深圳市建筑科学研究院股份有限公司
Shenzhen Institute of Building Research Co.,Ltd.

ENERGY FOUNDATION
能源基金会

中国光储直柔建筑战略发展路径研究

子课题 2：中国“光储直柔”建筑未来发展实施路径研究

Research on China’s PEDF Building System Development

Sub project 2: Implementation Path of PEDF Building in China

深圳市建筑科学研究院股份有限公司

2022 年 6 月 30 日

Shenzhen Institute of Building Research co., Ltd

June 30, 2022

关于作者

郝　斌　深圳市建筑科学研究院股份有限公司直流实验室主任
李叶茂　深圳市建筑科学研究院股份有限公司高级技术经理
陆元元　深圳市建筑科学研究院股份有限公司技术经理
李雨桐　深圳市建筑科学研究院股份有限公司直流实验室副主任

ABOUT THE AUTHORS

Hao Bin　Shenzhen Institute of Building Research co., Ltd
Li Yemao　Shenzhen Institute of Building Research co., Ltd
Lu Yuanyuan　Shenzhen Institute of Building Research co., Ltd
Li Yutong　Shenzhen Institute of Building Research co., Ltd

致谢

本研究由深圳市建筑科学研究院股份有限公司统筹撰写，由能源基金会提供资金支持（课题编号: G-2106-33086）。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Shenzhen Institute of Building Research co., Ltd and is funded by Energy Foundation China (Grant Number: G-2106-33086).

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.

前言

本研究是清华大学牵头的《中国“光储直柔”建筑发展战略路径研究》的子课题 2：中国“光储直柔”建筑未来发展实施路径研究（以下简称“本课题”）。课题旨在系统梳理中国建筑规模，全面分析建筑负荷特性，研判光伏、储能、直流、柔性等技术发展趋势与不确定性因素，规划发展“光储直柔”建筑的技术路径。

本研究项目受能源基金会资助，由清华大学牵头，深圳市建筑科学研究院股份有限公司承担，并邀请来自清华大学、深圳供电局有限公司等单位的专家学者共同完成。

减少建筑直接碳排放是低碳发展的前提，建筑电气化则是其中的重要技术路径。由能源基金会支持的“建筑电气化及其驱动的城市能源转型路径”项目研究指出，要实现 2℃温升目标，在建筑节能的基础上，建筑电气化率要从当前的 48%提高到 2050 年的 90%以上，非化石电力在建筑总电量中的比例至少从当前的 29%提高到 2050 年的 90%以上。建筑电气化率的提高，意味着需要更多的电力，非化石电力比例的提高在总量上将能够满足电气化率提高所带来的电力总量增长的需求。

着眼未来电力发展，我们仍将面临总量平衡的问题，同时面临电力不平衡的挑战。未来大规模的风电、光伏发电等可再生能源的发展，将彻底改变当前的发电形态，同时经济发展和用能习惯的改变，也将改变用能负荷形态。做到总量平衡不易，做到实时电力平衡，就需要“源荷互动”、“荷随源动”等新技术的应用。

“光储直柔”新型能源系统是建筑实现自身减排、减少间接碳排放的重要技术，更是与电网互动、解决电力平衡的关键技术。分布式光伏将能够直接抵消建筑用能，但在城市农村、不同建筑对象，发展策略不同；储能尚处在技术快速发展进步中，是否利用电动车电池、如何发展分布式储能等诸多方向等待明确；低压直流建筑应用是当前国际的热点，其关键技术和应用障碍有待深入研究；柔性技术是建筑与电网协同实现电力平衡的重要桥梁，但也是发展相对滞后的，面临技术攻关和政策机制的突破。

光、储、直、柔四项主要技术所处的发展阶段不同，如何客观认识并做到合

理的预测，如何根据“3060”目标看待“光储直柔”技术的未来，如何从识别障碍到问题解决再到规模化应用，如何理解其与交通和电网的关系，如何量化评估“光储直柔”技术对于目标的支撑，如何开展工程实践以及技术目标的性能实现等，都得到了行业广泛的关注。

执行摘要

- **光储直柔[1]（PEDF）是新型电力系统的重要组成，是建筑节能新方向。**建筑节能经历了 30%、50%、65%的“三步走”，建筑本体的性能以及设备系统效率大幅提升，采暖空调用能占建筑能耗的比例由过去的三分之二逐步降低到三分之一。同时，电器设备用能比例逐步提高。在建筑电气化的背景下，考虑可再生能源边际成本的降低，未来建筑负荷灵活性的作用甚至超过能效提高发挥的作用。未来建筑将融合光伏、储能、电动车，逐步由用能者转为产消者。“光储直柔”技术即是在建筑能效提升基础上进一步实现电能替代与电网友好交互的新型建筑配电技术，是建筑节能的新方向。

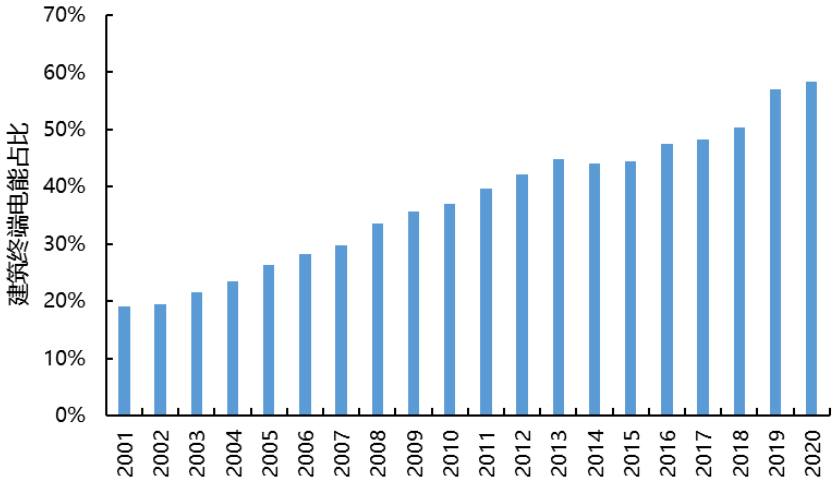


图 I　2001-2020 年建筑终端电能占比变化趋势

- **未来电力峰谷将被重新定义，光储直柔着力解决电力日平衡需求。**当前电力系统面临负荷连年增长的巨大压力，但尖峰负荷持续时间并不长。尤其是夏季，建筑空调负荷作为夏季电力负荷的重要组成，利用建筑空调负荷的可调节性参与需求响应是当前电力领域和建筑领域都共同关注的焦点。随着高比例可再生能源发电的接入，未来电网的挑战是风光电出力与用电负荷的不匹配。当我们同时考虑风电和光伏发电，未来的峰

[1] 《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030-2022 术语 2.1.1。

谷将被重新定义。从日平衡角度看，未来电力可能白天是谷晚上是峰，与现在正好颠倒过来。现在的电力紧张主要是由于用电负荷高峰，而未来的电力紧张还要看风光电出力的大小。用电负荷低但风光电出力更低的情况仍然会出现电力紧张，而用电负荷高但风光电出力更高的情况依然会出现电力盈余。随着能源结构的转变，电力供需关系也发生改变，建筑柔性价值也将发生改变。建筑柔性（负荷调节和电动车）对不同时间尺度的储能容量需求和累计储能量起不同程度的替代效果。在替代储能容量方面，建筑柔性几乎能解决全部的日调峰需求，不依赖于电网储能和调峰电源，如图 II 所示。

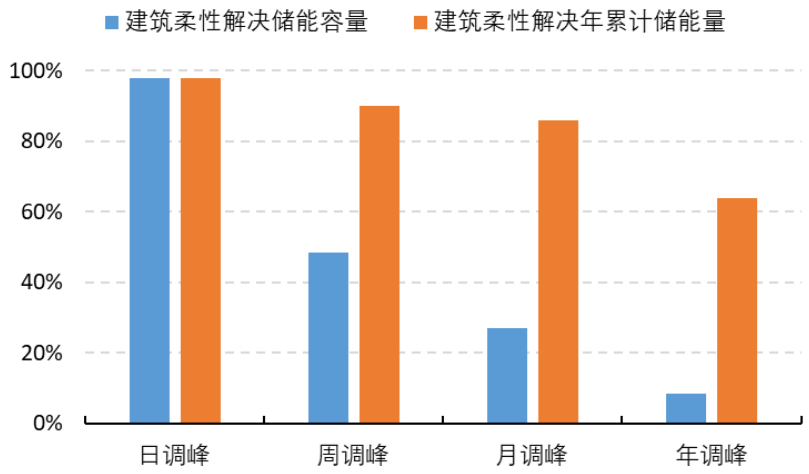


图 II　建筑柔性解决储能容量和年累计储能量的比例

- **光储直柔应遵循城乡差异化发展，城市应用重在“柔”且先公建、后住宅，而农村应用重在“光”和“光伏+”。**在城市地区，建筑用电负荷高、需求大，发展以“储”和“柔”为核心的“光储直柔”配电系统，发挥建筑的资源聚合作用，使建筑成为虚拟电厂，主动调节建筑负荷，与电动车、电力系统的双向友好互动，提高电力系统的经济性，提高可再生能源的消纳比例。且在前期由政府办公建筑带头发展分布式光伏，推动公车电动化和有序充放电模式，鼓励柔性用电。同时，结合峰谷价差、电力市场、需求响应等有关政策机制，探索“光储直柔”的市场化推广模式，走先公建、后居住的发展路径。如图 V 所示。而在农村地区，建筑屋顶资源丰富，发

展以“光”为核心的“光伏+”系统，自发自用、余电外送，围绕农村建筑屋顶和周边场地的太阳能资源全面开发，推动农村用能电气化、农业机具电动化、用电管理有序智能化，建设村级直流配电网和蓄电蓄热设施，促进光伏发电的高效利用和充分消纳。

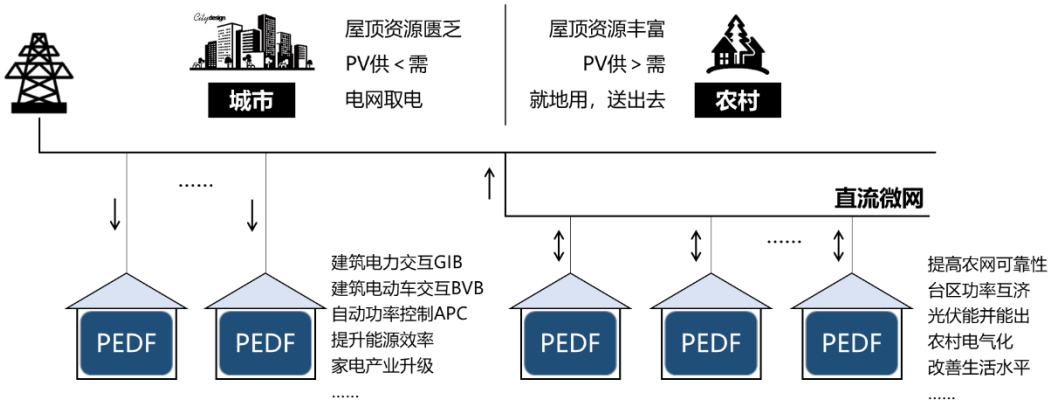


图 V　光储直柔在城市和农村的发展策略

- **中国光储直柔建筑未来发展实施路径近期侧重政策与科技研发，近中期重点在于示范，中远期则在于柔性价值突破。**光储直柔技术现阶段仍处于发展初期，其应用及推广离不开全社会对零碳电力和柔性用电的认知，离不开发电侧与用电侧的协同共识，离不开政府部门的带头示范，离不开商业模式与机制的探索与构建，更离不开持续的技术攻关与设备研发。总体看，近期侧重政策与科技研发，近中期重点在于示范，中远期则在于柔性价值突破，如图 VI 所示。具体推动光储直柔建筑发展应从以下六个方面入手：

  1) 从标准入手，确保太阳能光伏应用；
  2) 推动充电桩与建筑停车位绑定，成为规划审批的重要组成；
  3) 公共机构示范先行，尤其是建筑电动车交互[2]（BVB）；
  4) 探索零碳标识认证，解决“帽子”驱动力；
  5) 探索建筑电力交互[3]（GIB）商业模式，解决“利益”驱动力；
  6) 组织技术与产品装备的科技攻关，解决 1-100 多元化。

[2] 《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030-2022 术语 2.1.12。
[3] 《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030-2022 术语 2.1.2

图 VI　光储直柔实施路径

Executive Summary

- **PEDF[4] is an important component of the new power system and a new direction for building energy efficiency.**

  The building energy efficiency has been through a "three-step process" of 30%, 50%, and 65%, during which, the performance of the building envelope and the equipment efficiency have been greatly improved. The energy consumption of heating ventilation and air conditioning (HVAC) in the building gradually reduced from two-thirds of the total energy consumption to only one-third. Meanwhile, the proportion of energy used by electrical appliances has gradually increased. In the context of building electrification, considering the reduction of marginal cost of renewable energy, the role of future building energy flexibility will exceed that of the energy efficiency improvement. Future buildings will integrate PV, energy storage, electric vehicles, and gradually turn from energy consumers to prosumers. Based on the building energy efficiency improvement, PEDF is a new building electricity distribution technology that will further realize electric energy substitution and grid-friendly interaction, which is the new direction of building energy efficiency.

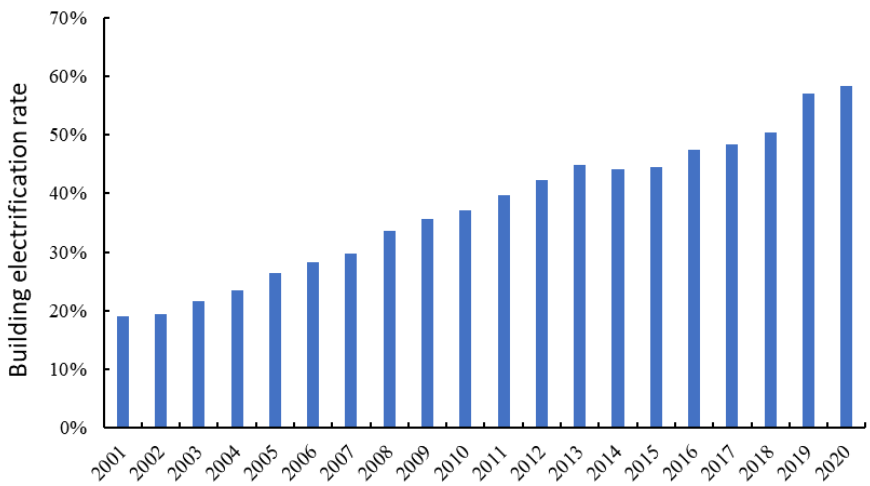


Figure 1. Change Trend of the Proportion of Building End Power from 2001 to 2020

- **With re-definition of future power peaks and valleys, PEDF focuses on meeting the daily balance demand of power.**

  The current power system is under tremendous pressure of increasing load growth, but the spike load does not last long. Especially in summer, building an air conditioning load, as an important component of the summer power load,

[4] PEDF is short for photovoltaics, energy storage, direct current and flexibility.

is part of the demand response with its adjustable nature, which is currently a common focus of both the power field and the building field. With a high percentage of renewable energy generation connected, the challenge for future power grids is the mismatch between wind power and PV output and the power consumption load. When we consider both wind power and PV generation, the peak and valley of the future will be redefined. From the perspective of daily balance, the future power may be a valley during the day and a peak at night, which is exactly the reverse of today. The current power tension is mainly due to the peak power load, while the future power tension will also depend on the size of the wind power and PV output. When the power load is low but the wind power and PV output are lower, there will still be a power tension. When the power load is high but the wind power and PV output are higher, there will be a power surplus. As the energy mix shifts, the relationship between power supply and demand also changes. As shown in Figure 2, building flexibility can solve almost all of the daily peak shaving demand, without relying on grid storage and peak shaving power.

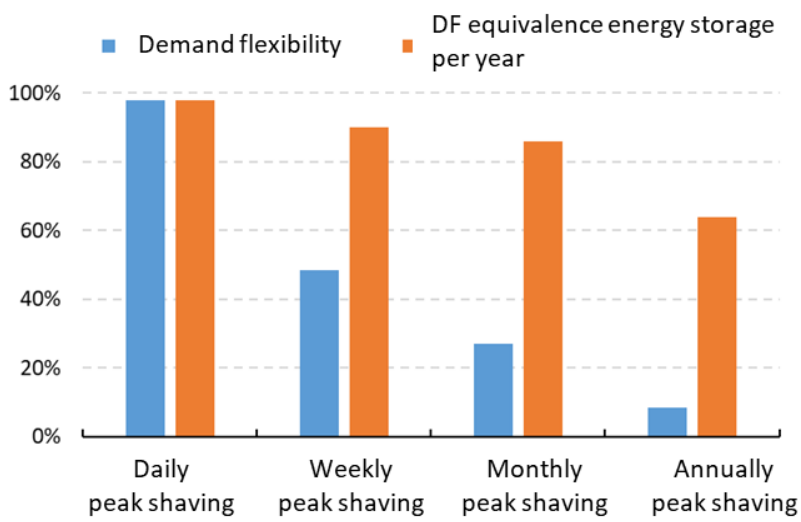


Figure 2. The ratio of demand flexibility and its equivalence energy storage per year

- **PEDF should follow the differentiated development of urban and rural areas. Its urban applications focus on "F" and public construction before residence, while its rural applications focus on "P" and "PV+".**

In urban areas where the power consumption of buildings features high power load and high demand, PEDF power distribution systems with "energy storage" and "flexibility" as the core give play to the resource aggregation of the building, so that the building can become a virtual power plant, actively adjust the building load, interact with electric vehicles and power system in a friendly way, improve the economy of the power system, and increase the proportion of renewable energy consumption. In the early stage, government office buildings should take the lead in developing distributed PV, promote the

electrification of public vehicles and orderly charging and discharging mode, and encourage flexible power consumption. Meanwhile, combined with the peak-valley price difference, power market, demand response and other relevant policy mechanisms, it explores the market-oriented promotion mode of PEDF and takes the development path of public construction before residence. As shown in Figure 5, rural areas are abundant in building rooftop resources and "PV+" systems with PV as the core should be developed. They self-generate and self-consume and deliver the surplus power out. Centering on the comprehensive development of solar power resources of the building rooftops and surrounding site of rural areas, those areas promote the electrification of rural energy use, the electrification of agricultural machinery, the orderly and intelligent management of power, the construction of village-level DC distribution networks and power storage and heat storage facilities, and promote the efficient use and full consumption of PV power generation.

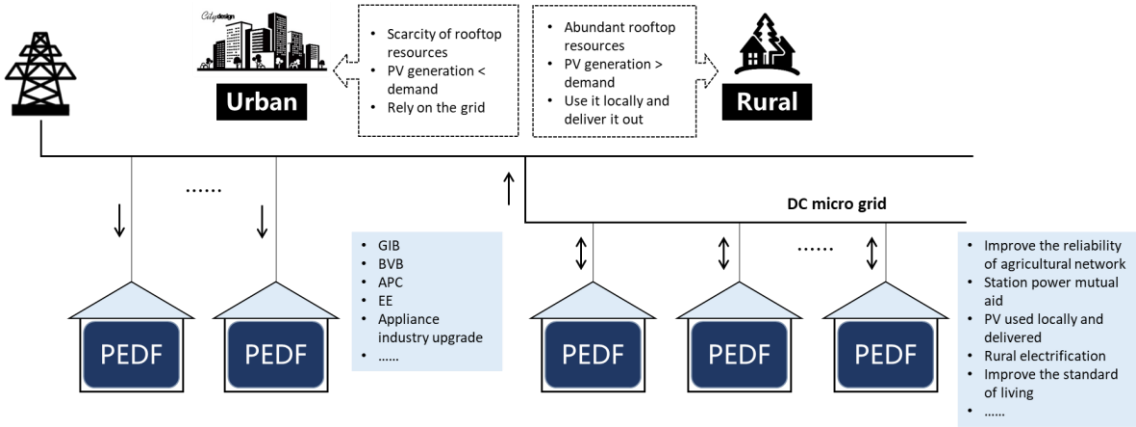


Figure 5. Development Strategies for PEDF in Urban and Rural Areas

- **The future development implementation path of China's PEDF building focuses on policy and technology R&D in the near term, demonstrations in the near-to-medium term and the value of demand flexibility breakthroughs in the medium-to-long term.**

The PEDF is yet in the early stage of development, and its application and promotion cannot be separated from the whole society's awareness of zero-carbon power and flexible power consumption, the consensus between the power generation side and the power consumption side, the leading demonstrations of government departments, the exploration and construction of business models and mechanisms, and the continuous technical R&D of equipment. Generally, the focus is on policy and technology R&D in the near term, demonstrations in the near-to-medium term, and breakthroughs in the value of demand flexibility in the medium-to-long term, as shown in Figure 6. The specific promotion of PEDF building development should start with the following six aspects:

a) Start with standards to ensure solar PV applications;
b) Promote charging piles tied to building parking as a key component of planning approval;
c) Pilot in public institutions, especially BVB[5] technology;
d) Explore zero carbon labeling certification to address the "hat" driver;
e) Explore the business model of grid-interactive building (GIB) to solve the "interest" driver;
f) Organize technology and product equipment scientific and technological research to solve the 1-100 diversity.

	Near term: policy & technology	**Near- to mid-term:** demonstrations and breakthroughs & main body		**Medium-to long-term:** interest breakthroughs
P-photovoltaics	• Standard mandatory	Public buildings first→	Developer	
E-energy storage	• Building energy storage (cooling, heating and electricity) • Safety and economy of electrochemical energy storage, etc. • Parking space-charging post binding → BVB*[a]	BVB→	Public institutions	
D-direct current	• DC equipment 1-100 diversity	DC micro grid→	Rural area	
F-flexibility	• Voltage - flexibility (U-F) control technology • Adopted in areas where the peak-valley price difference is more than 4 times • Demand response (DR)	VPP*[b]→	Building load aggregators	**Value of demand flexibility** • Dynamic carbon emission factors • RTP*[c] • Carbon trade.....

Zero-carbon building ⟷ **Zero-carbon electricity**

Note:
*[a] BVB is short for the charge-discharge coupling technology from building to vehicle and vehicle to building.
*[b] Virtual Power Plant (VPP).
*[c] Real-time pricing (RTP), also known as dynamic pricing, is a utility rate structure in which the per-kWh charge varies each hour based on the utility's real-time production costs.

Figure 6. PEDF Implementation Path

[5] BVB is short for the charge-discharge coupling technology from building to vehicle and vehicle to building.

目　录

前言 i

执行摘要 iii

Executive Summary vii

1 项目背景 1

1.1 双碳目标下能源绿色低碳转型新要求 1

1.2 建筑节能与电气化发展新趋势 2

1.3 高比例可再生能源电力快速发展 3

1.4 新型电力系统对建筑柔性负荷的需求 5

1.5 建筑领域碳中和路径 7

2 中国建筑规模与负荷特征 9

2.1 中国建筑规模 9

2.2 建筑负荷特征 11

2.3 小结 15

3 光储直柔技术趋势 17

3.1 建筑光伏 17

3.2 建筑储能 24

3.3 直流配电 31

3.4 用电柔性 35

3.5 小结 42

4 光储直柔建筑零碳用电模型 44

4.1 模型介绍 44

4.2 电网调峰储能量 44

4.3 光储直柔建筑调峰模型 46

4.4 情景设置 52

4.5 结果分析 55

4.6 不确定性因素 62

5 光储直柔目标、策略与实施路径 66

5.1 目标与策略.....66
5.2 实施路径.....69
参考文献 73

1 项目背景

1.1 双碳目标下能源绿色低碳转型新要求

自 2020 年 9 月中国在第七十五届联合国大会上提出将采取有力的政策和措施，于 2030 年前达到碳达峰，并力争于 2060 年前实现碳中和的国家目标（简称“双碳目标”），政策密集出台深化布局绿色低碳产业，促使能源结构逐步由高碳向低碳甚至无碳转变，相关政策如图 1-1 所示。

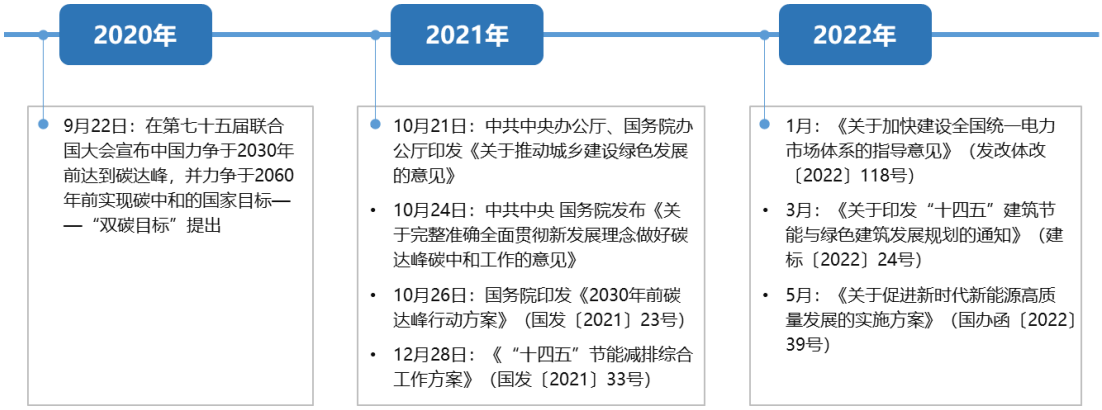


图 1-1　落实双碳目标相关政策

2021 年 10 月 24 日，中共中央 国务院发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》[1]（以下简称《意见》），作为碳达峰碳中和“1+N”政策体系中首份纲领性文件，明确了我国实现碳达峰碳中和的时间表、路线图，是“1+N”中的“1”，为碳达峰碳中和进行了系统谋划和总体部署，也是中国碳达峰碳中和的顶层设计。《意见》明确提出：以能源绿色低碳发展为关键，加快形成节约资源和保护环境的产业结构、生产方式、生活方式、空间格局，坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展道路，确保如期实现碳达峰、碳中和。

新时期电气化发展是推动能源绿色低碳转型，助力实现碳达峰、碳中和目标的重要途径。作为“N”中为首的政策文件，《2030 年前碳达峰行动方案》（国发〔2021〕23 号）[2]中明确提出：提高建筑终端电气化水平，建设集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的“光储直柔”建筑。到 2025 年，城镇建筑可再生能源替代率达到 8%，新建公共机构建筑、新建厂房屋顶光伏覆盖率力争达到 50%。可再生能源的随机性、波动性将对城市电网的安全、稳定运行带来极大的挑战，制约可再生能源大规模的应用。建筑中采用“光储直柔”技术不仅是解决分

布式光伏接入和消纳问题的重要技术手段，而且是面向新型电力系统实现“荷随源动”的重要技术支撑，对于零碳建筑和零碳电力的实现具有重要作用。

2022 年 3 月住房和城乡建设部发布《关于印发“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划的通知》（建标〔2022〕24 号）[3]，提出建筑用能电力替代行动、新型建筑电力系统建设两项建筑电气化重点工程。其中，建筑用能电力替代行动以减少建筑温室气体直接排放为目标，扩大建筑终端用能清洁电力替代，积极推动以电代气、以电代油，推进炊事、生活热水与采暖等建筑用能电气化，推广高能效建筑用电设备、产品。到 2025 年，建筑用能中电力消费比例超过 55%；新型建筑电力系统以“光储直柔”为主要特征，可以实现用电需求灵活可调，适应光伏发电大比例接入，使建筑供配电系统简单化、高效化。“十四五”期间积极开展新型建筑电力系统建设试点，逐步完善相关政策、技术、标准，以及产业生态。

1.2 建筑节能与电气化发展新趋势

建筑节能经历了 30%、50%、65%的三步走，从居住建筑延伸到公共建筑，从严寒寒冷地区拓展到夏热冬冷和夏热冬暖地区，从设计、施工到运行，建筑本体的性能以及设备系统效率大幅提升，采暖空调占建筑能耗的比例由过去的三分之二逐步降低到三分之一。与此同时，随着生活水平和智能化水平的提高，电器设备用能比例逐步提高。在建筑电气化的背景下，未来是继续把钱花在建筑本体的能效提升还是兼顾建筑用能的灵活性上，这是值得深入研究的。美国能源部 2021 年 5 月公布的《与电网互动的建筑国家发展路线图》（A National Road map for Grid-Interactive Efficient Buildings）[4]认为，考虑可再生能源边际成本的降低，未来建筑负荷灵活性的作用甚至超过能效提高发挥的作用。“光储直柔”技术是在建筑能效提升基础上进一步实现电能替代与电网友好交互的新型建筑配电技术。

从 2010~2020 年，我国建筑能耗总量中电力消耗量大幅增长。2020 年全国建筑运行总用电量 20000 亿 kWh[5]，占全社会用电量的 26.6%。根据电力平衡表，建筑用电量在全社会用电量中的比重从 2001 年至 2020 年提升了 6.6%，如图 1-2 所示。

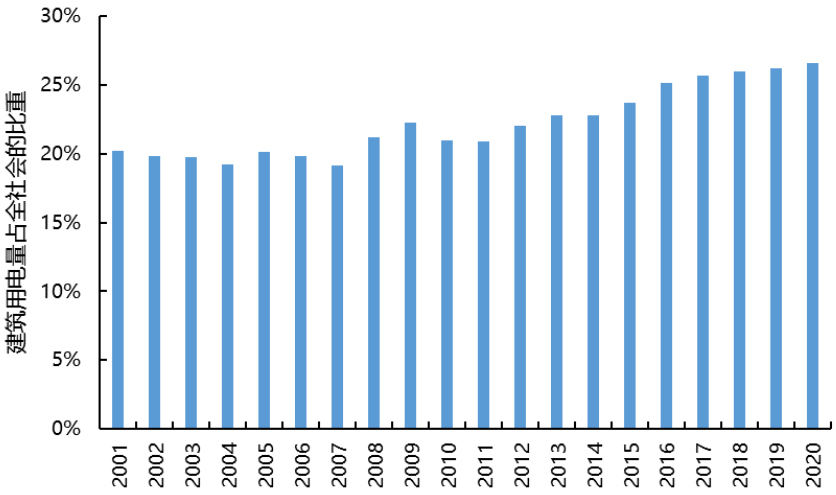


图 1-2　建筑用电量占全社会用电量的比重

而建筑电气化率，即建筑用电量在建筑终端能源消费中的比重也快速提升。在 2001 年到 2020 年间，如图 1-3 所示，建筑电气化率从 19%提升到 58.3%，未来还将提升到 85%以上，潜在的建筑负荷调节能力足以解决高比例可再生能源接入所带来的波动性难题。未来高比例的可再生能源将成为电力供应的主力，由此带来的突出矛盾是可再生能源的发电功率与终端用户用电功率的不同步。按照当前规划的“风光”比例，未来电力紧张的时候，从每天的分布看大概率出现在前半夜，从季节的分布看，大概率出现在冬季，也就是说电力的峰谷将被重新定义。

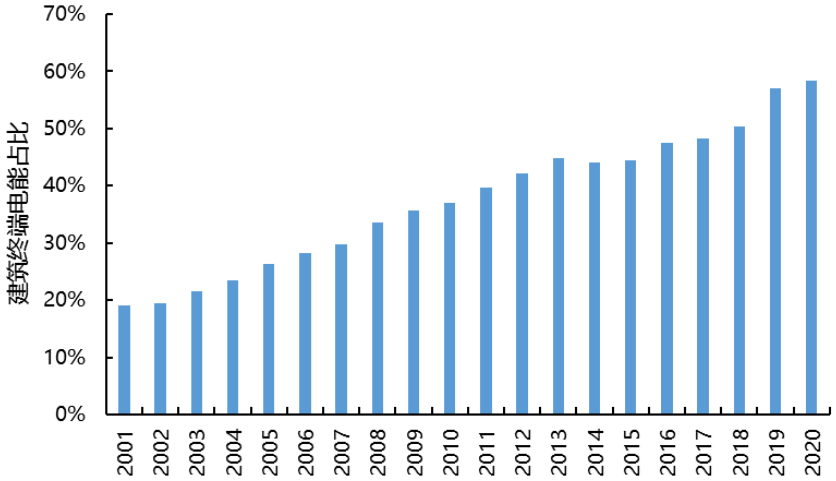


图 1-3　建筑电气化率

（注：按发电煤耗法计算）

1.3 高比例可再生能源电力快速发展

2021 年 3 月 15 日，中央财经委员会第九次会议上提出“要构建清洁低碳安全高效的能源体系，控制化石能源总量，着力提高利用效能，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统”。虽然这是国家层面首次明确新能源在未来电力系统当中的主体地位，强调构建新型电力系统，但早在 2015 年中共中央国务院发布《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（中发〔2015〕9 号），即已开启了深化电力体制改革的进程。过去的传统电网系统急需提高对高比例新能源的消纳能力，增强分布式能源的就地消纳，加强对尖峰用电的大数据预测预警及调配，提高对各类用户多样化、多元化用电需求以及极端天气急促变化的适应性、兼容性和灵活性。

2021 年全国可再生能源装机规模突破 10 亿 kW，风电、光伏发电装机均突破 3 亿 kW，海上风电装机跃居世界第一。全国发电量及发电装机容量组成如图 1-4 所示，截至 2021 年底，我国可再生能源发电量占比 27.7%，发电装机容量占比 43.1%。以风电、光伏发电为主的可再生能源，已经成为全国仅次于煤电的第二大电源。未来随着新型电力系统的加速构建，高比例可再生能源电力系统需要更强的调节能力，而现阶段电力系统调节能力不足已成为制约新能源消纳的重要因素。同时，在新型电力系统中，建筑将从单纯的电力消费者转变为集电力生产、消费、调蓄“三位一体”的综合体，用电行为也将从刚性向参与电力辅助调节、成为柔性负载转变。

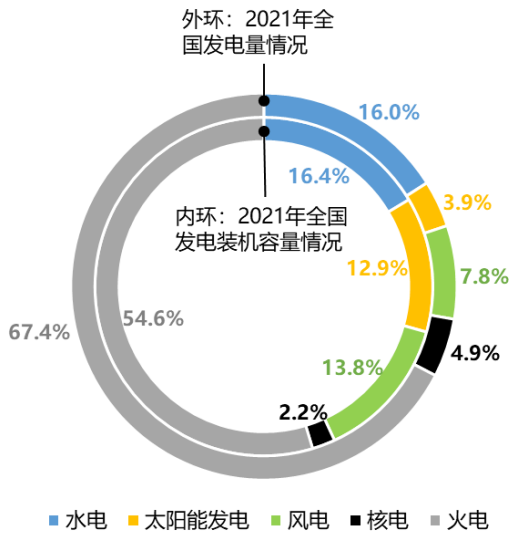


图 1-4　中国发电量及发电装机容量组成（2021 年）

（数据来源：国家能源局）

此外，通过光伏+电动车双向充电桩，在光伏发电富余的时候向电动车充电、光伏不出力且市政电网供电紧张时由电动车向建筑放电，这一模式在清华大学建筑节能楼、深圳建科院未来大厦等开展了大量的双向充放电实验，已经实践验证了可行性。即建筑-电动车-建筑（BVB）技术，实现了建筑用能和交通用能的耦合，电动车只会向建筑反向送电，建筑不会向电网反向送电，从而在根本上解决V2G 的重要瓶颈。如此不仅解决了电动车有序充电问题，也能够对电网起到重要的支撑作用。

2020 年 10 月，国务院办公厅印发《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年）》，提出到 2035 年，纯电动车成为新销售车辆的主流，公共领域用车全面电动化。我国电动车每年的产销量已达百万辆规模以上，电动车实现双向充放电对电网运行将起到巨大的调节作用，然而电动车-电网（V2G）技术由于大量并网点的存在将给电网运行带来巨大的挑战。“光储直柔”建筑即是在可持续发展层面，通过建筑电力交互技术实现电网、建筑、光伏、储能四者动态平衡，实现终端用能电气化、电力供应低碳化、能源利用高效化，推动城市能源生产与消费变革，支撑实现碳达峰、碳中和目标。

1.4 新型电力系统对建筑柔性负荷的需求

如图 1-5 和图 1-6 所示为南方某城市 2019 年全社会用电负荷曲线，可以看出其 95%以上的电力尖峰负荷持续很短，不过 30 余小时。短时尖峰负荷供应短缺是当前我国电力供应安全面临的主要难题，但这并非是电力装机不足导致的，其根源是我国电力系统结构性问题，即基础电源过多、而尖峰资源不足。

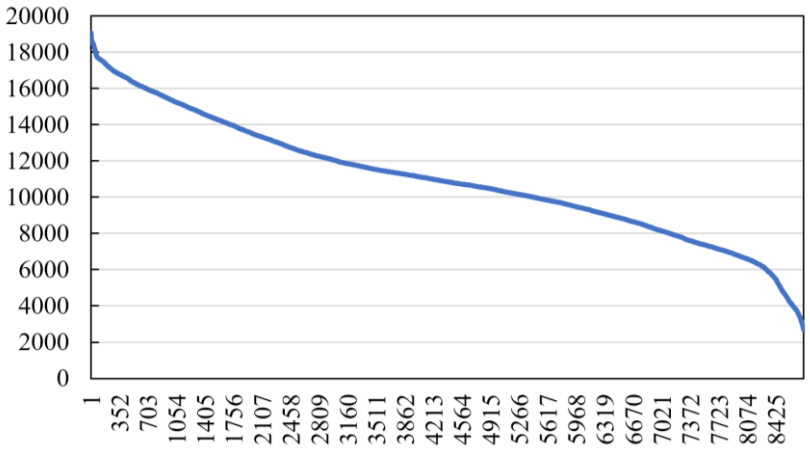


图 1-5　南方某城市电网年持续负荷曲线（小时为横坐标）

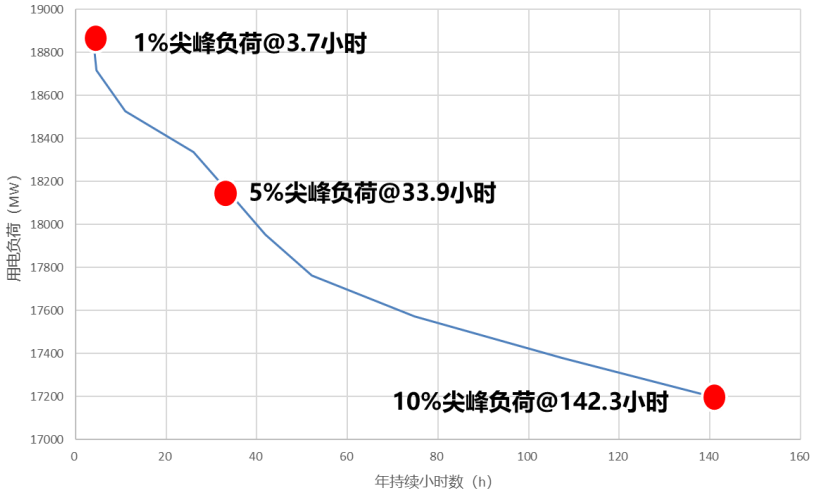


图 1-6　尖峰负荷延时曲线

新型电力系统的特点主要有：新能源发电占比显著增加，源、网、荷高度电力电子化，电网输配电成本上升等。由此带来的电网电力平衡困难、系统安全稳定难度增加、调节成本增加等挑战，需要大力挖掘灵活资源与电网的交互能力。此时加强调峰能力建设，提升系统灵活性是解决新能源发展问题，提高新能源开发和利用效益的关键。欧美很多发达国家的能源转型都是以约 30%的灵活电源作为基础支撑，目前我国灵活性电源的比例仍旧过低。

《国家发展改革委 国家能源局关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》（发改能源规[2021]280 号）提出“通过优化整合本地电源侧、电网侧、负荷侧资源，以先进技术突破和体制机制创新为支撑，探索构建源网荷储高度融合的新型电力系统发展路径。充分发挥负荷侧的调节能力。”这对于负荷侧的建筑来说，当通过优化建筑用能结构、提高建筑终端电气化水平而提升可调

节用电负荷的灵活性时，未来还能够通过“光储直柔”建筑、虚拟电厂等形式聚合的可调节负荷参与电力辅助服务，成为建筑领域碳达峰行动的必然选择。

1.5 建筑领域碳中和路径

根据《中国建筑能耗研究报告（2020）》指出，全国建筑全过程碳排放总量占全国碳排放总量比重超半数，其中建筑材料（钢铁、水泥、铝材等）占比 28%；运行阶段（城镇居建、公共建筑、农村建筑）占比 22%，施工阶段占比 1%。对于运行阶段，如图 1-7，减少建筑直接碳排放是低碳发展的前提，建筑电气化则是其中的重要技术路径；而“光储直柔”新型能源系统是建筑实现自身减排、减少间接碳排放的重要技术，更是与电网互动、解决电力平衡的关键技术。

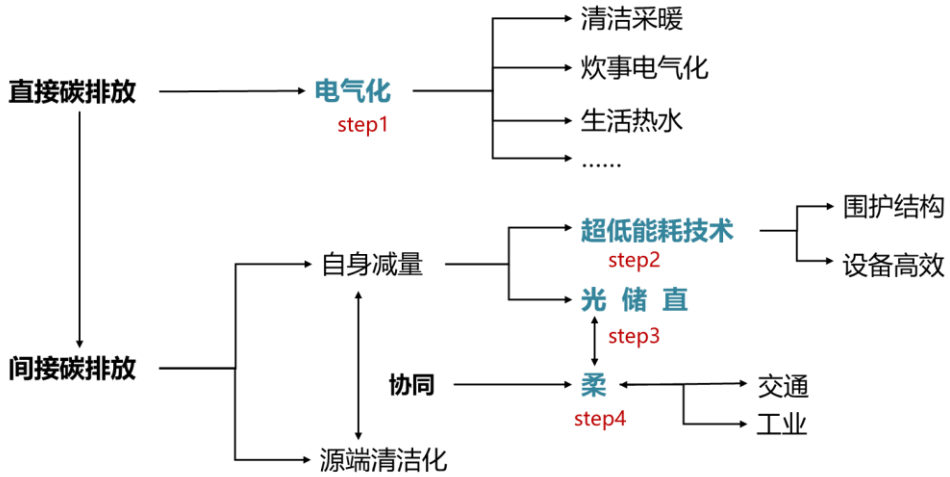


图 1-7　建筑运行阶段低碳减排发展路径

然而，当前电力系统面临负荷连年增长的巨大压力，但尖峰负荷持续时间并不长。尤其是夏季，建筑空调负荷作为夏季电力负荷的重要组成，利用建筑空调负荷的可调节性参与需求响应是当前电力领域和建筑领域都共同关注的焦点，上海、浙江、广东都有开展建筑负荷需求响应的试点示范。随着高比例可再生能源发电的接入，未来电网的挑战是风光电出力与用电负荷的不匹配。建筑节能需要更多地考虑如何更好地适应供给侧可再生能源波动，在城市尺度实现能源的安全可靠供应。实践表明，采用光储直柔技术的建筑，在满足终端用户舒适要求的前提下能够按照高比例风光出力规律用电，如图 1-8 所示。

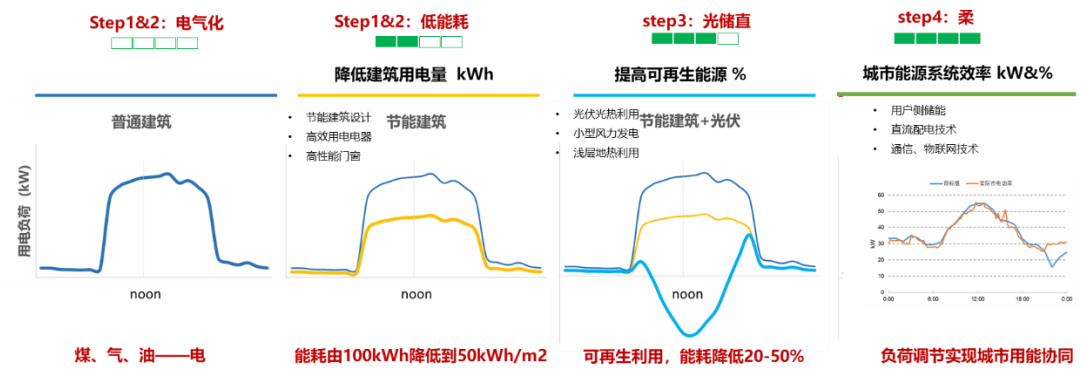


图 1-8　建筑在“双碳”目标下的技术路线图

由此，建筑部门未来的低碳转型途径为：①推动建筑用能的全面电气化，大力发展“光储直柔”的新型建筑配电系统，实现建筑部门的柔性用电；②在农村建立以屋顶光伏为基础的新型能源系统，全面实现农村用能电气化。充分开发农村生物质，实现生物质能源的商品化，成为全社会主要的零碳燃料供应；③引导鼓励中国居民坚持绿色节约的传统建筑使用模式；④建筑与电网协同，增加可再生能源供给、降低综合成本。站在全社会实现碳中和视角看，建筑零碳化将与电力零碳化携手同步实现。

2 中国建筑规模与负荷特征

2.1 中国建筑规模

2.1.1 总建筑面积

随着新型城镇化和城乡融合发展工作推进，截至 2021 年末我国常住人口城镇化率达到 64.72%，较 2010 年提高了 14.77 个百分点，见图 2-1。快速城镇化带动建筑业持续发展，我国建筑业规模不断扩大，城乡建筑面积大幅增加。2020 年我国建筑面积总量约 660 亿 m²，其中：城镇住宅建筑面积为 292 亿 m²，农村住宅建筑面积 227 亿 m²，公共建筑面积 140 亿 m²，如图 2-2 所示。

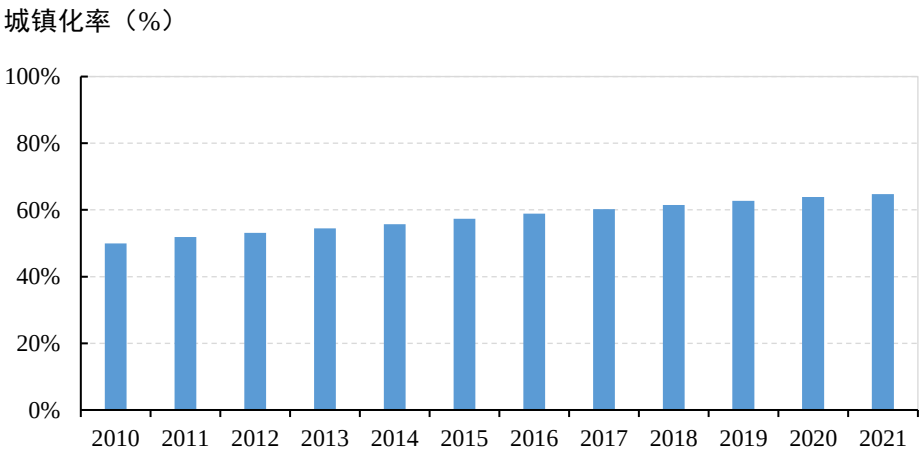


图 2-1　中国常住人口城镇化率（2010-2021 年）

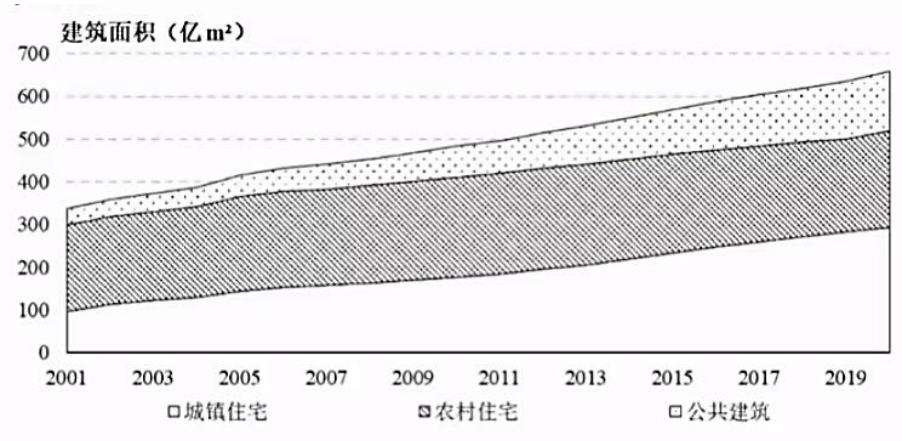


图 2-2　中国总建筑面积增长趋势（2001-2020 年）[5]

目前公共建筑中，办公建筑和商场建筑为主要类型，分别占比 34%和 23%；其次为学校建筑，占比 16%；医院和酒店建筑占比较小，分别为 5%和 4%。

2.1.2 人均建筑面积

2020 年我国建筑人均建筑面积为 36.8m²/人，其中城镇人均住宅面积为 32.4m²/人，农村人均住宅面积为 44.6 m²/人。对比我国与世界其他国家及地区的人均建筑面积水平，可以发现我国的人均住宅面积已经接近发达国家水平。

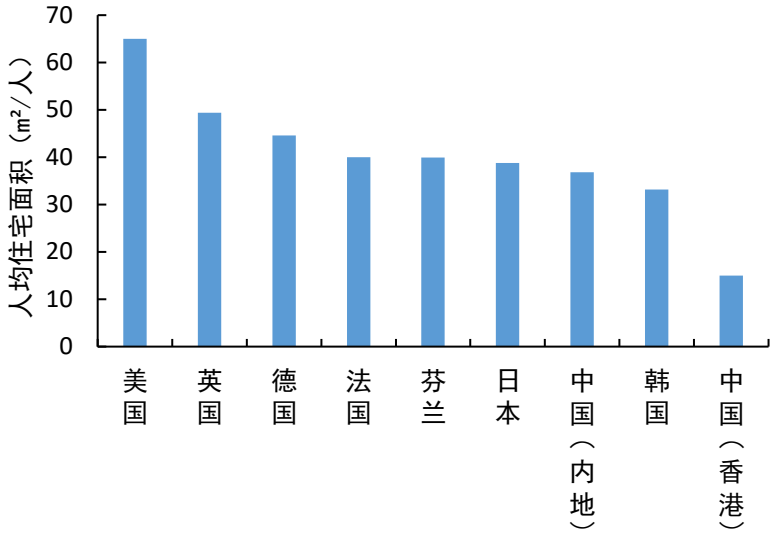


图 2-3　人均住宅建筑面积

但人均公共建筑面积与一些发达国家相比还相对处在低位，仅 9.9 m²/人。美国、荷兰、丹麦、芬兰、德国、加拿大几个国家的人均建筑面积最大，约大于 20m²/人，瑞士、新西兰、瑞典几个国家的人均公共建筑面积处于第二梯队，约为 15~20m²/人；日本、法国、英国、西班牙的人均公共建筑面积与我国水平相当，处于 5~15m²/人。目前我国的办公类和商场类公共建筑人均面积已基本达到发达国家水平，数据与法国、西班牙、英国等国家处于同一量级。酒店类建筑的人均面积仍显著低于发达国家水平，约为美国的五分之一。学校类、医院类公共建筑人均面积与部分发到国家的水平接近，但与国际上人均面积最大的国家仍有 4~5 倍的差距，学校教育建筑和医疗卫生建筑将是今后公共建筑发展的重点。

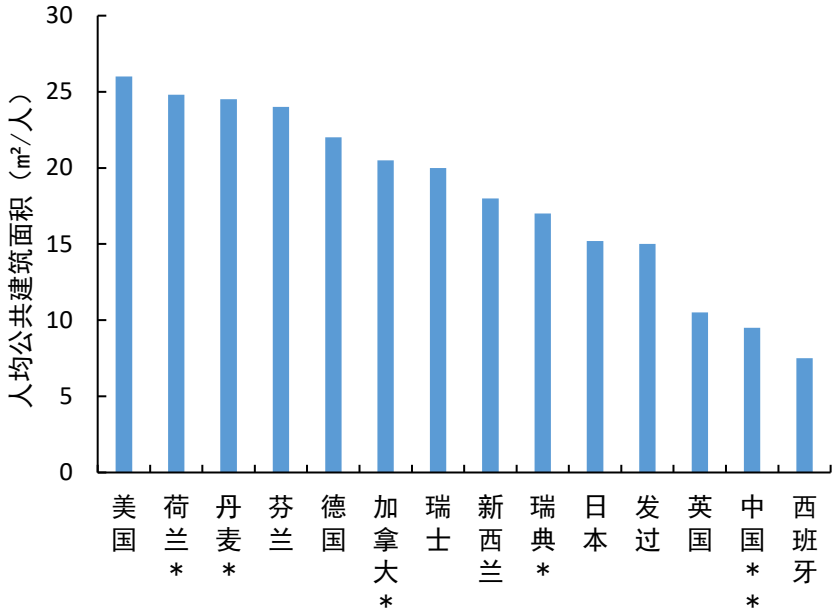


图 2-4　各国人均公共建筑面积（2019）[5]

（注：图中*为 2018 年数据，**为 2020 年数据）

2.2 建筑负荷特征

从建筑面积上来看，城镇住宅和农村住宅的面积最大，占建筑面积总量的 78.6%，公共建筑面积仅占建筑面积总量的五分之一。但从建筑用电量来看，2020 年中国建筑运行用电量 20000 亿 kWh[5]，其中公共建筑用电量最大，占建筑用电总量的 50%，城镇住宅和农村住宅用电量分别占建筑用电总量的 28.5%和 17.2%。本节将从城镇住宅、公共建筑两个方面分别介绍建筑负荷特征。

2.2.1 住宅建筑

从用能分项来看，炊事、家电和照明是中国城镇住宅除北方集中供暖外耗能比例最大的三个分项，如图 2-5 所示，其中家电和照明是城镇住宅中电气化率最高的用能分项。生活热水、炊事还有一部分采用非电能源供应，随着生活热水电能替代、炊事电能替代等技术的推广应用，住宅中非电能源供应占比将逐渐下降。而其他家电设备如空调、照明、多媒体、洗衣机等本身就使用电能，它们的数量增长和使用强度增加促进了建筑电气化率的提升。

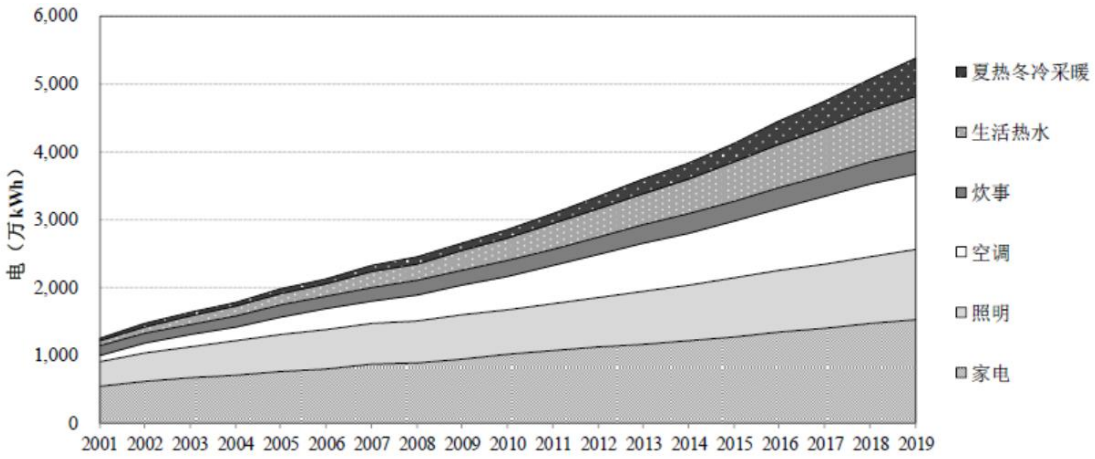


图 2-5　中国城镇住宅总用电量[6]

从不同季节典型工作日来看，如图 2-6 所示，住宅建筑用电负荷率为 25%~80%，夏季和冬季典型工作日用电负荷高峰均出现在夜晚，夏季午间则出现另一个用电小高峰，以空调、风扇等制冷用电电器为主。

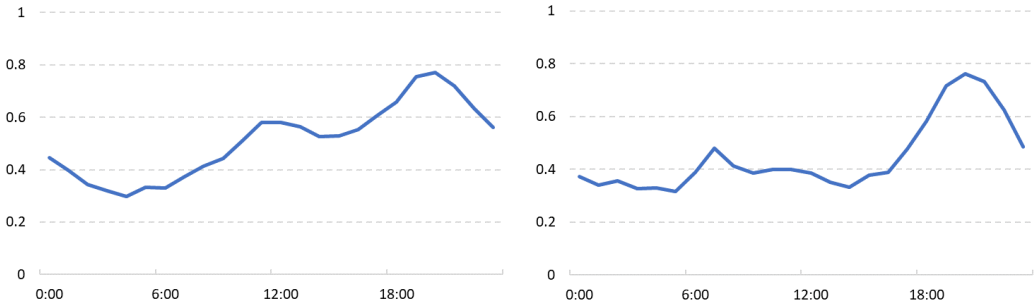


图 2-6　夏季（左）和冬季（右）典型工作日负荷示意图

从全年用电负荷来看，南方地区住宅建筑单位面积逐时用电负荷呈现夏季和冬季“双高峰”特征，如图 2-7 所示。这是由于我国大部分地区夏季均有制冷需求，且夏季空调季时单位面积用电负荷最高为过渡季时单位面积用电负荷的 5~6 倍；而冬季高峰主要为夏热冬冷地区、部分夏热冬暖地区冬季采暖用电。而北方地区由于集中供暖不存在冬季用电高峰，居住建筑单位面积用电负荷主要以夏季用电高峰为主。如图 2-8 所示为北京某高校宿舍全年逐时用电负荷示意图，即使高校有寒暑假用电低谷，仍可从图中看出明显的夏季高峰特征。

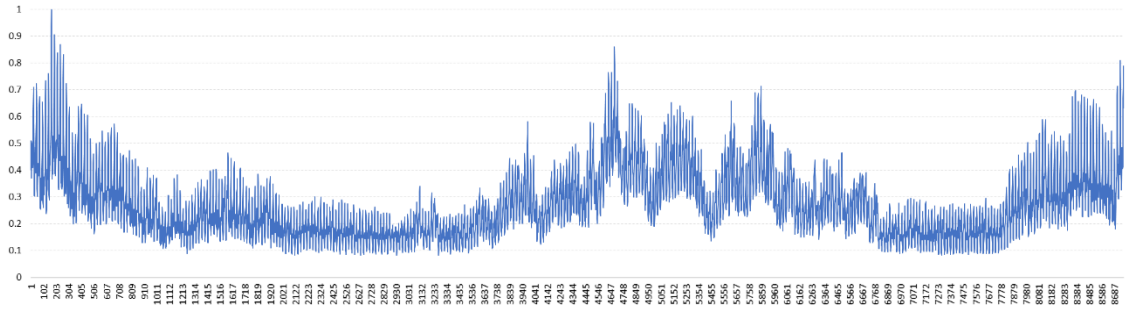


图 2-7　南方地区住宅建筑全年单位面积逐时负荷示意图

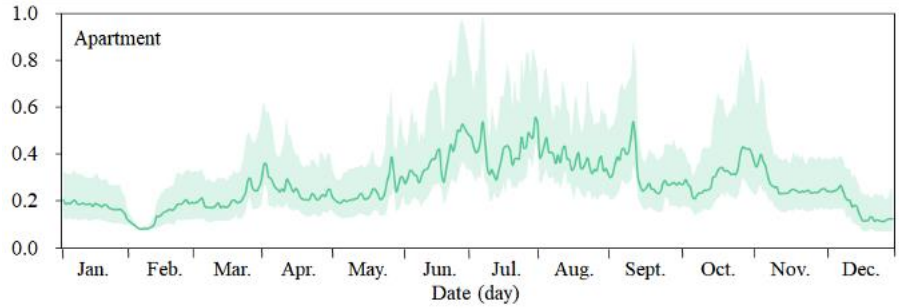


图 2-8　北方地区居住建筑全年单位面积逐时负荷示意图[7]

2.2.2 公共建筑

不同类型公共建筑夏季和冬季典型日负荷示意如图2-9所示，以商业办公建、宾馆饭店、大型超市等建筑为例，夏季用电负荷均高于冬季用电负荷。其中商业办公建筑工作日负荷高于休息日负荷，宾馆饭店和大型超市建筑在相同季节的工作日和休息日用电负荷差异不大，且休息日用电负荷略高于工作日，这与建筑功能及运行时间相关。从用电负荷峰谷比来看，商业办公、大型超市建筑用电负荷峰值最高为谷值的 5 倍左右，宾馆饭店建筑用电负荷峰值与谷值比为 2 倍左右。

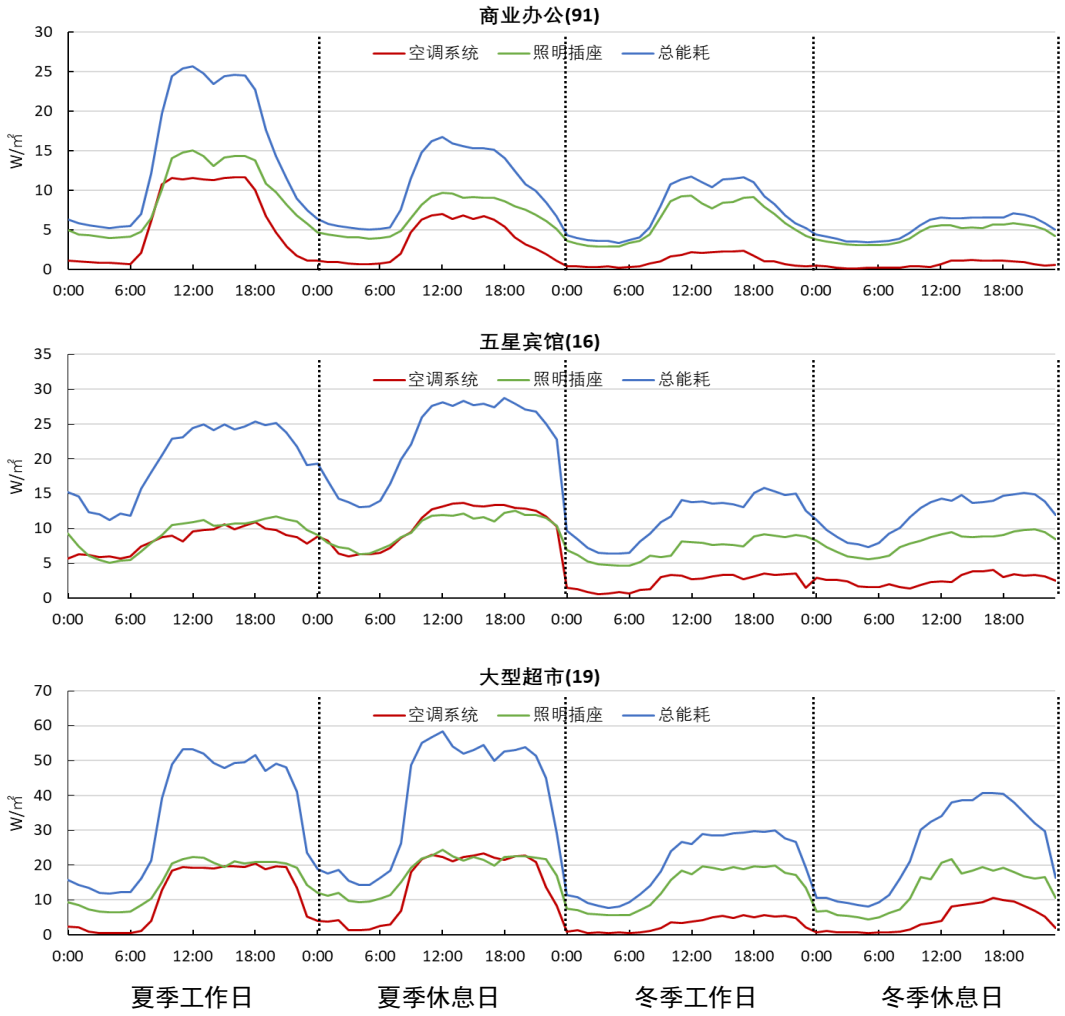


图 2-9　不同类型公建夏季和冬季典型日负荷示意图

从全年用电负荷来看，公共建筑单位面积逐时用电负荷呈现夏季高峰特征，如图 2-10 所示。这是由于我国大部分地区夏季均有制冷需求，且夏季空调季时单位面积用电负荷最高为过渡季时单位面积用电负荷的 2 倍左右。

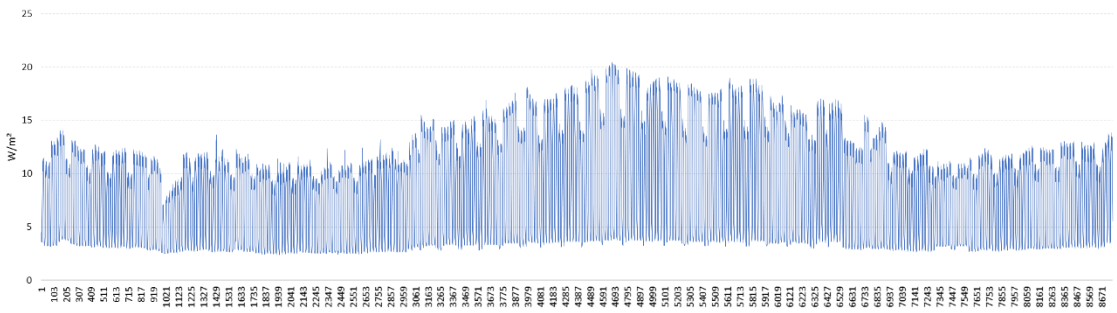


图 2-10　公共建筑全年单位面积用电负荷示意图

我国公共建筑中以办公建筑和商场建筑为主要类型，占比分别分 34%和 23%。以办公建筑为例，从不同气候区来看夏季、冬季典型工作日单位面积用电负荷示意如图 2-11 和图 2-12 所示。以北京、上海、深圳分别代表寒冷地区、夏热冬冷

地区、夏热冬暖地区，夏季办公建筑典型工作日单位面积用电负荷峰谷比均为 5 倍左右，其中上海和深圳在 10:00~13:00 和 19:00~23:00 时段用电负荷高于北京；而三个代表城市的冬季典型工作日单位面积用电负荷规律基本一致，但由于北京和上海冬季有采暖需求，分别为市政热力+空调系统和地源热泵+空调系统的形式，工作时间段的用电负荷均高于深圳地区，且用电负荷提升较深圳更早。

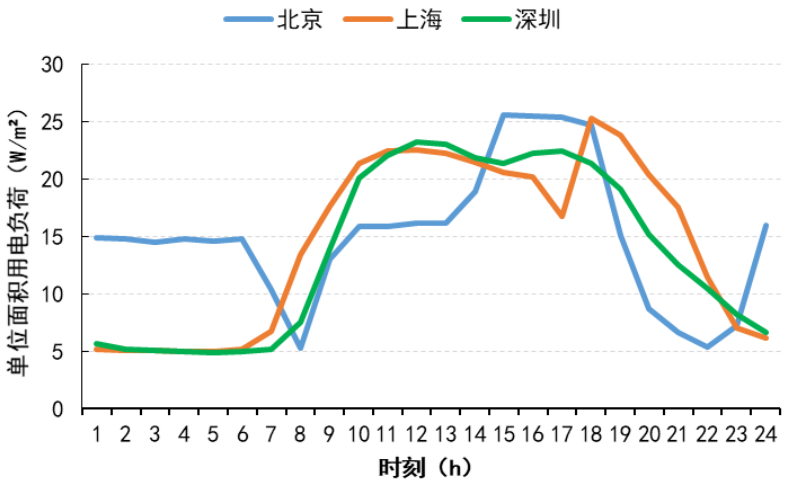


图 2-11　办公建筑夏季典型工作日单位面积用电负荷示意图

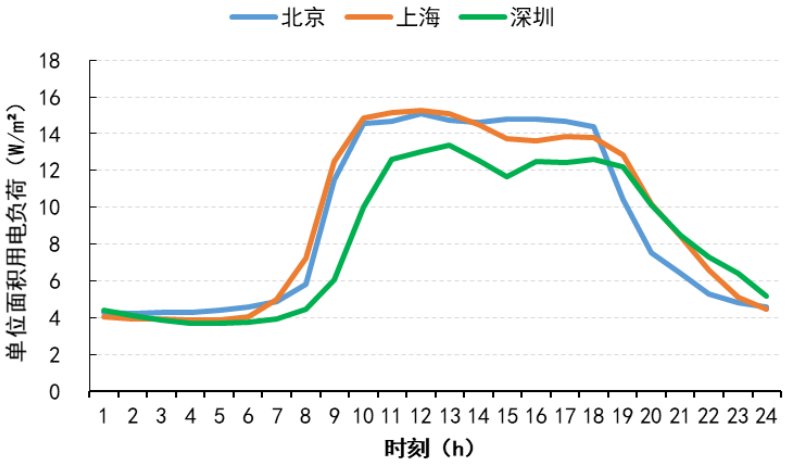


图 2-12　办公建筑冬季典型工作日单位面积用电负荷示意图

2.3 小结

从建筑规模看，2020 年我国建筑面积总量约 660 亿 m²，未来随着新型城镇化和城乡融合发展工作推进，居民对更多建筑和建筑面积的需求也将持续增长。

从负荷特征看，对于住宅建筑，用电分项中占比前三的分别为家电、照明、

空调，且夏季和冬季典型工作日用电负荷高峰均出现在夜晚，夏季午间则出现另一个用电小高峰，以空调、风扇等制冷用电电器为主。同时，住宅建筑单位面积逐时用电负荷呈现夏季和冬季“双高峰”特征。

对于公共建筑，不同类型公共建筑用电负荷与建筑功能及运行时间相关。对比住宅建筑来看，我国公共建筑单位面积用电负荷高于住宅建筑，且呈现夏季高峰特征。此外，寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区等不同气候区的办公建筑夏季典型工作日单位面积用电负荷峰谷比差异不大，均为 5 倍左右，而冬季典型工作日单位面积用电负荷规律和大小也基本一致。

3 光储直柔技术趋势

“光储直柔”建筑集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体，是配置建筑光伏和建筑储能，采用直流配电系统，且用电设备具备功率主动响应功能的新型建筑能源系统。本章将从建筑光伏、建筑储能、直流配电、柔性用电等四个方面介绍光储直柔技术现状与趋势。

3.1 建筑光伏

3.1.1 应用现状

据国家能源局统计，2021 年光伏新增并网装机约 5300 万 kW，其中分布式光伏约 2900 万 kW，占当年新增光伏发电装机比例首次突破 50%（转折点），如图 3-1 所示。而户用光伏新增装机容量约为 2160 万 kW，占分布式光伏装机容量的 74%（分布式主战场在农村），如图 3-2 所示。

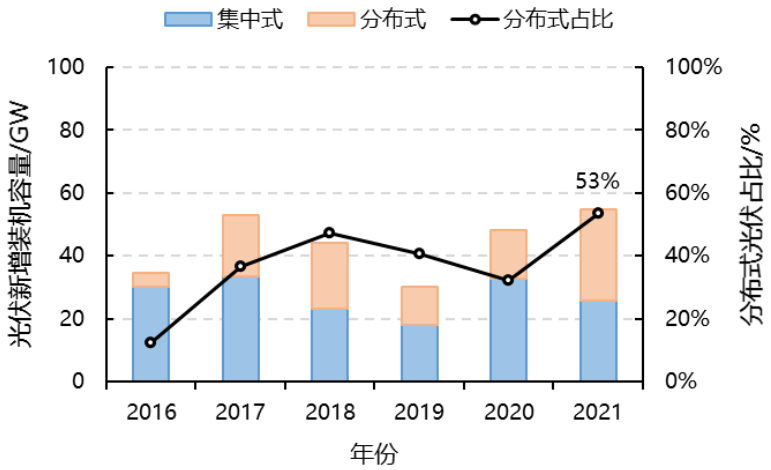


图 3-1　不同系统形式光伏新增并网装机容量

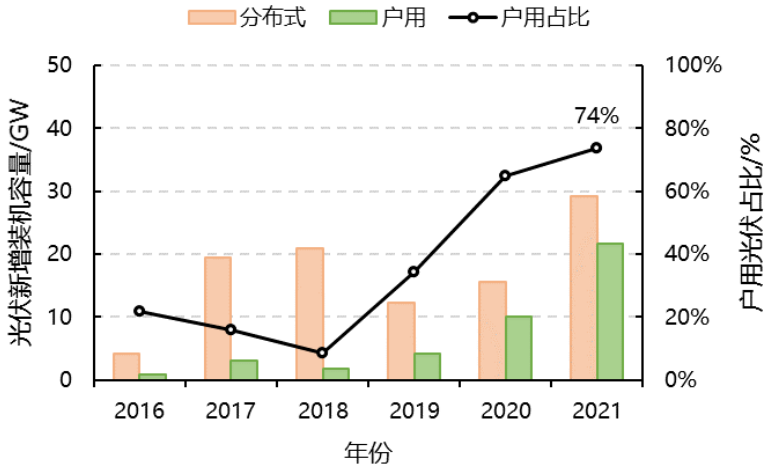


图 3-2　2016~2021 年分布式光伏新增装机容量构成

3.1.2 建筑光伏应用形式

光伏组件与建筑有多种结合方式，如光伏屋顶、光伏立面和光伏构件等，如图 3-3。但是不论哪种形式都必须考虑不同立面朝向、立面倾角、日照时间、太阳辐射量等根本性影响因素。

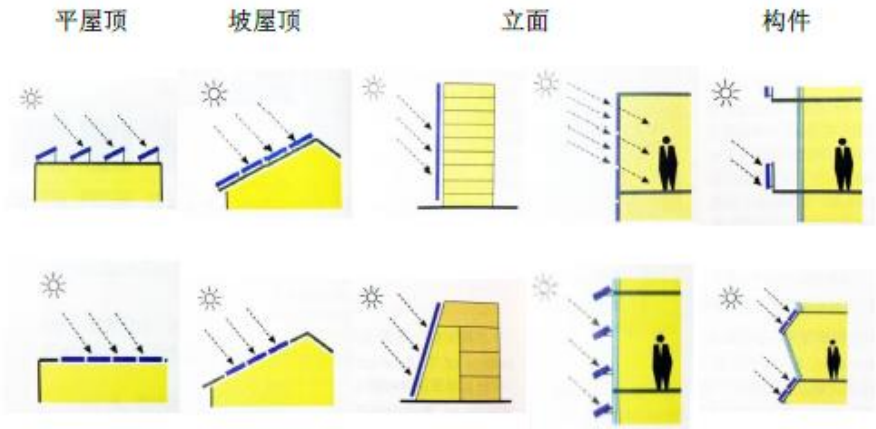


图 3-3　光伏组件与建筑结合的方式

建筑屋顶用于光伏发电的优势尤为明显。首先，屋顶是建筑外表面中接受太阳辐射最多的地方。其次，屋顶是建筑外表面中闲置面积最大、最完整的地方。再次，屋顶安装光伏系统不影响建筑美观。最后，光伏屋顶技术成熟，安装维修方便。采用建筑屋顶光伏系统，不仅可以产生大量的电力供给建筑使用，而且减少了太阳直射辐射得热，因此可以减少顶层空调能耗，还起到建筑节能的作用。

光伏系统还可以安装在建筑立面，形成光伏墙体系统，类似于屋顶光伏系统，

光伏墙体系统也可以减少墙体的太阳辐射得热，从而减少建筑空调能耗。研究表明，在香港地区相比于普通南向墙体，光伏墙体夏季可以减少 51%的热量，在冬季的白天和晚上分别可以减少 69%和 32%通过墙体的热量。另外，如果将光伏组件与墙体之间通道内的热量收集起来，还可以作为热源直接或间接的供建筑使用，进一步起到建筑节能的作用。

在光伏建筑一体化中，为了让光伏组件与建筑更加协调美观，彩色组件应运而生。种类繁多的彩色组件类型，不仅可以满足建筑美观需求，还可以根据需求定制，从而增强与建筑的协调性，满足建筑美观时尚的目的，如图 3-4（左）。虽然彩色光伏组件会对发电效率产生负面影响，但是对于建筑一体化光伏系统来说，除了发电效率之外，更应该考虑其他方面的评价指标。对于建筑一体化光伏系统，按照重要性排序应该是先确保系统安全性、再尽可能追求美观性和建筑的协调性、最后再兼顾发电效率提升，这是建筑一体化光伏系统与传统光伏系统的一个重要区别所在。

虽然光伏组件以最佳倾斜角安装时单位功率的发电量最高，然而以最佳倾斜角安装也会对后排光伏组件造成阴影遮挡。考虑到组件间距，以最佳倾斜安装时单位屋顶面积发电量比水平安装光伏组件时的单位屋顶面积发电量低。因此，采用最佳倾斜角安装光伏组件和采用水平安装光伏组件可以产生不同的经济效益。当屋顶面积比较紧缺、并且对初投资不敏感，但是对光伏发电量占比有要求时，可以采用水平安装光伏组件，最大化利用占地面积，从而实现单位占地面积光伏发电量最大；而当屋顶面积充裕并且对投资性价比要求高时，可以采用最佳倾斜角安装光伏组件，虽然单位屋顶面积光伏发电量较低，但是单位面积光伏组件的发电量相比其他安装方式要高，投资收益最大。

现代建筑中，玻璃幕墙由于其美观性而被大量使用，然而玻璃幕墙隔热性能较差，容易造成较高的建筑能耗。而通过将光伏电池与幕墙系统相结合，形成半透明光伏幕墙，如图 3-4（右），则不仅可以产生电力供给建筑使用，而且可以减少进入室内的太阳辐射并控制室内眩光，从而具有良好的节能性能，受到了研究人员的广泛关注。

图 3-4　彩色光伏组件（左）与半透明光伏幕墙（右）

此外，光伏组件还可以与各种建筑构件相结合，比如与遮阳系统结合形成光伏遮阳系统。虽然天然采光是建筑必不可少的一部分，然而天然采光并不是越多越好，当太阳辐射太强时，建筑中需要采用遮阳系统，而光伏遮阳系统将遮挡的这部分太阳辐射利用起来，通过光伏作用转变成电力，具有良好的节能效果。太阳能光伏技术还可以与传统瓦片结合，形成光伏瓦。光伏瓦不仅比传统瓦片更加美观，而且还能够源源不断地提供清洁的电能。将太阳能光伏技术与车棚结合，还可以形成光伏车棚，如图 3-5。

图 3-5　光伏遮阳与光伏车棚

3.1.3 光伏电池技术趋势

光伏建筑电池技术大概划分为 3 个发展阶段：

（1）第一代光伏电池

以单晶硅和多晶硅为主导，该类型光伏电池是现如今 BAPV 市场上最常见的一种，并且已经得到了广泛的应用，各项技术比较成熟，性能也很稳定。

由于多晶硅的光电转换效率要略优于单晶硅，多晶硅太阳能光伏电池是快速增长的光伏市场中最常见的太阳能电池类型。市场上生产的多晶硅绝大多数被用

于光伏产业，差不多每 MW 的装机量需消耗 5t 左右的多晶硅原料。

（2）第二代光伏电池

材料常见有碲化镉（CdTe）/硫化镉（CdS）以及铜铟镓硒（CIGS）。这些材料与第一代光伏电池相比，能够吸收更广的太阳光频谱范围。（CdTe）光伏太阳能电池是继多晶硅之后世界市场上第二丰富的太阳能光伏技术，并且 CdTe 薄膜光伏太阳能电池可以快速制造，为传统硅基光伏技术提供了一种低成本的替代方案。铜铟镓硒（CIGS）太阳能电池具有弹性好、抗太阳辐射强度高、比功率高等优点，应用也越来越广泛。

铜铟镓硒（CIGS）光伏太阳能电池在其 1.5 eV 的带隙处具有非常高的吸收系数，因此，对太阳光谱的吸收非常强。铜铟镓硒（CIGS）电池的光电转换效率是目前所有应用的薄膜电池中最高的，在玻璃基板上接近 20 %。根据这些特点铜铟镓硒（CIGS）光伏电池可以用于柔性光伏模块场景，暂时无法被替代。

（3）第三代光伏电池

目前，理论研究中有硫化铜锌锡光伏电池（CZTS）、染料敏化光伏电池、有机光伏电池、钙钛矿光伏电池、聚合物光伏电池以及量子点光伏电池。硫化铜锌锡属于四元半导体化合物，与铜铟镓硒（CIGS）有着类似的光学和电学性质，所以该材料非常适合做薄膜光伏电池的吸收层。但是与铜铟镓硒（CIGS）所不同的是该材料成本要低得多，并且储量相对丰富，对环境较友好。

钙钛矿电池被业界普遍认为是代替传统硅电池的最理想材料。该类型电池不仅制造简单，生产成本低廉并且光电转换效率已从 2009 年的 3.8%提升到了现如今的 25.7%，仅次于单晶硅电池的 26.7%，是迄今为止发展最快的太阳能电池技术。其最主要的优势是成本不到硅太阳电池的一半。由于可以采用刮涂、卷对卷等大面积制备工艺，提高单块组件面积可以提高生产效率，从而进一步降低单位产能投资，降低生产成本。

而全钙钛矿叠层太阳电池在过去的四年里取得快速进展，效率已超过单结电池，其效率进展如图 3-6 所示。

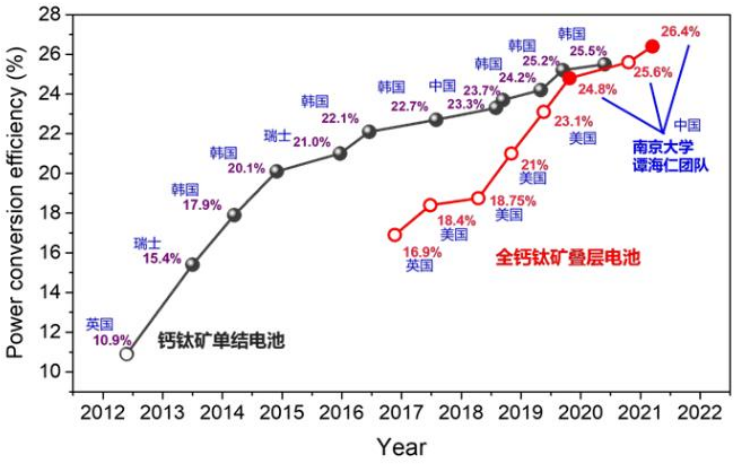


图 3-6　钙钛矿电池效率进展图[8]

3.1.4 光伏组件成本与效率

根据中国光伏行业协会数据显示，2021 年光伏组件价格为 1.9 元/W，分布式光伏系统初始投资成本为 3.74 元/W，2022 年预计下降至 3.53 元/W [9]。分布式光伏系统初始投资成本包括组件、逆变器、支架、电缆、建安费用、电网接入、屋顶租赁、屋顶加固以及一次设备、二次设备等，2021 年~2030 年光伏系统初始投资变化趋势如图 3-8 所示。

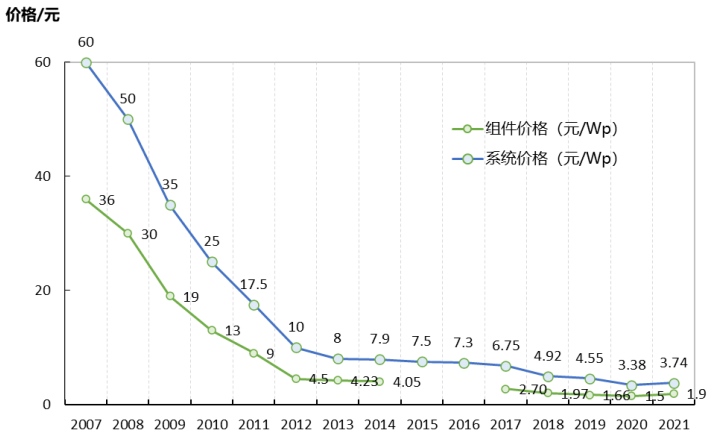


图 3-7　光伏组件及系统初始投资成本

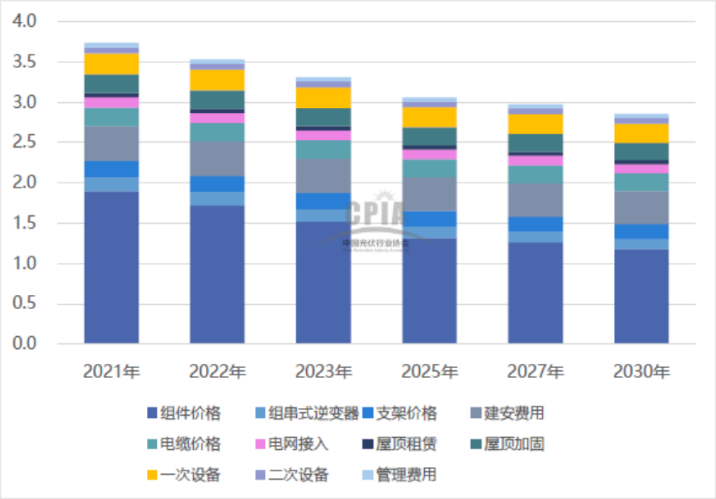


图 3-8　分布式光伏系统初始投资成本变化趋势（元/W）

从发电效率来看，近十几年来太阳能光伏电池技术有了快速的迭代与进步。如图 3-9 所示为美国国家可再生能源实验室（NREL）更新发布的光伏组件光电转化效率曲线图（Best Research-Cell Efficiency Chart），在实验室条件下最高的转化效率已达到 47.1%，当前量产晶体硅组件的效率也很容易达到 22%以上，且单位容量的成本下降到过去的 1/10。

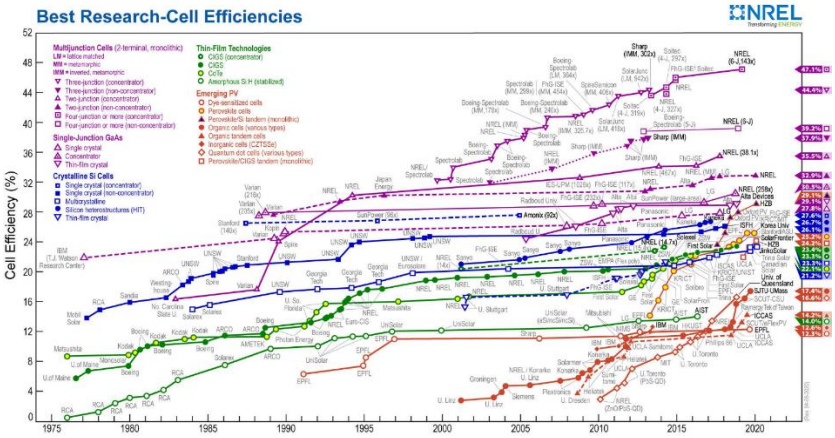


图 3-9　光伏电池效率变化趋势[10]

根据中国光伏行业协会统计数据，2021 年规模化生产的 p 型单晶电池均采用 PERC 技术，平均转换效率达到 23.1%；采用 PERC 技术的多晶黑硅电池片转换效率达到 21.0%；常规多晶黑硅电池效率提升动力不强，2021 年转换效率约 19.5%，未来效率提升空间有限；铸锭单晶 PERC 电池平均转换效率为 22.4%，n 型 TOPCon 电池平均转换效率达到 24%，异质结电池平均转换效率达到 24.2%，IBC 电池平均转换效率达到 24.1%，如表 3-1 所示。今后随着技术发展，TBC、HBC 等电池技术也可能会不断取得进步。未来随着在生产成本的降低及良率的

提升，n 型电池将会是电池技术的主要发展方向之一[9]。

表 3-1　2021-2030 年不同类型组件功率变化趋势

晶硅电池 72 片半片组件平均功率（W）		2021 年	2022 年	2023 年	2025 年	2027 年	2030 年
多晶	BSF 多晶黑硅组件（157mm）	345	345	350	-	-	-
	PERC p 型多晶黑硅组件	420	425	425	430	435	440
	PERC p 型铸锭单晶组件	450	450	455	460	465	470
p 型单晶	PERC p 型单晶组件	455	460	460	465	470	475
	PERC p 型单晶组件（182mm）	545	550	555	560	565	570
	PERC p 型单晶组件（210mm）（55 片）	550	555	560	565	570	575
	PERC p 型单晶组件（210mm）（66 片）	660	665	670	675	680	685
n 型单晶	TOPCon 单晶组件	465	470	475	485	490	495
	TOPCon 单晶组件(182mm)	570	575	580	590	600	610
	异质结组件	470	475	480	490	500	510
	IBC 组件（158.75mm）	355	360	365	375	380	385
MWT 封装	MWT 单晶组件(72 片)	465	470	488	505	513	520
	MWT 单晶组件(94.5 片)	575	580	590	595	600	605
叠瓦	TOPCon 单晶组件（210mm）	645	650	655	660	665	670

综上，经过十几年的发展，光伏产业已成为我国少有的形成国际竞争优势、实现端到端自主可控、并有望率先成为高质量发展典范的战略性新兴产业，也是推动我国能源变革的重要引擎。光伏建筑应用已具备良好的技术经济性优势。

3.2 建筑储能

建筑可以根据自身能源系统特点和能耗情况来配置储能装置，并控制其运行，实现用电柔性。本节的建筑储能主要是指电力储能装置，优先采用电化学储能。从技术发展和规模推广的角度，电动车也是重要的建筑储能方式。

3.2.1 发展现状

2017 年我国出台了第一个储能产业指导性政策《关于促进我国储能技术与产业发展的指导意见》，对我国储能产业发展进行了明确部署，各地政府机构和电网公司也开始积极探索分布式储能产业发展路径。2021 年由于“双碳”战略的推动，国家及地方政府密集出台了 300 多项与储能相关的政策，储能也受到了前

所未有的关注。2021 年 7 月，国家发展改革委和国家能源局发布了《关于加快推动新型储能发展的指导意见》，国家主管部门第一次明确新型储能的发展目标：到 2025 年新型储能装机规模达到 3000 万 kW 以上，由此将以电化学为代表的新型储能推向了快速发展的新赛道。

根据《储能产业研究白皮书 2022》统计结果显示，2021 年国内规划、在建新型储能项目规模 23.8GW/47.8GWh，新增投运新型储能项目装机规模 2.4GW/4.9GWh。截至 2021 年底，中国已投运电力储能项目累计装机规模 46.1GW，占全球市场总规模的 22%。其中，2021 年新型储能新增规模首次突破 2GW。新型储能中，锂离子电池和压缩空气均有百兆瓦级项目并网运行，以锂离子电池为主，累计装机规模占新型储能的比例近 90%（如图 3-10 所示）。

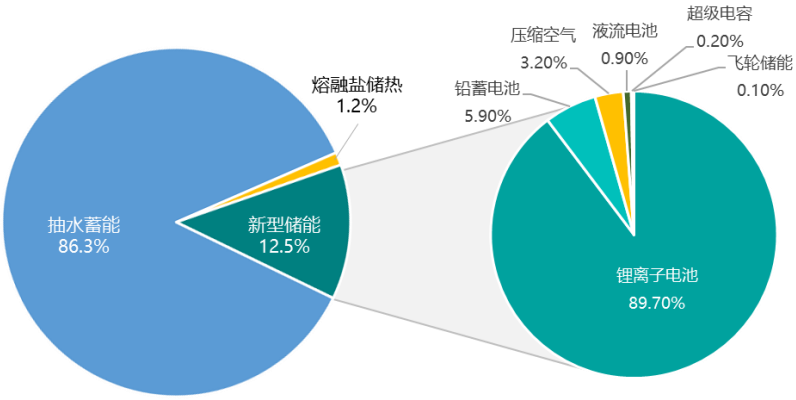
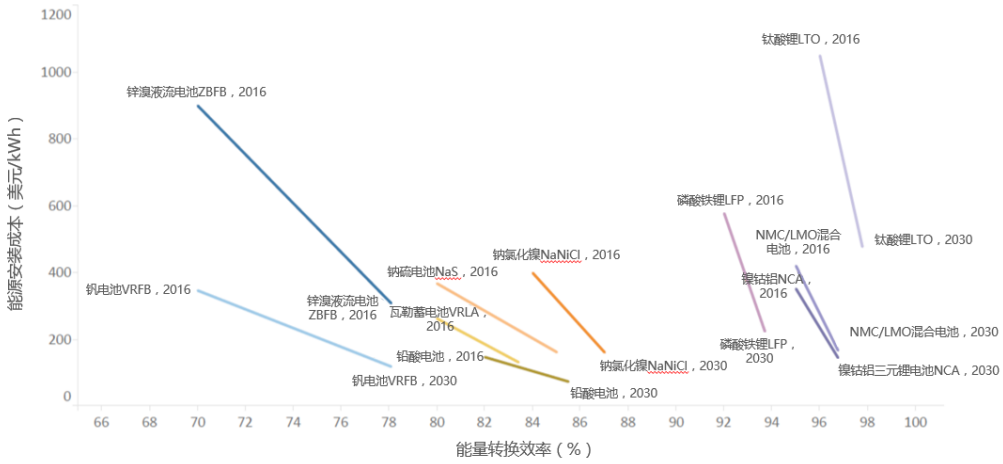


图 3-10　中国电力储能市场累计装机规模（2000-2021）

“碳达峰、碳中和”的目标下，风电、光伏发电将快速发展，而储能是解决风电、光伏发电不稳定性、间歇性，增强能源系统供应安全性、灵活性的重要手段之一。电化学储能电池包括锂离子电池、铅酸电池、镍镉电池等，可根据使用目的不同进行选择。在未来高比例可再生能源接入背景下，考虑不同材料的电池成本与转换效率发展趋势（如图 3-11 所示），储能将逐渐成用能系统的刚需。



数据来源：IRENA，Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030

图 3-11　不同材料的电池成本与转换效率发展趋势[11]

3.2.2 建筑储能技术

蓄电池可以将电网和分布式光伏的富余电能储存并在必要时释放，有效解决可再生电力供给和建筑用电需求在时间上的不匹配问题。同时，蓄电池还具有响应速度快、效率高及对安装维护的要求低等优势，因此受到建筑用户的欢迎。从电池产业的终端需求看，蓄电池作为备用电源和移动电源的应用较多，用于削峰填谷的储能电池在城市电网中有应用，而专门应用于建筑削峰填谷的储能电池还比较少。建筑场景对储能电池在布置和消防方面有特殊要求，与其他用户的储能技术不尽相同，因此建筑储能电池技术还处于初级发展阶段。

常见储能形式根据原理可以分为电化学储能、电磁储能、机械储能、热储能等多种形式，如表 3-2 所示。从建筑电气化趋势和储能技术成熟度来看，建筑储能更适宜采用电化学能储能。

表 3-2　常见储能形式

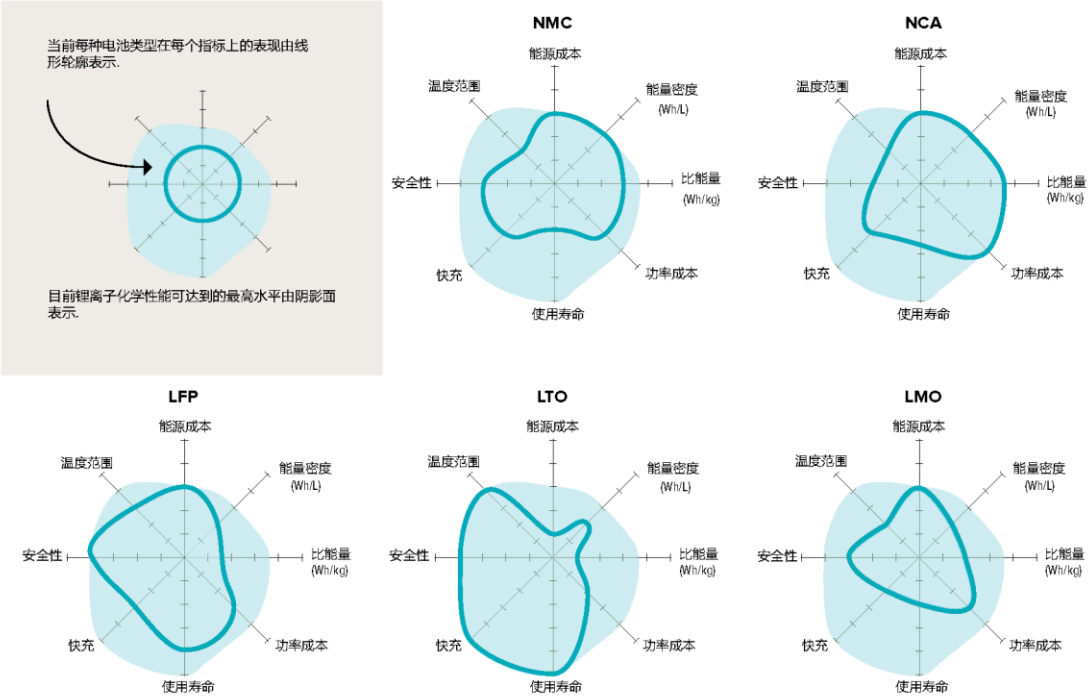
储能技术	分类	优点	缺点
电化学能	锂离子电池	能量效率高、使用寿命长、充放电倍率高	成本略高
	铅酸/铅碳电池	应用最早、技术最成熟、成本低廉	能量密度低、循环寿命略低

储能技术	分类	优点	缺点
	全钒液流电池	能量效率高、使用寿命长、电化学极化小	投资成本高、占地面积大
机械能	抽水蓄能	成熟、容量规模大	受地理因素制约、基础投资大
	压缩空气	能量密度大	受地理因素制约
	飞轮储能	使用寿命长、瞬时功率大、响应速度快	试验阶段、造价成本高、噪声大
电磁能	超级电容储能	功率密度高、循环寿命长	试验阶段
	超导储能	功率密度高、循环寿命长、响应速度快	试验阶段、技术不成熟

目前，可能应用于建筑的电化学储能主要有锂电池、铅酸电池、锌溴液流电池、镍镉电池、钠离子电池等。其中铅酸电池在过去几十年中应用广泛，但由于其放电深度受到限制且存在环境污染等问题，锂离子电池得益于近些年的技术发展和成本降低，钠离子电池材料具备显著成本优势，更具发展潜力。

（1）混合光伏电池蓄能技术

建筑储能最基本的功能，是通过调整充放电功率改变直流配电系统的负荷特性，达到光伏消纳、平抑负荷波动和电力交互等目的，是建筑整体用电柔性调节的重要手段。电池在正负极外部电压差的驱动下以化学能的形式存储过剩的可再生能源发电，并在负荷高峰期通过电化学反应产生电子流进行放电以满足建筑需求。电池蓄能技术因为响应速度快、效率高及对安装维护的要求低而受到建筑用户的欢迎。表 3-3 为电池厂家近年公布的几种常用蓄电池性能参数。其中铅酸电池在过去几十年中应用广泛，但由于其放电深度受到限制且存在环境污染等问题，近年来建筑中常用锂离子电池作为储能技术。



注：镍钴锰酸锂（NMC）、镍钴铝酸锂（NCA）、磷酸铁锂（LFP）、钛酸锂（LTO）和锰酸锂（LMO）。

图 3-12　不同锂离子电池特性[12]

表 3-3　应用于建筑蓄能的常用电池性能参数比较

电池种类	锂离子电池	铅酸电池	锌溴液流电池	镍镉电池
使用寿命（年）	磷酸铁锂: 5-10, 钴酸锂: 5-7, 锂锰氧化物: 10-30	3-15	5-10	10-20
循环寿命 (循环次数)	磷酸铁锂: 2000+, 磷酸铁锂: 500-1000, 锂锰氧化物: 1000-1500	200-1800	2000+	1500
放电深度	磷酸铁锂: 50-90%, 磷酸铁锂: 50%, 锂锰氧化物: 90%	50%	--	--
循环效率	磷酸铁锂: 89%, 磷酸铁锂: 97%,	70-90%	70-80%	60-65%

电池种类	锂离子电池	铅酸电池	锌溴液流电池	镍镉电池
	锂锰氧化物: 75-95%			
工作温度	磷酸铁锂: 0 to 45°C, 磷酸铁锂和锂锰氧化物: -10 to 45°C	-10 to 45°C	20 to 50°C	-40 to 45°C
环境影响	非常小	中等	最小	中等
优势	循环寿命长 放电深度大； 体积小，重量轻； 环境友好型； 维护要求低	技术成熟 价格便宜 可回收性好	能量和功率密度大 循环寿命长	技术成熟 能量和功率密度大 比铅酸电池寿命长 工作温度范围大
劣势	成本高 可回收性差	放电深度有限 需经常检查维修 需良好的通风环境	技术新且复杂 维修要求高 安全危害 (腐蚀性和有毒物质)	电池电压低 初投资比铅酸电池高 安全危害 (镉)

（2）混合光伏电动车技术

电动车是一种实现可再生能源发电存储的新兴技术，鉴于其大规模生产，它有望为促进可再生能源应用和提高能源效率做出重大贡献。在安装光伏的建筑中使用电动车既可以满足供能需求，也可以满足储能方面的需求，这可以帮助改善建筑本省的能量匹配度并调节峰值负荷。目前广泛实现电动车应用于蓄能的四个基本途径是智能充电、电网结合、电池更换和循环使用二次电池。

通过充电桩为电动车充电，或通过充电桩从电动车取电，实现建筑用电与电动车充放电耦合的技术，称为建筑电动车交互（BVB）[13]。电动车的普及将给发

电、输电、配电系统带来严峻挑战。充电桩的功率从 7kW 到 20kW、60kW，甚至 100kW 以上，如果城市中有 100 万辆电动车，即便采用电动车与电网协同技术（Vehicle-to-Grid，简称 V2G）并考虑同时使用系数，为满足其充电新增电力装机容量将显著增长，甚至超过城市已有配电网的能力。如何缓解电动车数量增长对城市配电网的影响，甚至利用电动车固有的储能特性与建筑用电协同，进而与城市电网协同，是推动电动车发展的关键。伴随着电动车的快速发展，建筑将成为充电桩布局的重要载体，电动车用电将与建筑用电深度融合，需在城市尺度协同建筑-交通-电网实现 BVB，通过耦合建筑用电与电动车充放电，有效减少 V2G 给城市电网运行带来的挑战，通过优化需求侧用电规律，更高效地实现资源配置。

3.2.3 未来规划及发展趋势

2022 年 1 月，国家发展改革委 国家能源局正式印发《“十四五”新型储能发展实施方案》（发改能源〔2022〕209 号）[14]提出：到 2025 年，新型储能由商业化初期步入规模化发展阶段、具备大规模商业化应用条件。其中，电化学储能技术性能进一步提升，系统成本降低 30%以上。并进行一系列试点示范。

另外，2021 年 9 月最新 IPCC 全球气候变化报告出炉，再度向全世界发出警报。储能作为“双碳”背景下构建零碳电网的关键组成部分，终于迎来爆发性的发展机遇。大多数人印象中的储能，主要是放电时长较短（<10hr）的抽水蓄能或以锂电池为主的电化学储能系统，占全球储能总装机 93%。随着电力结构不断革新，长时储能（long-duration energy storage）这一概念逐渐受到关注，长时储能的时长尚无明确定义，美国能源部将其归类在额定功率下连续放电 10 小时或以上。也许这是下一个颠覆性储能技术方向。据报道，太平洋西北国家实验室（PNNL）的一个团队提出了一种新的设计，展示了一种“冬眠”电池，它可以一次保存能量数月。这项研究的核心是一种被称为熔盐电池的储能技术[15]。这种电池由于其成本低和使用常见的材料，被认为是电网规模的可再生能源存储解决方案。

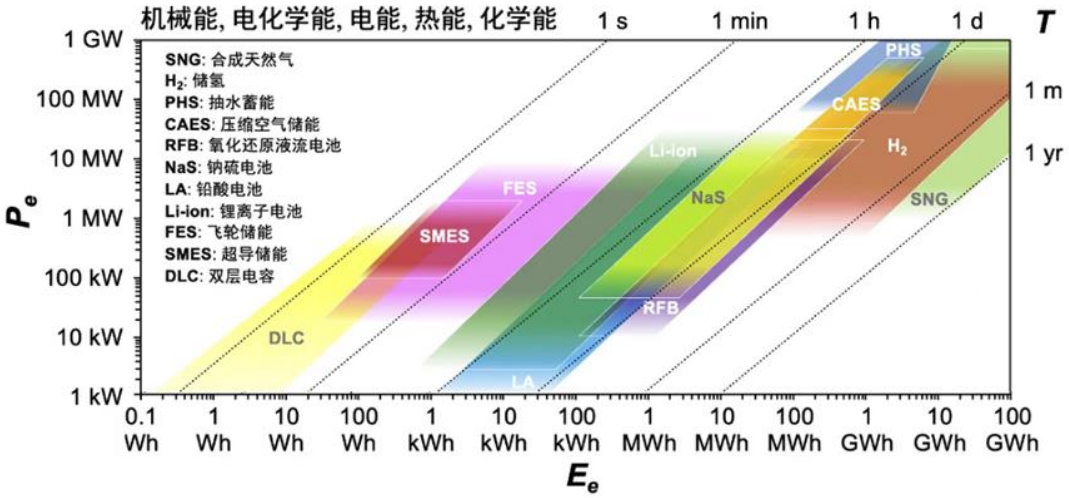


图 3-13　不同时间尺度的储能示意图[16]

为了释放可再生能源的全部潜力，科学家们仍在不断探索先进的电池技术，努力解决太阳能和风能发电的间歇性问题。

3.3 直流配电

3.3.1 系统组成

根据《民用建筑直流配电设计标准》，直流配电系统的组成包括：①电源设备，包括城市电网、建筑光伏、建筑储能或柴油发电机等，不一一列举；②配电设备，包括交直/直直变换器、光伏变换器、储能变换器，线缆以及开关等保护装置；③用电设备，包括照明、空调、办公设备等用电设备，以及插座等；④监控系统，包括传感器、测量/计量表具、控制器和监控软件等。直流配电系统的组成如图 3-14 所示。

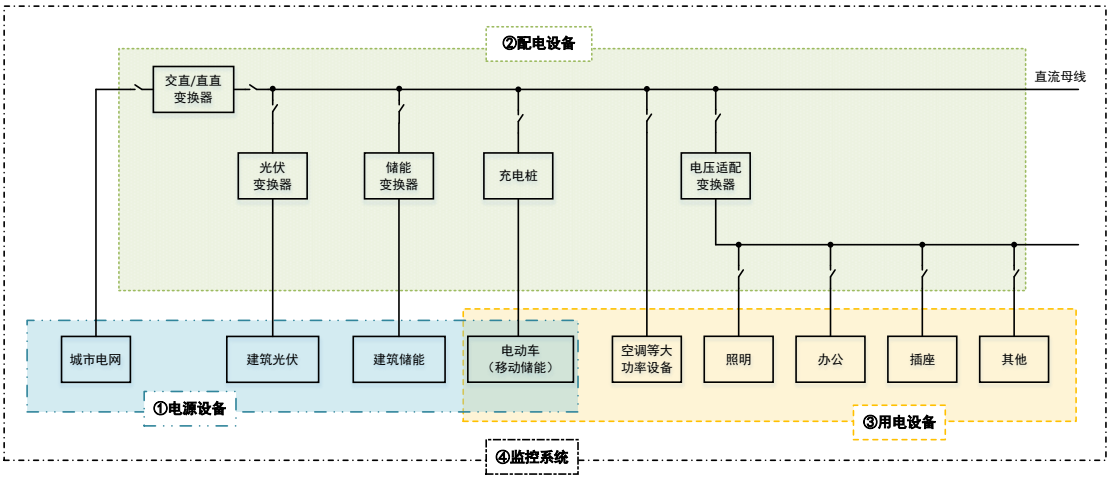


图 3-14　直流配电系统组成[13]

3.3.2 系统拓扑

民用建筑直流配电系统中城市电网、光伏、储能和用电负荷四者的物理布局与相互连接方式，即称之为系统拓扑。系统拓扑描述的是城市电网、光伏、储能和用电负荷相互连接的物理关系，不反映各自量的大小，可以从不同的角度进行描述和分类，最重要的特征包括直流母线极性和配电回路的连接方式。

根据导体电位的极性关系，直流母线有单极和双极两种形式，如图 3-15 中 a)和 b)所示。单极系统由正极（L+）和负极（L-）组成，由于采用两根线配出供电，在《低压电气装置 第 1 部分 基本原则、一般特性评估和定义》GB/T 16895.1-2008 标准中，也被称为二线制结构；双极系统由正极（L+）、负极（L-）和中间极（M）组成，相对中间极，正负极分别是两种不同的极性。如果双极系统中正极、负极和中间极都被引出并用于配电，在前述标准将其称为三线制结构。但是，对于双极系统中间极没有被引出的情况，不论是用三线制或二线制的称谓，都很难准确表达结构上的特征，加上二线制和三线制也可以用来描述交流系统，为避免混淆，同时突出直流配电系统不同接地型式的电位特征，强调直流配电系统电压极性的概念，采取单极系统和双极系统进行区分。

a)单极结构　　b)双极结构

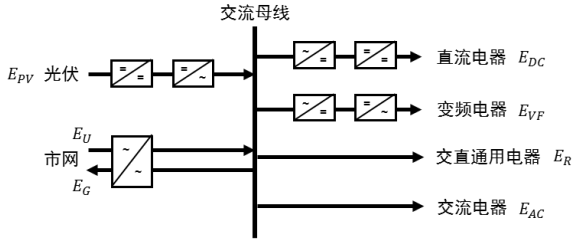
图 3-15　直流配电系统单极和双极结构

目前，民用建筑直流配电系统中主要的电源设备大多采取集中布置方式，配电回路则采取放射状、树干状或放射状与树干状混合的连接方式。

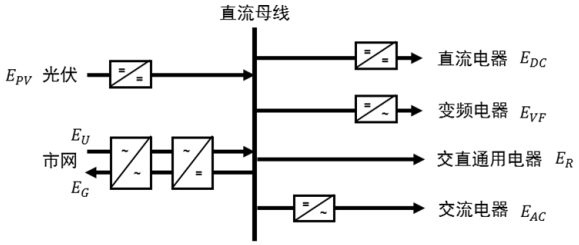
3.3.3 技术优势

（1）高效的建筑供配电系统

对比图3-16可知，建筑采用直流配电可以减少光伏等直流电源的逆变环节、直流电器和变频电器的整流环节，但是同时需要增加建筑从市网购电的整流环节、建筑向电网馈电的逆变环节、交流电器的逆变环节。



a）建筑交流配电系统示意图



b）建筑直流配电系统示意图

图 3-16　交直流配电系统对比

通过对比发现，交直转换损失差异与直流电源和直流负载占比有关。如果光伏的自发自用量 越大、从电网购电量越小、直流电器用电量越大、交流电器用电量越小，则从交直转换损失的角度越趋向于采用建筑直流供配电系统。这是直流建筑核心特征必须包括高比例的建筑光伏和高比例的直流设备的原因。

（2）基于电压的无通讯信息传递

直流建筑的母线电压可以在较大范围的电压带内变化，而不限于额定电压值的±5%。直流建筑可以通过 AC/DC 控制母线电压，进而引导各末端设备进行功率调节。当然，这种控制逻辑的实现前提是末端 DC/DC 应具有母线电压和设备功率的关联关系。例如连接蓄电池的 DC/DC 可根据母线电压的高低，电压高于

某一设定值时充电、电压低于另一设定值时放电，同时母线电压越高充电功率越大、母线电压越低放点功率越大。空调设备可以根据电压高低调整压缩机频率或者室内温度。充电桩还可根据电压高低决定充电速率，甚至在母线电压过低时从汽车电池中取电，反向为建筑供电。其他设备也可以根据自身特点在设备控制逻辑中增加母线电压高低与设备功率大小的关联控制逻辑。这样当 AC/DC 在控制直流母线电压升高或者降低时，各末端设备就可以通过监测电压来切换运行模式和调节功率大小。而各末端设备的动作效果又会体现在 AC/DC 的输出功率上，AC/DC 通过反馈控制来修正电压就可以使建筑功率逐渐趋近某一目标范围。这种基于直流系统的控制模式可以不依赖于 AC/DC 与建筑末端设备的通信，具有简单和可拓展性的优势，从而适应复杂多样的建筑终端设备和用户需求。

（3）更高的供电可靠性

直流建筑转换环节较少，设备元件数量较少，因而由设备故障所导致的系统停电概率降低。直流供电建筑因简化电能处理环节而大大减少了电源变换器内部的零件数目达到 30%左右，因而降低了成本，提高了可靠性。直流建筑与分布式可再生电源和储能设备集成，在外电网故障时依然有电源供电，从而降低了停电风险。配有储能的直流建筑可以优化建筑电力负荷曲线，使供配电设备长期处于更稳定的运行状态，从而进一步降低设备故障率、提高可靠性。

（4）更高的用电安全性

因绝缘损坏、操作失误等导致的电击事故会让电流流过人体，损害使用者。国家标准 GB/T 13870.1 -2008《电流对人和家畜的下映 第 I 部分：通用部分》中给出了不同电流和时间区域的对人效应，其中 3 区可能导致心脏发生无意识的肌肉反应和可逆紊乱，4 区可能发生病例生理学效应，如心搏、呼吸停止等。对比交流电和直流电的对人效应可以发现，直流电各区的人体电流值和电流持续时间均大于交流电。尤其在持续时间较长时，直流电 3、4 区的人体电流阈值均明显高于交流电。因此，直流建筑具有安全性优势。

而且，直流建筑一般在建筑空间中进行电压分区，即采用低电压为建筑内部直接供电。目前很多直流建筑的系统架构都采用的多个电压等级分区设计的架构，其中在近用户侧采用低压、特低压电压等级（48V、24V 等）。这样即使发生触电事故，其较低的人体电流效应也不会危险生命安全，进一步提高了直流建筑的用

电安全性。

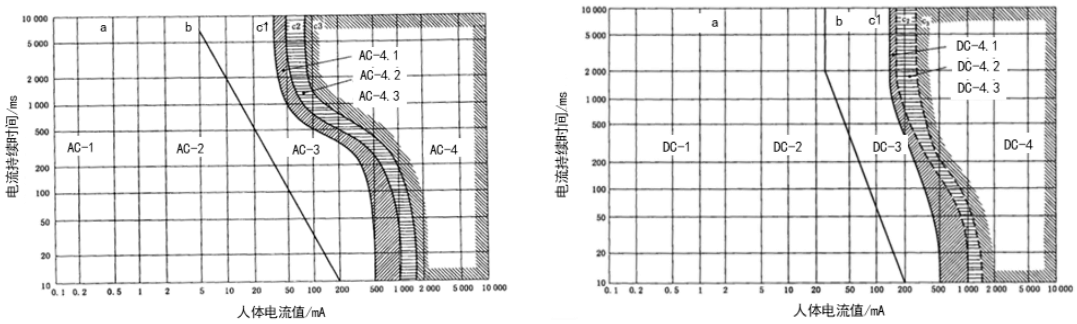


图 3-17　电流人体效应（双脚到双手，左交流，右直流）

3.4 用电柔性

3.4.1 柔性定义

柔性用电以城市电网指令为约束条件，通过建筑整体用电柔性实现需求侧与供给侧动态平衡的技术，即建筑电力交互。

可再生能源发电与常规发电机发电的边际成本变化规律大不相同。理论上，在没有弃风弃光且供需关系完全匹配时，可再生能源发电系统边际成本最低。当需求侧用电规律偏离可再生能源发电规律越远时，需要付出的额外代价越高，度电成本也会更高。

建筑节能通常考虑的是用能总量或单位面积用能的降低。然而未来高比例可再生能源发电及其波动性是常态，建筑节能需要更多地考虑如何更好地适应供给侧可再生能源波动，在城市尺度实现能源的安全可靠供应。这将是全社会层面更显著的能源节约。

3.4.2 柔性负荷

建筑用电柔性是通过调节用户侧解决发电负荷和用电负荷不匹配问题的一种能力。建筑用电柔性来自于三方面，一是建筑用电设备，在保障生产生活基本质量的前提下，通过优化设备的运行时序，错峰用电；二是储能设施，投资建设储能电池、蓄冷水箱、蓄冰槽、蓄热装置等，直接或间接地实现电力的存储；三是电动车，通过智能充电桩连接电动车电池和建筑配电系统，在满足车辆使用需

求的基础上，挖掘冗余的电池容量，使停车场中电动车发挥“移动充电宝”的作用。

- **用电设备的柔性。**建筑中有丰富的可调节设备，或是可以转移用电负荷，或是可以削减用电负荷。例如，暖通空调就典型的可调节负荷，建筑围护结构、冷冻水系统都具有一定的蓄冷和蓄热能力，短时间的关闭空调或调整空调输出功率并不会显著影响室内环境温度，因此通过控制空调启停、改变变频空调的压缩机频率、切换中央空调末端风盘的风速档位、或者放开室内温度的控制精度等方式都可以在不影响用户舒适度的情况下实现负荷柔性控制。照明系统从技术上也是可以实现在用电高峰时段降低室内照度等级，从而降低照明功率的，但是由于人对灯光变化比较敏感，需要充分考虑人的舒适度，分时分区制定精细化的调控策略。智能设备如洗衣机、洗碗机等，在非急用的情况下，可以通过节能模式降低负荷，也可以延迟启动避开高峰。还有很多自带电池的移动设备，也可以作为可中断负荷来调控。过去，用电设备的调节手段主要为满足多样化的使用需求；现在，基于智能化管理调度，能够利用用电设备的柔性改变建筑的负荷形态，实现电力调峰和可再生能源消纳。
- **储能设施的柔性。**储能电池是直接储存电力的设备，它既可以作为建筑或者设备的备用电源，在电力供给故障时为建筑或者设备提供短暂的电力供给，还可以结合峰谷电价在低电价时段储存电力，在高电价时段释放电力，从而来实现削峰填谷。蓄冷水箱、蓄冰槽或者蓄热装置可以间接的储存电力，即把用电低谷时期的电力通过暖通空调系统转化为冷量或者热量储存起来，在用电高峰时期释放以减少原本暖通空调在该时段需要消耗的电力。储能设施的柔性是单纯的能量转移，对用户舒适性没有影响，但是需要增加投资，所以它的应用推广取决于经济性。从趋势上看，储能成本和调峰收益分别呈下降和上升趋势。在成本方面，2022年国家发改委、国家能源局发布的《“十四五”新型储能发展实施方案》提出了到 2025 年电化学电池系统成本降低 30%以上的发展目标。在收益方面，2021 年国家发展改革委发布关于进一步完善分时电价机制的通知，提出要拉大峰谷电价，多省市陆续执行，如深圳市普通工商业用户的峰谷电价分别为 1.3553 元/kWh 和 0.289 元/kWh，峰谷价差达 1.0663

元/kWh。以系统成本 1500 元/kWh、循环寿命超过 3000 次、效率超过 85%的磷酸铁锂电池为例，度电储能成本约为 0.56 元/kWh，在当前的峰谷价差下已经可以盈利。未来，随着电池成本的进一步降低、峰谷价差的进一步拉大，建筑中配置储能的经济价值会越来越好。

- **电动车的柔性。**为适应能源结构的低碳转型、减少城市汽车大气污染物排放，新能源汽车是未来的重要发展趋势。虽然目前新能源汽车保有量只有几百万辆，但是增长速度迅速，预计未来电动车保有量会超过 3 亿辆。与此同时，电池技术的发展使得电动车电池在满足行驶需求之外还有大量的冗余容量。按照 500 公里续航里程和 3000 次循环计算，可以行驶 150 万公里，已经远远超出了普通私家车的行驶里程需求，电池循环次数对于汽车使用生命周期是冗余的。电动私家车的使用场景主要是城市内通勤，500 公里的续航里程基本能做到一周一充，电池容量对于日行驶需求是冗余。而且，电动私家车 80%的时间是停在住宅、办公、商业建筑周边的停车场。在充电桩设施健全后，电动车完全可以实现有序充电和双向充放电，与建筑用电负荷协同，利用冗余电池容量和循环次数可以为建筑提供柔性。

3.4.3 负荷聚集商

虽然建筑负荷有调节能力，但是由于建筑可调节负荷的体量小且不确定性大，而且不同建筑之间的负荷差异也很大，普遍达不到电力系统辅助服务的标准要求。因此，建筑无法直接与电网交互，而需要经过负荷聚集商。2021 年 12 月，国家能源局印发《电力辅助服务管理办法》进一步扩大了辅助服务提供主体：按照国务院《2030 年前碳达峰行动方案》有关要求，将提供辅助服务主体范围由发电厂扩大到包括新型储能、自备电厂、传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、电动车充电网络、聚合商、虚拟电厂等主体，促进挖掘供需两侧的灵活调节能力，加快构建新型电力系统。电力系统辅助服务标准要求见表 3-4。

表 3-4　电力系统辅助服务标准要求

	具体要求

一次调频	国标：一次调频死区±0.03Hz~±0.05Hz; 一次调频调差率为 0.5%~3%; 一次调频有功功率的响应滞后时间 t_{hx} 不大于 Is; 一次调频有功功率调节时间： 10s; 一次调频稳定时间： 不低于 10s; 一次调频有功功率调节偏差不超过 1%额定有功功率； 山西：一次调频功能技术参数 a.测频精度： 频率测量分辨率不大于 0.003Hz; b.频率采样周期： 不大于 100ms; c.频率测量偏差： 频率测量偏差不大于 0.001Hz。
二次调频	福建：储能设备、电站容量不小于 10MW，机组调频新能综合指标 K 不低于 0.53
调峰	福建：可调节负荷暂定调节容量不小于 2.5MWh，最大充（用）电功率不小于 5MW 浙江：可调节容量不小于 2.5MWh，调节功率不小于 5MW，持续响应时间不小于 1h 甘肃：参与调峰辅助服务交易的可中断负荷用户最小用电电力须达到 10MW 及以上
备用	华东：旋转备用必须在 10 分钟内能够调用。电储能装置装机容量大于 20MW

建筑负荷聚集商负责匹配电网调节需求和建筑调节能力。建筑负荷聚集商平台需要配置电力市场交易算法、建筑可调节潜力评估算法、建筑收益分配算法等等，以满足对电网管理平台的交易需求，对建筑的调节目标拆解下发、效果检测、效益分配等需求。此外，负荷聚集商平台还可以根据建筑的特性和需求提供柔性改造服务，如图 3-18。

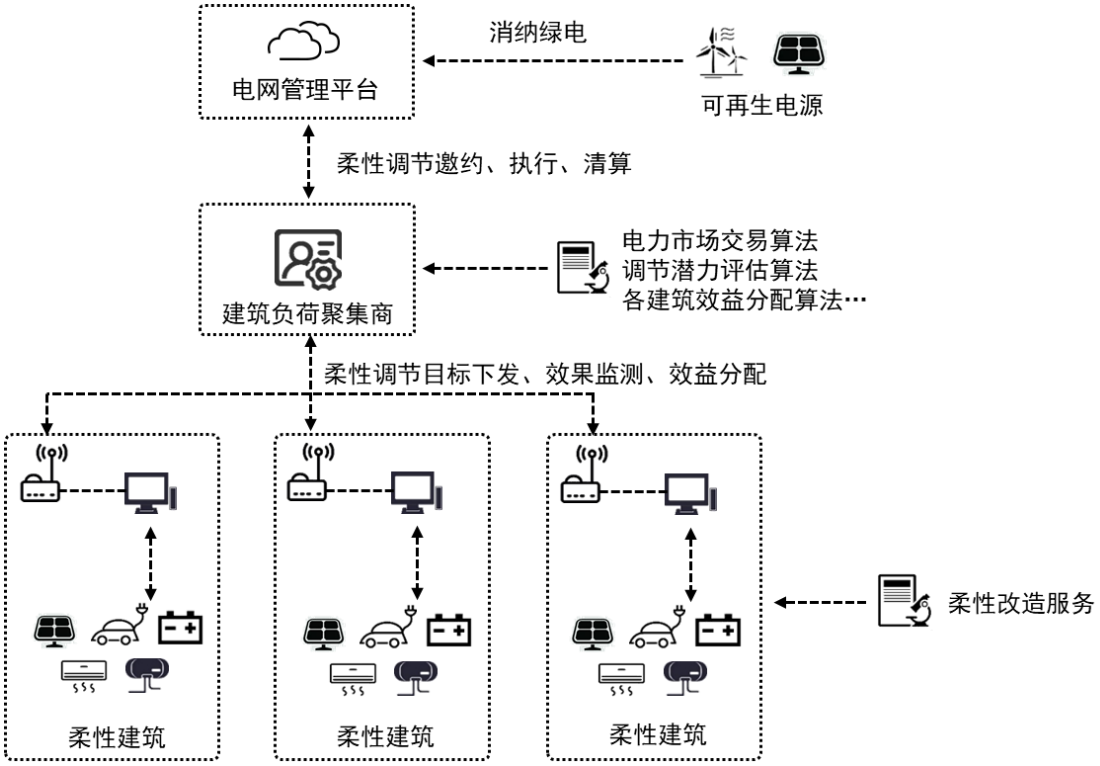


图 3-18　建筑电力交互模式设想

3.4.4 柔性用电的优势

实现电力交互对于用户的效益也十分显著。国家发改委发布《关于进一步完善分时电价机制的通知》（发改价格〔2021〕1093 号），强化尖峰电价、深谷电价机制与电力需求侧管理政策的衔接协同，充分挖掘需求侧调节能力；鼓励工商业用户通过配置储能、开展综合能源利用等方式降低高峰时段用电负荷、增加低谷用电量，通过改变用电时段来降低用电成本。国家发改委、能源局联合发布《关于鼓励可再生能源发电企业自建或购买调峰能力增加并网规模的通知》（发改运行〔2021〕1138 号），提出实现碳达峰关键在促进可再生能源发展，促进可再生能源发展关键在于消纳，保障可再生能源消纳关键在于电网接入、调峰和储能，鼓励发电企业自建储能或调峰能力、允许发电企业购买储能或调峰能力增加并网规模。国家能源局发布《关于 2021 年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知》（国能发新能〔2021〕25 号），建立了保障性并网、市场化并网等并网多元保障机制，对于保障性并网范围以外仍有意愿并网的项目，可通过自建、合建共享或购买服务等市场化方式落实并网条件后，由电网企业予以并网。并网条件主要包

括配套新增的抽水蓄能、储热型光热发电、火电调峰、新型储能、可调节负荷等灵活调节能力。此外，当前国内很多省市已开展电力需求响应试点，高峰期负荷消减收益达 15 元/kWh 甚至 30 元/kWh，填谷的收益在 1.2 元/kWh。

目前建筑与电网互动的形式主要是需求侧响应，而既有需求侧响应政策主要从电网推动，其目的是提高电力系统运行的可靠性和经济性，远期高比例风光电情景下建筑柔性用电解决灵活性稀缺的意义并没有得到体现。既有需求侧响应政策以经济激励为主，而没有节能低碳方面的收益，而建筑的电费成本在建筑运营收益中的占比较低，尤其相对于城市的高房价和高租金，从而导致建筑用户参与柔性用电的积极性不高。

迫切需要建立柔性用电与建筑低碳的关联机制，用低碳收益来激励建筑柔性用电，促进建筑和电网同步向未来低碳情景转型发展。机制初步设想如下，首先由政府部门制定绿电消费凭证的发放规则，并且确定绿电消费凭证发放总量；然后电网发出以消纳可再生电力为目标的辅助服务邀约，并对参与辅助服务的建筑进行监测、考核，根据参与程度核发绿电消费凭证和补偿资金；最后政府部门还要把绿电消费凭证纳入建筑碳排放核算方法中，建筑可凭绿电消费凭证抵消外购电的碳排放，进而申请相应的低碳标识。此外，获得绿电消费凭证的建筑用户还可以通过售卖碳额度获取额外的补偿资金，前提是碳交易市场规则要认可绿电消费凭证。

3.4.5 建筑电力交互

多个世纪以来，电力网络都是以化石燃料为动力，依赖于从电厂集中发电、输电到终端用户的单向能源流动。但这样生产和输送能源的方式也带来了一系列不利于可持续发展的问题，比如雾霾、地球温度上升等，且化石能源终究是有限的。如今，新的减排政策、新技术的发展，为电力网络的低碳化转型提供了可能。

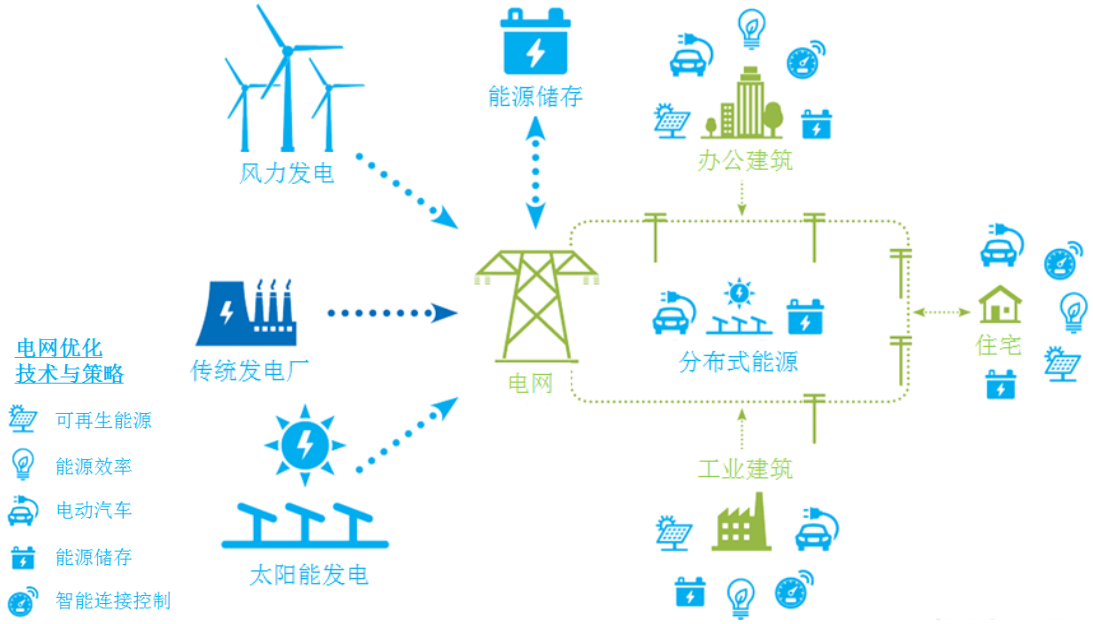


图 3-19　低碳型电网中的多向能源流动

通过将高效节能系统、可再生能源、能源储存等技术更好地结合在建筑设计中，建筑领域在电网转型的过程中发挥着至关重要的作用。比如，“电网友好型（grid-friendly）”建筑可以根据电网需求调节自身的能耗或是将其生产的可再生能源输出到电网。然而，至今为止世界上还没有一个统一的、用于衡量建筑与电网间交互作用的指标。为了填补这一领域的空白，新建筑协会（NBI）与美国绿色建筑委员会（USGBC）于 2018 年联合提出了电网优化倡议（GridOptimal Initiative），该倡议旨在开发与运用新的指标，用以衡量建筑与电网间交互作用的质量。为了更好地在建筑领域中推广和优化这些新指标，美国绿色建筑委员会专门在美国绿色建筑（LEEDTM）评价体系中设立了试行得分点——电网优化建筑（EApc152: GridOptimal Building ACP）。项目团队可以通过电网优化指标（GridOptimal Metrics）来定义项目表现并获得相应的得分。

电网优化建筑评价指标共采用了六项核心指标（见表 3-5）。前三项指标基于全年 8760 小时逐时计算，将建筑用电需求曲线与建筑以外的因素（如电网系统负荷或电网温室气体排放因子）建立联系。后三项指标衡量了建筑在用电高峰时刻削减用电需求的能力。每项指标的评价范围为 0~100 分。

表 3-5　电网优化指标

指标	定义
rid Peak Contribution 电网峰值贡献程度	该指标定义了在电网高峰时刻中，建筑用电需求对电网峰值的贡献程度。计算过程中，只有前 5%（按数值大小）电网峰值发生的时刻被纳入考量。在这些时刻中，按下式进行计算： 电网峰值贡献程度 $= \overline{(\text{建筑负荷因子})}$ (即对定义时刻中的建筑负荷因子求算术平均值) 建筑负荷因子 $= \frac{\text{建筑净电力需求(W)}①}{\text{调整型最大参照需求(W)}②}$ 得分规则为：实际得分 $= 100 -$ 电网峰值贡献程度 $\times 100$。
id Carbon Alignment 电网碳排放影响	该指标定义了在一年时间内，建筑用电需求对电网碳排放的贡献程度。评估方式如下： 电网碳排放影响 $= \frac{\sum_{i=1}^{8760}(\text{建筑负荷因子}_i \times \text{电网碳排放因子}_i)}{8760}$ 建筑负荷因子$_i$ $= \frac{\text{第 i 小时建筑净电力需求(W)}}{\text{调整型最大参照需求(W)}}$ 电网碳排放因子$_i$ $= \frac{\text{第 i 小时电网边际碳排放量（kg CO2/MWh）}}{\text{全年内电网最大边际碳排放量（kg CO2/MWh）}}$ 得分规则为：实际得分 $= 100 -$ 电网碳排放影响 $\times 100$。
Onsite Renewable tilization Efficiency 现场可再生能源 利用效率	该指标定义了建筑就地利用可再生能源来削减用电需求的能力。 现场可再生能源利用效率(%) $= [1 - (\frac{\text{一年内输出到电网的可再生能源(W)}}{\text{一年内就地生产的可再生能源总和(W)}})] \times \text{可再生能源所抵消的建筑用能比例} \times 100$ 可再生能源所抵消的建筑用能比例 $= \frac{\text{一年内就地生产的可再生能源总和(W)}}{\text{一年内建筑用能需求总和（电 + 燃气）(W)}}$ 得分规则为：实际得分=现场可再生能源利用效率。
hort-Term Demand Flexibility 短期需求弹性	该指标定义了建筑在 1 小时内削减用电需求的能力。计算时，需选取建筑净电力需求(W)最高值出现的那一天作为研究对象。 短期需求弹性(%) $= \frac{\text{建筑用电需求的削减量(kW/h)} \times 1000}{\text{调整型最大参照需求(W)}} \times 100$ 得分规则为：实际得分=短期需求弹性 ÷ 0.5。在 1 个小时区间内，短期需求弹性必须大于等于 10%（否则得 0 分）；若短期需求弹性达到 50%，则可获得 100 分。
ong-Term Demand Flexibility 长期需求弹性	该指标定义了建筑在 4 小时内削减用电需求的能力。计算时，需选取建筑净电力需求(W)最高值出现的那一天作为研究对象。 长期需求弹性(%) $= \frac{\text{建筑用电需求的削减量(kW/h)} \times 1000}{\text{调整型最大参照需求(W)}} \times 100$ 得分规则为：实际得分=长期需求弹性 ÷ 0.5。在 4 个小时区间内，长期需求弹性必须大于等于 10%（否则得 0 分）；若长期需求弹性达到 50%，则可获得 100 分。

3.5 小结

建筑电气化是实现碳中和目标的必然选择，也就是说未来建筑用能以电为主甚至全部是电。接下来是电的零碳化，即太阳能光伏、风电和水电等将成为未来的主导电源。但不管是集中式的还是分布式的可再生能源，发电的波动性是其主要特征。主要解决方案包括：（1）通过大规模储能来调节。目前抽水蓄能是主要方式，电化学储能也在快速发展中。但面临的问题是选址难、经济性不佳以及安

全性等；（2）火电厂进行调节。但面临的问题是未来要实现碳中和目标，留给火电的份额将大幅缩小；（3）尽可能按照可再生能源发电规律来用电。在民用建筑领域，开展 GIB、BVB，能够很好实现“荷随源动”，是有效且经济的技术路径。PEDF 是新型建筑能源系统，核心目的是实现电力交互。

通常建筑电气设计考虑的是用电负荷和城市电网两者的关系，如公式（1）。当建筑采用 PEDF 时，变成了建筑光伏、建筑储能、用电负荷和城市电网四者的关系，如公式（2）。开展直流配电设计时，需要以城市电网为边界条件，更多地考虑四者的动态平衡[13]，如图 3-20 所示，这将对负荷计算、储能容量以及系统控制等产生显著的影响。

$$P_{grid} = P_{load} \tag{1}$$

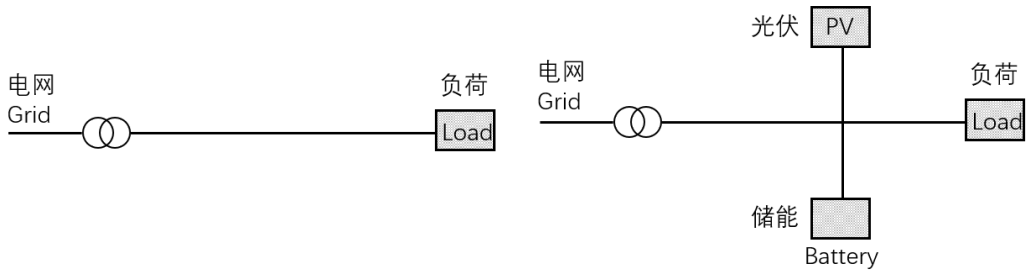
$$P_{grid} + P_{PV} = P_{load} + P_{battery} \tag{2}$$

式中：P_{grid}——城市电网负荷（kW）；

P_{load}——用户用电负荷（kW）；

$P_{battery}$——建筑储能负荷（kW）；

P_{PV}——建筑光伏负荷（kW）。



(a)二者关系　　(b)四者关系

图 3-20　配电设计能量平衡关系图

建筑光伏和 BVB 都具备向电网反向送电的能力，但考虑以下因素：（1）大量并网点的存在将给电网运行带来显著影响；（2）在城市中建筑光伏年发电量通常小于建筑年用电量等因素；（3）《分布式电源接入电网承载力评估导则》（DLT 2041-2019）规定，反向负载率小于等于零时，评估等级为绿色，推荐分布式电源接入。不建议通过交直变换器向城市电网反向送电。

4 光储直柔建筑零碳用电模型

4.1 模型介绍

“光储直柔”建筑零碳用电模型以供需匹配为核心，基于不同类型建筑的逐时用电负荷信息和不同类型电源的逐时发电负荷信息，可用于计算分析不同情景的电力供需平衡状态和电网调峰储能量。模型考虑了“光储直柔”建筑的调峰能力，内置了建筑光伏弃电、用电负荷削减、用电负荷迁移、电动车充放等调峰技术模块，以电网调峰储能量最小为目标，求解建筑柔性用电和电动车充放的最优计划，分析建筑柔性用电和电动车充放替代电网调峰的效果，如

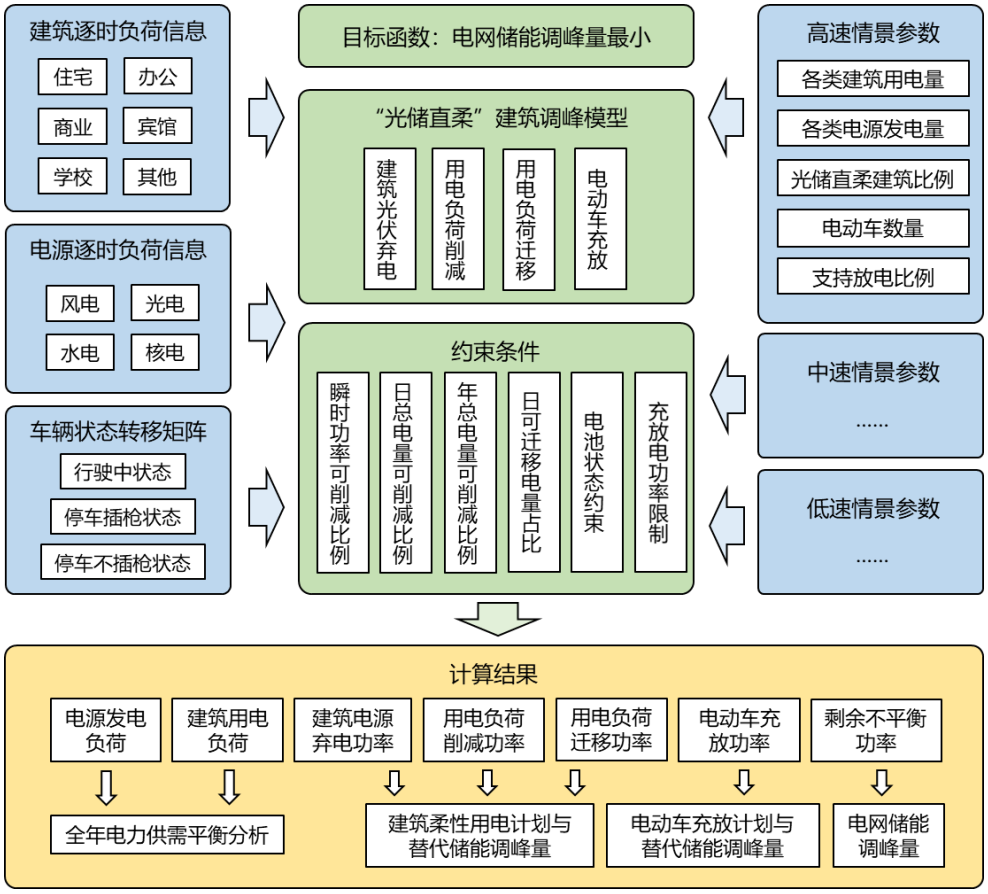


图 4-1。

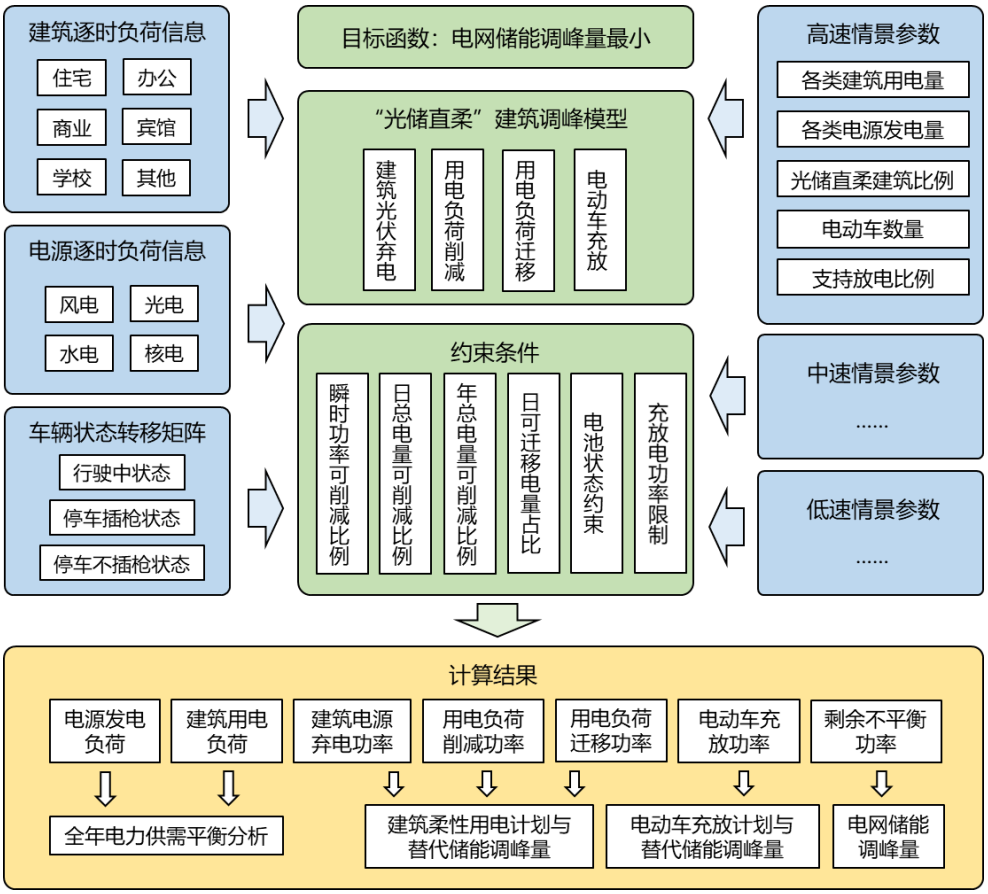


图 4-1　光储直柔零碳用电模型

4.2 电网调峰储能量

电网调峰储能量是用于衡量建筑用电负荷与电源发电负荷不匹配程度的指标。根据能量平衡，如图 4-2，建筑用电负荷和电源发电负荷主要考虑了：

（1）　光电、风电：逐时负荷曲线根据典型光电场、风电场的发电负荷生成；

（2）　核电：不参与调峰，全年恒功率发电；

（3）　水电：根据水电的季节性差异生成逐日发电量，日内调峰优先考虑建筑侧的柔性；

（4）　备用电源/其他负荷：用于平衡日总电量偏差，当风光水核电源日发电量大于公建住宅电动车的日用电量时其他负荷消纳多余电量，当风光水核电源日发电量小于公建住宅电动车的日用电量时备用电源补足多余电量，但不参与日内调峰，即一天内的发电/用电曲线为恒功率曲线；

（5） 住宅、公建用电负荷：逐时的用电负荷曲线根据不同地区、不同分类建筑的用电负荷加权得到；

（6） 储能：上述电源发电负荷与建筑用电负荷的逐时不平衡功率由储能吸收。

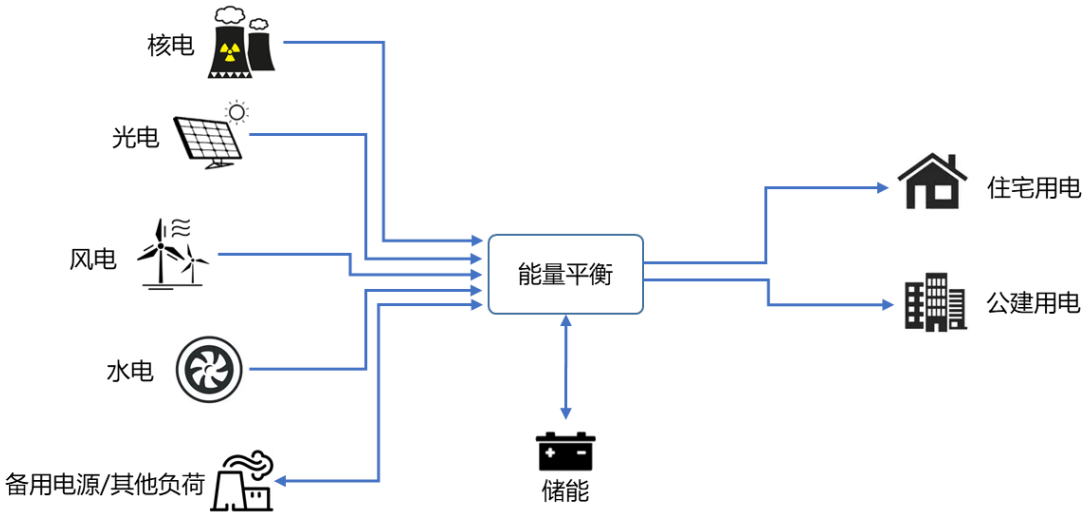


图 4-2 能量平衡

电网储能调峰容量的计算过程如图 4-3 所示：

（1） 如图①所示，电源发电负荷与建筑用电负荷在逐时尺度上不完全匹配，白天电源发电负荷大于建筑用电负荷时，需要把电量储存起来，夜间则相反，需要释放电量补足用电需求。

（2） 考虑到电源发电总量和建筑用电总量也不一定相等，如图②所示，在电源发电总量小于建筑用电总量时，通过备用电源补足总电量。但是备用电源不承担调峰任务，所以全天恒功率运行。

（3） 增加备用电源后，电源发电总量将等于建筑用电总量，虽然逐时负荷不完全匹配，但是需要储存的总电量将等于需要释放的总电量，如图③所示储能充电面积和储能放电面积相等。

（4） 如果通过储能电池来进行电量的存储和释放，不考虑充放损失，那么经过一天的充放，电池存储电量的初末状态相同，如图④所示。电池存储电量在全天充放过程中出现的最大值就是调峰储能量，也表示为了满足解决电力供需不平衡的问题所需安装的最小储能电池容量。

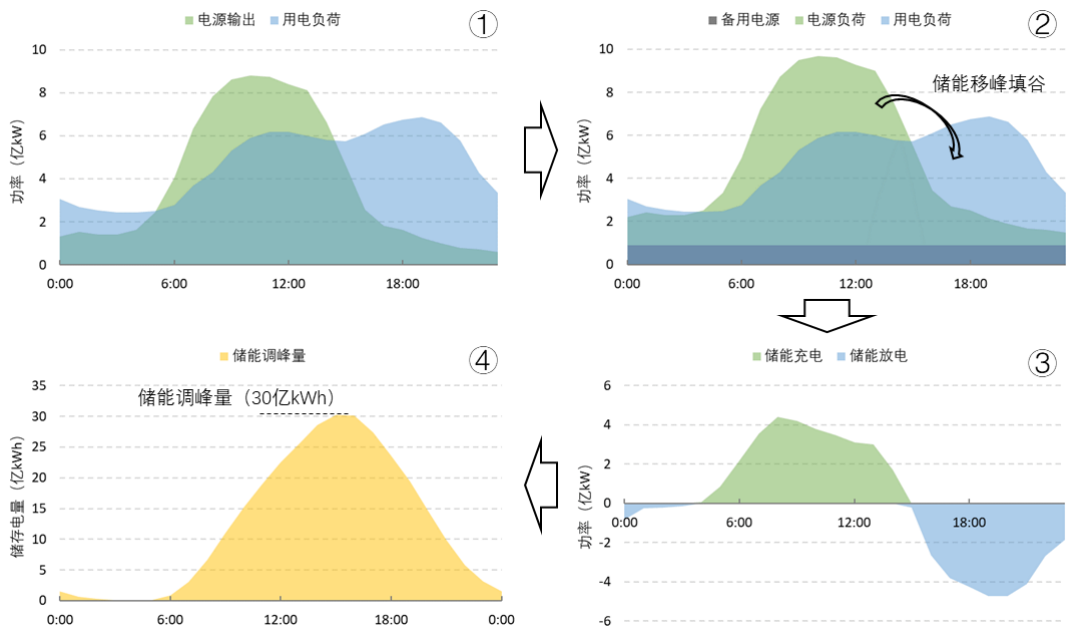


图 4-3　调峰储能量

4.3 光储直柔建筑调峰模型

“光储直柔”建筑调峰模型考虑了用电负荷削减、建筑电源弃电、用电负荷迁移、电动车充放等 4 种调节手段，模型介绍如下：

（1） 用电负荷削减或建筑电源弃电

用电负荷削减是在供电紧缺时削减建筑的用电负荷，减轻电网的调峰储能量。用电负荷削减需要考虑三方面约束：①瞬时功率削减比例 K1，即任一时刻的功率削减程度小于等于该时刻功率值的 K1 倍；②日电量最大削减比例 K2，即任一天的功率削减总量小于等于该天的功率累积总量的 K2 倍；③年电量最大削减比例 K3，即全年的功率削减总量小于等于全年的功率累积总量的 K3 倍。其中 K1、K2、K3 视负荷调节性能和用户调节意愿而定。

$$\Delta p_i(t) \le K_1 g p_i(t) \tag{1}$$

$$\sum_{t=(j-1)*24+1}^{j*24} \Delta p_i(t) \le K_2 g \sum_{t=(j-1)*24+1}^{j*24} p_i(t) \tag{2}$$

$$\sum_{t=1}^{8760} \Delta p_i(t) \le K_2 g \sum_{t=1}^{8760} p_i(t) \tag{3}$$

建筑电源弃电的原理与用电负荷削减类似，在电力富余时考虑削减电源发电

负荷，其作用效果等同于用电侧填谷。根据电源的调节性能和电源运行的经济性确定瞬时功率削减比例、日电量最大削减比例和年电量最大削减比例。

如图 4-4 所示，某典型天工况下电源供应曲线和负荷用电曲线并不匹配，存在前半天电力富余、后半天电力紧缺的情况，需要电池储能将前半天的富余电力转移到后半天。通过前半天削减电源发电量、后半天削减用电负荷，可以起到减少电网调峰储能量的效果。

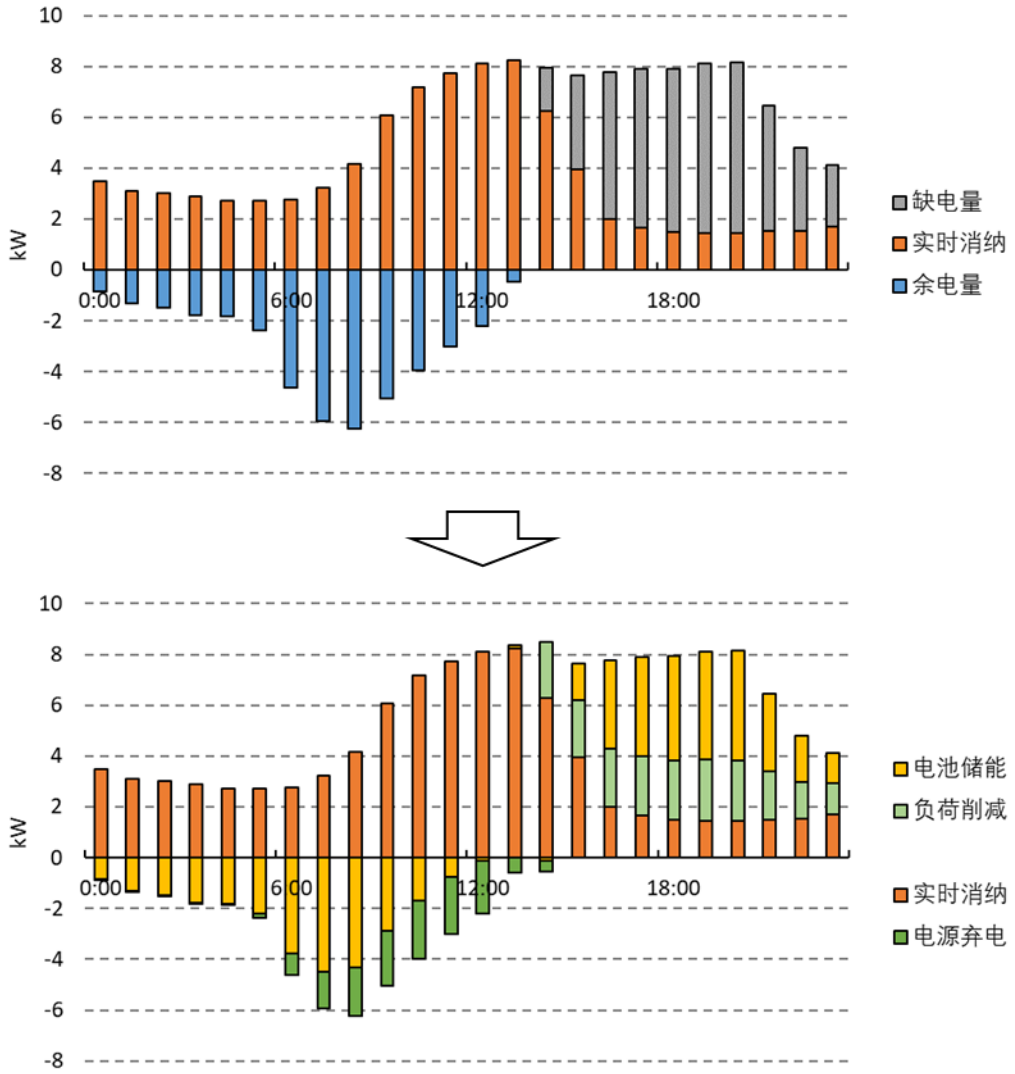


图 4-4　用电负荷削减/发电负荷弃电效果示意

（2）　用电负荷迁移

用电负荷迁移是通过设备延迟启动、空调提前预冷、建筑内储能等方式，将电力紧缺时间段的部分负荷转移到电力富余时间段使用，从而实现减少电网调峰储能量的效果。用电负荷迁移需考虑以下约束条件：①负荷迁移不会影响增加或

者减少用电总量，即相对原用电负荷的负荷削减总量等于负荷增加量；②可迁移负荷比例 K4，即负荷迁移总量小于等于日用电负荷总量的 K4 倍。

$$\sum \Delta p_{shave,i}(t) = \sum \Delta p_{fill,i}(t) \tag{4}$$

$$\sum \Delta p_{shave,i}(t) \leq K_4 \cdot \sum p_i(t) \tag{5}$$

如图 4-5 所示，某典型天工况下存在上午电力负荷、下午至夜间负荷紧缺的情况，通过将部分上午的用电负荷迁移到下午或者夜间时段使用，可以起到减少电网调峰储能量的效果。

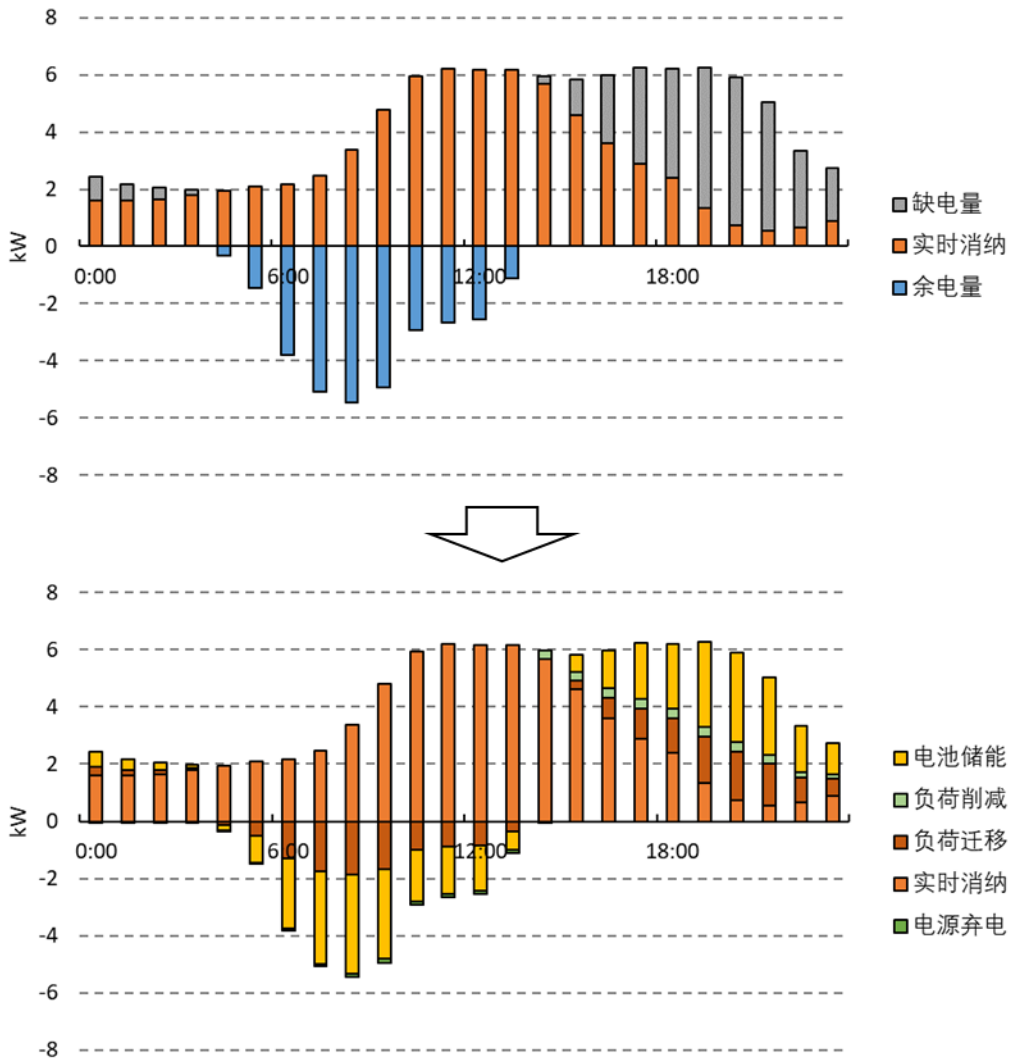


图 4-5　用电负荷迁移效果示意

（3）　电动车充放

电动车充放可分为有序充电和有序充放电两种调节方式，其中有序充电只允许单向电能流动，在电力富余时为汽车充电，而有序充放电既能在电力富余时为

汽车充电也能在电力紧缺时从电池取电。当系统中同时存在有序充电和有序充放电两种模式时，分开计算。

电动车有序充放电需要满足电动车的用车需求，包括以下约束条件：①调节周期结束时的 SOC 大于等于本周期开始时的 SOC；②任一时刻的 SOC 介于最高 SOC（默认 100%）和最低允许的 SOC 值之间；③充放电功率小于等于最大充放电功率 Pmax。

$$SOC(t_{start}) \leq SOC(t_{end}) \tag{5}$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \tag{6}$$

$$p_{charge}(t), p_{dis}(t) \leq p_{\max} \tag{7}$$

电动车 SOC 计算需要考虑电动车的转移矩阵和行驶能耗，其中电动车的转移矩阵考虑在以下三种状态之间的转移规律：行驶状态、停车充电状态、停车未充电状态。转移矩阵可以根据不同城市区域的汽车行驶状态分布（如图4-6所示）计算得到。行驶能耗按照单位时间耗电比例ω%计算，即汽车每行驶 1 小时消耗汽车电池容量 Cap 的ω%。充放电只能作用在处于停车充电状态的汽车上。

$$p_{drive}(t) = \omega\% \cdot Cap \tag{8}$$

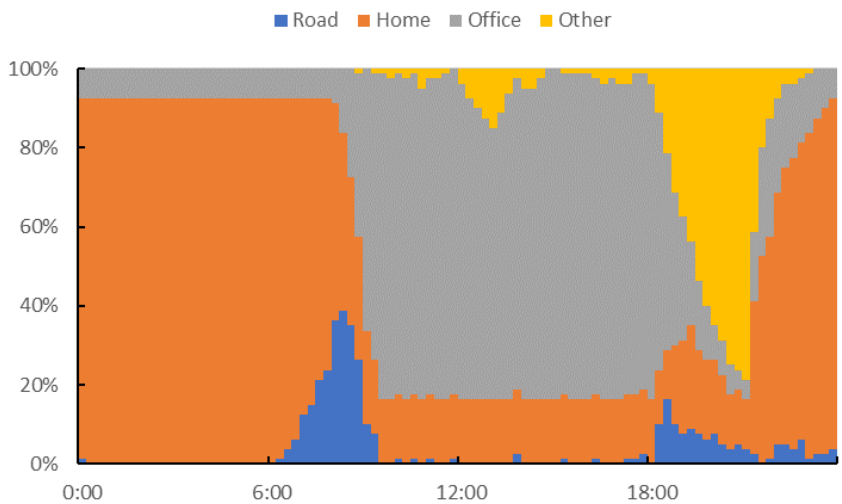


图 4-6　典型城市的汽车行驶状态分布

如图4-7所示，夜间的富余电力可以电动车充电，对于有序充电方式的车辆，充电量应满足其当日行驶需求；而对于有序充放电方式的车辆，充电量往往大于当日行驶需求，因为在白天电力紧缺时需要从车辆电池取电。电动车的有序充放电在满足用车需求的前提下，可以帮助电力调峰，减少电网调峰储能量。电动车

有序充放电的车辆电池 SOC 变化如图 4-8 所示。

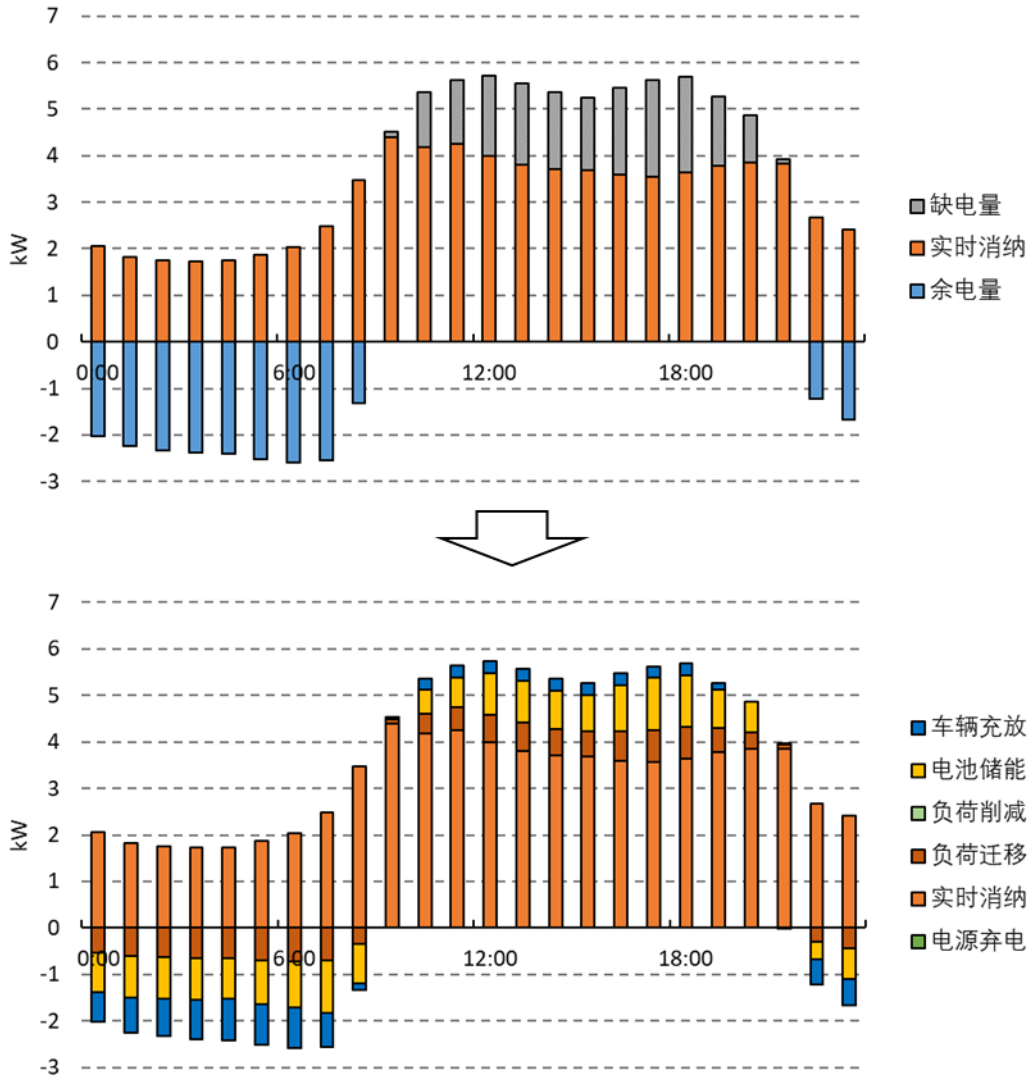


图 4-7　电动车有序充放电效果示意

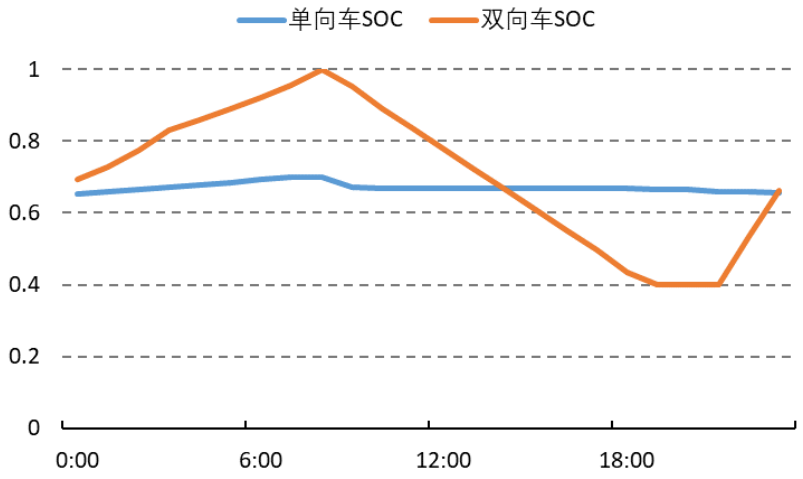


图 4-8　电动车有序充放电的车辆电池 SOC 变化（SOCmin=40%）

4.4 情景设置

模型设置了高速、中速、低速三个发展情景。情景设置的主要参数包括建筑用电量、电源发电量、电动车数量、光储直柔建筑比例、支持放电比例。在三个发展情景中，建筑用电量、电源发电量、电动车数量是相同的，而光储直柔建筑比例、支持放电比例随着低速、中速、高速情景中依次增大。

（1） 建筑用电量

基于建筑能耗和强度双控的政策延续，建筑用电量呈现增速逐渐放缓的趋势。预计 2030 年、2050 年、2060 年建筑用电量分别为 3.1 万亿 kWh、3.9 万亿 kWh、4.1 万亿 kWh，如图 4-9。

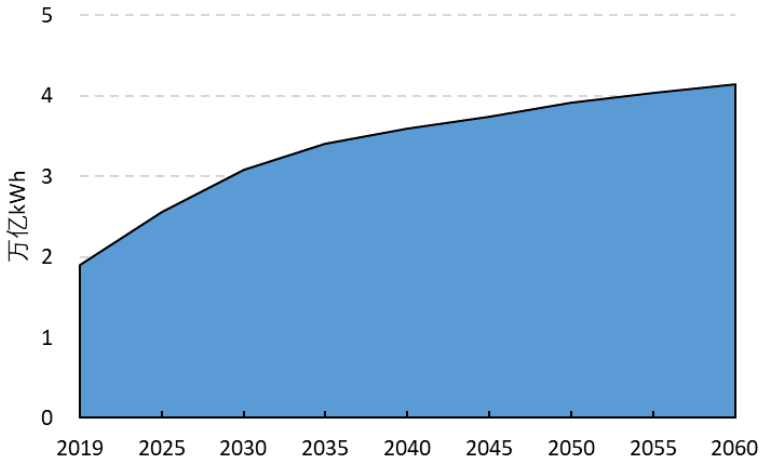


图 4-9 建筑用电量预测

（2） 电力供给侧结构

电力供给侧呈现出风光电比例快速增长的趋势，在 2030、2050、2060 三个时间节点上，风光电的发电量比例分别占到 24%、54%、70%，如图 4-10。

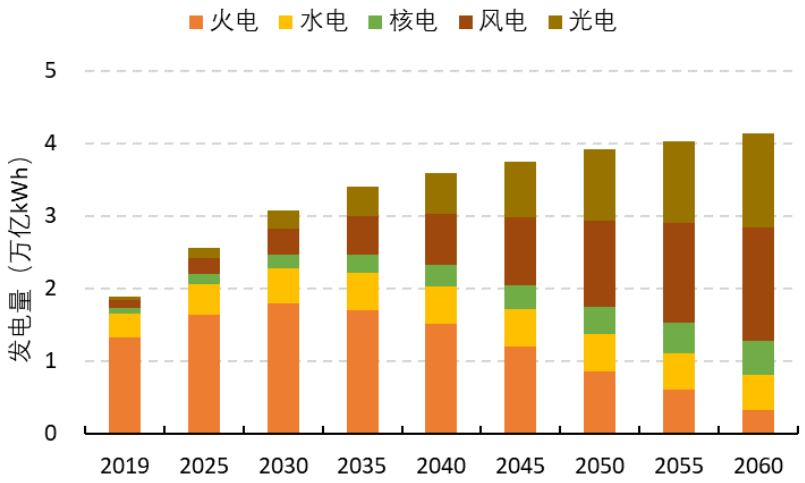


图 4-10　建筑供电量的电源结构

（3）　电动车数量

电动车保有量预测从现在的约 400 万辆增长到未来的 2 亿辆，其中在 2030、2050、2060 三个时间节点上的电动车保有量分别为 0.8、1.83、2 亿辆，如图 4-11。

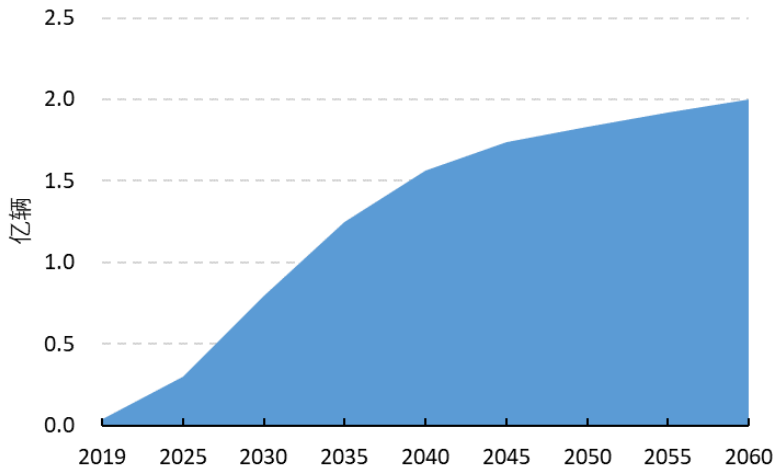


图 4-11　电动车数量

（4）　光储直柔建筑比例

“光储直柔”技术目前已有试点示范。2021 年，国务院文件提出建设集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的“光储直柔”建筑。“光储直柔”建筑即将进入快速发展阶段。本项目为“光储直柔”建筑的发展趋势设置了低速、中速、高速三个情景。其中，“光储直柔”建筑规模的发展趋势见图 4-12。

- 高速情景：2030 年、2050 年和 2060 年，“光储直柔”建筑面积分别达到 90 亿平米、450 亿平米和 540 亿平米（占总建筑面积 60%）
- 中速情景：2030 年、2050 年和 2060 年，“光储直柔”建筑面积分别达到

60 亿平米、300 亿平米和 360 亿平米（占总建筑面积 40%）

- 低速情景：2030 年、2050 年和 2060 年，“光储直柔”建筑面积分别达到 30 亿平米、150 亿平米和 180 亿平米（占总建筑面积 20%）

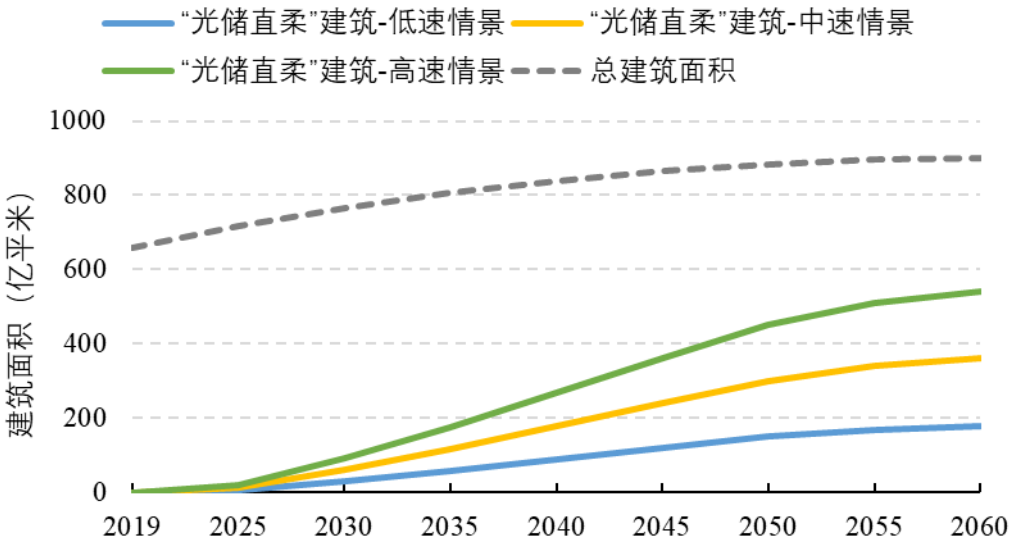


图 4-12　光储直柔建筑面积

（5）　支持放电比例

利用电动车电池的冗余容量，通过双向充电桩就近接入建筑配电网，参与电力柔性调节兼顾备用电源是未来的发展趋势。因此，支持放电的电动车和充电桩也会逐渐普及。本项目为电动车中支持放电比例设置了低速、中速、高速三个发展情景，如图 4-13。

- 高速情景：2030 年、2050 年和 2060 年，支持放电比例 0%、 48%、80%
- 中速情景：2030 年、2050 年和 2060 年，支持放电比例 0%、 30%、50%
- 低速情景：2030 年、2050 年和 2060 年，支持放电比例 0%、 18%、30%

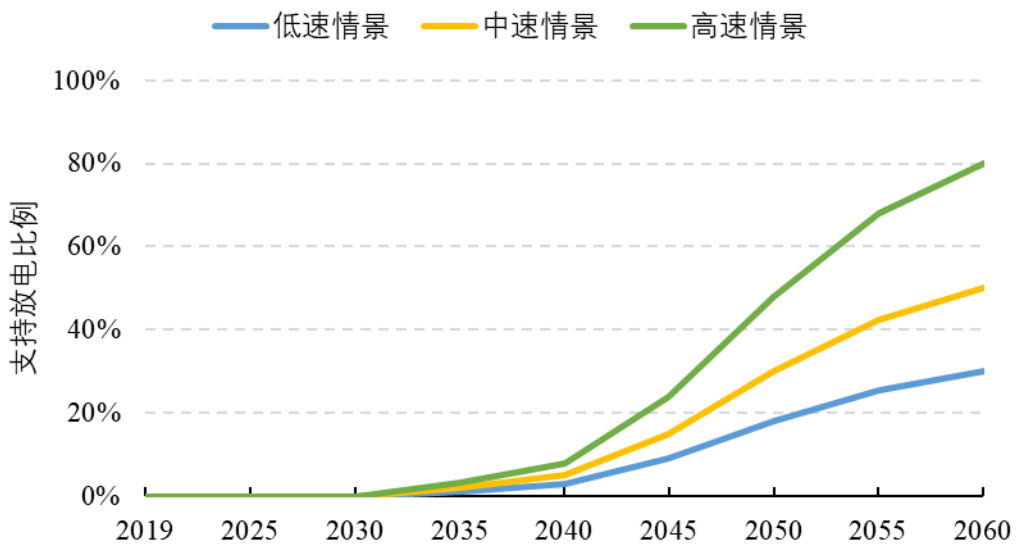


图 4-13　支持放电比例

4.5 结果分析

4.5.1 电力峰谷时段转移将改变未来的用电模式

目前，风光电在全国电网电量供应中的占比仅为 12%，火电比例仍高达 70%，电力供给侧的负荷曲线相对平稳，与建筑用电负荷曲线相比较，早上十点到晚上十点期间的用电高峰期存在电力紧缺，深夜至早上上班前电力富余。因此，现在电力系统调峰电源需要减少深夜至早上的发电量、增加用电高峰期的发电量。

未来，随着能源结构的转变，电力供需关系也发生改变：深夜电力富余的现象会随着火电比例的降低而逐渐消除；早上至午后的用电高峰也会随着光电比例的增加而消除，并产生大量余电需要消纳；晚上依然是用电高峰，而且由于火电比例降低，晚高峰的电力紧缺程度会进一步加剧。如图 4-14 所示，2030 年，风光电量比例提高到 24%，火电电量比例降低到 50%，电力供给侧的负荷曲线在白天有较为明显凸起，能满足早上至午后的建筑用电，并略有富余。电力紧缺时间段后移到下午 15:00 到晚上 23:00 之间。到 2060 年，风光电量比例提高到 70%，火电电量比例降低到 8%，电力供给侧的负荷曲线呈现出有明显的白天高峰、晚上低谷的特性。电力富余的时间后移，集中在光伏发电量较多的早上和中午；电力紧缺的时间也后移到下午 16:00 到凌晨。

电力峰谷时段的转移将会改变未来的用电模式。建筑可调节负荷是有时效性

的，电动车夜间停在住宅附近，白天停在办公楼和商场附近；住宅的空调负荷从晚上持续到清晨，而办公商业的空调负荷则从上午持续到晚上。谷电时间从清晨转移到早上，原来利用夜间谷电的住宅电供暖未来可能都需要具有较强的蓄热能力，以把白天的热量蓄存到晚上使用；原来电动车在家里利用谷电充电未来可能更多在办公场所附近白天充电。

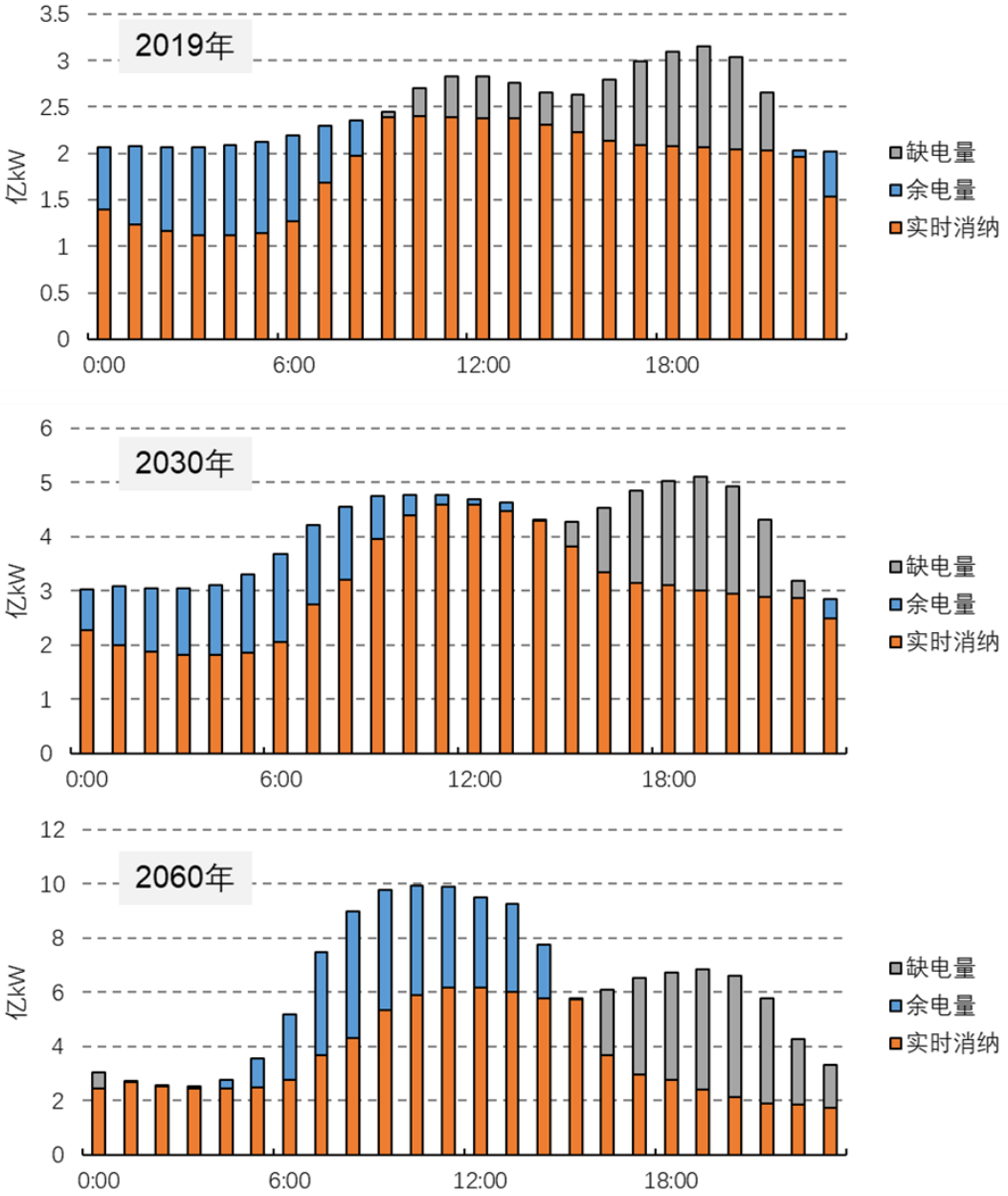


图 4-14　不同时期的典型日电力供需

4.5.2 不同时间尺度的调峰需求差异大，建筑柔性主要解决日调峰需求

图 4-15 的储能容量需求考虑了正负调峰需求的动态抵消，而图 4-17 的累计

储能量是指正或者负调峰需求的累计量。举例来说，安装蓄电池来解决建筑负荷的日调峰需求，蓄电池的安装容量是按照单日调峰需求的最大值来选取的，但由于每天都会充放，所以全年累计的储能量跟安装容量*365 处于同一量级。

对比图 4-15 和图 4-17，在日、周、月、年的不同时间尺度下，建筑负荷调峰的储能容量需求差异很大，的调峰需求差异很大。如图 4-15 所示的取在 2060 时间节点分析，下，不同时间尺度的调峰需求量储能容量需求从 45 亿 kWh 到 3300 亿 kWh 不等，因为。因为时间尺度越长，天用电需求差异、季节用能模式差异所导致的调峰需求越明显。然而，全年累计储能量差异却不是很大，都在 8000~9000 亿 kWh 之间。

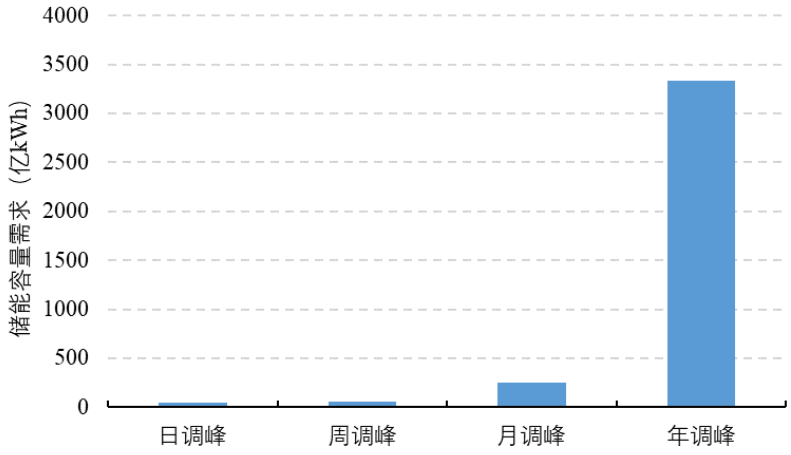


图 4-15　不同时间尺度建筑调峰的储能容量需求（2060 年）

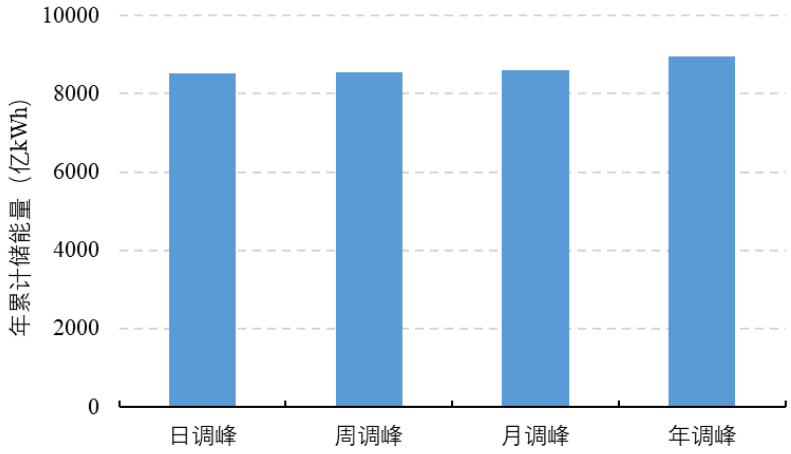


图 4-16　不同时间尺度建筑累计储能量（2060 年）

建筑柔性（负荷调节和电动车）对不同时间尺度的储能容量需求和累计储能量起不同程度的替代效果。在替代储能容量方面，建筑柔性几乎能解决全部的日

调峰需求，不依赖于电网储能和调峰电源。对于周调峰需求，建筑柔性只能解决50%，剩余 50%需要电网储能和调峰电源来解决。随着调峰需求的时间尺度增大，建筑柔性所能解决的比例越来越小，而对电网储能和调峰电源的依赖程度越来越大。月调峰需求中建筑柔性只能解决 27%，年调峰需求中建筑柔性只能解决 8%。在年累计储能量方面，建筑柔性解决日调峰具有最好的效果，所以，建筑柔性主要解决日调峰需求，如图 4-17 所示。

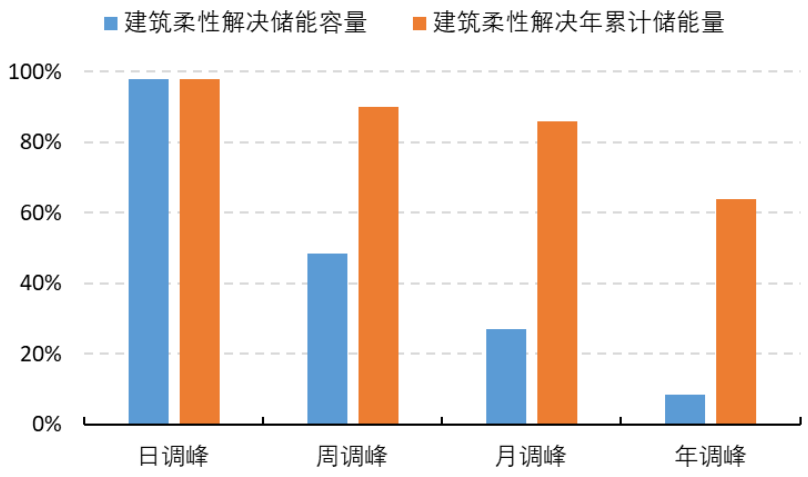


图 4-17　建筑柔性解决储能容量和年累计储能量的比例

4.5.3 不同日的调峰需求不一样，储能承担基础调峰需求，削峰弃电承担尖峰调峰需求

由于发电负荷和用电负荷的差异，不同日的调峰需求也有明显差异。如图 4-18 所示是全年 365 日的调峰需求的排序图，仅有 7 天的调峰需求超过最大量的 80%，而有超过 280 天的调峰需求介于 40%和 80%之间。

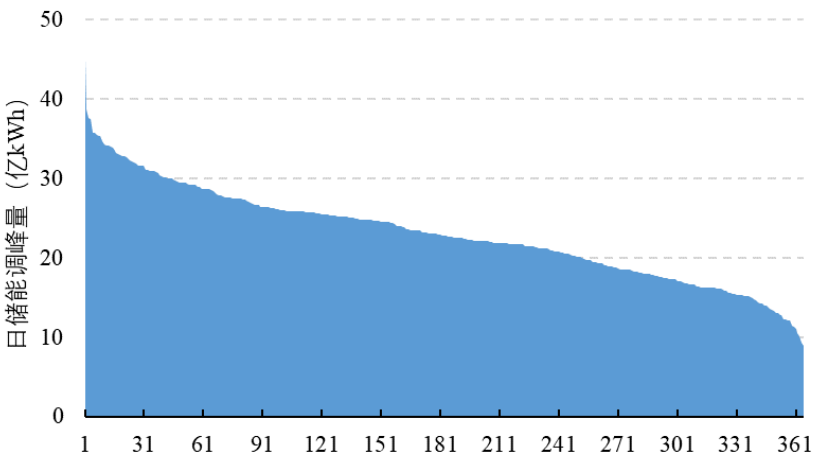


图 4-18　日调峰需求排序图（2060 年高速情景）

负荷削峰会影响用户舒适性，电源弃电会影响发电经济性，因此这两种调峰方式不应滥用，而主要集中解决尖峰问题。储能电池、蓄冷蓄热装置等实现负荷迁移的方式，对用户舒适性影响不大，但是有初投资成本，所以用于承担基础调峰需求，如图 4-19，可以增加利用率，提高经济性。

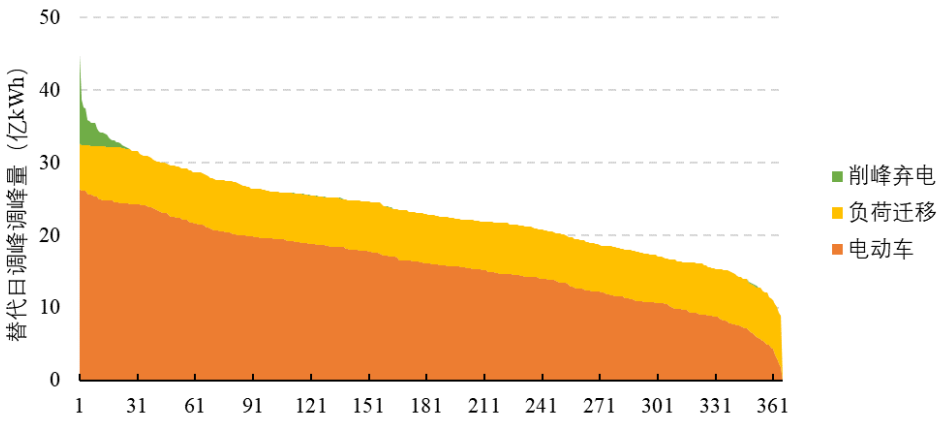


图 4-19　日调峰需求排序图（2060 年高速情景）

4.5.4 建筑消纳纯光伏的难度大于消纳混合电力

从能源消费者的角度考虑，建筑应该分担与其耗电量相对应的电力调峰责任。前面的分析假设建筑所消耗电量的风、光、水、核、火占比与整个电力系统的各电源发电量比例相同，即在 2060 年时间节点下风:光:水:核:火=38%:32%:12%:10%:8%。前面分析得出在该电源结构下，建筑柔性调节完全可以满足日调峰需求，甚至还有调节能力富余。

从分布式光伏就近消纳的角度考虑，建筑屋顶可安装的太阳能光伏板约 27

亿 kW，年发电量 4 万亿 kWh，与未来的建筑用电量基本相当。假设由建筑承担屋顶光伏的调峰责任，以光储直柔建筑和电动车的能力在高速发展情景下也只能替代 90%的日调峰储能量，电力系统还需要承担 10%的日调峰任务，如图 4-20。

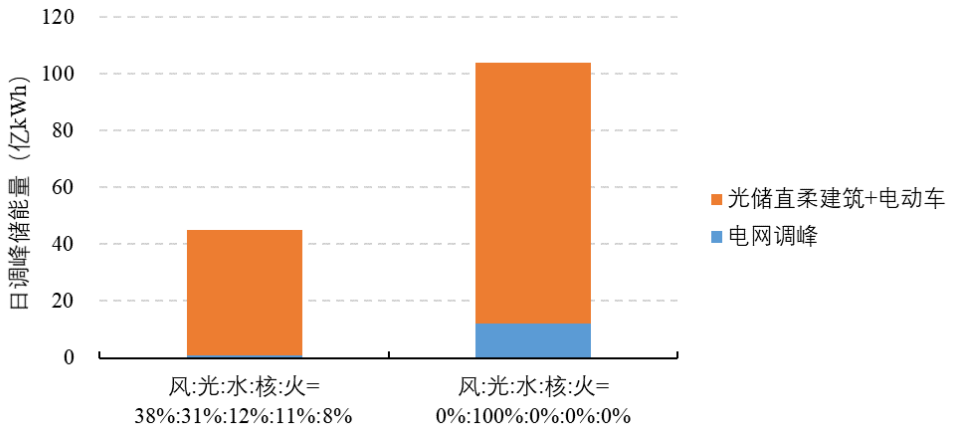


图 4-20　不同电源结构下建筑和电动车的调峰效果（2060 年高速情景）

4.5.5 光储直柔建筑和电动车未来完全可以满足日调峰需求

随着建筑用电量的增长和波动性电源比例的增加，建筑的日调峰需求逐年增长。如果用户侧不参与调峰，所有调峰任务全部由电网承担，如图 4-21 虚线所示。“光储直柔”建筑和电动车放电技术的发展对于缓解电网调峰压力起到了重要作用。即使在低速情景下，“光储直柔”建筑和电动车的调节能力也可以替代超过一半的日调峰储能量。在高速情景下，建筑对于电网调峰储能量的依赖程度在 2030 年达峰，而后迅速下降；到 2050 年至 2055 年间，建筑日调峰基本摆脱对电网的依赖。“光储直柔”建筑和电动车的调峰能力完全可以解决建筑用能的日调峰需求，富余能力可以进一步用来解决其他用能领域的调峰需求或者解决更长时间尺度的调峰需求。

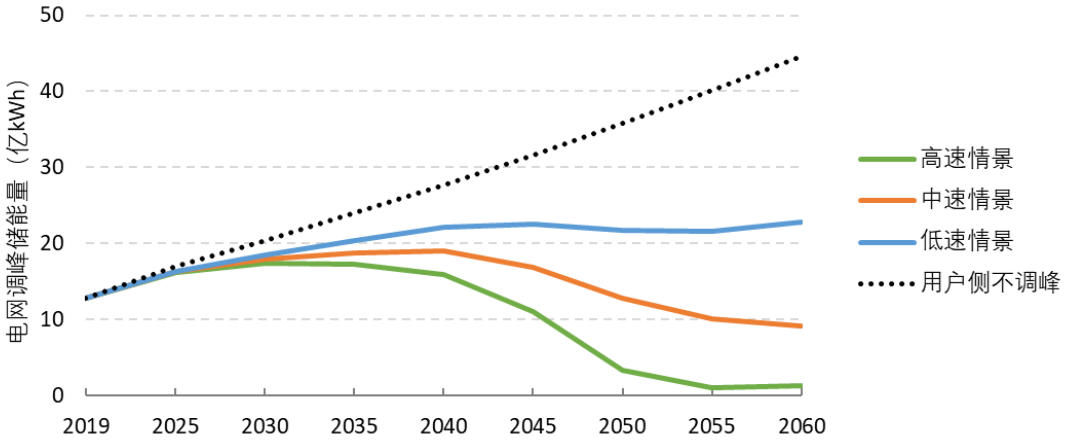


图 4-21　各情景的电网调峰储能量

4.5.6 建筑柔性应先从柔性设备和储能设施挖潜，逐步转到建筑与电动车交互

随着需求侧建筑用电量增长和供给侧风光电占比提升，可再生能源消纳所需的日调峰量也随之增加。图 4-22 是高速发展情景下，由柔性设备、建筑储能、电动车以及电网分别承担的日调峰责任：

- 2020-2030 年：柔性设备、建筑储能处于发展的起步阶段，电动车的充电模式开始向柔性充电转变，放电技术尚未开始规模推广。增量可再生能源消纳所需的日调峰增量主要靠柔性设备和建筑储能设施的挖潜。建筑对电网调峰的依赖程度增速减缓，到 2030 年左右达到峰值。
- 2030-2050 年：柔性设备、建筑储能、电动车放电技术均进入快速发展阶段，其中柔性设备和建筑储能基本能够抵消可再生能源消纳所需的日调峰量的增量，而电动车放电技术的推广可以促使建筑对电网调峰的依赖程度迅速下降。
- 2050-2060 年：柔性设备、建筑储能、电动车放电技术进入充分发展阶段，柔性设备、建筑储能的发展速度逐渐放缓，由电动车放电技术承担主要的日调峰任务。

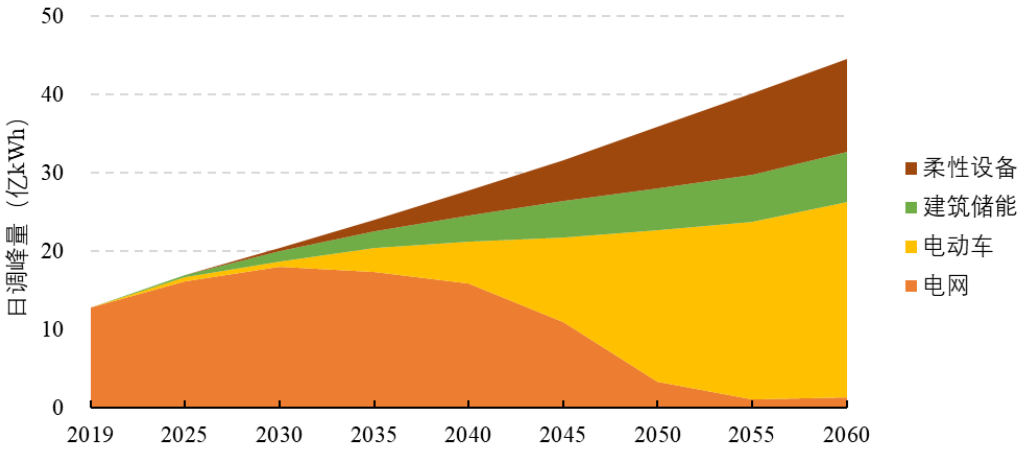


图 4-22　高速情景下的建筑柔性调节作用

4.6 不确定性因素

模型主要输入参数的不确定性是导致计算结果出现偏差的重要原因，影响模型变量的主要因素：

- **不可预期的替代性新技术**

技术发展日新月异，未来可能出现更高效、更绿色、更低碳的新技术。如 2020 年国家能源局发布《中华人民共和国能源法（征求意见稿）》首次将氢能正式列为能源，随后国家“十四五”规划也确立了其战略地位。氢能可以弥补电化学储能难以实现长周期调节、核心稀有金属材料依赖进口以及全生命周期污染严重等不足，实现从秒级到季节的负荷平移与优化，对全时段源荷电量平衡具有重要意义。虽然当前氢储能系统效率仅为 30%~40%，比抽水蓄能和电化学储能要低得多，碱性电解设备、燃料电池等技术成熟度、系统寿命等有待验证，但随着技术研发与工程实践的开展与深入，未来或将对光储直柔应用起到更大的推动作用。除了氢能，还有核能、化石能源+碳捕捉与封存技术等，也属于可以提供稳定电力服务的能源组合，这些技术未来发展和成本也会对光储直柔应用带来影响。

- **更低成本的建筑光伏技术**

经过十几年的发展，我国光伏产业已形成国际竞争优势，光伏组件发电效率及成本优势均在近年大幅下降，未来或将进一步改善其技术经济性。如 3.1.3 节所述，钙钛矿电池被业界普遍认为是代替传统硅电池的最理想材料，其制造简单，生产成本低廉并且光电转换效率已仅次于单晶硅电池，且仍具有较大提升潜力。

此外，光伏组件与建筑一体化技术的持续研发，也将推动立面光伏的应用，未来更低成本的建筑光伏技术不再遥远。

- **储能材料变革与安全性、经济性改善**

在“双碳”目标下，风电光电装机的大幅提升催生储能的大规模装机需求，从调峰调频到备电、价差套利，储能将成为“风光”需求提升的必然选择，也是新型电力系统的重要部分。过去十年电池价格的大幅下跌（下降了 85%）使电池储能成为了一种经济性越来越高的选择，一些燃气调峰电厂逐步转向可再生能源发电加电池储能的方案。建筑储能也随着建筑光伏的推广而逐步开始工程应用，包括用户侧储能、电动车等。2021 年以来，国家相关部委出台了《关于加快推动新型储能发展的指导意见》、《“十四五”新型储能发展实施方案》等多部储能推广政策，明确了到 2025 年实现新型储能从商业化初期向规模化发展转变，装机规模达 3000 万千瓦（30GW）以上，也强调了储能安全、强化电化学储能安全技术研究等，同时推动新型锂离子电池、液流电池、压缩空气等新型储能应用。从现阶段储能电池技术与经济水平看，提升储能安全性、经济性，以及提前的需求规划政策是未来储能快速发展的重要催化。未来，考虑到成本的进一步下降，电池的使用将会在 2030 年前持续扩大，并在此后随着非水可再生能源比例升高而迅速增长。随着储能材料变革与安全性、经济性提升，如钠离子电池、锌和铝空气电池、铁流电池、锌-溴流电池等[18]将对各类电力存储、长时储能等带来巨大影响。

- **新充电文化的接受度**

电动车电池的冗余容量，是未来可供建筑使用的潜在储能，在电动车保有量快速增长的趋势下发展潜力巨大。要想利用电动车电池来帮助建筑削峰填谷，前提是要健全双向充电桩的基础设施，并且培养用户的双向充放电习惯。具体而言，除加快电动车放电协议标准的制定，推动直流双向慢充桩在建筑周边停车场的建设，探索有序充电和双向充放电的商业模式，更重要的是形成新的充电文化，传播电动车在建筑节能和新型电力系统中的商业价值和柔性价值——不仅仅是交通工具，更是移动“充电宝”。

- **柔性价值的变现度**

建筑光储直柔的柔性价值，体现在建筑可调节负荷、电动车或以虚拟电厂形

式聚合等参与到电力服务辅助服务过程中。随着电力辅助服务和现货市场的完善，将进一步通过市场补偿机制打开负荷调节的收益空间。建筑蓄热蓄冷和围护结构热惰性使负荷调节成为了可能，电动车接入建筑配电网实现双向充放进一步增强了建筑负荷的调节能力。如果电动车直接接入电网，新增配电容量将超过 5 亿 kW，新增电力需求将超过 1 亿 kW，相当于全国最高用电负荷的 1/10 左右。相反接入建筑配电网，不仅能充分利用现有建筑配电冗余，增加用电柔性的同时不向电网馈电。以调节持续时间 2 小时为例，建筑负荷调减率可超过 20%，采用光储直柔技术的建筑，甚至可以实现 24 小时按照可再生能源发电规律连续调节。未来通过负荷灵活性调节，并与其停车场的充电桩系统结合，建筑可以解决 20~40 亿 kW 可再生能源的日平衡问题，并消除目前由于建筑用能导致的负荷侧的巨大波动，从而为工业用电提供可靠的保障[17]。然而，无论是经济价值还是减碳效益，建筑柔性的价值在既有的政策机制下都还没有得到充分体现。虽然很多省市出台了需求响应政策，对参与需求响应邀约并成功响应的用户给予补贴，但是大部分省市的需求响应仍处于试点阶段，每年的响应频次不确定，用户收益无法保障。其他的变现途径也还在酝酿当中，例如建筑参与辅助服务、电网发布动态碳排放因子、零碳建筑的评价认证等等。柔性变现政策机制的发布时间和推广效果直接影响建筑柔性设备、储能设施、电动车柔性充放等技术的实施进度，是未来情景预测中的不确定因素。

- **建筑电力交互的商业模式**

建筑具有柔性调节能力不代表它就能为电网所用，需要合理的商业模式和政策机制来协调建筑与电网的友好交互。目前，建筑与电网交互机制主要是峰谷电价、电力市场和需求响应：（1）峰谷电价也称“分时电价”，按高峰用电和低谷用电分别计算电费的一种电价制度，高峰用电一般出现在白天，收费高；低谷用电一般出现在夜间，收费低；（2）电力市场跟峰谷电价类似，也是通过不同时段的电力价差引导终端用户合理规划用电负荷，随着电力市场的用户覆盖面逐渐扩大，市场电价会逐渐替代峰谷电价的作用；（3）需求响应则是当电力批发市场价格升高或系统可靠性受威胁时，电力用户接收到供电方发出的诱导性减少负荷的直接补偿通知或者电力价格上升信号后，改变其固有的习惯用电模式，达到减少或者推移某时段的用电负荷而响应电力供应，从而保障电网稳定，并抑制电价上

升的短期行为。然而，既有政策机制在引导建筑用户进行柔性调节时仍存在以下两方面问题：

（1） 既有政策普遍以优惠电价或者经济补偿来激励终端用户进行柔性调节，反映了建筑柔性调节的经济收益，但是没能反映建筑柔性调节的低碳效益。而且，经济收益与电力市场的建议进度密切相关，目前建筑用能能够参与的交易品种还比较少，电网发布给建筑的调节需求量也较少，导致当前建筑参与电网交互的经济收益不佳。所以，可以考虑通过减碳激励来引导用户的柔性调节，例如逐时变化的态碳排放因子等。

（2） 建筑单体配电容量较小，往往无法直接参与电力交互，而且建筑运维人员普遍不具备参与电力市场的技术能力，建筑单位一般无法直接与电网交互。售电公司和负荷聚集商在现阶段又极少开展建筑与交互的业务。所以，为了推进建筑与电网技术的加速发展，需要一种更简洁、直接沟通电网与用户的信息传递方法。

5 光储直柔目标、策略与实施路径

5.1 目标与策略

“光储直柔”通过发展分布式的可再生能源、提高建筑配电能效和智慧能源管控水平、聚合建筑周边的灵活性资源与电网友好互动，在绿色节能的基础上进一步摆脱对化石能源的依赖，实现建筑清洁转型和零碳用电。基于建筑用电量、可再生电源以及电动车数量的发展趋势，逐步增加建筑光伏的安装容量、光储直柔建筑的面积、提高与建筑双向交互的电动车比例、提高建筑承担的日调峰比例。

整体目标：解决可再生电力日平衡问题

目标分解：在 2030 年、2040 年、2050 年、2060 年逐年目标规划见表 5-1。

- 表 5-1　光储直柔建筑未来发展目标

指标	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
电气化率城市	55%	67%	80%	85%
电气化率农村	30%	55%	75%	90%
建筑光伏安装容量（亿 kW）	2	8	16	20
建筑负荷日调节能力对应的可再生能源装机容量（亿 kW）	0.5	3.7	13.4	30

策略：

“光储直柔”建筑的发展应该遵循因地制宜的原则，城乡差异化发展。如图 5-1，在城市地区，发展以“储”和“柔”为核心的“光储直柔”配电系统，发挥建筑的资源聚合作用，使建筑成为虚拟电厂，主动调节建筑负荷，与电动车、电力系统的双向友好互动，提高电力系统的经济性，提高可再生能源的消纳比例。在农村地区，发展以“光”为核心的“光储直柔”配电系统，围绕农村建筑屋顶和周边场地的太阳能资源全面开发，推动农村用能电气化、农业机具电动化、用电管理有序智能化，建设村级直流配电网和蓄电蓄热设施，促进光伏发电的高效利用和充分消纳。围

绕“光”、“储”、“柔”的新业态、新场景，发展以“直”为纽带的新型建筑电力系统，提高建筑用电高效化和智能化。光储直柔建筑未来发展策略见**错误!未找到引用源。**。

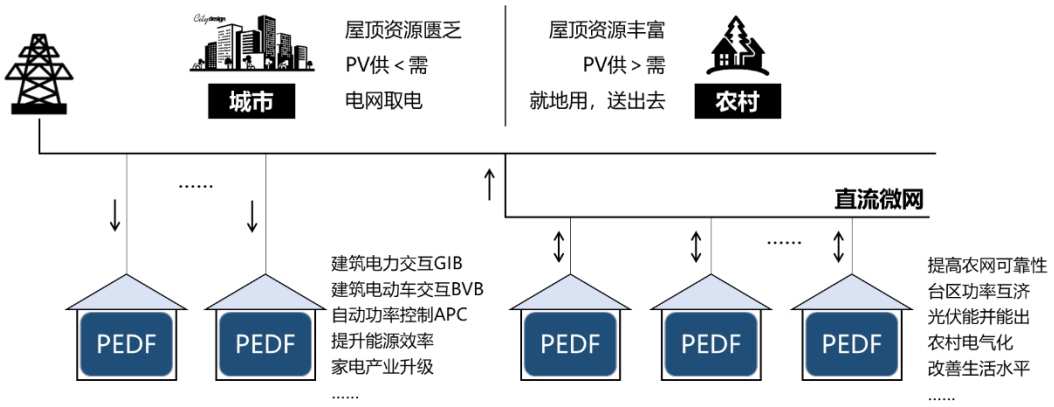


图 5-1　光储直柔在城市和农村的发展策略

- **城市以“柔”为主，只进不出**

城市电价高于农村，光伏发电削减高峰用电负荷的经济效益好，而且还能降低台站超载风险、缓解配网增容压力，产生潜在的电网经济运行效益。但是，城市土地价值高，光伏安装对建筑屋顶和立面的使用功能和造型美观的影响都是不可忽视的。很多项目通过架高铺设光伏保留屋面使用功能或者选用具有装饰性功能的光伏组件，无疑会增加设计和建设的成本，尤其是体量规模小且定制化程度高的条件下。所以，城市建筑适宜着重发展柔性调控技术和建筑电力交互，尽可能消纳可再生电力。

- **农村以“光”为重，只出不进**

建筑屋顶、立面、以及周边场地是发展太阳能光伏的宝贵资源。尤其在农村地区，土地资源丰富，光伏发电潜力巨大；且农村建筑用能强度较城市低，充分利用周边的太阳能资源从总量上能满足建筑的基本用能需求。围绕分布式光伏建设的“光储直柔”配电系统较远距离架电线在供电成本和维护费用上都具有明显的优势，而且可为当地居民提供负担得起且清洁环保的电能，极大改善农村地区居民的居住条件和生活质量，同时向城市地区输送余量电力，成为农村居民新的经济收入来源。但是，农村分布式光伏发展需要充分关注消纳和外送问题，一方面推进农村炊事、采暖、热水用能的电气化，推动农机具的电动化，尤其是使用带有柔性调节能力和储能的设备，提高就地消纳能力；另一方面加强农村配网建

设和外送通道建设，优化匹配不同农户的发电资源和用电需求，为城市提供绿色电力。

- **城市先公建后住宅，农村挖掘“光伏+”**

由于城市公共建筑与光伏的一致性较好，而且新建公建都具有数字化系统易于柔性实现，所以由政府办公建筑带头，新建公建跟进，发展分布式光伏，发展柔性充电技术，鼓励柔性用电，开展光储直柔公建与电网交互的试点示范。推动公车电动化和有序充放电模式，开展公车与建筑双向互动的示范。同时，加强对公众的引导与教育，改善柔性用电的用户体验。

而农村光伏难以消纳与并网已成为分布式光伏发展的主要障碍，即使政策大力推进分布式光伏、鼓励千村万户电力自发自用，光伏发电“用不了”和“出不去”两个矛盾仍比较突出[19]。根据农村光储直柔新型能源系统实践与示范，农村可挖掘“光伏+”模式，把光伏发电系统组成直流微网，通过柔性变换器和各个台区及电网交互，解决目前多点户用光伏并网带来的问题，实现柔性用电；另一方面，直流微网解决了不同台区之间的电力调度，先就地、就近消纳光伏发电，余电集中上网时可选择有余量的变压器，可实现在既有变压器容量下的并网分配，解决了变压器扩容成本的问题，还能提高农村电网可靠性、实现台区功率互济、光伏并网配置，在提高农村建筑电气化和居民生活水平方面具有重要意义。

- **柔性挖掘先从柔性设备和建筑储能着手，逐步过度到建筑电动车交互**

建筑用电柔性来自于三方面，一是建筑用电设备，在保障生产生活基本质量的前提下，通过优化设备的运行时序，错峰用电；二是储能设施，投资建设储能电池、蓄冷水箱、蓄冰槽、蓄热装置等，直接或间接地实现电力的存储；三是电动车，通过智能充电桩连接电动车电池和建筑配电系统，在满足车辆使用需求的基础上，挖掘冗余的电池容量，使停车场中电动车发挥“移动充电宝”的作用。2030 年前，柔性设备、建筑储能处于发展的起步阶段，电动车的充电模式开始向柔性充电转变，放电技术尚未开始规模推广，主要靠挖潜柔性设备和建筑储能设施满足可再生能源消纳所需的日调峰增量。2030 年后，靠柔性设备和建筑储能的快速发展抵消可再生能源消纳所需的日调峰量的增量，靠电动车放电技术的推广促使建筑对电网调峰的依赖程度迅速下降。2050 年后，建筑柔性完全解决建筑用能的日调峰量，多余能力可以进一步解决其他用能领域的调峰需求或者解决

更长时间尺度的调峰需求。

表 5-2　光储直柔建筑发展策略

领域		着力点	说明
城市“只进不出”	公建	建筑光伏	强制标准或政策中明确
		电气化率 100%公建试点	减少直接碳排放
		公共机构推动公车电动化和有序充放电示范	发展建筑与电动车双向互动技术，探索商业模式，为 2030 年后 BVB 规模化应用准备
		开展与电网交互的试点示范	利用建筑柔性设备和储能，市场化推进光储直柔公建参与电力调峰
	住宅	建筑光伏	强制标准或政策中明确
		电动车有序充电	光伏+电动车有序充电，逐步形成新的充电文化，为 2030 年后 BVB 规模化应用准备
农村“只出不进”	用不了	光伏+	推进农村的建筑电气化、农机具电动化、电动车普及化、清洁采暖
	出不去	直流微网+台区互联	增强本地电网可靠性，并通过储能和柔性用电平衡光伏发电，探索只出不进的柔性外送

5.2 实施路径

光储直柔技术现阶段仍处于发展初期，其应用及推广离不开全社会对零碳电力和柔性用电的认知，离不开发电侧与用电侧的协同共识，离不开政府部门的带头示范，离不开商业模式与机制的探索与构建，更离不开持续的技术攻关与设备研发。总体上看，近期侧重政策与科技研发，近中期重点在于示范，中远期则在于柔性价值突破（如图 5-2）。具体推动光储直柔建筑发展应从以下方面入手：

图 5-2　光储直柔实施路径

1. 从标准入手，确保太阳能光伏应用

随着建筑电气化水平的提升，以及太阳能光伏组件效率的显著提升和成本的持续下降，建筑光伏发电已具备良好的应用场景。同时，太阳能光伏发电系统简单高效，运行维护要低，建筑屋顶、立面等作为有限资源，已有国家及部分地区标准开始推广太阳能光伏系统应装尽装。如北京市《居住建筑节能设计标准》（DB11/891-2020）要求 12 层以上的建筑应有不少于全部屋面水平投影面积 40%的屋面设置太阳能光伏组件。国家标准《建筑节能与可再生能源利用通用规范》（GB 55015-2021）也对新建建筑太阳能系统安装做出了强制规定，但未对具体应用量提出要求。因此，需进一步从标准入手，推动更多适宜地区建筑屋顶太阳能光伏系统应装尽装，实现建筑屋顶、立面等有限资源的有效利用，使建筑逐步由用电者转为产消者。

2. 推动充电桩与建筑停车位绑定，成为规划审批的重要组成

由 4.6 节可知，电动车在建筑节能和新型电力系统中具有显著的商业价值和柔性价值——不仅仅是交通工具，更是移动“充电宝”。随着电动车的大力推广，充电设施逐渐成为新能源车发展的限制因素。中国电动车充电基础设施促进联盟发布的数据表明，当前车桩比约为 3:1，其中 50%以上的充电桩为私人充电桩。而私人充电桩接口兼容性不高、地理分布不均、缺乏电缆配套等问题显著，从而

有一定的安全风险。为解决充电难问题，实现 1:1 车桩比，需推动充电桩与电动车解绑、与建筑停车位绑定，实现停车场“一位一桩”，倡导使用者“既停既接”，彻底改变电动车的充电状况。将充电桩建设作为规划审批的重要组成纳入城市规划和建筑设计，与城市建设同步发展。

3. 公共机构示范先行，尤其是建筑电动车交互（BVB）

公共机构以政府办公建筑为主，且多为多层建筑，屋顶可安装面积较大。且由 2.2 节可知，办公建筑用电负荷集中在白天，与光伏发电出力时间匹配。同时，公共机构公车数量较多，若采用建筑电动车交互技术，电动车接入建筑配电网后使得建筑不仅仅服务于电动车充电，还使得电动车电池供建筑用电也成为可能。以一辆电动车为例，60kWh 的电池即可实现 1000m² 办公建筑约 10 小时的用电，大约 50 辆电动车就能实现 1 万 m²建筑 1 天的离网运行。这对于降低当前电网峰值负荷压力具有重要意义，同时能够在一定程度应对台风、暴雨等极端天气灾害的应急用电需求。建议优先在峰谷电价四倍以上城市开展光储直柔，已经具备经济性。

4. 探索零碳标识认证，解决“帽子”驱动力

探索建筑柔性用电减碳价值的量化方法，研究动态碳排放因子和基于柔性用电的绿色电力消费认证机制。加快零碳建筑评价认证标准编制，完善建筑碳排放核算方法，通过零碳建筑的“帽子”驱动“光储直柔”建筑的健康快速发展。

5. 探索建筑电力交互（GIB）商业模式，解决“利益”驱动力

探索建筑虚拟电厂参与电力交互的负荷聚集商模式，明确参与主体责任，解决相关方的利益述求。尽快出台建筑用户参与电力交互的实施办法，提高需求响应的频次和补偿单价，按照“谁受益、谁承担”的原则探索补偿市场化分摊机制，解决补贴资金的可持续性问题。开展建筑负荷规模化参与电力交互的试点示范，推动建筑虚拟电厂技术、建筑电力交互模式与机制的落地。

6. 组织技术与产品装备的科技攻关，解决 1-100 多元化

加快建筑机电设备直流化与产品开发，实现建筑直流机电设备柔性柔度主动调控功能，制定直流柔性设备的插头插座标准和柔性调控技术标准，研制多样化的直流柔性机电设备，满足办公、住宅、宾馆等多种建筑类型的功能要求，开展集成化示范推广。

研究新型建筑电化学储能技术，通过电池材料的优选、排布结构和位置选取的优化，提高建筑电化学储能的安全性和经济性，研究与建筑用能负荷相适应的电池管理技术，建立建筑电化学储能的技术标准。

研究建筑负荷柔性的量化评价指标，综合考虑建筑负荷的可调节能力和电网调节需求提出建筑柔性的基本要求，建立建筑负荷柔性的评价标准。基于典型建筑场景的使用功能需求，结合楼宇自控条件，研究建筑负荷柔性控制的低成本实现方法，促进建筑柔性用电技术在既有和新建建筑中的规模化应用。

参考文献

[1] 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/24/content_5644613.htm

[2] 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm

[3] 住房和城乡建设部关于印发“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划的通知[EB/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zfhcxjsbwj/202203/20220311_765109.html

[4] U.S. Department of Energy. A National Road map for Grid-Interactive Efficient Buildings[R]. May 15, 2021.

[5] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2022（公共建筑专题）[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

[6] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2021（城镇住宅专题）[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[7] Chen Q , Kuang Z , Liu X , et al. Energy storage to solve the diurnal, weekly, and seasonal mismatch and achieve zero-carbon electricity consumption in buildings[J]. Applied Energy, 2022, 312:118744.

[8] 南开大学张晓丹教授：钙钛矿及其叠层太阳电池现状及发展趋势[EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/6jPXW9Iwn3tRrEi1_Q6Ndw

[9] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图（2021 年版）[R]. 2022.

[10] NREL. Best Research-Cell Efficiency Chart [EB/OL]. https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[11] IRENA. Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030[R]. October 2017.

[12] 江亿，郝斌，李雨桐等.直流建筑发展路线图 2020-2030(II)[J].建筑节能(中英文),2021,49(09):1-10.

[13] 团体标准《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030-2022.

[14] 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”新型储能发展实施方案》的通知[EB/OL].https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220321_1319773.html?code=&state=123

[15] Li M M, Zhan X, Polikarpov E, et al. A freeze-thaw molten salt battery for seasonal storage[J].

Cell Reports Physical Science, 2022.

[16] IEC. Electrical energy storage white paper 2011[R]. December, 2011.

[17] 中国建筑节能协会光储直柔专业委员会.《携手零碳——建筑节能与新型电力系统》[R]. 2022.

[18] NITI Aayog, RMI. Need for Advanced Chemistry Cell Energy Storage in India [R]. April 2022.

[19] 郝斌.乡村光储直柔新型能源系统构架与挑战[J].可持续发展经济导刊,2022(04):46-47.

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。