

钟雨珊,陈景荣,吴剑斌,等. 海岛高山天气雷达地网的设计[J]. 气象研究与应用,2023,44(2):120-124.
Zhong Yushan,Chen Jingrong,Wu Jianbin,et al. Design of Island High Mountain Weather Radar Ground Network [J]. Journal of Meteorological Research and Application,2023,44(2):120-124.

海岛高山天气雷达地网的设计

钟雨珊¹, 陈景荣^{2*}, 吴剑斌³, 张桥容⁴

(1.江门市气象局, 广东 江门 529000; 2.广东省气候中心, 广州 510641;
3.江门市气象服务中心, 广东 江门 529000; 4.广东省五华县气象局, 广东 五华 514400)

摘要: 基于广东上川岛天气雷达建设项目的地网工程,总结海岛高山天气雷达地网一种设计方法。通过在计算雷达塔楼基础接地电阻的基础上确定需要增加附加地网的阻值,所需增加地网通过计算比对采用常规的角钢和扁钢接地体设计方案、深井钢管垂直接地体主导的设计方案和深井接地离子棒垂直接地体为主导的设计方案,得出采用以深井离子接地棒作为垂直接地体占主导的地网设计;按照所确定的方案实施后实测接地电阻满足设计要求。

关键词: 雷达;地网;防雷;接地设计;深井接地极

中图分类号: TN959.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.2.21

引言

雷达系统的接地是保障雷达整机可靠、稳定工作,消除电磁干扰的主要措施之一^[1-2]。一般要求接地电阻值 $\leq 4\Omega$ ^[3]。对于在高山等高土壤电阻率地区建设的雷达,其地网建设往往需要很大的经费投入和存在一次设计无法满足要求的情况。对于高土壤电阻率地区地网的建设,已经有不少的研究成果。赵显泽^[4]研究给出高土壤电阻率山地风电场的降阻措施为敷设外引接地体、深埋式接地体、置换电阻率较低的介质、采用防腐离子接地极和互联接地;白永胜^[5]在高山地区变电站接地网的设计中,采用防腐离子接地体和铜带接地网以及换土、回填降阻剂的方法解决地网设计问题;钟山等^[6]基于 CDEGS 建模研究换土、深井接地极、外引接地体、离子接地极的降阻率及其应用条件。这些研究成果给出各种接地降阻措施,但技术经济性存在商榷的地方。阴晓龙^[7]采用深井式接地体为主,结合降阻剂、离子接地极、外引接地极措施,解决鲁南高铁东段东邢家庄牵引变电所地网的降阻问题;邢玥等^[8]在集通铁路线的

好鲁库牵引变电所地网降阻采用深井接地,接地体深入地下水层的方法;郭振兴^[9]利用增设水下接地网、外引深井接地体的方法解决泸定水电站枢纽接地网降阻问题;陈海宏等^[10]在浙江平阳 35KV 山门变电站接地改造工程;朱敏捷等^[11]在浙江 220KV 楠江变电站的接地改造工程,张辰等^[12]在广西和宁波某 110KV 变电站接地网改造工程,均采用电解离子接地系统。出现这些地网改造工程,很大可能的原因是在地网第一次设计时没有很好进行接地网的理论计算,或者理论计算时所获取和选取的相关参数与实际相差太大。

本文基于广东上川岛天气雷达建设项目的地网工程,研究得出一种海岛高山天气雷达地网设计方法。该雷达项目是中国气象局、广东省政府合作确定的广东"平安海洋"气象保障工程重点项目。建设内容包括雷达系统主机设备及附属设备,风雨场校验系统,雷达塔楼、值班用房,雷达信息接收处理中心及台站配套基础设施,配套道路、供水、供电、通信、防雷及绿化等基础设施。

收稿日期: 2022-10-05
基金项目: 江门市气象局科学技术研究项目(202213)
作者简介: 钟雨珊(1979—),女,工程师,主要从事防雷工程服务。E-mail:791756285@qq.com
* 通讯作者: 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

1 资料来源

1.1 地勘情况

雷达地网工程是雷达建设项目的重要组成部分,由于雷达项目建设地为通过削平山顶所得,平台面积小、土壤电阻率高且四周陡峭,为使地网满足雷达设备的要求,基于建设用地实际情况对地网设计深入研究成为项目建设的需求,同时研究的成果可供类似环境条件下设备接地的设计作为参考。

根据建设单位提供的地质勘探报告显示,场地地貌单元属丘陵地带,场地位于海岛山顶,面积较小且四周陡峭,场地内只有燕山期(γ)基岩一大类,场地基底岩石为燕山期侵入岩,岩性为花岗岩,属硬质岩,呈中粗粒花岗结构,块状构造。

在场地内共完成 6 个勘探钻孔,孔深均为 20m,在揭露深度范围内,按其风化程度可划分为强风化、中风化 2 个岩带。

(1) 强风化岩带(层号 1-1)

ZK3 孔被中风化岩相间成 2 层,顶面高程 335.32~340.50m,直接分布于地表,层厚或揭露厚度 5.90~10.10m,平均 7.83m。呈褐黄色,岩芯呈土夹岩块状、碎块状,局部短柱状,遇水易软化,局部存在中风化岩块,ZK1 孔顶部 0.40m 为坡积土。

(2) 中风化岩带(层号 1-2)

中风化岩带均有揭露,顶面高程 327.22~333.50m,顶面埋深 5.90~10.10m,揭露厚度 5.00~14.10m,平均 10.87m。呈褐黄、褐灰色,岩体较破碎-较完整,岩芯呈不完整短柱状-柱状,局部块状,岩质较硬,节理裂隙发育,局部存在强风化岩软夹层及微风化岩硬夹层。

1.2 土壤电阻率

为准确获取地网设计需要的土壤电阻率,在山顶平台平整后(大约削去 5m),现场实测的土壤电阻率如表 1 所示。

2 地网设计

2.1 计算方法

根据由建设单位提供的雷达建设场地地质勘探报告、雷达塔楼基础结构设计图 and 建设用地红线图、现场实测的土壤电阻率数据等进行地网设计研究。

2.1.1 雷达塔楼基础接地电阻的计算

垂直圆柱形钢筋混凝土接地体的接地电阻(在均质土壤中的接地电阻)计算公式表示为

表 1 土壤电阻率实测值(测试时间 2021-11-12)

序号	间距/m	土壤电阻率/ $\Omega \cdot m$
1	1	733
2	2	990
3	3	1081
4	4	1050
5	5	936
6	6	854
7	7	806

$$R = \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{\rho_1}{K_1} \ln \frac{4l}{d} + \frac{\rho - \rho_1}{K_2} \ln \frac{4l}{d_1} \right) \quad (1)$$

式(1)中, ρ (单位: $\Omega \cdot m$)为土壤电阻率; ρ_1 (单位: $\Omega \cdot m$)为混凝土的电阻率; d (单位:m)为接地体(圆柱形混凝土体内钢筋体)的直径; d_1 (单位:m)为圆柱形混凝土体的直径; l (单位:m)为接地体(钢筋体或圆柱形钢筋混凝土体)埋设在地面下的长度; K_1 和 K_2 为接地体和混凝土体计算系数,参考苏邦礼等编著《雷电与避雷工程》表 4-7。

利用公式(1)计算单一独立钢筋混凝土基础接地体的接地电阻,土壤电阻率取实际测试值的平均值,季节系数取 1.1 得出为 $1013.57\Omega \cdot m$;混凝土的电阻率取苏邦礼等编著《雷电与避雷工程》表 4-1 埋在潮湿土壤中的平均值 $150\Omega \cdot m$;混凝土体的等效直径为 0.57m(基础深度内长宽均取 0.5m);混凝土体内钢筋体的等效直径为 0.47m(钢筋保护层均取 40mm);钢筋混凝土体埋设在地面下的长度为 2.0m;参考苏邦礼等编著《雷电与避雷工程》表 4-7, K_1 、 K_2 均为 1。

代入以上数据,计算(估算)得出 1 基独立钢筋混凝土基础接地体的接地电阻为 215.96Ω ,数量为 25 基(A 型和 B 型总和),考虑基础相互之间的距离和基础的埋深、基础的数量,利用系数取 0.5,得出独立基础并连后总的接地电阻约为 17.28Ω 。

2.1.2 圆形钢筋混凝土接地体的接地电阻计算

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{d_1}{d} + \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{l^2}{d_1 h} + A \right) \quad (2)$$

式(2)中: h (单位:m)为接地体(钢筋体或圆柱形钢筋混凝土体)的埋深; l (单位:m)为接地体的长度(接地体成闭合矩形时为周长); A 为闭合矩形接地体的形状系数,参考苏邦礼等编著《雷电与避雷工程》表 4-8。

根据实际情况,基础梁标高为 -0.15m(埋深 h 为

0.15m);基础梁(宽×高)为300×700mm,算得总长度1约为310m;形状系数A为1.69; ρ 为1013.57 $\Omega\cdot\text{m}$; ρ_1 为150 $\Omega\cdot\text{m}$;计算 d_1 为0.52m(等效直径); d 为0.39m(钢筋保护层为50mm)。代入公式(2)计算得基础梁接地电阻为8.21 Ω 。

2.1.3 雷达基础地网电阻计算

将独立基础总接地电阻的计算结果17.28 Ω 与基础梁接地电阻的计算结果8.21 Ω 并联,利用系数取0.5,得出雷达塔楼基础的接地电阻约为11.13 Ω 。

2.1.4 需要增加附加地网电阻计算

设计要求接地电阻为 $\leq 4\Omega$,根据地网并网的计算公式,以及两地网的相互位置及规模,地网利用系数取0.85,则需要增加的附加地网接地电阻为 $\leq 4.90\Omega$ 。

2.2 常规设计方案可行性判断

根据实际雷达站征地红线图,四周长度分别约为80m、53m、80m和40m。估算采用常规设计方案,采用-40×4热镀锌扁钢作为水平接地体和 $\angle 50\times 5$ 热镀锌角钢作为垂直接地体,水平接地体网格为5×5m,垂直接地极单根长2.5m。根据水平接地体主导的复合式接地网接地电阻估算公式为

$$R = \frac{1}{2} \frac{\rho}{2\sqrt{S}} \quad (3)$$

式(3)中, ρ 为土壤电阻率, S 为地网面积。雷达站的占地红线面积约为3720 m^2 ,土壤电阻率取实测平均值921.43 $\Omega\cdot\text{m}$,季节系数取1.1,如接地电阻 R 为4.90 Ω ,则需要的地网占地面积为10741.25 m^2 ,现有红线范围面积无法满足要求。

2.3 附加地网设计

由于雷达建设平台采取削平山顶所形成,周围很陡峭,且周围均为山体无低电阻率区域,不具备外引接地体措施条件,大面积换土由于土建地基建设不允许,以及地处海岛和山顶所造成的高成本,因此考虑深井接地极和施放降阻剂的降阻措施。统筹考虑地网占地面积、垂直接地体的利用系数、高土壤电阻率、岩石土质等,采取深井间距为深井接地极长度2倍左右原则进行布设,地网以深井垂直接地极为主导的设计。

2.3.1 采用深井钢管接地极主导的地网设计

(1)单一垂直接地体的电阻($l \gg d$)

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

式中: ρ 为土壤电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; l —接地体的长度, m ; d —接地体的直径或等效直径, m 。

(2)几个并联的相同垂直接地体的接地电阻

$$R_{nc} = \frac{R_c}{n\eta_c} \quad (5)$$

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

$$R_p = \frac{\rho}{2\pi l} (\ln \frac{l^2}{hd} + A) \quad (6)$$

式中: ρ —土壤电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; l —接地体的长度, m ; h —水平接地体埋深, m ; d —接地体的直径或等效直径, 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

$$R = \frac{R_{nc} \times R_p}{R_{nc} + R_p} \times \frac{1}{\eta} \quad (7)$$

式中: η —地网并联的利用系数。

利用以上接地电阻计算公式,从地网的技术经济考虑,深井接地极沿平台四周建设红线内布设^[13-14],保持相邻深井接地极之间的间距为其长度的2倍左右,这样可以得到采用不同长度接地极时对应的接地极数量,见表2。接地极采用直径为60mm热镀锌钢管,水平接地体采用-40×4mm热镀锌扁钢,土壤电阻率取实测平均值921.43 $\Omega\cdot\text{m}$,季节系数取1.1,垂直接地体的利用系数取0.75,水平接地体的形状系数取1.69,总长度为305m(不同的方案对比时水平接地体不变,仅调整深孔接地极的深度和数量),埋设1.0m,代入式(6)计算得水平接地网的接地电阻为9.02 Ω 。根据表2的“深井接地极长度”和“深井接地极数量”数据,水平地网和垂直地网并联的利用系数取0.65,得出不同设计方案时的计算电阻值,见表2。

从表2可以看出,在采用深井钢管接地极方案时,各方案均无法达到 $\leq 4.90\Omega$ 的设计要求。

2.3.2 采用深井离子棒接地极主导的地网设计

在深井钢管接地极方案的基础上,深井接地极采用接地离子棒替代镀锌钢管,考虑到海岛地网腐蚀的问题,水平接地体采用-40×4mm紫扁铜带替换热镀锌扁钢,地网的布局、接地极长度和数量与表2相同,分别计算其接地电阻。

(1)水平接地体的接地电阻计算结果与2.3.1计算结果相同,为9.02 Ω 。

(2)一组电解离子接地极的接地电阻计算公式为^[15-16]:

$$R_1 = \frac{k \times \rho \times \lambda \times \xi}{H} \quad (8)$$

表 2 以垂直接地极为主导的方案比对结果(钢管)

序号	深井接地极长度 /m	深井接地极数量 /个	计算电阻值 /Ω
1	6	16	8.17
2	9	9	8.98
3	12	8	8.60
4	15	6	8.92
5	18	5	9.01

表 3 以垂直接地极为主导的方案比对结果(离子接地棒)

序号	深井离子接地极 长度 /m	深井接地极 数量/个	计算电阻值 /Ω
1	6	16	4.97
2	9	9	4.81
3	12	8	4.29
4	15	6	3.61
5	18	5	3.61

式中: k 为离子接地极接地系统效率, 长度为 3~12m 时, $k=0.85$; 12~30m, $k=0.75$; 30~60m, $k=0.65$;
 ρ 为土壤电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$;
 λ 为降阻剂回填料降阻率, $\rho\leq 500\Omega\cdot\text{m}$, $\lambda=0.8$;
 $500<\rho\leq 1000\Omega\cdot\text{m}$, $\lambda=0.7$; $1000<\rho\leq 2000\Omega\cdot\text{m}$, $\lambda=0.6$; $2000\Omega\cdot\text{m}<\rho$, $\lambda=0.55$;
 ζ 为初始离子扩散半径, $H\leq 3\text{m}$, $\zeta=0.8$; $3<H\leq 6\text{m}$, $\zeta=0.7$; $6<H\leq 12\text{m}$, $\zeta=0.6$; $12\text{m}<H$, $\zeta=0.5$; H 为离子接极的长度(单位:m)。

(3)N 组电解离子接地极的接地电阻计算:

$$R_{1N}=\frac{R_1}{N}\times\frac{1}{\eta_1}$$

(9)

(4)水平接地网与垂直接地网并联的接地电阻见式(7),并联的利用系数取 0.65。

利用以上接地电阻计算公式,垂直接地极采用直径为 60mm 离子接地棒,水平接地体采用-40×4mm 紫扁铜(采用铜是为了地网的耐腐蚀性),土壤电阻率取实测平均值 $921.43\Omega\cdot\text{m}$,季节系数取 1.1,代入表 3 的“深井离子接地极长度”和“深井接地极数量”数据,计算结果见表 3。

从表 3 可以看出,在采用深井离子棒接地极方案时,能够满足接地电阻值 $\leq 4.90\Omega$ 要求。考虑到实际施工时需要在深井接地极的缝隙灌注降阻剂和水平接地极施放降阻剂,以及考虑场地纵向的地质结构,钻孔的费用,垂直接地极的利用系数等,深井离子棒接地极设计在强风化岩带(层号 1-1)并进入中风化岩带(层号 1-2),结合技术经济指标,选择单根离子接地极长为 9m,接地极数为 9 孔作为设计方案。

3 讨论

根据以上研究的结果,选择在雷达塔楼基础接地的基础上,增加深井离子垂直接地极为主导的附加地网设计方案为最佳。理论计算雷达塔楼基础的接地电阻值为 11.13Ω ,不能满足雷达设备 $\leq 4\Omega$ 的

要求,需要根据现场的实际情况研究如何增加附加地网,经过估算采用常规的角钢和扁钢作为接地体进行设计,由于用地面积的限制与该处的高土壤电阻率土质,无法达到附加地网阻值的需求。根据增大接地体与土壤的接触面积可以降低接地电阻的原理,由于用地面积受限,因此考虑采用深井垂直接地极为主导的设计方案,研究中以地网设计的技术经济性为原则,深井接地极的间距为其深度 2 倍进行接地极布置,分别计算 5 种不同间距和深度的设计方案,结果为当深井接地极采用普通热镀锌钢管时,5 种方案均不能满足要求,采用离子接地棒时,则能满足。

因此在高山高土壤率地区,当可供地网建设的用地面积受限制,周围没有条件采用外引接地体、土建又不允许大面积换土时,采用深井接地极为主导的地网设计方案能够解决地网设计问题。同时为了减少深井接地极相互之间的屏蔽效应,提高接地极的利用效率,接地极布置以极间间距为极深的 2 倍为原则布置,同时需要计算不同的组合方案以获得最佳方案。

4 结论

本研究得出了一种海岛高山高土壤电阻率地区天气雷达的地网设计方法,该方法能够有效避免地网的设计不足或过度设计。主要以地网设计的技术经济性为原则,通过自然接地体(雷达塔楼基础)的接地电阻计算,确定是否需要增加附加地网以及其规模,基于不同接地极布置和采用不同的接地材料方案比对,研究计算获取最佳方案。

按照所确定的设计方案实施后实测的接地电阻为 3.23Ω ,满足设计要求,与理论的误差为-19%。对于高山高土壤电阻率地区的地网设计,具体所采取的措施和方法应根据现场的实际环境条件来确定,由于土壤电阻率和接地体(网)并联所取的利用系数对设计值影响较大,需要准确获取和选取,尽量减少

理论设计和实际测试值之间的误差,避免设计不足或过度设计。本地网设计方法可供类似环境条件下设备接地的设计作为参考。

参考文献:

- [1] 杨立洪,李源锋,黄彬.多普勒雷达接地系统的设计[J].广东气象,2008(5):60-61.
- [2] 曹俊锋.雷达系统中的接地设计[J].信息与电子工程,2008(1):29-33.
- [3] 何俊裕,邹军,肖飞.科学装置接地网设计探讨[J].建筑电气,2022,41(10):64-68.
- [4] 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(11):70-73.
- [5] 白永胜.高山地区变电站接地网的设计及应用[J].山西冶金,2021,44(4):178-179+209.
- [6] 钟山,周炜明.高土壤电阻率变电站降阻措施分析及降阻目标选择[J].四川电力技术,2021,44(3):56-60.
- [7] 阴晓龙.高铁牵引变电所主接地网降阻方法的研究[J].哈尔滨铁道科技,2021(2):7-9+21.
- [8] 邢玥,耿占权.集宁至通辽铁路牵引变电所接地网设计研究[J].智能建筑与智慧城市,2021(12):162-163.
- [9] 郭振兴.泸定水电站枢纽接地网接地电阻超标处理[J].中国水能及电气化,2018(11):43-46.
- [10] 陈海宏,郑庆阳,吴德峰,等.IEA 电解离子接地系统的应用[J].电瓷避雷器,2009(5):33-35.
- [11] 朱敏捷,杨雷.电解离子接地系统的应用[J].华东电力,2007,35(12):108-109.
- [12] 张辰,周力行.对离子接地极在变电站接地网改造中的应用探讨[J].计算技术与自动化,2011,30(3):62-65.
- [13] 郭振威,罗庆跃,袁旭龙,等.CDEGS 在复杂大型接地网优化设计中的应用研究[J].湖南电力,2010,30(2):4-8+27.
- [14] 卓越,蒋伟.基于 CDEGS 软件的变电站接地网优化研究[J].机电信息,2014(24):120-121.
- [15] GUEMES J A, HERNANDO F E. Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2):595-600.
- [16] 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.

Design of Island High Mountain Weather Radar Ground Network

Zhong Yushan¹, Chen Jingrong^{2*}, Wu Jianbin³, Zhang Qiaorong⁴

(1.Jiangmen Meteorological Bureau, Guangdong Jiangmen 529000, China; 2.Guangdong Climate Center, Guangzhou 510641, China; 3.Jiangmen Meteorological Service Center, Guangdong Jiangmen 529000, China; 4.Wuhua Meteorological Bureau, Guangdong Wuhua 514400, China)

Abstract: Based on the grounding project of the ShangChuan Island Weather Radar Construction Project in Guangdong, a design method of the island alpine weather radar grounding network is summarized. According to the radar construction site, it is obtained by leveling the mountaintop, with a small platform area, high soil resistivity, and steep surroundings; Based on the calculation of the grounding resistance of the radar tower foundation, the resistance value of the additional grounding grid needs to be increased. The required additional grounding grid is determined by comparing and calculating the design scheme using conventional angle steel and flat steel grounding bodies, the design scheme dominated by vertical grounding bodies of deep well steel pipes, and the design scheme dominated by vertical grounding bodies of deep well grounding rods. The grounding grid design using deep well ion grounding rods as vertical grounding bodies is obtained; After implementing the determined plan, the measured grounding resistance meets the design requirements.

Key words: radar; Ground network; Lightning protection; Grounding design; Deep well grounding electrode