

[文章编号] 1003—4684(2022)05-0110-05

# 基于数字孪生的桥梁拆除多维模型

严肖锋, 孙贤斌, 邹贻权, 庄子婧

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 进入经济发展的新时代,许多老旧桥梁的安全性、适用性及耐久性等各项功能均难以满足现代城市交通发展的新需求,亟需拆除重建。为了安全、快速、经济的实现桥梁拆除,提出一种基于数字孪生的桥梁智能拆除方法,该方法基于数字孪生理论和数字孪生五维模型,综合运用云计算、大数据、人工智能、物联网等关键技术和 BIM (Building Information Modeling) 模型构建了基于数字孪生的桥梁智能拆除方法框架。通过数据共享、信息可视化、智能分析决策等手段,提高安全预警水平,增强决策能力,为桥梁拆除行业向信息化、智能化转型提供了支持。

**[关键词]** 桥梁拆除; 数字孪生; 框架搭建

**[中图分类号]** TU74 **[文献标识码]** A

近年来,我国交通运输网的运输压力与日俱增,众多公路桥梁在设计寿命周期内的病害剧增,导致了桥梁的安全性、适应性和耐久性功能已无法满足正常性能标准;再加上早期较低的建造标准以及缺乏养护意识,加剧了桥梁的病害化<sup>[1]</sup>。老旧桥梁在结构安全性、实用性及耐久性等各项功能上均难以满足现代交通发展的新需求<sup>[2]</sup>,因此,为保障交通运输的安全畅通,急需尽快将这些老旧桥梁拆除重建。随着数字化、网络化和智能化时代的到来以及“智能建造”和《中国建造 2035 战略研究》的相继提出,以大数据、区块链等为代表的一批批新技术相继问世,它们的发展深刻影响了我们的工作、学习乃至生活,倒逼传统建造行业走上转型发展之路,形成了智能化、信息化以及专业化的发展模式<sup>[3]</sup>。而在智能化升级改造过程中,实务界与学术界纷纷看到数字孪生技术的优势,它是在数字信息化基础上延伸形成的新技术,为建造行业的全方位感知,虚拟可视化操作,全面风险管控等提供了新思路。从本质上看,它是借助数字载体,结合物理空间建设虚拟模型,让现实和虚拟之间形成映射,从而更好地对现实中的人、机、法、环、料等要素或系统状态的实时感知,并通过承载指令的数据实时反馈到人、机、法、环、料等要素或系统指导其决策。

刘海涛<sup>[4]</sup>拆除过程采用先进的 BIM 建模技术,进行空间实体模拟讲解,反复论证旧桥拆除的可行性,最大限度地降低施工风险,保证施工安全。黄玮征等<sup>[5]</sup>在老桥拆除施工阶段运用 BIM 技术明确了

拆除构件的堆放场地,调整浮吊停机位置、明确锚点固定设置、提前做好疏浚工作,进一步论证了施工方案的合理性,降低施工风险,保障施工安全进行。孙士鹏等<sup>[6]</sup>将 BIM 技术应用到城市立交拆除工程中,借助 BIM 技术模拟现场拆除施工情况,确保方案的可实施性,同时将建立的 BIM 模型,利用 Navisworks 软件对项目实施过程进行全过程全空间推演,对机械设备进场线路、吊机站位及吊装、平板车运梁线路进行优化,对吊装过程进行碰撞检查。

综上所述:上述学者利用数字化技术,解决了一些传统工程建造过程中的重难点,推进了传统建造行业向智能化方向发展。但是以上学者的研究,都是从某一点或局部出发,单纯的利用数字化建模,或者是运用了数字化的单一功能到实际桥梁拆除施工中,缺少集成应用、系统应用的研究。

结合前人研究所得,引入了桥梁拆除施工的具体案例,结合工程项目的复杂性、信息繁冗特征,根据数字孪生技术,搭建了桥梁智能拆除多维模型,形成了桥梁拆除框架,提出了运行模式和关键技术。从数据收集、多维模型建立、数据驱动与融合预测等方面阐述基于数字孪生技术的桥梁智能拆除方法,从而为桥梁拆除工程作业转型升级提供一些新思路。

## 1 桥梁拆除对数字孪生的需求

传统桥梁拆除方法数字化、智能化程度低,且桥梁拆除施工具有涉及主体较多、资源配置复杂、工艺

工序繁琐的特点,导致传统施工过程中出现全生命周期管理流程割裂、资源未能最大化利用、施工安全难以保障。将数字孪生技术应用于桥梁拆除实际工程中,实现项目信息化管理,数字孪生具有可视化、模拟性、协调性、优化性,可在构建的模型基础上,实现施工场地预布置模拟、工程量自动统计、交通疏散模拟以及桥梁拆除全过程模拟等,能够对项目的重难点实时监控,达到桥梁智能拆除的目的。

通过研究总结<sup>[7]</sup>出桥梁拆除对数字孪生的需求:

1)工程信息共享性需求 现阶段工程施工尚未建立统一的信息共享平台,施工信息传递滞后,数据交互受到限制,使得项目施工信息共享不充分。

2)空间碰撞检查要求 当前的二维图纸不能全面反映管线、堆场、设备、材料等在整体空间的布局状态。

3)交通组织动态管理需求 施工期间应尽可能确保交通正常通行,现有的施工交通组织方案以分阶段静态管理为主,交通管理仍按阶段性计划执行,遭遇异常天气、施工进度等影响,交通组织缺少实时更新与全过程展现。

4)技术交底可视化需求 传统的技术交底形式单调,施工人员难以通过枯燥的文字说明深入理解施工内容关键、重要的施工环节交底资料相对复杂,文档资料缺乏生动性,不利于施工人员充分了解施工过程中的每处细节,信息传递过程的精确性难以确保。

随着施工工艺的不断优化以及三维建模仿真能力、软硬件集成化水平的提高,使得基于数字孪生技术实现桥梁智能拆除成为可能。传统桥梁拆除模式和智能化桥梁拆除模式对比如表 1 所示。

| 表 1 传统桥梁拆除模式和智能化桥梁拆除模式 |            |             |
|------------------------|------------|-------------|
| 对比内容                   | 传统桥梁拆除模式   | 智能化桥梁拆除模式   |
| 管理对象                   | 部分要素、流程、业务 | 全要素、全流程、全业务 |
| 管理模型                   | 业务模型、管理要求  | 多维多尺度融合模型   |
| 数据采集                   | 非实时采集为主    | 实时采集、虚实同步   |
| 施工监测                   | 报表、静态看板    | 三维模型、动态看板   |
| 分析决策                   | 以人工统计分析为主  | 预测性分析、智能决策  |
| 过程控制                   | 以人工处理为主    | 数据驱动、自动执行   |

## 2 桥梁拆除

### 2.1 多维模型

根据拆除桥梁项目的特征、属性,结合国内学者陶飞等人联合研究的“数字孪生五维模型”<sup>[8]</sup>提出了本文的研究模型,具体如公式(1)所示。

$$M_{BDT} = (B_{PE}, E_{PE}, P_{PE}, B_{VE}, E_{VE}, P_{VE}, B_{SS}, B_{DD}, B_{CN})$$

(1)

式中:  $M_{BDT}$  表示面向桥梁拆除的多维模型;  $B_{PE}$  表示桥梁物理实体;  $E_{PE}$  表示车载装备物理实体;  $P_{PE}$  表示施工人员物理实体;  $B_{VE}$  表示桥梁虚拟模型;  $E_{VE}$  表示车载装备虚拟模型;  $P_{VE}$  表示施工人员虚拟模型;  $B_{SS}$  表示面向全过程桥梁智能拆除服务;  $B_{DD}$  表示与桥梁拆除相关的数据;  $B_{CN}$  表示各组成部分的连接。

物理建造实体(PE)是五维模型的构成基础,对物理建造实体(PE)的准确分析与有效维护是建立  $M_{DT}$  的前提<sup>[8]</sup>。物理实体包含的信息要素众多,在该框架下  $B_{PE}$  的信息主要包含待拆桥梁本身的结构、构件以及桥梁的跨径、重量等相关信息;  $E_{PE}$  主要包含车载装备的结构组成,使用功能以及承载能力等信息;  $P_{PE}$  是施工过程中对施工人员的总概括;除此之外,物理建造实体(PE)还需包括物料、工法、环境等对象的相关要素信息。

虚拟模型(VE)是对物理实体的一一映射,需要与物理实体保持良好的时空一致性,这就需要在模型的建立时,对物理实体的细节层次更加接近。目前在工程领域研究较多且应用广泛的模型类型主要有 BIM 模型、有限元模型、点云模型等,虚拟模型不仅包含了物理实体的几何参数(如形状、尺寸、功能、位置等),还包含了物理实体的物理属性、约束以及特征等重要信息。

桥梁智能拆除服务系统(  $B_{ss}$  )具有强大的处理功能,结合现实场景中的需求,通过数据模型、运行算法、仿真实验等,实现数字孪生内部所需的各项功能性需求;同时又能以应用软件、客户端 APP 以及 Web 端应用程序等形式为施工管理决策人员提供智能决策服务。

孪生数据服务平台(  $B_{DD}$  )是数字孪生的驱动,数据主要来源包括待拆除桥梁以及施工人员、机械设备、工艺工法、施工环境、物料五大要素,通过实时数据交互反馈,对当前施工状态进行实时监测,不断将真实现场施工数据传递给服务系统端,利于施工管理决策人员在线实时决策,同时,将决策信息同步反馈给施工现场,便于施工进度安全、流畅进行。

连接模块(  $B_{CN}$  )实现数据交互反馈,是各模块之间联系的纽带,实现现实物理世界与虚拟数字世界的互联互通。

### 2.2 拆除框架

结合高速公路跨线桥梁拆除的数据特点和应用要求,本文提出了数字孪生驱动的桥梁拆除应用思路与方案,该框架总体架构布局由桥梁智能拆除服务系统、孪生数据服务平台、物理实体、虚拟模型和连接模块构成,如图 1 所示。桥梁智能拆除服务系

统是直接面向用户,包含了桥梁及拆除设备数据管理功能、可视化桥梁拆除预警功能、可视化拆除引导功能等,当然,用户可根据自身需求,开发其他功能模块。

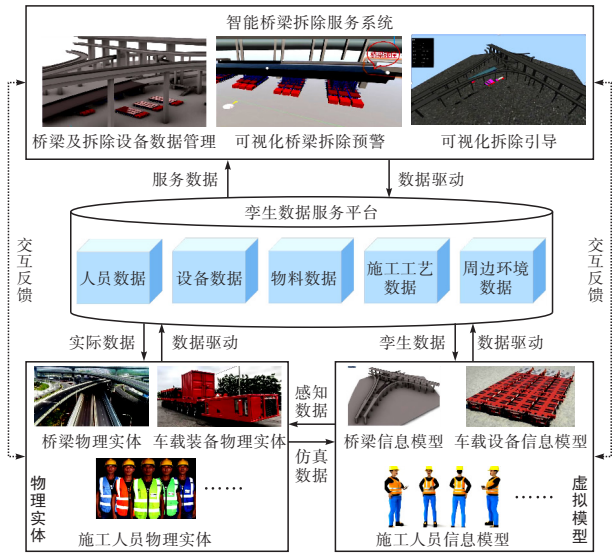


图 1 基于数字孪生的桥梁智能拆除方法框架

3 实现方法

3.1 拆除运行原理

桥梁数字孪生体的运行需要孪生数据的实时驱动,桥梁物理实体、虚拟桥梁模型和桥梁智能拆除服务系统通过数据进行实时交互、持续优化任务。

1)桥梁数字孪生体的迭代优化过程,是桥梁物理实体与桥梁智能拆除服务系统之间的数据交互过程,数据通过感知系统获得,感知系统由分布在桥梁物理实体上的各类传感器组成。当桥梁数字孪生体运行桥梁拆除任务时,桥梁拆除服务系统在孪生数据中调运资源数据(包括施工人员、机械设备、工艺工法流程状态、施工环境以及物料数据)的驱动下,会自动识别任务内容并匹配到满足任务要求的初步桥梁拆除方案。并将该方案以指令的方式传达给物理实体。物理实体根据系统指令进行调整,同时将实时数据不断反馈给桥梁智能服务系统,反复迭代分析,达到最优拆除要素,从而得到初步桥梁拆除方案。

2)在对桥梁拆除方案的迭代优化过程,也是桥梁数字孪生体中桥梁智能拆除服务系统与虚拟物理实体的交互过程。虚拟物理实体根据初步桥梁拆除方案,结合桥梁孪生数据服务平台中的历史数据、实时数据、对桥梁拆除方案进行仿真、预测及优化,并将结果反馈至桥梁智能服务系统,从而对桥梁拆除初步方案进行修正和优化,并反复迭代优化,得到最优结果。基于最终方案生成拆除过程操作指令。

3)对桥梁拆除过程的实时迭代优化过程,也是桥梁数字孪生体中物理实体和虚拟模型的交互过程。在桥梁孪生数据平台中,经过多次迭代优化后得到最优阈值,在桥梁物理实体与虚拟物理实体交互过程中,将实际数据与最优阈值进行对比,当实际数据接近阈值时,系统会弹窗提示,并让技术人员做相应的选择措施(比如:停止正在进行的步骤或对该步骤进行调整);当实际数据超过阈值时,系统会自动停止当前正在进行的操作,同时弹窗警告。

3.2 拆除关键技术

基于数字孪生技术的桥梁智能拆除方法具有很多优势,如:自动感知、可识别、运算分析、智能决策执行等等。此外,还涉及到物理空间模型的建立,数据信息传输分析等,运用到的关键技术,以云计算、大数据等为主。值得一提的是,在模型中还增加了复合导航、无人驾驶技术。这些均是传统拆除方法无法企及的。

1)多维多尺度虚拟建模 在数字孪生框架中,虚拟模型起至关重要的作用,虚拟模型的精细化程度决定了施工信息量的多少,建立精细的虚拟模型才能最大程度保留工程的有效信息,且尽可能的减少信息的冗余和错误。虚拟模型需要反映物理实体的几何尺寸、空间大小、物理形状、位置关系等信息,桥梁虚拟模型的建立离不开 BIM 技术,BIM 模型的创建又依赖于 BIM 核心软件,所以应当选择合适快速的 BIM 软件。当前,国内工程领域的主流 BIM 软件包括美国的 Bentley 系列和 Autodesk 系列、芬兰的 Tekla、法国的 Dassault 以及 McNeel 公司的 Rhino 软件。由于桥梁结构的特殊性,参数化软件对于桥梁虚拟模型的建立是最好的选择,Revit 内置有标准构件族库,同时还可以根据需要自定义构件族或者创建新的族文件;Rhino 具有很好的曲线建模功能,且内置许多插件,是很好的复杂构件和复杂曲线桥梁建模软件,如图 2 为建立的桥梁及车载装备虚拟模型。

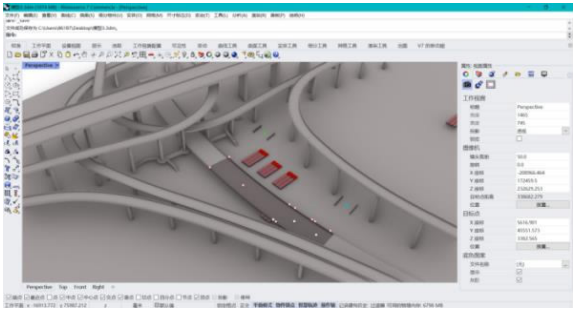


图 2 桥梁及车载装备虚拟模型

2)感知传输与数据识别 整个数字孪生系统体系的基础是高精度传感器数据的采集和快速传输,



监测内力、位移、温度等多种功能的传感器,它可以最大程度地还原物理实体系统运行的情况,通过全面、精准及快速布局传感器,形成一个庞大网格,随时捕获物理量信息<sup>[9]</sup>。对于桥梁拆除工程,本身就具有复杂性和变化性,其物理空间环境变化随着拆除跟进也会发生复杂性变化。众所周知,影响工程质量的独立因素有五大要素、智能感知以及网络数据识别,其中:数字孪生系统最基础的数据来源五大要素,通过多种类型、多种功能的传感器感知要素信息,采集多源异构数据,将其阐述给中央控制系统,为此需要在网络模型中统一数据接口、通讯协议,并针对不同类型、不同来源的信息进行统一化处理,经过转换后再进行传输,最终将数据传导至虚拟空间。具体原理参考下图 3 所示。

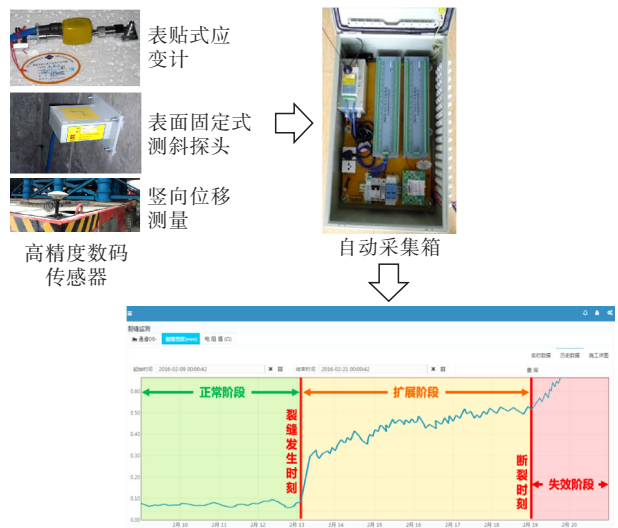


图 3 感知传输与数据识别流程

3)数据驱动与辅助决策 数字驱动就是运用最新数据和历史数据,对模型不断更新和调整,考虑到系统机理特征、运行数据特征,找数据驱动和解析模型契合之处,并通过解析模型,结合数据驱动原理,对模型进行补充和优化。在物理实体上分布了很多传感器,它们采集了很多实体数据,由多数据融合算法,根据桥梁结构所承受的各类工况参数,可以精确预测桥梁及设备受力限值,融合型预测方法的实施流程如图 4 所示。

3.3 案例应用

基于上述研究方法,以上海某项目为例进行研究。该高架桥接地段因道路改造规划,需将三跨连续梁拆除,待拆除桥梁截面形式为等截面单箱三室直腹板钢筋混凝土箱梁,桥面宽 18 m,顶板宽度 17.7 m,底板宽度为 10.4 m,梁高 2.2 m。下部结构为整体式钢筋混凝土基础,分离式双柱式桥墩。

1)多维多尺度虚拟建模 选用 Rhino 软件对施工现场的外观进行建模,待拆除桥梁用 ANSYS 软

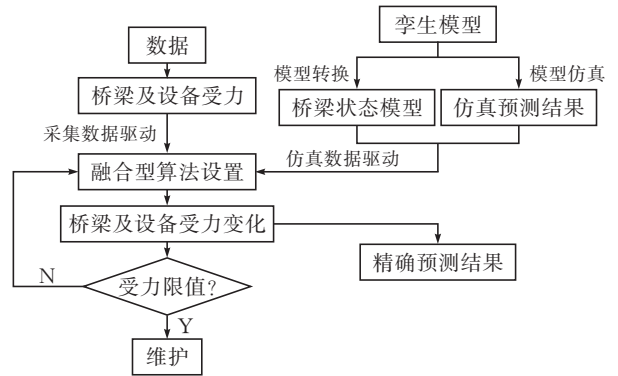


图 4 融合型预测方法的实施流程

件建立,转化为荷载形式作用在车载装备(模块车组+支撑结构)上,得出车载装备可能出现的所有参数变化。将参数变化模块化,建立动态可扩展的数字库,打包封装程可调用的文件包。通过在 WEB 端建立可视化的孪生数据平台,进行桥梁拆除模拟仿真展示。



图 5 WEB端可视化平台

2)感知传输与数据识别 桥梁体量大,拆除过程不可控因素较多,而物联网技术可对桥梁进行全面感知。物理实体模型、数字孪生虚拟模型、孪生数据服务平台通过低延迟、高速、高稳定性的 HTTP 数据传输协议以及 bluetooth、WIFI 等方式,为数据传输实现软硬件保障。

3)数据驱动与辅助决策 通过该项目桥梁拆除过程建立数字孪生模型,与此同时搭建了安全风险预测控制平台,实时分析拆除过程的信息,并在平台上进行可视化展示,分析虚拟模型所存储以及物理拆除过程实时采集的多源异构数据,实现对吊装安全风险实时预测,并对吊装过程风险演化规律进行分析,在智能安全管理平台上显示所收集的拆除多源异构数据以及风险预测结果,实现了对整个拆除过程数据全面获取并保证了施工过程的安全性。

4 总结

随着信息化和人工智能时代的到来,桥梁拆除施工必须向着数字化、智能化的方向前进,桥梁拆除智能化不仅能够提高桥梁拆除施工效率、节约成本,

还能更好地进行工地管控,使得桥梁拆除工程向着智慧工地迈进。

1)根据已有研究成果,提出了智能化桥梁拆除多维模型,通过模型生成了拆除框架,结合调研数据和历史数据,对整个拆除桥梁过程实施闭环管理,及时反馈跟进情况,提高作业质量、效率,减少成本和误差。今后在大数据集成的环境下,通过高精度的传感器采集设备,对施工过程的全要素进行感知分析,实现物理实体在虚拟模型中的真实映射。

2)桥梁智能拆除的实现,还需要更多的保障措施,如:完善的理论基础;先进的软件条件;优势的硬件系统等,而本文研究仅从理论体系入手展开研究,分析了数字孪生技术的应用,后续研究将会进一步讨论软件、硬件系统开发以及成本维护的相关内容,以此补充本文研究的不足。

3)传统桥梁拆除方法数字化、智能化程度低,将数字孪生技术应用于桥梁拆除实际工程中,实现项目信息化管理,数字孪生具有可视化、模拟性、协调性、优化性,可在构建的模型基础上,实现施工场地预布置模拟、工程量自动统计、交通疏散模拟以及桥梁拆除全过程模拟等,能够对项目的重难点实时监控,达到桥梁智能拆除的目的。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 孔令楠.西北干旱地区连续刚构桥梁加固方案优选研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.

[2] 肖列.城市核心地段高架桥静力切割拆除技术的应用研究[D].长沙:湖南大学,2019.

[3] 刘占省,刘子圣,孙佳佳,等.基于数字孪生的智能建造方法及模型试验[J].建筑结构学报,2021,42(6):26-36.

[4] 刘海涛.刍议拆除上跨铁路高危桥梁施工[J].城市建设,2019,16(11):165-168.

[5] 黄玮征,董宇路,张锡霖.BIM技术在跨内河航道桥梁拆除施工中的应用研究——以上海浦星公路桥工程为例[J].土木建筑工程信息技术,2019,11(5):36-42.

[6] 孙士鹏,刘涛,王玉国.复杂立交上部结构快速拆除技术[J].城市道桥与防洪,2021(5):208-211,23-24.

[7] GRIEVES M.Product lifecycle management:The new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005,2(1-2):71-84.

[8] 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.

[9] 刘占省,史国梁,王竞超.数字孪生驱动的预应力拉索索力智能预测方法研究[J].工业建筑,2021,51(5):1-9,123.

Multi-dimensional Model of Demolishing Old Bridge Based on Digital Twin

YAN Xiaofeng, SUN Xianbin, ZOU Yiquan, ZHUANG Zijing

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068, China )

**Abstract:** In the new era of economic development, the safety, applicability, durability and other functions of many old bridges cannot meet the new needs of modern urban traffic development, so they are in urgent need of demolition and reconstruction. In order to realize bridge removal safely, quickly and economically, an intelligent bridge removal method based on digital twin is proposed. The method is based on the digital twin theory and the digital twin five-dimensional model. By comprehensively applying cloud computing, big data, artificial intelligence, Internet of Things and other key technologies and Building Information Modeling (BIM) model, the framework of intelligent bridge demolition method based on digital twin is constructed. By means of data sharing, information visualization, intelligent analysis and decision making, the level of safety early warning is improved and the decision-making ability is enhanced, which provides support for the bridge demolition industry to transform to information and intelligence.

**Keywords:** bridge demolition; digital twin; frame building

[责任编辑:裴 琴]