

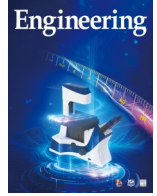


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Building Demand Flexibility—Review

## 住宅建筑需求侧柔性——定义、柔性负荷及量化方法

罗正意<sup>a,b</sup>, 彭晋卿<sup>a,b,\*</sup>, 曹静宇<sup>a,b</sup>, 殷荣欣<sup>a,b</sup>, 邹斌<sup>a,b,\*</sup>, 谭羽桐<sup>a,b</sup>, 严晋跃<sup>c</sup>

<sup>a</sup> College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410006, China

<sup>b</sup> Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Changsha 410006, China

<sup>c</sup> School of Business, Society & Engineering, Mälardalen University, Vasteras 999027, Sweden

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 17 September 2021

Revised 5 January 2022

Accepted 28 January 2022

Available online 18 March 2022

#### 关键词

住宅建筑  
需求侧柔性  
柔性负荷  
建模方法  
量化指标

### 摘要

本文综述了近年来关于住宅建筑需求侧柔性的定义、柔性负荷及柔性量化方法方面的研究。首先,针对建筑需求侧柔性、运行柔性和能源柔性等不同的术语,进行了系统的比较和区分;其次,对住宅建筑主要柔性负荷的运行特性和柔性能力进行了总结和比较;再次,对柔性负荷的建模方法和柔性量化指标也进行了详细的综述和总结。最后,提出了当前建筑需求侧柔性领域存在的一些亟待解决的问题。研究结果表明当前针对住宅建筑需求侧柔性的研究主要以中央空调、储水式电热水器、湿电器、冰箱和照明为主,分别占现有研究的36.7%、25.7%、14.7%、9.2%和8.3%。这些柔性负荷在运行特性、使用频率和柔性能力方面存在较大的差异,而对于它们实际的响应特性有待进一步研究。此外,本文给出了用于柔性负荷建模的白箱、灰箱和黑箱模型在不同应用场合下适用性的建议;对于柔性量化指标,现有研究主要从功率、时间、能量、效率、经济性和环保性等维度提出了大量的指标,但是缺少统一的柔性量化体系。本文能够帮助读者更好地理解建筑需求侧柔性、区分与柔性相关的不同的术语、了解住宅建筑不同柔性负荷的运行特性和柔性能力,同时也能为柔性负荷的建模和柔性量化的相关研究提供指导。

© 2022 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

### 1.1. 研究背景

随着间歇性可再生能源发电渗透率的不断提高,建筑需求侧柔性在保证电网稳定运行方面发挥着越来越重要的作用[1–2]。然而,利用建筑需求侧柔性需要解决以下几个关键问题:量化柔性潜力[3]、优化调度柔性资源[4]和开发柔性用能的商业模式[5]。其中,量化建筑需求侧柔性是解决其他两个问题的基础。由于各类柔性负荷在柔性能力、运行特征、能源使用模式和响应特性方面存在较大

的差异,量化建筑需求侧柔性,尤其是住宅建筑,面临巨大的挑战。

一般情况下,住宅建筑的用能需求包括房间制冷、采暖和生活热水等,空调、电热水器等家电可以满足上述需求。此外,洗衣机、烘干机、洗碗机等家电的使用也会导致用电需求。研究表明,通过一定的需求侧管理策略可以调整建筑的用电曲线进而提供柔性[6]。例如,通过调整空调和电热水器等温控负荷的设定温度,可以改变其用电功率[7];洗衣机、烘干机和洗碗机等家电的运行时间也可以转移至非峰值负荷时段[8];对电动汽车的充电时间

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [jqpeng@hnu.edu.cn](mailto:jqpeng@hnu.edu.cn) (J. Peng), [zoubin9005@163.com](mailto:zoubin9005@163.com) (B. Zou).

2095-8099/© 2022 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 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2022, 16(9): 123–140

引用本文: Zhengyi Luo, Jinqing Peng, Jingyu Cao, Rongxin Yin, Bin Zou, Yutong Tan, Jinyue Yan. Demand Flexibility of Residential Buildings: Definitions, Flexible Loads, and Quantification Methods. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.01.010>

也可以在一定程度上进行调整[9]。研究表明住宅建筑需求侧具有巨大的柔性潜力[10-11]。

### 1.2. 研究现状

目前,学者在量化建筑需求侧柔性潜力方面做了大量的研究。Ma等[12]对区域供暖技术的能源柔性进行了综述,包括区域供暖系统的组成部分、市场模式和能源柔性潜力。文献[13-14]综述了量化建筑能源柔性的方法,但这些方法并不具有普适性,只适用于特定系统。Bloess等[15]回顾了电制热技术、集成可再生能源利用技术的建模方法和柔性潜力,并指出热泵和被动式蓄热是柔性利用的有效方式。此外,文献[16]总结并讨论了提高芬兰能源系统柔性的几种方法,如区域供暖和供冷、电动汽车、储能、智能电表和需求响应等。文献[17]也开展了类似的工作。然而,这些综述[12-17]只关注建筑能源系统供给侧柔性,而没有考虑用户需求侧的柔性。

事实上,也有学者对建筑需求侧柔性进行了综述。Chen等[18]对可再生能源发电、空调系统、储能、建筑被动蓄热、可转移负荷和用户行为等建筑需求侧柔性利用技术进行了全面的综述,但是该研究没有涉及柔性负荷的特性和柔性能力,以及建筑需求侧柔性的定义、柔性负荷模型和用于量化其柔性潜力的指标。文献[19]总结了商业和住宅建筑中分布式可再生能源发电技术、静态电池、空调系统和可转移负荷等不同的柔性资源,但该研究对住宅柔性负荷的综述比较有限,没有涉及柔性负荷在运行、能耗和使用时间等方面的特性;此外,该研究也没有涉及建筑需求侧柔性的定义和量化方法。

表1总结了在建筑能源柔性领域的相关综述。从表中能够清晰地看出,区域供暖[12,16]、区域供冷[16]、电制热技术[15,17]、热能储存[13-14,16-18]、电能储存[16-17,19]、电动汽车[16-17]和分布式发电[17-19]等相关技术已

经得到了很好的论述。文献[18-19]也对空调系统、可转移负荷和照明等住宅柔性负荷的柔性进行了研究。但由于这些文献侧重于其他柔性利用技术,对住宅建筑柔性负荷的综述比较有限。此外,上述研究均未对建筑需求侧柔性的定义和量化方法进行综述。因此,为了更好地理解、量化和利用住宅需求侧柔性,有必要对其定义、柔性负荷和量化方法进行全面的综述。

### 1.3. 研究目的

通过上述文献综述可知,现有关于建筑需求侧柔性的综述研究致力于供给侧和能源转换侧的柔性,如分布式发电、区域供暖、区域供冷和储能等,而忽略了建筑需求侧的柔性。尽管少数研究也涉及了住宅建筑需求侧的柔性,但这些研究没有阐明住宅建筑柔性负荷的柔性能力和运行特性。此外,还缺少对柔性的定义、模型和柔性量化指标的综述。

因此,本文的主要目的是从柔性定义、柔性负荷和量化方法等方面对住宅建筑需求侧柔性进行系统的综述。首先,对住宅建筑需求侧柔性的基本现状进行了分析;其次,为了更好地理解建筑柔性,对建筑能源柔性、运行柔性、建筑需求侧柔性和建筑负荷柔性等相关术语进行了系统的比较和区分;再次,对建筑需求侧柔性的定义进行了全面的概述,并提出更全面的建筑需求侧柔性定义。此外,对住宅建筑主要柔性负荷的柔性能力和运行特性进行了总结。对柔性负荷的模型和柔性量化指标进行了全面的综述,指出当前住宅建筑需求侧柔性领域存在的问题和挑战。本文可以帮助读者更好地理解建筑需求侧柔性,区分不同住宅建筑柔性负荷的特点,也为住宅建筑柔性负荷模型的构建和柔性量化指标的相关研究提供建议。

表1 关于建筑需求侧柔性综述文献的总结

Year	Flexible resources											Market
	Supply-side						Demand-side					
	Onsite power generation	District heating	District cooling	Power-to-heat	Thermal energy storage	Electric energy storage	Others	HVACs	Electric vehicles	Deferred electrical appliances	Lighting	
2020 [12]		✓										✓
2016 [13]					✓							
2018 [14]					✓							
2018 [15]				✓								
2018 [16]		✓	✓		✓	✓			✓			✓
2015 [17]	✓			✓	✓	✓	✓		✓			
2018 [18]	✓				✓			✓		✓		✓
2021 [19]	✓					✓		✓		✓		✓

## 2. 研究方法

本文技术路线如图1所示。文献检索的关键词包括三类，如表2所示。将这三类关键词与逻辑运算符结合，用于检索文献。而后将搜索的文献导入文献管理器进行筛选。首先，根据标题、关键词、摘要和期刊的影响因子对检索到的文献进行粗略筛选；其次，通过深入阅读选出与建筑需求侧柔性定义、住宅柔性负荷特性、住宅柔性负荷

建模、柔性量化指标等相关文章。除了搜索的文章，也从一些专业的网站下载了一些有价值的报告。最后确定综述、期刊论文、会议文章和报告的数量，如图2所示。最后，对所选文献按照图1列出的四个方面进行综述。

## 3. 住宅建筑需求侧柔性的研究综述

对所选定的文献按作者所属的单位和研究对象进行分

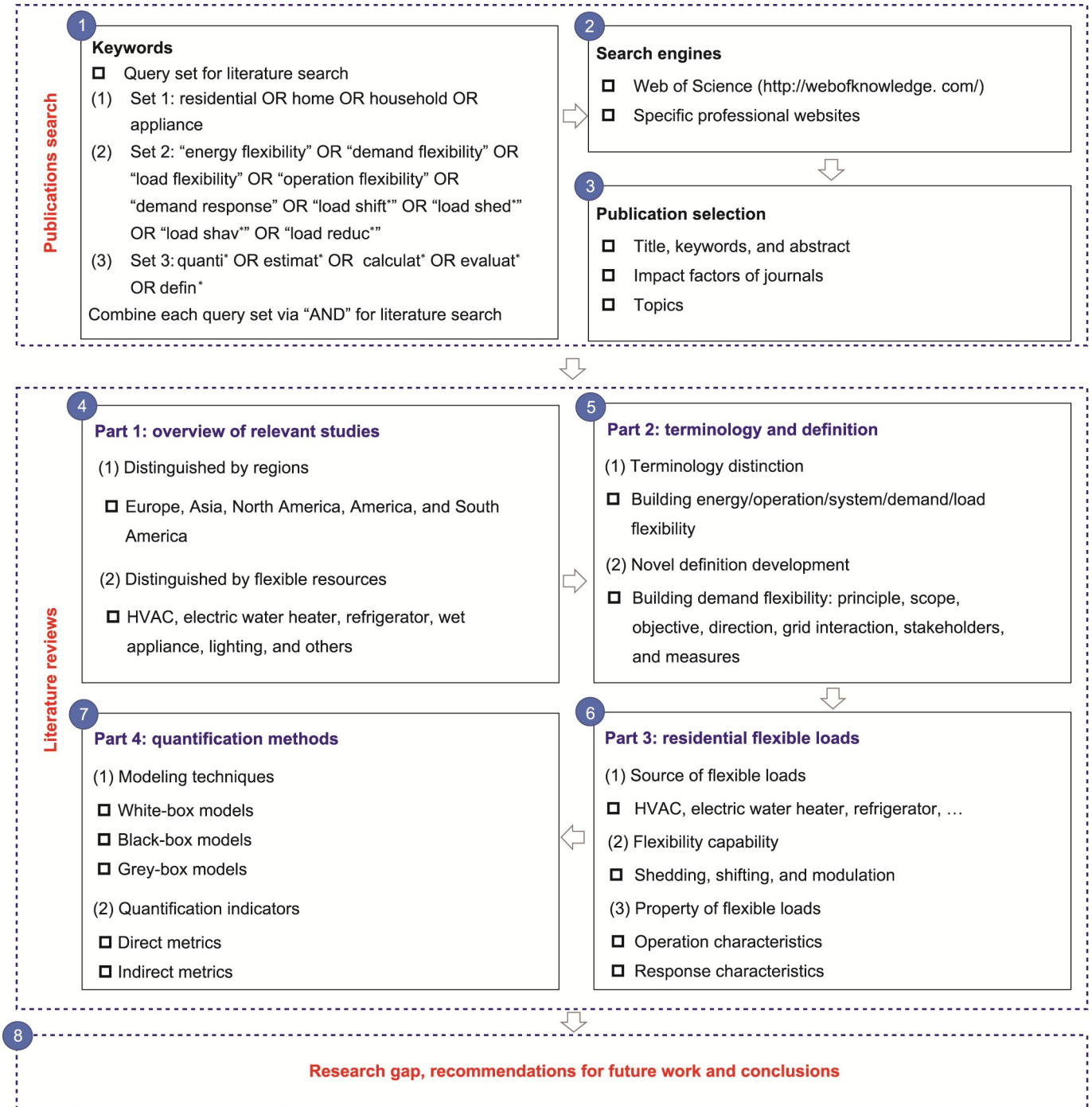


图1. 本文技术路线。

表2 文献搜索关键词分类

Set	Keywords	Meaning
1	Residential OR home OR household OR appliance	Set the search scope to be residential buildings
2	“Energy flexibility” OR “demand flexibility” OR “load flexibility” OR “operation flexibility” OR “demand response” OR “load shift*” OR “load shed*” OR “load shav*” OR “load reduc*”	Set the keywords related to energy flexibility
3	Quanti* OR estimat* OR calculat* OR evaluat* OR defin*	Set the keywords related to quantification

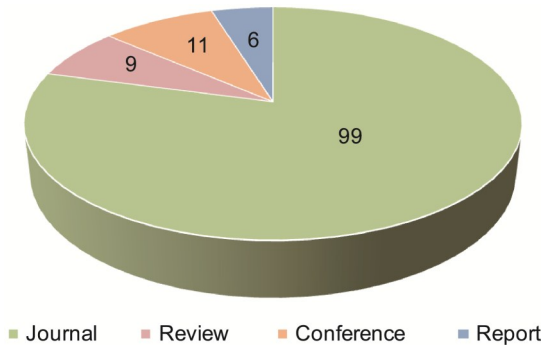


图2. 确定的各种文献的数量。

类, 结果如表3和图3所示。如表3所示, 目前住宅建筑需求侧柔性领域的研究主要由欧洲主导, 占有所有文献的54.4%; 其次是亚洲和北美洲, 占比分别达到22.8%和21.5%; 其余各大洲只占1.3%, 且主要来自于非洲。从国家层面分析, 美国和中国对住宅建筑需求侧柔性的研究最多, 分别占现有研究的17.7%和15.2%, 然后是丹麦、意大利、比利时和荷兰。除了国家之间的差异之外, 研究对象之间也存在一定的差异。如图3所示, 现有研究主要关注空调、电热水器和湿电器的柔性, 其比例分别为36.7%、25.7%和14.7%; 与冰箱和照明负荷柔性相关的研究只占9.2%和8.3%; 而关于电视等其他住宅柔性负荷的研究很少[20]。对于空调负荷的柔性, 现有的研究主要集中在中央空调, 而对分体空调的研究较少。然而, 分体空调在中国住宅建筑中应用十分广泛, 因此需要进一步开展分体空调柔性相关方面的研究工作。

## 4. 建筑需求侧柔性的定义和特点

### 4.1. 关于建筑柔性的不同术语

“柔性”在《牛津英语词典》(Oxford English Dictionary)中的定义是“改变以适应新条件或新情况的能力”。20世纪90年代, 电力系统工程中首次引入了柔性这一概念[21]。此后, 这一概念被逐渐应用到能源和建筑领域, 尤其是高效电网交互式建筑[22–23]。然而, 无论是在电力系统领域[24–25], 还是在建筑节能领域[26–28], 都没有统一的柔性定义。因此, 涌现了能源柔性、需求侧柔

表3 文献作者所属单位的分布情况

Continents	Countries	Ratio	Total
Europe	Denmark	10.1%	54.4%
	Italy	7.6%	
	Belgium	6.3%	
	Ireland	3.8%	
	Sweden	3.8%	
	Portugal	2.5%	
	France	3.8%	
	Greece	2.5%	
	Spain	1.3%	
	Germany	3.8%	
	UK	2.5%	
	Luxembourg	1.3%	
	The Netherlands	5.1%	
	Asia	China	
Singapore		2.5%	
Japan		1.3%	
India		1.3%	
The Republic of Korea		1.3%	
Iran		1.3%	
North America		USA	17.7%
	Canada	3.8%	
Africa	South Africa	1.3%	1.3%

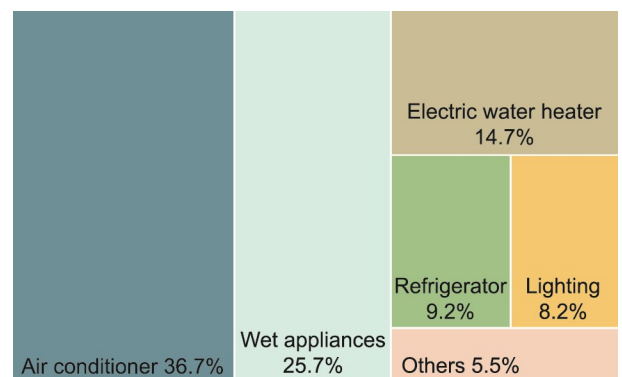


图3. 现有研究中研究对象的分布。

性、负荷柔性和运行柔性等多个与建筑柔性相关的术语, 研究者在使用这些术语时也未予以明确区分。在报告[23, 29]中, 作者认为能源柔性、需求侧柔性、负荷柔性具有相同的含义。报告[29]将建筑需求侧柔性定义为“分布式



能源在时间尺度上调整建筑负荷曲线的能力”，并指出能源柔性和负荷柔性可以与需求侧柔性互换使用。在许多研究[8,30–32]中，建筑需求侧柔性、运行柔性和能源柔性具有同样的含义。然而，在我们看来，需求侧柔性和负荷柔性这两个术语具有相同含义是合理的。从建筑角度来看，建筑的能源柔性、需求侧柔性和运行柔性有不同的含义。这些术语的系统区分如图4所示，详细描述如下。

在这四个术语中，“建筑能源柔性”涵盖的范围最广。它包含了建筑所有的柔性资源，包括建筑能源系统、建筑本身（如围护结构、空调系统、电器、电动汽车等），以及居住者的行为[33]。在建筑能源系统的供给侧，分布式能源发电技术（如太阳能光伏、风力涡轮机、冷热电三联供）被广泛应用，以减少建筑物从公共电网输入的净负荷。因此，许多研究人员认为，分布式能源发电技术的应用有助于提高建筑的能源柔性[18–19,34–35]。

此外，多种能源转换技术的联合使用可以提高建筑能源系统运行的柔性，这种柔性被称为“运行柔性”[36]或“系统柔性”[37]。文献[31]表明电网和区域热网的联合使用可以提高区域供热系统的柔性。此外，将建筑能源系统

和储能系统结合，可以通过优化蓄电池充放电提高运行柔性[38–40]。也可以通过使用电制气、电解产氢等能源转换技术提高运行柔性[17,41]。

而对于需求侧，通过一定的需求侧管理策略，在一定程度上可以转移、削减或调节建筑的空调、家用电器和电动汽车等负荷。这一柔性被称为“建筑需求侧柔性”或“建筑负荷柔性”[42–44]。因此，建筑的能源柔性、需求侧柔性和运行柔性有不同的含义和应用范围。

建筑能源柔性包括供给侧柔性和需求侧柔性。前者又分为发电柔性和运行或者系统柔性。发电柔性源于用户侧的分布式发电技术，由于该技术的使用降低了建筑的净负荷；而运行柔性侧重建筑能源系统的柔性。需求侧柔性（或负荷柔性）指的是来源于用户末端负荷的柔性。系统地定义和区分上述术语，可以使这些术语的含义更加清晰，避免在使用上产生混淆，可以帮助读者更好地理解 and 区分不同类型的建筑柔性。

#### 4.2. 建筑需求侧柔性的定义

上述内容从柔性资源的角度对能源/需求侧/运行柔性等建筑柔性相关的术语进行了区分。然而，没有回答“什

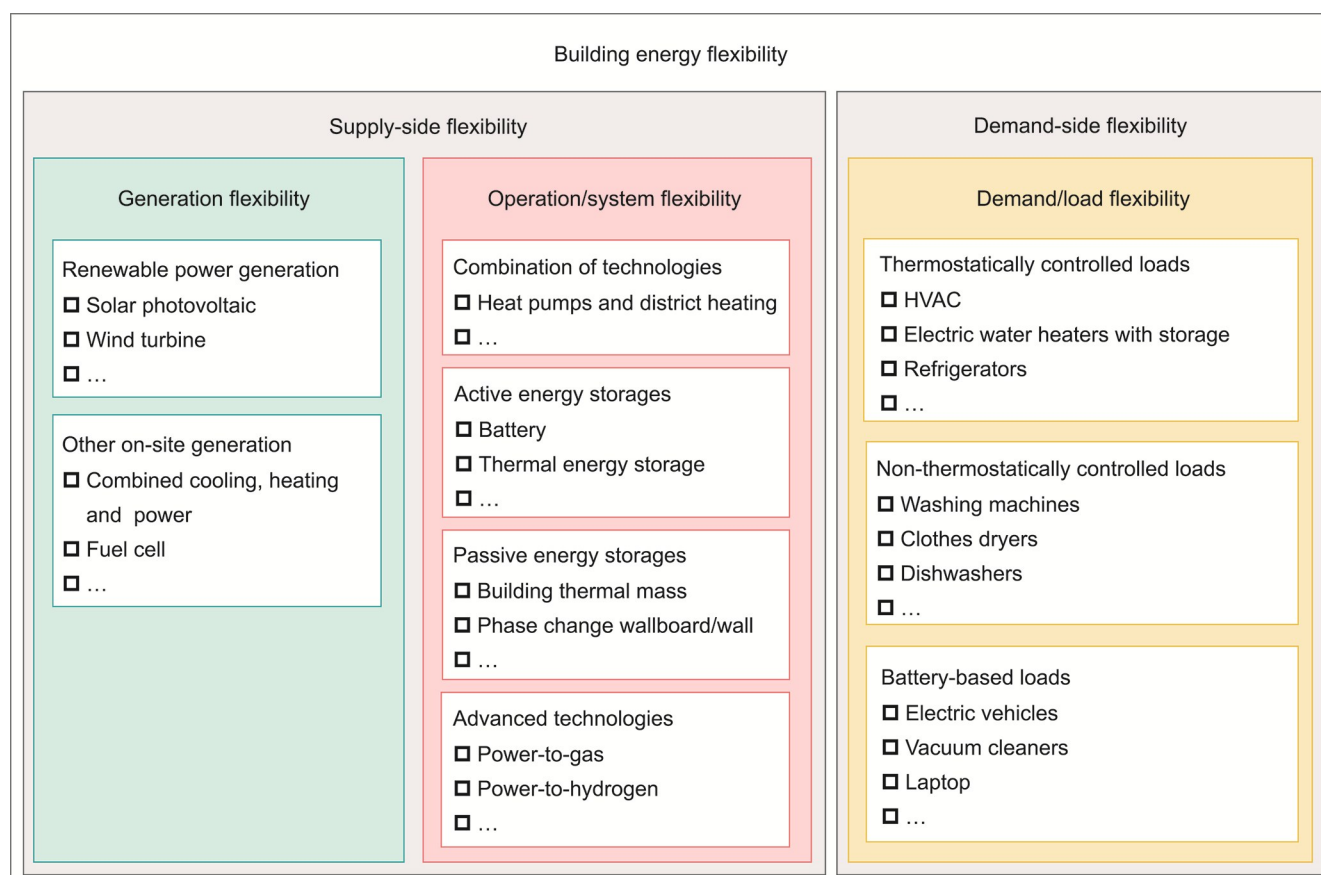


图4. 建筑柔性相关术语的分类。

么是建筑的能源/需求侧/运行柔性”这一问题。虽然，目前存在很多关于这些术语的定义，但缺乏一个统一的定义。本文主要关注建筑需求侧柔性，因此对现有关于建筑需求侧柔性的定义进行了对比和分析，在此基础上提出了一个关于建筑需求侧柔性的全面的定义。

表4总结了现有研究中对建筑需求侧柔性的定义[1, 18–19, 23, 45–47]。由于多数研究没有区分建筑能源柔性和建筑需求侧柔性的含义，故而表4也列出了建筑能源柔性的定义。可以看到，这些关于柔性定义背后的共同点是：调整建筑的负荷以满足不同的需求，包括用户需求、能源网络需求和电网需求。然而，大部分定义在其边界范围上过于狭窄甚至含糊不清。此外，大部分定义都没有清楚地阐明利用建筑柔性不应牺牲用户的舒适性、工作效率和健康这一原则，主要是因为这些定义只是从电网运行商或者用户等单个利益相关者的角度提出的。鉴于上述问题，本文对建筑需求侧柔性提出了一个关于建筑需求侧柔性的全面的定义，即：一种在不牺牲用户利益的前提下通过管理建筑柔性资源从而调整建筑负荷曲线以满足不同需求的能力。定义中“用户的需求”包括但不限于减少用户峰值负

荷、拉平建筑用电曲线、提高对可再生能源的消纳、保持能源系统的稳定性、提供电网服务、降低末端用户用能成本等；定义中“用户的利益”包括但不限于用户的舒适性、工作效率、健康和便利性等。显然，本文提出的建筑需求侧柔性的定义应用范围更广，不仅适用于热网和公共电网、微电网等，也适用于商业建筑和住宅建筑等不同类型的建筑。

本文主要关注住宅建筑需求侧柔性在电网中的应用。尽管该定义是针对建筑需求侧柔性提出的，但当定义中的边界范围拓展到建筑中的全部柔性资源时，该定义可以扩展到建筑能源柔性。表5对本文提出的定义与现有研究提出的定义进行了比较。显然，本文提出的定义更明确、更全面、应用范围更广。

## 5. 住宅建筑柔性负荷

住宅建筑通常具有不同类型的家用电器。如图5所示，一个典型的住宅建筑通常包括7类电器：制冷电器、制热电器、湿电器（白色电器）、烹饪电器、照明、灰色

表4 建筑能源柔性和建筑需求侧柔性的定义

Source	Terminology	Definition
Tang et al. [19]	Building energy flexibility	The ability to reshape the normal building consumption pattern under various requests from a power grid
Jensen et al. [1]	Building energy flexibility	① The energy flexibility of a building is the ability to manage its demand and generation according to local climate conditions, user needs, and energy-network requirements; ② energy flexibility of buildings will thus allow for demand-side management/load control and thereby demand response based on the requirements of the surrounding energy networks
Johra et al. [45]	Building energy flexibility	The capacity to shift in time heating use from high price to low price periods while insuring good indoor thermal comfort
Neukomm et al. [23]	Building demand flexibility	Capability of distributed energy resources to adjust a building's load profile across different timescales
De Coninck et al. [46]	Building energy flexibility	The ability to deviate from its reference electric load profile
Nuytten et al. [47]	Building energy flexibility	The maximum time a certain power draw can be delayed or additionally called upon at a certain moment during the day
D'hulst et al. [8]	Flexibility of appliances	The power increases and decreases that are possible within these functional and comfort limits, combined with how long the changes can be sustained

表5 柔性定义的比较

Implications	Previous definitions	Proposed definition
Objective	To decrease energy consumption at peak time	To curtail a building's peak loads, ensure utility grid stability, etc.
Principle	Mostly not considered	Not compromising end-user interests
Application scope	Limited application scenarios	Various energy networks such as heating networks, utility grids, microgrids, etc.
Direction	Decrease energy consumption	Decrease or increase energy consumption
Grid-interaction	Energy tariffs	Energy tariffs, local renewable generations, and CO <sub>2</sub> tax
Stakeholders	Individual stakeholders	End users, aggregators, and utility grids
Flexibility measures	Load shifting and load shedding	Load shifting, load shedding, and load modulation (e.g., frequency regulation and voltage support)

电器（主要指电视机等娱乐类家电）和电动汽车[48–49]，不同国家的分类是不同的[50]。对于住宅建筑，通过负荷转移、负荷削减、频率调节和电压调节等方式可以为电网提供需求侧柔性[29]。如图3所示，现有研究集中在中央空调、电热水器、湿电器、冰箱和照明电器的柔性。因此，本节主要针对上述柔性负荷的柔性能力和运行特性进行综述。

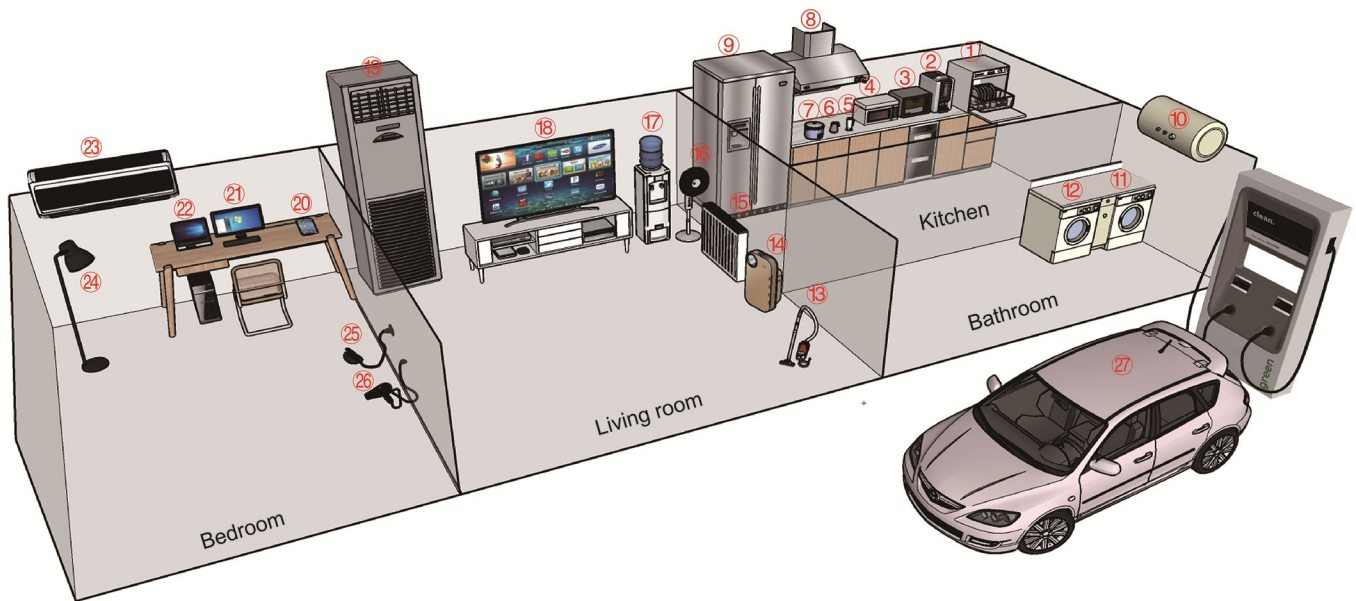
### 5.1. 空调

空调负荷占建筑能耗的40%，是导致夏季和冬季建筑用电高峰的主要原因[51]。空调通常在夏季和冬季使用，以维持室内温度、湿度和二氧化碳浓度在所需范围内，从而保证用户的舒适性、工作效率和健康[52]。

空调为电网提供需求侧柔性的方式包括调整设定温度和预冷/预热。通过提高设定温度，可以削减峰值时段的用电负荷；但是，由于需求响应结束后，室温需要恢复到初始值，将导致图6（a）所示的反弹效应。此外，预冷/预热也是一种十分重要的需求侧管理策略。该策略利用建筑围护结构（如外墙和屋顶）、室内空气和室内其他物体（如家具和内墙）的热惯性[53–54]，在提供柔性的同时，而不牺牲用户的舒适性。如图6（b）所示，空调可以利用建筑的热惯性将冷/热量储存在建筑中，在用电高峰期释放，帮助电网转移和削减负荷。此外，空调还可以通过静压调节、供水温度重置和频率调节等需求侧管理策略提

供负荷调节服务[51]。上述分析表明，空调提供需求侧柔性的方式包括削减负荷、转移负荷和调节负荷[51, 55–56]。

一般来说，空调在不同需求侧管理策略下的响应时间、爬坡时间、响应持续时间以及负荷转移和削减潜力等响应特性均不同。如表6所示，在调整设定温度的需求侧管理策略下，空调响应时间通常小于2 min，爬坡时间为5~30 min，相应的持续时间为0.5~4 h。预冷/预热策略的响应持续时间为0.5~3 h，但响应时间和爬坡时间尚不明确。当采用频率调节的方式时，空调的响应时间通常小于1 min，响应持续时间从几秒钟到几分钟不等。空调的响应特性受通信延迟、机械响应延迟或系统惯性延迟等多个因素的影响，而不同的空调往往具有不同的通信延迟、机械响应延迟或系统惯性延迟[57]。目前，对空调柔性的研究大都是利用仿真软件如TRNSYS [26,58]、EnergyPlus [55,59–61]、Dymola [35]、GAMS [62]，一些软件的联合使用[63–64]等，以及一些数据驱动的方法[42,56,65]开展的。然而，仅通过这些仿真方法很难确定空调的响应特性，需要通过大量的实验研究总结归纳空调的响应特性。此外，现有研究已经量化了不同策略下的空调负荷柔性的潜力。但是，由于各研究之间存在空调类型、边界条件和柔性量化指标等不一致的现象，因此难以对各研究的柔性量化结果进行比较。



- ① Dishwasher; ② coffee machine; ③ microwave oven; ④ electric oven; ⑤ soymilk machine; ⑥ kettle; ⑦ electric cooker; ⑧ range hood; ⑨ refrigerator; ⑩ electric water heater; ⑪ washing machine; ⑫ clothes dryer; ⑬ vacuum cleaner; ⑭ air purifier; ⑮ electric hob; ⑯ fan; ⑰ drinking fountain; ⑱ television; ⑲ packaged air conditioning unit; ⑳ electronic devices; ㉑ computer; ㉒ laptop; ㉓ packaged air conditioning unit; ㉔ lighting; ㉕ electric iron; ㉖ hair dryer; ㉗ electric vehicle.

图5. 典型住宅建筑中的家用电器。

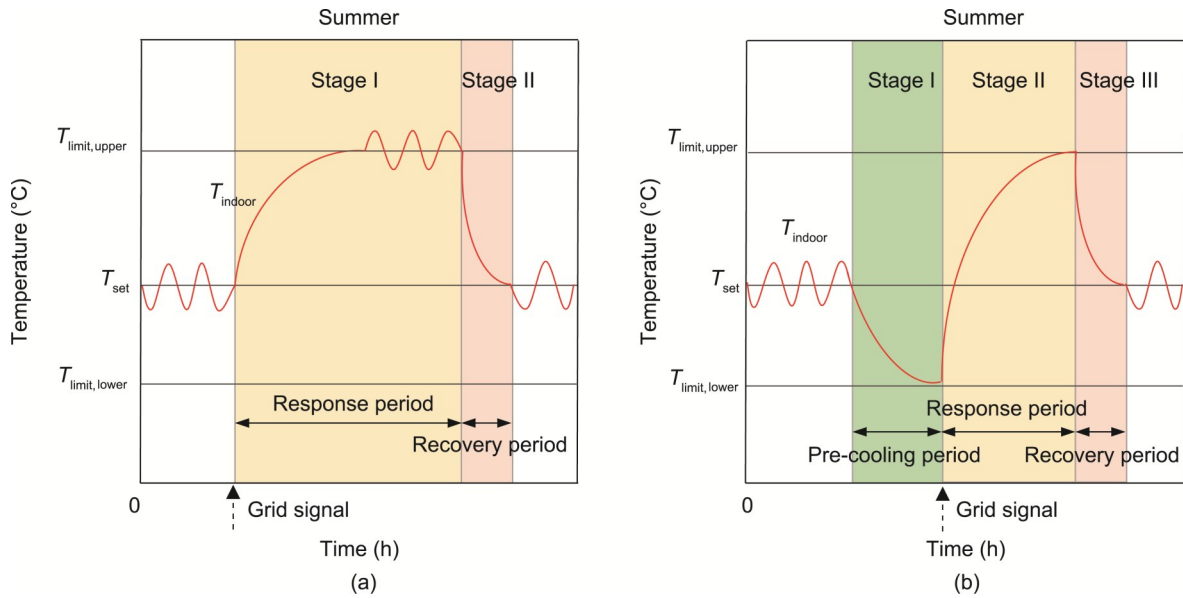


图6. 空调需求响应。(a) 调整设定温度；(b) 预冷。

表6 空调负荷的需求响应特性

Demand strategies	Response time	Ramping time	Response duration	Grid services	Potential
Set-point adjustment	< 2 min	5–30 min	0.5–4.0 h	Peak load reduction [26,35,42, 55–56,58,61, 63–66]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A maximum decrease of <math>0.005 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}</math> in peak power [55]</li> <li>• A maximum load decrease of 1.2 kW per household [42]</li> <li>• A maximum load reduction decrease of 1.9 kW per household [35]</li> <li>• 15%–20% load reduction [65]</li> <li>• 22%–37% load reduction [66]</li> <li>• 200–800 W load reduction [26]</li> </ul>
Pre-cooling/pre-heating	/	/	0.5–3.0 h	Peak load shifting [43,57,59–60,62,67–68]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Average 800 W load reduction [67]</li> <li>• 15%–30% load shifting [59]</li> <li>• 12–66 kWh load shifting [57]</li> <li>• <math>36 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}</math> load shifting [43]</li> <li>• <math>25 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}</math> year load shifting [60]</li> </ul>
Static pressure adjustment, supply water temperature re-setting, frequency control	< 1 min	/	Seconds to minutes	Frequency regulation [69–72]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15% of the fan power can be used for frequency regulation [69]</li> <li>• 4 GW power can be provided by variable speed fans for frequency regulation in the United States [70]</li> </ul>

## 5.2. 电热水器

电热水器通常有两种主要形式：储水式和无储水式[51,73]。其中，储水式电热水器在住宅建筑中应用广泛。储水式电热水器通过间歇运行，加热储水罐内的水，将水温维持在所需温度范围内，然后将其储存供用户使用。通常在不同季节，用户会设置不同的设定温度。

当电热水器内的加热器工作时，储水罐内的水温升高；停止工作时，由于热水消耗或待机热损失，储水罐内水温下降[74–75]。此外，电热水器的设定温度及热舒适温度上/下限由用户确定。电热水器可以削减和转移负荷[51]，但是受用户热舒适温度区间的影响[76]。与空调类

似，用户可以通过调低电热水器的设定温度，从而降低峰值时段的负荷。这种方式既可以减少对用户的影响，又能降低电热水器的热损失[68]。一旦需求响应结束，电热水器将以高功率状态运行，将热水加热到初始设定温度[8]。与空调类似，对电热水器而言，预热也是一种比较受欢迎的转移峰值负荷的需求侧管理策略。然而，预热会增加电热水器的热损失[77]。此外，电热水器也能提供频率调节等负荷调制服务[78]。

当前，学者针对电热水器的柔性已经开展了一定的研究工作。D’hulst等[8]基于现场实测数据，评估了额定功率为2.4 kW的电热水器的柔性潜力。结果表明，电热水



器的最大功率削减量为0.3 kW，在白天可以持续10 h以上。为了给电网提供峰值调节、频率调节、调峰容量储备等服务，文献[78]针对储水式电热水器提出了一种新的模型，该模型通过综合热损失和用水量确定水箱内的水温。为了降低峰值负荷，文献[79]提出了一种电压控制策略，用于集中管理住宅建筑的电热水器负荷。文献[80]以电力成本最小化为优化目标，优化了电热水器的运行方案，文献[81–84]也开展了类似的研究。此外，也有将电热水器与分布式光伏发电相结合的研究[73]。电热水器是住宅建筑需求侧的一种至关重要的柔性资源，可以用于削减、转移和调节负荷，以维持电网的稳定运行。然而，由于在这方面的研究较少，对储水式电热水器在不同需求侧管理策略下的响应特性仍不清楚[85]。

### 5.3. 冰箱

广泛应用于住宅建筑中的冰箱也可以为电网提供需求侧柔性[32,51]。与空调类似，冰箱通过蒸汽压缩循环将热量从内部空间转移到外部环境[86]。通过其间歇运行，使冷藏室保持在所需的温度范围，以防止食物腐败[87]。冰箱可以通过在低功率状态下运行的方式转移负荷[51]，也可以通过调整设定温度的方式削减负荷[88]，从而为电网提供辅助服务。此外，冰箱也可以提供负荷调制服务[89]。文献[90]研究结果表明，冰箱可以快速响应电网低于30 s的辅助服务需求，可以提供持续时长为15 min的频率调节服务，也可以通过调整温度设定点提供持续时间为1 h的负荷削减服务。除了上述研究，冰箱的响应特性在其他研究中很少被关注。此外，文献[91]在分时电价的电价机制下，以最小化峰值负荷和运行费用为目标，优化了一种结合相变材料的冰箱的运行。

### 5.4. 湿电器

湿电器，也被称为白色家电[92]，包括洗碗机、洗衣机和烘干机，占家庭总能耗的15%。一般来说，这些设备的运行周期是固定的，具有固定的运行时长。用户根据需要手动启动，一经启动，通常情况下直到运行周期结束才会关闭。然而，也有学者持有不同观点。例如，文献[82,93]认为湿电器的运行可以分为一系列连续的阶段，在相邻的阶段之间可以短暂的停止。

湿电器通过提前或者延迟运行，将整个运行周期的用电负荷转移，从而对用户几乎不产生影响。由于只能转移湿电器的运行时间，因此不能改变湿电器在运行期间的能耗，故而湿电器没有削减负荷的能力。湿电器的需求侧柔性取决于湿电器的使用频率——使用频率越高，其柔性越

大。在日常生活中，洗碗机的使用频率一般是一天一次或两次；洗衣机和烘干机在夏天使用频率较高，而冬天使用较少。使用频率因人而异，受年龄、性别、生活习惯、人口和收入等因素的影响[94–95]。此外，工作日和周末以及不同季节的使用频率也有所不同[8,50]。为了量化和转移湿电器的柔性能力，D'hulst等[8]提出了“柔性窗口”（flexibility window）的概念，其定义为湿电器允许最早开始运行和最晚结束运行时间之间的时长。湿电器在柔性窗口期间的柔性如图7所示。根据柔性窗口时长 $t_{\text{window}}$ 和峰值负荷持续时长 $t_{\text{peak}}$ 之间的关系，湿电器具备不同的柔性潜力。从图7(c)~(f)可以看出，湿电器只有部分用电负荷会从峰值时段转移；在图7(a)、(b)、(g)和(h)所示的条件下，湿电器的全部用电负荷可以从峰值时段转移出去。因此，湿电器的柔性潜力取决于柔性窗口的设置。

针对湿电器的柔性，学者开展了大量的研究，重点关注湿电器负荷柔性的量化[8,30,50,93,96–102]以及因湿电器负荷的转移给不同的利益相关者带来的利益[46,81–82,97,103–107]。开展上述研究的手段主要包括实验[8,50,92,97–102,104,107]、仿真[81–82,93,103,106,108–111]、调查[30]以及实验与仿真相结合的方式等[96,105]。基于实测数据分析柔性潜力是评估湿电器柔性的常用方法[98–101]。首先需要建立消费者行为的概率模型；其次将参与实验的家庭分为不同的类别；最后，基于统计的方法计算每类家庭的柔性用电曲线。上述过程对于评估湿电器在国家层面的柔性潜力必不可少[8,30,50,93,96,102]。通过总结上述类似的研究可以得到一些共性的结论——湿电器有明显的转移负荷的能力，非工作日的柔性潜力比工作日高，冬季的柔性潜力比夏季高[8,50,101–102]，而且可以长期稳定地提供柔性[99–100]；此外，洗碗机的负荷柔性远高于洗衣机[30,98,101]。为了发挥湿电器柔性调节的优势，通常采用单目标优化模型优化湿电器开始运行时间，在特定的电价机制下将用电成本降至最低。利用该模型，可以通过实验[104,107]、仿真[81–82,106,108–111]以及实验与仿真结合的方式[96,105]得到湿电器的调度计划。上述研究表明，在将湿电器的负荷转移到低电价时段的同时，可以提高对分布式可再生能源发电的消纳，降低用电成本。

### 5.5. 照明

照明也是一种重要的柔性负荷，其能耗在住宅建筑中占总能耗的10% [112]，在商业建筑中达到15% [113]。照明系统通过与自然光源联合给用户足够的视觉舒适性。一般照明主要在夜晚使用且持续运行，只有当用户睡

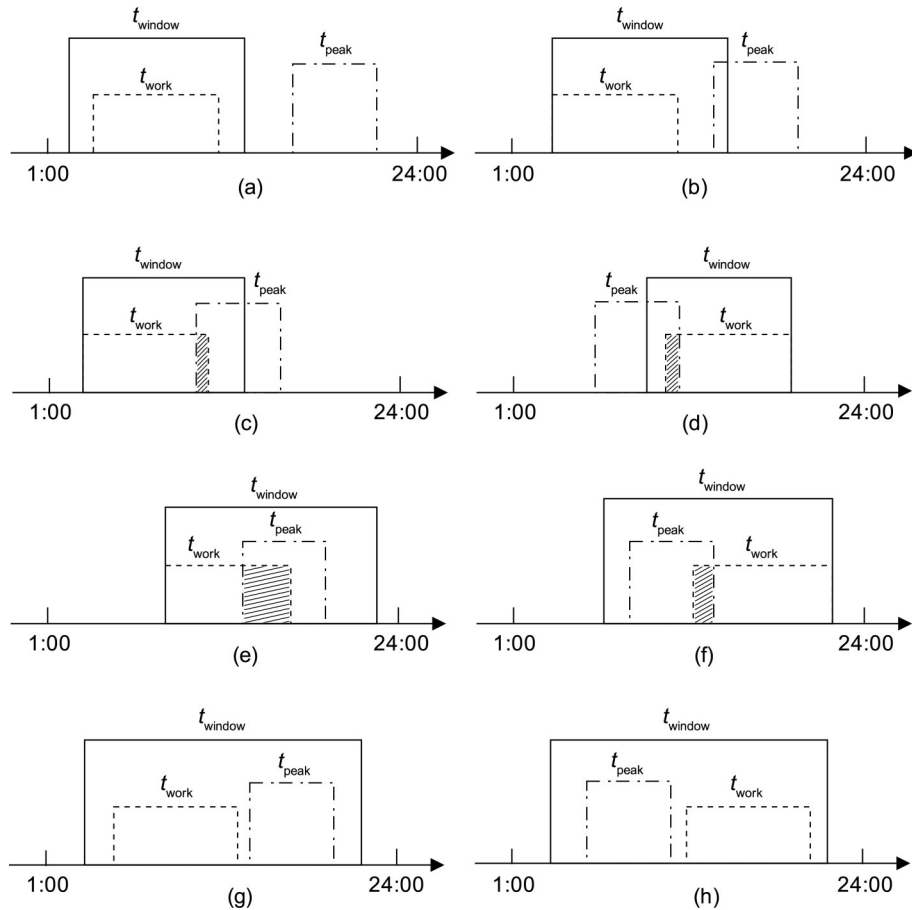


图7. 湿电器的柔性 $t_{\text{work}}$ ——湿电器工作持续时间。

觉或离开时才会关闭。照明负荷取决于天气条件、建筑的体型和居住情况[114–115]。当日光足够满足室内照明需求时，可以在不损害用户视觉舒适性的前提下调低人工照明[114,116]。例如，当住宅房间的室内照度超过 500 lx 时，可以通过能源管理系统关闭照明[117]。因此，照明系统可以通过削减负荷提供柔性。与空调和湿电器等其他柔性负荷相比，照明负荷不能转移。此外，照明系统能够快速响应电网的需求，为电网提供辅助服务，且不存在延迟[19]。照明负荷与时序无关，因为室内某时刻的照明只与当前照明功率有关，不受前一时刻照明情况的影响。

近年来，可调节的照明系统已广泛地应用于现代建筑中。可以通过调整该照明系统从而保持良好的视觉舒适性[118]。文献[35]采用三种不同的调节水平量化峰值时段照明的柔性潜力。文献[119]研究了两种不同的照明负荷的需求侧管理策略——改变光源的相关色温和调低其光通量。Yu 等[115]在考虑日照动态变化和居住房间随机性的基础上，开发了一种量化照明需求侧柔性潜力的方法，采用的柔性量化指标包括用于识别多维度光线需求调整参数的特征指标和用于评估根据电网需求调整建筑物负荷曲线

能力的性能指标。

## 5.6. 总结及比较

本节在文献综述的基础上，总结了空调、电热水器、冰箱、湿电器和照明系统在柔性能力和运行特性方面的差异。如表 7 所示，上述柔性负荷具有不同的柔性能力。温控负荷可以被削减、转移和调节；照明系统的负荷既可以削减又可以调节，而湿电器的负荷只能被转移。此外，上述柔性负荷具有不同的运行特性：空调、电热水器和冰箱间歇性运行，照明系统连续运行，而湿电器的运行有特定的周期和顺序。此外，这些设备的使用频率也有区别：空调在夏季和冬季几乎每天使用，电热水器和冰箱全天运行，照明系统全天使用；湿电器的使用频率取决于用户，在工作日和周末也有不同。在季节运行特性方面，空调分别在夏季和冬季使用制冷和制热模式；电热水器在不同季节的温度设定和静态热损失不同；洗衣机的使用频率也会受季节的影响。冰箱、洗碗机和照明设备的使用受季节的影响较小。

除此之外，需求响应事件发生对不同的柔性负荷有不同的影响。与无需求响应事件发生的情况相比，需求响应

事件的发生可能使得温控负荷的能耗增加、减少或保持不变。主要取决于以下几个因素：环境温度、建筑物或围护结构的特征、响应持续时间和设备的效率[51,59,67,120]。当峰值负荷转移到非峰值时段时，湿电器的能耗保持不变，因为只是在不同的时间运行。然而，削减照明负荷能够降低能耗。此外，表7所示的可调节负荷和转移负荷的柔性随时间变化，即前一个时段的柔性会影响后一个时段的柔性。因此，这些负荷的柔性与时间有关。而照明负荷的柔性与时间无关，因为后一个时段的柔性不受过去一个时段柔性的影响。在天气与负荷柔性特征的关系中，空调、电热水器、冰箱和照明系统在某一时刻的柔性受天气状况影响，湿电器的柔性几乎不受室外环境影响。除了上述特征，关于这些柔性负荷更具体的运行特性，如不同运行阶段的功率特点尚不清楚，需要根据电器的实际运行数据开展相关的研究。此外，对于这些柔性负荷的响应速度、爬坡时间、响应持续时间、能量转移或削减潜力等响应特性也需进一步研究。

## 6. 量化建筑需求侧柔性的方法

在明确了住宅建筑需求侧柔性负荷的特性后，如何量化其柔性潜力是当前亟待解决的关键问题之一。需求侧柔

性的量化是一个复杂的过程，需要考虑多种因素。柔性负荷模型和评估指标作为需求侧柔性量化最关键的两个部分受到了广泛的关注。在本节，将对现有研究中采用的柔性负荷模型和评估指标进行全面的总结。

### 6.1. 住宅建筑柔性负荷模型

#### 6.1.1. 建模方法

现有研究采用多种方法建立住宅建筑柔性负荷的模型。从模型复杂程度的角度可将现有模型分为三类：白箱、灰箱和黑箱模型。具体介绍如下：

- **白箱模型**。白箱模型主要基于牛顿定律、Navier-Stokes 方程、能量守恒定律等构建[2,63]。白箱模型能够详细地描述柔性负荷内部的物理过程，借助白箱模型可以实现不同边界条件、不同场景下的对比分析[43,54]。然而，白箱模型的构建比较复杂且验证比较困难 [26,58]。通常情况下，学者主要采用 TRNSYS、EnergyPlus 和 Mod-elica 等商业软件建立柔性负荷的白箱模型。

- **黑箱模型**。对于一些复杂的问题，由于物理过程太复杂，无法构建其白箱模型，因此采用黑箱模型建模。黑箱建模方法关注研究对象的输入与输出，在不了解研究对象复杂的物理过程的情况下，借助一定的手段确定研究对象输入与输出的关系[2,42]。然而，黑箱模型的训练需要

表7 住宅建筑不同柔性负荷的特性

Category	Appliance	Capability	Operation characteristics			Energy consumption changes	Time property	Weather property
			Running mode	Usage frequency	Seasonal features			
Adjustable loads	HVAC	Shed Shift, and modulate	Intermittently	Almost every day in winter and summer	Various operation modes in winter and summer	Increasing, decreasing, or remaining constant	Dependent	Dependent
	Electric water heaters	Shed Shift, and modulate	Intermittently	Running all day	Various temperature settings and standby heat losses	Increasing, decreasing, or remaining constant	Dependent	Dependent
	Refrigerators	Shed Shift, and modulate	Intermittently	Running all day	No obvious seasonal differences	Increasing, decreasing, or remaining constant	Dependent	Dependent
Shifting loads	Dishwashers	Shift	Finite cycle with sequential processing	Depending on occupants; twice a day or once a day	No obvious seasonal differences	Remaining constant	Dependent	Independent
	Washing machines	Shift	Finite cycle with sequential processing	Depending on occupants; different on weekdays, weekends, and in different seasons	Various usage frequencies in different seasons	Remaining constant	Dependent	Independent
	Clothes dryers	Shift	Finite cycle with sequential processing	Depending on occupants; different on weekdays, weekends, and in different seasons	Various usage frequencies in different seasons	Remaining constant	Dependent	Independent
Shedding loads	Lighting	Shed Modulate	Continuously	Used every day	No obvious seasonal differences	Decreasing	Independent	Dependent



大量高质量数据，且缺乏可解释性[53,62]。此外，开发一个通用模型也比较困难[89–90]。通常，可以采用人工神经网络和支持向量机等机器学习方法建立黑箱模型。

• **灰箱模型**。介于白箱模型和黑箱模型之间的灰箱模型也被用于柔性负荷的建模。灰箱模型融合了白箱模型和黑箱模型的优势[78–79]，简化了物理过程，也更容易拓展。此外，还提高了计算效率，虽然在一定程度上降低了模型的精度[102,109]。当前主要采用电阻-电容（RC）模型构建柔性负荷的灰箱模型[121]，该模型也被称为等效热参数（ETP）模型[7,64,122]。

### 6.1.2. 模型在现有研究中的应用情况

表8总结了白箱模型、灰箱模型和黑箱模型在现有研究中的应用情况。可以看到，白箱模型被广泛用于空调、电热水器和冰箱等温控负荷的建模。TRNSYS、Energy-Plus 和 Modelica 等商业软件在量化单个空调系统柔性和参数分析等方面应用广泛。借助商业软件可以很容易地实现不同建筑围护结构、空调末端、气候区和需求侧管理策略等条件下的仿真。因此，仿真软件很适合量化单个空调系统的柔性。此外，许多研究[73–76,78–80,83–85]采用白箱模型优化电热水器的调度，以达到提供柔性并减少运行费用的目的。灰箱模型主要用于空调系统和湿电器的建模，

很少用于冰箱。具体来说，RC模型通常用于优化控制单个空调系统[123–124]或与其他柔性负荷一起优化[38,121–122,125–126]。这些模型也可以用于量化多个空调系统的柔性。对于湿电器，通常将湿电器的运行过程简化为一组连续不间断的运行阶段，假设每个阶段的功率恒定，从而进行优化调度。黑箱模型已广泛用于湿电器的建模，文献[127–128]基于实测数据，采用统计学方法量化了湿电器在聚合层面的柔性。此外，也可以基于机器学习的方法构建黑箱模型，量化空调系统在聚合层面的柔性潜力。

上述分析表明，在研究单个柔性负荷时，使用白箱模型较好；灰箱模型适用于量化聚合层面的柔性，也可用于多个柔性负荷的优化调度；此外，黑箱模型也适用于量化聚合层面的柔性。基于此分析，表9给出了白箱模型、黑箱模型和灰箱模型在不同应用情况下的建议。

虽然现有研究已经在住宅建筑柔性负荷建模方面开展了大量的工作，但仍存在一些挑战。白箱模型可以详细地描述柔性负荷地动态物理过程。然而，它们通常忽略了家庭差异性、用户行为和能源使用习惯的影响，特别是在使用商业软件时。相比之下，黑箱模型不需要复杂的家电物理模型，可以直接基于实测数据量化建筑需求侧柔性。黑箱模型考虑了用户的能源使用行为，具有较高的准确性和可信度。然而，这种方法需要大量的高质量数据，而获取

表8 白箱模型、灰箱模型和黑箱模型在现有研究中的应用情况

Model type	Flexible load	Method/software	References	Purpose
White-box	HVACs	TRNSYS	[26,58]	Flexibility evaluation of individual HVACs; sensitivity analysis
		EnergyPlus	[55,59–61]	
		Modelica	[35,46]	
		Others	[43,57,62–63,68]	
Grey-box	Electric water heaters	Physical model	[73–76,78–80,83–85]	Optimal scheduling of individual flexible loads
	Refrigerators	Physical model	[91]	Optimal scheduling of individual flexible loads
Grey-box	HVACs	RC model	[38,121–126]	Optimal scheduling of individual or multiple flexible loads
		RC model	[7,64,129–133]	Flexibility evaluation at aggregation levels
	Refrigerators	RC model	[88,90]	Flexibility potential evaluation
	Wet appliances	Simplified model	[81–82,103–111]	Optimal scheduling of multiple flexible loads
Black-box	HVACs	Machine learning	[42,56,65]	Flexibility evaluation at aggregation levels
	Electric water heaters	Statistical method with measured data	[8]	Flexibility evaluation at aggregation levels
	Wet appliances	Statistical method with measured data	[8,30,50,92–93,96–102]	Flexibility evaluation at aggregation levels

表9 白箱模型、黑箱模型和灰箱模型在不同应用情况下的建议

Model type	Research objective			
	Flexibility potential evaluation		Optimal scheduling/control	
	Individual flexible load	Multiple flexible load	Individual flexible load	Multiple flexible load
White-box	✓		✓	
Grey-box	✓	✓		✓
Black-box		✓		



这些数据的成本较高，还需要考虑用户信息的隐私问题。因此，需要一种经济、有效、准确的方法获得家电的实际运行数据和用能行为等信息。或许非侵入式负荷监测[134]和负荷分解方法[135]是一种比较好的选择。此外，由于建筑负荷类型的差异和家庭使用家电习惯的差异，需要建立用户与智能家电设备的行为交互模型。当采用灰箱模型时，需要综合考虑时间、成本和模型精度等因素。构建住宅建筑柔性负荷模型，需要进一步明确各柔性负荷的运行特性、响应特性和用户的行为习惯。

## 6.2. 需求侧柔性指标

为了量化建筑需求侧柔性，需要选择合适的量化指标，从不同利益相关者的角度来表征柔性。本节对现有研究中的柔性量化指标进行了总结，并将柔性评估指标分为两类：直接量化指标和间接量化指标。前者直接描述了建筑需求侧柔性在各个方面的大小，而后者表征需求侧柔性在经济和环境方面的性能。

### 6.2.1. 直接量化指标

以“向下柔性”（downward flexibility）为例，图8完整地描述了需求响应事件中柔性负荷的响应过程。当柔性负荷接收到需求响应信号后，经过一定的响应时间，并采取相应的措施降低功率，并以最小功率持续运行一段时间。在需求响应事件结束后，柔性负荷经过一段时间将设备的状态恢复到原始状态。在现有研究中，学者采用不同的指标描述需求响应事件中柔性负荷在“功率”“时间”“能量”“效率”等方面的特性。具体介绍如下。

现有研究主要采用以下6个指标表征建筑需求侧柔性的功率特性。文献[35,67,136]采用需求响应时的功率 $P_{fle}$

表征需求侧柔性的功率特性；文献[48,86]采用需求响应期间的功率差异指标 $\Delta P$ 表征需求侧柔性的功率特性，可通过式（1）计算；文献[26]采用需求响应期间的平均功率差 $\Delta P_{ave}$ 表征需求侧柔性的功率特性，可由式（2）计算得到；文献[29]采用功率削减密度 $Int_a$ 表征需求侧柔性的功率特性，如式（3）所示。与 $Int_a$ 相似，文献[101]中提出了另一种功率削减密度指标 $Int_h$ ，表示为式（4）。此外，在参考文献[29,61]中使用了功率变化速率 $Ram_{down}$ 表征需求侧柔性的功率特性，其定义为柔性负荷提供的最大柔性所需的时间与最大柔性容量 $\Delta P_{max}$ 之比。

$$\Delta P(t) = P_{fle}(t) - P_{re}(t) \quad t \in [t_0, t_4] \quad (1)$$

$$\Delta P_{ave} = \left( \sum_{t=t_0}^{t_4} P_{fle}(t) - P_{re}(t) \right) / (t_4 - t_0) \quad (2)$$

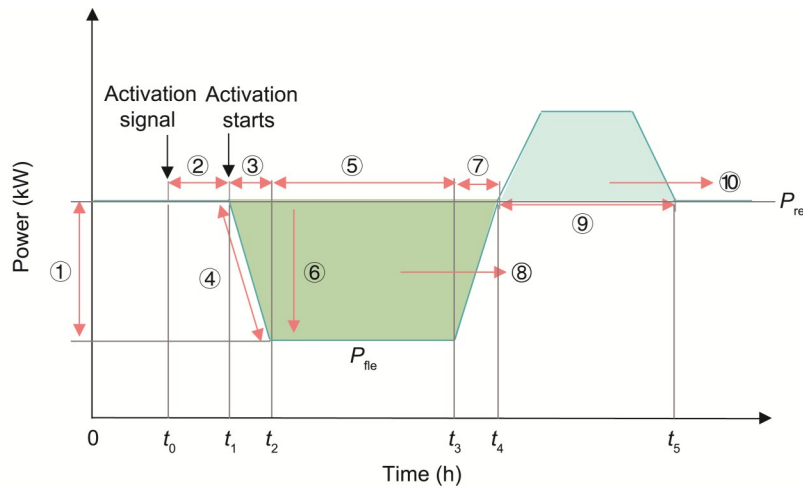
$$Int_a = \frac{\Delta P_{ave}}{A_{building}} \quad (3)$$

$$Int_h = \frac{\Delta P_{ave}}{N_{household}} \quad (4)$$

$$Ram_{down} = \frac{\Delta P_{max}}{(t_2 - t_1)} \quad (5)$$

式中， $P_{re}$ 为没有发生响应事件即正常运行的功率； $t_0$ 和 $t_4$ 分别为响应事件的开始和结束时间； $A_{building}$ 为建筑面积； $N_{household}$ 为用户数量； $t_1$ 和 $t_2$ 是需求侧管理策略开始执行的时间和柔性负荷达到最大柔性时间。

为了表征建筑需求侧柔性在时间方面的特性，文献[19]研究了柔性负荷在需求响应事件发生时的响应时间，如式（6）所示。响应时间 $T_{st}$ 指的是建筑物对电价 $[\kappa(t)]$ 和分布式可再生能源发电的波动等外部信号的响应速度。爬坡时间 $T_{ra}$ 表示需求侧管理策略开始执行到最低/最高功率



- ① Power capacity; ② response time; ③ ramping time; ④ ramping down rate; ⑤ duration of flexibility; ⑥ direction; ⑦ ramp up duration; ⑧ energy capacity; ⑨ duration of rebound effect; ⑩ rebound effect

图8. 需求响应事件中柔性负荷的响应过程。 $P_{re}$ 未参与需求响应时的功率； $P_{fle}$ 需求响应期间的功率。

所需要的时间[29], 可以通过式 (7) 计算。需求响应事件的持续时间  $T_{dur, fle}$  可以用式 (8) 计算[34,40]。此外, 学者还关注了需求响应事件引起的反弹效应的持续时间  $T_{dur, bou}$ , 该指标表示恢复初始条件所需的时间, 可由式 (9) [34] 计算得到。

$$T_{st} = t_1 - t_0 \quad (6)$$

$$T_{ra} = t_2 - t_1 \quad (7)$$

$$T_{dur, fle} = t_3 - t_2 \quad (8)$$

$$T_{dur, bou} = t_5 - t_4 \quad (9)$$

对于建筑需求侧柔性在能量方面的特性, 利益相关者关注的是需求响应期间减少的能耗  $E_{dif, fle}$ , 以及反弹效应导致的非高峰时段的额外的能耗。前者可以通过式 (10) [60] 计算, 采用峰值负荷削减密度  $Int_e$  和峰值负荷削减率  $\mu$  来表征建筑需求侧柔性在能量方面的特性, 可分别由式 (11) 和式 (12) 计算。对于反弹效应, 常采用如式 (13) 所示的反弹效应导致的额外的能耗指标  $E_{dif, bou}$  [47], 以及如式 (14) 所示的衡量需求响应期间和反弹效应期间的能耗差异指标  $E_{dif, tot}$  [29] 来表示。

$$E_{dif, fle} = \int_{t_0}^{t_4} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt \quad (10)$$

$$Int_e = \frac{\int_{t_0}^{t_4} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt}{A_{buiding}} \quad (11)$$

$$\mu = \int_{t_0}^{t_4} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt / \int_{t_0}^{t_4} P_{re}(t) dt \quad (12)$$

$$E_{dif, bou} = \int_{t_4}^{t_5} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt \quad (13)$$

$$E_{dif, tot} = \int_{t_0}^{t_4} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt + \int_{t_4}^{t_5} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt \quad (14)$$

为了提供需求侧柔性, 用户需要调整他们的用电模式, 从而导致能耗的变化。Le Dreau 等[60]提出了负荷削减或转移效率指标  $\eta$ , 并将该指标定义为反弹效应与需求

$$\eta = \frac{\int_{t_0}^{t_4} \{ [P_{fle}(t) - P_{re}(t)] \times \kappa(t) \} dt + \int_{t_4}^{t_5} \{ [P_{fle}(t) - P_{re}(t)] \times \kappa(t) \} dt}{\int_{t_0}^{t_4} [P_{re}(t) \times \kappa(t)] dt + \int_{t_4}^{t_5} [P_{re}(t) \times \kappa(t)] dt} \quad (18)$$

$$F_{fle, cos} = \frac{\int_{t_4}^{t_5} \{ [P_{fle}(t) - P_{re}(t)] \times \kappa(t) \} dt - \int_{t_0}^{t_4} \{ [P_{re}(t) - P_{fle}(t)] \times \kappa(t) \} dt}{\int_{t_4}^{t_5} \{ [P_{fle}(t) - P_{re}(t)] \times \kappa(t) \} dt + \int_{t_0}^{t_4} \{ [P_{re}(t) - P_{fle}(t)] \times \kappa(t) \} dt} \quad (19)$$

$$Em = \int_{t_0}^{t_4} \{ [P_{fle}(t) - P_{re}(t)] \times \lambda \} dt + \int_{t_4}^{t_5} \{ [P_{fle}(t) - P_{re}(t)] \times \lambda \} dt \quad (20)$$

响应事件的能耗之比, 表征可用柔性潜力, 如式 (15) 所示。可以看出该指标理论上取值范围为  $0 \sim \infty$ 。如式 (16) 所示, 也有研究[137-138]采用柔性因子  $F_{fle}$  表征可用柔性潜力, 该指标的取值范围为  $-1 \sim 1$ , 在无需求响应事件发生的情况下, 该指标为 0。

$$\eta = \int_{t_0}^{t_4} |P_{re}(t) - P_{fle}(t)| dt / \int_{t_4}^{t_5} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt \quad (15)$$

$$F_{fle} = \frac{\int_{t_4}^{t_5} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt - \int_{t_0}^{t_4} |P_{re}(t) - P_{fle}(t)| dt}{\int_{t_4}^{t_5} |P_{fle}(t) - P_{re}(t)| dt + \int_{t_0}^{t_4} |P_{re}(t) - P_{fle}(t)| dt} \quad (16)$$

### 6.2.2. 间接量化指标

除了直接表征建筑需求侧柔性的指标外, 现有研究还采用间接量化指标来评估需求响应事件对系统经济性和环保性的影响。对用户而言, 在提供需求侧柔性时主要考虑经济效益, 而政府和社会更关心二氧化碳的减排。建筑需求侧柔性对系统经济性和环保性的影响需要综合考量, 需求响应事件的发生可以降低运行成本和二氧化碳排放, 但反弹效应会导致运行成本的增加和额外的碳排放。因此, 经济和环境效益通常考虑需求响应事件和反弹效应的持续时间, 如式 (17) ~ (20) 所示。

运行成本节约率  $C_{op, tot}$  和运行成本降低率  $\varphi$  常用于评估需求侧柔性的经济效益, 可分别由式 (17) 和式 (18) 计算得到。此外, 与柔性因子的概念类似, 成本柔性因子  $F_{fle, cos}$  在文献[42,77,121]中也有使用, 可由式 (19) 计算得到。如式 (20) 所示, 在环境效益评估中, 主要采用二氧化碳减排指标  $Em$  [139]。

$$C_{op, tot} = \int_{t_0}^{t_4} \{ [P_{fle}(t) - P_{re}(t)] \times \kappa(t) \} dt + \int_{t_4}^{t_5} \{ [P_{fle}(t) - P_{re}(t)] \times \kappa(t) \} dt \quad (17)$$

### 6.2.3. 需求侧柔性评估指标的总结

现有研究针对需求侧柔性的量化问题提出了许多静态评估指标, 涉及功率、时间、能量、效率、经济性和环保性等方面。表 10 总结了 6.2 节中介绍的柔性量化指标。可

以看到现有研究采用了大量不同的指标去量化住宅建筑需求侧柔性，主要原因是缺乏一个大众普遍接受的关于建筑需求侧柔性的定义[20]，再者建筑需求侧柔性涉及不同的利益相关者，每个利益相关者关注的利益均不同。Zhang等[140]从不同利益相关者的角度出发，提出了表征不同利益相关者利益的指标。表10表明相比于其他指标，峰值时段功率变化量 $\Delta P$ 和峰值时段能耗削减量 $E_{dif, fle}$ 这两个指标在现有研究中使用得最频繁。此外，峰值时段的实际功率、需求响应事件持续时间、峰值需求减少率、削减或转移效率、运行成本减少率和成本柔性因子指标在很多研究中也采用，而表10中列出的其他描述柔性负荷响应特性的指标很少被使用。这一事实也证明了5.6节中提出的观点——对不同柔性负荷的响应特性的研究比较缺乏。此外，除了表10中的前两个指标外，其他指标均为静态指标，无法衡量可用的柔性潜力，因为建筑需求侧柔性受初始边界条件和时间的影响较大。此外，当前提出的这些柔性指标主要用于量化设备层面的柔性潜力，无法适用于各柔性负荷聚合下建筑层面的负荷柔性量化。

由于缺乏统一的量化指标，即使对于相同的柔性负荷，也难以比较不同研究中量化的柔性潜力。由于柔性负荷的多样性，制定一个统一的指标来量化建筑需求侧柔性是很有挑战的。然而，建立一个系统的评估框架，在不同

空间尺度上量化不同柔性负荷的柔性潜力，并提出相应的评估指标是可行的。当前，迫切需要构建这一系统的评估框架。此外，未来需要开发便于使用和拓展的柔性量化工具，从而快速量化建筑需求侧柔性。

## 7. 结论

本文从定义、柔性负荷和量化方法等方面综述了近年来关于住宅建筑需求侧柔性的研究。区分了与建筑物柔性相关的几个术语，包括能源柔性、需求侧柔性、负荷柔性和运行柔性。比较和分析了建筑需求侧柔性的定义，并提出了一个全面的定义。然后，总结和讨论了主要住宅柔性负荷的柔性能力和运行特点。此外，分类并总结了用于量化住宅建筑需求侧柔性的模型和评估指标。在文献综述的基础上，指出研究的不足、挑战和潜在的未来发展。本文的主要结论总结如下：

- 当前对建筑需求侧柔性没有一个公认的定义或统一的理解。本文针对建筑需求侧柔性提出了一个更全面的定义：一种在不牺牲用户利益的前提下通过管理建筑柔性资源从而调整建筑负荷曲线以满足不同需求的能力。
- 住宅柔性负荷具有不同的柔性能力和运行特性。温控负荷可以削减、转移和调节；照明负荷既可以削减又可

表10 现有研究中量化建筑需求侧柔性的指标

Category	Characteristic	Indicators	Unit	References
Direct quantification indicators	Power	$P_{fle}$	kW	[31,35,67,136]
		$\Delta P$	kW	[37,40,46,48,65,86,90,116–117,122]
		$\Delta P_{ave}$	kW	[26,101–102]
		$Int_a$	$kW \cdot m^{-2}$	[29,55]
		$Int_h$	kW per household	[35,42,101]
		$Ram_{down}$	$kW \cdot min^{-1}$	[61]
	Temporality	$T_{re}$	min	[29]
		$T_{ra}$	min	[29]
		$T_{dur, fle}$	h	[26,31,34,61]
		$T_{dur, bou}$	h	[26,61]
		$E_{dif, fle}$	kWh	[26,30,34,38,43,58–61,68,98–100,105,138,141]
	Energy	$Int_e$	$kWh \cdot m^{-2}$	[43,60]
		$\mu$	%	[59,65–66,69,82,104]
		$E_{dif, bou}$	kWh	[43,57,60]
		$E_{dif, tot}$	kWh	[29]
Efficiency	$\eta$	—	[38,57–58,60,68,138]	
	$F_{fle}$	—	[37,86,91]	
	Indirect quantification indicators	Economy	$C_{op, tot}$	USD
$\phi$			%	[82,103,108,110]
$F_{fle, cos}$		—	[38,68,138–139]	
Environment	Em	t CO <sub>2</sub>	[139]	

以调节；而湿电器只能转移负荷。这些电器有不同的运行模式、运行频率和季节特征。然而，对这些柔性负荷的运行特性，如不同阶段的功率特点，还需要结合实际设备的运行数据进行详细分析。此外，这些柔性负荷的响应速度、爬坡时间、相应持续时间、能量转移或削减潜力等响应特性也需进一步研究。

- 给出了白箱模型、黑箱模型和灰箱模型在不同应用情况下的建议。在量化单个柔性负荷的柔性潜力或者优化调度时，使用白箱模型较好；灰箱模型适用于柔性负荷聚合层面的柔性潜力量化以及多个柔性负荷的优化调度；而黑箱模型适用于柔性负荷聚合层面的柔性潜力量化。此外，需要综合考虑柔性负荷的运行特性、响应特性和用户行为从而构建更准确的住宅建筑柔性负荷模型。

- 现有研究已经从功率、时间、能量、效率、经济性和环保性方面提出了大量的用于量化需求侧柔性潜力的静态指标。但是还缺乏系统的用于量化住宅建筑需求侧柔性潜力的框架，尤其是对于不同柔性负荷的响应特性和不同人群的利益。此外，未来需要开发便于使用和拓展的工具，从而快速量化建筑需求侧柔性。

## 致谢

感谢湖南省科技创新计划项目(2020RC5003)、基于分布式储能和空调需求响应的零能耗建筑关键技术研究与应用项目(2020-K-165)、湖南省科技创新计划项目(2017XK2015、2020RC2017)的资助。

## Compliance with ethics guidelines

Zhengyi Luo, Jinqing Peng, Jingyu Cao, Rongxin Yin, Bin Zou, Yutong Tan, and Jinyue Yan declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Jensen SØ, Marszal-Pomianowska A, Lollini R, Pasut W, Knotzer A, Engelmann P, et al. IEA EBC annex 67 energy flexible buildings. *Energy Build* 2017;155:25–34.
- [2] Pallonetto F, De Rosa M, D'Ettoire F, Finn DP. On the assessment and control optimisation of demand response programs in residential buildings. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;127:109861.
- [3] Bampoulas A, Saffari M, Pallonetto F, Mangina E, Finn DP. A fundamental unified framework to quantify and characterise energy flexibility of residential buildings with multiple electrical and thermal energy systems. *Appl Energy* 2021;282:116096.
- [4] Kathirgamanathan A, De Rosa M, Mangina E, Finn DP. Data-driven predictive control for unlocking building energy flexibility: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;135:110120.
- [5] Jin X, Wu Q, Jia H. Local flexibility markets: Literature review on concepts, models and clearing methods. *Appl Energy* 2020;261:114387.
- [6] Li H, Wang Z, Hong T, Piette MA. Energy flexibility of residential buildings: a systematic review of characterization and quantification methods and applications. *Adv Appl Energy* 2021;3:100054.
- [7] Tulabing R, Yin R, DeForest N, Li Y, Wang K, Yong T, et al. Modeling study on flexible load's demand response potentials for providing ancillary services at the substation level. *Electr Power Syst Res* 2016;140:240–52.
- [8] D'hulst R, Labeeuw W, Beusen B, Claessens S, Deconinck G, Vanthournout K. Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium. *Appl Energy* 2015;155:79–90.
- [9] Sørensen ÅL, Lindberg KB, Sartori I, Andresen I. Analysis of residential EV energy flexibility potential based on real-world charging reports and smart meter data. *Energy Build* 2021;241:110923.
- [10] Dranka GG, Ferreira P. Load flexibility potential across residential, commercial and industrial sectors in Brazil. *Energy* 2020;201:117483.
- [11] Heitkoetter W, Schyska BU, Schmidt D, Medjroubi W, Vogt T, Agert C. Assessment of the regionalised demand response potential in Germany using an open source tool and dataset. *Adv Appl Energy* 2021;1:100001.
- [12] Ma Z, Knotzer A, Billanes JD, Jørgensen BN. A literature review of energy flexibility in district heating with a survey of the stakeholders' participation. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;123:109750.
- [13] Lopes RA, Chambel A, Neves J, Aelenei D, Martins J. A literature review of methodologies used to assess the energy flexibility of buildings. *Energy Procedia* 2016;91:1053–8.
- [14] Reynders G, Lopes RA, Marszal-Pomianowska A, Aelenei D, Martins J, Saelens D. Energy flexible buildings: an evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage. *Energy Build* 2018;166:372–90.
- [15] Bloess A, Schill WP, Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: a review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials. *Appl Energy* 2018;212:1611–26.
- [16] Paiho S, Saastamoinen H, Hakkarainen E, Similä L, Pasonen R, Ikäheimo J, et al. Increasing flexibility of Finnish energy systems—A review of potential technologies and means. *Sustain Cities Soc* 2018;43:509–23.
- [17] Lund PD, Lindgren J, Mikkola J, Salpakari J. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;45:785–807.
- [18] Chen Y, Xu P, Gu J, Schmidt F, Li W. Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): a review. *Energy Build* 2018;177:125–39.
- [19] Tang H, Wang S, Li H. Flexibility categorization, sources, capabilities and technologies for energy-flexible and grid-responsive buildings: State-of-the-art and future perspective. *Energy* 2021;219:119598.
- [20] Jin Y, Xu J, Yan D, Sun H, An J, Tang J, et al. Appliance use behavior modelling and evaluation in residential buildings: A case study of television energy use. *Build Simul* 2020;13(4):787–801.
- [21] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M. A basic framework for generating system operating health analysis. *IEEE Trans Power Syst* 1994;9(3):1610–7.
- [22] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Grid-Interactive Efficient Buildings|Department of Energy [Internet]. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy; [cited 2021 Apr 28]. Available from: <https://www.energy.gov/eere/buildings/grid-interactive-efficient-buildings>.
- [23] Neukomm M, Nubbe V, Fares R. Grid-interactive efficient buildings technical report series: overview of research challenges and gaps [Internet]. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy; 2019 Dec [cited 2021 Apr 29]. Available from: <https://www1.eere.energy.gov/buildings/pdfs/75470.pdf>.
- [24] Degefa MZ, Sperstad IB, Sæle H. Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources. *Electr Power Syst Res* 2021;194:107022.
- [25] Alizadeh MI, Moghaddam MP, Amjady N, Siano P, Sheikh-El-Eslami MK. Flexibility in future power systems with high renewable penetration: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;57:1186–93.
- [26] Arteconi A, Mugnini A, Polonara F. Energy flexible buildings: a methodology for rating the flexibility performance of buildings with electric heating and cooling systems. *Appl Energy* 2019;251:113387.
- [27] Junker RG, Azar AG, Lopes RA, Lindberg KB, Reynders G, Relan R, et al. Characterizing the energy flexibility of buildings and districts. *Appl Energy*



- 2018;225:175–82.
- [28] Hu M, Xiao F, Wang S. Neighborhood-level coordination and negotiation techniques for managing demand-side flexibility in residential microgrids. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;135:110248.
- [29] Liu J, Yin R, Pritoni M, Piette M, Neukomm M. Developing and evaluating metrics for demand flexibility in buildings: comparing simulations and field data. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Conference*; 2020 Aug 16–21; Pacific City, CA, USA. ACEEE Summer Study; 2020.
- [30] Stamminger R, Schmitz A. Load profiles and flexibility in operation of washing machines and dishwashers in Europe. *Int J Consum Stud* 2017;41(2):178–87.
- [31] Zhang Y, Campana PE, Yang Y, Stridh B, Lundblad A, Yan J. Energy flexibility from the consumer: integrating local electricity and heat supplies in a building. *Appl Energy* 2018;223:430–42.
- [32] Xu F, Zhang T, Lai LL, Zhou H. Shifting boundary for price-based residential demand response and applications. *Appl Energy* 2015;146:353–70.
- [33] Du J, Yu C, Pan W. Multiple influencing factors analysis of household energy consumption in high-rise residential buildings: evidence from Hong Kong. *Build Simul* 2020;13(4):753–69.
- [34] Zhou Y, Cao S. Quantification of energy flexibility of residential net-zero-energy buildings involved with dynamic operations of hybrid energy storages and diversified energy conversion strategies. *Sustain Energy Grids* 2020;21:100304.
- [35] Chen Y, Chen Z, Xu P, Li W, Sha H, Yang Z, et al. Quantification of electricity flexibility in demand response: Office building case study. *Energy* 2019;188:116054.
- [36] Li Y, Wang C, Li G, Wang J, Zhao D, Chen C. Improving operational flexibility of integrated energy system with uncertain renewable generations considering thermal inertia of buildings. *Energy Convers Manage* 2020;207:112526.
- [37] Perera ATD, Nik VM, Wickramasinghe PU, Scartezini JL. Redefining energy system flexibility for distributed energy system design. *Appl Energy* 2019;253:113572.
- [38] Finck C, Li R, Kramer R, Zeiler W. Quantifying demand flexibility of power-to-heat and thermal energy storage in the control of building heating systems. *Appl Energy* 2018;209:409–25.
- [39] Stinner S, Huchtemann K, Müller D. Quantifying the operational flexibility of building energy systems with thermal energy storages. *Appl Energy* 2016;181:140–54.
- [40] Corsetti E, Riaz S, Rielo M, Mancarella P. Modelling and deploying multi-energy flexibility: The energy lattice framework. *Adv Appl Energy* 2021;2:100030.
- [41] Ruggles TH, Dowling JA, Lewis NS, Caldeira K. Opportunities for flexible electricity loads such as hydrogen production from curtailed generation. *Adv Appl Energy* 2021;3:100051.
- [42] Ziras C, Heinrich C, Pertl M, Bindner HW. Experimental flexibility identification of aggregated residential thermal loads using behind-the-meter data. *Appl Energy* 2019;242:1407–21.
- [43] Foteinaki K, Li R, Heller A, Rode C. Heating system energy flexibility of low-energy residential buildings. *Energy Build* 2018;180:95–108.
- [44] Ayón X, Gruber JK, Hayes BP, Usaola J, Prodanović M. An optimal day-ahead load scheduling approach based on the flexibility of aggregate demands. *Appl Energy* 2017;198:1–11.
- [45] Johra H, Heiselberg P, Le Dréau J. Influence of envelope, structural thermal mass and indoor content on the building heating energy flexibility. *Energy Build* 2019;183:325–39.
- [46] De Coninck R, Helsen L. Quantification of flexibility in buildings by cost curves—methodology and application. *Appl Energy* 2016;162:653–65.
- [47] Nuytten T, Claessens B, Paredis K, Van Bael J, Six D. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating. *Appl Energy* 2013;104:583–91.
- [48] Yao R, Steemers K. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. *Energy Build* 2005;37(6):663–71.
- [49] Sakah M, de la Rue du Can S, Diawuo FA, Sedzro MD, Kuhn C. A study of appliance ownership and electricity consumption determinants in urban Ghanaian households. *Sustain Cities Soc* 2019;44:559–81.
- [50] Yamaguchi Y, Chen C, Shimoda Y, Yagita Y, Iwafune Y, Ishii H, et al. An integrated approach of estimating demand response flexibility of domestic laundry appliances based on household heterogeneity and activities. *Energy Policy* 2020;142:111467.
- [51] Goetzler B, Guernsey M, Kassuga T. Grid-interactive efficient buildings technical report series: heating, ventilation, and air conditioning (HVAC), water heating, appliances and refrigeration [Internet]. Washington, D. C.: U. S. Department of Energy; 2019 Dec [cited 2021 May 5]. Available from: <https://www1.eere.energy.gov/buildings/pdfs/75473.pdf>.
- [52] ashrae.org [Internet]. Peachtree Corners: ASHRAE Handbook online; [cited 2021 Apr 28]. Available from: <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/ashrae-handbook-online>.
- [53] Xu P, Haves P, Piette M, Zagreus L. Demand shifting with thermal mass in large commercial buildings: field tests, simulations and audits [Internet]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory; 2006 Jan [cited 2021 May 5]. Available from: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/cec-500-2006-009.pdf>.
- [54] Troitzsch S, Sreepathi BK, Huynh TP, Moine A, Hanif S, Fonseca J, et al. Optimal electric-distribution-grid planning considering the demand-side flexibility of thermal building systems for a test case in Singapore. *Appl Energy* 2020;273:114917.
- [55] Liu M, Heiselberg P. Energy flexibility of a nearly zero-energy building with weather predictive control on a convective building energy system and evaluated with different metrics. *Appl Energy* 2019;233:764–75.
- [56] Kara EC, Tabone MD, MacDonald JS, Callaway DS, Kiliccote S. Quantifying flexibility of residential thermostatically controlled loads for demand response: A data-driven approach. In: *The 12<sup>th</sup> ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*; 2014 Nov 3–6; Memphis, TN, USA. New York: Association for Computing Machinery. 2014.
- [57] Reynders G, Diriken J, Saelens D. Generic characterization method for energy flexibility: applied to structural thermal storage in residential buildings. *Appl Energy* 2017;198:192–202.
- [58] Vivian J, Chiodarelli U, Emmi G, Zarrella A. A sensitivity analysis on the heating and cooling energy flexibility of residential buildings. *Sustain Cities Soc* 2020;52:101815.
- [59] Yin R, Xu P, Piette MA, Kiliccote S. Study on Auto-DR and pre-cooling of commercial buildings with thermal mass in California. *Energy Build* 2010;42(7):967–75.
- [60] Le Dréau J, Heiselberg P. Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass. *Energy* 2016;111:991–1002.
- [61] Hurtado LA, Rhodes JD, Nguyen PH, Kamphuis IG, Webber ME. Quantifying demand flexibility based on structural thermal storage and comfort management of non-residential buildings: A comparison between hot and cold climate zones. *Appl Energy* 2017;195:1047–54.
- [62] Nyholm E, Puranik S, Mata É, Odenberger M, Johnsson F. Demand response potential of electrical space heating in Swedish single-family dwellings. *Build Environ* 2016;96:270–82.
- [63] Kathirgamanathan A, Péan T, Zhang K, De Rosa M, Salom J, Kummert M, et al. Towards standardising market-independent indicators for quantifying flexibility in buildings. *Energy Build* 2020;220:110027.
- [64] Huang S, Wu D. Validation on aggregate flexibility from residential air conditioning systems for building-to-grid integration. *Energy Build* 2019;200:58–67.
- [65] Yin R, Kara EC, Li Y, DeForest N, Wang K, Yong T, et al. Quantifying flexibility of commercial and residential loads for demand response using setpoint changes. *Appl Energy* 2016;177:149–64.
- [66] Kirby B, Kueck J, Laughner T, Morris K. Spinning reserve from hotel load response. *Electr J* 2008;21(10):59–66.
- [67] Chen Y, Xu P, Chen Z, Wang H, Sha H, Ji Y, et al. Experimental investigation of demand response potential of buildings: combined passive thermal mass and active storage. *Appl Energy* 2020;280:115956.
- [68] Foteinaki K, Li R, Péan T, Rode C, Salom J. Evaluation of energy flexibility of low-energy residential buildings connected to district heating. *Energy Build* 2020;213:109804.
- [69] Hao H, Lin Y, Kowli AS, Barooah P, Meyn S. Ancillary service to the grid through control of fans in commercial Building HVAC systems. *IEEE Trans Smart Grid* 2014;5(4):2066–74.
- [70] Maasoumy M, Ortiz J, Culler D. Flexibility of commercial building HVAC fan as ancillary service for smart grid. 2013. arXiv:1311.6094.
- [71] Zhao P, Henze GP, Plamp S, Cushing VJ. Evaluation of commercial building HVAC systems as frequency regulation providers. *Energy Build* 2013;67:225–35.
- [72] Kim YJ, Fuentes E, Norford LK. Experimental study of grid frequency regulation ancillary service of a variable speed heat pump. *IEEE Trans Power Syst* 2016;31(4):3090–9.
- [73] Amabile L, Bresch-Pietri D, El Hajje G, Labbé S, Petit N. Optimizing the self-consumption of residential photovoltaic energy and quantification of the impact of production forecast uncertainties. *Adv Appl Energy* 2021;2:100020.
- [74] Tejero-Gomez JA, Bayod-Rújula ÁA. Energy Management System design oriented for energy cost optimization in Electric Water Heaters. *Energy Build*

- 2021;243:111012.
- [75] Pied M, Anjos MF, Malhamé RP. A flexibility product for electric water heater aggregators on electricity markets. *Appl Energy* 2020;280:115168.
- [76] Kapsalis V, Hadellis L. Optimal operation scheduling of electric water heaters under dynamic pricing. *Sustain Cities Soc* 2017;31:109–21.
- [77] Pallonetto F, Oxizidis S, Milano F, Finn D. The effect of time-of-use tariffs on the demand response flexibility of an all-electric smart-grid-ready dwelling. *Energy Build* 2016;128:56–67.
- [78] Paull L, Li H, Chang L. A novel domestic electric water heater model for a multi-objective demand side management program. *Electr Power Syst Res* 2010;80(12):1446–51.
- [79] Nehrir MH, Jia R, Pierre DA, Hammerstrom DJ. Power management of aggregate electric water heater loads by voltage control. In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting; 2007 Jun 24–28; Tampa, FL, USA. New York: IEEE; 2007.
- [80] Wang C, Zhou Y, Wang J, Peng P. A novel Traversal-and-Pruning algorithm for household load scheduling. *Appl Energy* 2013;102:1430–8.
- [81] Lezama F, Soares J, Canizes B, Vale Z. Flexibility management model of home appliances to support DSO requests in smart grids. *Sustain Cities Soc* 2020;55:102048.
- [82] Mohseni A, Mortazavi SS, Ghasemi A, Nahavandi A, Abdi MT. The application of household appliances' flexibility by set of sequential uninterruptible energy phases model in the day-ahead planning of a residential microgrid. *Energy* 2017;139:315–28.
- [83] Moreau A. Control strategy for domestic water heaters during peak periods and its impact on the demand for electricity. *Energy Procedia* 2011;12:1074–82.
- [84] Kapsalis V, Safouri G, Hadellis L. Cost/comfort-oriented optimization algorithm for operation scheduling of electric water heaters under dynamic pricing. *J Clean Prod* 2018;198:1053–65.
- [85] Heffner GC, Goldman CA, Moezzi MM. Innovative approaches to verifying demand response of water heater load control. *IEEE Trans Power Deliv* 2006; 21(1):388–97.
- [86] Paul A, Baumhögger E, Elsner A, Moczarski L, Reineke M, Sonnenrein G, et al. Determining the heat flow through the cabinet walls of household refrigerating appliances. *Int J Refrig* 2021;121:235–42.
- [87] Liu G, Yan G, Yu J. A review of refrigerator gasket: development trend, heat and mass transfer characteristics, structure and material optimization. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;144:110975.
- [88] Diaz-Londono C, Enescu D, Mazza A, Ruiz F. Characterization and flexibility of a thermoelectric refrigeration unit. In: 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC); 2019 Sep 3–6; Bucharest, Romania. New York: IEEE; 2019.
- [89] Kremers E, González de Durana JM, Barambones O. Emergent synchronisation properties of a refrigerator demand side management system. *Appl Energy* 2013;101:709–17.
- [90] Diaz-Londono C, Enescu D, Ruiz F, Mazza A. Experimental modeling and aggregation strategy for thermoelectric refrigeration units as flexible loads. *Appl Energy* 2020;272:115065.
- [91] Maiorino A, Del Duca MG, Mota-Babloni A, Aprea C. Achieving a running cost saving with a cabinet refrigerator incorporating a phase change material by the scheduling optimisation of its cyclic operations. *Int J Refrig* 2020;117: 237–46.
- [92] Sadeghianpourhamami N, Demeester T, Benoit DF, Strobbe M, Devellder C. Modeling and analysis of residential flexibility: timing of white good usage. *Appl Energy* 2016;179:790–805.
- [93] Nistor S, Wu J, Sooriyabandara M, Ekanayake J. Capability of smart appliances to provide reserve services. *Appl Energy* 2015;138:590–97.
- [94] Marszal-Pomianowska A, Heiselberg P, Larsen OK. Household electricity demand profiles-A high-resolution load model to facilitate modelling of energy flexible buildings. *Energy* 2016;103:487–501.
- [95] McLoughlin F, Duffy A, Conlon M. Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study. *Energy Build* 2012;48:240–8.
- [96] Vellei M, Le Dréau J, Abdelouadoud SY. Predicting the demand flexibility of wet appliances at national level: The case of France. *Energy Build* 2020;214: 109900.
- [97] Ji Y, Rajagopal R. Demand and flexibility of residential appliances: an empirical analysis. In: 2017 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP); 2017 Nov 14–16; Montreal, QC, Canada. New York: IEEE; 2017.
- [98] Vanthournout K, Dupont B, Foubert W, Stuckens C, Claessens S. An automated residential demand response pilot experiment, based on day-ahead dynamic pricing. *Appl Energy* 2015;155:195–203.
- [99] Klaassen E, Kobus C, Frunt J, Slootweg H. Load shifting potential of the washing machine and tumble dryer. In: 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON); 2016 Apr 4–8; Leuven, Belgium. New York: IEEE; 2016.
- [100] Klaassen EAM, Kobus CBA, Frunt J, Slootweg JG. Responsiveness of residential electricity demand to dynamic tariffs: Experiences from a large field test in the Netherlands. *Appl Energy* 2016;183:1065–74.
- [101] Staats MR, de Boer-Meulman PDM, van Sark WJHM. Experimental determination of demand side management potential of wet appliances in the Netherlands. *Sustain Energy. Grids Networks* 2017;9:80–94.
- [102] Labeeuw WJ, Stragier GD, Deconinck G. Potential of active demand reduction with residential wet appliances: a case study for Belgium. *IEEE Trans Smart Grid* 2015;6(1):315–23.
- [103] Setlhaolo D, Xia X, Zhang J. Optimal scheduling of household appliances for demand response. *Electr Power Syst Res* 2014;116:24–8.
- [104] Finn P, O'Connell M, Fitzpatrick C. Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction. *Appl Energy* 2013;101:678–85.
- [105] Widén J. Improved photovoltaic self-consumption with appliance scheduling in 200 single-family buildings. *Appl Energy* 2014;126:199–212.
- [106] Gottwalt S, Ketter W, Block C, Collins J, Weinhardt C. Demand side management-A simulation of household behavior under variable prices. *Energy Policy* 2011;39(12):8163–74.
- [107] Kobus CBA, Klaassen EAM, Mugge R, Schoormans JPL. A real-life assessment on the effect of smart appliances for shifting households' electricity demand. *Appl Energy* 2015;147:335–43.
- [108] Sou KC, Weimer J, Sandberg H, Johansson KH. Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming. In: 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference; 2011 Dec 12–15; Orlando, FL, USA. New York: IEEE; 2011.
- [109] Marszal-Pomianowska A, Widén J, Le Dréau J, Heiselberg P, Bak-Jensen B, de Cerio Mendaza ID. Operation of power distribution networks with new and flexible loads: a case of existing residential low voltage network. *Energy* 2020; 202:117715.
- [110] Lu Q, Zhang Z, Lü S. Home energy management in smart households: Optimal appliance scheduling model with photovoltaic energy storage system. *Energy Rep* 2020;6:2450–62.
- [111] Kakran S, Chanana S. Energy scheduling of residential community equipped with smart appliances and rooftop solar. In: 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS); 2017 Dec 21–23; Pune, India. New York: IEEE; 2018.
- [112] Nubbe VYM. Grid-interactive Efficient Buildings Technical Report Series: Lighting and Electronics[Internet]. Washington, D. C.: U. S. Department of Energy; 2019 Dec[cited 2021 May 5]. Available from: <https://www1.eere.energy.gov/buildings/pdfs/75475.pdf>.
- [113] Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy Build* 2008;40(3):394–8.
- [114] Bodart M, De Herde A. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. *Energy Build* 2002;34(5):421–9.
- [115] Yu Z, Lu F, Zou Y, Yang X. Quantifying the flexibility of lighting systems by optimal control in commercial buildings: insight from a case study. *Energy Build* 2020;225:110310.
- [116] Li DHW, Lam JC, Wong SL. Daylighting and its effects on peak load determination. *Energy* 2005;30(10):1817–31.
- [117] Sehar F, Pipattanasomporn M, Rahman S. An energy management model to study energy and peak power savings from PV and storage in demand responsive buildings. *Appl Energy* 2016;173:406–17.
- [118] Yang IH, Nam EJ. Economic analysis of the daylight-linked lighting control system in office buildings. *Sol Energy* 2010;84(8):1513–25.
- [119] Beccali M, Bellia L, Fragliasso F, Bonomolo M, Zizzo G, Spada G. Assessing the lighting systems flexibility for reducing and managing the power peaks in smart grids. *Appl Energy* 2020;268:114924.
- [120] Harris C. Grid-interactive Efficient Buildings Technical Report Series: Windows and Opaque Envelope. <https://www1.eere.energy.gov/buildings/pdfs/75387.pdf> (accessed May 5, 2021).
- [121] De Rosa M, Bianco V, Scarpa F, Tagliafico LA. Heating and cooling building energy demand evaluation; A simplified model and a modified degree days approach. *Appl Energy* 2014;128:217–29.
- [122] Taylor ZT, Gowri K, Katipamula S. GridLAB-D technical support document: residential End-Use module version 1.0. Report. Richland: Pacific Northwest National Lab; 2008.

- [123] Hu M, Xiao F. Price-responsive model-based optimal demand response control of inverter air conditioners using genetic algorithm. *Appl Energy* 2018;219:151–64.
- [124] Wang H, Meng K, Luo F, Dong ZY, Verbič G, Xu Z, et al. Demand response through smart home energy management using thermal inertia. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*; 2013 Sep 29–Oct 3; Hobart, Australia. New York: IEEE; 2014.
- [125] Klein K, Herkel S, Henning HM, Felsmann C. Load shifting using the heating and cooling system of an office building: quantitative potential evaluation for different flexibility and storage options. *Appl Energy* 2017;203:917–37.
- [126] Stavrakas V, Flamos A. A modular high-resolution demand-side management model to quantify benefits of demand-flexibility in the residential sector. *Energy Convers Manage* 2020;205:112339.
- [127] Dupont B, Vingerhoets P, Tant P, Vanthournout K, Cardinaels W, De Rybel T, et al. LINEAR breakthrough project: Large-scale implementation of smart grid technologies in distribution grids. In: *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*; 2012 Oct 14–17; Berlin, Germany. New York: IEEE; 2012.
- [128] Heinrich C, Ziras C, Syrri ALA, Bindner HW. EcoGrid 2.0: A large-scale field trial of a local flexibility market. *Appl Energy* 2020;261:114399.
- [129] Xie D, Hui H, Ding Y, Lin Z. Operating reserve capacity evaluation of aggregated heterogeneous TCLs with price signals. *Appl Energy* 2018;216:338–47.
- [130] Hui H, Ding Y, Liu W, Lin Y, Song Y. Operating reserve evaluation of aggregated air conditioners. *Appl Energy* 2017;196:218–28.
- [131] Adhikari R, Pipattanasomporn M, Rahman S. An algorithm for optimal management of aggregated HVAC power demand using smart thermostats. *Appl Energy* 2018;217:166–77.
- [132] Che Y, Yang J, Zhou Y, Zhao Y, He W, Wu J. Demand response from the control of aggregated inverter air conditioners. *IEEE Access* 2019;7:88163–73.
- [133] Mahdavi N, Braslavsky JH. Modelling and control of ensembles of variable-speed air conditioning loads for demand response. *IEEE Trans Smart Grid* 2020;11(5):4249–60.
- [134] Liu Y, Liu W, Shen Y, Zhao X, Gao S. Toward smart energy user: real time non-intrusive load monitoring with simultaneous switching operations. *Appl Energy* 2021;287:116616.
- [135] Qi N, Cheng L, Xu H, Wu K, Li X, Wang Y, et al. Smart meter data-driven evaluation of operational demand response potential of residential air conditioning loads. *Appl Energy* 2020;279:115708.
- [136] El Geneidy R, Howard B. Contracted energy flexibility characteristics of communities: analysis of a control strategy for demand response. *Appl Energy* 2020;263:114600.
- [137] Christantoni D, Flynn D, Finn DP. Modelling of a multi-purpose commercial building for demand response analysis. *Energy Procedia* 2015;78:2166–171.
- [138] Finck C, Li R, Zeiler W. Optimal control of demand flexibility under real-time pricing for heating systems in buildings: a real-life demonstration. *Appl Energy* 2020;263:114671.
- [139] Zhou Y, Cao S, Kosonen R, Hamdy M. Multi-objective optimisation of an interactive buildings-vehicles energy sharing network with high energy flexibility using the Pareto archive NSGA-II algorithm. *Energy Convers Manage* 2020;218:113017.
- [140] Zhang L, Good N, Mancarella P. Building-to-grid flexibility: modelling and assessment metrics for residential demand response from heat pump aggregations. *Appl Energy* 2019;233:709–23.
- [141] Bechtel S, Raffii-Tabrizi S, Scholzen F, Hadji-Minaglou JR, Maas S. Influence of thermal energy storage and heat pump parametrization for demand-side-management in a nearly-zero-energy-building using model predictive control. *Energy Build* 2020;226:110364.