

基于 BIM 的建筑空间与设备拓扑信息提取及应用

摘要: 建筑空间与设备拓扑信息是建筑设计优化、运维管理的基础数据。然而在传统建筑设计与运维过程中,上述信息存储割裂,难以实现信息集成应用。建筑信息模型(Building Information Modeling, 简称 BIM)技术实现了各专业信息的统一描述、存储与管理,可显著提升拓扑信息的提取与应用效率。本文引入 BIM 数据标准工业基础类(Industry Foundation Classes, 简称 IFC),提出了建筑空间与设备的集成拓扑模型,研究了空间与设备拓扑信息的提取与集成技术。在此基础上,本文研发了原型系统并采用实际项目数据进行了应用验证。应用结果表明,本研究提出的技术和方法可以有效避免重复建模,提高设计分析优化效率,充分发挥 BIM 的富信息优势,实现空间与设备拓扑信息的综合应用。

关键词: 建筑信息模型; 空间拓扑; 设备拓扑

中图分类号: TU17

Space and MEP topology extraction and application based on BIM

Abstract: Topologies of space and Mechanical, Electrical and Plumbing (MEP) are crucial to a building's design and maintenance. Traditionally, the information is stored in drawings, which is difficult to extract and utilize. Building Information Modeling (BIM) is a digital representation of a building, which can improve the efficiency of information retrieval. Therefore, this paper presents a topology extraction method based on Industry Foundation Classes (IFC, a widely used data standard in BIM). Furthermore, an integrated topology model is proposed to combine the two topologies. A prototype system is developed

收稿日期: 2017-mm-dd

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0702107);
中国博士后科学基金资助(2016M601038);
中国科协“青年人才托举工程”(YESS20160122)

作者简介: 张建平(1953—),女,教授。

通信作者: 林佳瑞,博士后,E-mail: jiarui_lin@foxmail.com

and tested. The result shows that the proposed model can avoid re-modeling, accelerate the design process, utilize BIM's rich information, and realize the integrated application.

Key Words: Building Information Modeling; Space topology; MEP topology

1 研究背景

建筑拓扑信息表达了建筑各空间或构件之间的连接关系,对建筑的性能有至关重要的影响。其中,空间和设备拓扑信息是建筑设计和运营阶段分析优化、维护维修的数据基础。空间拓扑信息反映了建筑物的功能特点和设计风格,广泛应用于空间句法、室内导航等分析优化过程中。设备拓扑信息是管道、管件与设备之间的上下游关系,在设计阶段用于计算流量和荷载,在运维阶段用于定位设备和查询信息,辅助设备维护维修。

然而,传统建筑设计与运维过程中,建筑拓扑信息主要来源于纸质或电子图纸。这些图纸中各专业数据及视图割裂存储,信息辨识度低,数据提取过程需要大量人工分析或重新建模,难以实现多专业信息的集成应用。这种数据管理及信息应用方式不仅造成了分析优化过程的效率瓶颈,也增加了信息转换、提取错误的风险,严重制约了建筑设计、运营管理的水平。

建筑信息模型(Building Information Modeling, 简称 BIM)是工程设施实体及其特性的完整数字化表达,旨在实现建筑全生命期各参与方的信息集成与共享。工业基础类(Industry Foundation Classes, 简称 IFC)是 BIM 信息存储与交换的国际标准,也是该领域应用最广的数据存储格式,可以支持建筑空间及设备拓扑信息的提取。因此,以 IFC 为基础,

提取建筑拓扑信息，可以大大提升信息的提取效率与精度，实现空间与设备拓扑信息的统一提取与集成应用，拓展拓扑信息的应用范围，充分发挥 BIM 的富信息优势。同时，由于 IFC 的通用性，从 IFC 中提取信息比从图纸或其他 BIM 设计软件中提取信息适用范围更为广泛。

本文基于 IFC 提出了建筑空间与设备集成拓扑模型，研究了建筑空间与设备拓扑信息提取技术，实现了两种拓扑信息的集成与综合应用。在此基础上，本研究研发了原型系统，并以实际项目数据进行了应用验证。

2 相关理论及研究

2.1 IFC 标准与 BIM 结构

IFC 是由国际 buildingSMART 组织为建筑领域制定的产品数据描述标准，广泛应用 BIM 的存储与交互过程中。IFC 模型体系分为 4 层，从下至上分别是资源层、核心层、共享层和领域层，如图 1 所示。

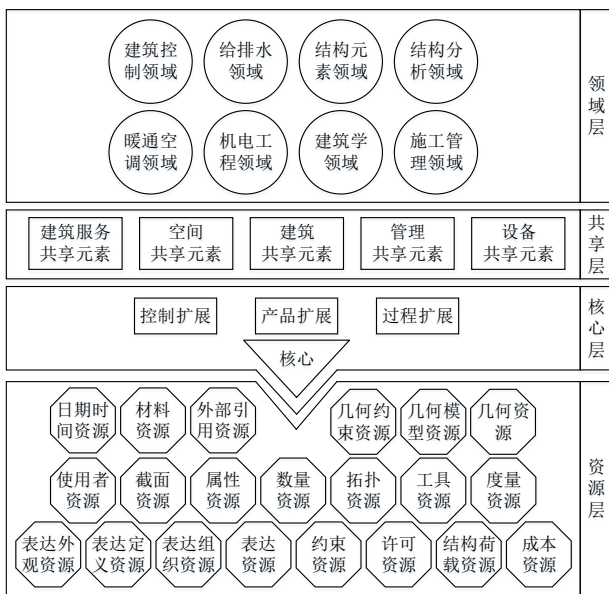


图 1 IFC 标准体系结构

IFC 支持建筑全生命周期管理，信息全面广泛，可以支持建筑空间及设备拓扑信息的提取，其中空间拓扑信息相关定义集中在核心层的产品扩展和共享层的空间共享元素中，而设备拓扑信息相关定义集中在核心层的产品扩展和共享层的设备共享元素中。同时，由于 IFC 的通用性，从 IFC 中提取信息比从图纸或其他 BIM 设计软件中提取信息适用范围更为广泛。

2.2 基于 BIM 的空间与设备拓扑信息提取

樊永生^[1]通过 Revit 二次开发实现了建筑空间连通拓扑的信息提取，并可进一步应用于 BIM 分类。然而，该提取方式难以应用于 ArchiCAD、Tekla 等其他 BIM 设计软件中。针对单一 BIM 软件适用范围的局限性，Langenhan 从 IFC 中基于关联关系 IFCRelVoidsElement 提取连通及相邻拓扑关系^[2]，但该方法仅能提取由墙分割形成的空间，不能有效处理虚拟房间分割的情形。而 Daum^[3]进一步考虑了 IFC 中建模不精确及随意性带来的误差，通过构件体素化及原位生长，识别墙、门之间的连接关系，进而实现 BIM 空间拓扑关系的提取，但该方法在处理大体量模型时将出现效率问题。

崔欢欢^[4]通过 Revit 二次开发，提取了机电设备之间的连接关系和设备节点深度图，实现了机电设备一级与二级链接关系查询，但该方法仅考虑了设备实体，未考虑管道和管件。Becker^[5]研究了 IFC 和 CityGML 的设备信息表达方式，提出了一套三维多设施网模型（3D Multi-utility Network Model），给出了基于 IFC 的设备拓扑提取方式及映射至 CityGML 的方法。Hijazi^[6]也提出了一套将 BIM 信息转化至 GIS 中的方法，将 IFC 中各类构件的几何信息和其他属性信息映射至 CityGML 中，实现 BIM 与 GIS 信息的集成。但上述两项研究仅实现了三维模型和属性信息的转换，没有将 IFC 中隐含表达的拓扑信息提取出来并映射到 GIS 中。

综上所述，无论是空间还是设备拓扑，基于 BIM 的信息提取技术在全面性、正确性和效率等方面或多或少有所欠缺，不能充分发挥 BIM 的富信息优势。除此以外，当前缺少空间与设备拓扑信息两者集成相关的应用。

2.3 空间与设备拓扑信息应用

空间布置决定空间功能^[7]，建筑空间拓扑信息反映了建筑物的功能特点和设计风格。建筑空间拓扑有很多类，包括连通性、相邻性、可视性等。其中最重要的是空间的连通性，即人是否可以不受阻碍地从某个空间移动到另一个空间。空间拓扑信息常应用于室内导航、可达性分析、检索与分类等领域。Boysen 等^[8]通过应用 WTL（Walk the Line）算法建立拓扑联系并实现了室内导航。Taneja 等^[9]则通过建立拓扑联系并 S-MAT（Straight Medial Axis Transform）算法在空间轮廓的基础上实现了室内导

航。Langenhan^[10]提出了建筑语义指纹（Semantic Fingerprint）的模型描述建筑的连通性和相邻性拓扑关系，实现基于图匹配算法的建筑拓扑信息查询。

设备拓扑信息表达了管道、管件与设备之间的上下游关系，是建筑设计和运维阶段的重要信息，多应用于逻辑结构检查、故障定位等领域。胡振中等^[11]研发了 BIM-FIM 软件系统，支持设备拓扑 BIM 导入并建立设备上下游逻辑关系，实现了 BS 端和 MS 端跨平台的设备信息查询，进而辅助设备维修维护管理、设备识别和应急处理。Hu 等^[12]通过建立多层次 BIM，辅助大型公共建筑的设备管理。

然而，目前大多数研究集中在空间拓扑或设备拓扑的单项应用上，未能借助 BIM 信息关联性程度高的优势，没有实现空间与设备拓扑的综合应用。

3 基于 BIM 的拓扑信息提取与集成

3.1 空间与设备集成拓扑模型

为实现空间和设备拓扑信息的集成与综合应用，本研究首先提出了空间与设备集成拓扑模型，如图 2 所示。

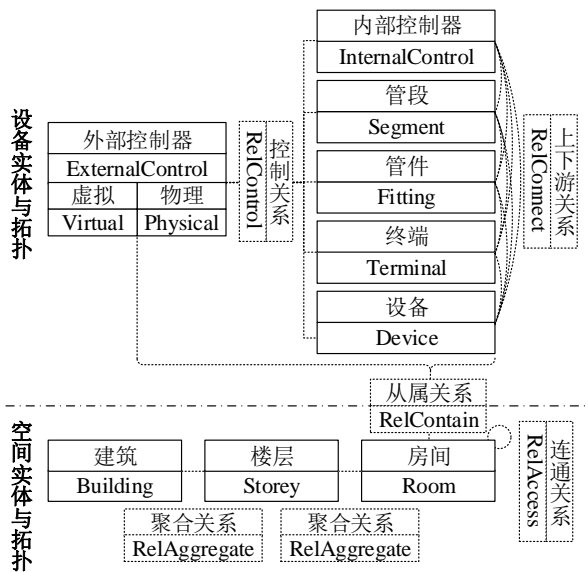


图 2 空间与设备集成拓扑模型

该模型定义了 9 类实体和 5 类关联关系。空间实体包括建筑、楼层和房间，三者之间通过聚合关系关联，而房间与房间之间通过连通关系关联。设备实体包括外部控制器、内部控制器、管段、管件、管段和设备。其中内部外部控制器通过控制关系与其他实体关联，而其他实体间通过上下游关系关联。除虚拟外部控制器外的其他设备实体通过从属关系与房间关联。因此，从属关系是空间拓扑与设备拓

扑联系的桥梁，也是建立空间与设备集成拓扑模型的关键。借助上述关系可以拓展原有的空间或拓扑模型的单项应用，实现空间与设备拓扑综合应用。例如，可以将室内导航和设备上下游查询结合起来，将设备故障定位、上游设备排查、应急处理规程查询、维修信息查询、应急维修导航等结合应用。由于空间和设备之间有紧密关联，空间和设备所包含的维修信息、监测信息等其他相关信息也可以充分利用起来，形成信息集成优势。

3.2 模型实体提取与转换

从基于 IFC 构建的 BIM 中提取并形成集成拓扑模型，首先应提取 BIM 中的实体及其属性集，建立对应的目标实体。集成拓扑模型与 IFC 实体的对应关系如表 1 所示。

表 1 集成拓扑模型实体与 IFC 实体对应关系

目标实体	IFC 实体	子类数量
楼栋	IfcBuilding	-
楼层	IfcBuildingStorey	-
房间	IfcSpace	-
外部控制器	IfcDistributionControlElement	7
内部控制器	IfcFlowController	8
管段	IfcFlowSegment	4
管件	IfcFlowFitting	5
终端	IfcFlowTerminal	13
	IfcEnergyConversionDevice	20
	IfcFlowMovingDevice	3
设备	IfcFlowStorageDevice	2
	IfcFlowTreatmentDevice	3
	IfcBuildingElementProxy	-

其中三类空间实体与 IFC 实体间存在一一对应关系。而对于设备实体，除 Device 实体外的其他目标实体均与一个 IFC 抽象实体相对应，而抽象实体包含了多个子实体，因此是一对多关系。Device 实体则对应了多个 IFC 抽象实体，因此也是一对多关系。除此以外，还应提取 IFC 实体关联的属性集并关联在目标实体上，作为后续应用的数据基础。

3.3 空间关联关系提取

空间关联关系分为聚合关系和连通关系两类，其 IFC 表达如图 3 所示。聚合关系与 IfcRelAggregates

关联关系对应，可以直接提取，进而判定建筑、楼层、房间之间的层级关系。对于空间连通关系，则需通过 IfcSpace、IfcWall 和 IfcDoor，及其之间的关联关系 IfcRelVoidsElement 和 IfcOpeningElement 综合判断。空间边界可通过与 IfcSpace 实体相关的 IfcRelSpaceBoundary 关联关系取得。该实体包含 PhysicalOrVirtualBoundary 和 RelatedBuildingElement 属性。当空间边界为墙时，PhysicalOrVirtualBoundary 属性值为 PHYSICAL，且 RelatedBuildingElement 属性值为该空间边界对应的 IfcWall；当空间边界为非物理隔开的虚拟分隔时，PhysicalOrVirtualBoundary 属性值为 VIRTUAL，且 RelatedBuildingElement 属性值为 IfcVirtualElement 或 NULL，表示该空间边界并不对应任何实体构件。如果该属性值为 NULL，连通性只能由 2 个虚拟空间边界之间的最近距离是否为 0 确定。

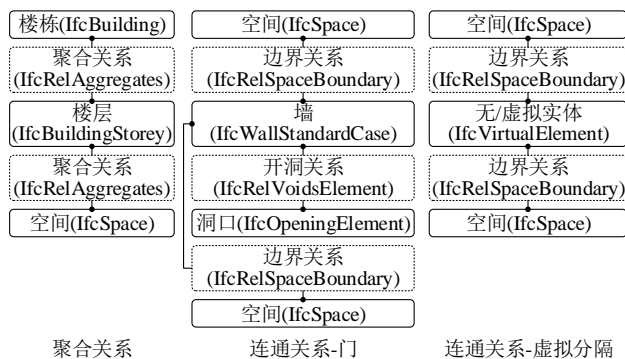


图 3 空间拓扑信息在 IFC 中的表达

3.4 设备关联关系提取

设备关联关系分为控制关系和上下游关系两类，其 IFC 表达如图 4 所示。其中控制关系与 IfcRelFlowControlElements 关联关系对应，可以直接提取。设备上下游关系则需通过 IfcDistributionPort 和 IfcDistributionElement 及其之间的关联关系判断。建筑设备专业主要包括机电、暖通和给排水三个专业，在 IFC 中均通过 IfcDistributionElement 及其子类表达。而构件之间的上下游关系，则通过附着在构件上的 IfcDistributionPort 实体，及其之间的关联关系表达。根据接口与设备构件之间连接方式的不同，IfcDistributionPort 通过 IfcRelConnectsPortToElement 和 IfcRelNests 两种关联关系与设备构件相连。而 IfcDistributionPort 之间则通过 IfcRelConnectsPorts 关联关系定义上下游关系，并通过 IfcDistributionPort 的 ConnectedFrom, ConnectedTo 两个反向属性定义

上下游关系的方向。

在上述框架的基础上，上下游表达关系还分为隐式 (Implicit) 和显示 (Explicit) 两种。隐式表示中，IfcDistributionPort 仅附着在设备或终端上。如两个设备或终端相连，则通过一个 IfcRelConnectsPorts 关系表达，并将该关系的 RealizingElement 属性值设置为作为连通两者媒介的构件 (如 IfcPipeElement)。而在显示表达中，IfcDistributionPort 除附着在设备或终端上外，还会附着在管道和管件上。设备与终端必须与其间对应的管道通过 IfcRelConnectsPorts 相连，并不需再设置 RealizingElement 属性值。

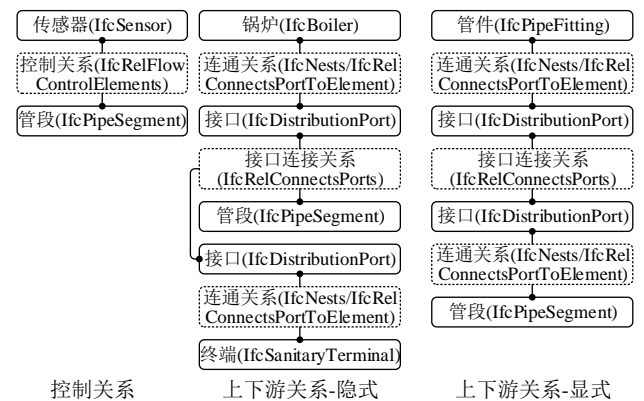


图 4 设备拓扑信息在 IFC 中的表达

3.5 空间与设备从属关系

从属关系是空间拓扑和设备拓扑相结合的桥梁，其提取方式如图 5 所示。一般的，管件、设备以及较短的管道从属于单个空间，而较长的管道则从属于多个空间。从属关系在 IFC 中通过关联关系 IfcRelContainedInSpatialStructure 表达。该关联关系定义了 IfcElement 及其子类与 IfcSpatialStructure 及其子类之间的从属关系。由于代表管道、管件和设备的 IfcDistributionElement 是 IfcElement 的子类，代表空间的 IfcSpace 是 IfcSpatialStructure 的子类，理论上空间和设备之间的从属关系可以通过该关联关系表达。然而，在实际工程中，由于很大一部分管道与管件安装在吊顶之上或地板之下，很多 BIM 设计软件不能正确识别上述构件与空间之间的从属关系。因此，空间与设备的从属关系很少可以通过 IfcRelContainedInSpatialStructure 实体正确判断，绝大多数管道和管件对应的空间是 NULL 或是比 IfcSpace 更高一级的空间实体 IfcBuildingStorey。因此，需要通过判断管道、管件和设备是否处于空间边界之内严格确定两者的从属关系。同时，考虑到

吊顶上和地板下的构件，在进行几何关系判断时应适当考虑将空间的上下边界做一定偏移，并注意偏移后空间之间不可重叠，避免判断错误。

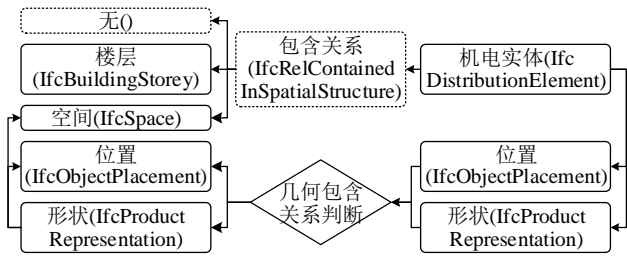


图5 空间与设备从属关系在 IFC 中的表达

4 系统研发与应用验证

本研究实现了上述信息提取与集成技术，并研发了原型系统进行应用验证。验证项目为大连月亮湾培训中心项目，该项目采用 Autodesk Revit 建模。本研究将上述模型导出为 IFC 模型进行测试。为借

助 Revit 图形平台的可视化手段验证方法的正确性，本研究的原型系统以 Revit 插件的形式研发，通过 Revit API 导出 IFC 文件并自动执行解析算法，提取空间与设备拓扑信息，建立集成拓扑模型。

本文首先实现了空间和设备拓扑的单项应用。本研究在空间拓扑信息此基础上实现了空间句法分析。空间句法分析算法计算了各空间的关键指标，包括平均深度、选择度和整合度等。同时，本研究在设备拓扑信息基础上实现了拓扑设备信息检索与上下游查询，支持查询任意管道、管件与设备的信息及其上下游节点，也支持沿上下游查询节点。

在上述功能和集成拓扑信息模型的基础上，以设备检修与应急处理为应用场景，本文研发了相关工具并进行了测试，如图6所示。

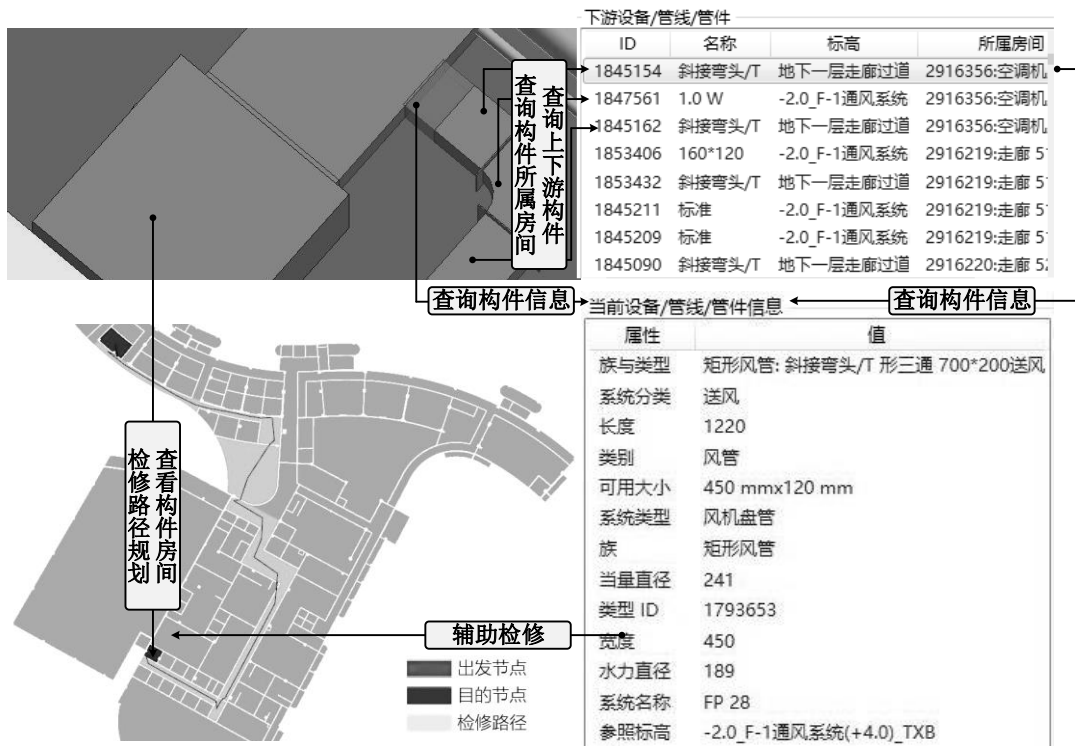


图6 拓扑综合应用——设备检修与应急处理

当某一设备构件发生事故时，用户可通过该工具支持定位事故构件的上下游相关管道、管件和设备。定位事故相关构件后，用户通过工具查询相关构件的型号和主要参数，辅助检修人员掌握维护信息并准备维护材料和工具。上述信息均提取自 IFC 中对实例所关联的属性集。完成设备信息查询后，检修人员可以快速定位至相关管道、管件或设备的事故地点，指定检修负责人位置后，该工具将立即计算检修路径，指导检修人员前往事故现场。经验

证，实现空间与设备拓扑的集成应用有以下优势：

1. 避免重复建模。从 BIM 中提取得到的空间拓扑信息直接用于空间句法分析，省去了在分析软件中重复建模或模型转换的工作量，也避免了可能造成的错误和信息丢失。

2. 加快分析效率。由于 BIM 具有一致性和关联性的特点，在设计方案优化过程中可以自动调整并生成优化后的 IFC 模型文件。这个过程将大大减少设计阶段优化迭代所需的时间，加快优化效率，进

而提高项目质量。

3. 扩大适用范围。采用 IFC 提取信息与采用具体 BIM 软件相比, 可以支持更多的设计软件。目前, 主流的 BIM 设计软件, 如 Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD, TEKLA, CATIA 等, 均支持 IFC 的导出。本研究提出的信息提取方法和集成应用均可应用。

4. 实现综合应用。将空间和设备拓扑信息相结合, 可实现事故定位、上下游构件查询、构件检修信息查询、检修道路规划等一系列应用, 提高信息利用效率与深度, 拓展原有的拓扑信息应用范围。

值得一提的是, 本研究中所有的空间拓扑、设备拓扑以及空间设备之间的关联关系均通过解析 IFC 获取, 与已有的研究和应用相比, 支持处理虚拟房间分割、支持提取管段管件, 适用范围更广。同时, 解析 IFC 中隐式表达的拓扑关系, 比通过体素等方法效率更高、结果更为可靠。

5 结论

针对建筑工程设计与运维阶段的实际需求, 在已有拓扑信息提取和应用理论的基础上, 本文提出了建筑空间与设备集成拓扑模型, 研究了基于 BIM 的空间建筑空间与设备拓扑信息提取技术, 实现了两种拓扑信息的集成与综合应用。通过原型系统研发和实际项目数据测试进行了应用验证。应用结果表明, 研究提出的技术和方法可以有效避免重复建模, 辅助设计检查工作, 加快设计分析优化效率, 充分发挥 BIM 的富信息优势, 实现综合项目应用。

参考文献

- [1] 樊永生. 建筑信息模型的空间拓扑关系提取和分类研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2013.
FAN Y S. Building Information Modeling Spatial Topological Relations Extraction and Classification [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (In Chinese)
- [2] LANGENHAN C, WEBER M, LIWICKI M, et al. Graph-based retrieval of building information models for supporting the early design stages [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2013, 27(4): 413-426.
- [3] DAUM S, BORRMANN A, LANGENHAN C, et al. Automated generation of building fingerprints using a spatio-semantic query language for building information models [J]. *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2014*, 2014: 87.
- [4] 崔欢欢, 周方晓, 李智杰, 等. 基于BIM的机电设备系统建模方法 [J]. *现代建筑电气*, 2017(02): 37-42.
CUI H H, ZHOU F X, LI Z J, et al. Modeling Method of MEP Equipment System Based on BIM [J]. *Modern Architecture Electric*, 2017(02): 37-42. (In Chinese)
- [5] BECKER T, NAGEL C, KOLBE T H. Integrated 3D modeling of multi-utility networks and their interdependencies for critical infrastructure analysis [J]. *Advances in 3D Geo-Information Sciences*, 2011, 1-20.
- [6] HIJAZI I, EHLERS M, ZLATANOVA S, et al. Initial investigations for modeling interior Utilities within 3D Geo Context: Transforming IFC-interior utility to CityGML / UtilityNetworkADE [J]. *Advances in 3D Geo-information sciences*, 2011, 95-113.
- [7] HILLIER B. Space is the machine: a configurational theory of architecture [M]. *Space Syntax*, 2007.
- [8] BOYSEN M, HAAS C, LU H, et al. A journey from IFC files to indoor navigation [C]. *13th International Symposium: Web and Wireless Geographical Information Systems 2014*, 2014, 148-165.
- [9] TANEJA S, AKINCI B, GARRETT J H, et al. Transforming IFC-based building layout information into a geometric topology network for indoor navigation assistance [J]. *Computing in Civil Engineering*, 2011, 315-322.
- [10] LANGENHAN C, PETZOLD F. The fingerprint of architecture-sketch-based design methods for researching building layouts through the semantic fingerprinting of floor plans [J]. *International electronic scientific educational journal: Architecture and Modern Information Technologies*, 2010, 4: 13.
- [11] 胡振中, 陈祥祥, 王亮, 等. 基于BIM的机电设备智能管理系统 [J]. *土木建筑工程信息技术*, 2013(01): 17-21.
HU Z Z, CHEN X X, WANG L, et al. A BIM-based facility intelligent management system [J]. *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 2013(01): 17-21. (In Chinese)
- [12] HU Z Z, ZHANG J P, YU F Q, et al. Construction and facility management of large MEP projects using a multi-scale building information model [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 100: 215-230.