

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.229



# 桥梁云计算 2020 年度研究进展

杨兴旺, 唐成, 易用强, 梁伟军  
(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:**随着桥梁建设的深入发展、桥梁设计-施工-运维的一体化和运营管理的精细化发展趋势,对数据存储、计算能力等提出了更高要求,云计算技术是解决此类问题的有效手段。通过文献检索与分析,从基于云计算的桥梁健康监测、桥梁大数据处理和物联网技术以及基于云计算的桥梁 BIM 和协同设计等方面对近年来桥梁工程中的云计算应用进行了总结,对桥梁云计算可能的研究及应用的重点方向进行了预测。

**关键词:** 云计算;桥梁健康监测;大数据;建筑信息模型(BIM)

**中图分类号:** U446      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0261-07

## State-of-the-art review of cloud computing for bridge engineering in 2020

YANG Xingwang, TANG Cheng, YI Yongqiang, LIANG Weijun

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** With development of bridge construction, integration of bridge design-construction-maintenance, refined management of bridge operation in China puts forward higher requirements for data storage, computing capacity etc. Cloud computing is an effective measure to satisfy the demands. By means of literature retrieval, the applications of cloud computing in bridge engineering in recent years are summarized, such aspects as bridge health monitoring, big data and internet of things in bridge, BIM and collaborative design based on cloud computing. The feasible focuses of future research and application are suggested.

**Keywords:** cloud computing; bridge health monitoring; big data; Building Information Model (BIM)

近年来,中国的桥梁工程无论在建设规模还是科技水平上,均已跻身世界先进行列,进入了桥梁建设的快速发展期。随着桥梁建设过程中的设计、施工和运维等,势必会有海量的数据需要存储和处理,以及桥梁结构的复杂化和设计-施工-运维的一体化和运营管理的精细化等要求,这对存储和计算设备的能力提出了更高的要求。

云计算(Cloud Computing)是一种基于互联网的计算方式,通过这种方式,共享的软硬件资源可以按需提供给各种计算机终端、移动终端等设备(图 1)<sup>[1-2]</sup>。其主要特点包括:云服务的访问不受时间和地点的限制,并且可以通过任意互联网设备进行访问;多用户共享计算基础设施,保证隐私安全;计算资源的弹性属性好,即可根据用户需求增加或减少对计算资源的请求<sup>[3]</sup>。云计算概念仍在不断发展中,目前其核心技术包括 BIM,大数据(Big Data),物联网(IoT, Internet of Things), AI, VR (Virtual Reality), AR (Augmented Reality),移动计算(Mobile Computing),机器人

(Robotics)等。

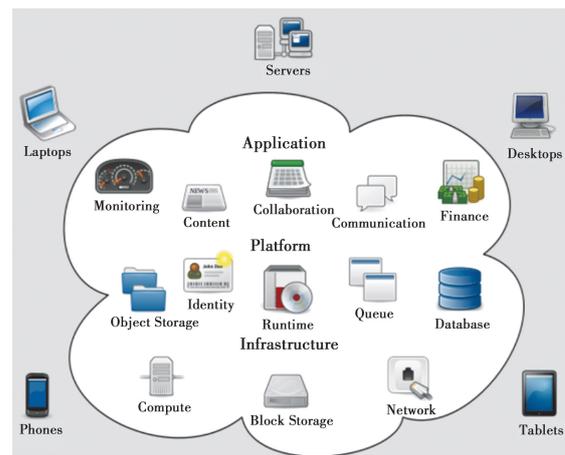


图 1 云计算概念图<sup>[1]</sup>

云计算自 2006 年由亚马逊 (Amazon) 公司率先推出以来,近十几年发展迅速,在世界范围内多个行业产生了广泛

收稿日期:2021-07-07

作者简介:杨兴旺(1975-),男,博士,主要从事大跨度桥梁结构行为、斜拉桥施工控制研究,E-mail: xwy@swjtu.edu.cn.

影响,在建筑行业的应用逐年增多,在中国的发展尤为迅速<sup>[4-5]</sup>。建筑行业中云计算的相关英文文献统计见图 2。

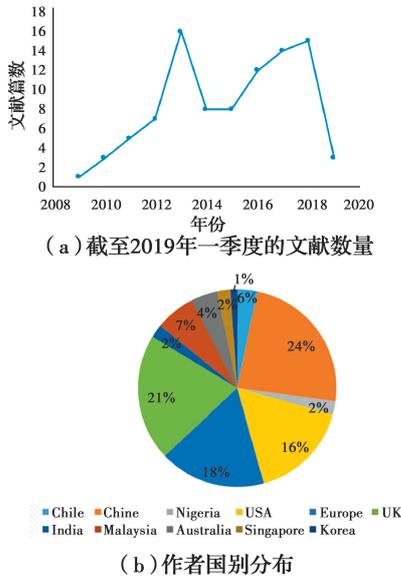


图 2 建筑行业 (Construction Industry) 中云计算相关英文文献统计<sup>[4]</sup>

桥梁工程深入发展所带来的新问题和新要求,很多方面是与云计算的特点相契合的,两者的结合一定程度上是必然的<sup>[6]</sup>。笔者通过文献检索,对桥梁工程中的云计算应用进行总结,主要包括基于云计算的桥梁健康监测平台架构、大数据处理和物联网及基于云计算的桥梁 BIM 及协同设计等方面。

### 1 基于云计算的桥梁健康监测系统

目前,云计算在桥梁结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 系统中的应用主要集中在监测数据的存储、数据的可视化处理及多终端接口等方面,有少量系统利用云平台的强大计算能力实现了监测数据的(准)实时分析。

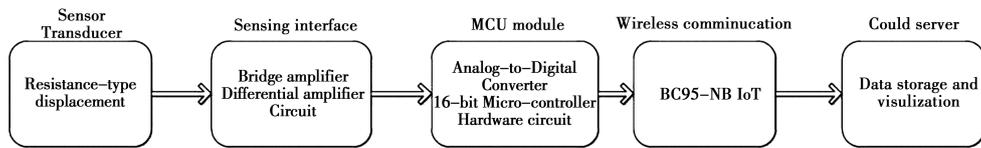


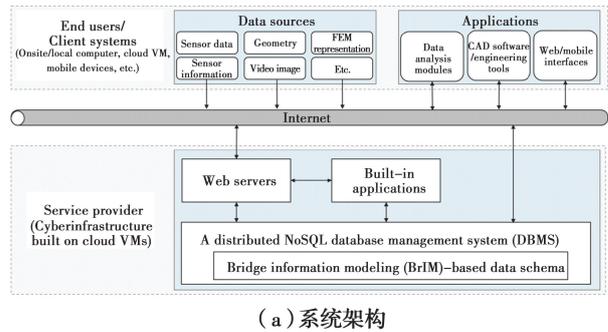
图 4 基于服务器的无线位移监测系统框图<sup>[8]</sup>

综合多种来源的大量数据、形成有效的以数据驱动的决策系统是 SHM 系统成功的关键,Alampalli 等<sup>[9]</sup>提出了一个基于多种相关监测和分析数据并及时做出风险决策的大数据分析框架,如图 5 所示,其数据源包括传感器采集的近实时数据流、历史巡检数据及结构计算模型的分析数据。该框架实现快速决策的关键在于 4 项技术的应用:云计算、关系型数据库处理、NoSQL 数据库支持及内存分析 (in-memory analytics)。他们在一条存在多种危险源的铁路线上对该框架进行了验证,可实时计算桥梁关键部件及桥跨的可靠度指标,并基于风险分析做出决策。

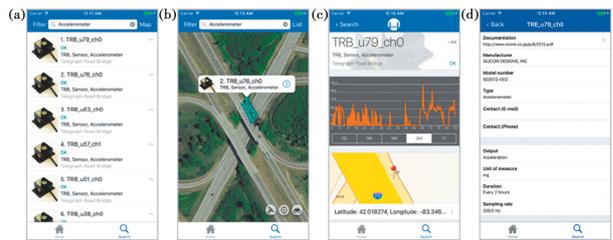
意大利 Polcevera 桥坍塌是由于侵蚀性环境引起的局部

### 1.1 SHM 云平台架构设计方面

结构健康监测系统会生成大量的各种类型数据,云计算的合理应用可为 SHM 的长期部署提供可靠保证,Jeong 等<sup>[7]</sup>设计了一套基于云平台的桥梁监测系统,如图 3 所示,该系统包括虚拟机、分布式数据库及云端服务器,可实现 SHM 数据的弹性管理、共享和有效利用,该系统还在一座实桥上进行了测试。结果表明,该云平台可以有效管理传感器数据,方便管理人员及时可靠地获取数据。



(a) 系统架构



(b) 传感器管理、数据查询移动终端

图 3 基于云平台的桥梁监测系统<sup>[7]</sup>

位移监测是桥梁健康监测及保证结构安全的重要内容之一,拉线式位移监测费用较高,传统的无线位移监测传输距离受限,设备维护及数据处理困难。Hou 等<sup>[8]</sup>基于物联网 (IoT) 概念设计了一种低成本、低功耗的无线位移传感器,可直接向云端服务器发送监测数据,并在网页端远程分析及可视化监测数据。该监测系统框图见图 4。

损伤累积直接导致的严重事故,针对该桥垮塌原因的分析,Furinghetti 等<sup>[10]</sup>提出了一种桥梁 SHM 系统方案及其软件、硬件布置策略,如图 6 所示,可实现对全部桥梁重要构件单元的可靠养护,及时预警,防止桥梁结构垮塌。该系统的数据存储与分析采用了云计算技术。

张若钢等<sup>[11]</sup>以一座主跨 180 m 的三跨连续梁为例,探讨了基于“北斗系统”的桥梁变形监测,变形数据存储在云数据中心,并实现了多终端访问。杨亮等<sup>[12]</sup>以云计算在桥梁健康监测系统中的应用为背景,从安全角度分析了云计算系统面临的风险和威胁,介绍了桥梁健康监测云计算系统各层次的安全防护体系,阐述了云计算安全防护体系在云计算系统中

的重要作用。朱仕村等<sup>[13]</sup>则提出了一种新兴的由第三方专业机构提供服务的结构健康监测云的概念,描述了云平台的

系统架构,总结相关技术的研究现状并展望了应用前景。

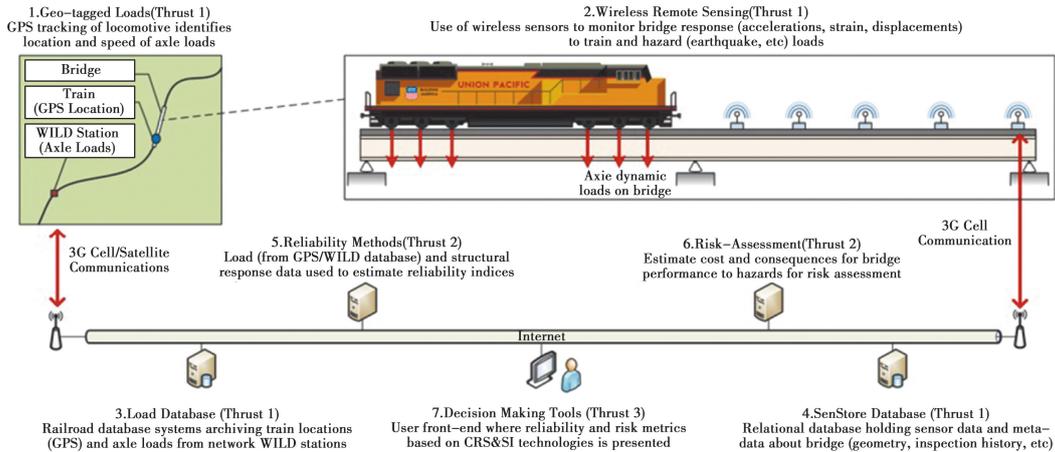


图5 对铁路网进行健康评估及风险缓释 (risk mitigation) 的系统架构<sup>[9]</sup>

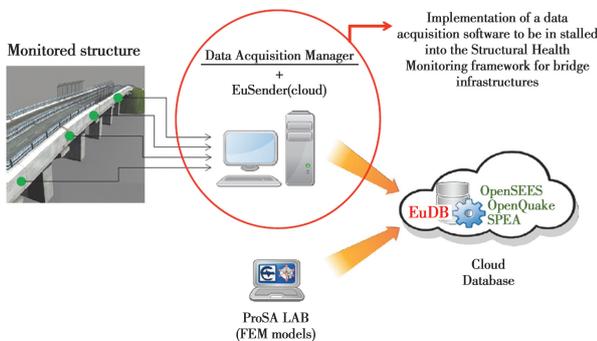


图6 一种桥梁 SHM 系统的软件布置方案<sup>[10]</sup>

### 1.2 SHM 大数据处理方面

桥梁健康监测系统通常会接入数百至上万个传感器,系统应考虑大量监测数据实时并发处理的场景;系统对大风、地震、超载及车船撞击等突发事件及偶然荷载响应的实时性要求高,数据采集通常为连续动态采集,部分监测项采集频

率更高(如振动),一般一座大型桥梁的监测系统一年可产生数百 GB 的监测数据。此外,系统还需对数据进行滤波、物理量转换、温度补偿、时频域转换和统计值计算等大量数据处理。如此海量数据的实时采集、处理、分析和存储等依靠传统方法已很难处理,作为云计算基础技术之一的大数据 (Big Data) 架构是一种有效的解决方案。

梁柱<sup>[14]</sup>提出传统的桥梁健康监测系统建设方式在机房建设、软件开发及部署上投资大,且管理者后期对系统进行运维管理的难度高。随着云计算技术的发展,数据和服务向云端迁移已成为必然趋势。研发桥梁健康监测云平台需要重点解决大量传感器高频信号的并发采集及处理、海量数据存储与分析等关键技术问题,采用分布式实时大数据处理系统架构(图 7)、基于 NoSQL 的分布式数据库及分布式文件系统、分布式计算框架 Spark 等可有针对性地解决这些问题。

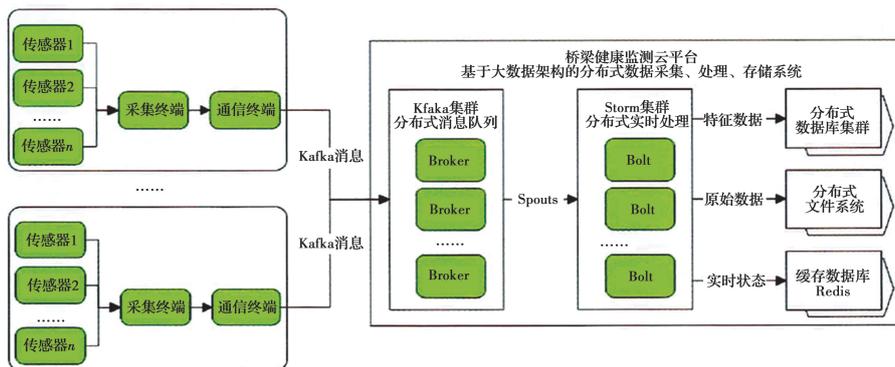


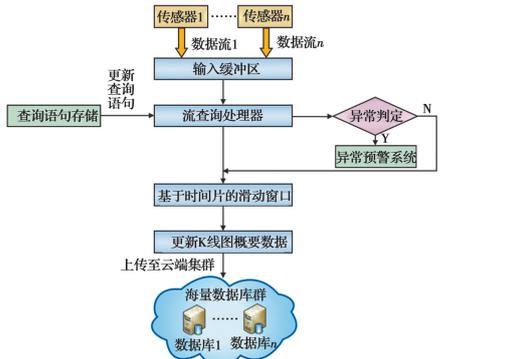
图7 基于流式大数据的分布式实时数据处理架构<sup>[14]</sup>

向阳等<sup>[15]</sup>针对桥梁健康监测系统海量数据在传输、处理等环节面临的难题,提出了一种基于 K 线图时间片驱动的滑动窗口数据流处理模型,对传感器网络中的数据流进行快速有效地采集,并且减少了数据存储量;针对斜拉索索力统计评估,提出了基于 Map/Reduce 的索力并行处理模型,如图 8 所示。

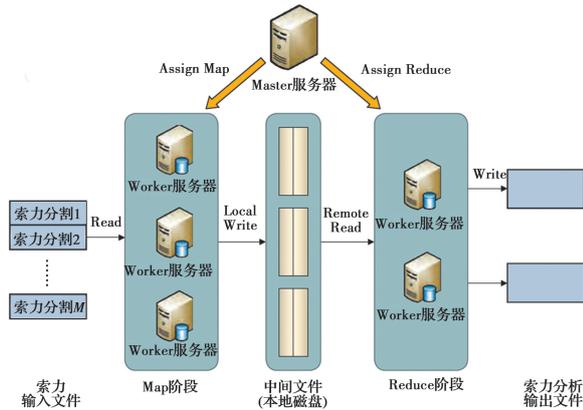
Zhao 等<sup>[16]</sup>提出了一种利用动应变相关系数指标对铰接的装配式梁桥协同工作性能进行评价的方法,并在一座实桥上实现了动应变数据采集、云端存贮、铰接性能指标(准)实时计算及状态诊断的远程云监测系统,如图 9 所示。

受计算能力和数据分析方法所限,桥梁 SHM 系统的海量监测数据所蕴含的信息目前未能很好地提取出来,大数据

(Big data)和人工智能中的深度学习(Deep Learning)技术是解决这一问题的可能途径之一。针对桥梁 SHM 的具体问



(a) 基于K线图时间片驱动的滑动窗口数据流处理模型



(b) 基于Map/Reduce的索力分布式并行处理流程

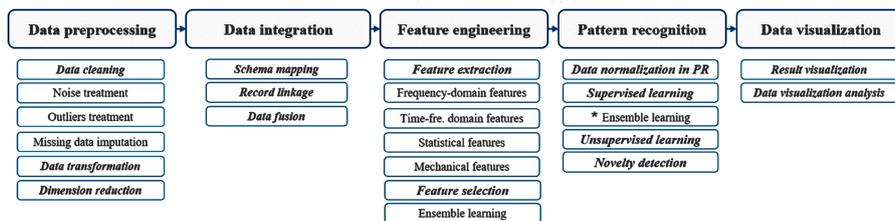
图 8 SHM 系统中的大数据处理方案<sup>[15]</sup>

Data acquisition	Data storage	Data computing	Data analysis
Internet Internet of Things Internet of Vehicle ...	HDFS NoSQL NewSQL ...	Hadoop MapReduce Storm Spark Cloud computing GPU	Knowledge Discovering in Databases Machine Learning Data Mining Pattern Recognition Statistics

(a) 大数据技术

Application	Results	Techniques	References
Building big data-oriented SHMS	Multiscale SHMS was built Information repository to integrate bridge model information and monitoring data was built Framework to manage structured and unstructured monitoring data and for decision making was built	Hadoop ecosystem NoSQL Cloud computing NoSQL	Liang et al. (2016) Jeong et al. (2016) Alampalli et al. (2016)
Solving the bottleneck of computing ability	Computational efficiency was improved in a damage detection process More than 200 million data points were processed with less than 14 h, and can be further improved by adding calculating node Computing process of calibrating a concrete slab model with massive data was accelerated Framework was built to fulfill near-real-time damage detection	Cloud computing MapReduce MapReduce MapReduce Apache spark Cloud computing	Yu and Lin (2015) Vespier et al. (2011) Cai and Mahadevan (2018) Khazaeli et al. (2016)

(b) SHM中的大数据计算技术



(c) 桥梁SHM中大数据分析过程

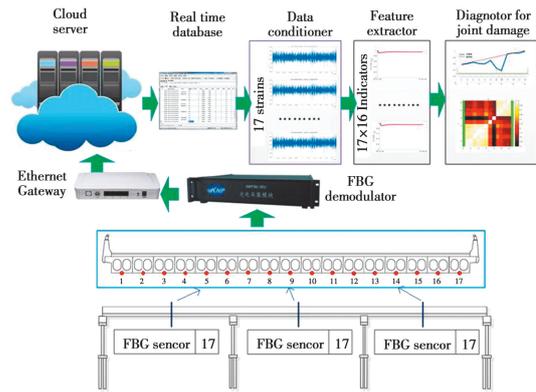


图 9 装配式梁桥协同工作性能远程云监测系统架构<sup>[16]</sup>

题, Sun 等<sup>[17]</sup>提出, 大数据技术可分为两类, 即计算技术和数据分析方法, 在 SHM 系统数据采集、存储和分析的不同阶段应分步骤综合运用各类别下的具体技术手段, 如图 10 所示; 深度学习算法可用于处理诸如视觉观察的非结构化数据和时间序列数据, 并据此对结构损伤进行识别。

涂慧敏等<sup>[18]</sup>分析了桥梁安全与健康监测数据中心的数据管理技术及发展趋势, 阐述了基于云计算的数据中心基础架构, 探讨了关键设备和软件选型, 对基于云计算的桥梁安全监测数据中心的应用前景进行了展望。

### 1.3 物联网方面

物联网(IoT)是云计算的基础技术之一, 是一种借助智能终端, 依照约定将物体与互联网相连, 实现对物体的智能识别、感应、监控和管理的网络。它能实现施工现场数字化、信息化施工和管理, 形成全寿命周期的安全管理智能化网络。

图 10 桥梁 SHM 监测数据的大数据处理方案<sup>[17]</sup>

Hou 等<sup>[8]</sup>基于 IoT 概念设计了一种低成本、低功耗的无线位移传感器,其单元集成如图 11 所示。

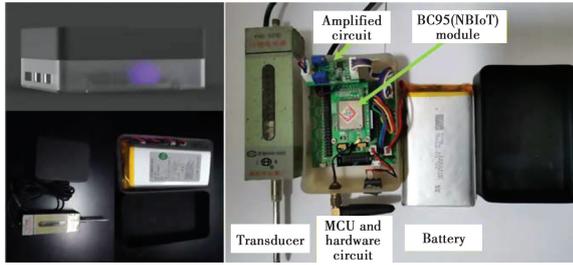


图 11 无线位移传感器单元集成<sup>[8]</sup>

Tong 等<sup>[19]</sup>介绍了低功耗无线加速度传感器的研制与部署,研究了无线网关上的传感器和遵循物联网协议的云平台桥梁监测,SHM 系统在上海赤泾大桥的现场测试中得到了验证,其可实现实时数据的采集、传输、存储和分析处理等综合功能。

杜立婵等<sup>[20]</sup>基于物联网技术设计了一种桥梁健康远程在线监测系统,如图 12 所示,通过采集预埋的振弦式传感器信息,实时反映桥梁结构健康状态。系统采用 ARM 处理器 STM32F407 作为主控制器,采集振弦式传感器频率变化及温度信息,并通过物联网 NB-IoT 模块 BC26 将数据上传至云服务器。此系统采用了目前主流的技术方案,具有较好的实用价值。

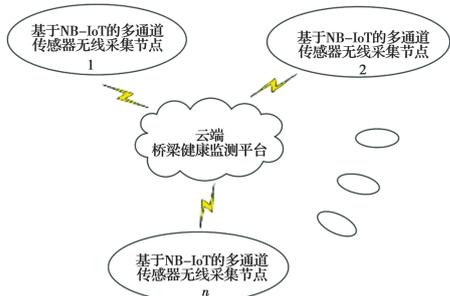


图 12 基于 NB-IoT 无线数据采集桥梁监测系统<sup>[20]</sup>

马小琴等<sup>[21]</sup>将物联网技术与桥梁构造相结合,设计出了一个桥梁智能健康监测系统,从虚拟节点的构建、传感器的选择和优化布设、监测数据采集与无线传输、云端车载的数据连接与立体即时反馈等方面探讨了应用中涉及的关键问题并提出了相应的解决方案。

## 2 基于云计算的桥梁 BIM 及协同设计

简而言之,BIM 是带有设计参数的三维模型,同时也是多用户信息交流与共享的平台。基于 BIM 的桥梁结构能够承载桥梁全生命期不同阶段的数据和资源,对桥梁构件进行完整描述,实现多方管理协同,提升桥梁工程信息化水平<sup>[22]</sup>。对 AEC(Architecture Engineering Construction)行业,云计算与 BIM 的结合(Cloud-BIM)是 BIM 应用的新阶段,必将对全行业带来广泛而深入的影响<sup>[23]</sup>。目前对桥梁 Cloud-BIM 的研究相对较少。

Wong 等<sup>[23]</sup>通过文献检索和分析发现,当前多数 Cloud-BIM 研究集中在建筑规划、设计和施工阶段,建议应对建筑全寿命周期的运营、维护、设备管理及能源效率、拆除,包括结构安全性、可靠性等方面投入更多研究。基于云计算的 BIM 概念框图如图 13 所示。

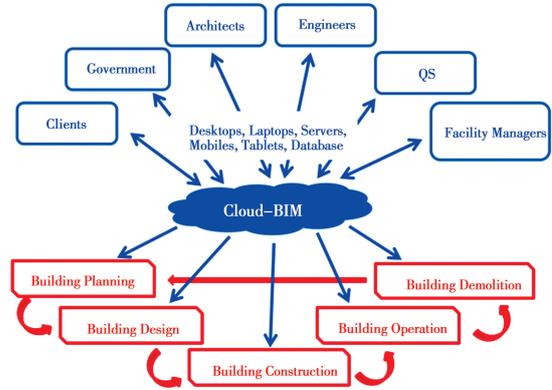


图 13 基于云计算的 BIM 概念框图<sup>[23]</sup>

Zhang 等<sup>[24]</sup>从云计算的基本概念出发,对 BIM 的云平台框架进行了分类,包括传统单机软件的云服务(云存储,云计算)、软件开发商云服务平台和通用云服务平台,并对各平台的特点及适用情况进行了比较,可作为 BIM 选择云平台框架的参考。

关于云计算在促进 BIM 应用、在结构全寿命周期内结合 BIM 以促进各方协作等方面的潜在影响已多有研究,但对协作的具体方法、数据接口等方面研究不多,这也是 BIM 协作平台广泛应用的主要障碍。Alreshidi 等<sup>[25]</sup>考察了 BIM 管理方法的需求,提出了基于云计算的 BIM 管理平台的规范及流程,如图 14 所示。并按照软件工程方法,使用 BPMN (Business Process Model Notation) 和 UML (Unified Modeling Language) 对此进行了定义,可作为基于云计算的 BIM 平台设计参考。

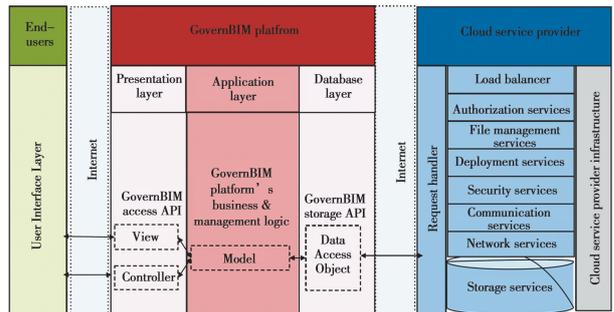


图 14 基于云计算的 BIM 平台软件架构<sup>[25]</sup>

许玉娟<sup>[26]</sup>提出了基于云计算的 BIM 施工管理体系模型及结构(图 15),并以施工模拟为例,介绍了系统的典型应用流程,分析了该管理体系的效能。

云计算和 BIM 技术使得协同设计成为可能,而基于云计算的 BIM 能给予协同设计更大的支持<sup>[27]</sup>。陈杰等<sup>[28-29]</sup>构建了一个基于云计算的 BIM 协同设计平台(图 16),设计了包括 BIM 建模、任务划分与设计协同、设计者权限管理、冲突检

测与消解、知识管理和基于 BIM 模型的扩展功能等六大模块,并通过一个实际拱桥工程案例分析了该协同设计平台的实施过程。陈杰在文献[29]中还构建了一个 Cloud-BIM 施工协同平台。

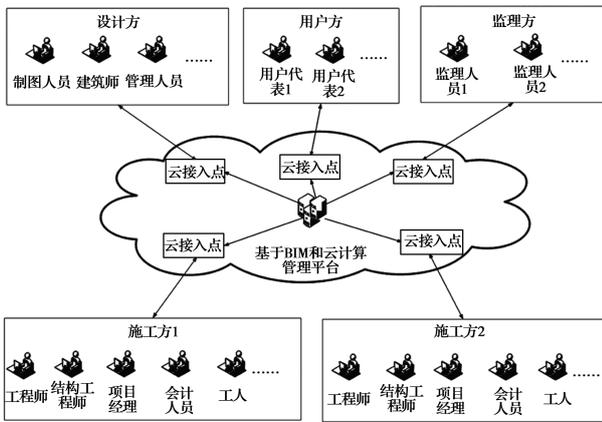


图 15 基于云计算的 BIM 施工管理体系模型<sup>[26]</sup>

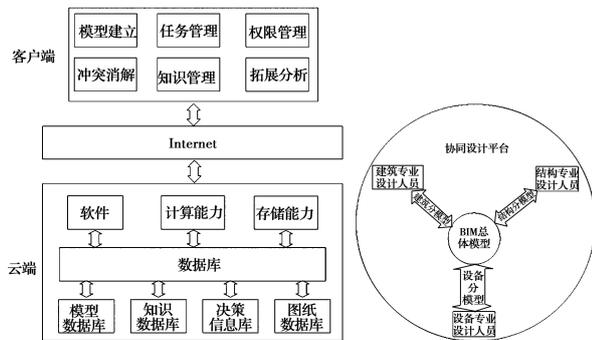


图 16 基于云计算的 BIM 协同设计平台<sup>[28-29]</sup>

### 3 总结与展望

近年来,云计算发展极为迅速,应用十分广泛,但在土木工程行业,特别是桥梁工程方面的应用范围仍相对较小,应用深度也不够。笔者认为,以下方面的研究及应用近期值得关注:

- 1) 基于大数据架构、AI 深度学习的桥梁健康监测数据分析及可视化;
- 2) 桥梁结构全寿命周期的 Cloud-BIM 模型及应用;
- 3) 桥梁的设计、施工(含施工控制)和管养(含 SHM 系统建立、融合)等部分工作“云服务”化。

#### 参考文献:

[ 1 ] [https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud\\_computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing). Wikipedia, 2021.

[ 2 ] MELL P M, GRANCE T. The NIST definition of cloud computing [R]. Communications of the ACM, 2011, 53(6): 50.

[ 3 ] BILAL M, OYEDELE L O, QADIR J, et al. Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends [J]. Advanced

Engineering Informatics, 2016, 30(3): 500-521.

[ 4 ] BELLO S A, OYEDELE L O, AKINADE O O, et al. Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges [J]. Automation in Construction, 2021, 122: 103441.

[ 5 ] OESTERREICH T D, TEUTEBERG F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4. 0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry [J]. Computers in Industry, 2016, 83: 121-139.

[ 6 ] 刘波. 浅谈云计算在桥梁工程中的应用[J]. 城市建设理论(电子版), 2013(36).

[ 7 ] JEONG S, HOU R, LYNCH J P, et al. A scalable cloud-based cyberinfrastructure platform for bridge monitoring [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(1): 82-102.

[ 8 ] HOU S T, WU G. A low-cost IoT-based wireless sensor system for bridge displacement monitoring [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(8): 085047.

[ 9 ] ALAMPALLI S, ALAMPALLI S, ETTOUNEY M. Big data and high-performance analytics in structural health monitoring for bridge management [C]// Spie Smart Structures & Materials + Nondestructive Evaluation & Health Monitoring, April 20, 2016. Las Vegas, Nevada, USA: SPIE, 2016.

[10] FURINGHETTI M, PAVESE A, LUNGHI F, et al. Strategies of structural health monitoring for bridges based on cloud computing [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2019, 9(5): 607-616.

[11] 张若钢, 李文洋, 李万鹏, 等. 基于“北斗系统”的大跨连续梁桥形变监测设计分析[J]. 广东土木与建筑, 2017, 24(3): 82-85.

[12] 杨亮. 桥梁健康监测云计算系统的安全防护体系浅析 [J]. 计算机时代, 2016(4): 49-52.

[13] 朱仕村, 张宇峰, 张立涛, 等. 面向长大桥梁结构健康监测物联网的云计算[J]. 现代交通技术, 2011, 8(1): 24-27.

[14] 梁柱. 基于大数据架构的桥梁健康监测云平台[J]. 中国交通信息化, 2020(6): 115-117.

[15] 向阳, 杜君. 桥梁健康监测系统中的大数据分析与研究 [J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(1): 44-48, 54.

[16] ZHAO Y M, DAN D H, YAN X F, et al. Cloud monitoring system for assembled beam bridge based on index of dynamic strain correlation coefficient [J]. Smart Structures and Systems, 2020, 26(1): 11-21.

[17] SUN L M, SHANG Z Q, XIA Y, et al. Review of bridge structural health monitoring aided by big data

- and artificial intelligence; from condition assessment to damage detection [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(5): 04020073.
- [18] 涂慧敏, 吴巨峰. 基于云计算的桥梁安全与健康监测数据中心基础架构及其数据管理技术[J]. *计算机时代*, 2013(12): 18-21.
- [19] TONG X L, YANG H L, WANG L B, et al. The development and field evaluation of an IoT system of low-power vibration for bridge health monitoring [J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1222.
- [20] 杜立婵, 王文静, 韦冬雪, 等. 基于 NB-IoT 的桥梁健康远程监测系统设计[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(20): 155-159.
- [21] 马小琴, 毛凡俊, 刘雨凡, 等. 桥梁智能健康监测系统的研究与设计[J]. *黑龙江工业学院学报(综合版)*, 2019, 19(7): 38-46.
- [22] 吴巨峰, 祁江波, 方黎君, 等. 基于 BIM 的桥梁全生命周期管理技术及应用研究[J]. *世界桥梁*, 2020, 48(4): 75-80.
- [23] WONG J, WANG X, CHAIR W, et al. A review of cloud-based BIM technology in the construction sector [J]. *Journal of Information Technology in Construction*, 2014, 19: 281-291
- [24] ZHANG L, ISSA R R A. Comparison of BIM cloud computing frameworks [C]//International Conference on Computing in Civil Engineering. June 17-20, 2012, Clearwater Beach, Florida, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012: 389-396.
- [25] ALRESHIDI E, MOURSHED M, REZGUI Y. Cloud-based BIM governance platform requirements and specifications: software engineering approach using BPMN and UML [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(4): 04015063.
- [26] 许玉娟. 基于 BIM 和云计算的桥梁施工管理系统研究[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2019(5): 75-77, 80.
- [27] REDMOND A, HORE A, ALSHAWI M, et al. Exploring how information exchanges can be enhanced through Cloud BIM [J]. *Automation in Construction*, 2012, 24: 175-183.
- [28] 陈杰, 武电坤, 任剑波, 等. 基于 Cloud-BIM 的建设工程协同设计研究[J]. *工程管理学报*, 2014, 28(5): 27-31.
- [29] 陈杰. 基于云 BIM 的建设工程协同设计与施工协同机制[D]. 北京: 清华大学, 2014.

(编辑 颜永松)