

燃料电池汽车能耗、排放与经济性评估

孔德洋¹, 唐闻翀¹, 柳文灿², 王敏敏³

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 广汽菲亚特克莱斯勒汽车有限公司, 湖南 长沙 410100;
3. 上汽通用汽车销售有限公司, 上海 201206)

摘要: 针对电解水制氢路径, 深入讨论不同发电方式对燃料电池汽车全生命周期的影响; 对不同发电方式下电解水制氢路径的燃料电池汽车采用 GREET 软件进行能耗、排放、环境影响和替代效益的建模及仿真计算; 对不同发电制氢路径的燃料电池汽车综合成本进行计算和分析。结果表明, 风能发电电解水制氢路径的能耗和排放最低, 对环境最为友好, 且经济效益相对较高, 是目前实现绿色、高效使用燃料电池汽车的最可行路径。

关键词: 燃料电池汽车; 全生命周期; GREET 软件; 能耗; 排放

中图分类号: U473

文献标志码: A

Energy Consumption, Emissions and Economic Evaluation of Fuel Cell Vehicles

KONG Deyang¹, TANG Wenchong¹, LIU Wencan², WANG Minmin³

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. GAC Fiat Chrysler Automobile Corporation Limited, Changsha 410100, China; 3. SAIC General Motors Sales Corporation Limited, Shanghai 201206, China)

Abstract: Water electrolysis hydrogen production pathways were concerned, and the effects of different power generation modes on the life cycle of fuel cell vehicles were discussed. GREET software was used to model and simulate the energy consumption, emissions, environmental impact and substitutability of fuel cell vehicles with different hydrogen production pathways, in which water electrolysis was powered by different energies. The comprehensive cost calculation and analysis of fuel cell vehicles with different pathways was carried out. The results showed that the hydrogen production pathway, in which water electrolysis is powered by wind energy, had the lowest energy consumption and emissions, being the most environment-friendly, meanwhile is relatively

higher in economic efficiency. It is the most workable pathway to make green and efficient use of fuel cell vehicles.

Key words: fuel cell vehicles; life cycle; GREET software; energy consumption; emissions

燃料电池汽车(fuel cell vehicle, FCV)是我国新能源发展战略中重要的能源消费终端, 具备氢气加注时间短、续航里程长、能源转换效率高、排放少等特征, 并能够适应苛刻环境的驾驶工况。重要的是, 将风能、太阳能产生的不稳定和剩余电力用于制氢, 再将氢气转化为 FCV 的动力, 可以有效提高清洁能源的利用率, 解决新能源发电并网困难的问题。然而, 从全生命周期的角度来看, 新能源发电制氢在燃料制备、运输及车辆使用等环节的能耗、排放和经济性不明确, 相关研究逐渐成为热点。

国外研究大多结合目前 FCV 技术现状和能源环境, 有针对性地对相关技术指标和成本参数进行评估和预测, 从能耗、排放和经济性角度对 FCV 全生命周期进行综合评估, 见文献[1-8]。

国内研究从氢能系统研究到车载电池及整车性能研究都有所涉及, 与本文相关度较大的主要在以下 3 个方面: FCV 技术和经济性研究、氢气制备与储运及基础设施研究、FCV 全生命周期能耗与排放及成本研究, 见文献[9-19]。

FCV 车用氢气的制备方法较为多样, 目前常见的有烃类蒸汽转化法制氢、煤制氢、超临界水褐煤制氢以及电解水制氢等。本文针对电解水制氢, 分析不同能源发电方式下的 FCV 电解水制氢路径, 计算从制氢到 FCV 使用整个过程的全生命周期能耗和排放, 并核算 FCV 能源-车辆综合成本, 对各路径进行综合评估。

收稿日期: 2017-01-22

基金项目: “十三五”国家科技支撑计划(2015BAG11B01)

第一作者: 孔德洋(1973—), 男, 副教授, 管理学博士, 主要研究方向为汽车产业组织与政策、新能源汽车应用环境与商业模式。

E-mail: kongdeyang@tongji.edu.cn

1 目标路径

目前,我国电力结构中火力发电方式占主导,但新能源发电,特别是风能发电与光伏发电比例正不断攀升.这已成为未来能源发展的重要趋势,有利于实现节能减排的目标.因此,本文以风能发电、光伏发电以及我国目前电力结构下发电电解水制氢(以火力发电为主,以水力、风能、光伏发电等为辅的混合发电模式电解水制氢)作为目标路径进行研究,并与传统汽油车的传统汽油路径作对比.3条制氢路径及1条对比路径依次为:①风能发电电解水制氢路径(WE-W),②光伏发电电解水制氢路径(WE-S),③我国现有电力结构下发电电解水制氢路径(WE-M),④传统汽油路径(G).

制氢路径包括燃料生产、燃料运输、电力生产、氢气制备、储运加注和使用环节,传统汽油路径与其类似.结合我国目前具体现状,各路径建模过程如表1所示.

表 1 各路径建模过程

Tab.1 Pathway modeling process

路径	建模过程
WE-W	风电场发电→风电电解水制氢→氢气压缩至长管拖车中→氢气通过长管拖车运输至加注站→氢气压缩储存→氢气加注至车辆→车辆运行
WE-S	光伏发电→现场电解水制氢→氢气压缩储存→氢气加注至车辆→车辆运行
WE-M	以火力发电为主的混合发电→输配至加注站→加注站现场电解水制氢→氢气压缩储存→氢气加注至车辆→车辆运行
G	原油开采→原油运输至炼油厂→原油炼制生产汽油→汽油运输与配送至加油站→汽油加注至车辆→车辆运行

2 能耗和排放计算

2.1 GREET 软件建模

GREET 软件是美国阿贡实验室开发的用于专门分析车辆等运输工具全生命周期能耗和排放的软件,本文运用最新发布 GREET 2015 软件对 FCV 不同制氢路径进行全生命周期的评估.通过输入各环节的能源结构、能耗、排放、转换效率等参数,最终可计算得出全生命周期的能耗与排放结果.

所研究的全生命周期包括从原材料开采到车辆运行,即 WTW(from well to wheel),整个过程所有燃料输出、输入的各个环节分为能源制备端 WTT(from well to tank)和车辆运行端 TTW(from tank

to wheel). WTT 阶段包括车用燃料的制备、储运和加注,在 GREET 软件中输入各环节产生的能耗、排放以及转换效率数据即可完成建模.

对风能发电电解水制氢路径,其能耗和排放数据参考我国内蒙古某风电场的实际运行经验^[20],转换效率则包括电解系统效率、氢气加压装入长管拖车效率、氢气从拖车装入储氢罐效率,取 GREET 软件系统默认值即可,分别为 66.8%、96.4863%、93.9470%.

对光伏发电电解水制氢路径,其能耗和排放数据参考文献^[21],转换效率则包括电解系统效率和站内氢气加压储存效率,同样取系统默认值即可,分别为 66.8%、90.7287%.

我国现有电力结构下发电电解水制氢路径的建模需要先设定各发电方式所占比重.其中火力发电占 74.3%^[22],需消耗煤、天然气及石油,比例分别为 94.3%、2.3%、0.5%,各类燃料生成每度电的能耗和排放均按 GREET 软件系统默认值计算.发电效率取 34.50%^[23].水力发电基本无能耗和排放,发电效率为 99.35%^[24].风能发电、光伏发电各占 2.8%、0.5%,相关数据设定同前文.核能发电以及生物质发电各占 2.4%、0.8%,相关数据设定按照系统默认值即可.通过各类能源生成电力后,需将电力输配至加注站电解水制氢,其中电力输送效率取系统默认值 93.36%,电解系统效率和站内氢气加压储存效率同前文.

对传统汽油路径,GREET 软件已具有完备的路径建模、能耗和排放计算方法和数据,因此直接采用软件的内置模型.

TTW 阶段为车辆运行阶段.根据表 2 数据,在 GREET 软件中分别构建 FCV 和传统汽油车的车辆模块,即可完成 3 条制氢路径以及传统汽油路径 TTW 阶段的建模.其中,为增强对比性,选择位于同一级别且整备质量、最大功率、最大扭矩、车辆尺寸等参数相接近的丰田 Mirai 燃料电池车型和丰田锐志 2.5 L 汽油车型进行建模.

表 2 TTW 阶段建模

Tab.2 TTW stage modeling

车型	能源	能耗	排放
丰田 Mirai	氢气	1.04 kg · (100 km) ⁻¹	无
丰田锐志 2.5 L	汽油	8.8 L · (100 km) ⁻¹	系统默认值

2.2 能耗分析

以终端车辆行驶 100 km 所消耗的能源为输出,计算不同路径下 FCV 全生命周期能耗情况,如表 3 所示.可见,能耗最低的为风能发电电解水制氢路

径,能源效率相对传统汽油路径高出 23.2%;其次是光伏发电电解水制氢路径,能源效率比传统汽油路径高 16.6%;我国现有电力结构下电解水制氢路径能耗最大,比传统汽油路径能源效率低 47.4%。由此可见,发电方式对 FCV 全生命周期能耗影响巨大。我国电力结构中火力发电占比高且效率低,资源损耗较为严重,使得我国现阶段电解水制氢路径的 FCV 的能源效率远不及传统汽油车。

表 3 不同路径下车辆全生命周期能耗

Tab. 3 Vehicle life cycle energy consumption under different pathways

能耗	WE-M	WE-W	WE-S	G
化石能源消耗	466.89	69.37	96.66	358.22
煤	452.57	36.03	86.96	7.73
天然气	6.80	12.25	5.66	45.50
石油	7.52	21.09	4.04	304.99
总能耗	531.39	277.11	300.88	360.60

为进一步比较各路径化石能源的消耗情况,运用 GREET 软件分别对煤、天然气和石油 3 类主要化石能源的能耗情况进行分析计算,结果如表 3 所示。可见,我国现有电力结构下发电电解水制氢路径的化石能源消耗最大,传统汽油路径其次,风能发电电解水制氢路径能耗最少。

不同路径能源制备端 WTT 和车辆运行端 TTW 的能耗具体计算结果如图 1 所示。从 TTW 阶段看,FCV 在 TTW 阶段的能耗远低于传统汽油车,这得益于燃料电池转换效率高,而内燃机工作效率较低。从 WTT 阶段看,我国现有电力结构下电解水制氢路径能耗较高的主要原因是 WTT 阶段的能耗非常高,其甚至已经超过了其他 3 种能源模式的 WTW 总能耗,这是我国电力结构中火力发电比例高且能耗高所导致的。综合来看,风能和光伏发电电解水制氢路径的总能耗和化石能源消耗都远低于传统汽油路径,且风能发电电解水制氢为最佳路径。

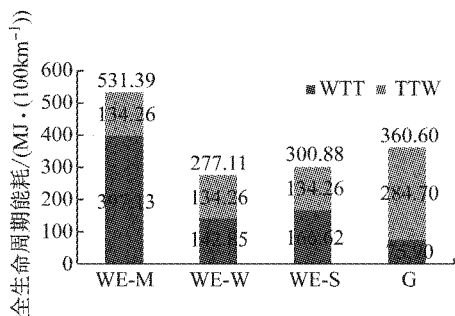


图 1 不同路径下 WTT 与 TTW 能耗

Fig. 1 WTT and TTW energy consumption under different pathways

2.3 排放分析

以终端车辆行驶 100 km 的排放为输出,计算不同路径下 FCV 全生命周期排放情况,如表 4 所示。可见,风能发电电解水制氢路径各项排放量都远低于传统汽油路径;光伏发电电解水制氢路径 NO_x 和 SO_x 排放量非常高,其他各项排放量则较低,若能控制硅电池板制造过程的氮硫化物的排放量,对减少大气污染物排放也能发挥重大作用;我国现有电力结构下电解水制氢路径在颗粒物排放和温室气体排放方面都远高于传统汽油路径。

表 4 不同路径下车辆全生命周期排放

Tab. 4 Vehicle life cycle emissions under different pathways

排放物	WE-M	WE-W	WE-S	G
VOC	3.80	0.56	0.70	11.73
CO	6.60	4.78	25.82	178.20
NO _x	23.63	13.31	5.23×10 ³	27.92
PM10	8.30	0.56	0.84	1.46
PM2.5	3.09	0.22	0.19	1.22
SO _x	109.20	5.80	1.62×10 ⁴	11.69
CH ₄	64.55	8.61	13.91	24.48
CO ₂	4.46×10 ⁴	5.86×10 ³	6.95×10 ³	2.58×10 ⁴
N ₂ O	0.727 4	0.084 5	0.090 2	0.575 5
GHG100	4.60×10 ⁴	6.13×10 ³	7.42×10 ³	2.70×10 ⁴

2.4 环境影响分析

单项指标的比较并不能反应各路径真正的环境影响,因此选取 5 项环境影响指标对各路径的环境效益进行不同维度的评估,分别为:人体毒性潜力、气溶胶潜力、光化学烟雾潜力、酸化潜力和全球变暖潜力^[25]。5 项指标的参数和权重系数如表 5 所示。

表 5 环境影响评价指标和权重^[25]Tab. 5 Environmental impact assessment indicators and weights^[25]

评价指标	参数	权重
人体毒性潜力	CO	0.012
	NO _x	0.780
	SO _x	1.200
气溶胶潜力	PM10	1.000
	PM2.5	1.000
光化学烟雾潜力	CH ₄	0.006
	NO _x	0.028
酸化潜力	SO _x	1.000
	NO _x	0.700
全球变暖潜力	CO ₂	1.000
	CH ₄	23.000
	N ₂ O	296.000

根据表 4 和表 5 数据,通过加权求和计算得到各路径的环境影响潜值如表 6。风能发电电解水制氢路径各环境影响潜值均为最小,对环境最友好;光伏

发电电解水制氢路径的人体毒性、光化学烟雾和酸化潜力 3 项指标最大,最易造成人体毒性、光化学烟雾及酸性降雨的形成;我国目前电力结构下发电电解水制氢路径的气溶胶潜力值和全球变暖潜力值最大,最易造成人体呼吸系统损害及温室效应。

表 6 各路径下环境影响潜值

Tab.6 Environmental potential impact of each pathway

环境影响潜值	WE-M	WE-W	WE-S	G
人体毒性潜力	149.55	17.40	23 519.71	37.94
气溶胶潜力	11.39	0.78	1.03	2.68
光化学烟雾潜力	1.05	0.42	146.52	0.93
酸化潜力	125.74	15.12	19 861.00	31.23
全球变暖潜力	46 269.96	6 083.04	7 296.63	26 543.39

2.5 替代效益分析

由于风能发电电解水制氢路径在所有路径中能耗和排放综合评估结果最好,且我国目前风能发电比例逐步提高,因此对并网风能替代效益进行分析。假设我国电网结构中按比例以风能发电替代火力发电且其他能源模式发电比例维持不变,对其能耗和排放进行计算。

FCV 能耗随风电并网比例变化如图 2,随风电比例上升,各项能耗指标均下降。风电比例接近 20% 时,FCV 全生命周期化石能源的消耗与传统汽油车持平。风电比例越高,FCV 节能效果越显著。

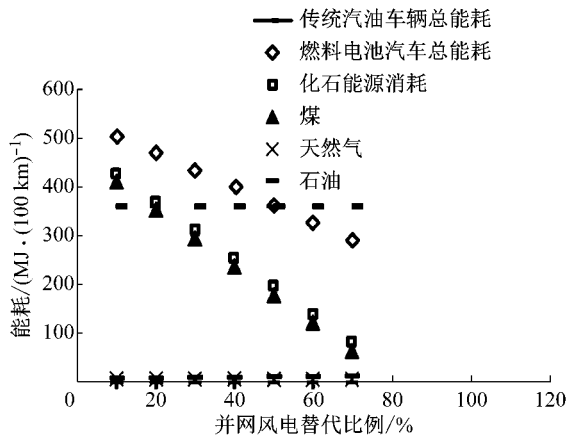


图 2 FCV 能耗随风电并网比例变化情况

Fig.2 Energy consumption of fuel cell vehicles varying with the proportion changes of wind power in the grid

以传统汽油车的碳排放值为基准,FCV 碳足迹变化情况如图 3 所示。风电并网比达 37%,才可实现 FCV 排放与传统汽油车持平。因此,需要根据实际情况处理好风能并网与现场制氢问题,从能耗和排放的全生命周期替代效益选取可行路径。

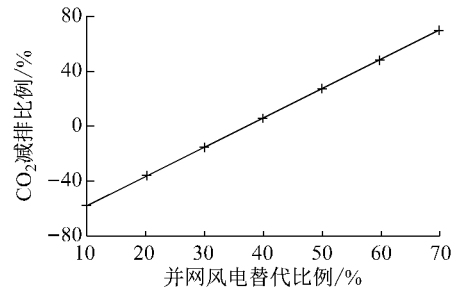


图 3 FCV 碳足迹随风电并网比例变化情况

Fig.3 Fuel cell vehicles carbon footprint varying with the proportion changes of wind power grid

3 经济性分析

为进一步评估不同路径下 FCV 发展潜力,需从能源消耗和成本效益进行综合评估,以探索 FCV 在实现其环境效益的同时,在经济性上是否具备优势。

3.1 成本构成

根据消费者持有成本理论,FCV 消费者持有成本包括购置成本、保有成本和使用成本^[26]。参照该理论,构建 FCV 车辆成本体系如图 4 所示,并在此基础上将计算范围延伸至全生命周期,结合 WTT 阶段的燃料生产成本与 TTW 阶段车辆实际能耗得到能耗成本,同时将环境成本也纳入体系中,最后得到全生命周期能源-车辆综合成本(C_{VAE})。

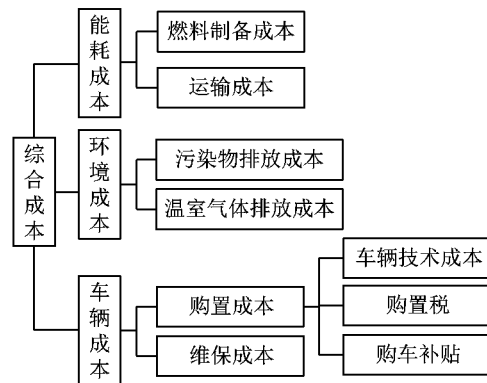


图 4 全生命周期能源-车辆综合成本体系

Fig.4 Full life cycle energy-vehicle integrated cost system

3.2 成本计算

对 FCV 和传统汽油车的能耗成本、环境成本以及车辆成本进行分析,在构建成本模型时进一步区分动态成本和静态成本,以便对总的能源-车辆综合成本进行现值计算。其中,折现率 r 取 5%。

3.2.1 能耗成本

能耗成本需逐年累计投入,为动态成本,单位取

元·(100 km)⁻¹. FCV 能耗成本 $C_{E(i),fcv}$ 计算公式为

$$C_{E(i),fcv} = K_{fcv} \cdot \left[\sum_{t=0}^N \frac{K_d \cdot K_{we} \cdot C_{ele(i)} + C_w + C_{we} + C_{tr}}{(1+r)^t} \right] \quad (1)$$

式中: i 为 m, w, s, 分别代表 WE-M、WE-W 和 WE-S, 即 3 条不同发电模式制氢路径; t 为车辆运行的第 t 年; N 为车辆运行的总年数; K_{fcv} 为 FCV 100 km 的能耗; K_d 为电力输配能耗系数; K_{we} 为电解水制氢耗电系数; $C_{ele(i)}$ 为不同发电模式下的电力成本; C_w 为电解水制氢耗水成本; C_{we} 为电解水制氢其他成本; C_{tr} 为氢气输送成本.

传统汽油车能耗成本 $C_{E,icev}$ 计算公式为

$$C_{E,icev} = K_{icev} \cdot \left[\sum_{t=0}^N \frac{0.0309P_g}{(1+r)^t} \right] \quad (2)$$

式中: K_{icev} 为传统汽油车 100 km 能耗; P_g 为我国 92 号汽油价格, 元·L⁻¹; 折算系数 0.0309 的单位为 L·MJ⁻¹.

3.2.2 环境成本

环境成本为动态成本, 单位取元·(100 km)⁻¹. 对于车辆全生命周期排放的环境成本研究, 主要针对 5 种标准污染排放物和 CO₂ 温室气体, 共 6 种排放物. 环境成本 C_M 计算公式为

$$C_M = \sum_{t=0}^N \frac{\sum_{j=1}^6 P_j \cdot Q_j}{(1+r)^t} \quad (3)$$

式中: P_j 为第 j 种排放物的当量价格, 元·g⁻¹; Q_j 为第 j 种排放物的单位排放量, g·(100 km)⁻¹.

3.2.3 车辆成本

FCV 和传统汽油车的车辆成本均主要为购置成本与维保成本之和. 此外, 对于 FCV 要额外加入电池更换成本.

购置成本为静态成本, 单位取元. 燃料电池汽车和传统汽油车的购置成本均可以式(4)表示:

$$C_{vp} = C_{vt} + C_{pt} + C_{su} \quad (4)$$

式中: C_{vp} 为不同类型车辆的购置成本; C_{vt} 、 C_{pt} 、 C_{su} 分别为对应类型车辆的技术成本、车辆购置税和购车补贴.

维保成本为动态成本, 单位取元. FCV 和传统汽油车的维保成本均可以式(5)表示:

$$C_{vm} = \sum_{t=0}^N \frac{K_m \cdot D + C_{vmi}}{(1+r)^t} \quad (5)$$

式中: C_{vm} 为不同类型车辆的维保成本; D 为车辆年行驶里程; K_m 、 C_{vmi} 分别为对应类型车辆的 1 km 保养成本和年保险成本.

电池更换成本 C_{vmb} 为动态成本, 单位元. 根据经

验数据, 需在第 4 年和第 8 年更换电池, 因此 C_{vmb} 为

$$C_{vmb} = C_B \cdot \left(\frac{1}{(1+r)^4} + \frac{1}{(1+r)^8} \right) \quad (6)$$

式中: C_B 为单次更换燃料电池成本.

3.3 成本计算结果分析

通过计算, 得到各路径的各类成本如表 7 所示, 其中每项成本计算结果均为车辆 10 年行驶 15 万 km 情形下的总成本, 单位为元. 结果显示: 风能发电和我国现有电力结构下发电电解水制氢路径综合成本均低于传统汽油路径; 综合成本最低路径为我国现有电力结构下发电电解水制氢路径; 风能发电电解水制氢路径其次; 光伏发电电解水制氢路径综合成本最高, 且高于传统汽油路径.

表 7 各路径成本汇总

Tab.7 Summary of the cost of each pathway

路径	能耗成本	环境成本	车辆成本	能源-车辆综合成本
WE-M	34 271.49	3 149.00	338 712.95	376 133
WE-W	50 577.43	416.90	338 712.95	389 707
WE-S	66 327.41	16 898.35	338 712.95	421 939
G	68 893.92	2 045.37	334 635.07	405 574

从车辆成本看, 考虑当前 FCV 成本现状及趋势, 在享受国家新能源汽车购车补贴的情形下, FCV 车辆成本高于传统汽油车车辆成本 4 078 元. 另外, 在使用周期内关键零部件 MEA(膜-电极组件)的更换成本也拉高了其总体车辆成本.

从能耗成本看, 3 种路径的能耗成本均低于传统汽油路径. 其中, 由于目前风能和光伏发电的能源成本相对较高, 因此两者对应路径的能耗成本均大于我国现有电力结构下电解水制氢路径.

从环境成本来看, 由于风能发电电解水制氢路径排放最低, 因此环境成本最低. 光伏发电电解水制氢路径受氮硫化物排放量较高的影响, 导致其环境成本远高于其他路径.

4 结论及展望

通过不同路径的建模分析对 FCV 全生命周期能耗、排放及经济性进行评估, 结果表明, FCV 与风能、光伏发电等新能源发电技术联合发展, 有望在未来真正实现高能效、零排放的技术价值.

在 3 条制氢路径中, 风能发电电解水制氢路径的能耗和排放均最低, 综合环境效益最佳. 若采取风能并网替代传统火力发电, 并网风能比例需超过 20% 才可实现节能减排效益. 因此可有效利用无法并网的风电进行制氢, 使 FCV 节能减排效果更为显

著.此外,风能发电电解水制氢路径在能源-车辆综合成本上稍高于我国现有电力结构下发电电解水制氢路径,但低于传统汽油路径和光伏发电电解水制氢路径,故在经济性上也较有优势.综上,该路径是目前实现FCV高效、节能、绿色的最可行路径.

光伏发电电解水制氢路径的能耗和排放仅次于风能发电电解水制氢路径,同样具有一定环境效益.然而,其能源-车辆综合成本在3条制氢路径中最高,且大于传统汽油路径,因此在目前情况下实施难度最高,市场化推广潜力最低.此外,硅电池板生产制造阶段氮硫化物排放量较高也是一大关键问题.未来可通过提高技术弥补此类缺陷,有效促进该路径的发展.

我国现有电力结构下发电电解水制氢路径在经济性上最具优势,能源-车辆综合成本也小于传统汽油路径.这因我国煤炭资源丰富,火力发电成本较低所致.但火力发电导致该路径的能耗和排放都远高于其他制氢路径和传统汽油路径,因此,降低火电比例和升级火电节能减排技术是该路径发展的前提条件.

参考文献:

- [1] LEE Jiyong, AN Sanghyuk, CHA Kyoung, *et al.* Life cycle environmental and economic analyses of a hydrogen station with wind energy [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(6): 2213.
- [2] POSSO F, ZAMBRANO J. Estimation of electrolytic hydrogen production potential in Venezuela from renewable energies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(23):11846.
- [3] AHMADI P, KJEANG E. Comparative life cycle assessment of hydrogen fuel cell passenger vehicles in different Canadian provinces [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(38): 12905.
- [4] GRANT D C. Short and long term energy storage for enhanced resilience of electric infrastructures: Storage of compressed hydrogen and oxygen gasses derived from electrolysis to provide grid connected mechanical and electrochemical electrical power generation on demand [C] // 2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet; IEEE, 2014: 1-6.
- [5] RIBAU J P, SILVA C M, SOUSA J M C, *et al.* Efficiency, cost and life cycle CO₂ optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses [J]. *Applied Energy*, 2014, 129(9): 320.
- [6] ITO Y, MANAGI S. The potential of alternative fuel vehicles: A cost-benefit analysis [J]. *Research in Transportation Economics*, 2015, 50(1):72.
- [7] MOCK P, SCHMID S A. Fuel cells for automotive powertrains—A techno-economic assessment [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 190(1): 133.
- [8] LEE Jiyong, YOO Moosang, CHA Kyoung, *et al.* Life cycle cost analysis to examine the economical feasibility of hydrogen as an alternative fuel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(10): 4243.
- [9] 陈专,吕洪,刘湃,等. 燃料电池电动车商业化中存在的问题 [J]. *公路与汽运*, 2009, 25(1): 10.
CHEN Zhuan, LÜ Hong, LIU Pai, *et al.* Fuel cell electric vehicle in the commercialization of the problem [J]. *Highway and Automotive*, 2009, 25(1): 10.
- [10] 孔德洋,王宁. 燃料电池汽车的环境影响及燃油替代效应 [J]. *汽车工业研究*, 2009, 24(6): 22.
KONG Deyang, WANG Ning. Environmental impact of fuel cell vehicles and fuel substitution effect [J]. *Auto Industry Research*, 2009, 24(6): 22.
- [11] 何彬,卢兰光,李建秋,等. 燃料电池混合动力汽车能量控制策略仿真研究 [J]. *公路交通科技*, 2006, 23(1): 151.
HE Bin, LU Languang, LI Jianqiu, *et al.* Study on energy control strategy of fuel cell hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23(1): 151.
- [12] 金振华,卢青春,高大威,等. 燃料电池汽车车载经济性测试系统 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2006, 30(6): 927.
JIN Zhenhua, LU Qingchun, GAO Dawei, *et al.* Development of fuel cell vehicle on-board economic test system [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition)*, 2006, 30(6): 927.
- [13] 刘绍军,马建新,周伟,等. 小型加氢站网络的成本分析 [J]. *天然气化工*, 2006, 31(5): 44.
LIU Shaojun, MA Jianxin, ZHOU Wei, *et al.* Cost analysis of small hydrogen refueling station network [J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2006, 31(5): 44.
- [14] 冯文,王淑娟,倪维斗,等. 燃料电池汽车氢能系统的环境、经济和能源评价 [J]. *太阳能学报*, 2003, 24(3): 394.
FENG Wen, WANG Shujuan, NI Weidou, *et al.* Environmental, economic and energy evaluation of hydrogen energy system in fuel cell vehicle [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2003, 24(3): 394.
- [15] 邓学,王贺武,黄海燕,等. 中国车用氢能潜力分析 [J]. *科技导报*, 2010, 28(9): 96.
DENG Xue, WANG Hewu, HUANG Haiyan, *et al.* Hydrogenic potential analysis of vehicles in china [J]. *Science and Technology Review*, 2010, 28(9): 96.
- [16] 孙大林. 车载储氢技术的发展与挑战 [J]. *自然杂志*, 2011, 33(1): 13.
SUN Dalin. Development and challenge of vehicle hydrogen storage technology [J]. *Natural Science*, 2011, 33(1): 13.
- [17] 高玉冰,毛显强,杨舒茜,等. 基于LCA的新能源轿车节能减排效果分析与评价 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(5): 1504.
GAO Yubing, MAO Xianqiang, YANG Shuqian, *et al.* Analysis and evaluation of energy saving and emission reduction of new energy car based on LCA [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5): 1504.