

革命文物三维模型展示设计评价指标 体系构建与应用研究

蒋振¹, 蒋超^{1*}, 铁铮², 燕耀^{3a}, 俞琳^{3b,4}

(1.安徽财经大学 艺术学院, 安徽 蚌埠 233030; 2.故宫博物院, 北京 100000;

3.西安工程大学 a.新媒体学院 b.服装与艺术设计学院, 西安 710048;

4.西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: **目的** 设计评价是设计质量提升的重要手段, 为提升革命文物三维模型展示效果, 对其设计评价指标体系进行构建研究与应用验证。**方法** 首先, 利用 Nvivo 软件进行文献分析, 结合人工解读和补充, 实现初步评价指标体系的构建; 其次, 运用德尔菲法和两轮问卷调查对初步拟定的指标体系进行筛选、优化和增设; 再次, 采用层次分析法对各指标权重进行计算赋值; 最终, 构建完成了一套具有 4 个一级指标、12 个二级指标、36 个三级指标的评价指标体系, 并通过实际项目对所提出的评价指标体系进行应用验证。**结果** 对 9 款“马灯”文物三维模型展示设计实例进行了评价应用实践, 完成了方案的排序优选和进一步优化。**结论** 通过问卷调查将优化后的结果与原设计方案进行再次比较, 验证了优化后的结果相较于原有方案在设计质量上得到提升, 与用户主观评价结果具有良好的一致性。故所构建的评价指标体系科学、有效, 具有良好的可操作性, 能够帮助设计师进行设计方案的筛选, 并提供明确的优化方向。

关键词: 评价指标体系; 设计评价; 三维模型展示; 革命文物

中图分类号: TB472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)08-0121-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.08.014

Construction and Application of Evaluation Index System for 3D Display Design of Revolutionary Cultural Relics

JIANG Zhen¹, JIANG Chao^{1*}, TIE Zheng², YAN Yao^{3a}, YU Lin^{3b,4}

(1. School of Art, Anhui University of Finance and Economics, Anhui Bengbu 233030, China; 2. The Palace Museum, Beijing 100000, China; 3. a. New Media College, b. Apparel and Art Design College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 4. Key Laboratory of Modern Design and Integrated Manufacturing Technology of the Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: Design evaluation is an important means to improve design quality. In order to promote the display effect of 3D models of revolutionary cultural relics, the work aims to study the construction of the design evaluation index system and verify its application. Firstly, the preliminary evaluation index system was constructed through literature analysis by Nvivo software and manual interpretation and supplement. Secondly, the preliminary index system was screened by Delphi method and two rounds of questionnaire surveys. Thirdly, the index weight was calculated via analytic hierarchy process. Finally, a set of evaluation index system with 4 first level indexes, 12 second level indexes and 36 third level indexes was established and verified in an actual project. The 3D model display design of 9 "baron lantern" cultural relics

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 安徽省高等学校省级质量工程项目: 三维扫描与虚拟展示实验教学 (2022xnfzkc001); 安徽财经大学研究生科研创新基金: 面向多媒介融通设计的安徽革命文物数字化保护研究 (ACYC2022260)

*通信作者

was evaluated and applied and the ranking of the schemes and further optimization were completed. At last, through the questionnaire survey, the optimized results are compared with the original design scheme again, and it is verified that the optimized results improve the design quality compared with the original scheme, and have good consistency with the subjective evaluation results of the users. Therefore, the evaluation index system constructed is scientific, effective, and has good operability, which can help designers screen design schemes and provide a clear optimization direction.

KEY WORDS: evaluation index system; design evaluation; 3D model display; revolutionary cultural relics

自2018年始,中共中央办公厅、国务院办公厅《关于实施革命文物保护利用工程(2018—2022年)的意见》、国家文物局与财政部联合印发的《关于加强新时代革命文物工作的通知》相继出台,明确提出“要合理运用现代科技手段加大革命文物数字化展示与传播”^[1]。2021年3月,习近平总书记再次对革命文物作出重要指示,进一步阐明了新时代革命文物展示工作的重大意义。

目前,革命文物数字化展示通常基于VR(Virtual Reality)、AR(Augmented Reality)、数字孪生(Digital Twins)等多种数字技术开展,主要采用“虚拟展厅展示”和“三维模型展示”两种展示形式。其中,“虚拟展厅展示”因其内容全面、体验真实,已在革命文物数字化展示中得到了较好应用。如宁夏博物馆推出的“红旗漫卷——宁夏革命文物陈列”虚拟展馆;中国人民抗日战争纪念馆推出的“烽火印记——北京抗日战争主题片区特展”虚拟展厅;安徽博物院推出的“烽火江淮——安徽革命史陈列”数字展厅等。而革命文物“三维模型展示”由于早期技术与配套生态不成熟,长期以来未得到广泛运用。近年来,随着信息技术的不断发展和进步,一方面,“三维模型展示”的功能模块现已得到极大拓展(如增添了音视频播放、动画演示、交互互动等功能),展示效果大幅提升;另一方面,“三维模型展示”因其具有“轻量化”^[2]“易传播”“能够更好地适应大众在现代快节奏生活下新的阅读和浏览习惯”等突出优势,使其再次获得行业关注并受到青睐,成为当下文物传播矩阵中关键的因素之一。

对相关研究进行梳理发现,文物三维模型展示现有研究多集中于技术和开发方面^[3-4],相应的设计评价还鲜有讨论。然而,设计评价是设计工作不可或缺的重要环节,它能够有效辅助设计师筛选设计方案,提升方案质量。因此,文物三维模型展示设计评价研究具有极强的实用意义。进一步研究发现,虚拟博物馆在本体设计、游览体验、服务质量等方面已有较多讨论,这为三维模型展示设计评价提供了思路启发和借鉴。如在虚拟博物馆的本体设计研究方面(包括界面、功能、交互等),裴卉宁等^[5]以对称度、密集度、简洁度、次序度、优势度作为评价指标,提出一种融合视觉认知特征的虚拟博物馆界面布局设计美学评价方法,并进行了实验验证;Tromp等^[6]通过用户角色模型(Personas)、认知过程走查法(Cognitive

Walkthrough)、启发性评估(Heuristic Evaluation)三种方法,对交互式博物馆虚拟展厅应用程序的可用性进行了评估;Barbieri等^[7]以意大利“布鲁蒂人与海洋博物馆”作为主要研究对象,基于用户研究对多个交互设计方案进行了评价、筛选、优化;Moien等^[8]运用定性比较法(Qualitative Comparative Method)对虚拟博物馆的功能设计进行了评估;Kabassi等^[9]采用模糊多准则决策模型从直观性、易用性、即时性三个方面对虚拟博物馆的可用性进行了评估。在虚拟游览体验评价方面,Kabassi等^[10]综合利用FAHP(Fuzzy-Analytic Hierarchy Process)和TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)对意大利博物馆的虚拟游览体验进行了评价;Juan等^[11]通过考察用户的“存在感”(Sense of Presence),对多种虚拟现实技术进行了评价和比较。在服务设计和质量评价方面,铁铮等^[12]提出了一种基于用户满意度的虚拟博物馆服务设计评价方法,实现了陕西韩城古代建筑壁画虚拟博物馆设计方案的筛选和优化;Byeon等^[13]构建了一款专门针对虚拟博物馆服务质量的量表——MuseumQual,并以此作为评价工具对韩国等多个国家的虚拟博物馆进行了评价实践。

为进一步提升革命文物三维模型展示设计的质量与效果,本文拟对革命文物三维模型展示设计中的关键因素进行分析,从内容设计、功能设计、界面设计、交互设计四个方面构建具有设计指导意义的革命文物三维模型展示设计评价指标体系,并基于层次灰色关联分析和实际案例对评价指标体系的有效性和可用性进行应用验证。

1 评价指标体系构建

革命文物三维模型展示设计评价指标体系的构建主要采用德尔菲法(Delphi Method)和层次分析法(Analytic Hierarchy Process)。德尔菲法(又称专家调查法)是一种通过匿名提出问题、咨询专家意见,经过多轮反馈与集中讨论,最终得出一个一致且可靠的结论或方案的方法。层次分析法是一种多目标决策分析方法,主要是将一个主要目标分解为多个次要目标,再下分为若干要素,通过比较两两指标之间的相对重要程度,建立判断矩阵,计算最大特征值与对应的特征向量,以确定各要素或方案的权重层次。在革

命文物三维模型展示设计评价指标体系的构建过程中，德尔菲法用于设计评价指标的确立，层次分析法用于指标权重的计算。

1.1 评价指标体系的初步构建

利用中国知网（CNKI）对“革命文物”“三维模型展示”“3D 展示”“虚拟展示”“虚拟博物馆”“数字博物馆”“展示设计”等关键词进行学术期刊、硕博论文、会议论文检索，共得到有效文献 291 篇。同时，在全球引文数据库 Web of Science 对“Virtual Museum”“3D Display”“Three-dimensional Exhibition”“Display Design”等词进行了检索，得到有效文献共计 135 篇。

将文献导入 Nvivo 软件进行词频分析，剔除无意

义高频词汇，剩余频次较高的词汇包括“界面”“交互”“虚拟”“模型”“设计”“信息”等。一方面考虑到所选出的高频词汇含义抽象，另一方面为避免遗漏重要词汇，采用人工阅读的方式对 Nvivo 软件统计出的词汇进行进一步解读和补充。具体步骤如下：1）组建研究组（包括相关领域副教授 3 名、博士生 2 名、硕士生 6 名）；2）对 Nvivo 软件导出的词汇进行解读和诠释；3）挖掘未涵盖的重要词汇并进行补充，如“体验”“加载”等；4）进行多次组内研讨，将所搜集到的词汇进行整理、分类、归纳，从而建立起包括 4 个一级指标、12 个二级指标、37 个三级指标的革命文物三维模型展示设计评价初步指标体系，如表 1 所示。

表 1 革命文物三维模型展示设计评价指标体系
Tab.1 Evaluation index system of 3D model display design of revolutionary cultural relics

一级指标	二级指标	三级指标
C 内容设计	C1 本体展示	C11 革命文物选取能够较好地表达展示主题
		C12 革命文物三维模型质量高，包括模型误差小、纹理真实、光影自然等
		C13 革命文物三维模型展示完全、重点突出
	C2 关联展示	C21 相关资料完整全面、精炼易懂
		C22 相关资料展示形式合理
		C23 相关资料能够较好地诠释和辅助革命文物本体展示
		C24 相关资料具有一定的吸引力或趣味性
F 功能设计	F1 基础功能	F11 基础功能设置完备
		F12 基础功能设置层级清晰
	F2 拓展功能	F21 拓展功能能够促进革命文物展示传播
		F22 拓展功能模块具有开放接口
S 界面设计	S1 布局设计	S11 界面布局分区合理、简洁规整
		S12 界面设计主次分明、重点突出
		S13 界面设计视觉协调、具有美感
		S14 各级展示界面风格统一
		S15 界面排版具有对齐性
		S16 字体间距一致
	S2 色彩设计	S21 主色选择合理，色彩意象能够符合或凸显主题
		S22 配色设计协调，符合大众审美
	S3 图标设计	S31 图标设计符合规范
		S32 图标语义明确、易于理解
		S33 图标设计美观、统一
	S4 文字设计	S41 字体易认、可读性强
		S42 字体风格符合展示主题
		S43 文字排版清晰易读，符合大众的阅读习惯
		S44 文字可进行个性化设置，能够满足不同人群阅读需求
I 交互设计	I1 等待设计	I11 系统响应时间短、加载速度快
		I12 通过设计能够缓解用户在等待过程中产生的消极情绪
	I2 提示设计	I21 提示信息完善全面、详尽准确
		I22 提示信息清晰明确、易于理解
		I23 提示方式显著，如位置显著、色彩显著或伴有声音、震动等

表 1 (续)

一级指标	二级指标	三级指标
	I3 操作设计	I31 交互参数设置合理, 包括操作灵敏度、模型旋转速率等
		I32 场景能够切换
		I33 交互操作反馈合理, 如听觉、触觉、视觉等
		I34 操作方式具有一定的趣味性
	I4 视听设计	I41 视听情景真实、沉浸感强
		I42 视听交互具有一定的吸引力

1.2 指标体系优化与最终确立

1.2.1 编制咨询问卷

为进一步优化和完善评价指标, 编制相关咨询问卷。对咨询问卷做两点说明: 一是采用五级李克特量表对指标重要度进行衡量, 具体量表如表 2 所示; 二是在咨询问卷中设置“主观建议和意见填写处”^[14], 以便专家对评价指标进行补充和修改。

表 2 重要度五级李克特量表
Tab.2 Five-level Likert scale of importance

指标重要度	不重要	较不重要	一般	较为重要	极为重要
评分分数	1	2	3	4	5

1.2.2 咨询专家筛选

由研究团队对虚拟博物馆、文物陈列与展示、展示设计等相关领域专家的资质进行严格筛选, 筛选的关键因素包括工作经验、逻辑推理、行业了解、直观感觉及对该领域的熟悉程度。为提升筛选的科学性, 研究团队参考相关文献^[15]采用判断依据系数 C_a 与熟悉程度系数 C_s 的量化处理方法, 并将其组合形成专家权威系数 C_r , 以便进行筛选, 筛选条件为“专家权威系数 $C_r \geq 0.70$ ”^[15], 计算公式为 $C_r = (C_a + C_s) / 2$,

$C_r \in [0, 1]$ 。其中, C_r 值越高表示该专家权威性越高。

专家权威系数具体计算过程及结果如下: 首先, 分别构建判断依据系数 C_a 量表和熟悉程度系数 C_s 量表 (表 3~4)。其次, 根据判断依据系数 C_a 和熟悉程度系数 C_s 两个量表对专家进行权威度评价, 评价结果见表 5。最终, 遴选出 15 名专家 (全部专家的专家权威系数 C_r 均大于等于 0.75, 符合遴选条件)。

表 3 专家判断依据系数量表
Tab.3 Scale of C_a

判断依据	专家判断影响程度		
	大	中	小
工作经验	0.50	0.40	0.30
逻辑推理	0.30	0.20	0.10
行业了解	0.10	0.10	0.10
直观感觉	0.10	0.10	0.10
合计	1.00	0.80	0.60

表 4 熟悉程度系数量表
Tab.4 Scale of C_s

熟悉程度	很不熟悉	较不熟悉	一般	较为熟悉	特别熟悉
系数	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00

表 5 专家权威系数计算结果
Tab.5 Calculation results of C_r

编号	专家判断影响程度				判断依据系数 (C_a)	熟悉程度系数 (C_s)	专家权威系数 (C_r)
	工作经验	逻辑推理	行业了解	直观感觉			
1	0.50	0.20	0.10	0.10	0.90	0.75	0.825
2	0.40	0.30	0.10	0.10	0.90	1.00	0.950
3	0.40	0.20	0.10	0.10	0.80	1.00	0.900
4	0.50	0.30	0.10	0.10	1.00	0.75	0.875
5	0.40	0.30	0.10	0.10	0.90	1.00	0.950
6	0.50	0.30	0.10	0.10	1.00	0.75	0.875
7	0.50	0.20	0.10	0.10	0.90	1.00	0.950
8	0.40	0.30	0.10	0.10	0.90	0.75	0.825
9	0.50	0.30	0.10	0.10	1.00	1.00	1.000
10	0.50	0.20	0.10	0.10	0.90	0.75	0.800
11	0.50	0.30	0.10	0.10	1.00	0.50	0.750
12	0.40	0.30	0.10	0.10	0.90	1.00	0.950
13	0.50	0.30	0.10	0.10	1.00	0.75	0.875

表 5 (续)

编号	专家判断影响程度				判断依据系数 (C_a)	熟悉程度系数 (C_s)	专家权威系数 (C_r)
	工作经验	逻辑推理	行业了解	直观感觉			
14	0.50	0.30	0.10	0.10	1.00	1.00	1.000
15	0.50	0.20	0.10	0.10	0.90	1.00	0.950
均值	0.467	0.267	0.10	0.10	0.933	0.867	0.898

1.2.3 德尔菲 I 轮咨询问卷发放与回收

通过邮箱对 15 位专家进行 I 轮咨询问卷发放, 要求专家依据表 1 对各个指标进行重要度评分, 并对需要增加和修改的指标在“主观建议和意见填写处”进行说明(I 轮共回收咨询问卷 15 份, 有效回收率 100%)。回收整理 I 轮咨询问卷并计算指标重要度评分均值。其中, “界面排版具有对齐性”“字体间距一致”两项指标的重要度均低于 3.50, 故从指标体系中剔除^[14]。通过变异系数 C.V 对专家意见是否一致进行判断。设 s_{ij} 为第 i 个专家对第 j 项指标的重要度评分, $\bar{s}_j$ 为 15 位专家对第 j 项指标的重要度评分均值, $i=1,2,\cdots,15; j=1,2,\cdots,34$, 则第 j 项指标的变异系数 C.V _{j} 的计算公式见式(1)。

$$A_{cv_j} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (s_{ij} - \bar{s}_j)^2 / \bar{s}_j}$$

(1)

$$\bar{s}_j = \sum_{i=1}^{15} s_{ij} / 15$$

(2)

C.V 值越大, 则专家意见差别越大。一般认为, C.V 值大于 0.25^[16], 表示专家意见不统一, 该项指标未通过一致性检验。经过计算, “场景能够切换”指标的 C.V 值为 0.31, 大于 0.25, 未通过一致性检验, 故对其进行删除。根据咨询问卷结果, 增添“防止用户误操作或误操作后易于复原”“交互操作方式简单,

符合用户体验或易于理解”两项三级指标, 并对描述模糊的个别指标进行修正, 最终形成一套包含 4 个一级指标、12 个二级指标及 36 个三级指标的评价指标体系。

1.2.4 德尔菲 II 轮咨询问卷发放与回收

根据新得到的指标体系编制 II 轮咨询问卷并再次发放和回收, 本轮共发放咨询问卷 15 份, 回收咨询问卷 15 份, 有效回收率 100%。对咨询问卷结果进行统计和计算, 全部指标重要度均大于 3.50, 变异系数 C.V 均小于 0.25, 故全部指标均可保留。对肯德尔(Kindle)协调系数进行计算, 本轮肯德尔协调系数 $K=0.46$ 。一般认为, $K \in [0.40, 0.50]$ 表示协调性较好, 可以停止咨询问卷发放^[17]。

1.3 指标权重的确立

1.3.1 评价指标体系建立

通过上述步骤, 建立了包含“内容设计”“功能设计”“界面设计”“交互设计”4 个一级指标, “本体展示”“关联展示”“基础功能”“拓展设计”等 12 个二级指标和“革命文物选取能够较好地表达展示主题”“革命文物三维模型质量高, 包括模型误差小、纹理真实、光影自然等”“革命文物三维模型展示完全、重点突出”“相关资料完整全面、精炼易懂”等 36 个三级指标的评价指标体系, 如表 6 所示。

表 6 革命文物三维模型展示设计评价指标体系

Tab.6 Evaluation index system of 3D model display design of revolutionary cultural relics

一级指标	二级指标	三级指标
C 内容设计	C1 本体展示	C11 革命文物选取能够较好地表达展示主题
		C12 革命文物三维模型质量高, 包括模型误差小、纹理真实、光影自然等
		C13 革命文物三维模型展示完全、重点突出
	C2 关联展示	C21 相关资料完整全面、精炼易懂
		C22 相关资料展示形式合理
		C23 相关资料能够较好地诠释和辅助革命文物本体展示
F 功能设计	F1 基础功能	C24 相关资料具有一定的吸引力或趣味性
		F11 基础功能设置完备
	F2 拓展功能	F12 基础功能设置层级清晰
		F21 拓展功能能够促进革命文物展示传播
S 界面设计	S1 布局设计	F22 拓展功能模块具有开放接口
		S11 界面布局分区合理、简洁规整
		S12 界面设计主次分明、重点突出
		S13 界面设计视觉协调、具有美感
		S14 各级展示界面风格统一

表 6 (续)		
一级指标	二级指标	三级指标
I 交互设计	S2 色彩设计	S21 主色选择合理, 色彩意象能够符合或凸显主题
		S22 配色设计协调, 符合大众审美
	S3 图标设计	S31 图标设计符合规范
		S32 图标语义明确、易于理解
		S33 图标设计美观、统一
	S4 文字设计	S41 字体易认、可读性强
		S42 字体风格符合展示主题
		S43 文字排版清晰易读, 符合大众的阅读习惯
		S44 文字可进行个性化设置, 能够满足不同人群阅读需求
	I1 等待设计	I11 系统响应时间短、加载速度快
		I12 通过设计能够缓解用户在等待过程中产生的消极情绪
	I2 提示设计	I21 提示信息完善全面、详尽准确
		I22 提示信息清晰明确、易于理解
		I23 提示方式显著, 如位置显著、色彩显著或伴有声音、震动等
	I3 操作设计	I31 交互操作方式简单, 符合用户体验或易于理解
		I32 交互参数设置合理, 包括操作灵敏度、模型旋转速率等
		I33 交互操作反馈合理, 如听觉、触觉、视觉等
		I34 防止用户误操作或误操作后易于复原
		I35 操作方式具有一定的趣味性
	I4 视听设计	I41 视听情景真实、沉浸感强
		I42 视听交互具有一定的吸引力

1.3.2 Ⅲ轮咨询问卷发放与回收

为确定各个指标的权重, 设计并发放革命文物三维模型展示设计评价指标权重Ⅲ轮咨询问卷, 采用1~9标度方法对各项指标进行两两比较打分如表7所示, 部分数据如表8所示。本轮共发放咨询问卷15份, 回收咨询问卷15份, 有效回收率100%。同时, 基于SPSSPRO软件对Ⅲ轮咨询问卷结果中一致性指标CR和各项指标权重进行计算。其中, CR值小于0.10, 即通过一致性检测。

表 7 1~9 标度方法 Tab.7 1-9 scaling method	
标度	含义
1	两个指标具有相同的重要度
3	前一指标相较于后一指标, 稍重要
5	前一指标相较于后一指标, 明显重要
7	前一指标相较于后一指标, 极为重要
9	前一指标相较于后一指标, 强烈重要
2, 4, 6, 8	相邻重要度判断的中间值
1~9 的倒数	两个指标交换次序后的相对重要度

革命文物三维模型展示设计评价指标权重整理如表9所示。从表9的统计数据可以看出, 革命文物三维模型展示设计评价一级指标的权重从高到低排序依次为: 内容设计、界面设计、交互设计、功能设

计。内容设计下的二级指标权重从高到低排序依次为: 本体展示、关联展示。界面设计下的二级指标权重从高到低排序依次为: 布局设计、色彩设计、图标设计、文字设计。交互设计下的二级指标权重从高到低排序依次为: 操作设计、等待设计、提示设计、视听设计。功能设计下的二级指标权重从高到低排序依次为: 基础功能、拓展功能。由于篇幅有限, 三级指标不再过多展开。

表 8 重要度判断矩阵 (部分数据) Tab.8 Judgement matrix of importance (partial)			
	C11	C12	C13
C11	1.000	0.259	0.714
C12	3.867	1.000	0.333
C13	1.400	3.000	1.000

2 应用验证

2.1 方案选取

选取9款马灯文物三维模型展示设计方案作为评价指标体系应用和验证的实例, 马灯文物如图1所示。设计方案选自“红色江淮”主题革命文物数字化展示设计项目, 由3名艺术设计研究生完成, 如图2所示。

表 9 革命文物三维模型展示设计评价指标权重
Tab.9 Weight of evaluation index for 3D model display design of revolutionary cultural relics

指标编号	指标权重	指标编号	指标权重	指标编号	指标权重	指标编号	指标权重
C	0.277	F	0.216	S	0.254	I	0.253
C1	0.654	C2	0.346	F1	0.671	F2	0.329
S1	0.309	S2	0.249	S3	0.223	S4	0.219
I1	0.247	I2	0.225	I3	0.309	I4	0.219
C11	0.175	C12	0.482	C13	0.343	C21	0.319
C22	0.220	C23	0.217	C24	0.244	F11	0.607
F12	0.393	F21	0.566	F22	0.434	S11	0.277
S12	0.241	S13	0.252	S14	0.230	S21	0.491
S22	0.509	S31	0.386	S32	0.310	S33	0.304
S41	0.337	S42	0.257	S43	0.219	S44	0.187
I11	0.521	I12	0.479	I21	0.347	I22	0.344
I23	0.309	I31	0.215	I32	0.201	I33	0.184
I34	0.188	I35	0.212	I41	0.502	I42	0.498



图 1 马灯文物
Fig.1 Baron lantern cultural relic

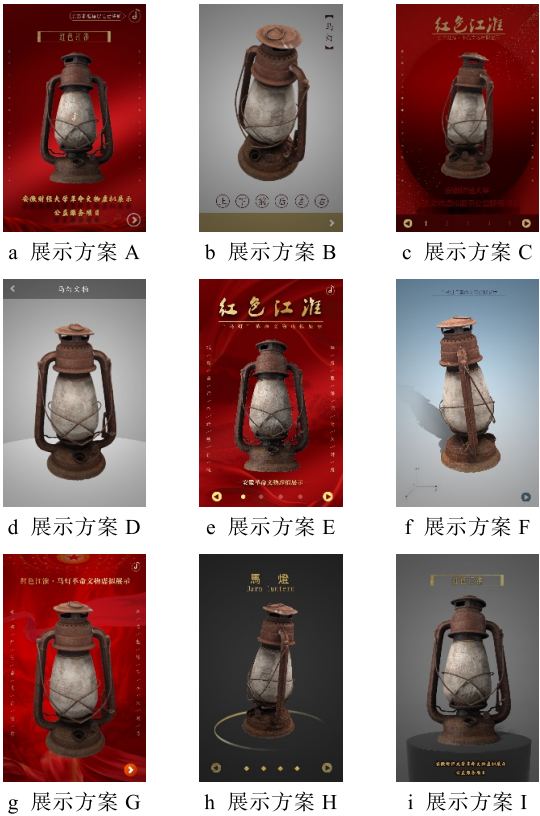


图 2 马灯三维模型展示设计方案
Fig.2 3D model display design schemes of baron lantern

2.2 方案评分

由于评价打分在一定程度上依靠专家的主观性，为了让专家更好地进行评分，在专家进行评价前，研究团队已将项目的背景、目的、主题等相关信息告知专家组 15 位专家成员，以帮助专家更好地把握评价内容、衡量设计质量。15 位专家成员利用评分表（如图 3 所示）对 9 款展示设计方案进行逐项打分。评分表中的评价项目依照表 5 中的评价指标体系进行设计，方案评级采用五级李克特量表“优秀、良好、中等、合格、不合格”，分别对应“5 分、4 分、3 分、2 分、1 分”。

方案的最终评分为 15 位专家打分的均值，设 S_k 是第 k 个专家对某指标的评分， $k=1,2,\cdots,15$ ；则指标的最终得分为 $\bar{S} = \sum_{k=1}^{15} S_k / 15$ 。9 款方案的部分评分数据如表 10 所示。

2.3 评分计算

对多种评价计算方案进行比较，最终选取层次灰色关联模型作为本文的评分计算方法^[18]。对其计算过程简要描述如下：

设方案数量为 n ，评价指标数量为 m ，则待评价方案可表示为：

$$\begin{cases} \{X_1\} = \{x_1(1), x_1(2), \cdots, x_1(m)\} \\ \{X_2\} = \{x_2(1), x_2(2), \cdots, x_2(m)\} \\ \cdots \\ \{X_n\} = \{x_n(1), x_n(2), \cdots, x_n(m)\} \end{cases} \quad (3)$$

选取各指标最大得分构成参考方案，参考方案可表示为：

$$\{X_0\} = \{x_0(1), x_0(2), \cdots, x_0(m)\} \quad (4)$$

则第 u 个方案与参考方案在第 v 个指标上的灰色关联度系数为：

方案编号:					
指标详细内容	您认为该展示方案在此项指标上表现如何?				
C11革命文物选取能够较好地表达展示主题	☐ 优秀	☐ 良好	☐ 中等	☐ 合格	☐ 不合格
C12革命文物三维模型质量高, 包括模型误差小、纹理真实、光影自然等	☐ 优秀	☐ 良好	☐ 中等	☐ 合格	☐ 不合格
⋮					
I41视听情景真实、沉浸感强	☐ 优秀	☐ 良好	☐ 中等	☐ 合格	☐ 不合格
I42视听交互具有一定的吸引力	☐ 优秀	☐ 良好	☐ 中等	☐ 合格	☐ 不合格

图 3 方案评分表
Fig.3 Scheme scoring sheet

表 10 部分评分数据
Tab.10 Partial scoring data

方案	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C24	F11	F12	F21	F22	...	I42
A	3.20	3.47	3.20	2.80	3.13	3.20	3.93	3.47	2.87	3.20	3.07	...	3.13
B	3.07	3.20	2.87	3.40	3.00	3.13	3.73	3.67	3.27	2.87	4.40	...	2.87
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
I	2.13	3.40	2.40	1.93	2.27	3.07	1.60	1.87	2.33	2.07	1.94	...	2.13

$$L_u(v)=\frac{\min |x_u(v)-x_0(v)|+\rho\cdot\max |x_u(v)-x_0(v)|}{|x_u(v)-x_0(v)|+\rho\cdot\max |x_u(v)-x_0(v)|} \quad (5)$$

式中： $u=1,2,\cdots,n$ ； $v=1,2,\cdots,m$ 。分辨系数一般取 0.5^[18]。

设 W_v 为指标权重，则第 u 个方案的加权关联度计算公式为：

$$r_u=\sum_{v=1}^mW_vL_u(v) \quad (6)$$

更高层次的方案关联度可同理类推。

2.4 计算结果

利用 Matlab 软件进行算法编程，并导入表 11 中

的评分数据，计算出 9 款方案的灰色关联度值如表 11 所示。其中，方案 E 关联度值最大（0.806），故为综合最优方案。然而，方案 E 在指标“ $I21$ ”“ $I22$ ”“ $I23$ ”等方面，仍有提升和优化空间，故对单项指标最优方案进行统计（如表 12 所示）。

对表 13 进行分析，1）方案 A 在首页右上方设置语音讲解提示框，其色彩和位置突出，提示内容精炼易懂，因此，在指标“ $I21$ ”“ $I22$ ”“ $I23$ ”上得分较高，此外，该方案在对马灯文物进行旋转展示时，速率参数设置合理，符合人眼观看习惯，在指标“ $I32$ ”上亦有良好表现；2）方案 G 图标设计美观精致、风格统一，且图标设计语义明确、易于理解，故在指标“ $S32$ ”“ $S33$ ”上有着亮眼表现；3）方案 H 在页面

表 11 全部方案关联度值
Tab.11 Relevance values of all schemes

方案	A	B	C	D	E	F	G	H	I
关联度值	0.736	0.535	0.695	0.581	0.806	0.616	0.719	0.683	0.653

表 12 单项指标最优方案
Tab.12 Optimal scheme for individual index

指标编号	最优方案	指标编号	最优方案	指标编号	最优方案	指标编号	最优方案
C11	E	C12	E	C13	E	C21	E
C22	E	C23	E	C24	E	F11	E
F12	E	F21	E	F22	E	S11	E
S12	E	S13	E	S14	E	S21	E
S22	E	S31	E	S32	G	S33	G
S41	E	S42	E	S43	E	S44	E
I11	E	I12	H	I21	A	I22	A
I23	A	I31	E	I32	A	I33	C
I34	E	I35	E	I41	E	I42	E

加载过程中设置了文字和图片信息,在一定程度上缓解了用户在加载等待过程中所产生的“消极”情绪,故该方案在指标“*I12*”上得分较高;4)方案C的交互反馈具有较好的“流畅度”(同步性和连续性),在指标“*I33*”上得到较高评分。

2.5 方案优化

由于设计实例采用模块化设计,各设计模块可以实现拓展、删除、修改等操作,故依据表 13 分析结果对方案 E 进行优化,将优化后的方案 E 重新命名为方案 E+如图 4 所示。方案 E 的具体优化内容如下:1)针对指标“*I21*”“*I22*”“*I23*”方面的不足,在方案的展示页面右上角添加语音讲解图标,并设置形式突出的提示框与精炼易懂的提示内容,以更好地引导用户进行相应的操作;2)针对指标“*I32*”方面的不足,参照方案 A 调整其文物模型旋转速率参数;3)针对指标“*S32*”“*S33*”,借用方案 G 的图标系统;4)针对指标“*I12*”方面的不足,移植方案 H 的加载页面设计方案;5)针对指标“*I33*”方面的不足,优化方案 E 的交互反馈设置,提升其反馈的同步性和连续性。

2.6 评价验证

为验证本文所提出的评价指标及相应方法的有效性,采用问卷调查的形式,检验用户主观偏好与本文评价结果之间的一致性。本轮随机发放问卷 541 份,有效回收问卷 537 份,回收率 99.26%。从问卷结果可知,方案 E+投票占比 82.31%,也是用户主观选择的最优方案。



图 4 方案 E+
Fig.4 Scheme E+

3 结语

本文基于大量相关文献分析,综合运用德尔菲法和层次分析法,以革命文物三维模型展示设计为研究对象,构建了一套革命文物三维模型展示设计评价指标体系,该体系具有良好的实用性和可操作性。经验证,其不仅能够辅助设计师进行方案的评价和筛选,还能够为方案的深入和进一步优化提供明确方向,可以有效提升革命文物三维模型展示质量,促进发挥革命文物在提供公共文化服务、满足人民精神文化生活需求、涵养社会主义核心价值观等方面的作用。需要说明的是,评价指标体系在指标量化评估方面还存在一些不足。如在等待设计、提示设计、视听设计等指标方面,本文采用了“李克特量表+专家评估”的方式,这种方法虽然具有方便、敏捷、低成本等优点,但在评价结果上具有一定的主观性。在相似的研究中,也可以采用实验法等更加准确的量化评价方法。

参考文献:

[1] 国家文物局.《关于报送革命文物名录的通知》[EB/OL]. (2018-10-19)[2023-09-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-10/19/content_5332523.htm. National Cultural Heritage Administration. "Notice on Submitting the List of Revolutionary Cultural Relics"[EB/OL]. (2018-10-19)[2023-09-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-10/19/content_5332523.htm.

[2] 陈斌, 牛津文, 万红, 等. 变电站辅助设备监控系统三维建模及展示技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 180-186. CHEN B, NIU J W, WAN H, et al. Research on Three-Dimensional Modeling and Display Technology of a Substation Auxiliary Equipment Monitoring System[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 180-186.

[3] 高清云, 高清雪, 梁芳. 基于“HTML5+VR”微链接式的唐崇陵翁仲逆向设计实践[J]. 包装工程, 2021, 42(22): 330-336. GAO Q Y, GAO Q X, LIANG F. Reverse Design Practice of Tang Dynasty Mausoleum Statues Based on HTML5+VR Micro-Link[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(22): 330-336.

[4] 胡云岗, 陶涛, 吴育华, 等. 大足石刻千手观音造像三维展示系统设计及实现[J]. 文物保护与考古科学, 2015, 27(S1): 71-76. HU Y G, TAO T, WU Y H, et al. Design and Implementation of a Three-Dimensional Display System for the Dazu Thousand-Hand Bodhisattva Rock Carvings[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2015, 27(S1): 71-76.

[5] 裴卉宁, 温志强, 黄雪芹, 等. 融合视觉认知特征的虚拟博物馆界面布局美度评价方法[J]. 图学学报, 2023, 44(2): 389-398. PEI H N, WEN Z Q, HUANG X Q, et al. Evaluation

- Method of Virtual Museum Interface Layout Aesthetic with Visual Cognitive Characteristics[J]. *Journal of Graphics*, 2023, 44(2): 389-398.
- [6] TROMP J G, WOLFF A, et al. Usability Evaluation of the Interactive 3D Virtual Reality Cultural Heritage Museum Display: Fountain of the Lions Software Application[J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, 7(2.28): 95.
- [7] BARBIERI L, BRUNO F, MUZZUPAPPA M. Virtual Museum System Evaluation through User Studies[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2017, 26: 101-108.
- [8] BARKESHLI M, ROSTAMIAN M. Evaluating Practical Functions of Available Web-Based Virtual Museums Using Qualitative Comparative Method[J]. *The International Journal of the Inclusive Museum*, 2015, 8(4): 15-21.
- [9] KABASSI K, MARAVELAKIS E, KONSTANTARAS A. Heuristics and Fuzzy Multi-Criteria Decision Making for Evaluating Museum Virtual Tours[J]. *The International Journal of the Inclusive Museum*, 2018, 11(3): 1-21.
- [10] KABASSI K, AMELIO A, KOMIANOS V, et al. Evaluating Museum Virtual Tours: The Case Study of Italy[J]. *Information*, 2019, 10(11): 351.
- [11] JUAN A. Exploring the Effect of Diverse Technologies Incorporated in Virtual Museums on Visitors' Perceived Sense of Presence[J]. *Ambient Intelligence and Smart Environments*, 2013, 17: 493-506.
- [12] 铁铮, 蒋超, 燕耀, 等. 基于用户满意度的数字博物馆服务设计评价方法研究[J]. *文博*, 2022(4): 105-112.
- TIE Z, JIANG C, YAN Y, et al. A Methodological Study of Service Design and Evaluation of Digital Museums Based on User's Satisfaction Rate[J]. *Relics and Museology*, 2022(4): 105-112.
- [13] BYEON. Design and Evaluation of Service Quality of Domestic and Foreign Virtual Museums as Tourist Attractions[J]. *Journal of Korea Service Management Society*, 2014, 15(5): 277-293.
- [14] 沈绮云, 欧阳河, 欧阳育良. 产教融合目标达成度评价指标体系构建 ——基于德尔菲法和层次分析法的研究[J]. *高教探索*, 2021(12): 104-109.
- SHEN Q Y, OUYANG H, OUYANG Y L. Construction of the Evaluation Index System for the Achievement Degree of Production and Education Integration Goal [J]. *Higher Education Exploration*, 2021(12): 104-109.
- [15] 龚雪. 糖尿病专科护士首次认证评价指标体系的构建 [D]. 广州: 暨南大学, 2014.
- GONG X. Establishment of Diabetes Specialist Nurses Initial Accreditation and Evaluation Index System[D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.
- [16] 王青, 朱晓丹, 常茹, 等. 基于德尔菲专家咨询法构建稳定期精神分裂症康复方案的研究[J]. *现代医药卫生*, 2021, 37(14): 2357-2361.
- WANG Q, ZHU X D, CHANG R, et al. Research on the Construction of Rehabilitation Program for Stable Schizophrenia Based on Delphi Expert Consultation Method[J]. *Journal of Modern Medicine & Health*, 2021, 37(14): 2357-2361.
- [17] 张震, 马丽, 刘桂平, 等. 应用 Delphi 法构建麻醉科护士岗位胜任力模型[J]. *职业与健康*, 2019, 35(21): 2956-2960.
- ZHANG Z, MA L, LIU G P, et al. Core Competency Model for Nurses in Anesthesiology Department Based on Delphi Method[J]. *Occupation and Health*, 2019, 35(21): 2956-2960.
- [18] 高俊杰, 余隋怀, 赵晓彤. 无人机造型设计层次灰关联评价方法研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(12): 106-110.
- GAO J J, YU S H, ZHAO X T. Multi-Hierarchy Grey Relation Evaluation Method on UAV Styling Design[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(12): 106-110.