

电网在线消缺设备电磁干扰与屏蔽效能研究

李永亮^{1,2}, 范学军^{1,2}, 李 扬¹, 王浩丞¹, 尹利杰¹

(1.国网河北省电力有限公司邯郸供电分公司,河北 邯郸 056004;2.河北省智能电网配用电运维技术创新中心,河北 邯郸 056004)

摘要:电网消缺是保障电力系统可靠性的关键环节,以机器人为主的电网自动化消缺装置是未来电网巡检消缺的发展方向,装置需在强电磁干扰环境下稳定运行,因此电磁兼容屏蔽设计至关重要。本文采用模拟电荷法和毕奥萨伐尔定理分析 220 kV 100 MW 高压架空输电线路空间电磁场分布,在临近输电线路区域,电场强度可达到 70 kV/m 以上。通过有限元方法分析不同结构和材料在该电磁场分布下的屏蔽效能,分析结果表明:良好的壳体屏蔽材料和合适的结构设计是达到优秀屏蔽效果的重要因素,为兼顾安全与电磁屏蔽效能,电网消缺装置应考虑综合使用多种屏蔽材料。

关键词:电网架空输电线路;电磁场分析;在线消缺;电磁场屏蔽

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-9898(2026)01-0059-06

Study on Electromagnetic Interference and Shielding Efficiency of Power Grid on-line Defect Elimination Equipment

LI Yongliang^{1,2}, FAN Xuejun^{1,2}, LI Yang¹, WANG Haocheng¹, YIN Lijie¹

(1.State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Handan Power Supply Branch, Handan 056004, China; 2. Hebei Smart Grid Power Distribution Operation and Maintenance Technology Innovation Center, Handan 056004, China)

Abstract: Grid defect elimination is a crucial link in ensuring the reliability of the power system. The power grid automatic defect elimination devices dominated by robots represent the future development trend of grid inspection and defect elimination. These devices are required to operate stably in a strong electromagnetic interference environment, making the electromagnetic compatibility and shielding design extremely important. In this paper, the Charge Simulation Method (CSM) and Biot-Savart's theorem are employed to conduct the theoretical analysis and calculation of the spatial electromagnetic field distribution of 220 kV 100 MW high-voltage overhead transmission lines. In the area adjacent to the high-voltage lines, the electric field intensity can exceed 70 kV/m. The shielding effectiveness of different structures and materials under this electromagnetic field distribution is analyzed using the finite element method. The analysis results indicate that good shell shielding materials and appropriate structural design are significant factors for achieving excellent shielding effects. To balance between safety and electromagnetic shielding effectiveness, grid defect elimination devices should adopt the comprehensive utilization of multiple shielding materials. The analysis results have rather good guiding significance for the design, operation, and maintenance of grid defect elimination devices.

Key words: overhead transmission lines of the power grid; electromagnetic field analysis; on-line defect elimination; electromagnetic field shielding

0 引言

电网传输系统在长期的工作过程中会出现螺栓松动、销钉脱落等问题,这些缺陷故障导致电网存在运行风险。电网消缺是指电力系统运行中,通过检测、分析、定位和消除设备缺陷或隐患,确保电网安全、稳定、可靠运行的一系列技术和管理

措施。传统的电网消缺工作由人工执行,效率低下且存在一定的风险系数,因此应采用机器人替代人工执行消缺工作。

机器人替代人工开展电网巡检和消缺作业是当前的发展方向,目前存在电网电磁干扰对机器人电子设备的影响等问题待研究。在线消缺机器人采用悬挂作业方式,工作时直接悬挂在高压架

收稿日期: 2025-03-03 **修回日期:** 2025-07-21

作者简介: 李永亮(1993—),男,工程师,主要从事电磁分析、智能巡检装置研发、架空输电线路自动化等工作。

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目(kjcb2023-004)。

空输电线路,消缺作业时会直接接触电网器件。受气候、工作负荷等影响,电网周围电磁场分布较为复杂,可能会造成消缺机器人的图像识别错误、误动作、通信故障等,严重时甚至会导致电网消缺工作机器人永久损坏。因此,研究电网消缺机器人工作范围内电磁场分布,以及复杂电磁场对消缺机器人的影响十分必要。本文将开展架空输电线路电磁场分析计算和消缺装置电磁屏蔽效能分析工作,通过分析结果改善消缺装置屏蔽效能。

国内外学者针对电网电磁场分析计算提出了若干方法,早在上世纪 70 年代,美国学者 H. singer 等利用模拟电荷法计算了 735 kV 三相架空输电线路的电磁场分布^[1]。上世纪 90 年代,Krajewski W 等使用矩量法对 400 kV 电网输电线路附近电场分布进行计算^[2]。2009 年,M. Trlep 等利用有限元法对高压架空输电线路下方存在导电体场景下的电场进行分析^[3]。2015 年深圳大学王敬晓等提出了模拟电荷和镜像电荷方法进行二维电场数值分析计算^[4]。2019 年重庆大学王旭旭等人提出了模拟电荷与有限元结合的方法,对高压电力设备进行了三维电场分布计算^[5]。2024 年西安交通大学谢玮琛等人基于渐近法,通过对架空多导体线路沿线电流进行半解析表征,并利用散射矩阵、反射矩阵以及一系列未知离散电流,实现对线路电流的快速计算^[6]。对于输电线路近场分析,2011 年牟秋谷等人模拟分析了 3 种典型 220 kV 气体绝缘组合电器设备,研究这些电气设备采用不同变电站进线方式,在周围空间所产生的工频电场和磁场分布特征及影响规律^[7]。2023 年张寿强研究了不同相间距对架空输电线路电磁环境的影响^[8]。上述研究工作集中在输电线路近远电磁场分析,本文将在上述研究内容的基础上对直接挂载于输电线路上的消缺装置的内外电磁场进行分析。

1 架空输电线路近场电场计算理论

电场计算采用模拟电荷法,将高压架空输电线路等效成模拟电荷,电荷所在位置为架空线路垂直截面位置,如图 1 所示。

其中 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 为高压输电线路等效电荷,由于大地表面电势为 0,为方便计算,设置了 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 为其镜像等效电荷。因此可以建立以下方程组如下所示:

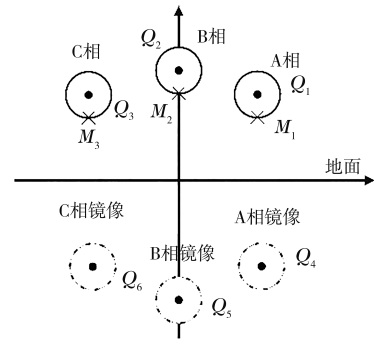


图 1 模拟电荷法等效点设置

$$\begin{cases} P_{11}Q_1 + P_{12}Q_2 + \dots + P_{16}Q_6 = \varphi_{M1} \\ P_{21}Q_1 + P_{22}Q_2 + \dots + P_{26}Q_6 = \varphi_{M2} \\ P_{31}Q_1 + P_{32}Q_2 + \dots + P_{36}Q_6 = \varphi_{M3} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{11}, P_{12}, \dots, P_{36}$ 为电位系数; $\varphi_{M1}, \varphi_{M2}, \varphi_{M3}$ 分别为图 1 中 M_1, M_2, M_3 点处电位。由于点 Q_1, Q_2, Q_3 与 Q_4, Q_5, Q_6 大小相等符号相反,则(1)式又可简化为:

$$\begin{cases} P'_{11}Q_1 + P'_{12}Q_2 + P'_{13}Q_3 = \varphi_{M1} \\ P'_{21}Q_1 + P'_{22}Q_2 + P'_{23}Q_3 = \varphi_{M2} \\ P'_{31}Q_1 + P'_{32}Q_2 + P'_{33}Q_3 = \varphi_{M3} \end{cases} \quad (2)$$

P'_{ij} 为等效电位系数:

$$P'_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r'_{ij}}{r_{ij}}\right), i, j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中: i 为已知电位计算点; j 为模拟电荷; j' 代表第 j 个模拟电荷的镜像电荷; r_{ij} 代表 j 与 i 之间的距离;相应的 r'_{ij} 为 j' 与 i 之间的距离。

选择电势位置为架空输电线路附近区域电位,可近似等效为输电线路电位。通过求解上述方程组(2),即可求得模拟电荷 Q 。则空间中任意一点 $M(x, y)$ 的横向电场 $\dot{E}_x$ 和纵向电场 $\dot{E}_y$ 可通过以下公式表征:

$$\begin{cases} \dot{E}_x = \sum_{i=0}^k E_{ixR} + \sum_{i=0}^k E_{ixI} = E_{xR} + jE_{xI} \\ \dot{E}_y = \sum_{i=0}^k E_{iyR} + \sum_{i=0}^k E_{iyI} = E_{yR} + jE_{yI} \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为模拟电荷数量,这里 $k=3$; E_{ixR} 和 E_{ixI} 分别为 $M(x, y)$ 点电场沿 x 轴实部和虚部; E_{iyR} 和 E_{iyI} 分别为电场沿 y 轴的实部和虚部; E_{xR} 和 E_{yR} 分别为电场沿 x 轴和 y 轴实部累加值; jE_{xR} 和 jE_{yR} 分别为电场沿 x 轴和 y 轴虚部累加值。 $E_{ixR}, E_{ixI}, E_{iyR}, E_{iyI}$ 分别可表示为:

$$\begin{cases} E_{ixR} = -\frac{\partial \varphi_R}{\partial x} = \frac{Q_{iR}}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x_0 - x_i}{r_i^2} - \frac{x_0 - x_i}{r_i'^2} \right) \\ E_{ixI} = -\frac{\partial \varphi_I}{\partial x} = \frac{Q_{iI}}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x_0 - x_i}{r_i^2} - \frac{x_0 - x_i}{r_i'^2} \right) \\ E_{iyR} = -\frac{\partial \varphi_R}{\partial y} = \frac{Q_{iR}}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y_0 - y_i}{r_i^2} - \frac{y_0 - y_i}{r_i'^2} \right) \\ E_{iyI} = -\frac{\partial \varphi_I}{\partial y} = \frac{Q_{iI}}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y_0 - y_i}{r_i^2} - \frac{y_0 - y_i}{r_i'^2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: Q_{iR} 和 Q_{iI} 分别为电荷实部和虚部;架空输电线路坐标为 $W_i(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, 3$; r_i 为导线 $W_i(x_i, y_i)$ 至场点 $M(x_0, y_0)$ 的距离; r_i' 为导线的镜像 $W_i'(x_i', y_i')$ 至场点 $M(x_0, y_0)$ 的距离; $r_i^2 = (x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2$; $r_i'^2 = (x_0 - x_i')^2 + (y_0 - y_i')^2$ 。

则 $M(x_0, y_0)$ 点的合成场强 $\vec{E}$ 为:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= (E_{xR} + jE_{xI})\vec{e}_x + (E_{yR} + jE_{yI})\vec{e}_y \\ &= E_x\vec{e}_x + E_y\vec{e}_y \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $E_x = \sqrt{E_{xR}^2 + E_{xI}^2}$; $E_y = \sqrt{E_{yR}^2 + E_{yI}^2}$; $\vec{e}_x$ 和 $\vec{e}_y$ 为在 x 轴和 y 轴的电场单位矢量。

2 架空输电线路近场磁场计算理论

采用毕奥萨伐尔定律(biot-savart law)可准确计算通电电缆在任意处产生的磁场,该定理描述了稳态电流元在空间任意点 M 处所产生的磁感应强度 B 。如图2所示,电流元 $I dl$ 在空间某点 M 处产生的磁感应强度 $d\vec{B}$ 的大小与电流元 $I dl$ 的大小成正比,与电流元 $I dl$ 所在处到 M 点的位置矢量和电流元 $I dl$ 之间的夹角 θ 的正弦成正比,而与电流元 $I dl$ 到 M 点的距离 r 的平方成反比^[9-10]。其方程为:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \times d\vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2} \quad (7)$$

式中: I 是激励电流; dl 是电流元; μ_0 为真空磁导率; $\vec{r}$ 为电流元到 M 点的方向向量。

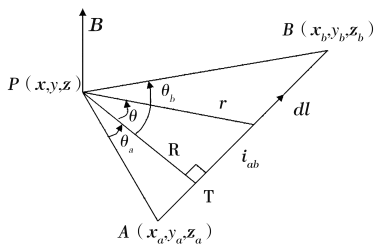


图2 载流体在空间任意点产生的磁场

根据毕奥萨伐尔定律,空间从起点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 到终点 $B(x_b, y_b, z_b)$ 的连续载流体在任意一点 M 产生的磁场 $\vec{B}$ 可以用下式表示:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i_{ab}}{4\pi} \int_A^B \frac{dl \times r_0}{r^2} \quad (8)$$

式中: i_{ab} 为载流体电流; r_0 为线元 dl 指向 M 点的矢量单位; μ_0 为空气磁导率; r 为电流元微段 dl 到 M 点的距离; l 为指定两点间的距离。

式(8)经过几何关系变换后得到:

$$\begin{cases} B = \frac{\mu_0 i_{ab}}{4\pi R} (\sin \theta_a + \sin \theta_b) \\ \sin \theta_a + \sin \theta_b = \frac{l_{AT}}{l_{MA}} + \frac{l_{AB} - l_{AT}}{l_{MB}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: l_{AT} 为图2中 A 点到 T 点的距离; l_{MA} 为 M 点到 A 点的距离。

磁场 $\vec{B}$ 的方向为:

$$\begin{cases} \vec{e}_B = \vec{e}_{AB} \times \vec{e}_{pB} = \frac{\vec{l}_{AB} \times \vec{l}_{MB}}{|\vec{l}_{AB} \times \vec{l}_{MB}|} \\ \vec{l}_{AB} \times \vec{l}_{MB} = \begin{vmatrix} e_x & e_y & e_z \\ x_b - x_a & y_b - y_a & z_b - z_a \\ x - x_b & y - y_b & z - z_b \end{vmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

式中: e_x, e_y, e_z 分别为 x, y, z 上的单位矢量。

3 架空输电线路电磁场数值计算

架空输电线路中流过的三相电为对称正弦电流,可使用有效值相量表征电压与电流,高压架空输电线路的A、B、C三相电压可表示为:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U_{AR} + jU_{AI} \\ \quad = |U_A| \cos \theta + j |U_A| \sin \theta \\ \dot{U}_B = U_{BR} + jU_{BI} \\ \quad = |U_B| \cos(\theta + 2\pi/3) + j |U_B| \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \dot{U}_C = U_{CR} + jU_{CI} \\ \quad = |U_C| \cos(\theta - 2\pi/3) + j |U_C| \sin(\theta - 2\pi/3) \end{cases} \quad (11)$$

A、B、C三相电流可表示为:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = I_{AR} + jI_{AI} \\ \quad = |I_A| \cos \theta + j |I_A| \sin \theta \\ \dot{I}_B = I_{BR} + jI_{BI} \\ \quad = |I_B| \cos(\theta + 2\pi/3) + j |I_B| \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \dot{I}_C = I_{CR} + jI_{CI} \\ \quad = |I_C| \cos(\theta - 2\pi/3) + j |I_C| \sin(\theta - 2\pi/3) \end{cases} \quad (12)$$

以 220 kV、100 MW 单回三相三角排列二分裂线路为例,其线路敷设参数如图 3 所示,由于分裂导线之间的间距远小于相间距,因此将分裂导线等效成一个中心导线。

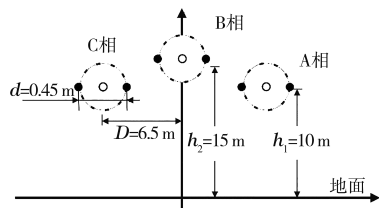


图 3 220 kV 电网铺设参数

结合公式(6)、(9)、(11)、(12),并使用 Matlab 仿真计算得到架空输电线路近场电磁场分布曲线,其中距离地面 1.5 m 处电磁场分布曲线如图 4 所示,电场强度分布曲线是一个关于中心导线对称分布的鞍型曲线,电场强峰值约为 1.22 kV/m,出现在 A 相和 C 相的高压输电线路正下方。

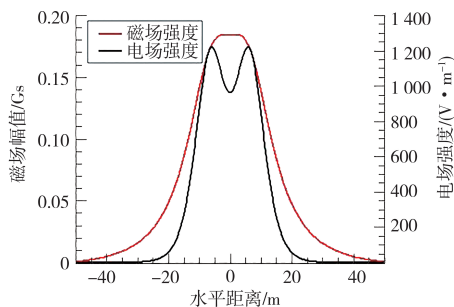


图 4 距离地面 1.5 m 处水平电磁场分布曲线

图 4 中水平磁场幅值分布曲线是关于中心导线对称分布的,最大值为 0.19 Gs,在中心导线的正下方。磁场幅值分布曲线从中心向外侧迅速衰减,此分析结果与相关文献^[11-13]一致,验证了该计算方法的准确性。

架空输电线路的垂直方向电磁场分布如图 5 所示,电场强度和磁场强度分布曲线近似指数曲线,临近输电线路位置磁场最大达 70 kV/m,最大磁场强度也达到 10 Gs 以上,分析结果与文献[14-15]一致,证明本文采用模拟电荷分析法和毕奥萨伐尔定理的方法对输电线路电磁场分析有效。

从图 4 和图 5 的分析结果可以发现,在靠近架空输电线路周围具有非常强的电场,而电网消缺装置直接挂载于架空输电线路上。强电磁场会对设备运行产生干扰,严重时甚至会造成设备损坏。

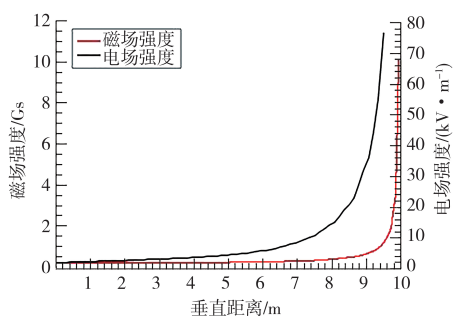


图 5 架空输电线路垂直方向电磁场分布

4 消缺装置电场分布分析及优化

架空输电线路在线消缺机器人主要用于电网设备自动化检修,作业主要包含:螺栓、销钉等零部件状态检修、电网放电、污秽、破碎、老化等巡检等。电网消缺装置使用 4 个驱动轮在线路上运行,2 侧各分布 2 个驱动轮,分别挂载于分裂导线的 2 根平行等电位线缆上。驱动轮采用聚四氟乙烯材料制成,具有良好的耐磨损、机械强度和绝缘性能。消缺装置简化模型如图 6 所示。

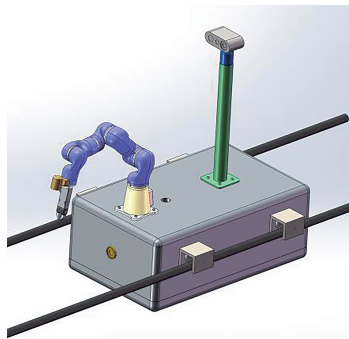


图 6 电网消缺装置结构

本文第 3 节利用模拟电荷法计算出边界场分布,但由于单纯的模拟电荷法难以分析等电势体对电场分布的影响,因此,将采用有限元三维仿真分析软件对其进行分析。考虑因素主要包含:1)消缺装置采用不同材质外壳,对电场分布的影响;2)材料选型的磁场屏蔽作用。所有三维仿真分析均在 CST 软件中实现。

4.1 非金属材料壳体的电场分析

当采用非金属材质外壳,仿真采用环氧外壳材料,分裂导线的电势设置为 220 kV,在距离分裂线缆 15 m 下方,设定一个电势为 0 的基准地。其仿真结果如图 7 所示,在靠近输电线路区域,电场强度相对较高,其中输电线路表面附近最高电场强度为 3 kV/m 左右,壳体内部最高电场强度

为 400 V/m , 靠近中心区域电场趋于 0。由于摄像头外壳和摄像头支架底部螺丝为金属材料, 因此在该类部件附近产生局部的电场分布畸变。

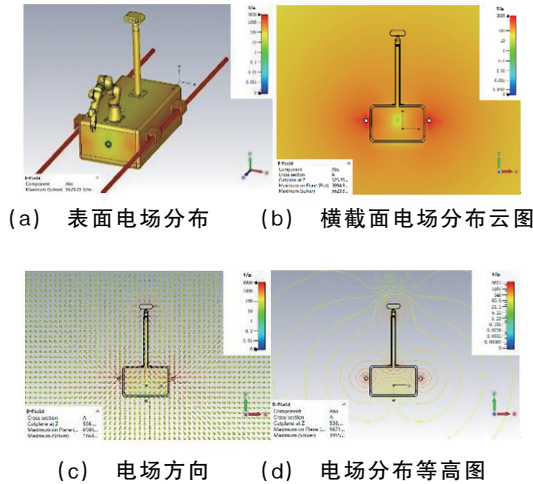


图 7 非金属材料壳体电场分布仿真

4.2 金属材料壳体的电场分析

当采用金属材质外壳时, 仿真的外壳材料选择为铝, 由于上下壳体良好接触, 可看成一个整体。由法拉第笼效应可知, 壳体内部感应出的电场与外部电场大小相等、方向相反, 叠加后壳体内部的电场强度将趋近于 0, 仿真结果如图 8 所示。由图 8 可看出金属外壳表面区域的磁场方向全部垂直于外壳表面, 壳体表面切向电场为 0, 这与静电屏蔽现象一致。

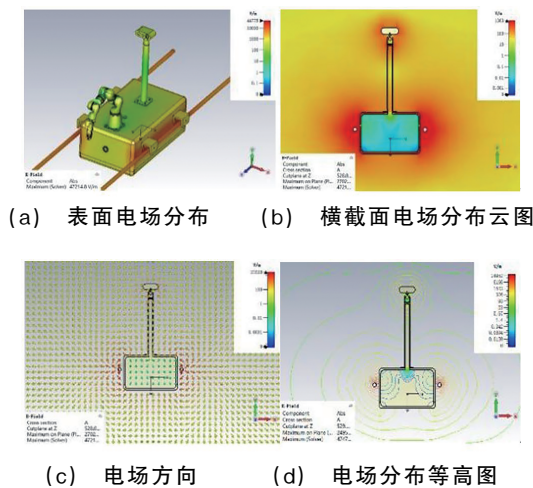


图 8 金属材料壳体电场分布仿真

从仿真结果中可以发现, 由于摄像头安装在一个较长的支架上, 造成摄像头和装置壳体两者有空间, 因此存在一定电势差。如果支架采用绝

缘材料制作, 此时摄像头电位将与主壳体内部有 300 V 左右的电位差, 虽然可以通过数据信号线缆将两个连接起来达到等电位效果, 但由于电网波动影响, 电位差会一直对信号传输造成影响, 产生图像毛刺和畸变, 这也是架空输电线路图像采集干扰的起因。因此摄像头支架也需要进行等电势处理, 从而保证图像信号传输的稳定性。

4.3 金属材料壳体的屏蔽优化

采用全铝制外壳, 金属屏蔽壳摄像头, 将摄像头支架与摄像头外壳保持电连接, 减少壳体开孔数量, 降低壳体开孔尺寸。经过优化后的仿真如图 9 所示, 优化后的摄像头支架电场强度由 100 V/m 左右降低到 5 V/m 以下, 壳体与支架连接处电场强度也从 50 V/m 降低到 1 V/m 以下, 从而达到良好的屏蔽效果。

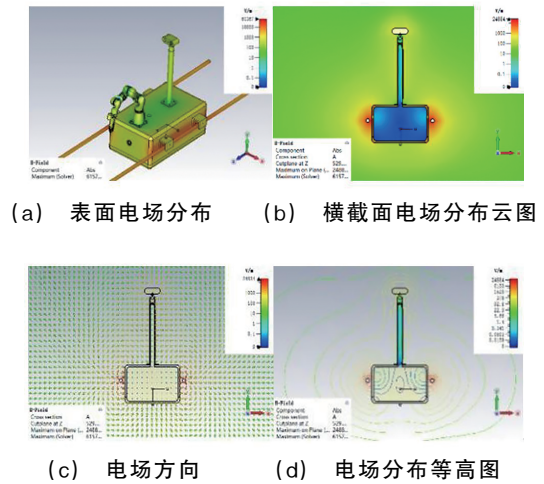


图 9 屏蔽优化后壳体电场分布仿真

5 消缺装置磁场屏蔽效能分析

上述第 3 节理论分析中得到高压架空输电线路近场磁场约为 10 Gs , 该磁场对装置内部敏感器件会产生影响, 因此需要对磁场进行屏蔽。

磁场屏蔽主要分为高频磁场屏蔽和低频磁场屏蔽两个方面。对于高频磁场, 铝制外壳在外界高频交变电磁场的作用下会产生涡流形成反向磁场, 从而抵消掉高频磁场影响。对于工频范围内的低频磁场, 铝制外壳无法有效进行屏蔽, 因此需要选用合适的材料和结构进一步防护。

低频磁场屏蔽原理如图 10 所示。

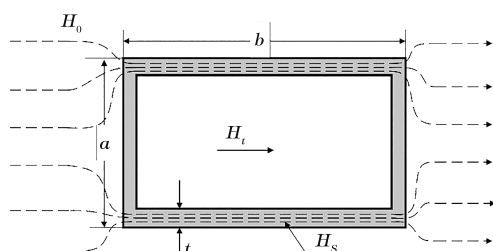


图10 低频磁场屏蔽示意

其中 H_0 为外部磁场强度, H_t 为屏蔽后装置腔体磁场强度, H_s 为屏蔽壳内部磁场强度。可得:

$$\begin{cases} \mu_0 H_0 a = 2\mu_s H_s t + \mu_t H_t t(a - 2t) \\ U_{ms} = \Phi_s \cdot R_{ms} = H_s b \\ U_{mt} = \Phi_t \cdot R_{mt} = H_t(b - 2t) \end{cases} \quad (13)$$

式中: φ_s 和 φ_t 为磁通; R_{ms} 和 R_{mt} 为磁阻; U_{ms} 和 U_{mt} 为对应磁压降; μ_0 和 μ_s 分别为空气和屏蔽材料磁导率。

由于磁压降 U_m 仅与初始点和终点相关, 与所选路径无关, 可得: $U_{ms} = U_{mt}$ 。屏蔽材料壁厚远小于屏蔽壳高度 a 和宽度 b , 因此有 $b - 2t \approx b$, $a - 2t \approx a$, 则由公式(13)可得壳体的屏蔽效能:

$$\eta_{SE} = 20 \lg \frac{H_0}{H_t} = 20 \lg \left(\frac{2\mu_s t}{a} + 1 \right) \quad (14)$$

由式(14)可以看出, 对于磁场屏蔽, 屏蔽材料的相对磁导率 μ_r 越高, 垂直于磁场方向的物理长度越小, 屏蔽壳体越厚, 磁场屏蔽效果越好。铝材料的电场屏蔽效果较好, 但相对磁导率低, 无法有效屏蔽低频磁场, 而坡莫合金的磁导率为 2×10^4 以上, 因此坡莫合金是磁场屏蔽的理想材料。

6 结论

本文采用模拟电荷法和毕奥萨伐尔定律对架空输电线路近场区域电磁场分布展开了分析, 分析结果表明 220 kV、100 MW 单回三相三角排列二分裂线路的近场的电场最大可达 70 kV/m, 磁场最大值可达 10 Gs。电网强电磁场会对消缺装置运行产生干扰, 为保障消缺装置稳定运行, 本文开展了消缺装置电磁屏蔽效能优化设计分析, 采用有限元分析软件, 分析工况条件下非金属材料 and 金属材料装置内外电场分布, 同时还采用磁压降理论对消缺装置磁场屏蔽效能展开分析。结论如下:

1) 壳体材料选择和结构设计对电磁场屏蔽有着较大的影响。结构设计上尽量减少开孔, 保证装置部件间良好的电接触, 使得装置成为一个等

势体, 可实现良好的电场屏蔽效果。

2) 为保障设备安全运行, 消缺装置与输电线路接触部分应采用绝缘和力学性能优秀的环氧材料。

3) 消缺装置内部在靠近电网分裂线位置的电场强度相对较高, 而中间位置电场强度相对较低, 因此应尽量将控制电路板放置在中间位置。

4) 选用高磁导率材料如坡莫合金, 对内部磁场敏感部件进行单独磁屏蔽。

通过上述方法, 可有效提高电网在线消缺装置的电磁屏蔽效能。

参考文献:

- [1] SINGER H, STEINBIGLER H, WEISS P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974(5): 1660 - 1668.
- [2] KRAJEWSKI W. BEM analysis of electric field excited by overhead HV lines erected in built-up areas[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 1997, 144(2): 81 - 86.
- [3] TRLEP M, HAMLER A, JESENİK M, et al. Electric field distribution under transmission lines dependent on ground surface[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1748 - 1751.
- [4] 王敬晓. 深圳电网高压输电设备电磁环境影响的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [5] 王旭旭, 李永明, 邹岸新, 等. 超高压输电线下复杂场景的工频电场分析[J]. 中国测试, 2018, 44(4): 123 - 129.
- [6] 周柯, 金庆忍, 莫枝阔, 等. 基于 FACE 软件和半经验公式分析输电线路的电磁环境[J]. 中国测试, 2024, 50(S1): 254 - 259.
- [7] 牟秋谷, 周凯, 肖先勇. 3 种典型 220 kV GIS 变电站进线方式的电磁场分析[J]. 四川电力技术, 2011, 34(5): 30 - 33.
- [8] 张寿强. 相间距对架空输电线路电磁环境的影响[J]. 自动化应用, 2023, 64(24): 171 - 174.
- [9] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [10] 刘青松. 时域有限差分法在超高压输电线路电磁场仿真中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [11] 俞集辉. 电磁场原理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- [12] M.S. ABOU-SEADA, E. Nasser. Digital computer calculation of the electric potential and field of a rod gap[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 56(5): 813 - 820.
- [13] 郭雄, 万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [14] 冯健, 罗日成, 王凤等. 110 kV 输电线路巡检无人机电磁环境效应分析[J]. 电力学报, 2021, 36(6): 498 - 504.
- [15] 张文亮, 陆家榆, 赵鹏, 等. 电力系统电磁兼容实验室设计与建设[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1520 - 1525.

本文责任编辑: 秦明娟