

# Economic Analysis of Methanol Reforming Fuel Cell Heat and Electricity Cogeneration

Yuanyuan Liu

National Engineering Research Center of Coal Gasification and Coal-Based Advanced Materials, Jining, Shandong, 272000, China

## Abstract

With the continuous expansion and use of special secondary energy sources such as hydrogen energy, it has significant applications in large-scale energy storage due to its carbon free, clean, and high energy density characteristics. Combined with methanol reforming fuel hydrogen cells, it is expected to have significant applications in the world's clean energy system and enhance the important position of clean energy in social development.

## Keywords

methanol reforming fuel cell; heat and electricity cogeneration; economy

## 甲醇重整燃料电池热电联供经济性分析

刘园园

大型煤气化及煤基新材料国家工程研究中心, 中国 · 山东 济宁 272000

## 摘要

随着氢能源等特殊的二次能源的不断扩展使用, 其以无碳、清洁和能量密度较高等特点在一些大规模储能方面有着十分重要的应用, 且结合甲醇重整的燃料氢电池为依据, 有望能够在世界的清洁能源体系中有十分重要的应用, 提升清洁能源在社会发展中的重要地位。

## 关键词

甲醇重整燃料电池; 热电联供; 经济性

## 1 引言

氢能源具有来源广泛、清洁低碳、灵活高效等优点, 具有广泛的适用范围和独特的优势, 将是推动中国新一轮能源革命的关键载体, 也是实现交通和工业等领域规模化深度脱碳的理想途径。氢能源的有效开发与应用离不开“卡诺循环”, 可实现燃料中的化学能向电、热转换, 且理论转换效率超过 90%, 是一种非常有效的氢能源技术。

## 2 甲醇重整燃料电池相关分析

### 2.1 甲醇重整燃料电池定义与内容

转化型或间接型甲醇燃料电池 (RMFC 或 IMFC) 作为一种新型的燃料, 需要先将甲醇转化为甲醇, 再将其转化为燃料。与传统的 DMFC 相比, 重整甲醇燃料电池具有效率高、体积小、对甲醇纯度的需求高等优点。由于甲醇所产的温度为  $-97.0^{\circ}\text{C} \sim 64.7^{\circ}\text{C}$  ( $-142.6^{\circ}\text{F} \sim 148.5^{\circ}\text{F}$ ), 因此不需要水管理,

更好地在低温下工作, 并且存储在  $0^{\circ}\text{C}$  下, 由于在蓄电池中不存在液体甲醇 - 水的混合溶液, 一旦发生冰霜, DMFC 的薄膜就会破裂。相对于直接 RMFC 而言, RMFC 的优势在于其将氢气直接注入燃料电池组中, 且其在阳极处存在较小的过电势 (即反应过程中的能量损耗)。缺点是 RMFC 的工作温度较高, 因而对热量和隔热性能要求较高。在这种情况下, 垃圾就是  $\text{CO}_2$  和水。甲醇由于其固有的储氢量 (储氢量), 可在较低温度下进行水蒸气转化制取氢气。同时其还具有天然来源, 可生物降解, 高耗能等优点。RMFC 包括燃料处置系统、燃料电池、燃料箱以及装置均衡<sup>[1]</sup>。

### 2.2 存储与燃料成本

甲醇燃料一般被储存在燃料盒中。在 RMFC 体系中, 一般使用 100% 的甲醇 (IMPCA 行业标准) 或者甲醇和 40 体积 % 的水的混合气作为燃料。相对于水 - 甲醇混合液 (预混液), 100% 甲醇具有更小的能耗, 但其阴极水凝结导致的系统复杂度更高。RMFC 的燃油费用一般在 (常规的甲醇)  $0.4 \sim 1.1$  美元 / ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )。每度电  $0.45 \sim 1.3$  美元 / ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ) (可循环使用的甲醇来自市政废物或可持续发电)。相对于常规的 (瓶) 氢驱动的低温质子交换膜 (质子交换膜), 其

【作者简】刘园园 (1985-), 女, 中国河北人, 硕士, 工程师, 从事燃料电池/电解池研究。

价格在 4.5~10 美元 / (kW · h) 之间。

### 2.3 甲醇重整燃料电池内部系统与部件分析

①燃油处理系统 (FPS)。在 250℃~300℃ 的高温条件下,由甲醇、半氧化、自热重组 (ATR)→水汽转换 (WGS)→优先氧化 (PROX),由甲醇直接制取氢气和二氧化碳,此反应一般会发生在 250℃~300℃ 的温度下。

②燃料电池。氢气转化 (H<sub>2</sub>) 与氧 (O<sub>2</sub>) 的反应可以发电,同时生成副产物是水 (H<sub>2</sub>O)。在 RMFC 中,常用的是低温 (LT-PEMFC) 或高温 (HT-PEMFC)。

③燃油处理系统的输出。尾气燃烧器 (TGC) 催化燃烧加力燃烧室或 (催化燃烧) 与铂 - 氧化铝 (Pt-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 催化剂→冷凝器。

④植物平衡。装置均衡 (BOP) 涉及所有的燃油泵、空气压缩机和风机,这些都是使一个系统内的燃气和流体进行循环所必需的。为运行和监视 RMFC,通常也要求有控制系统。

## 3 用户需求分析

在中国, RMFC 作为一种新型的能源形式,其发展相对滞后。苏州华清京昆电厂 1kW 规模的 RMFC 已于 2021 年 6 月正式投产,该系统的能量转换效率在 40%~45% 之间,其整体能量转换效率在 79%~85% 之间。同一年由中广核院研制的 1.5kW 级 RMFC 热电联产装置通过了运行试验,其直流发电效率 (DC) 能量转换效率高达 65%。山东政府与国家发展改革委就“氢进万家”项目签订了合作备忘录。按照合作意向,中国济南、青岛、潍坊、淄博四个城市为“氢进万家”项目的选址地,将开展 5 年的“示范”工作,创建国家“氢能源一体化利用”的示范基地。本项目拟选取中国一、二线 (北京) 为代表,以 1.5kW 家庭 RMFC 为例,应用与工程经济学有关的理论建模,开展家庭 RMFC 家庭 RMFC 的经济性研究与应用示范<sup>[2]</sup>。

### 3.1 用户负荷分析

中国北上广深等一、二线大城市是中国热能消耗最大的地区,而北京市地处温暖的北半球,冬天又冷又干,因此其火电能源消耗也是国内火电能源消耗中最大的。为此,论文选取北京市的城市家庭作为研究对象,对其进行实证研究。

从 2022 年的《北京统计年鉴》的数据来看,北京市居民的生活能源消费水平在不断提高。在 2021 年,城市居民年人均生活用电 1277.9kW · h/a,城市居民家庭平均人数为 2.7 人,可计算出城市居民家庭年用电量为 3450.34kW · h/a。北京市在 2021 年的总供给量为 123019.51 × 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,按照“七普”统计,2021 年北京市的常住居民总数为 2189.3 万人,可以计算出每年人均用水 56.2m<sup>3</sup>,每户用水 151.7m<sup>3</sup>。假定居民生活用水占全部用水量的 40%,自来水年平均温度为 15℃,生活用水平均温度为 40℃,自来水比热容取值

4181J / (kg · °C),密度按 1000kg/m<sup>3</sup> 进行计算,可以得出户均年生活热水负荷为 6343.26MJ/a。

根据目前北京市的燃气加热器,以 90% 的加热器为例,计算出以燃气加热器和电能加热器为例,计算出以普通加热器为代表的家庭平均每年能耗 2251.24 元,如表 1 内容所示。

表 1 典型用户的常规用能费用

年份	地区	分项	数据
2021 年	北京市	天然气低热值	34.48MJ/m <sup>3</sup>
		家用热水器的制热效率	90%
		第一档电价	0.50 元 / (kW · h)
		第二档电价	0.54 元 / (kW · h)
		第一档天然气价格	2.64 元 / m <sup>3</sup>
		燃气热水器的户年均耗气量	204.48m <sup>3</sup> /a
		燃气热水器的户年均燃气费	537.77 元 / a
		市政供电使用的户年均电费	1713.48 元 / a
		常规供能方式的户年均电费	2251.24 元 / a

### 3.2 家用联供的系统商业模式

在中国家用热电联供系统的商业模式是:采用城市燃气, RMFC 是在基荷长期内,以全功率的形式进行发电,其所生成的电能是一种典型的分布式发电模式。而剩余的电能,也会被用来抵消。甲醇重整燃料电池 (RMFC) 所生成的高温废气可分为两类:一是将 40℃ 以上的自来水通过蓄热器进行贮存,以满足居民日常洗澡和洗漱所需的用水。二是利用供暖系统的供热与换热器来解决冬季住户的供暖问题。一般情况下,当冬季和夏季时用户的热负载会有很大的波动,可以通过和好邻居或者是共用一个单元的热量来抑制负载的变化。

在热电联产方面,参照日本大阪天然气公司 Ene-Farm Type S 192-AS11 的技术特点,并以中广核院自主研发的热电联产技术为基础,设计一套热电联产的热电联产装置,该装置具有 65% 的能量转换效率,90% 的能量转换效率,10 年的使用年限,如表 2 所示。

表 2 技术特征分析

序号	分项	人本大阪燃气 Ene-Farm Type S 192-AS11	本文所采取的产品
1	发电效率, %	55	65
2	综合效率, %	87	90
3	发电功率, W	700	1500
4	系统热功率, W	407.3	576.9
5	系统成本, 元	92400	93753.8
6	系统寿命, a	10	10

## 4 经济性分析的财务模型

### 4.1 净现值

本文所采取的经济性分析是在对时间、资金和价值的充分考虑以及与资金等值换算之后,在相同时间点(一般为年末)的现金流入和流出的代数作和作为净现金的流量,并以一定的利率实施动态折算所得到的结果,如下公式所示:

$$NPV \sum_{t=1}^n (C_1 - C_0)_t (1+i)^{-t}$$

其中,  $NPV$  表示为净现值, 单元;  $C_1$  表示为节点的现金流入量, 单位为元;  $C_0$  表示节点的现金流出量, 单位为元;  $i$  表示为利率;  $t$  表示为本次计算的年份。

### 4.2 投资回收期 and 内部收益率

主要的财务指标包括: 固定的回收期  $P_t$  和内部的收益率  $IRR$ 。静态投资回收期(也被称为投资返本年限)是一个可以体现出财政上投资回收能力的关键指标, 如果  $P_t$  不超过行业基准投资回收期或设置的基准投资回收期 ( $P_c$ ), 则可以被视为在财政上是可以被接受的。 $IRR$  是指净现值为 0 时的贴现率, 其被用于对投融资项目进行经济评估, 如果  $IRR$  高于产业内的标准投资贴现率(如 8%), 则被视为可被金融机构所接受。

$$P_t = T^* - 1 + \left| \sum_{t=1}^{T^*-1} NPV \right| / NPV_{T^*}$$

其中,  $T^*$  表示为累计的净现金流量开始所出现正值的年分数, 单位为年; 而  $NPV$  则表示上一年所累积的额净现金流量的绝对值, 单位为元;  $NPV_{T^*}$  表示为当年的净现金流量值, 单位为元。

而  $IRR$  则需要结合以下公式进行计算:

$$\sum_{t=1}^n (C_1 - C_0)_t (1 + IRR)^{-t} = 0$$

### 4.3 敏感度分析

对于投资与融资过程中的不确定因素, 通常使用敏感性分析与损益平衡点分析。敏感性分析是研究投资项目中各类不确定性对基础方案经济指标的影响, 识别敏感因子, 估计其对收益的敏感程度, 并对其可能面临的风险进行预测。敏感度系数可根据以下公式来计算:

$$SR = \frac{\partial \xi / \xi}{\partial p / p} = \frac{[\xi(p + \Delta p) - \xi(p)] / \xi(p)}{\Delta p / p}$$

其中,  $\xi$  和  $P$  都表示选择的评价指标。

### 4.4 用户成本

有关设备的购买及固定资产的折旧问题, 家用的 RMFC 热电联供系统的主要成本在于设备的购置费用。日本大阪天然气 Ene-Farm Type S 192-AS11 的市价为 9.24 万元

人民币, 根据我们对中广核科院自主研发的产品进行分析, 按照批量生产计算, 该系统的总成本为 9.38 万元人民币, 假定国家对其进行 50% 的补助, 则需要客户的实际购买费用为 4.69 万元人民币。购买家用 RMFC 供热联合供应系统的费用, 全部构成固定资产的原值, 其残值率为 5%, 固定资产每年的折旧额为 0.89 万元。用户是家庭 RMFC 热电联供系统的最终消费者, 其不会牵扯到诸如专利及专有技术使用费、商标权等没有实物形态可识别的非货币性资产, 也不会对无形资产进行折旧<sup>[1]</sup>。

有关用户自身的经营成本费用而言。家庭 RMFC 热电联供系统的运营费用, 其最大的来源是外购原材料、燃料和动力费, 也就是天然气发电的煤气费用, 按照天然气售价 2.63 元 / m<sup>3</sup> 计算, 一年内连续运转的煤气费用为 5552.6 元。

### 4.5 用户收益

家用 RMFC 热电联供系统, 年发电量为 13140kW · h, 用户年用电量为 3450.33kW · h, 将过剩的电力反馈给电网。假定上网电价为 0.53 元 / (kW · h), 用户一年可得到 5135.5 元的售电收益, 再加上自产自用的电力效益, 用户年发电收益为 6849 元。家用 RMFC 热电联供系统的年产热量达到 18193.8MJ, 用户的年生活热水负荷达到 6343.26MJ, 多余的热力可以被用来在冬天供暖或者是在睦邻供热水中使用, 多余的热力达到 11850.6MJ, 按照 100 元 / GJ 来计算热价格, 用户年售热收益达到 1185.1 元, 再加上自产自用产生的热力效益, 用户年产热收益达到了 3436.29 元。在不计各种税金的情况下, 该客户的年发电、供热收入为 10285.3 元。

## 5 结语

综上所述, 结合上述研究发现, 家用的甲醇重整燃料电池的商业模式对于政府补贴、上网电价、燃气价格和设备的成本具有高度的敏感性, 如当设备投资降低 39.3%, 或者天然气价格下浮动 45.71%, 或者上网电价提高 23.9%, 或者政府补贴增加 35.88% 时, 家用 RMFC 热电联供系统也会拥有较为显著的经济效益。此外, 降低设备成本是一个永远不变的趋势, 这种商业模式下, 设备成本的经济效益阈值为每套 5.7 万元, 产品成本越低, 用户的经济效益就会越明显。

### 参考文献

- [1] 葛艺, 宋鑫华, 朱万超, 等. 耦合甲醇重整制氢的新型冷热电联供系统 4E 分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022(2): 52.
- [2] 王世学, 路晓瑞, 梅书雪, 等. 固体氧化物燃料电池冷热电三联供系统及其性能分析[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2021, 54(10): 9.
- [3] 吴磊, 彭黎菊, 李爽, 等. 百千瓦级天然气制氢质子交换膜燃料电池热电联产系统稳态特性模拟分析[J]. 发电技术, 2023, 44(3): 350-360.