

## 能效资源的规模有多大？

建议引述: Amory B Lovins 2018 *Environ. Res. Lett.* **13** 090401

## Environmental Research Letters



## 能效资源的规模有多大?

开放存取

卢安武 (Amory B Lovins)

Rocky Mountain Institute, 22830 Two Rivers Road, Basalt CO 81621, United States of America

发表于  
2018年9月18日E-mail: [ablovins@rmi.org](mailto:ablovins@rmi.org)本作品的原创内容可能在 [Creative Commons Attribution 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 协议许可条款下使用。

关键词: 投资回报递增

对本作品任何进一步的分发请注明作者、标题、期刊引用以及 DOI。



## 摘要

多数经济理论学家认为能效——全球最大的能源服务来源——是一种有限的、体量递减的资源。能效的应用受价格和政策的主导,因此其潜力将不可避免地逐渐耗尽,成本也将不断提高。在这种理论结构的影响下,多数传统的能效分析和应用人士仅看到和开发了有价值的能效资源中的一小部分,未能实现理应能够实现的能源节约,投入成本也较高。然而从经验上来看,当代能效是一种规模不断扩大、成本不断下降的资源,并且有可持续的开发潜力。当代能效应用受主要的市场失灵影响,但这种市场失灵在积极的外部条件刺激下能够得到纠正。最重要的是,不论是在新建或能效改造应用领域,能效资源的规模都比能源和气候领域现有认知要大数倍,且成本更低。能效资源的实际规模远远超过单一技术可实现的节约量总和,因为对更少、更简单技术的使用进行巧妙地选择、组合,并控制各种技术的使用顺序及使用时机,能够比零散地、随机地应用更多、更新奇的技术节约更多能源和成本。这种“一体化设计”理念尚未被市场理解和大规模使用,并且因为它太普通而被认为很难实现。而实际上,这种方法已经得到了实例验证,且正在迅速发展和逐渐推广中。然而,那些未能预测可再生能源革命的经济模型同样也会忽视一体化设计,因而无法认识到大部分的能效资源或能效潜力。这种分析上的差距使得应对气候变化的行动看起来比实际更有挑战且成本更高,而且使得气候行动重心和资本投资没有落在最优选项上。气候保护行动需要以更快的速度推进,而能效则是该行动的基石。气候保护关键取决于对整个能效资源的认识和利用。这需要我们更多关注于整体系统(建筑、工厂、交通出行,以及包括这些元素的更大规模系统)而不是单一技术,抛开传统理论对能效回报递减的错误假设,以实际行动实现能效资源更大的投资回报。

## 引言

从理论上讲,理论与实践是相同的,但在实践中,二者却不同。多数气候模型设计者均明确或默认将经济理论作为评价终端用能

<sup>1</sup>本文中使用的“效率”一词属于工程学范畴(能源输出与能源输入之比,或效果与出力之比),而非经济学范畴,共包含7种类型的效率。“终端用能效率”指提供给用户的能源中有多少被转化为了终端服务(舒适、照明、出行、力矩等)。向上游看,“开采效率”指从地下燃料总量到未加工的一次燃料总量;“转化效率”指从开采到二次能源(汽油、电力等);“一次能源效率”指从一次能源或可再生能源到传递到用户的服务;“分配效率”指从能源转化(精炼厂、油气处理厂、发电厂等)到向用户提供的服务。向下游看,“享乐效率”指从向用户提供的服务到经济福利和人类幸福。“系统效率”包括从能源资源到福利与幸福的整个系统——从最终手段到最终结果。本文专注于来自终端用能技术,而非来自行为、城市形态等的能效收益。本文使用能源“节约”一词作为“减少的能源强度”的简称。

效率潜在技术回报的主要框架(Lovins 2018a)<sup>1</sup>。经济理论倾向于认为能效是一种有限的、体量递减的李嘉图资源(如燃料),其应用受价格和政策的主导,而这会耗尽能效资源的潜力,增加它的成本。然而,基于四十年来在全球各个用能部门应用先进能效技术的实践经验,笔者不断发现事实与这一理论是相反的。经验证明,能效是一种规模不断扩大、成本不断下降的资源。积极的外部因素可以推动能效的应用,而严重的、具有挑战性的、多元化的、复杂的市场失灵会阻碍它的应用,因而需要政策的

干预和商业创新(Hirst and Brown 1990, Koomey 1990, Sutherland 1991, Lovins 1992, Koomey et al 1996, Bressand et al 2007, Metz et al 2007 pp 418–430, Gillingham et al 2009, Granade et al 2009, National Academies 2009b section 2.7)。这些障碍似乎是内衡的:雄心不够或清除障碍的努力不足只能收益甚微,这样使不作为看起来理所应当;而崇高的志向和更大的努力则会带来显著成果,能够支持进一步的努力和投入,带来更多成果。但关于如何将这阻碍转化成商业机遇和外部积极因素究竟能够实现多大回报等话题的热烈讨论忽略了这样一个关键事实:能效资源本身及其可经济地捕捉的“储量”远远大于能源、商业、经济学、政策和气候领域的一般认识,其成本也低得多,这足以激发更大的雄心,推动决定性的气候保护实践行动。

多数传统的能效分析和应用人士仅看到和应用了有价值的能效资源中的一小部分。用石油开采领域(过去隶属于经济地质学(United States Geological Survey 1991)的术语来讲,它们只是已探明和已测量出(已证明)的储量。他们通常忽略不够经济的已探明资源,而不会对称地将其与长期边际供应相竞争;也通常忽略了推测出的已有证据证明的储量和尚未发现的假定的资源。与地质领域一样,能效领域总储量大于已证明的储量,而随着勘探与开采技术的进步,能效资源总量变得越来越可开发利用,将远远超过能效总储量和已证明储量。

这一地质学类比可用于推算能效规模,但在成本上两者却存在本质上的区别,因为能效与矿体不同,大部分被忽略的能效资源的成本实际上要低于目前正在开发的能效的成本,因而开发这些被忽略的资源能够降低平均成本,加速能效技术的应用。这是因为这并不需要应用更多或更高级的技术(Regnier 2017),而是通过对更少、更简单

技术的使用进行巧妙地选择与组合、更好的时机控制以及使用顺序的规划,从而以更低的成本实现更多的能源节约和其他伴随效益<sup>2</sup>。储量是能够盈利的、可开发的资源,是资源总量的子集,因此“发现”更多能效资源,成本可能会更低,能效资源储量会激增。此外,能够降低石油生产(Lovins 2014)和其他矿产开采成本的技术进步同样甚至更加适用于能效领域,从而会使更多竞争性资源更快搁浅。

这种“一体化设计”在建筑、电器、设备、交通和工业工艺等各个单一领域都已经过实践验证<sup>3</sup>(Brohard et al 1998, Lucon, Ürgе-Vorsatz et al 2014),但在多数能源工程类文献与教学中仍很少提到,而在经济学著作和文献中更是完全不存在,因为其反映的洞见只来源于设计实践经验。被忽视的大部分能效储量和资源因此还继续隐藏在大众视野之外。石油储量与矿体是原子的有限组合,开采与消耗会耗尽它们的负熵。但能效资源却是创意的无限<sup>4</sup>扩展和组合,依赖于人类的智慧水平,是一项取之不竭的资源。

这种概念性的偏差产生严重的后果。对大部分能效资源潜力的忽略严重低估了经济可行的气候解决方案的规模:这让气候保护工作看起来比实际上更加困难,成本更高,而且更多注意力转移到了成本更高、风险更大的选项上。下文展示的例证表明,这种对有限人力、物力、精力、财力及时间的错误配置忽略了当代能源革命的大部分潜力,促使更多气候模型更加偏向于供应侧方案,忽略需求侧的潜力(Lovins 2018a),从而进一步抑制捕捉全部能效潜力。这与技术专家主导的讨论中的人类行为和城市设计等非经济社

4 根据热力学第一定律,能效是有限的,但根据一项全球性测算,2005年全球热力学第二定律能源转换系统效率(AIP 1975)仅为约11%(Cullen and Allwood 2011)。也就是说,能源用量是理论最小值的9倍,所以包括被动系统在内,“85%的能源需求实际上都可以利用现有知识与技术来避免”(Cullen et al 2011)。(能源使用的构成也会对能源效率造成影响:1900-1998年间,按照热力学第二定律定义,美国每一种电力终端应用的效率都在提高,但整体电力使用效率却没有提高,因为越来越多的部分被用于低温环境制热(Ayres et al 2005)。)一体化设计可以视为一种提高热力学第一定律效率的方法,或一种以极低成本接近热力学第二定律极限的方法。此外,重新定义所需的状态变化常常可以避免明显的热力学限制:相对于一味地改进照明设备,你可以打开窗帘利用自然光;相对于通过提高窑炉能效来制作陶器,你可以使用从自然界观察到的技术制造和通过仿生学设计的更优质且近零能耗的替代材料(Benyus 1997)。

<sup>2</sup> 在建筑行业,这些伴随效益常常比节省的能源成本更高一个(有时是两个)量级(Ürgе-Vorsatz et al 2014, Muldavin 2010, Bendewald et al 2014, Bendewald Miller Muldavin 2015)。大量的伴随效益在工业(Worrell et al 2003, IEA 2010, Williams et al 2012)和交通(Cramer and Lovins 2004)领域也很常见。

<sup>3</sup> 仅本文作者创立的智库落基山研究所凭借基于经验的实践已使用一体化方式重新设计了超过1000幢建筑,总价值超过400亿美元的主要工业设施以及多种陆地和海上交通工具。

会科学因素相似，并且可能同样重要。(Creutzig et al 2016, 2018, Mundeco, Urge-Vorsatz and Wilson 2018)

很少有决策者意识到节约的能源已超过石油，成为世界上最大的能源服务来源（如：若以1990年全球能源强度为基准，2016年全球能源强度的降低所实现的全球能源节约总量超过了当年全球的石油用量）。大众对能效的看法也同样片面。1975年-2016年间，美国因用能强度下降而累计节约的一次能源总量是因可再生产生的新增能源的30倍，尽管这段时间内美国可再生能源已经增长一倍。然而，二者获得的关注比例却刚好相反，这是因为可再生能源的增加是显而易见的，而未使用的能源则是人们看不见的。一体化设计所能带来的更大的节约潜力几乎是不可想象的。

即使对于多数工程师（这个1000年以来一直在提高能效的专业人群）而言，一体化设计既没有在他们的课本或课程中学过<sup>5</sup>，也一直没有出现在他们其实已经非常出色的工作中。众所周知，如果各个部件之间的配合得不到合理的设计，它们的运行就会相互制约，使整体节约量小于部分节约量之和。但是现实是，只要改变一下设计方法和工艺，就可以通过一体化设计实现比各部分节约量之和更大的整体节约量，只是这种思维方式仍未被大众所了解。很少有人将设计视为一种可规模化

<sup>5</sup> 也有一些例外 (Lovins 2007, 2011, Stasinopoulos et al 2009, Autodesk 2011)。落基山研究所希望补救这种意识上的缺乏，并在探索不同的方式来扩大一体化设计的规模，使其更加常见。我们正在提炼并测试详细的教学法，也在征求实践案例和其他建议。

<sup>6</sup> 例如，美国国家学院最新的美国能源综述 (2009a) 在第144-145页提到，“独立使用各种技术的方式……会如何错失各类一体化举措，而这些举措能够通过整体建筑系统手段来发现”，但它对能效潜力的估算并未包括一体化设计。以其为基础的能效分析 (2009b) 在第2.4.1章节专门描述了“一体化全建筑或全系统方案” (第40-41页)，并进一步解释了它们的应用 (第54-57页)，认为至少在商业建筑领域存在着“可以利用一体化设计使用现有可用技术提高能源性能的巨大机遇”，并指出“一体化设计……是一种非技术的概念化思维转变，以此来思考建筑系统如何能够以最高效率协同工作，并成功实现设计意图”。然而，关键的在经济性方面的洞见（一体化设计一般会缩小或避免高成本的机械系统和其他成本推动因素，这些通常就足以支付能效手段的成本）仍未被提及。整个讨论甚至也并未影响到该研究对建筑部门潜在节能量及其成本的结论。交通或工业领域则完全没有提到一体化设计。而且传统上的非一体化设计并未被视为一种障碍，尽管Rosenfeld (1999) 对他与笔者协助领导的ACT2实验取得如此大规模的节约并不意外 (Brohard et al 1998)，却对难以找到有能力做到这些一体化设计的设计师而惊讶不已。

的矢量（迅速扩大规模的一种方式），因为设计不是一种技术（即，以传统方式组织能源效率的一种框架），因而极少被归为能效机遇的范畴而写入规划。对能效回报潜力规模和成本的权威研究（如 Blok 2004, Bressand et al 2007, Stern 2007, International Energy Agency 2008, Graus et al 2009, National Academies 2009a, 2009b）有时会提到，但尚未采纳一体化设计的潜力<sup>6</sup>。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的第五次评估仅在建筑部门 (Edenhofer et al eds., ch 9) 应用了这一概念，但它在各种 IPCC 使用的气候模型中发挥的影响仍非常有限。

### 1.1 规模化推广一体化设计的迫切性

正如 Blok (2004) 提醒，Rosenfeld 和 Bassett (1999) 曾指出，能效回报是动态的。美国历史能源强度年均下降率约为3%，或在不考虑结构性转变前提下，基于技术改进能源强度年均下降率约为2%。这不仅代表了所有用能设备和系统的能效提高速度，更意味着新设备每年约5%的能效提升率（全球水平约为3.5%）。因此，我们的努力方向不仅应包括提高用能设备的特定能效，还应包括加快更迭速度（替换、增加新设备和退役旧设备的净效应）和提前淘汰能效最低的机型。Blok (2004) 认为，经合组织国家新设备每年约5%的特定能效提升率至少还能够维持半个世纪。在新建建筑和改造现有建筑领域，一体化设计能够简化和缩短建设过程，提供更优质的服务，创造有价值的伴随效益，从而在特定能效和更迭速度方面能够激发更大雄心，实现更好的节能效果。相反，传统的非一体化设计常常复杂化或阻碍一体化设计，加大一体化设计的实施难度和成本，延缓节能效果的实现。因此，加快传统能效资源应用反而会错失以更低成本实现更大节约的机会——除非同时应用、深化和规模化推广一体化设计。

一体化设计理念对那些正快速修建基础设施的国家尤为重要，因为当前错失的提高能效机遇可能会导致未来数十年大量的能源浪费。国际能源署成员国的绝对用能量从2007年峰值之后纷纷开始逐年下降，而发展中国家在全球能源用量中占比不断攀升，这为他们直接跳跃到采用最佳技术和一体

化设计创造了重要机遇,这些发展中国家甚至可以在最佳技术方面寻求并实现市场主导地位。一体化/被动式设计是中国建筑节能潜力的最大元素(Zhou et al 2016)。深度改造能够带来 70%-90% 的能源节约,这样可以及时避免一种风险,即过早采用轻度节能改造取得 20%-40% 节约,但这样却会在后期妨碍深度改造实现 70%-90% 的节约。所以,从长远来看,等到深度节能方案彻底成熟后再进行改造会比急于进行轻度改造实现更多的节约(Güneralp et al 2017)。令人高兴的是,中国基本上可以同时深度上和速度上取得积极成果。(中国的整体经济更加复杂,但机会也同样成熟。中国能源强度下降速度领先全球要归功于多个因素:初始能源强度较高、较早开始深度结构化改革、一步到位完成优质建设而不是先建设后改造)。而在人口众多但私家车保有量仍然较低的印度,其重点目标在于阻止私有汽车占领市场,在 2030 年实现向共享化、互联化、电气化车辆个人出行系统的跳跃式发展(NITI Aayog and RMI 2017)。令人欣慰的是,中国和印度都非常希望在新建和改造应用中运用一体化设计手段。与多数纯技术型方案不同,经过一体化设计的建筑符合传统文化,贴合人们的行为习惯与生活方式,并有助于提供健康、公平、安全、经济价值和其他主要的伴随效益(Lucon, Üрге-Vorsatz et al 2014, pp 705-709)。

事实上,能效评估领域早就开始了对一体化设计的考虑。多数分析人士如今都承认,根据历史发展趋势,太阳能和风能发电的规模将远远超过传统预期(Creutzig et al 2017, Breyer et al 2016),投资回报也越来越高:当代可再生能源购买量越大,成本就越低,从而形成良性循环。现如今,同样的认识水平尚未发生在能效领域,虽然能效一直以来都是规模最大的(IEA 2017)、“成本最低、最温和、能够最快应用、最不易发现、最难被了解、也最被忽略的能源服务提供手段”(Lovins 2005),通过大规模应用和改变思维方式及硬件信息就能够提供越来越多的回报。

因此,能效并不是多数经济理论学家所认为的一种有限的、体量递减的资源,而是优秀实践者通过实践发现的一种规模不断扩大、

成本不断下降的丰富资源。因此,本文将对传统理论对于终端用能设备和系统可通过技术进步实现的节能规模的评估提出质疑,并提出这对未来的影响,预测未来的发展方向。

## 2. 被忽略的能效资源—各行业例证

建筑消耗了全球终端能源的 1/3 和美国用电总量的近 3/4,而建筑部门也是一体化设计应用最不充分的部门。由劳伦斯伯克利国家实验室 Mark Levine 博士共同领导的 IPCC 第三工作组的专家咨询小组对此做了如下恰当的总结(Metz et al 2007, p416):

通过一体化设计过程节约能源与成本。虽然供给曲线有利于政策的制定,但用来绘制供给曲线的方法却极少将建筑作为一体化系统进行考虑。相反,它们关注于对单一用能设备的递增式改进所带来的节能潜力.....一体化建筑设计不仅能够实现比单一手段更大的节能,而且还有利于提高经济性。因此,与通过系统化方式提高建筑能效的手段相比,那些单纯针对建筑个别组成部分的研究可能会低估节能潜力或高估节能成本。最近发布的分析显示,通过一体化手段,(1) 节能成本会随着节能量的增加而降低,(2) 高能效建筑的成本比按照标准做法建造的建筑的更低(Harvey 2006, chapter 13)。

十一年后的今天,依然没有主流文献或官方研究承认这一论点适用于几乎任何用能设备,包括建筑、交通工具、工业工艺与设备。不仅“公共机构、政策和金融资源普遍性地偏向于能源供给技术”,而且“定向的创新也都明显地偏离了排放制约下世界的真正需求(Wilson et al 2012)”。但这些相同的因素均偏向技术胜过设计,偏向硬件胜过思维方式,从而极大地低估了优秀设计的作用与应用范围。

## 2.1 建筑

帝国大厦能效改造是一个典型的案例。虽然帝国大厦在2010年整体改造 (United States Green Building Council 2008, Buhayar 2009, Harrington and Carmichael 2009, Vaughn 2012, Empire State Building 2014) 前, 已单独将单层玻璃系统改为双层玻璃系统, 这次整体改造之后, 进一步实现节约将更难, 成本也将更高。但是, 后来这次一体化设计的整体改造仍将大厦用能强度降低了38%, 从稍低于美国办公建筑能耗强度中值 (293千瓦时/平方米·年) 的277千瓦时/平方米·年下降到了173千瓦时/平方米·年。改造项目通过将建筑制冷系统缩小1/3, 而不是通过更换更大更新的制冷系统 (加上更大的电力管) 降低了建筑的制冷需求, 以此节约的1740万美元用来支付大部分节能改造成本。同时, 缩小制冷系统规模还将整个项目的投资回收期缩减至了3年 (如果计入业主或租户的收益, 实际回收期还不到1年)。非一体化设计改造项目的预期投资回收期也是3年, 但其节能量仅为一体化设计节能量的1/6。

3年后, 丹佛市的Byron Rogers联邦中心的深度节能改造项目用经济可行的手段将用能强度从284千瓦时/平方米·年下降到85千瓦时/平方米·年, 降幅达70% (落基山研究所 2012, Bartels and Swanson 2016), 使这幢已有半个世纪历史的建筑的能效超过了当时美国新建办公建筑的最高能效水平 (国家可再生能源实验室在科罗拉多州的RSF办公楼, 用能强度为108千瓦时/平方米·年, Hootman et al 2012)。接着, 落基山研究所2015年建成的位于巴索尔特 (同样位于科罗拉多州但气候更加寒冷) 的创新中心办公大楼又将新建办公建筑能效提高了1倍多, 用能强度低至51千瓦时/平方米·年, 并且创新中心依靠被动式设计没有安装锅炉和制冷设备, 实现了能源净产出<sup>7</sup>。据报道, 一幢德国巴伐利亚州建筑 (虽然不是单纯的办公楼) 的用能强度比创新中心又低了3/5, 为21千瓦时/平方米·年 (Meyer 2015, Passive

House Database 2013)。这些改造项目应用的所有技术在10多年前就已存在: 利用一体化设计而不是更高级的技术, 通过摒弃更多冗余设备而不是添加更多设备, 包括新建和改造的美国办公建筑最佳能效水平均在5年内提高了大约一倍 (Lovins 2007, 2010)。

### 2.1.1 技术的选择与组合

通过缩小或避免安装暖通空调 (HVAC) 设备节约投资成本, 从而抵消替代这些设备的能效成本 (Metz et al 2007, p 389), 这种做法很早之前就被用于新建建筑。例如, 在科罗拉多州海拔2200米的阿斯彭, 气温最低可降至零下44摄氏度, 曾连续39天经历严寒天气。一座1983年修建于此的集被动式住房、办公室和室内农场为一体的建筑通过避免安装供热系统节约了约99%的空间供热能耗和约1100美元建造成本 (RMI (Rocky Mountain Institute) 2007, Yi et al 2010, Knapp 2018)。仅在欧洲, 截至2012年, 就有总建筑面积达2500万平方米的约5.7万被动式标准建筑通过类似手段以较低的边际建设成本避免了空间供热需求, 尤其是在商业建筑领域由经验丰富的设计师和施工人员参与的建筑中 (Lucon, ÜrgeVorsatz et al 2014); 最近这些建筑的预计总量已超过16万。Harvey (2013) 的研究发现:

*新建建筑供热负荷要满足被动房标准 (比当前标准建筑供热负荷低5%-10%) 所需的增量成本占参考建筑建造成本的0-16%。高性能商业建筑的整体用能强度仅为近期建设的传统建筑水平的25%-50%, 而且成本更低, 或仅比传统建筑成本高几个百分点。*

<sup>7</sup> 美国最寒冷气候地区的最高能效建筑 (RMI 2016 及其引文), 总用能强度为 51 千瓦时 / 平方米·年, 仅为平均水平的 1/6, 并且在进一步调试下用能强度还在继续下降。太阳能发电量超过建筑用电量。

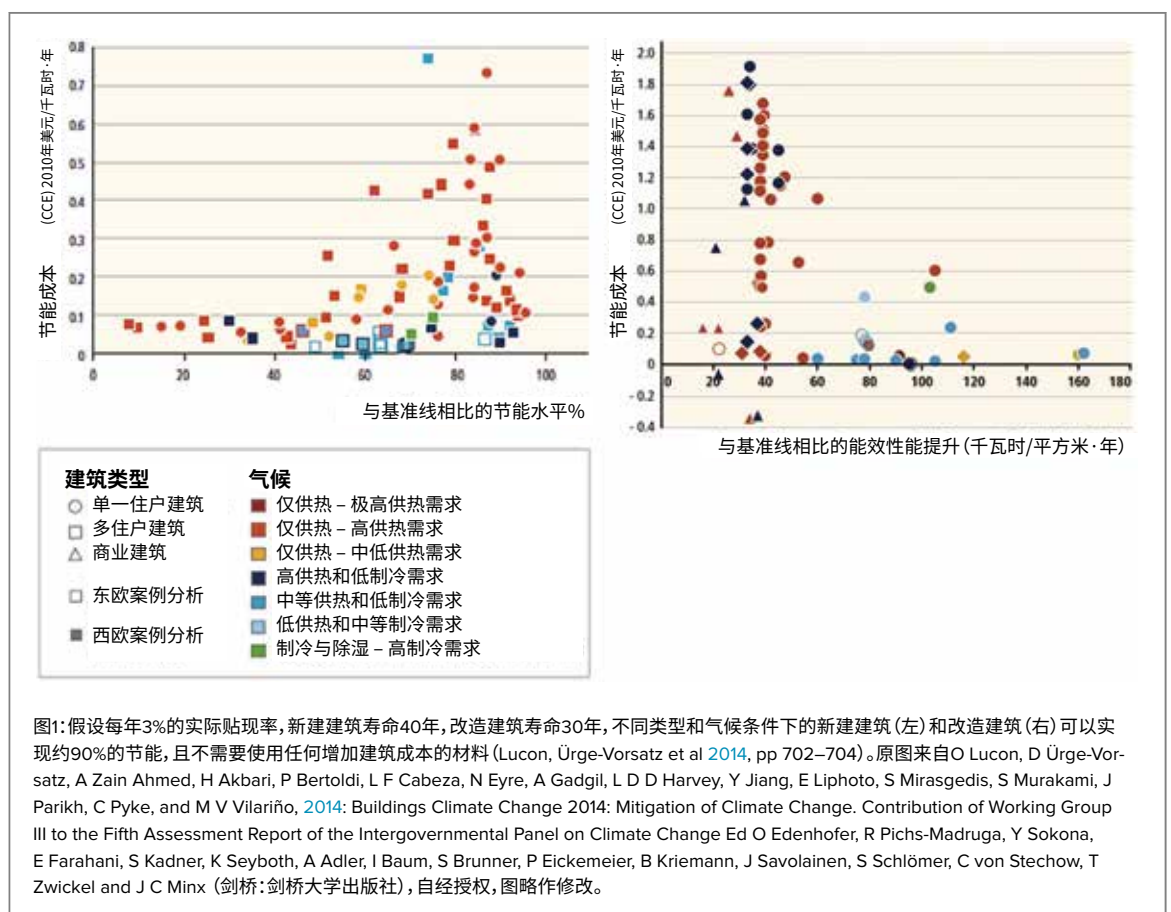
自此以后,一体化设计领域的实践得到了快速发展,从欧洲发展至北美(落基山研究所 2017c)的Energiesprong (2018) 工业深度改造/翻新方法能够将许多普通老旧住房改造为具有30年性能保证的净零能耗建筑,并通过能源节约弥补改造成本,不需要额外补贴。IPCC也已确认(Lucon, Ürge-Vorsatz et al 2014, pp 702–704),与经济学理论相反,深度改造比轻度改造(Korytarova and Ürge-Vorsatz 2012)的全生命周期总成本更低,并且“高性能新建建筑可以把增量成本控制在很小范围甚至是负值的水平”。德国旨在通过深度改造和新建被动房(PassivHaus)手段在2050年完成建筑部门脱碳的战略发现,此类建筑的全生命周期总成本远低于逐步进行小规模改造的建筑,并确认了深度改造与轻度改造的全生命周期总成本基本相同(Umweltbundesamt 2017)。

作为也许是最具说服力的国际最佳实践分析,IPCC AR5第三工作组在2006-2013年发布的8部文件汇编中指出(图1):超高能效新

建和改造建筑如果实现低于80%-90%的节能,建筑成本将不会提升。

两幅图表中确实有一些成本很高,所以被经济学理论过分影响的分析人士可能会根据这些数据得出供给曲线上升的结论。但一位有洞察力和雄心的实践者会探究垂直方向的分散度,这反映了非常不一致的设计技巧和安装技术,从而对高成本结果进行改进,使其靠拢低成本项目的实践。虽然存在即合理,但不好的实践会得到提高,否则将被淘汰,而必然不会被模仿。

炎热气候地区的分析结果也与之类似。加利福尼亚州戴维斯的一栋设计于1994年的新建地区性住宅没有安装空调或壁炉,能耗量比当时最严格的美国建筑标准还低82%(1992 California Title 24)。这栋建筑热舒适度超高,如果大规模建造,其建造成本和维护成本现值会比小规模建造分别低大约1800美元和1600美元(Lovins 1995, Pacific Gas and Electric Company 1990–97)。这个位于最高温度可达45°C地区的项目和相同ACT2 实验(Brohard et al 1998, Pacific



Gas and Electric Company 1990–97) 里位于最高温度 46°C Stanford Ranch 地区的建筑再次确认了, 在干燥气候地区能够以相同或更低的建设成本实现完全被动式制冷。即使是在闷热的曼谷, Suntoorn Boonyatikarn 教授 1996 年建造的 350 平方米住房借鉴了阿斯彭 1983 年建筑的一体化设计方案, 虽然气候条件完全相反, 但仍以和普通建筑项目相同的成本将空调能耗降低了约 90%, 同时还能够提供超高热舒适度 (Lovins 2008)。这两栋建筑的地理位置覆盖了从亚北极地区到热带地区的大部分人类居住的气候条件在湿热气候地区, 著名的 Infosys 公司位于六座印度城市的办公楼总建筑面积达 150 万平方米。这些建筑在提供超高舒适度的同时, 用能强度只是普通建筑水平的 1/5 (低至 66 千瓦时 / 平方米·年), 而建设成本却比普通水平低大约 10%–20% (R Parikh, 私人谈话, 2012–18, Slavin 2014)。位于津巴布韦首都哈拉雷的 East-Gate 中心是该国最大的办公和购物综合建筑, 建筑面积达 31,600 平方米。该建筑使用以白蚁穴为模型的仿生被动制冷和通风设计, 以普通建设成本实现了 90% 机械能耗节约, 同时提供正常或更高水平的舒适度 (Doan 2012)。

因此, 总体来看, 主要通过淘汰或缩小和简化暖通空调设备, 一体化设计能够以不高的成本 (甚至比普通水平更低的成本) 带来不同数量级规模的能效提升。这种方式可以将总体用能需求降低至原来的 1/4~1/6 (相比于普通水平是用能需求降低 1/2), 从而将能源节约的成本效益提高至少 2 倍。但更深度的设计整合可以将这个机遇变得更大, 成本更低。我们将在下面的章节进一步讨论。

### 2.1.2. 规划技术的使用顺序

重要的建筑系统和功能通常蕴藏着许多以较低成本节约更多能源的机会, 但需要以正确的顺序采取正确的行动。例如, LED 等高效照明设备在照明工程学会基础手册的优先推荐步骤中仅排在第 6 位。如果首先落实常被忽略的前 5 个步骤<sup>8</sup>, 能够节约更多照明能耗 (>90%), 提供更好的采光效果, 并通过减少设备的数量和复杂程度

来降低成本。在普通办公室中, 这些手段可以将美国采暖、制冷与空调工程师学会 (ASHRAE) 90.1–2007 名义照明功率密度降低 75%–90% (下降幅度根据日光水平不等而不同), 并提供相同或更好的视觉和美学效果。

相似地, 更高效空调或制冷器在 ASHRAE 基础手册描述的空间制冷优先选项中仅列第 6 位。如果首先落实前 5 个步骤<sup>9</sup> (其中 4 个都被广泛忽略了) 可以在任意气候条件下以更低的投资成本提供更好的热舒适度, 不使用空调, 节约设备, 从而节约成本和 90%–100% 的制冷能耗。这种手段可以降低成本, 将能效提高 2 倍, 并不再需要不具竞争力的制冷剂系统 (Houghton et al 1992, Shepard et al 1995)。为 HVAC 设备提供动力的电机系统也具备类似的节能潜力, 我们将在下文中讨论<sup>10</sup>。

### 2.1.3 技术的使用时机

新建建筑可通过缩小或不使用 HVAC 设备节约投资成本, 而现存建筑也可以通过合适地安排改造项目的实施时间, 将其与主要定期维修计划 (如 HVAC 系统或外立面更新) 安排在一起, 从而节约大量成本。芝加哥市一栋建筑面积为 18,606 平方米的

<sup>8</sup> 提高任务的视觉质量; 改善房间反射率和空间几何学; 提高照明质量以减少光幕反射或造成不适的眩光; 优化照明量; 收获和分布自然光; 然后, 在提高源效率后, 才是优化灯具和提高控制、维护和培训水平。

<sup>9</sup> 让人感受到制冷效果, 而不是建筑; 利用所有舒适度变量, 提高人的舒适度; 将不需要的热量与湿度最小化; 被动制冷 (通风、辐射、地源或地下水源等-Cook 1989); 主动非制冷剂制冷 (蒸发、干燥、吸收、吸附、混合手段, 譬如 Pennington 和 Van Zyl 循环); 超高能效制冷剂制冷; 以及冷量存储与控制 (Houghton et al 1992, Shepard et al 1995)。仅应用前四种方法, 许多传统被动式设计就可以在炎热气候地区不安装 HVAC 设备而提供热舒适, 例如 Kerala 的家, 在 17°C–36°C 环境温度变化范围条件下将卧室温度控制在 23°C–29°C (Lucon, Ürge-Vorsatz et al 2014 p 693), 或 Dhiru Thadani AIA 的现代对流双层墙体公寓楼可在孟买的季风气候下保持室内气温比室外气温低 11°C–12°C, 并通过吊扇进一步降低 5°C (通过优化气流波动可将该数字增加至 7°C)。这种建筑的建设成本增量仅为 2%, 目前广受市场欢迎, 已知建造面积达 2 百万平方米。

<sup>10</sup> 许多插座负荷、电器和热力系统也是这样的。例如, ACT<sup>2</sup>戴维斯房屋的设计师设计了一款水冷冰箱——提高了能效, 免费利用冷却水供热, 并在夏季将冰箱变为空间制冷设备 (因为冷却水经下水道流走, 带走了不需要的室内热量)。与其类似, 落基山研究所的创新中心使用热泵利用 IT 设备、空气热交换风扇电机和太阳能逆变器的废热加热水。大型建筑和工厂常常有很多重要的机会来综合利用热力, 将废热用于低质量应用, 尤其在使用了今天的 COP 6–15 低提升热泵 ( $\Delta T = 13–31\text{K}$ , Gasser et al 2017) 的条件下。同时城市形态也会极大地增强建筑的能效 (Creutzig et al 2015, Güneralp et al 2017)。



全玻璃外墙办公大楼因玻璃幕墙的普通封条失效而必须进行改造。一套改造方案显示能够以比计划中20年一次的外立面更换（无节能效果）成本略低的建造成本实现76%的节能。该方案将制冷负荷减小至原来的1/4，从而使HVAC系统缩小至原来的1/4，但能效提高2.8倍，而且成本比普通HVAC改造少大约20万美元，足够支付其他改造项目的成本还有少量结余，相当于项目回收期仅为5个月（Lovins 1995）。当时这一改造设计方案获得业主批准，但因为该建筑在一家依赖于交易流但资金短缺的出租经纪公司控制之下，而该公司不愿推迟通过租赁续约带来的佣金收入而没有执行上述改造计划。但最终这家经纪公司的计划也没有成功，该建筑后来以极低的价格被转售，而能效改造的机会也被耽误了20年。这个例子证明了商业房地产价值链20+环节的复杂性及其固有的缺陷（Lovins 1992）——每一环节都可以得到纠正，从而创造商业机遇，但任何一个被忽略的环节也都可能终结整个项目。尽管如此，考虑周全的建筑群业主可以运用现有的工具协调建筑的深度改造计划（落基山研究所 2017a）与HVAC和外立面更新等建筑的计划改造项目（落基山研究所 2017b），将不具备潜在效益的改造成本变为零成本或负成本投资，同时创造巨大的资产价值。

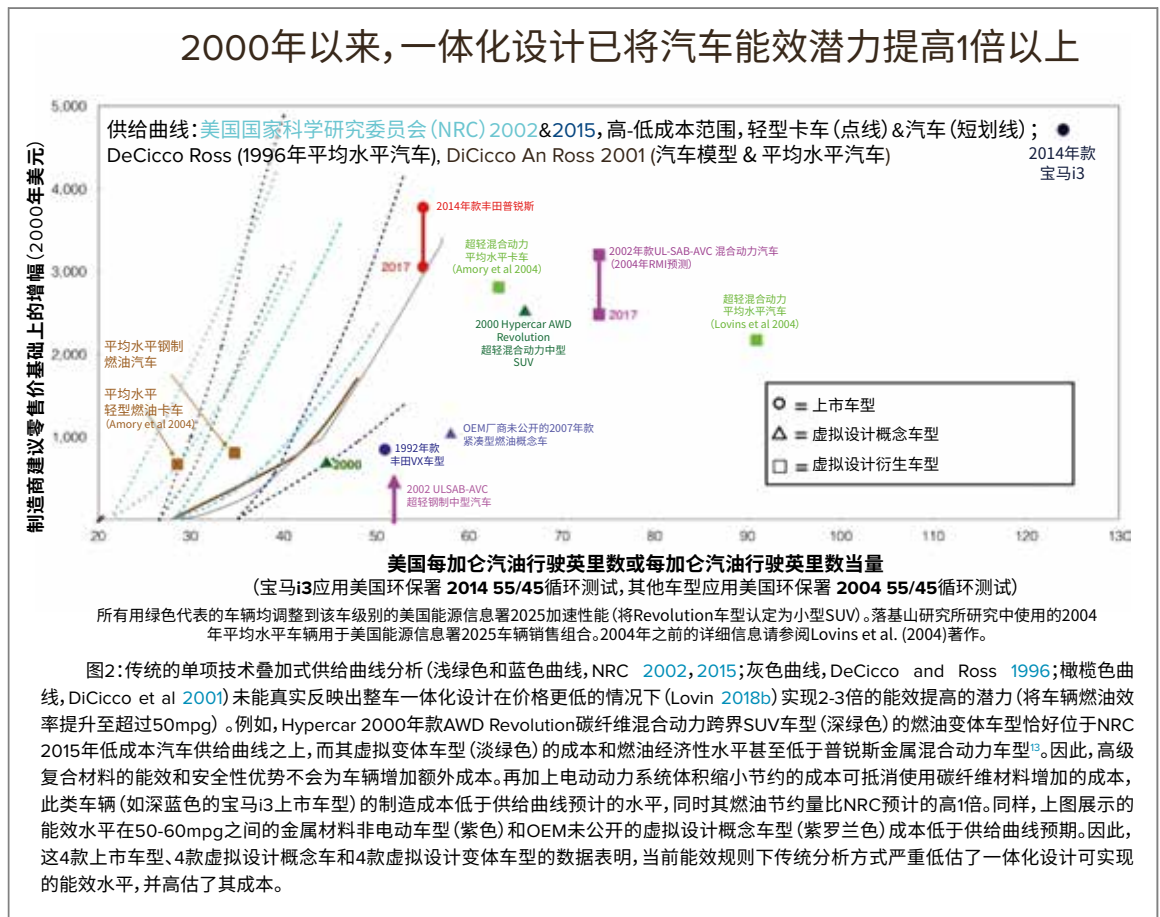
此类建筑案例一般都应用高级玻璃立面，具有更好的保温性能，看起来更通透，更丰富的自然采光，但阻挡不需要的热交换，并根据光谱被调整至各个朝向。通过优化照明、自然采光、气流组织、热交换和许多其他因素，这些项目紧密地结合不同设计和建造技巧，通过寻找优秀的设计师，以合理的方式组织各种方案，最好是因能源节约而不是支出节约奖励设计师（Eubank Browning 2004, Bendewald et al 2010, RMI 2016）。一些案例（如RMI (Rocky Mountain Institute) 2007）应用了更多层次的设计整合，有些方案可能发挥多达8-12种不同功能，但仅需一次成本投入。

一体化设计可以应用于各种气候条件下、各种规模的新建和现有建筑，并且已不再如

IPCC第四次评估报告第三工作组所描述的那样新奇（Metz et al 2007）。2014年，IPCC第五次评估报告的第9章节记录了许多几乎净零成本超高能效建筑案例，包括各种规模、项目和气候条件（Lucon, Ürge-Vorsatz et al 2014, ch 9; figure 1 above），并解释了设计中的一体化和简单化如何能够抵消更高的部件成本（第689页）。然而，报告的第8章节和第10章节并未在交通工具和工业领域，或与其相关的系统中应用这一方法。下文中的案例将简要描述一体化设计应用在这些领域的潜在机遇。

## 2.2 交通

当前权威的业内专家（Sims and Schaeffer 2014 p 613）认为，新的轻型车辆的牵引荷载，也就是移动车辆所需的动力或能源，有潜力降低约25%，并且到2030年动力系统也优化以后，其燃料用量可以减少至少一半。但这些分析忽略了重要的一体化设计可节约更多能源和成本的机会。正如建筑中缩小HVAC设备带来的成本节约常常足够抵消减少其能效提高需要投资的成本（甚至还有结余）一样，通过减小车辆的质量、阻力或滚动阻力来减小牵引荷载可以缩小其推进装置（动力系统）的尺寸，以此方式节约的能耗成本可以抵偿前期需要的投资。例如，宝马的4倍能效（相当于百公里油耗1.9升）i3电动汽车使用碳纤维座舱，由于原材料质量大大减轻，车辆可以通过减少电池数量从而节约充电电量来弥补其增加的成本（Loveday 2011），并获得超轻质量和更快的充电速度。这一策略能够在汽车领域奏效是因为汽车大约2/3的牵引荷载是其车体质量造成的（在印度缓慢驾驶状态下这一数字是大约90%），而因为燃油到车轮行驶转化过程的能源损失是大约79%，在当今标准的新型内燃机（ICE）动力系统中，每减少一个单位的牵引荷载，就可降低5个单位的动力系统损失，节约油箱中大约6个单位的燃料（上个世纪90年代时曾是7个单位）。至少在电池或燃料电池成本足够低之前，缩小动力系统是电动汽车最有效的节能方式。



## 2.2.1 轻型车辆

汽车工业整车设计领域已确认,如果将车辆作为一个系统进行优化,那么在考虑动力电气化的情况下能够有效将其效率提升3-7倍,而在不考虑动力电气化的情况下提升1-2倍(Cramer and Lovins 2004, Lovins 2015a, 2018b);然而,从传统的逐个技术措施供给曲线分析中却只能得出不到真正节能潜力的1/2,且成本更高这一结论,即便如此还常常需要在其他方面做出牺牲。仅降低牵引动力这一项,就已被证明能够在增加极少的净成本甚至是创造净收益的情况下将公认25%的节能潜力提高1倍以上,并将车辆质量降低70%以上(参考文献同上)。和建筑领域类似,汽车少量效率提升需要付出的成本很可能大于大规模效率提升需要的投入,这是因为一旦将整车不同部分的系统协同作用考虑进来,随着整车效率的不断提高,其边际成本就会逐渐降低,而这一现象只会出现在整车设计系统中(Lovins 2018b),对于目前普遍应用的单项技术供给曲线并不适用。因此,尽管有文

献指出(Sims et al 2014 p 624),到2030年汽车本身能够以几乎不增加社会成本甚至产生社会净收益的情况下将效率提高至少50%(包括燃料节约和其他外部效应),事实上车辆整体设计带来的节能潜力更大且成本更低。

尽管业内设计已经提供了令人信服的证据(Lovins 2018b),但目前依然没有正式的研究分析认真考虑上述结论的可能性。为了展示这一差距的大小,图2对美国国家科学研究委员会(NRC)提出的2002年(浅绿色)和2015年(蓝色)汽车能效技术的供给曲线(点线代表轻型卡车,短划线代表汽车),以及14种特定设计车辆1996年(灰色)与2001年(橄榄色)的能效技术供给曲线分别进行了对比。图中:

- 红色和紫色点分别代表了在当时引起市场轰动的1992年款本田VX车型(Koomey et al 1993)和2004年款丰田普锐斯这两款车型的燃油经济性和相对价格水平(可以看出丰田普锐斯汽车从

2004 年到 2017 年发动机的边际价格走势)；<sup>11</sup>

- 紫罗兰色点代表了一家主要 OEM 厂商未公开的 2007 年款轻金属高量产紧凑型燃油概念车, 其中一些虚拟概念化的设计方案能够实现比其钢制基础款能效水平高出 60% 的效果, 但相应的价格高约 1030 美元 (2000 年) (Lovins 2018b)。
- 两个洋红色点分别代表了一款由保时捷工程服务有限公司设计的能效水平为 52mpg 的超轻钢制燃油汽车 (ULSAB-AVC 2002), 和一款相对应的能效水平为 74mpg 的混合动力车型, 落基山研究所对其 2002 年和 2017 年的成本进行了粗略估计, 可以看出二者均是节约燃料的传统车型。
- 两个棕色点分别代表了模拟 Conventional Wisdom 的平均水平小汽车和轻型卡车两种车型基本款的虚拟设计衍生车型 (Lovins et al 2004), 他们的能效表现与 NRC 2002 年的假设基本一致;
- 两个深绿色点分别代表了 Hypercar 公司两款 Tier Ones 2000 年款 Revolution 全轮驱动碳纤维燃油和混合动力 SUV 虚拟设计概念车 (Cramer and Lovins 2004)。
- 两个淡绿色点分别代表了平均水平混动轻型卡车和混动轻型汽车的模拟变体车型 (其中混动轻型汽车的能效水平达到了 91mpg, 是其棕色基础车型的 2.6 倍, 远远超出了 NRC 对其能效水平的预期, 但边际价格仅比基础车型高 1361 美元, 比 NRC 预测的成本增幅 (浅绿色曲线) 低了 50%-80%);

- 右上角的深蓝色点代表了能效水平为 124mpg 当量的 2014 年款宝马 i3 中等规模量产电动车, 具备轻型碳纤维车体 (Marklines 2015) 以及电池动力系统。按照 NRC 浅绿色供给曲线来衡量, 此款宝马 i3 汽车的零售价应比实际高出 4721 美元 (2000 年)<sup>12</sup>。

这款现代化宝马 i3 车型的数据证实了其等能效远高于 2015 NRC 供给曲线计算的可比边际成本下车辆的能效水平。显然, 标准的 (Greene and DeCicco 2000)、叠加式的单项技术逐个叠加等计算方法都会忽略车辆一体化设计中已证实的实际设计节能潜力中的大半。此外, NRC 的供给曲线 (除了汽车 2015 年的较低曲线外) 在 2002 年到 2015 年间斜率增大, 表明对高效投资的回报率会随着能效的提升而降低。然而, 宝马 i3 证明了一体化设计能够在市场中以经济可行的方式实现更高的投资回报 (Munro and Associates 2015)。

超轻车身和整车设计占据四个绿色点曲线代表车型主要燃料节约潜力的 2/3 (Cramer and Lovins 2004, Lovins et al 2004), 这为我们打开了一个崭新的领域 (上图右边 1/2 到 2/3 的部分), 在一体化设计的作用之下, 车辆可以通过更低的成本实现燃料节约水平的成倍增长。这也意味着传统意义上的递增式技术供给曲线分析已经过时, 它对汽车能效的分析结果只是整车一体化设计可以实现的能效潜力的一小部分, 而且成本比后者更高。因此, 气候模型严重低估了汽车能效提升的潜力, 当前的汽车能效标准 (现在却在在美国被认为是不可实现的) 比人们预计的还要保守数倍, 电动汽车成本可以比当今高牵引荷载汽车的成本低很多, 因此能够更快地规模化推广。

<sup>11</sup> 2017 款普锐斯混合动力系统的预计边际制造成本 < 2104 (2000 年) 美元 (EPA (US Environmental Protection Agency) 2016 pp 2-350 and 2-399; K G Duleep, 私人谈话, 2018 年 8 月 3-4 日), 乘以 1.5 倍传统增量, 得出边际制造商建议零售价约 3052 美元; 未考虑 2004 年至 2017 年能效的细微变化。

<sup>12</sup> 宝马 i3 独特的全新设计没有使用过任何金属车身或非电动基础原型, 因此其边际价格无法通过自下而上的方式计算——但可以通过将其零售价与基础车辆市场替代价格对比做直接估计。钢制 ICE 27-mpg 2014 款 MINI Cooper Countryman John Cooper Works (JCW) 基础车型的驾驶属性、功能、用途、舒适度和市场定位均与 i3 非常近似。(二者仅有的实质上的不同在于 JCW 最高速度为 153-mph (i3 为 93-mph)、等量单位美国加仑行驶英里数是 i3 的 1/4.6, 转弯半径是 i3 的 2.2 倍。) 本图显示, 使用 GDP 物价折算指数计算, i3 在 2014 年的零售价格 (MSRP) 增量是 6275 (2014 年) 美元。

### 2.2.2. 重型车辆

整车设计还能够以经济可行的手段将重型卡车能效提高2倍 (Lovins et al 2004, Ogburn et al 2008, Lovins and Rocky Mountain Institute 2011)。IPCC承认,到2030年,长途卡车可以在降低成本的同时将能效提高1倍 (Sims and Schaeffer, p 624)——在美国能源部超级卡车计划中,卡车制造商也通过公路测试验证了不带复合拖车的传统车头挂车可以实现上述目标,且在实际路上行驶的情况下获得了验证 ([www.runonless.com](http://www.runonless.com))。根据波音、美国国家航空航天局和麻省理工学院的权威概念设计,飞机能效提高2倍至4倍在技术和经济上均是可行的——使用液态氢或电力推进甚至可以将其能效提高更多 (Lovins et al 2004, Lovins and Rocky Mountain Institute 2011)。类似的节能设计中的一半甚至更多已经应用在了多种轮船的设计当中 (参考文献同上)。

### 2.2.3. 出行系统

在无线信息技术支持下,共享型互联出行系统可以为人类出行 (Johnson and Walker 2016) 和货物运输 (Agenbroad et al 2016) 提供更多一体化的设计方案。城市形态 (Sims et al 2014) 和密度 (Creutzig et al 2015, Güneralp et al 2017) 的改进,通过各种方式减少不需要的出行或货物运输,都能够进一步增加节能潜力。这些相对复杂的节能方式能够在大幅减少驾驶和货物运输距离的同时,提供相同或更高水平的出行和应用服务,其未来的实现和进一步推广应用都需要依赖于车辆平台的一体化设计。

## 2.3. 工业

全球电力的一半以上,也许是3/5都用于运行电机,并主要集中在工业领域。高效电机和变速驱动器是业内的两项标准能效手段,但它们的节电潜力只是全驱动系统改造节电潜力的一半,而单位成本却是后者的5倍。全驱动系统改造的35项改进中,有28项属于前7项改进的免费副产品 (Lovins et al 1989, Fickett et al 1990)。但要普遍提高电机驱动系统的能效,首先应考虑的是缩小电机规模,从而降低成本,实现更大的能效进步。

全球一半的驱动动力都用于运行泵和风机。粗、短、直的管道,会比细、长、多弯的管道减少约80%至90%以上的摩擦阻力 (Stasinopoulos et al 2009, Chan Lizardo et al 2011 ch 6),这种设计在改造项目中的投资回收期一般不到一年,而在新建项目中还能够降低建造成本 (Lovins 2005 pp 16–17, 2015a; P Rumsey PE FASHRAE and E L Lee, 私人谈话, 2017)。电厂、电线、换流器、电机、泵、管道造成复合损失占电厂燃料能源的约90%。但把这些复合损失进行转化,可以实现自下游到上游的复合节约,在管道中节约一个单位的摩擦阻力或流量就可以在电厂减少大约十个单位的燃料、成本和排放。因此,在全球范围内优化所有管道系统能够在实现可观收益的同时,大体上节约足够的泵与风机能耗,从而节约全球大约1/5的发电量或一半的燃煤发电量。大概尚未有官方气候评估提到这些重要的节能机遇。

这些驱动系统和燃料节约机遇仅仅是工业一体化设计的开始。一项实践性研究对价值超过400亿美元的多种工业设施的系统化全系统再设计发现,可以通过改造实现约30%-60%的节能,投资回收期仅在几年之内;或在新建项目中以几乎总是更低的投资成本实现约40%-90%以上的节能。以下案例证明了这些节约量比同等技术人员非一体化再设计手段的节约量高数倍,而成本仅为后者的几分之一:

- 德州仪器位于德克萨斯州理查德森的微芯片制造厂“R-fab”部分通过综合能效改造缩小配套设备(提供冷却水、清新空气、真空等的设备),将2层厂房改为1层,节约了20%能耗(且尚未运用两项最重要的改造建议,计划在后期加工厂使用)、35%用水量和30%建设成本,价值相当于2.3亿美元 (TI 2010, McGill 2006)。R-fab的节能量后来达到了40%,生产普通TI芯片的能耗在2005-2017年间降低了65% (Westbrook 2008)。随后,一家竞争对手工厂的概念设计预计可以节约2/3的能耗和一半的投资成本,并避免安装了全部2.2万吨冷却装置。

- 2009年建成于英格兰北部, EDS设计的Wynard数据中心(Koulos 2009)非IT用电量和制冷及抽运能源用量比名义基础设计水平分别减少了73%和98%, 每千瓦时计算能力提高了2倍, 投资成本保持不变——但EDS预测, 实现全部节能潜力可以减少95%用电量和50%投资成本。
- 全球最大规模铂矿(英美铂金2004)的业主预计可以通过改造设计节约多达39%(至少26%)的能耗, 投资回收期为2-3年, 而且能够同时提高产品回收率、安全性、工人生产率并带来更多其他战略机遇。
- 壳牌石油对其最高效炼油厂、一座大型LNG液化厂和一座北海石油平台的改造设计预计可分别实现42%、至少40%和约100%的节能, 投资回收期均在几年之内; 一座50亿美元新建的基于费托法的合成天然气液化厂有望节约50%以上的能耗和约20%的投资成本。
- 作为全球规模最大的工业设施之一, 特斯拉的电池超级工厂用15 kWe热泵替代了原定的1 MWt燃气锅炉, 用于提供大约1.5K温差的溶剂再蒸馏作用, 实现了98.5%的现场节能。一项经过独立认证的欧洲工艺热能改造项目通过相似手段, 节约了92%的天然气用量(Norman Crowley, 私人谈话, 2018年6月30日)。

因为各种工业和工艺千差万别, 这些个别案例无法被广泛推广。同样地, 一些项目也完成了设计但没有实施, 其原因常常是公司的资金限制无法满足区域管理者的节能热情。其中许多设计仍归属于私人所有。然而实践者通过检查公开案例的证据, 仍会对他们的计算和测试成果充满信心。因此, 最令人惊讶的现实在于, 即使一体化设计的节能潜力如粗管道/小泵案例中显示的那样显著, 却仍然没有出现在任何官方研究、产业预测、IPCC分析或(save Stasinopoulos et al

2009)工程学科教科书中, 并且尚未成为那些在能效计划和传统领域最具权威的大公司的标准做法。为什么呢? 显然是因为一体化设计不是一种技术, 而是一种设计方法, 属于被广泛忽略的范畴。

一体化设计在不同部门的应用揭示了相同的结论。管道/泵系统自下游到上游实现的10倍节能与汽车领域减小牵引荷载实现5-7倍燃料节约具有异曲同工之处。在建筑中使用较小(或不使用)HVAC设备, 并以此来弥补能效提升方案带来的增量成本也和汽车领域使用较小动力系统来弥补超轻车体制造材料带来的增量成本, 或工业领域使用较小的泵和电机系统来弥补更粗管道产生的增量成本的做法类似。相同的方法学上的错误也会发生在不同工程分类和应用中。在寒冷气候地区建筑中优化隔热性能的计算中仅考虑节约燃料的现值, 而忽略了避免安装供热系统的投资成本节约, 这就如同在优化管道直径的计算中仅考虑抽运能耗节约的价值, 而忽略了避免安装泵系统的投资成本节约。要改正此类普遍性错误, 我们需要回到维多利亚时期清晰的全系统工程理论, 就像John Ericsson(1876)根据几何学所提出的: “我强烈建议被要求使用压缩空气传递机械动力的那些工程师, 不要期待通过使用小直径(细的)管道来获取经济性。”

即使是上文指出的令人惊讶的节能量也可能仍是保守的。领先的工业能效改造公司Crowley Carbon为客户提供的能效提升方案能够实现经独立认证的约35%-60%的能源节约(单项方案最高可达95%), 一般投资回收期为3年左右。例如, 2017年, 该公司在22个国家开展的62个项目实现了平均37%的一次能源节约, 平均投资回收期为2.8年。但该公司的操作并不强调一体化设计, 而是更多地使用传统硬件改进方式, 并通过关键的诊断软件提供支持, 持续发现并评估所需的维修和操作改进机会<sup>14</sup>。此类以维护为主的持续性节能软件在上文提到的类似30%-

<sup>13</sup> 历史上首款中等规模量产碳纤维汽车——宝马i3验证了落基山研究所1990年代的其他关键论点, 包括: 规模混合度提升约1.5-2.5倍(Kranz 2010, 由Greil (2018)确认), 简化制造工艺, 成本下降约2/3, 组装时间和用电量减半, 用水量减少70%, 并且不需要传统车体车间或喷漆车间。

<sup>14</sup> 该公司2015年对其过去5年开展的约130个项目的内部研究发现, 有70%的项目中都出现了超过30%的节能效果衰退, 主要原因包括操作变化、设施扩建或设施用途变化、不熟练的操作人员以及管理层的疏忽等。这种衰退意味着即使设计、技术和行动水平保持不变, 能效机遇的规模也总是在扩大(Norman Crowley, 私人谈话, 2018年6月30日)。

60%节能方案(类似投资回收期)中并未使用,因此,将这种软件结合一体化设计能够获得比单独使用任意一种方式更多的节能。

## 2.4 总结

以上证据证明的‘能效资源丰富论者’观点常会引来强烈的质疑,尤其是来自不熟悉工程实践的经济理论学家。但迄今为止,能效资源丰富论者似乎提供了比怀疑论者更有说服力的论据。例如,当官方预测认为能效潜力极小甚至没有潜力的时候,一项1976年的另类研究重新构造了围绕终端应用和最低成本的能源问题,认为美国一次能源强度可以在50年内降低72% (Lovins 1976, 2016)。到2017年,能源强度已经在42年内降低了57% (图3)。2011年预测到2050年,创新技术的出现将使能源强度有望再下降2/3 (Lovins and Rocky Mountain Institute 2011),这是1970年代引起广泛争议的节能量预测的两倍<sup>15</sup>,而实际成本仅为预测值的1/3。并且现在看来,这些2011年的预测仍然是保守的。一切皆有可能。在适当的时候,曾被认为疯狂的理论会悄悄地成为世人皆知的认知。

## 2.5 被忽略的能效意味着什么?

我们看到,迄今为止,正如传统分析方法更强调能源供应而不是能源的高效使用,更着重技术而不是非经济学的社会科学工具与见解,它们也重视单一技术的性能,而不是设计过程,这些过程能够优化选择、组合这些技术并控制其使用时机,规划其使用顺序。这里产生的分析上的差距可能和缺失的基础设施软硬件 (Creutzig et al 2016) 同样重要,这些基础设施对于实现和最大化技术能效收益至关重要。

全经济系统的一体化设计能够增加多少能效资源储量——也就是以现有技术能够以

经济可行方式发现的能效资源?下文中详述的于2004至2017年完成的四项研究全部与20世纪80年代其他独立分析人士所做的非常详细的自下而上的分析大体一致<sup>16</sup>。

其中最详细的一个于2000年代中期完成的分析,该分析研究了美国如何完全摆脱对石油的依赖 (Lovins et al 2004),这一研究分析由五角大楼联合支持,并通过广大同行专家的审阅。该分析发现,到2025年,由企业主导、市场推动的转型能够让美国以12美元/桶(2000年美元)的平均成本将石油生产效率翻一番,带来每年700亿美元的回报,并节约一半的美国天然气用量,再加上可盈利的燃料转换,可以使美国在2040年停止进口石油,在2050年停止使用石油,并保持着与美国能源信息署预测一样的到2025年的GDP增长速度和到2050年的GDP推测。这一2004年完成的对美国摆脱石油依赖的路径图未预见到页岩气的出现,然而,其需求分析已被证明过于保守:12年后,美国实际石油消耗量比当初颇具争议的分析预测值还要低150万桶/天,而实际的石油净进口量也比分析预测值低300万桶/天(不包括页岩油)或700万桶/天(包括页岩油)。

一项由62名团队成员共同完成并经过同行专家审阅的更深入分析<sup>17</sup>还对2050年之前建筑和工业部门非石油燃料用量和电力用量进行了预测 (Lovins and Rocky Mountain Institute 2011, 在Lovins 2015a, 2015b中有所总结)。该分析详细描述了如何以7美元/兆瓦时(2017年美元)的平均技术成本将美国电力终端用能效率翻两番,同时项目管理交付成本不超过10美元/兆瓦时。这一分析在建筑、交通及工业(仅包括驱动系统和流体处理,不包括工艺流程)领域保守地应用了一体化设计。与美国国家学院(2009a)使

<sup>15</sup>1989年我绘制的美国长期电气能效潜力的供给曲线符合我们在2000年根据此前六部落基山研究所/Competitek技术地图册(2509页,5135个备注,1986-1992)发现的4倍能效提升水平,约相当于1986-2010年所实现节约量的3倍。然而,这个曲线里的平均技术成本比Lovins与落基山研究所2011年发现的成本高1.6倍,所以1989-2011年实际的单位成本节能量要高2倍。这与Lovins和Lovins (1991)对1986-1991年发现的6倍能效潜力的不同主要是由于早期分析未充分认识到一体化设计的作用。

<sup>16</sup> 这些分析发现的节能潜力(全部转化为1986年美元)可以帮助瑞典以1.3美分/千瓦时的平均成本减少一半的全国用电量(Bodlund et al 1989),帮助丹麦以0.6美分/千瓦时的成本减少建筑部门一半用电量或以1.3美分/千瓦时的成本减少建筑部门3/4的用电量(Nørgård 1989),帮助西德以2.6年投资回收期减少80%(包括燃料转换)家庭用电量(Feist 1987)。自此之后,多数未能捕捉到的节能潜力已进一步扩大。

<sup>17</sup> 与前述研究分析类似,该分析将需求反弹纳入了可靠文献已证明的范围。

用老式技术和非一体化设计认为在2030年可行的能效水平相比,该分析发现2050年电气能效收益增加了1倍,且平均技术成本下降了约3/4。

这一研究将相同的分析方法应用于所有部门(Lovins and Rocky Mountain Institute 2011),结果显示到2050年可以将美国一次能源效率提高2倍,再加上5倍的可再生能源供应量,可以使美国2050年GDP达到2010年水平的2.6倍,而且不需要使用石油、煤炭或核能,天然气用量减少1/3。这一路径可以将美国2050年化石燃料二氧化碳排放减少82%-86%,节约私营领域成本5万亿美元(2009年美元净现值,不计算碳价或其他外部价值),并且不需要新的技术发明或通过新的国会法案,只需要在考虑周全的市场机制中应用合理的非联邦政策,就能够由企业主导而实现盈利。事实证明,2010-2017年间美国一次能源和电力能源使用强度下降趋势(不是天气正常化用能量)与该研究的预测轨迹非常一致,而可再生能源实际开发速度则超过了预期水平。当然,这只是40年转型中的前7年,然而实际已实现的节能量与这一独特分析的一致程度远远超过了与美国能源信息署或能源行业其他预测的一致程度。

基于这份2011年完成的对美国市场的独立研究的分析及方法,中国也开展了另外一项类似投入规模(32位研究人员花费2年多时间),甚至更加详尽的自下而上的综合研究。该研究由中国国家发改委能源研究所发起,并与劳伦斯伯克利国家实验室、能源基金会中国以及落基山研究所共同完成。这项研究成果的执行摘要报告已于2016年G20峰会上首发,完整报告中文版也于2017年末对外发行(Lovins et al 2016, Zhou et al 2016, ERI et al 2017, Price et al 2017)。报告展示了中国如何在2010年基础上,到2050年实现GDP增长6倍,能源生产效率提高6倍,化石燃料用量减少67%(电力部门减少83%),燃煤量减少80%,化石燃料二氧化碳排放降低42%,单位化石燃料碳排放对应GDP产出提高12倍,并节约3.1万亿美元(2010年美元净现值,不包括其他外部效益)的目标。这一由中国最优秀能源分析专家团队完成的官

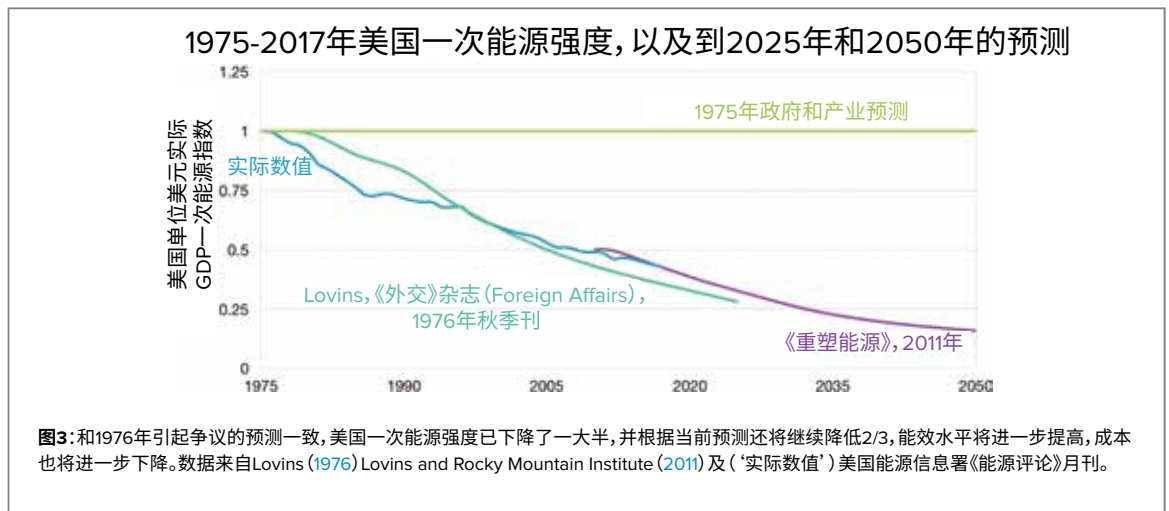
方研究为中国的十三五规划献计献策(十三五规划能源领域资深作者正是本次研究项目的顾问),因此对中国的能源战略制定与实施具有深远影响。到目前为止,实际发展正以和研究预测一致或更快的速度推进,尽管多数预测情景还有待实现。印度的新兴出行部门转型(NITI Aayog and RMI 2017)也展现了相似的发展前景与推动力。

传统文献既不能妥协于这些研究的成果,也无法反驳它们,因此一般选择忽略它们。但这并不是因为这些研究不够细致或严谨,没有经过行业专家审阅或缺乏有力且充分的证据——而仅仅因为它们不符合传统共识。

本文第二章节展示的分部门例证显示,一体化设计至少可以将传统分析认为可通过经济可行方式在多个部门的节能潜力翻一番,包括建筑、汽车(甚至未计算变革性的出行/IT融合)、重型卡车包括物流车、飞机、工业驱动系统(占工业用电主导地位)及其下游的流体处理系统(其潜力甚至更大)以及大型工业工艺领域。这与上述四项(三项美国、一项中国)对比研究的结论大致吻合。这种结合了特定技术和全经济系统的证据常常显示出比传统认识高一倍以上的节能潜力,与本文观点一致,即一体化设计如果能够广泛应用并付诸实践,能够以低于传统认识水平的成本将全球能源生产效率潜力提高数倍。

1970年代中期复杂且不透明的计量经济模型对2000年美国能效水平的预测仍比实际值低了一半<sup>18</sup>,而类似地,在此之后应用了相似方法与心态且更加细致的研究分析(甚至更严重地)低估了可再生能源成本的骤降和应用的激增。基于资源缺乏和枯竭的分析模型无法得出或容忍不断增长的投资回报——例如,当我们购买更多太阳能光伏(PV)电力和风电时,会促进其价格下降,所以我们会购买更多,这也将使其价格进一步下降。自2002年起,国际能源署对风电和

<sup>18</sup> 相反,Lovins(1976)独立对2000年美国能源需求提出了准确的预测(Craig et al 2002),没有依靠任何计算机模型,只使用一把计算尺和一部HP-35计算器,构建了一套“以大量工程和经济计算主导”的“印象派”情景(参考文献同上)。其半定量化、情景式、跨学科的分析方式同样为电力部门提出了极具价值的预测(Burr and Lovins 2014, Lovins 2013, 2016, Flin 2016)。



光伏装机量的预测已分别上调了5倍和23倍, 然而仍不及实际装机增加的速度。当今全球光伏发电装机是国际能源署2002年预测值的40倍: 根本性的物理和商业现象使光伏成本在数十年间不断大幅下降, 没有一年是增长的。因此, 2017年全球新增光伏发电装机就超过了所有化石燃料发电的新增装机总量, 而且新增可再生能源发电装机占全球新增发电装机总量的64%<sup>19</sup> (FS-UNEP-BNEF 2018)。同样地, 当代能效资源也可以通过结合批量生产设备、革命性IT和网络技术进步以及一体化设计的技术和经济协同作用而变得体量更大、成本更低。虽然受到以上各种障碍的影响, 能效资源仍将以有价值创意的传播速度快速传播, 而且似乎越来越有潜力改变设计的教学、实施以及评估其价值的方式。因此, 在越来越多的人意识到 (Creutzig et al 2018) “气候变化应对研究越发倾向于供应侧技术解决方案, 但缺乏对需求侧解决方案的更深入理解”时, 还将设计, 尤其是一体化设计加入到他们有价值的工具和学科目录中, 分析人士和IPCC即将发布的第六次评估报告均应加入和认真考虑这些工具和学科目录 (Mundaca, Ürge-Vorsatz and Wilson 2018)。

<sup>19</sup> FS几位作者表示, 他们的数据是根据2017年2月彭博新能源财经的预测结果计算得出。后者预测, 核电装机将在2017年净增加11吉瓦, 但实际增量 (IAEA PRIS) 仅为0.3吉瓦, 或0.9吉瓦 (包括美国升级的项目)。

### 3. 对气候保护工作的启示

本文第2.5节总结的对美国和中国严谨研究呈现了一种推测性的、简单化的思维实验, 但颇具启发意义。在欧洲 (欧洲气候基金会2010) 也采取对比综合研究, 并将美国和中国的研究结果分别作为其他非欧洲经贸组织国家和非经贸组织国家的代表, 按GDP增长比例计算到2050年, 其结果认为2°C温升发展轨迹在与常规发展模式相比下能够提供相同或更好的能源服务, 同时能够节约大概18万亿美元成本 (2010年美元净现值)。新近兴起的评估和一些最新研究认为, 将这些节约资金中的部分重新投资于自然系统脱碳领域 (Clarke et al 2014, Edenhofer et al 2014, Paustian et al 2016, United States Government 2016, Griscom et al 2017, Abramczyk et al 2017, Pratt and Moran 2010, Stanley et al 2018), 能够让我们进一步向1.5°C温升的发展轨迹靠近, 而且仍将剩余数万亿美元资金, 从而减轻气候政治问题。这种一体化、自下而上、以工程学为基础的节能潜力值得我们深入探索。

作为朝这一方向迈出的重要一步, Grubler等人 (2018) 2018年6月应用标准的一体化评估模型框架发布了一种1.5°C温升情景, 其全球能源效率远高于一体化评估模型领域此前的假设。这一“低能源需求”情景能够在2050年实现80%的可再生能源供应, 并更具体、更快速地规模化部署, 供应侧投资降低数倍, 大幅减轻政策依赖, 在需求领



域预留50%丰富的“安全裕度”，带来一系列重要的正面效应，并且不需要任何负排放技术。然而除了被动式建筑，这一令人印象深刻的结论似乎并未应用本文所描述的一体化设计。这一研究中的许多技术能效假设，包括运输工具、结构材料和交叉工业技术等，看起来均远远低于本文的假设（例如，假设新的2050年汽车燃料效率比笔者驾驶的2015年量产车型要高约58%，表明后者可以通过经济可行的方式进一步得到改进）。Grübler等人预计2050年全球一次能源需求为每年290-EJ，甚至比前一段中描述的思维实验认为的每年429 EJ更低，但却并没有使用先进的能效技术。因此，虽然很可能被各方认为不可能实现（正如笔者提出图3中假设时引发的争议一样），但Grübler等人首创的低能源需求情景仍是技术保守的。在这种低能源需求情景中系统地、全面地应用一体化设计可以使其结果更有说服力、更严谨、更具吸引力，并能够阐明经济可行的气候变化应对行动中设计领域极大的发展空间。相反，Grübler等人研究结果中的能源需求比我们的思维实验的预测更低，展示了这种后者未全面反映的以社会科学为基础的改进所具备的巨大影响。

#### 4. 对分析方法的启示

因为经济学和工程学领域看待问题角度的不同，许多气候分析人士错误地将后视镜当成了挡风玻璃（Lovins 2005）。经济学理论无法证明能效中更容易摘到的果子是会越来越少还是会以比采摘更快的速度生长<sup>20</sup>，但当前的实践经验有力地表明了后者的正确性。例如，经过数十年的努力，太平洋西北地区电气节约的实际成本大约降低了一半，但节约量却达到了1990年代的3倍（Northwest Power Planning Council 2016）。对服务于美国一半用电负荷的36个州的电力公司能效计划的研究发现，在多年5400个计划的工作中，节约每千瓦时的实际项目管理成本在2009-2013年保持

<sup>20</sup> 美国用水生产效率貌似也是如此。美国用水生产效率在1950-2010年间提高了3.31倍，比一次能源生产效率的2.31倍提升高43%。少有人注意到了这些革命。日益紧迫的能源/水资源的关系使这两个领域面临更大的压力。

“相对持平或下降”（Hoffman et al 2017<sup>21</sup>）。因此，即便不使用一体化设计，学习和规模化带来的影响仍能够快速降低能效成本，这至少足够抵消供给曲线的上升<sup>22</sup>。

即便缺乏可靠证据，理论学家和建模人员依然假定能效供给曲线将继续上扬。

比如，纽约州能源研究和开发署（NYSERDA）发现，纽约州在2003年可以实现的电气能效潜力几乎与1989年的相同，所以“经验表明，几十年来技术进步可能不仅仅是跟上提高基准能效的步伐”；然而，也许是为了迎合经济理论学家和避免被批评过分乐观，NYSERDA（2015）仅对LED等几项选定技术绘制了学习曲线。诚然，能效资源的普及面对着真正的和实质性的阻碍（Lovins 1992），而且美国目前的节电速度只是一次能源节约速度的一半，但这一差距即将缩小或消失（Lovins 2017）。

当然，过去的表现无法保证未来的结果。不过陶氏化学公司在1994-2010年间，以不到10亿美元的能效投资已节约了超过90亿美元，并且该数值还在不断上升，到2015年已达270亿美元（Almaguer 2015）。这一成果的基础在于该公司路易斯安那部门在1981-1993年间同时实现了节能和投资回报的增长，近900个项目中实现了平均超过200%的投资回报率，因为他们的车间工程师在十几年的时间里持续在完成原有节能目标前更快地发现新的节能机遇（Nelson

<sup>21</sup> Hoffman等人（2018）经两年多时间采集的数据集合显示（通过2018年7月20日的私人谈话，经由几位作者澄清），除了美国节电计划中规模最大、最成熟的1/3外，国家集合、数据质量问题、多样化及变动的评估细节以及有限的精确度尚未找到令人信服的“枯竭”效应证明，因此这一观点应被谨慎地解读。正如上述太平洋西北地区的案例那样，如果评估方法和假设相对稳定，一家电力公司或一个地区资源组合的长期趋势更有说服力，但遗憾的是此类数据集合非常罕见。除非发现更多与实际成本保持稳定或下降这些有限但清晰的证据相矛盾的情况，否则传统假设为能效的实际成本会随着购买人数增加而上升的看法都不合理，也是不正确的。

<sup>22</sup> 即使在简单且重要的组成部件水平上，能效成本也未必更高。在有些方面，能效供给曲线是下行的（Lovins 1996 n 14），而在其他方面，它们是持平的：例如，2010年最常见工业电机的北美交易价格与小于100马力机型的能效都不相关，仅与400马力机型勉强相关（McCoy 2011）。不过很难找到任何经济学文献承认或解释这种惊人的经验异常现象。

1993)<sup>23</sup>。即便在这样一个极度注重成本且技术熟练的产业,因为能源成本占其总成本的一半,公司非常关注能源应用问题,其能效资源供给曲线的下降速度依然超过了其上升的速度。当陶氏化学甚至在没有应用本文描述的一体化设计情况下就实现了以上令人印象深刻的节能量时,难道其他能源用户和应用不应给能效学习、普及和创新更多机会来赶超能效的“枯竭”速度吗?

今天的能效-可再生能源革命不仅是技术、设计、信息技术的结合,它反映的也不仅仅是新的经济模式的出现。今天的能源转型所展现的不是耕地和矿物等收益递减资源的李嘉图式短缺经济学,而是投资回报递增的当代富足经济学(Arthur 1999, 2004, Gritsevskiy and Nakicenovic 2000, Nagy et al 2013)。这些回报来自发展迅速的精细化技术的量化生产、快速的学习、网络的推动以及互相促进的创新。在这些新型因素的推动下,今天出现的经济可行的气候稳定手段展现了一种能源和土地应用方式的变革。这种变革不会因掌控者的迟钝而减缓,只会在颠覆者的雄心推动下不断加速(Rockström et al 2017, Abramczyk et al 2017),正如Jon Creyts指出的那样,会以软件而不是基础设施的发展速度与成本水平不断推进。

## 5. 结论

当今被大众了解和追求的能效只是能效资源总量中成本较高的一小部分。我们需要不断发现和探索剩余部分。能效是气候保护工作推进的基石,气候保护行动需要继续加快脚步,发现和应用整个能效资源是其中的关键。这意味着我们需要将当代净零能耗或能源净产出以及如一体化设计手段的深度改造建筑设计哲学拓展至工业、交通和出行领域,并加强它们与信息技术及城市形态间的联系;将我们的气候变化应对分析框架从不同的组成部分或设备扩大到整个系统;忘记传统理论的能效回报递减假设,以实际行动实现能效资源更大的投资回报。

## 鸣谢

作者衷心地感谢Norman Crowley、K G Du-leep、Mark Dyson、Jules Kortenhorst、Thomas Kåberger教授(热心提供了Ericsson的引文)、Ryan Laemel(也与Robby McIntosh参与了此文章的编辑和发表工作)、Jamie Mandel、Clay Stranger、Diana Üрге-Vorsatz教授和一位匿名审稿人的评论。本文阐述的仅为作者个人观点。本文的完成与发表未获得任何特别资助。作者的雇主落基山研究所([www.rmi.org](http://www.rmi.org))是一家由慈善家和企业资助的独立的非盈利组织。作者声明,本文的发布不涉及任何利益冲突。

## 开放研究者与贡献者身份信息

Amory B Lovins  <https://orcid.org/0000-0002-6362-3526>

<sup>23</sup> 发现并坚持推动节能潜力不断进步的主要障碍就是认为这些潜力并不存在的传统理论认识。

## 参考文献

- Abramczyk M 2017 Positive Disruption Rocky Mountain Institute ([https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/08/RMI\\_Report\\_Positive\\_Disruption\\_2017.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/08/RMI_Report_Positive_Disruption_2017.pdf))
- Agenbroad A, Creyts J, Mullaney D, Song J and Wang Z 2016 Improving Efficiency in Chinese Trucking and Logistics Rocky Mountain Institute ([https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/03/China\\_Trucking\\_Charrette\\_Report\\_2016.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/03/China_Trucking_Charrette_Report_2016.pdf))
- Almaguer J 2015 The Dow Chemical Company: energy management case study Ch 2 ed A Rossiter and B Jones Energy Management and Efficiency for the Process Industries (Arlington, VA: Center for Energy and Climate Solutions) doi: [10.1002/9781119033226.ch02](https://doi.org/10.1002/9781119033226.ch02)
- Anglo American, LLP 2004 Anglo platinum energy technology strategy opportunity scoping Innovation Laboratory at Rustenburg Platinum Complex (16–19 February 2004)
- American Institute of Physics 1975 Efficient Use of Energy: Part 1—A Physics Perspective ed W Carnahan et al AIP Conf. Procs. 25 (NY: American Institute of Physics)
- Arthur W B 1999 Complexity and the economy Science [284](#) 107–9
- Arthur W B 2004 Complexity and the Economy (Oxford: Oxford University Press)
- Autodesk 2011 Whole systems design: introduction to life cycle thinking <https://youtube.com/watch?v=L06Zg0FV4c>
- Ayres R, Ayres L and Pokrovsky V 2005 On the efficiency of US electricity usage since 1900 Energy [30](#) 1092–145
- Bartels M and Swanson M 2016 From retro to retrofit High Performing Buildings (Atlanta: ASHRAE) pp 26–34 Summer 2016 ([www.radiantprofessionalsalliance.org/HIA/Documents/Articles/HPB\\_Byron\\_Rogers\\_Building\\_Denver.pdf](http://www.radiantprofessionalsalliance.org/HIA/Documents/Articles/HPB_Byron_Rogers_Building_Denver.pdf))
- Bendewald M, Franta L and Pradhan A 2010 Autodesk AEC Headquarters and Integrated Project Delivery [https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OCS\\_Autodesk\\_Case\\_Study\\_AEC\\_HQ\\_Integrated\\_Project\\_Delivery\\_2010.pdf](https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OCS_Autodesk_Case_Study_AEC_HQ_Integrated_Project_Delivery_2010.pdf)
- Bendewald M, Miller D and Muldavin S 2015 Deep retrofit value guide for investors <https://rmi.org/insights/reports/calculate-present-deep-retrofit-value-investors/>
- Bendewald M et al 2014 Deep retrofit value guide for owner occupants <https://rmi.org/insights/calculate-present-deep-retrofit-value-owners-managers/>
- Benyus J 1997 Biomimicry: Innovation Inspired by Nature (New York: Harper Perennial)
- Blok K 2004 Improving energy efficiency by five percent and more per year? J. Ind. Ecol. [8](#) 87–99
- Bodlund B, Mills E, Karlsson T and Johansson T B 1989 The challenge of choices: technology options for the Swedish Electricity Sector Electricity ed T Johansson et al (Lund: Lund University Press) pp 883–947
- Bressand F 2007 Curbing Global Energy Demand Growth: The Energy Productivity Opportunity (San Francisco: McKinsey Global Institute) [https://mckinsey.com/media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability%20and%20Resource%20Productivity/Our%20Insights/Curbing%20global%20energy%20demand%20growth/MGI\\_Curbing\\_Global\\_Energy\\_Demand\\_full\\_report.ashx](https://mckinsey.com/media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability%20and%20Resource%20Productivity/Our%20Insights/Curbing%20global%20energy%20demand%20growth/MGI_Curbing_Global_Energy_Demand_full_report.ashx)
- Breyer C et al 2016 On the Role of Solar Photovoltaics in Global Energy Transition Scenarios 32nd Eur. Photov. Solar En. Conf. (Munich) (<https://doi.org/10.1002/pip.2885>)
- Brohard G et al 1998 Advanced customer technology test for maximum energy efficiency (ACT2) project: the final report Procs. Summer Study on Energy-Efficient Buildings (ACEEE)([207.67.203.54/elibsqli05\\_p40007\\_documents/ACT2/act2fnl.pdf](https://doi.org/10.2172/203.54/elibsqli05_p40007_documents/ACT2/act2fnl.pdf))
- Buhayar N 2009 Old Wine, New Bottles, Wall St. J. online. [wsj.com/article/SB10001424052970203987204574338684174566044.html](http://wsj.com/article/SB10001424052970203987204574338684174566044.html) (misprinting \$17.4 million as \$7 million of saved capex)
- Burr M and Lovins A 2014 Turning Energy Inside Out. Public Utilities Fortnightly [www.fortnightly.com/fortnightly/2013/03/turning-energy-inside-out](http://www.fortnightly.com/fortnightly/2013/03/turning-energy-inside-out)
- Chan-Lizardo K 2011 Big Pipes, Small Pumps: interface, Inc., Factor Ten Engineering Case Study [https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OCS\\_BigPipes\\_SmallPumps\\_Interface\\_2011.pdf](https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OCS_BigPipes_SmallPumps_Interface_2011.pdf)
- Clarke L et al 2014 Technology and US Emissions reductions goals: results of the EMF 24 modeling exercise Energy J. [35](#) 9–21
- Cook J 1989 Passive Cooling (Cambridge MA: MIT Press)
- Craig P, Gadgil P and Koomey J 2002 What can history teach us? A retrospective examination of long-term energy forecasts for the United States Annu. Rev. Energy Environ. [27](#) 83–118
- Cramer D and Lovins A 2004 Hypercars®, hydrogen, and the automotive transition Int. J. Veh. Des. [35](#) 50–85
- Creutzig F et al 2015 Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge PNAS [112](#) 6283–8
- Creutzig F et al 2016 Beyond technology: demand-side solutions for climate change mitigation Annu. Rev. Environ. Resour. [41](#) 173–98
- Creutzig F et al 2017 The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change Nat. Energy [2](#) 17140
- Creutzig F et al 2018 Towards demand-side solutions for mitigating climate change Nat. Clim. Change [8](#) 260–71

- Cullen J and Allwood J 2010 Theoretical efficiency limits in energy conversion devices *Energy* **35** 2059–69
- Cullen J, Allwood J and Borgstein E 2011 Reducing energy demand: what are the practical limits? *Environ. Sci. Technol.* **45** 1171–718
- DeCicco J, An F and Ross M 2001 Technical options for improving the fuel economy of US cars and light trucks by 2010–15 ACEEE <http://aceee.org/research-report/t012>
- DeCicco J and Ross M 1996 Recent advances in automotive technology and the cost-effectiveness of fuel economy improvement *Transp. Res. D* **1** 79–96
- Doan A 2012 Biomimicry's Cool Alternative: Eastgate Centre in Zimbabwe, <https://inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe/>
- Edenhofer O et al 2014 *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press) (<http://ipcc.ch/report/ar5/wg3/>)
- Empire State Building 2014 Sustainability and Energy Efficiency website including extensive resources <http://esbnyc.com/esb-sustainability>
- Energiesprong 2018 [energiesprong.eu](http://energiesprong.eu)
- EPA (US Environmental Protection Agency) 2016 Proposed Determination on the Appropriateness of the Model Year 2022–2025 Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emissions Standards under the Midterm Evaluation: Technical Support Document EPA-420-R-16-021 (<https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/420r16021.pdf>)
- ERI (Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission), Lawrence Berkeley National Laboratory, Energy Foundation China, and Rocky Mountain Institute 2017 重塑能源: 中国面向2050年能源消费和生产革命路线图研究 Reinventing Fire: China (Beijing: China Science & Technology Press) 5 vols, 2017; English edition Accepted, RMI (2018); Executive Summary in English at [https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/05/OCS\\_Report\\_ReinventingFireChina\\_2016.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/05/OCS_Report_ReinventingFireChina_2016.pdf), in Chinese at [http://rmi-china.com/static/upfile/news/nfiles/RF%20China%20Executive%20Summary%20-%20CN%20FINAL\\_1104.pdf](http://rmi-china.com/static/upfile/news/nfiles/RF%20China%20Executive%20Summary%20-%20CN%20FINAL_1104.pdf) in Japanese at [http://renewable-ei.org/en/activities/reports\\_20170131.php](http://renewable-ei.org/en/activities/reports_20170131.php)
- Ericsson J 1876 Contributions to the Centennial Exhibition (New York: 'The Nation' Press) p 553 reference courtesy of Prof. Tomas Kåberger
- Eubank H and Browning W 2004 Energy performance contracting for new buildings (San Francisco: Eley Associates) [www.10xe.org/Knowledge-Center/Library/D04-23\\_EnergyPerformanceNewBuildings](http://www.10xe.org/Knowledge-Center/Library/D04-23_EnergyPerformanceNewBuildings)
- European Climate Foundation 2010 Roadmap 2050 <http://roadmap2050.eu>
- Feist W 1987 Stromsparerpotentiale bei den privaten Haushalten in der Bundesrepublik Deutschland (Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt)
- Fickett A et al 1990 Efficient use of electricity *Sci. Am.* **263** 64–74
- Flin D 2016 Back to the Future: European power predictions *Power Eng. Int.* **24** 26, May <http://powerengineeringint.com/articles/print/volume-24/issue-5/features/back-to-the-future.html>
- FS-UNEP-BNEF 2018 Global Trends in Renewable Energy Investment 2018 Frankfurt School (FS-UNEP Collaborating Centre), UN Environment, Bloomberg New Energy Finance (Frankfurt: Frankfurt School of Finance and Management gGmbH) <http://fs-unep-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-report-2018>
- Gasser L et al 2017 High efficiency heat pumps for low temperature lift applications 12th IEA Heat Pump Conf. 2017 (Rotterdam) ([hpc2017.org/wp-content/uploads/2017/05/O.1.4.5-High-efficiency-heat-pumps-for-low-temperature-lift-applications.pdf](http://hpc2017.org/wp-content/uploads/2017/05/O.1.4.5-High-efficiency-heat-pumps-for-low-temperature-lift-applications.pdf))
- Gillingham K, Newell R and Palmer K 2009 Energy efficiency economics and policy *Annu. Rev. Resour. Econ.* **1** 597–620
- Granade H et al 2009 Unlocking Energy Efficiency in the U.S. Economy (McKinsey Global Institute) ([https://mckinsey.com/client\\_service/electric\\_power\\_and\\_natural\\_gas/latest\\_thinking\\_/media/204463a4d27a49ba8d05a6c280a97dc.ashx](https://mckinsey.com/client_service/electric_power_and_natural_gas/latest_thinking_/media/204463a4d27a49ba8d05a6c280a97dc.ashx))
- Graus W et al 2009 Global technical potentials for energy efficiency improvement IAEE Eur Conf. [http://aaee.at/2009-IAEE/uploads/fullpaper\\_iaee09/P\\_176\\_Graus\\_Wina\\_31-Aug-2009,%2012:55.pdf](http://aaee.at/2009-IAEE/uploads/fullpaper_iaee09/P_176_Graus_Wina_31-Aug-2009,%2012:55.pdf)
- Greene D and DeCicco J 2000 Engineering-economic analyses of automotive fuel economy potential in the United States *Ann. Rev. Energy Environ.* **25** 477–535
- Greil J 2018 private communication
- Griscom B et al 2017 Natural climate solutions *PNAS* **114** 11645–50 Gritsevskiy and Nakicenovic 2000 Modeling uncertainty of induced technological change *En Pol* **28** 907–21
- Grübler A et al 2018 A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emissions technologies *Nat. Energy* **3** 515–27
- Güneralp B et al 2017 Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050 *PNAS* **114** 8945–50
- Harrington E and Carmichael C 2009 Project Case Study: Empire State Building ([https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/Buildings\\_Retrofit\\_EmpireStateBuilding\\_CaseStudy\\_2009.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/Buildings_Retrofit_EmpireStateBuilding_CaseStudy_2009.pdf))
- Harvey L 2006 A Handbook on Low-Energy Buildings and District Energy Systems: Fundamentals, Techniques, and Examples (London: James and James)
- Harvey L 2013 Recent advances in sustainable buildings: review of the energy and cost performance of the state-of-the-art best practices from around the World *Annu. Rev. Environ. Resour.* **38** 281–309

- Hirst E and Brown M 1990 Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy Resour., Conservation Recycling 3 267–81
- Hoffman I, Leventis G and Goldman C 2017 Trends in the Program Administrator Costs of Saving Electricity for Utility Customer-Funded Energy Efficiency Programs, LBNL-1007009, <https://emp.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-1007009.pdf>
- Hoffman I et al 2018 The Cost of Saving Electricity Through Energy Efficiency Programs Funded by Utility Customers pp 2009–15 (<https://emp.lbl.gov/publications/cost-saving-electricity-through>)
- Hootman T et al 2012 Net zero blueprint High Performing Buildings (Atlanta: ASHRAE) pp 20–33 Fall ([www.hpbmagazine.org/attachments/article/12170/12F-Department-of-Energys-National-Renewable-Energy-Laboratory-Research-Support-Facility-Golden-CO.pdf](http://www.hpbmagazine.org/attachments/article/12170/12F-Department-of-Energys-National-Renewable-Energy-Laboratory-Research-Support-Facility-Golden-CO.pdf))
- Houghton D et al 1992 The State of the Art: Space Cooling and Air Handling (Rocky Mountain Institute/Competek)
- Howe B et al 1993 Drivpower Technology Atlas (Boulder CO: E Source) [www.esource.com](http://www.esource.com)
- International Energy Agency 2008 Energy Technology Perspective: Scenarios and Strategies to 2050 (<http://iea.org/media/etp/etp2008.pdf>)
- International Energy Agency 2010 Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency ([http://iea.org/publications/freepublications/publication/Captur\\_the\\_MultiplBenef\\_ofEnergyEfficiency.pdf](http://iea.org/publications/freepublications/publication/Captur_the_MultiplBenef_ofEnergyEfficiency.pdf))
- International Energy Agency 2017 Energy Efficiency Market Report 2017 (<https://iea.org/publications/freepublications/publication/market-report-series-energy-efficiency-2017-.html>)
- Johnson C and Walker J 2016 Peak Car Ownership Rocky Mountain Institute (<https://rmi.org/insights/reports/peak-car-ownership-report/>)
- Knapp R 2018 Assembling the Possible: The Lovins House and Its Lessons in editing
- Koomey J 1990 Energy Efficiency Choices in New Office Buildings: An Investigation of Market Failures and Corrective Policies PhD thesis University of California [www.mediafire.com/file/5c19qteclrov7a7/JGKdissert.pdf/file](http://www.mediafire.com/file/5c19qteclrov7a7/JGKdissert.pdf/file)
- Koomey J, Schechter D and Gordon D 1993 Improving Fuel Economy: A Case Study of the 1992 Honda Civic Hatchbacks Transp Res Rec 1416 115–23, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1416/1416-014.pdf>
- Koomey J, Sanstad A and Shown J 1996 Energy-Efficient Lighting: Market Data, Market Imperfections, and Policy Success Contemp. Ec. Pol. XIV 98–111
- Korytarova K and Ürge-Vorsatz D 2012 Energy savings potential in Hungarian public buildings. Scenarios for 2030 and beyond Intl Energy Workshop 2012 (Cape Town, 19–21 June)
- Koulos P 2009 Shades of green: a data centre case study Strategic Facilities 9 45–50
- Kranz U 2010 Interview with Ulrich Kranz on BMW Megacity Vehicle and Project i. 5 Aug. <https://bmwblog.com/2010/08/05/interview-with-ulrich-kranz-on-bmw-megacity-vehicle-and-project-i/>
- Loveday E 2011 Report: BMW i3 uses carbon fiber toKcut costs? Autoblog (<https://www.autoblog.com/2011/07/27/report-bmw-i3-uses-carbon-fiber-to-cut-costs/>)
- Lovins A 1976 Energy strategy: the road not taken? Foreign Affairs 5565–96
- Lovins A et al 1989 The State of the Art: Drivpower (Rocky Mountain Institute/Competek) incl 2-page supplementary scoping calculation 'Potential Savings in U.S. Drivpower (1986)'; summarized in Howe et al 1993 and later online editions, [www.esource.com](http://www.esource.com)
- Lovins A and Lovins L H 1991 Least-cost climatic stabilization Annu. Rev. Energy Environ. 16 433–531
- Lovins A 1992 Energy-Efficient Buildings: Institutional Barriers and Opportunities (Boulder CO: SIP-2 E Source)([http://rmi.org/Knowledge-Center/Library/1992-02\\_EnergyEfficientBuildingsBarriersOpportunities](http://rmi.org/Knowledge-Center/Library/1992-02_EnergyEfficientBuildingsBarriersOpportunities))
- Lovins A 1995 The super-efficient passive building frontier ASHRAE J. 37 79–81 ([https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/09/E95-28\\_SuperEffBldgFrontier.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/09/E95-28_SuperEffBldgFrontier.pdf))
- Lovins A 1996 Negawatts: twelve transitions, eight improvements, and one distraction Energy Policy 24 331–43
- Lovins A et al 2004 Winning the Oil Endgame (Rocky Mountain Institute)([https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/06/RMI\\_Winning\\_the\\_Oil\\_Endgame\\_Book\\_2005.pdf](https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/06/RMI_Winning_the_Oil_Endgame_Book_2005.pdf))
- Lovins A 2005 Energy End-Use Efficiency, InterAcademy Council ([https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OCS\\_Energy\\_End-Use\\_Efficiency\\_2005.pdf](https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OCS_Energy_End-Use_Efficiency_2005.pdf))
- Lovins A 2007 Advanced Energy Efficiency (five lectures), Stanford U School of Engineering (<https://youtube.com/playlist?list=PL702A1EE2F77F0504>)
- Lovins A 2008 Advanced Energy Efficiency for Buildings, 23 May course for Government of Singapore [http://e2singapore.gov.sg/data/0/docs/Seminar\\_Buildings.pdf](http://e2singapore.gov.sg/data/0/docs/Seminar_Buildings.pdf)
- Lovins A 2010 Integrative Design: a Disruptive Source of Expanding Returns to Investments in Energy Efficiency [https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/OCS\\_Integrative\\_Design\\_Disruptive\\_Source\\_of\\_Expanding\\_ROI\\_in\\_Energy\\_Efficiency\\_2010.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/OCS_Integrative_Design_Disruptive_Source_of_Expanding_ROI_in_Energy_Efficiency_2010.pdf)
- Lovins A 2011 Integrative Design: Amory Lovins at Autodesk University <https://youtube.com/watch?v=0RZjDN3v650>
- Lovins A and Rocky Mountain Institute 2011 Reinventing Fire: Bold Business Solutions for the New Energy Era (Vermont: Chelsea Green) [www.rmi.org/reinventingfire](http://www.rmi.org/reinventingfire)
- Lovins A 2013 Scratching the surface Public Utilities Fortnightly (<https://fortnightly.com/fortnightly/2013/03/scratching-surface>)

- Lovins A 2014 Efficiency: the rest of the iceberg The Colours of Energy ed G Kramer and B Vermeer (Amsterdam: Shell International ) pp 163–74
- Lovins A 2015a Oil-free transportation Proc. Am. Inst. Phys. 1652129–39
- Lovins A 2015b Reinventing fire: Physics + markets = energy solutions Proc. Am. Inst. Phys. 1652 100–11
- Lovins A 2016 Soft energy paths: lessons of the first 40 years RMI Solutions J. 9 4–8 (Summer)
- Lovins A, Creyts J and Stranger C 2016 Reinventing Fire: China: a clean energy roadmap for China's energy future Boao Rev. 1682–7
- Lovins A 2017 Why Are We Saving Electricity Only Half As Fast As Fuels? <https://forbes.com/sites/amorylovins/2017/04/25/why-are-we-saving-electricity-only-half-as-fast-as-fuels/>
- Lovins A 2018a Recalibrating climate prospects Clim. Change Essay, in review
- Lovins A 2018b Superefficient Vehicles and Easier Electrification, Transportation Research Board, Jan Annual Meeting, Session 466, Presentation pp P18–21428 (<http://amonline.trb.org/2017trb-1.3983622/t009-1.3999602/466-1.4125818/p18-21428-1.4116638/p18-21428-1.4125823?qr=1>)
- Lucon O, Ürge-Vorsatz D et al 2014 Buildings. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ed O R Edenhofer (Cambridge: Cambridge University Press)
- Marklines 2015 Recent trends in CFRP development: increased usage in European vehicles [https://marklines.com/en/report\\_all/rep1419\\_201506](https://marklines.com/en/report_all/rep1419_201506)
- McCoy G 2011 DOE Motor Master (2010 US dataset) reanalysis privately reported to author 10 March
- McGill A 2006 How Dallas Beat China pp 24–9 Dallas CEO (<https://resourcedesign.org/wp-content/uploads/2015/06/Article-from-Dallas-CEO-publication.pdf>)
- Metz B et al (ed) 2007 Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 (Cambridge: Cambridge University Press) ch 6 <http://ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- Meyer M 2015 Presseinformation: Weltweits Premiere für das House of Energy, [http://airoptima.de/app/download/21512561/Presseinformation+House+o+Energy\\_PassivhausPremium+301015.pdf](http://airoptima.de/app/download/21512561/Presseinformation+House+o+Energy_PassivhausPremium+301015.pdf)
- Muldavin S 2010 Value Beyond Cost Savings: How to Underwrite Sustainable Properties Green Building Finance Consortium <https://books.google.com/books?isbn=0982635702>
- Mundaca L, Ürge-Vorsatz D and Wilson C 2018 Demand-side approaches for limiting global warming to 1.5 °C Energy Efficiency doi: [10.1007/s12053-018-9722-9](https://doi.org/10.1007/s12053-018-9722-9)
- Munro and Associates 2015 BMW i3 Teardown Analysis Study: Reports Summary and Pricing Detail, esp. p 9 refs <http://leandesign.com/pdf/BMW-i3-Prospectus.pdf>
- Nagy B, Farmer J, Bui Q and Tramcik J 2013 Statistical basis for predicting technological progress PLoS One **8** e52669
- National Academies 2009a America's Energy Future <https://nap.edu/catalog/12091/americas-energy-future-technology-and-transformation>
- National Academies 2009b Real Prospects for Energy Efficiency in the United States [www.nap.edu/catalog/12621.html](http://www.nap.edu/catalog/12621.html)
- National Research Council 2002 Effectiveness and Impact of Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Standards (<https://doi.org/10.17226/10172>)
- National Research Council 2015 Cost, Effectiveness, and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light Duty Vehicles (<https://doi.org/10.17226/21744>)
- Nelson K 1993 Dow's Energy/WRAP Contest, Lecture at Industrial Energy Technology Conf. (Houston, 24–25 March)
- NITI Aayog and RMI 2017 India Leaps Ahead [http://niti.gov.in/writereaddata/files/document\\_publication/RMI\\_India\\_Report\\_web.pdf](http://niti.gov.in/writereaddata/files/document_publication/RMI_India_Report_web.pdf)
- Nørgård J 1989 Low electricity appliances—options for the future, at 125–172 Electricity ed T Johansson et al (Lund: Lund University Press)
- Northwest Power Planning Council 2016 Regional Conservation Progress Survey Results, 8 Nov, slide 18, <https://nwcouncil.org/media/7150689/2.pdf>
- NYSERDA 2015 Energy Efficiency and Renewable Energy Potential Study v. 2, #14–19 New York State
- Ogburn M, Ramroth L and Lovins A 2008 Transformational Trucks: Determining the Energy Efficiency Limits of a Class-8 Tractor Trailer [https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/05/RMI\\_Document\\_Repository\\_Public-Reports\\_T08-1\\_RMITransformational\\_Truck\\_Study\\_080709compressed.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/05/RMI_Document_Repository_Public-Reports_T08-1_RMITransformational_Truck_Study_080709compressed.pdf)
- Pacific Gas and Electric Company 1990–97 ACT2 Project Technical Reports, <http://pge.soutrnglobal.net/Library/Catalogues/Search.aspx> (click on Collections blue bar at top right, ACT2 collection is the first folder)
- Passive House Database 2013 ID #4239, [http://passivhausprojekte.de/index.php?lang=en#d\\_4239](http://passivhausprojekte.de/index.php?lang=en#d_4239)
- Paustian K et al 2016 Climate-smart soils Nature **532** 49–57
- Pratt K and Moran D 2010 Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential Biomass and Energy **34** 1149–59
- Price L et al 2017 Reinventing Fire: China—the role of energy efficiency in China's roadmap to 2050 (1-242-17) Procs ECEEE Summer Study <http://proceedings.eceee.org/visabstrakt.php?event=7&doc=1-242-17/>
- Regnier C 2017 'Beyond Widgets': systems EE for Utilities, LBNL [https://energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/cbi56\\_Regnier\\_041415.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/cbi56_Regnier_041415.pdf)

- RMI (Rocky Mountain Institute) 2007 Visitors' Guide (6th edn) [https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/Locations\\_LovinsHome\\_Visitors\\_Guide\\_2007.pdf](https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/Locations_LovinsHome_Visitors_Guide_2007.pdf)
- RMI 2012 Byron G Rogers Federal Office Building [https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/Buildings\\_ByronRogers\\_CaseStudy\\_2009.pdf](https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/Buildings_ByronRogers_CaseStudy_2009.pdf)
- RMI 2016 The RMI Innovation Center <https://rmi.org/our-work/buildings/pathways-to-zero/scaling-zero-net-carbon/rmi-innovation-center/>
- RMI 2017a Deep Retrofit Tools and Resources <https://rmi.org/our-work/buildings/pathways-to-zero/deep-retrofit-tools-resources/>
- RMI 2017b The Retrofit Depot <https://rmi.org/our-work/buildings/pathways-to-zero/deep-retrofit-tools-resources/deep-retrofit-case-studies/>
- RMI 2017c How-To Guide: net Zero Retrofit Technical and Cost Benchmark Studies [https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/09/RMI\\_Techno\\_Economic\\_Study\\_How\\_To\\_Guide.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/09/RMI_Techno_Economic_Study_How_To_Guide.pdf)
- Rockström J et al 2017 A roadmap for rapid decarbonization *Science* **355** 1269–71
- Rosenfeld A 1999 The art of energy efficiency: protecting the environment with better technology *Ann. Rev. Energy Environ.* **24** 33–82
- Rosenfeld A and Bassett D 1999 The dependence of annual energy efficiency improvements (AEEI) on price and policy IEA Intl Workshop on Technologies to Reduce Greenhouse Gas Emissions (Washington DC, 5–7 May) cited in Blok (2004), op cit supra
- Shepard M et al 1995 Space Cooling Technology Atlas (Boulder CO:E Source) [www.esource.com](http://www.esource.com)
- Sims R et al 2014 Transport, in Edenhofer et al (2014), op. cit. supra, IPCC
- Slavin T 2014 India's second biggest IT company inspires Google eco-friendly building *Guardian* 29 May, <https://theguardian.com/sustainable-business/india-it-infosys-google-eco-friendly-energy>
- Stanley P et al 2018 Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems *Agricult. Syst.* **162** 249–58
- Stasinopoulos P, Smith M, Hargroves K and Desha C 2009 Whole System Design: An Integrated Approach to Sustainable Engineering Earth Scan (London and Sterling VA)
- Stern N 2007 *The Economics of Climate Change: The Stern Review* (Cambridge: Cambridge University Press) <https://cambridge.org/core/books/the-economics-of-climate-change/A1E0BBF2F0ED8E2E4142A9C878052204>
- Sutherland R 1991 Market barriers to energy-efficiency investments *Energy J.* **12** 15–34
- Texas Instruments (TI) 2010 RFAB: Green Design <https://ti.com/corp/docs/manufacturing/RFABfactsheet.pdf>
- ULSAB-AVC 2002 Advanced Vehicle Concepts Overview Report [https://autosteel.org/media/Files/Autosteel/Programs/ULSAB\\_AVC/avc\\_overview\\_rpt\\_complete.pdf](https://autosteel.org/media/Files/Autosteel/Programs/ULSAB_AVC/avc_overview_rpt_complete.pdf)
- Umweltbundesamt 2017 Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 <https://umweltbundesamt.de/publikationen/klimaneutraler-gebäudebestand-2050-0>
- United States Geological Survey 1991 Mineral reserves, resources, resource potential, and certainty Suggestions to Authors of the Reports of the United States Geological Survey pp 95–7 <https://nwr.usgs.gov/techrpt/sta13.pdf>; full report at <https://pubs.usgs.gov/msb/7000088/report.pdf>
- United States Government 2016 United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization ([https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/docs/mid\\_century\\_strategy\\_report-final.pdf](https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/docs/mid_century_strategy_report-final.pdf))
- United States Green Building Council 2008 High Performance Building: Perspective and Practice (<https://www.youtube.com/watch?v=OiKhXrDds8U>) (also including 12 other projects)
- Ürge-Vorsatz K et al 2014 Measuring the co-benefits of climate change mitigation *Ann. Rev. Env. Res.* **39** 549–82
- Vaughn K 2012 Empire State Building Retrofit Surpasses Energy Savings Expectations [https://rmi.org/news/blog\\_empire\\_state\\_retrofit\\_surpasses\\_energy\\_savings\\_expectations/](https://rmi.org/news/blog_empire_state_retrofit_surpasses_energy_savings_expectations/)
- Westbrook P 2008 private communication
- Williams C et al 2012 Int. Experiences with Measuring and Quantifying the Co-Benefits of Energy Efficiency and Greenhouse Gas Mitigation Policies and Programs LBNL-5924E <https://eta.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbl-5924e-co-benefitssep-2012.pdf>
- Wilson C, Grübler A, Gallagher K and Nemet G 2012 Marginalization of end-use technologies in energy innovation for climate protection *Nat. Clim. Change* **2** 780–8
- Worrell E et al 2003 Productivity benefits of industrial energy efficiency measures *Energy* **28** 1081–98
- Yi A, Ramirez S, Bendewald M and Pradhan A 2010 Lovins GreenHome 1.0, Factor Ten Engineering Case Study [https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OCS\\_Lovins\\_Green\\_Home\\_2010.pdf](https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OCS_Lovins_Green_Home_2010.pdf)
- Zhou N et al 2016 Policy roadmap to 50% energy reduction in Chinese buildings by 2050 Procs ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings 9-1–9-12 [http://aceee.org/files/proceedings/2016/data/papers/9\\_1132.pdf](http://aceee.org/files/proceedings/2016/data/papers/9_1132.pdf)