

引用格式:张洪程,颜冰,伞晨峻,等.电动汽车充电站投资策略分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):262-269.

Citation: ZHANG Hongcheng, YAN Bing, SAN Chenjun, et al. Analysis of investment strategies for electric vehicle charging stations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 262-269.

## 电动汽车充电站投资策略分析

张洪程<sup>1</sup>, 颜冰<sup>1</sup>, 伞晨峻<sup>1</sup>, 曹璇<sup>2</sup>, 叶顺然<sup>3</sup>, 张新华<sup>3</sup>

(1. 云南电网有限责任公司, 云南昆明 650000; 2. 南京特殊教育师范学院, 江苏南京 2100382;

3. 长沙理工大学经济与管理学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:** 电动汽车数量的递增给公共充电站投资带来机遇, 但竞争和电价波动等不确定因素增加了充电站投资项目的风险。针对单位充电量边际贡献和充电桩使用率随机波动的情况, 构建实物期权模型, 并通过求解模型, 得到期望投资价值最大条件下的充电桩投资阈值; 运用投资阈值条件, 讨论充电服务费随机波动和储能配套两种情况下的投资策略。研究表明: 外部环境的不确定性会显著延迟充电桩投资, 政策上保证投资环境的相对稳定尤为重要; 充电桩投资等待时间不仅由外部环境不确定性决定, 也与初始收益有关, 确保充电桩最低收益是激励投资的有效方式; 储能配套投资是否占优, 与增加的投资额和单位电量边际贡献有关, 即在储能投资占比较小的情况下, 提高储能投资可能有利于促进充电桩投资。

**关键词:** 充电桩; 投资策略; 实物期权

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.026 **中图分类号:** TM73 **文章编号:** 1673-9140(2024)05-0262-08

### Analysis of investment strategies for electric vehicle charging stations

ZHANG Hongcheng<sup>1</sup>, YAN Bing<sup>1</sup>, SAN Chenjun<sup>1</sup>, CAO Xuan<sup>2</sup>, YE Shunran<sup>3</sup>, ZHANG xinhua<sup>3</sup>

(1. Yunan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China; 2. Nanjing Normal University of Special Education, Nanjing 2100382, China;

3. School of Economics & Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The increasing number of electric vehicles presents opportunities for investment in public charging stations, but uncertainties such as competition and electricity price fluctuations elevate the risks associated with these investment projects. Considering the random fluctuations in the marginal contribution per unit of charging and the utilization rate of charging stations, a real options model is constructed. By solving this model, the investment threshold for charging stations under the condition of maximizing expected investment value is obtained. Using this investment threshold condition, investment strategies are discussed in two scenarios: random fluctuations in charging service fees and the integration of energy storage systems. The research findings indicate that: 1) Uncertainty in the external environment significantly delays investment in charging stations, highlighting the importance of policies to ensure relative stability in the investment environment; 2) The waiting time for charging station investment is determined not only by external environmental uncertainty but also by initial returns, suggesting that ensuring a minimum return for charging stations is an effective way to incentivize investment; 3) Whether energy storage investment is advantageous depends on the additional investment amount and the marginal contribution per unit of electricity. Specifically, when the proportion of energy storage investment is relatively small, increasing such investment may help promote investment in charging stations.

**Key words:** charging station; investment strategy; real options

收稿日期: 2023-12-16; 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 南方电网公司 2023 年第一批软课题项目研究计划 (YNRKT2023001); 国家自然科学基金 (72171027)

通信作者: 曹璇 (1985—), 女, 副教授, 研究员, 主要从事充电桩投资方面的研究; E-mail: 903249860@qq.com

据中国充电联盟发布的《2023年全国电动汽车充换电基础设施运行情况》,截至2023年8月,中国公共充电桩保有量为227.2万台;其中2023年充电基础设施增量为199.8万台,新能源汽车销量537.4万辆,桩车增量比为1:2.7。据公安部数据,截至2023年6月底,中国新能源汽车保有量达1620万辆,占汽车总量的4.9%。预计到2030年,中国新能源汽车保有量将达6420万辆,根据车桩比1:1的建设目标,中国充电桩建设存在约6000万的缺口。

虽然电动汽车充电行业有广阔的市场空间,但充电站的投资与盈利领域仍存在许多亟待解决的问题。在技术发展成熟、市场壁垒较弱的现状下,大量社会资本的涌入加剧了充电桩市场的激烈竞争,投资者对投资回报率预测的需求愈发强烈,充电站的盈利也愈发依赖设备利用率及市场价格的提高。因此,开展利用率变化下充电站的投资阈值测算,可为投资者提供有效的决策参考与理论支撑。

目前,国内外对电动汽车充电设施(electric vehicle charging infrastructure, EVCI)的投资策略研究主要归为3方面:一是运用传统的投资效益等财务指标评价方法,二是将充电站投资视为利益主体,从博弈论角度讨论投资决策;三是构建实物期权模型,讨论投资策略。

在投资效益财务指标评价方面:文献[1-3]运用成本效益定价法,考察了经营者与消费者的静、动态投资回收期、净现值和内部收益率4种投资决策评价指标,建立了充电站运营的效益模型,分析讨论了经营者的盈利情况与能力。文献[4-5]在比较长续航里程能力电池投资和快速充电基础设施(fast charging infrastructure, FCI)投资时,采用成本效益分析方法,计算了这2种投资项目的约当年均成本(equivalent annual cost, EAC),并指出FCI的投资成本更低。文献[6]采用净现值(net present value, NPV)法,评估电动汽车充电设施投资项目的盈利能力,并考察了不同补贴政策支持下投资项目的收益。文献[7-9]建立了总净现值(gross net present value, GNPV)模型,研究了随机电价和瞬态投资成本下光伏路面投资的最佳时机,并对电动汽车充电设施投资提出了建议。传统投资指标方法易忽视电动汽车充电设施项目的潜在价值与不确定性因素,且决策灵活度较低,不利于投资决策者对投资项目的整体把控。部分学者在此基础上考虑风险因素,文献[10-11]基于对电动汽车充电设施

投资风险的考量,采用层次分析法来识别风险权重,构建马科维茨模型再次分配投资风险的权重,其研究发现运营、信用风险等非系统风险是该类投资的主要风险,社会投资方风险权重与政府承担的风险权重相近。文献[12]基于生命周期理论,建立1投资效益模型,从充电量不确定性角度,运用蒙特卡洛法得到投资回报率的概率分布,获得充电桩项目风险价值,并量化了投资效益风险。

EVCI投资项目涉及多方的利益。因此,常有学者运用博弈论的方法对EVCI投资展开研究。文献[13]考虑了消费者对电动汽车与换电模式的不同价值偏好,构建了充电汽车制造商、换电汽车制造商和换电站投资商这3方组成的Stackelberg博弈模型,得到了电动汽车与换电模式的最优定价及投资策略。文献[14-15]分析了充电设施投资对电动汽车需求的扩张效应,通过建立Cournot和Stackelberg双寡头博弈模型,对比发现政府与企业在Cournot模型下均能获得更大利润,而在Stackelberg模型下电动汽车充电设施投资总量更大,并从电动汽车行业发展的角度,给出了充电设施投资建议。文献[16-17]考虑了电动汽车充电站的建设模式,分别从电动汽车制造商和分销商的角度,建立Stackelberg顺序博弈模型,对充电站建设提出了联合决策,分析了制造商和分销商在不同时期对充电设施的投资意愿。文献[18]分别研究了公共停车场和私人停车场的电动汽车充电设施投资策略,建立了国有企业与私营企业之间的两种进化博弈模型,并运用前景理论分析了经济行为对最优决策的影响。文献[19]研究了零售企业关于充电设施的投资,从是否具有社会效率激励措施的角度,建立Hotelling博弈模型,得到了零售企业的投资激励措施可能导致囚徒困境的结论。文献[20]基于演化博弈理论,设计了一个基于不同主体之间战略互动的理论模型,并从可再生能源附件(renewable energy annex, REA)、充电基础设施运营商和电动汽车终端用户角度分析了8种博弈均衡条件,发现公私合作电动汽车充电基础设施(electric vehicle charging infrastructure-public private partnership, EVCI-PPP)投资模式能够帮助企业降低运营成本,开发增值服务。

电动汽车充电设施的建设具有高成长性和高风险性的特点。因此,部分学者将考虑风险价值的实物期权法应用到EVCI的投资决策研究。文献[21]考虑了电动汽车充电站投资收益的多重不

确定性,运用实物期权相关方法,在B-S模型基础上嵌套充电量波动和充电站成本变动的波动率模型,通过算例分析验证了模型的有效性。文献[22]以投资时机为切入点,通过加入差价合约(contract for difference, CFD),扩展了实物期权模型,将投资者面临的风险分为政策风险与剩余风险两种,量化了不确定性导致的延迟投资期权价值。其研究结果表明:使用传统投资决策方法的充电基础设施投资要比使用实物期法的推迟5 a以上。

此外,还有部分学者从其他角度对EVCI项目投资展开研究。文献[23-24]对充电设施运营商投资决策与电动汽车发展的交互作用机理展开了研究。其考虑了电动汽车技术进步和充电设施供给因素,建立了电动汽车充电设施运营商的动态投资决策模型,将其应用到不同激励政策场景进行分析。文献[25]从充电设施投资的时间与空间角度,分析了充电设施服务商分别在序贯投资和同时投资模型、不同区域市场的动态投资行为,并给出了相应的投资激励方案。文献[26]探讨了欧盟电动汽车充电基础设施投资的影响因素,从需求侧角度,提出了充电设施规模化的长期投资部署建议。文献[27]从电动汽车制造商和政府的角度,分企业是否投资与政府是否补贴等4个情况,建立了4种模型,分别刻画了不同情况下EVCI项目建设的福利效益与环境效益。

综上所述,电动汽车充电站投资策略问题主要从财务指标评价、博弈论及实物期权模型这3个维度展开研究。目前,已有丰富的研究成果。特别是实物期权方面,大量学者探讨了不确定性、投资时间与政府补贴等因素对企业投资决策与收益率的影响。但以往研究大多集中于不同场景下收益率的具体测算,并提供具体的投资策略建议。鲜有分析充电服务费、设备利用率等因素与充电站投资回报率间动态关系的研究。与这些研究不同的是,本文针对单位电量边际贡献(主要是充电服务费)和充电桩使用率均为随机波动的情况,构建双重不确定条件下的实物期权投资模型,通过模型求解,得到投资价值最大条件下的投资阈值。运用模型分析充电服务费随机波动和储能配套这2种情况下的投资阈值和期望投资时点。研究表明:为规避投资风险,实现投资价值最大,投资者的最优投资时点不仅与不确定的投资环境有关,也与初值有关;储能配套投资是否占优与增加的投资额和单位电量边际贡献有关。

## 1 电动汽车充电桩投资阈值模型

传统的投资决策方法是建立在估计投资项目实施后的现金流之上的,其基于估计的现金流,计算净现值(net present value, NPV)或内部收益率(internal rate of return, IRR),以 $NPV > 0$ 或 $IRR >$ 标准收益率这两者是否成立作为是否投资的标准。这种决策方法会延迟投资<sup>[22]</sup>。且这种传统的投资决策方法很难描绘充电桩企业运营所面临的市场不确定性。基于此,本文考虑构建实物期权模型,讨论投资价值最大的投资时点。实物期权模型以金融交易思路对充电桩企业的投资决策展开建模,与传统方法不同之处在于,本文实物期权模型的构建是基于充电服务费和充电桩使用率双重随机波动条件下进行的,通过模型优化结果可得到服务费、利用率及投资回报率这3者的动态关系。假定充电桩运营后的利润函数 $\pi$ 可表示为

$$\pi = \eta(t)Q(\rho - c) - c_0 \quad (1)$$

式中, $0 \leq \eta(t) \leq 1$ , $\eta(t)$ 为 $t$ 时刻充电桩使用率,当 $\eta(t) = 1$ 时,充电量为最大充电量; $Q$ 为最大充电量; $\rho$ 为充电桩的充电价格(含服务费); $c$ 为充电桩的单位购电成本价; $c_0$ 充电桩的运维成本,其包含充电桩维护费用、工作人员薪金福利与场地租金等费用。

实物期权模型的核心是期权定价即期权价值的确定,而充电桩企业的期权价值来自提供充电服务所获得收益的现值。充电服务收益与充电服务费的定价规模直接相关,同时受充电桩利用率及使用年限的影响,因此充电桩的投资价值函数 $V$ 可表示为

$$V = Q \int_0^T e^{-rt} \kappa(t) \eta(t) dt - c_0 \int_0^T e^{-rt} dt \quad (2)$$

式中, $t$ 为时间; $r > 0$ 为企业无风险利率,可设其为定值,多采用近5 a内的银行平均贷款利率; $\kappa(t) = \rho(t) - c(t)$ 为单位充电服务费; $T > 0$ 为充电桩的运行年限。

在生产实际中,充电服务费 $\kappa(t)$ 和充电桩使用率 $\eta(t)$ 受外部市场等多重因素影响,具有较大随机波动特性。且这2个参数的波动幅度往往随时间变化。因此,可假设其均服从时间序列的几何布朗运动(geometric Brownian motion, GBM)<sup>[21-22]</sup>,即有

$$\begin{cases} d\kappa = \mu_1 \kappa dt + \sigma_1 \kappa dz_1 \\ d\eta = \mu_2 \eta dt + \sigma_2 \eta dz_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mu_i > 0$ , $i = 1, 2$ 是GBM的漂移项; $\sigma_i > 0$ , $i = 1, 2$ 是GBM的标准差; $dt \rightarrow 0$ 为时间间隔; $dz_i$ , $i =$

1, 2 是维纳过程 (Wiener process) 增量, 其均值为 0, 方差为  $dt$ 。

记  $y(t) = \kappa(t)\eta(t)$ , 由伊藤引理, 有

$$dy = \mu y dt + \sigma y dz \quad (4)$$

其中,  $\mu = \mu_1 + \mu_2 + \zeta\sigma_1\sigma_2$ ,  $E(dz_1 \cdot dz_2) = \zeta dt$ ,  $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\zeta\sigma_1\sigma_2}$ ,  $dz$  是标准维纳过程, 其连续且不可微。  $\zeta$  为相关系数, 将式 (4) 代入式 (2), 则有

$$V(y) = \begin{cases} A_1 y^{\beta_1}, & y < c_0/Q \\ A_2 y^{\beta_2} + Q \frac{y}{r-\mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] - c_0 \frac{1 - e^{-rT}}{r}, & y > \frac{c_0}{Q} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $A_1, A_2$  是待定系数;  $\beta_i (i = 1, 2)$  应满足:

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \quad (6)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \quad (7)$$

因为投资价值函数  $V(y)$  连续可导, 故在  $y = c_0/Q$  处, 有

$$\begin{cases} A_1 y^{\beta_1} = A_2 y^{\beta_2} + Q \frac{y}{r-\mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] - c_0 \frac{1 - e^{-rT}}{r} \\ \beta_1 A_1 y^{\beta_1} = \beta_2 A_2 y^{\beta_2} + Q \frac{y}{r-\mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] \end{cases} \quad (8)$$

由式 (8), 可得

$$A_2 = \frac{(1 - \beta_1) \frac{c_0}{r - \mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] + \beta_1 c_0 \frac{1 - e^{-rT}}{r}}{(\beta_1 - \beta_2) \left(\frac{c_0}{Q}\right)^{\beta_2}} \quad (9)$$

由实物期权理论, 有

$$\begin{cases} V - I = F \\ \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial F}{\partial y} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $V$  为投资函数;  $I$  为充电桩投资额;  $F = Ay^{\beta_1}$  为期权价值函数;  $A$  为待定系数。

当  $y \geq \frac{c_0}{Q}$  时, 由式 (5)、(9)、(10), 可得

$$c_0 \left[ \frac{1 - \beta_1}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T}) + \frac{\beta_1}{r} (1 - e^{-rT}) \right] \left(\frac{Q}{c_0}\right)^{\beta_2} \cdot (y^*)^{\beta_2} + (\beta_1 - 1) Q \frac{y^*}{r - \mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] = \beta_1 \left[ \frac{c_0}{r} (1 - e^{-rT}) + I \right] \quad (11)$$

式中,  $I$  为充电桩的投资成本;  $y^*$  为充电桩企业的投资阈值, 即投资价值函数的拐点值。

当充电桩的费率与使用率大于该值时, 可以进行投资, 当这两者小于该值时, 则投资处于亏损状态, 不宜投资。式 (9) 即为充电桩的投资阈值条件:  $y(t) = \kappa(t) \cdot \eta(t)$ ,  $\kappa(t)$  为  $t$  时刻的充电服务费;  $\eta(t)$  为  $t$  时刻的充电桩使用率, 当  $y(t) = \kappa(t) \cdot \eta(t) > y^*$  时, 立即投资; 当  $y(t) \leq y^*$  则持有投资期权 (不投资), 等待  $y(t) > y^*$  时再投资。

查阅的文献表明: 充电桩的运维成本与其投资  $I$  之间成线性关系, 即  $c_0 = \lambda I$ , 其中  $0 < \lambda < 1$ ,  $\lambda$  为充电桩的年运维费占投资的比重; 投资额  $I$  与最大可充电量  $Q$  也大体呈线性关系, 记  $I = \xi Q$ ,  $\xi > 0$  为系数。将其代入式 (9), 则有

$$\lambda I \left\{ \frac{1 - \beta_1}{r - \mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] + \frac{\beta_1}{r} (1 - e^{-rT}) \right\} \left(\frac{1}{\lambda \xi}\right)^{\beta_2} (y^*)^{\beta_2} + (\beta_1 - 1) \frac{I}{\xi} \frac{y^*}{r - \mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] = \beta_1 \left[ \frac{c_0}{r} (1 - e^{-rT}) + I \right] \quad (12)$$

因此, 影响电动汽车充电桩投资策略的因素有: 随机过程参数  $\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, \zeta$ , 无风险利率  $r$ , 运维费比例  $\lambda$ , 充电桩投资额与其最大可充电量比例系数  $\xi$ , 充电桩的运行周期  $T$  等。

## 2 电动汽车充电桩投资策略分析

由目前充电桩运营的生产实际可知, 充电桩的使用寿命普遍在 8~10 a, 各地充电设施用电价格见表 1。该用电价格在 0.30~1.15 元/(kW·h), 含服务费 0.30~0.50 元/(kW·h) 后, 平均充电价格在 0.80~1.50 元/(kW·h), 充电桩的年运维费占初始投资规模的比重在 10% 上下。因此, 综合参考文献 [2-13], 可整理出相关参数取值, 结果见表 2。

表 1 充电设施用电价格

Table 1 Electricity prices for charging facilities

地区	不同时段用电价格 元/(kW·h)		
	峰段	平段	谷段
湖南	0.704	0.604	0.404
云南	0.610	0.510	0.310
湖北	0.780	0.580	0.430
山东	0.888	0.555	0.385
浙江	1.153	0.670	0.280

表 2 参数取值

Table 2 Values of parameters

$\lambda$	$I_c/(\text{元} \cdot \text{W}^{-1})$	$r/\%$	$T/\text{a}$
0.1	1.2	5	10

基于表 2 的参数,本文以 30 kW 的快速充电桩为研究对象,根据其单位容量的投资成本参数,可测算初始总投资额为  $I=1.2 \times 30 \times 1\,000=36\,000$  元。该充电桩的年最大可充电量  $30 \times 24 \times 365=262\,800 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,  $\xi=10/73$ 。

显然,在初始投资成本及容量等参数确定后,充电桩投资价值评估的不确定因素主要由随机过程参数  $\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, \zeta$  决定。在不同投资环境下,这些参数的取值有显著不同。

### 2.1 充电桩投资阈值分析

本节的主要研究内容是逐项分析各随机过程参数  $\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, \zeta$  的变化对充电桩投资价值与投资阈值的影响,研究投资者在不同环境下的投资倾向。充电桩运营商提供充电服务需要从电力市场中购电,而未来运营期内电力市场价格的变化趋势是不确定的,可视其处于随机波动状态。企业从电力市场购入电能后的运营收入来自充电服务费,即用户支付的充电费与购电成本的差值。 $\kappa(t)$  是充电桩的单位电量边界贡献值,其也处于波动状态,但其波动相对较为平稳。若  $c(t)$  波动较大,则可以通过适当调整  $\rho(t)$  来对冲。因此,重点考察充电桩使用率的不确定性对投资阈值的影响。

参照文献[2-13],假设  $\mu_1=0.015, \sigma_1=0.15, \sigma_2=0.10, \zeta=-0.5$ ,得到图 1 所示的投资阈值曲线。从图 1 中可以看出,随  $\mu_2$  的增加,投资阈值随之增大。

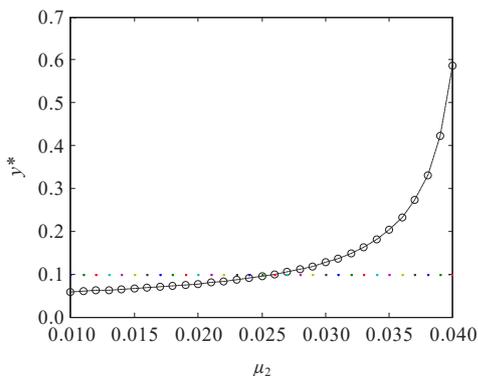


图 1 投资阈值曲线

Figure 1 Investment threshold curve

由文献[29],若  $y(t)=\kappa(t) \cdot \eta(t)$  服从几何布朗运动,充电桩的预期投资时间  $E(t)=\log(y^*/y_0)/(\mu-0.5\sigma^2)$ ,若给定初值  $y_0$ ,即可得到预期投资时间。

图 2 为  $y_0=\kappa_0\eta_0=0.1$  情况下,充电桩项目的预期投资时间。从图 2 中看出:当  $\mu_2 \leq 0.026$  时,充电桩项目的最优时点是“立即投资”,但当  $\mu_2 > 0.026$ ,随  $\mu_2$  增加,预期投资时间随之增大。因此,在外部环境不变情况下,  $\mu_2^*=0.026$  为“立即投资”和“等待投资”的分界点。

类似地,随机波动性变化的期望投资时点如图 3 所示。在图 3 中,若其他参数不变,且假设  $\mu_2=0.025$ ,可求得:  $\sigma_2 < \sigma_2^*=0.084$  时,立即投资,当  $\sigma_2 > \sigma_2^*=0.084$ ,为规避投资风险,充电桩投资者应持有投资期权(即不投资),待时再进行投资。

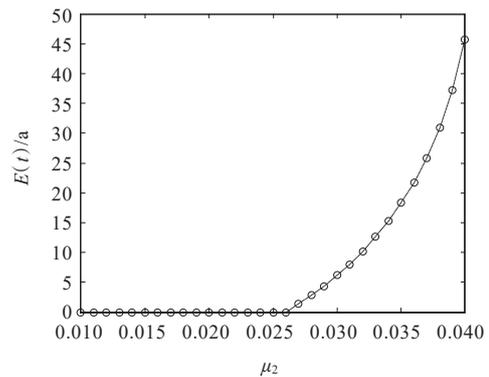


图 2 随预期增长率变化的期望投资时点

Figure 2 Expected investment timing with changing expected growth rate

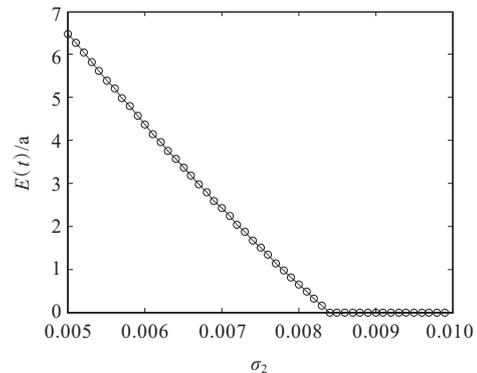


图 3 随波动性变化的期望投资时点

Figure 3 Expected investment timing with changing volatility

进一步分析可知:电动汽车充电桩投资,存在一个立即投资和等待投资的阈值点(如  $\mu_2^*=0.026$  或  $\sigma_2^*=0.084$ ),但该阈值点随外部环境变化而变化;)投资阈值  $y^*$  与初始值  $y_0=\kappa_0\eta_0$  无关,但预期投

资时间则与  $y_0$  有关,并有  $\frac{\partial E(t)}{\partial y_0} < 0$ 。

图 4 给出了  $\mu_2, \sigma_2$  同时变化情况下的充电桩投资时点曲面。从图 4 中可看出,  $\mu_2, \sigma_2$  越小,即充电桩使用率越确定,投资商越倾向于选择立即投资,图 4 中左前方深色区域是立即投资区。在图 4 中等待投资区域( $\mu_2, \sigma_2$  较大),随  $\mu_2, \sigma_2$  递增,期望投资时点越久,即越倾向于延迟投资。

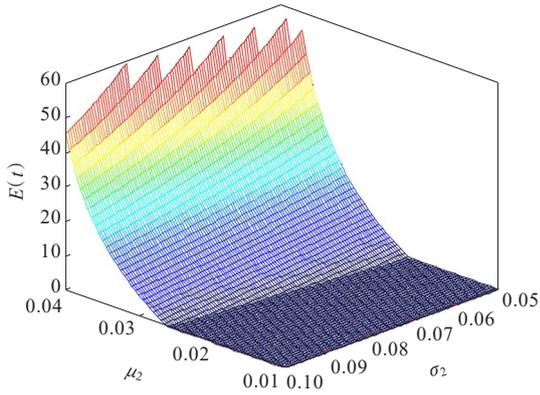


图 4 预期增长率和波动率同时变化的投资时点

Figure 4 Investment timing with simultaneous changing in expected growth rate and volatility

### 2.2 储能配套情况下的投资阈值分析

与文 3.1 分析不同,本节考虑充电桩企业建造配套储能装置,在电价低谷时段购入电能储存起来,使单位电量边际贡献  $\kappa(t) = \rho(t) - c(t)$  保持相对稳定。简单地,有  $\mu_1 = 0, \sigma_1 = 0, \zeta = 0$ ,但与文 3.1 分析相比,式(12)中要考虑储能投资  $I' = \omega I$  及其运维成本  $c'_0 = \tau c_0$ ,则式(12)转化为

$$(1 + \tau)\lambda I \left\{ \frac{1 - \beta_1}{r - \mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] + \frac{\beta_1}{r} [1 - e^{-rT}] \right\} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda(1 + \tau)\xi} \right]^{\beta_2} (y^*)^{\beta_2} + (\beta_1 - 1) \frac{I}{\xi} \frac{y^*}{r - \mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}] = \beta_1 \left[ \frac{(1 + \tau)\lambda I}{r} (1 - e^{-rT}) + (1 + \omega)I \right] \tag{13}$$

图 5 给出了  $\mu_2 = 0.025, \sigma_2 = 0.10$  且  $\tau = \omega$  情况下充电桩投资阈值  $y^*$  随  $\tau, \omega$  的变化曲线。从图 3 中可看出,随  $\tau, \omega$  递增,投资阈值递增。该结果很直观,即储能等新增投资及其运营成本越大,越倾向于延迟投资(持有投资期权)。

图 6 为与图 5 对应的投资价值最大情况下的期望投资时点曲线图。在图 4 中,从上至下依次为  $y_0 = 0.09, 0.12, 0.15$  这 3 种情况。 $y_0 = \kappa_0 \eta_0$ , 其中,  $\eta_0$  为

投资初期充电桩的使用率,  $\kappa_0$  为投资初期为单位电量的边际贡献(主要是充电服务费)。从图 4 中可以看出,  $\eta_0$  不变前提下,单位电量边际贡献越大,投资的等待时间越短(图中  $y_0 > 0.15, \omega < 1.3$ , 投资等待时间为零,即“立即投资”)。

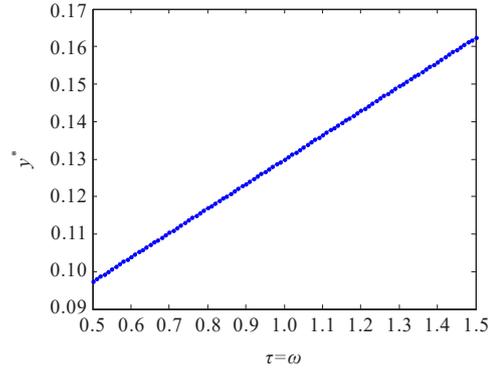


图 5 储能配套下的投资阈值曲线

Figure 5 Investment threshold curve under supporting energy storage facilities

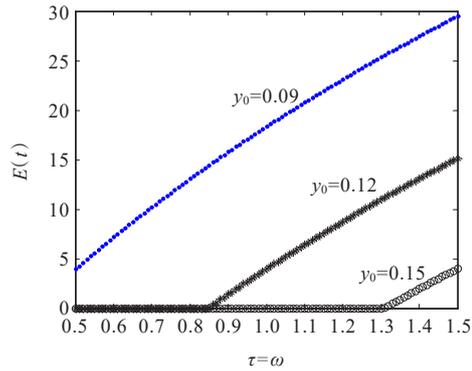


图 6 储能配套下的预期投资时间

Figure 6 Expected investment time under supporting energy storage facilities

进一步地,  $\mu_1 = 0.015, \sigma_1 = 0.15, \zeta = -0.5$ , 即单位电量边际贡献随机波动情况下,对应的投资阈值为  $y^* = 0.0948$ , 若  $y_0 < y^* = 0.0948$ , 则投资者的最优选择是持有期权,待时再投资。

这些分析结果表明:投资者的最优投资等待时间与初值  $y_0$  有关,初值越高,投资等待时间越短;储能配套投资是否占优,由增加的资额和单位电量边际贡献共同决定。即储能投资规模越小或充电桩单位电量收益越大,投资者收益越大,越倾向于立即开展投资。

针对当前充电桩投资面临的外部环境不确定性与储能配套成本延缓投资问题,提出以下政策建议。首先,政府应致力于降低市场环境的不确定性,通过定期发布行业报告和市场预测信息,制定长期充电服务费政策等手段,为投资者提供一个相

对稳定的投资环境;其次,为了激励充电桩的大规模投资,政府应确保充电桩的初始收益,可通过设定最低充电服务费标准或提供相关补贴,保障投资者的利益。鼓励充电桩运营商通过优化运营策略、提高服务质量等方式,增加充电桩的使用率,提高充电桩的盈利能力;最后,针对储能配套投资带来的初始成本过高问题,应对储能配套投资规模较大项目给予税收优惠和补贴,提供多样化的融资渠道和金融服务,优化融资支持政策以降低成本、提高经济性。

### 3 结语

随着国家“能源革命”战略的推进实施和新型能源体系的构建,能源消费电气化将逐步成为现实,上路的电动汽车数量正迅猛增加,与之配套的充电设施也正以30%以上的速度在递增,但相对于预期的电动汽车保有量,充电设置的建造还有相当大的缺口。充电设施的投资需要面临不确定性的投资环境(如市场需求、充电价格的波动性等)带来的投资风险。

本文考虑单位充电量边际贡献和充电桩使用率随机波动的情况,构建实物期权模型,得到期望投资价值最大条件下的充电桩投资阈值,基于投资阈值条件讨论充电服务费随机波动和储能配套这两种情况下的投资策略,得出如下结论:

1) 外部环境的不确定性会显著延迟充电桩投资。因此,要激励充电桩大规模投资,从政策上保证投资环境的相对稳定性;

2) 充电桩投资等待时间,不仅仅由外部环境的不确定性决定,也与充电桩的初始收益有关。因此,确保充电桩最低收益也是激励投资的有效方式;

3) 储能配套投资是否占优,与增加的投资额和单位电量边际贡献有关。在储能投资不大的情况下,储能投资可能有利于促进充电桩投资。

综上所述,对充电设施投资者而言,需要在充分调研的基础上,估计式(12)中的各类参数及其波动区间,得到适合于自身投资的投资阈值;再结合初值条件,推断投资价值最大情况下的投资时点,为充电设施投资的策略参考。

#### 参考文献:

[1] 张建冰.电动汽车充电价格定价机制研究[J].价格理论与实践,2018(9):135-138.  
ZHANG Jianbing. Research on pricing mechanism of

electric vehicle charging price[J]. Price (Theory & Practice),2018(9):135-138.

[2] 林卉,周一辰,李永刚,等.基于电动汽车两阶段充电站分配的聚合商定价方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(21):44-56.  
LIN Hui, ZHOU Yichen, LI Yonggang, et al. Aggregator pricing methodology based on two-stage charging station allocation for electric vehicles[J]. Power System Protection and Control,2023,51(21):44-56.

[3] 史亮,葛晓琳,顾闻,等.考虑需求响应的电动汽车充电负荷研究[J].电测与仪表,2022,59(7):42-47.  
SHI Liang, GE Xiaolin, GU Wen, et al. Research on charging loads of electric vehicles considering demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022,59(7):42-47.

[4] 胡金迪,刘思,沈广,等.基于端对端通信的充电桩无功响应分布式模型预测控制策略[J].电力系统自动化,2022,46(4):25-35.  
HU Jindi, LIU Si, SHEN Guang, et al. Distributed model predictive control strategy of reactive power response for charging piles based on peer-to-peer communication [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 25-35.

[5] FUNKE S Á, PLÖTZ P, WIETSCHEL M. Invest in fast-charging infrastructure or in longer battery ranges? A cost-efficiency comparison for Germany[J]. Applied Energy,2019,235:888-899.

[6] BAUMGARTE F, KAISER M, KELLER R. Policy support measures for widespread expansion of fast charging infrastructure for electric vehicles[J]. Energy Policy,2021,156:112372.

[7] HE H N, LI S Q, WANG S Y, et al. Investment strategies under stochastic electricity prices and implications for charging infrastructure network coverage: a case of photovoltaic pavements[J]. Computers & Industrial Engineering,2022,172:108523.

[8] KIM H, KIM D W, KIM M K. Economics of charging infrastructure for electric vehicles in Korea[J]. Energy Policy,2022,164:112875.

[9] LIU Z C, BORLAUG B, MEINTZ A, et al. Data-driven method for electric vehicle charging demand analysis: case study in Virginia[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment,2023,125:103994.

[10] 马晓明,陈栋,计军平.电动汽车充电设施PPP项目中投资方风险研究[J].现代管理科学,2016(8):3-5.  
MA Xiaoming, CHEN Dong, JI Junping. Research on investor's risk in PPP project of electric vehicle charging facilities[J]. Modern Management Science,2016(8):3-5.

[11] 方华亮,廖家齐,徐彦,等.基于风险评估的电动汽车直流充电站运维策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):96-105.

- FANG Hualiang, LIAO Jiaqi, XU Yan, et al. Maintenance strategy research of DC charging stations for electric vehicle based on risk assessment[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1):96-105.
- [12] 冯昊,孙秋洁,杨云露,等.基于风险价值的电动汽车充电桩效益风险评估[J]. *现代电力*, 2020, 37(5):501-509.  
FENG Hao, SUN Qiuji, YANG Yunlu, et al. Benefit and risk assessment for electric vehicle charging pile based on value at risk[J]. *Modern Electric Power*, 2020, 37(5): 501-509.
- [13] 徐素秀,谢冰,秦威,等.电动汽车充电与换电模式定价及投资策略[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(5): 183-189.  
XU Suxiu, XIE Bing, QIN Wei, et al. Pricing and investment strategies for electric vehicle battery charging and swapping[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(5):183-189.
- [14] 左晓露,郑锐,施文.基于需求扩张效应的电动汽车充电设施投资策略研究[J]. *科技管理研究*, 2017, 37(2):207-214.  
ZUO Xiaolu, ZHENG Rui, SHI Wen. Study on electric vehicle charging facilities investment strategy based on demand expansion effect[J]. *Science and Technology Management Research*, 2017, 37(2):207-214.
- [15] 徐家良,李晓露,柳劲松,等.考虑多重不确定性的综合能源系统与充电站的鲁棒定价策略[J/OL]. *现代电力*, 1-13[2023-10-22]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0127>.  
XU Jialiang, LI Xiaolu, LIU Jinsong, et al. Robust pricing strategy for integrated energy system and charging stations considering multiple uncertainties[J/OL]. *Modern Electric Power*, 1-13[2023-10-22]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0127>.
- [16] 王田,邓世名.以电动汽车供应链为依托的充电站建设模式研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(10):152-163.  
WANG Tian, DENG Shiming. Optimal building policies of charging stations with automobile supply chain analysis[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(10):152-163.
- [17] 张美霞,叶睿琦,杨秀,等.基于多维状态空间MCMC充电负荷预测的充电站规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(4):78-87.  
ZHANG Meixia, YE Ruiqi, YANG Xiu, et al. Charging station planning for electric vehicle based on charging load forecast by MCMC method in multi-dimensional state space[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(4):78-87.
- [18] TAN B Q, KANG K, ZHONG R Y. Electric vehicle charging infrastructure investment strategy analysis: state-owned versus private parking lots[J]. *Transport Policy*, 2023, 141:54-71.
- [19] ARLT M L, ASTIER N. Do retail businesses have efficient incentives to invest in public charging stations for electric vehicles? [J]. *Energy Economics*, 2023, 124: 106777.
- [20] HUANG X J, LIN Y, LIM M K, et al. Evolutionary dynamics of promoting electric vehicle-charging infrastructure based on public-private partnership cooperation[J]. *Energy*, 2022, 239:122281.
- [21] 尚姗姗,刘敦楠,李晓宇,等.基于实物期权的电动汽车充电站投资决策评估研究[J]. *智慧电力*, 2022, 50(9):67-73+89.  
SHANG Shanshan, LIU Dunnan, LI Xiaoyu, et al. Investment decision evaluation of electric vehicle charging station based on real option[J]. *Smart Power*, 2022, 50(9):67-73+89.
- [22] DIMANCHEV E, FLETEN S E, MACKENZIE D, et al. Accelerating electric vehicle charging investments: a real options approach to policy design[J]. *Energy Policy*, 2023, 181:113703.
- [23] 史乐峰,王松,吕胜男.充电设施运营商投资决策与电动汽车发展的交互作用机理研究[J]. *管理评论*, 2023, 35(1):243-256.  
SHI Lefeng, WANG Song, LV Shengnan. Interaction mechanism between charging facility operators' investment decision and the development of electric vehicles[J]. *Management Review*, 2023, 35(1):243-256.
- [24] 徐楠,赵子豪,王永利,等.基于设备初选的综合能源系统扩容规划研究[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(12):124-130.  
XU Nan, ZHAO Zihao, WANG Yongli, et al. Research on capacity expansion planning of the integrated energy system based on primary equipment[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(12):124-130.
- [25] 王松,史乐峰,任缙.电动汽车充电设施时空双维度投资分析模型及投资激励模式研究[J]. *管理评论*, 2022, 34(8):76-91.  
WANG Song, SHI Lefeng, REN Jin. Investment motivation analysis of electric vehicle facilities and corresponding incentive scheme design[J]. *Management Review*, 2022, 34(8):76-91.
- [26] TSIROPOULOS I, SISKOS P, CAPROS P. The cost of recharging infrastructure for electric vehicles in the EU in a climate neutrality context: factors influencing investments in 2030 and 2050[J]. *Applied Energy*, 2022, 322:119446.
- [27] KUMAR R R, CHAKRABORTY A, MANDAL P. Promoting electric vehicle adoption: who should invest in charging infrastructure? [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 149: 102295.