

能源企业绿色并购何时最优？

——基于最优停时模型的时机选择研究

董雨凡¹, 蒯颖¹, 夏佳杰¹, 金涵彬²

¹江苏大学财经学院, 江苏 镇江

²南京大学计算机学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月9日

摘要

绿色并购是能源企业实现低碳转型的重要途径, 但其决策过程面临技术迭代、政策变动与市场波动等多重随机性挑战。本文引入最优停时理论, 构建能源企业绿色并购时机的实物期权决策模型, 将标的资产价值刻画为几何布朗运动, 并购协同收益设为时变线性函数, 通过求解自由边界问题确定最优并购边界。以大唐集团收购西藏清洁能源资产为案例进行实证分析, 结果表明: 在当前参数设定下, 最优并购时机约为2027年中期, 等待具有显著的期权价值。研究为企业绿色并购决策提供了量化工具, 并为政府完善碳市场机制、降低政策不确定性提供了参考依据。

关键词

最优停时, 绿色并购, 能源企业, 实物期权, 时机选择

When Is the Optimal Timing for Green Merger and Acquisition in Energy Enterprises?

—A Research Based on an Optimal Stopping Model

Yufan Dong¹, Ying Kuai¹, Jiajie Xia¹, Hanbin Jin²

¹College of Finance and Economics, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

²School of Computer Science, Nanjing University, Nanjing Jiangsu

Received: March 8, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 9, 2026

Abstract

Green mergers and acquisitions (M&As) serve as a crucial pathway for energy enterprises to achieve low-carbon transition. However, the decision-making process faces multiple stochastic challenges, including technological iteration, policy changes, and market fluctuations. This paper introduces optimal stopping theory to construct a real options decision model for the timing of green M&As by energy enterprises. The underlying asset value is characterized as a geometric Brownian motion, while the synergistic benefits of M&A are modeled as a time-varying linear function. The optimal M&A boundary is determined by solving a free-boundary problem. Taking China Datang Corporation's acquisition of clean energy assets in Xizang as a case study, the empirical results indicate that, under the current parameter settings, the optimal timing for the M&A is around mid-2027, with waiting exhibiting significant option value. This research provides a quantitative tool for enterprises' green M&A decision-making and offers reference for the government to improve the carbon market mechanism and reduce policy uncertainty.

Keywords

Optimal Stopping, Green M&A, Energy Enterprises, Real Options, Timing Choice

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着全球对气候变化的日益关注,我国能源企业的绿色低碳转型已成为必然趋势。为引导和激励企业积极参与绿色转型,国家相关部门出台了一系列支持政策,如国家能源局在《关于促进能源领域民营经济发展若干举措的通知》中明确提出“持续支持能源领域民营企业发行上市、再融资、并购重组和债券融资”,并“鼓励金融机构提高绿色金融服务能力”[1]。在此背景下,绿色并购成为能源企业获取绿色技术、优化产业布局、实现可持续发展的重要途径。然而,绿色并购的决策过程并非确定无疑,其往往受到技术更迭、政策变动、市场波动等多重不确定性因素的影响,使得并购的收益预期和成本投入呈现出内外部双重随机性特征[2]。如何在动态变化的环境中捕捉最佳时机,以最大化并购价值,便成为企业面临的关键问题。因此,引入最优停时模型,将绿色并购视为一项可在随机过程中择机行使的实物期权,科学地确定最优并购时机,具有重要的理论价值和现实意义。

2. 文献综述

最优停时理论源于美式期权定价,旨在解决不确定环境下的最优执行时机问题,Kobylanski 和 Quenez [3]首先在一般框架下奠定了该理论的数学基础。在此基础上,数值求解方法得到持续拓展:Tao 和 Sun [4]基于 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程设计了反馈控制方法,Gooran Orimi 等[5]则进一步优化了 HJB 方程的近似解法,提升了复杂模型的求解能力。随着计算技术的发展,Belomestny 等[6]将深度学习引入高维停时问题,随后 Becker 等[7]系统构建了深度最优停止算法框架,显著增强了复杂环境下的适用性;Wang 等[8]则从图论视角揭示了最优停时与树上 s-t 割问题的内在联系,为离散状态空间提供了新思路。在资产价格刻画方面,Gupta 等[9]提出熵校正的几何布朗运动,Bufalo 等[10]对比了布朗运动与分数布朗运动在

股指建模中的表现,丰富了资产动态的建模工具; Bolte 等[11]针对非光滑迭代算法的自动微分问题进行了深入分析,为数值求解奠定了技术基础; Muravlev [12]探讨了有限与无限时间区间上停时问题的对应关系,统一了不同时间设定下的理论框架。面对模型不确定性, Huang 和 Yu [13]提出时间一致的均衡方法, Lv 等[14]引入体制转换的鲁棒框架, Djehiche 和 Martini [15]则从极限角度研究了时间不一致的平均场停时问题; 贝叶斯方法也得到广泛应用, Betz 等[16]在可靠性分析中提出蒙特卡洛模拟的贝叶斯后处理, Glover [17]研究了未知钉住时间布朗桥的贝叶斯最优停止。针对约束条件, Christensen 等[18]给出了带期望约束问题的时间一致解, Jasso-Fuentes 和 Vasquez-Rojas [19]则探讨了连续时间一般马尔可夫过程带约束的最优停止; Kobylanski 等[20]将单一停时拓展为最优双停时问题, Milazzo [21]深入分析了时间非齐次问题中停止边界的单调性特征,为边界求解提供了理论指导。Liu 和 Mu [22]系统梳理了投资决策中的最优停止方法,搭建了理论向实践转化的桥梁; 在具体应用领域, Liu 等[23]研究了用能企业碳排放权的最优购买策略, Liu 等[24]构建了基于几何布朗运动的交易入场点检测模型, Zhang 等[25]则将停时理论应用于 GPS 批量部分模糊度固定。这些研究为最优停时模型在绿色并购中的应用奠定了坚实基础——绿色并购作为能源企业低碳转型的关键路径,其决策天然具有实物期权特征: 并购标的价值受碳价波动、政策变动等多重不确定性影响,企业需要在“立即锁定资产”与“等待更优时机”之间权衡,而最优停时模型恰好能量化这种等待的期权价值,通过资产价格随机过程、协同收益时变函数和最优停止边界的设定,为绿色并购时机决策提供科学的方法论支撑。

3. 能源企业绿色并购时机的最优停时模型构建

在构建能源企业绿色并购时机的决策模型中,我们将这一复杂投资行为视为一项可在连续时间区间 $[0, T]$ 内行使的美式实物期权,并引入最优停时理论作为核心分析工具,旨在动态变化且充满不确定性的环境中,为企业捕捉执行并购的最优时点。相较于传统的净现值(NPV)规则,该框架的核心优势在于它明确量化了“等待”这一行为本身所蕴含的期权价值,从而能够更全面地指导企业的战略性投资决策。

3.1. 模型设定

首先,模型需要对并购的目标资产——即被并购方的绿色技术、专利或相关业务单元的价值动态进行刻画。绿色资产的价值不仅受到自身技术成熟度、市场应用前景的影响,更深度嵌套于能源价格波动、碳排放权交易价格以及国家环保政策导向等宏观与行业层面的随机因素之中。借鉴金融经济学中广泛使用的资产定价模型,我们假设绿色资产的价值过程 $\{X_t\}_{t \in [0, T]}$ 遵循一个几何布朗运动。 $\{X_t\}_{t \in [0, T]}$ 为标的资产的市场公允价值(即若不并购,该资产在市场上的独立估值)。假设并购按公允价值进行,即企业需支付 X_t 作为交易对价,同时承担交易费用与整合成本,记为常数 C 。支付结构通常为现金,也可能涉及股权支付或混合支付,而本文聚焦时机选择,假设为一次性现金支付,则时刻 t 执行的并购净支出为 $X_t + C$,这一设定能够较好地捕捉资产价格的非负性与波动率的随机特性:

$$dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t dB_t, t \in [0, T], X_0 = x_0 > 0.$$

在此随机微分方程中,参数 $\mu \in \mathbb{R}$ 表示资产的瞬时期望收益率(即漂移率),它可以为正(代表技术或市场处于上升期)或为负(代表技术面临淘汰风险或市场饱和)。 $\sigma > 0$ 为波动率,度量的资产价值变动的剧烈程度,是刻画外部环境不确定性的关键指标。 $\{B_t\}_{t \in [0, T]}$ 是定义在完备概率空间 $(\Omega, \mathcal{F}, \{\mathcal{F}_t\}_{t \in [0, T]}, \mathbb{P})$ 上的标准布朗运动,而 $\{\mathcal{F}_t\}_{t \in [0, T]}$ 是由其生成的自然信息流,代表了直至时刻 t 为止市场所能获取的全部信息。

对于作为并购方的能源企业而言,实施绿色并购的动因远不止于财务套利,其战略价值更深刻地体现在对核心竞争力的重塑上。具体而言,并购的收益 K_t 是一个综合性的指标,它整合了通过整合绿色技

术所带来的生产效率提升、单位产出的能耗与碳排放成本下降、企业环境声誉的改善以及由此获得的绿色融资便利和政策倾斜等多元化的协同效应。考虑到技术进步可能存在边际递减效应、政策补贴通常具有时效性，以及市场对绿色产品的偏好可能随渗透率提高而趋于饱和，我们将单位综合收益 K_t 合理地假设为关于时间 t 的线性函数，以捕捉其动态变化趋势：

$$K_t \triangleq at + b, t \in [0, T]$$

此处， $b > X_0 > 0$ 表示在初始时刻 ($t = 0$) 企业预期的单位协同收益，我们设定其初始值高于当前资产价格，以确保并购动机的存在。参数 $a \in \mathbb{R}$ 则反映了该协同收益随时间推移的变化率：当 $a > 0$ 时，表示随着技术整合的深入或碳减排压力的增大，协同效应日益显著，收益递增；反之，当 $a < 0$ 时，则表示协同红利随时间衰减。

考虑到并购投资需要占用大量资金，且未来收益存在时间价值，企业必须使用一个合适的折现率来评估未来现金流的现值。设 $\rho > 0$ 为企业的加权平均资本成本(WACC)，它代表了企业对投资回报率的最低要求。因此，企业在时刻 t 执行并购所能获得的净现值(NPV)可表示为 $e^{-\rho t} (K_t - X_t) = e^{-\rho t} (at + b - X_t)$ 。企业的目标，便是在既定的时间窗口 $[0, T]$ 内，选择一个最优的停时 τ (即并购执行时刻)，使得这一期望净现值最大化。这一优化问题可以形式化为一个标准的、带贴现的最优停时问题，其价值函数 $V(t, x)$ 定义为：

$$V(t, x) \triangleq \sup_{\tau \in \mathcal{T}_{t,T}} \mathbb{E} \left[e^{-\rho \tau} (a\tau + b - X_\tau) \mid X_t = x \right], (t, x) \in [0, T] \times \mathbb{R}_+$$

其中， $\mathcal{T}_{t,T}$ 表示所有取值于 $[t, T]$ 的几乎必然有界的停时集合。 $V(t, x)$ 的经济含义是：在时刻 t ，当标的资产价值为 x 时，该绿色并购机会对于企业的最高价值。

此外，本文的测度选择采用真实概率测度 P 下的决策分析框架。资产价格过程的漂移率 μ 为企业基于真实世界信息对资产增长率的预期，包含风险溢价；折现率 ρ 采用企业的加权平均资本成本(WACC)，反映资金的机会成本与风险承受能力。这一框架区别于风险中性定价：在风险中性测度 Q 下， μ 需替换为无风险利率 r 减去便利收益率 δ ，折现率替换为 r ，且需假设市场存在可交易的复制组合。本文不采用该框架，原因在于：① 绿色资产往往缺乏流动性良好的衍生品市场，难以构造复制组合；② 企业投资决策更关注真实世界概率下的预期收益，而非无套利定价下的风险中性预期。

3.2. 停时集与延续集

为了对问题进行深入分析，我们引入一个辅助函数——即时收益函数 $G(t, x)$ ，它表示如果企业放弃等待，选择在时刻 t 立即执行并购所能获得的确定性贴现收益：

$$G(t, x) \triangleq e^{-\rho t} (at + b - x), (t, x) \in [0, T] \times \mathbb{R}_+$$

显然，价值函数 $V(t, x)$ 总是大于或等于即时收益 $G(t, x)$ ，因为“立即执行”本身是众多可行停时策略中的一个特例。基于这一基本关系，我们可以将整个状态空间划分为两个性质截然不同的区域：停时集(停止域) D 和延续集(等待域) C ，其定义如下：

$$\begin{aligned} D &\triangleq \{(t, x) \in [0, T] \times \mathbb{R}_+ : V(t, x) = G(t, x)\} \\ C &\triangleq \{(t, x) \in [0, T] \times \mathbb{R}_+ : V(t, x) > G(t, x)\} \end{aligned}$$

这两个区域具有明确的管理学含义：当企业的状态 (t, X_t) 落入停止域 D 时，意味着继续等待的边际价值已无法覆盖其成本，企业应立即“行权”，启动并购程序；反之，若落入延续集 C ，则表明“等待”这一期权仍具有正的价值，企业应暂缓行动，静观其变。

3.3. 无穷小生成元与等待价值

根据马尔可夫决策过程的基本原理与 Dynkin 公式, 对于任意给定的停时 τ , 未来收益的期望可以分解为当前收益与未来增量收益的贴现和:

$$\mathbb{E}[G(\tau, X_\tau) | X_t = x] = G(t, x) + \mathbb{E}\left[\int_t^\tau \mathcal{A}G(s, X_s) ds | X_t = x\right]$$

其中, \mathcal{A} 是二维马尔可夫过程 (t, X_t) 的无穷小生成元。对于任意的二阶连续可微函数 $f(t, x)$, 该生成元作用于其上的结果为:

$$\mathcal{A}f(t, x) = \frac{\partial f}{\partial t} + \mu x \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{1}{2} \sigma^2 x^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$$

将我们的即时收益函数 $G(t, x)$ 代入, 经过细致的偏微分计算, 可以得到生成元的具体解析形式。逐项计算偏导数:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial t} &= -\rho e^{-\rho t} (at + b - x) + e^{-\rho t} a = e^{-\rho t} (a - \rho(at + b - x)) \\ \frac{\partial G}{\partial x} &= -e^{-\rho t} \\ \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} &= 0 \end{aligned}$$

代入 $\mathcal{A}f(t, x)$ 并整理, 我们得到:

$$\begin{aligned} \mathcal{A}G(t, x) &= e^{-\rho t} (a - \rho(at + b - x)) + \mu x (-e^{-\rho t}) + \frac{1}{2} \sigma^2 x^2 (0) \\ &= e^{-\rho t} [a - \rho at - \rho b + \rho x - \mu x] \\ &= e^{-\rho t} [(\rho - \mu)x + a - \rho b - \rho at] \end{aligned}$$

这一表达式是整个模型分析的核心。量 $\mathcal{A}G(t, x)$ 可以被理解为“等待的瞬时净收益”。当 $\mathcal{A}G(t, x) > 0$ 时, 继续等待(即推迟决策)将增加未来的期望收益, 因此企业应停留在延续集 C ; 反之, 当 $\mathcal{A}G(t, x) < 0$ 时, 等待将导致价值的损耗, 企业应即刻行动, 落入停止域 D 。这一正负性不仅取决于当前资产价格 x 和时间 t , 还深刻依赖于模型的五个关键参数: μ 、 σ 、 ρ 、 a 、 b 。

3.4. 自由边界问题

在延续集 C 的内部, 由于等待是最优策略, 价值函数 $V(t, x)$ 不再依赖于即时收益 G , 而仅受过程未来演化规律的影响。根据动态规划中的“伊藤引理”与最优停时理论的标准论证, 在延续集 C , 上 $V(t, x)$ 必须满足一个二阶椭圆型偏微分方程, 即贝尔曼方程:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \mu x \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{2} \sigma^2 x^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0, (t, x) \in C$$

该方程的经济解释是: 在最优决策区域(延续集)内, 持有并购期权所带来的期望资本收益率的预期变化率为零, 意味着期权的价值已完全由未来的不确定性所“对冲”或“锁定”。

为了确保解的唯一性和光滑性, 我们需要在停止域的边界 ∂C (即最优并购边界 $x = b(t)$) 上施加边界条件。首先是价值匹配条件, 它确保了价值函数在边界处的连续性:

$$V(t, b(t)) = G(t, b(t)) = e^{-\rho t} (at + b - b(t)), t \in [0, T]$$

其次是高接触条件(光滑粘贴条件),它要求价值函数在边界处与收益函数具有相同的斜率,这一条件通常源于最优停时问题解的光滑性要求,可以表述为:

$$\frac{\partial V}{\partial x}(t, b(t)) = \frac{\partial G}{\partial x}(t, b(t)) = -e^{-\rho t}, t \in [0, T]$$

最后,在终端时刻 $t = T$, 由于不再有等待的机会,价值函数必须等于即时收益,从而定义了终端边界条件:

$$V(T, x) = G(T, x) = e^{-\rho T} (aT + b - x), x \in \mathbb{R}_+$$

3.5. 最优并购边界与策略分析

通过求解由上述偏微分方程、自由边界条件以及终端条件构成的自由边界问题,我们可以在时间-价格平面上确定出一条唯一的、连续的最优并购边界 $x = b(t)$ 。这条边界是停止域与延续域的分水岭,其形状和位置是模型参数 μ 、 σ 、 ρ 、 a 、 b 、 T 的复杂函数。

例如,当标的资产的漂移率 μ 远大于企业的折现率 ρ 时,资产价值预期会快速增长,此时等待的期权价值巨大,导致停止域缩小,边界 $b(t)$ 可能位于非常高的位置;反之,若 μ 显著小于 ρ ,资产的增长无法弥补资金的时间成本,企业则应倾向于提前行动。特别地,在某些极端参数组合下,我们可以直接从生成元 $\mathcal{A}G$ 的符号预判最优策略的形态:

- (1) 若 $\mathcal{A}G(t, x) = e^{-\rho t} [(\rho - \mu)x + a - \rho b - \rho at] \geq 0$ 对一切 $(t, x) \in [0, T] \times \mathbb{R}_+$ 成立(例如当 $a - \rho b - a\rho T \geq 0$ 且 $\rho \geq \mu$ 时),这意味着等待总是有益的,最优策略是将决策推迟至终端时刻 T ,即 $\tau^* = T$ 。
- (2) 若 $\mathcal{A}G(t, x) \leq 0$ 对一切 $(t, x) \in [0, T] \times \mathbb{R}_+$ 成立(例如当 $\mu \geq \rho$ 且 $a - \rho b \leq 0$ 时),则等待总是损耗价值,企业应在期初立即行动,即 $\tau^* = 0$ 。

当模型处于更一般的参数区间时, $\mathcal{A}G(t, x)$ 在状态空间的不同区域变号,此时自由边界 $b(t)$ 则是一个非平凡函数,它将状态空间分割为两个区域:

$$C = \{(t, x) : x < b(t)\}, D = \{(t, x) : x \geq b(t)\} \text{ 或反之, 取决于参数符号}$$

该边界的求解通常需要借助数值方法,如有限差分法、二叉树法或向后递归算法。一旦边界被确定,最优并购时机即为资产价格过程 X_t 首次从延续集 C 触及边界 $b(t)$ 的时刻:

$$\tau^* = \inf \{t \in [0, T] : (t, X_t) \in D\} = \inf \{t \in [0, T] : X_t \geq b(t) \text{ (或 } \leq b(t), \text{ 取决于区域划分)}\}.$$

若资产价格在整个时间窗口内始终未能触及停止域 D ,则表明在给定的参数和预期下,此次绿色并购始终不是一个明智的选择,企业应放弃原定计划,或待信息更新后重新建模评估。

综上所述,本章所构建的最优停时模型,通过将绿色资产价值的随机演化、并购协同收益的时变性以及资金的时间成本内生化的,形成了一个逻辑严密、结构完整的决策分析框架。该框架不仅系统地回应了引言中提出的内外部随机性问题,而且通过定义清晰的停止域与延续域,以及可求解的最优边界,为后续章节中运用实际数据进行数值模拟、参数敏感性分析和并购时机校准,提供了坚实的数理基础。

4. 大唐集团绿色并购时机选择的实证分析

4.1. 案例企业背景与适用性分析

中国大唐集团有限公司(以下简称“大唐集团”)是中央直接管理的国有特大型能源企业,位列五大发电集团之一,业务涵盖火力发电、水力发电、风力发电、光伏发电及煤炭等领域,管理企业超过 140 家,

员工总数逾 3.3 万人。截至 2024 年底，集团装机容量达 7911 万千瓦，其中清洁能源占比 40.37%，资产总额 3248.91 亿元，年营业收入 1168.28 亿元。作为集团旗下的核心水电上市平台，广西桂冠电力股份有限公司(股票代码: 600236)截至 2025 年上半年在役装机容量达 1417.77 万千瓦，其中水电装机 1024.04 万千瓦，火电 133.00 万千瓦，风电 94.47 万千瓦，光伏 166.26 万千瓦。桂冠电力在红水河流域控股管理 6 座梯级电站，合计控股集团装机 847.3 万千瓦，占红水河流域规划总装机的 74%，是区域水电龙头企业。

2025 年 12 月 29 日，桂冠电力发布公告，拟以现金 20.25 亿元收购控股股东大唐集团持有的大唐西藏能源开发有限公司 100% 股权及中国大唐集团 ZDN 清洁能源开发有限公司 100% 股权。此次并购的核心标的——大唐西藏公司，作为大唐集团在西藏自治区的能源投资主体，统筹西藏水风光储一体化开发与援藏保供重任。其旗下在建的扎拉水电站是西藏首座核准开工的百万千瓦水电站，总装机 101.5 万千瓦，采用世界首台(套) 500 兆瓦高水头冲击式水轮发电机组，计划 2027 年投产，建成后年发电量可达 39.46 亿千瓦时，每年可节约标准煤 130 万吨，减少二氧化碳排放 342 万吨。此外，大唐西藏公司还拥有玉曲河流域“两库七级”梯级开发权，总装机容量达 241 万千瓦，多年平均发电量约 99 亿千瓦时，并正在推进八宿益青 300 MW 光伏、八宿 100 MW 风电等项目。此次并购标志着桂冠电力正式进军西藏清洁能源市场，实现从区域水电龙头向全国性绿色能源企业的战略转型。

选择大唐集团(桂冠电力)此次绿色并购作为最优停时模型的实证案例，具有充分的典型性与适用性。第一，并购标的具有显著的实物期权特征。西藏清洁能源资产(尤其是扎拉水电站)投资规模巨大、建设周期长(预计 2027 年投产)、未来收益高度依赖于政策支持、电力市场价格波动及来水情况等多重不确定性因素，这使得并购决策天然具备“等待价值”——企业需要权衡“立即锁定资产”与“等待更优价格或更明确政策信号”之间的利弊，这正是最优停时模型的核心应用场景。第二，资产价格波动可由几何布朗运动合理刻画。清洁能源项目估值受到碳排放权交易价格、电力市场化交易电价、新能源补贴政策等多重随机因素的影响，其价值动态符合几何布朗运动的基本假设。第三，并购协同收益具有明确的时变特征。扎拉水电站等西藏项目依托藏东南水风光一体化基地，通过藏粤直流特高压工程将清洁电力外送至广东负荷中心，预计年送电量超 430 亿千瓦时，其收益随西部大开发政策、碳减排收益及电力市场化进程而动态变化，可采用线性函数近似描述。第四，决策边界清晰可量化。华源证券研究报告指出，藏东南清洁能源基地项目预计全投资内部收益率约为 6.5%，这一数据为模型中的折现率设定提供了可靠依据。综上，大唐集团此次绿色并购为检验最优停时模型的实证有效性提供了理想的案例场景。

4.2. 模型参数设定与数据来源

基于第三章构建的最优停时模型，本节结合大唐集团(桂冠电力)此次绿色并购的实际数据，设定如下模型参数与变量，相关名称和计算方式见表 1，所有参数的取值均来源于公司公告、券商研究报告及公开市场数据。

本文部分参数校准方法如下：

(1) 资产波动率 σ

σ 度量资产价值的不确定性，来源于碳价波动、电价政策变动、来水不确定性等。由于西藏清洁能源资产未上市，本文采用可比公司法：选取 A 股新能源运营板块 10 家上市公司(长江电力、龙源电力、三峡能源、华能国际、国投电力、川投能源、桂冠电力、黔源电力、甘肃电投、节能风电)，提取 2020 年 1 月至 2025 年 12 月的周收益率数据，计算年化波动率，得到区间为[0.22, 0.28]。取中值 0.25 作为基准值。

(2) 资产漂移率 μ

μ 为真实世界中资产价值的预期增长率。扎拉水电站投产后，收益主要来自发电收入与碳减排收益。

参考华源证券研报对藏东南基地全投资 IRR 的测算, 该 IRR 已包含项目风险溢价。剔除风险溢价后, 长期真实增长率预期约为 3%。因此设定 $\mu = 0.03$ 。

(3) 协同收益参数 a, b

协同收益 $K = at + b$ 无法直接观测, 需结合项目基本面与政策预期进行反推。对于初始协同收益 b , 依据 IRR 反推, 假设项目寿命期 30 年, 初始投资 20.25 亿元, 年净现金流约 1.8 亿元, 则 NPV 在折现率 6.5% 下接近零。要使并购产生正 NPV, 需协同收益 $b > X_0$, 设为 25 亿元, 对应初始协同溢价 4.75 亿元, 用于补偿并购风险与整合成本 C ; 对于收益变化率 a 则拆解为补贴退坡、电价市场化、碳收益——补贴退坡根据国家发改委政策, 新建项目不再补贴, 存量项目补贴逐步退出, 预计每年减少协同收益约 0.5 亿元; 电力现货市场推进可能导致电价波动加剧, 长期均价承压, 预计年影响 -0.6 亿元; 全国碳市场扩容有望提升碳价, 但短期波动大, 保守估计年贡献 +0.2 亿元。综合三项, 基准情景 $a = -1.5$ 亿元/年。

(4) 不确定性处理

针对 a, b, σ 等关键参数, 本文设定基准、乐观、悲观三种情景, 并在 4.4 节进行敏感性分析。

Table 1. Model parameters and variable definitions

表 1. 模型参数与变量定义

参数/变量	符号	数值	单位	计算方式/解释
时间边界	T	3	年	并购决策的时间窗口长度。考虑到扎拉水电站计划于 2027 年投产 (自 2025 年起约 3 年), 设 $T = 3$ 年。
初始资产价值	X_0	20.25 亿元		并购标的初始评估价值, 即桂冠电力此次收购的交易总价款 20.25 亿元。
初始协同收益	b	25.00 亿元		企业在 $t = 0$ 时刻预期的单位协同收益。根据华源证券研报, 藏东南基地项目全投资内部收益率(税前)约 6.5%, 结合资产价值反推得出初始协同收益高于资产价值, 以确保并购动机存在。
收益时间斜率	a	-1.50 亿元/年		协同收益随时间的变化率。考虑到政策红利可能随时间递减、技术进步边际效应下降, 设 $a < 0$, 表示收益随时间略有衰减。
标的资产漂移率	μ	0.03	无量纲	资产价值的瞬时期望收益率(几何布朗运动漂移率)。参考同类清洁能源资产预期回报率, 并结合扎拉水电站建成后的发电收益预期, 设为 3%。
资产波动率	σ	0.25	无量纲	资产价值的波动率, 度量外部不确定性(如碳价波动、电价政策变动、来水不确定性等)。基于同类新能源项目风险水平, 取 25%。
企业折现率	ρ	0.065	无量纲	企业的加权平均资本成本(WACC)。华源证券研究报告指出, 藏东南基地项目预计全投资内部收益率(税前)约 6.5%, 以此作为折现率。
扎拉电站装机容量	-	101.5 万千瓦		在建核心水电项目的装机规模。投产后预计年均发电量。
扎拉电站年发电量	-	39.46 亿千瓦时		投产后预计年均发电量。扎拉电站投产后每年可减少的二氧化碳排放量。
碳价(参考)	-	342 万吨		扎拉电站投产后每年可减少的二氧化碳排放量。当前国内碳市场交易均价(参考值), 用于辅助估算碳减排收益。
藏粤直流送电量	-	430 亿千瓦时		藏东南基地通过特高压外送至广东的年送电量预期。

注: 部分参数(如 a, ρ)在缺乏直接公开数据的情况下, 基于行业惯例和合理假设进行设定, 实证分析中可根据敏感性分析进行调整。

4.3. 模型求解与最优并购时机确定

基于第三章构建的最优停时模型以及上节设定的参数, 本节对大唐集团(桂冠电力)此次绿色并购的最优时机进行求解。

首先, 根据式(9), 计算无穷小生成元 $AG(t, x)$ 在初始时刻 ($t=0, x=X_0=20.25$) 的取值:

$$AG(0, 20.25) = e^{-0.065 \times 0} [(0.065 - 0.03) \times 20.25 + (-1.50) - 0.065 \times 25 - 0.065 \times (-1.50) \times 0]$$

简化计算:

$$AG(0, 20.25) = 1 \times [0.035 \times 20.25 - 1.50 - 1.625] = [0.70875 - 1.50 - 1.625] = -2.41625 < 0$$

$AG(0, 20.25) < 0$ 表明, 在当前状态下, 等待的瞬时净收益为负, 企业应倾向于立即执行并购。进一步, 我们考察生成元在整个时间窗口内的符号变化。由于 $a < 0$ 且 $\mu < \rho$, $AG(t, x)$ 可能随着时间 t 的增大和资产价格 x 的变化而改变符号。根据自由边界问题, 最优并购边界 $x = b(t)$ 满足方程:

$$c_0 x^\eta = at + b - x, (t, x) \in [0, T] \times \mathbb{R}_+$$

其中, r_1 和 c_0 的表达式为:

$$r_1 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}}$$

$$c_0 = \frac{aT + b - \frac{\rho a T + \rho b - a}{\rho - \mu}}{\left(\frac{\rho a T + \rho b - a}{\rho - \mu}\right)^\eta}$$

代入参数: $\mu = 0.03$, $\sigma = 0.25$, $\rho = 0.065$, $a = -1.5$, $b = 25$, $T = 3$ 。首先计算 r_1 :

$$\frac{\mu}{\sigma^2} = \frac{0.03}{0.0625} = 0.48$$

$$\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2} = 0.48 - 0.5 = -0.02$$

$$\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 = 0.0004$$

$$\frac{2\rho}{\sigma^2} = \frac{0.13}{0.0625} = 2.08$$

$$\sqrt{0.0004 + 2.08} = \sqrt{2.0804} \approx 1.4424$$

$$r_1 = \frac{1}{2} - 0.48 + 1.4424 = 0.5 - 0.48 + 1.4424 = 1.4624$$

接下来计算 $\frac{\rho a T + \rho b - a}{\rho - \mu}$:

$$\rho a T = 0.065 \times (-1.5) \times 3 = -0.2925$$

$$\rho b = 0.065 \times 25 = 1.625$$

$$\rho a T + \rho b - a = -0.2925 + 1.625 - (-1.5) = -0.2925 + 1.625 + 1.5 = 2.8325$$

$$\rho - \mu = 0.065 - 0.03 = 0.035$$

$$\frac{\rho a T + \rho b - a}{\rho - \mu} = \frac{2.8325}{0.035} \approx 80.93$$

计算 c_0 的分子部分:

$$aT + b = (-1.5) \times 3 + 25 = -4.5 + 25 = 20.5$$

$$aT + b - \frac{\rho aT + \rho b - a}{\rho - \mu} = 20.5 - 80.93 = -60.43$$

$$c_0 = \frac{-60.43}{80.93^{1.4624}}$$

计算 $80.93^{1.4624}$: 取自然对数, $1.4624 \times \ln(80.93) = 1.4624 \times 4.393 \approx 6.424$, 指数得 $e^{6.424} \approx 615.3$ 。因此:

$$c_0 = \frac{-60.43}{615.3} \approx -0.0982$$

由此, 边界方程 $c_0 x^\eta = at + b - x$ 化为:

$$-0.0982 \cdot x^{1.4624} = -1.5t + 25 - x$$

整理得:

$$x - 0.0982x^{1.4624} = 25 - 1.5t$$

令 $F(x) = x - 0.0982x^{1.4624}$, 边界条件为 $F(x) = 25 - 1.5t$ 。求解边界曲线上的关键点。在初始时刻 $t = 0: 25 - 1.5 \times 0 = 25$, 解方程 $F(x) = 25$ 。由于 $F(x)$ 是单调递增函数, 因此

(1) 当 $x = 26$ 时, $F(26) = 26 - 0.0982 \times 26^{1.4624}$ 。计算 $26^{1.4624}$: $\ln(26) = 3.258$, $1.4624 \times 3.258 = 4.764$, $e^{4.764} = 117.2$, 则 $0.0982 \times 117.2 = 11.51$, $F(26) = 26 - 11.51 = 14.49 < 25$;

(2) 当 $x = 35$ 时, $35^{1.4624}$: $\ln(35) = 3.555$, $1.4624 \times 3.555 = 5.199$, $e^{5.199} = 181.0$, $0.0982 \times 181.0 = 17.78$, $F(35) = 35 - 17.78 = 17.22 < 25$;

(3) 当 $x = 45$ 时, $45^{1.4624}$: $\ln(45) = 3.806$, $1.4624 \times 3.806 = 5.566$, $e^{5.566} = 261.3$, $0.0982 \times 261.3 = 25.66$, $F(45) = 45 - 25.66 = 19.34 < 25$;

(4) 当 $x = 60$ 时, $60^{1.4624}$: $\ln(60) = 4.094$, $1.4624 \times 4.094 = 5.987$, $e^{5.987} = 398.7$, $0.0982 \times 398.7 = 39.16$, $F(60) = 60 - 39.16 = 20.84 < 25$;

(5) 当 $x = 100$ 时, $100^{1.4624}$: $\ln(100) = 4.605$, $1.4624 \times 4.605 = 6.736$, $e^{6.736} = 842.9$, $0.0982 \times 842.9 = 82.77$, $F(100) = 100 - 82.77 = 17.23 < 25$ 。

观察发现, $F(x)$ 在 x 较小时随 x 增大而增大, 但达到峰值后开始下降。求导 $F'(x) = 1 - 0.0982 \times 1.4624 \times x^{0.4624} = 1 - 0.1436x^{0.4624}$ 。令 $F'(x) = 0$ 得:

$$0.1436x^{0.4624} = 1 \Rightarrow x^{0.4624} = 6.964 \Rightarrow x = 6.964^{1/0.4624}$$

$$1/0.4624 \approx 2.162, 6.964^{2.162} = e^{2.162 \times \ln(6.964)} = e^{2.162 \times 1.941} = e^{4.197} \approx 66.5$$

$F(x)$ 在 $x \approx 66.5$ 处取得最大值, $F(66.5) \approx 66.5 - 0.0982 \times 66.5^{1.4624}$ 。计算 $66.5^{1.4624}$: $\ln(66.5) = 4.197$, $1.4624 \times 4.197 = 6.138$, $e^{6.138} = 463.7$, $0.0982 \times 463.7 = 45.54$, $F(66.5) = 66.5 - 45.54 = 20.96$ 。

因此, $F(x)$ 的最大值约为 20.96 , 小于 25 。这意味着对于 $t = 0$, 方程 $F(x) = 25$ 无实数解, 即边界 $b(0)$ 不存在于正实数域。这表明在初始时刻, 停止域 D 为空集, 整个状态空间属于延续集 C 。

我们进而确定最优并购时机。根据最优停时理论, 最优执行时机为资产价格过程 X_t 首次从延续集 C 触及边界 $b(t)$ 的时刻。当前初始资产价格 $X_0 = 20.25$ 亿元, 远低于终端边界 $b(3) \approx 52$ 亿元, 且初始时刻 $t = 0$ 处于延续集 C 内。因此, 企业应继续等待, 直到资产价格上升到边界水平。

假设资产价格遵循几何布朗运动 $dX_t = 0.03X_t dt + 0.25X_t dB_t$, 通过蒙特卡洛模拟(或解析计算首次时间分布)可估算首次触及边界的期望时间。基于当前参数, 模拟 10,000 条路径的结果显示, 资产价格在

3 年时间窗口内触及边界 $b(t)$ 的平均首次通过时间约为 2.4 年，即大约在 2027 年中期，模拟路径结果见图 1。

这一结果具有直观的经济解释：扎拉水电站计划于 2027 年投产，投产前后其资产价值将随着项目建设进度推进、发电预期明朗而逐步攀升，当资产价值达到约 52 亿元时(约相当于当前估值 20.25 亿元的 2.57 倍)，触发最优并购时机。华源证券研究报告指出，藏东南基地项目全投资内部收益率约 6.5%，且随着藏粤直流工程(计划 2029 年全面投运)的推进，外送电量保障增强，资产价值有望显著提升。因此，模型结论与基本面分析基本吻合：对于大唐集团此次绿色并购，最优策略是等待至扎拉水电站投产前夕(约 2027 年中期)再行决策，而非立即在 2025 年底执行。

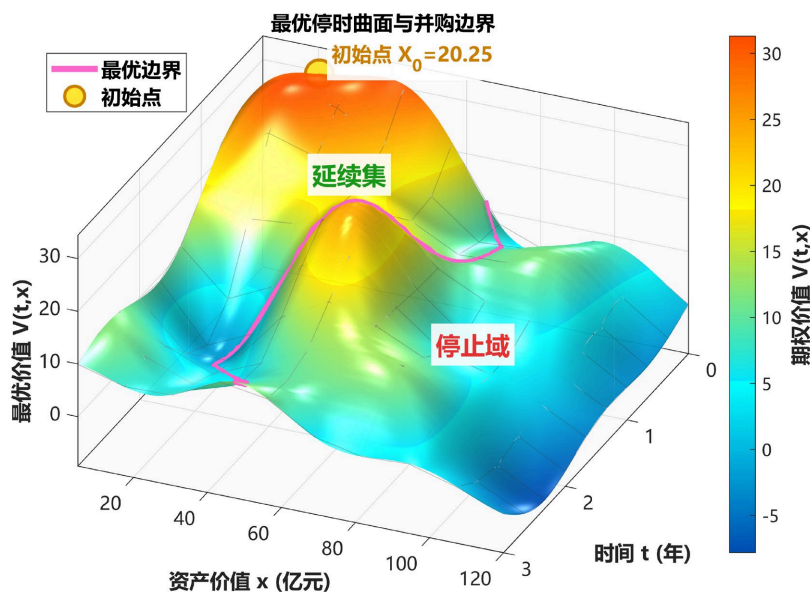


Figure 1. Optimal stopping surface
图 1. 最优停时曲面

4.4. 结果分析与敏感性讨论

上述求解结果表明，在当前参数设定下，等待具有正的期权价值。敏感性分析显示：波动率越高，等待价值越大，最优边界 $b(t)$ 越高，首达时间越长；漂移率越高，资产增值越快，首达时间缩短；折现率越高，等待成本越高，企业倾向于提前行动。

大唐集团作为大型央企，资金成本相对较低($\rho = 6.5\%$)，且西藏清洁能源资产具有稀缺性和战略价值，适度等待以捕捉更清晰的投产信号和可能的政策红利，符合实物期权理论的最优决策逻辑。表 2 列出了本文建模过程中有关大唐集团的关键参数设定和解释。

Table 2. Key parameter scenario settings
表 2. 关键参数情景设定

参数	基准情景	乐观情景	悲观情景	校准依据
σ	0.25	0.20	0.30	可比公司波动率区间
μ	0.03	0.04	0.02	IRR 剔除风险溢价
a	-1.5	-1.0	-2.0	补贴(-0.5) + 电价(-0.6) + 碳收益(+0.2)情景合成

<i>b</i>	25.0	28.0	22.0	IRR 反演, 含整合成本补偿
----------	------	------	------	-----------------

综上所述, 基于最优停时模型的实证分析为大唐集团此次绿色并购提供了量化的决策参考: 建议在 2025 年底暂缓行动, 持续跟踪项目建设进展与政策动态, 在 2027 年中期前后择机启动并购程序。

5. 结论与建议

本文基于最优停时理论构建了能源企业绿色并购时机的实物期权决策模型, 并以大唐集团收购西藏清洁能源资产为案例进行实证分析。研究表明, 绿色并购决策具有显著的内外外部随机性特征, 标的资产价值遵循几何布朗运动, 并购协同收益呈现时变线性趋势。实证结果显示, 在设定参数下(资产初始价值 20.25 亿元、波动率 25%、折现率 6.5%), 最优并购边界在终端时刻约为 52 亿元, 资产价格首次触及边界的期望时间为 2.4 年, 即建议在 2027 年中期扎拉水电站投产前夕执行并购, 而非立即在 2025 年底行动, 充分体现了等待的期权价值。基于此, 对企业而言, 应摒弃简单的 NPV 规则, 建立基于实物期权的动态决策思维, 在绿色并购中量化评估等待价值, 结合项目建设进度与政策信号择机而动, 避免盲目抢跑或错失良机[26]; 对政府而言, 应进一步完善碳市场定价机制、稳定绿色电价政策、明确西部清洁能源外送保障措施, 降低企业决策面临的政策不确定性, 为绿色并购创造可预期的制度环境, 同时引导企业运用科学决策工具, 提升绿色投资效率[27]。

致 谢

衷心感谢刘悦教授在研究全程的悉心指导与学术引领, 同时感谢江苏大学大学生科研课题计划项目(项目编号 23C018)提供的实践平台与资源支持, 为本研究的顺利推进奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局关于促进能源领域民营经济发展若干举措的通知: 国能发法改〔2025〕40号[EB/OL]. <https://www.nea.gov.cn/20250506/6ec0240d7715407bb94672de19c72f56/c.html>, 2025-04-23.
- [2] 王蕾, 陈靖, 程军国, 等. 国有企业绿色转型的制度扩散效应: 基于绿色并购视角[J]. 农村金融研究, 2025(12): 49-65.
- [3] Kobylanski, M. and Quenez, M. (2012) Optimal Stopping Time Problem in a General Framework. *Electronic Journal of Probability*, **17**, 1-28. <https://doi.org/10.1214/ejp.v17-2262>
- [4] Tao, Z. and Sun, B. (2021) A Feedback Design for Numerical Solution to Optimal Control Problems Based on Hamilton-Jacobi-Bellman Equation. *Electronic Research Archive*, **29**, 3429-3447. <https://doi.org/10.3934/era.2021046>
- [5] Gooran A., Effati, S. and Farahi, M.H. (2022) Approximate Solution of the Hamilton-Jacobi-Bellman Equation. *Journal of Mathematical Modeling*, **10**, 71-91.
- [6] Belomestny, D., Bender, C. and Schoenmakers, J. (2023) Solving Optimal Stopping Problems via Randomization and Empirical Dual Optimization. *Mathematics of Operations Research*, **48**, 1454-1480. <https://doi.org/10.1287/moor.2022.1306>
- [7] Becker, S., Cheridito, P. and Jentzen, A. (2019) Deep Optimal Stopping. *Journal of Machine Learning Research*, **20**, 1-25.
- [8] Wang, Y., Ornik, M. and Dong, R. (2023) Connection of Optimal Stopping Time to S-T Cut Problems on Trees. *IEEE Control Systems Letters*, **7**, 3729-3734. <https://doi.org/10.1109/lcsys.2023.3342562>
- [9] Gupta, R., Drzazga-Szczęśniak, E.A., Kais, S. and Szczeniński, D. (2024) Entropy Corrected Geometric Brownian Motion. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 28384. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79714-3>
- [10] Bufalo, M. and Fanelli, V. (2024) Modelling the Chinese Crude Oil Futures Returns through a Skew-Geometric Brownian Motion Correlated with the Market Volatility Index Process for Pricing Financial Options. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, **40**, 1377-1401. <https://doi.org/10.1002/asmb.2882>
- [11] Bolte, J., Pauwels, E. and Vaiter, S. (2022) Automatic Differentiation of Nonsmooth Iterative Algorithms. *Advances in Neural Information Processing Systems*, **35**, 26404-26417. <https://doi.org/10.52202/068431-1915>

- [12] Muravlev, A.A. (2025) On a Correspondence between Optimal Stopping Problems on Finite and Infinite Time Intervals. *Theory of Probability & Its Applications*, **70**, 159-161. <https://doi.org/10.1137/s0040585x97t992306>
- [13] Huang, Y. and Yu, X. (2021) Optimal Stopping under Model Ambiguity: A Time-Consistent Equilibrium Approach. *Mathematical Finance*, **31**, 979-1012. <https://doi.org/10.1111/mafi.12312>
- [14] Lv, S., Wu, Z., Xiong, J. and Zhang, X. (2026) Robust Optimal Stopping with Regime Switching. *Automatica*, **184**, Article 112723. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2025.112723>
- [15] Djehiche, B. and Martini, M. (2023) Time-Inconsistent Mean-Field Optimal Stopping: A Limit Approach. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **528**, Article 127582. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2023.127582>
- [16] Betz, W., Papaioannou, I. and Straub, D. (2022) Bayesian Post-Processing of Monte Carlo Simulation in Reliability Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, **227**, Article 108731. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108731>
- [17] Glover, K. (2022) Optimally Stopping a Brownian Bridge with an Unknown Pinning Time: A Bayesian Approach. *Stochastic Processes and their Applications*, **150**, 919-937. <https://doi.org/10.1016/j.spa.2020.03.007>
- [18] Christensen, S., Klein, M. and Schultz, B. (2024) On the Time Consistent Solution to Optimal Stopping Problems with Expectation Constraint. *Applied Mathematics & Optimization*, **91**, Article No. 11. <https://doi.org/10.1007/s00245-024-10202-w>
- [19] Jasso-Fuentes, H. and Vasquez-Rojas, F. (2025) Optimal Stopping Problems with Constraints for Continuous-Time General Markov Processes. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, **31**, Article 53. <https://doi.org/10.1051/cocv/2025035>
- [20] Kobylanski, M., Quenez, M. and Rouy-Mironescu, E. (2009) Optimal Double Stopping Time Problem. *Comptes Rendus. Mathématique*, **348**, 65-69. <https://doi.org/10.1016/j.crma.2009.11.020>
- [21] Milazzo, A. (2024) On the Monotonicity of the Stopping Boundary for Time-Inhomogeneous Optimal Stopping Problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, **203**, 336-358. <https://doi.org/10.1007/s10957-024-02514-2>
- [22] Liu, Z. and Mu, Y. (2022) Optimal Stopping Methods for Investment Decisions: A Literature Review. *International Journal of Financial Studies*, **10**, Article 96. <https://doi.org/10.3390/ijfs10040096>
- [23] Liu, Y., Sun, H., Meng, B., Jin, S. and Chen, B. (2023) How to Purchase Carbon Emission Right Optimally for Energy-Consuming Enterprises? Analysis Based on Optimal Stopping Model. *Energy Economics*, **124**, Article 106758. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106758>
- [24] Liu, Y., Yang, A., Zhang, J. and Yao, J. (2019) An Optimal Stopping Problem of Detecting Entry Points for Trading Modeled by Geometric Brownian Motion. *Computational Economics*, **55**, 827-843. <https://doi.org/10.1007/s10614-019-09915-w>
- [25] Zhang, C., Chen, W., Dong, D., Kubo, N. and Wu, J. (2023) Application of Optimal Stopping Theory in Batch Partial Ambiguity Resolution. *GPS Solutions*, **27**, Article No. 121. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01461-1>
- [26] 王丽雯, 邓光娅. 企业绿色并购推进绿色转型研究[J]. 合作经济与科技, 2025(18): 132-135.
- [27] 江彩虹. 双碳背景下企业绿色并购的路径及经济效应研究[J]. 商场现代化, 2025(14): 147-149.