



建筑光学中人因研究的进展与方法

张昕*, 唐博, 陈晓东, 董英俊

清华大学建筑学院, 北京 100084

* 联系人, E-mail: zhx@mail.tsinghua.edu.cn

2022-01-28 收稿, 2022-03-08 修回, 2022-03-09 接受, 2022-03-10 网络版发表

国家自然科学基金(52078266)、清华大学自主科研基金(20211080095)和清华大学-丰田联合研究基金(20213930037)资助

摘要 建筑光学研究的核心目的是保障安全, 提高视觉功效和人类绩效, 优化人居环境的光品质, 提高人类福祉. 本文简要回顾了建筑光学中人因研究的发展脉络、当下热点、实验环境、实验被试与人因测量方法, 探讨了在建成环境的整体框架内, 生理测量、绩效测量与心理测量的有效性问题, 并对跨感官通道的多环境参数交叉研究进行了展望.

关键词 建筑光学, 人因研究, 视觉功效, 人类绩效, 实验环境, 实验被试

建筑光学是在建成环境中利用光能的科学, 是建筑物理的组成部分, 是涉及建筑学、物理学、生理学、心理学、人类工效学以及美学等领域的交叉学科, 是研究在空间中如何利用天然光和人工光创造适宜工作、生活的光环境, 保护并促进人类身心健康的应用学科. 本文简要回顾了建筑光学在视觉功效和人类绩效领域的发展脉络与研究进展, 对比了真实环境、虚拟环境、隔离式评价环境3种不同的实验环境设置条件, 整理了建筑光学人因研究的实验被试设置条件与人因测量方法, 探讨了在建成环境的整体框架内, 生理测量、绩效测量与心理测量的有效性问题, 展望了跨感官通道的多环境参数交叉研究方向.

1 建立在人因研究基础上的建筑光学

建筑光学中被测度的光根据以人眼视觉感受为基准的辐射建立, 其光度学和色度学的根基在于光谱光视效率曲线 $V(\lambda)$ 的提出, 在物理量(光谱的能量内容)与视知觉(眼睛的视觉感受)之间建立了桥梁. 从学理上

讲, 建筑光学研究的根基就是“人因”. 建筑光学研究的核心目的是保障安全, 提高视觉功效与人类绩效, 优化人居环境的光品质, 提高人类福祉.

光与人类视觉感知的关联研究早期以经验为主. 20世纪进入实证性阶段后, 将主观视觉感知进行量化和标准化, 并与客观物理测量值建立联系. 建筑光学实证研究早期聚焦视觉功效. 2002年, 随着第三类感光细胞ipRGCs(intrinsically photosensitive retinal ganglion cells)的发现, 建筑光学研究从视觉效应拓展至非视觉效应, 后者影响褪黑激素的分泌和与之关联的生理节律系统, 影响体温、血压、心率, 影响人的觉醒度和情绪等, 与人类绩效产生了更为密切的联系. 图1呈现了视觉功效与人类绩效的复杂逻辑关系^[1].

2 视觉功效领域的研究进展

视觉功效研究关注人眼处理视觉作业的速度和准确性, 并依此确定适用于不同功能空间的光剂量指标. 视觉功效与计算、寻路等视觉任务的安全性和效率直

引用格式: 张昕, 唐博, 陈晓东, 等. 建筑光学中人因研究的进展与方法. 科学通报, 2022, 67: 1771–1782

Zhang X, Tang B, Chen X D, et al. Research methods and progress of human factors in architectural lighting (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1771–1782, doi: [10.1360/TB-2022-0144](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0144)

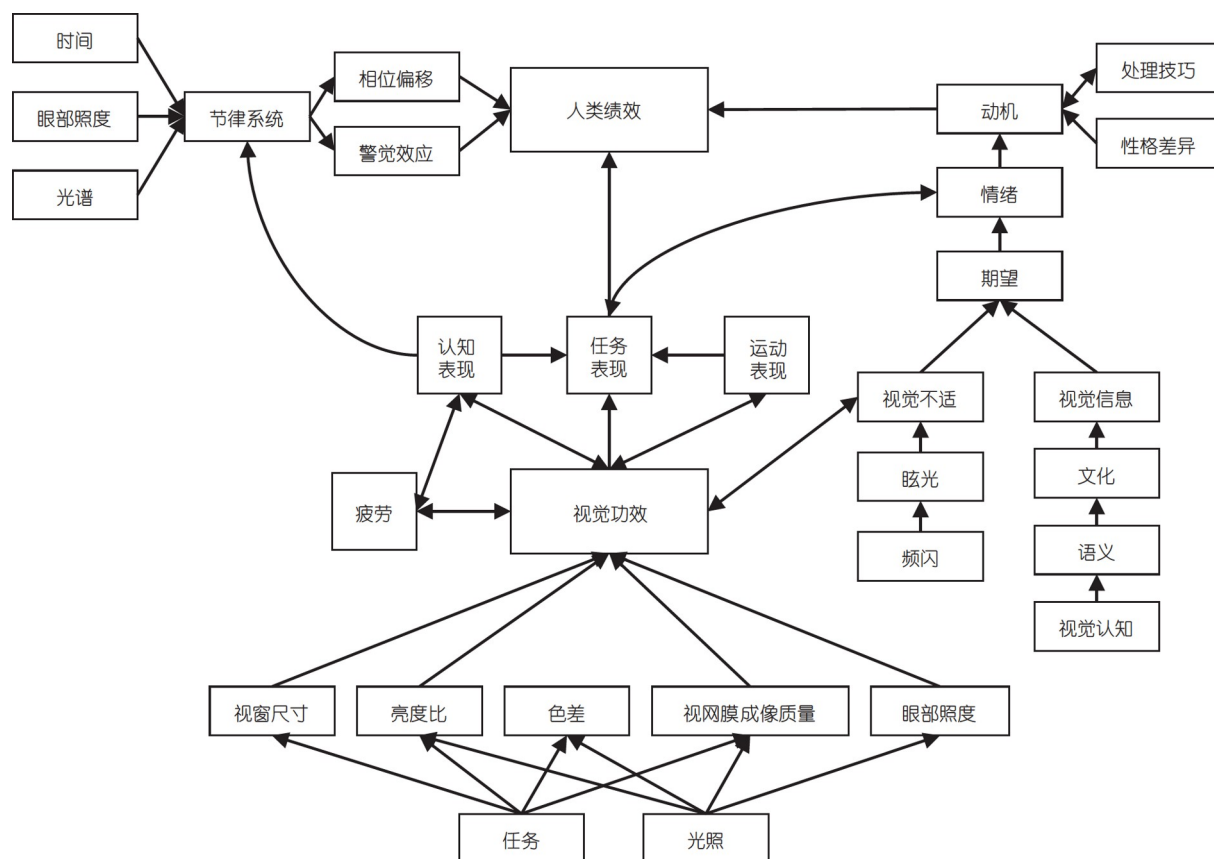


图1 视觉功效与人类绩效的复杂逻辑关系^[1]

Figure 1 The complex logical relationship between visual performance and human performance^[1]

接相关, 具体包括数字计算^[2]、阅读理解^[3]、校对^[4]、视觉检测^[5]、视觉搜索^[6]、驾驶^[7]、寻路^[8]等。从研究范式而言, 视觉功效研究多为表面效度研究, 致力于探索在特定场景实现视觉功效“好”的标准所需要的光剂量, 具有明确的应用导向, 如为学校、办公、道路等不同功能空间提供照度标准值。

视觉功效任务的影响因素包括视觉目标物尺寸及对比度^[9]、背景照度^[10]、光源光谱构成^[11]、光的空间分布^[12,13]等。尽管不同研究效度不同, 但大部分研究结论遵循边际递减效应, 即从低照度到中照度, 视觉功效任务的速度和准确率提升幅度较大, 当照度值超过某一阈值, 照度提升所带来的视觉功效表现增益变小^[14,15]。视觉功效研究开始于19世纪初期, 随着20世纪70~80年代研究数量的累积, 20世纪90年代出现评估视觉功效的数学模型, 如相对视觉功效模型(relative visual performance, RVP)^[16]。该模型以发光目标物的对比度、尺寸及背景照度为自变量, 以反应时间和速率

为因变量, 综合评估人的视觉功效, 适用于室内外多种应用场景。但早期传统视觉功效研究还未臻于完善。20世纪初期, 随着人眼生理结构研究的深入, 视觉功效领域涌现了新的研究问题。如近期涌现的视觉任务目标物周围物体的视觉功效研究^[17~19], 虽然与视网膜中央任务同样遵循边际递减效应, 但其中起作用的人眼感光接收器却存在差异。

传统视觉功效实验方法严格要求光的输入变量, 普遍使用人工光作为实验条件, 但基于建筑学视角, 真实环境中的天然光是人因工程学的核心变量之一。如何将天然光动态不规律的变化特征纳入定量实验的科学体系中, 是视觉功效研究不可忽视的问题。如Tregenza和Mardaljevic^[20]回顾了天然光设计实践, 认为光不仅是物理层面的能量, 更应被看作信息载体。天然光携带外部信息从窗户进入, 在物理特性、视野属性、自然度心理偏好等多方面区别于人工照明, 因而研究难点是如何建立有效实验细分探讨各因素作用机制。已有

研究需重新审视评估, 新研究亦有待开展。

广义的视觉研究可分为视觉神经和视觉照明^[21]。从视觉神经研究的角度, 视觉系统可划分为两个子系统, 每个子系统对光环境作出不同响应。视觉信号产生于视网膜后, 随即产生两个分支: 一个子系统处理目标检测、视觉搜索、视运动和眼球移动, 主要依托M通道作用; 另一个处理感知的形状、颜色和亮度, 主要为P、K通道作用^[22,23]。视觉照明研究包括视觉功效和视亮度两部分。从视觉神经研究审视视觉照明研究, 视觉功效研究的关注点为M通道作用, 而相对应的视亮度研究为P通道作用。

视觉功效研究多为应用导向, 为不同的照明项目提供指导和建议, 如安全照明、驾驶安全、任务绩效或眩光等问题, 对社会发展有直接价值^[24]。然而, 其实实验设计和执行往往忽略了背后的视觉神经理论基础, 研究结论滞于表层, 缺少视觉神经层面的理论探讨^[25]。有效结合视觉神经研究, 将对研究问题更精准定位, 对数据更深入剖析, 是视觉功效研究未来的发展方向。视觉功效研究过往一直非常重要, 然而近期较少单独提及, 学者的研究转移到了警觉度、认知和行为等其他问题, 但这并不意味着视觉功效研究的重要性缺失^[26]。视觉功效关注视觉系统处理视觉刺激信号的能力, 外延至人脑加工、储存和提取信息的认知表现, 以及神经肌肉系统执行特定任务的运动表现^[27,28], 落脚于任务表现, 研究视野更拓展, 研究方法与工具更多样化。

3 人类绩效领域的研究进展

2000年以前, 光健康相关的影响研究主要集中在睡眠和情绪两方面, 受照明和控制技术限制, 研究多在光的宏观控制层面及人的生理影响层面。自2002年第三类感光细胞发现以来, 照明的研究热点集中在光的非视觉效应及其应用领域。神经节细胞独立存在于视网膜神经末端, 且能够将环境中接收到的光刺激转换为神经信号^[29], 与视觉信号的传输路径不同, 该传输路径称为非视觉通路。因而, 非视觉研究主要关注光照刺激对人体生理和心理的影响, 如激素分泌、睡眠质量、情绪、觉醒度和积极性等。

天然光被广泛证实对节律健康有益, 可从时间维度改善节律, 提升办公人员的舒适性、觉醒度、情绪^[30~32]以及睡眠质量^[33,34]。能提供室外视野的天然光可提高记忆、缓解压力^[35]。2008年前后, 光的评价指标由视看面照度转向以眼部曝光为主。眼部曝光对昼夜

节律的影响是非视觉研究的主要内容之一。光照抑制褪黑激素分泌, 因此, 可利用光照调节睡眠周期、心率和新陈代谢等, 使人体适应季节节律变化, 该研究领域称为节律照明。目前, 几种主流节律照明测度值包括节律影响因子C/P值(circadian rhythm influencing factor C/P value)^[36]、视黑素等效照度EML^[37](equivalent melanopic lux)、视黑素等效日光照度EDI(equivalent daylight illuminance)^[38]、昼夜节律刺激CS值(circadian stimulus)^[39]等。

随着人因研究的发展, 光与人体之间的作用关系也得以重新梳理, 并根据不同时段人的行为模式和光照作用特点加以细化。2010年以后, 随着LED照明和控制技术的进步, 光照参数和动态控制更加精准, 可保障按时间的分段细化设置。例如, 醒前一定时间内, 天然光^[40,41]或人工光^[42]唤醒对醒后觉醒度、情绪和当晚的睡眠质量更为有利; 黎明和黄昏光照模拟令阿尔茨海默病患者夜间睡眠、醒后情绪明显提高^[43]; 晨间模拟天然光的人工照明可显著提高日间觉醒度、情绪^[44]和夜间睡眠质量^[45]; 下午天然光照射令傍晚觉醒度更高、认知任务表现更好^[46]。

节律照明也应用于水下、地下、极地、航天等特殊环境。作业人员长期在狭小封闭空间生活与工作, 与天然光、视野等外界信息隔离, 且长期处于高应激、高心理压力条件, 易出现生物节律紊乱(如睡眠质量下降)^[47]、认知能力下降^[48]、烦躁焦虑^[49]等生理心理问题。尽管已量化证实节律照明对于维持节律、情绪等具有积极作用, 但因人工照明难以建立朝向与时间暗示, 令节律重建与疗愈作用效果欠佳。研究表明, 人工照明并不能替代自然光照和户外景观对人体健康的实质影响^[50]。

非视觉效应的临床应用以对季节性情感障碍(seasonal affective disorder, SAD)和节律紊乱的光治疗为主。早在20世纪80年代, 光治疗已用于季节性情感障碍^[51]。此外, 目前已证实光治疗对于阿尔茨海默病^[52]、帕金森病^[53]和注意力缺陷多动障碍^[54]等疾病有积极作用。光治疗的基本原理在于, 给予患者定时定量的光照可提高日间觉醒度, 提升夜间睡眠质量, 减少夜间躁动, 同时避免药物治疗的副作用。健康照明和光治疗的核心是以人为本, 光对人体节律效应存在明显个体差异^[55]。同样, 基于个体差异的光剂量和照射时间尚需更多研究佐证。

光源光谱^[56]、光照强度^[57]、持续时间^[58]、作用时

刻和光的空间分布^[59]激发不同的非视觉效应,其研究内容和方法涉及跨多学科背景.被试的视觉能力、生活习惯、年龄、性别和光耐受程度的差异都会对实验结果造成影响,应根据实验目的有针对性地选择被试并设计实验.被试特征、实验环境设置、人因测量方式、光环境评估指标的多样性,使得研究常常会遗漏某些信息,从而增加不同研究间交流比较的难度^[60].因此,CIE国际照明委员会(International Commission on Illumination)提供了一份简明模板^[60],对光环境人因实验中需要报告的内容提供指导建议.规范研究表述有助于提高研究内容的推广性,促进交互作用的探究,以及未来实现相关领域的数据整合.

4 实验环境设置

实验环境主要包括沉浸式的真实环境、虚拟环境,以及隔离式的图像评价环境.在实际场景中,人的生理、心理反应最接近真实,但干扰因素较多,因此实验多在变量易于控制的实验室场景进行.虚拟环境对真实空间感受的还原能力正不断提升.Chen等人^[61]综合实验结果和文献分析,从临场感(presence)、真实感(reality)、景深感(field depth)、立体感(stereo)、舒适度(comfort)和清晰度(clarity)6个维度来衡量4种媒介的呈现能力.结果表明,虚拟现实最接近真实环境,但目前虚拟现实设备尚无法还原真实环境的亮度和光谱,其建筑光学研究应用存在较大局限.隔离式评价环境的变量,尽管在模拟工具中易于控制,但景深感、舒适度、临场感等真实感方面的评价有效性较差.

4.1 真实环境

真实环境的视野范围为水平180°/垂直140°,亮度范围为 $10^{-4} \sim 10^{10}$ cd/m²^[62],可分为实验室场景和实际场景.主要区分在于对真实空间几何关系、装修、家具

的还原程度,实验任务、时长与真实生活的相似程度,被试视觉能力等生理特征与目标人群的相似程度.二者的比较详见表1^[63].

实验室场景对夜间、地下等全人工光环境场景可实现较高还原度.但是对于日间有窗空间的实验,天然光整体有规律而具体无规律的动态变化大幅提高了实验难度.视野是制约实验成果的另一因素,利用实验室场景解决该问题的典型技术策略见表2.

4.2 虚拟环境

虚拟现实技术在保障安全性和部分真实性的同时,可支持真实环境中难以实现的实验条件.如改变空间几何参数和界面参数,可实现水平视野180°、垂直视野140°、亮度范围在0~480 cd/m²的实验场景^[64].

研究表明,高质量的计算机渲染可以提供接近于真实光环境的虚拟场景.Chamilothori等人^[65]利用unity和radiance渲染出不同时间下的日光场景,让29名被试比较同一天空时刻下的真实环境和虚拟环境,发现被试的生理和心理感受没有明显的差异.Heydarian等人^[66]在研究办公空间中的阅读速度、理解能力和物体识别能力时发现,被试在虚拟空间和真实空间中的工作效率没有明显的差异.另一项类似的研究^[67]发现,被试在真实环境和虚拟环境中调节百叶窗和人工照明强度的偏好性没有明显差异.

虚拟环境常用于真实环境不易进行的实验,如航站楼等特殊功能的高大空间寻路实验等.Suzer等人^[68]使用3Dmax搭建了安卡拉埃森博阿国际机场的值机大厅场景,并采用mental ray renderer渲染不同色温的照明环境,探讨3000~21000 K色温跨度下的寻路效率差异.Vilar等人^[69]在虚拟环境中研究水平和垂直两种标志系统对寻路效率的影响.

虚拟现实技术存在一定局限性:目前尚未成熟的

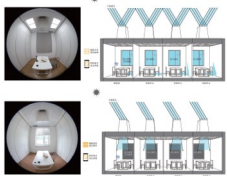
表 1 不同真实环境的比较^[63]

Table 1 Comparison of two real experimental environments^[63]

真实环境	环境因素	数据测量与收集	对被试的影响	实验结果
实验室场景	实验环境简明,针对性强;变量明确,易于控制;实验成本可控,可复制性高;场景还原度受限	对测量方法限制较小,更关注准确性;数据收集完整精确	实验环境理想化,实验者偏差、被试偏差等更明显	实验结果显著性高;外部效度较低,推广应用需要验证
实际场景	实验环境复杂,关注各种交互影响;干扰变量较多,实验变量不易控制;实验成本高,可复制性低	除准确性外,关注测量方法的便捷性、抗干扰性;数据收集复杂分散	实验环境接近真实,实验者偏差、被试偏差等实验误差较小	实验结果显著性低;外部效度较高,易于推广应用

表 2 (网络版彩色)天然光实验室的常见技术策略

Table 2 (Color online) Common technical strategies of daylight laboratories

实验室名称	环境照片 ^{a)}	性能描述
德国弗劳恩霍夫日光实验室 (Tageslichtlabor, Fraunhofer ISE)		搭建相同配置的实验室和测试室, 实现在不干扰实验的情况下获取眼部曝光数据; 实验室于顶楼可自由转动朝向, 可设置各种遮阳装置
清华大学建筑光学实验室		搭建相同配置的实验室与测试室, 通过北向侧窗、深筒式平天窗、假天窗的调控, 探究天窗/侧窗采光情境混光使用的最优配置方案

a) 德国弗劳恩霍夫日光实验室图片来源: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/energieeffiziente-gebäude/gebäudehülle/fassade-fenster-tageslicht.html>; 清华大学建筑光学实验室图片来源: 陈晓东绘制

实时渲染技术, 难以在短时间内渲染出足够真实的光环境和场景; 由于虚拟现实设备的发光强度限制, 对于过亮、过暗及强烈明暗对比的环境难以实现光学上的完整还原; 由于虚拟现实设备的屏幕元件限制, 目前无法在虚拟环境中创造出与真实环境相似的光谱特性, 也就无法真实展现出受制于光谱的光学特性, 如非视觉效应; 虚拟现实屏幕的分辨率、刷新率等参数的不足, 以及设备引起的晕动症等问题, 也会对被试的体验产生影响。对于建筑光学研究, 需测试对比真实环境和虚拟环境的效度, 明确实验结果的有效性。

4.3 隔离式评价环境

图像评价法是以静态或动态图像为媒介呈现真实环境, 被试在实验室中进行主观评价量化的研究方法。利用渲染图像或照片, 可实现水平/垂直视野30°、亮度范围在0.5~1000 cd/m²的实验场景^[62]。隔离式评价环境应与图像环境的光学特性保持一致, 必要时需进行屏幕参数、眼部曝光的校正。

视觉信息以光的形式进入眼睛, 通过进一步的分析和特征提取被标识成了“具有语义的描述”^[70], 即各种有意义的成分和特征。一张图像被分解为形状、大小、色彩、材质等信息, 要素之间的关系如比例、节奏、均质性等被分析并记录; 在视知觉的后期, 成分和特征被整合到一起。图像分析过程必然存在个体差异, 与个体的先验性知识有关^[70]。因此, 通过图像法研究场景, 结果必然是对该场景的认知, 而非被引导出的某一

特征, 且每个被试个体对图像的评价都有其独特性。

图像评价法常用于不易量化或不易现场实验的情形, 有两种常见的实验思路: 绝对评价法和相对评价法^[71]。绝对评价法一般是在无标准的参考图像时, 先进行数据测量与图像化处理, 再由被试根据实验者给出的语义差别量表和描述对待测图像作出评价, 最后进行主客观量值间的数据分析。相对评价法不需要被试对单张图片进行量化, 只需将一批图像由好到差进行排序, 通过互相比对给出分值。相对判断往往比绝对判断更加稳定、准确^[71]。

视频、照片和渲染图像都可作为待评价图像。摄影照片有两种呈现形式: 传统图像和高动态范围图像 (high dynamic range, HDR)。HDR图像技术能够满足现场测量无法实现或难以准确测量的区域亮度评估及关键光谱强度分布^[72]。Mahdavi和Eissa^[73]利用渲染图像研究被试对光环境亮度的主观评价及偏好性, 其结果与真实环境一致。光照条件的变化为人们提供时间、天气和户外环境的信息^[74], 其中亮度变化作为关键属性可以描述室外视野的动态特征^[75]。城市景观和环境心理学研究已将图像的动态属性纳入研究范畴, 并将室外视野中的动态环境属性与随时间推移的积极恢复性效果建立联系^[76]。

图像评价法受限于现有图像显示设备分辨率及亮度范围, 无法完全还原真实场景的光环境^[77]。此外, 不同光源条件会影响HDR的亮度数值, 相比实际测量存在误差^[78], 需要进行实测校正。目前的研究多集中于室

内场景,对室外高照度场景、低照度高对比度场景等的研究较少^[79],在道路光环境测量等方向上具有很大潜力^[80].

5 实验被试与人因测量方法

5.1 被试选择

选择被试时,应遵循实验伦理,根据应用场景确定被试特征和样本量.被试选择应涵盖所有可能影响实验结果的相关特征.

在为建筑光学人因研究选择被试时,应重点关注视觉特性,包括视力及矫正情况、色觉能力、有无眼部疾病等,并将年龄因素纳入变量考虑范围.随着年龄增长,视觉系统出现明显衰退^[81],眼内视网膜照度下降,光散射增加,视觉对比敏感度和明暗适应能力下降,老人颜色辨别能力下降,所需照度水平提高.视觉功效研究在选择被试时,应关注认知负荷,将影响实验结果的年龄、受教育程度等因素纳入考虑范围,且需考虑学习效应,收集被试对视觉作业的接触情况和熟悉程度,选择相同熟悉程度的被试人群.人类绩效研究在选择被试时,需考虑性别、年龄、性格、健康状况、生活习惯等因素.依据CIE技术报告TN.011.2020^[60],根据研究问题收集的信息包括:(1)光照历史;(2)被试节律类型;(3)睡眠质量和睡眠觉醒史;(4)压力症状;(5)健康状况;(6)心理健康;(7)近期服用普通处方和非处方精神活性药物情况等.此外,应选择一般化个体,通过问卷、测试等排除特殊个体.对于个体间差异,可以通过标准化处理减小影响程度.

确定被试样本数量时,应按照统计学要求,根据研究问题和影响测量结果的特征数量进行测算.样本量过小,将无法排除偶然因素,得出错误结论.样本量过大,将增加数据分析工作量,增加得出实验结论的难度^[82]. Uttley^[83]对近20年光学实验研究的比较分析表明,被试内设计研究的平均样本量为23,被试间设计研究的平均样本量为30;被试内设计减少了个体差异影响,比被试间设计具有更高的统计功效.通过对文献样本量和统计方法的分析,Uttley^[83]认为,目前光学研究多为中等样本量,欠缺揭示细微规律的能力.

5.2 测量方法

建筑光学的人因研究方法包括生理测量、心理测量、行为测量、绩效评估等.所有研究方法均应遵守:

- (1) 有利无伤原则;
- (2) 保密原则;
- (3) 知情同意原则;
- (4) 尊重风俗及文化禁忌原则;
- (5) 伦理审查原则.

通过生理测量可获取生物电信号、生化指标、瞳孔反应、心跳、血压、呼吸等人体生理指标,以客观精细地反映人的整体状态变化,包括觉醒度、情绪、睡眠、昼夜节律变化等.例如,脑电图(electroencephalogram, EEG)可以评价不同照度、色温条件下的脑疲劳程度^[84];皮肤电活动(electrodermal activity, EDA)可以区分不同照明条件下的神经活跃程度,可作为衡量情绪活跃/平静的标准参数^[85].生理测量可以连续测量而不干扰实验过程,但单个指标的信息解读有时并不明确,因而常与其他指标同时使用. Chamilothori等人^[67]在研究自然采光条件下窗户和立面形式对人的心理与生理反应时,发现需要综合分析EDA和心率变异性(heart rate variability, HRV)才能得到愉悦与觉醒的维度指标.生理测量的个体差异明显,受人体状态、环境条件的干扰较大.

心理测量主要通过主观量表评价人的能力、人格及心理健康等心理特性,评估视觉感受、视觉疲劳、觉醒度、情绪等状态.主观量表难以实现连续时间充分采样,对于持续性行为需要打断或结束后回顾.主观量表的准确性容易受到被试主观抑制情绪、对语义理解的准确程度、文化差异、述情障碍等的影响. Papi-nutto等人^[86]在研究背光屏幕对视觉舒适度的影响时,发现被试的心理特征也会影响被试的行为和感受.在使用和设计量表时,需综合考虑测量目的、测量环境和被试人群等因素.

行为测量利用某些情绪状态具有明显行为特征这一发现,通过观察行为分析被试特定情绪状态的变化,包括惊愕反应、面部表情、躯体行为等.例如,在研究光环境时,常利用眼动仪记录眨眼、注视、瞳孔大小、眼跳等研究视疲劳程度^[87].

绩效评估收集被试在具体任务中的表现,对人体状态进行间接测量^[88].绩效评估依赖于有目的的用户行为、场景和任务设计,因而受被试认知能力、以往使用经验等条件的影响较大.光环境研究中常利用特定视觉任务评估被试的视觉能力,如评估视觉敏锐度和信息处理能力的兰道尔环阅读测试^[89].

6 讨论

当下,建筑光学的科研与设计面对的首要问题是,光的数量、光谱、分布、照射时刻、持续时长、受光

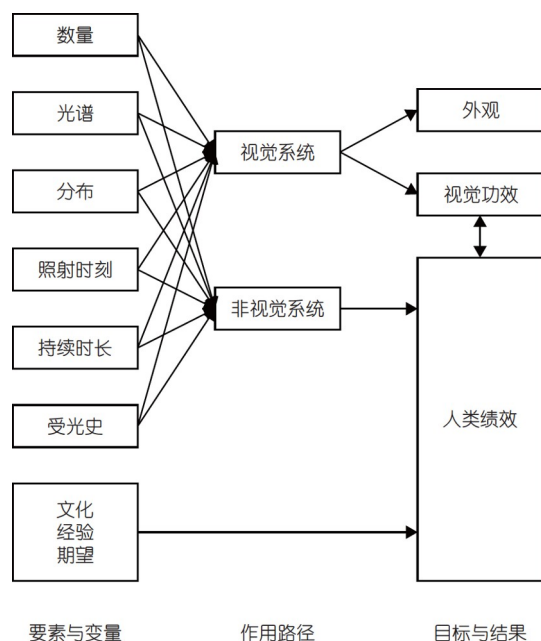


图2 视觉系统和非视觉系统的作用原理

Figure 2 The principle of visual systems and non-visual systems

史同时作用于视觉系统和非视觉系统(图2)。视觉效应关注于被照物(视觉任务及背景)接收到的光照,非视觉效应关注人眼接收到的光照。非视觉效应的光谱灵敏度也不同于视觉效应中的明/暗视觉。不同于视觉刺激,非视觉效应中人体对光刺激的响应时间从几秒至几分钟甚至更长,且敏感度随时刻而不同。随着非视觉效应与视觉效应更多的交互作用被发现,应从人因工程的系统思想入手,重新审视并整合建筑光学领域的科研与设计策略。

生理测量可以客观、精细、连续记录被试的生理状态。通过基线测量和生理信号标记,可以准确预测行为^[86]。然而,各种生理测量方法均存在适用范围^[90],生理指标易受到各种环境因素干扰。例如,头部任何轻微的运动都会导致脑电信号出现大量噪声^[91],生理指标如HRV、EDA^[92]、体温^[93]等对光环境的反应时间不同,限制了实验时长和实验流程的设计。因此,传统生理测量多依赖理想化的实验室场景,使得实验结果的外部效度受到限制^[94]。将传统测量方法应用于实际场景的尝试^[95,96]发现,两种场景中的测量结果相关性很低,其有效性仍需验证,应用于实际场景的可移动测量方法尚不成熟^[95]。生理电信号分析仍面临许多挑战,如EEG信号信噪比低^[97],需要进行多通道捕捉以及复杂

的分析系统^[98]提取有效特征;EDA信号仅表示应激水平,对情绪效价缺乏辨识度^[99,100]。

绩效测量方面,以往研究多为短时间(20~40 min)暴露在特定光环境下的单次绩效测试,例如较高色温较高照度下绩效表现更优的结论,主要反映个体短时注意力集中^[101]。然而,真实场景中个体往往较长时间(1~3 h及以上)在同一环境工作,持续注意力对绩效表现的影响更大。因存在脑疲劳、视疲劳,以及不同工作任务转换等问题,长时工况对最佳照明的需求与短时工况并不相同。对于长时间学习、工作状态下的光照环境,多建议照明应有所变化^[102],但对于具体变化方式,尚未达成共识。

传统心理学研究方法中基于平均数和变异性的组间比较具有局限性,对于个体复杂性问题,需采用特殊法则研究法(idiographic approach)或个案研究(case study)^[103,104]。个体内的差异来源于人格特质的影响。以McCrae和Costa^[105]所阐述的大五人格模型为例,在生理学层面,人格特质会影响大脑皮层唤醒,从而作用于个体生理机制^[106];在认知操作层面,人格特质会影响不同的认知能力,且存在一定的年龄、性别差异^[107]。实验室场景往往难以模拟日常情境中的行为和心理生理状态,也难以跟踪个体心理和行为的发展趋势与变化规律^[108]。以往的建筑光学人因研究以预先设定的真实环境为主,存在关注研究变量非动态过程、较少进行纵向研究、关注组间差异多于个体差异等局限性。为更好地研究个体特殊性问题,可以采用经验取样法,通过测量真实情境下不断变化的现象,缩小回顾偏差,提高生态效度^[109,110],并通过与个体间设计的结合,连续采集行为、生理、环境数据,考察个体内的变异,了解个体如何体验、感觉、思考、行为^[111,112]。

建成环境中单一环境参数的研究正拓展至多环境参数研究,声、光、热等环境因素对舒适性、心理和生理的交互效应愈发受到关注。基于研究复杂度与可实施性的考量,双因素交叉研究较为突显^[113],其中光热交互研究最多,声光其次。已有研究表明,低色温可改善低温环境的热舒适^[114],视觉舒适性在较低温度下更优^[115],噪声对视觉感知存在显著的负面作用^[116]。基于室内环境整体性的研究亟待补充^[117,118],从热、声等视角挖掘建筑光学研究盲点,系统性揭示跨感官通道交互感知的作用机制,以完善室内综合人因环境的理论体系。

参考文献

- 1 Boyce P R. Human Factors in Lighting. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2003
- 2 Smith S W, Rea M S. Relationships between office task performance and ratings of feelings and task evaluations under different light sources and levels. In: Proceedings of Commission Internationale de l'Eclairage 19th Session, 1980. 207–211
- 3 Smith S W, Rea M S. Performance of a reading test under different levels of illumination. *J Illum Eng Soc*, 1982, 12: 29–33
- 4 Smith S W, Rea M S. Proofreading under different levels of illumination. *J Illum Eng Soc*, 1978, 8: 47–52
- 5 Megaw E D, Richardson J. Eye movements and industrial inspection. *Appl Ergon*, 1979, 10: 145–154
- 6 Boynton R, Boss D. The effect of background luminance and contrast upon visual search performance. *Illum Eng*, 1971, 66: 173–186
- 7 Akashi Y, Rea M S, Bullough J D. Driver decision making in response to peripheral moving targets under mesopic light levels. *Lighting Res Technol*, 2007, 39: 53–67
- 8 Ouellette M J, Rea M S. Illuminance requirements for emergency lighting. *J Illum Eng Soc*, 1989, 18: 37–42
- 9 Boyce P R. Movement under emergency lighting: The effect of illuminance. *Lighting Res Technol*, 1985, 17: 51–71
- 10 Weston H C. The Relation between Illumination and Visual Efficiency—The Effect of Brightness Contrast. London: His Majesty's Stationery Office, 1945
- 11 McNelis J F. Human performance—A pilot study. *J Illum Eng Soc*, 1973, 2: 190–196
- 12 Lynch J B. The measurement of visual acuity. *Arch Ophthalmol*, 1933, 100: 882–883
- 13 Goodspeed C H I, Rea M S. The significance of surround conditions for roadway signs. *J Illum Eng Soc*, 1999, 28: 164–173
- 14 Chen X, Zhang X, Du J. Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and human performances at a workspace: A full-scale experiment in Beijing. *Build Environ*, 2019, 153: 168–185
- 15 Schnell T, Yekhshtyan L, Daiker R. Effect of luminance and text size on information acquisition time from traffic signs. *Transp Res Record*, 2009, 2122: 52–62
- 16 Rea M S, Ouellette M J. Relative visual performance: A basis for application. *Lighting Res Technol*, 1991, 23: 135–144
- 17 Born R T, Bradley D C. Structure and function of visual area MT. *Annu Rev Neurosci*, 2005, 28: 157–189
- 18 Rea M S, Ouellette M J, Tiller D K. The effects of luminous surroundings on visual performance, pupil size, and human preference. *J Illum Eng Soc*, 1990, 19: 45–58
- 19 Wolf E, Gardiner J S. Studies on the scatter of light in the dioptric media of the eye as a basis of visual glare. *Arch Ophthalmol*, 1965, 74: 338–345
- 20 Tregenza P, Mardaljevic J. Daylighting buildings: Standards and the needs of the designer. *Lighting Res Technol*, 2018, 50: 63–79
- 21 Ingle D J, Goodale M A, Mansfield R J. Analysis of Visual Behavior. Cambridge: MIT Press, 1982
- 22 Ungerleider L. 'What' and 'where' in the human brain. *Curr Opin Neurobiol*, 1994, 4: 157–165
- 23 Schmolesky M T, Wang Y, Hanes D P, et al. Signal timing across the macaque visual system. *J Neurophysiol*, 1998, 79: 3272–3278
- 24 Bullough J, Fu Z, Derlofske J V. Discomfort and Disability Glare from Halogen and HID Headlamp Systems. SAE Technical Paper Series. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2002
- 25 Bullough J, Boyce P, Bierman A, et al. Response to simulated traffic signals using light-emitting diode and incandescent sources. *Transp Res Record*, 2000, 1724: 39–46
- 26 Rea M S. The what and the where of vision lighting research. *Lighting Res Technol*, 2018, 50: 14–37
- 27 Boyce P R, Carter D J. Lighting Research and Technology: Past, present and future. *Lighting Res Technol*, 2018, 50: 5–13
- 28 Boyce P R. Light, lighting and human health. *Lighting Res Technol*, 2021, doi: 10.1177/14771535211010267
- 29 Gooley J J, Lu J, Fischer D, et al. A broad role for melanopsin in nonvisual photoreception. *J Neurosci*, 2003, 23: 7093–7106
- 30 Sahin L, Wood B M, Plitnick B, et al. Daytime light exposure: Effects on biomarkers, measures of alertness, and performance. *Behav Brain Res*, 2014, 274: 176–185
- 31 Borisuit A, Linhart F, Scartezzini J L, et al. Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood. *Lighting Res Technol*, 2015, 47: 192–209
- 32 Aries M B C, Veitch J A, Newsham G R. Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *J Environ Psychol*, 2010, 30: 533–541
- 33 Boubekri M, Cheung I N, Cheung I N, et al. Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: A case-control pilot study. *J Clin Sleep Med*, 2014, 10: 603–611
- 34 Figueiro M G, Rea M S. Office lighting and personal light exposures in two seasons: Impact on sleep and mood. *Lighting Res Technol*, 2016, 48: 352–364

- 35 Stamps A E. Mystery of environmental mystery. *Environ Behav*, 2007, 39: 165–197
- 36 Gall D, Bieske K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities. In: Proceedings of the CIE Symposium 2004 on Light and Health, 2004. 129–132
- 37 Lucas R J, Peirson S N, Berson D, et al. Irradiance Toolbox User Guide. 2013
- 38 CIE Central Bureau. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light. International Standard, CIE S 026/E-2018, 2018-01-01
- 39 Rea M S, Figueiro M G, Bierman A, et al. Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system. *Lighting Res Technol*, 2012, 44: 386–396
- 40 Dong Y, Zhang X. Investigation of the effects of awakening daylight on the morning alertness, mood, and sleep quality of male college students. *Build Environ*, 2020, 180: 106989
- 41 Dong Y, Zhang X. Study on the effect of awakening daylight in dormitories on morning alertness, mood, fatigue and sleep quality of college students. *Build Environ*, 2021, 203: 108060
- 42 Smith M R, Eastman C I. Shift work: Health, performance and safety problems, traditional countermeasures, and innovative management strategies to reduce circadian misalignment. *Nat Sci Sleep*, 2012, 4: 111–132
- 43 Bromundt V, Wirz-Justice A, Boutellier M, et al. Effects of a dawn-dusk simulation on circadian rest-activity cycles, sleep, mood and well-being in dementia patients. *Exper Gerontol*, 2019, 124: 110641
- 44 Leichtfried V, Mair-Raggautz M, Chaeffer V, et al. Intense illumination in the morning hours improved mood and alertness but not mental performance. *Appl Ergon*, 2015, 46: 54–59
- 45 Figueiro M G, Steverson B, Heerwagen J, et al. The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. *Sleep Health*, 2017, 3: 204–215
- 46 Münch M, Linhart F, Borisuit A, et al. Effects of prior light exposure on early evening performance, subjective sleepiness, and hormonal secretion. *Behav Neurosci*, 2012, 126: 196–203
- 47 Pjrek E, Friedrich M E, Cambioli L, et al. The efficacy of light therapy in the treatment of seasonal affective disorder: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Psychother Psychosom*, 2019, 89: 17–24
- 48 Figueiro M G. Light, sleep and circadian rhythms in older adults with Alzheimer's disease and related dementias. *Neurodegener Dis Manag*, 2017, 7: 119–145
- 49 Rutten S, Vriend C, Smith J H, et al. Bright light therapy for depression in Parkinson disease: A randomized controlled trial. *Neurology*, 2019, 92: 1145–1156
- 50 Hao L X, Cao Y X. Lighting and Health (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 2021. 74–79 [郝洛西, 曹亦潇. 光与健康. 上海: 同济大学出版社, 2021. 74–79]
- 51 Zivi P, De Gennaro L, Ferlazzo F. Sleep in isolated, confined, and extreme (ICE): A review on the different factors affecting human sleep in ICE. *Front Neurosci*, 2020, 14: 851
- 52 Mallis M M, Deroshia C W. Circadian rhythms, sleep, and performance in space. *Aviat Space Environ Med*, 2005, 76: 94–107
- 53 Bishop S L, Kobrick R, Battler M, et al. FMARS 2007: Stress and coping in an arctic Mars simulation. *Acta Astronaut*, 2010, 66: 1353–1367
- 54 Rybak Y E, McNeely H E, Mackenzie B E, et al. An open trial of light therapy in adult attention-deficit/hyperactivity disorder. *J Clin Psychiatry*, 2006, 67: 1527–1535
- 55 Zhao J P, Wang S X, Gao Y C. Application of helpful lighting: Research progress and prospects (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 300–310 [赵建平, 王书晓, 高雅春. 健康照明应用研究发展与展望. 科学通报, 2020, 65: 300–310]
- 56 Figueiro M G, Bullough J D, Rea M S. Spectral sensitivity of the circadian system. In: Proceedings of the Third International Conference on Solid State Lighting. Washington DC: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004, 5187: 207–214
- 57 McIntyre I M, Norman T R, Burrows G D, et al. Human melatonin suppression by light is intensity dependent. *J Pineal Res*, 1989, 6: 149–156
- 58 McIntyre I M, Norman T R, Burrows G D, et al. Quantal melatonin suppression by exposure to low intensity light in man. *Life Sci*, 1989, 45: 327–332
- 59 Edwards L, Torcellini P. A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants. Technical Report. US Department of Energy, 2002
- 60 Veitch J A, Knoop M. What to Document and Report in Studies of ipRGC-influenced Responses to Light. Technical Report. International Commission on Illumination, 2020
- 61 Chen Y, Cui Z, Hao L. Virtual reality in lighting research: Comparing physical and virtual lighting environments. *Light Res Technol*, 2019, 51: 820–837
- 62 Seetzen H, Heidrich W, Stuerzlinger W, et al. High dynamic range display systems. *ACM Trans Graph*, 2004, 23: 760–768
- 63 Sun L Y. Human Factors (in Chinese). 2nd ed. Beijing: China Science and Technology Press, 2005 [孙林岩. 人因工程. 第2版. 北京: 中国科学技术出版社, 2005]

术出版社, 2005]

- 64 Krupiński R. Virtual reality system and scientific visualisation for smart designing and evaluating of lighting. *Energies*, 2020, 13: 5518
- 65 Chamilothori K, Wienold J, Andersen M. Adequacy of immersive virtual reality for the perception of daylight spaces: Comparison of real and virtual environments. *Leukos*, 2019, 15: 203–226
- 66 Heydarian A, Pantazis E, Wang A, et al. Towards user centered building design: Identifying end-user lighting preferences via immersive virtual environments. *Autom Constr*, 2017, 81: 56–66
- 67 Chamilothori K, Chinazzo G, Rodrigues J, et al. Subjective and physiological responses to façade and sunlight pattern geometry in virtual reality. *Build Environ*, 2019, 150: 144–155
- 68 Suzer O K, Olgunturk N, Guvenc D. The effects of correlated colour temperature on wayfinding: A study in a virtual airport environment. *Displays*, 2018, 51: 9–19
- 69 Vilar E, Rebelo F, Noriega P. Indoor human wayfinding performance using vertical and horizontal signage in virtual reality. *Hum Factors Ergonom Manuf Serv Ind*, 2014, 24: 601–615
- 70 Han J W. A visual evaluation study for walking streetscape (in Chinese). Doctor Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018 [韩君伟. 步行街道景观视觉评价研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2018]
- 71 Liu S Q, Wu L F, Gong Y, et al. Overview of image quality assessment (in Chinese). *China Sciencepaper*, 2011, 6: 501–506, 523 [刘书琴, 毋立芳, 宫玉, 等. 图像质量评价综述. 中国科技论文在线, 2011, 6: 501–506, 523]
- 72 Wang J L. Application and evaluation of the HDR photography combined with camera for analyzing museum lighting environments (in Chinese). *China Illum Eng J*, 2011, 22: 6 [王嘉亮. 相机结合HDR图像技术在博物馆光环境分析中的应用与验证. 照明工程学报, 2011, 22: 6]
- 73 Mahdavi A, Eissa H. Subjective evaluation of architectural lighting via computationally rendered images. *J Illum Eng Soc*, 2002, 31: 11–20
- 74 Yeung S, Rubino C, Viswanathan J, et al. The latencies of prosaccades are prolonged by both executed and planned (but not executed) prior antisaccades. *J Vision*, 2014, 14: 97
- 75 Rodriguez F, Garcia-Hansen V, Allan A, et al. Testing the adequacy of luminous change descriptors to represent dynamic attributes in outdoor views. *Build Environ*, 2021, 191: 107591
- 76 Ode A, Tveit M, Fry G. Capturing landscape visual character using indicators: Touching base with landscape aesthetic theory. *Landsc Res*, 2008, 33: 89–117
- 77 Newsham G R, Cetegen D, Veitch J A, et al. Comparing lighting quality evaluations of real scenes with those from high dynamic range and conventional images. *ACM Trans Appl Percept*, 2010, 7: 13
- 78 Inanici M N. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system. *Lighting Res Technol*, 2006, 38: 123–136
- 79 Wang L X, Chen Y N. The new trends of the apply of high dynamic range image (in Chinese). In: 2011 (Tianjin) Lighting Technology Forum of Four Municipalities Directly under the Central Government. 2011 [王立雄, 陈燕男. 高动态范围图像技术应用的新动态. 见: 2011(天津)四直辖市照明科技论坛. 2011]
- 80 Chen Y N. Research on obtaining light parameters based on the high dynamic range image (in Chinese). Master Dissertation. Tianjin: Tianjin University, 2013 [陈燕男. 基于高动态范围图像技术的光环境参数提取方法研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2013]
- 81 Akashi Y, Akizuki Y, Cobhan M, et al. CIE 227: 2017 Lighting for Older People and People with Visual Impairment in Buildings. Technical Report. International Commission on Illumination, 2017
- 82 Tabachnick B G, Fidell L S. Using Multivariate Statistics. 5th ed. Boston: Pearson, 2007
- 83 Uttley J. Power analysis, sample size, and assessment of statistical assumptions—Improving the evidential value of lighting research. *Leukos*, 2019, 15: 143–162
- 84 Yang C Y, Wang T Y, Liang S Y, et al. Changes in EEG signals of students in different LED lighting environments (in Chinese). *China Illum Eng J*, 2019, 30: 55–58 [杨春宇, 汪统岳, 梁树英, 等. 不同LED照明环境下学生的脑电信号变化. 照明工程学报, 2019, 30: 55–58]
- 85 Russell J A. A circumplex model of affect. *J Pers Soc Psychol*, 1980, 39: 1161–1178
- 86 Papinutto M, Nembrini J, Lalanne D. “Working in the dark?” investigation of physiological and psychological indices and prediction of back-lit screen users’ reactions to light dimming. *Build Environ*, 2020, 186: 107356
- 87 Liang S Y, Yang C Y, Li J J. Experimental scheme exploration on visual fatigue in multimedia classroom light environment (in Chinese). *China Illum Eng J*, 2019, 30: 43–47, 101 [梁树英, 杨春宇, 李娟洁. 适于多媒体教室光环境研究的视疲劳实验方案. 照明工程学报, 2019, 30: 43–47, 101]
- 88 Yan Y H, Guan Y, Liu X D, et al. Productivity and physiological response of students subjected to fluorescent lamps with different colour temperatures and luminance level (in Chinese). *J Civil Arch Environ Eng*, 2010, 32: 85–89 [严永红, 关杨, 刘想德, 等. 教室荧光灯色温对学生学习效率 and 生理节律的影响. 土木建筑与环境工程, 2010, 32: 85–89]
- 89 Guignard J C, Bittner Jr A C, Einbender Jr S W, et al. Performance evaluation tests for environmental research (PETER): Landolt C reading test. *Proc Hum Factors Soc Annu Meet*, 1980, 24: 335–339

- 90 Fairclough S H, Venables L. Prediction of subjective states from psychophysiology: A multivariate approach. *Biol Psychol*, 2006, 71: 100–110
- 91 Pijn J P, Neerven J V, Noest A, et al. Chaos or noise in EEG signals dependence on state and brain site. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1991, 79: 371–381
- 92 Prayag A S, Jost S, Avouac P, et al. Dynamics of non-visual responses in humans: As fast as lightning? *Front Neurosci*, 2019, 13: 126
- 93 Kulve M T, Schlangen L, Schellen L, et al. The impact of morning light intensity and environmental temperature on body temperatures and alertness. *Physiol Behav*, 2017, 175: 72–81
- 94 Charles R L, Nixon J. Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. *Appl Ergon*, 2018, 74: 221–232
- 95 Ladouce S, Donaldson D I, Dudchenko P A, et al. Understanding minds in real-world environments: Toward a mobile cognition approach. *Front Human Neurosci*, 2017, 10: 694
- 96 Spiers H J, Maguire E A. Decoding human brain activity during real-world experiences. *Trends Cogn Sci*, 2007, 11: 356–365
- 97 Sagila G K, Vinod A P. Drowsiness detection using portable wireless EEG. *Comput Meth Programs Biomed*, 2021, 214: 106535
- 98 Mumtaz W, Rasheed S, Irfan A. Review of challenges associated with the EEG artifact removal methods. *Biomed Signal Process Control*, 2021, 68: 102741
- 99 Stern R M, Ray W J, Quigley K S. *Psychophysiological Recording*. Oxford: Oxford University Press, 2001
- 100 Cacioppo J T, Tassinary L G, Berntson G. *Handbook of Psychophysiology*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 101 Hansen E K, Nielsen S M L, Georgieva D, et al. The impact of dynamic lighting in classrooms. A review on methods. In: Brooks A L, Brooks E, Vidakis N, eds. *ArtsIT 2017, DLI 2017: Interactivity, Game Creation, Design, Learning, and Innovation*. Heraklion: Springer, 2018. 479–489
- 102 Davis J A, Moreno I, Sánchez-López M M, et al. Diffraction gratings generating orders with selective states of polarization. *Opt Express*, 2016, 24: 907–916
- 103 Allport G W. *Pattern and Growth in Personality*. New York: Holt, Rinehart and Winston Publishers, 1961
- 104 Allport G W. The general and the unique in psychological science. *J Pers*, 1962, 30: 405–422
- 105 McCrae R R, Costa P T. Personality trait structure as a human universal. *Am Psychol*, 1997, 52: 509–516
- 106 Revelle W, Loftus D A. Individual differences and arousal: Implications for the study of mood and memory. *Cogn Emot*, 1990, 4: 209–237
- 107 Zhao Y H, Yu L. Personality traits and cognitive ability: Age differences in their relations (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2014, 22: 1924–1934 [赵宇晗, 余林. 人格特质与认知能力的关系及其年龄差异. 心理科学进展, 2014, 22: 1924–1934]
- 108 Conner T S, Mehl M R. Ambulatory assessment: Methods for studying everyday life. In: Scott R, Kosslyn S, Pinkerton N, eds. *Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences*. Hoboken: Wiley, 2015. 1–15
- 109 Christie S, Chu K P, Ed D. Experience sampling: Promises and pitfalls, strengths and weaknesses. In: Diener E, ed. *Assessing Well-Being*. Dordrecht: Springer, 2003. 157–180
- 110 Duan J Y, Chen W P. Ambulatory-assessment based sampling method: Experience sampling method (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2012, 20: 11 [段锦云, 陈文平. 基于动态评估的取样法: 经验取样法. 心理科学进展, 2012, 20: 11]
- 111 Klumb P, Elförling A, Herre C. Ambulatory assessment in industrial/organizational psychology. *Eur Psychol*, 2009, 14: 120–131
- 112 Feng X, Zhang D. The study of mind and behavior in daily life based mobile sensing technology (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2017, 35: 5 [冯雪, 张丹. 探索日常生活中的心理与行为规律: 运用移动传感技术的心理学研究. 科技导报, 2017, 35: 5]
- 113 Dong X, Wu Y Y, Chen X D, et al. Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review. *Sci Total Environ*, 2021, 786: 147537
- 114 Chinazzo G, Chamilothoni K, Wienold J, et al. Temperature-color interaction: Subjective indoor environmental perception and physiological responses in virtual reality. *Hum Factors*, 2021, 63: 474–502
- 115 Chinazzo G, Wienold J, Andersen M. Effect of indoor temperature and glazing with saturated color on visual perception of daylight. *Leukos*, 2021, 17: 183–204
- 116 Ren X, Kang J. Effects of the visual landscape factors of an ecological waterscape on acoustic comfort. *Appl Acoust*, 2015, 96: 171–179
- 117 Yang W, Moon H J. Combined effects of acoustic, thermal, and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment. *Build Environ*, 2018, 148: 623–633
- 118 Li H, Zhu Y, Qin O, et al. A study on the effect of thermal, luminous and acoustic environment on indoor environmental comfort. *Build Environ*, 2012, 49: 304–309

Summary for “建筑光学中人因研究的进展与方法”

Research methods and progress of human factors in architectural lighting

Xin Zhang^{*}, Bo Tang, Xiaodong Chen & Yingjun Dong

School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^{*} Corresponding author, E-mail: zhx@mail.tsinghua.edu.cn

The core purpose of architectural lighting research is to ensure safety, improve visual performance and human performance, optimize the light quality of living environments, and improve human well-being. This paper briefly reviews the development context, current hot spots, experimental environment, experimental subjects, and measurement methods of human factors research in architectural lighting. Then we discuss the effectiveness of physiological measurement, performance measurement and psychological measurement within the overall framework of the built environment. Finally, we look forward to the cross research of multi-environmental parameters across sensory channels.

At present, a core problem faced by architectural lighting research and design is that the quantity, spectrum, distribution, irradiation time and duration of light act on both visual systems and non-visual systems. Visual effects focus on the light received by the object (visual task and background), while non-visual effects focus on the light received by the human eye. With the interaction between non-visual effects and visual effects, the rational operation of space needs to be reconsidered. It is nonnegligible to quantify the characteristics of luminous environments, especially the variation characteristics of dynamic daylight, and bring them into the scientific system of quantitative experiments in the era of human factors.

The experimental environment mainly includes immersive real environments and virtual environments, and isolated image/video evaluation environments. Experiments in the actual scene can get the human response closest to the reality, but face many interference factors. Therefore, the experiments are mostly carried out in a laboratory environment where the variables are easy to control. The ability of virtual reality to restore the feeling of real space is closest to the real environment. However, virtual reality equipment cannot restore the brightness and spectrum of the real situation, leading to the results of poor reliability and guidance. In isolated evaluation environments, the evaluation effectiveness of realism such as depth of field, comfort and existence is poor, though the variables in it are easy to control.

The research methods of human factors research in architectural lighting include physiological measurements, psychological measurements, behavior measurements, performance evaluation and so on. When selecting research methods, the characteristics of luminous environments, the action mechanism of visual/non-visual pathway and human visual characteristics should be considered. Human factors research should abide by experimental ethics.

With the trend of multi-environmental-parameter studies, the architectural lighting research excavates the blind spots from the perspective of thermology and acoustics. The action mechanism of cross sensory channel interactive perception was revealed systematically to improve the theoretical system of indoor comprehensive environments.

architectural lighting, human factors, visual performance, human performance, experimental environment, experimental subjects

doi: [10.1360/TB-2022-0144](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0144)