

1 kV以上高压绝缘电阻诊断 测试指导

Megger 梅凯™



为什么要使用10 kV绝缘测试仪？

Megger公司在20世纪初发明了绝缘测试，至今仍是创新和技术进步的领导者。那么为什么我们会在其他竞争对手都只有5 kV型号的时候研发了10 kV型号呢？那是因为IEEE标准，我们的10 kV仪器能够按照更新的IEEE标准的要求进行测试。所以在2001年Megger就有了10 kV绝缘电阻测试仪。

2000年3月，IEEE-SA委员会批准了IEEE Std 43-1974标准《IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery》的重修版，即Std 43-2000。重新修订的标准强调了把当前测试标准升级的重要性，以适应绝缘材料的改进和进步，并强调了高压对发现潜在缺陷的价值。

以下是该标准的简单总结：

- 绕组额定电压大于12 kV的设备推荐使用10 kV测试电压
- 推荐绝缘测试应包含绝缘电阻和极化指数
- 测试结果与历史数据比较以发现是否发生变化
- 如果没有历史数据，可基于设备类型与电阻和极化指数这两个参数的标准推荐值进行比较
- 根据设备的等级不同，绝缘测试结果的一个参数或两个参数必须大于最小的标准推荐值
- 如果读数小于最小的标准推荐值，那么不推荐对绕组进行耐压测试或运行设备

IEEE Std 43-2000标准包含了对750 W以上的同步电机、感应电机、直流电机、同步调相机的电枢和绕组的测试步骤。还包含了不同电压等级设备的测试电压推荐值和电机绕组的最小绝缘电阻推荐值。

若要获取IEEE标准的更多信息，请参阅本手册第22页。

为什么使用15 kV绝缘测试仪？

现在需要15 kV绝缘测试仪是因为工程师在高压设备上要进行早期的劣化检测和更好的故障检测。南美洲的许多电力公司已将15 kV测试纳入其程序中，这一趋势现已扩展到欧洲，中东和亚洲。在US NETA标准中规定了15 kV的测试电压。NETA Pearl修复标准/NETA MTS-1997规定了对最高额定电压为35 kV及以上的设备进行15 kV测试。在铭牌上使用34,500 V或以上的NETA ATS 2007测试的电机也需要在15 kV下进行测试。

简介	4	斜坡电压测试	16
什么是绝缘?	4	电介质放电测试	18
导致绝缘失效的原因是什么?	4	不同的问题/不同的测试方法	19
电场应力	4	附录	20
机械应力	4	潜在误差来源/确保质量检测结果	20
化学腐蚀	4	测试线	20
热应力	5	测量超过100 GΩ的电阻	20
环境污染	5	精度说明	20
预防性维护的作用	5	输出给定的电压	20
新技术的优势	5	干扰抑制	20
如何测试绝缘电阻	6	测试和比较法则	20
绝缘电阻测试仪如何运行	6	CAT安全等级	21
测试电流包含的分量	6	CAT安全等级标准	21
电容性充电电流	6	CAT安全等级的重要性	22
吸收电流或极化电流	6	CAT安全等级的一些统计数值	22
表面泄漏电流	6	在高海拔地区进行测试	22
电导性电流	6	旋转电机的绝缘电阻测试	22
绝缘测试仪接线	7	温度的影响	23
不同设备的绝缘测试接线	7	湿度的影响	24
带屏蔽层的电力电缆	7	防水防尘	24
断路器/套管	7	高压测试	25
电力变压器	7	电流 (nA) 读数 vs. 电阻 (MΩ) 读数	25
交流发电机	8	燃弧能力	25
绝缘电阻测试仪结果显示	8	电气设备干燥	26
电压特性	9	放电测试	26
屏蔽 (Guard) 终端	10	大型设备的充电时间	27
介绍	10	电机驱动的绝缘测试仪	27
屏蔽终端工作原理	10	测试引线设计	27
屏蔽终端性能	11	重要的安全性能增强	27
比较结果	11	安全操作应考虑的事项	28
将屏蔽终端作为诊断性工具	12	安全警示	28
屏蔽终端保护	12	仪器箱设计	28
结语	12	阻燃安全	28
结果的分析和评估	13	Megger绝缘电阻测试仪	29
无穷大读数的分析	13	MIT515, MIT525, MIT1025, MIT1525	29
诊断性高压绝缘测试	13	S1-568, S1-1068, S1-1568	29
单值绝缘电阻测试	13	MJ15和BM15	30
电阻的时间曲线	14	测试引线	30
极化指数测试	15		
步进升压测试	16		

简介

设备运行过程中，电气绝缘会在各种应力的作用下，随着时间的推移而发生老化。绝缘材料的设计目标是使其在运行过程中长时间地承受这些应力，时长通常可达几十年。

然而，异常的应力会加快绝缘的老化进程，从而显著降低其寿命。因此，对绝缘进行定期的测试以评估这种加速的老化是否正在发生是非常重要的。如果能确定这种老化是否可逆那就更好。

进行绝缘诊断测试的目的是：

- 发现加速的老化
- 找出老化加速的原因
- 找出解决问题的办法

最简单的一种诊断测试方法是所谓的「单点测试」。大部分专业测试人员都进行过这种测试，即对设备加压，然后得到电阻值。这种测试通常只能判断绝缘的「好」与「坏」，但是对测试之后如何进一步处理通常比较棘手。这就好比是一个病人咳嗽了去看医生，医生诊断为：「你的病很严重」，这对病人来说是远远不能满意的。病人更加希望医生对其进行进一步的检查，找到咳嗽的原因并给出治疗方案。

只进行「单点」绝缘测试就等同于医生只告诉病人他是健康的还是病了，有用信息太少。这种测试通常只应用于低压设备，这种设备的故障所导致的损失较小，更换也比较简单和廉价。由于设备的电压等级比较低，因此通常只需要500 V或1000 V的测试电压，所有电气维护工作者对此比较熟悉。

如果医生讲此次的检查结果与以前的结果进行比较，就可以得到事情的发展趋势，然后就可以开出药方。同样地，如果绝缘电阻读数与以前的结果进行对比，可能就能够得到绝缘状态的变化趋势，为下一步的决策提供依据。

许多测试人员对1 kV以上的诊断性绝缘测试可能就没那么熟悉了。因此这本手册的目的是：

- 让读者了解如何进行诊断性绝缘电阻测试
- 提供诊断性绝缘电阻测试结果的判断依据
- 介绍高压和多电压测试的优势

手册后面的多个附录为读者提供了更多与诊断性绝缘电阻测试相关的信息。

这本手册的内容是在“A Stitch in Time - The Complete Guide to Electrical Insulation Testing”的基础上修订完成的，上文的作者是Biddle公司的James G.，发表于1966年。

什么是绝缘？

马达、发电机、电缆、开关、变压器等电气设备中的每一根导线表面都会覆盖一层绝缘材料。导线本身是一种良好的导电材料（通常是铜或铝），而绝缘必须阻止电流的流动，从而将电流限制在规定的区域内。了解以下的欧姆定律公式，是理解绝缘的关键。

即 $E = I \times R$

E = 电压，单位V

I = 电流，单位是A

R = 电阻，单位是 Ω

给定一个电阻值，电压越大，电流也越大。也就是说，当电压恒定时，电阻越小，电流就越大。

理想的绝缘（电阻无穷大）是不存在的，因此总会有一小部分电流在绝缘材料中流过，或经过绝缘材料流入大地。这个电流与实际中的负载电流相比可能是微不足道的，但是它却是绝缘测试的基础。

什么是「好的」绝缘？「好」是指「保持大电阻的能力」。通过测试电阻值可以了解绝缘是否状态良好。

导致绝缘失效的原因是什么？

导致绝缘失效的基本原因有以下五种。这些原因互相交织在一起，使绝缘的性能发生螺旋式的下降。

电场应力

绝缘材料在设计时是存在适用范围的，过高或过低的电压都会导致应力异常，造成绝缘的开裂或脱层。

机械应力

挖掘时将电缆挖断是一种非常明显机械系损坏，但机械应力也可以是由其他情况造成的，如电机的三相不平衡或频繁的启停，造成的震动可能会逐渐造成绝缘中产生缺陷。

化学腐蚀

不仅腐蚀性物质会对绝缘材料造成损害，灰尘和油也可能会降低绝缘特性。

热应力

电机运行时过高或过低的温度会造成绝缘的过度膨胀或收缩，从而导致开裂和故障。除非经过特殊设计，在电机启停时也会带来热应力的增加，从而加速绝缘老化。

环境污染

环境污染包含了一系列不同的情况，如设备运行过程中带入的水汽、闷热空气中的湿气，甚至是啮齿动物的啃噬。

当设备投运后，绝缘的老化就开始了。只有在外部条件与设计工况一致时绝缘才能够稳定运行多年。异常的运行情况如果没有及时发现，就会加速绝缘的老化，并最终导致击穿。当绝缘无法将电流保持在规定的区域内时，包括电流流经绝缘的外表面或内表面、电流穿透绝缘本体等，就认为绝缘已经失效了。

类似于绝缘内部形成小孔或裂缝，水汽或外部物质穿透表层等情况会在外加电压作用下发生电离，在表面形成低电阻回路，与干燥、未受污染的绝缘相比，表面泄漏电流显著增大。对绝缘进行清洁和烘干可改善这种情况。

其它的绝缘天敌就不那么好对付了。总的来说，一旦绝缘开始失效，各种因素的叠加作用都会使其进一步加速。

预防性维护的作用

虽然有时绝缘电阻会突然下降，如设备浸水，但通常情况下绝缘电阻是逐渐下降的，只要定期测试，就可发现征兆。通过这些常规的检查，可在故障发生前提前采取修复措施。

如果没有周期性的维护措施，故障就会突然到来。由于毫无准备措施，意外停电会带来很大的不便，占用大量的时间和经济资源。例如，如果流水线工厂有一台抽取液态材料的电机停止工作，液体材料就会凝固。这台电机的意外故障，加之由其导致的工厂停工，造成的损失是巨大的。如果在日常的维护计划中加入了诊断性绝缘测试项目，就可在空余时段对电机进行进一步维护或更换，从而将损失降到最低。实际上，在电机运行时对其进行修复也是可能的。

如果绝缘的严重失效没有被及时发现，发生触电甚至死亡的概率、由绝缘击穿引起火灾的概率会显著增加，电气设备的使用寿命会缩短，甚至造成意外的停电。因此，对绝缘状态进行定期评估是设备维护计划的重要组成部分，它有助于预防和防止电气设备的故障。

当进入存量时代，随着电网中电气设备的逐渐老化，这种维护计划是非常适时的。一些设备正在逐渐达到其预期寿命，而另一些已经超过了服役年限，但是依然在正常地运行。

由于通常情况下只对关键设备进行诊断性测试（有时也不尽然），测试电压最好选择5 kV或10 kV，因为较高的测试电压更有助于发现一些中压设备如电机、电缆及变压器等的缺陷。

新技术的优势

绝缘测试仪的发明可追溯到20世纪初，Sidney Evershed和Ernest Vignoles发明了第一台绝缘测试仪（于1903年成为Megger®公司的产品系列）。

早期的仪器是需要手摇的，这种方式限制了一些测试时间较长的项目，并造成了测试电压的不稳定（稳定的电压需要保持摇动的速率）。之后出现了带外部驱动电机的仪器，这种仪器可进行长时间的测试，但电压的稳定性并没有得到改善。而且这些仪器的量程一般不超过1000 MΩ。模拟的指针运动缓慢，还会隐藏正在发生的暂态事件。

电子元器件的出现和电池技术的进步使绝缘测试仪的设计发生了革命性的变化。现代的绝缘测试仪可由外部电源或电池供电，在各种情况下都可以提供稳定的电压。它们还可以测量到非常微小的电流，将量程拓展了一千倍，达到了TΩ级。有些仪器甚至取代了铅笔、纸张和计时器，因为它们可将结果储存到内部存储器，在测试完成后进行下载分析。这种进步的主要原因是绝缘制造厂商的努力工作，使当前的绝缘材料电阻值远远大于20世纪初的绝缘材料。

更新的技术使仪器的性能得到了提高，从而使人们能从标准化的测试中得到更多信息，并且诞生了一些新的方法。现代化的仪器能在电阻量程范围内提供稳定的电压，基于微处理器的传感器灵敏度大大增加，将量程扩展到了TΩ级。电压稳定性和精度的提高使仪器可以测量到流过全新的、重要的电力设备绝缘的微小电流，相应地，依赖于精密测试技术的新方法也能够简单地实现。

现在的绝缘测试仪不仅能够判断设备绝缘「好」与「坏」，还能够定位设备所处老化曲线的位置。使测试人员高兴的「无穷大」对于诊断人员来说依然「是空白」。一些仪器将诊断性测试编入了程序，在测试过程中可以自动运行，从而在「空白」中填入宝贵的分析数据。

如何测试绝缘电阻

绝缘电阻测试仪如何运行

Megger®公司的绝缘电阻测试仪是一款便携式的仪器，能够直接给出电阻的读数，单位包括 Ω 、 $M\Omega$ 、 $G\Omega$ 和 $T\Omega$ （取决于具体型号），与测试电压无关。较好的绝缘电阻值一般在 $M\Omega$ 级别或更高。实际上，兆欧表就是一种带直流发生器的大电阻测量装置。

仪器的电压发生器可通过手摇、外部电源或电池发生高压直流电压，从而在被测绝缘中产生微小的电流。欧姆计测量到电流后，能够以数字或模拟的方式将其显示在屏幕上。

测试电流包含的分量

理论上，如果在一片绝缘材料的两端施加测试电压并测试流过的电流，通过欧姆定律可计算出绝缘的电阻（ $R=E/I$ ）。实际测试到的电流包含多个分量，从而使情况变得更为复杂。

电容性充电电流

电容在充电时产生的电流应该还是比较易于理解的。这个电流初始值较大，随时间呈指数衰减，随着试品充电的完成衰减至零。绝缘材料的充电过程与电容中的电介质的充电过程是一样的。

吸收电流或极化电流

吸收电流包含不超过三种不同的电流分量，这些分量会以一定的速率衰减到接近于零的值，衰减时间一般为数分钟。

第一个电流分量是由绝缘材料分子中的电子在电场作用下发生漂移而形成的。

第二个电流分量是由分子在电场作用下发生扰动而形成的。原子核周围的电子云向电源正极偏移。

第三个电流分量是由电偶极子向电场方向偏转而形成的。未施加电场时分子的电偶极子指向是随机的，受到电场作用后，带极性的电偶极子就会快速或较快地发生偏转，逐渐与电场方向一致。

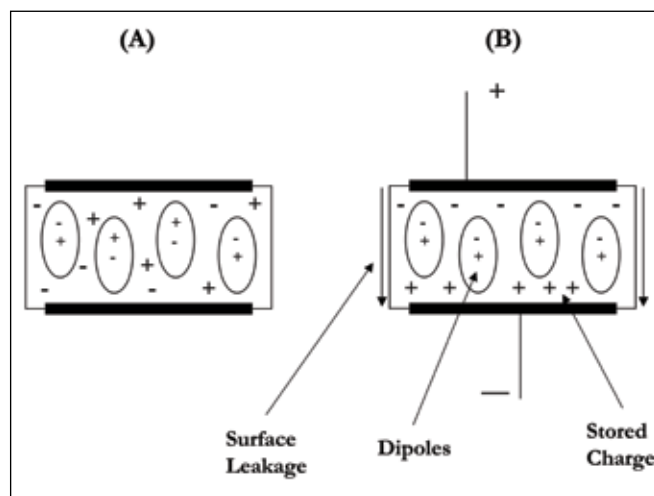


图1：带极性的分子在外加电场作用下发生偏转

这三个电流分量的和通常被视作吸收电流分量，这个分量主要受绝缘中连接性物质的类型和状态的影响。虽然吸收电流会逐渐衰减至接近于零的位置，但是衰减过程耗时比电容性电流要长得多。

绝缘材料受潮后，极化过程会加快，原因是水分是一种极性较强的物质，从而使绝缘的极性也更加显著。绝缘聚合度降低也会导致吸收电流的增加。

并不是所有绝缘材料都会包含这三种电流分量，例如聚乙烯等材料的极化电流分量几乎为零。

表面泄漏电流

如果绝缘表面受潮或被污染，就会出现表面泄漏电流。表面泄漏电流是恒定的，幅值与污染程度有关，也会受温度的影响。这个分量通常被归入下文所描述的电导性电流而被忽略。

电导性电流

绝缘中流过的电导性电流分量是一种恒定的电流，其模型是与电容并联的一个很大的电阻。它是泄漏电流分量之一，当绝缘充电完成、完全极化后就可被测量到。注意，这个分量通常会包含表面泄露电流分量，通过引入屏蔽电极可将表面泄露分量消除。

图2所示为绝缘测试电流中各个分量随时间的变化曲线示意图。

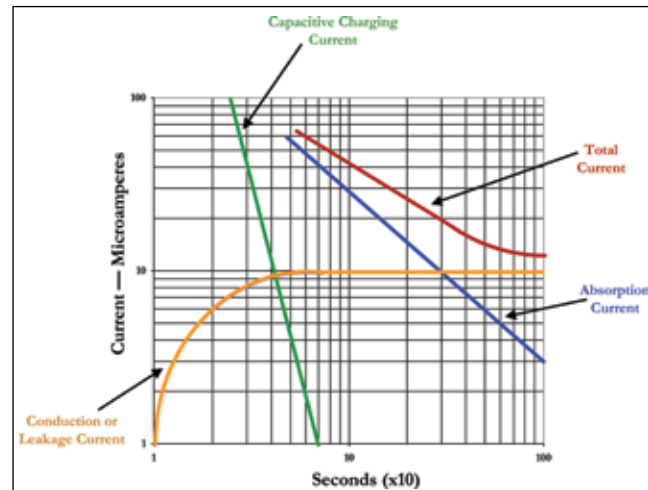


图2：绝缘测试电流分量

总的绝缘测试电流是这四个分量之和（泄漏电流被视作一个分量）。绝缘电流可通过微安计进行测量，Megger公司的缘电阻测试仪将其显示为在某个特定电压下的电阻值，单位是兆欧。有些绝缘电阻测试仪也会显示测量电流值或电阻值。

由于电流会随时间发生变化，因此只有施加电压的时间达到无穷大以后，才能够使用欧姆定律得到恒定的电阻值。电流的幅值与绝缘初始状态下的电荷存储情况也有很大的关系，因此在进行绝缘电阻测试前，需要使试品完全放电。

请注意：试品充电过程中电容性电流分量的衰减相对较快。电容量较大的试品充电过程可能会较慢。试品存储的电荷是一种能量，为了安全起见，测试后需要将试品存储的电荷完全释放。幸运的是，放电过程相对较快。测试中，取决于绝缘状态，吸收电流分量的衰减较慢。同样地，测试完成后也需要对试品进行放电。然而若要使吸收电流降到很小需要较长的时间。

绝缘测试仪接线

当前的绝缘材料电阻读数和电压极性关系很小，而一些较老的材料当电压正极施加到接地的那一侧时读数会降低，这种现象被称为电内渗。在测试外屏蔽未接地的电缆时，通常将正极连接到电缆的外屏蔽层，因为这个屏蔽层通过泥土接地，如图3所示。请注意测试时不可将测试线直接连接在绝缘上，而应该连接到电缆的中性点或接地屏蔽层。

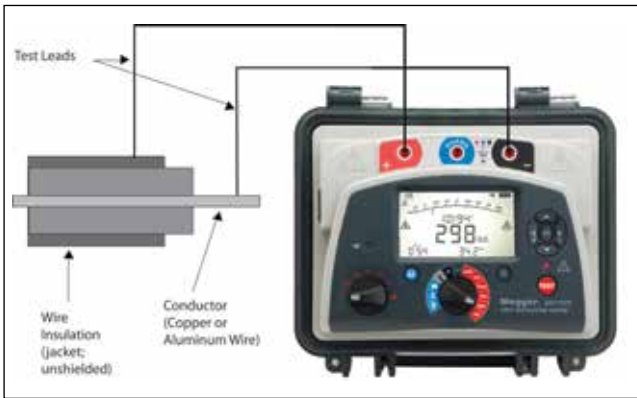


图3：电缆测试接线示意图

不同设备的绝缘测试接线

带屏蔽层的电力电缆

测试某一相导线的对地绝缘电阻。

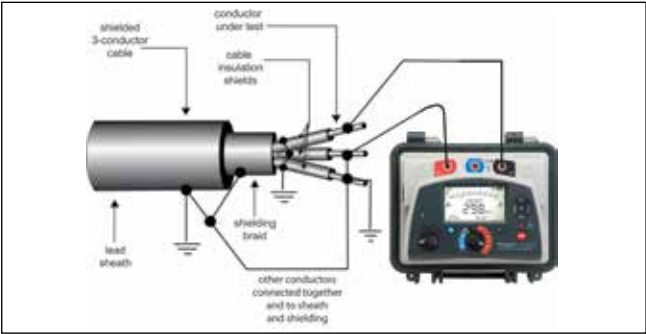


图4：带屏蔽层的电缆绝缘测试接线图。

断路器/套管

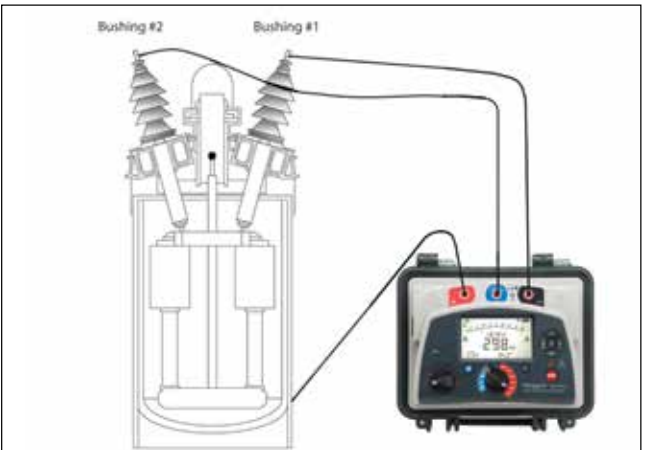


图5：断路器绝缘测试接线图。

电力变压器

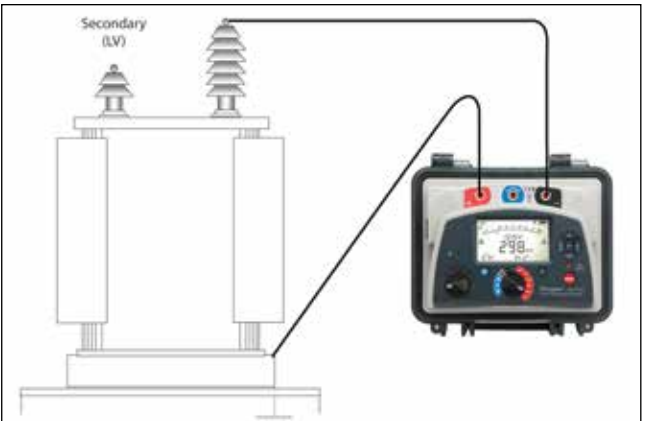


图6：变压器绝缘测试接线图。

交流发电机

细心的读者会发现，断路器测试中使用到了屏蔽（Guard）终端。屏蔽终端的作用会在稍后进行详细的阐述。

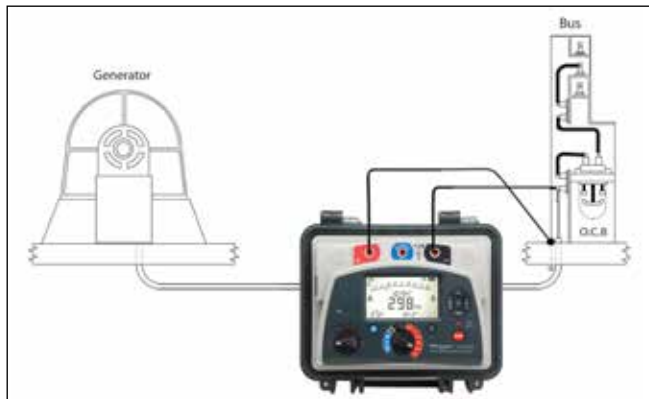


图7：发电机绝缘测试接线图。

绝缘电阻测试仪结果显示

大多数现代的绝缘电阻测试仪都自带显示屏，为用户提供数字读数和模拟读数。图8所示为Megger公司MIT1025测试仪的显示屏。



图8：Megger MIT1025测试仪的显示屏

当完成与被测试品的接线开始测试后，会发生数个事件。首先产生的是三个不同的电流分量，即电容性电流分量、吸收电流分量和电导性电流分量。这三个分量的和会使读数不断变化并上升，初始时变化较快，随后变慢。

模拟指针的移动对有经验的测试人员来说也是一种有用的信息。指针的移动是平滑的还是抖动的？是一直稳定上升还是上上下下？只看数字读数的话是无法得到这些信息的。以下是造成指针不同运动的几个案例：

- 测试电压上升时试品绝缘被击穿前，产生的电晕放电会造成指针抖动。这种现象提醒测试人员试品能够承受的最大电压已经达到了。看到这种情况后及时终止测试就可以避免绝缘被完全击穿，防止设备受损。
- 对经验丰富的测试人员来说，指针移动的速度反映了试品电容的信息。这样的信息在高压电缆测试过程中是非常有用的，是稍后会讲到的更为复杂的放电测试的理论基础。
- 如果指针时而上升时而下降，可能说明试品中的电弧太弱，不足以中断测试。这种情况下，测试人员需要找到问题所在。
- 当指针的移动逐渐变慢至类似静止的情况下（可能还在移动，但比较慢），此时进行读数可能会比等数字读数相对稳定时更为容易。数字读数是较难稳定的，尤其是最后几位。

这些信息光靠观察电子显示屏上的数字读数是很难得到的。当指针相对静止后，从标尺上读数会引入误差，而数字读数会相对准确的告诉测试人员测试结果，最终的测试结果还会包含电容信息。

大多数Megger公司的1 kV以上绝缘电阻测试仪能够提供模拟表头和数字读数。模拟表头的优点是，当它摇摆震荡时，意味着测试电流正在受吸收电流分量和充电电流分量的影响，尚未进入稳定值，需要继续等待或试品出现问题。当测试稳定后，可从数字读数直接获取结果，无需额外的计算。

有一种接近「平均值」概念的柱状图是除数字/模拟显示方式外的另一种不同的显示方式，但这种方式并不能反映电阻值的实时变化。有些测试仪提供了曲线式的柱状图来替代对数坐标表头，对数坐标的特点相同的变化量，起点数字较小时在坐标轴上移动的距离较长，起点数字较大时移动的距离较短。柱状图显示需要读取每个时刻的数据、进行计算然后再显示结果。这种计量方法的问题在于其运行原理。如果在柱状图停止读数期间发生问题，那么这个信息就丢失了，因为它不会出现在显示屏上。此外，柱状图模拟了指针的运动，但观察起来效果并没有像指针运动那样直观，机械运动也无法像预期的那样得到复制。

进行绝缘测试时，测试人员的经验越丰富（测试前和测试后），出现问题时就越了解该如何解决问题。如果因为使用柱状图而丢失了某个信息，那么就有可能错过发现某个问题的机会。

电压特性

绝缘测试仪的输出电压与被测电阻值是相关的。当电阻较低时，如几十欧姆，输出电压可能非常接近于零，最多只有几个伏特。当负载电阻增加时，电压也会上升，直至达到预设值。有时最高电压会略微超过预设值（例如当最大电压选为 5 kV 时输出电压达到 5104 V）。

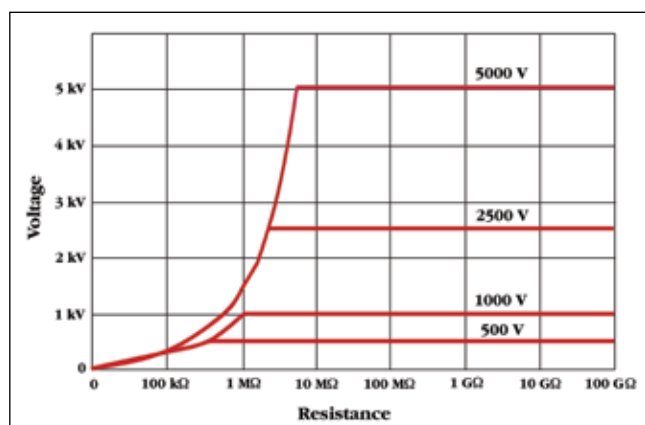


图9: 高品质测试仪的电压负载曲线

用户必须知道的是，绝缘测试仪的输出电压和负载电阻存在一条关系曲线。通过这条曲线，用户就可以确定在感兴趣的电阻量程范围内，仪器的输出电压是否能满足要求。

当负载电阻达到良好的绝缘应有的阻值水平时，高品质的绝缘测试仪能够使输出电压迅速上升，从而确保测试结果的有效性。图9所示的电压特性曲线代表了一种优良的电压特性。在此案例中，当负载为500 kΩ时输出电压能够达到500 V；当负载为1 MΩ时输出电压能够达到1000 V。与建筑物内电线测试相关的国际标准中规定了上述测试电压。虽然这两个电压对诊断性绝缘电阻测试仪来说并不重要，但是严谨的制造商仍将其视为一种高质量的标准。以上原理也适用于更高的测试电压。总的来说，取决于所选的电压，在1 MΩ到5 MΩ范围内电压应该能够迅速上升，并在更大的电阻负载下保持该电压等级。

低品质的绝缘测试仪输出电压的上升会比较缓慢。如图10所示的仪器需要在很大的负载电阻下才能够产生额定的电压。实际测试中所得到的电阻值结果虽然合格，但很有可能是在一半的额定测试电压下得到的。

注意：部份仪器没有发布负载曲线。

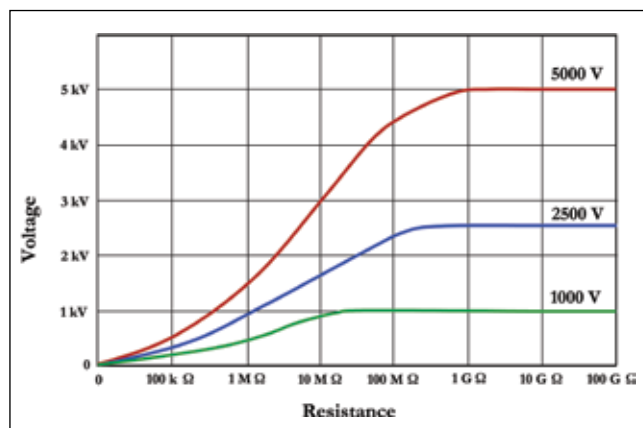


图10: 低品质测试仪的电压负载曲线

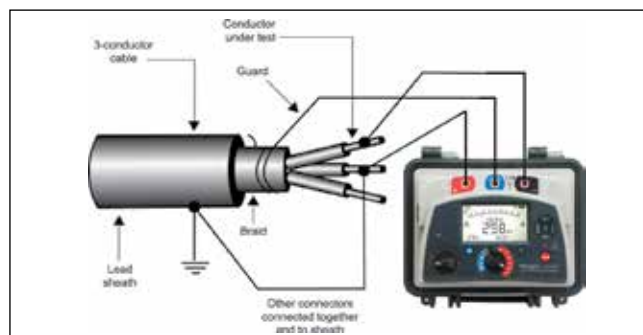


图11: 屏蔽终端在电力电缆上的应用

屏蔽 (GUARD) 终端

介绍

当进行绝缘电阻测试时，人们的注意力有时过分集中于绝缘本身，而忽略了绝缘材料外表面的泄漏回路。而这个回路的电阻常常构成了测试结果的一部分，并且有时会对测试结果造成很大的影响。

回顾上文提到的内容，绝缘电阻测试的总电流是由三个主要分量构成的：

1. 电容性电流分量，为试品电容充电。
2. 吸收电流分量，由绝缘材料分子中电荷的极化产生。初始值较大，随时间衰减（衰减速度比电容性电流分量慢很多）。
3. 电导性电流或泄漏电流，幅值较小，最终稳态值取决于两种因素：
 - a. 绝缘内部的电流回路电阻值。
 - b. 绝缘表面的电流回路电阻值。

流过绝缘表面的电流是干扰性电流分量，如果要得到绝缘材料本身的电阻，需要将这个分量排除。如果要测试的绝缘材料具有较高的电阻，那么消除干扰分量的需求就更加迫切。

有些绝缘电阻测试仪带有两个终端，而另一些则有三个终端。这些测试仪都是直流设备，因此都具备「+」终端和「-」终端。第三个终端被称为屏蔽 (Guard) 终端。测试时并不是每次都需要用到这个终端，许多测试人员对仅使用两个终端得到的结果也感到满意。但是，当问题出现时，这个终端就为测试人员提供了一种额外的查找问题的手段。

与屏蔽终端相连接的是一个分流电路，测试过程中产生的表面泄漏电流会流过这个电路。如果存在与绝缘电流并联的泄漏回路电流，那么屏蔽终端就可以将这个干扰电流分量从测量回路分离，使剩下的电流分量的测量更加准确。

从本质上讲，表面泄漏电流的模型可看作是与被测绝缘材料本身真实的绝缘电阻并联的一个电阻。当使用两个终端测试绝缘材料时，表面电阻也会被计入测量回路，并且可能会对读数产生较大的影响。而使用了屏蔽终端的三终端测试可将表面泄漏的影响排除。这种做法在测试高压设备如绝缘子、套管和电缆等高阻设备时非常有用。

例如，变压器套管表面的脏污和水分会在「+」终端和「-」终端之间引入较大的表面泄漏电流，从而使绝缘电阻读数下降，并可能造成绝缘状态的错误判断。此时，将一段裸导线缠绕在套管表面，然后连接到屏蔽中断，就可将表面泄漏电流消除，从而使流过绝缘内部的缺陷电流占主导。

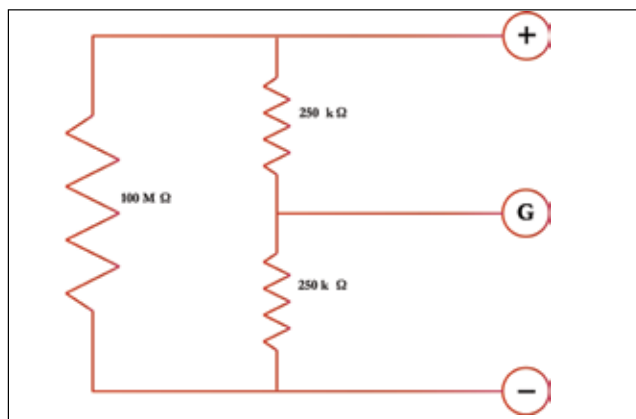


图12: 屏蔽终端原理图

最重要的一点是：不要将屏蔽与接地混淆。将屏蔽和测试线连接到同一个点的话只会多出一个电流分支，测量功能将受影响。选择测试仪器时，考虑以下几个因素：

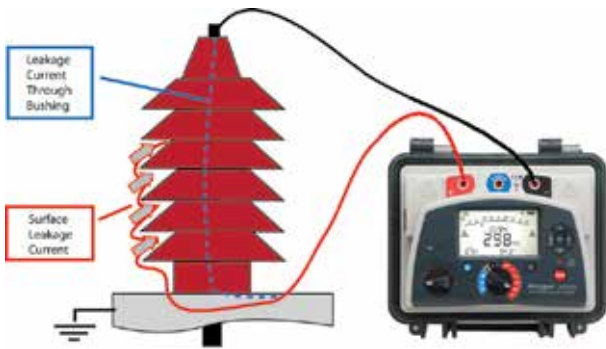
- 测试目的（设备的基本检测不需使用屏蔽）
- 被测试品电路结构（通过将电机和变压器绕组对地的泄漏电流屏蔽，可以单独测试绕组间的泄漏电流）
- 表面泄漏电流可能造成的影响（测试线可能带有因污垢或受潮而产生的表面泄漏电流以及流过绝缘材料内部的电流）
- 结果分析的深度（结果不合格直接更换设备还是对缺陷定位后进行维修）

屏蔽终端工作原理

以下高压套管的测试案例描述了屏蔽终端的工作原理。第一张图中的测试未使用屏蔽。仪器测到的电流是流过套管内部的泄漏电流和外表面的泄漏电流的和。第二张图中，将一段裸导线在套管表面缠绕后连接到屏蔽终端，从而可以将表面泄漏电流流至屏蔽终端。流到屏蔽终端的电流不会被测试回路测量到，也就是说绝缘电阻的测试结果是不包含表面泄漏电阻的。

为了便于理解仪器内部的情况，请看下图。仪器内部主要有三种元件：高压直流源、高压电压表和电流表。绝缘电阻的测量是欧姆定律的简单应用，将测量到的电压除以电流，而屏蔽终端的作用是将一部分电流从测量回路中分离出来，从而使其不会对结果产生影响。

未使用屏蔽终端



使用了屏蔽终端

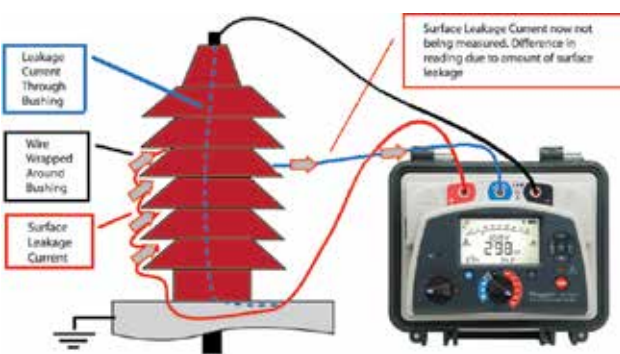


图13: 高压套管测试案例

屏蔽终端性能

带屏蔽终端的测试仪较普通的双终端测试仪成本会高一些。但在许多情况下，双终端测试仪得到的结果并不能反映完整的绝缘信息。

而常常被人们忽略的一点是屏蔽电路的性能，因为这种性能在规格书中常被隐藏或遗漏。当存在表面泄漏电流时，屏蔽终端的性能参数比仪器标称的测试精度（如5%）要重要的多。

表面泄漏电流是测量过程中的未知因数。表面泄漏电流占总电流的比例越大，屏蔽后剩下的流过测量回路的电流就越小。屏蔽性能越好的设备，在测试比例较小的电流分量时精度越高。有效的预防性维护的前提是得到可靠的绝缘趋势数据，从而可以提前发现击穿之前的征兆。如果不采用屏蔽终端，表面泄漏电流对测试结果的影响可能会完全破坏绝缘的状态变化趋势。

以下的一个案例是表面泄漏电阻仅有绝缘主体电阻1/200的极端情况。

绝缘主体的电阻为100 MΩ，这个电阻是需要被测量的电阻。由于表面受到污染，泄漏回路只有500 kΩ。如果只是使用两个终端的测试仪器，那么表面泄漏电流幅值为绝缘主体电流幅值的20倍，造成最后的绝缘电阻测试结果仅有497 kΩ。

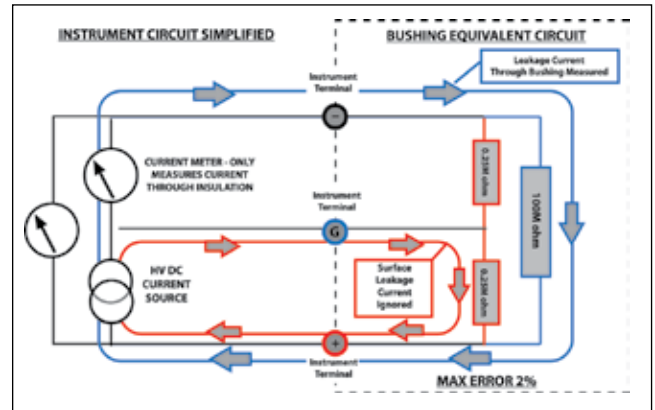


图14: 绝缘测试仪内部电路简化图

如果对试品采用了「屏蔽」，两个泄漏回路电阻分别位于屏蔽的两端，就可以在一定程度上消除这个表面泄漏电流。消除的比例与仪器的屏蔽电路的性能有关，从不到1.0%至超过80%。在选取仪器时最好对屏蔽终端的精度有足够的重视。

这是一个典型的屏蔽效果的案例，未使用屏蔽的结果和使用了屏蔽的结果具有很大的差异。除了测试结果中记录了是否用到了屏蔽终端，否则测试人员无从知晓这个细节。

比较结果

检查屏蔽终端性能的一种方法是在校准盒上比较使用和不使用屏蔽终端的结果，该校准盒具有添加到电路中的已知泄漏值（待屏蔽）。在将泄漏值添加到电路（无人屏蔽的测量）之后以及将其添加到电路（并且测量到屏蔽）之后，高质量仪器（和屏蔽终端）将提供相同的结果。此外，测试电压将保持在选定的水平。

具有较差的屏蔽终端的仪器在使用屏蔽终端时，读数可能会出现95%以上的差异（误差）。此外，它们经常显示出由所选电压电平显著下降的输出电压。即使具有更精确的屏蔽终端的仪器仍然会显示出显著下降的输出测试电压，令测量结果有问题。

以下是实际仪器的一些结果，使用校准盒上的1 TΩ位置，然后引入5 MΩ泄漏进行屏蔽。除Megger仪器外的所有仪器名称和型号均已删除。数据用于显示低质量的屏蔽终端可以导致读数中出现多少误差。

将屏蔽终端作为诊断性工具

通过进行两次测试，一次使用屏蔽一次不使用，测试人员就可以快速判断是否存在表面泄漏，以及泄漏的严重等级。如果能从仪器读取测量电流，用户可将没有使用屏蔽时的电流减去使用了屏蔽时的电流，从而得到表面泄漏电流的幅值。

不合格的绝缘电阻测试结果会导致昂贵的套管更换决策，而有时只需对表面进行清洁就足够了。屏蔽的使用能够发现这种情况，从而提高了经济性。

注意：有些规格提供输入阻抗

屏蔽终端保护

屏蔽终端是1千伏以上的绝缘测试仪的重要组成部分，屏蔽终端不仅要表现良好，还必须得到很好的保护。它能够有效地消除绝缘测量中表面或不需要的泄漏的影响。该保护是针对IEC61010规定的CAT安全等级所要求的无意中施加的电压或瞬变。

Megger MIT和S1系列的5 kV及10 kV绝缘测试仪对其屏蔽终端的性能有特定的规范，该规范意味着当屏蔽泄漏电流是测量的绝缘泄漏电流的200倍，并且精度误差不超过2%时，仪器能够进行IR测量。

要实现以上并仍然提供所需的安全性保护以符合IEC61010标准非常重要。但是，某些仪器制造商的最常用方法是采用更高的输入阻抗来提供所需的保护。这会有效地破坏屏蔽终端的测量性能。

为了解释这种效应，我们以一个仪器制造商的研究为例，重点介绍了受200 kΩ输入阻抗保护的屏蔽终端的优点。

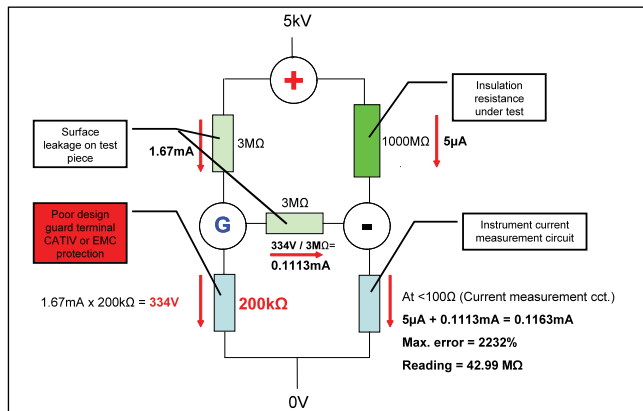


图15: 被高阻抗屏蔽装置「保护」的测量电路

图15显示了一个测量1000 MΩ绝缘电阻的等效电路，其表面泄漏为6 MΩ。表面泄漏已连接到屏蔽终端以确保不会对此进行测量。但是，仪器被200 kΩ输入阻抗保护。结果，测量值约为43 MΩ，远离应测量到的1000 MΩ超过2000%。

在Megger绝缘测试仪中，屏蔽采用有效的保护，但输入阻抗保持在可接受的水平，如下图16中所示。

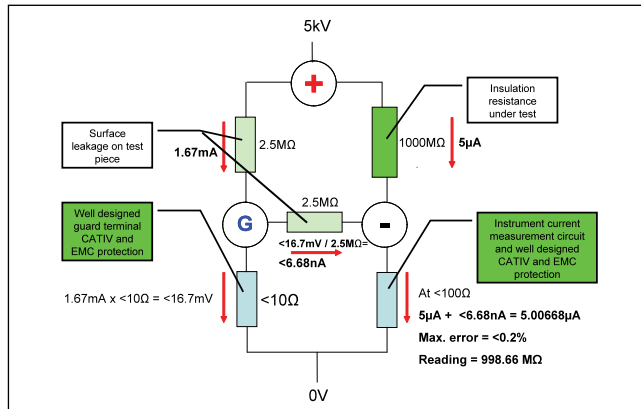


图16: 具有低阻抗高精度屏蔽的测量电路

在图16中，Megger屏蔽终端的输入保护是低阻抗但仍能满足IEC61010的要求。低阻抗保护的重要性很明显，在此计算示例中，引入到屏蔽测量的附加误差不超过0.2%。

在选择5 kV或10 kV绝缘测试仪时，确保仪器的所有终端包括屏蔽终端都得到适当保护是非常重要的，同时也要确保所使用的保护不会破坏仪器作为绝缘测试仪的性能。Megger在安全性上不会让步。

结语

明显地，屏蔽是一项非常有用的功能，但是还需注意一些事项。使用屏蔽终端后如果表面泄漏电流过大，并不能总是保证得到的结果是正确的。尤其是当仪器提供了CAT IV 600 V安全等级的情况下，屏蔽性能的提高是比较困难的。确保检查屏蔽性能不会影响仪器的安全等级。

影响屏蔽终端性能的因素有很多，其中一个最重要的原因是，仪器不仅要输出实际流过绝缘的电流，还需要输出流过屏蔽终端的电流。如果仪器的电压源容量有限，即内阻过大，会导致输出电压下降，从而造成结果误差。考虑到这一点非常重要，因为实际测试时，屏蔽终端的电流可能是测量回路的电流的十倍以上。

当使用屏蔽终端时，仪器的稳定性对结果的精度也有较大的影响。有些仪器在使用屏蔽终端时，最大的误差可达到80%。这样的误差会抵消屏蔽终端的优势，并且可能使结果更糟，失真的合格结果会掩盖设备存在的问题。那么用户如何才能避免这种问题的发生呢？

幸运的是解决方法很简单。只需询问设备制造商使用屏蔽终端时的仪器精度就可以。如果厂家对提供这个参数比较犹豫，那么就要考虑是否需要更换厂家了。

高压绝缘测试在故障诊断和状态监测方面具有很大的价值。测试结果的可靠性会受到仪器性能的影响。包含屏蔽终端的三终端测试仪的成本与双终端测试仪相比通常会高一些。

由此可见，只要屏蔽终端的使用不影响测试精度，多花的钱是值得的。只是在购买前不要忘记询问带屏蔽的测试的精度。

结果的分析和评估

无穷大读数的分析

绝缘电阻测试仪最重要的参数之一是其电阻量程。测试目的决定了是否只需要基础的测试量程，还是需要扩展的量程。只需普通电工来完成的简单的功能性验证的场合，一千兆欧的基础量程就足够了。如果新设备不存在缺陷或安装工艺良好，除了少数最先进的设备以外，其电阻值会超出大多数测试仪器的量程，但这通常是没有问题的。因为在这种情况下，测试人员并不需要知道精确值，一个很大的值（无穷大）就表明设备是良好的。但是，「无穷大」并不是测试结果，它表明被测设备的绝缘电阻值已超出仪器的最大量程。此时测试仪应该显示「> 1000 MΩ」或仪器能够显示的最大电阻值。这样的结果一般来说问题不大，因为标准中的最小可接受值一般比仪器的最大可测电阻值要低得多。

但对关键设备的检修来说，量程有限的测试仪存在「欺骗」电网运行人员的嫌疑。对于预防性维护，「无穷大」读数是不可接受的。电网运行人员只知道这台设备可以运行，仅此而已。1 TΩ (1 TΩ = 1000000 MΩ) 级别量程的测试仪在设备完成安装的那一刻起就可以持续监测其电阻的变化趋势，为运行人员的决策提供了可靠的参考。

绝缘状态的变化有时只在大电阻范围内才能观察到，而这个范围是普通的测试仪达不到的，如图17所示。

在此案例中，小量程的仪器无法捕捉到这种有用的变化趋势的。我们可以清楚地看到，虽然最后一次测试的结果值显示电阻值超过了10 GΩ，但电阻下降的速率在增加，说明绝缘是存在问题的。如果仪器的量程在2000 MΩ以下，就会完全错失这个信息。检修人员发现问题的时间就会推后，可能已来不及采取纠正措施。

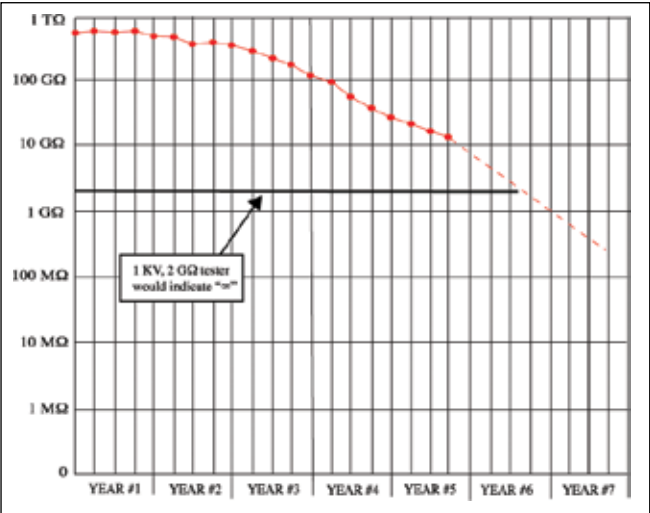


图17: 高读数的绝缘电阻变化曲线

诊断性高压绝缘测试

诊断性绝缘测试是通过给绝缘施加一个刺激信号，然后获取它的响应来实现的。通过对响应信号进行分析，就可以对绝缘的状态作出判断。

诊断性绝缘测试的范围非常广，有些测试项目只需便携式设备，而另一些项目则需要很多需要固定的设备。这里我们仅讨论便携式直流绝缘电阻测试仪能完成的测试，它们包括：

- 绝缘电阻变化趋势测试
- 时间常数
- 极化指数 (PI)
- 步进电压 (SV)
- 电介质放电 (DD)

每一种测试都提供了观察绝缘状态的一个窗口，只有完成所有测试项目后，才可以得到一幅相对完整的绝缘状态图。

单值绝缘电阻测试

只有一个读数的绝缘电阻测试是所有绝缘测试方法中最简单的一种方法，也是低电压绝缘测试仪最常见的一种功能。在一段较短的时间内施加电压（通常是60秒，目的是使电容充电电流衰减到零），然后读取电阻值，再与标准推荐值相比较。如果这个值不是明显偏低，最好的方式是与历史数据进行比较，从而判断绝缘的状态变化趋势。

由于绝缘电阻受温度的影响较大，要进行趋势分析之前，首先要将电阻值校正到标准温度，通常是40℃。温度效应会在之后的章节有详细的介绍，基本规律是温度每升高10℃，阻值减小一半。使单值绝缘电阻测试发挥最大效果的做法是保持持久的时间记录、有效的信息记录和进行趋势分析。

仪器	无屏蔽的 读数	无屏蔽的 输出电压	增加泄 漏	带屏蔽的 读数	带屏蔽的 输出电压
Megger MIT525	978 MΩ	5090 V	5 MΩ	978 MΩ	5001 V
仪器1	1.01 TΩ	5010 V	5 MΩ	37.6 MΩ	3287 V
仪器2	975 MΩ	5103 V	5 MΩ	961 MΩ	3757 V
仪器3	978 MΩ	5269 V	5 MΩ	746 MΩ	3680 V

如上文所述，诊断性绝缘测试仪灵敏度的增加，有助于测试人员在缺陷的初期发现问题的存在，而不是在故障发生后才有所行动。在许多情况下，查看趋势比评估一个单一的数值重要得多。

图18记录了两条曲线，A曲线绝缘电阻值较高，B曲线绝缘电阻值较低。但是当我们观察电阻值的变化趋势时，B设备的状态更加让人放心。因为它的电阻值在数年间几乎保持了恒定，而且可能在不久的将来还会一直保持下去。相反地，虽然A设备的电阻值较大，但是下降趋势比较明显，并且如果不采取措施的话应该还会继续下降，几年后可能就会发生故障了。而B设备绝缘电阻长期保持恒定的特点，可能预示着绝缘状态是良好的。

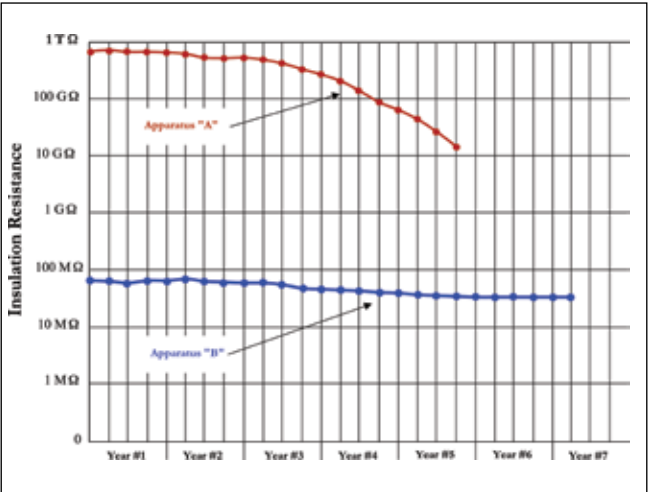


图18: 测试结果趋势比较

绝缘电阻值应该将其视为相对值而不是绝对值。如果连续三天对同一台电机进行的绝缘电阻测试，其结果可能会大相径庭。如上文所述，更加有效的判断方法是进行趋势分析，电阻值的不断下降意味着问题的存在。测试的时间间隔会因设备类型、位置和重要性而有所不同。评估数月或数年的数据能够使测试人员从测试者向诊断者过渡。

进行周期性测试时应使测试方法保持一致。使用相同的测试接线和测试电压，测试相同的时间。尽量在相近的温度下测试，或者将测试结果校正至同一温度。测试设备周围环境湿度的记录有助于结果分析。低温、高湿度可能意味着绝缘表面会有凝结。因此最好在露点以上的温度进行测试，否则凝结的水会使结果发生完全的偏离，除非使用了良好的「屏蔽」。

下表所示为评估周期性绝缘电阻测试结果的方法以及需要采取的相应措施。

状态	措施
a) 阻值相对较高 趋势保持良好	■ 无需采取措施
b) 阻值相对较高 有持续下降的趋势	■ 找出问题并进行修复，继续观察趋势
c) 阻值较低 趋势保持良好	■ 虽然绝缘状态可能是好的，但是需要找到低阻值的原因。可能是由于正在使用的绝缘的自身属性
d) 阻值非常低	■ 通过清洁、干燥等措施将电阻值提高以后再投运（在干燥过程中测试受潮的设备）
e) 之前测试阻值较高且趋势保持良好，但是出现突然下降的现象	■ 增加测试频率，直至找到问题并进行修复 ■ 或直至阻值虽然较低，但是可以安全运行 ■ 或直至阻值低到无法保持安全运行

电阻的时间曲线

近年来，由于测试设备性能的提高，按照标准的测试程序可以达到更好的诊断效果。实现这种目的的基本方式是得到电阻的时间曲线，这是有效地反映了绝缘状态的信息。电流产生的原因是绝缘材料中的电子在外部电场作用下发生偏转。

有两种不同的指标可提供绝缘状态的参考信息：一种指标是电流随着电子完成转向而衰减到零；而另一种指标则会因绝缘受潮或失效而产生的幅值较大的电流长时间保持恒定。

对于「好的」绝缘来说，总电流中泄漏电流的比例较小，随着电子转向的完成电流快速衰减，电阻持续上升。失效的绝缘会产生一个比例较大的恒定电流，有时会「淹没」充电电流和吸收电流。

良好绝缘的电阻时间曲线会呈现平滑上升的特性，「平坦」的曲线意味着绝缘失效。电阻的时间曲线是通过一段时间内对电阻数值进行持续记录而得到的。通过了解清洁、干燥的绝缘产生的泄漏电流和吸收电流与被污染、受潮的绝缘产生的泄漏电流和吸收电流的相对幅值就可以判断绝缘的状态。状态良好的绝缘的电阻曲线会持续上升；而较差的绝缘由于泄漏电流比吸收电流大得多，导致总的电阻上升较为缓慢。

采用电阻的时间曲线测试的好处是，结果与温度的相关性较小，并且无需历史数据就可以判断绝缘的状态。

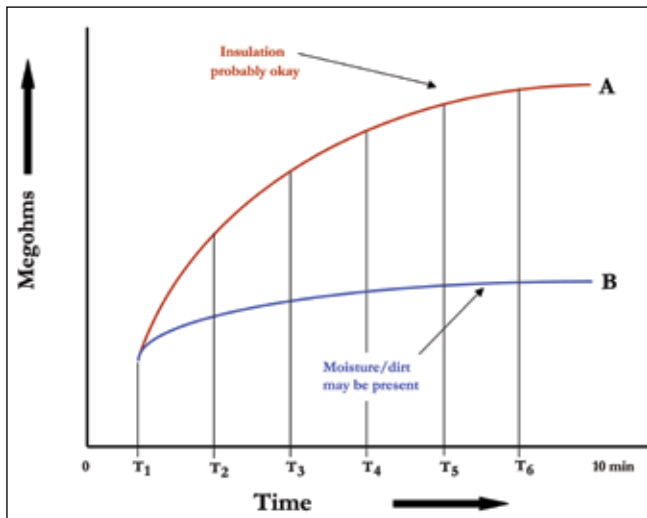


图19: 绝缘电阻的时间曲线

极化指数测试

电阻的时间曲线测试最简单的应用是固体绝缘的极化指数 (PI) 测试，它是两个时刻的电阻读数的比值，即十分钟时刻的电阻与一分钟时刻的电阻的比值。结果只是一个数字，没有单位，并且在一般情况下这个数字与温度的相关性较小。

由于被测设备的热质量非常巨大，因此在测试过程中，十分钟以内的温度变化可以忽略不计。

总的来说，较低的极化指数意味着电流变化较小，绝缘状态较差，而极化指数高说明绝缘状态良好。通常可以把测试结果与标准推荐值相比较，因此这项测试被广泛应用。「通常」说明了并不是所有案例都是通用的，有些绝缘材料不存在或几乎没有极化特性。这些材料的极化指数接近1。

注意，只看电阻读数的话无法准确判断绝缘状态，因为设备从全新到停运前绝缘阻值的变化会从一个非常大的值降至几兆欧姆。

极化指数的价值在于，首先它可以应用于最大型的设备；其次，相对值比绝对值更能够反映绝缘的状态变化情况。但是，如果测试设备的量程有限，那么就无法计算极化指数，因为「无穷大」并不是一个有效读数。高级的测试设备量程可达TΩ级别，因此电阻曲线不会中断。即使是最大、最新的设备也可以得到重复性好的数据，从而进行趋势分析。下表是极化指数的推荐值，供电网运行人员参考。

极化指数	绝缘状态
<1	差
1-2	存疑
2-4	良好
>4	优良

极化指数超过4说明设备是完美的，短期内无需采取任何维护措施。一些特别高的数值（5以上）可能预示了绝缘处于脆弱或开裂的状态，这是显而易见的。如果未发生修护而PI值突然增加20%，需要引起重视。极化指数应该在较长的周期内保持稳定，不应该有较大的自我修复。

极化指数测试的优点是能只需10分钟就可以对大型设备的绝缘状态进行评估，而这些大型设备有时需要一个多小时才能够完全充满电。如果是单值电阻读数，测试人员需要等电流相对稳定后才可以读数，花费时间较长。而选择先进行低压极化指数测试，然后再使用高压验证设备的耐压特性，可节省测试时间。

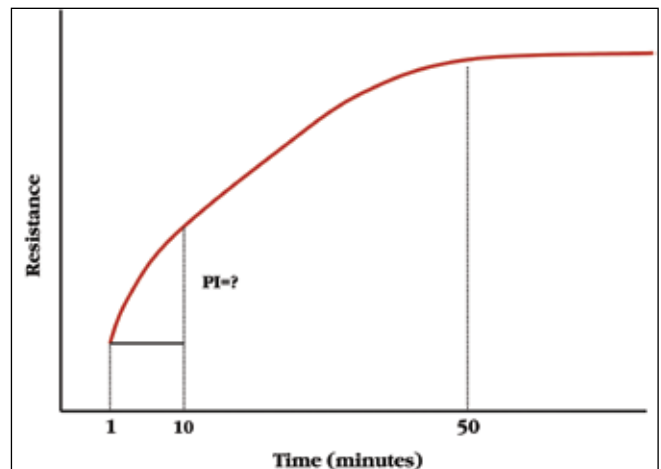


图20: 大型设备极化指数测试的优势

虽然极化指数参考值已经存在很多年并被广泛认可，但有时还是会遇到异常情况。许多年前，有一台全新的3750 kVA发电机的定子极化指数值为13.4。定子已经冷却，并且毫无疑问地，其热压过程还未完成。接下来的几次测试结果稳定在4.7左右，并且在例行维护时没有再出现过高的读数。

同样值得讨论的是，许多人曾经对油浸式变压器进行过极化指数测试，但是不能理解为什么全新的变压器极化指数非常接近于1。其实答案很简单，极化指数标准不适用于油浸式变压器。因为在外加电场作用下，固体绝缘才会有极化效应，需要吸收能量使电子发生偏转。这个过程在理论上需要无穷长的时间（实际中会采用一定的近似方法），直到电子的指向完全与外加电场方向相同。而极化指数恰恰反映了这个过程。而绝缘油是液体绝缘，不存在这样的过程，因此极化指数测试对其不适用。

步进升压测试

好的绝缘呈现电阻性，当测试电压升高时，电流也会呈比例的上升。电流的偏差预示着绝缘可能存在缺陷。较低的电压，如500 V或1000 V，可能无法使这样的缺陷显现。但是当电压升高到一定的幅值，使绝缘中的裂缝或空隙发生电离时，电流就会显著增加，绝缘电阻减小。注意，发现这些缺陷的电压不一定要达到额定值，只要电压使缺陷发生局放就可以了。

步进升压测试就是基于这个原理，当电压超过2500 V时作用就会显现出来。步进升压测试可作为过电压测试或欠电压测试。但是需要注意的是，过电压测试可能会使绝缘永久失效，尤其是在电压超过击穿电压且电源功率很大的情况下。绝缘测试仪的欠电压测试通常功率较小，不容易对绝缘造成永久性损坏。

标准规定的测试步骤是分五步达到设定电压值，每步持续一分钟，在每一步的最后时刻读取电阻值。电阻的任何异常降低都是潜在缺陷的征兆。现代的电子技术可使测试过程和结果读取完全自动化。

以下是500 V到2500 V步进升压测试的案例，此例可使测试人员得到启示：

- 良好的绝缘电阻值差异不会很大。
- 电阻值出现明显差异需要对设备采取维护措施。
- 绝缘在2500 V电压下发生击穿 — 电机存疑，重新投运时可能会发生故障。进行维修后再次对其进行测试时应使用低电压。

图21是某台电机分别在受潮、脏污（下面的曲线）和干燥、清洁（上面的曲线）时的测试结果。

一般情况下，当相邻电压下得到的电阻结果出现25%的偏差时说明存在湿气或其它污染杂质。绝缘击穿或产生电弧可进一步地发现局部的物理损坏。

当击穿电压接近时，「口吃」或「抖动」的指针移动可以预测这种情况。在此刻终止测试是可取的，可避免绝缘击穿进一步恶化被测试品的状况。

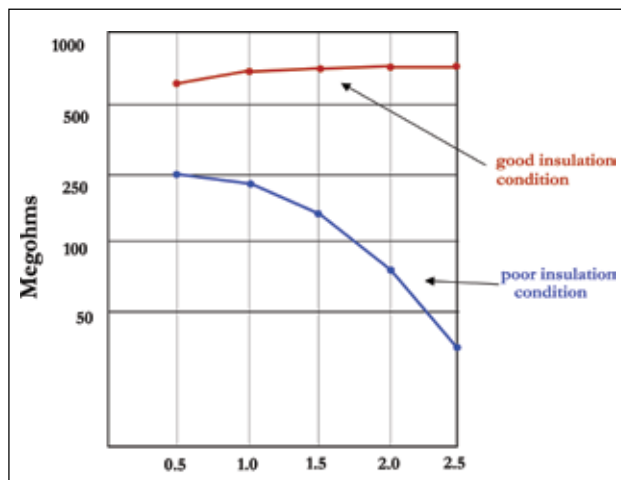


图21：步进升压测试曲线

与极化指数测试一样，步进升压测试是一种重复性较好，能够独立地代表绝缘状态的测试。其较短的测试时间可使其不受温度变化的影响。

斜坡电压测试

斜坡电压测试在IEEE95-2002中得到认可，作为高直流电压的交流电机（2300 V及以上）绝缘测试的推荐做法的一部分。当使用这测试方法时，测试电压以设定的速率逐渐增加（斜坡化）到最终水平，导致电流增加。与施加的测试电压的增加相比，电流的任何变化可以提供关于绝缘状况的有用诊断信息。这测试通常用于旋转机械，有助于诊断各种绝缘缺陷和劣化形式，例如：

- 裂缝或裂痕
- 表面污染
- 未固化的树脂
- 吸湿
- 分层
- 空洞

这测试由美国垦务局推荐用于各种聚酯、沥青和环氧云母绝缘的旋转机器。斜坡测试的另一个可能应用是通过监视指定电流下的施加电压，测试电压抑制设备。

与阶跃电压测试相比，斜坡测试可以更好地控制所施加的测试电压，从而更好地警告即将发生的绝缘击穿，避免绝缘损坏。此外，电压增加的速率通常为每分钟1000 V，而在步进增加期间电压的上升速率较快，通常为每秒1000 V。较慢的电压增加率不太会导致绝缘损坏。

此外，斜坡测试允许用户将漏电流与电容和极化电流分开。这意味着可以更容易地检测到绝缘中的小缺陷。

与阶跃电压测试一样，斜坡电压测试要求操作员解释测试结果并根据产生的图表确定绝缘状况。以下的快速指南指出了结果的图形显示所指示的是什么：

- 良好状态的绕组应产生一条平滑、几乎直线上升的电流曲线对比施加电压
- 任何与平滑曲线的偏差都应视为绝缘测试有机会接近可能的击穿的警告（可以获得低于击穿电压5%的偏差）
- 电流突然增加通常表明即将发生故障
- 电流突然下降很少会出现，但如果测试电压高于绕组的峰值工作电压，它也可能表示即将发生故障

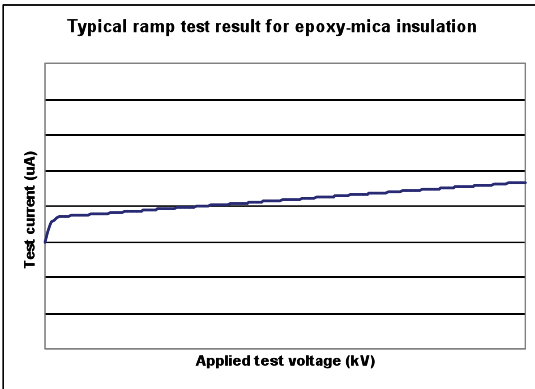


图22: 环氧-云母绝缘的典型斜坡测试结果

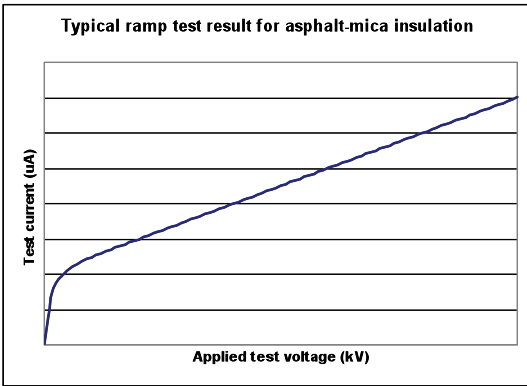


图23: 沥青-云母绝缘的典型斜坡测试结果

比较图22中的环氧-云母绝缘结果与图23中的沥青-云母绝缘结果，差异是由于存在的电流吸收水平。相对于传导泄漏电流，沥青-云母绝缘具有更高水平的吸收电流。这导致更陡峭的斜率。然而，由于线性响应，两种绝缘材料都被诊断为处于良好状态。

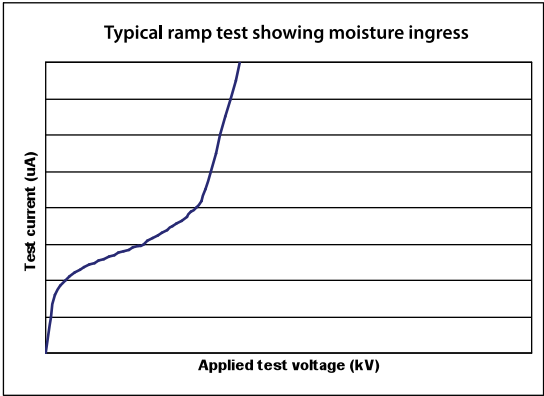
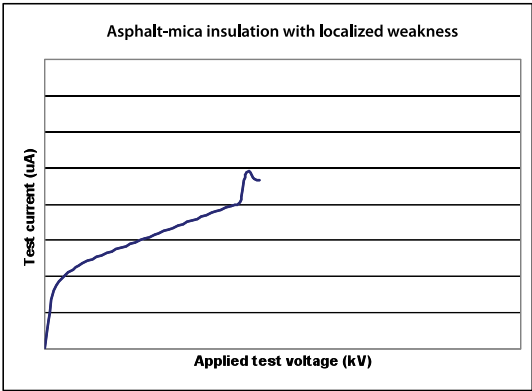


图24: 典型的斜坡测试显示水份进入

图24是绝缘材料对吸收水分的响应。例如，这可能是由于长时间的废弃所造成。由于电流的突然增加，这测试将被停止以防发生故障。



Figure

图25: 具有局部弱点的沥青-云母绝缘

旧的沥青绝缘可能会提供轻微的非线性响应，并且可能会在当前图表中显示非常小的偏差或波动。显著的局部弱点将显示出更大和突然的电流增加，如图25所示。在这种情况下，测试已经终止，因为图形接近垂直；故障将迫在眉睫。

地面墙体绝缘中的裂缝也会显示出突然接近垂直的电流响应，通常在最终发生故障之前会出现小尖峰。图26显示了典型的响应，在这种情况下是环氧-云母绝缘。

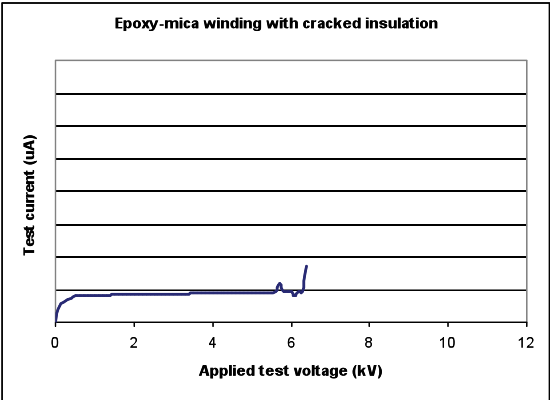


图26: 具有破裂绝缘的环氧-云母绕组

还可以比较来自不同阶段的电流曲线。所有三个绕组应提供可比较的结果。一个阶段显示不同的响应（如图27所示）通常表示绝缘状况存在问题。

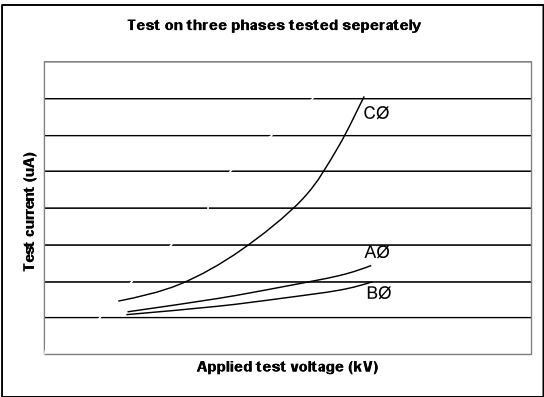


图27: 分别测试三个阶段的测试

以上的图表是通过斜坡测试可以诊断出的故障类型的示例。参考IEEE95-2002将提供测试诊断能力的更多细节。

电介质放电测试

电介质放电测试（DD）是一种由法国国家电力公司基于多年的研究提出的全新的测试方法。其它绝缘测试反映的是充电特性，而DD测试反映的是放电特性，因此其并非是绝缘电阻测试，而是电阻测试的补充。DD测试中通过将一个放电电阻并联到试品两端，绝缘电阻测试时储存在试品中的电荷会释放出来。

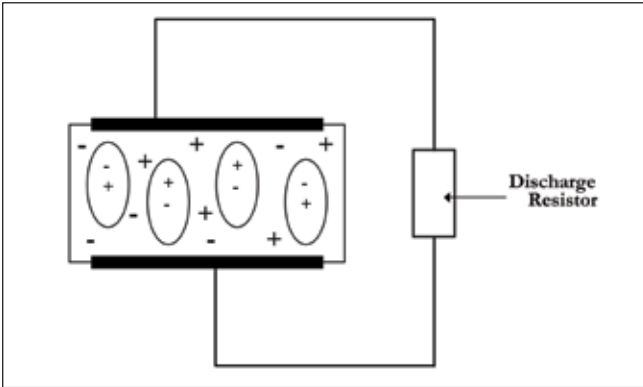


图28: 存储在试品内部的电荷的释放

放电的速率与存储的电荷量和放电电阻的大小有关。电容性的电荷会快速释放，试品两端的电压接近于零，此时泄漏电流分量就可以忽略不计了。剩下的电流分量就是反向吸收电流，也就是所谓的电介质反吸收，电流幅值与吸收电流相同，极性相反。

电容性的电流会由一个较大的幅值快速地衰减，时间常数基本是恒定的（数秒钟）。吸收电流（或反向吸收电流）初始值较大，但是衰减时间常数较长（数分钟）。这个电流产生的原因是电偶极子的指向重新恢复随机性和电子云偏移的消失。此时试品两端如果连接放电电路会有电流产生，如果开路电压就会重新产生。由于电容性电流和泄漏电流衰减很快，因此反吸收电流仅反映了绝缘极化的程度，这个参数只与绝缘状态相关。

首先对被测试品施加10至30分钟的高压，直到完全吸收。（Megger绝缘测试仪可以自动完成对试品的30分钟加压过程。）30分钟后电容被完全充满，极化过程也基本完成了，剩下的只有泄漏电流分量。此时停止施加电压，试品通过仪器内部的放电电阻快速释放电容性电荷。60秒放电后，测试剩下的电流分量，由于电容性电流和泄漏电流已经衰减完毕，因此剩下的电流分量完全反映了绝缘的极化特性，不会被其它电流的「淹没」。

测试结果指数可用以下公式计算：

$$\frac{\text{1分钟后的电流 (nA)}}{\text{测试电压 (V) } \times \text{电容 } (\mu\text{F})}$$

测试结果会受到温度的影响，所以最好在参考温度下进行测试，并且记录测试温度。

高压设备的绝缘一般都有数层，并且具有层间电容和层间泄漏电阻。采用多层结构的原因的目的是使电压均匀分布于每一层。当绝缘放电时，每一层的电荷都会以相同的速度释放，直至电压降为零。

当存在层间缺陷时，电容性电荷会保持恒定，泄漏电阻会下降。普通的绝缘电阻测试良好的绝缘层会在测试结果中占主导，因此大多数情况下无法发现这类缺陷。但是这种缺陷对放电常数的影响较大，因此会产生较大的DD值。DD值较小说明放电电流衰减快，每层的时间常数相近。DD值较大说明衰减时间常数变大，预示着问题的存在。

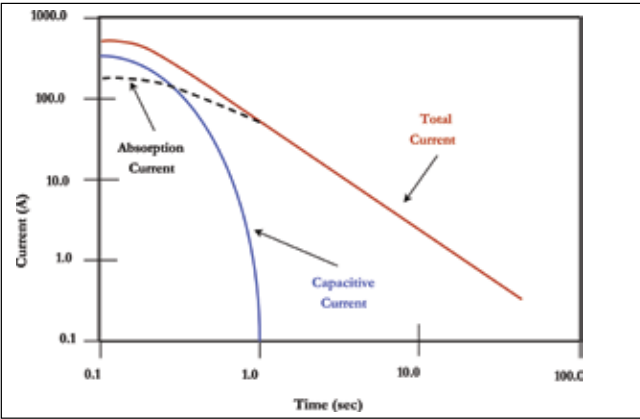


图29: 反吸收电流

法国电力公司根据对发电机绝缘的实际研究结果，编制了下表所示的DD测试推荐值。此表虽然主要用于高压发电机，但是对一些具有多层绝缘的设备也是适用的。

D 值 (mA V ⁻¹ F ⁻¹)	绝缘状态
> 7	糟糕
4 - 7	较差
2 - 4	存疑
< 2	OK

不同的问题/不同的测试方法

从上述案例可以看到，电介质放电测试可以发现多层绝缘系统中某一层的缺陷，而其它方法可能无法发现这样的问题。极化指数测试的优势在于能够发现湿气、油污和较大程度的污染。这些杂质会形成一个低阻泄漏回路，造成对周围绝缘的损坏并最终形成短路。这类问题的探测不会受到电压的限制，测试结果的特点是「平坦」的电流曲线和较低的PI值。湿气和杂质也会降低PI读数，但需要和前值相比。PI的优点是可以直接进行内部比较。

有些问题可能在低压下能够通过极化指数和绝缘电阻测试，呈现高阻特性。这些问题包括，局部的物理损坏，如针状孔以及干燥但脆化的老化设备绝缘。步进升压测试能够发现这类问题，缺陷越多，升高相同的电压电流上升得更快，电阻值越小。高压会在缺陷的空隙中形成电弧，为潜在缺陷发出警示。随着设备的老化，空隙会随着杂质的堆积而越来越小，直至发生对地短路。

附录

潜在误差来源

以下内容是高压绝缘测试中可能的误差来源的讨论。这些问题可能对1 kV以下的测试影响不大，但电压和灵敏度提高以后情况就会不同。

测试线

注意有些非原装的测试线额定电压等级比仪器的输出电压要低。测试线本身不产生泄漏电流是非常重要的，因为如果测试线也有泄漏的话，测到的电阻值是测试线的电阻值而不是设备的电阻。

Megger公司提供的测试线都是高品质的测试线，能够承受比仪器输出电压高得多的电压。即使如此，还是需要通过减少线与线、线与地尤其是线和水的接触来减小杂散泄漏。

有关设计的更多信息以及安全操作的重要性，请参见第27页。

测量超过100 GΩ的电阻

在测试线清洁和干燥的情况下，测量100 GΩ以内的电阻不需要特别的措施。如果需要可以用屏蔽来消除表面泄漏电流的影响。100 GΩ以上的电阻测量需要采取特殊措施，因为杂散泄漏会干扰测试结果，注意以下几点：

- 测试线不能彼此接触或与其它物体接触，因为接触后可能会形成泄漏回路。
- 测试线的连接应该保证平滑，尖点容易形成电晕放电。
- 仪器的接口位置较深，以减少终端之间的泄漏。

精度说明

密切注意仪器规格书上的精度说明。只是给出读数的精度百分比是不科学的，还需说明数位的精度。因为绝缘测试的数字读数的最后几位都是不稳定的（非重要有效位）。如果只是说明了读数的百分比精度，量程范围内所有读数都需要达到这个精度是不切实际的。

模拟仪表的「量程百分比误差」或「全量程误差」也是不可接受的。因为模拟仪表的误差来自于指针位置的偏差，在对数坐标下，相同的位置偏差对应的电阻结果偏差是不一样的。相同的位移，在起始位置可能代表了几兆欧姆的区别，而在终点位置可能代表了几百兆欧姆的区别。综上所述，不可以只察看规格书中的精度百分比，还要察看其它的说明信息。

如果不仔细解释，准确性陈述也可能会产生误导。请务必检查数据表中精度声明所涵盖的量程，因为它可能在不同仪器之间有很大差异。一个显示5%精度、高达40 GΩ或100 GΩ的仪器，跟一个显示5%精度、高达1 TΩ的仪器有着明显差异。有些仪器显示准确性声明但未给出相应的量程。如果仪器未指明，请务必询问具体准确度的量程。

注意：提防没有发布负载曲线的仪器。

输出给定的电压

在说明书中，输出电压是与负载电阻相关的一条曲线。曲线上可以看到在一个特定的绝缘电阻下，仪器可以输出最大的测试电压。这虽然看似是一个常识，但说明书中能够明确说明还是非常重要的。当绝缘电阻较小时，低品质的测试仪器无法输出给定的电压，只有在理想情况下才可以达到最大电压输出，所以它们不会在说明书中绘制出电压-负载曲线。

这种现象是一些标准机构如UL在现场临时搭建高压测试设备时发现的，这类测试设备的输出电压问题在如今的标准文献中可以找到记录。Megger的设备在较小的绝缘电阻下（取决于型号与电压的不同，范围在1到10兆欧之间）就可以输出并保持额定电压。输出电压一般会比设定值高几伏，但不会比设定值低。为了提高测试报告的准确性，有些型号在报告中除了给出电压设定值以外，还会特别强调实际输出的电压。

干扰抑制

干扰是指被测设备上所携带的各个频段的电信号。它们通常是由于受周围带电设备的影响而产生的感应电流或感应电压。这种现象在变电站，尤其是高压变电站是比较常见的，其中工频干扰处于主导地位。

电气干扰会将一个交流信号叠加在直流测试电流上，导致读数跳变。如果干扰的幅值超出了仪器的承受范围，那么有无法得到读数。例如，400 kV以上高压变电站中，幅值超过4 mA的工频干扰并不罕见。

如果绝缘测试仪器具有抗干扰的能力，那么就可以在更加复杂的环境下使用了。变电站并不只有工频干扰，为了应对各种不同的干扰频率，一些高端的仪器提供了软件滤波功能。重要的是，要确保使用的仪器能够处理测试现场的干扰预期值。

测试和比较法则

通过结果比较来观察绝缘状态的变化是整个预防性维护项目的关键。需要强调的是，这个概念仅适用于在多个离散的维护时刻得到数据。严格地按照标准规定的步骤进行测试是必须的。现场立即比较两次读数是完全不同的概念，并且容易产生潜在的误差。

如果需要对设备或接线进行微调，或者有人对结果提出质疑，从而想要通过第二次测试来验证之前的测试结果的想法非常好，但实际并不可行。绝缘测试仪与万用表是不同的！高压测试的过程很像海森堡不确定原理（不可能同时知道电子的速度和位置）描述的那样，测试本身改变了试品的状态，即使是同一试品，第二次读数也会和第一次读数有所不同。

如上所述，施加测试电压后使绝缘材料的分子产生了极化，从而改变了分子内部的结构和电介质特性。由于绝缘材料是一种不良的导体，它需要足够的时间来进行「松弛」，也就是电荷恢复到原来的随机位置。测试完成后，设备就立即变成了与之前不同的一台设备了，立即开始第二次测试会显著地改变上一次测试造成的电荷分布。

两次测试哪个是正确的呢？它们都正确！这两次测试都能够准确地反应进行测试之前的绝缘状态。此外，行业标准规定的放电时间只是为了保证测试的安全，但并不足以使试品中的电荷恢复到原来所处的位置，以满足重复性要求。残余电荷可能会储存在试品中长达数小时甚至数天。这种现象对普通万用表来说是微乎其微的，但对高灵敏度的绝缘测试仪影响会非常大。再次进行测试前，需要将设备短路并接地数小时，等到第二天再测的效果会很好。然后，不应忽视外部因素，特别是温度。

但这并不意味着不应该进行重复性测试，如果只是定性的查看结果，重复测试还是有价值的。这种情况下测试人员应该预期到测试结果会有差异。

如果测试过程的细节有所不同，也可能无法得到相近的结果。温度是一个因素。如果第一次测试完成，设备启动后再停机，那么第二次的测试结果可能无法与第一次相比较。测试时间也容易被忽略，有的测试人员会等待一段固定的时间后再读数，而有的测试人员在结果稳定后才会读数。这就等同于在电阻的时间曲线上取两个不同时刻的阻值，结果同样是不可比较的。

如果觉得这些因素太过细节化，不妨看一下标准制定机构的文献。一些标准机构，如UL和ASTM，并不只是给出类似于「连接测试仪并读数」这种笼统的说明，而是为每一个标量，包括接线、步骤、仪器特点都作了详细的规定，从而确保了结果的一致性。维护工作需要非常仔细。

CAT安全等级

绝缘测试仪的性能显然是非常重要的，但是除此以外，其他方面尤其是安全特性却是最重要的。国际电工委员会（IEC）的文件EN61010-1:2001是被广泛接受的安全标准。这个标准对仪器在一些特定环境下的闪络和灭弧能力提出了要求，也就是仪器的CAT安全等级。CAT安全等级严格的叙述了在特定的环境下仪器是否能够进行安全测试，需要测试人员牢记。



图30: Megger MIT型号确保CAT等级适用于所有终端以确保安全。当今市场上的一些仪器存有误导性。

CAT安全等级标准

CAT安全等级包含两个参数，一个参数定义了系统的等级，另一个参数定义了额定电压的等级。「CAT IV 600 V」表示仪器适用于CAT IV等级及以下的电气环境，相对地额定电压600 V及以下的设备。注意，有些仪器的CAT安全等级没有给出额定电压值。这种信息的欠缺可能会构成潜在的安全隐患。CAT安全等级定义了仪器能够承受的最大暂态电压（尖峰或浪涌）。根据电源的特性，暂态参数的幅值和时长会有所不同。有些暂态信号幅值可达数kV但是时间只会持续50 μ s。这些信号的主要危险在于，当它们叠加到正弦电压信号上以后可能会在绝缘内形成电弧，至下一个过零点熄灭。在CAT IV系统中这种电弧产生的短路电流可达1000安培以上。这个电流在数毫秒内在仪器内部较小的空间内产生数百千瓦功率的热量。由此造成的空气迅速膨胀会造成测试仪器的解体甚至爆炸。起火和爆炸飞溅物会造成严重的后果。

带有安全等级的测试仪器会在关键元件之间留出足够的空间，以防止暂态信号导致的电弧的产生。IEC61010在电气方面（电路）和机械方面（外壳）都提出了不同安全等级的设备的设计要求。

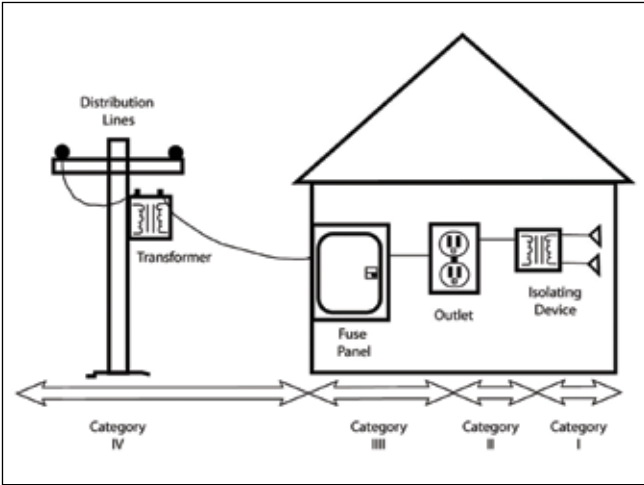


图31: 电力设备的安全等级划分

CAT安全等级的重要性

CAT安全等级的划分将配电网的变压器作为起点然后向下进行的。架空线和埋地电缆使CAT IV类设备，因为接近电源起点（变压器）处的短路功率是非常大的。这是最危险的测试环境，因此对仪器保护的要求是最高的。当电压穿过配电板进入建筑物后，等效阻抗会增加，暂态参数的幅值会降低，从而减小了断路功率。其它CAT等级下降的原理与上述原理是相同的。电源后面的设起始备被定义为CAT III安全等级；插座以后的设备被定义为CAT II安全等级；与隔离变压器相连的设备内部的电路被定义为CAT I安全等级。CAT安全等级较低的设备不会发生爆炸，可以使用万用表进行测试。虽然有时万用表的量程看似可以涵盖CAT IV电压等级设备，但是这类设备是不可以使用万用表进行测试的。

CAT安全等级的一些统计数值

不要混淆稳态工作电压和暂态电压。测试仪器需要承受的暂态电压幅值是稳态电压幅值的数倍。例如，要在CAT IV环境中的300 Vrms相对中性线路上评为安全，测试仪必须能够承受4 kV的冲击！

Megger MIT和S1系列5 kV及10 kV仪器的最大输出额定值为CAT IV 600 V，这意味着它们能够承受8 kV的冲击。最近推出的15 kV仪器MIT1525和S1-1568的额定值为CAT IV 1000 V，它们能够承受12 kV的脉冲。

如果存在如此高的电压会发生什么？虽然小至数百伏的暂态电压时常发生，但幸运的是，大的暂态电压（5 kV-12 kV）却是较少发生的，但这并不意味着大的暂态电压可以被忽略。使用安全等级正确的仪器都够使发生击穿的概率降到百万分之一，而选择错误的安全等级的仪器会使意外概率增加30倍左右。这也意味着如果有100个测试人员使用不适当的仪器，每天一小时，每年200天对带电系统进行测试，那么每隔18个月就会发生一起意外事故。

在高海拔地区进行测试

国际电工委员（IEC）标准EN61010-1:2001规定，CAT等级必须有效，最高可达2000米。这是因为随着高度增加，空气密度降低，因此其绝缘性能也降低。这对于例如智利露天矿等地点高度可能在4000米左右是一个问题，这意味着大多数仪器的CAT等级变得无效。实际上，许多仪器将在这些高度会在其测试电压下内部击穿。

最新的MIT和S1系列仪器引入了更高的CAT额定值，超过了EN61010-1 2001的标准要求。MIT515、MIT525和MIT1025可以运行并保持其安全类别等级为3000米高度，S1-568、S1-1068和S1-1568可以将其安全类别等级保持在4000米高度。

旋转电机的绝缘电阻测试

IEEE-SA标准委员会在2000年3月通过了由IEEE电气工程协会电机委员会提交的IEEE Std 43-2000标准，作为测试旋转电机绝缘电阻的标准。

随着电机所采用的绝缘材料类型的变化，各种不同的材料在绝缘电阻特性方面表现出了巨大的差异。因此，目前迫切的需求是对现存的IEEE标准进行重新修订。IEEE认为此标准的适用范围是：

- 制造旋转电机的个人或机构。
- 对新制造的旋转电机进行验收的个人或机构。
- 对旋转电机进行测试和维护的个人或机构。
- 操作旋转电机的人员或机构。

Megger公司建议所有旋转电机的测试人员仔细阅读这个标准。本文将对标准的重点做一个总结。

IEEE Std 43-2000标准给出了750 W以上旋转电机的电枢和现场绕组的绝缘电阻测试步骤，标准适用于同步电机、异步电机、直流电机以及同步调相机，它不适用于分数马力机器。它还建议绝缘测试电压（基于绕组额定值）以及交流和直流旋转机器绕组的绝缘电阻的最小可接受值。

下表是绝缘电阻测试电压推荐值。注意，12 kV以上额定电压的绕组推荐使用10 kV的测试电压。

*绕组额定电压 (V)	绝缘电阻测试直流电压 (V)
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12,000	2500-5000
>12,000	5000-10,000

* 三相电机的额定电压是指线电压，单相电机的额定电压是指相电压，直流电机的额定电压是指直流电压

标准推荐对每一相绕组都进行隔离和单独测试，从而可以比较三相的测试结果。不需要被测量的两相应与定子铁芯同处地电势。当对三相进行整体测试时，只有对地绝缘能够被测量到。进行绝缘电阻测试时，将所有与电机相连的外部设备，包括电缆、电容器、避雷器等断开并接地，因为这些设备会对读数产生干扰。所有接地点都应该是等电位的，从而防止接地回路中产生杂散损耗影响测试结果。

标准包含了绝缘电阻测试和极化指数测试，并推荐测试人员两种方法都使用。测试结果应与历史数据相比较，如果没有历史数据，那么就与标准中的最小推荐值比较来评估绕组的状态。如果测试结果低于最小推荐值，那么不推荐对电机进行耐压测试或投运。

最小极化指数推荐值与绝缘材料的耐热等级有关，并且适用于所有绝缘材料，无论它们在制造时是否遵循IEC 60085-01:1984标准。极化指数不适用于没有绝缘材料的现场绕组。对于有些绝缘材料，如漆浸布、树脂云母带或沥青等，如果出现非常高的极化指数（大于8），可能表明绝缘已严重热老化，存在较大的击穿风险。可通过观察绝缘是否干燥易碎来验证。

耐热等级	最小PI值
A类	1.5
B类	2.0
F类	2.0
H类	2.0

在40°C下一分钟时刻的最小绝缘电阻推荐值如下表所示。三相绕组中一相绕组的最小电阻（另外两相接地）大约为绕组整体电阻值的两倍。如果每相分开测试（未被测量的两相连接到了屏蔽终端），那么最小电阻值约为绕组整体电阻值的三倍。

最小绝缘电阻值 (MΩ)	被测试品
kV* + 1	适用于1970年之前制造的大部分电机，现场绕组和以下没有说明的电机。
100	适用于大部分1970年以后制造的直流电机和交流电机（模绕线圈）。
5	对大多数1 kV以下散绕线圈电机适用。

* kV是指电机线电压的额定值（单位为kV）

电机的额定参数决定了电机绕组是否必须达到最小绝缘电阻和最小极化指数值。

额定功率	评估标准
小于或等于 10,000 kVA	绝缘电阻和极化指数至少有一项高于最小推荐值（于40°C）
大于10,000 kVA	绝缘电阻和极化指数都必须高于最小推荐值（于40°C）

温度的影响

绝缘电阻值受温度的影响较大。同一试品，当温度增加时绝缘电阻会显著下降。每种绝缘材料都会有不同的温度特性。设备制造商应该能够提供各种不同设备的温度校正表。如果制造商无法提供，那么推荐读者自己建立温度校正表，方法是在不同的温度下测量同一台设备的绝缘电阻值，然后绘制出温度（线性坐标）- 电阻值（对数坐标）曲线图。曲线图一般是一条直线，并且可扩展至各个温度，从而得出校正值。

详细的历史数据记录表明，一个通用的规律是，温度每增加10°C，电阻减小一半；温度每降低10°C，电阻增加一倍。例如，20°C下100 GΩ电阻值对应的是40°C下25 GΩ的电阻值。

为什么温度校正非常重要呢？以下案例是在每年不同时间、不同温度（变化范围在15°C以内）下同一台电机的测试结果，温度校正则是根据通用规律来进行的。

日期	绝缘电阻 (MΩ)	温度 °F	经温度校正的绝缘电阻 (MΩ)
Jan-01	15,000	68	14,990
Jun-01	9,000	80	14,276
Jan-02	14,500	68	14,490
Jun-02	8,500	82	14,562
Jan-03	14,300	68	14,290
Jun-03	8,700	81	14,341
Jan-04	14,500	68	14,490
Jun-04	8,900	81	14,671
Jan-05	14,200	69	14,748
Jun-05	8,900	80	14,117
Jan-06	13,600	68	13,591
Jun-06	8,900	78	13,071
Jan-07	13,500	66	12,491
Jun-07	7,500	80	11,896
Jan-08	11,300	68	11,292
Jun-08	6,500	80	10,310
Jan-09	8,000	67	7,693

如果没有进行温度校正的话，这些结果会令人产生疑惑。如果将结果绘制成曲线的话，趋势并不是很明显。进行温度校正后重新绘制的曲线中可以观察到绝缘状态正在变差这一有用信息。

当进行高压、高灵敏度的测试时，温度校正是极其重要的。

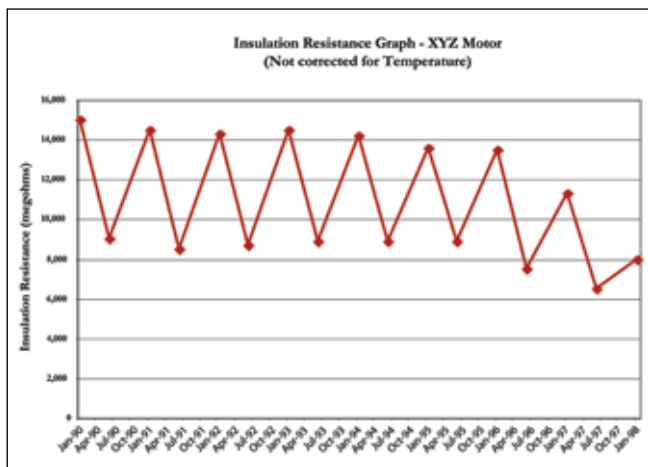


图32: 未经温度校正的绝缘电阻曲线

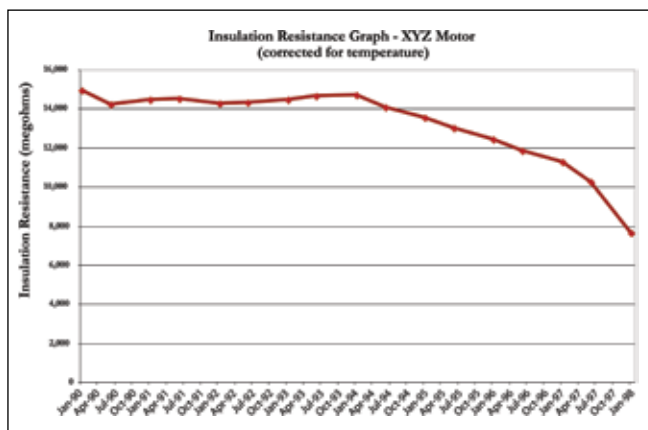


图33: 经过温度校正后的绝缘电阻曲线

湿度的影响

湿度（水分）对绝缘电阻也会有影响，但是这种影响无法像温度的影响那样定量地表达出来。不同的绝缘材料、不同的老化程度都会导致较大的亲水特性差异。但有一点可以肯定的是，湿度是一个影响绝缘测试结果的不可忽略的因素。与温度不同，湿度的影响不是恒定的梯度，只要温度保持在露点以上，湿度就不会明显影响绝缘读数。

周围环境湿度的增加对绝缘电阻的影响变化较大。如果设备常在露点（水蒸气凝结温度）以上的温度运行，那么湿度对测试结果的影响就会比较小。即使设备停运，只要本身温度高于露点，那么影响就会很小。但是设备表面必须无污染物，例如绒线、酸或盐，因为这些物质具有亲水特性。

我们更为关心的是电气设备暴露在空气中的部分发生水蒸气揭露后对绝缘电阻的影响。研究表明，在表面出现水珠之前，水珠首先会填满绝缘的裂缝和缺口。露点测试通常给出的是被测试品表面水分含量的信息，无法发现内部情况。

高压测试受湿度的影响更为明显，因为高压比低压更容易促使电离的产生。因此，在1 kV测试电压下湿度的影响可能可以忽略，但是5 kV测试电压下会产生明显偏低的电阻值。湿度造成的影响并不一定是一个重大的问题，两个不同电压下的测试结果可用于发现水分的存在；是否使用屏蔽终端屏蔽表面泄漏电流可判断水分位于表面还是内部。

防水防尘

多数测试设备的规格书中都会明确地给出设备的防水防尘（IP）等级，数字的大小决定了具体的性能。IP等级能够方便用户判断该设备是否适合他的测试试品和测试环境。

「IP」是「ingress protection」的缩写，即渗漏防护。这是仪器阻止外部物质侵入内部的防护性能的参数。仪器IP等级的规定可参阅IEC Standard 529标准。这个参数是用户确保仪器是否能够在需要的场合进行正常运行的参考。

IP等级是由两个数字构成的，每个数字代表了不同的意义。数字大小代表了对外部物质水分和灰尘抵御能力，数字越大表示性能越好。那么IP54代表了设备什么样的性能呢？如果需要严格一点，那么54应读作「五四」而不是「五十四」。两个数字之间是没有关系的。

第一个数字反映的是仪器对固体物质渗透的抵御能力。「5」表示的是设备能够防尘，同时能阻挡任何1.0 mm以上的导线的插入。比这个等级更高的只有一个，那就是「绝对防尘」。第二个数字表明的是防水特性。「4」表示的是能够防止任何方向泼向仪器的水进入内部。更高的等级5至8分别表示仪器能在「喷射水流」、「短期浸水」或「持续浸水」的情况下防止水进入内部。

那么知道IP等级到底有什么用呢？假设测试人员有一台IP43的仪器，那么它具体的局限性是什么？它能在采石场或水泥厂可靠地运行吗？几乎不能！数字「4」表明仪器能够阻止直径大于等于1.0 mm的物质进入，但是与工业自动化过程中产生的颗粒相比，1.0 mm的物质如岩石一般巨大。侵入的灰尘会导致仪器故障。

假设仪器的IP等级时IP42，「2」代表了仪器可以阻止水滴的进入内部，但是不能阻挡飞溅起的水花。如果使用环境超过了仪器的IP等级，那么很快用户就需要更换仪器。IP40表示什么？防水等级「0」说明仪器无法阻止任何液体进入内部。

下表是各个防护等级的具体说明，供测试人员参考：

带电部件接触防护 (第一个数字)	
数字	说明
0	无防护
1	防止手背触摸 (50 mm)
2	防止手指触摸 (12 x 80 mm)
3	防止工具触碰 (2.5 mm)
4, 5, 6	防止导线触碰 (1.0 mm)

对外部固体物质侵入的防护 (第一个数字)	
数字	说明
0	无防护
1	直径等于或大于50 mm的物质
2	直径等于或大于12.5 mm的物质
3	直径等于或大于2.5 mm的物质
4	直径等于或大于1 mm的物质
5	防尘
6	绝对防尘

对液体侵入的防护 (第二个数字)	
数字	说明
0	无防护
1	垂直方向的水滴
2	与垂直方向呈15°以内的水滴
3	与垂直方向呈60°以内溅起的水
4	任意方向的水泼
5	任意方向的喷射水
6	任意方向的高压喷射水
7	短暂的水浸
8	持续的水浸

高压测试

「高压测试」虽然很常用，但是目前还没有统一的定义，根据应用场合的不同，在定义上式仁者见仁，智者见智。理论上讲，高压测试一般使用了额定电压的两倍或更高的测试电压，因此也常被称为耐压测试。

绝缘电阻的测试电压一般不超过被测试品的额定电压，而耐压测试却使用了比额定电压高得多的电压，因此是过电压测试。过电压会在试品中产生过大的应力，因此会加速绝缘的老化。有些标准会要求一直增大测试电压直至试品发生击穿。

如果需要进行过电压测试，最好先进行一次低压极化指数测试，以确定绝缘的状态。

高压测试既可以使用交流电压，也可能使用直流电压，根据具体应用来决定。电容量较大的试品在交流下阻抗较小，需要使用输出功率较大的测试设备。在这种情况下，常见的方法是使用峰值相等的直流测试电压。

电流 (nA) 读数 vs. 电阻 (MΩ) 读数

绝缘电阻测试仪将测量到的电流读数转化为电阻读数。进行这样的转化主要是因为传统。状态良好的绝缘读数高，状态较差的绝缘读数低。此外，状态良好的绝缘呈现较强的电阻性，即电压加倍后电流也加倍，电阻保持不变。但是有时候查看测试电流更有助于问题的诊断。

电流和电阻的选取取决于用户，现代的绝缘电阻测试仪大多可以提供两种选择。

燃弧能力

1 kV以上多功能绝缘测试仪一般都具有燃弧模式。虽然很多人从不使用这个功能，但在少数场合却是非常有用的功能。

绝缘电阻测试仪会对大电阻施加高压，但如果绝缘内部发生击穿，那么电阻就会显著降低，并且电流升高。如果此时不采取任何操作，那么电弧就会熄灭，电阻会升高，导致电压回升，然后再发生击穿，循环往复。如果发生这样的循环，读取电阻就会产生一定的困难，并且会使绝缘中的小孔变大或使灼烧痕迹扩大。因此，与其使绝缘损坏，大部分测试设备此时会中断测试。

然而，如果用户需要查找击穿点，自动中断的功能就会变得极不方便。因此，许多仪器会提供燃弧模式，在这种模式下发生击穿时仪器会维持微弱的电弧电流，并且需要手动中断测试。需要强调的是，此时仪器的短路电流限制会发挥作用。仪器无法满足「完美」短路的电流要求，用户可通过查看火花、烟雾或使用电离探测器来定位或发现故障点。如果能发现绕组绝缘漆覆盖下的小孔，设备就可以修复并重新投运。电缆维护时需要使用输出电流大得多的高压设备，使高阻故障位置的绝缘发生击穿，从而形成时域反射计能够探测到的「开路」。

电气设备干燥

电和水不相容的特性使电力设备需要进行干燥，从而消除绝缘材料表面或内部的水分。有些设备带有内置的加热线圈，可用于除水，另一些设备需要使用其他方法进行干燥。

最佳的干燥方法是將绕组置于干燥箱中进行干燥，配合适宜的温度控制和空气循环。如果无法使用这种方式，则可使用红外灯阵，或者在设备周围建立一个容器，将电阻性元件作为热源。容器必须有开口，从而使空气得以流通，否则蒸发的水分会使容器内的湿度增加。设置排气扇可加速空气的流动。

真空干燥的有效使用可以加快设备的干燥时间，但是这种方法有诸多限制，仅限于经验丰富的人员使用。

另外一种方法是在线圈中注入低压电流，但是在绝缘电阻达到100 MΩ之前不要使用这种方法。注入的电流须远低于额定电流值，并且需要密切注意绝缘件表面的最高温度。绕组表面的最高温度不应该超过90°C（温度计读数）。过高的温度不仅会大大加速绝缘的热老化，而且可能会因为产生的高压蒸汽导致绝缘的损坏。

如果要进行干燥，历史数据非常重要，因为确定设备是否干燥需要与参考值进行对比。以下是一个浸水的电机的例子。将电极晾干、清洁后，绝缘电阻读数为15 MΩ，如果之前的数值介于10 MΩ至20 MΩ之间，那么就可认为这台电机已恢复正常；如果之前的数值介于100 MΩ至150 MΩ之间，那么电机绕组绝缘中应该仍然存在水分。

如果在干燥过程中使用绝缘电阻值作为绕组绝缘干燥程度的判断依据，阻值达到要求后需要继续干燥一段时间以确保读数的可靠性。电阻曲线经常会发生一次或数字突然上升，并随着干燥过程的继续进行而发生下降。这是在水分脱离绕组的过程中发生的。当干燥完成后，需要进行除尘。除尘过程可通过施加40 psi以下的干燥压缩空气来完成。

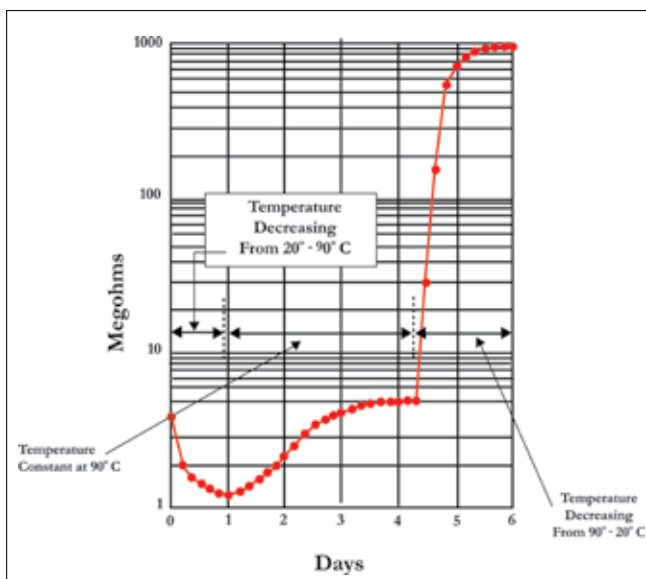


图34: 典型的干燥过程电阻曲线

图34是一台直流电机的典型的干燥曲线，显示了绝缘电阻的变化过程。干燥刚开始时，电阻由于温度的升高而下降，然后在干燥过程中逐渐增加，最后因为达到室温（20°C）而显著增大。

使用绝缘电阻测试仪测试潮湿的绝缘会有一个较大的隐患，潮湿的设备绝缘容易击穿，即使测试电压比较低。如果绕组吸收了大量水分，那么就会变得很脆弱。因此，操作人员必须非常谨慎地使用高压。Megger仪器能够以25 V的步进值生成25 V至5 kV的测试电压。

放电测试

存储电容器时，首先对电容器放电，然后将所有终端进行短接，这种做法读者或许很熟悉，但是原因却鲜为人知。电容放电后，两个终端之间的电压已经降为零，为什么还需要进行短接？

原因是电容器绝缘的电介质吸收电流。如果终端未进行短接，那么电介质吸收过程存储的能量会被缓慢地释放，从而使负电荷和正电荷聚集在两个终端。经过时间的积累，这些电荷逐渐使电压升高，甚至达到原来绝缘测试电压的幅值，并且具有足以致命的能量。

测试完成后，被测试品实际上就成为了一个充满电的电容器。绝缘电介质内部存储了可观的电能。

关于充放电有一个重要的准则，那就是放电时间应该达到充电时间的五倍。如果用户进行了一次10分钟的极化指数测试，那么应对试品放电50分钟。

优质的仪器会在测试完成后立即对试品进行放电。普通的仪器需要使用分离的放电旋钮或放电开关，增加了额外的测试步骤。如果忘了对试品进行放电，可能对下一个接触试品的人员造成致命的风险。

Megger的仪器在放电过程中还会对电压进行探测，当电压下降至安全的等级时会显示这个电压。此时才可以对被测试品进行操作。

然而，到目前为止，释放的只是存储在试品中的电容性电荷。本文一开始就说明了测试开始时的电容充电过程是快速完成的；同样地，测试结束时的电容放电过程也是快速完成的。但是，吸收电流进入电介质较慢；同样地，吸收电流的释放也会较慢。

因此，虽然放电完成后对试品进行处理是安全的，但是如果将试品的终端短路，那么电荷就会逐渐聚集，使试品的终端再次产生高压。综上所述，如果设备不会被立即投运，确保所有终端被短接并接地。

大型设备的充电时间

我们经常被问到的一个问题是「使一台设备完全充电需要多久？」。答案是，「我们不知道！」。

为什么没有确定的答案呢？原因是充电时间是由被测试品的实际特性决定的。例如，Megger的S1-5010规定了在2 mA输出电流下，为每微法电容充电的时间不超过5秒；在5 mA输出电流下，为每微法电容充电的时间不超过2.5秒。也就是说，如果知道了试品的电容量，就可以自行计算所需的充电时间，不管试品是电机、电缆还是单片绝缘材料。

电机驱动的绝缘测试仪

另一个常见的问题是，「那些老式的装在木箱里的、使用电机驱动的绝缘测试仪去哪了？」。一些人认为这样的仪器确立了绝缘测试标准，并且依然符合目前的标准。

这些装在木箱里的、使用外部电机驱动的绝缘测试仪产于1910至1972期间，采用了最初由Evershed发明的「Cross Coils Ohmmeter」专利。如同名字一样，大而且重的两个指针运动至互呈一定角度的位置，构成了首台真正意义上的「欧姆表」。但是这种运动结构具有优缺点。

主要的优点是，由于指针具有一定的重量和惯性，因此对暂态干扰抑制能力较强，运动非常平滑。不幸的是，指针的自重使其相对容易损坏，因此搬运仪器时需要格外小心。此外，仪器使用前还需要调平，需要与外部水平仪和可调脚配合使用。指针的运动与最大电阻量程关系不大，最大可测电阻能达到M Ω 和G Ω 之间。

由于老式的发电机庞大、笨重，那些用过手摇式仪器的人都知道，因此需要开发新的电源。没人会希望在做极化指数测试时不停地手摇。当然，没有外部电源时手摇是唯一的选项。

技术的进步使得「设备电子化」方式得到普及，这种新的方法使仪器变得更为结实和精密。全新的低压发电机被开发出来，使手摇变得轻松得多，最终被电池取代。这就是当今我们所看到的持久、稳定的电源。

电子元件的普及使得仪器更加结实、精度更高、重量更轻。同时仪器还可以提供更多与暂态有关的信息，这样的信息在过往由于电源的不稳定和指针的关系常被忽略。

哪种仪器更好？读者可以做出自己的决定。

测试引线设计

测试引线组的设计旨在便于连接到各种断电系统，以进行绝缘电阻测量。在所有情况下，用户都有责任采用安全的工作方法，并在连接前验证系统是否安全。即使是电隔离的系统也可能表现出很大的电容，在绝缘测试的应用过程中会产生高电荷。这种电荷可能是致命的，在测试过程中不应接触包括引线和夹子在内的连接。在接触连接之前，系统必须安全放电。

测试导线是任何精密仪器的关键部件，其安全性、长寿命以及为实际应用中的各种测试件提供可靠连接的能力至关重要。

精心的设计确保可重复连接、实用且安全。只有最好的材料和最合适的材料才能被用于提供性能和安全性的必需组合。例如，准确规定电缆可确保其在所有条件下都保持灵活性，并具有极佳的绝缘性能，而不会影响测量。

使用双绝缘硅电缆可确保可靠和安全的测量。使用不良或漏电导线进行测试可能会产生误导性测量，并可能导致绝对良好的绝缘故障被诊断出错误，浪费时间和金钱进行不必要的维修。使用长测试引线时尤其如此。

重要安全性能增强

国际标准IEC61010-031详细说明了用于电气测量和测试的手持式探头组件的安全要求。就这标准进行了一些修改，特别是：防止电弧闪光和短路造成的危险。

有两种危险被考虑到：（1）探头尖端或鳄鱼夹临时桥接两根高能导体的危险，以及（2）在电流流动时接触被破坏的危险。

这些危险特别适用于使用5 kV和10 kV绝缘电阻测试仪的许多环境。如果探头或夹子在连接过程中瞬间将两根高能导体短路，则会产生极高电流，加热金属并熔化绝缘层。这本身可能会对夹子或探头附近的操作员或旁观者造成严重灼伤。另外，如果在电流流动时触点断开，则可能发生电弧放电，导致称为电弧闪光的极其严重的情况。

这标准描述了电弧放电的危险如下：「电弧放电会将电弧附近的空气电离，允许在探头尖端或鳄鱼夹附近持续流动电流。如果有足够的可用能量，则空气的电离将继续扩散，并且通过空气的电流继续增加。结果是出现电弧闪光，类似于爆炸，可能对操作员或旁观者造成伤害或致命。」

IEC61010-031:2008 要求探头尖端和鳄鱼夹的构造要减少电弧闪光和短路的风险，此要求适用于所有安装类别为III或IV（CAT III或CAT IV）的鳄鱼夹或夹具。因此，鳄鱼夹的表面一定不能导电，并且在夹子闭合时不应有可接触的金属部件（如标准所定义）。

在设计阶段，详细的测量和测试程序用于评估电气距离和间隙路径，以确保符合标准。导电金属制品的可接近性可使用IEC标准测试手指来评估。

安全操作应考虑的事项

在电气测试环境中，安全工作实践对于确保操作员的安全至关重要。在高压、高能环境中进行绝缘测试会产生许多独特的危险，如下所示：

1. 使用完全绝缘的夹子保持实用性

如果夹子增加的绝缘阻碍了操作和可靠地连接到所需的各种母线、电线和端子的能力，则这设计是无用的，操作员可能会移除额外的绝缘以进行连接。

2. 避免长电缆的充电电容

仪器端的锁定高压插头降低了插头失去连接或拔出的可能性，这可能导致负载在测试结束时无意中保持充电，并且仪器错误地报告没有电压存在。锁定装置使用简单，可防止「插头端」断开，有助于确保测试后负载放电的完整性。

3. 在CAT IV 600 V或CAT IV 1000 V环境中防止高压

由于连接到更上游的供电系统（过电压类别IV涉及工业厂房的输入电源），过电压需要更多的保护。这些是在电源上自然发生的瞬变，通常是由开关动作或远程雷击引起的，并且会在连接的设备、测试引线、夹子等呈现数千伏的脉冲。这种设备必须在连接过程中为操作员提供保护。额定用于过压类别CAT IV 600 V电源的夹子必须能够承受高达8 kV的脉冲。

额定用于过压类别CAT IV 1000 V电源的夹子必须能够承受高达12 kV的脉冲。

具有精确限定尺寸的高介电强度绝缘聚合物模制的夹子能确保即使在不利条件下也能保持电气爬电距离和间隙距离。

4. 仪器输出（5 kV、10 kV或15 kV）的保护

许多人担心其绝缘测试仪的电力输出可能是5、10或甚至15 kV。然而，实际上，从仪器获得的电流通常限于几毫安，并且其本身具有相对低的危险。

这里的危险不在于仪器的输出，而在于工作环境。如果连接的负载是电容性的，当仪器充电到高压时，这可以提供非常大的能量，并且如果被触摸可以是致命的。此外，在许多高压环境中测试绝缘时，必须爬上梯子才能到达变压器等设备上的连接，并伴有高空作业的风险。在这种情况下，一个有害的电脉冲可能会导致用户自动作出反应，并可能造成严重的跌伤。完全绝缘的夹子有助于降低此风险。

安全警告

在进行绝缘测试连接之前，必须关闭、断电、隔离并检查被测电路是否安全。连接仪器时，要确保电路未重新通电。绝缘测试期间不得触摸电路连接。

完成测试后，在断开测试引线之前，必须将电容电路完全放电。电容电荷可以是致命的。

在放电后，被测物品应通过短路连接牢固地短路，直至需要使用时为止。这是为了防止随后释放的任何存储的电介质吸收电荷，从而将电压升高到潜在危险的水平。

测试导线，包括鳄鱼夹，必须处于良好状态、清洁、干燥，并且没有破损或破裂的绝缘层。如果导线组的任何部分损坏，则不应继续使用。

仪器箱设计

5 kV至15 kV绝缘测试仪可用于多种环境，从车间的电机测试到高压开关站中的电源线和开关设备的测试。所开展工作的性质要求最终的便携性和坚固性。与开关站中的大多数设备其耐用性和安全性来自坚固的金属外壳有所不同，绝缘测试仪必须小巧轻便，能够在所有位置 and 高度进行工作。为了实现这一目标，仪器制造商通常采用注塑成型塑料，一般采用ABS或类似材料，提供一个轻质耐用的外壳。

为确保用户的最大安全性，产品应满足国际标准IEC61010（测量、控制和实验室使用电气设备的安全）的严格要求。

绝缘测试仪不仅设计用于测量断电系统的绝缘电阻，还可以在高达600 V ac的通电系统上进行电压测量（相对地）。在这两种情况下，必须确保仪器不仅可以处理所施加的电压，还可以处理可能在系统其他地方发生的任何瞬变，并向上传播到连接的仪器。在涉及配电系统的外部位置，这种瞬变可能很大，携带着非常大量的能量并对用户造成重大危险。即使在绝缘测试期间连接电路已经断电，网络上其他地方的开关操作或远程雷击也会在未通电系统中引起很大的瞬态电压，这时候仪器必须安全地运行以保护用户。

阻燃安全

IEC61010根据配电系统内的位置和电源电压将这些瞬变分类为不同的严重程度。当我们沿着分配系统向上游移动时，会遇到越来越严重的瞬变。连接外部系统的仪器必须评定为IV类（CAT IV）。例如，额定为CAT IV 600 V的仪器必须能够安全地承受8,000 V的瞬态电压。

当连接到这样的系统时，如果发生故障，并且瞬变导致仪器内的闪络，空气中的局部电离可以在可能是非常高能量的电源之间产生有效的短路，对用户造成重大危险。因此，IEC61010-2-030要求仪器在发生这种瞬变时保持安全。

此外，IEC61010的第1部分要求，在仪器内发生单一故障时，例如电池故障，设备外部不会发生火灾蔓延。有两种途径可以检查合规性：第一，在仪器内进行「单故障」测试；第二，只需要安装一个阻燃外壳。最安全的仪器会包括这两种合规性途径。

遗憾的是，虽然适用于制造箱子的注塑材料对于它们的轻质和耐久性能是理想的，但它们通常不具有阻燃性，并且在发生故障时不能提供足够的保护。具有阻燃添加剂的材料耐久性较低，因此也不能承受日常使用的严苛要求。这个难题给仪器制造商带来了严峻挑战。

Megger采用了独特的双外壳设计方法，内层提供必要的防火保护，外壳仍然坚固耐用，不受损害。

MEGGER绝缘测试仪器

Megger 5 kV、10 kV和15 kV绝缘测试仪器专为工业和公用事业应用而设计。所有Megger绝缘测试仪都坚固可靠，适用于高性能应用。它们在所有端子上提供高达CAT IV 1000 V的安全等级，并安装在坚固的聚丙烯外壳中，在运输时具有IP65的全面保护。所有仪器均采用独特的双外壳设计，可在保持坚固性的同时实现阻燃保护。

10 kV的仪器完全符合IEEE 43-2000标准「旋转机械的绝缘电阻测试的推荐规范」。这允许用户有效地测试任何现有机械。15 kV的仪器完全符合NETA对于测试额定电压高于35 kV的设备的要求。

MIT515、MIT525、MIT1025、MIT1525

MIT系列由四个仪器组成：两个5 kV型号、一个10 kV型号和一个15 kV型号。系列专为工业和配电而设计。MIT515（5 kV型号）可用于执行简单的绝缘测试和基本诊断绝缘测试，例如极化指数（PI）。两个新的先进型号，MIT1025（10 kV型号）和MIT1525（15 kV型号）提供存储器和诊断绝缘测试。MIT1025和MIT1525适用于更高电压设备的更严格测试。

MIT系列具有完全指定的屏蔽终端/电路，可在各种测试情况下获得准确的结果。测试可以使用电池或交流电源进行，并享有长电池寿命和快速充电时间。为了帮助存储和趋势结果，MIT525、MIT1025和MIT1525包括了存储器可通过U盘下载到电脑，还有其他诊断测试，如步进电压（SV）和斜坡测试。

MIT系列的一些功能有：

- 旋转开关拨盘提供直观操作
- 主电源供电或电池供电
- 更换电池容易
- 斜坡测试

S1-568、S1-1068和S1-1568

S1系列包括三种型号，分别为5 kV、10 kV和15 kV型号（分别为S1-568，S1-1068和S1-1568）。S1系列专为公用事业而设计，特别适用于电气噪声较高的和使用到长电缆的输电及发电应用，以及服务公司。所有S1型号均配备6 mA额定电流的高输出功率以处理容性负载，更有提升了的电气噪声抗扰度，以应对最具挑战性的变电站环境及输电压环境。

S1系列有五种诊断测试，包括PI、SV和斜坡测试。这些仪器可以通过USB端口和蓝牙存储和下载结果。此外，S1系列可以通过USB和Power DB Lite软件进行远程控制，以增加使用信心和便利性。

S1系列的一些功能有：

- 6 mA输出电流可为容性负载提供快速充电和测试
- 8 mA抗噪能力，可在超高压环境中进行稳定测量
- 测量量程为15 TΩ（5 kV型号）及35 TΩ（10 kV和15 kV型号）
- USB和蓝牙流式传输实时测试数据和下载存储结果
- 板载内存，用于存储结果
- 通过USB远程操作



MJ15和BM15

5 kV绝缘电阻测试仪

- 合格/不合格限值可用于快速的合格性测试
- 最大量程达20 GΩ
- 电压量程达到600 V会自动放电

BM15和MJ15是两款紧凑的5 kV绝缘电阻测试仪，操作简单，可快速和高精度地获取被测试品的绝缘电阻。两款仪器都提供了四个不同的测试电压（500 V、1 kV、2.5 kV、5 kV）、模拟表头、量程达20 GΩ。

BM15由8节「AA」电池或可充电碱性电池供电；MJ15除电池外还有手摇发电机。

测试引线

Megger提供全系列的测试引线套件，能提供符合IEC16010-031 2008标准的安全隔离。它们实用同时提供双重绝缘。然而，在较高的电压下，较大的物理尺寸会使这对于可用的夹子变得不切实际时，单一绝缘便会提供。必须使用安全的工作方法，并且在通电时不得触摸夹子和连接。

有关Megger测试引线的更多信息，请访问我们的网站 cn.megger.com 内的5 kV和10 kV绝缘测试仪产品系列。



所有必备测试设备的「一站式」解决方案

- 电池测试设备
- 电缆故障定位设备
- 断路器测试设备
- 数据通信测试设备
- 光纤测试设备
- 接地电阻测试设备
- 绝缘介损测试设备
- 绝缘电阻测试设备
- 电线测试设备
- 低电阻测试设备
- 电机和相序测试设备
- 万用表
- 绝缘油测试设备
- 便携式电器测试设备
- 电能质量测试设备
- 重合闸测试设备
- 继保测试设备
- TDR时域反射测试设备
- 变压器测试设备
- 电度表测试设备
- STATES®接线模块和测试开关
- 专业培训

Megger是全球领先的测量和测试仪器制造商，专注于电力、建筑布线和电信行业。

在美国、英国、德国和瑞典设有研发、工程和制造基地，在全球大部分国家和地区都设有销售和技术支持办事处，满足全球客户的需求。

在电力测试领域领先了一个世纪

Megger商标是1903年5月在英国注册的，并且被公司保留至今。虽然Megger以兆欧表闻名于世，但是公司还提供了全套的解决方案来满足客户所有电气测试的需求。

Megger为许多重要的维护领域提供测试方案，这些领域包括电缆故障定位、继电保护测试、断路器测试以及电能质量测试等。

Megger在全球范围内制造和推广产品，在英国、美国、瑞典、德国设有5个制造工厂。所有的Megger产品在质量、可靠性和安全性方面都符合最高的标准。所有公司的设施都符合ISO 9001质量标准，英国和瑞典工厂还符合ISO14001，国际环境标准。Megger一直在为产品质量而努力，保证世界的用户能够分享他们使用Megger产品的经验。

Megger办事处

Megger China Co., Ltd.

梅凯电力仪器(上海)有限公司

苏州工业园区唯新路60号 启迪时尚科技城38幢3楼3002-3005室

电话 0512-65567262

传真 0512-65567267

电邮 meggerchina@megger.com

Megger Hong Kong Limited

香港办事处

新界荃湾美环街1号时贸中心26楼8室

电话 +852 2618 9964

传真 +852 2618 9001

电邮 meggerhongkong@megger.com

cn.megger.com

Above1kV_cn_V01

「Megger梅凯」是一个注册商标。

版权所有 © 2019 Megger Hong Kong Limited

