



让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together

中瑞零碳建筑项目

技术报告

综合能源规划

能源枢纽介绍及示范工程案例分析

中文版



2024年8月



中华人民共和国
住房和城乡建设部



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Agency for Development
and Cooperation SDC



环能科技

intep

skat



让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together

本报告系在中瑞零碳建筑项目框架下编制。该项目由瑞士发展与合作署资助，并与中华人民共和国住房和城乡建设部合作实施，旨在推动国际合作与交流。

作者:

朱继龙、王昕昱、Roland Stulz、路枫博士 | 瑞士茵态 (intep) 综合规划咨询有限公司

Wesley Wojtas | 瑞士Skat 咨询公司

内容贡献与审阅人员:

无锡示范工程项目团队

大连示范工程项目团队

设计与排版:

Intep-Skat 联合团队

intep
skat

引用格式:

朱继龙. 王昕昱. Roland, S. 路枫. 综合能源规划-能源枢纽介绍及示范工程案例分析报告:《中瑞零碳建筑项目技术报告》[R]. 苏黎世: Intep-Skat, 2024.

中瑞零碳建筑项目是由瑞士发展与合作署资助，并与中华人民共和国住房和城乡建设部合作开展的国际合作项目。该项目旨在通过分享瑞士在可持续及零碳建筑领域的先进经验，推动减少温室气体排放，助力中国建筑行业实现碳中和发展。

项目实施团队:

瑞士茵态 (intep) 综合规划咨询有限公司

瑞士Skat 咨询公司

中国建筑科学研究院

微信公众号:

SinoSwissZEB



网站:

zeb-china.org



封面图片: 中瑞零碳建筑项目无锡示范工程-无锡市尚贤湖基金PARK二期建设项目



目录

1.	引言	2
2.	E-HUB方法及网页应用平台	6
3.	过程与方法	8
4.	无锡示范工程成果及分析	11
5.	大连示范工程结果及分析	14
6.	经验总结	17
7.	开放讨论	19
8.	附录	20



1. 引言

1.1. 关于中瑞零碳建筑项目

为了共同应对全球气候变化,加强中瑞两国在建筑行业减排领域的合作,2020年11月24日,中华人民共和国住房和城乡建设部与瑞士联邦外交事务部签署了在建筑节能领域发展合作的谅解备忘录。在此备忘录框架下,瑞士发展合作署(SDC)发起并资助了中瑞零碳建筑项目,旨在通过引入瑞士的经验和技术,支持中国制定零碳建筑技术标准和建筑行业中长期碳减排路线图,并在不同气候区建设零碳建筑示范工程,同时开展多种形式的能力建设活动,最终推动中国建筑行业的碳中和发展。

项目目标:

- 将现有建筑能效标准升级至零碳建筑技术标准
- 在中国4个典型气候区实施示范项目,以测试新的零碳建筑标准并寻找优化潜力
- 开展零碳建筑设计能力建设以及相关的知识传播

项目起止时间:

2021年3月15日至2025年11月30日

项目对保护气候的影响:

减少建筑行业的二氧化碳排放

1.2. 无锡和大连示范工程简介

1.2.1. 无锡示范工程

无锡示范工程地处江苏省无锡市,在既有国际合作低碳生态城建设基础上,致力于进一步探索低碳园区建设(包括零碳会议中心),打造无锡金融产业文化新名片。项目总建筑面积约为210980平方米,拟通过一系列的低碳技术措施,将本项目打造成我国夏热冬冷地区首个低碳数字化产业园区(以及建设国际级的零碳会议中心)。项目年单位建筑面积减碳量约38.0kg CO₂,碳减排潜力大,该项目致力于建设成为国内一流的低碳数字化产业园。

1.2.2. 大连示范工程

大连示范工程位于大连市中山区虎滩东沟,项目建筑面积约161,130平方米。项目规划设计条件明确要求,该地块项目全面按照国家标准《近零能耗建筑

技术标准》(GB/T51350-2019)中“近零能耗建筑”的能效标准进行设计与建造,并取消了传统集中供热形式。通过应用大量创新绿色低碳技术手段,采用水源热泵进行集中供暖和制冷,充分利用屋顶面积建设光伏等,在建筑所需空调、采暖、照明、电梯和生活热水等多项能耗大幅降低的前提下,实现住宅区一年四季维持恒温、恒湿、恒氧、恒静、恒洁的高标准室内环境品质。

1.3. 关于Sympheny

Sympheny成立于2020年,是瑞士研究机构Empa的一个衍生公司,专注于多能源系统的建模和优化,并在瑞士和欧洲的规划项目中应用创新的设计方法“能源枢纽(E-hub)”。Sympheny为建筑、社区和区域的能源系统规划提供了一种新的决策方法。该方法以创新的云端软件平台为基础,通过进行全面的能源系统规划,识别出最具成本效益和减碳效率的能源供应解决方案。为了借助“能源枢纽(E-Hub)”更加有效地评估示范工程的各种技术方案,充分利用可再生能源,加强系统耦合,使示范工程能够以最优的效率和成本效益实现能源供应系统的去碳化,中瑞零碳建筑项目瑞方实施团队Intep-Skat委托并陪伴Sympheny为选中的示范工程提供咨询。在项目实施过程中,中瑞零碳建筑项目团队与Sympheny团队和示范工程团队(统称为“项目团队”)通力合作,为示范工程提供了全面且详尽的支持,诸如方案审查,能源系统建模,专业建议,技术研讨会等。

1.4. 报告总结

本份报告总述了“基于能源枢纽为中瑞零碳建筑示范工程项目制定能源解决方案”的流程和方法。该能源枢纽方法被选定应用于大连和无锡的示范工程中。大连示范工程“大连市中山区虎滩东沟地块项目”原计划由大连胜鼎虎滩滨海置业有限公司开发,无锡示范工程“江苏无锡市尚贤湖基金PARK二期建设项目”则由江苏新慧恒工程项目咨询有限公司主导。

这两个项目的核心目标是探索能源解决方案,旨在最大限度地减少项目的温室气体排放,并形成商业案例。为实现这一目标,项目采用了“多能源系统优化法”,即“能源枢纽方法”,基于该方法研发的工具为评估不同能源系统的减排效果设定了统一框架,并能够



图1 无锡示范工程早期规划阶段的效果图和剖面图 (资料来源:2023年3月14日项目介绍, 中国建筑科学研究院)



图2 大连示范工程鸟瞰图 (资料来源:项目介绍, 都市城市设计集团)



通过数学优化识别最优的能源系统。此外，作为可以在Web浏览器运行的软件，该工具不仅能够支持项目实施过程中的协作开发，还可以实现在项目完成后继续访问数字模型，并基于实际情况进行调整。

系统设计方案，并在各个团队的协作下，为每个示范工程创建了能源系统的数字孪生模型，通过数字平台进行了展示。

两个示范工程的结果表明，整体和综合规划是实现经济减排的关键因素。项目团队在考虑投资成本的同时，还从生命周期的角度出发，量化和评估能源解决方案。报告中所展示的两个示范工程均确定了满足“低碳建筑”、“近零碳建筑”及更高标准的最佳系统设计，相关结果对今后的项目及研究也有一定的借鉴性。

无锡示范工程

无锡示范工程的初步能源系统设计在项目开始前已完成，并已达到低碳标准。为了进一步降低二氧化碳排放并实现零碳标准，采用了E-Hub方法对几种改进选项进行了评估。这些选项包括增加热能储存以及在南、东、西立面集成光伏板。分析结果表明，这些优化措施不仅使生命周期成本较初始系统设计降低了28%，还使二氧化碳排放量相比于最初设计减少了41%。

此外，还确定了一些超越零碳标准的进一步措施，如表格 1所示。这些措施包括全面安装立面光伏系统、引入电池以提高可再生能源自用比例，以及扩展

场地内部热能网络，以利用地热能更广泛地满足热能需求。尽管这些措施需要较高的前期投资，但相较于初始设计，它们能够降低13%的生命周期成本，并减少68%发二氧化碳排放。

大连示范工程

大连示范工程的初步能源系统设计在项目开始前就已准备就绪，并且已达到 GB55015 标准，然而与低碳标准略有差距。通过采用能源枢纽方法，项目团队确定了几种方案，以实现低碳、近零碳和零碳标准。

为了实现低碳标准，项目团队决定采用屋顶光热一体化(PVT)系统取代传统的燃气锅炉。这样一来，不仅保持了与最初设计相近的初始投资，还能够很大程度上减少碳排放量。在此基础上，为了达到近零碳标准，设计方案通过以下措施得到了进一步优化：在西南和东南外墙全面安装光伏板，同时引入热能存储系统和电池，以显著提升能源自给率。为了进一步完善并接近零碳标准，设计方案再次升级。通过在东南、西南和西北三个方向的外墙全面安装光伏板，并将电池容量增加 100 倍，设计最大限度地提高了建筑的自耗电比例。

为了在不大幅增加能源供应系统投资成本的情况下实现近零碳和零碳标准，替代措施还包括实施能效提升策略，以减少终端用户的总体能源需求。然而，这些方案涉及的技术与措施超出了本研究的探讨范围，因此未作深入分析。

两个示范工程的模拟结果均表明，在建筑物上集成光伏外墙系统对于经济有效地减少排放至关重要。

	基准方案/ 低碳标准	零碳标准	超零碳标准
碳强度[千克 CO ₂ /平方米/年]	26.9 (28.0)	15.9 (-50% Ref.*)	8.6 (<-50% Ref.*)
生命周期成本 [百万元/年]	6	4.3	5.2
投资成本 [元/平方米]	283	389	525
转换技术 [MW]	11.7	10.6	10
屋顶光伏 [MW]	1.6	1.6	1.6
立面光伏 [MW]	-	5.2	7
电池 [MWh]	-	-	5
地源热泵系统(钻孔) [MWh]	4279	2597	2987
热储能 [MWh]	0.6	2.3	10
热力网络 [MW]	-	-	2.1

表1 无锡示范工程的优化系统设计与初始设计对比(*参考文献:GB55015《建筑能源效率及可再生能源应用通用规范》)

虽然合作团队最初认为这种技术不具备经济性,但通过 E-Hub 方法对整体系统和生命周期进行深入分析,表明光伏幕墙系统实际上是一种切实可行的解决方案。团队利用 E-Hub 算法精确计算了幕墙光伏系统的最佳尺寸,并将其与其他已安装系统的规模进行了比较。这种方法不仅验证了光伏幕墙系统的经济性,还确保了整体设计的能源效率和可持续性。

需要指出的是,在该能源系统的规划模拟过程中,存在一定的局限性。尽管这些问题超出了本项目的分析范围,但除了探索能源系统的替代方案外,还需要评估降低能源需求的节能措施,比如增加自然通风、使用遮阳装置和实施夜间制冷等。除此之外,还需要注意建模过程中的一些假设,特别是在技术投资成本和运行排放方面的定义。本报告仅考虑了通过自我消费减少的排放量,即减少了对电网电力进口的需求。在本项目中,由光伏电池板产生的电力未被视为减排。然而,在某些定义中,这类清洁能源产生的电力可被视为排放抵消,因此这种差异可能会在一定程度上影响对结果的解读。

每个替代方案中的投资成本假设已获得合作方的认可,但这些假设的准确性可能会随实施阶段的不同而有所变化。例如,其中一个最主要的差异体现在两个示范项目对幕墙光伏板的成本假设。鉴于立面光伏系统是实现减排的关键技术,在确定最佳系统设计方案之前,需要仔细审查这些成本假设,以确保设计的经济性和可行性。

尽管存在这些局限性,各方都通过本次项目对系统设计策略以及对成本和排放的影响有了更深入的

理解。此外,也更清楚地认识到,从整体系统和生命周期角度进行能源规划的重要性。借助该平台,项目相关者能够更清楚地了解系统设计策略及其对成本和排放的影响。此外,能源系统迭代和完善的过程是知识转移的重要载体,针对大连和无锡示范工程,我们举办了一系列研讨会,来不断验证并改进模型,并提供完整的方案包,其中包括数据和可视化结果,可以详细展现最佳能源系统解决方案。在了解了成本和减排之间的关系后,借助该平台可以系统地检查与成本和效率相关的假设。例如,使用相同的建模框架进行价格趋势敏感性分析,进而确定对系统性能影响最大的组件,并确定可行的价格范围。这一过程为新技术进行更有针对性的市场研究提供了支持。

总体而言,此次合作取得了圆满成功,各方均表现出了高度的参与和积极性。在项目实施过程中,我们深入了解了各方诉求,为未来类似项目的顺利推进积累了宝贵的经验。同时,此次合作也充分彰显了在国际合作中,文化理解、语言偏好以及全面沟通的重要性。

	基准方案	低碳标准	近零碳标准	零碳标准
碳强度[千克 CO ₂ /平方米/年]	21.9	21.0 (21.0)	15.7 (16.0)	10.2 (-50% Ref.)
生命周期成本 [百万元/年]	4.8	4.4	7.1	48.6
投资成本 [元/平方米]	147	145	484	4009
转换技术 [MW]	5.5	3.4	3.4	3.6
屋顶光伏 [MW]	1.9	1.9	1.9	1.9
屋顶光热一体化系统 [MW]	-	0.01	0.01	0.01
立面光伏 [MW]	-	-	2	4
电池 [MWh]	-	0.03	0.4	36.9
热储能[MWh]	2	3	13	311
热力网络[MW]	3.7	3.5	3.5	3.6

表2 大连示范工程的优化系统设计与初始设计对比(*参考文献:GB55015《建筑能源效率及可再生能源应用通用规范》)



2. E-HUB方法及网页应用平台

E-Hub能源枢纽优化方法的核心在于,利用先进算法精准识别并设计出既适应现场环境又满足客户特定需求的最优能源供应解决方案。此方法着重于应对未来能源系统所面临的诸多挑战,尤其当建筑项目致力于达成诸如零碳排放、能源自给自足、产能提升以及负碳排放等新目标时,这些目标的设定极大地增加了能源方案设计的复杂性。为了实现这些宏伟目标,我们必须最大限度地提升现场可再生能源的利用率,优化各能源流之间的协同作用以及能量的梯级利用,并精确选择适合的能源转换和存储技术,以确保能源在时间维度上达到供需平衡,而传统的能源规划方法不足以实现这些目标。

凭借该方法及其开发的网页应用平台,能够采用一种全新的整体规划方法,对多种能源资源、能源流、能源需求以及技术供应解决方案进行了综合优化。其中,能源枢纽模型作为该软件的基石,已经在优化建筑、区域及城市能源系统设计和控制策略方面展现出了卓越的成效。这一优化模型基于混合整数线性规划(MILPs)算法构建,旨在实现整个生命周期内的总成本和排放量最小化,并在求解效率和准确性之间找到了完美的平衡点,从而确保了结果的最优性[2]。

MILP模型的约束条件包括:(1) 负荷平衡约束,确保每个时间点的能源供应与能源需求相平衡;(2) 容量约束,所有技术(例如,热泵、热电联产机组、电池)都在预设的容量范围内运行;(3) 排放量/成本约束,满足成本或排放量的限制。在目标函数中,决策变量包括技术容量及其运行计划 [2][3]。

在此基础上,用户无需具备数学建模的专业知识,即可通过该软件将其对项目的特定需求设置在MILP模型中。该软件具有友好的用户界面和详尽的可视化结果图表,为用户提供了一种一致、可扩展且高效的多能源系统规划综合分析工具。

2.1. Sympheny:简介与贡献

Sympheny 是瑞士研究机构 Empa 的一家衍生公司,成立于2020年,专注于多能源系统的建模与优化,并在瑞士及欧洲的规划项目中拥有应用创新“能源枢纽(energy hub, e-hub)”设计方法的丰富经

验。Sympheny推动了一种全新的能源系统规划决策方式,适用于建筑、社区及区域层面的能源规划。其核心是一款创新的、基于云端的软件平台,可实现能源系统的整体规划,并为任意场址识别出在成本和二氧化碳排放方面最优的能源供应方案。

Sympheny与intep-Skat团队紧密合作,为中国选定的示范项目(Demo projects)规划团队提供咨询支持,旨在通过帮助规划人员高效评估多种技术选项,并充分利用可再生能源及跨部门耦合(sector coupling)的潜力,以最高效、最具成本效益的方式实现能源供应脱碳化。

本项目是 Sympheny 团队、intep-Skat 团队以及位于瑞士和中国的中国示范项目(DP)团队之间的合作项目,在本报告中统称为 ZEB 项目团队。

2.2. E-hub 方法与 Sympheny 网络应用程序

该方法的核心在于利用算法来支持识别符合场地条件和客户需求的创新能源供应解决方案。其目标是应对未来能源系统规划中的复杂挑战,尤其是随着建筑项目中出现的“净零碳(net-zero CO₂)”、“能源自给(energy autarky)”、“正能量(positive energy)”以及“负碳(negative CO₂)”等新优先目标所带来的不断上升的复杂性。

实现这些目标需要最大化地利用场址内的可再生能源产出,优化不同能源流之间的协同效应与能量级联(energy cascading)机会,并选择合适的能源转换与储存技术组合,以在时间上平衡资源可用性与能源需求模式。传统的能源规划方法已无法充分应对这些要求。Sympheny 的软件使用户能够在一个集成的平台中,同时考虑并优化多种能源资源、能源流、能源需求以及大量可能的技术供应方案。

“能源枢纽模型(Energy Hub Model)”是该方法的核心支撑。该模型已被证明在识别建筑、社区及城市能源系统的最优设计和控制策略方面非常有效。这些模型被构建为混合整数线性规划(MILP,

Mixed-Integer Linear Programming) 问题,通常以最小化全生命周期成本与全生命周期排放为目标,能在求解效率与精度之间取得良好平衡。

MILP问题的主要方程包括:

(1) 负载均衡约束 (load balancing constraints): 确保在每个时间步内能源供给与需求相匹配;

(2) 容量约束 (capacity constraints): 确保各项技术 (如热泵、CHP 联合供热发电单元、电池等) 在定义的容量范围内运行;

(3) 排放或成本约束 (emission/cost constraints): 限制在一定时间内允许的总成本或排放量。

在目标函数中, 决策变量包括各项技术的装机容量及其运行调度。

基于这一核心框架, Sympheny 网络应用程序 (Web App) 使用户无需具备数学建模专业知识, 就能将项目需求转化为 MILP 模型。

凭借其友好的用户界面和详尽的结果可视化图表, 用户可以以一致、可扩展且高效的方式, 进行多能源系统规划的综合分析与优化。

3. 过程与方法

3.1. 项目结构

在2023年7月至12月为期六个月的时间内，项目团队为两个示范工程并行实施了相同的流程。整个项目被划分为三个阶段：首先是数字孪生建模（为期8周，详情请见8.1中的图13），紧接着是分析与讨论最佳设计方案阶段（同样为期8周），此阶段深入探讨了各种方案的优劣，力求精准定位最优解。最后，训练与知识转换阶段（8周）则聚焦于将理论与实践深度融合。

在此流程中，3.2节中“四步法”详尽阐述了前两个阶段的具体操作细节，确保了每一步都稳健前行。尤为值得一提的是，项目团队通过每周的在线互动会议，积极邀请并鼓励所有利益相关者的参与，不仅加深了示范工程团队对工具的理解与掌握，更促进了跨领域、跨部门的紧密合作与信息共享。

进入最终阶段，通过精心策划的多次在线培训，不仅实现了从理论到实践的平滑过渡，还极大地提升了参与者对能源系统数字孪生技术的驾驭能力。两个示范工程团队均成功构建了全面的数字孪生模型，并获得了软件的全面访问权限，为后续深入研究与应用打下了良好基础。此外，值得一提的是，2023年10月举办的线下研讨会，为项目团队与示范工程间深入交流提供了机会。会议不仅评估了该方法在中文环境下的适应性与拓展潜力，更为后续的合作与创新提供了宝贵的反馈与灵感。

3.2. 多能源系统最优规划的四步法

3.2.1. 步骤 1: 评估现状，确定目标

在这一阶段，项目团队之间交换了初步能源概念、具体边界条件，以及用于评估所设计能源系统的相关指标。

由于地方政策、利益相关者的资源和优先事项各不相同，每个项目的性能目标也会有所差异。因此，统一性能目标的定义和量化方法至关重要。

在中瑞零碳建筑项目的框架下，主要使用的政策依据是《零碳建筑技术标准》。该标准基于“建筑二氧化碳排放强度”，即每平方米建筑面积终端能源使用

和现场可再生能源生产而产生的等效二氧化碳排放量，从而将建筑的碳排放目标划分为四个等级：低碳建筑、近零碳建筑、零碳建筑和全过程零碳建筑。具体的排放核算方法详见第8.3节。第二个重要指标是对于商业可行性至关重要的全生命周期成本。全生命周期成本反映了在运营阶段额外技术投资所带来的利弊，它不仅涵盖技术的初始投资，还包括替换成本、运营和维护成本，以及能源购买成本。

示范工程中使用的多能源系统最优规划方法的一个优势就在于，可以通过数学优化手段量化减排所需的边际成本，从而协助决策者更清晰地理解其能源规划决策中的权衡关系。

3.2.2. 步骤2: 开发能源需求场景

在开发能源需求场景时，深入考量项目规划方案是确保能源配置既精确又高效的关键步骤。在此过程中需要识别构建能源需求模型的整个过程，首先要识别并理解各类能耗，如电力、供暖、制冷和燃料，它们各自的特点以及可能产生的协同效应。同时，还需要根据建筑物的具体使用功能，将这些能耗类型作为主要的考量因素。



图3 优化能源系统规划的四步法

对于上述两个示范工程 (DPs)，能源需求被细致划分为四大类别：电力、供暖、制冷及热水供应。建模需要细致精确的数据，即覆盖全年并细化至每小时的能源需求变化。空间供暖和制冷需求数据通过先进的建筑热模拟技术获取，分别由两个示范工程的专业团队提供，确保了数据的准确性和可靠性。

在无锡示范工程中，商业用途占据核心地位，包括现代化的办公空间及配套餐厅设施。该场地内的十栋建筑，总面积达116,000平方米，被划分为三个“能源枢纽”，以优化能源分配与管理。考虑到工作日与周末的能源使用差异，结合项目团队的深入调研，对建筑物及电动汽车的电力需求进行了详尽推算，覆盖了全年的能源使用情况。

大连示范工程则展现出不同的风貌，项目包括39栋多层住宅建筑、学校及零售设施，总建筑面积高达161,130平方米。所有建筑被整合为一个统一的“能源枢纽”，并与另一个专门负责能源生产的“能源枢纽”紧密相连。后者作为能源中心，为前者提供空间供暖、制冷及热水等关键能源服务，确保了整个系统的顺畅运行。并且，大连示范工程借助前沿的建筑能源模拟技术，提供了详尽的一年中每小时的能源需求数据。这一数据集为深入理解能源使用模式、优化能源配置策略提供了强有力的数据支撑。

3.2.3. 步骤 3: 确定可用能源和技术可选项

本阶段旨在构建一个项目专属的数据储存库，作为能源系统数字孪生模型的输入基础。此数据库整合

了与多方利益相关者共同界定的关键边界条件信息，包括：(a) 可利用的清洁能源资源，如太阳能、地下水能、地热能及废热回收；(b) 能源生产与储存技术的技术规格与经济评估参数；(c) 现有及规划中的基础设施与现场电网连接状况；(d) 能源市场价格动态。

项目团队与国内相关方紧密合作，从多个信息源，包括各伙伴的内部数据库，搜集相关数据。对于数据缺失的情况，团队积极利用本地与国际上的权威数据库进行补充，确保数据的全面性和准确性。

首先，建立了一个基线模型，该模型反映了本地团队在初期规划的能源系统设计。在此模型中，所有技术的规模均得到了明确。为了探索成本节约与减排的潜力，团队在基线模型基础上进一步开发了“扩展选项空间”数字孪生模型。

该模型不仅包含了基线模型的所有元素，还纳入了新技术选项和能源资源，同时去除了技术规模的限制，为评估更广泛的能源系统解决方案和优化设计方案提供了平台。

表格3中对比了“基准”模型与“扩展选项空间”模型之间的差异，突出了后者在评估全面能源系统方案和优化设计方面的优势。通过此模型，可以对不同配置下的成本效益与环境影响进行更为深入的分析，进而为项目的可持续发展战略提供有力支持。

3.2.4. 步骤 4: 评估和优化能源供应变量

在成功构建项目专用的数据库之后，能源系统的数字孪生模型便迎来了其优化与完善的阶段。此阶段

模型类型	需求	能源资源	能源市场	技术
基线模型	按照项目计划	按照项目计划	按照项目计划	按照项目计划
扩展选项空间	按照项目计划	新增资源作为候选项	按照项目计划	新增资源作为候选项

表3 两种能源系统数字孪生模型（“基线模型”和“扩展选项空间”），及其对应的假设



的核心目标在于提炼出一系列优化的能源系统解决方案, 这些方案旨在以最低的生命周期成本和运行排放实现最佳效能, 确保在特定排放阈值下, 能源系统的成本效益达到最优。

每个精心设计的能源系统优化方案均详尽阐述了所采用技术的安装容量及其全年逐小时的运行概况, 确保了系统运行的精确模拟与预测。此外, 所有能量流动路径均得到了详尽的量化分析, 从电网的能量输入输出、现场资源的有效利用, 到各类技术的产能输出、各网络间的能量分配, 无一遗漏。同时, 相应的成本结构也被全面剖析, 涵盖投资成本、运营维护费用、能源采购开支及潜在收入等各个层面。

此优化流程与两个示范工程紧密交织, 历经了多轮迭代与精细调整。在定期的研讨会上, 项目团队不仅展示了最新的优化成果与分析报告, 还积极引导示范工程团队深入理解影响能源系统性能的关键因素, 共同探讨是否需要进一步微调模型参数。优化工作涵盖广泛, 从调整技术成本参数、更换技术或资源规模限制, 到优化技术配置组合, 每一步都旨在探求最佳解决方案。这一过程不仅是技术优化的实践场, 更是知识传递与共享的桥梁。通过一系列针对性的研讨会, 项目团队不仅验证了模型的最终形态, 还向示范工程团队传授了完整的成果包, 其中包括详尽的数据集与结果展示, 为双方后续的多能源系统优化实践提供了坚实的理论支撑与实践指南。

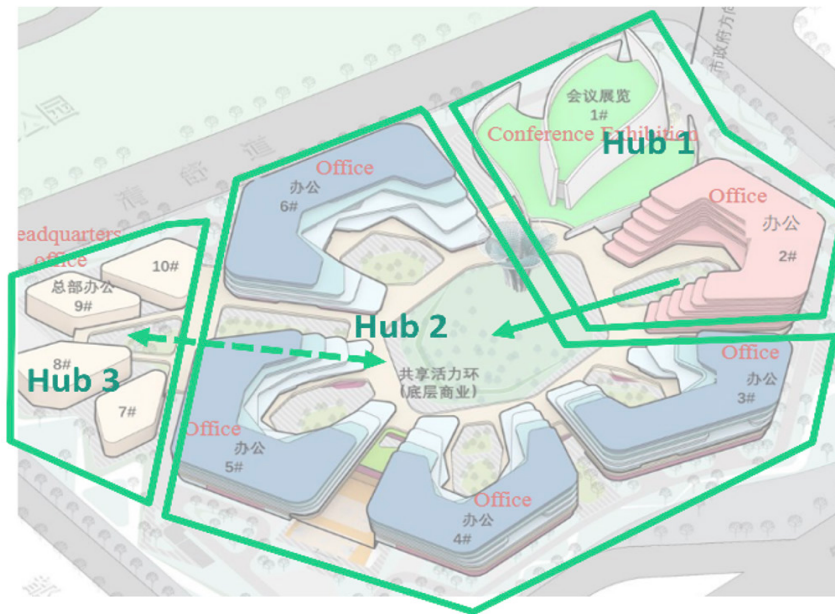


图4 无锡示范项目场址由十栋建筑组成, 分为三个能源枢纽(Hub)组。实线箭头连接的枢纽 1 和枢纽 2 表示初始项目规划中的内部供热网络;虚线连接的枢纽 2 和枢纽 3 表示对供冷与供热网络的考虑(图片来源:无锡示范项目, 以建筑平面图为基础绘制)

4. 无锡示范工程成果及分析

4.1. 能源系统数字孪生

如图5所示，数字孪生的核心构建块涵盖了能源需求的精确规格、多样的可再生能源资源，以及详尽的能源系统配置，这些元素共同构成了其框架。

在数字孪生的内部逻辑中，能源系统配置扮演着至关重要的角色，它细致地描绘了能源转换与存储技术之间如何错综复杂又高效地相互连接。为了更直观地理解这一复杂网络，图6特别数字化呈现了中心1和中心2，即Hub 1和Hub 2。

此外，为了确保数字孪生模型的准确性和完整性，所有详细的数据规格都被精心记录在网页应用中的数字孪生模型里。用户不仅可以在线查看这些数据，还能方便地通过网页应用下载包含所有必要信息的文本文件，以便进一步的分析或存档。这样的设计不仅提升了数据管理的效率，也增强了数字孪生模型在实际应用中的灵活性和实用性。

4.2. 降本减排的潜力

在项目推进中，我们深入探索了不同系统设计方案在降低成本和减少排放方面的潜在影响力。这些方

案覆盖了能源系统各项技术容量，并引入前沿的能源转换与储存技术，再到优化系统配置以及最大化现场可再生能源的利用等多个维度。

在图4中，我们清晰地展示了多种增强措施相较于原始项目规划所带来的不同程度的影响，如增设储能技术（绿色）、安装立面光伏板（橙色）以及构建内部热网（蓝色）。值得注意的是，那些能够在不增加过多成本的同时显著降低排放的解决方案，如图7绿色区域的点所示。

随着进一步分析我们发现，若全面引入所有技术能在理论上实现高达88%的减排效果，但这伴随着巨大的成本负担。相反，部分解决方案以仅25%的生命周期成本增加为代价，便实现了约63%的减排成效。对比之下，后者显得更为经济高效。例如方案中立面光伏技术的引入在成本节约与减排效果上均展现出了非凡的潜力，成为了众多方案中的亮点。

此外，当我们把精心设计的解决方案与“低碳建筑”及要求更高的“近零碳建筑”指标相对照时，无锡示范工程所展现的卓越进展令人印象深刻，它完全能够满足“近零碳建筑”的指标要求。

Energy Demand 能源需求:

- Space Heating 供暖需求
- Space Cooling 供冷需求
- Domestic Hot Water 生活热水
- Electricity 供电需求
- E-mobility 电动车用电需求

Energy Conversion 供能设备:

- Rooftop PV 屋顶光伏板
- Ground-source heat pump 地源热泵
- GSHP (VRV) 地源VRV
- Air-source heat pump 风冷VRV
- Chiller 磁悬浮单冷机
- Façade PV 立面光伏板

Thermal Network 内部传热管线:

- Hot water network (Hub1&3)
- Space heating network (Hub 2&3)
- Space cooling network (Hub 2&3)

Renewable Energy Resources 可再生能源资源:

- Shallow geothermal 地源热
- Rooftop solar irradiation 屋顶太阳能
- Façade solar irradiation 立面太阳能

Energy Storage 储能设备:

- DHW storage 热水罐
- Boreholes 地井
- Cold water storage 储冷槽
- Hot water storage 储热槽
- Battery 电池

图5 无锡示范工程的能源系统数字孪生模型中指定的数据(黑色文字部分为“基线”模型和“扩展选项空间”模型中的共有项目，绿色文字部分仅包含在“扩展选项空间”模型中)

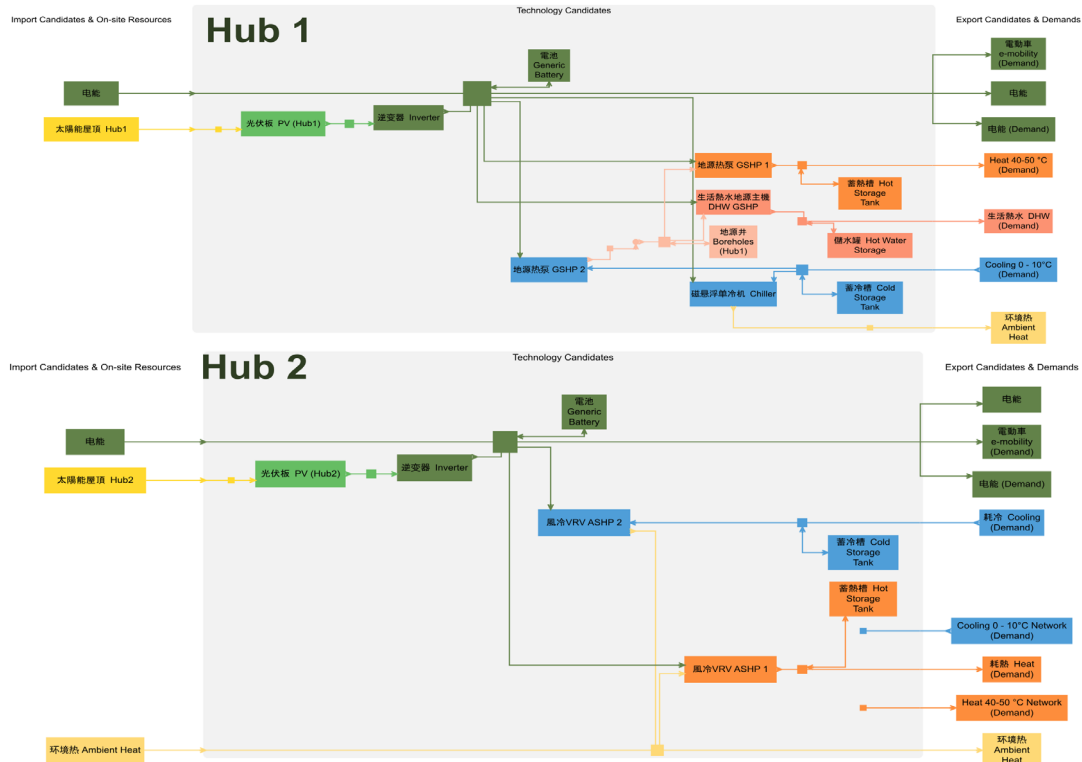


图6 无锡示范工程中Hub 1和Hub 2的能源系统配置 (图片来源:Sympheny网络应用程序)

4.3. 降本减排的关键措施

图 8展示了首个设计方案(即基准方案)与最优系统替代方案(对应图7中标识为方案A、B、C)之间的生命周期成本构成对比。在基准方案中,能源费用占据了全生命周期成本的50%以上,说明能源效率提升对于成本优化有着关键作用。

在采纳了立面光伏技术的最佳系统替代方案(尤其是方案B与C)中,这一比例发生了根本性转变。通过有效利用幕墙光伏系统,原本需从电网大量采购的电力得到了显著替代,进而降低了约60%的能源支出。这一变化不仅体现了可再生能源技术的经济性与环境效益的双重优势,也彰显了技术创新在降低建筑运营成本方面的巨大潜力。

4.3.1. 能源存储

引入能源储存系统,包括热储存和电池储能,是增强可再生能源自给自足能力、促进减排的关键举措。为达成“近乎零碳”的宏伟目标,理想的路径应借鉴方案B的设计理念,并在此基础上增加热储存设备的部署。然而,排放抵消的界定方式可能会对减排成效产生影响(见8.3),因此在规划时需谨慎考虑这一因素。

在追求减排的同时,我们也应关注成本效益的优化。比如,通过调整地源探针(如涉及地热利用)和其他蓄热设施的规模,可以在保证减排效果的前提下,有效降低转换技术和相关设施的投资成本。这一策略不仅体现了对成本效益的精细考量,也彰显了在追求低碳转型过程中,技术创新与资源配置优化的重要性。

4.3.2. 立面光伏

为实现“近零碳标准”乃至“零碳标准”,外墙光伏的部署显得尤为关键。在规划安装时,我们优先考虑将光伏系统部署于南面、东面和西面的立面上,这些方向能够最大化地捕获太阳能。同时,北面的立面也不容忽视,它同样需要满足“零碳标准”的要求,以确保整体建筑的绿色性能。

尽管与初始设计方案相比,外墙光伏的增设导致了初始投资成本上升了37%,但这一举措带来的长远效益是显而易见的。随着光伏系统发电量的增加,能源销售收入也相应提升,从而有效抵消了部分额外成本。因此,从整个生命周期的角度来看,立面光伏的引入实际上降低了总体成本,为建筑项目的可持续发展奠定了坚实的基础。

4.3.3. 其余能效措施

在方案C中, 为达到零碳标准, 我们引入了热力网络系统。该系统从Hub 3向Hub 2输送热能, 以满足部分空间供暖和制冷的需求。这一举措依托于集中供热和制冷系统, 极大地促进了能源资源的高效利用。通过热力网络的巧妙布局, 可以成功降低对独立转换设备的依赖, 从而有效减轻了转换技术领域的投资压力。

4.3.4. 知识迁移与应用

在深入剖析无锡项目的实施过程中, 整体规划与综合策略的重要性愈发凸显。这一方法超越了传统上仅聚焦于投资成本的视角, 而是从生命周期的广阔维度出发, 对低碳技术的效益进行了全面量化与深入评估。这一新颖且全面的分析框架, 不仅凸显了长期效益的重要性, 也为项目决策提供了更为坚实的依据。

基于这一洞见, 我们为项目后续的替代系统设计

方案探索了新的可行性研究路径。通过组织系列专题研讨会, 我们与无锡团队深入探讨了热水储存系统的最优操作模式及其对整个能源系统的广泛影响。这一互动不仅加深了团队对技术间复杂相互作用的理解, 还揭示了通过综合规划可实现的成本节约与减排潜力。

与此同时, 构建的数字孪生模型, 不仅作为数学优化的关键输入, 还成为了整合所有能源项目数据的核心仓库。它如同项目的智慧大脑, 在整个实施过程中持续指导着我们进行策略调整与决策优化。更重要的是, 这些经过验证的能源系统配置方案, 展现出了跨项目复用的巨大潜力, 为未来的绿色建筑实践提供了宝贵的参考与借鉴。

无锡示范工程团队对该方法给予了高度评价, 并在项目团队的紧密协作下, 将这一成功模式拓展至新的项目, 进一步验证了其广泛的适用性与深远的影响力。

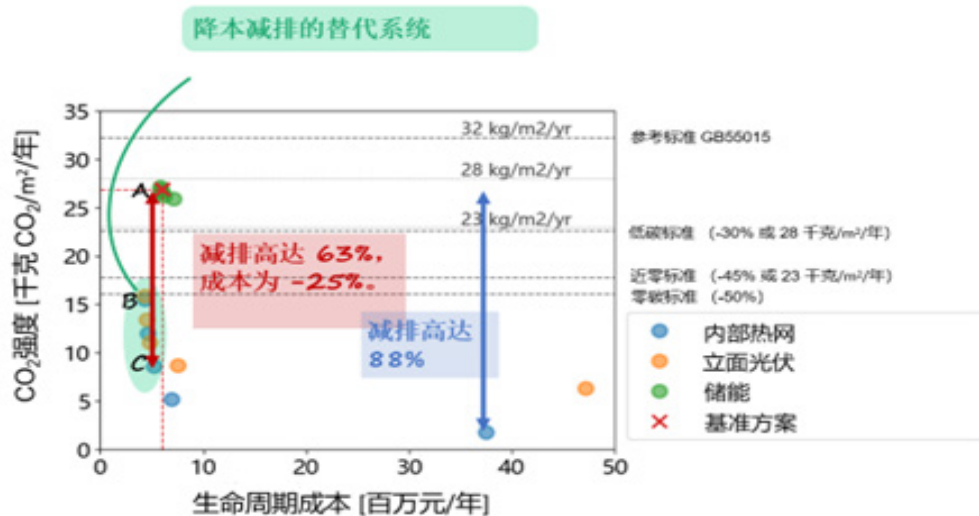


图7 无锡示范工程中, 规划能源系统的二氧化碳排放强度和全生命周期成本, 以及包含额外技术选项和优化尺寸的最优系统设计替代方案

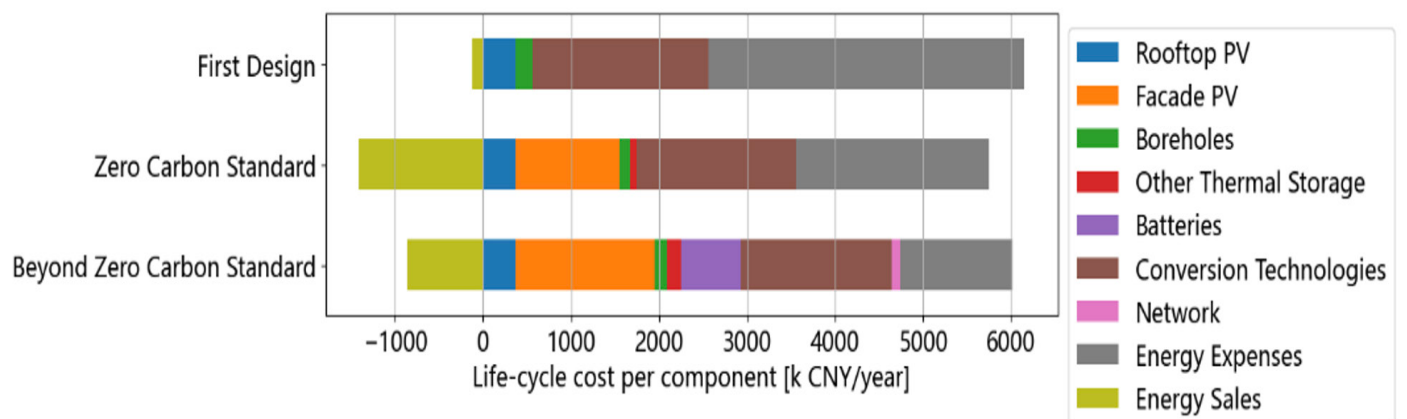


图8 无锡示范项目中, 基准方案和另外两个最优系统设计替代方案的生命周期成本



5. 大连示范工程结果及分析

5.1. 能源系统数字孪生

如图9大连示范工程中能源系统数字孪生中指定的数据(黑色文字部分在“基准”和“扩展选项空间”模型中均有体现,而绿色文字部分仅在“扩展选项空间”模型中体现)大连示范工程的能源系统数字孪生模型的主要组成部分包括能源需求规格、可再生能源资源和能源技术,其中黑色文字部分在“基准”和“扩展选项空间”模型中均有体现,而绿色文字部分仅在“扩展选项空间”模型中体现。

图11详细展示了大连示范工程数字孪生模型的能源系统配置情况。其中,“扩展选项空间”是在基准系统的基础上进一步拓展而来的。基准能源系统主要依赖于集中式污水热泵系统,以满足空间的供暖和制冷需求。在这一系统中,配水管网的泵送要求和热损失都在“泵”技术模型中得到了明确指定。同时,建筑的热水需求则由建筑级的燃气锅炉来提供。在扩展系统中,我们进一步考虑了外墙光伏的安装可能性。具体而言,我们将可用于安装外墙光伏的表面按照其方向进行了分组,并在模型中详细指定了每组外墙的对应面积以及每小时的辐照度,以便更全面地评估和优化能源系统的性能。

策略,这些策略着力于微调基线转换效率与储能技术的规模,融入前沿的能源转换与储能技术,并努力提升现场可再生能源的利用效率。图10清晰地展示了这些变化所带来的多维度影响,尤其是增加储能系统(以橙色标识)、替换部分屋顶光伏技术为更高效的光伏发电方案,以及增设立面光伏板(以绿色标识)所带来的显著成效。

与原始设计方案相比,理想的替代方案应能够在降低成本的同时减少温室气体排放。然而经过深入评估发现,这样的“双赢”方案并不多见(如方案A),即便存在,其额外收益也相对有限。涵盖额外蓄热技术的解决方案对于减排虽有一定贡献,但其效果并不显著。相反,立面光伏技术的引入(如解决方案B、C)在减排潜力上表现得更为突出,通过最大化太阳能资源的利用,有效提升了项目的环保效益。然而,这一优势的实现也伴随着项目全生命周期成本的增加。

通过将所有解决方案与零碳建筑技术标准进行对比,项目初始设计比低碳标准高出4%,比近零碳标准高出28%,并且大连示范工程能够在生命周期成本相近的情况下,实现低碳建筑。然而若如方案C所示,为了达到近零碳建筑标准,则至少需要增加46%的生命周期成本。

5.2. 降本减排的潜力

在第一种设计方案的基础上,构思了一系列替代

Energy Demand	能源需求:	Renewable Energy Resources	可再生能源资源:
- Electricity	供电需求	- Sewage heat	污水源热
- Space Heating	供暖需求	- Rooftop solar irradiation	屋顶太阳能
- Space Cooling	供冷需求	- Façade solar irradiation	立面太阳能
- Domestic Hot Water	生活热水		
Energy Conversion	供能设备:	Energy Storage	储能设备:
- Sewage heat pump	污水源热泵	- Cold water storage	储冷槽
- Gas Boiler	燃气热水器	- Hot water storage	储热槽
- Rooftop PV	屋顶光伏板	- DHW storage	热水罐
- Rooftop PVT	屋顶光伏/热板	- Battery	电池
- Façade PV	立面光伏板		

图9 大连示范工程中能源系统数字孪生中指定的数据(黑色文字部分在“基准”和“扩展选项空间”模型中均有体现,而绿色文字部分仅在“扩展选项空间”模型中体现)

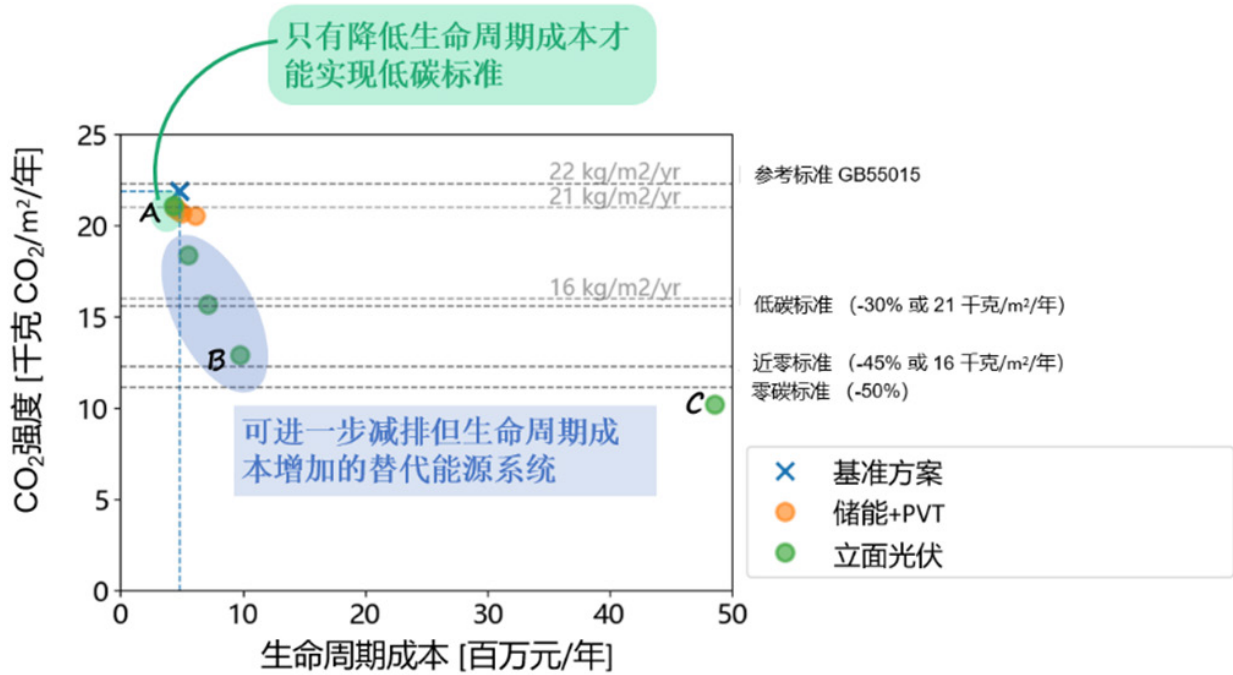


图10 大连示范工程初始和扩展能源系统的二氧化碳排放强度和生命周期成本对比

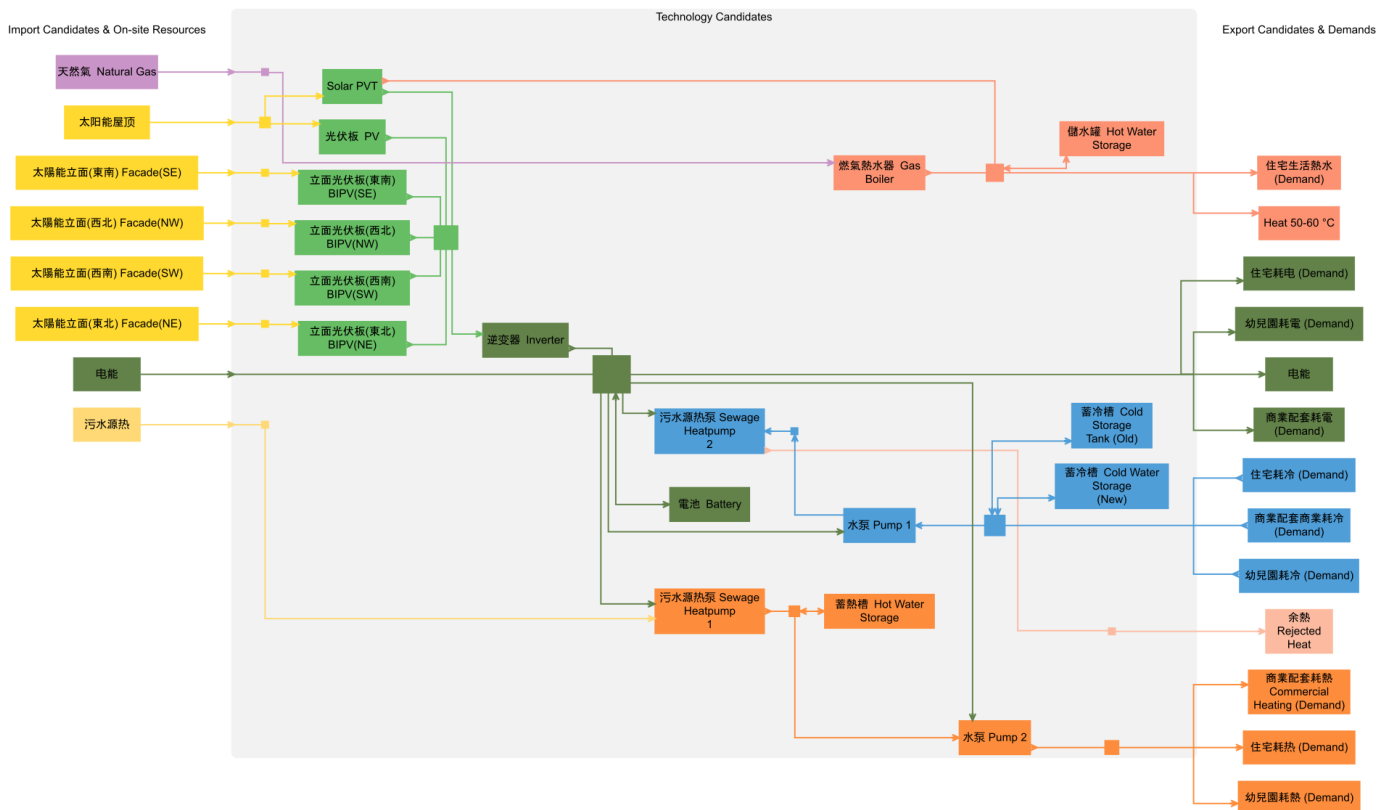


图11 大连示范工程的“扩展选项空间”能源系统数字孪生模型 (图片来源:Sympheny 网络应用程序)



5.3. 降本减排的关键措施

图12展示了初始设计方案以及优化系统替代方案(解决方案A、B、C)的生命周期成本分解,其中解决方案A以近基准方案的成本,实现了减排并达到了低碳建筑标准。

5.3.1. 光热技术

解决方案A通过使用屋顶光热一体化系统(PVT)替换燃气锅炉,减少了燃气消耗,实现减排,并且增加了热储存,合理控制了转换技术的规模,降低了方案成本。

5.3.2. 立面光伏

在解决方案B、C中,立面光伏对于进一步减少排放至关重要,但同时也造成了更高的生命周期成本。虽然使用立面光伏可使能源费用减少35%—45%,但其初期投资成本却超出了预期节省的能源费用。对于立面光伏初始投资成本的假设对其全生命周期成本有显著影响。在大连示范工程的假设中,立面光伏系统每千瓦成本是屋顶光伏系统的两倍。如果假设立面光伏和屋顶光伏的价格范围相近,那么解决方案B的整体成本将有望实现显著降低。

就项目场地情况而言,西南与东南朝向的立面是安装光伏板的理想选择,在解决方案B中,西南和东南的立面表面安装了光伏,而在解决方案C中,包括东北和西北方向在内的所有可用立面表面都覆盖了光伏板。为提高自用率和减少排放,还安装了电池。根据优化结果,电池主要在中午储存西南立面产生的可再生电力,以供晚间使用。但仍需注意,排放抵消的定义及其计算方法可能对最终的碳排放评估值产生影响(见8.2)。

5.4. 知识迁移与应用

随着项目的推进与合作的不断深入,综合多能源规划系统的引入在确定有效减排策略方面的有效性得到了证明。该方法不仅能够清晰量化不同减排目标下的成本,还能在深入理解成本与减排之间平衡关系的基础上,系统性地评估与成本和效率相关的各项假设。依托这一建模框架,项目团队能够深入进行价格趋势的敏感性分析,精准识别出对系统性能影响最为显著的组件,并据此确定其经济可行的最佳价格区间,从而为新技术市场研究提供更具针对性的指导。

在考虑能源资源可用性和需求的时间动态时,推荐的系统配置为设计提供了指导,这些指导在传统分析中往往难以得出。例如,在优化立面光伏分布时,只增加光照最强表面的光伏容量并不总是成本效益最优的选择,还需综合考虑多种因素以实现最佳的减排与成本平衡。

大连示范工程团队在建筑能源建模与仿真领域展现出了卓越的能力,能够迅速掌握网络应用程序界面。他们也意识到,在面对更加复杂多样的项目,如涵盖多种建筑用途、多个能源枢纽以及广泛技术集成的项目时,这一方法将展现出更为显著的价值。这不仅体现了他们专业技能的灵活性和强大适应性,也验证了E-Hub平台在复杂项目场景下的巨大应用潜力,为未来更加复杂且高效的能源项目实施奠定了坚实的基础。

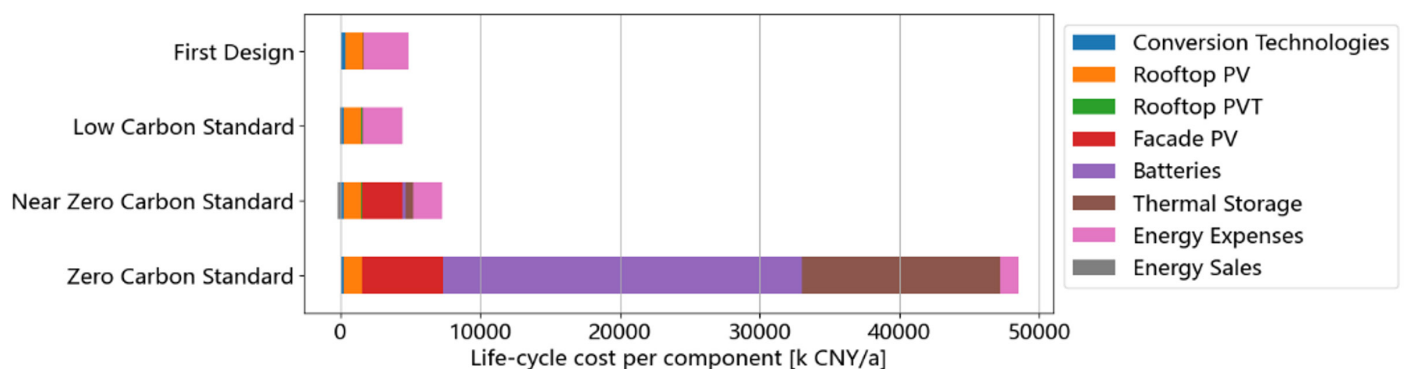


图12 初始设计方案及三个其他最佳系统设计中的技术配置的生命周期成本

6. 经验总结

6.1. 综合多能源规划的实际应用

本项目通过探索综合能源规划策略在中国两个实际开发项目中的应用，重点评估了其成本效益与减排优势。基于这两个示范工程的实施经验，我们认识到，尽管数据收集过程中不可避免地需要做出一些假设，但这些假设依然能够支撑我们提出具有实践意义且说服力强的系统解决方案。

两个示范工程团队在低碳技术的实施上展现了良好的专业素养和扎实的技术基础，特别是在钻孔、地源热泵及污水源热泵等技术的应用上成效显著。同时我们也注意到，尽管立面光伏系统在理论上具有显著的减排效果和成本竞争力，但由于缺乏直接的实践经验，项目团队对其兴趣相对有限。为此，我们建议未来应加强对立面光伏技术的市场调研，积累成功案例，以便更全面地评估其可行性和经济效益。

此外，在能源需求与资源数据的处理上，两个示范工程团队均展现了优秀的数据管理能力，但数据的详细程度主要局限于年度汇总层面。对于复杂的多能源规划而言，更高时间分辨率的数据对于优化可再生能源和储能系统的配置至关重要。因此，我们建议通过细化数据假设、引入更先进的分析工具（如敏感性分析和情景模拟）来提升数据精度和规划的科学性。同时，针对冷却能源需求可能存在的高估以及污水温度季节性变化的不确定性，我们鼓励项目团队在未来的工作中进一步收集和分析相关数据，以更准确地反映实际运营情况。

当前，多能源规划的标准做法已经能够利用到一些类似的数据库，但尚未普遍采用一种综合方法，来系统性地将这些数据整合到同一详细的层级上。为了应对日益严格的排放规定，我们需要从全面的区域角度出发，同时考虑各种约束条件。如果没有综合规划的方法，这些目标在经济效益上或将难以达成。因此，我们需要加快转变现有的标准，采用综合方法，以确保更有效地管理和优化复杂的多能源系统。

6.2. 政策对能源规划的影响

基于中国的双碳目标，建筑领域预计将出台一系列与能源紧密相关的政策，这些政策框架将直接对能源系统的规划决策产生深远影响。这些政策涵盖了建筑规范、碳税制度、排放证书制度、补贴与激励措施、

可再生能源发展目标、补偿机制、地方社区可再生能源所有权框架的构建，以及能源市场的全面改革等多个方面。

本项目的核心政策参考为《零碳建筑技术标准》，该标准预期将成为未来零碳建筑和区域发展的强制性规范。其中，“建筑二氧化碳排放强度”作为关键指标，在公式2中得到了具体定义（见8.2）。该公式创新性地可将可再生能源向电网的外送视为减排贡献，从而激励了现场可再生能源的最大化生产，并强调了电网接入能力的必要性。

然而，本报告则遵循不同的思路，采用公式1作为计算依据，并不将可再生能源的外送视为减排行为。这一方法更加侧重于促进能源的自我消费，并强调了能源储存系统的重要性，以有效平衡能源生产与消费之间的供需差异。

为了科学制定政策，政策制定者需在多种政策情境下，对电网容量及其扩展成本进行深入的区域性分析。这些分析将帮助识别哪些政策能够在确保成本效益和技术可行性的前提下，实现最大的环境效益。同时，考虑到上述其他政策和市场机制在中国尚未明确，以及能源系统通常具有超过20年的使用寿命，提前规划并了解未来可能的政策变动将对建筑行业至关重要。这将有助于行业有效对接碳减排目标，并避免技术和投资的锁定效应。

6.3. 跨国远程协作的可行性

本项目由中瑞两国专家团队携手示范工程团队共同推进，其合作模式主要依托于高效的在线交流平台，辅以关键的线下会议。特别是在2023年10月，一次面对面的成果展示与培训研讨会成功举行，标志着项目合作达到了新的高度，各方参与热忱且成效显著。

项目初期，项目团队便与示范工程团队确立了定期的周度在线会议机制。通过会议，项目团队不仅系统介绍了数据收集的关键要点及其对研究结果的潜在影响，还深入分享了能源系统性能分析、方法论、数据资源替代方案及国际建筑标准等专业知识，实现了数据收集效率与知识传递的双重提升。这一模式在前三个阶段成效显著，第四阶段通过增加项目启动时的面对面培训环节，有望进一步增强合作效果。



某些交流内容在面对面环境下进行能激发更高的互动性和理解深度,例如,2023年10月在北京举办的线下研讨会,其互动性和参与度远超线上会议,参会者超过20人,共同探讨了项目进展与未来方向。鉴于此,建议在网络应用推广初期即组织一天的线下研讨会,为后续的在线结果分析与模型优化奠定坚实的沟通基础。

在定期进行会议交流的基础上,语言与沟通工具的选择也是本项目成功的关键因素。普通话作为主要沟通语言,不仅提升了交流效率,也促进了团队间的亲密合作与信任建立。此外,微信作为辅助沟通工具,其即时性和便捷性极大地增强了团队成员间反馈与问题澄清的意愿,相较于电子邮件,更受示范工程团队的青睐。

综上所述,本项目通过不同的交流模式与语言偏好考量,构建了一个高效协作的国际合作环境。这些经验不仅确保了项目的顺利与及时完成,也为未来类似项目提供了宝贵的启示:深入洞察并融合不同文化的精髓,精准匹配沟通语言以跨越语言障碍,并灵活运用多样化的沟通渠道,从而确保项目能够顺畅无阻地向前推进。

7. 开放讨论

在深入剖析结果并据此制定后续策略时,有几个至关重要的问题亟待审慎考量:立面光伏板的成本预估、终端能源需求的预测,以及运行排放的明确界定。这些假设均基于当时的最佳知识水平进行了确认,并在得到了各相关示范工程团队的认可。这些项目与分析的设计采用了可复制的方式,确保了在未来迭代过程中能够快速进行调整。

7.1. 立面光伏的成本

每个示范工程的投资成本假设已和相关企业进行确认,但这些假设的准确性可能因各示范工程的实施阶段而异。就目前而言,两个示范工程之间假设的主要差异之一在于立面光伏板的成本。鉴于立面光伏是整体项目过程中实现减排目标的关键技术,在确定最佳系统设计方案之前,应对这些成本假设重新进行评估。此外,在项目初期阶段,我们认识到大连与无锡两个示范工程在立面光伏实施方面尚属初探,因此缺乏直接的经验积累,也缺乏准确的成本数据。

因此,本分析参考了瑞士的实施经验,以支持对立面光伏成本的假设。建筑光伏一体化(BIPV)成本假设的总体趋势表明,立面光伏可能替代传统的外墙覆盖材料和支撑结构,因此在比较时,应从立面光伏系统的总成本中减去这部分费用。

基于上述信息,无锡示范项目团队同意将幕墙光伏的成本与当前屋顶光伏的成本保持一致,而大连示范项目则采取更为保守的态度,决定将成本设定为屋顶光伏的两倍。为了准确地评估幕墙光伏的成本,我们建议在后续阶段积极收集并整理中国境内的实际实施数据,为成本估算提供更加坚实和可靠的依据。

7.2. 终端能源需求

在本次项目合作中,示范工程团队通过能源模拟提供了建筑物的终端能源需求数据。在之前的交流中,一些瑞士专家提出,空间冷却的终端需求数据偏高。这表明需要进一步调整预期的使用模式,包括设定温度、运行时间以及通风偏好等方面的参数。据中国各示范工程团队反馈,在中国,空调的功能已经超越了单纯的热舒适性提供,转而成为确保室内空气质量的重要工具。特别是通过空气过滤功能,空调在维护室内环境健康方面发挥着不可替代的作用。这一观

点不仅加深了我们对空调功能的认识,也为我们提供了调整使用模式的新视角。

尽管本项目的分析范围没有涵盖这一点,但除了研究能源系统的替代方案外,还应考虑评估节能措施来降低能源需求。例如,增加自然通风、使用遮阳设备和实施夜间冷却等措施都是有效的节能手段。

7.3. 运营排放

在探讨建筑运营排放的核算方法时,其选择直接关联到能源系统的设计与运营策略的优化。依据《零碳建筑技术标准》草案,虽然可再生能源并网可实现碳排放抵消(见8.3公式2),但这一方式并未充分激励可再生能源的即时自我消耗。

在本报告中,我们只考虑通过自身能耗减少的排放量(见8.3公式1),光伏板产生的电力不被计算为减少碳排放。本方法侧重于评估项目实际发生的排放减少效果。鉴于实际情况与时间考量,两个示范工程团队均采用这一方法核算减排效果。此方法的选择,对系统设计的多个方面产生了深远影响,特别是在可再生能源技术(如光伏板)与储能解决方案(如电池储能、热能储存系统)的部署与优化上。它鼓励设计者优先考虑如何最大限度地实现可再生能源的自我消化,而非仅仅追求并网发电的碳减排效应。

对于政策制定者而言,深入分析并比较这两种核算方法下的系统行为差异有助于制定更为科学合理的性能目标与核算标准,还能有效促进可再生能源的广泛应用,同时避免可能出现的负面效果,减少电网压力。



8. 附录

8.1. 项目第一阶段进程安排

Dates	工作进度	Progress
07.07.2023	评估现况以及数据蒐集	Data input communication
14.07.2023	评估现况以及数据蒐集	Data input communication
21.07.2023	完成多能源系统配置模型	Finalize technology configurations
28.07.2023	第一轮能源系统模拟结果(带入现有数据)	1st optimal system iteration with available data. Discussion on analyses goals.
04.08.2023	讨论未来可能发生的场景	Analyses and discussion on possible scenarios.
11.08.2023	第二轮能源系统模拟结果(带入现有数据)	2nd optimal system iteration with available data.
18.08.2023	对关键问题和可能的多能源系统配置方案进行分析和讨论	Analyses and discussion on key questions & possible multi-energy system variants.
25.08.2023	第三轮能源系统模拟结果(带入现有数据)	3rd optimal system iteration with available data. Key question discussion.
31.08.2023	多能源系统配置方案定稿	Finalized multi-energy system variants.

图13 项目第一阶段 8 周时间安排示例

8.2. 资料归档

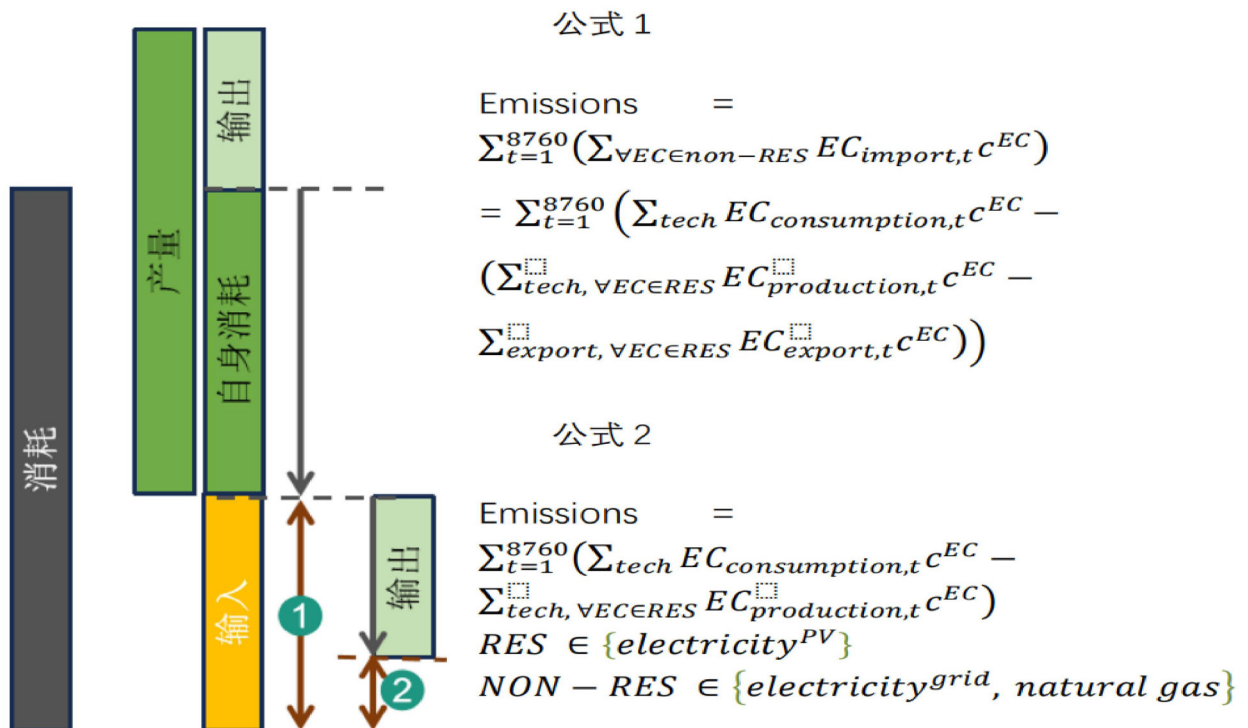
输入参数、结果和所开发模型的完整数据将与报告一起提供。数据描述见下表：

文件名	描述
[DP xx] Input Parameters.xlsx	模型的所有输入参数，包括技术成本、能源成本、排放因子和每小时概况。
[DP xx] Sympheny Results.xlsx	所有方案的结果数据，包括关键指标、每种技术的成本、每种技术的容量，以及报告中所有图表的数据。
[DP xx] Sympheny Models and Results.xlsx	模型所有方案的输入和输出。
[Assumptions] Carbon reduction compared to GB55015.xlsx	根据 GB55015 计算排放标准所做的假设。
Sympheny_ZEBChina_Report.pptx	报告的概述和四个步骤的详细概述。



8.3. 运营排放的计算方法

等效碳排放量可通过公式1或公式2计算得出。两者的主要区别在于是否将出口的可再生能源计入减排量。在公式1中，排放量与非可再生能源进口量成正比，从而鼓励建筑增加可再生能源的自用。在公式2中，进口非可再生能源（如电力）产生的排放量可通过出口的可再生能源量进行抵消。这种计算方法鼓励最大化可再生能源的生产，而可再生能源的自用程度则不会影响这一价值。目前，《零碳建筑技术标准》中的定义采用的是公式2。但为了展示自用对能源系统设计的影响，本报告在计算二氧化碳强度时采用了公式1。





让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together



中华人民共和国
住房和城乡建设部



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Agency for Development
and Cooperation SDC

IBEE 环能科技

intep skat