POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Urban Ergonomics: A design science on spatial experience quality

Original
Urban Ergonomics: A design science on spatial experience quality / Zhang, L.i., Deng, H., Mei, X., Pang, L., Xie, Q., Ye, Y.. - In: CHINESE SCIENCE BULLETIN. - ISSN 1001-6538. - 67:16(2022), pp. 1744-1756. [10.1360/tb-2021-1241]

Availability:
This version is available at: 11583/2993137 since: 2024-10-08T05:13:33Z

Publisher:
SCIENCE PRESS

Published
DOI:10.1360/tb-2021-1241

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

11 November 2026

科学通报 2022 年 第 67 卷 第 16 期: 1744 ~ 1756
城市人因工程学专题 评 述
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

城市人因工程学: 一种关于人的空间体验质量的设计科学

张利*, 邓慧姝, 梅笑寒, 庞凌波, 谢祺旭, 叶扬

清华大学建筑学院, 北京 100084

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

2021-11-29 收稿, 2022-02-17 修回, 2022-02-18 接受, 2022-02-22 网络版发表

摘要 面对当前全球范围内资源环境、社会公平与卫生健康问题的加剧, 以及新的技术文明所导致的生活方式的转变, 城市-建筑空间设计应当适应时代的需求, 回归人本主义, 以科学的方式服务人们生活的快速演进. 城市人因工程学就是一种以当代人因技术为基础的新设计科学, 其科学性在于通过建立需求-空间干预两者关系的描述性模型, 使实证性的人体动态测量数据能够精准支持城市-建筑空间的设计过程. 城市人因工程学这一新兴设计科学的出现符合我国当前以人为核心的新型城镇化, 也契合我国“双碳”战略目标. 本文从三个方面来阐述城市人因工程学这一新兴设计科学的“为什么”“是什么”, 以及可能的“如何做”, 并结合21世纪世界城市更新话题的讨论, 提供一种发展设计科学的新路径.

关键词 城市人因, 设计科学, 人因分析, 全尺度空间干预, 人因量谱图, 空间体验质量

设计往往被认为是一种创意性、个性化的思维过程. 然而, 在当前全球计算技术的快速迭代, 以及新技术所导致的生活方式转变的背景下, 城市-建筑空间设计再也不能局限于形态方面的创新, 而是要适应时代的需求, 以人为本, 以科学的方式服务人的生活的快速演进. 城市-建筑设计需要建立起有效的知识迭代结构, 改变传统设计方法中以主观经验为主的状况, 使其他学科的知识与工具能够被充分引入. 因此, 设计科学这一被建筑师、发明家富勒(Richard B. Fuller)于20世纪中期提出的概念在当代再次受到重视, 它所强调的通过融入实证研究的设计思维服务于人类生存福祉的理念也再次成为建筑学引领性话题之一.

城市人因工程学是一种以当代人因技术为基础的新的设计科学, 其科学性在于通过建立描述性模型衔接城市空间体验的量化和空间干预, 使实证性的人的动态测量数据精准支持城市-建筑空间的设计过程. 它从城市-建筑空间系统消费的主体端, 即人的一端, 而不是建成空间的客体端, 即物的一端, 来精确描述动态空间体验, 量化城市空间体验问题背后的客观规律性部分. 基于这种量化形成描述性模型, 驱动更优的设计解决方案的形成.

城市人因工程学这一新兴设计科学的出现符合我国当前以人为核心的新型城镇化的要求. 习近平总书记指出, “要更好推进以人为核心的城镇化, 使城市更健康、更安全、更宜居, 成为人民群众高品质生活的空间”. 高品质城市生活空间是人民群众的普遍向往, 城市人因工程学可以服务于这一向往的实现.

城市人因工程学这一新兴设计科学也契合我国“双碳”战略目标. 国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》明确指示加快提升建筑能效水平. 更高品质的城市空间意味着对人体验质量的更精准优化, 从而实现对资源、能源的更高效配置和使用. 城市人因工程学在这方面具备显著潜力.

下文将分别阐述城市人因工程学这一新兴设计科学的“为什么”“是什么”, 以及可能的“如何做”.

引用格式: 张利, 邓慧姝, 梅笑寒, 等. 城市人因工程学: 一种关于人的空间体验质量的设计科学. 科学通报, 2022, 67: 1744–1756
Zhang L, Deng H S, Mei X H, et al. Urban Ergonomics: A design science on spatial experience quality (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1744–1756, doi: 10.1360/TB-2021-1241

© 2022《中国科学》杂志社 www.scichina.com csb.scichina.com
https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

1 城市空间体验问题与其在设计层面的原因

1.1 人的城市空间体验层级及各层级下的常见问题

进入21世纪以来, 在“前策划-后评估”等理论的帮助下, 我国城市在工程规模、设施配置、建筑功能任务等方面已实现了高精确度、高质量的决策过程[1]. 但在人的生活界面上, 城市空间品质不佳仍然是当代城市的普遍现象, 而且其解析一直存在相当的难度, 由此也产生了众说纷纭的多种理论. 我们主张从人的空间体验出发, 通过体验层级划分问题域, 将前述现象转化为具体可研的问题. 在此前已有的层级体系中, 心理学中有马斯洛[2](Abraham H. Maslow)从人的动机出发提出的生理、安全、归属-爱、尊重、自我实现五级体系; 设计学中有诺曼[3](Donald A. Norman)的本能设计(visceral design)、行为设计(behavioral design)、意义设计(reflective design)三级体系; 环境行为学中有阿尔方索[4](Mariela A. Alfonzo)针对步行体验提出的可行性(feasibility)、可达性(accessibility)、安全性(safety)、舒适性(comfort)与愉悦性(pleasurability)五级体系. 这些体系为我们研究城市空间体验的层级体系提供了非常有益的参考.

综合上述体系, 结合长期的实践探索, 我们提出人的城市空间体验的生存(survival)、效率(expediency)、感知(reception)、价值表达(expression)四级体系. 城市中各类空间存在的品质不佳现象, 均可以从生存、效率、感知和价值表达这4个层级分析, 使得城市品质问题转化为不同层级的体验质量问题. 例如在社区公共空间中, 慢行空间不安全属于生存问题, 人流、车流在上下班高峰产生短时拥堵属于效率问题, 休憩活动空间不足属于感知问题; 又如在地下空间中, 噪声、通风差、闷热潮湿等属于影响健康的生存问题, 寻路困难属于效率问题, 对封闭公共空间及地下环境印象不佳属于感知问题等. 我们可以用相应的量度来量化空间体验的质量, 而在这些量化过程中, 人因技术提供的支撑作用是最突出的. 需要补充说明的是, 人的价值表达需求通常因社会文化背景、个人生活经历、价值取向等不同而存在较大差异, 表现为很强的主观性, 因而暂不在城市人因工程学重点关注之列.

1.2 应对城市空间品质问题亟须突破传统设计方法局限

难以形成可复制的应用场景是传统设计方法最大的局限. 长时间以来, 在城市-建筑传统设计方法中, 设计决策以定性判断为主, 多依赖观察、访谈、问卷等带有很强主观性的过程, 不论是设计问题的细分定义, 还是设计解决方案的生成, 都具有相当大的模糊性和经验性, 应用场景难以复制. 自20世纪中期以来, 在场调查被认为是了解人的生活方式的主要工具. 扬·盖尔[5](Jan Gehl)在《如何研究公共生活》(《How to Study Public Life》)中系统总结了这一工具: 以计数、地图定位、拍摄、日记、漫步等对现场状况进行主观选择性记录, 试图从中总结人与空间的互动规律, 形成设计导则. 长期以来, 这一方法在城市与建筑设计中占据主导地位, 被广泛使用. 虽然这一方法在公共意识、空间共享、活动丰富性等方面做出了一定的积极贡献, 然而, 由于缺乏描述性模型, 该方法往往仅对具体空间有效, 所依据的设计原理不具有普遍性, 城市品质问题仍然长期存在, 时至今日未得到根本解决.

我们认为, 城市-建筑传统设计方法多依赖设计者的经验总结, 缺乏实证数据建立描述性模型, 其底层逻辑不具备重用性, 也不具备可证伪这一科学的基本属性[6], 因而未能形成可复制的应用场景. 我们注意到近年来, 人的生理、行为数据的动态测量技术发展, 显现出对人的空间体验建立描述性模型的可能, 如能量代谢当量(metabolic equivalent, MET)用于检验建成空间的运动健康性能[7], 人体肌肉压力和关节扭转角度用于衡量城市空间的慢行友好性[8,9], 人体褪黑素水平用于评估地下建筑光环境对人体节律的影响等[10]. 这类人体动态测量数据展现出强大的潜力, 基于它们, 可以建立起一系列衔接城市空间体验的量化和设计空间干预的描述性模型, 完成特殊性应用场景向一般性应用场景的转变, 形成一种全新的设计科学.

2 城市人因工程学的基础逻辑、框架以及相关领域进展

2.1 基础逻辑: 采用人因技术量化空间体验, 作用于设计决策循环

城市人因工程学属于设计科学领域, 它的形成基于建筑大类学科和现代人因工程学的交叉. 21世纪以来, 新型人因技术的出现为精准量化人的空间体验提供可能. 事实上, 随着生理学、运动人体科学、认知神经科学等领域理论的发展和技术的成熟, 人因技术可以通过测量获取人的生理、行为数据, 反映人的身体

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

状况与情绪变化[11]，进而客观描述人的空间体验. 尽管相较于人机关系，城市空间体验涉及的因素更为综合，但通过结合人的城市空间体验层级体系与多因子数据采集和多层次分析方法，新型人因技术在研究城市空间体验方面仍大有可为. 例如，眼部注视时长和瞳孔大小等眼动数据可以反映人的专注度[12]；脑电、皮电、心电等多项生物电数据可以结合面部表情参数，反映人的心理情绪[13]；肌电数据可以结合动作频率，反映人体的疲劳度[14]. 综合这些数据，并与人所处的城市空间形态相联系，我们可以从传统的主观城市审美体验中剥离出带有客观规律性的部分，进行重点研究.

结合新型人因技术，城市人因工程学使用人因分析支持设计师进行精准决策(图1). 对于尚未建成的空间方案，人因分析主要以虚拟应用场景可能性枚举为自变量，以测得的生理/行为数据为因变量，借助描述性模型，对方案参数进行精准选择；对于已建成空间，人因分析针对实际生活应用场景，借助描述性模型，采集人的生理/行为数据，对空间体验质量进行客观评估，为建成空间的改造更新提供支持；对于设计目标，人因分析还可以在传统设计任务的基础上，增加新的可量化空间体验的设计任务. 上述的人因分析过程、结果、设计任务增量都可以直接指导可复制的应用场景，形成设计科学的相关知识积累.

2.2 空间干预尺度框架: 宏、远、中、近、微

依据空间规模，传统的空间干预常被分为区域-城市规划、城市设计、建筑设计、室内设计、家具与设备系统设计等尺度. 城市人因工程学作用于设计干预，其所依据的人的空间体验涵盖了全部尺度. 根据设计问题所影响的空间范围，认知、感受、改造空间的颗粒度可以分为宏、远、中、近、微5个尺度，并结合前述四级体系中的生存、效率、感知层级，精准定义设计问题，采集相应的数据，来描述人的空间体验质量(图2).

首先是宏(macro)尺度，指城市居民所处的城市生活圈，其所涉及的范围在2.5 km以上，设计干预经常以1:2000及以上的图纸表达. 如公共避难场所的可达性、自然环境中系统性人工干预亲近程度等属于这一尺度的设计问题.

第二是远(far)尺度，城市居民15 min的骑行生活圈，其所涉及的范围在1~2.5 km，设计干预经常以1:1000以上的图纸表达. 如骑行道路可预期、交通枢纽换乘路径可识别性、工业设施再利用空间认同感等属于这一尺度的设计问题.

第三是中(medium)尺度，与15 min步行生活圈的尺度相对应，其所涉及的范围在1 km以内，设计干预经常以1:100~1:1000的图纸表达，其中最常用的是1:200、1:300、1:500. 如无障碍通道明确可预期、道路交通标

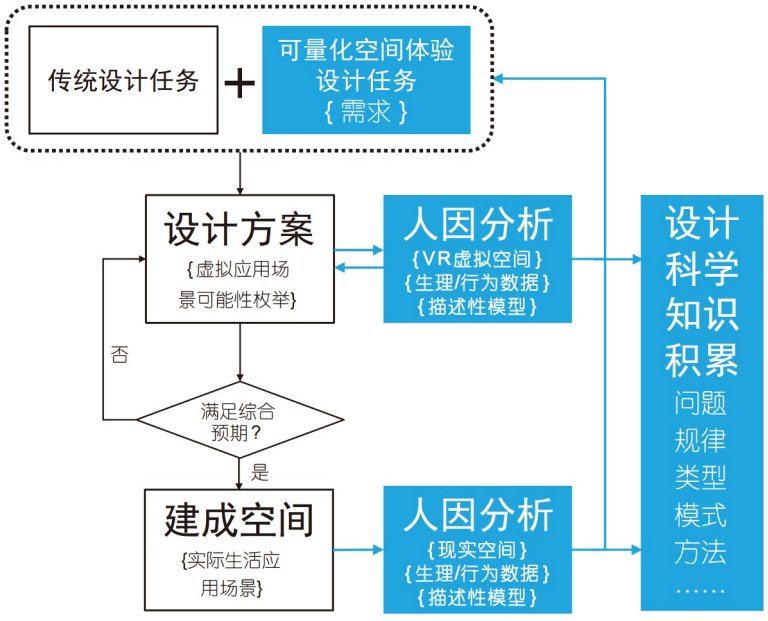


图 1 城市人因工程学在设计决策循环中的关键作用点

Figure 1 Key elements of Urban Ergonomics in the cycle of design decision making

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

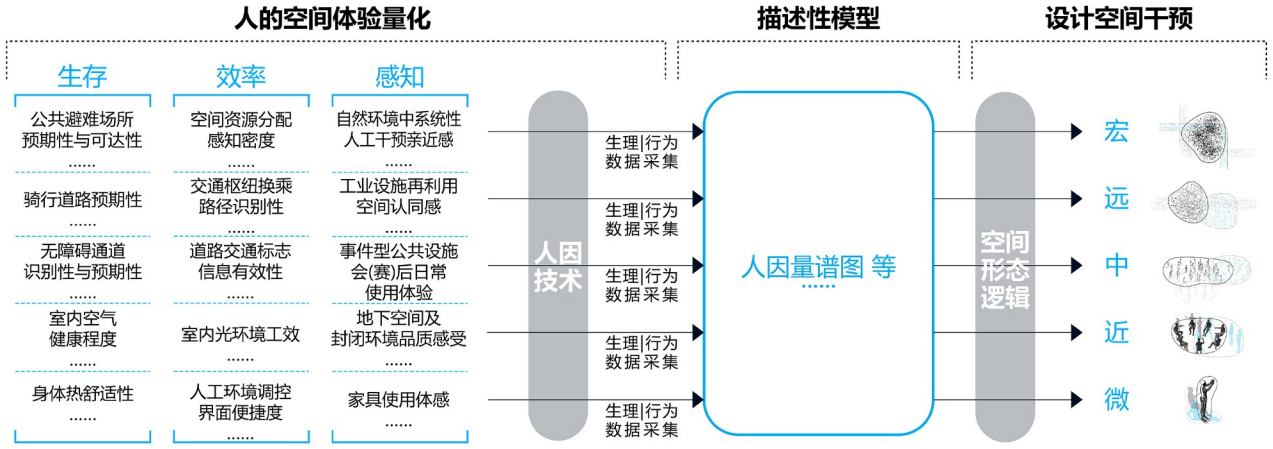


图 2 城市人因工程学的基础逻辑
Figure 2 The basic logic of Urban Ergonomics

志信息有效性、事件性公共设施会(赛)后日常使用效果等属于这一尺度的设计问题.

第四是近(near)尺度, 指大约1 min的步行距离范围, 约为50 m, 其衡量标准是人眼能够清晰识别他人面部的距离, 设计干预经常以1:50~1:100的图纸表达. 如室内空气卫生与健康程度、室内光环境工效、地下空间及封闭环境品质感受等属于这一尺度的设计问题.

最后是微(micro)尺度, 指在无移动时间或移动距离的情况下肢体所能触及的范围, 其设计干预经常以1:20及以下的图纸表达. 如热舒适性、人工环境调控界面便捷度、家具使用体感等属于这一尺度的设计问题.

2.3 城市人因工程学在各设计领域已取得初步进展

在城市设计领域, Nourian等人[15]为了改进人在城市中的步行、骑行基础设施品质, 通过开发一种计算方法, 对道路网络和人口密度等数据进行城市空间层面的建构, 尝试衡量、比较步行、骑行基础设施的供需现状. 王培和饶培伦[16]为了提升驾驶员在城市道路中驾驶的效率, 减轻疲劳, 通过实验模拟驾驶员脑力负荷与城市道路交通标志的交互强度, 改进了交通标志信息量计算方法. 袁周等人[17]和邵磊[18]为提升无障碍设施体验质量, 针对一定样本的肢残人的人群特征与无障碍需求进行研究, 尝试为城市无障碍规划提供支撑.

建筑设计领域则在传统行为学归纳总结的基础上, 逐渐加入了客观数据分析. Bonino等人[19]与本文作者团队合作, 为了评估人与城市空间交互的体验感, 通过装置实验测量并归纳人的身体在与城市空间交互时的一般性特征. 程晓青等人[20,21]的研究集中在老年人群, 为了满足适老需求, 通过对一定样本的对象作行为分析来指导空间设计. 刘燕南等人[22]为了提升高品质公共建筑用能效率, 以办公园区建筑为例研究人的行为对公共建筑节能的影响, 提出了基于行为引导的缓冲空间设计方法.

城市人因工程学在照明设计领域有较为雄厚的基础. 其中, 人体工程学[23]、环境认知[24]、视觉功效[25]问题已得到较多关注. 杜战其等人[26]为提升教室照明效率, 采用层次分析模型和模糊数学综合评价方法, 分析了5所高校的教室照明并提出设计改进策略. 同时, 非视觉正逐渐得到认识与研究. 张昕等人[27,28]出于照明健康的考虑, 依据天然光的“非视觉”理论, 初步形成天然光设计策略.

在通风采暖等工程设备的设计领域中, 城市人因工程学也在建成环境干预实践方面取得了稳步进展. 程瑞等人[29]基于居住者热舒适的相关规律, 提出建筑蓄能围护结构的设计方案与室内环境调控方法的选择. 曹彬等人[30]和朱颖心[31]的人体热舒适与热健康基础理论研究, 验证了热环境动态化对热舒适和热健康水平更有利的规律, 并基于动态热环境参数对人体热舒适的影响, 提出了营建室内热环境的设计建议. 曹世杰等人[32]基于“非均匀、非定常”室内环境参数, 通过耦合有限监测数据与多种快速预测模型, 指导暖通空调在线监控系统的建立和健康室内环境的智能调控. 王闯[33]对建筑用能的人行为模拟研究, 为节能技术的选用提供依据. 近年来, 绿色建筑[34]、健康建筑[35]等理

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

念的提出与发展，反映了数据采集从“物”(建筑能耗或性能)到“人”(生理、行为指标)的主要趋向，更显示出通过指标分析建立描述性模型并为设计决策提供参考的研究趋势.

城市人因工程学在各设计领域的探索，已体现出基于人体动态测量数据建立描述性模型，从而驱动设计决策循环这一基础逻辑的意义. 值得注意的是，各领域的研究进展、应用程度存在明显差异，其中，在城市-建筑设计的经典内核——空间形态设计方面，这一逻辑的应用就存在很大提升空间.

3 一种城市人因工程学的空间形态研究工具: 人因量谱图

3.1 作用: 衔接人体动态测量数据和空间形态设计

客观数据与空间形态设计的有效衔接是突破传统城市-建筑设计方法论局限的难点和关键. 众所周知，从客观数据不能直接推导出空间的几何形态，因而客观数据对空间形态生成的作用必须通过某种桥梁加以实现. 经典的设计工具完全无法提供这种桥梁. 近年，随着技术，特别是大数据技术的发展，一些尝试嫁接数据-几何形态的桥梁性设计工具开始出现. 但不得不指出的是，它们或聚焦于“宏”“微”两个尺度，或以数据的可视化异化空间形态设计，而在城市-建筑空间设计的主体问题域，即“远”“中”“近”3个尺度上，与空间体验质量相关的客观数据-空间形态衔接方面，仍然束手无策.

例如，空间句法(Space Syntax)在宏尺度上运用图论建立城市形态模型[36]，结合拓扑计算方法对空间构形进行量化解析[37]，其量化指标侧重空间数据，非人体数据. 在微尺度上，建筑学借用人机工程学(Ergonomics)研究，通过工作流程图[38,39]、运动轨迹图[40,41]、肌肉激活程度图[42]等，指导家具及室内界面设计. 参数化设计直接通过数据的可视化算法生成空间形态，并不强调数据变量与人的实际生活需求之间的关系.

通过长期的实践和校正，我们提出人因量谱图这种城市人因工程学的空间形态研究工具(图3). 它聚焦在“远”“中”“近”尺度，为人体动态测量数据和城市-建筑空间形态的设计提供了全面系统的衔接. 当然，人因量谱图亦可适用于“宏”“微”尺度.

3.2 方法: 基于空间-时间关系的图解分析

人因量谱图是一种以人在空间中游历的空间-时间关系为基础，描述空间基本人因属性的图解分析工具. 它认为人在空间中所获取的信息量与在该空间中游历的时间正相关，因而在该空间中游历的时间成为人与空间界面交互强度的衡量基础. 这一方法能将城市空间形态审美体验中的主观因素剥离开，而聚焦于人在空间中的主要动线，以及由于附加“信息”而带来的驻留感受.

人因量谱图绘制通常分为5个步骤(图4).

第一步: 领域分割. 依据基本的建筑空间关系，将建筑平面划分为多个连续的领域. 领域主要存在两种形式: 线状空间和面状空间，分别对应以通行为主的空间和以休闲活动为主的空间. 当面状空间M中包含面状空间N时，则对空间M基于空间N进行分解，将分解后的以通行为主的空间视为线状空间，将能够休闲活动的空间仍视为面状空间.

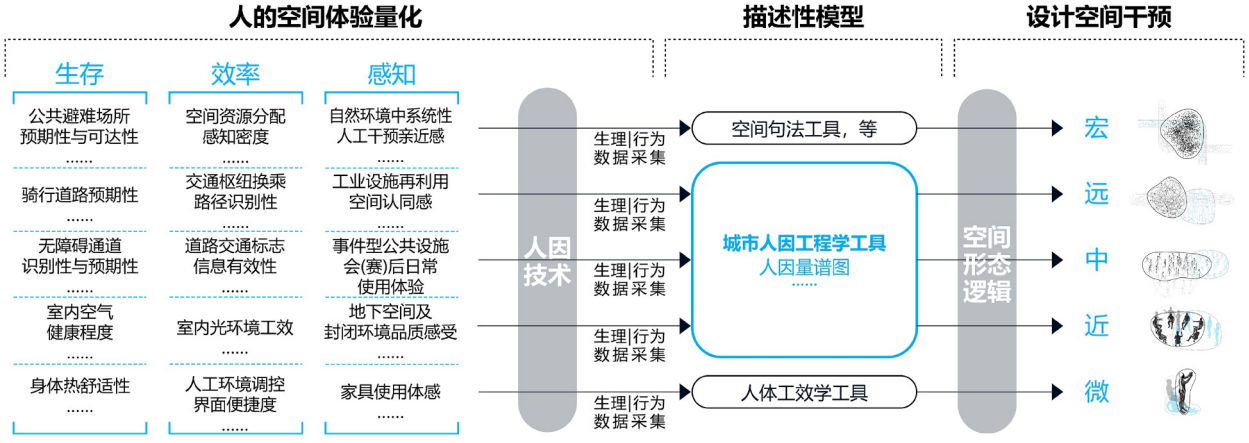


图 3 人因量谱图在描述性模型中的位置

Figure 3 Ergonomic Notation System's position in the descriptive model

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

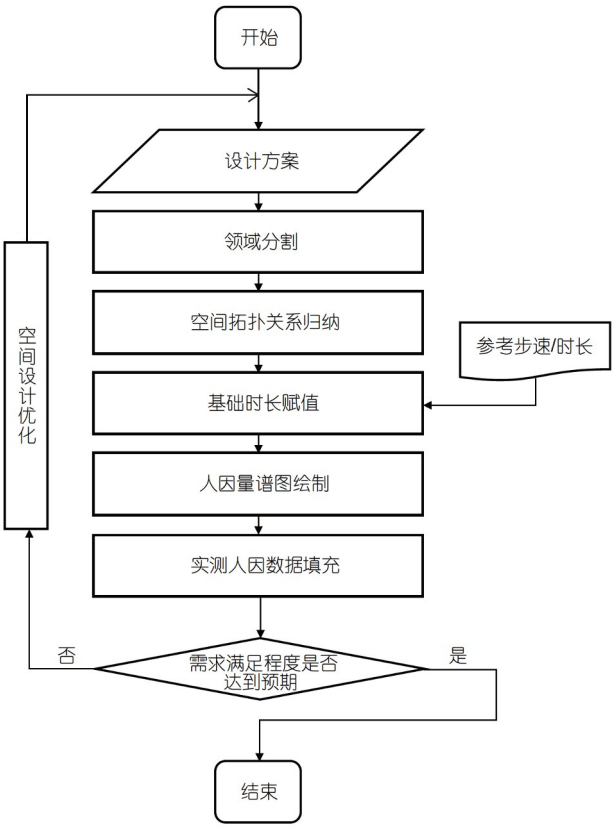


图 4 人因量谱图的图解分析流程
Figure 4 Analytical process of the Ergonomic Notation System

第二步: 空间拓扑关系归纳. 依据平面各部分空间的关系, 将领域分割后各空间的基础时长所对应的矩形以线段/倒角折线相连. 以实线表示慢行可达, 以虚线表示仅车行可达. 线段仅代表连接关系, 无距离信息.

第三步: 基础时长赋值. 依据领域形式, 分别对线状空间和面状空间赋予基础时长. 其中, 线状空间的基础时长t_l为移动距离d_l和速度v的比值; 面状空间的基础时长t_p则按照人在该空间的休闲活动类型, 选择相应的参考基础时长. 不同物理环境条件所对应的参考速度v与不同休闲活动对应的参考基础时长t_p可参照表1和2.

第四步: 人因量谱图[线框]绘制. 对应第二步的拓扑空间关系, 以矩形线框表达每一空间领域的基础时长. 根据领域形式, 线状空间的基础时长t_l与面状空间的基础时长t_p以矩形面积S_l和S_p表示.

对一线状空间:

$$S_l = k\,t_l = k\left(\left[\frac{D}{d_0}+\frac{1}{2}\right]d_0\right)\frac{1}{v}, \tag{1}$$

式中, D为实际距离, d_0为单位距离, v为该空间对应的步速; k为比例系数, 单位为m^2/s. d_0、k与所处尺度相关. d_0取值可参照表3, 并根据研究对象确定具体取值. k用于把基础时长转换为矩形面积, 取值可根据图面表达需求确定, 使得空间所对应的矩形长宽比满足制图清晰要求.

由于在同一条路线上人的行进方向有前后之别, 因而制图将遵循左手原则, 使得基础时长t_l与前进方向路线左侧的面积S_l始终对应.

对一面状空间, 通过极坐标计算, 将其基础时长t_p转化为一矩形的面积S_p:

$$S_p = k\,t_p = L_p\,H_p, \tag{2}$$

表 1 参考速度
Table 1 Reference table for v

场景	v (m/s)
正常步行	1.20[43,44]
开阔地带步行	1.00[45]
3%坡度下坡	1.25[46]
7%坡度下坡	1.33[44]
3%坡度上坡	1.15[44]
7%坡度下坡	1.05[44]
25°以下坡度上楼梯	0.80[44,46]
35°~45°坡度上楼梯	0.50[44,46]

表 2 参考基础时长
Table 2 Reference table for t_p

场景	场景举例	t_p (s)
餐厅用餐	休闲餐厅	≥1800[47]
	酒店	≥3000[48]
体育赛事	单板大跳台	≥1800[49]
看电影	一般	7200~9000[50]
机场候机	一般	≥7200[51]
火车站候车	一般	≥2700[43]

表 3 参考单位距离
Table 3 Reference table for d_0

空间干预尺度	尺度范围(m)	d_0 (m)
宏	>2500	>20
远	1000~2500	10~20
中	50~1000	3~10
近	2~50	1~2
微	2	<1

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

式中, k为比例系数, L_p为矩形的长度, H_p为矩形的高度.

设面状空间的外接矩形一组对边与主要人流方向平行, 以外接矩形的中心为极点O, 向主要人流方向的顺时针90°方向引射线为极轴Ox. 当面状空间中存在实际生活所公认的一代表性标志物时, 如纪念碑、高塔、大型雕塑等, 则将标志物作为极坐标极点进行以上计算. 以极点O为端点、以$\theta(\theta=360°/n,\ n\in N^*)$为角度引射线, 将原面状空间划分为$n$个类扇形区域. 每条射线与面状空间外轮廓线的交点为M_i (i=1, 2, 3, ⋯, n), 其中极轴上的交点为M_1.

取每个类扇形区域的最长侧边长度$\rho_i=\begin{cases}\mathrm{Max}\{|OM_i|,|OM_{i+1}|\}, & i<n\\ \mathrm{Max}\{|OM_1|,|OM_i|\}, & i=n\end{cases}$, 矩形长为

$$L_p=\sum_{i=1}^{n}\left(\left[\frac{\rho_i}{d_0}+\frac{1}{2}\right]d_0\right), \tag{3}$$

矩形高为

$$H_p=\frac{k\,t_p}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left[\frac{\rho_i}{d_0}+\frac{1}{2}\right]\right)d_0}. \tag{4}$$

通过以上步骤, 建筑平面空间系统完全转化为带有基础时长的拓扑图解, 即人因量谱图$_{[线框]}$, 为人因量化指标的比较提供了必要基础条件.

第五步: 实测人体动态测量数据填充. 将实测收集到的人体动态测量数据X(如心率、皮电、脑电、肌电、眼动、肢体姿态等)表示在人因量谱图$_{[线框]}$中, 得到人因量谱图$_{[填充.X]}$实测时长, 以填充矩形面积表示; 其他人体动态测量数据以填充颜色灰度表示.

人因量谱图可直观反映不同空间形态设计所具备的不同人因属性, 协助精准评估空间品质, 指导设计者与决策者对具体空间设计进行精准优化.

3.3 应用场景示例: 北京冬奥会张家口赛区古杨树场馆群

人因量谱图应用于设计通常包含3个环节: 运用人对城市空间体验的四级体系, 解析设计问题; 运用人因量谱图, 基于空间-时间关系分析比较人体动态测量数据; 依据比较结论, 评估城市-建筑设计方案.

以下通过北京2022冬奥会张家口赛区古杨树场馆群中, 远与中尺度下的两个应用场景进行示例.

3.3.1 远尺度

以北京2022冬奥会张家口赛区古杨树场馆群和平昌2018冬奥会平昌赛区阿尔宾西亚场馆群为例, 基于人因量谱图$_{[线框]}$比较规划设计.

根据古杨树场馆群总平面, 对不同领域选取相应的基础时长. 古杨树场馆群主要属于远尺度, 取参考单位距离d_0=20 m, 参考单位角度θ=45°, 比例系数k=15, 得到其人因量谱图$_{[线框]}$(图5). 以同样取值得到阿尔宾西亚场馆群人因量谱图$_{[线框]}$(图6).

据此, 两方案具有了可比性, 呈现出不同的特征. 其中, 在空间拓扑关系方面, 古杨树场馆群具备慢行体验连续性即较高步行可达性, 阿尔宾西亚场馆群则强调机动车连续性. 在基础时长方面, 二者具有相近的空间距离范围, 古杨树场馆群总游历时长更大, 接近构建旅游目的地的“2.5小时法则”要求(“2.5小时法则”指参观者在旅游目的地中游历2.5 h以上, 形成完整的连续性体验. 如黄潇婷[52]研究得出, 旅游者在颐和园的总游览时间集中在2~3 h; 戈鹏等人[53]研究得出, 九寨沟各景点游览时长之和为170 min; 蔡超然[54]研究得出, 滨海城市居民日常休闲活动的时长集中在2~3 h; 等等).

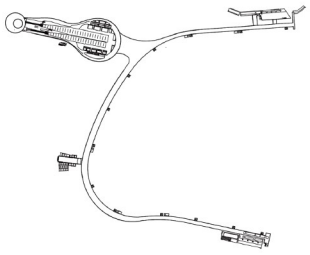
3.3.2 中尺度

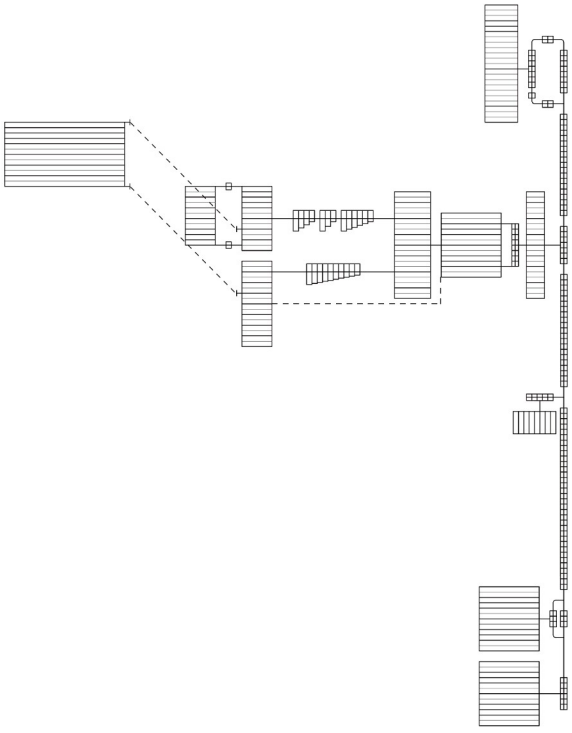
以北京2022冬奥会张家口赛区古杨树场馆群中的“雪如意”国家跳台滑雪中心顶峰圆环的多方案比较为例. 如图7所示, 顶部圆环布局具有方案1-同心圆、方案2-微偏心圆、方案3-重偏心圆3种方案. 此处的重点设计问题有二: 其一, 室内空间如何能容纳更多样的活动; 其二, 顶峰空间提供了360°的全景视野, 人如何能在观景时获得更好的体验.

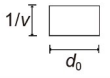
通过对3种方案的人因量谱图$_{[线框]}$进行绘制, 取参考单位距离d_0=6.4 m, 参考单位角度θ=45°, 比例系数k=5. 比较人因量谱图$_{[线框]}$, 可以看出, 方案1中分割出了两块面积均匀的公共空间: A空间与B空间, 此两处空间面积有限, 都只适合容纳短时间的展览活动; 方案2中, A空间面积更大, 可以容纳包括展览、演出、讲座会议等更多活动, B空间同样具有一定面积; 方案3中, A空间面积也很大, 同样可以容纳多种活动, 但B空间只剩余线状空间, 不再具有面状空间.

通过对3种方案的室内空间进行VR建模, 测量被试在沿着外圈游历时, 在各处的停留时长, 并将停留时长数据填充入人因量谱图中. 从图7可以看出, 方案1中, B空间中人在游历中的停留时长更长, 方案2中, A空间中的停留时长更长, 而方案3各处较均匀. 这显示了方案1

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241



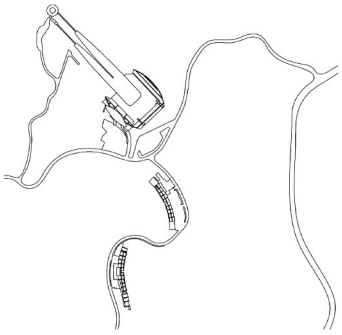


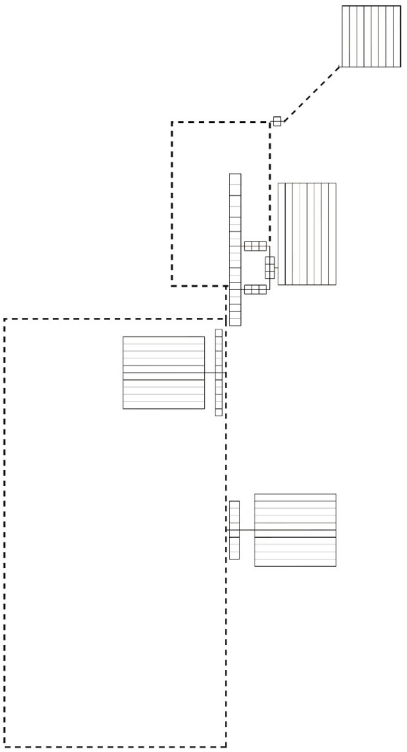


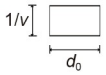
· 参考单位距离d_0: 空间实际距离
· 高度 1/v: 步行速度的倒数
· 面积 S: 基础时长

场景	参考步速v (m/s)	参考时长t (s)
正常步行	1.20	–
开阔地带步行	1.00	–
3%坡度下坡	1.25	–
7%坡度下坡	1.33	–
3%坡度上坡	1.15	–
7%坡度上坡	1.05	–
25°以下坡度上楼梯	0.80	–
35°~45°坡度上楼梯	0.50	–
音乐会	–	7200
演唱会	–	7200
滑雪比赛	–	3600
室内通道型广场休憩	–	600
室外通道型广场休憩	–	900

图 5 古杨树场馆群人因量谱图[线框]
Figure 5 Ergonomic notation for Nodic Cluster, Beijing 2022[Unfilled]





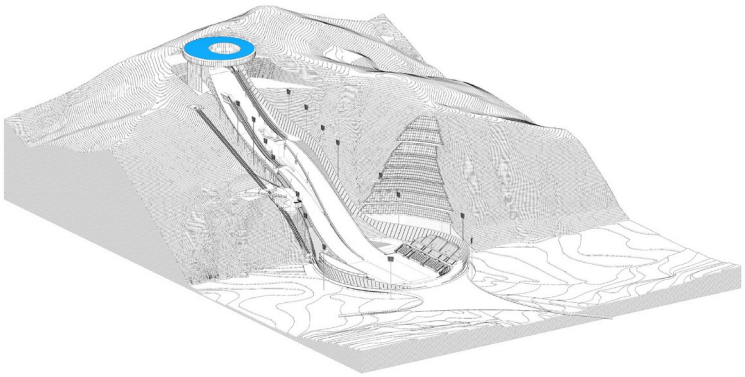


· 参考单位距离 d_0: 空间实际距离
· 高度 1/v: 步行速度的倒数
· 面积 S: 基础时长

场景	参考步速v (m/s)	参考时长t (s)
正常步行	1.20	–
开阔地带步行	1.00	–
3%坡度下坡	1.25	–
7%坡度下坡	1.33	–
3%坡度上坡	1.15	–
7%坡度上坡	1.05	–
25°以下坡度上楼梯	0.80	–
35°~45°坡度上楼梯	0.50	–
音乐会	–	7200
演唱会	–	7200
滑雪比赛	–	3600
室内通道型广场休憩	–	600
室外通道型广场休憩	–	900

图 6 阿尔宾西亚场馆群人因量谱图[线框]
Figure 6 Ergonomic notation for Nordic Cluster, Pyeongchang 2018[Unfilled]

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241



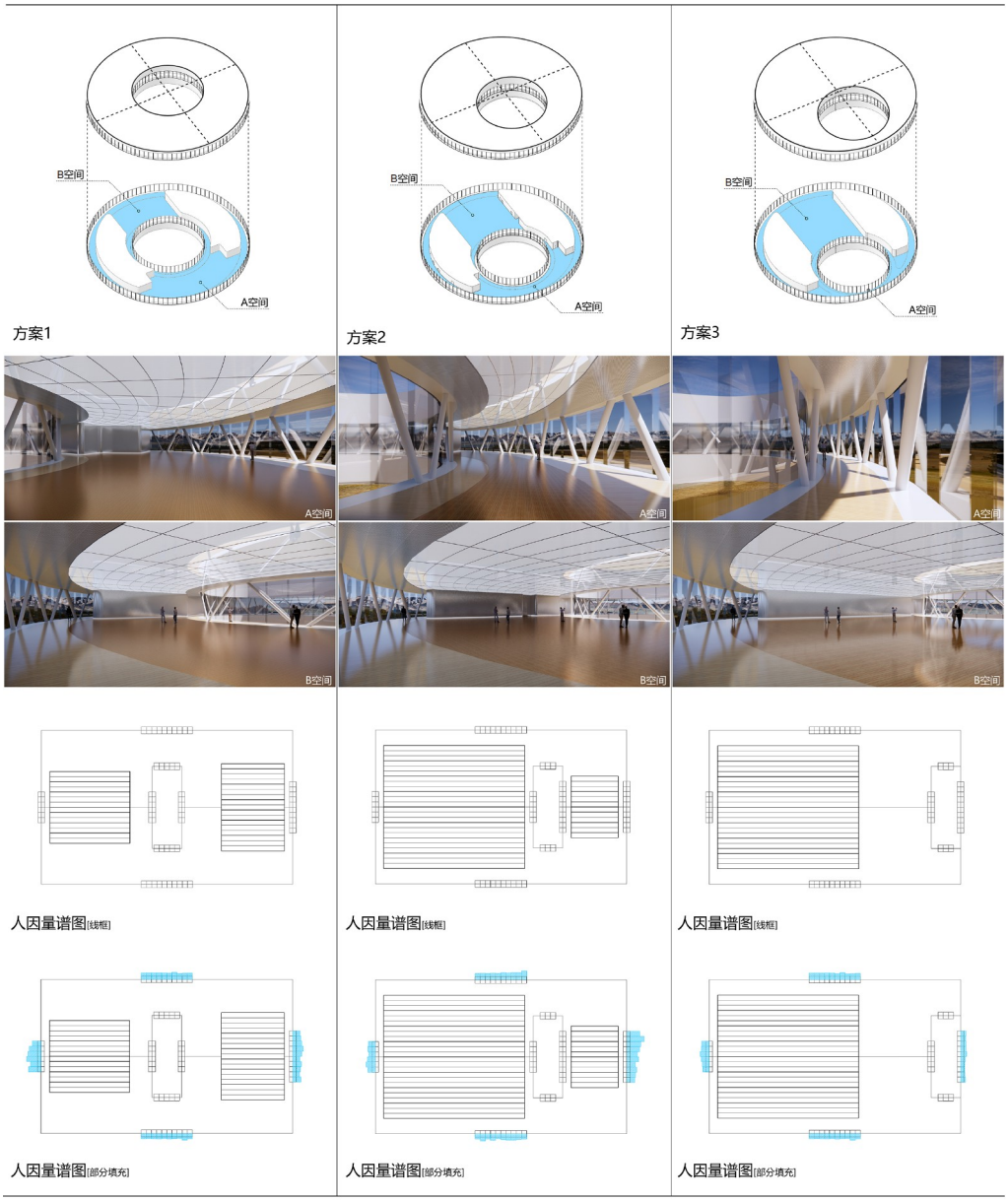


图 7 “雪如意”顶峰俱乐部3种方案对比

Figure 7 Comparison of three design solutions for the peak club in National Ski Jumping Centre

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

中B空间与方案2中A空间的特质更能吸引人在此停留.

综上, 设计团队选用方案2作为实施方案. 对比3个方案, 一方面, 方案2具有一大一小两种面状空间, 能够适应更多样的活动; 另一方面, 综合宏与远尺度考虑, A空间方向将具有更多景色可观, 因此选择A空间更适合人停留的方案2.

4 总结与展望

城市人因工程学是一种立足于高品质城市空间需求与碳中和时代背景的设计科学, 它基于实际生活体验或VR环境中的人体动态测量数据, 作用于以建成空间品质提升为目的的设计干预.

根据人的城市空间体验的生存、效率、感知、价值表达四级体系, 城市人因工程学将相对模糊或抽象的城市品质问题转化为不同层级清晰的体验问题, 在空间上将这些体验问题分解到宏、远、中、近、微5个尺度.

城市人因工程学相关研究在城市、建筑、照明、通风采暖等设计领域已取得初步进展, 说明人因技术能够用于空间体验的量化过程, 其量化结果也能对设计起到指导作用.

在城市-建筑设计的经典内核——空间形态设计方面, 城市人因工程学拥有巨大的潜力. 它提供了一种衔接实测数据与空间形态的桥梁. 借助人因量谱图等工具, 它可以从传统的主观审美体验中剥离出带有客观规律性的部分, 以更精准的方式服务于设计评估与设计决策, 未来可广泛应用于设计过程. 在设计前期, 可用人因量谱图协助进行空间需求判断; 在设计后期, 当人因量谱图基本稳定后, 在一定精度范围下, 以VR环境进行数据采集, 借助接近穷举的方法寻找最优解; 在空间建成后, 可在实际生活环境中再次进行数据采集, 检验设计预设, 归纳、提炼设计方法论、空间类型学、空间认知机制等方面的规律性知识.

城市人因工程学对实现“双碳”目标具有积极的意义. 一方面, 建成空间作为物质和能源消费端的重要组成部分, 优化其体验质量可明显提升资源集约度、能源利用率; 另一方面, 城市人因工程学的数据采集方法也可用于测量人的实际生活碳足迹.

城市人因工程学作为新兴的设计科学, 诸多方面有待进一步探索和讨论. 例如, 城市人因工程学仍然坚持设计师是设计干预的主体, 这一论断与“人工智能终将取代设计师”的观点之争仍在继续; 城市人因工程学建立了部分量化城市审美体验的体系, 但鉴于城市与建筑审美本身的复杂性与多样性, 这一体系目前只适用于城市-建筑审美中公认的共性部分; 城市人因工程学已经应用于若干城市-建筑更新实践项目, 虽然现阶段已取得积极效果, 但因建成与实际使用时间尚短, 其长期效应还有待考证.

我们期待城市人因工程学在各学科的交融支持下, 结合我国新时期的城市更新实践, 创造出更高品质的城市生活空间; 也结合21世纪世界城市更新话题的讨论, 提供一种发展设计科学的新路径.

参考文献

1 Zhuang W M. From architectural programming to post occupancy evaluation: A feedback mechanism of architectural procedure circle (in Chinese). Design Community, 2017, (5): 125–129 [庄惟敏. “前策划-后评估”: 建筑流程闭环的反馈机制. 住区, 2017, (5): 125–129]
2 Maslow A. Motivation and Personality. Beijing: Tsinghua University Press, 2020. 22–35
3 Norman D. Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things. New York: Basic Books, 2007. 63–89
4 Alfonzo M A. To walk or not to walk? The hierarchy of walking needs. Environ Behav, 2005, 37: 808–836
5 Gehl J, Svarre B. How to Study Public Life. Washington DC: Island Press, 2013
6 Hou Y M, Ji L H. Design science: From normative to descriptive (in Chinese). Sci Technol Rev, 2017, 35: 10 [侯悦民, 季林红. 设计科学: 从规范性到描述性. 科技导报, 2017, 35: 10]
7 Mendes M A, da Silva I, Ramires V, et al. Metabolic Equivalent of Task (METs) thresholds as an indicator of physical activity intensity. PLoS One, 2018, 13: e0200701
8 Unfried B, Aguinaldo A, Cipriani D. What is the influence of cambered running surface on lower extremity muscle activity? J Appl BioMech, 2013, 29: 421–427
9 Lay A N, Hass C J, Gregor R J. The effects of sloped surfaces on locomotion: A kinematic and kinetic analysis. J BioMech, 2006, 39: 1621–1628
10 Nie J, Zhou T, Chen Z, et al. Investigation on entraining and enhancing human circadian rhythm in closed environments using daylight-like LED mixed lighting. Sci Total Environ, 2020, 732: 139334
11 McCauley-Bush P. Ergonomics: Foundational Principles, Applications, and Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2011

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

12 Rayner K. Eye Movements and Visual Cognition: Scene Perception and Reading. New York: Springer Science & Business Media, 2012
13 Kim K H, Bang S W, Kim S R. Emotion recognition system using short-term monitoring of physiological signals. Med Biol Eng Comput, 2004, 42: 419–427
14 Cifrek M, Medved V, Tonković S, et al. Surface EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics. Clin BioMech, 2009, 24: 327–340
15 Nourian P, Rezvani S, Valeckaite K, et al. Modelling walking and cycling accessibility and mobility. Smart Sustain. Built Environ, 2018, 7: 101–116
16 Wang P, Rao P L. A driver's perception and comprehension of traffic signs in Beijing (in Chinese). Ind Eng J, 2011,14: 114–117 [王培, 饶培伦. 驾驶员对北京市道路交通标志的感知和理解. 工业工程, 2011, 14: 114–117]
17 Yuan Z, Liu T, Shao L. The physically disabled's accessibility needs and satisfaction study of the 15-minute community service circle in Beijing (in Chinese). Planners, 2019, 35: 25–31 [袁周, 刘田, 邵磊. 北京市肢残人对一刻钟社区服务圈的无障碍需求与满意度研究. 规划师, 2019, 35: 25–31]
18 Shao L. Accessibility-related issues in the construction of the 15-minute community service circle (in Chinese). Design Community, 2021, (1): 16–17 [邵磊. 一刻钟社区服务圈建设中的无障碍相关问题. 住区, 2021, (1): 16–17]
19 Bonino M, Mancini M, Deng H S. Reconnecting human body and urban space: Reading tools and design practices (in Chinese). World Archit, 2021, (3): 78–85, 124 [Bonino M, Mancini M, 邓慧姝. 人体与城市空间再连接——阅读工具和设计实践. 世界建筑, 2021, (3): 78–85, 124]
20 Cheng X Q, Zhang H X, Yin S J. Renovating the existing buildings for the elderly in a community: Revelation of the construction of a service center for the elderly in Dashilar Community in Beijing (in Chinese). Archit J, 2018, (8): 62–67 [程晓青, 张华西, 尹思谨. 既有建筑适老化改造的社区实践——北京市大栅栏社区养老服务驿站营建启示. 建筑学报, 2018, (8): 62–67]
21 Cheng X Q, Li J N. Interpretation of the design for the elderly from the perspective of ergonomics (in Chinese). World Archit, 2021, (3): 54–57, 124 [程晓青, 李佳楠. 人因工程学视角下建筑适老化设计理念解读. 世界建筑, 2021, (3): 54–57, 124]
22 Liu Y N, Cheng X X, Lin Y Y. Research on buffer space design of office park building based on behavior guidance (in Chinese). Archit Techn, 2020, (7): 92–97 [刘燕南, 程晓喜, 林奕莹. 基于行为引导的办公园区建筑缓冲空间设计研究. 建筑技艺, 2020, (7): 92–97]
23 Li K X, Shao X F. Research on human rhythmic lighting design based on Human Factors Engineering (in Chinese). Furn Inter Design, 2018, (8): 62–63 [李可欣, 邵晓峰. 基于人因工程学的人体节律照明设计研究. 家具与室内装饰, 2018, (8): 62–63]
24 Cai J Q, Du P, Wen R R. The effect of illumination light environment on visual comfort (in Chinese). Design Commun, 2016, (6): 58–63 [蔡建奇, 杜鹏, 温蓉蓉. 照明光环境对视觉健康舒适度的影响. 住区, 2016, (6): 58–63]
25 Zhang X, Zhou X Y, Chen X D. From "classroom daylighting" to "desk daylighting": Reassessment of daylighting standard in primary and middle school classrooms based on proportion of bad utilisation time (in Chinese). World Archit, 2021, (3): 36–41, 126 [张昕, 周昕怡, 陈晓东. 从"教室采光"到"课桌采光"——基于不良利用时间占比的中小学教室采光标准重评估. 世界建筑, 2021, (3): 36–41, 126]
26 Du Z Q, Yin J N, Wang H W, et al. Evaluation and optimization of lighting system of classroom based on Ergonomics (in Chinese). J Hebei Univ Eng (Nat Sci Ed), 2016, 33: 61–66 [杜战其, 殷佳妮, 王洪伟, 等. 基于人因学视角的高校教室照明综合评价与优化. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33: 61–66]
27 Zhang X, Du J T. Research and design of daylighting: The new trend towards non-visual effect and health (in Chinese). Archit J, 2017, (5): 87–91 [张昕, 杜江涛. 天然光研究与设计的"非视觉"趋势和健康导向. 建筑学报, 2017, (5): 87–91]
28 Dong Y J, Zhang X. Review and application prospect of arousal lighting reseach (in Chinese). New Archit, 2019, (5): 32–35 [董英俊, 张昕. 唤醒照明研究综述与应用展望. 新建筑, 2019, (5): 32–35]
29 Cheng R, Wang X, Zhang Y P. New concepts and approaches to develop a sustainable building envelope (in Chinese). South Archit, 2012, (1): 86–91 [程瑞, 王馨, 张寅平. 营造可持续建筑蓄能围护结构的新思路及新方法. 南方建筑, 2012, (1): 86–91]
30 Cao B, Huang L, Ouyang Q, et al. Human thermal adaptation in real building environment (1) — Comparison between air-conditioned and non-air-conditioned public buildings (in Chinese). Heat Vent Air Condition, 2014, 44: 74–79 [曹彬, 黄莉, 欧阳沁, 等. 基于实际建筑环境的人体热适应研究(1)——夏季空调与非空调公共建筑对比. 暖通空调, 2014, 44: 74–79]
31 Zhu Y X. How to create a healthy and comfortable indoor thermal environment: Exploration on the relationship between the built environment and human comfort and health (in Chinese). World Archit, 2021, (3): 42–45, 126 [朱颖心. 如何营造健康舒适的建筑热环境——建筑环境与人体舒适及健康关系的探索. 世界建筑, 2021, (3): 42–45, 126]
32 Cao S J, Ren C, Zhu H C. Online monitoring strategy of HVAC system based on the fast prediction models using limited monitoring data and low-dimensional linear models (in Chinese). Build Sci, 2021, 37: 83–92 [曹世杰, 任宸, 朱浩程. 基于有限监测与降维线性模型耦合预测的暖通空调系统在线监控方法与策略. 建筑科学, 2021, 37: 83–92]
33 Wang C. Simulation Research on occupant energy-related behaviors in building (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2014 [王闯. 有关建筑用能的人行为模拟研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2014]
34 Qin Y G, Lin B R, Zhu Y X. Chinese green building assessment system research (in Chinese). Archit J, 2007, (3): 68–71 [秦佑国, 林波荣, 朱颖心. 中国绿色建筑评估体系研究. 建筑学报, 2007, (3): 68–71]

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

35 Ge Y J, Meng C, Han M C, et al. Assessment practice and thinking of healthy building in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 239–245 [盖轶静, 孟冲, 韩沐辰, 等. 我国健康建筑的评价实践与思考. 科学通报, 2020, 65: 239–245]

36 Yang T. Space Syntax: Meso-and micro-urban morphology under the view of graph theory (in Chinese). Urban Plann Inter, 2006, (3): 48–52 [杨滔. 空间句法: 从图论的角度看中微观城市形态. 国外城市规划, 2006, (3): 48–52]

37 Zhang Y, Wang J G. Re-discussing “Spatial Syntax” (in Chinese). Architect, 2004, (3): 33–44 [张愚, 王建国. 再论“空间句法”. 建筑师, 2004, (3): 33–44]

38 Wickens C. Engineering Psychology and Human Performance. Columbus: Charles E. Merrill Pub, 1984

39 Ioannou G. An integrated model and a decomposition-based approach for concurrent layout and material handling system design. Comput Ind Eng, 2007, 52: 459–485

40 Jia S. Dynimaics and motion planning of lower extremity exoskeleton (in Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Southeast University, 2016 [贾山. 下肢外骨骼的动力学分析与运动规划. 博士学位论文. 南京: 东南大学, 2016]

41 Ma G, Hao Z, Wu X, et al. An optimal electrical impedance tomography drive pattern for human-computer interaction applications. IEEE Trans Biomed Circuits Syst, 2020, 99: 1

42 Palmas G, Bachynskyi M, Oulasvirta A, et al. MovExp: A versatile visualization tool for human-computer interaction studies with 3D performance and biomechanical data. IEEE Trans Visual Comput Graphics, 2014, 20: 2359–2368

43 Huo L Q. Research on passenger flow assiginment in internal service network of railway passenger terminals (in Chinese). Master Dissertation. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019 [霍立群. 铁路客运枢纽内部服务网络客流分配研究. 硕士学位论文. 武汉: 武汉理工大学, 2019]

44 Chen R, Dong L Y. Observations and preliminary analysis of characteristics of pedestrian traffic in Chinese metropolis (in Chinese). J Shanghai Univ (Nat Sci), 2005, (1): 93–97 [陈然, 董力耘. 中国大都市行人交通特征的实测和初步分析. 上海大学学报(自然科学版), 2005, (1): 93–97]

45 Editorial Committee of Traffic Engineering Handbook of China Highway Society. Handbook of Traffic Engineering (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 1998. 583–602 [中国公路学会《交通工程手册》编委会. 交通工程手册. 北京: 人民交通出版社, 1998. 583–602]

46 Rastogi R, Thaniarasu I, Chandra S. Design implications of walking speed for pedestrian facilities. J Transp Eng, 2011, 137: 687–696

47 Fujiyama T, Tyler N. An explicit study on walking speeds of pedestrians on stairs. Japan Society of Civil Engineers/Transportation Research Board, USA, 2004

48 iResearch. China new food & beverage consumer behavior trends research report 2018 (in Chinese). iReseach Research Series, 2018 [艾瑞咨询. 中国新餐饮消费行为趋势研究报告2018年. 艾瑞咨询系列研究报告, 2018]

49 FIS. FIS Freeski & Snowboard World Cup Event Guide. Beijing, 2019

50 Zeng G J, Liu M, Zhang X. Revenue management strategies of a star-rated hotels self-service restaurant: Case from Guangzhou Grand Hyatt (in Chinese). Tourism Tribune, 2016, 31: 86–96 [曾国军, 刘梅, 张欣. 星级饭店自助餐厅收益管理策略研究——基于富力君悦凯菲厅的案例分析. 旅游学刊, 2016, 31: 86–96]

51 Gao P F, Chen G J, Zhang S Y, et al. Analysis of travel expectation reserved time based on user portrait of advanced traveler (in Chinese). Sci Technol Eng, 2021, 21: 12286–12293 [高鹏飞, 陈国俊, 张抒扬, 等. 基于智慧出行用户画像的出行期望预留时长分析. 科学技术与工程, 2021, 21: 12286–12293]

52 Huang X T. A study on temporal-space behavior pattern of tourists based on time-geography science: A case study of Summer Palace, Beijing (in Chinese). Tourism Tribune, 2009, 24: 82–87 [黄潇婷. 基于时间地理学的景区旅游者时空行为模式研究——以北京颐和园为例. 旅游学刊, 2009, 24: 82–87]

53 Ge P, Zheng W M, Xiao X H, et al. A simulation study based on the regional space-time load balancing of Jiuzhaigou (in Chinese). J Ind Eng Eng Manag, 2013, 27: 99–106 [戈鹏, 郑伟民, 肖雄辉, 等. 基于九寨沟区域时空负荷均衡的仿真研究. 管理工程学报, 2013, 27: 99–106]

54 Cai C R. Study on leisure behavior of coastal city residents (in Chinese). Master Dissertation. Xaimen: Huaqiao University, 2020 [蔡超然. 滨海城市居民休闲行为的研究. 硕士学位论文. 厦门: 华侨大学, 2020]

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241

Summary for “城市人因工程学: 一种关于人的空间体验质量的设计科学”

Urban Ergonomics: A design science on spatial experience quality

Li Zhang*, Huishu Deng, Xiaohan Mei, Lingbo Pang, Qixu Xie & Yang Ye

School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China
* Corresponding author, E-mail: brianchang@mail.tsinghua.edu.cn

Urban Ergonomics is a design science driven by modern ergonomic data. It reacts to the challenges to architecture posed by changes, emergencies and advancements of the contemporary world, signifying a return to architectural humanism powered by new sciences. The key methodology of Urban Ergonomics is the quantitative descriptive model through which ergonomic data inform design with precision. The rise of Urban Ergonomics is aligned with the new human-centred urbanisation movement in China while offering positive potential in the country’s transformation towards carbon net zero. This paper is a general introduction to Urban Ergonomics, putting basic discussions on its “why”, “what” and “how” in three sections: 1 emergence, 2 ranges, and 3 tools. Urban Ergonomics opens up a whole new dimension for the revival and redevelopment of design science in the 21st-century discourse.

Combined with the emerging technologies, Urban Ergonomics supports a more precise design decision-making process based on ergonomic analysis. For the project to be built, the ergonomic analysis generally takes the parameter of enumeration of virtual scenario as the independent variable, and takes ergonomic data as the dependent variable, with the help of descriptive models for a precise selection among different solutions; for the built spaces, real-life scenarios are analysed and assessed through the descriptive models and ergonomic data to support the renovation and regeneration; for design purposes, ergonomic analysis adds new design targets based on new quantitative spatial experience to the traditional targets. All of the processes, results and quantitative design targets above can lead to replicable application scenarios and bring new knowledge to design science.

According to the four-level system of the spatial experience of survival, efficiency, reception and expression, Urban Ergonomics transforms relatively vague urban space quality issues into clear design targets, and divides these spatial experience issues into five scales: Macro, far, medium, near and micro. Initial research progress has been made in the fields of urban design, architecture, lighting design, ventilation and heating design, and so on. It shows that human factors techniques can be applied in the quantification of spatial experience and that their quantified results can lead to more precise design intervention.

Urban Ergonomics demonstrates its great potential in the core area of urban-architecture design intervention — forming in which it fills the gap between the ergonomic data and the spatial form. With the help of tools such as Ergonomic Notation Systems, Urban Ergonomics studies the objective and regular parts of the traditional aesthetic experience and helps both post-occupancy evaluations (POE) as well as design decision-making, which can be widely applied in the design process in the future: In the early stage of design, Ergonomic Notation System can help determine spatial requirements; in the late stage of design, when the ergonomic notation of the design is decided, the ergonomic data collected in a VR scene can help accurately search for the optimal solution to some extent; when the environment has been built, ergonomic data can also be collected in real-life scenarios to help evaluate the spatial experience quality and to summarise and redefine the knowledge of design methodology, spatial typology, spatial cognition, and so on. It is expected to provide a new pathway for the redevelopment of design science supported by the interdisciplinary in the 21st century.

Urban Ergonomics, design science, ergonomic analysis, cross-scale design intervention, Ergonomic Notation System, spatial experience quality

doi: 10.1360/TB-2021-1241

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1241