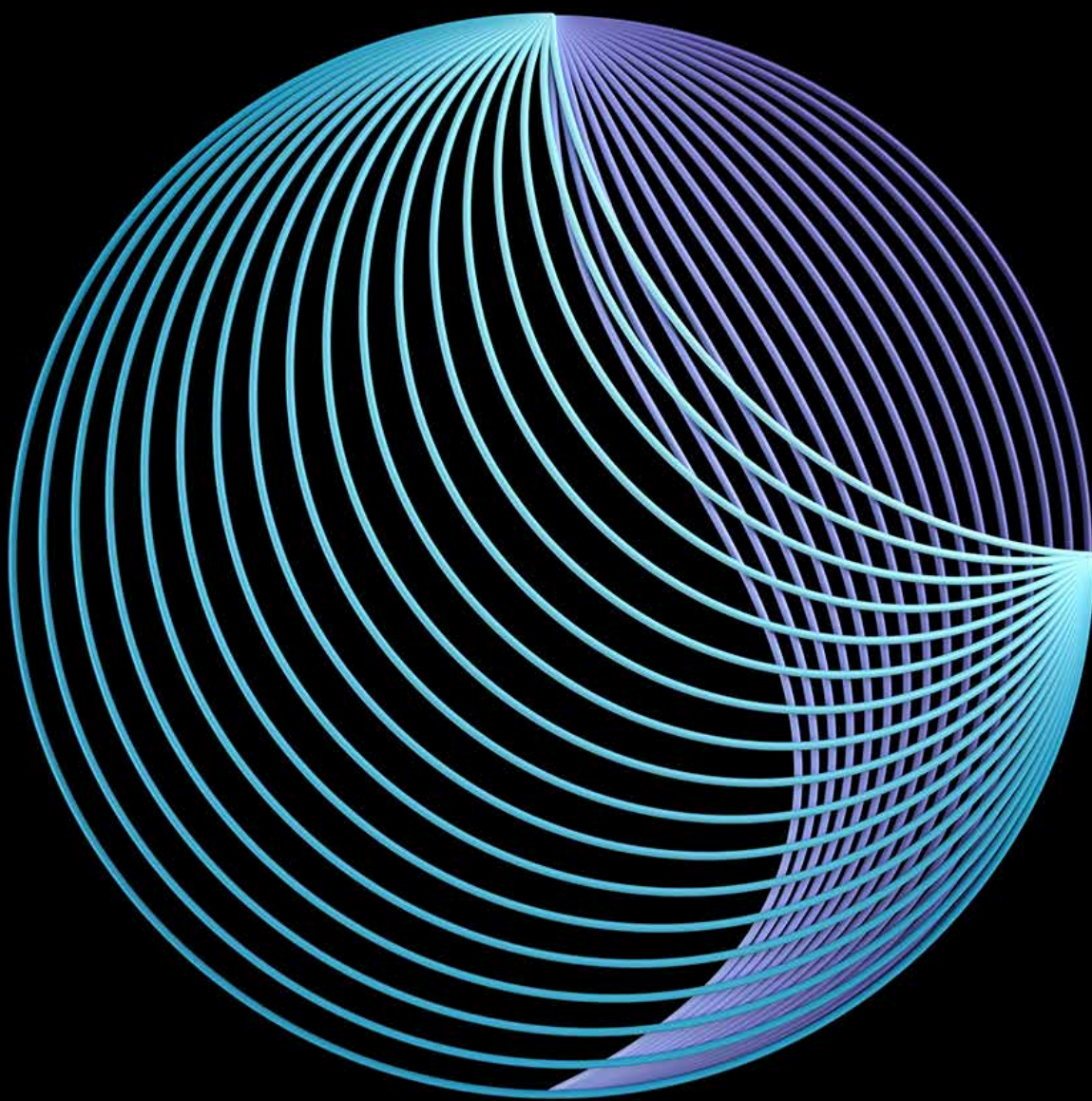




未来移动出行的动力源泉

氢能源及燃料电池交通解决方案
白皮书系列

系列一
德勤中国

财务咨询



执行摘要

本白皮书由德勤与巴拉德动力系统有限公司联合撰写并发表，旨在介绍燃料电池汽车的奇妙技术及其商业应用。通过深入的研究和分析，本白皮书回答了行业高管和外界人士最关心的问题——燃料电池汽车的商业可行性如何，以及它们对环境的影响如何？

氢是宇宙中最丰富的物质之一。或许正因为氢的大量存在，我们有时会忘记了氢的价值。从最初作为初代内燃机的燃料，到现在氢气已经可以为空中旅行提供动力，并正在以燃料电池这一应用形式，又一次成为全人类能源革命中的焦点。

我们将陆续推出3卷白皮书对氢能进行介绍，并将全面解析氢能在未来将如何驱动移动出行领域的发展。本卷为白皮书系列的第一卷，将主要对氢能及燃料电池进行介绍，并通过总拥有成本分析对燃料电池车、纯电动车及燃油车进行深入对比。我们采取了自下而上的总拥有成本分析法（“TCO”），对美国、中国及欧洲的氢能源车进行了跨度长达13年的深入分析。通过对燃料电池车的购买成本进行拆分，我们对燃料电池车的燃料电池系统、电机等组件的价格均进行了测算；此外我们也对燃料费用、基础设施成本、维修费用等运营成本也分别进行了测算。我们相信通过这种分析方法，不仅对当前行业的研究成果进行了补充，也可以帮助我们的读者将这个TCO模型应用到各种类别的燃料电池车辆运营TCO测算中。事实上，我们在搭建了基础的TCO模型后，将其应用到了三个实际的燃料电池车辆运营使用案例中：上海的氢燃料物流车运营、加利福尼亚的氢燃料港口重卡运营及伦敦的氢燃料公交车运营。

我们的TCO分析展示了燃料电池车的良好发展前景。即使不考虑氢能的非定量优势（如零污染性排放等），仅就定量成本而言，在美国、中国及欧洲三个地区及各个

实际应用案例中，燃料电池车的TCO均预计会在2029年之前低于纯电动车及燃油车的TCO。这一方面是由于技术进步及大规模生产带来的制造成本下降导致的，另一方面也受益于氢气价格、加氢站等运营相关的成本持续下降。因此各国政府开始投入越来越多的精力发展氢能相关技术及推动氢能的应用。

通过我们的TCO模型测算，2019年燃料电池车的每百公里总拥有成本约比纯电动车及燃料车分别高40%及90%左右。从购买成本看，较高的燃料电池系统价格及因为缺乏规模效应导致的零部件成本加价是购买成本较高的主要原因；从运营成本来看，较高的氢气价格是当前运营成本高昂的主要原因。

然而，预计到2026年，燃料电池车的TCO将会开始低于纯电动车，到2027年，燃料电池车TCO将会开始低于燃油车。总体来看，我们预计未来10年内燃料电池车TCO将会降低50%，燃料电池系统及氢气价格下降是主要驱动因素。其中燃料系统成本预计到2029年将下降超过50%。燃料电池系统成本下降空间较大，主要是因为当前燃料电池系统价格高企是由于高技术门槛和高制造成本导致的，而不是由于原材料成本较高导致的。当前有很多观点认为燃料电池价格较高的原因是使用了铂金作为催化剂，但实际上，铂金的成本在燃料电池系统总体成本中占比不到1%。与之相反，锂电池的金属材料成本如锂和钴则在电池总体成本中占据了很大比例。因此，技术进步及大规模生产可以驱动燃料电池系统价格显著下降。运营成本方面，其下降的主要驱动因素是氢气价格，受益于更多的可再生能源将用于氢气生产（目前由可再生能源生产的氢气占比还不到5%）及相关运输及存储技术的提升，预计氢气价格将在美国、中国、欧洲等国家和地区均明显下降。

我们的TCO预测采取了非常保守的假设。实际上历史经验表明，随着新兴技术的出现，生产成本的下降往往会比预测值要大的多；此外，我们也没有将任何政府补贴（车辆购买补贴、加氢站建设补贴、加氢站运营补贴等）或政府激励纳入到TCO模型中。从上海、加利福尼亚及伦敦的案例分析来看，由于政府补贴或对燃油车的额外路税将使得燃料电池车的TCO更快地与纯电动车及燃油车的TCO实现交叉。此外，我们仍假设燃油车成本变动较为稳定，但实际上，燃油车成本可能由于油价上涨、更严格的排放标准出台、市区准入限制、燃油车禁令等无法量化的原因而大幅上升。因此，考虑到其他因素，燃料电池车的TCO有可能会在2025年之前就低于电动车及燃油车的TCO。

最后，本文还对燃料电池车的能量转换效率、氢气生产、和温室气体排放等燃料电池技术相关的环境影响进行了现状分析及未来展望。事实上这并不是本白皮书的研究重点，我们将会在第3卷*白皮书中进行更为详细的讨论，但是我们相信在本白皮书中引入关于氢产业链的基础分析，将有助于我们的读者更好的理解氢能相关价值链及未来发展趋势。当前燃料电池车的能量转换效率是高于燃油车，但低于纯电动车的，这主要是由于氢气生产过程的低效及能量损失。而在未来，风力及光伏等可再生能源将会在制氢过程中发挥更大作用，提升燃料电池车的能量转换效率。因为当前可再生能源受到季节、高峰低谷使用周期等因素的影响较大，产生了大量被浪费的过剩电力。可再生能源的边际成本接近于零，使得其定价低于其他当时

生产的电力，而因为过剩电力浪费情况的存在，新能源电力在欧洲某些国家甚至有负电价情况出现。而氢能恰好可以利用这些可再生能源，将过剩的电力以氢气的形式储存起来。

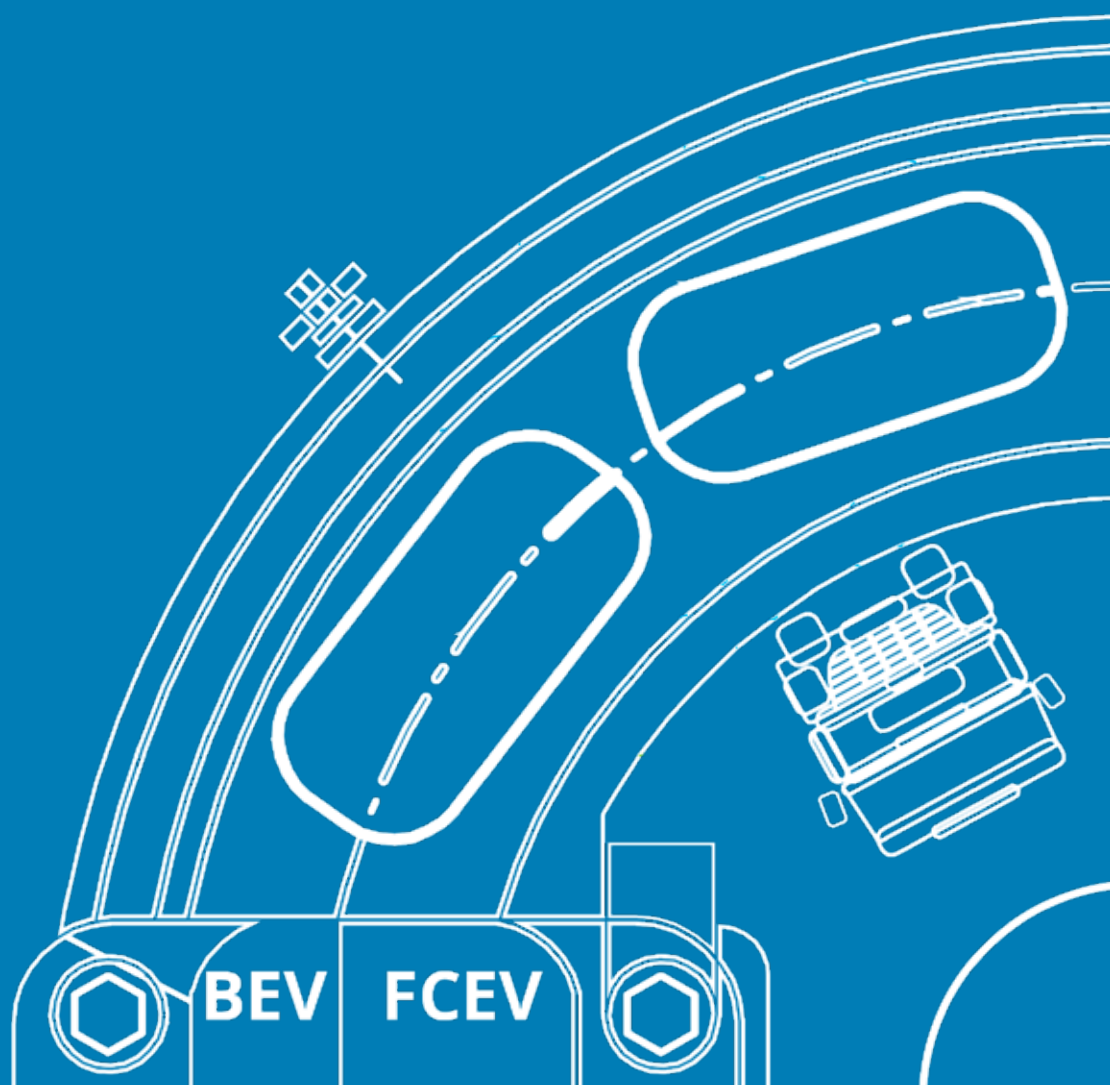
从环境影响的角度来看，燃料电池车是最清洁的，相较于的电动车及燃油车，燃料电池车的全生命周期碳排放是最少的。而随着可再生能源更多的应用于氢气制取，及氢气运输技术的提升，预计燃料电池车的碳排放还将继续降低。同时，相较于纯电动车，燃料电池车在制造过程中的碳排放也较低。因为电池生产过程中使用了大量金属材料如锂和钴等，金属材料的挖掘、生产加工等过程均有大量能量消耗及碳排放。同时燃料电池车回收在报废阶段也比电动车回收更容易且更有经济吸引力。

正如比尔盖茨的名言：“我们总是高估未来两年将发生的变化，低估未来十年将发生的变化。不要让自己陷入无所作为的状态。”我们希望本白皮书可以对我们的读者理解氢能及氢能如何应用在交通领域提供一些帮助，尽管我们的努力可能微不足道，我们也希望竭尽所能的为创造更加经济合理的商业模式及更加绿色的世界而做出一些微小贡献。

注释：*三卷白皮书系列包括：1.交通出行中的氢燃料电池解决方案；2.氢和燃料电池的应用现状和未来；3.氢供应链的演进与未来

目录

目录	3
燃料电池简介	5
燃料电池车应用概述	22
总拥有成本分析	35
能源效率与环境影响的比较	67
总结与展望	89
参考文献	91
联系我们	101



燃料电池简介

1.1 什么是燃料电池

广义上来讲，燃料电池是通过化学反应，将燃料及氧化剂中蕴含的化学能转换为电能的装置¹。最近，燃料电池这个词几乎被专门用来形容以氢作为燃料的反应堆²。

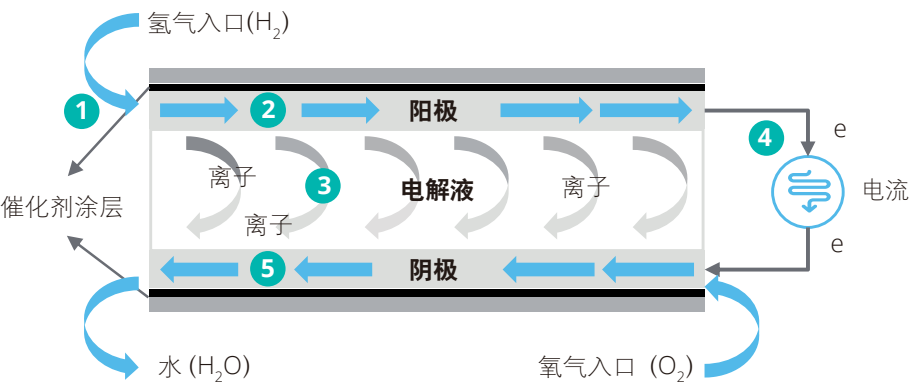
氢气作为汽车燃料已经有很长的历史了。在200年前，氢气就被用在第一代内燃机中作为燃料，与现在内燃机里汽油等燃料工作原理类似³。但是因为安全性及能量密度较低，氢气作为内燃机燃料并没有表现出优越性⁷。然而，在如今的燃料电池技术中，氢气并不直接燃烧，而是和氧气反应转换为电能⁴。

氢气和氧气的化学反应是非常简单的，可以用如下公式表示： $2H_2+O_2=2H_2O$ ⁵。在

燃料电池中，氢气和氧气分别进入到电池的阳极和阴极（图1）。电池两极之间通过电解液隔离，一方面可以阻止电池两极的反应物相互接触，一方面为阳极产生的离子提供到达阴极的通道。

如图1所示，燃料电池反应原理如下：氢气首先进入燃料电池的氢电极（称为阳极）（步骤1），然后氢气与覆盖在阳极上的催化剂反应，释放电子形成带正电荷的氢离子（步骤2），氢离子穿过电解液到达阴极（步骤3）。然而，电子不能通过电解液，相反，电子流入电路，形成电流，产生电能（步骤4）。在阴极，催化剂使氢离子与空气中的氧结合形成水，水是燃料电池反应中的唯一副产品（步骤5）⁶。

图1：燃料电池反应堆工作原理



燃料电池可以简单的根据电解液的不同分为几种不同的类别，主要的燃料电池类型包括：质子交换膜燃料电池（“PEM”），碱性燃料电池（“AFC”），磷酸燃料电池（“PAFC”），固体氧化物燃料电池（“SOFC”）以及熔融碳酸盐燃料电池（“MCFC”）。图2对不同燃料电池进行了对比。PEM目前是处于商业化最前沿的燃料电池，因为PEM可以在50-100摄氏度下运行，启动时间较短，同时对氧化剂要求较低，空气就可以作为其氧化剂来源⁸。这些特性使得PEM成为汽车能源的理想解决方案，并且使得PEM从20世纪90年代开始得到了快速发展¹⁰。

图2：燃料电池的5种类型对比⁹

燃料电池类型	电解液	运行温度/°C	催化剂	主要优势	主要劣势	应用领域
PEM	质子交换膜	50-100	铂金	启动快 室内温度较低 可以将空气作为氧化剂	对CO敏感 需要将反应物加湿	汽车 便携式电源
AFC	碱性电解液	90-100	镍/银	启动快 工作温度较低	需要纯氧作为催化剂	航空航天 军事
PAFC	磷酸	150-200	铂金	对CO₂不敏感	对CO敏感 启动较慢	分布式发电¹
SOFC	固体氧化物	650-1,000	LaMnO3/LaCoO3	可以将空气作为氧化剂 较高的能量效率²	运行温度较高	大型分布式发电 便携式电源
MCFC	熔融碳酸盐	600-700	镍	可以将空气作为氧化剂 较高的能量效率²	运行温度较高	大型分布式发电

注释: 1.用多种小型, 连接电网的设备发电和储能; 2. 热电转换效率可以达到85%, 纯电转换效率约为60%

图 3：氢燃料电池的主要应用及示例

种类	主要应用	示例
交通	乘用车	
	卡车	
	叉车	
	公交	
	物流车	
	航空器	
	船只	
	电动自行车	
固定电源	热电联产系统（“CHP”）	
	不间断供电系统（“UPS”） ¹	
		

预览已结束，完整报告链接和二维码如下：

https://www.yunbaogao.cn/report/index/report?reportId=1_38713

