

交直流杂散电流对土壤电阻率影响的研究进展

卫 宪¹, 吴广春², 杨岭¹, 胡宇峰¹, 朱 艳¹, 曹宏远³

(1. 中国石油大港油田分公司赵东采油管理区, 天津 300280;

2. 安科工程技术研究院(北京)有限公司, 北京 102200; 3. 天津北海油人力资源咨询服务有限公司, 天津 300453)

摘 要: 聚焦交流和直流杂散电流对土壤电阻率的影响, 介绍了近年来国内外在该领域的试验探索与认知, 总结了土壤导电理论模型的认知历程, 并系统阐述了直流和交流杂散电流对土壤电阻率的影响机制, 总结分析了土壤电阻率在交直流电流作用下的非线性变化特性, 介绍了土壤电阻率温度修正模型的最近研究进展, 展望了该领域的发展趋势。

关键词: 土壤电阻率; 直流电流; 交流电流; 导电模型; 影响; 温度修正

中图分类号: TE88

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)01-0058-09

土壤电阻率是埋地油气管道杂散电流干扰和阴极保护研究的重要参数, 直接影响了埋地管道杂散电流干扰程度和阴极保护效果, 也是划分土壤腐蚀性的关键指标之一, 一般情况下土壤电阻率越低, 土壤腐蚀性越强^[1-2]。目前, 埋地管道杂散电流干扰研究往往会将土壤电阻率作为恒定值进行处理, 忽略了交流和直流杂散电流对其产生的影响。实际上, 土壤在遭受直流、交流、冲击等不同的激励作用时, 由于土壤直流极化、激发极化、电离等原因, 土壤电阻率在不同的激励类型和强度下存在一定的差异^[3-7], 如: 国内某±800 kV 特高压直流输电线路单极运行条件下最大入地电流可达 7 530 A, 其圆环型接地极上的最大溢流密度约为 0.44 A/m²^[8], 而另一条采用直线型接地极的±800 kV 特高压直流线路, 当入地电流为 1 200 A 时, 由于端部效应其接地极上最大溢流密度高达 80 A/m²^[9], 在两种直流电流密度下, 土壤带电胶粒和孔隙溶液中电解质的离子电迁移率、电离程度等均有所不同, 最终导致土壤电阻率存在差异; 雷电流击中输电线路杆塔, 经杆塔接地系统泄放时, 电流幅值高达 100 kA, 冲击时间在微秒级别, 振幅频谱为 0~几 MHz, 与特高压直流系统单极运行时的入地电流相比, 雷电流的暂态、高幅值和宽频特性又会通过不同的机制影响土壤电阻率^[10-11]。研究交流和直流电流对土壤电阻率的影响机制和规律有利于更准确评价埋地管道的杂散电流干扰风险和阴极保护系统有效性。笔者系

统介绍了交流和直流电流对土壤电阻率的影响机制, 阐述了土壤电阻率在交直流电流作用下的变化规律, 以期为业内同行提供借鉴和参考。

1 土壤导电模型

目前, 人们广泛接受的土壤导电模型是 RHOADES 等^[12]在 1993 年提出的三元导电模型。在非饱和黏性土壤中, 存在三种导电途径, 如图 1 所示, 第一种是通过表面直接接触的固相颗粒导电; 第二种是孔隙水液相导电途径, 通过孔隙水溶液中离子在外电场作用下的定向移动实现导电; 第三种是固液相串联形成的导电路径, 土壤中含有带电的胶体微粒, 胶粒微粒由胶核、吸附层和扩散层等三部分组成, 胶核表面吸附一层离子, 称为内吸附层, 同时还吸附有部分相反电荷等离子, 称为外吸附层, 由于内吸附层的离子数目多于外吸附层, 所以土壤胶粒是带电粒子, 由于扩散层中离子的活性大于外吸附层中离子的, 因此其极易与土壤溶液中的离子进行交换, 通过固/液界面交换性离子实现导电。

早在 1942 年, ARCHIE 等^[14]在第一种导电途

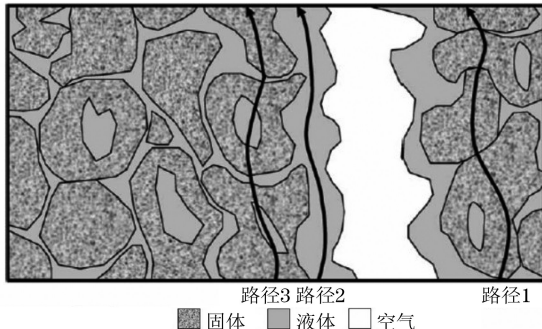


图 1 非饱和黏性土中电流流通途径示意^[13-14]

Fig. 1 Current flow pathways in unsaturated clay^[13-14]

收稿日期: 2021-12-05

通信作者: 吴广春(1986—), 硕士, 工程师, 从事腐蚀与防护相关工作, 13686425900, 584846686@qq.com

径的基础上首先提出了适用于饱和和无黏性土或纯净沙岩的电阻率模型,如式(1)所示,在饱和和无黏性土或纯净沙岩条件下,第一种和第三种导电路径可以忽略,由于其未考虑土壤胶体的导电性,此模型不适用于含黏土矿物的土壤和非饱和土壤。在 ARCHIE 研究的基础上,KELLER 等^[15]提出了适用于非饱和和无黏性土的电阻率模型,如式(2)所示。其中,定义 $F = an^{-m}$ 为土壤的结构因子,其物理含义为土壤电阻率与孔隙水电阻率的比值,反映土壤的结构组成、孔隙情况等信息,与土壤的颗粒形状、长轴方向、孔隙比、胶结指数和饱和度等参数有关^[16]。

$$\rho = a\rho_w n^{-m} \quad (1)$$

$$\rho = a\rho_w n^{-m} S_r^{-p} \quad (2)$$

式中: ρ 为实测土壤电阻率, $\Omega \cdot m$; ρ_w 为孔隙水电阻率, $\Omega \cdot m$; a 为土性参数,无量纲; m 为胶结系数,无量纲; n 为孔隙率,%; S_r 为饱和度,%; p 为饱和度系数,无量纲。

WAXMAN 等^[17]在第一种和第二种导电途径的基础上,考虑了土壤颗粒表面的导电影响,假设土壤导电路径由孔隙水液相导电和固体颗粒导电路径并联而成,其等效电路如图 2 所示,其中, R_w 表示孔隙水液相导电路径电阻, R_s 表示固体颗粒导电路径电阻。提出了适用于非饱和黏性土的电阻率模型,如式(3)所示。其中,采用表观结构因子 F_a 替代了 ARCHIE 模型中定义的结构因子 F ,两者的函数关系如式(4)所示。

$$\rho = \frac{a\rho_w n^{-m} S_r^{1-p}}{S_r + \rho_w BQ} \quad (3)$$

$$F_a = F(1 + BQ\rho_w)^{-1} \quad (4)$$

式中: B 为双电层中与土壤颗粒表面电性相反电荷的电导率, S/m ; Q 为单位土壤孔隙中阳离子交换容量,无量纲; F 为土壤结构因子,无量纲; F_a 为表观土壤结构因子,无量纲;其他参数同式(1)和(2)。

由于 ARCHIE 和 WAXMAN 模型均未考虑第

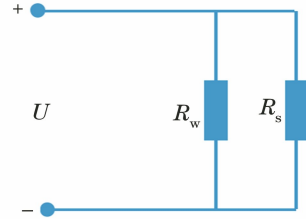


图 2 WAXMAN 土壤导电模型等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of WAXMAN soil conductance model

三种土壤导电途径,存在一定的理论局限性和不合理性。MITCHELL 三元导电理论的等效电路模型如图 3 所示,其中, R_w 表示孔隙水液相导电路径电阻, R_s 表示固体颗粒导电路径电阻, R'_w 为第二种导电途径上液相总电阻, R'_s 为第二种导电途径上固相总电阻, $R_{d1} \sim R_{dn}$ 是土壤结构不均匀性导致的 n 层电介质等效电阻, $C_{d1} \sim C_{dn}$ 是 n 层电介质等效电容^[18-19]。在此模型的基础上,聂向晖等^[20]提出了如式(5)所示土壤电阻率模型,土壤导电主要是孔隙水液相和固/液界面上交换性离子导电,在高含水条件下,土壤主要通过孔隙水液相导电,固/液界面上交换性离子导电可以忽略不计。查莆生等^[21]在 MITCHELL 三元导电模型的基础上推导出非饱和黏性土的电阻率结构模型公式,如式(6)所示,通过该模型结合相关的试验研究结果,探讨了合肥膨胀土的基本特征。

$$R = \frac{1}{Y} = [Y_w + Y_s + \sum_{i=1}^n Y_i]^{-1} \quad (5)$$

式中: R 为单位体积土壤的电阻, Ω ; Y 为单位体积土壤的电导, S ; Y_w 为孔隙水液相导电路径电导, S ; Y_s 为固体颗粒导电路径电导, S ; Y_i 为 i 层电介质等效电导, S 。

$$\rho = \left\{ \frac{nS_r - F[\theta/(1+\theta)]}{\theta} BQ + \frac{nS_r - F[\theta/(1+\theta)]}{\rho_w} + \frac{F(1+\theta)BQ}{1 + BQ\rho_w\theta} \right\}^{-1} \quad (6)$$

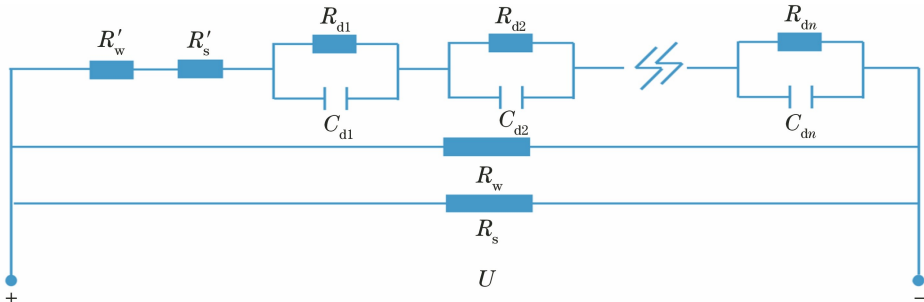


图 3 MITCHELL 土壤导电模型等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of MITCHELL soil conductance model

式中: F 为土壤结构因子, 无量纲; θ 为固液并联部分的水-土体积比, 无量纲; 其他参数同式(1)、(2)和(3)。

由式(1)~(6)可知, 土壤电阻率的影响因素包括饱和度、孔隙水离子浓度、离子电迁移率、温度、土壤类型、颗粒形状与排列方向、渗透性和黏性等^[22]。在不同激励电流条件下, 孔隙水离子浓度、离子电迁移率、温度、饱和度等参数都存在差异, 电阻率也随之受到不同程度的影响。值得注意的是, 由于土壤不均匀性, 土壤中存在多层电介质, 土壤在直流电作用下存在显著的极化和吸收现象^[23], 众所周知, 采用 Wenner 四电极法测量土壤电阻率时, 不宜采用直流电源以避免电极极化导致的测量误差, 实际上除了电极极化, 土壤自身的极化现象也不容忽视, 这主要是土壤中多层电介质的夹层极化^[24-25]。假定土壤中含有两层电介质, 其等效电路如图 4 所示, 当开关 S 闭合瞬间($t \rightarrow 0$), 电压从 0 迅速上升至 U , 电阻支路相当于开路, 此时两层电介质上的电压与电容成反比, 见式(7):

$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow 0} = \frac{C_{d2}}{C_{d1}} \quad (7)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 即电路完全稳定时, 电容支路相当于开路, 此时两层电介质上的电压与电阻成反比, 见式(8):

$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow \infty} = \frac{R_{d2}}{R_{d1}} \quad (8)$$

对于均匀的单一电介质土壤, $R_{d2}/R_{d1} = C_{d2}/C_{d1}$, 即对于均匀土壤, 施加外电压后不存在电荷重新分配的过程。但对于实际土壤来说, 一般情况下式(7) $\neq$ 式(8), 假设 $C_{d1} > C_{d2}$, $R_{d1} > R_{d2}$, 则 $t \rightarrow 0$ 时, $U_1 < U_2$; 而 $t \rightarrow \infty$ 时, $U_1 > U_2$, 随着 t 的增加, U_1 逐渐增大, 而 U_2 逐渐减小, C_{d2} 在开关闭合瞬间获得的部分电荷通过 R_{d2} 释放, 而 C_{d1} 则通过 R_{d2} 从电源再吸收一部分电荷, 称为吸收电荷, 两层电介质间在外电场的作用下存在一个电荷重新分配的过程, 此过程进程相对缓慢, 土壤均匀性越差, 电荷重新分配所需的时间就越长, 可达几十分钟^[26], 吸收电荷也越多, 以上现象即为多层电介质的夹层极化现象。因此, 在直流电压作用下, 土壤中的电流 $i = i_a + i_g$, 其中 i_a 为吸收电流, i_g 为不随时间变化的稳定电流, 可通过式(9)~(11)计算^[26], 对应的电流和电阻率变化曲线如图 5 所示。

$$i_g = \frac{U}{R_{d1} + R_{d2}} \quad (9)$$

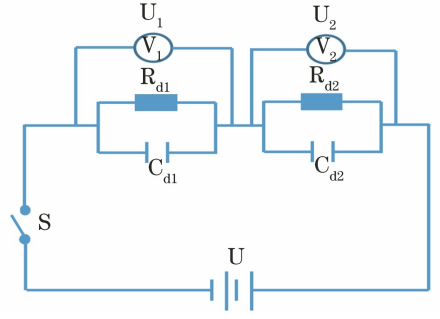


图 4 土壤双层电介质极化等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of double-layer dielectric polarization

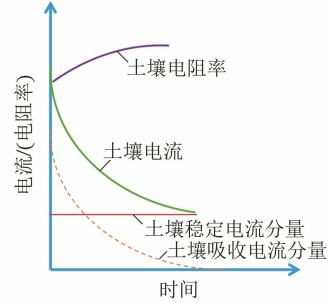


图 5 直流电压作用下土壤电流和电阻率变化趋势

Fig. 5 Change trend of soil current and resistivity under DC voltage

$$i_a = \frac{U(R_{d2}C_{d2} - R_{d1}C_{d1})^2}{(C_{d1} + C_{d2})^2(R_{d2} + R_{d1})R_{d1}R_{d2}} e^{-t/\tau} \quad (10)$$

$$\tau = (C_{d1} + C_{d2}) \frac{R_{d1}R_{d2}}{(R_{d1} + R_{d2})} \quad (11)$$

式中: τ 电介质夹层极化时间常数, 无量纲。

2 直流电流的影响

从土壤电阻率测试的角度阐述直流电流对土壤电阻率的影响过程, 测量电路如图 6 所示, 土壤箱两侧面为平板电极, 通过金属螺栓引出测试端子, 分别在土壤箱 1/3 和 2/3 长度处设置两个可自由抽动的黄铜探针, 用以测试 1/3 土壤箱长度范围内的土壤压降, 采用直流电源供电, 利用 WENNER 四电极法测量土壤电阻率。为了便于理解, 将土壤箱中的土壤分为电极区和非电极区。电极区的电极反应使得该区域孔隙溶液的离子浓度增大, 通过电迁移和扩散作用向非电极区移动; 非电极区内, 孔隙溶液离子在外电场的作用下定向移动至电极区; 土壤胶粒则在外电场作用下发生夹层极化效应。

在此过程中, 逐渐增大直流电流, 延长作用时间, 土壤电阻率会呈现不同的变化趋势。

(1) 当直流电流(I)很小时, 离子从非电极区定向(电)迁移至电极区的速度与从电极区迁移和扩散

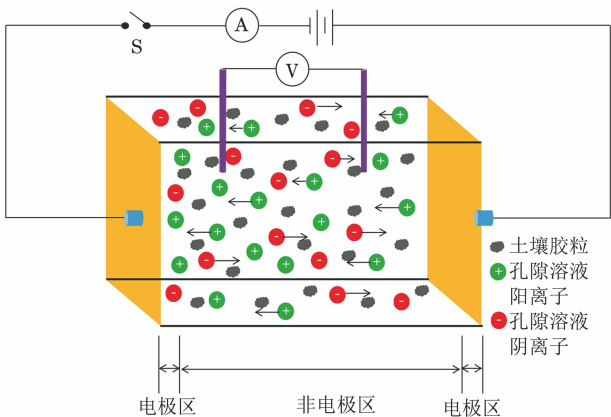


图 6 土壤电阻率测量电路

Fig. 6 Circuit of soil resistivity measurement

至非电极区的速度相当,土壤胶粒双电层的极化效应也较弱,土壤电阻率基本保持不变。曹晓斌等^[27]证实了该阶段的存在。郑智慧等^[28]也得到了类似的研究结果。其分别测试了含水率 10.4%、26.3% 和 35.6% 的红壤试样的电阻率与直流电流密度的变化曲线,结果表明,三种试样的电阻率分别在 0~2 A/m²、0~5 A/m² 和 0~8 A/m² 直流电流密度区间内保持稳定,且电流密度区间随含水率增加而变宽。

(2) 增大直流电流,延长作用时间,当非电极区离子电迁移的速度大于电极区离子电迁移和扩散的速度时,非电极区内离子含量降低;张润霞等^[29]研究了松砂土在直流电场力作用下的离子分化迁移与分布规律。在距离极 1 cm 处,10,20,40,60 V 外加直流电压分别作用后的 Cl⁻ 含量较未通电处理条件的相比分别增加了 4、3、2.6 和 2.5 倍。而距离阳极 2 cm 处 Cl⁻ 含量显著降低,在距阴极 1 cm 处,Na⁺ 质量分数分别增加了 73%、60%、87% 和 47%。在外加电场力的作用下电极附近存在明显的离子富集,且 Cl⁻ 和 Na⁺ 的迁移存在明显的差异,Cl⁻ 迁移较快而 Na⁺ 则相对较慢,这主要是因为 Na⁺ 带正电荷,与土壤胶粒有相互吸附作用,阻碍了迁移^[30];除了土壤,在混凝土结构中也同样存在外电场导致的离子富集现象,LINGVAY 等^[31]研究表明,外加电场会导致混凝土中的 Ca、Mg、Al 等离子含量大幅度降低,引起水泥水化产物的分解;RASHEEDUZZAFAR 等^[32]研究发现 Na⁺ 和 K⁺ 在钢筋表面富集,导致了钢筋与混凝土的结合强度降低。同时,土壤胶粒在直流电作用下的极化效应显著增大,离子电迁移和土壤极化的综合作用使得电阻率增大,张润霞等^[29]结果表明:分别采用 10,

20,40,60 V 直流电压作用约 10 h 后,电阻率急剧递增且电压越高,增幅越大;周蜜等^[26]对装有含水率 15.05% 黏土样品的土壤盒两端电极施加 50 V 恒定电压 15 min 后,土壤电阻率从 69 Ω·m 递增至 72 Ω·m;曹晓斌等^[28]的研究表明,当外加直流电流密度从 14 A/m² 增大至 20 A/m² 时,砂土的电阻率从 150 Ω·m 增大至 400 Ω·m;郑智慧等^[29]也得到了同样规律的试验结果,当外加直流电流密度从 5 A/m² 增大至 40 A/m² 时,土壤电阻率从 53 Ω·m 显著增大至 120 Ω·m。

(3) 进一步增大直流电流,土壤内部的电场强度也随之升高,当电场强度大于土壤电离强度时,土壤胶粒和孔隙水中电解质发生电离,带电粒子增多,离子电迁移率增大,土壤电阻率降低^[33]。同时,在高直流电流密度和长时间作用下,土壤温度升高。张润霞等^[30]对松砂土施加 10,20,40,60 V 直流电压作用 5 h 后,土壤温度从室温分别上升至 28,45,50,85 ℃,温度升高导致土壤内离子活度增加,孔隙水溶液的黏滞性减小,进一步降低了土壤电阻率^[34-35]。需要注意,在大电流长时间作用下,土壤中的水分会逐渐蒸发,严重时土壤会发生板结开裂。曹晓斌等^[27]研究表明,黄土试样在测试电流达到 83.2 A/m² 后水分开始大量蒸发,7 min 后土壤电阻率从 80.68 Ω·m 上升至 217.33 Ω·m。因此在研究高压直流接地极放电对管道的影响时,应考虑大电流持续作用引起的土壤水分蒸发导致的土壤电阻率显著增长;而由于雷电流的作用时间极短,其高幅值电流引起的土壤水分蒸发效应相对较弱^[36]。

由以上内容可知,在直流电作用下,土壤电阻率呈现一种非线性变化的特性^[37-39],可近似用图 7 和式(12)所示模型进行表征,其对电力系统接地装置冲击性能、管道阴极保护有效性和杂散电流干扰风险评价存在一定的影响。

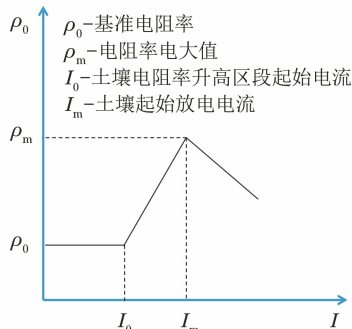


图 7 土壤电阻率的直流电非线性模型^[27]

Fig. 7 Direct current nonlinear model of soil resistivity^[27]

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 & 0 < I < I_0 \\ \rho_0 + k_i(I - I_0) & I_0 < I < I_m \\ \rho_m - k_p(I - I_m) & I > I_m \end{cases} \quad (12)$$

式中: k_i 和 k_p 为系数, 无量纲。

3 交流电流的影响

与直流电不同, 在利用 WENNER 四电极法测量土壤电阻率时, 采用交流电激励可避免电极和土壤的极化效应, 从而有效降低测量误差^[40-41]。周蜜等^[27]分别对装有含水率 15.05% 黏土样品的土壤盒两端电极施加 50 V 恒定电压的直流和交流信号, 作用时间为 15 min, 结果表明, 采用交流电信号测试可以得到稳定的回路电流和土壤电阻率, 而直流电测试回路中电流随时间增加而逐渐降低, 土壤电阻率相应逐渐增大; 陈文广等^[42]采用 0~250 V 的交流调压器和图 6 所示测量回路, 分别测试了含水率为 10.4%、26.3% 和 35.6% 的黏土试样的电阻率, 当交流电流密度小于 1.02 A/m² 时, 土壤电阻率变化幅度均小于 1%。进一步增大交流电流, 与直流电类似, 离子电迁移率、电离程度和温度随之增大和升高, 土壤电阻率降低, 这与相关学者的研究结论一致^[26, 42]。由以上内容可知, 在交流电作用下, 土壤电阻率同样呈现一种非线性变化的特性, 与直流电模型相比, 差异在于无电阻率升高的区段, 可近似用图 8 和式(13)所示模型进行表征, 其中 J_0 为电阻率下降区段的起始交流电流密度, 与土壤含水率有关。相关研究表明: 含水率 10.4%、26.3% 和 35.6% 的黏土对应的 J_0 值分别为 1.026、7.039、9.532 A/m²; 含水率 4.0%、13.4% 和 16.3% 的砂土对应的 J_0 值分别为 0.18、0.73、1.37 A/m², 其随含水率升高而增大^[42]。

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 & 0 < J < J_0 \\ \rho_0 - k_p(J - J_0) & J > J_0 \end{cases} \quad (13)$$

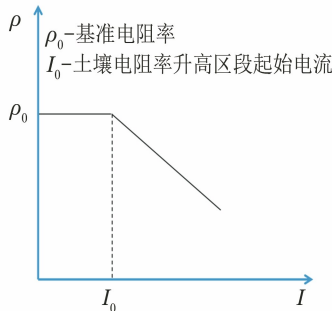


图 8 土壤电阻率的交流电非线性模型

式中: k_p 为系数, 无量纲。

除了交流电流幅值, 交流电频率对土壤电阻率也存在一定的影响。这主要由土壤导电粒子的电导频散效应引起^[43-44]。土壤孔隙电解质溶液中, 在静电力的作用下, 任何一个中心离子都是被电荷极性相反的球形离子氛所包围^[45], 中心离子在外界电场作用下向极性相反的电极处移动, 而中心离子外围的离子氛运动方向则相反, 导致离子氛的对称性遭到破坏, 不对称的离子氛对中心离子的移动产生一种静电阻滞力, 称为松弛效应, 在交流电作用下, 尤其是高频交流电, 其周期可能比离子氛的松弛时间还短, 此时离子氛的对称性来不及发生较大的改变, 导致对中心离子的静电阻滞力减弱, 离子的电迁移率相应提高, 表现为电解质的电阻率降低, 该效应称为电解质的电导频散效应。因此, 一般来说, 土壤电阻率随交流电频率增大呈现降低的趋势。目前, 对于土壤电导频散效应公认的模式是 Cole-Cole 模型^[46], 如式(14)所示, 若只考虑频率与电阻率的关系, 式(14)可以简化成下式(15), 相关学者给出了黏土和砂土的频散拟合函数参数, 如表 1 所示, 四种土壤中除 3.8% 含水率的砂土外, 其他三种土壤的 k 值均很小, 对土壤电阻率的影响也较小, 尤其是在低频交流电工况下。当频率在 10 kHz 内时, 黏土的电阻率下降比例小于 5%, 其对 3.8% 含水率砂土的影响较大, 电阻率下降比率可达 20%^[42]。

表 1 黏土和砂土频散拟合函数参数

Tab. 1 Dispersion effect fitting function parameters of clay and sand

土壤类型	含水率/%	参数	数值
黏土	11.2	ρ_0	256.10
		k	4.16×10^{-4}
		b	0.49
	34.6	ρ_0	74.67
		k	9.48×10^{-5}
		b	0.66
砂土	6.0	ρ_0	949.95
		k	4.85×10^{-4}
		b	0.54
	3.8	ρ_0	1 434.16
		k	3.36×10^{-2}
		b	0.25

$$\rho(j\omega) = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{(j\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (14)$$

$$\rho = \rho_0 (1 - k f^b) \quad (15)$$

式中: ρ_0 为直流电下的电阻率, $\Omega \cdot m$; ω 为角频率,

rad/s; m 为充电率,%; τ 为时间常数; b, c 为与交流电流频率相关的系数。

雷电流作为一种特殊的交流电流,其暂态、高幅值和宽频的特性会对土壤电阻率产生不同的影响。雷电流经杆塔接地系统向土壤中散流时,接地装置周围土壤中的电流密度急剧升高,电场强度随之增大,当大地中的电场强度超过一定值,但还没有达到土壤的临界击穿强度时,土壤电阻率随电场强度的增加而下降,当冲击电流继续增大使得土壤中电场强度超出临界击穿强度 E_c 时,在接地体的周围出现存在土壤电离现象的火花放电区域;随着冲击电流强度进一步增大,土壤中的电场强度大于临界电弧放电强度 E_s ,此时火花区域区域逐步发展为沿着不规则土壤颗粒表面的离散电弧通道,形成电弧区,即在雷电流作用下,接地装置周围的土壤中会产生如图 9 所示的 4 个区域:电弧区、火花放电区、半导体区和恒定电导区^[47-49]。对于电弧区,其电阻率可设定为金属导体的电阻率^[50];对于火花放电区,依据对大量冲击特性试验数据的分析结果,可取 $7\% \rho_0$ ^[51];对于半导体区,土壤电阻率为区域内电场强度的函数,即 $\rho = f(E)$ ^[52];恒定电导区,电阻率为基准电阻率 ρ_0 ,保持不变。

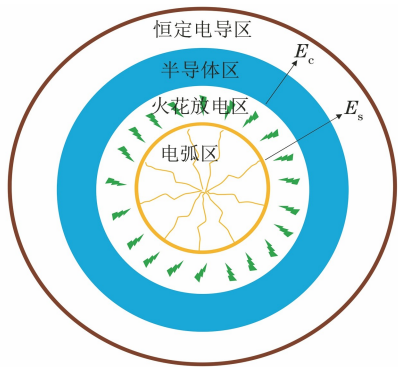


图 9 雷电流作用下接地装置周围土壤四个区域

Fig. 9 Four zones of the soil around the grounding device under the impact of lightning current

4 土壤电阻率的温度修正

如前文所述,土壤在故障或雷电等大电流短时作用或稳态电流长时间作用下,发热量增大,当超过土壤热容量时,土壤温度升高,在土壤水分无大量蒸发的情况下,土壤电阻率随温度升高而降低。不同温度下测量的土壤电阻率往往需要修正到某一参考温度(一般采用 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)。USDA(美国农业部)在 1954 年发布了 $3\sim 47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 土壤浸出液电导率转换至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的修正因子^[53],在此基础上,后来的学者基于对 USDA 和

其他补充土壤浸出液试验数据的拟合分别建立了不同形式的土壤电阻率温度修正模型,如 RHOADES 模型^[54]、SHEETS and HENDRICKX 模型^[55]、LÜCK 模型^[56]、CAMPBELL 模型^[57]、KELLER & FRISCHKNECHT 模型^[58]、HAYASHI 模型^[59]等。根据修正因子的数学形式,可将以上温度修正模型划分为四类^[60-61],即比率模型,指数模型,多项式模型和乘幂模型。需要注意,以上模型中除了乘幂模型外,其他模型均建立在土壤浸出液或电解质溶液等非土壤介质的基础上。

由于土壤电阻率除了受孔隙水溶液电阻率的影响外,还受土壤胶粒电阻率的影响,且土壤浸出液的黏性、离子浓度在离开土壤后也会发生改变,进而进一步影响电阻率^[62],因此,在以实际土壤为试验介质的电阻率温度修正模型研究上,BESSON 等^[61]基于 6 种不同成分土壤在 $5\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下建立了 BESSON 模型,但其在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上情况下的修正效果不佳。周蜜等^[63]选取了珠三角地区具有代表性的砂土、砂粉土、粉土、粉壤土、黏壤土 5 种不同质地各 3 种土壤样品,采用四电极法和交流伏安法开展了 $5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的土壤电阻率温度特性试验,结果表明,目前大多数基于土壤浸出液或电解质溶液提出的土壤电阻率修正模型对实际土壤数据的修正效果并不理想,在实际土壤电阻率测试数据的基础上,作者通过非线性回归分析方法分别建立了比率、指数、乘幂和多项式四种形式的电阻率温度修正模型,结果表明,乘幂模型不适合在 $5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温度范围内进行电阻率修正,建立的比率模型、指数模型和多项式模型对土壤电阻率温度修正效果较好。

5 结束语

总结了土壤导电模型、土壤电阻率在交直流电流作用下的非线性变化特性及温度修正模型的研究进展,目前,交直流电流对土壤电阻率的影响尚处于探讨阶段,有待于进一步深入的研究:

(1) 土壤非线性特性应用技术研究:目前考虑土壤电阻率非线性特性的应用技术研究较少,现有的研究也主要集中在接地系统的冲击特性上,且主要研究方法也是采用数值模拟仿真方法,试验数据缺乏。将土壤非线性特性应用于埋地管道杂散电流干扰层面的研究鲜有报道,有待进一步的探索;

(2) 暂态大电流冲击作用下土壤电阻率模型:暂态大电流冲击作用下的土壤电阻率模型还不成

熟,理论体系未达成共识,且现场和室内模拟试验数据体量远远不足;

(3) 土壤电阻率温度修正模型:目前各学者的研究均存在一定的局限性,研究结果也仅适用于某些特定的土壤类型和成分,温度对土壤电阻率影响机制、主控因素等方面未得到系统诠释,普适性的修正模型也未建立。

参考文献:

- [1] 崔淦,李自力,郭百合,等. 日仪管道沿线土壤腐蚀性的两种评价方法[J]. 腐蚀与防护,2013,34(8):727-729.
- [2] 和燕,崔秀琴. 焦作地区软土固结非线性特性的试验研究[J]. 路基工程,2008(3):88-89.
- [3] 蒋战朋,文远芳,冯天佑,等. 计及土壤电离的地网冲击特性分析[J]. 水电能源科学,2011,29(11):178-181,217.
- [4] 李晓丽. 变电站接地网冲击特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [5] 杨财伟,司马文霞,袁涛. 冲击电流下接地极屏蔽效应的试验研究(英文)[J]. 高电压技术,2008,34(12):2609-2614.
- [6] 司马文霞,李晓丽,袁涛,等. 不同结构土壤中接地网冲击特性的测量与分析[J]. 高电压技术,2008,34(7):1342-1346.
- [7] 徐韬,徐政,张哲任,等. 特高压直流输电圆环型接地极电流场计算[J]. 高电压技术,2012,38(6):1445-1450.
- [8] 阮江军. 直线型直接地极附近三维电流场边界元法计算[J]. 高电压技术,1997,23(3):49-50,74.
- [9] 王森,李伟,李柯,等. 分层土壤模型下大型接地网冲击特性研究[J]. 电瓷避雷器,2021(4):30-34.
- [10] 王思捷,黄松,赵海龙. 杆塔接地电极的冲击散流分布研究及结构优化[J]. 计算机与数字工程,2020,48(6):1379-1385.
- [11] ANNAN Z, JUNLIANG T, XIAOQIANG G, et al. Fundamentals of soil behaviours[C]// Proceedings of Geo Shanghai 2018 International Conference. Singapore:Springer, 2018.
- [12] RHOADES J D, MANTEGHI N A, SHOUSE P J, et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations[J]. Soil Science Society of America Journal,1989,53(2):433-439.
- [13] CORWIN D L, LESCH S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2005,46(1/2/3):11-43.
- [14] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transactions of the AIME,1942,146(1):54-62.
- [15] KELLER G V, FRISCHKNECHT F C. Electrical methods in geophysical prospecting[M]. New York: Pergamon Press, 1900.
- [16] 查甫生,刘松玉. 土电阻率理论及其应用探讨[J]. 工程勘察,2006,34(5):10-15,44.
- [17] WAXMAN M H, SMITS L J M. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands[J]. Society of Petroleum Engineers Journal,1968,8(2):107-122.
- [18] 刘松玉,查甫生,于小军. 土电阻率室内测试技术研究[J]. 工程地质学报,2006,14(2):216-222.
- [19] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [20] 聂向晖,杜鹤,杜翠薇,等. 大港土电阻率的测量及其导电模型[J]. 北京科技大学学报,2008,15(9):981-985.
- [21] 查甫生,刘松玉,杜延军,等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(8):1671-1676.
- [22] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transactions of the AIME,1942,146(1):54-62.
- [23] ARULANANDAN K, MURALEETHARAN K K. Level ground soil-liquefaction analysis using in situ properties:I[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988,114(7):753-770.
- [24] ALLAN J, DELANEY,. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil [J]. Cold Regions Science and Technology,2001,32(2/3):107-119.
- [25] 刘国华,王振宇,黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(1):83-87.
- [26] 周蜜,王建国,黄松波,等. 土壤电阻率测量影响因素的试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(11):3269-3275.
- [27] 曹晓斌,吴广宁,付龙海,等. 直流电流密度对土壤电阻率的影响[J]. 中国电机工程学报,2008,28(6):37-42.
- [28] 郑智慧,滕芸,童雪芳,等. 直流电流下土壤电阻率的变化规律及仿真研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2020,53(1):49-53.
- [29] 张润霞,王益权,解迎革,等. 直流电场力作用下土壤中离子迁移与电阻率的时空变化特征[J]. 土壤通报,2014,45(6):1364-1369.
- [30] 李玲. 盐渍土电阻率特性研究[D]. 甘肃:兰州大学,2012.
- [31] LINGVAY C, COJOCARU A, VIAN T, et al. Degradations of reinforced concrete structures due to D. C. and A. C. stray currents[J]. Upb Scientific

- Bulletin,2011, 73(4): 143-152.
- [32] RASHEEDUZZAFAR R, ALI M G, ALSULAIMANI G J. Degradation of bond between reinforcing steel and concrete due to cathodic protection current[J]. Aci Materials Journal, 1993, 90(1): 8-15.
- [33] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [34] 郝钰. 温度对土体电化学特性影响的试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2019.
- [35] 戴迪. 温度对黏性土压缩特性影响的试验研究[D]. 扬州:扬州大学,2011.
- [36] 刘平,吴广宁,隋彬,等. 雷电流波形参数估计仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):115-121.
- [37] 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.
- [38] 陶玉郎. 土壤非线性击穿效应对接地网雷电冲击特性的影响研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2017.
- [39] 陶玉郎,张其林,侯文豪,等. 土壤非线性电离对单根水平接地体冲击特性参数的影响研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(2):63-69.
- [40] ANDROVITSANEAS V P, DAMIANAKI K D, CHRISTODOULOU C A, et al. Effect of soil resistivity measurement on the safe design of grounding systems[J]. Energies,2020,13(12):3170.
- [41] 王雅君,通瑞生,薛维俊. 对称四极电测深法在测量场地浅部地层土壤电阻率中的应用[J]. 内蒙古电力技术,2020,38(3):62-66.
- [42] 陈文广,鲁海亮,杨世海,等. 交流电流下土壤电阻率变化规律及仿真分析[J]. 电瓷避雷器,2018(2):156-163.
- [43] 苏庆新. 低频下岩石的电学模型和介电频散的关系[J]. 测井技术,1999,23(2):127-132.
- [44] 李成保,季国亮. 用电导频散法研究 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 阴离子与土壤的相互作用[J]. 土壤学报,1999,36(1):54-60.
- [45] 朱勇. 铬污染场地复电阻率法时频域联合探测技术研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [46] ELWAKIL A S, AL-ALI A A, MAUNDY B J. Extending the double-dispersion Cole-Cole, Cole-Davidson and Havriliak-Negami electrochemical impedance spectroscopy models [J]. European Biophysics Journal,2021,50(6):915-926.
- [47] 陶玉郎,冯建伟,张其林,等. 基于FDTD方法的垂直接地体冲击时-频特性分析[J]. 电瓷避雷器,2018(1):68-76.
- [48] 冯志强. 接地装置冲击特性及土壤火花放电形貌特征研究[D]. 武汉:武汉大学,2016.
- [49] 李景丽,张宇,贺鹏威,等. 复杂土壤结构对杆塔接地装置冲击 特性影响分析[J]. 电瓷避雷器,2019(2):1-8.
- [50] WANG J P, LIEW A C, DARVENIZA M. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(3):2160-2165.
- [51] LIU Y Q, THEETHAYI N, GONZALEZ R M, et al. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results [C]//2003 IEEE. Boston:IEEE, 2003: 794-799.
- [52] 杨财伟,司马文霞,袁涛. 冲击电流下接地极屏蔽效应的试验研究[J]. 高电压技术,2008,34(12):2609-2615.
- [53] RICHARDS L A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[J]. Soil Science, 1954, 78(2): 154.
- [54] RHOADES J D, CHANDUVI F, LESCH S. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements [M]. London: Macmillan Publisher, 1999.
- [55] SHEETS K R, HENDRICKX J M H. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction[J]. Water Resources Research, 1995, 31(10):2401-2409.
- [56] LÜCK E, RÜHLMANN J, SPANGENBERG U. Physical background of soil EC mapping: laboratory, theoretical and field studies [M]. Holland: Wageningen Academic Publishers, 2005.
- [57] CAMPBELL R B, BOWER C A, RICHARDS L A. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts [J]. Soil Science Society of America Journal,1949,13(C):66-69.
- [58] KELLER G V, FRISCHKNECHT F C. Electrical methods in geophysical prospecting [M]. Oxford: Pergamon Press,1966.
- [59] HAYASHI M. Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2004, 96(1/2/3): 119-128.
- [60] MA R J, MCBRATNEY A, WHELAN B, et al. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement [J]. Precision Agriculture,2011,12(1):55-66.
- [61] BESSON A, COUSIN I, DORIGNY A, et al. The

temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples[J]. Soil Science,2008,173(10):707-720.

[62] SAARENKETO T. Electrical properties of water in clay and silty soils [J]. Journal of Applied Geophysics,1998,40(1/2/3):73-88.

[63] 周蜜,王建国,范璇,等. 珠三角地区的土壤电阻率温度修正模型[J]. 高电压技术,2012,38(3):623-631.

Research Progress on the Influence of AC and DC Stray Current on Soil Resistivity

WEI Xian¹, WU Guangchun², YANG Ling¹, HU Yufeng¹, ZHU Yan¹, CAO Hongyuan³

- (1. Zhaodong Oil Production Management Area of PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China;
2. Safetech Research Institute, Beijing 102200, China;
3. Tianjin Beihai Oil Human Resources Consulting Services Co., Ltd., Tianjin 300453, China)

Abstract: The influence of AC and DC stray currents on soil resistivity is focused, and the experimental exploration and cognition in this field at home and abroad in recent years are introduced. The cognition history of the theoretical model of soil conductivity has been summarized, the influence mechanism of DC and AC stray current on soil resistivity has been systematically explained, and the nonlinear change characteristics of soil resistivity under the action of AC and DC current has been summarized. At the same time, the recent research progress of the temperature correction model of soil resistivity is introduced, and the development trend in this field is prospected.

Key words: soil resistivity; DC current; AC current; conductive model;influence; temperature correction

《腐蚀与防护》杂志 2024 年征订启事

《腐蚀与防护》杂志属应用技术类期刊,创办于1980年。本刊是国内最早的腐蚀专业学会——上海市腐蚀科学技术学会的会刊,也是国内创办最早的腐蚀专业杂志之一,为领域内的学术交流和科技成果推广作出了重要贡献。

我刊是中文核心期刊,并被多种国内外数据库收录。

我刊作者和读者主要包括:大学及科研单位的研发人员、防腐工程技术人员、建筑工程技术人员,油田、石油化工、化工厂、电镀厂、发电厂、矿山的工程技术人员和工程管理、设备管理人员。

本刊提供针对广大读者、作者单位应用的有关腐蚀控制与防护的各种仪器设备及缓蚀、防锈技术、表面技术、电化学保护、工程防腐蚀等广告宣传业

务,欢迎联系刊登。

本刊为大16开,120页,月刊,各地邮局均可订阅,订阅代号:4-593,也可向本刊发行部订阅;每册定价:30.00元,360元/年。刊号ISSN 1005-748X, CN 31-1456/TQ。

地址:上海市虹口区邯郸路99号

邮编:200437

编辑电话:021-65556775-290;021-65559079

E-mail:cp@mat-test.com

广告电话:021-65544943

广告联系人:陈哲森

发行电话:021-65527634

E-mail:wm@mat-test.com

投稿网址:www.mat-test.com