

埋地金属导体对接地系统电阻测试影响试验分析

覃彬全¹ 郭在华^{2,3} 陈佳祺^{2,3} 吴刚⁴ 糜翔¹

(1 重庆市气象安全技术中心, 重庆 401147; 2 成都信息工程大学, 成都 610225;

3 中国气象局大气探测重点开放实验室, 成都 610225; 4 重庆市沙坪坝区气象局, 重庆 400030)

摘要 搭建试验地网研究土壤中金属导体对接地电阻的影响。通过埋设不同形状金属导体, 改变金属导体埋设深度、与试验地网相对距离, 在不同点位测量试验地网接地电阻值。分析试验数据发现, 埋地金属导体导致接地电阻测量值偏小, 其中环形金属导体对接地电阻测量值影响最大, 一形金属导体对接地电阻测量值影响最小; 金属导体位于测试电压极外侧相比位于内侧时, 对接地电阻测量值的影响更大; 金属导体位于测试电压极内侧时, 不同测试点位接地电阻测量值差异较大, 金属导体位于测试电压极外侧时, 各点位接地电阻测量值差异不大; 金属导体埋设深度对接地电阻测量值影响不明显。

关键词 埋地金属导体; 接地电阻; 测试影响

中图分类号: P49 **DOI**: 10.19517/j.1671-6345.20200244 **文献标识码**: A

引言

接地电阻值是衡量接地装置是否有效、安全的重要参数, 但接地电阻值在测量过程中受到诸多因素的影响, 例如测量装置的误差、不当的测量方法、接地装置所处土壤环境等, 都会导致接地电阻测量值的不准确^[1-5], 为此学者们对不同对象影响接地电阻的情况开展了研究。郑君亮等通过土壤结构的反演获取土壤结构参数, 进行仿真分析研究土壤电阻率对接地电阻的作用^[6]。张宇从土壤结构对接地极接地性能影响的角度进行了分析^[7]。史锦旗从分析接地阻抗的角度入手, 提出了科学测量接地电阻值的理论依据^[8]。孙金华等从三级测试法入手, 分析了接地电阻测量过程中杂散电流、高频、工频及测试引线互感对测量值的影响^[9]。高振洲等提出通过变频法来降低工频干扰对接地电阻测量的影响, 并进行了变频测量设备的设计^[10]。褚文超等通过分析变电站地网测试中接地电阻测试值不准确的实例, 提出了改进测试方法^[11]。张柯林以变电站地网为例, 对接地电阻的数值计算及改造技术进行了研

究^[12]。李密在研究接地检测时提出了测量不确定因子的控制办法^[13]。李鹏从接地网状态综合检测的角度进行了分析研究^[14]。然而, 在诸多对接地电阻测量值准确度的研究中, 并未见以埋地金属导体对接地电阻测量值影响角度入手开展的研究。为研究埋地金属导体对接地电阻的影响, 本文搭建了试验地网, 通过埋设不同形状金属导体, 改变金属导体埋设深度、与试验地网相对距离等, 在不同测试点位测量试验地网接地电阻值, 分析试验测试数据, 获取土壤中存在金属埋设物时的接地电阻测试值的修正系数, 为接地电阻的准确测量提供方法依据。

1 接地电阻的测量原理

接地电阻测量采用电位降法: 在离被测接地体一定距离的土壤中插入电流极和电压极, 经电流极向被测接地体注入恒定电流, 电流流经接地体后再通过大地—电流极形成回路。测量电压极与接地体之间的电压, 通过公式 $R=U/I$, 求出接地体的接地电阻。测量原理图如图 1 所示:

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

重庆市技术创新与应用示范项目“爆炸危险场所雷电防护关键技术研究”(项目编号: cstc2018jscx) 和重庆市气象局开放式研究基金项目“复杂地质条件下雷电流入地散流机理和腐蚀效应研究”(项目编号: kfjj-201401) 资助

作者简介: 覃彬全, 男, 1976 年, 硕士, 高工, 主要研究方向为雷电灾害防御, Email: cqbbq@vip.163.com

收稿日期: 2020 年 6 月 24 日; 定稿日期: 2021 年 1 月 25 日

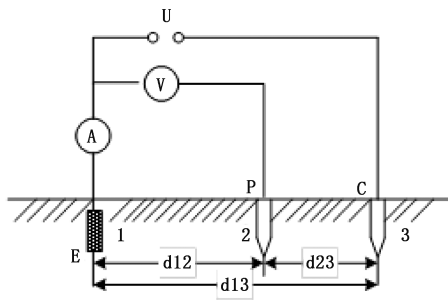


图 1 接地电阻测量

(图中:E 为被测接地体,P 为电压极,C 为电流极)

2 试验模型及测试方法

搭建试验地网:在均质土壤中利用 40 mm×4 mm 扁钢和 40 mm×4 mm×2500 mm 角钢敷设 5 m×5 m 试验地网,在试验地网中心位置预留出测试点。待试验地网与土壤充分稳定接触后,采用三极测试法(直线布极法、三角形布极法、两侧布极法)分别在地网的 8 个方位进行测试。试验前,首先测试土壤湿度,确保其土壤湿度大概一致,同时,在无埋地金属导体条件下,获取试验地网接地电阻测试数据。选取 DN100 普通钢管做埋地金属导体,通过改变埋地金属导体的几何形状、埋设深度、数量、与试验地网相对位置关系,开展试验地网周围有埋地金属导体时的接地电阻测试,测试方法与试验地网周围无埋地金属导体时对应,记录每组测试数据。根据获得的相关数据进行比较,分析土壤中埋地金属导体几何形状、埋设深度、数量、与地网相对位置关系等因素对试验地网接地电阻测试结果的影响,获取土壤存在金属埋设物时的接地电阻测试值修正系数。

图 2 为 5 m×5 m 试验地网示意图,图 3 为无埋地金属导体时的试验地网接地电阻测试布置方式。

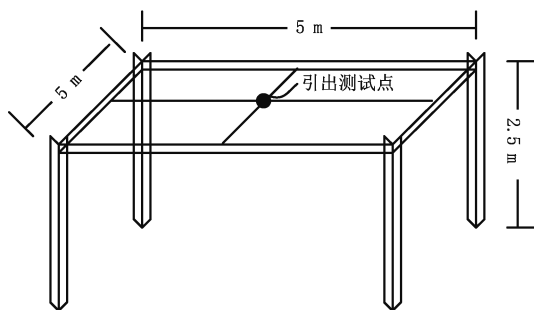


图 2 5 m×5 m 环形试验地网示意

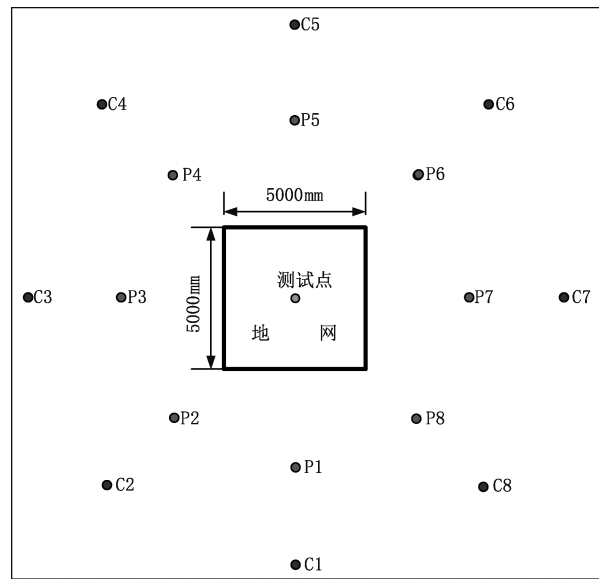


图 3 无埋地金属时试验地网接地电阻测试布置方式

(其中 P 为电压极,C 为电流极)

埋地金属导体几何形状有 4 种:一形、L 形、U 形、环形,埋设深度分 4 个:300 mm、600 mm、900 mm、1200 mm。埋设物与试验地网无连接(图 4),埋设完毕回填土夯实并待试验环境稳定(土壤自然沉淀)。图 5、图 6 为不同形状埋地金属导体位于电压极内侧、电压极外侧的布置方式(内侧指地网和电压极之间,外侧指电压极和电流极之间)。

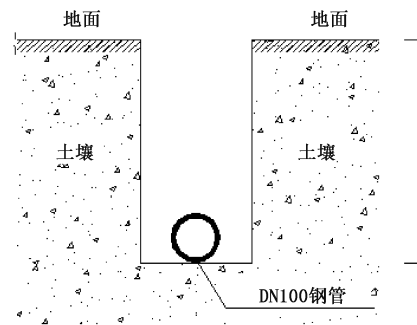


图 4 钢管埋设示意

3 试验数据分析

在试验地网无金属埋设物的情况,以及有不同形状金属埋设物埋设不同深度、不同位置的情况下,于不同时刻反复对试验地网的 8 个测试点位进行测试,记录测试时的环境温度和土壤湿度,获得试验测试数据,各个点位多次测量后取平均值,如表 1 所示。

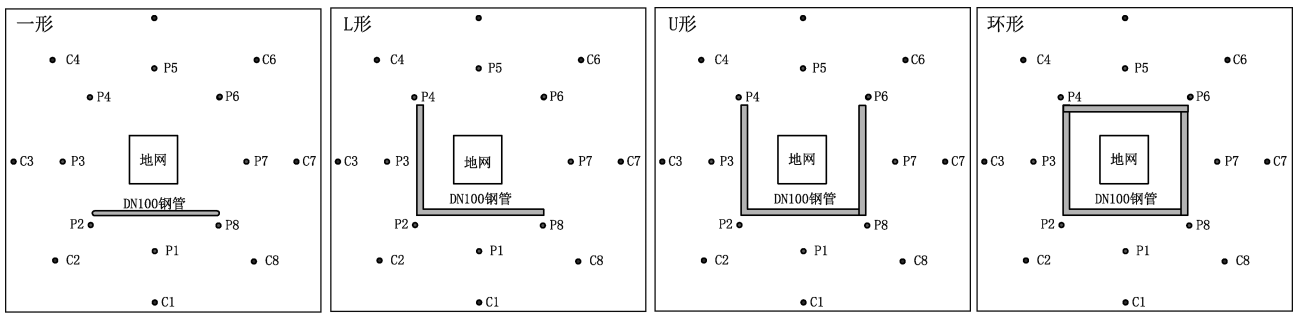


图 5 不同形状埋地金属导体位于电压极内侧模型

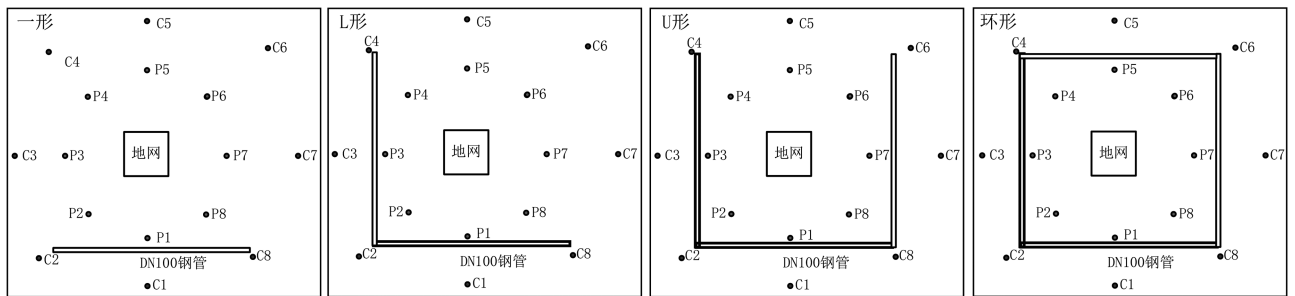


图 6 不同形状埋地金属导体位于电压极外侧模型

3.1 埋地金属导体形状位置对接地电阻的影响

埋地金属导体对接地电阻测量值的影响如图 7 所示。从埋地金属导体埋设位置来看,金属导体位于电压极内侧时,对接地电阻测量值的影响较小,位于电压极外侧时,对接地电阻测量值的影响较大。从埋地金属导体的形状来看,环形埋地金属导体对接地电阻测量值的影响最大,U形、L形埋地金属导体对接地电阻测量值的影响次之,一形埋地金属导体对接地电阻测量值的影响最小。总体来看,当土壤中存在金属导体时,都会对接地电阻测量值产生影响,使得接地电阻测量值变小。

图 8 是不同形状下接地电阻测量值偏差分布情况,每一点的值代表该点在某种形状下 4 种不同深度测量或偏移的均值。一形埋地金属导体平均偏差最小,位于电压极内侧时为 0.08Ω ,变化范围是 $0.02 \sim 0.13 \Omega$;位于外侧时为 0.51Ω ,变化范围是 $0.40 \sim 0.57 \Omega$ 。L形埋地金属导体平均偏差稍大于一形,位于电压极内侧时为 0.10Ω ,变化范围是 $0.01 \sim 0.20 \Omega$;位于外侧时为 0.53Ω ,变化范围是 $0.46 \sim 0.63 \Omega$ 。U形埋地金属导体平均偏差大于 L形,位于电压极内侧时为 0.15Ω ,变化范围是 $0.04 \sim 0.22 \Omega$;位于外侧时为 0.56Ω ,变化范围是 $0.47 \sim$

0.67Ω 。环形埋地金属导体平均偏差最大,位于电压极内侧时为 0.22Ω ,变化范围是 $0.153 \sim 0.28 \Omega$;位于外侧时为 0.58Ω ,变化范围是 $0.49 \sim 0.64 \Omega$ 。

埋地金属导体对接地电阻测量值的影响程度取决于其对测量回路电流散流的影响大小,该影响大小又取决于埋地金属导体对试验地网的包围程度。一形埋地金属导体对试验地网的包围范围最小,因此在散流回路上对测量电流扩散的影响也较小。而 L形、U形、环形埋地金属导体对试验地网的包围范围依次增大,对电流的扩散或泄放影响也依次增强。

3.2 埋设深度对接地电阻的影响

从图 7 来看,当埋地金属导体位于电压极内侧时,埋设深度对接地电阻测量值的影响并不大;位于外侧时,埋设深度对接地电阻测量值的影响较为明显。埋地金属导体同样形状、同样埋设位置情况下,600 mm 埋设深度测得的接地电阻测量值与参考值偏差最大。

图 9 是埋地金属导体在不同深度与不同形状下,接地电阻测量值与无埋地金属导体情况下测量值的偏差分布。当埋地金属导体位于电压极内侧时,接地电阻测量值偏差范围在 $-0.05 \sim 0.32 \Omega$ 之间波动,波动幅度达 0.37Ω 。埋设深度 300 mm 下

表 1 不同条件下的埋地金属导体接地电阻测量值

埋设位置	深度/mm	形状	气温/℃	土壤湿度/%	测试点位阻值/Ω							
					1	2	3	4	5	6	7	8
内侧	300	—	34.7	33	2.11	2.25	2.27	2.48	2.43	2.42	2.34	2.31
		L	31.1	40	2.15	2.03	2.11	2.35	2.32	2.41	2.38	2.31
		U	25.4	41	2.18	2.12	2.18	2.24	2.37	2.39	2.22	2.25
		环	33.4	32	2.1	2.11	2.2	2.19	2.21	2.3	2.18	2.21
	600	—	33.9	32	2.05	2.1	2.2	2.39	2.4	2.37	2.33	2.24
		L	32.2	30	2.03	2	2.1	2.23	2.41	2.4	2.35	2.22
		U	28.9	39	2	2.12	2.11	2.15	2.39	2.33	2.21	2.21
		环	24.2	40	2.01	2.05	2.05	2.12	2.22	2.26	2.14	2.16
	900	—	26.9	36	2.21	2.27	2.25	2.41	2.32	2.37	2.35	2.32
		L	26	35	2.14	2.19	2.21	2.33	2.45	2.4	2.34	2.3
		U	28.2	35	2.1	2.08	2.11	2.17	2.3	2.27	2.25	2.24
		环	23.5	40	2.02	2.05	2.19	2.2	2.23	2.25	2.2	2.22
	1200	—	23.6	37	2.18	2.17	2.22	2.31	2.34	2.43	2.21	2.33
		L	26.8	35	2.22	2.19	2.17	2.33	2.4	2.43	2.28	2.36
		U	20.8	33	2.21	2.16	2.17	2.3	2.38	2.35	2.2	2.31
		环	18.9	33	2.02	2.1	2.03	2.11	2.17	2.25	2.14	2.16
外侧	300	—	18.9	33	1.89	1.87	1.92	1.86	1.89	1.85	1.78	1.9
		L	17.6	33	1.77	1.81	1.81	1.8	1.88	1.89	1.86	1.85
		U	12.4	34	1.8	1.82	1.84	1.84	1.88	1.84	1.87	1.81
		环	12.4	32	1.81	1.81	1.83	1.82	1.83	1.82	1.85	1.88
	600	—	8.5	34	1.74	1.75	1.81	1.82	1.85	1.86	1.85	1.86
		L	7.7	33	1.77	1.74	1.79	1.77	1.85	1.85	1.87	1.82
		U	9.7	33	1.75	1.75	1.75	1.79	1.87	1.81	1.81	1.78
		环	10.6	35	1.73	1.74	1.74	1.76	1.74	1.77	1.78	1.75
	900	—	6.1	36	1.81	1.83	1.88	1.86	1.92	1.95	1.85	1.83
		L	8.0	35	1.79	1.78	1.79	1.85	1.95	1.93	1.9	1.81
		U	9.7	34	1.77	1.76	1.76	1.78	1.82	1.81	1.79	1.76
		环	13.4	33	1.72	1.75	1.74	1.77	1.77	1.74	1.78	1.77
	1200	—	17.2	32	1.85	1.89	1.88	1.92	2.01	1.89	1.91	1.81
		L	21.2	31	1.86	1.88	1.87	1.88	1.95	1.93	1.92	1.82
		U	23.5	32	1.85	1.84	1.86	1.86	1.9	1.84	1.87	1.76
		环	25.5	34	1.81	1.81	1.83	1.82	1.86	1.8	1.83	1.87
无埋设物试验地网测试			32.0	34	2.3	2.35	2.31	2.51	2.48	2.43	2.39	2.44
			25.9	33	2.31	2.33	2.3	2.54	2.44	2.45	2.41	2.46
			26.9	33	2.33	2.4	2.27	2.48	2.5	2.39	2.46	2.52
			23.9	50	2.2	2.25	2.21	2.36	2.33	2.4	2.42	2.41
			19.4	42	2.26	2.18	2.25	2.42	2.36	2.36	2.38	2.45
均值			33	2.2	2.31	2.23	2.31	2.32	2.51	2.47	2.43	
均值				2.27	2.3	2.27	2.43	2.4	2.42	2.42	2.45	

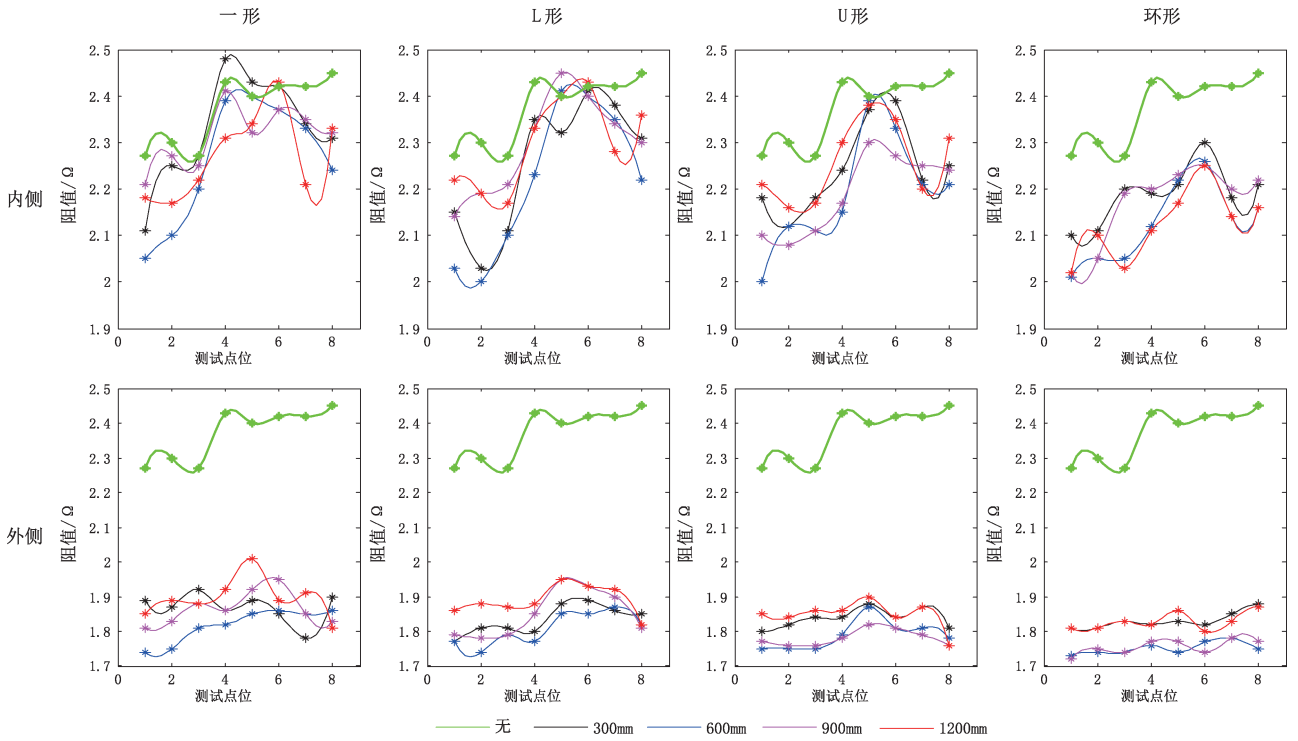


图 7 不同深度、不同形状埋地金属导体对接地电阻测量值的影响

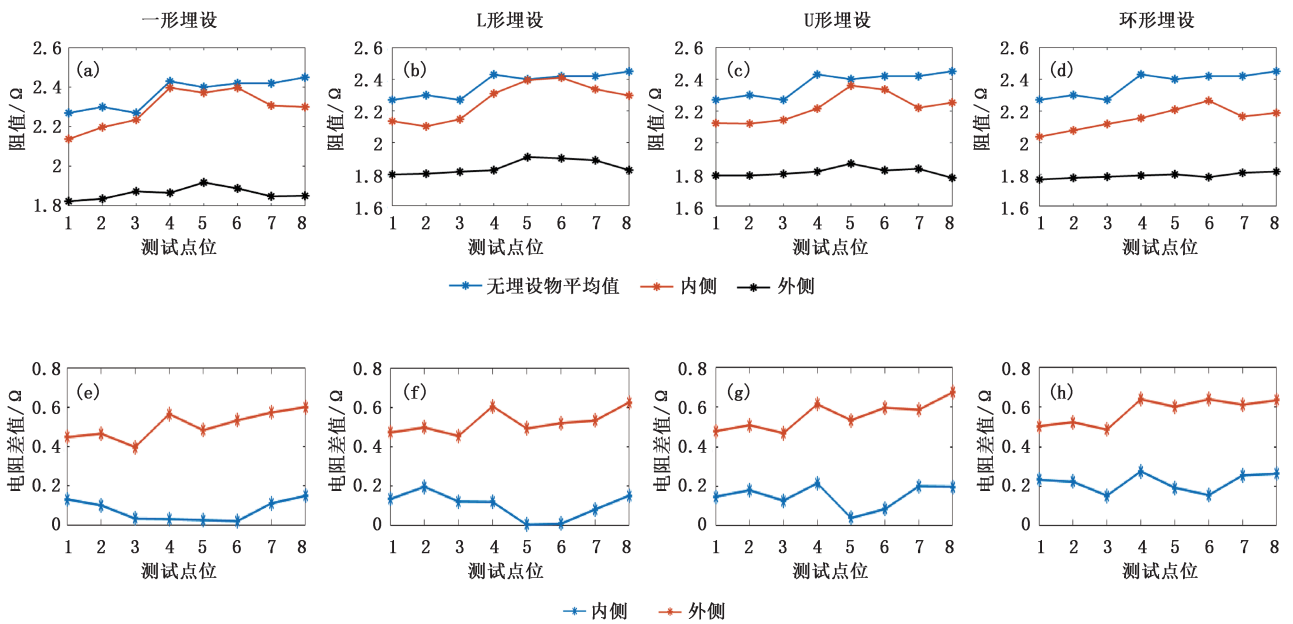


图 8 不同形状埋设下接地电阻值的测量值(a,b,c,d)及偏差(e,f,g,h)

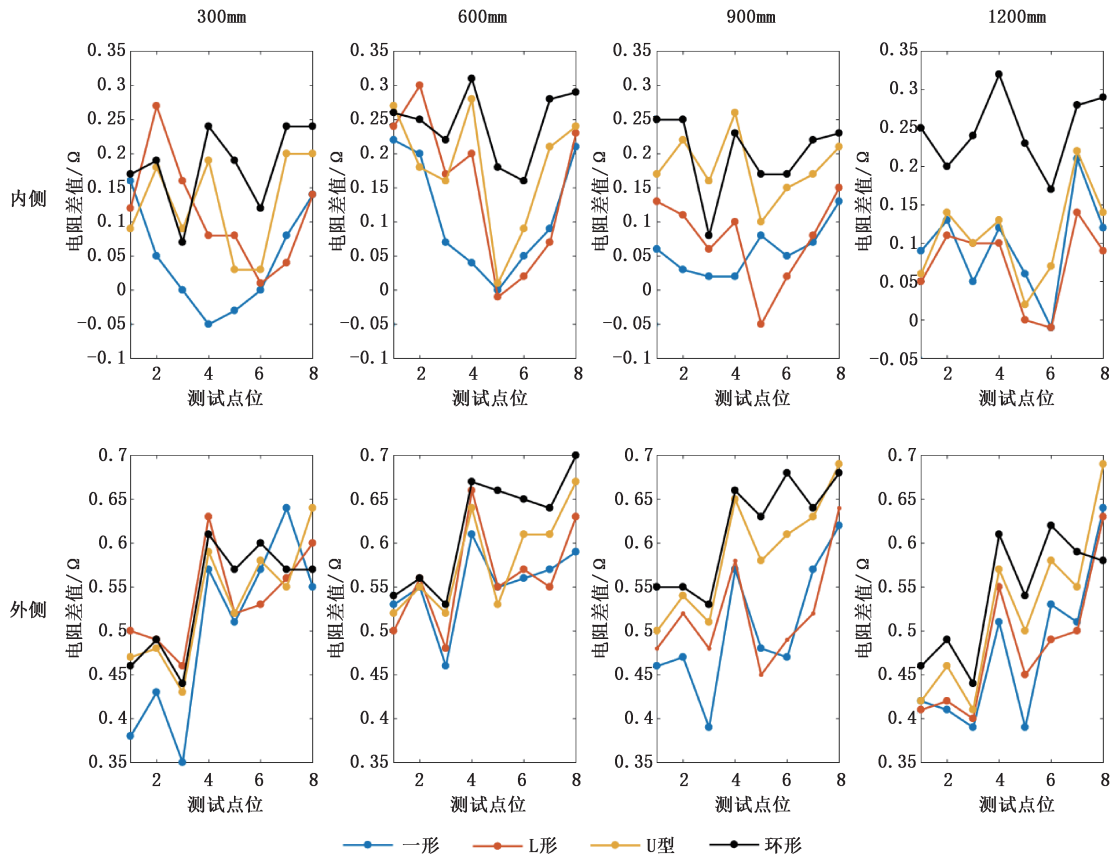


图 9 不同埋设深度接地电阻值测量的偏差

一形埋地金属导体,埋设深度 600 mm 和 900 mm 下的 L 形埋地金属导体使接地电阻测量值略高于参照值,这是由于测试点位避开了埋地金属导体所致。当埋地金属导体位于电压极外侧时,接地电阻测量值的偏差较大,偏差范围在 0.35~0.7 Ω 之间波动,波动幅度达 1.05 Ω。

图 10 是埋地金属导体位于电压极内外、侧时,接地电阻测量值的偏差总体分布。埋地金属导体位于电压极外侧比位于内侧时,接地电阻测量值的偏差要大。埋地金属导体位于电压极外侧时的综合测量偏差平均值为 0.55 Ω,内侧时为 0.14 Ω,随着测量点位的不同,呈现波动性变化,总体平稳。在实际测量过程中,如果遇到埋地导体,应该尽量使其位于电压极的内侧。

当埋地金属导体位于电压极的内侧时,试验地网与埋地金属导体之间通过大地连通,与电流极之间形成共同回路,此时埋地金属导体等效于一个次生地网,与原地网串联形成一个共用大地网,从而导致试验地网的接地电阻测量值降低,但限于埋地金

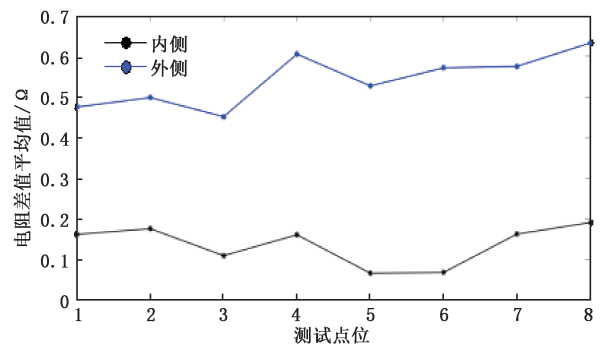


图 10 内外侧接地电阻值的测量平均偏差

属导体的规模,接地电阻测量值降幅很小,在 0.2 Ω 以下。

当埋地金属导体位于电压极的外侧时,电流极、埋地金属导体、电压极之间也形成通路,部分电流将通过埋地金属导体散流,导致埋地金属导体周边地电位升高,改变了正常测量条件下电压极的零电位特征,从而使得接地极与电压极之间的电位差变小,但测量电流未变,从而导致接地电阻测量值减小。

其减小幅度由电压极与埋地金属导体之间距离、测量电流共同决定。

3.3 测试点位对接地电阻的影响

测试点位,对接地电阻测量值的影响明显,也是造成测量值波动的最主要原因。如图 3,从地网 6 点钟方向开始,顺时针将整个平面均分为 8 个测试点位,用数字“1~8”表示。图 11 为不同点位接地电阻值测量值的分布情况,当埋地金属导体位于电压极内侧时,不同测试点位的接地电阻测量值差异较大,曲线波动性较强,但整体平稳。埋地金属导体不同形状,不同深度下接地电阻测量值的平均偏差为 0.14 Ω,其中 1、2、7、8 测试点偏差较大,最大偏差值达到 0.26 Ω,5、6 测试点偏差较小,最小偏差值是 0.01 Ω。埋地金属导体位于电压极外侧时,不同测试点位接地电阻测量值差异较小,波动特征不明显,有上升趋势。埋地金属导体不同形状,不同深度下接地电阻测量值的平均偏差为 0.54 Ω,其中 7、8 测试点偏差较大,最大偏差值达到 0.67 Ω,1、3 测试点偏差较小,最小偏差值是 0.40 Ω。

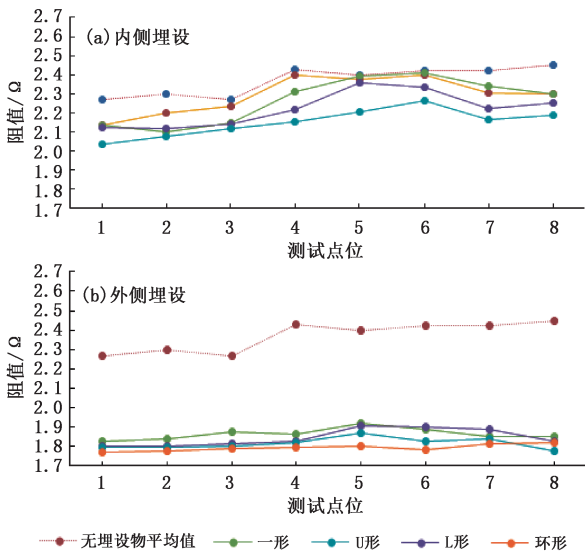


图 11 埋地金属导体位于电压内侧(a)和外侧(b)时不同点位接地电阻值的测量值

不同测量点位引起不同的测量偏差,这是由于不同的测量方向,测试回路散流路径不同所造成的。从图 11 可见,一形、L 形和 U 形埋地金属导体的反方向均有非常接近于参考值的测量值(5、6 点),同时在正对埋地方向也具有接近于参考值的测量值(1 点),而在其他方向,值的变化比较明显,这是由于这

两个方向测试电路的影响水平接近。在反方向,接地体不与埋地导体形成电流回路,测量结果基本与参考值一致。而在有埋地金属导体的方向,测量电流回路均全部通过埋地金属导体,测量结果表现为原接地体与埋地金属导体的总接地电阻,因此偏差最大。环形埋地金属导体在各个方向的测量值变化不大,总体稳定,部分点位略为偏高,这是因为它在各个方向的散流影响相同,部分点位略微偏高估计由于人工测试的测量误差。

4 不同点位接地电阻测量差值均值分布拟合分析

结合前面的分析,对不同形状的埋地金属导体在不同方向进行测量值的修正。这里面不考虑测量深度的影响,将不同深度的测量值作整体考虑。图 12 为不同点位接地电阻值内外侧差值均值分布拟合函数。

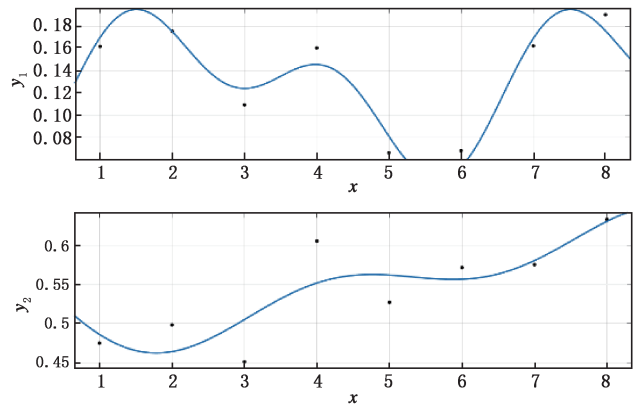


图 12 不同点位接地电阻值内外侧差值均值分布拟合函数

本文选择傅里叶函数,获取最佳拟合函数:

$$y(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) \tag{1}$$

其中, y 表示测量偏差, x 是测量点位,对于 95% 置信区间内的拟合函数结果如下:

$$y_1(x) = 0.125 - 0.035\cos(1.046x) + 0.034\sin(1.046x) - 0.036\cos(2.092x) + 0.017\sin(2.092x) \tag{2}$$

$$y_2(x) = 0.558 + 0.003\cos(0.606x) - 0.068\sin(0.606x) + 0.006\cos(1.212x) - 0.041\sin(1.212x) \tag{3}$$

其中, y_1 为不同测量点在电压极内侧时的差值分布函数, y_2 为不同测量点在电压极外侧时的差值分布函数。

测量时,不同方向和测量点的偏差可以由 y_1 、 y_2 来表示,此时,各点的偏差值也可以作为修正参数,在测量时进行应用。另外计算得到 y_1 的均值为 0.137Ω ,分布区间为 $[0.054 \Omega, 0.175 \Omega]$; y_2 的均值为 0.542Ω ,分布区间为 $[0.486 \Omega, 0.632 \Omega]$ 。

关于 y_1 的拟合优度有:和方差(SSE)为 0.001209 ;决定系数(R^2)为 0.9276 ;校正决定系数为 0.7467 ;均方根(RMSE)为 0.02459 。

关于 y_2 拟合优度有:和方差(SSE)为 0.008488 ;决定系数为 0.7071 ;校正决定系数为 -0.02504 ;均方根(RMSE): 0.06515 。

SSE 越接近于 0,说明模型选择和拟合越好,数据预测也越成功,说明该函数可较好地用来预测不同点位下埋地金属导体位于电压极内、外侧时接地电阻测量值的偏差值。 R^2 的正常取值范围为 $[0, 1]$,其值越接近 1,表明方程的变量对 y 的解释能力越强,由此可见该模型对接地电阻偏差值的拟合也较好。

在不具备地下埋设物详细资料的情况下,也可以简化应用 y_1 、 y_2 平均值进行修正。

5 结论

本试验分别在试验地网的 8 个方位对其进行接地电阻测试,获取试验地网在有、无埋地金属导体条件下接地电阻值的测试数据,经分析得出以下结论:

(1)土壤中的埋地金属导体会对接地电阻的测量值产生影响,使得接地电阻的测量值偏小,埋地金属导体位于测试电压极外侧时对接地电阻测量值的影响较大。

(2)环形的埋地金属导体对接地电阻的测量值影响最大,使得接地电阻测量值减小最多。一形的埋地金属导体对接地电阻的测量值影响较小。

(3)埋地金属导体位于测试电压极内侧时,埋设深度对接地电阻测量值的影响并不大;位于测试电压极外侧,埋设深度为 600 mm 时对接地电阻测量

值的影响最大。

(4)除环形外,埋地金属导体位于测试电压极内侧时,不同测试点位测得接地电阻测量值差异较大,其中在点位 1 处所测得电阻测量值最小;埋地金属导体位于测试电压极外侧时,各测试点位接地电阻测量值差异不大。

(5)在具有埋地金属导体的情况下测量接地电阻时,可以通过不同的测量方向,对测量值进行偏差修正。

参考文献

- [1] 李家启,陈宏.接地电阻测量环境影响机理及其对策[J].气象科技,2012,40(6):1013-1017.
- [2] 翟玉泰,于东海,王立民.接地电阻测试影响因素分析[J].气象研究与应用,2012,33(3):91-93.
- [3] 冯志伟.土影响接地电阻测量的因素分析[D].南京:南京信息工程大学,2011.
- [4] 黄立盛.不同的接地电阻测试操作方法对测试结果的影响分析[J].福建气象,2006(2):45-47.
- [5] 杜昌海,高建文.环境对接地电阻测量的影响[J].现代农业科技,2014(16):0236-02.
- [6] 郑君亮,刘隽.基于 CDEGS 系统的土壤结构参数及接地体仿真分析[J].气象科技,2019,47(2):349-354.
- [7] 张宇.土壤结构对接地极接地性能影响分析[D].郑州:郑州大学,2018.
- [8] 史锋旗.变电站防雷接地阻抗测量分析[J].气象科技,2016,44(3):489-494.
- [9] 孙金华,惠良,陈晓东.建筑物接地电阻测试干扰因素分析及消除方法[J].山西建筑,2011,37(21):119-120.
- [10] 高振洲,陈玲,金昌根,等.接地电阻测试改进分析[J].四川兵工学报,2010,31(10):97-99.
- [11] 褚文超,董德成.接地网接地电阻测试值超标原因分析及方法改进[J].内蒙古电力技术,2013,31(1):80-86.
- [12] 张柯林.变电站地网接地电阻的数值计算及改造技术的研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [13] 李密.接地装置的防雷检测[J].气象科技,2007,35(3):448-450.
- [14] 李鹏.接地网状态综合检测分析方法及其实现[D].长沙:湖南大学,2009.

Influence Experiment and Analysis of Buried-Metal Conductor on Resistance Test of Grounding Systems

QIN Binqun¹ GUO Zaihua^{2,3} CHENG Jiaqi^{2,3} WU Gang⁴ MI Xiang¹

(1 Chongqing Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Chongqing 401147;

2 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225;

3 Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225;

4 Shapingba District Meteorological Service, Chongqing 401147)

Abstract: The influence of a metal conductor in soil on ground resistance is studied by setting up the experimental ground grid. By embedding different shape metal conductors, changing the buried depth of metal conductors and the relative distance from the test grounding grid, the grounding resistance of the test grounding grid was measured at different points. Analysis of test data shows that the buried metal conductor leads to the smaller measured value of grounding resistance, among which the square-shaped metal conductor has the greatest influence on the measured value of grounding resistance, and the line-shaped metal conductor has the least influence on the measured value. When the metal conductor is located outside the test voltage pole, the influence on the measured value of grounding resistance is greater than that on the inside. When the metal conductor is located inside the test voltage pole, the measured value of grounding resistance at different test points is quite different. When the metal conductor is located outside the test voltage pole, the measured value of grounding resistance at each point has little difference. The buried depth of a metal conductor has no obvious influence on the measured value of grounding resistance.

Keywords: buried metal conductor; grounding resistance; test influence