

# 人境交互：人因建筑学视角下的建筑空间信息与人体知觉反馈

Human-Building Environment Interaction : Research on Architectural Spatial Information and Human Perceptual Feedback from the Perspective of Human Factors Architecture

李珺杰 | LI Junjie 赵如月 | ZHAO Ruyue 吴炜 | WU Wei 金怡淳 | JIN Yichun

**摘要:** 研究采用虚拟现实技术(VR)和实验室环境调控(LEC)来搭建建筑仿真空间,通过虚拟空间的营造,创造不同场景下的沉浸式空间感受;并通过受试者佩戴脑电信号(EEG)采集帽获取受试者在仿真空间中的脑电信号数据。研究方法和结论用于通过人因建筑学视角分析人对建筑空间环境的量化感受,进而优化建筑空间设计。最后,本研究以可持续灾后应急建筑项目BBBC中的半室外灰空间为例,验证了建筑空间对人体生理反应的作用情况,对设计给出了检验反馈。

**关键词:** 人因建筑学、EEG、VR、建筑空间环境

**Abstract:** The researchers adopted virtual reality technology in a controlled laboratory environment to compose building simulation spaces and created immersive space perceptions in response to different scenarios. Neural signal electroencephalogram (EEG) data were obtained in the simulation space from participants wearing EEG signal acquisition caps. The methods and conclusions demonstrated here can be adopted as feedback for ways of obtaining more realistic information from human factors architecture method and using those data to optimize architectural space design. Finally, taking the semi-outdoor gray space in the sustainable post disaster emergency building project BBBC as an example, this study verifies the effect of the building space on human physiological response, and gives the test feedback to the design.

**Keywords:** Human factors architecture, EEG, VR, Building environment

## 一、神经科学与人因建筑学

建筑师一直在不断地探索建筑、环境和人三者之间的关系。不同于客观物理环境的定量描述,从使用者心理出发的建筑环境主观评价多为定性因子。当环境和建筑空间发生变化时,人的主观“感觉”难以精确地描述<sup>[1-2]</sup>。在现实的使用环境中,使用者的主观评价受到心理、时间、事件、生理等多方面的因素影响,主观问卷的数据不能排除干扰因素,真实、客观地反映人体的主观满意度感受,因此数据模糊,缺乏准确性<sup>[3]</sup>。

神经科学方法近年来被引入到人因建筑学的领域,用于探讨建筑环境对人类感知的影响<sup>[4-5]</sup>。

相对于传统的经验医学,循证设计(Evidence-Based Design)<sup>[6]</sup>强调运用科学的研究方法和统计数据来分析建筑环境对患者健康、工作效率、建筑能耗等方面的实证效果和积极影响,是在循证医学和环境心理学基础上诞生的一种设计思想<sup>[7-8]</sup>。利用循证医学中的手段,例如EEG信号、fMRI、PET、ERP、MEG等神经成像技术来量化评价人体生理表现的手段越来越多地受到关注<sup>[9]</sup>,利用定量和客观的实验手段,用来检测建筑、人、环境三者之间的影响关系<sup>[10]</sup>。亚历山大·科本(Alexander Coburn, 2019)等美国研究者基于实验室空间,通过让受试者佩戴EEG观看对比照片的实验,获取受试者的脑电数据,研究室

### 作者:

李珺杰, 北京交通大学建筑与艺术学院副教授;

赵如月, 北京交通大学建筑与艺术学院硕士生;

吴炜, 北京交通大学建筑与艺术学院硕士生;

金怡淳, 北京交通大学建筑与艺术学院硕士生。

国家自然科学基金面上项目(52078294&52078264)。

Doi: 10.12285/jzs.20211223004

内自然因素对人心理的影响, 研究发现室内自然因素的色彩和形状是影响人心理的主要因素<sup>[11]</sup>; 瓦伦·库马罗贾 (Varun KumarOjha, 2019) 等瑞士、德国研究者基于实验室空间, 通过检测实验中受试者的皮肤电信号变化, 研究城市环境对人生理因素的影响<sup>[12]</sup>。

从实验室实证研究手段来看, 大量的实验研究提供了一些可供选择的、高可信度的实验手段。例如在心理方面, 大多数研究采用的手段是基于 PMV 模式——一种通过计算平均投票数的方法——的心理调查问卷<sup>[13-14]</sup>。基于实验室空间, 通过让受试者在实验中填写相关的心理问卷来获取实验数据, 最终评估受试者的心理变化, 此种方法操作方便, 对于受试者心理有一定的评价效果, 但是容易受到受试者主观意愿以及外部因素的干扰<sup>[15-16]</sup>。在生理方面, 基于实验室空间, 让受试者佩戴测定人生理因素的仪器 (包括皮肤电信号、心率、出汗率、指尖温度等), 通过实验获取信号数据<sup>[17-18]</sup>, 此种方法能反映受试者的生理变化但受限于设备本身, 生理变化反馈研究尚不成熟, 缺乏针对性。在工作效率方面, 通过让受试者在实验过程中进行不同类型的认知实验 (字色干扰实验、无意义图形再认实验等), 获取实验中的反应时间、反应效率等实验数据来评价工作效率<sup>[19-20]</sup>。这种方式可以有效地评价人的工作效率, 但研究的重点关注在人脑的工作效率方面, 没有建立起有效的空间环境与人脑反馈间的关联, 不能完全等同实际工作情况下的工作效率, 具有一定的局限性。

## 1. 脑电信号的获取与分析

大脑约占体重的 2%, 却消耗人体总能量的 20%<sup>[21]</sup>。当大脑中的神经元被激活时, 细胞膜上的电压会发生变化, 神经元的同步电压变化可以共同产生一个电势, 即为脑电信号。脑电信号检测, 即 EEG, 是一种非侵入性技术, 通过放

脑电节律分布与特征<sup>[25]</sup>

表 1

EEG 节律	频率 (Hz)	波幅 ( $\mu V$ )	位置与功能
Delta ( $\delta$ )	1~4	> 50	成人前额 (睡眠状态), 儿童后额 (慢波睡眠)
Theta ( $\theta$ )	5~7	> 50	枕叶区; 儿童、昏昏欲睡的成人、被情绪困扰的人
Alpha ( $\alpha$ )	8~13	50~100	枕区; 觉醒时闭眼放松的节律
Beta ( $\beta$ )	14~30	20	颞叶区、额叶区精神活动/兴奋
Gamma ( $\gamma$ )	>30	极小	感觉皮层, 不同神经元的结合/感觉知觉

置在头皮表面的电极监测记录大脑的电活动。脑电图通过直接捕捉中枢神经系统的活动, 可以准确反映大脑神经活动和被试者的认知状态。<sup>[22]</sup> 式样一致、周期一致且重复出现的脑电信号, 称为脑电节律。<sup>[23]</sup> 大量的医学、神经学研究表明, 脑电节律与人脑的工作状态有着紧密的联系 (表 1)<sup>[24-25]</sup>。

## 2. 虚拟现实技术与实验室环境调控

虚拟现实技术能快速完成大量空间及环境元素的构建及模拟, 并提供沉浸式展示, 设计者及终端用户能够非常快速地完成待选方案的评价及择优实验, 从而大大缩短设计和检验的周期。VR 技术在建筑环境中的研究近年来有了一定的拓展, 例如利用 VR 技术展开适老色彩环境循证设计方法的探索, 通过模拟真实建筑空间及空间中的视觉要素, 进行空间建构和沉浸式色彩呈现, 达到循证设计流程的有效性, 证明了 VR 技术在科学实验方面的可靠度<sup>[26]</sup>。也有学者利用 VR 模型结合眼动仪设备, 展开传统村落、校园或者交通枢纽空间的视觉认知与行为机制研究<sup>[27]</sup>。

通过实验室环境调控技术, 在特定的实验空间改变某一类参数 (如光、温、湿、风、雨、空气、尺度、界面等), 从而发

现人、建筑与环境作用规律的方法已较为成熟<sup>[28]</sup>。在日本现今已拥有各类专业人工气候室, 其中大型和专用型 70 余座。銚井修一等在实验舱中基于 stolwijk 多节点热生理模型, 对日常生活中典型的行为活动 (坐、立、走、沐浴、睡眠等) 的热生理反应进行实验与预测对比研究<sup>[29]</sup>。天津大学为研究建筑空间设计要素与主观热感受之间的关联而设计建造环境实验舱, 研究空间尺度、空间界面、空间光照度等要素对人行为的影响<sup>[30]</sup>。

## 二、建立 EEG+VR+LEC 的人因建筑学研究方法

本研究主要采用了虚拟现实技术 (VR)、脑电信号采集技术 (EEG) 和实验室环境调控技术 (LEC) 的实验手段。实验通过基于虚拟现实技术和实验室环境调控生成的虚拟空间来营造不同场景的沉浸式空间体验 (表 2), 并通过脑电信号采集帽获取受试者在仿真空间中的脑电信号数据, 以此探讨空间环境和使用者生理、心理以及工作效率之间的关联性 (图 1)。最后, 本研究将针对一座可持续灾后应急建筑项目对该实验方法进行验证, 用以指导和优化建筑空间设计。

研究首先通过对大量图像样本的对比

三个场景中实验室物理环境控制范围

表 2

实验室调控参数	最高值	最低值	平均值
温度 ( $^{\circ}C$ )	22.8	19.3	20.9
PM2.5 ( $\mu g/m^3$ )	7.1	112	43
PM10 ( $\mu g/m^3$ )	10	123.2	60.9
TVOC ( $mg/m^3$ )	0.03	0.11	0.064

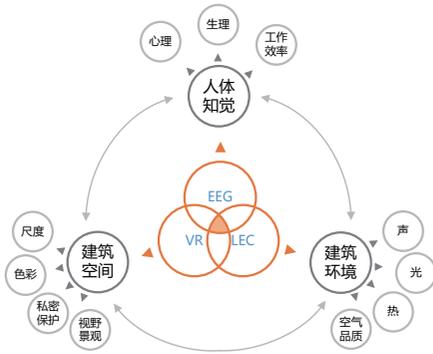


图1: 探究建筑空间、建筑环境和人体知觉之间的关联

分析, 选取3个不同类型且差异性较大的场景, 即开敞的自然环境、半开敞的图书馆环境、封闭的地下室空间(表3), 对场景差异化的选择利于增强不同场景对人生理、心理以及工作效率的影响, 并更好地反馈到脑电信号数据的变化之中。接着让受试者在3个场景的虚拟仿真空间中进行调查问卷和认知实验的测试, 在实验测试过程中记录相关的实验数据, 包括脑电信号、实验室物理环境数据、调查问卷、认知实验完成时间等。最后对实验数据进行多层次交叉对比分析。

研究要求受试者需要有活跃的思维、对外界刺激敏锐的感知以及清晰明白的表达能力, 因此, 实验选择了30名(15名男生和15名女生)18~25岁不同专业的在校大学生, 身心健康、近期无重大疾病者作为实验受试者。为了保证实验过程的科学性和实验数据的准确性, 减少受试者自身差异和脑电信号数据易受外界干扰特性的影响, 实验开展遵循以下三个步骤(图2):

1) 在受试者佩戴好VR和EEG仪器设备之后, 进行30s的闭眼休息和4min的场景适应。



图2: 每个场景实验流程

场景信息列表

表3

场景名称	拍摄地点	场景空间信息	360° 全景图片
S1 场景1	空旷的自然环境	空间形式: 开敞 采光方式: 自然采光 绿化率: 80% 人数: 1 场景面积: > 10000m <sup>2</sup> 噪声: 较安静(鸟叫声、树叶声)	
S2 场景2	正在使用的图书馆	空间形式: 半开敞 采光方式: 自然采光 + 人工照明 绿化率: 0% 人数: 60 场景面积: 2500m <sup>2</sup> 噪声: 较安静(走动声、翻书声、交谈声)	
S3 场景3	正在使用的地下自习室	空间形式: 封闭 采光方式: 人工照明 绿化率: 0% 人数: 15 场景面积: 30m <sup>2</sup> 噪声: 较安静(走动声、翻书声、交谈声)	

和 EEG 设备的个人适应性而造成的生理和心理波动。场景适应让受试者快速沉浸到虚拟仿真空间之内, 以反馈最真实的空间体验感。

2) 进行基于语义学解析法(SD法)的空间主观问卷调查<sup>[31]</sup>。空间主观问卷从场景认知感受、空间参数感受、物理环境感受三个层面评价受试者在三个不同虚拟仿真空间的心理感受。

3) 根据人体认知层次, 进行4种不同类型的认知实验, 即斯特鲁普字色干扰实验、数字计算实验、无意义图形再认实验、符号数字模拟实验。从四个层次全面地评价不同空间场景下受试者的工作效率(图3、图4)。

### 三、人体生理感知与建筑空间环境的规律解析

#### 1. 寻找目标点

EEG的波幅代表脑电位的强度, 波幅大小与参与同步放电的神经元数量以及神经元的排列方向等密切相关<sup>[32]</sup>。如果参与同步放电的神经元数量多, 神经元排列方向一致, 且与记录电极的距离较近, 则其波幅增高; 反之, 则降低<sup>[33]</sup>。

通过实验, 研究获取了30位受试者在3个不同场景下的脑电数据。基于大量数据的分析, 研究首先需要挑选出当场景切换后的场景适应阶段, 脑电变化最剧烈

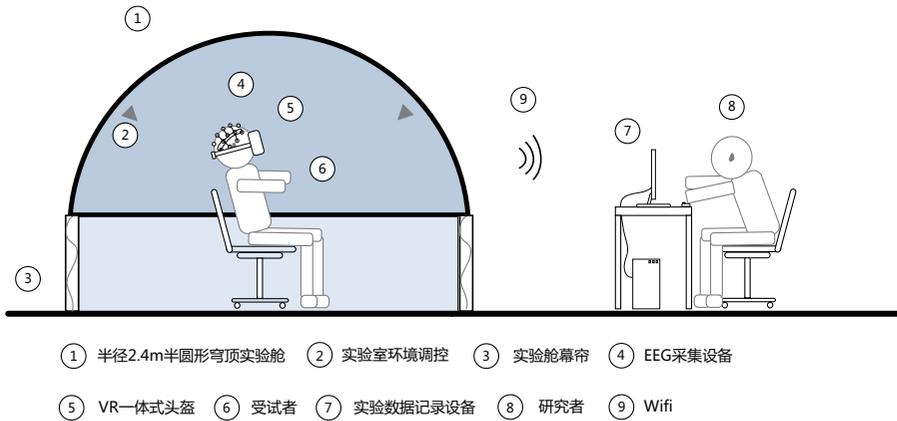


图3: 实验室环境设置



图4: 实验场景照片

的若干点位  $Ph$ , 作为研究对象。研究结论的生成逻辑如下:

1) 在场景适应阶段, 选取 30 位受试者脑电波稳定的 10s 区间, 排除掉眨眼、转头、接触不良等干扰因素。

2) 对三个场景以 S1&S2、S2&S3、S1&S3 两两进行波段的相关性分析。对相关系数进行统计, 对于  $|R| < 0.2$  的标记为  $R_A$ ; 对于  $|R| \geq 0.2$  的标记为  $R_B$ 。  $R_A$  说明两两场景比较下, 脑电电势差异性显著 (significant differences);  $R_B$  说明两两场景比较下, 脑电电势差异性不显著 (图 5)。图 6 中越趋于红色, 说明脑电电势差异性越显著; 越趋于蓝色, 说明脑电电势差异性越不显著。

3) 统计 32 个点位  $R_A$  的数量, 并进行排序。定位排序前 4 名点位为脑电变化最剧烈的  $Ph1 \sim 4$  (限于篇幅因素, 本文只列举了部分点位的相关系数分布)。

4) 确定  $Ph1 \sim 4$  为分别位于额叶的 F7, 顶叶的 CP2, 右颞叶的 FC6 点, 以及枕叶的 P3。并在脑电点位图中标记出来 (图 6)。

5) 通过数据统计, 从整体分区来看, 右颞叶区的脑电电势差异性较其他区域显著。

因此, 经过三个场景的切换前后, 30 位受试者脑电势的两两相关性比较, 可确定  $Ph1 \sim 4$  为分别位于额叶的 F7, 顶叶的 CP2, 右颞叶的 FC6 点, 以及枕叶的 P3。此外, 从整体分区来看, 右颞叶区的脑电电势差异性较其他区域显著。由此, 研究将聚焦于  $Ph1 \sim 4$  和右颞叶区, 来进一步研究人脑与空间环境间的作用肌理。

## 2. 建立节律与效率的关联性

式样一致、周期一致且重复出现的脑电, 称为脑电节律<sup>[34]</sup>。大量的医学的、神经学的研究表明, 脑电节律与人脑的工作状态有着紧密的联系<sup>[35-37]</sup>。由上节得出的结论发现, 右颞叶区在场景切换前后的变化最为显著, 这与医学上分析出的主要位于颞叶和额叶区域的  $\beta$  波结论吻合<sup>[38]</sup>。而  $\beta$  波反

映的是积极思考、注意或解决特定问题的大脑活动, 这与论文希望证明的场景环境与工作效率间的关联机制有着重要的关系。

由于  $\beta$  波与有意识或处于清醒、专注和警觉状态密切相关, 因此, 研究将统计个体在认知实验的总时长  $T$  与  $\beta$  节律的耦合关系—— $T$  是在保证正确率的情况下记录的时长。将总时长  $T$  与  $\beta$  节律占比统计做出统计学的回归分析, 发现在四类题目中, 总时长  $T$  与  $\beta$  节律占比均存在着反比关系, 即  $\beta$  节律占比越大, 任务完成期间的耗时越短,  $\beta$  节律占比越小, 任务完成期间的耗时越长。也正说明了  $\beta$  波与人脑工作的效率成正比, 在  $\beta$  波比较活跃的情况下, 有利于人脑高效率地完成工作 (图 7)。因此, 本阶段的研究结论, 即  $\beta$  波与人脑的工作效率有正比的关系, 将作为下个阶段研究不同场景对  $\beta$  波的激发作用机理的研究基础。

将 30 位受试者的  $T$  与  $\beta$  拟合成为一个关系公示。初步地将  $T$  与  $\beta$  建立一个一次函数的关系式。可以看出  $\beta$  是  $T$  的一个函数, 并且两者之间存在着一定的反比关系 (图 8)。

$$T = f(\beta, C)$$

## 3. 研究场景信息与 $\beta$ 波的关联性

根据上节得出的结论,  $\beta$  波的能量会影响到受试者的工作效率, 两者呈正比关系。因此, 本节将讨论在三个不同的场景下 (自然环境、半开敞的大空间、封闭的地下室), 对受试者大脑的  $\beta$  波的激发情况。研究结论的生成逻辑如下:

1) 统计三个场景中  $\beta$  波的总能量

通过统计发现, 在场景 1 自然环境中, 受试者平均产生的  $\beta$  波的总能量最高, 场景 2 和场景 3 的人工环境中,  $\beta$  波的总能量相近, 大空间略优于小空间。三个场景  $\beta$  波的总能量排序如下:

$$\bar{\beta}_{S1} > \bar{\beta}_{S2} > \bar{\beta}_{S3}$$

2) 分析场景参数的差异性

实验过程中, 实验人员对受试者做了主观问卷的调查。主观问卷的问题两

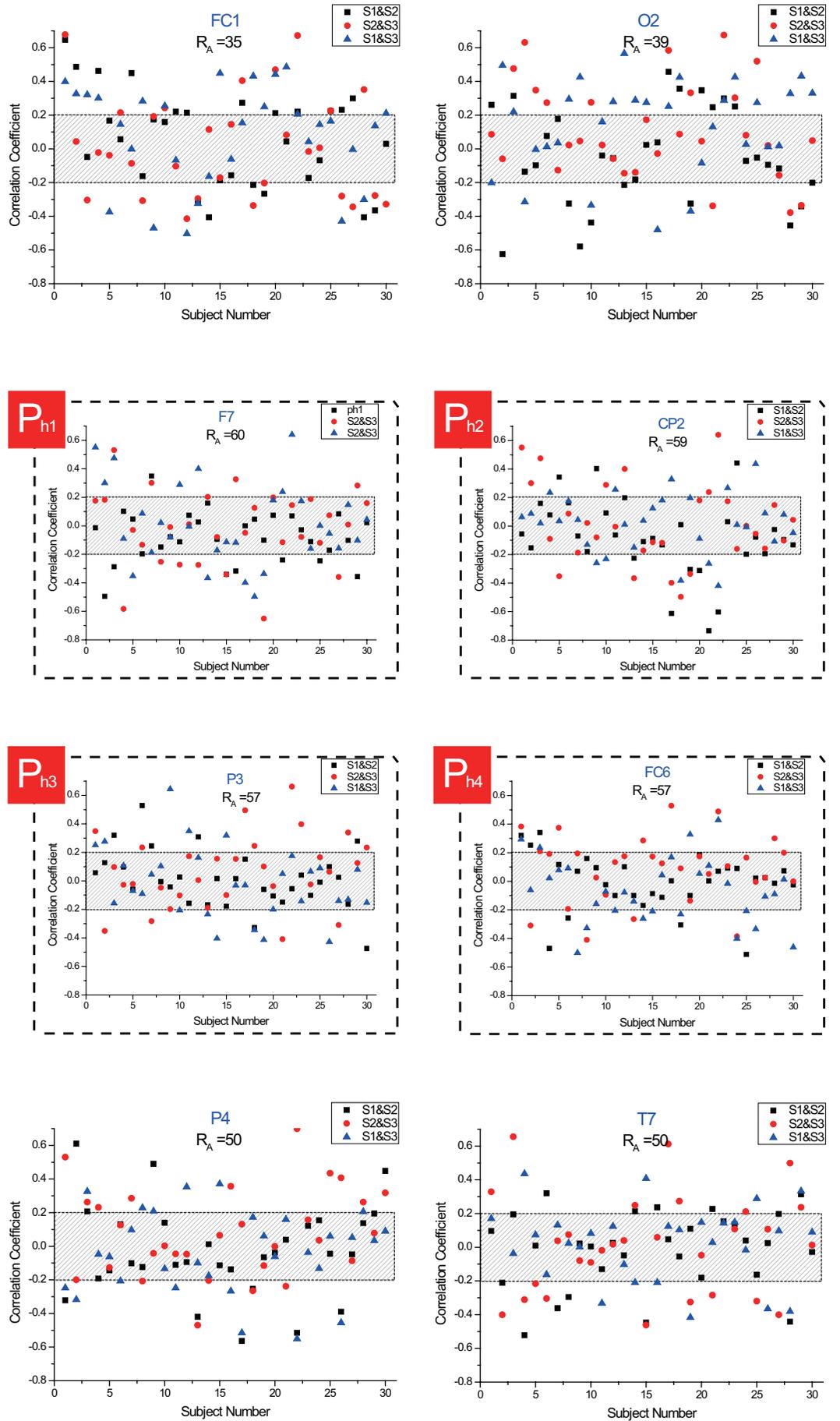


图5: 代表点(|R|最大、|R|最小、|R|居中) 相关系数分布

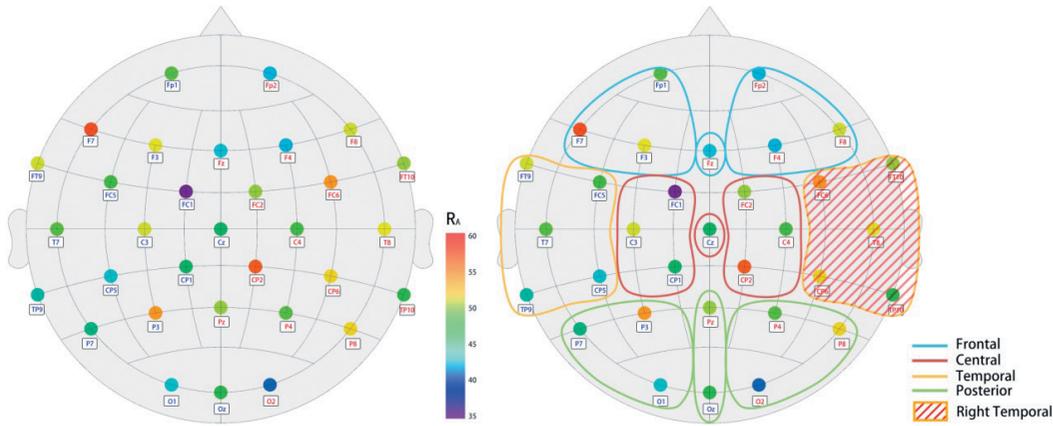
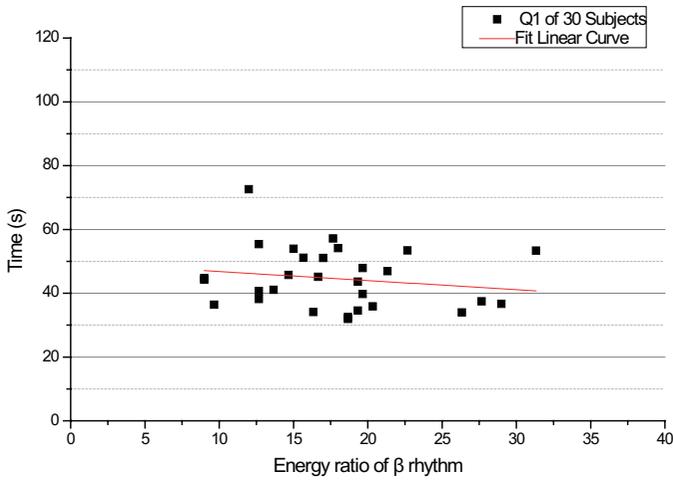


图6: 大脑点位中场景切换相关性分布(图中点位越趋于红色,说明脑电势差异性越显著,越趋于蓝色,说明脑电势差异性越不显著)

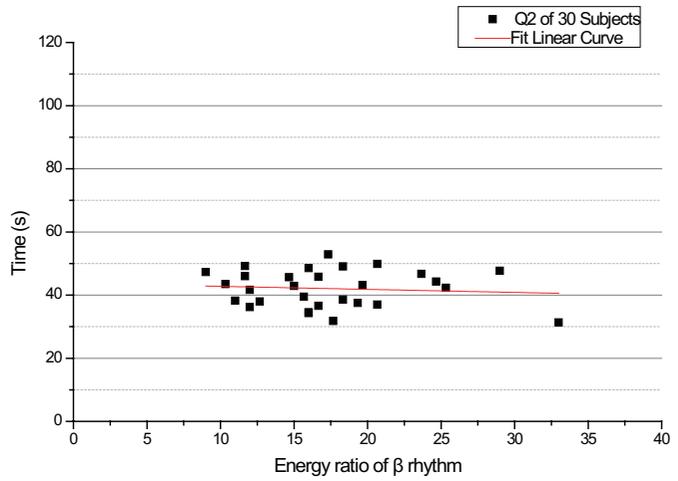
两成对出现,一个是受试者对某种情况的认知,反映在生理层面上,例如视觉、听觉、触觉、温度、光环境等;另一种是受试者对该情况的感受评价,反映在心理层面上,即该信息通过生理反应,传递给大脑,由大脑做出判断后产生的心理活

动或者是情绪。

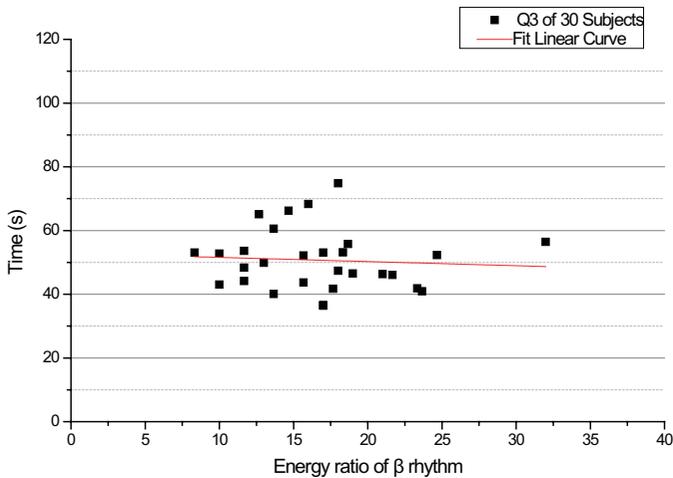
依据主观问卷调查的得分情况,研究将三个场景下该10s内的 $\beta$ 波与主观调研问卷的得分进行统计学的相关性分析(图9)。研究发现,生理方面(SSRV、SCRV、TSV、LSV)



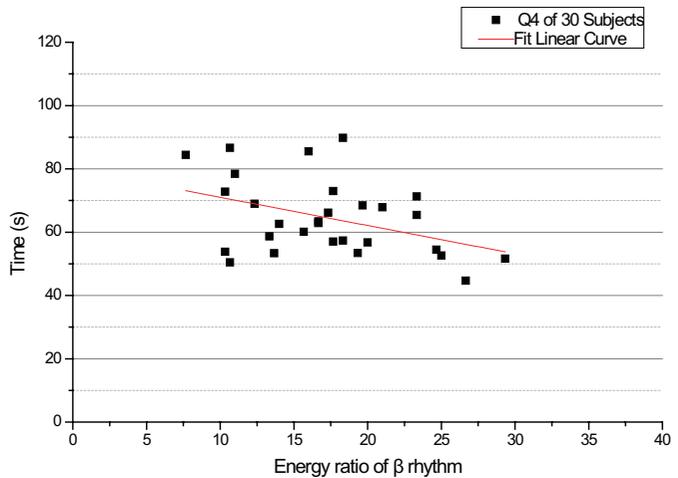
题目类型1: 斯特鲁普字色干扰实验



题目类型2: 数字计算实验



题目类型3: 无意义图形再认实验



题目类型4: 符号数字模拟实验

图7: 计分时长T与计分 $\beta$ 节律占比的回归分析

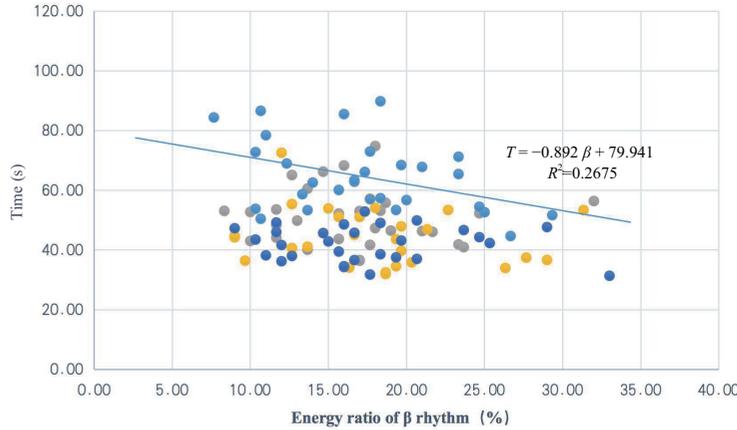


图8: 总时长T与总β节律占比的回归分析

与β波的相关性较小，而心理层面上(SSCV、SCCV、TCV、LCV)与β波的相关性较大。即从生理层面上对β波的影响均小于从心理层面上对β波的影响。例如即使使用者感知到空间尺度狭小，但是如果使用者判断觉得该空间是舒适的，对应的β波的占比就较大，从而在该空间的工作效率也就越高。又如即使使用者身体感知该环境的温度较低，但是若使用者经过大脑反馈，心理上感觉该环境舒适，则对应的β波的占比也会增大，从而在该空间的工作效率也就越高。

主观问卷里还包括了受试者对于情绪、注意力、VR环境的舒适度及满意度的问卷调查，该组问题每个场景的实验前和实验后均要求受试者做出评价(图10)。

研究发现实验前的问卷得分与β波占比的相关性系数均大于实验后的数据。其中，受试者的情绪和注意力与β波占比的相关性显著，说明受试者的β波很大程度上受到受试者心理状态的影响，因此主观满意度将很大程度上影响到受试者的工作效率。而VR环境的舒适度与满意度与β波占比的相关性不显著，说明VR在本次实验中受试者的沉浸式感受良好，VR场景的效果逼真，实验结果受到VR虚拟仿真效果的影响较小。

#### 四、人因建筑学研究方法对建筑设计的反馈

BBBC项目是一座可持续灾后应急建筑，项目位于河北张家口，建成于2021年，

建筑面积为155m<sup>2</sup>。在灾后应急的设计背景下，为了居住者更好地进行休息、放松与社交活动，设计了半开敞的棚下灰空间，面积达到245m<sup>2</sup>。为了验证该建筑空间对使用者生理和心理的影响并对设计优化产生有效的反馈，本研究以BBBC项目为例，进行了基于VR+EEG+LEC实验(图11)。

#### 1. 反馈实验设计

实验通过引入压力，记录被试者在受情绪压力后在BBBC建筑灰空间中以及其他不同场景的脑电信号和主观问卷数据，探求具有一定庇护的棚下灰空间的休息和放松效益。实验除BBBC建筑外，选取了较为封闭的灾后板房建筑以及开敞的自然空间环境作为对照场景，记录了30名(15名男生与15名女生)18~25岁不同专业的在校大学生的脑电信号数据及主观问卷数据。实验开展遵循以下四个步骤：

- 1) 受试者佩戴仪器并进行3min的休息，以减少心理波动。
- 2) 通过情绪影片、英语朗读和心算引入压力。
- 3) 被试者进入虚拟仿真空间进行5min休息与放松。
- 4) 填写基于情绪、空间认知感受以及物理环境感受三层面的问卷(表4, 图12)。

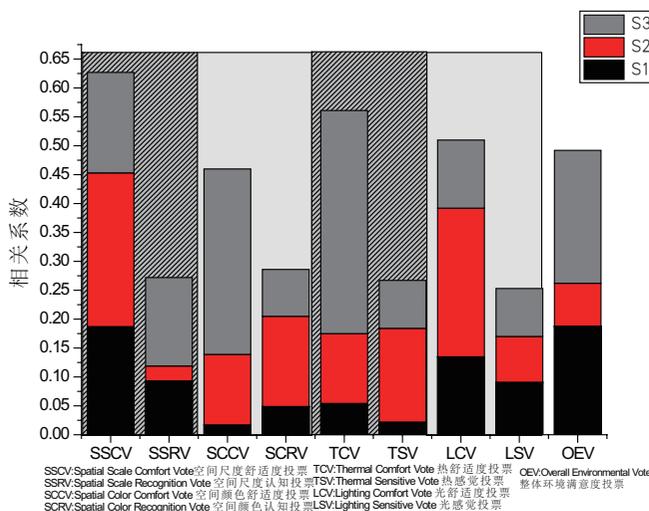


图9: 三个场景中主观问卷与β波占比的相关性分析

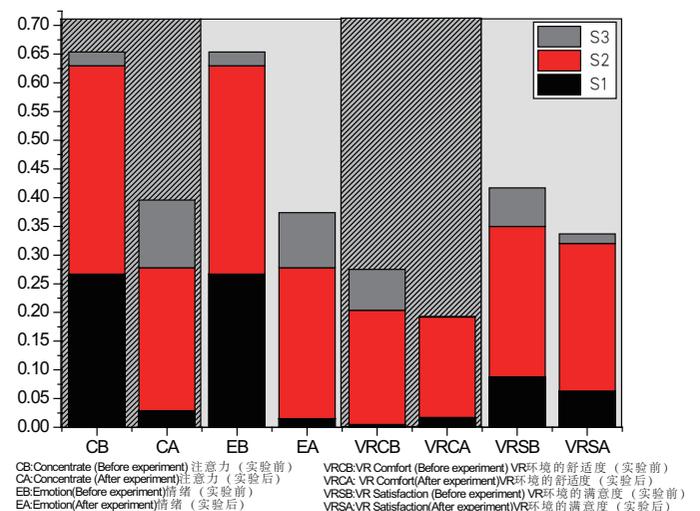


图10: 实验前后主观问卷与β波占比的相关性分析



a) 实景照片



b) VR 虚拟场景

图 11: 真实建筑场景与虚拟场景对比

场景信息列表

场景名称	场景内容	场景空间信息	场景
S4 场景 4	空旷的自然环境	空间形式: 开敞 采光方式: 自然采光 绿化率: 80%	
S5 场景 5	BBBC	空间形式: 半开敞 采光方式: 自然采光 绿化率: 15%	
S6 场景 6	灾后应急板房	空间形式: 封闭 采光方式: 人工照明 绿化率: 0%	

表 4

## 2. 实验结论对建成建筑效果的验证与反馈

根据前文实验得出的结论：主要产生于右颞叶的 FC6 点位的  $\beta$  波能量高低与大脑注意集中、紧张、警觉有关，本次实验同样分析了这一点位的  $\beta$  波能量，并选取 30 位受试者脑电波稳定的 10s 区间，排除掉眨眼、转头等干扰因素，对能量值进行了两方面的分析。

1) 三个场景  $\beta$  波的总能量验证设计  
比较三场景该 10s 内  $\beta$  波的总能量高低。同时进行了假设：如  $\beta$  波能量高，则受试者在休息时处于紧张状态，不利于休息放松。如  $\beta$  波能量较低，则受试者紧张程度较小，得到了较好的休息与恢复。通过统计发现，受试者在场景 1 封闭板房空间与场景 3 自然空间的  $\beta$  波的总能量均高于场景 2 BBBC 住宅空间。三个场景

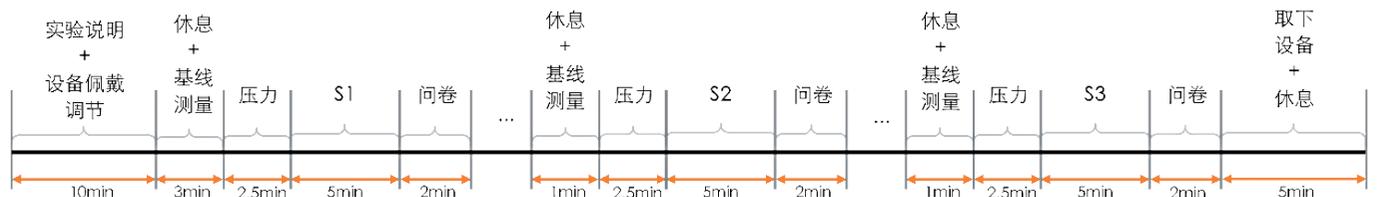


图 12: 实验流程

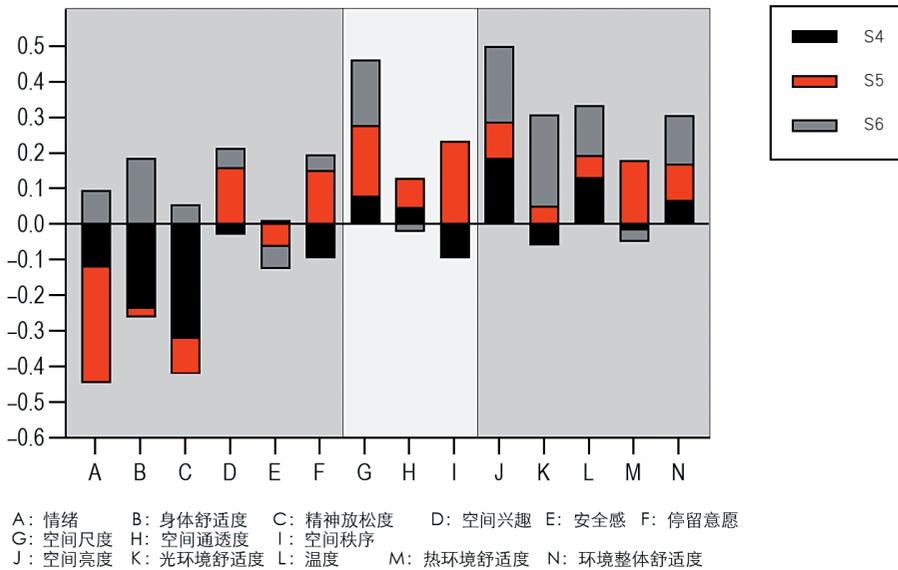


图 13: 主观问卷与β波占比的相关性分析

β 波的总能量排序如下：

$$\bar{\beta}_{S3} > \bar{\beta}_{S1} > \bar{\beta}_{S2}$$

由此可得，受试者在 BBBC 灰空间中得到了更好的放松与休息。艾普顿 (Appleton) 提出的瞭望理论中<sup>[39]</sup>，人类在进化过程中保留了作为捕猎者和猎物的双重身份产生的环境偏好，即既需要对外界环境保持良好的视野，又需要一定的空间庇护元素。这与 BBBC 棚下灰空间的设计较为契合。

### 2) β 波能量与主观问卷的关联性

研究同样将三个场景下该 10s 内的 β 波与主观调研问卷的得分进行统计学的相关性分析。研究发现，受试者的情绪和精神放松度的主观感受和 β 波更多地显示较大的负相关性，即使用者的自我感知的情绪越舒缓，精神感受到越放松，对应 β 波占比越小，这一结论也有效地支持了前文的假设 (图 13)。

## 五、研究总结与展望

本文研究揭示了建筑空间信息与人体知觉反馈的关联机制。在未来的研究中，可以进一步基于计算机分析和机器学习中的算法开发，形成面向应用的量化模型，将实验室循证嵌入设计过程，完成程序编写与软件开发。设计方法可用于挖掘医疗、商业、办公、地下、特殊环境等场

所中，使用者的生理反馈与空间场景的作用机理，并且对设计优化产生有效的反馈。未来的研究可以形成利于 EEG 数据的分析范式，并直观反馈于可视化平台，针对典型空间环境进行应用与检验。例如在办公空间中，通过设计要素的调整，刺激脑电节律，从而提高工作效率；在商业空间中，通过空间要素的改变，刺激脑电节律，从而提高消费者的消费情绪；在地下空间或医疗空间，通过有限的环境要素提升使用者的舒适度和满意度，从而影响到使用者的健康程度。

### 参考文献

[1] 宋晔皓. 技术与设计: 关注环境的设计模式[J]. 世界建筑, 2015 (07) : 38-39.  
 [2] Julia K. Day, David E. Gunderson. Understanding high performance buildings: The link between occupant knowledge of passive design systems, corresponding behaviors, occupant comfort and environmental satisfaction[J]. Build Environ, 2015, 84 (01) : 114-124.  
 [3] Junjie Li, Shuai lv, Qingguo Wang. Graphical visualization assist analysis of indoor environmental performance: Impact of atrium spaces on public buildings in cold climates[J]. Indoor and Built Environment, 2018 (03) : 331-347.  
 [4] Xiyuan Luo. Research on the Effects of Building Environment on Human Health from the Perspective

of Neuroscience[J]. Urbanism and Architecture, 2020, 17 (33) : 76-78.  
 [5] L. Xiaodong, S. Shu, Z. Zhihui, K. Xiangqin. An integrated environmental and health performance quantification model for pre-occupancy phase of buildings in China[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2017, 63 (03) : 1-11.  
 [6] 褚英男, 宋晔皓, 赵金彦, 金海燕. 人因工程学导向的循证设计方法在主动健康环境营造中的整体设计路径初探[J]. 世界建筑, 2021 (03) : 32-35, 124.  
 [7] Luoxi Hao, Yixiao Cao, Tongyue Wang. Research and Application of Healthy Lighting for Rhythm and Emotion Improvement[J]. Light and Lighting, 2019, 43 (01) : 6-10.  
 [8] 唐建, 孙美琪, 陈杨. 关于改善灾后群体心理障碍的室内设计手法分析[J]. 城市建筑, 2021, 18 (04) : 152-154.  
 [9] L. J. Trejo, K. Kubitz, R. Rosipal, R.L. Kochavi, L.D. Montgomery. EEG-based estimation and classification of mental fatigue[J]. Psychology, 2015, 6 (05) : 572-589.  
 [10] Y. Song, J. Li, J. Wang, S. Hao, N. Zhu, Z. Lin. Multi-criteria approach to passive space design in buildings: Impact of courtyard spaces on public buildings in cold climates[J]. Building and Environment, 2015, 89 (07) : 295-307.  
 [11] Alexander Coburn, Omid Kardan, Hiroki Kotabe, etc. Psychological responses to natural patterns in architecture[J]. Journal of Environmental Psychology, 2019, 62 (04) : 133-145.  
 [12] Varun Kumar Ojha, Danielle Griego, Saskia Kuliga, etc. Machine learning approaches to understand the influence of urban environments on human's physiological response[J]. Information Sciences, 2019, 474 (02) : 154-169.  
 [13] P. O. Fanger. Fundamentals of thermal comfort. Advances in Solar Energy Technology, 1988 (04) : 3056-3061.  
 [14] L. Zampetti, M. Arnesano, G.M. Revel. Experimental testing of a system for the energy-efficient sub-zonal heating management in indoor environments based on PMV[J]. Energy and building, 2018, 166 (05) : 229-238.  
 [15] Bin Cao, Qin Ouyang, Yingxin Zhu, Li Huang, Hongbo Hu, Gaofeng Deng. Development of a multivariate regression model for overall satisfaction in public buildings based on field studies in Beijing and Shanghai[J]. Build Environ, 2012, 47 (01) : 394-399.  
 [16] Li Huang, Yingxin Zhu, Qin Ouyang, Bin Cao. A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices. Build Environ, 2012, 49 (03) : 304-309.  
 [17] Jimin Kim, Taehoon Hong, Minjin Kong. Building occupants' psycho-physiological response to indoor climate and CO<sub>2</sub> concentration changes in office buildings[J]. Build Environ, 2020, 169 (02) :

106596.

[18] D. J. Hsu, Y. M. Sun, K. H. Chuang. Effect of elevation change on work fatigue and physiological symptoms for high-rise building construction workers[J]. Safety Science, 46 (06) : 833-843.

[19] Xi Wang, Da Li, Carol C. Menassa. Investigating the effect of indoor thermal environment on occupants' mental workload and task performance using electroencephalogram[J]. Build Environ, 2019, 158 (07) : 120-132.

[20] M. Frontczak, S. Schiavon, J. Goins, E. Arens, H. Zhang, P. Wargocki. Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design: indoor environmental quality[J]. Indoor Air, 2022, 22 (2) : 119-131.

[21] C. Lee, J. Kwon, G. Kim, J. Hong, D. Shin, D. Lee. A study on EEG based concentration transmission and brain computer interface application[J]. Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, 2009, 46 (2) : 41-46.

[22] 贾会宾. 第四届脑电数据处理入门班进行脑电数据分析基础课程[Z]. 2017.

[23] M. H. MacLean, K. M. Arnell, K. A. Cote. Resting EEG in alpha and beta bands predicts individual differences in attentional blink magnitude[J]. Brain Cogn, 2012, 78 (3) : 218-229.

[24] H. Jebelli, S. Hwang, S. Lee. EEG signal-processing framework to obtain high quality brain waves from an off-the-shelf wearable EEG device[J]. J. Comput. Civ. Eng. 2018, 32 (1) : 04017070.

[25] L. J. Trejo, K. Kubitz, R. Rosipal, R.L. Kochavi, L.D. Montgomery. EEG-based estimation and classification of mental fatigue[J]. Psychology, 2015, 06 (05) : 572-589.

[26] 陈尧东, 崔哲, 郝洛西. 基于VR技术的适老色彩环境循证设计方法探索——以适老建筑室内色彩设计为例[J]. 照明工程学报, 2019, 30 (02) : 123-129.

[27] 苑思楠, 张寒, 何蓓洁, 张玉坤. 基于VR实验的传统村落空间视认知行为研究——以闽北下梅和城村为例[J]. 新建筑, 2019 (06) : 36-40.

[28] 李宁. 装配式绿色建筑表皮实验舱研究——以中央美术学院装配式绿色建筑表皮实验舱为例[C]. 2019国际绿色建筑与建筑节能大会论文集, 2019: 422-425.

[29] 铨井修一, 李永辉. 建筑热环境对人体热生理反应的影响

与实验模拟研究[J]. 新建筑, 2019 (05) : 18-22.

[30] 魏昱. 天津大学建筑空间环境实验舱设计研究[D]. 天津大学, 2018.

[31] 刘佳凝, 庄惟敏. 基于多维数据分析的建筑空间预测研究[J]. 建筑学报, 2016, S1: 41-44.

[32] M. Serman. Sensorimotor EEG operant conditioning: experimental and clinical effects, Pavlovian J. Biol. Sci[J]. Official Journal of the Pavlovian, 1977, 12 (2) : 63-92.

[33] C. Lee, J. Kwon, G. Kim, J. Hong, D. Shin, D. Lee. A study on EEG based concentration transmission and brain computer interface application[J]. Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, 2009, 46 (2) : 41-46.

[34] M. H. MacLean, K. M. Arnell, K. A. Cote. Resting EEG in alpha and beta bands predicts individual differences in attentional blink magnitude[J]. Brain Cogn, 2012, 78 (3) : 218-229.

[35] C. D. Katsis, N. Katertsidis, G. Ganiatsas, D. I. Fotiadis. Toward emotion recognition in car-racing drivers: a biosignal processing approach[J]. IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. A, Syst. Hum, 2008, 38 (3) : 502-512.

[36] K. H. Kim, S.W. Bang, S. R. Kim. Emotion recognition system using short-term monitoring of physiological signals[J]. Med. Biol. Eng. Comput, 2006, 42 (3) : 419-427.

[37] E. T. Esfahani, V. Sundararajan. Using brain-computer interface to detect human satisfaction in human-robot interaction[J]. Int. J. Human. Rob, 2011, 8 (1) : 87-101.

[38] Katarzyna Jurewicz, Katarzyna Paluch, Ewa Kublik. EEG-neurofeedback training of beta band (12-22 Hz) affects alpha and beta frequencies – A controlled study of a healthy population[J]. Neuropsychologia, 2018, 108 (01) : 13-24.

[39] Vartanian O, Navarrete G, Chatterjee A, et al. Architectural design and the brain Effects of ceiling height and perceived enclosure on beauty judgments and approach/avoidance decisions[J]. Journal of Environmental Psychology, 2015, 41: 10-18.

图片来源

所有图表均为作者自绘或自摄