

陈景荣,李文飞,戴春容,等. X波段双极化相控阵天气雷达防雷工程实践[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(4): 137–142.

CHEN Jingrong, LI Wenfei, DAI Chunrong, et al. Lightning protection engineering practice of X-band dual-polarization phased array weather radar[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(4): 137–142.

X波段双极化相控阵天气雷达防雷工程实践

陈景荣^{1,2}, 李文飞^{1,2}, 戴春容³, 钟雨珊^{4*}, 曹虎文⁵

(1.广东天文防雷工程有限公司, 广州 510080; 2.广东省气候中心, 广州 510641; 3.佛山市气象局, 广东 佛山 528000;

4.江门市气象局, 广东 江门 529000; 5.广东纳睿雷达科技股份有限公司, 广东 珠海 519080)

摘要: 基于某X波段双极化相控阵天气雷达项目的防雷工程实践, 总结介绍天气雷达防雷的设计思路和施工做法, 以期为此类项目安全运行提供科学有效的防雷措施参考。

关键词: 雷达; 防雷; 滚球法; 铁塔

中图分类号: P415.2

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.22

X波段双极化相控阵天气雷达(以下简称相控阵雷达)是一种新颖高效的气象探测设备,能有效捕捉龙卷、冰雹、局地强降水等中小尺度强对流天气的发生发展。与S、C波段雷达相比,相控阵雷达观测数据具有更高的时空分辨率,可以提供更细微水凝物信息,在灾害天气预警中发挥更重要的补充作用^[1-3]。截止2021年5月,粤港澳大湾区已建成由25部(相控阵)雷达组成的灾害性天气精细化监测网,在防御雷暴、雷雨大风、冰雹等发挥了积极作用^[4]。未来广东将持续提升气象现代化基础业务能力,推进监测精密,加大相控阵雷达建设^[5]。

雷达选址的净空条件要求,使雷达成为区域相对制高点^[6],大大增加其雷击概率,防雷安全极为重要。由于该类型雷达近几年才投入使用^[4],与S波段和C波段的天气雷达相比,其防雷方面的相关研究较少,需要不断总结实践经验并进一步开展雷达防雷研究^[7]。李和捷等^[8]提出了竖向单针加横向多针的直击雷保护方法,并从阵列天线的接闪保护、接地网形状及布置、电源系统的防雷保护3个方面给出技术要点;陈景荣等^[7]基于安装铁塔高度小于15 m和大于15 m时,以直击雷防护和感应雷防护尽量独立设置为原则提出一种防雷设计方案。本文基于某X

波段双极化相控阵天气雷达项目的防雷工程,详细介绍其防雷设计并对施工过程的经验进行总结。

1 雷达构成及其安装特点

相控阵雷达是由阵列天线、转台、机柜、底座4部分组成的一个高度集成的遥感探测器(图1),雷达对外只有一个电源接口和通信网接口。

雷达安装方式为固定阵地安装,一般安装在专用铁塔顶部平台或建筑物天面。



图1 X波段双极化相控阵天气雷达构成

收稿日期: 2022-11-20

基金项目: 广东省气象公共安全技术支持中心科学技术研究项目(GDTSC-Sel-008-2021)

第一作者简介: 陈景荣(1970—),男,高级工程师,主要从事防雷工程服务。E-mail: 13602732442@139.com

* 通讯作者: 钟雨珊(1979—),女,高级工程师,主要从事防雷工程服务。E-mail: 791756285@qq.com

2 直击雷防护

2.1 接闪杆及其引下线设计

根据雷达的重要性和广东地区属于多雷区或强雷区,雷达防雷类别为第二类。直击雷保护设计时,将雷达和铁塔视为一个整体进行保护。

考虑雷达铁塔所安装位置地形和植被的因素,利用滚球法计算保护范围时其基准面已经不是水平面,此时采用设计竖向接闪杆和横向接闪杆托起滚球,使滚球不会触及雷达和铁塔而使其得到保护^[9-13]。为尽可能减少接闪杆对雷达工作时的遮挡,直击雷防护采取在铁塔顶部平台雷达工作的次方位设置 1 根竖向接闪杆,当仅竖向接闪杆无法达到有效保护时,在其他方位均布 3 根横向接闪杆,竖向接闪杆的高度和横向接闪杆的长度可通过 CAD 根据滚球法原理作图求得(图 2),具体如下:

作图法求竖向接闪杆和横向接闪杆的方法见图 2(a)~(d),如图 2(a),画出铁塔顶部平台和雷达工作空间的平面图和立面图,以平台为基准,设竖向接闪杆净高 6 m,以竖向接闪杆针尖 A 点为圆心,45 m

为半径画圆,以雷达工作空间高点 B 为圆心,45 m 为半径画圆,以两圆上部的交点为圆心,45 m 半径画圆,则该圆与平台 D 点的右延长线相交 C 点,则 CD 的长度(1.839 m)为初步确定的横向接闪杆的长度。按照 1 根 6 m 竖向接闪杆和 3 根 1.839 m 横向接闪杆的设计,选取如图 2(b)图的 2-2 剖切面验证所设计是否能够进行有效保护,2-2 剖切线与横向接闪杆 a、b 点的连线相交 c 点,以 c 点为该剖切面的等效横向接闪杆的顶点,通过该剖切面的立面图作保护图,分别以 f、d 为圆心,以 45 m 为半径画圆,以两圆上部的交点为圆心,45 m 半径画圆可得弧 fg,通过在 CAD 上放大,可以看到雷达的工作空间 g 点不在保护范围内,因此需要调整横向接闪杆的长度(当然也可以选择调整竖向接闪杆的高度)。将横向接闪杆的长度调整为 2 m,按照以上的作图方法,可以验证符合要求,见图 2(c)~(d)。以上作图方法所选取 2 个立面进行滚球保护范围验证(实际有无数个立面),具有很好的代表性,所确定的竖向接闪杆和横向接闪杆的长度能够满足雷达直击雷保护的需求。

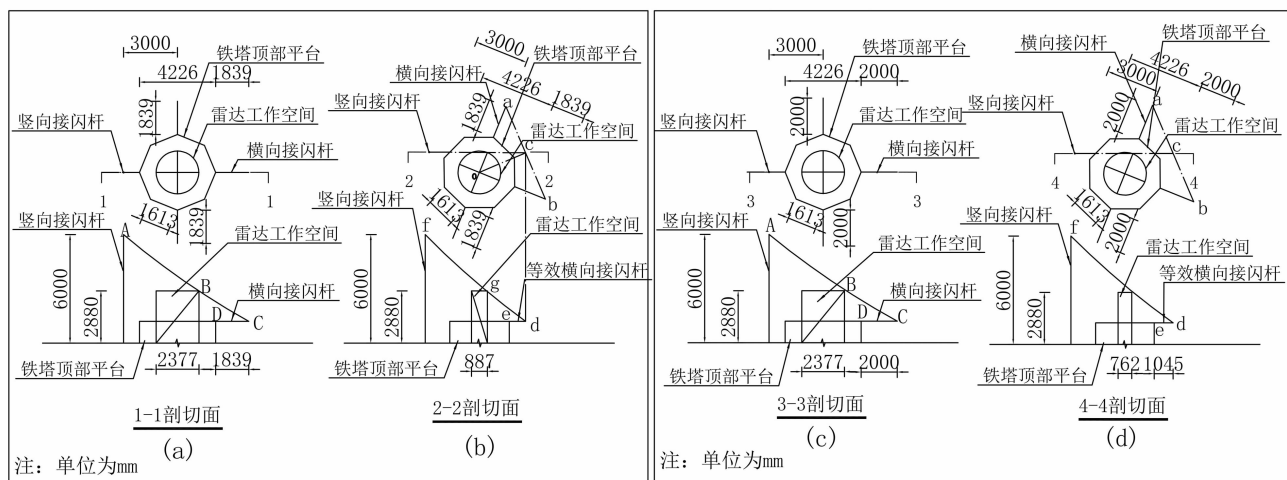


图 2 雷达直击雷保护接闪杆作图法设计图

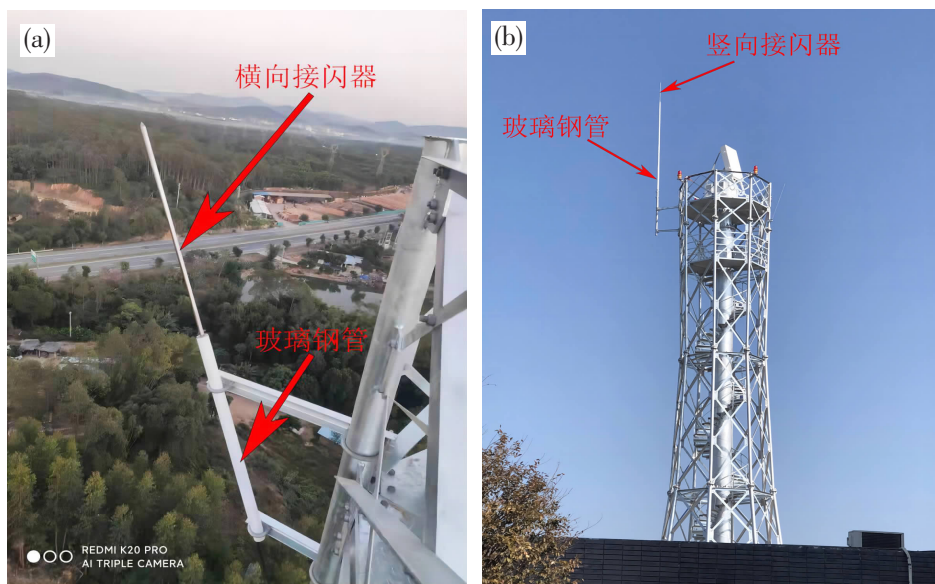
接闪杆的安装实物见图 3,其中横向接闪杆的安装方法见图 3(a),此时接闪器针尖与平台护栏顶部在一水平线,距离为 2 m,即为设计图求得的横向接闪杆的长度。接闪杆顶部的接闪器通过玻璃钢与塔身绝缘固定,接闪器通过专设的高压屏蔽电缆沿铁塔外侧钢管敷设至塔底,与共用接地网直击雷接入点连接,该接入点与雷达接地干线的地网接入点沿接地极长度不应小于 15 m^[14]。

2.2 地网设计

本项目采用共用地网,接地电阻要求 $\leq 4\Omega$,由铁塔基础钢筋附加人工接地体组成(图 4)。

2.2.1 基础接地电阻计算

环形基础为正八边形形状,埋深 4.0 m,周长 26.51 m,每边设计 1 外塔柱基础(图 4)。环形基础垫层宽 2.5 m,厚 0.1 m,基础宽 2.3 m,厚 0.6 m,外塔柱基础长 0.8 m,宽 0.8 m,至地面高为 3.4 m,中心塔柱基础



(a) 横向接闪杆实物图

(b) 竖向接闪杆实物图

图 3 接闪杆实物图

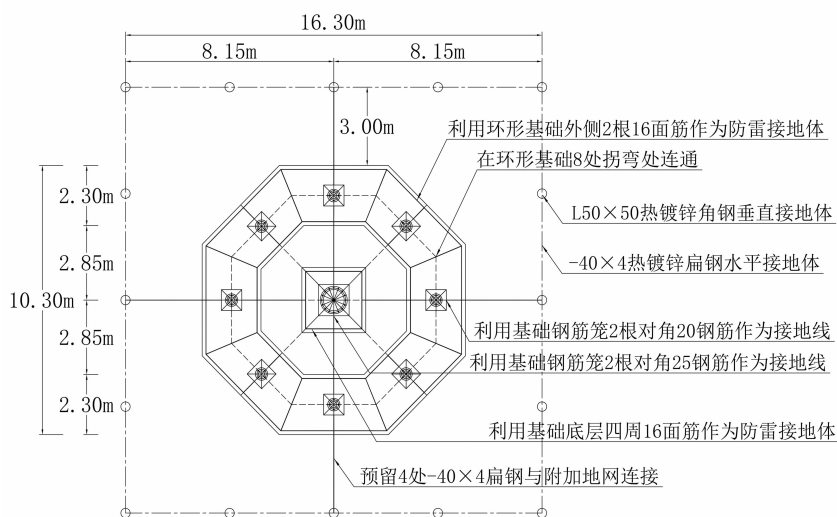


图 4 雷达共用地网设计图

埋深 4.0 m, 垫层长 2.7 m, 宽 2.7 m, 厚 0.1 m, 底层长为 2.5 m, 宽为 2.5 m, 厚 0.6 m, 面层长为 1.2 m, 宽为 1.2 m, 至地面高为 3.4 m。

铁塔中心基础接地电阻计算。土壤电阻率 ρ 取实测平均值 $300 \Omega \cdot \text{m}$; 混凝土电阻率 ρ_1 取埋潮湿土壤中的平均值 $150 \Omega \cdot \text{m}$; 基础上部混凝土体等效直径 d_1 为 1.36 m; 基础上部混凝土内钢筋体等效直径 d 为 1.24 m; 钢筋混凝土体埋设在地面下的长度为 3.4 m; 接地体和混凝土体计算系数 K_1 和 K_2 均为 0.98。代入公式(4-4)^[15]得到中心基础面层接地电阻 $R_1=33.68 \Omega$ 。平板形钢筋混凝土中的钢筋网等效直

径 d_p 为 2.83 m; 混凝土层影响系数 Kh 取 1; 代入公式(4-9)^[15]得到基础下部平板形钢筋混凝土体的接地电阻 $R_2=53.10 \Omega$ 。将 R_1 和 R_2 代入公式(4-8)^[15], 得到中心塔柱基础的接地电阻 $R=22.90 \Omega$ 。

铁塔八边形环形基础接地电阻计算。土壤电阻率 ρ 、混凝土电阻率 ρ_1 取值同上; 基础上部混凝土体等效直径 d_1 为 0.90 m; 基础上部混凝土内钢筋体等效直径 d 为 0.79 m; 钢筋混凝土体埋设在地面下的长度 l 为 3.4 m; 接地体和混凝土体计算系数 K_1 和 K_2 均为 0.98。代入公式(4-4)^[15]得到单一上部基础接地电阻 $R_1=39.82 \Omega$, 环形基础上部共有 8 个相同

规格的基础,利用系数取 0.70^[16-18],合并后的接地电阻为 7.11 Ω 。环形基础的埋深 h 为 4.0 m、周长 l 为 26.51 m;形状系数 A 取 1.69;土壤电阻率 ρ 、混凝土电阻率 ρ_1 取值同上;环形基础的等效直径 d_1 为 1.33 m;环形基础内钢筋体等效直径 d 为 1.19 m。代入公式(4-7)^[15]得 $R=11.95 \Omega$ 。将环形基础上部基础的电阻值 7.11 Ω 和底部基础的电阻值 11.95 Ω 合并,取利用系数为 0.70^[16-18],则其总接地电阻为 6.37 Ω 。

铁塔基础总的接地电阻为环形基础电阻值 6.37 Ω 和中心基础电阻值 22.90 Ω 的合并值,取利用系数为 0.75^[16-18],则其总接地电阻为 6.64 Ω 。

地网设计电阻值为 $\leq 4 \Omega$,铁塔基础接地电阻为 6.64 Ω ,需要增加附加地网。在铁塔基础 3 m 外增加环形人工地网(图 4),取利用系数为 0.9^[16-18],根据电阻并联公式及考虑相互之间影响的利用系数,可得需要增加人工地网的电阻值为 $\leq 7.86 \Omega$ 。

2.2.2 人工附加地网接地电阻计算

①单一垂直接地体的电阻($l \gg d$)

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (1)$$

式中: ρ —土壤电阻率(单位: $\Omega \cdot m$); l —接地体的长度(单位:m); d —接地体的直径或等效直径(单位:m)。

②几个并联的相同垂直接地体的接地电阻

$$R_{nc} = \frac{R_c}{n\eta} \quad (2)$$

式中: η_c —垂直接地体的利用系数; n —垂直接地体的数量。

③水平接地体的接地电阻

$$R_p = \frac{\rho}{2\pi l} (\ln \frac{l^2}{hd} + A) \quad (3)$$

式中: ρ —土壤电阻率(单位: $\Omega \cdot m$); l —接地体的长度(单位:m); h —水平接地体埋深(单位:m); d —接地体的直径或等效直径(单位:m); A —水平接地体的形状系数。

④水平接地网与垂直接地网并联的电阻

$$R = \frac{R_{nc} \times R_p}{R_{nc} + R_p} \times \frac{1}{\eta} \quad (4)$$

式中: η —地网并联的利用系数。

利用公式(1)~(4),土壤电阻率 ρ 取值同上,垂直接地体单根长度 2.5 m,接地体顶面埋深 0.60 m,利用系数均取 0.70^[16-18],计算图 4 地网的接地电阻为 6.89 Ω ,满足 $\leq 7.86 \Omega$ 的人工附加地网接地电阻的要求。

2.3 机房直击雷防护设计

机房位于铁塔底部距铁塔外延 2.5 m 处,尺寸为 3.36 m \times 2.36 m \times 2.40 m(长 \times 宽 \times 高)的单层砖混结构或设备方舱。机房处于铁塔的直击雷保护范围内,无需单独设置直击雷防护装置。

3 感应雷防护

3.1 电源供电线路防雷

雷达为单相交流供电,配备有交流 UPS,放置在雷达铁塔底部旁的供电机房内。供电取自附近通讯基站电房,采用铠装电力电缆套金属管埋地敷设,经 UPS 输出通过铠装电力电缆沿铁塔中心钢管柱敷设至铁塔顶部安装平台配电箱。

供电线路防雷。在通讯基站总配电柜内安装第一级电源浪涌保护器,要求 $U_p \leq 2.5 \text{ KV}$, $I_{imp} \geq 12.5 \text{ KA}$;在雷达供电机房安装第二级电源浪涌保护器,要求 $U_p/f \leq 1.5 \text{ KV}$, $I_n \geq 60 \text{ KA}$;铁塔平台雷达配电箱处安装第三级电源浪涌保护器,要求 $U_p/f \leq 1.2 \text{ KV}$, $I_n \geq 40 \text{ KA}$ 。

3.2 通信线路防雷

通讯采用非金属加强芯光缆,本项目由距离约 40m 处原有通讯铁塔机柜穿镀锌钢管埋地敷设引至铁塔底部供电机房,通过预埋钢管敷设至中心塔柱,沿中心钢管塔柱敷设至铁塔顶部平台。由于采用非金属加强芯光缆,只需将光电转换器、光缆终端盒等通信设备的金属外壳与所预留的接地端子排等电位连接。

3.3 供电机房感应雷防护

在外来各种管线入户处设置入户接地排,在配电箱处、UPS 处就近设置设备接地排,两接地排分别与共用接地网连接,其接入点沿接地体距离 $\geq 15 \text{ m}$ 。将供电机房的所有设备金属外壳与相应设备接地排连接。将入户的管线金属管和铠装层与入户接地排连接。

3.4 雷达等电位接地

将安装在铁塔顶部平台的雷达金属底座、金属外壳,塔顶平台雷达金属配电箱,电力电缆铠装钢带,配线钢管、金属软管,光缆终端盒金属件等与铁塔顶部平台所设置的设备接地排连接。

4 防雷施工

4.1 地网施工

由于地网的理论设计值和完工后的实际测试值

之间存在一定的误差,建议在地网施工时进行随工检测,如发现与设计值误差较大,则应及时与设计单位沟通,采取合适的降阻措施或申请调整设计。

4.2 接闪杆与引下线施工

高强度玻璃钢接闪杆安装所需的钢管底座,其与铁塔固定安装的紧箍件与铁塔一起设计和制作,施工时建议随铁塔安装施工一起进行。玻璃钢管顶端的接闪器通过专用高压电缆沿铁塔外钢柱内引下与地网连接,其固定所需的电缆夹应与铁塔同时设计和制作。

4.3 铁塔顶部平台雷达等电位施工

在铁塔顶部平台设置铜设备接地排,通过接地电缆沿中心钢管塔柱内敷设与地网连接。平台上的各接地均通过 16 mm^2 多股铜缆双色接地线与设备接地排连接。

4.4 预留预埋件施工

供电机房至铁塔中心钢管塔柱需要随土建预埋 2 根金属管,预留铁塔基础接地体与人工地网连接的 -40×4 热镀锌扁钢,在供电机房内分别设置入户接地排和设备接地排。

5 结论和讨论

本文通过具体的工程实例,针对该类型雷达的安装特点,给出一种雷达直击雷防护的接闪杆作图法设计方法;总结接闪杆安装固定、专用引下线安装固定等需要融入铁塔的设计和制作,同时防雷安装需要利用铁塔、雷达的安装施工面与其同步安装;引入机房需要设置入户接地排和设备接地排及其设置使用要求;通过详细的地网设计尽可能减少地网理论值和实际的误差、工程预结算的偏差。

由于雷击属于小概率事件,特别是直接雷击相对于感应雷击而言更低,因此当雷达系统在一定时期没有受雷雨天气影响时,应分析判断其是否遭受到直击雷或感应雷,才能判断所采取的防雷措施是否可行有效;从工程费用的角度看,地网所占的比例较大,提高地网设计的技术经济性,需要不断总结提高地网理论计算精度,特别是接地体(网)相互之间利用系数的选取;建议建立该类型天气雷达的雷击数据库,为其防雷效果的持续改进提供数据支撑。该项目验收投入使用 2 年多,未发生雷击情况,防护效果明显。

参考文献:

- [1] 吴瑞雅,吴蔚.广东协同港澳共建大湾区相控阵雷达示范网[N].中国气象报,2022-12-27.
- [2] 张羽,吴少峰,李浩文,等.广州 X 波段双偏振相控阵天气雷达数据质量初步分析及应用[J].热带气象学报,2022,38(1):23-34.
- [3] 夏凡,张乐坚,张林.基于双线偏振参量对北京 X 波段雷达非降水回波识别方法的研究[J].气象,2021,47(5):561-572.
- [4] 雷卫延,路永平,王明辉,等.X 波段双极化相控阵天气雷达金属球定标技术[J].广东气象,2021,43(6):68-71.
- [5] 庄旭东.坚定历史自信 增强斗争精神 启航广东气象事业高质量发展新征程—2022 年全省气象局长会议报告[J].广东气象,2022,44(1):1-4.
- [6] 倾鹏程,谢啸天,汤沛.中山市 X 波段相控阵雷达选址分析[J].气象水文海洋仪器,2022,39(1):67-69.
- [7] 陈景荣,李文飞,黄春生.X 波段双极化相控阵天气雷达的防雷设计[J].气象水文海洋仪器,2020,37(4):50-54.
- [8] 李和捷,彭彪,蔡君,等.X 波段双偏振相控阵天气雷达的防雷技术要点[J].广东气象,2021,43(2):78-80.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB 50057-2010 建筑物防雷设计规范[S].北京:中国计划出版社,2010.
- [10] 胡夏初,曾欣,邓丰年,等.如何正确运用滚球法确定接闪器的保护范围[J].气象研究与应用,2015,36(2):116-119,125.
- [11] 王惠臣.“滚球法”在煤矿瓦斯抽采泵站防雷设计中的应用[J].煤炭工程,2021,53(3):52-56.
- [12] 马金福,冯志伟,汝洪博,等.雷达天线罩直击雷防护计算方法探讨[J].建筑电气,2013,32(6):55-59.
- [13] 李剑.关于滚球法在新一代天气雷达直击雷防护中的应用问题[J].浙江气象,2007,28(1):35-41.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB 50169-2016 电气装置安装工程接地装置施工及验收规范[S].北京:中国计划出版社,2016.
- [15] 苏邦礼,崔秉球,吴望平,等.雷电与避雷工程[M].广州:中山大学出版社,1996.
- [16] 赵显泽.高土壤电阻率山地风电场降阻装置设计要点[J].电工技术,2022,43(11):70-73.
- [17] 蒋理成.接地体的选择和经济分析[J].铁路通信信号工程技术,2011,8(5):60-62.
- [18] 黄勇,陈先禄.长垂直接地极的利用系数和降阻效果研究[J].高电压技术,1995,21(4):17-19.

Lightning protection engineering practice of X-band dual-polarization phased array weather radar

CHEN Jingrong^{1,2}, LI Wenfei^{1,2}, DAI Chunrong³, ZHONG Yushan^{4*}, CAO Huwen⁵

(1.Guangdong Tianwen Lightning Protection Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2.Guangdong Climate Center, Guangzhou 510641, China;

3.Foshan Meteorological Bureau, Guangdong Foshan 528000, China;

4.Jiangmen Meteorological Bureau, Guangdong Jiangmen 529000, China;

5.Guangdong Narui Radar Technology Co., Ltd., Guangdong Zhuhai 519080, China)

Abstract: Based on the lightning protection engineering practice of an X-band dual-polarization phased array weather radar project, the design ideas and construction practices of weather radar lightning protection are summarized and introduced, with a view to providing scientific and effective lightning protection measures for the safe operation of such projects.

Key words: radar; lightning protection; rolling ball method; iron tower