中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

LED光源照度与色温对佩伯尔幻象展陈效果的作用趋势

林嘉源 邹念育 梁静 贺晓阳 慕雨凡 黄霞 何启鹏

Trend of action on the display effect based on Pepper's ghost images affected by illumination and color temperature from led light sources

LIN Jia-yuan, ZOU Nian-yu, LIANG Jing, HE Xiao-yang, MU Yu-fan, HUANG Xia, HE Qi-peng

引用本文:
林嘉源, 邹念育, 梁静, 贺晓阳, 慕雨凡, 黄霞, 何启鹏. LED光源照度与色温对佩伯尔幻象展陈效果的作用趋势[J]. 中国光学, 2023, 16(2): 339–347. doi: 10.37188/CO.2022–0027
LIN Jia-yuan, ZOU Nian-yu, LIANG Jing, HE Xiao-yang, MU Yu-fan, HUANG Xia, HE Qi-peng. Trend of action on the display effect based on Pepper's ghost images affected by illumination and color temperature from led light sources[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 339-347. doi: 10.37188/CO.2022-0027

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022–0027

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于点光源和球面光源的集鱼灯照度模型比较研究

Comparative study on the illumination model of fishing lamps based on point light sources and spherical light sources

中国光学. 2019, 12(2): 274 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0274

非制冷热像仪内部温升对测温精度的影响修正

Correction of temperature measurement accuracy affected by internal temperature rise in uncooled thermal imager

中国光学. 2018, 11(4): 669 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0669

基于区域滤波的模糊星图复原方法

Restoration method for blurred star images based on region filters

中国光学. 2019, 12(2): 321 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0321

10kW级直接输出半导体激光熔覆光源的研制与热效应分析

10 kW CW diode laser cladding source and thermal effect

中国光学. 2019, 12(4): 820 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0820

新生儿黄疸治疗仪光源的光生物安全

Photobiological safety of light source of neonatal jaundice therapeutic device

中国光学. 2017, 10(4): 499 https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0499

不同角度包层光剥离的理论与实验研究

Stripping of cladding light at different angles: theoretical and experimental studies

中国光学. 2019, 12(5): 1124 https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1124

文章编号 2097-1842(2023)02-0339-09

LED 光源照度与色温对佩伯尔幻象展陈效果的作用趋势

林嘉源[1], 邹念育[1*], 梁 静[1], 贺晓阳[1], 慕雨凡[1], 黄 霞[1], 何启鹏[2]
（1. 大连工业大学 光子学研究所, 辽宁 大连 116034;
2. 贵州致富光谷投资管理有限光创服务中心, 贵州 毕节 551700）

摘要: 随着数字化展示技术的不断发展, 展陈方式也发生了改变。佩伯尔幻象的展陈空间的光环境在保证效果的同时, 还具有较好的视觉舒适性。为探寻光环境对佩伯尔幻象展示效果的影响, 搭建了虚拟成像展示空间, 研究了影响成像效果的因素与趋势。研究设定 12 组不同照度和色温组合的 LED 光照参数, 选取 25 名观察者进行心理物理学实验, 以分析不同光环境对佩伯尔幻象展陈效果的影响。通过实验可知: 色温对幻象中的色彩真实度、细节表现力、立体感表现力评价影响较低; 照度对色彩真实度评价未产生显著影响, 对它的细节表现力、立体感表现力具有显著性影响, 在色温为 3 500 K, 照度为 10 lx 的光环境下, 展示效果中的细节表现力、立体感表现力相对较高, 在色温为 2 500 K、照度为 10 lx 时视觉舒适度较好。

关 键 词: 佩伯尔幻象; 照度; 色温; 心理物理实验
中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2022-0027

Trend of action on the display effect based on Pepper’s ghost images affected by illumination and color temperature from led light sources

LIN Jia-yuan[1], ZOU Nian-yu[1*], LIANG Jing[1], HE Xiao-yang[1], MU Yu-fan[1], HUANG Xia[1], HE Qi-peng[2]
（1. *Research Institute of Photonics*, *Dalian Polytechnic University*, *Dalian* 116034, *China*;
2. *Innovation & Service Center for Lighting of Guizhou Zhifu Optical Valley Investment Management Co., Ltd.*, *Bijie* 551700, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *n_y_zou@dlpu.edu.cn*

Abstract: With the continuous development of digital display technology, display methods have also changed. Pepper’s ghost images that adopt modern display methods require the light environment of the exhibition space not only to ensure the effect but also ensure better visual comfort. In order to explore the influence of the lighting environment on the display effect based on Pepper’s ghost images, a virtual imaging dis-

收稿日期: 2022-02-22; **修订日期:** 2022-03-10
基金项目: 贵州省科技支撑计划项目（No. 3Y007）; 大连市科协 2019 创新助力站课题（No. 201971）; 辽宁省教育厅 2019 年科学研究项目（No. J2019004）
Supported by the Science and Technology Program of Guizhou Provincial (No. 3Y007), the 2019 Innovation Project of Dalian Science and Technology Association (No. 201971), Education 2019 Scientific Research Project of Liaoning Provincial Department (No. J2019004).

play space is set up to analyze the factors and trends affecting the imaging effect, in which 12 sets of LED lighting conditions with different illuminances and color temperatures are generated. 25 observers are selected to conduct a psychophysical experiment. The experiment shows that color temperature has no significant effect on the evaluation of color authenticity, detail expressiveness and stereoscopic expressiveness for Pepper's ghost images; illumination has no strong effect on the evaluation of the color authenticity of Pepper's ghost images, but has a significant effect on their detail expressiveness and stereoscopic expressiveness. Under the lighting environment where the color temperature is 3 500 K and the illumination is 10 lx, the detailed expressiveness and stereoscopic expressiveness of the display effect are relatively high and the visual comfort of 2 500 K and 10 lx is better.

Key words: Pepper's ghost images; illuminance; color temperature; psychophysical experiment

1 引 言

新冠肺炎疫情使我国博物馆“云展览”大规模走进大众视野[1]。同时，数字技术在文化领域的应用日趋成熟，也为我国博物馆数字化提供了良好的外部环境[2]。通信技术的迅速发展以及人们对显示设备的展示形式和丰富度的追求，促使显示设备向多功能和多维度方向发展[3]。推动文化遗产的数字化展示已成为重要课题，数字化展陈的研究也深入到了数字存储、在线展示、虚拟体验等领域[4-9]。多媒体技术、虚拟现实、增强现实、3D 显示技术各有优劣，其中佩伯尔幻象显示技术在诸多显示技术中具有应用时间久、成像清晰、3D 立体感强、搭建便利、技术成熟等优势，成为了虚拟展陈的主要方式。参观者可以从各个角度观看虚拟展品，使原本较小的文物放大展示，使参观者可以欣赏更多文物细节[10]。佩伯尔幻象的实现原理为：因成像膜的折射率与空气的折射率不同，光在两种不同的介质中传输速率也不同，参观者可以观看到实体景物，而视觉上忽略成像膜的存在，成像膜与投放视频设备成一定角度，使动态内容于投影膜另一侧成虚像，参观者同时看到虚像与实体相结合景物，由此形成佩伯尔幻象。目前，该显示技术广泛应用于大型活动、艺术汇演等场合，呈现虚拟现实的效果[11]。

随着数字化技术的发展，现代佩伯尔幻象更多地与投影等数字化展示手法相结合，此时与光环境之间的关系已然发生了改变，因此探究影响其成像效果的光环境因素变得至关重要。

现阶段在文物艺术品展陈领域，国外已有研究者从照明光源及物体色彩角度对文物艺术品展陈喜好问题进行探索[12-14]。以往研究表明，文物艺术品的展陈喜好受照明光源及其自身色彩属性共同影响[15]。目前多数关注点在于成像技术，由最开始强光照射物体结合投射与反射的光学现象进行动态展示逐渐发展为数字化展示。文献 [16] 使用截断金字塔反射数字屏幕创建图像的方法实现佩伯尔幻象的展示。文献 [17] 控制机械装置与成像膜的配合对佩伯尔幻象展示效果进行优化。但对于虚拟成像技术与所处光环境的研究尚未引起广泛关注。

虚拟展示空间中除成像所需光源外，还应有必要的功能性照明。而探究展示空间照明环境对成像效果的影响,对于实现既有照明功能又不影响成像效果观赏性的最佳光环境具有不可或缺的作用，可用于提高展陈效果。本研究着眼于分析佩伯尔幻象与所处光环境之间的关系，探寻不同光环境下的成像效果差异以及何种光环境中佩伯尔幻象展示效果更为理想。模拟佩伯尔幻象展示叙事性文物或历史进程空间，改变空间中 LED 灯具的照度和色温参数指标，组合成为 12 种不同光环境，现场获取观测者对佩伯尔幻象成像效果的主观评价数据，分析研究光源照度和色温对佩伯尔幻象成像效果的影响，以便为提高博物馆、展览馆等的展陈效果提供参考和依据。

2 基于佩伯尔幻象的 3D 显示技术展示原理

虚拟技术能够将计算机生成的虚拟物体非几何信息叠加到真实世界场景上，传达的信息层次

更加丰富[18]。显示技术已融入人们生活的各个方面, 在虚拟展陈中幻影成像技术的应用, 实现了新媒体技术由二维向三维的转变, 使公众可以在物理空间感知到虚拟影像的空间尺度[19-20]。此幻象技术利用半透明反光物质使物体在物质中成虚像, 同时可以看到物质后的景物, 由此产生虚实结合展示效果, 其称为佩伯尔技术[21]。

佩伯尔幻象是一种光学现象,最早应用于舞台表演, 其中灯光是最重要的一个组成部分, 其要求为灯光可控, 并要求不同场景变换不同的灯光。投射为虚像的物体部分灯光需要更为强烈, 和周围景物形成对比并通过半透半反的成像膜产生效果。另一关键因素为成像介质, 其特点为半透明, 此前多数情况下使用玻璃作为成像介质, 现阶段由于材料选择的多样性, 博物馆中多采用半透半反的成像膜贴附于亚克力板作为成像介质, 优点为成本相对较低, 安装运输方便。原理图如图 1 所示。

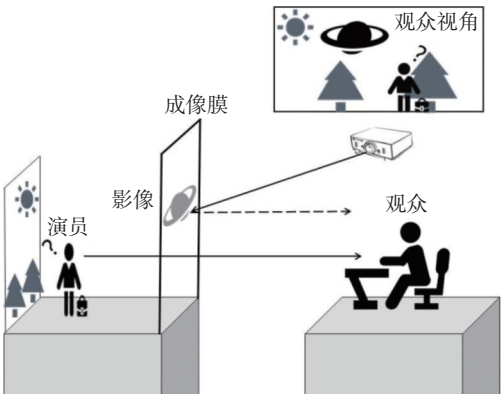

图 1　佩伯尔幻象原理图

Fig. 1　Schematic diagram of Pepper's ghost images

佩伯尔幻象技术在博物馆展示中, 部分利用投影仪将影像投射至半透半反的成像膜上, 通过景物与虚像相结合, 建立立体展示空间, 当此空间内环境灯光比投影仪光源更暗时, 投影仪投射到成像膜上的影像才能更加清晰, 但因博物馆环境中需要基本的照明, 不能移除环境光, 因此成像效果与佩伯尔幻象的成像效果环境光有着极为紧密的关系。此外如果成像、传输与显示技术不能充分覆盖图像的色域, 就会导致图像的色度失真、色饱和度下降, 从而导致重现图像质量变差、真实感降低[22]。

此系统是本实验首先需要搭建的重要系统, 在不同光环境下的密闭展厅内模拟博物馆中佩伯尔幻象展示空间。

3　实验设计

3.1　实验环境搭建

实验中, 照度与色温分别进行两两组合, 共得到 12 组不同的照度与色温组合[23]。控制照度与色温分别变化, 在 12 种不同光环境下, 观测者观看投影的展示视频后, 对在当前光环境下佩伯尔幻象成像效果进行主观评价, 探寻照度与色温对佩伯尔幻象展示效果的影响。对实验收集的数据进行可靠性分析、双因素方差分析、单因素方差分析, 研究不同照度、色温对佩伯尔幻象成像效果是否具有显著影响, 如具有显著影响, 影响趋势如何, 并从 12 种实验光环境中筛选出最适合佩伯尔幻象展示的光环境。

为保证实验数据的可靠性, 避免其他环境因素对实验结果的影响, 在实验过程中选择无自然光介入的暗室模拟博物馆佩伯尔幻象展示空间进行实验。模拟地点为大连工业大学光子学研究所, 无自然光, 使用智能照明控制光环境变化, 保持佩伯尔幻象系统各参数不变, 进行心理物理实验。

一个成功的博物馆展示与照明设计息息相关, 它能直接影响展示效果与观众对展示的喜好程度[24], 也可营造一种良好的艺术氛围。光在博物馆之中不仅仅是照明手段, 更重要的是作为艺术媒介而存在。而自然光存在过多的不可控因素, 故选择人造光源 LED 作为佩伯尔幻象展示空间的照明灯具。

在博物馆中存在光照明暗对比与烘托艺术氛围的手法展示作品, 但人眼在过多的明暗对比下会产生视觉疲劳。因此设计佩伯尔幻象展示空间时, 考虑到整个展厅灯光的均匀度, 留出足够视觉适应区域以调节和平衡视觉[25], 结合实际测量与佩伯尔幻象的自身特性, 本研究实验的照度分别为 10 lx、30 lx、50 lx, 色温为 2 500 K、3 500 K、4 500 K、5 500 K。实验过程中, 每次设定照度与色温其中一个量作为变量, 组合为 12 组不同的光环境。

实验采用智能 LED 光源, 显色指数 Ra>90, 照度与色温值可调, 在展示空间天花板距离成像

系统 2.3 m 处安装照明装置。实验场景示意图如图 2 所示。

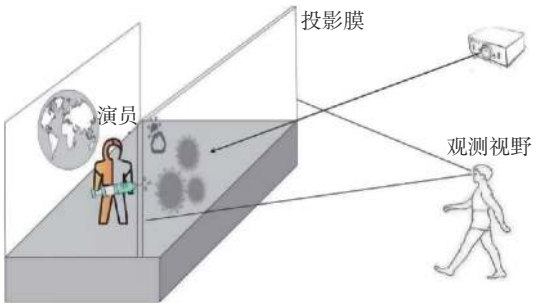

图 2 实验空间场景

Fig. 2 First-person schematic diagram of experimental space scene

3.2 实验仪器

利用上述的光学现象，实现虚拟与现实的叠加[26]。此技术采用的成像方式为投影仪正投成像，利用纳米成像膜中的透光与反射两种性质，将虚像与实景相结合。使用 3300 lm 明基投影仪将视频影像投射在与介质结合的纳米成像膜之上，介质采用透明甲基丙烯酸甲酯单体。投影仪光学参数如表 1 所示。由于投影膜为半透明状态，观测者可以通过成像膜看到膜后的景物，给人视觉上产生立体感。

表 1 实验用投影仪 BenQMW529 相关参数

Tab. 1 Related parameters of BenQMW529 used as experimental projector

型号	显示技术	亮度 lm	标准分辨率	最高分辨率
BenQMW529	DLP	3300 pixel	1280 pixel×800 pixel	1920 pixel×1200 pixel

3.3 主观评价实验

实验选取 25 名观测者模拟参观者观看佩伯尔幻象，年龄为 18～25 周岁，无色盲及色弱人员。

实验中，将佩伯尔幻象系统设置在模拟室中心位置，实验人员面向佩伯尔幻象成像处进行实验观测，观测时光环境在特定照度值与色温值中随机变化，以此实现在不同照度与色温下的观测佩伯尔幻象效果。要求观测者在不同光环境下对佩伯尔幻象成像的色彩真实度、细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度进行评价。

为避免光环境转换的影响，故在改变实验因素时，要求实验观测者闭眼休息 30 s，在光环境转换过后实验观测者继续适应 30 s 后开始实验观测。实验主观评价采取语义差别量表法，量词评价内容如表 2 所示。

表 2 实验量表

Tab. 2 Experimental scale

实验项	感性意象	评分							感性意象
色彩真实度	虚幻	1	2	3	4	5	6	7	真实
细节表现力	粗略	1	2	3	4	5	6	7	细节
立体表现力	平面	1	2	3	4	5	6	7	立体
视觉舒适度	疲劳	1	2	3	4	5	6	7	舒适

4 实验数据分析与讨论

4.1 实验 Cronbachα 系数分析

实验选取 25 名实验观测者在不同照度、色温下对佩伯尔幻象成像的色彩真实感、细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度进行评价。收集数据后首先进行量表信度分析，检测实验数据的可靠性。采用 Cronbach α 系数分析检验实验所获量表数据的一致性情况[27]。α 取值在 0～1 之间。α 系数数值大于 0.8 时，所获实验数据信度高；α 系数数值位于 0.7～0.8 之间，所获量表数据信度较好；α 系数数值在 0.6～0.7 时，收集的实验数据信度可接受；当 α 系数数值低于 0.6 时，收集数据信度质量不佳。

依据不同照度不同色温下佩伯尔幻象成像效果的影响评价试验的实验量表数据，使用 SPSS 数据分析统计软件进行 Cronbachα 系数分析，得到所有实验观测人员的观测量表数据的 Cronbachα 系数。本次实验量表所得 Cronbachα 系数为 0.851，由此可知在不同照度色温下对佩伯尔幻象成像效果的影响数据信度质量高。

4.2 影响佩伯尔幻象成像效果的因素

使用双因素方差分析数据观察照度与色温存在/不存在相互作用时对佩伯尔幻象展陈效果产生影响。将照度色温双因素方差分析数据整理至表 3。

表 3 双因素方差分析结果

Tab. 3 Double factor variance analysis results

条件	显著性p			
	色彩真实度	细节表现力	立体感表现力	视觉舒适度
照度×色温	0.978	0.425	0.430	0.000

其中照度与色温对色彩真实度、细节表现力、立体感表现力的显著性 p 值大于 0.05, 由此可知, 色温与照度相互作用在这 3 个评价项目上并未产生显著性影响。而照度与色温对视觉舒适度的显著性 p 值为小于 0.001, 表示照度与色温的相互作用对视觉舒适度产生较大的影响。绘制视觉舒适度估算边际平均值如图 3 所示 (彩图见期刊电子版), 由图可以看出在照度与色温的共同作用下 2 500 K、10 lx 的视觉舒适度估算边际平均值最高, 各曲线趋势基本符合 Kruithof 舒适度区域。

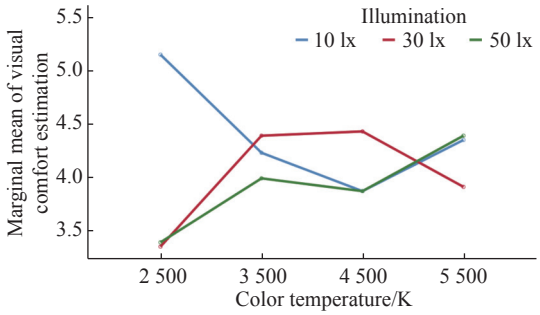

图 3　不同照度与色温作用下视觉舒适度估算边际平均值

Fig. 3　Marginal mean of visual comfort estimation under different illuminations and color temperatures

照度与色温的交互作用未在色彩真实度、细节表现力、立体感表现力中有所体现, 故对二者进行单因素方差分析。首先进行方差齐性检验, 计算量表数据方差是否齐性, 运用 SPSS 软件进行方差齐性检验得到表 4。

表 4　方差齐性检验

Tab. 4　Test of homogeneity of variance

评价项目	显著性p
色彩真实度	0.164
细节表现力	0.073
立体感表现力	0.368
视觉舒适度	0.145

各项评价项目方差齐性检验显著性 p 值均大于 0.05, 由此可得出各评价项目样本数据方差具有齐性, 故使用单因素方差分析的结果可靠。

对在不同色温、不同照度光环境下所获得的实验观测者对佩伯尔幻象成像效果的量表数据进行单因素方差分析, 结果如表 5 所示。为了研究利用显著性 p 值对实验观测者在不同照度、不同色温光环境下观测到的佩伯尔幻象成像的各项评价分析是否存在显著性差异, 根据给定的显著性水平 α, 查表, 确定临界值 F_α 为 0.05, 若 p 值小于 0.05, 则说明影响因素对因变量的影响是显著的; 反之, 则表明影响因素对因变量无显著影响[28]。

表 5　单因素方差分析

Tab. 5　One-way analysis of variance

条件	显著性p			
	色彩真实度	细节表现力	立体感表现力	视觉舒适度
色温	0.547	0.354	0.797	0.647
照度	0.264	0.047	0.021	0.039

表 5 中的数据表明, 色温在色彩真实度、细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度(观看佩伯尔幻象)评价项目上显著性 p 值大于 0.05, 表明在不同色温下对佩伯尔幻象成像的色彩真实度、细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度评价不存在显著差异性, 即不同色温对佩伯尔幻象的色彩真实度、细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度未产生较大影响。照度在色彩真实度评价项目的显著性 p 值为 0.264, 大于 0.05, 故在不同照度下对佩伯尔幻象的色彩真实度评价不存在显著差异性, 即不同照度对佩伯尔幻象的色彩真实度未产生较大影响。照度在细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度评价项目上显著性 p 值分别为 0.047、0.021、0.039, 均小于 0.05, 说明在不同照度下对佩伯尔幻象的细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度评价存在显著差异性, 即不同照度对佩伯尔幻象的细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度产生显著性影响。

4.3　不同色温、照度对观测者视觉舒适度的影响

双因素方差分析中照度与色温相互作用时对视觉舒适度的显著性 p 值为 0.000, 小于 0.05, 说明在不同照度与色温光环境下, 照度与色温相互作用对佩伯尔幻象视觉舒适度具有显著性差异, 即照度与色温相互作用对佩伯尔幻象的视觉舒适度产生较大影响。

色温虽未在观测者观看佩伯尔幻象时产生较大影响, 但色温与照度之间需要在合理比值之中才符合舒适光环境。图 4 为 25 名实验观测者在

不同照度、色温下视觉舒适度的均值。1941 年发表的 Kruithof 舒适度区域是照明领域最早的色温和照度舒适度实验结果，低照度的低色温光源和高照度的高色温光源被认为是舒适照明[29]。而根据图 4 视觉舒适度评价的均值可看出，与上述理论相符，同时在色温为 2 500 K、照度为 10 lx 时为观测佩伯尔幻象较为舒适光环境。

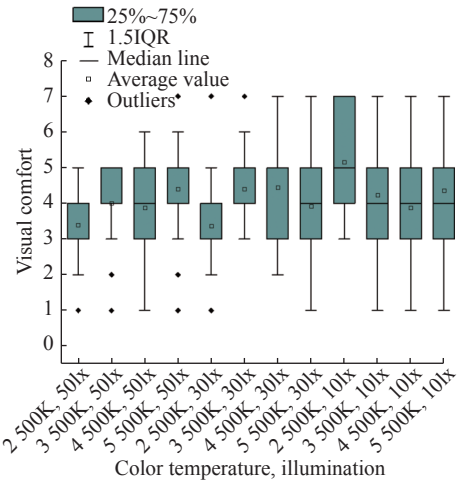

图 4 25 名观测者在不同色温照度下的视觉舒适度评价均值

Fig. 4 The average value of visual comfort evaluation by 25 observers under different color temperatures and illuminations

4.4 不同照度、色温对细节表现力与立体感表现力的影响

依据双因素方差分析结果得知，不同照度、色温对佩伯尔幻象成像效果的色彩真实度不存在显著差异，即不同照度、不同色温对佩伯尔幻象成像效果的色彩真实度未产生较大影响。单因素方差分析结果表明不同照度对佩伯尔幻象成像效果的细节表现力、立体感表现力存在显著性差异，即不同照度对佩伯尔幻象的细节表现力、立体感表现力产生较大影响。

图 5、图 6 是 25 名观测者在不同照度、色温下的评价均值。依据图 5~图 6 整体来看，随着照度值的降低，细节表现力、立体感表现力的评价均值升高，在同一照度值下，色温与照度符合低色温低照度、高色温高照度的舒适区域理论。细节表现力在 3 500 K、10 lx 的光环境下评价均值最高，在同一照度下，随着色温的升高，细节表现力评价均值呈下降趋势，在 2 500 K、50 lx 光环境下为细节表现力评价均值的最低分。整体分析，细节表现力在照度 50 lx、30 lx 的光环境下评价均值波动较小，而照度为 10 lx 时，波动较大。3 种照度值两两分析，照度为 10 lx 时评价均值较高，故佩伯尔幻象细节表现力在 10 lx 照度光环境下效果更好。而立体感表现力在同一照度下评价均值波动较为明显，在 2 500 K、10 lx 和 3 500 K、10 lx 的光环境下立体感表现力评价均值为最高。评价均值最低分与细节表现力相同，在 2 500 K、50 lx 光环境下立体感表现力最差。

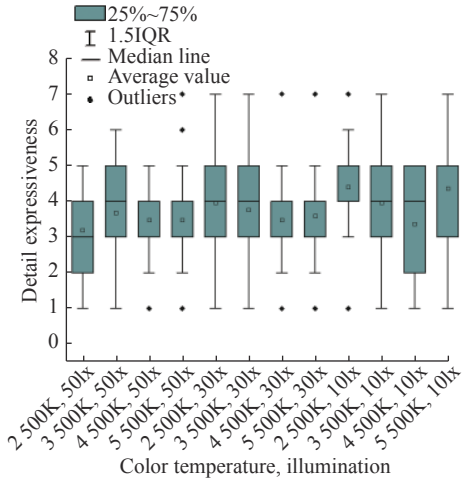

图 5 25 名观测者在不同色温、照度下的细节表现力评价均值

Fig. 5 The average value of detail expressiveness evaluation by 25 observers under different color temperatures and illuminances

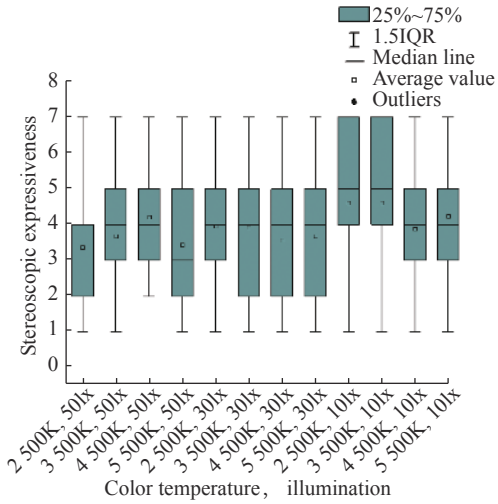

图 6 25 名观测者在不同色温、照度下的立体感表现力评价均值

Fig. 6 The average value of the stereoscopic expressiveness evaluation by 25 observers under different color temperatures and illuminances

5　结　论

本研究通过模拟博物馆佩伯尔幻象展示空间, 设立 12 组不同照度、不同色温光环境, 在不同光环境下邀请 25 名实验观测人员对佩伯尔幻象成像效果进行心理物理实验, 收集观测者在不同照度、不同色温下对佩伯尔幻象的色彩真实度、细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度的主观评价数据, 依据所获实验数据进行数据分析与讨论。

结果表明: 对于 18~25 周岁阶段观展人员, 色温对佩伯尔幻象的色彩真实度、细节表现力、立体感表现力评价未产生显著影响。本研究佩伯尔幻象成像方式采用数字化投影仪进行幻象生成, 传统佩伯尔幻象采用强光照射物体或演员, 使其在舞台成像膜后成像, 故此推论成像方式不同导致色温对其成像效果影响产生差别, 佩伯尔幻象的色彩真实度、细节表现力、立体感表现力与环境色温相比, 投影仪中的光参数影响效果更加显著, 在调节测试光环境与投影仪时的现象基本与推论相符。

照度对佩伯尔幻象的色彩真实度评价未产生显著影响, 其原因为现代佩伯尔幻象的色彩真实度受到投影仪的色彩表现能力的影响更为显著。对佩伯尔幻象的细节表现力、立体感表现力、视觉舒适度评价项目具有显著性影响, 光环境照度与投影仪光参数产生明显对比, 直接影响到幻象产生后观众对其成像效果的评价。

对于视觉舒适度的评价项目需要色温与照度同时进行观测分析, 得出低色温低照度与高色温高照度为舒适区域和 Kruithof 舒适度区域。

综合分析, 佩伯尔幻象在 3 500 K、10 lx 的光环境下, 细节表现力、立体感表现力相对较高, 2 500 K、10 lx 视觉舒适度较好, 在投影仪设备亮度一定的情况下, 照度 10 lx, 色温可在 2 500~3 500 K 之内浮动, 此时佩伯尔幻象展示效果较为优秀。

参考文献:

[1] 欧阳敏. 以联合办展和“云展览”模式提升革命文物展示传播水平——“中流砥柱——中国共产党抗战文物展”的实践探索[J]. 中国博物馆, 2021(3): 35-38.
OUYANG M. Enhancing the display and communication of the revolutionary cultural relics by establishing jointly-organized exhibitions and “cloud exhibitions”: “mainstay: exhibition of the cultural relics of the communist party of China in the Anti-Japanese War”[J]. *Chinese Museum*, 2021(3): 35-38. (in Chinese)

[2] 梅海涛, 段勇. 质与量——新冠肺炎疫情背景下博物馆“云展览”观察[J]. 中国博物馆, 2020(3): 32-37.
MEI H T, DUAN Y. Quality and quantity—— observation on museum “cloud exhibitions” under the background of COVID-19 pandemic[J]. *Chinese Museum*, 2020(3): 32-37. (in Chinese)

[3] 杨神武, 赵娟, 肖振中, 等. 悬浮显示系统分析与设计[J]. 液晶与显示, 2021, 36(12): 1637-1644.
YANG SH W, ZHAO J, XIAO ZH ZH, *et al*.. Analysis and design of floating display system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(12): 1637-1644. (in Chinese)

[4] 谈国新, 何琪敏. 中国非物质文化遗产数字化传播的研究现状、现实困境及发展路径[J]. 理论月刊, 2021(9): 87-94.
TAN G X, HE Q M. The current situation, dilemma and development path of digital communication research in intangible cultural heritage[J]. *Theory Monthly*, 2021(9): 87-94. (in Chinese)

[5] 潘志庚, 袁庆曙, 陈胜男, 等. 文化遗产数字化展示与互动技术研究与进展[J]. 浙江大学学报 (理学版), 2020, 47(3): 261-273.
PAN ZH G, YUAN Q SH, CHEN SH N, *et al*.. State of the art on the digital presentation and interaction of culture heritage[J]. *Journal of Zhejiang University* (*Science Edition*), 2020, 47(3): 261-273. (in Chinese)

[6] FILIPPINI-FANTONI S. Museums with a personal touch[C]. *Proceedings of EVA 2003 London Conference*, EVA, 2003: 1-10.

[7] BOWEN J P, FILIPPINI-FANTONI S. Personalization and the web from a museum perspective[C]. *Proceedings of the Conference on Museums and the Web 2004: Selected Papers from an International Conference*, 2004: 63.

[8] JACOBSON J, LEWIS M. Game engine virtual reality with cave UT[J]. *Computer*, 2005, 38(4): 79-82.

[9] GLASGOW S B, BREWSTER S. The impact of haptic ‘touching’ technology on cultural applications[C]. *Proceedings of EVA'01*, EVA, 2001: 1-14.

[10] 杨拓. 新技术视角下博物馆发展实践与趋势[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2019(11): 146-152.
YANG T. Practice and trend of museum development in the perspective of new technology[J]. *Journal of National Museum of China*, 2019(11): 146-152. (in Chinese)

[11] 李季. 一款基于OpenGL的佩珀尔幻象实现方案[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(5): 102-104.
LI J. An experimental scheme that implements Pepper’s ghost using OpenGL[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2020, 16(5): 102-104. (in Chinese)

[12] LEE H J, KIM S Y. Rethinking art museum spaces and investigating how auxiliary paths work differently[J]. *Buildings*, 2022, 12(2): 248.

[13] LECCESE F, SALVADORI G, MACCHERONI D, *et al*.. Lighting and visual experience of artworks: results of a study campaign at the national museum of San Matteo in Pisa, Italy[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2020, 45: 254-264.

[14] DANG R, GUO W L, LUO T. Correlated colour temperature index of lighting source for polychrome artworks in museums[J]. *Building and Environment*, 2020, 185: 107287.

[15] 刘强, 唐美华. 照明光源及纸张色彩对传统书法作品展陈喜好的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(11): 3664-3670.
LIU Q, TANG M H. Influence of light source and paper color on the exhibiting preference of traditional calligraphy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(11): 3664-3670. (in Chinese)

[16] CHEHLAROVA T, CHEHLAROVA K. Managing Pepper's ghost illusion using intelligent methods[C]. *Proceedings of 2020 IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems*, IEEE, 2020: 415-420.

[17] CHIBA K, NAKAYAMA Y, HASHIDA T. Phantazuma: the stage machinery enabling the audience members to watch different contents depending on their position by vision control film and Pepper's ghost[C]. *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, ACM, 2018: 111.

[18] 晏茗. 虚拟现实AR技术在智慧博物馆中的应用[J]. 电子技术, 2021, 50(9): 194-195.
YAN M. Application of virtual reality AR technology in smart museum[J]. *Electronic Technology*, 2021, 50(9): 194-195. (in Chinese)

[19] 刘澍鑫, 李燕, 苏翼凯. 基于液晶散射膜的多平面增强现实显示[J]. 液晶与显示, 2020, 35(7): 725-732.
LIU SH X, LI Y, SU Y K. Review on multi-plane augmented reality display based on liquid crystal scattering films[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 725-732. (in Chinese)

[20] 张蒙蒙, 代阳, 杨鹏程, 等. 幻影成像装置的自然手势识别系统设计[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(5): 63-67.
ZHANG M M, DAI Y, YANG P CH, *et al*.. Design of natural gesture recognition system for phantom imaging device[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2020, 34(5): 63-67. (in Chinese)

[21] 李栋栋, 刘莹, 连易渡, 等. 全息3D显示技术的原理分析及其发展[J]. 科技经济导刊, 2020, 28(8): 43.
LI D D, LIU Y, LIAN Y D, *et al*.. Principle analysis of holographic 3D display technology and its development[J]. *Technology and Economic Guide*, 2020, 28(8): 43. (in Chinese)

[22] 宇欣, 雷志春. 宽色域视频图像技术研究与发展[J]. 液晶与显示, 2020, 35(3): 262-271.
YU X, LEI ZH CH. Overview on research and development of wide color gamut video image technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(3): 262-271. (in Chinese)

[23] 张原铭, 林嘉源, 高闻, 等. 不同照度和色温LED光源照射下书法作品的视觉影响[J]. 照明工程学报, 2019, 30(3): 55-60.
ZHANG Y M, LIN J Y, GAO W, *et al*.. Visual impact of calligraphy works illuminated by LED light sources with different illumination and color temperature[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2019, 30(3): 55-60. (in Chinese)

[24] 艾晶. 探讨我国博物馆照明设计的发展与方向[J]. 照明工程学报, 2017, 28(4): 1-5.
AI J. Discussion on the development and trend of Chinese museum lighting design[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(4): 1-5. (in Chinese)

[25] 田湘萍, 赵东. 博物馆临时展览照明设计初探——以金沙遗址博物馆为例[J]. 中国博物馆, 2019(1): 84-89.
TIAN X P, ZHAO D. Lighting design in temporary exhibition—— case study on Jinsha Site Museum[J]. *Chinese Museum*, 2019(1): 84-89. (in Chinese)

[26] 桂亮, 胡改玲, 奚延辉, 等. 基于伪全息原理的立体影像展示机设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(6): 84-86.
GUI L, HU G L, XI Y H, *et al*.. Design of 3D Image displayer based on pseudo holography[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, 37(6): 84-86. (in Chinese)

[27] 张虎, 田茂峰. 信度分析在调查问卷设计中的应用[J]. 统计与决策, 2007(21): 25-27.
ZHANG H, TIANG M F. Application of reliability analysis in survey questionnaire design[J]. *Statistics and Decision*, 2007(21): 25-27. (in Chinese)

[28] 陈崇双, 唐家银, 何平. 方差分析法的线性回归建模重构[J]. 统计与决策, 2018, 34(7): 71-75.
CHEN CH SH, TANG J Y, HE P. Linear regression model restructuring of variance analysis[J]. *Statistics and Decision*, 2018, 34(7): 71-75. (in Chinese)

[29] KRUITHOF A A. Tubular luminescence lamps for general illumination[J]. *Philips Technical Review*, 1941, 6: 65-96.

作者简介：

林嘉源(1997—), 男, 辽宁阜新人, 硕士研究生, 就读于大连工业大学电子信息工程领域, 主要从事光环境的测试评价研究。E-mail: 20052085400544@xy.dlpu.edu.cn

邹念育(1964—), 女, 辽宁锦州人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事光学测试、照明产品研发和光环境评价的研究。E-mail: n_y_zou@dlpu.edu.cn

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

* 美国工程索引 EI 核心期刊
* 中国出版政府奖期刊提名奖
* 中国精品科技期刊
* 中文核心期刊
* 百种中国杰出学术期刊
* 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
　　中国仪器仪表学会
地址:长春市东南湖大路 3888 号　　邮编:130033
电话:0431-86176855　　传真:0431-84613409
电邮:gxjmgc@ sina. com　　网址:http://www. eope. net
定价:100.00 元/册