



工业4.0背景下 既有建筑的零碳改造技术

欧美市场评估报告



作者与鸣谢

作者

落基山研究所 REALIZE 团队：Amy Egerter, Martha Campbell

*REALIZE 是落基山研究所发起的一个项目，旨在与市场推动者合作，在美国促进零碳建筑改造技术的开发。

建议引用格式

Amy Egerter, Martha Campbell, 工业 4.0 背景下既有建筑的零碳改造技术，落基山研究所，2020.

鸣谢

感谢以下个人及单位为本报告做出的贡献：

- Jasper van den Munckhof, Energiesprong/Factory Zero
- Loic Chappoz, New York State Research and Development Authority: RetrofitNY
- Jordan Dentz, The Levy Partnership
- Shilpa Sankaran, Alpha Group
- Carlos Klein, RC Panels
- Folkert Linnemans, Bouwgroep Dijkstra Draisma
- Jan Willem Sloof, Renolution
- Avril Levasseur, Point Energy Innovations.

特别鸣谢美国能源部能效与可再生能源办公室建筑技术办公室对本报告提供的资金支持。

执行摘要

本报告介绍了荷兰的一个政府和社会资本合作（PPP）项目 Energiesprong 开发的建筑改造综合解决方案，探讨了该项目所展示的建筑改造技术现状和市场缺口，并为美国既有建筑改造市场的发展提供了关键建议。荷兰 PPP 项目的解决方案首次应用了多种先进数字技术，智能化的制造使其成为工业 4.0 背景下净零碳建筑改造服务领域的先驱者。至今该项目已完成了大约 5 千套中低层多户住宅建筑的改造项目，并在欧洲各地还有另外 10 万套计划项目有待开展。ⁱ

该报告讨论了荷兰 PPP 项目为多户住宅净零碳改造开发的装配式外墙板和一体化建筑设备系统这两种创新技术解决方案，以及在美国应用这些产品所需要解决的技术难题。此类技术能够简化原本复杂的建筑改造过程，将其整合为一套完整的产品服务，从而释放建筑改造市场的潜力。虽然这些技术也可以应用于独户住房的改造，但本报告关注的重点仍是多户住宅市场的开发与应用。

装配式外墙板是一种预制的组合式建筑幕墙，可以直接装配在既有建筑的外墙上。此类外墙板已经预先做好了所有的门窗和表面处理，一旦抵达项目现场就可以直接进行安装。荷兰大部分的建筑改造外墙板由六家主要制造商提供，本文会介绍其中三家最大的公司，简称 A、B、C 公司。这些外墙板制造商都生产装配式外墙板，但生产能力和制造手段各不相同。而美国的外墙板制造商大多只着眼于新建建筑项目，并没有专门针对既有建筑改造而开发的技术。实际上，美国市场对于中高层建筑的定制化改造有很大需求。如果美国制造商们能够学习荷兰制造商的经验，在同一生产线上生产新建项目外墙板和改造用外墙板，那么其业务范围和市场竞争能力都将得到提升。

一体化建筑设备系统主要指较小规模的全电气化组合系统。和装配式外墙板一样，该系统也能实现快速的现场安装，把对住户造成的影响降到最低。此类技术在欧洲市场应用广泛，而在美国市场却并没有普及。一些大型的全球性制造商认为这种技术在美国的需求具有不确定性，且在产品引入环节将面临各种问题。如果国际制造商不把他们的产品引入美国，则需要对美国现有的建筑设备系统进行重新设计组合，针对不同气候地区的特点，将供暖、制冷、家用热水、通风、除湿、控制甚至是电池储能等功能进行集合。

总体而言，装配式外墙板和一体化建筑设备系统在美国市场的发展仍处于初级阶段。随着各城市对于建筑能效规范的日益重视，建筑改造领域将面临巨大的市场需求，甚至可能超过新建建筑市场。本报告讨论了供应商、政府、研究机构和市场推动者为进一步促进美国建筑改造市场发展可以采取的行动，包括提高对高性能改造产品开发的关注、为此类产品的研发提供更多资金支持，以及通过整合市场需求来确保为供应商提供稳定的销路。

ⁱ “多户住宅建筑”指包含 5 套以上住房的建筑，“低层建筑”指 4 层或以下建筑，“中层建筑”指 5-9 层建筑，“高层建筑”指 10 层或更高的建筑。

目录

执行摘要.....	3
1. 背景与目标	5
1.1 荷兰 PPP 项目介绍	7
2. 装配式外墙板	9
2.1 荷兰市场概述	10
2.1.1 外墙板制造商市场开发	11
2.1.2 外墙板制造商案例	11
2.1.3 应用于美国的技术转型障碍	14
2.2 美国市场概述	15
2.2.1 市场开发建议	16
3. 一体化建筑设备系统	17
3.1 荷兰市场概述	18
3.1.1 建筑设备产品案例	18
3.1.2 应用于美国的技术转型障碍	20
3.2 美国市场概述	21
3.2.1 市场开发建议	22
4. 对美国市场的建议	23
4.1 市场研究与指导	24
4.2 创新研发	24
4.3 整合需求	24
4.4 政策与市场信号	25
4.5 专业人才培养	25
4.6 结论	25
参考文献.....	26

1. 背景与目标



建筑部门是美国碳排放最多的部门，贡献了全美 39% 的排放量和 74% 的用电量¹。有研究预测，北美 70% 的既有建筑将在 2050 年依然存在²。因此，建筑部门的减排在很大程度上取决于现有建筑能耗问题的改进。在美国，多户住宅建筑约占所有建筑存量的 18%，而当前大约每年 1% 的改造率将不足以满足该建筑类型的减排转型需求³。

荷兰一个名为 Energiesprong 的政府和社会资本合作项目（Public-Private Partnership, PPP）开发了一种提高多户住宅建筑改造率的解决方案模型。该项目以市场开发团队的角色整合市场需求和供应链，部署了大规模的装配式改造项目。目前，该项目已促成了 5 千多套多户住宅的建筑改造项目，在欧盟各地还有另外 10 万套计划项目有待开展。虽然该项目对建筑能耗改造的最大贡献是组织市场整合需求，但本报告的重点在于介绍其开发的技术，即安装简便、对住

户干扰最小，并能够规模化应用的建筑改造解决方案。政策激励手段也同样在市场建立中发挥了重要作用，但不在本报告讨论范围内。

荷兰开发的建筑改造解决方案由两类技术构成：可安装于建筑外围护结构的装配式外墙板和全电气化的一体化建筑设备系统。我们认为此类解决方案能够释放美国建筑改造市场的潜力，简化原本复杂的建筑改造过程，将其综合为一套成熟的产品服务。



图 1：荷兰 PPP 项目改造前（左）和改造后（右）对比图

照片由项目组（左）和落基山研究所（右）提供

落基山研究所的零碳住宅工作组（REALIZE）也计划在美国组织一个类似的建筑改造平台，初步目标是以平价多户住房（经济适用房）为起点，在常见的高密度多户住房建筑区快速规模化地推广这种改造手段。在下一阶段，零碳住宅工作组希望通过新技术和商业模式的开发，将这一改造手段推广至更大范围的多户住房市场、独户住房市场，乃至中小规模的商业建筑市场。

本报告的主要目的是指出美国建筑改造领域要应用荷兰 PPP 项目解决方案而必须解决的技术难题。报告讨论了技术解决方案（装配式外墙板和建筑设备系统）在荷兰建筑改造项目中的应用现状，以及其对美国市场的适用性，并基于上述分析提出了在美国快速部署类似改造产品的建议。

1.1 荷兰 PPP 项目介绍

名为 Energiesprong 的 PPP 项目由荷兰政府提供 5 千万欧元（5500 万美元ⁱⁱ）资金用于研发，其中的 4 千万欧元（4400 万美元）被用于促进独户与多户住房的发展。该项目首先评估了荷兰现有建筑存量，最终决定将解决方案的实施对象定位在能源用量最高、数量最多的建筑类型上，并制定了一项融资机制来激励建筑业参与改造行动。

荷兰住房市场的规模总量是 750 万套住房。其中，240 万套是政府补助的公益性住房（公租房），60 万套是市场租赁住房，剩下的是自住房。为了确定最适合改造的建筑类型，项目组进行了全国范围内的调研。研究发现，公益性联排式住房是一类大规模、同种类的建筑存量，其供暖用能占住宅部门总量的 80%，是最具规模化部署潜力和影响力的目标类型。因此，这



图 2：荷兰常见的联排式住房改造前（右侧）和改造后（左侧）对比图

照片由 Energiesprong 项目组提供

种建于 20 世纪 70 年代的公益性联排式住房成为了初步建筑改造方案的理想实施对象（见图 2）。一方面，这些联排住房拥有相似的所有权结构、几何结构和用能特点，便于改造工程的开展；另一方面，此类建筑的使用寿命大约是 40 年，目前正处于需要改造的阶段。

选定建筑类型后，项目与荷兰的一些外墙板和建筑设备系统制造商合作，开始着手设计初步改造方案。

项目为建筑改造设计制定了节能目标和其他建筑性能要求，并与制造商共同参与技术开发和规模化生产。该项目的最终目标是覆盖 240 万套公益性住房（公租房）的所有主要建筑类型。为了实现这一目标，近年来，项目团队对联排式住房类型改造的初步模型进行了调整，目前已能应用于中层建筑。荷兰在组织市场过程中实施的行业调研、规范性服务、支持性融资机制和多方合作模式，都是值得学习的关键战略性做法。

ⁱⁱ 假设汇率为 1:1.1

进一步研究发现，资金问题是阻碍需求侧业主支持改造行动的一大主要原因。为了解决这一问题，项目组提出了一项新的规定，要求租户直接向业主而不是能源公司支付用能产生的费用，以此解决业主可能面临的投资效益分离问题。在这种融资机制下，建筑业主虽然承担了建筑的改造成本，但这部分投资也能

从租户节约的用能费里得到回收。如图 3 所示，净零碳（NZE）投资指的是为了将净能源用量降低至零而对租赁住房做出的资本投资。该项目的最终目标是将改造增量成本（业主为高性能 / 高效建筑部件支付的额外成本）降低至能够通过运营成本节约完全回收的水平。

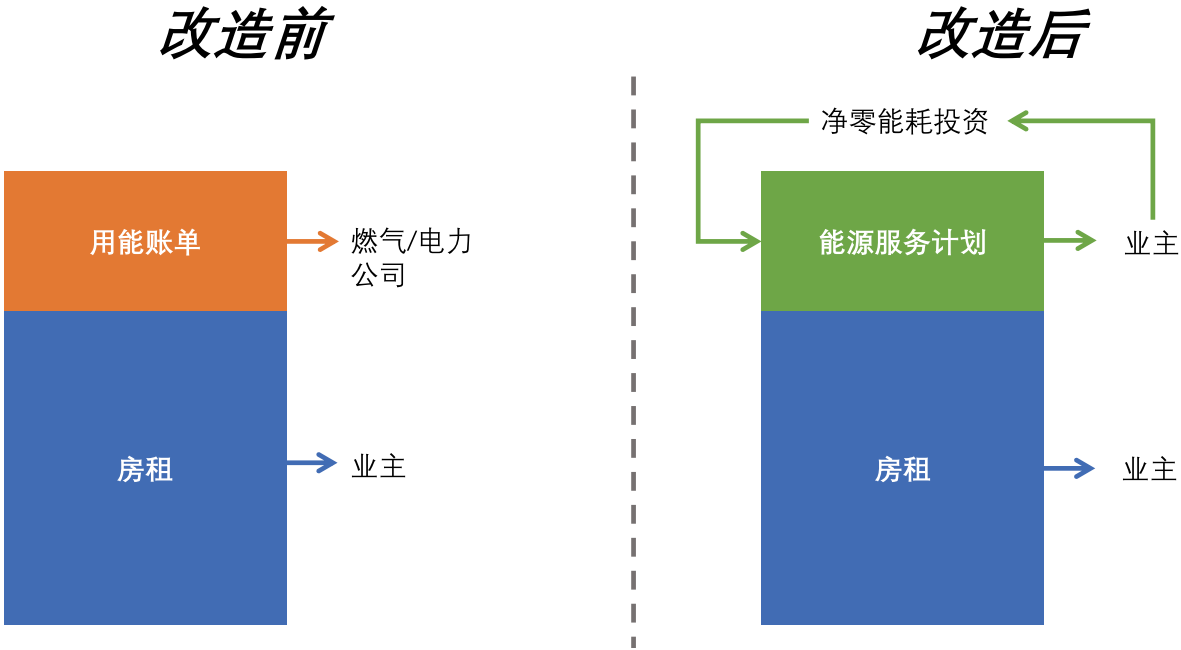


图 3：荷兰 PPP 项目融资模型图解

2. 装配式外墙板



Energiesprong（荷兰 PPP 项目）建筑改造方案的标志性创新之一在于，用组合式的装配式外墙板包裹现有结构的外墙，从而大幅提升建筑外墙的热工性能。这种技术手段对处于炎热或寒冷气候条件下的建筑尤其重要，因为这些地区的建筑大部分能耗都集中在热负荷上，实现净零碳建筑的首要任务就是降低热负荷。这些按照被动式房屋标准设计的外墙面还有一个优势，就是能够较好地抵御高温或低温极端天气带来的影响。此外，组合式的外墙板还是完全独立的，包括了所有的结构框架、保温层、门窗和气密性装置，且全部部件都在其运输到项目现场前就已经组装完毕。

接下来，我们将依次介绍荷兰部分外墙板制造商的情况，并评估将类似产品应用在美国的可行性。

2.1 荷兰市场概述

荷兰目前共有大约 25 家针对各个应用领域的建筑外墙板制造商，其中有六家制造商提供了荷兰 PPP 项目中的大部分外墙板。本节将提到其中最大的三家供应商的设施、做法与外墙板设计，简称 A、B、C 公司。这三家供应商都在项目成立前就已存在，不过是在与该项目合作后才得以建成了工厂和标准化改造产品。

以上提到的三家制造商都提供集成化的装配式外墙板解决方案，即在送至项目现场之前就已经安装好门窗和并做好表面处理。荷兰 PPP 项目建筑改造技术的另一个标志性创新点在于改造过程开始时首先对建筑进行扫描，制作一个改造前现状的数字化模型。这

一过程运用了 3D 成像技术和测光扫描技术，前者使用激光建立点云数据，而后者则使用图片和三角剖分算法。这些点云数据和三角剖分过的图片随后将被转换为建筑信息模型（Building Information Modelling，BIM），用来展示建筑现状。在此基础上，通过设计使建筑改造外墙板适应现有情况，然后再将设计结果转化为 CAD/CAM 输入制造设备。根据从点云输入的原始几何图形，计算机数控（CNC）机床会将改造外墙板的各部件切割成正确的大小。这一流程在各个公司互有差别，并取决于外墙板的结构材料与包层。表 1 对比了三家主要制造商的制作手段及背景信息。

表 1：三大主要供应商的外墙板制造设施对比 *

制造商	结构材料	加入项目时间	工厂自动化水平	年产量	产品保修期
A公司	木制框架	2013	中	每年至少350户住房	25年
B公司	结构隔热板	2016	高	每年500-600户住房	10年
C公司	轻钢结构	2015	低	每年约200户住房	—

* 此表仅展示荷兰市场使用的一般类型外墙板。

2.1.1 外墙板制造商市场开发

外墙板制造商们最初开始接触非现场安装技术，主要是由于以下几个原因：荷兰劳动力市场的萎缩，住房存量升级需求的增长，以及项目组提供的指导与需求。而荷兰 PPP 项目通过以下做法为制造商降低风险：建立改造项目清单来确保长期的产品需求；对主要参与者公开建筑改造市场信息；发放必要的资金补助。

A 公司作为一家早期项目参与者，曾独立进行了市场研究，发现如果不投资工厂自动化，改造建筑的成本将成倍增长。对自动化的投资使 A 公司从一家典型的总承包公司转变成了一家设计建造公司，从而能够在设计、制造和安装过程方面保持领先地位。另一方面，B 公司很早就看到了荷兰 PPP 项目带来的需求和一些初始项目案例，于是决定先将一种现有产品应用于建筑改造，同时以较慢的速度推进生产线的自动化。

在荷兰 PPP 项目组对 A 公司的改造方案提出设计指导后，后者还投入资金进行了更深入的研究。A 公司仅在一块外墙板的初步假定设计和实地测试上就花费了四个月的时间。而 B 公司由于同意在提供外墙板产品的同时进行开发设计工作，其时间线进展更快，仅用了三个月的时间就制造出了一整个项目所用的外

墙板。两家公司都认为项目最困难的并不是生产技术，而是如何保持生产的经济可行性，要想让工厂持续运转，就必须依赖于稳定的项目需求量。

此外，三家制造商都能做到在同一生产线上既生产改造用外墙板，又生产新建项目外墙板，这一方面能够有效将市场扩大一倍，另一方面也为投资更先进的制造技术创造了商业条件。

2.1.2 外墙板制造商案例

2.1.2.1 A 公司

A 公司是一家设计与建造公司，最初成立于 1904 年。其最近成立的建筑改造部门利用加强型机器臂制造工艺提供建筑外部装配式构件解决方案。A 公司是首批加入荷兰 PPP 项目改造计划的外墙板供应商之一，其在荷兰北部 Dokkum 设立了一家工厂（见图 4），能够快速地为改造和新建项目生产组合式外墙板。该公司还针对新建项目开发了便于安装的装配式模块化厨房与浴室。A 公司的员工透露，他们新工厂的目标是每天生产八块外墙板，如果生产设备 100% 负荷运转，最快可以每 45 分钟生产一块⁴。该工厂由 A 公司与某木制家具厂商合作建造，使用“Robi-One”机器臂设计木制框架生产线。荷兰北部地区的经济刺激政策也为该工厂的发展提供了资金方面的帮助。

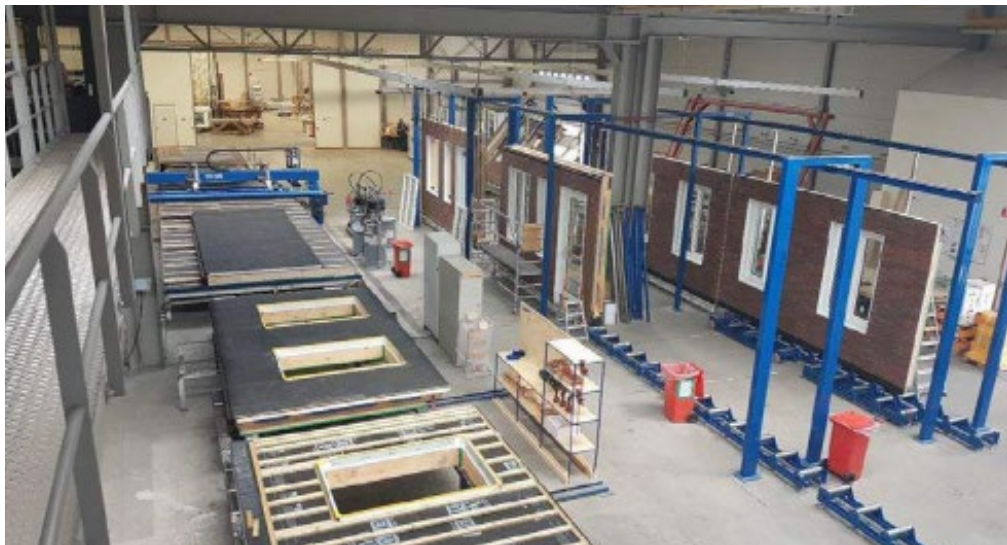


图 4：A 公司位于 Dokkum 的工厂车间

照片由 A 公司提供

该工厂使用无人机测绘技术来构建 BIM，进而向计算机数控机床提供尺寸信息来切割和组装木制框架和刚性绝缘（图 5）。



图 5：机器臂外墙包层应用（左）和计算机数控机床（右）制造的木制框架

照片由 A 公司提供

首先由工厂工人手工在木制框架构件间安装三层玻璃窗户和保温层，然后再由机器臂进行立面表面处理并将各组件钉牢在一体。窗户玻璃对材料的选择考虑了使用寿命结束后的处置。A 公司在其外墙板中使用了木材、纤维素、再生纸、矿物棉和砖包层，因为这些材料的生产更具可持续性，并可在使用寿命结束后回收再利用。

根据设计，外墙板先通过一套挂钩装置紧贴建筑外立面进行安装，再将保温材料注入现有外墙和新外墙之间的缝隙中。

公司目前不向其他安装公司提供他们的外墙板，因为这需要对不同细节进行定制化设计，涉及巨大的工作量。公司在之前的一个项目中曾经有过尝试，但发现这会大大降低制造过程中可应用的自动化工艺。

2.1.2.2 B 公司

B 公司利用专利粘合技术生产一种结构隔热外墙板。该公司过去为冷链运输卡车和模块化住房生产外墙板，但自从在 2016 年与荷兰 PPP 项目签约并获得大

批量生产需求，该公司便开始制造建筑改造外墙板。认识到净零建筑改造市场的情况后，他们认为其生产能力可以很好地适应新的应用领域。

通过应用自动化生产，B 公司已经成功将生产成本缩减了 30%，并希望在下一代外墙板制造过程中成本可以再减少 10%。由于获得了预计每年 1000 组的规模化生产订单，该公司在生产自动化方面投资了大约 5 百万欧元（548 万美元）ⁱⁱⁱ，从而节约了大量人力成本。B 公司与建筑师合作设计、制造外墙板，并将产品提供给承包商进行安装。他们的外墙板由一块刚性玻璃纤维、定向刨花板、注入石墨的膨胀聚苯乙烯和另一块刚性玻璃纤维组成，先用真空密封法将这些夹层材料粘合在一起，再用计算机数控机床将其切割成建筑的相应尺寸。B 公司还使用 3D 成像技术制作 BIM，并将其输入计算机数控机床。该公司使用机器臂在外墙板上贴上砖镶面，并制作木制或藤条包层。门窗也是在工厂内完成安装的，首先在泡沫墙板上按设计设置木枕，之后在木枕上安装门窗。墙板的缝隙通过垫圈或密封剂产品密封，可以将整个建筑的气密水平保持在 0.4 ACH 以下。

ⁱⁱⁱ 假设汇率为 1:1.1



图 6：B 公司位于荷兰 Lemelerveld 的生产设施
照片由落基山零碳住宅工作组在工厂参观时拍摄



图 7：B 公司工厂内的外墙包层产品
照片由落基山零碳住宅工作组在工厂参观时拍摄

B 公司最高性能的外墙板 R 值为 39.8，厚度为 5.5 英寸（14 厘米），并在他们的外墙板中使用了 3 层玻璃窗。该公司称他们的产品是市场上最薄的，能通过悬挂在建筑外墙上的两个壁架进行安装。由于质量很轻（7.2-8.2 磅 / 平方英尺；35-40 千克 / 平方米），安装这些外墙板不需要对建筑进行任何结构性加固。

一般来说，外墙板需要下沉至地下 1 英尺（30 厘米）的深度以保证建筑地下部分的隔热。

B 公司目前正在计划与某建材供应商合作推出一种自带集成式太阳能光伏板的屋顶及外墙板。



图 8：B 公司产品安装流程
照片由落基山零碳住宅工作组在现场参观时拍摄

2.1.2.3 C 公司

C 公司生产了一种集供暖和通风管道为一体的轻钢结构外墙板，具有较强的抗震性。该公司创立时是一家装配式整体房屋建造商，在荷兰 PPP 项目的需求下开始涉及净零碳改造相关的业务。C 公司与其长期

合作的分包商一起，在 2015 年完成了首个建筑改造项目。该公司的外墙板重量一般为 6.1-10.2 磅 / 平方英尺（30-50 千克 / 平方米），并且不需要对建筑进行地基加固等结构改良措施。



图 9：C 公司外墙板生产

照片由 C 公司提供

C 公司还使用 3D 扫描技术开发了一套 BIM，为产品制造过程提供支持。其外墙板使用三层玻璃窗和保

温层，并装有利于热回收的通风设备或空气源热泵的集成管道。



图 10：C 公司外墙板中的集成管道

照片由 C 公司提供



图 11：C 公司外墙板项目案例

照片由落基山零碳住宅工作组团队在现场参观时拍摄

2.1.3 应用于美国的技术转型障碍

面对荷兰 PPP 项目提供的用户需求，荷兰供应商们做出快速响应，扩大了组合式建筑改造外墙板的生产规模。该项目在建筑业主和供应商之间搭建了沟通桥梁，先从业主那里确定承诺改造的建筑数量，然后

将其与建筑能耗要求和验证协议相结合。这种方式能够明确目标需求产品和建筑业主的支付意愿，从而确定供应商在研发和生产上的投资规模。这种模式在荷兰获得了极大的成功，美国市场面对类似的净零建筑改造需求也应采用这种模式。

如果要将荷兰的建筑改造技术运用到美国的类似建筑上，技术方面还需要解决以下问题：

- **中层（5-9 层）和高层（10 层以上）建筑解决方案。**在美国，多户住宅建筑一般层高都超过 5 层。而在荷兰，从未有 5 层以上的建筑安装过此类外墙板。目前外墙板主要安装在非结构立面构件或底层结构砖石上，具体情况取决于外墙板的重量。除非能够制造出质量非常轻的外墙板，否则对于中高层建筑来说可能只能竖向堆叠外墙板，或对建筑进行结构加固，这种情况下则还需要对堆叠外墙板结构完整性和结构加固限制进行研究。
- **抗震设计。**考虑到外墙板未来在美国高震区的应用，还需要在设计时考虑抗震性。C 公司开发了一种符合最小抗震设计标准的外墙板，但目前还不清楚其是否符合加州等地区的抗震标准。此外，这些外墙板尚未经过高层建筑抗震标准的测试，需要根据不同的建筑结构进行重新设计考虑。
- **建筑设备一体化。**外墙板制造商需要与建筑设备设备制造商合作，根据美国不同的建筑几何形状设计一套完整的安装方案。荷兰制造商已经整合了他们的系统设计，尤其是管道系统。但是在美国可能会面临更多的设计开发需求，如将建筑设备整合到墙面内部，以避免占用建筑内部或屋顶的空间。
- **考虑特定气候因素。**荷兰全国的气候都比较一致，所以在外墙板设计中并没有过多地考虑气候因素差异。而美国各地的气候差异较大，需要开发不同解决方案以适应不同的气候区域（例如 R 值的变化、建筑设备系统尺寸的变化等）。

2.2 美国市场概述

经过初步调研和访谈发现，美国市场上目前还没有生产组合式外墙板的制造商。多方面因素限制了这种高效解决方案在美国规模化生产的潜力：

- **预加工组合技术的欠缺。**通过采访和现场调研得知，大多数美国制造商都没有使用高科技的智能先进制造技术，很少在生产过程中应用机器臂或自动化技术，这意味着调整产品设计的成本很高，不利于在一条生产线上同时生产新建和改造项目外墙板。这种预先组装好的外墙板可以在现场快速安装，并能减小湿气侵入门窗连接处的风险，然而美国制造商们却很少提供这样的产品。
- **现有外墙板不适用于较高的建筑结构。**美国制造的多数外墙板都使用开放型木制框架或钢框架，出于结构和防火考虑，可能都不能很好地应用于较高的现有建筑结构。而开发轻质、防火的外墙板则需要制造商更换使用的结构材料，这就可能改变其商业模式，带来更大的风险和成本消耗。
- **现有外墙板只针对新建建筑。**当前美国市场中的外墙板多为模块化建筑（完全在场外建成，并通过堆叠或其他快速连接方式安装的建筑或房间）和独立外墙组件（没有安装门窗的装配式墙面）。荷兰开发的建筑改造外墙板介于二者之间，墙板外部已完全竣工，而在内部还留有未完成的部分用来与原有建筑连接。

有些美国制造商的产品已经比较接近装配式外墙板，这些产品包含了其中一些重要功能，但没有把这些功能整合起来形成一个一体化的建筑改造系统。虽然目前这些公司开发的外墙板是为新建建筑设计的，但通过一些技术调整，未来也可以成为规模化普及的高效外部改造外墙板。表 2 总结了一些有潜力发展为建筑改造外墙板的产品。

表 2：美国市场装配式外墙板概况 *

制造商	外墙板类型**	应用对象	包含部件
X1	非组合式木制外墙板	新建独户住房	墙体, 包括窗户; 现场安装外包层
X2	非组合式木制外墙板	新建独户住房	墙体, 包括窗户; 现场安装外包层
X3	非组合式木制外墙板	新建独户住房	结构框架; 现场安装窗户、保温层和外包层
X4	金属结构保温外墙板	商业新建建筑与改造项目	完整墙体, 窗户和外包层在工厂已安装完毕
X5	装配式保温混凝土	新建多户住宅和商业建筑	外墙板, 窗户和保温层在工厂已安装完毕; 内部未完工
X6	非组合式木制外墙板	新建独户住房	结构框架; 现场安装窗户、保温层和外包层
X7	组合式金属外墙板	新建中高层建筑***	雨幕墙, 窗户和外包层在工厂已安装完毕
X8	组合式木制外墙板	新建多户住房与商业建筑	完整墙体, 已装配窗户、电线和防火层
X9	金属结构保温外墙板	新建商业建筑	带外包层的保温外墙板; 现场安装窗户
X10	纤维复合材料	新建商业建筑	建筑外包层系统

* 此表仅展示目前市场存在的一般类型产品。

** 组合式的外墙板在工厂内已安装所有门窗和表面材料。非组合式外墙板在项目现场交付时不包括以上一种或多种部件。

*** 中层指 5-9 层建筑, 高层指 10 层及以上建筑。

2.2.1 市场开发建议

目前美国市场对建筑改造外墙板的需求与供应都很欠缺, 可以通过以下几项措施鼓励制造商开发装配式外墙板:

- 1. 识别建筑存量。**制造商需要知道他们应该为哪些建筑类型开发产品, 包括每种建筑类型的普及程度和特征, 以便评估其开发产品的市场规模和需求。此外, 如果能够将建筑特征的识别细化到建筑结构、屋顶结构和结构完整性, 则更加有助于建筑改造外墙板的开发。
- 2. 整合需求。**装配式外墙板市场分散化程度很高, 通常由小型的本地制造商组成。有些制造商依托一家总承包商经营, 而另一些则是规模稍大的区域性经营。由于装配式外墙板的制造成本高且订单需求不稳定, 制造商们在开发此类新业务时面临较大风险。为了让制造商放心将研发资源投入到建筑改造技术上, 必须建立一个长久有效的建筑改造需求链。市场促进者、政

府和大型建筑组合投资者应该发挥的作用是整合需求并向制造商展示这种需求, 通过一系列有针对性的措施来挖掘潜在的需求量, 从而吸引行业创新者并降低市场采用的成本。

- 3. 为创新研发提供资金支持。**即使是大型的创新制造商, 其研发预算可能也需要资金补贴。这些资金的发放形式可以包括公用事业研发资金和激励措施、国家实验室研究资金、政府机构拨款、设施扩建的激励措施或其他创新型融资模式, 还可以为一些潜在创新技术提供资源, 关注不同方法的收益、成本和风险。此外, 也应该对新进入市场的独角兽企业进行投资, 因为它们的资源需求将与现有企业的研发需求略有不同。
- 4. 开发适用于中高层建筑的装配件。**许多城市多户住宅建筑的消防规范都不允许使用木制框架外墙板, 在这种情况下就需要考虑注重结构和消防安全的轻质外墙板。

3. 一体化建筑 设备系统



荷兰 PPP 项目 Energiesprong 建筑改造方案的第二项关键技术是一体化建筑设备系统，该技术使用全电气化手段实现建筑的净零碳排放。电气化是能源转型的大趋势，荷兰已经出台了一项目标性指令，计划在 2050 年前逐步停止使用天然气。虽然美国在国家层面还不存在类似的指令，但许多州市都在考虑用这种手段来实现各自的气候目标。落基山零碳住宅工作组（REALIZE）发现，随着更多可再生能源发电装机上网，电网已经变得更加清洁，所以应用全电气化系统能够实现建筑的脱碳。此外，全电气化系统还有其他优势，例如不再需要为燃气进行通风，以及利用感应电炉等技术实现更好的灶台控制。本章将依次介绍目前荷兰和欧洲建筑设备系统市场的情况，并将其与美国市场进行对比并提出建议。

3.1 荷兰市场概述

从 2013 年起，荷兰 PPP 项目就开始在欧洲市场开发一种既能满足项目目标要求，又能综合性大规模部署的暖通空调（HVAC）和监控解决方案。该项目中使用的建筑设备系统一般包括一台用于家用热水和空间调节的热泵、一台热能回收通风机（HRV）或能源回收通风机（ERV）、一个热水箱、太阳能板、一台光伏逆变器和印刷电路板控制系统。

大多数改造项目使用的建筑设备部件和系统采购自不同的制造商，并都在项目现场完成安装。然而，也有一些项目使用一体化的建筑设备系统，将供暖、制冷、家用热水、热能或能源回收通风机和控制器全部安装在装配式模块之中。这种系统的优势在于集成度更高，可规模化推广，且改造项目和新建项目都可以使用，其潜在效益还包括降低安装复杂程度、优化

系统控制与运行，以及热能捕集协同效应。在荷兰及欧洲其他国家，一些建筑设备制造商已经开始开发可以在一套住房（一般为一室或两室公寓）中提供多种服务的一体化建筑设备系统。荷兰 PPP 项目主要使用了三家制造商提供的产品，本报告中简称 D、E、F 公司，下文将分别对这些产品进行详细介绍。

3.1.1 建筑设备产品案例

3.1.1.1 D 公司

D 公司的产品使用了一台空气 - 水热泵装置来提供热水和供暖服务，这种装置具备多种配置方案，可根据系统安装环境和需求进行调整。除此之外，系统还包括了一台 HRV 和一台光伏逆变器。该系统的尺寸为 2.5 英尺 x 4.7 英尺 x 7.7 英尺（0.770 米 x 1.435 米 x 2.350 米）。

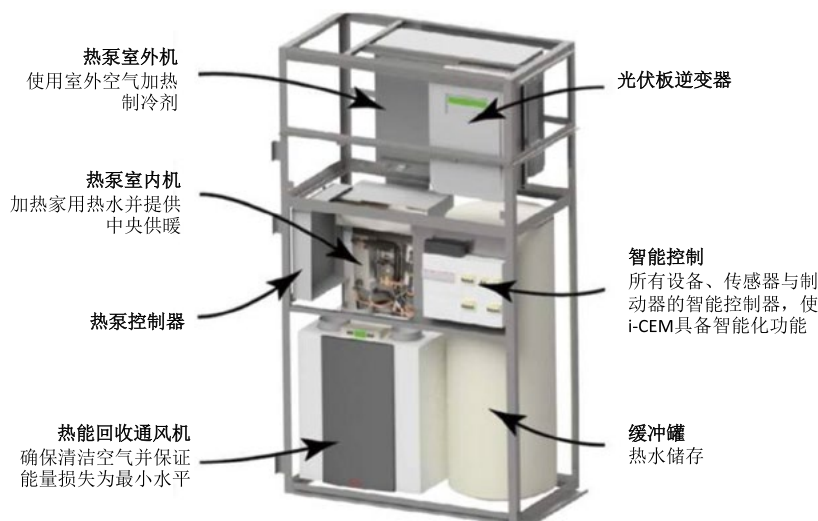


图 12：D 公司产品图解

图片由 D 公司提供

3.1.1.2 E 公司

E 公司也是荷兰 PPP 项目的一家供应商。该公司提供了一系列用途广泛的“百宝箱”解决方案，可以利用一台 HRV 提供供暖、制冷、热水和通风服务。E 公司产品包括电热锅炉、空气源热泵和地源热泵，可通过地暖或暖气片提供热水和供暖服务。E 公司过去曾在北美销售过该系列中的产品，但在 2015 年退出了美国市场。该系统的尺寸为 2 英尺 x 3 英尺 x 6.8 英尺 (0.610 米 x 0.900 米 x 2.065 米)。



图 13：E 公司产品图解
图片由 E 公司提供

3.1.1.3 F 公司

德国制造商 F 公司提供的是一款与 E 公司相似的产品。该产品使用空气源、水源或地源热泵，利用地暖或散热板中的热水或冷水来提供家用热水和空间供暖或制冷。各种配置的系统还都包括一台用于通风的 HRV。该系统的尺寸为 2.8 英尺 x 2.1 英尺 x 6.8 英尺 (0.850 米 x 0.650 米 x 2.073 米)。

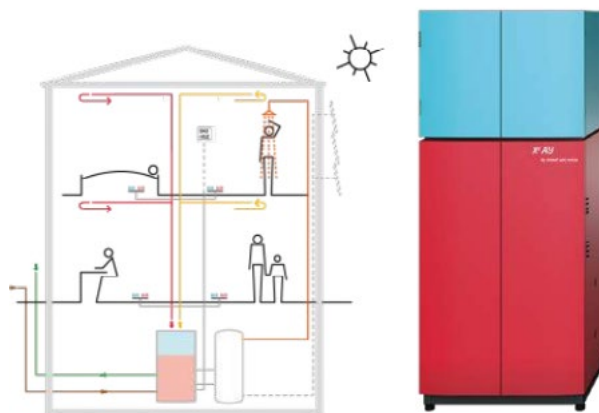


图 14：F 公司产品图解
图片由 F 公司提供

许多在美国和欧洲经营热泵业务的制造商也都在欧洲提供一体化建筑设备系统。表 3 总结了欧洲市场现有的各种产品和相应功能。

表 3：欧洲现有建筑设备系统 *

产品	家用热水	供暖	制冷**	通风	除湿	其他功能/备注
Y1	空气-水热泵	-	-	ERV	-	能源模块
Y2	空气-水热泵或地源水-水热泵	可逆冷却回路，可以将供气温度冷却到10摄氏度左右，但并不像空调系统那样工作	HRV	-	-	能源模块
Y3	空气-水热泵	可逆冷却回路	-	-	-	-
Y4	空气-水热泵、水-水热泵或地源水-水热泵	-	HRV	-	-	能源模块
Y5	空气-水热泵	-	-	-	-	-
Y6	空气-水热泵	-	-	-	-	-

Y7	地源水-水热泵		-	ERV	-	-
Y8	空气-水热泵		-	-	-	-
Y9	空气-水热泵		-	-	-	需要定制化改动来提供空间供暖热水
Y10	空气-水热泵		-	HRV	-	-
Y11	-	空气-水热泵	-	-	-	可选择与建筑的屋顶、墙面和烟囱集成在一起
Y12	空气-水热泵		-	ERV	-	NIBE与威能产品与R&R系统的整合产品
Y13	空气-水热泵		ERV	-	-	-
Y14	过热降温器	空气-水热泵		ERV	有	-
Y15	过热降温器	空气-水热泵		ERV	-	-

* 此表仅展示当前市场现有的一般类型产品。

** 虽然热泵系统在理论上可以用于制冷，但由于荷兰气候条件温和，除表中专门指出外，在设计中并不提供制冷服务。

*** 能源模块将所有系统部件集成在一个中央柜机或外壳中。

3.1.2 应用于美国的技术转型障碍

虽然欧洲的一体化建筑设备系统已经初见规模，但市场仍在开发便于安装在多数住房的小型建筑设备系统。为了把类似产品引入美国市场，以下关键技术缺口必须得到填补：

- 除湿。**由于荷兰气候较干燥，荷兰 PPP 项目中的建筑设备系统不包括除湿装置。而在美国的许多地区，建筑设备系统都需要提供这项功能。
- 制冷。**虽然荷兰开发的系统都可以提供制冷服务（因为它们一般都使用热泵），但系统的制冷模式常常从未被使用，制冷能力也不在系统设计的考虑范畴之内。使用散热板的空气 - 水热泵配置也许并不是在美国一些湿热地区提供制冷服务的最佳选项，因为与加压气流系统不同，散热板无法提供潜制冷能力。
- 中高层建筑解决方案。**到目前为止，在荷兰应用的这些系统尚未包括针对五层以上大型多户住宅建筑的设计。但考虑到集成系统的实际尺寸，美国可能需要为较高的建筑开发一种集中

式的系统选项。应用一种标准化的独户系统或标准化的集中式系统将是提高市场占有率的关键。

- 电气系统不兼容。**欧洲产品的供电电压与美国通用电压不同。例如，E 公司产品的输入电压和频率是 230 伏和 50/60 赫兹，如果要应用于美国的改造项目，首先要将其改变为美国标准的 120 伏和 60 赫兹。要评估与电气兼容性相关的特定挑战和确定必需的修改，还有更多的研究工作需要进行。
- UL 认证和其他认证。**欧洲引入的产品必须经过测试和 UL 认证，需要投入一定的时间和成本，很多制造商因此不愿将产品印入美国。但如果市场需求明确，制造商也许会愿意在时间与成本上妥协，具体情况还需要进行进一步的深入研究。
- 缺乏专业维护人员。**制造商们担心如果将产品投入美国市场，可能会缺少经过培训的维护人员为他们的产品提供后续保障。

3.2 美国市场概述

与外墙板的情况类似，目前还没有建筑设备制造商向美国市场供应荷兰正在应用的一体化、全电气化建筑设备系统。美国有多家公司都开发了更高效且体积更小的热泵产品，但都没有组合成一个一体化的建筑设备解决方案。目前，美国市场还没有任何一款产品可以在一个系统中集成供暖、制冷、热水、除湿和热回收循环的功能。不过，有一些产品集成了这些功能的其中几项。以下是三种最常见的功能组合：

- 提供供暖和制冷的能源回收通风系统 ERV
- 提供供暖、制冷和通风的空气 - 空气热泵系统
- 提供热水供暖、制冷和家用热水的空气 - 水热泵系统

下表总结了一些美国大型制造商的主要产品和功能：

表 4：美国市场现有建筑设备系统 *

产品	家用热水	供热	制冷	通风	除湿	其他功能/备注
Z1	-	空气-空气热泵		ERV	通过热泵提供	-
Z2	空气-水热泵			-	-	-
Z3	-	空气-空气热泵		HRV	通过热泵提供	独立设备
Z4	二氧化碳气源热泵热水器	空气-空气热泵		HRV	通过热泵提供	与其他制造商合作, 可提供所有想要的功能
Z5	地热水-空气热泵			仅提供通风但不提供热能回收	-	独立设备, 利用风扇提供通风
Z6	空气-水热泵			-	-	独立设备
Z7	空气-水热泵			仅提供通风但不提供热能回收	利用线圈提供动态湿度控制	内部无管道扩散器
Z8	-	空气-空气热泵		ERV	-	正在开发中, 尚未实现商业化; 独立设备, 配备带有能源回收功能的空气-空气热泵

* 此表仅展示当前市场现有的一般类型产品。

3.2.1 市场开发建议

一直以来，阻碍美国开发生产荷兰项目类似多系统组合的主要原因有两个：缺乏此类产品的大规模市场和缺乏内部开发资金。与前文对美国外墙板制造商的建议类似，为了克服这些障碍，工作的重点应更多地专注于需求整合和研发支持。刺激产品开发的另一种方法是将目光转向低负荷的新建项目市场，这一庞大市场也有对于此类系统的需求。

此外，想要此类建筑设备系统在美国市场得到推广，还有以下几个技术障碍需要得到解决：

1. 组合现有产品。美国市场上的许多现有产品可以提供满足落基山研究所零碳住宅工作组标准所需的几乎所有功能，但是没有任何产品可以同时提供能源回收通风和家用热水。一些厂家已经展开合作，通过在一个一体化的装置内集成他们原有的 HVAC 和家用热水系统来满足不断提高的市场需求（见表 4）。另外一些大规模的企业可以提供所有需要的独立产品，但没有将它们集成在一个系统中。对于美国市场来说，在一套系统中联合打包各种设备有着显著的商业机遇。

2. 为多户住宅建筑开发较小规格的系统。大部分热泵供暖和制冷系统的规格都不小于 24,000 Btu/小时（2 吨），远远超过了普通多户住宅建筑公寓需要的系统规格。在落基山研究所零碳住宅工作组的零碳准备程度分析报告⁵中，如果在建筑改造中使用被动房屋建筑技术，空气 - 空气热泵系统的规格可以缩小至 11,000 Btu/小时，并仍能够满足通风负荷需求。随着越来越多的城市开始采用更严格的建筑能耗规范，对建筑外墙保温性能和气密性的要求越来越高，进而造成用能负荷的显著降低，各制造商们也应更新各自提供的产品规格来响应这种需求变化。

3. 用系统设计代替大规模电气系统改造。现有建筑改造模式需要实现终端用户全面电气化，这可能需要大规模进行大规模的电气系统升级。理想情况下，建筑用能负荷的下降会大于终端用户因电气化而增加的额外电力消耗。应优先考虑高效的系统设计，以减少所需的电力容量。如果确实需要电气系统升级，也应与其他系统升级同步，从而降低增量成本，如安装太阳能系统和电动汽车充电基础设施。

4. 开发标准化的中央系统。建筑改造设计过程中往往面临两种选择，要么继续使用现有集中式 HVAC 或家用热水系统，要么放弃整个系统或其中的一部分。不管是哪种选择，都应该开发相应的标准化产品。

4. 对美国市场的 建议



如前文所述，装配式外墙板和一体化建筑设备系统在美国还没有得到推广和普及，然而市场对于这种降低建筑能耗的改造方案的需求是巨大的。据估计，仅住房管理部门就有约 260 亿美元的建筑改造需求没有得到满足⁶。而对于建筑业主来说，他们需要一种简单快捷的改造方案，来将有限的资金发挥出最大化效用。本报告中提到的技术可以大规模满足上述住房保障机构以及多户住宅和独栋住宅的需求。

在提高建筑改造率的过程中，除了要用到本文提到的技术手段和商业模式，还需要改变采购和安装改造设备的整体模式。在这方面，荷兰 PPP 项目 Energiesprong 充分利用了自身作为市场组织者的优势，发现并解决规模化建筑改造市场的痛点，起到了总体调控和规划的作用。美国也应该采取类似的市场促进方式，以便有效协调不同规模和类型的市场。

荷兰 PPP 项目的成功离不开供应商、当地政府、研究机构、金融机构和标准制定机构的多方参与，这些主体各自发挥职能，共同支持建筑改造市场的转型。本章将从多个方面提出有助于推动美国市场发展的建议。

4.1 市场研究与指导

- **调研建筑类型。**落基山研究所零碳住宅工作组已经通过一些调研确定了美国东北部地区的典型建筑，但美国其他地区建筑的所有权结构、使用年限、暖通空调系统和能源使用情况还需要进一步的确认。各地政府可以收集更多建筑存量的相关信息，为建筑类型研究提供进一步的支持。
- **了解各类建筑外墙系统的潜在需求。**利用建筑类型调研的结果，计算各种外墙板解决方案的潜在市场需求，并将研究成果在相关领域内公开。落基山研究所零碳住宅工作组已对建筑设备系统完成了这些工作，希望通过本报告继续促进制造商研发团队和产品开发团队之间的交流。

- **考虑区域气候特点。**与荷兰不同，美国地域宽广，气候类型丰富，制造商需要想办法在确保满足区域气候特点的同时实现产品标准化。支持制造商开展工作。建立一个信息资源库，为制造商提供培训手册、流程概述和设计指南来支持项目的落地实施。

4.2 创新研发

- **改造性价比高的区域。**当出现聚集性的需求时，只关注个别相似的气候区域，最好是建筑存量且建筑类型丰富的区域。
- **用资助示范和技术实地研究来证明技术可行性。**要想完全说服建筑业主和租户，就必须公开现场检测的结果。
- **开发和部署多种解决方案。**建筑改造领域不存在适用于所有情况的方案，所以应该鼓励在一个地区或气候区域内开发多种不同的解决方案。每个气候区域都需要通过多个改造项目的实践来了解区域差异，并构建该区域的市场知识体系。
- **投资内部研发。**企业应学习荷兰制造商的做法，引导研究团队针对建筑改造市场的需求进行创新研发。
- **鼓励知识共享。**制造商们通过参加市场创新会议论坛和建立工作小组的方式来分享行业信息、创办合资企业或合作开发示范项目。

4.3 整合需求

- **举办建筑业主和开发商会议。**地方政府可以通过组织和指导研讨会的方式向业主推广高度标准化的深度能源改造，从而增加业主对装配式一体化且高度标准化的改造产品的需求。
- **与大客户合作挖掘需求。**利用已开发的性能规格，整合大型建筑项目所有者对于招标的软性和硬性要求，调动承包商和制造商生产满足这些需求的产品。

4.4 政策与市场信号

- **制定挑战性的目标。**地方政府可以通过设定建筑规范或其他政策机制，对新建和现有建筑的性能和改造率提出积极大胆的目标，以此创造更多的市场需求。
- **支持业主参与行动。**建立项目流程信息资源库，在项目实施过程中为建筑业主提供支持。此外，各个城市还可以组织能够让建筑业主群体参与其中的项目，比如这种项目可能需要准备好的净零 / 近净零改造套装，以便获得许可和验收的快速跟踪。
- **与金融机构合作。**金融机构提供的优惠条款和费率可以极大地增强建筑业主承担此类项目的的能力。例如，在申请低收入住房税收抵免时，宾夕法尼亚房屋管理局对被动式设计的房屋有特殊优惠，这类规定就是在向业主表明对于高性能建筑改造升级的鼓励和支持。
- **多方寻求资金支持。**在行业的学习曲线结合需求量规模能够实现与传统建筑系统的成本平价前，都需要与公共机构和其他利益相关者的合作来填补资金短缺。

4.5 专业人才培养

- **增强服务供应商的能力。**需要培养大量经验丰富的服务供应商和安装商，来应对市场规模的日益扩大，其中关于安装和维护高性能技术系统的培训将是确保服务质量和推广持续性的关键。

4.6 结论

总体来说，美国市场已经从很多方面逐渐展露出对于荷兰这类建筑改造方式的需求，如在落基山零碳住宅工作组试点项目的投标请求中，大部分业主对建筑改造方案表示很感兴趣。此外，地方和州政府也在通过部署资源来在市场中推广这种方式。例如，纽约州能源研究与发展管理局开展的 3000 万美元的 Retrofit NY 计划，以及加利福尼亚能源委员会为开发市场促进平台提供的约 700 万美元资金和在加州各地低收入社区开发的示范项目。波士顿等城市也开始组织和开展有利于市场的活动，在其所有建筑存量中部署零排放改造。市场推动者可以利用这个极好的机会，将这种趋势转化为市场行动。如上文所说，荷兰 PPP 项目为美国的建筑改造指明了方向，但也必须对其进行调整以满足美国市场的需求。这一过程需要所有利益相关方共同努力，一同推动行业向前发展，改造现有的多户住宅建筑存量，最终实现整个建筑部门的转型。

参考文献

1. U.S. Energy Information Administration. 2017. International Energy Outlook 2017.
2. Abergel, Thibaut, Brian Dean, and John Dulac. 2017. Global Status Report 2017. See Figure 3: “Floor area additions to 2060 by key areas.” United Nations Environment Programme.
3. IEA. 2017. “Energy Technology Perspectives 2017.”
4. Doodeman, Marc. 2018. “Biense Dijkstra, the builder with a never-ending drive for innovation.” Energisprong.org.
5. Egerter, Amy, Martha Campbell, Jamie Mandel, Avril Levasseur, Kimberly Llewellyn, Galen Staengl, and Graham Wright. 2018. “Next-Generation Building Mechanical Systems: How Manufacturers Can Capture Value Through Innovation in Multifunctional Systems.” Rocky Mountain Institute.
6. Finkel, Meryl, Ken Lam, Christopher Blaine, R.J. de la Cruz, Donna DeMarco, Melissa Vandawalker, Michelle Woodford, Craig Torres, and David Kaiser. 2010. “Capital Needs in the Public Housing Program.” Abt Associates Inc. Prepared for U.S. Department of Housing and Urban Development.

* 文中部分信息和数据来自作者对制造商的现场调查及员工采访。

Amy Egerter, Martha Campbell, 工业4.0背景下既有建筑的零碳改造技术, 落基山研究所, 2020.



除特别标注, 图片均来自istock.



北京市朝阳区景华南街5号远洋光华国际C座16层
06、07、08A单元

www.rmi.org

© July 2021 RMI. 版权所有。Rocky
Rocky Mountain Institute® 和 RMI® 都是注
册商标