

Views & Comments

氢燃料电池——重型车辆内燃发动机的替代者

Kevin Kendall^a, 叶思宇^{b,c}, 刘志祥^{d,e}^a Adelan Ltd., Birmingham B17 9HD, UK^b Huangpu Hydrogen Energy Innovation Center, School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China^c SinoHyKey Technology Company Ltd., Guangzhou 510760, China^d Yunfu Center of Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Yunfu 527326, China^e Guangdong Sino-Synergy Hydrogen Energy Technology, Yunfu 527326, China

可控燃烧也许是人类最古老的发明，几千年来为人类提供了食物、温暖、保护和动力。例如，20世纪，它使英国的农业劳动力削减到接近人口的1%，取代了19世纪和更早时期马匹和人力的主导地位[1]。然而，像所有伟大的发明一样，类似于现在充斥着全球的塑料，内燃机的成功应用在给许多国家带来财富的同时，也伴随着气候变化和空气污染等灾难[2]。

1997年，全球从内燃机汽车过渡到带有小型电池和电动机的混合动力车[3]，这在很大程度上减少了空气污染。然而，由于欧洲力图在21世纪实现全电动交通，因此新目标就是取代柴油车和汽油车[4]。2009年，几款不同的电动车型——包括电池电动车和氢燃料电池车——经过了测试，结果证明它们可以作为内燃机汽车的实用替代品，尽管其生产效率低，价格昂贵；这是英国电动车的一个转折点。到2021年，英国道路上的电池电动车（BEV；图1[5]）普及率达到1%，现在几乎每年都在翻倍增长[6]。尽管如此，现行使用中的大型电池（如100 kW·h）难以在居民家中过夜充电，而且许多家庭都缺乏家庭基础设施。

随着20世纪90年代BEV的发展，Ballard在加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华市发明了氢燃料电池公交车[7]。从那时起，氢燃料电池公交车上安装了一个大型电池，以帮助加速和制动，现在被称为氢燃料电池电动汽车（HF-

CBEV）。图1[5]比较了HFCBEV和纯BEV的设计。新颖的HFCBEV概念的进展比BEV晚了几年，但对于重型、高使用频率的车辆，HFCBEV的优势越来越明显，目前世界各地有30 000辆HFCBEV在进行演示和测试[8]。本文严格比较了BEV和HFCBEV在竞争方面取得的进展和潜力。

亚洲国家通过定义HFCBEV的技术空间、消费技术产品，并且有组织地引进电动汽车技术，为HFCBEV的发展指明了前进的方向，而西方国家在该领域的进展却有所拖延，因为西方化石燃料巨头企业和汽车公司依旧依赖内燃机的运作[9]。以往对燃料电池的预测过于乐观，包括Ostwald在1894年预测20世纪将是“电化学燃烧的时代”[10]。尽管从那时起情况发生了很大变化，但我们若不能充分了解目前的机会，可能会在绿色氢气方面犯同样的错误。本文提出了一个更合理的时间表，列出了用HFCBEV技术取代内燃机的计划时间，特别是在高使用率的出租车、重型公交车和卡车领域，以促进在能源和运输系统分析上达成共识。

实质上，这里重申的论点已经反复争论了有两个世纪之久，即电气设备最终将取代内燃机，尽管内燃机有以下优势：

- 用于燃烧的化石燃料的获取成本低；
- 不纯的燃料仍然可以在内燃机中燃烧，而纯度对电

化学转换至关重要；

- 电化学装置的大规模生产还不能成功地与柴油机和其内其他内燃机竞争；
- 在重量、成本和充电时间方面，电能储存一直是个长期的问题。

电动汽车的第一个基本优势是，与内燃汽车相比，汽车的能源需求减少了一半（基于标准驱动循环工况）[5]。其次，可再生电力越来越容易获取，可用于电解水来制备、储存绿色氢气以供汽车使用，这可以将碳和其他排放物减少到接近于零，而且电力价格也在逐年降低。

从图 1 [5]所示的标准驱动循环测试结果中我们得出的主要结论（我们在车辆广告中常见到的是每百公里耗油量，但在这里用标准单位 $\text{MJ}\cdot\text{km}^{-1}$ 表示）是，由于汽车以零速度回到了起点，因此没有做净功。这不是通常所说的“效率”[11]，因为效率是牵引能量输出除以燃料能量输入的比值。图 1 [5]描述了每公里的能量消耗，而不是能源效率，后者的单位是百分比。

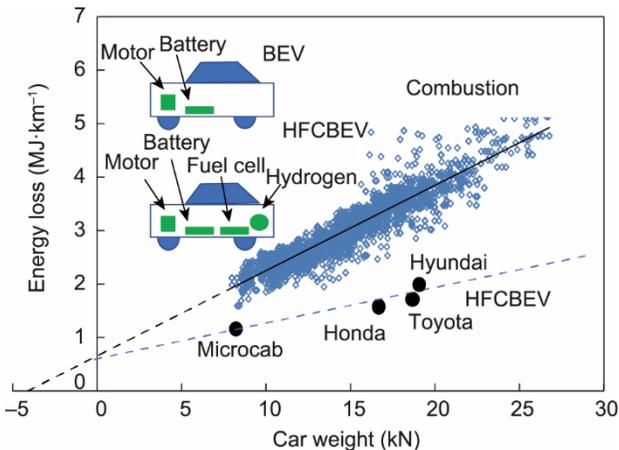


图 1. 2010 年中国 3800 种内燃汽车的能量消耗结果，显示内燃汽车的能量消耗是以燃料电池/氢气为动力的 HFCBEV 汽车的两倍[5]。HFCBEV：氢燃料电池电动汽车。

因此，汽车中的损耗机制至关重要。图 1 中所示的理论线十分显眼[5]，当每公里消耗的能量与车辆重量相比较时，它通过结合汽车中不同的损耗机制得到一个线性库仑摩擦图。在中国，对 3800 辆不同型号的汽油车进行了标准的驾驶循环测试，将损失的能量（单位： $\text{MJ}\cdot\text{km}^{-1}$ ）与重量（单位： kN ）做了比较。汽油车是由内燃机驱动的；对这些能量损失（绘制在上面的线）与新型 HFCBEV 的能量损失（绘制在下面的线）在图 1 中进行了比较[5]。该图显示，在同等重量的情况下，内燃机汽车的损失要比 HFCBEV 大得多。然而，为了将成本降低到内燃机汽车的水平，HFCBEV 的产量要达到数百万台，但

目前没有做到。

有些车辆损失与重量无关，如车窗电机损失，而汽车轮胎摩擦力与重量呈线性关系。理论曲线是通过添加 10 个不同的损失函数得到的，令人惊讶的是，这条曲线是一条直的库仑线。重量是至关重要的；化石燃料消耗增加的主要原因之一是过去 50 年中汽车重量的增加，这几乎使燃料消耗增加了一倍[12]。因此，在同等重量下，HFCBEV 表现出的能量损失是内燃机汽车的一半（图 1 [5]），而通过将重量从 30 kN 降至 8 kN ，HFCBEV 的能量损失又减少了两倍。同样也测量了大型卡车和公共汽车的能量损失[13]，结果显示都落在相同的氢燃料电池电动曲线上，表明重型 HFCBEV 比内燃机卡车和公共汽车有所改进。

Elon Musk 声称，与锂电池汽车相比，氢燃料汽车“愚蠢得令人难以置信”[14]；然而，他的论点是不正确的，因为氢气和锂设备都有已知的电化学优势，可以减少能量损失。在峰值功率下，这两种设备都会产生大约一半的电能和一半来自内部电阻损失的热量。尽管 BEV 有几个百分点的优势，但典型 BEV 的结果几乎与 HFCBEV 在图 1 [5]中的曲线吻合。由图 1 [5]可知，在标准驱动循环测试中，HFCBEV 与 BEV 的表现相似，两者的每公里能耗约为内燃车的一半。尽管如此，Musk 对制造氢气会产生巨大能量损失的看法是正确的，大约 20% 的能量是通过电解水损失的，而且只有绿色氢气才是有意义的。然而，应该注意的是，特斯拉汽车用英国电网电力充电，平均只有 50% 使用了绿色能源。

在实践中，2008 年在英国展示的氢燃料电池/锂电池混合动力汽车（图 2）以最小的成本表现出最佳的性能。其他车辆，如丰田 Mirai，起初使用的是镍氢电池，但现在已变为锂电池，而超级电容器也可用于存储电能。将氢燃料电池与锂电池结合起来，为从内燃车过渡到电动车的问题提供了一个意想不到但却十分有用的解决方案。与 BEV 相比，HFCBEV 具有更长的续航能力和更快的燃料加注速度，因此很适合出租车、货车、卡车和公共汽车等车辆在 500 km 等长距离内 18 h 轮班运行。

然而，人们发现，电池本身是移动电话、笔记本电脑和许多其他小型应用的理想选择。自 1999 年以来，中国一直是全球电动自行车的领导者。由于中国一些地区对内燃机自行车的限制，2009 年电动自行车的市场有所增长。目前，中国每年销售约 1700 万辆电动自行车，并且全国电动自行车保有量近 3 亿。铅酸电池因其成本低和可回收在市场上占主导地位，但其他类型的电池现在也在争相发展。电动自行车的这一进步预示着中国引领全球 BEV 制

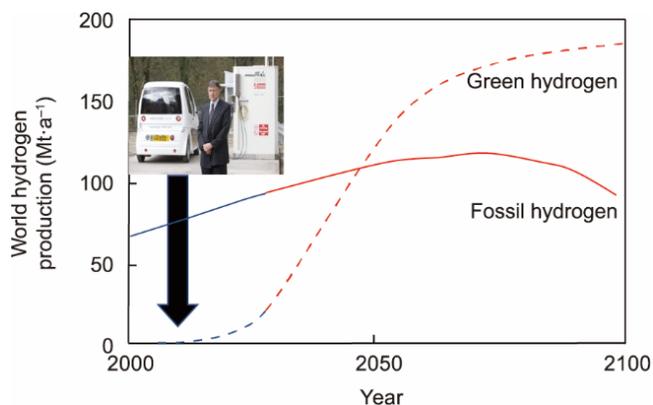


图2. 化石氢气（实线）和绿色氢气（虚线）过去的增长（蓝色）和未来（红色）的预期增长；预计前者将在21世纪晚些时候被后者超越。（插图）Kendall博士在2008年用5辆HFCBEV开启了英国第一个绿色氢气站。

造，2021年中国售出290万辆混合动力车，占该年中国汽车销量的11.1%。尽管如此，挪威仍是迄今为止电动汽车普及率最高的国家，其中BEV占年销售量的49%，人们预测到2025年这一比例将达到100% [15]。问题是，为什么电池只限于小型车辆，而且几乎每天只使用约一个小时？

尽管电池性能一直在提高，但电池重量和充电时间仍然是需要解决的关键问题。通常情况下，一辆BEV可以连续运行2~4 h，但随后需要长时间的充电。目前，BEV不能与柴油动力汽车竞争，后者只需要5 min的时间加油就可以行驶18 h。在高使用率的重型车辆中，氢能体现出这一优势。中国现在主导着氢能公交车和卡车的制造，在2022年2月的北京冬奥会上，福田汽车的655辆HFCBEV公交车需要 $28 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的纯氢来运行。在其他城市，如佛山，有1400辆HFCBEV公交车在运行。预计到2025年，中国HFCBEV的总数量约为50 000~100 000辆，2030—2035年为8万~100万辆[16]。

目前，向HFCBEV过渡的关键问题是氢气燃料的碳足迹，因为全世界生产的氢气大部分来自化石燃料。图2中的实线显示了全球主要的“化石氢”产量，其主要来自石化工厂，从2000年的 $60 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$) 上升到2022年的 $80 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ；之后，随着气候危机控制措施的生效，预计这一数字将达到峰值。图2中的虚线显示了新型绿色氢气的生产，据说Kendall在2008年开设了英国第一个绿色氢气站，可为5辆HFCBEV提供燃料，但其需求几乎为零（图2）。当时的绿色氢气来自于生物质，成本相当高；然而，现在多余的风力发电很便宜，可以用来电解水，制造经济的绿色燃料。生物质、废水和其他来源的绿色氢气也是可能的。中国计划每年从可再生能源中生产100 000~200 000 t绿色氢气，并在2025年前建立1000个

绿色氢气加注站[17]。

在世界范围内，许多国家和城市都在努力引进电动交通工具，现在主要是以BEV为主，目前奥斯陆在这些城市中处于领先地位。亚洲与西方之间形成了鲜明的对比：英国在2021年制造了10万辆BEV，而中国则是300万辆，从2020年到2021年，英国的BEV制造增长率为30% [18]，而中国则是160%。HFCBEV在制造数量上远远落后于BEV，但对于需要长距离运输和快速添加燃料的重型、高使用率车辆而言，HFCBEV更受重视。英国目前正在为伯明翰和其他城市从WrightBus和Alexander Dennis订购数百辆氢燃料公交车，并计划在2030年之前取代目前正在使用的32 000辆柴油公交车。据预测，到2025年，中国HFCBEV的产量将比2020年增加55倍[19]。

全球拥有最多HFCBEV的城市是美国洛杉矶（13 000辆）、日本裾野（6000辆）、中国佛山（2000辆）、韩国首尔（1000辆）和德国汉堡（1000辆）。另外还包括3万辆美国叉车。中国加氢站安装量激增，从2017年仅有的一个增加到2022年的174个，体现了中国对氢燃料的投入。相比之下，英国目前只有4个加氢站正在运营。中国政府对这些开发项目的补贴一直高于西方国家，这导致了生产率有一些波动，但总体上刺激了从内燃机汽车到电动汽车的更快过渡。绿色氢气和化石燃料的车辆之间的经济竞争是一个持续的问题。随着化石燃料价格的上涨，通过风力发电的电解法生产氢气变得越来越经济，到2025年，在英国电解氢气应该比柴油化石燃料更便宜。

总之，HFCBEV在生产数量上已经落后于纯BEV（即BEV）。现在，由于重型公交车和卡车的额外储能要求，HFCBEV的数量正在增加。一辆典型的电池汽车需要大约 $50 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的储能，这相当于大约3 kg的氢气。一辆出租车需要 $250 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的储能，这使得应用锂电池既太重又太贵，而丰田2021年的Mirai可以用5 kg ($80 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的储能)的氢气轻松行驶500 km。一辆公共汽车可能需要30 kg的氢气——大约 $480 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的储能——才能行驶400 km，这相当于一个5 t的锂电池；因此，锂电池对于同等的BEV公共汽车来说太重了。

因此，1993年在Ballard公交车上首次展示的氢燃料电池电动技术[7]，现在对于重型、高使用率的汽车来说，表现出比纯BEV更明显的优势，并且预计到2030—2035年其数量将在全球激增。到那时，预计全球将部署几百万台HFCBEV装置，特别是与来自可再生能源的绿色氢气相结合，这将减少能源浪费，并减少目前化石燃料车辆产生的碳排放[20]。这样，有毒气体排放、碳排放和能量耗散等燃烧产生的问题可能会在21世纪逐渐解决，

并且预计到2050年将取得实质性进展[21]。

References

- [1] Industrial agriculture and small-scale farming [Internet]. Berlin: Globalagriculture; [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://www.globalagriculture.org/report-topics/industrial-agriculture-and-small-scale-farming.html>.
- [2] CO₂ emissions from cars: facts and figures (infographics) [Internet]. Strasbourg: European Parliament; [updated 2022 Jun 15; cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>.
- [3] The story behind the Birth of the Prius, part 1 [Internet]. Toyota: Toyota Motor Corporation; 2017 Dec 11 [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://global.toyota/en/detail/20209700>.
- [4] King J. The King review of low-carbon cars: part I: the potential for CO₂ reduction. 2007 Nov 7.
- [5] Staffell I, Kendall K. Lower carbon cars by reducing dissipation in hydrogen hybrids. *Int J Low Carbon Technol* 2012;7(1):10–5.
- [6] Vehicle licensing statistics: 2021 [Internet]. London: GOV.UK; 2022 May 24 [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://www.gov.uk/government/statistics/vehicle-licensing-statistics-2021/vehicle-licensing-statistics-2021>.
- [7] Our history – power to change the world [Internet]. Burnaby: Ballard Power Systems; [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://www.ballard.com/aboutballard/our-history>.
- [8] Carlier M. Global hydrogen fuel cell road vehicles 2020, by type [Internet]. Hamburg: Statista; 2021 Apr 6 [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://www.statista.com/statistics/1291480/hydrogen-fueled-road-vehicles-worldwide/>.
- [9] Kendall K, Kendall M, Liang B, Liu Z. Hydrogen vehicles in China: replacing the Western model. *Int J Hydrog Energy* 2017;42(51):30179–85.
- [10] Ostwald W. Present science of electrochemistry and future technology. *Z Elektrochem* 1894;1:122–5. Germany.
- [11] Moss D. *The efficient drivers handbook*. Dorset: Veloce Publishing; 2010.
- [12] Knittel CR. Automobiles on steroids. *Am Econ Rev* 2012;101:3368.
- [13] Liu Z, Kendall K, Yan X. China progress on renewable buses: fuel cells, hydrogen and battery hybrid vehicles. *Energies* 2018;12:54.
- [14] D’Allegro J. Elon Musk says the tech is “mind-bogglingly stupid,” but hydrogen cars may yet threaten Tesla [Internet]. Englewood Cliffs: CNBC LLC; [updated 2019 Feb 24; cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://www.cnbc.com/2019/02/21/musk-calls-hydrogen-fuel-cells-stupid-but-tech-may-threaten-tesla.html>.
- [15] Carlier M. Electric vehicles in Norway – statistics & facts [Internet]. Hamburg: Statista; 2022 Sep 15 [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://www.statista.com/topics/7176/e-mobility-in-norway>.
- [16] Kendall M, Kendall K, Lound APB. *Hystory: the story of hydrogen*. Adelan; 2021.
- [17] Xu M, Patton D. China sets green hydrogen target for 2025, eyes widespread use [Internet]. London: Reuters; [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://www.reuters.com/world/china/china-produce-100000-200000-t-green-hydrogenannually-by-2025-2022-03-23>.
- [18] UK electric vehicle and battery production. Report. Didcot: The Faraday Institution; 2019 May.
- [19] Hydrogen vehicles in China: will it overtake EVs? [Internet]. Shanghai: Daxue Consulting; 2022 Jul 11 [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://daxueconsulting.com/hydrogen-vehicles-china>.
- [20] The world will expand the use of hydrogen energy on a large scale [Internet]. Quebec: FuelCellsWorks; 2021 Mar 28 [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://fuelcellsworks.com/subscribers/the-world-will-expand-the-use-of-hydrogen-energy-on-a-large-scale/>.
- [21] Kendall K. Green hydrogen in the UK: progress and prospects. *Clean Technol* 2022;4(2):345–55.