

基于不完备监测响应的桥梁连续损伤场反演

郭佳佳

湖北交投智能检测股份有限公司 湖北 武汉 430051

【摘要】：桥梁监测中，传感器故障可能造成响应通道缺失，影响损伤判断。本文先用多尺度卷积和回声状态网络补全缺失响应，再将补全结果、缺失掩码及传感器坐标输入 iFNO，得到沿桥梁纵向分布的刚度折减场。三跨桥梁模型试验中，重构结果保留了主要时频信息；在多通道缺失和噪声干扰下，模型仍能识别主要损伤区域。

【关键词】：桥梁健康监测；缺失响应重构；回声状态网络；连续损伤场；傅里叶神经算子

DOI:10.12417/3041-0630.26.10.002

1 引言

桥梁服役环境较为复杂，车辆通行、温度变化和材料老化都会引起结构响应变化。工程中通常利用加速度、应变等传感器连续记录运行数据，为桥梁状态判断和养护安排提供依据^[1]。随着监测数据增多，数据驱动方法也开始用于桥梁分析^[2]。不过，设备故障或通信异常会造成局部数据缺失，严重时甚至丢失整个通道，使原有时序关系和测点间关联受到破坏。

现有研究多以波形误差评价补全效果，较少分析重构响应能否继续用于损伤定位和程度量化。传统损伤识别依赖模态频率、振型和刚度变化，容易受到环境与运营条件干扰。车桥耦合指标、元学习和深度网络已用于损伤识别或信号重构^{[3][4][5]}，但多数模型输出预设类别或少量参数，难以描述未知位置、多处损伤和具有空间宽度的损伤区域。因此，本文将不完备响应重构与连续损伤场反演相结合。

2 连续损伤场反演方法

所提方法如图1所示，包括多维多尺度卷积增强回声状态网络（MDSC-ESN）和逆向傅里叶神经算子（inverse Fourier neural operator, iFNO）两部分。前者恢复缺失响应，后者将有限测点响应映射为沿桥梁纵向分布的刚度折减场。

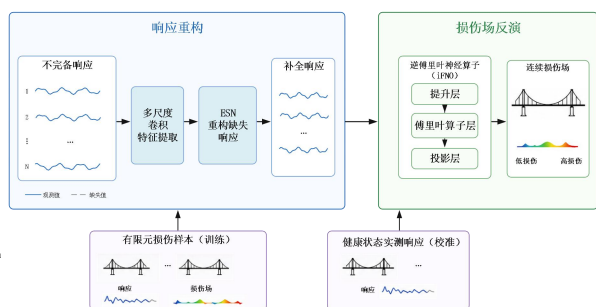


图1 基于不完备监测响应的桥梁连续损伤场反演框架

2.1 不完备响应重构

将多通道响应组织为“传感器通道×时间”矩阵，设置时

间、空间及时空三个卷积分支，分别提取多尺度动态、相邻测点关联和联合时空变化。三类特征拼接后与原始可观测响应共同输入回声状态网络。

回声状态网络通过随机稀疏储备池保留历史信息，主要训练输出映射参数。网络预测缺失响应后依据二值掩码选择性融合：可观测位置保留原始测量值，缺失位置采用预测值，从而避免改变有效数据，并为后续反演保留数据来源信息。

2.2 连续损伤场反演

将补全响应、缺失掩码和归一化传感器坐标联合编码。掩码区分实测值与重构值，坐标赋予通道空间含义。联合特征经提升层进入傅里叶算子层，频域分支学习全局关联，局部分支保留邻域细节。投影层输出44个单元中心的刚度折减值，并线性插值形成连续损伤场，其分辨率由单元尺寸决定。

训练分三步：利用完整实测响应构造缺失模式并训练 MDSC-ESN；固定重构模块，以有限元响应—损伤场样本预训练 iFNO；利用健康实测响应校正输出基线。

3 试验设置

试验采用三跨桥梁模型数据，桥梁由两个6m边跨和一个10m中跨组成，沿纵向布置5个加速度传感器AR1—AR5，采样频率为100Hz。信号经10Hz低通滤波，并划分为长度1000的窗口。

设置R1—R4整通道缺失任务：R1保留AR1—AR4，R2保留AR1—AR3，R3保留AR1、AR2，R4仅保留AR1。有限元模型以0.5m为单元划分44个单元，通过降低杨氏模量模拟10%~50%、宽1~5个单元的损伤。共构造600个状态，每个状态施加3组随机车辆激励，形成1800组样本。数据按70%、15%和15%划分，同一损伤场的3组激励位于同一子集。

4 结果与分析

在R1任务中，MDSC-ESN重构AR5的平均MSE为0.0039，标准ESN为0.0057，误差降低31.6%。重构响应能够

跟随真实响应的主要时域变化，主要频率峰值位置也基本一致，说明多尺度卷积增强了局部动态和跨测点关联特征的表达。

不同输入条件下的损伤场反演结果见表1。完整响应条件下，损伤场MSE为0.00036，MAE为0.0078，平均位置误差为0.28个单元。在表中R1和R4任务下，补全响应均优于直接使用不完备响应。

表1 不同输入条件下的连续损伤场反演结果

任务	输入条件	损伤场 MSE	损伤场 MAE	位置误差/单元
完整条件	完整响应	0.00036	0.0078	0.28
R1	补全响应	0.00043	0.0085	0.34
R1	不完备响应	0.00067	0.0107	0.51

参考文献：

[1] 王凌波,王秋玲,朱钊,等.桥梁健康监测技术研究现状及展望[J].中国公路学报,2021,34(12):25-45.

[2] 孙利民,尚志强,夏烨.大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J].中国公路学报,2019,32(11):1-20.

[3] 阳洋,许文明,谭小琨,等.基于车桥耦合振动的统计矩曲率梁式桥损伤识别研究[J].中国公路学报,2024,37(3):308-320.

[4] 王磊,黄杜康,马亚飞,等.基于元学习的结构损伤定位与量化[J].中国公路学报,2024,37(11):38-51.

[5] 陈鑫婷,张军,鲁东明,等.基于多头卷积自编码器的桥梁结构信号重构与损伤识别方法研究[J].振动与冲击,2025,44(6):298-305.

R4	补全响应	0.00102	0.0138	0.81
R4	不完备响应	0.00197	0.0219	1.46

注：MSE、MAE 按全部测试样本计算，位置误差仅统计损伤样本。

R4 任务中，响应补全后 MSE 由 0.00197 降至 0.00102，MAE 由 0.0219 降至 0.0138，位置误差由 1.46 降至 0.81 个单元。说明补全数据仍保留了损伤反演所需的信息。信噪比为 10 dB 时，MSE 为 0.00196，位置误差为 1.37 个单元，主要损伤区域仍可定位。

5 结论与展望

本篇文章采用 MDSC-ESN 恢复缺失响应，利用 iFNO 反演连续损伤场。实验中，将补全响应与缺失掩码、传感器坐标共同输入后，严重通道缺失时的损伤程度和位置误差均有所下降。下一步将增加桥型和长期实测数据，考察模型在不同监测条件下的稳定性。