



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

基于熵权-AHP与云模型的国产BIM建模软件多维度评价研究

赵雪锋, 侯笑, 孙哲, 李梦璇

引用本文

赵雪锋, 侯笑, 孙哲, 李梦璇. 基于熵权-AHP与云模型的国产BIM建模软件多维度评价研究[J]. 计算机科学, 2023, 50(6A): 220400216-9.

ZHAO Xuefeng, HOU Xiao, SUN Zhe, LI Mengxuan. [Multidimensional Evaluation Method for Domestic Building Information Modeling Software Based on Entropy-Weight-AHP and Cloud Model](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(6A): 220400216-9.

相似文献推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于改进模糊综合评价法的电力监控系统网络可靠性分析](#)

Network Reliability Analysis of Power Monitoring System Based on Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

计算机科学, 2023, 50(6A): 220400293-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400293>

[EHFM:一种面向多源网络攻击告警的高效层级化数据过滤方案](#)

EHFM: An Efficient Hierarchical Filtering Method for Multi-source Network Malicious Alerts

计算机科学, 2023, 50(2): 324-332. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220800049>

[基于双重指针网络的车货匹配双重序列决策研究](#)

Study on Dual Sequence Decision-making for Trucks and Cargo Matching Based on Dual Pointer Network

计算机科学, 2022, 49(11A): 210800257-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800257>

[一种融合多层次情感和主题信息的TS-AC-EWM在线商品排序方法](#)

TS-AC-EWM Online Product Ranking Method Based on Multi-level Emotion and Topic Information

计算机科学, 2022, 49(6A): 165-171. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210400238>

[面向个性化需求的云制造服务可信评价模型](#)

Trust Evaluation Model of Cloud Manufacturing Services for Personalized Needs

计算机科学, 2022, 49(3): 354-359. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210200116>

基于熵权-AHP与云模型的国产BIM建模软件多维度评价研究

赵雪锋 侯笑 孙哲 李梦璇

北京工业大学城建学部 北京 100124

(zhaoxuefeng@bjut.edu.cn)

摘要 随着BIM在我国建筑领域的重点研究与广泛应用,BIM建模软件的战略意义不断提升。长期依赖国外BIM建模软件使我国建筑业面临“卡脖子”的风险,我国建筑业迫切需要国产BIM建模软件的高质量发展。系统、科学、合理且客观的软件评价是推动我国国产BIM建模软件发展的重要手段,也是目前我国建筑业亟需解决的关键问题。首先对国外主流BIM建模软件的特性进行调研及系统性分析,建立了包含功能评价、质量评价和BIM化程度评价在内的国产BIM建模软件多维度评价模型。然后基于熵权-AHP与云模型理论,建立了针对国产BIM建模软件的多维度评价流程。最后以多维度评价模型为基础,对案例软件PKPM-BIM和广联达数维建筑设计软件进行了多维度评价,验证了评价模型的可行性和适用性。

关键词: 国产BIM建模软件;多维度评价;层次分析法;熵权法;云模型

中图分类号 TU18

Multidimensional Evaluation Method for Domestic Building Information Modeling Software Based on Entropy-Weight-AHP and Cloud Model

ZHAO Xuefeng, HOU Xiao, SUN Zhe and LI Mengxuan

Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract With the key research and wide application of BIM in China's architectural field, the strategic significance of BIM modeling software has been continuously improved. Long-term dependence on foreign BIM modeling software makes China's construction industry face the risk of "getting stuck". China's construction industry urgently needs the high-quality development of domestic BIM modeling software. Systematic, scientific, reasonable and objective software evaluation is an important means to promote the development of China's domestic BIM modeling software, and it is also a key problem to be solved urgently in China's construction industry at present. Firstly, the characteristics of foreign mainstream BIM modeling software are investigated and systematically analyzed, and a multi-dimensional evaluation model of domestic BIM modeling software including function evaluation dimension, quality evaluation dimension and level of BIM implementation dimension is established. Then, based on entropy weight-AHP and cloud model theory, a multi-dimensional evaluation process for domestic BIM modeling software is established. Finally, based on the multi-dimensional evaluation model, the case software PKPM-BIM and Glodon numerical dimensional architecture design software are evaluated in a multi-dimensional way, and the feasibility and applicability of the evaluation model are verified.

Keywords Domestic BIM modeling software, Multidimensional evaluation, Analytic hierarchy process, Entropy weight method, Cloud model

1 引言

在“数字新基建”的背景下,我国建筑业面临着智能化升级转型,在此过程中,建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术受到了业内的广泛关注,学者们对BIM的研究热情持续高涨,BIM成为当下以及未来建筑领域的研究热点。

随着BIM在我国建筑领域的重点研究与广泛应用,BIM建模软件的战略意义不断提升。当前,我国建筑信息化市场

中的BIM建模软件既有国内软件也有国外软件,但国外软件占据了绝大多数的市场份额,如Autodesk系列软件占比高达87.08%^[1]。在国际环境错综复杂的背景下,长期依赖国外软件将使我国建筑业面临“卡脖子”的风险,也使得我国建筑业信息安全存在巨大隐患。安全隐患叠加不断升级的行业需求,使得BIM建模软件国产化的必要性与紧迫性逐渐凸显,亟需促进我国国产BIM建模软件的高质量发展。系统、科学、客观且合理的软件评价是推动软件发展的重要手段,也是目前我国建筑业亟需解决的关键问题。然而国产BIM建模软

基金项目:教育部工程管理和工程造价专业教学指导分委员会课程思政专项研究项目(CMPC202129)

This work was supported by the Special Research Project on Curriculum Civics of the Teaching Guidance Sub-Committee of Engineering Management and Engineering Costing of the Ministry of Education(CMPC202129).

通信作者:侯笑(houx@emails.bjut.edu.cn)

件如何提升、如何对标主流 BIM 软件、如何展开科学合理的评价仍面临诸多挑战,亟需建立系统性软件评价流程与方法。

早在 20 世纪 70 年代,国内外学者就开始研究评价软件质量的模型与方法,相关专家已经提出了多个成熟的软件质量模型,如 Boehm 质量模型^[2]、McCall 质量模型^[3]、ISO/IEC 系列模型^[4]等。基于以上模型,常用的软件评价方法有层次分析法、模糊综合评价法、贝叶斯网络法,神经网络法等,如 Shi 等^[5]基于信息熵和 FAHP 计算软件属性组合权重,并将其应用于基于垂直映射距离的 TOPSIS 方法中,最终实现对软件质量的评价;Bo 等^[6]采用粗糙集理论和专家意见得到指标权重,并应用于模糊综合评价方法实现软件质量评价;Lan 等^[7]提出了评价模型,并利用贝叶斯网络学习和评估给定系统;Song 等^[8]结合神经网络和 D-S 证据理论,提出了一种利用并行神经网络进行质量评价的方法。软件评价相关的模型和方法非常丰富,各有优点和不足,但是这些评价模型对国产 BIM 建模软件不具备针对性,不能完全适用。

近年来,国内学者展开了对国产 BIM 建模软件的研究,如 Zhao 等^[9]研究了 BIM 建模软件的基本工作原理,对 BIM 建模软件本土化具有一定的借鉴意义;Chen 等分析了国产 BIM 建模软件发展的影响因素,采用 PCA 论证了关键因素^[10],并在后来的研究中采用 DEMATEL-ISM 混合建模方法分析了上述影响因素的层级与作用路径,提出了国产 BIM 建模软件的未来发展建议^[11]。Zhang^[12]分析了基于国产自主平台的 BIM 建筑电气设计软件整体架构,并提出了国产 BIM 建筑电气设计软件的设计思路。目前以国产 BIM 建模软件为研究对象的研究相对较少,且并不涉及软件评价研究。国产 BIM 建模软件的评价,无论是在概念界定、评价模型构建,还是评价方法等方面都尚未成熟,值得我们进一步深入研究。

本文在以往研究的基础上,对标国外主流 BIM 建模软件的功能特性,建立了国产 BIM 建模软件多维度评价模型,并基于熵权-AHP 赋予的指标权重,采用云模型综合评价法对国产 BIM 建模软件 PKPM-BIM 与广联达数维建筑设计软件展开了多维度评价,验证了评价模型的可行性与适用性。评价模型对国产 BIM 建模软件极具针对性,形成了独特的理论和方法,可为国产 BIM 建模软件的评价研究提供一种新思路。

2 国产 BIM 建模软件多维度评价模型

建立合适的评价模型是进行软件评价的基础,本文通过文献调研、软件学习、专家咨询并结合国产 BIM 建模软件的特点建立了包含目标层、一级指标层、二级指标层和三级指标层在内的四层次国产 BIM 建模软件多维度评价模型。

2.1 多维度评价模型总体框架

本文国产 BIM 建模软件多维度评价模型的三个维度为功能评价、质量评价以及 BIM 化程度评价,用以评价基础的软件功能完备性及实现程度、软件质量水平以及专有的 BIM 化程度。

根据层次分析法中的层次结构模型思想,多维度评价模型具体分为 4 层,其中目标层 U 为国产 BIM 建模软件

多维度评价,一级指标层为功能评价指标 U_1 、质量评价指标 U_2 和 BIM 化程度评价指标 U_3 ,各指标进一步细化为二级指标层和三级指标层,多维度评价模型总体框架如图 1 所示。

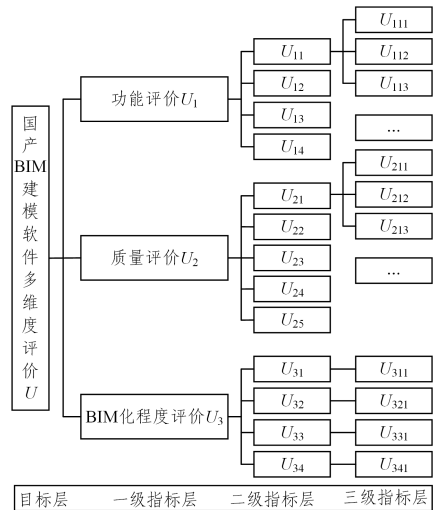


图 1 多维度评价模型总体框架

Fig. 1 Overall framework of multidimensional evaluation model

评价模型主要针对国产 BIM 建模软件建筑专业模块。下面分别对各级指标展开详细描述。

2.2 功能评价指标

本文依据对当下国外主流 BIM 建模软件 Autodesk Revit Architecture 和 Graphisoft ArchiCAD 现有功能的学习和了解完成了功能评价指标的初步确定,并在与专家的不断探讨中最终确定为图 2 所示指标。

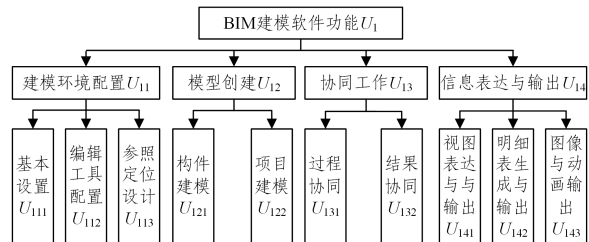


图 2 国产 BIM 建模软件功能评价指标

Fig. 2 Domestic BIM modeling software function evaluation index

功能指标相对专业且各功能包含多项功能点,因此本文对其三级指标进行了细化描述,以提高评价的准确性。评价时应评价指标下功能点的完备性以及实现程度。

(1)建模环境配置是建模前的准备功能,其下 3 个三级指标细化后的具体评价内容如表 1 所列。

表 1 指标 U_{11} 的具体评价内容

Table 1 Specific evaluation content of index U_{11}

功能	三级指标	具体评价内容
建模环境配置 U_{11}	基本设置 U_{111}	捕捉设置等软件系统设置;项目名称等项目信息设置
	编辑工具配置 U_{112}	移动、镜像等通用编辑工具配置;过滤、隐藏、剪切板等其他编辑工具配置
	参照定位设计 U_{113}	标高轴网以及参照平面等定位准则设置;构件约束关系(参照平面)

(2)模型创建是 BIM 建模软件最基本的功能,其下 2 个

三级指标细化后的具体评价内容如表2所列。其中,构件建模中添加的非几何信息应进一步评价其材质属性是否使对象具有真实的外观和行为,如表面纹理等外观属性,屈服强度和热传导率等物理属性。物理属性用以决定构件及结构的密度、强度、抗剪抗压、各向同性以及各向异性等,作为下游BIM软件计算分析的基础。对于构件库的设置可从以下几点进行评价:1)内含构件类型是否覆盖基本工程所需;2)构件分类与层级是否清晰;3)能否实现类型特性赋予,例如Revit软件中灯具这一族类型赋予了能依附于面的特性,使其自动捕捉墙或天花板等面。

表2 指标 U_{12} 的具体评价内容Table 2 Specific evaluation content of index U_{12}

功能	三级指标	具体评价内容
模型创建 U_{12}	构件建模 U_{121}	参数化建模;几何和非几何属性的添加;构件关系与规则等知识内置;构件库设置
	项目建模 U_{122}	构件参数化装配,从局部到整体形成项目;从整体到局部形成项目;批量与延续创建项目

项目建模中从局部到整体形成项目指将构件按照与定位基准的相对关系装配成项目模型。从整体到局部的项目建模是比较高级的建模技术,如Revit软件的概念体量工具,以“数字黏土”的方式捏造型和形体,然后通过标高等方法进行切割,形成建筑房间,建筑的墙板等构件捕捉这些捏出来的“面”,然后在面上生成。项目建模的批量与延续性包括通过项目样板、企业族库或者传递项目标准的方式延续已有项目的经验,例如项目的视图类型、出图方式等可以直接套用已完成项目的样板文件中的设置。

(3)工程项目是由建筑、结构、给排水、暖通、电气多专业组成的,各个专业又由不同的部分组成,在实际工程中往往不是由同一个人完成所有的建模工作,这就需要国产BIM建模软件具备协同工作建模功能。其下2个指标细化后的具体评价内容如表3所列。

表3 指标 U_{13} 的具体评价内容Table 3 Specific evaluation content of index U_{13}

功能	三级指标	具体评价内容
协同工作 U_{13}	过程协同 U_{131}	实现程度;同步情况;权限设置
	结果协同 U_{132}	“复制/监视”功能;“协调/查阅”功能

其中过程协同指所有设计过程均在一个模型中完成,当整个设计过程完成时,就可以直接获得设计模型。例如Revit软件以中心文件为基础的工作共享模式,利用工作集划分中心文件,专业内各部分设计人员在自己的工作集中建模,如图3所示。

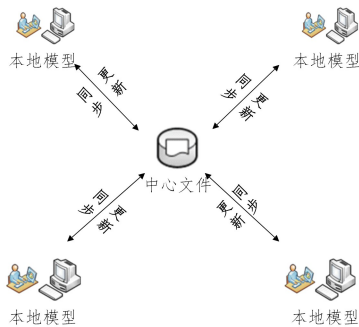


图3 Revit中心文件模式协同

Fig. 3 Revit center file mode collaboration

对于过程协同功能:1)评价是否实现;2)评价设计内容是否可以及时在本地文件与中心文件间同步;3)评价协同权限设置是否可以限制操作、防止冲突,是否可以借用权限,实现实时沟通。

结果协同指各专业在自己的模型中完成编辑和修改的所有工作,各自独立、互不影响,最后进行合模得到完整的设计模型。例如Revit软件的链接功能,以一个专业模型为主模型,链接其他专业进行合模,以获得成果文件;PKPM-BIM中的合并工程功能,用于专业间或专业内数据合并,合并后转换为当前项目原文件且可编辑。

对于结果协同功能:1)评价是否有“复制/监视”功能,“复制/监视”功能是在仅用外部链接作为参照不能满足工程需要的基础上产生的,如其他专业需要与建筑专业保持一致的标高轴网时,通过复制/监视功能可以在本文件内生成,并且链接文件的标高轴网发生更改时,主文件刷新监视可以重新生成更改后的版本;2)评价是否有“协调/查阅”功能,“协调/查阅”功能指主文件的构件附着于链接文件的主体上时,删除链接文件,主文件的构件可以协调主体,选择捕捉新主体或者不附着新的主体,如果不附着新的主体,主文件相应的构件会随链接文件的删除而消失,当重新加载链接文件时会恢复。

(4)BIM是数据和信息的载体,模型创建完成之后需要具备信息的表达与输出功能,以向团队成员、客户等传达设计意图。其下3个三级指标细化后的具体评价内容如表4所列。

表4 指标 U_{14} 的具体评价内容Table 4 Specific evaluation content index U_{14}

功能	三级指标	具体评价内容
信息表达与输出 U_{14}	视图表达与输出 U_{141}	视图完备性;控制视图图元可见性与图形显示;以图纸形式输出且自动生成二维尺寸标注等;内嵌国家或行业制图标准
	明细表生成与输出 U_{142}	明细表类型完备性;明细表信息自定义;以图纸形式或者电子表格形式输出
	图像与动画输出 U_{143}	渲染模型三维视图并输出;形成动画并以常用动画文件格式导出

视图表达与输出功能首先要评价视图完备性,即是否包括平、立、剖面视图,三维视图和详图索引视图等,以提供不同视角的模型表现形式。其次评价能否实现图元可见性和图形显示的灵活控制,进而实现对视图显示信息的控制。如Revit可以通过“过滤”和“隐藏图元”的方式控制图元可见性,通过“裁剪区域”定义项目视图的边界以控制图形显示。然后要评价是否能实现以图纸的形式输出,并自动生成符号、尺寸标注以及按构件材质生成剖面线和填充图案等。当下占据国内最高市场份额的BIM建模软件Revit的出图标准并不完全适用于我国市场,因此还要评价能否实现在软件中内嵌我国国家或行业制图标准,真正做到软件国产化,直接生成合法合规的二维图纸。

2.3 质量评价指标

ISO/IEC25010软件质量模型吸收了以往软件质量模型的优点,并在其基础上进行了补充和创新,因此本文选择该模型作为国产BIM建模软件多维度评价模型中质量评价指标部分的基础。但其质量模型指标是对所有软件的抽象概括,在国产BIM建模软件的评价中存在以下问题和不足:1)缺乏对国产BIM建模软件的针对性,不能真实反映国产BIM

建模软件的关注重点;2)有些指标对国产 BIM 建模软件来说是难以获得与度量的,可操作性差;3)有些指标与本文建立的多维度评价模型中的其他指标相近。因此本文质量评价指标在其基础上进行了删减、保留和补充,并根据国产 BIM 建模软件的特点重新定义了指标的含义。质量评价指标下各级指标确定流程如图 4 所示。

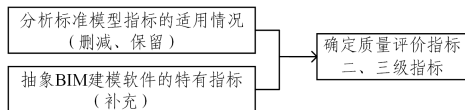


图 4 质量评价指标确定流程

Fig. 4 Determination process of quality evaluation index

所示。质量评价指标相对抽象,因此本文对其三级指标的具体评价内容进行了简要阐释,如表 5 所列。

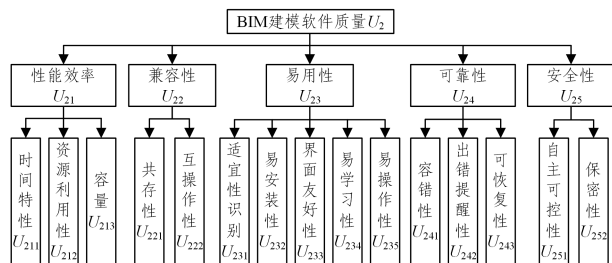


图 5 国产 BIM 建模软件质量评价指标

Fig. 5 Quality evaluation index of domestic BIM modeling software

最终确定的国产 BIM 建模软件质量评价指标如图 5

表 5 质量评价指标具体评价内容

Table 5 Specific evaluation content of quality evaluation index

二级指标	三级指标	具体评价内容
性能效率 U_{21}	时间特性 U_{211}	软件打开与基本命令点击的响应时间满足用户需求的程度;外部构件导入与明细表、图纸等的导出时间满足用户需求的程度;链接模型导入与模型通过插件或接口导出的时间满足用户需求的程度
	资源利用性 U_{212}	软件安装包与软件自带资源的大小;在某种建模场景下的 CPU 使用情况和内存占有率
	容量 U_{213}	BIM 建模软件最大限度满足建模要求的程度,如项目大小
兼容性 U_{22}	共存性 U_{221}	与其他 BIM 软件共享公共环境和资源且不对任何其他 BIM 软件产生不利影响的情况下,软件能够有效执行其功能的程度
	互操作性 U_{222}	接收、处理上游软件信息的能力,准确传递模型及属性信息至下游计算、生产等软件的能力;同公司系列软件间、不同公司软件间信息传递的完整程度;与当前主流 BIM 软件间的信息互导与格式兼容的程度;与通用数据格式的兼容程度
易用性 U_{23}	适宜性识别 U_{231}	用户可以依据 BIM 建模软件教程文档或网站首页等信息识别软件产品功能是否适合其需求的程度
	易安装性 U_{232}	软件安装向导的完整与清晰程度;软件占用计算机系统存储空间的用户接受程度;软件中构件库、材质库等资源安装的完整无错程度;软件卸载时软件与其资源卸载的完全程度
	界面友好性 U_{233}	界面操作环境与其他主流 BIM 软件客户习惯的适配程度;界面布局及色彩搭配的合理性;在线帮助功能的健全性与便利性
	易学习性 U_{234}	功能操作与客户习惯的适配程度
	易操作性 U_{235}	软件功能按钮突出与软件功能操作流程符合一般工程建筑的建设流程的程度
可靠性 U_{24}	容错性 U_{241}	对错误数据的容错能力;对异常情况(网络异常、硬件异常等)的容错能力;对违规操作的容错能力
	出错提醒性 U_{242}	输入有效性识别与提醒能力,例如绘制楼梯时输入的楼梯高度与楼梯踢面数和楼梯踢面高度的乘积数据不一致时是否会提醒;操作错误识别与提醒能力
	可恢复性 U_{243}	恢复软件正常操作的能力,例如模型体量大导致卡顿或崩溃时及时保存文件并恢复正常操作的能力;恢复受直接影响的数据的能力
安全性 U_{25}	自主可控性 U_{251}	图形平台的每个分层自主可控的程度;国家标准采用情况;是否拥有源代码并能进行自主分析、自主构建,全部源代码是否可由有关部门进行彻底审查、测试
	保密性 U_{252}	软件确保模型数据只被授权访问的人访问的程度

2.4 BIM 化程度评价指标

本文 BIM 化程度评价指标依据《BIM 建模软件原理》一书中对主流 BIM 建模软件原理的阐述以及与专家的探讨完成了最终确定,是国产 BIM 建模软件的专有评价指标。BIM 化程度是指三维化、参数化和工程属性封装等面向对象的程度。只有达到模型是三维的,具备参数化建模能力且软件能够定义柱、梁、板等建筑构件,具有工程属性这样的程度才算是 BIM 建模软件。本文建立的 BIM 化程度指标如图 6 所示。BIM 化程度指标同样也是比较抽象的,表 6 是对 BIM 化程度指标具体评价内容的描述。

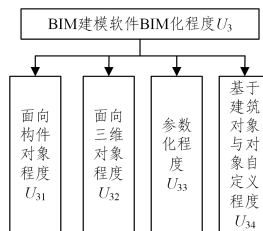


图 6 国产 BIM 建模软件 BIM 化程度评价指标

Fig. 6 BIM degree evaluation index of domestic BIM modeling software

表6 BIM化程度指标具体评价内容

Table 6 BIM degree index specific evaluation content

二级指标	具体评价内容
面向构件对象程度 U_{31}	1)评价封装性程度。封装性指隐藏构件的属性和实现细节,仅对外公开接口,控制在程序中属性读和修改的访问级别,将抽象得到的数据和行为(或功能)相结合,形成一个有机的整体。例如,在 Revit 中,通过墙构件的属性功能,可以设置承重部分、装饰区域、保温层材质厚度以及墙饰条分割条等墙的属性,这部分属性封装于墙这一构件,属于墙,但是比墙低一个级别,在对墙进行长度及造型的编辑时会一起进行修改。2)评价继承性程度。继承性指子类从父类继承方法,使得子类具有与父类相同的行为。例如,Revit 具有类别、族名称、类型、实例 4 个层级,非常鲜明地体现了面向构件对象的继承性。3)评价多态性程度。多态性指子类继承父类的特征但不同的子类又可以有不同的特征
面向三维对象程度 U_{32}	1)从功能实体角度评价由三维几何构件围合而成的功能实体中建筑信息的封装与继承做得是否充分。例如,厨房是一个功能实体,围合厨房的几何构件(如吊顶)发生更换或者增减等变化时,厨房本身并没有发生变化。2)从分析模型角度评价建筑模型与分析模型的数据映射及数据集成方面的解决方案,以及两种模型如何关联、模型信息如何封装与传递
参数化程度 U_{33}	评价尺寸约束实现程度;几何约束实现程度;关系表达式约束实现程度
基于建筑对象与对象自定义程度 U_{34}	评价软件定义的是不是建筑构件,同时这些建筑构件是否具备工程属性和工程逻辑,其信息是否可以自定义,例如评价墙这一构件是否可以自定义尺寸、材质和墙配件等

3 评价方法

对软件评价的研究在流程上一般分为两步:1)建立评价模型;2)选用合适的研究方法,将底层软件指标逐层向上聚合为高层次目标,逐步得到软件多维度评价结果。本文在前人研究的基础上选择了主客观相结合的权重赋予方法——熵权-AHP,以明确各评价指标在综合评价中的作用大小;然后选择了能实现定性概念与定量数值相互转换,且可以有效处理随机性和模糊性问题的云模型综合评价方法来完成案例软件的多维度评价,以使评价结果直观且具有说服力。

3.1 熵权-AHP

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)^[13] 是一种典型的主观赋权法,其模拟人脑对一个复杂决策问题的思考、判断过程,在对问题本质和内在关系等深入分析的基础上,根据决策者的主观判断经验,将复杂的、较为模糊的系统问题逐层分解,层层细化,自上而下建立一个清晰的层次结构,使决策者的思维过程模型化、数学化,从而为复杂问题提供一种简便灵活又实用的决策方法。

熵权法是一种客观赋权法,其基本原理是通过计算信息熵,来反映各指标评价情况的变异程度以及指标提供有效信息的贡献度^[14],进而确定该指标在综合评价中的作用大小^[15]。根据信息熵的思想,评价对象在某项指标上的值相差越大,熵值就越小,该指标提供的有效信息量就越大,该指标的权重也就越大;反之,若某项指标的值相差较小,熵值较大,说明该指标提供的信息量较小,该指标的权重也应较小^[16]。

3.2 云模型

云模型是一种处理不确定性问题的综合评价方法,能够通过正向云变换和逆向云变换算法实现定性概念和定量数值之间的相互转化^[17],进而有效解决模糊概念量化处理过程中模糊性和随机性的问题。

云模型可以用 3 个数字特征表示,分别是 E_x , E_n , H_e 。其中 E_x (Expected Value) 为期望值,表示相应的定性概念在论域空间的中心值,该指标最能体现定性概念,反映在云图上就是确定度为“1”的点; E_n (Entropy) 为熵,是期望不确定性的度量,反映在论域空间中可以被定性概念所接受的云滴的取值范围,即云图上云的“跨度”,由定性概念的随机性和模糊性共同决定,熵值越大,表示定性概念的随机性和模糊性就越大,云的“跨度”就越大; H_e (Hyper Entropy) 为超熵,表示熵

的熵,是熵的不确定性的度量,反映了云滴的离散程度,反映在云图上即为云的“厚度”,超熵越大,云滴离散程度就越大,云就越“厚”^[18]。

云模型通过云发生器实现定向概念和定量数值之间的相互转换,云发生器有正向和逆向之分,正向云发生器指从定性向定量的转换,即基于云模型的 3 个数字特征和云滴数输出云滴结果以及由云滴构成的云图;逆向云发生器指从定量向定性的转换,即输入 n 个云滴的每个精确数值 x (及其确定度 $u(x)$) 输出云模型的 3 个数字特征,如图 7 所示。

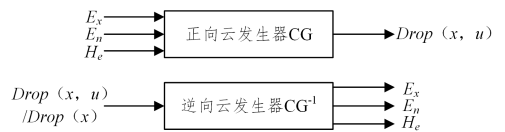


图7 正向/逆向云发生器

Fig. 7 Forward/reverse cloud generator

4 基于熵权-AHP与云模型的软件评价流程

运用熵权-AHP与云模型综合评价方法进行评价前,首先要确定评价指标,即第1节中3个维度的各层指标,然后再通过熵权-AHP确定指标的组合权重,最后建立云模型评语集。通过 Matlab 将其放置于云标尺上,得到标准云模型,通过专家打分以及云模型计算得到综合云,并将其与标准云进行相似度比较,得到最终评价结果。基于熵权-AHP与云模型的软件评价流程如图8所示。

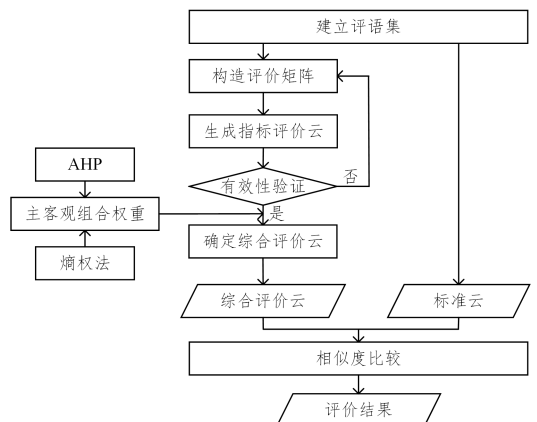


图8 评价流程图

Fig. 8 Evaluation flow chart

4.1 计算权重

本文应用 AHP 与熵权法分别确定各指标权重,然后结合两者权重确定指标主客观组合权重。具体步骤如下。

(1)对评价指标进行专家打分

针对两种方法设计两组问卷,邀请专家对评价指标进行打分。AHP 法两两比较打分的数字标度含义如表 7 所列,熵权法打分的分值含义如表 8 所列。

表 7 数字标度含义

Table 7 Number scale meaning

标度	意义
$\alpha_{ij}=1$	两个指标相比同样重要
$\alpha_{ij}=3$	两个指标相比,前者 <i>i</i> 比后者 <i>j</i> 稍微重要
$\alpha_{ij}=5$	两个指标相比,前者 <i>i</i> 比后者 <i>j</i> 明显重要
$\alpha_{ij}=7$	两个指标相比,前者 <i>i</i> 比后者 <i>j</i> 强烈重要
$\alpha_{ij}=9$	两个指标相比,前者 <i>i</i> 比后者 <i>j</i> 绝对重要
$\alpha_{ij}=2,4,6,8$	上述判断的中间值

表 8 指标分值情况

Table 8 Index scores

分值	重要程度
1	极其不重要
3	不重要
5	中等重要
7	重要
9	极其重要
2,4,6,8	介于上述两相邻分值尺度之间

(2)构造判断矩阵

AHP 问卷收回后选择各指标众数打分作为判断矩阵的数据,生成判断矩阵 A_{ij} :

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(3)建立评价矩阵(熵权法)

熵权法问卷收回后,可以形成一个矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,矩阵行表示专家 n ,矩阵列表示指标 m 。

(4)AHP 权重计算

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_j a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_j a_{ij}}} \quad (3)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{AW_i}{W_i} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)求出各判断矩阵的最大特征向量 w_i 和最大特征值 λ_{\max} ,其中 w_i 为指标相对于上一层某个指标相对重要性的权重。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)计算一致性比例 CR ,进行判断矩阵的一致性检验, $CR < 0.1$ 时,判断矩阵满足一致性,否则需调整。其中 RI 数值如表 9 所列。

$$b_i = \sum_{j=1}^m b_{ij} a_j \quad (7)$$

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^m CI(j) a_j}{\sum_{j=1}^m RI(j) a_j} \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)求出各指标相对于目标层的权重 b_i 以及一致性比例 CR ,其中, a_j 为某一层相对于目标层的权重, b_{ij} 为下一层相对于这一层的权重。

表 9 随机一致性指标数值

Table 9 Random consistency index values

矩阵阶数	RI	矩阵阶数	RI	矩阵阶数	RI
1	0.00	4	0.89	7	1.36
2	0.00	5	1.12	8	1.41
3	0.52	6	1.26	9	1.45

(5)熵权计算

$$x'_{ij} = \left[\frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})} \right] \quad (9)$$

根据式(9)(越大越优的指标处理公式)进行标准化处理。

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \ln \left(\frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \right) \quad (10)$$

$$\alpha_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)}, 1 \leq j \leq m \quad (11)$$

根据式(10)和式(11)计算信息熵 e_j 和第 j 项的权重系数 α_j ,即熵权。

(6)组合权重计算

$$\beta_j = \omega_j \cdot \frac{\alpha_j}{\sum_{j=1}^m \omega_j \alpha_j} \quad (12)$$

根据式(12)计算熵权-AHP 组合权重。

4.2 建立评语集

评语集是多维度评价过程中可能出现的评语的集合,本文采用语言值“差”“一般”“中等”“良好”和“优秀”对国产 BIM 建模软件进行描述,即评语集 $V = \{\text{差, 一般, 中等, 良好, 优秀}\}$,对应评分取值范围设定为 $[0, 10]$,区间划分为差 $[0, 2)$,一般 $[2, 4)$,中等 $[4, 6)$,良好 $[6, 8)$,优秀 $[8, 10]$,分数越高代表软件越好。按照云模型的概念,国产 BIM 建模软件多维度评价指标对某一评语的云数字特征可按式(13)一式(15)计算^[19]:

$$E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \quad (13)$$

$$E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \quad (14)$$

$$H_e = K \quad (15)$$

其中, C_{\max} 和 C_{\min} 分别表示某一评语的最大边界与最小边界, K 为常数,且不宜过大,故本文设 K 为 0.1。由此得到每一个评语的云模型数字特征,如表 10 所列。

表 10 评语云模型数字特征

Table 10 Commentary cloud model digital features

评语	差	一般	中等	良好	优秀
区间	$[0, 2)$	$[2, 4)$	$[4, 6)$	$[6, 8)$	$[8, 10]$
E_x	1	3	5	7	9
E_n	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
H_e	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

将评语云模型数字特征输入正向云发生器,利用 Matlab 软件工具可以得到如图 9 所示的各评价等级对应的标准云图。

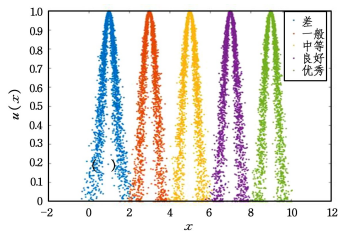


图9 标准云模型

Fig.9 Standard cloud model

4.3 生成指标评价云

邀请专家按照上述评语集对软件进行评价,可以得到评价矩阵(云模型): $Y(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}), i=1, \dots, n, n$ 表示填写问卷的人数, m 表示指标个数。然后通过云模型逆向云发生器求各个指标的数字特征,即指标评价云。具体公式如式(16)一式(19)所示:

$$E_{xj} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} \quad (16)$$

$$E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{ij} - E_{xj}| \quad (17)$$

$$H_{ej} = \sqrt{|S_j^2 - E_{nj}^2|} \quad (18)$$

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - E_{xj})^2 \quad (19)$$

4.4 有效性验证

根据云模型的雾化性质和正态函数的 3δ 原则,当 $He < En/3$ 时,云模型状态较好,满足要求;否则云模型雾化状态较明显,需要重新评分。

4.5 计算综合评价云

将熵权-AHP组合权重 β_j 和由云模型求得的指标评价云按照式(20)一式(23)进行运算,即可得到国产BIM建模软件多维度评价的综合评价云 $C(E_x, E_n, H_e)$ 。

$$E_x = \sum_{j=1}^m E_{xj} \beta_j \quad (20)$$

$$E_n = \sqrt{\sum_{j=1}^m (E_{nj} \beta_j)^2} \quad (21)$$

$$H_e = \sum_{j=1}^m (H_{ej} \beta_j) \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^m \beta_j = 1, j=1, 2, \dots, m \quad (23)$$

将案例软件的综合评价云输入图9所示的标准云发生器,与评语集云模型进行对比,按照最大相似度原则即可确定软件的最终评价结果。

5 案例应用

本节选用PKPM-BIM 2021 R1.0(建筑专业)以及广联达数维建筑设计(单机公测版0.21)两款软件作为案例软件,以下简称PKPM-BIM和广联达数维建筑设计。PKPM-BIM是央企中国建筑科学研究院北京柯力科技有限公司完全自主知识产权的国产BIM建模软件,2011年开始研发,基于自主三维图形内核P3D,致力于解决行业信息化领域“卡脖子”问题。广联达数维建筑设计是广联达集团面向建筑设计人员开发的一款BIM建模软件,以自主图形平台为基础,以参数化驱动为核心,致力于实现从三维设计建模到快速出图的全阶段功能,同样是国产BIM建模软件中的佼佼者。

首先进行专家打分,计算评价模型的指标权重,本文选择了15位BIM软件及相关领域内经验丰富的专家,受访专家基本信息如表11所列。

表11 受访专家基本信息

Table 11 Basic information of interviewed experts

	单位	BIM研究/实践经验
专家1	软件研发单位	5~10年
专家2	高等院校	15年以上
专家3	施工单位研究院	15年以上
专家4	高等院校	5年以内
专家5	施工单位研究院	5~10年
专家6	施工单位研究院	5~10年
专家7	咨询企业	15年以上
专家8	设计单位	5~10年
专家9	软件研发单位	10~15年
专家10	高等院校	10~15年
专家11	设计单位	15年以上
专家12	施工单位研究院	5~10年
专家13	高等院校	5年以内
专家14	软件研发单位	10~15年
专家15	软件研发单位	5年以内

由AHP问卷得到的判断矩阵有13个,以功能评价判断矩阵 A_{U1} 为例进行计算。

$$A_{U1} = \begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 1/5 & 1/4 \\ 6 & 1 & 3 & 4 \\ 5 & 1/3 & 1 & 2 \\ 4 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

根据式(3)一式(6)计算得到权重 $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}\} = \{0.0559, 0.5387, 0.2490, 0.1555\}$, $CR = 0.0518 < 0.1$,满足一致性要求。

最终得到基于AHP的指标权重如表12所列。

表12 基于AHP的指标权重

Table 12 AHP-based index weights

一级指标层	权重	二级指标层	权重	综合权重	三级指标层	权重	综合权重			
U ₁	0.3333	U ₁₁	0.0559	0.0186	U ₁₁₁	0.1220	0.0023			
					U ₁₁₂	0.3196	0.0059			
					U ₁₁₃	0.5584	0.0104			
		U ₁₂	0.5387	0.1795	U ₁₂₁	0.5000	0.0898			
					U ₁₂₂	0.5000	0.0898			
		U ₁₃	0.2490	0.0830	U ₁₃₁	0.3333	0.0277			
					U ₁₃₂	0.6667	0.0553			
					U ₁₄₁	0.7838	0.0406			
					U ₁₄₂	0.1349	0.0070			
					U ₁₄₃	0.0813	0.0042			
		U ₁₄	0.1555	0.0518	U ₂₁₁	0.5714	0.0115			
					U ₂₁₂	0.1429	0.0029			
					U ₂₁₃	0.2857	0.0057			
					U ₂₁₁	0.1667	0.0020			
U ₂	0.3333	U ₂₃	0.1885	0.0628	U ₂₁₂	0.8333	0.0100			
					U ₂₃₁	0.0621	0.0039			
					U ₂₃₂	0.0985	0.0062			
					U ₂₃₃	0.1619	0.0102			
					U ₂₃₄	0.2886	0.0181			
					U ₂₃₅	0.3889	0.0244			
U ₃	0.3333	U ₂₄	0.4146	0.1381	U ₂₄₁	0.1365	0.0189			
					U ₂₄₂	0.2385	0.0329			
					U ₂₄₃	0.6250	0.0863			
					U ₂₅₁	0.7500	0.0752			
					U ₂₅₂	0.2500	0.0251			
					U ₃₁	0.4393	0.1464	U ₃₁₁	1.0000	0.1464
					U ₃₂	0.1036	0.0345	U ₃₂₁	1.0000	0.0345
U ₃₃	0.3107	0.1036	U ₃₃₁	1.0000	0.1036					
U ₃₄	0.1464	0.0488	U ₃₄₁	1.0000	0.0488					
合计	1			1			1			

注:为便于AHP综合权重的计算,本文对原模型指标体系进行了处理:将二级指标 U_{31}, U_{32}, U_{33} 和 U_{34} 各分解出一个权重为1的子指标(即其本身)

其中,根据式(8)计算得到二级指标层 $CR = 0.0655 < 0.1$,三级指标层 $CR = 0.0233 < 0.1$,满足一致性检验。

基于熵权法建立的评价矩阵 X 为 15 行 29 列的矩阵。根据式(9)一式(11)对其计算得到的熵权,如表 13 所列。

表 13 基于熵权法的指标权重

Table 13 Index weights based on entropy weighting method

三级指标层	熵值	权重	三级指标层	熵值	权重		
1	U_{111}	0.8918	0.0163	16	U_{231}	0.8665	0.0201
2	U_{112}	0.7058	0.0443	17	U_{232}	0.9477	0.0079
3	U_{113}	0.7698	0.0346	18	U_{233}	0.8971	0.0155
4	U_{121}	0.7211	0.0420	19	U_{234}	0.6727	0.0493
5	U_{122}	0.6757	0.0488	20	U_{235}	0.8314	0.0254
6	U_{131}	0.7142	0.0430	21	U_{241}	0.7842	0.0325
7	U_{132}	0.7142	0.0430	22	U_{242}	0.7427	0.0387
8	U_{141}	0.6944	0.0460	23	U_{243}	0.8665	0.0201
9	U_{142}	0.7794	0.0332	24	U_{251}	0.7341	0.0400
10	U_{143}	0.7579	0.0364	25	U_{252}	0.8427	0.0237
11	U_{211}	0.7755	0.0338	26	U_{311}	0.7755	0.0338
12	U_{212}	0.8150	0.0278	27	U_{321}	0.6698	0.0497
13	U_{213}	0.8971	0.0155	28	U_{331}	0.6798	0.0482
14	U_{211}	0.7605	0.0360	29	U_{341}	0.6470	0.0531
15	U_{212}	0.7258	0.0413				

根据式(12)计算得到基于熵权-AHP 的组合权重如表 14 所列。

表 14 熵权-AHP 组合权重

Table 14 Entropy weight-AHP combination weights

序号	三级指标层	AHP 权重	熵权	组合权重
1	U_{111}	0.0023	0.0163	0.0000
2	U_{112}	0.0059	0.0443	0.0068
3	U_{113}	0.0104	0.0346	0.0094
4	U_{121}	0.0898	0.0420	0.0979
5	U_{122}	0.0898	0.0488	0.1138
6	U_{131}	0.0277	0.0430	0.0310
7	U_{132}	0.0553	0.0430	0.0618
8	U_{141}	0.0406	0.0460	0.0485
9	U_{142}	0.0070	0.0332	0.0060
10	U_{143}	0.0042	0.0364	0.0040
11	U_{211}	0.0115	0.0338	0.0101
12	U_{212}	0.0029	0.0278	0.0000
13	U_{213}	0.0057	0.0155	0.0000
14	U_{211}	0.0020	0.0360	0.0000
15	U_{212}	0.0100	0.0413	0.0107
16	U_{231}	0.0039	0.0201	0.0000
17	U_{232}	0.0062	0.0079	0.0000
18	U_{233}	0.0102	0.0155	0.0041
19	U_{234}	0.0181	0.0493	0.0232
20	U_{235}	0.0244	0.0254	0.0161
21	U_{241}	0.0189	0.0325	0.0159
22	U_{242}	0.0329	0.0387	0.0331
23	U_{243}	0.0863	0.0201	0.0450
24	U_{251}	0.0752	0.0400	0.0782
25	U_{252}	0.0251	0.0237	0.0154
26	U_{311}	0.1464	0.0338	0.1285
27	U_{321}	0.0345	0.0497	0.0445
28	U_{331}	0.1036	0.0482	0.1297
29	U_{341}	0.0488	0.0531	0.0673
合计		1	1	1

注:表中数据均保留 4 位小数,个别权重较小的指标保留 4 位小数后权重为 0

然后邀请 25 位 PKPM-BIM 软件的使用用户,按照多维度评价模型对软件进行打分,计算软件指标评价云,进而计算综合评价云。

PKPM-BIM 软件的评价矩阵有 25 行 29 列,矩阵行表示软件用户(25 位),矩阵列表示指标(29 个)。对其应用式(16)一

式(19)计算可得到三级指标评价云数字特征,其中对各指标的第一次评分信息不够集中,有些云图云滴较为分散,雾化状态明显,故及时对评分情况进行了总结与反馈,然后进入第二轮评价,直至云图清晰,概念逐步形成,最终通过有效性验证的三级指标云数字特征如表 15 所列。

表 15 三级指标评价云数字特征

Table 15 Three-level index evaluation cloud digital features

序号	三级指标层	E_x	E_n	H_e
1	U_{111}	7.0000	1.3034	0.3666
2	U_{112}	7.2000	1.3636	0.1615
3	U_{113}	6.7200	1.6965	0.2862
4	U_{121}	6.6800	1.6203	0.3856
5	U_{122}	6.8400	0.8583	0.1153
6	U_{131}	5.2400	1.3395	0.3816
7	U_{132}	6.0400	1.3636	0.3118
8	U_{141}	5.9200	1.3235	0.0912
9	U_{142}	6.3600	1.0067	0.3267
10	U_{143}	6.0400	1.5641	0.3057
11	U_{211}	6.1200	1.6604	0.3833
12	U_{212}	6.6400	1.5080	0.3642
13	U_{213}	6.7200	1.2232	0.1905
14	U_{211}	6.8000	1.5641	0.4433
15	U_{212}	6.2000	1.5641	0.4433
16	U_{231}	6.2800	1.7687	0.4101
17	U_{232}	6.4000	1.1029	0.2231
18	U_{233}	6.6400	1.4438	0.4218
19	U_{234}	6.6000	1.6243	0.4708
20	U_{235}	6.2800	1.7968	0.5930
21	U_{241}	6.6000	1.3235	0.4103
22	U_{242}	6.4800	1.5762	0.2401
23	U_{243}	6.2000	0.9425	0.1684
24	U_{251}	6.3600	0.9425	0.2549
25	U_{252}	6.1200	1.8730	0.3846
26	U_{311}	6.0400	1.5641	0.5100
27	U_{321}	6.5200	1.5762	0.2401
28	U_{331}	6.4800	1.3275	0.4110
29	U_{341}	6.8400	1.2593	0.1710

根据式(20)一式(23)计算得到 PKPM-BIM 软件综合评价云为 $C(6.3963, 1.1559, 0.3131)$ 将其与评语集云模型数字特征输入正向云发生器,利用 Matlab 软件绘制出云图,如图 10 所示。

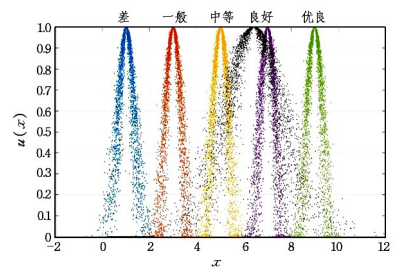


图 10 PKPM-BIM 软件多维度评价云模型

Fig. 10 PKPM-BIM software multi-dimensional evaluation cloud model

由此可见,本文计算得到的 PKPM-BIM 软件综合评价云结果介于“中等”和“良好”之间,且更接近于良好,根据最大相似度原则,本研究认为 PKPM-BIM 软件多维度评价结果为良好。

此外,从期望值可以观察到 PKPM-BIM 软件在功能维度的编辑工具配置和基本设置上是比较有优势的,且它是基于建筑对象的 BIM 建模软件,但是在协同工作、信息表达与输

出层面还需要加强。

同样邀请 25 位广联达数维建筑设计软件的使用用户,按照多维度评价模型对软件进行打分,计算软件指标评价云,进而计算综合评价云。最终得到广联达数维建筑设计软件综合评价云为 $C(6.0096, 1.0309, 0.2085)$, 将其与评语集云模型数字特征输入正向云发生器,利用 Matlab 软件绘制出云图,如图 11 所示。

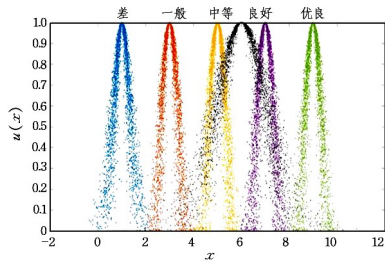


图 11 广联达数维建筑设计软件多维度评价云模型

Fig. 11 Multi-dimensional evaluation cloud model of Glodon numerical dimensional architecture design software

由此可见,本文计算得到的广联达数维建筑设计软件综合评价云结果介于“中等”和“良好”之间。

总体来说,国产软件虽存在一些不足,但仍可以看出其优势及发展性,国产 BIM 建模软件的发展大有希望。

结束语 (1)创新性地建立了包括功能、质量和 BIM 化程度在内的国产 BIM 建模软件多维度评价模型,具备一定的完备性与科学性,对国产 BIM 建模软件评价理论与方法的发展具有一定的借鉴意义。

(2)基于多维度评价模型,应用熵权-AHP 与云模型综合评价方法,完成了国产 BIM 建模软件 PKPM-BIM 与广联达数维建筑设计软件的综合评价,评价结果直观且说服力比较强,验证了评价模型的可行性和适用性。

(3)本文对评价模型指标权重的确定仍然存在一定的主观性,之后可以进一步寻找更客观的赋权方法,如结合一些用户操作数据或国家标准,以提高评价的科学性和准确性。

参考文献

- [1] Analysis Report of BIM Application in Chinese Construction Industry(2021) [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2021:13.
- [2] BOEHM B W, BROWN J, LIPOW M. Quantitative evaluation of software quality[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Software Engineering. San Francisco, California, United States, 1976:592-605.
- [3] MCCALL J, RICHARDS P, WALTERS G. Factors in software quality[C]// Proceedings of the Ninth International Software Metrics Symposium(METRICS'03). 1977:1530-1435.
- [4] International Standardization Organization and International Electrotechnical Commission. Information technology software product quality model: ISO/IEC 9126-1[S]. Geneva: ISO/IEC/JTC1/ Junio, 1998.
- [5] SHI L, YANG S L, LI K, et al. Developing an Evaluation Approach for Software Trustworthiness Using Combination Weights and TOPSIS[J]. Journal of Software, 2012, 7(3): 532-543.
- [6] BO L, YANG C. An Improved Comprehensive Evaluation Model of Software Dependability based on Rough Set Theory[J]. Jour-

nal of Software, 2009, 4(10): 1152-1159.

- [7] LAN Y, LIU Y, KUANG M. Evaluate the Quality of Foundational Software Platform by Bayesian Network[C]// International Conference on Artificial Intelligence & Computational Intelligence. Springer-Verlag, 2010.
- [8] SONG Y Z, SHEN X H, LI H Y. Evaluation of aerospace software quality using parallel neural network [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 595-600.
- [9] ZHAO X F, ZHOU Z, SONG J. Principles of Modeling Software [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017.
- [10] CHEN K, CHEN Q J, DU P. Thoughts on the Development of Domestic BIM Modeling Software: Research on Influencing Factors Based on PCA [J]. Information Technology of Civil Construction Engineering, 2021, 13(4): 6-12.
- [11] CHEN K, MA E C, CHEN Q J, et al. Research on the Influencing Factors of the Development of Domestic BIM Modeling Software Based on DEMATEL-ISM [J]. Annual Journal of Engineering Management, 2021, 10(Z1): 37-46.
- [12] ZHANG L. Development of BIM Building Electrical Design Software Based on Independent Platform [J]. Sichuan Architecture, 2021, 41(S1): 100-102.
- [13] SATTY T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: Mc Graw-Hill 1980.
- [14] CUI X D, GONG J Y, LIU X Q. Research on domain-oriented software quality evaluation method [J]. Information Technology and Standardization, 2018(3): 36-40.
- [15] HE S, SONG D, MITRI H, et al. Integrated rockburst early warning model based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 142: 104767.
- [16] WANG T F, PAN X H. The application of entropy fuzzy mathematical method in water quality evaluation [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(14): 359-360.
- [17] YANG J, WANG G Y, LIU Q, et al. Review and prospect of normal cloud model research [J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(3): 724-744.
- [18] YE Q, LI C W, ZHANG Y H, et al. Overview of cloud models and applications [J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(12): 4198-4201.
- [19] WANG Y C, JING H W, ZHANG Q, et al. Classification prediction of rockburst intensity of deep buried underground engineering based on normal cloud model [J]. Geotechnical Mechanics, 2015, 36(4): 1189-1194.



ZHAO Xuefeng, born in 1977, Ph.D., associate professor. His main research interests include BIM and engineering management.



HOU Xiao, born in 1997, postgraduate. Her main research interests include BIM and engineering management.