

氢燃料电池汽车全生命周期 经济性分析2020

研究报告

联合发布单位



引言

近年来，燃料电池产业迅猛发展，全球燃料电池出货量不断增加。从燃料电池类型看，质子交换膜燃料电池发展最为迅速。在 2009~2018 年 10 年间，质子交换膜燃料电池出货量从 60MW 增长至 589MW，年均增长率达到 29%，2015~2018 年的年均增长率达到 69%，增长规模远超过其他种类燃料电池。

从应用领域看，2011~2013 年，固定式应用领域的燃料电池增长占据主导，但是燃料电池出货量整体规模不大；2013 年以来，交通运输领域的燃料电池出货量迅速增长，2018 年，交通运输领域的燃料电池出货量占比达 70%，交通运输领域成为燃料电池目前的主要应用领域之一。

全球来看，欧美日韩等发达国家和地区在燃料电池领域不断布局，并以交通领域作为突破口。例如，美国在 2019 年 11 月发布的《美国氢能经济路线图》中提出，氢燃料电池汽车将在 2025~2030 年与传统内燃机汽车的总拥有成本（TCO）持平。

中国氢燃料电池汽车的发展也正在过渡到国家引导、地方因地制宜的发展模式中，市场规模迅速增长。2019 年 1~11 月燃料电池汽车产销分别完成 1426 辆和 1337 辆，同比分别增长 398.6% 和 375.8%。

从氢燃料电池车型来看，国外以乘用车车型为主，氢燃料电池乘用车的销量已突破万辆，主要以丰田、本田和现代等车企为主导。国内，

受政策导向影响，目前以客车、物流车等商用车为主，氢燃料电池乘用车仍然处于研制阶段。

当前阶段，由于燃料电池部分关键零部件仍依赖进口、规模也较小，此外上游氢能供应以及规模化不足，导致氢燃料电池汽车的车辆购置成本和能源使用成本较高，经济性优势尚未显现。因此，有必要对氢燃料电池汽车的全生命周期经济性进行分析，以探讨氢燃料电池汽车在不同场景下的适用性，以及未来成本下降的潜在空间和关键路径。

本报告详细描述了中国氢燃料电池汽车全生命周期经济性现状与未来发展趋势，同时基于现状与问题，给出了相应的发展建议，期待我们的研究可以为从业人士、政府机构、咨询机构和投资机构等更好的了解产业发展情况以及面临的问题，提供一些帮助。

《氢燃料电池汽车全生命周期经济性分析 2020》是本年度氢能及燃料电池产业研究的一部分，接下来我们会继续开展氢燃料电池汽车全生命周期经济性的深入研究，我们也真诚的希望产业内的企业、研究机构、专家和学者共同参与，一起为中国氢能产业的发展贡献一份力量。

本报告全部采用某时点固定值计算，暂不考虑折现率、未来基础数据动态变动导致的终值动态变化，这些内容在后续版本中将逐步完善，如需完整模型欢迎与车百智库沟通交流。

一、车辆全生命周期经济性现状分析

1.1 研究方法与研究范围

本报告所采用的经济性分析模型基于氢燃料电池汽车的全生命周期成本，并面向消费者角度建立。氢燃料电池汽车的全生命周期成本包括车辆购置成本（Purchase Cost, PC）、能源使用成本（Energy Cost, EC）、维修养护成本（Maintenance Cost, MC）、车辆报废残值（Scrap Residual Value, SRV），即可认为是总拥有成本（Total Cost of Ownership, TCO），表达为：

$$TCO=PC+EC+MC+SRV$$

图表 1 氢燃料电池汽车全生命周期成本模型（TCO）

成本发生阶段	包含内容	成本构成
车辆购置成本 PC	以汽车厂商的市场售价为准，是用户支付给车企用于研发、试验、生产、运营等活动，其中各子系统细分成本也当以车企实际所需成本考量	能源转换与储存系统：燃料电池系统、蓄电池系统、储氢系统 驱动系统：驱动电机及控制器 车身及其他设施：除上述子系统外，包含车身、底盘、转向、悬挂、车轮、空调等
车辆维护成本 MC	车辆零部件的维护成本、车辆保养费用等	燃料电池系统定期维护成本 蓄电池系统定期维护成本 日常保养费用
能源使用成本 EC	使用过程中的能源消耗成本	氢气终端销售价格：考虑生产与运输成本在内 车辆氢耗：与车辆百公里氢耗和使用场景相关

成本发生阶段	包含内容	成本构成
车辆报废残值 SRV	车辆使用寿命终止后的残值现值，包括车辆本体残值及动力部件残值，以负成本计入	车辆残值 燃料电池残值 蓄电池残值

资料来源：车百智库

本报告选取了目前中国已经示范运行的氢燃料电池客车、物流车以及尚处在示范探索阶段的氢燃料电池重卡作为研究对象。

1.2 客车经济性现状

1.2.1 车辆购置成本

以某 10.5 米级氢燃料电池客车为例，其能源转换与储存系统由 46 kW 燃料电池系统、109 kWh 磷酸铁锂蓄电池系统、6 个水容积 140L 储氢罐组成。该车的相关参数如下表所示。

图表 2 某 10.5 米级氢燃料电池客车主要性能参数

指标	10.5米级客车
车身尺寸	10500*2550*3450mm
总质量/核载人数	16500kg/90人
最高车速	69km/h
动力系统技术参数	燃料电池系统额定功率 46kW 蓄电池系统容量 109.27kWh（磷酸铁锂）
储氢系统技术参数	容量140L*6，压力35MPa，顶置气瓶
驱动电机技术参数	额定/峰值功率 90/180kW，额定/峰值转速 900/2500r/min 额定/峰值扭矩955/2800N·m

指标	10.5米级客车
续驶里程	165km（氢系统不工作）/510km(氢系统工作)（等速法） 350km（工况法）

资料来源：中通客车，公开资料，车百智库

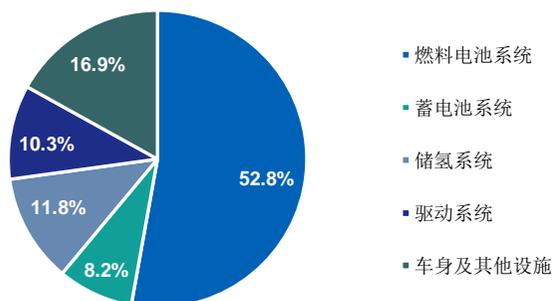
该款氢燃料电池客车的整车购置成本为 195 万元。其中，燃料电池系统、蓄电池系统、储氢系统的成本分别为 103 万元、16 万元、23 万元，占比分别为 52.8%、8.2%、11.8%。

图表 3 某 10.5 米级氢燃料电池客车 PC 细分成本

一级分类	二级分类	成本 (万元)
整车合计		195
燃料电池系统	电堆	50
	氢循环系统	5
	空气系统	25
	附件（DC/DC、散热器、冷却器等）	23
蓄电池系统	电池芯	13
	箱体及管理系统附件	3
储氢系统	储氢罐	11
	气瓶阀	4
	管路及附件	8
驱动系统		20
车身及其他设施	除上述子系统外	33

资料来源：中通客车，车百智库

图表 4 某 10.5 米级氢燃料电池客车的车辆购置成本结构



资料来源：中通客车，车百智库

1.2.2 车辆维护成本

当前应用于客车领域的燃料电池寿命基本达到 5000~10000 小时，则在客车约 8 年的全生命周期使用过程中，燃料电池客车需更换电堆 2 次，蓄电池系统作为辅助动力无需更换。以此推算，全生命周期的车辆维护客观成本大约在 125.6 万元。

从消费者的角度，目前氢燃料电池客车订单中，大多数都已经包含“氢燃料电池发动机系统 8 年质保”的要求，可以认为用户需要承担维护成本为 1.7 万元/年，消费者需要支付的全生命周期维护成本约为 13.6 万元。

图表 5 某 10.5 米级氢燃料电池客车的车辆维护成本

指标	客观成本	消费者TCO需承担部分
日常车辆保养费用	1.7 万元/年	1.7 万元/年
动力系统保养费用	1.5 万元/年	0
动力系统更换费用	50 万元/次	0
全生命周期维护成本	125.6 万元	13.6 万元

资料来源：中通客车，车百智库

1.2.3 能源使用成本

现阶段，焦炉煤气、氯碱副产、丙烷脱氢、乙烷裂解、合成氨等工业副产氢和电解水制氢是我国车用氢能的主要来源。

图表 6 不同技术路线下的氢气成本

环节	技术路线	成本 (元/kg)	备注
制氢	工业副产氢	14.6~26.9	目前行业内 2~3N 级工业用氢的生产成本约 0.8~1.5 元/Nm ³ ，提纯成本与规模和工艺相关，约为 0.5~0.9 元/Nm ³ ，合计工业副产氢制氢成本为 1.3~2.4 元/Nm ³ 。
	电解水制氢	23~50 ¹	与电价、电解槽技术路线等因素相关。(电价 0.2~0.6 元/kWh)。
储运	20MPa 气态高压储氢与集束管车运输	9.3~ 22.4	该储运方式的成本与加氢站规模、运输距离关系密切。行业共识的有效储运半径 200km 以内，其成本经济性较高。

资料来源：车百智库

由于目前市场用氢需求较小，各地的用氢市场规模、氢源供应、加氢站类型不一，且制氢、储运、加氢各环节的商业模式还未成熟，因此，不同区域、不同模式的加氢站氢气销售价格差异较大。目前加氢站氢气销售价格区间为 30~80 元/kg。

¹ 基于国内电解水制氢项目案例，根据电价测算

图表 7 目前我国部分加氢站的氢气销售价格

地区	加氢站类型	氢气销售价格
佛山南海	外供氢加氢站	60~80元/kg
上海	外供氢加氢站	60~70 元/kg
山西大同	在站电解水制氢一体站 (由于法规限制, 目前采用外供氢模式)	50 元/kg
张家口望山	在站电解水制氢一体站 (加注协议价)	30 元/kg

资料来源: 公开资料及调研数据, 车百智库

根据实际调研数据, 氢燃料电池客车用作公交运营场景下的车辆氢耗在 4~9kg/100km 不等, 本研究按 7kg/100km 计算。通过下列案例整理, 我国氢燃料电池客车在公交运营场景下, 单车年均运行里程在 72000km 左右。按 8 年运营使用期限作为全生命周期时长。

图表 8 我国氢燃料电池客车的运营场景

来源	车型
四川成都市郫都区的氢燃料电池公交车实际运行数据	200km/车/天 360 天/年 年运行总里程数约 72000km
河北张家口市的氢燃料电池公交车实际运行数据	2018 年 9 月 29 日到 12 月 31 日, 94 天内, 25 辆公交车累计运行里程超过 45.9 万 km 换算年运行总里程数约为 71080km

资料来源: 公开资料, 车百智库

在氢气价格为 60 元/kg 时, 氢燃料电池客车的全生命周期能源使用成本约 242 万元。

图表 9 某 10.5 米级氢燃料电池客车的能源使用成本 (EC)

氢气销售价格	单位里程EC	年均EC	全生命周期EC
30元/kg	2.1元/km	15.1万元	121万元
60元/kg	4.2元/km	30.2万元	242万元
80元/kg	5.6元/km	40.3万元	323万元

资料来源：车百智库

1.2.4 车辆报废残值

现阶段，氢燃料电池汽车的车辆残值尚无可以准确参考的依据。根据《报废机动车回收管理办法》，可以回收报废车辆的总成，用于重新制造新车，零部件的循环利用可以进一步降低成本。因此，可以从废弃的电堆中回收铂金。

以客车为例，某 10.5 米级氢燃料电池客车的系统功率为 46kW，假设单车电堆功率为 52kW²。按燃料电池催化剂铂含量 0.175g/kW 计算，则该款客车电堆的铂金含量 9.1g，按铂金回收价格 150 元/g³计算，单车回收铂金约 1365 元，其他部件的残值约 1~5 万元⁴。为方便计算，10.5 米级氢燃料电池客车的残值假设为 2.5 万元。

1.2.5 氢燃料电池客车全生命周期成本

以 10.5 米级氢燃料电池客车为例，当前阶段，在氢气价格为 60 元/kg 的条件下，氢燃料电池客车全生命周期成本为 448.1 万元。其中车辆购置

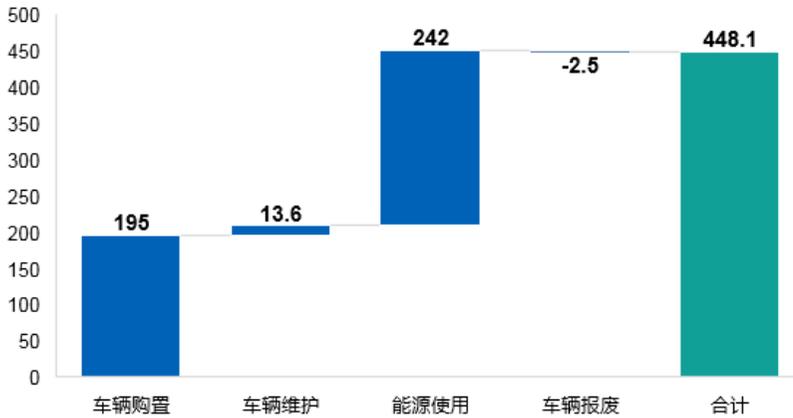
² 中通客车调研数据

³ 燃料电池回收行业调研数据

⁴ 中通客车调研数据

成本和能源使用成本的占比较大。

图表 10 氢燃料电池客车全生命周期成本（万元）



资料来源：车百智库

1.3 物流车经济性现状

1.3.1 车辆购置成本

以某 9 吨氢燃料电池物流车为例，其能源转换与储存系统由 32kW 燃料电池系统、26.63kWh（锰酸锂电池）蓄电池系统、3 个水容积 140L 储氢罐组成。

图表 11 某 9 吨级氢燃料电池物流车主要性能参数

指标	9吨级物流车
车身尺寸	7630 × 2370 × 3060mm
总质量/核载重量	9吨/ 3.6吨

指标	9吨级物流车
最高车速	90km/h
动力系统技术参数	燃料电池系统额定功率32kW 蓄电池系统容量26.63kWh
储氢系统技术参数	容量140L* 3个, 压力35MPa, 横向布置
驱动电机技术参数	额定/峰值功率60/120 kW, 额定/峰值转速1637/5000r/min, 额定/峰值扭矩350/750 N·m
续航里程	420km (40km等速法)

资料来源：工信部公告数据⁵，中通客车，车百智库

该款氢燃料电池物流车的整车成本为 130 万元。其中，燃料电池系统、蓄电池系统、储氢系统的成本分别为 75 万元、6 万元、14 万元，占比分别为 57.7%、4.6%、10.8%。

图表 12 某 9 吨级氢燃料电池物流车的 PC 细分成本

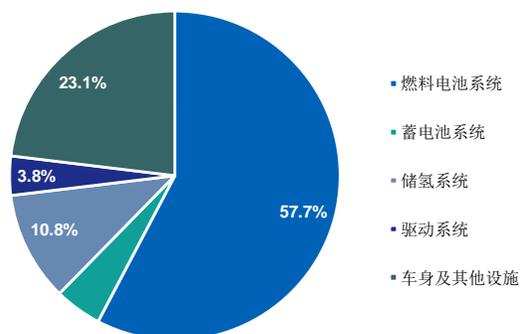
一级分类	二级分类	成本 (万元)
整车合计		130
燃料电池系统		75
蓄电池系统	电池芯	4
	箱体及管理系统附件	2
储氢系统	储氢罐	7.5
	气瓶阀	3.5
	管路及附件	3

⁵ 《道路机动车辆生产企业及产品公告》第312批和《新能源汽车推广应用推荐车型目录》(2018年第10批)

一级分类	二级分类	成本 (万元)
驱动系统		5
车身及其他设施	除上述子系统外	30

资料来源：中通客车，车百智库

图表 13 某 9 吨级氢燃料电池物流车的 PC 成本结构



资料来源：中通客车，车百智库

1.3.2 车辆维护成本

当前应用于物流车领域的燃料电池寿命基本达到 8000 小时，则在物流车约 8 年的全生命周期使用过程中，氢燃料电池物流车需更换电堆 1 次，蓄电池系统作为辅助动力无需更换。以此推算，全生命周期的维修养护客观成本大约在 54.4 万元。

从消费者的角度，目前氢燃料电池物流车订单中，大多数都已经包含氢燃料电池发动机系统的质保的要求，可以认为，用户承担维修养护成本为 1.5 万元/年。消费者需要支付的全生命周期维修养护成本约为 12 万元。

图表 14 某 9 吨级氢燃料电池物流车的维修养护成本

指标	客观成本	消费者TCO需承担部分
日常车辆保养费用	1.5 万元/年	1.5 万元/年
动力系统保养费用	0.8 万元/年	0 万元/年
动力系统更换费用	36 万元/次	0 万元/次
全生命周期维养成本	54.4 万元	12 万元

资料来源：中通客车，车百智库

1.3.3 能源使用成本

根据实际调研数据，氢燃料电池物流车用作负载短途运输场景下的车辆氢耗在 2.8kg/100km 左右，此处按 2.8kg/100km 计算。通过下列案例整理，我国氢燃料电池物流车在负载短途运输场景下，单车日行驶里程 150km，全年使用天数为 300 天，按 8 年运营使用期限作为全生命周期时长。

图表 15 我国氢燃料电池物流车的运营场景

来源	运营现状
上海市 2017 年底投入 500 辆氢燃料电池物流车实际运行数据	>120km/车/天、单日最高里程 570km 300 天/年 2018 年 11 月~2019 年 3 月，每月运营里程基本维持 5~6.5 万 km 之间。
深圳市 2018 年底投放 600 辆氢燃料电池物流车实际运行数据	单车续驶里程 350km
广东佛山市 2019 年 6 月投放 390 台氢燃料电池物流车实际运行数据	单车续驶里程约 360km
江苏苏州市 2019 年 6 月投放 200 台氢燃料电池物流车实际运行数据	单车续驶里程约 360km

资料来源：公开资料,车百智库

在氢气价格为 60 元/kg 时，氢燃料电池物流车的全生命周期能源使用成本约 60.48 万元。

图表 16 某 9 吨级氢燃料电池物流车的能源使用成本 (EC)

氢气销售价格	单位里程EC	年均EC	全生命周期EC
30元/kg	0.84元/km	3.78万元	30.24万元
60元/kg	1.68元/km	7.56万元	60.48万元
80元/kg	2.24元/km	10.08万元	80.64万元

资料来源：车百智库

1.3.4 车辆报废残值

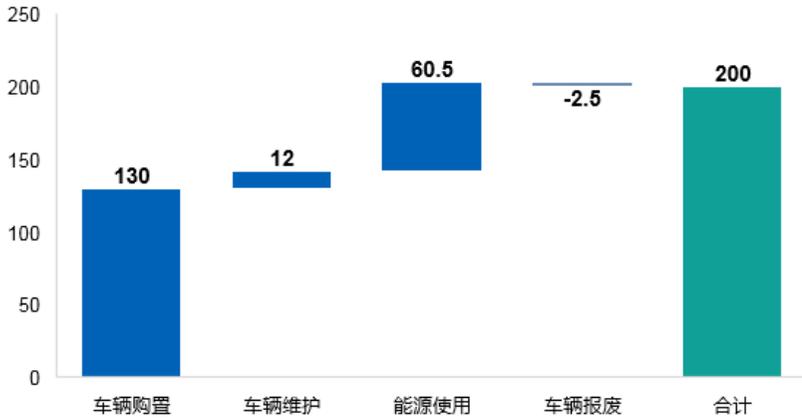
如客车部分的分析，9 吨级物流车单车电堆功率在 35~70kW 之间，则铂金含量为 6~12g，按铂金 150 元/g 计算，单车回收铂金约 900~1800 元，其他部件残值约 1~3 万元⁶。则 9 吨级物流车残值按照 2.5 万元计算。

1.3.5 氢燃料电池物流车全生命周期成本

以 9 吨级氢燃料电池物流车为例，当前阶段，在氢气价格为 60 元/kg 的条件下，燃料电池物流车全生命周期成本为 200 万元。其中车辆购置成本和能源使用成本占比较大。

⁶ 中通客车，车百智库

图表 17 氢燃料电池物流车全生命周期成本 (万元)



资料来源：车百智库

1.4 重卡经济性现状

1.4.1 车辆购置成本

目前国内的氢燃料电池重卡尚无上市车型，多数车型处于前期的研发阶段，根据不同实际应用场景研发的车型具有特定性。以某 42 吨级港口牵引重卡车型为例，其能源转换与储存系统由 80kW 燃料电池系统、100 kWh 磷酸铁锂蓄电池系统、10 个容积 140L 储氢罐组成。

图表 18 某 42 吨级氢燃料电池重卡主要性能参数

指标	42吨级重卡
车身尺寸	3850 mm
总质量	42吨
最高车速	80km/h
动力系统技术参数	燃料电池系统额定功率80kW 蓄电池系统容量100kWh
储氢系统技术参数	容量10L*140个，压力35MPa
驱动电机技术参数	额定/峰值功率215/350kW
续航里程	≥200km（综合工况）

资料来源：上海捷氢科技，车百智库

该款氢燃料电池重卡的整车成本为 150 万元。其中，燃料电池系统、蓄电池系统、储氢系统的成本分别为 80 万元、15 万元、25 万元，占比分别为 53.3%、10%、16.7%。

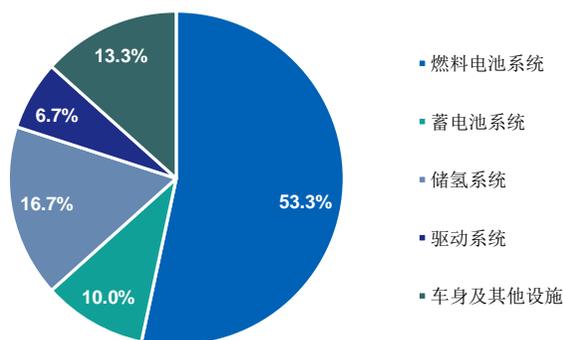
图表 19 某 42 吨级氢燃料电池重卡的 PC 细分成本

分类	成本（万元）
整车	150
燃料电池系统	80
蓄电池系统	15
储氢系统	25
驱动系统	10

车身及其他设施	20
---------	----

资料来源：上海捷氢科技，车百智库

图表 20 某 42 吨级氢燃料电池重卡的 PC 成本结构



资料来源：上海捷氢科技，车百智库

1.4.2 车辆维护成本

当前应用于重卡领域的燃料电池寿命基本达到 10000 小时，此研究车型为特定使用场景下的港口运输车辆，使用工况相对简单，路线固定，燃料电池处于稳定的高效输出区间内，因此寿命可以达到 20000 小时，港口日行驶里程约为 400km。在重卡长达 5 年的全生命周期使用过程中，总行驶里程约达到 73 万 km，需更换电堆 0 次，蓄电池系统作为辅助动力不需更换。

图表 21 某 42 吨级氢燃料电池重卡维修养护成本

指标	客观成本	消费者TCO需承担部分
日常车辆维保费用	1.3 万元/年	1.3 万元/年

指标	客观成本	消费者TCO需承担部分
动力系统保养费用	0.3 万元/年	0 万元/年
动力系统更换费用	0 万元/次	0 万元/次
全生命周期维养成本	8 万元	6.5 万元

资料来源：上海捷氢科技，车百智库

1.4.3 能源使用成本

目前我国氢燃料电池重卡的氢耗量约为 8~10kg/100km。由于我国燃料电池重卡还处于起步阶段，还没有形成可参考的年行驶里程及全生命周期。此处，氢燃料电池重卡氢耗按照 8.7kg/100km 计算。

图表 22 某 42 吨级氢燃料电池重卡的使用场景

来源	运营场景	车辆氢耗
企业内部数据	港口运输，日行驶里程 400km，365 天/年	8.7kg/100km (40km/h 等速工况)

资料来源：上海捷氢科技，车百智库

在氢气价格为 60 元/kg 时，氢燃料电池物流车的全生命周期能源使用成本约 381 万元。

图表 23 某 42 吨级氢燃料电池重卡的能源使用成本 (EC)

氢气销售价格	单位里程EC	年均EC	全生命周期EC
30 元/kg	2.6 元/km	38 万元	190 万元

氢气销售价格	单位里程EC	年均EC	全生命周期EC
60 元/kg	5.2 元/km	76 万元	381 万元
80 元/kg	7 元/km	101 万元	508 万元

资料来源：上海捷氢科技，车百智库

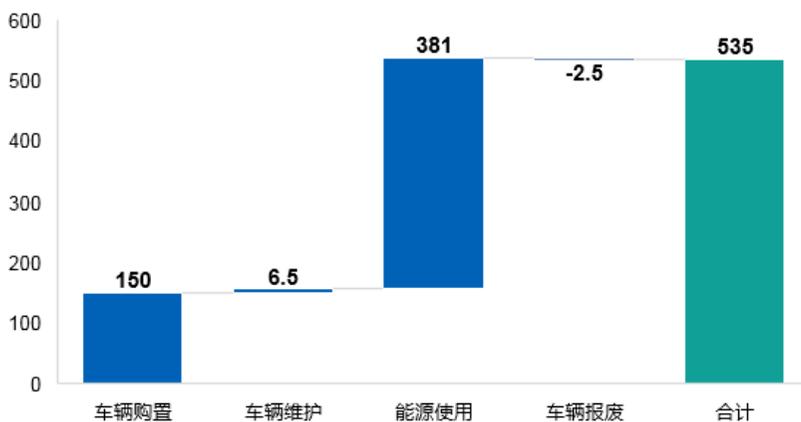
1.4.4 车辆报废残值

如前文分析，假设该款 42 吨级重卡单车电堆功率为 100kW，则铂金含量为 17.5g，按铂金 150 元/g 计算，单车回收铂金约 2625 元，其他部件残值约 1~5 万元。在此，残值按照 2.5 万元计算。

1.4.5 氢燃料电池重卡全生命周期成本

以 42 吨级港口牵引重卡车型为例，当前阶段，在氢气价格为 60 元/kg 的条件下，氢燃料电池重卡全生命周期成本为 535 万元。其中能源使用成本的占比较大。

图表 24 氢燃料电池重卡全生命周期成本 (万元)



资料来源：车百智库

1.5 小结

本章对不同车型的车辆购置成本、车辆维护成本、能源使用成本、车辆报废残值等指标进行了分析，探究了各应用场景下氢燃料电池汽车的全生命周期经济性。当氢气价格为 60 元/kg 时，10.5 米级公交客车、9 吨级物流车和 42 吨级重卡的全生命周期成本分别为 448.1 万元、200 万元和 535 万元。

图表 25 氢燃料电池汽车典型车型全生命周期经济性对比表 (单位: 万元)

	客车 (10.5 米级)	物流车 (9 吨级)	重卡 (42 吨级)
车辆购置成本	195	130	150
车辆维护成本	13.6	12	6.5
能源使用成本	242	60.5	381
车辆报废残值	-2.5	-2.5	-2.5
合计	448.1	200	535

资料来源: 车百智库

目前阶段, 氢燃料电池汽车的全生命周期成本与同级别纯电动车型相比还普遍偏高。一方面在于燃料电池技术尚不够成熟, 部分关键零部件尚需进口; 另一方面, 氢燃料电池汽车市场规模远小于纯电动汽车, 当前纯电动汽车的年销量已接近百万辆, 氢燃料电池汽车年销量仍处于千辆级。此外, 上游氢能供应产业链尚未打通, 基础设施环节薄弱, 氢气终端销售价格居高不下, 造成氢燃料电池汽车的能源使用成本高的困境。

在一些特定场景下, 氢燃料电池汽车的适用性相对更优, 如低温环境、无法接受长时间充电、续驶里程要求长的场景等。未来, 随着燃料电池技术的不断进步和规模的不断提升, 氢燃料电池汽车全生命周期成本有望快速下降。

二、车辆全生命周期经济性未来趋势分析

2.1 车辆全生命周期成本未来变动因素分析

2.1.1 补贴因素

为鼓励燃料电池技术发展，自 2009 年起，财政部等开始给予氢燃料电池汽车购置财政补贴。近年，在鼓励引导的同时，也提高了补贴的技术门槛，以落实行业技术发展和增进产业化进程。

- 2018 年 2 月，财政部、工信部等四部委发布《关于调整完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》(以下称《通知》)，对氢燃料电池乘用车、客车、货车进行补贴。
- 2019 年 3 月《通知》规定，2019 年 3 月 26 日至 6 月 25 日过渡期氢燃料电池汽车按 2018 年补贴的 0.8 倍给予补贴。
- 2019 年过渡期后至今暂未发布补贴方案。

图表 26 氢燃料电池汽车国家补贴政策

车型	2018年	2019年 过渡期	技术要求	
			乘用车	标准 6000 元/kW 上限 20 万 元/辆

轻型客车、 轻型货车	上限 30 万 元/辆	2018 年 的 0.8 倍	燃料电池系统额 定功率 $\geq 30\text{kW}$, 纯 电 续 驶 里 程 \geq 300km	倍补贴, 比值 0.4~0.5 按 0.9 倍补 贴, 比值 ≥ 0.5 按 1 倍补贴
车型	2018年	2019年 过渡期	技术要求	
大中型客车、 中重型货车	上限 50 万 元/辆	2018 年 的 0.8 倍	燃料电池系统额定功 率 $\geq 30\text{kW}$, 纯电续驶 里程 $\geq 300\text{km}$	

资料来源：财政部，车百智库

地方补贴层面，自 2018 年以来各省市也纷纷出台了一系列政策支持与引导氢燃料电池汽车行业的发展。其中在车辆购置环节，地方补贴基本以国家补贴为标准，国家补贴与地方补贴标准范围在 1:0.2~1:1 不等，有些地方采取补贴相关企业或机构的方式来直接支持行业的发展。

按照目前的政策趋势，国家和地方对氢燃料电池汽车补贴力度基本维持，假设补贴方案设置为，未来几年内氢燃料电池汽车的购置补贴减少到当前补贴的 80%。则本报告研究对象的当前与未来补贴方案如下表所示。

图表 27 基于中国政策现状下的补贴方案及未来情景

本报告研究对象	国补方案	国补+地补方案	假设补贴方案
客车	购置补贴 50 万元	购置补贴 100 万元	购置补贴 80 万元
物流车	购置补贴 30 万元	购置补贴 60 万元	购置补贴 48 万元
重卡	购置补贴 50 万元	购置补贴 100 万元	购置补贴 80 万元

资料来源：车百智库

基于国补、国补+地补、未来假设补贴方案三种情景分析，本文研究的客车、物流车、重卡代表车型，在当前技术与规模条件下的车辆购置成本产生不同幅度的降低。

图表 28 主要省市关于氢燃料电池汽车购置的补贴政策统计

序号	省/市/区	政策名称	地方补贴标准
1	安徽合肥	《关于进一步做好我市新能源汽车推广应用工作的通知（征求意见稿）》	按中央 1:0.2 比例补贴。
2	北京	《关于调整完善北京市新能源汽车推广应用财政补助政策的通知》	按照中央与地方 1:0.5 比例安排市级补助。
3	成都	《成都市支持氢能暨新能源汽车产业发展及推广应用若干政策》	对燃料电池汽车给予购置补贴
4	广东广州	《广州市推动新能源汽车发展若干政策》	按照不超过中央 1:1 比例补贴。
5	广东江门	《江门市新能源汽车推广应用地方财政补助实施细则（2016-2020）》	新能源公交客车和燃料电池汽车地方补贴标准按不超过国家补贴的 50% 进行补贴。
6	广东省	《关于加快新能源汽车产业创新发展的意见》	新能源汽车推广应用省级财政补贴资金中 30% 用于支持氢燃料电池汽车推广应用；可按燃料电池装机额定功率进行补贴，最高不超过中央 1:1 比例，补贴总额(国家补贴+地方补贴)最高不超过车辆销售价格的 60%。
7	广西南宁	《南宁市人民政府关于调整完善南宁市新能源汽车地方财政补贴政策的通知》	按中央 1:0.8 比例补贴。自治区和南宁市地方补助政策叠加后，燃料电池汽车获得地方补助是国家标准的 100%。

序号	省/市/区	政策名称	地方补贴标准
8	海南	《关于调整完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》	按中央 1:0.5 比例补贴。
9	河南	《关于调整河南省新能源汽车推广应用及充电基础设施奖补政策的通知》	按中央 1:0.3 比例补贴。
10	湖北武汉	《武汉市新能源汽车推广应用地方财政补贴资金实施细则》	对单位和个人购买的燃料电池汽车，按中央 1:1 比例补贴。
11	湖北襄阳	《关于襄阳市 2018 年新能源汽车推广应用财政支持政策》	按照中央 1:1 比例补贴，燃料电池乘用车 20 万元/辆，燃料电池轻型客车、货车 30 万元/辆，燃料电池大中型客车、中重型货车 50 万元/辆。
12	江苏如皋	《扶持氢能产业发展的实施意见》	对于公共交通、物流运输企业，购买氢燃料电池客车、物流车、专用车开展业务，运行里程达 2 万公里以上的，每辆车给予一次性补贴。
13	江苏镇江	《2018-2020 年镇江市新能源汽车推广应用地方补贴实施细则》	规定在本市上牌的燃料电池汽车补贴标准为当年度中央财政相应车型单车补贴额的 40%。
14	青海	《关于调整 2017 年-2018 年新能源汽车推广应用购置补贴政策的通知》	按中央 1:0.5 比例补贴。
15	山西省	《山西省新能源汽车产业 2019 年行动计划》	按照中央财政补助 1:1 的比例给予省级财政补助
16	陕西省	《推动汽车产业加快发	购买省内生产的氢燃料等汽车，重

序号	省/市/ 区	政策名称	地方补贴标准
		展的支持措施》	卡按每辆 1 万元补助，乘用车按每辆 5000 元补助。
17	上海	《上海市燃料电池汽车推广应用财政补助方案》	燃料电池系统不低于驱动电机额定功率的 50% 或不小于 60kW 的，按照中央 1:1 比例补贴，其他按 1:0.5 比例。
18	深圳	《深圳市 2018 年新能源汽车推广应用财政支持政策》	按中央 1:1 补贴，燃料电池乘用车 20 万元/辆，燃料电池轻型客车、货车 30 万元/辆，燃料电池大中型客车、中重型货车 50 万元/辆。
19	西安	《西安市新能源汽车推广应用地方财政补贴资金管理暂行办法》	公共服务领域(包括公交领域，巡游出租车领域，环卫用车、救护车和校车)的燃料电池车按中央 1:0.5 比例补贴，非公共服务领域按 1:0.3 比例。
20	云南	《云南省加快新能源汽车推广应用工作方案》	按中央 1:0.5 比例补贴。
21	浙江 宁波	《关于宁波市 2018 年新能源汽车推广应用地方财政资金补助政策的通知》	按中央 1:0.5 比例补贴。
22	浙江 绍兴	《绍兴市区 2018 年新能源汽车推广应用财政补助办法》	对国产纯电动、插电式混合动力(含增程式)和燃料电池汽车按中央 1:0.5 比例补贴，补贴总额最高不超过车辆市场指导价的 50%。
23	重庆	《重庆市 2018 年度新能源汽车推广应用财政补贴政策》	按中央约 1:0.4 的比例补贴。

资料来源：政府官网，车百智库

自 2018 年以来各省市陆续出台了多个地方政策推进加氢站建设的规划建设与运营管理工作，加氢站建设根据日加氢能力给予 100~900 万元不等的补贴，有地方采取对面向消费者的氢气销售价格补贴后不超过 20 元/kg 的方式来支持氢燃料电池汽车的运营和使用。

按照目前的政策趋势，国家和地方对氢燃料电池汽车补贴力度基本维持，假设补贴方案设置为，未来几年内氢气销售价格补贴后 20 元/kg。

图表 29 我国主要省市 2018 年以来在加氢站方面的补贴政策统计

	市/区	政策名称	地方补贴标准
1	广东	《关于 2016-2018 年省级新能源汽车充电基础设施建设补贴资金计划的公示》	补贴 2.96 亿元用于新能源汽车充电基础设施建设，其中加氢站 500 万元，城市配额分别为广州 100 万元、佛山 100 万元、云浮 300 万元。
2	广东 佛山 南海	《佛山市南海区促进加氢站建设运营及氢能车辆运行扶持办法（暂行）》	根据加氢站的类型以及建成时间，进行单站 150~800 万元的梯段式补贴。对加氢站运营进行扶持补贴，2018-2019 年对销售价格 40 元/kg 及以下的氢气给予 20 元/kg 的补贴；2020-2021 年对销售价格为 35 元/kg 及以下的氢气给予 14 元/kg 的补贴；2022 年对销售价格 30 元/kg 及以下的氢气给予 9 元/kg 的补贴。
3	广东 广州	《关于组织开展 2019 年（第二批）广州市新兴产业发展补助金项目申报工作的通知》	对加氢站项目采用后补助支持方式，支持额度不超过项目总投资的 20%，单个项目不超过 200 万元。

	市/区	政策名称	地方补贴标准
4	广东 中山	《中山市关于广东省新能源汽车充电基础设施财政补贴专项资金管理实施细则》	符合国家技术标准且加氢能力不少于200kg/d的加氢站给予100万元/站的补贴。
5	江苏 张家港	《张家港市氢能产业发展三年行动计划（2018-2020年）》	对加氢能力达到500kg/d的35MPa加氢站或加氢能力达到200kg/d的70MPa加氢站最高不超过300万元。对加氢能力达到1000kg/d的35MPa加氢站或加氢能力达到400kg/d的70MPa加氢站最高不超过500万元。
6	六安	《六安市人民政府关于大力支持氢燃料电池产业发展的意见》	对加氢能力达到400kg/d的35MPa加氢站或加氢能力达到200kg/d的70MPa加氢站最高不超过200万元。对加氢能力达到1000kg/d的35MPa加氢站或加氢能力达到400kg/d的70MPa加氢站最高不超过400万元。
7	山东 济南 先行区	《先行区促进产业发展十条政策》	在先行区建设运营的商业化、公共服务用的加氢站、油电气氢合建站，最高给予900万元建设补贴。
8	山东 济宁	《关于支持氢能产业发展的意见》	对建设的500kg/d撬装式加氢站，每个补贴400万元；建设的500kg/d固定式加氢站，每个补贴800万元，对加氢站运营销售氢气，按20元/kg补贴。
9	山东 青岛	《青岛市加快新能源汽车产业发展的若干政策措施》	加氢站正式运营后前3年度按照地方经济贡献100%给予奖励，由市、区（市）两级按照现行财政体制共同负担。
10	山西省	《山西省新能源汽车产业2019年行动计划》	对加氢站和氢燃料加注进行适度补贴。

	市/区	政策名称	地方补贴标准
11	山西 长治	《长治市上党区氢能产业扶持办法》	简化加氢站建设项目审批程序，加氢站建设根据加氢能力给予补贴，最高补贴 800 万元。
12	浙江 嘉兴	《关于加快嘉兴氢能产业发展的若干意见》	对加氢站一次性 20% 补助。加氢补贴按 20 元/kg 给予加氢站运营企业加氢补贴（从 2019 年开始），每年补助标准降低 5 元/kg。
13	重庆	《关于印发重庆市 2019 年度新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》	将对加氢站补贴按照日加氢能力分档次给予补贴最高补贴 200 万。同时，区县（自治县）安排有配套补贴的，市级和区县（自治县）两级财政的补贴累加之和不得超过相应加氢站标准造价的 50%。

资料来源：政府官网，车百智库

2.1.2 技术进步和规模升级

在车辆购置成本构成中，车身与电驱动系统技术相对成熟，其成本因而相对刚性，而燃料电池系统、蓄电池系统、储氢系统的成本在未来 10 年仍将持续降低，属于非刚性成本。以 10.5 米级客车为例，氢燃料电池客车的车辆购置成本构成中，非刚性部分的占比达到 73%。

本节主要对车辆购置成本中的非刚性成本展开分析，即燃料电池系统、蓄电池系统、储氢系统，探索其成本下降路径。

2.1.2.1 燃料电池系统

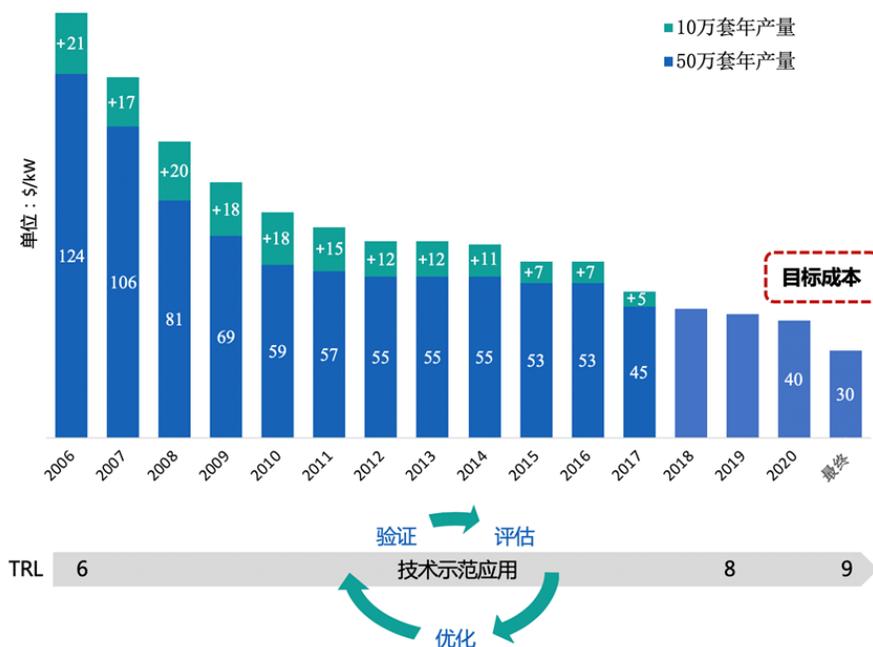
长期来看，随着技术逐步走向成熟与年产规模逐步扩大，燃料电池系统成本将大幅降低。

从技术进步角度看，根据美国能源部（DOE）的研究结果，车用燃料电池技术成熟度由 6 到 8 的发展需要经过很长一段时间的示范应用，在此

期间不断地进行技术验证、评估与优化。燃料电池系统技术升级上，通过开发低铂含量催化剂，非铂催化剂；开发高质子导电性、低气体渗透性和高耐久性的质子交换膜；开发低电阻率、高孔隙率的气体扩散层；；开发能够在极端环境下运行的燃料电池及其组件；优化电堆散热与进气设计、优化氢循环泵流量控制技术等方面，系统成本能够降低一定幅度。由于技术进步带来的降本效应，会随着技术成熟度提高而减弱。

- 美国燃料电池系统的预测量产成本从 2006 年的 124~145 美元/kW 下降到 2012 年的 55~67 美元/kW，成本降幅较大在 55%左右。
- 2012~2017 年，基于 10 万套年产规模的成本从 67 美元/kW 下降到 50 美元/kW，降幅为 25%；基于 50 万套年产规模的成本从 55 美元/kW 下降到 45 美元/kW，降幅为 18%。

图表 30 美国 2006 年以来燃料电池系统预测量产成本



资料来源：美国能源部，车百智库

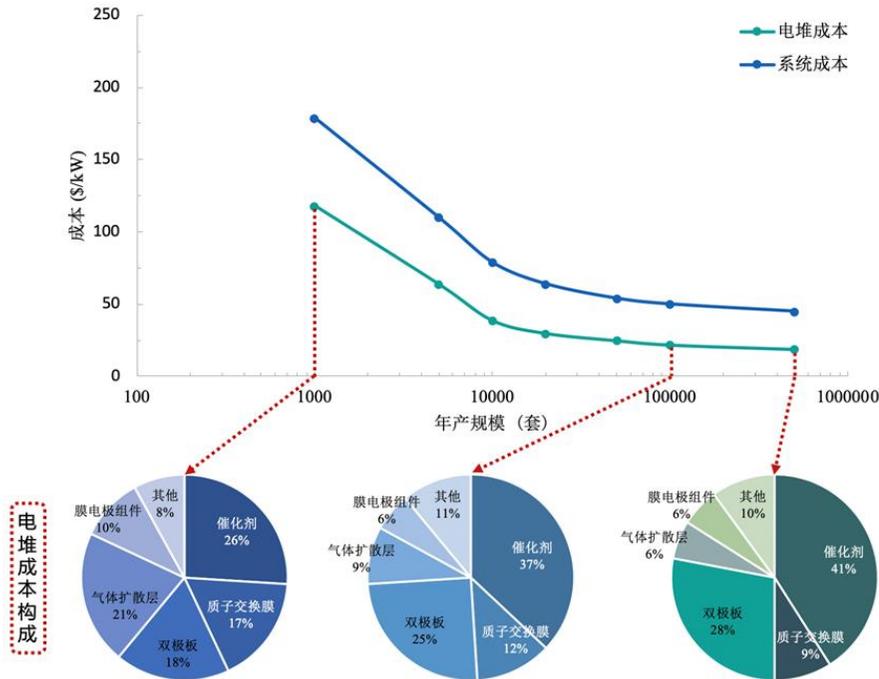
从规模效应来看，如下图所示，按照美国能源部 2017 年的最先进技术水平：

- 车用燃料电池系统在年产规模为 1000 套时，系统预测成本为 179 美元/kW，其中电堆成本 118 美元/kW，占比 66%；
- 当年产规模扩大至 500000 套时，系统预测成本约 45 美元/kW，其中电堆成本 19 美元/kW、占比 44%⁷。

进一步拆分电堆成本可以发现，随着产量规模扩大，催化剂与双极板的成本占比增大，这主要是因为，两者成本以材料成本（分别为铂和金属）为主，对产量相对不敏感。

⁷ 美国能源部 Hydrogen & Fuel Cells Program Records-Fuel Cell System Cost 2017.

图表 31 美国 2017 年燃料电池系统和电堆成本随年产规模变化的预测



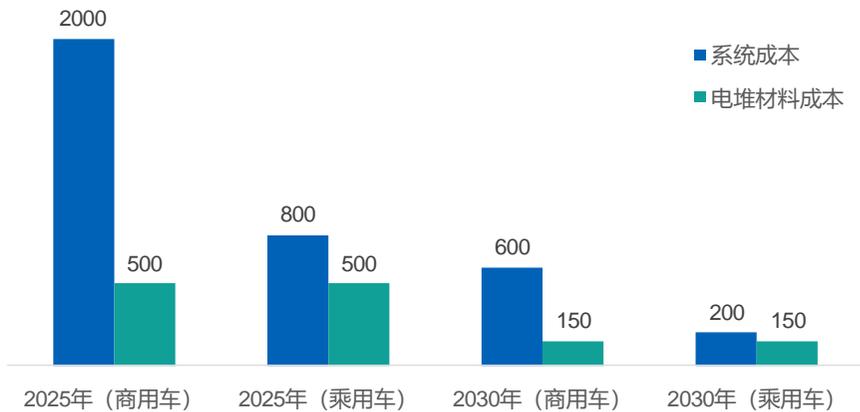
资料来源：美国能源部，车百智库

另外，商业化应用使得系统的量产成本高于工艺法计算成本。根据美国能源部的分析报告，按照 2017 年最先进技术水平，商业化应用的车用燃料电池系统预测成本约为 230 美元/kW（年产规模 1000 套）。成本增高的原因主要是为确保车辆使用寿命，需要在系统设计上考虑更多耐久性的要求，如提高催化剂中铂族金属负载量、使用耐腐蚀性较好的的无定型碳涂层钛双极板而非低成本的不锈钢双极板、使用氢循环泵而非低成本的气喷射器。

根据前文分析，各典型车型的燃料电池系统成本约为 1~2.3 万元/kW，年产规模低于 1000 套。按照我国节能与新能源汽车技术路线图：

- 商用车用燃料电池系统在 2025 年、2030 年的目标成本分别为 2000 元/kW、600 元/kW，电堆材料成本也分别下降至 500 元/kW、150 元/kW。
- 乘用车用燃料电池系统在 2025 年、2030 年的目标成本分别为 800 元/kW、200 元/kW。相应的燃料电池乘用车发动机功率分别为 75kW、100kW，即单台燃料电池乘用车的发动机成本在 2025 年降低到 6 万元/台，到 2030 年发动机成本降低到 2 万元/台。

图表 32 我国车用燃料电池系统成本及电堆材料成本下降目标 (元/kW)



资料来源：《节能与新能源汽车技术路线图》，车百智库

燃料电池电堆成本降低的实现路径主要体现在：催化剂方面，降低铂含量减少原材料成本，并寻找新型非铂催化剂改善催化剂中毒现象；质子交换膜方面，目前市场的进口依赖度较高，未来需加强在材料优化方面的自主研发，开发低成本量产制备工艺；双极板方面，多种技术路线并行发展，技术进步与工艺改进能带来可观的降本结果；气体扩散层方面，目前在燃料电池电堆各部件中技术最成熟、商业化利用潜力最好，未来通过在国内建立批量化的生产设备，开发标准化平台化的产品，降低开发生

产成本，可以大幅降低气体扩散层的制造成本。

图表 33 燃料电池电堆成本下降路径

	优化材料和工艺	规模化量产	标准平台体系
催化剂	√		
质子交换膜	√	√	
双极板	√		
气体扩散层		√	√

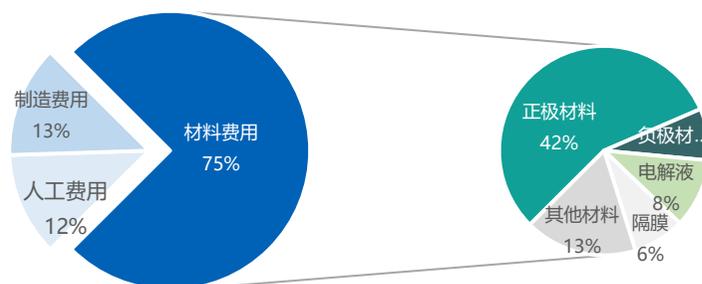
资料来源：广证恒生，车百智库

2.1.2.2 蓄电池系统

不同于燃料电池系统的技术发展阶段，动力电池技术已经较为成熟，其电芯成本构成中原材料成本占比可达到 75%，人工费用、制造成本等占比较小，由规模效应带来的边际效应逐步减小。2014~2017 年，锂电池销售价格从 2478 元/kWh 下降到 1410 元/kWh，年均降幅为 17%，其中能量密度提升和全产业链生产效率提升的贡献率分别为 47%、53%。

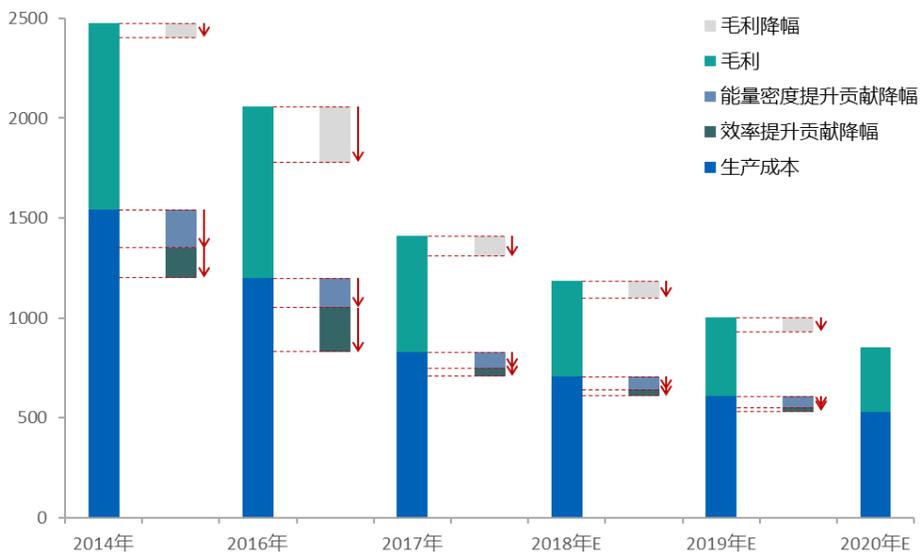
下一阶段电池系统成本的下降主要依赖于重大技术突破和电池企业自身精细化经营。按照当前动力电池主流技术路线的发展，至 2020 年系统成本预计下降至 128~174 美元/kWh（折合人民币约 881~1197 元/kWh），锂电池系统平均价格有望在 2025 年降到 109 美元/kWh（约 750 元/kWh），2030 年达到 75 美元/kWh（约 516 元/kWh）。

图表 34 动力锂电池电芯成本结构 (以 18650 三元电池为例)



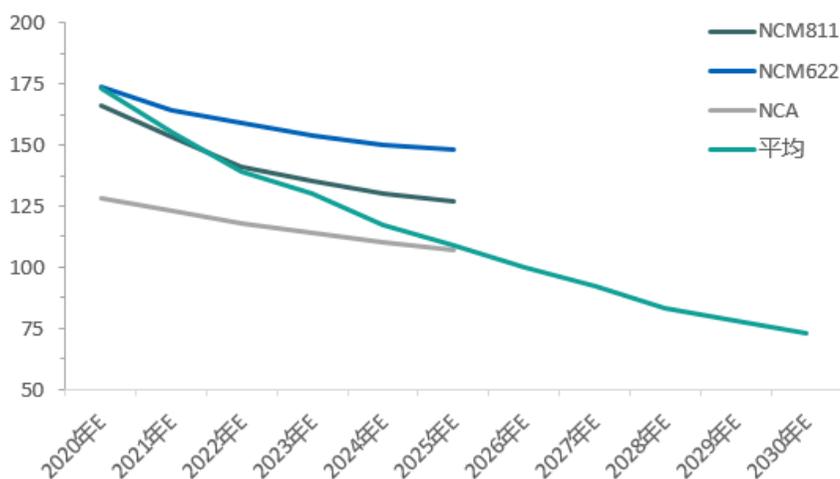
资料来源：公开资料，车百智库

图表 35 锂电池成本下降的贡献度分析 (元/kWh)



资料来源：华创证券，车百智库

图表 36 未来锂电池系统成本下降趋势预测 (\$/kWh)



资料来源： Bloomberg NEF，车百智库

按照目前国际上氢燃料电池汽车发展趋势来看，大功率燃料电池加上低容量蓄电池系统是主要技术发展趋势，因此蓄电池系统占整车的成本比重将逐渐缩小。

2.1.2.3 车载储氢系统

储氢系统由储氢瓶、阀体、氢循环泵、管路及附件构成，目前国际市场均以 70MPa 气态储氢技术为主，国内已实现商业化应用的客车、物流车应用的储氢瓶以 35MPa 的 III 型瓶为主，并有相当数量的国内企业正在布局 IV 型瓶的技术研发与制造，未来储氢瓶技术将向着轻量化、高压力、大容量、低成本的方向发展。

根据我国节能与新能源汽车技术路线图，在产业化技术路线上，我国以边产业化边技术攻关的方式，逐步提升相关技术参数如质量储氢率、体积储氢密度并降低系统成本达到产业化要求，解决关键阀门组件的生产能力，满足行业发展需求。在关键时间节点上：

- 2025 年实现质量储氢率达到 5.5%，体积储氢率达到 40g/L，单瓶 6.0kg 级车载储氢能力，突破 70MPa 储氢瓶批量化生产技术，并可开发出一体式高压瓶阀。
- 2030 年实现质量储氢率达到 7.5%，体积储氢率达到 70g/L。

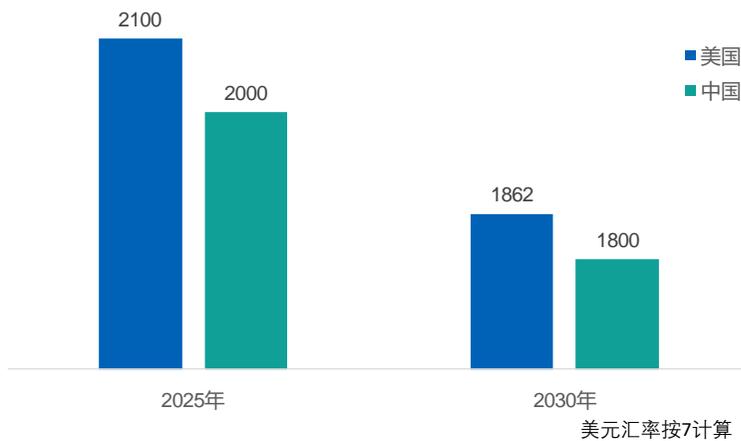
图表 37 我国储氢系统关键性能指标发展目标

	质量储氢率	体积储氢率	单瓶储氢能力
2025 年	5.5%	40g/L	6.0kg
2030 年	7.5%	70g/L	6.0kg

资料来源：《节能与新能源汽车技术路线图》，车百智库

我国目前储氢系统的成本普遍在 1 万元/kg 左右，参照国内外技术目标仍有较大成本下降空间，我国节能与新能源技术路线图计划到 2025、2030 年车载储氢系统的成本将逐步下降至 2000 元/kg、1800 元/kg。

图表 38 中国与美国储氢系统成本下降目标（元/kg）



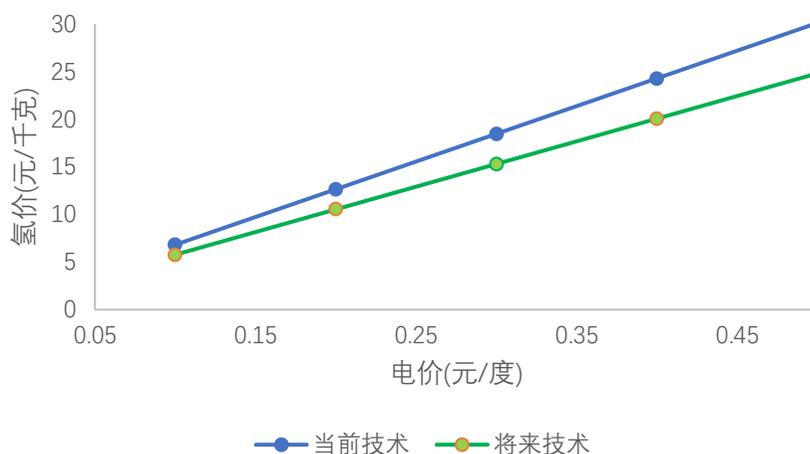
资料来源：美国能源部，《节能与新能源汽车技术路线图》，车百智库

2.1.3 电价下降及碳排放政策

由于能源结构转型、温室效应及技术进步等因素，中国可再生能源在能源结构中的占比将逐渐扩大，根据中石油发布的《中国可再生能源展望》，到 2050 年，中国可再生能源占比将达 30~47%。

在制氢端，电解水制氢成本受电价影响显著。随着可再生能源的大规模应用及发电技术的逐渐提升，将促使电价的下降及可再生能源的进一步发展，随着电价降低，电解水制氢成本优势将逐渐变大，考虑到碳排放限制等因素，电解水制氢应用范围将逐步扩大。

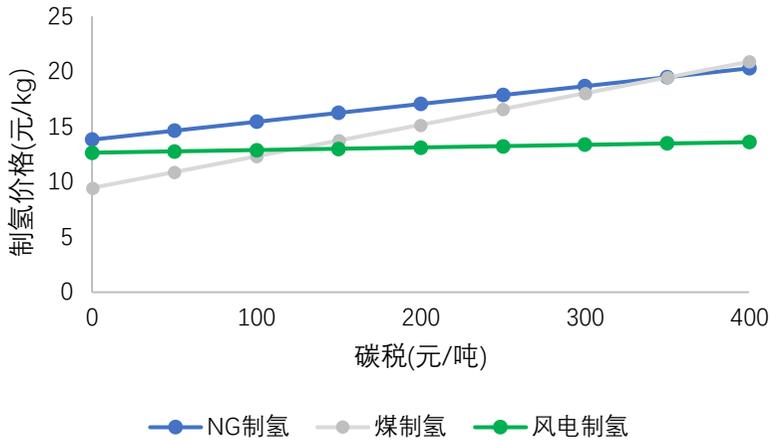
图表 39 电解水制氢原料成本的敏感度分析



资料来源：未势能源，车百智库

如果考虑未来碳税的影响，则可再生能源电解水制氢优势非常明显。假设风电电价为 0.2 元/kWh，天然气价为 2.5 元/m³，煤价为 600 元/吨，制氢规模均为 10 吨/天，应用美国考虑碳排放因素在内的 GREET 模型，填入 2019 年中国碳排放因子进行计算，则随着碳税的改变，不同制氢方式的成本对比如下图所示。

图表 40 碳税对不同制氢方式成本的影响

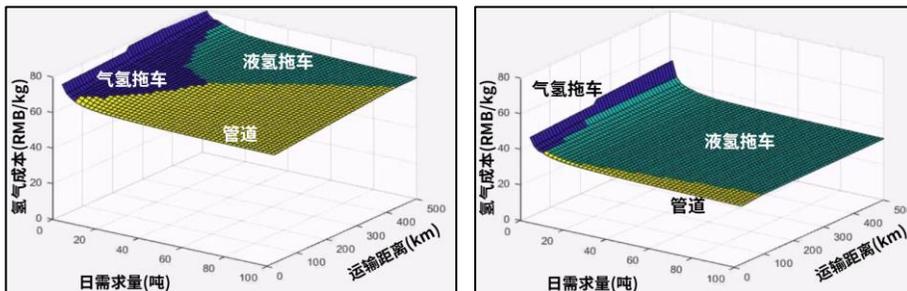


资料来源：未势能源，车百智库

在运输端，由于液氢液化过程耗电量较大，故随着电价降低，液氢运输适用范围将越来越大。随着液氢的大范围应用，中国可利用西氢东输，逐步实现能源布局的优化及能源效率的提升。

图表 41 不同电价下的氢气运输方式边界

(左图 0.7 元/kWh, 右图 0.2 元/kWh)



资料来源：未势能源，车百智库

由于中国能源分布的不均衡，可再生能源资源较丰富的地区基本分布于西部，而氢能需求大部分位于东部，故如果使用可再生能源制氢，需要长距离液氢运输。假设制氢及运输规模为 10 吨/天，可再生能源（此处用风能）制氢液氢拖车运输距离 1000km，化石能源制氢气拖车运输距离 300km。综合考虑制氢、压缩/液化、运输及加氢站耗电等因素，则每 kg 可再生能源制氢碳排放较天然气制氢少 6.2kg，比煤制氢少 17.8kg。

氢能供应方面，氢气的终端价格降低需依靠上游产业链制氢、储运、加氢各环节的整合，寻找更经济的氢气来源、采用更经济的氢气制取方式和氢气运输渠道。目前国内加氢站氢气销售价格区间在 30~80 元/kg，已有 1000kg/d 规模的在站制氢项目案例，在 0.3 元/kWh 电价下能达到氢气成本 30 元/kg 以下。未来，随着用氢需求的扩大，结合可再生能源的分布式制氢加氢一体站、氢能产业链部件随着规模增加及技术的提升，价格进一步下降、经济高效的集中式制氢与液氢储运的方案，将有望将面向消费者的氢气终端销售价格降低至 20 元/kg（日本 2030 年目标约 20 元/kg）。

图表 42 日本氢能战略关于氢能供应的目标

	氢能供应规模	氢能供给价格	加氢站
总体目标	2020 年 0.4 万吨 2030 年 30 万吨 远期 1000 万吨以上	化石能源+CCS: 2030 年约 1.8 元 / Nm ³ 远期约 1.2 元 / Nm ³	2030 年 900 座
总体战略	通过与资源国构建政府级合作关系扩大氢能供给网络 确立国内可再生能源制氢技术，远期实现无碳排放制氢（褐煤+CCS、可再生）	褐煤制氢： 制氢成本降至约 0.72 元 /Nm ³ ，氢气液化效率提高至 6kWh/kg，液化氢储存设备达到 5 万 m ³ 可再生能源制氢： 2030 年电解水装置系统成本降低到约 3000 元/kW,能	2025 年，建设成本降至 1200 万元 运营成本降至 90 万元/年 压缩机成本降至 300 万元 储氢罐成本降至 60 万元

		耗降低至 4.3 kWh/Nm ³	
--	--	------------------------------	--

资料来源: 日本《氢能燃料电池路线图 (2019 年 3 月)》, 日本《氢能基本战略 (2017 年 12 月)》, 以日元汇率 0.06 计算, 车百智库

综合可再生能源发电成本下降和碳税等因素, 我们预测 2025 年中国氢气价格约 35 元/kg, 2030 年能达到 25 元/kg。

2.1.4 其他因素

车辆维护成本方面随着燃料电池技术不断成熟, 并且车企普遍替用户承担全生命周期内燃料电池系统等关键零部件的维修与养护成本, 从消费者角度来看承担的全生命周期维护成本只是车辆日常维护成本, 变动较小。

车辆残值部分, 目前尚没有相关数据, 氢燃料电池车和传统汽车残值的主要区别在于燃料电池系统残值, 随着技术进步, 铂催化剂的用量逐步减少, 车辆报废后铂回收价值减少等因素影响, 未来车辆残值或将略有下降。

2.2 不同车辆未来全生命周期成本变化趋势

2.2.1 客车

2.2.1.1 车辆购置成本

在假设补贴方案中, 氢燃料电池客车将享受 80 万元的购置补贴, 则按当前技术与规模条件的 10.5 米级客车仍需要消费者承担 115 万元的购置成本。

考虑技术进步与规模升级的因素, 氢燃料电池客车在 2025 年整车购置成本控制在 70 万元。到 2030 年整车购置成本将降低到 55 万元。

图表 43 我国氢燃料电池客车未来购置成本 (以 10.5 米级客车为例)

	2025年	2030年
燃料电池系统成本 (元/kW)	2000	600
蓄电池系统成本 (元/kWh)	750	516
储氢系统成本 (元/ kg)	2000	1800
寿命 (年)	8	8
整车购置成本 (万元)	70	55

资料来源：中通客车，车百智库

2.2.1.2 车辆维护成本

目前氢燃料电池汽车大多采用 8 年以上质保，质保期内用户不需要承担动力系统的维修养护成本。以客车为例：

随着燃料电池系统的耐久性不断提高，氢燃料电池客车的维护成本也会逐年降低，2025 年客车领域的燃料电池寿命基本达到 15000 小时，则在客车长达 8 年的全生命周期使用过程中，需更换电堆 1 次，2030 年燃料电池寿命基本达到 30000 小时，则在全生命周期使用过程中无需更换电堆。

图表 44 我国氢燃料电池客车的车辆维护成本预测 (10.5 米级客车为例)

指标	2025 年	2025年	2030年	2030年
	客观 MC	消费者需承担部分	客观MC	消费者需承担部分
日常车辆保养	1.5 万元/年	1.5 万元/年	1 万元/年	1 万元/年
动力系统保养	1.2 万元/年	0	0.7 万元/年	0
动力系统更换	25 万元/次	0	0	0
全生命周期 维养成本	46.6 万元	12 万元	13.6 万元	8 万元

资料来源：中通客车，车百智库

2.2.1.3 能源使用成本

通过氢燃料电池汽车的技术进步，车辆的综合氢耗有望下降。根据我国节能与新能源汽车技术路线图数据，商用车以 12 米级公交客车为典型车型，平均百公里氢耗在 2025 年、2030 年分别降至 6.5kg/100km、6 kg/100km 以下；对于 10.5 米级的公交车，我们按照车长等比例折算，得到 2025 年和 2030 年的平均百公里氢耗分别为 5.69 kg/100km 和 5.25 kg/100km。

行驶里程方面，假设各车型的使用场景与当前一致，因此采用当前阶段的行驶里程计算，则 2025 年和 2030 年的全生命周期能源使用成本分别为 114.7 万元和 75.6 万元。

图表 45 我国氢燃料电池客车的能源使用成本预测（10.5 米级为例）

	2025	2030
百公里氢耗 (kg/100km)	5.69	5.25

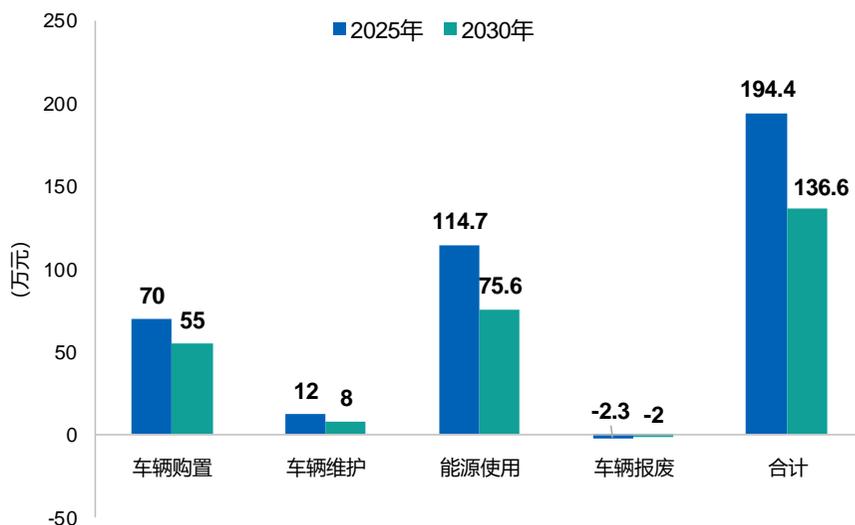
氢气价格 (元/kg)	35	25
行驶里程 (万km)	57.6	57.6
能源使用成本	114.7	75.6

资料来源：节能与新能源汽车技术路线图，车百智库

2.2.1.4 小结

综合上述部分经济性测算，随着技术进步，铂催化剂的用量逐步减少，车辆报废后铂回收价值减少。预测 10.5 米级公交车的报废残值分别为 2025 年 2.3 万元、2030 年 2 万元，得出氢燃料电池客车总的全生命周期成本为：

图表 46 氢燃料电池客车的全生命周期成本预测



资料来源：车百智库

2.2.2 物流车

2.2.2.1 车辆购置成本

在假设补贴方案中，氢燃料电池轻型物流车将享受 48 万元的购置补贴，则按当前技术与规模条件的 9 吨级物流车需要消费者承担 82 万元的购置成本。考虑技术进步与规模升级的因素，氢燃料电池物流车在 2025 年整车购置成本控制在 65 万元，到 2030 年整车购置成本将降低到 50 万元。

图表 47 我国氢燃料电池物流车未来购置成本（以 9 吨级物流车为例）

	2025 年	2030 年
燃料电池系统成本 (元/kW)	2000	600
蓄电池系统成本 (元/kWh)	750	516
储氢系统成本 (元/ kg)	2000	1800
寿命 (年)	8	8
车辆购置成本 (万元)	65	50

资料来源：车百智库

2.2.2.2 车辆维护成本

随着燃料电池系统的耐久性不断增加，氢燃料电池物流车的维护成本也会逐年降低，2025 年和 2030 年物流车领域的燃料电池寿命基本达到 15000 小时和 30000 小时，则在物流车长达 8 年的全生命周期使用过程中，氢燃料电池物流车不需更换电堆，目前氢燃料电池物流车订单中，大多数都已经包含氢燃料电池发动机系统的质保的要求，到 2025 年和 2030 年的时候，燃料电池系统的寿命已远超这个要求，到 2025 年和 2030 年可以认为用户需要承担的全生命周期维修养护成本为 12 万元和 8 万元。

图表 48 9 吨级氢燃料电池物流车的车辆维护成本预测

指标	2025 年	2025 年	2030 年	2030 年
	客观 MC	消费者需承担部分	客观 MC	消费者需承担部分
日常车辆保养	1.5 万元/年	1.5 万元/年	1 万元/年	1 万元/年
动力系统保养	0.8 万元/年	0	0.5 万元/年	0
动力系统更换	0	0	0	0
全生命周期 维养成本	18.4 万元	12 万元	12 万元	8 万元

数据来源：中通客车，车百智库

2.2.2.3 能源使用成本

通过氢燃料电池汽车技术进步，车辆的综合氢耗有望下降。根据我国节能与新能源汽车技术路线图，商用车以 12 米级公交客车为典型车型，平均百公里氢耗在 2025 年、2030 年分别降至 6.5kg/100km、6 kg/100km 以下。

假设随着技术进步，物流车的百公里氢耗相比于当前阶段，在 2025 年下降 7.14%，在 2030 年下降 14.28%。则物流车的百公里氢耗量在 2025 年、2030 年分别为 2.6 kg/100km 和 2.4 kg/100km。

行驶里程方面，假设各车型的使用场景与当前一致，因此采用当前阶段的行驶里程计算，则 2025 年、2030 年能源使用成本分别为 32.8 万元和 21.6 万元。

图表 49 我国氢燃料电池物流车的能源使用成本预测

	2025	2030

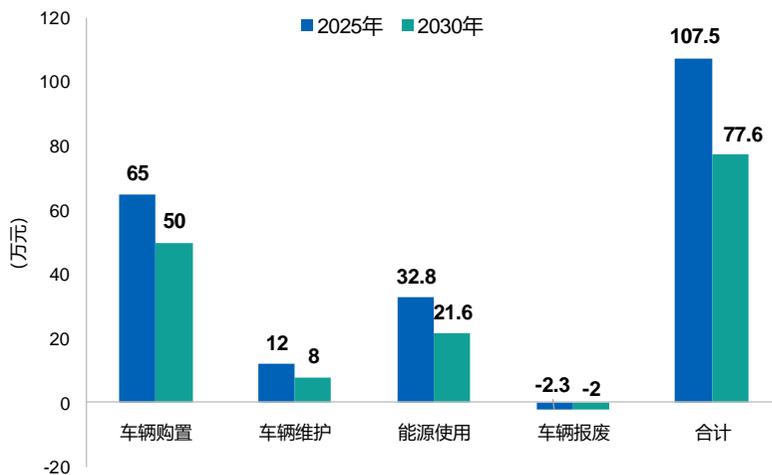
百公里氢耗 (kg/100km)	2.6	2.4
氢气价格 (元/kg)	35	25
行驶里程 (万 km)	36	36
能源使用成本	32.8	21.6

资料来源：《节能与新能源汽车技术路线图》，车百智库

2.2.2.4 小结

综合上述部分经济性测算,预测 9 吨级物流车的报废残值分别为 2025 年 2.3 万元、2030 年 2 万元,从而得出氢燃料电池物流车总的全生命周期成本为:

图表 50 氢燃料电池物流车的全生命周期成本预测



资料来源：车百智库

2.2.3 重卡

2.2.3.1 车辆购置成本

在假设补贴方案中，氢燃料电池重卡将享受 80 万元的购置补贴，则按当前技术与规模条件的重卡需要消费者承担 70 万元的购置成本。

考虑技术进步与规模升级的因素，2025 年 42 吨级氢燃料电池重卡可从目前 150 万的整车成本降至 100 万以下，2030 年争取进一步降低至 60 万左右。

图表 51 我国氢燃料电池重卡购置成本预测

	2025 年	2030 年

重卡 (42 吨级)	100 万元	60 万元
------------	--------	-------

数据来源：上海捷氢科技，车百智库

2.2.3.2 车辆维护成本

相对于当前 13.6 万元的全生命周期维护成本，客车的维护成本在 2025 年和 2030 年分别下降了 11.76% 和 41.18%。考虑到维护成本在全生命周期成本中占比较小，我们按照客车的维护成本下降趋势（2025 年下降 11.76%、2030 年下降 41.18%）去预测重卡的全生命周期维护成本。

图表 52 我国氢燃料电池重卡的车辆维护成本预测

	2025 年	2030 年
重卡 (42 吨级)	5.7 万元	3.8 万元

资料来源：车百智库

2.2.3.3 能源使用成本

假设随着技术进步，重卡的百公里氢耗相比于当前阶段，在 2025 年下降 7.14%，在 2030 年下降 14.28%。则重卡的百公里氢耗量在 2025 年、2030 年分别为 8.1 kg/100km 和 7.5 kg/100km。

行驶里程方面，假设各车型的使用场景与当前一致，因此采用当前阶段的行驶里程计算，则 2025 年、2030 年能源使用成本分别为 207 万元和 137 万元。

图表 53 我国氢燃料电池重卡的能源使用成本预测

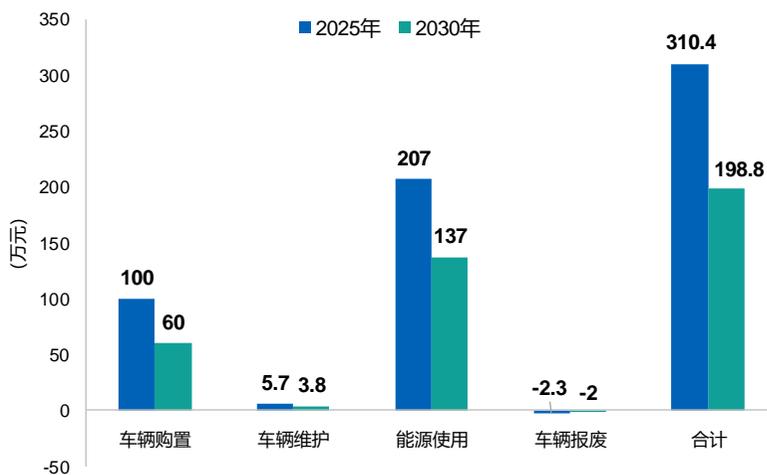
	2025	2030
百公里氢耗 (kg/100km)	8.1	7.5
氢气价格 (元/kg)	35	25
行驶里程 (万 km)	73	73
能源使用成本 (万元)	207	137

资料来源：《节能与新能源汽车技术路线图》，车百智库

2.2.3.4 小结

综合上述部分经济性测算，预测 42 吨级重卡的报废残值分别为 2025 年 2.3 万元、2030 年 2 万元，得出氢燃料电池重卡总的全生命周期成本为：

图表 54 氢燃料电池重卡的全生命周期成本预测



资料来源：车百智库

2.3 小结

在技术进步及规模升级后、用氢市场需求与上游氢能供应相匹配的条件下，根据车辆的燃料经济性、耐久性等指标的分析，于 2030 年氢燃料电池汽车的全生命周期经济性有明显提升。并且，氢燃料电池汽车在续航里程、低温环境适应性、安全性、能量补给速度等方面在新能源汽车技术路线中具有其独特的综合优势，按上述分析，在不依赖补贴的情况下最终氢燃料电池各个车型将能实现市场化。

图表 55 技术与规模升级效应下 2025、2030 年氢燃料电池汽车的全生命周期经济性

	客车		物流车		重卡	
	2025	2030	2025	2030	2025	2030
购置成本	70	55	65	50	100	60
维护成本	12	8	12	8	5.7	3.8
能源成本	114.7	75.6	32.8	21.6	207	137
残值	-2.3	-2	-2.3	-2	-2.3	-2
合计	194.4	136.6	107.5	77.6	310.4	198.8

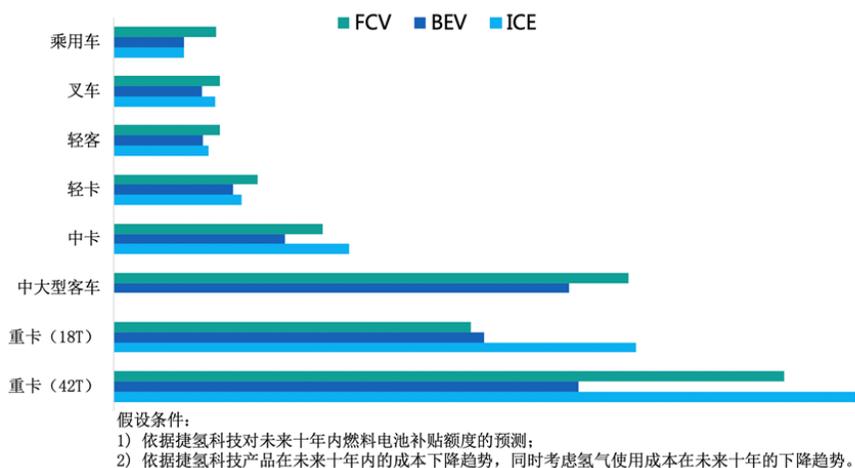
资料来源：车百智库

随着未来氢燃料电池汽车的全生命周期成本不断下降，其经济性也将逐步体现。本文针对几个典型燃料电池车型做了全生命周期经济性的分析。尚未对电动汽车和燃油车的全生命周期成本进行分析。

在不同燃料的车型经济性对比方面，捷氢科技针对性的做了很多工作。一并附上，供大家参考。

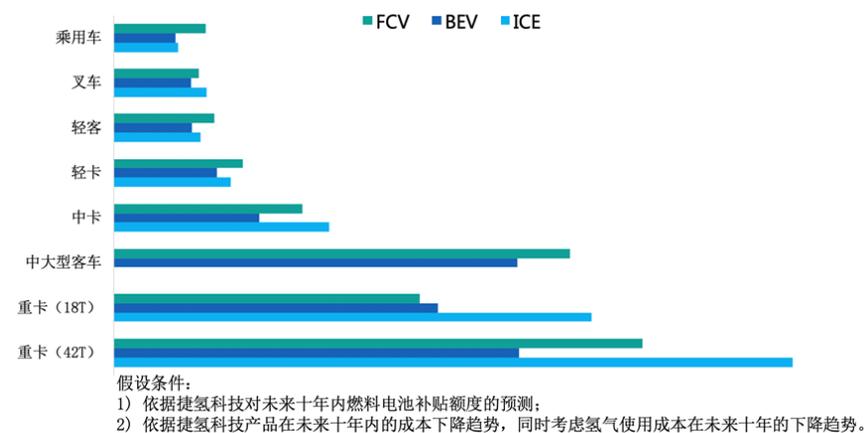
根据捷氢科技的预测，2025 年和 2030 年，在 18 吨重卡领域，氢燃料电池车型相对于纯电动车型（BEV）和燃油车型（ICE）均具有经济性。

图表 56 不同动力形式车型 TCO 对比 (2025 年)



数据来源: 上海捷氢科技提供, 车百智库

图表 57 不同动力形式车型 TCO 对比 (2030 年)



数据来源: 上海捷氢科技提供, 车百智库

2025 年, 在 H_2 价格 25 元/kg 基础上, 相比 ICE, 货车存在经济性。但与 BEV 相比, 仅 18T 重卡车型存在经济性。

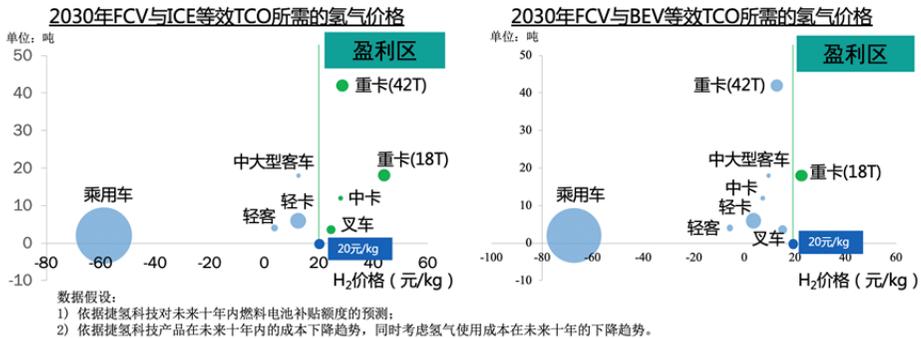
图表 58 氢燃料电池汽车与同级 ICE 和 BEV 车型等效 TCO 时所需的氢气价格 (2025 年)



数据来源: 上海捷氢科技提供, 车百智库

2030 年在 H₂ 价格 20 元/kg 基础上, TCO 存在优势的车型仍为重卡。

图表 59 氢燃料电池汽车与同级 ICE 和 BEV 车型等效 TCO 时所需的氢气价格 (2030 年)



数据来源: 上海捷氢科技提供, 车百智库

三、建议

氢燃料电池汽车市场的成功发展取决于许多因素，包括强力的市场支持政策、充足的加氢站网络、适当的安全性、法规标准以及消费者意识的增强。在这些因素中，充足的加氢站网络覆盖是发展氢燃料电池汽车的必要条件，初期加氢站数量的不足会极大影响氢燃料电池汽车消费者的使用意愿。现阶段，氢燃料电池汽车不具有成本优势，且科研开发和技术创新的投资数额巨大。在发展初期，存在发展混乱等问题，需要政府针对可以撬动整个产业链健康发展的关键领域进行政策扶持及补贴，对加氢站及氢燃料电池汽车的协同发展进行综合规划，并尽可能保证政策的稳定性和可预期性，促进产业的健康发展。

首先，针对国内氢能发展混乱的问题，建议建立一个政府与行业的合作组织，对氢能产业链进行全面的分析及规划，以帮助应对安全、法规和标准、公众意识/教育及加氢站网络建设过程中的挑战。在德国、美国加利福尼亚及日本等很多国家，政府和行业都建立了合作组织，联合进行产业规划，且对规划中遇到的问题及解决方案发布了很多报告。建议国内也成立一个类似的合作组织，充分阅读及吸收国外氢能规划过程中的失败教训及成功经验，促进国内安全、标准、公众意识及加氢站网络建设等众多方面的有序提升及健康发展，避免政府及社会资源的浪费。

针对国内氢燃料电池汽车示范过程中由于氢气成本高昂导致的示范及推广成本昂贵，极大限制了产业发展，建议对加氢站网络进行合理规划，对氢气销售端给予充分的先期财政支持。对氢能端的着重补贴，可极大的降低汽车运维费用，从而提高燃料电池汽车的使用率，促进产品示范、推广及技术验证。和车辆推广相匹配的合理的车站网络规划可保证加氢站建设在氢燃料电池汽车数量最多、氢需求最大且最有盈利潜力的地方，通过

提升初期氢能相关企业的盈利能力，建立示范效应，促进产业发展。

为撬动产业链发展，建议补贴重点放在燃料电池部件端。氢燃料电池汽车降本重点在降低燃料电池系统的成本，而燃料电池系统的应用范围不仅局限于汽车，美国和日本初期推广燃料电池时，推广对象更多集中于固定电源、热电联供等更适合燃料电池发挥作用的领域，随着推广数量的增加，逐步发挥规模经济优势来降低部件成本，从而实现了快速产业化。建议将补贴重点放在燃料电池端，促进燃料电池在船舶、固定发电等多领域的成本竞争优势及新应用领域的发现及发展，进而促进产业融合，推动氢能产业链健康发展。

建议由权威、高层级的专业协会牵头，组织行业共享研发资金、资源，分领域、分侧重点地开展研发工作，共同推进核心部件的国产化。

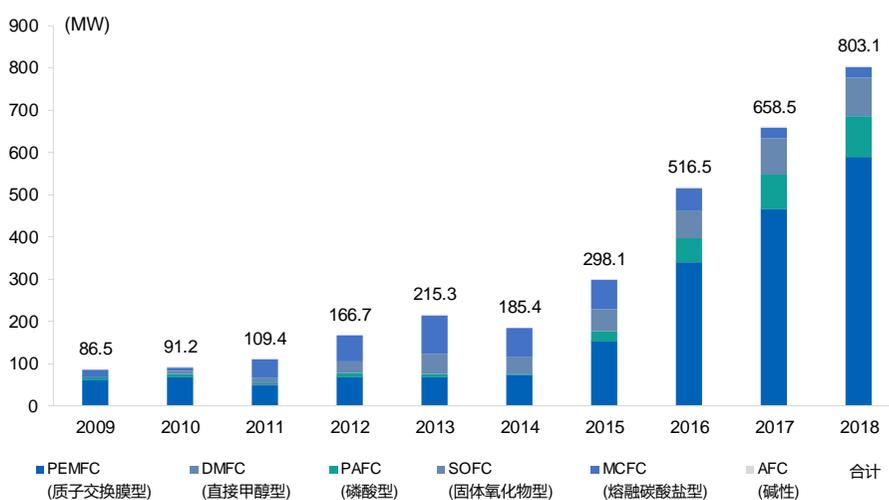
可考虑建立综合全生命周期成本、性能、能耗、效率、碳排放等多项指标的车辆评定体系，并以此评定结果为基础设立补贴、激励机制，从而促进国内燃料电池汽车市场竞争力的提升。

四、附录：燃料电池汽车行业动态

4.1 市场动态

2018年，全球燃料电池出货量达到803 MW。从燃料电池类型看，质子交换膜燃料电池发展最为迅速。2015~2018年，质子交换膜燃料电池全球出货量年均复合增长率达到69%。

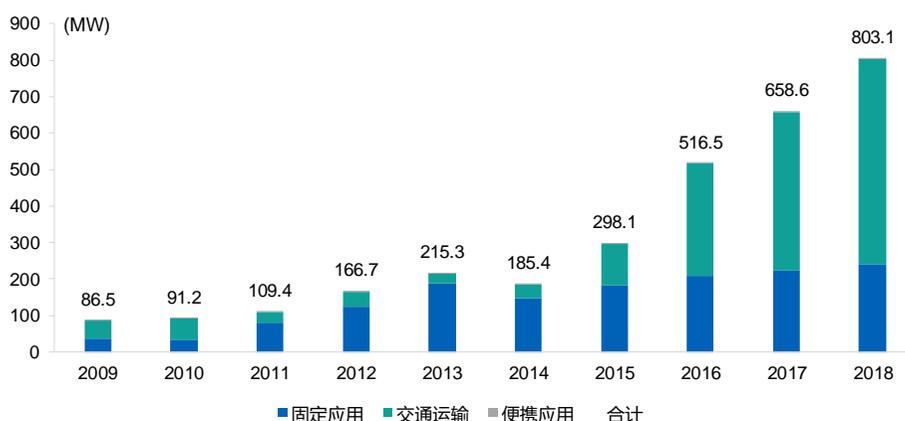
图表 60 全球不同类型燃料电池出货量



资料来源：The Fuel Cell Today Industry Review 2013，Fuel Cell Today Industry Review 2018，车百智库

从燃料电池应用领域看，2013年以来，燃料电池在交通运输领域的出货量迅速增长，2018年，交通运输领域的燃料电池出货量占比达70%，是燃料电池目前的主要应用领域。

图表 61 全球燃料电池不同应用领域的出货量

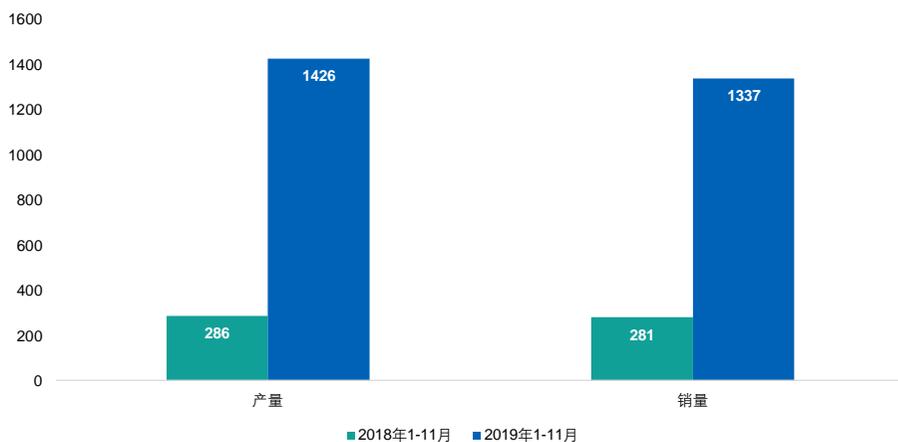


资料来源: The Fuel Cell Today Industry Review 2013, Fuel Cell Today Industry Review 2018, 车百智库

全球不同国家和地区来看, 欧美日韩等国家和地区在燃料电池领域不断布局, 并以交通领域作为突破口。美国在 2019 年 11 月发布的《美国氢能经济路线图》中提出, 到 2030 年, 美国在行驶的氢燃料电池汽车将达到 530 万辆, 氢燃料电池汽车的总拥有成本 (TCO) 将在 2025 至 2030 年与传统内燃机汽车持平。韩国在氢经济发展路线图中也计划到 2040 年氢燃料电池汽车累计产量增至 620 万辆。

中国氢燃料电池汽车市场规模在 2019 年增长迅速。2019 年 1~11 月, 中国氢燃料电池汽车累计产销量分别为 1426 和 1337 辆, 同比分别增长 398.6% 和 375.8%。

图表 62 中国氢燃料电池汽车的累计产销量 (2019 年 1~11 月)



资料来源：中国汽车工业协会，车百智库

4.2 公交车

公交车作为当前燃料电池在交通领域的重要应用场景，近年来发展迅速。2019 年以来，中国多个省市新开通了氢燃料电池公交车路线，开通线路比较多的省市及地区主要有河北张家口、广东佛山、山西大同和山东等。

图表 63 中国各省市 2019 年以来新开通的氢燃料电池公交线路

时间	省市	城市	公交数量	公交车供应商	燃料电池系统供应商	备注
2019/11/24	山东	济南	40		潍柴动力	交付及示范运行开通仪式举行
2019/11/20	江苏	盐城	10	南京金龙	江苏兴邦能源科技有限	首条氢燃料电池公交

时间	省市	城市	公交数量	公交车供应商	燃料电池系统供应商	备注
				客车	公司提供动力总成	车示范线开通
2019/11/9	山东	济宁	10	中通客车	潍柴动力	首条氢能公交示范线路在兖矿国宏化工有限公司举行启动仪式
2019/11/5	福建	福州		厦门金龙汽车	雪人股份	福建省首批氢燃料电池公交巴士在福州市长乐区 616 路闽运公交线路上线运营，百公里氢耗约 4.2kg
2019/11/4	上海				爱德曼 60kW 燃料电池系统	长三角生态绿色一体化发展示范区区域公交开行仪式，最高车速 70km/h，氢耗量实测百公里 3.8kg 左右
2019/11/22	河北	张家口	30	福田欧辉		12 米氢燃料电池公交车投入 2 路运营
2019/10/29	河北	张家口	8	福田欧辉		氢燃料电池公交 K2 线路开通
2019/10/26	河北	张家口	12	福田欧辉		氢燃料电池公交 K1 线路开通
2019/10/26	浙江	嘉善	10	厦门金旅客车	爱德曼	浙江省首条氢燃料电池公交线在嘉善开通运行，2019 年内，嘉善还将投入 40 辆氢燃料电池公交车，陆续投放到 205、211、103、218、219 等城市和城

时间	省市	城市	公交数量	公交车供应商	燃料电池系统供应商	备注
						乡公交线路，另有一条线路将抵达上海。
2019/9/17	广东	佛山	4			2019年西樵镇公交出行宣传周及无车日活动暨氢能源公交车启动仪式在西樵汽车客运站举行
2019/8/26	山西	大同	10			大同新开通的33路氢能源公交线路正式上线
2019/7/24	山西	大同		中通客车		大同62路全部更新为中通氢能源空调公交车
2019/7/18	山西	大同	20		雄韬氢雄45kW燃料电池发动机系统	大同201路全线20部车辆全部更新为氢燃料电池公交车
2019/8/24	山东	聊城	30	中通客车		氢燃料电池公交车正式上线运营，首批30辆氢燃料公交车投放至K11路和K351路两条线路。
2019/8/23	山东	潍坊		中通客车	潍柴动力	潍坊创建氢能示范城市暨潍柴氢燃料电池公交车启动仪式
2019/6/14	江苏	张家港	15	宇通客车（10辆）、苏州金龙	亿华通（7辆）、上海重塑（8辆）	苏州市首条氢燃料电池公交线路“港城公交28路”在张家港正

时间	省市	城市	公交数量	公交车供应商	燃料电池系统供应商	备注
				客车（5辆）		式开通运营。
2019/7/29	四川	成都	20	中植一客	亿华通	首批 20 辆氢燃料电池客车交付成都经开区（龙泉驿区）使用
2019/5/29	湖北	武汉	21		武汉泰歌	武汉开发区（汉南区）21 辆氢能源公交车正式上线示范运营
2019/1/16	广东	云浮				云浮市 Q102 路 11 米氢能源公交示范线正式投入运营

资料来源：公开资料统计，车百智库

2019 年四季度以来，已有多个地区发布氢燃料电池公交车（客车）招标及中标信息，主要有广东佛山氢燃料电池公交车采购项目、武汉市东湖新技术开发区氢能源公交车采购项目等。具体的中标信息见下表。

图表 64 2019 年四季度以来氢燃料电池公交车中标情况统计

地区	项目名称	中标车企	中标金额 (万元)	中标数量 (辆)	单车价格 (万元)
广东省 佛山市 南海区	氢燃料电池公交车采购项目（第一、二批）	云南五龙	37560	200	187.8
广东省	氢燃料电池公	厦门金龙旅行	36800	186	198

地区	项目名称	中标车企	中标金额 (万元)	中标数量 (辆)	单车价格 (万元)
佛山市南海区	交车采购项目 (第三、四批)				
武汉市东湖新技术开发区	氢能源公交车采购项目	武汉泰歌	1380	10	138
广东省佛山	三水国鸿公交公司新能源公交车采购项目-01包	飞驰汽车与广东飞驰汽车贸易有限公司组成的联合体	8733	41	213
广东省佛山	禅南公共交通有限公司氢能源公交车采购项目	飞驰汽车与广东名阳集团有限公司组成的联合体	7135.8	42	170

资料来源：公开资料，车百智库

4.3 物流车

目前，国内氢燃料电池物流车主要服务于快递物流企业。2017 年以来，相关物流车运营企业不断探索氢燃料电池物流车的运营商业模式，目前有代表性的氢燃料电池物流车运营企业主要有氢车熟路，山东氢能和氢力氢为等。此外，雄韬股份子公司大同氢雄云鼎与物拉邦、华熵能源三方签订战略合作协议，计划于 2020~2022 年在国内市场分别投放不少于 300 台、600 台、900 台氢燃料物流车，由雄韬氢雄提供燃料电池发动机系统，物拉邦负责车辆市场推广及运营，华熵能源提供燃料电池辅助系统，上海申龙作为重要合作伙伴支持整车匹配及制造。

图表 65 目前典型的氢燃料电池物流车运营企业

运营企业	服务对象	开始运营时间	车辆数量 (辆)
氢车熟路	京东等等电商物流配送平台	2018 年初	500
山东氢能	1) 快递及快运企业; 2) 新型落地配、自配送企业; 3) 互联网的快运平台	2019 年 5 月	30 (第一阶段), 下一阶段投入 100 辆以上
氢力氢为	承运顺丰业务等	2019 年 11 月	
大同氢雄			计划于 2020~2022 年在国内市场分别投放不少于 300 台、600 台、900 台氢燃料物流车

资料来源: 公开资料统计, 雄韬股份公告等, 车百智库

目前的氢燃料电池物流车的运营模式, 主要呈现以下特点: 1) 先确定需求, 找到服务对象; 2) 先在某一地区进行示范运营, 获得相关经验, 模式成熟后再逐步推广; 3) 不是一家企业在做, 而是整个产业链协同, 从燃料电池动力系统供应、到加氢站建设、到下游的终端物流企业一起参与。以氢车熟路在上海地区运营的氢能源物流车为例:

- 确定区域。长三角、江浙沪地区, 当地的化工基础带来的氢气资源相对丰富, 同时这个区域的经济相对发达, 氢能产业的基础比较完善, 因此开展轻型和中型的货运市场的尝试。
- 确定需求。京东物流率先于 2018 年 3 月首次引入氢燃料电池物流车用于上海的城际配送, 并在之后多次扩充氢燃料电池车队规模。与此同时, 其他企业如申通、菜鸟物流、盒马鲜生等也陆续在上海加入使用氢燃料电池物流车的行列。

- 探索模式。为了解决当时阶段性基础设施不够或者是稀缺的问题，重塑科技和产业链上相关的氢气装备企业、运营企业合资建立了加氢站公司。通过氢气来源的经济性、加氢站的投资运营分析、运力的规模化测算，去分析全生命周期成本的控制。

4.4 重卡

重卡作为燃料电池未来的重要应用场景，在 2019 年发展迅速。近期内多家车企发布燃料电池重卡车型，主要有上汽红岩的自卸车、江铃的氢能重卡、中国重汽的牵引车以及清能股份等。海外发布的重卡主要有现代汽车发布的 HDC-6 Neptune、康明斯的重卡、尼古拉的燃料电池重卡等。

图表 66 国内外近期发布的燃料电池重卡车型

序号	地区	公司/车型	其他信息
1	国内	上汽红岩自卸车	\
2	国内	清能股份燃料电池	\
3	国内	中国重汽牵引车	以氢气燃料为主要动力，动力电池为辅助动力，加氢时间仅需3~5分钟，动力电池几乎不需要充电，避免了纯电动车长时间充电的问题。其采用增程式技术方案，燃料电池作为增程器，可根据实际需求配置氢气瓶，能够满足多种运营工况
4	国内	江铃氢能重卡	最高时速达85km/h，续航里程达400~500km。这款车有8个140L的氢气瓶（氢气压力标准为35MPa）
5	国外	丰田北美拖车头“UNO”	\

序号	地区	公司/车型	其他信息
6	国外	现代汽车发布牵引车HDC-6 Neptune	\
7	国外	康明斯燃料电池重卡	设计为90KW的燃料电池,可按30kW或45kW的增量扩展至180kW,并同时具有100kWh锂离子电池容量。卡车的续航里程为150至250英里
8	国外	尼古拉燃料电池原型机Nikola Two	\
9	国外	巴拉德900kW燃料电池模组	8个FCveloCity®-HD模组将为改装的超重型矿用卡车提供动力,而第9个将作为备用模组存放。

资料来源：公开资料，车百智库

以上汽红岩氢燃料电池重卡为例，红岩燃料电池自卸车搭载了行业最大功率电机系统，实际最大功率可达 352 kW，与之匹配的是 AMT 变速器，并与坡度传感器协同工作，提高整车坡道换挡舒适性，大大减低运行能耗。该款车型搭载的上汽红岩自主研发的燃料电池，采用了世界一流的金属双极板和领先的低温启动策略，无需外部加热，可在-30℃低温条件下自启动；并通过优化电堆结构设计、优化系统策略，还可实现自增湿功能，降低了燃料电池系统成本。高度集成化也是其一大亮点。整个燃料电池系统采用模块化设计，部分零件共用壳体和安装结构模块化集成，整个系统由多个模块组成，可适应车辆前舱布置要求。又通过功能模块化和嵌入式集成，实现关键部件的功能合并、外形合并、模块化集成、传感器集成和控制器集成等。