

基于数字孪生的岸桥应变全景感知方法^{*}

李禹志, 李宏坤, 魏代同, 张乾鹏, 曹顺心, 杨晨

(大连理工大学机械工程学院 大连, 116024)

摘要 针对岸边集装箱起重机结构尺寸大、应变测试困难以及监测测点少的问题,提出了一种基于数字孪生概念的岸桥钢结构全局应变状态虚拟感知方法。首先,将数字孪生技术应用于岸桥,建立岸桥钢结构的数字孪生系统总体框架,通过建立高精度的孪生模型、数据采集与传输体系、可视化模块等,实现了对岸桥钢结构实时应变状态的监测和分析;其次,通过构建岸桥的有限元模型,并结合面收缩网格简化方法、半径最近邻算法和基于径向基函数的代理模型,使岸桥数字孪生系统能实时、准确地计算和预测岸桥钢结构的全局应变情况;最后,以岸桥小型实验台为例,通过模拟实际岸桥工作状态对比了孪生模型和实验测试数据。结果表明,提出的岸桥应变全景感知方法可以对岸桥钢结构的全局应变状态进行实时监测,更加全面地获取岸桥钢结构应变信息,岸桥小车稳定运行时应变的相对误差低于 10%,验证了该方法的有效性。

关键词 数字孪生;岸边集装箱起重机;代理模型;虚拟感知;可视化

中图分类号 TH215

0 引言

岸边集装箱起重机简称岸桥,是港口物料装卸和搬运的主要机械设备。岸桥主要承载结构的失效破坏^[1]会严重影响港口和船舶的正常工作运转,甚至造成重大伤亡事故及经济损失。针对岸桥钢结构的应变状态监测,现有的应变监测方法多采用在线应变测量技术或定期对钢结构进行应变测试,可有效检测岸桥钢结构应变情况^[2]。但是,由于在线应变测量技术存在传感器布置困难、现场信号干扰大及可靠性低等问题,只能选择少量重点部位进行钢结构定期应变测试,未监测的位置结构存在隐患,无法对岸桥钢结构的全局应变状态进行实时监测^[3-5],制约了岸桥钢结构的应变监测和故障预警。因此,寻求一种可以实现岸桥钢结构应变状态实时全面监测的方法具有重要意义。

随着大数据、物联网及人工智能等信息通信技术的不断发展,产生了数字孪生技术,并被应用于各个领域。相较于传统监测方法,数字孪生技术具有实时监控、优化仿真、增强协作和决策等多方面的优势,为各领域带来应用价值,许多学者基于数字孪生的概念开展了相关研究。Liu 等^[6]提出了基于数字孪生的机械加工过程监控方法,实现了对复杂加工

过程的实时监控。陶飞等^[7]提出了数字孪生五维模型的概念,结合实际应用需求提出了数字孪生在多个领域的应用思路与方案。丁华等^[8]将采煤机物理空间实时状态镜像到虚拟空间,实现了采煤机的位置、位姿及轨迹等实时状态在线可视化。王凯平等^[9]基于数字孪生技术开发了塔机工作姿态监测系统,可有效预防塔机事故和保障施工现场安全。贾政楠等^[10]建立了塔式起重机数字孪生系统,实现了塔式起重机的运动状态实时映射和结构性能的在线预测。

综上所述,虽然数字孪生技术已经在机械加工和结构状态监测等领域取得了显著进展,实现了机械设备的实时监控和行为映射,但大多数研究仅在几何层面映射机械结构的位置和轨迹等空间运动信息,没有侧重于机械结构的应变状态分析,对机械结构在工作过程中的实时全局应变感知研究较少。在机械结构性能的研究中只对有限元结果和预测模型进行对比,缺少与实际测量数据的对比,无法证明在实际应用中的有效性。

本研究针对岸桥钢结构全局应变状态在线监测问题,首先,基于数字孪生概念,结合有限元分析、传感器数据采集通信、代理模型构建及三维可视化等技术,构建了岸桥钢结构数字孪生框架,提出岸桥钢

^{*} 辽宁省科技计划联合计划资助项目(2023JH2/101800031)

收稿日期:2024-03-12;修回日期:2024-06-09

结构的应变全景感知方法;其次,在此框架下,提出一种岸桥钢结构全局应变预测模型,为保证预测应变数据的实时性和准确性,结合半径最近邻算法和径向基函数代理模型对岸桥钢结构应变数据进行计算,建立岸桥钢结构孪生模型;然后,利用三维动画引擎搭建岸桥钢结构数字孪生可视化平台,显示岸桥钢结构在工作过程中的应变状态变化,实现了物理实体结构的应变状态快速分析及可视化;最后,通过岸桥实验台实例,采集岸桥钢结构前大梁关键点应变与孪生模型应变进行对比,验证了该方法的准确性和有效性。

1 基本理论

1.1 径向基函数代理模型

为构建岸桥钢结构数字孪生模型,实现岸桥钢结构应变状态全景感知,需要快速根据传感器的输入计算出岸桥钢结构全局各节点的应变数据。由于通过有限元分析得到岸桥钢结构应变数据时间成本高,无法满足数字孪生的实时性要求,因此寻求岸桥运行工况和性能数据之间的映射关系,以节省计算时间和资源。径向基函数代理模型的计算效率高,适用于实时数据处理,本研究采用径向基函数代理模型作为计算预测模型,以提高计算速度和效率。

基于径向基函数法建立数学模型^[11]是利用离散数据点拟合近似函数 $f(x)$ ($x \in R^n$)来无限逼近 n 维变量实值函数 $F(x)$ 。径向基核函数 $\varphi(r)$ 作为 $f(x)$ 的基函数,待测样本点与中心点的欧氏距离作为自变量,通过这些函数的线性叠加来计算未知待测 x 处的响应结果。径向基函数本质上是一个实数值函数,其取值仅仅取决于离中心点 c 的距离,即 $\varphi(x, c) = \varphi(\|x - c\|)$ 。当 c 为0时,取值变为到原点的距离,即 $\varphi(x) = \varphi(\|x\|)$ 。

径向基函数近似模型可表示为

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \beta_i \varphi(\|x - x_i\|) \quad (1)$$

其中: $f(x)$ 为不同节点对应的应变值; β 为欧式距离基函数 $\varphi(\cdot)$ 的加权系数; $\|\cdot\|$ 为欧式范数。

$r_{ij} = \|x_i - x_j\|$ ($i, j = 1, 2, \dots, m$)是待测点 x 与样本点 x_i 之间的欧式距离。本研究采用的径向基核函数为逆二次函数 $\varphi(r) = (r^2 + c^2)^{-\frac{1}{2}}$,用式(1)作为预测模型时,需要满足的插值条件为

$$f(x) = F(x_j) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得到

$$A\beta = F \quad (3)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} \varphi(r_{11}) & \cdots & \varphi(r_{1m}) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi(r_{n1}) & \cdots & \varphi(r_{nm}) \end{bmatrix}; \text{向量 } F = \begin{bmatrix} F(x_1) \\ \vdots \\ F(x_n) \end{bmatrix}。$$

式(3)在样本点不重合且函数 $\varphi(x)$ 为正定函数时存在唯一解,即

$$\beta = A^{-1}F \quad (4)$$

求出 β 即可得到近似计算模型,通过近似计算模型可以快速计算出在不同工况下岸桥钢结构的应变数据。

1.2 半径最近邻算法

半径最近邻算法是一种基于 K 最近邻(K -nearest neighbors,简称KNN)原理的算法,其基本原理是在训练阶段,将整个训练数据集保存下来,当需要进行预测时,算法会为每个待预测的新样本寻找训练集中与之距离最接近的 K 个样本。基于这 K 个最近邻样本的类别,通过计算平均或加权平均确定新样本的预测值。

假设训练数据集^[12]有 N 对数据,表示为

$$T = \left\{ (X_i, y_i) \right\}_{i=1}^N$$

$$(X_i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i\} \in R^m; y_i \in Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}) \quad (5)$$

其中: X_i 为训练样本集的第 i 个输入样本数据,维度是 m 维空间; x_j^i 为第 i 个样本的第 j 个特征参数,对应的输出值为 y_i 。

根据KNN算法的定义,测试样本 X 与训练样本 X_i 的相似关系是通过计算特征参数之间的距离(通常采用欧式距离)来进行判断,即

$$d(X, X_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - x_j^i)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

将 X 与 X_i 的距离按从小到大排序,找到距离最近的 K 个样本,并将对应的输出 y_i 进行数值平均,即可得到测试样本的输出估计值为

$$\hat{y} = K^{-1} \sum_{i=1}^K y_i \quad (7)$$

半径最近邻算法在KNN算法的基础上进行进一步扩展,与仅考虑固定数量的KNN算法不同,半径最近邻算法在预测时考虑所有位于预定半径 r 内的邻居点。对于每个新样本,算法会找出所有在指定半径范围内的训练样本,并利用这些样本的信息

进行新样本的预测。

在对岸桥钢结构进行网格划分时,由于各个零件之间网格划分的尺寸不同,所以使用固定数量的KNN最近邻算法无法充分捕捉到局部的数据密度变化。半径最近邻算法可以适应数据密度的变化,如果某个区域的网格划分较密,半径内会包含更多的点;如果某个区域网格较稀疏,半径内的点则相对较少。其适用于网格划分尺寸不同造成的数据分布不均匀的情况,通过调整半径大小,半径最近邻算法可以更灵活地控制邻域的范围,为每个点提供更合理的局部邻域信息。

在半径最近邻算法中,半径 r 是一个预定义的值,表示在特征空间中围绕目标样本点的邻域范围。对于每个待预测的样本点 x ,算法会在训练集中查找所有与 x 的距离小于或等于 r 的点,将这些点视为 x 的邻居。给定一个样本点 x ,其邻居集合 $N_r(x)$ 可以定义为

$$N_r(x) = \{x_i; d(x, x_i) \leq r\} \quad (8)$$

其中: $d(x, x_i)$ 为点 x 和 x_i 之间的距离; r 为半径。

样本点 x 的值是其邻居值的平均或加权平均。本研究采用简单平均,其预测值 $\hat{y}$ 为

$$\hat{y} = \frac{1}{|N_r(x)|} \sum_{x_i \in N_r(x)} y_i \quad (9)$$

2 岸桥钢结构数字孪生系统总体框架

数字孪生^[13]以数字化的方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科及多物理量的动态虚拟模型,来仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为和规则等。为推动数字孪生技术在相关领域和行业的进一步应用,陶飞等^[7]提出了数字孪生五维模型的概念。数字孪生系统主要包含三部分基本元素:物理空间、数字空间及连接二者的数据和信息。

本研究基于数字孪生的概念,提出岸桥钢结构数字孪生总体框架如图1所示。该数字孪生框架主要包括物理实体空间、数字虚拟空间以及为实现二者之间实时映射的数据传输通信模块。

物理实体空间是数字孪生系统框架的基础,其主要包括岸桥钢结构、岸桥小车、采集卡及红外激光测距传感器等硬件设备。岸桥结构示意图如图2所示。岸桥的工作流程主要是利用小车挂载货物,通过移动岸桥小车,将货物从船舱内卸出,放置到指定的位置。在物理实体空间中,通过传感器及采集程序实时将小车的移动位置和小车挂载的载荷情况传

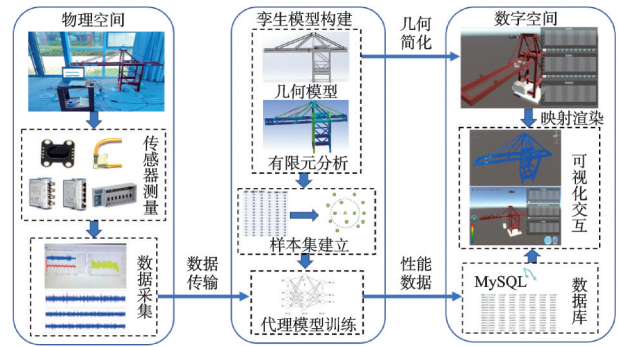


图1 岸桥钢结构数字孪生总体框架

Fig.1 Digital twin overall framework of shore bridge steel structure

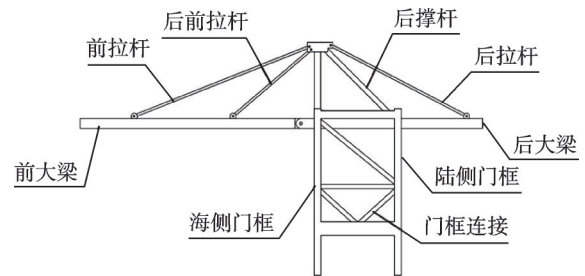


图2 岸桥结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of shore bridge structure

输给数字虚拟空间中的岸桥孪生模型。

通过融合有限元模型、半径近邻算法、代理模型和三维动画渲染引擎,在数字虚拟空间中构建岸桥钢结构的孪生模型,以达到对岸桥钢结构的应变全景感知。数字虚拟空间通过物理实体的传感器数据来反映岸桥钢结构工作时的真实运行状态,以传感器数据作为输入,采用半径近邻算法结合代理模型,实时计算更新孪生模型的应变状态,通过三维动画引擎进行实时渲染,直观体现岸桥钢结构在工作时的应变变化情况,实现由物理空间与数字空间的动态信息交互。

连接实体空间与数字空间的数据驱动岸桥孪生模型通过应变云图显示和实现数据实时监测功能,主要包含3类数据^[14]:几何数据、传感器数据及结构性能数据。几何数据是通过岸桥结构进行网格划分后,提取结构的网格节点三维坐标位置信息;传感器数据为红外激光传感器数据、关键点应变数据及振动数据等;结构性能数据是结构全部网格节点的全局应变数据。以时间戳为基准,将以上多种数据处理整合后写入构建的数据库中存储,前端可视化界面实时读取数据库中的数据,完成物理空间与数字空间的链接。

3 岸桥数字孪生模型构建

在数字空间中构建满足准确性和实时性等要求的孪生模型是实现数字孪生系统总体框架的关键,本节采用几何面片收缩方法、半径最近邻算法构建代理模型训练样本集,结合径向基函数代理模型封装岸桥钢结构全局应变预测计算模型,对训练完成的模型进行封装。预测分析时,只需对代理模型进行二次调用计算即可。应变预测代理模型确保孪生模型与实体模型的高度一致性,同时增强孪生模型的实时性,经过数据采集与传输系统将数据传输到前端,利用可视化技术实现岸桥钢结构在数字虚拟空间中的实时映射。

3.1 全因子实验设计及样本生成

采用 ANSYS 软件对岸桥钢结构整体进行有限元分析,对岸桥钢结构适当简化并进行网格划分,划分后的网格共有 300 328 个节点、130 961 个单元。岸桥钢结构材料属性定义为 Q345B。根据岸桥的实际结构和工作状态,对其连接关系与边界条件进行设置,岸桥 4 个支腿设置为固定支撑,模拟小车挂载在岸桥小车轨道上施加载荷。以实验数据为基准修正仿真模型后,针对不同工况进行有限元分析,构建不同工况下的岸桥钢结构的性能数据,提取钢结构全局网格节点应变数据与应变分布状况。岸桥钢结构应变云图如图 3 所示。

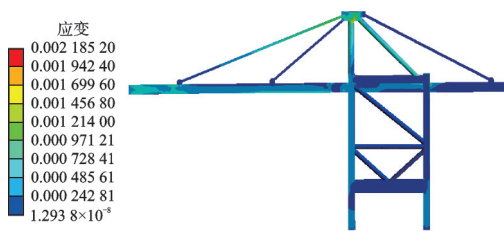


图 3 岸桥钢结构应变云图

Fig.3 Strain cloud diagram of steel structure of shore bridge

采用全因子法进行实验设计构建训练样本集,选取小车移动位置 L 和负载 F 为自变量,结合岸桥实际工况和实验台承载能力等因素选定自变量范围。 L 取值范围为 0~150 cm,以 15 cm 为等间隔,共有 10 水平; F 取值范围为 60~180 N,以 10 N 为等间隔,共有 13 水平,在样本空间中生成 130 个样本点。通过 ANSYS 软件提取所有样本下的各网格节点应变数据,每个网格节点的坐标 (x,y,z) 及坐标所对应的应变值存储为一维数组形式,利用这些样本

数据作为高保真数据集,便于模型简化后新样本集的生成及径向基函数代理模型的训练。

3.2 代理模型训练与误差分析

通过细密网格划分生成了大量高保真样本,但在细密网格划分下产生的大量网格节点与三角面片会增大模型占用的存储空间,延长数据通信所用的时间,同时细密网格划分的结果会超出其三维渲染引擎所能计算的节点上限,影响实时显示效果。为节省计算渲染时间,满足数字孪生的实时性要求,采用网格简化方法对模型进行简化处理,可以减少网格的三角片数量,同时尽量保持网格的几何信息和其他属性。

常见的网格简化方法主要分为 3 类:顶点删除、边压缩及面片收缩^[15]。其中,面片收缩方法更倾向于保持原始模型的局部形状特征,相比单独考虑边或顶点,可以更好地维持局部几何形态,面片收缩在处理模型时可以更灵活地对多个顶点进行操作。本研究采用面片收缩方法对模型进行简化操作,即将网格内的 1 个面片收缩为 1 个顶点,退化该面片以及临边的 3 个面片。面片收缩原理如图 4 所示。

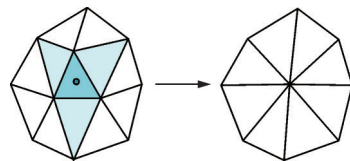


图 4 面片收缩原理图

Fig.4 Principle diagram of facet shrinkage

为了验证网格简化算法的准确性,利用面片收缩方法对岸桥钢结构的网格进行简化处理。以岸桥钢结构中前大梁为例,岸桥钢结构几何简化对比如图 5 所示。缩减前后的前大梁网格节点数从 46 742 个简化到 17 011 个,几何形状特征保持完好,可以进行后续的新样本集构建。

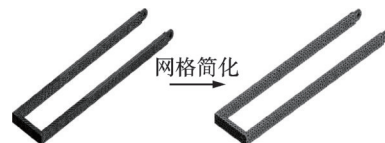


图 5 岸桥钢结构几何简化对比

Fig.5 Comparison of geometric simplification of shore bridge steel structure

将简化后的模型网格节点数据导出,这些数据仅含有节点坐标信息。以简化后的节点坐标信息所对应的应变值作为待预测样本,通过仿真分析获得

高保真数据集,从中找出待预测样本的固定半径范围内的高保真样本,利用半径最邻近算法对其进行计算,获取待预测样本的应变值,得到简化后三角形面片各网格节点的应变数据,生成新的样本数据集,以此新的样本数据集作为构建径向基函数代理模型的最终样本集。

将样本集导入模型进行训练,构建以小车距离和负载为输入、几何简化后的岸桥钢结构各网格节点的应变为输出的代理模型。评估径向基函数代理模型的预测准确度时,仅在原有样本点上的完美拟合并不能充分证明模型在未知数据上的表现,必须引入模型原始样本集外的新测试点,通过在非样本

点上的测试可以更有效地验证模型的预测能力和准确性。定义相对误差的表达式^[16]为

$$RE = \frac{f^a(x^{(i)}) - f^b(x^{(i)})}{f^b(x^{(i)})} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

其中: $f^a(x^{(i)})$ 为第*i*个样本点处的模型结果; $f^b(x^{(i)})$ 为第*i*个样本点处的有限元结果;*m*为样本点个数。

在样本空间中随机生成 5 个样本来模拟 5 种工况,同时选取岸桥钢结构上随机 3 个网格节点的应变结果进行对比,以测试模型预测精度。测试样本点误差见表 1。由表可知,随机抽取的 3 个网格节点测试样本的相对误差不超过 -8.75%,代理模型精度满足要求。

表 1 测试样本点误差
Tab.1 Errors of the test sample points

序号	位置/cm	负载/N	有限元结果			代理模型			相对误差/%		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	35	22	1.52	2.98	4.94	1.57	2.93	4.51	3.41	-1.50	-8.75
2	63	40	1.47	3.71	2.39	1.45	3.70	2.38	-1.60	-0.22	-0.60
3	92	59	1.30	3.91	1.56	1.32	3.91	1.63	1.39	-0.19	4.46
4	113	37	1.19	3.81	1.82	1.16	3.78	1.74	-2.29	-0.88	-4.49
5	56	43	1.50	3.51	3.09	1.52	3.50	3.22	1.25	-0.17	4.42

3.3 数据采集传输与可视化开发

为了实时获取岸桥工作时小车的实时位置和关键测点应变情况,需要选取合适的传感器对岸桥进行监测,并对传感器采集的数据进行处理与存储。数据采集与传输模块如图 6 所示。

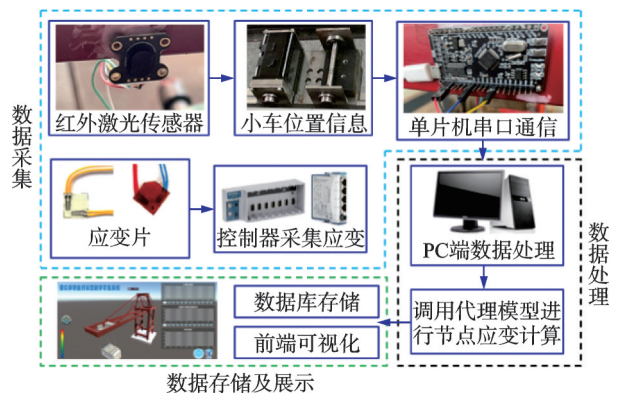


Fig.6 Data acquisition and transmission module

通过编写 LabVIEW 多通道采集传输程序,实时获取传感器测得的小车位置和载荷数据,再将采集到的数据写入数据库并传输到封装的代理模型预测模块中,实时预测岸桥钢结构的全局应变状态,对

岸桥钢结构进行全工作周期应变状态的预测分析。

为实现直观的岸桥钢结构全景应变感知,利用 Unity3D 平台三维渲染引擎进行可视化模块开发,从数据库中读取经过几何简化后岸桥模型的节点坐标和节点索引信息,利用读取的数据在 Unity3D 平台中生成网格,并初始化所有节点颜色为白色。网格节点映射的岸桥模型如图 7 所示。

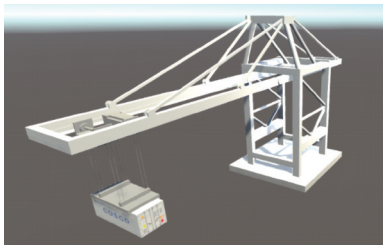


图 7 网格节点映射的岸桥模型
Fig.7 Shore bridge model with mesh node mapping

前端可视化系统与本地数据库通信是实现实时数据交互的关键,前端系统不断从本地数据库中读取各节点应变数据,确保了用户操作的响应性和数据的实时更新。读取各网格节点的应变数据,并通过颜色映射更新组件实现实时云图变化更新,使用户能够直观地观察和分析岸桥钢结构的应变状态。

实验过程中应变片采集的不同测点的多个应变数据会被实时记录和显示,每个测点的数据变化将用折线图绘制出来,与实际测点对应的孪生模型中的相应节点数据也会在同一个折线图中同步绘制,以便于用户进行直观对比,同时验证孪生模型的实时性与准确性。

在可视化模块中提供一个友好的用户操作界面,允许用户进行不同的操作。用户可以调整应变探针到岸桥钢结构孪生模型的不同位置作为应变观测点,也可同时设置多个应变观测点,通过鼠标点击不同的测点序号按钮,能够切换显示测点应变状态。

4 实验与验证

以图 8 所示的岸桥钢结构实验台为例,基于岸桥钢结构数字孪生框架建立了岸桥钢结构应变状态全景感知系统。根据岸桥结构的设计图纸和基于相似理论推导的比例因子^[17],利用三维设计软件建立其 1:50 的缩比三维模型。实验台主要包括以下部分:岸桥主体钢结构、小车、小车驱动控制器、红外激光传感器、应变片以及数据采集装置等。设计加工 4 个底座,用螺栓将岸桥、底座及 T 型槽平台之间进行连接固定。

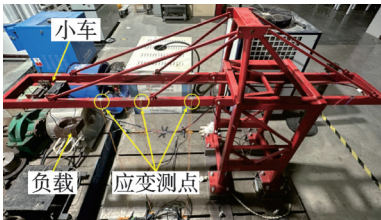


图 8 岸桥钢结构实验台

Fig.8 Test bench for steel structure of shore bridge

通过 LabVIEW 软件编写实验采集程序,并实时将传感器采集的小车距离、应变、振动等数据传入服务器。数据采集通信程序如图 9 所示。服务器中收到的数据实时写入数据库进行储存,以便于后续分析及孪生模型数据传输。

实验以 2 kHz 作为应变采样频率进行数据采集,小车负载分别为 7.91、10.525 和 15.135 kg。图 10 为实验台数据采集现场图。

为了验证孪生模型的准确性,比较建立的孪生模型各观测点应变数据与对应实验中应变片实测的应变数据,在岸桥前大梁上表面粘贴应变片进行应变测试。岸桥前大梁应变测点如图 11 所示。

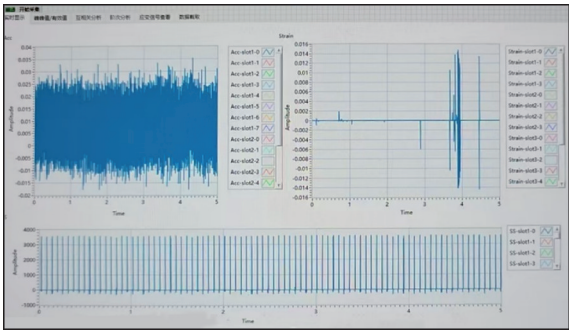


图 9 数据采集通信程序

Fig.9 Data acquisition communication program

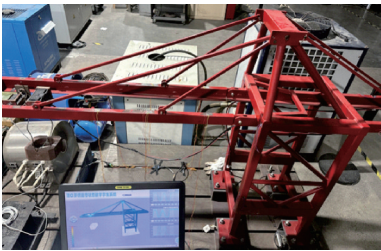


图 10 实验台数据采集现场图

Fig.10 Field diagram of data acquisition on the test bench

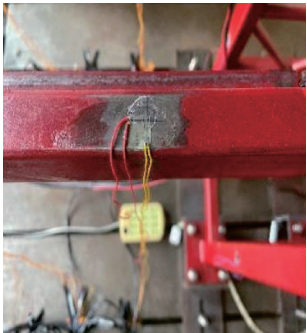


图 11 岸桥前大梁应变测点

Fig.11 Strain measurement points on the front main beam of the shore bridge

在小车挂载负载正常运行一个工作周期状态下,通过实验获得应变测点随时间变化的应变曲线。测点应变历程对比如图 12 所示。与孪生模型的应变曲线进行对比可知,孪生模型结果与实验测试的应变结果变化趋势基本一致,在小车运行过程中二者应变最大相对误差低于 10%。由于驱动电机启停时不稳定,因此在小车启停时应变误差偏大,应变最大相对误差低于 15%。结果表明,岸桥数字孪生模型的构建方法可在实际应用中提供一定的参考价值。

在数字孪生系统的可视化部分,借助 Unity3D 平台三维渲染引擎并结合 LabVIEW 程序和 MySQL 数据库,构建岸桥钢结构应变全景感知可视化平台,在数字空间的孪生模型显示岸桥钢结构

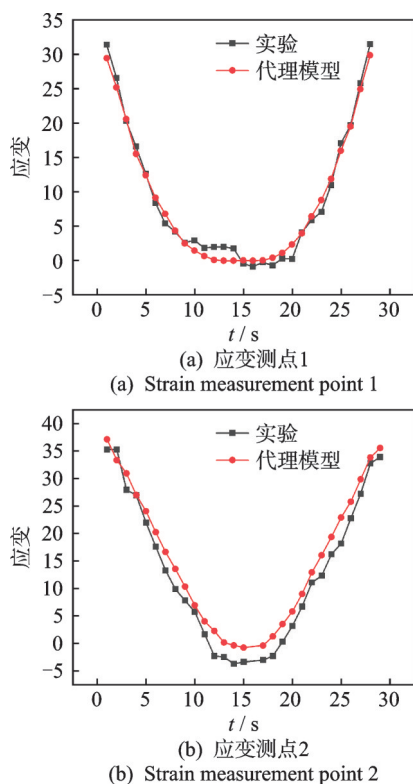


图 12 测点应变历程对比

Fig.12 Comparison of strain histories at measurement points

应变云图的实时变化,实现应变状态全景感知。根据物理空间中实际传感器的测试数据实时在数字空间中显示岸桥和小车的运行状态,同时绘制折线图实时显示应变数据的变化情况。岸桥钢结构数字孪生可视化平台如图 13 所示。

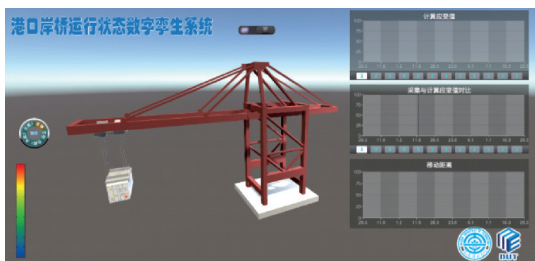


图 13 岸桥钢结构数字孪生可视化平台

Fig.13 Digital twin visualization platform for steel structure of shore bridge

Unity3D 平台可实时读取 MySQL 数据库中的数据,并使用这些数据来更新 3D 模型的用户界面。用户可以监测并可视化数据库中的数据,实时了解系统状态和数据变化。岸桥钢结构数字孪生平台运行状态如图 14 所示。岸桥钢结构数字孪生可视化平台运行计算延迟如图 15 所示。平台运行过程中延迟最高峰值为 140.65 ms,满足系统实时性要求。结果表明,孪生模型的构建及可视化开发可以实现

对岸桥钢结构应变状态的全景感知和实时状态监测,为进一步进行岸桥钢结构健康监测奠定了基础。

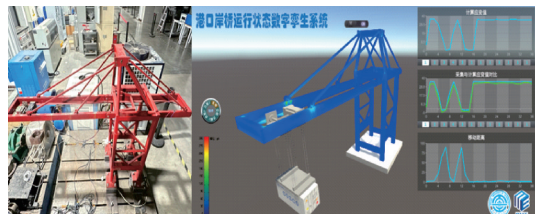


图 14 岸桥钢结构数字孪生平台运行状态

Fig.14 Operating status of the digital twin platform for steel structure of shore bridge

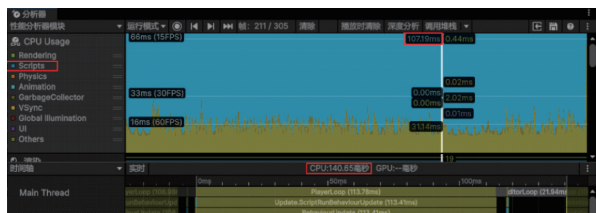


图 15 岸桥钢结构数字孪生可视化平台运行计算延迟

Fig.15 Operation calculation delay of digital twin visualization platform for steel structure of shore bridge

5 结 论

1) 根据提出的岸桥数字孪生系统总体框架,建立了岸桥钢结构数字孪生系统,实现对岸桥钢结构应变的全景感知。数字孪生系统能够实时准确地映射岸桥的状态,验证了所提孪生框架的有效性。

2) 结合面收缩和半径最近邻算法,建立了岸桥钢结构应变的代理模型,搭建岸桥钢结构实验台,通过实验应变测试,对比实验数据和孪生模型数据。结果表明,在小车稳定运行过程中应变最大相对误差低于 10%,满足数字孪生的实时性和精确性要求。

3) 基于 LabVIEW 软件、Unity3D 平台和 MySQL 数据库开发了港口岸桥运行状态数字孪生系统,通过系统的可视化界面可以实时监测岸桥的工作状态及其应变分布,验证了可视化技术的实用性。

参 考 文 献

[1] 张冲,姚海子,赵俊,等.基于光纤光栅应变传感系统的在役港口起重机结构健康监测[J].机电工程,2013,30(4):426-429.
ZHANG Chong, YAO Haizi, ZHAO Jun, et al. Structure health monitoring of an in-service harbor crane based on fiber grating strain sensing system[J]. Journal

- of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(4): 426-429. (in Chinese)
- [2] 陈敏, 吕中樑. 在役造船门座起重机结构有限元分析及应力测试[J]. 机电信息, 2019(20): 111-113.
CHEN Min, GUO Zhongliang. Finite element analysis and stress testing of the structure of in-service shipbuilding gantry cranes[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(20): 111-113. (in Chinese)
- [3] WANG S, LAI X N, HE X W, et al. Building a trustworthy product-level shape-performance integrated digital twin with multifidelity surrogate model[J]. Journal of Mechanical Design, 2022, 144(3): 031703.
- [4] 郭小强, 黄大志, 王海潮, 等. 海港岸桥钢结构检测与安全性评估方法研究[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2021, 30(4): 47-54.
GUO Xiaoqiang, HUANG Dazhi, WANG Haichao, et al. Research on inspection and safety evaluation method of seaport quay crane steel structure[J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Sciences Edition), 2021, 30(4): 47-54. (in Chinese)
- [5] 方圣恩, 郭新宇. 结合数字孪生的斜拉桥系统更新和响应预测[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(1): 11-17.
FANG Sheng'en, GUO Xinyu. System updating and response prediction of a cable-stayed bridge based on digital twins[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 11-17. (in Chinese)
- [6] LIU S M, LU S Y, LI J, et al. Machining process-oriented monitoring method based on digital twin via augmented reality[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(11): 3491-3508.
- [7] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18. (in Chinese)
- [8] 丁华, 杨亮亮, 杨兆建, 等. 数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 815-823.
DING Hua, YANG Liangliang, YANG Zhaojian, et al. Health prediction of shearers driven by digital twin and deep learning[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 815-823. (in Chinese)
- [9] 王凯平, 卢彦霖, 李涵, 等. 基于数字孪生的塔机工作姿态监测系统的设计与应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(19): 83-85.
WANG Kaiping, LU Yanlin, LI Han, et al. Design and application of tower crane working attitude monitoring system based on digital twins[J]. Automation Application, 2023, 64(19): 83-85. (in Chinese)
- [10] 贾政楠, 王欣, 高顺德, 等. 基于数字孪生的塔式起重机结构性能在线监测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(12): 4468-4476.
JIA Zhengnan, WANG Xin, GAO Shunde, et al. On-line structural performance monitoring method of tower crane based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(12): 4468-4476. (in Chinese)
- [11] 杨慧, 范硕硕, 刘荣强. 光学薄膜折展机构单元胞豆荚蜂窝杆优化[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2244-2251.
YANG Hui, FAN Shuoshuo, LIU Rongqiang. Optimization of single lenticular honeycomb boom for optical film deployable mechanism[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2244-2251. (in Chinese)
- [12] 金宏平. 基于K近邻非参数回归的压痕弹性模量估计[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2023, 37(4): 76-80.
JIN Hongping. Estimation of indentation elastic modulus based on k-nearest neighbor nonparametric regression[J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2023, 37(4): 76-80. (in Chinese)
- [13] MUKHERJEE T, DEBROY T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components[J]. Applied Materials Today, 2019, 14: 59-65.
- [14] 邹亚男, 来孝楠, 王鑫, 等. 矿用电铲的形性一体化数字孪生方法及其验证[J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(4): 20-22.
ZOU Yanan, LAI Xiaonan, WANG Xin, et al. Shape-performance integrated digital twin method and its verification for mine excavator[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2021, 34(4): 20-22. (in Chinese)
- [15] YI R, LIU Y J, HE Y. Delaunay mesh simplification with differential evolution[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(6): 1-12.
- [16] YANG H, FAN S S, WANG Y, et al. Novel four-cell lenticular honeycomb deployable boom with enhanced stiffness[J]. Materials, 2022, 15(1): 306.
- [17] 金玉龙. 集装箱岸桥结构的抗震分析与隔震研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.



第一作者简介:李禹志,男,1999年3月生,硕士生。主要研究方向为数字孪生、故障诊断及状态检测。
E-mail:lyz7332@163.com