

能源效率 2.0

打造未来 能源系统



并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

是时候重新思考 能源效率了

费允德 (Jürgen Fischer)
丹佛斯集团气候方案事业部总裁

电网作为输送电力的基础设施，并未得到人们的足够关注。而实际上，无论是在当下还是未来，电力对我们的意义和影响，远超我们的想象。从工厂、医院和港口，到治安、军事和交通，以及通信系统，一切都依赖于电网来运作。停电时，失去光源只是最小的问题。在一些地区，电力中断的情况愈加频繁，有时持续时间也越来越长。未来，我们的电力需求将大幅增加，所以断电这一问题与我们在未来能源系统中所将面临的挑战相比，影响甚微。因此，如果我们不立即重新思考能源效率，并将其置于能源政策和应对气候变化战略的核心位置，我们将面临比电力中断更为严峻的挑战。

为实现净零排放和《巴黎协定》的目标¹，到2050年，可再生能源在能源结构中的占比需达到70%左右。尽管如此，对于能源系统需要做出的改变，人们的关注度依然不足。如果届时，我们确实能获得足量的可再生能源，我们是否拥有相应的能力和基础设施，将其有效利用？为了实现未来能源系统脱碳，我们现在必须采取哪些措施？

我们先来谈谈风能和太阳能，它们是可再生能源讨论的热点。风能和太阳能所产生的能量主要以电力的形式表现出来。然而，无论是交通业、建筑业还是工业，如果我们没有相应的基础设施来进行有效使用，生产再多的电力也毫无意义。为了有效利用可再生能源产生的电力，**我们必须展开一场系统化的基础设施层面的变革，使能源系统实现全面电气化。**

充分实现了电气化的社会可以减少高达40%的最终能源消耗，因为电力技术浪费的能源比化石燃料技术更少²。与此同时，能源效率的提升措施能加速各个行业的电气化转型。例如，提高重型车辆的能源效率是缩小其供电所需电池尺寸的前提条件。因此，我们必须开始将电气化本身看作提升能效的一种形式。

时机决定一切。在未来的能源系统中，仅确保使用绿色能源是不够的，我们还需要在正确的时间使用能源。现在，我们的习惯和行为决定了何时需要能源——白天需求量大，夜间需求量小。

同样，大自然也决定了太阳能和风能集中的时间，因此并不总能满足我们对能源的需求。在可再生能源供应不足时，我们必须使用化石能源作为替代。这不仅会提升电力成本，还会在高峰时段产生更多的碳足迹。幸运的是，**通过制定需求侧灵活性解决方案来提升能源效率，我们可以更好地调整能源的供需关系，以避免在某些时刻对化石能源发电的需求高峰。**通过现有的提升能源需求侧灵活性的技术，我们可以节省资金、减少二氧化碳排放、增强电网稳定性。

即使在未来，也并非一切都直接依靠电力运作，因此我们仍需找到清洁的替代能源，助力重工业、航空和长途运输等行业深度脱碳。氢能是最有前景的替代能源。未来的能源系统不可避免会出现可再生能源过剩的时期，届时氢能将会发挥关键作用。然而，电制氢(电解水)的过程将需要大量的电力，为我们已经过时的能源电网带来巨大的压力。然而，**将能源效率与电气化相结合，我们可以将氢能需求维持在实际可控的水平，同时以最节能的方式制氢。**如果我们想要提高未来的能源效率，就必须从政策上支持高效的制氢方式。

2050年地球人口将达到98亿，即使能源系统实现充分电气化，可再生能源的产量仍旧不足以满足所有人的用能需求。为了弥补这部分需求差额，余热将为我们提供最大助力。到2030年，全球能源消耗中的53%将以余热的形式被浪费³。然而，**如果我们将这些余热回收再利用，以取代大量的电力、天然气等供热所需的其他能源形式，**将有助于增强未来电网的稳定性，缓解绿色转型的压力。

正如上述所示，提升能效并非可再生能源不足的补救办法。在未来的能源系统中，**能源效率必须占据中心位置，并与可再生能源的开发建设相协调，**以实现气候变化目标、保障能源安全、促进经济发展，并从根本上改变能源的管理和使用方式。我们将这种对能源效率的重新理解定义为“能源效率2.0”，对于我们实现2050年净零排放愿景，这是最快且最具成本效益的方式。乐观的是，我们已经掌握了必要的技术。我们不需要魔法，而需要立即采取行动，推出相关政策，以加速相关解决方案的实施。

“用‘停电无光’一词来指代电力中断实属不当。当电力系统崩溃时，失去光源并不是最大的问题。”

格雷琴·巴克 (Gretchen Bakke)《电网》⁴

“任何足够先进的科技，
均与魔法无异。”

阿瑟·克拉克 (Arthur C. Clarke) 《预言的危害》⁵

只有两分钟？

能源系统2.0关键点



1. 实现全面电气化

从化石能源系统过渡到充分电气化的能源系统，我们可以减少高达40%的最终能源消耗⁶。电气化本身就可以提升能效，因为大多数电力技术在实现与化石能源相同功能时能源损耗率较低。



2. 实施需求侧灵活性解决方案

重塑能源效率不仅要减少能源使用，还要在合适的时间使用能源。通过最大限度地发挥需求侧灵活性方案的潜力，**欧盟和英国每年可减少4000万吨二氧化碳排放，减少106太瓦时天然气发电量**，约占2022年欧盟天然气发电消耗量的五分之一。此外，**到2030年，每年可节省的社会成本将达到105亿欧元，家庭平均可节省7%的电费。**



3. 合理发挥氢能潜力

利用可再生能源助力未来的能源系统，需要迅速扩大氢能的规模。然而，制备氢需要大量能源；到2050年，制氢所需的电力将超过现在总电力需求的一半^{7,8,9,10}。高效的电解技术对于确保能源安全稳定以及降低氢能源需求至关重要。



4. 推进行业耦合

通过战略性地实施工业耦合技术、充分利用余热，我们最终可以降低对能源生产的需求，并最大限度地提高效率。**到2030年，全球高达53%的能源消耗将作为余热被浪费掉¹¹。**然而，通过更深入的行业耦合，这些热量可以被收集和再利用，为机械提供动力，为建筑供暖、提供生活用水。

能源效率2.0

打造未来能源系统

为实现净零排放，需要改变的不仅是能源的来源，能源的分部、转换、储存、使用和再利用的方式也必须改变。

本白皮书围绕能源效率展开论述，展现了**电气化、需求侧灵活性解决方案、能源转换、储能和行业耦合**如何在未来能源系统中占据中心位置，从而打造由可再生能源驱动的电网。

7

电网大改造

11

未来属于电气化

19

灵活性：时机决定一切

25

能源转换：实现净零的关键

31

储存未来能源

35

通过行业耦合实现能源再利用

41

政策建议

丹佛斯《影响力系列白皮书》第四册，依托可靠信源，展示了对能效的另一种理解（本文称之为“能效2.0”）对于全面电气化和能源系统脱碳的关键作用。

在各种文献中，“智能电网”一词被广泛用于描述未来的互联能源系统。在智能电网中，电气化、行业耦合、灵活性手段、能源转换和储能将在一个更高效的系统中相辅相成，在正确的时间为人们提供正确的能源，也就是我们本册中所指的“未来能源系统”。

在未来想要实现脱碳，氢能的生产必须依靠电力。根据国际能源署的《世界能源展望》，本册将使用可再生能源生产的氢气称为“低排放氢”。该术语可与“绿氢”互换，后者在文献中被广泛使用，但没有标准定义。

特别感谢Nick Eyre教授（牛津大学能源与气候政策教授、环境变化研究所能源高级研究员）、Jan Rosenow博士（监管援助项目欧洲项目主任、牛津大学环境变化研究所名誉副研究员、Frederik Dahl Nielsen（奥尔堡大学可持续能源规划博士研究生）和Brian Vad Mathiesen博士（奥尔堡大学可持续能源规划教授）对本文初稿提出的宝贵意见和建议。

本文所表达的观点仅代表丹佛斯公司，其完整性和准确性与其他机构或个人无关。

丹佛斯《影响力系列白皮书》第4册由丹佛斯集团传播与公共事务部分析团队编写，电气化业务发展总监Helge Vandel Jensen、数字服务组合经理Ditte Lykke Wehner和丹佛斯气候方案全球公共事务与传播负责人Andrea Voigt提供了不可或缺的协助。

丹佛斯集团传播与公共事务分析团队负责人Sara Vad Sørensen: sara.sorensen@danfoss.com。

丹佛斯行业专家库(按首字母排序)

程宝江

船舶解决方案
13952447758
chengbaojiang@danfoss.com

曲磊

数据中心解决方案
13924018046
qulei@danfoss.com

唐小辉

储能、工业热泵解决方案
13925015676
tangxiaohui@danfoss.com

练俊

新能源汽车功率半导体解决方案
15201847582
jun.lian@semikron-danfoss.com

芮小东

电子厂房解决方案
13601696529
ruixiaodong@danfoss.com

王超

电气化解决方案
13061893621
chao.wang@danfoss.com

电网大改造

“化石燃料时代正开始走向终结，而我们正在见证这一历史性时刻。我们需要为此做好准备。”

法提赫·比罗尔 (Fatih Birol), 国际能源署总干事¹²

要想打造未来净零排放的能源系统，世界能源供应需要在2021年至2050年间减少15%，同时可再生能源必须快速扩张（见图1）。

2021年，全球能源的79%来自化石燃料。到2050年，这一比例必须至少减少到18%，甚至更少。这其中减少的8%必须通过碳捕集与封存来实现。尽管对碳捕集与封存的潜力仍存在一些争议，但科学界的共识是，我们需要大幅减少对化石燃料的依赖。与此同时，可再生能源在2021年占能源供应总量的11%，到2050年这一数字必须增加到70%，其中太阳能和风能合计占39%。也许不难理解，我们需要采取比现有政策更多的行动，甚至需要采取比已宣布的，在2050年实现净零排放的承诺更多的行动。这也就是说，**我们必须对能源供应进行全面革新，以打造与净零目标相匹配的能源系统。**

从纯粹的能源供应角度来看，我们需要对太阳能、风能和其他可再生能源进行大量投资，额度远远超出了目前的声明甚至承诺范畴。

当然，对可再生能源的投资一定与减少化石能源同步进行¹³。幸运的是，近年来可再生能源的成本大幅下降，其中太阳能和陆上风能的进展最快¹⁴。与此同时，煤炭的价格却停滞不前。由于安全法规的增加，核能的价格却显著上涨。简而言之，投资可再生能源而非化石能源，在经济上是有利可图的。而且，随着风能功率转换器和太阳能逆变器等技术的发展，可再生能源生产清洁电力的效率获得提升，使得这种投资更具吸引力，这意味着我们向全世界提供的低排放能源，同时也是最便宜的、最高效的选择。然而，**在向可再生能源过渡的同时，也需要对我们的电网进行重构。**

用电力驱动世界

为了使未来能源系统脱碳，可再生能源必须取代化石燃料，能源系统必须实现全面电气化。

世界能源供应的转变

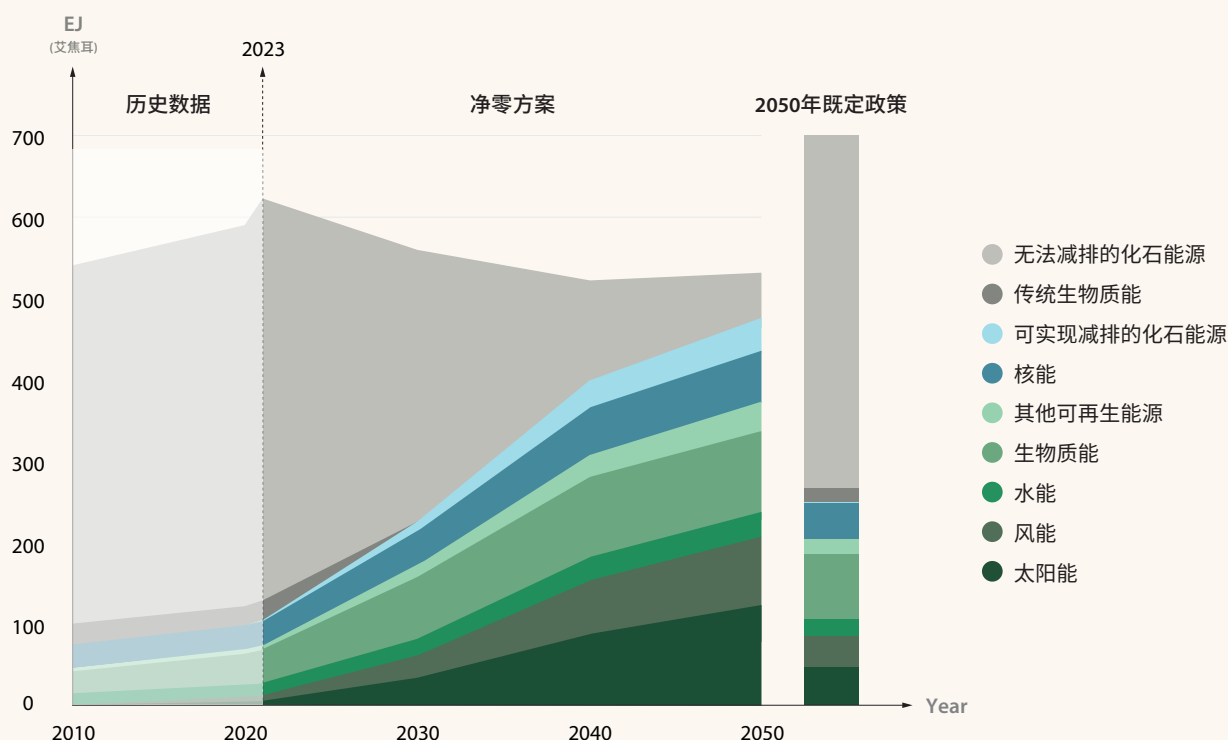


图1：如要实现净零排放过程中世界能源供应所必须要做出的改变，以及如果继续按照目前轨迹实施既定政策，到2050年我们的处境。

资料来源：国际能源署2022年《世界能源展望》¹⁶

这种全面电气化不仅会大幅减少温室气体排放，还将大幅减少最终能源需求，并节约大量经济成本¹⁵。

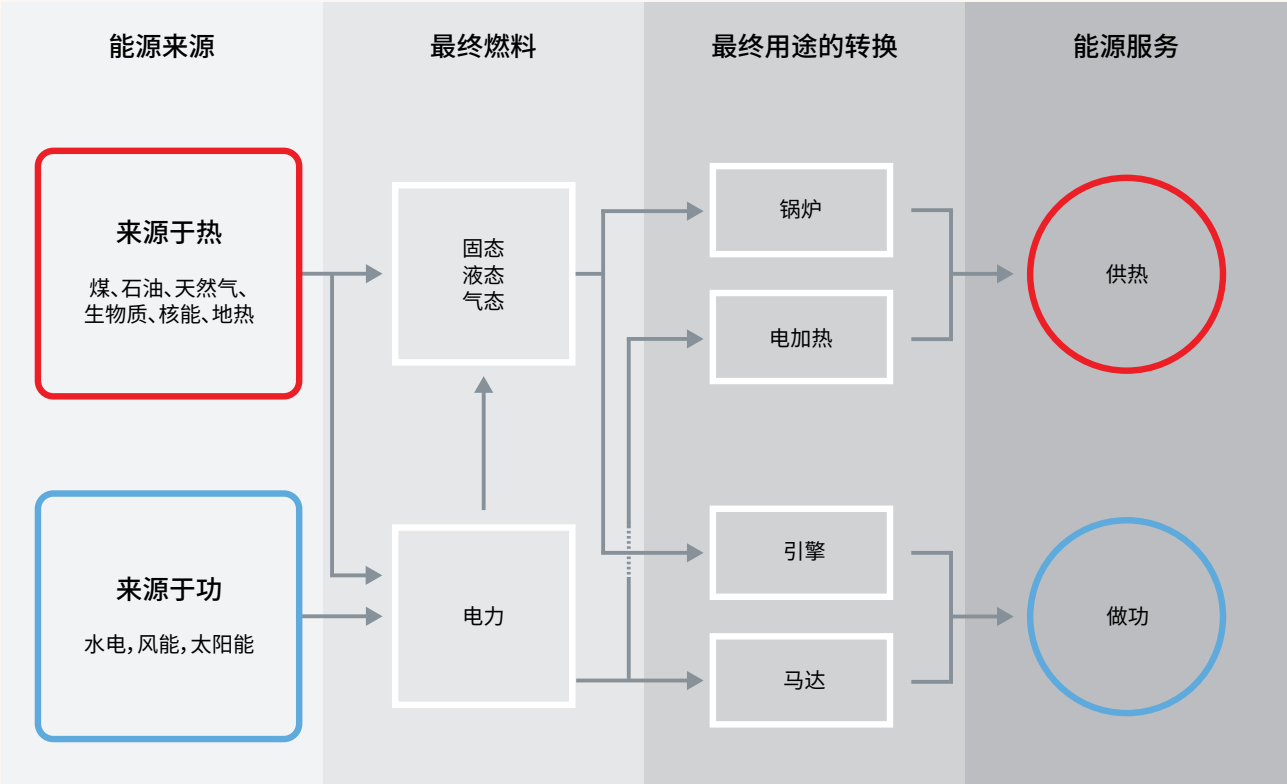
为了理解电网的巨大转变，牛津大学教授Nick Eyre描述了如何从热生能源转变为功生能源，这是实现《巴黎协定》目标的必要条件。

我们经济和社会的所有功能都以热能或做功为动力。化石燃料是热能的主要来源。燃烧后，化石燃料转化为热能，可用于为建筑供暖、为汽车提供动力等。另一方面，“做功”是指利用运动（如风电机组的旋转）来提供动力。如图1所示，这将成为未来的主要能源之一，与太阳能和水力发电等其他功生能源并驾齐驱。

目前，我们社会主要由需要燃烧化石燃料的热生热源提供动力。要实现能源系统的脱碳，我们必须从根本上将大部分能源从热生转变为功生。

从热能到电能转换过程中的主要挑战并不是电力的生产，而是用户端的电气化。目前，约80%的能源使用终端尚未实现电气化¹⁷。我们面临的变革基本上是工业革命的逆转，也就是说不再通过热能获取电力以为完成特定活动提供动力，而是利用“做功”为几乎所有服务提供能源。换句话说，既可通过做功获得热量，同时也为其他活动提供能源。我们迄今为止对能源系统的全部思考方式都将被颠覆，从用热能做功，到用做功生产热能。

当前能源系统中的热与功



未来能源系统中的热与功

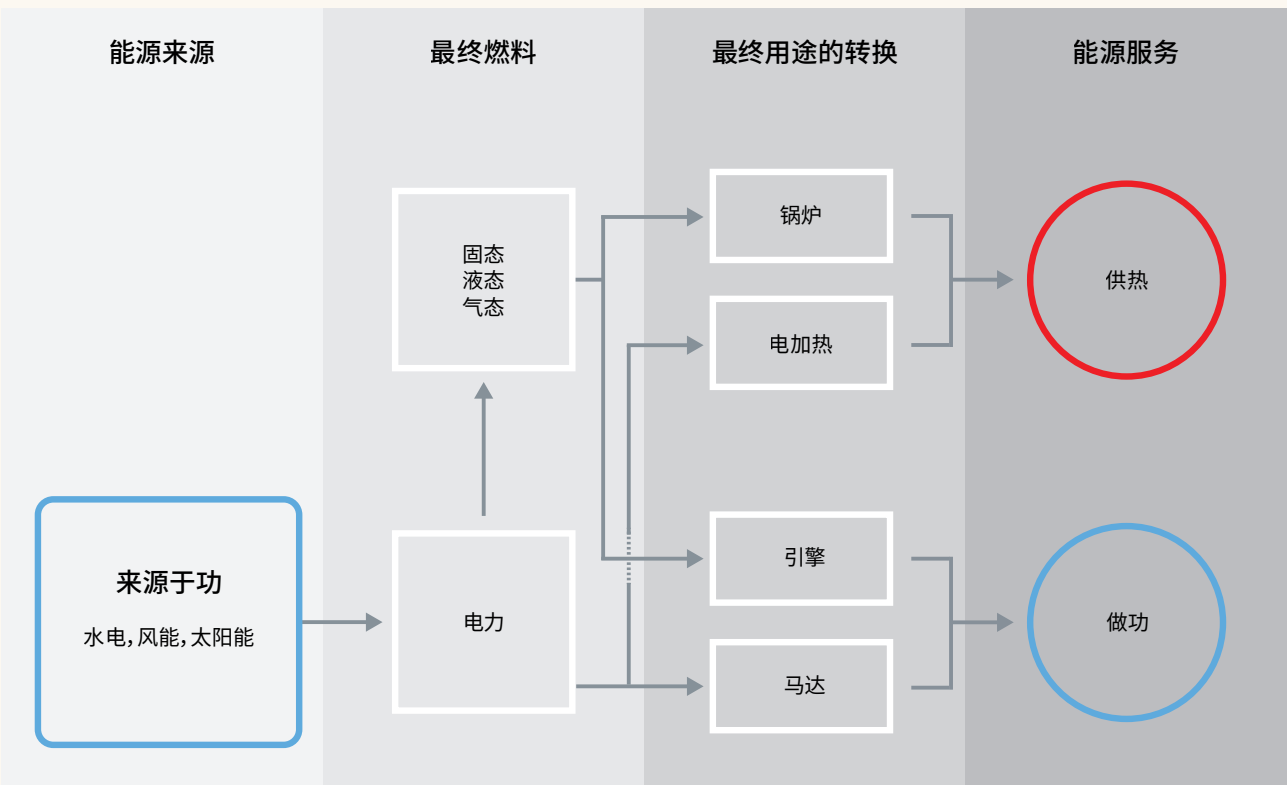


图2：改编自Eyre, N. (2021)。热能能源的来源包括生物质、煤炭、石油、天然气、核能和地热。功生能源包括水电、风能和太阳能。在可再生能源系统中，我们预计会有一些能源来自核能和地热，但从全球范围来看，这些能源微不足道。热能服务包括建筑供暖、洗涤、烹饪、干燥、蒸汽加热和熔化。做功服务包括固定电源、运输、照明、数据处理和电子化学。
资料来源：Eyre, N. (2021). 《从使用热能到使用功：重新认识零碳能源转型》，《能源效率》14:77, 1-20

能源网络电气化的 关键步骤

在净零排放的情况下，不仅能源来源必须改变，能源的使用方式也必须改变。我们的电网必须进行转型，在不牺牲舒适度、能源安全或经济增长的前提下提供服务。这种转变包括：

1

实现全面电气化，大多数可再生能源都能发电。

为了配合实现净零排放带来的可再生能源大规模建设，电气化的广度和深度都需要更进一步。这是本章节的要点。

2

摒弃热生能源，转而通过电力制热——如第13页所述，直接通过热泵制热或间接上通过区域能源。在100°C以下的供热中，电力比化石能源更高效，而100°C的标准对于建筑供热和许多工业流程来说绰绰有余¹⁸。

3

在难以脱碳的行业实现间接的电气化。虽然还未实现完整规划，但我们必须在长途航空业、长途航运业和一些高温工业流程中寻找替代能源。其中最有前途的替代能源之一是低排放的氢能，我们将在第15页对此进行探讨。

未来属于电气化

充分电气化的能源系统可降低高达40%的最终能源消耗¹⁹。

20世纪是电气化的黄金时代。随着电力在效率、可靠性和应用场景方面的重大突破，电力成为并一直作为几乎所有现代技术的基础架构而存在²⁰。正是因为有了电，20世纪以来的绝大部分技术突破才得以实现。试想一下，如果没有电，会有互联网、冰箱甚至是电灯吗？

既然如此，如果说电气化定义了20世纪，我们对21世纪又能有什么期待呢？事实证明，**足以改变我们生活的电力，还远远未被挖掘**。电气化已经促成了数以百万计的技术创新，极大地改善了人类的健康和生活质量。就像煤炭和天然气等化石燃料为工业革命提供动力一样，电气化也将为我们未来的能源系统提供动力。

电气化的途径

说到电气化，我们通常会想到将目前由化石燃料直接驱动的机械（如乘用车）转换为电动设备，当然最好是使用可再生能源。这就是我们所说的直接电气化。

然而，电气化并不仅仅是给设备通电。例如在交通领域，走乘用车电气化转型的路径似乎看起来很简单：换成电池驱动，再用可再生能源充电。但对于大部分交通部门来说，说起来容易做起来难。

让我们以重型车辆为例。首先，与乘用车相比，许多重型车辆的工作强度更大，充电间隔时间更长，这意味着它们需要超大容量的电池，才能达到柴油车的生产效率。其次，例如野外或大型建筑工地的场景中，操作和物流方面的障碍往往让电池更换变得复杂。第三，电网中的可再生能源并非无穷无尽，挖掘机电气化需要的可再生能源相当可观：据粗略统计，如果要实现全球所有挖掘机的电气化，所消耗的能源将相当于目前全球所有海上风电机组所产生的能源之和²¹。既然如此，化石能源驱动的机械应该先实现内部功能（如液压泵）的电气化，以提高发动机效率。对于重型机械，尤其是工业、建筑和海运业来说，这种混合电气化形式是一种非常有价值的中短期解决方案。

案例： 重型车辆脱碳



全球工程机械每年排放400公吨二氧化碳²²，相当于国际航空的排放总量²³。排放量的50%来自挖掘机²⁴。现如今，挖掘机的系统效率只有30%，这意味着发动机产生能量的70%被浪费掉了，而不是为挖掘机的铲斗供能。要确定重型车辆的能源损耗，光看车辆的发动机是不够的。在工程机械的液压系统中，液压泵对液体（油）进行加压，以传输发动机的动力，从而完成起重或挖掘等工作。无论车辆使用的是电动机还是内燃机，都可以采取节能措施大幅降低车辆的能耗。例如，通过变排量泵、数字排量泵、变速泵和分散式驱动器等解决方案，可以在车辆非运行期间大幅降低能耗。

这些节能措施可以使挖掘机能够用更紧凑的发动机和更少的燃料完成更多的工作。这些措施还可将电气化所需的电池容量减少24.8%²⁵。**这类技术发展迅速，其中一些先进技术可为15吨以上的挖掘机节省15-30%的燃料，同时提高机器的工作表现²⁶。**很快，这类技术就可以应用到所有规格的挖掘机上，甚至可以节省高达50%的燃料消耗²⁷。

通过提高能效
可节省燃料消耗
15-30%

正如我们在第12页所看到的，车辆效率的提高也为全面电气化铺平了道路。

最后，在我们的能源系统中，有许多领域无法实现直接电气化或混合电动机械，或者说至少在短期内无法实现，比如航空、长途航运、水泥和钢铁生产等行业。要使这些行业实现直接电气化，所需的电池对于设备体积来说太大，或者需要产生大量的热量（如制造水泥和钢铁）。虽然这些领域很难实现直接电气化，但它们却是温室气体的主要排放者，因此这些行

业的电气化将大大有助于减少温室气体排放和实现净零排放目标。为此，我们可以在这些行业采取间接电气化。

间接电气化主要以电解氢的形式实现。通过电力制氢可以间接的储存电力，并在以上行业用作燃料。我们将在题为“转换：实现净零的关键”的章节中对此进行详细阐述，在此处仅作简要介绍，因为间接电气化是未来能源系统全面电气化的基本要素。

案例：高效电采暖

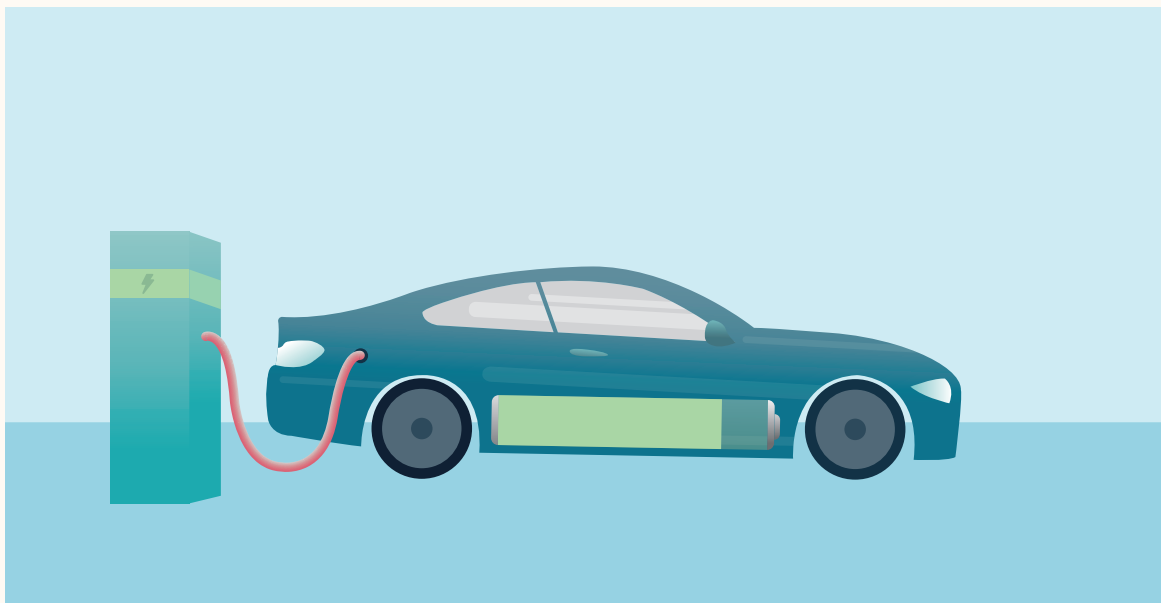
目前，全球约60%的供暖通过化石能源实现²⁸，每年排放约4千兆吨二氧化碳，占全球排放量的10%²⁹。这是因为许多住宅和商业建筑都在使用燃气锅炉等传统供热技术。然而，热泵可以提供相同水平的热量，但能耗更低，碳排放量更少。事实上，对于一个普通家庭来说，热泵输出的热量是用于运行热泵的电能的四倍³⁰。**根据热泵类型的不同，即便是单个热泵的能效也比化石燃料或电阻系统高出3-5倍³¹**，因为热泵的原理是用电力从空气、水或地下源源不断地获取已有的热量，而不是使用燃气或电力产生新的热量。换句话说，热泵可以循环利用热量，从而减少加热相同空间所需的能量。

此外，与燃气锅炉相比，热泵可节省大量能源费用，在德国可节省45%，在法国甚至可节省60%，具体取决于燃气价格和安装的热泵类型³²。在单体建筑中，特别是在城市中，区域能源是热泵很好的替代品，可以将可再生能源和多余热量等不同能源更深入地渗透到能源网中。当然，热泵也可以作为区域能源的补充。例如，如果区域能源网的温度低于需求水平，热泵可以用来提升温度。

热泵的能效
是化石燃料或电阻系统的

3-5倍

案例： 新能源汽车产业推动减排进程



陆路交通排放占全球能源相关排放量的15%以上³³。然而人们普遍认为，扩大新能源汽车规模是我们降低陆路交通排放，实现2050年净零排放的最大机遇。事实上，根据国际能源署的数据，目前看来，“扩大新能源汽车规模”是为数不多的几个在实现净零排放道路上进度正常的目标之一³⁴。但是，新能源汽车究竟能多大程度上帮助减少碳排放呢？

显而易见的一点是，新能源汽车不会直接向大气排放温室气体，而且电力可以做到零碳。但推动该行业实现脱碳的另一个关键因素是，**新能源汽车的电驱系统比其燃烧系统更高效，能量损失仅为15-20%，而汽油发动机的能量损失为64-75%**³⁵。

除此之外，通过采用高效率的功率模块，还可以进一步减少能量损耗，从而将电池体积缩小5-10%，或将行驶里程增加4-10%^{36,37,38,39}。也就是说，驾驶新能源汽车行驶同样的距离，浪费的能量更少，这意味着驾驶者可以用更少的电来行驶相同里程。

转头来看看新能源汽车的生产过程。尽管由于电池制造过程中碳排放量大，新能源汽车的生产往往比使用内燃机的汽车更加高碳，但麻省理工学院的一项研究显示，由于新能源汽车靠充电行驶，生产过程中的排放将在6到18个月内被迅速抵消⁴⁰。如果这些技术发展、迭代，新能源汽车将成为内燃机汽车更好的替代品。

案例： 让能源密集型行业实现脱碳



在还不能实现电气化的行业，我们至少可以实现脱碳。例如，生产钢铁和水泥需要极高的温度，而电炉还无法实现高效生产。虽然高温工艺电气化技术已在发展，但这些工艺目前还没有实现大规模投入使用。除了化石燃料，我们几乎没有其他选择。同样，在航空和长途航运等行业，虽然电动机可以产生足够的动力，但所需的电池过于重，而且占用空间太大，以至于并不实用。在高温生产和长途航运、航空等行业，氢能都是实现脱碳的最大希望。

水通过电解分成氧气和氢气，氧气可以被简单地释放回大气中，而氢气则可以被捕获、储存或进一步转化为替代燃料，如电子氨、电子煤油和电子甲醇。然后，这些燃料可用于需要高温或长距离运输的工业或工艺。

转换过程中的每一步都会有能量损失。例如，电解过程中有大约30%的能量损失⁴¹。把氢再转换成某种形式的可部署能源（如电子燃料）时，还会有额外的能量损失，因此总的往返能源效率为18-42%⁴²。由于存在较大量的能量损失，这些电子燃料并不一定比化石燃料更节能。然而，假设用于制氢的电力来自可再生能源（2050年能源系统中的绝大多数电力都将来自可再生能源），这将是实现这些能源密集型行业脱碳的可行途径，但这还有很长的路要走。

脱碳的基本要素

上述几个案例都说明了电气化与能效之间的紧密关系。通过提高能效，电气化更加容易实现，经济成本也更低。同时，电气化还能降低能源损耗，从而进一步提升能效。更重要的是，在完全由可再生能源驱动时，这些案例将会更加高效。但关键在于，**只有通过节能措施和电气化降低能源需求，并确保有足够的、可满足需求的可再生能源供应，才有可能实现上述目标。**

这又回到了本节的开头：从化石能源系统转变为充分电气化的能源系统，可以降低高达40% 的最终能源消耗⁴³。例如，在正常情况下，即便燃料不同，热泵的效率也要高于燃气锅炉，即使热泵的电力来自化石燃料的燃烧过程。

通过采用电动技术，即使是在当前的能源系统中，我们也可以通过减少化石能源需求来减少碳排放。然而，在未来，如果电力来源于可再生能源，热泵的效率就会大幅提高，因为在系统中燃烧燃料产生电力时，能量损失将不复存在。新能源汽车或任何其他以电力为主要能源的情况也是如此。

如果到2050年，世界要依靠可再生能源，我们就需要通过提高能效来减少能源需求，同时对我们的基础设施进行全面的电气化，以适应能源需求。同样，如果我们要安装数以百万计的热泵和新能源汽车充电站，我们将需要可再生能源电力来供电，并确保全面脱碳。这说明，**如果我们要实现能源系统的全面脱碳，就必须同时考虑能效、可再生能源和电力技术，缺一不可。**

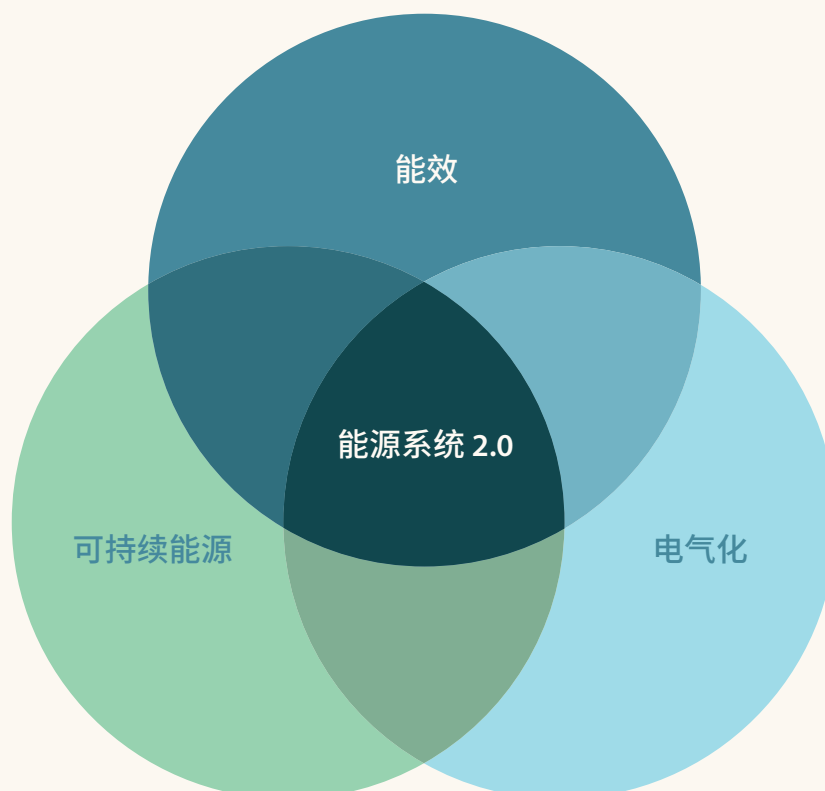


图3：如果我们要在 2050 年实现净零排放，就必须同时考虑能效、电气化和可再生能源。

“**更高效的电气化技术**
将使可再生能源更快地
占据能源市场的
更大份额。”

Jan Rosenow博士和Nick Eyre教授
(Dr. Jan Rosenow & Prof. Nick Eyre)
《为零排放重新定义能源效率》⁴⁴

实现全面电气化

1

提升能效可加快电气化进程

提升能效可加快电气化进程。例如，在乘用车、重型车辆和海运中，提升能效的措施可以减小所需的电池体积。这就意味着减少了所需的充电功率和可再生能源，从而使电气化成本更低，更具竞争力。提升效率还可以降低对充电基础设施的需求，提高车辆的生产率和续航能力。

2

电气化本身就是一种能效提升手段

电气化既能推动可再生能源取代化石燃料，又能以电力技术的更高效率实现能源的节约，从而实现减排。事实上，牛津大学的一项研究表明，**从化石能源系统转变为充分电气化的能源系统，可降低高达40%的最终能源消耗⁴⁵**。这是因为通过可再生能源而不是煤炭或天然气等产热来源来发电，不会以热能的形式浪费能源（见图2）。

灵活性技术： 时机决定一切

我们一天的能量消耗方式由行为决定。清晨时分，我们大多数人都在熟睡。路灯亮着，火车每半小时才来一班。但是，当我们醒来开始一天的生活时，水流进了楼房，煤气通到了炉灶，电力通到了家中。孩子们上学去了，大人们上班去了，家里便没有了能源消耗。然而，在白天住房空空如也时，城市的其他地方却开始热闹起来。商店开门营业，办公室里人满为患，火车运行频率也更高了。经过短暂的午餐高峰和空调与午后酷热的搏斗，人们从学校和工作场所返回家中。这时，我们对能源的需求陡增。准备晚餐、洗衣服、看电影、入夜后开灯照明。在家里度过一个正常的夜晚后，我们和能量系统终于可以获得整晚的休息。

这是一个生动的例子，说明在一个相对发达的能源系统中，能源需求是如何在正常工作日中循环往复的。同样，在未来以可再生能源为基础的能源系统中，能源生产也会出现高峰和低谷。当人们起床或工作一天后回家时，能源系统中会出现急剧的用电高峰，但这并不总是与艳阳高照或狂风大作的时段完全一致（见第32页图7）。

这种不对位是我们未来能源系统面临的主要挑战之一。目前，即使是在可再生能源占比较高的国家，化石燃料仍被用作高峰时段的补充能源，这意味着我们在这些高峰时段排放的二氧化碳远远超标。然而，当不能再用天然气发电厂来满足高峰时段的需求时，我们必须找到新的方法来更灵活地管理能源。

**“在可再生能源发电量较少的高峰时段节约一度电，
比在可再生能源发电量过剩的时段节约同样一度电，
所产生的减碳价值和环境效益要大得多。”**

Nick Eyre教授,《为零排放重新定义能源效率》⁴⁶

本节介绍了实现更加灵活的能源系统的途径，以及大规模实施需求侧灵活性解决方案可能节约的能源和成本的新数据。

什么是需求侧灵活性解决方案？

需求侧灵活性解决方案是指在可再生能源充足时使用可再生能源，并在高峰时段降低用电需求。这意味着要平衡能源消耗，使我们的高需求和绿电的低供应时段不会同时出现。实现这一目标的主要方法是需求侧灵活性解决方案，如负荷转移或削峰填谷，这两种方法或多或少都是为了减少高峰期的能源需求。要么将能源使用从高峰期转移到其他时段，要么通过减少一种功能的能源消耗，供给给另一种功能，从而完全避开高峰期。

从根本上说，可以在需求高峰期关闭或减少设备，而选择在其他时间使用。虽然在某些情况下，这一过程实际上会导致更高的能源使用量，但容易实现，有时甚至更便宜和环保。因为能源在需求高峰期之外使用，不仅减少了电网压力，还节省了资金，因为非高峰期的能源更便宜。事实上，在美国，通过优化建筑能效、需求灵活性解决方案和电气化等手段，每年可节省高达1,070亿美元的用电成本。到2050年，建筑物的碳排放量还将减少91%⁴⁷。

当需求侧灵活性解决方案与高效的能源储存机制（见“储能”部分）相结合时，能效会更高，因为可以实现低需求时段自动储存能源，以便在高需求时段使用。同样，这也能让消费者在能源价格高昂、碳排放高的时段使用廉价的可再生能源。

案例：模型预测控制

利用数字技术控制设备或改变使用能源的方式或时间，可以实现负荷转移和削峰填谷的自动化，主要通过实施“模型预测控制”数字工具来实现。以楼宇为例，**人工智能驱动的技术通过结合楼宇、天气和用户数据来预测供暖和通风需求，可为楼宇节省高达20%的能源成本。**通过控制，建筑物可以在高峰时段提前预热，或者在太阳即将照射到建筑物外墙时降低供暖，从而节约能源。

对芬兰的100,000套配备了这种技术的公寓进行跟踪分析显示，最大用电量减少了10%-30%⁴⁸。同时，通过将用电量转移到最经济的时段，该系统可确保在不影响居民舒适度的情况下节省高达20%的建筑能源成本⁴⁹。2021年，伦敦地方政府在八栋住宅楼中安装了模型预测控制装置，运行的前11个月就成功收回了初始成本，并节省了600兆瓦时的热量，相当于英国50个家庭一年的供暖用量。

案例： 欧盟和英国的能源灵活性前景



让我们想象一下未来的情景，当电力充足时，我们的汽车会自动开始充电，而当电力不足时，汽车又会自动送电。在未来，供暖和制冷系统可以在不影响舒适度的情况下，自动在最佳需求时段运行。或者，当电价便宜时，超市里的冰箱可以自动调至超冷却状态。其实，这并不是科幻场景，其中许多灵活性解决方案已经存在，而且现在就可以实施（见“模型预测控制”案例）。

在提高能源安全的同时，需求侧灵活性解决方案在节约能源、减排和节约成本方面的潜力同样巨大。包括欧盟在内的许多政府机构都认识到，需求侧灵活性对于大规模整合可再生能源非常重要⁵⁰。然而，虽然政府部门对此认可度很高，但激励全面实施需求侧灵活性解决方案的政策行动却不甚积极。

经由丹佛斯委托，一项新的分析研究了需求侧灵活性在欧盟和英国能源市场中的潜力⁵¹。分析发现，**雄心勃勃来巨大的社会和环境效益，并降低消费者的能源开支**。实际上，需求侧灵活性政策的潜力可能更大，因为本分析未考虑节省下来的配电网和内部输电网的投资，以及向系统运营商出售相关的支持性服务可能带来的收益。

需求侧灵活性解决方案是逐步淘汰化石燃料发电的重要工具。到2030年，天然气年发电量会大幅减少106太瓦时，约占2022年欧盟天然气发电量的五分之一⁵²。同样，**到2030年，欧盟和英国每年可减少4,000万吨二氧化碳排放**，超过丹麦2021年的国内碳足迹⁵³。

与此同时，**到2030年，欧盟和英国每年可节省105亿欧元的社会成本，到2050年可节省155亿欧元**，这其中也包含了需求侧灵活性解决方案的大部分建造成本。2050年节省的部分成本源自于电力线路投资减少的21%。

到2030年
每年可节约的社会成本高达

10.5亿欧元

在最近的能源危机中，英国为应对能源危机拨出1,030亿欧元的专款，欧盟国家拨出了6,810亿欧元⁵⁴。整个欧盟和英国都可以推广需求侧灵活性技术，使电网更具韧性。这将大大减少对政府补贴的需求，并在社会 and 消费者层面节省资金。**到2030年欧盟和英国的普通消费者可以节省7%的电费，到2050年可以节省10%。**

为了实现《巴黎协定》的目标，欧盟和英国必须实现能源系统电气化。这将需要发电量的大幅增加，包括巨大的电池容量。然而，**通过全面实施需求侧灵活性解决方案，在2050年之前，发电量的扩张可以减少313吉瓦，约占总发电量的10%。**

这包括将电网级的电池存储需求从298吉瓦大幅降至2吉瓦以下。从这个角度来看，2022年全球电池容量为28吉瓦⁵⁵。世界已经面临着电池原材料稀缺的挑战⁵⁶。通过减少对电池的需求，关键矿产供应链的压力将会缓解，并限制矿产开采带来的环境恶化。

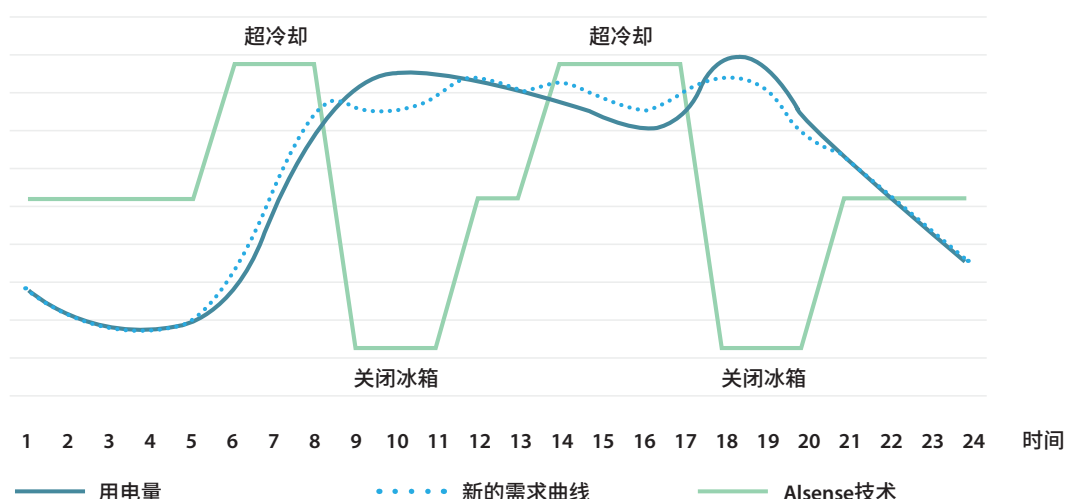
如果不能大规模推广需求侧灵活性解决方案，可能会对社会和环境造成重大影响。**如今，我们每年要向可再生能源运营商支付数亿美元，让他们在风力或日照太强时关闭生产⁵⁷。然而，到2030年，需求侧灵活性解决方案可以将这项支出减少25%⁵⁸。**同样，如果我们不设计一个可再生能源系统来应对能源供应不足的时期，我们就会面临停电的风险，这可能会造成巨大的经济损失^{59,60,61}。需求侧灵活性解决方案是避免这些代价高昂的停电事故的重要工具。这应该给决策者留下一个问题：“我们负担得起错过需求侧灵活性解决方案的机遇吗？”

到2030年
每年减排的二氧化碳高达

40万吨

案例： 超市冷柜的超冷却技术

图4: Alsense技术如何降低需求高峰



超市用电量占工业化国家总用电量的3%。而在超市内部，制冷系统在总能耗中所占的比例最高。然而，通过优化需求或负荷转移，可以降低超市在高峰时段的用电需求。

例如，利用Alsense等数字技术，可以自动进行负荷转移，将超市冷柜冷却到比所需温度低得多的温度（也称为超冷却），在需求高峰时段之外，冷柜可以像电池一样有效地储存能量。这样，冰箱就可以在能源需求高峰时段关闭，既降低了电网压力，又为超市节省了开支。

虽然该系统比传统冰箱系统耗电更多，但通过在可再生能源充足的时候使用能源，超市可以通过降低用高峰时段的需求，减少对高碳能源的需求。欲知更多信息，请参阅丹佛斯案例研究“为世界建造更好的超市”⁶³。

3%

的工业化国家总电力需求来自超市

实施灵活性解决方案

1

灵活性能源需求可减少排放

通过实施需求侧灵活性解决方案，电力需求可以更好地与供应高峰时段保持一致。在欧盟和英国，**将能源使用从碳密集型的需求高峰转移开来，到2030年每年可减少4,000万吨二氧化碳排放**，超过丹麦2021年的国内碳足迹。同样，**到2030年，天然气年发电量可大幅减少106太瓦时**，约为2022年欧盟天然气发电量的五分之一。

2

灵活性将为社会和家庭带来重大经济效益

一项新的分析显示，雄心勃勃但又切合实际的需求侧灵活性解决方案将为消费者和整个社会带来巨大的经济效益。**到2030年，欧盟和英国每年可节省105亿欧元的社会成本。除此之外，到2030年，普通消费者还可节省7%的电费。**

3

减少对电网级电池存储的需求

通过全面实施需求侧灵活性解决方案，欧盟在2050年前的电网扩张可减少313吉瓦，约占总发电能力的10%。其中包括**将电网级的电池储能需求从298吉瓦大幅减少到不足2吉瓦**。从这个角度来看，2022年全球电池容量为28吉瓦。

能源转换： 实现净零的关键

可再生能源可以生产出大量绿电。然而，在电力供大于求的情况下，风电机组和太阳能电池板等可再生能源基础设施就会被关闭。过多的电力供应会破坏电网稳定性，若运营商不削减部分能源供应，会为电网稳定性带来影响。因此，可再生能源运营商有时会被要求停产一段时间。在德国，2019年的停产补偿高达7.1亿欧元⁶⁴。

然而，正如我们在第22页所探讨的，到2030年，需求侧灵活性解决方案可以让这种情况减25%⁶⁵。实现这一目标的两个主要方法是能源转换和储存。在本节中，我们将探讨转换过程中的挑战和机遇，然后在下一节中重点讨论储能。

什么是能源转换？

能源转换既简单又复杂。简单地说，就是将一种形式的能源转换成另一种形式的能源，可以是风能转化为电能，也可以是电能转化为氢能，还可以是其他任何形式的转换。然而，在实践中，成功的能源转换需要相当复杂的工程技术。如果我们要实现能源系统的脱碳，掌握能源转换的技术和实施方法至关重要。

未来的能源系统中，几乎所有的能源都来自于将太阳能和风能等可再生能源转化的绿电。此外，氢能转换

将成为储能的主要形式。接下来让我们深入探讨如何提供足够的电力来支持氢能生产，以及这一过程如何帮助稳定电网。

氢能在未来至关重要

未来，我们将需要大量低排放的氢能，以实现《巴黎协定》的目标。一方面，氢能是储存多余可再生能源电力的有用工具。而同时，氢能在生产低排放钢铁、电子氨气、电子甲醇和其他电子燃料的行业中也至关重要，因为氢能可以替代化石燃料。此外，它还有潜力成为一种可持续的低排放燃料，用于长途国际航运、重型卡车甚至飞机等难以减碳的领域。虽然各项研究的结果不尽相同，但总的来说，氢能在能源组合中所占的比例只会继续增长^{66,67,68,69}。

但是，如何才能实现这些宏伟的制氢目标呢？未来，电解水，也就是通过将水分离为氢气和氧气而将电能转化为氢能的过程将大规模推广。如果为这一过程供电的电力来自可再生能源，我们就可以间接地使用任何可以使用氢能，或由氢能产生的电子燃料的行业实现电气化，进而实现脱碳。

然而，电解水过程需要大量电力供应。据国际能源署估计，到2030年，我们将需要额外11EJ的氢能，到2050年将需要54EJ的氢能⁷⁰。从这个角度来看，**氢能生产将需要目前总电力需求的一半以上^{71,72,73,74}**。这将不可避免地推动绿电供应的扩大，如何为电网提供这一部分电力，将成为未来的一大挑战之一。

要生产2050年所需的低排放氢，需要大量的投资⁷⁵。但未来我们究竟需要多少氢呢？欧盟计划到2030年生产和进口总计666太瓦时的氢，全部由低排放源生产⁷⁶。这相当于约140座核电站的发电量⁷⁷。一项分析表明，**欧盟可以通过能效和电气化，同时大规模推广太阳能和风能、区域供热和高效热泵，将对氢的需求量减少到约116太瓦时（不到原计划的五分之一）⁷⁸**。

无论如何，到2030年获取116太瓦时的氢仍然是雄心勃勃的，而且所需的电力将对能源网的稳定性和安全性构成重大挑战。

制氢可稳定电网

整个能源系统，包括家中的电源插座，都调整到了一个特定且稳定的电压和频率。要维持电网频率，需要大量的工程设计。然而，当电力供需不匹配时，这一理想频率就会失衡，从而导致能源供应出现问题。热电厂机组的产能调整空间较大，可以有效地起到稳定电网的作用。换句话说，当需求增加时，电厂可以在短期内向电网输送更多的电力，也就是让电网有足够的时间向机组注入更多的蒸汽，类似在汽车驶近山坡时加大油门以保持相同的速度一样。

电解水

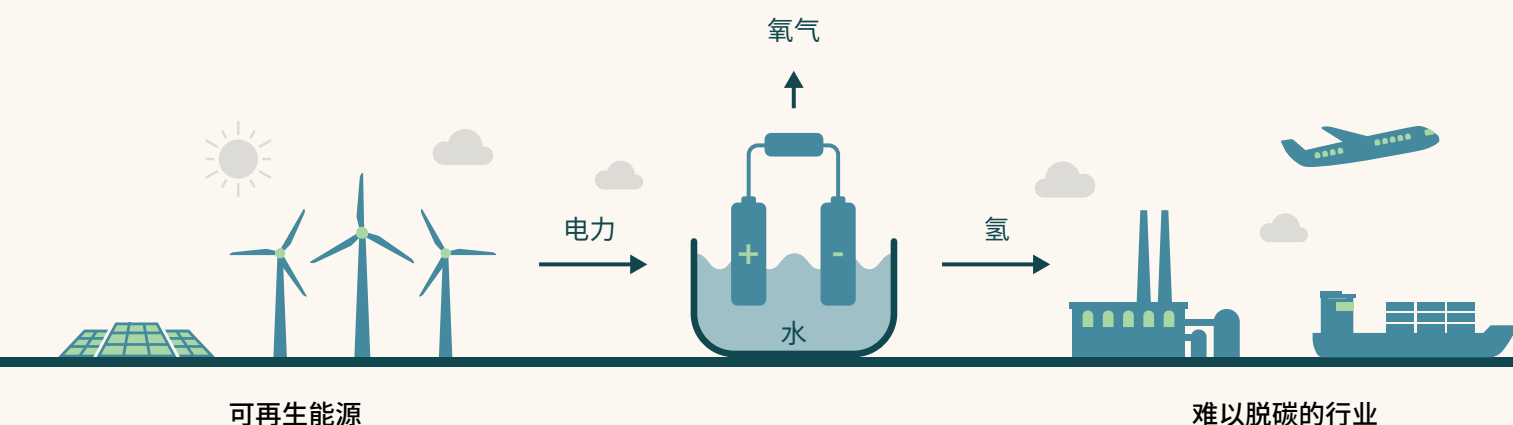


图5: 通过电解将可再生能源转化为氢

在未来的能源系统中，我们将从集中式发电转向分散的新能源发电。这些新能源没有体积庞大的传统热电机稳定，因此我们必须思考出其他办法来稳定电网。在较短时间内，电池可以很好地弥补供需之间不稳定的情况。在较长时间的失衡情况下，例如连续几天或几周风力强劲时，系统中的电力就会过剩。在这种情况下，**提高制氢量有助于消耗掉过剩的绿电，因此制氢本身就能起到稳定电网的作用。**

氢能不仅能为电网稳定和能源安全带来好处，还能帮助降低成本。根据供求关系的基本规律，产量高时电价便宜，产量低或供小于求时电价昂贵。但是，氢的生产可以根据电价的高低来调节。因此，一旦所有必要的基础设施到位，在电力生产量大而需求量小的时段生产氢将具有经济意义，从而确保在可再生能源过剩时以具有成本效益的方式加以利用。

正确使用氢能

氢是一种有效的能源载体，其最终用途多种多样。然而，与所有形式的能源一样，如果我们要向可再生能源全面转型，就必须尽可能高效地使用氢能。

如果用氢来为建筑供暖，那这实际上是在低效地使用氢能。如果要利用海上风电场生产的低排放氢为英国家庭供暖，我们将需要385吉瓦的产能来生产足够的氢。

然而，全球海上风力发电量预计在未来十年内只会增长380吉瓦⁷⁹。但如果我们改用热泵和区域能源为英国供暖，所需的发电量就要小得多。使用热泵，67吉瓦的发电量就足够了，如果我们为人口较稠密的地区提供区域供热，所需的电力甚至更少。这样还可以更方便地利用周围建筑物和工厂生产过程中产生的余热为家庭供暖。而如果采用氢能作为供热的热源，那么我们则需要建设一个占地52,000平方公里的海上风电场。然而，如采用热泵解决方案，则只需建设9,000平方公里的风电场。概括来说，用热泵为英国供暖所需要的电力仅为用氢能供暖需要的电力的六分之一⁸⁰，如果将热泵与区域能源相结合，所需的电力甚至更少。

然而，正如上文所述，氢有许多很好的用途。**对于难以脱碳的行业，我们不能依靠电池**，因为用于集装箱船或国际航空的电池实在是太大了。不过，**我们可以用氢生产电子燃料来降低交通部门的排放**。未来，我们有望看到使用电子氨和电子甲醇航行的轮船，以及使用电子煤油飞行的飞机，所有这些都是用氢而不是化石燃料生产的。**钢铁生产等其他行业需要极高的温度，在这方面，氢也能在脱碳过程中发挥关键作用。**

用热泵或绿氢为英国供暖

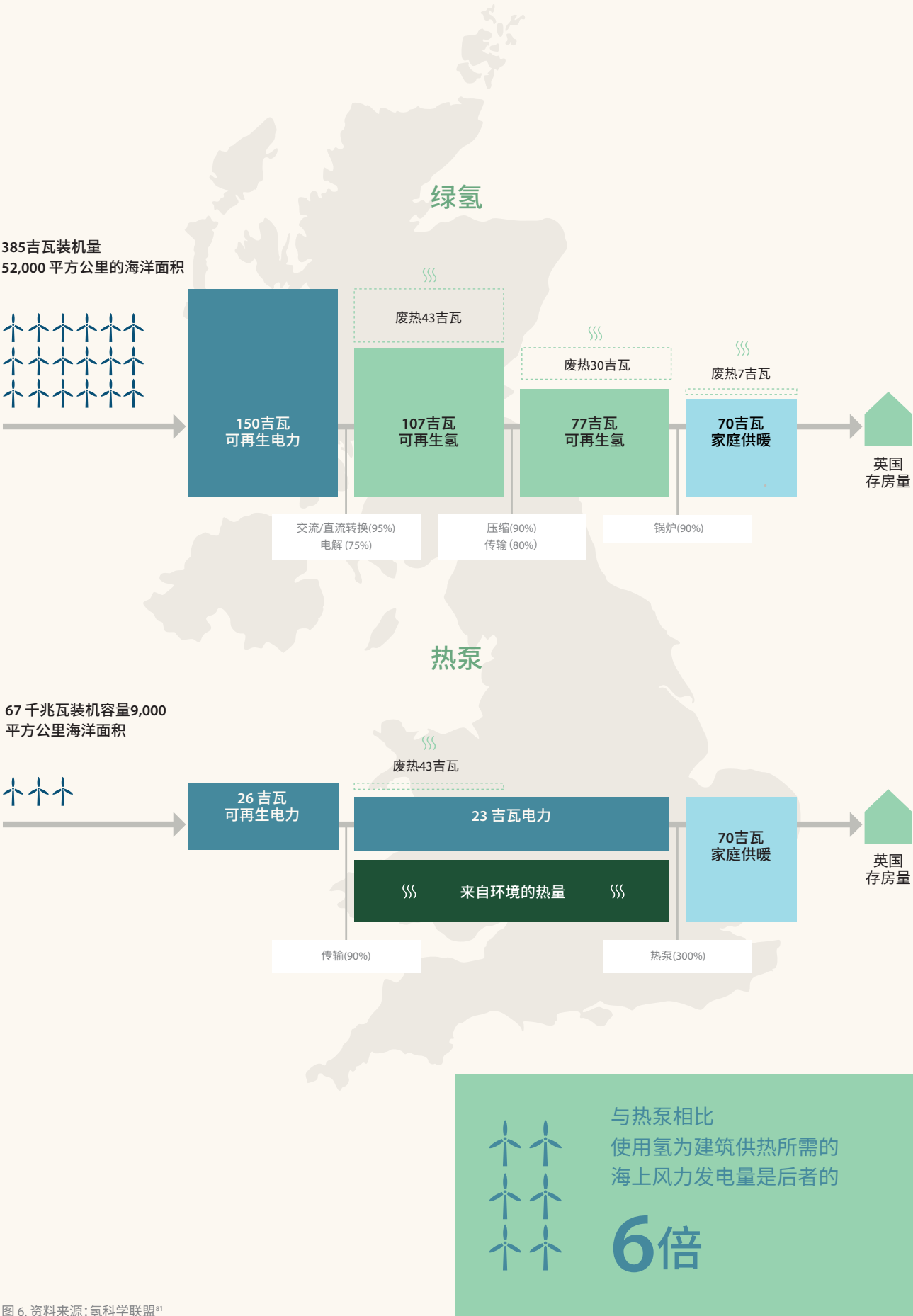
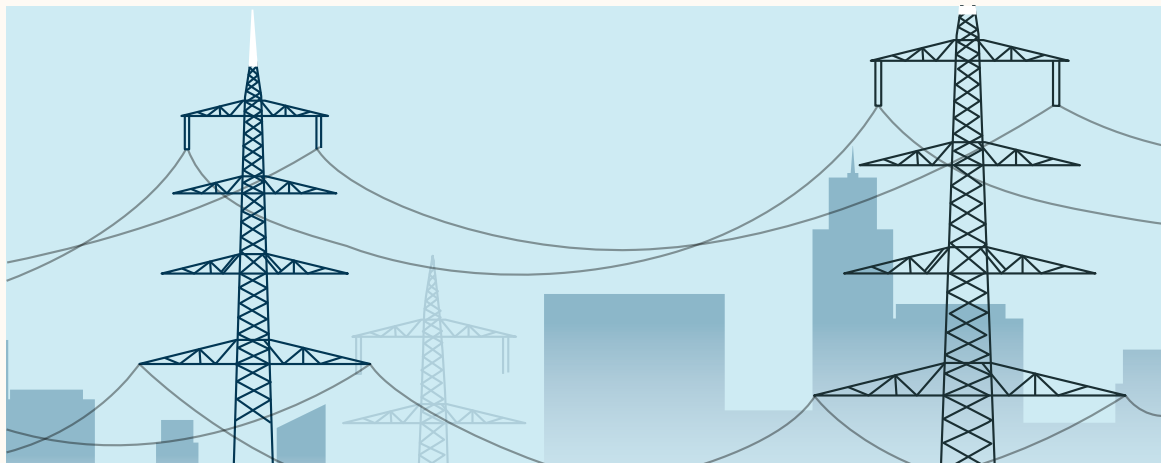


图 6. 资料来源: 氢科学联盟⁸¹

案例： 好的变流器省电又省钱



未来，制氢将对电网产生巨大的拉动作用，因此我们必须确保生产过程尽可能高效，避免对电网造成不必要的干扰。氢通过电解水生产，电解器利用电力将水分离成氧气和氢气。所有电解器都使用直流电（DC），而电网则使用交流电（AC）。直流电存在于普通的AAA电池中，电流始终朝一个方向流动，而电网中的交流电则周期性地改变方向。这意味着需要将交流电转换成直流电才能制氢。低质量的交流/直流变流器会干扰电网中的交流电，因此需要加入其他补偿装置来确保电能质量。

在讨论氢的生产时，低质量的变流器对电网的干扰愈发受到关注。此外，这种变流器还会向电解设备输送低质量的直流电。不过，现在的市场上已经有了更好的变流器，几乎不会对电网造成干扰，从而不再需要补偿设备，同时还能为电解厂提供更清洁的直流电源。

更清洁的直流电源可将生产的整体效率提高约1%⁸²。虽然这听起来并不多，**全球制氢用电量的1%却足以满足伦敦四年的用电量**，从整个电网的角度来看可以大幅降低成本。同样，由于减少了对补偿装置的需求以及随之而来的维护工作，恰好抵消掉了高质量转换器的部分成本。在一定情况下，更好的设备不仅能简化系统，还能提高电网的韧性。

未来全球制氢用电量
的1%足够伦敦使用

4年

合理发挥氢能潜力

1

将电转化为氢对深度脱碳至关重要

多余的可再生能源可以氢的形式储存起来。虽然这种转换会带来能量损失，但氢能将是钢铁生产、长途航运和远程航空等行业实现脱碳的关键。

2

高效制氢至关重要

未来，氢的生产将对电网产生巨大影响，因此必须确保尽可能高效地制氢，避免对电网造成不必要的干扰。通过使用高效变流器等电力电子产品，我们可以节省电力和成本。

3

必须合理使用氢能

氢能供暖效率极低。利用海上风电场生产的低排放氢为英国家庭供暖，需要385吉瓦的产能才能生产出足够为英国供暖的氢。如果转而使用热泵，仅需67吉瓦的产能。如果人口稠密地区使用区域供热，所需的产能甚至会更少。

储存未来能源

储能对未来的智能电网至关重要。随着电网走向去中心化，我们更需要存储能源，以便在能源不足时提供电力。事实上，从2020年到2026年，全球储能装机量预计将增加56%，主要原因是全球对灵活性方案和储能的需求增加，从而整合越来越多的可再生能源⁸⁴。

储能并不是一项简单或低成本的事情，因此在选址和技术路线选择方面，需要格外慎重。合适的储能方案取决于许多因素，如地理位置、能源来源、土地使用情况、储能时长以及需要从储能装置中获取电力的时间。有许多储能技术可以采用，有些现在已经成熟，有些则处于前沿。下一页，我们将介绍几种关键技术的潜力。

短期与长期储存

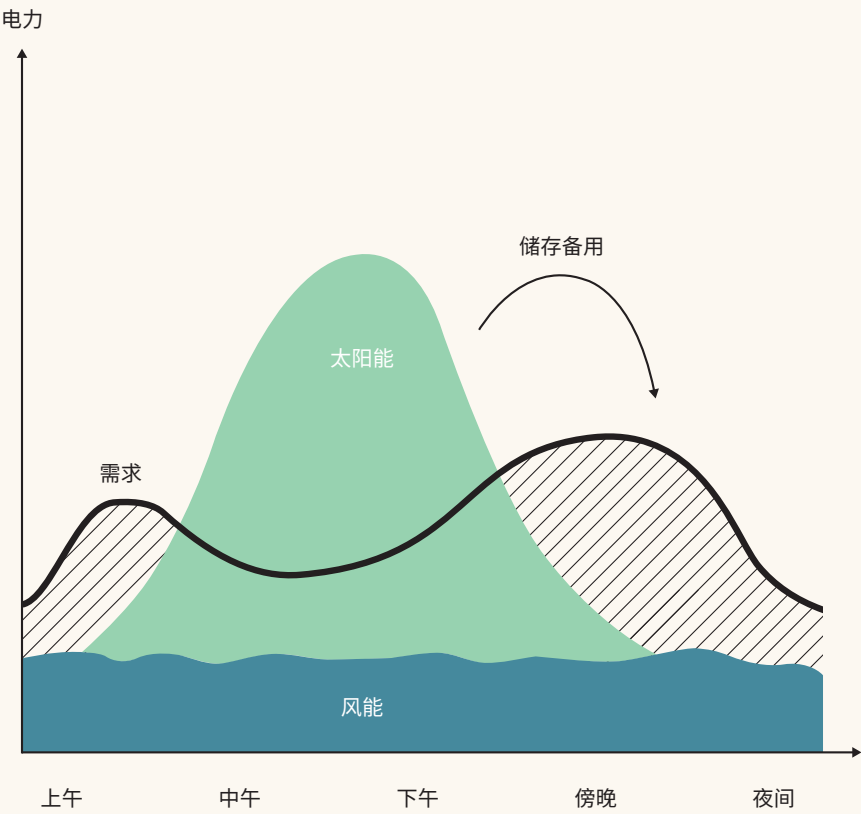
光伏电站会在每天需求高峰出现之前产生多余的电力（见图7）。然而，只有将这些多余的电力储存到傍晚和夜间使用，我们才能实现对可再生能源的依赖。短时储能的一些理想解决方案包括锂电池和热储存，例如区域能源。**当电网中有大量绿电时，区域能源系统是储存热能的绝佳解决方案**，可以按需供热或供冷，储能时长可在几小时到几个月之间。

这一特点使区域能源成为需求侧灵活性措施的重要手段（详细内容见第20页关于需求侧灵活性措施的部分）。

正如每天都存在用电高峰一样，用电量也存在季节性变化。在高纬度地区，冬季需要为家庭供暖，而中低纬度国家在夏季对空调的需求较大。同样，在高纬度地区，夏季生产的绿电更多，但冬季对电力的需求最大，两者之间也会存在时间差。为了填补这一缺口，我们必须考虑长期储能方案。考虑到成本及其长时储能损耗的问题，锂电池并不是有效的解决方案，就像家里的AAA电池一样无法持久。热能储存、氢能和抽水蓄能电站是更好的长期储存方案，这些方案可以储存大量能源，而且随着时间的推移损耗非常小，每兆瓦时的成本也很低。

决定使用哪种储能解决方案的另一个重要因素是成本。各种技术的储能价格普遍下降，储能规模越大，单位储能成本越低。尽管预计未来所有技术的成本都会降低，但目前热储存、转化为氢储存和建立抽水蓄能电站的成本最低，而且未来成本将持续降低⁸⁵。锂电池的价格预计会下降，但这种技术对关键矿物质的依赖较高，因此价格受到矿物质供应的影响较大⁸⁶。

短时储能



长时储能

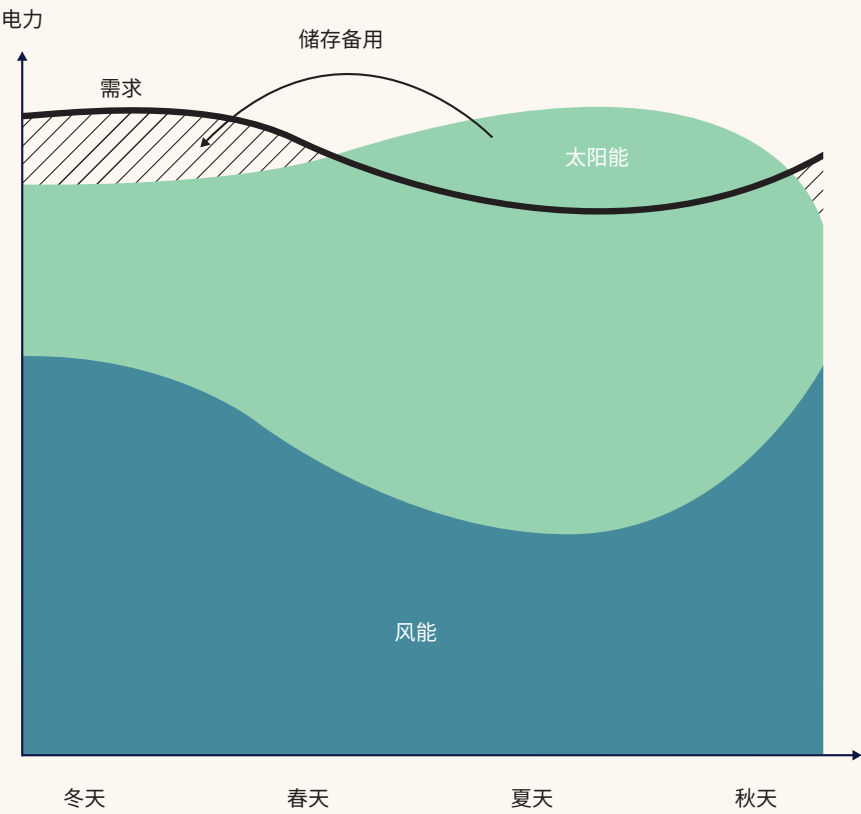


图7: 短时与长时储能



通过区域能源蓄热

热能储存是指加热或冷却一种介质，以便在以后需要时使用，最简单的形式是使用水箱进行热能储存。在能源充足时给水加热，将能量储存在水中，在能源不足时加以使用。热能储存还可用于平衡昼夜之间的能源消耗。现代区域能源系统拥有灵活的热能基础设施，能源可以直接“接入”，例如以热水或冷冻水为形式的能源可以通过管网输送到建筑物中立即使用，也可以储存在蓄热设备中备用。通过蓄热罐，热能可储存数小时甚至数天。如果使用较大的深坑或其他储存设施，热能可以储存长达数月之久。通过这种方式，区域能源系统可以通过两个关键功能为能源系统提供灵活性：提供存储和实现不同能源之间的切换，如大型热泵、废热、太阳能蓄热和地热⁸⁷。

H_2 氢

通过电解水将绿电转化为氢，也可以实现储能。有几种可行的方法可以实现氢的大规模储存，从盐洞到罐装压缩气体⁸⁸，氢可以长期储存而不会造成能量损失。因此，氢是实现季节性能源平衡的理想选择⁸⁹。此外，目前的天然气管道也可以改装成氢运输的管道⁹⁰。这样就可以利用一个地方过剩的绿电，为另一个遥远的地区提供能源，实质上就是创造了一个类似于当前天然气市场的氢市场。

氢的储存有许多潜在用途，但其效率比不上电池等其他储存形式。电—氢—电转换过程的能源效率可能低至18%⁹¹，因为每次转换都有一定程度的能量损失。在工业中使用氢能以达到高温，或生产用于航运和航空的电子燃料时，也会有大量的能量损失。但对于这些难以脱碳的领域，我们可能不得不接受能量损失，技术的发展将使电子燃料成为经济上可行的选择⁹²。目前，以氢的形式储存能源非常昂贵，但随着技术的发展，预计未来价格会有所下降^{93, 94}。有关氢、氢能的更多信息，请参阅第25-30页。

抽水蓄能电站

抽水蓄能电站利用多余的电力将水抽到海拔较高的水库，当需要用电时，通过机组将水放回海拔较低的水库发电⁹⁵。目前，抽水蓄能电站是应用最广泛的蓄能技术，2020年占蓄电总量的90%⁹⁶。

抽水蓄能电站的储能成本很低，即使是大型设施也是如此⁹⁷，而且可以提供数小时至数周的电力⁹⁸。然而，尽管技术成熟且成本低廉，但人们普遍认为适合建造新站点的地点有限⁹⁹。抽水蓄能水力发电是一种低排放的能源储存方式，但必须牢记一点，在大型水电站筑坝可能会对环境和生物多样性造成负面影响¹⁰⁰。

锂电池

电池是一种可行的短期存储解决方案。尽管锂电池仍然昂贵，但在过去十年中价格已经下降。这种电网侧的电池对资源的要求很高。即使变得越来越便宜，电池价格仍将受到关键矿物的影响。目前全球电池储能容量远低于抽水蓄能电站，但预计将从2022年的28吉瓦大幅增至2030年的967吉瓦，相当于全球抽水蓄能电站容量¹⁰¹。

总的来说，这些储能机制都有各自的优势。电池特别适合与太阳能电池板结合使用，尤其是在日照模式可预测且稳定的地区，如半干旱区和干旱地区，可以根据日照时间以外的电力需求来调整电池存储量。不过，电池有两个主要缺点，第一是循环次数有限，第二是受限于环境因素，特别是电池依赖于大量开采关键矿物。但技术发展日新月异，我们很可能很快就能拥有性能可维持25-30年的电池¹⁰²。

通过行业耦合： 实现能源再利用

可再生能源并非取之不尽、用之不竭。然而，一个充分电气化的能源系统对可再生能源电力的需求将是巨大的。因此，我们需要充分利用所有可用的能源，尤其是余热。在我们的能源系统中，到处都有能量以热量的形式被浪费到大气中。**这些余热是提高能源效率的沉睡巨人**；如果从战略上加以回收，并将其作为能源加以利用，就有可能减少大量宝贵的能源消耗，如化石燃料和电力，从而既节省资金，又减少温室气体排放。

行业耦合是指将不同部门结合起来，以更高效、更可持续的方式开展合作。行业耦合的目的是找到各部门合作的方法，减少浪费，提高整个系统的效率，而不是对每个部门单独改造。行业耦合还有助于更多地利用过剩热能等替代能源，从而减轻电网压力。

余热的潜力

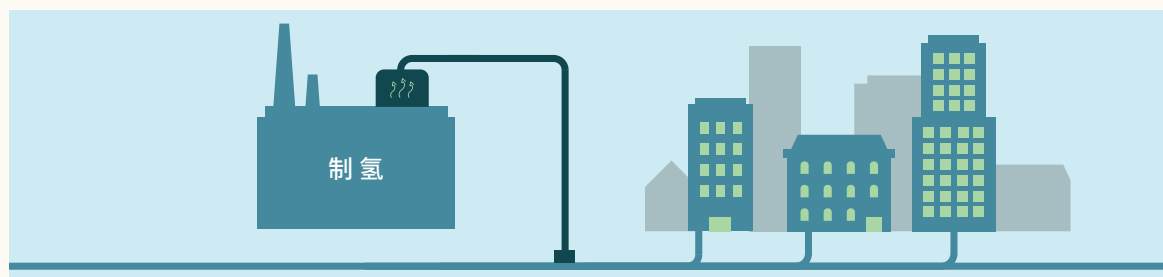
机器每次运转都会产生热量，就像冰箱背后总是温热的。**全球各地的超市、数据中心、废水处理厂和制氢设备同样会产生大量热量。**

到2030年，全球高达53%的能源将作为余热被浪费掉¹⁰³。如果我们能回收余热，气候也会受益匪浅。理论上，如果我们能回收全部的余热，全球范围内可实现减排10%-19%¹⁰⁴。

供暖是能源系统中最大的消耗源之一。在欧洲，供暖占每年最终能源消耗的50%以上，而欧洲的大部分供暖仍使用化石燃料，其中近一半是天然气¹⁰⁵。与此同时，欧洲所有城市地区都有大量的余热资源。欧盟每年可利用的余热约为2,860太瓦时，其中大部分都可以重新利用¹⁰⁶。从这个角度来看，这个数字几乎相当于欧盟每年对住宅和服务业建筑供热和提供热水的总能源需求，在欧盟27国和英国这个数字约为3,180太瓦时¹⁰⁷。

在一些国家，余热的潜力甚至与总热量需求相当¹⁰⁸。例如，在荷兰，余热达到每年156太瓦时¹⁰⁹，而水和建筑供暖需求仅为每年152太瓦时¹¹⁰。世界其他地区的情况也类似。例如，以中国北方的工业部门为例，仅在采暖季就会产生约813太瓦时的余热¹¹¹。试想一下，全中国所有行业的余热总量是多少！

案例： 制氢过程中产生的余热



电解水制氢所产生的余热可以收集起来，用于家庭供暖和工业供热。到2050年，低排放氢的生产量将十分巨大，据国际能源署（IEA）估计，全球电解氢所的电力为14,800太瓦时¹¹²。**大约三分之二的制氢过程的用电量被转化为氢，其余则作为热量被浪费掉。从理论上讲，到2030年，这些能源损耗中约有17%可以回收并接入到区域能源系统中，为城市减轻可再生能源的供热负担¹¹³。**

图8列出了《彭博能源展望》中全球电力需求的来源。显而易见，制氢所需的电力将是巨大的。因此，我们必须确保尽可能多地利用电解过程中产生的余热。然而，只有合理规划氢的生产，在规划或现有的区域能源系统附近建设制氢厂，才能利用这些余热潜力。事实上，今天我们已经有能力做到这一点。有几个项目已经开始实施，很快就能通过区域能源系统将电解厂的多余热量分配给家庭供暖^{114,115}。

影响余热实际利用率的因素很多。例如，要充分发挥潜力，就需要大量区域能源建设，而且氢的生产必须在区域能源系统附近进行。除此之外，许多地区对热量的需求很少，或根本没有。然而，从电解中回收余热的理论潜力如此巨大，我们在规划未来能源基础设施时必须考虑到这一点。

在全球范围内，如果制氢设施靠近合适的区域能源系统，理论上我们可以在2050年从制氢过程中回收1,228太瓦时的热量，并将其作为区域能源重新分配。**从这个角度来看，1,228太瓦时的热量几乎相当于当今全球最大热源煤炭发电量的三分之二¹¹⁶。**

仅在欧盟，到2030年就可回收约83太瓦时的热量，足以满足目前德国1.5倍以上的家庭供暖需求¹¹⁷。在中国，到2060年可回收296-427太瓦时，相当于中国目前供热量的18%到26%¹¹⁸。当然，这些都是理论上的潜力，但如果在长期能源系统规划中考虑到区域能源和余热，区域能源可以成为实现1.5°C目标的关键因素。

制氢的电力需求

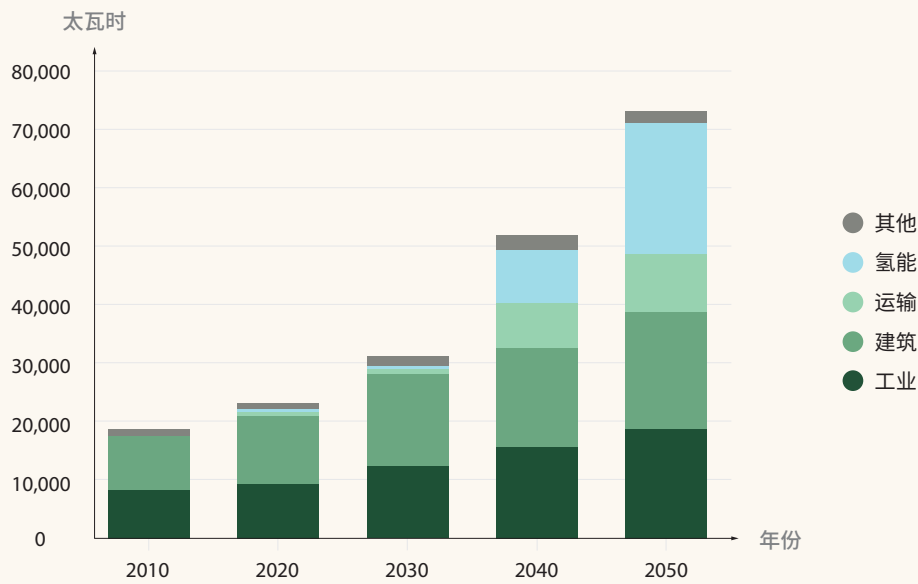


图8：彭博社NEF“净零”情境下全球各行业的电力需求¹¹⁹

将能源消费者和生产者联系起来

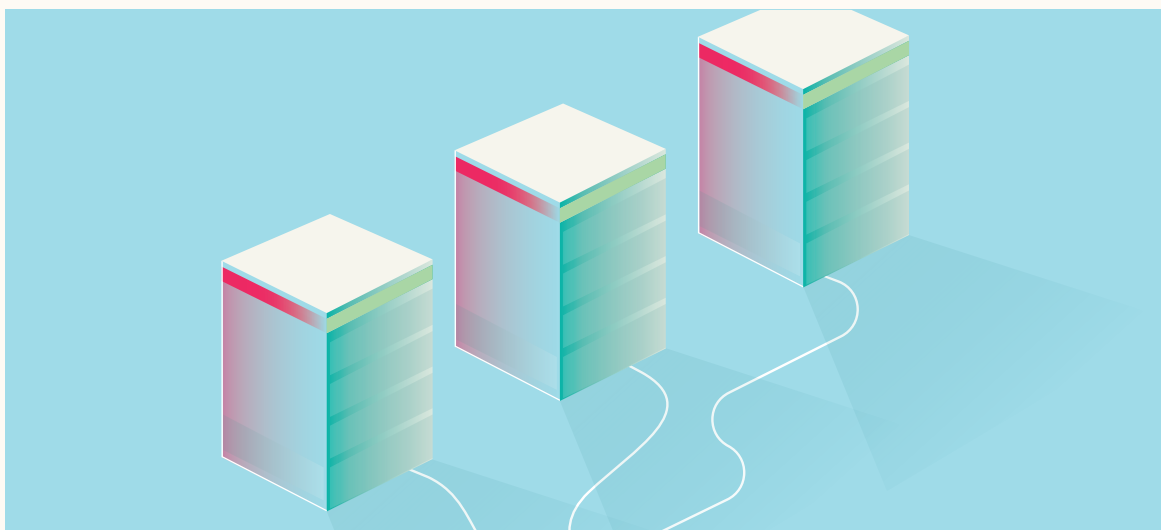
热能生产商可以在其内部流程中重复利用所产生的热量，以提高效率。例如，在生产过程或加热、冷却、冷冻和燃烧过程中经常会出现余热。利用余热最简单的方法就是将热量重新整合到相同的流程中。例如，在超市中，冰柜和冰箱产生的多余热量可以用来提供热水或给超市供暖。系统内部利用余热的主要方法是安装热回收装置。几乎在所有把余热当“废品”的情况下，热回收装置都可以加以利用。

在城市中，行业耦合可以通过城市规划在小范围内实现，也可以通过区域能源网络在更大范围内实现。城市规划可以通过智能电网将能源生产者与能源消费者连接起来，从而发挥行业耦合和余热的潜力。当余热的生产者（如数据中心）靠近可以购买和使用大量余热的实体（如温室等园艺类设施）时，就会产生巨大的协同效应。

在城市规划中研究能源生产者和使用者之间的协同效应的可能性被称为产业集群规划，对能源系统脱碳大有帮助。此外，临近公司之间的合作已被证明可为买卖双方带来经济效益。

在世界上的许多地方，区域能源系统正在为家庭和公司供暖和供冷。区域供热网络综合利用可再生能源（太阳能、地热和生物质能）和化石能源（如发电厂），通过管道以加热水的形式向终端用户输送热量。目前，全球大部分区域供热都依赖化石燃料。然而，**区域能源系统的主要优势之一是能够整合不同的热源，从而将化石燃料挤出供热和供冷用能组合。**随着区域能源技术的发展，越来越多的余热可以整合到系统中。如今，第四代区域能源系统可以将温度很低的热源纳入区域能源系统，并为可以在低温条件下运行的新型建筑提供供暖。

案例： 数据中心的余热潜力



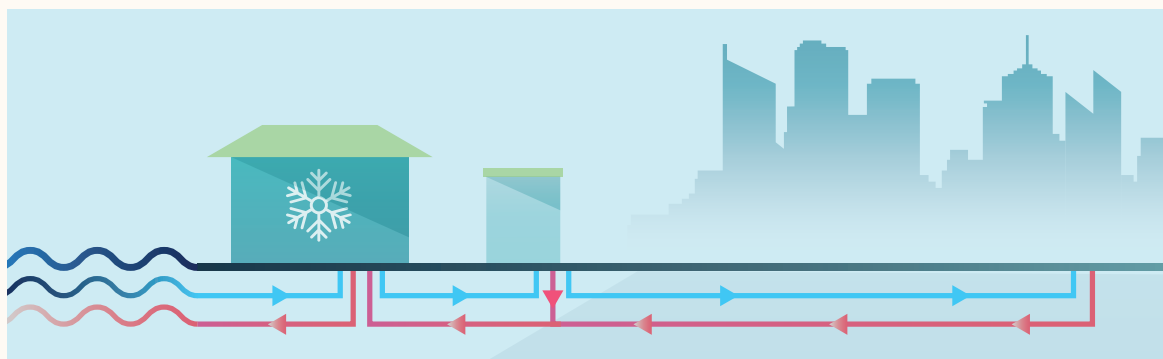
数据已成为当今全球数字经济的命脉，是信息流的支柱，并为从基础设施和运输到零售和制造等各行业的运营提供必要的信息和助力。根据国际能源署的数据，2021年数据中心的耗电量为220-320太瓦时，约占全球最终电力需求的0.9-1.3%¹²⁰，相当于澳大利亚或西班牙一整年的耗电量¹²¹。

数据中心也是重要的余热“生产商”。数据中心内的服务器产生的热量相当于其用电量，对这些机器进行必要的冷却也会产生大量余热。与其他余热源相比，**数据中心的余热是不间断的，因此是非常可靠的清洁能源来源**。有多个实例表明数据中心的余热可以通过微电网重新用于为附近的建筑物供暖，也可以输出到区域能源网络，用于多种用途。

法兰克福市有几个正在进行中的项目，目的是帮助该市从数据中心获取余热，用于满足家庭和办公楼的全部热量需求。据估算，到2030年，法兰克福数据中心的余热可满足该市家庭和办公楼的全部供热需求¹²²。

在都柏林，亚马逊云科技公司（Amazon Web Services）建造了爱尔兰首个定制的可持续解决方案，为都柏林郊区不断扩建的区域提供低碳供热。最近建成的数据中心将为47,000平方米的公共建筑供热，还将为3,000平方米的商业建筑和135套经济型出租公寓提供热能¹²³。

案例： 区域供冷系统的能耗仅为空调一半



在区域供冷系统中，冷冻水通过中央供冷管道供应给商业和民用建筑。用于区域供冷的冷水来自于免费的天然冷水资源（海洋、湖泊、河流或地下水库），或由发电或工业废热、中央电动冷却器提供。区域供冷系统中的冷水可在夜间生产，并在白天高峰时段使用。这就减少了在需求高峰时段对制冷机组容量的需求，并降低了运营成本，因为夜间的电费更便宜，环境温度也更低。

全球约有10%的电力需求来自建筑制冷，据国际能源署估计，到2050年，全球约有三分之二的家庭将安装空调¹²⁴。根据国际研究，商业和民用建筑的供冷需求在未来几年将会成倍增长，尤其是在高收入国家和新兴经济体，如印度、中国和印度尼西亚¹²⁵。

然而，区域供冷系统的能耗仅为空调的一半，而且还能减少对环境有害的含氟温室气体的消耗¹²⁶。

巴黎、迪拜、赫尔辛基、哥本哈根和路易港等城市现有的区域供冷系统证明，区域供冷的效率是传统分散供冷系统的两倍以上¹²⁷。例如，在迪拜，70%的电力被空调消耗，为了满足供冷需求，迪拜开发了世界上最大的区域供冷网络之一。到2030年，该市40%的供冷需求将由区域供冷来满足¹²⁸。**在可以利用湖泊或海洋水的情况下（也称为“免费供冷”），能源需求甚至可以比传统冷却方式减少90%¹²⁹。**加拿大多伦多就有这样一个系统，利用安大略湖底的水进行大规模区域供冷¹³⁰。

行业耦合

1

世界上大部分能源都被以余热的形式浪费掉了

到2030年，全球高达53%的用能将作为余热被浪费。然而，如果我们加大力度回收这些余热，将对改善全球气候有所助益。事实上，**回收余热的全部理论潜力可使全球排放量减少10-19%。**

2

将能源生产者和消费者联系起来

通过智能城市规划和区域能源系统收集余热并重新分配，数据中心、超市、制氢设施和废水处理设施等能源消耗大户可以成为主要的能源供应者。

3

制氢可产生大量余热

据国际能源署估计，到2050年，全球制氢的电力需求将达到14,800太瓦时。如果不采取行动，大约三分之一的电力将作为余热被浪费掉。然而，**从理论上讲，到2050年，我们可以在全球范围内回收1,228太瓦时的热量用于区域供热**，这几乎相当于目前全球煤炭供热量的三分之二。

政策 建议



现在正是各级决策者制定正确的监管和经济框架的时候，以便到2050年实现净零排放。能源效率2.0不仅具有减少碳排放的潜力，还能在社会和客户层面带来可观的经济效益。但要实现这一目标，一整套规章制度非常有必要。

这些政策建议的目的是确保我们未来能源系统的解决方案不仅设计得当，还要得到充分实施。



将需求侧灵活性解决方案纳入各级能源政策，以调解可再生能源的供需关系，确保能源安全。

新的智能电网必须采纳调峰技术。在建筑和行业法规中引入需求侧灵活性解决方案，指导消费者更快实施。其次，让消费者和生产者都能访问能源消费数据，促进积极参与，并为系统运营商提供进一步整合需求侧灵活性解决方案的机会。另外，需要实施合理的定价机制，鼓励在非高峰时段使用能源。

- **在建筑和工业领域**，在地方、国家和国际层面，实施灵活性标准法规，引导电力用户更快地实施需求侧灵活性解决方案。通过政府补贴或建筑法规提供智能电表安装，为消费者积极提高灵活性提供经济激励。允许系统运营商访问楼宇、工业和家庭用电数据。
- **在能源市场**，需要实施灵活的市场标准，确保新设备可与和本地可再生能源轻松连接，从而为制造商、系统运营商和管线公司创造一个有竞争力的市场。例如，欧盟的S2标准可实现设备间的通信和互操作性，同时检索电网信息以协调能源消耗并确保其与生产同步，从而确保有效实施需求侧灵活性解决方案。



节约能源，实现交通、工业和建筑电气化。

在对基础设施进行全面电气化改造的同时，提高各部门的效率是至关重要的第一步。要减少各部门的能源浪费，首先要对能源使用情况进行摸底，找出需要改进的地方。授权进行能源规划，制定高标准且可行的短期、中期和长期目标和计划，并实施适当的监管框架以激励投资。

- **在建筑方面**，设计并实施强制性建筑节能规范，加快向零碳建筑过渡。制定长期建筑改造战略，包括适当的法规和激励措施，以推动改造，使用可再生能源，提高现有建筑的翻新率。鼓励用热泵或区域能源网络等可再生能源系统取代使用化石燃料进行建筑供暖、生活热水和供冷的建筑技术系统。
- **在工业领域**，为关键设备（如电机和泵）设定最低能效标准，以提高工业能效水平。确保税收和财政政策推动各行业提高能效，例如，利用胡萝卜加大棒政策，通过碳定价鼓励企业采取行动。启动相关计划，确保中小型企业全面了解并制定脱碳计划。制定方案，将能源审计与有效传达绿色倡议的指导相结合。在能源审计过程中指定短期的激励性措施，鼓励节能降耗，并加以实施。
- **在交通领域**，通过投资、监管和激励措施提高效率并实现电气化。通过为新机械和车辆设定高强度脱碳标准，为全面电气化技术创造市场。制定车辆税收政策，鼓励购买新能源汽车，并规划新能源汽车停车场和充电站。将建筑过程纳入充电站生命周期评估。提供激励措施，改造现有的长寿命柴油发动机，以提高能源效率。利用地方法规和许可选项，创建低排放或零排放区域和建筑工地。实现市内“最后一公里”货运和货物交付交通的电气化。建设充电基础设施，确保财政激励措施优先考虑智能充电，以充分利用数字化，使新能源汽车成为解决灵活性解决方案和应对储能挑战的贡献者。



投资升级能源网以适应系统中增加的可再生能源。

电网投资是适应电力需求增长和可再生能源供应增加的必要条件。为了回到2050年“净零排放”的轨道上来，到2030年，对未来能源系统的投资必须翻一番。¹³¹ 这些投资将降低社会成本，减少能源成本和消费者的能源消费。有几项措施可以解决电网基础设施老化、急需扩建的问题。大多数配电网都位于集中发电厂周围，需要进行升级，以分配来自当地太阳能电池板和风力发电场的电力。实施“一站式服务”，可再生能源投资者只需向一个实体提交项目申请，然后由该实体与相关部门协调所有授权程序。

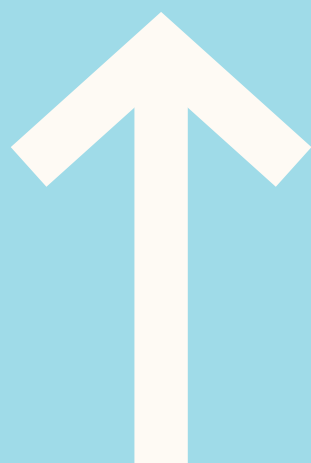
- **在电网规划中**，应优先考虑利用风、光等设备产生的可再生能源，以及预计将在未来几十年启动的其他长期基础设施项目。分配给创新和研究的公共资金应侧重于可再生能源技术的高效系统集成。这可能需要开发新产品和新工艺，测试和展示新的应用和模式，以及与学术界、工业界和社会各领域的广泛合作。
- **在向未来能源网过渡的过程中**，应提供法律框架条件，使智能电表、传感器、逆变器、开关和软件等智能电网技术得以快速有效地实施。加强区域协调与合作，确保电网采用可再生能源。加强信息、资源和服务共享，协调政策和法规，通过制定能源和辅助服务的价格、规则和标准，改进市场设计。此类举措可有助于激励和增加机制，高效、公平地分配可再生能源整合的成本和收益。
- **在确保能源供应方面**，应投资电力转换和储能设施，以充分发挥可再生能源在电网中的潜力和可用性。氢电解设施将在储能和转换方面发挥重要作用，但必须全面规划优化电解设施的使用。对此类设施进行监管，确保达到高效标准以控制能源使用，并计划整合电解设施产生的余热。



投资行业耦合。

市场壁垒正阻碍着余热潜力的释放，我们要消除这些障碍，例如支持平等对待热网中使用的余热和可再生能源。重新设计能源市场，允许行业耦合技术参与特定市场，并将低碳技术的所有积极外部效应内部化。

- **对各国政府来说**，应设定目标以达到一定的行业耦合门槛。制定废弃能源再利用的目标，并将其作为能源市场的指导方针，鼓励采用整体方法进行行业耦合。消除行政障碍，激励用户接入区域供热网络，鼓励区域供热公司提高效率。
- **在城市和农村规划中**，实施强制性能源规划，以评估废弃能源的潜力，并充分利用当地现有资源。电网规划作为一种工具，应遵循“能效优先”原则，这将减少国家和国际层面对新电网投资的需求。通过强制要求各实体制定利用余热的规划，推动余热的更多利用。制定详细的供热规划，其中需要包括未来潜在的过剩热源，如电解设施产生的余热。能源规划既可以显示局部区域的潜力，也可以显示更大规模的机会，如推广区域供热。
- **在能源市场**，降低最低投标规模，允许较小的参与者向能源网提供能源服务，创建地方灵活性市场以解决地方电网问题。通过税收立法推动行业耦合的实施，支持使用余热，并确保考虑合适的费率结构。



注释

1. 国际能源署 (2022) :《世界能源展望》。表A.1.c:世界能源供应。(World Energy Outlook Table A.1.c: World energy supply)
2. Eyre, N. (2021) :《从使用热能到使用功:重新认识零碳能源转型》。《能源效率》(14:77, 1-20. (From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency.)
3. Firth, A等 (2019) :《全球废热量及其环境影响的量化》。《应用能源》。第235卷, 第1325页。(Quantification of global waste heat and its environmental effects, Applied Energy.)
4. Bakke, G. (2016) :《电网》。(Bloomsbury USA)
5. Clarke, A.C. (1962) :《预言的危险:想象力的失败》。《未来的轮廓》(Hazards of Prophecy: The Failure of Imagination. Profiles of the Future.)
6. Eyre, N. (2021) :《从使用热能到使用功:重新认识零碳能源转型》。《能源效率》14:77, 1-20. (From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency.)
7. 国际能源署 (2022) :《世界能源展望》。第136页。(假设氢的能量含量为33.33千瓦时/公斤) (World Energy Outlook) (Assuming the energy content of hydrogen to be 33.33 kWh/kg)
8. 国际能源署 (2022) :《世界能源展望》。第136页。(World Energy Outlook)
9. IRENA (日期不祥) :《绿氢政策》(Policies for green hydrogen)
10. 彭博社NEF (2022) :《新能源展望》(New Energy Outlook)
11. Firth, A等 (2019) :《全球废热量及其环境影响的量化》。《应用能源》(第235卷, 第1325页。(Quantification of global waste heat and its environmental effects, Applied Energy.)
12. Birol, F在Sheppard, D., 2023中:《“世界处于化石燃料时代末端的开端”, 全球能源监管机构称》。《金融时报》。(*“World at ‘beginning of end’ of fossil fuel era, says global energy watchdog”, Financial Times.)
13. 国际能源署 (2022) :《世界能源展望》。表A.1.c:世界能源供应。(World Energy Outlook Table A.1.c: World energy supply)
14. IRENA (2022) :《2022年可再生能源发电成本》(Renewable Power Generation Costs in 2022)
15. Eyre, N. (2021) :《从使用热能到使用功:重新认识零碳能源转型》。《能源效率》(From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency.) 14:77, 1-20
16. 国际能源署 (2022) :《世界能源展望》。全球数据集。国际能源署产品级别的分类:生物能源涵盖“现代生物能源:固体”、“现代生物能源:液体”和“现代生物能源:气体”。减排化石能源涵盖“具有碳捕获利用与储存(CCUS)的天然气”和“具有CCUS的煤炭”。未减排化石能源涵盖“未减排的天然气”、“石油”和“未减排的煤炭”。(World Energy Outlook 2022 Free Dataset. Global data. Grouping of IEA PRODUCT lvl 2: Bioenergy covers 'Modern bioenergy: solid', 'Modern bioenergy: liquid', and 'Modern bioenergy: gas'. Abated fossil energy covers 'Natural gas: with CCUS' and 'Coal: with CCUS'. Unabated fossil energy covers 'Natural gas: unabated', 'Oil', and 'Coal: unabated'.)
17. 国际能源署 (2021) :《到2050年实现净零排放:全球能源部门路线图》第72页, 表格2.5 (Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, Table 2.5. p. 72) ,
18. Eyre, N. (2021) :《从使用热能到使用功:重新认识零碳能源转型》。《能源效率》14:77, 1-20 (From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency.)
19. Eyre, N. (2021) :《从使用热能到使用功:重新认识零碳能源转型》。《能源效率》14:77, 1-20 (From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency.)
20. NAE网站:伟大成就与重大挑战 (Great Achievements and Grand Challenges)
21. 丹佛斯 (2023) :FPC2023丹佛斯, 第12页 (FPC2023 Danfoss, p. 12.)
22. IDTechEx (2022) :《电动建筑机械对绿色建筑至关重要》(Electric Construction Machines Vital for Greener Construction)
23. JRC (2022) :《世界各国二氧化碳排放 (CO2 emissions of all world countries.)
24. 小松 (2010) :小松正品液压油KOMHYDRO HE介绍 (KOMATSU. Introduction of Komatsu genuine hydraulic oil KOMHYDRO HE.)
25. 欧洲建设 (2023) :丹佛斯问答:减少挖掘机能耗的技术 (Construction Europe. Danfoss Q&A: Technology to reduce excavator energy consumption.)
26. 欧洲建设 (2023) :丹佛斯问答:减少挖掘机能耗的技术 (Construction Europe. Danfoss Q&A: Technology to reduce excavator energy consumption.)
27. 欧洲建设 (2023) :丹佛斯问答:减少挖掘机能耗的技术 (Construction Europe. Danfoss Q&A: Technology to reduce excavator energy consumption.)
28. 国际能源署 (2023) :追踪供暖 (IEA, Tracking Heating.)
29. 国际能源署 (2022) :《热泵的未来:世界能源展望特别报告》第11页 (The Future of Heat Pumps: World Energy Outlook Special Report)
30. 国际能源署 (日期不祥) :热泵的工作原理 (IEA. How a heat pump works.)
31. 国际能源署 (2023) :供暖及家庭供暖技术 (IEA, Heating. Home heating technologies.)
32. 国际能源署 (2023) :供暖及家庭供暖技术 (IEA, Heating. Home heating technologies.)
33. 国际能源署 (2023) :电动汽车 (IEA, Electric Vehicles.)
34. 国际能源署 (2023) :电动汽车 (IEA, Electric Vehicles.)
35. 美国能源部-能源去向:电动汽车 (U.S. Department of Energy – Where the Energy Goes: Electric Cars.)
36. IDTechEx (2023) :《电动汽车电力电子 2023-2033》(示例页) 第6页 (Power Electronics for Electric Vehicles 2023-2033)
37. 《欧洲电力电子》(2018) 第3期, 第22-25页:《基于碳化硅的功率模组降低了电池供电车辆的成本》(SiC-Based Power Modules Cut Costs for Battery-Powered Vehicles)
38. 《电力电子新闻》(Power Electronic News) (2022) :《碳化硅在电动出行中的作用》(The Role of SiC in E-Mobility)
39. 丹佛斯估算 (Danfoss calculations.)
40. Penny, V. (2021) :《电动汽车对地球更好, 而且通常对您的预算也更好》(《纽约时报》(Electric Cars Are Better for then Planet – and Often Your Budget, Too. New York Times)
41. Buitendach等 (2021) :《涟漪电流对质子交换膜电解器效率的影响》(《工程结果》, 10, 1-13.) (Effect of a ripple current on the efficiency of a PEM electrolyser. Results in Engineering)
42. Sepulveda, N.A等人 (2021) :《脱碳电力系统中长时段储能的设计空间》(《自然能源》, 6, 506-516页。(The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems. Nature Energy)
43. Eyre, N. (2021) :《从使用热能到使用功:重新构想零碳能源转型》。《能源效率》。(From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency)
44. Rosenow, J. & Eyre, N. (2022) :《为零排放重新定义能源效率》。《能源研究与社会科学》, 90, 1-5页。(Reinventing energy efficiency for net zero. Energy Research & Social Science)
45. Eyre, N. (2021) :《从使用热能到使用功:重新认识零碳能源转型》。《能源效率》(14:77, 1-20. From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency.)
46. Rosenow, J. & Eyre, N. (2022) :《为零排放重新定义能源效率》(《能源研究与社会科学》(Reinventing energy efficiency for net zero. Energy Research & Social Science) , 90, 第3页。
47. Langevin等 (2023) :《美国建筑行业的需求侧解决方案可以实现深度减排, 并避免电力部门的超过1000亿美元的成本》(《一个地球》, 6 (8) , 1005-1031页。(Demand-side solutions in the US building sector could achieve deep emissions reductions and avoid over \$100 billion in power sector costs. One Earth)
48. 丹佛斯:《面向业主的精益供热》(Leanheat – for building owners)
49. 丹佛斯:《面向业主的精益供热》(Leanheat – for building owners)
50. 欧盟委员会 (2020) :《能源总司, Küpper, G., Hadush, S., Jakeman, A.等人《启用需求侧灵活性的监管优先事项》出版办公室p. 6. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/410530> (Regulatory priorities for enabling demand side flexibility. Publications Office)
51. Ea Energy Analyses (2023) :《欧洲电力部门需求侧灵活性的价值》(Value of Demand Flexibility in the European Power Sector)
52. 欧盟在2022年产生了2641太瓦时的电力, 其中19.6%或517太瓦时来自天然气。《欧盟 (2023年) 信息图表 - 欧盟的电力是如何产生和销售的?》(The EU produced 2641 TWh of electricity in 2022, of which 19.6% or 517 TWh stemmed from natural gas. (EU (2023). Infographic - How is EU electricity produced and sold?))
53. JRC (2023) :《消耗足迹平台 | EPLCA》(Consumption Footprint Platform | EPLCA)
54. 路透社 (2023) :《欧洲在能源危机上的支出接近8000亿欧元》(Europe's spend on energy crisis nears 800 billion euros.)
55. 国际能源署 (2023) :《追踪电网级的储能》(Tracking grid-scale storage.)
56. JRC (日期不祥) :《RMIS - 原材料信息系统:电池供应链挑战》(RMIS – Raw Materials Information System: Battery supply chain challenges.)
57. Clean Energy Wire (2021) :《为稳定德国电网而限制更多可再生能源 - 报告》(More renewables curbed to stabilise German power Grid – report.)
58. 国际能源署 (2023) :《能源效率:行动的十年》, 第13页 (Energy Efficiency: The Decade for Action)
59. Wärttilä (2018) :《停电经济学》(Blackout economics.)
60. Shuai, M.等 (2018) :《关于停电经济损失评估的回顾》(《计算机科学文摘》, 130, 1158-1163页(Review on Economic Loss Assessment of Power Outages. Procedia Computer Science.)
61. Macmillan, M.等 (2023) :《揭示长时间停电的经济成本》(《能源研究与社会科学》, 99, 103055页(Shedding light on the economic costs of long-duration power outages. Energy Research & Social Science.)
62. Environmental Investigation Agency and Shecco (2018) :《关于HFC-free超市制冷的技术报告》, 第10页。(Technical report on energy efficiency in HFC-free supermarket refrigeration. p. 10.)
63. 丹佛斯 (2023) :《为世界打造更好的超市》(Danfoss, Building better supermarkets for the world.)
64. Clean Energy Wire (2021) :《为稳定德国电网而限制更多可再生能源 - 报告》(More renewables curbed to stabilise German power Grid – report.)
65. 国际能源署 (2023) :《能源效率:行动的十年》, 第13页 (IEA, Energy Efficiency: The Decade fo Action)
66. 国际能源署 (2022) :《世界能源展望》, 第136页 (IEA, World Energy Outlook)
67. IRENA (日期不祥) :《绿氢政策》(Policies for green hydrogen)
68. 彭博社NEF (2022) :《新能源展望》(New Energy Outlook.)
69. Deloitte (2023) :《绿氢:推动零排放之路》, 第13页 (Green hydrogen: Energizing the path to net zero)
70. 国际能源署 (2022) :《世界能源展望》, 第136页。(假设氢的能量含量为33.33千瓦时/公斤) (IEA, World Energy Outlook, Assuming the energy content of hydrogen to be 33.33 kWh/kg)
71. 国际能源署 (2022) :《世界能源展望》, 第136页 (IEA, World Energy Outlook)
72. IRENA (日期不祥) :《绿氢政策》(Policies for green hydrogen.)
73. 彭博社NEF (2022) :《新能源展望》(New Energy Outlook.)
74. Deloitte (2023) :《绿氢:推动零排放之路》, 第13页 (Green hydrogen: Energizing the path to net zero.)
75. 在2030年, 我们将需要90百万吨 (10.79 EJ/ 900万公斤) 氢 (国际能源署2022《世界能源展望》, 第136页)。最低价格是每公斤1.3到3.5美元的氢 (国际能源署2021《全球氢回顾:执行摘要》)。90亿公斤氢 X 每公斤1.3到3.5美元=需要投资117-315亿美元 [In 2030 we will need 90 Mt (10.79 EJ/9 million kg) hydrogen (IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136). The lowest price is USD 1.3 to 3.5/kg hydrogen (IEA (2021). Global Hydrogen Review: Executive Summary). 90 billion kg hydrogen X USD 1.3 to 3.5/kg hydrogen = USD 117-315 billion investments needed.]
76. 欧盟委员会 (日期不祥) :《氢, 假设氢的低热值为33.3千瓦时/公斤》(Hydrogen. Assuming a lower heating value of hydrogen of 33.3 kWh/kg.)

77. 2017年,美国核电站R.S. Ginna(美国地质研究所(日期不祥)《典型核电厂发电量是多少》)产生了4,697,675兆瓦时或4,697太瓦时的电力。欧盟计划到2030年生产和进口总共666太瓦时的氢。 $666/4.697=142$ 个类似R.S. Ginna的核电厂(In 2017, the US nuclear power plant R.S. Ginna (American Geosciences Institute (n.d.). How much electricity does a typical nuclear power plant generate?) produced 4,697,675 MWh or 4,697 TWh electricity. EU will plan to produce and import a total of 666 TWh hydrogen. 666 TWh/4.697 TWh = 142 nuclear plants like R.S. Ginna.)
78. Agora Energiewende (2023):《摆脱化石气体的束缚:走向气候中立欧洲的新路径》,第11页。(Breaking free from fossil gas: A new path to a climate- neutral Europe)
79. 全球风能理事会《2023》:《2023年全球近海风电报告》,第 页(Global Offshore Report 2023.)
80. 氢科学联盟(2022)《氢用于供暖?与热泵的比较》(第一部分)[Hydrogen for heating? A comparison with heat pumps (Part 1)]
81. 氢科学联盟(2022)《氢用于供暖?与热泵的比较》(第一部分)[Hydrogen for heating? A comparison with heat pumps (Part 1)]
82. 丹佛斯基于Buitendach等人(2021年)的估算:《直流对PEM电解器效率的影响》《工程结果》,第10卷,第1-13页 (Effect of a ripple current on the efficiency of a PEM electrolyser. Results in Engineering.)
83. 2018年伦敦建筑和交通领域的年用电量为37.82万千瓦时(伦敦市长2022年《伦敦年能源使用》),到2050年,我们将需要14800万千瓦时的电力来生产氢(国际能源署(2022年)《世界能源展望》,第136页)。14800万千瓦时的1%为148万千瓦时。148万千瓦时/37.82万千瓦时=3.8,几乎是2018年伦敦用电量的四倍。(London's annual electricity consumption in buildings and transport in 2018 was 37.82 TWh (Mayor of London (2022). London annual energy usage) and we will need 14 800 TWh of electricity for hydrogen production in 2050 (IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136). 1 % of 14 800 TWh is 148 TWh. 148 TWh/37.82 TWh = 3.8, almost four times London's electricity consumption in 2018.)
84. 国际能源署(2021年):《到2026年,全球电力存储市场将以多快的速度增长?》(IEA, How rapidly will the global electricity storage market grow by 2026?)
85. PNNL (2021年):《能源存储成本与性能数据库》(Energy Storage Cost and Performance Database.)
86. 国际能源署(2023年):《电网级的储能》(Grid-scale Storage.)
87. 丹佛斯(日期不祥):《热能存储》(Danfoss. Thermal energy storage.)
88. J. Andersson等(2019年):《氢的大规模储存》《国际氢能期刊》,第44卷,第23期,第11901-11919页 (Large-scale storage of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy.)
89. CLOUGLOBAL (2023年):《氢能储存的利弊:是否值得投资?》(Pros and Cons of Hydrogen Energy Storage: Is Worth the Investment?)
90. Energinet (2023年):《丹麦和德国的氢市场评估报告》,第12页(Hydrogen Market Assessment Report for Denmark and Germany.)
91. Sepulveda, N.A.等(2021年):《脱碳电力系统长时间能量存储的设计空间》。《自然能源》,第6卷,第506-516页 (The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems. Nature Energy)
92. 德勤(2023年):《绿氢:推动实现净零排放的道路》,第16页 (Green hydrogen: Energizing the path to net zero.)
93. Choudhury, S. (2021年):《飞轮能量存储系统:对技术、应用和未来前景的关键评价》《国际电能系统转换》,2021年;31 (9) (Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects. Int Trans Electr Energy Syst.)
94. 德勤(2023年):《绿氢:推动实现净零排放的道路》,第16页 (Green hydrogen: Energizing the path to net zero.)
95. EESI (2019年):《能源存储2019》(Energy Storage 2019.)
96. 国际能源署(2023年):《电网规模的储能》(IEA, Grid-scale Storage.)
97. PNNL (2021年):《能源存储成本与性能数据库》(Energy Storage Cost and Performance Database.)
98. Blakers, A.等(2021年):《抽水蓄能储能的评述》《能源进展》,第3卷,第2期。(A review of pumped hydro energy storage, Progress in Energy.)
99. Conolly D. & MacLaughlin S. (2011年)《抽水蓄能电力储存场所的定位》,可持续能源储存国际会议论文集(Locating Sites for Pumped Hydroelectric Energy Storage. In Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy Storage)
100. Anna Normyle & Jamie Pittock (2020年):《对于雪山抽水蓄能扩展项目的亚高山和高山生物多样性影响的回顾》《澳大利亚地理学家》,51:1, 53-68, DOI:10.1080/00049182.2019.1684625(A review of the impacts of pumped hydro energy storage construction on subalpine and alpine biodiversity: lessons for the Snowy Mountains pumped hydro expansion project. Australian Geographer.)
101. 国际能源署(2023年):《电网规模的储能》(IEA, Grid-scale Storage.)
102. 国际能源署(2023年):《电网规模的储能》(IEA, Grid-scale Storage.)
103. Firth, A., 等(2019年):《全球废热及其环境影响的量化》《应用能源》,第235卷,第1325页 (Quantification of global waste heat and its environmental effects, Applied Energy)
104. Firth, A., 等(2019年):《全球废热及其环境影响的量化》《应用能源》,第235卷,第1330页(Quantification of global waste heat and its environmental effects, Applied Energy)
105. Euroheat & Power (2023年):《地热供热市场展望》,第3页(DHC Market Outlook)
106. Connolly, D.等(2013):《欧洲热路线图2:欧盟27国的第二次预研》,奥尔堡大学发展与规划系,第54页 (Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27)
107. Connolly, D.等(2013):《欧洲热路线图2:欧盟27国的第二次预研》,奥尔堡大学发展与规划系,第54页 (Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27)
108. 根据2015年《欧洲热路线图4》的数据,住宅和服务部门建筑所需的热量,也称为“低温热需求”。这种需求不包括工业热需求,因为所需的输入温度对于余热回收技术来说太高了。(Heat demanded by residential and service sector buildings, also called "low-temperature heat demand", according to 2015 data from the Heat Roadmap Europe 4. This demand doesn't cover industrial heat demand as required input temperatures are too high for excess heat recovery technologies.)
109. <https://heatroadmap.eu/peta4/>
110. 热路线图-欧洲热路线图(Heat Roadmaps – Heat Roadmap Europe)
111. Luo, A., Fang, H., Xia, J., & Lin, B. (2017年):《中国北方低品位工业废热潜力的绘制》《资源、保护与循环利用》, 125, 335-348页 (Mapping potentials of low-grade industrial waste heat in Northern China. Resources, Conservation and Recycling.)
112. 国际能源署(2022年):《世界能源展望》,第136页(IEA, World Energy Outlook)
113. 丹麦能源局(2017年):《技术数据-可再生燃料》,第128页(Technology Data – Renewable Fuels.)
114. TVS (2022年):《从丹麦首个PtX协议为1300户家庭提供远程供热》(Fjernvarme til 1300 husstande mere fra Danmarks første PtX-aftale)
115. COWI (2023年):《Kassø PTX (E-甲醇)-环境影响报告》,第24页(Kassø PTX (E-methanol) - Miljøkonsekvensrapport.)
116. 2050年,全球可回收的电解过程余热为1.228万千瓦时(占14800万千瓦时的8.3%),或者说4,420,800 TJ。2020年全球来自煤炭的热量发电量为7,039,840 TJ(国际能源署2022年。能源统计数据浏览器,过滤器:能源主题:电力和热力,指标:能源来源的热力发电,国家或地区:世界)。(The global recoverable excess heat from electrolysis is 1.228 TWh in 2050 (8.3% of 14.800 TWh) or 4.420.800 TJ. The global heat generation from coal in 2020 was 7.039.840 TJ (IEA (2022). Energy Statistics Data Browser, filter: Energy topic: Electricity and heat, Indicator: Heat generation by source, Country or region: World). 117. 欧盟计划到2030年通过电解过程生产1000万吨可再生氢(欧盟2022年。能源-氢)。假设每千克氢需33.3千瓦时电力,这相当于333万千瓦时的氢气。大约有2/3的电力输入用于电解制氢,1/3作为热能浪费。333万千瓦时/(2/3)=499.5万千瓦时的电力输入。根据丹麦能源局2017年的数据,到2030年,有16.6%的电解过程的电力输入可回收为区域供热。499.5万千瓦时X 0.166 = 82.9万千瓦时,2030年欧盟可从电解过程中回收的区域供热。2017年,德国的私人家庭和住宅建筑用热量为51.5万千瓦时(德国联邦统计局2017年。供热总平衡表)。82.9万千瓦时/51.5万千瓦时=1.6,超过2017年德国国内供暖需求的1.5倍。(The European Union plans to produce 10 million tons of renewable hydrogen through electrolysis by 2030 (EU (2022). Energy – Hydrogen). Assuming 33.3 kWh/kg hydrogen, this is 333 TWh hydrogen. Roughly 2/3 of the electricity input for electrolysis is converted to hydrogen, and 1/3 is wasted as heat. 333 TWh / (2/3) = 499.5 TWh electricity input. 16.6% of the electricity-input for electrolysis can be recovered to district heating in 2030 (Danish Energy Agency (2017). Technology Data – Renewable Fuels. p. 128). 499.5 TWh X 0.166 = 82.9 TWh recoverable for district heating from electrolysis in EU in 2030. 51.5 TWh heat was distributed to private households and residential buildings in Germany in 2017 (Statistisches Bundesamt (2017). Balance sheet of heat supply, total). 82.9 TWh / 51.5 TWh = 1.6, more than 1.5 times Germany's domestic heating in 2017.]
118. 到2060年,中国的氢产量将达到9000到1.3亿吨,其中80%将通过电解制取(国际能源署2022年。中国采用CCUS技术生产氢气的机会:执行摘要)。假设每千克氢需33.3千瓦时,通过电解制取的氢气将含有2.376-3.432 X 10-12千瓦时,或者是2.376-3.432万千瓦时。大约有2/3的电力输入用于电解制氢,剩下的作为热能浪费,所以电解的电力需求是2.376到3.432万千瓦时/(2/3)=3.564-5.148万千瓦时。到2050年,电解过程的电力输入中有8.3%的可回收余热(丹麦能源局(2017年)。技术数据-可再生燃料。第128页)。假设这在2050年是代表性的情况,我们可以得出:3.564万千瓦时X 0.083 = 296万千瓦时,和5.148万千瓦时X 0.083 = 427万千瓦时。中国2020年的热量发电量为5,953,612 TJ,或者是1.654万千瓦时(国际能源署(2022年)。能源统计数据浏览器,过滤器:能源主题:电力和热力,指标:能源来源的热力发电,国家或地区:中国)。100 / 1.654万千瓦时X 296万千瓦时 = 17.9%,和100 / 1.654万千瓦时X 427万千瓦时 = 25.8%。[In 2060, China's hydrogen production will be 90 to 130 million tons, of which 80% will be produced through electrolysis (IEA (2022). Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China: Executive summary). Assuming 33.3 kWh per kg hydrogen, the hydrogen produced from electrolysis will contain 2.376-3.432 X 10-12 kWh, or 2.376-3.432 TWh. About 2/3 of the electricity input for electrolysis is converted to hydrogen and the rest is wasted as heat, so the electricity demand for electrolysis is 2.376 to 3.432 TWh / (2/3) = 3.564-5.148 TWh. 8.3% of the electricity input for electrolysis is recoverable excess heat in 2050 (Danish Energy Agency (2017). Technology Data – Renewable Fuels. p. 128). Assuming this is representative for 2050, we can say: 3.564 TWh X 0.083 = 296 TWh, and 5.148 TWh X 0.083 = 427 TWh. China's 2020 heat generation is 5.953.612 TJ, or 1.654 TWh (IEA (2022). Energy Statistics Data Browser, filter: Energy topic: Electricity and heat, Indicator: Heat generation by source, Country or region: People's Republic of China). 100 / 1.654 TWh X 296 TWh = 17.9%, and 100 / 1.654 TWh X 427 TWh = 25.8%.]
119. 彭博社NEF (2022年):《新能源展望2022》(Bloomberg NEF, New Energy Outlook 2022.)
120. 国际能源署(2022年):《数据中心和数据传输网络》(IEA, Data Centres and Data Transmission Networks)
121. 2021年澳大利亚的电力消耗为237万千瓦时,西班牙为234万千瓦时(EIA日期不祥)。国际。电力消耗。),在2021年全球数据中心的电力消耗范围内(220-320万千瓦时)。(Australia's electricity consumption was 237 TWh and Spain's was 234 TWh in 2021 (EIA (n.d.). International. Electricity Consumption.), well within the range of global electricity consumption from data centers in 2021 (220-320 TWh)]
122. 互联网行业协会 (Association of the Internet Industry) (2021):《数据中心成为城市能源供应的游戏规则改变者:到2030年,法兰克福市可用余热满足其大部分供暖需求》(Data centres as Gamechangers for Urban Energy Supply: City of Frankfurt am Main Could Cover Most of its Heating Needs by 2030 with Waste Heat)
123. DCD (2021年):《Heatworks在爱尔兰都柏林开展AWS区域供热方案》(Heatworks breaks ground on AWS district heating scheme in Dublin, Ireland)
124. 国际能源署(2018):《供冷的未来》,第26、59页 (IEA, The Future of Cooling)
125. 国际能源署(2018):《供冷的未来》,第11页(IEA, The Future of Cooling) 126.丹佛斯(2016):《让区域供冷物有所值》,第3页(Making the case for district cooling) 127.丹佛斯(2016):《让区域供冷物有所值》,第3页(Making the case for district cooling)
128. MarkNetel (2023):《阿联酋区域制冷市场研究报告:预测(2023-2028)》(UAE District Cooling Market Research Report: Forecast (2023-2028))
129. 美国供暖、制冷与空调工程师协会(2022):《炎热潮 气候下弹性能源系统设计指南》(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Guide for Resilient Energy Systems Design in Hot and Humid Climates.) 130.美国供暖、制冷与空调工程师协会(2022):《炎热潮 气候下弹性能源系统设计指南》(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Guide for Resilient Energy Systems Design in Hot and Humid Climates.)
131. 国际能源署(日期不详):《智能电网》(IEA, Smart-grids.)

whyee.com

访问以上网址，更多了解能效方案如何加快绿色转型。