

橡胶动态力学性能对输送带压陷滚动阻力的温度效应研究

纪斌 姚艳萍 周利东 韩刚 张文超

(太原科技大学 机械工程学院, 太原 030024)

摘要:【目的】针对带式输送机压陷滚动阻力受温度显著影响、现有计算模型对温度-频率耦合效应考虑不足的问题,揭示橡胶动态力学参数随温度的变化规律及其对压陷滚动阻力的作用机制,为输送机节能设计与运行优化提供参考。【方法】首先,采用反向传播(Back Propagation, BP)神经网络预测-20~40 °C内橡胶动态力学参数,弥补低温下试验数据的不足;其次,建立考虑瞬态能量损耗的压陷滚动阻力力学模型,完善黏弹性力学分析体系;然后,通过迭代算法求解模型,结合 Matlab 软件开展数值仿真,系统探究温度、带速、受载压力对阻力的影响规律;最后,验证模型拟合精度,保障研究结果的可靠性。【结果】恒定工况下,压陷滚动阻力随温度呈非单调分段变化,在-20~5 °C,随温度升高而增大;在5~40 °C,随温度升高而减小,峰值出现在约5 °C;带速6 m/s、受载压力8 kN时,最大压陷滚动阻力达45 N;模型拟合精度为0.999,可精准反映各参数对阻力的非线性影响,为输送带能耗优化提供量化依据。

关键词: 输送带; 温度效应; 压陷滚动阻力; 动态力学参数; BP神经网络

中图分类号: TH222 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.04.009

0 引言

随着采矿领域向绿色节能与高质量发展转型^[1]、长距离、高速重载带式输送机已成为散料运输的核心装备,其运行过程中的能量损耗优化成为行业研究重点^[2]。带式输送机运行工况中,压陷滚动阻力造成的能量损耗约占总损耗的35%^[3]。输送带下覆盖层的核心材料为橡胶,其动态力学性能对温度变化高度敏感,直接导致不同工况温度下的压陷滚动阻力存在显著差异,最终影响输送机的运行效率。因此,明确温度、橡胶动态力学参数与压陷滚动阻力三者间的耦合关系,对降低带式输送机运行能耗具有重要工程价值。

陈洪月等^[4]通过变温动态压缩试验,推导了考虑温度影响的3元件4变量力学参数模型,分析了该模型对钢丝绳输送带压陷阻力系数的影响规律。苏金虎等^[5]基于4参数 Burgers 模型的积分形式,推导动态压陷滚动阻力,研究托辊半径、带速、覆盖层厚度等参数对应力分布的影响,并联合有限元法对压陷变形量进行了验证。冯渊等^[6]基于三元件固体模型理论,通过仿真获得的等效应力,推导压陷滚动阻力,探究带速、下压载荷和托辊直径与阻力的关系,并搭

建试验平台验证仿真结果的准确性。赵晓霞等^[7]采用 Mooney-Rivlin 2 参数模型表征橡胶力学性能,通过仿真,分析温度对织物芯层输送带压陷滚动阻力的影响。MUNZENBERGER 等^[8]设计了输送带压陷滚动阻力专用试验台,验证了温度、带速、托辊直径、受载压力对钢丝绳芯与织物芯输送带压陷阻力测量值的影响。WOŹNIAK^[9]设计了小型化压陷滚动阻力测量装置,通过多因素影响分析,为长距离水平带式输送机的能耗降低提供了参考依据。DOS 等^[10]将 JONKERS 等^[11-12]提出的压陷滚动阻力模型推广应用于圆管带式输送机,提出了适配该类输送机的阻力测量方法。

现有针对温度对输送带压陷滚动阻力的研究,大多基于3元件黏弹性力学模型开展^[13],普遍存在对频率与温度的耦合影响考虑不足、未充分计入瞬态能量损耗的问题,最终导致模型计算精度受限。本文引入橡胶储能模量与损耗模量主曲线,精准表征动态力学性能;采用反向传播(Back Propagation, BP)神经网络预测低温下的材料参数;通过数值仿真与迭代算法求解力学模型,考虑瞬态能量损耗,提升压陷滚动阻力计算的准确性,为输送机的温度适应性设计提供依据。

收稿日期: 2024-07-05

基金项目: 山西省基础研究计划项目(自然科学研究面上项目)(202203021211202); 山西省研究生教育改革研究课题(2023JG142); 山西省高等学校科技成果转化培育项目(2020CG043)

作者简介: 纪斌,男,1999年生,山东日照人,硕士研究生; 主要研究方向为连续运输机械、智能物流装备; E-mail:2954535031@qq.com。

姚艳萍(通信作者),女,1977年生,山西太原人,博士,教授; 主要研究方向为连续运输机械、智能物流装备; E-mail:919405128@qq.com。

引用格式: 纪斌,姚艳萍,周利东,等. 橡胶动态力学性能对输送带压陷滚动阻力的温度效应研究[J]. 机械强度, 2026, 48(4): 75-82.

Ji Bin, YAO Yanping, ZHOU Lidong, et al. Temperature effect of dynamic mechanical properties of rubbers on indentation rolling resistance of conveyor belts[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(4): 75-82.



免费获取

1 压陷滚动阻力产生的机制

输送带由上、下覆盖层与带芯组成,下覆盖层的核心功能是保护带芯,避免其在与托辊的挤压摩擦中发生损伤,同时降低输送机运行阻力。输送机运行过程中,输送带自身质量与物料载荷由托辊支撑,托辊与下覆盖层接触并产生挤压变形。橡胶材料的黏弹性特性使变形存在显著时滞效应:输送带经过托辊后,压陷区域无法瞬时恢复,以托辊中心线为中心形成不对称变形,如图1所示。

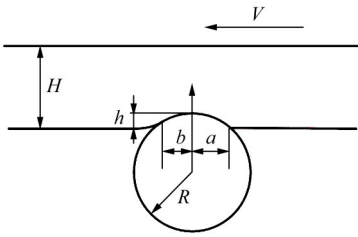


图1 托辊作用下输送带橡胶压陷不对称变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the asymmetric indentation deformation of the conveyor belt rubber under idler action

图1中, V 为输送带水平移动速度; a 为下覆盖层压陷最深处与托辊前端接触点的水平距离; b 为下覆盖层压陷最深处与托辊后端接触点的水平距离; R 为托辊半径; h 为输送带最大压陷深度; H 为输送带下覆盖层厚度。

2 橡胶材料的动态力学性能分析

输送带下覆盖层橡胶为高分子聚合物材料,兼具液体黏性与固体弹性双重特性^[14]:受力变形过程中储存弹性势能,卸载后弹性变形部分可完全恢复,黏性变形部分则将机械能转化为其他形式的能量,最终形成不可逆的形变残留。

橡胶动态力学性能主要研究其在交变应力作用下的形变、应力响应及能量损耗特性,动态测试常采用正弦应变激励法测试材料剪切模量,即在特定温度下以角频率 ω 进行振动试验。正弦剪切应变 $\varepsilon(t)$ 表达式为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (1)$$

式中, ε_0 为应变幅值; t 为时间。

正弦应变作用下,橡胶的黏弹性特性导致应力响应滞后于应变,两者间存在损耗角 δ ,应力响应 $\sigma(t)$ 表达式为

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2)$$

式中, σ_0 为应力幅值。

动态复数模量 \bar{G} 为应力幅值与应变幅值的比值,表达式为

$$\bar{G}(\omega) = \sigma_0 / \varepsilon_0 = \sqrt{G'^2(\omega) + G''^2(\omega)} \quad (3)$$

式中, $G'(\omega)$ 为储能模量,表征弹性变形的能量储存能力; $G''(\omega)$ 为损耗模量,表征黏性形变的能量损耗程度。

储能模量与损耗模量的表达式为

$$G'(\omega) = \bar{G}(\omega) \cos \delta \quad (4)$$

$$G''(\omega) = \bar{G}(\omega) \sin \delta \quad (5)$$

损耗因子 $\tan \delta$ 为损耗模量与储能模量的比值,反映能量损耗效率,即

$$\tan \delta = G''(\omega) / G'(\omega) \quad (6)$$

$\bar{G}(\omega)$ 、 $G'(\omega)$ 、 $G''(\omega)$ 和 δ 关系如图2所示。

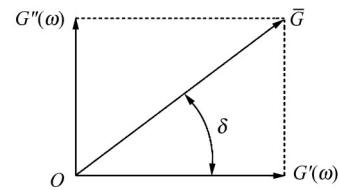


图2 橡胶动态力学复数模量与相关参数关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of relation between complex modulus and relevant parameters of rubber dynamic mechanics

3 温度效应的压陷滚动阻力力学模型

基于一维 Winkler 基础模型(图3),假设输送带下覆盖层为弹性基底、带芯为刚性基底,对输送带与托辊的接触变形过程进行简化分析。

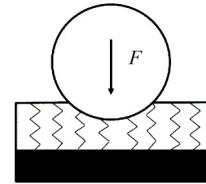


图3 输送带压陷变形分析(一维 Winkler 基础模型)

Fig. 3 Indentation deformation analysis of conveyor belt (1D Winkler foundation model)

下覆盖层挤压变形 $\varepsilon(x)$ 沿接触长度的分布为

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_1 \sin(\pi x / 2a) \quad (7)$$

式中, ε_1 为 x 处的应变, $\varepsilon_1 = h/H$ 。

输送带以速度 V 水平移动(图1),变形随时间的变化为

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon(Vt) = \varepsilon_1 \sin(\pi Vt / 2a) \quad (8)$$

式中, $\varepsilon^*(t)$ 为瞬时应变。

基于线性黏弹性理论,接触应力的积分表达式为

$$\sigma^*(t) = \Phi(t) \varepsilon^*(0^+) + \int_0^t \Phi(t-\tau) \dot{\varepsilon}^*(\tau) d\tau \quad (9)$$

式中, $\sigma^*(t)$ 为瞬时接触应力; $\Phi(t)$ 为应力松弛模量; $\varepsilon^*(0^+)$ 为初始瞬时应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 为应变率, $\dot{\varepsilon}^* = d\varepsilon^*/dt$; τ 为松弛时间。

平面应变条件下,应力松弛模量 $\Phi(t)$ 与剪切应力松弛模量 $G(t)$ 关系为

$$\Phi(t) = 4G(t) \quad (10)$$

采用 Weichert 模型 (Maxwell-Weichert 模型) 拟合 $G(t)$, 即

$$G(t) = g_0 + \sum_{i=1}^{N_0} g_i \exp(-t/\tau_i) \quad (11)$$

式中, g_0 为瞬时弹性模量; g_i 为第 i 个弹性弹簧的模量; τ_i 为第 i 个元件的特征时间; N_0 为弹簧缓冲元件数量。

将式(8)、式(10)、式(11)代入式(9)得到

$$\sigma^*(t) = 4\varepsilon_1 [G'(\omega)\sin\omega t + G''(\omega)\cos\omega t - M(\omega, \omega t)] \quad (12)$$

式中, $\omega = \pi V/2a$; $M(\omega, \omega t)$ 为瞬态能量损耗项, 用于修正传统模型忽略瞬态损耗导致的阻力高估问题。

将 $t = x/V$ 代入相应的式(12), 得到应力 $\sigma(x)$ 沿接触长度的分布为

$$\sigma(x) = 4\varepsilon_1 [G'(\omega)\sin(\pi x/2a) + G''(\omega)\cos(\pi x/2a) - M(\omega, \pi x/2a)] \quad (13)$$

$$m(\omega, \alpha) = M(\omega, \alpha)/\bar{G}(\omega) \quad (14)$$

式中, x 为沿输送带与托辊接触长度的坐标变量。

将式(3)、式(6)、式(14)代入到式(13), 即

$$\sigma(x) = 4\varepsilon_1 \bar{G}(\omega) \{[\sin[(\pi x/2a) + \delta] - m(\omega, \pi x/2a)]\} \quad (15)$$

当 $x=0$ 时, $\sigma(0) = 0$ 成立, 得到

$$M(\omega, 0) = G''(\omega) \quad (16)$$

当 $x=a+b$ 时, $\sigma(a+b) = 0$ 成立, 得到

$$\sin[(\pi/2)(1 + b/a) + \delta] - m[\omega, (\pi/2)(1 + b/a)] = 0 \quad (17)$$

根据力的平衡关系, 单位宽度垂直载荷 W 的计算式为

$$W = \int_0^{a+b} \sigma(x) dx \quad (18)$$

将式(13)、式(18)联合得到

$$W = \frac{8a^3}{\pi DH} \bar{G}(\omega) B \quad (19)$$

$$B = \cos\delta - \cos[(\pi/2)(1 + b/a) + \delta] - \int_0^{(\pi/2)(1 + b/a)} m(\omega, \alpha) \cos\alpha d\alpha \quad (20)$$

式中, D 为托辊直径, $D = 2R$ 。

根据能量损耗平衡原理可得

$$FV = H \int_0^{a+b} \sigma(x) (d\varepsilon/dt) dx \quad (21)$$

将式(7)、式(13)代入式(21)得出压陷滚动阻力为

$$F = C(\pi/4B)^{\frac{4}{3}} [H/\bar{G}(\omega)R^2]^{\frac{1}{3}} W^{\frac{4}{3}} \quad (22)$$

$$C = (1/2)\cos\delta\sin^2[(\pi/2)(1 + b/a)] + (1/4)\sin\delta\{\pi(1 + b/a) + \sin[\pi(1 + b/a)]\} - \int_0^{(\pi/2)(1 + b/a)} m(\omega, \alpha) \cos\alpha d\alpha \quad (23)$$

式中, F 为单位宽度压陷滚动阻力。

在 Weichert 参数的基础上, 拟合获得相应的参数 B 和 C 比较复杂。为简化计算过程, 引入函数 $N(\omega, \alpha)$ 替代 $M(\omega, \alpha)$, 在保证计算精度的前提下, 需满足以下 4 个边界条件:

$$N(\omega, 0) = G''(\omega)$$

$$N[\omega, \frac{\pi}{2}(1 + \frac{b}{a})] = M[\omega, \frac{\pi}{2}(1 + \frac{b}{a})]$$

$$\int_0^{(\pi/2)(1 + b/a)} N(\omega, \alpha) d\alpha = \int_0^{(\pi/2)(1 + b/a)} M(\omega, \alpha) d\alpha$$

$$\int_0^{(\pi/2)(1 + b/a)} N(\omega, \alpha) \cos\alpha d\alpha = \int_0^{(\pi/2)(1 + b/a)} M(\omega, \alpha) \cos\alpha d\alpha$$

b/a 为未知数, 当 $\alpha = \frac{\pi}{2}(1 + \frac{b}{a})$ 时, 无法作为分配

点, 将分配点改为 $\alpha = \pi$, 对应边界条件更新为

$$N(\omega, 0) = G''(\omega) \quad (24)$$

$$N(\omega, \pi) = M_2(\omega) \quad (25)$$

$$\int_0^{\pi} N(\omega, \alpha) d\alpha = M_3(\omega) \quad (26)$$

$$\int_0^{\pi} N(\omega, \alpha) \cos\alpha d\alpha = M_4(\omega) \quad (27)$$

基于文献[15]中相关理论可证明, 瞬态能量损耗项的简化形式为

$$M(\omega, \alpha) \approx N(\omega, \alpha) = A(\alpha)G''(\omega) \quad (28)$$

$A(\alpha)$ 通过 $M(\omega, \alpha)$ 的表达形式可以推导, 假设 $A(\alpha)$ 为指数形式, 则可以表达为

$$A(\alpha) = A_1 e^{-a\alpha/\Gamma} + A_2 \alpha + A_3 \quad (29)$$

式中, $A_1=0.6520$; $A_2=0.0544$; $A_3=0.3480$; $\Gamma=0.4843$; 均为无量纲数。

$$n(\omega, \alpha) = N(\omega, \alpha)/\bar{G}(\omega) = A(\alpha)\sin\delta(\omega) \quad (30)$$

将式(27)和 $\alpha^* = \frac{\pi}{2}(1 + \frac{b}{a})$ 代入式(20)、式(23)

中可得

$$B = \cos\delta - \cos(\alpha^* + \delta) - \sin\delta \int_0^{\alpha^*} A(\alpha) d\alpha \quad (31)$$

$$C = (1/2)\cos\delta\sin^2\alpha^* + (1/4)\sin\delta[2\alpha^* + \sin(2\alpha^*)] -$$

$$\sin\delta \int_0^{\alpha^*} A(\alpha) \cos\alpha d\alpha \quad (32)$$

将式(31)、式(32)代入式(21)得到压陷滚动阻力计算式为

$$F = \sin\delta D'(\pi/4)^{\frac{3}{4}} [H/\bar{G}(\omega)R^2]^{\frac{1}{3}} W^{\frac{4}{3}} \quad (33)$$

式中, D' 为无量纲函数, 计算式为

$$D' = \left\{ \frac{1}{2} \sin \alpha^* [A(\alpha^*) - \cos \alpha^*] + \frac{1}{4} [2\alpha^* + \sin(2\alpha^*)] - A_4 \right\} [\cos \delta - \cos(\alpha^* + \delta) - \sin \delta \int_0^{\alpha^*} A(\alpha^*) d\alpha]^{\frac{4}{3}} \quad (34)$$

式中, A_4 为积分常数。

4 温度效应的压陷滚动阻力计算

4.1 动态力学参数确定

参考文献[16], 采用变频变温方法提取橡胶材料的储能模量 $G'(\omega)$ 和损耗模量 $G''(\omega)$, 并将模量曲线拟合合成 5 参数模型。该模型在 0 °C 以上的预测结果与试验结果一致, 但在低温预测中与橡胶黏弹性力学行为存在一定偏差。为此, 提取文献[17]中 0 °C 以上的相关数据, 并采用 BP 神经网络对温度为 -20~40 °C 内的储能模量和损耗模量进行预测。BP 神经网络结构如图 4 所示。

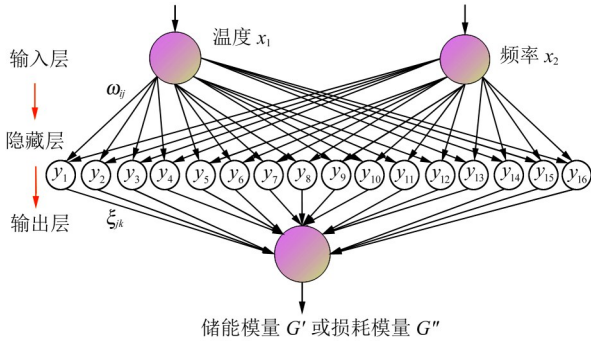


图 4 橡胶动态力学参数预测 BP 神经网络结构图

Fig. 4 Structure diagram of the BP neural network for rubber dynamic mechanical parameter prediction

BP 神经网络以温度 x_1 和频率 x_2 作为输入层, 以储能模量 $G'(\omega)$ 和损耗模量 $G''(\omega)$ 作为输出层。输入通过权重分配连接至隐藏层, 隐藏层设置为 16 层。第 j 个隐藏层神经元的输出表达式为

$$y_j = f(\omega_{1j}x_1 + \omega_{2j}x_2 + \theta_j^y) \quad (35)$$

隐藏层至输出层的映射逻辑与输入层一致, 经权重与偏置映射后, 输出层表达式为

$$G'(\omega) = f\left(\sum_{j=1}^{16} y_j \xi_{jk} + \theta^y\right) \quad (36)$$

式中, ξ_{jk} 为隐藏层至输出层的连接权重; θ^y 为输出层偏置。

试验共采集 2 155 组样本数据, 将其中的 70% 作为训练集, 30% 作为测试集。储能模量预测值与真实值的误差对比如图 5 所示, 误差为 0. 002 478 3, 拟合效果如图 6 所示; 损耗模量预测值与真实值的误差对比如图 7 所示, 误差为 0. 019 684, 其拟合效果如图 8 所示。

对比预测数据与试验真实值可知, BP 神经网络的

预测误差较小。通过对数据进行归一化与反归一化处理, 预测得到不同温度、不同频率下橡胶的储能模量、损耗模量及损耗因子, 结果如图 9、图 10 和图 11 所示。

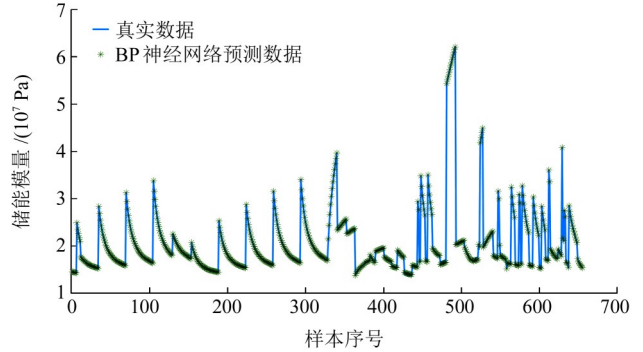


图 5 橡胶储能模量 BP 神经网络预测值与真实值误差对比

Fig. 5 Comparison of the error between predicted and real values of rubber storage modulus by the BP neural network

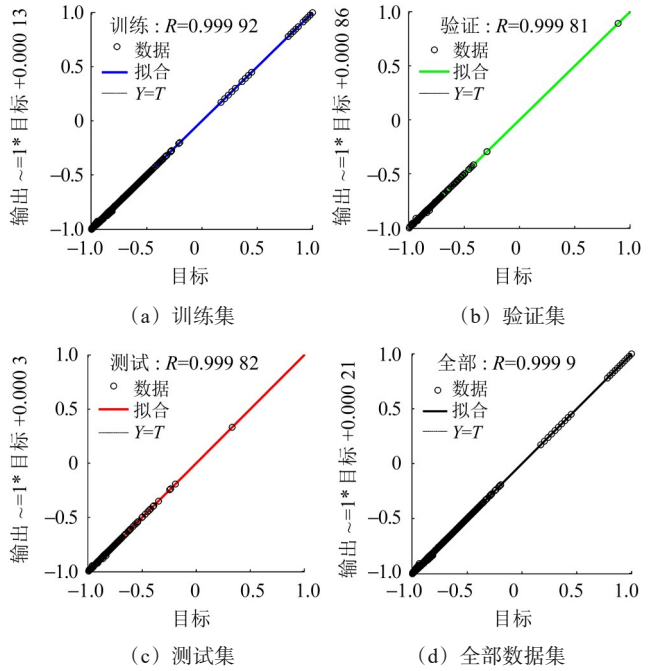


图 6 橡胶储能模量 BP 神经网络拟合效果

Fig. 6 Fitting effect of rubber storage modulus by the BP neural network

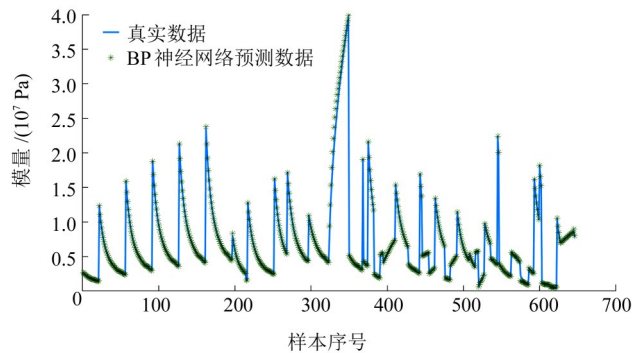


图 7 橡胶损耗模量 BP 神经网络预测值与真实值误差对比

Fig. 7 Comparison of the error between the predicted and real values of rubber loss modulus by the BP neural network

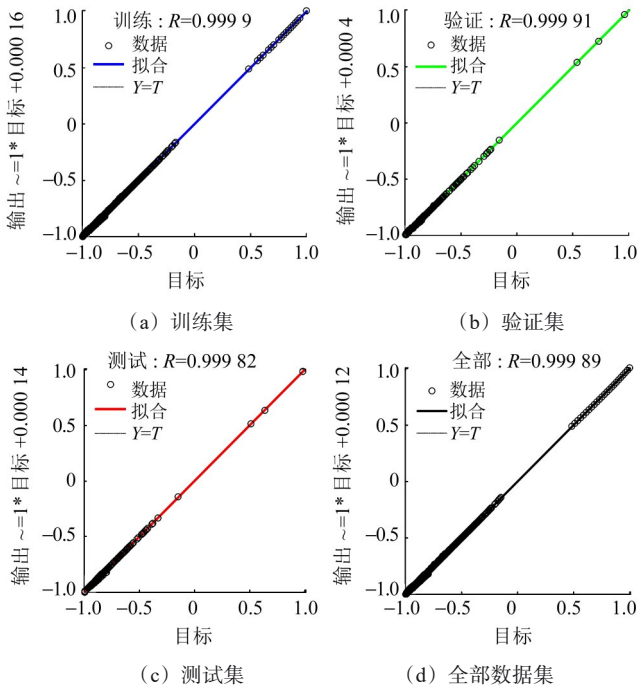


图 8 橡胶损耗模量 BP 神经网络拟合效果

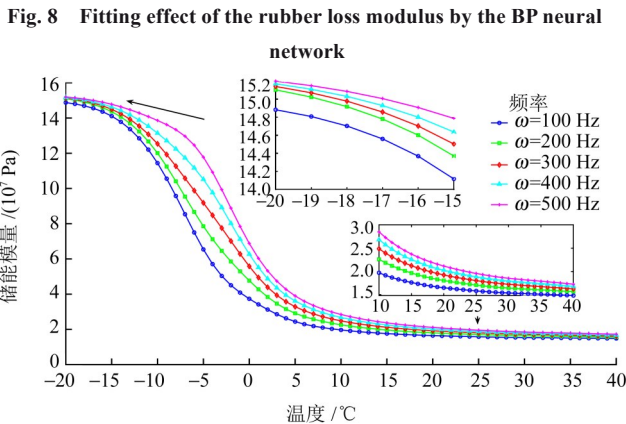


图 9 不同频率下橡胶储能模量随温度变化曲线

Fig. 9 Curves of the rubber storage modulus with temperature under different frequencies

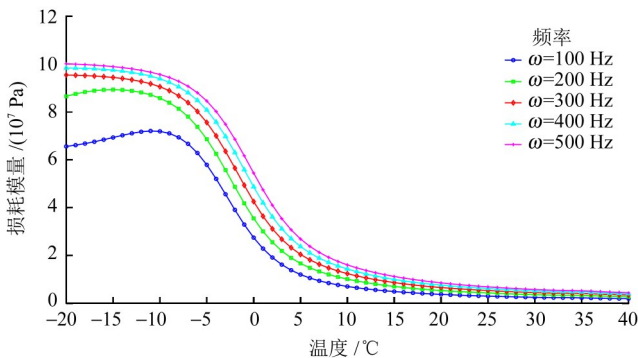


图 10 不同频率下橡胶损耗模量随温度变化曲线

Fig. 10 Curves of the rubber loss modulus with temperature under different frequencies

4.2 滞后引起的输送带与托辊接触的接触角确定

不同温度、带速、受载压力工况下,橡胶的能量损耗特性会发生显著变化,进而影响滞后效应引起的接触角。该接触角可通过压陷滚动阻力力学模型求解

确定,是分析接触区域能量损耗特性的核心参数。

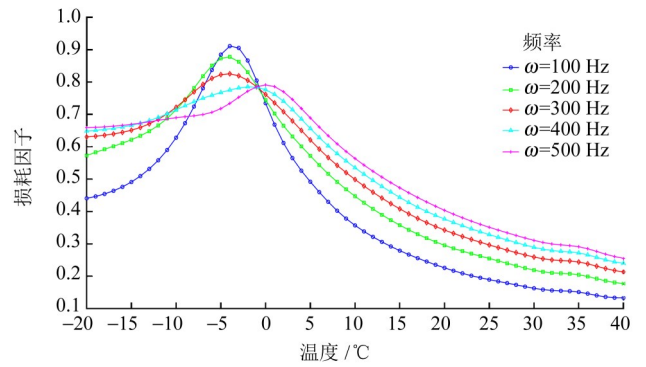


图 11 不同频率下橡胶损耗因子随温度变化曲线

Fig. 11 Curves of the rubber loss factor with temperature under different frequencies

首先,基于橡胶力学特性参数,求解不同温度下的储能模量、损耗模量与损耗角主曲线;给定带速与载荷条件下,输送带与托辊的接触压陷区域呈非对称分布,需初步预测 a 值,压陷区域施加载荷的频率计算式为 $\omega = \pi V/2a$ 。

通过计算该频率,可确定对应温度下动态力学参数主曲线中的储能模量 $G'(\omega)$ 、损耗模量 $G''(\omega)$ 和损耗角 δ 参数。

已知 $0 < \frac{b}{a} < 1$ 且 $\alpha^* = (\frac{\pi}{2}) [1 + \frac{b}{a}]$, 对式(36)引入迭代算法进行迭代计算,设定迭代初始值为 $\alpha^* = \frac{\pi}{2}$, 且迭代次数最大值为 10 000 次,迭代计算精度为 10^{-6} , 确保迭代出来的更加准确达到所需要的数据。

$$\sin(\alpha^* + \delta) = \frac{A(\alpha^*)G''(\omega)}{\bar{G}(\omega)} \quad (37)$$

进行迭代算法后将所得到的 α^* 代入式(18)判断得到每单位的垂直载荷 W 是否满足所期望的值,如果 $|W_1 - W_2| \leq 0.1$ 则保留,不满足则重新预估 a 值计算,其流程图如图 12 所示。

4.3 基于温度效应下橡胶动态力学压陷滚动阻力数值模拟

选取托辊直径 D 为 89 mm,输送带覆盖层厚度 H 为 10 mm,基于前述推导的压陷滚动阻力力学模型,开展不同温度、带速、受载压力工况下的数值计算;通过 Matlab 软件仿真不同温度、带速、载荷下的压陷滚动阻力,拟合精度达 0.999。

假设输送带的运行速度为 2 m/s,将速度带入图 12 求出输送带受载压力为 2、4、6 kN/m 在不同温度下的储能模量 $G'(\omega)$ 、损耗模量 $G''(\omega)$ 和损耗角 δ 参数,并且求出 α^* 。将所得数值代入压陷滚动阻力力学模型,通过 Matlab 软件数值模拟获得数据,并用光滑曲线拟合,拟合精度为 0.999。

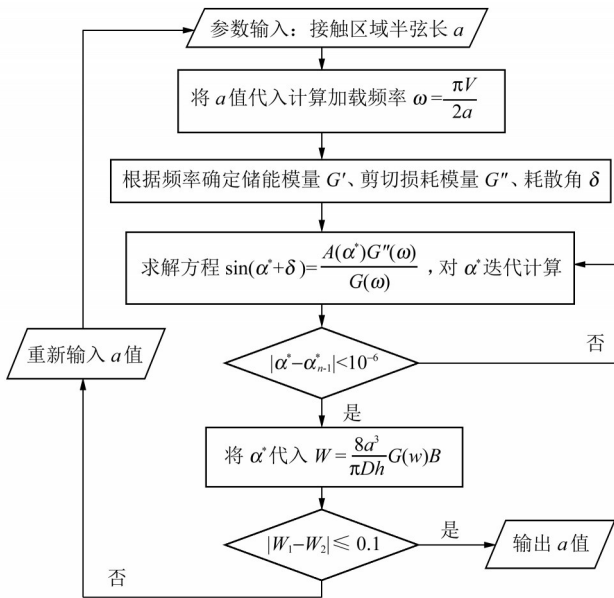


图 12 输送带与托辊接触区域半弦长 a 值迭代求解流程图

Fig. 12 Flow chart for iterative solution of the half chord length a of the conveyor belt-idler contact area

图 13 所示为带速 2 m/s 下,不同承载压力时压陷滚动阻力与温度的关系。由图 13 可知,压陷滚动阻力受温度影响显著,在 $-20\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,阻力随温度升高逐渐增大;在 $2\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,阻力随温度升高逐渐减小。在 $2\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的阻力变化趋势较 $-20\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内更为平缓。同时,压陷滚动阻力随承载压力的增大而显著提升,其变化趋势与图 11 所示的橡胶损耗因子变化趋势具有高度一致性,核心原因为温度通过改变橡胶黏弹性特性影响能量损耗效率,最终决定压陷滚动阻力的变化规律。

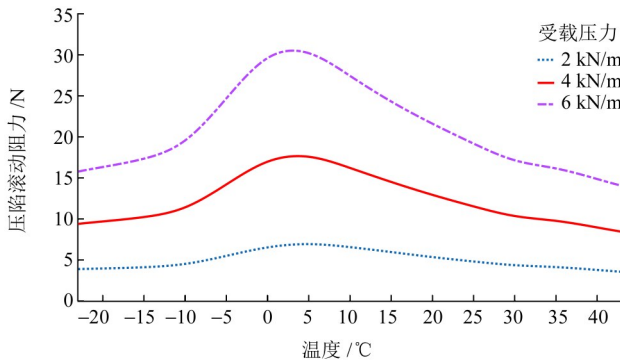


图 13 带速为 2 m/s 下压陷滚动阻力随温度变化曲线

Fig. 13 Variation curves of indentation rolling resistance with temperature at 2 m/s belt speed

将输送带运行速度增加至 4 m/s,不同承载压力时压陷滚动阻力随温度的变化规律如图 14 所示。随带速提升,压陷滚动阻力峰值出现在约 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,在 $-20\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,阻力随温度升高而增大;在 $5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,阻力随温度升高而减小,表明低温区间橡胶材料的压陷滚动阻力对温度变化更为敏感。根据式(35)可知,带速提

升会导致加载频率同步增大,而图 11 显示,损耗因子峰值随频率增加向高温方向偏移,最终造成阻力峰值对应的温度随带速提升而升高。

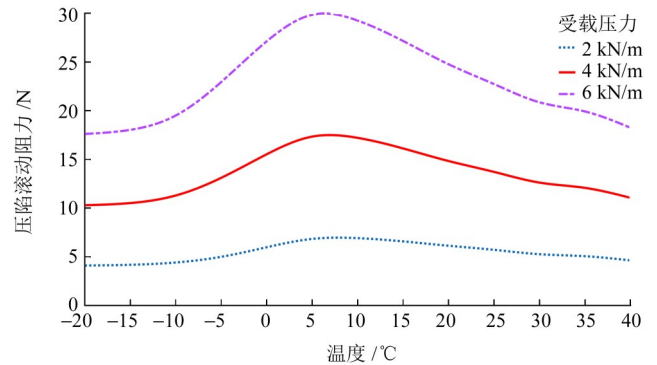


图 14 带速为 4 m/s 下压陷滚动阻力随温度变化曲线

Fig. 14 Variation curves of indentation rolling resistance with temperature at 4 m/s belt speed

将带速进一步增加至 6 m/s,并增大输送带承载压力,探究重载高速工况下压陷滚动阻力的变化,结果如图 15 所示。随着承载压力增大,压陷滚动阻力显著增加,从 6 kN/m 作用下的约 30 N 增至 8 kN/m 作用下的约 45 N。同时,阻力峰值对应的温度相对 4 m/s 时有所升高。压陷滚动阻力的变化趋势为:在 $-20\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,逐渐增大,在 $8\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,逐渐减小。

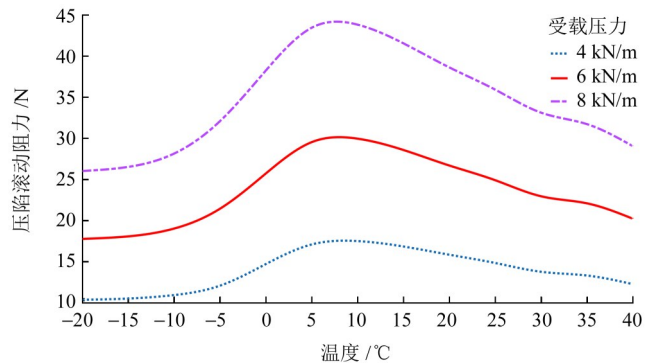


图 15 带速 6 m/s 下压陷滚动阻力随温度变化曲线

Fig. 15 Variation curves of indentation rolling resistance with temperature at 6 m/s belt speed

承载压力不仅直接影响压陷滚动阻力幅值,还会通过改变接触状态间接影响加载频率,进而影响橡胶的动态力学响应。固定带速为 2 m/s,不同温度下压陷滚动阻力随承载压力的变化规律如图 16 所示。压陷滚动阻力随承载压力的增大而持续增大,对比可知, $5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下压陷阻力差值较 $-20\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下阻力差值变化更小,这表明 $-20\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的阻力变化趋势更为显著。

图 17 和图 18 所示分别为带速为 3 m/s 和 4 m/s 时压陷滚动阻力随承载压力的变化曲线。由图 17、图 18 可知,压陷滚动阻力随承载压力的增大并非简单的线性增加,其增长趋势随压力增大而变得更为明显。

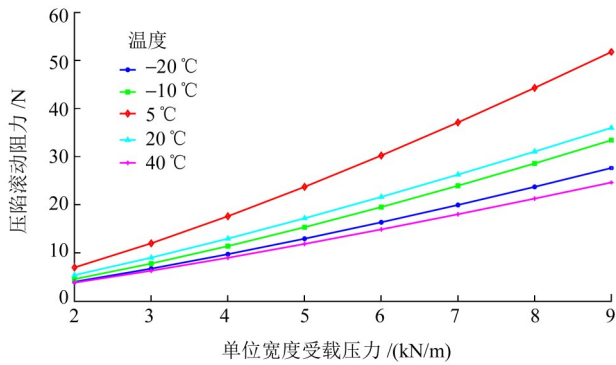


图 16 带速 2 m/s 下压陷滚动阻力随载荷变化曲线

Fig. 16 Variation curves of the indentation rolling resistance with load at 2 m/s belt speed

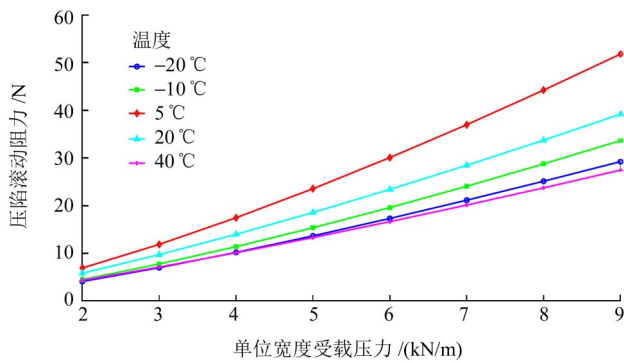


图 17 带速 3 m/s 下压陷滚动阻力随载荷变化曲线

Fig. 17 Variation curves of the indentation rolling resistance with load at 3 m/s belt speed

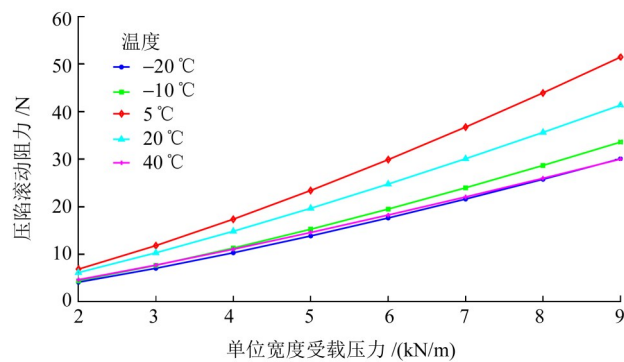


图 18 带速 4 m/s 下压陷滚动阻力随载荷变化曲线

Fig. 18 Variation curves of the indentation rolling resistance with load at 4 m/s belt speed

5 结论

基于橡胶动态力学性能与压陷滚动阻力力学模型,结合 BP 神经网络与数值仿真方法,揭示了温度对输送带压陷滚动阻力的影响规律,得出如下主要结论:

1) 恒定带速(4 m/s)与载荷条件下,压陷滚动阻力随温度变化呈非单调趋势:在 $-20\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时随温度升高而增大;在 $5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随温度升高而减小,并于约 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到峰值。

2) 恒定带速与温度条件下,压陷滚动阻力随受载

压力的增大而增大,且呈非线性增长特征,压力越大,阻力的增长速率越显著; $-20\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温区间内,压陷滚动阻力对温度变化的敏感性显著高于 $5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间。

3) 构建的考虑瞬态能量损耗的压陷滚动阻力力学模型,拟合精度达 0.999,可精准反映温度、带速、受载压力对阻力的非线性影响,为不同工况下带式输送机的压陷阻力计算与能耗优化提供参考。

参考文献(References)

- [1] 刘峰,郭林峰,张建明,等. 煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J]. 煤炭学报,2024,49(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and it's path of building new coal productivity [J]. Journal of China Coal Society,2024, 49(1): 1-15. (In Chinese)
- [2] 刘宇超,高妍,张红娟. 矿用带式输送机多目标参数协同优化控制储能方法[J]. 煤炭技术,2024,43(4):246-249.
LIU Yuchao, GAO Yan, ZHANG Hongjuan. Multiple objective parameters cooperative optimization control energy storage method of mine belt conveyor [J]. Coal Technology, 2024, 43 (4) : 246-249. (In Chinese)
- [3] 石浩,张皓男,周满山,等. 带式输送机寿命品字形托辊组压陷阻力研究[J]. 煤炭工程,2023,55(8):143-147.
SHI Hao, ZHANG Haonan, ZHOU Manshan, et al. Sag resistance of the equal-life zigzag idlers for belt conveyors [J]. Coal Engineering,2023,55(8):143-147. (In Chinese)
- [4] 陈洪月,许若镛,毛君. 考虑温度影响的钢丝绳橡胶输送带粘弹性模型建立及压陷阻力分析[J]. 机械强度,2020,42(3): 680-687.
CHEN Hongyue, XU Ruoyong, MAO Jun. The viscoelastic model of steel wire rope rubber conveyor belt and the analysis of depression resistance under the influence of temperature [J]. Journal of Mechanical Strength,2020,42(3):680-687. (In Chinese)
- [5] 苏金虎,孟文俊,张磊. 输送带压陷阻力的推导及数值分析[J]. 煤矿机械,2020,41(11):9-11.
SU Jinhu, MENG Wenjun, ZHANG Biao. Derivation and numerical analysis of collapse resistance of conveyor belt[J]. Coal Mine Machinery,2020,41(11):9-11. (In Chinese)
- [6] 冯渊,俞亚东,李毕胜. 基于有限元仿真的压陷滚动阻力研究[J]. 机械设计,2022,39(增刊1):97-101.
FENG Yuan, YU Yadong, LI Bisheng. Research on indentation rolling resistance based on finite element simulation[J]. Journal of Machine Design,2022,39(Suppl. 1):97-101. (In Chinese)
- [7] 赵晓霞,孟文俊,阴璇,等. 不同环境温度下的织物芯输送带压陷滚动阻力仿真研究[J]. 科学技术与工程,2022,22(26):11379-11385.
ZHAO Xiaoxia, MENG Wenjun, YIN Xuan, et al. Simulation on indentation rolling resistance of fabric core belt conveyor under different environmental temperatures [J]. Science Technology and Engineering,2022,22(26):11379-11385. (In Chinese)
- [8] MUNZENBERGER P J, O' SHEA J I, WHEELER C A. A comparison of rubber stress relaxation models for conveyor belt

- indentation rolling resistance calculations[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2019, 15(2):213-224.
- [9] WOŹNIAK D. Laboratory tests of indentation rolling resistance of conveyor belts[J]. *Measurement*, 2020, 150:107065.
- [10] DOS SANTOS E SANTOS L, RIBEIRO FILHO P R C F, MACÊDO E N. Indentation rolling resistance in pipe conveyor belts: a review[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(4):230.
- [11] JONKERS C. The indentation rolling resistance of belt conveyors: a theoretical approach[J]. *Fördern und Heben*, 1980, 30(4):312-318.
- [12] RUDOLPHI T J, REICKS A V. Viscoelastic indentation and resistance to motion of conveyor belts using a generalized Maxwell model of the backing material [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2006, 79(2):307-319.
- [13] 周利东, 朱瑞, 孟文俊, 等. 基于温度效应的带式输送机压陷滚动阻力研究[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(12):95-98.
ZHOU Lidong, ZHU Rui, MENG Wenjun, et al. Research on indentation rolling resistance of belt conveyor based on temperature effect[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(12):95-98. (In Chinese)
- [14] 于海富, 李凡珠, 杨海波, 等. 有限变形下橡胶材料非线性高弹-粘弹性本构模型[J]. *橡胶工业*, 2017, 64(11):645-649.
YU Haifu, LI Fanzhu, YANG Haibo, et al. A nonlinear hyper-viscoelastic constitutive model for rubber material with finite strain [J]. *China Rubber Industry*, 2017, 64(11):645-649. (In Chinese)
- [15] QIU X J, CHAI C. Estimation of energy loss in conveyor systems due to idler indentation[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2011, 137(1):36-43.
- [16] 侯宏, 高星, 孙亮, 等. 变频变温条件粘弹材料参数化数学模型[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(21):209-213.
HOU Hong, GAO Xing, SUN Liang, et al. Parameterized mathematical model of a viscoelastic material under variations of temperature and frequency [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(21):209-213. (In Chinese)
- [17] 余国锋, 袁亮, 任波, 等. 底板突水灾害大数据预测预警平台[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11):3502-3514.
YU Guofeng, YUAN Liang, REN Bo, et al. Big data prediction and early warning platform for floor water inrush disaster [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11):3502-3514. (In Chinese)

Temperature effect of dynamic mechanical properties of rubbers on indentation rolling resistance of conveyor belts

JI Bin YAO Yanping ZHOU Lidong HAN Gang ZHANG Wenchao

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problem that the indentation rolling resistance of belt conveyors is significantly affected by temperature and the existing calculation models have insufficient consideration of the temperature-frequency coupling effect, the variation law of dynamic mechanical parameters of rubber with temperature and its action mechanism on indentation rolling resistance are revealed, so as to provide reference for energy-saving design and operation optimization of conveyors. [Methods] Firstly, a BP neural network was used to predict the dynamic mechanical parameters of rubber in the range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to make up for the deficiency of test data at low temperature; Secondly, a mechanical model of indentation rolling resistance considering transient energy loss was established to improve the viscoelastic mechanical analysis system; Thirdly, the model was solved by iterative algorithm, and numerical simulation was carried out with Matlab software to systematically explore the influence law of temperature, belt speed and load pressure on the resistance; Finally, the fitting accuracy of the model was verified to ensure the reliability of the research results. [Results] Under constant working conditions, the indentation rolling resistance presents a non-monotonic segmented change with temperature, which increases with the rise of temperature in the range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and decreases with the rise of temperature in the range of $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, with the peak value appearing at about $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. When the belt speed is 6 m/s and the load pressure is 8 kN , the maximum resistance reaches 45 N . The fitting accuracy of the model is up to 0.999 , which can accurately reflect the nonlinear influence of each parameter on the resistance, and provides a quantitative basis for energy consumption optimization of conveyor belts.

Key words: Conveyor belt; Temperature effect; Indentation rolling resistance; Dynamic mechanical parameter; BP neural network

Corresponding author: YAO Yanping, E-mail: 919405128@qq.com

Fund: Fundamental Research Program of Shanxi Province (202203021211202); Graduate Education Reform Research Project of Shanxi Province (2023JG142); Transformation of Scientific and Technological Achievements Programs of Higher Education Institutions in Shanxi (2020CG043)

Received: 2024-07-05

(编辑: 李凯阳)