕组,根据局部放电源在绕组中的位置,通常老化最严重。绕组局部放电试验应使用相同的试验设备在相同的频率范围内进行测试。

## 10.3 局部放电模式识别

### 10.3.1 概述

图 3 的 PRPD 图说明了一种常见离线局部放电测量方法。由于损害的程度以及绝缘失效的风险与局部放电的特定类型密切相关,因此获得任何局部放电活动源的声音信息是至关重要的,亦即放电类型和在定子绕组或绕组部件内的可能位置。

当使用 PRPD 模式时,能将各种局部放电源彼此分开,以评估其相对危险和分别的发展趋势。在了解了其后的物理过程或这些分离的局部放电源位置时,就可能分别重视它们的风险。由于局部放电值与局部放电模式中表示的老化过程之间相关性非常小,这是应区分放电源的原因。

例如,在同一次局部放电读数中可能出现局部放电值相近的两个子模式:一个是由于槽部主绝缘内部分层引起的,另一个是在端部绕组某处的表面效应引起的。尽管两种现象会产生相近的局部放电值,但过热或热循环引起的槽部分层局部放电比由污染或潮湿引起的端部绕组表面局部放电显示出更危险的绝缘状态。

### 10.3.2 基本评价

按照图 8 所示的基本步骤,使用相位分离模式对绕组的典型局部放电源进行辨识和定位,用这种方法可以对从完整的局部放电读数中分离出来的子模式进行分类。

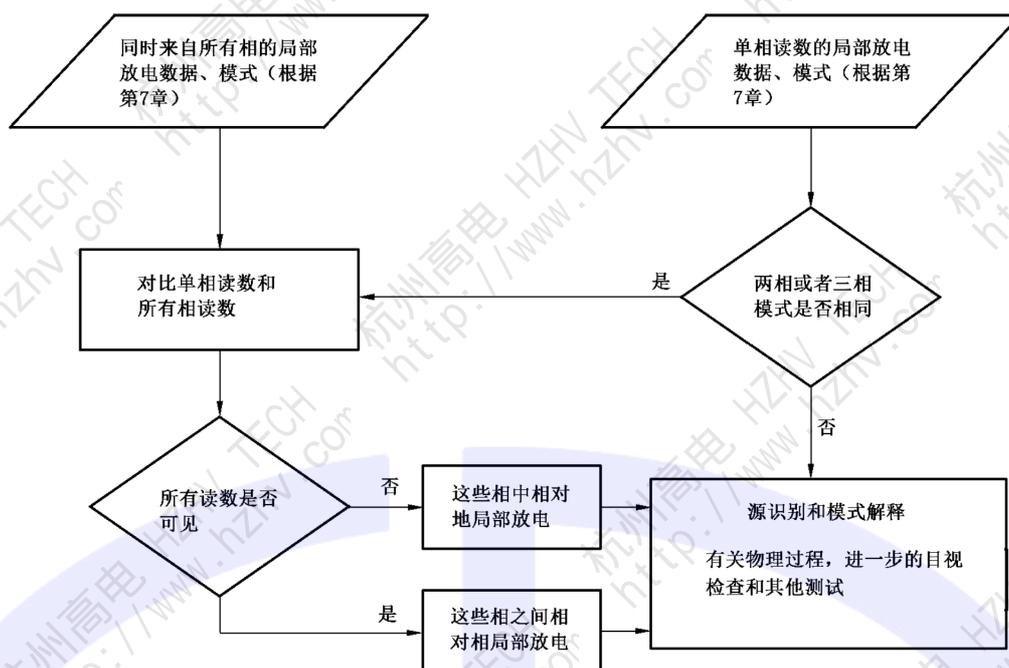


图 8 局部放电源的辨识和定位示例

局部放电模式评定的目的是区分试品内部不同局部放电源的局部放电结果，以获得下列信息（参见附录 F）：

- 观察每个局部放电源的趋势特征；
- 定位不同的局部放电现象；
- 提供精确定位的原始信息；
- 根据局部放电源和位置，评估绝缘状况。

在分析相位离散的局部放电模式时，仍然可以通过下列方法得到最有价值的评价：

- 使用相同的测量方法和具有相同技术参数的测量设备，同一定子在一定时间内局部放电模式趋势；
- 使用相同的测量方法和具有相同技术参数的测量设备，对具有相同设计的几个定子局部放电模式进行对比；
- 用相同的测量方法和具有相同技术参数的测量设备，对同一个定子的不同相之间的局部放电模式进行对比。

为便于试验结果间的比较，应利用适合的局部放电测量数据库，理想情况下，数据库应包括试验的每台电机局部放电的全部历史记录以及运行和维护数据。

此外，宜按第 6 章将局部放电试验结果可视化并收录数据库，则新测量后获得的模式能直接与典型的局部放电模式进行比较。若使用这样的数据库，就可将局部放电试验结果依照第 6 章进行量化，并归类至特定的局部放电源。

局部放电源典型特征和其对绝缘失效风险指示之间的特定关系通常是基于经实践证实的经验。另外，对设计结果和绝缘结构类似电机的局部放电结果也可与数据库直接比较，以得到进一步有用的信息。

## 11 试验报告

试验报告宜包含所有用于将来趋势分析所需的数据,以及给用户关于电机运行情况明确的建议。

试验报告包括以下项目:

## a) 电机资料:

- 制造厂;
- 类型和编号;
- 制造年份;
- 原绕组/重绕组日期;
- 额定电压;
- 额定电流;
- 额定视在功率;
- 额定功率因数;
- 额定频率;
- 绝缘等级/最大允许绕组温度;
- 绝缘结构;
- 定子冷却系统/介质;
  - 间接空气/氢气/二氧化碳;
  - 直接冷却/空气/氢气/水。

## b) 用户资料:

- 用户名称;
- 安装位置;
- 机组号。

## c) 运行数据:

- 运行方式(连续/间断);
- 逆变器驱动;
- 总的和/或等效运行小时数据;
- 总的启动数据,如果可以包括热启动、暖启动和冷启动;
- 跳机次数数据;
- 最大绕组温度和条件;
- 绕组平均温度;
- 重要事故情况。

## d) 试验回路和装置:

- 试验电流描述(见 7.3)。
- 使用的试验装置:
  - 制造商;
  - 型号;
  - 编号;
  - 校正数据和证书编号;
  - 耦合电容器的电容量(如果使用);

- 仪器设定；
  - 使用的归一化设备类型。
- 局部放电测量系统的测试带宽。
- e) 试验条件：
- 试验人员；
  - 日期；
  - 环境温度；
  - 定子绕组温度；
  - 相对湿度；
  - 大气压力；
  - 电机/定子绕组状态(常规冷却介质/压力,或暴露在空气中)；
  - 如果与额定频率不相同,则使用测试电压的频率。
- f) 试验结果：
- 绝缘电阻；
  - 仪器设定；
  - 试验电压水平/上升速率；
  - 测试电压波形图(如有)；
  - 调整过程；
  - 标准化/每次连接的校准系数(如果有关联)；
  - 噪声水平；
  - 周围干扰源(如知道)；
  - $Q = f(U)$ ,若  $Q_m$  或  $Q_{iec}$  为 PD 量值计算的指示值；
  - 相位离散放电次数分布(如可能)；
  - 相位离散放电幅值分布(如可能)；
  - 相位离散局部放电模式(如可能)。
- g) 诊断和建议：
- 以下列为基础：
    - 测量结果；
    - 与早期测量结果的比较(如可能)；
    - 测量期间观察到的现象；
    - 与参考数据库比对以确定测得放电的性质(如可能)。

可将测量结果作为最原始数据形式储存以供将来参考。

附录 A  
(资料性附录)

试验频率的参数对试验过程的影响

对于大多数试验,在工频 50 Hz 或 60 Hz 的线电压下进行测试非常方便。对于在工频电源下的测试,老化及局部放电现象已有完整的表述。当在不同的测试频率下使用谐振测试系统,甚至是在低频下测试,如 0.1 Hz,要采用 9.1.5 描述的试验。

对于 VLF 测试,因试验频率和局部放电<sup>[7]</sup>重复率之间存在一定的关系,为获得有意义的局部放电重复率,可以增加阶梯升压试验的停顿时间以及降低匀速升压试验的电压转换速率。因此,当考虑到上述线性频率依赖关系时,在 VLF 上获得相同数量的局部放电测试时间将会大大增加,导致无法测试。

为减少试验工作的时间,宜使用以下停顿时间及电压转换速率,见表 A.1。

表 A.1 宜使用的最小测试时间和最大转换速率

试验频率	Hz	400	50/60	10	5	1	0.5	0.1
最小测量时间	s	10	10	20	25	50	60	100
最小周期次数	—	4 000	500/600	200	125	50	30	10
最大转换速率 $Q=F(U)$	V/s	1 000	1 000	200	100	30	20	10
注:一般来说,如 PDIV 这样的局部放电现象可能与频率有关。因此,在不同频率下得到的结果没有可比性。除运行中的频率外,其他频率下的测试结果可能不能反映其运行过程中的特性。								

由于监测到零星放电信号的可能性很高,不宜采取较短的持续测量时间。另一方面,考虑到大多数 PD 可视化方法都是基于相位参考(如过零点),也不宜测量时间过长。频率抖动或过零点的故障检测使 PRPD 图像更模糊。

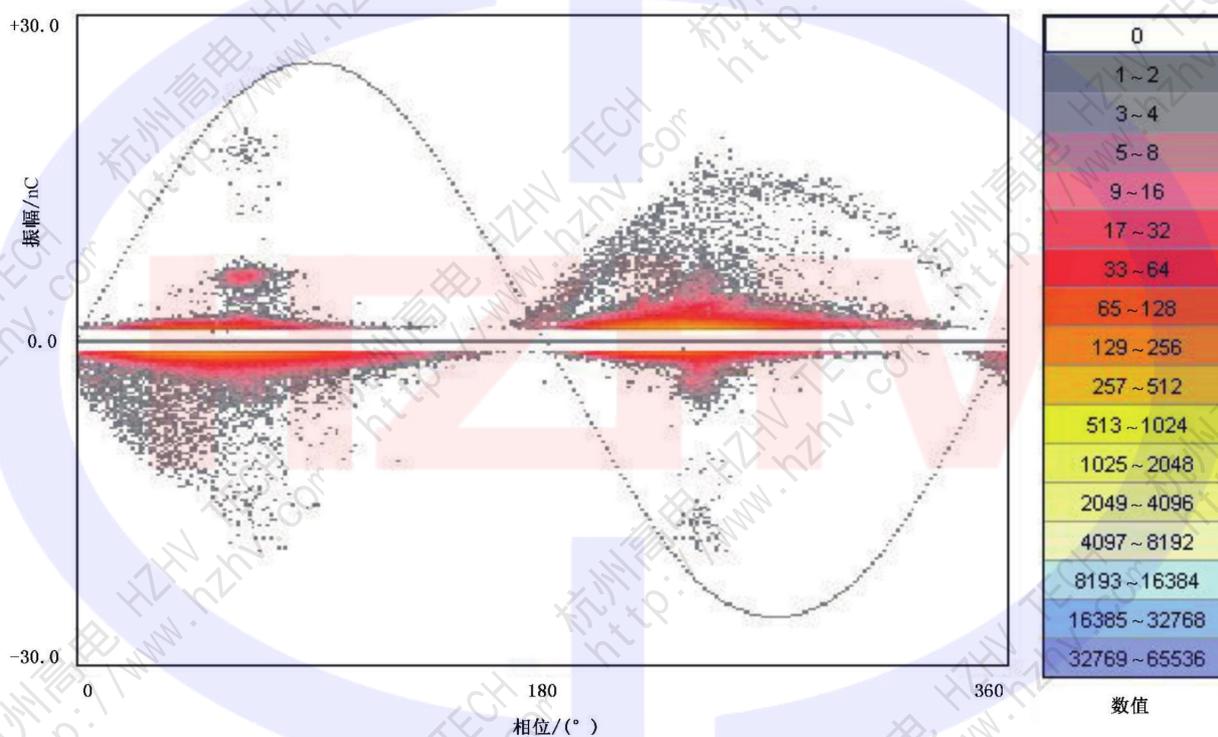
当从测量的字符串中生成特性值(如电荷值  $Q$ ),测量频率或周期对结果有较大影响。以  $Q_m$  为例,它被定义为工频下每秒重复发生 10 次及以上 PD 的量值,因此在一定周期内放电将以较长或较短的时间发生。例如,测量变压器在 30 Hz 谐振下运行时的每秒循环数,因此 30 Hz 的  $Q_m$  要定义为每 2 s 发生 10 次脉冲的值。或用于更高频率的测量,上述方法反之亦然。

附录 B  
(资料性附录)

确定局部放电幅值的其他方法

B.1 3.14 定义的  $Q_m$

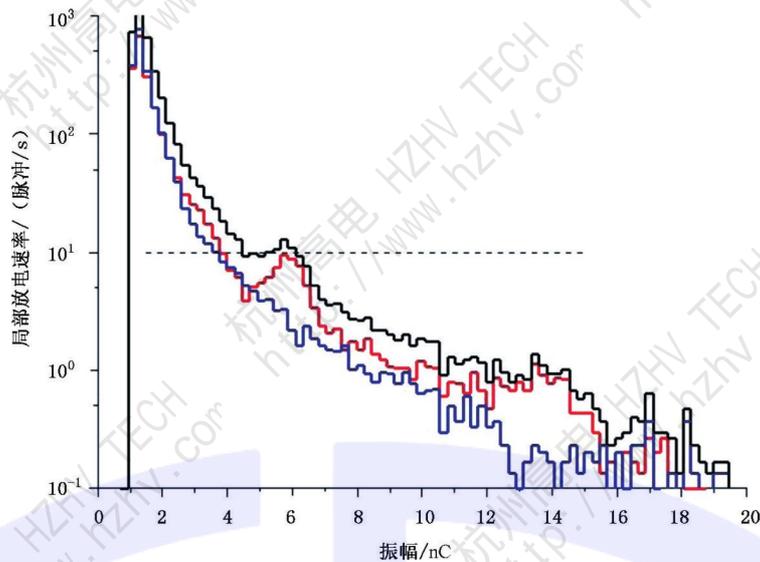
根据 3.14,  $Q_m$  定义为与 PD 脉冲重复率每秒 10 次 (pps) 有关的幅值, 可以从脉冲幅值分布中直接确定。为表示给定值的极性 (如突显极性), 在符号后面加上极性的后缀  $Q_{m+}$  以及  $Q_{m-}$ 。对于不同的脉冲幅值分布,  $Q_m$  可能是相同的, 而  $Q_{m+}$  或  $Q_{m-}$  可能是不同的。这种情况见图 B.1。



a) 图 D.1a) 等效电容的 PRPD 图形

注 1: 图 B.1a) 的 PRPD 图形具有不对称极性, 负半周期放电强度较大。

图 B.1 极化效应指标示例



b) 图 D.1a) 等效电容的脉冲幅值分布图

注 2: 图 B.1b) 所示的脉冲幅值分布表明, 红色的正极脉冲在最高振幅处比蓝色的负极脉冲频率高。这是由于坐标轴的对数缩放, 总体 PD 值大小  $Q_{m+}$  与该示例中的  $Q_m$  相同。黑色曲线是 PD 脉冲的绝对值。该曲线以较高的振幅通过 10 pps 的脉冲速率。

图 B.1 (续)

当使用数字设备时, 可以使用相同的方法, 应用于根据 3.15 定义的加权局部放电幅值  $Q_{iec}$ 。

在实际系统中, 每秒的脉冲数量 (pps) 是根据幅值范围计算的。当脉冲计数速率大于或等于 10 pps 时, 该范围的最大值定义了  $Q_m$ 。而幅值范围的选择, 如数字仪所定义的, 影响脉冲计数的最大量程和其他设置, 如触发等级和截止时间, 可能对  $Q_m$  有明显影响。对于较小的振幅范围, 可能无法获得 10 pps 计数率。

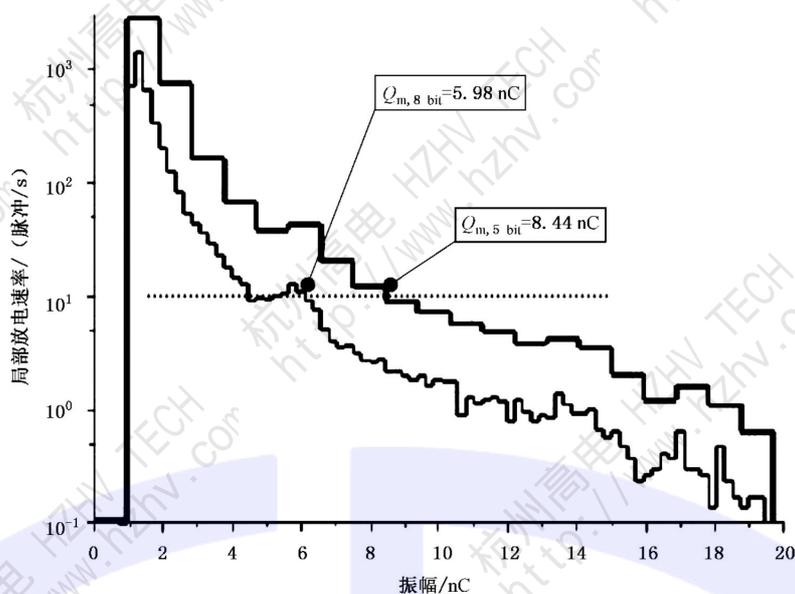
## B.2 累积重复 PD 幅值 $Q_r$

从本质上讲, 数字仪器把实数转换成有限的一组数组。在计算典型电荷  $Q_m$  值或  $Q_{iec}$  时, 这会导致舍入误差。从模拟信号到数字信号转换的离散精度越高,  $Q$  值越低, 而离散程度越低,  $Q$  值则高, 例如 12 位系统的  $Q$  值可能比 6 位系统略低。

为了说明这一点, 将图 B.1a) (用 8 位分辨率 A/D 转换器测量) 中的 PD 图转换为 5 位分辨率, 如图 B.2a) 所示。尽管数据源是相同的, 但两者之间的差异约为 40%。

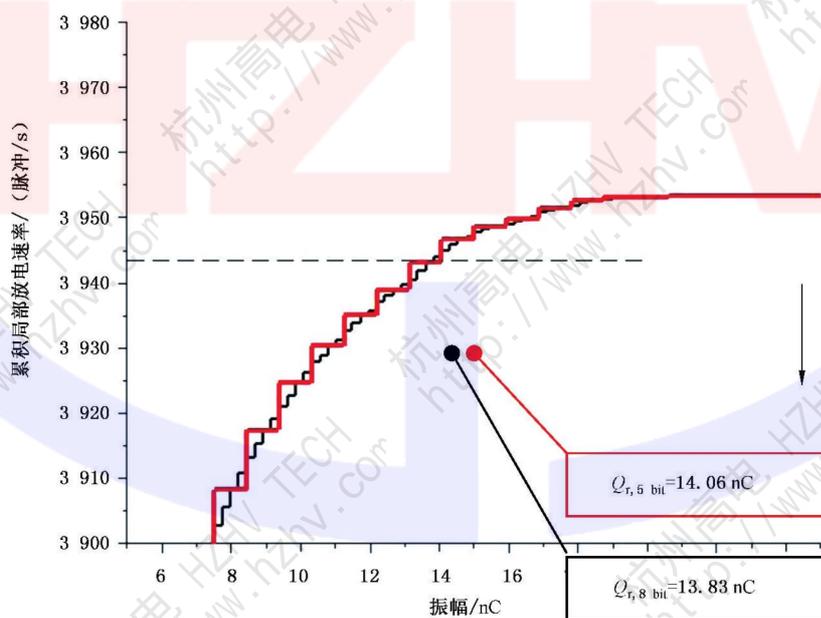
另一种具有代表性计算电荷值的方法是计算给定脉冲幅值分布<sup>[2]</sup>的累积频率。在 1s 的时间内出现 10 个最高脉冲的阈值表示累积重复 PD 值大小  $Q_r$  [图 B.2b)]。

这个量也可以在脉冲计数器之前直接用阈值电路来确定。但也可能来自脉冲幅值分布。



a)  $Q_m$  的计算, 基于 5-bit 和 8-bit 原始数据

注 1: 图 B.2a) 中的脉冲幅值分布是根据图 B.1 测量得到的。将相同的数据集从 128 个单极 (8 位 AD 双极变换器) 降低到 5 位低转换精度 (32 个单极), 表明了离散化的效果。根据这些数据计算  $Q_m$  时, 两个值的差值为 2.5 nC。脉冲总数分布在较大的幅值类中; 因此, 在每个类中计算更多的 PD 脉冲。



b)  $Q_r$  的计算, 基于 5-bit 和 8-bit 原始数据

注 2: 图 B.2b) 中, 使用图中相同的数据集绘制了累积重复 PD 值  $Q_r$ 。B.1 为 128 个单极和 32 个单极。总的 PD 脉冲数是完全相同的, 在本例中, 在 30 s 的时间内共 115 696 个脉冲。PD 幅值分布仅差 0.23 nC。

### 图 B.2 A/D 转换精度的影响及 $Q_r$ 的计算实例

对于  $Q_m$  和  $Q_{iec}$ ,  $Q_r$  受仪器设置的影响较小, 但随着仪器数量的增加, 振幅范围和 A/D 转换精度的选择对  $Q_r$  的影响较小。对于  $Q_m$ ,  $Q_r$  定义为绝对值。为了表示给定极性的值, 添加极性符号的后缀, 如  $Q_{r+}$  和  $Q_{r-}$ 。对于相同的脉冲幅值分布,  $Q_{r+}$  或  $Q_{r-}$  可能与  $Q_r$  不同。

## 附录 C (资料性附录)

### 其他离线局部放电检测和离线定位的方法

宜注意的是,局部放电可能并不局限于电机端部绕组。接线盒、引接线、接线板、支撑绝缘子等均可发生局部放电,使用下列方法时宜包括在内。

下列方法是不可比较和不可量化的。参考文献中<sup>[1]</sup>给出了更详细的概述:

a) 裸眼目视检查<sup>[8]</sup>

交流电压下暗室(熄灯)试验:在完全黑暗的情况下,确定发生表面或间隙放电以及放电位置的一种方法。(可调节)高压适用于单个绕组元件或电机的所有相,以检测端部防晕层绕组表面的放电,或隔离段、支撑环等相间的放电情况。

注意,护目镜使用紫外线过滤防护。这将限制或无法让检查员检测出肉眼可视的放电。

b) 紫外探测<sup>[8]</sup>

表面局部放电不仅会在光学成像方法可检测到的频率范围内产生光,例如肉眼可见[见 a)],而且还会在较高的紫外线频率产生光。这种光线不仅可以在黑暗的环境中用特殊的紫外探测器探测到,而且在白天也能探测到。尤其是考虑到安全问题时,该方法优于上述的可视化检查。

c) 声波探测

在安静的环境中施加交流电压;利用人耳或声波探测器(有闪络保护)进行定位,例如绝缘听诊器。除非放电声特别大,一般不容易检测到主绝缘的局部放电。

d) 超声波探测

局部放电在绕组表面或间隙处形成的噪声[见 c)]其范围在几百赫兹到 100 kHz 以上,最大声震能量约为 40 kHz。使用特殊的超声波检测设备检测。

e) 电磁探测

使用电磁探针定位局部放电信号需要扫描定子槽(有时可能需要去除转子)、槽口区域或施加不同电压的端部绕组区域。除了获得最高电压下的测量外,还可能需要在中压下进行类似的测量。通常,可以将数据与试验电机在已建立的数据库内进行比较,可使用此方法。

宜注意的是,探针扰乱电场分布,可能引起放电。如果使用电磁探头,则要考虑附加的安全要求。

附录 D  
(资料性附录)  
外部噪声、干扰和灵敏度

D.1 概述

噪声和干扰可定义为任何不该有却出现的电信号。局部放电测量需要区分噪声为测量仪器的内部噪声还是外界干扰的噪声。来自恒定波信号或者脉冲干扰信号的外界骚扰表现为传导信号或者辐射信号。因此,灵敏度、噪声和干扰之间有密切的内在联系。如果考虑其中一个因素而不考虑另外两个因素是不现实的。在现场或工厂进行离线试验一般使用测量装置,下列内容将局限于这些基本问题讨论以及如何处理这些基本问题。

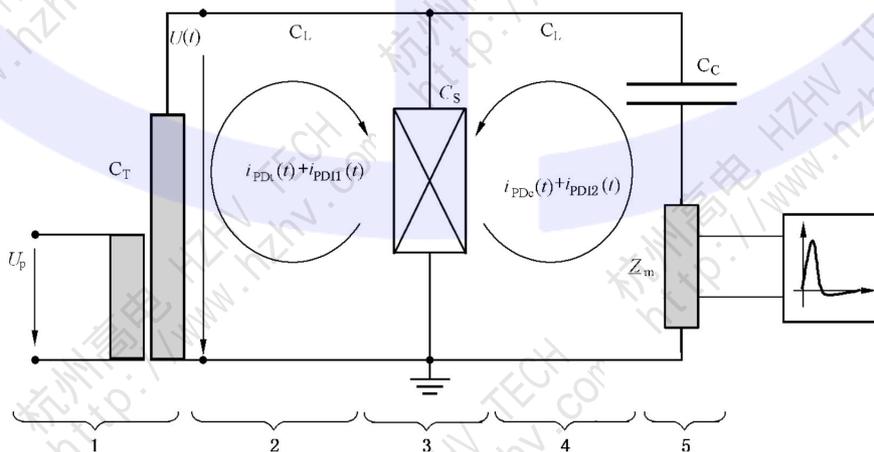
D.2 灵敏度

局部放电测量装置的灵敏度可基本定义为,在局部放电位置的实际局部放电与局部放电检测仪器检测到的能量之比。

在局部放电发生的瞬间,整个试验装置及电容器(包括变压器  $i_{PDt}$ 、电源线  $i_{PDI}$ 、局部放电耦合单元  $i_{PDc}$ 、试品  $i_{PDs}$ )对这个局部放电部位进行再充电(图 D.1)。显然,所有这些电流分量之和等于局部放电部位的总电流:  $i_{PD} = i_{PDt} + i_{PDI} + i_{PDs} + i_{PDc}$ 。

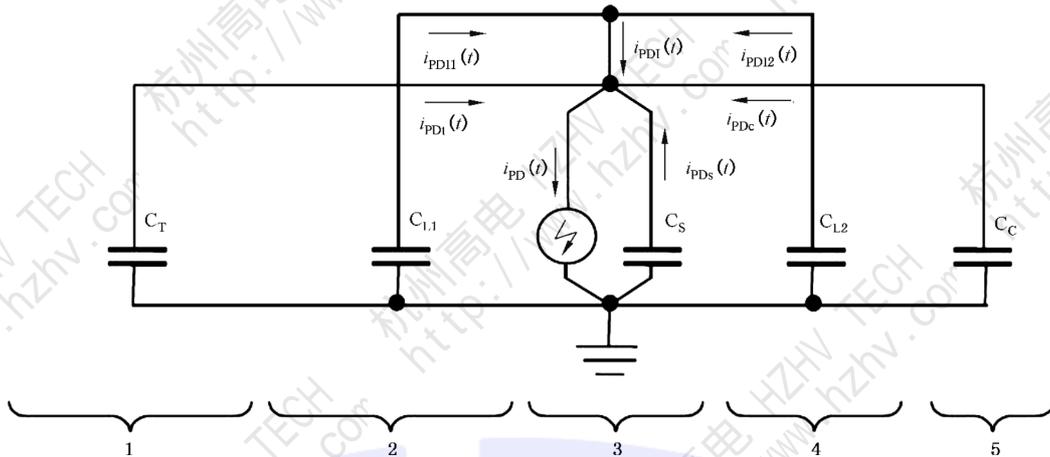
因此,比率  $i_{PDc} / (i_{PDt} + i_{PDI} + i_{PDs})$ ,即耦合电容器的电荷转移,反映了测量的灵敏度。局部放电耦合单元的电容越大,即耦合电容与试品电容的比率越大,则测量的灵敏度越高。

因此,如果自由选择耦合电容器,则电容量大的耦合电容器灵敏度较高。当然耦合电容器还需要至少满足测量装置的带通特性和测量阻抗  $Z_m$  要求。



a) 多个电流分量对试品再充电,电路元件

图 D.1 多个电流分量对试品再充电



b) 图 D.1 a) 的等效电容图

说明:

- 1 —— 变压器, 辅助设备;
- 2 —— 接线;
- 3 —— 试品;
- 4 —— 接线;
- 5 —— 耦合装置;
- $U(t)$  —— 试验电压(变压器二次电压);
- $U_p$  —— 变压器一次电压;
- $C_L$  —— 电源线的杂散电容;
- $C_{S1}$  —— 试样电容, 并联;
- $C_{S2}$  —— 试样电容, 串联;
- $C_T$  —— 变压器的杂散电容;
- $C_C$  —— 耦合电容;
- $i_{PD1}(t)$  —— 变压器的瞬时局部放电电流;
- $i_{PDC}(t)$  —— 耦合单元的瞬时局部放电电流;
- $i_{PDS}(t)$  —— 电容试品的瞬时局部放电电流;
- $i_{PDI}(t)$  —— 电缆电容的瞬时局部放电电流。

图 D.1 (续)

### D.3 噪声和信噪比

电子系统中的全部噪声可分为两种截然不同的类型:基础噪声和附加噪声。基础噪声是由回路中离散电荷运动引起的,无法完全消除。附加噪声是由仪器设备的缺陷或者非理想的元器件特征引起的,原则上可以减少至可忽略的水平。这两种类型的噪声,基本上都与频率无关。由于附加噪声主要受仪器设计的影响,测量人员无法改变和抑制它,因此不再进行讨论。

基础噪声主要是热噪声(Johnson 噪声),它由离散电荷的热运动产生。电荷携带者的热波动在电阻两端引起电压降,表现为穿过这些元器件的外部噪声。显然,噪声水平随温度升高(热运动越快)和电阻增大(电压降越大)而增大。

所有遵从 IEC 60270 的局部放电测量系统都按照准积分滤波器的原理工作,测量装置的带宽对信号和噪声具有相同的特性:带宽越宽,检测到的信号能量越多。因此这种积分器的输出信号将随着带宽

增加而增加,使所需要的局部放电输出信号更大,噪声信号也更大。但与所需要的局部放电源的幅频谱特征相比,局部放电源在非常高的频率范围内它基本是不变的,而热噪声频谱则随频率增加而减小。

对局部放电脉冲而言,带通滤波器的输出信号与带宽成正比。对热噪声而言,它与带宽的平方根成正比。因此信噪比(SNR)近似地随带宽平方根而增大——带宽越宽,SNR 越高。

对于具有固定阻值的局部放电耦合器上述关系是成立的。由此决定了下限截止频率,对某个特定的回路是有效的。为了降低下限截止频率,有必要增加耦合电容。耦合电容越大使通过传感器的电流更大,输出信号也更大。在低频范围工作的窄带装置具有与高频范围工作的宽带装置相同的 SNR。由耦合电容器、耦合阻抗和测量装置构成的测量系统一定要相互匹配。

#### D.4 干扰

干扰和噪声可通过它们的特性加以区分。干扰是偶然或周期性出现,并且来自外界源,例如整流器、电压骤降或附近的高压电晕放电。安装离线测量系统要进行一些测量以减少这些干扰的影响。对于离线测量而言,这些外界信号中的部分信号比在线测量弱。如何减少这些外界干扰信号影响基本原则已在 9.1.6.2 中给出。

附录 E  
(资料性附录)  
噪声抑制方法

### E.1 频率限制范围

对于局部放电脉冲而言,外界干扰(干扰噪声)的频谱不是连续频谱(图 1)。

为了减少这些干扰对测量回路的影响,可使用带宽 9 kHz~30 kHz 的窄带系统(附录 H)。当改变最大干扰之间的中心频率时,会显著减少干扰的影响。测量装置能与试验回路相匹配。

### E.2 相位窗遮蔽法

相位稳定的干扰可以通过衰减进行消除(图 E.1 和图 E.2)。这可通过预制相位窗内的测量通道电子失效来实现。使用者宜意识到由于来自试品的干扰和局部放电都被遮蔽了,数据不可避免地会丢失。

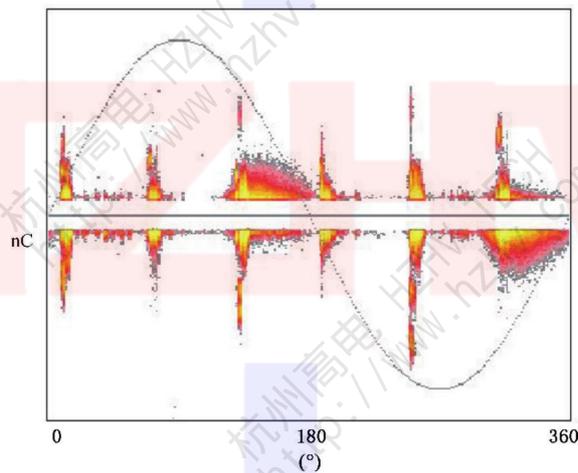


图 E.1 无相位窗遮蔽

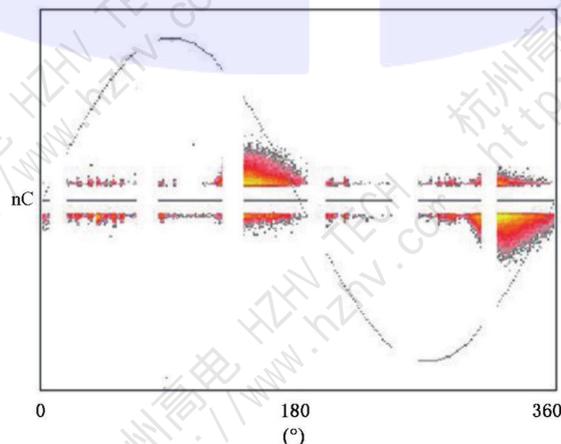


图 E.2 有相位窗遮蔽

### E.3 噪声信号触发遮蔽

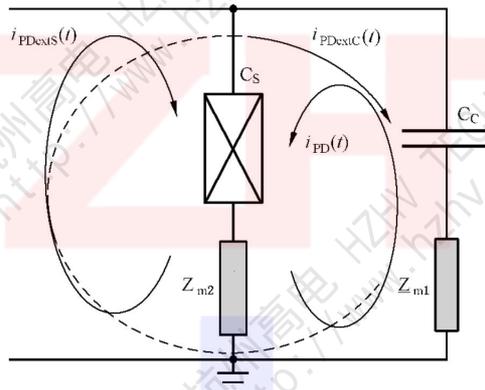
局部放电测量装置需要至少配备两个输入通道:除了测量通道外,采用作为选通通道的第二个测量通道是必要的。如果第二个通道接收到信号,测量通道将在该时间间隔内会关闭。因此,选通通道的局部放电传感器完全接受干扰源。

### E.4 通过测量传播时间来检测噪声信号

局部放电脉冲以波的形式通过试品和电缆,因此,脉冲到达试品和电缆内不同位置的时间不同。在不同位置安装两个局部放电耦合器,可确定脉冲的方向。与外部干扰信号一样,外部局部放电源可与试品局部放电源区分开。如果外部干扰信号与试品交叉耦合,就可能将它们作为试品局部放电处理。

### E.5 双通道信号差分法

因为外部信号和绝缘局部放电通过试品局部放电耦合装置传播,因此在试品和局部放电耦合装置上都能够测量到它们。



说明:

- $C_S$  —— 试样电容;
- $C_C$  —— 耦合电容;
- $Z_{m1}, Z_{m2}$  —— 耦合装置(测量阻抗);
- $i_{PD}(t)$  —— 试样局部放电产生的局部放电电流;
- $i_{PDextC}(t)$  —— 外部局部放电在耦合单元内产生的局部放电电流;
- $i_{PDextS}(t)$  —— 外部局部放电在试样内产生的局部放电电流。

图 E.3 通过测量装置的脉冲电流

显然,对于外界信号源,通过两个测量阻抗的电压降具有相同的极性;对于试品的局部放电,通过两个测量阻抗的电压降具有相反的极性(见图 E.3)。

有两种可选的方法将测量装置连接至低压耦合装置(测量阻抗):

- 第一种方法是用双通道的测量装置,每个通道对应一个耦合装置,单独测量电压降。然后用极性信号削弱外部信号。
- 第二种方法是在测量阻抗的上部相连之间连接测量装置。假定测量阻抗相同并且通过两个回

路设有相位偏移,则对外部信号或者干扰而言,测量到的电压差接近 0;对来自试品的局部放电而言,电压差为 2 倍。

### E.6 用数字滤波器抑制恒波(CW)

恒定波信号是窄带正弦噪声信号,例如可由无线电台的载波频率引起。抑制恒波信号的有效方法是采用高阶数字滤波器,它能对不同频段的恒波噪声进行削弱。这些滤波器是依靠数字局部放电测量装置中的信号处理算法得以实现。与窄带局部放电测量系统的频带限制(见 E.1)相比,数字滤波器的优点是能够从绕组中检测到更多的局部放电能量信号成分,因此信噪比更高。此外,脉冲的极性信息也将保留下来。

为了消除干扰信号,宜知道干扰信号的频率。因此,该方法需要频域内检测信号的分析,通过分析频域内环境噪声来确定滤波系数,以检测和对加权噪声频率范围作进一步衰减。因此,数字滤波器的优化设计取决于局部放电试验的特定环境。

在实际的局部放电测量期间,检测到的信号按照典型的滤波器特性进行处理。

### E.7 用信号处理方法抑制噪声

电厂内的脉冲噪声来源有几种,例如电晕放电(试品外的局部放电)、励磁机中的电力电子设备发出的脉冲。

通过对脉冲波形的数字化分析可实现对噪声脉冲的抑制。实际上,由于脉冲源和探测器输入之间的传输阻抗及噪声源的性质,局部放电和噪声脉冲的波形和频谱通常不同。例如,励磁机产生的脉冲通常比绝缘结构中产生的局部放电脉冲具有更低的频率分量。

抑制噪声方法需要捕获每个局部放电脉冲波形的合适的硬件(比如,提供足够的带宽、采样率和捕获内存,能够获得基于触发条件的脉冲和短的停顿时间)以及合适的软件工具。为了减少连续噪声叠加影响,采用合适的滤波器绘制出检测器的频率响应曲线。

根据一些特征参数(例如带宽、脉冲形状、衰减特性等),将每个记录的脉冲加以分类,可区分试品中的局部放电和噪声脉冲,也能确定每个单独脉冲的类型或局部放电源。这样的分类也可有效地用于单独分析每个检测到的局部放电源,例如用于趋势分析和评价。

区分局部放电脉冲和噪声脉冲的一般程序如下:

- 记录足够数量的脉冲;
- 从每个记录的脉冲中,提取一些能够区分局部放电和噪声脉冲间差异的特征;
- 将具有类似特征的脉冲分组归类;
- 对每组脉冲相位可辨识的局部放电模式进行评价;
- 去除那些会引起相位可辨识的局部放电脉冲与噪声相混淆的脉冲。对这个程序可以自动进行或者基于操作人员的经验。

在图 E.4 和图 E.5 中,给出了依据等价时间长度  $T$  和带宽  $W$  进行脉冲分类的两个例子。这些参数定义可参考电信理论的标准教科书。

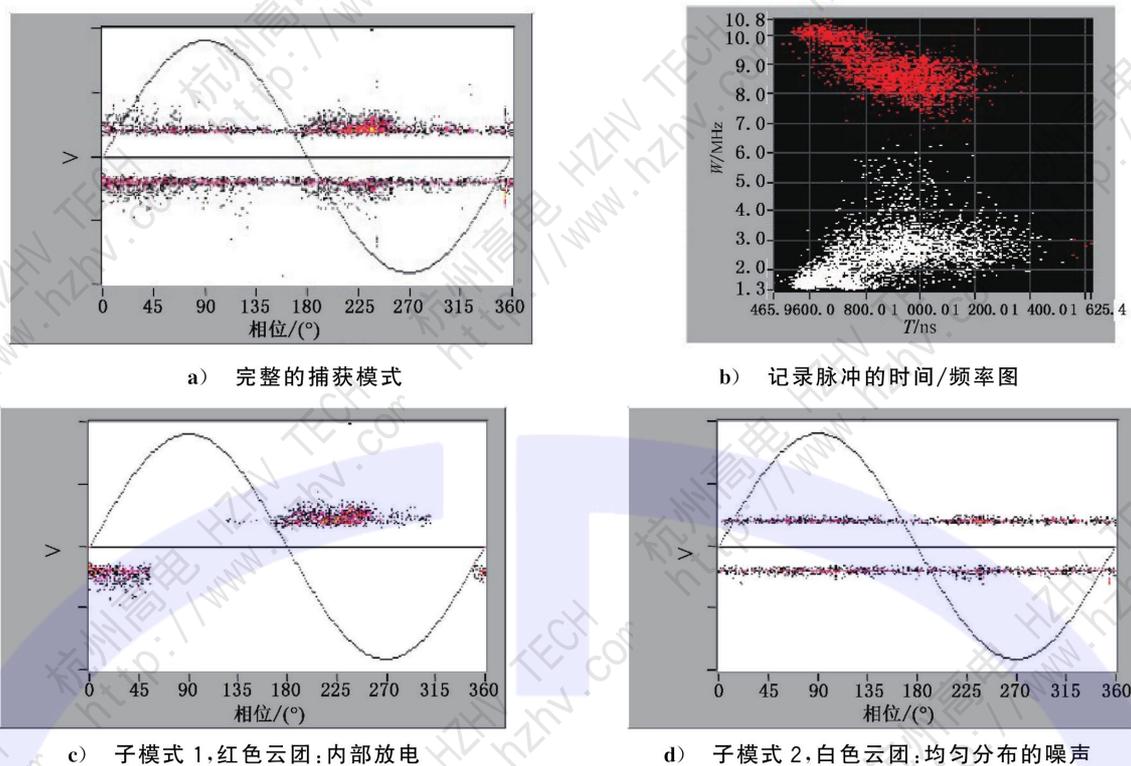


图 E.4 噪声抑制的示例

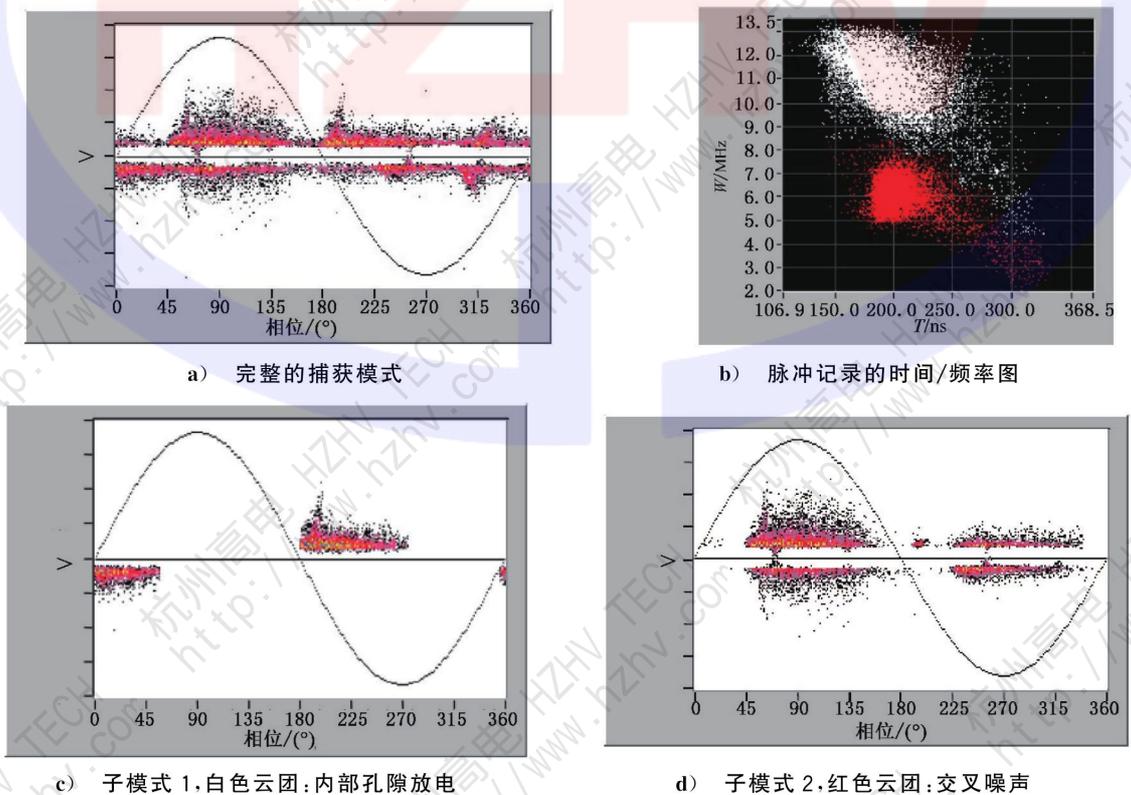


图 E.5 抑制交叉噪声示例

外部干扰通常可由下列一种或多种方法可靠地抑制：

- 电源滤波；
- 电源隔离变压器；
- 电磁屏蔽室；
- 工作几小时后在设施内进行测试。



附录 F  
(资料性附录)

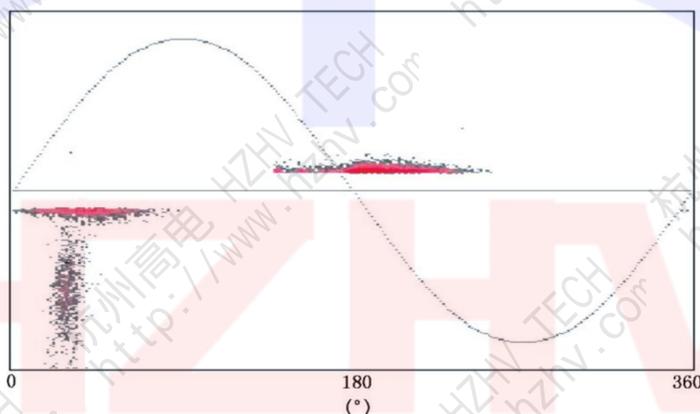
局部放电数据和相位可辨识的局部放电图的评价

F.1 局部放电 (PRPD) 图评价说明

F.1.1 局部放电 (PRPD) 图示例

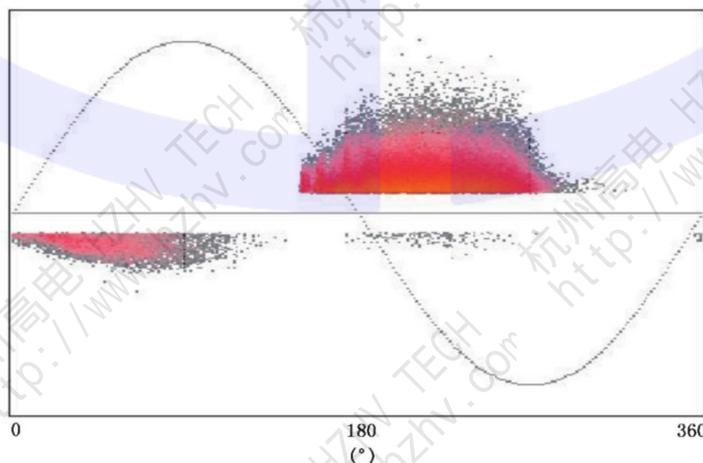
下述测量在控制良好的实验室条件下进行,以便观测局部放电过程<sup>[6]</sup>。当采用合适的测量设备时,相位辨识的  $\Phi$ - $q$ - $n$  图可提供局部放电图,表示局部放电是可以测量及显示的。图形可能会重叠,图形、局部放电频率或其他特征可能会变化。此处不同的局部放电源显示了不同的模式。

此处的局部放电图(图 F.1)是根据图 4a)(低压耦合装置在耦合电容器的对地侧)进行测量的。



注 1: 由于空气/绝缘之间的污染,沿着端部绕组表面放电/电痕。

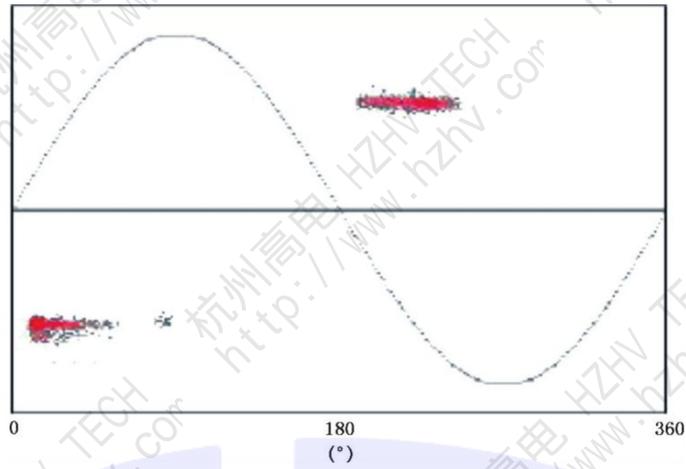
a) 绕组端部的放电



注 2: 由于不适当的界面性质,端部防晕和槽部防晕层结合处的放电。

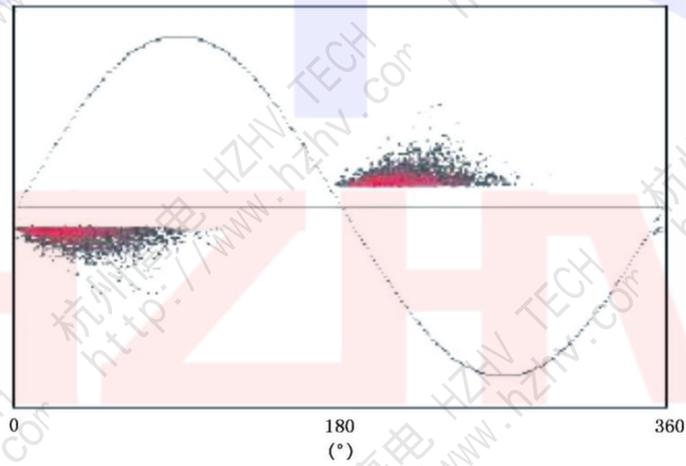
b) 绕组端部的放电

图 F.1 局部放电图示例



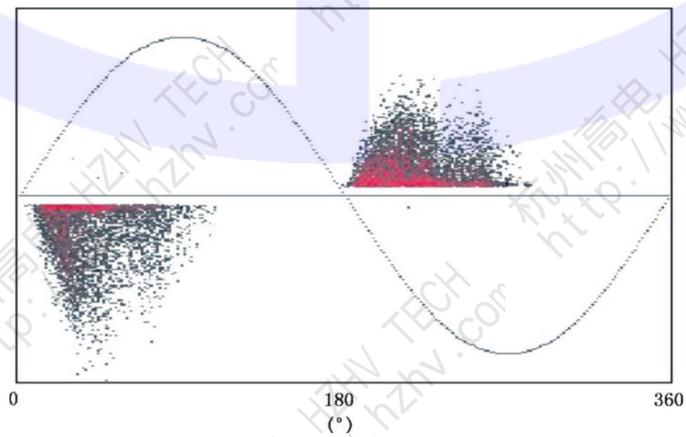
注 3：绕组端部中线棒间或者线棒与铁心指压间的间隙放电。

c) 绕组端部的放电



注 4：主绝缘内部孔隙的放电。

d) 内部孔隙放电



注 5：主绝缘和铜导体间分层放电。

e) 绕组端部的放电

图 F.1 (续)

## F.1.2 基本危险评估

表 F.1 参考第 4 章(旋转电机中的局部放电性质),给出涉及主要局部放电源相关风险的一些基本概念。

表 F.1 旋转电机中主要局部放电源相关的危险性

局部放电源	危险性	备注
内部孔隙 4.2.2.1	低	内部放电是由嵌入主绝缘内的空气或者气体形成的小孔隙引起的。这些小孔隙是在制造工艺过程中形成的,并不代表老化因素。在正常环境下,内部放电不会导致绝缘严重老化
内部分层 4.2.2.2	高	内部分层局部放电是由嵌入主绝缘内的空气或者气体形成的狭长的孔隙(沿线棒纵向)引起的。这些孔隙一般是由过热或者极端机械力引起的,这两种会导致绝缘层之间的大面积分离
绝缘导体和主绝缘的分离 4.2.2.3	高	导体和绝缘材料间的分层局部放电是嵌入主绝缘和电场分级材料间和空气或者气体形成的狭长的小孔隙(沿线棒纵向)引起的。这些小孔隙一般是由过热或者极端机械力引起的,这两种会导致绝缘层之间大面积的分离
槽放电 4.2.3	高	槽放电是由电场防晕层和定子槽壁间的接触不良或者脱落引起的。典型的槽放电只出现在电机运行期间。电磁力和振动导致接触性电弧,就是检测到的槽局部放电。只有在电场防晕层严重老化的情况下,离线测量才能检测到槽放电,也具有 4.2.2 中描述的局部放电源特征
绕组端部间隙与表面放电 4.2.4	正常	绕组端部表面的局部放电出现在绝缘材料表面的某部位,一般位于电机绕组端部区域。通常由导电的污染物(碳、油、磨损物等)引起,或者由端部电场分级材料遭破坏引起。由于放电只出现在绝缘的表面,对绝缘不会产生严重的老化。然而,在臭氧浓度高或表面污染的情况下,将加速老化
外来导电物放电 4.2.5	正常	导电颗粒的局部放电出现在绝缘材料表面的某部位,一般位于电机绕组端部区域。它们通常由大面积的导电污染物(碳、油、磨损物等)引起的,或者由个别电场分级材料的区域引起。由于放电只出现在绝缘表面,对绝缘不会产生严重的老化。然而,在臭氧浓度高或表面污染的情况下,将加速老化

危险评估是基于目前树脂浸渍云母带高压绝缘结构为基础,随着绝缘材料、绝缘质量、强度(能量)和 PD 源位置、表面条件等不同而变化。

PD 图所指示的 PD 源宜通过额外的调查(例如目视检查)来确认,以执行可靠的状态评估。局部放电与电应力有关,而绝缘系统的老化是机械运行过程中出现的电应力、热应力、机械应力和环境应力的综合作用。因此,对于一台新机器,PD 图不会与使用性能直接相关,因为电应力本身可能不是主要的老化因素。对于已投入使用的机器,局部放电也会成为某些热老化、机械老化和环境老化现象的一种症状。

对机器安全运行、维修时间和维修成本的影响并不总是取决于局部放电源。而是取决于绝缘缺陷、劣化或损坏的原因或机理。确定的局部放电源可能表明测量时绝缘状态的早期症状。无论 PD 源在哪里,评估影响绝缘条件的现象的原因是非常重要的。

危险区域机器的风险评估,如各类防爆机器,需要特别注意,不包括在表 F.1 的风险评估中。

在进行 PD 源识别时,基本的幅值评估是最有用的。例如,表面 PD 可能显著高于内部 PD 或脱粘产生的 PD,而不显示导致过早绝缘失效的老化现象。然而,例如,线圈的脱粘过程的存在,独立于测量的 PD 振幅,表明快速老化,需要立即修复。

### F.1.3 从接线端和星接中性点解释局部放电测量

离线测量从线路末端到星接中性点为整个绕组施加电压。在操作时,电压沿绕组均匀分布。星接中性点附近的局部缺陷所造成的局部放电可能并不明显。例如,由于电机组装不良,线棒和铁心的齿压板之间有一处放电。同一缺陷靠近接线端一侧时会侵蚀绝缘材料,而靠近星接中性点时却没有影响。

假设信号衰减量是一个常数,且沿绕组对称,并假设在正常运行下该缺陷的 PDIV 与离线测试条件相比,不会发生太大的变化。通过比较接线端和星接中性点获取的相关局部放电图形,可以判断缺陷是位于更靠近中性点还是更靠近接线端,从而评估该缺陷在正常运行时是否有影响。

只有当局部放电图形的 PDIV 清晰时,才可以使用此方法。

### F.1.4 感应放电/振动火花

槽放电的变化有时被称为振动火花<sup>[9]</sup>。当线圈/线棒因松动而振动时,会产生振动火花,此时槽部防晕层的导电性增强。如果线圈/线棒表面与定子铁心(沿槽部轴向距离足够)不接触,由于槽内硅钢片电位差的不同,振动的线圈/线棒与铁心接触部位会产生电弧。当感应电压和电流均超过电弧起始值时,叠积式铁心表面与线圈/线棒槽部防晕层之间会产生<sup>[9]</sup>电弧(振动火花),并且电弧会对导电层和对地绝缘造成损伤。当槽部防晕层因绕组高压端线圈/线棒的振动火花而严重损伤时,可能发生槽放电。离线局部放电测量中,上述现象可以作为槽放电测量。

由于沿槽部防晕层的轴向感应电流可以在所有线圈/线棒上通过,因此振动火花可能发生在线圈的任意位置,而与中性点和相位端连接的位置无关。如果槽部防晕层受到振动火花的严重破坏时,在离线测量期间比较接线端和中性点的局部放电强度和图形,可以将振动火花侵蚀的影响认为是槽放电。

附录 G  
(资料性附录)  
完整绕组试验电路

G.1 概述

在 7.3 中给出了高压电源及局部放电耦合单元如何连接完整定子绕组。本附录给出了连接结构图。

- 图 G.1 中的一个或多个识别号对于某些方案具有代表性。所有与本方案相匹配的识别号均列于此。
- 线圈一般是对称结构,因此本部分中某些方案不仅对于单相匹配,还与另外两相匹配。通常,给出了 U 相的测量方法,其他两相需要交换相位识别。
- 假设本部分所涉及的大多数电机都是星形连接,7.3 中的表格和图示都基于此连接类型。在此附录中,另一个方案是如何使星形连接与三角形电机匹配。
- 单相绕组或多相绕组不是星形就是三角形电机,要使用最佳搭配。
- 如与 7.3 中的结构不一致,可以在绕组的任意一侧接地。例如 7.3 中的 V1W1 也可以写成 V1W2、V2W1 或 V2W2。
- 具有封闭绕组连接的测试样机,要保证测试设备能满足整个绕组所需的电压等级。

G.2 连接图

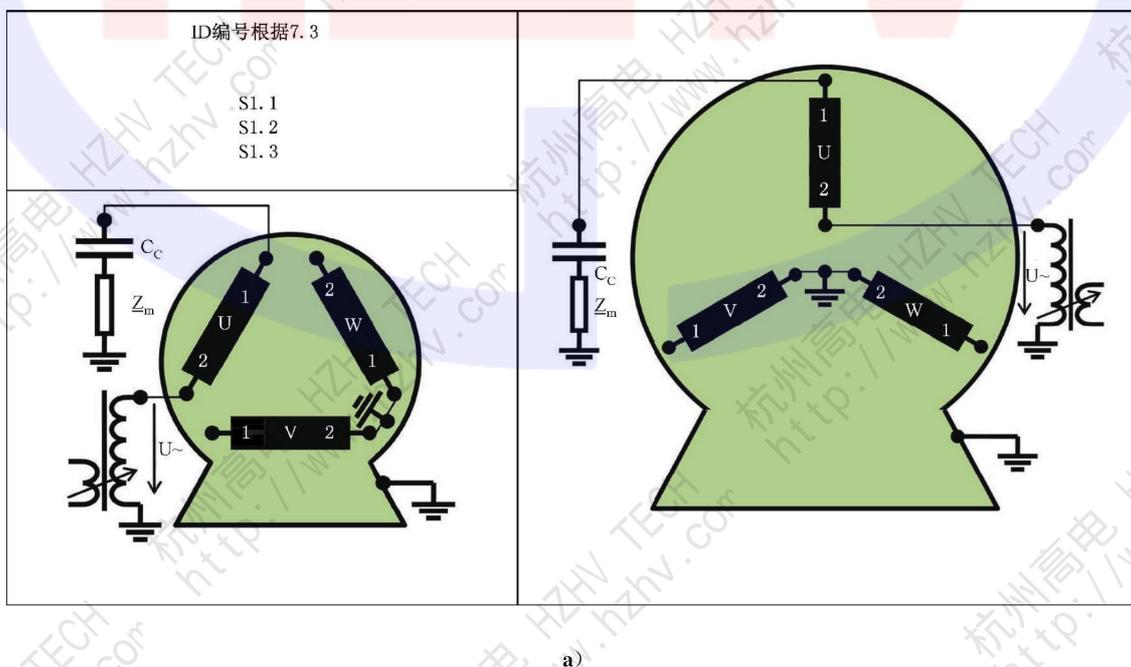
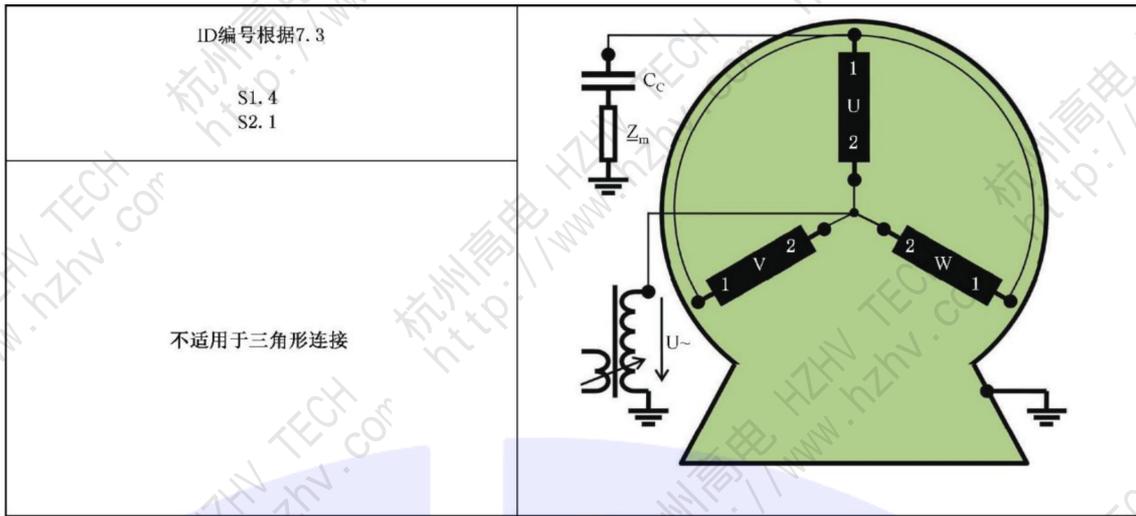
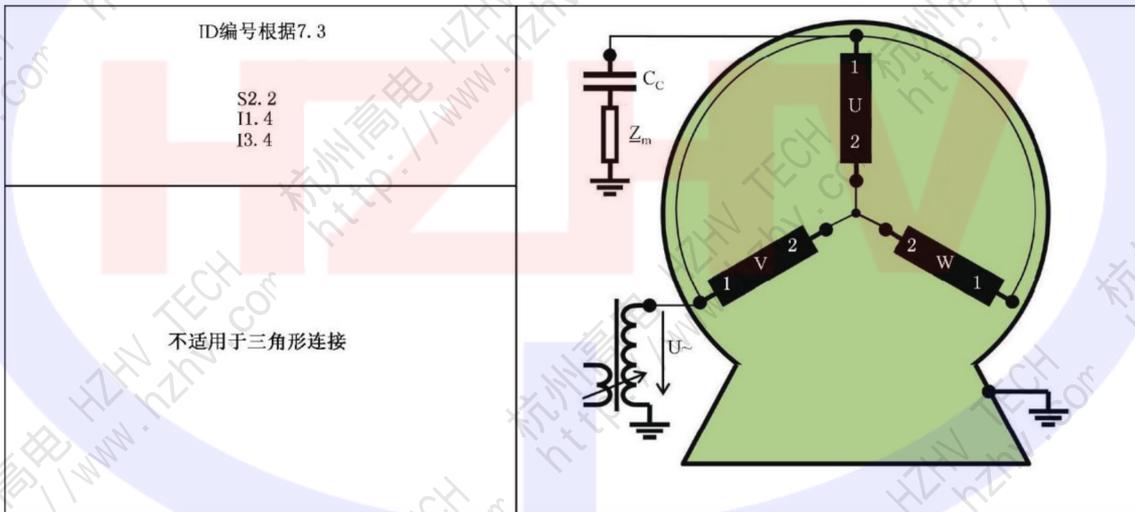


图 G.1 星形和三角形连接的说明图,参见 7.3



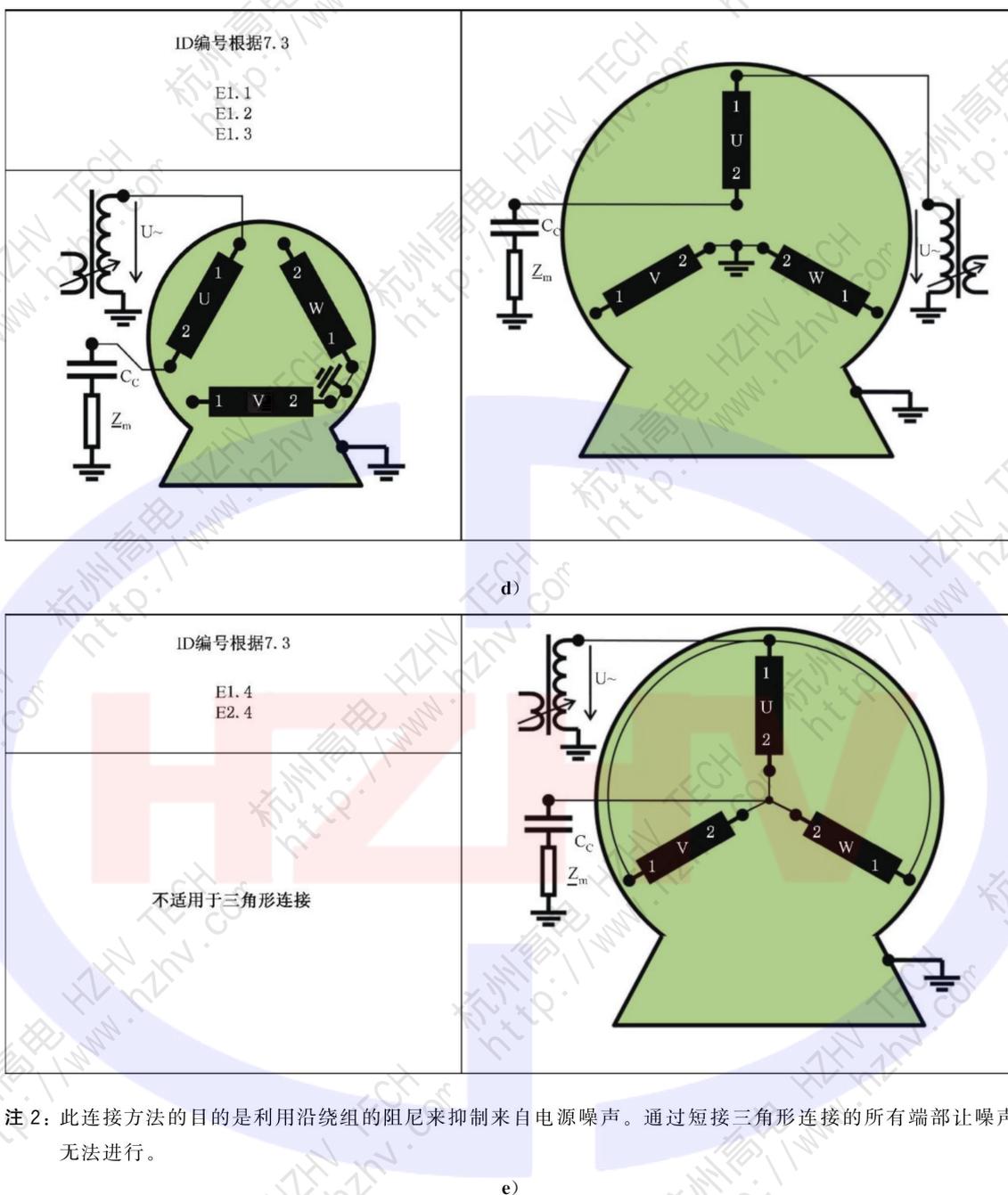
注 1：此连接方法的目的是利用沿绕组的阻尼来抑制电源噪声。通过短接三角形连接的所有端部让噪声抑制无法进行。

b)



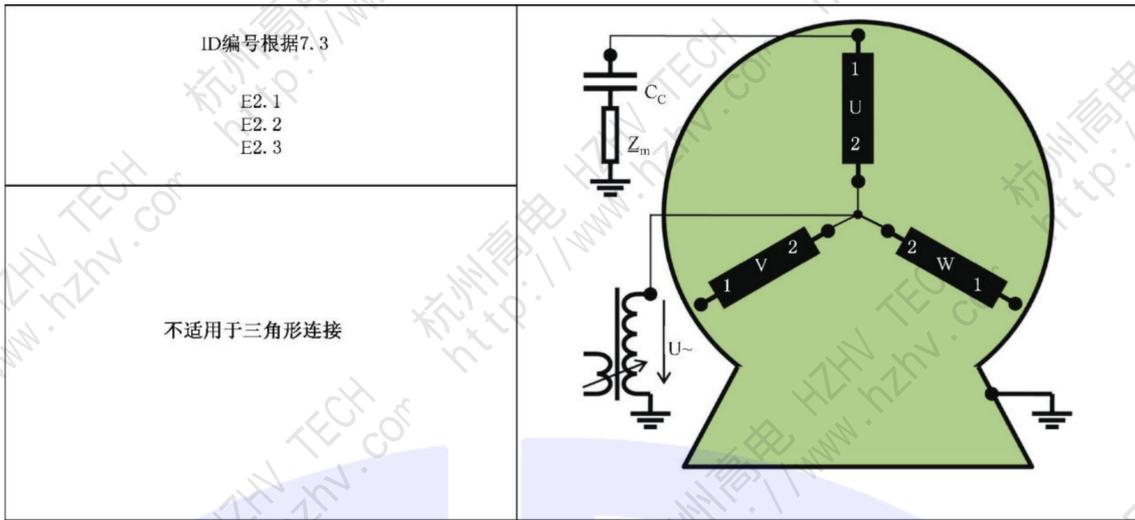
c)

图 G.1 (续)



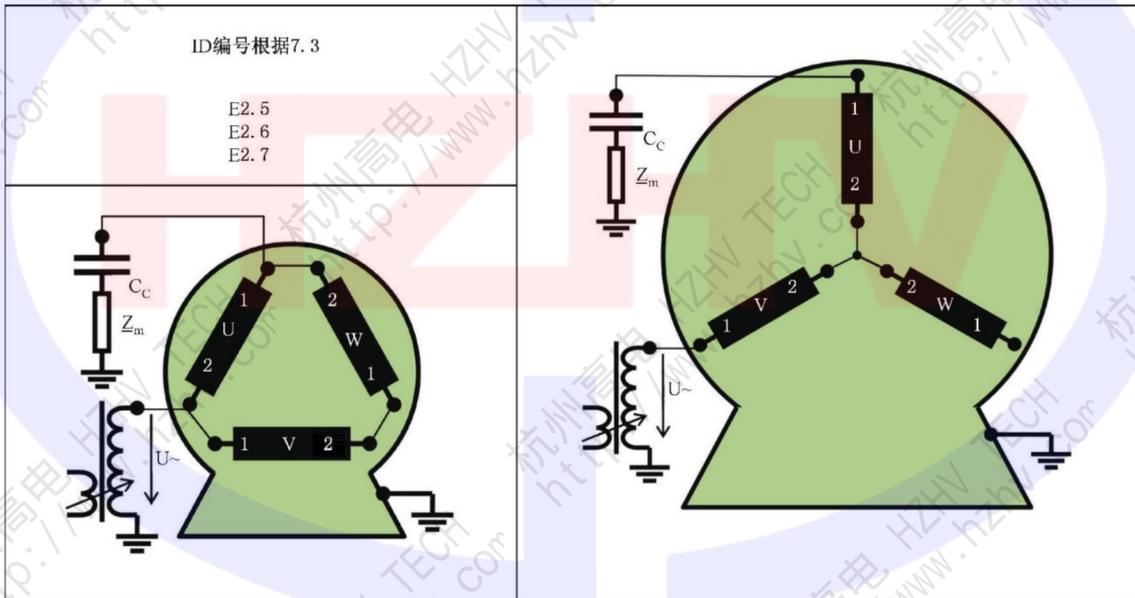
注2：此连接方法的目的是利用沿绕组的阻尼来抑制来自电源噪声。通过短接三角形连接的所有端部让噪声抑制无法进行。

图 G.1 (续)



注 3：此连接方法的目的是利用沿绕组的阻尼来抑制来自电源的噪声。通过短接三角形连接的所有端部让噪声抑制无法进行。

f)



注 4：三角形固定绕组连接不能识别从 U 和 W 相的局部放电（在此例中）。因此，如果绕组连接不断开，所测局部放电始终是两相的。

g)

图 G.1 (续)

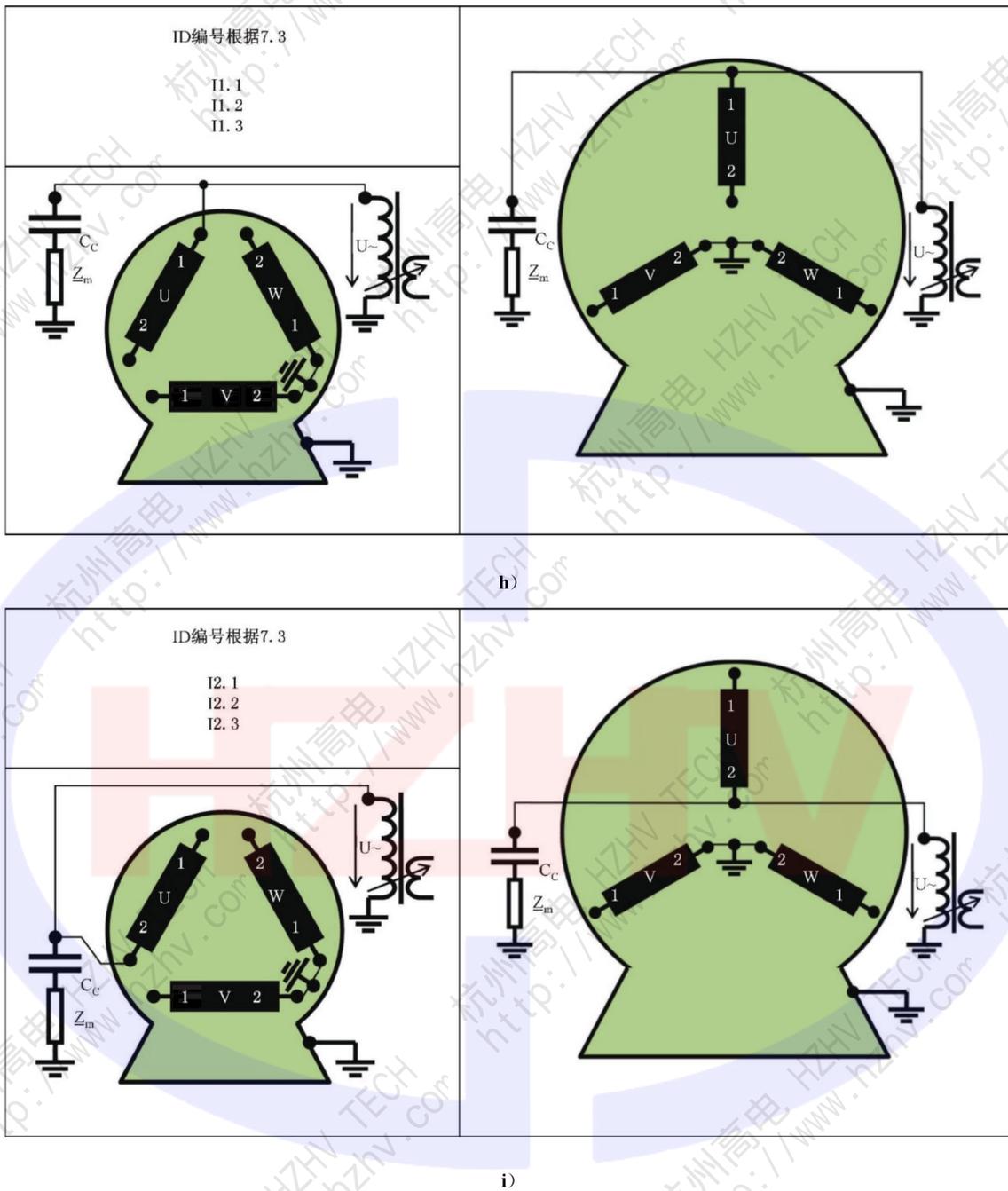
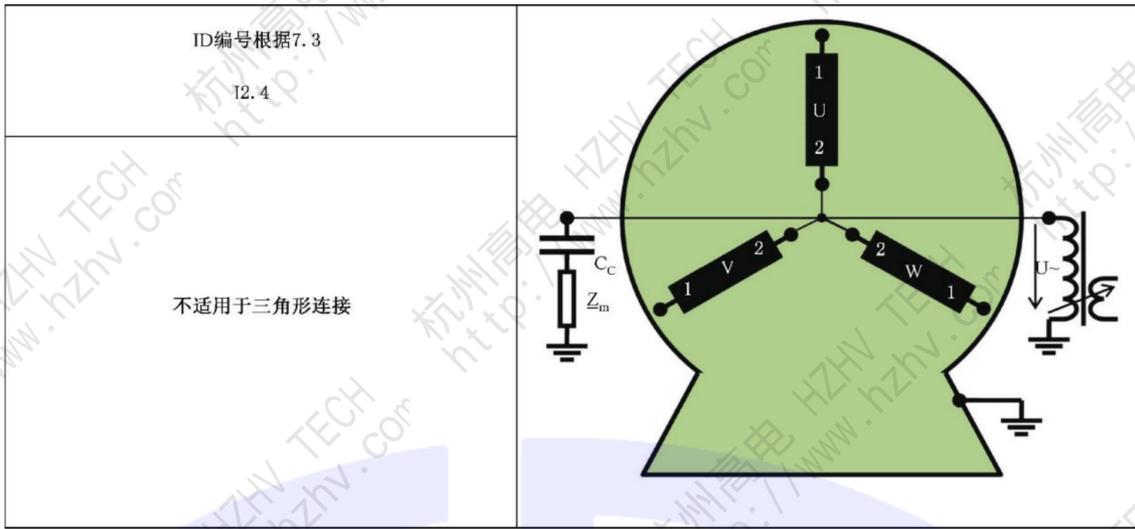
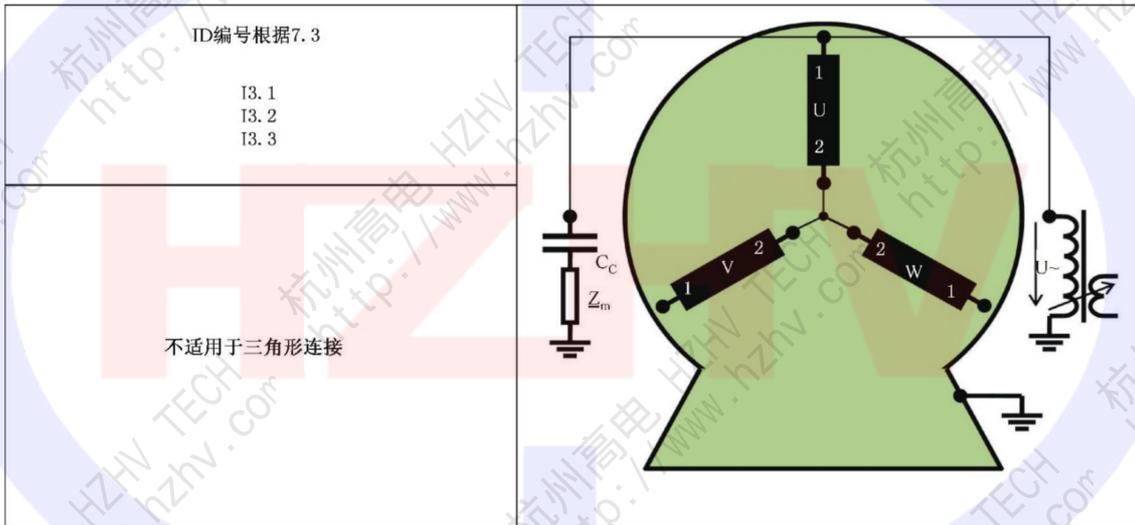


图 G.1 (续)



j)



k)

图 G.1 (续)

附录 H  
(资料性附录)  
宽带和窄带测量系统

H.1 概述

不同局部放电测量系统的主要区别是带宽。端部局部放电脉冲频谱具有电机绕组传输函数的特征,测量系统的带宽影响测量局部放电源的大小。此外,云母绝缘结构具有局部放电脉冲高重复率的特征,图 H.1 显示不同测量系统的典型脉冲响应,波形图上边的线代表输入脉冲,下边的线为测量系统的脉冲响应:

- a) 宽带系统:
  - 1) 低脉冲重复率;
  - 2) 上升率;
  - 3) 高速率导致的脉冲叠加。
- b) 窄带系统:
  - 1) 低脉冲重复率;
  - 2) 上升率;
  - 3) 高速率导致的脉冲叠加。

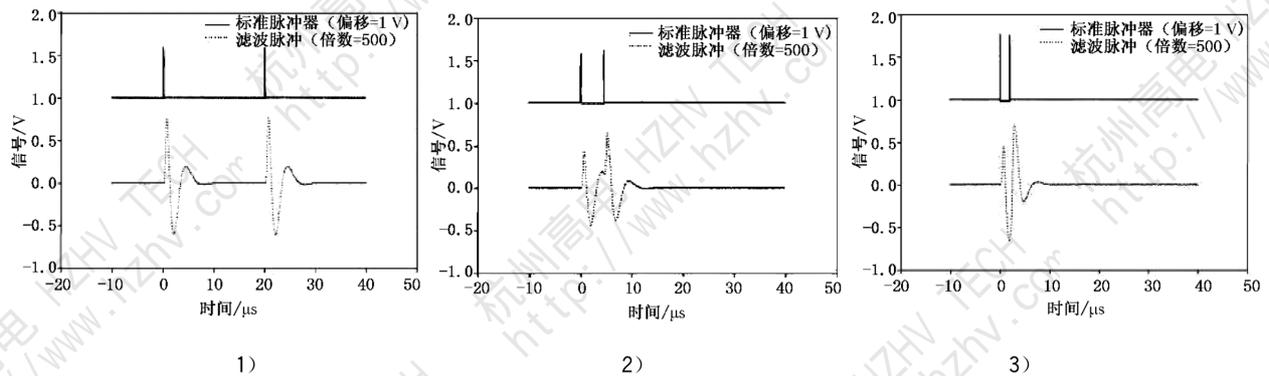
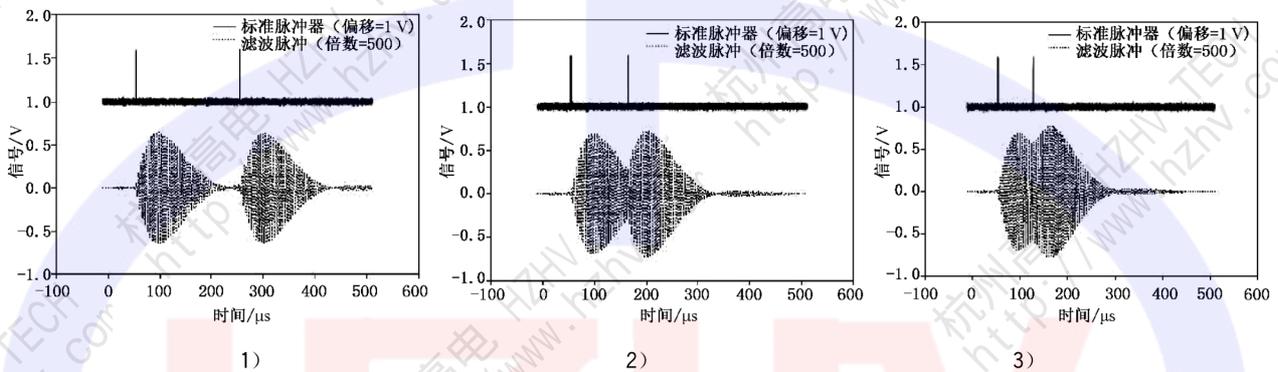
a) 宽带系统:  $-3\text{ dB}$ ,  $\Delta f = 210\text{ Hz}$  (二阶滤波)b) 窄带系统:  $-3\text{ dB}$ ,  $\Delta f = 9\text{ Hz}$  (二阶滤波)

图 H.1 宽带和窄带局部放电系统的典型脉冲响应

## H.2 宽带系统

根据 IEC 60270, 如果带宽超过 100 kHz, 那么局部放电测量系统定义为宽带系统。对于电机, 宽带测量系统通常使用的带宽接近 1 MHz, 一些系统采用 500 MHz 的带宽。系统带宽由耦合单元的频率响应和测量仪器的信号处理所决定。

多数宽带局部放电测量装置满足 IEC 60270 中的要求, 下限频率设定为  $\geq 10\text{ kHz}$  以抑制电源频率及其谐波, 下限频率可变化到几百千赫兹以抑制外部干扰。例如, 功率半导体的换向频率。许多测量装置的典型频宽在 100 kHz~1 MHz 变化。

随着数字示波器的选择, 某些局部放电测量装置使用几百兆赫兹的带宽。根据 IEC 60270, 脉冲幅值不以电荷为单位, 以毫伏 (mV) 为单位。某些仪器可以通过不同的测量方法来抑制外部干扰信号。如果宽带系统的频率范围与 IEC 60270 的宽带多数重叠, 则如使其标准化等在原则上是可行的。

## H.3 窄带系统

窄带局部放电测量装置的特点是频带在 9 kHz~30 kHz 之间, 带中心频率在 1 MHz 频率范围内变化。云母绝缘材料通常会大量的局部放电, 故振荡脉冲衰减时间长的放电会导致连续放电脉冲的叠加 (见图 H.1), 这样可能会引起个别脉冲电荷的读数误差。因此窄带测量系统很少使用在电机的局部放电测量上。

参 考 文 献

- [1] IEEE Std. 1434—2014 IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, IEEE, New York, USA, (2000), ISBN 0-7381-2482-6, SH94850
- [2] PETIT, A. Comparison of PD amplitudes of stator bars taken with different instruments, 2015 Electrical Insulation Conference (EIC), Seattle, Washington, USA, 7-10 June 2015
- [3] CIGRE Technical Brochure 226 Knowledge Rules for Partial Discharge Diagnosis in Service
- [4] IEEE Std. 433 (R1991) IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Voltage at Very Low Frequency
- [5] IEEE Std. 43—2013 IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [6] HUDON, C.; BÉLEC, M.; Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, pp. 297-319, 2005
- [7] KAUFHOLD, M.; SCHÄFER, K.; BAUER, K.; ROSSMANN, M. Medium and high power drive systems; Requirements and suitability proof for winding insulation systems. 10th Insucon International Conference Birmingham, pp. 86-92, 2006
- [8] IEEE Std 1799—2012 IEEE Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars, and Windings
- [9] LIESE, M.; BROWN, M. Design-Dependent Slot Discharge and Vibration Sparking on High Voltage Windings. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 4, pp. 927-932, August 2008
- [10] IEC 60034-18-41 Rotating electrical machines—Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type D) used in rotating electrical machines fed from voltage converters—Qualification and quality control tests
-





中华人民共和国  
国家标准  
旋转电机 绕组绝缘

第1部分：离线局部放电测量

GB/T 20833.1—2021/IEC 60034-27-1:2017

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)  
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: [www.spc.org.cn](http://www.spc.org.cn)

服务热线: 400-168-0010

2021年3月第一版

\*

书号: 155066·1-66918

版权专有 侵权必究



GB/T 20833.1—2021



码上扫一扫 正版服务到