告别千次迭代！机器学习模型让缺口构件疲劳分析提速千倍

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/43020.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

告别千次迭代！机器学习模型让缺口构件疲劳分析提速千倍。航空、汽车、桥梁与基础设施的结构安全，核心取决于对疲劳寿命的可靠评估。结构上的孔洞、圆角、沟槽等缺口部位天然存在应力集中，是疲劳裂纹萌生的高发区。缺口根部材料进入屈服阶段后的弹塑性应力-应变状态，是决定裂纹起裂与扩展速率的核心指标。要精准获得这一指标，工程界长期面临快不准、准不快的两难困境。

经典的缺口根部近似法（NRAs）通过能量平衡公式，直接由线弹性应力推算弹塑性结果，计算速度快，但在多轴应力、应力梯度陡峭、平面应变等复杂工况下误差可超过20%~30%。高精度的有限元（FE）分析可以精细刻画几何与塑性行为，但单次弹塑性仿真的计算量较近似方法高出几个数量级；而现代概率化设计需要考虑材料性能离散、加工公差、载荷波动，往往要运行数千乃至上百万次计算，有限元的计算成本会高到难以承受。

近日，越南胡志明市理工大学土木工程学院Nam VU-BAC团队在中国工程院Engineering集群分刊ENGINEERING Structure and Civil Engineering上发表题为Probabilistic analysis of elastic – plastic stress in notched components via machine learning的研究论文，提出了一种面向缺口构件弹塑性应力概率分析的机器学习代理建模框架。

该研究将机器学习代理模型与缺口力学相结合，通过线弹性应力直接预测非线性弹塑性响应，在避免传统迭代求解的同时实现高精度概率评估，并识别出影响应力响应的主导参数，为缺口构件的大规模可靠性分析与初步设计提供了一种高效、可解释的新方法。

梯度提升模型精度最高

研究团队采用拉丁超立方抽样生成10000组样本，覆盖应力状态、材料性能、几何特征共8项输入参数的真实工程波动范围，所有样本均通过经有限元验证的缺口近似方法生成标签，确保训练数据的物理合理性。研究团队对比了四种主流机器学习算法的预测效果：深度神经网络（DNN）、随机森林（RF）、梯度提升（GB）、支持向量机（SVM）。结果显示，梯度提升模型精度最高，测试集拟合优度R^2达到0.9853，预测误差控制在输出范围的2%以内，精度与有限元处于同一水平；深度神经网络紧随其后，随机森林表现稳健，支持向量机在该问题上精度相对较低。

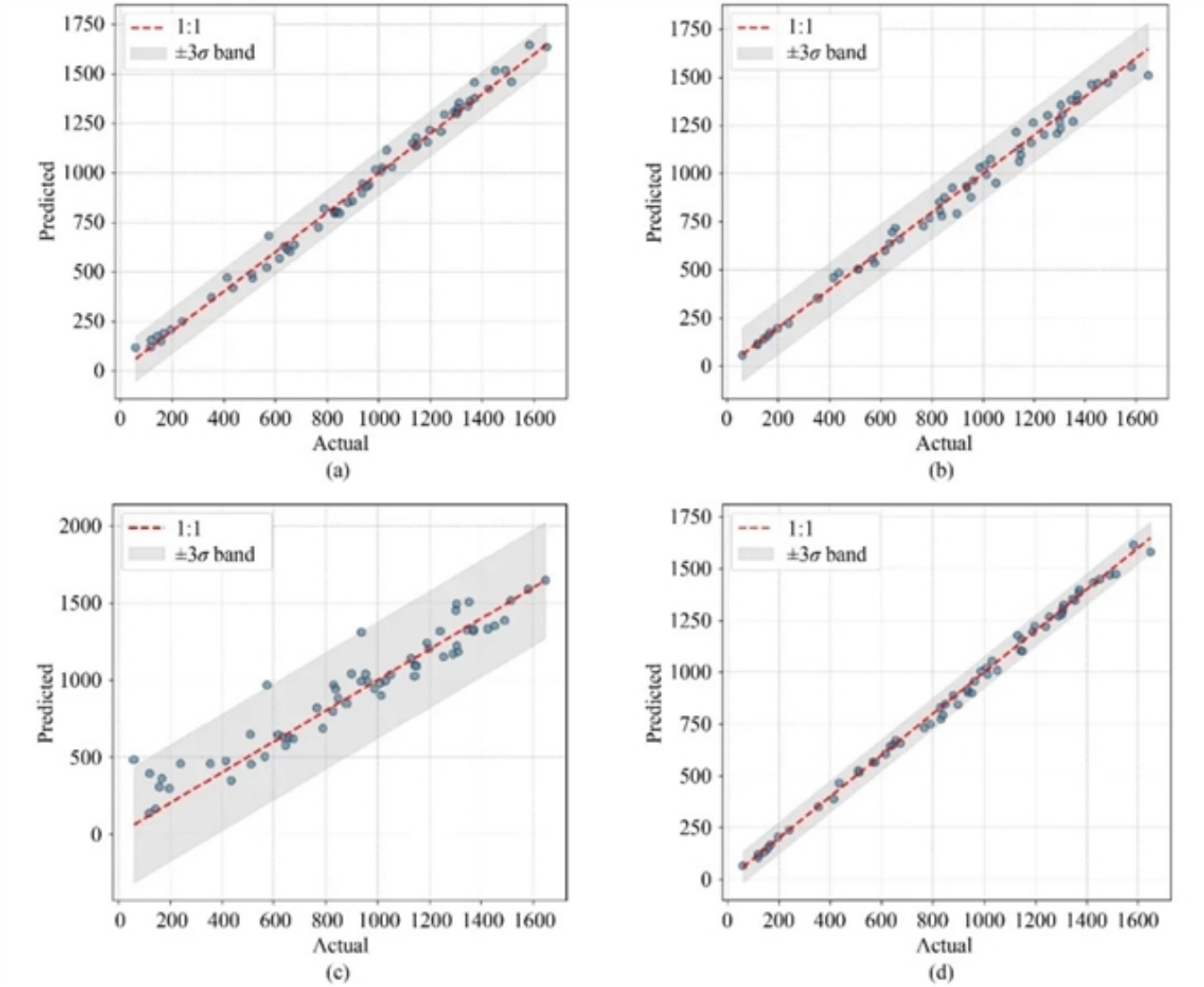


图1.不同回归模型下的预测值与实际值对比,(a) DNN；(b) RF；(c) SVM；(d) GB

线弹性冯?米塞斯应力与循环硬化系数贡献90%的结果波动

更具工程实用价值的是，研究借助代理模型的高效计算能力，完成了基于方差的Sobol全局敏感性分析，量化了每项输入参数对最终弹塑性应力的影响权重。结果显示：线弹性冯?米塞斯应力与循环硬化系数两个参数，合计贡献了约90%的结果波动；而循环硬化指数、几何多轴度、应力梯度等其余6项参数，各自贡献占比均不足3%。这意味着在初步设计阶段，工程师应重点把控弹性应力水平与材料硬化性能这两项核心指标，以便有效把握缺口处的弹塑性响应，大幅简化设计流程。

Parameter	$\widehat{S_I}$	$\widehat{S_{T_I}}$
σ_{el}	0.538	0.543
K'	0.361	0.368
n_0	0.021	0.023
h	0.018	0.019
κ	0.016	0.017
χ^*	0.011	0.012
K_p	0.009	0.010
E	0.008	0.009

图2.一阶与总效应Sobol敏感性分析

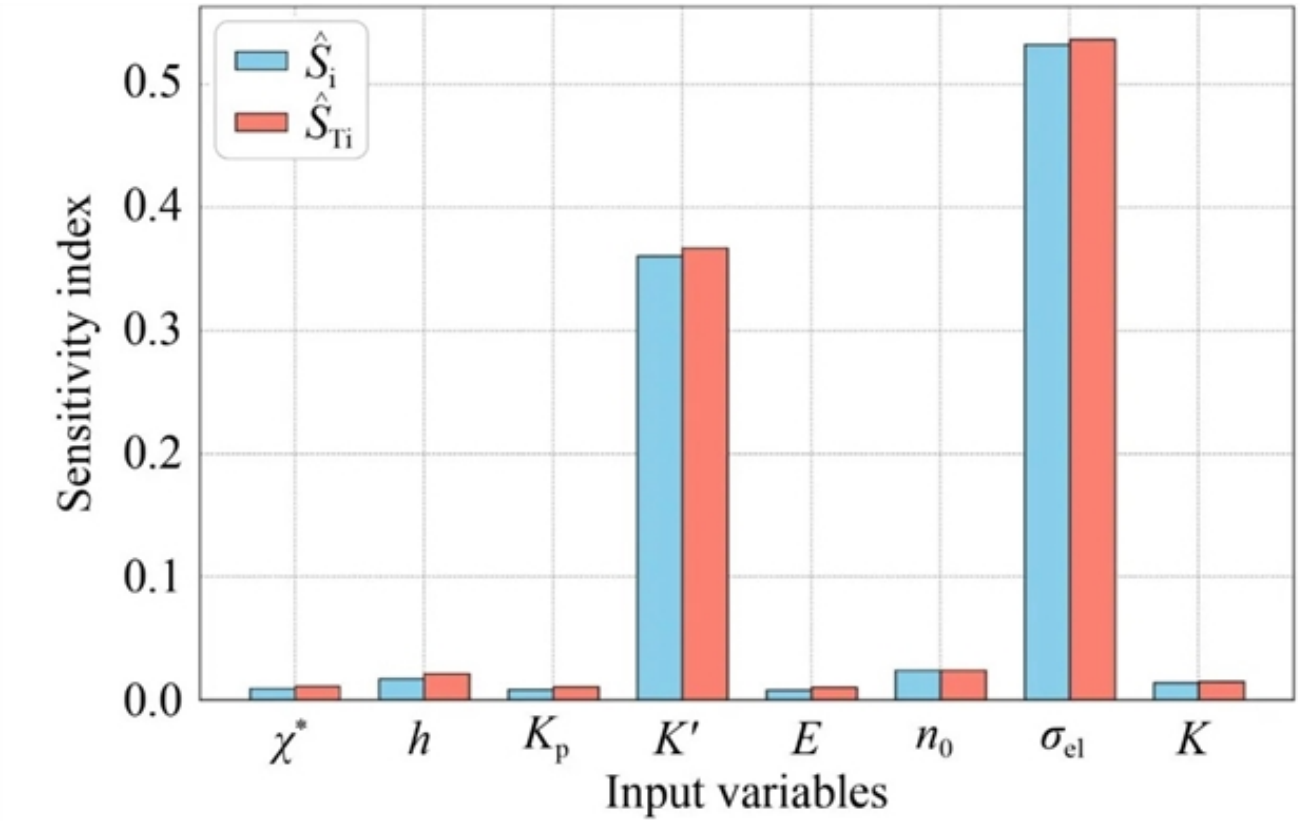


图3.各输入参数的一阶与总效应敏感性指数（K ’为循环硬化系数， σ el为线弹性冯 · 米塞斯应力）

助力十万、百万级别蒙特卡洛概率可靠性分析

这套代理模型的核心价值，是把原本需要反复迭代、校验收敛的弹塑性求解过程，转化为毫秒级的直接计算，同时消除了迭代不收敛的风险。这实现了十万、百万次级别的蒙特卡洛概率可靠性

分析，而这类大规模随机分析正是现代结构疲劳定寿、安全认证的核心需求。与纯黑箱机器学习模型不同，该方案的输入特征全部来自力学理论，模型可解释性强，结论符合经典缺口力学规律，既保留了物理根基，又实现了计算效率的数量级提升。

研究同时指出，当前模型基于输入参数相互独立的假设，且训练数据局限于缺口近似方法的有效域内。后续工作可引入考虑参数相关性的抽样方法，也可直接用高精度有限元数据训练模型，进一步拓展适用工况与材料范围。

（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：https://journal.hep.com.cn/fsce/EN/10.1007/s11709-026-1280-1

作者：Nam VU-BAC 来源：《工程 · 结构与土木工程》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发