

肖武军,孙海元,赵楠,等.冬奥会保障项目地电阻率台站防雷技术系统设计关键技术[J].地震工程学报,2020,42(3):812-817.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.812

XIAO Wujun,SUN Haiyuan,ZHAO Nan,et al.Key Design Techniques of a Lightning Protection System for the Geoelectrical Resistivity Monitoring Stations in the Winter Olympic Games Security Project[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):812-817.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.812

冬奥会保障项目地电阻率台站防雷技术 系统设计关键技术

肖武军¹,孙海元²,赵楠³,陈敏⁴,查斯⁵,胡玉良⁶

(1. 中国地震台网中心,北京 100045; 2. 广州徕信电子科技有限公司,广东 广州 510623;
3. 安徽省地震局,安徽 合肥 230031; 4. 重庆市地震局,重庆 401147;
5. 内蒙古自治区地震局,内蒙古 呼和浩特 010010; 6. 山西省地震局,山西 太原 030021)

摘要:雷电危害是影响地震台站稳定运行的重要因素之一,对台站进行雷电防护具有重要意义。介绍冬奥会保障项目地电阻率台站改造中避雷系统的设计,并重点分析研究地电阻率台站架空线路防雷、埋地线路防雷等关键技术点出现的问题,探讨地电阻率台站综合防雷系统在接地网、供电、综合布线等方面的整体设计,最后设计完成宝昌台防雷技术系统。在此基础上,完成项目全部 8 个台站的避雷系统方案设计,全面提升冬奥会项目台站的防雷实效。通过计算,在项目深化研究中得到一些新的技术成果:(1)地电阻率台站应尽量将供电及测量线路进行埋地;(2)埋地供电及测量线路应避免接地体 10 m 以上;(3)仍采用架空线路的台站可以安装相应电流值的信号防雷器。研究成果可供今后全国台站防雷系统建设时参考。

关键词:地电阻率;台站;防雷技术系统;设计

中图分类号:P315.7

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2020)03-0812-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.812

Key Design Techniques of a Lightning Protection System for the Geoelectrical Resistivity Monitoring Stations in the Winter Olympic Games Security Project

XIAO Wujun¹, SUN Haiyuan², ZHAO Nan³, CHEN Min⁴, CHA Si⁵, HU Yuliang⁶

(1.China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China;

2.Guangzhou Laixin Electronic Technology Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong, China;

3.Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, Anhui, China; 4.Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China;

5.Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China;

6.Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, Shanxi, China)

Abstract: Lightning damage is one of the important factors that affect the stable operation of seis-

收稿日期:2019-10-11

基金项目:冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目;台站综合观测技术保障系统项目;2019 年重点地震台站观测环境优化改造

第一作者简介:肖武军(1976-),男,高级工程师,主要研究方向为台网建设、地球物理观测。E-mail:xiaowj@seis.ac.cn。

通信作者:赵楠(1986-),男,主要研究方向为地震监测与地震资料分析应用。E-mail:xtaolake@163.com。

mic stations; thus, it is of significance to protect the stations from lightning. This study introduced the design of a lightning protection system for the geoelectrical resistivity monitoring stations in the Winter Olympic Games security project. Through the analysis of problems in the key design techniques of the lightning protection system, the overall design of a comprehensive lightning protection system in terms of the aspects of grounding grid, power supply, and comprehensive wiring was discussed, and the lightning protection system at Baochang Station was designed. On this basis, the design of the lightning protection system of all eight stations in the project was completed, and the effectiveness of the lightning protection system of the stations was improved. In this study, some new technical achievements were attained, i.e., (1) the power supply and measuring lines were buried; (2) the buried power supply and measuring lines were more than 10 m from the grounding body; and (3) the network signal lightning arrester with corresponding current values was installed in the stations that still used overhead lines. These research results can be used as a reference for the construction of the lightning protection system for national stations in the future.

Keywords: geoelectrical resistivity; station; lightning protection system; design

0 引言

在自然灾害中,周而复始的雷电引起的灾害是最为严重的灾害之一,最常见的是各种电子产品与设备受损。我国地域广阔,是一个多雷的国家,大部分地震台站都遭受过雷电干扰。一般情况而言,雷电危害可分为直击雷、感应雷两大类:雷云对建筑物、架空线路、大地、防雷装置等放电称直击雷;雷雨云的静电感应或放电时的电磁感应作用称为感应雷,它通过室外有线导体(供电线、信号线、金属线等)引导进入电子产品与设备并造成损坏。感应雷可由静电感应产生,也可由电磁感应产生,感应雷电压形成的几率很高。据统计,全球每年约有 10 亿次雷暴发生,平均每小时约发生 2 000 次,每分钟平均产生 1~3 次云对地闪电。就整个地球表面来说落地闪电(或称落地雷)每秒钟就有 30~100 次^[1],对台站观测仪器系统设备威胁极大。

雷电灾害严重影响地震监测系统的连续、稳定运行,特别是“十五”以来随着台站数字化和网络化程度的不断提高,地震台站因雷击灾害造成的损失日益增多,部分台站连续多年遭受雷击,严重影响了仪器运行和数据产出。我国每年平均雷电日 25 天,高的可达 100 多天,大部分地震台站都受雷电干扰,严重的约占 1/3~1/4^[2]。从台站调研情况来看,陈德福^[3]对 19 个形变台站进行调查统计,发现其中有 13 个台站遭到不同程度的雷害,占全部台站的 68%。2006 和 2007 年,湖北省地震局三峡地下水动态观测网由于仪器设备遭雷击造成的停测事故分别占停测总次数的 30%和 24%^[4]。全建军等^[5]调

研了 2007—2009 年全国 27 个单位 371 个台站设备受雷击情况,共统计出雷击 911 次,其中单台最高遭受雷击次数达 17 次。我们通过对广东、天津、河北、山东、重庆的多个地电阻率台进行调研,发现 2016—2017 年地电阻率台雷击概率比其他台高,几乎每个台每年至少遭受 2~3 次雷击,部分台站地电阻率设备甚至被严重损坏。2022 年北京冬奥会保障项目涉及的 8 个地电阻率台站也多次遭遇雷击,造成观测设备损坏。地震台站的防雷防护工作是保护台站观测设备、确保观测数据产出的一项重要内容。我国台站防雷技术系统工作者自 20 世纪 90 年代后期开始陆续开展了不同学科综合防雷技术的研究及应用^[6-11],取得了较好的效果。地电阻率台站由于观测极距长、场地空间大,遭受直击雷和感应雷的几率较其他台站更大,因此其防雷关键技术是一个重要的研究课题。

为提升冬奥会期间晋冀蒙地区的震情监测和保障能力,冬奥会保障晋冀蒙地震监测能力提升项目在晋冀蒙交界及周边的宝昌、集宁、阳原、大同、代县、临汾、通州和平谷 8 个地电阻率台站的基础上,增加了具有立体观测性质的小极距井下地电阻率观测^[12]。本文对地电阻率台站地网建设、架空线路防雷、埋地线路防雷等关键技术进行重点分析,通过计算得出地电阻率台站采取架空线路埋地并离接地体 10 m 以上时可有效减轻防雷灾害;在此基础上,对台站接地地网、供电、综合布线等进行防雷设计,设计完成宝昌台防雷技术系统,并推广至项目其他 8 个台站,全面提升这 8 个台站地电阻

率防雷实效。

1 冬奥会保障项目地电阻率台站防雷技术系统现状

1.1 避雷地网与接地

在台站冬奥会保障项目改造前期调研中,冬奥会项目涉及的8个台站曾多次遭遇雷击,其中宝昌台、临汾台、大同台、代县台、平谷台等都出现过因雷击造成观测仪器损坏的情况。通过详细调查发现这些台站的防雷技术系统都存在一些典型问题,主要体现在以下几个方面:

(1) 一些台站避雷地网因时间长、连线老化,接地电阻检测不达标,如宝昌台观测室机房原地网接地电阻达 8.5Ω , 超过行业标准技术指标要求;

(2) 有些台站地网离观测场地或电极距离较近,附近遭受雷击时,雷电流通过接地体释放到大地,接地体感应到雷电后通过供电线和测量线反馈到台站地电阻率观测系统,引起观测仪器受损;

(3) 有些台站观测室内接地布线工艺不规范,或没有接地母排,没有采用线耳连接,易造成等电位接触不良。

1.2 台站供电

8个地电阻率台站均处偏僻地带,台站供电多数为农电,且电压不稳,严重影响仪器的寿命,甚至损坏仪器。部分台站由于变压器年久老化,经常发生故障;有些台站UPS电源接线不规范,造成仪器运行出现漏电情况;有些台站观测机房供电电源防雷设计不完善,没有3级电源防雷器设计。

1.3 综合布线

在综合布线方面,8个台站均存在不同程度的供电、网络、信号输出各类布线不规范,或观测室入线方式不规则,室内局部走线不合理、凌乱无序等问题。部分台站观测室内强电和弱电没有完全分开,或未采取桥架和线槽方式布设;一些测项设备交错放置,造成信号线、网络出线交叉缠绕,给台站的

安全运行带来极大隐患。

1.4 外场地线路

冬奥会改造项目中,8个地电阻率台站由于原外场地观测空间较大,外线均采用架空线路。架空线路极易引入雷电,造成雷击,雷击过电压则可能沿供电线路进入台站仪器房,造成观测仪器损坏。

2 地电阻率台站防雷关键技术

冬奥会保障项目通过对接地地网、架空线路防雷、埋地线路与接地体的距离等关键技术进行详细计算和分析,对台站交流配电线路及电源设备进行整体防护,对观测场地供电等采取有效的防雷击保护措施。

2.1 防雷地网

冬奥会保障项目部分台站新建避雷地网,将地网布设在观测室附近,且远离地电阻率观测区。要求观测室接地网的接地电阻小于 4Ω , 其根据土壤电阻率进行实地测量,并计算得出:

$$R = 0.5\rho / \sqrt{S} \quad (1)$$

式中: ρ 为土壤电阻率($\Omega \cdot \text{m}$),使用土壤电导率测试仪测试得出; S 为新增估算地网面积(m^2),采用四极法估算得出。

2.2 观测场地布线

2.2.1 架空线路直击雷引起过电压分析

观测场地供电线和测量电线易遭受直击雷,强雷电引起过电压直接将仪器损坏(图1)。当某一相导线遭雷击时,该相的电压上升为 $U_l = I^0 Z / 4$ (U_l 为直击雷电压; I^0 为直击雷电流; Z 为波阻抗,约为 300Ω)。当直击雷电流为 1 kA 时,引起的过电压为 75 kV ,远大于地电阻率观测设备测量端口能承受的脉冲电压。因此对宝昌台外场地观测线路采取埋地方式,避免直击雷对仪器造成破坏。

2.2.2 架空线路感应过电压分析

当线路附近地面或高建筑物上落雷时,在供电线上会出现感应过电压,其计算式为:

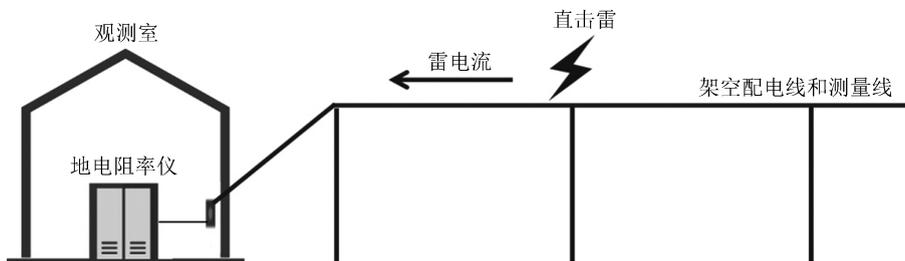


图1 架空线路直击雷引起过电压

Fig.1 Overvoltage caused by direct lightning strike of overhead lines

$$U_g = 25 \frac{Ih}{S} (S \gg h) \quad (2)$$

式中: I 为雷电流值; h 为导线高度; S 为雷击点与导线的垂直距离。

由式(2)可知,感应过电压的幅度值与雷电流 I 和导线离地面高度 h 成正比,与雷击地面点与导线的距离 S 成反比。取架空线路高 $h = 8 \text{ m}$, $S = 65 \text{ m}$, $I = 10 \text{ kA}$, 测得线路上的感应过电压达 30.4 kV , 也远大于设备测量端口能承受的脉冲电压。

2.2.3 地理线路感应过电压分析

配电线路和通信线路采取地理线路时应尽量远离观测场地和接地体, 否则雷击时接地体上的雷电流易对电缆产生感应过电压(图 2)。在理想情况

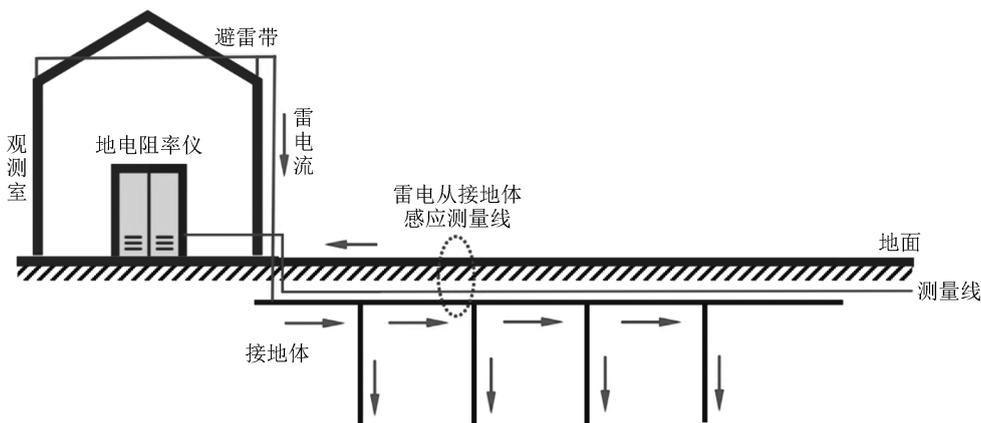


图 2 地理线路感应过电压(靠近接地体)

Fig.2 Overvoltage induced by buried lines (close to grounding body)

下,地理线路感应过电压的大小为:

$$U = \frac{\mu dI}{2\pi r dt} \quad (3)$$

式中: U 为感应电压(kV); μ 为土壤中的磁导率,理想情况下取真空磁导率为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; dI 为流经接地体上的雷电流峰值; r 为电缆与接地体之间的距离(m); dt 为雷电流的上升沿时间,直接雷击为 $10 \mu\text{s}$ 。

由式(3)可以估算,当直击雷电流为 100 kA 时,距离接地体 0.5 m 电缆的感应电压为 4 kV , 这也大于设备测量端口能承受的脉冲电压。加大接地体和测量线之间的距离($>10 \text{ m}$)能有效降低感应电压。

3 宝昌台防雷系统设计

3.1 防雷地网及接地

通过计算得出宝昌台地网面积约 60 m^2 。为确保避雷地网效果,我们采取增加接地模块数的方式以加大接地网面积,再添加一定的化学长效降阻剂,加强接地阻值下降改造,使接地网阻值小于 4Ω 。对于观测室内接地(等电位)不规范问题,解决措施是在室内设置接地母排,室内机柜、仪器外壳等采用线耳连接工艺,就近接地与母排相连接。接地导线截面积不小于 10 mm^2 ,从地网引主接地线到室内接地母排上,供电电缆的外铠装层严格接地(图 3)。

3.2 外场地布线防雷设计

根据上述分析,为避免直击雷造成仪器损坏,宝昌台外场地布线采取埋地敷设方式。在井下观测场地,供电线路和测量线路采用埋地方式布线,沟槽埋地深大于 1.5 m ,测量线和供电线沟槽间隔大于 0.5 m ,沟槽引至观测室外,在观测室外 $3 \sim 5 \text{ m}$ 处竖杆,

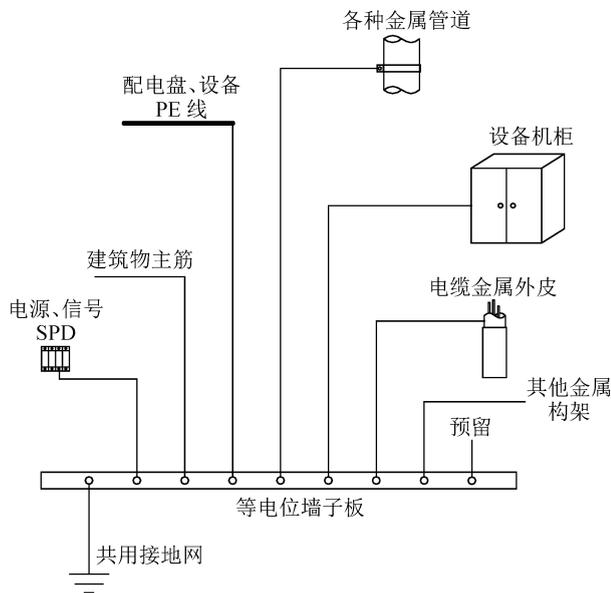


图 3 宝昌台接地系统图

Fig.3 Design of grounding system at Baochang station

将线路引入观测室内。根据已确定的电极埋设点,

通过式(3)计算可知,供电线路及测量线周围大于10 m范围内无相应泄流接地网(图4)。根据测量线上的感应过电压,结合测量线阻抗、电极电阻和观

测设备的电阻值计算观测场地进来的雷电流,并安装放电电流不小于10 kA的智能信号防雷器监控雷击次数和防雷器状态。



图4 宝昌台井下地电阻率观测外场地线路布局图

Fig.4 Layout of outfield lines for borehole earth resistivity observation at Baochang station

3.3 供电防雷

在台站观测系统设备供电方面,宝昌台通过统一采购智能电源,为地电阻率观测设备提供智能型稳定供电。在保证仪器观测稳定供电的基础上,智能电源还配备了环境、温度、气压辅助监测,可有效监控台站设备的供电情况及周边环境。对进入观测室的交流配电线路进行三级防雷设计:在观测室配电箱(柜)处设计一级交流电源防雷;在稳压电源或不间断电源(UPS)配电输入处设计二级(D)交流电源防雷;在观测仪器设备的电源输入处及机柜里设计三级(D)交流电源防雷。

3.4 综合布线

台站严格按照行业防雷技术规范要求^[13]进行综合布线的统一设计和规范整理。台站观测室外线路采用金属管敷设入室,观测室内各类线路也通过金属管敷设;强弱线严格分开敷设,室内分开设计强电线金属线槽和弱电线线槽,线槽重复接地;购置并安装标准机柜,观测仪与辅助设备安装在机柜内,进行标准的机柜设备分层安装与布线。

4 冬奥会保障项目总体防雷技术系统设计

通过对地电阻率台站防雷关键技术进行分析,开展了宝昌台防雷地网与接地、台站供电及电源防

雷、综合布线以及观测场地线路布设等方面的设计。冬奥会项目其他台站避雷系统将按照宝昌台方案进行全面改造,使改造后的避雷地网接地电阻符合小于 $4\ \Omega$ 的要求。部分台站在实施过程中拟增加接地模块并采用降阻剂以改善接地电阻;各台站统一采购智能电源以确保电压稳定,配电全部采取三级防雷设计;台站综合布线严格按照台站防雷技术要求进行整理,并根据实际情况安装专用信号防雷器;除大同台外,其他7个台站观测场地外线路全部采取埋地方式,以减少直击雷和感应雷的影响。大同台由于外场地与观测室相距较远,在确保接地及相关电源防雷的基础上采用架空线路,在外场地观测线路上根据直击雷引起的过电压分析,结合测量线阻抗、电极电阻和观测设备的电阻值进行计算后安装相应电流值的防雷装置。

5 结论

本文重点分析了地电阻率台站架空线路、埋地线路引起的直击雷和感应雷的危害。对于冬奥会保障晋冀蒙地震监测能力提升项目中的大部分台站,将架空线路改为埋地线路,以避免直击雷和感应雷;对于埋地线路,通过计算得出距埋地体10 m以上时可有效减少感应雷灾害;对于仍使用架空线路的

台站,可采用增加智能防雷器等方式以避免雷击造成仪器损坏。对项目改造的 8 个台站的地电阻率井下观测系统进行综合改造,根据《地震台站综合防雷》规范要求,从台站避雷地网与接地母排、台站供电、台站综合布线、观测场地供电线路及测量线路架设等方面进行综合设计,全面提升 8 个地电阻率台站的防雷效果,确保观测数据产出的可靠性。

参考文献(References)

- [1] 黄锡定,梁焕贞.地震台站应用防雷技术探讨[J].地震地磁观测与研究,2007,28(5):35-42.
HUANG Xiding,LIANG Huanzhen.Study on the Application of Lightning Protection Technique in Seismic Station[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2007,28(5):35-42.
- [2] 中国地震局监测预报司.地震前兆数字观测公用技术与台网[M].北京:地震出版社,2003.
Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration.Seismic Precursor Digital Observation Public Technology and Network[M].Beijing:Seismological Press,2003.
- [3] 陈德福.地壳形变动力学观测与研究[M].北京:海洋出版社,1993.
CHEN Defu.Observation and Study on the Crustal Deformation Dynamics[M].Beijing:China Ocean Press,1993.
- [4] 车用太,刘成龙,鱼金子,等.金沙江水网井台防雷地网施工与试验研究[J].地震,2010,30(3):45-52.
CHE Yongtai,LIU Chenglong,YU Jinzi,et al.Construction and Experiment of Well-station Lightning Protection Ground-network for the Groundwater Observation Net in the Jinshajiang Reservoir Area[J].Earthquake,2010,30(3):45-52.
- [5] 全建军,郑志泓,郑永通,等.地震台站综合防雷技术[J].地震工程学报,2017,39(增刊1):168-178.
QUAN Jianjun,ZHENG Zhihong,ZHENG Yongtong,et al.Comprehensive Lightning Protection Technology at Seismic Stations[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(Supp1):168-178.
- [6] 陈德福,文习山,张建民,等.形变台站防雷保护及接地改进[J].中国地震,1998,14(1):81-91.
CHEN Defu,WEN Xishan,ZHANG Jianmin,et al.Protection and Grounding Against Lightning in the Deformation Seismostation[J].Earthquake Research in China,1998,14(1):81-91.
- [7] 王勇,王雪森,洪新华,等.一种有效的防雷保护系统:综合防雷工程网络[J].西北地震学报,2000,22(2):182-186.
WANG Yong,WANG Xuesen,HONG Xinhua,et al.An Effective Device Against Thunder-bolt[J].Northwestern Seismological Journal,2000,22(2):182-186.
- [8] 王凤.地震前兆台站的防雷[J].灾害学,2005,20(2):58-60.
WANG Feng.Lightning Proof of Earthquake Precursory Stations[J].Journal of Catastrophology,2005,20(2):58-60.
- [9] 韩进,宋澄.遥测地震台站的防雷思考[J].地震地磁观测与研究,2011,32(1):109-112.
HAN Jin,SONG Cheng.Consideration of Thunder-proof in Telemetry Seismic Stations[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2011,32(1):109-112.
- [10] 瞿昊,霍祝青,戴波,等.测震台站综合防雷系统建设及效能评价[J].地震工程学报,2015,37(2):619-622,628.
QU Min,HUO Zhuqing,DAI Bo,et al.Construction and Evaluation of a Comprehensive Lightning Protection System for Seismic Stations[J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(2):619-622,628.
- [11] 孙宏志,李秀丽,雷晨,等.测震台站智能隔离防雷系统的设计与实现[J].地震工程学报,2015,37(3):878-883.
SUN Hongzhi,LI Xiuli,LEI Chen,et al.Design and Implementation of an Intelligent Isolated Lightning Protection System for Seismic Stations[J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(3):878-883.
- [12] 肖武军,解滔,张尧.晋冀蒙交界及附近地区小极距井下地电阻率观测装置设计[J].中国地震,2019,35(1):134-143.
XIAO Wujun,XIE Tao,ZHANG Yao.Observation Scheme for Short Electrode Spacing Well Apparent Resistivity at the Vicinity of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia Area[J].Earthquake Research in China,2019,35(1):134-143.
- [13] DB/T 68-2017 地震台站综合防雷[S].北京:地震出版社,2017.
DB/T 68-2017 Integrated Lightning Protection of Seismic Stations[S].Beijing:Seismological Press,2017.