

大截面电力电缆固定金具参数与涡流损耗的数值关系分析

蒲丽娟¹, 游世良², 吴昊², 田俊², 刘念¹, 刘航宇¹, 李娟¹

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 四川电力设计咨询有限公司, 成都 610016)

摘要: 电力电缆固定金具安装在电缆线路上, 是对电缆起固定和支撑作用的重要附件设备, 而目前工程中对于大截面电力电缆固定金具的选型仍缺乏相关规范。文中通过建立大截面电力电缆与固定金具的三维有限元涡流场模型, 仿真计算出不同固定金具参数下金具的涡流损耗值, 并以仿真数据为基准分析了电缆固定金具参数与涡流损耗之间的数值关系。通过曲线拟合、非线性回归分析以及误差校验得出固定金具涡流损耗与金具厚度、长度、气隙大小以及金具材料电导率之间的计算公式。为实际工程中电力电缆固定金具的安装提供了参考, 对电力电缆固定金具的设计和选型具有一定的指导意义, 可供电缆固定金具生产和研究的应用。

关键词: 有限元; 固定金具; 涡流损耗; 拟合; 回归分析

Numerical Relationship Between Metal Cleat Parameters of Large Cross-section Power Cable and Eddy Current Loss

PU Lijuan¹, YOU Shiliang², WU Hao², TIAN Jun², LIU Nian¹, LIU Hangyu¹, LI Juan¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Electric Power Design Consulting Co., Ltd., Chengdu 610016, China)

Abstract: To provide a selection basis for the metal cleat of large cross-section power cable, a three-dimensional finite element model of eddy current field is built for large cross-section power cable and metal cleat. Simulation is performed with the model to calculate the eddy current loss of cleat with different cleat parameters. And the numerical relationship between cleat parameters and eddy current loss is analyzed based on the simulation data. By fitting curve, nonlinear regression analysis and error checking, a formula of cleat's eddy current loss versus cleat's thickness, length, size of air gap, and conductivity is deduced. This research may provide a reference for design, manufacture, selection, and installation of metal cleat of power cable.

Key words: FEM; metal cleat; eddy current loss; fitting; regression analysis

0 引言

随着电网发展的需要, 电力电缆的输送容量越来越大, 2 000 mm² 以上的大截面电缆的应用也日益广泛。在大电流的作用下, 电力电缆固定金具中感应出的涡流损耗不能被忽略, 尤其在电缆短路的情况下, 短路电流幅值可达到几十千安, 会在金具中产生很大的涡流损耗, 导致金具发热, 温度升高^[1]。固定金具的长期发热会导致电缆绝缘变差, 影响外护套的寿命, 这一问题已成为影响输电质量和电网安全运行的重大隐患。因此, 电力电缆固定金

具的选型对于维持线路的稳定和电网的可靠运行有着重要的作用。对电力电缆固定金具涡流损耗进行研究, 有利于合理选择金具的尺寸、材料以及布置方式, 能有效减少线路损耗, 提高电缆运行水平^[2]。国内外关于电力电缆支架的涡流损耗已有相关研究^[3-4], 然而对于电力电缆固定金具的涡流损耗却鲜有涉及, 固定金具参数的改变对电力电缆涡流损耗有何影响也未有提及, 并且目前工程中对于电缆固定金具的选型仍缺乏相关参考及规范。

在该研究中, 使用有限元仿真工具能很好地模拟实际情况, 建立精细逼真的仿真模型, 简化实验工作并节约时间^[5-6]。文中通过对有限元三维涡流场

仿真结果的数据进行曲线拟合、回归分析以及误差分析校验,得出关于固定金具涡流损耗与金具厚度、长度、气隙大小以及金具材料电导率之间的经验计算公式,对于实际工程中电力电缆固定金具的选型具有较强的工程指导意义,可供电力电缆固定金具生产和研究参考应用。

1 建立模型计算涡流损耗

1.1 涡流损耗产生原因

高压电力电缆通常采用金具进行固定,金具由导电材料组成,电缆中通过较大的正弦变化电流将引起交变磁场,磁场强度 B 的表达式为

$$B = \mu H = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (1)$$

式(1)中: μ 为磁导率; H 为磁场强度; I 为电流; r 为距离无限长直导线的距离。该交变磁场渗入固定金具,设磁通强度为 ψ ,感应出的电动势为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (2)$$

该电动势会在固定金具中引起感生电流,即涡流,涡流在金具中产生的功率损耗称为涡流损耗^[7]。

1.2 涡流计算原理

工频电磁场可以作近似稳态场处理,位移电流忽略不计,涡流问题的麦克斯韦方程见式(3)^[7-8]。

$$\begin{cases} \nabla \times H = J_c \\ \nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times B = 0 \\ \nabla \times D = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: H 为磁场强度; J_c 为传导电流密度; D 为电通量; E 为轴向电场强度; B 为磁感应强度。

求解三维涡流场问题,将求解域 V 分为涡流区 V_1 和非涡流区 V_2 ^[9-10]。电力电缆固定金具为涡流区,含有导电媒质,媒质方程引进动态位矢量磁位 A 与标量电位 ϕ 作未知函数,见(4)、(5)。

$$\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \cdot A) = J_s; \quad (4)$$

$$\begin{cases} \nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \cdot A) + j\omega \sigma A + \sigma \nabla \phi = 0 \\ \nabla \cdot (-j\omega \sigma A - \sigma \nabla \phi) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

固定金具以外的区域为非涡流区,包含电流源。固定金具内边界面的连续方程用动态位 A 表示,见式(6)。

$$\begin{cases} A_1 = A_2 \\ v_1 \nabla \cdot A_1 = v_2 \nabla \cdot A_2 \\ v_1 \nabla \times A_1 \times n_{12} = v_2 \nabla \times A_2 \times n_{12} \\ n \cdot (-j\omega \sigma A - \sigma \nabla \phi) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

固定金具外边界面的连续方程见式(7)、(8)。

$$\begin{cases} n \times A = 0 \\ v \nabla \cdot A = 0 \end{cases}; \quad (7)$$

$$\begin{cases} n \cdot A = 0 \\ (v \nabla \times A) \times n = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(6)–(8)中: σ 为电导率; n 为求解域 V 外边界的单位法矢量; n_{12} 为 V_1 和 V_2 内边界的单位法矢量,方向从 V_1 指向 V_2 。

根据伽辽金形式的加权余量法^[9,11]将整个求解域剖分成 N 个立体单元。任一单元 e 内,矢量磁位 A^e 的插值构造函数可以用该单元各节点处的磁位近似表示为

$$A^e \approx \sum_{k=1}^g (N_k^e A_{kx} i + N_k^e A_{ky} j + N_k^e A_{kz} k) = \sum_{k=1}^g N_{km}^e A_{km} \quad (9)$$

式(9)中: e 表示单元号; A_{kx} 、 A_{ky} 、 A_{kz} 分别为 A_k 在 x 、 y 、 z 方向的分量; N_k^e 为该单元在节点 k 的形状函数; g 为单元节点总数。整个场域内的矢量磁位可表示为

$$A = \sum_{k=1}^{NP} (N_k A_{kx} i + N_k A_{ky} j + N_k A_{kz} k) \quad (10)$$

式(10)中: NP 为求解域内的节点总数; N_k 为节点 k 的整体形状函数。同样标量电位计算式为

$$\phi = \sum_{k=1}^{NP} (N_k \phi) \quad (11)$$

故体积 V 内的涡流损耗值为

$$P = \int_V \frac{1}{2} \rho |J|^2 dv \quad (12)$$

式(12)中: ρ 为单元电阻值; J 为涡流电流密度瞬时值。

1.3 建立有限元仿真模型计算涡流损耗

该研究选用工程中已有的实体金具作为参考。在仿真计算中,固定金具的螺栓对金具涡流损耗结果影响可忽略不计,并且占用仿真计算内存很大,因此忽略金具中的螺栓结构。电缆固定金具模型的正视图和侧视图见图1,并在图1中标注出金具的厚度、长度(纵长)和气隙大小分别所指示的位置。

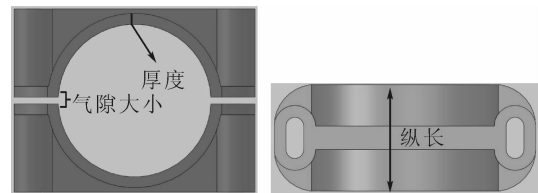


图1 固定金具模型正视图和侧视图

Fig. 1 Front view and side view of fixed cleat model

将建立好的固定金具模型导入有限元仿真软件中,选取磁场为求解物理场。由于不能在无限大区域中进行求解,故取电缆长度为 500 mm,以缆芯为圆心作半径为 250 mm 的圆柱体为求解域。在低频时,集肤效应不明显,电流密度分布对涡流损耗影响可忽略不计,因此将缆芯简化为一根加载额定电流 2 000 A 的铜导线以简化计算模型。该仿真采用型号为 YJLW02-Z 型大截面电缆,设置好电缆的基本参数和边界条件,建立电缆固定金具有限元三维涡流场模型见图 2。

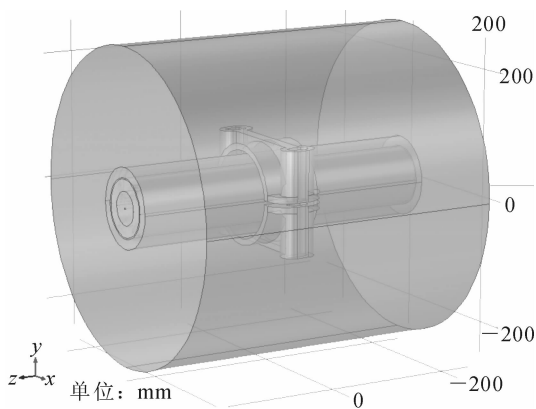


图 2 电力电缆及金具三维模型

Fig. 2 The 3D model of power cable and cleat

然后对建好的模型进行有限元网格剖分,将模型离散成单元求解,在单元求解域中结合麦克斯韦方程组和伽辽金有限元法即式(3)-(12)进行计算求解。不同的网格划分方式会影响计算结果和计算精度。如果网格过于粗糙,那么计算结果可能包含错误并且无法收敛;如果网格过于精细,将花费过多的计算时间和内存,浪费计算资源^[12-13]。

首先利用自适应网格剖分产生可以满足误差估计准则的网格。与电力电缆相比较,固定金具形状更为复杂,型面变化剧烈,圆角过渡和拐角处应力变化较大,因此需用更为精细的网格。电缆金属屏蔽层相较绝缘层和外屏蔽层面积缩小,计算数据梯度变化较大,也需细化网格。最终网格剖分情况见图 3。使用工程实体固定金具参数(厚 10 mm,纵长 90 mm,气隙大小 6 mm,材料电导率为 40%IACS),仿真所得三维涡流损耗分布见图 4。

在此基础上采用控制变量法进行仿真计算,即对固定金具的厚度、长度、气隙大小以及金具材料电导率中的一个参数进行改变时,其余 3 个参数保持为所选工程中实际固定金具的数据。电力电缆固定金具不同厚度、长度、气隙大小以及不同金具材料电导率情况下的电缆固定金具涡流损耗见表 1-4。

为了分析电力电缆固定金具涡流损耗分别随

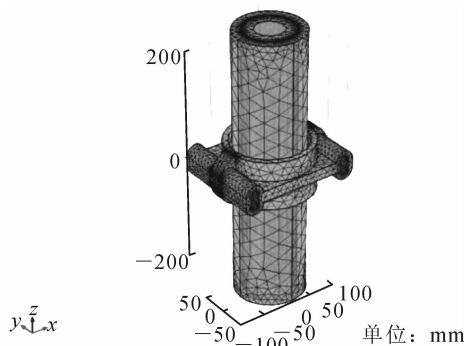


图 3 网格剖分图

Fig. 3 The grid subdivision

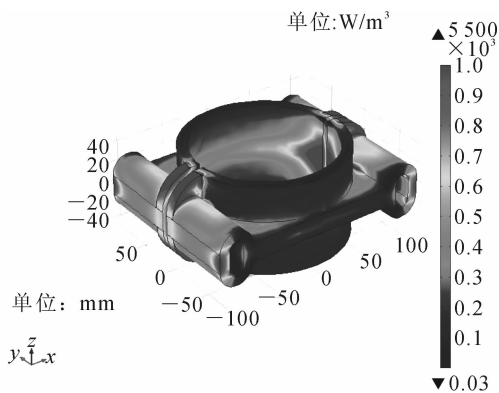


图 4 涡流损耗分布图

Fig. 4 Eddy current loss distribution

金具各个参数的变化关系,将表 1-4 的数据结果分别作曲线图进行观察。

金具涡流损耗随金具厚度变化见图 5。由图 5 可知,电力电缆固定金具涡流损耗 P 随金具厚度 D 变化近似呈线性正相关。金具涡流损耗随金具长度变化见图 6。由图 6 可知,金具涡流损耗与金具长度 L 也呈线性正相关。这是因为涡流损耗是变化的磁场感生出的电流引起的,随着固定金具厚度和长度的增大,金具本体位于磁场中的体积也会增大,体积积分所得涡流损耗便随之增大。

固定金具涡流损耗随着金具气隙 M 的增大而减小,见图 7。因为随着气隙的增大,磁力线穿过空气的路程增加,空气是磁的弱导体,阻力大,因而磁场强度随之减弱,导致涡流损耗这一变化趋势。

为了探讨不同材料电导率对金具涡流损耗的影响,文中选用了 20 种常用电工铝合金材料进行研究。固定金具涡流损耗随金具材料电导率变化见图 8,可以看出当电导率值较小时,涡流损耗 P 随电导率 σ 近似呈线性变化;当电导率值较大时,涡流损耗随电导率的变化逐渐平缓,尤其当电导率大于 70%IACS 之后涡流损耗逐渐趋于一个较为稳定的值。

表1 不同厚度下固定金具的涡流损耗

Table 1 Fixed cleat eddy current losses under different thickness

厚度/mm	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8
损耗/W	0.164 1	0.168 9	0.173 4	0.177 6	0.182 9	0.187 9	0.192 9	0.197 3	0.202 3	0.207 0
厚度/mm	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8
损耗/W	0.212 1	0.217 0	0.222 2	0.226 7	0.231 3	0.236 2	0.240 6	0.245 2	0.244 9	0.249 0

表2 不同长度下固定金具的涡流损耗

Table 2 Fixed cleat eddy current losses under different length

长度/mm	88.0	88.2	88.4	88.6	88.8	89.0	89.2	89.4	89.6	89.8
损耗/W	0.201 0	0.201 0	0.210 2	0.210 4	0.210 6	0.210 9	0.211 2	0.211 4	0.211 7	0.211 9
长度/mm	90.0	90.2	90.4	90.6	90.8	91.0	91.2	91.4	91.6	91.8
损耗/W	0.211 7	0.212 4	0.212 6	0.212 8	0.213 1	0.213 3	0.213 5	0.213 8	0.214 0	0.214 3

表3 不同气隙大小下固定金具的涡流损耗

Table 3 Fixed cleat eddy current losses under different air gap size

气隙大小/mm	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8
损耗/W	0.213 5	0.213 3	0.213 2	0.213 0	0.212 8	0.212 7	0.212 4	0.212 3	0.212 2	0.212 0
气隙大小/mm	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8
损耗/W	0.211 66	0.211 50	0.211 30	0.211 10	0.210 90	0.210 70	0.210 54	0.210 50	0.210 10	0.201 00

表4 不同金具材料电导率下固定金具的涡流损耗

Table 4 Fixed cleat eddy current losses under different cleat material conductivity

电导率/%IACS	3	8	13	18	23	28	33	38	43	48
损耗/W	0.022 9	0.059 9	0.094 4	0.125 2	0.151 8	0.174 0	0.192 0	0.206 3	0.217 4	0.225 9
电导率/%IACS	53	58	63	68	73	78	83	88	93	98
损耗/W	0.232 2	0.236 9	0.240 3	0.242 7	0.244 1	0.245 4	0.246 0	0.246 4	0.246 4	0.246 4

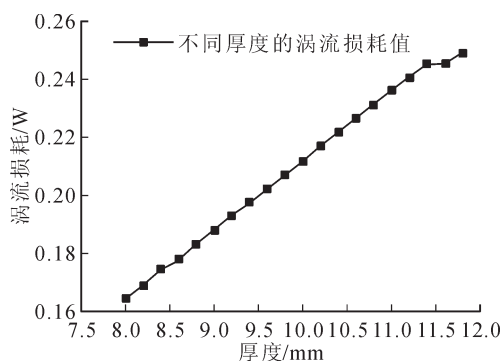


图5 金具涡流损耗随金具厚度变化

Fig. 5 Eddy current losses of cleat change with cleat thickness

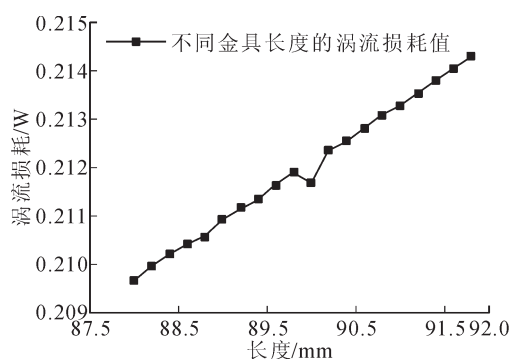


图6 金具涡流损耗随金具长度变化

Fig. 6 Eddy current losses of cleat change with cleat length

2 函数拟合与回归分析

2.1 单个变量的函数关系拟合

曲线拟合问题是指已知 $n+1$ 个点 (x_i, y_i) , $i=0, 1, 2, \dots, n$ 。其中 x_i 互不相同, 寻求与所有数据点最为接近的函数 $f(x)$, 也可以称为数据的平滑问题。当计算结果与实际结果的残差值小于所设置的收敛条

件时, 拟合过程结束^[14-16]。相关系数可以反映拟合程度好坏, 越接近 1 说明拟合程度越好, 为负数则说明结果偏差较大。残差平方和表示随机误差效应, 一组数据的残差平方和越小说明拟合程度越好。

由图 5、图 6 可知, 电力电缆固定金具涡流损耗与金具厚度和长度近似线性正相关, 因此将拟合公式均设定为线性函数 $y_i = a + bx_i$ 。a 和 b 是通过最小二

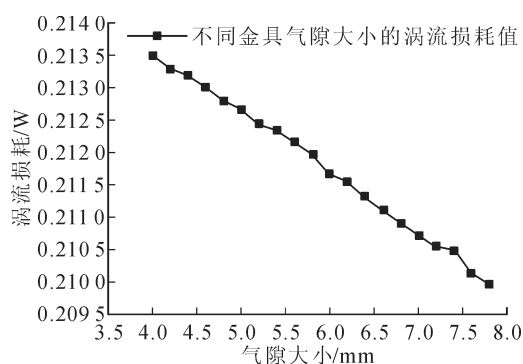


图7 金具涡流损耗随金具气隙大小变化

Fig. 7 Eddy current losses of cleat change with cleat air gap size

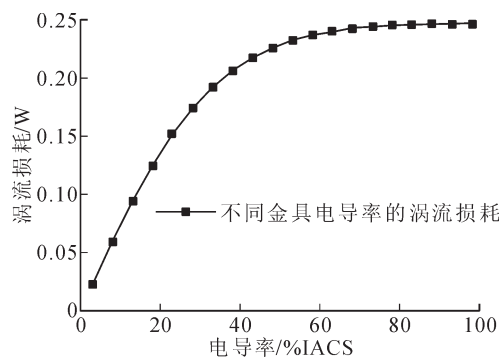


图8 金具涡流损耗随金具电导率变化

Fig. 8 Eddy current losses of cleat change with cleat material conductivity

乘法拟合而成。 a 为截点: $a=\bar{y}-b\bar{x}$; b 为斜率: $b=$

$$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}。$$

固定金具涡流损耗随金具厚度变化拟合所得曲线见图9,相关系数为0.996 94,接近于1,残差点均匀地落在水平的带状区域中,残差平方和为 4.17×10^{-5} 。因此函数选用合理,所得函数关系式为

$$y_1 = -0.020\ 98 + 0.023\ 2x_1。 \quad (13)$$

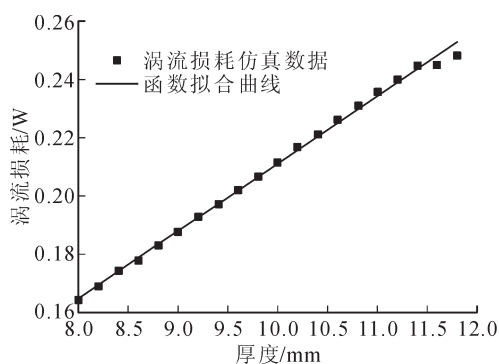


图9 厚度拟合曲线与散点分布比较

Fig. 9 Fitting curve of thickness compared with scatter distribution

固定金具涡流损耗随金具长度变化拟合所得曲线图见图10,涡流损耗仿真数据点基本落在一条线性曲线上。相关系数为0.994 5,拟合程度较好,残差点均匀地落在回归线附近,残差平方和为 2.01×10^{-7} ,选用函数合理,拟合得出的函数关系式为

$$y_2 = 0.103\ 63 + 0.001\ 2x_2。 \quad (14)$$

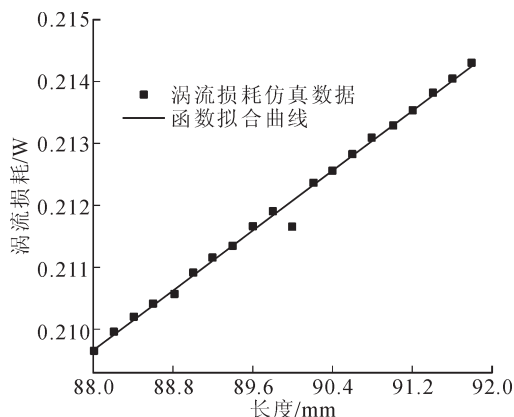


图10 长度拟合曲线与散点分布比较

Fig. 10 Fitting curve of length compared with scatter distribution

由图7可见,固定金具涡流损耗随着气隙的增大而减小,呈近似线性负相关,选用符合曲线变化趋势特征的一阶衰减指数函数进行拟合。拟合曲线图见图11,散点基本落在曲线上,相关系数为0.998,残差点均匀落在回归线附近,残差平方和为 4.18×10^{-8} ,函数选用合理。所得函数关系式为

$$y_3 = -0.012\ 8e^{\frac{-x_3}{18.748\ 12}} + 0.229\ 34。 \quad (15)$$

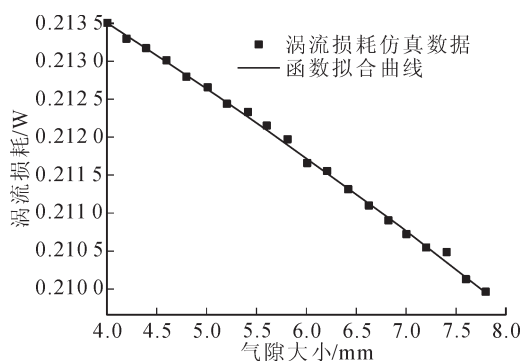


图11 气隙拟合曲线与散点分布比较

Fig. 11 Fitting curve of air gap size compared with scatter distribution

根据图8固定金具涡流损耗随材料电导率的变化趋势,选用一阶指数函数进行拟合,拟合得到一条平滑的曲线,见图12。相关系数为0.997,符合预期效果,残差点均匀分布在水平带状区域内,近似呈正态分布,残差平方和为 2.75×10^{-5} ,函数选用合理,其表达式为

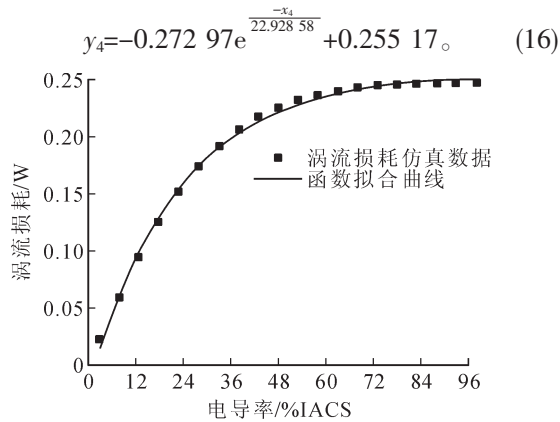


图12 材料电导率拟合曲线与散点分布比较

Fig. 12 Fitting cure of material conductivity compared with scatter distribution

2.2 数据的回归分析

该研究的目标是基于三维有限元涡流场模型仿真数据进行曲线拟合与回归分析,最终得出关于电力电缆固定金具涡流损耗随金具厚度、长度、气隙大小以及金具材料电导率变化的总计算公式。由于涉及4个变量参数,线性回归不能得到满意的结果,因此采用自定义函数进行非线性回归分析^[17-18]。前文已通过控制变量法拟合得到电力电缆固定金具涡流损耗分别与金具厚度、长度、气隙大小和金具材料电导率单个参数对应的函数关系式。现根据已有的4个函数关系式(13)~(16)进行加权分析,设加权系数分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ,常数 a_0 ,自定义函数关系式为

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_3 e^{\frac{x_3}{18.748 12}} - a_4 e^{\frac{-x_4}{22.928 58}} \quad (17)$$

建立矩阵等式 $\mathbf{XA}=\mathbf{Y}$, 见式(18)。

$$\begin{pmatrix} x_1 & 90 & 6 & 40 \\ 10 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & x_2 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & e^{\frac{x_3}{18.748 12}} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 10 & 90 & 6 & e^{\frac{-x_4}{22.928 58}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y_{80} \end{pmatrix} \quad (18)$$

式(18)中: $\mathbf{X}$ 是一个的自变量矩阵; $\mathbf{A}$ 是未知参数列矩阵; $\mathbf{Y}$ 为的因变量矩阵。 $\mathbf{X}$ 矩阵中的 $\mathbf{x}_1$ 、 $\mathbf{x}_2$ 、 $\mathbf{x}_3$ 、 $\mathbf{x}_4$ 均是子矩阵。第1列1至20行为厚度变化的20个参数,即矩阵 $\mathbf{x}_1$;第2列21至40行为长度变化的20个参数,即矩阵 $\mathbf{x}_2$;第3列41至60行为气隙大小变化的20个参数,即矩阵 $\mathbf{x}_3$;第4列61至80行为金具材料电导率变化的20个参数,即矩阵 $\mathbf{x}_4$ 。计算矩阵得到方程各加权系数,最终所得计算式为

$$y = -0.053 5 + 0.023 2 x_1 + 0.001 1 x_2 - 0.013 5 e^{\frac{x_3}{18.748 12}} - 0.275 4 e^{\frac{-x_4}{22.928 58}} \quad (19)$$

为了校验式(19)的精确度,将式(19)计算所得固定金具涡流损耗值 k_i 与实际仿真所得结果 e_i 进行误差分析^[19-20]。误差分析采用式(20)。

$$\varepsilon = \frac{|k_i - e_i|}{e_i} \times 100\% \quad (20)$$

误差计算结果用点线图表示出来,见图13,横坐标分别为电缆固定金具厚度、长度、气隙大小和材料电导率的取值,纵坐标为误差百分数 ε ,由点线图可以看出误差在很小范围内波动。固定金具不同厚度、长度和气隙大小下涡流损耗的误差不超过1%,金具材料电导率的误差出现了波动略大的3个值,但平均误差仍不超过2%。考虑到仿真数据本身有一定误差浮动,说明该计算公式能作为可靠选型参考。

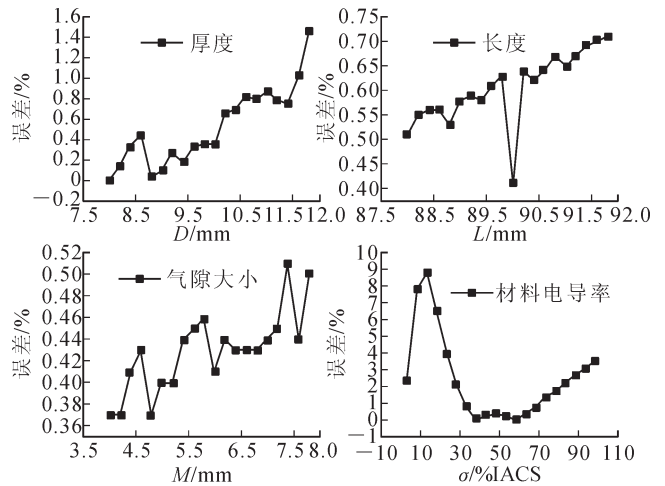


图13 计算公式拟合误差

Fig. 13 The fitting error of calculation formula

3 结语

文中采用有限元法,建立电力电缆与固定金具的有限元三维涡流场模型。在仿真计算出大截面电力电缆固定金具涡流损耗值的基础上,分析了电缆固定金具参数与涡流损耗之间的数值关系。分别拟合得出固定金具涡流损耗与金具厚度、长度、气隙大小以及材料电导率之间的单个函数关系式(式(13)~(16))。然后在这4个函数关系式基础上,进行加权自定义函数非线性回归分析计算,最终得出含有4个参变量的经验计算公式(式(19))。经过误差校验,该公式计算所得值与实际仿真数据基本符合,可供电力电缆固定金具生产和研究的应用。为实际工程中电力电缆固定金具的安装标准提供了理论支撑,对电力电缆固定金具的设计和选型具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] WANG X, WANG C C, WU K, et al. An improved optimal

- design scheme for high voltage cable accessories[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1):5-15.
- [2] CHARLES A D, MAURICE L B, RACHARD A S. Cable cleats-a global technique to protect three-phase single conductor cables during short-circuits[C]//Fifty-first Annual Conference on Petroleum and Chemical Industry Technical. [S.l.]:IEEE, 2004:143-150.
- [3] 朱景林. 电缆支架涡流损耗的研究[J]. 上海电力, 2009(5):400-402.
ZHU Jinglin. Research of cable eddy current losses[J]. Shanghai Electric Power, 2009(5): 400-402.
- [4] 聂永峰, 王建辉, 孟 毓. 输电电缆支架涡流损耗的计算与分析[J]. 电网技术, 2008, 1(s1):142-145.
NIE Yongfeng, WANG Jianhui, MENG Yu. Calculation and analysis of eddy current losses in girder frame for transmission cables[J]. Power System Technology, 2008, 1(s1): 142-145.
- [5] 中仿科技公司. COMSOL MULTIPHYSICS 有限元法多物理场建模与分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
Cnitech Co., Ltd.. Modeling and analysis of multiphysics finite element method[M]. Beijing:China Communications Press, 2007.
- [6] 耿荣林, 谢德馨, 李洪友. 变压器箱体涡流损耗的三维有限元分析[J]. 变压器, 2008, 45(2):1-4.
GENG Ronglin, XIE Dexin, LI Hongyou. 3D finite element analysis of eddy current loss in transformer tank[J]. Transformer, 2008, 45(2):1-4.
- [7] 梁永春, 柴进爱, 李彦明, 等. 有限元法计算交联电缆涡流损耗[J]. 高电压技术, 2007, 9(9):196-199.
LIANG Yongchun, CHAI Jin'ai, LI Yanming, et al. The finite element method to calculate eddy current losses of cross linked cable[J]. High Voltage Engineering, 2007, 9(9): 196-199.
- [8] 王泽忠, 全玉生, 卢斌先. 工程电磁场[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
WANG Zezhong, QUAN Yusheng, LU Binxian. Electromagnetic field in engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [9] 谢德馨, 白保东. 三维涡流场的有限元分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
XIE Dexin, BAI Baodong. Finite element analysis of 3D eddy current field[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [10] 鲍晓华, 方 勇, 程晓巍, 等. 基于三维有限元的大型充水式潜水电机端部涡流损耗[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7):83-89.
BAO Xiaohua, FANG Yong, CHENG Xiaowei, et al. 3-D finite element method analysis of eddy current losses in the end region of large water filling submersible motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7):83-89.
- [11] 王洪友, 杨光源, 邵可然. 基于无单元伽辽金法的电机电磁场计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15):148-154.
WANG Hongyou, YANG Guangyuan, SHAO Keran. Computations for electromagnetic field of synchronous generators based on the element-free galerkin method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15):148-154.
- [12] 姜京伟, 程 阔. 有限元网格划分剖析[J]. 山西交通科技, 2007, 5(5):71-73.
JIANG Jingwei, CHENG Kuo. The analysis of FEM grid classification[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2007, 5(5):71-73.
- [13] 李海峰, 吴冀川, 刘建波, 等. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程, 2012, 23(3):368-377.
LI Haifeng, WU Jichuan, LIU Jianbo, et al. Finite element mesh generation and decision criteria of mesh quality [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(3):368-377.
- [14] 叶卫平, 方安平, 于本方. 7.0 科技绘图及数据分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
YE Weiping, FANG Anping, YU Benfang. Technology drawing and data analysis of origin 7.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [15] 王秀峰, 江洪涛, 程 冰, 等. 数据分析与科学绘图软件 ORIGIN 详解[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
WANG Xiufeng, JIANG Hongtao, CHENG Bing, et al. Data analysis and scientific drawing software ORIGIN[M]. Beijing: Chemical industry press, 2008.
- [16] 陈旭红. 用 Origin 软件的线性拟合和非线性曲线拟合功能处理实验数据[J]. 江苏技术师范学院学报, 2006, 12(6):85-89.
CHEN Xuhong. Experimental data processed by liner regress and nonlinear curve regress using software of Origin[J]. Journal of Jiangsu Teachers University of Technology, 2006, 12(6):85-89.
- [17] 石辛民, 郝整清. 基于 MATLAB 的实用数值计算[M]. 北京:清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2006.
SHI Xinmin, HAO Zhengqing. Numerical calculation of the utility based on MATLAB[M]. Beijing:Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2006.
- [18] 许 波, 刘 征. MATLAB 工程数学应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
XU Bo, LIU Zheng. MATLAB application engineering mathematics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [19] 邱竹贤, 邱天爽, 王兆文, 等. 铝电解实验数据的回归分析和经验公式拟合[J]. 东北大学学报, 2003, 24(4):352-357.
QIU Zhuxian, QIU Tianshuang, WANG Zhaowen, et al. Aluminum electrolytic regression analysis of experimental data and empirical formula fitting[J]. Journal of Northeastern University, 2003, 24(4):352-357.

- breakers[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(3): 24-26.
- [4] 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [5] 刘渝根, 刘敏, 苏玉萍. 取消 750 kV 断路器合闸电阻的可行性研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 60-64.
- LIU Yugen, LIU Min, SU Yuping. Studies on the overvoltage for eliminating 750 kV circuit breaker pre-inset resistor[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 60-64.
- [6] 计荣荣, 易强, 苏菲, 等. 超/特高压交流输电线路断路器合闸电阻的适用性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 18-25.
- JI Rongrong, YI Qiang, SU Fei, et al. Study on applicability of circuit breaker closing resistance in EHV and UHV AC systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 18-25.
- [7] 周沛洪, 戴敏, 娄颖, 等. 取消 750 kV 线路断路器合闸电阻的研究[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 24(3): 12-17.
- ZHOU Peihong, DAI Min, LOU Ying, et al. Studies on eliminating 750 kV circuit breaker pre-inset resistor[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(3): 12-17.
- [8] 杨鹏程, 陈水明, 周宗川, 等. 避雷器代替 750 kV 线路合闸电阻[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1105-1109.
- YANG Pengcheng, CHEN Shuiming, ZHOU Zongchuan, et al. Adding one group of arresters to replace parallel resistor in 750 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1105-1109.
- [9] 刘青, 张玉峰, 万耕, 等. 750 kV 交流输电线路的工频及操作过电压[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1338-1343.
- LIU Qing, ZHANG Yufeng, WAN Geng, et al. Power frequency and switching overvoltage of 750 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1338-1343.
- [10] 张佩, 赵书涛, 申路, 等. 基于改进 EEMD 的高压断路器振声联合故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 77-81.
- ZHANG Pei, ZHAO Shutao, SHEN Lu, et al. Research on vibration and acoustic joint mechanical fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on improved EEMD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 77-81.
- [11] 陈昊, 邓广静, 王玉荣, 等. 电抗器间隔断路器后置式接线所引起二次问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 122-126.
- CHEN Hao, DENG Guangjing, WANG Yurong, et al. Research on the secondary side problem caused by breaker rear-wiring pattern in reactor interval[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 122-126.
- [12] 李兴文. 低压断路器研发新技术综述[J]. 电器与能效管理技术, 2015(9): 1-7.
- LI Xingwen. Review of the new research and development technologies for low voltage circuit breakers[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(9): 1-7.
- [13] 周云红. 低压断路器的限流性能与级联技术应用[J]. 电器与能效管理技术, 2014(22): 75-77.
- ZHOU Yunhong. Application of current limiting performance and cascaded technology of low voltage circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(22): 75-77.
- 马欢(1990—), 女, 研究生在读, 主要研究方向为电力系统过电压与绝缘配合。

(上接第 135 页)

- [20] 罗涛, 陈民铀, 曾灿. 电力电缆安全监测中温度场和电场数值关系分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 20-24.
- LUO Tao, CHEN Minyou, ZENG Can. Study of numerical relationship between temperature and electric field in power cables safety monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 20-24.
- 蒲丽娟(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压技术应用与电力设备故障诊断。