ICS 07.060
CCS A47

团　体　标　准

T/GSEE 15-2025

风力发电场区域防雷技术规范

Regional Lightning Protection Technical Standard of Wind Farm

2025-09-10 发布　　2025-09-10 实施

广东省电机工程学会　发布

目　　次

前言 III
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 一般要求 4
5 现场勘察 4
5.1 基本内容 4
5.2 风力发电场 5
5.3 地理陡度 5
5.4 电力电子系统 5
5.5 雷击路径 6
6 雷击风险评估 7
6.1 风力发电场雷击风险源 7
6.2 风险源与风险因子 7
6.3 风险因子赋值 7
6.4 雷击风险等级 11
6.5 雷击风险等级划分的原则 11
7 预防直接雷击 12
7.1 基本原则 12
7.2 全方位雷电拦截器的保护范围 12
7.3 全方位雷电拦截器保护半径 r 的值 13
7.4 雷电拦截点的选择 14
7.5 多个雷击路径时保护范围的计算 16
7.6 设计图纸 16
8 预防雷电电磁脉冲 17
8.1 风机发电系统 17
8.2 风机配电系统 17
8.3 集电线路、升压站 17
8.4 光缆端口 17
9 区域防雷效果监测 18
10 区域防雷设备的施工及运维 18

10.1 全方位雷电拦截器的安装要求 18
10.2 道路运输 19
10.3 运行维护 19
10.4 施工安全要求 19
附录 A （规范性） 全方位雷电拦截器的工作原理及技术参数 20
附录 B （规范性） 多脉冲电涌保护器（MSPD）和高能吸收器（HEA）的技术参数 22
附录 C （资料性） 全方位雷电拦截器对雷击点电流的衰减效率 24
附录 D （规范性） 风力发电场区域防雷装置检测项目及技术指标 26
参考文献 28

前　　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020 的规定起草。

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，涉及到区域防雷方法、全方位雷电拦截器、多脉冲电涌保护器专利的使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案，相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人：佛山市顺德区伦教金盾防雷技术发展有限公司。

地址：广东省佛山市顺德区伦教街道羊大路 1 号。

联系人：曾萍海。

联系方式：0757-27836172。

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别其它专利的责任。

本文件由广东省风力发电有限公司提出。

本文件由广东省电机工程学会归口。

本文件起草单位：广东省风力发电有限公司、广东粤电阳江海上风电有限公司、佛山市顺德区伦教金盾防雷技术发展有限公司、天纵雷电科技（佛山）有限公司、四川盐源华电新能源有限公司、四川省能投会东新能源开发有限公司、中广核新能源投资(深圳)有限公司华南分公司、中广核（安溪）风力发电有限公司、中广核（南安）风力发电有限公司、广东国能龙源新能源有限公司、华润电力广东新能源公司、南方电网电力科技股份有限公司、南京信息工程大学、广东海洋大学、广州理工学院、中国气象局雷电野外科学试验基地、广东省气象局、广州市气象局、深圳市气象局、茂名市气象局、广东百立防雷科技有限公司、广东雷迪通工程技术有限公司、广州市海德防雷科技有限公司、广东粤电湛江风力发电有限公司、中国大唐集团新能源股份有限公司广东分公司、华能新能源股份有限公司广东分公司、中国长江三峡集团有限公司广东分公司、广东省风力发电有限公司湖南分公司、广东省风力发电有限公司内蒙古分公司、广东粤电茂名新能源有限公司。

本文件主要起草人：杨少杰、李家锋、李高、杨晖、李秋鹏、董家华、陈卓平、黄昱、高子钦、公方涛、史忠秋、张林渠、米凌志、陈珍、郭仁宏、潘晓庆、裴莹、杨赠儒、陈锐良、苏柱坚、顾展召、徐启腾、陈绿文、黄校贵、颜志、杨彦、冯伟翔、黄冬至、肖稳安、龙景超、蒙小飞、钟驰宇、行九晖、陈青山、郭春晓、张云龙、朱文峰、颜云、黄伟、王剑彬、吴天中、龙海洪、孟遂民、宋国炜、夏颂成、程文锋、段少俊、肖彬、王元强、龙忠楷、卢信军。

本文件为首次发布。

风力发电场区域防雷技术规范

1 范围

本文件制定了风力发电场区域防雷的现场勘察、雷击风险评估、工程设计、施工运维与设备性能的技术要求。

本文件适用于新建风力发电场的区域防雷设计和已投运风力发电场的区域防雷技术改造。风电行业生产制造厂宜按照本规范要求，在出厂前安装相应防雷装置；光伏发电场、核能发电站、水力发电站、变电站、架空输电线路等发电、输电、变电、配电设施参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 28547—2023 交流金属氧化物避雷器选择和使用导则

GB 50057—2010 建筑物防雷设计规范

GB 50601—2010 建筑物防雷工程施工与质量验收规范

T/GZLY 3—2022 楼宇建筑防雷技术评价指南

T/CMSA 0045—2023 雷电多脉冲试验通用准则

T/LYCY 4062—2024 森林区域雷电拦截技术规范

NF C17—102:2011 雷电防护 提前放电雷电防护系统

IEC 61400—24:2019 风能源系统 第 24 部分：雷电防护

IEC 61643—11:2011/2PFG 连接到低压电力系统的多脉冲电涌保护器附加试验-性能要求和试验方法

IEC 62305—2:2010 雷电防护 第 2 部分：风险管理

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光纤环网通信系统 fiber optic ring network communication system

基于光纤传输技术的风力发电场通信网络系统，由多个风机节点、终端机和光缆线路组成一个双向环形拓扑结构。

3.2

下行先导 downward leader

当雷云底部电场强度达到空气电离阈值时，开始形成向下运动的离子电流（流光），称下行先导。从时间的角度看像梯级一样，故又称梯级先导。

[来源：T/GZLY 3—2022，3.5]

3.3

上行先导　upward leader

受雷电下行先导端部电场的作用，避雷针等地面突出物体端部感应出与下行先导电场极性相反的电荷，当其电场强度达到电晕阈值时发生电晕并产生电晕电流（流光），受库仑定律约束，其方向向上并朝下行先导端部方向运动，称上行先导。

[来源：T/GZLY 3—2022，3.6]

3.4

雷击路径　path of lightning strikes

雷云对地放电的路径。雷击路径与雷云运动方向一致。

3.5

雷击点分布　distribution of lightning strikes

保护区域内雷击点的分布规律。雷击点分布与雷击路径和地面高大物体的分布形态相关，在山区，雷击点可能发生在山脊、山腰或山脚下，且具有一定规律。

[来源：T/LYCY 4062—2024，8.3]

3.6

直接雷击　direct strike

雷电的下行先导与地面尖端物体产生的上行先导相连接而发生的雷击，包括过顶雷击和侧面雷击。

[来源：T/GZLY 3—2022，3.1]

3.7

过顶雷击　over the top of the lightning strike

雷电经过被保护物体的顶部而发生的直接雷击，简称直击雷。

[来源：T/GZLY 3—2022，3.2]

3.8

侧面雷击　side lightning strike

雷电经过被保护物体的侧面而发生的直接雷击，简称侧击雷。侧击雷一般发生在相对高度 20m 以上的地面物体。

[来源：IEC 62305-3—2010，5.2.2]

3.9

地电位反击　ground potential strikes back

雷电流通过土壤传导而导致地下金属构件地电位升高而产生的闪络现象。

[来源：T/GZLY 3—2022，3.4]

3.10

避雷针　lightning rod

1752 年富兰克林发明的预防直接雷击装置，其由一段端部为针状的导电金属材料接地组成。

注：欧洲叫“Lightning Conductor”，美国叫“Lightning rod”，麦克斯韦（Maxwll）称其为引雷针，布克纽(Bouquegneau)称其为拦截器，中译名避雷针。避雷针产生的上行先导平均长度约50m，电晕产生的正负离子具有吸引和屏蔽雷电的作用。

3.11

离子云　ion cloud

地面尖端物体电晕后，与雷电下行先导端部电荷极性相同的离子受到电场力的排斥和风（平流输送）的共同作用，向下风向区域扩散形成像云一样的离子屏蔽层。

3.12

雷电拦截器 lightning interceptor

在雷电下行先导端部电场作用下，产生比避雷针等地面突出物体更长的上行先导，率先吸引雷电放电并衰减雷击点电流的装置。

[来源：T/GZLY 3—2022，3.7]

3.13

全方位雷电拦截器 comprehensive lightning interceptor

具有自动识别雷电的空间位置，全方位拦截雷电并衰减雷击点电流，适应雷电多脉冲放电的装置。

[来源：T/GZLY 3—2022，3.8]

3.14

雷电拦截点 Lightning interception point

在雷击路径上风向拦截雷电的点。

3.15

雷击点电流 Lightning point current

雷云对地面物体放电后，从接闪点流入大地的传导电流，也称雷电流。区别于雷电放电通道的位移电流和物体尖端的电晕电流。

[来源：T/GZLY 3—2022，3.9]

3.16

衰减效率 interceptor decay efficiency

雷电拦截器输出端的雷电流幅值与输入端雷电流幅值之比，用百分数表示。

3.17

多脉冲 Multi-Pulses

指雷电放电多次回击组成一组有时间间隔的脉冲串，简称多脉冲。

[来源：IEC 61643-11:2011/2 PFG]

3.18

单脉冲电涌保护器 single-pulse surge protective device;SSPD

采用单个雷电流脉冲波进行冲击检验的电涌保护器。

3.19

多脉冲电涌保护器 multi-pulse surge protective device;MSPD

能够承受同一时序多个脉冲组合波冲击的电涌保护器。

[来源：T/LYCY 4062—2024，3.15]

3.20

高能吸收器 high energy absorber;HEA

具有吸收电源线路雷电和操作过电压等瞬态脉冲能量的装置。

3.21

区域防雷 regional lightning protection

针对需要防雷的区域，在雷击路径的上风向安装全方位雷电拦截器拦截直接雷击，达到在下风向一定区域内避免或减少直接雷击发生和优化电磁场环境的工程技术方法。

[来源：T/LYCY 4062—2024，3.15]

3.22

半圆法 semicircular method

区域防雷的保护范围计算方法，定义为：从雷击路径的上风向首个雷电拦截点 a 到下风向直线距离

r 的半圆区域（下风向没有超过上风向首个雷电拦截点保护高度的物体），简称半圆法。

［来源：T/LYCY 4062—2024，8.1.1，修改］

3.23

雷击风险源　lightning risk source

根据风力发电场可能遭受雷击的种类划分为直击雷、侧击雷、雷电电磁脉冲、地电位反击四个风险源。

［来源：T/GZLY 3—2022，3.17］

3.24

雷击风险等级　lightning risk grade

按照风力发电场雷击风险评估结果划分为 0 风险 A 级，低风险 B 级，中风险 C 级，高风险 D 级。

［来源：T/GZLY 3—2022，3.18］

4　一般要求

4.1　风力发电场实施区域防雷工程前，应对风力发电场进行现场勘察，依据勘察结果进行雷击风险评估或区域防雷工程设计。

4.2　预防直接雷击对风机叶片的损害，应在风机机舱顶部安装全方位雷电拦截器。全方位雷电拦截器的技术参数应符合附录 A.3.2 的规定。

4.2.1　已投入使用的风机，应保留原风机叶片接闪系统。

4.2.2　未投入使用的风机，宜将安装全方位雷电拦截器的技术要求纳入风机出厂的验收内容；其叶片接闪系统是否保留，由风力发电场设计方和生产制造厂家研究确定。

4.3　预防直接雷击对架空集电线路的损害，应在线路杆塔上安装全方位雷电拦截器，原有的避雷线应予保留。

4.4　升压站应利用原有的独立避雷杆塔安装全方位雷电拦截器，原有避雷针宜予拆除；保留升压站建筑物天面女儿墙上的避雷带，拆除避雷带四角的避雷短针并对断面采取圆角处理。

4.5　预防雷电电磁脉冲对电力电子设备的损害，应依据电源线路的额定电压等级采用相应的多脉冲电涌保护器（MSPD）或高能吸收器（HEA），MSPD/HEA 的技术参数应符合附录 B 的规定。

——已投入使用的风机、箱变设备，应按本规范要求安装 MSPD/HEA。安装时，宜拆除原有单脉冲电涌保护器。

——未投入使用的风机、箱变设备，在生产制造时，宜按本规范要求安装 MSPD/HEA，并纳入风机、箱变设备出厂验收的技术要求。

——线路高压避雷器的通流量$I_n \geq 10kA$。

4.6　风机、箱变、杆塔的工频接地电阻$R \leq 10\Omega$；当土壤电阻率$\rho \geq 1000\Omega/m$时，$R \leq 30\Omega$；升压站$R \leq 4\Omega$。

5　现场勘察

5.1　基本内容

5.1.1　现场勘察内容应包括地理环境、雷云运动规律、风机机位分布、升压站和架空集电线路杆塔位置；并获取风机、箱变、架空集电线路和输电线路、升压站、继电保护等技术数据。

5.1.2　现场勘察宜获取风力发电场建设项目的可行性研究报告、风机、箱变、光缆设备、架空集电线路的设计资料、历年雷击损坏设备记录及线路录波器故障波形图、故障报告等设计资料。

5.2 风力发电场

——风机坐标（经纬度、等高线、高程）、类型、占地面积、四至范围；
——风机数量、型号、功率；
——相邻风机距离；
——平原风力发电场离山脉边缘距离、海上风力发电场离岸距离。

5.2.1 风力发电场的分类

5.2.1.1 陆地风力发电场按地理环境不同划分为七类：海岛、海岸、平原、丘陵、盆地、沙漠、高原。
5.2.1.2 海上风力发电场按离岸距离划分为两类：近海与远海。

5.3 地理陡度

陆地风力发电场需计算地理陡度。地理陡度用（1）计算，见图 1。

$$G = \frac{\Delta H}{\Delta S} \times 100\% \quad (1)$$

式中：G -用%表示的陡度；
P_1 -参考点位；
P_2 -山脉最高点位；
ΔS -P_1与P_2两点间水平距离；
ΔH-P_1与P_2两点间垂直距离；
P' -P_1与P_2垂直相交点。

注：如G=15%，表示每百米升高15m。

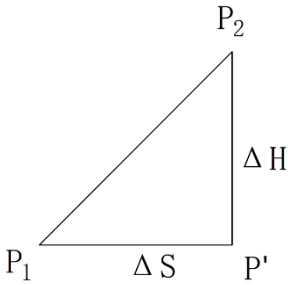


图1 地理陡度的概念示例

5.4 电力电子系统

5.4.1 风机发电系统

——风机：发电机类型、功率，换流器输出额定电压值，塔筒、叶片几何尺寸，叶片接闪器及引下线安装方式；
——机舱顶部：安全围栏、气象桅杆几何尺寸，风向风速仪位置；
——轮毂、机舱：控制柜中断路器的规格、参数，避雷器的规格、参数，轮毂中 EPD 避雷器的规格、参数；
——塔基控制柜：断路器的规格、参数，避雷器的规格、参数；
——PE 线：轮毂、机舱、塔筒、塔基、塔底（负一层）各节点连接方式；
——塔筒内电缆：电力电缆与信号电缆的间距；
——接地装置：风机工频接地电阻测量值。

5.4.2　箱式变压器

——接线方式、线路电压有效值；
——箱变高压侧线路避雷器规格、参数；
——低压侧中性点接地方式、箱变工频接地电阻测量值。

5.4.3　集电线路

——额定电压等级、架空或直埋、环境、走向；
——避雷线架设方式、线路避雷器规格、参数，杆塔工频接地电阻测量值；
——集电线路的高程、长度，杆塔高度、基数、相线数量与布置方式。

5.4.4　升压站

——建筑物顶部避雷针/带安装方式，独立避雷针数量与高度；
——风力发电场主接线图，主变接线方式、容量、中性点接地方式；
——主变两侧线路避雷器规格、参数；
——主变高压侧断路器规格、参数、整定值，低压侧线路断路器规格、参数、整定值；
——继电保护及线路录波器的设置（录波、测距、开关量、报文、故障报告）；
——进入建筑物内的各类金属管线，电力、信息、防雷系统等的接地方式和工频接地电阻测量值；
——升压站到电网变电站的距离。

5.4.5　光纤环网通信系统

——光缆类型、规格、参数，直埋光缆井设置方式（如有），架空光缆架设方式；
——光缆端口绝缘处理、接地方式。

5.4.6　高压输电线路

——额定电压等级、架设形式、长度、环境、走向。

5.5　雷击路径

5.5.1　确定雷击路径至少应获取下列资料中的一种进行分析

——依据气象数据绘制的 30 年或近 1-2 年雷暴高发月份风向频率玫瑰图；
——风力发电场测风塔一年或多年逐月风向频率玫瑰图；
——闪电定位系统雷暴高发期一年或多年逐月雷击散点图。

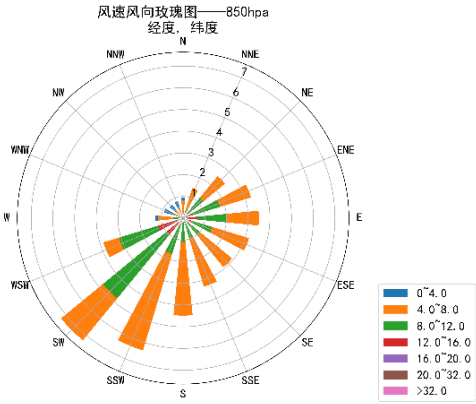


图2　风向频率玫瑰图示例

5.5.2　当地气象观测站的地理高程小于被保护区域的地理高程时，其风向频率玫瑰图仅作参考，应以其它气象资料、测风塔资料、闪电定位系统作为确定雷击路径的主要分析依据。

5.5.3　雷击路径的划分

5.5.3.1　雷击路径划分为八种基本类型

——东-西或西-东（E-W/W-E）
——南-北或北-南（S-N/N-S）
——东北-西南或西南-东北（NE-SW/SW-NE）
——东南-西北或西北-东南（SE-NW/NW-SE）

5.5.3.2　雷击路径应依据风向频率玫瑰图的概率峰值确定，偏移量≤±5°。

5.5.3.3　雷击路径应标明方向和角度，如 E90°--W270°，NE75°--SW245°，用线条和双箭头表示方向并放置于设计图纸的相应位置。

6　雷击风险评估

6.1　风力发电场雷击风险源

——S1:直击雷（过顶雷击）：雷击风机叶尖，集电线路杆塔，升压站；
——S2:侧击雷（侧面雷击、侧下雷击）：雷击风机叶尖以下轮毂以上部分，集电线路杆塔，升压站；
——S3:雷电电磁脉冲：通过传导（金属介质、土壤）和辐射方式导致电力电子设备过电压；
——S4:邻近雷击：雷击风机、集电线路、升压站附近物体或地面；
——S5:地电位反击：雷电流通过土壤传导引起地下金属构件电位抬升，并通过风机接地系统传导到电力电缆铠装金属层、埋地光缆铠装金属层等发生闪络放电损坏电力电子设备的现象。

6.2　风险源与风险因子

雷击风险源按雷击的不同形式和性质分为：直击雷 S1，侧击雷 S2，雷电电磁脉冲 S3，邻近雷击 S4，地电位反击 S5，雷击风险源与风险因子的关系见表 1。

表1　雷击风险源与风险因子的关系

序号	雷击形式/性质	风险源	风险因子
1	直击雷	S1	R1
2	侧击雷	S2	
3	雷电电磁脉冲	S3	R2
4	邻近雷击	S4	R3
5	地电位反击	S5	

6.3　风险因子赋值

6.3.1　直击雷风险因子 R1（S1、S2）

雷击风力发电场与其所在的地理位置、四周地面突出物体的高度有关。当该风力发电场处在雷击路径范围内，场内电气设备将大概率受到雷击。雷电流将导致风机设备的物理损坏或产生雷电电磁脉冲损

坏电力电子设备。把此现象定义为风险因子 R1，需要根据下列现状对 R1 赋值。

a) R1=0，0 风险

——风机：机舱顶部安装全方位雷电拦截器，机舱所有金属物体电气连通并与机舱内接地汇流排可靠连接；风机叶片接闪器引下线经碳刷与机舱内接地汇流排可靠连接，机舱内接地汇流排用多股铜缆与塔筒接地装置可靠连接，整个机舱不存在放电间隙；机舱和轮毂不存在齿轮箱漏油现象。

——集电线路：全场采用埋地电缆并符合电力埋地电缆的有关规定；全场架空线路杆塔顶部已安装全方位雷电拦截器有效保护。

——升压站：站区内采用原有避雷塔已安装两支全方位雷电拦截器（对角位置），站内建筑物顶部安装有避雷带（避雷带四角没有避雷短针），主变高压侧断路器采用 GIS 且继电保护已实现低压侧断路器不受雷击高压侧线路影响而动作。

——接地系统：风机具有良好的接地系统，风机、箱变接地装置工频接地电阻年平均值$R \leq 10\Omega$。升压站接地装置工频接地电阻$R \leq 4\Omega$。

b) R1=1，低风险

——风机：机舱顶部安装全方位雷电拦截器，机舱所有金属物体电气连通并与机舱内接地汇流排可靠连接；风机叶片接闪器引下线经碳刷与机舱内接地汇流排可靠连接，机舱内接地汇流排用多股铜缆与塔筒接地装置可靠连接，整个机舱不存在放电间隙；机舱和轮毂存在轻微的齿轮箱漏油现象。

——集电线路：风机箱变高压侧电缆出线采用埋地电缆，经架空线路送到升压站，架空线路杆塔顶部已安装全方位雷电拦截器有效保护。

——升压站：站区内采用原有避雷塔安装两支全方位雷电拦截器（对角位置），站内建筑物顶部安装有避雷带、四角安装有避雷短针；主变高压侧断路器采用 GIS，但继电保护未考虑雷击电流分量，主变低压侧断路器偶尔受雷击高压侧线路影响而动作。

——接地系统：风机具有良好的接地系统，风机、箱变接地装置工频接地电阻年平均值$R \leq 10\Omega$。升压站接地装置工频接地电阻$R \leq 4\Omega$。

c) R1=2，中风险

——风机：机舱顶部安装全方位雷电拦截器，机舱所有金属物体电气连通并与机舱内接地汇流排可靠连接；风机叶片接闪器引下线经碳刷与机舱内接地汇流排可靠连接，机舱内接地汇流排用多股铜缆与塔筒接地装置可靠连接，整个机舱不存在放电间隙；机舱和轮毂存在明显的齿轮箱漏油现象。

——集电线路：全场采用架空线路，架空线路杆塔顶部未安装全方位雷电拦截器。

——升压站：站区内未安装全方位雷电拦截器，站内建筑物顶部安装有避雷带、四角安装有避雷短针；主变高压侧断路器采用 GIS，但继电保护未考虑雷击电流分量，主变低压侧断路器受雷击高、低压侧线路影响而经常动作。

——接地系统：风机接地系统存在较大阻抗，风机、箱变接地装置部分工频接地电阻年平均值$10\Omega < R < 30\Omega$；升压站接地装置工频接地电阻$R \leq 4\Omega$。

d) R1=3，高风险

——风机：采用风机叶片接闪，叶片接闪器引下线与轮毂铜环之间接触不良或松脱，机舱顶部气象桅杆上采用避雷针保护；机舱所有金属物体等电位连接，并与机舱内接地汇流排可靠连接；风机叶片接闪器引下线经碳刷与机舱内接地汇流排可靠连接，机舱内接地汇流排用多股铜缆与塔筒接地装置可靠连接；机舱存在放电间隙；轮毂内部潮湿影响绝缘性能，齿轮箱严重漏油。

——集电线路：全场采用架空线路，架空线路杆塔未安装全方位雷电拦截器且存在尖端物体。

——升压站：站区内采用两支或多支避雷针保护，站内建筑物顶部安装有避雷带、四角安装有避雷

短针；主变高压侧断路器采用 GIS，继电保护未考虑雷击电流分量，主变低压侧断路器受雷击高、低压侧线路影响而频繁动作。

——接地系统：风机接地系统存在较大阻抗，风机、箱变接地装置部分工频接地电阻年平均值$R \geq 30\Omega$；升压站接地装置工频接地电阻$R \leq 4\Omega$。

6.3.2 雷电电磁脉冲风险因子 R2（S3）

雷击风力发电场的风机、集电线路、升压站、附近地面物体及雷击高压输电线路时，将在雷击点附近空间和雷电流经过的路径周围产生强电磁场。当风力发电场设备处在雷击强电磁场环境时，将产生线路过电压或闪络放电而损坏设备。把此现象定义为风险因子 R2，为预防雷电电磁脉冲对风力发电场设备的损害，需要根据下列现状对 R2 赋值。

a） R2=0，0 风险

——风机：在机舱控制柜电源开关处（QF）安装三相高能吸收器或多脉冲电涌保护器(T1)（其恒定转速时的电压值因风机功率大小而不同，如 690V、1140V 等，下同），吸收雷击和风机启动-恒速过渡过程大陡度过电压能量，其$I_n \geq 40kA$；在塔筒控制柜 380V 开关处（QF）安装三相多脉冲电涌保护器（T2），其$I_n \geq 20kA$；在塔筒控制柜底部安装 N-PE 多脉冲电涌保护器（T2），其$I_n \geq 20kA$。

——箱变：在箱变低压侧安装三相高能吸收器或多脉冲电涌保护器，其$I_n \geq 20kA$。在箱变高压侧安装的线路避雷器，其$I_n \geq 10kA$。

——集电线路：架空线路安装的三相线路避雷器，其$I_n \geq 10kA$，杆塔工频接地电阻$R \leq 10\Omega$。

——升压站：主变高低压侧安装相应额定电压等级的线路避雷器，其$I_n \geq 10kA$。

——接地系统：风机具有良好的接地系统，风机、箱变接地装置工频接地电阻年平均值$R \leq 10\Omega$；升压站接地装置工频接地电阻$R \leq 4\Omega$。

b） R2=1，低风险

——风机：在机舱控制柜电源开关处（QF）安装三相高能吸收器或多脉冲电涌保护器（T1），其$I_n \geq 40kA$；在塔筒控制柜 380V 开关处（QF）安装三相多脉冲电涌保护器（T2），其$I_n \geq 20kA$；在塔筒控制柜底部安装 N-PE 多脉冲电涌保护器（T2），其$I_n \geq 20kA$。

——箱变：在箱变低压侧安装三相高能吸收器或多脉冲电涌保护器，其$I_n \geq 20kA$；在箱变高压侧安装的线路避雷器，其$I_n \geq 10kA$。

——集电线路：架空线路三相避雷器，其$I_n \geq 10kA$，杆塔工频接地电阻$R \geq 10\Omega$。

——升压站：主变高低压侧安装相应额定电压等级的线路避雷器，其$I_n \geq 10kA$。

——接地系统：风机具有良好的接地系统，风机、箱变接地装置工频接地电阻年平均值$R \leq 10\Omega$。升压站接地装置工频接地电阻$R \leq 4\Omega$。

c） R2=2，中风险

——风机：在机舱控制柜电源开关处（QF）安装三相单脉冲电涌保护器（T1），在塔筒控制柜 380V 开关处（QF）安装三相单脉冲电涌保护器（T2），出现过 SPD 离线现象（故障指示色标由绿色翻转为红色）。

——箱变：低压侧安装三相单脉冲电涌保护器（T1 或 T2），高压侧安装的线路避雷器，其$I_n \leq 5kA$，出现过雷击导致线路避雷器击穿损坏现象。

——集电线路：架空线路三相避雷器，其$I_n \leq 5kA$，曾经出现脱扣、爆裂现象；部分杆塔工频接地电阻$R \geq 10\Omega$。

——升压站：主变高低压侧安装相应额定电压等级的线路避雷器，其$I_n \leq 5kA$。雷击主变低压侧线路出现低压侧断路器跳闸现象。

——接地系统：风机的接地系统存在较大阻抗，风机、箱变接地装置部分工频接地电阻年平均值$10\Omega < R < 30\Omega$；升压站接地装置工频接地电阻$R \leq 4\Omega$。

d) R2=3，高风险

——风机：在机舱控制柜电源开关处（QF）安装三相单脉冲电涌保护器（T1），在塔筒控制柜 380V 开关处（QF）安装三相单脉冲电涌保护器（T2），经常出现离线或爆裂现象。

——箱变：低压侧安装三相单脉冲电涌保护器（T1），高压侧安装的线路避雷器，其$I_n \leq 5kA$，曾出现线路避雷器和箱变绝缘击穿损坏现象。

——集电线路：架空线路三相避雷器，其$I_n \leq 5kA$，曾出现脱扣、爆裂现象；部分杆塔工频接地电阻$R \geq 10\Omega$。

——升压站：主变高低压侧安装相应等级的线路避雷器，其$I_n \leq 5kA$，雷击主变高、低压侧线路均出现低压侧断路器跳闸现象。

——接地系统：风机的接地系统存在较大阻抗，风机、箱变接地装置部分工频接地电阻年平均值$R \geq 30\Omega$；升压站接地装置工频接地电阻$R \leq 4\Omega$。

6.3.3 邻近雷击和地电位反击风险因子 R3（S4、S5）

邻近雷击是指雷击发生在风力发电场范围外部附近，其对风力发电场内部设备的损害，主要通过空间的辐射和通过土壤的传导两个途径。空间辐射的电磁场产生的影响可能导致集电线路过电压；通过土壤传导的雷电流则可能对地下的金属构件产生高电位而导致电力电子设备损坏。把此现象定义为风险因子 R3，需要根据下列现状对 R3 赋值。

a) R3=0，0 风险

——风机：风机叶片接闪器、叶片引下线、碳刷、机舱接地汇流排、专用 PE 接地线、风机接地环、塔基接地装置任一连接节点不存在放电间隙；在塔基负一层，风机接地环与塔基接地装置之间连接的过渡直流电阻$R \leq 0.2\Omega$；其连接材料规格符合现行规范要求。

——箱变：设置在风机外的箱变与风机共用接地装置，通过电缆井与塔基接地装置连接时拐角>90°；用于保护箱变的金属围栏，已在对角不少于 2 处与箱变接地装置可靠连接。

——集电线路：埋地金属电缆接头处连接的方法满足最大故障电流热容量，未发生雷击爆裂现象。

——光纤环网通信系统：进入光缆接线箱的铠装金属和碳素钢丝（加强筋）分别可靠接地，并与光纤有效绝缘。

——升压站：电气接地、建筑物接地、独立避雷塔接地等采用全等电位连接。

b) R3=1，低风险

——风机：风机叶片接闪器、叶片引下线、碳刷、机舱接地汇流排、专用 PE 接地线、风机接地环、塔基接地装置任一连接节点不存在放电间隙；在塔基负一层，风机接地环与塔基接地装置之间连接的过渡直流电阻$R \leq 0.2\Omega$；其连接材料规格符合现行规范要求。

——箱变：设置在风机外的箱变与风机共用接地装置，通过电缆井与塔基接地装置连接时拐角<90°；用于保护箱变的金属围栏，仅有 1 处与箱变接地装置连接。

——集电线路：埋地金属光缆接头处采用机械压接的方法，未发生雷击爆裂现象。

——光纤环网通信系统：进入光缆接线箱的铠装金属和碳素钢丝（加强筋）分别可靠接地，并与光纤有效绝缘。

——升压站：电气接地、建筑物接地、独立避雷塔接地等采用全等电位连接。

c) R3=2，中风险

——风机：风机叶片接闪器、叶片引下线、轮毂连接板、碳刷、机舱接地汇流排、专用 PE 接地线、风机接地环、塔基接地装置某一连接节点存在放电间隙；在塔基负一层，风机接地环与塔基接地装置之间过渡直流电阻$R > 0.2\Omega$；其连接材料规格不符合现行规范要求。

——箱变：设置在风机外的箱变与风机共用接地装置，通过电缆井与塔基接地装置连接时拐角<90°；用于保护箱变的金属围栏没有与箱变接地装置可靠连接，存在放电间隙。

——集电线路：埋地金属光缆接头处采用机械压接的方法，曾发生雷击爆裂现象；杆塔线路避雷器

偶有爆裂现象。

——光纤环网通信系统：进入光缆接线箱的铠装金属和碳素钢丝（加强筋）未可靠接地，未与光纤有效绝缘，光缆端口有明显的雷击闪络痕迹。

——升压站：电气接地、建筑物接地共用接地装置，独立避雷塔采用独立接地。

d） R3=3，高风险

——风机：风机叶片接闪器、叶片引下线、碳刷、机舱接地汇流排、专用 PE 接地线、风机接地环、塔基接地装置某一连接节点存在放电间隙；在塔基负一层，风机接地环与塔基接地装置之间过渡直流电阻$R>0.2\Omega$；其连接材料规格不符合现行规范要求。

——箱变：设置在风机外的箱变与风机共用接地装置，通过电缆井与塔基接地装置连接时拐角＜90°；用于保护箱变的金属围栏，没有与箱变接地装置可靠连接，存在放电间隙。

——集电线路：埋地金属光缆接头处采用机械压接的方法，频繁发生雷击爆裂现象，杆塔线路避雷器经常发生爆裂现象。

——光纤环网通信系统：进入光缆接线箱的铠装金属和碳素钢丝（加强筋）未可靠接地，未与光纤有效绝缘，曾发生光纤熔断现象。

——升压站：电气接地、建筑物接地、避雷塔接地未实现共用接地体；频繁出现集电线路断路器跳闸现象。

6.4 雷击风险等级

把风力发电场的雷击风险划分为四个等级：分别为零风险 A，低风险 B，中风险 C，高风险 D，如表 2：

表2 雷击风险等级划分

雷击源	雷击风险等级			
	A	B	C	D
直击雷 S1	R1=0	R1=1	R1=2	R1=3
侧击雷 S2				
雷电电磁脉冲 S3	R2=0	R2=1	R2=2	R2=3
邻近雷击 S4	R3=0	R3=1	R3=2	R3=3
地电位反击 S5				

6.5 雷击风险等级划分的原则

当不符合表 2 划分条件时，按风险因子最大值划分等级。如在 A 级中，只要有一个因子值为 1，即划为 B 级，如有一个因子值为 2，即划为 C 级，如有一个因子值为 3，即划为 D 级，其逻辑关系见图 3。

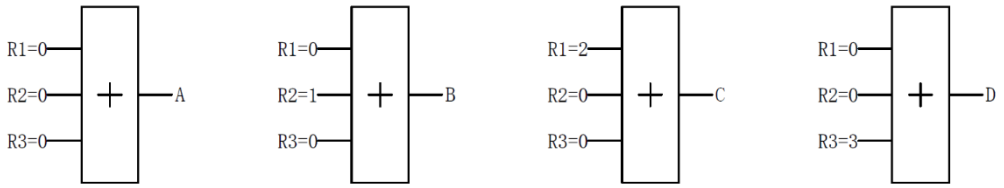


图3 按风险因子最大值划分等级示例

6.6 已建风力发电场应依据雷击风险评估结果进行整改，经整改后达到相应等级的，可调整到相应等级。新建风力发电场可依据风险评估结果，按 A 级 0 风险安排设备采购和建设。

7 预防直接雷击

7.1 基本原则

预防直接雷击对风机的损坏，应采用具有自动识别雷电空间位置，全方位拦截雷电并衰减雷击点电流，适应雷电多脉冲放电的全方位雷电拦截器。

7.2 全方位雷电拦截器的保护范围

7.2.1 单支全方位雷电拦截器的保护范围

从雷击路径的上风向首个雷电拦截点 a 到下风向直线距离 r 的半圆区域，（下风向没有超过上风向首个雷电拦截点保护高度的物体），简称半圆法。以 a 为圆心，r 为半径画圆，保护范围按公式（2）计算，见图 4。

$$A = \frac{\pi r^2}{2} \quad \text{(2)}$$

式中：A—被保护区域的面积（m^2）；

r—两次雷击之间的距离，即保护半径（m）。

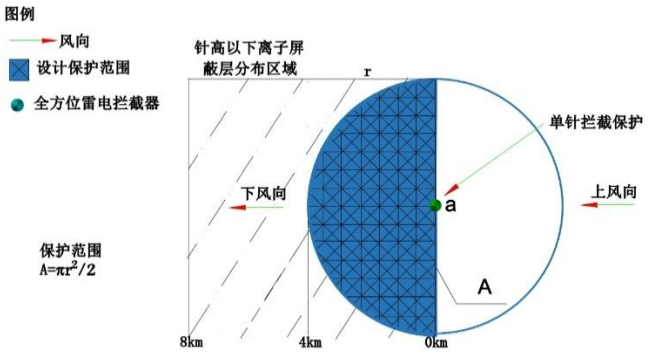


图4 单支全方位雷电拦截器的保护范围示例

7.2.2 四支全方位雷电拦截器的保护范围

四支全方位雷电拦截器的保护范围按（3）计算，见图 5。

$$A = L \times W \quad \text{(3)}$$

式中：A—保护区域的面积（m^2）；

L—南北两支全方位雷电拦截器之间的直线距离（m）；

W—东西两支全方位雷电拦截器之间的直线距离（m）。

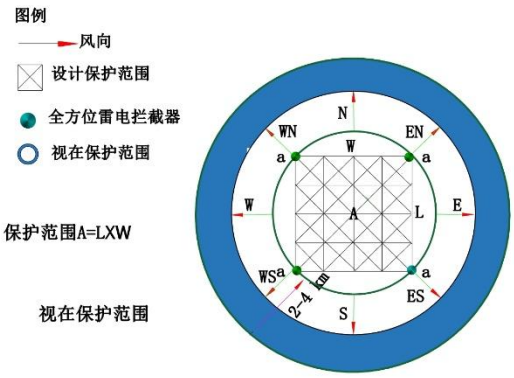


图5　四支全方位雷电拦截器的保护范围示例

7.2.3　采用多支全方位雷电拦截器保护时，应严格按照公式（2）计算各支全方位雷电拦截器的保护范围，以实现保护区域全覆盖。

7.3　全方位雷电拦截器保护半径 r 的值

7.3.1　基本原则

依据雷击路径与保护对象（风力发电场、集电线路）的相互关系，确定公式（2）中下风向保护半径 r 的值，见表 3。

表3　雷击路径与保护对象的相互关系确定保护半径

空间形态	相互关系	下风向保护半径 r（km）	适用类别
面状	平行	2-4	远海、近海、平原、沙漠、丘陵
	夹角	1-3	海岛、海岸、盆地、丘陵、高原
	垂直	1-2	盆地、丘陵、高原、近海
线状	同时存在三种关系	0.5-1	架空集电线路、风机

7.3.2　特殊条件下保护半径 r 的调整

7.3.2.1　地形陡度$G \geq 15\%$。

7.3.2.2　当雷电拦截点下风向存在河流、湖泊时，保护半径 r 的值取雷电拦截点到湖泊、河流边缘的距离。

7.3.2.3　当地下存在较大金属矿时，保护半径 r 的值取雷电拦截点到矿区边缘的距离，矿区内的保护应另行设计。

7.3.2.4　河流、湖泊、矿区保护半径 r 调整见图 6。

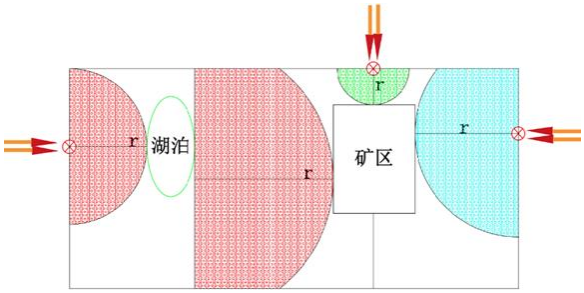


图6　河流、湖泊、矿区保护半径 r 的调整示例

7.3.2.5　当每部风机或集电线路每基杆塔安装了全方位雷电拦截器时，保护半径 r 可忽略。

7.4　雷电拦截点的选择

7.4.1　基本要求

7.4.1.1　山区、高原、丘陵、盆地风力发电场

雷击路径与所处山脉的相互关系决定了雷击点位置，依据下列情况应选择合适位置作为雷电拦截点。

——当雷击路径与山脉走向垂直时，雷电拦截点宜设在山脚处，见图 7。

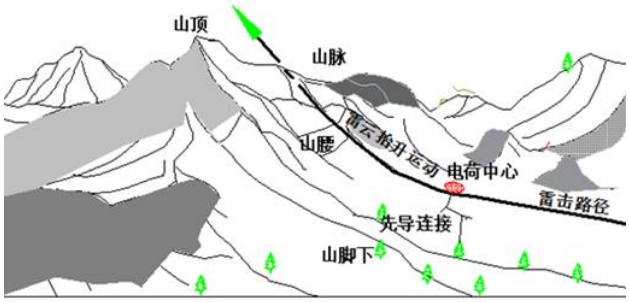


图7　雷击路径与山脉走向垂直时雷击点分布示例

——当雷击路径与山脉走向呈夹角时，雷电拦截点宜设在山腰处，见图 8。

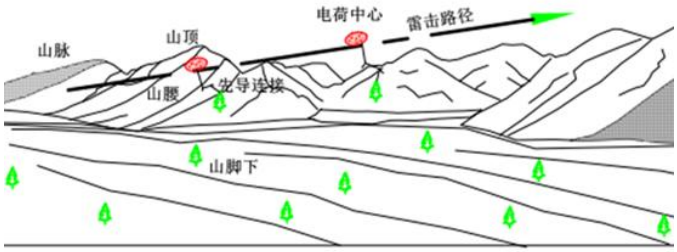


图8　雷击路径与山脉走向呈夹角时雷击点分布示例

——当雷击路径与山脉走向平行时，雷电拦截点宜设在山脊处，见图 9。

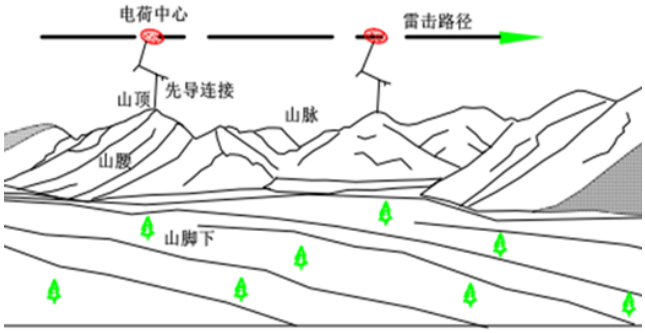


图9　雷击路径与山脉走向平行时雷击点分布示例

——山脉地形雷电拦截点的选择见表 4。

表4　山脉地形雷电拦截点的选择

雷击路径与山脉的关系	大概率雷击点	雷击风机（地面尖端物体）的概率			雷电拦截点位置
		山脊	山腰	山脚	
垂直	山脚	小	小	大	山脚
夹角	山腰	小	大	小	山腰
平行	山脊	大	小	小	山脊

7.4.2　平原、草原、沙漠风力发电场

雷击路径与风力发电场的相互关系决定了雷击点，依据下述情况应选择合适位置作为雷电拦截点：

——区域的雷击路径可视为水平线性运动；

——当雷击路径与风力发电场垂直，雷击点主要发生在风力发电场迎风向首行（列）风机附近，雷电拦截点应设在迎风向首行（列）风机位置，见图 10；

——当雷击路径与风力发电场平行（侧面）时，雷击点主要发生在风力发电场对应侧面首行（列）风机附近，雷电拦截点应设在对应侧面首行（列）风机位置；

——风力发电场离山脉＜5km，雷云向山脉方向运动产生抬升作用，雷击点将发生在抬升过程曲率最大处，雷电拦截点的设置可参照历史雷击点的分布（雷击损坏风机、集电线路设备的位置），结合地理环境特点和保护半径 r 选择雷电拦截点；

——雷电拦截点的设置应实现电晕离子屏蔽层对风力发电场保护区域全覆盖。

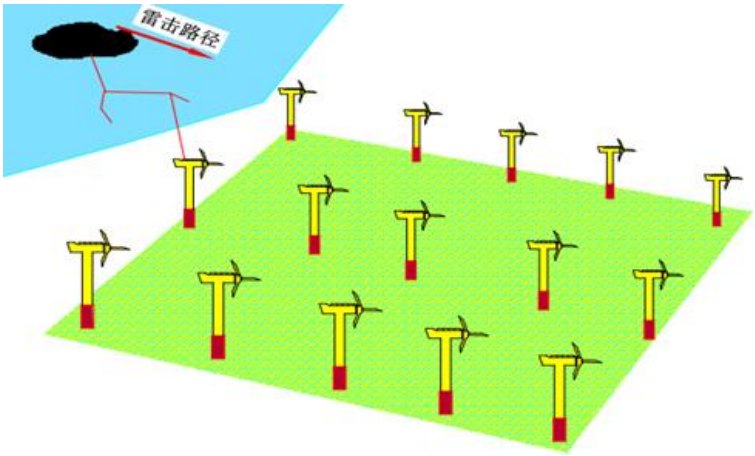


图10 雷击路径与风力发电场垂直时雷击点分布示例

7.4.3　海上风力发电场

雷击路径与海上风力发电场的位置关系决定了落雷点，依据下列情况应选择合适位置作为雷电拦截点：

——远海风力发电场和近海风力发电场，雷击路径可视为水平线性运动；

——当雷击路径与风力发电场垂直，雷击点主要发生在风力发电场迎风向高程最大的风机附近，雷电拦截点应设在迎风向高程最大的风机位置；

——当雷击路径与风力发电场平行（侧面），雷击点主要发生在风力发电场对应侧面首行（列）的风机附近，雷电拦截点应设在对应侧面首行（列）风机位置，见图 11；

——当近海风力发电场离岸距离 $<15km$时，雷云朝陆地方向运动将产生抬升现象，雷击点将发生在抬升过程曲率最大处。雷电拦截点的设置应参照历史雷击点的分布（雷击损坏风机设备的位置），结合地理环境特点和保护半径 r 选择雷电拦截点；

——雷电拦截点的设置应实现电晕离子屏蔽层对风力发电场保护区域全覆盖。

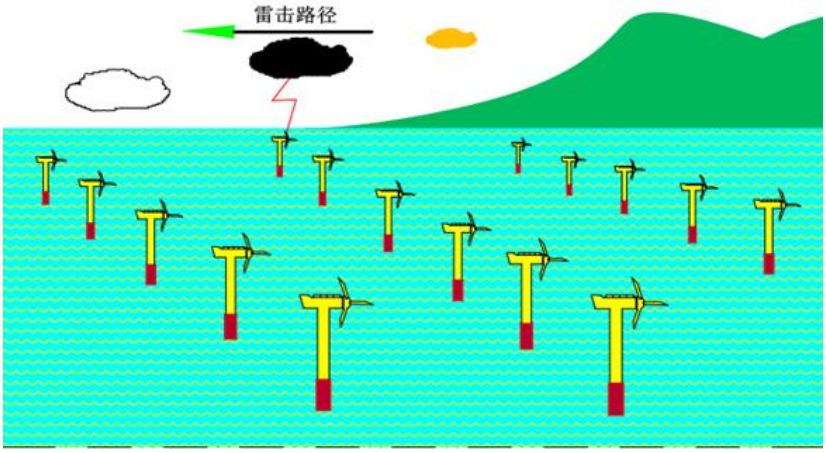


图11 雷云从风力发电场侧面经过时雷击点分布示例

7.4.4 特殊情况

——由山脉等地形因素导致地表风产生抬升或辐合处宜作为雷电拦截点；
——历史雷击点位置宜作为雷电拦截点；
——相对海拔最高处宜作为雷电拦截点；
——集电线路拐角处杆塔宜作为雷电拦截点。

7.5 多个雷击路径时保护范围的计算

若保护区域内存在多个雷击路径，特别是海上、海岛、海拔≥2000m 孤立的山峰等受涡旋状雷击路径（如台风）影响的风力发电场，应依据不同路径按照公式（2）分别进行保护范围的计算。

7.6 设计图纸

7.6.1 设计图纸应包括：设计说明、雷电拦截点布置图和施工图。

7.6.2 设计说明应包括现场勘测结果、雷击风险等级，并重点描述地理环境、风机布置、雷击路径、雷电拦截点和保护范围。

7.6.3 雷电拦截点布置图应包括图题、图例、指北针、雷击路径、四至范围、风机位置编号、轮毂高度、历史雷击损坏风机编号、拟安装全方位雷电拦截器风机编号。其中，雷击路径宜用红色双箭头表示，历史雷击损坏风机编号宜用红色表示，拟安装全方位雷电拦截器风机编号宜用深绿色表示，见图 12。

7.6.4 施工图应按照国家有关施工图的规范执行。

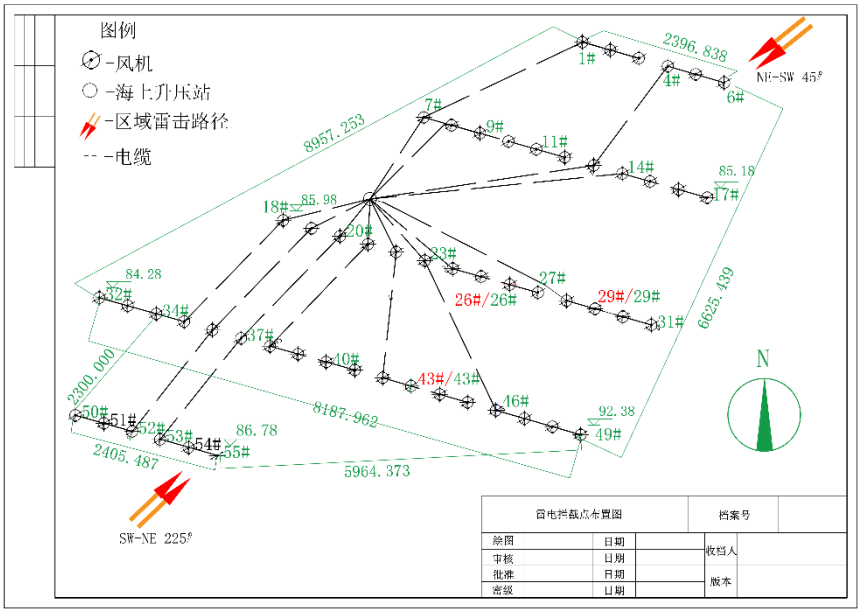


图12 雷电拦截点布置图示例

8 预防雷电电磁脉冲

8.1 风机发电系统

应在风机发电系统安装与发电机额定电压一致的 MSPD（690V）/HEA（1140V/1380V）。第一级 MSPD/HEA 宜安装在尽可能靠近风力发电机输出端的位置，通常在机舱控制柜的第一级断路器处（QF）或换流器的输入端，第二级 MSPD/HEA 宜安装在箱变的低压侧，其$I_{imp} \geq 12.5kA$或$I_n \geq 20kA$；当风机塔筒高度$\geq 100m$时，应在发电机输出端、箱变、塔基控制柜进行三级防护。

8.2 风机配电系统

应在风力发电机辅助变压器 380V 输出端或塔基控制柜安装 MSPD(T2)，其$I_n \geq 40kA$；为有效预防地电位反击，宜在塔基控制柜安装 N-PE MSPD，其$I_n \geq 40kA$。

MSPD 应安装在尽可能靠近辅助变压器 380V 输出端或塔基控制柜的 380V 开关处；N-PE MSPD 宜安装在塔基控制柜 N-PE 之间。

8.3 集电线路、升压站

主变高低压侧线路避雷器，其$I_n \geq 10kA$，其技术参数应符合 GB/T 28547—2023 规定。

8.4 光缆端口

当光纤曾因雷击导致熔断时，应在光缆端口把光纤与光缆金属铠装层、碳素钢丝绝缘；有条件时可加装光缆端口专用陡度抑制器，其$I_n \geq 20kA$。

9 区域防雷效果监测

9.1 区域防雷效果宜采用自然雷电多脉冲智慧监测预警系统进行自动监测，其拓扑结构见图 13。

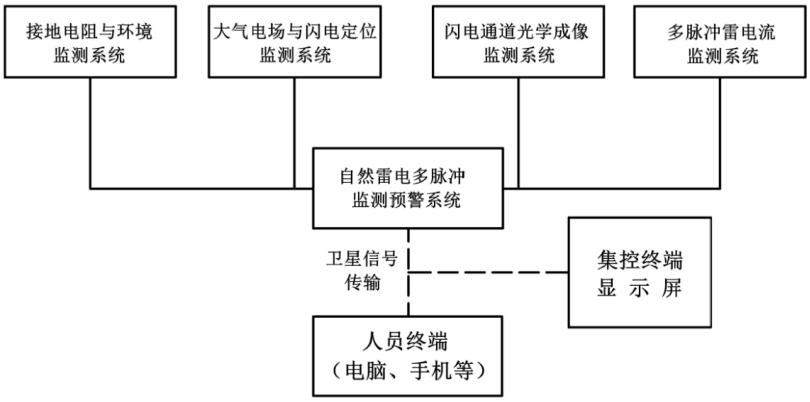


图13 自然雷电多脉冲智慧监测预警系统拓扑结构示例

9.2 在不具备供电和通信条件的地方，可安装用于统计全方位雷电拦截器接闪次数的雷击计数器，其应是无源或自备电源，并具有防水、防潮的措施。

9.3 在具备供电和通信（包括卫星短报文）的条件下，应安装具有监测发生时间、雷击次数、雷电流幅度，陡度、极性、脉冲个数六个参数和温度、湿度；具有统计功能和远程监测终端，可在电脑或手机查看数据并具有预警功能的自然雷电多脉冲智慧监测预警系统。

9.4 对具有重要科研价值的风力发电场，可采用雷击计数器、自然雷电多脉冲智慧监测预警系统结合闪电定位系统对拦截效果进行统计分析。闪电定位系统应能提供该区域的年雷暴日、雷击次数、最大雷电流、最小雷电流、平均雷电流、雷电极性和脉冲个数等典型的雷电参数。

9.5 风力发电场区域防雷的效果具有对应性，应以全方位雷电拦截器是否拦截雷电和 MSPD/HEA 是否保护对应设备为主要评价内容；由于集电线路继电保护整定值尚未考虑雷电流分量，当集电线路断路器跳闸次数超过雷击跳闸率时，应以线路录波器故障分析报告的监测结果区分雷击点的区间位置，以便进一步整改。

10 区域防雷设备的施工及运维

10.1 全方位雷电拦截器的安装要求

10.1.1 安装相对高度

安装在风机机舱顶部气象桅杆或独立金属支撑杆上的全方位雷电拦截器，其色散波导谐振腔体的底部宜比气象桅杆上的风向风速仪高 20cm；安装在集电线路杆塔、升压站、陆上集控中心等建（构）筑物顶部的全方位雷电拦截器，宜比杆塔避雷线、建（构）筑物避雷带高 50cm。

10.1.2 工频接地电阻

安装在风机机舱顶部、集电线路杆塔的全方位雷电拦截器，应直接与其接地的金属构件可靠连接，连接点过渡直流电阻$R \leq 0.2\Omega$，不再另设引下线；安装在升压站、陆上集控中心等建（构）筑物的全方位雷电拦截器，当建（构）筑物接地系统符合现行规范要求时，直接利用其接地系统接地，其工频接地电阻值$R \leq 30\Omega$。

10.1.3 空间方位角

拦截某一雷击路径所设置的一个或多个雷电拦截点，在上风向第一个雷电拦截点安装的全方位雷电拦截器，宜有一支水平短针与雷云运动路径方向相反；当雷电拦截点为行、列式形态时（如海上风力发电场），相邻拦截器的水平短针之间宜保持 45° 夹角。

10.1.4 抗风能力

抗风能力应≥70m/s，安装全方位雷电拦截器的铁塔，应符合 GB 50017-2017、GB 50135-2019 的规定。

10.2 道路运输

区域防雷工程设备主要包括全方位雷电拦截器、多脉冲电涌保护器、高能吸收器及自然雷电多脉冲智慧监测预警系统等设备，在陆地或海上运输时，应采取防坠落、防水的有效措施，确保设备安全。

10.3 运行维护

运维检测项目与技术指标宜符合附录 D 的规定。

10.3.1 运维内容

——全方位雷电拦截器的安装牢靠程度，其与安装点金属构件的扭力应≥50N；
——全方位雷电拦截器表面腐蚀状态；
——MSPD/HEA 工作状态；
——自然雷电多脉冲智慧监测预警系统、雷击计数器工作状态；
——接地系统参数。

10.3.2 运维周期

区域防雷装置的运维周期一年一次，宜在风力发电场所在地非雷暴高发期进行。

10.4 施工安全要求

10.4.1 现场勘察和设备安装人员进入风力发电场，应遵守风力发电场的安全生产规定。

10.4.2 取得高处作业证的工程技术人员可进行风机机舱顶部、集电线路杆塔等高处作业，作业时必须配备安全带、安全帽、防滑鞋。

10.4.3 所有安装设备和工具应有预防高处坠落措施。

10.4.4 高处作业现场不应少于两人，其中一人在地面负责施工安全监督。有条件时，宜用无人机对安装过程监测和录像。

附　录　A
（规范性）
全方位雷电拦截器的工作原理及技术参数

A.1　全方位雷电拦截器的工作原理

全方位雷电拦截器的工作原理，主要是根据雷电流的双指数波特点，利用傅里叶变换和巴塞瓦尔等式，得到雷电流的振幅频谱和能量频谱；按照雷电流的振幅和能量频谱分布规律，采用了具有振幅频谱选择/阻抗变换，波阻抗电压倍增技术、分布参数控制技术的色散波导谐振腔体结构，使其不仅能产生比避雷针更长的上行先导，还具有显著衰减雷击点电流的能力。

全方位雷电拦截器克服了避雷针存在的四个缺陷，具有自动识别雷电的空间位置、全方位拦截雷电并衰减雷击点电流、适应雷电多脉冲放电的能力，是一种新型避雷针。

A.2　设计依据

GB/T 169271-2011　高电压试验技术第 1 部分：一般定义及试验要求
GB/T 33588.1-2017　雷电防护系统部件（LPSC）第 1 部分：连接件的要求
NF C17-102：2011　Protection against lightning：Early streamer emission lightning protection systems

A.3　雷电拦截设备主要技术指标

A.3.1　雷电拦截器（Ⅰ型）的技术参数

——结构：色散波导谐振腔体单针终端
——功能：拦截过顶雷击
——技术参数：
　——$\Delta t \geq 45\mu s$（1200kV 条件下与标准避雷针比对试验/试验报告参数）；
　——$P = 100\%$（过顶雷接闪概率/试验报告参数）；
　——$I_a \geq 75\%$（衰减雷击点电流/理论计算值）；
　——$r < 6.5m$（以 30kA 全球平均计算，雷击磁场强度 2.4Gs 半径/理论计算值）；
　——$A = \pi r^2/2$（下风向保护范围）；
　——使用寿命 5 年；
——特点：使用限高 20m。仅预防过顶雷击（城镇建构筑物 h≤20m），不能应用在发生侧面雷击的场合（h≥20m，高山等）。

A.3.2　全方位雷电拦截器（Ⅱ型）的技术参数

——结构：色散波导谐振腔体五针终端
——功能：自动识别雷电空间位置，全方位拦截雷电并衰减雷击点电流，适应雷电多脉冲放电。
——技术参数：
　——$\Delta t \geq 45\mu s$（1200kV 条件下与避雷针比对试验/试验报告参数）；
　——$P = 100\%$（过顶雷接闪概率/试验报告参数）；
　——$P = 100\%$（侧击雷接闪试验，水平针接闪概率为 90%，垂直针接闪概率为 10%/试验报告参数）；

——$I_a \geq 60\%$（户外运行检验，多个脉冲平均衰减雷击点电流值≥ 60%，见附录 C）；

——$r < 6.5m$（以 30kA 全球平均计算，雷击磁场强度 2.4Gs 半径/理论计算值）；

——$A = \pi r^2/2$（下风向保护范围）；

——使用寿命 5 年；

——特点：使用无需限高，可预防过顶雷击和侧面雷击（包括侧下雷击）。

A.3.3 雷电抑制器（Ⅲ型）的技术参数

——结构：色散波导谐振腔体球状终端

——功能：抑制过顶雷击和侧面雷击

——技术参数：

——$P \leq 20\%$（直击雷接闪概率/试验报告参数）；

——$I_a \geq 75\%$（衰减雷击点电流/理论计算值）；

——A（保护范围正在试验之中）；

——使用寿命 5 年；

——特点：可预防过顶雷击和侧面雷击，使用在不希望发生直接雷击的单体建（构）筑物。

注：在污染、腐蚀环境下，由于全方位雷电拦截器腔体内存在电场而吸附污染物，导致其表面呈灰黑色，不影响其工作性能。

附　录　B
（规范性）
多脉冲电涌保护器（MSPD）和高能吸收器（HEA）的技术参数

B.1　多脉冲电涌保护器（MSPD）和高能吸收器（HEA）的背景

专门为风力发电系统研发的系列产品，其对雷电电磁脉冲具有强大的吸收能力。

迄今为止，低压配电系统均使用按照 IEC 61643-2011 或国家标准 GB 18802.1-2011 生产的电涌保护器，其采用单个脉冲电流波冲击检验，又称为单脉冲电涌保护器 SPD；由于其试验方法与自然雷电的多脉冲放电不符，投入使用后如果遭到雷击，往往脱扣、起火。

2014 年，中国发明了多脉冲电涌保护器 MSPD。（多脉冲英文专有名词为：Multi-pulse，多脉冲电涌保护器的英文缩写为 MSPD）。

2017 年，经国际电工委员会批准，MSPD 成为 IEC 61643-2011/2PFG 附加测试标准。

2022 年，中国建筑学会、中国气象服务协会联合颁布了 T/ASC 6001-2022。

2022 年，专门用于风力发电系统不同额定电压等级（690V/1140V/1380V）的 HEA（High-energy absorber）投入使用。

B.2　设计依据

IEC 61643—2011　低压电涌保护设备　第 11 部分:连接到低压电力系统的电涌保护装置-要求和测试方法

IEC 61643—2011/2PFG　连接到低压电力系统的多脉冲电涌保护器附加试验-性能要求和试验方法

B.3　多脉冲电涌保护器（MSPD）和高能吸收器（HEA）的技术参数

B.3.1　风电/箱变专用多脉冲电涌保护器（MSPD，T1）

表B.1　风电/箱变专用多脉冲电涌保护器（MSPD，T1）技术参数

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	工作电压 U_0	$400V$	8	防护等级	$IP20$
2	最大持续工作电压 U_C	$510V$	9	MSPD 类型	限压型
3	多脉冲组合波 MCW	$MS-8/20\mu s-10P/40kA$	10	使用模式	TN/TT
4	冲击电流 I_{imp}	$\geq 12.5kA$	11	保护模式	$L/N-PE$
5	电压保护水平 U_p	$\leq 1.2kV$	12	故障显示	LED
6	后备保护装置 T_d	$1.0s \leq t \leq 2.0s$	13	远程监测	有
7	电源频率 f	$47-63Hz$	14	组合方式	$1P/2P/3P/4P$

B.3.2　多脉冲电涌保护器（MSPD，T2）

表B.2　多脉冲电涌保护器（MSPD，T2）技术参数

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	工作电压 U_0	$220V$	8	防护等级	$IP20$
2	最大持续工作电压 U_C	$385V$	9	MSPD 类型	限压型
3	多脉冲组合波 MCW	$MS-8/20\mu s-10P/40kA$	10	使用模式	TN/TT
4	冲击电流 I_n	$\geq 40kA$	11	保护模式	$L/N-PE$
5	电压保护水平 U_p	$\leq 1.5kV$	12	故障显示	LED
6	后备保护装置 T_d	$1.0s \leq t \leq 2.0s$	13	远程监测	有
7	电源频率 f	$47-63Hz$	14	组合方式	$1P/2P/3P/4P$

B.3.3　1140V/1380V发电系统高能吸收器（HEA）

表B.3　1140V 高能吸收器（HEA）技术参数

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	工作电压 U_0	$1140V$	8	防护等级	$IP20$
2	最大持续工作电压 U_C	$1500V$	9	MSPD 类型	限压型
3	多脉冲组合波 MCW	$MS-8/20\mu s-10P/20kA$	10	使用模式	TN/TT
4	冲击电流 I_n	$\geq 20kA$	11	保护模式	$L-PE$
5	电压保护水平 U_p	$\leq 3.5kV$	12	故障显示	LED
6	后备保护装置 T_d	$1.0s \leq t \leq 2.0s$	13	远程监测	有
7	电源频率 f	$47-63Hz$	14	组合方式	$3P$

表B.4　1380V 高能吸收器（HEA）技术参数

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	工作电压 U_0	$1380V$	8	防护等级	$IP20$
2	最大持续工作电压 U_C	$1800V$	9	MSPD 类型	限压型
3	多脉冲组合波 MCW	$MS-8/20\mu s-10P/40kA$	10	使用模式	TN/TT
4	冲击电流 I_n	$\geq 40kA$	11	保护模式	$L-PE$
5	电压保护水平 U_p	$\leq 6.0kV$	12	故障显示	LED
6	后备保护装置 T_d	$1.0s \leq t \leq 2.0s$	13	远程监测	有
7	电源频率 f	$0-20kHz$	14	组合方式	$3P$

附　录　C
（资料性）
全方位雷电拦截器对雷击点电流的衰减效率

C.1　雷电拦截效果监测

2022 年 8 月 9 日 16 时，热水风力发电场 11 号风机机舱顶部安装的全方位雷电拦截器拦截了一次雷击，安装在其引下线处的雷电监测系统显示共有 3 个脉冲，幅值分别为 30kA、33kA、11.5kA。经中国科学院电工研究所采用三维闪电定位系统检索，这一雷击发生的准确时间为 2022 年 8 月 9 日 16 时 28 分 24 秒 381 毫秒至 16 时 28 分 24 秒 492 毫秒；云地闪共有 3 次回击，雷电流强度分别为 75.325kA、80.159kA、30.774kA。

C.1.1　同一次雷击认定三要素

风机雷电监测系统与三维闪电定位系统的雷击时间，雷击脉冲个数与地点一致，即可认定为同一次雷击。

C.1.2　全方位雷电拦截器对雷电流的平均衰减效率

$$\eta = \left(1 - \frac{I_2}{I_1}\right) \times 100\% \qquad \text{(C.1)}$$

式中：

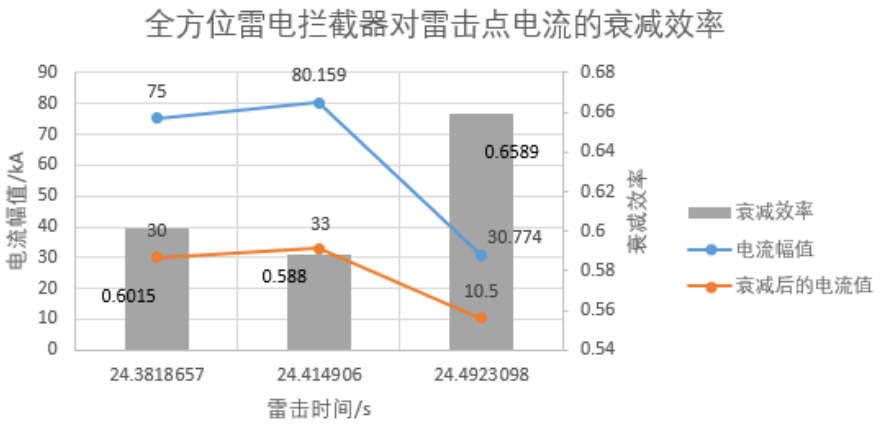
η——衰减效率；

I_1——闪电定位系统监测的雷电流幅值（A）；

I_2——风机监测系统监测的雷电流幅值（A）。

此次雷击共有三个脉冲，第一个脉冲$\eta =$ （$1 - 30kA/75.325kA$）$\times 100\% = 60.15\%$；第二个脉冲$\eta =$ （$1 - 33kA/80.159kA$）$\times 100\% = 58.8\%$；第三个脉冲$\eta =$ （$1 - 10.5kA/30.774kA$）$\times 100\% = 65.89\%$。

计算结果表明，全方位雷电拦截器衰减效率几何平均$\eta = 61.5\%$。其衰减结果如图 C.1 所示：

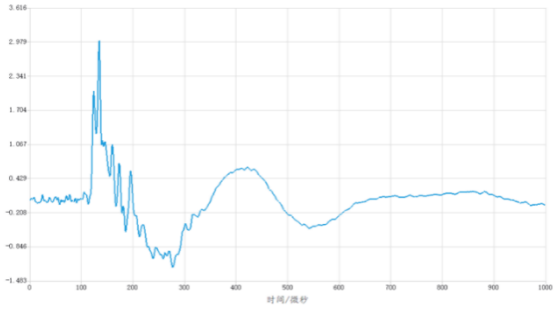


图C.1　全方位雷电拦截器的衰减效率

C.1.3 雷电流的波形

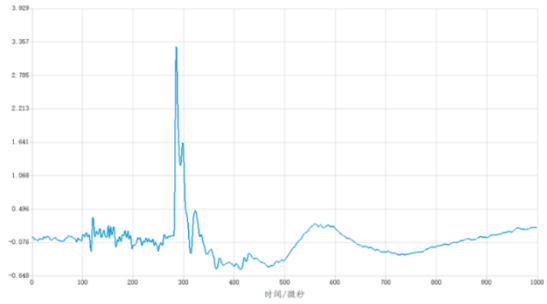
中国科学院电工研究所 VLF/LF 三维闪电定位监测网与定位地点相距最近的观测站是广西陆川站，距离约为 121km，其次为海南琼海站，距离约 285km，广西蒙山站，距离约 294 公里，记录的闪电电磁脉冲波形如下：

——第 1 次回击：发生时间 2022-8-19 16:28:24.3818657



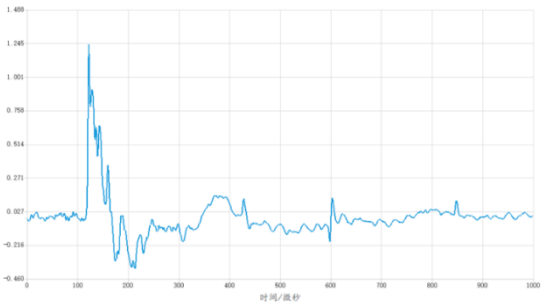
图C.2 第一个回击电流脉冲波形（陆川站）

——第 2 次回击：发生时间 2022-8-19 16:28:24.4149060



图C.3 第二个回击电流脉冲波形（陆川站）

——第 3 次回击：发生时间 2022-8-19 16:28:24.4923098



图C.4 第三个回击电流脉冲波形（陆川站）

C.1.4 雷电流波形参数

——放电持续时间：111ms；
——脉冲平均时间间隔：55.5ms；
——雷电流平均幅值：62.1kA；
——电流极性：正极性。

附　录　D
（规范性）
风力发电场区域防雷装置检测项目及技术指标

D.1　风力发电场区域防雷装置检测项目及技术指标

表D.1　风力发电场区域防雷装置检测项目及技术指标

序号	名称、型号	类别	位置	项目	判定方法	合格标准	备注
1	全方位雷电拦截器	预防直接雷击	机舱顶部、集电线路杆塔、升压站、集控中心	腐蚀	目测	本体无腐蚀	表面污染物可擦除
				紧固	扭力计	$\geq 50N$	
				连接点过渡电阻	毫欧表	$<0.2\Omega$	
2	多脉冲电涌保护器、高能吸收器	预防雷电电磁脉冲	机舱控制柜、塔基控制柜、箱变	接线点温度	红外测温仪	与所在位置气温比较，不超过 3° C	
				本体温度	红外测温仪		
				接地点温度	红外测温仪		
3	光纤环网通信系统	预防雷电电磁脉冲	塔基控制柜、塔基底层（负一层）	光缆端口金属与光纤绝缘	高压绝缘电阻测试仪	光缆端口金属与光纤绝缘电阻$> 1G\Omega$	
				端口金属接地连接点过渡电阻	数字毫欧表	$<0.2\Omega$	
				备用光缆金属接地点过渡电阻	数字毫欧表	$<0.2\Omega$	备用光缆接地保护
4	自然雷电多脉冲智慧监测预警系统	效果监测	机舱、塔基控制柜、塔基底层、升压站、集中控制中心等	后台终端预警系统	计算机	运行程序及预警正常	列出不正常的项

5	陆地风力发电场接地系统	预防雷电电磁脉冲	塔基接地装置、箱变接地装置、升压站接地装置、光缆井（假如有）接地装置、杆塔接地装置	土壤电阻率	土壤电阻率测试仪	实测值	1.安装三点法接地电阻自动测试系统的此项免测； 2.塔基、箱变、杆塔接地电阻大小要求与土壤电阻率有关，见4.6。
				工频接地电阻	接地电阻测试仪	≤ 10Ω（塔基、箱变、杆塔） ≤ 4Ω（升压站）	
				连接处搭接电阻	数字毫欧表	<0.2Ω	
				接地线（扁钢）腐蚀程度	目测	<20%	
6	海上风力发电场接地系统	预防雷电电磁脉冲	塔基控制柜接地汇流排	接地电阻	回路法电阻测试仪	≤ 10Ω	1.安装回路法接地电阻自动测试系统的此项免测； 2.塔筒腐蚀程度仅作了解，分析用。
				塔筒腐蚀程度	目测	腐蚀程度	

参 考 文 献

[1] GB 50017—2017 钢结构设计规范
[2] GB 50135—2019 高耸结构设计标准
[3] YD/T 901—2018 通信用层绞式室外光缆
[4] 郄秀书，张其林，袁铁，等.雷电物理学[M].北京:科学出版社，2016
[5] 杨晖等.避雷针工作原理研究[J].电力系统装备，2023(6):66-68
[6] 拉科夫(V.A.Rakov).高燚，杨少杰译.雷电参数的工程应用[M].北京:气象出版社，2019
[7] 杨晖，等.区域防雷的理论和应用技术研究[J].广东气象， 2018 41(4):69-73
[8] 戈尔德（R.H.Golde）雷电[M]（下）周诗健等译，北京:水电出版社，1981
[9] 张义军等.雷暴电学[M].北京：气象出版社，2009
[10] 何量，等.高空核爆与雷电电磁脉冲特征及能量吸收技术[J].广东气象，2022，44(1):66-68
[11] yang yan，etal.Analysis on Lightning strike Cause of Directly Buried Optical Cable in windFarm and Its Prevention Methods[J].Meteorological and Environmental Research，2022，13(3): 67-70
[12] yang hui，etal.Distribution Characteristics and Shielding Effects of Ion Clouds [J].Meteorological and Environmental Research，2023，14(2):42－44，49.
[13] yang hui，etal.Analysis on attenuation Efficiency of Lightning Current by lightning Interceptor[J].Meteorological and Environmental Research，2023，14(1):56－59