

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.021

土壤电参数的频变特性验证及在冲击响应中的适用性

王琪瑞¹, 李纯², 王丰润³, 郑智慧³, 吴田¹, 鲁海亮³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院, 广东 广州 510663; 3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 接地装置在雷击下的暂态响应特性与工频响应特性存在较大区别, 其接地阻抗会在土壤冲击特性的作用下降低。文中搭建土壤电参数频率特性测试平台, 基于四极法对土壤交流电下的电参数频率特性进行测试, 从而获得一定频率范围内土壤的介电常数实部和电导率的变化规律。同时, 文中利用电导率与介电常数实部之间的频域关系验证测试结果的准确性。结合土壤的交流稳态响应和冲击暂态响应测试可得, 计算电压波形均与测量电压波形具有较好的一致性, 验证了土壤电参数的交流频率特性在冲击响应计算中的有效性。样品土壤的冲击响应测试和计算结果表明, 考虑土壤电参数频率特性对冲击响应计算的准确性至关重要, 可以为导体的冲击接地阻抗计算提供参考。

关键词: 土壤电参数; 频率特性; 复介电常数; 土壤极化; 冲击暂态响应; 交流稳态响应

中图分类号: TM89

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)05-0218-08

0 引言

雷电流通过接地装置散流时, 接地导体附近的电场强度较大, 导致土壤电离, 引起局部土壤的电阻率降低, 造成冲击接地阻抗减小, 此时接地装置的冲击接地阻抗与入地电流幅值为非线性关系^[1-6]。同时, 土壤电参数有明显的频率特性, 其电阻率在高频时会显著降低^[7]。冲击电流含有大量的高频分量, 而土壤的冲击等效电阻率要小于工频电阻率, 若在接地装置的暂态计算中忽略土壤电参数的频率特性, 会造成较大误差^[8-13]。

土壤电参数频率特性已在地质勘探、土壤含水量测量和土壤污染检测等多个领域中应用, 但上述研究关注的频率区段与雷电流的频率区段相差较大, 相关成果无法直接用于防雷接地领域。土壤电参数频率特性在防雷接地领域的研究起步相对较晚, 直至2009年, 文献^[14]对接地体进行小电流冲击实验时, 发现测量电压要明显小于计算值, 因此在冲击接地计算中不可忽略土壤电参数频率特性的影响。在这之前, 由于学界对于土壤冲击特性的认知尚不够全面, 接地装置冲击接地阻抗降低被全部归因于土壤电离, 导致土壤电参数频率特性的研究长期未得到重视。目前, 部分学者未能充分认识到土壤电参数频率特性对接地装置冲击性能的重要影响, 防雷接地技术的创新与发展受到限制, 亟待引起学界重视并对其展开深入研究。

文献^[15-16]均采用 Novocontrol 宽频介电阻抗

谱仪对土壤电参数频率特性进行测量。根据不同学者提出的经验公式^[17-18], 将初始电阻率相近的土壤电参数频率特性进行对比, 发现其结果存在较大差异。目前, 学者们在土壤电参数频率特性方面已经开展大量测试工作, 但由于不同学者测试时土壤样品、测试回路、测试仪器和操作手法不同, 各个文献中的测试结果差异较大。同时, 由于缺乏测试结果检验方法, 学者们难以对自己的测试结果进行检验。

文中将对检验土壤电参数频率特性测试结果可信度的方法进行研究, 并结合交流和冲击条件下的测试和计算结果, 进一步研究交流条件下测试得到的土壤电参数频率特性在冲击响应计算中的适用性。

1 土壤电参数频率特性测试方法

土壤的电导率和介电常数都会随频率变化, 在相同幅值、不同频率的电压激励下, 土壤电流的幅值及其与电压的相位差都会发生变化, 这些变化会直接反映在土壤的导纳中。通过测量土壤导纳, 可得到不同冲击电压下土壤的电导率和介电常数。

1.1 土壤电参数频率特性测试平台

考虑接地装置雷电冲击响应受土壤电参数频率特性的影响, 根据雷电流的频谱特征, 选择测试频率范围为 10 Hz~1 MHz^[19]。

二极法和四极法在土壤电参数的低频测量中得到广泛应用。相比于二极法, 四极法可以有效减小小电极与土壤之间界面电压的影响^[20-21], 测量结果更为准确, 但涉及高频测试时, 需要注意以下两个

问题: (1) 为保障高频下的测试精度, 在实验设计中应尽可能地减小电压极与参考电位点之间的阻抗, 并采用输入电容较低的电压探头; (2) 尽量增大土壤样品的截面积, 减小测试样品的阻抗, 增大测试电流, 以提高测试的准确度。

基于四极法搭建土壤电参数频率特性的测试回路, 如图 1 所示。该平台采用的电流极板尺寸为 $35\text{ cm} \times 35\text{ cm}$, 电流极板间的距离为 12 cm , 在测试中可假设电场均匀分布, 忽略边缘效应^[22]。电压极采用宽度为 1 cm 的扁钢, 原则上扁钢的厚度越小越好, 但其厚度过小时容易被土壤压弯, 综合考虑上述因素, 取扁钢的厚度为 2 mm 。电压极之间的距离为 6 cm 。测试所用电压探头的输入电容为 4 pF , 以确保高频时的测量精度。利用 DG1032Z 信号发生器作为交流电源, 其输出幅值为 10 V , 输出频率高达 30 MHz 。在回路中串入 $100\ \Omega$ 无感采样电阻, 通过测量电阻电压得到回路的电流。

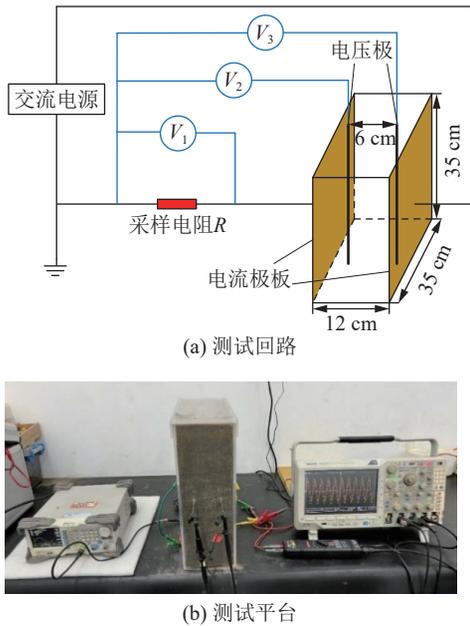


图 1 土壤电参数频率特性测试回路及测试平台

Fig.1 Soil electrical parameter frequency characteristic test circuit and test platform

通过测量采样电阻 R 两端的电压 V_1 以及两个电压极的对地电压 V_2 和 V_3 , 可得回路电流 $I=V_1/R$ 以及电压极之间的电压 $U=V_3-V_2$ 。

电压极之间土壤的导纳 Y 满足:

$$Y = A + jB = \frac{I}{U} = \frac{(\sigma + j\omega\epsilon_r)ES}{Ed} = \frac{(\sigma + j\omega\epsilon_r)S}{d} \quad (1)$$

式中: A 、 B 分别为土壤的电导、电纳, 基于测量得到的回路电流波形和电压极之间的电压波形计算获得; S 为电流极板的面积; d 为电压极之间的距离;

E 为土壤中的电场强度; σ 为土壤的等效电导率, 可基于式(2)求解得到; ω 为角频率; ϵ_r 为介电常数, 可基于式(3)求解得到。

$$\sigma = \frac{Ad}{S} \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \frac{Bd}{S\omega} \quad (3)$$

低频时, 由于 ω 的值较小, 其又在式(3)中分母位置, 介电常数的测量误差会被放大, 因此低频时介电常数测量结果的准确度较低。

1.2 典型土壤电参数频率特性测试

对现场取样的红土进行测试, 不同频率下的测试结果如图 2 所示。根据结果可知, 10 Hz 时的 Y 为 $1.256 + j0.026\text{ mS}$, 将其代入式(2), 可得低频电导率为 0.615 mS/m 。由于频率较低时 ω 的值较小, 介电常数的测量误差会被放大, 因此舍弃 $0 \sim 1.3\text{ kHz}$ 的结果。 1 MHz 时的 Y 为 $2.829 + j2.463\text{ mS}$, 将其代入式(2)和式(3), 可得此时的电导率为 1.39 mS/m , 介电常数实部为 21.68 。

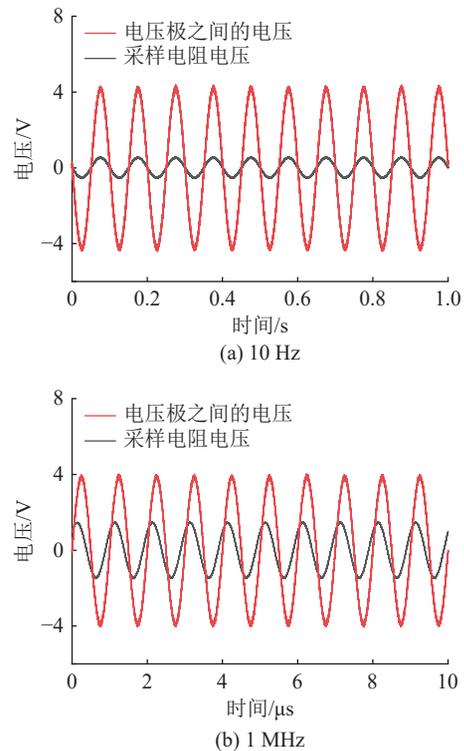


图 2 不同频率下的测试波形

Fig.2 Test waveforms at different frequencies

在 $10\text{ Hz} \sim 1\text{ MHz}$ 区间, 通过对数取样的方式选取 20 个频率测试点, 对初始电阻率 ρ_0 分别为 525 、 981 、 $1\ 625\ \Omega \cdot \text{m}$ 的土壤进行测试, 其电参数随频率的变化如图 3 所示。

根据测试结果可知, 介电常数随频率增大而降低, 电导率随频率增大而增大。

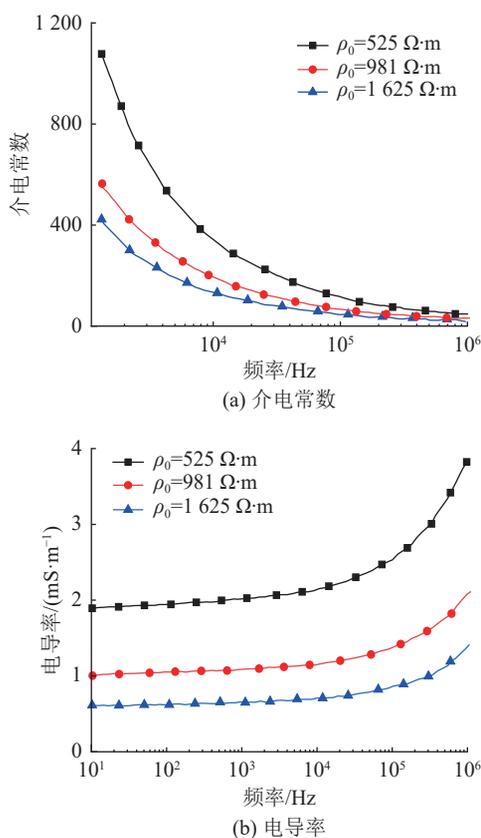


图3 土壤电参数的频率特性测试结果
Fig.3 The frequency characteristic test results of soil electrical parameters

2 土壤电参数频率特性测试结果的可信度检验

基于 1.1 节的测试平台得到不同频率下的土壤电参数。土壤电参数随频率的变化由土壤极化引起,基于土壤的极化机理,分析电参数在频域中的内在联系,对测试结果的可信度进行检验。

土壤在电场的作用下存在多种极化形式,根据极化时间的长短可将其分为位移极化 P_∞ 和松弛极化 P_r 两类^[23]。土壤的总极化强度为:

$$P(t) = P_\infty(t) + P_r(t) \quad (4)$$

其中,位移极化的时间极短,可忽略不计;而松弛极化的时间较长,在电场频率较高时,极化速度会跟不上电场的变化速度。

当对土壤施加和撤离恒定电场时,土壤的极化过程如图 4 所示。施加电场后,土壤的极化强度瞬间上升至 P_∞ ,随后缓慢上升至稳态 $P_\infty + P_m$,其中 P_m 为稳定后的松弛极化强度。撤离电场后,土壤的极化强度瞬间减小至 P_m ,随后缓慢减小至零。

设土壤的静态介电常数为 ϵ_s ,与位移极化对应的介电常数为 ϵ_∞ ,在 t_0 时刻施加幅值为 E_0 的阶跃电场,对应的电位移^[23-24]如下:

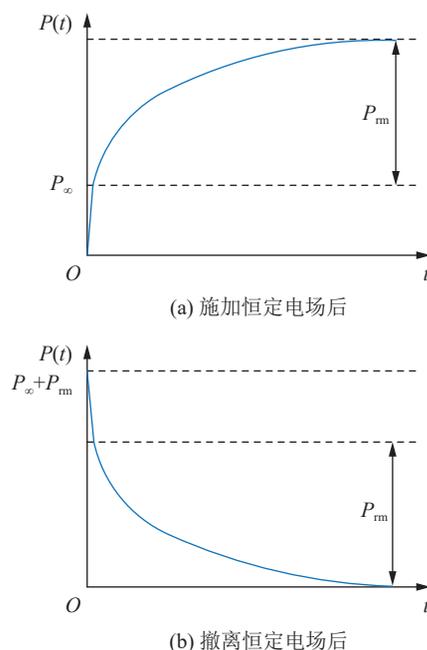


图4 施加和撤离恒定电场后土壤极化强度的变化过程
Fig.4 Variation of soil polarization intensity after applying and withdrawing constant electric field

$D(t) = \epsilon_\infty E_0 u(t - t_0) + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) E_0 \varphi(t - t_0)$ (5)
式中:等号右侧第一项为位移极化的作用,第二项为松弛极化的作用; $u(t)$ 为阶跃函数; $\varphi(t)$ 为松弛作用导致的滞后,随着时间 t 从 t_0 到 ∞ 变化, $\varphi(t)$ 从 0 增大到 1。

采用 Φ 表示 φ 的导数,在 $t = -\infty$ 时施加随时间连续的电场,引入变量 $u = t - t_0$,假设外电场为 $E(t) = E_0 \cos(\omega t)$ 的交变电场,则此时的电位移^[25]如下:

$$D(t) = \epsilon_\infty E_0 \cos(\omega t) + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) E_0 \int_0^\infty \cos(\omega t - \omega u) \Phi(u) du = \left[\epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \int_0^\infty \cos(\omega u) \Phi(u) du \right] E_0 \cos(\omega t) + \left[(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \int_0^\infty \sin(\omega u) \Phi(u) du \right] E_0 \sin(\omega t) \quad (6)$$

在交流电场的作用下,土壤的电位移与外加电场之间会存在相位差,介电常数实际上为复数^[14]:

$$D = \epsilon E = (\epsilon' - j\epsilon'') E \quad (7)$$

式中: ϵ' 、 ϵ'' 分别为复介电常数 ϵ 的实部和虚部; D 为电位移矢量; E 为电场强度矢量。通常提到的介电常数一般指实部 ϵ' , ϵ'' 反映极化过程的损耗。介电常数的实部与电场相位相同,而虚部与电场相位相差 $\pi/2$,结合式(6)可得:

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \int_0^\infty \cos(\omega u) \Phi(u) du \quad (8)$$

$$\epsilon''(\omega) = (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \int_0^\infty \sin(\omega u) \Phi(u) du \quad (9)$$

式中: $\epsilon'(\omega)$ 、 $\epsilon''(\omega)$ 分别为复介电常数的实部和虚部,是关于角频率 ω 的函数。由式(8)和式(9)可

知,复介电常数的实部和虚部均与 $\Phi(u)$ 有关,可将 $\Phi(u)$ 分别表示为 ε' 和 ε'' 的函数。对式(8)和式(9)进行傅里叶变换^[14],得到复介电常数实部和虚部在频域中的关系^[16]:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{t\varepsilon''(t)}{t^2 - \omega^2} dt \quad (10)$$

$$\varepsilon''(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon'(t) - \varepsilon_{\infty}}{t^2 - \omega^2} dt \quad (11)$$

式中: $\varepsilon'(t)$ 、 $\varepsilon''(t)$ 分别为 t 时刻复介电常数的实部和虚部。土壤电流包含传导电流和位移电流,考虑复介电常数的情况,土壤电流密度 \mathbf{J} ^[22]可以表示为:

$$\mathbf{J} = \sigma_0 \mathbf{E} + j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'')\mathbf{E} = (\sigma_0 + \omega\varepsilon'')\mathbf{E} + j\omega\varepsilon'\mathbf{E} = \sigma\mathbf{E} + j\omega\varepsilon'\mathbf{E} \quad (12)$$

式中: σ_0 为土壤的低频电导率。

不同角频率 ω 对应的 ε'' 为:

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma(\omega) - \sigma_0}{\omega} \quad (13)$$

式中: $\sigma(\omega)$ 为角频率 ω 对应的土壤电导率。

将式(13)代入式(10)和式(11),进一步得到土壤电导率与介电常数实部之间的频域关系,如式(14)和式(15)所示。

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma(t) - \sigma_0}{t^2 - \omega^2} dt \quad (14)$$

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 - \frac{2\omega^2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon'(t) - \varepsilon_{\infty}}{t^2 - \omega^2} dt \quad (15)$$

式中: $\sigma(t)$ 为 t 时刻的土壤电导率。

由式(14)、式(15)可知,根据电导率的频率特性计算可得到介电常数实部的频率特性。同理,基于介电常数实部的频率特性计算也可得到电导率的频率特性,利用以上特性可对测试结果的准确性进行验证。介电常数在低频时的测量误差较大,这将给电导率的计算带来误差。因此,选择基于土壤电导率的测试结果,利用式(14)计算土壤介电常数的实部,并与测量值进行对比,验证测试结果的准确性。

将上述验证方法应用于前文的测试结果,1.2节中测试得到的电导率结果为介电常数虚部作用后的等效电导率,介电常数结果为介电常数的实部。介电常数实部计算值与测试结果的对比如图5所示,可知两者的偏差较小,说明测试结果准确可靠。其中计算值和测量值在低频时略有差异,这是因为低频测量误差大。

由图5可知,基于电导率的频率特性计算介电常数实部的频率特性,并将其与介电常数实部频率特性的测试结果对比,可有效检验测试结果的可信度。

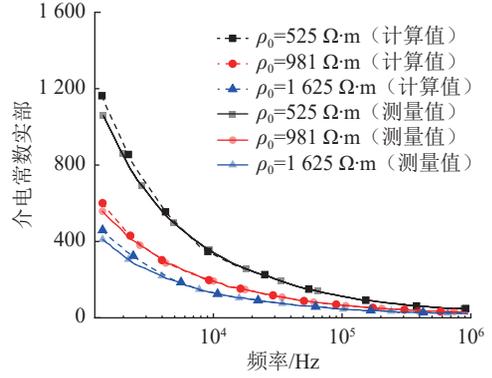


图5 测试结果的可信度验证

Fig.5 Reliability verification of test results

3 土壤电参数的交流频率特性在冲击响应计算中的有效性

1.2节中土壤电参数频率特性是在交流条件下测得,将其应用于冲击电流还有待验证。

冲击电流波形可视为 $[0, T]$ 区间的周期函数,利用式(16)的傅里叶级数进行模拟,将测量得到的电流波形转换为不同频率正弦电流的线性叠加^[25],分别计算土壤在这些正弦电流下的电压响应,将其线性叠加后即可得到土壤的冲击电压。

$$\begin{cases} i(t) = \sum_{k=-N}^N I_k e^{j\omega_0 k t} \\ I_k = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) e^{-j\omega_0 k t} dt \end{cases} \quad (16)$$

式中: $i(t)$ 为 t 时刻流过土壤的电流; I_k 为 k 倍基频对应的傅里叶级数的系数; N 为采样点个数; ω_0 为基波的角速度,其值取决于周期 T , $\omega_0 = 2\pi/T$ 。 N 和 T 共同决定级数的频率上限。以 $8/20 \mu\text{s}$ 的1 A波形为例,不同 N 和 T 值下的模拟波形与原始波形的偏差见表1。

表1 不同 N 和 T 值下的模拟波形与原始波形的偏差
Table 1 Deviation of the simulated waveforms from the original waveforms at different N and T values

$T/\mu\text{s}$	N	幅值偏差/%	零点偏差/A
100	10	2.92	0.07
100	20	0.05	0.01
100	40	0.01	<0.01
200	10	3.42	0.22
200	20	3.00	0.07
200	40	0.12	0.01
400	10	26.20	0.38
400	20	4.01	0.23
400	40	3.03	0.07
400	400	<0.01	<0.01

根据结果可知,当 N 和 T 的值同时较大时,拟

合效果最好。为保障拟合效果,应在计算效率合理的情况下,尽量取较大的 N 值和 T 值。以 N 取 400、 T 取 400 μs 为例,拟合波形与原始波形的对比如图 6 所示。

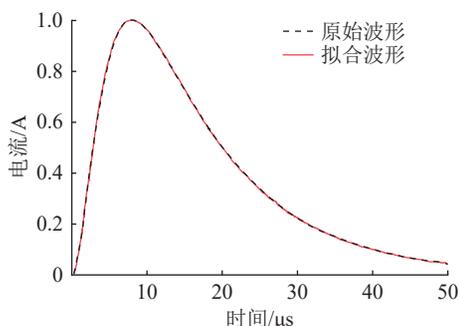


图 6 基于傅里叶级数的冲击电流波形
Fig.6 Impulse current waveforms based on Fourier series

基于 2.2 节对土壤极化过程的推导结果,通过傅里叶级数将冲击电流下的土壤极化转换为多个正弦电流极化的叠加。然而,由于冲击电流的持续时间短,部分正弦电流尚未完成一个完整周期,因此需要明确此时土壤极化程度与交流稳态时的极化程度是否存在显著差异。低频电流的极化对土壤电参数的改变不明显,即使极化但未达到稳态时影响也较小。而高频电流的周期短,在冲击电流持续时间内已完成多个周期且达到稳态。因此选取中频的 10 kHz 电流,对应周期为 100 μs 。以冲击电流波尾时间 50 μs 为例,在波尾时间之前 10 kHz 电流未完成一个周期。

选取红土作为测试对象,以在土壤上施加交流的瞬间为触发点,记录土壤的测量波形;在施加激励 1 min 后,再次记录土壤的测量波形,将二者波形进行对比,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,施加激励瞬间的测试波形和施加激励 1 min 后的测试波形无明显差异,说明极化建立的时间较短,可以忽略。因此,利用多个正弦电流极化的线性叠加来等效冲击电流的极化可行。

为考虑冲击过程中土壤电参数的频率特性,在计算土壤不同频率的电压响应时,可带入对应频率的电参数。以均匀电场下两点之间的电压为例,式(17)即为考虑土壤电参数频率特性后的冲击电压。

$$U(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_n e^{j\omega_n t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n e^{j\omega_n t} h = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{I_n e^{j\omega_n t}}{S(\sigma(\omega) + j\omega\epsilon'(\omega))} h \quad (17)$$

式中: U_n 为 n 次谐波的电压幅值; E_n 为 n 次谐波的电场强度幅值; h 为两点之间的距离。若将电导率

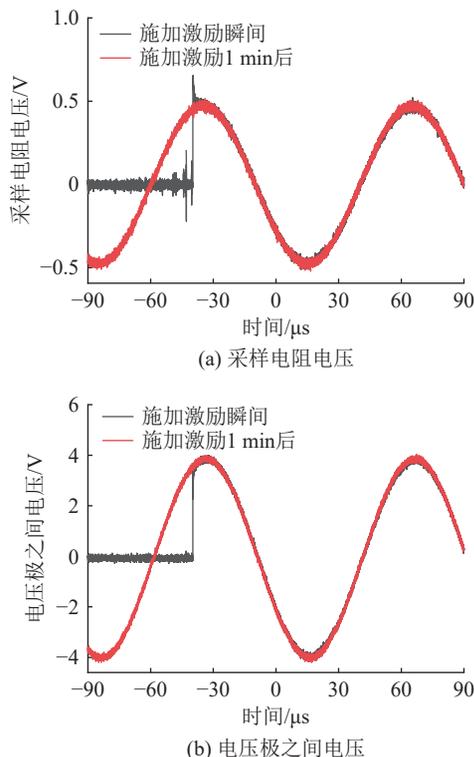


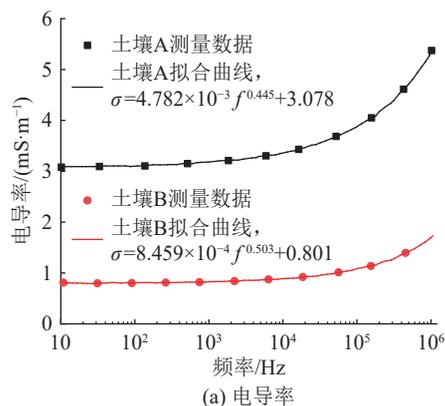
图 7 施加激励瞬间和 1 min 后的测试波形

Fig.7 The test waveforms at the instant of excitation application and after 1 min

和介电常数设置为工频参数,不随频率变化,即可得到不考虑土壤电参数频率特性的冲击电压。

选取初始电阻率分别为 325 $\Omega\cdot\text{m}$ 和 1 275 $\Omega\cdot\text{m}$ 的土壤 A 和土壤 B,其电参数频率特性如图 8 所示。

将测试回路中的 DG1032Z 信号发生器替换为浪涌保护器(surge protective device, SPD)测试仪,对土壤 A 和土壤 B 施加冲击电流,测量冲击条件下电压极之间的电压以及回路的电流。利用式(16)将测量的冲击电流转换为傅里叶级数,将图 8 中的土壤参数代入式(17)可以得到土壤的冲击电压。冲击电压测量波形与计算波形的对比如图 9 所示。考虑土壤电参数频率特性之后,土壤 A 和土壤 B 的计算电压波形均与其测量电压波形具有较好的一致性。相比于土壤电参数恒定的情况,考虑电参数



(a) 电导率

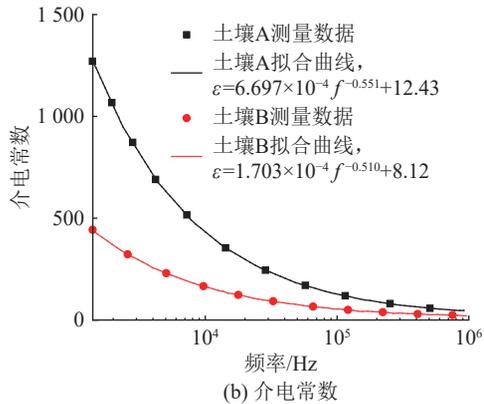
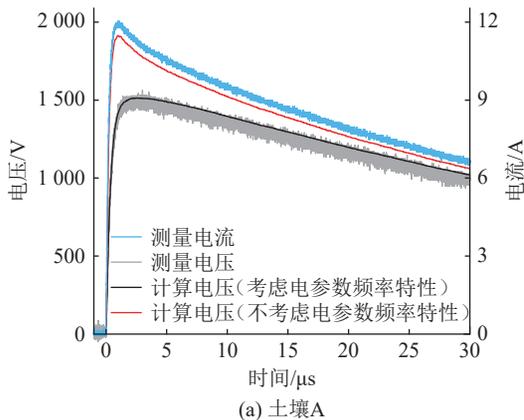


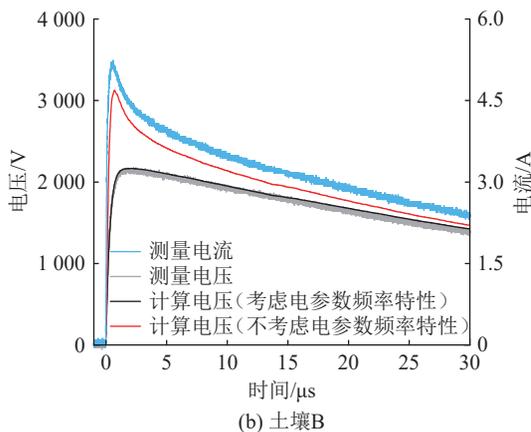
图8 土壤A和土壤B的电参数频率特性

Fig.8 Frequency characteristics of electrical parameters of soil A and soil B

频率特性后,土壤A和土壤B的电压峰值分别下降了21%和33%。



(a) 土壤A



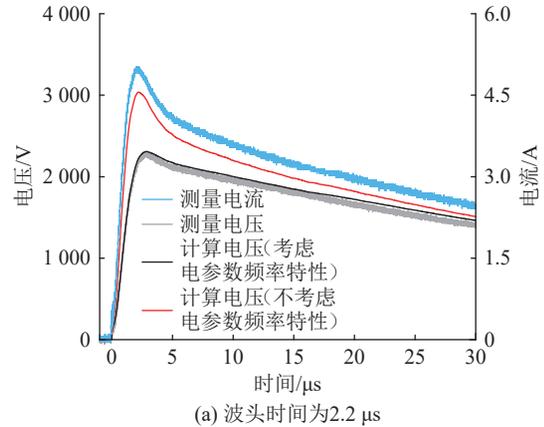
(b) 土壤B

图9 土壤冲击响应的测量与计算

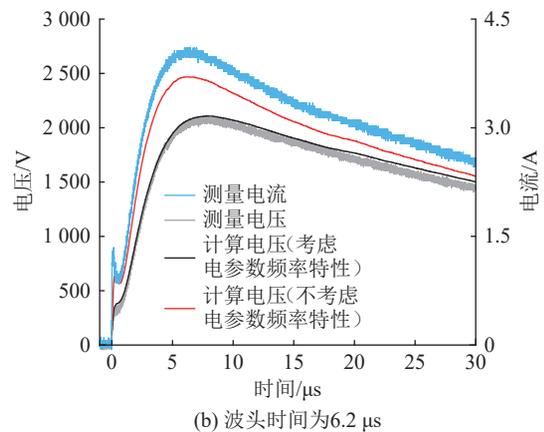
Fig.9 Measurement and calculation of soil impulse response

针对土壤B开展冲击实验,在实验回路中串入电感调整冲击电流的波形,波头时间分别为2.2 μs和6.2 μs,如图10所示。两种电流波形下,计算电压波形均与测量电压波形具有较好的一致性。相比于土壤电参数恒定的情况,考虑电参数频率特性后,两种电流波形下的电压峰值分别下降了26%

和17%,电流上升时间越短,其高频分量占比越高,频率效应对电压峰值的降低作用更明显。



(a) 波头时间为2.2 μs



(b) 波头时间为6.2 μs

图10 不同电流波形下冲击响应的测量与计算对比

Fig.10 Comparison of measurement and calculation of impulse response under different current waveforms

在不同电阻率的土壤和冲击电流波形下,基于土壤电参数交流频率特性计算得到的冲击电压波形均与测量结果具有较好的一致性,说明土壤电参数的交流频率特性可用于冲击条件的计算。

4 结论

文中建立土壤电参数频率特性的四极法测试平台,提出基于电导率和介电常数频域关系的测试结果可信度检验方法,从而验证了土壤电参数交流频率特性在冲击响应计算中的有效性,同时研究冲击响应下土壤电参数的频率特性。主要结论如下:

(1) 利用电导率与介电常数实部之间的频域关系,可根据电导率的频率特性计算得到介电常数实部的频率特性,通过介电常数实部计算值和实测值的对比,实现测试结果准确度的验证。

(2) 利用傅里叶级数将冲击电流等效为不同频率正弦电流的线性叠加,求解相应频率的交流稳态电压响应后,通过线性叠加得到的冲击电压计算波形与冲击暂态测试波形具有良好的一致性,表明交

流条件下测得的土壤电参数频率特性可直接应用于土壤在冲击电流下的响应计算。

(3) 文中研究结果可为土壤电参数频率特性与土壤冲击电离的关联影响研究提供参考。后续研究可根据文中结果,逐步增大测试所用的冲击电流,对测试结果进行傅里叶分解,得到土壤在不同冲击电流下的频率特性,综合考虑土壤电离和频率特性的影响。

参考文献:

[1] 刘石玉,周力行,邓勇.连续雷电冲击下土壤恢复特性分析及仿真研究[J].电瓷避雷器,2023(1):92-98.
LIU Shiyu, ZHOU Lixing, DENG Yong. Analysis and simulation of soil recovery characteristics under continuous lightning strike[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1): 92-98.

[2] 鲁海亮,冯志强,文习山,等.考虑土壤火花放电的接地装置暂态特性全时域电网模型[J].中国电机工程学报,2017,37(23):7058-7065,7098.
LU Hailiang, FENG Zhiqiang, WEN Xishan, et al. Full-time electrical network model of the transient characteristics of the grounding devices considering soil sparkover[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 7058-7065,7098.

[3] 李景丽,时永凯,朱子卓,等.考虑土壤火花击穿特性的针刺式接地装置降阻研究[J].电瓷避雷器,2023(1):11-20.
LI Jingli, SHI Yongkai, ZHU Zizhuo, et al. Resistance reduction of needle-punched grounding device considering soil spark breakdown characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1): 11-20.

[4] 刘宇彬,雷川丽,唐利松,等.连续雷电冲击下典型杆塔接地装置冲击接地电阻分析[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):243-248.
LIU Yubin, LEI Chuanli, TANG Lisong, et al. Impulse grounding resistance analysis of typical tower grounding device under continuous lightning impulse[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 243-248.

[5] 康吉义,曾中伟.考虑土壤非线性的输电线路暂态过电压特性研究[J].电瓷避雷器,2024(3):16-23.
KANG Jiyi, ZENG Zhongwei. Transient overvoltage characteristics of transmission lines considering soil non-linearity[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 16-23.

[6] 张亚.冲击接地电阻降阻试验研究[J].电工技术,2022(6):159-160,165.
ZHANG Ya. Experimental study on impulse grounding resistance reduction[J]. Electric Engineering, 2022(6): 159-160,165.

[7] VISACRO S, ALIPIO R. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 927-935.

[8] 李景丽.接地网频域性能及杆塔接地极冲击特性的数值分析及试验研究[D].重庆:重庆大学,2011.

LI Jingli. Study on numerical analysis and simulation experiment of frequency characteristics of grounding grid and impulse characteristic of grounding electrode of tower[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

[9] 唐力,严泽鑫,黄家豪,等.考虑土壤时变性与频变性的接地体冲击特性研究[J].电瓷避雷器,2024(4):106-113,121.
TANG Li, YAN Zexin, HUANG Jiahao, et al. Impact characteristics of grounding device considering soil time-dependent and frequency-dependent electrical parameters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(4): 106-113,121.

[10] 朱子茵,杨鑫,焦艺哲,等.多层土壤结构下垂直接地装置在输电杆塔接地中的应用方法[J].电瓷避雷器,2024(6):111-120.
ZHU Ziyin, YANG Xin, JIAO Yizhe, et al. Application method of vertical grounding device in grounding of transmission tower under multilayer soil structure[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(6): 111-120.

[11] 曹晓斌,高竹青,马御棠,等.雷击下500kV杆塔接地装置的散流有效性[J].高电压技术,2017,43(5):1596-1601.
CAO Xiaobin, GAO Zhuqing, MA Yutang, et al. Current divergence validity of 500 kV tower grounding device under lightning stroke[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1596-1601.

[12] 魏铭.输电线路杆塔接地装置频域分析方法及其冲击特性研究[D].成都:西南交通大学,2021.
WEI Ming. Research on frequency domain analysis method and impulse characteristics of tower grounding device of transmission line. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[13] 苗浩铭,申巍,曹雯,等.连续冲击作用下不同土壤地区接地装置的散流特性研究[J].电网与清洁能源,2022,38(11):71-79,87.
MIAO Haoming, SHEN Wei, CAO Wen, et al. A study on dispersion characteristics of grounding devices in different soil areas under continuous impact[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 71-79,87.

[14] VISACRO S, ROSADO G. Response of grounding electrodes to impulsive currents: an experimental evaluation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(1): 161-164.

[15] 朱彬.土壤电参数变化特性及其对接地装置性能的影响研究[D].重庆:重庆大学,2015.
ZHU Bin. Study on the variation characteristics of soil electrical parameters and the influence on grounding device's performance[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[16] 张宝平.冻土雷电冲击击穿特性及击穿机理研究[D].北京:清华大学,2010.
Zhang Baoping. Research on the lightning impulse breakdown characteristics and mechanisms of frozen soil[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

[17] 贺鹏威.土壤电参数频变性对接地装置冲击特性的影响分析[D].郑州:郑州大学,2018.

- HE Pengwei. Analysis of impuls characteristics of soil electrical parameters frequency denaturation docking device. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [18] ALIPIO R, VISACRO S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(5): 1163-1171.
- [19] 陈绍东, 王孝波, 李斌, 等. 标准雷电波形的频谱分析及其应用[J]. *气象*, 2006, 32(10): 11-19.
CHEN Shaodong, WANG Xiaobo, LI Bin, et al. Frequency spectrum of standard lightning currents and its application[J]. *Meteorological*, 2006, 32(10): 11-19.
- [20] GARROUCH A A, SHARMA M M. The influence of clay content, salinity, stress, and wettability on the dielectric properties of brine-saturated rocks; 10 Hz to 10 MHz[J]. 1994, 59(6): 909-917.
- [21] 刘刚, 汤亮亮, 徐霞, 等. 特高压直流接地极土壤电阻率测量方法研究[J]. *电瓷避雷器*, 2023(4): 77-83.
LIU Gang, TANG Liangliang, XU Xia, et al. Soil resistivity measurement method of UHV DC grounding electrode[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2023(4): 77-83.
- [22] MANJUNATH A D B, KHAN F, NOYANBAYEV N, et al. Investigation into variation of resistivity and permittivity of aqueous solutions and soils with frequency and current density[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(2): 443-455.
- [23] 孙目珍. 电介质物理基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2000.
SUN Muzhen. *Fundamentals of dielectric physics*[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2000.
- [24] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
FENG Cizhang, MA Xikui. *An introduction to engineering electromagnetic fields*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [25] 顾樵. 数学物理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
GU Qiao. *Mathematical methods for physics*[M]. Beijing: Science Press, 2012.

作者简介:



王琪瑞

王琪瑞(2004), 男, 本科在读, 研究方向为电气工程及其自动化(E-mail: ydzgff809765@163.com);

李纯(1994), 男, 博士, 工程师, 从事电气工程、高电压与绝缘技术工作;

王丰润(2001), 男, 博士在读, 研究方向为电磁兼容和电力系统接地技术。

Validation of frequency-varying characteristics of soil electrical parameters and their applicability in impulse response

WANG Qirui¹, LI Chun², WANG Fengrun³, ZHENG Zhihui³, WU Tian¹, LU Hailiang³

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. China Southern Power Grid Co., Ltd. Ultra High Voltage Transmission Company Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: There is a great difference between the transient response characteristics and the power frequency response characteristics of the grounding device under lightning strike. Its grounding impedance decreases under the action of soil impulse characteristics. In this paper, a test platform for the frequency characteristics of soil electrical parameters is built, and the frequency characteristics of soil electrical parameters are tested based on the quadrupole method. The real part of the relative dielectric constant of the soil and the change rule of conductivity are obtained. Meanwhile, the accuracy of the test results is verified in this paper by using the frequency domain relationship between the conductivity and the real part of the dielectric constant. Combined with the AC steady state response and impulse transient response tests of the soil, the calculated voltage waveforms are in good agreement with the measured voltage waveforms. It also verifies the validity of the AC frequency characteristics of the soil's electrical parameters in the calculation of the impulse response. The results of the impact response tests and calculations of the sample soils show that the consideration of the frequency characteristics of the soil electrical parameters is crucial to the accuracy of the impact response calculation, which provides a reference for the calculation of the impact grounding impedance of the conductor.

Keywords: soil electrical parameters; frequency characteristics; complex permittivity; soil polarization; impulse transient response; AC steady state response

(编辑 陆海霞)