Data-Centric Engineering (2026), 1–
23 doi:10.1017/xxxx

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

数据文章

结构健康监测中损伤识别的数值基准

Francesca Marafini[1], Giacomo Zini[1], Alberto Barontini[2], NunoMendes[3], Alice Cicirello[4], Michele Betti[1] 和 Gianni Bartoli[1]

[1]佛罗伦萨大学土木与环境工程系（DICEA），佛罗伦萨，意大利[2]基耶蒂-佩斯卡拉大学工程与地质系（InGeo），佩斯卡拉，意大利[3]米尼奥大学土木工程系，吉马良斯，葡萄牙[4]剑桥大学工程系，剑桥，英国 *通讯作者。电子邮箱：francesca.marafini@unifi.it

收稿日期：2026年3月4日；**修回日期：**-；**录用日期：**-

关键词： 合成数据、环境与运行变异性、快速变化损伤、缓慢变化损伤、传感器故障

arXiv:2603.12069v1 [cs.DB] 12 Mar 2026

摘要

目前，缺乏可用于验证新型数据驱动策略和/或物理-数据混合方法的数据集，是工程领域面临的最紧迫挑战之一。数据所有权、安全性、访问权限和元数据的易用性，目前正阻碍着许多领域的发展，尤其是结构健康监测（SHM）应用的发展。本文提出了一个模拟的结构健康监测数据集，其中包含动态和静态测量数据（即加速度和位移），并介绍了用于生成该数据集的概念框架。模拟测量数据的生成纳入了环境与运行变化（EOVs）、不同类型的损伤、测量噪声以及传感器故障和失灵的影响，以涵盖实际采集过程中可能出现的情景。数值基准测试选用一根两端固定钢梁结构作为参考。模拟监测分别基于单自由度（SDOF）假设生成加速度记录，以及基于欧拉-伯努利梁假设生成模拟位移测量数据。生成过程采用了并行计算，相关细节已在所提供的开源代码中说明。生成的数据也以开源形式提供，从而确保后续研究的可复现性、可重复性和可访问性。对数据类型、格式和采集方法的全面描述，使该数据集成为致力于开发或改进结构健康监测技术的研究人员的重要资源，并通过易于获取的高质量合成数据推动该领域的发展。

影响声明

所提出的基准测试旨在支持在完全明确且可控的环境中，对结构健康监测方法进行可比性评估。它通过将真实损伤敏感性与其他模拟效应（也称为混杂影响）区分开来，使系统性测试成为可能；在真实数据中，这些影响可能会模拟或掩盖损伤的存在。此外，它还可用于量化系统对传感器故障和失灵的鲁棒性，并支持重复开展消融研究，在数据模拟中纳入或排除单一效应。配对的动态和静态记录还有助于实现异构数据融合，并对不同响应类型进行一致性检查。由于该基准测试经过参数化且可复现，因此可作为报告性能和不确定性的共同参考，促进数据驱动、基于物理和混合方法之间更公平的比较，并加快各类损伤识别方法从数值测试向实验和真实场景测试的迁移。

© 作者，2020年。本文为开放获取文章，依据知识共享署名许可（http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）发布，允许在任何媒介中不受限制地再使用、分发和复制，但须适当引用原作。

1. 引言

结构健康监测（SHM）方法日益广泛地应用于结构和基础设施的智能管理，旨在以预防性的高性价比方式维护关键资产。尽管过去几十年来，监测、数据分析和预测方面的许多工具已相继问世，但由于现有开放获取基准数量有限且存在诸多局限，利用大型且贴近现实的数据集验证和测试这些工具的性能，仍然是一项艰巨任务。真实数据存在由环境与运行变异（EOVs）引起的固有变化，例如温度波动和使用方式变化。此外，监测数据还可能受到其他不确定性和误差来源的影响，例如传感器故障或失灵。这些因素相互叠加，有时还彼此依存，可能妨碍结果的可解释性，并掩盖短期内的损伤效应（或快速变化损伤，即短期内导致性能骤降的损伤）以及长期内的损伤效应（缓慢变化损伤，例如结构随时间自然老化所致）。为在受控条件下评估结构健康监测技术，研究人员开发了众多实验基准，例如著名的Z24桥梁 [1] 和Hawk T1A飞机 [2]。对真实原型造成损伤以生成大量带标签数据，受时间和经济条件限制，因此近年来人们转而采用数值基准。这些基准通常从简单的机械系统表述入手 [3]，或扩展现有实验装置 [4],，主要侧重于损伤情景的模拟。部分研究纳入了环境变化 [5] 和长期损伤效应 [6],，但仅限于特定情况，且从未与传感器故障结合。表1）[1]汇总了目前文献中所有近期数值基准研究。本文介绍一个合成生成的数据集，旨在提供真实、可控且全面的结构健康监测数据，并涵盖上述所有效应。最终数据集及其生成代码均以开源形式提供，用于测试和基准评估损伤识别方法，并应对合成结构健康监测数据生成中的关键开放挑战。

2. 方法

2.1. 框架

结构健康监测数据的数值生成采用了一种直接且可扩展的方法，基于一个简单但信息丰富的案例研究，以平衡真实性与计算效率。考虑了一种通用的结构健康监测设置，其中可以识别出三个主要要素：结构系统 $H(t)$具有时变属性，输入激励 $x(t)$，以及测量响应 $y(t)$ 由 $x(t)$ 通过 $H(t)$ 的传递而产生（见图 1）。在真实数据中，可以观察到众多影响（记为$Z(t)$) 作用于这三个组成部分中的每一个，例如系统属性的变化（如随温度变化的材料变化），或输入性质的变化（如激励变异），或采集条件的变化（如传感器漂移或电子设备退化），并被测量响应所捕获。此类效应通常被称为混杂影响，因为它们可能在测量响应中掩盖或模仿损伤。在本研究中，混杂影响被建模为影响系统、输入或测量响应的时变协变量向量。[2]

假设该系统在监测期内为线性时变系统。研究采用单输入单输出构型，并监测一个自由度（DOF）。作为参考案例，选取了一根承受变化静荷载和环境振动激励的两端固定钢梁。通过挠度测量监测该梁，以获取其静态响应；通过加速度信号获取其动态响应。

[1]对于表1）中带星号*的研究，数据同样来自实验；若作者姓名带有下划线，则数据或用于生成这些数据的模型可供公众使用。[2]在此语境中，变异性是指参数波动（如运行变异性（OV）和环境变异性（EV）），而变化则指由此产生的结构响应变化（例如刚度变化引起的频率偏移）。

表 *1.* 选定的数值结构健康监测基准测试概述

Ref.	Year	结构	目标	OVs	FAST
[3]	1996	多自由度系统（MDOF）机械系统	新颖性检测使用传递率函数作为一种特征	谐波激励	1%、10%和50%刚度降低
[7]*	1999	SAC第二阶段钢框架	试验控制策略	地面加速度	刚度降低对应于18%的降低频率
[8]	2002	IASCE–ASCE结构健康监测2×2跨钢框架	地震结构健康监测方法评估方法	白高斯噪声（WGN），振动器	6种情景，包括拆除支撑杆或螺栓松动
[9]*	2003年 IABMAS	跨桥桥梁	测试损伤检测算法	白高斯噪声，锤子冲击，振动器	刚度降低，边界状态变化
[10]	2017	两个偏移悬臂梁	复杂非线性动力学系统识别	载荷幅值变化	无损伤情景
[5]	2019	两跨钢梁	验证决策工具	WGN，确定性的移动荷载	6种情景，包含刚度降低
[6]	2021	风力涡轮机叶片	状态评估一片风力涡轮机叶片	转子速度变化	裂缝开口模拟为局部刚度降低
[11]	2021	两层钢框架结构采用 Bouc–Wen滞回连接件	验证SHM，模型降阶，and结构识别方法	地震动激励场景	强度和刚度退化Bouc–Wen模型参数变化
[4]*	2022	钢桁架桥（Hell桥测试场）	混合结构健康监测用于钢桥上的损伤识别	WGN	刚度降低连接部位

虽然此处以梁作为具体案例研究，但基准生成流程具有通用性，可扩展至其他结构构型和更多影响因素。在所有可能相互作用、共同影响结构健康监测数据的 $Z_{\!\!\!

- 突发损伤（FAST）的影响，在数据中表现为阶跃变化，并建模为刚度降低 $d_{快速}$；
- 渐进性损伤（SLOW）的影响，通过逐渐减小梁截面面积、刚度和质量来模拟加速腐蚀 $d_{缓慢}$；
- 系统传感器故障和失灵（SF/M）的影响，在模拟数据（sfm）生成后施加。

图中定性展示的模拟效应1 在设计设置中被模拟为作用于输入、结构系统参数或测量输出。虚线标出了混杂影响被模拟为间接作用的情形，例如，控制缓慢损伤演化的环境参数，或影响运行条件的同一演化过程。模拟监测覆盖了三年时间跨度，可表征缓慢过程（季节性周期、长期趋势）以及间歇性或突发事件（运行变化、快速损伤、传感器故障）。对于静态监测，生成了跨中挠度的单值每小时采集数据，以模拟长期位移记录；对于动态监测，生成的合成数据由 3 分钟加速度时程组成，用以模拟 AV采集。在此框架中，采用两种模型计算系统响应：用于静态响应的欧拉-伯努利梁模型，以及用于动态响应的线性单自由度（SDOF）模型。

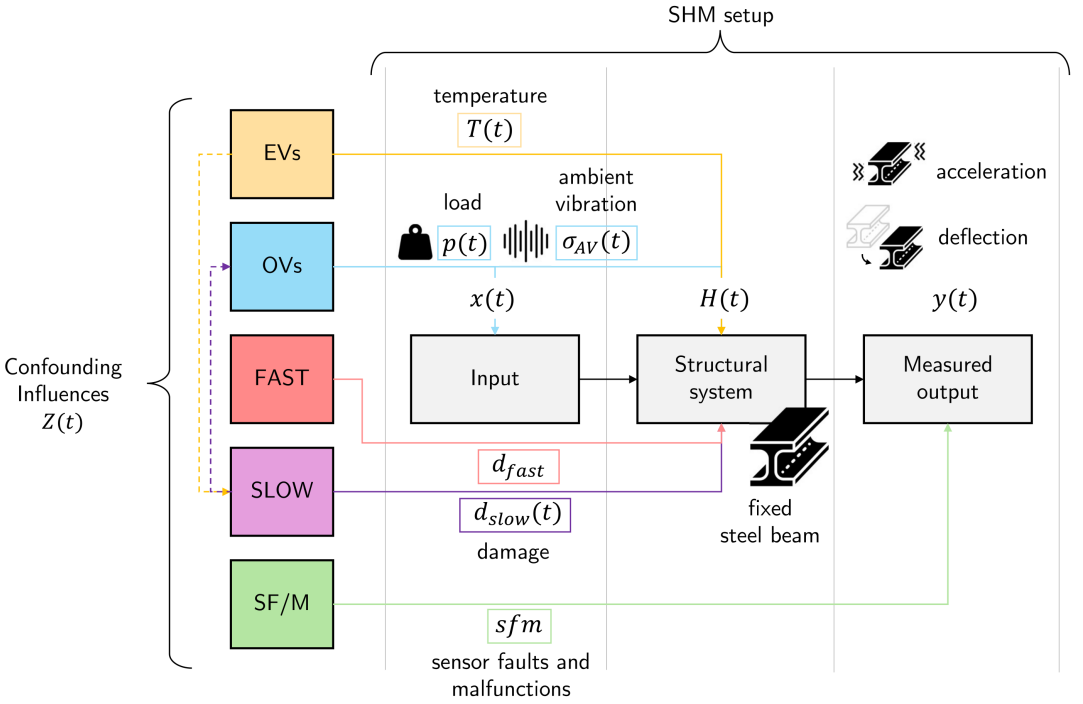

图*1*。 为基准测试选定的简化结构健康监测设置表示，以及作用于结构健康监测系统的建模的混杂影响因素 *Z(t)* 的示意表示。

图 2 所示的动态响应模拟公式中，所考虑的单自由度刚度为梁弯曲刚度 k，其取决于以下因素：边界条件 ρ；弹性模量 E，而弹性模量又取决于随时间变化的温度$T(t)$ 以及截面惯性矩 I，后者受 FAST 和 SLOW 变化损伤的影响，这些损伤由施加的突发刚度骤降

和横截面积的逐渐减小所引起（损伤模拟见第 3.6.3.1 节和第 3.6.3.2 节）。质量 m 则不受环境变量影响，仅受缓慢施加活荷载所产生的变异性影响，并略受 SLOW 损伤影响，这是由于体积损失导致横截面减小。环境激励 σ_{AV} 随时间的变异性施加于输入端，而 SF/M 则仅施加于测量输出端。输出加速度取决于上述所有参数。相比之下，挠度是根据欧拉-伯努利理论在跨中（$L/2$）处计算的，与施加的静荷载（OVs）成正比，与梁弯曲刚度成反比，因此取决于环境变量（影响杨氏模量）以及影响 I 的 FAST 和 SLOW 变化损伤（图3）。

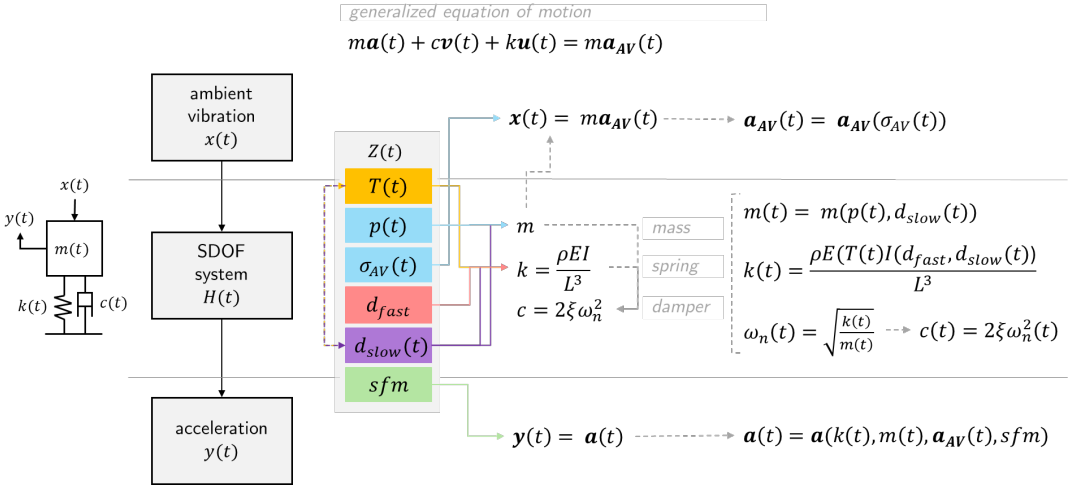

图*2.* 包含混杂影响的单自由度公式。

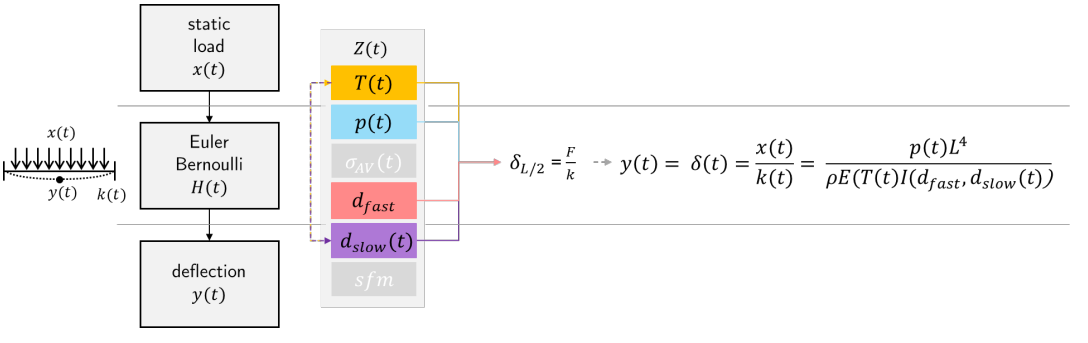

图*3.* 采用欧拉-伯努利并包含混杂影响的跨中挠度计算。

从图中使用的时变符号表示法2 和 3出发，通过离散化连续时间公式，描述混杂影响的级联效应。生成每次采集时，考虑了有限个每小时的时刻，并假设这些时刻的模拟效应（以协变量参数表示）保持不变（即假设温度在单个 3 分钟加速度信号内不发生变化）。因此，在 3 年

监测期内生成的每小时采集离散序列，按 $i = 1, \ldots, n_a$ 编号（n_a = 次采集）。每次动态采集表示为一个加速度向量 $\mathbf{a}_i \in \mathbb{R}^{n_s}$，其中 n_s 为每次采集中的样本数。每次静态测量模拟表示为标量 $\delta \in \mathbb{R}^1$。

对于每次每小时采集 i，基准数据生成的设置旨在模拟温度变异性 T_i、运行载荷 p_i以及两类损伤效应的累积影响：$d_{\text{FAST},i}$ 表示突发事件（例如，表明快速损伤发生的刚度衰减），$d_{\text{SLOW},i}$ 表示渐进性损伤（例如，腐蚀）；此外还包括传感器故障或失效（记作 sfm_i），用于捕捉与结构健康状态本身无直接关系的数据异常，且仅在生成的加速度 a_i 事后施加。还纳入了 ε_i 一项，以考虑采集 i过程中可能出现的随机误差或噪声，并将其建模为白高斯噪声（WGN）。如式 1 和式 2 所示，所有这些效应均以每个采集层级的协变量向量合成表示；这两个公式对定性模型进行了形式化描述，说明每次采集如何取决于其协变量。混杂影响的级联效应也通过离散化连续时间公式来表示。每次采集均基于有限的每小时时间点生成，并假设以协变量参数表示的模拟效应在这些时间点保持恒定（即，不考虑温度在单个 3 分钟加速度信号内发生变化）。因此，在 3 年监测期内生成的每小时采集离散序列以 $i = 1$、.....、 n_a（n_a = 次采集）为索引。每次动态采集表示为一个加速度向量 $\mathbf{a}_i \in \mathbb{R}^{n_s}$，其中$n_s$ 为该次采集中的样本数。每次静态测量的模拟结果表示为标量 $\delta \in \mathbb{R}^1$。在每次每小时采集 i中，基准数据生成设置旨在模拟温度变异性 T_i、运行载荷 p_i以及两类损伤效应的累积影响：$d_{fast,i}$ 表示突发事件（例如，表明快速损伤发生的刚度衰减），$d_{slow,i}$ 表示渐进性损伤（例如，腐蚀）；此外还包括传感器故障或失效（记作sfm_i），用于捕捉与结构健康状态本身无直接关系的数据异常，且仅在生成的加速度 i 事后施加。还纳入了 ε_i 一项，以考虑采集 i 过程中可能出现的随机误差或噪声，并将其建模为白高斯噪声（WGN）。如式 1 所示，所有这些效应均可合成为每个采集层级的协变量向量；式 2 则对定性模型进行了形式化描述，说明每次采集如何取决于其协变量。

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_i^{(\text{dyn})} &= \left[T_i,\ p_i,\ \sigma_{\text{AV},i},\ d_{\text{fast},i},\ d_{\text{slow},i},\ sfm_i\right], \\ \mathbf{z}_i^{(\text{stat})} &= \left[T_i,\ p_i,\ d_{\text{fast},i},\ d_{\text{slow},i}\right]. \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} a_i &= f\left(\mathbf{z}_i^{(\text{dyn})}\right) + \varepsilon_i, \\ \delta_i &= f\left(\mathbf{z}_i^{(\text{stat})}\right) + \varepsilon_i. \end{aligned} \tag{2}$$

2.2. 局限性与适用性

合成数据生成过程模拟了加速度时程和位移数据，并假设存在温度测量。所得数据集包含一个人工数据集，其中包含异构数据，类似于环境、静态和动态监测系统所能获取的数据集。然而，关于静载荷施加和损伤状态的假设限制了数据集的全面性。目前，该基准测试未考虑与材料属性、几何形状、约束条件相关的非线性，也未考虑对前述条件以外的运行和环境条件的依赖性。我们有意采用了一些简化处理：首先假设材料行为为线性；忽略板在弯曲时的刚度贡献；仅通过经验关系模拟温度对钢材刚度的影响，而未考虑其他环境驱动因素，以及因几何特性导致的暴露条件差异和热响应差异所产生的可能耦合效应。不确定性仅针对

活荷载过程采用概率方法处理；几何形状、材料属性和约束条件的不确定性则未进行传播。这些都是经过权衡的选择，旨在以可复现的方式生成信息丰富的带标签数据。环境激励的建模未纳入更先进的效应，例如模拟人员在板上行走、风效应，以及微震动和地震活动的影响。尽管该数据集具有很高的真实度，仍可通过若干扩展来纳入更复杂的因素并引入更丰富的不确定性，例如：增加支座处的接触/滑移等非线性；采用随机过程作为环境激励，并依据实测的室内/室外活动、风、微震动和附近交通数据进行校准；完善与环境变量的关系，以纳入温度梯度、膨胀对几何形状的影响，以及使用人数较多时由质量决定的刚度变化；在SF/M模拟中加入维护事件；最后，将结构配置扩展为多自由度模型，并模拟加速度计阵列，从而能够使用振型和模态柔度矩阵作为损伤敏感特征。不过，开源代码为未来的扩展提供了机会。总体而言，该数据集是一个全面且可公开获取的基准测试，可推动结构健康监测研究，并用于测试损伤检测算法，适用于学术和实际场景。

3. 基准设计

3.1. 几何形状、材料和约束条件

用于生成模拟监测数据的基准结构选用一根 IPE400 钢梁，支承一块不参与截面刚度的混凝土板。假设该梁属于一座位于佛罗伦萨、用于住宅用途的结构，并且两端均为固支。梁的左端和右端支座分别标记为 A 和 B。为兼顾真实性和计算效率，定义了几何尺寸、材料参数、边界约束和荷载条件。表2从几何形状、材料、荷载和边界条件方面展示了用作初始参考的结构特性。

3.2. 运行条件

引入静态活荷载变化，以模拟正常使用中的变异性以及特殊拥挤事件所引起的动态行为波动，并通过结构质量的变化予以体现。由自重产生的永久荷载 p_G通过确定性计算得出，并在整个监测期内保持不变。相反，活荷载 p_Q 并非视为时不变荷载（如表3所示），而是根据结构安全联合委员会（JCSS）的《概率模型规范》 [12]采用概率模型进行建模。活荷载由两个部分组成：持续（长期）部分$p_{Q,\,lt}(t)$ 以及间歇（短期）部分$p_{Q,\,st}(t)$，以反映使用人数的变异性和可能发生的拥挤事件。结构所承受的总荷载根据正常使用极限状态（SLS）组合 [13],按照式3）定义。

$$p_{des}(t) = 1.0\,p_G + 1.0\big(p_{Q,lt}(t) + p_{Q,st}(t)\big). \tag{3}$$

持续荷载$p_{Q,\,lt}(t)$ 被视为泊松方波平稳过程，其强度取自伽马分布$i_{lt,\,k} \sim$ 伽马$(\alpha,\ \beta)$，并在占用情况变化之间保持恒定。参数 α 和 β分别为伽马分布的形状参数和率参数，根据均值和方差计算得出 $m_{lt} = \frac{\alpha}{\beta}$，$\sigma_{lt}^2 = \frac{\alpha}{\beta^2}$。均值 $\underline{m}_{lt}$ 和方差 $\underline{\sigma}_{lt}$ 根据 [8] 中的公式(2.2)和(2.3)选取，参数取自 [12] （另见公式4和表3）。方差根据公式4定义：

$$\sigma_{\mathrm{lt}} = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_u^2\,\kappa\,\frac{A_0}{A}}, \tag{4}$$

表 2. 几何形状、材料属性和约束条件

描述	符号	数量	单位 [ ]
几何形状			
A到B的长度	L	6000	mm
梁分担面积	A_s	$30 \cdot 10^6$	mm^2
混凝土板的厚度	t_s	180	mm
IPE400截面	A	84。$46 \cdot 10^4$	mm^2
截面高度	h	400	mm
翼缘宽度	b	180	mm
腹板厚度	t_w	8.60	mm
翼缘厚度	t_f	13.50	mm
强轴惯性矩	I_{xx}	231。$30 \cdot 10^6$	mm^4
弹性截面模量	W_{el}	$1156 \cdot 10^3$	mm^3
塑性截面模量	W_{pl}	$1307 \cdot 10^3$	mm^3
材料			
钢材杨氏模量	E_0	210000	MPa
S235钢屈服强度	σ_y	235	MPa
钢材分项安全系数	γ_s	1.05	» ...
S235钢屈服设计强度	f_{yd}	$\sigma_y/\gamma_s = 223.9$	MPa
钢材密度	d_s	7850	kg/m^3
钢筋混凝土密度	d_c	2500	kg/m^3
约束条件			
水平位移受约束	x_A, x_B	0	m
竖向位移受约束	y_A, y_B	0	m
支座约束转角	ϕ_A, ϕ_B	0	rad
参考恒定荷载			
梁自重	p_b	0.65	kN/m
板自重	p_s	22.07	kN/m
非结构恒载	p_{G2}	6.0	kN/m
结构总恒载	p_{G1}	$= p_b$, $p_s = 22。72$	kN/m
总恒载	p_G	$= p_{G1}, p_{G2} = 28.72$	kN/m
参考时不变活荷载	p_Q	15.0	kN/m

其中， κ 表示影响线形状系数（假定为1）， A_0/A 为参考面积与分担面积 A 之比（其中 $A > A_0 = 20$米^2）。

持续荷载变化之间的时间间隔通过从指数分布中抽样计算得出。用于表示变化率的指数分布的均值和方差（$m = \frac{1}{\lambda}$ 和 $\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}$）根据更新率 λ 计算得出，该更新率也见表 [12]。

间歇荷载 $p_{Q,\ st}(t)$ 则被建模为泊松尖峰非平稳过程，其强度同样假定服从伽马分布（均值 m_{st} 见表 3 ，方差σ_{st} 由式5 给出），并采用指数分布定义发生时间。

$$\sigma_{st} = \sqrt{\sigma_u^2 \kappa \frac{A_0}{A}}. \tag{5}$$

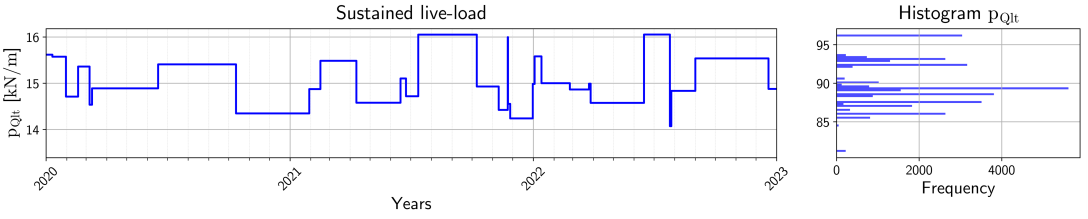

图*4.* 随时间变化的施加活荷载变异性的模拟。

用于间歇荷载的指数分布尺度参数被定义为每年发生次数的倒数（ν）。每次间歇荷载事件的持续时间被视为常数，并设定为5天。生成的荷载剖面绘制于图4。最后，为验算所设计的梁，在同时考虑承载能力极限状态（ULS）和针对不可逆效应的正常使用极限状态（SLS）时，[13] 被纳入考虑（见表3）。

在模拟期间内，将两个活荷载分量合并，以表示总活荷载 [14, 15]。请注意，所选的间歇荷载发生率显著高于 [8]，中建议的值，持续荷载的均值和变化率也经过了调整（在表4 中以删除线和高亮标示）。这些调整旨在更好地符合数据生成目标：模拟现实的运行变化范围，同时使永久荷载与活荷载之比保持在计算所得的参考范围内；而 JCSS 指南旨在针对极限状态超越进行可靠度分析。

表*3.* 住宅类别所用活荷载参数。相对于 *[12]*，中报告的建议值，部分参数进行了调整，括号内为建议值

描述	符号	数量	单位 [ ]
参考最小影响面积	A_0	20	m^2
荷载强度均值（长期）	m_{lt}	3„0.3”	千牛/米²
全局荷载强度标准参数（长期）	σ_ν	0.15	千牛顿/米²
局部荷载强度标准参数（长期）	σ_u	0.3	kN/m²
持续荷载强度标准参数	σ_{lt}	0.07	kN/m²
更新率倒数	$1/\lambda$	10„7”	year
平均荷载强度（短期）	m_{st}	0.3	千牛/米²
荷载强度标准参数（短期）	σ_U	0.4	千牛/米²
荷载强度（短期）标准差	σ_{st}	0.03	千牛顿/米²
年发生次数的倒数	$1/\nu$	0.2„1”	year
间隔持续时间强度	d_p	5	days

3.3. 环境条件

钢的杨氏模量 E 在每次模拟中均按照方程6）进行变化，其中 E_0 是 E 在 20°C下的参考值，T^* 是表面温度，α_T 是用于缩放温度效应的放大参数。常数 e_1、e_2、e_3和 e_4 通过实验获得，实验地点为 [16]。

$$E(T) = E_0\,(1 - \alpha_T \cdot T^*)\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T^*}{e_3}\right)^{e_1} - \frac{1}{2}\left(\frac{T^*}{e_4}\right)^{e_2}\right] \tag{6}$$

温度时间序列取自佛罗伦萨大学结构与材料测试实验室附近一台传感器的记录。为凸显温度的影响，

表4。 选定剖面的活荷载极值及正常使用极限校核

描述	符号	数量	单位 [ ]
最大持续活荷载	$p_{Q\mathrm{lt,max}}$	16.05	kN/m
最小持续活荷载	$p_{Q\mathrm{lt,min}}$	13.51	kN/m
最大间歇活荷载	$p_{Q\mathrm{st,max}}$	4.18	kN/m
最小间歇活荷载	$p_{Q\mathrm{st,min}}$	0.00	kN/m
最大活荷载	$p_{Q,\mathrm{max}}$	最大值($p_{Q,}$,t”) = 19.11	kN/m
最小活荷载	$p_{Q,\mathrm{min}}$	min($p_{Q,}$,t”) = 11。51	kN/m
平均活荷载	$p_{Q,\mathrm{avg}}$	平均值（ p_Q“t”） = 15。01	kN/m
与永久荷载的最大比值	$\frac{p_{Q,\mathrm{max}}}{p_G}$	67.29	%
与永久荷载的最小比值	$\frac{p_{Q,\mathrm{min}}}{p_G}$	47.83	%
极限状态下的最大总荷载	$p_{\mathrm{des,ULS,max}}$	67.20	kN/m
ULS最大作用弯矩	$M_{A,\mathrm{ULS}}$	201.60	kN m
p_Q引起的最大挠度	$\delta_{\mathrm{des},Q,\mathrm{max}}$	1.32	mm
ULS平均设计荷载	$p_{\mathrm{des,ULS}}$	61.04	kN/m
SLS平均设计荷载	$p_{\mathrm{des,SLS}}$	43.72	kN/m
抗弯矩	M_R	$W_{\mathrm{el}} \cdot f_{yd} = 258.84$	kN m
极限状态作用弯矩	$M_{A,\mathrm{ULS}}$	$\frac{p_{\mathrm{des,ULS}} L^2}{12} = 183。12$	kN m
p_G的挠度限值	$\delta_{\mathrm{lim},G}$	$\frac{L}{250} = 24$	mm
p_Q的挠度限值	$\delta_{\mathrm{lim},\ Q}$	$\frac{L}{300} = 20$	mm
p_G导致的最大挠度	$\delta_{\mathrm{des},G}$	$\frac{p_G L^4}{384\, E\, I_x} = 1。99$	mm
p_Q导致的最大挠度	$\delta_{\mathrm{des},\ Q}$	$\frac{p_Q L^4}{384\, E\, I_x} = 1。04$	mm

采用了一个放大参数（$\alpha_T = 0。0015$ 见式6），以增强环境变异性对杨氏模量的影响（见图5）。应用该放大处理后，固有频率的变异性与文献中的数值及实际案例研究中的观测结果相符。

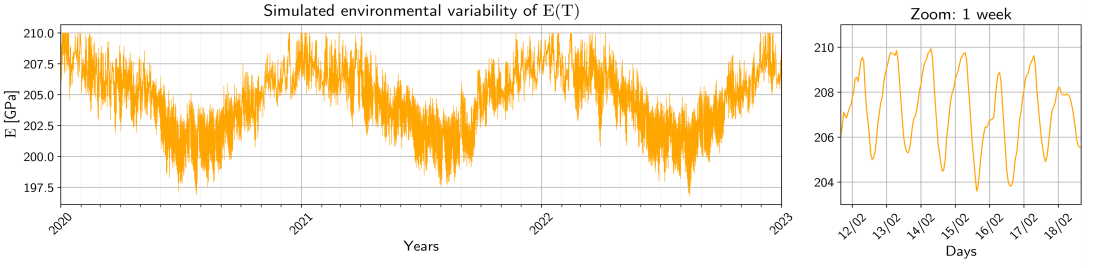

图5。钢的杨氏模量随温度变化的模拟变异性。

3.4. 动态与静态响应

在动态响应模拟中，利用两个带通滤波器针对特定频带，以模拟人类活动和车辆交通的影响。为区分这两种作用，在每个监测（采集）小时内生成两个高斯输入，其标准差在特定范围内随机采样（见表5），经滤波后叠加，从而得到 ω_{AV}输入。示例见图6。

表5. 环境振动模拟

描述	符号	数量	单位
采样频率	f_s	100	Hz
信号长度	l_s	180	s
时间间隔	dt	0.01	s
频率分辨率	Δf	0.0056	Hz
人机交互	f_{range}	$1.2 - 4.8$	Hz
	σ_{range}	$5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-4}$	m/s^2
交通	f_{range}	$7 - 15$	Hz
	σ_{range}	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$	m/s^2

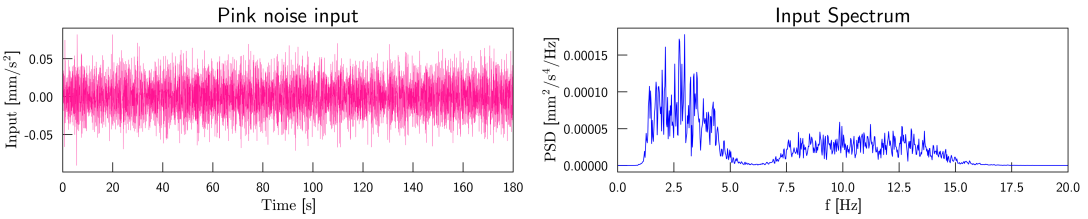

图6. 用于环境振动模拟的彩色输入示例。

采用状态空间方法求解运动方程，以计算单自由度系统的结构动力响应；其中，等效刚度根据 E 计算，因此取决于温度， $k(T(t))$；等效质量根据时变施加静载荷计算， $m(l(t))$；阻尼系数为 $c(c = 2\zeta m\sqrt{k/m}$其中 $\zeta = 5\%)$，输入振动定义为 ω_{AV}。该方法允许加入测量噪声 ω_M，尽管当前的数据生成过程中并未引入噪声。状态变量位移 $x_1 = x(t)$ 和加速度 $x_2 = \dot{x}(t)$代入运动方程后，得到一个由两个一阶微分方程组成的系统（见式 7）。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} (\omega_{\text{AV}}\, m) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \omega_M \tag{7}$$

经验证，模拟生成的最大加权加速度符合人体舒适度限值，适用于昼间和夜间振动，依据 UNI 9614–2017 [17] 和 ISO 2631–2014 [18]。

对于静态响应仿真，计算了参考固支-固支欧拉-伯努利梁在时变均布荷载作用下的跨中挠度单值，

静态监测模拟。正常使用极限校核所用的公式也用于生成静态响应（见表 4）。图 7展示了对3年监测期间模拟的未损伤状态的挠度结果。

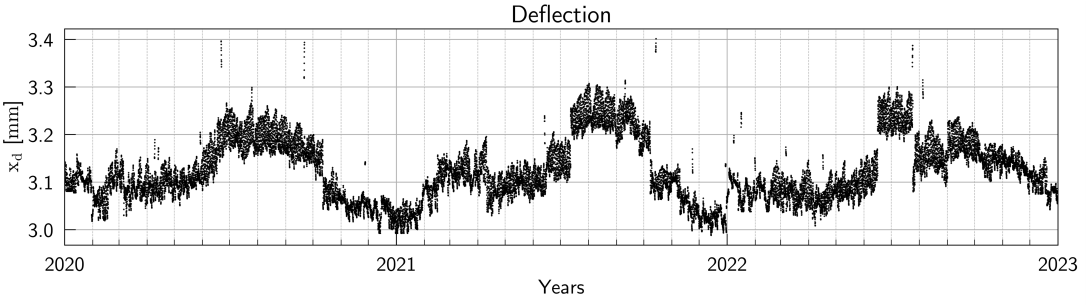

图*7*。 静态监测模拟：考虑环境与运行变化影响的跨中挠度。

3.5. 损伤模拟

损伤可视为一种导致结构系统的初始或未损伤状态发生变化或偏离的现象，从而影响其性能（k_i，m_i 在本研究中）。参照图 2所示的等效刚度公式，损伤被建模为局部刚度降低，以表示连接松动或梁某一特定截面发生局部屈服等情况。假定损伤仅影响 I，其衰减率为 $r = \Delta I / I_{\mathrm{UD}}$，由此相对于未损伤（UD）状态的刚度变化为 $\Delta k = k_{\mathrm{UD}}\, r$。由于固有频率与刚度之间的关系为 $f \propto \sqrt{k}$，相应的频率变化为 $\frac{\Delta f}{f_{\mathrm{UD}}} = \sqrt{r}$。为将施加的刚度降低置于参考截面的力学承载能力范围内，通过比较弹性抗弯矩 $M_{R,\,\mathrm{el}}$与最大作用弯矩 $\max(M_A(t))$，评估塑性极限状态并确定临界衰减率（式 8）。

$$r_{\mathrm{pl}} = \frac{M_{R,\mathrm{el}} - \max(M_A(t))}{M_{R,\mathrm{el}}}. \tag{8}$$

从而得到相应的刚度和频率限值 $\Delta k_{\mathrm{pl}} = k_{\mathrm{UD}} r_{\mathrm{pl}}$ 以及 $\Delta f_{\mathrm{pl}} = f_{\mathrm{UD}} \sqrt{r_{\mathrm{pl}}}$。类似地，假设挠度与刚度成反比，可推导出恒载和活荷载作用下的正常使用极限（$\delta \propto 1/k$）。对于每个挠度限值 δ_{lim}，相应的衰减率由式 9 给出。

$$r_{\mathrm{lim}} = 1 - \frac{\delta_{\mathrm{des}}}{\delta_{\mathrm{lim}}}, \tag{9}$$

由式 9 可直接得出相应的刚度变化和频率变化 $\Delta k_{\mathrm{lim}} / k_{\mathrm{UD}} = r_{\mathrm{lim}}$以及 $\Delta f_{\mathrm{lim}} / f_{\mathrm{UD}} = \sqrt{r_{\mathrm{lim}}}$。这些限值经计算后汇总于图 8。塑性刚度衰减为 $\Delta k_{\mathrm{pl}} = 29。3\%$，而以刚度和频率变化表示的正常使用极限远高于塑性阈值。

3.5.1. 快速变化损伤

根据上述建模方法，模拟了三种突发性快速损伤情形，如第8 节5 生成的数据中所述，见表1% 的 k_i 降幅大致对应于理论固有频率0.5% 的下降 f_n，以及在假设刚度损失按惯性减少建模时，跨中抗弯矩1% 的变化 M_R。参见图8，所列刚度降幅百分比的选取，旨在将关注的变异性限制在弹性范围内。研究发现，环境与运行变化（EOVs）会导致频率变化，幅度最高约为4% 和6%；

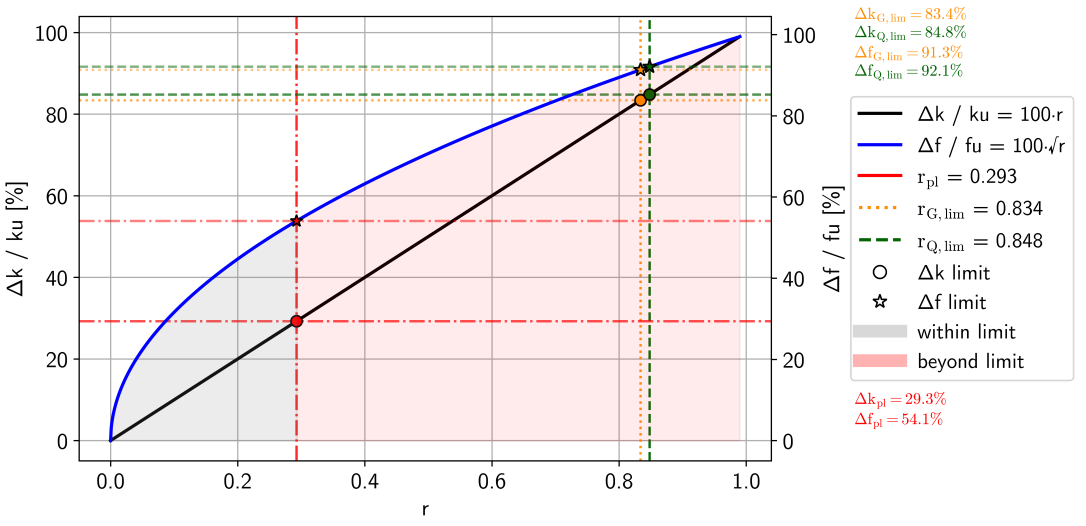

图*8*。 刚度($\Delta k/k_{\mathrm{UD}}$)和频率($\Delta f/f_{\mathrm{UD}}$)随刚度衰减率参数 r 的变化。

分别而言，由于模拟的 FAST 诱导刚度下降会与这些影响累积，因此其幅度通常控制在 28% 以下，只有一个数据集中的少部分数据达到 $\Delta k = 32\% > \Delta k_{\mathrm{pl}}$。这样选择是为了评估损伤接近并最终超过塑性阈值时的可检测性。

3.5.2. 缓慢变化损伤

损伤也被建模为弥散且缓慢变化的过程，以表示腐蚀导致横截面厚度按照预设速率逐渐、均匀地减小。这种渐进的截面损失意味着惯性随之减小，进而导致刚度降低；此外，体积损失也会使质量略有减少。因此，SLOW 损伤表现为等效刚度 k_i 逐步降低，并且在较小程度上，质量 m_i 也会在各次采集中逐渐减少，这反映了结构特性随时间逐渐劣化。

在导致缓慢变化损伤的各种机制中，腐蚀被选为最具代表性的金属部件损伤机制。腐蚀的发展具有非线性特征：早期由于直接暴露于环境因素，腐蚀进展迅速；随后，随着保护性氧化层形成并部分遮蔽表面，腐蚀速度减缓。长期来看，腐蚀程度取决于水和反应性物质通过该氧化层缺陷渗入的情况。为考虑环境影响，采用了 2007 [19] 中提出的关系式，因为该关系式明确描述了腐蚀与环境变量之间的相互作用（见式 10）。

$$d(t) = A \cdot t^{B} \cdot \left(\frac{\mathrm{TOW}}{C}\right)^{D} \cdot \left(1 + \frac{[\mathrm{SO_2}]}{E}\right)^{F} \cdot \left(1 + \frac{[\mathrm{Cl}]}{G}\right)^{H} \cdot e^{J(T+T_0)} \tag{10}$$

腐蚀率参数在公式10中表示，其中：

- d 是以»μm...表示的腐蚀损失，它是 t的函数，即暴露时间»年...；此处将暴露起始时间设定为监测开始后1.5年；
- TOW是年度润湿时间»h/年...，即金属表面保持湿润的时间比例。为简化起见，TOW近似定义为一年内相对湿度高于80%且温度高于 0°C [20] 的总时间；
- SO_2 和 Cl 分别表示非海洋环境中的二氧化硫浓度和氯化物沉积速率；

- $T_{\text{平均值}}$ 表示一年内以 »℃... 为单位的平均温度；
- A，B，D，E，F，G，H，J 以及 T_0 是 [19] 针对当前情况提出并加以调整的系数。

采用的腐蚀性类别为“ISO9223 C3 中等：温带、中度污染” „5 < SO_2,»μg/m^3... < 30”，氯化物影响较低，代表城市或轻度沿海环境。尽管所选模型可能会高估长期腐蚀，但它提供了与环境参数明确关联的关系。根据 2020年 的平均环境值，估算腐蚀速率为 47.03 μm/年 (0.04703 毫米/年)，相当于 3 年监测期内约 0.2 毫米的损失；若暴露 100 年，翼缘厚度损失则为 35%。分析了三种腐蚀情景：估算速率以及加速速率 10× 和 20×, ，并考虑其对质量和刚度的影响。还评估了监测期结束时的抗弯矩：在第一级情景下，结构保持在弹性范围；第二级达到塑性范围；第三级则不满足安全校核要求。

3.6. 传感器故障与失灵模拟

通过在加速度信号中引入典型异常模式，模拟传感器故障或失灵。类似模式也可用于污染整个时间序列中的位移测量，但少数特定于加速度计的故障或失灵除外（例如电缆脱落）。根据文献调研 [21–23]以及作者对实际监测数据的经验，确定了大多数预期故障／失灵（见图 9 ）。图 10 和 10 展示了所有模拟的传感器故障和失灵，并区分为七类传感器故障／失灵（表 6 ）：

1. 漂移（D）：传感器输出随时间逐渐变化；2. 偏置或突变（B）：传感器输出中持续存在偏移，也可能由先前采集中的漂移造成；3. 尖峰（S）：特定时刻出现的高幅值；4. 增益（G）：信号的放大或衰减；5. 噪声（N）：叠加在信号上的高斯噪声；6. 数据缺失（M）：时间序列中出现空缺；7. 电缆脱落（C）：正弦波的幅值快速降低，用于模拟传感器暂时或彻底断连的情况。

表 *6.* 模拟的传感器故障类型

类别	公式		变异范围
D	a_D„τ” = a„τ” , $s_D \cdot \exp(-\frac{\tau}{l_s/10})$, s_D	$\tau \in$»τ_{st}, τ_{end}...	$s_D = 1e^{-3} \div 2e^{-3}$ »m/s^2...
B	a_B“τ” = a“τ” , s_B	$\tau \in$»τ_{st}, τ_{end}...	$s_B = 1.2 \div 1.7$ »米/秒^2...
S	a_S„τ” = a„τ” , $s_S \cdot$ „$\Delta\tau_S$”	$\tau \in$»τ_{st}, τ_{end}...	$s_S = 5e^{-2} \div 5e^{-3}$ »m/s^2..... $\Delta\tau_S = 0.1 \cdot f_s \div 0.2 \cdot f_s$ [–...
G	a_G„τ” = a„τ” $\cdot s_G$	$\tau \in$»τ_{st}, τ_{end}...	s_G = 1。1 ÷ 3。1 »m/s^2...
N	a_N„τ” = a„τ” , η„τ”	$\tau \in$»τ_{st}, τ_{end}...	$s_N = 1e^{-3} \div 1e^{-5}$ »m/s^2...
M	a_M„τ” = 为空或缺失	$\tau \in$»τ_{st}, τ_{end}...	$\tau_{st} = 0.8 \div 0.2\,\Delta t$ [–... f_C = 0。5 ÷ 1。5 »Hz...
CD	a_C„τ” = s_C正弦„$2\pi f_C \tau$” 指数„$-\lambda_C \tau$”	$\tau \in$»τ_{st}, $\Delta\tau_C$...	$s_C = 0.05 \div 0.2$ »米/秒^2... λ_C = 0。02 ÷ 0。05 »1/秒...

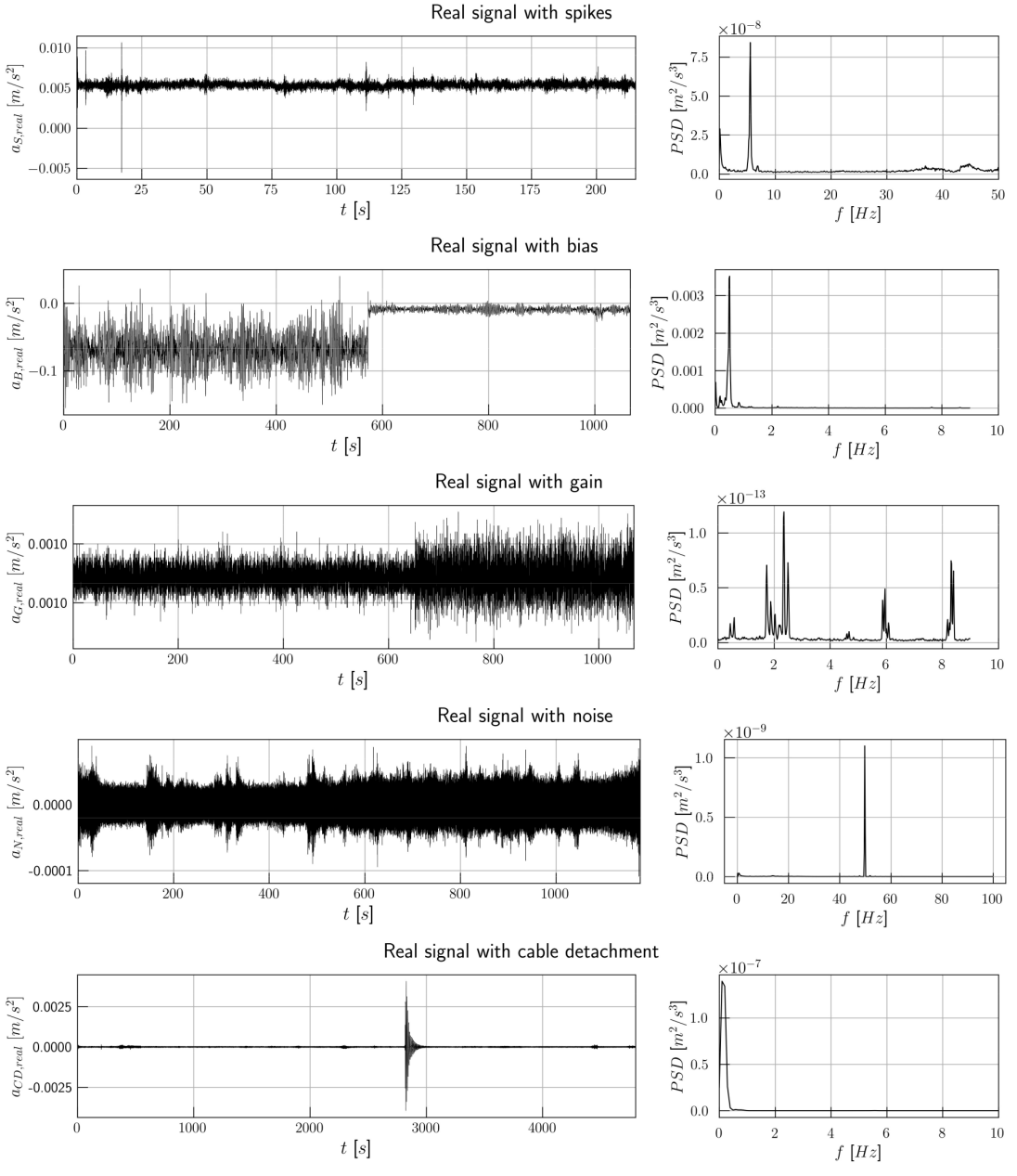

图 **9.** 模拟传感器故障和/或失灵的真实数据采集样本。

部分选定的 SF/M类别可能适用于任何类型的振动传感器，而不受其类型限制；其他类别则仅适用于某些传感器类型（例如，电缆脱落不适用于无线传感器）。这些类别是根据在实际观测数据中的出现频率选定的，同时也旨在获得一组对损伤敏感特征产生不同影响的类别，因为它们在频域和时域中表现出不同的效应。

每种类型的模拟所用数学公式见表 6。在公式中，$a(\tau)$ 表示原始信号，而 $a_*(\tau)$ 表示故障施加后的修改后的信号，其中

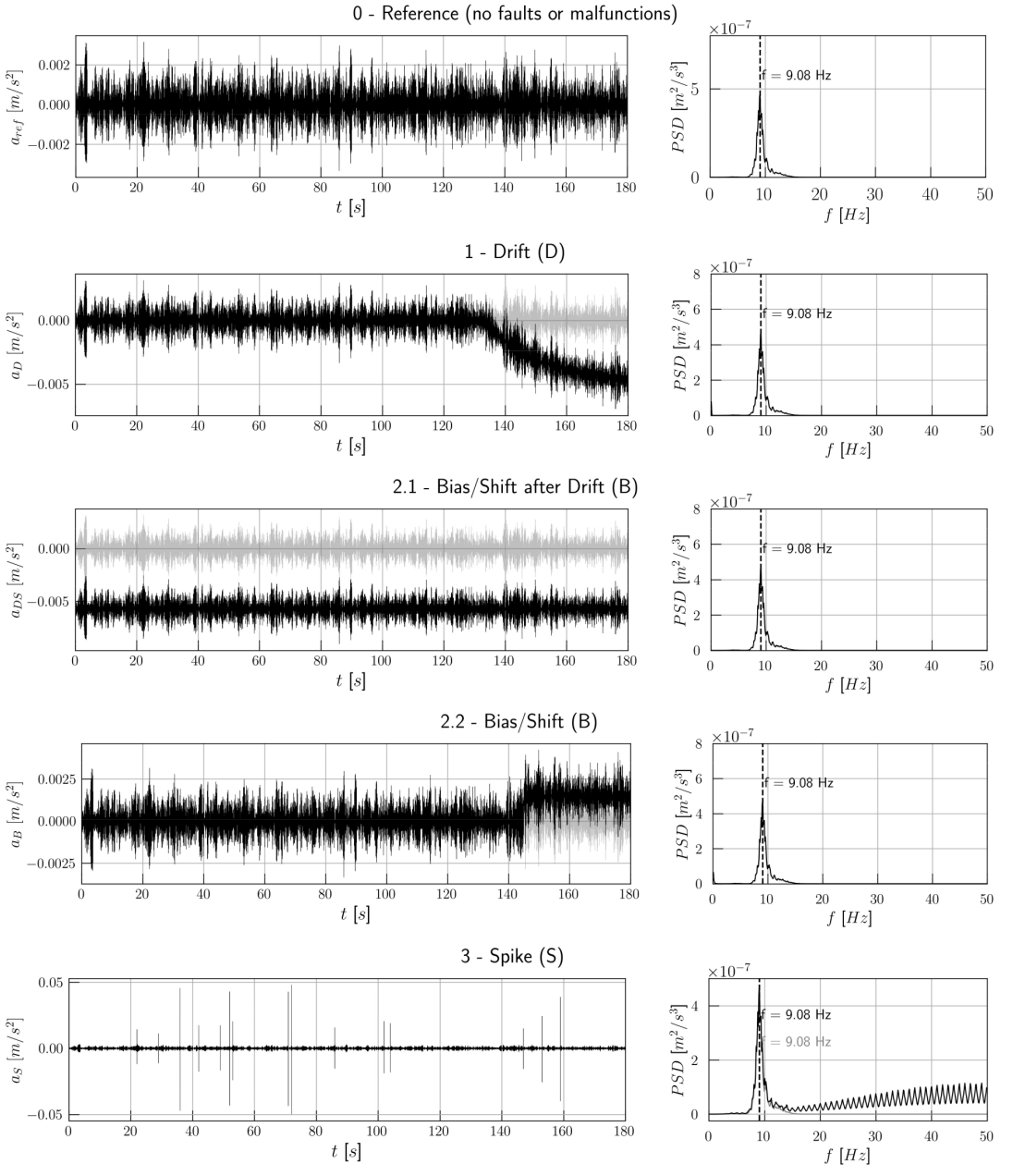

图*10*。按从上到下的顺序生成的 *SF/M* 示例：（*0*）无故障或失灵的参考加速度信号；（*1*）漂移；（*2*）偏置；（*3*）尖峰。每张图均显示时域和频域中的输出。

这些变化取决于每次模拟加速度采集过程中的时间进程 τ，不同于前文所述监测期内的时间进程 t。比例因子s_* 用于量化各类故障的程度，并根据测得的加速度幅值进行校准。 L_s 表示信号长度， t_{st} 标记故障施加或故障发生的起始点，该点随机选取； t_{end} 表示信号时程的终点。具体持续时间为

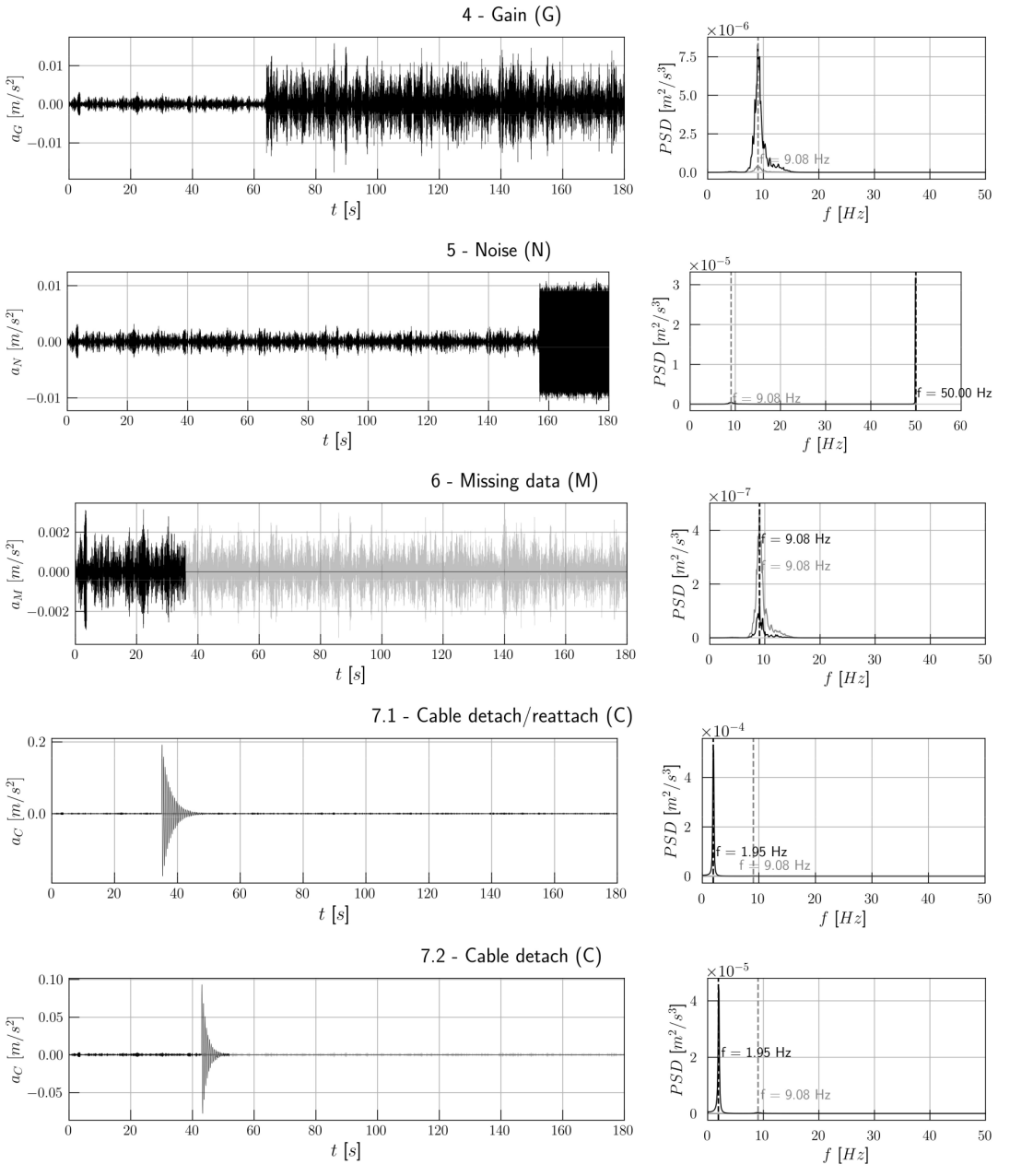

图*11.* 从上到下依次为生成的 *SF/M* 示例：*(4)* 增益、*(5)* 噪声、*(6)* 数据缺失，以及临时（*7.1*）或永久（*7.2*）电缆脱落。每张图均显示时域和频域中的输出。

尖峰和电缆脱落用 Δt_* 表示。高斯噪声 η„τ”以零均值和标准差 s_N 为特征，该标准差反映了传感器噪声水平。在电缆脱落模拟中， s_C定义正弦波的初始振幅， f_C 定义其频率， λ_C 定义其衰减率，因此脱落开始后振幅会迅速下降。尖峰被模拟为单次采集

故障，以及电缆脱落并立即重新连接的情况。所有其他故障均被模拟为持续影响，持续时间为随机选取的 5 至 25 次采集。

4. 数据生成

借助并行计算的能力，该基准测试利用配备 12 个核心、主频为 2.2GHz 的 Intel Core i7-8750H 处理器的算力，使用 Python 3.11，在 2.5 小时内模拟了三年的监测数据，并通过 `Ray` 软件包实现。算法1详细总结了采用并行计算的数据生成过程。所有生成的子数据集类型均列于表 7。生成的输入频谱即使出现极小波动，也可能导致输出频谱产生变化，并影响后续特征提取过程，例如固有频率识别。为减弱这一影响，并将固有误差控制在合理范围内，每次动态仿真最多重复十次，且将模拟的容差阈值设定为参考频率的 1% 。这一数值与提取频率的实际波动相符。如果模拟结果未能达到该范围内的频率，则选取十次迭代中频率值最接近的生成信号。下表 6 详细说明了数据生成所用的算法。

算法 1 通过并行状态空间仿真进行动态数据生成

从矩阵 $M \in \mathbb{R}^{n_a \times 2}$ 中加载 n_{CPUs} 个样本
以小时为间隔生成时间序列，并筛除闰年
设置输入生成、状态空间仿真和频率检查的方法
在 n_{CPUs} 上初始化并行计算
对 每个核心 $c = \text{“}1, \ldots, n_{\text{CPUs}}\text{”}$ **执行**
    选择一个样本 $\text{“}k_i,\ m_i\text{”}$
    当 $n_{\text{sim}} < n_{\text{sim}}^{\text{最大}} = 10$ **时**
        生成长度为 n_s 的输入信号
        应用带通滤波器（人机交互、交通）
        求解 $\text{“}k_i,\ m_i\text{”}$ 的状态空间方程
        计算Welch功率谱密度
        提取主频（功率谱密度峰值）
        if $\frac{f_{n,\text{extr}}}{f_{n,\text{anal}}} < 1\%$ **然后**
            选择加速度并中断
        else
            增量 n_{sim}
        结束 if
    结束 while
    选择与最佳频率对应的加速度
    将选定的加速度写入 HDF5 文件
结束 for
结束并行计算

5. 数据集描述

完整的生成数据集包含 9 个动态和静态合成采集子数据集（见表 7 和图 12）。所有数据和脚本均存储在数据可用性声明中所提供链接指向的数据库中。

参考模拟时间涵盖三年（例如，2020年–2022年）。对于每个采样小时，都会生成模拟加速度响应，形式为时长三分钟、每秒 100 个样本的加速度记录，并附带单个位移值。加速度信号以 HDF5（`.h5`）格式提供，单位为 m/s^2。

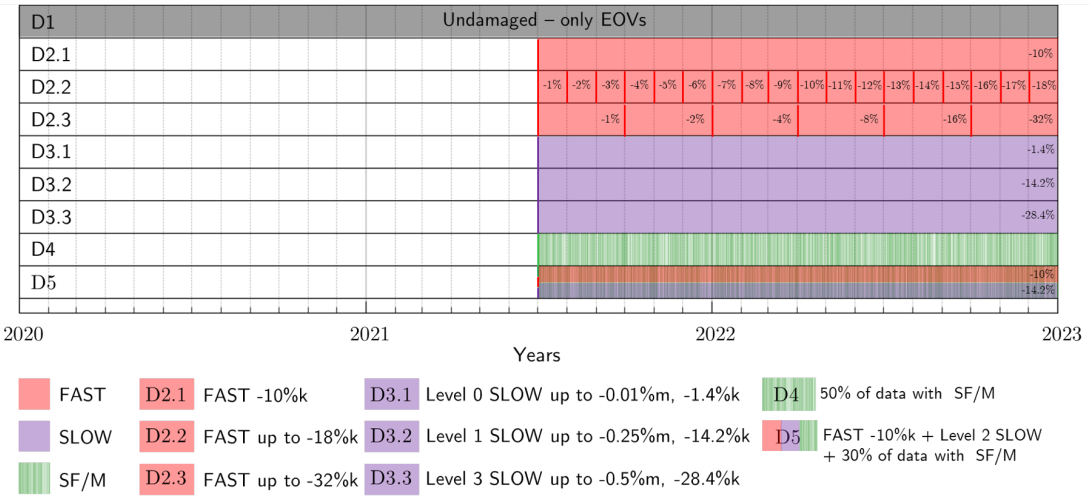

图 ***12.*** 子数据集内容的定性表示（红色为 *FAST*，紫色为 *SLOW*，绿色为 *SF/M*）。

每个加速度文件均按约定 `accXXXXX-YZ.h5`命名，其中 `XXXXX` 是与固定的3年时间序列相对应的五位、零填充数值代码，Y 根据信号所属的子数据集在0到5之间变化，Z 在存在时对应于一个子集备选方案。子数据集2和3均提供三种备选方案，用于模拟不同程度的快速变化和缓慢变化损伤；每种备选方案通过在数据集索引后添加递增数字来表示（即，`acc00000-21.h5` 属于子数据集2的备选方案1）。导入每个 `.h5` 文件时，必须使用名称`acc`。

挠度采集数据以毫米表示，提供于单个文本文件（`deflection_D1-5.txt`）中，并排列为矩阵，每一列对应于子数据集 Y。矩阵的每一列代表一个子数据集（在此情况下，为参考初始时段生成的数据会在每个子数据集中重复）。挠度数据在子数据集4中不发生变化，因为其不被认为受传感器故障或失灵的影响。

第一个子数据集包含完整的时间序列，其中仅体现环境与运行变化对未受损结构的影响。后续每个子数据集均由初始未损伤数据集的一部分生成，并包含以下一种或多种影响：

- 快速变化损伤（FAST）突然作用于数据所产生的影响（阶跃变化），建模为一次或多次刚度（k）骤降。
- 缓慢变化损伤（SLOW）逐渐作用于数据所产生的影响（趋势变化），模拟不同腐蚀率下的加速腐蚀状况，使梁的横截面积减小，从而导致其刚度（k）和质量（m）下降。
- 对模拟的加速度数据事后施加传感器故障和/或失灵（SF/M）的影响。

所使用的时变荷载和温度曲线均已提供，同时还提供了用于生成每个子数据集的一系列 k-m 对（全部以 `.txt` 格式存放于文件夹 `input`中）。最后，还提供了 9 `.txt` 文件

表 7. 生成数据集

代码	描述	模拟效应	持续时间	Num. Acq.	Dim. [GB]
D1	未损伤（UD）	EOVs	3年（2020年1月1日-2022年12月31日）	26280	1.90
D2.1	快速变化损伤（FAST）	1个单步-10% (max 10%)	距今1.5年索引 13104 (2021年7月1日-2022年12月31日)	13176	0.98
D2.2		18个步骤，每步-1%，最高至-18%		13176	0.98
D2.3		每月强度逐步增加的 6 个步骤（从 1% 增至 32%，按等比数列递增每次翻倍）		13176	0.98
D3.1	缓慢变化损伤（SLOW）	老化损伤（等级 0）	自索引起 1.5年索引 13104（2021年7月1日-2022年12月31日）	13176	0.98
D3.2		加速腐蚀（等级 1）		13176	0.98
D3.3		加速腐蚀（等级 3）		13176	0.98
D4	传感器故障和/或失灵 (SF/M)	≤ 50% 的污染数据平均分布于 8 种传感器故障类别或失灵	6600 采集随机抽取的在以下时段内索引 13104 至 end	6623	0.49
D5	重叠	数据集 2.3 的 FVD 和 SVD 数据集 3.3 的重叠其中 30% 的数据受传感器故障污染或出现故障	索引之后的 1.5 年 13104（2021年7月1日-2022年12月31日）	13176	0.98

其中包含所有数据集的标签（见表7）。图13展示了一个包含所有挠度数据的挠度数据集摘录示例。

代码以四个针对 Python 3.11.9 编写的 Jupyter 笔记本形式提供，包含以下信息：

- 所应用的环境与运行变化定义的描述（`EOVs.ipynb`）。
- 单自由度系统建模（`SDOF.ipynb`）。
- 数据生成脚本示例（`SHM.ipynb`）。
- 传感器故障/失效建模与数据集污染（`SFM.ipynb`）。

每个笔记本都附有文档，用于指导用户修改模拟，以生成新数据或调整设定的参数。数据可按原样直接使用，也可以利用所提供的代码进行定制，以探索不同的模拟场景，例如模拟不同索引处的损伤偏移，或延长监测期。整个数据库约占用 10GB，包含以下所有文件：

	D1	D21	D22	D23	D31	D32	D33	D5
26275	3.063	3.224	3.670	4.298	3.127	3.774	4.682	4.523
26276	3.068	3.229	3.676	4.306	3.132	3.781	4.690	4.531
26277	3.070	3.231	3.678	4.308	3.134	3.783	4.693	4.533
26278	3.068	3.229	3.676	4.305	3.132	3.781	4.690	4.530
26279	3.069	3.230	3.677	4.306	3.133	3.782	4.692	4.532

图***13.*** 挠度数据集末尾部分的摘录；第一列为样本 *ID*，挠度值的单位为毫米。

涵盖三年监测期内的所有子数据集。因此，该数据库包括生成的数据、生成所需的全部输入数据，以及运行模拟所需的代码。

6. 结论、局限性与适用性

本文介绍了一种受控的多年期数值结构健康监测数据基准的设计与开发，该基准在单一框架内涵盖环境与运行变异、快速和缓慢变化的损伤机制，以及传感器故障／失灵。案例研究采用一根固定钢梁，静态响应通过欧拉-伯努利梁理论建模，动态响应则采用等效单自由度表示。本文模拟了三年的逐小时静态挠度数据和每三分钟采集一次的环境振动数据，并明确考虑了活荷载、环境激励内容、温度相关刚度、刚度骤降（FAST）、渐进式刚度／质量损失（SLOW）的变异性，以及事后施加于模拟加速度数据的七类传感器故障（漂移、尖峰、偏置、增益、噪声、数据缺失和电缆脱落）。该数据集被划分为 9 个子数据集，以用于特定目的。本文选取了特定的公式来模拟环境与运行变化（EOVs）和损伤，并为每种传感器故障／失灵类型制定了参数和变异范围，从而产生可复现的污染，以反映真实数据中观察到的实际影响。总体而言，该基准将静态和动态响应置于一组连贯且不断变化的荷载、温度、损伤和异常条件之下，使未来能够测试单一因素及其相互作用。由于开放的结构健康监测数值数据集仍然有限，尤其是同时包含环境／运行变异、长期损伤和传感器问题的数据集，而实验活动的规模化成本仍然过高，因此开发该数据集旨在弥补这一空缺，提供一个计算成本低廉的基准，同时保留影响许多基于振动的损伤敏感特征的关键行为，并可直接用于应用统计方法、机器学习和深度学习，以开展系统辨识、异常／损伤检测和鲁棒性研究，包括当前研究。短期内，该基准目前正作为测试平台，用于进一步开展损伤敏感特征和损伤识别方面的研究 [24]。从长远来看，利用所提供的开放代码和数据集，可以复现、调整和／或扩展相同的基准设计，以纳入更复杂的影响因素。

资助声明。本研究是在佛罗伦萨大学国际博士项目期间开展的，项目由托斯卡纳大区通过“Giovanisì”项目提供奖学金资助，并与米尼奥大学及该研究所联合培养，同时还获得了伊拉斯谟 + 实习项目的额外支持。

利益冲突。作者声明，他们不存在已知的竞争性财务利益或个人关系，可能会被认为影响了本文所报告的研究工作。

数据可用性声明。 生成的数据集以及用于定义该数据集的代码，均通过 Zenodo 存储库以“单自由度结构健康监测基准”的名称公开。可通过以下持久标识符访问数据 https://doi.org/10.5281/ zenodo.17900300。存储库包含复现本文所展示数据生成过程所需的完整数据集。模拟在佛罗伦萨大学和米尼奥大学的服务器上执行。

AI 使用声明。 作者在研究准备过程中使用了 AI 语言模型，以协助编辑文本和代码、校对及格式编排。AI 未用于生成科学结果、分析或解释。所有内容均经作者审阅和验证。

伦理规范。 本研究符合所有伦理准则，包括遵守研究所在国的法律要求。

作者贡献。 Francesca Marafini：概念构思、方法、软件、正式分析、调查、数据整理、撰写初稿、审阅与编辑、可视化、资源；Giacomo Zini：概念构思、验证、监督、撰写、审阅与编辑、资源；Alberto Barontini：概念构思、验证、监督、撰写、审阅与编辑、资源；Nuno Mendes：监督、撰写、审阅与编辑、项目管理；Alice Cicirello：概念构思、监督、撰写、审阅与编辑；Michele Betti：概念构思、监督、项目管理、经费获取；Gianni Bartoli：概念构思、监督

参考文献

[1] J. Maeck 和 G. De Roeck。《Z24基准测试描述》。机械系统与信号处理，17(1):127–131，2003年1月。ISSN 08883270。doi: 10.1006/mssp.2002.1548。[2] Marcus Haywood-Alexander、Robin S. Mills、Max D. Champneys、Matthew R. Jones、Matthew S. Bonney、David Wagg 和 Timothy J. Rogers。Hawk T1A飞机的全尺寸模态测试：用于基于振动的方法基准测试。声学与振动学报，576:118295，2024年4月。ISSN 0022460X。doi: 10.1016/j.jsv.2024.118295。[3] K. Worden。使用新颖性度量进行结构故障检测。声学与振动学报，201(1):85–101，1997年3月。ISSN 0022460X。doi: 10.1006/jsvi.1996.0747。[4] Bjørn T. Svendsen、Gunnstein T. Frøseth、Ole Øiseth 和 Anders Rønnquist。一种基于数据的结构健康监测方法：利用实验数据检测钢桥损伤。土木结构健康监测学报，12 (1):101–115，2022年2月。ISSN 2190-5452, 2190-5479。doi: 10.1007/s13349-021-00530-8。[5] Konstantinos Tatsis 和 Eleni Chatzi。用于系统辨识的数值基准：运行和环境变异性。2019年。doi: 10.3929/ETHZ-B-000385231。[6] Konstantinos Tatsis、Yaowen Ou、Vasilis K. Dertimanis、Minas D. Spiridonakos 和 Eleni N. Chatzi。不同气候和运行条件下小型风力涡轮机叶片的基于振动的监测。第二部分：数值基准。结构控制与健康监测，28(6)，2021年6月。ISSN 1545-2255, 1545-2263。doi: 10.1002/stc. 2734。[7] B F Spencer、R E Christenson 和 S J Dyke。地震激励建筑物的下一代基准控制问题。1999年。[8] E. A. Johnson、H. F. Lam、L. S. Katafygiotis 和 J. L. Beck。IASC-ASCE结构健康监测基准问题第一阶段：使用模拟数据。工程力学学报，130(1):3–15，2004年1月。ISSN 0733-9399, 1943- 7889。doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:1(3)。[9] Jason Lee Burkett。基于解析和实验模型的结构健康监测基准研究。博士论文，中佛罗里达大学，奥兰多，2005年。[10] Paolo Tiso 和 Jean-Philippe Noël。一个新的、具有挑战性的非线性系统辨识基准。机械系统与信号处理，84:185–193，2017年2月。ISSN 08883270。doi: 10.1016/j.ymssp.2016.08.008。[11] K Vlachas、K Tatsis、K Agathos、A R Brink 和 E Chatzi。带有Bouc-Wen滞回连接件的两层框架：多自由度非线性响应模拟器。[12] JCSS概率模型规范第2部分：荷载模型，2021年5月。[13] Andrea Barocci。2018年建筑技术规范：NTC 2018（2018年1月17日部长令）及其应用：规范正文、评注、NTC 2008与NTC 2018对比。Maggioli，圣阿尔坎杰洛迪罗马涅（RN），2018年。ISBN 978-88-916-1980-8。[14] To m Vrouwenvelder、Milan Holicky 和 Jana Markova。JCSS概率模型规范第4部分：示例应用，2021年5月。[15] Luis G L Costa、Andre T Beck 和 Wagner C Santiago。建筑物随机活荷载模型及其在基于可靠度的规范校准中的应用。2022年。[16] Mina Seif、Joseph Main、Jonathan Weigand、Fahim Sadek、Lisa Choe、Chao Zhang、John Gross、William Luecke 和 David McColskey。结构钢的温度相关材料建模：公式与应用。技术报告 NIST TN 1907，美国国家标准与技术研究院，2016年4月。[17] UNI 9614:2017——建筑物振动测量与扰动评估标准，2017年9月。[18] UNI ISO 2631-1:2014 机械振动与冲击——人体全身振动暴露评估——第1部分：一般要求。采用 ISO 2631-1:1997。2014年12月。[19] Dawn E. Klinesmith、Richard H. McCuen 和 Pedro Albrecht。环境条件对腐蚀速率的影响。土木工程材料学报，19(2):121–129，2007年2月。ISSN 0899-1561, 1943-5533。doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:2(121)。[20] Luigi Di Sarno、Armin Majidian 和 George Karagiannakis。大气腐蚀对钢结构的影响：研究现状与案例研究。11(12):571。ISSN 2075-5309。doi: 10.3390/buildings11120571。URL https://www.mdpi.

com/2075-5309/11/12/571。[21] Atia Javaid、Nadeem Javaid、Zahid Wadud、Tanzila Saba、Osama Sheta、Muhammad Saleem 和 Mohammad Alzahrani。用于无线传感器网络中改进基于信念函数的决策融合的机器学习算法与故障检测。*Sensors*，19(6):1334，2019年3月。ISSN 1424-8220。doi: 10.3390/s19061334。[22] Muhammad Ahmer、Fredrik Sandin、Pär Marklund、Martin Gustafsson 和 Kim Berglund。轴承套圈磨床中用于基于状态的维护的故障模式分类。国际先进制造技术杂志，122(3-4):1479–1495，2022年9月。ISSN 0268-3768, 1433-3015。doi: 10.1007/s00170-022-09930-6。[23] Andreea-Maria Oncescu 和 Alice Cicirello。用于稳健结构健康监测的传感器故障识别自监督分类算法。载于 Piervincenzo Rizzo 和 Alberto Milazzo 编，欧洲结构健康监测研讨会，第253卷，第564–574页。施普林格国际出版公司，查姆，2023年。doi: 10.1007/978-3-031-07254-3_57。[24] F. Marafini、G. Zini、A. Barontini、M. Betti、G. Bartoli、N. Mendes 和 A. Cicirello。基于振动的结构健康监测中的长期老化损伤识别。载于 Álvaro Cunha 和 Elsa Caetano 编，土木工程结构实验振动分析，第442–452页。施普林格自然瑞士公司。ISBN 978-3-031-96114-4。doi: 10.1007/978-3-031-96114-4 46。_