

黄茜^{1,2*} 孙澄^{1,2} 曲大刚^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学建筑学院; huangxi_hit@hotmail.com

2. 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室

Huang Xi^{1,2*} Sun Cheng^{1,2} Qu Dagang^{1,2}

1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology

2. Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology

国家自然科学基金重点项目(51938003)、黑龙江省重点研发计划项目(GZ20210211)

基于神经网络的自然采光办公空间视觉舒适度预测方法研究

Research on Visual Comfort Prediction Method in Daylighting Office Based on Neural Network

摘要:本研究根据现有视觉舒适性研究成果,提出耦合桌面水平照度(Eh)、人眼处垂直照度(Ev)、视野质量(VQ)三个主要光环境参数构成的视觉舒适性综合性描述指标 CVC(composite visual comfort)。本文提出基于神经网络的自然采光办公空间视觉舒适度预测方法研究。通过实验实测及问卷获得光环境数据 Eh、Ev 及视野质量 VQ 和对应的视觉舒适度主观评价值;利用所获数据分别训练了 BP 神经网络及 PSO 优化下的 BP 神经网络,然后验证模型,优化参数,对比结果选择最优预测模型。

关键词:视觉舒适性;预测方法研究;神经网络;办公建筑;光环境模拟

Abstract: Based on existing visual comfort research results, the research proposes a comprehensive description index of visual comfort (CVC) composed of three main light environment parameters: desktop horizontal illuminance (Eh), vertical illuminance at the eye (Ev), and view quality (VQ). This paper proposes a method for predicting the visual comfort of daylighting office based on neural network. The light environment data Eh, Ev and VQ and the corresponding subjective evaluation value of visual comfort were obtained through experimental measurements and questionnaires; the BP neural network and the PSO-BP neural network were trained with the data, and verified the model and optimized the parameters and compared to select the optimal prediction model.

Keywords: Visual Comfort; Method of Prediction; Neural Network; Office Building; Daylight Simulation

自然光对于人类的健康和幸福感的提升有重要影响作用,已经被多方面研究印证^[1,2]。其中办公空间作为大量人群长时间使用的建筑空间类型,办公空间光环境舒适性问题值得重点关注。办公空间光环境舒适性不足不仅会直接导致使用者的低效率、低满意度,同时会伴随意外的使用者的环境干预性行为,易造成设备能耗的增加。目前照明耗电量占比超过办公类建筑总耗电量的四分之一,仅次于暖通空调系统^[3]。因此对于办

公空间视觉舒适性及相关预测方法研究具有很高的社会性价值。但由于目前还没有一种被普遍认可和大量应用的视觉舒适性的综合性描述指标,导致相关光环境舒适性评价工具缺乏,造成建筑设计过程中不能直接调用成熟方法及工具,造成光环境舒适性方面的设计短板,造成后期建成空间的能源浪费等现象。在健康建筑与“双碳”目标的大背景下,本研究以建设量与存量大、单位面积能耗高的办公建筑为研究对象,总结已有视觉

舒适度评价指标与方法,提出一种综合水平、垂直照度与视野质量的综合性视觉舒适度评价指标;并提出一种基于神经网络的针对该综合性视觉舒适度指标的预测方法。

1 视觉舒适度评价指标

光环境舒适性的定义和具体引发因素是什么在学术上一直没有定论,照度虽为目前最为常用的评价指标,但在光舒适性上的评价作用很有限。视觉舒适性为描述视觉无不适情况下的状态,是当今较被认可的定义。视觉舒适性的影响因素很多,除了目前使用的物理量,还与文化、年龄、外界景象等因素有关。生理变量或者心理因素等可以影响感知到的不舒适度,如解释个体之间对眩光感受的差异。本文对现有研究中发现的对视觉舒适性影响显著的因素及指标进行梳理,可分为以平面照度、眩光、视野质量为主的单因素指标及多因素耦合的综合性指标两类。本文提出研究中所应用到的视觉舒适度综合性描述指标 CVC。

1.1 单因素视觉舒适度指标

1.1.1 与平面照度相关的评价指标

光环境评价指标中应用最为广泛的即是与平面照度相关的评价指标。基于易被测量及模拟的水平面照度值,可进一步得到如采光系数 DF(daylight factor)、照度均匀度等静态指标。若再累计不同时间段下的照度水平数据可得到目前研究领域及标准规范中常用的动态指标,如自然采光百分比 DA(daylight autonomy)、有效天然采光照度 $UDI_{300\sim 2000}$ (useful daylight illuminance)。

sDA(spatial daylight autonomy),北美照明学会推荐的采光指标,是同时在采光的空间和时间两个纬度上进行评估的采光标准。一般采用 $sDA_{500\text{ lx}, 50\%}$ 表示 50% 的空间达到 50000lx 时人们对空间视觉舒适度与满意度较高^[4]。但该指标未加入对照度上限值的考虑,导致无法排除眩光情况,因此不能完全保证视觉舒适性。

1.1.2 与眩光相关的评价指标

眩光问题一直是自然采光环境空间中的重点问题。在电脑更加普及的 VDT 办公模式下,眩光引起使用者视觉不舒适的概率也大大增加。普遍应用的眩光类指标有日光眩光指数(DGI)、统一眩光等级(UGR)、日光眩光概率 DGP(daylight glare probability)、视觉舒适概率(VCP),眩光类指标多为瞬时值且计算复杂,所以在实际工程项目设计中应用相对较少。后续有学者提出一种简化的方法,用坐着的人眼高度 1.2 m 的每个点的垂直眼睛照度(Ev)计算 DGP,公式如下。

$$DGPs = 6.22 \times 10^{-5} \times Ev + 0.184 \quad (1)$$

SVD(spatial visual discomfort)将眩光评价指标叠加

了时间, $SVD_{DGP} > 0.45 \sim 20\%$ 表示超过 20% 的占用时间内 DGP 高于 0.45,会引起空间使用者的不舒适。

1.1.3 与视野质量相关的评价指标

办公空间的窗除了满足人们对于日光的需求外,还提供与外界交互的视野。由于人们对于视野的生理及心理需求被诸多研究广泛证实^[5],在办公空间视觉舒适性方面的各类评价标准将视野质量纳入考量。例如 LEED 2015 版^[6]设有视野质量(view quality, VQ)条目,其中表示需要常驻空间地板面积的 75% 能够从窗口获得直接对户外的视线,获取外部清晰图像,在不能有任何阻碍的前提下,满足视野系数、视野深度、视野范围和窗外景观特征这四个建筑物内视野主要因素条件中的两个,则该空间视野质量可受到认可。另有多名学者对量化视觉质量进行研究探讨。Hellinga 等^[7]开发了一种算法来评估通过外部窗口的视图质量。Won Hee Ko 等^[8]提出了一种视野质量评价方法框架,基于三个主要变量:视野内容(view content)、视野获得量(view access)、视野清晰度(view clarity),提出计算公式(2)。本研究采用此视野质量 VQ 计算方法。

$$VQ = V_{\text{content}} \cdot V_{\text{access}} \cdot V_{\text{clarity}} \quad (2)$$

1.2 多因素视觉舒适度研究

由于视觉舒适度问题的复杂性,诸多学者从单一指标描述视觉舒适度研究转向借助统计学、神经网络、深度学习等工具的多因素视觉舒适度研究。

Martell 等^[9]应用神经网络预测模型研究基于视觉舒适和节能目标下的优化设计。Xue P 等^[10]研究结果显示光舒适是受人们的行为方式和建筑采光条件共同影响的。光均匀分布的比例是使用者心理感觉光舒适关键因素。刘刚等^[11]研究了照度、相关色温、照度均匀度对舒适度的影响规律,同时根据得到指标对舒适度的影响因素进行量化研究,通过 SPSS 软件进行多元非线性回归分析,提出了办公室光环境评价数学模型。

1.3 综合性视觉舒适度评价指标

根据已有视觉舒适性影响因素的研究成果可知在自然采光办公建筑空间中,足够的光照度、没有眩光的发生、良好的视野在使用者的舒适度评价方面起主要的影响作用。因此本研究选取桌面水平照度(Eh)、人眼处垂直照度(Ev)、视野质量(VQ)三个主要光环境参数构成的视觉舒适度综合性描述指标(composite visual comfort),文中简称 CVC。其中桌面水平照度可用于衡量光量是否充足;人眼处垂直照度可通过公式(1)计算得到 DGP 值,用于衡量眩光情况;视野质量通过公式(2)计算获得。

选择此三个参量也综合考虑了综合性舒适度评价

指标的易模拟性和计算性,为未来基于视觉舒适性的建筑空间智能化设计工具的开发做铺垫。若评价指标由于参量过多或运算过于复杂,容易导致以此为核心的研究方法在后期设计推广实践中、从业者在使用过程中“门槛”过高或运算量过大、运算时间过长,降低了工具的可用性与易用性。

本文所选用的三个参量中,桌面水平照度(Eh)与人眼处垂直照度(Ev)均为瞬时值,视野质量(VQ)为各网格点一个方向下的定值,因此视觉舒适性综合性描述指标CVC亦为瞬时值。后期工具开发应用中可通过Ev、Eh累积运算结果获得动态光环境指标,如UDI、sDA等,也可获得基于全年光环境的动态CVC指标,更利于指导建筑早期阶段的设计。

2 基于神经网络的自然采光办公空间视觉舒适度预测方法

由于现有的单因素或单类型因素评价指标不足以作为舒适度的判定指标,而获得一个综合性的光环境舒适度预测工具,需要整合多个因素,获得一个综合性评价指标与使用者主观舒适度感知之间的关系。

本文基于上一节的综合性视觉舒适度评价指标,提出基于神经网络的综合性视觉舒适度预测方法(见图1):

第一步,设计并开展综合性视觉舒适度实验,利用照度仪测量、相机拍摄并填写问卷。第二步,统计水平、垂直照度,实地测量数据;根据图像计算获得视野质量值;统计调研问卷,获得办公空间使用者综合性舒适度数据。第三步,建立神经网络模型并训练及验证、调试。第四步,获得综合性视觉舒适度预测模型,用于指导设计实践。

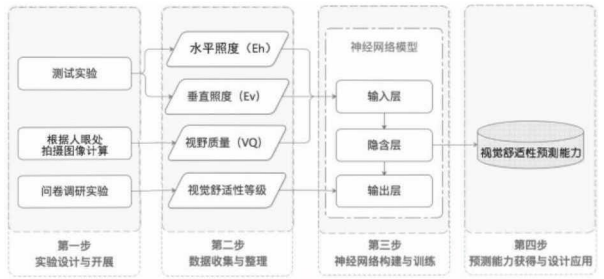


图1 基于神经网络的办公空间视觉舒适度预测方法框架
(图片来源:作者自绘)

3 综合性视觉舒适度实验

3.1 实验设计与开展

实验在爱因霍芬理工大学实验室5月期间进行。

房间5.5 m宽,5.1 m进深,空间高2.7 m。西侧采光(窗洞尺寸5 m×1.35 m)。实验室共布置4套办公桌椅,桌面放置显示器、键盘、鼠标(见图2)。三个实验位置椅子后放置测量及拍摄设备套组(照度仪、鱼眼相机)固定于三脚架上,相机镜头及照度仪感光区距地面1.2 m。实验中受试者以随机顺序坐在A、B、C三个位置,如图2所示,每个位置上进行2分钟的纸质办公及2分钟的电脑办公行为,完成后填写该位置当时的光环境的舒适度评价问卷,每完成一组测试休息1分钟。整个舒适度实验是不干扰性测量,问卷基于使用者的主观舒适度感知。

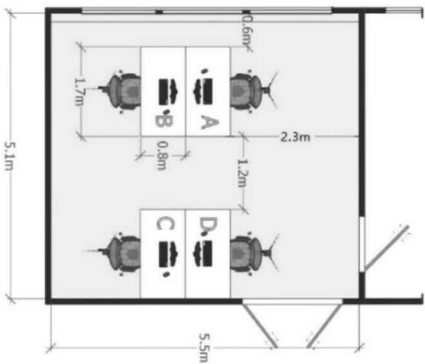


图2 综合性视觉舒适度实验室平面布置图
(图片来源:作者自绘)

3.2 实验数据与整理

人眼位置处配有鱼镜头的相机装置拍摄记录各位置180°广角视野照片,如图3所示,用于计算此位置视野质量(VQ)数值。利用公式(1)可得实验中A、B、C三个位置下的视野质量(VQ)值,如表1所示。



图3 实验测量设备布置
(图片来源:作者自绘)

表 1 各实验位置视野质量计算(来源:作者自绘)

位置	V_{content}	V_{access}	V_{clarity}	VQ
A	1	1	1	1
B	0.75	1	1	0.75
C	0.75	0.5	1	0.375

综合性舒适度问卷评价分 7 个等级对应 1~7 分(很不舒适、不舒适、不太舒适、一般、较舒适、舒适、很舒适)。实验室窗外视野情况如图 4 所示,A、B、C 三个实验位置处视野情况如图 5 所示。



图 4 实验室窗外视野情况

(图片来源:作者自绘)



图 5 A、B、C 三个实验位置处视野情况

(图片来源:作者自绘)

4 综合性视觉舒适度神经网络预测模型

4.1 神经网络算法选取

4.1.1 BP 神经网络

BP 神经网络作为使用范围最广泛的神经网络之一,算法中进行信号的正向传播与误差的反向传播,其对复杂非线性函数具有良好的训练与预测效果。整体结构可分为输入层、隐含层、输出层三部分。隐含层神经元个数根据公式(3)确定,其中 y 代表隐含层节点个数, n 为输入层节点个数, m 为输出层节点个数, a 为 1 到 10 的整数。

$$y = \sqrt{n+m} + a \quad (3)$$

实际操作中 a 需要反复实验对比找到较适合的值,本研究中 a 取 6,即隐含层节点数为 8 时预测模型预测准确度最高,即形成 3-8-1 的神经网络结构,如图 6 所示。

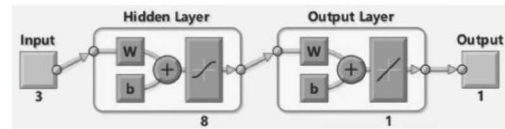


图 6 单隐含层 BP 神经网络预测模型结构图

(图片来源:作者自绘)

尝试双隐含层 BP 神经网络,设置如图 7 所示的 3-8-15-1 神经网络结构,进行相同数据集的训练与预测,其结果并没有 3-8-1 结构的神经网络效果好。

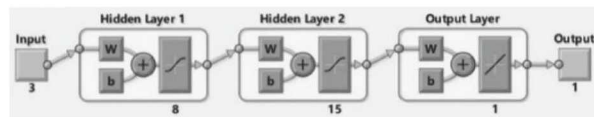


图 7 双隐含层 BP 神经网络预测模型结构图

(图片来源:作者自绘)

4.1.2 PSO-BP 神经网络

粒子群算法,也称粒子群优化算法(particle swarm optimization,PSO),是一种仿生算法,由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出,算法流程如图 8 所示。PSO 操作性好,需要调节的参数少,可优化权重和阈值选取,能够减少过度运算并提高整体模型预测准确度。

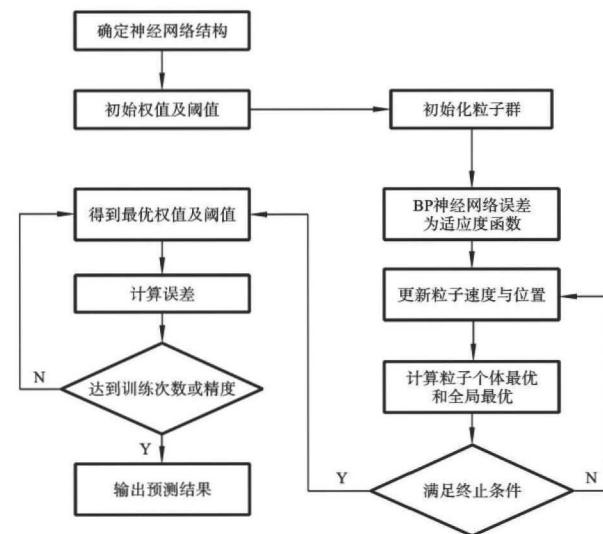


图 8 PSO-BP 神经网络预测模型算法流程图

(图片来源:作者自绘)

4.2 预测模型的训练与评价

选取应用的 BP 神经网络,结构如图 9 所示。神经网络训练参数中最大迭代次数为 1000、学习率 0.01、误差范围目标 0.001。PSO 优化的 BP 神经网络模型中参数设定:种群规模为 20,最大迭代次数为 100,学习因子 c1、c2 设定为 2,惯性权重为 1。

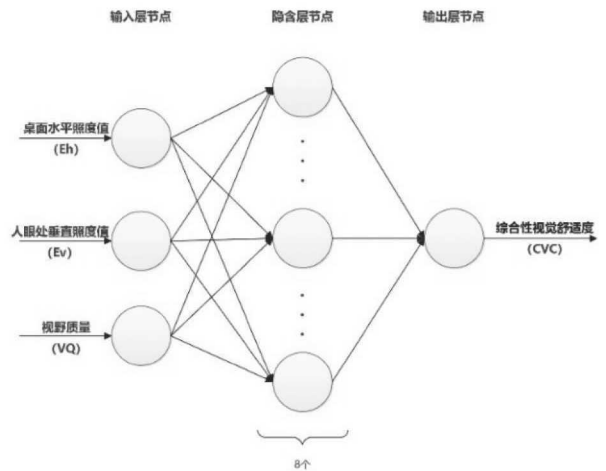


图 9 BP 神经网络预测模型结构示意图
(图片来源:作者自绘)

300 组数据中 270 组为训练组,30 为验证组,数据模式如表 2 所示。各输入、输出数据具有差异,运算时进行归一化处理,统一为[0,1]之间数据。BP 神经网络与 PSO-BP 神经网络模型预测验证组结果对比如图 10 所示,预测误差如表 3 所示,可以看出 PSO-BP 模型具有更好的预测效果。

表 2 输入与输出数据节选(来源:作者自绘)				
编号	Eh(lx)	Ev(lx)	VQ	CVC
1	1151.4	548	1	5
2	1117.2	581	0.75	6
3	228	205	0.375	4
4	2166	2075	1	3
5	860.7	900	0.375	6
...

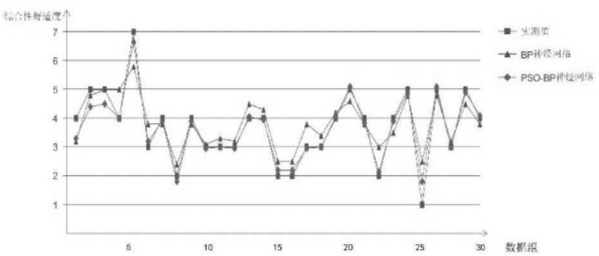


图 10 模型预测验证组结果对比图
(图片来源:作者自绘)

表 3 两个神经网络模型预测误差(来源:作者自绘)

模型	BP 神经网络	PSO-BP 神经网络
MAE	0.0338	0.0299
MAXAE	0.08	0.07
RMSE	0.0360	0.0345

5 结语

本文提出了一种基于神经网络的视觉舒适度预测模型。研究根据光环境质量方面研究成果,整合水平照度、垂直照度、视野质量三个主要光环境参数构成视觉舒适度综合性描述指标 CVC。研究采用实测实验获得被测试者所处办公空间的垂直与水平照度值,通过视觉舒适度问卷调研获取所处环境视觉舒适度评价价值 CVC;并应用深度神经网络探索挖掘上述三方面光环境参数与视觉舒适度评价指标之间的数据关系,从而实现开放办公建筑视觉舒适度预测的目标。未来该模型与模拟软件相结合可实现设计阶段的办公建筑视觉舒适度预测目标。该模型能够更好地辅助建筑师进行方案创作,完成平面设计与空间布置。希望本研究能为建筑光环境研究、计算性设计理论方法及其技术工具开发等相关领域提供有益的启示和参考。

参考文献

[1] VEITCH J A, NEWSHAM G R. Lighting quality and energy-efficiency effects on task performance, mood, health, satisfaction, and comfort[J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 2013, 27(1). B.
[2] CAJOCHEN C. Alerting effects of light[J]. Sleep Medicine Reviews, 2007, 11(6): 453-464.

- [3] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告2020[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(02): 1-6.
- [4] MARDALJEVIC J, HESCHONG L, LEE E. Daylight metrics and energy savings[J]. *Lighting Research & Technology*, 2011, 41(3): 261-283.
- [5] ARIES M, VEITCH J A, NEWSHAM G R. Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2010, 30(4): 533-541.
- [6] KUBBA S. LEED v4 practices, certification, and accreditation handbook: second edition [M]. Cambridge: Elsevier, 2015.
- [7] HELLINGA H, HORDIJK T. The D&V analysis method: A method for the analysis of daylight access and view quality[J]. *Building & Environment*, 2014, 79: 101-114.
- [8] KO W H, KENT M G, SCHIAVON S, et al. A window view quality assessment framework[J]. *LEUKOS*. 2021.
- [9] MARTELL M, CASTILLA M, RODRÍGUEZ F, et al. An indoor illuminance prediction model based on neural networks for visual comfort and energy efficiency optimization purposes [C]// *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*. Springer, Cham, 2019.
- [10] XUE P, MAK C M, CHEUNG H D. The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: A questionnaire survey[J]. *Building and Environment*, 2014, 81(nov.): 51-59.
- [11] 刘刚, 刘梦柳, 雒琛, 等. 基于评价实验的办公室光环境舒适度研究[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(6): 48-51, 69.