

重庆理工大学学报(自然科学)

Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)

ISSN 1674-8425,CN 50-1205/T

## 《重庆理工大学学报(自然科学)》网络首发论文

题目: 光环境视觉舒适性测评方法综述  
作者: 徐剑, 向泽锐, 支锦亦, 陈尧东, 何思俊  
网络首发日期: 2020-10-16  
引用格式: 徐剑, 向泽锐, 支锦亦, 陈尧东, 何思俊. 光环境视觉舒适性测评方法综述. 重庆理工大学学报(自然科学).  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1205.T.20201016.1140.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 光环境视觉舒适性测评方法综述

徐 剑<sup>1,3</sup>, 向泽锐<sup>1,2</sup>, 支锦亦<sup>1,2</sup>, 陈尧东<sup>1</sup>, 何思俊<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 建筑与设计学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学 人机环境系统设计研究所, 成都 610031;  
3. 阜阳师范大学 信息工程学院, 阜阳 236041)

**摘要：**全面分析和认识光环境视觉舒适性测评方法对于设计营造健康照明光环境具有重要的作用。对光环境视觉舒适性测评方法进行综述。首先结合文献对光环境视觉舒适性定义进行了阐述，总结提出了光环境视觉舒适性的影响因素；然后从常用量表、测量方法及特点对光环境视觉舒适性的测量方法进行介绍；接着分别从主观和客观两方面对视觉舒适性评价方法进行归纳和评述；最后总结提出了光环境视觉舒适性测评研究内容、研究指标、测评方法和测评应用四方面的发展趋势。

**关键词：**视觉舒适性；光环境；评价方法

**中图分类号：**X822

**文献标识码：**A

**文章编号：**1671-0924 (2020) xx-xxxx-x

## Survey on measurement and evaluation method of visual comfort in lighting environment

Xu Jian<sup>1,3</sup>, Xiang Zerui<sup>1,2</sup>, Zhi Jinyi<sup>1,2</sup>, Chen Yaodong<sup>1</sup>, He Sijun<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Design, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China; 2. Institute of Design and Research for Man-Machine-Environment Engineering System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China; 3. School of Information Engineering, Fuyang Teachers' College, Fuyang 236041, China.)

**Abstract:** It was very important to analyze and understand the visual comfort evaluation method of lighting environment for the design and construction of healthy lighting environment. The measurement and evaluation method of visual comfort was reviewed in the study field of lighting environment based on the past literature achievements. The definition of visual comfort in lighting environment was described in combination with the literature, and the influencing factors of visual comfort in lighting environment were summarized. The measurement of visual comfort in lighting environment was introduced from the commonly used scales, methods and characteristics; and the evaluation methods of visual comfort were summarized and commented from the subjective and objective aspects. Finally, the development trend of measurement and evaluation method of visual comfort in lighting environment were summarized and proposed including the further research content, index, evaluation method and application.

**Key words:** visual comfort; lighting environment; evaluation method

随着经济的发展和科技的进步，健康照明光环境逐渐受到了社会的重视，人们对生活、学习和工作环境的照明质量要求也在不断提高<sup>[1-2]</sup>。照明质量又称光环境质量<sup>[3]</sup>，既涉及光度学问题，又涉及人的视觉舒适性（Visual comfort）问题<sup>[4-5]</sup>。从人的视觉舒适性角度对各种环境的照明进行研究，有助于改善和提升其照明质量。

视觉舒适性的影响因素较多，既涵盖极端亮度

对比和眩光等物理因素对人眼刺激造成的不适，也涉及人的主观视觉心理感受<sup>[6-7]</sup>，同时不同的人对同一场所的光环境的要求也不同。所以，这对视觉舒适性的相关研究带来挑战。第一，所涉及的相关学科理论知识较为复杂；第二，对视觉舒适性的影响因素增多，增加量化困难。第三，对于不同层次的视觉舒适性，难以用一种方法处理。从以上难点，可知视觉舒适性研究存在以下几点不足：(1)用户的主观因素（体验经历、观念）对视觉舒适性的影响难以量化，大部分研究方法集中在对环境因素的研究上；(2)文献对视觉舒适性的评价指标主要集中在光环境的物理因素上，较少从用户的生理指标出发研究；(3)视觉舒适性不同层次的评价指标，有很大的差异性；(4)视觉舒适性的理论性不够成熟，不同的专家从不同的角度对视觉舒适性做出量化方法

**基金项目：**国家重点研发计划资助项目（2017YFB1201103-9/2017YFB1201103-12）；  
教育部人文社会科学研究青年基金项目（17YJC760102）；  
四川省哲学社会科学重点研究基地现代设计与文化研究中心资助项目（MD20E006）。

**作者简介：**徐剑，男，博士生，主要从事工业设计、人因设计与评价研究，E-mail: xujian2005825@163.com；**通讯作者** 向泽锐，男，博士，副教授，主要从事交通工具设计与人因综合评价研究，E-mail: xiangzerui@163.com。

和评价方法。

针对以上问题，本文主要对光环境视觉舒适性方面的研究成果进行了较为系统地梳理，给出一个全面整体的光环境视觉舒适性的定义，对其影响因素分析，且综述了测量和评价方法，最后指出了光环境视觉舒适性研究的发展趋势。

# 1 光环境视觉舒适性的概述

## 1.1 光环境视觉舒适性的定义

在人机工程领域，“Comfort”宜译为“舒适”或“舒适性”，常用于表达人对舒适（Comfort）与不舒适（Discomfort）的主观感受，是一个中性词（Neutral word）<sup>[8-9]</sup>。长期以来，学界对舒适（性）也并没有形成统一的共识，但相关研究均表明舒适是人的一种重要主观感受：Richards 等<sup>[9]</sup>认为舒适是人在特定环境中产生的一种有效的感觉状态；Slater<sup>[10]</sup>认为舒适是人与环境在生理、心理和物理三方面处于和谐而形成的一种愉悦状态；Hertzberg<sup>[11]</sup>认为舒适即为没有不舒适（Discomfort）感受；Zhang 等<sup>[12]</sup>还进一步指出舒适和不舒适既有区别又有联系，不舒适主要与生理、生物力学和疲劳等方面联系紧密，如人的疼痛感、难过感和僵硬感等，且主要是由设计形成的物理限制因素所导致，舒适主要与放松感和康乐感等体验感觉有关，如人对产品或环境的审美印象等。

同时，视觉舒适性（Visual comfort）也没有统一的共识，目前学术界主要存在 2 类定义方法<sup>[13-14]</sup>：第一类是基于“舒适就是没有不舒适”假设基础上的“无烦恼法”（non-annoyance approach），如 Hopkinson<sup>[15]</sup>认为视觉舒适性是指没有生理疼痛、刺激或分心的感觉，Araji<sup>[16]</sup>指出视觉舒适性是确保人们在任何情况下都有舒适的视力，最大限度减缓眼睛紧张和眼睛疲劳；第二类是基于主观幸福和满意感受来评判的“康乐感法（well-being approach）”，如 EN 12665<sup>[17]</sup>定义视觉舒适性是视觉环境诱发的一种主观的视觉康乐感受。综上分析可以得出，视觉舒适性本质上是用户基于视觉通道，在与各种光环境交互作用过程中所产生的主观感受，可见用户和光环境为视觉舒适性的直接影响因素。所以，将视觉舒适性定义成用户在视觉方面对光环境形成的刺激的整体满意程度。

## 1.2 光环境视觉舒适性的影响因素

光环境视觉舒适性的影响因素涉及两个方面：光环境和用户（见图 1）。光环境方面的影响因素主要包括可见光和空间环境的结构形态、照明布置和各种物件的配置等，其中可见光涉及的主要有光的数量（如，照度、亮度、眩光、采光系数、全自然采光百分比等）、光的分布（如照度均匀度、亮度比率等）及光的颜色（色温、显色性指数等）等参数<sup>[18-20]</sup>。用户方面的影响因素主要涉及个人背景（如，年龄、性别、受教育程度、观念等）、体验经历、期望、视觉心理和生理等<sup>[7, 21-23]</sup>。

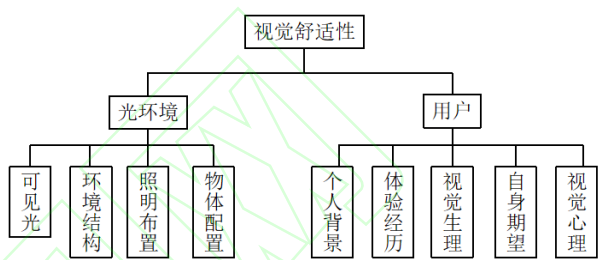


图 1 视觉舒适性影响因素

Figure 1 Factor affecting visual comfort

## 2 光环境视觉舒适性的测量方法

### 2.1 测量量表类型

依据心理测量理论的分类，量表一般分为以下 4 类<sup>[24]</sup>：类别量表（Nominal scale，也称名称量表）、顺序量表（Ordinal scale，也称等级量表）、等距量表（Interval scale，也称区间量表）、等比量表（Ratio Scale，也称比率量表），各自特点详见表 1。其中，类别量表主要是用数字和符号指代事物的种类，不涉及比较，数字没有数量意义<sup>[25]</sup>；顺序量表是按照事物的大小、等级、程度进行数字排列，不仅能指代事物类别，还能表明不同类别的大小、等级或事物具有的特征的程度，数字也不表示绝对数值和事物特征的数量<sup>[26]</sup>；等距量表不仅能够指代事物的种类、等级，而且具有相等的单位，数字是一个真正的数量，各个部分的单位相等，但没有绝对的零点<sup>[27]</sup>；等比量表既具有种类、等级、等距的特征，同时也是具有绝对零点的量表<sup>[28]</sup>。在行为研究方面很少有符合等比量表的条件<sup>[29]</sup>，所以等比量表在光环境视觉舒适性评测方面应用较少。

表 1 测量量表及特点

Table 1 Measurement scale and characteristic

水平	名称	数学运算方式	特点
----	----	--------	----

1	类别量表（名称量表）	等于、不等于	定性
2	顺序量表（等级量表）	等于、不等于、大于、小于	定性
3	等距量表（区间量表）	等于、不等于、大于、小于、加、减	定量
4	等比量表（比率量表）	等于、不等于、大于、小于、加、减、乘、除	定量

2.2 视觉舒适性测量

在光环境视觉舒适性测量中，人对整体光环境刺激的感知和情感是两个最重要的测量项，运用的主观判断方式主要有 3 类<sup>[30]</sup>：认同判断（Judgments of agreement）、满意判断（Judgments of satisfaction）和质量判断（Judgments of quality）。在问卷的选项中，使用这些判断的具体量表均属于类别量表、顺序量表和/或等距量表。表 2 为视觉舒适性测量的常用量表、测量方法及特点。

在用户主观感知测量方面，文献[31-32]将用于测评照明条件问题的量表分为 2 类（2-point scale），包括同意（agree）和不同意（disagree），属运用认同判断测量的类别量表。

文献[33-35]均使用了顺序量表：文献[33]将用于测评照明条件的量表分为 7 级（7-point scale），包括 7 = 非常强烈同意（very strongly agree），6 = 强烈同意（strongly agree），5 = 同意（agree），4 = 中立（neither agree nor disagree），3 = 不同意（disagree），2 = 强烈不同意（strongly disagree），

1 = 非常强烈不同意（very strongly disagree），属认同判断测量；文献[34]将用于测评照明条件的量表划分为 3 级（3-point scale），包括更好（better），相当（about the same）和更差（worse），属质量判断测量；文献[35]综合运用了认同判断、满意判断和质量判断来进行照明质量测评，将量表分为 5 级（5-point scale），包括 5 = 强烈同意（strongly agree）/非常满意（very satisfied）/极好（excellent），4 = 同意（agree）/比较满意（fairly satisfied）/比较好（pretty good），3 = 中立（neither agree nor disagree）/中立（neither satisfied nor dissatisfied）/一般（neutral），2 = 不同意（disagree）/不太满意（not very satisfied）/不太好（not very good），1 = 完全不满意（not at all satisfied）/强烈不统一（strongly disagree）/差（poor）。

在用户主观情感测量方面，为了研究照明条件和光源特性如何影响用户的情感认同，文献[21-22]采用语义差异量表（Semantic differential rating scales）分别对光源色彩和美术馆照明条件进行研究。由于语义差异量表所获取的数据具有等距性，因此这种测量方法属于等距量表类型。

表 2 视觉舒适性测量的常用量表、测量方法及特点

Table 2 Scales, measuring methods and characteristics of visual comfort measurement

测量项	代表文献	量表类型	测量方法	优点	缺点
主观感知	[29-30]	类别量表	认同判断	易于用户识别，方便评价	缺乏足够的精细度
	[31-33]	顺序量表	认同判断、满意判断和质量判断（3 级、5 级、7 级）	能够精细描述用户感受	数据不精确、客观性不够
主观情感	[21-22]	等距量表	语义差异量表	照明设计与用户情感关系	有争议性

3 视觉舒适性主观评价方法

主观评价就是通过研究受试群体的意见来确定或评估相关因素对用户主观感觉的影响<sup>[8]</sup>。采用主观评价的优点是能够基于用户真实感受和意见来研究和评估光环境，但通过主观性问卷调查方式获得的数据具有模糊性、不确定性，所以评价过程通常需要引入数学模型对相关数据进行处理。在光环境视觉舒适性主观评价研究中，常用的有基于因子分析法和基于综合评判 2 类评价方法。

3.1 基于因子分析法的评价方法

针对光环境视觉舒适性评价，主要是研究视觉舒适性评价方法、评价指标以及各指标间的相互关系。为了全面、系统地研究视觉舒适性，理论上需要研究并获取尽可能多的影响视觉舒适性的变量。但是，获得的变量越多所带来的变量分析工作量就会越大，同时对评价模型也会提出更大的挑战。因



此评价过程中，通常采用因子分析法（Factor analysis）<sup>[36]</sup>来对相关变量进行分析和简化。文献[37]对 18 种照明条件的视觉效果进行了主观测量，获得评分数据后用因子分析法对其进行处理，提取并获得 2 个主要因子：视觉兴趣（visual interest）和视觉亮度（visual lightness），从而简化了影响视觉舒适性的变量，为研究光环境视觉舒适性评价提供了参考。

### 3.2 基于综合评判的评价方法

#### 3.2.1 层次分析法

层次分析法（Analytic hierarchy process, AHP）是一种定性与定量相结合的多目标决策分析方法，可用于分析多指标、多方案综合照明问题，主要涉及四个步骤<sup>[38]</sup>：第一，构建包括目标层、准则层和方案层的层次结构模型；第二，结合专家、用户或相关决策者意见构造成对比较矩阵；第三，进行层次单排序和总排序，并进行一致性检验；第四，获取评价结果。文献[39]建立了高校教室光环境舒适性层次分析模型，将影响高校教室照明舒适性的准则层指标分为照明水平、眩光感觉、亮度分布、灯具与室内布置四个方面，然后把教室照明系统作为方案层指标，计算获得了照明最适宜的教室照明系统方案，提出了提升教室光环境视觉舒适度的优化建议。

#### 3.2.2 模糊综合评价

模糊综合评价法（Fuzzy comprehensive evaluation method, FCEM）是应用模糊集合论对决策活动所涉及的人、物、事、方案等进行多因素、多目标的评价和判断，其应用步骤涉及<sup>[40]</sup>：第一，确定被评判对象的因素（指标）集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  和评价（等级）集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ；第二，分别确定各因素的权重及它们的隶属度向量  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ，对被评判对象进行等级评价并获得模糊评判矩阵  $R = (r_{ij})_{nm}$ ；第三，将模糊评判矩阵与因素的权向量进行模糊运算  $B = A \cdot R$ ，进行归一化处理并得到模糊评价综合结果。文献[41]提出了住宅光环境舒适性模糊综合评价方法，指出室内光环境舒适性影响因素包括照度（ $E$ ）、一般显色指数（ $R_a$ ）、光色的相关色温（ $T_{CD}$ ）和眩光（ $UGR$ ），并基于这 4 项因素构建了因素集；将室内光环境的舒适性评价等级分为优、良、中、较差、差，并基于 5 级划分构建了评价集；对光环境舒适性各因素进行评判，建立模糊评判矩阵，获得了照度、一般显色指数、光色的相关色温和眩光对评判

结果的隶属度集；对模糊评判矩阵进行归一化处理，获得了综合评判结果，并以案例论证了有效性。

基于综合评判的这两种评价方法对多指标以及多层次的问题能够很好解决，它们的缺点是需要依赖专家人员的经验，对于同一层次指标间的相互关系无法描述，而且要保证同一层指标间的相互独立。

## 4 视觉舒适性客观评价方法

随着测量技术的快速发展，视觉舒适性研究开始由光环境物理因素转向人的生理因素。也即通过在现场光环境或实验光环境中进行合理的实验设计，采用专用仪器设备来测量光环境物理参数和用户样本生理反应，以获取客观性的物理和生理数据来支撑研究<sup>[23]</sup>。通过测量获得的物理数据和人体生理数据均具有客观性、误差小的特征，但是这些数据本身不能预测人的主观感受，包括光环境的视觉舒适性<sup>[42]</sup>，因此需要通过在物理和生理指标与视觉舒适性的主观测量之间建立数学模型来进行预测。

### 4.1 基于韦伯-费昔勒定律的视觉舒适性评价方法

韦伯-费昔勒定律（Weber-Fechner law）是用于描述心理量（感觉量）和物理量之间关系的定律，该定律认为心理量和物理量之间是对数关系，可用于照明方面的评价研究<sup>[43]</sup>。韦伯在研究人对重量的感觉时，发现差别感觉阈限和原有重量的比值在中等刺激强度范围内是一个常数，可用数学模型： $k = \Delta S/S$  表示，其中  $\Delta S$  为刺激增量， $S$  为刺激量， $k$  为韦伯常数；在此基础上，费昔勒提出心理量与物理量的对数值成正比，并进一步推导出了数学模型： $P = k \log I$ ，其中  $P$  为心理量， $I$  为刺激量<sup>[44]</sup>。

韦伯-费昔勒定律可用于量化描述人类心理和生理两个方面对物理刺激感觉，适用于视觉、听觉、味觉、嗅觉和时间感知等多方面<sup>[45]</sup>。基于韦伯-费昔勒定律，文献[46]建立了视觉舒适性与照度关系的数学模型，结合实验数据求得了起居室光环境下视觉舒适性随照度的变化曲线，为节能照明设计提供了依据；文献[47]研究获得了列车内室照度与照度变化率的综合舒适性评价指标，为列车车内综合照度舒适性分级提供了参考依据。

### 4.2 人工智能评价方法

人工智能（Artificial intelligence, AI）的重点研究领域之一为机器学习，包括支持向量机、人工神经网络等关键技术，被应用于视觉舒适性评价问题。

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 由 Vapnik 提出<sup>[48]</sup>, 其原理是通过核函数将输入的数据集映射到特征空间, 在其中寻找划分数据集的分类器, 构建预测或评价模型。优点是仅需少量样本可达到很好的效果。文献[49]通过模拟不同场景下的古塔夜景照明, 进行古塔夜景照明色温视觉舒适性的主观实验, 并利用支持向量机 (SVM) 的径向基函数来构建不同场景下古塔夜景照明色温视觉舒适性评价模型, 实现对古塔夜景色温视觉舒适性预测。

神经网络模型主要涉及浅层人工神经网络和深度神经网络, 常用于解决复杂的非线性问题<sup>[50]</sup>。BP 神经网络是神经网络模型中应用最广泛的一种, 其训练学习和算法过程主要包括<sup>[51]</sup>: 第一, 神经网络初始化, 确定神经网络的拓扑结构及输入和输出层的神经元数目; 第二, 训练神经网络, 确定隐藏层的神经元个数和学习算法; 第三, 校验神经网络, 校准神经网络模型的精确度和稳定性。文献[52] 将 BP 神经网络技术应用于视觉舒适性评价研究, 以 559 人次视觉生理测试数据为基础, 利用基于 BP 神经网络和视觉参数特征的视觉健康舒适性分级评价模型来进行光环境视觉健康舒适程度的等级预测, 为设计研发健康照明产品提供了新的方法。神经网络具有非线性的特征, 更接近于人的非线性认知方式, 优点是精度较高, 缺点是神经网络训练学习过程较为复杂。

### 4.3 基于照明仿真软件的评价方法

与上述评价方法不同, 基于照明仿真软件的评价方法可以在光环境设计阶段评估并预测其视觉舒适性, 从而保证设计方案的照明质量。在照明研究领域, 常用的商业照明仿真软件包括<sup>[53-55]</sup>: ASAP, Zemax, Code V, TracePro, FRED, Lighttools, Dialux, SPEOS, Specter, Radiance, Relux, AGI32, 等。其中, 在视觉舒适性评价方面应用较为广泛的有 DIALux 和 SPEOS: 其中, DIALux 已被应用于控制舱室<sup>[56]</sup>、煤矿巷道<sup>[57]</sup>、船舶机舱<sup>[58]</sup>等空间环境的照明舒适性仿真评估, SPEOS 则在飞机驾驶舱<sup>[59]</sup>、高速列车驾驶室<sup>[60]</sup>等空间环境的照明舒适性仿真评估中得到了应用。

## 5 结论与展望

光环境视觉舒适性测评是一项涉及人-机-环境多要素的系统问题, 其研究目的就是要以用户为中心, 从定性和定量相结合的视角来测评光环境的整体质量, 从而为人们生活、学习和工作提供健康照

明光环境。基于对上述现有研究成果的分析, 可以总结得出其未来整体的发展趋势是: 光环境视觉舒适性的研究发展方向已开始从最初的心理物理学研究方法转变为生理物理学研究方法, 也即从研究主观心理反应与光物理条件之间的关系转向了研究人体 (眼) 生理反应与光物理条件之间关系。发展趋势的具体细节可分为研究内容、研究指标、测评方法和测评应用 4 个层面:

1) 研究内容: 需研究视觉生理功能与不同光参数之间的关系, 以及脑电和心电与不同光参数的映射关系, 进一步从生理-物理相互作用来揭示视觉舒适性的神经机制; 构建人眼健康视觉生理指标体系数据库, 为预测光环境的健康照明提供方法; 构建全面系统的光环境照明条件-视觉舒适性要素匹配模型, 为健康照明光环境设计提供科学合理的依据和参考。

2) 研究指标: 视觉舒适性的客观生理指标与用户的主观感受密切相关, 除涵盖了泪液发酵质量和褪黑素水平<sup>[23]</sup>, 屈光度、瞳孔、眼压、像差、光学传递函数 (MTF) 和高频肌颤 (HF)<sup>[51]</sup>之外, 还有心电图 (ECG)、脑电图 (EEG) 等<sup>[61]</sup>多维指标可用于研究确定视觉舒适区域的照度边界值, 而且这些生理数据在预测视觉舒适性方面较物理数据更具优势。

3) 测评方法: 在用户主观感知和情感测量方面, 应设计集认同判断、满意判断、质量判断和语义差异量表的综合性问卷进行测量; 应结合不同的光环境特征, 充分考虑用户的视觉行为, 主客观相结合地改进和整合现有测评方法, 进一步提升光环境视觉舒适性评价的合理性和精确度, 降低评价争议; 现有的评价方法忽略了光环境视觉舒适性主观评价是一个动态、随机的过程, 未来可引入隐马尔可夫模型 (Hidden Markov Model, HMM)<sup>[62]</sup>进行研究, 以提升评价的稳定性和可靠性。

4) 测评应用: 目前, 基于照明仿真软件的评价方法是利用商业照明仿真软件来模拟设计方案的光环境物理参数, 然后结合相应领域照明标准来对设计方案的照明质量进行优劣评估。未来照明仿真软件将融入人的生理指标参数, 模拟光环境中光度学参数对用户的生理指标的影响, 从而进一步提升光环境视觉舒适度, 为用户营造更多舒适健康的照明环境。

## 参考文献:

- [1] 徐代升. 健康照明光环境相关问题探讨[C]// 海峡两岸第二十六届照明科技与营销研讨会. 中国照明学会, 2019:

- [2] KRUISSELBRINK T, DANGOL R, ROSEMAN A. Photometric measurements of lighting quality: An overview[J]. *Building and Environment*, 2018 (138): 42-52.
- [3] 刘炜. 住宅人工照明光环境智能控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [4] VEITCH J A, NEWSHAM G R. Determinants of lighting quality I: State of the science[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1998, 27(1): 92-106.
- [5] BOYCE P R. Illuminance selection based on visual performance—and other fairy stories[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1996, 25(2):41-49.
- [6] JONES N L, REINHART C F. Experimental validation of ray tracing as a means of image-based visual discomfort prediction[J]. *Building and Environment*, 2017, 113:131-150.
- [7] FLYNN J E, SPENCER T J. The Effects of light source color on user impression and satisfaction[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1977, 6(3): 167-179.
- [8] 孙守迁, 徐江, 曾宪伟, 等. 先进人机工程与设计——从人机工程走向人机融合[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [9] RICHARDS L G, JACOBSON I D, KUHLETHAU A R. What the passenger contributes to passenger comfort[J]. *Applied Ergonomics*, 1978, 9(3): 137-142.
- [10] SLATER K. Discussion paper the assessment of comfort[J]. *Journal of the Textile Institute*, 1986, 77(3): 157-171.
- [11] HERTZBERG H T E. The human buttocks in sitting: Pressures, patterns, and palliatives[R]. New York: Society of Automotive Engineers, Inc., 1972.
- [12] ZHANG L, HELANDER M G, DRURY C G. Identifying factors of comfort and discomfort in sitting[J]. *Human Factors*, 1996, 38(3): 377-389.
- [13] IACOMUSSI P, RADIS M, ROSSI G, et al. Visual comfort with LED lighting[J]. *Energy Procedia*, 2015(78): 729-734.
- [14] BOYCE P R, WILKINS A. Visual discomfort indoors[J]. *Lighting Research and Technology*, 2018, 50(1): 98-114.
- [15] HOPKINSON R G. *Architectural Physics: Lighting*. UK: N/A, 1963.
- [16] ARAJI M T. Balancing human visual comfort and psychological wellbeing in private offices[D]. Dissertations and Theses-Gradworks, 2008.
- [17] EN 12665: 2018. Light and lighting-Basic terms and criteria for specifying lighting requirements[S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2018.
- [18] CARLUCCI S, CAUSONE F, ROSA F D, et al. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47:1016-1033.
- [19] SLATER A I. Illuminance differences between desks: Limits of acceptability[J]. *Lighting Research & Technology*, 1993, 25(2): 91-103.
- [20] ARAJI M T, BOUBEKRI M, CHALFOUN N V. An examination of visual comfort in transitional spaces[J]. *Architectural Science Review*, 2007, 50(4): 349-356.
- [21] LOE D, ROWLANDS E, WATSON N. Preferred lighting conditions for the display of oil and watercolour paintings[J]. *Lighting Research and Technology*, 1982, 14(4): 173-192.
- [22] 陈科吉, 翁季, 张青文, 等. 基于辨识效果的地下车库照明质量评价指标研究[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(3): 36-46.
- [23] SUN C, LIAN Z. Sensitive physiological indicators for human visual comfort evaluation[J]. *Lighting Research and Technology*, 2016, 48(6): 726-741.
- [24] PUPOVAC V, PETROVECKI M. Summarizing and presenting numerical data[J]. *Biochemia Medica*, 2011, 21(2):106-110.
- [25] JACOB C. Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit[J]. *Psychological Bulletin*, 1968, 70(4): 213-220.
- [26] TANNER M A, YOUNG M A. Modeling ordinal scale disagreement[J]. *Psychological Bulletin*, 1985, 98(2): 408-415.
- [27] HALME M, JORO T, KOIVU M. Dealing with interval scale data in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 137(1):22-27.
- [28] HARKER P T, VARGAS L G. The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process[J]. *Management Science*, 1987, 33(12):1511-1511.
- [29] ANNETT J. Subjective rating scales: science or art?[J]. *Ergonomics*, 2002, 45(14): 966-987.
- [30] ALICIA A C, GARCIA-HANSEN V, ISOARDI G, et al. Subjective assessments of lighting quality: A measurement review[J]. *Leukos*, 2019, 15(2-3): 115-126.
- [31] LINHART F, SCARTEZZINI J L. Evening office lighting--visual comfort vs. energy efficiency vs. performance?[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(5): 981-989.
- [32] EKLUND N H, BOYCE P R. The development of a reliable, valid, and simple office lighting survey[J]. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 2013, 166(1):129-33.
- [33] WYMELENBERG K V D, INANICI M. A critical investigation of common lighting design metrics for predicting human visual comfort in offices with daylight[J]. *Leukos*, 2014, 10(3):145-164.
- [34] AKASHI Y, BOYCE P. A field study of illuminance reduction[J]. *Energy Build*, 2006, 38(6): 588-599.
- [35] VEITCH J, MILLER N, MCKAY H, et al. Lighting system effects on judged lighting quality and facial



- appearance[C]// The 1996 Annual Conference of the Illuminating Engineering Society of North America, Cleveland, OH, 1996.
- [36] YANAI H, ICHIKAWA M. Factor Analysis[J]. Handbook of Statistics, 2006, 26(2): 257-296.
- [37] LOE L, MANSFIELD K P, ROWLANDS E. Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study[J]. Lighting Research and Technology, 1994, 26(3): 119-133.
- [38] 程乾生. 层次分析法 AHP 和属性层次模型 AHM[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(11):25-28.
- [39] 杜战其, 王洪伟, 张丽珍, 等. 基于模糊综合 AHP 法的教室照明系统评价与优化[J]. 照明工程学报, 2016, 27(6): 33-36.
- [40] AFFUL-DADZIE H, AFFUL-DADZIE A, OPLATKOVÁ Z K. Measuring progress of the millennium development goals: A fuzzy comprehensive evaluation approach[J]. Applied Artificial Intelligence, 2014, 28(1): 1-15.
- [41] 胡晓倩, 张莲, 李山, 等. 住宅光环境舒适度的模糊综合评价方法[J]. 重庆理工大学学报, 2013, 27(7): 103-107.
- [42] PARSONS K C. Environmental ergonomics: A review of principles, methods and models[J]. Applied Ergonomics, 2000, 31(6): 581-594.
- [43] 陈启高, 马贯中, 丁笑中, 等. 广义的韦伯-费昔勒定律[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1991, 14(4): 17-22.
- [44] NUTTER F W, ESKER P D. The role of psychophysics in Phytopathology: The Weber-Fechner Law Revisited[J]. European Journal of Plant Pathology, 2006, 114(2): 199-213.
- [45] REICHL P, EGGER S, SCHATZ R, et al. The logarithmic nature of QoE and the role of the Weber-Fechner Law in QoE assessment[C]// IEEE International Conference on Communications. South Africa: IEEE, 2010:1-5.
- [46] 刘沁, 张乘风. 视觉舒适度的理论模型及其图像研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(3): 28-29.
- [47] 苏燕辰, 张瑞萍, 李俊. 高速列车车内照度舒适性评价指标研究[J]. 中国测试, 2013, 39(S2): 15-17.
- [48] VAPNIK V. The support vector method of function estimation[M]//Suykens J A K. Vandewalle J.(eds) Nonlinear Modeling Springer, Boston, MA,1998.
- [49] 侯万钧,贾铁,王立雄,等.楼阁式古塔建筑夜景照明色温表现视觉适宜性评价研究[J/OL].重庆大学学报, [2020-04-15].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20200401.0856.002.html>.
- [50] 张荣, 李伟平, 莫同. 深度学习研究综述[J]. 信息与控制, 2018, 47(4): 385-397.
- [51] 李晓峰, 刘光中. 人工神经网络 BP 算法的改进及其应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2000, 32(2): 105-109.
- [52] 蔡建奇, 陈凯, 胡李敏, 等. 评价 LED 照明产品对人眼舒适度影响的新方法[J]. 照明工程学报, 2013(S1): 22-26.
- [53] SON A R, KIM I T, CHOI A S, et al. Analysis of UGR values and results of UGR calculations in commercial lighting simulation software[J]. Leukos, 2015, 11(3): 141-154.
- [54] CHOI N, HARVEY J E. Image degradation due to surface scatter in the presence of aberrations[J]. Applied Optics, 2012, 51(5): 535-46.
- [55] SUN W S, TIEN C L, PAN J W, et al. Simulation and comparison of the lighting efficiency for household illumination with LEDs and fluorescent lamps[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2013, 17(5): 376-383.
- [56] 吴姗, 余隋怀, 杨延璞, 等. 车载控制舱无眩光照明设计方法[J]. 制造业自动化, 2014, 36 (1):35-38.
- [57] 景国勋, 张峰, 周霏. 基于 DIALux 的煤矿巷道照明模拟及照度分析[J]. 安全与环境学报, 2018,18(3):972-976.
- [58] 朱煜, 杨骏, 王杰, 等. 船舶机舱光环境仿真[J]. 船舶与海洋工程, 2019, 35(4): 42-47.
- [59] 张炜, 马智, 俞金海. 基于 SPEOS/CATIA 的飞机驾驶舱眩光量化评估方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012,32(1):219-224.
- [60] 詹自翔,郭北苑,方卫宁. 高速列车驾驶界面设计中的照明眩光评估[J].机械工程学报, 2016, 52(8): 170-178.
- [61] KAKITSUBA N. Comfortable indoor lighting conditions evaluated from psychological and physiological responses[J]. Leukos, 2016, 12(3): 163-172.
- [62] MUNDADA M, GAWALI D B. Evaluation of Hidden Markov Model based Marathi Text-To-Speech synthesis system[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2016, 6(10): 1-5.