DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.027

建筑信息物理模型：一种建筑信息描述新形式

杨启亮*，邢建春

（陆军工程大学国防工程学院，南京 210007）

摘要：信息是驱动建筑全生命期“人、机、物”协同，推进建筑活动有序运行的核心元素，而更加真实和高效的建筑信息描述及共享一直是建筑领域的重要研究主题。本文提出了作为建筑信息描述新形式的建筑信息物理模型（BIPM），旨在满足建筑物联实景监控、城市数字孪生等建筑虚实动态实景化交互协同的急剧增长需求，实现建筑物理实体向信息空间的全真映射和协同。BIPM由建筑基本信息模型、物理模型、交互模型构成，统一了建筑外在几何属性信息、内在物理机理的描述。探讨了BIPM涉及的理论基础、关键技术，以建筑冷机的BIPM实现为例阐明了应用成效，进一步分析了BIPM的应用生态与价值。研究认为，应深化BIPM理论和核心关键技术研究，构建系列化的BIPM标准规范，研发体系化的BIPM建筑工业软件工具，更好拓展BIPM应用生态，追求形成自主可控的建筑信息模型新体系，为建筑设计、施工、运维，城市数字孪生等新型建筑工业基础软件的研制提供基础支撑。

关键词：建筑信息描述；信息模型技术；建筑信息模型（BIM）；数字孪生；建筑工业软件

中图分类号：TU17　　**文献标识码：**A

Building Information and Physical Model: A Novel Form of Information Description for Buildings

Yang Qiliang*, Xing Jianchun

(College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Information is the core element to drive human–cyber–physical collaborations and promote the orderly operation of building activities in the entire lifecycle of buildings. More realistic and efficient description and sharing of building information has always been an important theme pursued in the field of architecture. To meet the rapidly growing demand for interactive collaboration between virtual and real building conditions, this study proposes a novel form of information description for buildings, namely a building information and physical model (BIPM), for realizing the true mapping and collaboration from building physical entities to the information space. The BIPM is composed of a building basic information model, a physical model, and an interaction model, and unifies the description of the external geometric attribute information and the internal physical mechanisms of buildings. The theoretical foundation and key technical system of the BIPM are discussed, and the application effectiveness and benefits of the BIPM are demonstrated using building chillers as an example. Furthermore, the application ecologies and values of the BIPM are analyzed. Research suggestions are proposed as follows: (1) deepening the research on BIPM theories and key technologies, (2) formulating serialized BIPM standards and specifications, and (3) developing BIPM building industry software tools to expand the BIPM application ecosystem. This study is expected to provide support for the development of new basic software for the building industry,

收稿日期：2023-03-20；**修回日期：**2023-05-10

通讯作者：*杨启亮，陆军工程大学国防工程学院教授，研究方向为智能建筑、建筑信息模型技术、自适应软件工程、信息物理融合系统；E-mail：yql@893.com.cn

资助项目：国家自然科学基金项目(52178307)；江苏省自然科学基金项目(BK20201335)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

involving architectural design, construction, operation and maintenance, and urban digital twins.
Keywords: architectural information description; information modeling technology; building information model; digital twins; building industry software

一、前言

信息是驱动包括设计、构造、运维在内的建筑全生命期活动的核心元素，参与其中的“人、机、物”等活动主体通过共享建筑信息来协同推动建筑活动的进程。信息用于描述建筑特征，也是对建筑的抽象，在建筑不同阶段的可靠传递、流转和共享，对提升建筑工程建设与运维的进度、质量、效益具有重要意义。建筑信息模型（BIM）是目前较为完善的建筑信息描述方法，被视为土木建筑领域重要的技术进展之一，引发了建筑行业生产管理、运维过程的重大变化。按照研究定义，BIM是对建筑设施物理、功能等特性的数字化表达，通过参数化模型对建筑实体进行立体、直观、精确的刻画描述[1]；也指对构造建筑信息活动的描述[2]。可以认为，BIM的本质是将现实世界的建筑物理实体映射为虚拟对象实体，而当前定义突出了建筑实体的静态信息（如几何属性、结构属性）。

随着智慧城市、智慧战场、元宇宙[3]的发展，增强现实（AR）、混合现实（MR）、“信息－物理”融合交互[4,5]，城市灾害预演、战场全息模拟等应用需求不断涌现，涉及这些新型技术系统的建筑设施构造与信息描述的复杂性不断增加，对具有动态性、真实性、实时性的新型建筑信息建模能力提出了新要求。这类新型的建筑设施信息模型，既要提供复杂信息系统中的参数化三维模型，还要反映建筑实体的动态变化以及相应物理过程（如结构形变、管网压力分布、对象运行特性），以此支持快速、精确、安全、高效的建筑全生命期管理和决策。

然而，以BIM为代表的建筑信息建模技术，侧重建筑几何数据、空间位置、关系模型、质量属性等静态信息的定义与刻画，是典型的“静态信息模型”，未能体现建筑实体的物理规律融合、动态信息接入[6,7]。近年来，已有研究关注BIM与外部环境的交互以及物理仿真问题，如以BIM为基础的过程扩展[8,9]、BIM与人的交互[10,11]、BIM与物的交互[12~17]、BIM动态模拟[18]，但依然无法进行物理世界实体的实时感知与调控，反映建筑实体动态物理特性及过程的物理模型缺乏，难以适应面向直观性、真实性、动态性的BIM应用新需求。

研究并建立一种能够更加真实描述建筑、融合动态运行物理规律、具备动态交互能力的新型BIM，具有理论意义和应用价值。本文立足已有研究基础[6,7]，提出一种建筑信息描述新形式的建筑信息物理模型（BIPM），阐明建筑固有的静态信息模型与动态交互模型、物理规律模型叠加/融合的一般性原理、方法和技术，形成建筑物理实体在信息世界中的数字孪生体；可为高效构造智慧建筑新型技术系统提供统一的理论与技术支撑，涵盖物联网管控、AR/MR交互、全性能动态模拟评估等关键内容。

二、建筑信息物理模型的研究背景与概念内涵

（一）问题提出背景

更加真实、高效地描述建筑并建立相应的信息模型，一直是建筑领域的重要研究主题。建筑信息的描述手段先后经历了口口相传、人工绘制图纸、计算机辅助数字化设计（CAD）等发展阶段（见图1）。在早期，有关建筑及其建设过程的信息描述主要以语言交流实现，没有存贮介质和模型；后来，通过人工绘制图纸实现建筑信息的具象化、图形化并可长期存储，但仍面临共享传递不便的问题；再后来，随着CAD技术的推广应用，以电子文件形式描述和共享建筑信息显著提高了流转效率；如今，建筑信息描述和共享进入了BIM阶段，可对建筑进行三维立体描述，实现建筑信息在建筑全生命期内的无损传递，提高了建筑生产和运行的高效协同能力。

从历史发展的维度来审视建筑信息描述方式的变迁，自然提出新的问题：新一代建筑信息描述与共享方式是什么？如何定义和实现？值得指出的是，我国建筑CAD、BIM等标准框架都源自引进，在新一代模型发展过程中需要加强自主创新研究，

图1　建筑信息描述与共享方式的历史变迁

追求形成原生定义、有影响力的建筑信息描述标准模型；呼应诸多新型应用需求，加快发展具有直观性、真实性、动态性的新型BIM，形成参数化的三维实体呈现能力、虚拟实体与物理实体的融合交互能力、物理特性动态呈现能力。例如，战场全息模拟系统需要三维立体呈现的战场防护工程设施几何实体模型，将战场物联网感知而得的实时信息（如爆炸冲击波压力）叠加到防护工程设施三维模型上并进行动态监视，动态呈现防护设施当前的物理过程效应（如冲击波压力作用下的形变），如此才能近乎真实地呈现、复盘战场场景，提高战场态势生成的快速性和精确性。

受上述背景因素的综合驱动而提出了BIPM，旨在形成一种原生定义、指向现实应用需求的建筑信息描述新形式。

（二）研究现状分析

1. 面向建筑全生命期的BIM应用

BIM技术已渗透至建筑工程全生命期的各个阶段[8]，在设计[19,20]、施工[9,21]阶段的研究应用更为深入和成熟。例如，BIM用于设计阶段风险管理过程中的关键因素控制[19]，拓展形成施工管理4D模型[9]、集成物联网的模块化集成施工平台[21]，在建筑能源[22,23]、安全风险分析与灾害预防[24,25]等方面得到较好应用。近年来，基于BIM的建筑运维[26,27]成为研究热点，BIM与大数据、物联网等技术融合也是重要趋势。

也要注意到，现有研究多将BIM视为与外部物理世界隔离、封闭且纯粹的虚拟模型，侧重构建可在虚拟信息世界中高效运行的BIM实体模型；而BIM模型及其支撑技术，不具有与外部物理世界交互协同的能力，不支持相关软件设施，仍处于“聋哑模型”层次。例如，国际上应用广泛的工业基础类[10,28]，采用面向对象思想，从领域层、共享层、核心层、资源层定义建筑实体对象，同时支持模型分析、性能模拟等高级功能，但仍不支持可与外部物理世界进行直接交互的模型实体。

2. BIM动态交互

BIM技术在人机交互AR、建筑运维动态管控、建筑性能动态模拟等方向应用逐步深化。为了实时响应工程动态过程、保障良好的用户体验，BIM与外部环境动态交互问题获得进一步关注。① 在BIM与人的交互方面，开发了BIM与虚拟现实（VR）结合的虚拟训练平台，实现与人的动作行为的交互及自动响应[11]。② 在BIM与物理系统的交互方面，着重考虑将外部物理环境、对象动态数据等接入到BIM平台中。例如，提出了一种信息集成概念框架[12]，研究了BIM与建筑设施及环境进行实时数据交互的方法与技术[13~15]；针对建筑结构健康检测需求，扩展了BIM模型并增加了结构传感器实体，但仅具有感知能力而不具有控制能力[16]。另外，将信息物理融合系统（CPS）概念[4,5]引入到建筑工程领

域[17,18]，形成面向“信息－物理”融合的BIM扩展方法[6,7]。这些工作侧重构建一种面向建筑工程的CPS系统，仍属“特定而专设”方法，缺乏统一的通用化交互模型和物理模型。③ 在建筑性能动态模拟方面，可将BIM集成到第三方仿真工具提供的动态模型库中，但BIM设计工具与第三方仿真工具存在数据交互接口不统一、自动化程度不高等问题[29]。

随着物联网动态管控、虚拟现实与AR、动态场景模拟仿真等对BIM应用需求的不断增加，BIM与外部环境（如用户、物理系统）的动态交互、动态模型集成等获得更多关注。然而，多数研究针对单一方面（如交互模型[11]、动态物理模型[29]）、具体问题（如结构传感器扩展[16]、指射频识别对象扩展[17]）而展开，通用性不强，无法解决BIM虚拟实体与物理实体双向实时交互、动态物理模型融合问题，具有统一化特征的BIM模型及支撑技术依然缺乏。

3. 其他相关领域信息建模技术

地理信息系统、产品设计与制造等领域与建筑信息建模密切相关，较为重视物理实体信息化建模研究。在地理信息建模方面，三维地理信息系统（3D-GIS）是以数字化的三维形式来表达地理空间实体的信息模型[30]。随着智慧城市建设的发展，三维城市信息模型（CIM）[31~33]成为3D-GIS的重要研究内容。虽然3D-GIS（或CIM）与BIM类似都能表达结构与环境空间实体，但3D-GIS侧重从建筑单体到城市、国土等宏观层面的空间信息表达，不能用于单体建筑内建筑构件、设施设备等更加微观和具体对象的数字化描述。融合BIM、AR等技术以提高模型的交互性，成为3D-GIS、CIM的重要发展方向[30,34]。

在产品设计与制造领域，物理产品的数字化描述与建模同样是开展产品全生命周期有效管控的关键内容。在智能制造、工业4.0等需求的引领下，工业物理产品信息建模经历了从二维到三维再到数字孪生的演变[35]。数字孪生用于实现物理系统向信息空间数字化模型的映射，利用系统中分布的传感器，对物理实体进行数据分析与建模，开展多学科、多物理量、多时间尺度、多概率的仿真[36]，将物理系统在真实场景中的全生命周期过程反映出来[37]；主要分为物理空间中的物理实体、虚拟空间中的虚拟实体、虚实之间的双向连接交互[38,39]，技术思想源于CPS[4,5]。数字孪生在智能制造、智能车间等领域应用前景良好[37,40]，但在智慧建筑、智慧城市领域的应用研究仍停留在概念阶段，缺乏统一的信息模型、技术平台、标准体系[34,41]。

当前，3D-GIS、CIM研究主要面向宏观且粗粒度的地理空间与城市空间，较少关注建模对象的物理过程，包含的技术方法难以沿用到高精度的建筑信息描述及建模过程。源于智能制造领域的数字孪生理念，蕴含了高保真建模、虚实交互等思想，但处于概念阶段，缺少支撑技术和实用工具。整体来看，在建筑领域以及其他相关领域都缺乏基础共性成果，未能形成可与外部实体动态交互、全真映射内在机理的建筑信息描述模型。

（三）BIPM概念内涵与基本特征

1. 概念内涵

针对更加真实和动态的应用场景对建筑信息描述方式的重大需求、构建自主可控BIM的内在需要，本文提出了一种区别于现有BIM的建筑信息描述新形式，即BIPM。BIPM融合了建筑外在的可视化模型、建筑内在的物理模型、建筑与外部交互的模型，实现了建筑向信息世界更加真实全面的映射及投影。此处的“建筑”为广义概念，不仅包括建筑结构本身，而且涵盖建筑相关的专业设施设备（如管线、空调、配电）、物理环境（如温度、湿度、光、声）。因此，BIPM也指建筑及其相关专业的信息物理模型。

在BIPM概念中，有机融合建筑基本信息模型、交互模型、动态物理模型，形成“信息－物理”融合的建筑信息全新基础模型（见图2）；不仅能描述建筑尺寸、材质等“外在”静态信息，也能描述建筑自身的“内在”物理机理、数字实体与物理实体交互等动态信息。究其实质，是建筑物理实体向信息世界更加保真的映射，形成建筑实体在信息世界的孪生体，具有与物理实体相同的结构行为、物理特性；虚拟孪生实体模型、建筑物理实体通过智能交互实现协同演化。

2. 基本特征

相比静态式BIM、BIM-4D等，BIPM在保持建筑基本信息的基础上，具有新增特征：① 交互性，专门定义了交互实体，实现与物理世界建筑实体的动态交互；② 动态性，融合了反映动态运行过程的

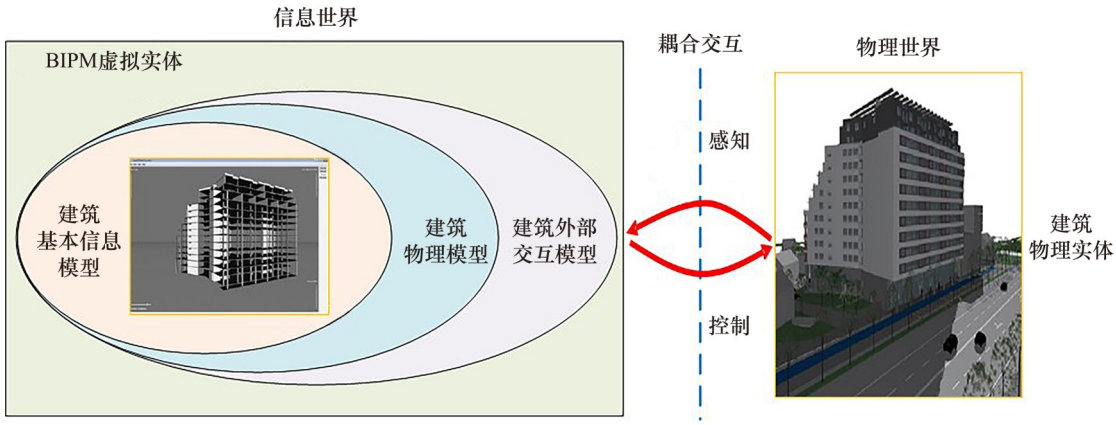

图2　BIPM概念设想

物理模型（如建筑热湿物理场、力学模型），可近乎真实地在信息世界中动态模拟并呈现物理系统过程；③ 智能性，专门定义了用于推理决策的实体，增强模型的智能推理决策能力，决策结果通过交互实体作用于建筑物以实现运行自优化。

对比应用领域可见，静态式BIM用于主要关注建筑静态信息的阶段（如建筑设计、施工），而BIPM是动态模型，其应用既适应建筑设计、施工阶段，也可拓展至建造、运维阶段以覆盖建筑全生命期。BIPM与CPS[2,3]也有本质不同：前者仍是虚拟化的信息模型，将实际物理系统的物理规律进行模型化、虚拟化，转化为可被计算机读取和执行的信息模型；后者实为软硬件系统，通过信息和控制策略来调控物理系统。BIPM与数字孪生体模型[38,39]也有实质不同：前者是驻留并运行于计算机上的纯虚拟软件模型，后者包括位于虚拟空间、包含物理场的数字（软件）实体，位于物理空间的物理实体。

BIPM将突破现有BIM技术框架限制，形成自主定义和控制的建筑信息描述新模型，更具有建筑工程领域的具体指向性（见表1），对丰富BIM理论与技术体系、推动建筑领域数字孪生研究具有理论和现实意义。

表1　BIPM与相关模型的区别

类型	虚拟实体	物理实体	物理机理	交互接口
BIPM	√		√	√
BIM	√			
CPS	√	√		√
数字孪生	√	√	√	√

三、建筑信息物理模型总体框架

BIPM的核心要义在于全真、完整地描述建筑，在数字空间中构造形成数字建筑，主要描述建筑“外在”信息（如几何尺寸、建筑材料、连接关系），建筑“内在”信息（如结构的形变模型、建筑空间热湿变化规律），建筑数字实体与外部物理实体的动态交互行为。相应地，BIPM总体框架主要包括基本信息模型、物理模型、交互模型3种子模型（见图3）。基本信息模型实体分别绑定物理模型实体、交互模型实体，构成具有动态性、交互性、智能性的BIPM实体。

在BIPM各子模型融合的具体实现思路上，基本信息模型包含建筑几何、尺寸等属性信息，可采用数据文件、静态数据库表等形式存贮此类静态信息；物理模型可采用静态数据结构形式存贮物理规律；外部交互模型主要处理静态数据结构信息（描述模型的属性构成、连接关系），动态监测信息（如物联网采集来的环境温度）：前者可与模型的静态信息一起，由统一的文件或数据库形式存储，进而实现模型融合；后者可存储到实时数据库表，通过统一的对象编号建立静态数据文件与动态实时数据库之间的链接，实现模型融合及底层数据集成。

一是基本信息模型，包括建筑的基本对象实体，如空调机组、门等，刻画了建筑实体的几何、尺寸、位置等基本静态属性。

二是物理模型，作为对建筑物理行为内在机理规律的刻画，包括建筑基本实体的时变特性、功能特性，如空调机组换热过程物理解析模型、门的力学模型、结构老化疲劳规律等。部分物理过程可能

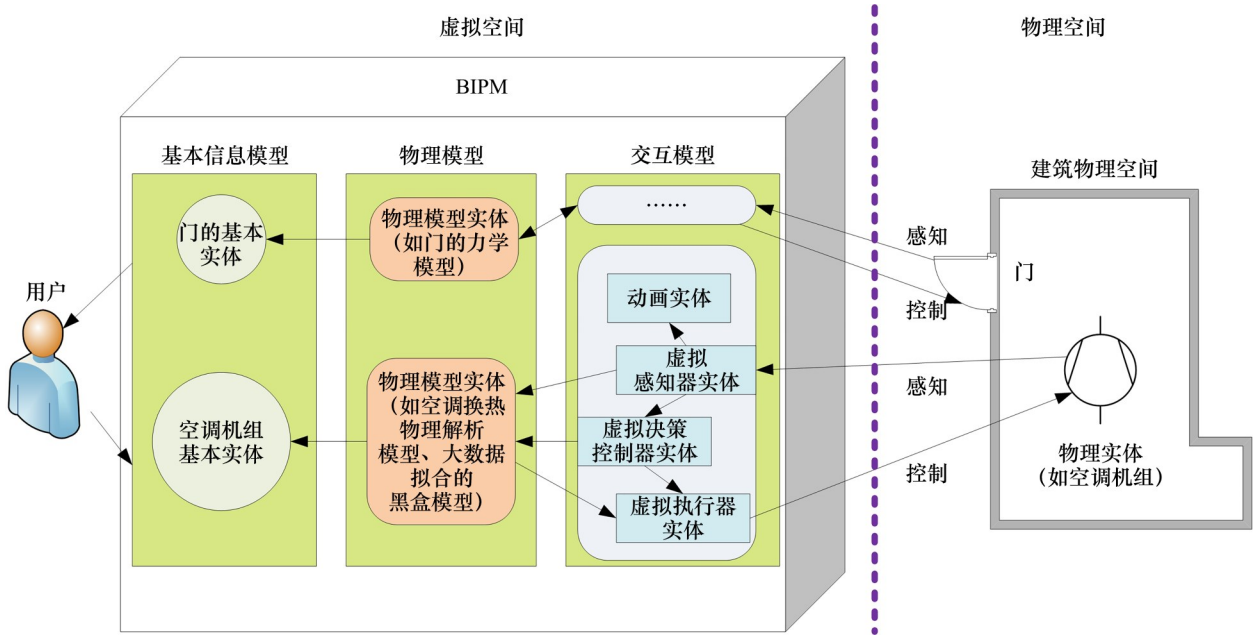

图3 BIPM总体框架

无法经由数理解析公式来建立，可采用大数据、人工智能等分析方法建立相应的黑盒模型。动态化的物理模型是实现BIPM动态性的技术保障，可由大数据、智能算法来驱动构建并实现自我演化，一定程度上显现了智能性特征。

三是交互模型，由一套信息物理融合交互实体构成，包括感知器实体、决策控制器实体、执行器实体、动画实体。建立这些实体及其交互关系，需要分析和抽象CPS的“感知－决策－实施”反馈闭环结构以及相应行为；通过概念实体进行建筑虚拟实体（如空调模型）、建筑物理实体（如空调机组）的动态交互，由此体现BIPM的交互性特征。① 感知器实体，实时感知物理实体的参数和状态（如温度、门的开闭），用于从物理世界到信息世界的信息传递。② 决策控制器实体，基于感知器的信息进行自主决策推理，将决策结果（控制指令）传递给执行器对象，由执行器对象驱动建筑物理实体改变其运动状态，实现BIPM智能决策和自主管理。③ 执行器实体，执行（用户或决策控制器实体）施加到BIPM虚拟实体上的控制动作（如启动、停止、温度参数设定），驱动建筑物理实体运行状态的改变，将信息（或控制指令）从BIPM虚拟实体空间传递至建筑物理空间。④ 动画实体，在信息空间中动态展示虚拟BIPM与对应物理世界中建筑实体的运行状态，以一致性的三维可视化呈现虚拟实体与物理实体的运动状态。

四、建筑信息物理模型理论基础与关键技术

将抽象的BIPM总体框架转化为在计算机上执行的软件体并进行高效运行管理，是推动BIPM走向工程应用的关键步骤，需以理论基础研究、关键技术突破为依托。BIPM是动态与静态信息、离散与连续模型的复合体，其构造与运行管理的理论基础涉及建筑结构、建筑物理、离散数学、形式语言与自动机、控制理论、软件工程等学科。从应用视角看，BIPM本质上是1个软件体，在一定程度上也是智能体，构造与运行管理的关键技术涵盖数字表征与可计算描述、数字实体与建筑物理实体的链接交互、物理场可视化、软件体自演化等。

（一）BIPM理论基础

1. 离散与连续逻辑融合的建筑状态时空建模理论

BIPM中的基本信息模型用于对建筑空间结构的数字描述，相应状态的时空轨迹表现为离散、静态、有穷、串行，逻辑基础多为离散数学。BIPM中的物理模型用于刻画建筑结构、环境、机电设备系统的物理规律，相应状态的时空轨迹表现为连续、动态、无穷、并发，逻辑基础多为力学、电

学、热学。在理论层面建立BIPM离散、连续相混合，统一状态的时空演变数学模型，是关键科学问题，主要涉及：研究建筑设施、设备单元物理过程的模型化、数字化方法，已有数字仿真模型在BIPM中的嵌入与集成方法，基本信息模型的时空语义物理表达等。

2. 信息空间与物理空间耦合的建筑交互行为建模理论

BIPM作为软件数字实体，运行于信息空间，但在众多应用场景中（如数字孪生、智慧运维等）需要与关联的建筑物理系统（如建筑结构、机电系统等）进行双向交互；感知真实物理的运行参数，在可视化呈现后输入物理模型进行推演运算，再将基于BIPM的仿真结果输出并作用到真实物理系统上，实现以虚控实、优化调控。这种双向交互行为跨越了数字、物理空间的边界，具有多层级、多尺度、不确定性、并发性等特征。刻画和建模相关建筑行为是关键科学问题，主要涉及：BIPM信息与物理空间交互并发行为的描述机制，基本信息模型、物理模型、交互模型的组合连接交互关系建立，异常事件扰动下BIPM与物理系统交互时空演变规律以及关键性质确保方法等。

3. BIPM可信分析与验证理论

BIPM是信息－物理耦合、多物理场融合、具有多尺度层级、构造性复杂的逻辑体，内部逻辑交互的正确性、执行路径的畅通程度、执行结果的有效性唯有经过严格的分析和验证，才能确保BIPM的可信性。从建筑单元要素实体关系，拓展至几何、物理、交互等单个模型，再到多模型组装的BIPM复合模型，由此形成分层级严格推理的验证与分析方法，具有完备性验证、功能验证、性能验证、一致性验证、兼容性验证等能力。

（二）BIPM关键技术

1. BIPM的数字表征与可计算描述技术

抽象的BIPM概念框架转化为可计算的实体模型，才能在计算机上运行和管理，涉及的核心问题有：BIPM的概念要素实体封装并转化为可计算实体的形式，以计算机的规约语言描述可计算实体来实现BIPM的持久化存储。

一是BIPM可计算实体的实现与构造技术。采用面向对象的系统分析与设计方法，研究BIPM基本信息模型中要素实体的软件对象式封装、调用、关联等技术。针对BIPM的物理模型实现方法，研究基于解析模型的建筑物理模型构件化封装与调用，基于大数据、智能分析生成黑盒模型的建筑物理模型实体化封装、调用、演化。针对BIPM的建筑信息物理交互模型实现方法，研究要素实体软件中对象形式的封装、调用、协作，信息与物理实体的交互反馈、闭环协同。

二是BIPM可计算实体的规约化描述与结构化存储。研究基于信息建模语言（如EXPRESS语言）的BIPM实体规约化描述方法、结构化信息存储机制，建立BIPM的统一描述模型，支持BIPM数据在计算机上的开放式存取、全生命期信息交换、持久化存储。

2. 虚拟BIPM实体与建筑物理实体的链接耦合与交互协同技术

交互性是BIPM的重要特征，需要确保虚拟BIPM实体与其建筑物理实体的可靠绑定、高效交互。建筑物理实体是实现虚拟空间、物理世界匹配交互的基础，需唯一标识BIPM信息实体，研究相关匹配绑定的方法及机制。

一是虚拟BIPM实体与建筑物理实体的链接耦合，包括各自标识方法、基于标识的快速匹配绑定与链接耦合机制、信息传输机制等。

二是虚拟BIPM实体与建筑物理实体的动态交互协同，包括典型场景下的协同交互机制、基于形式化方法的实体之间动态交互行为数学建模、基于模型检验的动态交互行为实时性与安全性分析。

3. BIPM的动态解析与可视运行技术

BIPM是立体化、多参数的虚拟实体，需要在计算机上进行运行调度并动态可视呈现，涉及两方面：动态解析BIPM模型的结构化数据，如几何、物理、交互等模型类别；基于解析出的参数和数据，实现三维BIPM实体的动态生成与呈现。

一是BIPM数据的动态解析方法。针对BIPM数据的结构化存储特征，研究基本信息模型、动态物理模型、动态交互模型的分类解析算法，具备对BIPM描述语法、语义的高效解析能力。

二是BIPM动态可视化呈现与运行技术。基于解析数据，结合计算机图形化技术，研究BIPM三维几何模型动态生成算法、虚拟实体与物理实体交互接口动态绑定方法、物理模型构件的动态链接与

执行方法等。

4. BIPM 自适应演化技术

依据复杂环境下 BIPM 的自适应演化特征，实现 BIPM 数字实体与物理体的性能 / 功能自主同步、可自主进化的 BIPM 智能推理预测能力。

一是 BIPM 物理模型自适应演化方法。BIPM 对应的物理实体，其物理特性（如混凝土梁的力学性能）必然随着时间而变化。研究 BIPM 物理模型自动随时间演化的机制及方法，以自适应演化实现物理模型与实际物理体性能的自主同步，使 BIPM 内部封装的物理模型能够较好地反映实际物理性能。

二是 BIPM 驱动物理体自适应寻优方法。自演化的 BIPM 具有较好的推理预测能力，利用虚拟空间中的 BIPM 推理预测结果，驱动建筑物理体自主寻优，支持实现以虚控实、虚实共生、虚实协同进化的终极目标。

五、建筑信息物理模型应用案例与价值分析

（一）BIPM 应用案例

冷机是建筑空调系统的核心设备，构建数字孪生冷机系统对提升建筑空调冷机运维效能、优化运行能力、支持建筑运行节能减碳等均有积极意义。基于 BIPM 概念与技术框架，自行开发了建筑数字孪生体图形化建模语言、代码自动生成工具[42]，自主研制了建筑冷机数字孪生系统[43]，验证了 BIPM 技术理念的可用性；通过冷机孪生实体与物理实体的双向交互，形成了冷机数字孪生系统（见图 4）[43]。

BIPM 的基本信息模型功能主要由 BIM 模型文件实现。静态信息模型作为数字孪生冷机的基础，首先要解决直观上“像不像”的问题；使用冷机 BIM 作为静态信息模型，可以复用现有模型，也可简化开发过程，与未来数字孪生系统拓展保持底层技术的一致性。冷机 BIM 模型由 Revit 建模工具构建，可定义几何尺寸等属性；选择 xBIM Toolkit 中的 xBIM WeXplorer 组件，嵌入应用程序 Web 页面，作为 BIM 模型渲染引擎。

采用机器学习方法建立冷机 BIPM 的物理模型，在分析冷机运行历史数据的基础上，形成拟合物理方程以求解冷机性能系数（COP）[43]。数字孪生冷机物理模型支持交互模型的优化控制，预测调整冷机设定值后的 COP 值并判断该调整能否实现优化，据此向运维人员给出操作建议。冷机 BIPM 的交互模型用于冷机 BIPM 实体（数字孪生体）与物理冷机进行交互，采用 RS-485 协议进行连接，通过 Modbus 数据通信协议实现双向信息交互。

冷机 BIPM 实体向用户提供了接近真实物理冷机的交互体验，可直观、实时监控冷机运行参数，依据内置的 COP 物理模型实时运算 COP 指标；基于 COP 指标优化来调控实际冷机的运行状态，实现冷机 BIPM 实体与物理体的双向交互、融合共生、协同优化。在气候条件稳定的情况下开展了为期 4 天的冷机运行 COP 测试试验。其中，前 2 天物理冷机没有连接其 BIPM 孪生体，后 2 天物理冷机连接 BIPM 孪生体并通过 BIPM 动态调优物理冷机。物理冷机与 BIPM 孪生实体连接以及交互运行与否

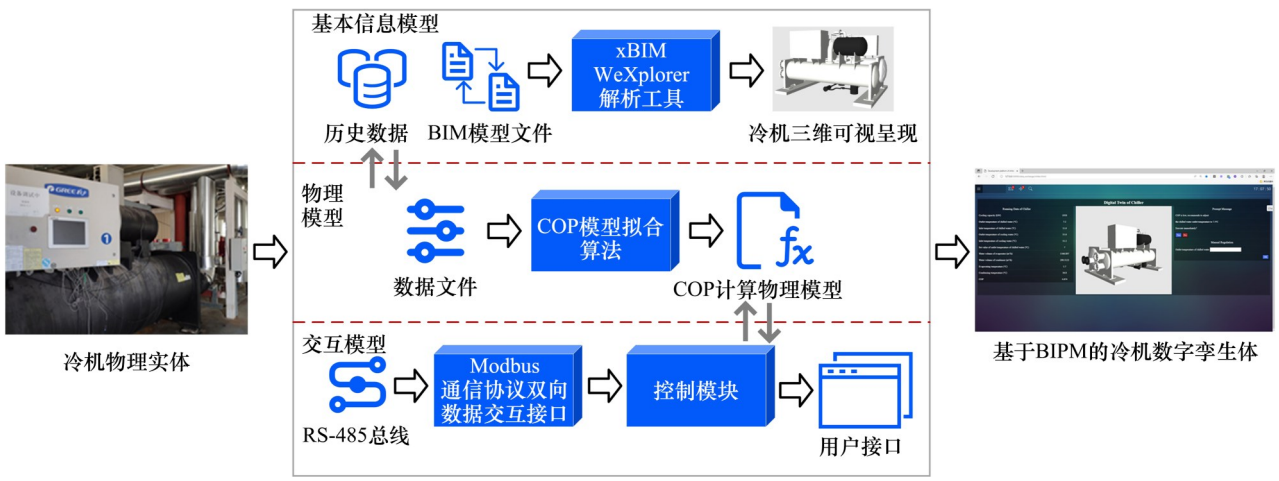

图 4　基于 BIPM 的冷机数字孪生系统实现原理

的效果对比如图5所示，可见协同优化运行时的COP值显著高于未连接工况，说明引入BIPM带来了良好收益。究其原因，BIPM内置了冷机的物理模型以增强预测能力，利于动态调控优化实际物理设备。BIPM对冷机COP性能的改善还可由COP差异值来刻画（见图6）。在94个采集点上，有85个COP值得到改善，占比超过90%；有48个COP差异值明显，体现了冷机BIPM孪生体在提高物理冷机效率、改善节能成效方面的极大潜力。

（二）BIPM应用生态与价值

BIPM作为新的建筑信息描述形式，可突破现有BIM技术框架的限制，丰富BIM理论与技术体系，应用前景体现在两方面：BIPM可在建筑设计、施工、运维全生命期，应急和战时场景下应用，显著拓展传统以设计为主的BIM应用空间；基础模型自身封装了建筑物理过程动态模拟、信息物理实体

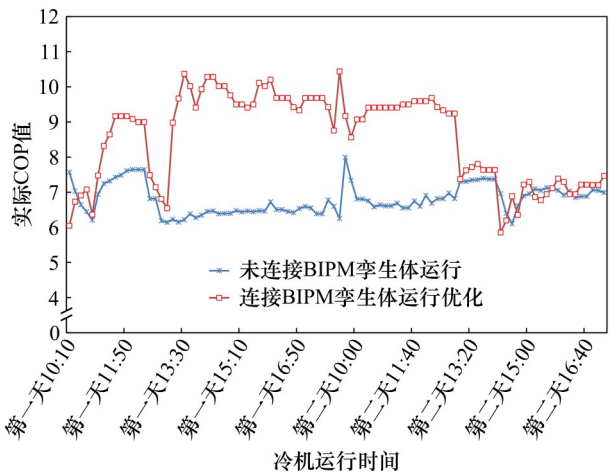

图5　物理冷机连接BIPM孪生体前后运行COP结果对比

注：横坐标时刻非均匀放置。

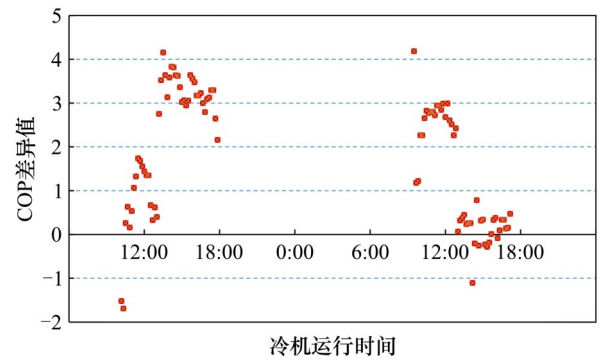

图6　物理冷机连接BIPM孪生体前后运行COP差异值对比

动态交互等能力，可为建筑运维动态管控、城市数字孪生、战场动态全息模拟等新型系统的高效研发提供直接支持。

1. 建筑设计阶段的应用前景

在建筑设计阶段构建基于BIPM的建筑设计工具，相较基于BIM的设计工具，在常规的三维立体设计能力之外，因内置了物理模型而具有较强的仿真预测能力。例如，在设计墙体时，基于BIPM设计工具可进行墙体受强冲击条件下的形变、破坏效应仿真，在设计阶段即增强未来施工、运维阶段的预见性。

2. 建筑施工阶段的应用前景

在建筑施工阶段，基于BIPM可形成多种有价值应用。与BIM类似，构建虚拟施工平台，直观展示施工运行工序；由于内置了建筑设备的物理模型，BIPM在施工阶段即具有虚拟调试功能。例如，大型地下工程的空调系统异常复杂，若在实体安装后的调试实验中才发现缺陷，可造成更换组件困难；而依托BIPM的仿真能力和虚拟调试功能，在实体空调系统安装之前即在BIPM施工虚拟平台上进行虚拟调试，测试空调系统的温/湿度调节性能、各部件之间的协作情况。再如，在施工过程中建立混凝土BIPM，因其含有混凝土收缩变形等物理模型，可以在施工过程中对建筑混凝土结构变形进行仿真分析并开展相应的质量控制。

3. 建筑运维阶段的应用前景

BIPM融合了物理模型和交互模型，适用于建筑运维阶段。构建基于BIPM的建筑数字孪生体，为建筑运维提供全场景、立体可视的综合平台，可提升建筑运维快速反应能力。BIPM交互模型与物联网技术叠加，将增强建筑物理系统的实时感知和控制能力。BIPM物理模型叠加建筑运维业务，对建筑运维预案进行推演和决策评估，将结果反馈到实际建筑物理系统，实现建筑运维过程的优化调度、应急安全事件的预先处置。例如，构建建筑室内火灾蔓延BIPM，在运维平台上进行突发火情的蔓延扩散模拟，提高火灾应急疏散方案的有效性。

六、结语

本文针对建筑物联实景化运维、城市数字孪生、战场MR等应用对动态实时交互、真实映射模

拟的迫切需求，辨识BIM技术框架的不足，提出了BIPM这一静态与动态相融合、信息与物理相融合的建筑信息描述新形式。BIPM具有动态性、交互性、智能性，可更加真实地将物理世界的建筑实体映射到信息世界中，适应AR、动态全息模拟、物联网交互、可视化应急决策等更复杂应用场景；革新了对传统BIM仅能封装几何等静态属性信息的认识，是自主可控BIM创新研究的有益探索。BIPM使相关信息在建筑规划、设计、施工、运维等虚拟信息世界中顺畅流动，还将建筑信息流无缝延伸至物理世界；不但能够单纯地与人交互，而且可以真实模拟物理动态过程，自主地同外部物理设施设备进行交互。BIPM技术能够自然地应用到建筑运维动态管控、AR、城市数字孪生、战场动态全真模拟等新兴领域，显著拓展了传统BIM的应用空间。

BIPM作为对标BIM的一种建筑信息描述形式，当前研究与应用仍显初步，为了拓展应用范围，可从以下方面予以深化。① 研究BIPM理论和关键技术，支持BIPM从抽象概念到具象的工程应用。开展离散与连续逻辑融合的建筑状态时空建模、信息空间与物理空间耦合的建筑交互行为建模、BIPM可信分析构造与验证等研究，形成BIPM理论基础。突破BIPM的数字表征与可计算描述、虚拟BIPM实体与建筑物理实体的链接耦合与交互协同、动态解析与可视轻量运行、BIPM自适应演化等关键技术，确立BIPM技术体系。② 构建系列化的BIPM标准规范，形成数据交换和交互格式，保障推广应用。构建面向设计、施工、运维等环节的BIPM技术标准，规范应用统一标准、BIPM内部子模型接口标准、信息分类与编码标准、数据存储标准、模型交付标准，尽量增强与现有BIM数据标准的兼容性。③ 研发体系化的BIPM建筑工业软件工具，覆盖建筑设计、施工、运维等全生命期。采用软件工程思维，研发BIPM快速生成自动化工具，提高BIPM软件开发效率，降低开发门坎。面向MR、数字孪生等新业态，研发基于BIPM的数字孪生应用基础软件，形成数字孪生监控、仿真、推演、训练等能力，建立可持续的BIPM技术和应用生态。

致谢

深圳大学陈湘生院士在稿件撰写过程中给予指导性意见，研究团队李苏亮、孔琳琳、邹荣伟等同学帮助整理部分文稿。谨致谢意。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 20, 2023; **Revised date:** May 10, 2023

Corresponding author: Yang Qiliang is a professor from the College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA. His major research fields include intelligent building, building information modeling technology, adaptive software engineering, and cyber-physical system. E-mail: yql@893.com.cn

Funding project: National Natural Science Foundation of China project (2021-XZ-24); Natural Science Foundation of Jiangsu Province project (BK20201335)

参考文献

[1] Annex B. National BIM standard–United States version 3 [EB/OL]. (2007-12-15)[2023-02-15]. https: //classes. engr. oregonstate. edu/cce/winter2018/cce203/NBIMS-US_V3/NBIMS-US_V3_Annex_B_NBIMS-V1P1_December_2007.pdf.

[2] Eastman C, Teicholz P, Sacks R, et al. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors [M]. New York: John Wiley and Sons, 2008.

[3] Li K, Cui Y K, Li W C, et al. When Internet of things meets metaverse: Convergence of physical and cyber worlds [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(5): 4148–4173.

[4] Lee E A. Cyber physical systems: Design challenges [C]. Orlando: The 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008.

[5] 何积丰, 李宣东. 信息–物理融合系统 [J]. 中国计算机学会通讯, 2013, 9(7): 6–7.
He J F, Li X D. Cyber physical systems [J]. Communication of China Computer Federation, 2013, 9(7): 6–7.

[6] 杨启亮. 面向“信息–物理”融合的建筑信息模型扩展方法研究 [R]. 北京: 清华大学, 2017.
Yang Q L. Research on the extension method of building information model oriented to cyber physical systems [R]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

[7] 杨启亮, 马智亮, 邢建春, 等. 面向信息物理融合的建筑信息模型扩展方法 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2020, 48(10): 1406–1416.
Yang Q L, Ma Z L, Xing J C, et al. An extension approach of building information modeling to cyber-physical systems [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(10): 1406–1416.

[8] Ding L Y, Zhou Y, Akinci B. Building information modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3D to computable nD [J]. Automation in Construction, 2014, 46: 82–93.

[9] 张建平, 范喆, 王阳利, 等. 基于4D-BIM的施工资源动态管理与成本实时监控 [J]. 施工技术, 2011, 40(4): 37–40.
Zhang J P, Fan Z, Wang Y L, et al. Dynamic management of construction resources and real-time monitoring of costs based on 4D-BIM [J]. Construction Technology, 2011, 40(4): 37–40.

[10] Zhu J X, Wu P, Lei X. IFC-graph for facilitating building information access and query [J]. Automation in Construction, 2023, 148: 104778.

[11] Sanchez B, Ballinas-Gonzalez R, Rodriguez-Paz M. Development of a BIM-VR application for elearning engineering education [C]. Vienna: 2021 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2021.

[12] Chen K, Lu W S, Peng Y, et al. Bridging BIM and building: From a literature review to an integrated conceptual framework [J]. International Journal of Project Management, 2015, 33(6): 1405–1416.

[13] Azimi R, Lee S, AbouRizk S M, et al. A framework for an automated and integrated project monitoring and control system for steel fabrication projects [J]. Automation in Construction, 2011, 20: 88–97.

[14] Shu T, Sheldena D R, Eastman C M, et al. BIM assisted building automation system information exchange using BACnet and IFC [J]. Automation in Construction, 2020, 110: 103049.

[15] Zahid H, Elmansoury O, Yaagoubi R. Dynamic predicted mean vote: An IoT-BIM integrated approach for indoor thermal comfort optimization [J]. Automation in Construction, 2021, 129: 103805.

[16] Rio J, Ferreira B, Poças-Martins J. Expansion of IFC model with structural sensors [J]. Informes de la Construcción, 2013, 65: 219–228.

[17] Akanmu A, Anumba C J. Cyber-physical systems integration of building information models and the physical construction [J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2015, 22 (5): 516–535.

[18] Lin C H, Ho M C, Hsieh P C, et al. Study of a BIM-based cyber-physical system and intelligent disaster prevention system in Taipei main station [J]. Applied Sciences, 2022, 12: 10730.

[19] Da Silva T F L, De Carvalho M M, Vieira D R, et al. BIM critical-success factors in the design phase and risk management: Exploring knowledge and maturity mediating effect [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2022, 148(10): 04022104.

[20] Cavalliere C, Dell'Osso G R, Favia F, et al. BIM-based assessment metrics for the functional flexibility of building designs [J]. Automation in Construction, 2019, 107(11): 102925.

[21] Zhai Y, Chen K, Zhou J X, et al. An Internet of things-enabled BIM platform for modular integrated construction: A case study in Hong Kong [J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 90: 100997.

[22] Nizam R S, Zhang C, Tian L. A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings [J]. Energy and Buildings, 2018 (7): 1–14.

[23] Yan D, O'Brien W, Hong T. Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges [J]. Energy and Buildings, 2015, 170: 1–14.

[24] Li M, Yu H, Liu P. An automated safety risk recognition mechanism for underground construction at the pre-construction stage based on BIM [J]. Automation in Construction, 2018, 91: 284–292.

[25] Lei Y, Rao Y P, Wu J M, et al. BIM based cyber-physical systems for intelligent disaster prevention [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2020, 20: 100171.

[26] Gao X H, Pishdad-Bozorgi P. BIM-enabled facilities operation and maintenance: A review [J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 39: 227–247.

[27] Cheng J C P, Chen W W, Chen K Y, et al. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms [J]. Automation in Construction, 2020, 112: 103087.

[28] IFC2x edition 3 final [EB/OL]. [2023-04-15]. http://www.iai-international.org/.

[29] Negendahl K. Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models [J]. Automation in Construction, 2015, 54(6): 39–53.

[30] Wang H, Pan Y, Luo X. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis [J]. Automation in Construction, 2019, 103: 41–52.

[31] Huang C Y, Chiang Y H, Tsai F. An ontology integrating the open standards of city models and internet of things for smart-city applications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 20(9): 20444–20457.

[32] Lei B Y, Stouffs R, Biljecki F. Assessing and benchmarking 3D city models [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2023, 37(4): 788–809.

[33] Biljecki F, Lim J, Crawford J, et al. Extending cityGML for IFC-sourced 3D city models [J]. Automation in Construction, 2021, 121: 103440.

[34] Julin A, Jaalama K, Virtanen J P, et al. Characterizing 3D city modeling projects: Towards a harmonized interoperable system [J]. International Journal of Geo-Information, 2018, 55(7): 1–18.

[35] 戴晟, 赵罡, 于勇, 等. 数字化产品定义发展趋势: 从样机到孪生 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(8): 1554–1562.
Dai S, Zhao G, Yu Y, et al. Trend of digital product definition: From mock-up to twin [J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2018, 30(8): 1554–1562.

[36] Barricelli B R, Casiraghi E, Fogli D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications [J]. IEEE Access, 2019, 7: 167653–167671.

[37] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望 [J]. 自动化学报, 2019, 4(11): 2001–2031.
Yang L Y, Chen S Y, Wang X, et al. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 4(11): 2001–2031.

[38] Jiang F, Ma L, Broyd T, et al. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector [J]. Automation in Construction, 2021, 130: 103838.

[39] Minerv R, Lee G, Crespi C. Digital twin in the IoT context: A survey on technical features, scenarios, and architectural models [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(10): 1785–1824.

[40] Lyu Z H, Chen D L, Lyu H B. Smart city construction and management by digital twins and BIM big data in COVID-19 scenario [J]. ACM Transactions on Multimedia Computing Communications and Applications, 2022, 18: 117.

[41] Zhao J F, Feng H B, Chen Q, et al. Developing a conceptual framework for the application of digital twin technologies to revamp building operation and maintenance processes [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104028.

[42] 李苏亮. 建筑设施设备数字孪生体的建模与实现方法研究 [D]. 南京: 陆军工程大学 (硕士学位论文), 2021.
Li S L. Research on modeling and implementation methods of digital twins for building facilities and equipment [D]. Nanjing: Army Engineering University of PLA (Master's thesis), 2021.

[43] Li S L, Yang Q L, Xing J C, et al. A foundation model for building digital twins: A case study of a chiller [J]. Buildings, 2022, 12(8): 1079.