文章编号：0253-374X(2026)01-0022-09　　**DOI**：10.11908/j.issn.0253-374x.24289

数字化精益建造成熟度评价体系与方法

马智亮[1]，刘　刚[1,2]，宋银灏[2]，张　杨[2]，李　伟[3]，曾　勃[4]，周新会[2]
（1. 清华大学 土木水利学院，北京 100084；2. 广联达科技股份有限公司，北京 100193；
3. 瑞森新建筑有限公司，山东 济南 250098；4. 北京市通州区住房和城乡建设委员会，北京 101115）

摘要：随着数字技术应用与发展，数字化精益建造的理念已被提出并受到重视。为支撑数字化精益建造应用和推广，对《建筑工程项目数字化精益建造成熟度评价标准》的核心技术方法进行阐述，即数字化精益建造的评价体系和方法。首先基于数字化精益建造管理模型，建立成熟度评价指标体系；然后分别确定评价指标权重及评价方法；最后介绍该标准在工程项目中的实际应用并进行分析。结果表明，该标准可用于量化评估工程项目的数字化精益建造水平。

关键词：精益建造；管理模型；成熟度
中图分类号：TU712；TU398+.9　　**文献标志码**：A

Maturity Assessment Framework and Method for Digital Lean Construction

MA Zhiliang[1]，*LIU Gang*[1,2]，*SONG Yinhao*[2]，*ZHANG Yang*[2]，*LI Wei*[3]，*ZENG Bo*[4]，*ZHOU Xinhui*[2]
(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Glodon Co., Ltd., Beijing 100193, China; 3. Ruisen New Construction Co., Ltd., Jinan 250098, China; 4. Tongzhou District Commission of Housing and Urban-Rural Development of Beijing Municipality, Beijing 101115, China)

Abstract: With the application and development of digital technology, the concept of digital lean construction has been proposed and increasingly emphasized. To support the application and promotion of digital lean construction, this paper explains the core technologies of the "Evaluation Standard for Digital Lean Construction Maturity of Construction Engineering Projects", namely the evaluation system and methodology for digital lean construction. First, based on a digital lean construction management model, a maturity assessment index system is established. Then, the weights of the evaluation indicators and the evaluation methods are determined. Finally, its practical application of the standard in engineering projects is introduced and analyzed. The results show that this standard can be used to quantitatively assess the level of digital lean construction in engineering projects.

Keywords: lean construction; management model; maturity

精益建造被提出已近30年，其理论、方法和工具在实践的基础上不断发展。随着数字技术的不断进步，以建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)、物联网、计算机视觉(Computer Vision, CV)、公共数据环境(Common Data Environment, CDE)等为代表的数字技术与精益建造的融合应用已逐渐成为研究热点[1]。为此，作者等提出了数字化精益建造的理念，即面向工程项目的设计和施工过程，通过融合应用精益建造和数字技术，并采取与之相匹配的统筹化项目交付模式，更好地实现减少或消除浪费，最大限度地满足客户需求的工程项目精益建造新模式；同时，构建了数字化精益建造管理模型，开发了面向施工阶段的数字化精益施工管理平台，并以专家研讨会和实际项目应用的方式进行了成功的验证[2]。

为衡量数字技术与精益建造融合应用的实施效果和应用水平，一些学者做了研究。Gurevich等[3]在2个案例工程上通过实施虚拟仿真、问卷调研和显著性分析研究KanBIM对精益建造工作流和效率的影响。Nguyen等[4]通过对72个工程项目的数据分析，定性分析了集成项目交付(IPD)、精益建造、建筑信息模型(BIM)三者集成对项目进度和成本的影响。Maraqa等[5]通过对多个项目的BIM和LPS(Last Planner System)实施水平和应用情况的对比分析得

收稿日期：2024-09-02
第一作者：马智亮，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为土木工程信息技术。
E-mail：mazl@tsinghua.edu.cn
通信作者：刘　刚，高级工程师，工程博士，主要研究方向为数字化精益建造、智能建造、BIM技术。
E-mail：liug@glodon.com

论文拓展介绍

知，应用BIM和LPS能显著改善建造工作流指数且集成应用比单独应用效果更好。Singh等[6]基于专家经验（问卷）评估打分确定3类40种浪费的来源，通过定性分析确定其中23种浪费来源可被信息技术消除。Varela等[7]通过问卷调研得知仅仅精益制造对可持续性的影响不显著，而与工业4.0融合对可持续性的影响非常显著。

另一方面，成熟度理论可用于对业务的能力水平进行评价和分级[8]，目前以软件能力成熟度模型[9]和智能制造成熟度模型[10]等为代表的行业领域成熟度评价模型已被证明在实际过程中可以发挥重要作用。

为了推动数字化精益建造在实际工程中的应用，基于上述数字化精益建造管理模型和成熟度理论，由清华大学和广联达科技股份有限公司等单位联合编制了《建筑工程项目数字化精益建造成熟度评价标准》[11]。本文旨在阐述该标准的核心技术，即数字化精益建造的评价体系和方法的建立。首先基于数字化精益建造管理模型，建立成熟度评价指标体系，然后分别确定评价指标权重及评价方法，最后介绍其在工程项目中的实际应用并进行分析。

1　数字化精益建造成熟度评价体系

数字化精益建造管理模型是数字化精益建造的核心。为此，首先对作者等提出的数字化精益建造管理模型进行分析，然后基于该模型构建成熟度评价指标体系，建立评价方法并划分成熟度等级。

1.1　数字化精益建造管理模型概要

如图1所示，数字化精益建造管理模型包含数字化精益设计管理模型和数字化精益施工管理模型，分别面向于设计过程和施工过程。

数字化精益设计管理模型主要包括3个要素：设计交付物、数字化精益设计过程和数字化精益设计管理平台，如图1左框图所示。设计工作在数字空间中进行，其中，设计交付物是在数字化精益设计过程中设计交付的基本单元。设计人员在设计软件上完成设计后，按既定规则将设计交付物及其关联的信息提交到数字化精益设计管理平台，平台一方面承载设计交付物及其管理数据，另一方面基于这些数据驱动和支撑数字化精益设计过程。

数字化精益施工管理模型主要包括3个要素：精益工序、数字化精益施工过程和数字化精益施工管理平台，如图1右框图所示。其中，“精益工序”是传统的“工序”在数字化精益施工中的体现，它是数字化精益施工管理中的基本管理单元。

作为一种特定“工序”，它是以“可执行、可计量、可交付”为原则，将施工工作分解到符合“一个可作业的施工部位，可应用一套工具和方法，并可由一个班组去执行”条件的工作包。施工工作包含的精益工序确定后，管理人员通过数字空间的数字化精益施工管理平台，基于精益工序对其进行计划—执行—检查—处置（PDCA）闭环管理。数字化精益施工管理平台一方面承载精益工序及其管理数据，另一方面基于这些数据，驱动和支撑数字化精益施工过程在物理空间的执行。

1.2　数字化精益建造成熟度评价指标体系的建立

由于数字化精益建造管理模型反映了数字化精益建造的本质，并提炼了关键管理要素，因此，基于该模型建立数字化精益建造成熟度评价指标体系。评价指标是易于评估的数字化精益建造成熟度指标。评价指标的筛选需要遵循全面性、系统性和实用性原则。全面性原则要求评价指标能全面覆盖评价域的内容；系统性原则要求评价指标的结构合理、

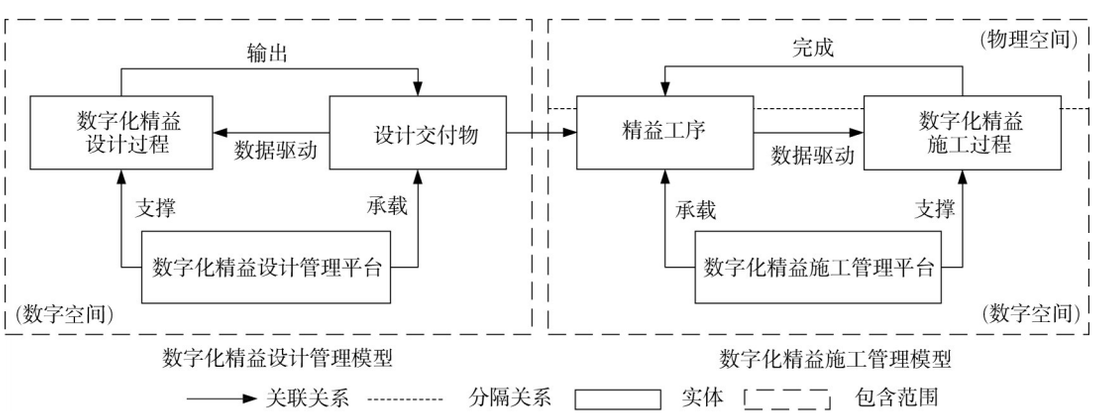

图1　数字化精益建造管理模型

Fig. 1　Management model for digital lean construction

层次分明、指标之间保持相对独立,范围不重叠;实用性原则要求评价指标可客观反映数字化精益建造成熟度,且易于理解和评价执行。基于这些设计原则,提出了成熟度评价指标,并通过调研和专家论证进行确定。

如图2所示,所建立的评价指标体系包括了评价维、评价域、评价指标共3层,其中,评价维和评价域与数字化精益建造管理模型所包含的要素形成了一一对应关系。

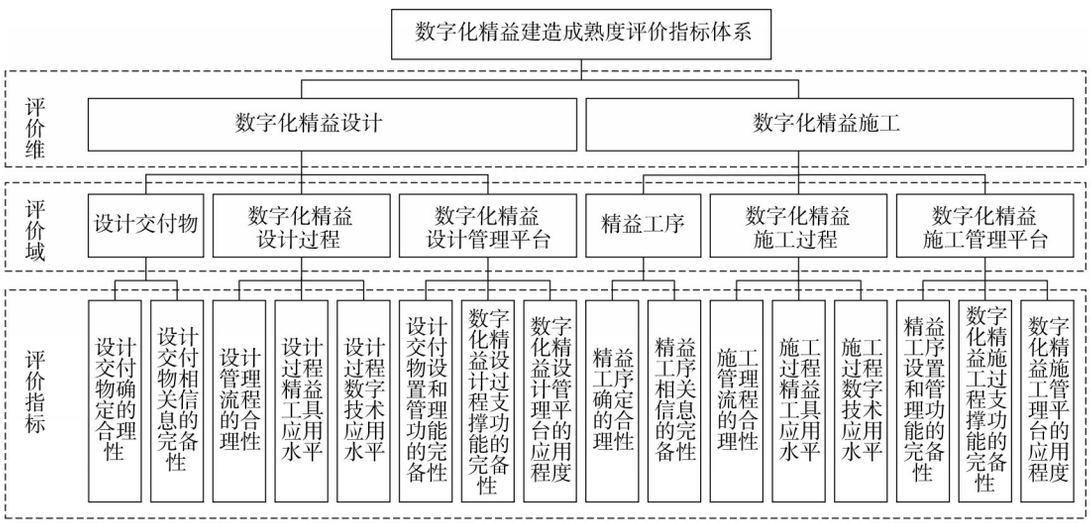

图2 数字化精益建造成熟度评价指标体系

Fig. 2 Maturity assessment index system for digital lean construction

1.3 数字化精益建造成熟度评价指标及要点的建立

以下对数字化精益设计和数字化精益施工的评价指标及其要点说明如下。

1.3.1 数字化精益设计评价指标及要点

设计交付物评价域包括设计交付物确定的合理性和设计交付物相关信息的完备性2个评价指标。其中,前者反映设计交付物是否已按照专业及交付类型进行分解确定,并经相关参与方(建设方、施工方等)确认;后者反映设计交付物的基本数据、计划数据和执行数据的完备性。

数字化精益设计过程评价域包括设计管理流程的合理性、设计过程精益工具应用水平和设计过程数字技术应用水平3个评价指标。其中,设计管理流程的合理性反映设计管理流程是否满足实际需求并符合PDCA闭环管理要求;设计过程精益工具应用和数字化技术应用反映对设计管理流程有效执行的支撑程度,其中设计过程精益工具应用水平反映是否已按需选择合适的拉式计划、限额设计、多方案比选、协同设计等精益工具来支撑设计管理流程的有效执行;设计过程数字化技术应用水平反映是否已按需选择和应用BIM、人工智能、大数据等技术,开展设计、校对、审图、成本测算和管理,支撑设计管理流程有效执行。

数字化精益设计管理平台评价域包括设计交付物设置和管理功能的完备性、数字化精益设计过程支撑功能的完备性和数字化精益设计管理平台的应用程度3个评价指标。其中,设计交付物设置和管理功能的完备性反映是否已结合业务需求灵活设置设计交付物并能按设计交付物的状态进行自动迁移;数字化精益设计过程支撑功能的完备性反映对支撑工作计划制定、跟踪与纠偏,基于数据驱动的设计任务推送、执行的数据采集与维护功能的程度;数字化精益设计管理平台的应用程度反映设计管理流程线上进行程度、管理平台所覆盖的应用人员的在线率,以及应用平台所取得的效率提升、图纸质量提高和降低变更的成效。

数字化精益设计各评价指标及相关评价要点说明详见表1所示。

1.3.2 数字化精益施工评价指标及要点

精益工序评价域包括精益工序确定的合理性和精益工序相关信息完备性2个评价指标。精益工序确定的合理性反映施工方在设计交付物的基础上基于施工组织设计确定精益工序且精益工序清单能满足项目需求的程度;精益工序相关信息完备性反映涵盖精益工序的基本数据、计划数据和执行数据的

表 1　数字化精益设计评价指标及要点

Tab. 1　Assessment index and key points for digital lean design

评价域	评价指标	评价要点
设计交付物	设计交付物确定的合理性	设计交付物分解的合理性、设计交付物清单的满足度及是否经过审核确认
	设计交付物相关信息的完备性	设计交付物的基本数据、计划数据、执行数据是否完备
数字化精益设计过程	设计管理流程的合理性	设计管理流程满足项目实际需求，并符合PDCA闭环管理要求
	设计过程精益工具应用水平	针对整体设计过程合理选择并应用“末位计划者系统”和“目标价值设计”等精益工具的水平、针对单个交付物的设计过程合理选择并应用精益工具的水平
	设计过程数字技术应用水平	针对整体设计过程合理选择并应用BIM、人工智能、大数据等数字技术的水平、针对单个交付物的设计过程合理选择并应用数字技术的水平
数字化精益设计管理平台	设计交付物设置和管理功能的完备性	按需设置精益工序并对精益工序执行过程状态进行管理等功能的完备性
	数字化精益设计过程支撑功能的完备性	工作计划编制、基于设计交付物的任务派发与执行过程管理功能的完备性
	数字化精益设计管理平台的应用程度	设计管理流程线上进行程度、应用人员在线率、平台应用成效

相关信息的完备性。

数字化精益施工过程评价域包括施工管理流程的合理性、施工过程精益工具应用水平和施工过程数字技术应用水平3个评价指标。其中，施工管理流程合理性反映施工管理流程是否结合项目实际情况并符合PDCA闭环管理要求；施工过程精益工具应用和施工过程数字化技术应用反映对施工管理流程执行的支撑程度，其中，施工过程精益工具应用水平反映在施工管理流程各个环节，合理选择和应用末位计划系统、拉式计划、准时制和持续改善等精益工具来支撑流程有效执行的水平；施工过程数字化技术应用水平反映在施工管理流程各个环节，合理选择和应用BIM、人工智能、大数据等数字技术进行优化排程、进行任务派发、接收、执行和反馈以及实时纠偏等支撑流程有效执行的水平。

数字化精益施工管理平台评价域包括精益工序设置和管理功能的完备性、数字化精益施工管理支撑功能的完备性、数字化精益施工管理平台的应用程度3个评价指标。其中，精益工序设置和管理功能的完备性反映结合业务需求灵活设置精益工序并对精益工序的状态进行自动迁移的功能完备性；数字化精益施工过程支撑功能的完备性反映支撑工作计划制定、执行跟踪与纠偏，基于数据驱动的精益工序级任务的推送、执行数据的采集与维护等功能的完备性。数字化精益施工管理平台的应用程度反映施工管理流程线上化程度、应用人员的在线率以及应用平台带来显著提升管理效率、提高施工质量、加快施工进度、节省施工成本的成效。

数字化精益施工各评价指标及其评价要点说明详见表2所示。

表 2　数字化精益施工评价指标及要点

Tab. 2　Assessment index and key points for digital lean construction

评价域	评价指标	评价要点
精益工序	精益工序确定的合理性	精益工序分解的合理性、精益工序清单的满足度及是否经过审核确认
	精益工序相关信息完备性	精益工序的基本数据、计划数据、执行数据是否完备
数字化精益施工过程	施工管理流程的合理性	施工管理流程满足项目实际需求，并符合PDCA闭环管理要求
	施工过程精益工具应用水平	针对整体施工过程合理选择并应用“末位计划者系统”和“持续改进”等精益工具的水平、针对单个精益工序的施工过程合理选择并应用精益工具的水平
	施工过程数字技术应用水平	针对整体施工过程合理选择并应用BIM、人工智能、大数据等数字技术的水平、针对单个精益工序的施工过程合理选择并应用数字技术的水平
数字化精益施工管理平台	精益工序设置和管理功能的完备性	按需设置精益工序并对精益工序执行过程状态进行管理等功能的完备性
	数字化精益施工管理支撑功能完备性	工作计划编制、精益工序级任务的派发与执行过程管理功能的完备性
	数字化精益施工管理平台的应用程度	施工管理流程线上化覆盖率、应用人员在线率、平台应用成效

1.4　成熟度等级划分

成熟度等级作为数字化精益建造成熟度评价的结果，反映了实施数字化精益建造的阶段水平。参考相关成熟度的等级划分[12-14]，结合评价指标的特点和实际应用情况，将数字化精益建造成熟度评价划分为4个等级。即L0级代表数字化精益建造应用尚处于规划与策划阶段，还未付诸实施；L1级代表在设计、施工管理过程中开展了初步的数字化精益建造应用；L2级代表实现了较为全面和深入的数字化精益设计或数字化精益施工的应用；L3级代表实现了数字化精益设计与数字化精益施工的全面和深入应用。

结合成熟度等级的各级特征，预设了每个等级的分值范围，如表3所示，其中S表示评价得分。通过工程实证和专家论证迭代优化成熟度等级所对应的分值范围，最终确定每个等级的合理分值范围。

表3 成熟度等级划分

Tab. 3 Classification of maturity level

成熟度等级	评价得分范围
L3级	$85 \leqslant S \leqslant 100$
L2级	$70 \leqslant S < 85$
L1级	$60 \leqslant S < 70$
L0级	$S < 60$

2 成熟度评价指标权重的确定

在数字化精益建造成熟度评价体系的基础上，应用层次分析法(AHP法)及德尔菲专家评分法进行指标权重的确定。AHP法由Satty等提出，是一种定量分析与定性分析相结合的方法。其原理在于将决策者的经验判断定量化，构建若干具有平行或隶属关系因素所构成的层次，通过层层分级与分类组合，形成一个多层次多因素的复合模型，将复杂问题简化为一系列因素之间的比较关系，从而对问题进行分析[15]。应用AHP法可以将决策者的经验判断定量化，从而增强了决策准确性，尤其在目标结构较为复杂且缺乏统计数据的情况下更为实用。总体来说，应用AHP法确定评价指标的权重，就是在建立有序递阶的指标体系的基础上，通过比较同一层次各指标的相对重要性，来综合计算指标的权重系数。

2.1 基于AHP法建立层次结构

根据1.2节所述的数字化精益建造成熟度评价指标体系，基于AHP法建立总体评价、评价维、评价域、评价指标4个层次的结构并编号，如图3所示。

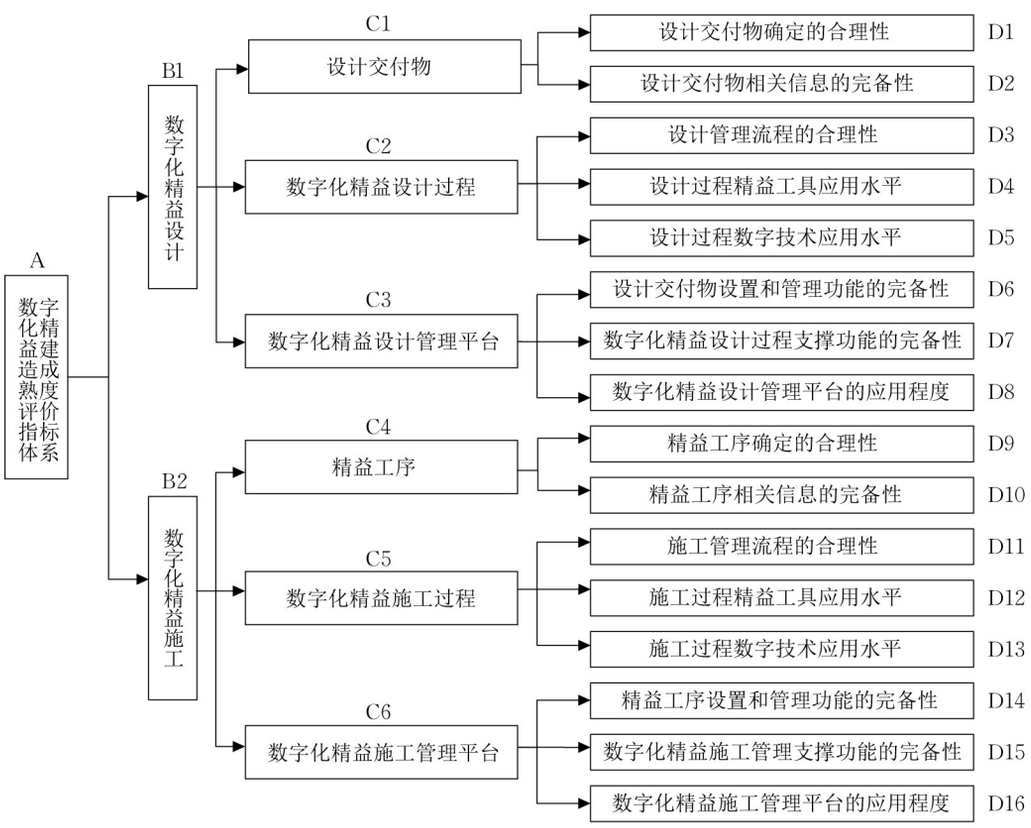

图3 数字化精益建造成熟度评价指标层次结构

Fig. 3 Hierarchical structure of maturity assessment indicators for digital lean construction

2.2 构造比较判别矩阵

在已建立的层次结构基础上构造比较判别矩阵，能够确定因素权重、解决优先级冲突和保证决策合理性。以评价维B_1包括的评价域C_1、C_2、C_3为例，建立比较判别矩阵，如表4所示，表示要素i与要素j重要性比较结果。

表4 比较判别矩阵示例

Tab. 4 Example of comparative discriminant matrix

B_1	C_1	C_2	C_3
C_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}
C_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}
C_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}

在构建比较判别矩阵时，需要对同一层次中的各个因素进行两两比较，评估它们相对于上一层次中某个准则或目标的重要性，这种比较通常使用一个标度系统（如1—9标度法）来进行量化，从而形成判断矩阵。如表5所示给出量化值进行判断。

2.3　基于德尔菲法确定指标分值

为保障指标权重赋值的客观性与专业性，采用德尔菲法，组织专家借助比较判别矩阵开展评分工作，进而测算得出各位专家赋予指标的权重值。为了能更加客观和专业地打分，专家组由5位行业专家组成，包括数字化领域、精益建造领域、设计领域和施工领域相关的学术界和产业界专家，专家情况详见表6。

表5　判别量化取值表示例

Tab. 5　Example of quantitative values for discrimination

因素i与因素j关系	量化值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
非常重要	7
极端重要	9
两相邻判断的中间值	2,4,6,8

表6　评分专家清单

Tab. 6　Checklist of scoring experts

序号	专家身份	工作领域	专业方向	工作时间/年
1	教授	重点高等院校	BIM、数字孪生、智能建造、数字建造等数字技术研究、精益建造、IPD交付等项目管理模式研究	30
2	专家研究员	数字建筑软件企业	智能建造、精益建造、BIM技术等研发	25
3	业务总监	设计院	标准管理、BIM技术应用、工程设计与管理等	20
4	副总经理	施工单位	工程总承包、IPD等统筹化交付模式项目管理和施工管理	16
5	业务专家	建设单位	数字化精益建造、工程项目数字化应用	25

5位专家分别对评价维、评价域、评价指标进行权重打分，以专家2给出的评价维B_1和评价域C_1、C_2、C_3的判别矩阵为例，详见表7。

表7　C_1、C_2、C_3判别矩阵示例

Tab. 7　Example of discrimination matrix for C_1, C_2, C_3

B_1	C_1	C_2	C_3
C_1	1.00	0.50	0.25
C_2	2.00	1.00	0.33
C_3	4.00	3.00	1.00

根据专家给出的判别矩阵计算出权重，并对判别矩阵进行一致性和随机性检验，按照百分制得到每位专家给出的指标分值，取平均值后得到每个指标的分值，如表8所示。

表8　专家对评价指标打分的加权均值

Tab. 8　Weighted mean scores of assessment index by experts

评价维	评价域	评价指标	分值
B_1	C_1	D_1	5
		D_2	5
	C_2	D_3	3
		D_4	4
		D_5	7
	C_3	D_6	5
		D_7	6
		D_8	5
B_2	C_4	D_9	7
		D_{10}	8
	C_5	D_{11}	5
		D_{12}	6
		D_{13}	10
	C_6	D_{14}	7
		D_{15}	10
		D_{16}	7

3　评价方法

基于上述成熟度评价指标体系，采用专家评价方法[16-17]，来确定数字化精益建造成熟度评价方法。其流程包括：参评申报、专家组组建、项目调研与评分、成熟度等级判定和公布结果5个步骤。

（1）参评申报。由参评方向评价组织方提交项目参评报告，并由评价方对参评方提交的参评报告进行初步筛查和确认。

（2）专家组组建。确定受理评价申请后，组建评价专家组，其成员人数为不少于3人的单数，从成员中确定一名评价组长。专家组成员来自设计、施工以及信息技术应用等相关领域，并具有多年相关从业的经验。

（3）项目调研与评分。评价专家组针对评价项目通过现场踏勘、资料查询、系统应用考察、沟通访谈等途径进行项目调研。根据收集到的信息，专家

组通过评价会的方式,应用“数字化精益建造成熟度评价表”对受评项目给出各指标评分。

(4)成熟度等级判定。结合成熟度等级划分的分数区间和各等级特征,判定得出项目成熟度等级。

(5)公布结果。专家组将评价结果给受评方交底,给出存在的不足和下一步提升方向与改进建议,共识后公布成熟度评价的结果,并由专家签字确认。

4 工程应用实证分析

根据数字化精益建造成熟度评价体系适用的项目类型和条件,选择了4个工程项目进行实际应用和实证分析。邀请了进行指标体系评分的同一批专家,对实证项目进行评分。专家组基于成熟度评价体系进行评价,并与实际情况进行对比分析,验证评价体系的正确性和实用性。

下面针对工程项目的选取和评价结论进行阐述和分析。

4.1 工程项目的选取

选取的参评项目均在设计初期开展了数字化精益建造的应用策划,从而统筹设计和施工两阶段的数字化精益建造工作,并采用集成项目交付[18]或工程总承包(EPC)[19]等统筹化交付模式。4个工程项目的基本情况见表9所示。

表9 实证工程项目

Tab. 9 Empirical engineering projects

序号	项目名称	项目规模/万m^2	承包模式	开工时间	竣工时间	项目特征
1	广联达西安大厦	6.7	IPD	2019—05	2022—10	采用IPD模式、数字化精益建造方法、数据驱动的数字化精益建造管理平台三层一体有机融合。基于精益工序进行进度排程、任务派发和任务执行和验收。
2	某医院建设项目	3.8	EPC	2022—07	2024—02	利用BIM设计、数字化精益施工管理平台开展项目管理,对设计过程和工地现场人、机、料进行精细化管理。
3	某科研教学楼建设项目	6.6	EPC	2022—01	2023—06	利用BIM设计、数字化精益施工管理平台,开展精益工序级项目管理,以生产管理为主线,成本为核心、安全、质量为重点,提升项目管理效率和效益。
4	某住宅小区工程	29.5	EPC	2022—05	2024—11	应用BIM设计、数字化精益施工管理系统实现BIM正向设计与精益化施工,提质增效,节本降耗。

4.2 评价结论及分析

专家组依据成熟度评价指标、评价方法及流程对表9所列的项目开展数字化精益建造成熟度评价,形成评分结果如表10所示。

表10 各项目成熟度评价得分情况

Tab. 10 Scores for maturity assessment of projects

评价域	分值	项目1	项目2	项目3	项目4
C_1	10.0	9.5	9.0	9.0	7.5
C_2	14.0	11.5	10.0	10.0	10.0
C_3	16.0	14.0	6.0	12.5	11.0
C_4	15.0	14.0	13.0	9.5	13.0
C_5	21.0	19.0	16.0	17.0	15.0
C_6	24.0	23.0	18.0	13.0	15.5

首先,将各项目成熟度评分情况分别汇总可得到各个项目总分,并依据表3的成熟度等级划分,分别判定各项目成熟度等级。即,项目1为91分,定为L3级;项目2为72分,定为L2级;项目3为71分,定为L2级;项目4为72分,定为L2级。

然后,根据各个项目的成熟度评分,统计并计算各个项目C1—C6各评价域的得分率,得到项目评价结果统计雷达图,如图4。

可以看出,项目1各个评价域得分的分布比较均衡,成熟度评价分值和等级最高,其中数字化精益设计过程(C2)得分率为82%,得分率略低,数字技术及精益工具的应用若在此基础上加强,可以进一步提升数字化精益建造应用水平;项目2数字化精益设计管理平台(C3)得分率仅为38%,可以针对此项重点加强,提升数字化精益建造应用水平;项目3数字化精益施工管理平台(C6)以及精益工序(C4)与其他评价维度相比明显偏低,分别为54%和63%;项目4除精益工序(C4)外,其他5项的得分都在80%以下,需要开展较全面的提升措施。评价结果经评价专家组综合研判,认为整体成熟度评价指

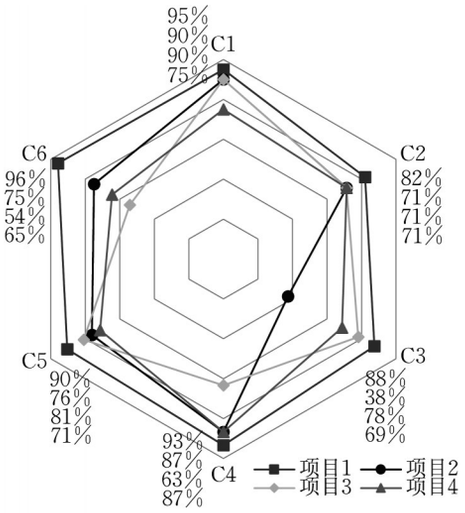

图4　项目评价结果统计雷达图

Fig. 4　Radar chart of statistics for project assessment results

标体系、评价方法及流程合理，评价结果与工程项目的数字化精益建造应用水平相符。

5　结论

为支撑数字化精益建造应用和推广，作者等编制了《建筑工程项目数字化精益建造成熟度评价标准》，本文阐述了该标准的核心技术，即数字化精益建造的评价体系和方法，介绍了该标准在工程项目中的实际应用并进行了分析。结果表明，该标准可用于量化评估建筑工程项目的数字化精益建造水平。

作者贡献声明：

马智亮：论文大纲指导、研究方法与技术路线指导、论文审核、研讨论证。

刘　刚：论文大纲、重点文献分析、评价体系与方法研究、论文撰写。

宋银灏：文献收集、研讨论证。

张　杨：文献收集、研讨论证、论文校对。

李　伟：案例工程验证、研讨论证。

曾　勃：研讨论证、案例工程验证。

周新会：研讨论证、案例工程验证。

参考文献：

[1] 刘刚，马智亮，李松阳. 基于文献研究的精益建造与数字技术集成综述[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2024，52(1)：145.
LIU Gang，MA Zhiliang，LI Songyang. Survey on lean construction and digital technology integration based on literature research [J]. Journal of Tongji University (Natural Science)，2024，52(1)：145.

[2] LIU Gang，MA Zhiliang，LI Jiayi，*et al*. Framework of digital lean construction and implementation of its management platform for construction phase [J]. Journal of Construction Engineering and Management，2024，150(6)：04024051.

[3] GUREVICH U，SACKS R. Examination of the effects of a KanBIM production control system on subcontractors task selections in interior works [J]. Automation in Construction，2014，37：81.

[4] NGUYEN P，AKHAVIAN R. Synergistic effect of integrated project delivery，lean construction，and building information modeling on project performance measures：a quantitative and qualitative analysis [J]. Advances in Civil Engineering，2019(1)：1.

[5] MARAQA M，SACKS R，SPATARI S. Quantitative assessment of the impacts of BIM and lean on process and operations flow in construction projects [J]. Engineering，Construction and Architectural Management，2021，28(8)：2176.

[6] SINGH J，MANGAL M，CHENG J. IT for Lean construction：a survey in India [C]//25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion：[s. n.]，2017：119-126.

[7] VARELA L，ARAÚJO A，ÁVILA P，CASTRO H，PUTNIK G. Evaluation of the relation between lean manufacturing，industry 4.0，and sustainability [J]. Sustainability，2019，11(5)：1439.

[8] 陶飞，张辰源，戚庆林，等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统，2022，28(5)：1267.
TAO Fei，ZHANG Chenyuan，QI Qinglin，*et al*. Digital twin maturity model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2022，28(5)：1267.

[9] 刘婷婷. CMM 软件能力成熟度模型概述[J]. 电脑知识与技术，2010，6(10)：2397.
LIU Tingting. An introduction to capability maturity model for software [J]. Computer Knowledge and Technology，2010，6(10)：2397.

[10] 于秀明，郭楠，王程安，等. 智能制造能力成熟度模型研究[J]. 信息技术与标准化，2016(5)：39.
YU Xiuming，GUO Nan，WANG Chengan，*et al*. Research on smart manufacturing capability maturity model [J]. Standardization Research，2016(5)：39.

[11] 马智亮，刘刚，张俊杰，等. 建筑工程项目数字化精益建造成熟度评价标准：T/ZBD 02—2023[S]. 北京：中关村数字建筑绿色发展联盟，2023.
MA Zhiliang，LIU Gang，ZHANG Junjie，*et al*. Standard for maturity assessment on digital lean construction of architecture engineering：T/ZBD 02—2023 [S]. Beijing：Zhongguancun Digital Building Green Development Alliance，2023.

[12] DEMIRDOGEN G，DIRN N，ALADAG Z. Lean based maturity framework integrating value，BIM and big data

analytics: evidence from AEC industry [J]. Sustainability, 2021, 13: 10029.

[13] MOLLASALEHI S, ABOUMOEMEN A, RATHNAYAKE A, *et al*. Development of an Integrated BIM and lean maturity model [C]//26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion: [s.n.], 2018: 1217-1228.

[14] MOHAMMAD A M, KUDRET D. Assessment of lean maturity level in manufacturing cells [J]. IFAC PapersOnLine, 2015, 48(3): 1876.

[15] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008 (5): 148.
GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Study and applications of analytic hierarchy process [J]. China Safety Science Journal, 2008 (5): 148.

[16] 刘文, 邵泽华, 李赟, 等. 智慧城市成熟度模型及评估方法研究[J]. 信息技术与标准化, 2020 (7): 17.
LIU Wen, SHAO Zehua, LI Yun, *et al*. Research on maturity model and evaluation methods of smart city [J]. Standardization Research, 2020 (7): 17.

[17] 中华人民共和国工业和信息化部. 智能制造能力成熟度评估方法: GB/T 39117—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Maturity assessment method of intelligent manufacturing capability: GB/T 39117—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

[18] 马智亮, 张东东, 马健坤. 基于BIM的IPD协同工作模型与信息利用框架[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42 (9): 1325.
MA Zhiliang, ZHANG Dongdong, MA Jiankun. BIM based collaborative work model and information utilization framework for IPD projects [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(9): 1325.

[19] MALIK M O, KHAN N. Analysis of ERP implementation to develop a strategy for Its success in developing countries [J]. Production Planning & Control. 2020(12): 1020.

(上接第21页)

Journal of Civil Engineering and Management, 2024, 41 (1): 1. DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2024.20240046.

[17] HU E J, SHEN Y, WALLIS P, *et al*. LoRA: low-rank adaptation of large language models[J/OL]. (2021-06-17) [2024-05-07]. http://arxiv. org/abs/2106.09685. DOI: 10.48550/arXiv.2106.09685.

[18] 徐伟, 吴水根. 建筑工程施工[M]. 1版. 上海:同济大学出版社, 2013.
XU Wei, WU Shuigen. Building construction[M]. 1st ed. Shang Hai: Tong University Press, 2013.

[19] 徐伟, 吴水根. 土木工程施工[M]. 2版. 上海:同济大学出版社, 2014.
XU Wei, WU Shuigen. Basic principles of civil engineering construction [M]. 2nd ed. Shanghai: Tong University Press, 2014.

[20] ZHENG J, FISCHER M. Dynamic prompt-based virtual assistant framework for BIM information search [J]. Automation in Construction, 2023, 155: 105067. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105067.

[21] TEAM Q. Qwen1.5-MoE: Achieving the performance of a 7B model with only one-third of the activated parameters [EB/OL]. (2024-03-28) [2024-09-12]. http://qwenlm.github.io/zh/blog/qwen-moe/.

[22] DAI D, DENG C, ZHAO C, *et al*. DeepSeekMoE: Towards ultimate expert specialization in mixture-of-experts Language Models[J/OL]. (2024-01-11)[2024-09-12]. https://arxiv.org/abs/2401.06066v1.

[23] LIN C Y. ROUGE: A package for automatic evaluation of summaries [C]//Text Summarization Branches Out. Barcelona: Association for Computational Linguistics, 2004: 74-81.

[24] SALTON G, WONG A, YANG C S. A vector space model for automatic indexing [J]. Communications of the ACM, 1975, 18(11): 613. DOI:10.1145/361219.361220.

[25] Meta Platforms, Inc. AI at Meta blog[EB/OL].(2024-04-18) [2024-05-26]. https://ai.meta.com/blog/.

[26] WEI J, WANG X, SCHUURMANS D, *et al*. Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models[J/OL]. (2022-01-28) [2024-05-26]. http://arxiv.org/abs/2201.11903. DOI:10.48550/arXiv.2201.11903.