

# 团 体 标 准

T/CSEE 0008—YYYY

T/CEEIA 260—YYYY

代替T/CSEE 0008—2016

T/CEEIA 260—2016

## 大中型电机定子绕组绝缘性能检测方法

Property detection methods of large-medium electric machinery  
stator winding insulation

(征求意见稿)

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

中国电机工程学会 发布

## 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
4 试验要求及安全注意事项 .....	3
5 定子绕组绝缘性能检测方法 .....	4
5.1 总则 .....	4
5.2 绝缘电阻、极化指数检测试验 .....	4
5.3 直流耐电压和泄漏电流试验 .....	9
5.4 交流耐电压试验 .....	12
5.5 槽电位/槽内接触电阻检测试验 .....	18
5.6 局部手包绝缘直流电压试验 .....	21
5.7 介质损耗因数检测试验 .....	24
5.8 局部放电检测试验 .....	27
5.9 电晕检测试验 .....	28
5.10 匝间耐冲击电压试验 .....	30
附录 A（资料性） 绕组绝缘性能试验项目及其效果、优点及缺点 .....	34
附录 B（资料性） 槽电位测试原理分析 .....	36
附录 C（资料性） 定子绕组电晕检测方法—紫外成像仪检测法 .....	37
附录 D（资料性） 定子线圈及绕组绝缘老化状态的介电响应检测法 .....	38

## 前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准化管理办法》、《中国电机工程学会标准化管理办法实施细则》的要求，依据 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 T/CSEE 0008—2016 /T/CEEIA 260—2016《大中型电机定子绕组绝缘性能检测方法》。与 T/CSEE 0008—2016 /T/CEEIA 260—2016 相比，除编辑性修改外，主要技术性变化如下：

- a) 增加了“IEC 60034-33 旋转电机-第 33 部分：同步水轮发电机(发电电动机)基本技术要求(IEC 60034-33: 2022, Rotating electrical machines – Part 33: Synchronous hydrogenerators including motor-generators – Specific requirements)”(见第 2 章)；
- b) 增加了“条式线圈、圈式线圈、分瓣、不分瓣、露点”术语和定义(见第 3 章)；
- c) “试验引线使用较大直径的导线可降低电晕损耗，……，则应进行更换”更改为“高压试验引线宜使用分裂导线或直径较大的空心导线，……，那么测试引线应进行处理尽量做到圆滑”(见第 4 章 e) 项)；
- d) “可以通过尖端倒圆处理、……，降低电晕”更改为“高压导线可通过尖端倒圆处理、……，采用聚乙烯片或板也能有效隔绝高压电场降低电晕”(见第 4 章 f) 项)；
- e) 增加了“直流试验和交流试验电压测量系统应保证计量检测合格”与“定子绕组高电压试验过程中，试验区域须设置安全绳，并有专人监护，防止无关人员进入试验现场。整个试验应严格按 GB 26861《电力安全工作规程 高压试验室部分》进行，以确保人身安全”(见第 4 章 g) 项和 h) 项)；
- f) 删除“较老的绝缘系统由于补强带子电导率的原因具有较高的电导电流，如沥青云母或虫胶云母箔”(见 5.2.2)；
- g) “以及选用最大输出电流为 1 mA 及以上的绝缘电阻表”更改为“以及选用满足测试容量要求的绝缘电阻测试仪(最大输出电流宜为 3 mA 及以上)”(见 5.2.3.1)；
- h) 增加了“还可以利用总的泄漏电流试验检测定子绕组端部绝缘表面受潮、脏污、裂纹等缺陷”(见 5.3.1)；
- i) 根据 GB/T 7894 与 GB/T 8564 新版内容，对表 6~表 13 中定子交流耐电压限值进行相应修改(见 5.4.3.2)；
- j) 增加了“定子绕组现场更换局部线棒时，所使用的单根线棒下线前均需要进行交流耐电压试验(具体试验值由制造厂家确定)，且  $1.5U_N$  时无电晕情况”(见 5.4.3.2 中的 h) 项)；
- k) 增加了“需要注意的是，如果检查仪表测量探头与线棒低阻层之间接触不良，也会造成测量值偏大，一定要将探头接触在线棒低阻层上”(见 5.5.2.2 中的 d) 项)；
- l) 增加了“(也包括汽轮发电机空冷)”(见 5.6.1)；
- m) 更改了图 13(见 5.6.2)；
- n) 增加了“如图 13,  $R=100\text{ M}\Omega$ ”与“试验完毕并切断电源后，须将高压引线接地以使其充分放电”(见 5.6.2 与 5.6.3.1)；
- o) 增加了“(试验人员身体各部位与高压引线和定子绕组间距必须保持 1 m 以上)”、“超出标准要求部位，需要重新进行绝缘处理，处理好后再次进行试验检测直至合格为止”(见 5.6.3.2 中的 d) 项、h) 项)；

- p) “ $\tan\delta$  值”更改为“ $\tan\delta_{0.2U_N}$  值”（见 5.7.3.3，表 15 中注 2）；
- q) “要求在最大试验电压下整个试验回路产生的背景干扰水平不应超过 100 pC”更改为“试验前，应先将测试系统（被试品未接入）的电压升至最大试验电压，此时检测到的局部放电量不应超过 1000 pC”（见 5.8.3.1）；
- r) 增加了“紫蓝色晕光”（见 5.9.3.2，表 17 中检测标准内容）；
- s) 修改了 5.10.3.2 和 5.10.3.3；
- t) 附录 C 中补充紫外成像测试方法的原理，并对现有内容进行相应修改；
- u) 增加了附录 D 的内容“定子线圈及绕组绝缘老化状态的介电响应检测法”。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会电机标准专业委员会技术归口和解释。

本文件起草单位：、、、。

本文件主要起草人：、、、。

本文件首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条 1 号，100761，网址：<http://www.csee.org.cn>，邮箱：[cseebz@csee.org.cn](mailto:cseebz@csee.org.cn)）。

# 大中型电机定子绕组绝缘性能检测方法

## 1 范围

本文件规定了额定电压 3 kV 及以上的大中型发电机（汽轮发电机、水轮发电机和调相机等）与电动机（第一冷却介质为空气）的定子绕组绝缘性能检测方法及评判标准。

本文件适用于额定电压 3 kV 及以上的大中型发电机（汽轮发电机、水轮发电机和调相机等）与电动机（第一冷却介质为空气）的定子绕组，在安装过程中及检修过程中的定子绕组绝缘性能检测及评判。

## 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。

- GB 755 旋转电机 定额和性能（IEC 60034-1:2004，IDT）
- GB/T 7354 局部放电测量标准（IEC 60270: 2000，IDT）
- GB/T 7894 水轮发电机基本技术条件
- GB/T 8564 水轮发电机组安装技术规范
- GB/T 11021 电气绝缘 耐热性分级（IEC 60085: 2004，IDT）
- GB/T 16927.1 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 高电压试验技术 第 2 部分：测量系统（IEC 60060-2: 2010，MOD）
- GB/T 16927.3 高电压试验技术 第 3 部分：现场试验的定义及要求（IEC 60060-3: 2006，MOD）
- GB/T 20160 旋转电机绝缘电阻测试（IEEE Std 43-2000，IDT）
- GB/T 20833.1 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(IEC/TS 60034-27: 2006，IDT)
- GB/T 22715 旋转交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平（IEC 60034-15: 2009，IDT）
- GB 26860 电力安全工作规程 发电厂和变电站电气部分
- GB 26861 电力安全工作规程 高压试验室部分
- GB/T 31464 电网运行准则
- GB 50150 电气装置安装工程电气设备交接试验标准
- DL/T 298 发电机定子绕组端部电晕检测与评定导则
- DL/T 474.3 现场绝缘试验实施导则 第 3 部分:介质损耗因数  $\tan\delta$  试验
- DL/T 492 发电机环氧云母定子绕组绝缘老化鉴定导则
- DL/T 596 电力设备预防性试验规程
- DL/T 878 带电作业用绝缘工具试验导则
- DL/T 1612 发电机定子绕组手包绝缘施加直流电压测量方法及评定导则
- JB/T 6204 高压交流电机定子线圈及绕组绝缘耐电压试验规范
- JB/T 7608 测量高压交流电机线圈介质损耗角正切试验方法及限值

T/CSEE 0008—####

T/CEEIA 260—####

JB/T 8439 使用于高海拔地区的高压交流电机防电晕技术要求

IEC 60034-1 旋转电机-第 1 部分：性能与定额（IEC 60034-1：2017，Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance）

IEC 60034-33 旋转电机-第 33 部分：同步水轮发电机（发电电动机）基本技术要求（IEC 60034-33：2022，Rotating electrical machines–Part 33:Synchronous hydrogenerators including motor-generators–Specific requirements）

IEEE Std 522 交流旋转电机模绕定子线圈匝间绝缘的试验指南（IEEE Std 522-2004，Guide for testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for AC Electric Machines）

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**条式线圈** stator bar

由双排或四排多股带有股线绝缘层的扁铜线组成的单匝线圈，扁铜线分实心线和空心线两种，线圈槽部采用换位结构，两个端部需要弯型，便于其端头与同相的条式线圈端头焊接连成整体绕组。

#### 3.2

**圈式线圈** stator coil

由多匝组成的线圈，每匝由一股或多股并联的带有股线绝缘层的扁铜线平绕成梭形、棱形和梯型三种。

#### 3.3

**分瓣定子** split stator

将电机的定子机座分成多瓣，通过机座合缝板把合组成整圆，每一瓣机座上分别进行定子铁心叠装和下线后形成了分瓣定子，多瓣定子运输到现场后通过机座合缝板连接螺栓把合成整圆，并进行合缝线圈下线后形成的整体定子。

#### 3.4

**不分瓣定子** entire stator

电机的定子为整圆结构，定子进行整体铁心叠装和下线后形成的整体定子。

#### 3.5

**露点** dew

在固定气压之下，空气中所含的气态水达到饱和而凝结成液态水所需要降至的温度。

#### 3.6

**绝缘电阻** insulation resistance

定子绕组铜导体到对地之间的主绝缘层施加的负极性直流试验电压与总电流的比值。测试时需要记录不同时间的绝缘电阻值，以方便考察极化指数。

#### 3.7

**极化指数** polarization index

同一次试验中 10 min 绝缘电阻（ $R_{10\min}$ ）除以 1 min 绝缘电阻（ $R_{1\min}$ ）的商。

注：吸收比  $K$  是同一次试验中 60 s 绝缘电阻（ $R_{60s}$ ）除以 15 s 绝缘电阻（ $R_{15s}$ ）的商。

#### 3.8

**表面泄漏电流** surface leakage current

定子绕组通入直流电压时在定子绕组端部表面测得的不随时间变化的电流值。

### 3.9

#### 绕组端部 winding overhang

绕组中伸出铁心两端之外的部分。

### 3.10

#### 介质损耗因数 dielectric dissipation factor

由绝缘材料作为介质的电容器上所施加的电压与由此而产生的电流之间的相位差的余角,称为介质损耗角  $\delta$ , 损耗角  $\delta$  的正切值称为介质损耗因数。

### 3.11

#### 局部手包绝缘 partial hand-making insulation

发电机定子绕组绝缘部件间的电气连接处由手工叠绕包主绝缘材料(层间涂刷粘接胶)制成的绝缘,如定子绕组上下层线圈接头间绝缘(也称为过渡绝缘、鼻部绝缘、并头绝缘)、线圈与引线间绝缘以及引线间的绝缘。

### 3.12

#### 局部放电 partial discharge; PD

导体间绝缘仅被部分桥接的电气放电。这种放电可以在导体附近发生也可以不在导体附近发生。本标准中的局部放电包括:槽内放电、绝缘内部放电、线棒脱壳放电和端部表面放电。

### 3.13

#### 表面电晕 surface corona

在绝缘较差或局部电场过于集中的绝缘表面,因气体电离出现的局部放电。表面电晕通常伴随发光和噪声。本标准中提到的电晕,均指表面电晕。

### 3.14

#### 电晕起始电压 corona inception voltage

绝缘层外表面出现电晕时的最低电压。

### 3.15

#### 端部防晕层 stress control coating

在高压电机的定子线棒和绕组上,从槽部低阻层向端部延伸出来的用于主绝缘外面的防晕涂层或防晕带。防晕层部分搭接在低阻层上,在两者之间应有一个良好的电气接触,以形成一个均匀的电场。

### 3.16

#### 暗室目测法 blackout test

在遮挡住可见光的环境下,通过肉眼观察可见光来判断被施加高电压定子绕组表面产生电晕的试验方法。

## 4 试验要求及安全注意事项

本文件中的试验项目,均在电机静止状态下进行,试验过程中做好必要的安全防护措施,按照 GB 26860 和 GB 26861 要求进行操作。试验时应记录定子绕组温度、环境温度、相对湿度和大气压力。试验要求及安全注意事项如下:

- a) 接地保护要求地线应有机械强度且保证试验人员的安全,不恰当的接地将影响测试结果和数据分析。地线应固定良好,不易因意外而脱落或断裂。地线的连接应该是可见的,因此接线时一般不使用绝缘带、绝缘夹或绝缘子。线夹不能完全包裹所有导线而应露出一部分导线。

- b) 试验设备外壳应就近接地。如果高压试验设备的输出端与电机绕组出线端连接，则设备外壳应单独接地。为保证试验人员的安全，地线应长期连接。
- c) 试验区域附近，在金属物、未接地线圈、半导体漆等表面可能存在悬浮电位，容易引起电击的危险。因此，高压试验区域 3 米内不可移动的部件、设备、工具等应接地，其中包括：定子测温电阻或热电偶、与定子绕组相连的其他设备、次级绕组的电流互感器、转子绕组（所有出线端）与转轴、试验设备外壳、距离过近的所有物体。
- d) 高压接线应减小泄漏电流和电晕损耗，高压线与接地部件的爬电距离不小于  $100 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}/10 \text{ kV}$ 。高压线应尽量悬空于试验人员可见处；若试验中用到固体绝缘部件，则应保持干燥且有一定爬电距离。
- e) 高压试验引线宜使用分裂导线或直径较大的空心导线，导线采用绝缘层（如聚乙烯绝缘层）可降低电晕。采用分裂导线、空心（或绝缘）大直径导线均可均匀高压电场，有利于降低爬电距离要求。如果高压试验引线绝缘没有被特殊设计，那么测试引线应进行处理尽量做到圆滑。若绝缘线在试验中绝缘受损，则应该更换。
- f) 高压导线可通过尖端倒圆处理、引线头使用导电或绝缘物填充等方法降低电晕。分相试验的引线头可采用半导体塑料或腻子制成球形屏蔽罩或采用金属罩措施以减少尖端电晕，但不建议使用易起皱的铝箔以避免增加新的尖端。采用聚乙烯片或板也能有效隔绝高压电场降低电晕。
- g) 直流试验和交流试验电压测量系统应保证计量检测合格。
- h) 定子绕组高电压试验过程中，试验区域须设置安全绳，并有专人监护，防止无关人员进入试验现场。整个试验应严格按 GB 26861《电力安全工作规程 高压试验室部分》进行，以确保人身安全。

## 5 定子绕组绝缘性能检测方法

### 5.1 总则

本章中的定子绕组绝缘性能应满足电机在额定出力工况下的要求（参见 GB/T 31464）。

### 5.2 绝缘电阻、极化指数检测试验

#### 5.2.1 适用性

测量绝缘电阻、极化指数可有效发现绕组绝缘局部或整体受潮或脏污、槽内及槽口绝缘击穿和严重过热老化等缺陷，但是无法发现其它局部绝缘缺陷（如端部绝缘在高压下击穿或磕碰伤等局部缺陷时，极化指数值仍可能正常）。适用于判断电机停机后是否适合恢复运行或进行耐电压试验，以及过电压试验结果是否良好。在电机事故处理后或保护性跳闸后，绝缘电阻测试是评估对地绝缘是否存在缺陷的首选检测试验。

#### 5.2.2 一般规定

旋转电机定子绕组绝缘电阻是所用的绝缘材料的种类、状况及其应用工艺的函数。通常绝缘电阻随绝缘厚度成正比变化，而随导体表面积成反比变化。绝缘电阻测试接线示意图如图 1 所示，当同时对所有相进行试验时，仅是对地绝缘进行试验而未对相间绝缘进行试验；只有一相被试验而其他两相接地时，才能同时测试到对地绝缘和相间绝缘。绝缘电阻测试中总电流（ $I_T$ ）是 4 个不同电流的和：表面泄漏电流（ $I_L$ ）、几何电容电流（ $I_C$ ）、电导电流（ $I_G$ ）和吸收电流（ $I_A$ ）。绝缘电阻测试中的 4 种被测

电流的等效电路如图 2 所示,图 3 是具有相对较低表面泄漏电流且无电导电流的环氧云母绝缘的电流类型。

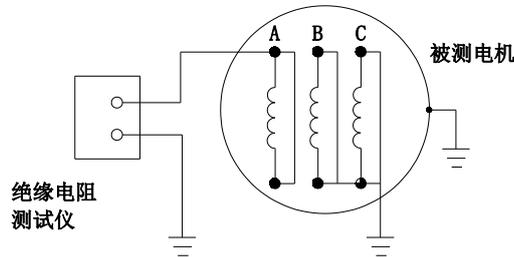


图1 绝缘电阻测试接线示意图

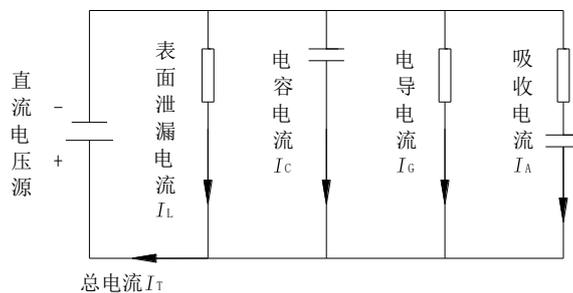


图2 绝缘电阻测试中 4 种被测电流的等效电路

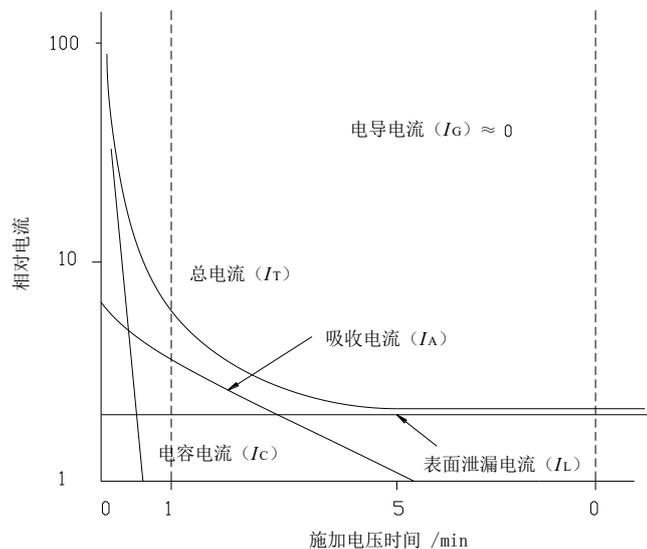


图3 具有相对较低表面泄漏电流且无电导电流的环氧云母绝缘的电流类型

电容电流 ( $I_C$ ) 通常不影响测量,因为在 1 min 内读取第一个读数时它就已经不存在了。吸收电流 ( $I_A$ ) 有两个分量,第一个分量是由于浸渍材料极化所产生的。例如环氧、聚酯和沥青的有机分子在直流电场的作用下会改变取向。由于这些分子必须反抗其它分子的吸引力,施加电场后分子重新取向通常需要几分钟的时间。因此,所施加电流的极化能量几乎降低至零。吸收电流的第二个分量是通过大部分有机材料的电子和离子的逐步漂移所产生的,这些电子和离子一直漂移至云母表面。云母在旋转电机的绝缘系统中是常见的材料。通常对于清洁干燥的旋转电机绝缘,其 30 s 和几分钟之间的绝缘电阻主要由吸收电流决定。

在粘接较好的聚酯和环氧云母绝缘系统中，电导电流（ $I_G$ ）几乎为零，除非绝缘受潮。

表面泄漏电流（ $I_L$ ）对于时间是恒定的，高的表面泄漏电流，即低的绝缘电阻通常是由于电机内部潮湿或其它类型的导电污染所引起的。

最初施加电压时被测绝缘的电阻通常会迅速增加，而后随时间的延长逐渐趋近于一个相对恒定的电阻值（如图 4 所示）。处于良好状态的干燥绕组的绝缘电阻读数达到恒定值的时间可能会随施加的恒定试验电压连续增加数小时。对于较老类型的绝缘，合理的稳定值通常在 10 min~15 min 内达到。现代类型的薄膜绕包线以及环氧云母或聚酯云母绝缘的定子绕组的绝缘电阻，可在 4 min 或更少的时间内达到恒定值。如绕组受潮或污染，通常在施加试验电压后的 1 min 或 2 min 内电阻达到一个较低的稳定值。

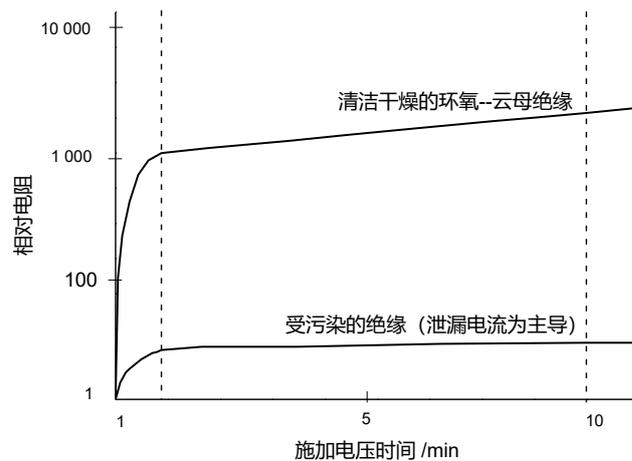


图4 绝缘电阻随测量时间的变化趋势

在绝缘体中，温度的提高提供了热能，使额外的电荷载体获得释放从而降低了电阻率。绕组的绝缘电阻取决于绕组的温度和所施加电压的时间、表面洁净度、潮湿状况等因素。一般被试电机的热容量足够大，这样在 1 min 和 10 min 绝缘电阻读数之间绕组的温度差可以忽略。如果 1 min 和 10 min 两次试验时的温度不能控制一致，则建议所有绝缘电阻试验值(利用式(1))校正到一个统一的基础温度 40 °C，最终的测试报告应该包括绕组温度和相对环境湿度。

$$R_c = K_t R_t \quad (1)$$

式中：

$R_c$  ——校正到 40 °C 的绝缘电阻值，单位为兆欧（ $M\Omega$ ）；

$K_t$  ——温度为  $t$  °C 时绝缘电阻的温度系数；

$R_t$  ——温度为  $t$  °C 时所测量的绝缘电阻值，单位为兆欧（ $M\Omega$ ）。

对于温度在露点以下的绕组，很难预测表面凝结的潮气对所测电阻的影响，因此校正到 40 °C 对趋势分析产生了一个不可接受的误差。在这种情况下，建议将电机在相似条件下试验的历史数据作为投入运行的主要判断依据。虽然潮气污染降低了绝缘电阻和/或极化指数的读数，但可以校正到 40 °C 按标准进行比较。按照式（2）（参见 GB/T 20160），得到温度系数，结合公式（1）可以校正到 40 °C 的阻值。

$$K_t = 0.5^{\frac{40-t}{10}} \quad (2)$$

式中：

$t$  ——测量绝缘电阻时的温度值，单位为摄氏度（°C）。

获取绝缘电阻与绕组温度曲线数据的建议方法，在绕组露点以上测量几个温度点，并将结果画在半对数坐标上。当绝缘电阻用对数坐标，温度用线性坐标，试验点应近似直线。通过这条直线的外推可获得 40 °C 的校正值。

绝缘表面的粉尘（或盐）在干燥的情况下是不导电的。只有暴露于潮气或油中才会部分导电，所以绝缘电阻会降低，如绝缘电阻或极化指数因污染而降低，可通过清理和干燥而达到允许值。

在不考虑绕组表面清洁程度的情况下，当绕组温度在环境空气的露点或露点以下时，绝缘表面就会形成潮气膜，从而降低绝缘电阻或极化指数。如表面被污染或绝缘有裂缝存在，则这种影响会更明显。

### 5.2.3 检测方法

#### 5.2.3.1 测试装置要求

可用手动或电动的直接显示绝缘电阻测试仪、自带检流计和电池的电阻电桥等仪器直接测量绝缘电阻。还可以使用直流电压源通过电压表和微安表的读数经计算而得到。水内冷发电机采用专用的绝缘电阻测试仪测量绝缘电阻，在绝缘引水管干燥或吹干的情况下，可用普通绝缘电阻测试仪测量。测量吸收比和极化指数应尽量采用大容量的电动绝缘电阻测试仪（或手摇式绝缘电阻测试仪，下同），以及选用满足测试容量要求的绝缘电阻测试仪（最大输出电流宜为 1 mA 及以上）。绝缘电阻值、吸收比、极化指数随绝缘电阻测试仪电压高低而变化，故每次试验应选用电压相同和负载特性相近的绝缘电阻测试仪（参考 GB/T 20160）。

#### 5.2.3.2 试验要求

绝缘电阻、极化指数试验要求如下：

- a) 在进行任何测试之前，应对绕组绝缘进行放电。对于试验电压为 5 kV 及以上者，试验设备和绕组间的连线必须采取适当的绝缘措施，并与地、设备外壳以及非试验绕组之间保持一定的空间距离，否则表面泄漏电流和电晕损耗数据将产生误差。出于安全考虑，同时为防止杂散电流的影响，测试线应采用屏蔽线。
- b) 测试前断开待测试的绕组对外的一切连线。清理干净绕组表面的污染物，必要时用高电压清洁剂洗净，室温晾干。绝缘电阻测试连线示意图如图 1 所示，当一相进行试验时，其它两相应与定子铁心、转子本体等同一接地点接地。当中性点连在一起而无法分开的电机或绕组、断引困难的水轮发电机，非大修时可测量所有连在一起的绕组对机壳的绝缘电阻。但大修时，必须分相测量（中性点连在一起而无法分开者除外）。

绝缘电阻试验通常在 500 V~10 000 V 负极性的恒定直流电压下进行。为了避免电内渗现象，首选的极性是负极性。试验电压值见表 1，绝缘电阻的读数在直流试验电压施加 1 min 以后读取。

表1 绝缘电阻试验期间施加直流电压值

单位：kV

绕组额定电压 $U_N$	绝缘电阻试验的直流电压
$5 \geq U_N \geq 3$	1~2.5
$10.5 \geq U_N > 5$	25
$15.75 \geq U_N > 10.5$	5
$U_N > 15.75$	5~10

注 1：对于三相交流电机为额定电压；对于单相电机为线对地电压；对于直流电机或磁场绕组为额定直流电压。  
注 2：对凸极式内冷机组定子绝缘电阻测量电压为 2.5 kV。  
注 3： $U_N$  为额定线电压，单位为 kV，以下章节中均同。

对水冷定子绕组直接进行绝缘电阻测量，宜排干水并使内部电路完全干燥。如果水不排出，则水的电导率宜低于 0.25  $\mu\text{S}/\text{cm}$ （参考 GB/T 20160）。

- c) 试验完成断开绝缘电阻测试仪连线后,应通过合适的电阻器对绕组进行放电,将瞬时放电电流限制到 1A 以下,并在最短的放电时间内放电至安全电压值以下。随后的直流耐压试验、交流耐压试验也必须在绕组彻底放电后方可进行。

### 5.2.3.3 判断标准

绝缘电阻、极化指数检测试验的判断标准如下:

- a) 电机定子绕组对机壳或绕组间的绝缘电阻值在换算至 100 °C,应不低于按下式计算的数值:

$$R = \frac{U_N}{1000 + 0.01S_N} \quad (3)$$

式中:

$R$ ——对应温度为 100 °C 的绕组热态绝缘电阻计算值,单位为兆欧 (MΩ);

$U_N$ ——电机的额定电压,单位为伏特 (V);

$S_N$ ——电机额定容量,单位为千伏安 (kVA)。

对于干燥清洁的电机,在测试温度为  $t$  °C 时的定子绕组绝缘电阻值  $R_t$ ,可按式进行修正:

$$R_t = R \times 1.6^{\frac{100-t}{10}} \quad (4)$$

式中:

$t$ ——测试时绕组温度,单位为摄氏度 (°C);

$R_t$ ——在绕组温度为  $t$  时的阻值,单位为兆欧 (MΩ);

$R$ ——定子绕组对机壳或绕组间的绝缘电阻值在换算至 100 °C 的热态阻值,单位为兆欧 (MΩ)。

- b) 定子绕组在直流试验电压施加 1 min 后的绝缘电阻最小值  $R_{1\min}$  如表 2 所示,利用  $R_{1\min}$  值判断电机是否具备运行或继续试验的可行性。用于与  $R_{1\min}$  进行比较的绕组绝缘电阻,是通过对整个绕组施加一个恒定的直流电压并保持 1 min 而得到的,同时校正到 40 °C。

表2 40 °C时绝缘电阻的最小推荐值

单位:MΩ

最小绝缘电阻值	试验对象
$R_{1\min}=100$	直流电枢和交流绕组的预防性试验中的绝缘电阻值。
$R_{1\min}=U_N+1$	直流电枢和交流绕组,在发电机开机前或备用状态时测量的定子三相绕组并联绝缘电阻值。
$R_{1\min}=2(U_N+1)$	大多数直流电枢和交流绕组,在发电机开机前或备用状态时测量的定子绕组分相试验时的绝缘电阻值。

注 1:  $R_{1\min}$  是整个电机绕组在 40 °C 时的绝缘电阻最小推荐值。  
注 2: 本表中最小绝缘电阻值适用于耐温等级 B 级以上的绝缘材料, A 级绝缘的阻值应咨询制造厂家。

- c) 电机定子绝缘极化指数的最小推荐值列于表 3,推荐的交流或直流旋转电机绕组最小极化指数或绝缘电阻最小值是电机投入运行或耐电压试验的基本要求。表 3 是以绝缘材料的耐热等级为基础的,除对未绝缘的磁极绕组外,适合于所有的绝缘材料,而不考虑它的使用范围。极化指数和绝缘电阻读数低的电机不宜做进一步的高电压试验。表 3 为预防性试验中对绝缘电阻要求,发电机开机前或备用状态测量绝缘电阻时不做此要求,原因是发电机开机前或备用状态测量定子绝缘电阻时,发电机通常是带着励磁变、出口母线、制动开关等附属设备一起测量,附属设备会影响发电机绝缘的极化指数。

表3 电机定子绝缘极化指数的最小推荐值

耐热等级	最小的极化指数
130 °C (B 级)	2.0
155 °C (F 级)	2.0
180 °C (H 级)	2.0

注 1: 如 1 min 绝缘电阻值在 5 000 MΩ 以上, 这种情况下就不需要极化指数来衡量绕组的状况。  
注 2: 绝缘耐热等级按 GB/T 11021 执行。

### 5.3 直流耐电压和泄漏电流试验

#### 5.3.1 适用性

在机组安装、事故处理、局部更换线棒及日常维护检修时, 利用直流耐电压试验和泄漏电流测量考核电机定子绕组的绝缘性能。还可以利用总的泄漏电流试验检测定子绕组端部绝缘表面受潮、脏污、裂纹等缺陷。

#### 5.3.2 一般规定

在高压试验过程中, 测试电流是电容电流、吸收电流与电导电流的总和。电容电流由绕组对地的电容形成的, 它等于单位时间的电压变化与电容的乘积:

$$i_C = C \times dV / dt \quad (5)$$

电容 C 与定子绕组铜导体到铁心之间介质 (尺寸、形状和间隙) 的介电常数相关。

随着施加电压的变化, 电容电流在很短时间内迅速衰减到零。电容电流可描述成一种可逆的储存能量, 一般不用它来评价绝缘的好坏。

吸收电流对阶梯电压的响应与电容电流相似, 只是吸收电流需要数分钟或数小时才能衰减到很小的值。它包含可逆和不可逆两部分。吸收电流与施加电压的表达式如下:

$$i_A = KCVt^{-n} \quad (6)$$

式中:

$K$  ——吸收系数, 与绕组绝缘的类型和温度有关;

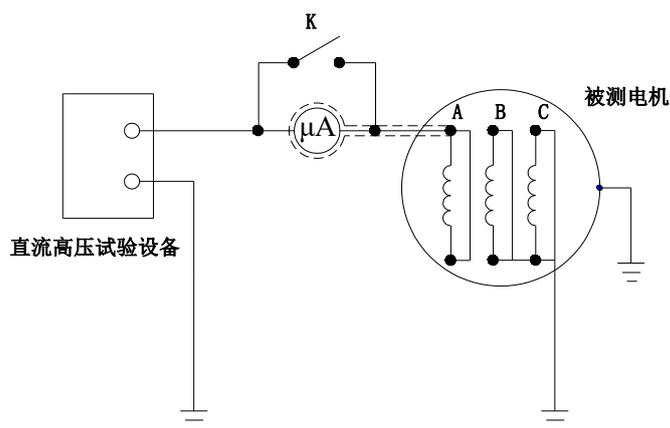
$C$  ——绕组电容, 单位为法拉 (F);

$V$  ——施加电压大小, 单位为伏特 (V);

$t$  ——电压施加的时间, 单位为分钟 (min);

$n$  ——绕组绝缘的吸收指数 (典型范围: 沥青是从 0.5~0.9, 聚酯是从 0.8~1.6, 环氧树脂是 1.0~1.9)。

体积电导电流在绝缘体积内部和有缺陷地方流通, 表面电导电流在绕组表面流通, 体积电导电流和表面电导电流会随温度、湿度、污秽程度、施加电压及绝缘质量和条件的变化而变化。绝缘质量很好时电导电流一般都很小 (与施加电压成线性比例关系), 并且随时间的延长而保持不变。随着绝缘老化, 电导电流会增加, 在某些电压等级下从电流对电压的关系曲线中可以明显看到大斜度的非线性增长。电流随测试电压的突然增加可以反映绝缘系统存在的某些问题。直流耐电压试验接线示意图如图 5 所示。



元件：

K —— 闸刀开关；

$\mu\text{A}$  —— 微安表（与绕组连线表面有屏蔽线，如图中虚线部分，避免绝缘表面杂散电流流过微安表而影响测量准确性）。

图5 直流耐电压试验接线示意图

当直流电压施加于被试设备时，其充电电流（电容电流和吸收电流）随时间的增加而逐渐衰减至零，而泄漏电流保持不变。故微安表在加压一定时间后其指示数值趋于恒定，此时读取的数值则等于或近似等于漏导电流即泄漏电流。图 6 为典型的电流-电压测试结果的实用解释。对于条件较好的绕组，测量电流随施加电压变化通常是一条上升的光滑近似直线，直到最大电压值下的电导电流都应是忽略不计的。电流随电压的增加依赖于使用的测绘比例。当与先前的测试进行比较时，须使用同样的比例。当光滑的近似直线上没有明显的偏差时，击穿可能不会立即发生，可以继续进行测试直到最大电压值。近似直线上的任何偏离都可能是接近绝缘击穿的警示。通常最接近击穿的显示是电流随电压出现一个快速增加的斜率（图 6 中的 AB 段），这种行为通常是绕组周围环境由正常变为高湿度所导致的。到达 B 点后，如果电压继续再增加，则电流将急剧增长，产生更多的损耗，以致绝缘被破坏，发生击穿。为了获得击穿电压的显示，可以保守的稍微加速曲线，将电流曲线外推到垂直。如果预测的击穿电压低于推荐的最大测试电压，可通过再增加一个电压阶梯来确认趋势。如果推断仍然显示一个较低击穿电压，应停止测试以避免发生击穿。

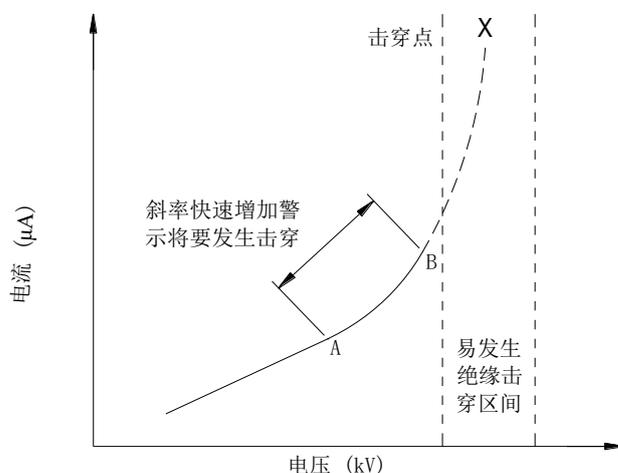


图6 绝缘击穿前的电流-电压变化示意图

在预防性试验中，测量泄漏电流时所加的电压大多在 A 点以下，故对良好的绝缘，其伏安特性应近似于直线。当绝缘有缺陷（局部或全部）或有受潮的现象存在时，则泄漏电流急剧增长，使其伏安特性曲线不是近似于直线状态。因此，可以通过测量泄漏电流来判断绝缘是否有缺陷或是否受潮。

将直流电压加到绝缘上时，其泄漏电流是不衰减的，在加压到一定时间后，微安表的读数就等于泄漏电流值。绝缘良好时，泄漏电流和电压的关系几乎呈一直线，且上升较小；绝缘受潮时，泄漏电流则上升较大；当绝缘有贯通性缺陷时，泄漏电流将猛增，与电压的关系曲线不是直线状态。因此，通过泄漏电流和电压之间变化的关系曲线就可以对绝缘状态进行分析判断。

### 5.3.3 检测方法

#### 5.3.3.1 测试装置要求

直流高压试验设备，一般要求见 GB/T 16927.1。直流电压和电流测试一般要求见 GB/T 16927.2。

#### 5.3.3.2 试验要求

直流耐电压和泄漏电流试验要求如下：

- a) 接地保护。试验过程中的短路放电和接地保护非常重要。一般使用带有放电电阻的放电棒进行保护。该放电棒应在最高试验电压下不影响试验人员的安全。该放电电阻要求按照最高试验电压的 $1\text{ k}\Omega\sim 6\text{ k}\Omega/\text{kV}$ 进行选用。放电电阻和接地端的连线应该非常柔软、电导率很高并且有一定的机械强度，接地电缆绝缘要保证良好。固定接地线与接地板之间的夹具应良好固定以避免两者脱开。

绕组必须通过放电电阻进行放电直至电压为零。某些试验设备在切断高压时自动对绕组进行放电。无论试验设备是具有自动放电系统还是手动放电系统，都必须备用一种无电阻的外接放电装置，这可以确保测试后绕组可靠接地和紧急时使用。

- b) 绕组高压试验的连接。试验时测试相绕组的出线侧和中性点侧均施加高压。而不进行试验的其它相绕组的出线侧和中性点侧均接地。将绕组的出线侧和中性点侧相连，能使试验中由击穿和闪络引起的破坏性浪涌最小化。如果绕组的出线侧和中性点侧难以连接，则试验高压只能连接绕组一端，且应采取避免闪络发生。分相试验有利于降低闪络放电的能量。
- c) 当绕组中性点连在一起而无法分开的电机或绕组断引困难的水轮发电机，非大修时可测量所有连在一起的绕组对机壳的泄漏电流。但大修时，必须分相测量（中性点连在一起而无法分开者除外）。
- d) 中性点连线未引出的电动机，不进行直流耐电压试验（包括泄漏电流试验）。
- e) 试验流程。直流耐电压试验和泄漏电流测量的流程如下：
  - 1) 预极化试验：直流耐高压试验之前，应按照 GB/T 20160 的要求测试定子绕组绝缘电阻和极化指数。
  - 2) 试验时微安表应接在高压侧，并对出线套管表面加以屏蔽。水内冷发电机汇水管有绝缘者，应采用低压屏蔽法接线；汇水管直接接地者，应在不通水和引水管吹净条件下进行试验，如果无法保证此条件，则现场可不进行该项试验（参见 GB/T 50150）。冷却水质应透明纯净，无机械杂物，电导率在水温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时要求：对于开启式水系统不大于 $5.0\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ ；对于独立的密闭循环水系统为 $1.5\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

- 3) 额定功率为10 MW（或MVA、Mvar）及以上且额定电压6 kV等级以上的汽轮发电机、同步调相机和水轮发电机，在制造厂内应进行 $3.5U_N$ 、在安装工地应进行 $3.0U_N$ 的直流耐电压试验，一般在冷状态下进行。其它见表4（参见DL/T 596）。

表4 直流耐电压和泄漏电流试验中施加的最高试验电压值

试验条件		试验电压	备注
全部更换定子绕组并修好后		$3.0U_N$	应在停机后清除污秽前的热状态下进行。处于备用状态时，可在冷态下进行。氢冷发电机应在充氢后氢纯度为96%以上或排氢后含氢量在3%以下时进行，严禁在置换过程中进行试验。
局部更换定子绕组并修好后		$2.5U_N$	
大修前	运行20年及以下者	$2.5U_N$	
	运行20年及以上与架空线直接连接者	$2.5U_N$	
	运行20年以上不与架空线直接连接者	$2.0U_N \sim 2.5U_N$	
小修时和大修后		$2.0U_N$	

- 4) 施加电压过程：在冷状态下，直流电压分相施加在每相绕组上。试验电压从零开始，按每级 $0.5U_N$ 分阶段缓慢升高至最高试验电压，每一阶段停留1 min，记录1 min时的泄漏电流值。试验电压的施加应该平滑，避免超过试验规定的最大电流，试验过程中避免不必要的过电压或过电流以减少不需要的冲击波。当试验电压升到目标值时开始计时。
- 5) 数据记录。每个电压阶段读取泄漏电流值。

### 5.3.3.3 判断标准

- a) 直流耐电压和泄漏电流试验的判断标准如下：
- 1) 泄漏电流不应随时间的延长而增大。
  - 2) 各相泄漏电流的差别不应大于最小值的100%，当最大泄漏电流在 $20 \mu\text{A}$ 以下，根据绝缘电阻值和交流耐电压试验结果综合判断为良好时，各相间差值可不考虑。
- b) 出现下述情况之一时，应尽可能找出原因，但不作不合格处理。
- 1) 泄漏电流随时间延长而异常增大。
  - 2) 在 $2.5U_N$ 下，最大泄漏电流在 $20 \mu\text{A}$ 及以上时，各相泄漏电流之差大于较小值的50%。
- 注：根据机组使用年限和检修等级，试验电压可以适当调低。
- 3) 测量所有连在一起的绕组对机壳的泄漏电流时，当在最大试验电压下泄漏电流大于初次测量值的100%。

## 5.4 交流耐电压试验

### 5.4.1 适用性

在机组安装、事故处理、局部更换线棒及日常维护检修时，对线圈或绕组绝缘施加一个规定的交流电压，以考核绕组绝缘性能。交流耐电压试验是判断绕组能否继续运行，避免绝缘事故，评估绝缘水平的重要手段。

### 5.4.2 一般规定

固体绝缘材料的短时击穿有电击穿、热击穿和局部放电击穿。电击穿发展非常迅速，在 $10^{-7} \text{ s} \sim 10^{-9} \text{ s}$ 内就可完成，因此电压作用时间在秒到微秒数量级，击穿电压几乎不随加压时间改变。而热的积累与局部放电的发展需要时间，因而击穿电压随加压时间而改变，所以测量固体绝缘材料的工频耐电压性能

时，必须规定加压时间、升压方式与升压速度。定子绕组交流耐电压试验接线示意图如图 7 所示。试验设备中球隙和球径按高压电器设备绝缘试验电压和试验方法的规定选择，球隙的放电电压应调整到试验电压的 1.1 倍~1.15 倍。

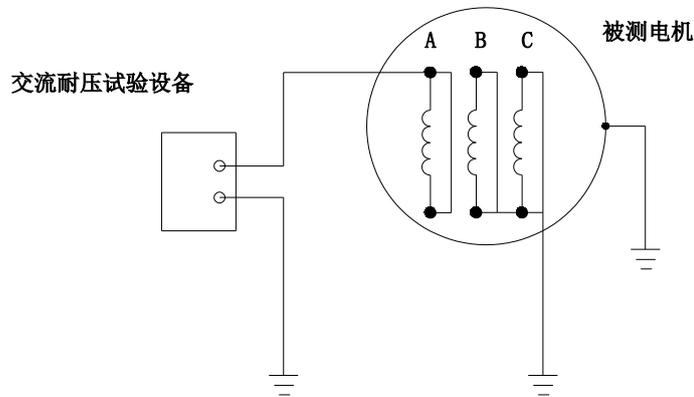


图7 定子绕组交流耐电压试验接线示意图

### 5.4.3 检测方法

#### 5.4.3.1 测试装置要求

测试系统一般有高压变压器或谐振变压器、分压器、互感器、高压静电电压表、可测量泄漏电流的电流表、球隙等。测试系统要求详见 GB/T 16927.2。

#### 5.4.3.2 试验要求

交流耐电压试验要求如下：

- a) 应在被试绕组和电机机壳之间施加试验电压，而铁心和非被试绕组、测温元件等则与机壳连接。试验时，电机的所有部件均应安装就位，如同正常工况。试验应在制造厂内、现场安装完毕后和电机大修（或整体维修）时进行。进行工频交流耐电压试验前和试验后，按照 5.2 的要求进行绕组的绝缘电阻测量。
- b) 交流电压频率国内为工频 50 Hz，按照 GB/T 16927.1 规定工频试验频率范围为 45 Hz~55 Hz；国外为工频 60 Hz，工频试验频率范围为 45 Hz~65 Hz。试验电压的波形应为近似正弦波，且正半波峰值与负半波峰值的幅值差应小于 2%。按照 GB/T 16927.3 规定，若正弦波的峰值与有效值之比在  $\sqrt{2} \pm 0.15$  范围内，则认为交流耐电压试验结果不受波形畸变的影响。
- c) 按 GB 755 的规定，整机定子绕组交流耐电压试验的试验电压值见表 5。对于由静止电力变流器供电的直流电动机，应根据电机的直流电压或静止电力变流器输入端相与相间额定交流电压的有效值两者中的较高者，从表 5 中选取交流耐电压试验电压值。对于额定电压为 6 kV 及以上的电动机，在机组大修或检修时，如果工频电源设备不能满足要求，经过协商，可以用直流试验来代替，电压为根据表 5 值的 1.7 倍（参见 GB 755）。

注：沿绕组端部绝缘的表面电位分布及老化机理方面，直流试验与交流试验是有差异的。

表5 整机定子绕组交流耐电压试验的试验电压值

序号	电机或部件		试验电压（有效值）
1	额定输出小于 10 000 kW（或 kVA）旋转电机的绝缘绕组 <sup>a</sup>		$2U_N+1$ kV 最低为 1.5 kV <sup>b</sup>
2	额定输出 10 000 kW（或 kVA）及以上旋转电机的绝缘绕组 <sup>a</sup> 额定电压 $U_N$ <sup>b</sup> : 3 kV~6 kV 6 kV~24 kV >24 kV		$2.5U_N$ $2U_N+1$ kV 按协议
3	电机与装置的成套组合		应尽可能避免重复项 1~2 的试验，但如对成套装置试验，而其中组件事先均已通过耐电压试验，则施加于该装置的试验电压应为装置任一组件中的最低试验电压的 80% <sup>c</sup>
4	与绕组接触的装置，如温度传感器，应该和电机机壳一起被测试，在对电机进行耐电压试验时，所有和绕组有接触的装置均应和电机机壳连接在一起		1.5 kV
5	大修前或局部	运行 20 年及以下者	$1.5U_N$
	更换定子绕组	运行 20 年以上与架空线路直接连接者	$1.5U_N$
	并修好后	运行 20 年以上不与架空线路直接连接者	$1.3U_N\sim 1.5U_N$
注 1：应在停机后清除污秽前的热状态下进行。处于备用状态时，可在冷状态下进行。氢冷发电机应在充氢后氢纯度为 96% 以上或排氢后含氢量在 3% 以下时进行，严禁在置换过程中进行试验。			
注 2：水内冷电机一般应在通水的情况下进行试验，进口机组按厂家规定，冷却水质应透明纯净，无机械混杂物，电导率在水温 20℃ 时要求：对于开启式水系统不大于 5.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；对于独立的密闭循环水系统为 1.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。			
<sup>a</sup> 对采用分级绝缘的电机，耐电压试验应由制造厂与用户协商。			
<sup>b</sup> 对有一共同端子的两相绕组，表中的电压均为在运行时任两个端子间所出现的最高电压有效值。			
<sup>c</sup> 当一台或多台电机的绕组作电连接时，电压应为绕组对地发生的最高电压。			

机组在安装过程中不同阶段的交流耐电压的电压最终值应根据表 6~表 11 的规定（参见 GB/T 7894、GB/T 8564、JB/T 6204），其中  $S_N$  ( $P_N$ ) 是电机的额定容量。

当一相（或局部绕组线棒）进行试验时，其他两相（或其余绕组线棒）应与定子铁心、转子本体等同一接地点接地。当三相绕组的中性点不易分开时，则三相绕组应同时施加电压。

对于水冷定子绕组，试验在绕组通水的情况下进行时，此时汇水管应接地。在不通水的情况下进行时，必须将绝缘引水管中的水吹干。

- d) 试验应从不超过试验电压全值的一半开始，然后均匀地或以不超过全值 5% 逐步增至全值，电压从半值增至全值的时间应不少于 10 s。全值试验电压值应符合表 6~表 11 规定，并维持 1 min。试验完毕，应均匀降压，待电压下降到全值的 1/3 以下时，方可断开电源，并将被试绕组进行放电至安全电压。
- e) 验收时不应对绕组重复进行全值电压的交流耐电压试验。然而在用户坚持下进行第二次试验时（如认为必要应进一步烘干后进行），试验电压值应为表 6~表 11 规定的 80%。
- f) 电机定子绕组在安装过程中的各序工频交流耐电压试验（适用于海拔高度 1 000 m 及以下）推荐按照表 6~表 11 规定进行，高于 1 000 m 由制造厂和用户协商确定。

- g) 完全重绕的绕组，应与新电机一样用全值试验电压作试验。部分重绕的绕组，除成品线圈和线圈下线前阶段的试验电压按全值试验电压外，其它试验阶段的试验电压应为各相应阶段试验电压的 75%（额定电压大于 4 kV）。试验前应对未重绕的部分进行清洗和干燥。
- h) 局部更换定子绕组时的交流耐电压试验值见表 12 与表 13。定子绕组现场更换局部线棒时，所使用的单根线棒下线前均需要进行交流耐电压试验（具体试验值由制造厂家确定），且  $1.5U_N$  时无电晕情况。
- i) 额定电压 24 kV 以上的电机，试验电压按照专门协议。对于引进技术的机组，试验电压按照制造厂的标准执行。

主绝缘固化后的圈式线圈及其组成的不分瓣定子，试验电压见表 6。

表6 主绝缘固化后的圈式线圈及其组成的不分瓣定子交流耐电压试验 单位:kV

序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
			$3 \leq U_N \leq 6.3$	$6.3 < U_N \leq 24$
1	成品线圈	—	$2.75 U_N + 4.5$	$2.75 U_N + 6.5$
2	下线打槽楔后	—	$2.0 U_N + 3.0$	$2.0 U_N + 3.0$
3	并头、连接绝缘后，定子完成	分相	$2.0 U_N + 2.0$	$2.0 U_N + 2.0$
4	对浸渍固化后的定子插转子之前	分相	$2.0 U_N + 2.0$	$2.0 U_N + 2.0$
5	电机装配后	分相	$2.0 U_N + 1.0$	$2.0 U_N + 1.0$

注 1：非整体浸渍的绕组不执行序号 4。  
注 2：整体浸渍的绕组从序号 4 开始执行。  
注 3：对三个出线端绕组中性点不易分开的电机，允许不分相试验。  
注 4：序号 3 和序号 4，均为插转子之前的试验电压值。

主绝缘固化后的圈式线圈及其组成的分瓣定子，试验电压见表 7。

表7 主绝缘固化后的圈式线圈及其组成的分瓣定子交流耐电压试验 单位：kV

地点	序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
				$3.0 \leq U_N \leq 6.3$	$6.3 < U_N \leq 24$
制造厂	1	成品线圈	—	$2.75U_N + 4.5$	$2.75U_N + 6.5$
	2	下线打槽楔后	—	$2.0U_N + 3.0$	$2.0U_N + 3.0$
	3	并头、连接绝缘后	分相	$2.0U_N + 2.0$	$2.0U_N + 2.0$
	4	对浸渍固化后的定子	分相	$2.0U_N + 5.0$	$2.0U_N + 5.0$
安装工地	5	合缝线圈下线前	—	$2.0U_N + 4.0$	$2.0U_N + 4.0$
	6	合缝线圈下线打槽楔后	—	$2.0U_N + 3.0$	$2.0U_N + 2.0$
	7	连接合缝线圈，并头绝缘后，定子完成	分相	$2.0U_N + 2.0$	$2.0U_N + 2.0$
	8	电机装配后	分相	$2.0U_N + 1.0$	$2.0U_N + 1.0$

注 1：非整体浸渍的绕组不执行序号 4。  
注 2：整体浸渍的绕组从序号 4 开始执行。  
注 3：分瓣定子在制造厂进行装配并试验者，耐电压试验仍按表 6 进行。

主绝缘固化后的条式线圈及其组成的不分瓣定子，试验电压见表 8。

表8 主绝缘固化后的条式线圈及其组成的不瓣定子交流耐电压试验

单位：kV

序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
			$3.0 \leq U_N \leq 6.3$	$6.3 < U_N \leq 24$
1	成品线圈（制造厂）	—	$2.75U_N + 4.5$	$2.75U_N + 6.5$
2	下层线圈下线后	—	$2.0U_N + 4.0$	$2.0U_N + 4.0$
3	上层线圈下线后打完槽楔	—	$2.0U_N + 3.0$	$2.0U_N + 3.0$
4	焊好并头，装好连线，引线包好绝缘，定子完成	分相	$2.0U_N + 2.0$	$2.0U_N + 2.0$
5	对浸渍固化后的定子	分相	$2.0U_N + 2.0$	$2.0U_N + 2.0$
6	电机装配后	分相	$2.0U_N + 1.0$	$2.0U_N + 1.0$

注 1：非整体浸渍的绕组不执行序号 5。

注 2：整体浸渍的绕组从序号 5 开始执行。

注 3：由于线棒接头结构的原因使上下层线棒接头无法分隔开，致使上层线棒无法进行序号 3 耐电压试验，可以不进行序号 3 试验。

主绝缘固化后的条式线圈及其组成的分瓣定子，试验电压见表 9。

表9 主绝缘固化后的条式线圈及其组成的分瓣定子交流耐电压试验

单位：kV

地点	序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
				$3.0 \leq U_N \leq 6.3$	$6.3 < U_N \leq 24$
制造厂	1	成品线圈	—	$2.75U_N + 4.5$	$2.75U_N + 6.5$
	2	下层线圈下线后	—	$2.0U_N + 4.0$	$2.0U_N + 4.0$
	3	上层线圈下线后打完槽楔	—	$2.0U_N + 3.0$	$2.0U_N + 3.0$
	4	焊好并头，装好连线，引线，包好绝缘	分相	$2.0U_N + 2.0$	$2.0U_N + 2.0$
安装工地	5	对浸渍固化后的定子	分相	$2.0U_N + 3.0$	$2.0U_N + 3.0$
	6	合缝线圈下线前	—	$2.0U_N + 5.0$	$2.0U_N + 5.0$
	7	合缝处下层线圈下线后	—	$2.0U_N + 4.0$	$2.0U_N + 4.0$
	8	合缝处上层线圈下线后打完槽楔	—	$2.0U_N + 3.0$	$2.0U_N + 3.0$
	9	焊好并头，装好连线引线，包好绝缘，定子完成	分相	$2.0U_N + 2.0$	$2.0U_N + 2.0$
	10	电机装配后	分相	$2.0U_N + 1.0$	$2.0U_N + 1.0$

注 1：非整体浸渍的绕组不执行序号 5。

注 2：整体浸渍的绕组从序号 5 开始执行。

注 3：由于由于线棒接头结构的原因使上下层线棒接头无法分隔开，致使上层线棒无法进行序号 3 耐电压试验，可以不进行序号 3 试验。

主绝缘固化后的整台圈式线圈在安装工地下线时，试验电压见表 10。

表10 主绝缘固化后的整台圈式线圈下线前后交流耐电压试验

单位：kV

地点	序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
				$3.0 \leq U_N \leq 6.3$	$6.3 < U_N \leq 24$
制造厂	1	成品线圈	—	$2.75U_N + 4.5$	$2.75U_N + 6.5$
安装	2	线圈下线前	—	$2.0U_N + 5.0$	$2.0U_N + 5.0$

工地	3	下线打槽楔后	——	$2.0U_N+3.0$	$2.0U_N+3.0$
	4	并头, 连线绝缘后, 定子完成	分相	$2.0U_N+2.0$	$2.0U_N+2.0$
	5	电机装配后	分相	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$

主绝缘固化后的整台条式线圈在安装工地下线时, 试验电压见表 11。

表11 主绝缘固化后的整台条式线圈下线前后交流耐电压试验 单位: kV

地点	序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
				$3.0 \leq U_N \leq 6.3$	$6.3 < U_N \leq 24$
制造厂	1	成品线圈	——	$2.75U_N+4.5$	$2.75 U_N+6.5$
安装 工地	2	线圈下线前*	——	$2.0U_N+5.0$	$2.0 U_N+5.0$
	3	下层线圈下线后	——	$2.0U_N+4.0$	$2.0U_N+4.0$
	4	上层线圈下线后, 打完槽楔	——	$2.0U_N+3.0$	$2.0U_N+3.0$
	5	焊好并头, 装好连线引线包好绝缘, 定子完成	分相	$2.0U_N+2.0$	$2.0U_N+2.0$
	6	电机装配后	分相	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$

注 1: \*定子线棒下线前抽检 5%。  
注 2: 由于由于线棒接头结构的原因使上下层线棒接头无法分隔开, 致使上层线棒无法进行序号 4 耐电压试验, 可以不进行序号 4 试验。

交流电机运行过程中因局部线棒绝缘受损需要进行更换, 更换定子绕组时的交流耐电压试验见表 12 与表 13。返回制造厂重新制作主绝缘的线棒按照新线棒的要求进行检测, 不在本标准要求范围内。

表12 整台圈式线圈（在电厂修理）的试验电压 单位: kV

序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
			$3.0 \leq U_N \leq 6.3$	$6.3 < U_N \leq 24$
1	拆除故障线圈后, 留在槽中的老线圈	——	$0.80 \times (2.0U_N + 1.0)$	$0.80 \times (2.0U_N + 1.0)$
2	线圈下线前	——	$2.75U_N$	$2.75U_N$
3	下线打槽楔后	——	$0.75 \times (2.0U_N + 4.0)$	$0.75 \times (2.0U_N + 4.0)$
4	并头, 连线绝缘后, 定子完成	分相	$0.75 \times (2.0U_N + 3.0)$	$0.75 \times (2.0U_N + 3.0)$
5	电机装配后	分相	$1.5U_N$	$1.5U_N$

注: 运行年久的电机, 试验电压值可根据具体条件适当降低。

表13 整台条式线圈（在电厂修理）的试验电压 单位: kV

序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
			$3.0 \leq U_N \leq 6.3$	$6.3 < U_N \leq 24$
1	拆除故障线圈后, 留在槽中的老线圈	——	$0.80 \times (2.0U_N + 1.0)$	$0.80 \times (2.0U_N + 1.0)$
2	线圈下线前	——	$0.75 \times (2.0U_N + 5.0)$	$0.75 \times (2.0U_N + 5.0)$
3	下层线圈下线后	——	$0.75 \times (2.0U_N + 4.0)$	$0.75 \times (2.0U_N + 4.0)$
4	上层线圈下线后, 打完槽楔	——	$0.75 \times (2.0U_N + 3.0)$	$0.75 \times (2.0U_N + 3.0)$
5	焊好并头, 连线绝缘后, 定子完成	分相	$0.75 \times (2.0U_N + 2.0)$	$0.75 \times (2.0U_N + 2.0)$
6	电机装配后	分相	$1.5U_N$	$1.5U_N$

注: 运行年久的电机, 试验电压值可根据具体条件适当降低。

T/CSEE 0008—####

T/CEEIA 260—####

### 5.4.3.3 判断标准

在 1 min 内的交流耐电压试验中，绝缘不发生击穿、绝缘表面无炭化痕迹。

## 5.5 槽电位/槽内接触电阻检测试验

### 5.5.1 适用性

槽电位/槽内接触电阻检测试验是检验定子绕组槽部与铁心槽壁之间的接触紧密度的试验，适用于额定电压为 10.5 kV 以上的非整浸汽轮发电机与水轮发电机定子绕组。发电机运行时，槽内定子绕组槽部与铁心槽壁之间由于气隙的存在会产生电位差，电位差的大小和气隙大小相关，当电位差达到气隙击穿强度时，产生火花放电腐蚀防晕层和绝缘层。为消除槽内电腐蚀，常采用半导体材料堵塞槽内消除气隙。在机组安装、局部更换线棒时，进行槽电位或接触电阻试验，选用其中一种试验即可，选用哪种试验方便由制造厂选择。

### 5.5.2 槽电位

#### 5.5.2.1 一般规定

高压电机定子绕组在装配过程中，因定子线棒截面与铁心槽之间的装配公差，定子绕组槽部与铁心之间可能出现一些小间隙。在高压电机运行过程中，定子绕组槽部对地最高电压为电机额定相电压。在此电压下，这些间隙可能发生放电，在电、热、化学等因素作用下引起绕组防晕材料和绝缘材料的逐渐腐蚀劣化，影响绕组寿命。因此，对绕组槽部施加对地最高相电压，检查绕组槽部对铁心之间的电压以避免槽内放电。

定子线棒下线后槽部与铁心应是低阻紧密接触，定子线棒表面的电压通过半导体槽衬或垫条被限制在一个比较小的电压范围（0 V~10 V），定子线棒表面的电压就是泄漏电流通过半导体槽衬或垫条所产生的电压。

如果线棒侧面与铁心槽壁之间有间隙，则会形成空腔（见图 8）。具体分析过程见附录 B。

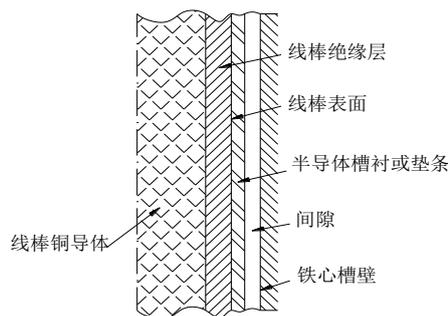


图8 槽内有间隙的线棒与铁心之间的等效示意图

#### 5.5.2.2 检测方法

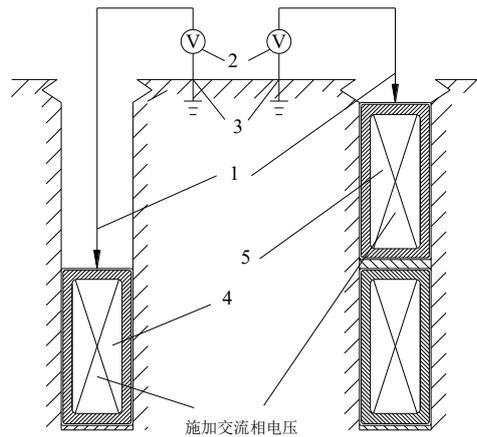
##### 5.5.2.2.1 测试装置要求

测试系统一般有高压变压器或谐振变压器、分压器、互感器、高压静电电压表等。

##### 5.5.2.2.2 试验要求

槽电位检测试验要求如下：

- a) 检测前先检查线棒与铁心的侧面间隙，如果间隙超过 0.3 mm，长度超过 100 mm 或超过制造厂要求时，应填充半导体垫条。测量槽电位前，应测试绕组的绝缘电阻和极化指数。
- b) 安全防护。地线应有机械强度且保证试验人员的安全。按照第 4 章的要求进行安全防护。
- c) 槽电位应使用电压测量准确度不低于 $\pm 0.5\%$ 的数字万用表、高压静电电压表等仪表。按照图 9 进行测试前的准备工作。仪表的一端通过测量电极与线棒表面接触，另一端与定子铁心连接。一般抽检 10%的槽数，每槽沿长度方向均匀测试，对于水轮发电机定子绕组，每槽至少测试三处；对于汽轮发电机、核电发电机、燃气轮发电机定子绕组，每槽至少测试十处。



说明：

- 1 ——测量探头及测量线；
- 2 ——高内阻电压表或万用表等；
- 3 ——接地端；
- 4 ——下层线棒；
- 5 ——上层线棒。

图9 测试槽电位示意图

- d) 测试时对试验绕组引线施加额定相电压的工频交流电压，而不参加试验的绕组、铁心与测温元件等应可靠接地。测量范围在铁心内，不能超过铁心长度。

如果槽电位值过高，应仔细检查线圈侧面的紧密性，重新塞紧侧面垫条或侧面波纹板后再测量；如果重新塞紧后测量的电阻值仍然很高，则需进一步检查线圈表面低阻层是否完整。需要注意的是，如果检查仪表测量探头与线棒低阻层之间接触不良，也会造成测量值偏大，一定要将探头接触在低阻层上。

- e) 记录线圈表面槽电位值，同时记录槽号。

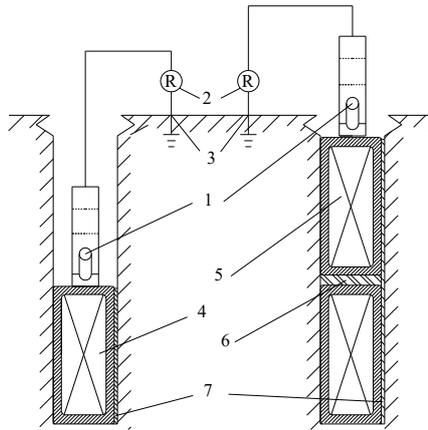
### 5.5.2.3 判断标准

额定相电压下检测槽电位应小于 10 V。槽电位超标时需要 100%检验槽数，超标部位允许修复后达到标准要求，修复措施由电机制造厂家提供。

### 5.5.3 槽内接触电阻检测试验

#### 5.5.3.1 一般要求

测试原理同 5.4.2。测试接线图如图 10 所示。



说明:

- 1 —— 测量电极;
- 2 —— 万用表或绝缘电阻测试仪等;
- 3 —— 接地端;
- 4 —— 下层线棒;
- 5 —— 上层线棒;
- 6 —— 层间垫条;
- 7 —— 侧面垫条或侧面波纹板。

图10 接触电阻测量的示意图

### 5.5.3.2 检测方法

#### 5.5.3.2.1 测试装置要求

一般利用万用表（选用欧姆档）测量，但是阻值较高时可以使用 500 V 的绝缘电阻测试仪。测量电极与被试试样的接触面积为 100 mm×13 mm（长×宽），如果线棒宽度小于 13 mm，电极宽度小于线棒宽度 2 mm，建议电极由橡胶垫外覆一层导电金属薄片组成，以确保测量过程中电极与被试试样的良好接触。

#### 5.5.3.2.2 试验要求

槽内接触电阻检测试验要求如下：

- a) 表面接触电阻应在线圈嵌入槽并放入侧面垫条或侧面波纹板后测量，上层线圈表面接触电阻应在打入槽楔之前测量。线路接线和电极位置如图 10 所示。
- b) 测量时测量仪表的一端接铁心，另一端接测量电极。
- c) 测量线圈槽部表面对铁心的接触电阻。一般抽检 10%的槽数。每槽沿长度方向均匀测试，对于水轮发电机定子绕组，每槽至少测试三处；对于汽轮发电机、核电、燃气轮发电机定子绕组等，每槽至少测试十处，避免超出铁心范围。
- d) 如果线圈表面接触电阻值过高，应仔细检查线圈侧面的紧密性，重新塞紧侧面垫条或侧面波纹板后再测量；如果重新塞紧后测量的电阻值仍然很高，则需进一步检查线圈表面低阻层是否完整。
- e) 记录线圈表面接触电阻值，同时记录槽号。

### 5.5.3.3 判断标准

每槽线圈表面接触电阻的平均值不大于 30 kΩ，个别值不大于 50 kΩ，允许返修后达到标准要求。

## 5.6 局部手包绝缘直流电压试验

### 5.6.1 适用性

局部手包绝缘直流电压试验（俗称端部电位外移试验）是对水内冷（也包括汽轮发电机空冷）定子绕组绝缘部件之间过渡绝缘（也称为鼻部绝缘或并头绝缘）的质量检验或故障排查。主要检验过渡绝缘本体与绝缘部件搭接处绝缘的整体性和连续性；发现绕组端部空芯铜线焊接不良、断裂渗水等缺陷。

### 5.6.2 一般规定

通过对手包绝缘部件（见图 11）施加直流电压后，部件表面的电位或泄漏电流大小反馈的是手包绝缘电阻的状态。测量时电极应覆盖手包绝缘本体和绝缘部件搭接区域。当线圈导体施加直流电压  $U_N$  时，正常情况下主绝缘的表面电阻和体积电阻要优于手包绝缘处的电阻状况；当手包绝缘外包电极经测试杆接地后，该处绝缘处于承载电压状态，绝缘电阻可以看成搭接区域绝缘电阻和手包绝缘本体绝缘电阻的并联（薄弱处在搭接处，如图 11 中的直流耐电压检测部位）。定子绕组端部过渡绝缘质量检测电路示意图（以检测表面电位为例）如图 12 所示，当手包绝缘本体绝缘与搭接区域绝缘良好时，测试点处对地泄漏电流很小，测得的表面电位值接近于零。当手包绝缘本体绝缘良好而搭接区域绝缘存在缺陷时，测试点处对地泄漏电流增大，测得的表面电位值也会相应增大。因此可以根据测试点处测得的电压值或泄漏电流值相对反映绕组端部手包绝缘质量。

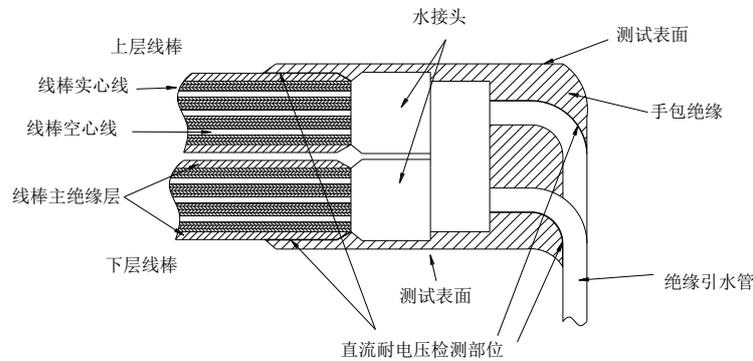
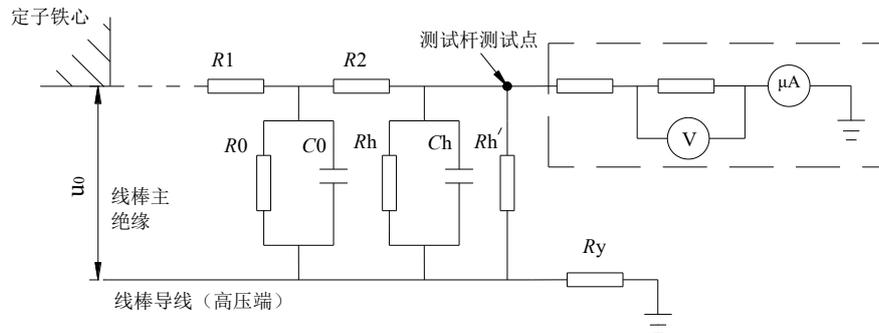


图11 过渡(并头/鼻部)绝缘直流电压检测部位示意图



说明：

T/CSEE 0008—####

T/CEEIA 260—####

$R_1$ ——高阻段的表面电阻；

$R_2$ ——主绝缘层表面电阻；

$R_0$ ——主绝缘层体积电阻；

$C_0$ ——主绝缘层电容；

$R_h$ ——手包绝缘层电阻；

$C_h$ ——手包绝缘层电容；

$R_h'$ ——手包绝缘搭接处等效电阻；

$R_y$ ——引水管电阻；

图中虚框是测试杆的电路图。

图12 定子绕组端部过渡绝缘质量检测电路示意图（以检测表面电位为例）

局部手包绝缘直流耐电压试验有两种接线方式，即正接线方式和反接线方式。

正接线方式：通水状态下水质保持合格，不通水状态下要将定子冷却水管中的水吹净，然后定子绕组外加直流高压，直流试验电压为  $U_N$ ，测试杆一端接触包裹柔软金属箔纸或导电布的手包绝缘部位，另一端经  $100\text{ M}\Omega$  电阻串联微安表接地，如图 13 所示， $R=100\text{ M}\Omega$ 。正接线方式适用于测量部位较多、绝缘缺陷未明的情况，较为安全，要求试验工作量较大。

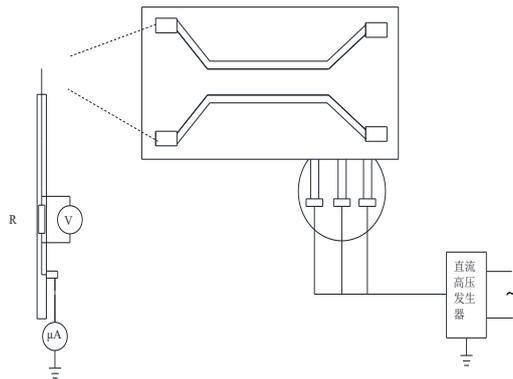


图13 手包绝缘直流耐电压试验正接线方式

反接线方式：不通水的定子绕组经  $100\text{ M}\Omega$  电阻串接微安表接地。在包裹金属箔纸或导电布的部位采用绝缘杆外加的直流电压，如图 14 所示。反接线方式的优点在于不受绕组端部表面状态的影响。反接线方式适用于检修后少数部位进行测量的情况，与正接线方式相比，所需试验量较小，因为从包金属箔纸处加压，所以应采取较为严格的安全措施。试验完毕并切断电源后，须将高压引线接地以使其充分放电。

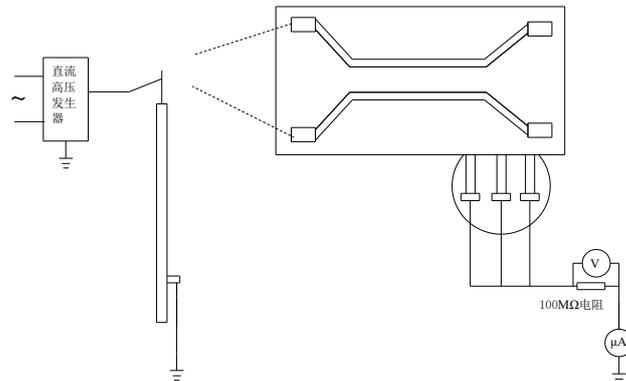


图14 手包绝缘直流耐电压试验反接线方式

### 5.6.3 检测方法

#### 5.6.3.1 测试装置要求

直流高压试验装置一套，能稳定输出测试所需的直流高压且满足容量需求；直流微安表一只，最大测量电流（ $\mu\text{A}$ ）不低于  $0.01U_N$ ；专用的绝缘测试杆一根（主体为带有电阻分压电压测量功能的绝缘杆，如图 13 所示， $R=100\text{ M}\Omega$ ，分压电阻容量不低于  $10\text{ W}$ ，电阻一端连接金属探头，一端装有接地线柱），应符合 DL/T 878 的规定。

#### 5.6.3.2 试验要求

局部手包绝缘直流电压试验要求如下：

- a) 在定子绝缘处理完工并烘焙以后（此时鼻端槽楔块未装），在定子绕组做交直流耐电压试验之前进行测试。对待测部件编号，待测部位包裹一层厚度为  $0.01\text{ mm}\sim 0.02\text{ mm}$  的导电金属箔纸或导电布。由于线圈端部几何形状不规则，应尽可能将其包裹实，同时金属箔纸不可与相邻线棒相碰以免影响测量结果。金属箔纸对地距离在  $50\text{ mm}$  以上，避免绝缘层存在贯通性缺陷时产生放电现象。
- b) 在通水及不通水情况下，试验接线通常采用正接线方式。反接线方式必须在不通水的条件下采用。为了提高测试灵敏度，一般在端部接头清扫前进行试验，若端部严重脏污（如事故后的状态等），可采取反接线方式。为了更有效发现发电机漏水或其它缺陷，应在通水或充水条件下进行。在通水或充水条件下试验时，应在水压试验后进行；在不通水条件下试验时，应保证引水管内壁无残留水分。
- c) 施加的直流电压一般为  $U_N$ ，具体直流电压值，根据不同手包绝缘在定子绕组直流耐电压试验中承受的电压而定。
- d) 应保证被测部位无遮挡，满足从机外进行测量的安全距离要求（试验人员身体各部位与高压引线和定子绕组间距必须保持  $1\text{ m}$  以上），当测量发电机端部手包绝缘时，发电机端盖应打开。
- e) 所有发电机内部测温元件、出线电流互感器二次绕组等应短路接地。
- f) 加压前应将测试杆及试验仪器接地。试验过程中，检测人员须站在绝缘胶皮垫上并戴绝缘手套。读取试验数据时，应等数据显示稳定后记录电压值或电流值，当数据超标时，应分段找出具体部位。
- g) 试验结束，拆除接线前，应对定子绕组和高压试验设备充分放电；拆除导电金属箔纸或导电布前也应对其进行放电，并注意防止金属箔纸或导电布掉进发电机定子膛内。
- h) 超出标准要求的部位，需要重新进行绝缘处理，处理好后再次进行试验检测直至合格为止。

#### 5.6.3.3 判断标准

局部手包绝缘直流电压试验的判断标准如下：

汽轮发电机定子绕组在施加的直流电压为  $U_N$  时，定子绕组局部手包绝缘施加的直流电压测量限值需满足表 14 规定（参见 DL/T 1612）。

表14 局部手包绝缘直流电压测量限值

测试阶段	测量部位	测试结果 V
交接或现包绝缘后	全部手包绝缘（含端部接头、引线接头及过渡引线接头等部位）	泄漏电流为 10 μA；100 MΩ 电阻上的电压降值为 1 000 V
大修时	全部手包绝缘（含端部接头、引线接头及过渡引线接头等部位）	泄漏电流为 20 μA；100 MΩ 电阻上的电压降值为 2 000 V
注 1：当施加的直流电压为大于 $U_N$ 值时，各制造厂自定。 注 2：B 级绝缘的机组在大修时，局部手包绝缘直流电压测量限值可参照 DL/T 596 中表 1 规定值：泄漏电流为 30 μA；100 MΩ 电阻上的电压降值为 3 000 V。		

## 5.7 介质损耗因数检测试验

### 5.7.1 适用性

介质损耗因数表征绕组绝缘结构在交变电场下绝缘本身的介质状况；介质损耗角正切值增量反映了绝缘介质内部随电压增加介质特性的变化增量，它通常间接体现绕组绝缘内部致密性。介质损耗因数能有效发现：整体受潮，贯穿性的放电通道，绝缘内含有气隙，绝缘分层、脱壳、劣化等绝缘整体性缺陷。不能发现非贯穿性的局部损伤、很小部分绝缘的劣化、个别的绝缘弱点等局部缺陷。

### 5.7.2 一般规定

介质损耗因数是绝缘材料的一种特性，能反映绝缘中电介质损耗的情况，是电阻电流分量  $I_R$  和电容电流分量  $I_C$  所形成的三角正切，通常以%的形式记录。

在交流电压下流过绝缘介质的电流等效为：电容电流分量  $I_C$  和电阻电流分量  $I_R$ ，通常  $I_C \gg I_R$ ，如图 15 所示。介质中的功率损耗公式为：

$$p = UI_R = UI_C \tan \delta = U^2 \omega C \tan \delta \quad (7)$$

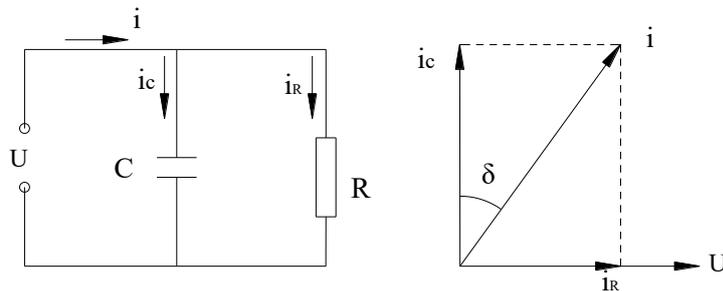


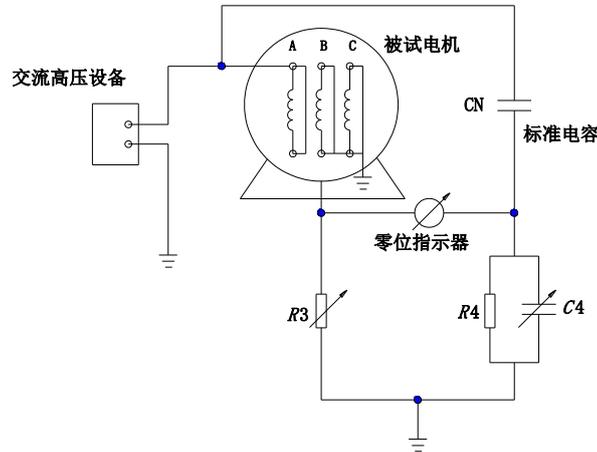
图15 交流电压下绝缘介质中的电流等效图

电机绝缘材料中均包含极性分子，当施加工频交流电压时，绝缘材料中的极性分子随电压由正到负再由负到正，以每秒 50 次周期性运动。极性分子在固体介质中运动时，与相邻分子或与自身不同部分摩擦产生热量，这些分子产生的能量来自测试电源施加的电场。

介质损耗试验测试的是绝缘整体状态，当集中性缺陷相对被测试绝缘的比例很小时，测试的灵敏度大大降低。因此整体测量介质损耗角正切值，不能检测出局部缺陷。

根据被测电机接地是否可脱离，测试接线方法分为正接法和反接法。正接法：整台定子应对地绝缘（可放置于对地绝缘的支撑台上并垫上绝缘橡皮）。将被测电机三相连接，并接高压端；或被测电机单

相（分支）连接在高压端，其余两相（及其它分支）接地。测温元件及其他外部设备连同铁心一起接到电桥测量极。其典型接线图如图 16 所示。反接法：将整台定子铁心、测温元件及其他外部设备接地。将被测电机三相连接，并接高压端；或被测电机单相（分支）连接在高压端，其余两相（及其它分支）接地。其典型接线图如图 17 所示。



说明：

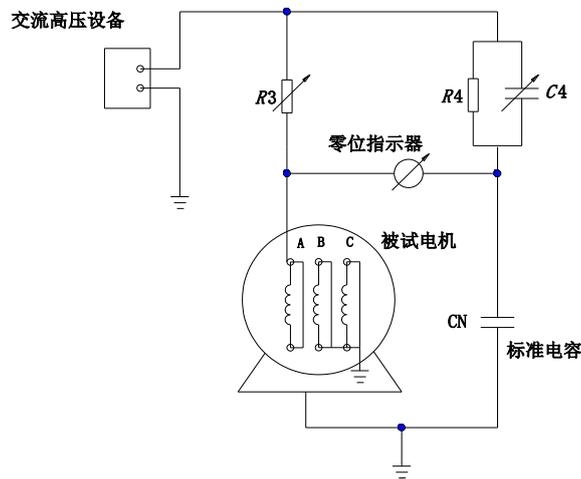
$C_N$  ——标准电容；

$R_3$  ——无感可调电阻；

$C_4$  ——可调电容；

$R_4$  ——无感固定电阻。

图16 正接法测试介质损耗接线示意图



说明：

$C_N$  ——标准电容；

$R_3$  ——无感可调电阻；

$C_4$  ——可调电容；

$R_4$  ——无感固定电阻。

图17 反接法测试介质损耗接线示意图

### 5.7.3 检测方法

T/CSEE 0008—####

T/CEEIA 260—####

### 5.7.3.1 测试装置要求

试验时应使用具有足够容量的工频交流电源，电压应为工频正弦波电压，电压波形畸变率应符合 GB/T 16927.1 的要求。利用西林电桥或相当类型的电桥进行测量(参见 JB/T 7608 与 DL/T 474.3)。测出  $\tan\delta$  值的精度应该控制在  $\pm(0.1 \times 10^{-3} + 0.1 \tan\delta)$  范围内，在使用西林电桥时应注意屏蔽和接地。

### 5.7.3.2 试验要求

介质损耗因数检测试验要求如下：

- 根据被测电机接地是否可脱离，测试接线方法分为正接法和反接法。如果定子铁心不能对地绝缘，就只能采用试样接地方法进行介质损耗测量，即反接法。需要配置双绝缘高压输出的大容量试验变压器并采取相应措施消除杂散电容的影响。
- 测量前必须检查绕组对铁心，绕组之间（相间）的绝缘电阻，并满足要求，其测试方法和阻值符合 GB/T 20160 的要求。当采用正接法时，还需要检查铁心对地的绝缘电阻，其阻值应不小于 100 M $\Omega$ 。
- 电机定子绕组应清洁干燥，且与母线解开；测量单相（支路）介质损耗时，其它两相（及其它支路）定子绕组接地，测温元件接机座；对于汇水管直接接地的水内冷发电机，应在吹干水回路后进行试验；对于汇水管不是直接接地的水内冷发电机，内冷水电导率应小于 0.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，试验时应将汇水管屏蔽端子接入屏蔽回路，以消除内冷水回路的影响。
- 由于整相（分支）绕组的介质损耗因数值与冷却气体类型、压力及绝缘温度密切相关，试验时应记录冷却气体类型、压力和定子绝缘温度及环境温度和湿度。水内冷电机还应记录内冷水的电导率。应使历次试验条件尽量接近，以便数据对比。
- 最高试验电压应为额定线电压  $U_N$ ，每隔 0.2 $U_N$  测定  $\tan\delta$  值，每个试验点稳定 1 min 后记录介质损耗因数值。

### 5.7.3.3 判断标准

本项判断标准适用于云母绝缘的定子绕组。定子绕组的介质损耗因数受环境、绕组防晕结构和固定结构等因素影响，有的大型机组不适合进行整机检测，所以整机介质损耗因数检测不作为电机必检项目。

检测时定子绕组在室温下逐级升压，测量各级电压下的  $\tan\delta$  值。整机介质损耗因数判断标准，如表 15 和表 16 所示（参见 DL/T 492）。

表15 大中型发电机定子绕组整机介质损耗因数

室温下测量		
$\tan\delta_{0.2U_N}$	$\Delta\tan\delta_{0.2U_N}$	$\tan\delta_{U_N}$
$\leq 3\%$	$\leq 4\%$	$\leq 6\%$
注 1: $\tan\delta_{0.2U_N}$ : 0.2 $U_N$ 时的 $\tan\delta$ 测定值; $\tan\delta_{U_N}$ : $U_N$ 时的 $\tan\delta$ 测定值; $\Delta\tan\delta_{0.2U_N}$ : 每相邻间隔 0.2 $U_N$ 时的 $\tan\delta$ 测定值之差。		
注 2: 整相（或分支）绕组的 $\tan\delta_{0.2U_N}$ 值达到 2.5% 时，应加强监视。		
注 3: 电晕严重的发电机（包括无防晕处理的发电机），整机介质损耗因数有时会超过表中规定值，鉴定时应注意不要和正常老化机组混淆。		
注 4: $U_N > 24 \text{ kV}$ 的机组，定子绕组介质损耗因数值由用户与制造厂协商确定。		

表16 交流高压电动机整机介质损耗因数

电压阶级	$\tan\delta_{0.2U_N}$ %	$\Delta\tan\delta_{0.2U_N}$ %	$\tan\delta_{U_N}$ %
$6\text{kV}\leq U_N < 10\text{kV}$	2	1	6
$10\text{kV}\leq U_N < 13\text{kV}$	2	1.5	6
$13\text{kV}\leq U_N$	2	2	6

注 1:  $\tan\delta_{0.2U_N}$ :  $0.2U_N$  时的  $\tan\delta$  测定值;  
 $\tan\delta_{U_N}$ :  $U_N$  时的  $\tan\delta$  测定值;  
 $\Delta\tan\delta_{0.2U_N}$ : 每相邻间隔  $0.2U_N$  时的  $\tan\delta$  测定值之差。  
 注 2: 本方法适用具有防晕结构的交流电机定子。测量在定子绕组加工完成后, 在室温下进行。

## 5.8 局部放电检测试验

### 5.8.1 适用性

局部放电是绕组绝缘内部气隙击穿、绕组端部沿面放电或绕组与定子铁心槽壁间气隙击穿等现象的反映, 局部放电是一种检测线棒或定子绕组绝缘老化状态的方法。通常规定对额定电压为 6 kV 以上的电机定子绕组进行局部放电的测量。

### 5.8.2 一般规定

局部放电发生在绝缘材料介质特性不均匀的部位, 如线棒绝缘层中间、导体与绝缘层间或绝缘层与防晕层间的气隙; 线棒低阻层和槽壁或槽底接触不紧密而存在的气隙。在这些部位, 局部电场强度可能集中。由于局部电场强度过高, 会导致该部位局部击穿。该局部击穿不会导致绝缘系统的完全崩溃。局部放电的发展一般需要一个空气孔隙, 例如绝缘内部的、临近导体的或者绝缘体分界面的气体孔隙中。

放电时传递的电荷量与不均匀介质的具体特性有密切关系, 如尺寸、击穿电压和相关材料的特有绝缘性质 (如表面性质、气体类型、气体压力等)。

高压电机定子绕组绝缘结构通常会有一些局部放电活动, 而无机云母成分对局部放电具有抵抗性, 因此在电机中出现严重的局部放电通常是绝缘缺陷的征兆, 但不是导致绝缘故障的直接原因, 例如制造质量问题或者运行后的绝缘劣化会导致局部放电加重。然而在特殊情况下, 电机中的局部放电也可能直接损害绝缘并导致绝缘老化。引发绝缘出现故障的时间可能与局部放电水平无关, 但与其他因素密切相关, 如运行温度、槽楔松动情况、污染程度等。

局部放电测量和分析能有效地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, 这些绝缘缺陷由运行中的热、电、环境和机械应力等因素引起的, 并可能导致绝缘故障。一般以最大局部放电量  $q_{\max}$  (pC) 来表征绝缘局部放电状态, 但是局部放电量大的定子绕组不一定比放电量小的使用寿命短, 原因是放电量只反映最大一个缺陷的放电电荷, 不能反映整体的绝缘情况, 局部放电量的大小还和绕组的具体结构有关。

### 5.8.3 检测方法

#### 5.8.3.1 测试装置要求

局部放电测量的试验回路的基本要求是为定子绕组局部放电的检测提供合适的条件, 试验回路是除定子绕组外其他部分无局部放电。试验回路主要包括: 符合 GB/T 16927.1 和 GB/T 16927.2 规定的高压

T/CSEE 0008—####

T/CEEIA 260—####

电源；电压测试装置；合适的局部放电耦合单元；阻抗与测试装置间的连接电缆，要求其具有足够低的阻尼特性和良好的屏蔽；局部放电测试系统；高压连接回路（参见 GB/T 7354 与 GB/T 20833.1）。

为了确保试验回路不影响定子绕组局部放电的测量，试验前，应先将测试系统（被试品未接入）的电压升至最大试验电压，此时检测到的局部放电量不应超过 1000 pC。

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，则在绕组和高压源之间引入阻抗或者滤波器，起到衰减来自高压电源干扰的作用，例如，来自试验变压器、高压导线或套管的局部放电，或者在测试系统的频带内或接近测试系统频带的试验电压高次谐波干扰。

整个测量回路应是低感布线，特别是接地回路，建议采用低感导线作为接地连接。

### 5.8.3.2 试验要求

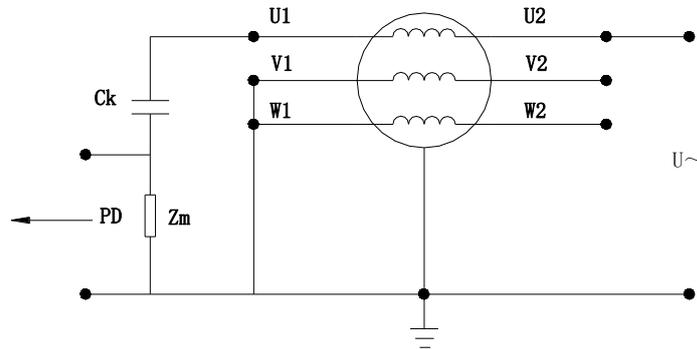
局部放电检测试验要求如下：

a) 定子绕组绝缘表面必须在清洁和干燥的条件下才能进行局部放电检测，避免绝缘表面污秽或受潮产生局部放电影响检测结果。试验时定子绕组温度应与环境温度一致。

b) 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试装置所选择连接图。

高压电源和局部放电耦合单元应分别连接至相反的绕组端，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，定子铁心应正常接地。

图 18 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；

$Z_m$ ——测量阻抗；

$C_k$ ——耦合电容；

PD——局部放电测试仪。

图18 完整绕组的测量回路

c) 定子绕组测量的局部放电量仅作参考，不作考核，可以作为同一台机组运行不同时间后定子绕组绝缘老化趋势的判断分析依据。

## 5.9 电晕检测试验

### 5.9.1 适用性

检验定子绕组防晕结构可靠性以及耐电晕的性能，避免机组运行时产生电晕。

## 5.9.2 一般规定

大中型电机预防电晕产生的措施有：槽内线棒表面涂刷或包绕一层低阻防晕层，端部线棒表面涂刷或包绕多段不同阻值的碳化硅防晕层。电晕试验主要检测绕组是否出现电晕问题，如定子绕组出槽口、端部绕组之间、绕组端部间隔垫块处及线棒与端箍之间等部位，这些部位会存在一些曲率半径非常小或局部电位差非常高的问题，在运行高电压下，这些部位电场分布不均匀，局部场强过高导致附近空气电离而引起局部放电，形成电晕现象。电晕现象本身的放电强度不高，仅在绝缘表面局部场强过高之处出现，对主绝缘影响是缓慢的过程。电晕放电产生的臭氧，其氧化性强，与氮化合成氧化氮，再与水蒸气反应生成硝酸附在线棒表面，长时间腐蚀表面绝缘层而出现白色粉末状物质，因此应避免电晕现象。测试电晕试验的接线方式与交流耐电压试验一致。定子绕组电晕检测方法--紫外成像仪检测法参见附录 C。

## 5.9.3 检测方法

### 5.9.3.1 测试装置要求

按 5.4.3.1 的要求。

### 5.9.3.2 试验要求

电晕检测试验要求如下：

- a) 观察方式及安全注意事项。电晕检测试验必须在暗室中进行，试验时由具有经验的两名以上的观察人员用肉眼观测，观察人员进入暗室应使视力在黑暗环境中适应不少于 5 min，方可进行观测，观测结果以两人以上人员确认为有效（参见 DL/T 298）。

如果对同一电机或其定子线棒需要观察两次，则间隔时间不少于 15 min，以使臭氧扩散，游离气体跑掉才能重新试验。为确保试验时人身和设备的安全，试验时应注意：暗室里应用绝缘木栅或接地铁栏将高压实验区和操作观察区隔开。观察者必须注意安全，进入暗室，必须穿好绝缘鞋，站在观察区内，并选好位置不得随意移动，所站位置与被试定子绕组之间要保持足够的安全距离，试验时必须精力集中，试验时手不得指向被试定子绕组。

- b) 试验前的准备工作

- 1) 确定定子绕组的相带位置，以便于确定电晕缺陷的位置和区域。
- 2) 工频加压设备满足将被检测的电机单相长时间加压要求，加压至表 17 所规定的测试电压，
- 3) 2 m 的绝缘棒，应符合 GB 26860 中关于绝缘安全工器具的规定。绝缘棒的把手处应有可靠的接地线。绝缘棒前端可固定有记号笔。用激光笔定位电晕点。
- 4) 检测时，应遮挡好电机端部，使端部亮度足够低，并有足够的空间保证暗室中观察人员与加压绕组之间有足够的操作距离。
- 5) 用记号笔标记线棒的槽号，能根据绕组的展开图确定线棒的相间位置。
- 6) 将定子绕组的所有测温元件、定子绕组的振动传感器等附加测量元件在引出端子箱处短接地。电机定子绕组应具备交流耐电压的试验条件。

- c) 观察起晕部位。定子绕组全部安装完毕，在绝缘电阻检测合格后进行电晕检测。观察起晕部位：端部防晕层及定子线棒出槽口位置，绕组与端部压板、压环、压指之间，端部支撑环、绑绳周围，绕组汇流排、出线与周围的支撑件之间，测量元件（热电阻、热电偶及其他检测设备）的引出电缆周围。
- d) 加压方式和测试电压。相关操作应符合 GB 26860 中关于高压试验的相关规定。当同一相有多个分支时，应将所有的分支并联同时加压，非加压相接地。也可以三相并联同时加压。

T/CSEE 0008—####

T/CEEIA 260—####

按照表 17 施加测试电压，在任一检测阶段升压过程中达到最高试验电压的 75%时，应以最高试验电压的 5%分段加压。加压过程中，一旦出现严重的放电现象时，应立即降低电压并停止检测。

在达到第一阶段的测试电压时，停留 1 min 观察绕组是否有电晕，如没有电晕现象，则继续升压到第二阶段的测试电压，停留 1 min 观察绕组是否有电晕。

试验观察完毕后，将电压均匀地降至试验电压的半值，然后迅速降到零，断开电源后将被试绕组对地放电。

由于被测电机个体间的差异和试验过程中所遇情况的不确定性，不宜对试验持续时间做统一规定。考虑一般试验持续时间远比耐电压试验时间更长，为确保试验人身和设备的安全，应有专门人员监视加压设备的状态，如发生过热、异味、异音、放电等异常，应及时降低电压并停止检测。

- f) 出现电晕现象后，应进行现场处理，如果电厂或检修单位无合适的处理方案，应由制造厂家制定处理方案。

### 5.9.3.3 判断标准

判断标准见表17。

表17 判断标准

电机冷却类型	测试电压	
	第一阶段	第二阶段
空气冷却	$1.05U_N/\sqrt{3}$	$1.05U_N$
氢气冷却	$U_N/\sqrt{3}$	$U_N$
判断标准	1) 无明显亮点和火花，无连续晕带，合格。 2) 有间断出现的金黄色亮点；或有明显的金黄色亮点、稳定的火花、紫蓝色晕光或连续晕带，不合格。	
注 1：当机组海拔超过 1 000 m 时，在制造厂进行电晕试验时，试验电压值应按照 JB/T 8439 修正；电厂进行电晕试验时，试验电压值按照表内的电压值进行。		
注 2：不适于电动机。		

## 5.10 匝间耐冲击电压试验

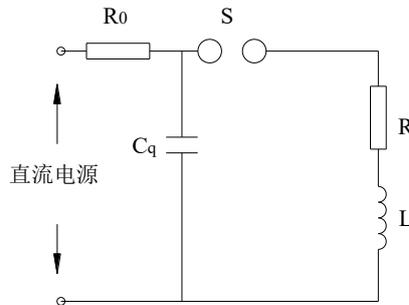
### 5.10.1 适用性

检验多匝定子线圈匝间绝缘耐受冲击电压水平，有效地检验出定子线圈中匝间绝缘缺陷。

### 5.10.2 一般规定

冲击试验具有全面检验匝间绝缘的作用，与主绝缘承受短时逐级耐电压试验一样，能灵敏有效地检验出定子线圈中多匝匝间绝缘缺陷。对被试线圈施加冲击电压的基本原理电路如图 19 所示。试验时电容  $C_q$  由直流电源充电，使充电电压达到一定值，放电球隙开始放电，电容与被试线圈 L 形成有一定频率的阻尼振荡电路，其振荡频率见式（8）、式（9）。当振荡电流衰减到零时，从直流电源提供的电流太小（因为  $R_0$  很大）不足以维持电弧，因此电弧熄灭，电弧熄灭后，电容  $C_q$  又开始充电，当充电电压达到球隙的击穿电压后球隙再次放电，而后电容  $C_q$  与被试线圈再次产生串联阻尼振荡，此过程不断重复直至电流电源被断开。

如果电机线圈存在匝间短路时,由于线圈之间互感的存在,短路匝中将产生感应电动势而引起环流,环流会在线圈中产生磁场,使整个电机线圈的总磁场减少,即电机的电感量减少,从而使整个振荡电路的频率发生变化。短路匝内的环流会引起线圈的损耗增加,从而使整个振荡电路的电压和电流的衰减速度加快,能量损耗加快。因此电机线圈有短路匝存在时,在冲击电压试验中将引起电压或电流的振荡频率和波形衰减速度的变化。



说明:

$L$  ——被试线圈的电感;

$C_q$  ——脉冲电容;

$S$  ——放电球隙;

$R$  ——被试线圈的电阻;

$R_0$  ——为限流电阻

图19 冲击电压基本原理电路

试验时可以在一相绕组上施加冲击电压(引线端接高压,中性点接地),或者在两相绕组上(中性点不在接线盒中连接)施加冲击电压。由于绕组自感,绕组间会有电位差,因此施加电压点与接地点电压不相同(匝间电压分布也同样如此)。示波器显示了脉冲电压施加在绕组上产生的振荡波形。绕组在这个频率下有最小的电阻( $R$ )以及电感( $L$ )、电容( $C$ ),振荡频率由式(8)(参见IEEE 522附件A)计算得出。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left( \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} \right)} \quad (8)$$

当式(8)中的第二项比第一项小,可以忽略不计,公式简化为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

冲击试验可以检测出匝间绝缘中的薄弱点,匝间绝缘薄弱点在试验时会发生击穿。试验时,如果谐振频率增加,绕组电感减小,由式(8)和式(9)得出的绕组匝间绝缘冲击试验电压的波形与完好匝间绝缘的冲击试验电压波形不符。

### 5.10.3 检测方法

#### 5.10.3.1 测试装置要求

能满足匝间冲击试验要求的设备。

T/CSEE 0008—####

T/CEEIA 260—####

### 5.10.3.2 试验要求

#### 5.10.3.2.1 概述

试验线圈应是成品线棒(6.3 kV 以上试验线圈应有防晕层),线圈直线部分应包绕导电带或金属箔,样品线圈的数量至少为 2 个。单个线圈和装在定子上的线圈在进行匝间试验时,其中一匝接高压,其余匝接地。

所有试样线圈均应承受随后的电气试验,如有失效,制造厂应查明原因。冲击试验中的失效可从示波器上所见的信号形状中查明。正常线圈和短路线圈的信号示例见 GB/T 22715 中的图 B.3。

#### 5.10.3.2.2 匝间绝缘耐冲击电压试验

在试样线圈的两端施加一个陡波前冲击电压以进行匝间绝缘冲击试验,见表 18 第 3 栏。

匝间试验电压是由电容阻尼振荡放电产生。开关操作数应至少 5 次。在 35 kV 及以下试验电压时,试验线圈端部的第一个电压峰值的波前时间应为  $0.2 \mu\text{s} \pm 0.1 \mu\text{s}$ ; 在试验电压在 35 kV 以上时,波前时间应为  $0.2^{+0.3}_{-0.1} \mu\text{s}$ 。在试验期间应检查最后一个冲击电压的波前时间是否一致。

试样线圈端部的电压峰值应为表 18 第 3 栏中给出的值或通过表 18 中注 4 中公式算出的值,  $U_p$  的容差为  $\pm 3\%$ 。

#### 5.10.3.2.3 主绝缘耐雷电冲击电压试验

在线圈端和接地端之间施加雷电冲击电压以进行主绝缘的冲击电压试验,见表 18 第 2 栏。

通过冲击发生器施加符合 IEC60060-1 中规定的试验电压,其波前时间为  $1.2 (1 \pm 30\%) \mu\text{s}$  和半峰值时间为  $50 (1 \pm 20\%) \mu\text{s}$ 。冲击次数至少 5 次且极性相同。

线圈端与对地之间的电压峰值应为表 18 第 2 栏中给出值的 100%, 或者为表 18 中注 2 给出公式计算出值的 100%,  $U_p$  的容差为  $\pm 3\%$ 。

#### 5.10.3.2.4 工频耐电压试验

工频耐电压试验可替代耐雷电冲击电压试验。在这种情况下,在线圈和地之间施加  $(2U_N+1 \text{ kV})$  的电压,持续 1 min, 然后以至少 1 kV/s 速率增加电压到  $2(2U_N+1 \text{ kV})$ , 立刻以至少 1 kV/s 的速率将电压降低至零值。整个过程不发生电压击穿,这时主绝缘和端部防晕相对应的耐冲击电压水平至少满足表 18 第 2 栏的要求。

注 1: 由于电机的冲击水平取决于匝间的纵向电压分布(见 GB/T 22715 中的附录 A.1), 表 18 中第 2 栏、第 3 栏列出的额定冲击水平规定值要比本试验取的峰值电压值  $2\sqrt{2} (2U_N+1 \text{ kV})$  低。取较高的交流电压试验水平的目的是在槽部出口区域产生一个尽可能接近于冲击试验的电压梯度。

注 2: 若制造商与用户之间达成协议, 本文件容许采用直流试验电压取代上面规定的工频电压。推荐按照 IEC 60034-1 中表 16 的规定, 推荐直流电压应至少高达 1 min 工频试验电压的 1.7 倍。

表 18 交流电机成型线圈试样的耐冲击电压水平

额定电压	额定耐雷电冲击电压 (峰值) (见注 1、注 2)	额定耐陡波前冲击电压 (峰值) (见注 3、注 4)
$U_N/\text{kV}$	$U_P/\text{kV}$	$U_P/\text{kV}$
3	17	11
3.15 <sup>a</sup>	17.6	11.4

额定电压	额定耐雷电冲击电压（峰值） （见注 1、注 2）	额定耐陡波前冲击电压（峰值） （见注 3、注 4）
3.3	18	12
4	21	14
6	29	19
6.3 <sup>a</sup>	30.2	19.6
6.6	31	20
10	45	29
10.5 <sup>a</sup>	47	30.6
11	49	32
13.2	58	38
13.8	60	39
15	65	42

注 1：第 2 栏的水平是根据 GB/T 16927.1 规定的标准雷电冲击波确定的，其波前时间为 1.2（1±30%）μs，半峰值时间为 50（1±20%）μs，冲击电压峰值为  $U_p \pm 3\%$ 。

注 2：第 2 栏的水平是用下式求得的：  
 $U_p = 4U_N + 5$  kV

注 3：第 3 栏的水平是根据 35 kV 及以下时波前时间为 0.2 μs±0.1 μs 及 35 kV 以上时波前时间为  $0.2 \pm 0.1$  的冲击确定的。

注 4：第 3 栏的水平是用下式求得的：  
 $U_p' = 0.65U_p$

注 5：第 3 栏的水平适合于与运行中断路器操作有关的应力，但不适合于特殊的运行情况（例如断续启动或直接与架空线连接）。这类情况下，电机绕组设计成能耐受其他冲击水平或者是以适当方式加入防护。

<sup>a</sup> 按我国实际情况增加。

### 5.10.3.3 检查试验

#### 5.10.3.3.1 线圈

检查试验应在线圈嵌入定子铁心之后，加工处理接线之前进行。在这种情况下，绝缘不具有完整工艺后线圈的耐电气能力，通常冲击试验（表18第3栏）按减小电压进行。作为指导，应使用陡波前冲击试验，试验水平通常为表18中第3栏电压的40%~80%，精确的试验水平依赖于所采用的绝缘技术。

#### 5.10.3.3.2 完整定子

由于难以探测匝间失效，不推荐进行完整绕组的匝间冲击试验。

## 附录 A

(资料性)

## 绕组绝缘性能试验项目及其效果、优点及缺点

绕组绝缘性能试验项目及其效果、优点及缺点，见表A.1。本表引用了2015年国际大电网会议（CIGRE）工作组A1.17编制的《GUIDE OF METHODS OF DETERMINING THE CONDITION OF STATOR WINDING INSULATION AND THEIR EFFECTIVENESS IN LARGE MOTORS》部分内容。

表A.1 定子绕组绝缘性能试验项目及其效果、优点、缺点

试验项目	目的	效果	优点	缺点
绝缘电阻 (1 min)	检测严重缺陷，表面受潮或脏污。确定绕组进行下序高压试验前的状态	中等	技能要求不高，设备不昂贵	绕组温度对试验结果影响较大，没有有效的温度修正，对环氧云母绝缘效果有限
极化指数 (PI) (10 min)	检测严重缺陷，表面受潮或脏污。确定绕组进行下序高压试验前的状态	有效	技能要求不高，设备不昂贵。温度对测试数据无影响	如果 1 min 绝缘电阻远大于 5 GΩ，测试 PI 无意义
直流耐电压 试验	检测绕组局部缺陷，仅能发现局部裂纹和贯通性击穿等严重缺陷	中等	技能要求不高，设备不昂贵。对于端部缺陷，比交流耐电压试验要灵敏。	试验可以导致绝缘击穿
交流耐电压 试验	检测绕组局部弱点，如裂纹、局部裂纹和击穿等缺陷	比直流耐电压试验更有效	比直流耐电压试验能更好检测槽内缺陷	设备尺寸大且昂贵，具有累积效应，每次试验都会略微使绝缘老化
槽电位/槽内接触电阻	检验定子绕组槽部与铁心槽壁之间的接触紧密度	有效	技能要求不高，能可靠保证绕组槽部与铁心槽壁之间接触良好	需要拆除槽楔。槽电位检测时安全防护要求高
局部手包绝缘 直流电压试验	对水内冷定子绕组绝缘部件之间过渡绝缘（也称为鼻部绝缘或并头绝缘）的质量检验或故障排查	有效	能可靠保证手包绝缘质量。能发现空芯铜线焊接不良、断裂渗水等缺陷	必须在检测部位表面包裹好导电的金属箔或导电布；保证足够的对地距离
介质损耗因数 试验	检测主绝缘热老化、表面受潮及局部脏污等缺陷	中等	能提供关于槽部半导体涂层接触状态的信息	对环氧云母绝缘由于热老化或者负荷循环导致的绝缘劣化，检测效果有限
介损增量	检测绕组整体局部放电，主要是热老化和负荷循环导致的局部放电	中等	很好的检测方法。通过介损增量的趋势分析，能很好地反映绝缘老化趋势	不但受防晕层损耗影响，还受有严重局放活动的背景噪音影响。另外，在测试过程中部分质量良好的绕组绝缘掩盖了局部缺陷，因此无法检测局部缺陷
离线局部放电	检测局部放电	部分有效	能检测出接近中心点区域的局放活动（机械性缺陷）。没有外部影响	用无局放交流电源加压。测试过程中绕组的状态与绕组实际运行状态差别较大，绕组没有承受热应力和电磁应力

表 A.1 (续)

试验项目	目的	效果	优点	缺点
暗室电晕试验	检测定子绕组端部表面局放活动	有效	识别防晕材料及结构缺陷、反映绕组端部脏污、绕组之间和连接线之间的小间隙缺陷	在暗室中靠近高压绕组，需要注意安全。试验时存在相间电压，部分绕组比实际运行时承受更大的应力
匝间冲击电压试验	在多匝线圈绕组中检测匝间绝缘缺陷	低	没有其它离线测试方法能检测匝间绝缘弱点	不能检测匝间绝缘老化或者较小的缺陷。对于匝数较多的绕组效果较差。需有经验的工程师解释检测结果

附录 B  
(资料性)  
槽电位测试原理分析

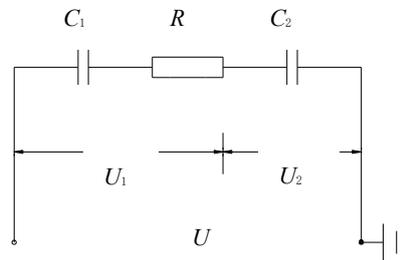
B.1 槽内的线棒与铁心之间有间隙的等效电路原理图见图 B.1，根据图 8 我们可以得知（其中  $Z$  是总阻抗）：

$$Z = R + (1 / j\omega C_1) + (1 / j\omega C_2) \quad (\text{B.1})$$

由于  $R \ll (1 / j\omega C_1 + 1 / j\omega C_2)$ ，可得下面公式：

$$Z \approx (1 / j\omega C_1) + (1 / j\omega C_2) = (C_1 + C_2) / (j\omega C_1 C_2) \quad (\text{B.2})$$

$$U_2 = (U / Z) \times (1 / j\omega C_2) = U / (1 + C_2 / C_1) \quad (\text{B.3})$$



说明：

$C_1$ ——线棒绝缘层等效电容；

$R$ ——线棒绝缘层与半导体槽衬或垫条的等效电阻；

$C_2$ ——间隙等效电容；

$U_1$ ——施加在线棒绝缘层及半导体槽衬或垫条上的电压；

$U_2$ ——线棒表面电压。

图 B.1 槽内有间隙的线棒与铁心之间的等效电路原理图

B.2 由上可知，定子线棒表面的电压  $U_2$  与  $(C_2/C_1)$  的比值成反比。而定子线棒绝缘层的等效电容  $C_1$  可以通过定子线棒交流耐电压时求出，可以认为  $C_1$  是常数。因此定子线棒表面的电压  $U_2$  与  $C_2$  成反比。

B.3 根据公式  $C = \epsilon S / d$  可知（ $\epsilon$  为电极间介质的介电常数， $S$  为电极面积， $d$  为电极间距），当半导体垫条与铁心之间的间隙越小（ $d$  减小），间隙形成的电容  $C_2$  越大， $U_2$  就越低。可见线棒与铁心之间的间隙越小，线棒表面与铁心会形成等电位，而有较低的槽电位。

## 附录 C

(资料性)

### 定子绕组电晕检测方法—紫外成像仪检测法

在高压设备在电晕和其他型式的放电过程中，空气中的电子不断获得和释放能量，而当电子释放能量(即放电)，便会放出紫外线。紫外成像仪是对接收到的电晕放电所产生的紫外波段的光线进行成像。为便于对电晕放电点的目视定位，紫外成像仪附加一路可见光通道，通过图像叠加的方式，将电晕放电图像叠加至可见光图像上，经图像处理模块进行的两路视频叠加、光子计数等运算处理，完成图像的显示、存储和输出。

日盲紫外成像仪在应用滤光片技术时，只接收 240 nm~280 nm 波段的紫外线进行成像(非日盲普通紫外成像仪工作波段为 285 nm~400 nm)，这个比较窄的波长范围内产生的影像信号也比较微弱(因为电晕信号只包括很少的光子)，因此图像处理系统的影像放大器将微弱的影像信号变成可视的影像。由于该波段避开了阳光的干扰，仪器可以直接在强太阳光下正常操作，实现了白天户外检测，更加适合于现场应用，用户也更广泛。因没有太阳光辐射的影响，可以得到高清晰的图像。紫外影像经处理后与可见光影像重叠，显示在仪器的屏幕上，达到确定电晕的位置和强度的目的，从而为进一步评估设备的运行情况提供更可靠的依据。紫外成像仪工作原理示意图 C.1，叠加模式图像显示见图 C.2。

在机组检修过程中，可以使用固定的紫外成像仪进行数据积累，便于进行历史数据跟踪比较；在科研试验中，适合单根或单层线棒防晕定位检测。

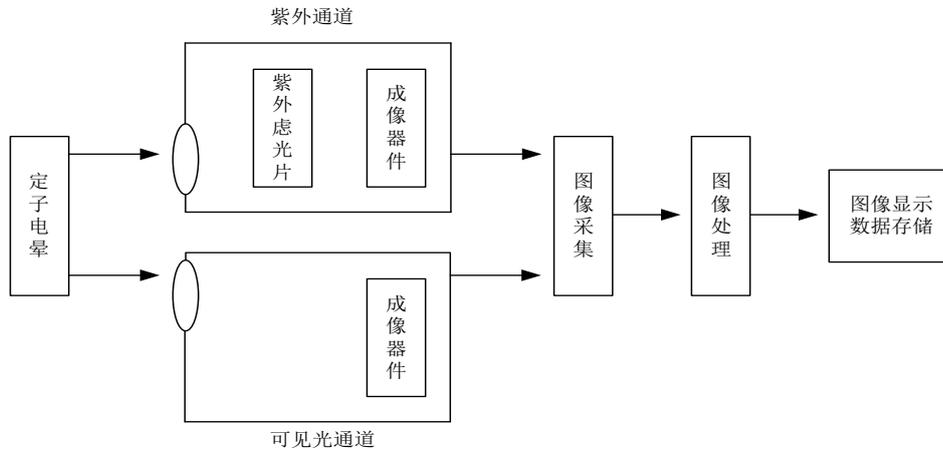


图 C.1 紫外成像仪工作原理示意图



图 C.2 叠加模式图像显示

## 附录 D

(资料性)

### 定子线圈及绕组绝缘老化状态的介电响应检测法

#### D.1 概述

近年来,介电响应测试技术因其具有非破坏性、高精度、高抗干扰能力等优点,逐渐发展成为一种重要的绝缘老化状态表征手段。介电响应法分为时域和频域两大类,频域即为频域介电谱(Frequency Domain Spectroscopy, FDS)法,时域包含极化去极化电流(Polarization and Depolarization Current, PDC)法、热刺激去极化电流(Thermally Stimulated Depolarization Current, TSDC)法等,这些测试方法均对绝缘试样没有损伤,在绝缘老化状态评估方面应用广泛。其中, FDS 测试的优势是在中高频段具有较高的抗干扰能力及测试效率,非常适合于真机线棒的现场测试; PDC 测试的优势是可以直观的以阻容串联电路表征绝缘的弛豫过程,具有较为明确的物理意义,同时还能通过经验公式换算为频域介电谱的超低频曲线,大大降低超低频 FDS 测试的时间; TSDC 测试的优势是可以对绝缘材料进行微观极化机理分析,并表征老化对材料内部微观极化过程的影响,适合于环氧云母绝缘片状试样的实验室测试,此方法需要从定子线棒上截取小试样进行检测,本文不介绍此部分内容。

在电老化过程中环氧云母绝缘内部胶黏剂的大分子链会在长时间机械振动、高温或陷阱电荷的反复入陷和脱陷、高速带电粒子轰击等影响下发生断裂,形成很多极性端基加剧偶极子转向极化,同时起粘接作用的化学键断裂会导致绝缘材料内部介质分界面增多并加剧界面极化,在这些老化过程的作用下环氧云母绝缘的各介电响应特征参量会随着老化时间发生不同程度的变化。采用不同的介电响应测试技术分别从频域及时域两个角度深入分析环氧云母绝缘介电响应特征参量随老化时间的变化规律,有助于更为全面的了解绝缘老化对其介电响应特性的影响。同时,对环氧云母绝缘介电响应特征参量随老化时间的变化规律进行量化表征并通过数学处理提取综合性特征参数,就可以达到对环氧云母绝缘的老化状态进行综合性评估的目的。

#### D.2 FDS 检测方法

按照图 D.1 所示连接好测试线路,单相(或单支路)测量时,其他两相(或其他支路)定子绕组接地。开始测量时,对测试的定子绕组施加不低于 10 V 的电压,频率范围为 1 mHz~1 000Hz。获取的测试数据为介质损耗因数、电容值、电导率等。

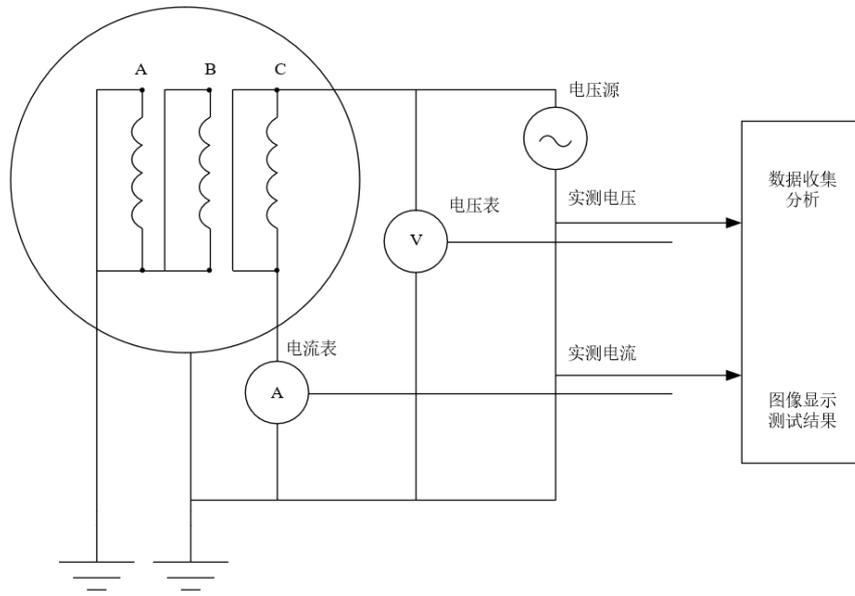


图 D.1 FDS 测试线路示意图

### D.3 PDC 检测方法

PDC 测试线路如图 D.2 所示，单相（或单支路）测量时，其他两相（或其他支路）定子绕组接地。测试前将测试的定子绕组进行短路放电以释放试样上的残余电荷。开始测量时，开关 S1 断开，S2 闭合，测试仪器对定子绕组施加直流电压进行充电，即极化过程，记录极化电流值；极化过程达到要求的时间后，断开开关 S2，闭合 S1，试样开始放电，即去极化过程，记录去极化电流，去极化过程达到要求的时间后，PDC 测试结束。

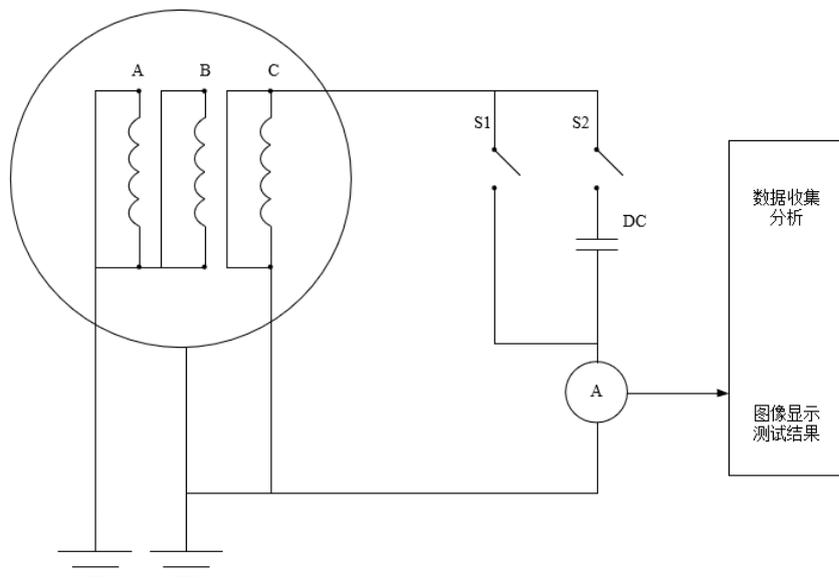


图 D.2 PDC 测试线路示意图