

电力变压器绝缘垫块黏弹性本构模型 构建及参数辨识

徐明阳¹, 张凡¹, 张雷¹, 高树国², 田源², 于德源¹, 赵振杰¹, 汲胜昌¹

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 050021, 石家庄)

摘要: 针对动态载荷下电力变压器绝缘垫块黏弹性特性表征不足, 进而导致绕组暂态振动位移难以精确计算的问题, 通过循环压缩实验对其在不同频率载荷条件下的力学响应特性进行系统研究, 揭示了该材料在加载初期应变快速累积、进入稳态阶段后力学性能逐渐趋于稳定的演化规律。基于实验结果构建计及垫块超弹性、黏弹性和时变黏性系数的凯尔-沃格特串联本构模型, 采用自适应差分进化算法对本构模型参数进行有效辨识。研究结果表明: 所构建的本构模型能够有效表征电力变压器短路冲击过程中绝缘垫块黏性应变快速累积后趋于饱和的特征, 并可模拟短路结束后应变逐渐恢复的力学响应; 基于本构模型辨识参数计算得到的应力-应变曲线与垫块实验数据高度一致, 决定系数 R^2 均高于 0.980。该研究可为电力变压器抗短路能力设计和运行状态精确评估提供重要的理论依据与工程参考。

关键词: 本构模型; 超弹性; 黏弹性; 自适应差分进化算法

中图分类号: TM41 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202608014 **文章编号:** 0253-987X(2026)08-0160-10

Construction and Parameter Identification of a Viscoelastic Constitutive Model for Power Transformer Insulation Spacers

XU Mingyang¹, ZHANG Fan¹, ZHANG Lei¹, GAO Shuguo², TIAN Yuan²,

YU Deyuan¹, ZHAO Zhenjie¹, JI Shengchang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: To address the problem of insufficient characterization of the viscoelastic properties of power transformer insulation spacers under dynamic loading, which makes it difficult to accurately calculate the transient vibration displacement of windings, the mechanical response of the insulation spacers under cyclic compression loading at different frequencies was systematically investigated. The results reveal that strain accumulates rapidly during the initial loading phase, and the mechanical properties gradually stabilize after entering the steady-state stage. Based on the experimental results, a Kelvin-Voigt series constitutive model that accounts for hyperelasticity, viscoelasticity, and time-varying viscosity coefficients was established, and an adaptive differential evolution algorithm was subsequently employed to identify the model parameters. The results demonstrate

收稿日期: 2025-10-21。 作者简介: 徐明阳(1998—), 男, 博士生; 汲胜昌(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金

项目: 国家电网公司科技资助项目(5108-202218280A-2-357-XG)。

网络出版时间: 2026-02-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260203.1002.002>

that the proposed constitutive model can accurately capture the rapid accumulation and subsequent saturation of viscous strain in insulation spacers during power transformer short-circuit impacts, and can also simulate the gradual strain recovery after the short-circuit event. The stress-strain curves calculated using the identified constitutive parameters show excellent agreement with the experimental data for the insulation spacers, with coefficients of determination R^2 exceeding 0.98 in all cases. This study provides an important theoretical basis and engineering reference for the short-circuit withstand capability design of power transformers and the accurate assessment of their operating conditions.

Keywords: constitutive model; hyperelasticity; viscoelasticity; adaptive differential evolution algorithm

电力变压器是电力系统中实现电压等级变换和能量传输的关键设备,其安全可靠运行直接关系到电网稳定与供电可靠性。然而,外部短路工况下,变压器绕组将承受巨大的短路电磁力,极易引发绕组失稳、变形等机械故障^[1-6]。因此,准确计算绕组在短路冲击下的振动位移,对于提升电力变压器的抗短路能力、保障电力系统的安全稳定运行具有至关重要的意义^[7-11]。

国内外学者普遍采用质量-弹簧-阻尼系统对变压器绕组进行力学建模,以研究其在暂态工况下的位移响应特性^[12-16]。该类模型的计算结果与绝缘垫块材料参数直接相关,因此构建绝缘垫块力学特性的准确模型对于振动分析的可靠性至关重要。Swihart等通过施加不同静态压力,揭示了绝缘垫块应力-应变关系的非线性特性^[17]。张凡等通过平均化加载和卸载过程的绝缘垫块应变数据,拟合其非线性参数^[18-19]。文献^[20-21]进一步考虑了不同应变率对绝缘垫块弹性模量的影响,并在振动模型中进行了相应修正。徐征宇等研究了多次短路作用下绝缘垫块的塑性变形规律,并以此计算绕组压紧力的衰减^[22],但并未考虑单次短路动态压缩过程中绝缘垫块的黏性变形。目前,相关研究大多依赖绝缘材料在低速、单轴压缩实验中获得的应力-应变关系,确定绕组振动等效模型中的刚度和阻尼参数。然而,在实际短路工况下,绝缘垫块承受的是幅值高达数十 MPa、持续数十个工频周期的高速动态压缩应力^[23]。循环载荷作用下,经恒压干燥处理的绝缘垫块表现出明显的黏弹性累积效应,其力学行为呈现初期变形递增、后期逐渐稳定的特征。因此,基于传统静态或准静态实验获得的应力-应变关系与真实动态响应之间存在一定偏差,难以准确反映绕组在暂态振动过程中的实际位移。为此,在建立绕组振动模型时,有必要进一步考虑绝缘垫块材料的黏

性特性。

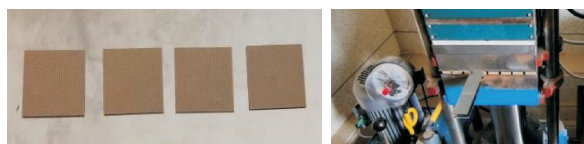
为了准确表征绝缘垫块的黏弹性力学性能,本文实验研究了不同循环载荷频率下绝缘垫块的应力-应变曲线,构建计及超弹性、黏弹性和时变黏性系数的绝缘垫块力学本构模型,结合自适应差分进化算法对黏弹性本构模型的参数进行识别。所提方法有助于深入揭示绝缘垫块在短路冲击等复杂载荷下的力学响应机理,对提升变压器在短路工况下的机械稳定性,以及实现现场绕组状态的准确评估与诊断具有重要的工程指导意义。

1 绝缘垫块压缩实验

1.1 实验平台

油浸式变压器中的绝缘垫块结构通常由较薄的绝缘纸层叠而成,其微观结构表现为由纤维素大分子链聚集形成的薄壁中空管状纤维束,纤维束之间存在大量孔隙^[24]。与干燥状态下的绝缘纸相比,浸油绝缘纸的力学行为更加复杂,其响应不仅受纤维本体性质影响,还与孔隙结构及油-纸界面相互作用密切相关,呈现典型的黏弹性特征。

为获取绝缘垫块在短路冲击周期应力下的力学特性,本文开展了循环加载-卸载实验。选取尺寸为 20 mm×20 mm×1 mm 的绝缘垫块试样置于两块钢板之间,然后放入平板硫化机加热夹板中,在压力为 5 MPa、温度为 100 °C 的条件下保持 48 h,以实现绝缘垫块的致密化处理并降低其含水量。随后,将处理后的绝缘垫块置于烘箱内,在温度为 105 °C 的真空环境下干燥 48 h,确保试样中水分的质量分数低于 0.1%。在此基础上进行真空注油,使得绝缘垫块充分吸附变压器油。注油完成后,继续在温度为 105 °C 的真空条件下干燥 4 h,以保证绝缘垫块完全浸渍。图 1 给出了绝缘垫块样品及密化处理实验装置。



(a) 绝缘垫块样品 (b) 密化处理实验装置

图1 绝缘垫块样品及密化处理实验装置

Fig. 1 Insulating paperboard sample and densification treatment test device

将预处理完成的3块绝缘垫块整齐叠放于盛有变压器油的不锈钢容器中,模拟绝缘垫块在实际变压器运行环境下的工作状态。随后,将该不锈钢容器置于MTS-880电液伺服万能材料实验机的上、下夹具之间。实验前,分别测量每组试样中绝缘垫块的厚度,并选取变形量相近的绝缘垫块组作为循环载荷加载对象,以确保实验条件的一致性和结果的可比性。

根据国标 GB/T 1094.5—2008,变压器短路工况下绝缘垫块的许用应力为80 MPa。典型变压器绝缘垫块在短路状态下所承受的应力通常为十几至几十 MPa,为有效激发绝缘垫块在动态压缩条件下的黏弹性累积与恢复行为,同时避免高应力水平下不可逆损伤对实验结果的干扰,选取许用应力(80 MPa)的30%作为正弦循环载荷峰值,循环15次,以模拟运行中实际短路动态压缩应力。为了分析黏弹性的频率依赖性,循环载荷的施加频率分别设为1、2、5、10 Hz。每个频率包含5组样品,取其平均值作为该频率下的代表性应力-应变曲线,以确保实验结果的统计可靠性。循环载荷实验装置示意图如图2所示。

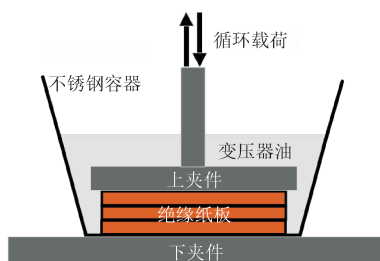


图2 绝缘垫块循环载荷实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cyclic load test device for insulating paperboard

1.2 实验结果分析

对绝缘垫块进行2次加载循环实验,应力-应变曲线如图3所示。由图可见,两次循环所得的应力-应变曲线变化趋势基本一致。相较于初次压缩,复压缩时的黏性变形略有降低。结合实际工况,变压器短路过程中绝缘垫块承受压缩应力的循环次数有限,单次短

路过程中的塑性变形累积较少。因此,本文所定义的累积变形量主要为单次短路过程中的黏性应变。

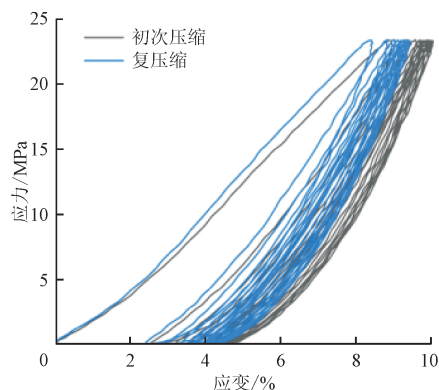
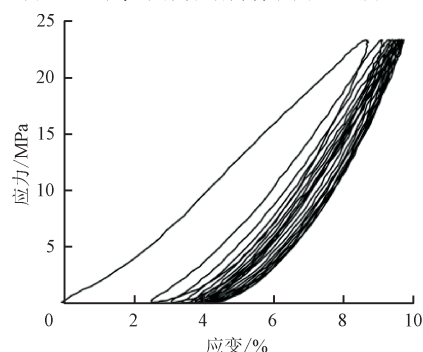


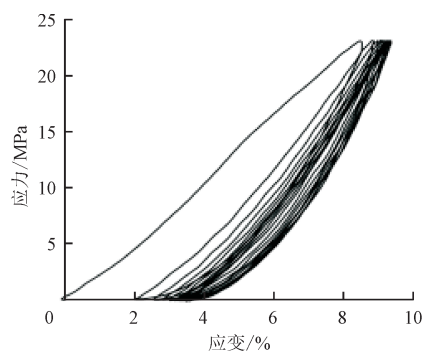
图3 2次循环加载下绝缘垫块的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of insulating paperboard under two cycles of loading

不同频率下绝缘垫块的应力-应变曲线如图4所示。由图可见,在加载初期,黏性变形快速累积。其主要原因是试样内部的孔隙尚未完全闭合,纤维束间的相对滑移较为自由,导致黏性变形累积尤为显著,首次加载所引起的应变累积幅度最大。随着循环次数增加,累积速率放缓,试样逐渐被压密,微观孔隙逐步闭合,纤维之间的接触面积增大,摩擦阻力增强,体系内的耗能机制由初期的显著黏性耗散逐步向由弹性主导的稳定响应转变。因此,结合实验曲线对加载过程进行分阶段处理,选取前3个载荷周期作为暂态阶段,剩余载荷周期作为稳态阶段。



(a) 1 Hz



(b) 2 Hz

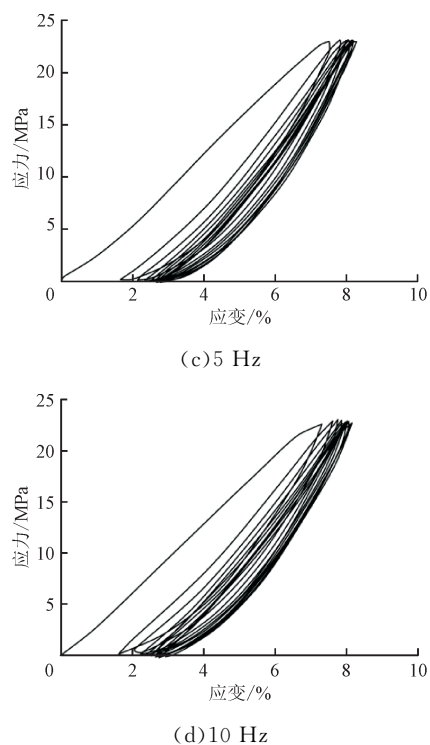


图 4 不同频率下绝缘垫块的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of insulating paperboard under different frequencies

不同频率下,稳态阶段绝缘垫块的应力-应变曲线如图 5 所示。由图可见,不同频率下的曲线差异较小,材料的动态响应频率依赖性较低,表明在该应变区间内,绝缘垫块变形机制以可恢复的弹性变形为主。随着应变的增加,应力响应呈非线性快速增长,反映出绝缘垫块典型的超弹性特征。

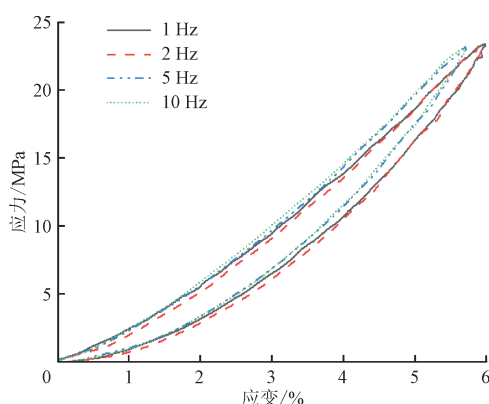


图 5 不同频率下稳态阶段绝缘垫块的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of insulating paperboard at steady state under different frequencies

为定量分析暂态阶段加载频率对黏性累积应变的影响,将首次循环结束后的应变、最后一次循环应

变的最大值和循环卸载完成时的应变作为 3 个关键特征值。其随频率的变化规律如图 6 所示。由图可见,随着加载频率增大,黏性累积应变均近似呈线性减小趋势。结合图 5 和图 6 可知,加载初期的黏性应变累积与载荷频率密切相关,而在稳态阶段,其影响则趋于弱化,因此分析过程中可忽略载荷频率的影响。

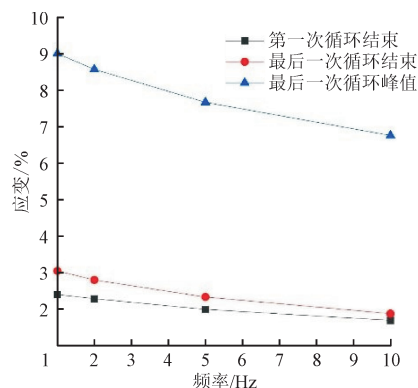


图 6 加载频率对累积黏性应变的影响

Fig. 6 Influence of loading frequency on cumulative viscous strain

2 绕组绝缘垫块黏弹性本构模型构建

2.1 串联黏弹性模型

本构模型是以数学形式描述材料在外载作用下的应力-应变关系及其随时间演化规律的力学模型,是将材料力学特性引入数值计算的基础。根据绝缘垫块的黏弹性特征,采用凯尔-沃格特(K-V)黏弹性模型描述其动态响应。该模型将弹性元件和黏性元件以并联形式组合,保证两个元件的应变始终相等,应力则分别由弹性元件和黏性元件的力学特性决定。两个元件的应力可分别表示为

$$\sigma_e = E_e \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\sigma_v = \eta_v \frac{d\varepsilon_t}{dt} \quad (2)$$

式中: σ_e 、 σ_v 分别为弹性元件和阻尼元件的应力; E_e 为弹性元件的弹性模量; η_v 为阻尼元件的黏性系数; ε_t 为弹性/黏性元件的应变。

考虑到初始加载周期内,材料的黏性应变在初期快速累积而后逐步趋于稳定,单一的 K-V 模型仅对应单一特征时间尺度,难以同时刻画实验中绝缘垫块的双阶段响应特征。因此,可将其力学模型分解为两个串联的 K-V 模型,用于描述稳态过程和暂态过程,分别记为 K-V₁、K-V₂,如图 7 所示。图中,

F_0 为应力幅值, ω_F 为激励力频率, t 为时间, C_1 、 C_2 和 K_1 、 K_2 分别为 K-V₁、K-V₂ 模型的阻尼系数、弹性刚度。将上述两模型的应变相加, 可精确获得材料的整体黏弹性应变, 即在保证物理解释清晰的前提下, 有效控制了模型的复杂度和待辨识参数个数。

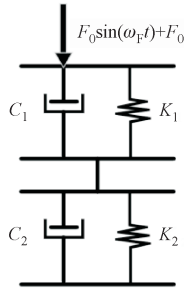


图 7 两个串联的 K-V 黏弹性模型

Fig. 7 Two K-V viscoelastic models connected in series

2.2 非线性模型参数

由图 5 可知, 稳态阶段下加载与卸载曲线非线性变化的趋势一致, 均呈凹函数形式, 且不同频率下的曲线差异较小。为消除应变率影响并获得宽频范围内稳定的力学响应, K-V₁ 模型的数学表达式可修正为

$$\sigma_1 = a\varepsilon_1 + b\varepsilon_1^3 + \eta_1 \frac{d\varepsilon_1}{dt} \quad (3)$$

式中: σ_1 、 ε_1 、 a 、 b 分别为 K-V₁ 模型的应力、应变、线性系数和非线性系数; η_1 为 K-V₁ 模型的黏性系数, 计算式为

$$\eta_1 = (c\varepsilon_1 + d\varepsilon_1^3 + e)/f \quad (4)$$

其中, c 、 d 、 e 分别为黏性系数的线性项、非线性项和常数项, f 为 K-V₁ 模型的加载频率。

暂态阶段下, 应变在循环应力加载初期逐渐增大并最终趋于稳定, K-V₂ 模型的数学表达式为

$$\sigma_2 = E_2\varepsilon_2 + \eta_2 \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (5)$$

式中: σ_2 、 E_2 、 η_2 、 ε_2 分别为 K-V₂ 模型的应力、弹性模量、黏性系数和应变。

在加载初期, 黏性应变快速累积并逐步趋于稳定。结合 K-V 模型的理论特征可知, 黏性应变的增长速率与黏性系数 η_2 密切相关。初期孔隙较多、纤维约束较弱, 特征时间常数较小; 随着试样被压实, 特征时间常数增大, 累积速率降低。因此, 黏性系数 η_2 在加载过程中呈现显著的时变特性, 随着加载次数的增加而增大。其数学表达式为

$$\eta_2(t) = (1 - ue^{-vt})\xi_0/f \quad (6)$$

式中: ξ_0 为 K-V₂ 模型中垫块的黏性基准参数; u 为

衰减比例系数; v 为衰减时间常数。

由图 6 可知, 在不同频率应力加载过程中, 绕组绝缘垫块的黏性变形与加载频率近似呈线性关系。考虑到黏性累积变形与模型弹性模量的相关性, 将弹性模量的表达式调整为与频率相关的函数形式, 具体表示如下

$$E_2(f) = p + qf \quad (7)$$

式中: $E_2(f)$ 为考虑加载频率影响后的等效弹性模量; q 为频率修正系数; p 为零频修正值。

综上所述, 采用串联双单元凯尔-沃格特模型描述绝缘垫块力学行为, 遵循两单元应力相等、应变叠加的基本关系, 通过对刚度和黏性系数进行参数化调控, 可实现对暂态黏性累积及稳态超弹性响应的统一表征。其本构关系表示为

$$\begin{cases} \sigma_1 = a\varepsilon_1 + b\varepsilon_1^3 + \frac{1}{f}(c\varepsilon_1 + d\varepsilon_1^3 + e) \frac{d\varepsilon_1}{dt} \\ \sigma_2 = (p + qf)\varepsilon_2 + \frac{\xi_0}{f}(1 - ue^{-vt}) \frac{d\varepsilon_2}{dt} \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ 、 ε 分别为串联模型的总应力和总应变。

3 绕组参数寻优算法

3.1 自适应差分进化辨识算法

为确定所构建绕组绝缘垫块的超弹性-黏弹性模型参数, 通过给定 1 组初始模型参数, 构建实测应变数据与理论计算数据误差函数, 在参数搜索域内迭代寻优, 使得模型计算曲线与实验曲线的偏差最小, 以实现模型参数的迭代优化与精确识别。

差分进化(DE)算法通过变异、交叉和选择等操作对种群个体进行迭代演化, 以搜索全局最优解。然而, 在求解某些复杂优化问题时, 传统 DE 算法常面临收敛速度较慢、参数设置依赖性强以及易陷入局部最优等问题。针对上述不足, 本文基于自适应差分进化算法, 通过自适应调整变异因子与交叉概率, 并引入历史记忆机制, 有效提升了算法的全局搜索能力和收敛效率。

在算法初始化阶段, 分别采用柯西分布、正态分布对缩放因子 F 和交叉概率 P_{CR} 进行初始化, 以增强种群多样性。迭代过程中, 通过个体间的差分信息进行全局搜索, 根据个体适应度对种群进行排序并确定精英集合。迭代中, 从精英个体集合中随机选取个体参与差分变异, 引导搜索向优良解区域收敛。个体 i 在第 G 代的突变向量生成公式可表示为

$$F_i^G = \text{Cauchy}(\mu_{\text{CR}}, 0.1) \quad (9)$$

$$P_{\text{CR},i}^G = N(\mu_F, 0.1) \quad (10)$$

$$v_i^G = x_i^G + F_i^G(x_{\text{best}}^G - x_i^G) + F_i^G(x_{r1}^G - x_{r2}^G) \quad (11)$$

式中: G 为种群进化代数; F_i^G 为第 G 代中第 i 个个体控制差分向量的缩放因子; $P_{\text{CR},i}$ 为第 i 个个体的交叉概率; μ_F, μ_{CR} 分别为生成下一代个体缩放因子和交叉概率的均值; $\text{Cauchy}(\cdot)$ 为柯西分布函数; v_i^G 为第 G 代中第 i 个个体产生的变异向量; x_i^G 为第 G 代种群中第 i 个个体; x_{r1}^G, x_{r2}^G 为随机选取的不同个体; x_{best}^G 为第 G 代当前种群中最优个体。

将变异个体作为下一代候选解,再通过选择操作依据适应度值筛选优良个体进入下一代,以保证种群整体质量持续提升。表达式为

$$x_i^{G+1} = \begin{cases} v_i^{G+1}, & f(v_i^{G+1}) \leq f(x_i^G) \\ x_i^G, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $f(v_i^{G+1})$ 、 $f(x_i^G)$ 分别为个体 v_i^{G+1} 、 x_i^G 的适应度函数。

每一代选择结束后,记录产生更优子代个体所对应的缩放因子集合 S_F 和交叉概率集合 S_{CR} ,并据此更新历史记忆均值,用于下一代的自适应参数生成。具体表达式可写为

$$\mu_{\text{CR}}^{G+1} = (1 - \beta)\mu_{\text{CR}}^G + \beta M_A(S_{\text{CR}}) \quad (13)$$

$$\mu_F^{G+1} = (1 - \beta)\mu_F^G + \beta M_L(S_F) \quad (14)$$

$$M_L(S_F) = \sum_{F \in S_F} F^2 / \sum_{F \in S_F} F \quad (15)$$

式中: μ_{CR}^{G+1} 、 μ_{CR}^G 分别为第 G 代和第 $G+1$ 代交叉概率均值; μ_F^{G+1} 、 μ_F^G 分别为第 G 代和第 $G+1$ 代缩放因子均值; β 为学习率常数,用于控制参数的自适应调整速度; $M_L(S_F)$ 、 $M_A(S_{\text{CR}})$ 分别为集合中所有值的 Lehmer 平均值和算术平均值。

Lehmer 平均值可赋予较大缩放因子更高的权重,从而保留和强化进化过程中发挥重要作用的缩放因子特征,提升算法的全局搜索能力与收敛效率。将应变计算值与实测值之间的均方根误差作为优化目标函数,在预定义搜索域中寻找使目标函数值最小的待辨识参数。其数学模型表示为

$$\begin{cases} \min \epsilon_{\text{error}} = \sqrt{(\sum_{i=1}^N (\epsilon_{\text{cal},i} - \epsilon_{\text{mea},i})^2) / N} \\ \text{s. t. } x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ x = \{a \ b \ c \ d \ e \ u \ v \ p \ q \ \xi_0\} \end{cases} \quad (16)$$

式中: ϵ_{error} 为应变计算值与实测值之间的均方根误差; N 为采样点个数; $\epsilon_{\text{cal},i}$ 、 $\epsilon_{\text{mea},i}$ 分别为绝缘垫块第 i 个应变计算值和实测值; x 为待辨识参数集合; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为待辨识参数集的上界和下界。

3.2 参数辨识结果

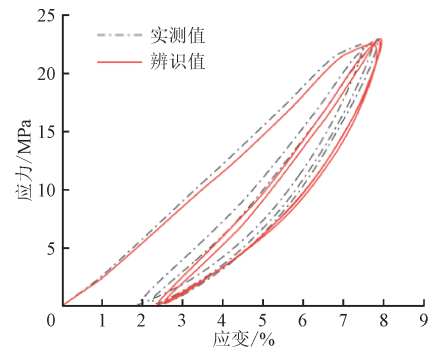
基于 3.1 节所提出的自适应差分进化算法,对绝缘垫块力学本构模型的关键参数进行辨识。以 24 MPa(30% 许用应力)工况下的实验数据作为优化依据开展参数辨识,得到的结果如表 1 所示。

表 1 自适应参数差分进化算法辨识结果

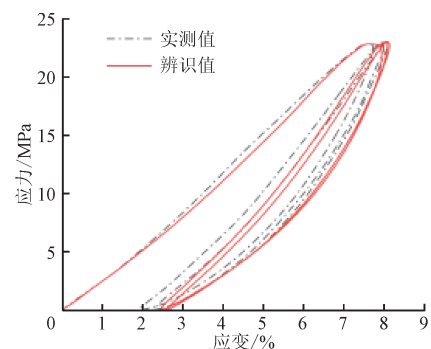
Table 1 Identification results of adaptive parameter differential evolution algorithm

参数	辨识值	参数	辨识值
a/MPa	251.67	c/MPa	118.284 9
b/MPa	55 474.38	d/MPa	26 005.2
p/MPa	144.93	e/MPa	0.47
$q/(\text{MPa} \cdot \text{s})$	28.98	u	1.0
ξ_0/MPa	1 851.3	v	0.343

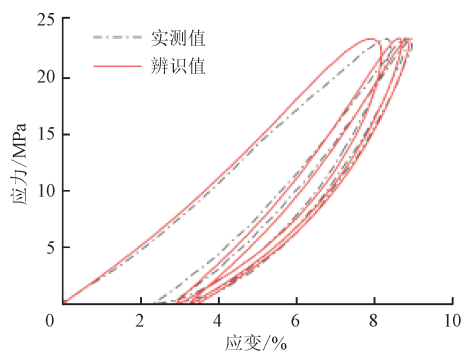
将表 1 中的参数辨识结果代入式(8),计算得到绝缘垫块在应力-应变暂态与稳态阶段的响应曲线,并与对应实测数据进行对比,结果如图 8 和图 9 所示。



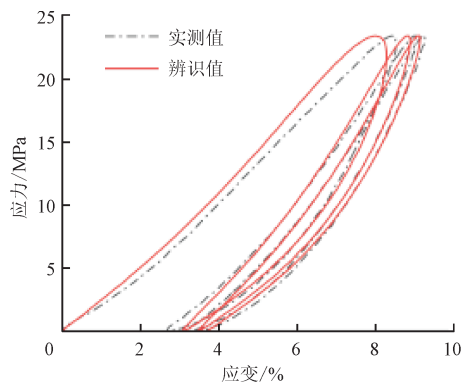
(a) 10 Hz



(b) 5 Hz

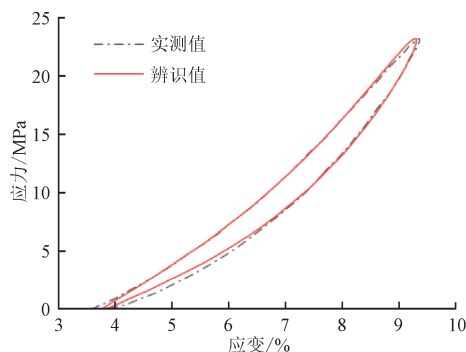


(c) 2 Hz

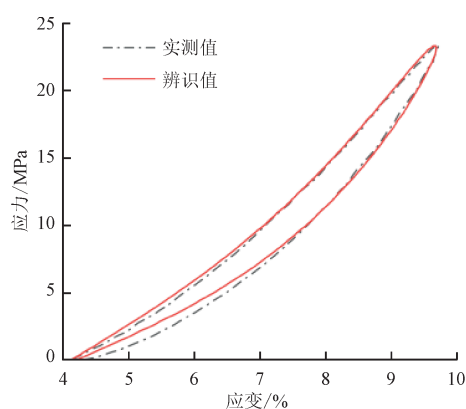


(d) 1 Hz

图8 暂态阶段绝缘垫块应力-应变曲线的辨识结果对比
Fig. 8 Comparison diagram of transient stage identification of stress-strain curves of insulation spacers

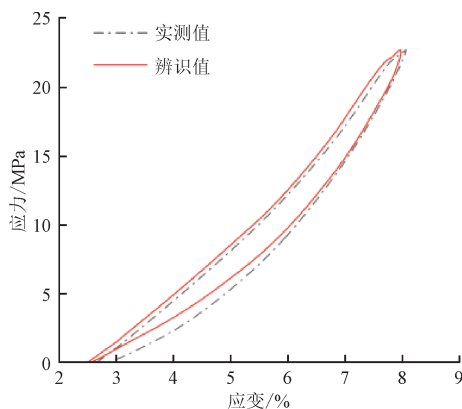


(c) 2 Hz

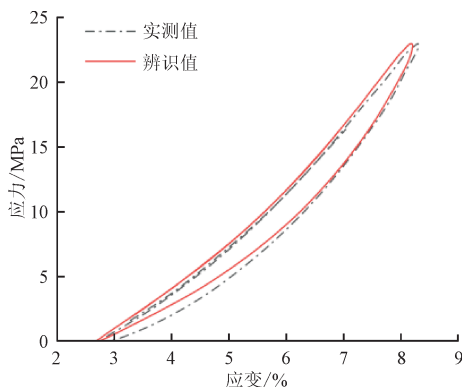


(d) 1 Hz

图9 稳态阶段绝缘垫块应力-应变曲线的辨识结果对比
Fig. 9 Comparison diagram of steady-state identification of stress-strain curves of insulation spacers



(a) 10 Hz



(b) 5 Hz

由图8和图9可知,在暂态与稳态阶段,模型黏性累积应变计算值和实测值的相对误差整体均低于7.5%,即未出现明显偏差。为从统计角度进一步评估绝缘垫块本构模型的准确性,计算了模型计算结果与实验数据之间的决定系数 R^2 。决定系数是评价模型拟合优度的重要指标,其取值范围为0~1,数值越接近1,表明模型预测值与实测值之间的一致性越高,模型的解释能力与拟合精度也越强。其表达式如下

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_{\text{cal},i} - \epsilon_{\text{mea},i})^2}{\sum_{i=1}^n (\epsilon_{\text{mea},i} - \bar{\epsilon}_{\text{mea}})^2} \quad (17)$$

式中: $\bar{\epsilon}_{\text{mea}}$ 为实测应变值的平均值。

辨识结果显示:当加载频率为1、2、5、10 Hz时,决定系数 R^2 分别为0.992、0.991、0.987和0.985,均超过0.980。这表明,基于模型计算得到的绝缘垫块应力-应变曲线与实测曲线具有高度一致性,进一步验证了所构建黏弹性本构模型在描述绝缘垫块黏性累积时具有较高的预测精度和鲁

棒性。

3.3 黏弹性本构模型在短路振动中的应用

当绕组发生外部短路时,短路电流^[25]表示为

$$i_1 = \sqrt{2}I_k [\cos \alpha \exp(-R_k t/L_k) - \cos(\omega t + \alpha)] \quad (18)$$

式中: I_k 为稳态短路电流有效值; R_k 、 L_k 分别为绕组短路的电阻和漏感; ω 为激励电流频率; α 为突发短路合闸角。

根据式(18),短路电流由衰减直流分量和 50 Hz 交流分量叠加而成。以 SZ-50 MV·A/110 kV/10.5 kV YNd11 电力变压器线饼为单元,建立二维轴对称漏磁场有限元模型,得到 0.25 s 短路过程中的绕组电流和电流峰值时刻对应的电磁力,如图 10 所示。

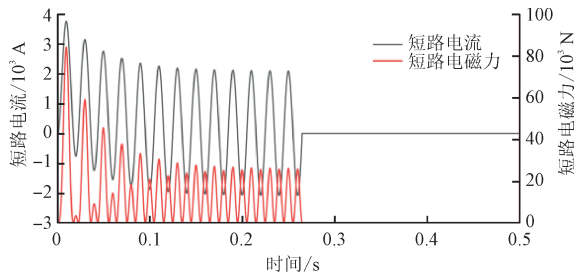


图 10 绕组短路电流和电磁力的分布

Fig. 10 Distribution of winding short-circuit current and electromagnetic force

为准确刻画短路电磁力频谱随时间的变化,对其进行时频分析,得到的结果如图 11 所示。

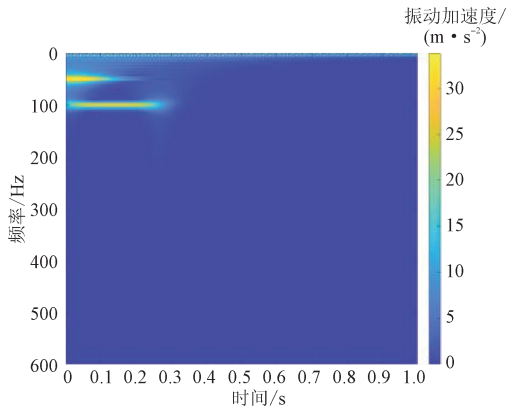


图 11 绕组短路电磁力时频图谱

Fig. 11 Time-frequency diagram of winding short-circuit electromagnetic force

由图 11 可知,短路初期,电磁力以 50 Hz 分量为主,随着自由分量的衰减,100 Hz 分量逐渐占据主导地位。考虑到黏性累积应变与频率相关,根据各频率分量能量占比确定等效频率,用以修正不同

短路时刻电磁力频谱结构对垫块动态响应的影响。其具体表达式如下

$$f_{eq}(t) = 50\lambda_{50}(t) + 100\lambda_{100}(t) \quad (19)$$

$$\lambda_{50}(t) = \frac{E_{50}(t)}{E_{50}(t) + E_{100}(t)} \quad (20)$$

$$\lambda_{100}(t) = \frac{E_{100}(t)}{E_{50}(t) + E_{100}(t)} \quad (21)$$

式中: $E_{50}(t)$ 和 $E_{100}(t)$ 分别为 50、100 Hz 电磁力频率分量在短路 t 时刻的能量; $\lambda_{50}(t)$ 和 $\lambda_{100}(t)$ 分别为 50、100 Hz 电磁力频率分量在短路 t 时刻的能量权重系数。

基于所构建的本构模型和等效激励频率,计算得到短路电磁力作用下绕组短路过程中绝缘垫块的应力-应变、应变-时域曲线,分别如图 12、图 13 所示。

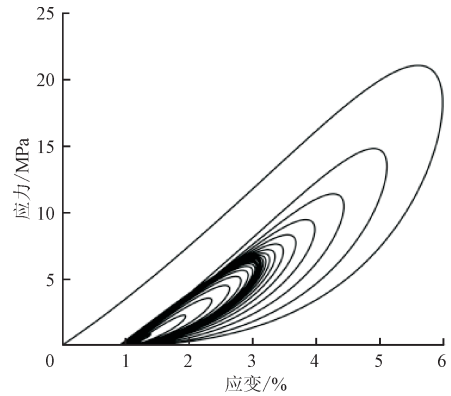


图 12 短路电磁力作用下绝缘垫块的应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curve of insulation spacer under short-circuit electromagnetic force

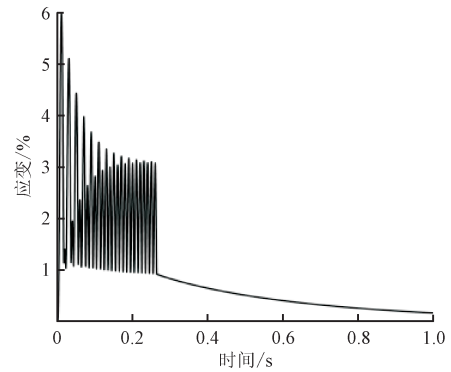


图 13 短路电磁力作用下绝缘垫块的应变-时域曲线

Fig. 13 Strain-time curve of insulation spacer under short-circuit electromagnetic force

由图 12 可知,垫块在短路瞬态过程中不仅发生弹性变形,还伴随着黏性应变的累积。由图 13 可知,绝缘垫块的应变-时域曲线与电磁力波形基本同步。最大应变出现在电磁力达到峰值时,后伴随短

路电流中直流分量的衰减,电磁力幅值逐渐下降,应变也逐步回落。短路过程结束后,变形进入自恢复阶段,累积的黏性应变也随之逐渐释放。

相较于传统单一等效刚度/阻尼模型,本文所构建的绝缘垫块黏弹性模型能更准确地描述加载初期应变快速累积及其后续趋于稳定的全过程;同时,该模型可用于分析重合闸短路工况下的绕组振动响应。初次短路过程中,由于绕组在承受强压缩应力后会产生可恢复的黏弹性变形,导致预紧力下降,因此结构整体的等效刚度与阻尼特性也随之改变,使得后续重合闸短路冲击下的绕组振动响应进一步增大。

4 结 论

本文结合实验测试与理论建模,系统研究了绕组绝缘垫块的机械特性和参数辨识方法。通过对绝缘垫块在强压缩应力作用下的应力-应变曲线进行测试,提出了考虑超弹性和黏弹性的本构模型,并利用自适应差分进化算法实现了模型参数的精确识别。研究得到如下主要结论。

(1)绝缘垫块的动态应变始终滞后于动态应力,加载过程中形成显著的滞回环。随着循环加载次数增加,绝缘纸材料的力学性能趋于稳定,外部载荷输入的能量主要转化为弹性势能,材料力学性能呈现出由黏弹性主导向弹性主导的转变。

(2)基于材料应力-应变响应对曲线不同阶段进行划分,发现暂态阶段黏性变形与应力加载频率线性相关,黏性系数表现出显著的时变特性,且与频率近似成线性关系。稳态阶段的应力-应变曲线对频率敏感性较低,非线性特征显著。

(3)建立了基于串联双K-V单元的绝缘垫块黏弹性、非线性本构模型,并引入时变黏性系数,以提高对暂态特性的描述精度。基于自适应差分进化算法进行参数辨识,不同频率下模型辨识结果的计算曲线与实测曲线高度一致,决定系数 R^2 均大于0.980。

(4)所提模型可应用于基于质量-弹簧-阻尼系统的绕组短路冲击振动分析。在短路振动初期,绕组黏性变形最大;当短路结束后,绕组存在自恢复过程,黏性变形逐渐衰减。因此,该模型可应用于绕组重合闸短路工况分析,为重合闸振动响应计算与策略评估提供依据。

未来,可进一步开展电力变压器长期运行中力-热累积对材料力学性能衰减作用的实验研究。

参考文献:

- [1] 毛晓燕, 欧强, 王静, 等. 变压器短路热效应与动稳定的综合分析 [J]. 变压器, 2019, 56(7): 29-32.
Mao Xiaoyan, Ou Qiang, Wang Jing, et al. Comprehensive analysis of short-circuit thermal effect and dynamic stability of transformer [J]. Transformer, 2019, 56(7): 29-32.
- [2] Christina A J, Salam M A, Rahman Q M, et al. Causes of transformer failures and diagnostic methods: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82(Part 1): 1442-1456.
- [3] 杨擎柱, 程养春, 李斐然, 等. 基于现场数据的变压器首次故障率研究 [J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1855-1864.
Yang Qingzhu, Cheng Yangchun, Li Feiran, et al. Study on the first failure rate of transformer based on field data [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1855-1864.
- [4] 刘勇, 汲胜昌, 杨帆, 等. 检测变压器故障的扫频阻抗法特性研究及应用 [J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3237-3245.
Liu Yong, Ji Shengchang, Yang Fan, et al. Characteristics and application of sweep frequency impedance method for detecting transformer fault [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3237-3245.
- [5] Wang F H, Xu J, Jin Z J, et al. Experimental research of vibration sweep frequency response analysis to detect the winding deformation of power transformer [C]//IEEE PES T & D 2010. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [6] 孟庆民, 陈玉红, 洛君婷, 等. 大容量变压器内绕组辐向失稳特性的模拟研究 [J]. 变压器, 2010, 47(4): 32-40.
Meng Qingmin, Chen Yuhong, Luo Juntao, et al. Simulation research on radial stability of internal winding in large transformer [J]. Transformer, 2010, 47(4): 32-40.
- [7] 汲胜昌, 张凡, 师愉航, 等. 基于振动信号的电力变压器机械状态诊断方法研究综述 [J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 257-272.
Ji Shengchang, Zhang Fan, Shi Yuhang, et al. Review on vibration-based mechanical condition monitoring in power transformers [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 257-272.
- [8] 张占龙, 肖睿, 武雍烨, 等. 换流变压器振动信号多层次特征提取模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7093-7103.
Zhang Zhanlong, Xiao Rui, Wu Yongye, et al.

- Research on multi-level feature extraction model of converter transformer vibration signal [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7093-7103.
- [9] 刘云鹏,王博闻,李欢,等. 结合载纤绕组形变测量法的大型变压器绕组多次短路冲击暂态声纹特征 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 434-446.
- Liu Yunpeng, Wang Bowen, Li Huan, et al. Transient acoustics characteristics of large transformer windings under multiple short-circuit impulse combined with fiber-carrying winding deformation measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 434-446.
- [10] Shi Yuhang, Ji Shengchang, Zhang Fan, et al. Application of operating deflection shapes to the vibration-based mechanical condition monitoring of power transformer windings [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2164-2173.
- [11] 吴书煜,汲胜昌,祝令瑜,等. 基于多重信息分解与时变权重组合的换流变压器振动状态参量综合预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7792-7804.
- Wu Shuyu, Ji Shengchang, Zhu Lingyu, et al. Comprehensive prediction method of converter transformer vibration state parameters based on multiple information decomposition and time-varying weight combination [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7792-7804.
- [12] Watts G B. A mathematical treatment of the dynamic behaviour of a power-transformer winding under axial short-circuit forces [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1963, 110(3): 551-560.
- [13] Mchutt W J, JOHNSON W M, NELSON R A, et al. Power transformer short-circuit strength: requirements, design, and demonstration [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89(8): 1955-1969.
- [14] Hori Y, Okuyama K. Axial vibration analysis of transformer windings under short circuit conditions [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(2): 443-451.
- [15] Patel M R. Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces: part II windings and clamps as a combined system [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems. 1973, PAS-92(5): 1567-1576.
- [16] 汲胜昌,张凡,钱国超,等. 稳态条件下变压器绕组轴向振动特性及其影响因素 [J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3178-3187.
- Ji Shengchang, Zhang Fan, Qian Guochao, et al. Characteristics and influence factors of winding axial vibration of power transformer in steady-state operation condition [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3178-3187.
- [17] Swihart D O, Wright D V. Dynamic stiffness and damping of transformer pressboard during axial short circuit vibration [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(2): 721-730.
- [18] Zhang Fan, Ji Shengchang, Ma Hui, et al. Operational modal analysis of transformer windings [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1285-1298.
- [19] 张凡,吴书煜,徐征宇,等. 变压器绕组非线性动力学模型及多次短路冲击下的振动特征 [J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4882-4892.
- Zhang Fan, Wu Shuyu, Xu Zhengyu, et al. Nonlinear vibration model of transformer windings and their vibration characteristics during multiple short circuits [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4882-4892.
- [20] 汪鑫宇. 短路冲击下变压器绕组与垫块力学特性及形变辨识研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [21] Wang Xinyu, Wang Ping, Geng Jianghai, et al. Study on the dynamic mechanical properties of winding-block axial structure considering short circuit strain rate effect [J]. High Voltage, 2024, 9(2): 380-390.
- [22] 徐征宇,李鹏,李林达,等. 基于等效短路试验的变压器用层压垫块累积效应 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4535-4543.
- Xu Zhengyu, Li Peng, Li Linda, et al. Cumulated effect of spacers in transformers based on equivalent short-circuit test [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4535-4543.
- [23] 张凡,马程,李秀广,等. 计及振动响应的变压器绕组轴向机械强度动态评估方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6494-6504.
- Zhang Fan, Ma Cheng, Li Xiuguang, et al. Dynamic assessment of windings' axial mechanical strength in power transformers considering the vibration response [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6494-6504.
- [24] Emsley A M, Xiao X, Heywood R J, et al. Degradation of cellulosic insulation in power transformers: part 3 effects of oxygen and water on ageing in oil [J]. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 2000, 147(3): 115-119.
- [25] 路长柏. 电力变压器理论与计算 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2007: 286-290.

(编辑 李慧敏)