

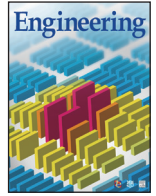


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Sustainable Infrastructure—Article

以上海 10 km² 的近零能耗区项目为例浅谈作为城市基础设施的人力 - 能源 - 水资源联动系统的地理设计方案

Perry Pei-Ju Yang^{a,b}, Cheryl Shu-Fang Chi^{c,*}, Yihan Wu^{a,b}, Steven Jige Quan^{a,b,d}

^a Eco-Urban Lab, School of City and Regional Planning & School of Architecture, College of Design, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0155, USA

^b Eco-Urban Lab, College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China

^c Disney Research China, Shanghai 200021, China

^d Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 November 2017

Revised 1 December 2017

Accepted 3 January 2018

Available online 7 April 2018

关键词

地理设计

城市设计

城市基础设施

能源表现

迭代过程

多目标优化

摘要

日益显著的气候变化对新的城市设计模式提出了巨大的挑战，我们需将如能源、水资源的使用效率等城市系统的性能元素纳入考虑范围。传统的城市设计模式注重形式的设计过程，却缺乏性能维度的考量。地理设计是一种新兴的方法，该方法更加强调系统性思维、数字技术与地理环境之间的联系。本文介绍了该领域大规模合作研究第一阶段的研究成果，并进一步提出了一种用于区域规模城市设计的地理设计方案，以整合可再生能源生产系统、能源消耗系统及雨水管理系统等，并兼顾了人类的城市生活体验。该方案结合了地理信息系统（GIS）、参数化建模技术和多学科设计优化（MDO）工具，可实现协同设计决策。为了实现近零能耗城市实验区的设计，该方案通过了测试案例的反复推演与调整。我们最终的方案有如下3个特点：①集成的地理设计和参数化设计：方案采用参数化设计方法，通过自定义程序算法生成焦点尺度的原型，并应用地理设计来评估设计方案的性能；②关注设计流程：方案阐述了设计过程中的问题定义标准、信息的选择标准以及设计决策的制定标准；③多目标优化：测试案例通过性能建模生成指标，并通过多目标计算实验得出原理，从中我们可以得知如何改进该设计。本文总结了基于多学科设计优化（MDO）工具的城市设计方案和基础设施系统建模方案，并描述了随后的实施步骤。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

由气候变化以及资源短缺带来的突出挑战对我们的城市设计提出了更高要求，我们需将能源的高效运用与水资源的基础设施建设同更紧凑的城市节奏及更舒适的居住体验等要求相结合。这使得城市系统的设计比往常更加复杂，并使城市设计者与工程师协同工作，以探索相互关联的城市系统的潜在协同效应比以往更加迫

切。依靠设计师的经验和启发式判断的传统城市设计方法会产生有限的替代方案和与之相关的风险，从而造成了节能方案的弹性——伴随着我们所承受不起的风险。

地理设计的出现作为一种新型方案有效解决了上述问题，它将设计及其生态和社会影响融入基于价值和面向目标的地理空间信息中，以解决跨系统设计挑战。地理设计是一个迭代式的动态过程，它链接系统思维、数字技术以及地理信息[1]。它强调思维逻辑差异巨大的

* Corresponding author.

E-mail address: cheryl.chi@disney.com (C.S.-F. Chi)

学科间的合作（如地理学家、社会学家、建筑师、城市设计师、土木工程师和当地居民等之间的合作）。地理设计框架包含6个连续模型：表示、过程、评估、变更、影响和决策，如图1所示[1]。该框架中的前3个模型定义了其表述及范围，并评估了该框架所含的条件及相关操作。通过设计后3个模型解决了基于现状可能发生的变化，并评估了这些变化可能带来的潜在影响。最重要的是，该模型以3次迭代回答了6个问题，分别从设计的原因、方式和内容作了阐述。具体而言，第一次迭代为设计团队提供了识别当前情况下的机制所需的基本知识与信息，并确定了设计问题；第二次迭代则以相反的顺序（即从问题6到问题1）回答了相同的6个问题，并形成解决所确定问题的方法；最后，第三次迭代根据收集的数据以及前两次迭代期间所确定的方法生成最终设计方案。

将地理设计融入城市设计中时将面临3大挑战：①了解设计变量、内容以及系统之间复杂的关系及其相互依赖性，掌握上述元素变化的基本机制；②确定决策目标并处理不同利益相关者目标间的冲突；③提出更多设计方案，以便做出最佳抉择。此外，当地理设计首次被开发面世时，还没有可用于强有力的分析和信息综合的先进计算仿真工具。因此，这些工具如何优化流程设

计同时解决我们城市面临的当代挑战等问题仍未引起足够重视。

因此，我们针对近零能耗区提出了区域规模的具有实验性及发展性的地理设计方案框架，其中着重强调了数字技术，特别是参数化建模、地理信息系统（GIS）和多学科设计优化（MDO）等的应用，使城市工程系统融入城市设计。本文将对一个更大规模研究合作的第一阶段的结果进行报告，在该合作中我们使用测试案例对我们的设计框架进行了开发与检测。本文最后讨论了已被印证的问题，并提出了推进该项工作的研究议程。最终，我们所提出的由数字技术赋能的地理设计方案将以人为本的城市设计和基于科学的工程设计紧密地结合，从而能够更有效地应对气候变化所带来的巨大挑战。

2. 地理设计方案框架

2.1. Steinitz 地理设计框架的扩展

在本研究中提出的地理设计框架扩展了Steinitz的地理设计方案的框架，如图2所示，该框架将3个核心组件纳入多学科协同设计，并探索了大量的设计选项：多学科设计优化（MDO）、参数化建模和城市建模仿真工

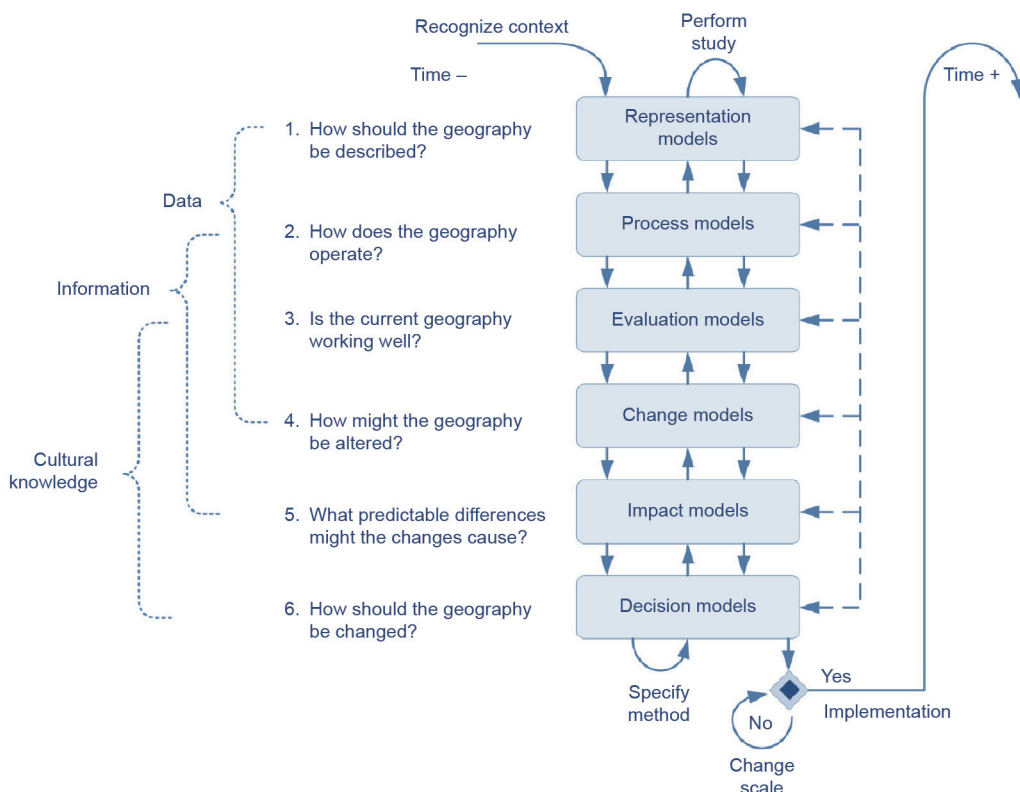


图1. Steinitz[1]的地理设计方法。

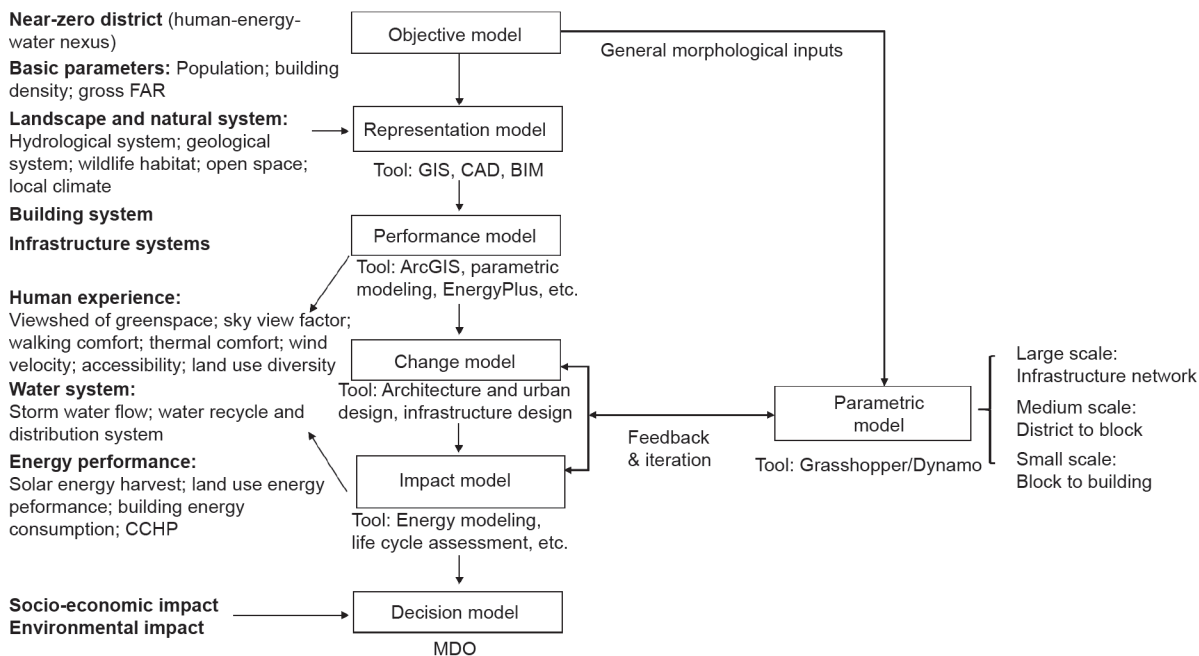


图2. 城市系统中人力-能源-水资源联动的地理设计延伸方案。CCHP: 冷热电三联供系统; FAR: 容积率。

具等（如城市建筑能耗建模）。

为使设计人员能够探索大量设计方案，充分利用现有知识并构思出超越个人经验范围的设计方案，我们需要一种充分利用先进计算和仿真技术优势的全新思维路径及工具，MDO正是我们想要的。

开发MDO工具是为了解决设计挑战，解决在设计复杂系统过程中会存在的复杂性和不确定性问题。这种方法将设计规则与设计要求进行提取，并编码成一组用于导航设计空间的算法和约束[2,3]。MDO创建于20世纪80年代，从那时起，由于复杂工程系统对可靠性和鲁棒性等方面的高性能需求日益增加，MDO的性能也随之迅猛发展[2]。MDO也被称为多目标设计优化，以强调其在多个目标间评估与权衡的能力。

随着在先进飞机的设计、车辆、能源系统和建筑系统方面的广泛成功应用，MDO似乎成为解决未来城市设计新兴需求的有效方法。而已经提出的用于分布式卫星系统[3]概念设计的MDO过程与地理设计方法[1]之间存在很多相似之处，这更表明有机会将MDO应用于城市设计。

例如，MDO工具需将城市设计问题转化为数学优化问题，其中包括：①决策变量；②目标函数；③约束方程和④决策变量界限[3]。在地理编码方法[1]的第二次迭代中（即问题的解答过程），使用MDO的正确时机可以被有效识别。与决策及其影响相关的问题将定义设计目标与设计要求。而评估相关的问题则会与其他定性

指标一同定义设计的性能指标。

然而，尽管城市设计往往基于城市的物理属性与空间特性，但城市设计问题也往往涉及城市系统的应急能力，包括了城市中与社会、经济相关的方方面面。在复杂的工程系统和城市系统的背景下，为了实现其既定目标，我们的系统会被定义为一个系列组件的集成。相比于单个组件的最佳性能总和，系统的最佳性能往往是由其各个组件的高效协同产生的。

因此，城市的设计目标往往是难以估量的，盲目制订的目标也通常难以落地实现。相比于教科书式的定义[4]，设计要求的确定通常更加高度依赖于其设计的实际背景环境（如设计区域与建筑类型等）。事实上并不存在绝对量化的、定义清晰的、或是形式绝对客观的关系，而应急能力与城市系统设计之间的潜在机制也还远未明确[5,6]。

为了应对这些挑战，对于不同系统层面连接的设计考量而言，性能仿真工具与参数化建模工具至关重要。而设计的尺度也应当集中由可用的计算与仿真工具[6]来定义，并且，我们所选择的设计参数需进行具体量化处理，以期对设计目标与度量产生显著影响[5]。为了通过将输入设计与输出性能指标（如生命周期成本、能源性能以及弹性指标等）相关联来评估协同性能，需要捕捉设计的组成系统在焦点尺度内的紧急行为的性能仿真模型。同时，参数化建模工具使得在较低设计尺度下对物理对象的配置进行改变及研究成为可能。参数化建

模是一种基于规则的设计方法，其中的设计意图可由几何约束和用于定义参数间关系的脚本表示。通过参数化建模，设计师可通过大量迭代来进行表单设计实验。参数化建模还使设计师能够系统地探索目标与形式间的关系，将理论与实际问题有机结合[7]。

对于大型复杂系统而言，下一步是对概念性的设计问题进行分解分类，并确定设计参数间高度耦合的设计模块[3]。针对每个单独的模块，我们通过系统研究在设计框架的基线上对设计参数进行变化推演，并测量最终的系统属性如何导致改变。然后，我们将得到的知识用于制定MDO算法或开发参数化模型和优化工作流程，以定义模块之间的接口关系，以便系统、快速地对大量可能出现的设计选项进行导流。

通过这种方式，建模和仿真工具体现并存储了设计规则，并允许设计师操作超越仅取决于其个人经验的设计类型。因此我们可以说，设计师极具创造性的工作是建立在有效且经过测试的科学规则的基础之上的。

2.2. 近零能耗区的地理设计框架

2016年，来自佐治亚理工学院、同济大学和迪士尼中国研究中心（DRC）的城市设计团队在上海迪士尼乐园附近的一处占地2.7 km²的场地举办了一场近零能耗区相关主题的研讨会。该研讨会讨论了如何提供一个集经济可行、生态敏感和性能驱动于一体的设计方案，旨在建立一个可持续的、低碳的近零能耗区。基于图2所示的框架，该团队随后进行了以下工作。

步骤 I ——客观模型：客观而言，设计目标是探索研究地点的设计方案，以解决独特的人力-能源-水资源联动系统之间的关系。该提案不仅要实现接近零的碳排放目标，还要实现高效的水管理和以人为本的价值观，如视觉体验和城市环境中的人体舒适度。人力-能源-水资源的结点被定义为能源、水系统与人类体验间的内在联系，而它们与城市形态之间的相互作用，塑造了城市对气候变化的抵御能力。设计工作的范围、所需数据以及性能评估标准均是根据设计目标确定的。尤其是通过实地考察和与利益相关者（包括原始场地规划人员及政府相关成员）的互动，设计团队深入了解利益相关方的利益以及当地的设计规范和制约因素后，可从中更好地确定核心设计价值，更有效地评估设计方案。

步骤 II ——表示模型：收集反映设计目标的性能评估先决条件和现场信息，以便充分描述现场细节。同时我们进行场地清单分析以调查地理空间数据的可用性，

随后，现场的信息通过数字可视化工具进行演示。

步骤 III ——性能模型：由不同学科成员组成的设计团队往往会对下面的问题存疑：一个好的设计究竟在传达什么？随后，他们会根据设计目标制定以人为本的价值观和包括水和能源在内的基础设施系统考量的性能标准。接下来，团队将提出并测试几种先进的仿真工具(图2)。值得注意的是，仿真工具的选择必然会影响评估标准，会生成对当前设计问题有意义的量化性能标准。在这个阶段，设计团队将应用仿真工具或设计模块来生成性能指标，以确定该项目在当前条件下是否运行良好。

步骤 IV ——参数化模型：参数化建模采用设计参数和程序算法来开发各种理论化的区域规模的城市形态原型（1 km²），以辨别真正性能良好的设计。城市区划法和建筑施工标准通常构成控制城市形态的再生和新发展的几何基元。其中重要的设计参数包括总容积率(FAR)、道路网络模式、建筑密度分布、街区大小、地块数量、建筑物覆盖率、建筑物方向和建筑类型；利用这些参数的规范关系和约束条件作为形式规则，可以产生不同的城市设计变化。设计团队会应用参数化的基于网格的模型来描绘城市形态和基础设施，并确定场地面积（即960 m×960 m）、总FAR（即0.8、1和1.5）、街区大小（即80 m×80 m、120 m×120 m、240 m×240 m）、每个街区内地块的数量（即4、8、12）和覆盖率（即0.3、0.45、0.6），它们被用作调控剂来控制街区构型、建筑物占地面积、密度和高度。值得注意的是，密度变化也被纳入模型之中，以便比较集中、分散和线性形态地排列对能量、水系统和人类体验的不同影响，如图3所示。

步骤 V ——准则模型：接下来，我们使用仿真工具检查参数排列，并且平衡性能标准以便呈现一系列设计变化并观察设计变化与性能结果之间的模式化关系。而根据系统计算实验的分析结果，团队随后编撰了设计指南及相关法则的内涵。

步骤 VI ——变化模型：团队提出了多种设计方案，将传统的设计方法与各学科的专业知识技能相融合，而脱胎于焦点级原型设计的设计指南被用作不同学科间的学习和交流工具。

步骤 VII ——影响模型：影响模型使用了与性能模型相同的基于代理的工具包，以便系统评估设计方案的性能。我们的目标是能够以整体的方式评估设计的性能，以便了解焦点尺度系统在较粗尺度上的表现。由于时间和可用数据的限制，以及在这个研究阶段参数化建模的实验性质，伴随着MDO算法开发的脚步，会产生大量

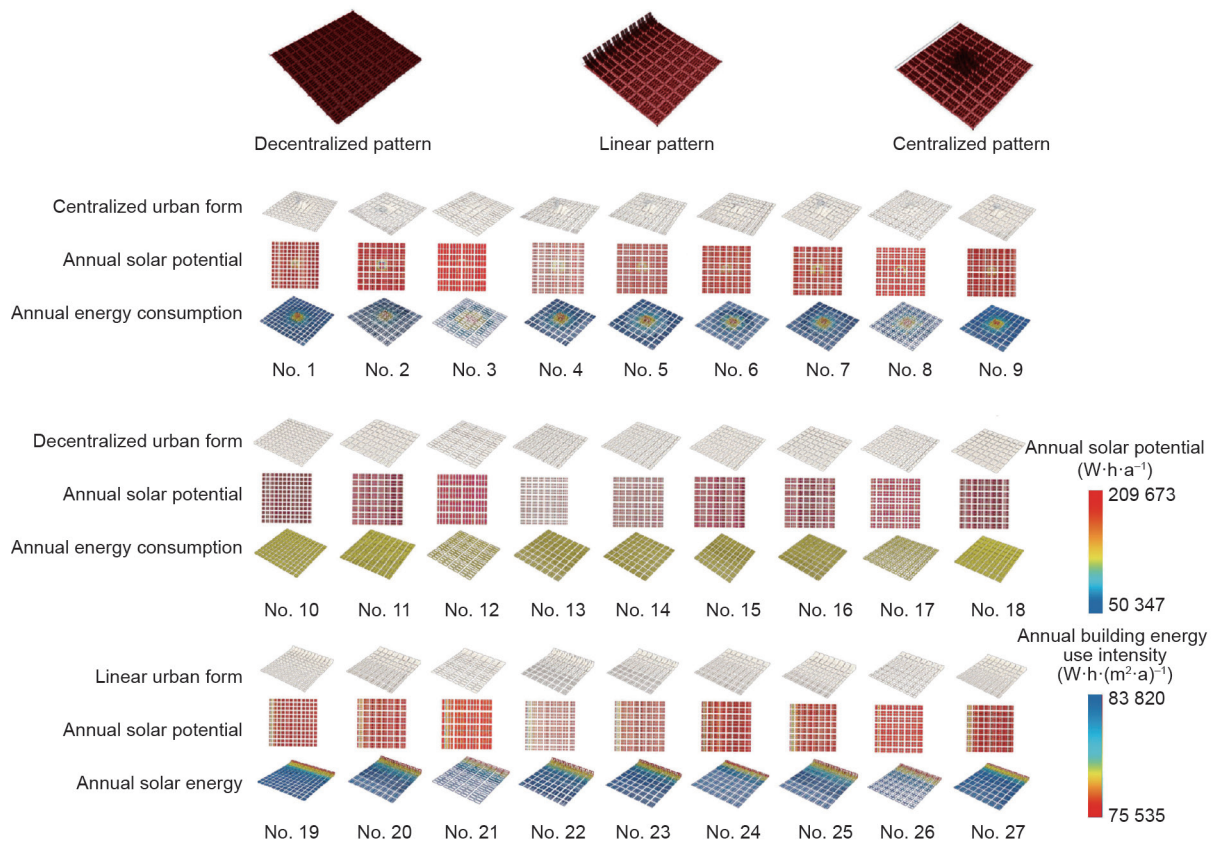


图3. 基于不同城市形态的太阳能捕获与能耗计算。

设计选项并导致选项在车间中难以实现。MDO将用于评估不同设计方案之间的多重目标与权衡。若所有所需的算法都得到了合理的开发，那么可以快速生成设计选项以及不同时间框架下的开发场景，以评估设计所受时间的影响。

步骤Ⅷ——决策模型：我们将利用MDO模型和其他数字技术的分析结果来为不同设计目标之间的量化权衡提供依据。这将使决策者在接受最终决策之前再权衡利弊与价值和偏好。

3. 设计模块的选择

鉴于城市绩效评估模型的复杂程度，我们应当建立一些标准化的模拟解决方案来支持可重复和流程清晰的问题的分析与评估。设计模块用于调查人力-能源-水资源系统与城市造型之间的联系，从而有助于生成设计指南或探索设计参数公差，以便为设计师提供早期设计支持。

3.1. 能源模型

为了创造节能的城市运行模式，我们应该回答的问题之一是：为实现接近零的碳排放，填补能源消耗与可

再生能源生产之间的差值究竟有多大。城市区域能耗的计算和太阳能的收集与城市形态参数（如建筑密度、建筑体积和屋顶面积）相关，因此，能源应用设计模块可以被用于发现最优的城市形态，以达到最大限度的能源平衡。

3.1.1. 可再生能源生产：对于太阳能的分析

许多研究发现，当场以可更新的方式生成并收集能源非常困难。而太阳能的收集是预实施的唯一可行的方法，其获取的能量随后可以通过太阳能电池板转换成电力。随着全球范围内越来越多的获得LEED（Leadership in Energy and Environmental Design）认证的建筑物建成，在建筑屋顶安装太阳能电池板以进行太阳能收集已成为一种普遍做法。我们的太阳能收集分析使用ArcGIS 10.3中的“区域太阳辐射”工具，并且涉及许多参数，如持续时间的分析（即时长、日期范围、月份或年份），空间分辨率（在本分析中使用1 m×1 m的单元），还有用于屋顶建造的几何形状等，该设计方案会产生一个辐射光栅，以每年每平方米瓦特·时数的方式提供太阳能电位。与其他太阳能计算工具（如EPC计算器）相比，“区域太阳辐射”的方案考虑到了如屋顶建筑间会彼此遮

蔽等可能会显著影响建筑物屋顶太阳能应用的潜在因素[8]。

3.1.2. 能源消耗

在过去的几年中，能源消耗的评估问题得到了深入的探索与研究。参与讨论的大多数人都认为，能源的消耗随着当地气候的变化而变化，并且与建筑物的使用类型、材料及所采用的几何形状密切相关[9]。我们的研究使用了一个强大的建筑能耗模拟软件“EnergyPlus”来计算建筑物的供暖和制冷负荷及相关能耗，同时包括天气、建筑物的几何形状、建筑材料、系统以及入住率等因素均被纳入了考量范围。

3.2. 水资源模型：雨水管理

为实现水资源高效循环使用，近零能耗区的既定目标之一就是最大限度地收集和存储雨水。许多前人的研究已经探索并模拟了雨水的排放过程，从而可以有效帮助我们估计降雨过程中的降水量、入渗量、地表径流量、蒸散量和侧向流量。除了地形条件，如土地覆盖类型、土壤湿度和坡度梯度之外，城市地区捕捉雨水的能力也依赖于当地的气象因素，如降雨强度、降雨量和气温等。

在这项研究中，我们引入了基于小单元的GIS水文模拟模型，其目的是将研究地点转换为基于单元的栅格层，其特征在于输入参数包括一些气象因素和地质特征[10]。

水文模型建立在桑思韦特（Thornthwaite）的水文理论基础之上，该理论假定通过降水、渗透和蒸散过程可实现水平衡，因此，通过比较进水量、水渗透量和出水量，可以确定水剩余量和地表径流量[11]。最后，由ArcGIS提供的水文分析工具可以使操作者通过统计流入每个下坡单元的降水量来计算流入每个单元流量。因此，可以在任何降雨事件的指定时段内计算每个单元的储存水和地表水径流量。

应该指出，为了从焦点尺度参数排列中提炼出设计原则，我们只考虑了诸如当地气候数据、可渗透表面积和不可渗透表面积等因素。在制定设计方案后，我们将在影响模型中采用完整的水文模拟过程。

3.3. 人类体验模型：可达性分析

在这项研究中，为了调查对于游人来说建筑环境是否有助于在给定步行距离内使其参观尽可能多的景点，我们选择了可达性作为代表人类体验的度量。正如雅各

布斯在她的《美国大城市的死与生》[12]中所主张的那样，我们人类充满活力的城市生活一直依赖于步行能力与我们对土地的混合使用，是可达性而非汽车所代表的流动性决定了城市的成功。为了揭示建筑密度与可达性之间的复杂关系，设计团队选择了名为“达到”和“直线度”的测量工具来量化“可达性”这个抽象概念。“达到”分析计算并总结了在给定搜索范围内每个建筑物可以轻松达到的建筑物数量；而“直线度”则分析确定了建筑物与其他建筑物之间的最短网络距离与欧几里得距离相似的程度[13]。其“达到”指数可以使用以下公式计算：

$$\text{Reach}^r[i] = \sum_{j \in G - \{i\}; d[i,j] \leq r} W[j] \quad (1)$$

式中， r 是搜索半径； i 和 j 表示某个在 i 的人到达 j 时建筑物的位置； $d[i,j]$ 是建筑网络 G 中建筑物 i 和 j 之间的最短路径距离； $W[j]$ 是目的地 j 的权重。权重可以是建筑体积、工作机会的数量等。

“直线度”指数可以使用以下公式计算：

$$\text{Straightness}[i]^r = \sum_{j \in G - \{i\}; d[i,j] \leq r} \frac{\bar{a}[i,j]}{d[i,j]} \cdot W[j] \quad (2)$$

式中， $\bar{a}[i,j]$ 是建筑物 i 和 j 之间的测地距离。

建筑密度的增加通常意味着更好的可达性，然而，为了确定街道网络是否由于转弯次数增加而可能影响人类到达目的地的能力，我们还应该考虑直线因子。因此，这两种测量工具需要结合起来，以测试社区在可达性方面的宜居与否。

4. 设计准则

通过设计模块的应用，设计团队能够产生水资源、能量和人类体验的性能标准，并将其用于焦点尺度的参数排列（表1）。对于每个性能指标而言，参数和性能标准之间均存在模式化的相关性，这些指标传递某些设计指令或优化设计方案。例如，为了实现能量利用平衡最大化，建筑物高度和密度均匀分布的分散参数置换被认为是城市设计实践的最佳配置。

然而，在实践中我们通常发现设计模块可以传达不同设计指南的指导思想，这一发现突出了城市设计在人类体验、高效能源使用和水资源利用等方面平衡各种决策标准所面临的挑战。它还强调了在理解各种设计决策

表1 不同城市的水资源、能量及人类体验相关性性能标准比较

No.	Urban form typology - Performance measures															
	Individual sample area	Individual block portion (m)	Individual block area (m ²)	Number of blocks	Coverage ratio per block	Gross FAR	Number of parcels per block	Individual building roof area (m ²)	Total roof area (m ²)	Number of buildings	Building energy-use intensity (w·h·(m ² ·a) ⁻¹)	Annual solar energy total (w·h·a ⁻¹)	Annual solar energy per unit (w·h·(m ² ·a) ⁻¹)	Total roof rain water collected (t)	Average accessibility index	Average straightness index
1	Centralized	80	6 400	144	0.33	1.0	8	260	299 520	1 152	81 133	34 201 749 402	114 188.53	313 896.96	608	554
2	Centralized	120	14 400	64	0.42	1.0	8	756	387 072	512	79 908	44 380 833 224	114 657.82	405 651.46	224	198
3	Centralized	240	57 600	16	0.50	1.0	8	3 572	457 216	128	79 565	52 649 149 012	115 151.59	479 162.37	71	57
4	Centralized	120	14 400	64	0.20	1.0	8	360	184 320	512	79 782	21 047 904 549	114 192.19	193 167.36	224	198
5	Centralized	120	14 400	64	0.31	1.0	8	560	286 720	512	79 868	32 847 071 501	114 561.49	300 482.56	224	198
6	Centralized	120	14 400	64	0.42	0.8	8	756	387 072	512	80 893	44 446 987 156	114 828.73	405 651.46	224	198
7	Centralized	120	14 400	64	0.42	1.5	8	756	387 072	512	78 204	44 197 202 227	114 183.41	405 651.46	224	198
8	Centralized	120	14 400	64	0.41	1.0	4	1 482	379 392	256	80 023	43 582 753 860	114 875.26	397 602.82	134	112
9	Centralized	120	14 400	64	0.40	1.0	12	484	371 712	768	79 891	43 851 037 107	117 970.46	389 554.18	402	376
10	Decentralized	80	6 400	144	0.33	1.0	8	260	299 520	1 152	83 215	34 574 499 180	115 433.02	313 896.96	608	554
11	Decentralized	120	14 400	64	0.42	1.0	8	756	387 072	512	81 134	44 680 891 248	115 433.02	405 651.46	224	198
12	Decentralized	240	57 600	16	0.50	1.0	8	3 572	457 216	128	81 107	52 749 852 912	115 371.84	479 162.37	71	57
13	Decentralized	120	14 400	64	0.20	1.0	8	360	184 320	512	80 897	21 299 176 800	115 555.43	193 167.36	224	198
14	Decentralized	120	14 400	64	0.31	1.0	8	560	286 720	512	81 029	33 096 956 480	115 433.02	300 482.56	224	198
15	Decentralized	120	14 400	64	0.42	0.8	8	756	387 072	512	82 675	44 657 210 304	115 371.84	405 651.46	224	198
16	Decentralized	120	14 400	64	0.42	1.5	8	756	387 072	512	80 123	44 704 578 240	115 494.22	405 651.46	224	198
17	Decentralized	120	14 400	64	0.41	1.0	4	1 482	379 392	256	81 124	43 794 365 628	115 433.02	397 602.82	134	112
18	Decentralized	120	14 400	64	0.40	1.0	12	484	371 712	768	80 893	44 208 077 584	118 930.99	389 554.18	402	376
19	Linear	80	6 400	144	0.33	1.0	8	260	299 520	1 152	82 214	34 119 109 689	113 912.63	313 896.96	608	554
20	Linear	120	14 400	64	0.42	1.0	8	756	387 072	512	80 568	44 351 804 307	114 582.83	405 651.46	224	198
21	Linear	240	57 600	16	0.50	1.0	8	3 572	457 216	128	80 457	52 635 800 831	115 122.39	479 162.37	71	57
22	Linear	120	14 400	64	0.20	1.0	8	360	184 320	512	81 201	20 960 521 086	113 718.1	193 167.36	224	198
23	Linear	120	14 400	64	0.31	1.0	8	560	286 720	512	82 010	32 765 671 177	114 277.59	300 482.56	224	198
24	Linear	120	14 400	64	0.42	0.8	8	756	387 072	512	81 203	44 467 832 233	114 882.59	405 651.46	224	198
25	Linear	120	14 400	64	0.42	1.5	8	756	387 072	512	79 011	44 015 470 360	113 713.91	405 651.46	224	198
26	Linear	120	14 400	64	0.41	1.0	4	1 482	379 392	256	81 523	43 603 788 156	114 930.7	397 602.82	134	112
27	Linear	120	14 400	64	0.40	1.0	12	484	371 712	768	81 230	43 730 363 952	117 645.82	389 554.18	402	376

η : individual block proportion; S_{bi} : individual block area; n_{bi} : number of blocks; CR_{bi} : coverage ratio per block; n_{bop} : number of parcels per block; S_{bop} : individual building roof area; S_{it} : total roof area; n_{buit} : number of buildings; EU_{buit} : energy-use intensity of buildings; E_{sc} : annual total solar energy; w_{rw} : total weight of rain water collected from the roof; AI: accessibility index; SI: straightness index.

^aWithin a sample area of 1 km².

与多重设计目标之间做权衡的重要性, 这些目标对于人类福祉和可持续性发展是有意义的。因此, 我们应制定并开展多目标优化分析。

5. 探讨与结论

由于传统的设计方法通常基于个人的经验, 因此不可避免地会与科学事实有出入, 而以证据为基础的设计框架可以作为连接、合并多学科设计结果的手段。该框架可以确保最终的设计决策是经过严格的、系统的、基于科学的迭代所做出的, 这些迭代过程考虑到了各种环境、社会和政治元素的实际情况。

为应对气候变化与资源枯竭所带来的巨大挑战, 城市设计师承担着前所未有的社会责任, 他们不得不改变自己的设计模式。正如Batty[14]恰如其分的论断所言, 地理设计的核心是参与科学的过程, 而“科学是后续设计活动的前奏, 设计被视为是一个持续不断的寻求解决方案或对紧急问题作出有效回应的过程”(第2页)。Batty呼吁“让设计与科学相互渗透, 建立新的强有力的解决方案, 以及一条贯通推理、预测以及解决方法的逻辑链”(第2页)。本文提出了一种城市系统设计方案, 以响应Batty的呼吁。我们所提出的方法使GIS超越了作为管理设计信息核心工具的相关职能, 它协调多个先进的计算和仿真工具, 并解决城市形式和性能目标之间的相互关系。此外, 该方案还可有效揭示城市系统整体突发情况与单个城市系统或系统组件的属性之间的联系。

在工作室里, 我们以一支多学科背景的国际设计团队为样本对该方案进行了实验, 并确定了下列将该方案发展成为成熟形式的实验步骤。

(1) 我们需对城市设计领域的知识体系进行整合。大多数的知识及设计经验都嵌入设计师的个人经历中, 且分散在他们职业生涯中有限数量的项目上。为了最大限度地利用这一领域强大的数字技术, 我们需系统地捕捉现有的知识, 随后我们即可基于已有的知识储备进行变量、算法以及定量方案的开发。

(2) MDO是从专家经验中提炼和积累设计规则、建立设计标准的有效方法, 它还可以开发和集成单个城市系统中的先进技术。但是, 这需要团队的努力来提炼设计规则、标准和技术, 并将其转化为数据库和算法。

(3) 目前的模拟和建模工具只可捕捉和量化复杂城市系统中非常有限的即时行为和属性。其中一个原因可能是在目前的城市设计研究缺乏系统的分析和量化, 并

且严重依赖于预期的方法。为了理解设计决策的后果, 我们需要整合各种案例进行研究, 同时, 对于过去设计的走访与调查也必不可少。衡量方法和标准的确定需要经过严谨地开发与严格的实证研究测试。

(4) 为了将各个设计组件和模块的属性与焦点尺度内的设计性能联系起来, 跨设计尺度(或设计层次级别)的设计迭代至关重要。必须指出的是: ①城市设计的质量属性, 如生活质量, 与定量属性同等重要; ②模拟和模型是设计目标与实际情况的表现形式和近似体现。因此, 在设计过程中, 专业判断和设计师的经验仍然至关重要。计算和仿真工具如何在快速迭代中对设计师进行辅助与启发式判断交互的问题仍需进一步研究。

(5) 参数化建模工具和性能仿真工具的发展已经取得显著进展。但是, 用于验证这些模块和仿真工具的数据仍然非常有限。此外, 产生高质量输出的模拟工具通常需要大量数据。为了系统地收集、积累和分享数据, 需要学术界人士与专业人员之间的跨界合作。

(6) 正如Steinitz[15]所指出的, 设计过程中的多学科协作是具有挑战性的。不同学科的设计师和工程师很难理解他们的决定如何影响其他学科的设计决策。同时, 设计师和工程师通常在设计层次较低的层面上工作(如细节设计或工程组件设计), 往往难以看到“大局”。我们仍需对各学科之间以及跨设计层次之间的相互依赖关系进行清晰的认识, 以便设计协作和综合化机制。

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the fellow members who participated in the Shanghai Disney 10KM² urban design studio. We also give special thanks to Jiang Wu, Yi Wang, Linlin Huang, and Yongjie Cai of Tongji University; Ben Schwegler, Helen Chen, Yanping Wang, and Kevin Hsu of Disney Research China; John Koon, Richard Dagenhart, John Crittenden, and Michael Chang of the Georgia Institute of Technology; Jerry Jinyue Yan of Royal Institute of Technology (KTH) and Mälardalen University (MDH), Sweden; Yoshiki Yamagata of Global Carbon Project and National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan; and Annette Wiedenbach and Yogendra Chauhan of Covestro, who together provided guidance and oversight of the studio, which was essential for the development of this paper. This work was partially supported by the

National Natural Science Foundation of China (71471138).

The authors wish to thank the editor and the anonymous reviewers for their thoughtful suggestions.

Compliance with ethics guidelines

Perry Pei-Ju Yang, Cheryl Shu-Fang Chi, Yihan Wu, and Steven Jige Quan declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Steinitz C. A framework for geodesign: changing geography by design. Redlands: Esri Press; 2012.
- [2] Simpson TW, Martins JRRA. Multidisciplinary design optimization for complex engineered systems: report from a National Science Foundation workshop. *J Mech Des* 2011;133(10):101002.
- [3] Jilla CD. A multiobjective, multidisciplinary design optimization methodology for the conceptual design of distributed satellite systems [dissertation]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology; 2002.
- [4] Habraken NJ. The control of complexity. *Places* 1987;4(2):3–15.
- [5] Lynch K, Rodwin L. A theory of urban form. *J Am Inst Plan* 1958;24(4):201–14.
- [6] Yang PPJ. Complexity question in urban systems design. *J Archit Eng Technol* 2012;1(2):e107.
- [7] Lynch K. *Good city form*. Cambridge: The MIT Press; 1984.
- [8] Quan SJ, Li Q, Augenbroe G, Brown J, Yang PPJ. A GIS-based energy balance modeling system for urban solar buildings. *Energy Procedia* 2015;75:2946–52.
- [9] Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Huang YJ, Pedersen CO, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy Build* 2001;33(4):319–31.
- [10] Chen H. Simulating the hydrologic impacts of land cover and climate changes under a semi-arid environment [dissertation]. Cincinnati: University of Cincinnati; 2013.
- [11] Thornthwaite CW, Mather JR. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publ Climatol* 1957;10(3):185–311.
- [12] Jacobs J. *The death and life of great American cities*. New York: Random House; 1961.
- [13] Sevtsuk A, Mekonnen M. Urban network analysis: a new toolbox for ArcGIS. *Revue Int Géomat* 2012;22(2):287–305.
- [14] Batty M. Defining geodesign (= GIS + design?). *Environ Plann B Plann Design* 2013;40(1):1–2.
- [15] Steinitz C. Which way of designing? In: Lee D, Dias E, Scholten HJ, editors. *Geodesign by integrating design and geospatial sciences*. Cham: Springer; 2014. p. 11–40.