文章编号:1674-2974(2024)09-0206-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024101

明清木结构古建筑底层数据标准化研究

王茹[1,2],张小峰[1†],胡又文[1],吕明倩[1],王垚[1]
(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;
2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室,陕西 西安,710055)

摘 要:现有IFC标准体系中,存在无法表达中国古建筑中特有的形制、结构、属性、艺术等特性的问题.基于UML,构建了斗栱、榫卯等古建筑结构的语义关系图,根据IFC四层架构体系,采用实体扩展和属性集扩展的方式,分层扩展了相应的构件实体、关系实体和属性集等,并以EXPRESS语言对扩展内容进行描述.通过使用IfcOpenShell工具包解析、VScode编辑的模型文件;并以Solibri和Blender为验证平台,检验IFC文件的可视化、可读性和实体与属性集信息的内容.根据验证结果,文中提出的古建筑领域的扩展符合IFC的扩展体系方法,对实现古建筑的结构和艺术等特性在信息模型中的交互和共享具有重要意义,可为古建筑工程勘察、修缮和运维的信息化保护提供强有力的支撑.

关键词:木结构古建筑;信息化;工业基础类;语义;标准化;EXPRESS
中图分类号:TU17 **文献标志码**:A

Research on Standardization of Foundational Data for Ming and Qing Historic Timber Building

WANG Ru[1,2],ZHANG Xiaofeng[1†],HU Youwen[1],LÜ Mingqian[1],WANG Yao[1]
(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education(XAUAT),Xi'an 710055, China)

Abstract: In existing IFC standard systems, there is a problem of not being able to express the unique characteristics of type-form, structure, attributes, and art in Chinese historic buildings. This paper constructs the semantic relationship diagram of bracket sets, mortise, and tenon structures based on the UML. According to the IFC four-layer frame system, the extension of corresponding component entities, relationship entities, and property sets is achieved through entity extension and property set extension. This extension is carried out in a layered manner, and the extended content is described using EXPRESS. Model files are parsed and edited using the IfcOpenShell toolkit and VScode; Solibri and Blender are used as validation platforms to verify the visualization, readability, and content of entity and attribute set information of IFC files. According to the verification results, the extension of the historic building domain proposed in this paper conforms to the extended system method of IFC, which is of great significance to realize the interaction and sharing of the structure and art characteristics of historic buildings in the information model, and can provide strong support for the information protection of historic building

* **收稿日期**:2023-10-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278400), National Natural Science Foundation of China(51278400)
作者简介:王茹(1968—),女,江苏徐州人,西安建筑科技大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: zhangxiaofeng@xauat.edu.cn

engineering investigation, repair, and operation-maintenance.

Key words: historic timber building; informatization; industry foundation classes; semantics; standardization; EXPRESS

中国古建筑是中华民族的文化结晶,古建筑在全国的分布区域广泛,数量多.第一至第八批次全国重点文物保护单位中,古建筑的数量为2 160,占总量的42.7%,可见其在中国文化中的重要性.以山西省木结构古建筑为例,现有国家级保护单位369处,省级保护单位487处,市县级单位12 466处,未公布保护单位并登记在册的木结构古建筑总计14 705处.面对古建筑数字化、信息化保护的需求,亟需建立针对中国明清古建筑底层数据的标准化体系.

Murphy 等[1]提出古建筑信息模型(Historic Building Information Modeling,HBIM)的概念,解决了古建筑勘察过程中遗产信息的表达问题. Palomar 等[2]创建了基于SQL-Server的在线HBIM管理系统,实现了HBIM的网络协同的信息化管理.杨娜等[3]建立了包含实验室物理模型、有限元模型、平台试验和配套网站4个模块的中国古建筑木结构健康监测Benchmark平台.王茹等[4]基于AutoCAD图形数据库的扩展数据和扩展字典存储古建筑附加信息,构建了明清古建筑构件存储模型系统.陈伟[5]基于本体古建筑知识表达及案例推理,构建了古建筑的本体模型.王亚康[6]研究了IFC的木结构古建筑残损监测技术,建立了基于IFC的残损监测信息扩展模型,实现了木结构古建筑残损信息的实时可视化监测.淳庆等[7]采用有限元分析和结构动力特性测试的方法对木构古建筑的模型修正方法进行研究,提出了该类型建筑的最优修正模型.刘丹等[8]基于IFC通过研究水利水电工程信息模型存储标准,实现了水利水电领域的信息模型的存储和交换.何庆等[9]基于IFC构建了铁路轨道结构BIM模型,实现了铁路轨道的信息的存储和交换.

以上有关数字化技术在古建筑领域的研究,未能实现明清古建筑在形制化、斗栱、榫卯等兼具结构和艺术特征部件的信息存储和交互.作者研究团队以IFC标准体系为基础,研究了中国明清木结构古建筑(以下简称 古建筑)领域的底层数据的存储和交互,通过构建的语义模型,与IFC标准体系进行映射,完成了古建筑的结构信息和历史文化信息的扩展,解决了斗栱、榫卯等在信息模型中的表达问题.

1　IFC数据扩展方法

工业基础类(Industry Foundation Classes,IFC)标准体系作为国际通用BIM标准化数据格式之一,由国际协同工作联盟(International Alliance for Interoperability,IAI)提出.IFC标准体系通过实体和属性集来描述建筑对象,在IFC4.3中定义的实体872个、属性集755个.IFC标准的主要作用在于促进建筑业中不同专业以及同一专业中的不同软件共享同一数据源,从而实现数据的共享及交互.它是一种中立的开放文件格式规范,不受单个供应商或供应商的控制.这意味着,不同的软件和应用程序都可以通过遵循IFC标准来交换和使用建筑数据,从而提高了数据的互操作性和利用效率.

BuildingSMART官方为IFC标准提供了3种扩展机制[10]:基于实体定义的扩展、基于属性集定义的扩展、基于代理实体(IfcProxy)的扩展.

基于实体定义的扩展方式是其中最难的一种,要求用户具有丰富的知识储备,对IFC有深入的了解;版本兼容上,若扩展实体未被buildingSMART国际组织采用,则无法使用;可开发性上,需要对工具包进行修改才能支持自定义实体;运行效率,因新增实体将属性定义到实体本身,BIM软件可以直接访问,故较后两者运行效率高.

基于属性集定义的扩展方式难度低,大部分BIM应用软件为用户提供了扩展自定义属性集的方式;属性集依附于属性集实体(IfcPropertySet),因此具有较高的兼容性和可开发性,但其与其他实体通过关系实体连接,运行效率低于直接属性.

基于代理实体的扩展方式的难度处于三者中间,其兼容性与代理实体相同,但在IFC4.3版本中已经将代理实体(IfcProxy)弃用,无法采用该方法进行扩展.

研究过程中采用基于实体定义的扩展和基于属性集定义的扩展,通过这两种方式扩展进行古建筑

保护工程信息模型中结构信息和艺术信息等的表达.

在扩展过程中将遵循以下原则:尽可能利用既有实体进行扩展;尽可能通过增加属性集扩充实体;不能满足前两条原则时,通过定义新增实体,并增加相应的属性集.以保证扩展后的标准与已发布的IFC标准的兼容性,便于后续软件的开发和参与人员的使用.

2 语义模型构建方法

语义模型基于古建筑的本体进行构建,将古建筑结构主要构件进行集成.语义模型的构建方法包括:业务流程(Business Process Modeling Notation, BPMN)图的构建;信息交换需求(Exchange Requirement, ER)架构的构建;构建语义模型三个阶段.

2.1 BPMN图的构建

由于古建筑保护工程的类型不同,其业务流程图也存在部分差别,为保证工程实践的有序进行,梳理了通用的业务流程.古建筑为既有建筑,故所有的业务流程均处于运维阶段,根据古建筑保护的特点,将其数据业务流程分为日常维护和修缮,按修缮中的工作内容不同,划分为修缮勘察、修缮设计、修缮施工和交付4个阶段,如图1所示.

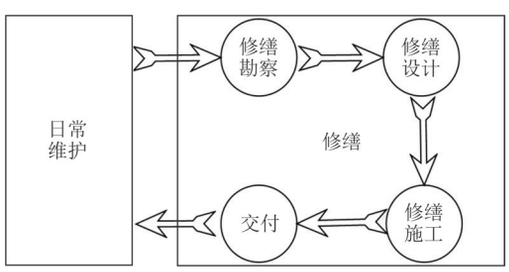


图1 古建筑保护工程阶段划分图

Fig.1 Phases division of historic building conservation projects

同时为构建完整的业务流程,明确信息在交互中的流程节点,梳理制定了明清古建筑保护完整、通用流程图,以不同的职能单位和工作阶段梳理了古建筑保护工作的主要流程图,详见附录图1.

2.2 ER架构的构建

信息交换需求是指数据在不同的信息实体之间进行交互的过程,目的是解决古建筑信息模型在异构环境中实现数据交换和共享的问题.构建ER架构可实现古建筑斗栱、榫卯等信息在不同软件之间的交互.

古建筑数字化保护的难点在于每一处古建筑皆无法复刻,同时缺乏原始资料,且参与方众多,在其保护过程中要做到零失误.从附录图1中摘录出古建筑日常维护阶段的信息交换需求,如图2所示.在古建筑日常维护阶段产生和交换的信息总结为:"0"表示日常维护文档,"1"表示日志项目申报书,"2"表示项目审批意见,"3"表示项目立项书.

日常维护包括日常性和季节性养护;若需对古建筑进行修缮则由业主单位提出项目申报,交由文物行政部门进行审批,审批通过后由后业主单位进行正式立项.

信息交换需求涉及工程项目的各参与方和各阶段,图2从文物行政部门和业主单位的角度分析了日常维护阶段的信息交换需求,根据业务流程分析了该阶段的信息交换需求.

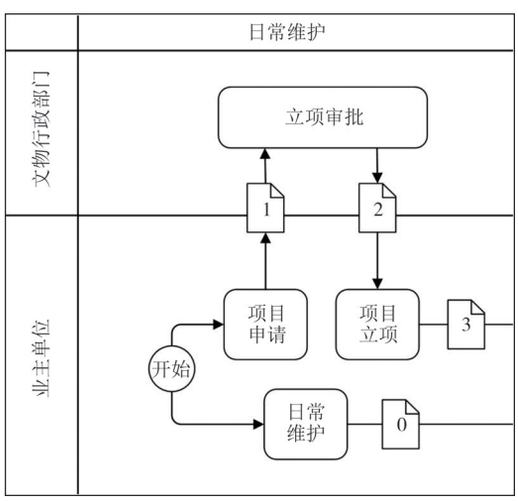


图2 日常维护阶段的信息交换需求

Fig.2 Exchange requirement during daily maintenance

2.3 语义模型的构建

语义模型以信息交换需求和信息源中的信息作为基础,信息交换需求已在2.2节中举例描述,信息源包含古建筑领域中著作书籍,例如,清工部《工程做法则例》和相关的技术文件等.

古建筑的语义模型按整体到局部的方式划分,分别为空间结构、组件、构件和零件4个层级进行表达.空间结构表示提供建筑物内某些功能的区域或体积;组件是具有某一功能的建筑物构件组合;构件是构成建筑物各个组成部分的单个元素,例如,梁、柱、门等;零件是比构件更小的单元,例如,铁钉、木插销、木制楔钉等.如图3所示,构建了语义模型的结构化关系.

采用统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)建立语义模型类图.古建筑类是语义模型中所

有类的超类,空间结构划分为场地(Site),建筑(Building),建筑楼层(Building Storey)和空间区域(Space),以西安都城隍庙,其空间结构分解如图4所示,其中场地为整个城隍庙的保护范围.

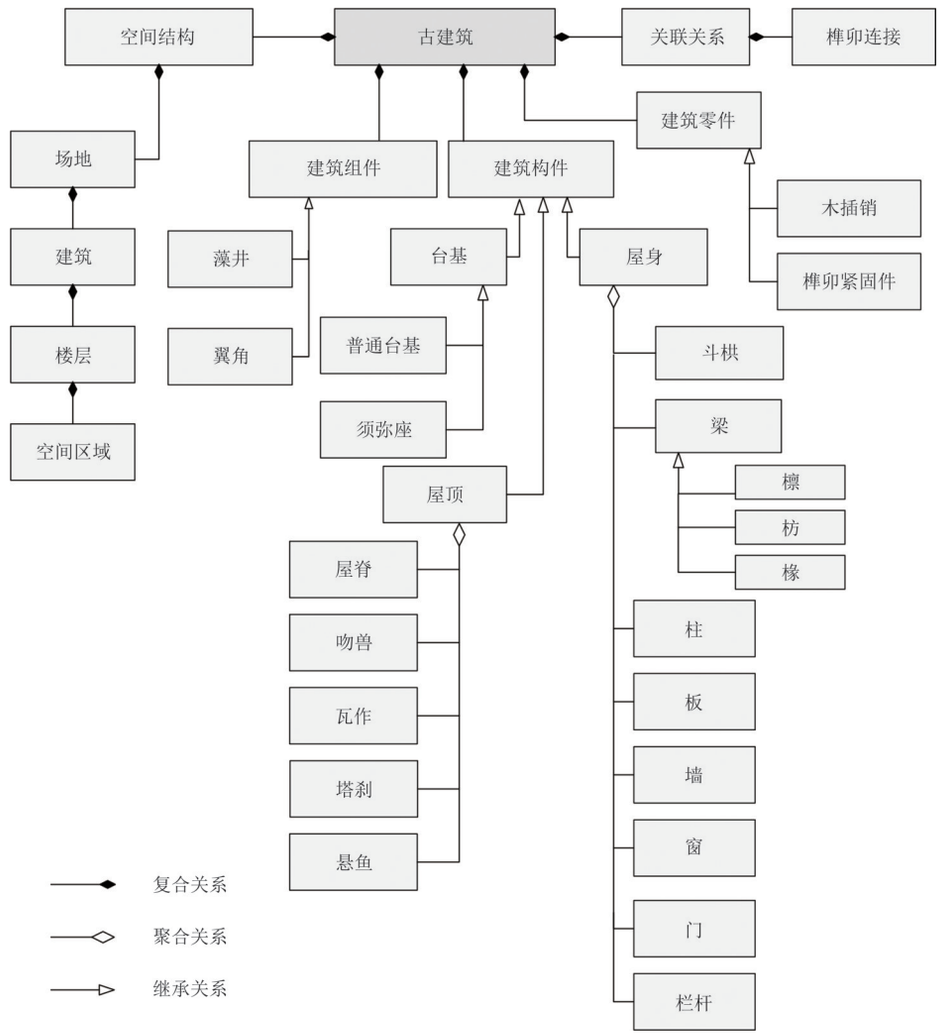


图3　UML语义模型类图

Fig. 3　UML semantic model class diagram

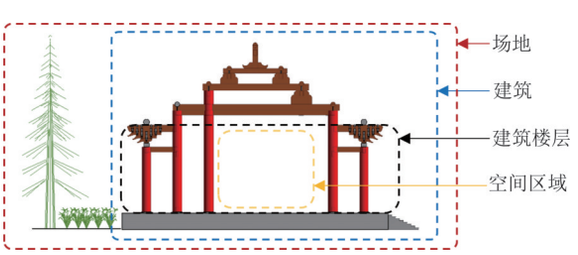


图4　古建筑空间结构分解

Fig.4　Decomposition of spatial structure in historic building

3　IFC标准体系的扩展

从语义模型映射到IFC标准体系,通过语义模型与IFC结构化信息的对比分析,IFC标准体系的扩展分析和IFC架构扩展验证这三个步骤实现了古建筑信息模型在IFC标准体系展示和表达.

3.1　语义模型与IFC结构化信息的对比分析

从1997年发展至今,IFC标准对建筑行业基本信息的表达,已经形成了稳定的架构体系.在对比分析语义模型和IFC4.3架构的研究中,优先沿用标准体系的元素,例如IFC实体、关系和属性集等,以减少标准体系中信息冗余,同时也降低实体和属性集扩展的难度和工作量.在语义模型与IFC标准的对比分析研究中遵循以下步骤:

1)识别IFC4.3架构中可继承实体和属性集,继承实体为古建筑领域中无需进行实体或属性修改,即可表达古建筑领域信息的实体和属性集.例如,IFC标准体系中的继承实体IfcSite实体表示语义模型中的场地.

2)识别可复用的实体和属性集:复用实体为古建筑领域中需要进行实体或属性集修改,但依旧采用IFC体系的现有实体和属性集进行信息表达的实体和属性.例如IfcBeam、IFC中梁实体无法表达檩的信息,需要通过修改实体的语义和属性实现.

3)IFC标准体系扩展:因标准体系中缺少的古建筑领域模型信息表达,故需进行扩展,扩展的方式采用实体扩展和属性集扩展两种方式.实体扩展包括对象实体和关系实体,属性集扩展除其本身外,还包括数量集的扩展.例如,斗栱的扩展为对象实体的扩展,同时扩展其相应的属性集用于描述斗栱的信息.

将遵循以上步骤扩展完成的实体,参照IFC的4层架构的定义,分配到IFC标准体系的架构与分层.

3.2 IFC标准体系的扩展分析

古建筑保护工程信息模型的IFC标准体系的扩展研究采用当前IFC常用的产品模型数据交换标准(Standard Exchange of Product Data Model,STEP),采用EXPRESS语言进行基本信息的描述.

基于IFC标准的核心架构,新增了实体用于描述古建筑信息模型,新增实体包括斗栱(IfcDouGong),榫卯连接(IfcRelConnectsTenons)和属性集等.基于BuildingSMART已发布的IFC4.3.0.0(IFC4X3)文件为基准进行扩展,最后将IFC4X3文件和扩展后的文件合并到单个模型文件.

古建筑工程信息模型基础数据架构,如图5所示.其中灰色框表示古建筑领域在该部分的内容中有相应的扩展,其他部分采用原IFC标准体系的实体和属性集.在核心层中对产品进行了扩展,包含了古建筑领域中的抽象概念;在共享层对共享建筑元素进行了扩展,包含古建筑构件等;在领域层扩展了古建筑领域,包含艺术、附属文物等实体和属性;在资源层对时间资源和度量资源进行扩展,增加中国历史时期和古建模数制的描述.古建筑领域模型信息的其他部分,均继承和复用IFC既有实体和属性集,即可进行表达.

根据语义模型中的类与IFC中的实体或属性集

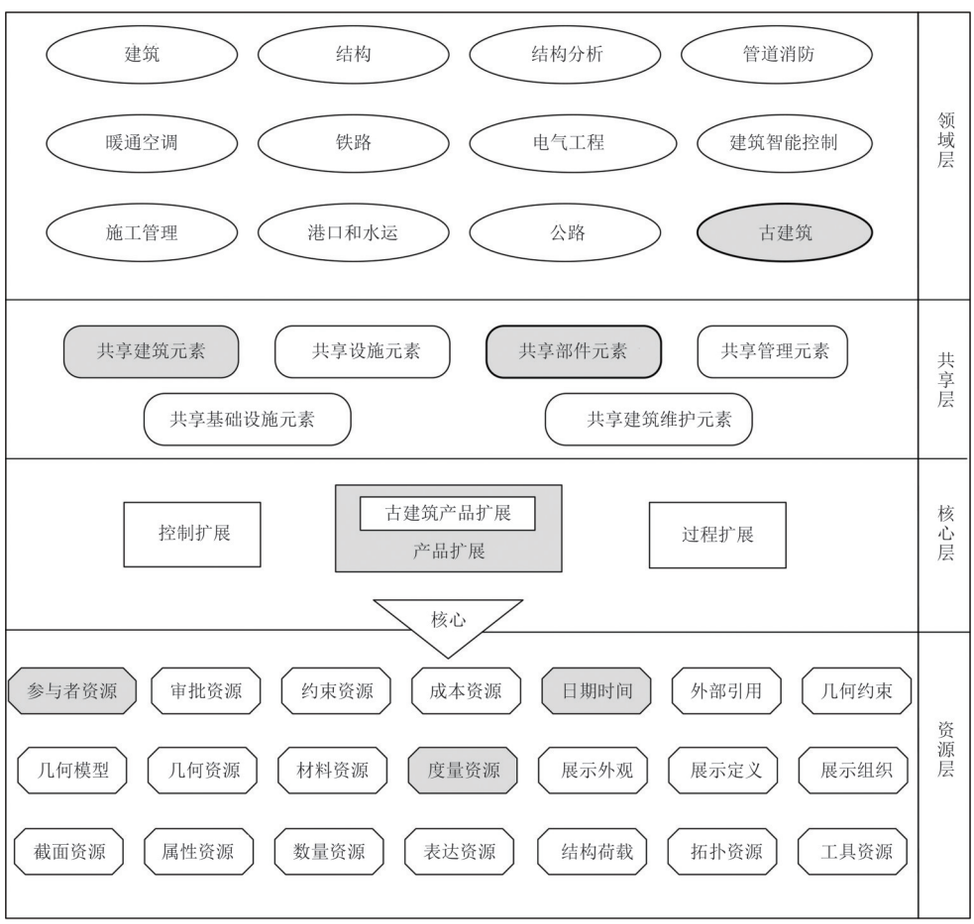


图5 古建筑工程信息模型基础数据架构

Fig.5 Basic data architecture of historic building information model

进行映射,得到适用于古建筑的IFC标准.古建筑工程信息模型IFC扩展继承关系如图6所示.古建筑实体由产品实体(IfcProduct)的子类派生,其中复用场地(IfcSite)、建筑物(IfcBuilding)、建筑楼层(IfcBuilding Storey)、空间区域(IfcSpace)表示古建筑领域空间结构.场地定义信息模型的空间边界、建筑物、建筑楼层、空间区域是整体和局部的关系,通过聚合关系(IfcRelAggregates)进行关联.

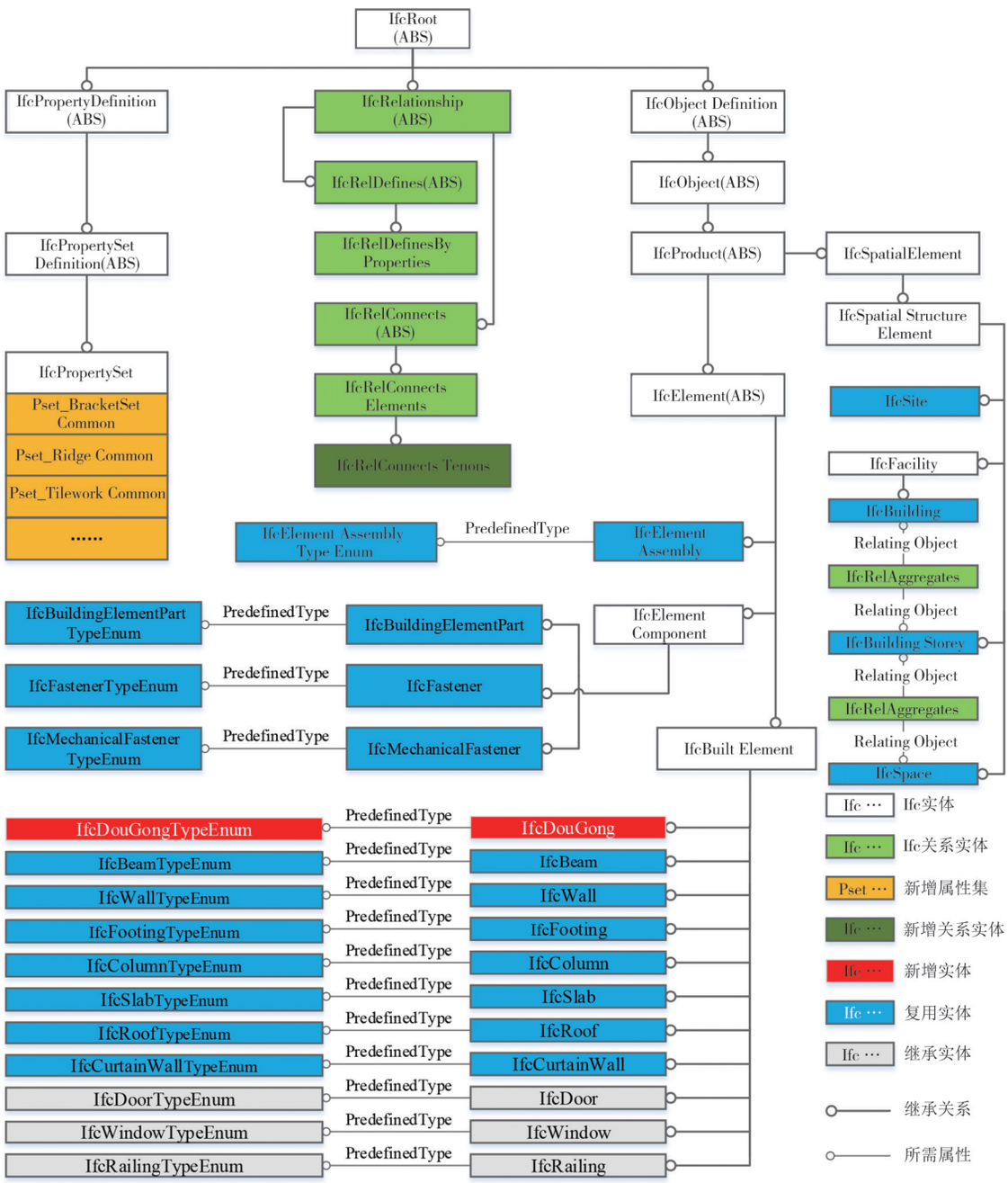


图 6　古建筑工程信息模型IFC扩展继承关系图

Fig.6　IFC extended inheritance graph of historic building information model

古建筑组件主要包含藻井(SunkPanel)、翼角(RoofCorner),复用构件组合(IfcElementAssembly)实体进行表达,作为构件组合实体中的类别,并在属性集中扩展 Pset_SunkPanel, Pset_ RoofCorner 记录其特征信息.

古建筑构件包含斗栱(IfcDouGong)、梁(IfcBeam)、柱(IfcColumn)、墙(IfcWall)等实体.IFC4.3标准未包含斗栱,因此需要进行扩展.古建筑梁、柱、墙等与现代建筑有所不同,复用已有实体,增加古建筑梁、柱、墙等的信息描述.古建筑门、窗、楼梯用

IFC4.3标准已能进行表达,在古建筑领域中直接继承相应的实体和属性.

古建筑零件常用于连接和加固,IFC4.3标准对该部分已有表达,在古建筑领域中复用已有实体IfcBuildingElementPart、IfcFastener、IfcMechanical Fastener进行表达,三个实体均派生自IfcElement-Component.

古建筑工程信息模型在IFC标准体系下的扩展实体,需要通过EXPRESS语言描述产品的信息,根据图6中的继承关系在图5中添加古建筑领域的实体.以斗栱实体为例,阐述IFC标准体系的扩展方法.

首先明确斗栱实体的语义定义,根据《古建筑木结构维护与加固技术标准》(GB/T 50165—2020)[11]确定了斗栱的语义定义:由方块形的斗,弓形的栱、翘,斜伸的昂和矩形断面的枋层层铺叠而成的组合构件,主要置于屋檐下和梁柱交接处.

在图4语义模型中明确了斗栱在古建筑信息模型的结构化关系,在与IFC4.3标准的映射过程中,需要新增斗栱实体.先进行类型定义(TYPE),通过IfcDouGongTypeEnum描述斗栱类型,再进行实体定义(ENTITY),其中IfcDouGong表示特定的斗栱构件,IfcDouGongType表示一类斗栱构件,并用"WHERE"约束给出的属性.

斗栱类型定义和实体定义的EXPRESS语言描述见表1~表3,并通过UML类图展示斗栱实体的继承关系,如图7所示.

表1 斗栱类型枚举EXPRESS表达

Tab.1 EXPRESS of IfcDouGongTypeEnum

名称	IfcDouGongTypeEnum
类型枚举	TYPE IfcDouGongTypeEnum = ENUMERATION OF (INTERCOLUMNDOUGONG平身科斗栱, CHAPITERDOUGONG柱头科斗栱, CORNERDOUGONG角科斗栱);
结束	END_TYPE;

表2 斗栱实体EXPRESS表达

Tab.2 EXPRESS of IfcDouGong

名称	IfcDouGong
开始	ENTITY IfcDouGong
属性	SUBTYPE OF (IfcBuiltElement); PredefinedType : OPTIONAL IfcDouGongTypeEnum
约束	WHERE CorrectPredefinedType : NOT(EXISTS(PredefinedType)) OR (PredefinedType <> IfcDouGongTypeEnum.USERDEFINED) OR ((PredefinedType = IfcDouGongTypeEnum.USERDEFINED) AND EXISTS (SELF\\IfcObject.ObjectType)); CorrectTypeAssigned : (SIZEOF(IsTypedBy) = 0) OR ('IFC4X3.IfcDouGongTYPE' IN TYPEOF(SELF\\IfcObject.IsTypedBy.RelatingType));
结束	END_ENTITY

表3 斗栱类型EXPRESS表达

Tab.3 EXPRESS of IfcDouGongType

名称	IfcDouGongType
开始	ENTITY IfcDouGongType
属性	SUBTYPE OF (IfcBuiltElementType); PredefinedType : IfcDouGongTypeEnum;
约束	WHERE CorrectPredefinedType : (PredefinedType <> IfcDouGongTypeEnum.USERDEFINED) OR ((PredefinedType = IfcDouGongTypeEnum.USERDEFINED) AND EXISTS (SELF\\IfcElementType.ElementType));
结束	END_ENTITY;

3.3 IFC架构扩展验证

验证古建筑底层数据体系扩展的内容和IFC文件是否符合IFC标准的结构化.如图8所示,验证过程中使用IfcOpenShell工具包,采用Python运行编译,用于读取、解析IFC文件.软件应用集成了IFC模式文件,该文件以EXPRESS格式整合了当前的IFC标准体系内容和3.2节中阐述的IFC标准体系扩展的内容,使用VScode编辑古建筑信息模型的IFC文

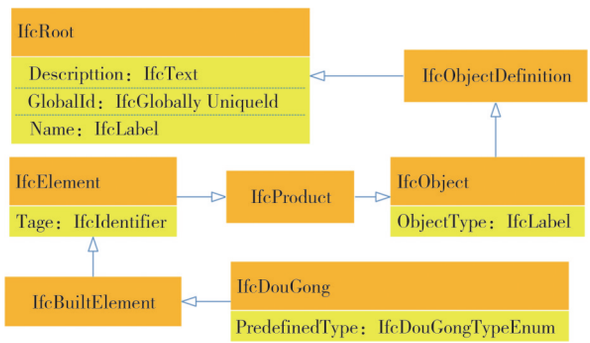


图 7　UML 继承关系图(斗栱)

Fig. 7　UML Inheritance relationship diagram(IfcDouGong)

件.最后,验证 IFC 文件是否符合 IFC 标准体系.

4　实例验证

以西安都城隍庙大殿[12]为例,验证扩展后 IFC 标准体系能够描述古建筑所需的信息.城隍庙大殿面阔七间、进深五间,是西安仅存的庑殿古建,殿内为抬梁式,露明造,七架梁.

分析扩展后 IFC 文件和 IFC 标准体系的定义规则的一致性,检验内容分为:①可视化和可读性检验;②检验实体和属性集内容.

验证过程中,首先使用 Revit2023 创建城隍庙大殿的几何模型,通过 Revit 插件 IFC for Revit 2023 导

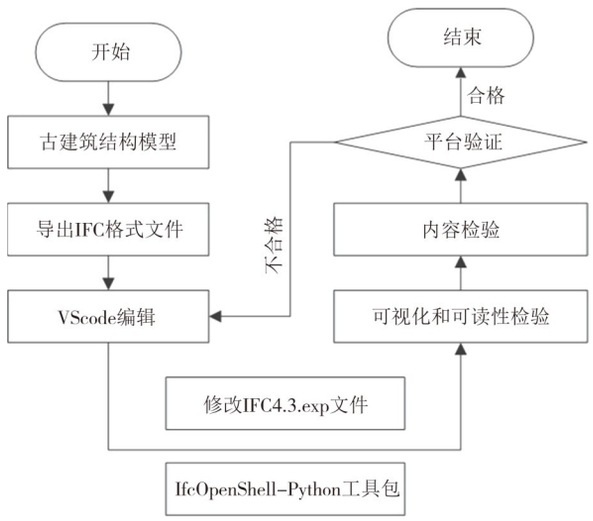


图 8　实例验证流程图

Fig.8　Instance verification process diagram

出城隍庙大殿模型的 IFC 实例文件;利用 VScode 编辑导出后的 IFC 文件,并修改 IFC4.3.exp 文件,然后使用 IfcOpenShell-Python 工具包解析的模型文件;最后分别以 Solibri Model Viewer V9.13 和 Blender 3.6 为验证平台,检验 IFC 文件的可视化、可读性及实体与属性集信息的内容.

检验可视化,对 IFC 文件进行测试,使用 Solibri Model Viewer 成功读取城隍庙大殿模型的 IFC 文件,如图 9 所示,模型包含了架梁、檩、枋、斗栱、檐柱、栏杆、台基、踏跺等主要构件.实体的几何信息均可视

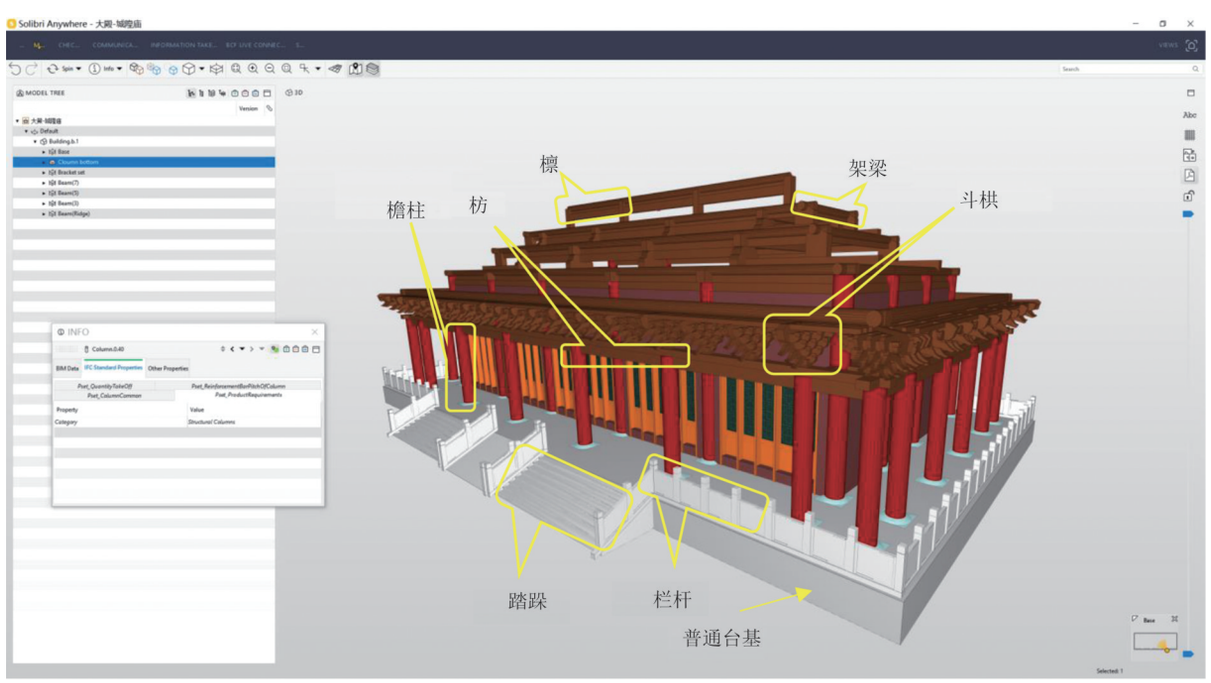


图 9　西安都城隍庙大殿的 IFC 模型 Solibri 可视化

Fig.9　IFC model Solibri visualization for Temple Hall of Xi'an City Deity

化且可读,例如斗栱(IfcDouGong).

检验内容,读取IFC文件包含的信息,对比扩展前的IFC文件,斗栱构件被读取为IfcBuildingElementProxy,扩展后斗栱实体IfcDouGong和其相应的属性集被嵌入IFC文件中,文件描述如表4所示,实体和属性集可进行正常的表达.

为检验IFC扩展后IFC文件在不同平台的可读性,以Blender3.6软件平台对模型进行检验,如图10所示,其模型的可视化展示,新增实体斗栱和斗栱属性集均能较好地读取和展示.

表4 斗栱实体的IFC文件数据提取

Tab. 4 IFC file data extraction of IfcDouGong

	IFC文件描述
扩展前	#19319=IFCBUILDINGELEMENTPROXY('2Gu4LA54T1iw_Bohnrvl9a',#20,'\\X2\\7D20678B\\X0\\1:\\X2\\7D20678B\\X0\\1:940394',$,'\\X2\\7D20678B\\X0\\1:\\X2\\7D20678B\\X0\\1',#19318,#19315,'940394',.NOTDEFINED.); #19320=IFCPROPERTYSET('2SWiJ8Kq7yfn2Duc7Z02Rr',#20,'Pset_BuildingElementProxyCommon',$,(#19268,#19269,#19303));
扩展后	#19378=IFCDOUGONG('2Gu4LA54T1iw_Bohnrvl8$',#20,'\\X2\\7D20678B\\X0\\1:\\X2\\7D20678B\\X0\\1:940397',$,'\\X2\\7D20678B\\X0\\1:\\X2\\7D20678B\\X0\\1',#19377,#19374,'940397',.NOTDEFINED.); #19379=IFCPROPERTYSET('0sBW55putRNgDaiuAe8w1Z',#20,'Pset_DouGongCommon',$,(#19268,#19269,#19303));



图10 西安都城隍庙大殿的IFC模型Blender可视化

Fig.10 IFC model Blender visualization for Temple Hall of Xi'an City Deity

5 结论

本文采用IFC标准体系对古建筑信息进行存储和交互研究,在建筑信息模型领域具有重要价值,有助于更好地保存和保护中国历史建筑的文化遗产,主要结论如下:

1)针对现有IFC标准体系无法表达中国古建筑中特有的形制、结构、属性、艺术等问题,基于UML构建了斗栱、榫卯等古建筑结构的语义模型.

2)根据IFC的架构体系,采用实体扩展和属性集扩展的方式,分层扩展了相应的构件实体、关系实体和属性集等,并以EXPRESS语言对扩展内容进行描述.

3)通过使用IfcOpenShell工具包解析、VScode编辑的模型文件,以及将Solibri和Blender作为验证平台,检验了IFC文件的可视化、可读性和实体与属性集信息的内容.

文中提出的古建筑领域的扩展符合IFC的扩展体系方法,对实现古建筑的结构和艺术等特性在信息模型中的交互和共享具有重要意义,可为古建筑工程勘察、修缮和运维的信息化保护提供强有力的支撑.

参考文献

[1] MURPHY M, MCGOVERN E, PAVÍA S. Historic building information modelling-adding intelligence to laser and image based surveys [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 76: 89-102.

[2] PALOMAR I J, GARCÍA VALLDECABRES J L, TZORTZOPOULOS P, et al. An online platform to unify and synchronise heritage architecture information [J]. Automation in Construction, 2020, 110: 103008.

[3] 杨娜,李天昊,刘威,等. 中国古建筑木结构健康监测Benchmark平台[J]. 土木工程学报,2022,55(6): 1-14.
YANG N, LI T H, LIU W, et al. Health monitoring Benchmark platform of Chinese ancient wooden structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(6): 1-14. (in Chinese)

[4] 王茹,孙卫新,徐东东. 明清古建筑信息模型设计平台研究[J]. 图学学报,2013,34(4): 76-82.
WANG R, SUN W X, XU D D. Research of the information model design platform of ancient architecture during Ming and Qing [J]. Journal of Graphics, 2013, 34(4): 76-82. (in Chinese)

[5] 陈伟. 基于本体的古建筑知识表达及案例推理[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
CHEN W. Knowledge expression and case-based reasoning of ancient architecture based on ontology [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese)

[6] 王亚康. 基于IFC的木结构古建筑残损监测技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.
WANG Y K. Research on damage monitoring technology of ancient wooden buildings based on IFC [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese)

[7] 淳庆,华一唯,张承文,等. 江南传统木构建筑模型修正方法研究:以津逮楼为例[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 54-63.
CHUN Q, HUA Y W, ZHANG C W, et al. Research on model updating methods of traditional timber buildings in the Yangtze River Region: a case study of Jindai building [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(5): 54-63. (in Chinese)

[8] 刘丹,滕彦,周争,等. 基于IFC的水利水电工程信息模型存储标准研究[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 240-247.
LIU D, TENG Y, ZHOU Z, et al. Research on storage standard of water projects information model based on IFC [J]. Yangtze River, 2022, 53(1): 240-247. (in Chinese)

[9] 何庆,荆传玉,高天赐,等. 基于IFC标准扩展的铁路轨道结构BIM模型构建研究[J]. 图学学报, 2023, 44(2): 357-367.
HE Q, JING C Y, GAO T C, et al. Research on BIM model of railway track structure based on IFC standard extension [J]. Journal of Graphics, 2023, 44(2): 357-367. (in Chinese)

[10] 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. (in Chinese)

[11] 古建筑木结构维护与加固技术标准:GB/T 50165—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
Technical standard for maintenance and strengthening of historic timber building: GB/T 50165—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)

[12] 乔方悦. 西安都城隍庙建筑设计[J]. 设计, 2019, 32(5): 156-157.
QIAO F Y. The architectural design of the City God Temple in Xi'an [J]. Design, 2019, 32(5): 156-157. (in Chinese)

附录

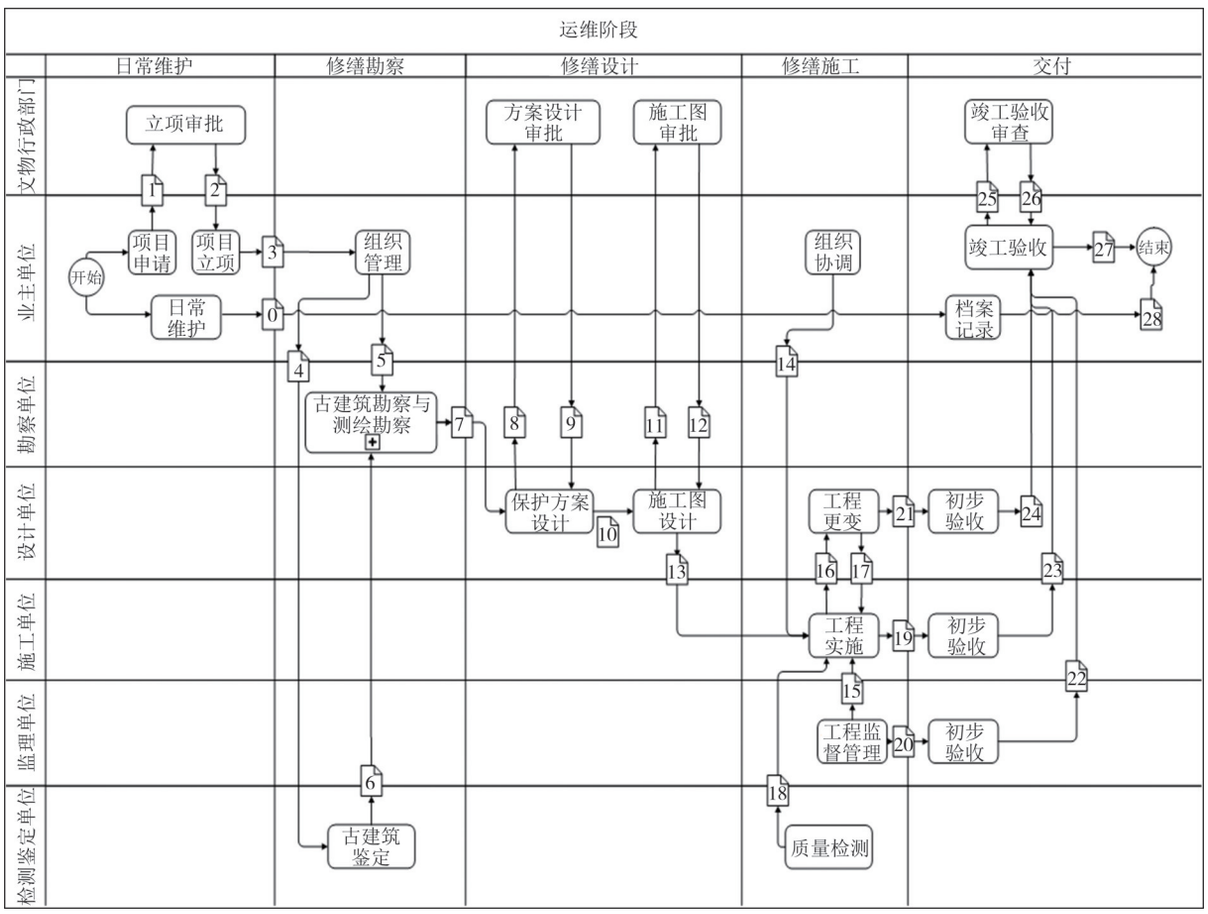


图 1 中国明清木结构古建筑 BPMN 图

Fig.1 BPMN of diagram historic timber building in Ming and Qing dynasties in China