

蒙特卡洛分析法在化工项目技术经济评价中的应用

——以某生物质制甲醇项目为例

周 林 (中石化南京工程有限公司, 江苏 南京 211100)

摘 要: 随着化工行业向绿色化、高端化方向转型, 项目前期技术经济评价中的风险评估成为规避重大投资风险的关键环节。本文针对化工项目风险要素复杂、动态关联性强等特点, 创新性地将蒙特卡罗模拟方法引入技术经济评价体系, 构建基于内部收益率 (IRR) 的多参数联合概率模型。通过某年产 18 万吨生物质甲醇的绿色化工项目案例, 重点分析了产品价格的分布函数, 并模拟了产品价格波动、原材料价格波动、生产负荷以及建设投资 4 项核心风险因子对项目经济性的影响。仿真结果表明, 仅考虑产品价格波动时, 项目存在 32.21% 的风险, 若考虑多项风险因子时, 项目存在 36.08% 的风险。研究证实蒙特卡罗方法能有效量化经济风险, 为项目前期决策提供数据支持。

关键词: 技术经济评价; 蒙特卡洛模拟; 风险分析; 生物质制甲醇

中图分类号: F407.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 023-0085-04

Application of Monte Carlo Analysis in Technical-Economic Evaluation of Chemical Projects

—A Case Study of a Biomass-to-Methanol Project

Zhou Lin (Sinopec Nanjing Engineering Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211100, China)

Abstract: As the chemical industry transitions toward green and high-end development, risk assessment in the preliminary technical-economic evaluation of projects has become critical to mitigating major investment risks. Addressing the complexity and dynamic interdependencies of risk factors in chemical projects, this study innovatively integrates the Monte Carlo simulation method into the technical-economic evaluation framework, establishing a multi-parameter joint probability model based on internal rate of return (IRR). Through a case study of a green chemical project producing 180,000 tons of biomass methanol annually, the distribution function of product prices is analyzed, and the economic impacts of four core risk factors—product price fluctuations, raw material cost volatility, production load variability, and construction investment deviations—are simulated. Simulation results reveal that the project faces a 32.21% risk when considering product price fluctuations alone, which increases to 36.08% under multi-factor scenarios. The research demonstrates that the Monte Carlo method effectively quantifies economic risks, providing robust data support for pre-investment decision-making.

Keywords: Technical-Economic Evaluation; Monte Carlo Simulation; Risk Analysis; Biomass-to-Methanol

随着全球经济格局以及能源布局的变化, 新兴技术崛起, 化工行业从基础化工往新兴产业发展。因化工新材料和精细化工的工艺技术更复杂、上下游市场的波动性更大, 项目前期决策对经济评价提出了更高的要求。例如绿色化工项目往往依赖于国内外的政策以及环保属性附加价值, 其市场波动并非常规依赖于上下游市场和产能等因素, 导致项目的可持续性和盈利性都充满变数。由此, 通过经济评价中的不确定分析探讨项目面临的风险对项目决策尤为重要。在实际工程中我们往往仅采用盈亏平衡分析和敏感性分析探讨项目的经济风险, 但盈亏平衡分析仅能判断出项目的盈利产能规模 (销售量), 不能反应每一年产量动态变化时的效益且体现不了时间价值。敏感性分析也没有考虑到不确定性因素变动的随机性, 有一定的盲目性。^[5] 为了弥补常规不确定性分析的缺陷, 可以

将蒙特卡洛模拟分析法引入化工项目技术经济评价。蒙特卡洛法是一种通过对随机变量的统计试验、随机模拟求解各类技术问题近似解的数学方法, 其特点是用数学方法在计算机上模拟实际概率过程, 然后加以统计处理, 解决具有不确定性的复杂问题^[1]。采用蒙特卡洛分析法探讨经济风险因素对项目经济效益的影响, 可以将风险量化表示, 为决策者提供一个明确的决策方向。

蒙特卡洛模拟法在项目经济评价中的应用研究已形成跨领域研究体系, 其核心价值在于量化不确定性因素的动态影响。现有文献显示, 该方法在光伏储能、工业固废利用、房地产及基础设施等多元化场景中展现出显著优势: 周红艳 (2021)^[1] 通过与传统贴现模型对比, 证实蒙特卡洛法能有效评估光伏项目风险韧性, 并揭示“光伏+储能”模式的经济可行性; 蔡

婷婷 (2021)^[2] 将其引入磷石膏综合利用领域, 结合 Crystal Ball 软件构建动态财务模型, 为固废处理项目提供科学决策框架。从方法论演进看, 研究呈现三大特征: 其一, 风险分析维度持续深化, 如王新 (2009)^[3] 在公路投资中整合造价、收费等 11 类风险因子构建综合评估体系; 其二, 技术集成度显著提升, 张春梅 (2018)^[4] 运用 MATLAB 实现房地产项目收益率的概率分布模拟; 其三, 应用场景加速拓展, 林君晓 (2006)^[5] 早期研究已将该技术成功应用于污水处理项目风险概率测算。研究共识表明, 蒙特卡洛法通过生成经济指标的概率分布, 突破传统静态分析的局限, 尤其在处理能源价格波动 (乔峙晶, 2019)^[6]、政策补贴敏感性 (周红艳)^[1] 等复杂变量时具有独特优势, 为投资决策提供可视化风险图谱。蒙特卡洛模拟的应用技术较为成熟, 但模拟中的风险因素采用何种分布函数依然需要进一步研究, 本文系统性的描述化工项目的蒙特卡洛模拟方法的实施步骤, 并针对风险因素的分布函数拟合方法进行了探讨, 创新性地将其运用在生物质制甲醇项目中, 科学地讨论了绿甲醇价格的概率分布情况, 并对结果进行了分析, 为以后的项目提供借鉴价值。

1 蒙特卡洛模拟在化工项目中的实施步骤

蒙特卡洛模拟 (Monte Carlo Simulation) 既可以进行多变量的敏感性分析, 又可以将不确定性用概率量化, 对于投资大, 变量多的化工项目决策有很大帮助, 其核心思想是通过构建数学模型, 将输入变量的不确定性转化为输出结果的概率分布, 从而揭示系统的潜在风险与机会, 实施步骤如下。

1.1 建立基础的经济评价模型

从项目的投资、收益和成本入手, 构建一套完整的财务评价报表。进行常规的单因素敏感性分析, 计算建设投资、生产负荷、原材料价格以及产品价格等敏感因子的敏感度系数, 初步判断项目的关键风险因素。

1.2 确定风险变量的概率分布

风险变量的概率分布是决定蒙特卡洛模拟结果的

关键因素, 一般可通过两种方法进行。其一, 根据风险变量的特性, 通过专家经验判断, 选择合适的分布, 常用的概率分布函数包括: 正态分布、均匀分布、三角分布、泊松分布等。其二, 当风险变量有一定的历史数据可供参考或者判断其趋势时, 可以采用数据拟合的方法得到风险变量的概率分布。拟合过程如下: ①获取足量的价格数据; ②检测异常数据, 并进行清理; ③可视化辅助判断拟合的理论分布类型: 绘制数据直方图与理论分布 PDF 对比, 可能采用的分布如下表 1 所示; ④根据图形判断分布类型后, 通过最大似然估计等方法计算分布的参数; ⑤采用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫 (K-S) 检验, 当 h 值为 0 时说明接收原假设, 当 p 值越大 (越显著), 说明拟合效果越好。

1.3 根据变量分布进行实验

最后根据变量的分布进行随机抽样, 重复多次实验 (采用 CRSTALBALL 软件, 设置试验次数和置信区间), 得到最后的模拟结果。

2 以某绿甲醇项目为例进行蒙特卡洛模拟经济风险分析

绿甲醇作为国内近年来的新兴化工风潮, 暂无稳定的买卖双方市场, 并且由于项目的产品和原材料种类单一, 更加依赖单一的上下游市场行情, 绿色甲醇的价格波动对项目经济性的影响极大, 因此本项目选取某绿甲醇项目作为案例分析材料对蒙特卡罗模拟进行说明。本项目年产甲醇 18 万吨, 主要消耗原料生物质 60 万吨, 燃料生物质 15 万吨, 建设投资约为 17.6 亿元。

2.1 选取风险变量

选取产品价格、原材料价格、生产负荷以及建设投资作为不确定性因素进行敏感性分析, 并计算敏感度系数。根据计算, 敏感度系数排序如下: 产品价格 > 原材料价格 > 生产负荷 > 建设投资。根据敏感度系数排序优先选择敏感度系数更高的因素进行分析探讨。因此本项目重点探讨产品价格 (绿甲醇价格) 的风险。

表 1 拟合数据特征与可能的分布

数据特征	可能的分布
对称、钟形	正态分布、t 分布
右偏 (正偏)、非负	对数正态分布、伽马分布、指数分布
左偏 (负偏)	Beta 分布、Weibull 分布 (形状参数 <1)
离散数据	泊松分布、二项分布
多峰	混合分布 (需更复杂建模)

2.2 确定风险变量的分布函数

因为绿甲醇作为近年来新兴的产品,暂无历史价格数据参考。根据目前市场数据显示,绿甲醇的价格基本在普通甲醇价格 1.5~2 倍之间,于是我们做出假设:绿甲醇价格基于普通甲醇价格按一定比例上浮,取系数 1.8。根据普通甲醇近五年的市场价格数据处理后绘制直方图和 Q-Q 图,可以判断出基本符合正态分布。

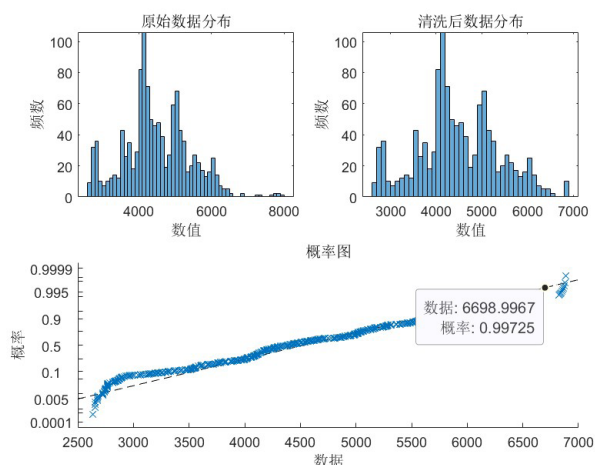


图 1 甲醇价格拟合图

拟合后概率密度函数图如下,符合均值为 4477.02,标准差为 918.72 的正态分布,matlab 检验 h 值为 0, k-s 检验 p 值为 0.051 大于 0.05,说明拟合为正态分布的结果显著。

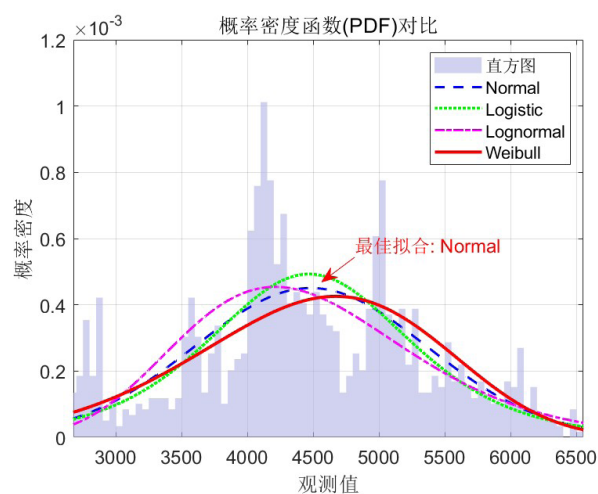


图 2 甲醇价格概率密度与理论分布对比

2.3 单因素蒙特卡罗模拟

在 Crystal Ball 软件中,选择绿甲醇价格作为假设变量,并输入分布 $N(4477.02, 918.72)$,确定目标变量净现值,设置模拟次数为 10000,运行模拟,结果如下图所示:

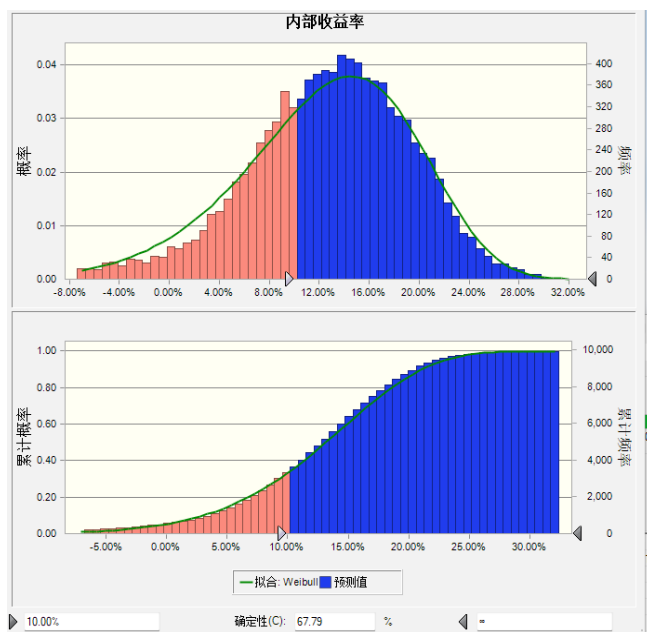


图 3 单因素蒙特卡罗模拟结果

运行结果显示为在绿甲醇价格服从假设分布的情况下项目全投资内部收益率的分布情况,结果 $P\{IRR \geq 10\% \} = 67.79\%$,且内部收益率的分布拟合为威布尔分布,其均值为 12.49%。说明项目的平均收益预期较好,有 67.79% 的概率能够达到预期收益。

2.4 多因素蒙特卡罗模拟

在考虑绿甲醇的价格变动时,若同步考虑生物质价格、建设投资以及生产负荷变动时,也可以借助蒙特卡罗模拟。因生物质来源于当地农户,收购价格较为稳定,结合各地生物质收购价格,本项目将设置生物质价格为均匀分布,其最大值为 500 元/吨,最小值为 200 元/吨;建设投资服从 160000~200000 的均匀分布;生产负荷服从 60%~100% 的均匀分布。同样设置模拟次数为 10000 次,其运行结果如下图。

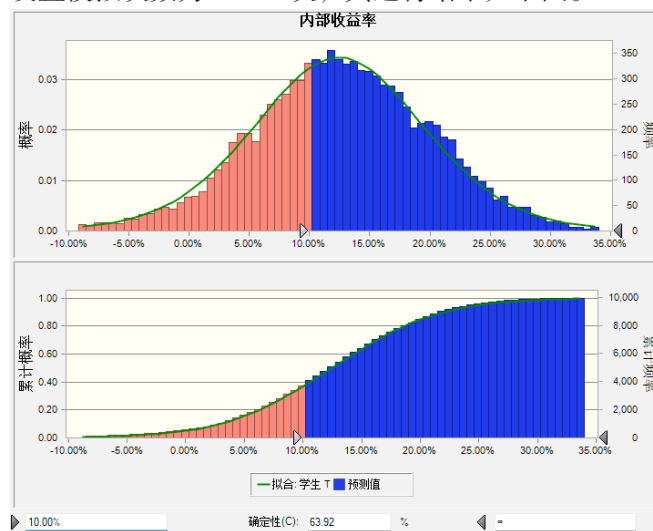


图 4 多因素蒙特卡罗模拟结果

由上图, $P\{IRR \geq 10\} = 63.92\%$, 结果符合 T 分布, 均值为 12.43%。说明内部收益率大于 10% 的可能性为 63.79%, 即项目在四项风险因素同步变化时, 有 63.92% 的概率达到预期收益。

3 结论

本文通过将蒙特卡洛分析法引入化工项目技术经济评价工作中, 并结合数据拟合等方法, 将化工项目的经济风险进行量化, 科学决策。使用蒙特卡洛模拟可以克服敏感性分析不够全面的缺点, 将参数的科学概率分布纳入经济评价, 使蒙特卡洛模拟结果更贴近现实, 以数据辅助科学决策, 保证项目前期经济研究的客观性。未来可以进一步扩展数据拟合的方法, 将混合分布纳入蒙特卡洛模拟中, 使该方法的适用范围更广。

参考文献:

[1] 周红艳. 基于蒙特卡洛模拟的 M 光伏储能项目经济

评价研究 [D]. 华中科技大学, 2021.

[2] 蔡婷婷. 基于蒙特卡洛模拟法的遵义恒聚磷石膏项目经济评价研究 [D]. 安徽建筑大学, 2021.

[3] 王新. 基于蒙特卡罗法的公路投资风险分析 [D]. 长安大学, 2009.

[4] 张春梅. 基于蒙特卡洛模拟技术的房地产项目经济评价研究 [D]. 青岛大学, 2018.

[5] 林君晓, 姜鹏飞, 谢玉萍. 蒙特卡洛模拟技术在污水处理项目风险分析中的应用 [J]. 科技管理研究, 2006, (12): 171-173.

[6] 乔峙晶. 蒙特卡罗仿真在石化项目经济评价的应用 [J]. 天津化工, 2019, 33(01): 53-55.

作者简介:

周林 (1991-), 女, 汉族, 陕西安康人, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向为化工工程经济。

广告

得到的不是永恒的拥有, 失去的将永不再来

——保护环境人人有责