

文章编号: 1671-251X(2025)02-0148-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024100013

钢丝绳断丝漏磁场分布规律三维动态仿真分析

魏明江¹, 战卫侠¹, 尚允坤², 刘继兵³, 刘耀¹

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 常州市大成真空技术有限公司, 江苏 常州 213000; 3. 蚌埠市特种设备监督检验中心, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 目前钢丝绳断丝漏磁场分布规律的仿真研究主要使用有限元静态磁场仿真模型, 该模型中钢丝绳与损伤检测仪器之间是相对静止状态, 而现场检测时钢丝绳与损伤检测仪器之间有相对运动, 导致仿真获得的漏磁场与现场检测的漏磁场存在偏差。针对上述问题, 采用 Ansoft Maxwell 电磁仿真软件建立了钢丝绳三维动态磁场仿真模型, 仿真钢丝绳与损伤检测仪器之间相对运动状态下的断丝漏磁场, 分析了不同断口宽度、断丝数量及脱离值对断丝轴向漏磁场峰峰值的影响规律。仿真结果表明: 三维动态磁场仿真模型可以模拟钢丝绳与损伤检测仪器之间的相对运动状态, 仿真计算的漏磁场含有断丝漏磁场和钢丝绳绳股漏磁场, 更接近实际漏磁场; 断丝轴向漏磁场峰峰值随着断口宽度的增加呈先增大后减小的趋势, 断丝轴向漏磁场峰峰值变化与断丝数量呈正相关、与脱离值呈负相关。通过建立三维磁偶极子模型对断丝轴向漏磁场峰峰值进行分析, 验证了三维动态磁场仿真模型分析结果的正确性。

关键词: 钢丝绳断丝; 漏磁检测; 漏磁场; 三维动态磁场; 断丝数量; 断口宽度; 脱离值
中图分类号: TD532 文献标志码: A

Three-dimensional dynamic simulation analysis of magnetic flux leakage distribution in broken strands of wire ropes

WEI Mingjiang¹, ZHAN Weixia¹, SHANG Yunkun², LIU Jibing³, LIU Yao¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
2. Changzhou Dacheng Vacuum Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, China;
3. Bengbu Special Equipment Supervision and Inspection Center, Bengbu 233000, China)

Abstract: Current simulation studies on the distribution pattern of magnetic flux leakage (MFL) in broken strands of wire ropes primarily use finite element static magnetic field simulation models. In these models, the wire rope and the damage detection instrument remain relatively stationary. However, during actual field inspections, there is relative motion between the wire rope and the detection instrument, leading to deviations between the simulated and actual MFL signals. To address this issue, this study established a three-dimensional dynamic magnetic field simulation model using Ansoft Maxwell electromagnetic simulation software. The model simulated the MFL of broken wires under relative motion conditions and analyzed the effects of different break widths, numbers of broken wires, and lift-off values on the peak-to-peak axial MFL. The simulation results show that the three-dimensional dynamic magnetic field simulation model can replicate the relative motion between the wire rope and the detection instrument. The simulated MFL include both the MFL caused by broken wires and that caused by wire strands, making it more representative of actual leakage fields. The peak-to-peak axial MFL initially increases and then decreases as the break width increases. Additionally, the peak-to-peak axial MFL

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2025-02-26; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021ME026, ZR2020QE158)。

作者简介: 魏明江(1998—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为钢丝绳损伤无损检测, E-mail: 2797628131@qq.com。

引用格式: 魏明江, 战卫侠, 尚允坤, 等. 钢丝绳断丝漏磁场分布规律三维动态仿真分析[J]. 工矿自动化, 2025, 51(2): 148-154, 162.

WEI Mingjiang, ZHAN Weixia, SHANG Yunkun, et al. Three-dimensional dynamic simulation analysis of magnetic flux leakage distribution in broken strands of wire ropes[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(2): 148-154, 162.



扫码移动阅读

exhibit a positive correlation with the number of broken wires and a negative correlation with the lift-off value. The accuracy of the three-dimensional dynamic magnetic field simulation model is further validated by establishing a three-dimensional magnetic dipole model to analyze the peak-to-peak axial MFL.

Key words: broken strands of wire rope; magnetic flux leakage (MFL) detection; magnetic flux leakage; three-dimensional dynamic magnetic field; number of broken wires; break width; lift-off value

0 引言

钢丝绳具有弯曲性能好、承载能力强、质量轻和结构多样性等优点,被广泛应用于矿井牵引和承载工作中^[1]。钢丝绳作为牵引和承载设备的关键构件,在长期作业过程中会受到腐蚀、冲击等影响,再加上处于承力、弯曲等工作状态,会出现断丝、锈蚀等损伤^[2-3]。断丝是在役钢丝绳常见的损伤类型,钢丝绳产生断丝后,剩余强度降低,削弱其承载能力,严重时可导致钢丝绳断裂,出现极大的安全隐患^[4-6]。为确保钢丝绳安全服役,各行业制定了相应的钢丝绳报废定量标准,其中钢丝绳断丝数量是评判钢丝绳是否报废的主要指标^[7-8]。漏磁检测因其原理简单、实施成本较低、检测效果好,成为目前钢丝绳无损检测最主要的方法之一^[9-11]。现场漏磁检测时将钢丝绳置于检测仪器中,通过移动钢丝绳或检测仪器进行扫描检测^[12],分析检测到的漏磁场,从而了解钢丝绳损伤状态,及时更换达到报废标准的钢丝绳,确保钢丝绳安全运行。

为建立断丝与漏磁场的定量关系,需通过理论计算方法分析钢丝绳断丝漏磁场分布规律。理论计算钢丝绳断丝漏磁场的方法分为解析法和数值法。解析法通过简化钢丝绳损伤模型建立等效磁偶极子模型,该模型最早用来模拟点状缺陷和裂纹的漏磁场^[13-15]。K. Seleznyova等^[16]建立了3种不同的磁偶极子模型,实现了磁偶极子模型的磁力线可视化。窦连城等^[17]采用二维磁荷模型对钢丝绳断丝漏磁场进行分析,得出钢丝绳断丝轴向漏磁场计算公式与磁场分布形态。解析法能够精确地计算出漏磁场,但在计算钢丝绳绳股漏磁场时存在困难。数值法是利用麦克斯韦方程组分析漏磁场参数变化,且利用有限元分析钢丝绳缺陷漏磁场的数值法研究较为完善。李登蓬^[18]使用有限元仿真软件建立了二维静态磁场仿真模型,对磁回路的磁化状态进行分析,验证了钢丝绳的磁化饱和状态。郭永亮^[19]通过建立钢丝绳二维动态磁场仿真模型,研究钢丝绳绳股漏磁场,证明了用直线运动对钢丝绳绳股漏磁场进行仿真的方法是可行的。朱良^[20]使用三维静态磁场仿真模型分析了断口参数变化对漏磁场的影响。目前钢丝绳断丝漏磁场分布规律的仿真研究主要使用有限元静

态磁场仿真模型,该模型中钢丝绳与损伤检测仪器是相对静止的,而现场钢丝绳损伤检测过程中钢丝绳与损伤检测仪器之间有相对运动,因此静态磁场仿真漏磁场和实际检测获得的漏磁场存在偏差。

为准确仿真钢丝绳与损伤检测仪器相对运动状态下的漏磁场,本文使用Ansoft Maxwell电磁仿真软件,基于漏磁无损检测原理,建立钢丝绳三维动态磁场仿真模型,分析不同断口宽度、断丝数量和提离值下断丝轴向漏磁场分布规律。

1 钢丝绳漏磁无损检测原理和漏磁场特征定义

钢丝绳漏磁无损检测原理如图1所示。使用永磁体将钢丝绳磁化至饱和,钢丝绳与气隙、永磁体、衔铁形成磁回路,钢丝绳出现断丝等损伤时,断口位置的磁阻会增大,有一部分磁通量泄漏至空气中形成漏磁场。使用霍尔元件等磁敏元件检测漏磁场,实现钢丝绳损伤状态的识别^[21]。

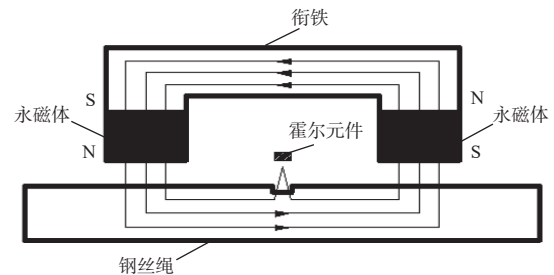


图1 钢丝绳漏磁无损检测原理

Fig. 1 Principle of magnetic flux leakage(MFL) non-destructive testing of wire rope

钢丝绳轴向漏磁场磁感应强度如图2所示。中间位置为钢丝绳断丝轴向漏磁场, P_z 为钢丝绳断丝轴向漏磁场峰峰值, 两侧类正弦波为钢丝绳绳股漏磁场。

2 基于三维动态磁场仿真模型的钢丝绳断丝漏磁场分析

Ansoft Maxwell 软件可通过设置模型的尺寸、结构和材料电磁属性,仿真分析二维/三维模型的静态磁场或动态磁场,根据钢丝绳漏磁无损检测原理,提取待检测位置仿真漏磁场^[22]。

Ansoft Maxwell 依据麦克斯韦方程组进行仿真计算:

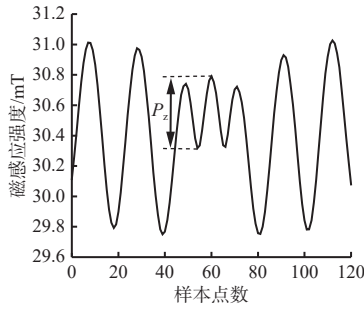


图 2 钢丝绳轴向漏磁场磁感应强度

Fig. 2 Magnetic induction intensity of axial leakage magnetic field

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_0 + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇ 为矢量微分算子; \mathbf{D} 为电位移; ρ_0 为自由电荷密度; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{j}_0 为传导电流密度; t 为时间。

静态磁场仿真中模型是静止的, 只能仿真模型单一时间节点的磁场状态; 动态磁场仿真可以通过设置部分模型的运动速度和方向仿真模型运动时间内任意时间节点的瞬时磁场状态。动态磁场仿真相较于静态磁场仿真, 其仿真结果含有断丝漏磁场和钢丝绳绳股漏磁场, 更接近实际情况下钢丝绳漏磁信号, 因此使用动态磁场仿真钢丝绳断丝漏磁场。

三维动态磁场仿真模型包括钢丝绳模型和励磁结构模型。根据 6×37+FC 的钢丝绳结构建立简化钢丝绳模型, 模型直径为 43 mm, 断丝设置在钢丝绳中间位置表面, 使用与钢丝绳绳股旋向相同的矩形凹槽表示断丝情况, 不同断丝参数设置见表 1。

表 1 不同断丝参数设置

Table 1 Settings for different broken strands parameters

断丝数量/根	断丝截面长度/mm	断丝深度/mm
1	2	2
2	4	2
3	6	2
4	8	2

励磁结构模型由永磁体和衔铁组成, 如图 3 所示, 采用 1 对径向充磁的环形永磁体进行励磁, 永磁体材料为钕铁硼, 磁铁之间的导磁部件为衔铁, 材料为工业纯铁, 其余部分设置为空气。

励磁结构模型轴线与钢丝绳模型轴线重合, 励磁结构模型保持不动, 钢丝绳模型沿轴线移动, 从运动初始位置开始移动, 经过励磁结构模型中心位置, 最后移动到运动结束位置, 总运动时间为 50 s, 初始

位置和结束位置关于励磁结构模型中心对称, 如图 4 所示。

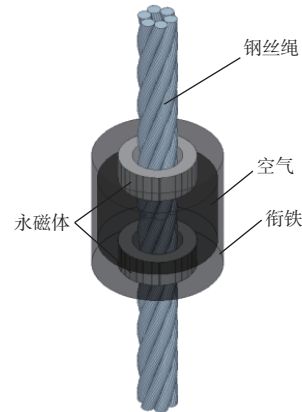


图 3 励磁结构模型

Fig. 3 Magnetization structure model

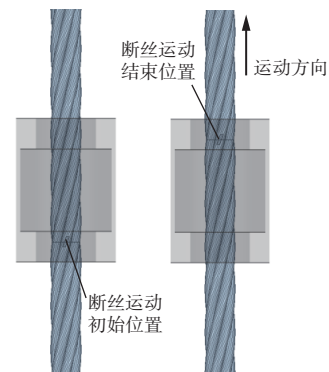


图 4 仿真运动的初始位置和结束位置

Fig. 4 Initial and final positions of simulated motion

基于漏磁无损检测原理, 为使磁化钢丝绳断丝后的漏磁场易于检测与分辨, 需要将钢丝绳磁化至饱和状态且磁化均匀。绘制钢丝绳磁通量密度云图 (图 5), 判断钢丝绳的磁化状态和磁通分布。

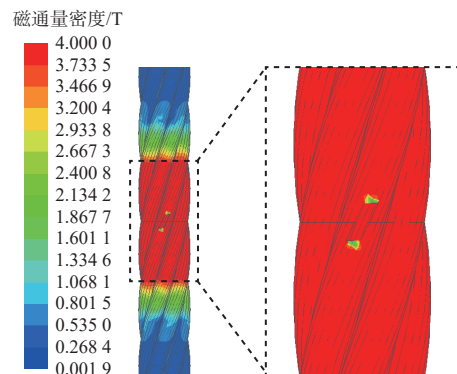


图 5 钢丝绳磁通量密度云图

Fig. 5 Magnetic flux density cloud map of wire rope

从图 5 可看出, 钢丝绳断丝周边已被均匀磁化, 断丝断口端面处相对于断口周围位置的磁通量密度偏小, 这是由于断丝断口断面处的空气磁阻远大于钢丝绳, 阻碍了磁力线的通过。

以下分析不同因素对断丝漏磁场的影响。

1) 断口宽度对断丝漏磁场的影响分析。设置断丝断口宽度分别为 3, 5, 7, 10, 13, 15 mm, 提取断丝上方 5 mm 处轴向漏磁场进行分析。通过三维动态磁场仿真模型得到的不同断口宽度下断丝轴向漏磁场磁感应强度及漏磁场峰峰值分别如图 6 和图 7 所

示。可看出三维动态磁场仿真计算的漏磁场中包含断丝漏磁场和钢丝绳绳股漏磁场; 在 4 种断丝数量情况下, 随着断口宽度增加, 断丝轴向漏磁场峰峰值均呈先增大后减小的趋势, 且峰峰值在断口宽度为 7, 10 mm 处开始减小。

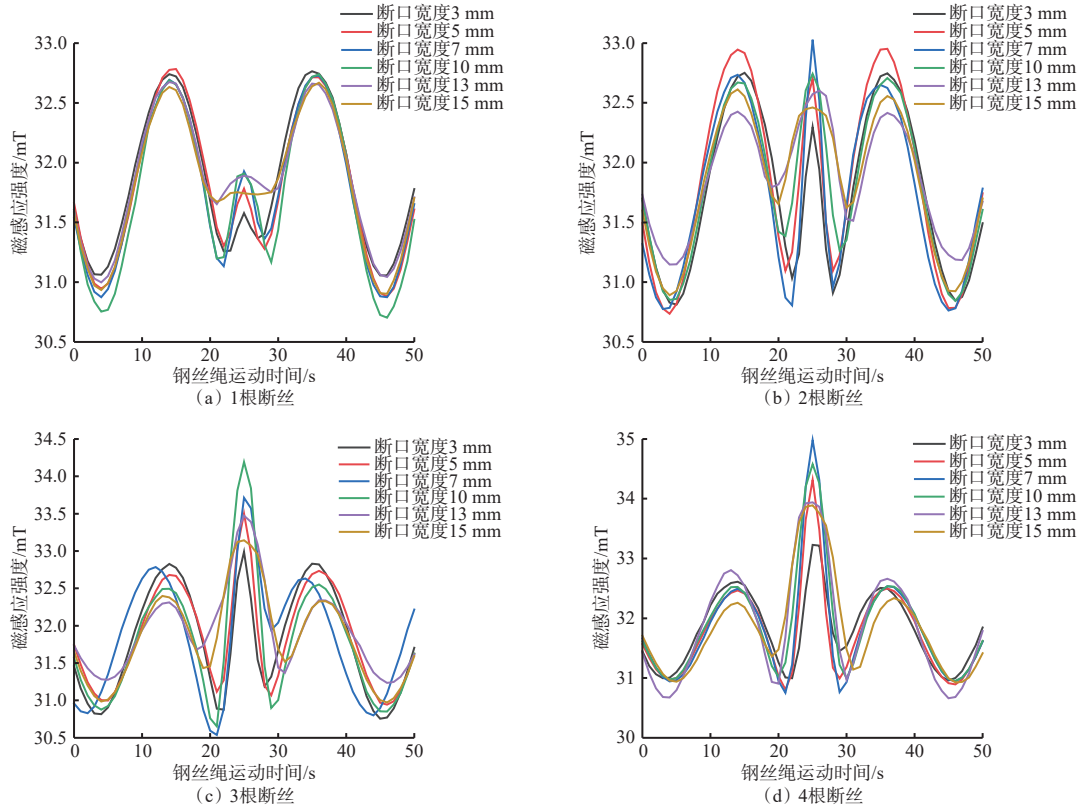


图 6 通过三维动态磁场仿真模型得到的不同断口宽度下断丝轴向漏磁场磁感应强度

Fig. 6 Magnetic induction intensity of axial leakage magnetic field at different fracture widths of broken strands obtained from the three-dimensional dynamic magnetic field simulation model

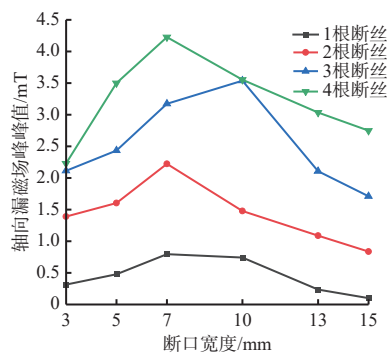


图 7 通过三维动态磁场仿真模型得到的断丝轴向漏磁场峰峰值随断口宽度变化规律

Fig. 7 Variation pattern of peak-to-peak value of axial leakage magnetic field with fracture widths of broken strands obtained from three-dimensional dynamic magnetic field simulation model

2) 不同断丝数量对断丝漏磁场的影响分析。设置断丝数量分别为 1, 2, 3, 4 根, 提取断丝上方 5 mm 处轴向漏磁场进行分析。通过三维动态磁场仿真模型得到的不同断丝数量下断丝轴向漏磁场磁感应强

度及漏磁场峰峰值分别如图 8 和图 9 所示。可看出在 6 种断口宽度情况下, 断丝轴向漏磁场峰峰值均随着断丝数量的增加而增大。

3) 提高值对断丝漏磁场的影响分析。定义霍尔元件与钢丝绳表面之间的距离为提高值。设置钢丝绳断丝数量为 3 根、断口宽度为 10 mm, 提取断丝上方 1~10 mm 处轴向漏磁场进行分析。通过三维动态磁场仿真模型得到的不同提高值下断丝轴向漏磁场磁感应强度及漏磁场峰峰值分别如图 10 和图 11 所示。可看出断丝轴向漏磁场峰峰值随着提高值的增加而减小。

3 基于三维磁偶极子模型的钢丝绳断丝漏磁场验证分析

为验证三维动态磁场仿真模型仿真结果的正确性, 构建常用于钢丝绳断丝漏磁场分析的三维磁偶极子模型, 如图 12 所示。

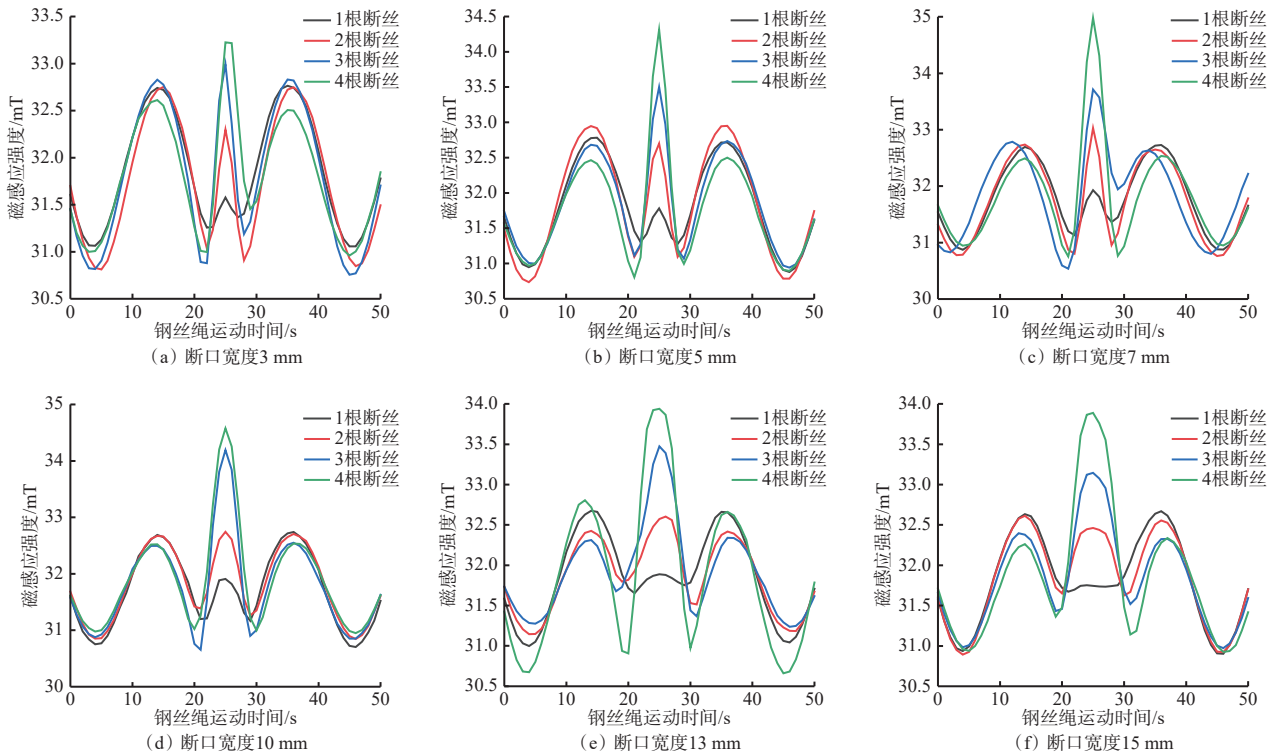


图 8 通过三维动态磁场仿真模型得到的不同断丝数量下轴向漏磁场磁感应强度

Fig. 8 Magnetic induction intensity of axial leakage field under different number of broken wires obtained by three-dimensional dynamic magnetic field simulation model

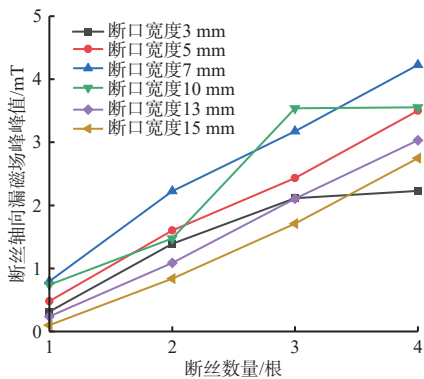


图 9 通过三维动态磁场仿真模型得到的断丝轴向漏磁场峰峰值随断丝数量变化规律

Fig. 9 Peak-peak value variation law of axial leakage magnetic field with the number of broken wires obtained by three-dimensional dynamic magnetic field simulation model

设定模型轴线中点 o 为原点, 模型轴线方向为 y 轴, 模型横截面内 x 轴和 z 轴正交, 建立笛卡尔坐标系。用磁荷 $+Q$ 和 $-Q$ 产生的磁场代替钢丝绳两侧断面磁场, 这 2 个磁场关于原点 o 对称。断面到原点 o 的距离为 l , 断口宽度为 $2l$, 磁荷 $+Q$ 和 $-Q$ 的坐标分别为 (x_1, l, z_1) 和 $(x_1, -l, z_1)$ 。 P 为空间任一点, 其坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 磁荷 $+Q$ 和 $-Q$ 到 P 点的磁场矢量分别为 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 , 根据磁场库仑定律, $+Q$ 在 P 点处产生的磁场强度 \mathbf{H}_{+Q} 和 $-Q$ 在 P 点处产生的磁场强度 \mathbf{H}_{-Q} 分别为

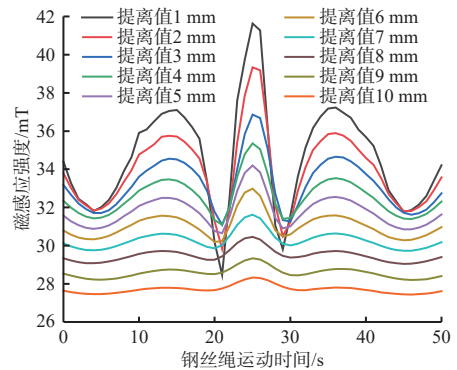


图 10 通过三维动态磁场仿真模型得到的不同提高值下轴向漏磁场磁感应强度

Fig. 10 Magnetic induction intensity of axial leakage field under different lifting values obtained by three-dimensional dynamic magnetic field simulation model

$$\mathbf{H}_{+Q} = \frac{q_1 \mathbf{r}_1}{4\pi\mu_0 |\mathbf{r}_1|^3} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_{-Q} = \frac{q_1 \mathbf{r}_2}{4\pi\mu_0 |\mathbf{r}_2|^3} \quad (3)$$

式中: q_1 为两磁荷的磁荷量; μ_0 为真空环境的磁导率。

根据磁场叠加原理, P 点处磁场强度为

$$\mathbf{H}_P = \mathbf{H}_{+Q} + \mathbf{H}_{-Q} = \frac{q_1 \mathbf{r}_1}{4\pi\mu_0 |\mathbf{r}_1|^3} + \frac{q_1 \mathbf{r}_2}{4\pi\mu_0 |\mathbf{r}_2|^3} \quad (4)$$

真空环境的磁导率定义为磁感应强度 \mathbf{B} 与磁场强度 \mathbf{H} 的比值, 则

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (5)$$

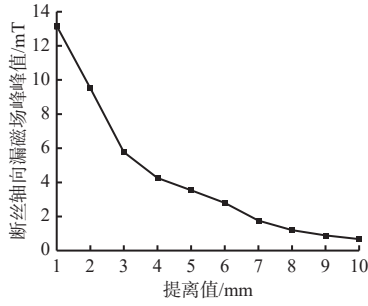


图 11 通过三维动态磁场仿真模型得到的断丝轴向漏磁场峰峰值随提高值变化规律

Fig. 11 Peak-peak value variation law of axial leakage magnetic field with lifting values obtained by three-dimensional dynamic magnetic field simulation model

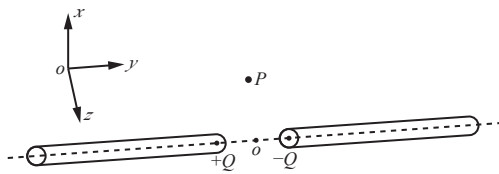


图 12 三维磁偶极子模型

Fig. 12 Three-dimensional magnetic dipole model

结合式(4)和式(5), 得到 P 点处磁感应强度:

$$B_p = B_{+Q} + B_{-Q} = \frac{q_1 r_1}{4\pi |r_1|^3} + \frac{q_1 r_2}{4\pi |r_2|^3} \quad (6)$$

单根断丝时, P 点处轴向磁感应强度分量为

$$B_{ps} = \frac{q_1}{4\pi} \left\{ \frac{y_p + l}{[(x_p - x_1)^2 + (y_p + l)^2 + (z_p - z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{y_p - l}{[(x_p - x_1)^2 + (y_p - l)^2 + (z_p - z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (7)$$

多根断丝时, P 点处轴向磁感应强度分量可看作多对磁荷磁场的叠加, 即

$$B_{p_m} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi} \left\{ \frac{y_p + l}{[(x_p - x_i)^2 + (y_p + l)^2 + (z_p - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{y_p - l}{[(x_p - x_i)^2 + (y_p - l)^2 + (z_p - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (8)$$

式中: x_i 和 z_i 为第 i 处断丝时磁荷在 x 轴和 z 轴的坐标; n 为断丝数量。

通过三维磁偶极子模型得到的钢丝绳断丝轴向漏磁场磁感应强度如图 13 所示。

1) 不同断口宽度下断丝漏磁场验证分析。设置断丝断口宽度为 1~20 mm, 变化步长为 1 mm, 提取断丝上方 5 mm 处轴向漏磁场进行分析。通过三维磁偶极子模型得到的不同断口宽度下断丝轴向漏磁场峰峰值如图 14 所示。可看出在 4 种断丝情况下, 随着断口宽度的增加, 通过三维磁偶极子模型计算的断丝轴向漏磁场峰峰值均呈先增大后减小的趋势, 且峰峰值在断口宽度为 8, 9 mm 处开始减小。

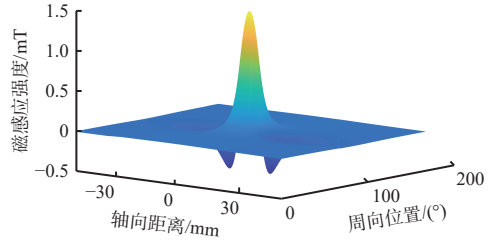


图 13 通过三维磁偶极子模型得到的断丝轴向漏磁场磁感应强度

Fig. 13 Magnetic induction intensity of axial leakage field of broken wire obtained by three-dimensional magnetic dipole model

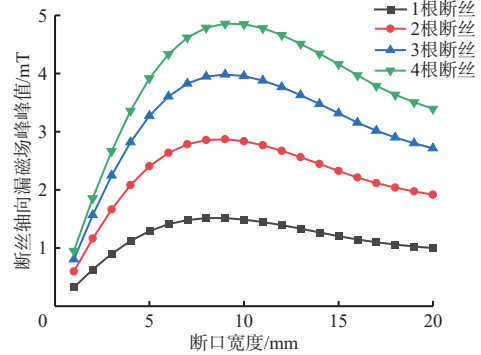


图 14 通过三维磁偶极子模型得到的断丝轴向漏磁场峰峰值随断口宽度变化规律

Fig. 14 Peak-peak value variation law of axial leakage magnetic field with fracture widths obtained by three-dimensional magnetic dipole model

2) 不同断丝数量下断丝漏磁场验证分析。设置断丝数量分别为 1, 2, 3, 4 根, 提取断丝上方 5 mm 处轴向漏磁场进行分析。通过三维磁偶极子模型得到的不同断丝数量下断丝轴向漏磁场峰峰值如图 15 所示。可看出在 20 种断口宽度情况下, 通过三维磁偶极子模型计算的断丝轴向漏磁场峰峰值均随着断丝数量的增加而增大。

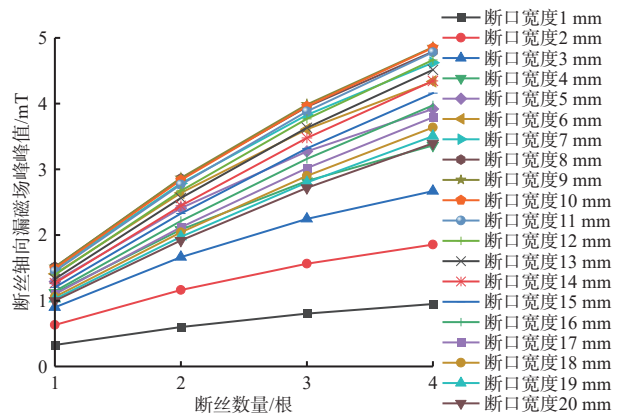


图 15 通过三维磁偶极子模型得到的断丝轴向漏磁场峰峰值随断丝数量变化规律

Fig. 15 Peak-peak value variation law of axial leakage magnetic field with the number of broken wires obtained by three-dimensional magnetic dipole model

3) 不同提离值下断丝漏磁场验证分析。设置钢丝绳断丝数量为 3 根、断口宽度为 10 mm, 提取断丝上方 1~10 mm 处轴向漏磁场进行分析。通过三维磁偶极子模型得到的不同提离值下断丝轴向漏磁场峰峰值如图 16 所示。可看出通过三维磁偶极子模型计算的断丝轴向漏磁场峰峰值随着提离值的增加而减小。

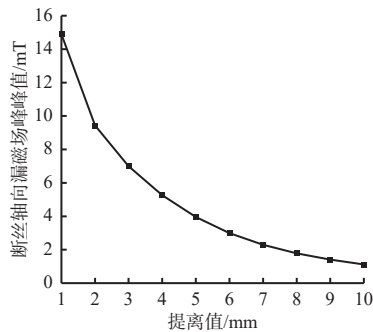


图 16 通过三维磁偶极子模型得到的断丝轴向漏磁场峰峰值随提离值变化规律

Fig. 16 Peak-peak value variation law of axial leakage magnetic field with lifting values obtained by three-dimensional magnetic dipole model

由上述分析可知, 通过三维磁偶极子模型得到的断丝轴向漏磁场峰峰值随断口宽度、断丝数量、提离值变化规律与通过三维动态磁场仿真模型得到的变化规律相同, 验证了三维动态磁场仿真模型的正确性。

4 结论

1) 三维动态磁场仿真模型可以模拟损伤检测仪器与钢丝绳间的相对运动状态, 其计算的漏磁场含有断丝漏磁场和钢丝绳绳股漏磁场, 更接近实际漏磁场。

2) 断丝轴向漏磁场峰峰值随着断口宽度的增加呈先增大后减小的趋势, 随着断丝数量的增加而增大, 随着提离值的增加而减小。

参考文献(References):

- [1] 谭继文, 战卫侠, 文妍. 钢丝绳安全检测原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
TAN Jiwen, ZHAN Weixia, WEN Yan. Principle and technology of wire rope safety detection[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 张义清. 钢丝绳断丝损伤检测与定量识别研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
ZHANG Yiqing. Research on detection and quantitative identification of broken wires of the steel wire rope[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
- [3] 战卫侠. 钢丝绳断丝损伤信号处理及定量识别方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
ZHAN Weixia. Research on signal process and quantitative recognition method of broken wires in wire rope[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013.
- [4] MAZUREK P. A comprehensive review of steel wire rope degradation mechanisms and recent damage detection methods[J]. Sustainability, 2023, 15(6). DOI: 10.3390/su15065441.
- [5] SHAMSUDIN S R, HARUN M, MOHD NOOR M, et al. Failure analysis of crane wire rope[J]. Materials Science Forum, 2015, 819: 467-472.
- [6] 王红尧. 煤矿提升钢丝绳在线检测关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
WANG Hongyao. Key technique of on-line detection for coal mine-hoist wire rope[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [7] GB/T 5972—2023 起重机 钢丝绳 保养、维护、检验和报废[S].
GB/T 5972-2023 Cranes-wire ropes-care and maintenance, inspection and discard[S].
- [8] GB/T 9075—2008 索道用钢丝绳检验和报废规范[S].
GB/T 9075-2008 Code for examination and discard of ropes for ropeway[S].
- [9] ZHOU Ping, ZHOU Gongbo, ZHU Zhencai, et al. A review of non-destructive damage detection methods for steel wire ropes[J]. Applied Sciences, 2019, 9(13). DOI: 10.3390/app9132771.
- [10] 李国勇. 钢丝绳实时在线检测系统研发[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
LI Guoyong. The research of online detection technology of wire rope[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [11] YAN Xiaolan, ZHANG Donglai, PAN Shimin, et al. Online nondestructive testing for fine steel wire rope in electromagnetic interference environment[J]. NDT & E International, 2017, 92: 75-81.
- [12] 任建浩, 陈实, 薛家杰, 等. 基于 1D-CNN-SVM 的钢丝绳损伤识别方法[J]. 无损检测, 2024, 46(6): 24-29.
REN Jianhao, CHEN Shi, XUE Jiajie, et al. Wire rope damage identification method based on 1D-CNN-SVM[J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(6): 24-29.
- [13] FENG Bo, WU Jianbo, TU Hongming, et al. A review of magnetic flux leakage nondestructive testing[J]. Materials, 2022, 15(20). DOI: 10.3390/ma15207362.
- [14] MANDACHE C, CLAPHAM L. A model for magnetic flux leakage signal predictions[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(20): 2427-2431.

(下转第 162 页)

- with different conductive characteristics in complete stress-strain process[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5): 779-786.
- [15] 李术才, 许新骥, 刘征宇, 等. 单轴压缩条件下砂岩破坏全过程电阻率与声发射响应特征及损伤演化[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 14-23.
LI Shucan, XU Xinji, LIU Zhengyu, et al. Electrical resistivity and acoustic emission response characteristics and damage evolution of sandstone during whole process of uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 14-23.
- [16] 陈耕野, 田军, 姚广仁. 岩石应力的电学效应及其断裂演化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(11): 1832-1840.
CHEN Gengye, TIAN Jun, YAO Guangren. Electrical effect of rock stress and its fracture evolution laws[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(11): 1832-1840.
- [17] CHEN Gengye, LIN Yunmei. Stress-strain-electrical resistance effects and associated state equations for uniaxial rock compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 223-236.
- [18] 孙建国. 阿尔奇(Archie)公式: 提出背景与早期争论[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 472-486.
SUN Jianguo. Archie's formula: historical background and earlier debates[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 472-486.
- [19] 郭海军. 煤的双重孔隙结构等效特征及其力学和渗透特性的影响机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
GUO Haijun. Equivalent characteristics of dual-porosity coal structure and their effects on coal mechanical properties and permeability[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [20] KACHANOV M. Effective elastic properties of cracked solids: critical review of some basic concepts[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1992, 45(8): 304.
- [21] 朱万成, 魏晨慧, 田军, 等. 岩石损伤过程中的热-流-力耦合模型及其应用初探[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3851-3857.
ZHU Wancheng, WEI Chenhui, TIAN Jun, et al. Coupled thermal-hydraulic-mechanical model during rock damage and its preliminary application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3851-3857.
- [22] SONG Mingyang, HU Qianting, LI Quanguai, et al. Effects of damage on resistivity response and volatility of water-bearing coal[J]. *Fuel*, 2022, 324. DOI: 10.1016/J.FUEL.2022.124553.
-
- (上接第 154 页)
- [15] 曹印妮. 基于漏磁成像原理的钢丝绳局部缺陷定量检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
CAO Yinni. Study on wire rope local flaw quantitative testing based on mfl imaging principle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [16] SELEZNYOVA K, STRUGATSKY M, KLIAVA J. Modelling the magnetic dipole[J]. *European Journal of Physics*, 2016, 37(2). DOI: 10.1088/0143-0807/37/2/025203.
- [17] 窦连城, 战卫侠. 钢丝绳断丝损伤漏磁场计算与仿真研究[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(10): 87-91.
DOU Liancheng, ZHAN Weixia. Calculation and simulation research on leakage magnetic field of broken wire damage of wire rope[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(10): 87-91.
- [18] 李登蓬. 基于聚磁技术的钢丝绳损伤电磁检测传感器研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
LI Dengpeng. Research on electromagnetic detection sensor for wire rope damage based on magnetic concentration technology[D]. Jinan: University of Jinan, 2019.
- [19] 郭永亮. 基于漏磁检测的钢丝绳断丝检测方法及其系统实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
GUO Yongliang. Method and system realization of broken wire of steel wire rope based on magnetic flux leakage detection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [20] 朱良. 基于磁特性的钢丝绳断丝损伤定量检测研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
ZHU Liang. Research on quantitative detection of broken wire damage of wire ropes based on magnetic characteristics[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [21] 华晋伟, 王兵, 邵帅, 等. 基于漏磁原理的钢丝绳无损检测技术研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2014(5): 38-39, 105.
HUA Jinwei, WANG Bing, SHAO Shuai, et al. Research of examining steel wire with no damaging method[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(5): 38-39, 105.
- [22] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
LIU Guoqiang, ZHAO Lingzhi, JIANG Jiya. Ansoft engineering electromagnetic field finite element analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.