

# 电缆铺设对气象设备的防雷效果对比分析

敖振浪<sup>1</sup> 敖进华<sup>2</sup> 龚志鹏<sup>3</sup>

(1. 广东省气象探测数据中心 广州 510080; 2. 阳江市气象局 阳江 529500;

3. 珠海市气象局 珠海 519000)

**摘要:** 安装在野外的气象设备一般需要输电线路提供电源, 出于工程施工方便输电电缆往往采用架空方式铺设, 由于架空电缆容易感应雷电脉冲, 造成后端连接的设备受到冲击而损坏。为了分析研究输电线路不同铺设方式是否有不同的防雷效果, 通过建立等效模型对输电电缆自身分布电容电感特性进行分析, 以及对电缆不同铺设方式引起分布参数变化的分析, 利用电缆分布参数能够对雷电脉冲产生的衰减作用, 得出了电缆埋地铺设对系统设备具有较好的防雷效果。工程实例表明, 供电电缆半埋方式效果一般, 直埋入土壤防雷效果最佳, 而且埋地长度越长防雷效果越好。

**关键词:** 输电线路; 埋地铺设; 分布参数; 设备防雷; 效果分析

中图分类号: TN011 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.7099

## Comparative analysis of lightning protection effect of cable laying on meteorological equipment

Ao Zhenlang<sup>1</sup> Ao Jinhua<sup>2</sup> Gong Zhipeng<sup>3</sup>

(1. Guangdong meteorological observation and data center, Guangzhou 510080, China;

2. Yangjiang Bureau of Meteorology, Yangjiang 529500, China;

3. Zhuhai Meteorological Bureau, Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** Meteorological equipment installed in the field to transmission line to provide power for construction convenient transmission cables are used for overhead laying, the overhead cable easy induction lightning pulse, causing rear end equipment is damaged by the impact. In order to study the transmission lines of different laying ways have different lightning protection effect, through the establishment of the equivalent model of distributed capacitance and inductance characteristics analysis of transmission cable, and the cable laying method analysis different distribution parameters change caused by cable distribution parameters, the lightning pulse attenuation, the cable laying underground with lightning protection good effect on the system equipment. The engineering example shows that the effect of the half burying mode of the power supply cable is general, and the effect of the direct buried soil is the best, and the longer the length of the buried, the better the lightning protection effect.

**Keywords:** transmission line; underground laying; distributed parameter; equipment lightning protection; effect analysis

## 1 引言

不论是室内还是室外的电子设备或者电气设备, 总是或多或少需要线缆连接, 可能是供电电缆, 也可能是通信信号电缆或者其他线缆。对于较长的电缆, 比如设备的室内部分和室外部分需要电缆连接, 那么电缆就可能是架空铺设或者埋地铺设。过去由于电缆绝缘材料原因或建设成本等其他原因, 在许多应用场合, 直接埋地铺设的做法比较少, 基本上都是架空铺设。在实际应用中, 设备的较长信号

电缆和电力电缆, 由于电缆本身是导体, 容易感应电磁脉冲, 都可能成为了引雷的载体, 把雷电流带入所连接的电子设备, 危及设备安全。气象观测设备如天气雷达、自动气象站, 风廓线雷达、闪电定位系统等目前全面大量在野外布点建设, 安装在各种各样的环境条件下, 非常容易受到供电线路引入的雷击而损坏。为了达到防雷目的, 常用的防雷方法是在设备前端加装浪涌保护器和旁边安装避雷针, 可是这种外加防护装置的方法往往效果不如人意, 不能满足系统设备防雷要求。高山雷达站、观测站、实景视频监控设备

等遭雷击事件时有发生,防雷问题比较突出。文献[1]对通过雷击风险评估得出,某变电站高压电源线路附近大地的年平均危险事件次数为4.05,表明了高压输电线路遭受雷击的概率相当大。文献[2]描述入户设施雷击风险程度基本上取决于入户设施年预计雷击次数,必须认真考虑电源线和信号线入户情况、土壤性状、土壤电阻率、其线路长度等要素。表明架空线比埋地线易遭受雷击,土壤电阻率越高且线路越长,电源线和信号线越易遭受雷击。文献[3]详细分析了电磁感应对输电线路的影响,认为雷电侵害主要是通过线路侵入,包括输电线路是主要雷害入侵通道,提出可以通过三级SPD保护及等电位地网实现防雷效果。文献[4]针对水质自动监测站的供电线路、通信信号电缆、控制电缆的铺设应该采取屏蔽措施,电缆屏蔽层两端接地,长度小于15 m的屏蔽电缆可只在室内接地,采用非屏蔽电缆时,宜穿金属管埋地铺设。文献[5]针对自控仪表工程电缆铺设技术有利于信号传输作了较好的研究,提出了实用的方法。比较多的文献侧重于对输电线路引入的雷害采取外部加设避雷器的方法,未见相关研究利用电缆自身特性来改善防雷效果的理论和方法。如果考虑防雷效果,那么电缆的铺设方式就显得十分重要。气象部门很多设备都是安装在野外,过去雷击事件时有发生,作者经过长期研究和实践,在满足工程建设需要的同时,利用电缆自身存在高频分布参数,分析研究如何合理地布线以提高有效的防雷能力取得良好效果,这里逐一分析对比,跟读者交流与分享实践经验。

## 2 埋地电缆分布参数特征

电工理论清楚表明,电缆分布参数主要是分布电感和分布电容。电缆的分布参数与电缆类型有关,不同电缆其分布电感量容量是不一样的,跟电缆的长度、绝缘介质、材料、屏蔽层、结构等因素有关<sup>[6]</sup>。这里主要讨论常用的电力电缆和信号同轴电缆的分布参数特征,因为在实际应用中最多是这两类电缆,应用于需要较长电缆连接的设备大多数是室外安装的设备,比如雷达、自动气象站、移动基站、微波发射台、电视差转台、视频摄像头等,而这些设备基本上都需要长信号电缆和电力电缆连接。

同轴电缆和电力铠装电缆有金属屏蔽层,中间有填充物,芯线与外层之间构成两极,形成电容器;有些电缆只有塑料外层,在架空条件下不能自身形成电容器,但是,只要它被直接埋地,与大地泥土紧密接触,假设泥土潮湿可以看作良导体,那么就可以看作同轴电缆,相对于大地来说,大地相当于同轴电缆的屏蔽层,芯线与屏蔽层之间视作同轴电缆<sup>[7]</sup>。从电工理论得知,同轴电缆示意图如图1所示。

一旦是同轴线或者相当于同轴线,自身就存在分布电感和分布电容,可以通过公式描述。如果忽略同轴电缆外导体的厚度,则其电感量计算公式为:

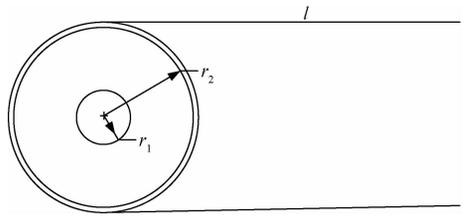


图1 同轴电缆截面示意图

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{4} \right) \quad (1)$$

式中: $L$ 为同轴电缆的电感(H); $l$ 为同轴电缆线的长度(m); $r_1$ 为同轴电缆内导体内径(m); $r_2$ 为同轴电缆外导体外径(m); $\mu_0$ 为真空导磁率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

同轴电缆电容计算可按圆柱形电容器的电容公式来计算,其电容量计算公式为:

$$C = \frac{24.13 \cdot \epsilon}{\lg \left( \frac{D_1 + D_w}{K_1 \cdot d} \right)} \quad (2)$$

其中: $D_w$ 为外导体结构的修正系数(理想外导体 $D_w = 0$ ,非理想外导体 $D_w =$ 编织外导体中的单线直径); $K_1$ 为内导体结构的修正系数; $D_1$ 为同轴线外导体内径(mm)。

从式(1)和(2)可以看出,对于特定电缆,分布电感 $L$ 大小主要取决于长度 $l$ ,长度越长电感越大;分布电容 $C$ 大小主要取决于同轴线内外导体之间绝缘层的厚度,内外导体离得越开分布电容越小。根据这样的特点,分析其对雷电脉冲信号的影响,利用它减弱电缆前端的雷电脉冲对后端设备的冲击,可以容易分析埋地电缆为什么能够起到防雷效果,提高系统整体防雷能力。

## 3 电缆埋地方式与防雷效果分析

电缆埋设方式的不同对后端设备所具有的防雷能力是不同的。实际应用经验证明,架空铺设的供电线路和信号电缆非常容易感应雷电脉冲,成为了致使后端设备损坏的主要雷害之一。因此,对于室外安装的设备,有没有更好的方法可以减少感应雷的破坏呢?答案是肯定的。对于某种特定电缆,在架空条件下自身的分布参数特征基本上是固定的,以大地作为参考,铺设方式的改变其分布参数就会引起变化,从而对瞬态脉冲的阻碍作用就会发生变化<sup>[8]</sup>。实践中根据不同需要设计不同的防雷措施。

### 3.1 架空铺设

对于野外工程建设,在建设供电线路的时候,可能出于成本考量或者条件所限,一般是直接将电缆架空铺设,很少考虑输电线路对系统设备防雷问题<sup>[9]</sup>。架空铺设方式满足了输电工程需要,但是基本上没有防雷效果,甚至于反效果。为什么呢?可以通过模型加以说明。如果电缆没有屏蔽层,远离地面架空铺设,那么就相当于一根导线,没有另

一电极而形成电容器,只有分布电感存在,描述其等效电路模型如图2所示。也相当于一根接收天线,当强大雷击发生时,电缆上感应出电磁脉冲,除了受到分布电感较少的衰减作用外,直接沿着线路送到后端设备而击坏设备。



图2 无屏蔽层架空电缆等效图

如果有屏蔽层电缆,相当于同轴电缆,同轴电缆的芯线导体自身沿着长度存在分布电感,芯线导体和屏蔽层之间就形成了单位长度的电容器<sup>[10]</sup>。对于某种类型电缆,存在单位长度电感 $L'$ 和单位长度电容 $C'$ 。但是架空铺设,没有与大地连接的接地点,芯线和屏蔽层均存在分布电感和分布电容,则描述其等效电路模型如图3所示。当强大雷击发生时,电缆上芯线和屏蔽层均可能感应出电磁脉冲,形成主要的共模电压脉冲和少量差模电压脉冲,同样,除了受到分布电感和分布电容组成的 $n$ 阶LC滤波器对差模电压产生的一定衰减作用外,大量的共模电压还是会直接送到后端设备而击坏设备。

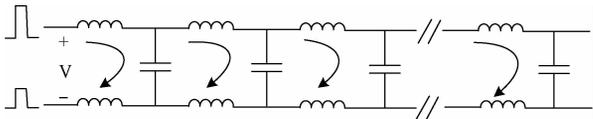


图3 有屏蔽层架空电缆等效图

从图2和3的分析说明了如果没有采取外部防雷措施,电缆架空铺设基本上是没有防雷效果的,相反,很可能加强了雷电感应效果,有可能成为了引雷对象。

### 3.2 半埋方法的防雷效果

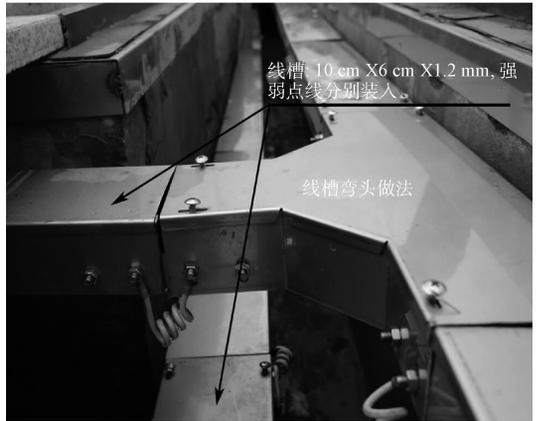
既然架空铺设方法基本上没有防雷效果,那么有没有其他方法可以兼顾防雷效果呢?在许多实际工程建设中,有时候考虑场景美观和维修维护方便,也有采用套管或者电缆槽的方式埋设。如图4(a)和(b)所示是目前气象观测场常用的电缆铺设方法,这里姑且叫做半埋方法。电缆不是直接和泥土紧密融合,而是经过塑料或者金属套管接触泥土,或者金属电缆槽间接接地。

对于工频来说,电力电缆的分布参数所起作用可以忽略不计,对于高频来说这些分布参数对电气信号产生的作用就不能忽略了<sup>[11-12]</sup>。上述分析可以看出,电缆架空和埋地铺设产生防雷作用的区别主要是电缆分布参数对雷电脉冲的阻碍作用,即是分布电感 $L$ 和分别电容 $C$ 组成的 $n$ 阶LC滤波器衰减作用,如图5所示。

对于某种电缆,单位长度电感 $L$ 基本固定,单位长度电容 $C$ 与内外层之间距离关系很大,对于图4(a)套塑料管铺设方式,电缆套上了塑料管,电缆不管有没有屏蔽层,相对于大地来说,大地可以看作外层电极与芯线形成电容器,



(a)



(b)

图4 (a)套塑料管铺设;(b)金属电缆槽铺设

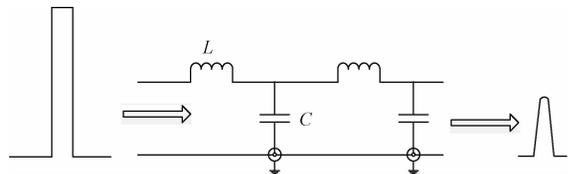


图5 分布参数LC衰减等效图

如图5所示,但是内外层之间距离变大且电极有效面积变小了,即单位长度分布电容 $C$ 变小了,所以LC滤波器滤波作用减弱了。同样,对于图4(b)金属电缆槽铺设方式,金属槽是接地的,电缆对地分布电容 $C$ 和图4(a)方式差不多。因此,半埋式的防雷能力主要表现在两个方面起作用,首先是电缆埋于地下,表面的泥土屏蔽了空中闪电的电磁波,减弱了感应的电磁脉冲强度。其次是分布参数形成的LC滤波器对于雷电脉冲的衰减作用比架空方式的LC滤波作用大得多。如果是前端感应来的高电压脉冲,LC滤波器对其起到较大衰减,所以说半埋式电缆铺设方式相对于架空铺设方式,防雷效果更好。

值得注意的是,半埋式的电缆槽必须良好接地,每隔很短距离就应该焊接一个接地点,才能保证地极面积足够大和良好接地,这是埋地防雷效果关键之所在。

### 3.3 直埋方法的防雷效果

既然半埋方式相对于大地来说,因为两极之间距离大,

所以分布电容  $C$  小, LC 滤波器的滤波作用还是比较小。很容易理解, 若要减小两极之间的距离就可以提高滤波作用, 那么只要设计成直埋方法就可以实现, 即将电缆直接埋入泥土里, 与泥土紧密接触, 在上面盖上比较厚的泥土, 如图 6 所示的实物图。



图 6 电缆直埋方法

电缆埋地则电力传输线裸芯通过介质(绝缘层)与大地之间形成两个极, 即形成电容器。雷电产生的强大电压电流是相对于大地而言, 电缆直接埋地后相对于大地来说, 描述其等效电路模型如图 7 所示。芯线通过绝缘层外皮与大地之间形成分布电容  $C$ , 电容量大小取决于绝缘层介质以及与大地接触紧密程度。在单位长度芯线上存在固有的分布电感  $L$ , 虽然电感量很小, 一般每厘米几个 nH 量级<sup>[13]</sup>。线路的分布电感  $L$  与分布电容  $C$  构成一阶 LC 低通滤波电路。一段电缆埋地后电力电缆分布参数等效于许许多多 LC 低通滤波电路串联起来, 形成  $n$  阶低通滤波器。交流电是 50 Hz, 频率太低, 通过这个  $n$  阶低通滤波器几乎没有衰减, 能够正常流过线缆不会受到影响<sup>[14-15]</sup>。

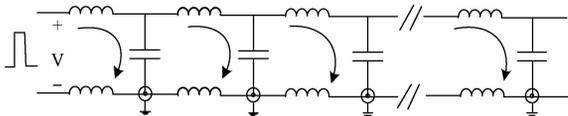


图 7 埋地电缆分布参数等效图

从图 7 可以分析, 由于大地的屏蔽和泄放, 在空中的闪电很难感应到埋在地下的电缆; 在前端假如雷电流进入电力电缆的芯线, 对于大地是差模感应电压, 那么其被沿线的  $n$  阶 LC 低通滤波器衰减, 部分能量泄放到大地上; 前端假如同时感应到芯线和屏蔽层, 有共模感应电压通过, 则部分能量直接泄放到大地上; 假如雷电流在前端主要感应到电力电缆的屏蔽层, 则感应电流直接泄放到大地上。这就是直埋方法能够获得更好的防雷效果的原理之所在。

具体可以这样理解, 雷电流非常巨大, 雷电所产生的最大电流可达 300 kA, 甚至更高, 而平均电流也可达 30 kA 以上, 闪电的雷电流包含的频率非常丰富, 涵盖 0 ~ 100 MHz, 雷电放电持续时间一般秒级以下, 所以可以把雷电流看作窄方波<sup>[16]</sup>。LC 低通滤波器是无源滤波器, 增益实际上小于 1, 也就是对幅度有衰减作用, 向大地泻放雷电

流高频电流分量, 也就是对瞬态的雷电脉冲起到过滤波平滑作用。这就是输电电缆埋地能够产生防雷效果之所在。

#### 4 应用效果检验

典型应用实例很多, 比如移动通信基站和高山雷达站。气象部门的观测场、雷达站、自动气象站等大多数都是建设在野外地处高山空旷、人员稀少的地方, 系统设备供电大多数都是通过架空高压线输送到台站的变压器, 转换为 220 V 交流电接入配电房, 再送给设备。

2008 年之前, 气象部门在防雷技术工作中基本做法是在供电线路上采取并联安装浪涌避雷器的方法, 一般安装了高压和低压两级避雷器, 效果依然不如人意, 设备还经常遭受雷击, 特别是通过架空线路供电的系统。据气象装备技术保障主管部门估算, 在所有遭受雷击的故障设备中, 大约有 40% 左右设备因为供电线路引入的雷击而损坏, 这是一个不可忽视的技术性问题! 以雷达站和观测场为例, 广东省气象部门 12 个天气雷达站大部分建设在高山上, 86 个观测场也有部分在山上。以前的供电线路多数是架空线引入系统, 遭受雷击比较多。比如阳江雷达站防雷系统受到了多次不同程度的影响, 其中最为严重的是 2005 年 8 月 24 日和 2006 年 5 月 4 日, 雷达天线伺服系统、接收机、多块电源板、雷达机房终端网卡、电话机、网卡避雷器和电源避雷器被击坏。其它雷达站同样发生过遭雷击现象。

2010 年前东莞、番禺、三水、佛冈、顺德、龙门等地的观测场先后发生多次因为供电线路引入雷击事故, 设备损失惨重。作者根据长期总结的经验, 经过以上的理论证明, 提出供电线路埋地铺设改善防雷性能的整改方案, 并且有针对性进行整改, 收到良好的效果。据广东省防雷技术部门统计, 实施埋地整改方案后 2011 ~ 2014 年的 4 年里, 尽管所在地落区雷击风险评估次数比较高, 实际发生打雷次数很多, 除顺德外, 各地再没有发生因为输电线路引入雷击而造成设备损坏现象, 统计表如表 1 所示。

表 1 2011~2014 年各地雷击统计表

地址	评估地闪密度		设备损坏次数	备注
	/(次·(km <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> )			
佛冈	14.1	0	直埋方式	
顺德	17.6	1	半埋方式	
龙门	15.7	0	直埋方式	
东莞	13.8	0	直埋方式	
番禺	13.2	0	直埋方式	
三水	16.4	0	半埋方式	
韶关	17.9	0	直埋方式	
汕头	13.7	0	半埋方式	
阳江	14.5	0	直埋方式	
广州	16.3	0	直埋方式	

表1结果可以表明,对表中雷达站和观测场架空供电电缆铺设方式进行整改,将供电电缆改为埋地铺设之后,对设备防雷效果的改善总体上是明显的,直埋方式的防雷效果比半埋方式更好。只要整改策略科学,技术方法得当,就能够使雷电脉冲幅度被大幅度减弱,使浪涌电压限制在变压器和其它设备能够承受的范围内,对后端设备影响大大减少。

## 5 结 论

供电电缆架空铺设和埋地铺设都是考虑工程需要,一般并不考虑其防雷作用。通过分析研究输电电缆建设工程不同的铺设方式,发现电缆自身分布参数能够对雷电脉冲产生不同的衰减作用,能够实现对工频交流电正常输送,对入侵的雷电脉冲实现阻碍减弱,从而达到抵御雷击的效果。实践经验表明,供电电缆直埋入土壤,防雷效果最佳;半埋方法是套金属水管或者塑料管再埋地,效果一般。电缆埋地长度越长防雷效果越好,如果埋地长度超过30 m以上,效果就比较明显了。因此,对于环境条件允许的地方,只要工程成本核算可以接受,应该尽量采取直接埋地的方式铺设供电电缆,以防供电线路引入雷击,有效地保护后端系统设备,提高系统设备运行可用性,产生较大业务效益和直接经济效益。

## 参考文献

- [1] 丘国良,杨旸,周建勇,等.变电站雷电灾害风险评估实例[J].现代电子技术,2013(10):18-23.
- [2] 谭惠芬,温耀美,庞军.电子系统雷击电磁脉冲风险评估分级及工程实例[J].科学技术与工程,2011,11(34):8635-8637.
- [3] 王俊波,董龙洋,张志伟,等.唐山地区220 kV输电线路综合防雷模拟仿真研究[J].科学技术与工程,2014,14(22):116-120.
- [4] 樊希彬,于森,梁铁军.水质自动监测站综合防雷技术研究[J].现代电子技术,2011,34(21):152-156.
- [5] 杜春禄,李刚.自控仪表工程电缆铺设技术[J].电工技术,2008(8):15-17.
- [6] 余同彬,周璧华.近地长电缆对高空电磁脉冲晚期部

分的响应[J].强激光与粒子束,2003,15(12):1237-1240.

- [7] 张杰,卜雄洙,徐森森.电磁耦合式无线供电在金属轴环境中的涡流损耗分析[J].电子测量技术,2016,39(3):38-41.
- [8] 行鸿彦,何贵先,徐伟,等.混合遗传算法在接地电阻测量中的应用[J].电子测量与仪器学报,2016,30(9):1389-1396.
- [9] 孙业锁,李锡钢,何敬国,等.电力电缆铺设方法的研究与改进[J].冶金动力,2011(1):20-21.
- [10] 孟恒信,张悦,朱良肄,等.保护用控制电缆分布电容参数测试方法研究[J].山西电力,2008,148(4):16-18.
- [11] 敖振浪,敖进华,罗雄光,等.“入土为安”防雷策略的研究与实践[J].电子测量技术,2016,39(7):49-52.
- [12] 田勇.110 kV高压交流输电线路防雷技术研究[J].电子技术与软件工程,2016(3):190-191.
- [13] 杨贵河.电缆电容的计算[J].电气开关,2010,48(1):81-82.
- [14] 杜建华,王长水.控制电缆分布电容对控制回路的影响分析及处理[J].自动化技术与应用,2010,28(9):120-122.
- [15] 王浩,陈亚洲,万浩江,等.雷电电磁脉冲对双绞线耦合的仿真研究[J].国外电子测量技术,2015,34(1):40-44.
- [16] 任明秋,严革新,朱勇,等.复杂电磁环境下雷达成抗干扰性能测试方法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(6):1277-1282.

## 作者简介

敖振浪,1962年出生,本科,教授级高级工程师,长期从事气象探测仪器设备研发、设备防雷技术研究、嵌入式软件硬件开发。

E-mail:zlaao@grmc.gov.cn