

城市能源系统规划设计及能耗分析工具综述

谢珊¹, 贾跃龙², 白雪涛¹, 张智慧³, 王舒仰¹, 郑徐跃^{4*}, 赵英汝^{1*}

(1. 厦门大学能源学院, 福建省 厦门市 361102;

2. 国网能源研究院有限公司, 北京市 昌平区 102200;

3. 国网上海能源互联网研究院有限公司, 上海市 浦东新区 201210;

4. 福建省政府投资项目评审中心, 福建省 福州市 350000)

A Review of Tools for Urban Energy Systems Planning and Energy Consumption Analysis

XIE Shan¹, JIA Yuelong², BAI Xuetao¹, ZHANG Zhihui³, WANG Shuyang¹, ZHENG Xuyue^{4*}, ZHAO Yingru^{1*}

(1. College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian Province, China;

2. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102200, China;

3. State Grid Shanghai Energy Internet Research Institute Co., Ltd., Pudong New Area, Shanghai 201210, China;

4. Fujian Government Investment Projects Assessment Center, Fuzhou 350000, Fujian Province, China)

Abstract: With rapid developments in the global economy and the acceleration of urbanization, urban energy consumption and emissions have continued to increase, thereby leading to severe resource shortages and environmental pollution problems. To meet the diversified energy demands of urban residents and the requirements of energy transition as being safe, efficient, clean, and low-carbon energy, urban energy systems have come into being and have quickly become a research hotspot in the field of energy. Domestic and foreign researchers have developed a series of related tools for the planning and design of urban energy systems and energy consumption analysis. However, owing to the differences in the development goals of various tools and the professional background of the developers, their application scenarios are not the same; meanwhile, the model presented great differences in temporal and spatial granularity. In this review, we focus on tools for urban energy system planning and energy consumption analysis. Typical commercial tools were selected to compare their functions and characteristics, and the applicability of the tools was analyzed with application cases to provide references for subsequent development and applications in this field.

Keywords: urban energy system; analysis tool; energy system planning; energy consumption analysis

摘要: 近年来, 随着全球经济快速发展和城镇化加速, 城市能耗及排放持续增长, 面临严峻的资源短缺和环境污染问题。为满足城市居民多样化的能源需求, 以及能源系统安全高效、清洁低碳的转型要求, 城市能源系统应运而生, 并迅速成为能源领域的研究热点。针对城市能源系统的规划设计及能耗分析, 各国研究学者已经开发了一系列相关工具, 然而各类工具的开发目的及开发者专业背景存在差异, 其适用场景不尽相同, 且模型的时间和空间颗粒度也存在较大差异。通过聚焦城市能源系统的规划设计及能耗分析工具, 分别选取对比典型商用工具的功能和特性, 并结合应用案例对工具的适用性进行分析, 为相关工具的后续开发及应用提供参考。

关键词: 城市能源系统; 分析工具; 规划设计; 能耗分析

0 引言

城市是全球能源消费的主体, 消耗全球80%的能源, 其温室气体排放量也占据全球总量的70%。随着全球经济快速发展和城镇化加速, 建设安全高效、清洁低碳的能源系统已成为应对环境污染、气候变化、资源限制等挑战的重要措施^[1-2]。传统能源系统供给侧(电、热、冷、气等)各自规划和运营, 且能源供给侧和需求侧脱节, 在资源配置和运营管理方面都有很大的优化空间。城市高密度能耗和多样化能源需求为能源系统集成提供了机会, 城市能源系统概念应运而生。

基金项目: 福建省中青年教师教育科研项目(JT180003); 国家自然科学基金(51876181)。

Education and Scientific Research Project for Young and Middle-aged Scholars of Fujian Province (JT180003); National Natural Science Foundation of China (51876181).

城市能源系统是城市供电、供热、供冷、供气、供水等各类能源系统的综合集成,系统通过资源优化配置与协调管理,实现多能源协同互补与梯级利用,达到提升能源综合利用效率、减少污染排放、提高能源系统安全和可靠性的目的。中国十分重视城市能源系统相关领域的发展,2016年《中共中央 国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》发布,要求推进节能城市建设^[3]。2016年国家发展改革委、国家能源局、工业和信息化部在《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》中提出推进能源互联网多元化、规模化发展的目标^[4]。《能源发展“十三五”规划》明确指出,要积极构建智慧能源系统,推进能源与信息等领域技术深度融合,建设“源-网-荷-储”协调发展、集成互补的能源互联网^[5]。2018年12月,中央经济工作会议把5G、人工智能、工业互联网、物联网等新型基础设施建设列为2019年经济建设的重点任务。《2020年政府工作报告》中明确提出加强新型基础设施建设^[6]。以上能源政策的出台,为城市能源系统技术的健康、快速发展营造了良好的政策环境。

随着城市终端用户对能源多样化需求的提升,城市能源系统成为能源领域近年来的研究热点,目前全球至少有70个国家先后开展了城市能源系统相关技术的研究^[7]。城市能源系统规划设计打破传统能源部门(如电力、热力、燃气)各自为政、分项规划的弊端,将各类能源形式、功能设备及管网作为一个整体进行规划,对城市能源系统技术组合和装机容量进行优化配置,而能耗预测与分析是开展城市能源系统设计的基础和前提。相关学者针对城市能源规划和能耗分析开展了大量研究,开发了一系列用于城市能源系统规划设计及能耗分析的工具,包括实验室自主开发和商业化工具。

在城市能源系统规划设计方面,Jing等人^[8]提出一种多目标优化与多指标评价相结合的框架方法,用于综合能源系统的优化设计和最优运行策略分析;Wu等人^[9]提出近似规模热电联供系统的优化设计模型,将博弈论约束应用于综合能源网络利益分配;Zheng等人^[10]提出可优化微电网的负载转移算法,实现在操作损耗较低的条件下有效削减负荷峰值;Wu等人^[11]提出一种可同时优化建筑供能系统及节能改造措施的多目标优化方法,将建筑能源需求动态模拟与混合整数线性规划(MILP)优化相结合;Zhou等人^[12]提出一种考虑用户主导需求侧响应和P2P交易的智能社

区能源管理方案,实现社区能源共享和能源费用的降低。在城市能源系统能耗分析方面,Ghedamsi等人^[13]基于统计方法建立居住建筑区域的能源负荷模拟与预测模型,并对阿尔及利亚7个居住建筑区的能源负荷进行了模拟与预测;Lu等人^[14]基于统计学方法,模拟和预测体育场馆的建筑负荷;Shi等人^[15]提出一种基于回声状态网络法的办公建筑的负荷预测模型。

在对已有城市能源系统规划设计和能耗分析商业工具的对比分析方面,Connolly等人^[16]从能源供给规划的角度介绍了37个可用于分析可再生能源与能源系统整合可行性的工具;Markovic等人^[17]根据项目不同的规划阶段,将13种分析工具分为地理模型、能源模型、评估模型3类进行介绍;Mendes等人^[18]对自下而上式的综合社区能源系统优化规划及分析工具进行概述;Manfren等人^[19]对分布式发电系统进行了全面综述,并根据其设计阶段和主要功能对14种模型进行了分类;Sinha等人^[20]评估了19种用于混合电力系统规划的工具;Allegrini等人^[21]对区域能源系统的建模方法和相关的软件工具进行了功能评估;Tozzi等人^[22]按其应用规模将12种工具分为多尺度、地区尺度和区域尺度;Ferrari等人^[23]则对17种用于城市/地区能源服务的工具按照分析类型、空间/时间尺度等特征进行分类;Crawley等人^[24]对比分析了20种建筑能耗模拟软件的应用场景及各自的优缺点。

由上述文献可知,各类工具的开发目的及开发者专业背景不同,其适用的问题和场景不尽相同,模拟的时间和空间尺度也存在很大差异,且部分工具及数据库有较大的地域局限性,因此有必要对现有工具的功能特性和适用性进行系统性梳理和对比分析。目前,城市综合能源服务在全国大面积推广,但相关服务模式和评估管理技术尚处于探索发展阶段,城市能源系统规划设计与能耗分析工具的本土化开发及应用是现阶段综合能源服务面临的核心技术难题。基于上述背景,本文聚焦城市能源系统分析工具的两大应用领域——规划设计和能耗分析,分别就典型商业工具的功能特性及应用场景进行分析和评估,为相关工具的后续开发及应用提供依据与参考。

1 城市能源系统规划设计工具

1.1 工具概述

城市能源系统规划设计建设涉及能源的生产、传输与分配、转换、存储、消费等环节^[25],与建筑、工

业、交通等多个领域相关，且需综合考虑能源效率、经济效益、环境影响、社会效应等因素。

从建模角度上看，城市能源系统规划设计工具可分为自上而下式、自下而上式和混合式3类^[26]。

自上而下式的城市能源系统规划设计工具以经济学模型为基础，通过宏观经济数据（如国内生产总值）来确定能源价格和供求关系^[17]，考察经济、能源、环境部门之间的联系，以分析不同政策情景下的能源消费及环境排放。此类分析工具能够更好地反映宏观层面上各经济部门之间的相互影响，但缺乏技术细节，适用于能源宏观经济分析和能源政策规划制定。

自下而上式的城市能源系统规划设计工具以技术为基础，对供给、需求和转换有关的各种具体的能源技术进行识别和分析，对技术和资源的优缺点进行综合考量，对能源消费和生产方式等进行预测，以评估不同政策对能源技术选择及环境的影响，从而确定投资选择和替代方案。此类分析工具能够充分展示技术细节，但不能反映经济系统内的反馈关系，能源价格等重要因素多在模型外给定，存在不确定性，更适用于能源技术的成本分析、能源供需预测、能源技术对环境的影响分析和能源技术的选择策略研究。

混合式城市能源系统规划设计工具是自上而下式与自下而上式的融合，通过模型结构设计或模型接口，将经济模型、技术模型相结合，兼顾二者优点，既对宏观经济结构下能源、经济、环境三者的关系进行探讨，又对微观层面下能源技术、环境减排技术等选择进行比较分析，实现综合分析，避免单一角度分析带来的偏差，其应用范围更广，结果也更具有现实意义和参考价值。

从建模空间尺度上看，城市尺度介于国家与建筑之间，城市的范围可以从城市内几栋建筑到整个城市区域。与建筑级别能源系统规划设计相比，城市能源系统规划设计更加复杂，除涉及工业、交通领域外，还涉及不同区域之间能量流交互。

城市能源系统规划设计工具因开发目标、算法等不同，所具备的功能各不相同，但其常见的主要功能包括：

1) 仿真模拟：给定的一组能量需求及其他约束条件，在满足条件的前提下，以一定的时间步长在一一定的分析周期内，模拟能源系统的运行。

2) 优化：分为运行优化及投资优化。运行优化的目标是通过形成具体的运行方案，提高城市能源系

统的能源利用效率；投资优化的目标是在满足约束条件下，实现收益最大化。

3) 场景分析：探究不同策略对城市能源系统能源消耗量、温室气体排放量等方面的影响。

4) 敏感性分析：从各个不确定性因素中找出对系统有重要影响的敏感性因素，并对其影响程度和敏感性程度进行分析、测算。

本文在对现有城市能源系统规划设计工具调研梳理的基础上，选取以下得到广泛应用的商业工具进行介绍和分析。

1.2 典型工具及案例

1.2.1 MARKAL/TIMES

MARKAL (Market Allocation of Technologies Model) 和TIMES (The Integrated MARKAL/EFOM System) 是国际能源署 (IEA) 能源技术系统分析项目 (Energy Technology Systems Analysis Program) ^[27] 开发的场景分析模型。与MARKAL相比，TIMES具备规划周期可调、数据解耦、灵活的存储和流程等更为通用、全面的功能^[28]。用户签署协议书可以免费试用源代码，但需借助用户界面 (ANSWER或VEDA) 对输入的数据、假设以及输出的结果进行处理，并购买编程语言GAMS (General Algebraic Modeling System)。MARKAL/TIMES用户不仅需要掌握编程语言，还需充分了解各项参数，专业性较强，往往需要几个月的培训。

MARKAL/TIMES以网络形式表示能源系统，采用一系列技术特征（如利用效率和可用性因素）、环境排放系数（如CO₂排放因子、SO₂排放因子、氮氧化物排放因子）及经济参数（如投资和成本）^[29]，对城市能源系统中能源开采、供应、转换、分配、终端消耗环节的所有能流进行详细描述，实现现有技术评估，并考虑未来可能出现的各种先进技术。MARKAL/TIMES可以季度、月度、工作日/周末、小时为时间步长，在满足各种用能需求及约束条件的前提下，实现在20~100 a的规划期内^[17]，城市能源系统总供能成本最低^[19]（盈余最大^[28]）或温室气体净排放量最小等优化目标，具备均衡、场景分析、投资优化的功能，可帮助研究者跟踪能源系统复杂的相互作用和反馈，定量分析政策变化造成的影响，确定最适合的能源规划方案。

作为一种3E (energy、environment、economy) 工具，MARKAL/TIMES被全球70个国家的250家机构

所使用, 活跃用户比例达到75%^[17], 已被用于碳捕集与封存潜力调查^[30]、氢和燃料电池^[31-32]、核能应用前景^[33-34]的研究, 其典型应用是对能源政策在大型能源系统长期影响的研究决策。MARKAL/TIMES已被欧盟委员会用于分析能源效率改进、气候变化调查和可再生能源政策发展^[35]。Thellufsen等人^[36]基于TIMES构建能源系统, 研究利用发电厂和工业废热的清洁供热解决方案。贾彦鹏等人^[37]基于TIMES构建北京市节能减排数据库, 研究对比北京市未来节能减排政策措施的效果。

MARKAL/TIMES基于自下而上的工程角度进行建模, 局限性在于虽能描述底层技术经济微观变化引起的综合效应, 却不能反映资源和经济的相互关系, 也不能对一般经济和非技术市场要素进行反馈^[26]。

1.2.2 LEAP

LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System) 是由美国波士顿特列斯研究所 (Tellus Institute) 与瑞典斯德哥尔摩环境研究所 (Stockholm Environment Institute) 共同研究开发的一个基于情景分析的能源-环境计量经济模型工具。相较于培训时间长达数月的MARKAL/TIMES, LEAP所需培训时间通常仅为3~4天, 官方提供的在线培训支持中文、英文、法文等多种语言^[38]。

LEAP以1 a为时间步长, 模拟周期通常在20~50 a, 既支持自下而上的工程技术建模方式, 又支持自上而下的宏观经济建模方式。以能源需求、消费和环境影响为研究对象, LEAP可对城市能源系统各个部门各项技术仿真模拟, 根据实际能源需求预测其未来的能源需求, 从一次能源出发模拟其转化过程, 计算本地资源能否满足需求。借助环境数据库, LEAP可对给定的能源方案进行环境影响预测。LEAP的能源方案整体由能源需求、能源转化、资源分析、环境影响评价、费用分析等5部分组成, 输出数据可以图表等形式呈现^[26], 数据种类和时序可灵活选择, 且支持导出到Excel及PowerPoint, 操作较为简便。

目前, LEAP的数千个用户来自全球190多个国家^[39], 包括政府机构、学术研究机构、非政府组织、咨询公司和能源公司, 应用成果包括亚太能源研究中心的APEC能源需求供应规划、中国国家发展改革委员会能源研究所的2020中国可持续能源情景分析等。在城市能源系统分析研究中, LEAP的典型应用是中长期能源供需平衡分析、能源流通和消费过程中大气污染物及温室气体的排放及成本效益分析, 对系统中各

部门资源开采、能源生产和消费行为的追踪。Chen等人^[40]通过构建LEAP模型, 估算4种情景 (基准情景、碳捕集与封存情景、高电耗情景和可再生能源情景) 下, 中国在2020—2050年能源转型期间的能源需求和碳排放。常征等人^[41]通过构建LEAP-Shanghai模型对不同情景下上海能源消费和碳排放趋势进行仿真模拟。

LEAP的局限性在于其不具备优化建模功能, 不能实现对能源技术的优化选择以及方案的投资优化。在具体利用时, 由于受到统计数据的限制, 对部门需求、市场发展潜力和对未来发展目标的量化工作依赖研究者的主观判断^[26], 难以进行完善的定量分析。

1.2.3 EnergyPLAN

EnergyPLAN是丹麦奥尔堡大学发展与规划部 (Sustainable Energy Planning Research Group at Aalborg University, Denmark) 开发的一款免费能源系统仿真优化工具^[42]。

EnergyPLAN可以从技术和经济角度, 对城市能源系统进行技术分析、市场分析、可行性研究、逐时仿真模拟、参数敏感性分析^[18], 对不同能源系统规划、投资方案进行评估, 实现技术优化及投资优化, 从而为能源规划提供决策依据。EnergyPLAN的仿真模拟周期为1 a, 时间步长为1 h。每年度的分析模拟结果可合并为更长期的场景。传统的能源计划工具, 如LEAP和MARKAL, 基于能源供需平衡, 对一次能源开发、电厂建设、能源运输和利用进行规划是合理可靠的, 但在探讨能源需求侧管理或小型可再生/分布式能源系统时, 这些工具并不适用^[43]。EnergyPLAN是一个逐时模拟模型, 而不是基于年度总的供需平衡, 因此可以分析可再生能源波动、电力和热量需求季节差异、大型水电系统的水量变化对系统的影响。EnergyPLAN基于分析编程, 而非迭代、动态编程或高级数学工具, 避免了任何增加计算时间的程序, 这使得其计算更直接、快速^[44], 在普通PC端上运行流畅快捷。

EnergyPLAN强调整个能源系统的协同效应, 其应用侧重于有可再生能源应用的可持续能源系统的设计和评估, 如: 大规模风能的并网^[45]、小规模热电联产的应用^[46]、电动汽车与风电并网^[47]、100%可再生能源系统的模拟^[48]。Bamisile等人^[49]基于EnergyPLAN研究了可再生能源技术不同组合的99种方案, 分析每种方案的初始投资、年度总成本、可再生能源比例、碳排放量和发电量。

EnergyPLAN的不足之处在于其情景分析周期较短,不具备需求预测功能,对城市能源系统方案的环境影响考量较少。

1.2.4 DER-CAM

DER-CAM (Distributed Energy Resources Customer Adoption Model) 是由美国劳伦斯伯克利国家实验室 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) 与来自美国、德国、西班牙等国的访问学者花费十余年,用GAMS编写的确定性MILP模型^[50],主要用于并网分布式能源系统的规划评估。DER-CAM用户无需掌握编程语言,比较容易学习。

DER-CAM的仿真模拟周期为1 a,时间步长因版本而有所不同,WebOpt的时间步长为1 h,完整版软件的时间步长分为1 h、15 min及5 min。DER-CAM的优化目标有3种:①能源系统年运行成本最小化;②二氧化碳排放量最低;③前二者的加权平均。DER-CAM可以输出一个建筑物或一个建筑群分布式发电、储能和转化量,以及与给定设计年相匹配的最佳技术组合。

DER-CAM主要适用于峰值容量为250~2000 kW的分布式能源系统规划设计。汪伟等人^[51]以系统年运行成本最低为优化目标,基于DER-CAM构建了冷热电蓄能联供的微网系统优化模型,分析了燃气价格、电价和分布式能源投资3个关键因素对优化配置的冷热电蓄能联供微网系统优化的影响。刘启波等人^[52]运用DER-CAM建立中国不同气候区11个城市的商业建筑分布式能源模型,研究影响分布式能源技术性能的因素。

DER-CAM的不足之处在于其只考虑并网运行,无法体现分布式能源系统孤岛运行时对可靠性的提高作用^[53]。此外,DER-CAM没有对系统进行网络建模^[54],大多采用简单的线性黑箱模型,设备的输出和效率等因素在其使用寿命期间被认为是恒定的,忽略了设备的规模经济效应、电力的质量与可靠性因素。

1.2.5 HOMER

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) 是由美国国家可再生能源实验室 (National Renewable Energy Laboratory) 开发^[35],现由HOMER ENERGY公司运营的离/并网小功率可再生能源系统模拟仿真工具,最新版本为HOMER Pro^[55]。

HOMER的仿真模拟周期为1 a,时间步长细化到1 min,支持不同的电、热生产、储存技术模块的模拟(包括传统发电设备、风力涡轮机、太阳能光伏

板、水力发电设备、燃料电池、氢能、生物质能等)。HOMER可同时实现仿真、优化和敏感性分析三大功能,考量技术成本的变化和能源资源的可用性,详细计算系统全年燃料、环境、可靠性、电源、电网等各项成本,实现对能源系统经济性和技术选择可行性的评估,提供全年每小时各种可再生能源的供应量及系统能量平衡情况,给出不同限制条件下的各能源供给最优化规划方案。

HOMER的用户来自全球193个国家,用户数量已超过12万^[56]。其典型应用是对小功率独立式及并网式微网的设计、优化及可行性评估,如对加拿大纽芬兰以氢能为储能方式的独立式混合能源系统^[57]、沙特阿拉伯风能-柴油独立式混合能源系统的可行性评估^[58]。Miao等人^[59]以英国的一所典型房屋作为案例,基于HOMER研究混合可再生能源系统为家庭提供电力和热量的最佳配置。李春平等人^[60]利用HOMER研究并网型微电网技术方案及并网运行模式下的微电网实时运行控制策略,在尽可能降低储能电池比例的情况下,提高可再生能源渗透率。

HOMER使用有一定的局限性,在储能模拟应用方面,软件只能模拟元件的储能容量,不能体现功率的突变,即无法模拟超级电容器起到的削峰填谷作用,不能对超级电容器的特性进行很好的模拟。而且HOMER只能对1种储能元件进行仿真,无法对2种不同的储能元件进行优化,所以无法分析出混合储能的容量配置情况^[61]。在系统方面,HOMER对系统的仿真模拟无法考虑负荷增长。

1.3 小结

综合以上典型城市能源系统规划设计工具的具体分析,表1—表3分别从建模角度及建模尺度、功能和特性方面对5个典型城市能源系统规划设计工具进行对比。

表1 典型城市能源系统规划设计工具建模角度及建模尺度对比

Table 1 Comparison of modeling angles and scales of typical urban energy system planning tools

工具	建模角度			建模尺度		
	自上而下式	自下而上式	混合式	城市	区域	建筑
MARKAL/TIMES		✓		✓		
LEAP			✓	✓		
EnergyPLAN		✓		✓	✓	

续表

工具	建模角度			建模尺度		
	自上而下式	自下而上式	混合式	城市	区域	建筑
DER-CAM		√			√	√
HOMER			√		√	

表 2 典型城市能源系统规划设计工具功能对比
Table 2 Comparison of the functions of typical urban energy system planning tools

工具	功能				
	模拟仿真	投资优化	运行优化	场景分析	敏感性分析
MARKAL/TIMES		√		√	
LEAP	√			√	
EnergyPLAN	√	√	√	√	√
DER-CAM	√	√	√	√	
HOMER	√	√	√		√

表 3 典型城市能源系统规划设计工具特性对比
Table 3 Comparison of characteristics of typical urban energy system planning tools

工具	周期长度	时间步长	能源形式/领域
MARKAL/TIMES	20~100 a	季度、月度、工作日/周末、小时	电、热、冷、工业、交通
LEAP	20~50 a	1 a	电、热、冷、工业、交通
EnergyPLAN	1 a	1 h	电、热、冷、工业、交通
DER-CAM	1 a	1 h、15 min、5 min	电、热、冷
HOMER	1 a	1 min	电、热

2 城市能源系统能耗分析工具

2.1 工具概述

能耗预测与分析是开展城市能源系统规划设计的基础和前提。建筑是城市能源消费的一大主体，城市内部的能源消耗大多依托建筑或建筑群，因此城市能源系统的能耗分析主要围绕建筑能耗分析展开。受气象参数、暖通空调系统设备性能、建筑使用管理情况等诸多因素影响，建筑能耗的计算分析十分复杂，目前常见的分析方法有数据驱动和物理模型驱动2类。已有的建筑能耗分析工具多属于物理模型驱动，该类

模型以详细的建筑设计与气象数据等参数为基础，根据流体力学、热力学及传热学等理论建立数值模型，通过计算机仿真对建筑的电、热、冷负荷进行预测。交通能耗也是城市能源消费的重要组成部分。

在对现有城市能源系统能耗分析工具进行调研梳理的基础上，选取典型商业工具进行介绍和分析。

2.2 典型工具及案例

2.2.1 DOE-2

DOE-2是由美国劳伦斯伯克利国家实验室（Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL）与JJH公司（James J. Hirsch & Associates）合作开发的一款免费建筑能耗分析工具，其最新正式版本是DOE-2.3^[62]，是应用最多的建筑能耗模拟软件之一。DOE-2被全球40多个国家用于建筑的节能分析和节能标准的制定^[63]。中国《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》（JGJ134—2001）^[64]中明确规定采用DOE-2作为建筑节能设计的节能综合性能指标计算工具。DOE-2对用户专业素养要求高，用户往往需进行数月的培训。

DOE-2可在给定逐时气象数据、建筑几何结构、暖通空调系统信息及建筑使用率等参数的条件下，完成建筑年度能耗的动态分析、设备运行的寿命周期成本（LCC）计算。软件采用集成传递函数法、反应系数法、加权系数法等计算方法实现负荷计算^[65]，包含一个输入转换子程序（建筑描述语言处理器）和多个仿真子程序（负荷模块、空调模块、经济模块）。其模拟过程采用顺序结构，在一个时间步长内，各个仿真子程序独立执行，生成相应的数据报告，传递给下一个仿真子程序，每个时间步长均达到能量平衡。DOE-2.3增加了由压缩机、冷凝器、蒸发器和其他部件组成的制冷环路，具备详细模拟制冷系统的能力。

DOE-2被广泛应用于各类建筑能耗研究中。Touchaei等人^[66]使用DOE-2建筑能耗模型研究对比加拿大蒙特利尔使用吸收性和反射性建筑表面材料的商业建筑的能耗。该项目中DOE-2被用于参数分析降低峰值电力需求的冷却策略。瞿燕等人^[67]利用DOE-2针对上海世博园建筑群空调负荷进行天气、人流量和新风供给方式的敏感度分析。李怀玉等人^[68]、侯余波等人^[69]用DOE-2分别对上海地区、深圳市的建筑进行能耗分析，并提出相应的节能措施。

DOE-2软件基于DOS环境，专业性强，但界面不太友好，有固定的输入格式，必须采用手动编程的方法输入，且有关键字的要求^[70]，输出数据需自行处理。

就计算结果精确性而言, DOE-2的顺序结构存在一定缺陷。顺序结构中不同模块之间不能进行反馈^[65], 而在实际的暖通空调过程中, 建筑室内热环境、空调系统以及主机的运行情况等是耦合的, 从而导致计算结果准确性受到影响。而邻室传热和间歇空调等工况时, DOE-2模拟结果不准确, 还因为DOE-2没有严格考虑房间热平衡: 围护结构内表面长波互辐射换热被折算在全年固定的综合换热系数中, 无法考虑辐射地板采暖、辐射吊顶供冷等辐射空调形式^[71]。

2.2.2 eQUEST

eQUEST (the Quick Energy Simulation Tool)^[72]是由美国劳伦斯伯克利国家实验室 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) 与JJH公司 (James J. Hirsch & Associates) 合作开发的以DOE-2为计算引擎的免费逐时能耗模拟工具, 其功能强大且易于使用, 在建筑模拟建模方面没有丰富经验的研究者也能借助其实现对建筑的能耗分析, 目前最新版本为eQUEST 3.65。

eQUEST在DOE-2.2的基础上进行了优化, 为用户提供建筑创作向导、能效测量 (energy efficiency measure, EEM) 向导, 使数据输入过程更为简便。通过自行创建或导入CAD文件, 用户可以在eQUEST查看二维及三维的建筑模型。输出方面, eQUEST提供了3种输出形式^[73]: ①包含全年的逐时负荷、各项能耗量、LEED标准分析结果的csv文件; ②存储各类报表 (如能耗报表和经济分析报表)、数据最齐全的SIM文件; ③在eQUEST中的Results View界面显示的各类图像报告 (如单运行报告和多运行对比报告)。

借助eQUEST, 研究者可以更快更便捷地对各类建筑进行能耗计算及相关经济分析。杨福等人^[74]用eQUEST对北京市某商业建筑进行模拟, 对比分析商业建筑空调系统节能的最佳方案。于美静等人^[63]用eQUEST对哈尔滨某校区楼宇进行实例能耗模拟, 并将模拟结果与《民用建筑节能设计标准》中的有效传热系数法计算出来的结果进行对比。

采用DOE-2为计算引擎, eQUEST对建筑能耗模拟计算的结果准确性同样受到顺序结构法及房间热平衡考虑不严格的影响。

2.2.3 EnergyPlus

EnergyPlus是在美国能源部 (U.S. Department of Energy, DOE) 建筑技术办公室 (Building Technologies Office, BTO) 资助下, 由美国劳伦斯伯克利国家实验室 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)、美

国能源部各个国家实验室、研究所及私有公司共同开发的一款免费的开源建筑能耗逐时模拟引擎。美国能源部每年发布2次EnergyPlus的重大更新, 最新版本是2020年3月27日发布的EnergyPlus 9.3.0^[75]。

EnergyPlus集合了采用传递函数法的DOE-2和采用热平衡法的BLAST的优点, 以更精确的CTF (conduction transfer function) 计算墙体传热, 用热平衡法计算负荷, 实现集成负荷、系统、设备的同步模拟方法, 被认为是用来替代DOE-2的新一代建筑能耗分析软件。EnergyPlus改进了DOE-2的日光照明模型, 采用各向异性的天空模型, 对倾斜表面上的天空散射强度进行了更为精确的模拟。在模拟建筑热区与环境的相互作用时, 用户可选择将时间步长调至1 h以下 (通常为10~15 min), 提高模拟的精确度。而在模拟建筑热区与暖通空调系统的相互作用过程中, EnergyPlus可以自动调整时间步长, 提高模拟的速度。在每个时间步长, 程序自建筑内表面开始计算对流、辐射和传热, 可以模拟辐射式供热与供冷系统, 并对热舒适度进行评估, 且各房间不断迭代求解, 保证了多房间的热平衡。

作为一个跨平台程序, EnergyPlus可以在Windows、Mac OS X和Linux操作系统上运行, 其应用广泛, 且具备与WINDOW、COMIS、SPARK^[65]、TRNSYS^[70]、SketchUp等专业分析软件进行数据交互的接口。孙祥祥^[76]以天津市某幕墙建筑为实例, 采用SketchUp建立建筑物理模型并导入EnergyPlus中, 对该幕墙建筑能耗进行模拟计算。薛红兵等人^[77]用EnergyPlus对中国南方地区典型结构、冬季采用热水地暖系统的保育猪舍的温度和能耗进行了模拟和分析。王斌^[78]用Energyplus模拟计算各节能策略对西安地区办公建筑空调采暖能耗和照明能耗的影响, 并提出了适宜西安地区高层办公建筑的节能策略。

EnergyPlus采用ASCII文本格式的输入输出方式, 输出文件需经电子数据表进一步处理, 呈现结果不够直观^[79]且对用户专业要求高。EnergyPlus立足于建筑模拟, 其处理系统的能力偏弱, 通常假定设备的调节为理想化的连续调节, 对于设备部分负荷运行时的模拟不太准确, 对暖通空调系统控制方式的模拟能力较弱^[70]。在模拟运算过程中, EnergyPlus不易收敛, 迭代误差难以收敛到5%内, 不够稳定^[80]。

2.2.4 TRNSYS

TRNSYS (Transient System Simulation) 软件是由威斯康星大学麦迪逊分校太阳能实验室 (Solar Energy

Laboratory, University of Wisconsin-Madison) 开发并在欧洲一些研究所 (CSTB、TESS、TRANSSOLAR Energietechnik GmbH) 的共同研究下逐步完善的开源动态仿真软件, 于2003年开始在国内销售^[81]。其最新版本为TRNSYS 18^[82]。

TRNSYS采用了与DOE-2、EnergyPlus不同的设计思路, 其模块化开放式结构是最大的特点^[83]。用户无需考虑模块内的算法、编程, 只需根据需要调用实现这些特定功能的模块, 给定输入条件, 便可对不同系统进行模拟。作为一个开源软件, TRNSYS允许用户根据各自的需要修改或编写新的模块并添加到程序库^[81]。TRNSYS的灵活开放性赋予其多样化的功能, 不仅可实现对建筑物的全年逐时能耗分析, 对暖通空调系统、地板辐射供暖、供冷系统、蓄冷、蓄热系统的动态模拟, 还可对太阳能系统、地源热泵系统、冷热电联产系统、燃料电池系统等能源系统进行模拟优化。TRNSYS强大的模拟控制器可对各种控制方式进行精确模拟, 在部分负荷的模拟中相对EnergyPlus等软件有一定的优势。TRNSYS的模拟周期可达数a, 时间步长可细化到s, 可在线输出100多个系统变量, 形成Excel计算文件, 与MATLAB、FLUENT、COMIS、CONTAM、WINDOW、GENOPT、SketchUp等众多软件都有接口, 调用几乎所有能耗模拟软件的负荷计算结果, 完成系统能耗的计算与优化。

由于界面友好、功能多样, TRNSYS作为一种强大的系统仿真优化软件, 被广泛应用于建筑节能优化计算^[84]、暖通空调系统设计和控制策略优化^[85]、独立太阳能系统^[86]、地源热泵系统^[87]及复合能源系统^[88]的仿真模拟等领域。中国建筑科学院建筑环境与节能模拟及优化设计工作室使用TRNSYS软件, 为20余个项目提供了绿色建筑设计方案^[89]。

TRNSYS虽在模拟系统、设备和控制方式的最优化问题以及系统中参数监测等问题上有优势, 但TRNSYS中建筑模型比较简单, 使其难以模拟复杂结构的建筑, 不能按照建筑实际外形建立模型, 在处理自然通风和渗透通风等问题时需要借助其它软件, 在建筑负荷以及建筑热性能的模拟上处于劣势。

2.2.5 DeST

DeST (Designer's Simulation Toolkit) 是由清华大学建筑技术科学系环境与设备研究所开发的一款免费的建筑环境及暖通空调系统模拟优化软件。根据所模拟的建筑类型, DeST分为住宅建筑热环境模拟工具包 (DeST-h) 和商业建筑热环境模拟工具包

(DeST-c), 最新版本为DeST 2.0^[90]。

DeST的一大特点是其“分阶段设计, 分阶段模拟”的方法^[91]。DeST根据实际设计过程的阶段性特点, 将模拟划分为建筑热特性分析、系统方案分析、AHU (Air Handling Unit) 方案分析、风网模拟和冷热源模拟5个阶段。在研究空调系统时, DeST融合了TRNSYS的模块化思想, 将自然室温与建筑特性参数组合构成建筑物模块, 实现系统的模块化灵活组合。在分析模拟建筑热性能时, DeST立足于建筑, 通过具体的建筑模型, 考量各房间的热状况受其邻室热状况的影响情况, 实现对各室自然室温的精确模拟计算。在操作使用方面, DeST可在Windows操作系统下运行, 且具有基于AutoCAD图形化工作界面和相关数据接口, 模拟计算结果可以Excel报表的形式输出, 便于用户学习掌握。由于状态空间法求解的稳定性以及误差与时间步长的大小没有关系, DeST理论上的计算时间步长可以是任意值^[71]。

DeST支持各种复杂建筑形式和暖通空调系统的模拟计算, 可根据计算出的建筑全年动态负荷, 比较不同冷热源形式的初始投资和运行费用, 预测舒适性, 给出不同空调供暖系统经济性分析, 辅助建筑设计方案, 空调供暖系统方案的比较与优化。刘文波等人^[92]用DeST构建了济南地区的一个标准房间, 定量分析不同围护结构以及通风次数对自然室温的影响。彭关中等人^[93]用DeST构建了南京地区的一个简化建筑模型进行窗户节能技术研究。

DeST虽然融合了模块化思想, 但相较TRNSYS等软件, 所包含的设备和系统数目仍较少。此外, DeST是基于AutoCAD平台, 用户必须根据DeST版本, 安装对应的AutoCAD2000、2002或2004^[94]。2010年以前, 中国还没有完整的气象数据文件, DeST的气象数据库是实测结合拟合得到的, 拟合的结果会影响计算的准确性^[70]。

2.2.6 CEA

CEA (City Energy Analysis) ^[95]是由苏黎世联邦理工学院 (ETH Zurich) 主导设计的分析邻域到区域规模的建筑节能系统开源计算架构, 其最新正式版本是CEA v3.13.0^[96]。CEA对用户专业素养要求不高, 具有前端界面, 较易上手。

CEA的地理信息系统 (geographic information system, GIS) 集成度较高, 可通过OpenStreetMap获取地理信息数据, 也可以手动添加建筑道路信息。工具提供了温带 (瑞士联邦楚格市) 和热带 (新加坡)

2个典型城市的建筑设计以及气候信息数据库。在输入区域建筑设计、道路情况、气候信息、供能系统选型等数据的条件下,可以实现对区域建筑年度冷、热、电需求的逐时预测、区域热网络的设计与供能优化,以及设备运行的全生命周期评估。

CEA软件使用Python v2.7开发,包含需求、资源潜力、系统技术、系统优化、决策模块、时空分析6个模块。模型中建筑物属性包括占地面积、高度、窗墙比、遮阳类型、占用类型、发电系统以及建造年份等。通过设定不同建筑占用率、最小通风速率、温湿度设定点、负载情况的标准时间表,对区域能源需求的时空分布做出预测。在此基础上,还能对区域能源系统进行优化设计。

CEA在全球多个国家被用于区域能源系统潜热建模、区域建筑能源系统的生命周期评估以及市区太阳辐射度分析。Fonseca等人^[97]通过改变建筑形式和占用类型,使用CEA生成城市改造的4个不同场景的能量需求时空模式。Mehta等人^[98]使用CEA生成苏黎世2000个构建基块的能源需求数据,提出了一种基于主体的模型来分析个人和社区光伏系统采用的动态水平。Happle等人^[99]使用CEA对建筑空气渗透率的随机性进行建模,并对新加坡案例进行了分析。

2.2.7 CitySim

CitySim是由洛桑联邦理工学院(EPFL)开发的用于动态建筑能耗模拟的工具。CitySim软件旨在为城市能源规划者和利益相关者提供决策支持,以最大程度地减少不可再生能源使用以及温室气体排放^[100]。

CitySim软件需要输入建筑物的特征(采用CitySim XML文件格式)和气候文件(Meteonorm CLI的规范文件格式),内部包含CitySim Solver(命令行综合求解器),用于模拟建筑物的能源需求和供应。该软件有以下特点:使用特有的XML文件描述建筑物的热物理属性以方便用户描述市区规模(包括数百栋建筑物)的几何3D建筑物形式;考虑居住者的占用情况和行为的随机性,进行建筑负荷预测并考虑一系列常用的供暖、通风和空调系统(Heating Ventilating & Air Conditioning, HVAC);将一系列常用可再生能源转换系统模型纳入到工具中,并根据城市环境驱动的辐射交换计算可利用情况;可以导出标准文本文件(TSV),支持用户对能源绩效数据进行分析。

CitySim使用详细的辐射模型^[101],用于描述太阳辐射以及相邻建筑物、地面和环境之间的辐射交换,模拟规模范围从一个小的邻里到整个城市。它能够计

算建筑物墙壁每小时的辐射量以及相应墙壁的温度。CitySim也可以对建筑热需求做出合理预估,并用于监控办公楼的供热消耗。不过, CitySim没有考虑到周围建筑物的屏蔽对墙体温度的影响,每面墙的温度在指定的时间是恒定的。Chen等人^[102]考虑将CFD与CitySim结合,可以更好地讨论热引起的气流和机械引起的气流与风向变化之间的影响机制。

2.2.8 ForFITS

ForFITS是由欧洲经委会运输司开发的交通排放评估分析模型,用于估算国家和地区(城市)运输服务中的污染排放水平并评估运输政策,其中CO₂排放计算免费向公众开放^[103]。

ForFITS模型可用于内陆路运输(包括公路、铁路和内陆水路)、航空和海上运输CO₂排放的预测,可用于预测和评估拟实施的运输政策的减排效果,从而对运输政策做出评价。ForFITS工具包括6种公路运输车辆类别,31种动力总成技术和10种燃油混合类型。每种模式可分为子模式和其他类别。计算过程包括120多种运输和社会经济运输参数。软件采用作业活动-方式结构-能耗强度-排放因子(activity-modal structure-energy intensity-emission factor, ASIF)方法建立减排框架^[104],可以基于使用多项式logit模型的离散选择(内生选择)或者直接设定(外部输入)的方法,来估算每种类别、模式和运输服务(客运和货运)中新注册车辆的动力总成技术所占的份额。

ForFITS模型可用于分析不同情况下交通部门的污染排放情况。Zawieska等人^[105]预测了在3种不同情况下华沙交通系统2050年的温室气体排放水平。Haddad等人^[106]分析了使用节油型和混合动力电动汽车更换现有公交车,到2040年减少能源消耗和CO₂排放的效果。

ForFITS的扩展计算性很好,是估算与交通相关的温室气体排放量的最可靠工具之一,但工具中未考虑智能城市设计对交通部门的影响。

2.2.9 MATSim

MATSim(Multi-Agent Transport Simulation)是使用Java实现的基于活动的开源可扩展仿真工具^[107],MATSim GUI最新的版本为2020年6月发布的v12.0^[108]。

MATSim由多个模块组成,这些模块可以组合或独立使用,也可以使用自定义程序来替换模块。它有以下特点:①快速的动态和基于代理的流量仿真,可以在几分钟之内模拟整天的情况;②模拟私用和公共交通,私人汽车和出入境交通都可以模拟;③支持

大型方案，MATSim可以模拟数百万个代理或者庞大详细的网络结构；④多功能分析和模拟输出，可以将模拟数据与实际进行比较。

MATSim通过跟随单个综合旅行者的每日或每周活动计划，产生交通和拥堵情况，即通过添加公共交通或私家车的出行时间表，对交通流量情况进行模拟。Viergutz等人^[109]在MATSim平台上比较了在德国科尔迪茨乡镇地区使用需求运输与传统按时刻表运输的公共交通方式的差别；崔毅等人^[110]借助南宁市交通出行调查数据，在MATSim仿真平台构建了当地居民的微观出行行为模型，并计算得出了使用小汽车的排放情况和时空分布特征；Khaïdem等人^[111]使用了强化学习方法替代MATSim中的协同算法，来模拟真实数据情况。

2.3 小结

综合以上城市能源系统能耗分析典型工具的具体讨论，表4和表5分别从工具特性和优缺点方面对9个典型城市能源系统能耗分析工具进行对比。

表4 典型能耗分析工具特性对比

Table 4 Comparison of characteristics of typical energy consumption analysis tools

工具	时间步长	费用	专业水平要求	应用对象
DOE-2	1 h	免费	高	建筑
eQuest	1 h	免费	低	建筑
EnergyPlus	≤1 h	免费	高	建筑
TRNSYS	1 s	付费	中等	系统
DeST	任意值，默认为1 h	免费	中等	建筑及系统
CEA	1 h或1月	免费	低	区域及建筑
CitySim	1 h	免费	中等	区域及建筑
ForFITS	1 a	部分免费	低	交通
MATSim	自定义，1 min~1 h	免费	中等	交通

表5 典型能耗分析工具优缺点对比

Table 5 Comparison of advantages and disadvantages of typical energy consumption analysis tools

工具	优点	缺点
DOE-2	免费；最权威、最经典的建筑能耗模拟软件之一，可处理复杂结构建筑	对用户专业素养要求高；计算结果准确性受顺序结构法及房间热平衡考虑不严格影响

续表

工具	优点	缺点
eQuest	免费；以DOE-2为核心，具备图形界面，提供使用向导与图表报告，对用户专业素养要求低	计算结果准确性受顺序结构影响
EnergyPlus	免费；采用更精确的传热算法和各向异性的天空模型；可以在Windows、Mac OS X和Linux操作系统上运行；具备与WINDOW、COMIS、TRNSYS、SketchUp等专业软件的数据交互接口	对用户专业素养要求高；对暖通空调系统控制方式的模拟能力较弱；在模拟运算过程中不易收敛，不够稳定
TRNSYS	采用模块化开放式结构，对用户专业素养要求不高；与MATLAB、FLUENT、COMIS、WINDOW、SketchUp等软件有接口；可对太阳能系统、地源热泵系统等进行模拟仿真	难以模拟复杂结构的建筑，在处理自然通风和渗透通风等问题时需要借助其它软件，在建筑负荷以及建筑热性能的模拟上相对处于劣势
DeST	免费；分阶段提供准确实用的分析结果；具备基于AutoCAD的图形界面，对用户专业素养要求较低	所包含的设备和系统数目较少；依托于AutoCAD，无独立运行的平台；计算的准确性受气象数据库中拟合数据的影响
CEA	免费；与地理信息结合程度高，可讨论不同地块规划情景；开源，支持自开发模块；具有用户界面，用户友好性高	考虑区块的可再生资源集中于光伏，其他方面涉及较少
CitySim	使用特有的XML文件描述建筑物的热物理属性；考虑居住者的占用情况和行为的随机性；考虑建筑物相互作用	没有考虑到周围建筑物的屏蔽对墙体温度的影响，每面墙的温度在指定的时间是恒定
ForFITS	根据当前模式预测未来的排放，可以通过对不同模式进行分析，对运输政策做出评价	未考虑未来智能城市设计对交通部门的影响
MATSim	免费；快速的动态和基于代理的流量仿真；支持模拟私家车和公共交通；支持大型模拟；多功能分析和模拟输出，可以将模拟数据与实际进行比较	需要详细的出行数据来设计用户出行模型，或数据驱动构建模型

3 结语

本文在对城市能源系统规划设计及能耗分析工具调研的基础上，分别选取典型工具进行对比，并结合应用案例对各工具的适用场景进行分析，为相关工具的后续开发及应用提供参考。

首先, 对MARKAL/TIMES、LEAP、EnergyPLAN、DER-CAM和HOMER等5种典型城市能源系统规划设计商业工具的适用范围、功能、特性等重要信息进行了归纳和评估, 并结合案例进行了应用场景分析。综合分析对比结果可知, MARKAL/TIMES适用于研究各项策略对大型城市能源系统的长期影响; LEAP适用于城市能源系统的中长期规划; EnergyPLAN侧重于可再生能源应用的可持续能源系统的设计和评估; DER-CAM则是峰值容量为250~2000 kW的并网分布式能源系统规划设计的理想工具; HOMER适用于小功率离/并网式微网的设计、优化及可行性评估。

其次, 对DOE-2、eQUEST、EnergyPlus、TRNSYS、DeST、CEA、CitySim、ForFITS、MATSim等9种典型城市能源系统能耗分析商业工具的特性和优缺点进行了归纳分析, 并结合案例进行了应用场景分析。综合分析对比结果可知, 对于熟悉ASCII码的专业人员, 在开展复杂结构建筑的能耗模拟时, 可选用最经典权威的DOE-2或使用算法更精确的EnergyPlus; 而对于习惯图形化界面的研究者, 选择以DOE-2为计算引擎的eQUEST较为合适; 若研究重点在于系统, 推荐选择具备模块化开放式结构的TRNSYS; 熟悉AutoCAD的研究者则可选用DeST对建筑物热特性及暖通空调系统性能进行精确模拟; 对于区域负荷预测, 需要结合区域HVAC设计的可以使用CEA, 考虑居住者随机性可以使用CitySim; 对于交通负荷预测, 长周期的交通污染排放分析可以使用ForFITS, 建立区域交通仿真可以使用MATSim。

城市能源系统建设是提高城市能源利用效率、减少污染排放的最有效手段之一, 已成为推动能源转型、建设现代能源体系的重要举措。随着城市大规模智能设备的应用, 使得能源实时监控、管理和调度成为可能, 也为城市能源系统建模提供了大量数据支撑。目前, 城市综合能源服务在中国大面积推广, 但相关服务模式和评估管理技术尚处于探索发展阶段, 面临诸多问题和挑战, 有很大的发展和提升空间。城市能源系统规划设计与能耗分析工具的本土化开发及应用是现阶段综合能源服务面临的核心技术难题。从各工具功能对比的结果看, 由于已有的城市能源系统规划设计工具开发的背景和语言不同, 工具间的集成和数据通信存在问题, 工具对系统实际运行过程中变工况的模拟能力还比较欠缺, 也缺乏对政策因素影响的考量, 这些方面可在后续开发过程中改进。此外, 已有的城市能源系统能耗分析工具大多采用物理

模型驱动的建模方法, 可考虑与数据驱动模型结合, 优化迭代, 实现更准确的能耗预测。当前, 城市能源网络日益复杂, 不断涌现出新的能源技术可集成在系统中, 模型规模将随着新网络和技术的接入爆炸性增长, 可考虑引入聚类、主成分分析法、时间矩法等进行模型的简化和降阶。

参考文献

- [1] KEIRSTEAD J, JENNINGS M, SIVAKUMAR A. A review of urban energy system models: approaches, challenges and opportunities[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3847-3866.
- [2] 赵一冰, 蔡闻佳, 丛建辉, 等. 低碳战略下供给侧减缓技术的综合成本效益分析[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(4): 319-327.
ZHAO Yibing, CAI Wenjia, CONG Jianhui, et al. Comprehensive cost-benefit evaluation of supply side mitigation technologies for low-carbon strategy[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(4): 319-327(in Chinese).
- [3] 中共中央, 国务院. 关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见[EB/OL]. (2016-02-21) [2020-07-05]. http://www.gov.cn/zhengce/2016-02/21/content_5044367.htm.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. (2016-02-29) [2020-07-05]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.
- [5] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源发展“十三五”规划[R]. 2016.
- [6] 李克强. 2020年政府工作报告[R]. 2020.
- [7] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(7): 198-207(in Chinese).
- [8] JING R, ZHU X Y, ZHU Z Y, et al. A multi-objective optimization and multi-criteria evaluation integrated framework for distributed energy system optimal planning[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 166: 445-462.
- [9] WU Q, REN H B, GAO W J, et al. Profit allocation analysis among the distributed energy network participants based on Game-theory[J]. *Energy*, 2017, 118: 783-794.
- [10] ZHENG Y Y, JENKINS B M, KORNBLUTH K, et al. Optimization of a biomass-integrated renewable energy microgrid with demand side management under uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 836-844.
- [11] WU R, MAVROMATIDIS G, OREHOUNIG K, et al.

- Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community[J]. *Applied Energy*, 2017, 190: 634-649.
- [12] ZHOU S Y, ZOU F H, WU Z, et al. A smart community energy management scheme considering user dominated demand side response and P2P trading[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 114: 105378.
- [13] GHEDAMSI R, SETTOU N, GOUAREH A, et al. Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 121: 309-317.
- [14] LÜ X, LU T, KIBERT C J, et al. Modeling and forecasting energy consumption for heterogeneous buildings using a physical-statistical approach[J]. *Applied Energy*, 2015, 144: 261-275.
- [15] SHI G, LIU D R, WEI Q L. Energy consumption prediction of office buildings based on echo state networks[J]. *Neurocomputing*, 2016, 216: 478-488.
- [16] CONNOLLY D, LUND H, MATHIESEN B V, et al. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1059-1082.
- [17] MARKOVIC D, CVETKOVIC D, MASIC B. Survey of software tools for energy efficiency in a community[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9): 4897-4903.
- [18] MENDES G, IOAKIMIDIS C, FERRÃO P. On the planning and analysis of integrated community energy systems: a review and survey of available tools[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9): 4836-4854.
- [19] MANFREN M, CAPUTO P, COSTA G. Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: methods and models[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(4): 1032-1048.
- [20] SINHA S, CHANDEL S S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 192-205.
- [21] ALLEGRIANI J, OREHOUNIG K, MAVROMATIDIS G, et al. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 1391-1404.
- [22] TOZZI P Jr, JO J H. A comparative analysis of renewable energy simulation tools: performance simulation model vs. system optimization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 390-398.
- [23] FERRARI S, ZAGARELLA F, CAPUTO P, et al. Assessment of tools for urban energy planning[J]. *Energy*, 2019, 176: 544-551.
- [24] CRAWLEY D B, HAND J W, KUMMERT M, et al. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(4): 661-673.
- [25] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. *电力建设*, 2015, 36(1): 16-25.
- JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(1): 16-25(in Chinese).
- [26] 龙惟定. 城区需求侧能源规划和能源微网技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [27] IEA. Tools[EB/OL]. [2020-07-05]. <http://www.iea-etsap.org/index.php/etsap-tools>.
- [28] IEA-ETSAP. A comparison of the TIMES and MARKAL models[EB/OL]. [2020-07-05]. <http://www.iea-etsap.org/tools/TIMESvsMARKAL.pdf>.
- [29] Department of Development and Planning, Aalborg University. MARKAL/TIMES | EnergyPLAN [EB/OL]. [2020-07-05]. <http://www.energyplan.eu/othertools/national/markaltimes/>.
- [30] CHEN W, JIA L, MA L, et al. Role for carbon capture and storage in China[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 4209-4216.
- [31] CONTALDI M, GRACCEVA F, MATTUCCI A. Hydrogen perspectives in Italy: Analysis of possible deployment scenarios[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(6): 1630-1642.
- [32] CONTRERAS A, GUERVÓS E, POSSO F. Market penetration analysis of the use of hydrogen in the road transport sector of the Madrid region, using MARKAL[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(1): 13-20.
- [33] VAILLANCOURT K, LABRIET M, LOULOU R, et al. The role of nuclear energy in long-term climate scenarios: an analysis with the World-TIMES model[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(7): 2296-2307.
- [34] LECHON Y, CABAL H, VARELA M, et al. A global energy model with fusion[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, 75-79: 1141-1144.
- [35] MAHMUD K, TOWN G E. A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks[J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 337-359.
- [36] THELLUFSEN J Z, NIELSEN S, LUND H. Implementing cleaner heating solutions towards a future low-carbon scenario in Ireland[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 377-388.
- [37] 贾彦鹏, 刘仁志. 基于TIMES模型的北京市节能减排分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(5): 857-865.
- JIA Yanpeng, LIU Renzhi. Analysis of Beijing energy saving and emission reduction strategy based on TIMES model[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(5): 857-865(in Chinese).
- [38] Community for Energy, Environment and Development, Stockholm Environment Institute. Long-range Energy Alternatives Planning System[EB/OL]. [2020-07-05]. <http://www.energycommunity.org>.
- [39] HEAPS C G. An Introduction to LEAP[EB/OL]. [2020-07-05]. <https://leap.sei.org/help/leap.htm#t=Concepts%2FIntroduction.htm>.
- [40] CHEN H T, WANG Z H, XU S, et al. Energy demand, emission reduction and health co-benefits evaluated in transitional China in a 2 °C warming world[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264: 121773.
- [41] 常征, 潘克西. 基于LEAP模型的上海长期能源消耗及碳排放

- 放分析[J]. 当代财经, 2014(1): 98-106.
- CHANG Zheng, PAN Kexi. An analysis of shanghai's long-term energy consumption and carbon emission based on LEAP model[J]. Contemporary Finance & Economics, 2014(1): 98-106(in Chinese).
- [42] LUND H, MÜNSTER E. Modelling of energy systems with a high percentage of CHP and wind power[J]. Renewable Energy, 2003, 28(14): 2179-2193.
- [43] HUANG Z S, YU H, PENG Z W, et al. Methods and tools for community energy planning: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1335-1348.
- [44] Department of Development and Planning, Aalborg University. EnergyPLAN[EB/OL]. [2020-07-05]. <https://www.energyplan.eu>.
- [45] LUND H. Large-scale integration of wind power into different energy systems[J]. Energy, 2005, 30(13): 2402-2412.
- [46] LUND H, ANDERSEN A N. Optimal designs of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(6): 893-904.
- [47] LUND H, KEMPTON W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G[J]. Energy Policy, 2008, 36(9): 3578-3587.
- [48] LUND H, DUIĆ N, KRAJAČIĆ G, et al. Two energy system analysis models: a comparison of methodologies and results[J]. Energy, 2007, 32(6): 948-954.
- [49] BAMISILE O, HUANG Q, XU X, et al. An approach for sustainable energy planning towards 100% electrification of Nigeria by 2030[J]. Energy, 2020, 197: 117172.
- [50] STADLER M, MARNAY C, DEFOREST N, et al. Web-based economic and environmental optimization of microgrids[C]// Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). 16-20 Jan. 2012, Washington, DC, USA.
- [51] 汪伟, 段绍辉, 张兆鹏, 等. 冷热电蓄能联供微网系统优化配置的影响因素[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 156-161.
- WANG Wei, DUAN Shaohui, ZHANG Zhaopeng, et al. Influential factors of optimal configuration for combined cooling heating and power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(4): 156-161(in Chinese).
- [52] 刘启波, 冯威, 周南. 分布式能源利用的经济性与环境影响研究: 基于DER-CAM模型[J]. 建筑经济, 2016, 37(5): 92-97.
- LIU Qibo, FENG Wei, ZHOU Nan. Research on economic advantages and environmental impact of distributed energy utilization: based on DER-CAM model[J]. Construction Economy, 2016, 37(5): 92-97(in Chinese).
- [53] 于波. 微网与储能系统容量优化规划[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- YU Bo. Optimization planning of microgrid and energy storage system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012(in Chinese).
- [54] 葛兴凯, 古云蛟. 分布式能源系统规划设计软件分析对比[J]. 电器与能效管理技术, 2015(3): 57-61.
- GE Xingkai, GU Yunjiao. Overview on planning & designing software of distributed energy system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(3): 57-61(in Chinese).
- [55] HOMER ENERGY. HOMER Pro[EB/OL]. [2020-07-05]. <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.
- [56] HOMER ENERGY. HOMER-Hybrid renewable and distributed generation system design software[EB/OL]. [2020-07-05]. <http://www.homerenergy.com/>.
- [57] KHAN M J, IQBAL M T. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland[J]. Renewable Energy, 2005, 30(6): 835-854.
- [58] REHMAN S, EL-AMIN I M, AHMAD F, et al. Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(4): 635-653.
- [59] MIAO C Q, TENG K L, WANG Y D, et al. Technoeconomic analysis on a hybrid power system for the UK household using renewable energy: a case study[J]. Energies, 2020, 13(12): 3231.
- [60] 李春平, 杨万清, 王跃东, 等. 基于Homer仿真的微网能量管理与控制策略[J]. 电测与仪表, 2014, 51(20): 91-94.
- LI Chunping, YANG Wanqing, WANG Yuedong, et al. Microgrid energy management and control strategy based on Homer simulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(20): 91-94(in Chinese).
- [61] 李嘉琛. 并网光伏电站中混合储能的控制与容量优化策略的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- LI Jiachen. Research on control and capacity optimization strategies of hybrid energy storage in grid-connected PV stations[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014(in Chinese).
- [62] HIRSCH J J & Associates. DOE-2 building energy use and cost analysis tool [EB/OL]. [2020-07-05]. <http://doe2.com/DOE2/index.html>.
- [63] 于美静, 王宏伟. 建筑节能计算机模拟软件的研究[J]. 区域供热, 2007(3): 69-72.
- [64] 中华人民共和国建设部. 中华人民共和国建筑工程标准: 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 JGJ 134—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [65] 潘毅群, 左明明, 李玉明. 建筑能耗模拟——绿色建筑设计与建筑节能改造的支持工具之一: 基本原理与软件[J]. 制冷与空调, 2008, 22(3): 10-16.
- PAN Yiqun, ZUO Mingming, LI Yuming. Building energy simulation-tool for green building design and building commissioning-part I: basic principle and software[J]. Refrigeration & Air Condition, 2008, 22(3): 10-16(in Chinese).
- [66] TOUCHAEI A G, HOSSEINI M, AKBARI H. Energy savings potentials of commercial buildings by urban heat island reduction strategies in Montreal (Canada)[J]. Energy and Buildings, 2016, 110: 41-48.
- [67] 瞿燕, 潘毅群, 黄治钟. 上海世博园区空调负荷变化情景分析[J]. 建筑节能, 2008, 36(7): 12-17.
- QU Yan, PAN Yiqun, HUANG Zhizhong. Scene analysis on the cooling loads changes of air-conditioning of Shanghai world expo garden buildings[J]. Construction Conserves

- Energy, 2008, 36(7): 12-17(in Chinese).
- [68] 李怀玉, 郑洁, 杨迪. 上海地区建筑节能分析[J]. 节能, 2006, 25(11): 38-40.
- [69] 侯余波, 付祥钊, 刘俊跃. 深圳市居住建筑能耗分析[J]. 制冷与空调, 2008, 22(3): 63-69.
- HOU Yubo, FU Xiangzhao, LIU Junyue. Analysis of Shenzhen's residential building energy-consumption[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2008, 22(3): 63-69(in Chinese).
- [70] 李骥, 邹瑜, 魏峥. 建筑能耗模拟软件的特点及应用中存在的问题[J]. 建筑科学, 2010, 26(2): 24-28.
- LI Ji, ZOU Yu, WEI Zheng. Characteristics of simulation software of building energy consumption and problems existing in the application[J]. Building Science, 2010, 26(2): 24-28(in Chinese).
- [71] 朱丹丹, 燕达, 王闯, 等. 建筑能耗模拟软件对比: DeST、EnergyPlus and DOE-2[J]. 建筑科学, 2012, 28(增刊2): 213-222.
- ZHU Dandan, YAN Da, WANG Chuang, et al. Comparison of building energy simulation programs: DeST, EnergyPlus and DOE-2[J]. Building Science, 2012, 28(Supplement 2): 213-222(in Chinese).
- [72] HIRSCH J J & Associates. eQUEST[EB/OL]. [2020-07-05]. <http://doe2.com/equest/index.html>.
- [73] 李莹莹. 湖南地区公共建筑节能评价体系的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LI Yingying. Research on the energy efficiency evaluation system of public buildings in Hunan[D]. Changsha: Central South University, 2013(in Chinese).
- [74] 杨福, 王衍金, 王伟宵. 基于eQUEST的某商业建筑空调系统节能分析[J]. 建筑节能, 2020, 48(5): 76-79.
- YANG Fu, WANG Yanjin, WANG Weixiao. Energy simulation analysis of a commercial building based on eQUEST[J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(5): 76-79(in Chinese).
- [75] Lawrence Berkeley National Laboratory. EnergyPlus[EB/OL]. [2020-07-05]. <https://energyplus.net>.
- [76] 孙祥祥. 天津市某幕墙建筑能耗模拟及节能性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- SUN Xiangxiang. Energy consumption simulation and energy saving study of a curtain wall building in Tianjin[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014(in Chinese).
- [77] 薛红兵, 代小蓉, 周斌, 等. 基于EnergyPlus的保育舍冬季温度与能耗模拟研究[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(15): 58-62.
- XUE Hongbing, DAI Xiaorong, ZHOU Bin, et al. Simulation of temperature and energy consumption of a weaner house in winter based on EnergyPlus[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2016, 52(15): 58-62(in Chinese).
- [78] 王斌. 西安地区办公建筑节能设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- WANG Bin. Research on energy efficiency design of office buildings in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009(in Chinese).
- [79] 黄俊鹏, 李峥嵘. 建筑节能计算机评估体系研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(11): 30-35.
- HUANG Junpeng, LI Zhengrong. Building energy efficiency computer evaluation systems[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, 34(11): 30-35(in Chinese).
- [80] 吕政. 建筑围护能耗的计算机仿真设计介绍[J]. 制冷空调与电力机械, 2006, 27(6): 37-40.
- LU Zheng. Introduction on the computer simulative design of building enclosure's energy consumption[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2006, 27(6): 37-40(in Chinese).
- [81] 中国建筑科学研究院. TRNSYS简介[EB/OL]. [2020-07-05]. http://www.trnsys.com.cn/index.php?_m=mod_article&_a=article_content&article_id=244.
- [82] The University of Wisconsin-Madison. A TRAnsient SYtems Simulation Program[EB/OL]. [2020-07-05]. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>.
- [83] 中国建筑科学研究院. TRNSYS介绍及主要功能 [EB/OL]. (2012-12-14)[2020-07-05]. http://www.trnsys.com.cn/index.php?_m=mod_article&_a=article_content&article_id=247.
- [84] DATTA G. Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS simulation[J]. Renewable Energy, 2001, 23(3/4): 497-507.
- [85] 宁巍. 基于TRNSYS的变风量空调系统优化控制仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- NING Wei. Optimal control simulation of variable air volume air conditioning system based on TRNSYS[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013(in Chinese).
- [86] HOBBI A, SIDDIQUI K. Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS[J]. Solar Energy, 2009, 83(5): 700-714.
- [87] 杨鹏. 基于TRNSYS地源热泵系统模型的建立与应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- YANG Peng. Establishment and application of ground source heat pump system model based on TRNSYS [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012(in Chinese).
- [88] 尹丽媛. 基于TRNSYS的太阳能耦合土壤源热泵系统仿真研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- YIN Liyuan. Simulation of solar coupled ground source heat pump system based on TRNSYS[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013(in Chinese).
- [89] 中国建筑科学研究院. 绿色建筑和LEED案例[EB/OL]. (2012-12-17)[2020-07-05]. http://www.trnsys.com.cn/index.php?_m=mod_article&_a=article_content&article_id=255.
- [90] DeST Group. DeST download site [EB/OL]. [2020-07-05]. <https://update.dest.com.cn>.
- [91] 燕达, 谢晓娜, 宋芳婷, 等. 建筑环境设计模拟分析软件DeST 第一讲 建筑模拟技术与DeST发展简介[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 48-56.
- YAN Da, XIE Xiaona, SONG Fangting, et al. Building environment design simulation software DeST(1): an overview of developments and information of building simulation and DeST[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, 34(7): 48-56.

- 48-56(in Chinese).
- [92] 刘文波, 曲云霞, 刘学亭, 等. 利用Dest分析济南地区不同围护结构下的自然室温[J]. 节能, 2006, 25(11): 25-26.
LIU Wenbo, QU Yunxia, LIU Xueting, et al. The analysis of natural room temperature for four different kinds of envelope in Jinan by Dest software[J]. Energy Conservation, 2006, 25(11): 25-26(in Chinese).
- [93] 彭关中, 缪小平, 胡啸, 等. 利用DeST模拟窗户对空调系统能耗的影响[J]. 洁净与空调技术, 2006(3): 19-21.
PENG Guanzhong, MIAO Xiaoping, HU Xiao, et al. DeST simulation on the effect of window on air-conditioning system energy consumption[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2006(3): 19-21(in Chinese).
- [94] DeST Group. DeST_FAQ[EB/OL]. (2008-04-16)[2020-07-05]. <http://dest.tsinghua.edu.cn/Chinese/Download/faq.asp>.
- [95] FONSECA J A, SCHLUETER A. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts[J]. Applied Energy, 2015, 142: 247-265.
- [96] CityEnergyAnalyst v3.13.0[EB/OL]. [2020-11-08]. <https://github.com/architecture-building-systems/CityEnergyAnalyst/releases/tag/v3.13.0>.
- [97] FONSECA J A, NGUYEN T A, SCHLUETER A, et al. City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts[J]. Energy and Buildings, 2016, 113: 202-226.
- [98] MEHTA P, GRIEGO D, NUNEZ-JIMENEZ A, et al. The impact of self-consumption regulation on individual and community solar PV adoption in Switzerland: an agent-based model[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1343: 012143.
- [99] HAPPLE G, FONSECA J A, SCHLUETER A. Effects of air infiltration modeling approaches in urban building energy demand forecasts[J]. Energy Procedia, 2017, 122: 283-288.
- [100] EPFL. CitySim Software[EB/OL]. [2020-11-08]. <https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/>.
- [101] MUTANI G, COCCOLO S, KÄMPF J. CitySim Guide[Z]. 2020.
- [102] CHEN G X, RONG L, ZHANG G Q. Comparison of urban airflow between solar-induced thermal wall and uniform wall temperature boundary conditions by coupling CitySim and CFD[J]. Building and Environment, 2020, 172: 106732.
- [103] UNECE. ForFITS Model-Assessing Future CO₂ Emissions [EB/OL]. [2020-11-08]. https://www.unece.org/trans/theme_forfits.html.
- [104] ANDREJSZKI T, GANGONELLS M, MOLNAR E, et al. ForFITS: a new help in transport decision making for a sustainable future[J]. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2014, 42(2): 119-124.
- [105] ZAWIESKA J, PIERIEGUD J. Smart city as a tool for sustainable mobility and transport decarbonisation[J]. Transport Policy, 2018, 63: 39-50.
- [106] HADDAD M G, MANSOUR C J, AFIF C. Future trends and mitigation options for energy consumption and greenhouse gas emissions in a developing country of the Middle East region: a case study of Lebanon's road transport sector[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2018, 23(3): 263-276.
- [107] MATSim. [EB/OL]. [2020-11-08]. <https://www.matsim.org/downloads/>.
- [108] HORNI A, NAGEL K, AXHAUSEN K W. The multi-agent transport simulation MATSim[M]. London: Ubiquity Press, 2016. <http://dx.doi.org/10.5334/baw>.
- [109] VIERGUTZ K, SCHMIDT C. Demand responsive - vs. conventional public transportation: a MATSim study about the rural town of Colditz, Germany[J]. Procedia Computer Science, 2019, 151: 69-76.
- [110] 崔毅, 潘海啸. 基于活动的微观交通仿真研究与交通排放计算[J]. 城市建筑, 2019(16): 104-109.
CUI Yi, PAN Haixiao. Activity-based microscopic traffic simulation and traffic emission calculation[J]. Urbanism and Architecture, 2019(16): 104-109(in Chinese).
- [111] KHAIDEM L, LUCA M, YANG F, et al. Optimizing transportation dynamics at a city-scale using a reinforcement learning framework[J]. IEEE Access, 2020, 8: 171528-171541.

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-13。

作者简介:



谢珊

谢珊(1986), 女, 工程师, 研究方向为综合能源系统优化设计和运行策略、能源系统仿真, E-mail: shanxie@xmu.edu.cn。

贾跃龙(1988), 男, 研究方向为综合能源系统、节能节电、电力需求侧管理, E-mail: jiayuelong@sgeri.sgcc.com.cn。

白雪涛(1996), 男, 硕士, 研究方向为结合地理信息的区域综合能源系统优化设计, E-mail: xuetaob704112078@163.com。

张智慧(1993), 男, 工程师, 研究方向为综合能源系统规划, E-mail: zzhzzh12306@163.com。

王舒仰(1994), 女, 硕士, 研究方向为综合能源系统规划, E-mail: sywang9918@foxmail.com。

郑徐跃(1988), 男, 博士, 研究方向为综合能源系统优化设计和运行策略。通信作者, E-mail: zxycly1218@sina.com。

赵英汝(1981), 女, 教授, 研究方向为复杂能源系统多尺度模拟和优化。通信作者, E-mail: yrzha@xmu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)