

钻孔深埋接地网在防雷工程中的应用

苏邦礼¹ 黄乃康² 朱文凯² 黄英杰³

(1 华南理工大学, 广州 510800)

(2 广州市顺康防雷科技有限公司, 广州 510800)

(3 广东移动通讯公司花都分公司, 广州 510800)

【摘要】 本文系统论述了一种防雷地网类型的兴起到发展的过程, 详细论述了防雷地网的施工新方法——钻孔深埋接地网的产生和目前的应用情况。重点阐明了钻孔深埋接地网的应用范围, 并指出其具有降阻幅度大、性能稳定不污染环境、占地面积小等特点, 应该说是目前移动通讯基站防雷地网的首选施工方法。

【关键词】 防雷地网 钻孔 钻孔深埋接地网 接地极 接地有效长度

引言

自从富兰克林于 17 世纪建立了雷电理论并发明了避雷针以来, 接地电阻或地网电阻就成为评估防雷技术的重要指标之一了。随着 18 世纪的工业革命, 特别是 20 世纪的第三次工业革命, 人类很快地进入了电气化阶段, 并迅速跨入信息化时代, 雷害问题从直击雷伤害为主发展为通过金属线或导体传输的雷电波危害为主了。人们建立了感应雷和高电压反击的理论, 出现了各种形式的避雷器, 而对地网的要求也更加严格。各种规范对地网的要求不同, 有的要求小于 5Ω , 4Ω , 甚至 1Ω 等。对高电阻地层, 达到上述要求都是十分困难的。有些条件下, 甚至是难于实现的。随着生产力的发展, 降阻的方法也从地表换土, 外引接地体、使用降阻剂, 到深埋接地体。近代, 由于钻探技术的广泛应用和在地壳钻孔工程成本的下降, 世界各国引入了钻孔深埋接地网, 把地网的泄流空间从地表引向了地层深处, 使地网的建设有了质的飞跃。

下面, 笔者就这一问题的发展, 主要是它在通信基站地网的应用为例作简要的归纳报告。

1 防雷地网的特点

众所周知, 当强大的高频、高压雷电流通过防直击雷的避雷系统, 避雷针(接闪器)、引下线、地网, 迅猛流入大地(标准的零电位体), 其过程只有十几至几十微秒, 在如此短暂的时间内, 将如此大量的高频、高压电荷通过接地体引入大地的需求, 使防雷地网必须具有如下的特点: 其一是防雷地网与其他地网一样, 都是将各种高、低压, 高、低频的, 正、负电荷引入大地; 其二是其他地网不具备的时限性, 即要求它们在最长仅几十微秒的时间内, 将如此大量的电荷完全地引入大地, 保护人员和设备仪器的安全。防雷地网的这二大特点成为本文讨论所有问题的主导观点。

2 防雷地网的技术指标

按规范 GB50057-94（下面简称“规范”），评价防雷地网的主要技术指标有三个，即接地体流散电阻、接地体的有效长度、接地体面积。现分述如下：

(1) 接地流散电阻 (R)，从它所流经电流的特性分为工频接地电阻 (R_ω) 和冲击接地电阻 (R_i)。对防雷地网而言，后者更重要，但测量时，都只是得出前者。故此，“规范”给出它们两者的换算式， $R_\omega = aR_i$ ，并由地网埋设处土壤电阻率 (ρ) 及地网最长支线的实际长度与地网有效长度 (L_e) 的比值，决定其换算系数 a (a 是一个恒大于 1 的数，所以同一接地网工频电阻一定大于冲击电阻)。当然，对不同的防要求，其 R 值的要求也不一样的。

(2) 接地有效长度 (L_e)，它是指地网在有效的流散时间内，通过接地体及时把强大的过电流和过电压排入大地，从而使受保护系统不致发生残压或残余电流的伤害。这个有效时间内电流可能达到的最远距离，就是有效长度。“规范”列出 $L_e = 2\sqrt{\rho}$ ，式中 ρ 为敷设地网处的土壤电阻率。 L_e 确定了地网支线实际长度的最大值。从而，否定了无限制地延长水平地网的有效性和可行性。

(3) 接地面积 (A)，是指由地网所包围的面积。“规范”指出环形接地体（地网）宜按以下方法敷设。

1) 当土壤电阻率 ρ 小于或等于 $500 \Omega \cdot m$ 时，地网所包围的面积 (A) 的等效圆半径 (r)， $r = \sqrt{A/\pi}$ 。当 $r \geq 5m$ 时，地网不需补加接地体。但如 $r < 5m$ 时，每一引下线处应补加水平或垂直接地体，前者的长度为后者的 2 倍。

2) 当 $\rho = 500 \sim 3000 \Omega \cdot m$ 时，地网的等效半径 $r \geq [(11 \cdot \rho - 3600) / 380]$ (m) 时，不需补加接地极，反之，在每一引下线处补加水平或垂直接地体。

换言之，在不同 ρ 的情况下， A 值的大小十分重要，它都要大于一个判定值。现按上式计算对应不同 ρ 值时，接地面积 A 有效长度 L_e 和等效半径 r 的判定值，见表 1。

表 1 接地网的相关数值

地表电阻率 ρ ($\Omega \cdot m$)	地网有效长度 L_e (m)	地网最小接地面积 A (m^2)	地网等效半径 r (m)	备注
≤ 500	≤ 44.7	≤ 78.54	≤ 5	$\sqrt{A/\pi} \geq 5m$; $L_e = 2\sqrt{\rho}$ (m)
≤ 1000	≤ 63	≤ 1191	≤ 19.5	$\sqrt{A/\pi} \geq [(11 \cdot \rho - 3600) / 380]$ (m)
≤ 1500	≤ 78	≤ 3620	≤ 34	$\sqrt{A/\pi} \geq [(11 \cdot \rho - 3600) / 380]$ (m)
≤ 2000	≤ 89	≤ 7366	≤ 48	$\sqrt{A/\pi} \geq [(11 \cdot \rho - 3600) / 380]$ (m)
≤ 2500	≤ 100	≤ 12427	≤ 63	$\sqrt{A/\pi} \geq [(11 \cdot \rho - 3600) / 380]$ (m)
≤ 3000	≤ 110	≤ 18805	≤ 77	$\sqrt{A/\pi} \geq [(11 \cdot \rho - 3600) / 380]$ (m)

按“规范”的表述，三个指标是并列的，而非仅达到其一即可。于是，虽然 R 达标，但 A 未达标，为要其达标，然而地网的设置受限的情况下，打垂直地极或深埋地极就显得尤为重要。更不用说 A 和 R 都同时未能达标的地网改造了。所以说，铺设深埋地极是施工和工程的需要与必然。

请注意，上述 1)；2) 论述最后关于补加水平接地体是引自 GB50057-94（见该规范 P9~P10），凡出现需要补加水平或垂直接地体的，规范均要求所加垂直接地体长度是水平接地体长度 1/2 就等效、就满足了！这隐含了在一定量值范围，垂直接地体的散流效果是等长水平接地体的 2 倍。

另一要关注的是遵守规范关于垂直接地体围闭成环状时，各钻孔间距应 $\geq 5\text{m}$ 的规定，以免各孔垂直接地体围闭成的圆柱体屏蔽作用降低投资效益。

3 深埋接地体的应用与发展

当地表土壤电阻率比较高时，雷电流在表面土层散流有困难，人们自然想起往深部发展。在生产力比较低下的时代，开始了人工向下挖坑，大小从 1m^2 至 $4\sim 8\text{m}^2$ 不等，深度从 $2\sim 3\text{m}$ 至 $6\sim 8\text{m}$ 不等，底部有放钢板，焊上钢筋，里面放进木炭、食盐之类的降阻材料，一个坑不成，挖上 $2\sim 4$ 个。这就是深埋接地体的原始做法。

随着生产力的发展，特别是十九世纪 50 年代，由于钻探技术的普及，开始把钻孔引入地网的施工中。钻孔是深埋接地体的最有效手段。通过钻孔下入棒状（如水管、角钢等）接地体，并在钻孔内再下入良好的降阻剂，使接地体与岩层之间有整合性的良好接触，造成雷电流与大地体（绝对零电位体）的通畅通道。钻孔本身是一个局部的低电阻区，深部散流的作用和效果就显示出来了。加上钻孔的精确布置，多孔并联……等技术手段的应用，近年来，使钻孔深埋接地网成为比较完善的地网施工新方法。

4 深部散洩雷电流的机理探讨

地层深处或岩层中，雷电流能不能逸散？笔者认为，即使岩层中，由于岩石有裂隙，节理解理，深处岩层中又有水，岩体和地下水中有许多化合物和阴阳离子，有的甚至有金属体，这些都是导电物质，钻孔中灌入降阻剂，本身就形成低电阻空间，其导电性能是肯定的。我们曾在完整的花岗岩体中作过孔深与电阻变化的测定资料，从《应用钻孔法解决高山高电阻地层地网的降阻问题研究报告》实验报告中，以芙蓉基站钻孔的曲线为例（见表 2、图 1），从图 1、表 2 中可以看出，在实验钻孔深度范围内，工频电阻是随孔深的增加而降低的。

表 2 广州花都区芙蓉山基站孔深与接地电阻变化情况（花岗岩地层）

单位： Ω

电阻 (Ω)	孔深 (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
孔号									
ZK1		100	40	24	20	18	15	14	13
ZK2		100	95	63	34	20	18	14	12

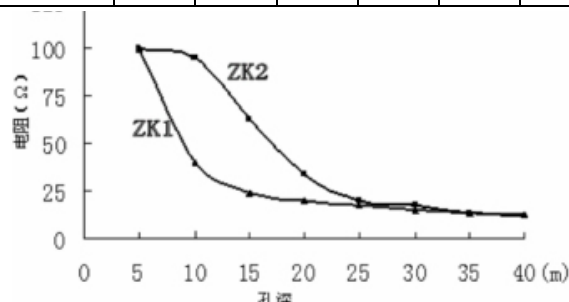


图 1 广州花都区芙蓉山基站孔深与接地电阻变化情况（花岗岩地层）

工频电阻下降了,冲击电阻是否会下降呢?从接地体的工频电阻与冲击电阻的换算关系可知,只要钻孔深度不超过地网的有效长度,工频电阻与冲击电阻的数值也同样是减少的。所以,只要钻孔深度 \leq 地网有效长度,冲击电阻一定会随工频电阻的下降而降低的。

至于趋肤效应主要存在高频电流在传导过程的表现,它在传导导体长度远大于截面直径才有意义,雷电流是强大场强作用下位移电流,在接地电阻——接地体至理论 0 电位的大地电阻或接地体为中心向三维空间发散到 $2\sqrt{\rho}$ 远的电阻,对此形状几何导体趋肤效应极微,水平式接地体与深埋式接地体无大差异。

从趋肤效应的角度来讨论,钻孔法是否有趋肤效应?有。无论任何金属导体,高频电流通过时,都有这一效应。由于电流集中到表面,相当于减少了电流截面的散流面积,电阻就增大了。常规的平面地网比钻孔的趋肤效应还要严重。接地体的趋肤效应与表面积的大小,散流环境等有关,钻孔内的角钢比平面地网的扁钢散流表面积要大。平面地网只有向下的半球体空间散流,钻孔可在整个圆柱体上散流。同时,用钻孔建造的深埋地网,由于钻孔内注满降阻剂,它与角钢等一起成为一个整体的,比单条角铁更大,表面更多的综合接地体(50 \times 50 \times 5角钢的表面积为 21000mm²/m,而 ϕ 91 钻孔的表面积为 285884 mm²/m,增加了 36%),加上降阻剂与岩层,地层相对角钢或扁钢与土层的直接接触而言的更为良好完美的接触,故其接地电阻值更低,防雷效果更佳。事实证明,深埋接地是减少趋肤效应的一个措施。由于趋肤效应,我们认为,高度重视钻孔深度或平面地网的长度是至关重要的,这些散流支线的长度均要在“有效长度范围内,工频电阻就比较接近于冲击电阻了”。钻孔以浅孔多孔并联为好,既可节省施工成本,又能达到防雷效果。冲击电阻与工频电阻的换算已如上面所列,同时,它主要根据接地体的长度及接地体的形状而决定,与接地体的埋藏方式和深浅无关。

顺便指出,对于趋肤效应,有些人理解为高频雷电流大部分在地球这个标准零电位体的表面(5m 深度内)散洩,而不会在地球的深处流入地球。然而,这个观点是建立在地球是一个均质的等阻抗体的假设上才能成立。就是说,雷电流一进入地网,立即会从其表面洩散到地球的表层,而不会进入地球的深部才流入地球表面。所以,他们对深埋接地体的防雷效果持怀疑态度,而极力推荐符合趋肤效应的平面型地网。但实际上,地球不是均质的,更非等阻抗体。地壳的电阻率到处都在变化,其大小不同是有目共睹的,更不用说地表的电阻率不一定低于或等于深部的,而可能比深部的高很多,这常见于高山区或低地下水位区。此时,用常规的平面法施工的地网的接地电阻值会高达三、四十欧姆,甚至更高,而要求雷电流在超出规范电阻值几倍甚至十几倍的地表平面地网上及时地流散,而不因残压过高致设备破坏,并危及人身安全是完全不可能和不现实的。如能建造合格的符合规范的深埋接地体地网,就为雷电流的迅猛及时排洩提供可靠的通道。从而保证了良好的防雷效果。所以,决定雷电流的入地路线除了考虑趋肤效应外,更重要的,应该是地网的接地流散电阻值,这是由防雷地网的时限性特点所决定的。

5 钻孔深埋接地网可以降低接地电阻的机理(数学模式)

普通地表接地电阻可以用(1)式表示。(1).
$$R_g = \frac{1}{I \cdot \int_0^L f(\rho) dL}$$

式中 R_g ——为地表层接地电阻 (Ω);

I ——为流入或流出地网的电流 (A);

L ——为地网表层积分限;

$f(\rho)$ ——为土壤电阻率在积分范围内的函数。

通常土壤电导率为土壤电阻率的倒数,以 g 表示。那么表层土壤电阻率可表作

而深层土壤电导率表作 $f(\gamma)$, $f(\gamma)$ 为待定函数, 与深层土壤电导率在特定条件下的函数关系, 如含水层、裂隙、金属导体、岩溶等条件下建立起来的函数关系, 需要实验数据来补充的量。深层总电导率表作

$$\int_0^{\beta} f(\gamma) d\beta$$

如果把表层电导率与深电导率分别分层积分则得到接地体总电导率

$$g = \frac{1}{\int_0^L f(\rho) dL} + \int_0^{\beta} f(\gamma) d\beta$$

β 表示所在深层次的 γ

把积分结果取倒数就是深层接地电阻的阻值和表层接地电阻阻值之和。

由于接地体的总电导是采用了各层电导的积分, 所以它肯定比地表层电导大, 而其倒数则肯定比地表层电阻小。钻孔深埋地网, 就是加长接地体, 就是这样把接地电阻降下来了。

接地电阻能降到多少则要看当地的土壤岩石结构而定, 不过从本实验 152 个移动基站近千个钻孔的钻孔深埋接地网中绝大多数可达到 5Ω 以下的事实, 说明了钻孔法的优势。以上是深埋接地体电阻的数理推导, 而实际上函数 $f(\rho)$ 、 $f(\gamma)$ 要通过实验是很难得到的, 不一定能算出来。

6 钻孔深埋接地网的应用实例

随着移动基站的迅猛发展, 它们林立于高山旷野及城乡居民楼中, 有许多基站就建在高山高电阻地层, 这些地层用常规的平面地网是无法达到接地电阻小于 5Ω 的要求, 此时, 钻孔深埋接地网就以其独有的功能使地网电阻降至最低, 由于它使地网符合规范要求, 所以, 比较容易被用户接纳, 而真正被用户认可的是其具有良好的防雷效果。下面, 列举使用的单位的回访的资料, 作为应用实例。

实例 1: 广州市花都区移动通信公司, 从 1999 年至 2001 年, 在高百丈、皇姆山、华岭等 18 个高山高电阻地区试用钻孔深埋接地网, 并作为广东移动公司立项研究的科研项目, 通过了广东省邮电管理局的科技成果鉴定, 肯定了“该研究首次提出运用深埋钻孔加入降阻剂降低高电阻地层接地电阻的新方法, 使接地体组成的地网电阻降至 5Ω 以下, 取得比较好的防雷效果。”据该科研成果报告的统计资料, 表明钻孔深埋接地网与普通平面地网相比, 雷击事故率下降了 24%。

实例 2: 中国联通惠州分公司。中国联通惠州分公司从 2002 年 10 月起至 2004 年 2 月, 建设 GSM 二期、八期、GDM 三期基站期间, 共有 66 个高山基站地网使用了钻孔深埋接地网, 2005 年回访资料表明, 只有 2 个基站出现过雷击事故, 该公司的回访意见是: “该公司使用钻孔深埋接地网施工的 66 个基站地网工程全部验收合格, 质量良好, 部分为优良工程。钻孔深埋接地网能将极高电阻率的地层电阻降至 5Ω 以下。具有占地面积小, 性能稳定的特点, 经过一年多雷雨季节的考验, 未发现因地网电阻问题引起的雷击事故, 防雷效果好。钻孔深埋接地网是地网施工的新方法, 值得推广……。”

实例 3: 广东移动中山分公司。从 2004 年至 2006 年, 专门在高山高电阻地层的基站使用钻孔深埋接地网施工地网, 共计有 28 个基站, 地网电阻均由当地防雷检测中心检测合格, 颁发了合格证书。用户反映, 防雷效果比平面地网要好得多。

实例 4: 中国联通佛山分公司。从 2003 年至 2006 年, 共施工了 7 个高山基站, 有一个是石头山上的基站, 其中, 2005 年回访时的工程评述是: “该公司使用钻孔深埋接地网施工的 4 个基站地网全部合格, 质量良好。钻孔深埋接地网能解决高山站地阻居高不下的问题。经历了 2004 年雷雨季节的验证, 确实能实现占地面积小,

阻值低,性能稳定等特点……防雷效果较明显。”

实例 5: 中国联通珠海分公司。2004 年 5 月, 中国联通珠海分公司在南海担杆岛建一个基站, 全岛都是花岗岩地层, 如把地网直接引入海中, 远远超过了由该处地表电阻率计算的有效长度, 根本起不了防雷作用。采用钻孔深埋接地网施工地网以后, 地网电阻达到了小于 5Ω 的要求, 06 年底回访, 该站自建成至现在, 还未发现雷击事故, 保证了基站的防雷建设工程。

实例 6: 从 2002 年至 2006 年, 又先后在广东云浮地区 7 个高山高电阻基站, 中山联通 6 个高山基站, 江门联通 8 个高电阻基站梅州移动联通各 1 个基站的地网施工中采用了钻孔深埋接地网的, 全部验收合格或取得了当地气象部门的合格证。普遍反映有良好的防雷效果。

7 钻孔深埋接地网的使用条件及发展展望

广州市顺康防雷科技有限公司在广东范围较大面积分布的 152 个移动通信基站, 采用了钻孔深埋接地网施工地网的实践及用户的评述意见可以肯定一点: 钻孔深埋接地网能使地网电阻降得很低, 有较好的防雷效果。但钻孔深埋接地网在很大程度上依赖于地层情况, 笔者从事多年的实践, 认为地层深处的地质结构和岩石性质是十分重要的。地层的岩石互变及地质结构复杂(如裂隙、断裂、水蚀、断层等)均有利于降阻, 如地层完整则不利于降阻。从岩性看, 白色砂岩、硅化细砂岩, 电阻最难降, 红色砂岩、煤层、灰岩、风化花岗岩等, 降阻情况比较理想。

钻孔的深度也是有条件的。我们知道, 土壤电阻率为 ρ 时, 水平接地体的有效长度为 $L=2\sqrt{\rho}$, 而钻孔的深度(有效深度)为 $h=\sqrt{\rho}$ 。为什么? 根据国际电工委员会 IEC61024—1 中特别是 IEX61024—1—1—2 中的 3.3.4 条明确指出的“垂直接地体的长度应为 IEC61024—1 图 2 中给出的接地体长度的 1/2。”当然, 图中给出的最少长度与地表电阻率 ρ 成正比的, 但不是与 $2\sqrt{\rho}$ 成正比的, 笔者认为, 垂直接地体是水平接地体允许长度的 1/2 可推广至最大长度的关系中的。从趋肤效应分析中可知, 水平接地体只向下半空间排泄电流, 而垂直接地体排泄电流为整个空间, 所以有 1/2 的关系。

综合上述二者, 在 $\sqrt{\rho}$ 的深度范围内, 电阻随孔深增加而降低的前提下, 单孔电阻又不大, (例如 30Ω 以内时), 采用钻孔深埋接地网完成地网施工是可行的, 是比较成熟的方案。特别是地网施工面积受限制, 用平面地网施工难度较大的情况下, 钻孔深埋接地网有更大的优越性。

钻孔深埋接地网自身的优点是: 性能长期稳定, 维修周期长, 降阻剂下入孔内深处, 故能长期保持潮湿, 实现长期低电阻, 而且它对地表作物、人畜无伤害, 属环保型工程, 维修费用少, 使用寿命长, 更增添了这一方法的发展空间。还有就降阻剂的离子浓度越高, 保湿性越好, 扩散性与渗透性越佳, 与孔壁的接触、亲和性越高, 其降阻性能越好, 稳定性越长。

钻孔深埋接地网是上世纪末, 本世纪初随着移动通信基站一起发展起来的新方法, 应该说, 就其本身的特性, 在其它行业, 如微波基站、电视台、地震观察站等要求低电阻防雷地网的施工中, 都有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 应用钻孔法解决高山高电阻地层地网的降阻问题研究报告, 广东移动通信有限公司花都分公司
- [2] 国际电工标准 IEC61024—1、IEC61024—1—1, 广东省防雷中心区、广州市防雷减灾办公室

[3] 建筑物防雷设计规范 GB57—94, 国家技术监督局、中华人民共和国建设部

[4] 科学技术成果鉴定证书粤邮鉴字[2002]第 02 号, 组织鉴定单位、广东省邮电管理局

[5] 附件: (略) 钻孔深埋接地网使用单位的回访资料。