

文章编号:0254-0096(2018)03-0651-08

燃料电池公共汽车氢能利用系统评价

宋雨田, 王雪强, 毕胜山, 吴江涛, 邱 硕

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 以氢燃料电池汽车系统为研究对象,将现有的氢气生产、输运、加注技术和燃料电池公共汽车(FCB)结合,设计出6种可行方案,运用生命周期评价(LCA)方法对每种方案的能耗、成本和环境影响进行评价,给出每种方案的综合评价指标。结果表明:采用天然气蒸汽重整法制氢(SRM)、钢瓶输运氢气、钢瓶存储氢气的方案极优,综合评价指标为0.65。还针对气价和FCB数量对系统成本的影响进行灵敏度分析,天然气价格的波动对系统成本影响很大,当天然气气价超过3.0 ¥/m³时,天然气制氢失去成本优势;FCB数量的增加使得系统成本降低,当FCB数量超过600辆时,不同方案成本趋于一致,稳定在约27 ¥/(kgH₂)。

关键词: 天然气; 氢能; 燃料电池汽车; LCA法; 模糊评价

中图分类号: TK01

文献标识码: A

0 引 言

氢能具有资源丰富、环境友好、利于存储、燃烧热值高、燃烧性能好5大优点,是极具潜力的清洁能源,在工业生产和民用生活中应用前景极为光明。燃料电池汽车(fuel cell vehicle, FCV)是氢能利用在交通领域的载体,奔驰、通用、丰田等国际大牌车企和北汽、上汽等国产车企都投入巨额资金进行研发,生产出系列概念产品进行测试和示范运行。作为FCV的一种,燃料电池客车(fuel cell bus, FCB)更适合率先进行推广,目前国内已在北京和上海进行过多次FCB示范运行,取得了良好的社会效益。其中,北京市示范运行的基本情况如表1所示。

与此同时,关于氢能利用系统的评价成为新的

研究热点,冯文^[1]运用能源管理领域的方法在国内首次完成FCB氢能利用的“系统性研究”,建立起FCB氢能利用评价体系;牛娇^[2]基于数学建模的理论,对多种制氢方法从技术、经济、环境和社会4个方面进行系统评价,得出天然气水蒸气重整制氢综合效益最高的结论;蒋东方等^[3]利用系统评价的方法,在现有技术路线的基础上,改进设计出更为清洁的氢能利用路线。另外,针对燃料电池汽车中的具体技术,清华大学、同济大学等高校联手北汽、上汽等车企也展开了多项“技术性研究”。清华大学与北汽福田联合研制的福田FCB,圆满完成了北京奥运会示范项目以及中国燃料电池客车二期示范项目,累计行驶超过6万km;同济大学与上汽集团联合开发的帕萨特FCV顺利完成了各种天气条件下的测试,并赴北美与通用、丰田等国际品牌一同

表1 北京市燃料电池汽车示范运行项目

Table 1 Fuel cell vehicle demonstrating running programs in Beijing

序号	项目名称	示范车型	数量	示范用途	示范时间
1	中国燃料电池客车(FCB)商业示范项目一期	奔驰 Citaro	3台	公共交通	2006-06~2007-10
2	北京奥运会示范项目	北汽福田 上海大众	FCB 3台, FCV 20台	奥运公共用车	2008-08
3	中国燃料电池客车(FCB)商业示范项目二期	北汽福田	3台	公共交通	2008-09~2009-07

收稿日期: 2016-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51276142; 51476130)

通信作者: 吴江涛(1973—), 男, 博士、教授, 主要从事能源规划管理、热力学及流体热物性方面的研究。thermo@mail.xjtu.edu.cn

参加燃料电池汽车的国际化示范运行项目^[4]。

本文将现有的氢气生产、输运和加注技术与FCB汽车结合构成FCB氢能利用系统,设计出6种可行方案;结合当前经济性条件,运用LCA法对每种方案的能耗、成本 and 环境影响进行分析评价,为FCB工业应用和推广改进提供参考依据。

1 FCB氢能利用系统方案

FCB氢能利用系统可分为制氢子系统、输运子系统、加注子系统和终端子系统,如图1所示。将

每个子系统中的不同技术方法合理组合,可得FCB氢能利用系统的方案。

本文中,制氢子系统选择水蒸气重整法(SRM)、部分氧化法(POM)和自热重整法(ATR),以煤气化法作为对比参照;输运子系统选择车运气氢、管道输运气氢和车运液氢;相应地,加注子系统选择钢瓶存储气氢加注、立罐存储气氢加注和储槽存储液氢加注;终端子系统选择FCB汽车。合理组合后,本文设计出6种目标方案,如表2所示。

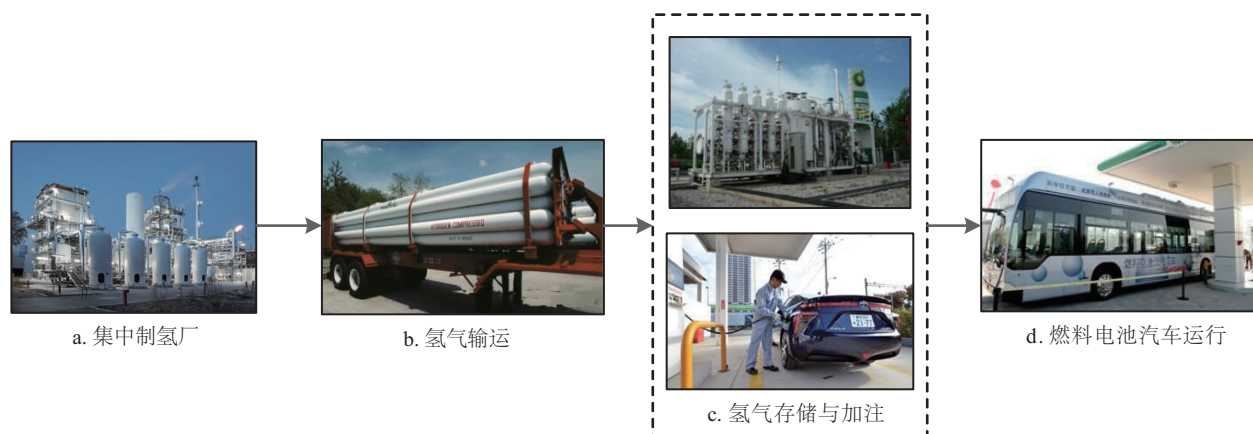


图1 FCB氢能利用系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FCB hydrogen energy system

表2 FCB氢能利用系统方案

Table 2 Feasible plans of FCB hydrogen energy system

编号	制氢	输运	加注	终端
1	SRM	钢瓶输运气氢	钢瓶存储	FCB(气氢)
2	POM	钢瓶输运气氢	钢瓶存储	FCB(气氢)
3	ATR	钢瓶输运气氢	钢瓶存储	FCB(气氢)
4	煤气化	钢瓶输运气氢	钢瓶存储	FCB(气氢)
5	SRM	管道输运气氢	立罐存储	FCB(气氢)
6	SRM	液氢输运	液氢储槽	FCB(液氢)

2 FCB氢能利用系统的LCA分析

对于氢能利用“系统性研究”,能源管理领域中的生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)最为常用,它能够全面定量地评价产品、活动或过程生命周期内的环境影响^[5],其核心思想是对研究对象进行“从摇篮到坟墓”的整个生命过程的所有环节影响进行分析,即对研究对象从原料开采至废弃处理的整个过程进行评估,从一个更宏观更科学的角

度衡量研究对象的环境影响。进一步可将LCA法的思想从环境领域推广至经济领域和能源领域,得到更为全面的评价结果^[6]。

FCB氢能利用系统的LCA分析流程可抽象为三维矩阵,如图2所示。空间上,系统可分为4个子系统;时间上,系统包含每个子系统全生命周期内的所有环节;对象上,系统分别包含每种能流。为方便计算,本文认为4个子系统相互独立,每个子系统分别计算后将结果相加得到总的分析结果,

据此对 6 种方案进行评价,得到能耗评价指标 N 、成本评价指标 C 和环境评价指标 P ,最终得到综合评价指标 X 。分析的过程具体可表示为:

$$X=f(N,C,P) \quad (1)$$

$$\text{能耗指标: } N=\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b f_1(x_1, x_2, \cdots, x_m) \quad (2)$$

$$\text{成本指标: } C=\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b f_2(x_1, x_2, \cdots, x_m) \quad (3)$$

$$\text{污染指标: } P=\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b f_3(x_1, x_2, \cdots, x_m) \quad (4)$$

式中, a ——子系统数目; b ——每个子系统内的子环节数目; x_k ——所有与利用系统有关的因素。

LCA 法的应用过程包含目标定义、清单分析、影响评价和改善评价,四者前后衔接,相互关联。

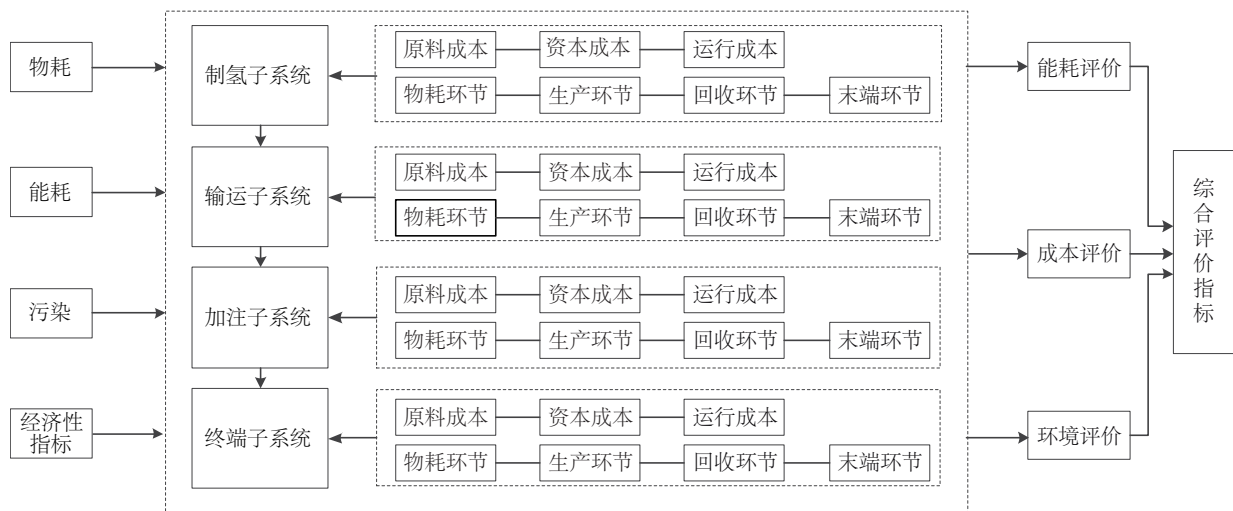


图2 FCB氢能利用系统LCA分析流程

Fig. 2 LCA analysis process of FCB hydrogen energy system

2.1 目标定义

目标定义对分析的目标和范围进行定义和界定。其中,全生命周期取 20 a,研究对象为从制氢原材料开采到氢气输送至 FCB 燃料电池的全过程,以 1 kgH_2 为输出目标来计算单位质量氢气的能耗、成本和污染物排放量,认为二次能耗均来自于燃煤火电,能量转换效率为 35%^[7],污染物排放为未经处理直接进行排放的值。

2.2 清单分析

2.2.1 数学模型建立

终端子系统为 400 台 FCB,车型选择北汽福田新一代燃料电池汽车,整车质量为 14.2 t,百公里氢耗 8.5 kg,续航里程 300 km,储氢瓶压力为 35 MPa^[1]。20 a 内终端子系统的物耗为 7160 t,20 a 内终端子系统的氢耗为 $3.723 \times 10^7 \text{ kg}$ 。

加注子系统的技术方案为高压氢气气瓶、立式氢气储罐和液氢储槽。假设市区建立 4 座氢气加注站,周转期为 4 d。经计算,每站每天有

50 辆 FCB 加注氢气,加注站储氢设备的容量为 56000 Nm^3 。

输运子系统的技术方案与加注子系统的技术方案配套:拖车输运气氢系统、管道输运以及液氢输运。拖车输运气氢系统中,拖车采用管状储存容器拖车;管道输运系统中,需铺设一条 30 km 长的氢气输送管道,输气压力约为 2 MPa^[3],管道规格参考文献[3];液氢输运简化后仅考虑运输储槽的卡车。

制氢子系统的技术方法包括天然气的 SRM 法、POM 法和 ATR 法。为比较以天然气为原料制氢的方案和工业上最为成熟的煤气化制氢的方案间的异同,本文以煤气化法作为参照对比。

本文以该数学模型为基础,利用 C++6.0 进行简单编程,对设计的 6 种方案进行定量分析,得出清单分析结果,程序所需的基础数据见表 3。

2.2.2 清单分析结果

基于搜集到的最新数据,本文得到每个子系统中每种技术方案的能耗、物耗和气态污染物排放的

表 3 基础数据汇总
Table 3 A Summary of basic data

物耗(数据来源于文献[4,8])			
FCB 质量/t	14.2	氢气瓶质量/t	2.2(全为钢)
立式氢气储槽质量/t	30(全为钢)	液氢储槽质量/t	15(全为钢)
拖车质量/t	7.8(全为钢)	挂车质量/t	25(全为钢)
管道运输钢耗/t	616	液氢运输钢耗/t	40
制氢厂建设钢耗/t	300	制氢厂建设水泥耗/t	400
能耗(数据来源于文献[7,9])			
炼钢能耗/MJ·t ⁻¹	22465	塑料能耗/MJ·t ⁻¹	42.5
炼铁能耗/MJ·t ⁻¹	11825	柴油能耗/MJ·L ⁻¹	41
炼铝能耗/MJ·t ⁻¹	12552	天然气能耗/MJ·t ⁻¹	46670
橡胶能耗/MJ·t ⁻¹	2754	煤能耗/MJ·t ⁻¹	26910
经济性假设(部分数据来源于文献[1])			
天然气价格/¥·Nm ⁻³	3.5	电费/¥·(kWh) ⁻¹	0.7
煤炭价格/¥·t ⁻¹	480	氢气瓶/万元·台 ⁻¹	15
柴油价格/¥·L ⁻¹	8	立式储氢气瓶/万元·台 ⁻¹	65
钢材价格/¥·t ⁻¹	3000	液氢储槽/万元·台 ⁻¹	100
水泥价格/¥·t ⁻¹	300	拖车+挂车系统/万元·套 ⁻¹	100
人员月薪/¥	4000	液氢储槽牵引车/万元·台 ⁻¹	40
气态污染物排放/kg(对应于生产 1 kWh 电能)(数据来源于文献[10])			
CO ₂	4.87×10 ⁻¹	CO	4.85×10 ⁻⁵
NO _x	1.19×10 ⁻³	CH ₄	3.53×10 ⁻⁴

量化数值,进而得出每种方案的计算结果,见表 4。FCB 氢能利用系统中,绝大部分气态污染物排放来源于制氢子系统,本文在计算时仅考虑该子系统。为直观反映出各方案之间的比较结果,将方案 4(煤气化+钢瓶运输气氢+钢瓶存储+FCB)作为比较基准,其余方案的计算结果分别与之作比,得到能耗指标 N 和成本指标 C 。

2.3 影响评价

影响评价指依据一定标准对清单分析的量化结果进行描述或评价,对清单分析结果进行比较和排序。本文影响评价包括能耗评价(图 3a)、成本评价(图 3b)、环境评价(表 5)和总体评价(表 6)。

2.3.1 能耗评价

方案 1 总能耗最低(193.58 MJ/(kgH₂)),方案 4

总能耗最高(348.25 MJ/(kgH₂))。制氢子系统中,效率由高至低分别为 SRM 法、ATR 法、POM 法和煤气化;输运和加注子系统中,效率由高至低分别为钢瓶运输存储、管道运输立罐存储和液氢运输储槽存储。方案 6 中输运子系统耗能远大于其他方案,这是因为在液化氢气的温度下,整个制冷系统的 COP 很低,能耗极高。

2.3.2 成本评价

方案 4 总成本最低(26.40 ¥/(kgH₂)),方案 2 总成本最高(36.21 ¥/(kgH₂))。制氢子系统中,成本由高到低分别为 POM 法、ATR 法、SRM 法和煤气化法,以天然气为原料的制氢方法成本均高于煤气化法,天然气制氢已经失去成本优势;输运和加注子系统中,管道输运立罐存储具有明显的成本优势。

表4 清单分析结果

Table 4 Inventory analysis result

	环节	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
能耗/ $\text{MJ}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	制氢	182.22	269.59	225.90	336.89	182.22	182.22
	输运	4.32	4.32	4.32	4.32	7.77	133.36
	加注	2.48	2.48	2.48	2.48	10.13	1.33
	终端	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56
	合计	193.58	280.95	237.26	348.25	204.67	321.47
	<i>N</i> 值	0.56	0.81	0.68	1.00	0.59	0.92
成本/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	制氢	21.95	30.46	26.21	20.64	21.95	21.95
	输运	0.66	0.66	0.66	0.66	5.00	7.00
	加注	5.09	5.09	5.09	5.09	4.29	2.13
	合计	26.74	36.21	31.96	26.39	30.83	31.08
	<i>C</i> 值	1.01	1.37	1.21	1.00	1.17	1.18
污染/ $\text{g}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	SO_2	0.017	0.022	0.019	0.108	0.017	0.017
	CO_2	10.038	15.006	12.522	36.736	10.038	10.038
	NO_x	0.043	0.064	0.054	0.068	0.043	0.043
	CO	0.007	0.011	0.009	0.005	0.007	0.007
	CH_4	0.071	0.107	0.089	0.004	0.071	0.071

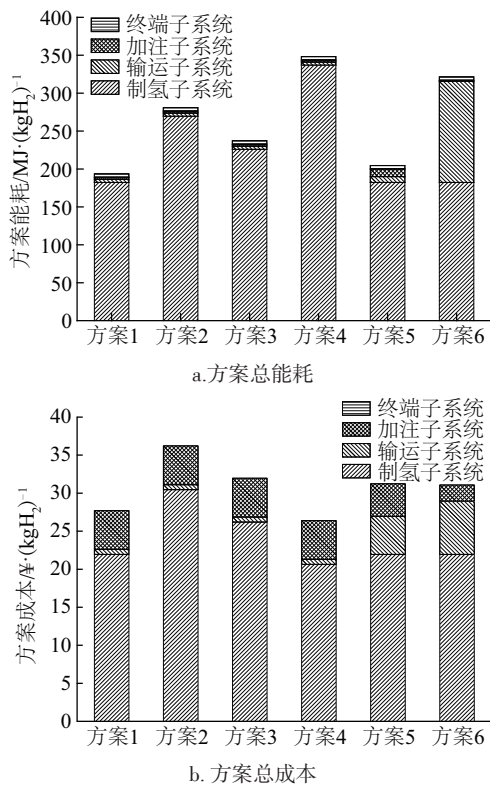


图3 方案总能耗和总成本对比

Fig. 3 Comparison on energy consumption and total cost of each plan

2.3.3 环境评价

运用“干预-效应”法^[11],本文对气态污染物的温室效应、毒性、酸化程度和富营养化进行量化,赋权本文参考文献^[12]处理。将温室效应、人类毒性、酸化程度和富营养化的值折合成比例,以煤气化法对应值为1,可求得其余3种方法对应的污染指标,平均加权后可以得出每种制氢方法的污染指标*P*(表5)。结果表明,煤气化法对环境的污染影响最大,*P*值为1.00;SRM法对环境的污染影响最小,*P*值为0.39。

表5 4种制氢方法的环境评价相对值

Table 4 The relative indexes of 4 hydrogen producing methods

环境评价 相对值	SRM	POM	ATR	煤气化
温室效应	0.31	0.46	0.39	1.00
人类毒性	0.28	0.44	0.33	1.00
酸化程度	0.33	0.40	0.40	1.00
富营养化	0.64	0.94	0.80	1.00
<i>P</i> 值	0.39	0.56	0.48	1.00

2.3.4 整体评价

将能耗、成本和环境 3 类数据整合为一个综合评价指标的关键在于加权平均,本文分别采用平均加权法和模糊评价法进行数据整合,所需基础数据为 N 值、 C 值和 P 值,得到综合评价指标 X 和每种方案的评语,列于表 6。

表 6 方案总体评价结果

Table 5 LCA assessment result of each plan						
项目	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
X	0.65	0.91	0.79	1.00	0.72	0.78
评语	极优	差	较差	极差	优	较优

由于能耗、成本和污染同等重要,本文采用等权处理,故平均加权法取 N 、 C 、 P 的算术平均值。模糊评价法同样是能够综合考虑能耗、成本和污染 3 方面因素的方法,其计算核心是指标集 I 、评语集 V 、评判矩阵 R 和权重分配向量 W 的确定。FCB 氢能利用系统中, $I = \{\text{能耗, 成本, 污染}\}$, $V = \{\text{极优, 优, 较优, 较差, 差, 极差}\}$, R 的计算过程此处忽略, $W = \{1, 1, 1\}$ 。2 种方法的评价结果高度一致,均符合“高效、环保重于成本”的理念。

2.4 改善评价

改善评价是 LCA 分析的根本目的,它指根据影响评价的分析结果对现有方案提出改进和优化的措施,本文改善评价主要有:

- 1)在能耗和环境两方面,以天然气为原料制氢

的方案均优于以煤为原料制氢的方案,但在成本方面却不具优势,降低气价或政府进行补贴对天然气制氢的发展和氢能利用的普及更为有利。

2)新型天然气制氢技术 POM 法和 ATR 法在能源、环境和成本 3 个方面均不如 SRM 法,亟待优化。

3)每种方案中,能耗、成本和污染的绝大部分都源于制氢环节,制氢环节是优化的最主要方向。

4)通过 X 值可整体上判断方案的优劣,通过 N 、 C 、 P 值可判断方案改进的方向,二者密不可分。

3 灵敏度分析

在燃料电池公共交通氢能利用系统已投入使用的情况下,制氢原材料价格和 FCB 的数量是影响方案成本的两大因素。

SRM 法和煤气化法分别是天然气制氢和煤制氢的主流方法,方案 1 和方案 4 在制氢方法上分别选用 SRM 法和煤气化法,其余子系统均一致,对这 2 种方案进行对比分析,可反映出原材料价格不同对系统成本的影响。由表 7 可知,当天然气价格超过 3.0 $\text{¥}/\text{m}^3$ 时,方案成本会高于以煤炭为原材料的制氢方案。近十年来,我国北京地区工业天然气价格从 1.4 $\text{¥}/\text{m}^3$ 攀升至 3.5 $\text{¥}/\text{m}^3$,气价的上涨会对天然气制氢的应用造成一定限制。

表 7 天然气和煤炭价格变化对方案成本的影响

Table 7 The influences of natural gas price and coal price on plan cost							
天然气价/ $\text{¥}\cdot\text{m}^{-3}$	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
流程成本/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	17.96	20.31	22.65	25.00	26.74	29.69	32.04
制氢环节/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	12.21	14.56	16.90	19.25	21.95	23.94	26.29
输运环节/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
加注环节/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09
煤炭价/ $\text{¥}\cdot\text{t}^{-1}$	440	460	480	500	520	540	560
流程成本/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	24.67	25.53	26.39	27.25	28.11	28.97	29.83
制氢环节/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	18.92	19.78	20.64	21.50	22.36	23.22	24.08
输运环节/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
加注环节/ $\text{¥}\cdot(\text{kgH}_2)^{-1}$	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09

本文选取基于 SRM 法制氢的 3 种方案(方案 1、方案 5 和方案 6),进行 FCB 数量对系统成本的

灵敏度分析。表 8 的结果表明,随着 FCB 数量的增加,方案成本相应下降,超过 600 辆时,高昂的资本

表8 FCB数量对方案成本的影响(¥/(kgH₂))Table 8 The influence of the total number of FCB on plan cost(¥/(kgH₂))

FCB数量/辆	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
方案1	43.26	32.15	28.51	26.74	25.71	27.04	26.32	25.80	25.41	25.12
方案5	57.88	39.66	33.72	30.83	29.17	28.13	27.44	26.95	26.63	26.40
方案6	49.38	37.07	33.05	31.08	29.94	31.47	30.65	30.08	29.64	29.33

成本被大量的氢耗量分摊,最终每种方案的成本均稳定在约 27 ¥/(kgH₂)。

4 结 论

1)能耗方面,方案1(SRM+钢瓶输运气氢+钢瓶存储气氢)的能效最高;成本方面,方案4(煤气化+钢瓶输运气氢+钢瓶存储气氢)的经济性最好;环境方面,方案4的环境性最差;平均加权后,方案1的综合评价指标 X 为0.65(极优),是6种设计方案中的最佳方案。

2)以天然气为原料制氢的方案在能耗和环境两方面均优于以煤为原料制氢的方案,但在成本方面却不具优势,降低气价或政府进行补贴尤为关键;每种方案中,制氢环节是优化的最主要方向;对于新型天然气制氢技术,进一步的技术优化亟待进行。

3)工业用天然气价格波动幅度较大,这导致以天然气为制氢原料的方案成本同样会产生很大波动,当天然气价大约超过 3.0 ¥/m³时,天然气制氢失去成本优势;随着 FCB 数量的增加,氢能利用系统成本持续下降,当 FCB 数量超过 600 辆时,不同方案的成本趋于一致,稳定在约 27 ¥/kgH₂。

[参考文献]

- [1] 冯 文. 燃料电池汽车氢能系统评价及北京案例分析[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [1] Feng Wen. Assessment of hydrogen energy system about fuel cell vehicles and a Beijing case study[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.
- [2] 牛 娇. 制氢技术的系统评价体系研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2007.
- [2] Niu Jiao. Research on systematic assessment of hydrogen production technology[D]. Beijing: University of Chemical Technology, 2007.
- [3] 蒋东方, 武 珍, 毕金生, 等. 氢能系统的综合效益分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(8): 70—73.
- [3] Jiang Dongfang, Wu Zhen, Bi Jinsheng, et al. Comprehensive benefit analysis of hydrogen system[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(8): 70—73.
- [4] 李建秋, 方 川, 徐梁飞. 燃料电池汽车研究现状及发展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1): 17—29.
- [4] Li Jianqiu, Fang Chuan, Xu Liangfei, et al. Current status and trends of the research and development for fuel cell vehicles [J]. Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1): 17—29.
- [5] Rafaschieri A, Rapaccini M, Manfrida G. Life cycle assessment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil [J]. Energy Conversion & Management, 1999, 14 (40): 1477—1493.
- [6] 李继峰, 张阿玲. 混合式能源-经济-环境系统模型构建方法论[J]. 系统工程学报, 2007, 22(2): 170—175.
- [6] Li Jifeng, Zhang Aling. Review of hybrid approaches of energy-economy-environmental system model[J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22(2): 170—175.
- [7] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴(2014年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [7] National Bureau of Statistics of China. China energy statistics yearbook (2014)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [8] 张海源. 制氢装置生产优化研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [8] Zhang Haiyuan. Research on production optimization of hydrogen production unit[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [9] 陈冠军. 炼铁系统能耗分析及节能[J]. 冶金能源, 2010, 29(4): 11—14.
- [9] Chen Guanjin. Analysis of energy consumption and energy-saving of iron-making system[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2010, 29(4): 11—14.
- [10] 高有山, 权 龙. 天然气蒸汽重整制氢WTT阶段能量消耗及排放分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8):

- 159—163.
- [10] Gao Youshan, Quan Long. Well-to-wheel analysis of energy consumption and emissions for hydrogen produced with natural gas by steam reforming [J]. *Mechanical Engineering*, 2013, 49(8): 159—163.
- [11] Vigon B W, Tolle D A, Curranby B W. Life-cycle assessment: Inventory guidelines and principles [R]. EPA/600/R-92/245, Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1993.
- [12] CML. Life cycle assessment: an operational guide to ISO standards[M]. Netherlands: Leiden University, 2000.

ASSESSMENT OF FUEL CELL BUS HYDROGEN ENERGY SYSTEM

Song Yutian, Wang Xueqiang, Bi Shengshan, Wu Jiangtao, Qiu Shuo

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, a HFCV (hydrogen fuel cell vehicle) system is set as the study object. Based on the system combined with current hydrogen producing technologies and FCB (fuel cell bus), 6 feasible plans are designed, and LCA method is employed to evaluate the energy, economic and environmental performance of each plan. To supply a better reference for industrial use, we compile a total index X based on the mentioned 3 aspects. Additionally, a sensitivity of gas price and the number of FCB towards plan cost is carried out. The analysis results showed that the best one, the total index X of which is 0.65, is the plan with SRM (steam reforming of methane) producing, cylinders transporting and storing. Moreover, gas price and the number of FCB also have definite influence.

Keywords: natural gas; hydrogen energy; HFCV; LCA method; fuzzy evaluation