

物理-数据双驱动的钢桥面板 RD 节点车-温耦合疲劳寿命预测

田亮^{1,2,3}, 赵嘉明¹, 王振乾¹, 程斌⁴, 樊立龙^{2,3}, 黄群广^{2,3}

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津, 300384; 2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津, 300300; 3. 天津市装配式桥梁智能建造技术与装备重点实验室, 天津, 300300; 4. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海, 200240)

摘要: 正交异性钢桥面板顶板-U肋(RD)节点在车辆-温度耦合作用下易发生疲劳开裂。针对有限元计算成本高、纯数据模型缺乏物理约束的问题, 本文提出一种基于物理信息时间卷积网络(Physics-Informed Temporal Convolutional Network, PI-TCN)的数据-物理双驱动寿命预测模型。采用 ABAQUS-FRANC3D 联合仿真与子模型技术, 建立含半椭圆表面裂纹的 RD 节点局部模型, 模拟车-温耦合作用下的裂纹扩展, 并构建包含裂纹尺寸、等效荷载、温度和耦合应力比的寿命数据集。模型利用因果空洞卷积提取时序特征, 将 Paris 定律残差与监督损失组成联合损失函数, 约束裂纹扩展单调性和物理一致性。结果表明, PI-TCN 较纯数据驱动 TCN 预测误差更低, 可减弱裂纹深度减小等非物理波动。独立测试中, 模型可跟踪 50 万~250 万次寿命变化, 大部分样本绝对误差在 10 万次以内, 代表性样本平均绝对百分比误差约为 2.85%。该方法能够提高 RD 节点疲劳寿命预测的精度和稳定性。

关键词: 正交异性钢桥面板; 物理信息神经网络; 车辆-温度耦合; 疲劳寿命; 数值仿真

中图分类号: U443.31

文献标志码: A

Physics-Data Dual-Driven Fatigue Life Prediction for Rib-to-Deck Joints in Orthotropic Steel Bridge Decks under Coupled Vehicle-Temperature Loading

Tian Liang^{1,2,3}, Zhao Jiaming¹, Wang Zhenqian¹, Cheng Bin⁴, Fan Lilong^{2,3}, Huang Qunguang^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. CRCC Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin, 300300, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Prefabricated Bridge Intelligent Construction Technology and Equipment, Tianjin, 300300, China; 4. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: Orthotropic steel bridge deck rib-to-deck (RD) joints are susceptible to fatigue cracking under coupled vehicle and temperature loading. To address the high computational cost of finite element analysis and the lack of physical constraints in purely data-driven models, this study proposes a data-physics dual-driven fatigue life prediction model based on a Physics-Informed Temporal Convolutional Network (PI-TCN). An RD-joint local model containing a semi-elliptical surface crack is established using ABAQUS-FRANC3D co-simulation and the sub-modeling technique to simulate crack propagation under coupled vehicle-temperature loading. A fatigue life dataset incorporating crack dimensions, equivalent load, temperature, and coupled stress ratio is subsequently constructed. The model employs dilated causal convolutions to extract temporal features and combines the Paris-law residual with the supervised loss to form a joint loss function, thereby constraining the monotonicity and physical consistency of crack propagation. The results show that PI-TCN achieves lower prediction errors than the purely data-driven TCN model and can mitigate non-physical fluctuations, such as decreases in crack depth. In independent tests, the model successfully tracks fatigue lives ranging from 0.5 to 2.5 million cycles. The absolute errors of most samples are within 100,000 cycles, and the mean absolute percentage error of representative samples is approximately 2.85%. The proposed method improves the accuracy and stability of fatigue life prediction for RD joints.

Keywords: orthotropic steel bridge deck; physics-informed neural network; vehicle-temperature coupling; fatigue life; numerical simulation

收稿日期: 2026-7-14

基金项目: 天津市自然科学基金项目 (24JCYBJC00850); 中国铁建股份有限公司科研重大专项 (2024-B03)

正交异性钢桥面板(Orthotropic Steel Decks, OSDs)因具有自重轻、承载效率高、适用于大跨径桥梁等优点,已广泛应用于现代钢桥结构中^[1]。然而,OSDs 构造细节复杂,顶板-U 肋连接区域(Rib-to-Deck, RD)存在明显几何不连续与焊接缺陷敏感性,在长期车辆荷载、温度变化及二者耦合作用下,易产生应力集中和疲劳损伤累积,进而诱发裂纹萌生与扩展^[2]。已有研究表明,轮载横向作用位置、焊趾局部应力集中、温度应力及铺装层刚度变化均会影响 RD 节点的疲劳应力幅和裂纹扩展行为^[3-4]。因此,研究车辆-温度耦合作用下 RD 节点裂纹扩展规律及疲劳寿命预测方法,对钢桥面板服役状态评估和维护决策具有实际意义^[5-6]。

目前,OSDs 疲劳寿命评估主要依赖线弹性断裂力学(LEFM)和有限元数值模拟。研究者通常利用 ABAQUS、FRANC3D 等软件建立局部精细化模型,通过交互积分法计算裂纹尖端应力强度因子,并结合 Paris 定律模拟裂纹扩展过程^[7]。该类方法具有明确的力学基础,能够较好刻画裂纹形态、扩展路径及焊接残余应力等因素对疲劳寿命的影响^[8]。然而,裂纹扩展模拟涉及局部网格重划分、应力强度因子计算及循环增量迭代;当同时考虑裂纹尺寸、车辆荷载和环境温度等多种参数时,需要开展大量重复计算,制约了其在多工况疲劳寿命分析中的计算效率。

为提高计算效率,人工神经网络(ANN)、长短期记忆网络(LSTM)等数据驱动方法逐渐应用于结构疲劳可靠度分析和寿命预测领域^[9-11]。该类模型能够从大量仿真或监测数据中学习裂纹尺寸、荷载幅值、应力比等特征与疲劳寿命之间的非线性映射关系,显著降低有限元分步积分的计算负担。部分研究还将 ANN 与 LEFM 相结合,在随机参数分析中取得了较好的预测精度^[12]。然而,纯数据驱动模型本质上缺少断裂力学约束,其预测过程具有黑箱特征,在样本不足或遭遇极端工况时,可能出现裂纹扩展非单调、寿命预测波动异常等不符合物理规律的结果,限制了模型的泛化能力和工程可信度。

近年来,物理信息机器学习(Physics-Informed Machine Learning)为融合数据建模与力学机理提供了新的思路。其核心思想是在神经网络训练过程中引入控制方程、物理残差或能量泛函,使模型在拟合数据的同时满足基本物理规律^[13]。对于疲劳裂纹扩展问题,Paris 定律能够描述稳定扩展阶段裂纹扩展速率与应力强度因子幅值之间的关系,具有清晰的物理意义。若将其嵌入神经网络损失函数,可有效约束模型输出符合疲劳损伤不可逆和裂纹单调扩展规律,从而提升预测结果的物理一致性与可靠性。

基于此,本文采用 ABAQUS - FRANC3D 联合仿真与子模型技术,构建车辆 - 温度耦合作用下 RD 节点疲劳裂纹扩展数据集;利用时间卷积网络的因果空洞卷积结构提取裂纹损伤演化的长时序特征;基于物理信息神经网络思想,将 Paris 裂纹扩展定律作为物理残差嵌入损失函数,建立 PI-TCN 数据-物理双驱动疲劳寿命预测模型。通过与 BiGRU、PI-BiGRU 和 TCN 模型进行对比,并采用独立测试样本检验模型预测结果,分析物理约束对预测精度和裂纹演化一致性的影响。

1 相关理论及方法

1.1 疲劳裂纹扩展理论

正交异性钢桥面板(OSDs)顶板-U 肋 RD 节点处于高度复杂的应力集中区域。在车辆轮载与环境温度场的共同作用下,其疲劳失效过程表现为裂纹的萌生、稳定扩展直至最终断裂^[14-16]。本研究基于线弹性断裂力学(Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM)体系,对 RD 节点的裂纹尖端应力场特征及裂纹扩展动力学行为进行理论描述。

针对高强钢材构建的正交异性钢桥面板,RD 节点在车辆循环荷载、温度应力及焊接残余应力共同作

用下，易产生局部应力集中，并诱发裂纹萌生与扩展。根据裂纹面相对位移特征及受力形式，裂纹扩展模式通常可分为张开型（I型）、滑开型（II型）和撕开型（III型）。其中，I型裂纹主要受法向拉应力控制，裂纹面沿垂直方向相互分离，是钢桥面板 RD 节点疲劳开裂中较为典型的扩展形式。考虑到本文研究对象主要表现为焊趾处裂纹张开及深度方向扩展，故重点分析I型裂纹行为，如图 1 所示。应力强度因子可量化裂纹尖端弹性应力场强度，是后续裂纹扩展速率与疲劳寿命计算的重要参数。该参数通常表达为以下数学形式

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中： σ 为名义应力（无裂纹假设下的理论计算应力）， a 为裂纹特征尺寸。

该模型以裂纹扩展门槛值 K_{th} 和材料断裂韧性 K_C 为界，当 $K_{th} < K_I < K_C$ 时，裂纹发生扩展。疲劳裂纹的扩展速率，根据断裂力学理论，裂纹扩展全过程通常分为三个阶段如图 2 所示：低速扩展区（近门槛区）、稳定扩展区（Paris 区）和高速扩展区（失稳区）。针对钢桥面板的疲劳寿命评估，主要关注占据寿命绝大部分的稳定扩展阶段，其力学行为遵循经典的 Paris 公式

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

式中： a 用于表征裂纹尺寸， N 则记录了所施加的载荷循环次数； C 和 m 为与疲劳裂纹扩展速率的相关常数； ΔK 为应力强度因子幅值。对式（2）进行积分，可以得到裂纹疲劳寿命 N

$$N = \int_{a_0}^{a_n} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (3)$$

在钢桥面板的实际服役环境中，RD 节点同时承受随机车辆荷载产生的机械应力场 σ_M 与环境温度变化产生的热应力场 σ_T 。基于线性叠加原理，结构内部的总应力场 σ_{total} 可表述为两者的线性叠加

$$\sigma_{total}(t) = \sigma_M(t) + \sigma_T(t) \quad (4)$$

在耦合作用下，温度场是通过改变裂纹尖端的绝对力学状态来影响疲劳驱动力。具体而言，热应力 σ_T 的引入会改变循环过程中的平均应力 σ_M ，进而导致应力比 R 发生漂移

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{M,min} + \sigma_T}{\sigma_{M,max} + \sigma_T} \quad (5)$$

应力比 R 的改变会显著影响裂纹闭合效应，即影响裂纹张开的有效应力强度因子范围。当 R 增大时，裂纹闭合效应减弱，有效驱动力增加，从而加速裂纹扩展。

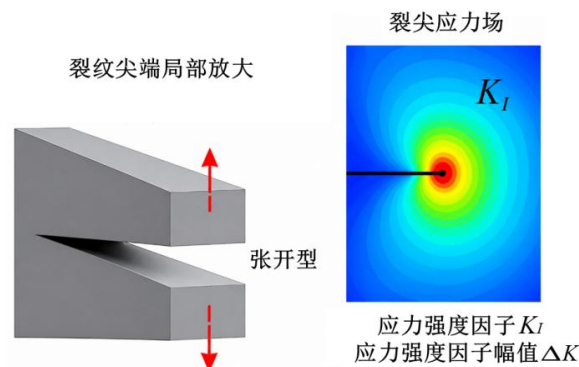


图 1 I 型裂纹张开模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Mode-I opening crack

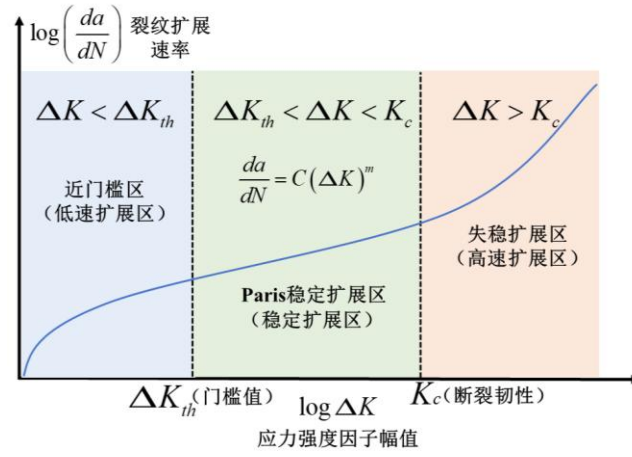


图 2 疲劳裂纹扩展速率曲线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fatigue crack growth rate curve

1.2 TCN 时间卷积网络

在正交异性钢桥面板(OSDs)车辆-温度耦合疲劳寿命分析中,结构受到的荷载历程出现复杂的长短期耦合荷载特性。本研究引入时间卷积网络 TCN 作为核心数据驱动模块如图 3 所示,相较于循环神经网络(RNN)及其变体,TCN 具备计算能力强、梯度传播稳定以及感受野灵活可控等显著优势^[17-18]。旨在高效提取多源异构时变信号中表征疲劳损伤演化的潜在非线性特征。

为高度契合疲劳裂纹扩展不可逆的物理因果性,TCN 架构采用了因果空洞卷积(Dilated Causal Convolution)。对于一维历史输入序列 X 和尺寸为 k 的卷积 W ,在时刻 t 且膨胀因子为 d 的卷积输出可表示为

$$Y_t = (X *_{d} W)(t) = \sum_{i=0}^{k-1} W_i \cdot X_{t-d \cdot i} \quad (6)$$

式中: Y_t 为 t 时刻的卷积输出; X 为输入序列; W 为卷积核权重; k 为卷积核尺寸; d 为空洞因子; i 为求和索引; $*_{d}$ 表示空洞因果卷积运算。

该机制使得深层神经元的感受野(Receptive Field)呈指数级扩张,从而在不增加计算复杂度的前提下,有效解耦并捕捉长周期、低频率的环境温度波动对高频车辆瞬态冲击应力的调制特征。

为解决深层网络长时序训练中的梯度消失问题,TCN 模块采用残差连接(Residual Connection)构建基本计算单元^[19-20]。如图 4 所示,单个残差块内包含两组空洞因果卷积,并接续权重归一化与ReLU激活函数,同时引入 Dropout 层抑制过拟合

$$O = \text{ReLU}(X + \mathcal{F}(X)) \quad (7)$$

式中: O 为残差块输出; X 为输入特征; $\mathcal{F}(X)$ 为残差分支对输入特征的变换结果;ReLU为线性整流激活函数; $X + \mathcal{F}(X)$ 表示输入特征与残差特征逐元素相加。

若输入输出维度不一致,则通过 1×1 卷积进行线性投影对齐。该结构不仅保障了网络梯度的稳定反向传播,也显著提高了模型对微小损伤演化特征的捕捉灵敏度。

在整体寿命评估架构中,TCN 模块充当了物理信息层(PI-Layer)的前置编码器。经过多层残差块的深度特征提取与全局平均池化后,高维时空特征向量通过全连接层被映射为低维参数空间,最终准确输出符合断裂力学递减规律的疲劳寿命 n 。这一过程实现了从纯数据统计特征到力学机理的显式转译,为后续将Paris定律作为物理残差嵌入损失函数提供了可靠的先验基础。

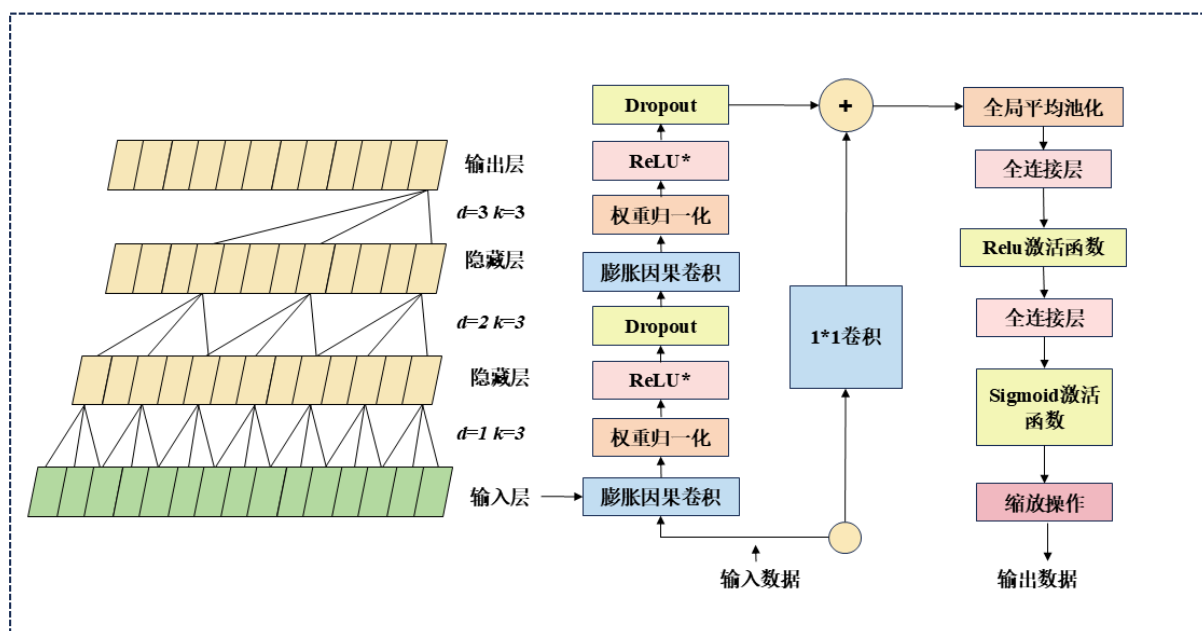


图 3 时间卷积网络 (TCN) 因果卷积架构图

Fig. 3 Causal convolution architecture of Temporal Convolutional Network (TCN)

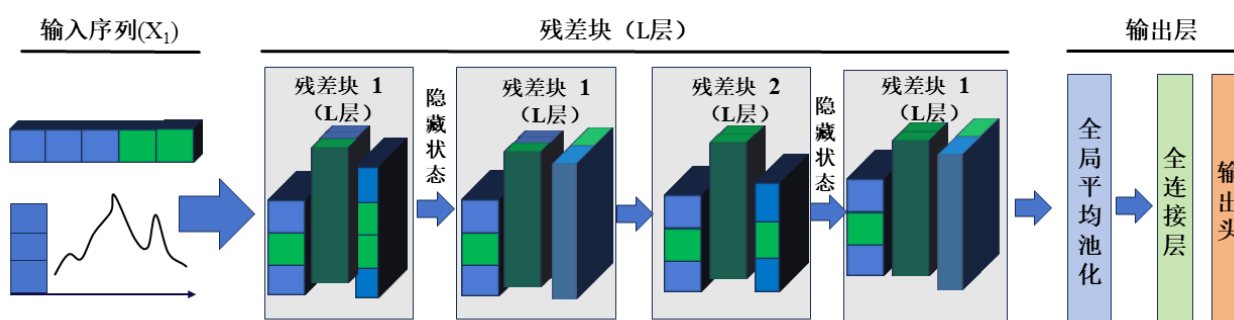


图 4 时间卷积网络 (TCN) 时序特征逻辑架构图

Fig. 4 Architecture of temporal feature extraction in the TCN

1.1

1.3 PI-TCN 物理信息时间卷积网络

物理信息神经网络(Physics-Informed Neural Network, PINN)的核心思想是在神经网络训练过程中引入明确的物理控制方程,使模型不仅能够拟合样本数据,还能够满足基本力学规律。对于钢桥面板 RD 节点疲劳裂纹扩展问题,单纯依靠数据驱动模型虽然可以学习裂纹尺寸、荷载幅值、温度和应力比等变量与疲劳寿命之间的非线性关系,但其预测过程缺乏断裂力学约束,容易在极端工况或样本稀疏区域出现不符合物理规律的结果。因此,将 Paris 裂纹扩展定律嵌入神经网络训练过程,是提升模型物理一致性和泛化能力的重要途径。

本文构建的 PI-TCN 物理信息时间卷积网络模型旨在解决正交异性钢桥面板在车辆-温度耦合场下的疲劳损伤表征难题。如图 5 所示,结合模型逻辑架构图,PI-TCN 深度融合了数据驱动的时序卷积分块与物理机理驱动的增强分块,其核心运作机理如下:

时序卷积分块中,模型首先接收包含历史状态与控制输入的时序序列。通过因果空洞卷积算子实施滑

动特征提取，在数学上严格复现了疲劳损伤累积的物理不可逆性与单向记忆能力。借助多层残差连接与层归一化激活，深层神经元能够跨越长周期，有效捕捉低频热力学趋势与高频车辆力学冲击之间的非线性耦合特征。

在物理增强分块中，模型引入自动微分(Automatic Differentiation)技术精确计算网络预测值关于输入变量的偏导数。特征融合层不直接输出黑箱寿命值，而是将 TCN 提取的高维时空特征向量投影至低维物理参数空间，动态解算出材料本构参数。

网络优化通过极小化联合总损失 L 实现，强制预测轨迹满足疲劳演化的严格单调递减原则。总损失函数由数据监督损失 L_{sup} 与物理残差损失 L_{phys} 线性加权构成

$$L_{sup} = \|y_t - \hat{y}_t\|^2 \quad (8)$$

$$L_{phys} = \|f(\hat{y}_t, \dots)\|^2 \quad (9)$$

$$L = \lambda_s \cdot L_{sup} + \lambda_p \cdot L_{phys} \quad (10)$$

式中： L_{sup} 为数据监督损失； L_{phys} 为物理残差损失； L 为总损失； y_t 和 $\hat{y}_t$ 分别为第 t 个时序步的数值基准值和模型预测值； λ_s 和 λ_p 分别为数据监督损失和物理残差损失的权重系数。该机制有效消除了纯数据模型在极端工况下的非物理波动。

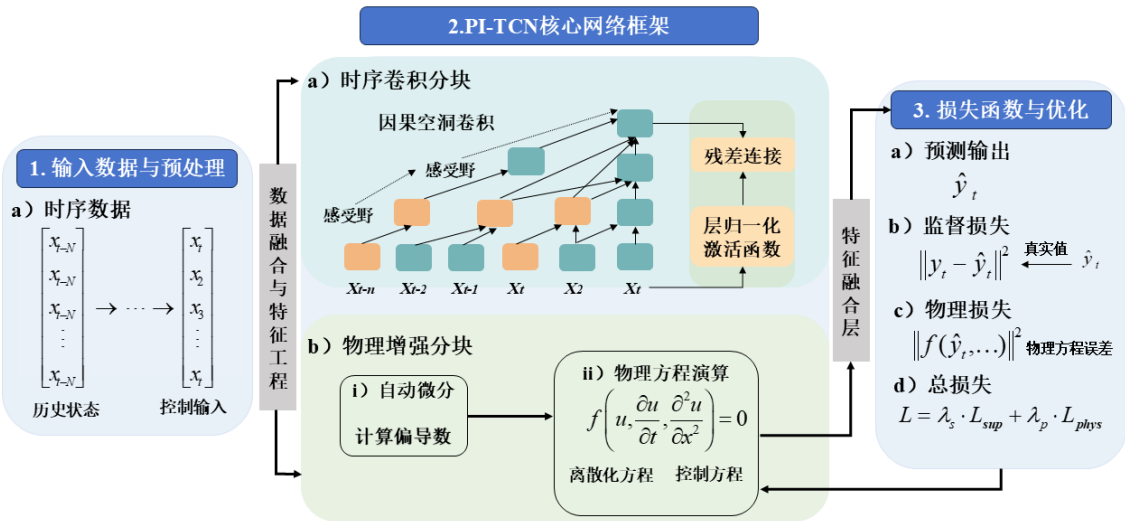


图 5 数据-物理双驱动 PI-TCN 模型整体架构图

Fig. 5 Overall architecture of the data - physics dual-driven PI-TCN model

2 数值仿真与数据集构建

2.1 疲劳应力分析

为建立车辆荷载与疲劳应力响应之间的定量映射关系，本文结合车-温耦合作用下钢桥面板 RD 节点疲劳试验平台，对其受力与监测特征进行分析，平台通过液压加载装置模拟车辆循环荷载作用，并结合温度控制、应变监测、位移采集和数据采集系统，表征 RD 节点在车辆荷载与环境温度共同作用下的疲劳响应特征。

在此基础上，本文基于 ABAQUS 平台构建正交异性钢桥面板 RD 节点局部精细化有限元模型，如图 6 所示，重点研究顶板-U 肋焊接细节的应力集中与疲劳敏感特性。模型以试验平台中的受力形式为参考，将

车辆轮载等效为局部均布压力，并考虑温度作用对局部应力状态的影响。

在建模假定方面，主梁结构在车辆作用下不发生整体滑移与扭转变形，仅考虑局部板单元的弹性响应。RD 节点几何参数依据工程实桥构造进行等效简化，如表 1 所示。

1) 几何构造：顶板设定为 1 000 mm×400 mm×20 mm，U 肋开口宽 300 mm、高 400 mm、厚 8 mm。焊缝采用实体单元显式建模，并将焊趾过渡区拟合为半径 8 mm 的圆弧以精准捕捉应力集中。

2) 材料属性：统一采用 Q345qD 桥梁高强钢。力学参数设为弹性模量 210 GPa、泊松比 0.3；热工参数设为热传导率 53 W/(m·K)、比热容 460 J/(kg·K)、线膨胀系数 $1.2\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。环境温度波动场设定为 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

3) 荷载工况：针对最不利的跨肋式偏心加载，在连接焊趾正上方设置 250 mm×250 mm×50 mm 的橡胶垫以等效传递轮载。设定循环应力幅在 0.32~0.9 MPa 间波动，温度-车载耦合应力比 R_{eff} 范围控制在 0~0.1。

工程监测与数值试验均表明，车辆跨肋式偏心加载是诱发 RD 节点焊趾处应力非线性放大与疲劳开裂的“最不利”受力状态。为模拟真实车轮跨肋偏心加载工况并考虑橡胶轮胎与桥面板间的刚度传递，根据规范推荐的单轮标准接触面积(约 600 mm×200 mm)，将移动轮载等效转化为该区域内的均布压力进行加载。这种基于橡胶垫偏心加载结合温度梯度的多物理场输入策略，能够精确重现车轮碾压过程中由桥面温度效应与荷载冲击协同导致的疲劳热点应力场，为后续在 FRANC3D 中基于线弹性断裂力学(LEFM)开展疲劳寿命 n 的预测构建了坚实的基础。RD 节点的有限元模型设置如下：单元类型为三维减缩积分实体单元 C3D8R。构件典型节点处的几何突变会引发应力显著集中，致使焊趾区域的应力值在网格细化后仍无法求得稳定解^[21]。因此，对盖板与 U 肋焊接连接处的网格适当加密，加密区网格法向分为 10 层，细化区网格尺寸为 2mm，模型加密区设置过渡网格，模型网格划分详见图 7。

表 1 有限元模型参数

Tab. 1 Parameters of the finite element model

编号	参数名称	数值
1	顶板尺寸	1 000 mm×400 mm×20 mm
2	U 肋尺寸	300 mm×400 mm×8 mm
3	焊趾圆弧半径	8 mm
4	弹性模量	210 GPa
5	泊松比	0.3

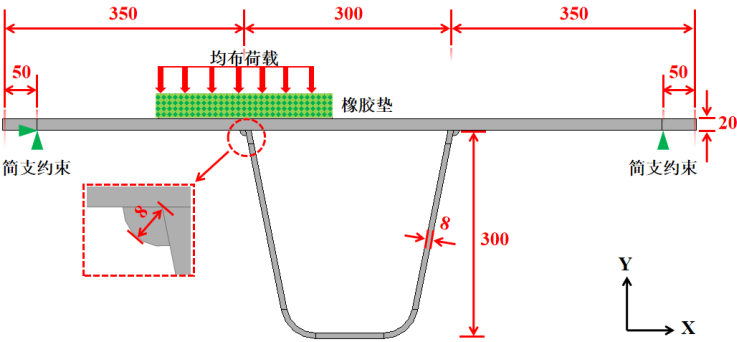


图 6 钢桥面板 RD 节点局部模型图 (单位: mm)

Fig. 6 Local model of the RD joint in the orthotropic steel bridge deck(Unit: mm)

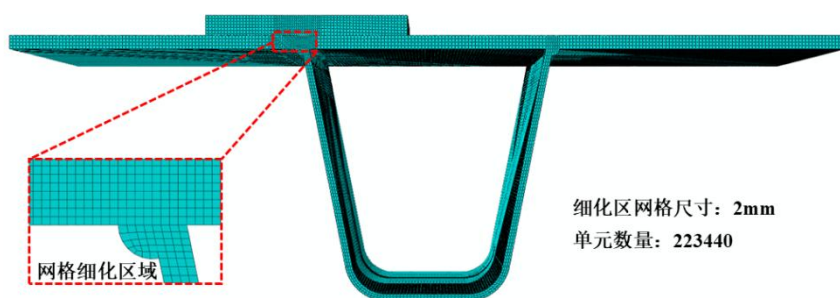


图 7 模型网格划分及加密区

Fig. 7 Mesh division and densified area of FE model

2.2 裂纹扩展模拟

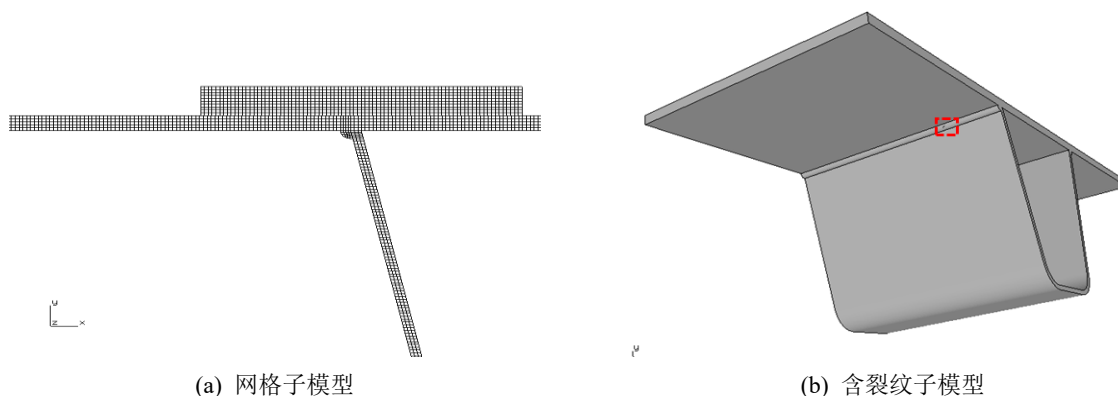
为兼顾计算精度与效率,本研究采用“ABAQUS-FRANC3D”联合仿真与子模型技术。首先,在 ABAQUS 中建立正交异性钢桥面板 RD 节点全局有限元模型,模拟车辆荷载与环境温度共同作用下的结构力学响应;随后,将全局模型计算得到的位移边界条件精确映射至 RD 节点局部子模型边界,从而在保证整体受力状态一致的基础上,对焊趾疲劳热点区域进行精细化裂纹扩展模拟。如图 8 所示,将宏观全局位移精确映射至 RD 节点局部边界,以驱动车-温耦合场下的三维裂纹动态扩展仿真。本研究基于 Paris 模型来模拟裂纹的扩展过程,参数如表 2 所列,依据线弹性断裂力学(LEFM)假设,模型在 U 肋-盖板焊趾处植入了由深度 a 与表面长度 c 唯一确定的半椭圆形表面初始裂纹^[22-23]。在此基础上,本研究提取了裂纹深度、表面长度、耦合场等效荷载、应力比及裂纹扩展增量,构建了如表 3 所列的输入特征向量。该数据集严格遵循断裂力学的物理控制机制,完整确立了决定应力强度因子的必要力学边界条件,从而从底层保障了后续数据驱动模型在实际应用中的物理鲁棒性。

各参数的取值范围明确(裂纹深度与长度: 0.1~6 mm; 外部荷载: 0.32~0.9MPa; 应力比: 0~0.1), 该设计充分覆盖了 RD 节点疲劳裂纹初始的典型工程工况,保证了数据集的有效性和代表性。

表 2 疲劳裂纹扩展分析参数

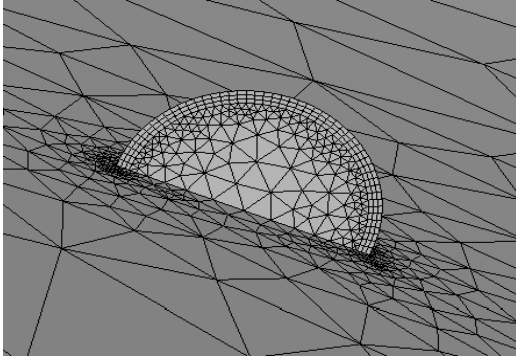
Tab. 2 Parameters for fatigue crack growth analysis

C	m	阈值 $K_{th}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	阈值 $K_c/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
4.552×10^{-17}	4.198 7	3.16	191.4

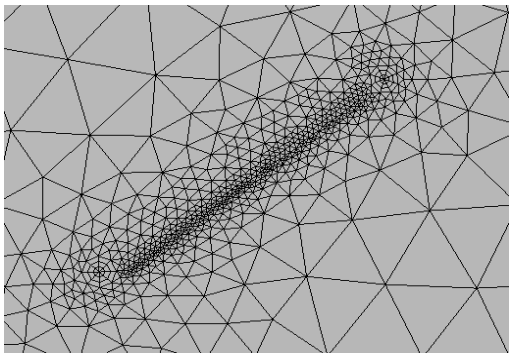


(a) 网格子模型

(b) 含裂纹子模型



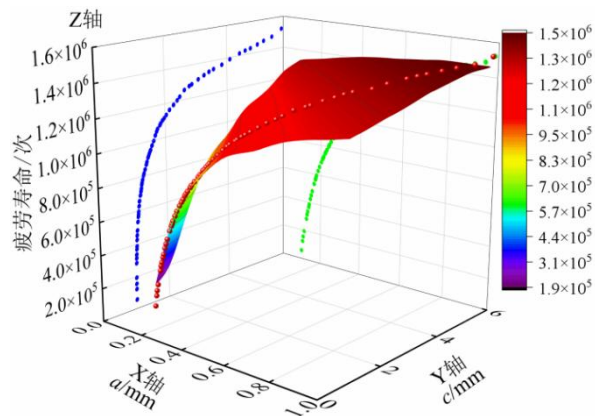
(c) 半椭圆表面裂纹局部细节网格



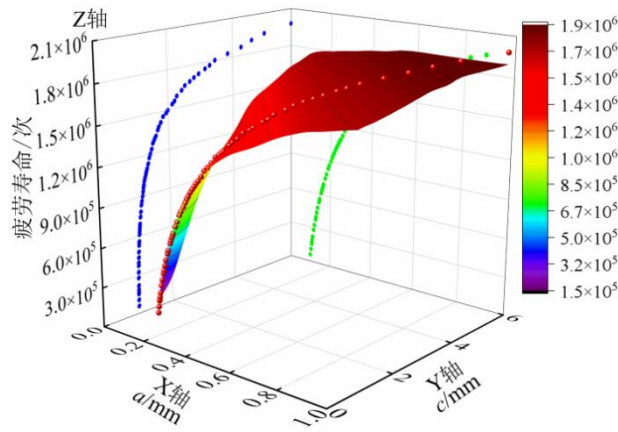
(d) 裂纹前缘自适应重划网格

图 8 裂纹扩展细节模型

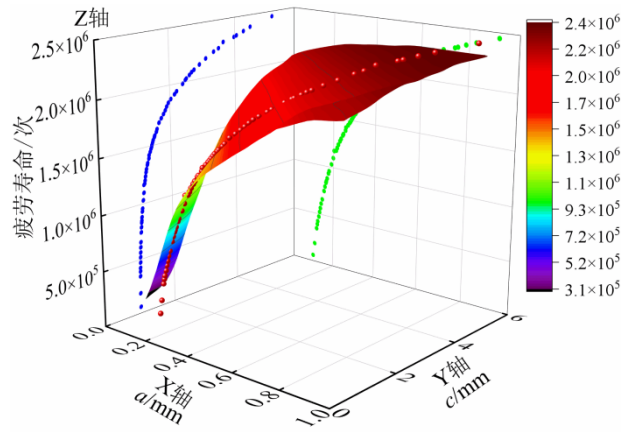
Fig. 8 Detailed model of crack propagation



(a) 20 °C 耦合标准车荷载疲劳响应面



(b) 0 °C 耦合标准车荷载疲劳响应面



(c) -20 °C 耦合标准车荷载疲劳响应面

图 9 不同温度下耦合标准车荷载疲劳响应面

Fig. 9 Fatigue response surfaces under coupled standard vehicle loads at different temperatures

表 3 训练样本示例

Tab. 3 Examples of training samples

编号	深度/mm	长度/mm	荷载/MPa	温度/°C	耦合应力比	疲劳寿命 N
1	0.12	2.5	0.32	-20	0	1,856,255
2	0.35	4.5	0.48	0	0.1	542,544
3	0.25	4	0.32	20	0	858,423
4	0.3	4.5	0.48	-20	0.1	615,242
5	0.4	5.5	0.64	20	0.1	132,563

3 数值结果与分析

3.1 模型训练与超参数配置

本研究中 PI-TCN 模型的构建、物理偏微分方程的内嵌及网络训练均在 MATLAB 深度学习框架下独立自主完成。本地硬件算力平台搭载 AMD Ryzen 7-8745H with Radeon 780M Graphics。在车辆-温度耦合作用下，RD 节点疲劳寿命随初始裂纹尺寸的增大呈显著非线性衰减规律，其中裂纹深度对疲劳寿命的影响更为敏感，在结构承载能力退化过程中起主导作用^[24]。由图 9 分析可知，温度对疲劳行为具有显著调制效应，分析整体表现为低温条件(-20 °C)下疲劳寿命明显提高，而常温(20 °C)下寿命相对较低。结合裂纹扩展 $a-N$ 曲线分析可知，低温环境通过抑制裂纹扩展速率延缓疲劳损伤演化，其内在机理为：低温提升了钢材屈服强度（缩小裂尖塑性区）并增强了裂纹闭合效应（降低有效应力强度因子幅 ΔK ），同时等效改变了 Paris 参数 C 与 m ，整体抑制了裂纹扩展速率。

3.2 PI-TCN 模型训练与预测结果

基于 ABAQUS-FRANC3D 联合仿真获得的车-温耦合疲劳裂纹扩展数据，本文构建了 PI-TCN 模型训练样本。提取五个关键力学与几何特征构成模型的输入向量 X ：初始裂纹深度 a_0 、初始裂纹长度 c_0 、等效循环应力幅 $\Delta\sigma$ 、温度-车载耦合应力比 R_{eff} ，以及单步裂纹扩展增量 Δa 。模型的预测目标定义为对应状态下的裂纹疲劳寿命值 n 。

共提取 500 组有效样本，并按 8:1:1 划分为训练集、验证集和测试集。训练前对各特征进行归一化处理，以减小量纲差异影响。模型训练参数设置为最大迭代 500 次、初始学习率 0.001、Batch Size 为 32。

图 10 给出了 PI-TCN 模型在训练集、验证集和测试集上的预测结果。可以看出，PI-TCN 预测值整体与真实疲劳寿命保持较高一致性，散点主要分布在 $y=x$ 理想拟合线附近，说明模型能够较准确地学习裂纹尺寸、荷载条件、温度效应与疲劳寿命之间的非线性映射关系。与传统 GRU 模型相比，PI-TCN 对长周期疲劳演化过程的拟合更加稳定，预测结果波动更小，尤其在长寿命区间仍能保持较好的跟踪能力。

从误差分布来看，测试样本误差集中在较小范围内，未出现明显的系统性偏差，表明模型在独立测试集上具有较好的泛化能力。其原因在于，TCN 的因果空洞卷积结构能够有效捕捉车-温耦合荷载下的长时序损伤特征，而 Paris 定律物理残差的引入进一步约束了裂纹扩展过程的单调性和物理一致性。因此，PI-TCN 模型不仅提高了疲劳寿命预测精度，也增强了预测结果的可靠性与工程可解释性。

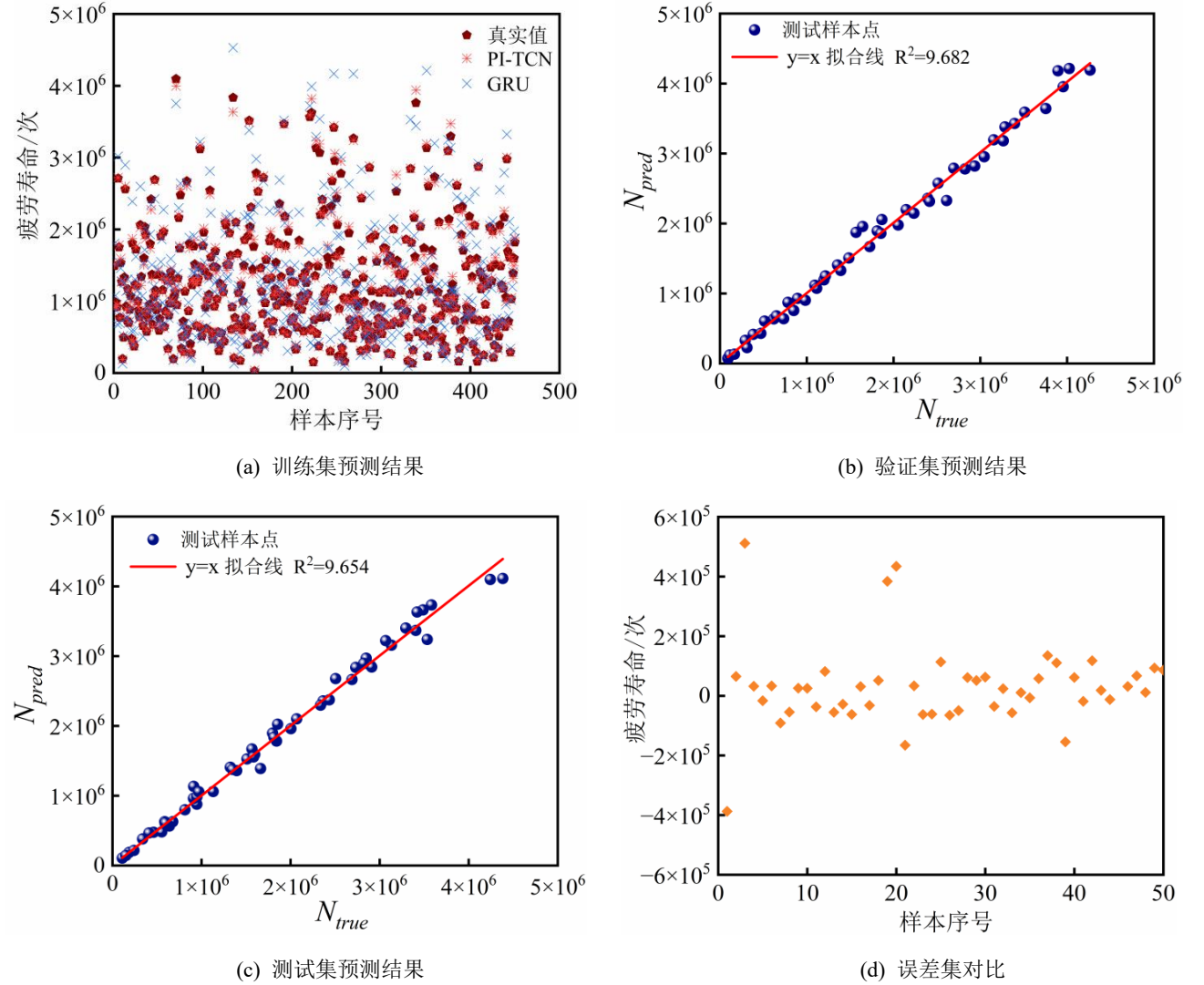


图 10 PI-TCN 模型训练结果

Fig. 10 PI-TCN model training results

3.3 消融实验与机制分析

为验证物理信息先验与 TCN 时序特征提取结构对疲劳寿命预测性能的影响，本文设置 BiGRU、PI-BiGRU、TCN 和 PI-TCN 四组模型进行消融对比。图 11 给出了不同模型在验证集上的误差分布结果。可以看出，传统 BiGRU 模型在长周期疲劳裂纹扩展序列中存在明显预测滞后，误差波动范围较大；PI-BiGRU 虽引入物理约束，但由于循环网络结构在自动微分和长序列反向传播过程中稳定性不足，整体

预测精度并未提升。相比之下，TCN 依靠因果空洞卷积扩大感受野，能够更有效捕捉车辆荷载与温度耦合作用下的时序损伤特征，误差较 BiGRU 明显降低。而 TCN 借助膨胀因果卷积有效拓宽感受野，成功将最大误差显著降至 186 万次循环。然而，作为纯数据驱动模型，TCN 在极端工况下易出现“裂纹深度减小”的违背力学常识现象。为此，PI-TCN 创新性地将 Paris 方程作为物理残差嵌入损失函数，不仅彻底消除了非物理波动、确保了裂纹深度的严格单调递增，更将平均绝对误差(MAE)和最大误差大幅压降至 12 万次与 28 万次循环以内如表 4 所示。此外，底层架构适配性对比表明，不同于 PI-BiGRU 在自动微分计算物理残差时因动态循环计算图导致梯度反向传播不稳定及收敛困难，PI-TCN 凭借其静态卷积拓扑与高并行计算效率，契合了高阶物理导数的求解需求，突破数据驱动黑盒瓶颈的同时，大幅缩短了训练时间。

表 4 不同模型的验证集结果

Tab. 4 Comparison of validation-set results for different models

模型	RMSE(10^4)	MAE(10^4)	MAPE(%)	R^2	最大误差(10^4)
BiGRU	235.62	185.45	24.53	0.8152	415.3
PI-BiGRU	268.35	210.82	28.31	0.7728	360.55
TCN	98.41	75.26	12.18	0.9145	186.42
PI-TCN	14.58	9.84	3.25	0.9893	25.46

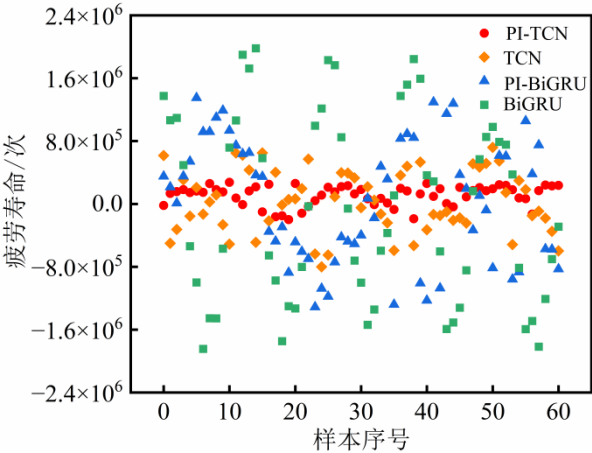
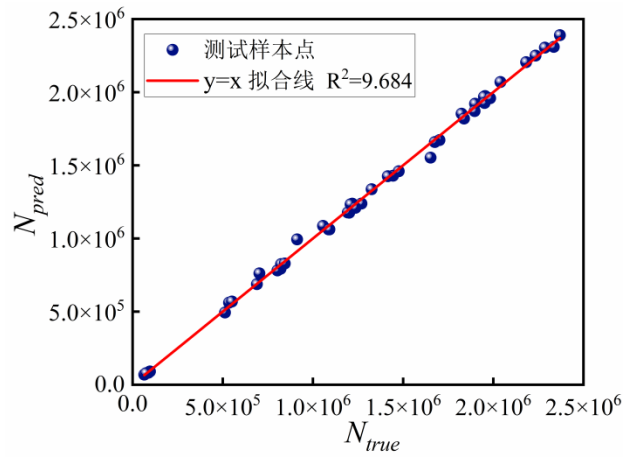


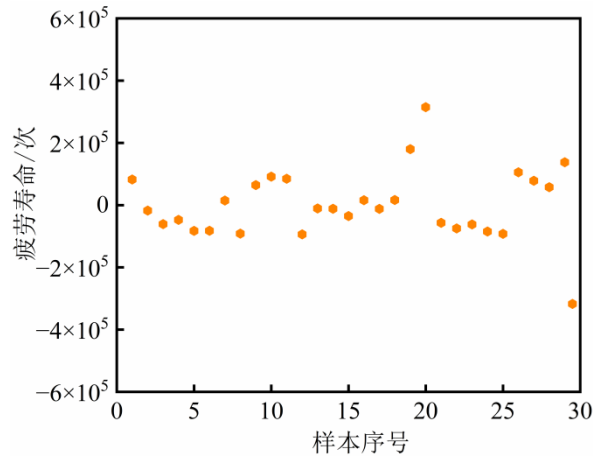
图 11 消融实验对比

Fig. 11 Ablation study comparison

为进一步检验模型的泛化能力，本文构建了 30 组未参与训练的独立测试样本，并采用训练完成的 PI-TCN 模型进行疲劳寿命预测。图 12(a)显示，测试集预测值与真实值整体接近 $y=x$ 理想拟合线，说明模型能够较准确地追踪疲劳寿命在 50 万至 250 万次循环区间内的变化趋势。图 12(b)的误差分布表明，大部分样本的绝对误差集中在 10 万次循环以内，个别样本存在较大偏差，但相对于百万次级疲劳寿命而言仍处于可接受范围。表 5 列出了部分测试样本的预测误差。以所列 6 组样本为例，预测寿命与真实值整体吻合较好。所列样本平均绝对百分比误差约为 2.85%。结果表明，PI-TCN 模型不仅在验证集中具有较高预测精度，在独立测试工况下同样保持了较好的泛化能力。真实值为仿真模拟裂纹扩展至对应长度时，所需承受的循环载荷次数；预测值则为本研究 PI-TCN 方法所得的循环次数。图表结果充分验证了该模型对正交异性钢桥面板 RD 节点裂纹剩余疲劳寿命具有可靠、稳定的预测能力。



(a) 测试集预测结果



(b) 测试集误差

图 12 PI-TCN 模型测试结果

Fig. 12 Test results of the PI-TCN model

表 5 部分测试样本的预测误差

Tab. 5 Prediction errors of selected test samples

编号	真实值	预测值	误差/%
1	5.30×10^5	5.40×10^5	1.89
2	1.22×10^6	1.13×10^6	-7.38
3	2.22×10^6	2.14×10^6	-3.60
4	1.70×10^6	1.67×10^6	-1.76
5	5.10×10^5	5.20×10^5	1.96
6	1.95×10^6	1.94×10^6	-0.51

3.4 模型拟合与泛化性能分析

本文选取 TCN 与 PI-TCN 两种模型的训练集和测试集决定系数 R^2 曲线进行对比分析，如图 13 所示。 R^2 能够反映模型预测值与真实值之间的拟合程度，其数值越接近 1，说明模型对疲劳寿命演化规律的解释能力越强。由图 13(a)可知，在训练初期，两种模型的 R^2 均快速上升，说明 TCN 结构能够有效学习裂纹尺寸、荷载水平及耦合应力比等输入特征与疲劳寿命之间的非线性关系。随着训练轮次增加，PI-TCN 模型的训练集 R^2 逐渐稳定在约 0.96 以上，整体高于普通 TCN 模型，且曲线波动幅度更小。这表明在 TCN 时

序特征提取基础上引入 Paris 裂纹扩展定律后，模型训练过程更加稳定，对疲劳损伤演化规律的拟合能力得到增强。由图 13(b)可知，在测试集上，PI-TCN 模型同样表现出更优的预测性能。普通 TCN 模型的测试集 R^2 稳定后约为 0.94~0.95，而 PI-TCN 模型的测试集 R^2 稳定在约 0.96 附近，说明 PI-TCN 在未参与训练的样本上仍能保持较高拟合精度。相比纯数据驱动 TCN，PI-TCN 通过物理残差约束限制了模型在极端或稀疏样本区域的非物理波动，使预测结果更加符合疲劳裂纹扩展的力学规律。

综合训练集与测试集结果可以看出，PI-TCN 模型不仅在训练阶段具有更强的拟合能力，而且在测试阶段保持了较好的泛化性能。其原因在于，TCN 的因果空洞卷积结构能够捕捉长周期车-温耦合作用下的时序损伤特征，而 Paris 定律的嵌入进一步保证了裂纹扩展过程的物理一致性。因此，PI-TCN 模型能够有效提升 RD 节点疲劳寿命预测的准确性、稳定性和工程可靠性。

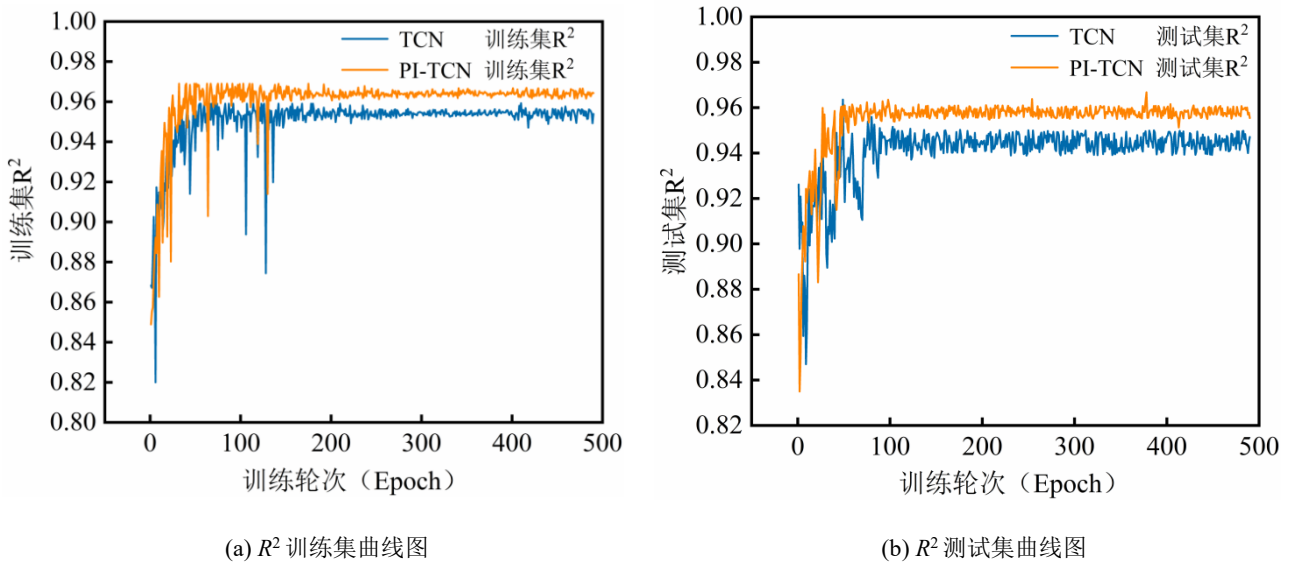


图 13 TCN 与 PI-TCN 模型 R^2 曲线对比

Fig. 13 Comparison of R^2 curves between TCN and PI-TCN models

4 结论

本研究围绕正交异性钢桥面板 RD 节点在车辆-温度耦合作用下的疲劳寿命预测问题，提出了一种数据-物理双驱动的 PI-TCN 寿命评估方法，主要结论如下：

1) 基于 ABAQUS-FRANC3D 联合仿真，建立了包含裂纹尺寸、等效循环应力幅、环境温度及耦合应力比等参数的疲劳裂纹扩展数据集，实现了不同车-温耦合工况下 RD 节点裂纹扩展状态与疲劳寿命之间的定量表征。

2) 针对车-温耦合作用下疲劳裂纹扩展序列的长时依赖特性，本文采用 TCN 因果空洞卷积结构，在保证时序因果关系的同时有效扩大网络感受野，使模型能够兼顾局部荷载波动与长期疲劳损伤累积效应，在车-温耦合条件下能够更稳定地表征裂纹状态与疲劳寿命之间的非线性关系。

3) 基于物理信息神经网络 PINN 思想，将 Paris 定律作为物理残差嵌入 TCN 损失函数，构建 PI-TCN 数据-物理双驱动模型。该模型以断裂力学规律约束寿命预测，有效抑制纯数据模型的非物理波动；验证集平均绝对误差低于 10 万次， R^2 约为 0.96，表明其兼具较好的预测精度与物理一致性，可为车-温耦合作用下钢桥面板疲劳寿命快速评估提供参考。

参考文献:

- [1] 田亮, 董熠鑫, 肖飞知, 等. 基于结构应力法的钢-UHPC 组合桥面板 RD 节点疲劳性能分析 [J]. 华东交通大学学报, 2025, 42 (2): 54-65.
Tian Liang, Dong Yixin, Xiao Feizhi, et al. Fatigue performance analysis of RD welded joint in steel-UHPC composite bridge deck based on structure stress method [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (2): 54-65.
- [2] 施鑫磊. 车—桥—温度耦合作用下拓宽桥梁拼接缝力学性能研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
Shi Xinlei. Mechanical properties of widening bridge joints under vehicle-bridge-temperature coupling [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [3] 田亮, 邢守航, 樊立龙, 等. 模拟轮载作用下钢桥面板 RD 节点疲劳寿命计算方法对比分析 [J]. 华东交通大学学报, 2023 (4): 76-85.
Tian Liang, Xing Shouhang, Fan Lilong, et al. Comparative analysis of fatigue life calculation methods for rib-to-deck joints in steel bridge decks under simulated wheel load [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023 (4): 76-85.
- [4] 张清华, 金正凯, 刘益铭, 等. 钢桥面板纵肋与顶板焊接细节疲劳裂纹扩展三维模拟方法 [J]. 中国公路学报, 2018, 31 (1): 57-66.
Zhang Qinghua, Jin Zhengkai, Liu Yiming, et al. 3-D simulation method for fatigue crack propagation in rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (1): 57-66.
- [5] 田亮, 邢守航, 樊立龙, 等. 移动荷载作用下正交异性桥面板应力响应分析 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41 (7): 47-55.
Tian Liang, Xing Shouhang, Fan Lilong, et al. Stress response analysis of orthotropic steel bridge deck under moving load [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41 (7): 47-55.
- [6] 张海萍, 刘扬, 罗媛, 等. 车-温度荷载耦合作用下悬索桥钢桥面板疲劳寿命评估 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35 (5): 41-52.
Zhang Haiping, Liu Yang, Luo Yuan, et al. Fatigue life assessment of the steel deck of suspension bridge under vehicle-temperature load coupling [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35 (5): 41-52.
- [7] 熊勋, 杨莹, 汪舟, 等. 基于 FRANC3D 和 ABAQUS 联合仿真三维疲劳裂纹扩展分析及寿命预测 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2020, 44 (3): 506-512.
Xiong Xun, Yang Ying, Wang Zhou, et al. Three-dimensional fatigue crack propagation analysis and life prediction based on co-simulation of FRANC3D and ABAQUS [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44 (3): 506-512.
- [8] 白文畅, 袁周致远, 吉伯海, 等. 钢桥面板顶板-U 肋焊缝裂纹萌生特征及扩展规律 [J]. 华东交通大学学报, 2024, 41 (1): 20-29.
Bai Wenchang, Yuan Zhouzhiyuan, Ji Bohai, et al. Study on crack initiation characteristics and propagation laws of U rib-to-DeckWeld joint of orthotropic steel bridge decks [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41 (1): 20-29.
- [9] Xiong Wei, Long Xiangyun, Bordas S P A, et al. The deep finite element method: a deep learning framework integrating the physics-informed neural networks with the finite element method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2025, 436: 117681.
- [10] 玄俞峰, 刘嘉. 基于机器学习的正交异性钢桥面板-U 肋双裂纹疲劳扩展寿命研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2025, 47 (8): 41-49.
Xuan Yufeng, Liu Jia. Fatigue propagation life study of dual cracks at deck-U-rib joints in orthotropic steel bridge decks based on machine learning [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2025, 47 (8): 41-49.
- [11] 郁胜. 公路桥梁监测数据孪生车流和温度作用模型与疲劳评估方法 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Yu Sheng. Digital twin models of traffic flow and ambient temperature action monitoring data and fatigue evaluation methods for highway bridges [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [12] Nie Lei, Wang Wei, Deng Lu, et al. ANN and LEFM-based fatigue reliability analysis and truck weight limits of steel bridges after crack detection [J]. Sensors, 2022, 22 (4): 1580.
- [13] Zhang Zhizhuo, Zhang Mengchuang, Li Yan, et al. Vision-driven and Bayesian-enhanced YOLO-PINN hybrid framework for crack propagation and fatigue life prediction [J]. International Journal of Fatigue, 2026, 207: 109511.
- [14] 鲁乃唯, 戴歆文, 王鸿浩, 等. 钢桥面板焊缝多疲劳裂纹耦合扩展试验 [J]. 中国公路学报, 2024, 37 (5): 267-277.

- Lu Naiwei, Dai Xinwen, Wang Honghao, et al. Experimental study on coupled propagation of multiple fatigue cracks in weld seam of steel bridge decks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37 (5): 267-277.
- [15] 滕华俊. 钢箱梁温度场及正交异性钢桥面板构造细节热应力研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- Teng Huajun. Research on temperature field of steel box girder and thermal stress of structural details of orthotropic steel deck [D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [16] 江琪, 张辉, 徐其波, 等. 正交异性钢桥面板与铺装一体化耦合受力特性研究 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2026, 39 (1): 39-46.
- Jiang Qi, Zhang Hui, Xu Qibo, et al. Study on the integrated coupling mechanical properties of orthotropic steel bridge deck and pavement [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2026, 39 (1): 39-46.
- [17] 鲁乃唯, 余孟南, 王凯, 等. 考虑轮载横向分布的钢桥面板疲劳裂纹随机扩展路径 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (3): 155-164.
- Lu Naiwei, Yu Mengnan, Wang Kai, et al. Random propagation path of steel bridge deck fatigue crack considering wheel load transverse distribution [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42 (3): 155-164.
- [18] 李德权, 江涛. 基于 TCN-Informer 的长短期多变量时间序列预测 [J]. 科学技术与工程, 2026, 26 (4): 1549-1557.
- Li Dequan, Jiang Tao. Long-and short-term multivariate time series forecasting based on TCN-informer [J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26 (4): 1549-1557.
- [19] 郝艳军, 董红霞, 徐婷, 等. 基于 TCN-LSTM-Attention 模型的桥梁挠度预测 [J]. 科学技术与工程, 2026, 26 (3): 1259-1268.
- Hao Yanjun, Dong Hongxia, Xu Ting, et al. Bridge deflection prediction based on TCN-LSTM-attention model [J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26 (3): 1259-1268.
- [20] 季瑞童, 高振兴, 张琳, 等. 基于 TCN-LSTM 与层次化注意力机制的机组疲劳预测 [J]. 南京航空航天大学学报 (自然科学版), 2025, 57 (6): 1212-1221.
- Ji Ruitong, Gao Zhenxing, Zhang Lin, et al. Fatigue prediction for flight crews using TCN-LSTM with hierarchical attention mechanism [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57 (6): 1212-1221.
- [21] 苏庆田, 刘凤瑶, 史占崇, 等. 钢-UHPC 组合桥面板焊钉-钢板连接处钢板疲劳行为: 失效机理与寿命预测 [J]. 中国公路学报, 2025, 38 (11): 21-33.
- Su Qingtian, Liu Fengyao, Shi Zhanchong, et al. Fatigue behavior of steel deck at stud-to-deck welded connections in steel-UHPC composite bridge decks: failure mechanism and life prediction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38 (11): 21-33.
- [22] 肖新辉, 陈方怀, 张海萍, 等. 考虑残余应力的钢桥面板-肋双面焊裂纹应力强度因子计算方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (2): 810-821.
- Xiao Xinhui, Chen Fanghuai, Zhang Haiping, et al. Calculation method of stress intensity factor for crack of rib-to-deck double-sided welded joints in steel bridge deck considering residual stress [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55 (2): 810-821.
- [23] Tan Dongmei, Luo Hao, Li An, et al. Analysis of crack geometry effects on fatigue crack propagation in orthotropic steel bridge decks based on fracture mechanics [J]. Welding in the World, 2026, 70 (5): 1791-1809.
- [24] Xiang Cheng, Wang Dalei, Wang Benjin, et al. Numerical simulation of root-deck crack propagation of orthotropic steel bridge deck [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2022, 18 (7): 1076-1090.



通信作者: 田亮(1984—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。研究方向为高性能钢桥结构、钢桥疲劳与断裂。