

数字孪生技术在桥梁结构安全监测中的实践探索

杨 鹏 仓小东*

云南云岭高速公路工程咨询有限公司 云南 昆明 650200

【摘要】：数字孪生技术在桥梁结构安全监测中的应用，能够为桥梁管理提供精准、实时的监控解决方案。通过传感器数据采集与虚拟模型的构建，数字孪生技术可以实现桥梁状态的动态仿真与评估，有效预测潜在风险，提高安全性。本文探讨了数字孪生技术在桥梁监测中的基本原理、数据采集与建模方法，分析了其在实际应用中的案例，提出了技术实施过程中面临的挑战及相应的解决策略。研究表明，数字孪生技术能够显著提升桥梁安全管理的效率与精度，未来有望成为智能基础设施管理的重要工具。

【关键词】：数字孪生技术；桥梁结构；安全监测；实时监控；数据分析

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.045

引言

桥梁作为基础设施的关键组成部分，其结构安全直接关系到交通安全和公共财产的保护。传统的桥梁监测方式往往依赖于人工巡检和定期检查，这种方式无法及时发现潜在的安全隐患。近年来，数字孪生技术的兴起为桥梁结构的安全监测提供了全新的解决思路。通过构建桥梁的数字化虚拟模型，结合传感器数据，数字孪生技术能够实现桥梁状态的实时监测与评估，提前预警潜在的风险。这一技术不仅能提高监测的效率，还能够在检测精度和响应速度上实现突破。实践证明，数字孪生技术在桥梁监测中具备了巨大的应用潜力和实际价值。本文将结合具体案例，探讨数字孪生技术在桥梁结构安全监测中的应用与挑战。

1 数字孪生技术在桥梁监测中的基本原理

1.1 数字孪生技术概述

数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟副本，使得现实世界的对象能够在数字空间中进行实时仿真与监控。通过集成来自传感器、监测设备和历史数据的信息，数字孪生模型能够动态更新，反映实体对象的实时状态。在桥梁结构监测中，数字孪生技术通过对桥梁的结构、负载、位移、温度等多种物理特性进行全面建模，实现了对桥梁状态的精准感知和预测分析。这种技术不仅提升了桥梁健康监测的准确性，还为桥梁的健康管理与维护提供了新的思路。

1.2 桥梁监测的传统方法与局限性

传统的桥梁监测方法主要依赖人工巡检、视觉检测以及定期的结构评估。这些方法存在效率低、覆盖范围有限的问题，难以实时获取桥梁的全面健康状态^[1]。传统监测方法往往无法提供桥梁各个部分的细致信息，难以及时发现潜在隐患。监测过程中，主观判断的偏差也可能导致检测结果不完全准确，无法有效预测桥梁的未来风险。随着桥梁数量的增加和检测要求的提高，传统方法已经无法满足现代化桥梁安全管理的需求。

1.3 数字孪生技术的优势与应用前景

数字孪生技术相较于传统监测方法，能够实现

对桥梁的全方位监测。通过将物理世界与虚拟模型紧密结合，数字孪生能够实时反映桥梁的实际状态，并通过数据分析进行精准的健康评估与故障预警。该技术的应用能够大大减少人工干预，提升监测效率，降低维护成本。同时，数字孪生技术支持大数据和人工智能的结合，使得桥梁安全管理更加智能化。未来，随着技术的不断成熟，数字孪生有望在桥梁的全生命周期管理中发挥更加重要的作用，推动智能交通和智能基础设施的发展。

2 桥梁结构数字孪生模型的构建

2.1 桥梁数据采集与建模方法

数据采集是桥梁结构数字孪生模型构建的关键步骤。为了保证模型的精确度，需通过多种传感器设备对桥梁的各类物理量进行实时采集。常用的传感器包括应变计、加速度计、位移计、温度传感器等，这些设备能够提供桥梁在运行中的动态响应数据。通过无线传感网络，实时传输采集到的数据，并与桥梁的设计参数和历史数据相结合，为后续建模提供支持。建模方法方面，通常采用有限元分析（FEA）和结构分析模型来构建桥梁的虚拟副本。有限元法可以对桥梁的各个组成部分进行精细建模，模拟桥梁在不同荷载和环境条件下的应力分布与变形情况，进而形成数字孪生模型的基础。

2.2 虚拟模型的创建与仿真分析

虚拟模型的创建是在获取了足够的桥梁数据后，通过计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助工程（CAE）工具进行的。桥梁的几何模型需要精确反映其实际结构，包括桥面、支座、桥墩、桥梁连接部分等^[2]。模型创建时，材料属性、尺寸、边界条件等因素均需考虑，确保模型的真实性和准确性。通过数值仿真分析，验证模型在不同载荷作用下的表现。仿真分析不仅有助于评估桥梁在极端情况下的安全性，还可以模拟桥梁在长期使用过程中可能发生的疲劳、裂缝等问题。基于仿真结果，进一步优化桥梁的设计，提供可靠的数据支持与决策依据。

2.3 数字孪生模型的实时更新与维护

数字孪生模型的实时更新与维护是其能持续有效应用的

关键。在实际应用中，桥梁的状态会随时间变化而发生变化，诸如裂缝扩展、材料老化、荷载增大等因素都可能影响桥梁结构的性能。实时监控系统通过传感器持续采集桥梁的状态数据，并将这些数据反馈给虚拟模型。每当采集到新的数据时，数字孪生模型便进行相应的更新，确保虚拟模型与实际桥梁状态保持一致。数据融合技术在此过程中起到了重要作用，能够将不同类型的数据进行有效整合，提升模型的精度。模型维护也涉及对模型参数的定期校准与优化，以应对桥梁老化和环境变化带来的影响。通过这种动态更新机制，数字孪生模型不仅能够提供实时监测数据，还能为桥梁的维修与加固提供决策支持。

3 数字孪生技术在桥梁监测中的应用案例

3.1 案例背景与监测目标

某市的跨河大桥是该地区交通的重要枢纽，随着使用年限的增加，桥梁的结构健康受到了不同程度的影响。为了更好地管理桥梁安全，该市决定引入数字孪生技术，通过精准监控桥梁的健康状态，确保桥梁能够在高流量的交通中长期安全运营。监测目标是通过实时获取桥梁的应力、位移、温度等数据，构建桥梁的数字孪生模型，分析其结构状态并预测潜在的故障风险。特别关注桥梁的关键部位，如支座、桥面及接缝处的状态变化，及时发现桥梁可能存在的结构性问题。此项目不仅旨在提高桥梁监测的效率和精度，还希望通过数字化手段实现桥梁维护的智能化和自动化。

3.2 数字孪生技术应用过程分析

在该桥梁监测项目中，首先完成了桥梁的数字孪生模型建立，采用了高精度的传感器网络，对桥梁的各个部分进行全面的实时监测。数据采集系统通过传感器实时反馈桥梁的健康数据，包括应变、位移、温度、振动等多项参数。这些数据通过无线传输至中心控制平台，平台利用先进的计算模型对数据进行处理与分析，更新桥梁的虚拟模型^[3]。监测过程中，数字孪生模型不断优化，实时反映桥梁的健康状况，特别是在极端天气或超载情况下，能够迅速预警并给出安全评估。该过程中，基于大数据分析和人工智能技术，模型能够自主学习并调整，适应桥梁结构的动态变化，确保长期监测的高效性与准确性。

3.3 实施结果与效果评估

实施后的效果评估显示，数字孪生技术在桥梁监测中的应用明显提升了桥梁的管理效率和安全性。通过对比传统监测方法，数字孪生技术能够在更短的时间内完成大范围、高精度的数据采集与分析，及时发现桥梁的隐患，减少了人工巡检的频次与成本。实时监控与状态预测功能也使得管理者能够更加精准地进行桥梁养护决策，延长了桥梁的使用寿命。对于桥梁的安全管理，数字孪生提供了可视化的决策支持平台，不仅提高了检测的敏感度，还能够有效减少事故发生风险。综合评估

显示，数字孪生技术的引入极大地优化了桥梁监测系统，并为智能基础设施的管理提供了成功范例。

4 数字孪生技术在桥梁监测中的挑战与解决策略

4.1 技术实现中的难点

数字孪生技术在桥梁监测中的应用面临诸多技术难点，特别是在桥梁结构复杂性和动态特性建模上。桥梁的结构组件多样，且受到荷载、环境变化等多种因素的影响，如何精准捕捉这些复杂的物理现象并进行建模成为技术实现中的核心问题。尤其是如何通过传感器数据实现动态模型的实时更新，确保虚拟模型与实际桥梁状态的高度一致性，仍然是一大挑战。数字孪生技术需要高性能计算平台支持，以处理大量实时数据并进行快速仿真分析，这对于计算资源的要求极为严格。如何有效整合不同来源的数据并进行高效处理，也是技术实施过程中不可忽视的问题。

4.2 数据精度与系统稳定性问题

在数字孪生技术应用过程中，数据精度是影响监测结果可靠性的关键因素。传感器采集的数据可能受多种因素干扰，如环境条件、设备故障和数据传输延迟等，这些问题可能导致数据不准确或不完整，进而影响数字孪生模型的正确性。随着监测数据量的不断增加，如何保证系统的稳定性和响应速度，成为保障监测系统正常运行的另一个难题^[4]。数据的时效性与实时性要求极高，任何数据的滞后或误差都会对桥梁安全评估产生重大影响。必须采取有效的技术手段，例如数据预处理、异常检测算法等，确保采集到的数据具有高精度，系统能够在高负荷条件下稳定运行。

4.3 技术优化与未来发展方向

针对当前面临的技术挑战，未来数字孪生技术的优化方向主要集中在提高数据采集精度、增强系统自适应能力及降低成本三个方面。首先随着传感器技术的不断发展，高精度、低成本的传感器将被广泛应用于桥梁监测，进一步提高数据的准确性和覆盖范围。其次机器学习和人工智能技术的引入，将使得数字孪生模型能够自主学习和调整，提升其对复杂环境变化的适应性。在未来，虚拟仿真和实时预测技术的结合将进一步增强桥梁监测系统的实时响应能力，为桥梁的健康管理提供更为精准的数据支持。技术优化还包括数据融合技术的改进，提升异构数据源的处理能力，从而实现更加精细的模型分析。

5 数字孪生技术的实践价值与前景

5.1 技术在桥梁安全管理中的实际效果

数字孪生技术在桥梁安全管理中的应用具有显著的实际效果，通过实时数据采集和虚拟模型的精确模拟，为桥梁管理提供了可靠的决策支持。该技术能够实时监测桥梁的动态变化，捕捉到潜在的结构问题和外部环境的影响，及时预警可能的风险。对于桥梁的维护管理，数字孪生技术不仅提高了检测的

精度，还减少了人工巡检的时间和成本。在一些桥梁的长期运行中，数字孪生技术能够通过历史数据和实时数据的融合分析，为未来的维修和加固提供预测分析，帮助管理部门优化资源配置，提升桥梁运营的安全性与稳定性。通过数字孪生技术的应用，桥梁的运营周期得到了延长，突发性事故的发生频率也显著降低。

5.2 对传统监测方式的替代与补充

传统的桥梁监测方式，依赖人工检查、定期检测和有限的传感器设备，往往无法全面、实时地捕捉到桥梁的状态变化。而数字孪生技术能够克服这些局限，通过集成传感器、物联网和数据分析技术，提供全面的监控解决方案。它能够实时反馈桥梁的各项结构参数，自动生成健康报告，并对潜在故障进行早期预警，弥补了传统监测方式中存在的滞后、信息不全等问题^[5]。数字孪生技术不仅替代了部分人工检测的功能，减少了人为误差，还可以在某些高风险区域提供更为精准的实时监控，增强了桥梁安全管理的智能化水平。通过这种技术补充，传统方法与现代监测技术能够协同工作，提升整体监控效率。

参考文献：

- [1] 王世昌.基于数字孪生的大桥组合结构桥梁施工技术[J].大众科技,2025,27(04):32-35.
- [2] 黄文业.智能化技术在桥梁结构健康自动监测系统中的应用[J].张江科技评论,2025,(06):93-95.
- [3] 宋明武,赵晴.智能传感与监测技术在桥梁结构状态实时感知中的应用[C]//广西大学广西县域经济发展研究院.第一届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会论文集.辽宁路行养护工程有限责任公司,2025:47-49.
- [4] 张红兵.数字孪生驱动公路桥梁结构健康监测的智能诊断技术研究[J].新发现,2025,(10):16-18.
- [5] 翟越,赵腾,雷尚学,等.融合数字孪生技术的桥梁结构安全风险监测与预测方法[J].安全与环境学报,2025,25(08):3069-3079.

5.3 未来发展方向与技术进步

技术的不断进步，数字孪生在桥梁监测中的应用前景十分广阔。未来，传感器技术和数据分析能力的提升将使得数字孪生模型更加精准与高效，能够实现更复杂桥梁结构的建模与监控。随着人工智能和机器学习算法的不断发展，数字孪生模型不仅能够实时监控桥梁的物理状态，还可以基于历史数据进行智能预测，提前发现潜在的风险并优化维护策略。5G技术的普及将使得大规模的传感器网络能够更加稳定、高效地进行数据传输和处理，进一步增强实时监控的能力。未来，数字孪生技术将在桥梁的全生命周期管理中发挥更大作用，不仅为桥梁的安全性提供保障，还能推动智能基础设施的全面发展，进一步提升城市交通网络的智能化与安全性。

6 结语

数字孪生技术在桥梁监测中的应用，极大地提高了桥梁安全管理的精准性与效率。随着技术的不断发展，数字孪生将为桥梁的长期健康监测和维护提供更为智能化的支持，推动基础设施管理的革新。未来，数字孪生技术的广泛应用将在提升桥梁结构安全性、减少事故风险和优化资源配置等方面发挥更加重要的作用，逐步成为智能城市建设中的核心技术之一。