

计及断股角度的高压输电导线钢芯漏磁场 矢量计算与分布规律研究

周 超^{1,2}, 王 伟^{1,2}, 魏超政^{1,2}

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对现有钢芯断股漏磁场的研究中只考虑断股的长、宽、深等几何参数, 鲜见涉及股线断口角度对漏磁场影响的问题, 建立钢芯漏磁检测装置的三维有限元模型, 分析 12 种断股角度工况下漏磁矢量 B_x 、 B_y 与 B_z 的分布规律, 并将 3 种矢量进行对比, 得到对断股最敏感的矢量方向。结果表明, 矢量 B_x 和 B_y 呈多峰形态, 且以断股角度 90° 为分界点, 正负峰分布特征相反, 而矢量 B_z 在断股角度 90° 时因断股宽度影响出现多峰, 其他工况均为单峰形态。对比各矢量峰值发现, 矢量 B_x 和 B_y 在各工况下正负峰值均较为相近。矢量 B_z 峰值远大于 B_x 和 B_y 峰值, 断股角度 90° 时差值最大, B_x 与 B_y 正峰值分别仅为 B_z 正峰值的 4.5% 和 2.2%, 负峰值绝对值仅为 B_z 正峰值的 1.5% 和 2.9%。矢量 B_z 对钢芯断股最敏感, 霍尔元件应垂直于导线表面布置以拾取矢量 B_z , 此时漏磁信号检测最为有效。

关键词: 钢芯铝绞线; 钢芯断股; 漏磁检测; 漏磁矢量分析; 无损检测

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.023 中图分类号: TM75 文章编号: 1673-9140(2023)03-0205-11

Research on vector calculation and distribution of steel core magnetic flux leakage in high voltage transmission conductor considering broken strand angle

ZHOU Chao^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, WEI Chaozheng^{1,2}

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Many existing studies on the magnetic flux leakage of broken strands in the steel core only consider geometric parameters such as length, width and depth of the broken strands, and the impact of the broken strand angle on the leakage field has rarely been discussed. Therefore, this paper establishes a 3D finite element model of a steel core magnetic flux leakage detection device to analyze the magnetic flux leakage vectors B_x , B_y and B_z under 12 different broken strand angle conditions. By comparing the three vectors, the vector direction which is most sensitive to detecting broken strand faults is obtained. The results show that vectors B_x and B_y exhibit multimodal distributions, and the distributions of positive and negative peaks are opposite with a 90° broken strand angle as the division point. Moreover, vector B_z exhibits multiple peaks at a 90° broken strand angle due to the influence of the broken strand width, while in other conditions B_z exhibits a single-peak distribution. The comparison of the vector peak values shows that the vectors B_x and B_y have similar positive and negative peak values under different operating conditions. The peak values of vector B_z significantly exceed that of B_x and B_y , with the largest difference observed at a 90° broken strand angle. The positive peak values of B_x

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(52075169); 国家重点研发计划(2018YFC0809400); 北京市自然科学基金(8202043)

通讯作者: 周 超(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事导线覆冰机理和机械动力学研究; E-mail: zhouchao@ncepu.edu.cn

and B_y are only 4.5% and 2.2% of the positive peak value of B_z , and the absolute values of the negative peaks are only 1.5% and 2.9% of the positive peak value of B_z . Vector B_z proves to be the most sensitive in detecting broken strands of the steel core. Consequently, Hall elements should be arranged perpendicular to the transmission line surface to detect vector B_z as the most effective signal detection scheme.

Key words: aluminum conductor steel reinforced; steel core broken strands; magnetic flux leakage detection; magnetic flux leakage vector analysis; nondestructive testing

风雨激振^[1]、过冷雨滴撞击输电导线形成水膜并冻结成覆冰^[2]等自然因素会引起断线等事故从而影响电力系统的稳定运行^[3],而输电导线内部钢芯为主要抗拉承载体,在交变张拉应力的反复作用下,内部钢芯容易最先发生疲劳断股现象,钢芯的断股极易导致断线事故。因此,输电导线的钢芯断股检测对于保证线路安全运行尤为重要。

由于高压输电导线多用钢芯铝绞线(aluminum conductor steel reinforced, ACSR),钢芯又处于铝线内部,常规的检测法,如红外成像法受环境条件影响^[4]、涡流检测法存在检测深度^[5]等问题难以对输电导线内部钢芯进行准确的检测,故研发一种能够准确检测钢芯断股情况的设备是十分迫切的。鉴于高压输电导线钢芯同样具有铁磁材料特性,漏磁检测(magnetic flux leakage, MFL)被认为是最有效的输电导线钢芯断股检测方法。MFL技术广泛应用于钢丝绳等铁磁材料的无损检测中,文献[6]从漏磁检测技术的基本理论、影响因素、磁化技术、信号处理等方面介绍了漏磁检测技术的发展。国内外诸多学者就漏磁检测分别从漏磁理论分析、漏磁信号分析及检测装置研究等方面展开了研究。

在漏磁理论分析方面,文献[7]基于磁偶极子模型,从ACSR钢芯断裂的漏磁场特性、漏磁场的周向分布特征及电流对漏磁场的影响3个方面进行了理论分析,并结合数值模拟方法验证了可行性,结果表明,MFL能够准确、可靠地检测钢芯的各种断股故障。文献[8]利用麦克斯韦方程组的第一性原理,结合偶极磁荷感应概念,以表面积分的形式得到了三维磁漏磁场模型。文献[9]利用磁偶极子理论模拟了管道漏磁分布,提出了一种可以识别管道内部或外部缺陷的方法。文献[10]基于安培一

麦克斯韦定律,给出了磁分量的具体表达式。文献[11]基于磁偶极子模型推导了任意单元的磁媒质在场点处产生磁场的积分公式,并利用数值积分法求解得到任一场点处磁场的计算方程。文献[12]提出一种快速求解三维磁场的有限元神经网络模型,该模型极大地简化了有限元的计算过程。

在漏磁信号分析方面,文献[13]对钢丝绳断股的多漏磁信号处理方法进行了比较与分析,提出了8种不同的信号去噪处理方法。文献[14]对静态磁场条件下的钢丝绳不同断丝宽度漏磁信号进行了分析计算,得出了缺陷尺寸与漏磁场分量的关系。文献[15]利用磁集中效应提高了检测信号的信噪比,结果表明磁集中效应可以增强霍尔元件检测到的漏磁信号。文献[16]提出了一种利用霍尔单元阵列与磁聚焦技术相结合的检测方法,实验结果表明该传感器的信噪比高于传统传感器。文献[17]提出了一种用于钢带断丝检测的漏磁方法,在漏磁信号的噪声抑制和特征提取方面具有较好的可靠性。

在检测装置研究方面,文献[18]提出了一种在强电磁干扰环境下对细钢丝绳可进行实时检测的新型漏磁检测装置,该装置输出噪声低,信噪比较高。文献[19]设计了一种对钢芯断股进行漏磁检测的传感器,并利用小生境自适应遗传算法优化了传感器的结构尺寸。文献[20-22]有限元分析了机械振动和电磁噪声对漏磁信号提离值的影响,给出了不同提离值和不同深度缺陷的漏磁场峰值的分布规律,并确定了不同尺寸缺陷的最佳提离值范围。文献[23]设计了一种基于霍尔阵列传感器的钢丝绳无损检测系统,可实现缺陷尺寸的定量分析。文献[24]探究了霍尔元件感应方向与漏磁矢量之间的关系,提出传感器平行或垂直于材料表面

放置分别检测磁场的法向或平行分量。

不难发现,众多学者在漏磁检测领域展开了诸多研究,但大多研究均以钢丝绳等为研究对象,鲜见涉及输电导线钢芯断股方面的研究。而且,在针对断股特征尺寸研究中,仅考虑断股的长、宽及深的特征尺寸,而忽略了 ACSR 实际断股由于导线在交变张拉应力的反复作用及自身螺旋结构影响会使断口与导线的轴向存在一定的夹角,而该夹角可能会对漏磁场的矢量分布情况产生影响,进而影响霍尔元件的布置方式及对漏磁矢量拾取的敏感度。为此,本文在已有的钢丝绳 MFL 基础上,结合 ACSR 的股线存在螺旋角实际情况,建立检测装置的三维有限元模型,以型号为 LGJ630/45 的 ACSR 为研究对象,定量分析不同角度断股的漏磁矢量 B_x 、 B_y 与 B_z 在漏磁场中的分布规律,并对其进行比较分析。

1 漏磁检测理论

漏磁检测是利用外加磁源对被检测段钢芯铝绞线钢芯局部进行饱和磁化^[19],如图 1 所示,由于无损导线钢芯磁导率远远大于空气的磁导率,磁力线几乎均被收敛在钢芯内部,当钢芯存在断裂缺口时,会导致断口处及其附近区域磁导率降低,磁阻增加,从而使断口附近的磁力线发生畸变。如图 2 所示,此时磁通的形式分为 3 部分,大部分磁通在钢芯内部绕过断口从未断裂区域穿过断口,少部分磁通直接穿过断口,还有部分磁通离开钢芯的上、下表面经空气绕过断口,该部分即为漏磁通,可通过磁敏器件检测该部分漏磁信号,从而实现钢芯的断股检测。

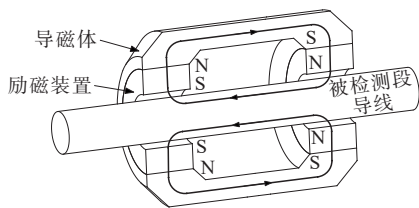


图 1 无损导线磁路示意

Figure 1 Schematic diagram of magnetic circuit of nondestructive conductor

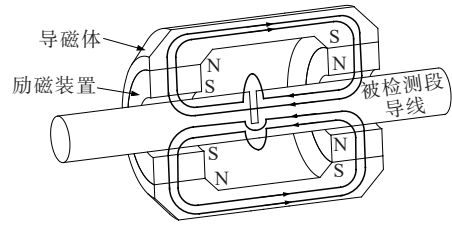


图 2 受损导线磁路示意

Figure 2 Schematic diagram of magnetic circuit of destructive conductor

1.1 磁偶极子理论

根据磁偶极子理论,单位体积磁偶极子的磁化强度 $M^{[2]}$ 可以表示为

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_i m_i \quad (1)$$

式中, ΔV 为单位体积; m 为磁偶极子。

因此,任何体积的绞合线的磁矢量都可以表示为 MdV ,磁偶极子产生的磁场点处的磁矢势 B 可表示为

$$B = -\frac{\mu_0}{4\pi} \oint_S \frac{K_M \times e_r}{r^2} dS \quad (2)$$

式中, $K_M = e_n \times M$, μ_0 为真空磁导率; S 为磁偶极子分布的总面积; r 为磁源位置到检测位置之间的距离。

由磁极强度定义可得磁极强度 P 为

$$P = \mu_0 M \quad (3)$$

继而可得磁荷表面密度 σ_m 为

$$\sigma_m = P \cdot e_n = \mu_0 M \cdot e_n \quad (4)$$

输电导线钢芯磁化后,感应强度 B_s 为

$$B_s = \mu_0 M \quad (5)$$

因此,对于直径为 d_g 的磁荷量 Q 为

$$Q = \frac{\pi}{4} B_s d_g^2 \quad (6)$$

根据式(2)~(5)可得:

$$B = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\sigma_m \times e_r}{r^2} dS = -\frac{Q}{4\pi r^2} \times e_r \quad (7)$$

由于高压输电导线多为钢芯铝绞线,结构较复杂,钢绞线断裂引起的 MFL 也比较复杂,因此,基于磁偶极子模型和磁荷理论,采用定量分析法对断裂钢绞线产生的 MFL 进行分析。

如图 3 所示,直径为 d 的钢芯铝绞线线股,断裂间隙为 2δ ,假设断股两侧都有磁荷,在 $P_1(-l, 0)$ 和

$P_2(l, 0)$ 处的假想磁荷分别为 $+q$ 和 $-q$ 。由于钢芯铝绞线中单根导线的磁场是轴对称的,因此可以在轴平面上讨论断口的磁场分布,根据磁荷分析理论和磁荷叠加原理,在坐标平面上任意点 $P(x, y)$ 处,由2个磁荷产生的磁感应 B_P 等于 $+q$ 和 $-q$ 引起的磁感应的矢量和。

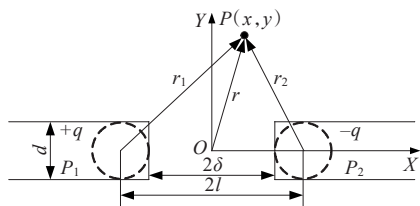


图3 输电导线断股磁偶极子模型

Figure 3 Magnetic dipole model of broken strand in transmission conductor

则磁荷 P_1 在点 P 处产生的磁感应 B_1 为

$$B_1(r) = \frac{-q}{4\pi r_1^2} \cdot e_{r1} = \frac{-q}{4\pi} \cdot \frac{(x+l)i + yj}{((x+l)^2 + y^2)^{3/2}} \quad (8)$$

同理可得磁荷 P_2 在 P 处产生的磁感应 B_2 为

$$B_2(r) = \frac{-q}{4\pi r_2^2} \cdot e_{r2} = \frac{-q}{4\pi} \cdot \frac{(x-l)i + yj}{((x-l)^2 + y^2)^{3/2}} \quad (9)$$

因此,点 P 处产生的磁感应 $B_P(r)$ 为

$$B_P(r) = B_1(r) + B_2(r) \quad (10)$$

$$B_{Px}(x, y) = \frac{q(x-l)}{4\pi((x-l)^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{q(x+l)}{4\pi((x+l)^2 + y^2)^{3/2}} \quad (11)$$

$$B_{Py}(x, y) = \frac{qy}{4\pi((x-l)^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{qy}{4\pi((x+l)^2 + y^2)^{3/2}} \quad (12)$$

1.2 有限元数值计算理论

有限元计算中,稳态漏磁场遵循麦克斯韦方程规律^[25],图2中受损导线漏磁场关系为

$$\nabla \times H = J \quad (13)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (14)$$

$$B = \nabla \times A \quad (15)$$

由此可得到:

$$\nabla \times A \times A = \mu_0(J + \nabla \times M) \quad (16)$$

式中, H 为磁场强度; J 为电流密度; B 为磁通密度; M 为磁化强度; μ_0 为真空磁导率。

通过对上述非线性等式采用有限元分析方法进行迭代数值求解,在给定的区域和边界条件下,计算得到缺陷漏磁场的分布情况^[25]。

2 有限元建模

2.1 检测装置模型的参数确定及简化

基于Ansoft Maxwell 3D^[26]建立三维有限元模型如图4所示,图4(a)模型选用N35钕铁硼永磁体为励磁装置,导磁体采用磁导率较高的纯铁。导磁体、轴向两端放置的2个环形永磁体、气隙以及被检测段导线共同形成闭合磁路。装置结构参数如下:磁极间距为180 mm,气隙为5 mm,型号LGJ630/45的钢芯铝绞线为待测对象,其外径为33.75 mm。因此,环形永磁体内径为43.75 mm,外径为83.75 mm,轴向宽度为40 mm。

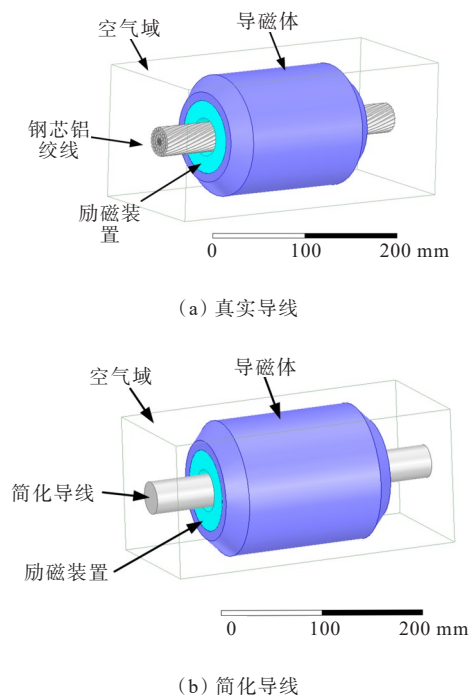


图4 钢芯铝绞线有限元模型

Figure 4 Finite element model of ACSR

真实钢芯铝绞线结构复杂,网格划分数量级较大,且绞合线的网格划分质量较差,计算效率也较低,鉴于钢芯铝绞线与钢丝绳均为绞合而成的相似

特性,参考文献[17]中将钢丝绳简化成同等直径的圆柱形的方法,如图 4(b)所示,该实体模型也将钢芯铝绞线简化成同等直径大小的圆柱体,材料采用钢 1010,在不影响钢芯铝绞线漏磁场断口处及其附近区域分布规律的前提下,提高计算效率。

2.2 钢芯饱和磁化强度和磁化均匀性确定

图 5 为钢 1010 的磁导率曲线,若永磁体磁场强度太低,钢芯未能达到饱和磁化状态,则会影响钢芯断口处漏磁场的强度,然而若磁场强度太高,钢芯的磁化强度达到一定程度后,随着磁场强度的增加其磁化强度增加缓慢,磁化效率较低,且会大幅度增加背景磁场。因此,为使钢芯被永磁体磁化时能够高效率地达到饱和磁化状态,应选择适宜的永磁体磁场强度。

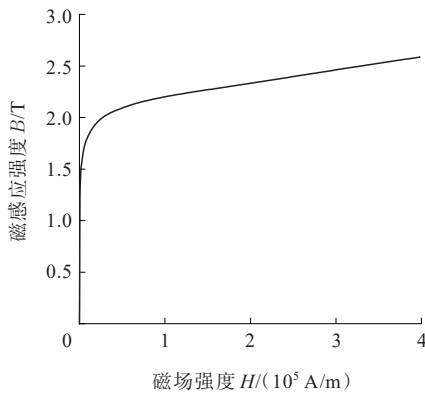


图 5 钢 1010 磁导率曲线

Figure 5 B-H curve of steel 1010

为此,设置永磁体磁场强度 H 分别为 $-1 \times 10^6 \sim -1 \times 10^7$ A/m,对导线轴心方向上中心位置处 80 mm 范围内的磁感应强度进行计算,计算结果如图 6 所示。

由图 6 可知,在 10 种不同的磁场强度下,钢芯的磁感应强度变化趋势一致,在靠近永磁体两端的位置磁感应强度值达到最大,既计算路径中计算位置与计算起始位置(最左端点)的距离 D 为 0 mm 和 80 mm 处,随着计算位置与永磁体距离的增加,磁感应强度值逐渐减小,在中间位置达到最小值,即 $D=40$ mm 处,且随着磁场强度的线性增加,钢芯的磁感应强度由两端到中间位置下降幅度逐渐增大: $H=-1 \times 10^6$ A/m 时,磁感应强度下降了 0.186 7 T,而当 $H=-1 \times 10^7$ A/m 时,磁感应强度下降了 2.6

T。从图 5 可以得知,钢 1010 磁感应强度达到 2.1 T 左右时,即可达到饱和磁化的状态^[27],结合图 6 可得,当磁场强度 $H=-2 \times 10^6$ A/m 时,在 40 mm 处钢芯中间磁感应强度已大于 2.1 T,即已达饱和磁化的状态,因此选用磁场强度 $H=-2 \times 10^6$ A/m 为永磁体的磁场强度。

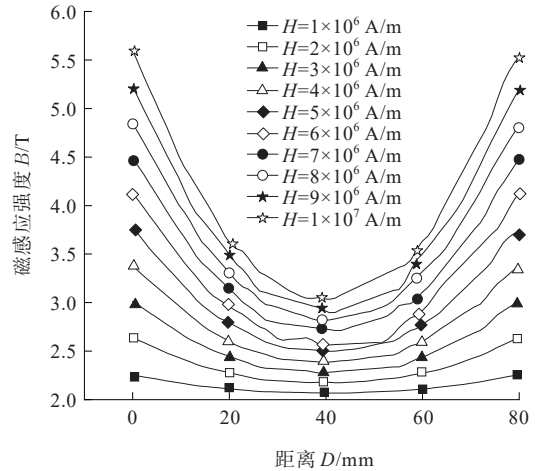


图 6 不同磁场强度下钢芯的磁感应强度

Figure 6 Magnetic induction intensity of steel core under different magnetic field intensities

确定了永磁体的磁场强度,保证了导线达到饱和和磁化状态,还应保证导线的磁化均匀性。为此,选定被检测段导线中间位置的横截面,即磁感应强度最低处,对导线内部不同深度下的磁感应强度进行计算。

如图 7 所示,以计算路径到导线表面的间距为深度 h ,记计算路径上各点的径向方向与 X 轴正方向的夹角为 β ,依次计算了 h 为 1~9 mm 深度下导线的磁感应强度,计算结果如图 8 所示,在不同角度 β 下,不同深度 h 下导线的磁感应强度均分布于 2.271~2.294 T,最大值与最小值相差 0.023 T,由此可见,导线在不同深度下均处于均匀磁化状态下。

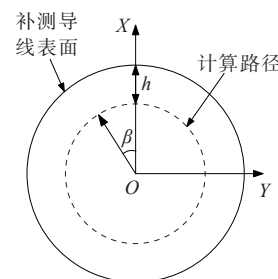


图 7 导线中间位置处横截面

Figure 7 Cross section in the middle of conductor

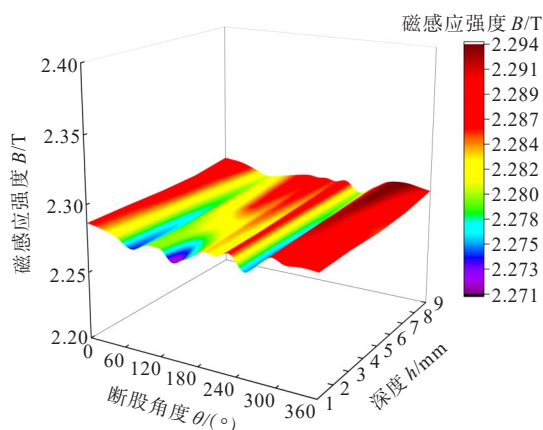


图8 导线不同深度下磁感应强度

Figure 8 Magnetic induction intensities of conductor at different depths

3 漏磁矢量分析

3.1 计算工况及计算路径的设置

漏磁检测中磁敏器件通常选用霍尔元件用于拾取断口缺陷处的漏磁场,将漏磁信号转换为便于处理的电信号^[27]。文献[23-24]指出,霍尔元件的布置方向平行于被检测的表面,测量的是漏磁矢量的法向(垂直)分量,如果霍尔元件布置方向垂直于被检测的表面,那么它测量的将是漏磁矢量的切向(水平)矢量,由此可见,霍尔元件的布置方式不同,所能够拾取的漏磁矢量也不同。鉴于单个霍尔元件只能对一个方向的漏磁信号进行识别,为了能够对受损导线的漏磁场进行准确检测,需要对漏磁场中漏磁矢量分布规律进行研究。

结合导线为绞线的结构特性,单股线存在螺旋角,与导线轴向存在一定的夹角,且在交变张力、交变拉力、交变应力的反复作用下,在导线断股时会发生扭转,从而使断股断口与轴向也存在一定的夹角。为此,基于与导线轴向存在不同角度的断股,模拟霍尔元件周向布置方式下,对导线断股处漏磁场中 X 、 Y 、 Z 方向上磁感应强度 B_x 、 B_y 与 B_z 矢量进行计算。如图9所示,采用长 $L=24$ mm,宽 $b=3$ mm,高 $h=5$ mm的立方体,分别与导线轴向存在不同夹角 θ 的情况下与导线做布尔减操作,从而模拟形成导线断股,依次讨论了 θ 为 $0^\circ\sim 165^\circ$,间隔为 15° ,共计12种工况下,对 B_x 、 B_y 与 B_z 漏磁矢量的计算情况。

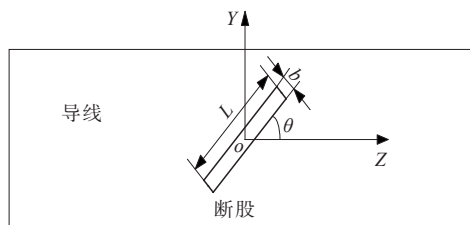


图9 导线断股示意

Figure 9 Schematic diagram of conductor broken strand

霍尔元件与被测导线表面之间的间距为提离值,文献[20-22]分析了提离值与漏磁场的关系,根据漏磁信号的峰值分布情况,以及结合误差分析,得出最佳提离值的范围为 $1.5\sim 3.0$ mm。参考常用霍尔元件感应距离一般为5 mm以内,选用提离值为2 mm。如图10所示,在距离导线表面2 mm处设置周向计算路径,模拟霍尔元件的周向布置,依次讨论了断股在12种角度工况下,周向布置霍尔元件角度 β 于 $0^\circ\sim 360^\circ$ 的漏磁矢量在 X 、 Y 、 Z 3个方向上的分布情况。

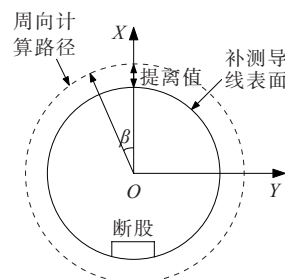


图10 周向计算路径模拟霍尔元件周向布置

Figure 10 Circumferential calculation path simulating the circumferential arrangement of Hall elements

3.2 不同断股角度下漏磁矢量 B_x 、 B_y 与 B_z 的分布情况

计算结果如图11~13所示,分别显示了12种断股角度 θ 在周向计算路径不同角度 β 处的漏磁矢量 B_x 、 B_y 、 B_z 在 X 、 Y 、 Z 3个方向上的分布情况。

图11显示了12种断股角度工况下漏磁矢量 B_x 的分布情况。整体来看,断股在除 90° 外的其他工况下的 B_x 矢量分别出现了2个正峰和2个负峰,正负峰均分布于提离路径角度 $\beta=180^\circ$ 的左右两侧。当断股角度 θ 小于 90° 时, B_x 矢量于 $\beta=180^\circ$ 的左侧出现负峰,在右侧出现正峰,在 θ 为 75° 时负峰值最大为 -176.4 mT,在 θ 为 60° 时正峰值最大为 130.4 mT。当断股角度大于 90° 时, B_x 矢量于 $\beta=180^\circ$ 的左侧出现正峰,在右侧出现负峰,在 θ 为 105° 时负峰值最大为 -151.2 mT,在 θ 为 120° 时正峰值最大为 122.2 mT。由此可知,在断股两侧,以 90° 为分界点,

B_x 矢量的正负峰分布特征相反。而 θ 等于 90° 时, B_x 矢量正峰出现于 $\beta=180^\circ$ 处, 正峰值仅有 24.8 mT。

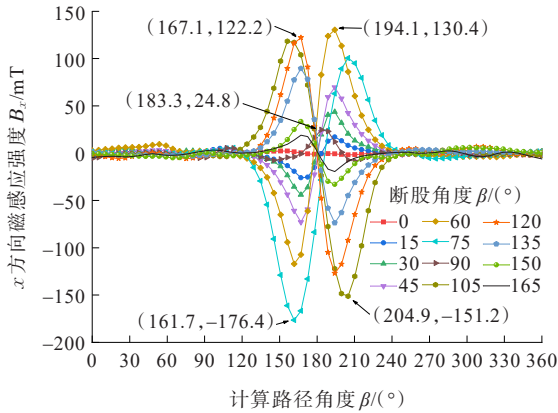


图 11 断股不同角度工况下 B_x 矢量

Figure 11 B_x vector under different angle conditions of broken strand

图 12 显示了 12 种断股角度工况下漏磁矢量 B_y 的分布情况。整体来看, B_y 矢量分别出现了 3 个正峰和 3 个负峰, 正负峰分别分布于偏离路径角度 $\beta=180^\circ$ 处以及其左右两侧。当断股角度 θ 小于 90° 时, B_y 矢量波形呈现出“M”型, 在 $\beta=180^\circ$ 的左右两侧出现 2 个正峰, 而在 $\beta=180^\circ$ 处出现负峰, 且两处正峰均在断股角度为 75° 时峰值最大, 其值分别为 87.8 mT 和 69.4 mT。当 θ 大于 90° 时, B_y 矢量波形呈现出“W”型, 在 $\beta=180^\circ$ 的左右两侧出现 2 个负峰, 而在 $\beta=180^\circ$ 处出现正峰, 且最大负峰均出现在在断股角度为 105° 处, 其值分别为 -66.7 mT 和 -95.0 mT。由此可知, 在断股两侧, 以 90° 度为分界点, B_y 矢量正负峰分布特征相反。

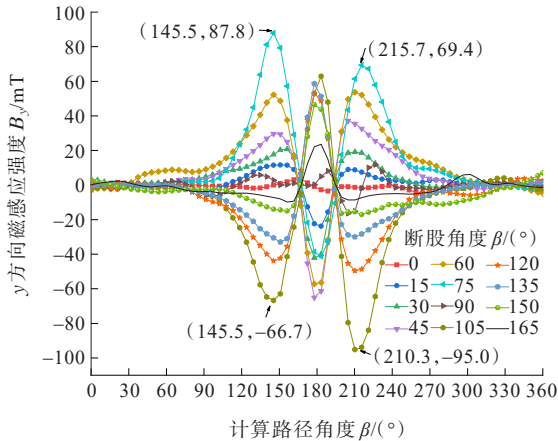


图 12 断股不同角度工况下 B_y 矢量

Figure 12 B_y vector under different angle conditions of broken strand

图 13 显示了 12 种角度工况下漏磁矢量 B_z 的分布情况。整体来看, 断股在除 90° 之外的其他角度工况下的 B_z 矢量均在 $\beta=180^\circ$ 附近出现一个正峰, B_z 矢量与矢量 B_x 、 B_y 多峰值形态不同, 只有单峰。而在断股角度为 90° 时波形与其他角度工况下单峰值形态不同, 在 $\beta=180^\circ$ 左右处出现 2 个正峰。文献[7]也指出当断股宽度达到一定值时, 漏磁轴向分量会出现 2 个峰值。断股角度为 90° 时峰值形态与其他角度工况不同, 分析其原因: 由导线断股磁偶极子模型理论, 如图 1 所示, 导线断股两侧产生的磁荷 ($+Q$, $-Q$) 极性相反, 任意计算点 P 处的漏磁矢量为断股两侧磁偶极子叠加的矢量和。当断股角度 θ 为 90° 时, 其断股的宽度方向与 B_z 矢量方向相同, 而周向计算路径正好均处于断股断口的长边两侧之间的中心位置, 即计算区域处于相距断股断口的长边两侧位置的最远处, 由于随着计算点与断股断口距离的增加, 计算域更多地暴露于空气域中, 而空气的磁导率低, 敛磁性较差, 因而会导致此区域内磁感应强度较靠近断股两侧区域有所下降, 从而形成了两边凸, 中间凹的形态。而其他断股角度工况下, 计算路径均会经过断股两侧的断口位置的正上方, 距离断口位置较近, 从而分布于断口两侧的磁偶极子叠加产生的磁感应强度在该处达到最大值。

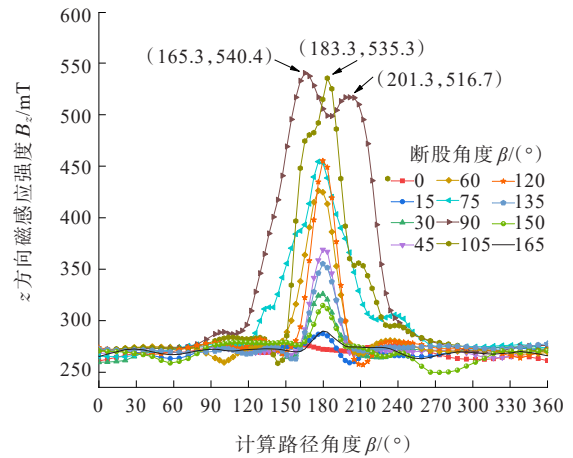
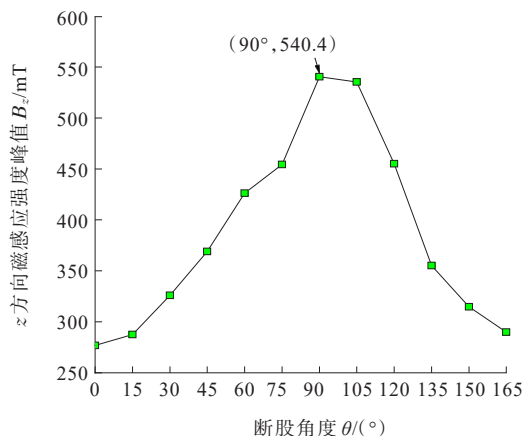


图 13 断股不同角度工况下 B_z 矢量

Figure 13 B_z vector under different angle conditions of broken strand

B_z 矢量峰值 B_{z_p} 随断股角度 θ 变化情况如图 14 所示, 各断股角度的峰值大小, 在断股角度 θ 小于 90° 时, 与 θ 呈正相关, 在断股角度 θ 大于 90° 时, 与 θ 呈负相关, 在各工况下 90° 时正峰值最大为 540.4 mT。

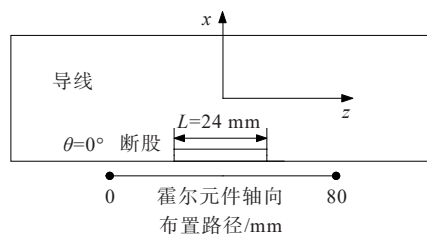
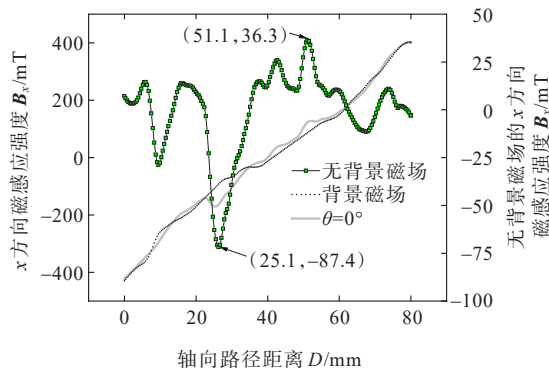
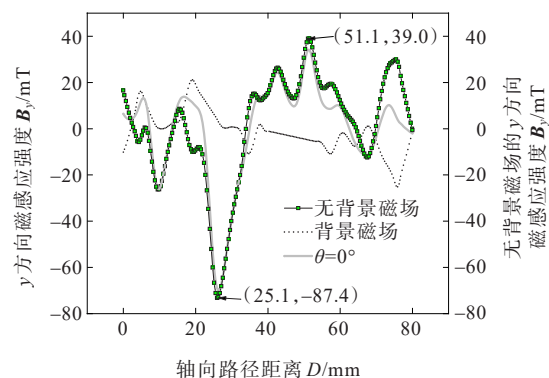
图 14 B_{zp} 随 θ 变化情况Figure 14 B_{zp} variation with θ

结合对比图 12~14 发现,漏磁矢量 B_x 、 B_y 、 B_z 在断股角度 θ 为 0° 时,其漏磁矢量大小均未发生明显变化。为此,考虑到断股角度为 0° 的工况下,其恰巧为输电导线钢芯的轴心发生断股,对于输电导线的安全运行尤为重要,因此需要对断股角度 θ 为 0° 的工况进行定量分析。

3.3 断股角度 θ 为 0° 的定量分析

分析漏磁矢量 B_x 、 B_y 、 B_z 在断股角度 θ 为 0° 时其大小均未发生明显变化的原因是:当断股角度为 0° 时,断股断口轴向两侧距离该计算路径太远,而断股产生的漏磁场主要为断口两侧截面突变引起而非断口中间,断口产生的漏磁场无法影响到该周向计算路径处所计算的磁感应强度,从而无法拾取到断口两侧的漏磁场,而该路径所计算的各空间点的磁场矢量以背景磁场为主,导致漏磁矢量 B_x 、 B_y 、 B_z 在断股角度 θ 为 0° 时其大小均未发生明显变化。为此,改变原有周向计算路径,重新选择计算路径对断股角度为 0° 时进行定量分析。鉴于真实的单个霍尔元件具有一定的轴向检测范围,改变原有周向计算路径为轴向计算路径,用于模拟霍尔元件沿 Z 轴轴向布置,如图 15 所示,该计算路径轴向间离为 80 mm,断股两侧断口所对应于计算路径的 28 mm 和 52 mm 处,计算路径位于断股的正下方 2 mm 处,即偏离值仍为 2 mm。

在该计算路径下依次讨论了未断股钢芯与断股角度 $\theta=0^\circ$ 时的漏磁矢量 B_x 、 B_y 、 B_z ,分别得出了无背景磁场条件下断股角度 $\theta=0^\circ$ 时的漏磁矢量 B_x 、 B_y 、 B_z 的变化情况,计算结果如图 16~18 所示。

图 15 断股角度 $\theta=0^\circ$ 的轴向布置路径Figure 15 Axial arrangement path with broken strand angle θ at 0° 图 16 $\theta=0^\circ$ 时有无背景磁场 B_x 矢量Figure 16 B_x vector with and without background magnetic field when θ at 0° 图 17 $\theta=0^\circ$ 时有无背景磁场 B_y 矢量Figure 17 B_y vector with and without background magnetic field when θ at 0°

由图 16 可得,断股角度 θ 为 0° 时 B_x 漏磁矢量与背景磁场变化趋势相同,均与轴向路径间距呈正相关,且漏磁矢量与背景磁场的值较接近,通过将断股角度为 0° 的漏磁场与背景磁场作差,得到了无背景磁场的漏磁场,发现在计算路径为 25.1 mm 时出现了一个最大的负峰,峰值为 -87.4 mT,最大的正峰位于 51.1 mm 处,峰值为 36.3 mT,最大负峰和正峰均出现在断股两侧断口附近。由图 17 所示,无背景磁场下的 B_y 矢量最大负峰和正峰出现的位置与 B_x 矢量相同,且负峰值也相同,正峰值仅相差 2.7 mT。

图 18 显示为 $\theta=0^\circ$ 工况下有无背景磁场的 B_z 矢量分布情况,在断股两侧断口处出现 2 个正峰和负峰,且 B_z 矢量出现较大的突变,无背景磁场下在左侧断口处 B_z 矢量突增 167.9 mT,在右侧断口处 B_z 矢量突降 166.7 mT,最大负峰值和正峰值分别为 -89.2 mT 和 88.0 mT,其峰值的绝对值均大于 B_x 和 B_y 矢量, B_x 、 B_y 矢量的最大正峰值分别仅为 B_z 矢量最大正峰值的 41.25% 和 44.32%。

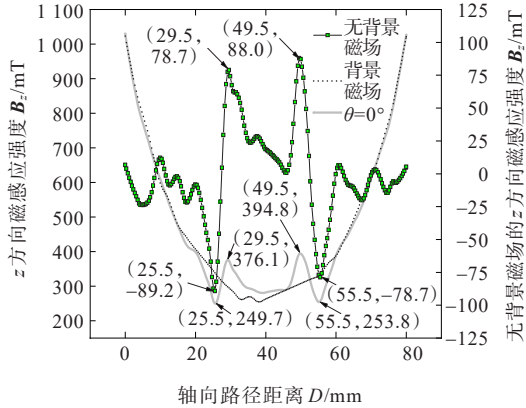


图 18 $\theta=0^\circ$ 时有无背景磁场 B_z 矢量

Figure 18 B_z vector with and without background magnetic field when θ at 0°

3.4 各漏磁矢量对各断股角度的敏感性对比分析

综合对比模拟霍尔元件周向布置方式所计算的漏磁矢量 B_x 、 B_y 与 B_z , B_x 与 B_y 波形呈现多峰形态,波形较复杂,而 B_z 矢量只有在 θ 为 90° 时由于断股宽度的影响出现 2 个正峰,其他工况均为单峰形态,波形较简单。且各矢量分布特征也不尽相同,矢量 B_x 与 B_y 以 90° 为分界点,正负峰分布特征相反。另外,3 个方向的漏磁矢量正负峰值大小差异较大。

图 19 显示了漏磁矢量 B_x 、 B_y 与 B_z 的正峰值对比雷达图,可知漏磁矢量 B_x 与 B_y 在 12 种断股角度工况下的正峰值大小均较为接近,且峰值较小,在断股角度为 0° 时,在 B_x 与 B_y 正峰值均达到了最小值,分别为 2.3 mT 和 3.3 mT,但漏磁矢量 B_z 在 12 种断股角度工况下的正峰值远远大于 B_x 与 B_y ,在断股角度为 90° 时差值最大, B_z 正峰值分别比 B_x 与 B_y 正峰值高出了为 515.6 mT 和 528.7 mT, B_x 与 B_y 正峰值分别仅为 B_z 正峰值的 4.5% 和 2.2%。图 20 显示了漏磁矢量 B_x 和 B_y 负峰值绝对值与 B_z 正峰值对比雷达图,矢量 B_z 在 12 种断股角度工况下的正峰值也远远大于 B_x 与 B_y 负峰值的绝对值,在断股角度为 90° 时差值最大, B_z 正峰值分别比 B_x 与 B_y 负峰

值的绝对值高出了为 532.1 mT 和 524.8 mT, B_x 与 B_y 负峰值的绝对值分别仅为 B_z 正峰值的 1.5% 和 2.9%。

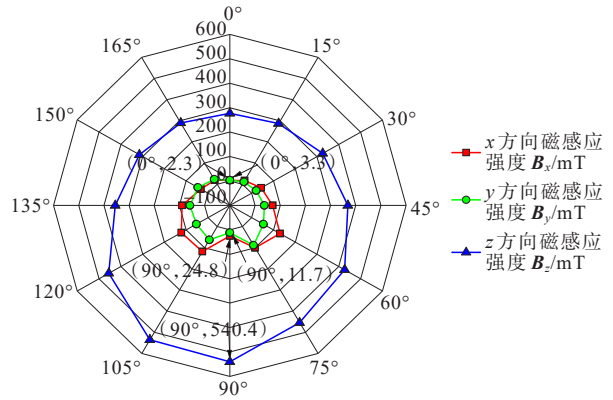


图 19 矢量 B_x 、 B_y 、 B_z 正峰值对比雷达图

Figure 19 Positive peaks of vectors B_x 、 B_y 、 B_z radar chart

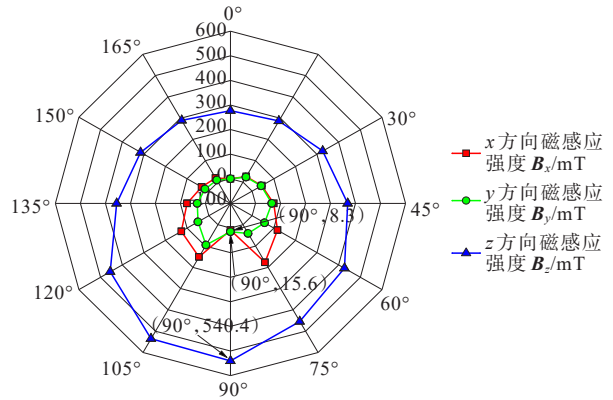


图 20 矢量 B_x 和 B_y 负峰值绝对值与 B_z 正峰值对比雷达图

Figure 20 Absolute values of negative peaks of vectors B_x 、 B_y 、 B_z contrast radar chart

图 21 显示了断股在不同角度工况下漏磁矢量 B_z 的曲面图。可明显看出在除断股角度 $\theta=0^\circ$ 的其余 11 种工况下, B_z 矢量在模拟周向布置霍尔元件计算路径下断股处均发生了明显的磁通泄漏现象,结合图 17~19, $\theta=0^\circ$ 工况在模拟轴向布置霍尔元件计算路径下有无背景磁场 B_x 、 B_y 、 B_z 矢量分析, B_x 、 B_y 矢量的正峰值分别仅为 B_z 矢量正峰值的 41.25% 和 44.32%。可以综合得出, B_z 矢量在各断股角度工况下均有明显的磁通泄漏现象, B_x 、 B_y 、 B_z 漏磁矢量中 B_z 矢量较与 B_x 、 B_y 矢量更易于体现出导线断股情况, B_z 矢量的磁通泄漏现象优于 B_x 、 B_y 矢量。由此可知导线断股产生的漏磁场中漏磁矢量 B_z 占主要成分,因此对于周向布置霍尔元件,应以拾取漏磁矢量 B_z 为检测依据,所以霍尔元件的布置方向应垂直于被检测的表面,测量漏磁矢量的切向(水平)矢量,在该模型中即为轴向 B_z 矢量。

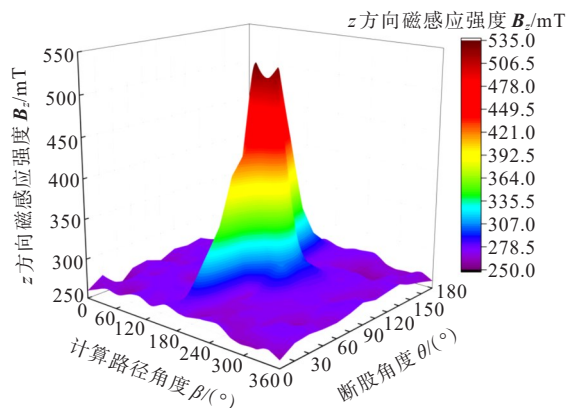


图 21 断股不同角度工况下漏磁矢量 B_z 曲面图

Figure 21 Surface graph of flux leakage vector B_z under different broken strand angle conditions

4 结语

基于漏磁检测原理,以 Ansoft Maxwell 建立三维实体模型对简化导线进行了讨论,分析了导线钢芯断股角度在 12 种不同工况下漏磁矢量 B_x 、 B_y 、 B_z 的分布规律,并对比了漏磁矢量 B_x 、 B_y 、 B_z 之间的差异,从而确定了霍尔元件的布置方向。可以得到以下结论:

1) B_x 矢量在除断股角度 $\theta=90^\circ$ 外的其他工况下于周向计算路径角度 $\beta=180^\circ$ 的左右两侧呈现“两正两负”的多峰形态,且以 $\beta=90^\circ$ 度为分界点, B_x 矢量的正负峰分布特征相反;

2) B_y 矢量在 12 种断股角度工况下于 $\beta=180^\circ$ 处及其左右两侧呈现出“三正三负”的多峰形态,当 θ 小于 90° 时, B_y 矢量波形呈现出“M”型,而 θ 大于 90° 时呈现出“W”型,在断股两侧,以 $\beta=90^\circ$ 度为分界点, B_y 矢量正负峰分布特征相反;

3) B_z 矢量与 B_x 、 B_y 矢量多峰形态不同,只有在 θ 为 90° 时由于断股宽度的影响出现 2 个正峰,其他工况均为单峰形态,且其峰值在断股角度小于 90° 时,与 θ 呈正相关,在断股角度 θ 大于 90° 时,与 θ 呈负相关,在断股角度下 90° 时峰值最大;

4) 漏磁矢量 B_z 在 12 种断股角度工况下的峰值远远大于 B_x 与 B_y ,在断股角度为 90° 时差值最大, B_x 与 B_y 正峰值分别仅为 B_z 正峰值的 4.5% 和 2.2%,负峰值绝对值仅为 B_z 正峰值的 1.5% 和 2.9%,导线钢芯断股产生的漏磁场中漏磁矢量 B_z 占主要成分,对

于断股漏磁场的敏感度矢量 B_z 较与 B_x 与 B_y 矢量更高,霍尔元件应垂直于导线表面放布置以拾取矢量 B_z 为最有效的信号检测方向。

参考文献:

- [1] 周超,芮晓明.高压输电线风雨激振特性研究及数值分析[J].振动与冲击,2013,32(6):173-175+194.
ZHOU Chao, RUI Xiaoming. Model of rain-induced vibration of transmission line and numerical analysis[J]. Journal of Vibration and Shock,2013,32(6):173-175+194.
- [2] 麻卫峰,王成,王金亮,等.基于激光点云的高压输电线覆冰厚度反演[J].电力系统保护与控制,2021,49(4):89-95.
MA Weifeng, WANG Cheng, WANG Jinliang, et al. Inversion of ice thickness for high voltage transmission line based on a LiDAR point cloud[J]. Power System Protection and Control,2021,49(4):89-95.
- [3] 刘闯,何沁鸿,卢银均,等.输电线路 PSOEM-LSSVM 覆冰预测模型[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):131-137.
LIU Chuang, HE Qinrong, LU Yinjun, et al. PSOEM-LSSVM forecasting model for the transmission lines icing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(6):131-137.
- [4] 蔡成良,丁一工,康宜华,等.基于涡流和漏磁检测原理的输电线路导线损伤检测[J].电网技术,2000,24(11):18-22.
CAI Chengliang, DING Yigong, KANG Yihua, et al. Conductor defect inspection of transmission line based on eddy current and leakage magnetic flux[J]. Power System Technology,2000,24(11):18-22.
- [5] 孙峰,陈民铀,罗涛,等.输电线路断股、损伤故障检测方法比较性研究[J].微计算机信息,2010,26(7):132-134.
SUN Feng, CHEN Minyou, LUO Tao, et al. The comparative research of detecting high-voltage transmission wire damage, broken strands faults detection methods[J]. Microcomputer Information,2010,26(7):132-134.
- [6] ZHANG Peng, WEI Minghui, GUO Zhiyong, et al. Advances in magnetic flux leakage testing technology[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2021, 1(12): 1-11.
- [7] JIANG X L, XIA Y F. A LMF based broken strand faults detection scheme for steel core in ACSR[C]//2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, New Orleans, LA, USA, 2010.
- [8] DUTTA S M, GHORBEL F H, RK S. Dipole modelling of magnetic flux leakage[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009,45(4):1959-1965.

- [9] LIU B, CAO Y, ZHANG H, et al. Weak magnetic flux leakage: a possible method for studying pipeline defects located either inside or outside the structures[J]. *NDT & E International*, 2015, 74: 81-86.
- [10] SUN Y H, LIU S W, DENG Z Y, et al. New discoveries on electromagnetic action and signal presentation in magnetic flux leakage testing[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, 38(4): 93.
- [11] 刘芙妍, 颜冰. 磁偶极子阵列模型的适用性研究与优化分析[J]. *物理学报*, 2022, 71(12): 124101.
LIU Fuyan, YAN Bing. Applicability and optimization analysis of magnetic dipole array model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(12): 124101.
- [12] 王泽忠, 刘恪, 李明洋, 等. 不同性质负载下特高压变压器直流偏磁特性分析[J]. *高压电器*, 2021, 57(5): 7-13.
WANG Zezhong, LIU Ke, LI Mingyang, et al. Analysis of DC magnetic bias characteristics of UHV transformer under load with different properties[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(5): 7-13.
- [13] LIU S W, SUN Y H, JIANG X Y, et al. Comparison and analysis of multiple signal processing methods in steel wire rope defect detection by hall sensor[J]. *Measurement*, 2021, 171: 108768.
- [14] GAO G H, GAO L. Signal analysis of broken wires fault with different width[C]// *International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2017)*, Beijing, China, 2017.
- [15] MA Y L, HE R Y, CHEN J Z. A method for improving SNR of drill pipe leakage flux testing signals by means of magnetic concentrating effect[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(9): 1-7.
- [16] WANG H Y, TIAN J E, MENG G Y. A sensor model for defect detection in mine hoisting wire ropes based on magnetic focusing[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2017, 59(3): 143-148.
- [17] LEI H M, TIAN G Y. Broken wire detection in coated steel belts using the magnetic flux leakage method[J]. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2013, 55(3): 126-131.
- [18] YAN X L, ZHANG D L, PAN S M, et al. Online nondestructive testing for fine steel wire rope in electromagnetic interference environment[J]. *NDT & E International*, 2017, 92: 75-81.
- [19] 夏云峰, 蒋兴良, 张志劲, 等. 应用小生境遗传算法优化导线钢芯断股漏磁检测传感器[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(19): 122-128.
XIA Yunfeng, JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, et al. Optimization design of detector for steel core broken strand faults in transmission line based on niche genetic algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(19): 122-128.
- [20] WU D H, ZHANG Z Y, LIU Z L, et al. Simulation and analysis on the best range of lift-off values in MFL testing[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 321/322/323/324: 811-814.
- [21] 吴德会, 柳振凉, 张忠远, 等. 漏磁检测中提离值影响的三维有限元仿真分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(6): 1188-1198.
WU Dehui, LIU Zhenliang, ZHANG Zhongyuan, et al. 3-D FEM simulation of lift-off effects on magnetic flux leakage testing[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(6): 1188-1198.
- [22] WU D H, SUN L X, WANG X H, et al. A novel non-destructive testing method by measuring the change rate of magnetic flux leakage[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36(2): 1-11.
- [23] LI L J, ZHANG X G. Discrimination method of wire rope fault signal based on Holzer sensor for multi array weak magnetic detection[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(2): 4901-4906.
- [24] GÖKTEPE M. Investigation of B_x and B_y components of the magnetic flux leakage in ferromagnetic laminated sample[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 2013: 1-8.
- [25] 郑玉平, 龚心怡, 潘书燕, 等. 变压器匝间短路故障工况下的漏磁特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(15): 121-127.
ZHENG Yuping, GONG Xinyi, PAN Shuyan, et al. Analysis on leakage flux characteristics of turn-to-turn short-circuit fault for power transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15): 121-127.
- [26] 田劼, 赵彩跃. 基于3D Maxwell的钢丝绳漏磁检测仿真研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(7): 152-156.
TIAN Jie, ZHAO Caiyue. Simulation on magnetic leakage detection of steel wire rope based on 3D Maxwell[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(7): 152-156.
- [27] 李岱岩, 张艳丽, 荆盈, 等. 基于J-A模型的电工钢片磁致伸缩特性模拟与实验[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(20): 5081-5091.
LI Daiyan, ZHANG Yanli, JING Ying, et al. Modeling of magnetostrictive characteristics in an electrical steel sheet based on the J-A model and its experimental verification[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(20): 5081-5091.