

# 高动态范围图像在建筑空间非 视觉光环境中的运用

李 鹏, 甘 甜

(武汉大学城市设计学院建筑系, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 高动态范围图像(HDRI)图学技术是利用照相机拍摄不同程度曝光量的照片以获得最全光亮度信息的技术。非视觉效应影响人体的生理节律, 对人类生理和心理健康均起着非常重要的作用。工业遗产建筑作为特殊建筑类型, 如何准确有效的评估建筑空间是否符合非视觉光环境健康值以及如何改造建筑空间形成更好的光环境具有一定的研究意义。以武汉市平和打包厂内某建筑作为研究对象, 利用 HDRI 图学技术对建筑空间内的非视觉光环境进行评估, 结合仪器实地测量验证光环境问题, 并提出相应的建筑空间改造策略。结果证明 HDRI 图学技术是一种有效的非视觉光环境测量方法, 可借此方法研究不同因素对建筑内非视觉健康的影响, 为后续建筑设计及决策提供依据。

**关 键 词:** 高动态范围图像; 非视觉效应; 健康光环境; 建筑空间

中图分类号: TP 113.2

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2020050771

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2020)05-0771-08

## Application of high dynamic range images in the non-visual light environment of architectural space

LI Kun, GAN Tian

(School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

**Abstract:** High dynamic range image (HDRI) graphics is a technique that uses cameras to take photos of a variety of exposure to obtain the maximum brightness. Non-visual effects affect human biorhythm and play a very important role in human physical and mental health. As a special type of building, it is of significance to carry out research on how to accurately and effectively determine whether the building space of the industrial heritage building meets the health value of non-visual light environment and how to transform the building space to shape a better light environment. A building in Pinghe packing factory in Wuhan was taken as the research object, and the non-visual light environment in the

收稿日期: 2020-02-14; 定稿日期: 2020-06-03

Received: 14 February, 2020; Finalized: 3 June, 2020

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2013FY112500); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208389)

Foundation items: Basic Work of Science and Technology of China (2013FY112500); The National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation Project (51208389)

第一作者: 李 鹏(1978-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 硕士生导师。主要研究方向为绿色建筑、城市热环境、数字图像处理。

E-mail: kunli@whu.edu.cn

First author: LI Kun(1978-), male, associate professor, Ph.D. His main research interests cover green building, urban thermal environment and digital image processing. E-mail: kunli@whu.edu.cn

通信作者: 甘 甜(1990-), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生。主要研究方向为绿色建筑、城市热环境、数字图像处理。E-mail: gantian@whu.edu.cn

Corresponding author: GAN Tian (1990-), female, master student. Her main research interests cover green building, urban thermal environment and digital image processing. E-mail: gantian@whu.edu.cn

building space was evaluated by the HDRI graphics. The on-site measurement and verification of the light environment was conducted with instruments and the corresponding reconstruction strategy of the building space was put forward. The results show that HDRI mapping technology is an effective method of non-visual light environment measurement, which can be used to study the influence of different factors on non-visual health in buildings and provide basis for future architectural design and decision-making.

**Keywords:** high dynamic range image; nonvisual effect; healthy light environment; building space

高动态范围图像(high dynamic range image, HDRI)图学技术是美国南加州大学 Paul Debevec 教授提出的,通过照相机捕捉实现从黑暗阴影到高亮光源的更大动态范围图像<sup>[1]</sup>。非视觉效应是如今光环境研究的重要方向,其影响人体的生理节律,对人类视觉、心理及生理产生不可忽视的作用<sup>[2]</sup>。

作为独特的工业遗产建筑类型,在成功完成从废弃拆除到保留改造的转型后,其室内非视觉天然光环境研究是非常有价值的。传统的非视觉研究方式多为完成设计建造后再通过实地测量和软件模拟来对建筑空间的光环境进行分析,但耗时长且操作过程复杂,人力物力昂贵。以如何运用 HDRI 图学技术对工业遗产建筑内办公空间非视觉天然光环境进行评估,并改造建筑内空间作为研究内容,最终验证了 HDRI 图学技术能快速评估和量化建筑内空间的非视觉光环境,并提出最适合人类非视觉健康的办公空间,为后续建筑设计及决策提供依据。

## 1 概述

### 1.1 非视觉光环境简述

人类视觉受视网膜上第三类感光细胞的影响,对人体的神经分泌行为产生明显作用,称为非视觉效应<sup>[3]</sup>。选择工业遗产建筑平和打包厂的办公场所作为非视觉天然光环境研究选址,其原因在于厂房改造类办公空间具有一定独特性;而办公空间是人类在日常生活中停留时间较长的区域。因此综合评定以工业遗产类建筑的办公场所作为非视觉光环境的研究对象具有一定意义。研究表明日间人眼处需接受 1 000~2 000 Lx 以上的光环境暴露水平来满足非视觉效应需求<sup>[4]</sup>。以人眼处照度值进行评估,蒋靖才和吴蔚<sup>[5]</sup>认为建筑的各朝向达到非视觉效应下的光环境标准照度值不同,东、西方位为 210 Lx,南方位为 190 Lx,北方位为 170 Lx。本文以这些数据为评估值来检测厂房内各测点的非视觉光环境是否符合标准,并希望得到该建筑最优的

办公空间设计方式。

### 1.2 研究对象

不同于其他拆除的工业遗产建筑旧址,平和打包厂选择保留改造。该厂由 6 个单元组成,为一级工业遗产<sup>[6]</sup>。通过对类似工业遗产旧址的调查发现,多数案例在完成室内改造后,办公区非视觉光环境并不理想。在视觉感知良好以外,如何使室内办公空间符合人体非视觉效应的健康标准也需要进一步的研究。根据对平和打包厂实地考察发现,改造后的建筑空间保留较完整,多数空间改为办公功能。另外建筑中存在未经室内装修的空地,可作为设计改造预留空间。

### 1.3 工作流程介绍

以往获取天然采光数据多以仪器测量为主要手段,随着 HDRI 图学技术的发展,更多建筑师将此运用到专业光环境分析中<sup>[7]</sup>。如王嘉亮<sup>[8]</sup>利用 HDRI 图学技术对 2 组博物馆建筑进行了光环境分析。HDRI 图学技术是利用数码相机对同一场景进行逐时拍摄,得到不同曝光程度的低动态范围图像(low dynamic range image, LDRI),再利用软件将 LDRI 图像合成为记录该场景亮度数据的 HDRI 图像<sup>[9]</sup>。因此尝试利用 HDRI 图学技术评估建筑内非视觉光环境,对建筑内所选取的 6 个不同测点进行逐时拍摄,得到 HDRI 图像后再综合分析各测点是否符合非视觉光环境的标准。为了使结果更准确,将仪器实测与 HDRI 图学技术结合进行数据误差校正如图 1 所示<sup>[8]</sup>。所用工具软件见表 1。

完成上述工作后,将得到具体数据来为该厂房未经过改造的内部空间进行评估,为形成更好的非视觉光环境提供建议和适应性分析。

## 2 调研及数据测量分析

### 2.1 实地考察

平和打包厂的办公区域基本分布在 2 至 4 层,

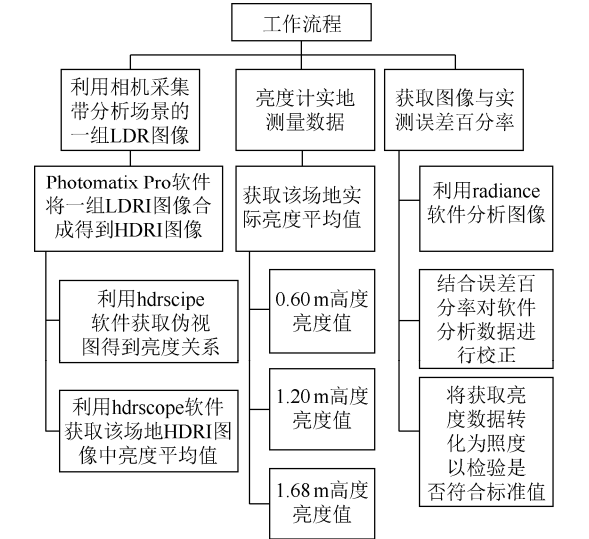


图 1  工作流程图  
Fig. 1  Work flow diagram

表 1  工具软件列表

| 测量工具                     |                  | 软件工具                    |                                   |
|--------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 佳能 EOS77D<br>(18-135 镜头) | 调整不同曝光量获取 LDR 照片 | Photomatix Pro 6.0      | 一款专业 HDR 处理软件 <sup>[10]</sup>     |
| 云腾 VT-180 单反三脚架          | 固定相机获取相同定位的照片    | hdrscope                | 光环境分析和 HDR 图像处理软件 <sup>[11]</sup> |
| XYL-III 全数字亮度计           | 获取精确亮度信息进行数据校正   | radiance-Image Analyzer | 建筑采光和照明模拟 <sup>[12]</sup>         |

部分空间已有单位入驻并完成室内改造，特选取平和打包厂 C 区 2 层未经内部改造的原始空间作为研究对象。该建筑西北侧为有钟塔的 A 区，外部光线有一定遮挡；北侧及东北侧均为低层和多层老式建筑，采光较好，南侧无开窗。在此基础上，对建筑内部光环境有影响的因素进行了分析：装修层面上，内部墙面以白色涂料粉刷(反射系数 0.84)和红砖墙(反射系数 0.15)为主，天花设备层外露并外包铝皮(反射系数 0.80)，水泥自流平地面(反射系数 0.15)，中部交通空间为黑框玻璃墙隔断(玻璃框反射系数 0.08，玻璃反射系数 0.80)；门窗层面上，黑色钢框玻璃窗(玻璃框反射系数 0.08，玻璃反射系数 0.80)，其长宽分别为 1.8 m×1.5 m、1.8 m×2.5 m、1.85 m×2.5 m 3 种尺寸，保留一扇原有黑色吊滑铁铸门和新增一扇黑色设备门(反射系数为 0.15)，其余为黑色钢框玻璃门，如图 2 所示。

通过调查平和打包厂其他已改造空间，并分析内部工作人员行为轨迹，主要办公时间上午 9:00 至下午 6:00，人的基本工作状态为静坐；午休时间 13:00 至 14:00 多为平躺休息；下午休息 15:00 至 15:30，工作人员起身闲谈保持站立状态。



图 2  室内外光环境影响因素图  
Fig. 2  Influencing factors of indoor and outdoor light environment diagram

2.2 HDRI 图学技术运用检测与分析

2.2.1 测点选取

特选取建筑内东、南、西、北以及东南向不同空间共计 6 个区域(测点 1~6 见表 2)进行全天候实地光环境测量。

表 2  场地内测点选取表  
Table 2  Site measurement points selection

| a.测点     | b.测点     | c.测点     | d.测点     | e.测点         | f.测点      |
|----------|----------|----------|----------|--------------|-----------|
| 1.东向端头空间 | 2.南向端头空间 | 3.西向中部空间 | 4.北向端头空间 | 5.东南向紧邻楼梯间空间 | 6.东南向端头空间 |
|          |          |          |          |              |           |

2.2.2 HDRI 图像和实测数据获取及比对

为获取更精确的非视觉光环境亮度信息，选取 2019 年 9 月 29 日和 9 月 30 日两个全晴天以及 10 月 7 日和 10 月 8 日两个全阴天进行现场测点 1~6 的 HDRI 图像拍摄及亮度计仪器实测。拍摄和测量为相同测点和时间，上午 9:30 至下午 17:30 共 8 h，每隔 1 h 记录图像和勘测数据。

因为要研究非视觉光环境效应，所以现场亮度计测量数据采集选取人眼水平高度为测量点，同时考虑不同时间段人群的活动状态。为获取更准确的垂直测点亮度平均值，选取 1.68 m、1.20 m、0.60 m 3 个不同视野高度对测点进行数据测量。HDRI 图像获取采用佳能相机拍摄得到各测点的逐时图像，全天测量 8 h，每小时每测点拍 7 张不同曝光量 LDR 图像，6 个测点，两个晴天和两个阴天，共计 1 176 张。利用 Photomatix Pro 软件按照不同测点和时间

分别合并 LDRI 图像, 最终得到两个全晴天和两个全阴天共计 168 张 HDRI 图像。再通过 Hdrscope 软件分别对 168 张 HDRI 图像进行分析, 得到对应的伪彩色图像及亮度百分比。因为图片数量大, 所以仅选取其中一个时间段为例, 图 3 为 9 月 29 日 9:30 不同测点的 HDRI 图像合成过程图、伪彩色图及亮度百分比示例图。

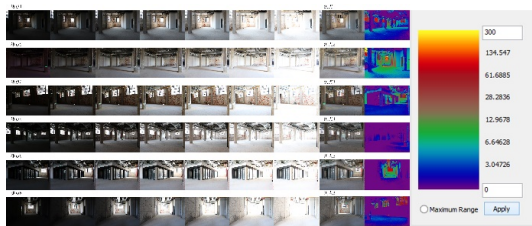


图 3 场地测点 HDRI 图像合成和伪视图及亮度百分比图

Fig. 3 HDRI image composition and pseudo-view and brightness percentage chart in site measurement points

获得 HDRI 图像和对应伪彩色图之后, 利用 Hdrscope 和 Radiance-Image Analyzer 软件分析图像, 得出测点 1~6 分别在全晴天和全阴天下不同时间的光亮度平均值, 图 4 为 9 月 29 日 9:30 测点 1 软件中 HDRI 图像亮度数据结果示意图。

计算出相应的亮度计测量数据平均值, 将实测

亮度数据与图像亮度信息进行比对, 得到两者的对比折线图(图 5)。

从图 5 中发现 HDRI 图像和实测亮度整体趋势走向基本一致, 亮度变化范围为  $0.10 \sim 101.57 \text{ cd/m}^2$ , 统计后的平均误差率全晴天为 12.71%, 全阴天为 11.43%, 利用误差值进行校正后的 HDRI 图像亮度信息更精准。由此可见运用 HDRI 图像检测建筑空间中非视觉光环境的方法具有可行性, 而且简单方便, 减少了大量仪器测量时间和成本。

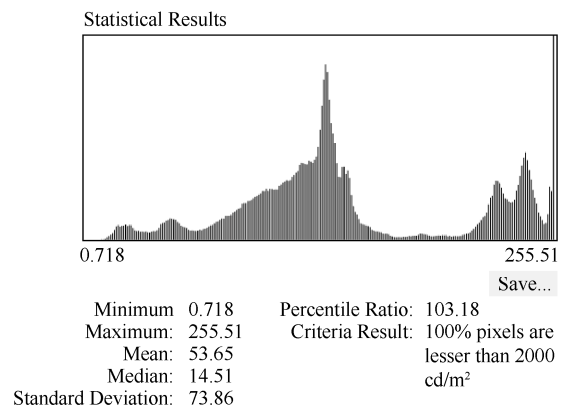


图 4 Hdrscope 软件亮度计算图

Fig. 4 Brightness calculation diagram made by Hdrscope software

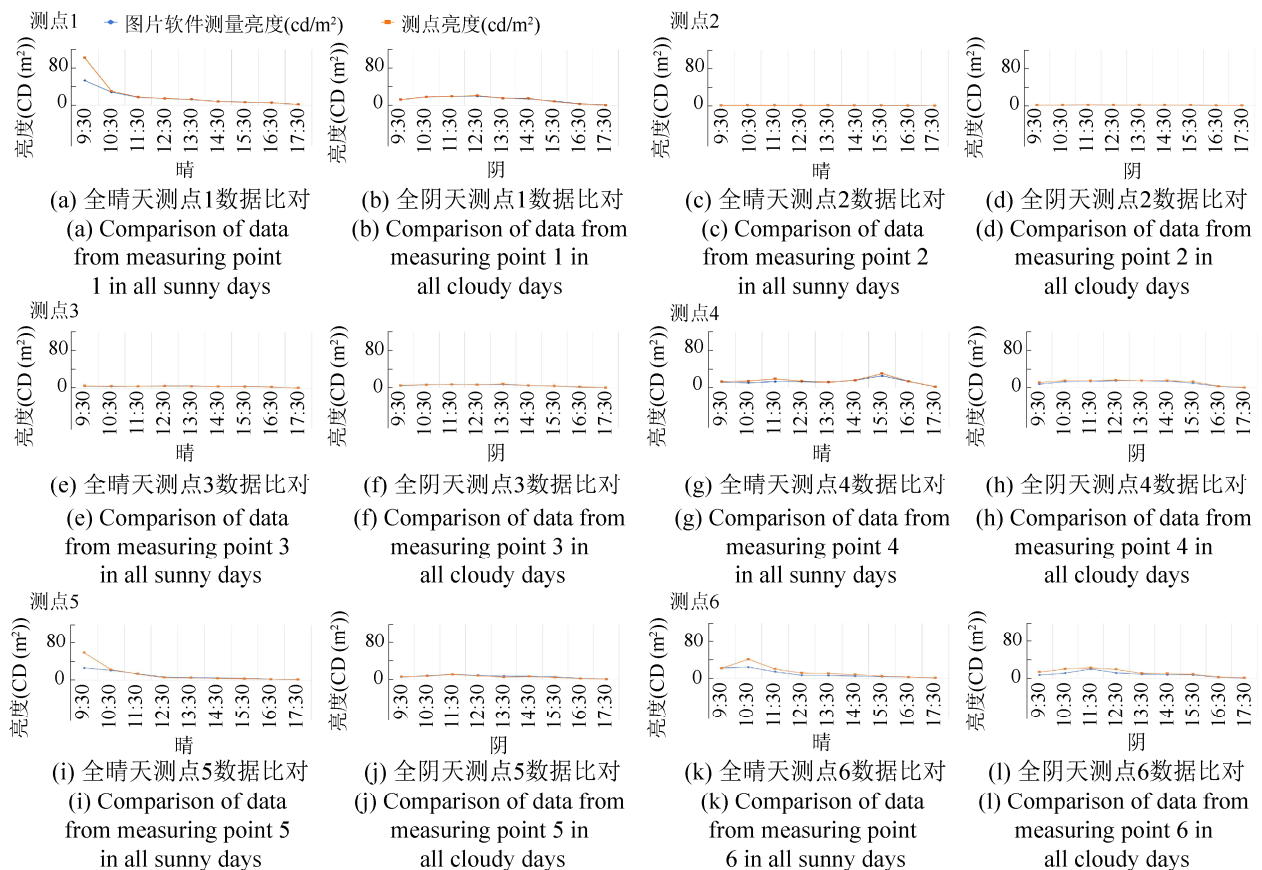


图 5 HDRI 图像与实测亮度对比折线图

Fig. 5 Contrast line diagram of HDRI image and measured brightness

3 数据分析

3.1 非视觉光环境分析

将测点 1~6 所对应的平均亮度值与 HDRI 图像及误差率结合获取不同测点的光源亮度值，再利用下式将光源亮度转换为相应照度<sup>[13]</sup>，即

$$E = La\Omega\cos i \tag{1}$$

其中， $La$  为发光表面的亮度； $\Omega\cos i$  为发光表面亮度与受光点所形成的夹角投影，相乘后得到对应照度值  $E$ 。

分析转换结果是否符合上述的非视觉光环境健康标准值，相关结果见表 3。

表 3 照度值达标分析表(Lx)  
Table 3 Illumination standard (Lx) analysis

| 全晴天  | 测点 1          | 测点 2         | 测点 3          | 测点 4         | 测点 5          | 测点 6          |
|------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 标准值  | 210           | 210          | 190           | 170          | 210           | 210           |
| 站立状态 | 206.942 (未达标) | 32.648 (未达标) | 88.433 (未达标)  | 205.842 (达标) | 135.441 (未达标) | 160.746 (未达标) |
| 静坐状态 | 220.06 (达标)   | 33.052 (未达标) | 94.7 (未达标)    | 219.439 (达标) | 154.688 (未达标) | 183.59 (未达标)  |
| 平躺状态 | 233.914 (达标)  | 33.415 (未达标) | 101.677 (未达标) | 233.95 (达标)  | 180.28 (未达标)  | 213.964 (达标)  |

| 全阴天  | 测点 1          | 测点 2         | 测点 3          | 测点 4         | 测点 5          | 测点 6          |
|------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 标准值  | 210           | 210          | 190           | 170          | 210           | 210           |
| 站立状态 | 197.887 (未达标) | 39.713 (未达标) | 107.647 (未达标) | 211.787 (达标) | 136.655 (未达标) | 111.826 (未达标) |
| 静坐状态 | 210.43 (达标)   | 40.204 (未达标) | 115.276 (未达标) | 225.776 (达标) | 156.074 (未达标) | 127.718 (未达标) |
| 平躺状态 | 223.678 (达标)  | 40.645 (未达标) | 123.768 (未达标) | 240.705 (达标) | 181.896 (未达标) | 148.848 (未达标) |

数据显示测点 4 的非视觉光环境达标率最高。测点 4 位于该建筑的北向端头空间，开窗面积充足，周边为低层老住宅商业，受光条件好，站立、静坐和平躺状态均达标，平均达标率为 31.13%。测点 1 位于东向端头空间，开窗面积小于测点 4，周边同样为低层和多层建筑，采光条件较好，平均达标率为 3.82%，站立状态在全晴天和全阴天下均不达标，静坐和平躺的状态符合标准。测点 5 和 6 位于东南向端头空间，开窗面积较小，其中测点 5 紧邻楼梯间，周边有厂内其他区域建筑的遮挡，采光条件较差，只有测点 6 达标，平均达标率为 0.32%，办公静坐状态不达标。测点 2 位于南向端头空间，场地内无直接光源，因此不达标。测点 3 位于西向中部空间，开窗面积虽充足但周边有钟塔和厂内建筑遮挡，并受西晒影响，采光条件较差不达标。

且测点 2 由于南向方位无开窗及局部周边建筑遮挡导致室内多数空间非视觉光环境不达标，因此南向方位受光量对室内整体非视觉光环境具有一定影响。其次，平躺较静坐和站立状态的非视觉光环境更优，但平躺不属于办公活动，且睡眠休息状态无需较高照度。根据上述分析，初步总结得出非视觉光环境最好区域为测点 4 所在区域，可以作为主要办公空间。测点 1 区域光环境达标率紧次于测点 4，因此作为次要办公空间。而测点 6 达标率低，其余测点未达标，因此均不建议作为办公区域，可局部作为休息和其他功能区域。

3.2 影响因素分析

每个测点接受阳光直射亮度不同为光环境主要影响因素，此外其他因素也会造成不同程度的影响。为得到更准确的场地光环境特点，需要进一步分析各种因素对光环境的影响，为后续建筑空间改造策略提供依据。

3.2.1 光气候条件影响

全晴天和全阴天 2 种光气候的室内非视觉光环境整体趋势统一，全晴天较全阴天更好，但全阴天更趋稳定(图 6)。

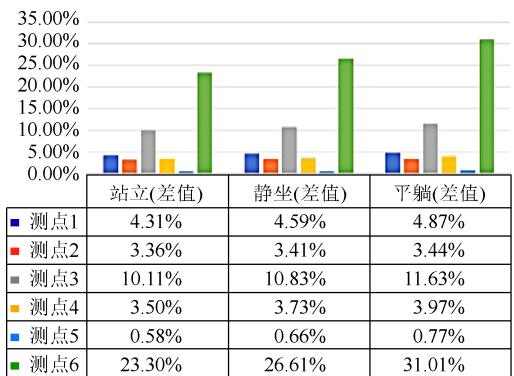


图 6 各测点全晴天与全阴天不同活动状态差值对比图  
Fig. 6 Difference comparison chart of activity status between all sunny days and all cloudy days at each measuring point

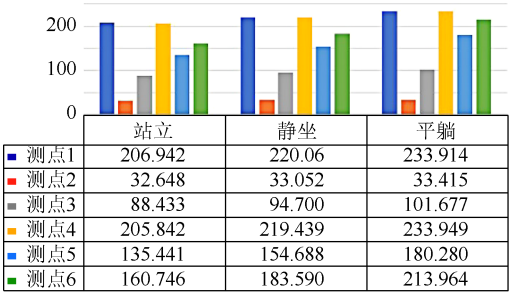
通过数据分析发现不同方位下站立、静坐、平躺 3 种状态在全晴天和全阴天下与标准值的偏差比最大为测点 6，平均偏差值高达 26.97%，其次为测

点 3, 平均偏差值为 10.86%。结合非视觉光环境达标率分析, 测点 6 静坐状态未达标, 加上不同光气候条件下动态差值过大, 因此不适合作为办公区域, 不利于人体非视觉健康; 测点 3 非视觉标准检验未达标, 因此也不作为办公区域。从整体数据看, 差值最小为测点 5, 平均偏差值仅 0.67%, 但该测点并未达标, 可考虑将作为休闲或辅助功能区域。

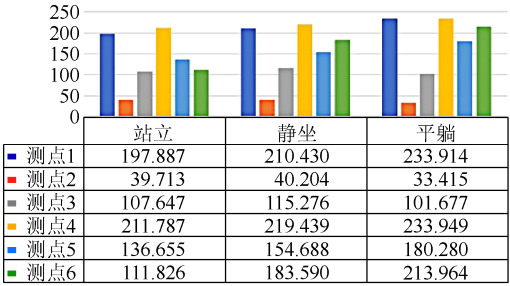
通过分析可知, 光气候条件对室内非视觉光环境具有一定影响, 在后续改造中不考虑将测点 3、测点 5、测点 6 作为办公空间。

3.2.2 采光口方位影响

结合各测点的平均达标率和不同方位的数据结果比对发现, 位于东方位的测点 1 和北方位的测点 4 非视觉光环境最佳。通过数据比对, 全晴天下, 测点 1 站立状态较测点 4 高 0.53%, 静坐状态较测点 4 高 0.28%, 平躺状态较测点 4 低 0.01%; 全阴天环境下, 测点 4 站立状态较测点 1 高 6.56%, 静坐状态较测点 1 高 6.8%, 平躺状态较测点 1 高 7.07%。对比发现测点 4 北向方位的非视觉光环境最优, 最适宜作为办公空间。测点 1 东向方位非视觉光环境虽低于测点 4, 但数据结果仍符合标准, 可作为次要办公区域(图 7)。



(a) 全晴天不同方位非视觉光环境对比图  
(a) Comparison chart of non-visual light environments in different directions on all sunny days



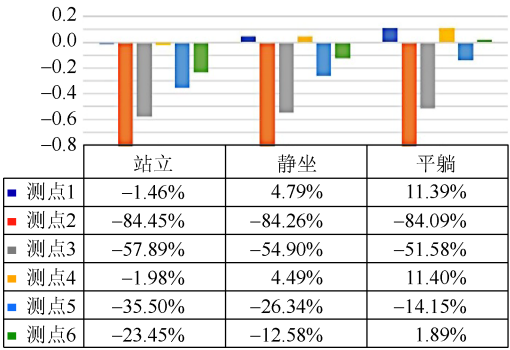
(b) 全阴天不同方位非视觉光环境对比图  
(b) Comparison chart of non-visual light environments in different directions on all cloudy days

图 7 不同方位非视觉光环境对比图  
Fig. 7 Comparison chart of non-visual light environment in different directions

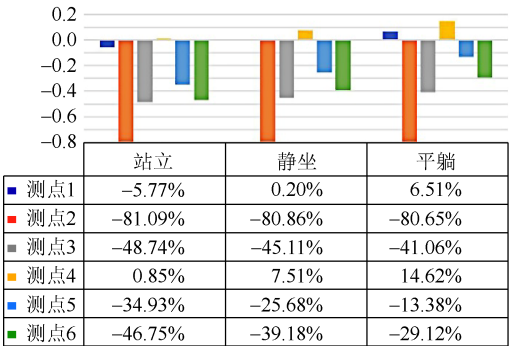
综上, 在建筑办公空间改造中可将办公区域布置在测点 4 北向及测点 1 东向区域。

3.2.3 不同活动状态影响

观察发现 6 个方位测点均为平躺状态 0.60 m 高度的非视觉光环境最佳, 其次为静坐状态 1.20 m 高度, 最后为站立状态 1.68 m 高度, 非视觉光环境条件会随着高度的下降而逐渐提高。另得到测点 1 和测点 4 非视觉光环境符合条件, 其中测点 4 站立状态下较测点 1 高 3.05%, 静坐状态下测点 4 较测点 1 高 3.51%, 平躺状态下测点 4 较测点 1 高 4.06%。因为大多数办公为静坐状态, 为了提高非视觉光环境可适当抬高窗户不超过 0.50 m, 以获得更高工作面及人眼视觉的照度。再观察测点 1 和测点 4 静坐状态下的非视觉光环境健康值, 测点 4 和测点 1 平均达标率分别为 6.0%和 2.5%, 如图 8 所示。



(a) 全晴天不同活动状态非视觉光环境达标率对比图  
(a) Comparison chart of non-visual light environment compliance rates with different activity states on all sunny days



(b) 全阴天不同活动状态非视觉光环境达标率对比图  
(b) Comparison chart of the compliance rate of non-visual light environment in different activity states on all cloudy days

图 8 不同活动状态非视觉光环境达标率对比图  
Fig. 8 Comparison chart of non-visual light environment compliance rate in different activity states

因此，最终分析得出静坐状态下测点 4 距离光源窗口 0.80~1.20 m 位置且办公桌面高 0.75 m、座椅坐面高 0.45 m 是最利于非视觉健康的办公空间。

3.2.4  采光门窗和室内材质反射系数影响

影响各测点内环境的主要因素，见表 4。

表 4  影响因素分析表  
Table 4  Influencing factors analysis

| 测点   | 窗墙比(%) | 窗地比(%) | 室内主要材料                                      |
|------|--------|--------|---------------------------------------------|
| 测点 1 | 9.51   | 19.35  | 黑框玻璃窗、红灰色砖墙、白墙、设备层外包铝皮、水泥自流平地面              |
| 测点 2 | 无主要开窗  | 无主要开窗  | 红灰色砖墙、白墙、设备层外包铝皮、水泥自流平地面                    |
| 测点 3 | 15.66  | 18.04  | 黑框玻璃窗、红灰色砖墙、白墙、设备层外包铝皮、水泥自流平地面              |
| 测点 4 | 14.12  | 23.43  | 黑框玻璃窗、红灰色砖墙、白墙、设备层外包铝皮、水泥自流平地面              |
| 测点 5 | 6.44   | 18.97  | 黑框玻璃窗及落地玻璃隔断墙、黑色铁门、红灰色砖墙、白墙、设备层外包铝皮、水泥自流平地面 |
| 测点 6 | 6.44   | 18.97  | 黑框玻璃窗、白墙、红灰色砖墙、设备层外包铝皮、水泥自流平地面              |

在室内材质反射系数影响分析中，测点 5 和 6 在相同方位且面积、窗墙比、窗地比一致的情况下，测点 5 内紧邻落地玻璃隔断墙和黑色铁门，测点 6 内主要为白墙，建筑材料的反射作用导致 2 点在相同环境下数据结果相差很大，测点 6 平均标准偏差率较测点 5 高 26.3%，在全晴天平躺状态符合非视觉光环境标准，而测点 5 均未达标。

由此可见，室内加大窗地比并采用浅色高反射材质将更利于非视觉天然光环境。

3.3  建筑空间改造建议

图 9 为研究案例的初步建筑内空间功能分区示意图。

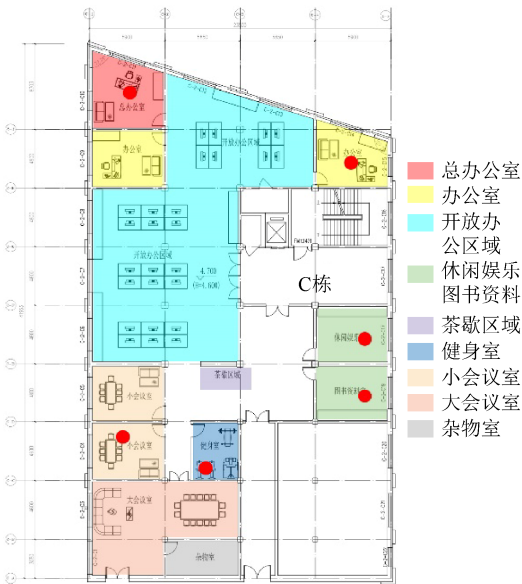


图 9  功能分区示意图(红色圆点为测量点)  
Fig.9  Functional zoning schematic diagram  
(red dots are measurement points)

非视觉办公环境最佳空间为测点 4 所在区域，其次为测点 1。因此，基本功能分区为测点 4 隔断布置为主办公区域，采用白色涂料进行室内墙体隔

断；因测点 1 数据值低于测点 4，因此作为次要办公区域，同样采用白色涂料进行室内墙体隔断；将测点 4 和 1 的连接空间作为开放式办公区，用于普通员工办公，不仅减少墙体隔断对非视觉光环境的不良影响，也增加同事之间的工作生活交流。最利于非视觉健康的布置方法为工作人员距离光源窗口 0.80~1.20 m，且办公桌面高 0.75 m、座椅坐面高 0.45 m，可将办公桌面垂直受光面，建议在办公区域中按照此距离及方位进行排布；测点 2 和 3 数据值不达标，为避免空间浪费将测点 2 作为健身娱乐辅助空间，测点 3 作为会议接待空间并划分成 2 间小会议接待室和 1 间大会议室，采用白色涂料或玻璃墙进行室内隔断；测点 5 和 6 只有部分达标，因此作为休憩娱乐及阅览资料辅助空间，可选取落地玻璃作为墙体隔断。

4  结  论

选择以工业遗产建筑案例为依托，探讨了运用 HDRI 图学技术对建筑空间中非视觉光环境进行评估并予以改造，以形成更好的光环境，对达到最佳建筑内办公空间提供相对合理建议。

(1) HDRI 图学技术对建筑空间设计和改造中非视觉天然光环境的评估起到很好的引导作用。利用高动态图像可获取建筑内空间的非视觉天然光环境情况，减少以往实地测量的工作流程和时间及人力物力的消耗，可以更有效地应用于建筑空间办公环境设计中。

(2) 在研究案例中，南向方位无开窗导致整体非视觉光环境达标率低，因此南向方位受光量会影响室内整体达标率，应注重南向开窗面积和窗地比。在此案例中为了最大限度满足人体非视觉标

准,设计测点4北向端头空间作为主办公区域,测点1东向端头空间作为次办公区域,采取开放式办公,减少光源阻挡,利用白色涂料进行室内墙体隔断粉刷,其他区域留作附属功能用房。

(3) 场地内非视觉光环境达标空间中测点4较测点1平均达标率高27.31%。其中全阴天非视觉光环境更趋平稳,较全晴天达标率高6.88%。作为主要办公活动静坐状态高出平均达标值1.285%,站立状态仅高0.14%。由于非视觉光环境与视觉垂直高度呈反比,结合人体办公工程学,最后总结得到静坐状态(座椅坐面高0.45 m)下,最佳的非视觉光环境在测点4北向端头办公空间距离受光源0.80~1.20 m处、0.75 m高的办公工作面。

(4) 随着 HDRI 图学技术和非视觉光环境研究的深入,建筑内空间光环境的评估设计将更具科学性和可量化性。此次研究仅停留在设计建议阶段,后续可以更深入的研究。希望此次研究对将来在建筑空间设计改造中,如何获取良好的光环境提供思路。

## 参考文献

### References

- [1] 朱恩弘, 张红英, 吴亚东, 等. 单幅图像的高动态范围图像生成方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(10): 1713-1722.  
ZHU E H, ZHANG H Y, WU Y D, et al. Method of generating high dynamic range image from a single image[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(10): 1713-1722 (in Chinese).
- [2] 沈志豪, 徐蔚, 韩秋漪, 等. 非视觉生物效应及其光谱灵敏度的研究综述[J]. 光源与照明, 2017(1): 7-11.  
SHEN Z H, XU W, HAN Q Y, et al. A review of non-visual biological effects and their spectral sensitivity[J]. Lamps & Lighting, 2017(1): 7-11 (in Chinese).
- [3] 张敬学, 王宁利. 生物钟“看到”光的视觉基础: 内在光感受性视网膜神经节细胞[J]. 中华实验眼科杂志, 2018, 36(11): 879-882.  
ZHANG J X, WANG N L. The visual basis of the biological clock “sees” the light: intrinsically photosensitive retinal ganglion cells[J]. Chinese Journal of Experimental Ophthalmology, 2018, 36(11): 879-882 (in Chinese).
- [4] 蒋靖才. 南京地区医院建筑视觉与非视觉效应的天然采光研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.  
JIANG J C. Study on visual and non-visual effects of natural lighting in Nanjing district hospital[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018 (in Chinese).
- [5] 蒋靖才, 吴蔚. 采光照明非视觉效应的评价方法综述[J]. 照明工程学报, 2018, 29(3): 129-136, 140.  
JIANG J C, WU W. Evaluation method of non-visual effect of daylighting[J]. Journal of China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(3): 129-136, 140 (in Chinese).
- [6] 张斯, 齐蔚, 钟迅, 等. 文物建筑中工业遗产的加固和改造: 以武汉市平和打包厂加固改造工程为例[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 137-144.  
ZHANG S, QI W, ZHONG X, et al. Reinforcement and upgrading of the industrial heritage among the cultural relics: case study on the reinforcement project of Wuhan pinghe packing factory[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(1): 137-144 (in Chinese).
- [7] 王嘉亮. 高动态范围图像技术在建筑天然光设计中的应用[J]. 建筑学报, 2010(S2): 37-39.  
WANG J L. Application of high dynamic range photography for building daylighting design[J]. Architectural Journal, 2010(S2): 37-39 (in Chinese).
- [8] 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[J]. 照明工程学报, 2011, 22(5): 68-73.  
WANG J L. Application and evaluation of the HDR photography combined with camera for analyzing museum lighting environments[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(5): 68-73 (in Chinese).
- [9] MANTIUK R, KRAWCZYK G, MYSZKOWSKI K, et al. High dynamic range image and video compression - fidelity matching human visual performance[C]//2007 IEEE International Conference on Image Processing. New York: IEEE Press, 2007: I-9-I.
- [10] 刘宽新. 高动态范围图像大合成: 怎样使用 Photomatix 获得 HDR[J]. 中国摄影家, 2008(9): 88-90.  
LIU K X. Overview of the equipment for outdoor photography[J]. Photo China, 2008(9): 88-90 (in Chinese).
- [11] KUMARAGURUBARAN V, INANICI M. Hdrscope: high dynamic range image processing toolkit for lighting simulations and analysis[C]//Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association. Washington, DC: IEEE Computer Society Press, 2013: 3400-3407.
- [12] 李卓, 王洪珍. 浅谈 Radiance 在建筑光环境设计中的应用[J]. 光源与照明, 2016(1): 39-41.  
LI Z, WANG H Z. Brief discussion on radiance in building light environment design[J]. Lamps & Lighting, 2016(1): 39-41 (in Chinese).
- [13] 张欣, 胡国清. 照度 E 与亮度 L 的关系[J]. 工程建设与设计, 2009(2): 70-71.  
ZHANG X, HU G Q. Relationship between luminance E and luminance L[J]. Construction & Design for Project, 2009(2): 70-71 (in Chinese).