

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0805

橡胶-铝界面摩擦参数识别和摩擦振动分析

钱逸淳, 瞿俊豪, 任 睿, 吴 翔, 袁泽帅, 黄海波*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 橡胶具有较强的非线性和大变形特征, 发生摩擦振动时不同运动状态下的摩擦参数会发生改变, 但其动力学机理还未被深入认识。针对橡胶-铝界面的摩擦振动开展研究, 设计物理试验结合遗传算法来识别摩擦副滑动接触刚度和阻尼, 并通过微动摩擦耗能法获得静刚度和阻尼, 代入非线性动力学模型中得到系统的运动特性。结果表明, 参数识别效果较好, 误差不超过 9.68%; 当传送带进给速度增大时, 橡胶-铝界面摩擦副摩擦振动会呈现出典型的 Hopf 分岔特征, 在 $0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度下可实现从振动到稳定状态的转变。

关键词: 橡胶-硬物质表面; LuGre 模型; 摩擦耗能; 参数识别; 摩擦振动

中图分类号: O322; O323

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 03-0016-09

橡胶作为高分子材料, 具有超弹性、黏弹性的特点, 同时具有优秀的抗疲劳强度和耐磨性, 这些特性使橡胶成为重要的生产原料, 在轮胎、刹车、悬置、密封圈、胶辊等生活用品和工业产品上都得到了广泛应用^[1-4]。在橡胶制品与对偶件发生接触并产生相对运动或具有相对运动趋势的情况下, 两者间接触表面会产生摩擦力。橡胶材料的摩擦性能相对复杂, 不仅可能使橡胶制品的形状和尺寸发生变化, 还可能对橡胶的使用寿命产生显著影响^[5]。因此, 深入理解橡胶材料的摩擦性能对提高橡胶制品可靠性和耐用性具有重要意义。

目前, 橡胶摩擦振动主要采用理论、试验及数值分析(有限元分析)等方法开展研究。Ludema 等^[6]通过试验证实了橡胶在摩擦过程中的黏弹性有较大影响。Persson 等^[7]和 Lorenz 等^[8]指出橡胶材料的表面黏附能对摩擦振动特性有很大影响。高天燕等^[9]研究探讨了界面润湿性和粗糙度对橡胶摩擦峰的影响。文献[10-13]研究了橡胶的表面结构 and 凹槽对铝盘摩擦振动的削弱作用。还有研究^[14-17]发现, 摩擦副摩擦振动主要由摩擦系数随相对运动速度增加而降低产生的负斜率引起。

目前, 不同学者^[18-23]通过不同的理论模型对摩擦自激系统进行了解析和数值分析, 揭示了滑动和黏滑运动的周期解, 并讨论摩擦振动系统在不同参数下的分岔特性。但是有关橡胶-硬物质界面摩擦副的摩擦振动动力学机理还未被深入认识, 且振动响应机理的研究相对滞后, 没有得出系统性的规律。

笔者以橡胶-铝界面摩擦副为研究对象, 运用 LuGre 摩擦模型和识别橡胶块微动响应时的摩擦力耗能对橡胶-铝界面的摩擦学行为进行参数识别, 并在此基础上建立含传送带模型的摩擦系统非线性动力学模型, 研究橡胶-铝界面摩擦副在不同速度下的振动特性和分岔行为, 进一步丰富了软材料-硬物质接触界面摩擦振动的理论, 为相关领域研究提供新的视角和方法。

1 模型参数识别

1.1 LuGre 摩擦模型简介

由于橡胶与硬物质是典型干摩擦系统, 其摩擦力大小与摩擦副的相对滑动速度存在复杂的非线性关系^[24]。因此, 通过 LuGre 模型来识别橡胶-

收稿日期: 2024-08-15

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(52475198); 浙江省自然科学基金(LTGS24E050001)

第一作者: 钱逸淳, 硕士研究生, 主要研究方向: 橡胶摩擦振动。E-mail: qyc1978113@outlook.com

*通信作者: 黄海波, 教授, 主要研究方向: 部件的摩擦磨损及防控、接触力学。E-mail: huanghaibo@nbu.edu.cn

铝界面的摩擦力, 并将摩擦力代入摩擦振动模型中进行数值分析。

LuGre 模型^[25]是一种描述干摩擦现象的微观模型, 其假定有微小的鬃毛相互接触, 并充满于橡胶-硬物质的接触面之间, 上表面橡胶材料的鬃毛刚度小于下表面硬物质的鬃毛刚度。当切向力作用于接触面时, 鬃毛变形(z 表示鬃毛的平均变形量), 此时界面产生静摩擦力; 当切向力足够大, 使鬃毛进一步变形, 并造成上下表面的鬃毛滑动(v 表示两者间的相对滑动速度), 产生了滑动摩擦力。

LuGre 模型的摩擦力 F_f 表示为

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0 |v|}{g'} z \quad (2)$$

$$g' = F_c + (F_s - F_c) e^{-(v/v_s)^2} \quad (3)$$

式中: σ_0 为鬃毛刚度系数; σ_1 为鬃毛阻尼系数; σ_2 为黏滞阻尼系数; g' 为摩擦力 Stribeck 效应的表达式; F_c 为库仑摩擦力; F_s 为最大摩擦力; e 为自然常数; v_s 为 Stribeck 速度。

由于橡胶块的摩擦振动是一种自激振动, 激励来源于摩擦副自身。因此, LuGre 模型鬃毛的接触刚度 σ_0 和阻尼 σ_1 可以被认为是橡胶块与铝盘接触面滑动时切向的接触刚度 k 和阻尼 c ^[24]。由此可见, 对模型精度影响较大的 2 个参数是 σ_0 和 σ_1 。

1.2 LuGre 模型参数识别

近年来, 国内外学者提出了多种辨识摩擦模型的方法, 其中智能算法包括粒子群算法^[26]、蚁群算法^[27]、遗传算法^[28-31]等。遗传算法是应用最广泛且效果最显著的一种智能算法, 其求解过程类似

于染色体基因的交叉、变异等过程。该算法个体选择的随机性强, 能有效处理复杂的优化问题, 可以较快的收敛速度在广阔的搜索范围中确定全局最优解或近似解, 具有较强的搜索能力, 适用于参数识别、调度规划等多种问题。因此, 笔者采用遗传算法对橡胶-硬物质界面的摩擦力进行静、动力参数的识别, 期待能够在多种可能的参数组合中找到最优或近似最优的摩擦模型参数, 为理解和预测橡胶-铝界面在干摩擦条件下的摩擦行为提供精确的参数支持。

1.2.1 遗传算法

首先, 实施稳态摩擦学试验, 测量不同相对速度下的摩擦力。将试验结果与 LuGre 模型的静态理论预测进行对比, 使用最小二乘法计算摩擦力误差, 并以此作为目标函数来确定静力参数。随后, 进行动态摩擦学试验, 记录动态条件下摩擦力与相对速度的关系。在此步骤中, 将先前确定的静力参数代入动态理论模型中, 并通过多次辨识进一步优化动力参数。最终, 将所有识别的参数整合到 LuGre 模型中, 验证其预测性能, 确保参数的准确性和可靠性。整个参数辨识流程如图 1 所示。

遗传算法具体步骤如下: 遗传算法中的个体以二进制字符串来表示, 需要辨识的静(动)力参数个数设置为 4 个或 2 个, 其等位基因由二进制的 0 和 1 构成。假设 $X = 10010101$ 表示为一个个体, 其基因长度为 $n = 8$ 。将参数种群数量设置为 $M = 50$, 随机生成 50 个 32 位或 16 位二进制字符串, 每个字符串表示一组需要辨识的静(动)力参数, 获得初始种群。对种群进行适应度评价, 遗传算法中所有个体的适应度值必须为非负, 个体适应度 F 与总

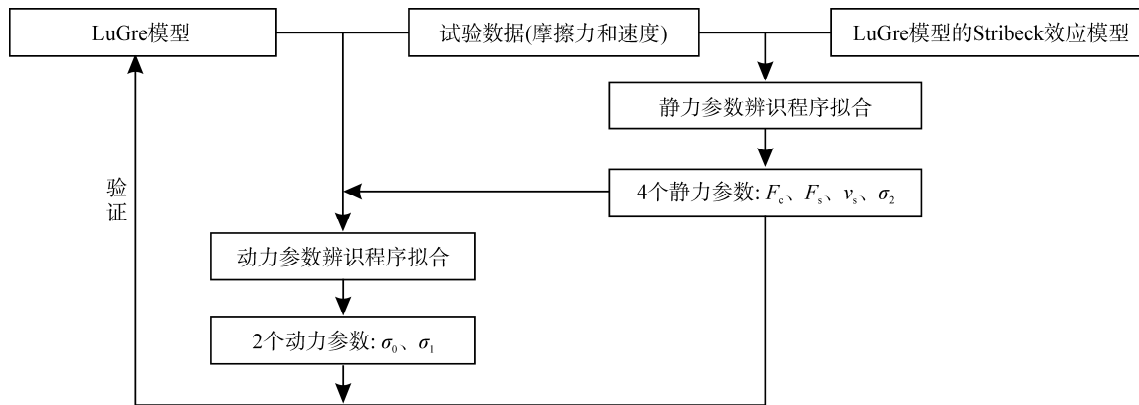


图 1 对 LuGre 模型使用遗传算法的参数辨识流程

体适应度和成正比的概率大小决定了当前群体中个体能够遗传到下一代的概率。因此须对目标函数 J 的最小化进行优化, 令

$$F = \begin{cases} C_{\max} - J, & J < C_{\max} \\ 0, & J \geq C_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $C_{\max}$ 是迭代到当前代为止的最大目标函数, J 则可由式(7)给出。

将函数容差设置为 $E = 1 \times 10^{-6}$, 需要辨识的静(动)力参数种群经过选择、交叉、变异运算后得到下一代种群。其中, 交叉概率 $P_c = 0.8$, 变异函数为均匀变异。若迭代次数大于 50 次, 则输出具有最佳适应度的个体, 并将此值作为最优解, 并终止迭代计算。

1.2.2 试验装置

LuGre 摩擦模型参数识别基于摩擦磨损试验装置进行面-面接触试验, 装置如图 2 所示。试验时, 摩擦块试样固定在夹具上, 摩擦块夹具和固定装置用螺钉直接相连, 摩擦盘与电机相连, 可以使用不同转速和旋转方向运行。摩擦块试样通过砝码和固定装置的配重压在摩擦盘上。数据采集与分析系统以 500 Hz 的采样频率进行数据记录。为确保试验的稳定性, 装置配备了简易限位器以保持固定装置的稳固。

在摩擦振动试验中, 摩擦盘试样选用直径为 210 mm、厚度为 3.2 mm 的铝盘。摩擦块试样是截面边长为 10 mm 的立方体销块, 由丁苯橡胶和天然橡胶的复合材料加工而成。在进行摩擦试验时, 摩

擦块的摩擦半径为 80 mm。

1.2.3 静力参数识别

静力参数辨识需要获得稳态下的摩擦力与相对速度曲线。7.2 N 法向载荷下, 令摩擦盘进行单向旋转, 在 $0.14 \sim 2.79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度区间上平均选取 20 组转速进行摩擦试验。为确保试验可靠性, 当速度稳定后, 截取 240 s 的摩擦力信号, 取每个信号的有效值。所有试验在温度 $24 \sim 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中进行。

在 20 组正常速度的静力试验中, 第 i 组试验的系统以相对速度 v_i 运行, 对应摩擦力为 u_i 。此时鬃毛的变化速率为 $dz/dt = 0$, 且在稳态下的摩擦力理论值为 F_1 , 而 4 个需要辨识的静力参数分别为 F_c 、 F_s 、 v_s 、 σ_2 。

辨识过程中, 将稳态下的摩擦力作为目标逼近值, 参数辨识误差 E_r 定义为稳态下摩擦力试验值与理论值的误差, 计算公式如下:

$$E_r(v_i) = u_i - F_1(v_i) \quad (5)$$

$$F_1(v_i) = \left(F_c + (F_s - F_c) e^{-(v_i/v_s)^2} \right) \text{sgn}(v_i) + \sigma_2 v_i \quad (6)$$

使用最小二乘法计算误差, 将目标函数 J 定义如下:

$$J = \frac{1}{2} \sum_i^N E_r^2(v_i) \quad (7)$$

其中, N 为试验数据个数, 定义为 20 个。

通过遗传算法将 J 最小化。其中, 种群搜索范围设置为 $F_c \in [0, 10]$, $F_s \in [0, 10]$, $v_s \in [0, 1]$, $\sigma_2 \in [0, 1]$ 。经过遗传算法识别后, 获得图 3 所示的识别结果, 当种群迭代到 50 次时, 种群中适应度的最佳值非常

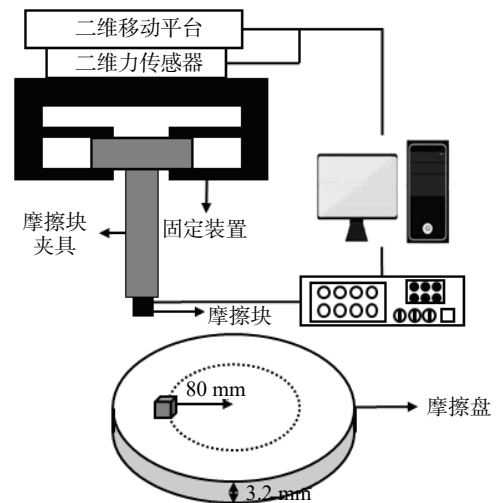
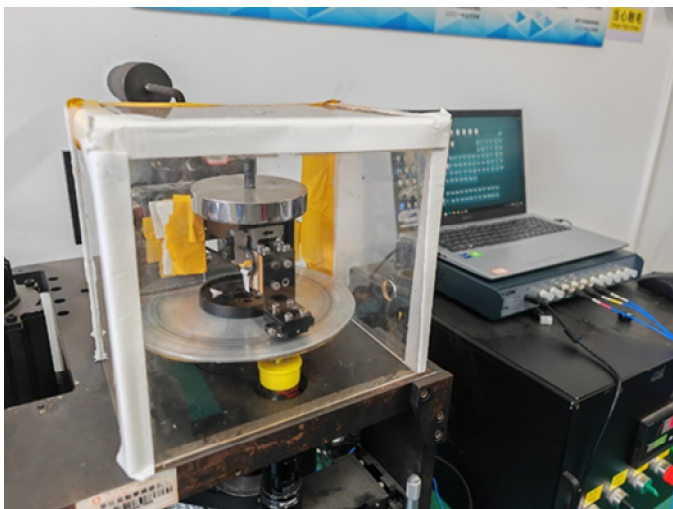


图2 摩擦磨损仪装置的实物和示意图

接近平均值, 迭代结果良好, 可得 $F_c = 2.72 \text{ N}$, $F_s = 3.82 \text{ N}$, $v_s = 0.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\sigma_2 = 0.18 \text{ N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 。

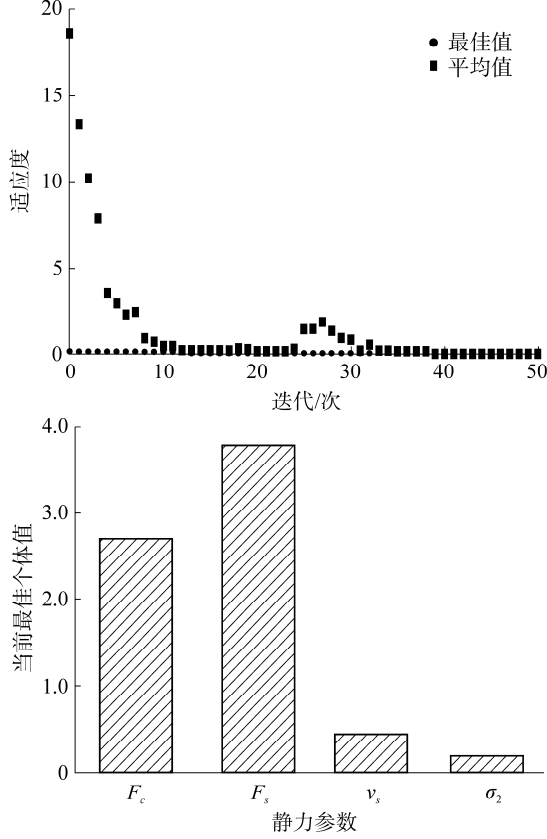


图3 静力参数遗传算法的识别结果

由图4可知, 拟合曲线与 y 轴的交点是最大静摩擦力 F_s , 线性上升段的反向延伸与 y 轴交点是库仑摩擦力 F_c , 线性上升段的斜率等于 σ_2 , 而 v_s 则是影响摩擦力下降段的主要因素。

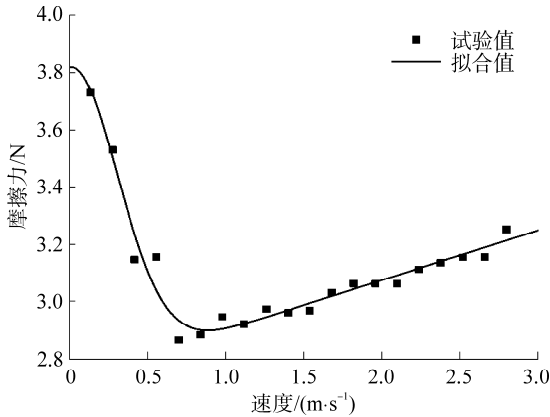


图4 稳态下摩擦力与速度关系的拟合曲线

1.2.4 动力参数识别

保持负载条件不变的情况下, 在 $0.17 \sim 1.57 \text{ rad}$ 范围内等间隔选取 5 个不同旋转角度, $0.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 转

速下使摩擦磨损仪的摩擦盘往复旋转进行试验。随着铝盘旋转角度的增加, 完成一次往复滑动的时间相应延长, 从而导致激励频率降低。为确保试验可靠性, 当振幅达到基本稳定状态后, 截取一段 240 s 的摩擦力信号数据进行后续处理。所有往复旋转试验均在温度为 $24 \sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境中进行。试验结果如图 5 所示, 表明摩擦力的峰值随旋转角度的增加而呈现出递减趋势。

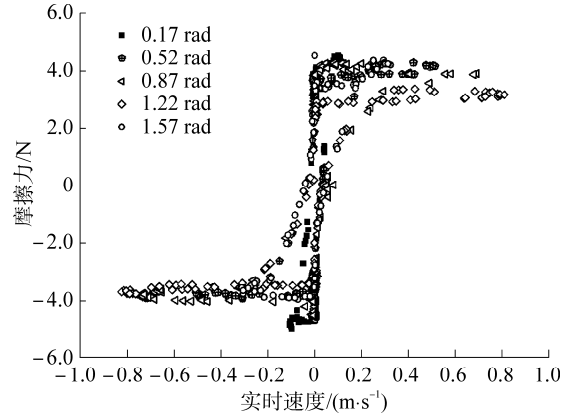


图5 $0.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下不同摩擦角度往复试验的摩擦力—速度曲线

在进行动力参数辨识时, 采用摩擦磨损仪对输出的摩擦力以及通过位移计算出的速度进行参数辨识。在参数辨识过程中, 将摩擦力作为目标函数逼近值来辨识动力参数 σ_0 和 σ_1 。试验中, 数据采集和分析系统对试验信号进行采样处理。对于第 i 个采样点, 其相对速度为 v'_i , 对应摩擦力为 u'_i , 在动态条件下的摩擦力理论值为 F_2 。由于试验数据集包含 1135 个数据点, 则令 $N = 1135$ 。动力参数辨识的误差 E'_r 定义为动态下摩擦力试验值与理论值的误差, 具体计算公式如下:

$$E'_r(v_i) = u'_i - F_2(v'_i) \quad (8)$$

$$F_2 = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v'_i \quad (9)$$

$$\frac{dz}{dt} = \dot{x} - \frac{\sigma_0 |v'_i|}{g(v'_i)} z \quad (10)$$

$$g(v'_i) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(v'_i/v_s)^2} \quad (11)$$

为使动力参数辨识的误差最小化, 将误差 E'_r 代入式(7), 并通过遗传算法进行优化。种群搜索范围设置为 $\sigma_0 \in [0, 5000]$, $\sigma_1 \in [0, 5]$ 。由于多次运行遗传算法得出的结果存在较大差异, 因此须对每个旋转角度的试验数据进行 4 次独立的遗传算法辨识, 并计算出此 4 次结果的有效值, 以获取更可

靠的动力参数辨识结果。图6为所有角度动力参数的辨识结果,得出橡胶-铝界面的接触刚度和阻尼随激励频率的降低呈现出总体下降趋势。具体而言,在0.17~0.87 rad 旋转角度范围内,接触刚度和阻尼的下降幅度较为显著;而当旋转角度超过 0.87 rad 时,这种下降趋势趋于平缓。

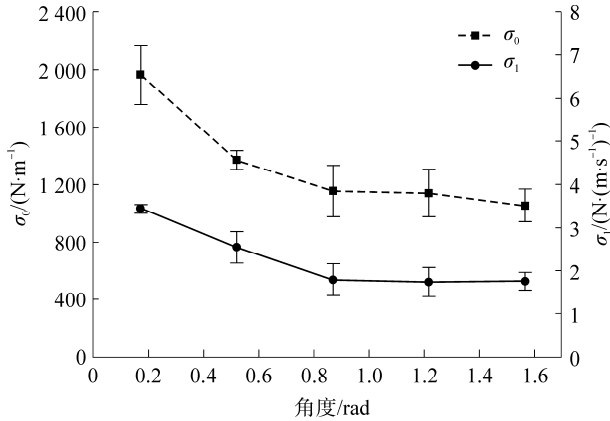


图6 鬃毛刚度阻尼与不同旋转角度的关系图

将通过遗传算法获得的参数代入 LuGre 模型进行验证。比较结果如图7所示,其中 LuGre 摩擦模型参数的辨识结果在大多数速度范围内与试验数据相吻合,但在速度方向发生改变阶段,模型预测与试验数据之间存在一定偏差。大致可以认为试验结果与 LuGre 模型的理论预测表现出良好一致性,从而相互验证了数据准确性。

1.3 系统黏滞时静刚度和阻尼的参数识别

通过分析橡胶-铝界面微动响应时接触界面传递的摩擦力—位移响应曲线来计算摩擦力耗能,并通过测量摩擦力—位移相图的特征进行系统静刚度和阻尼的参数识别。相应的接触刚度 k 、阻尼比 ζ 和阻尼 c 计算公式如下^[32]:

$$k = \frac{2f_{x\max}}{\delta_{\max} - \delta_s} \quad (12)$$

$$\zeta = \frac{\Delta W}{2\pi f_{x\max} \delta_{\max}} \quad (13)$$

$$c = \zeta \sqrt{mk} \quad (14)$$

其中,切向位移分成两个分量:滑动位移 δ_s 和部分滑移 $\delta_{\max} - \delta_s$ 。每个微动周期的能量损失 ΔW 为摩擦力—位移曲线所包围的面积, $f_{x\max}$ 为微动响应时的最大摩擦力, m 为橡胶块质量。

试验中,摩擦磨损仪往复旋转,设定转动速度为 $3.49 \times 10^{-2} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,转动角度为 $1.74 \times 10^{-2} \text{ rad}$,法

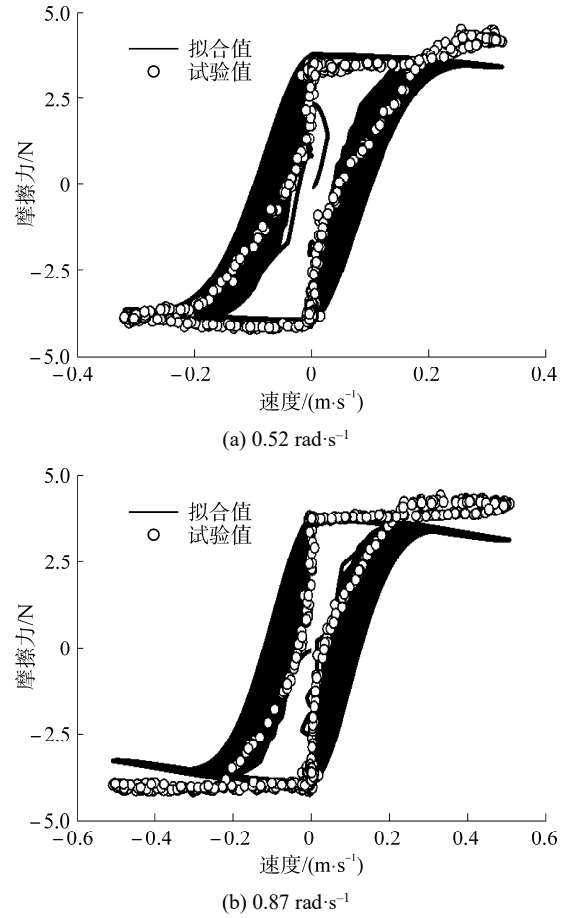


图7 摩擦学试验与 LuGre 模型的拟合图

向载荷有效值为 7.2 N,数据采集和分析系统的采样频率为 5 000 Hz。此时,橡胶块与铝盘的相对位移几乎可以忽略,因此可以认为它们处于黏滞状态。在这种状态下,两者的相对运动被定义为微动响应。获得的试验图像如图8所示。

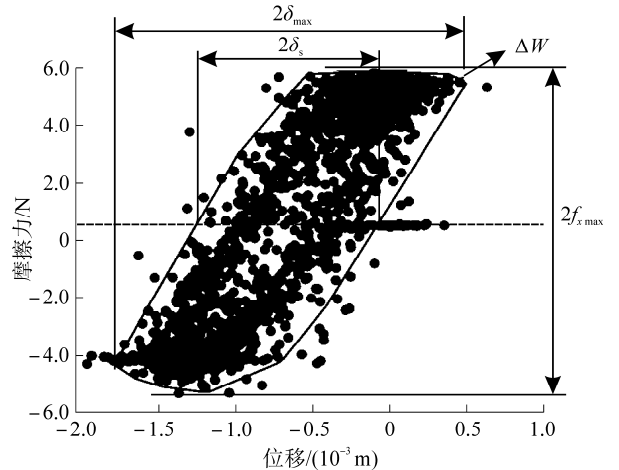


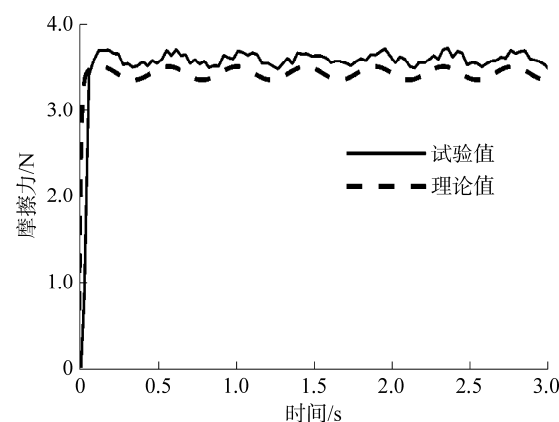
图8 计算微滑时的耗散

在微动条件下, 由于摩擦力与位移图像的数据点分布较为密集, 使遗传算法难以准确进行参数识别。因此, 笔者采取对运动特性图像进行二值化处理的方法, 使数值 0 的像素显示为黑色, 数值 1 的像素显示为白色, 通过这种方法可以识别出图像的大致轮廓和顶点坐标。接着, 将横坐标和纵坐标的值与相应方向的像素数之比进行缩放, 映射回图像中, 并计算出所占的像素面积, 以此来估计耗散能 ΔW 。据此计算出以下的参数: $k = 9\,023.50 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $\zeta = 0.32$, $c = 1.99 \text{ N}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$ 。

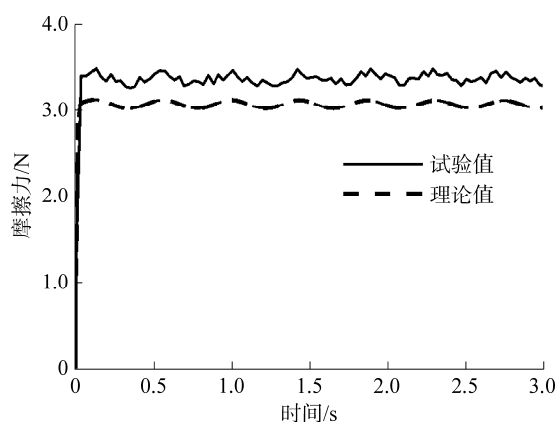
由黏滞状态下的参数辨识结果可知, 黏滞状态下的刚度系数辨识值高于纯滑动状态下的对应值, 此现象表明了“弹簧软化”行为^[33]。因此, 在研究橡胶-铝界面摩擦振动时, 需要区分滑动和黏滞两种不同状态下橡胶的运动特性。

2 橡胶-铝界面摩擦振动系统的运动特性

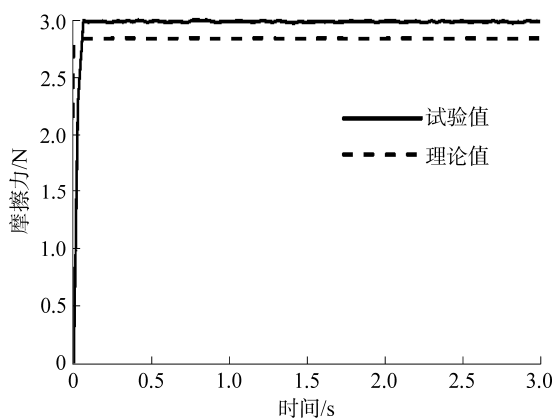
当橡胶块和铝盘表面接触且两者有相对滑动



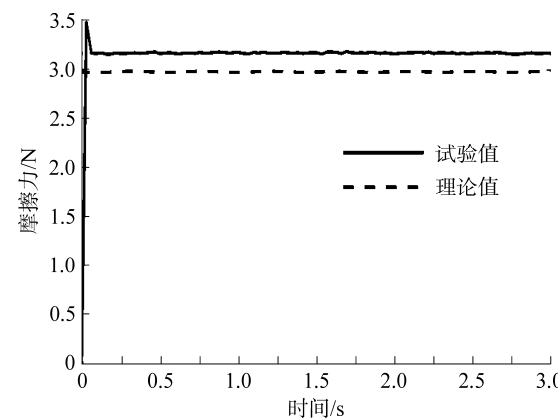
(a) $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



(b) $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



(c) $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



(d) $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

图9 理论和试验的摩擦力对比

或滑动趋势时, 其相对运动会受到滑动摩擦力或静摩擦力的影响。当橡胶块与传送带的相对速度 $v > 0.181 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 摩擦系统发生相对滑动, 此时采用 LuGre 模型的鬃毛刚度和阻尼; 而当相对速度 $v \leq 0.181 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 系统只有滑动趋势, 处于黏滞状态, 此时可采用黏滞状态下的静刚度和阻尼。

$$\begin{cases} k = 1\,367.50 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}, c = 1.980\,6 \text{ N}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{-1}, \\ v > 0.181 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \\ k = 9\,023.50 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}, c = 1.990\,0 \text{ N}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{-1}, \\ v \leq 0.181 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \end{cases} \quad (15)$$

由于摩擦的复杂物理性质, 一般通过理想化两者的接触表面, 并利用 LuGre 模型对摩擦力进行解释。文中采用传送带模型讨论橡胶-硬物质表面的摩擦振动机理。其中, 橡胶块质量为 m , 水平方向上接触面的切向刚度为 k' , 放置在进给速度为 v' 的传送带上, 橡胶块自身速度为 $\dot{x}$, 橡胶块与传送带的相对速度 v_r' 定义为 $v' - \dot{x}$ 。此时振动方程可以表示为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_f \quad (16)$$

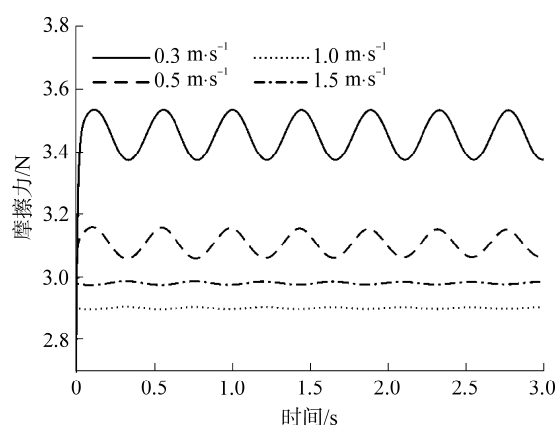
其中, 摩擦力 F_f 采用 LuGre 模型, 是关于相对速度的函数。

2.1 橡胶-铝界面摩擦振动的试验验证

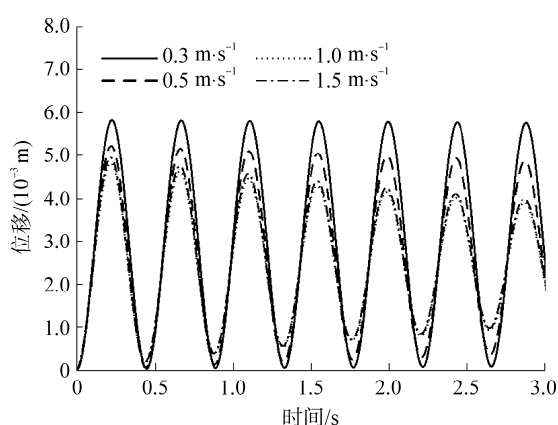
将第 1.2 节和 1.3 节中确定的参数代入振动方程(16)中, 并选取 4 个进给速度分别为 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 计算出橡胶-铝界面摩擦副摩擦振动运动方程的理论结果。理论结果与试验曲线对比如图 9 所示, 由图可见, 当进给速度为 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 对应的理论有效值与试验值误差分别为 4.44% 、 9.68% 、 5.18% 和 6.36% , 可见摩擦振动的理论值与试验值较为接近。由于摩擦磨损试验装置启动后, 法向载荷会轻微增加, 因此试验值稍高于理论值。

2.2 橡胶-铝界面摩擦振动系统的运动特性

对不同进给速度下的摩擦振动系统进行数值

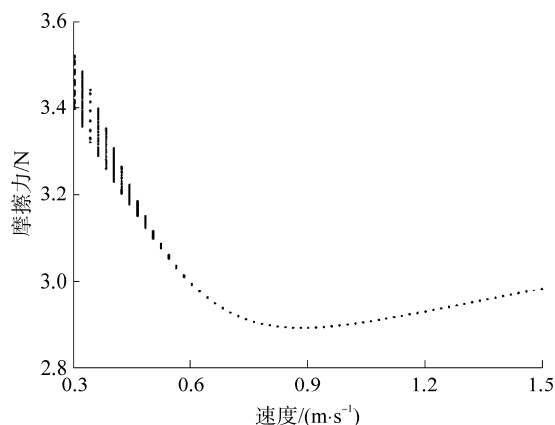


(a) 摩擦力—时间曲线

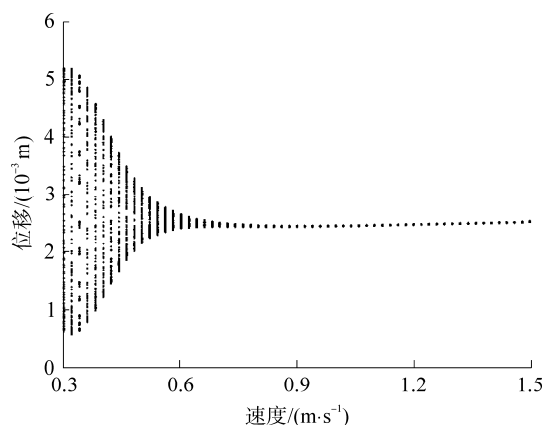


(b) 位移—时间曲线

图 10 不同进给速度下的运动特性图像



(a) 摩擦力—速度曲线



(b) 位移—速度曲线

图 11 不同传送带进给速度下的分岔图

分析。截取开始 3 s 内的信号数据, 由图 10 可以发现, 随着进给速度从 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 摩擦力和位移的振荡振幅呈逐渐减小趋势; $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进给速度下, 橡胶-铝界面摩擦系统表现出周期性振动的特征; 在 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进给速度下, 摩擦系统的振动振幅逐渐衰减, 最终将达到稳定状态。通过不同进给速度下的摩擦力和位移绘制出如图 11 所示的分岔图, 由图可见, 当摩擦系统的进给速度增加并超过 $0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 系统运动将从不稳定的振动状态转变为稳定状态, 因此该分岔属于 Hopf 分岔。并且当系统达到稳定状态后, 随着进给速度的进一步增大, 系统摩擦力也还会有一定程度的提高。

3 结论

(1) 通过试验结合遗传算法对橡胶在滑动状

态下的摩擦参数进行了辨识。将试验结果与 LuGre 模型的静态理论值进行对比,以最小二乘法计算得到的误差作为目标函数逼近值,辨识出 4 个静力参数和 2 个动力参数。对比后发现基于 LuGre 摩擦模型的静动力参数辨识具有较高的精确度,能够较好地确定橡胶-铝界面摩擦系统滑动时的接触刚度和阻尼。此外,通过微动摩擦耗能法计算了系统的静刚度和阻尼。对比两者结果,得出橡胶静刚度大于滑动接触刚度,体现了“弹簧软化”行为。

(2) 将辨识的参数代入橡胶摩擦振动模型,发现理论计算结果与试验结果高度一致,表明所建立的模型具有较高的精度和实用价值。

(3) 橡胶-铝界面摩擦副摩擦振动系统在摩擦力作用下呈现出典型的 Hopf 分岔特征,系统随着速度的增加实现周期性振动,直至到稳定状态的转变。传送带的进给速度是影响系统分岔特性的关键因素,其中 $0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的进给速度是橡胶-铝界面摩擦系统的 Hopf 分岔点。

参考文献:

- [1] 赵立. 基于 LuGre 摩擦理论的动态轮胎模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [2] 范让林, 徐春野, 吴列, 等. 电动汽车橡胶悬置高频动特性试验[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(1):126-131, 202.
- [3] 米雄伟. 安装状态的 O 形橡胶密封圈非线性有限元分析[J]. 液压与气动, 2022, 46(12):18-23.
- [4] 初红艳, 丁瑞龙, 余强, 等. 钢-橡胶辊对滚过程中橡胶层刚度和阻尼特性分析[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(9):948-958.
- [5] 孟凡超. 橡胶-金属滚动界面摩擦特性与影响因素研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- [6] LUDEMA K C, TABOR D. The friction and visco-elastic properties of polymeric solids[J]. Wear, 1966, 9(5):329-348.
- [7] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics[J]. Journal of chemical physics, 2007, 115(8): 3840-3861.
- [8] LORENZ B, PERSSON B N J, DIELUWEIT S, et al. Rubber friction: comparison of theory with experiment[J]. European physical journal E, 2011, 34(12):1-11.
- [9] 高天燕, 张开森, 叶家鑫, 等. 界面润湿性和粗糙度对橡胶滑动摩擦行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(7): 750-757.
- [10] 苏召乾. 橡胶材料摩擦振动特性及其结构化表面抑振机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [11] 王晓翠. 低相对速度下摩擦诱发振动-试验和理论研究及抑制方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [12] JIANG B, WANG H. An analytical solution for friction coefficients of grooved pavements considering tire rubber-groove interaction[J]. Tribology international, 2023, 190:109052.
- [13] QU J H, WANG R L, REN R, et al. The frictional vibration attenuation of rubber utilizing a groove on the body[J]. Polymers, 2024, 16:1704.
- [14] IBRAHIM R A. Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos. Part II: dynamics and modeling[J]. Applied mechanics reviews, 1994, 47(7):227-253.
- [15] 钱泓桦, 王东伟, 莫继良. 阻尼参数对摩擦系统稳定性及黏滑运动的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5): 1021-1027, 1040.
- [16] CROLLA D A, LANG A M. Paper VII (i) brake noise and vibration: the state of the art[J]. Tribology, 1991, 18(18): 165-174.
- [17] 张立军, 吴军, 孟德建. 模态耦合及摩擦系数-速度斜率与黏滑运动的关系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(12):1850-1859.
- [18] ELMER F J. Nonlinear dynamics of dry friction[J]. Journal of physics A: mathematical and general, 1997, 30(17):6057-6063.
- [19] 李小彭, 孙德华, 岳冰, 等. 质量-弹簧-带摩擦自激振动系统的分岔特性及其控制研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15):28-32, 44.
- [20] 张晓蓉, 卢鑫, 白冰. 一类含摩擦单自由度分段光滑碰撞振动系统的动力学分析[J]. 兰州交通大学学报, 2022, 41(5):81-87.
- [21] 李得洋, 李孟, 吴少培, 等. 单自由度含干摩擦碰撞振动系统周期运动转迁及共存特征[J]. 振动与冲击, 2024, 43(10):52-63.
- [22] 范旭东, 张艳龙, 张睿. 含改进 LuGre 摩擦的冲击振动成型机动力学分析[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(4): 83-89.
- [23] 李钰龙, 金花, 康凯. 一类含 Stribeck 摩擦机械振动系统的动力学特性分析[J]. 兰州工业学院学报, 2024, 31(2):46-52.
- [24] 黄铎, 左曙光, 杨宪武, 等. 基于 LuGre 摩擦模型的轮胎自振系统数值分析[J]. 计算机辅助工程, 2009, 18(4): 19-23.
- [25] CANUDAS D W C, OLSSON H, ASTROM K J, et al. A new model for control of systems with friction[J]. IEEE transactions on automatic control, 1995, 40(3):419-425.

- [26] 周冬冬, 陈明霞, 赵金迪. 基于混合粒子群算法优化橡胶挤出机 Smith-模糊 PID 温度控制系统[J]. 机床与液压, 2022, 50(16):125-130.
- [27] 圣文顺, 徐爱萍, 徐刘晶. 基于蚁群算法与遗传算法的 TSP 路径规划仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(12):398-402, 412.
- [28] 刘红. 基于遗传算法的摩擦模型参数辨识研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2007.
- [29] 张鹏, 张明, 夏群生, 等. 基于 LuGre 摩擦模型的轮胎稳态模型参数识别[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5):204-207, 159.
- [30] 孙洪鑫, 王修勇, 陈政清. 基于改进遗传算法的 LuGre 模型参数辨识[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(23): 113-117.
- [31] 李忠群, 欧阳芷楠, 曾朝朋, 等. 基于 LuGre 摩擦模型参数辨识与误差补偿方法的综述[J]. 制造技术与机床, 2024(6):82-88.
- [32] BOGRAD S, SCHMIDT A, GAUL L. Joint damping prediction by thin layer elements[C]//Proceedings of IMAC XXVI: A Conference and Exposition on Structural Dynamics. 2008.
- [33] HILLS D A. Mechanics of fretting fatigue[J]. Wear, 1994, 175(1/2):107-113.

Frictional parameter identification and frictional vibration at rubber and aluminum interface

QIAN Yichun, QU Junhao, REN Rui, WU Xiang, YUAN Zeshuai, HUANG Haibo
(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Rubber has strong nonlinear and large deformation characteristics, and the frictional parameters under different motion states will change when frictional vibration occurs. However, its dynamic mechanism has not been clearly known. Research is conducted on the frictional vibration at the interface between rubber and hard materials. Physical experiments are designed to identify both the sliding contact stiffness and the damping of the friction pair by using genetic algorithms, with their values obtained through micro slip energy dissipation method. The motion characteristics of the system are obtained by exploiting a nonlinear dynamic model. The results show that the two parameters are identified with good effectiveness, with an error of no more than 9.68%. When the feed rate of the conveyor belt increases, the frictional vibration of the rubber-aluminum interfacial friction pair exhibits typical Hopf bifurcation characteristics, during which a transition from vibration to stable state can be achieved at a speed of $0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Keywords: rubber-hard material surface; LuGre model; frictional energy dissipation; parameter identification; frictional vibration

(责任编辑 章践立)