

# 氢动力总成及汽车发展态势分析

朱云尧

(中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 404100)

【欢迎引用】朱云尧. 氢动力总成及汽车发展态势分析[J]. 汽车文摘, 2023(11): 1-11.

【Cite this paper】ZHU Y Y. Development Situation Analysis of Hydrogen Powertrain and Automobile [J]. Automotive Digest (Chinese), 2023(11): 1-11.

**【摘要】**氢能作为二次清洁能源已成为全球能源结构转型的重要方向,是道路交通体系绿色低碳发展的重要支撑。氢燃料电池汽车与氢燃料发动机汽车是氢能应用的2大技术路线且互为补充。通过综述大量文献,分析氢能应用2大技术路线成熟度并总结其发展态势。分析结果表明,氢燃料电池汽车发展初具规模但仍面临诸多不确定性,氢燃料发动机汽车正加速进入工程应用阶段。氢动力总成及汽车的最终产品形态取决于绿色电力制氢成本与技术成熟度。

**关键词:**氢能;氢动力总成;燃料电池汽车;氢燃料发动机汽车

**中图分类号:**U473.2\*5 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220277

## Development Situation Analysis of Hydrogen Powertrain and Automobile

Zhu Yunyao

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 404100)

**【Abstract】** As a secondary clean energy source, hydrogen energy has become an important direction of global energy structure transformation, and an important support for green and low-carbon development of road transportation system. Hydrogen fuel cell vehicle and hydrogen-fueled engine vehicle are two major technology routes of hydrogen energy application and complement each other. In order to analyze the maturity and actual development trend of the two major technology routes, this paper carries out research by literature review. The development of hydrogen fuel cell vehicles has begun to take shape but still faces many uncertainties, and hydrogen fuel engine vehicles are accelerating into engineering application stage. The final product form of hydrogen powertrain and automobile depends on the cost and technology maturity of hydrogen production from green electricity.

**Key words:** Hydrogen energy, Hydrogen powertrain, Fuel cell electric vehicle, Hydrogen-fueled engine vehicle

## 0 引言

在能源短缺及全球气候变化背景下,全球各国都在积极探索能源转型与节能减排<sup>[1]</sup>。我国已提出CO<sub>2</sub>排放力争2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和,这需要我国优化产业和能源结构,加快构建以可再生能源为主的能源发展格局<sup>[2]</sup>。考虑氢燃料的清洁循环特性<sup>[3]</sup>,氢能已成为全球能源转型、新一轮碳减排和碳中和的首选方向,被多个国家纳入能源战略部署<sup>[4]</sup>。

利用氢燃料作为能源的新能源汽车主要有燃料电池汽车(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)和氢燃料发动机汽车(Hydrogen-Fueled Engine Vehicle, HFEV)<sup>[4]</sup>,燃料电池发动机和氢燃料发动机<sup>[5]</sup>是车用

氢动力总成2种完全不同的技术路线,研究分析2种氢动力汽车发展态势并对比其发展差异,对我国新能源汽车产业发展,尤其对新能源商用车发展布局具有重要意义。

本文立足于全球视角,系统全面分析了燃料电池汽车与氢燃料发动机汽车发展态势,可为我国相关产业链布局及发展提供指引参考,并进一步提出氢动力总成及汽车高质量发展建议。

## 1 氢能及氢动力汽车基本情况

### 1.1 能源结构转型

当前,全球能源供给体系仍以碳排放高、不可再生的化石能源为主<sup>[6]</sup>。考虑到化石能源碳排放对气候

影响较大及持续走高的价格,世界能源格局向清洁、低碳、绿色、高效、多元方向转变<sup>[6]</sup>。从各机构对全球一次能源需求结构预测来看,未来30年,全球一次能源消费中,化石能源仍占72%以上,但中国对未来全球能源格局影响巨大<sup>[7]</sup>。我国已形成煤炭、石油、天然气、可再生能源多元能源供需体系<sup>[8]</sup>。根据国家能源局数据,截至2022年12月,水电、风电、太阳能发电累计装机规模分别达到4.13亿kW、3.65亿kW和3.93亿kW,均居世界首位,能源消费结构正加快向清洁可再生低碳能源转变<sup>[6]</sup>,具体能源需求及构成见图1。

## 1.2 氢能定位

为统筹推进“3060”双碳发展目标,须加快提升以光伏、水电、风电等可再生能源电力供给和消费比例。但是,可再生能源电力具有不稳定性、间歇性、区域性等特征,且电力不适合长期存储。为保障可再生能源

电力体系“源网荷储”互动并确保电网体系安全平稳,氢能作为易于存储、运输且几乎无任何污染的能源载体<sup>[9]</sup>,能与可再生能源电网体系有效互动,是推动可再生能源成为我国能源消费主体的重要举托者<sup>[6]</sup>,成为推动绿色电力发展的关键环节,各类能源定位见图2。

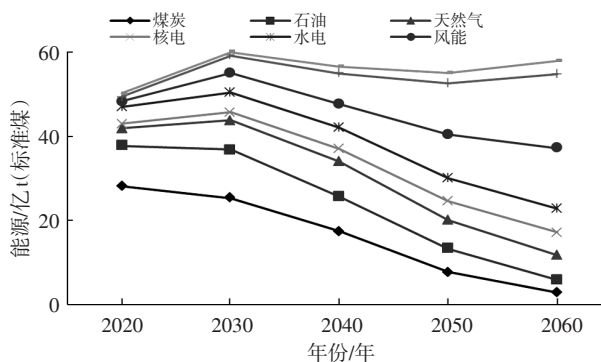


图1 2020—2060我国能源需求及构成<sup>[6]</sup>

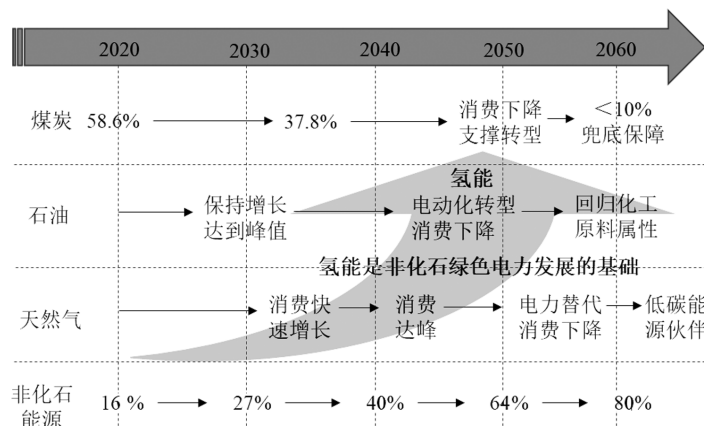


图2 各类能源定位或消费占比情况演变<sup>[6]</sup>

## 1.3 氢能特性

氢能作为化学储能能源,可利用废弃能量制取,因其具有高能量密度和清洁无污染的优点被视为未来能源技术方向<sup>[10]</sup>。与甲烷、汽油和柴油相比,氢气具有低热值高、自燃温度高、辛烷值高、点火能量小、淬熄距离短、燃烧速度快、燃烧极限范围广等优点(表1)。

## 1.4 氢动力总成及汽车

我国是全球汽车保有量和产销量最大的国家,截至2022年底,汽车保有量为3.19亿辆,其中传统燃油汽车保有量占比为95.9%,石油对外依存度为71.2%,这给我国能源与交通安全带来巨大挑战<sup>[11]</sup>。新能源汽车是我国能源结构转型、减少环境污染、降低碳排放、实现汽车强国等背景需求下的战略选择。

2022年,我国新能源汽车销量688.7万辆,其中乘用车销量655万辆,商用车销量33.7万辆。新能源乘用车销量占乘用车总销量比例为27.8%,新能源商用车销量占商用车总销量比例只有10.2%,整体远落后

于乘用车电动化进程。考虑到当前动力电池能量密度及环境适应性问题,无法满足商用车长途应用场景,氢动力汽车成为新能源商用车长途应用重要解决方案之一。

根据动力原理不同,使用氢动力总成的汽车包括燃料电池汽车和氢燃料发动机汽车2类。燃料电池发动机是利用氢气的化学能,在燃料电池发动机膜电极处发生电化学反应产生电能的动力装置。氢燃料发动机是氢气和氧气在发动机气缸内燃烧爆炸推动活塞往复运动产生机械运动的动力装置,属于传统热机的范畴。

## 2 氢动力总成及汽车发展态势

### 2.1 国外燃料电池汽车发展态势

氢能是具有广阔发展前景的二次能源,燃料电池汽车作为氢能应用终端,受到全球范围高度关注<sup>[12]</sup>。国外燃料电池汽车产业主要集中在日本、美国、韩国和欧洲,但各个国家和地区发展氢能与燃料

电池汽车的初衷与路径不同。

表1 氢气与其他能源特性对比<sup>[2]</sup>

特性/能源类型	氢气	甲烷	汽油	柴油
含碳量 $w$ (质量分数)/%	0	75	84	86
低热值/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	119.7	45.8	44.8	42.5
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.089	0.720	730.000~780.000	830.000
体积能量密度/ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$	10.7	33.0	33 000.0	35 000.0
自燃温度/K	858	813	623	523
辛烷值	130	130	92~98	25
空气中最小点火能量/ $\text{mJ}$	0.02	0.29	0.24	0.24
当量空燃比	34.5	17.2	14.7	14.5
淬熄距离/ $\text{mm}$	0.64	2.10	2.00	
空气中层流燃烧速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.85	0.35	0.37~0.43	0.37~0.43
空气中扩散系数/ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$8.5\times 10^{-6}$	$1.9\times 10^{-6}$		
燃烧极限(过量空气系数)	0.2~10.0	0.7~21.0	0.4~1.4	0.5~1.3

### 2.1.1 日本燃料电池汽车发展态势

国土资源限制与能源独立愿景是驱动日本发展氢能和燃料电池汽车的根本动力<sup>[13]</sup>。日本氢能与燃料电池汽车产业发展分为3个阶段。2000年前,氢气制取、运输和贮存技术是研究重点;2000—2015年,开展燃料电池汽车示范及补贴推广应用;2015年后,推动基础设施加氢站的建设,制定燃料电池汽车发展规划,燃料电池汽车与加氢站协同发展。对于日本,发展氢能首要目的是摆脱能源限制,燃料电池汽车仅仅是氢能应用场景之一<sup>[14]</sup>。

日本已构建起多重壁垒支撑的燃料电池汽车产业。(1)日本已构建起系统完善的燃料电池汽车产业链,从液氢制备、储运到燃料电池和加氢装备,再到燃料电池整车的各细分领域形成产业闭环。(2)日本燃料电池汽车技术优势明显,作为全球首个燃料电池汽车商业化的国家,其燃料电池汽车各项技术优势显著。(3)日本燃料电池汽车市场份额优势明显,自2014年12月丰田MIRAI FCV上市以来,日本产燃料电池汽车销量全球占比稳居20%以上<sup>[15]</sup>。

然而,日本实现燃料电池汽车发展目标仍具有不确定性。2019年3月,日本经济产业省、国土交通省等部门发布第二次修订的《氢能与燃料电池战略路线图》<sup>[15]</sup>。根据该路线图的发展目标,到2025年日本计划累计推广燃料电池汽车20万辆,累计建成加氢站320座<sup>[16]</sup>(表2)。但是截至2021年底,日本累计推广燃

料电池汽车17 933辆,约占全球36%,累计建成加氢站157座,占全球总量23.8%。日本燃料电池汽车推广目标实现难度较大,主要原因如下:(1)当前燃料电池汽车推广效果不佳;(2)全球纯电动与混合动力乘用车接受程度越来越高;(3)燃料电池汽车成本高昂;(4)加氢站基础设施建设相对滞后。

表2 日本燃料电池汽车发展目标<sup>[16]</sup>

目标项目	“氢能基本战略”	《氢能与燃料电池战略路线图》发展目标
轿车规模	2025年:推广20万辆	计划到2025年实现: •FCEV与混合动力汽车价格差缩小(从196万元缩小到46万元) •FCEV核心部件成本下降(燃料电池系统成本从1 304元/kW下降到326元/kW;车载储氢装置成本从46万元下降到19 563元)
	2030年:推广80万辆	
加氢站	2025年:累计建成320座	计划到2025年实现: •建设成本降低(从2 300万元下降到1 300万元)
	2030年:累计建成900座	•运营成本降低(从221万元下降到98万元)
客车规模	2030年:推广1 200辆	计划到2030年之前实现: •FCEV公交车成本下降(从685万元下降到342万元)

注:文中货币单位为人民币,以2020年7月8日中国银行汇率换算

### 2.1.2 美国燃料电池汽车发展态势

石油危机是美国将氢能作为战略方向的重要原因<sup>[17]</sup>。通过对美国氢能与燃料电池汽车产业政策分析,可以看出美国燃料电池汽车产业发展也可分为3个阶段。2005年之前,产业政策重点是扶持氢能制取、运输和储存技术;2005—2015年,产业政策重点是氢燃料电池汽车及加氢站建设的财税补贴,鼓励燃料电池汽车示范和市场化应用;2015年后,确定燃料电池汽车长期发展战略,继续对燃料电池汽车进行抵税补贴,产业发展进入快车道。对于美国,氢能是“发展低碳技术、为清洁能源奠基”的战略支点,且在《全面能源战略》中明确提出,氢能作为替代性能源在交通转型中起到引领作用<sup>[18]</sup>。

美国燃料电池汽车发展路径为物料搬运车(如叉车)到中重型载货汽车再到多元零排放车辆(如乘用车)。2020年3月,美国燃料电池和氢能协会发布的《美国氢能经济路线图》表明,发展氢能能够巩固美国能源领导地位并提振经济,保障能源安全<sup>[19]</sup>。按其激进目标设定情景,到2030年,氢能将为美国带来1 400亿美元收入,创造70万个就业岗位;到2050年,氢能将为美国带来7 500亿美元收入,创造340万个就业岗位。基于全成本计算,2025—2030年实现燃料电池汽

车成本与内燃机汽车持平,其目标详见表3。

表3 美国燃料电池汽车发展目标<sup>[19]</sup>

时间/年	燃料电池汽车发展目标	具体车型
2023—2025	到2025年,实现以下目标: ·FCEV总销量达15万辆 ·其中,物料搬运FCEV保有量12.5万辆 ·加氢站数量1000座	·燃料电池汽车和加氢站规模化发展,成本下降,性能提升 ·中型和重型车辆投放市场
2026—2030	到2030年,实现以下目标: ·FCEV累计销量达120万辆 ·其中,物料搬运·FCEV保有量达30万辆 加氢站数量达4300座	·中长途燃料电池载货车市场规模扩大 ·中大规模加氢站形成区域网络,实现全国覆盖
2030年后		·车型增多满足消费者个性化需求 ·零排放车辆保有量占比增加

美国燃料电池汽车推广不及预期,实现2025年激进目标有较大挑战。截至2021年底,美国燃料电池汽车保有量为12390辆,不及2025年15万辆总目标销量10%;累计建成加氢站86座,为2025年1000座加氢站目标8.6%。尽管激进目标难以实现,但在《美国氢能经济路线图》中也设定了基本目标,其销量目标约为激进目标15%~30%,表明美国对燃料电池汽车发展仍持相对谨慎态度。

### 2.1.3 韩国燃料电池汽车发展态势

韩国推进氢能与燃料电池汽车发展原因与日本类似,实现能源独立的同时激发经济增长新动能<sup>[6]</sup>。韩国能源对外依存度高达93%,化石能源使用占比超过83%。为保障能源安全,促进经济增长,近年来韩国陆续发布氢能和燃料电池汽车相关战略,旨在成为全球引领氢能发展经济体。

韩国燃料电池汽车发展路径为“先乘用车、后商用车,国内与国外市场并举”。2019年1月17日,韩国发布《氢能经济发展路线图》,提出2030年进入氢能社会,成为世界氢能经济领导者;2040年,韩国燃料电池汽车和国际市场占有率第一;氢能产业为韩国创造2500亿元收入和42万个就业岗位<sup>[20-21]</sup>。《氢能经济发展路线图》涉及氢能发展5大领域<sup>[22]</sup>,包括氢能交通、氢能发电、氢气生产、氢气储运和安全保障,氢能交通领域发展目标见表4。

韩国全球首部氢能法律保障氢能及燃料电池汽车产业发展。2022年2月,韩国颁布全球首部《促进氢能经济和氢安全管理法》,从5个方面助力韩国实现氢能社会及为氢能产业发展提供强有力的政策保障,包括:实施氢经济的保障体系、培育氢能专业公司、氢能供应设施部署、氢能经济基础和氢能安全管理。

表4 韩国燃料电池汽车发展目标<sup>[23]</sup>

领域	类别	《氢能经济发展路线图》发展目标
到2040年, FCEV累计产量达到620万辆(290万辆面向国内,330万辆用于出口)	轿车	·2022年,轿车累计产量8.1万辆 ·2025年,轿车年产量10万辆,售价为目前一半(约18万元),与燃油车基本持平
	公交车	·2040年,公交车数量增至4万辆
	出租车	·2040年,出租车数量达到8万辆
	载货车	·2040年,载货车数量力争达到3万辆
加氢站		·2022年,加氢站增至310座 ·2040年,加氢站增至1200座

尽管韩国燃料电池汽车保有量及全球累计投放量全球第一,但实现短期目标仍有难度。截至2021年底,韩国燃料电池汽车保有量19330辆,占全球燃料电池汽车保有量39%,位居全球第一。现代汽车推出的燃料电池SUV—Nexo全球累计投放量为22337辆,占全球总量45%,位居全球第一,但距离2022年8.1万辆的累计目标产量仍有将近6万辆差距。截至2021年底,韩国加氢站数量累计建成95座,距离2022年加氢站建设目标差距较大。

### 2.1.4 欧洲燃料电池汽车发展态势

为了应对能源与气候变化、实现脱碳目标是欧洲发展氢能和燃料电池汽车的驱动因素。欧洲将氢能与燃料电池技术视为能源领域的战略技术,一直致力于促进“交通与氢能”融合发展,支持氢能和燃料电池产业协同发展。欧洲氢能与燃料电池汽车发展分为3个阶段。1994—1998年,欧洲实施“第四个研究开发框架计划(1994—1998)”,初步开展氢能产业技术研究<sup>[23]</sup>。2008—2014年,欧洲设立燃料电池与氢能事业联合组织(Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking, FCH JU),支持燃料电池和氢能技术研发与示范<sup>[24]</sup>。2014年后,欧洲启动燃料电池技术与氢能合作计划二期(The Second Generation of the European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, FCH 2JU),工作重点转向推动燃料电池和氢能技术商业化,包括大规模示范、提供融资方案和提高社会接受度等<sup>[16]</sup>。

欧洲制定了宏伟的燃料电池汽车发展目标,以乘用车为主,轻型商用车为辅。2019年2月,FCH 2JU发布《欧洲氢能路线图:欧洲能源转型的可持续发展路径》<sup>[25]</sup>,制定2030年燃料电池汽车发展目标路线图。2030年前,欧洲氢能产业发展的3个优势领域为:(1)天然气管道掺氢、氢能交通发展(主要是乘用车、商用车、大型客车、重型交通设备),(2)物料搬运车的氢能使用),(3)现有制氢技术脱碳化。其中,氢能交通领

域具体目标见表5。

表5 欧洲2030年氢能交通发展目标<sup>[25]</sup>

类型	发展目标
燃料电池乘用车	占比达到1/22,达到370万辆
燃料电池轻型商用车	占比达到1/12,达到50万辆
燃料电池载货车和公交车	保有量达4.5万辆
加氢站	达到3 700座

欧洲燃料电池汽车发展成效不尽理想,俄乌冲突进一步阻碍燃料电池汽车产业发展。截至2022年底,欧洲燃料电池汽车保有量为2 135辆,仅占全球3.2%,与2030年400万辆以上燃料电池汽车保有量目标相距甚远。加氢站累计建成228座,占全球33.3%,燃料电池汽车保有量与加氢站数量发展严重不匹配。2022年,俄乌冲突爆发,受制于能源供给,将进一步冲击欧洲燃料电池汽车产业。

### 2.1.5 我国燃料电池汽车发展态势

我国已陆续颁布支持燃料电池汽车发展的产业政策。从2009年鼓励发展新能源汽车开始,我国陆续颁布了燃料电池汽车相关产业政策和规划,对燃料电池关键零部件、关键共性技术、基础设施建设、燃料电池汽车等发展开展了国家顶层设计,指导产业健康有序发展。

能源结构转型驱动我国将氢能作为能源体系重要组成部分,燃料电池商用车是应用重点。2022年3月,国家发展和改革委员会发布《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,对我国氢能发展做出顶层

设计和积极部署,首次明确提出氢能是未来国家能源体系的组成部分,有序推进氢能在交通领域的示范应用,重点推进燃料电池重型车辆应用,有序拓展燃料电池等新能源客车、货车市场应用空间,逐步建立燃料电池汽车与锂电池纯电动汽车互补发展模式<sup>[26]</sup>。

我国燃料电池汽车产业取得突破性进展,与国外差距逐步缩小,处于跟跑阶段。燃料电池系统方面,额定功率、启动温度、使用寿命等指标均已达到国际领先水平。目前,仅有部分高性能质子交换膜、碳纤维纸等关键材料依赖进口,其他材料国产化程度已达70%以上。车载储氢系统方面,我国35 MPa的III型氢瓶研发制造和产品应用趋于成熟,70 MPa高压IV型氢瓶技术也被攻克,产业化进程加快<sup>[27]</sup>。

我国燃料电池汽车发展总体目标设置比较理性,短期产业目标有望达成。2016—2022年,中国汽车技术研究中心、中国标准化研究院和中国电器工业协会燃料电池分会、国家发展和改革委员会陆续发布燃料电池汽车发展目标,具体见表6。总体看,2025年我国燃料电池汽车保有量约5万辆,2030年保有量达到100万辆。考虑到商用车(尤其是重型载货车、客车)电动化转型紧迫性,政府推出财税补贴及示范政策,使我国燃料电池商用车呈爆发式增长态势。截至2021年底,我国燃料电池汽车保有量为8 938辆,2022年前3季度,燃料电池汽车销量为2 589辆,同比增长162%;加氢站累计建成218座,居全球首位。

表6 中国燃料电池汽车发展目标

发文机构	中国汽车技术研究中心	中国标准化研究院和中国电器工业协会燃料电池分会	国家发展和改革委员会
发文时间/年	2016	2016	2022
标题	《中国燃料电池汽车发展路线图》	《中国氢能产业基础设施发展蓝皮书》	《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》
2025年目标	<ul style="list-style-type: none"> <li>•FCEV发展规模:5万辆</li> <li>•电堆比功率:2.5 kW/kg</li> <li>•耐久性:6 000 h</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>•FCEV保有量:约5万辆</li> <li>•部署建设一批加氢站</li> </ul>
2030年目标	<ul style="list-style-type: none"> <li>•FCEV发展规模百万辆</li> <li>•电堆比功率:2.5 kW/kg</li> <li>•耐久性:8 000 h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•加氢站:1 000座以上</li> <li>•FCEV运输车:200万辆</li> </ul>	
2050年目标	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>•加氢站网络构建完成</li> <li>•FCEV运输车:1 000万辆</li> </ul>	

## 2.2 全球氢燃料发动机及汽车发展态势

全球氢燃料发动机及汽车的发展可分为3个阶段。第1阶段,试验尝试期,时间为1970—2004年;第2阶段,应用探索期,时间为2005—2020年;第3阶段,应用实践期,时间为2021至今。从全球看,在新能源汽车价值链中,日本、韩国、美国在燃料电池汽车方面全球领先,中国在纯电动汽车方面全球领先,在传统

汽车方面处于领先地位的欧洲正在失去燃料电池和纯电动汽车发展机遇和战略优势,氢燃料发动机及汽车正在成为欧洲新能源汽车新的战略高地。

### 2.2.1 试验尝试期

试验尝试期氢燃料发动机及汽车开发以日本和欧洲为主。1970年,日本武藏工业大学开始研发氢燃料发动机,起初目的是研究发动机排放的碳氢化合物(Hy-

drocarbon, HC)是来自汽油还是润滑油,自此氢燃料发动机成为研究热点。1980年前后,梅赛德斯奔驰和宝马等欧洲汽车制造商相继进入氢燃料发动机开发领域,宝马曾对7系搭载的V12汽油发动机进行调校用于氢燃料汽车的发动机。1991年马自达开发了搭载氢燃料发动机的第一款原型车HR-X。1997年后的5年间,福特致力于基于2.0 L汽油发动机的氢燃料发动机研发,该款发动机的压缩比为14.5:1,最大功率

为47 kW@5 000 r/min,最大扭矩为105 N·m@4 000 r/min,但当发动机转速超过5 000 r/min后,将引发预燃等异常燃烧问题。

### 2.2.2 应用探索期

应用探索期氢燃料发动机及汽车开发以日本为主,欧洲为辅。氢燃料发动机各类控制技术不断成熟,热效率逐步提升,性能参数已接近传统发动机,主流直喷氢燃料发动机参数及性能指标如表7。

表7 主流直喷氢燃料发动机参数及性能<sup>[28]</sup>

研究机构	年份/年	参数	性能指标	采用技术
宝马汽车 <sup>[29]</sup>	2004	单缸0.5 L	当量比燃烧负荷可达1.4 MPa,有效热效率30%	点火正时,压缩比12:1
丰田汽车 <sup>[28]</sup>	2006	单缸0.85 L	0.95 MPa@1 200 r/min,最高有效热效率38.9%	优化喷射相位
武藏工业大学 <sup>[30]</sup>	2009	六缸7.68 L	3 000 r/min 最大功率可达147 kW	压缩比13:1,废气再循环,后处理系统
丰田汽车 <sup>[31]</sup>	2010	四缸2.2 L	0.8 MPa@2 000 r/min,有效热效率43.8%	分层扩散燃烧,废气再循环
东京城市大学 <sup>[31]</sup>	2010	单缸1.0 L	0.85 MPa@1 000 r/min,指示热效率41%	合适的燃烧策略,压缩比13:1,废气再循环
阿贡国家实验室 <sup>[32]</sup>	2012	单缸0.66 L	1.41 MPa@1 500 r/min,最高有效热效率45%	喷嘴计算流体动力学优化,压缩比12.9:1,机械增压
东京城市大学 <sup>[33]</sup>	2018	四缸4.7 L	400 N·m@1 500 r/min,0.8 MPa@1 600 r/min,有效热效率40%	可变压缩比12.7~18,冷却废气再循环,后处理系统
日本可持续能源研究中心 <sup>[34]</sup>	2019	单缸1.3 L	150 N·m@1 000 r/min,指示热效率50%	废气再循环,压缩比12.9:1,机械增压
博世 <sup>[35]</sup>	2020	四缸2.0 L	升功率83 kW/L,升扭矩191 N·m/L,有效热效率39%	涡轮增压,稀薄燃烧

### 2.2.3 应用实践期

应用实践期氢燃料发动机及汽车开发以欧洲为主。《巴黎协定》代表全球绿色低碳转型大方向,要求各国每5年更新一次“国家自主贡献(NDC, National Determined Contribution)”减排计划。欧盟将其减排目标更新为“到2030年将温室气体净排放量较1990年水平减少55%(此前为40%)”<sup>[36]</sup>。为应对此目标,2021年7月14日,欧盟委员会公布了“Fit for 55”的一揽子气候立法提案<sup>[37]</sup>。在交通领域,修订民用轿车与轻型商用车CO<sub>2</sub>排放标准,要求2030年和2035年注册的民用轿车排放量较2021年水平分别下降55%和100%,轻型商用车分别下降50%和100%<sup>[36]</sup>。纯电动动力总成是发展重心,纯电动动力总成无法覆盖的领域利用氢动力总成(包括燃料电池发动机和氢燃料发动机)进行补充,氢燃料发动机及汽车作为纯电动汽车和燃料电池汽车的补充技术再次受到关注。

整车和零部件制造商正在加快氢燃料发动机的开发进程,并制定量产发展战略。沃尔沃载货车2040年后大致形成纯电动汽车、燃料电池汽车、氢燃料发动机汽车占比分别为40%、40%和20%的市场格局。保时捷子公司Porsche Engineering于2022年4月发布

了高功率氢燃料发动机概念产品,通过配置电动涡轮增压器和电动压缩机,同时实现了高功率和零排放。博格华纳正在开发用于氢燃料发动机的氢喷射系统概念产品,计划到2023年底开始量产低容量中压直喷氢喷射系统,2026年前后开始量产大容量中压直喷氢喷射系统。FEV正在加快新款氢燃料发动机的开发进程,并且已在无压力振荡氢燃料导轨系统方面取得一系列成果,最新款的氢燃料导轨系统既可实现进气道喷射,也可实现缸内直喷<sup>[38]</sup>。康明斯正在投资一系列与氢燃料发动机相关的产品与技术,并联合物流企业验证15 L氢燃料发动机相关性能<sup>[39]</sup>。

## 2.3 我国氢燃料发动机及汽车发展态势

我国氢燃料发动机及汽车研究始于20世纪80年代,起步相对较晚,可分为2个阶段。第1阶段,理论试验发展期,以高等院校试验研究为主;第2阶段,工程应用发展期,以企业自主开发应用为主。考虑到我国氢气以蓝氢、灰氢为主,以及燃料电池汽车成本高昂等因素,氢燃料发动机及汽车正成为我国商用汽车零碳排放、绿色发展的新途径。

### 2.3.1 理论试验发展期

我国高等院校对氢燃料发动机开展了深入的研

究,积累了一定经验,为工程应用开发奠定了基础。浙江大学从燃烧理论和化学动力学角度分析了氢喷射火花点火氢燃料发动机中氢空气混合气的燃烧及 $\text{NO}_x$ 的形成<sup>[40]</sup>。天津大学通过喷水 and 废气再循环等措施来抑制氢燃料发动机异常燃烧,使之能正常工作<sup>[41]</sup>。上海交通大学研究了氢燃料发动机瞬态特性相关问题,涡轮当量流通面积的变化对发动机的过渡特性影响不大,减小涡轮增压器转动惯量和充气加速涡轮可改善涡轮增压氢燃料发动机的加速性能<sup>[42]</sup>。华北水利水电学院在分析喷氢正时和喷氢量对氢燃料发动机工作性能影响的基础上,设计了喷氢控制算法,使氢燃料发动机动力性、经济性与排放等综合性能达到优化目标<sup>[43]</sup>。北京交通大学进行了进气管喷射的氢燃料发动机 $\text{NO}_x$ 排放性能研究,指出影响氢燃料发动机 $\text{NO}_x$ 排放的因素,通过试验证明点火延迟对 $\text{NO}_x$ 排放具有一定作用,复合燃烧也可增加输出功率并降低 $\text{NO}_x$ 排放<sup>[44]</sup>。北京工业大学在一台加装了电控氢气喷射系统的四缸发动机上,就怠速、稀燃条件下纯氢发动机的燃烧与循环变动特性进行了试验研究。怠速工况下,适当提高过量空气系数有利于减小氢燃料发动机燃料能量流量。随着过量空气系数增加,氢燃料发动机怠速时的传热损失将有所减少。增加过量空气系数后,纯氢发动机火焰发展期和传播期均明显延长<sup>[45]</sup>。

### 2.3.2 工程应用发展期

以商用车为应用场景的氢燃料发动机及汽车加速涌现,2022年为氢燃料发动机及汽车应用元年。2022年6月8日,一汽解放自主设计研发的国内首款重型商用车缸内直喷氢燃料发动机成功点火并稳定运行,该款氢燃料发动

机为13 L重型发动机,运转功率超373 kW,指示热效率突破55%,具有技术首创、行业首发、国际领先3大特点<sup>[46]</sup>。

2022年6月15日,中国重汽、潍柴动力联合发布全国首台商业化氢燃料发动机重型载货车,搭载潍柴动力自主研发的13 L氢燃料发动机,达到国际领先水平<sup>[47]</sup>。该款氢燃料发动机采用精准氢喷射控制技术,应用高效增压、稀薄燃烧技术,解决氢气异常燃烧难题<sup>[48]</sup>。可商业化应用到港口、城市、电厂、工业园区等特殊工作场景<sup>[47]</sup>。

2022年6月30日,玉柴YCK16H氢燃料发动机在广西玉林成功点火,该款发动机排量为15.93 L,最大功率约为472 kW,是目前中国排量最大、功率最大的氢燃料发动机。该款发动机采用先进的燃料高压共轨、高压缸内直喷技术和双流道增压技术,可按需实现缸内均质燃烧或者分层燃烧,动力性更强、热效率更高、稳定性更好,可适配灰氢、绿氢、甲醇在线制氢等多种途径制备的燃料,依据需求和燃料制、储、运的基础条件,自由组合燃料供给,是一种高适应性、灵活可控的零碳或低碳动力解决方案<sup>[49]</sup>。

## 3 氢动力汽车对比分析

### 3.1 国内外氢动力汽车发展对比

#### 3.1.1 国内外燃料电池汽车发展对比

通过对国内外燃料电池汽车发展态势分析,从氢能发展驱动因素、氢能与燃料电池汽车发展策略、燃料电池汽车在氢能体系中的定位、燃料电池汽车重点布局、氢能与燃料电池汽车立法情况、燃料电池汽车发展目标评价、燃料电池汽车目标实现可行性、燃料电池汽车与传统汽车成本持平时间预估8个维度对比分析国内外燃料电池汽车产业,具体见表8。

表8 国内外燃料电池汽车发展对比

对比项	日本	美国	韩国	欧洲	中国
氢能发展驱动因素	能源独立	能源危机	能源独立	气候变化 交通脱碳	能源结构转型
发展策略	氢能技术储备→燃料电池汽车示范→基础设施建设,协同发展	氢能技术储备→基础设施建设与燃料电池汽车示范→持续抵税补贴		氢能技术研究→燃料电池和氢能技术研发与示范→燃料电池和氢能技术商业化	燃料电池技术储备→基础设施建设与燃料电池汽车示范→燃料电池示范推广→氢能体系
燃料电池汽车定位	仅是氢能应用场景之一	氢能主要应用载体	仅是氢能应用场景之一	氢能最重要应用载体	氢能应用场景之一
燃料电池汽车重点布局	乘用车为主	物料搬运车→中重型载货车→多元零排放车辆	先乘用车后商用车	乘用车为主 轻型商用车为辅	重型商用车为主
立法情况	否	否	是	否	否
发展目标评价	较为激进	较为激进	激进	激进	谨慎合理
目标实现可行性	难度较大	难度较大	难度很大	或将无法实现	短期目标有望达到
成本持平时间预估	2030年后	2025—2030年	2025年		

(1)氢能发展驱动因素方面,地域与能源特点是各国和地区氢能发展需要考虑的主要方面。日本与韩国为寻求能源独立,美国为应对能源危机,欧洲为应对气候变化,我国为寻求能源结构转型。

(2)发展策略方面,国内外氢能与燃料电池汽车发展策略取决于发展驱动因素。国外走出一条由氢能逐步过渡到燃料电池汽车示范及基础设施的发展路径,属于能源体系变革驱动车辆产品转变的自上而下发展模式。我国走出一条由燃料电池技术到基础设施建设和燃料电池汽车示范的发展路径,属于车辆产品变革引发的能源体系转变的自下而上的发展模式。

(3)燃料电池汽车定位方面,取决于氢能能在国家能源体系中的位置。日本与韩国燃料电池汽车仅是氢能应用场景之一,我国燃料电池汽车是氢能应用场景之一,美国燃料电池汽车是氢能主要应用载体,欧洲燃料电池汽车是氢能最重要应用载体。

(4)燃料电池汽车重点布局方面,与各国交通体系及当前新能源汽车产业进程高度相关。日本、韩国和欧洲等国家国土面积小,交通体系发达,燃料电池汽车重点布局乘用车,美国与我国幅员辽阔,同时考虑到我国纯电动汽车发展水平,燃料电池汽车重点布局物料搬运车和重型商用车。

(5)立法方面,氢能与燃料电池汽车立法表明国家发展决心。韩国成为全球首个氢能与燃料电池汽车立法的国家。

(6)发展目标评价与实现可行性方面,从当前各国燃料电池汽车发展态势对燃料电池汽车发展目标进行评价。日本、美国燃料电池汽车发展目标较为激进,实现难度较大;韩国燃料电池汽车发展目标激进,实现难度很大;欧洲燃料电池汽车发展目标激进,在俄乌冲突影响下或将无法实现;我国燃料电池汽车发展目标谨慎合理,短期目标有望达到。

(7)成本持平时间预估方面,燃料电池汽车成本是大规模推广应用的核心要素。日本、美国和韩国预估燃料电池汽车与传统汽车成本持平时间分别在2030年、2025—2030年期间和2025年。

### 3.1.2 国内外氢燃料电池汽车发展对比

通过对国内外氢燃料电池汽车发展态势分析,从氢燃料电池汽车研究起始时间、研究国家迁移、发展阶段、国家立法、车辆定位、产业链构成、重点布局7个维度对比国内外氢燃料电池汽车产业,具体见表9。

表9 国内外氢燃料电池汽车发展对比

对比项	国外	中国
研究起始时间	20世纪70年代	20世纪90年代
研究国家迁移	日本与欧洲→日本为主 →欧洲为主	
发展阶段	试验尝试期→应用探索期 →应用实践期	理论应用发展期→工程应用发展期
国家立法	欧盟立法提案	无
氢燃料电池汽车定位	纯电动汽车与燃料电池汽车的有效补充(欧洲)	无
产业链构成	关键零部件及系统总成(欧洲)	系统总成为主
氢燃料电池汽车重点布局	乘用车和商用车(欧洲)	重型商用车

(1)研究起始时间方面,我国氢燃料电池汽车起步相对较晚。

(2)研究国家迁移方面,国外氢燃料电池汽车研究起源于日本和欧洲,技术进步于日本,技术成熟落地于欧洲。

(3)发展阶段方面,国外氢燃料电池汽车发展经历试验尝试期、应用探索期和应用实践期3个阶段,我国氢燃料电池汽车经历理论应用发展期和工程应用发展期。

(4)国家立法方面,欧盟通过立法提案确立氢燃料电池汽车的产品地位,我国目前缺少对氢燃料电池汽车的顶层设计。

(5)氢燃料电池汽车定位方面,对于欧洲,氢燃料电池汽车是纯电动与燃料电池汽车的有效补充,我国对于氢燃料电池汽车的发展定位仍不明朗。

(6)产业链构成方面,欧洲从氢燃料电池汽车关键部件到系统总成逐步构建系统完善的产业链体系,我国目前氢燃料电池汽车产业链聚焦在系统总成。

(7)氢燃料电池汽车重点布局方面,欧洲氢燃料电池汽车同时布局乘用车和商用车,我国氢燃料电池汽车重点布局重型商用车。

### 3.1.3 燃料电池汽车与氢燃料电池汽车对比

燃料电池汽车与氢燃料电池汽车属于氢动力汽车2种完全不同的技术路线,目前看来,燃料电池汽车发展节奏明显快于氢燃料电池汽车,但是燃料电池汽车发展总体不及预期,氢燃料电池汽车或将成为燃料电池汽车的补充<sup>[9]</sup>。本小节系统对比了燃料电池汽车与氢燃料电池汽车,以阐明氢燃料电池汽

车技术路线可行性,具体见表10。

表10 燃料电池汽车与氢燃料发动机汽车对比

对比项	燃料电池汽车	氢燃料发动机汽车
产业扶持政策	相对完备	极少
规模应用瓶颈	高成本因素	技术成熟度低
燃料及价格	氢气,60~80元/kg	氢气,10~16元/kg
燃料纯度要求	极高(摩尔分数为99.97% <sup>[50]</sup> )	不高(可用工业副产氢) <sup>[58]</sup>
工作原理	电化学反应发电驱动车辆	氢氧混合燃烧化学能转化为机械能
工作效率	40%~50% <sup>[51]</sup>	35%~45%
环境适应性	受环境影响较大 <sup>[4]</sup>	受环境影响较小
产业链连续性	无	沿用部分内燃机产业链 <sup>[52]</sup>
污染物排放	无	以NO <sub>x</sub> 为主 <sup>[53]</sup>
碳排放	无	接近零
系统功率规模	200 kW以内	可达400 kW
耐久性	较短 <sup>[54]</sup>	约300 000 km <sup>[10]</sup>
续航里程	较长	较长
安全性	存在安全风险	存在安全风险
基础设施	需新建	需新建

(1)产业政策方面,国家和地方已颁布相对完备的产业政策支持燃料电池汽车规模化应用,氢燃料发动机汽车扶持政策基本处于空白。

(2)规模应用瓶颈方面,燃料电池系统需要铂作为反应催化剂及其他工艺不尽成熟的部件,规模应用瓶颈在于物料及氢气使用成本高。尽管国外预判2025—2030年燃料电池汽车与传统汽车成本接近,但从目前推广情况看成本预测过于乐观。氢燃料发动机汽车因燃烧控制、排放控制、供氢系统等技术不成熟,成为规模应用的主要瓶颈。

(3)燃料与纯度要求方面,燃料电池汽车与氢燃料发动机汽车尽管都采用氢气作为能源,但对氢气纯度要求差异巨大。根据GB/T 37244—2018《质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气》,燃料电池汽车用氢气纯度需达摩尔分数99.97%以上,氢燃料发动机汽车可用工业副产氢直接燃烧。

(4)工作原理方面,燃料电池汽车是利用氢气与氧气在膜电极处发生电化学反应产生电能,再利用驱动电机驱动车辆运动。氢燃料发动机汽车是利用氢气与氧气在发动机气缸内燃烧,将氢气化学能转换为热能再转化为机械能驱动车辆运动。

(5)工作效率方面,燃料电池汽车工作效率在40%~50%,氢燃料发动机汽车工作效率在35%~45%,

总体低于燃料电池汽车。

(6)环境适应性方面,燃料电池汽车受低温影响较大,氢燃料发动机汽车与传统天然气汽车接近,受低温影响较小。

(7)产业链连续性方面,燃料电池汽车需要搭建全新的动力系统产业链体系,氢燃料发动机汽车可沿用大部分内燃机产业链。

(8)污染物排放与碳排放方面,燃料电池汽车属于完全零排放汽车,既无污染物排放,又无CO<sub>2</sub>排放。氢燃料发动机汽车因燃烧高温,将产生一定NO<sub>x</sub>污染物排放,CO<sub>2</sub>排放接近零。

(9)系统功率规模方面,受限于燃料电池系统功率,燃料电池汽车功率规模多在200 kW以内,需要动力电池辅助来驱动车辆运动,导致车辆复杂性提升。氢燃料发动机功率可达400 kW,可依靠单一动力源驱动车辆运动。

(10)耐久性方面,燃料电池汽车耐久性低于氢燃料发动机汽车。

(11)续航里程,安全性与基础设施方面,燃料电池汽车与氢燃料发动机汽车基本相同。

## 4 总结及展望

在全球能源体系绿色转型、低碳发展大背景下,氢能作为“无限循环”零碳能源,已成为各国寻求能源独立和能源转型的战略选择。道路交通作为氢能重要应用场景之一,是新能源汽车产业重要组成部分。从国际看,燃料电池汽车与氢燃料发动机汽车两条腿走路发展态势愈发明朗,氢燃料发动机汽车将作为燃料电池汽车的有效补充,协同推进道路交通体系零碳化。从我国看,燃料电池汽车产业已建立起比较优势,但其发展仍受氢能体系、系统成本制约,属于完全政策驱动型产业。我国氢燃料发动机汽车起步较晚,但因其产业链连续性、系统成本等优势,逐步受到国内商用车企业的重视。为加快商用车辆新能源化,建议从以下4方面推进氢动力汽车规模化发展。

### (1)明确政策导向

产业政策是驱动我国新能源汽车产业前期发展的核心要素,氢能与燃料电池汽车已颁布明确产业发展规划及目标。氢燃料发动机汽车在我国当前氢能结构体系(蓝氢、灰氢等工业副产氢为主体)下是重要应用路线之一,建议加快研究制定氢燃料发动机汽车相关产业政策及发展目标,明确其市场地位,逐步形成燃料电池汽车与氢燃料发动机汽车两条腿走路的

发展格局。

### (2)核心技术攻关

目前来看,氢燃料发动机汽车技术总体不成熟,技术瓶颈是氢燃料发动机汽车规模化应用的主要障碍。建议从国家层面研究制定氢燃料发动机汽车发展技术路线图,推进氢燃料发动机汽车科技攻关专项,依托国内优质资源开展联合技术创新,突破燃烧控制、污染物排放、供氢系统、喷氢系统、储氢系统技术难点。

### (3)路线协同发展

燃料电池汽车和氢燃料发动机汽车是氢能在交通应用中的“一体两翼”,二者在氢气制取、存储、运输、加注等产业环节基本一致,在关键系统及部件方面存在交叉。建议将燃料电池汽车和氢燃料发动机汽车路线协同发展,着力推进商用车的新能源化,促进商用车绿色转型、低碳发展。

### (4)加强技术经济分析

技术经济性是汽车产业规模化应用的前提,燃料电池汽车与氢燃料发动机汽车成本问题是制约其进一步发展的主要因素之一。建议密切跟踪并分析氢能产业链、燃料电池汽及氢燃料发动机汽车主要零部件及系统的成本趋势,积极吸引行业投资,持续推进氢动力总成及汽车规模化、高质量发展。

### 参 考 文 献

- [1] 范英杰. 车用氢气发动机研究进展综述[J]. 内燃机与配件, 2021(3): 40-42.
- [2] 孙柏刚, 包凌志, 罗庆贺. 缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 265-278.
- [3] 王占宜, 赵岚, 张静. 氢气在发动机中的应用研究[J]. 内燃机与动力装置, 2010(5): 55-58.
- [4] 吕祥奎. 氢气发动机的现状及前景分析[J]. 人民公交, 2007(9): 48-50.
- [5] 柴油机设计与制造编辑部. 丰田与雅马哈汽车开展合作共同开发新款氢燃料发动机[J]. 柴油机设计与制造, 2022, 28(1): 1.
- [6] 匡立春, 邹才能, 黄维和, 等. 碳达峰碳中和愿景下中国能源需求预测与转型发展趋势[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(1): 9-17.
- [7] 杨永明. 2050年前全球能源将何去何从?[J]. 中国石油和化工, 2018(3): 36-39.
- [8] 国家能源局. 国家能源局2021年上半年能源经济形势等情况新闻发布会文字实录[J]. 中国电业, 2021(8): 40-43.
- [9] SEBOLDTD, MANSBARTM, GRABNER P, et al. 可用于轿车和轻型货车的氢燃料发动机[J]. 范明强, 译. 汽车与新

动力, 2021, 4(5): 56-60.

- [10] 祝勇, 黄翔, 陈昊, 等. 氢内燃机发展现状及展望[J]. 当代化工研究, 2021(24): 5-7.
- [11] 刘潇潇, 王盼, 丁宣升, 等. 能源转型新形势下对我国能源安全问题的思考[J]. 当代石油石化, 2022, 30(6): 1-6.
- [12] 谭旭光, 余卓平. 燃料电池商用车产业发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 152-158.
- [13] 蒋瑜洁, 丁钰慧, 关昕. 日本推动氢燃料电池汽车产业发展的机制研究[J]. 现代日本经济, 2022(1): 27-46.
- [14] 李浩东. 日本“氢能社会”建设经验及对我国的启示[J]. 日本研究, 2021(4): 33-42.
- [15] METI. The strategic road map for hydrogen and fuel cells [EB/OL]. (2019-03-12)[2022-09-13]. [https://www.meti.go.jp/English/press/2019/pdf/0312\\_002a.pdf](https://www.meti.go.jp/English/press/2019/pdf/0312_002a.pdf).
- [16] 王冉, 刘侃. 国内外氢能汽车发展现状及对我国未来氢能产业发展的思考[J]. 环境与可持续发展, 2022(3): 44-52.
- [17] 符冠云, 熊华文. 日本、德国、美国氢能发展模式及其启示[J]. 宏观经济管理, 2020(6): 84-90.
- [18] 赵学良. 美国氢能及燃料电池产业发展现状及启示[J]. 当代石油石化, 2021, 29(10):10-15.
- [19] FUEL CELL & HYDROGEN ENERGY ASSOCIATION. Road Map to a US Hydrogen Economy[R/OL]. [2023-10-23]. <https://static1.squarespace.com/static/53ab1f6ee4b0bef0179a1563/t/5e7ca9d6c8fb3629d399fe0c/1585228263363/Road+Map+to+a+US+Hydrogen+Economy+Full+Report.pdf>.
- [20] KOREA TIMES. Government unveils roadmap for hydrogen-powered economy[EB/OL]. (2019-01-17)[2022-09-13]. [http://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2019/01/419\\_262238.html](http://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2019/01/419_262238.html).
- [21] 张艳枫. 韩国《氢经济路线图》主要内容及启示[J]. 全球科技经济瞭望, 2019, 34(Z1): 4-6.
- [22] 吴善略, 张丽娟. 世界主要国家氢能发展规划综述[J]. 科技中国, 2019(7): 91-97.
- [23] 陈民. 欧盟推进实施第四个研究开发框架计划[J]. 世界科技研究与发展, 1995(1): 52-52.
- [24] 张强, 姜明慧, 郝旭辉, 等. 欧盟实现碳中和的氢燃料电池技术经济分析[J]. 汽车文摘, 2022(3): 19-28.
- [25] Fuel Cells and Hydrogen. 2 Joint Undertaking. Hydrogen roadmap Europe: a sustainable pathway for the European energy transition[EB/OL]. (2019-11-02)[2022-09-13]. <https://www.fch.europa.eu/publications/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition>.
- [26] 国家发改委. 国家发改委发布《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》[J]. 稀土信息, 2022(4): 26-32.

- [27] 刘锐,尹训飞,董凯.加速我国氢燃料电池汽车产业发展[J].智能网联汽车,2022(4):28-30.
- [28] MOHAMMADI A, SHIOJI M, NAKAI Y, et al. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(2): 296-304.
- [29] ROTTENGRUBER H, BERCKMÜLLER M, ELSÄSSER G, et al. Direct-injection hydrogen SI-engine - operation strategy and power density potentials [J]. SAE Technical Paper, 2004: 2004-01-2927.
- [30] KAWAMURA A, YANAI T, SATO Y, et al. Summary and progress of the hydrogen ice truck development project [J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2009, 2(1): 110-117.
- [31] TANNO S, ITO Y, MICHIKAWAUCHI R, et al. High-efficiency and low-Nox hydrogen combustion by high pressure direct injection [J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(2): 259-268.
- [32] MATTHIAS N S, WALLNER T, SCARCELLI R. A hydrogen direct injection engine concept that exceeds U.S. DOE light-duty efficiency targets [J]. SAE International Journal of Engines, 2012, 5(3): 838-849.
- [33] YAMANE K. Hydrogen fueled ICE, successfully overcoming challenges through high pressure direct injection technologies: 40 years of Japanese hydrogen ICE research and development [C]//SAE 2018 World Congress & Exhibition 2015. Michigan USA: SAE, 2018.
- [34] TSUJIMURA T, SUZUKI Y. Development of a large-sized direct injection hydrogen engine for a stationary power generator [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(22): 11355-11369.
- [35] EICHLSEDER H. H2 ICE for future passenger cars and light commercial vehicles [C]// 2019 International Vienna Motor Symposium. Vienna Austria: VDI, 2019.
- [36] 惠婧璇. 欧盟"Fit for 55"一揽子气候立法提案解读及应对建议[J]. 中国能源, 2021, 43(11): 9-14.
- [37] EUROPEAN COMMISSION. Delivering the European Green Deal[EB/OL]. (2021-08-11)[2023-10-23]. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-europeangreen-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-europeangreen-deal_en), 2021-07-14/2021-08-11.
- [38] 肖献法. 2021两会,全国人大代表刘汉如:4个建议涉及换电重卡计重方式,GB 1589修改,甲醇汽车落地,氢气内燃机研发[J]. 商用汽车, 2021(2): 33-38.
- [39] 马铮. 国外氢燃料内燃机的新进展[J]. 农机市场, 2021(10): 59-60.
- [40] 李径定,郭林松. 氢空气混合气的燃烧及其NO<sub>x</sub>的形成[J]. 燃烧科学与技术,1996(3):209-214.
- [41] 包铁成,付晓光. 氢燃料在汽车上的应用[J]. 小型内燃机, 1999(2): 7-10+38.
- [42] 马捷,周玉成,苏永康,等. 涡轮增压氢发动机加速特性的分析和改进[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2001(5): 940-944.
- [43] 李士雷,祁丽霞,秦瑞燕. 氢发动机喷氢控制算法设计[J]. 内燃机与动力装置, 2007(2): 6-9+38.
- [44] 杨振中,孙永生,李思颖. 氢燃料发动机NO<sub>x</sub>排放特性与预测[C]//第七届全国氢能学术会议论文集, 2006: 334-338.
- [45] 汪硕峰,纪常伟,张擘,等. 稀燃纯氢发动机怠速燃烧与循环变动试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 12-15+94.
- [46] 杨仑. 我国自主研发缸内直喷氢气发动机成功点火[N]. 科技日报, 2022-06-09(003).
- [47] 中国重汽. 潍柴动力联合发布全国首台商业化氢内燃机重卡[J]. 重型汽车, 2022(3): 2.
- [48] 韩光胤. 氢能重卡加快“成长”[N]. 中国交通报, 2022-06-23(008).
- [49] 商用车. 中国最大排量、最大马力燃氢发动机玉柴YCK16H成功点火[J]. 商用汽车新闻, 2022(7): 19.
- [50] 张祎玮,王亚敏,万伟,等. 质子交换膜燃料电池车用氢气品质分析整体解决方案开发及应用[J]. 分析实验室, 2022(7): 41.
- [51] 陈曦,贺凌轩,刘芹孝,等. 动态工况下车用燃料电池系统热力学分析[J]. 储能科学与技术, 2021(4): 1416-1422.
- [52] RANA K K, NATARAJAN S, JILAKARA S. Potential of hydrogen fuelled IC engine to achieve the future performance and emission norms [C]// SAE World Congress & Exhibition 2015, Michigan USA: SAE, 2015.
- [53] ABINASH P, VSSUT B. Formation, Kinetics and control strategies of NO<sub>x</sub> emission in hydrogen fueled IC engine [J]. International Journal of Engine Research, 2020, 9(1): 91-108.
- [54] CECH M, KNAPE M, WILFERT T, 等. 可实现零排放的氢燃料发动机[J]. 范明强,译. 汽车与新动力, 2021(6): 20-23.

## 【作者简介】

朱云尧,中国汽车工程研究院股份有限公司,研究方向为新能源汽车及产业。

E-mail: yzhusuper@163.com