



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Green Industrial Processes—Review

燃料电池商业化带来的技术经济挑战

Junye Wang^{a,*}, Hualin Wang^b, Yi Fan^b

^a Faculty of Science and Technology, Athabasca University, Athabasca, AB T9S 3A3, Canada

^b State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 December 2017

Revised 31 January 2018

Accepted 15 May 2018

Available online 21 May 2018

关键词

能源安全

燃料电池

成本分析

耐久性和可靠性能源储存

摘要

随着资源稀缺、气候变化加剧以及污染程度上升等问题的凸显，经济增长需要依赖更加环保、高效的生产过程。燃料电池具有高效和环保的特点，是内燃机和锅炉的理想替代品，也是通向绿色工业的途径。然而，作为一种新的能源技术，燃料电池的市场渗透率仍然不高。本文通过研究生命周期和价值链活动，对燃料电池系统进行了技术经济和环境方面的分析。首先，我们研究了燃料电池的发展进程，根据其生命周期活动、价值链活动以及最终用户验收标准确定了下一阶段需要采取的行动。然后，我们统一了解了燃料电池商业化的制度障碍。最终用户的主要验收标准是功能、价格和可靠性，比起其他同类产品，如内燃机和电池，燃料电池需要在这些标准上有所提升，以凸显其竞争优势。燃料电池的维修和保养费用可能会使成本大幅增加并减小可用性（由于可靠性较低），而成本和可用性是最终用户能否接受的主要因素。因此，为了克服可靠性的障碍，燃料电池产业面临着巨大的挑战。本文深入洞察了过去几年燃料电池商业化面临的主要障碍，讨论了燃料电池在未来绿色低碳经济中的潜在关键作用。文中还提出了未来低碳经济的必要性，并指出了相关的研究方向。以燃料电池为配置的绿色能源可以真正作为未来的商业模式。通过采取绿色公众投资、实行政策举措，为经济增长提供一条更加持续的发展道路，鼓励更多的环保产业投资。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

随着世界人口不断增长，化石燃料能源供应逐渐减少，世界能源供应已无法满足不断增长的需求或可持续的环境目标。因此，许多国家更加需要确保未来的能源安全以及可持续的环境。国际能源署（IEA）将能源安全定义为：以可支付得起的价格获得的充足的能源供应[1]。为了确保能源供应符合经济发展以及可持续的环境目标，许多国家都将发展低碳经济和绿色产业作为长期努力方向[2,3]。实现低碳经济有两种方法：一是增加绿

色能源的使用份额，以满足不断增加的能源需求，并通过减少化石燃料的使用量来缓解温室气体（GHG）的排放；二是通过提高现有能源体系的效率来达到节能减排的目的。

大量开发并利用可再生能源有助于发展绿色低碳经济，还可带来新的商机。目前已经开发了许多类型的可再生能源，如风能、太阳能、生物能和潮汐能[4–6]。尽管每一种可再生能源都有其优点和缺点，但将这些可再生能源和现存的化石燃料体系结合起来会增加能源体系的管理难度，为政府下达政策和投资带来困难。因

* Corresponding author.

E-mail address: junyew@athabascau.ca (J. Wang)

此, 要了解一个国家的能源安全需求和未来能源发展的整体方向, 单独分析一种能源体系远远不够, 必须要对更多能源的可用性和多样性有系统和充分的了解。在许多国家, 化石燃料(包括石油、天然气和煤)依然占主导地位。例如, 据美国能源信息署(EIA)报道, 化石燃料占2011年美国总能源消耗的79.78%[7]。因此, 节能减排还有很大空间, 这可以通过提高现有的能源体系效率来实现。燃料电池在转换能量时体现出了极高的热效率, 是传统内燃机的两倍, 被视为一种现有热能系统的理想替代物。因此, 燃料电池能在传统体系中的可再生能源和节能减排方面发挥重要作用(图1)。

燃料电池从原型阶段到产品部署阶段涉及许多因素, 因此要确保足够的资本回收以及积极的生命周期评估, 有必要对这些因素加以考虑。然而, 没有政府津贴的支撑, 很难获得足够的资本回收。我们在一系列出版物中分析并处理了推广燃料电池面临的关键问题[8]。我们阐明了氢燃料的“鸡和蛋”的问题、氢能基础设施的缺乏以及燃料电池的市场渗透问题。氢能基础设施并不是开发燃料电池技术的关键障碍。人们对于燃料基础设施的夸张说法误导了燃料电池市场。另一方面, 比起最终用户对此项技术的耐久性的接受度, 燃料电池的可靠性更为关键。然而人们对此关注度不高[8]。我们研

究了推广燃料电池面临的问题, 引入了推广燃料电池的标准和理论[9-12]。流场设计的目标和标准需要扩大燃料电池的流通领域。我们还提出了解决推广燃料电池问题的综合途径[13]。

作为燃料电池推广系列研究的一部分, 本文的主要目的是通过统一了解机构障碍来分析燃料电池商业化面临的技术经济挑战。我们将调查各成分的生命周期和价值链活动、产品的制造与装配, 并研究最终用户的接受情况。这将有助于我们更好地了解面临的挑战, 以便使政府能够鼓励高效利用资源和环保能源, 从而制定更明智的决策来发展低碳经济和技术。本文的另一个目的是分析燃料电池在未来的低碳经济中发挥的潜在作用, 并讨论燃料电池主导绿色产业的潜能。

2. 燃料电池在低碳经济中扮演的潜在作用

图1(a)展示了化石燃料的传统商业链。化石燃料、内燃机、锅炉和最终用户是该传统经济的主要成分。图1(b)展示了一种新的经济模式, 在该模式中, 绿色能源作为现有化石能源的替代能源。作为替代能源资源, 每一种可再生能源都需要和现有的化石燃料模式具备相同的功能和可靠性。因此, 图1阐释了燃料电池在

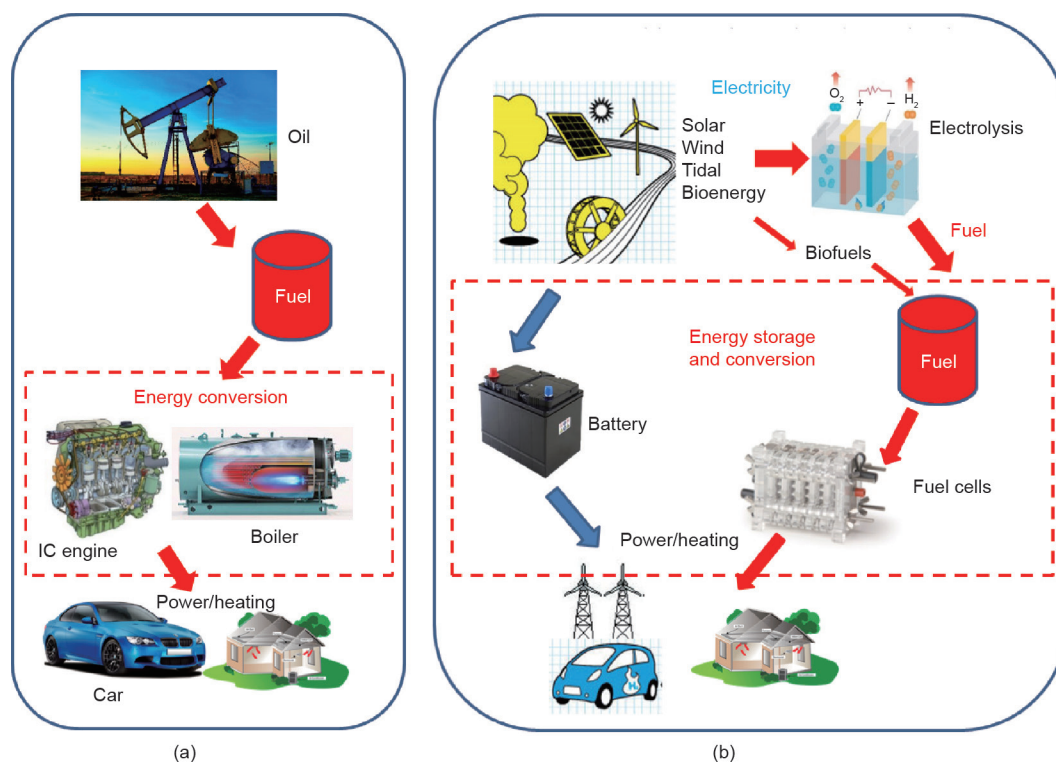


图1. 能源经济。(a) 化石燃料能源经济; (b) 可再生能源经济。

低碳技术和经济中起到关键作用的两种方法。首先，燃料电池可以作为可再生能源供应链中一种新的储能技术，如图1(b)所示。其次，燃料电池作为一种高效的发动机技术，可以取代传统内燃机、涡轮机或者锅炉，达到节能减排的目的，如图1(a)所示。然而，很少有人将低碳经济中的燃料电池的作用和绿色能源资源作为整体来进行研究。

2.1. 燃料电池和二次电池组

创造低碳技术和绿色产业，开发可再生能源是关键。一般而言，风能、太阳能和潮汐能是可再生能源商业链中发电的主要来源[图1(b)]。靠这些途径产生的电可用于汽车或者住房供暖。然而，可再生能源通常需要依赖季节、气候或地理条件，其时空分布也不均匀。可再生能源的这种异质性需要能源储存和有效的能源供应分布智能网络。然而大规模的电力储存长久以来都是一大挑战[14]。目前已经开发了许多技术来解决储能的问题，如抽水蓄能电厂[15]、相变材料[16]、充电电池[17,18]以及燃料电池[12,13]。如果将可再生能源作为一种可行的替代能源，就需要大规模储存电能，与燃料电池相关的电池技术和电解燃料是大规模储存电能的两种最佳方法(图1)。

目前已经开发了多种类型的充电电池，如锂电子电池和镍锰电池。充电电池的一个主要优势在于其蓄电的便利性。输电网每产生1 kW·h电的成本相对较低，而且电能可以由距离较远的地方产生。因此电池技术被广泛用于各种轻型动力源，如不间断电源(UPS)、手机以及笔记本电脑。然而，对于重型设备或大型应用程序而言，电池存在许多缺点，如充电时间长、较燃料(如甲烷或氢气)能量密度低、老化、影响环境和制造成本较高[19-21]。充电电池的这些缺点对于车辆来说也很重要。

根据电池容量的不同，在240 V电压、一定电流条件下充电将进行数小时。但是使用超级充电器，在120 kW的状态下只需30 min就能充满[21,22]。相比之下，使用能量密度燃料(如氢气和甲烷)的燃料电池的一个优势就在于它能规避充电时长以及充电范围的问题。一台燃料电池车(FCV)在3~5 min内就能加入足够的氢气燃料，可供车辆行驶200~300 mi(1 mi=1.61 km)。美国燃料电池技术团队(US drive fuel cell tech team)为FCV制定了目标，即能够行驶大约8000 h或以上(大约相当于150 000 mi)[23]。正常情况下，传

统的铅蓄电池平均寿命为4年，前提是其充电次数达到上限，且没有处于极端温度。因此，即使完全使用，电池每隔几年就需要更换，因为电池会浸析和老化。与之相比，燃料电池的退化取决于其使用时长。此外，电池组的成本随着其容量的增加而增加，其费用较之于相同容量的燃料电池要高出很多。因此，电池驱动的工具常用于短途或轻型的操作，如叉车和摩托车，但是对于长距离行驶和重型操作却不适用。

人们研发了许多混合动力汽车(HV)[24-27]。这种车辆的动力系统是发动机和电池。这种双动能汽车可以是内燃机和电池组相结合，也可以是燃料电池和电池组。目前，将内燃机与电池组相结合的方法是为了改善内燃机汽车的环境影响，而研发混合燃料电池电动汽车(FCEV)是为了结合燃料电池汽车(FCV)和电动汽车(EV)两者的特点。插电式FCEV的动力系统是燃料电池，电池电量可供汽车行驶30~50 mi。使用混合的动力系统，这种HV适用于长距离行驶，而且充电时间很短[27,28]。因此，其行驶距离可能比其他车辆更远，而不会像EV那样受到里程和充电时长的限制。例如，丰田汽车公司报道称，HV的续驶里程可长达1035 km[24]。当燃料电池出故障时，电池还可继续发挥作用以供汽车行驶，因此增加了HV的可靠性。然而，由于HV内含有两套动力系统，因此其成本高于单一动力系统的车辆。此外，两套动力系统还增加了FCEV的控制系统的难度。

值得注意的是在大多数国家中，在没有政府补贴的情况下，到2022年，用于制造EV和FCV的电池和燃料电池成本都需和内燃机汽车一样经济实惠。人们对燃料电池的实际成本有很多讨论和猜测，因为大多数EV和FCV的制造商对此没有做详细介绍。最近的研究表明在加拿大[29]和美国[30]，由政府补贴支撑的EV无法在很大程度上减少GHG排放。用于购买EV的政府补贴对GHG排放影响不大，而且比其他激励措施成本更高。尽管预测未来的发展趋势相当困难，但燃料电池技术确实是连接减少化石燃料使用和新兴可再生能源之间的一种方法，这是引人注目而且极具潜力的。因为燃料电池转换效率高且排放量低[8]。因此，如果以燃料电池为核心的新型经济模式能够成功替代内燃动力资源，正如图1(b)所示，就能走上低碳经济和环保产业的道路。

2.2. 传统发动机的替代品

大多数内燃机在转换能量时效率很低。一般来说，内燃机的热效率平均为20%左右。进一步提升内燃机和

燃气轮机技术也相当困难，即使是将其热效率提高1%~2%都很难实现。少数情况下，内燃机的最大热效率可能会达到38%，但是热电联产（CHP）这样的相关系统会导致系统复杂性和成本的增大，因为CHP还涉及了其他技术。燃料电池作为一种高效率的发动机，其热效率可达50%以上。由于燃料电池的热效率可以是内燃机和锅炉的两倍，因此将其替代传统的发动机就能将排放量降至原来的1/2。在发电能力相同的情况下，使用燃料电池就意味着更低的运行成本，因为燃料电池具有更高的转换效率。此外，燃料电池还更加环保。要想达到节能减排的目的，它是内燃机、涡轮机和锅炉理想的替代品。而且，不同的燃料电池使用的燃料也有所不同。例如，固体氧化物燃料电池（SOFC）的燃料是天然气，直接乙醇燃料电池（DEFC）的燃料是乙醇，质子交换膜燃料电池（PEMFC）的燃料是氢气[8]。因此，不需要对目前的燃料供应基础设施做出重大改变。

如果燃料电池取代传统的能源体系，将其运用到备用电源、材料处理、电池以及CHP市场上，那么这种高效率且环保的系统就能够极大地促进发电机市场的发展，创造新的商业模式。因此，如果在燃料电池的推广上取得技术性突破，将带来一场新的清洁能源革命。

3. 燃料电池生命周期和价值链

作为一种新兴的能源技术，燃料电池在能源市场上的渗透率仍然不高。成本、耐久性和可靠性是燃料电池商业化面临的主要挑战。在本文中，根据燃料电池的价值链活动和最终用户接受度标准，我们分析了燃料电池发展的生命周期和价值链，确定了克服这些障碍需要采取的行动。我们需要考虑许多因素，如制造过程的可行性、适用材料、产品质量和成本、供应链复原能力以及最终用户接受度。

3.1. 制造成本模型

一项新的产品要先在实验过程中达到经济和技术上的目标，然后再根据合理设计的指标，在完善的体系内进行大规模生产。制造过程的生命周期和价值链代表了产品的生产过程和成本，如图2所示。燃料电池组的技术经济生命周期可分为两个主要的阶段：制造阶段和最终用户阶段。

制造成本包括设计、材料、元件制造和装配、工人劳动、设备资产，这些要素贯穿整个燃料电池的定制以及商业生产过程。Ahluwalia等[31]在阿贡（Argonne）实验室计了80 kW_{net}质子交换膜（PEM）燃料电池的配置体系（图3）。Yang[32]分析了这种80 kW_{net}阿贡（Argonne）燃料电池组体系的成本，并准确计算出该电池组的总成本为大约30 USD·kW⁻¹。电池的电极（包括阴极和阳极）和催化剂占总成本的51%。电池组的装配和调试大约占总成本的7%。因此，燃料电池组中成本最高的3个部分是电极、双极板和电池密封圈[图4（a）]。

大批量生产的情况下，80 kW_{net}的PEM燃料电池组系统成本为59 USD·kW⁻¹。电池组占整个系统成本的50%[图4（b）]。电池组、空气管理以及热管理是该系统中花费最高的部分。电池组的装配和均衡占总成本的14%。

事实上，质子交换膜燃料电池的制造技术和材料已经得到了很大提升。一些材料的成本大幅减小了。例如，电池阳极和阴极的铂担量是0.1/0.15 mg·cm⁻²，允许0.12~0.3 mg·cm⁻²的偏差。在整个系统的成本分析中，假设铂的价格是2000 USD·t oz⁻¹（1 t oz=31.103 48 g）[32]，这个价格接近于铂价格的最高值（图5）。然而，铂的价格波动为±40%，因此其价格范围为800~2000 USD·t oz⁻¹以上[33]。目前，铂的价格低于1000 USD·t oz⁻¹，这比之前假设的最大值的一半还低。因此，铂担量不是这个整体系统成本的主要因素，由于铂这一主要材料的价格

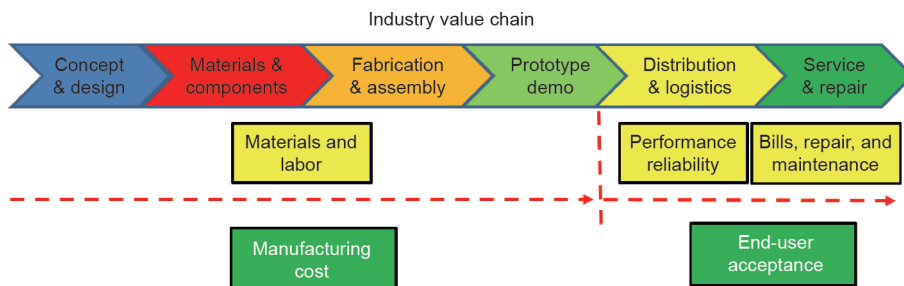


图2. 燃料电池生命周期和价值链。

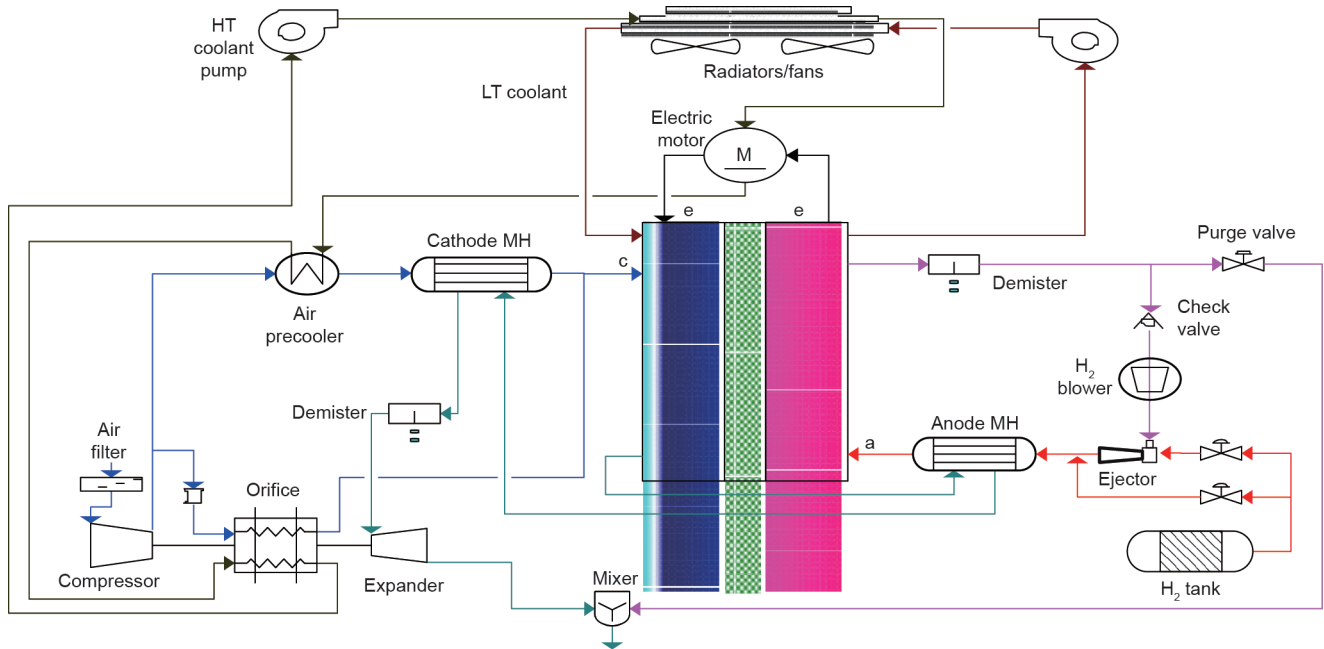


图3. 阿贡 (Argonne) 2009年质子交换膜燃料电池配置体系[31]。HT: 高温; LT: 低温; MH: 膜增湿器。

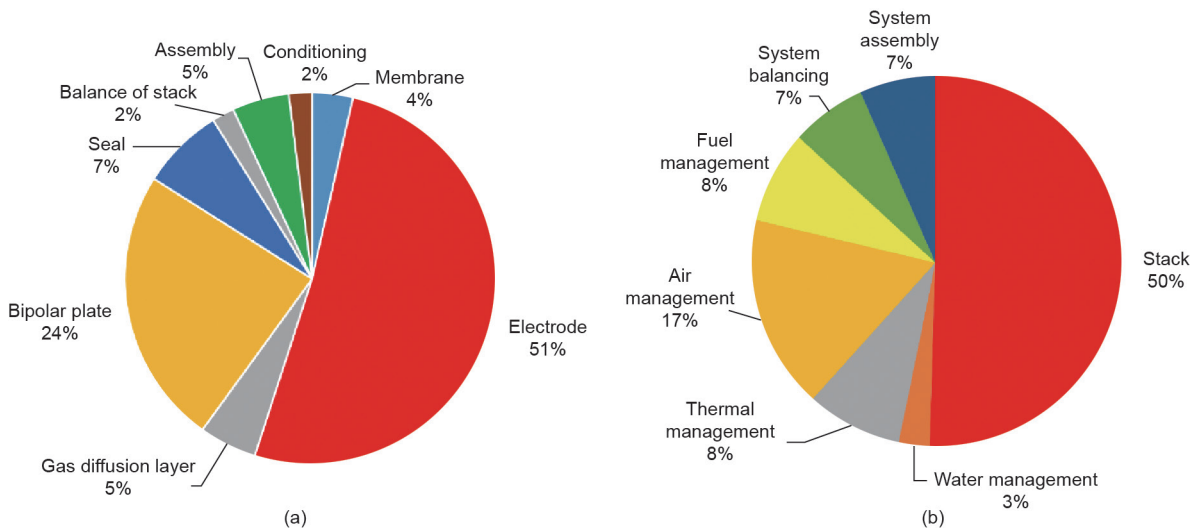


图4. 80 kW_{net}的质子交换膜燃料电池组系统成本[32]。(a) 电池组成本; (b) 电池组系统成本。

比其最大值小, 燃料电池组的成本也有所降低。所以燃料电池组的成本可能比整个系统成本的50%还低。

3.2. 燃料电池和内燃机的制造成本对比

Elnozahy等[34]对比了FCV、内燃机汽车和HV的成本(表1)。FCV的成本大约为24 363 USD, 内燃机汽车成本约为15 805 USD, 混合动力汽车成本约为24 050 USD。该对比表明, 如果将材料、制造和燃料纳入考虑范围, 燃料电池系统的成本与混合动力汽车的成本相当, 但却比内燃机汽车的成本高。然而, 从表1中可以看出燃料电池的热效率可达60%~70%, 这比内

燃机的效率高很多。因此, 由于较高的热效率, 燃料电池的燃料费用会大大减少, 就长期的运行来看, 燃料电池的总成本与内燃机相当。值得注意的是, 据美国能源署(DOE)报道, 目前燃料电池运行的热效率为40%~60%[35], 低于表1中所示的值。然而, 若配置CHP, 燃料电池的热效率就可达到90%以上。

在上述内容中, 我们分析了燃料电池的成本问题。尽管燃料电池的成本高于传统的内燃机(表1), 但其总费率与内燃机相当, 因为燃料电池有较高的热效率。因此, 燃料电池的成本不是影响最终用户接受度的主要因素。很明显, 大多数关于燃料电池成本的现有研究都是



图5. 1996年来铂的历史价格 (USD·t oz⁻¹)。2017年6月22日, 铂的价格为923.95 USD·t oz⁻¹[33]。

表1 FCV、内燃机汽车和HV的成本对比 (改编自参考文献[34])

Vehicle type	Engine type	Power	Efficiency	Fuel cost	Driving range	Cost (USD)					
						Propulsion system	Chassis and body	Transmission	Fuel tank	Others	Total
Proposed FCV	Fuel cell systems	112 hp	60%–70%	2–3 USD·kg ⁻¹	300.0 mi	13 964.0	7 902.5	316.1	750.00	1 422.45	24 355.05 ^a
Honda Civic Sedan	IC engine	140 hp	10%–16%	3.5 USD·gal ⁻¹	475.0 mi	4 741.5	7 902.5	1 580.5	158.05	1 422.45	15 805.00
Honda Civic Hybrid	Hybrid	110 hp	10%–16%	3.5 USD·gal ⁻¹	580.8 mi	7 215.0	12 025.0	2 405.0	240.50	2 164.50	24 050.00

1 hp = 0.7457 kW; 1 gal = 3.785412 L; 1 mi = 1.609344 km.

^aThe original number from Ref. [34] is 24 363.1.

基于电池组制造成本, 并未考虑维修与保养的成本。然而, 有必要考虑电池组商品的维修与保养费用对于最终用户接受度的影响。由于很少有人报道维修与保养费用在整个生命周期成本中所占的比重, 只有当燃料电池在最终能够用户市场存在竞争优势时才能决定当前的服务活动。使用燃料电池来推动商业与有竞争力的服务优势直接相关。

由于燃料电池是通过重复使用而得到推广的(所谓的通过增加数量达到推广目的), 膜或气体扩散层(GDL)等原件的失效可能会导致电池失效, 进而影响到整个电池组。尤其是当原件失效时, 通常需要拆卸整个电池组以替换该原件[8,13]。因此, 一个原件的轻微失效就相当于增加了电池组和系统的整个组装、调试和均衡的成本。如上述部分分析, 电池组系统装配和均衡

占整个系统成本的14%[图4(b)]。电池组的均衡、装配、调试和封口占电池组的16%[图4(a)], 由于它们占系统总成本的50%, 因此该值应该为原来的一半(即8%), 而电池组的装配和均衡以及系统的调试占整个电池组系统成本的22%。这22%包含了维修和保养的费用, 因为电池组的装配、均衡以及调试都是必要的。因此, 一个单一原件的失效可能导致整个电池组成本的大幅上升。

如果在燃料电池组的使用过程中需要经过两次维修, 那么装配、调试和均衡的成本大约为44%。此外, 有必要考虑运输成本以及原件失效成本。电池组系统的维修与保养费用可能超过系统总成本的60%[36], 取决于维修和保养的次数。因此, 可靠性和耐久性对于大幅降低整个系统的成本以及提高用户接受度有重要意义。所以如果一个供应燃料电池的企业希望胜过同类企业,

这些同类企业可能使用内燃机和锅炉，那么该企业的价值链活动需要优于其竞争对手，可以通过更高的质量和可靠性来拉开距离。有必要采用在质量和成本上占领主导地位的策略来提升燃料电池的可靠性，并减少维修和保养费用。

4. 燃料电池面临的技术挑战——耐久性和可靠性

可靠性和耐久性能在很大程度上影响燃料电池的可用性。这对最终用户接受度是一个关键因素[8,13]。燃料电池市场需要可靠的技术来提升和改进操作容差以及最终用户接受度。然而，现有的燃料电池发展和最终用户需求之间还存在很大差别[13]。

4.1. 最终用户接受度的可靠性

影响最终用户接受度的因素包括功能、成本、性能（即效率和可靠性）以及环境影响。带有发动机的燃料电池的功能与内燃机一样。燃料电池具有环保且噪声低的特点，其主要考虑因素是性能，包括效率和可靠性。前者不存在问题，因为燃料电池的热效率通常比内燃机高出很多。因此，除了由意外的维修和保养造成的额外费用，可靠性才是提高最终用户接受度的最大潜在技术障碍。

4.2. 技术就绪水平

严谨的生产过程有助于提高重复精度和密实度，为了进行评估，必须采用可重复的步骤和标准来实现规律性。技术就绪水平（TRL）被广泛用于测量某一技术的成熟度[37,38]。因此，燃料电池发展的TRL是对燃料电池就绪水平的评估，以达到更高耐久性和可靠性的目标。这次评估使人们对燃料电池在整个创新链中的技术地位达成了共识。TRL可分为10个等级，0级为最低，9级最高（图6）[37]。1级和2级TRL代表新兴技术的未来，3级到8级代表工业发展项目，9级代表商业化。

评估燃料电池的TRL就如同评估一台精密的化学加工设备一样复杂。燃料电池与其他产品不同，它没有确切的TRL。燃料电池产品存在各个等级的TRL，其分布可从1级（基础研究）到8级（常见于商业系统），以至于最高的9级（燃料商业部署）。虽然人们已经对诸如催化剂和通道中的多相流动等假定原理进行了大量的基础研究[39–41]，但燃料电池系统的部署也不乏报道[42,43]。

最终用户接受度可以是9级TRL的“黄金准则”，这就涉及燃料电池成本、功能和性能（如效率和可靠性）。如4.1部分中的讨论，燃料电池系统是一个重复单元，其中某一个原件失效就可能整个电池组失效。因此，一个占总成本10%的复合组件失效就可能消耗燃料电池系统成本的60%[13]。这样一来，燃料电池可靠

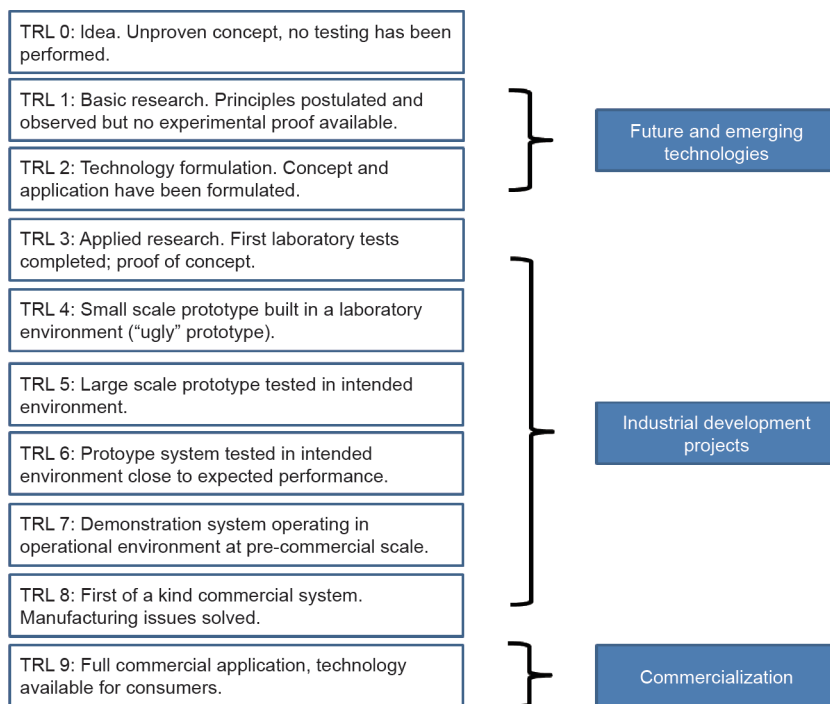


图6. 技术就绪水平（TRL）（改编自参考文献[37]）。

性的评估对于整个加工系统和技术成熟进程至关重要[8]。因此,有必要基于技术成熟度和有效性建立可靠的评价标准,因为这两者是造成高成本和低可用性的主要原因。

4.3. 可靠性的技术障碍

如上所述,意外产生的维修和保养费用对成本带来的影响很大[13,36]。在投入生产时,电池通道以及电池组系统需要处于相同状态。考虑到推广燃料电池及其系统所涉及的操作和风险,其框架和推广方法需要经过仔细审查,这对使用燃料电池技术的评估来说尤为重要。为了解决燃料电池高成本和低可用性的问题,可靠性成为了关键。

保持各个通道以及电池在同一水平运行十分困难。扩大生产的理论表明完全统一的流程分配仍然是一大挑战[12,44-47]。小规模且不均匀的流程分配可能会导致电池和电池组的操作失准,从而增加了不确定因素并使效率降低。因此,燃料电池的高成本可能是由频繁的维修和保养带来的故障时间造成的,这就导致了较低的可靠性[8]。Powell [44]指出推广微型反应器时面临的同样问题,也使用了相同的模块化。将“通过增加数量来进行推广”的策略作为一种工程途径运用到化工行业中还存在不确定性。这是因为尚未确定设计过程、模拟、试运行的无效流程分布设计所造成的影响[48]。然而,如果能根据低分布的理论仔细设计流场,就有可能在小范围或制造公差内控制燃料电池组的不均匀性[13]。

5. 燃料电池商业化的策略

美国能源署(DOE)及其他部门对燃料电池设备做了许多报道。例如,美国自2009年就报道了燃料电池备份系统使用情况的显著提升[42]。到2013年,已经安装了超过7000个燃料电池系统,总计16.3 MW。2000多个备用电源系统被用于电信系统。据DOE报道,康涅狄格州的CTtransit安装了400 kW的燃料电池[30]。该系统为这个运输机构的维护设备和储存设施提供电力。一家位于加利福尼亚安大略的废水处理厂安装了2.8 MW的燃料电池。然而,所有这些燃料电池的安装都来自政府津贴的支持。Behling[43]指出建设燃料电池的商业市场几乎要完全依靠政府津贴。人们还对材料和催化性能对燃料电池耐久性的影响做了大量研究[39,40]。这些研究都强调扩大燃料电池生产主要是解决材料和催化性能

的问题,因为正是这两个因素造成了成本过高。然而,材料和催化剂方面的问题是科学方面的问题,不能只靠生产规模决定。因此,由于存在不确定因素,扩大生产燃料电池还没有得到充分的认可,燃料电池产品及系统的TRL并未达到人们估计的高度。Wang[13]进行了一系列扩大生产燃料电池的研究。由于可靠性不高,所以无法将试验工厂直接升级为正式工厂,这是投资该新能源转换技术面临的主要障碍。为了解决可靠性问题,人们提出了系统整合。然而,原件、单个电池以及电池组之间还存在知识差距[13]。Wang[13]强调了在燃料电池商业化过程中可靠性十分重要。他提出了3种操作窗口来连接原件、流场设计、单个电池、电池组、整个过程的程序设计以及控制系统,以此来解决耐久性和可靠性的问题。本研究中,基于TRL和生命周期分析,我们对燃料电池商业化的大范围生产技术提出了建议和标准。与扩大生产燃料电池以及提高可靠性相关的所有人员都要齐心协力,包括科学工作者、建模人员、工程师、经验丰富且了解关键知识和技术的设计师、政府以及投资者。政府、投资者以及融资机构都应支持该技术集成。为了规避投资风险,该技术需要在更大规模示范单位的基础上达到更高水平的生产以及密度。

6. 结语

为了确保可持续的能源供应符合经济发展以及可持续的环境目标,许多国家都将发展低碳经济和绿色产业作为长期努力方向。发展低碳绿色经济有两种途径:一是增加绿色能源的使用份额,以满足不断增加的能源需求,降低GHG排放量,并减少化石燃料的使用量;二是通过提高现有能源体系的效率来达到节能减排的目的。燃料电池在这两种途径中都可发挥关键作用。燃料电池有较高的能量转换效率而且环保,如果其替代内燃机和锅炉,那么热效率将提升5%~40%。该分析结果表明燃料电池可作为内燃机和锅炉最有效的替代物,因此燃料电池有助于发展绿色低碳经济,甚至有助于绿色工业革命。

然而,燃料电池的市场渗透率仍然不高。在本文中,通过分析生命周期和价值链,我们对燃料电池系统做出了技术经济和环境方面的分析。我们分析了燃料电池的生命周期和价值链活动以及最终用户验收标准,对燃料电池商业化面临的制度障碍有了整体而且统一的了解。分析发现,尽管目前燃料电池的制造成本高于内燃机,

但由于其热效率很高，其运行成本可能比同类产品（如内燃机和锅炉）低很多。此外，制造成本并非影响最终用户接受度以及燃料电池商业化的主要因素。然而，燃料电池可靠性低、产生的意外维修和保养费用可能导致其成本增加60%，而且降低其可用性。因此，维修和保养造成的额外费用以及降低的可用性是提高最终用户接受度和燃料电池商业化面临的障碍。为了解决可靠性和耐久性方面的技术障碍，燃料电池产业面临着巨大的挑战。

本文考虑到燃料电池目前的发展速度，对实现扩大生产燃料电池的目标提出了质疑，但同时为读者对该能源领域提供了见解深刻的概述。有必要改变优先使用顺序，使用系统集成来大幅提升可靠性和耐久性，降低燃料电池系统的服务成本。过去几年，我们研究了燃料电池研发过程中面临的主要技术障碍，并思考了解决推广燃料电池面临的挑战的最优方法[13]。扩大燃料电池的生产还依赖于重复单元的有效试点。流场设计理论和实践是扩大生产试点单位的基础。在为经济增长探索一条更加可持续的道路上，以燃料电池为主的绿色能源很有可能成为未来的经济模式。

Acknowledgements

Junye Wang would like to thank the Ministry of Economic Development and Trade of Government of Alberta for the Campus Alberta Innovation Program (CAIP) Research Chair (RCP-12-001-BCAIP). We would also like to thank Mr. Jim Sellers for the proofreading.

Compliance with ethics guidelines

Junye Wang, Hualin Wang, and Yi Fan declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Energy security [Internet]. Paris: International Energy Agency; 2018 [cited 2018 April 2]. Available from: <https://www.iea.org/topics/energysecurity/>.
- [2] Jacobsson S, Lauber V. The politics and policy of energy system transformation—explaining the German diffusion of renewable energy technology. *Energy Policy* 2006;34(3):256–76.
- [3] Zhang PD, Yang YN, Shi J, Zheng YH, Wang LS, Li XR. Opportunities and challenges for renewable energy policy in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(2):439–49.
- [4] Ong HC, Mahlia TMI, Masjuki HH. A review on energy scenario and sustainable energy in Malaysia. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(1):639–47.
- [5] Wang JY. Decentralized biogas technology of anaerobic digestion and farm ecosystem: opportunities and challenges. *Front Energy Res* 2014;2:10.
- [6] Hepbasli A. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12(3):593–661.
- [7] US Energy Information Administration. Annual energy review 2011. Report. Washington, DC: Office of Energy Statistics, US Department of Energy; 2012. Report No.: DOE/EIA-0384(2011).
- [8] Wang JY. Barriers of scaling-up fuel cells: cost, durability and reliability. *Energy* 2015;80:509–21.
- [9] Wang JY, Wang HL. Flow field designs of bipolar plates in PEM fuel cells: theory and applications. *Fuel Cells* 2012;12(6):989–1003.
- [10] Wang JY, Wang HL. Discrete approach for flow-field designs of parallel channel configurations in fuel cells. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37(14):10881–97.
- [11] Wang JY, Wang HL. Discrete method for design of flow distribution in manifolds. *Appl Therm Eng* 2015;89:927–45.
- [12] Wang JY. Theory and practice of flow field designs for fuel cell scaling-up: a critical review. *Appl Energy* 2015;157:640–63.
- [13] Wang JY. System integration, durability and reliability of fuel cells: challenges and solutions. *Appl Energy* 2017;189:460–79.
- [14] Akinyele DO, Rayudu RK. Review of energy storage technologies for sustain power networks. *Sustain Energy Technol Assess* 2014;8:74–91.
- [15] Jiang RW, Wang JH, Guan YP. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro. *IEEE Trans Power Syst* 2012;27(2):800–10.
- [16] Ramakrishnan S, Wang XM, Sanjayan J, Wilson J. Thermal performance of buildings integrated with phase change materials to reduce heat stress risks during extreme heatwave events. *Appl Energy* 2017;194:410–21.
- [17] Goodenough JB, Park KS. The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *J Am Chem Soc* 2013;135(4):1167–76.
- [18] Li Y, Yang J, Song J. Design structure model and renewable energy technology for rechargeable battery towards greener and more sustainable electric vehicle. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;74:19–25.
- [19] Peters JF, Baumann M, Zimmermann B, Braun J, Weil M. The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters—a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;67:491–506.
- [20] Electric vehicle battery development gains momentum [Internet]. Golden: National Renewable Energy Laboratory; c2017 [updated 2017 Aug 16; cited 2017 Jul 5]. Available from: http://www.nrel.gov/continuum/sustainable_transportation/batteries.html.
- [21] Schaal E. A simple guide to electric vehicle charging [Internet]. Waterloo: CrossChasm Technologies; c2018 [cited 2017 Jul 5]. Available from: <http://www.fleetcarma.com/electric-vehicle-charging-guide/>.
- [22] David H. Range confidence: charge fast, drive far, with your electric car [Internet]. [cited 2017 Jul 5]. Available from: <https://greentransportation.info/ev-charging/range-confidence/chap8-tech/charge-faster-than-gas.html>.
- [23] Drive US. Fuel cell technical team roadmap. Southfield: US DRIVE; 2017.
- [24] Toyota hybrid cars: what's new for 2018 [Internet]. Toronto: Toyota Canada; c2018 [updated 2018 Jan 22; cited 2018 Jan 22]. Available from: <https://www.toyota.ca/toyota/en/connect/2034/hybrid-cars-suvs>.
- [25] Emadi A, Rajashekara K, Williamson SS, Lukic SM. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. *IEEE Trans Vehicular Technol* 2005;54(3):763–70.
- [26] Rahman KM, Patel NR, Ward TG, Nagashima JM, Caricchi F, Crescimbeni F. Application of direct-drive wheel motor for fuel cell electric and hybrid electric vehicle propulsion system. *IEEE Trans Ind Appl* 2006;42(5):1185–92.
- [27] Lane B, Shaffer B, Samuelsen GS. Plug-in fuel cell electric vehicles: a California case study. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42(20):14294–300.
- [28] Brunel J, Ponsard JP. Policies and deployment for fuel cell electric vehicles: an assessment of the Normandy project. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42(7):4276–84.
- [29] Belzile G, Milke M. Are electric vehicle subsidies efficient? [Internet]. Montreal: MEI; c2018 [updated 2017 Jun 22; cited 2018 April 2]. Available from: <https://www.iedm.org/71215-are-electric-vehicle-subsidiesefficient>.
- [30] Jenn A, Azevedo IML, Michalek JJ. Alternative fuel vehicle adoption increases fleet gasoline consumption and greenhouse gas emissions under United States corporate average fuel economy policy and greenhouse gas emissions standards. *Environ Sci Technol* 2016;50(5):2165–74.
- [31] Ahluwalia RK, Wang X, Tajiri K, Kumar R. Fuel cell systems analysis Report. Washington, DC: US Department of Energy; 2009.
- [32] Yang Y. PEM fuel cell system manufacturing cost analysis for automotive applications. Wellesley: Austin Power Engineering LLC; 2015.
- [33] Platinum prices—interactive historical chart [Internet]. Macrotrends LLC; c2010–2018 [cited 2017 Jul 5]. Available from: <http://www.macrotrends.net/2540/platinum-prices-historical-chart-data>.
- [34] Elnozahy A, Rahman AKA, Ali HH, Abdel-Salam M. A cost comparison between fuel cell, hybrid and conventional vehicles. In: Proceedings of the 16th International Middle-east Power Systems Conference—MEPCON 2014; 2014 Dec 23–25; Cairo, Egypt; 2014.
- [35] Curtin S, Gangi J. State of the states: fuel cells in America 2016. 7th edition. Report. Washington, DC: Energy Efficiency, Renewable Energy's Fuel Cell Technologies Office, US Department of Energy; 2016 Nov. Report No.: DOE/EE-1493.
- [36] Fuel cell electric vehicles: paving the way to commercial success [Internet]. Golden: National Renewable Energy Laboratory; c2017 [updated 2017 Aug 16; cited 2017 Jun 30]. Available from: http://www.nrel.gov/continuum/sustainable_transportation/fuel_cell_efs.html.

- [37] Technology readiness levels: a new dimension in horizon 2020 [Internet]. [cited 2017 Jun 30]. Available from: <http://www.ttopstart.com/news/technology-readiness-levels-a-new-dimension-in-horizon-2020>.
- [38] US Government Accountability Office. Technology readiness assessment guide [Internet]. [cited 2018 April 2]. Available from: <https://www.gao.gov/assets/680/679006.pdf>.
- [39] Kinoshita K, Lundquist JT, Stonehart P. Potential cycling effects on platinum electrocatalyst surfaces. *J Electroanal Chem* 1973;48(2):157–66.
- [40] Yuan XZ, Zhang S, Wang H, Wu J, Sun JC, Hiesgen R, et al. Degradation of a PEM fuel cell stack with nafion membranes of different thicknesses. Part I: in situ diagnosis. *J Power Sources* 2010;195(22):7594–9.
- [41] Zakaria Z, Kamarudin SK, Timmiati SN. Membranes for direct ethanol fuel cells: an overview. *Appl Energy* 2016;163:334–42.
- [42] Wei M, Chan SH, Mayyas A, Lipman T. Deployment and capacity trends for stationary fuel cell systems in the USA. In: Stolten D, Samsun RC, Garland N, editors. *Fuel cells: data, facts and figures*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2016. p. 257–69.
- [43] Behling N. Solving the fuel cell dilemma. *Fuel Cells Bull* 2012;2012(11):12–4.
- [44] Powell JB. Application of multiphase reaction engineering and process intensification to the challenges of sustainable future energy and chemicals. *Chem Eng Sci* 2017;157:15–25.
- [45] Wang JY. Theory of flow distributions in manifolds. *Chem Eng J* 2011;168(3):1331–45.
- [46] Wang JY. Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: Z-type arrangement. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35(11):5498–509.
- [47] Wang JY. Pressure drop and flow distribution in parallel-channel fuel cell stacks: U-type arrangement. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33(21): 6339–50.
- [48] Donati G, Paludetto R. Scale up of chemical reactors. *Catal Today* 1997;34(3–4):483–533.
- [49] Gordon-Bloomfield N. Toyota admits cutting costs of hydrogen fuel cell technology further will be tough [Internet]. Transport Evolved LLC; c2016 [cited 2017 Jun 30]. Available from: <https://transportevolved.com/2014/11/25/toyota-admits-cutting-costs-hydrogen-fuel-cell-technology-will-tough/>.