

基于平准化氢气成本模型的佛山市 氢能产业补贴政策优化研究

武艺芳¹

(1. 广州工商学院 商学院, 3033471337@qq.com)

摘要: 随着“双碳”战略的推进, 佛山市作为国家燃料电池汽车示范应用广东城市群的牵头城市, 其氢能产业已进入规模化推广的关键期。然而, 当前居高不下的终端用氢成本严重制约了市场内生增长, 且面临着财政补贴可持续性的严峻挑战。本文旨在通过量化评估, 探寻在财政预算约束下, 如何设计最优的政府补贴退坡路径, 以实现产业规模扩张与财政资金效率的平衡。本研究构建了基于平准化氢气成本 (LCOH) 模型动态评估框架。以 35 元/kg 的氢气价格为关键市场阈值, 模拟了 2025-2035 年间不同补贴策略下的成本下降轨迹、市场规模响应及财政支出压力。研究发现: 1) 运营补贴对终端价格的传导效率显著优于建设补贴; 2) 激进的早期补贴退坡 (如 2032 年归零) 将导致终端价格反弹并扼杀市场增长; 相比之下, 将补贴周期延长至 2035 年的平滑补贴退坡策略, 能够确保终端氢价始终锚定在 35~40 元/kg 的区间内; 3) 佛山市政府补贴的财政支出预计在 2030 年前后达到峰值, 随后随着氢能行业技术进步导致的综合成本下降而快速回落。综上, 本文指出平缓的长周期补贴退坡策略是佛山氢能产业实现长久发展的最优解。

关键词: 氢能产业; 补贴政策; 平准化氢成本 (LCOH); 演化博弈

资助项目: 本文受到 2025 年佛山市哲学社会科学规划项目资助 (项目编号: 2025-GJ097), 特此感谢。

一、引言

在国家“3060”双碳目标指引下, 氢能被明确定义为未来国家能源体系的重要组成部分和战略性新兴产业。作为一种处于商业化初期的二次能源技术, 氢能产业具有典型的“高技术门槛、高基础设施依赖、高初始成本”特征, 其早期发展高度依赖公共财政的支持^[1]。然而, 过度的补贴依赖可能导致“骗补”与低效产能扩张, 而过早的政策退出又可能引发产业“夭折”。因此, 如何设计科学、精准且具备动态调整能力的补贴政策, 在培育市场的同时倒逼技术进步和成本下降, 已成为地方政府面临的紧迫课题。

佛山市作为中国氢能产业的先行者, 已在加氢站建设数量和燃料电池汽车推广规模上走在全国前列^[2]。然而, 产业先发优势并未完全转化为市场竞争优势。根据市场调研, 当前佛山终端加氢价格普遍在 40-60 元/kg 区间^[3], 远高于 35 元/kg 的燃油车平价红线, 导致加氢站利用率不足、物流车全生命周期成本 (TCO) 缺乏竞争力^[4]。此外, 现行政策多侧重于加氢站建设等固定资产投资补贴 (CAPEX), 对运营端 (OPEX) 的支持力度和灵活性不足, 难以将氢能补贴有效传导至终端用户。面对国家示范期结束的政策调整窗口, 如何甄别补贴效率最高的产业链环节、设计保障市场平稳过渡的最佳退坡路径、并科学界定财政投入的可持续阈值, 是佛山氢能产业下一阶段发展的关键科学问题。

学术界关于氢能产业的政策量化评估仍存在局限性。首先, 现有研究多基于静态的平准化氢气成本 (LCOH) 模型^[5,6], 忽略了产业规模扩大带来的“技术学习效应”, 难以预测未来氢气成本的动态演化轨迹; 其次, 多数研究将政策退坡设定为线性的简单递减, 缺乏对价格变动产生的供需关系反馈机制的考量; 最后, 鲜有研究能将微观的单一车辆/加氢站成本与宏观的城市级财政支出预算进行联动分析, 导致政策建议缺乏财政可行性支撑。鉴于此, 本文构建了一个融合技术进步与市场反馈的动态政策演化模型。研究首先通过修正的 LCOH 模型, 对比分析了建设补贴与运营补贴的边际效率; 进而引入莱特定律 (Wright's Law)^[7], 模拟了 2025 年至 2035 年佛

山氢能产业在不同退坡路径下的成本-规模演化过程。

二、研究方法

（一）政策敏感性平准化氢气成本模型（LCOH）的构建

平准化氢成本（Levelised Cost of Hydrogen, LCOH）是衡量氢能经济性的核心指标。为量化政策工具的影响，本研究在传统 LCOH 模型中嵌入政策变量，构建政策敏感性模型如下：

$$LCOH_{policy} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{(I_t - S_{cap,t}) + (O_t - S_{op,t})}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

公式中， $LCOH_{policy}$ 为补贴后的终端氢气平准化成本； n 为项目运营周期（一般取 10 年）； r 为贴现率（取 5%）； Q_t 为第 t 年的氢气销售量。其中建设成本、运营成本与补贴部分拆解可以拆解为：建设资本支出净值($I_t - S_{cap,t}$)，其中 $S_{cap,t}$ 为政府提供的一次性建设补贴(CAPEX Subsidy);运营支出净值包括制氢电费、运费及站点运维费，其中 $S_{op,t}$ 为基于销量的运营补贴(OPEX Subsidy，如元/kg)。

（二）基于蒙特卡洛模拟的 LCOH 风险分析

鉴于氢能产业尚处于导入期，关键参数（如工业电价、加氢站利用率、技术成本）存在显著波动。本研究为了探究佛山市现行的氢能补贴政策是否对 LCOH 有长久影响，且为了避免出现仅使用平均值计算中出现的误差传递现象，本文采用蒙特卡洛模拟（Monte Carlo Simulation）对其进行风险评估，其核心方法是通过摒弃固定数值，对关键变量设定概率分布，从而可以更好地计算不同补贴情境下的 LCOH 变化趋势以及具体概率分布。例如，设定佛山市制氢所需的工业电价服从三角分布（最小值 0.5，最大值 0.8,众数 0.65），加氢站利用率服从贝塔分布 $\beta(\alpha, \beta)$ 以模拟市场冷热不均现状；在此基础上，利用 Python 脚本执行 10,000 次随机抽样迭代，生成不同补贴情景下终端氢价的概率密度函数（PDF），并以终端氢价低于 35 元/kg 的目标氢气价格的达标概率（Probability of Parity）作为评价政策稳健性的核心依据。

（三）基于莱特定律的动态演化模型

为探究补贴退坡的最佳时点，本研究构建了一个包含“成本-规模-政策”反馈回路的系统动力学演化模型。针对供给侧的内生技术进步模型，本文采用莱特定律（Wright's Law）模拟，即随着产业规模扩大，单位成本呈现指数下降，具体公式如下：

$$C_t = C_0 \times \left(\frac{V_t}{V_0}\right)^{-b}, b = -\log_2(1 - LR) \quad (2)$$

其中， C_t 为第 t 年的行业综合成本， V_t 为累计推广规模（即氢能源燃料电池汽车保有量）； LR 为学习率（Learning rate），根据氢能行业经验值设定为 18%，即累计产量翻倍，成本下降 18%。

针对需求侧的市场响应机制，本文构建了基于价格阈值的市场增长函数。设定 35 元/kg 为关键阻力位，当终端价格 P_t 逼近或低于此阈值时，激发市场内生增长动力，具体公式如下：

$$\Delta V_t = V_{t-1} \times (\alpha + \beta \times \max(0, 35 - P_t) \times (1 - V_{t-1}/K)) \quad (3)$$

其中， ΔV_t 为年新增氢能源燃料电池车辆数， α 为自然增长率， β 为价格弹性指数， K 则为整个市场的饱和容量。

针对政府氢能政策调节以及后续的补贴退坡机制，本文设定了“差额补齐+延迟退坡”的核心逻辑，具体的公式如下：

$$S_t = \min(\text{Policy_limit}, \max(0, C_t - 35)) \quad (4)$$

其中， S_t 代表了当年（第 t 年）的政府补贴金额， Policy_limit 则代表了政府补贴金额的上限。本文模拟对比了两种补贴模式情形，一种是 2032 年迅速补贴归零的快速降补模式，另一种是补贴缓慢下降到 2035 年后平

滑退出的情形。结合上述公式，通过迭代计算，可以输出每年的财政支出总额与市场规模（氢能源燃料电池汽车保有量）存量。

三、数据来源与参数基准

本文的模型输入数据主要依据来源为《佛山市氢能产业发展规划（2018—2030 年）》^[2]、佛山南海区现行补贴政策文件^[8]及主要设备商调研数据。基准情景设定为：2024 年加氢站建设成本为 1200 万元（1000kg 级的加氢站），制氢电耗 55 kWh/kg，初始综合供氢成本约为 65-70 元/kg。所有货币单位均以 2024 年不变价计算。为确保模拟结果的客观性与科学性，本研究的模型输入参数均源自权威行业报告、佛山本地政策文件及相关学术文献。具体参数设定如表 1 所示。其中，对于具有显著波动性的参数（如电价、设施利用率），本研究在蒙特卡洛模拟中采用了三角分布或贝塔分布进行描述，以覆盖‘悲观’、‘中性’及‘乐观’三种情景。技术学习率设定为 18%，符合氢能技术作为新兴产业的典型经验值。

表 1 本文模拟中关键参数设定、取值范围及数据来源说明

参数名称	单位	基准值/分布范围	说明与数据来源
加氢站建设成本	万元	1,200	1000kg 级别加氢站，数据来源为氢能产业报告 ^[3]
加氢站年运维费率	%	3.0%	占据建设成本的比例
制氢电耗	kWh/kg	55	质子交换膜电解水制氢平均水平 ^[5]
氢气储运成本	元/kg	12	长管拖车运输
基准贴现率	%	5.0%	参考能源基础设施项目
初始综合供氢成本	元/kg	70	无补贴市场均价
技术学习率	%	18%	国际氢能委员会预测
目标平价阈值	元/kg	35	氢能重卡全周期成本的盈亏点
市场自然增长率	%	10%	政策示范驱动增长
工业电价	元/kWh	T(0.50,0.65,0.80)	三角分布趋势，存在峰电和谷电不同价格
加氢站利用率	%	$\beta(2,5)$	贝塔分布，模拟当前利用率不均的现状
制氢技术成本波动	%	$\pm 15\%$	考虑技术迭代进度
建站补贴标准	万元	500	参考已有政策文件 ^[9]
运营补贴标准	元/kg	15 ~ 25	当前 15 元，改革情景设定为 25 元进行蒙特卡洛模拟

四、数据结果与讨论

（一）基于蒙特卡洛模拟的佛山氢能补贴政策效能对比

基于 10,000 次蒙特卡洛随机模拟，本研究对比了重点补贴加氢站建设的情景 A 与改革后的重视运营成本补贴的情景 B，在应对电价波动和市场冷遇时的表现（见图 1）。

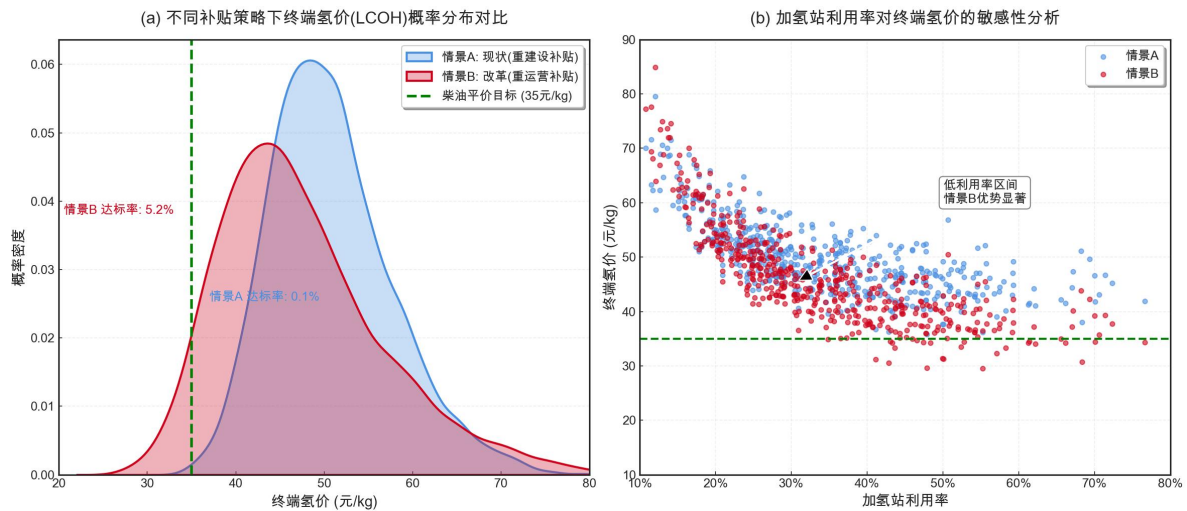


图 1 不同情景下的佛山氢能补贴政策效能对比

蒙特卡洛模拟结果表明，改革后的情景 B（重运营补贴）在降低终端成本与提升抗风险韧性方面均显著优于重视加氢站建设的情景 A。从整体分布特征来看，改革后的情景 B 的终端氢价概率密度曲线显著左移且更为集中，其平均终端氢价较情景 A，从 50.7 元/kg 降低约 47.3 元/kg，并将低于 35 元/kg 目标氢气价格的达标概率从 0.1% 提升至 5.2%，证实了将补贴重心向运营端转移能显著提高财政资金降低终端成本的边际效率。

进一步的散点分析（图 1b）揭示，在加氢站利用率低于 40% 的市场导入期阶段，现状情景因高昂的固定资产折旧无法有效摊薄，导致终端氢价指数级飙升至 60 元/kg 以上；相比之下，改革后的重视运营补贴的情景 B 通过改变成本对冲机制，将价格稳定控制在 40-50 元/kg 区间。这一结果表明，运营补贴能有效平抑市场冷启动阶段的成本波动，打破“车少—站亏—价高—车更少”的负反馈循环，为佛山市氢能产业跨越早期发展瓶颈提供关键支撑。

（二）补贴延期退坡策略下的动态演化路径

基于莱特定律的演化模型，本文进一步分析了佛山市政府补贴氢能产业的退坡策略及对市场响应的潜在影响。本文采用了 2025-2028 年前期全面兜底，2028-2035 年后期平滑降补的策略，具体情形可见图 2。

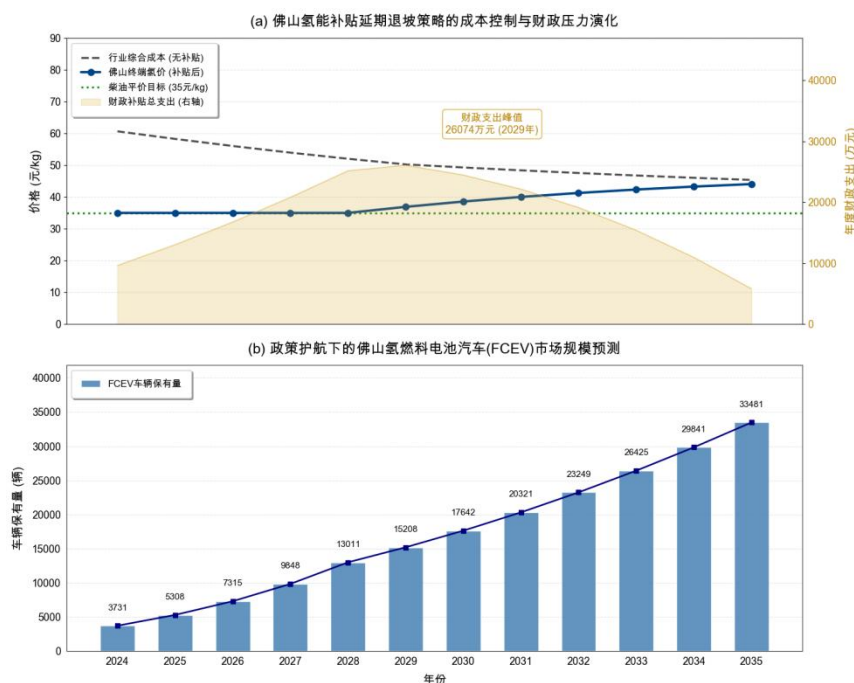


图 2 “平滑降补”策略下的佛山市氢能产业 LCOH 动态演化路径

基于莱特定律的动态演化模拟显示, 实施 2024-2028 年全额兜底、2029-2035 年线性退坡的延期退坡策略, 成功将佛山市终端氢价长期锚定在 35 元/kg 的平价线附近, 有效消除了前期高昂行业综合成本带来的市场阻力, 为产业链技术学习争取了宝贵窗口。在此策略下, 财政支出呈现典型的非线性的类似“驼峰曲线”特征: 支出随推广规模扩大经历爬坡期后, 预计于 2029 年达到约 2.6 亿元的峰值, 随后得益于技术进步带动的成本下降, 政府补贴需求收窄, 政府支出在 2032-2035 年间快速回落, 从每年 2.5 亿元降低至 6 千万每年, 并于 2036 年将政府补贴平稳退出。这种长期稳定的氢气低成本预期激发了市场活力的“S 型”增长响应, 推动佛山氢能源燃料电池汽车保有量在 2035 年突破 3 万辆, 有力证明了延期退坡策略虽然增加了中期财政负担, 但通过以时间换空间的策略, 成功换取了产业规模的稳定增长, 避免了政策过早退出可能引发的供需失衡及产业夭折风险。

五、结论与展望

本文构建了静态随机模拟叠加动态演化推演的双重评估框架, 对佛山市氢能补贴政策的效能与演进路径进行了量化研究, 主要得出以下三点结论:

(1) 补贴重心应从加氢站建设转向运营成本补贴。蒙特卡洛模拟证实, 在市场导入期(加氢站利用率<40%), 运营补贴在降低终端氢价、平抑成本波动方面的边际效率显著优于建设补贴, 是提升“柴油平价”达标率的关键杠杆。

(2) “延期退坡”是实现产业软着陆的最优解。演化模型表明, 激进的早期退坡会导致终端价格反弹并扼杀市场; 而采取“2024-2028 年兜底、2029-2035 年线性退坡”的策略, 虽增加了中期财政负担, 但能确保终端氢价长期锚定在 35 元/kg 以下, 成功换取了 FCEV 保有量的 S 型指数级增长。

(3) 财政压力呈现可预测的峰值后, 逐渐下降。随着产业规模扩张与单位补贴下降的博弈, 佛山氢能财政支出预计在 2029 年达到峰值(约 2.6 亿元), 随后得益于技术学习效应带来的成本内生性下降, 支出将快速回落, 最终在 2036 年实现政策的平稳退出。

整体上, 本研究仍存在一定局限性, 这是由于模型模型主要基于佛山本地数据, 未充分考虑粤港澳大湾区城市间的氢源协同与政策套利影响; 同时, 对于绿氢认证与碳交易市场对补贴的替代效应仅做了简化处理。未来研究可进一步拓展至“氢-电-碳”多市场耦合视角, 探索如何利用碳减排收益逐步接力财政补贴, 构建更加市场化的产业扶持长效机制。

参考文献:

- [1] 凌文, 刘玮, 李育磊, 等. 中国氢能基础设施产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 76-83.
- [2] 佛山市发展与改革局. 佛山市氢能源产业发展规划(2018—2030 年)[R]. 2018.
- [3] 中国氢能联盟. 中国氢价指数年度报告(2025 年版)[R/OL]. (2025). <https://www.chinah2data.com/file/bigdata-docs/abf4693f203451e9a903ec5b5f290579.pdf>.
- [4] 郭秀盈, 李先明, 许壮, 等. 可再生能源电解制氢成本分析[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 688-695.
- [5] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. 碳中和目标下电解水制氢关键技术及价格平准化分析[J/OL]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2022[2025-11-21].
- [6] 徐进, 丁显, 宫永立, 等. 电解水制氢厂站经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(7): 2374.
- [7] GLENK G, REICHELSTEIN S. Economics of converting renewable power to hydrogen[J/OL]. Nature Energy, 2019, 4(3): 216-222. DOI:10.1038/s41560-019-0326-1.
- [8] 佛山市南海区发展与改革委员会. 佛山市南海区氢能产业发展规划 2020-2035[R]. 2020.
- [9] 佛山市南海区发展和改革局. 佛山市南海区促进加氢站建设运营及氢能源车辆运行扶持办法[R]. 2022.