

迂回策略防雷技术研究与应用^{*}敖振浪¹ 敖进华² 吕雪芹¹ 龚志鹏³

(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: 安装在外场铁塔上面的仪器设备容易遭受雷击, 做好防雷设施至关重要。在忠于防雷标准规范基本要求的基础上, 探索如何有效地改进防雷方法, 提高防雷设施的防雷性能, 降低仪器设备遭受雷击的概率。在分析总结大量雷击实例的基础上, 从雷电脉冲频谱特性及电磁兼容原理入手深入分析雷击细节, 寻找雷击诱因, 基于导体分布电感电容参数能够减弱或者阻隔雷电脉冲的特性, 提出了运用迂回策略改变设备设置点偏离泄流主通路, 以分布电感阻隔作用调整分流, 减少雷电流对设备的直接冲击的解决方案。针对已建系统的低工程成本防雷改造, 提出了“短迂回策略”, 对于新建系统提出了“长迂回策略”防雷解决方案, 并都给出了具体的设计方法, 改进了传统的防雷做法。经过近 20 年的实例统计分析, 结果表明了迂回策略的防雷方法更加实用、有效, 易于实施, 与传统防雷方法相比, 其效果更加显著。

关键词: 防雷技术; 迂回策略; 抗雷击能力; 外场仪器设备; 分布电感电容参数

中图分类号: S761.5 TN03 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.7099

Research and application of circuitous strategy
lightning protection technologyAo Zhenlang¹ Ao Jinhua² Lv Xueqin¹ Gong Zhipeng³

(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: Installed on the outside of the tower above the instrument and equipment vulnerable to lightning strike, lightning protection facilities are crucial. On the basis of the basic requirements of the lightning protection standards, this paper explores how to improve the lightning protection methods, improve the lightning protection performance of lightning protection facilities, and reduce the probability of lightning strike. Based on the analysis on the example of a large number of lightning, lightning from the pulse spectrum characteristics and electromagnetic compatibility principle in-depth analysis of lightning details for lightning causes, can weaken or blocking lightning impulse characteristic of inductance capacitance conductor based on the distributions presented by a circuitous strategy change device set point discharge from the main path, the barrier effect of inductance adjustment of shunt, the solution to reduce the direct impact of lightning current on the equipment. In view of the low cost engineering of lightning protection has been built system, put forward the “short circuitous strategy” for the new system, put forward the “long circuitous strategy” lightning protection solutions, and gives the concrete design method, improved the traditional practice of lightning protection. After nearly twenty years of statistical analysis, the results show that the circuitous strategy of lightning protection method is more practical, effective and easy to implement.

Keywords: lightning protection technology; circuitous strategy; anti lightningability; outfield equipment; distribution of inductance and capacitance parameters

收稿日期: 2017-02

^{*} 基金项目: 广东省气象探测监测网建设工程项目资助

1 引言

日常生活中除了室内电子仪器设备以外,有许多仪器设备比如自动气象站、通信基站、微波差转台、电视发射塔、电视天线、视频监控摄像机、雷达等,不仅安装在野外无人的地方或者楼顶,还往往地处开阔区域的高处,这就很可能成为引雷目标^[1]。而现代精密电子仪器设备基本上采用大规模集成电路构成,电源电压一般在5 V以下,器件耐压在十几伏特以下,电源的涌动和电磁脉冲的冲击不仅能够使测量仪器的数据出错,而且较强的雷电脉冲很容易击坏电路器件,这就是现代仪器设备跟过去电子管仪器相比更容易被雷击的主要原因。雷电脉冲的强度通常是几百万伏特高压及几十万安培电流^[2-3]以上,而电子器件脆弱的耐压能力根本无法抵御强大的雷电脉冲的冲击,不管是直击雷还是感应雷,只要雷电脉冲超过电路器件承受能力,器件即可被击坏,造成设备损坏,严重影响正常工作。现实中的仪器设备在产品生产阶段很少考虑自身的防雷性能,也就是说仪器设备本身一般不具备防雷能力。以广东省气象部门为例,据广东省大气探测技术中心维修部门不完全统计,全省总共2 500多套地面气象观测设备,每年汛期四月到十月之间的雷雨季节,发生故障的设备大部分是由于遭受雷击损坏,从故障维修过程中可以判断出这些遭受雷击的仪器设备大多数因为避雷针接闪后雷电流反击造成,或者是输电线路引入雷击造成。文献[4]对基站电源线和信号线如何做屏蔽以及等电位接地方法提出处理方法改善防雷性能;文献[5]针对输电电缆提出降低杆塔接地电阻、减小保护角、架设耦合地线、加强绝缘水平和安装线路避雷器等综合防雷措施;文献[6]对雷达系统采取屏蔽、接地、电涌保护和电磁兼容等手段,提出了防雷避雷方案。文献[7]提出地网电位均衡问题,包括旁侧闪络、接触电压、跨步电压、闪电电磁辐射和地电位反击等危害采取的措施。本文在忠于防雷技术规范的基本做法基础上,结合实例,从雷电脉冲频谱特性和电磁兼容原理深入分析雷击细节,去挖掘更科学的防雷手段,找到更加有针对性的技术方法及有效的工程措施,尽可能减少电子设备遭受雷击的概率。

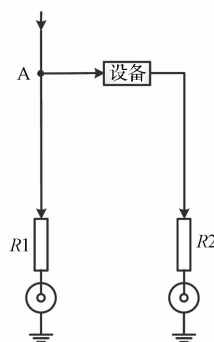
2 防雷一般做法和现状

野外的电磁环境比较复杂,干扰源较多,比如汽车、焊接电弧、打雷、大功率微波发射台等等,对外场电子设备尤其是精密测量仪器的影响比较大^[8-9]。为了减少仪器设备受到外来电磁波干扰,设备外壳需要屏蔽接地^[10];为了抵御雷击,按照相关防雷规范要求,除了安装避雷针以外,要求做到所有仪器设备等电位,一般做法是将所有设备的金属机壳连接到同一接地体,避雷针也要连接到接地体,即“共地”。在实际应用中,室外设备与避雷针往往共用一个平台,例如同时安装在铁塔上面,利用铁塔本身或者避雷针的引下线连接到接地体来实现“共地”,如图1(a)所示。

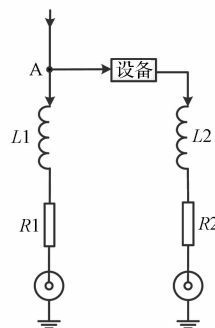
可是,在许多情况下,即使按照防雷规范要求安装了避雷针和牢靠接地还会累累遭受雷击。



(a)



(b)



(c)

图1 (a)安装图;(b)静态等效图;(c)分布参数等效

究其原因首先,防雷设施设计者往往出于设备安装高度需要,常常把室外设备如视频摄像头、自动气象站传感器、微波发射台、手机基站等直接安装在铁塔的最顶部,同时把避雷针接闪器焊接在铁塔顶上,只考虑静态条件下等电位原理,认为设备屏蔽层通过铁塔与地网相连接就能够实现等电位并且有效防雷;其次,可能是由于条件局限或者出于成本考虑,将避雷针直接焊接在铁塔顶部,焊接点与设备等高位置,未充分考虑避雷针焊接点位置对设备的致命影响。

从雷电放电机理和高频电子理论角度去分析上述防雷方案的防雷性能,不难发现,铁塔和引下线存在的分布电感电容参数对放电瞬态过程的影响是不能忽略的,结果很可能不遵循静态条件下设计方案的预期结果。

在图1(a)中,设备(测风传感器和摄像机)外壳与避雷针的接闪针接入铁塔支点几乎在同一高度而且距离非常近,相当于接闪点A直接接到了设备外壳。金属铁塔底部连接接地体,作为公共地。雷电流总是通过接地体向大地释放。假设只考虑静态或者低频,接闪针焊接点至接地体之间由铁塔、引下线连接,只有金属固有的电阻 R_1 ,设备至接地体之间电阻 R_2 ,接地体本身一般有阻值 $4\ \Omega$,电气等效电路如图1(b)所示。一般情况下 R_1 和 R_2 大小相差无几,理论上A点分流流向 R_1 通路和 R_2 通路的电流相同,电压也相同,如图1(c)所示,致使接闪点雷电流一半入侵设备而容易损坏设备。同样,闪点A至设备距离很短,分布电感忽略不计,避雷针和设备到地极之间的分布电感分别为 L_1 和 L_2 ,处于相同高度分布电感 L_1 和 L_2 一般来说比较接近,假设两者相等,那么在高频条件下 L_1 和 L_2 产生的电抗以及导体电阻值 R_1 和 R_2 ,那么对雷电流的电抗相等,理论上A点分流流向 L_1 通路和 L_2 通路的电流相同,电压也相同,如图1(c)所示,同样致使接闪点雷电流大约一半入侵设备而容易损坏设备^[11]。

2007年气象部门在全省台站建设了75个实景监测站,类似图1(a)的安装方法,外加两级避雷器,运行4年不少实景监视设备先后发生故障,据故障调查分析,判断部分因为直击雷或者感应雷造成损坏。因此说明了科学的安装方法非常重要。

3 “迂回”策略设计与工程实践

防雷规范并没有严格规定设备的等电位接地应该接入地网哪一点。但是实践表明从什么地方接入和如何接入公共地是非常讲究的,效果完全不一样。实际应用中,局限于既定条件,各种各样电子设备的安装地点及安装位置五花八门,各有不同,从防雷角度来看,所采用的防雷方法应该是不同的。如何科学合理地优化设计安装方法、接地线引入位置等就是本文讨论的重点。在不明显改变设备和避雷设施总体结构、不明显增加成本的条件下,“迂回”策略防雷方法是更加科学的安装方法。这里说的迂回,顾名思义就是间接绕过一段路再回到原来的地方,即是把敏感设备适当偏移离开雷电流泄放流动主方向,尽量避开雷电流泄放流动主通道。迂回的目的就是减少雷电流反击。

迂回策略是一种外部对策,主要针对已经建好的系统设备或者防雷设施,从系统布局的实际出发,重点分析避雷针、设备和地网的关系,在基本上不改变原有系统结构条件下,改进防雷设施的布局,以达到改善防雷性能的效果。

3.1 “短迂回”策略

迂回策略之所以能够起到防雷作用,主要是利用了导体分布参数的阻隔作用。避雷针接闪时,持续时间短强度大,雷电流总是通过接地体向大地释放,沿着阻抗小的通路流向大地^[12],如果设备直接连接到泄流主通路,那么很容易遭到冲击而损坏。因此,利用一段较长长度的引线将设备

和主通路间接连接,并利用引线分布参数的阻隔作用减弱反击过来的雷电流的冲击,从而保护了设备,这就是“短迂回”策略。以自动气象站为例,实际安装方法如图2(a)所示。

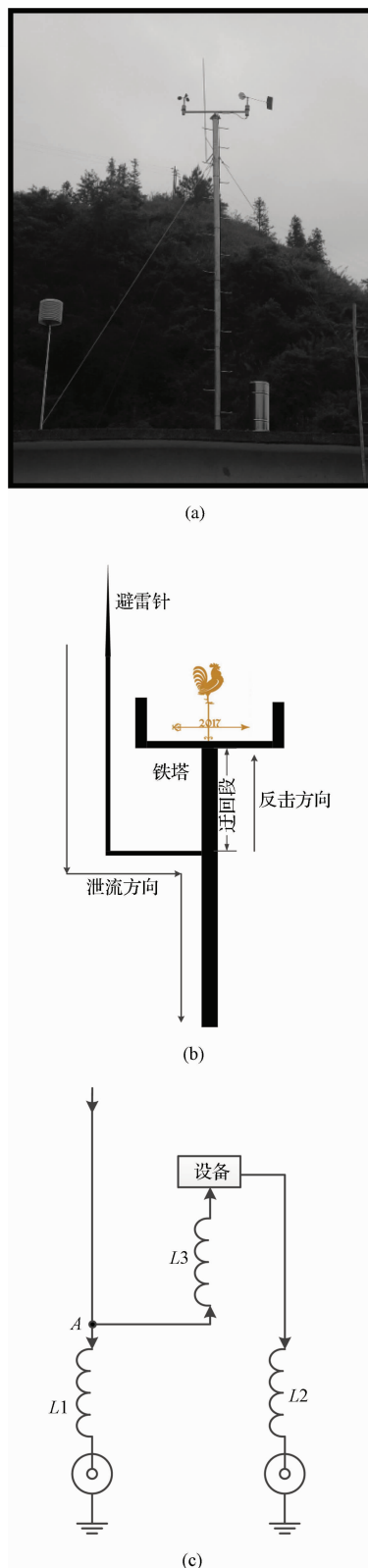


图2 (a)“短迂回”策略安装法;(b)泄流方向;(c)参数等效

图2(a)中避雷针接闪针是焊接在铁塔中间半高偏上位置,示意图如图2(b)所示。安装在塔顶的设备外壳连接铁塔,铁塔与接闪器焊接,实际上设备外壳与避雷针电气上相连,但是经过了上半部一段“迂回段”后才连接的,也就等于迂回了一定长度导体再连接。在这个“迂回段”中由于它存在分布电感 L_3 ,从设备下来又有电缆屏蔽层引至大地,分布电感 L_2 。接闪时,雷电脉冲包含许多高频成分,可以高达几百兆赫兹,分布电感对高频产生的感抗不能忽略^[13-15],从图2(c)分布参数等效图可以看出,由于导体存在一定的电感,不同材质和结构的导体分布电感有所不同,假设按照一般取 $L_0=1\mu\text{H}/\text{m}$,根据公式 $X_L=2\pi fL$,当频率 f 固定时,电感越大,感抗就越大。假设对于雷电脉冲100 MHz高频成份,在5 m迂回段上, $X_L=2\pi fL=2\times 3.14\times 100\times 10^6\times 10^{-6}\times 5=3140\Omega$,阻抗比较静态电阻大得多。即增加了迂回段电抗 X_{L3} ,则 $X_{L1}<(X_{L2}+X_{L3})$,则从接闪点A流入的雷电流大部分从 L_1 通路泄放,流向设备的雷电流显著减少,这就等于大大减弱流向设备的反击电流,从而达到了减少设备损坏的概率的目地。

3.2 “长迂回”策略

上面的“短迂回”方法主要是迂回段起作用,如果把迂回段不断加长,则 L_3 不断增加,当 $L_1\ll L_2+L_3$ 时,绝大部分雷电流就会流经通路 L_1 ,反击设备的电流就所剩无几了。基于这种考虑,对于通常安装楼顶的设备和避雷针,把避雷针安装在地基上,再与铁塔焊接相连。设备在塔顶,避雷针焊在塔脚地基,通过导线连接到楼面的引下线上,这样迂回段就更长了,这就是“长迂回”策略。实际工程中在楼顶安装的风塔和避雷针如图3(a)所示,在室外电子仪器设备所在地旁边架设一支避雷针,避雷针与仪器



(a)

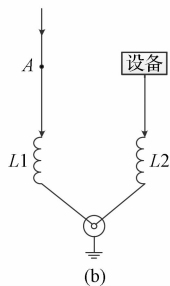


图3 “长迂回”策略安装法;(b)参数等效

设备的距离和高度需满足滚球法覆盖区要求,避雷针通过引下线连接接地体。

从图3(b)可以看出,泄流主通路 L_1 只在单独的避雷针向大地释放,设备通过较长的铁塔引下线在接地体汇合“共地”,在地下形成电气上的连接,接地体本身的接地电阻一般要求在 4Ω 以下^[16]。避雷针接闪时在接地体上产生的反击电压变得很低了,再沿着较长的迂回段返回到达设备,加上通路 L_2 电抗的阻隔作用,反击电压就会变得非常微弱了^[17],因此对设备损坏的概率就大大减少。

这里描述的“长迂回”策略与独立避雷针做法不完全相同,前者是设备与避雷针在引下线的地方共地的,后者是避雷针完全独立,有自己独立接地体,不与设备共地连接。

在实践中发现,对于某些不需要完全等电位连接的系统,或者不考虑干扰不需要接屏蔽地的系统,设备最好不接地,彻底防止雷电流反击^[18],可能会更加安全。

4 工程验证

20世纪由于我国气象设备防雷体系尚未建立,缺乏实践经验,广东省气象部门早期建设的区域自动气象站等设备的安装和避雷设施建设全部采用设备、避雷针、铁塔三者合一的一般方法,在风塔顶部焊接接闪针,在等高位位置焊接测风传感器基座,传感器安装在基座上,铁塔还作为引下线与接地体相连,形成防雷一般做法,如图1(a)所示。1996年开始至2005年间全省共建设620个区域自动气象站,安装方法和防雷设施按照图1(a)的方法进行。经过多年运行发现,自动气象站设备被雷击的数量很多,损失严重。经过详细分析研究,反复试验,认为过去安装方法不够科学,防雷效果有限,甚至可能引雷。为了节省改造成本,逐步对自动气象站按照“短迂回”策略进行改造,逐年新建设备也是直接按照“短迂回”策略进行,至2010年为止,新建和改造共1852个自动气象站防雷设施属于“短迂回”策略;2010年以后业务管理部门要求新建设备全部按照“长迂回”策略进行,目前总共2596个自动气象站。据不完全统计,每个阶段设备遭受雷击发生故障数量占总故障数比例如表1所示。

表1 雷击故障比例统计表

防雷策略	时间段	受雷击故障占总故障数比例(大约数)
一般做法	1996年~2005年	70%
短迂回策略	2005年~2010年	60%
长迂回策略	2010年~2016年	40%

从表1的统计数据可以看出,采用防雷一般做法的自动气象站设备发生故障当中有70%是因为雷击损坏,可见雷害是主因,当然包含了直击雷、感应雷和输电线路引入的雷击;经过“短迂回”策略改造以后,雷击概率减少,减

少比例10%左右,有效果但是不算大,因为“短迂回”策略毕竟只是适当加长了接闪针,改变了设备位置远离泄流主通路方向,迂回段不够长不足以大幅度阻隔雷电流,好处是成本低;“长迂回”策略既保持了等电位要求,又比较有力地阻隔雷电流,防雷效果最好,较一般做法减少了雷击概率30%。虽然成本相对较高,但是大幅度减少设备损坏,确保业务正常运行,其经济效益和业务效益更加明显。

5 结 论

室外设备防雷设施的设计是保障系统防雷性能的重要环节。在实践中研究和总结出的迂回防雷策略,防雷效果得到了理论证明和大量的工程实例验证,近20年统计数据表明,以往采用的一般防雷方法效果不够理想;“短迂回”策略易于实施,经济成本低,效果较好,迂回段越长效果越好;“长迂回”策略最好,但工程成本较高,适合于新建的比较脆弱的重要电子设备防雷设施建设;迂回策略适用于自动气象站、通信基站、微波差转台、电视发射塔、电视天线、视频监控摄像机、雷达等系统的防雷设计。

参 考 文 献

- [1] 邓红雷,李述文,戴栋. 基于层次化、差异化的架空输电线路雷击风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(4):69-75.
- [2] 胡月,黎海涛. 基于 WebGIS 的雷电监测系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(10):64-67.
- [3] 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.
- [4] 石晶. 浅析基站防雷工程中的几个问题[J]. 电信科学, 2007, 23(1):96-99.
- [5] 赵淳,阮江军,李晓岚,等. 输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 290-297.
- [6] 赵超. 论雷达防雷技术[J]. 自然科学:文摘版, 2015(2): 27-27.
- [7] 黎莫清,周小武,莫益江. DZZ5 新型自动气象站雷击隐患及改进措施[J]. 气象水文海洋仪器, 2016,33(2): 87-91.
- [8] 何成功,邓联文,贺君,等. 电力机车弓网离线电弧电磁辐射特性分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(9): 31-33.
- [9] 任明秋,严革新,朱勇,等. 复杂电磁环境下雷达抗干扰性能测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1277-1282.
- [10] 柴健,孙京. 雷电流作用下铁件剩磁量的规律分析[J]. 国外电子测量技术, 2016,35(8): 71-75.
- [11] 秦润杰,张清鹏,卢秋朋. 多导体传输线电容电感矩阵的分析求解[J]. 电子测量技术, 2015,34(6):34-36.
- [12] 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.
- [13] 韩永霞,张杰,阮耀萱,等. 电感型避雷针提高线路反击耐雷性能机理[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3456-3463.
- [14] 邢海瀛,袁汉川,邓春,等. 基于分布参数的电力电缆故障定位新型算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14):16-20.
- [15] 姜杰,郭威,黄文兴,等. 基于故障数据的线路分布参数时域辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 7-12.
- [16] 张博成,胡志坚,张凯军. 避雷线分流对杆塔接地电阻测量的影响[J]. 电力建设, 2016, 37(4):70-75.
- [17] 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.
- [18] 何俊佳,杨瑞,贺恒鑫,等. 取消人工接地体对特高压同塔双回路反击闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(11):3421-3428.

作 者 简 介

敖振浪,1962年出生,本科,教授级高级工程师,主要从事气象探测仪器设备研发、气象观测方法研究、设备防雷技术研究、嵌入式软硬件开发。

E-mail: zlao@grmc.gov.cn

敖进华,1975年出生,本科,助工,主要从事防雷技术设计与防雷工程。