

能量投入与成本视角的氢能技术 经济分析与产业发展政策

刘丹, 刘强

(中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 100732)

摘要: 本文对氢能发展的能量效益与技术经济成本进行了分析, 探讨了氢能发展的优劣势。在此基础上, 本文认为氢能产业的发展路径应包括: (1) 扩大应用范围, 并通过需求增长拉动相应基础设施建设的发展, 多使用低成本能源制氢; (2) 继续突破关键性产业技术, 实现技术成本的下降, 主要在制氢环节和燃料电池环节; (3) 寻找更能承担较高成本的用氢领域, 主要是应急电力保障; (4) 发展载氢液体燃料解决综合能源消耗尤其是在储存和运输中能耗过高的问题, 建议使用褐煤、煤层气等廉价化石能源来源的氢与碳捕捉、生物碳相结合的制取路线。

关键词: 氢能; 可再生能源; 碳中和

作者简介: 刘丹, 助理研究员, 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所能源安全与新能源研究室, 主要从事绿色金融研究。

氢能指的是用氢作为能源的载体，替代排放温室气体和具有自然垄断特性的化石能源。氢能概念可以追溯到1970年由约翰·博克里斯在美国通用汽车公司技术中心的演讲时提出的氢经济 (Hydrogen Economy)¹。氢经济指的是氢气取代石油成为支撑全球经济的主要能源后，整个氢能源生产、配送、贮存及使用的市场运作体系。上世纪70年代的石油危机，使氢能成为对化石能源的替代方案选项；在应对全球气候变化的新背景下，人们再度对氢能寄予厚望。

然而氢能情景目前为止还处于探索阶段。它作为一个新的能源路径，与它将要替代的化石能源相比还处于成本劣势。只有在经济上合理的技术路径，才有可能变成现实的产业与市场。本文以能量投入和生产成本的视角对氢能进行可行性分析，并在此基础上提出实现路径与政策路线。

一、氢能的基本逻辑在于碳减排和减少垄断

氢进入能源领域，首先是因为氢气是一种极高能量密度与质量比值的能源。但是氢能远景能否实现，还取决于从制氢、储氢、输氢到发电、汽车、炼钢等全产业链的综合能源效率和技术效率评价。

作为对比，传统化石能源的特点有：(1) 资源垄断特性，无论是化石能源还是水电、核电，都存在资源和控制权的稀缺性；(2) 大规模工厂式集中生产和网络化输配，存在明

显的规模经济；(3) 输配网络的自然垄断特性；(4) 由于前三个特点形成的垄断特性，即使按产业链进行分割阻止纵向一体化（比如煤、电分家），也有巨大的横向卡特尔或者合谋定价潜力；(5) 能源价格构成了宏观经济的价格基础，因此具备了影响通货膨胀水平的宏观经济影响，并对社会利益格局的结构具有决定性影响；(6) 由于石油天然气的国际市场特性，以美元定价的全球统一定价模式，使得油气市场具有典型的全球化特性，并受到国际经济波动的影响；(7) 化石能源引起严重的环境问题，除了是温室气体排放的主要来源，化石能源在开采、燃烧、转换过程中，也存在地质破坏风险、有毒有害污染物排放、PM_{2.5} 排放等问题。

对比以上特点，氢能的提出者希望通过其不同特征来解决这些问题：

(1) 氢燃烧后或者通过燃料电池的电化学反应形成水，没有温室气体的排放，也可以在钢铁工业中替代焦炭作为还原剂使用，同样也减少了温室气体的排放。当然，这需要是以绿色电力制氢为基础。

(2) 氢没有资源垄断特性，寄予厚望的绿氢来自于来源丰富的风、光等可再生能源电力电解水，生产既可以大规模工厂化制氢，也可以分布式小规模制氢，此外还可以有非电解水制氢（来自煤炭、天然气和工业过程），资源垄断性大为削弱。

(3) 因为资源和输配网络不具备垄断性，所以也不会形成垄断定价、卡特尔定价和大范围的统一定价，而是更多地取决于本地市

1.N. P. Brandon and Z. Kurban, Clean energy and the hydrogen economy, Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2017 Jul 28; 375(2098): 20160400. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5468720/>.

场的边际成本，因此切断了对宏观经济尤其是通货膨胀的传导机制。氢市场不会形成全球统一市场和统一定价。

综上所述，在理想情景即可再生能源电力制氢成本大幅下降的情景下，氢能为化石能源的退出提供了一个选项，并由此减少温室气体排放和缓解全球气候变化，能够有效解决使用化石能源所引起的相关经济与社会问题。

二、氢能的优劣势分析

实现氢能愿景的核心问题是成本，以下几方面构成了氢能目前的短板。

(一) 能量效率分析

在最终使用环节，也就是油箱 / 氢气箱

到车轮的转换效率上，氢燃料电池路线比汽油、柴油的内燃机路线有效率的的优势。根据汽油和氢气的高热值数据 (HHV)，燃料电池汽车仅需要内燃机汽车 70% 的能量来行驶相同的距离。

如果计算全过程的能量效率，氢能在交通领域应用的能量效率低于燃油内燃机路线。氢能是二次能源而非一次能源，自然界中并不普遍存在分子形式的氢，需要投入能量制取氢^[6]。因此，如果投入的能量超过氢本身可以提供的能量，从能量利用角度看就不划算。只有在利用弃风、弃光或者低谷电力等情况下，这种投入才可能是划算的。

首先，看制氢过程，它是典型的二次能源生产过程，需要较多的能量投入。这里比

表 1 现场制氢加氢站能源效率估算

每天加氢 (加油) 车辆数	辆	100	500	1000	1500	2000
车辆所需能量	吉焦	176	878	1755	2633	3510
氢气供应量	千克	1188	5938	11877	17815	23753
电解槽效率	%	70	75	78	79	80
交直流转换	%	93	94	95	96	96
电解能量	吉焦	3259	1195	2274	3332	4388
需要水	立方米	11	53	107	160	214
供水能源	吉焦	8	36	68	100	132
H ₂ 压缩能耗 (200bar)	吉焦	25	109	204	295	384
所需总能量	吉焦	292	1340	2546	3727	4903
需要持续供电	兆瓦	3	16	29	43	57
相对于供氢 HHV 的比率	%	173	159	151	147	146
供氢的能量净损耗	%	73	59	51	47	46
氢燃料电池车的能量效率	%	27	41	49	53	54

数据来源: Bossel, U. & Eliasson, B. (2003)^[3]

较电解水制氢，是氢能的根本追求。Bossel and Eliasson (2003) 对现场制氢的能量消耗做了测算，结果见表 1^[3]。测算结果显示，制氢的能量投入明显高于它能够提供给汽车的能量。现场制氢加氢站情景下，由于存在规模经济，氢燃料电池车辆的能量效率随车辆增加而提升，到每天加氢 2000 辆时总能量效率为 54%。

与使用汽油 / 柴油的内燃机相比，氢燃料电池路线在能量投入效率上有明显劣势。计算开采、加工和输配的能量损失后，燃油汽车（汽油或柴油）能量效率约为 70%^[2]。氢能较低的能量效率是因为制氢过程中，除了电解需要消耗能量之外，供电进行的交直流转换和供水都需要消耗能量，这些能量消耗都需要外部供给。而燃油的生产和输送过程所需的能量，基本上都来自于石油本身。虽然汽油和柴油在从油箱到车轮这一环节的能量效率低于氢燃料电池路线，但是燃油汽车发动机所输出的能量都来自燃油本身，从整个生命周期看都来自原油。而绿氢路线的氢燃料电池路线则相反，它需要从外界投入能量，输入的电能高于所能释放的电能，而且它还没有计算所用电力的发电能量效率损失。

其次，氢的运输环节，也同样存在效率劣势。在任何压力下单位体积氢气携带的能量明显低于甲烷（代表天然气）、甲醇、丙烷或辛烷（代表汽油）。在 800bar 压力下，气态氢达到液态氢的体积能量密度。但在任意相同压力下，甲烷气体的体积能量密度都超过氢气的 3.2 倍（忽略非理想气体效应）。甲醇、丙烷和辛烷（汽油）等常见液体能源载体的性

能分别是液氢的 1.8 至 3.4 倍（见表 2）^[5]。但在 800bar 或液态下，氢必须储存在压力容器或低温容器中，而其它的液体燃料则在通常大气条件下只需保存在简单的容器中。

表 2 氢和天然气的能量指标对比

	单位	氢	甲烷
常温常压密度	千克 / 立方米	0.09	0.72
重量高热值 (HHV)	吉焦 / 千克	142.0	55.6
体积高热值 (HHV)	吉焦 / 立方米	12.7	40.0

数据来源：Bossel, U., & Eliasson, B. (2003)^[3]

由于氢独特的物理化学特性，氢的储存、运输、移注（从一个容器到另一个容器）上的能量消耗都高于液态碳氢能源如柴油、汽油、甲醇等，也高于气态碳氢能源如甲烷、丙烷等。压缩气体形式储存，氢气压缩所投入的能量约为其高热值 (HHV) 的 7.2%。该数字涉及每小时 1000 千克氢气从 1bar 到 200bar 的 5 级压缩。对于 800bar 的最终压力，压缩能量需求约为氢气能量含量的 13%。该分析不包括供电系统中的电力损耗。液化形式储存对于小型液化厂来说，液化氢气所需的能量可能超过气体的 HHV 能量。但即使是最大的工厂 (10000kg/h)，液化过程也需要至少 30% 的 HHV 能量^[4]。

比较不同燃料的运输能耗：氢气 (200bar 压力)、液氢、甲醇、丙烷和辛烷（代表汽油）从炼油厂或制氢厂用卡车运输到消费者。总重为 40 吨（液氢为 30 吨）的卡车配备有合适

的储罐或压力容器。此外,满载时每100千米消耗40千克柴油,相当于每100千米每吨1千克。回程时油箱清空,燃油消耗相应减少。

液氢运输情况下,因液氢的密度也低于其他液体燃料,只有 $70\text{kg}/\text{m}^3$,略高于重型泡沫塑料的密度,大型搬运车(宽2.4m、高2.5m、长10m)的箱体的有效容积为 60m^3 ,只能装4.2吨液态氢,因此可以假设液氢运输船的总重量仅为30吨。

压力气体形式运输时,氢气压力罐只能在200bar至约42bar的压力范围内排空,以适应接收器的40bar压力系统。否则,必须使用压缩机将输送罐中的内容物完全清空到高压存储容器中。这不仅会使气体传输更加困难,而且还需要额外的压缩能量。因此,加压气体运输船只能运送80%的货物,而20%的货物仍留在储罐中并返回氢气工厂。

考虑每辆40吨卡车的设计可运载的最大燃料量,对于甲醇和辛烷两种液体燃料的运输,皮重负载约为26吨。在200bar的压力下,一辆40吨的卡车可以运载4吨甲醇或辛烷,或输送3.2吨甲烷。如今,在200bar的压力下,只能携带320千克氢气,扣除掉运输能量消耗,40吨卡车只能运送288千克氢气。这是氢气密度低以及压力容器和安全电枢重量的直接后果。另外,在回程中,空载的重型氢气卡车比轻得多的空载汽油运输车消耗更多的能量^[3]。

(二)电解制氢成本仍然较高

化石能源或者说碳氢能源有明显的规模经济,通过大规模集中式生产和大规模输配网络,可以有效地分摊成本,因此企业的成

本和每个消费者需承担的价格可以降到很低。氢尤其是绿氢在生产上存在一定的规模经济,但在输配上由于并不适合长距离管道运输,规模经济效应不明显。因此,与化石能源相比,氢能无法体现出相似的规模经济。

根据不同文献测算不同制氢方式的平准化制氢成本(LCOH),由于技术路径的差异,不同制氢方式的平准化制氢成本差别较大,不同计算方法产生的结果差异也很大。总体上看,我国当前制氢成本主要分布在10~60元/千克之间,煤制氢和天然气制氢的成本均低于电解水制氢技术,即清洁能源制氢的成本大大高于传统化石能源制氢技术,化石能源制氢是我国当前最具经济性的制氢手段。煤制氢的成本为10.803元/千克,天然气制氢成本为24.912元/千克,光伏和风电制氢成本最低也在30元/千克以上。煤制氢和天然气制氢发展时间长,是当前较为成熟的制氢技术,具有流程简单、装置可靠、单位投资成本低等优势。我国天然气制氢虽然较电解水制氢具有一定的成本优势,但是与煤制氢相比仍然价格较高,其原因主要来自于我国天然气资源供销缺口大,价格较高,天然气的原料成本高于煤炭的成本,导致天然气制氢成本较高。不考虑碳排放的成本,我国以煤制氢为主的化石能源制氢能否保持目前的成本优势,主要取决于未来煤炭价格水平以及各类制氢技术的发展水平^[1]。

(三)终端领域氢能替代的经济性

交通部门是最典型的用氢领域。本节利用美国和我国的购车和燃料价格数据,对比氢燃料电池汽车与燃油汽车、电动汽车的经济性。其中,美国能源价格数据采用目前推

表 3 美国加州与国内各种燃料典型车型每百公里燃料成本估算

	典型车型	燃料经济性 ¹	典型车型售价	燃料平均价格	百公里燃料成本 (美国)	国内能源成本 (人民币)	百公里能源成本(中国) 人民币
氢燃料电池车	2022 款丰田 Mirai LE	115.9 千米 / 千克氢气	中国： 标准版 74.8 万元 ² 美国： 50525 美元 ³	2128 美元 / 千克	18.36 美元 (132.20 元人民币)	未补贴： 70 元 / 千克 ⁴ 补贴后： 35 元 / 千克 ⁵	未补贴： 60.40 元 补贴后： 30.20 元
汽油内燃机汽车	中型沃尔沃 V90CCB6AWD 旅行车	10.6 千米 / 升	中国： 39.18 万元 ⁶ 美国加州 2021： 54900 美元 ⁷	5.46 美元 / 加仑 1.44 美元 / 升	13.58 美元 (97.81 元人民币)	8.43 元 / 升 ⁸	79.53 元
电动汽车	40 kWh 电池的 Nissan Leaf	6.0 千米 / 千瓦时	中国： 同档特斯拉价格 25.17 ~ 41.98 万元 ⁹ 美国 2023： 补贴后 21400 美元 ¹⁰	0.50 美元 / 千瓦时 (高峰价格)	8.33 美元 (60 元人民币)	2 元 / 千瓦时 ¹¹ (上海高峰电价)	33.33 元

注：人民币汇率以 2023 年 10 月 6 日牌价 7.20 元 RMB/ 美元计算。

数据来源：由相应脚注注明

1. 以美国加州为例，燃料经济性参考数据来自 Hydrogeninsight.

2. <https://m.xincheping.com/ev/139557.html>.

3. <https://www.h2weilai.com/cms/index/shows/catid/26/id/4194.html>.

4. 国际能源网. 2021 年上半年各国氢气价格统计，德国氢气价格 74.4 元 / 公斤，美国氢气价格，106.35 元 / 公斤，日本氢气价格 70 元 / 公斤，中国氢气价格 60-70 元 / 公斤。(单位：人民币) <https://www.in-en.com/keylist.php?q=%E6%B0%A2%E6%B0%94%E4%BB%B7%E6%A0%BC>.

5. 财政部等. 关于开展燃料电池汽车示范应用的通知(财建〔2020〕394 号)。 https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-10/22/content_5553246.htm.

6. <https://www.volvocars.com.cn/zh-cn/v/cars/v60/shop>.

7. <https://www.patrickvolvocars.com/new-models/volvo-v90-cc.htm>.

8. 北京 92 号汽油价格，8.43 元 / 升， <http://www.qiyoujiage.com/>.

9. <http://www.evzhidao.com/112345>.

10. <https://chejiahao.m.autohome.com.cn/info/10711622>.

11. 新华网. 新能源汽车充电涨价影响几何. 来源：人民日报海外版。 http://www.news.cn/fortune/2023-09/27/c_1129887953.htm.

动氢能汽车最为积极的美国加州的数据¹，各车型燃料经济性数据来自美国能源部的评估。利用这些数据可以得出美国加州燃料经济性条件下每百公里的燃料成本，并采用相同车型相同燃料消耗来测算在国内燃料价格条件下的百公里燃料成本，结果见表3。

由表3可以看出，目前氢价格条件下，氢燃料电池汽车的百公里燃料成本已经低于燃油汽车，但是由于氢燃料电池车售价显著高于燃油车和电动汽车，目前氢能汽车还不具备足够的经济性。从美国数据看，氢能汽车燃料成本高于汽油内燃机汽车，其原因在于美国没有大规模化石能源制氢，也没有进行明显补贴。此外，要实现基于可再生能源的氢能汽车的快速发展，还必须解决从制氢到终端用氢的输配问题。

(四) 发展优势分析

氢作为能源，一般不是通过化石燃料那样的燃烧过程来获取能量，而是通过燃料电池这种电化学形式，即非燃烧的方式获取电能形式的能量。技术上，氢燃料电池和电动机的组合明显高于燃油内燃机的效率²。如果氢能的综合成本降低到碳氢能源之下，氢能前景就会成为现实，这是氢能情景得以实现的基本逻辑。

氢能在技术经济上还有与绿色电力(风、光等可再生能源电力)的关系问题。从技术上，未来的新型能源体系可以在以可再生能源电力为主的电力体系和以绿电为基础的绿

氢体系之间建立协同关系。由于电力需要大规模输配网络，电力生产也有普遍的上网需求，对无法上网的剩余发电能力，制氢提供了一个储能的技术选项。氢能源比电力的优势主要在储存形式上，尤其是在交通领域。电动汽车无论如何都是要使用电池，因此会产生电池的回收处理问题。而氢能汽车以氢的电化学反应供给动力，没有严重的次生环境问题。由于绿氢需要依赖绿电，二者实际上是一个互补的关系，而不是完全的竞争关系。

三、氢能的前景分析

(一) 氢能产业链

氢能产业链主要包括上游制氢，中游氢储运、加氢站，以及下游多元化的应用场景。目前来看，其主要应用场景分布于交通、工业、发电以及建筑领域。

上游制氢方面，利用可再生能源的电解水制氢是目前众多氢气来源方案中碳排放最低的工艺，与全球低碳减排的能源发展趋势最为吻合。目前可再生能源电解水制氢是最有发展潜力的绿色氢能生产方式，电解水制氢主要有三种技术路线，包括碱性电解(AWE)、质子交换膜(PEM)电解和固体氧化物(SOEC)电解。其中碱性电解水制氢技术相对最为成熟、成本最低，更具经济性，已被大规模应用。PEM电解水制氢技术已实

1. Hydrogeninsight, <https://www.hydrogeninsight.com/transport/exclusive-fresh-blow-for-hydrogen-vehicles-as-average-pump-prices-in-california-rise-by-a-third-to-all-time-high/2-1-1351675>.

2. Truche, Laurent; Bazarkina, Elena F. (2019). "Natural hydrogen the fuel of the 21 st century". E3S Web of Conferences. 98: 03006. Bibcode:2019E3SWC..9803006T. doi:10.1051/e3sconf/20199803006.

现小规模应用，且适应可再生能源发电的波动性，效率较高，发展前景好。固体氧化物电解水制氢目前以技术研究为主，尚未实现商业化^[8,9]。

中游主要包括氢储运和加注。对于氢储运，高压气态储氢、低温液态储氢已进入商业应用阶段，而有机液态储氢、固体材料储氢尚处于技术研发阶段。其中，气态储氢是目前发展相对成熟、应用较广泛的储氢技术，但该方式仍然在储氢密度和安全性能方面存在瓶颈。长管拖车为主的气态运输，是当前较为成熟的运输方式。对于加氢站领域，到2022年年底，中国已建成加氢站310座，居世界第一¹。当前我国加氢站可实现除西藏、青海、甘肃外的省份全覆盖，同时又具有一定的区域集中性特征，位列前四的省份依次为广东省、山东省、江苏省和浙江省^[7]。

下游应用场景方面，目前工业和交通为主要应用领域，建筑、发电等领域仍然处于探索阶段。根据中国氢能联盟的预测，到2060年工业领域和交通领域氢气使用量分别占比60%和31%，发电领域和建筑领域占比分别为5%和4%²。对于交通领域，燃料电池汽车是交通领域主要的应用场景，未来有望实现高速增长。2020年受疫情等因素影响，我国燃料电池汽车产销量出现下降。2021年燃料电池汽车产量和销量分别同比增加49%和35%；2022年我国氢燃料电池汽车产量

累计分别完成3626辆，是2021年全年产量的2.04倍³，销量累计完成3367辆，同比增长112.3%。我国《氢能产业发展中长期规划（2021~2035年）》提出，到2025年我国燃料电池车辆保有量目标为达到5万辆。对于工业领域，氢不仅作为工业燃料，也可以作为工业原料帮助工业减碳发展。目前氢在钢铁冶金领域的应用还处于探索阶段。在化学工业中主要应用灰氢（来自煤炭和天然气）作为原料。对于发电领域，在美国，氢发电主要应用在应急电力上，在国内还处于示范阶段。对于建筑领域，氢能供热供暖在建筑中不占优势，初期在建筑中主要采用混合氢气。目前在山东省有建筑取暖用氢的示范工程。

（二）发展机制分析

氢能的基础是氢产业，与相关产业链共同形成氢产业生态。作为一项新兴技术，它从项目示范到形成覆盖全社会的大规模产业生态，是一个复杂的、且不是必然实现的过程。新兴技术在产业化过程中，随着应用规模的扩大，成本会逐步下降。因此，如何扩大应用规模是至关重要的难题。电动汽车的发展过程可供借鉴：先有一个小范围内的充电设施，电动汽车数量随之增长，然后再有更大范围、更多的充电桩，之后再有更多的电动汽车，依此循环扩张形成良性循环。在这一过程的同时，电动汽车生产规模随之扩大，并随着生产规模的扩大，“学习曲线”开

1. 国际氢能网. 中国石油石化：国内氢能产业布局综述，2023-06-15. 来源：海通国际. <https://h2.in-en.com/html/h2-2426020.shtml>.

2. 前瞻网. 中国氢气应用分布与需求前景分析：未来工业领域用氢依旧占主导地位，2021-07-12. <https://m.ofweek.com/hydrogen/2021-07/ART-180826-8420-30509108.html>.

3. 中汽协. 2022年中国氢燃料电池汽车产量及销量分析. https://www.sohu.com/a/647384640_350221.

始发挥作用，同时也有越来越多的边际性技术革新与颠覆性技术突破，使得电池性价比越来越高，续航里程越来越长，总体平均成本日益下降，从而形成产业发展与产业生态的良性循环。

氢能的大规模利用需要依托氢能产业的相关工业技术和构成从制氢到终端设备消费的整个产业生态，或者说产业链。氢产业生态包括制氢—储氢—输氢—加氢站—燃料电池—氢能汽车/氢能发电，以及相应的标准与安全设施，其中每一步又需要从材料、设备到数字化运行等支撑体系，比如电解制氢对应着各种电力生产，电解和燃料电池都需要膜技术和关键金属催化剂技术等等。

实现氢能大规模利用，比实现电动汽车普及的过程还要复杂。在电动汽车案例中，电力来自于现有生产体系，能源成本明显低于燃油汽车，其关键突破点只有电池单次充电续航里程与充电桩网络普及性两个因素。对于氢能来说，氢燃料电池方面，在汽车领域目前成本还远高于燃油汽车和电动汽车，在发电领域还远高于其他形式的发电形式；在基础设施网络方面，输氢网络也远比充电桩网络复杂，因为它需要从制氢开始新建输配网络，无论是管线输氢、液体输氢、还是化工品输氢，都不像充电桩那样只要从电力线路里再拉出一根线即可，它需要建设新的输配能力，而且都需要巨大的投资。也就是说，目前情况下，或者说它发展的初始阶段，氢能在制备（制氢）、输配、利用三个环节，都存在与替代品的不经济性，都不具备大规模推广的条件。

如果能在所有环节同时取得进步，以实

现氢能尤其是基于绿氢的氢能大规模利用，几乎是不可能完成的任务。比较可行的办法是，无论是绿氢还是非绿氢，可以先结合现有的工业产能与输配网络，扩大氢在交通、工业、能源电力、民用方面的市场需求，以需求扩张带动氢基础设施的建设，同时利用特定的产业扶持政策支持不同生产技术路径的氢生产，最终带动关键技术的突破和产业化，实现绿氢（包括制氢、储氢、输氢、用氢）成本相比于非氢燃料的经济性。

（三）发展路径探讨

氢能大规模利用能否实现，取决于全产业链的综合成本能否下降到与替代产品相比有竞争力的水平上，此乃经济学中典型的技术进步议题。基于前述分析，氢能要破解以下几方面的制约。

1. 扩展制氢技术路线，通过多技术路线实现低成本制氢、用氢，并通过需求增长拉动相应基础设施建设的发展。

为实现这一目标，现实的途径是先使用低成本的制氢路线。可以在有富余生产能力的地方使用工业副产氢和低质褐煤，也可以使用低成本的非化石能源电力制氢。产能富裕时期的水电、核电和超出上网能力的弃风、弃光电力等，都可以用来制氢。这时的制氢成本就具有一定的经济性。伴随着较低成本氢供应的增长，用氢范围可以随之扩展，并推动储配设施的发展。

2. 继续突破关键性产业技术，实现技术成本的下降。

在制氢领域，可以通过采用成本更低的设备、关键材料和催化剂，改进制氢工艺，提高制氢的转换效率，降低制氢成本。在燃

料电池领域，提高氢燃料电池的电化学转换效率、采用更低成本的膜技术和催化剂技术等都有助于提高能源效率，改善这一技术路线的经济性。此举需要颠覆性的技术创新，这种创新有一定的偶然性，也需要基础研究的进展。

3. 寻找更能承担较高成本的用氢领域。

目前，氢燃料电池储能电站/应急电站是一个可以承受更高成本的用氢领域。氢作为能源不仅可用于交通运输行业，它也可以作为储能电站的电化学燃料，这一领域是氢能可能首先发挥作用的地方。因为作为应急电力供应，安全保障是首要目标，可以承受较高的成本。氢燃料电池作为应急电力，在应急和安全性上都优于锂电池储能电站和柴油发电机。因此，有条件的地方可以试点在医院和要害部门建设氢燃料电池应急电站，作为推广氢能的一个示范，以后可以伴随着制氢成本的下降逐步推广。

4. 发展载氢液体燃料解决综合能源消耗，尤其是在储存和运输中能耗过高的问题。

理想的能量载体是沸点高于 80℃、凝固点低于 -40℃ 的液体，这种能量载体在正常气候条件下和高海拔地区保持液态。汽油、柴油和甲醇是此类燃料的典型例子。

常见的十种液态含氢液体：甲醇、乙醇、二甲醚 (DME)、乙基甲基醚、2-甲基丙烷 (异丁烷)、2-甲基丁烷 (异戊烷)、乙基苯、甲基环己烷 (甲苯)、辛烷、氨，每立方米所含的氢气都比相同体积的液化或 800bar 压缩氢气中所含的氢气多。每立方米氨甚至含有 136 千克氢。此外，碳氢化合物所携带的能量比相同体积的液态氢中所包含的能量大

二倍到四倍不等。如果想要输配氢气，最好的方法是将其与碳结合成液体燃料。从碳捕捉获得的碳或者生物碳与氢合成甲醇或其他含氢液体，无疑具有更好的经济性。目前已有日本与澳大利亚之间的氢能合作项目，日本新日石公司在澳大利亚使用专利电解技术生产氢气，并由一座 250 千瓦太阳能发电系统供电。工厂产出的氢气为气态，然后先以液态的甲基环己烷 (MCH) 形式储存和运输，运至日本后再提炼转化为氢气。

四、氢能产业技术经济政策讨论与建议

氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源，正逐步成为全球能源转型发展的重要载体之一。为助力实现碳达峰碳中和目标，深入推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系，我国需要促进氢能产业高质量发展。发展氢能也是我国紧跟国际前沿产业科技发展，培育新兴产业的重要领域。要实现氢能的发展和大规模利用，需要从氢能的技术经济特点出发制定适宜的产业政策来规避技术劣势、发挥技术优势，最终为氢能发展和大规模应用创造条件^[10]。

从国际看，全球氢能全产业链关键技术趋于成熟，燃料电池出货量快速增长、成本持续下降，氢能基础设施建设明显提速，区域性氢能供应网络正在形成。从国内看，我国是世界上最大的制氢国，年制氢产量约 3300 万吨，其中，达到工业氢气质量标准的约 1200 万吨。我国可再生能源装机量居全球第一，在清洁低碳的氢能供给上具有巨大潜力。国内氢能产业呈现积极发展态势，已初

步掌握氢能制备、储运、加氢、燃料电池和系统集成等主要技术和生产工艺，在部分区域实现燃料电池汽车小规模示范应用。

但是从总体看，我国氢能产业仍处于发展初期，相较于国际先进水平，我国在氢能领域核心技术仍有一定差距。为推动氢能顺利由试点示范走向大规模商业化应用，亟须在各个环节解决氢能作为能源的技术经济性，其关键在于通过扩展应用领域来实现氢能利用的规模经济，从而有效地降低氢能的综合成本。针对氢能技术经济特性与产业技术创新方向，我国需加强顶层设计和统筹谋划，有计划、有步骤地提出氢能发展的产业激励政策和中长期的政策退出机制，给予氢能产业明确的政策预期和市场容量预期，进一步提升氢能产业创新能力，不断拓展市场应用新空间，引导产业健康有序发展。具体建议如下。

建议一： 出台和完善相关政策，支持各种来源的氢在交通领域和钢铁领域的应用，无论是煤制氢还是化工副产氢。通过成本较低的灰氢和副产氢来分摊储运配基础设施的成本，为拓展氢基础设施网络创造条件，为将来绿氢的广泛应用打下基础。

建议二： 建立氢能产业技术国际合作机制，及时掌握先进氢能技术。氢产业实际上是一个国际化程度很高的新能源领域，日本 - 澳大利亚、欧洲 - 北非、美国 - 日本等都建立了跨国合作机制。目前低碳能源国际合作受到广泛重视，可以结合我国巨大的市场潜力与美日欧等先进企业和研发机构建立国际性的合作机制来推动和共享氢能产业技术创新，在核心科技尤其是贱金属和非金属

催化、质子交换膜等能够大幅降低氢能生产成本的领域上紧跟世界先进水平，最终通过技术进步来提高氢能的燃料经济性。

建议三： 针对目前氢能综合成本较高的特点，可以研究制定应急部门和医疗领域氢能应急电站的发展规划，建议财政支持若干氢燃料电池路线应急电站示范项目。此举既对氢能发展起到良好的促进作用，也有利于提升医疗系统和应急部门的抗风险能力，提高应急和要害部门的应急处置能力（比如 2021 年郑州水灾期间，医院置于地下的备用电站被水淹没导致全医院甚至 ICU 停电）。

建议四： 鉴于高含氢液体储运氢比储运气态氢有明显的成本优势，建议有关企业发展含氢液体能源相关技术和产业，如甲醇燃料电池、绿氨生产与终端氨制氢、结合二氧化碳捕捉的绿氢制绿色甲醇等技术和产业应用等。我国是化工生产大国，有良好、完备的制氢、制甲醇、制液态烃和氨的工业基础，在此基础上在钢铁、水泥、火电等高碳排放引入碳捕捉技术路线，并与化学工业相结合，生产低碳高氢的醇、烃、氨产品，将为我国和世界贡献出一条中国特色的工业化降碳产业技术路线，为我国实现 2060 年前碳中和目标和世界的净零目标做出贡献。

参考文献：

- [1] 廖振宇. 中国氢能供给的经济性评价研究 [D]. 中国社会科学院大学硕士学位论文, 2023.
- [2] Aiman Albatayneh, Mohammad N. Assaf, Dariusz Alterman, et.al. Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles[Z]. Environmental and Climate

- Technologies 2020, 24(1):669-680.
- [3] Bossel, U., & Eliasson, B. Energy and the Hydrogen Economy[EB/OL]. https://afdc.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf,2003.
- [4] KPMG. 一文读懂氢能产业 [Z]. <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/cn/pdf/zh/2022/09/understand-the-hydrogen-energy-industry-in-one-article.pdf>,2022.
- [5] N. P. Brandon and Z. Kurban. Clean energy and the hydrogen economy[Z]. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2017.
- [6] Truche, Laurent, Bazarkina, et.al. Natural hydrogen the fuel of the 21st century[Z]. E3S Web of Conferences.2019, 98: 03006. Bibcode:2019E3SWC..9803006T.
- [7] 时璟丽. 关于后补贴时代可再生能源发展机制的思考 [J]. 风能, 2019,9.
- [8] 俞红梅, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议 [J]. 中国工程科学, 2021,23(2):146-152.
- [9] 衣宝廉, 等. 氢燃料电池 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [10] 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所“能源转型与能源安全研究”课题组. 中国能源转型: 走向碳中和 [Z]. 2021.

Technological Economics and Development Policy of Hydrogen in the View of Energy Input and Cost Analysis

Abstract: This article analyzes the energy inputs and technical economic costs of hydrogen energy, and discusses the advantages and disadvantages of hydrogen. On this basis, this article believes that the development path of the hydrogen should include: (1) Expand the scope of application, promote the development of corresponding infrastructure construction through demand growth, and use more low-cost energy to produce hydrogen; (2) Continue to break through key industrial technology to reduce cost, mainly in the hydrogen production and fuel cell sectors; (3) Find hydrogen utilization areas that can bear higher costs, mainly in emergency power guarantee; (4) Develop hydrogen-carrying liquid fuel to solve the problem of high comprehensive energy inputs, especially in storage and transportation. It is recommended to use a production route that combines hydrogen from cheap fossil energy sources such as lignite and coal bed methane with carbon capture and biocarbon.

Key words: Hydrogen Energy; Renewable Energy; Carbon Neutrality