

FLUKE®

原理、测试方法与应用

间歇性电气线路问题诊断

避免不必要的停机

学习接地电阻安全原理

接地电阻



为什么要接地？为什么要测量接地电阻？

为什么要接地？

接地不良不仅会造成不必要的停机，而且存在危险，并且增加设备发生故障的风险。

如果没有有效的接地系统，我们可能受到电击的威胁，更不必说仪表故障、谐波失真问题、功率因数问题和众多间歇性出现的问题。如果故障电流不能通过经合理设计与维护的接地系统作为途径导入地下，它就会通过包括人体在内的非正常途径进入地下。以下为负责制定接地标准和/或建议的组织：

- 美国职业安全与健康管理局（OSHA）
- 美国国家消防协会（NFPA）
- 美国国家标准协会和美国仪器协会（ANSI/ISA）
- 电信行业协会（TIA）
- 国际电工委员会（IEC）
- 欧洲电子技术标准委员会（CENELEC）
- 电气与电子工程师协会（IEEE）

但是，良好的接地并非只为保障人身安全，还在于防止工业设施和设备发生损坏。良好的接地系统将提高设备的可靠性和降低因雷击或故障电流发生损坏的可能性。每年工作场所因电气火灾造成的损失多达几十亿美元，这还不包括相关的诉讼成本以及人员和企业生产效率的损失。

为什么要进行接地系统测试？

随着时间的推移，由于土壤的腐蚀性，加之含水、含盐量较高和高温影响，接地棒导电性及其连接会受到影响。因此，虽然接地系统安装初期的接地电阻值较低，但随着接地棒的腐蚀，接地系统电阻会增加。

Fluke 1623 和 1625 等接地电阻测试仪是保障线路正常运行所必不可少的检测工具，突然性电气线路故障可能与接地或电源质量有关。

因此，作为正常预防性维护计划的一部分，所有接地体和接地连接至少应每年检查一次。检查过程中一旦发现电阻值增加超过 20 %，技术人员应及时调查问题原因，并采取更换或增加接地棒等措施降低接地电阻。

接地的定义及其概念

《美国国家电气规范》第 100 条关于接地的定义是：“电路、设备与大地或某一代替大地的导体之间的导电连接，包括正常和非正常连接。”接地实际分为两种形式：地线接地和设备接地。地线接地是将电路的导体（通常是零线或中心线）连接到大地上的接地极，设备接地是为了保证建筑物内设备正常安全运行而进行的接地。

目录

2

为什么要接地？
为什么要测量接地电阻？

4

接地基本知识

6

接地电阻的测试方法

12

接地电阻的测量

除非这两种接地系统之间存在连接，否则应相互隔离，其目的在于防止因雷击造成闪络而产生电位差。接地的目的除了保护人员、设施和设备外，还为故障电流、雷击、静电放电、EMI 和 RFI 信号及干扰提供一条安全释放的路径。

良好的接地电阻值是多大？

人们往往搞不清楚好的接地体与好的接地电阻值之间的关系，理想的接地体电阻值应该等于零欧姆。

尽管目前没有一个统一的接地电阻限定值，但是，美国国家消防协会（NFPA）和电气与电子工程师协会（IEEE）建议接地电阻值为 5.0 欧姆或更低。

美国国家电气规范（NEC）提出“按照 NEC 250.56 规定，系统对地阻抗必须小于 25 欧姆。采用高灵敏度设备的设施应等于或小于 5.0 欧姆。”

电信行业通常以 5.0 欧姆或 5.0 欧姆以下作为接地和连接电阻值。

接地电阻值确定的目标在于确保经济性和可行性的同时使接地电阻值降至最低。



为什么要测量接地电阻？土壤具有腐蚀性



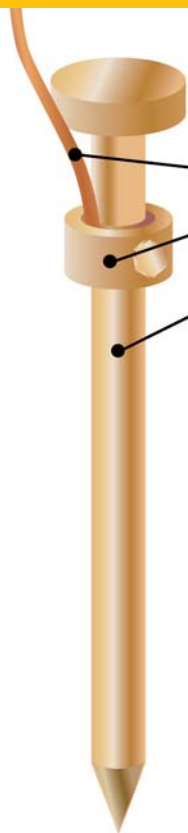
为什么要接地？雷击



利用 Fluke 1625 检查您的接地系统是否良好



接地基本知识



接地极的组成

- 接地线
- 接地线和接地极间的连接
- 接地极

电阻所在位置

(a) 接地极及其连接点

通常接地极及其连接点的电阻非常低，接地棒通常由导电性好 / 电阻低的材料制成，如钢或铜。

(b) 接地极与周围土壤的接触电阻

经美国国家标准协会（隶属美国商务部的政府机构）证明，只要接地极上没有油漆、油脂，并且接地极与土壤接触牢固，该电阻基本可以忽略。

(c) 周围土壤本身的电阻

概念上接地极周围的土壤由厚度相同的同心壳层组成，由于最靠近接地极的同心壳层面积最小，因而电阻最高，其余壳层的面积较大因而电阻较低。最终在其他壳层的作用下，导致接地极周围土壤的电阻非常小。

根据以上情况，我们在安装接地系统时应着重考虑降低接地电阻值。

影响接地电阻的因素有哪些？

首先，按照 NEC 标准(1987, 250-83-3)，接地极与土壤接触的最小长度应为 2.5 米（8.0 英尺）。但是，影响接地系统接地电阻的变量有四个：

1. 接地极的长度 / 深度
2. 接地极的直径
3. 接地极的数量
4. 接地系统设计

接地极的长度 / 深度

增加接地极的埋入深度可有效地降低接地电阻，由于土壤的电阻率不一致并且非难以预测，因而接地极应安装在冰冻线以下，使接地电阻不致受到周围土壤冻结的影响。

一般接地电阻的长度增加一倍可使电阻降低40%，部分情况下无法提高接地棒的埋设深度 - 如碎石、花岗岩较多区域，此时可使用接地混凝土等办法。

接地极的直径

增加接地极直径对于降低电阻值的效果甚微，例如，当接地极直径增加一倍时，电阻将降低 10 %。

接地极的数量

使用多个接地极也是降低接地电阻的一种方法，这种方法采用多个电极并联的方式来降低电阻。为使其他电极发挥效用，接地极之间的间距需至少等于埋设管件的深度。如果接地极之间的间距不正确，它们之间将互相影响，导致无法降低电阻值。

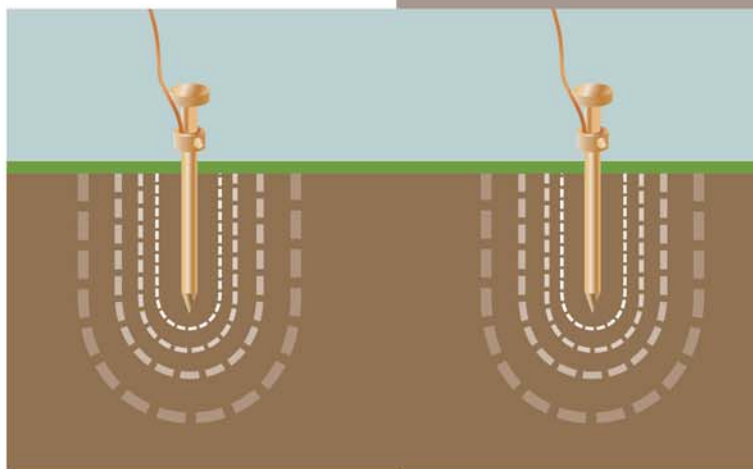
为使接地极的安装满足特定要求，可参照下面的接地电阻表。请记住此表只作参考使用，因为土壤是分层的，很少完全一致，电阻值的变化将较大。

接地系统设计

简单的接地系统能够由一根埋于地下的接地极组成，采用单根接地极接地的方法极为常见，您家周围和商业区域都可看到。复杂接地系统能够由多根相互连接的接地极、网状结构、接地板和接地环组成，此类系统通常安装在变电站、中心局和电讯塔位置。

复杂网络能够显著地提高与周围土壤的接触程度，降低接地电阻值。

土壤类型	土壤电阻率 RE	接地电阻					
		接地极深度 (米)			接地条 (米)		
	ΩM	3	6	10	5	10	20
非常潮湿的土壤，类似沼泽地	30	10	5	3	12	6	3
农耕土壤、肥沃土壤和粘性土壤	100	33	17	10	40	20	10
砂质粘土	150	50	25	15	60	30	15
潮湿砂质土壤	300	66	33	20	80	40	20
1:5 混凝土	00	-	-	-	160	80	40
潮湿砂石	500	160	80	48	200	100	50
干砂质土壤	1000	330	165	100	400	200	100
干砂石	1000	330	165	100	400	200	100
含碎石土壤	30,000	1000	500	300	1200	600	300
岩石	107	-	-	-	-	-	-

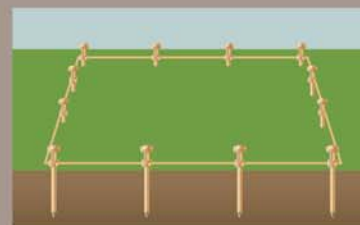


各接地极都有自己的“势力范围”

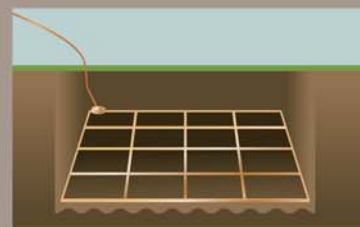
接地系统



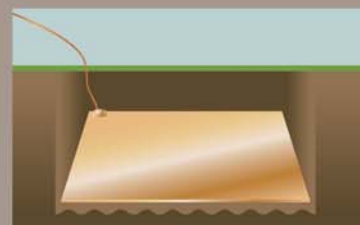
单根接地极



多根相互连接的接地极



网状结构



接地板

接地电阻测试的方法有哪些？

共有四种接地电阻测试方法：

- 土壤电阻率（使用辅助接地极）
- 电位降法（使用辅助接地极）
- 选择测量法（使用一只钳型表和辅助接地极）
- 无辅助极测量法（仅使用两只钳型表）

土壤电阻率测量

为什么要确定土壤电阻率？

土壤电阻率最为适合测量新型设施（绿场应用）的接地系统电阻，最好能选择电阻最低的位置进行测量，但是正如我们前面讨论的那样，土壤条件的不足可通过提高接地系统设计来弥补。

土壤的组成、含水量和温度都会影响土壤电阻率，土壤很难做到均匀一致，不同地区的土壤电阻率不同，不同深度的土壤电阻率也不同。水分含量随季节变化，随大地子层的性质以及永久性地下水位而变化。由于地层越深土壤和含水量越稳定，因而建议接地棒埋设越深越好，最好到达地下水位位置。同时，接地棒应安装在温度稳定的位置，即冰冻线以下。

为保证接地系统发挥作用，其设计应能够经受各种恶劣条件。

如何计算土壤电阻率？

下面我们介绍如何利用普遍采用的温纳法进行测量，该方法由美国标准局的 Frank Wenner 博士于 1915 年提出(F. Wenner, A Method of Measuring Earth Resistivity; Bull, National Bureau of Standards, Bull 12(4) 258, p.478-496; 1915/16.)。

其公式如下：

$$\rho = 2 \pi A R$$

(ρ = 深度 A 处的平均土壤电阻率，单位 ohm-cm)

$$\pi = 3.1416$$

A = 电极之间的距离，单位 cm

R = 测量仪器测得的电阻值，单位欧姆。

请注意：将 ohm-cm 值除以 100 换算成 ohm-m，一定要注意单位。

示例：假设接地系统的接地棒长度为三米，为了测量三米深处的土壤电阻率，我们假定测试电极之间的间距为三米。

测量土壤电阻率时，首先打开 Fluke 1625 并读出电阻值（欧姆），此时我们家电阻值读数等于 100 欧姆，则此时我们知道的值有：

$$A = 3 \text{ 米}$$

$$R = 100 \text{ 欧姆}$$

则土壤电阻率将等于：

$$\rho = 2 \times \pi \times A \times R$$

$$\rho = 2 \times 3.1416 \times 3 \text{ 米} \times 100 \text{ 欧姆}$$

$$\rho = 1885 \Omega\text{m}$$

如何测量土壤电阻率？

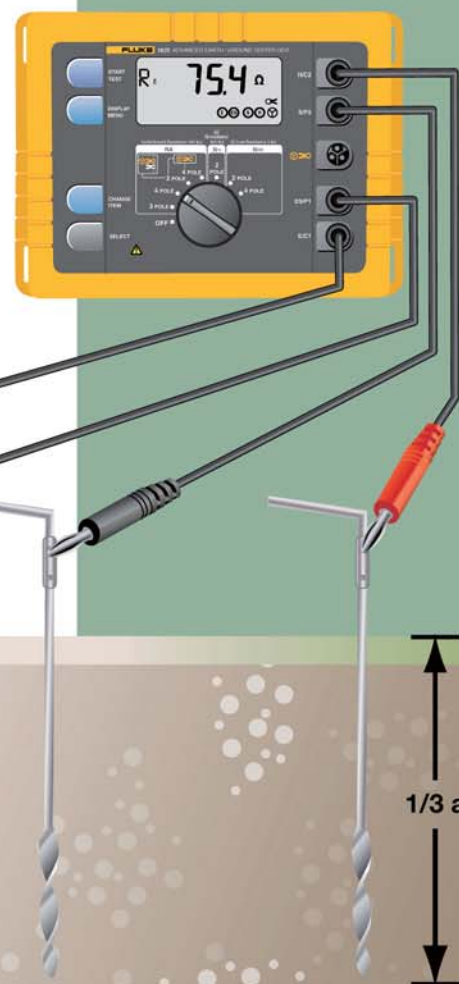
首先按下图连接接地电阻测试仪。

从图中可看出，四根插在土壤中的辅助接地极排成一条直线，相互之间间隔距离相等。两根接地极之间的距离至少大于接地极插入深度的三倍，因此，如果每根接地极的深度为1英尺（0.30米），则两根接地极之间的距离应大于3英尺（0.91米）。Fluke 1625 通过两根电流辅助极产生已知电流，然后测量出两根电压辅助极之间的压降，最后通过欧姆定律($V=IR$)自动地计算出土壤电阻。

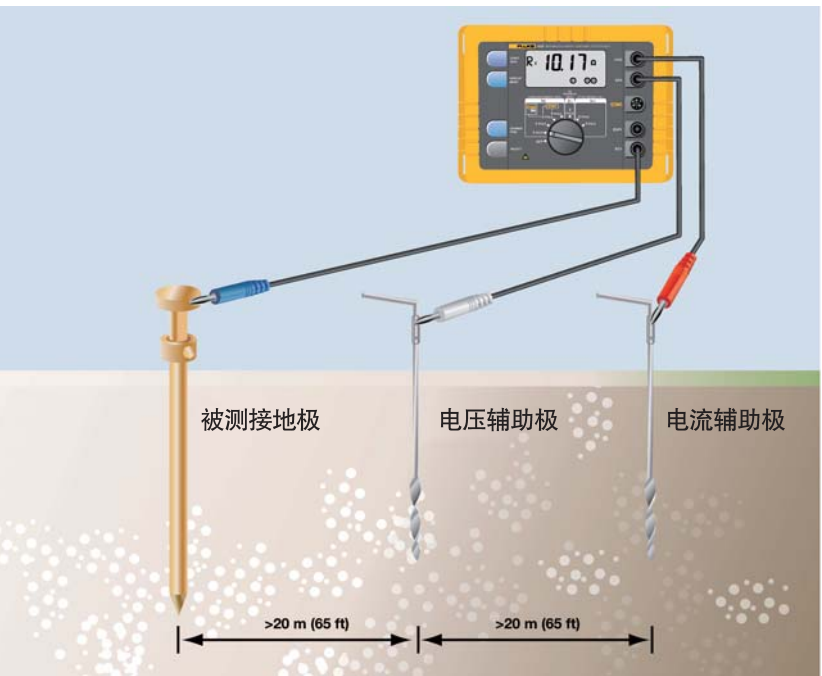
由于测量结果经常受到地下金属、地下水层等的影响，因而建议将接地极转动90度角再测量几次。将深度和距离改变几次再进行测量，可以大致选定合适的接地电阻系统。

由于土壤电阻率测量常常受到大地电流及其谐波的破坏，为避免这一情况发生，Fluke 1625 采用了“自动频率控制”(AFC)系统，该系统能够自动地选择噪声最小的测试频率，使您获得清晰的读数。

使用Fluke 1623或1625测量土壤电阻率的设置



接地电阻测试的方法有哪些？



电位降法

电位降法用于测量接地系统的性能或者单个电极排放电能的能力。

电位降法的测量原理是什么？

首先将需要测量的接地极的连接断开，接着将测试仪与接地极连接，然后根据3极电位降测试法，在土中插入两个接地极并与接地极排成一条直线。通常留出20米（65英尺）间距就够了，关于接地极的具体安装细节，请看下一节介绍。

Fluke 1625 在电流辅助极（辅助接地极）和接地极之间产生已知电流，同时测量出电压辅助极与接地极之间的电位降。

通过欧姆定律，测试仪自动地计算出接地极电阻。

按图所示连接接地电阻测试仪，按START键读出RE（电阻）值，该值是被测接地极的实际值，如果该电极与其他接地极并联或串联，则RE 值是所有电阻之和。

如何安装辅助接地极？

为使3极接地电阻测量法达到最高准确度，探头应放置在被测接地极和辅助接地极的影响范围之外。

否则，电阻的有效区域将出现重叠，使测量结果无效。下表列出了接地极（电压辅助极）和辅助地（电流辅助极）的正确设置方法。

为检验测量结果的准确性并保证接地极处在影响范围外，将电压辅助极（探头）沿任何一个方向移动1米（3英尺），如果读数变化较大(30 %)，则需要增加被测接地极、电压辅助极（探头）和电流辅助极（辅助地）之间的距离，直至移动电压辅助极（探头）时测量值保持相当稳定。

接地极深度	与电压辅助极之间距离	与电流辅助极之间距离
2 m	15 m	25 m
3 m	20 m	30 m
6 m	25 m	40 m
10 m	30 m	50 m

选择测量法

选择测量法与电位降法非常相似，但是更加安全，更加简单，因为在选择测量法中，不必断开接地极的连接！技术人员不需要冒断开接地的危险，也不会危及没有接地的设施内的其他人员或电气设备安全。

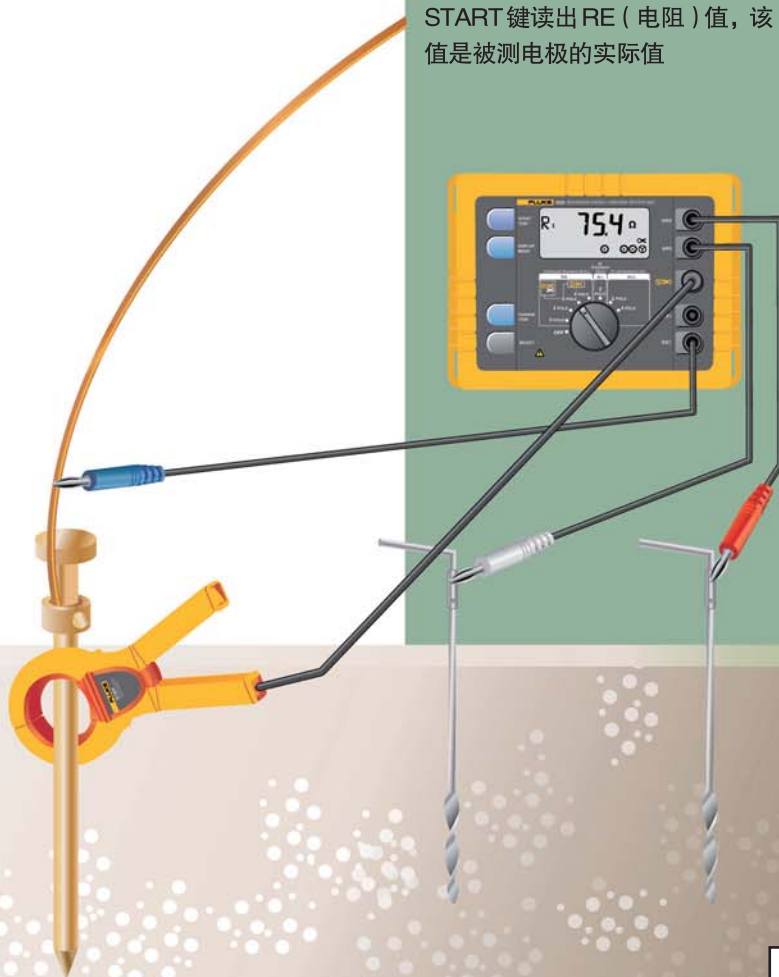
与电位降法相同，将两根接地极与接地极呈直线排列并插入土壤内，通常留出20米（65英尺）间距就够了，然后将测试仪与接地极连接，其好处在于不必断开与现场的连接，而是将一只特殊的钳型表置于接地极周围，从而消除接地系统中并联电阻的影响，只测量感兴趣接地极的电阻。

与前面方法一样，Fluke 1625在电流辅助极（辅助接地极）和被测接地极之间产生已知电流，同时测量出电压辅助极与被测接地极之间的电位降。利用钳型表只测量流过被测接地极的电流，尽管生成的电流也会流过其他并联电阻，但是电阻计算时($V=IR$)只使用流过钳型表的电流(即流过被测接地极的电流)。

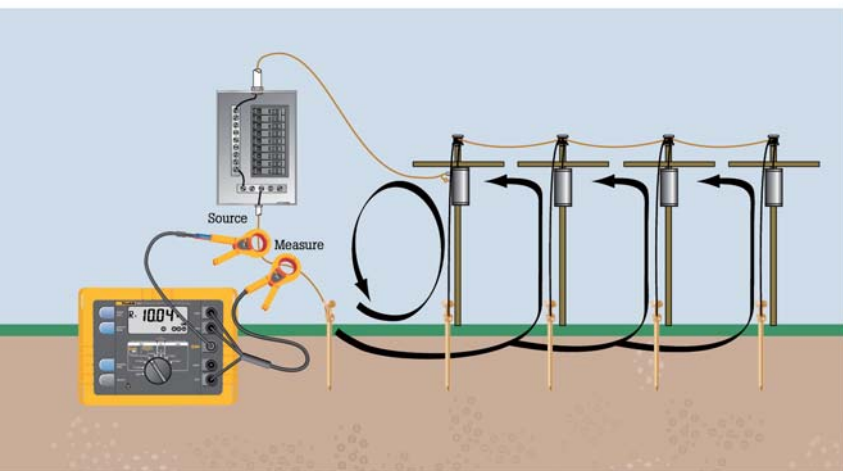
如果需要测量接地系统的总电阻，可将钳型表逐一置于各接地极周围测出各接地极的电阻，然后通过结算确定接地系统的总电阻。

测量采用架空地线或防静电线的高压输电塔各接地极电阻时，需要将地线拆下。如果输电塔存在多根接地线，需要将它们逐一拆下后再进行测量。但是，Fluke 1625有一个320 mm (12.7 in)直径的钳形电流表附件（选配），可不必拆下接地线或架空防静电 / 地线直接测量电阻。

按图所示连接接地电阻测试仪，按START键读出RE（电阻）值，该值是被测电极的实际值



接地电阻测试的方法有哪些？

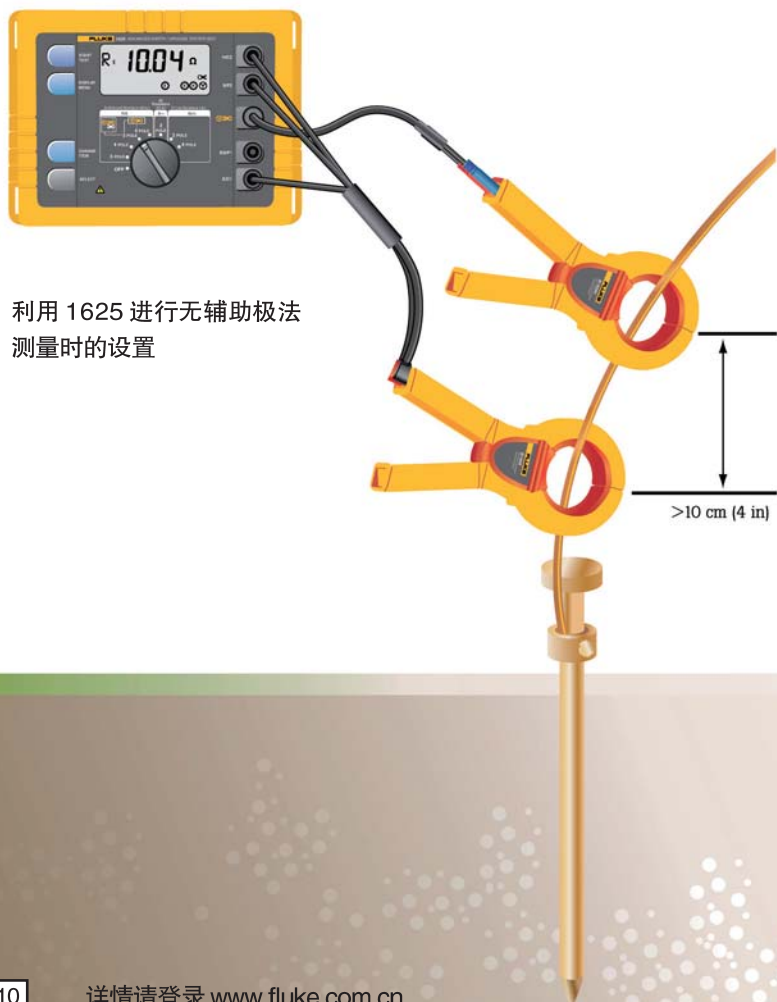


无辅助极测试法的测量电流路径

无辅助极法测量

Fluke 1625 单靠使用电流钳就能测量多处接地系统的接地环路电阻，这一测试技术的好处在于不必断开并联的接地体，不必寻找合适的辅助接地极安装位置，从而避免了危险，节省了时间。这一方法还可可在其他地方使用，如建筑物内、电缆塔上以及其他没有土壤的地方。

根据这一方法，首先将两只电流钳钳在接地棒或连接电缆周围，同时两只电流钳均与测试仪连接，其中一只电流钳感应出已知电压，另一只电流钳测量出电流，然后由测试仪自动确定该接地棒的接地环路电阻。如果只有一条接地路径，如许多住宅建筑的设置，无辅助极法将无法提供可以接受的测量值，而必须使用电位降测试法。



利用 1625 进行无辅助极法测量时的设置

Fluke 1625 的工作原理是：在并联 / 多点接地系统中，与其中任意一条路径（被测路径）相比，所有接地路径的净电阻极低。因此所有并联返回路径的净电阻实际等于零。无辅助极测量法只能测量与接地系统并联的单根接地棒的电阻，如果接地系统没有与地并联，则可能发生开路，或者只能测量接地环路的电阻。

接地阻抗测量

计算电厂和其他高压/电流场合的短路电流时，由于阻抗由感性和容性元件组成，因而确定复杂接地阻抗的大小非常重要。因为多数情况下电感率和电阻率是已知的，因而可通过复杂计算确定实际阻抗。

由于阻抗取决于频率，因而 Fluke 1625 在计算中采用了 55 Hz 信号以尽可能接近电压工作频率，从而确保了测量结果接近实际工作频率下的值。利用 Fluke 1625 的这一功能可直接准确地测量接地阻抗。

电力设施技术人员在测量高压输电线路时关心两件事情，即发生雷击时的接地电阻以及线路上某一特定点发生短路时整个系统的阻抗。在这种情况下，短路指火线脱落接触到了输电塔的金属结构。

2 极接地电阻测量法

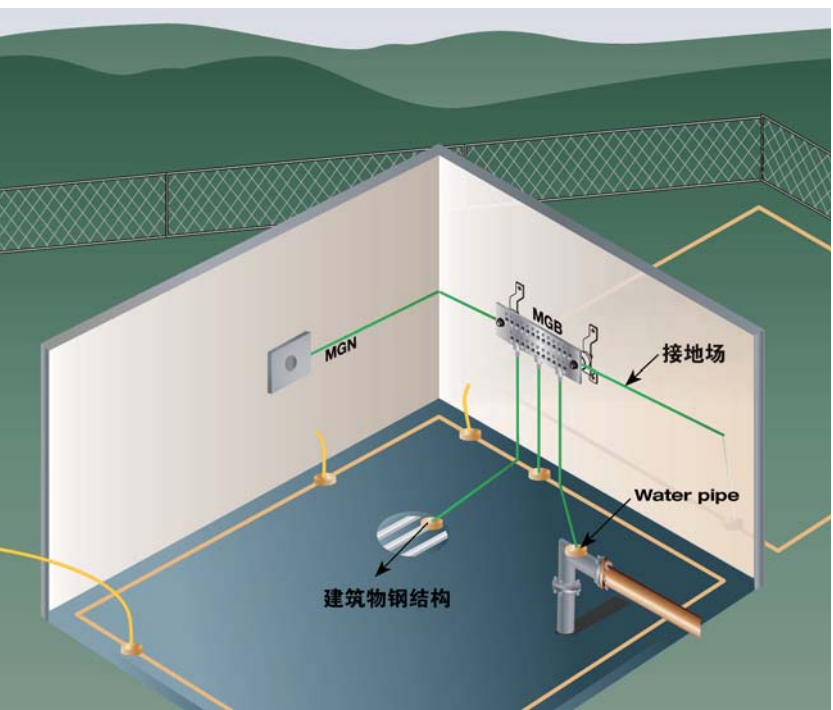
在无法安装接地极的情况下，您可以使用 Fluke 1623 和 1625 测试仪进行 2 极接地电阻/通断性测量，如下图所示。

按该方法进行测试时，技术人员身边必须有好的已知接地体，如全金属水管，水管应足够长并全部采用金属材料，无任何的隔离性联轴节或法兰。为确保测量结果稳定，Fluke 1623 和 1625 测量时采用了相当高的电流（短路电流 > 250 mA），这一点是其他许多测试仪所不具备的。



2 极法测量的等效电路

接地电路的测量



典型的中心局布局

中心局测量

中心局接地测量有三种不同方法。

测量前首先确定中心局内“总接地母线”（MGB）的位置，从而确定接地系统的类型。从图中可看出，MGB的接地引线存在以下连接：

- 多点接地中性线（MGN）或进线；
- 接地场；
- 水管；
- 结构或建筑钢。

首先对MGB的各路接地进行无辅助极法测量，目的在于确保所有接地体保持连接，尤其MGN。需要重点说明的是，此时测量的不是个别接地体的电阻，而是钳型表所钳环路的电阻。如图1所示，将Fluke 1625或1623与两只钳型表连接，两只钳型表钳于各连接线的周围，以测量MGN、接地场、水管和建筑物钢结构的回路电阻。

然后对整个接地系统进行3点电位降测量，按图2所示连接MGB。为了与远处的大地连接，许多电话公司都使用一对长达一英里的未使用导线。记录测量结果并至少每年测量一次。

接下来利用“选择法”逐一测量各接地系统的电阻，按图3所示连接福禄克1625或1623测试仪，测量MGN的电阻，以此作为该MGB特定分线的电阻值。然后测量接地场，该读数就是中心局接地场的实际电阻值，接下来测量水管和建筑物钢结构电阻。通过欧姆定律可非常容易的检验测量结果的准确性，各分线的电阻值应该等于整个给定系统的电阻值（由于可能无法测量所有的接地元件，因允许存在合理的误差）。

利用以上测量方法可提供极其准确的中心局测量结果，因为它测量了接地系统各个部分的电阻值及其实际表现。尽管非常准确，但是这些测量方法无法显示系统作为网络的整体表现，因为一旦发生雷击事故或故障电流，所连接的是整个接地网络。

为此，您需要进行其他测试项目。

首先，逐一对 MGB 各分路进行 3 极法测试并分别记录测量结果，然后再次利用欧姆定律进行计算，单项测量结果之和应该等于整个系统的电阻。通过计算可以看出，结果与总的 RE 值相差 20 % 至 30 %。

最后采用“选择无辅助极法”测量 MGB 各分路的电阻，该方法与无辅助极法相似，所不同的是使用了两只钳型表。我们首先将互感电压钳型表钳在 MGB 周围，由于 MGB 与进线连接，因而可满足测量要求。然后取出感应钳型表并将其置于连接接地场的电缆周围，所测电阻值即为接地场和 MGB 并联路径的实际电阻值。由于它的电阻非常低，因而对于测量读数没有实际影响。水管和结构钢等接地母线的其他分路也采用同样测量方法。

采用“选择无辅助极法”测量法时，将互感电压钳型表置于通过水管的线路周围（因为铜水管的电阻非常低），可认为读数就是 MGN 自己的电阻值。



图 1：中心局的无辅助极测试法

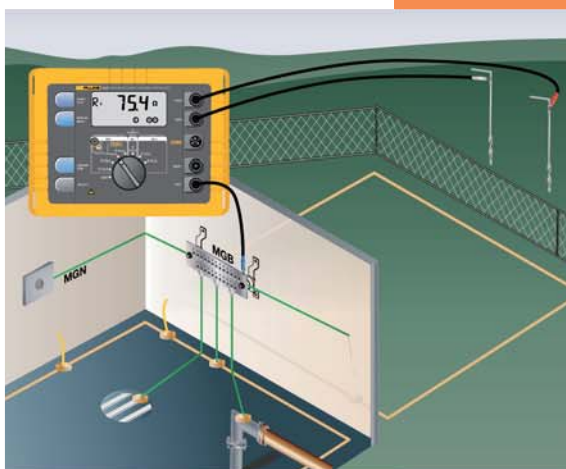


图 2：
对整个接地系
统进线 3 极法
测量

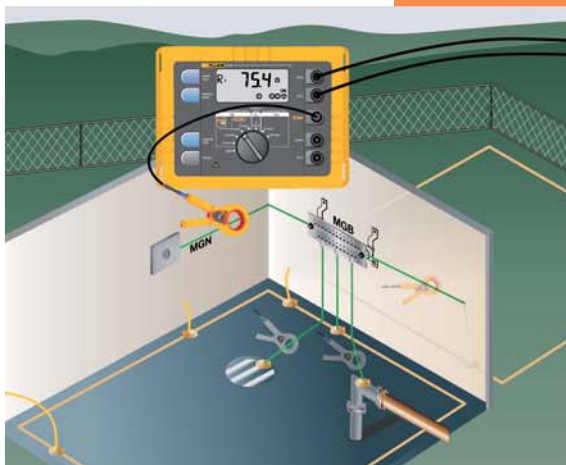
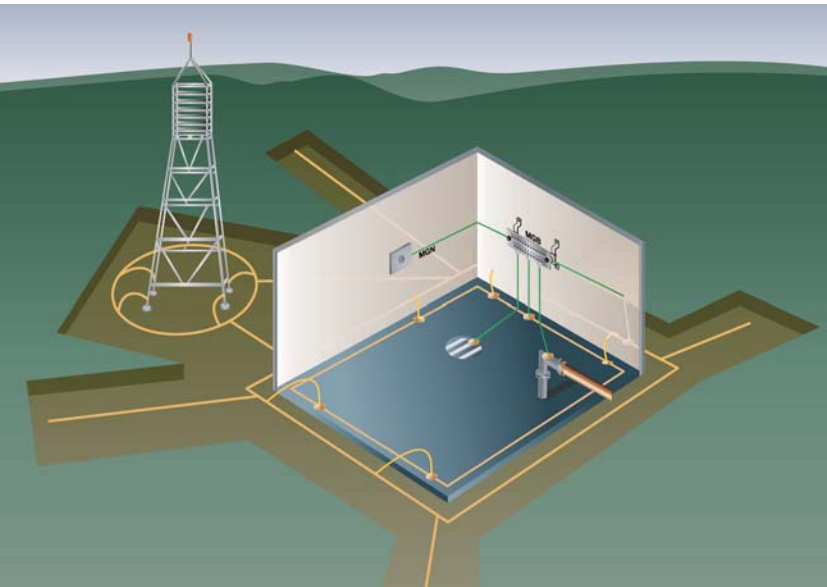


图 3：
利用选择法测量
接地系统各分路
的电阻

其他接地电阻测量应用



通讯塔接地电阻的典型设置

应用场合

Fluke 1625 还可用在其他四种特定场合的接地系统测量。

基站 / 微波和无线通讯塔

绝大多数通讯塔的腿部都分别接地，然后统一与一条铜缆连接。铁塔附近有基站建筑物，内有传输设备，建筑物内部有环形接地体和 MGB，环形接地体与 MGB 相连。基站四角分别通过一条铜缆与 MGB 相连，四角之间也通过铜导线互连，建筑物接地环和铁塔接地环之间也存在连接。

电力变电站

变电站是输配电系统的从属站，一般用于将高电压变成低电压。典型的变电站包括线路端接结构、高压开关柜、一台或多台电力变压器、低压开关柜、浪涌保护、控制电器和测量仪表。

远程交换站

远程交换站内有数字集线器和其他通讯设备，通常远程交换站的柜体两端同时接地，柜体周围安装接地极，接地极之间以铜导线连接。

商业 / 工业场所避雷装置

绝大多数避雷系统的设计采用建筑物四角接地，然后再通过铜缆连接。建筑物的大小和设计电阻值不同，接地棒的数量也不同。

测试方法推荐

对于每一种应用领域，要求终端用户采用三种测量方法：无辅助极测量法、3 极法和选择测量法。

无辅助极测量法

首先对以下装置进线无辅助极法测量：

- 铁塔各腿部和建筑物四角（基站/通讯塔）
- 所有接地连接体（电力变电站）
- 远程交换站的连接线路（远程交换站）
- 建筑物的接地极（避雷装置）

对于所有应用而言，上述测量并非真正的接地电阻测量，因为接地系统是一个网络，它主要是一种通断性测量，用以检查场所是否接地，线路连接是否正常，以及系统中是否有电流通过。

3 极法

接下来，我们通过 3 极法测量整个系统的电阻，要牢记接地极的安装规定。该测量应进行记录并至少每年进行两次。它测量整个场所的电阻值。

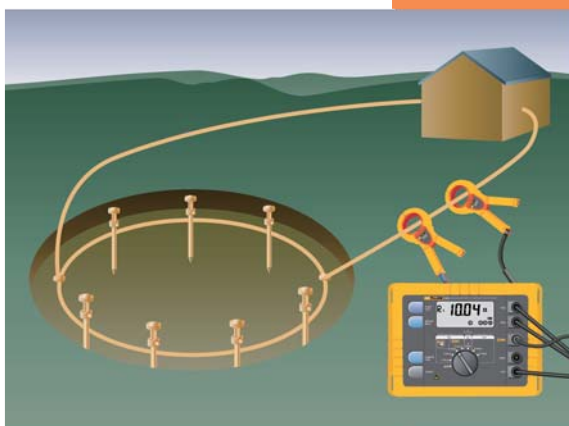
选择测量法

最后利用选择测量法对单个接地体进行测量，测量目的是检查各接地体的完整性、连接是否正常以及确定整体电势是否统一。如果其中任何一个接地体的测量结果与其他接地体相比存在较大偏差，应找出其中的原因。要测量的对象包括：

- 铁塔的每一条腿和建筑物四角(基站/铁塔)
- 各接地极及其连接（电力变电站）
- 远程交换站的两端（远程交换站）
- 建筑物四角（防雷设施）



电力变电站的典型设置



远程交换站的无辅助极法测量连接



防雷系统的选择法测量连接

接地电阻测量产品



Fluke 1625 高级
接地电阻测试仪



Fluke 1623 基本
接地电阻测试仪

功能最全的测试仪

Fluke 1623 和 1625 能够进行全部四种接地电阻测量：

- 3 极法（使用接地极）
- 2 极法（使用接地极）
- 选择测量法（使用一只钳型表和接地极）
- 无辅助极测试法（使用两只钳型表）

整套装置包括 Fluke 1623 或 1625 测试仪、两条一线、接地极、3 卷电缆、2 只钳型表、电池和手册、一个工具包。



完整套件

Fluke 1625 的高级功能

Fluke 1625 的高级功能包括：

- 自动频率控制 (AFC) - 找出干扰所在并选择相应的频率以降低其影响，提供最为精确的接地电阻值。
- R* 测量 - 计算 55 Hz 频率下的接地阻抗，更加准确地反映接地电阻值。
- 限定值可调 - 进一步提高测量速度

选配附件

320 mm (12.7 in) 分体式铁芯变压器 - 用于通讯塔各相的选择测量。

详情请登录 www.fluke.com.cn

福禄克，助您与时代同步！

福禄克中国客户服务中心热线：400-810-3435

北京办事处	电话：(010)65123435
上海办事处	电话：(021)61286200
成都办事处	电话：(028)85268810
西安办事处	电话：(029)88376090
深圳办事处	电话：(0755)83680030
重庆联络处	电话：(023)86859655
乌鲁木齐联络处	电话：(0991)3628551
武汉联络处	电话：(027)85743386
济南联络处	电话：(0531)86121727
沈阳联络处	电话：(024)22813668/9/0
南京联络处	电话：(025)84731286
广州分公司	电话：(020)38795800
北京维修站	电话：400-810-3435
上海维修中心	电话：(021)54402301
深圳第一特约维修点	电话：(0755)86337229