

不确定条件下不连续创新项目期权价值优化模型

王海龙*, 肖剑杰, 张赫伦

(大连理工大学 21 世纪发展研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为探讨不确定性对不连续创新项目期权价值及投资策略的影响, 通过引入泊松跳跃过程模拟项目价值的不连续变化建立了不连续创新项目的期权价值优化模型, 将技术、市场、组织与资源不确定性分别表示为项目产业化成功率、项目价值和投资成本的不确定性, 然后具体解析了不连续变化的跳跃强度、跳跃幅度、跳跃幅度波动率等不确定性对不连续创新项目最优投资策略的影响以及不确定性与期权价值的关系, 最后通过蒙特卡罗模拟检验了模型的有效性. 模型将现有研究扩展到投资成本亦为不确定的情形, 可为不连续创新项目投资和项目价值与风险评估提供决策参考.

关键词: 不连续创新; 不确定性; 期权价值; 优化模型; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: F224; F273.1 **文献标志码:** A

0 引言

在不连续变化主导的环境中, 如何评估不确定性对创新项目收益的影响是科技创新型企业面临的重要问题. 传统的观点认为应该对不确定性加以规避, 然而实物期权方法可以有效评估不确定性带来的机会价值, 有助于企业更好地进行战略投资决策^[1~4].

Berk 等^[5]把企业价值分解为现有资产的价值和成长期权的价值, Jagle^[6]也指出技术密集型企业的市场价值等于现有经营项目价值的折现值与成长期权价值之和. 进行不连续创新的科技企业往往集中研发一两个核心项目且企业有形资产价值相对较小, 因此企业价值主要取决于不连续创新投资项目带来的成长机会价值, 可采用实物期权定价方法进行评估. Black 等^[7]假设标的资产价值沿着连续的样本路径进行几何布朗运动, 而 Brach 等^[8]则认为研发项目中的创新表现为泊松过程; Pennings 等^[9]认为研发项目实物期权标的资产的运动用带有漂移参数的泊松跳跃过程描述更为恰当; Merton^[10]在综合几何布朗运动和泊松跳跃的基础上得出了欧式看涨期权的定价公式; McDonald 等^[11]则通过案例讨论了资产价值

可能衰减至 0 的特殊情形. 由于产品更新换代较快, 科技型企业的创新项目价值更多地表现为跳跃扩散过程^[12~15]. 因此, 不连续创新项目价值的变化应该综合考虑上述两种运动.

现有相关研究较多关注技术、市场不确定性^[9, 16]而忽略了与不连续创新密切相关的组织与资源不确定性的影响; 而投资成本固定的假设不能很好地描述不连续创新的高不确定性特征, 缺乏足够的实践指导意义. 因此, 本文重点研究包含投资成本不确定性在内的各种不确定性因素对不连续创新项目期权价值及投资策略的影响, 构建不连续创新项目的期权价值优化模型, 通过模型的具体化及求解探讨不连续创新项目产业化投资的临界条件以及不确定性与期权价值的关系.

1 模型构建

1.1 建模思路

从金融期权的视角来考察企业的不连续创新项目价值, 首先需要确定不确定性因素. 不连续创新项目的不确定性来源主要有技术、市场、组织和资源^[17]. 其中, 技术不确定性与不连续创新项目成功率密切相关, 市场不确定性直接影响项目价

值的不确定性,而组织不确定性和资源不确定性均可表现为投资成本的不确定性.因此,不连续创新项目的技术、市场、组织与资源不确定性在模型中可用不连续创新项目成功率、项目价值和投资成本这3种不确定性表述.由此,可以建立股票期权跳跃扩散模型与不连续创新项目的期权价值优化模型变量的对应关系,其中股票期权的股票价格、期权执行价格、战略性信息出现率分别对应不连续创新项目的市场价值、投资成本、产业化成功率(即不连续变化的跳跃强度).

1.2 基本假设

考虑科技企业进行一个两阶段的不连续创新投资项目:企业在研发完成的 T_0 时刻拥有产业化投资机会,将选择适宜的 T 时刻进行产业化.考虑到不连续创新项目投资的特点,并参照文献[18]的动态规划处理方法,提出如下基本假设:

(1)企业存在自主的不连续创新项目研发活动及研发投入.科技产品通常升级换代较快,需要企业有持续的研发投入以维持产品,适应迅速变化的市场需求.

(2)不连续创新所需的资金投入和市场开发费用等投资不可逆.由于资产专用性、交易市场低效率等因素,企业在改变策略时不能收回投资的初始成本.

(3)不连续创新项目的产业化成功率、项目价值和投资成本均不确定.由于技术的不确定性,不连续创新项目产业化能否成功不确定;由于市场的不确定性,项目最终的价值不确定;由于组织、资源的不确定性,不连续创新项目的投资成本亦不确定.

(4)不连续创新项目研发完成前后项目价值的运动参数存在差异.即 $t \leq T_0$ 时, $dV = \alpha_1 V dt + \sigma_1 V dz$; $t > T_0$ 时, $dV = \alpha_2 V dt + \sigma_2 V dz$,且 $\alpha_1 \neq \alpha_2$, $\sigma_1 \neq \sigma_2$.

(5)不连续创新项目产业化所需的资本投入和市场开发费用远大于研发费用.

1.3 模型框架

(1)目标函数

考虑科技企业投资不连续创新项目,项目价值 V 服从混合的跳跃扩散过程,投资成本 I 服从几何布朗运动.以 $F(V)$ 表示不连续创新的期权价值,在 t 时刻来自投资的回报为 $V_t - I_t$,则目标函数为

$$F(V) = \max \{E[(V_t - I_t)e^{-\rho T}], 0\} \quad (1)$$

其中 E 为期望值, T 为不连续创新的产业化投资时刻, ρ 为风险中性条件下的贴现率.

(2)约束条件

项目价值 V 在 t 时刻的运动路径服从带泊松跳跃的几何布朗运动:

$$dV_t = \alpha_V V_t dt + \sigma_V V_t dz_t + V_t dq_t \quad (2)$$

式中: α_V 是项目价值的漂移率; σ_V 是项目价值的波动率; z_t 与 q_t 相互独立, z_t 是标准的维纳过程, q_t 是强度为 λ 的泊松过程,表示不连续变化带来项目价值的跳跃过程,其在 dt 时间区间内满足

$$\begin{cases} p(dq = 0) = 1 - \lambda dt \\ p(dq = \eta) = \lambda dt \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为概率; η 为固定的跳跃幅度,且 $\eta > -1$.假设未来不连续变化发生, q 将按固定的比例 η 变化. $-1 < \eta < 0$ 时,表示项目价值向下跳跃; $\eta > 0$ 时,表示项目价值向上跳跃.即 V 以几何布朗运动波动,但在每一时间间隔 dt ,它都将以一小概率 λdt 变化到其初始值的 $1 + \eta$ 倍,然后继续波动,直到另一不连续变化发生.

项目投资成本 I 服从漂移率为 α_I 、波动率为 σ_I 的几何布朗运动:

$$dI_t = \alpha_I I_t dt + \sigma_I I_t dz_t \quad (4)$$

(3)模型设定

综上,项目产业化成功率、项目价值、投资成本均不确定时不连续创新项目的期权价值优化模型为

$$\begin{aligned} F(V) &= \max \{E[(V_t - I_t)e^{-\rho T}], 0\} \\ \text{s. t. } dV_t &= \alpha_V V_t dt + \sigma_V V_t dz_t + V_t dq_t \\ dI_t &= \alpha_I I_t dt + \sigma_I I_t dz_t \\ p(dq = 0) &= 1 - \lambda dt \\ p(dq = \eta) &= \lambda dt \end{aligned} \quad (5)$$

2 模型分析

2.1 模型的具体化及求解

由于模型(5)不存在解析解,为考察企业进行不连续创新项目产业化的投资决策临界条件,先假设投资成本为固定值 I .另外,当 $T \rightarrow \infty$ 时, V 的积分会无穷大,永远等待成为企业最优决策选择.因此,为使问题有意义,须有 $\rho - \alpha_V > 0$,故限定

$$\delta = \rho - \alpha_V > 0 \quad (6)$$

则不连续创新项目的期权价值优化模型具体化为

$$\begin{aligned} F(V) &= \max \{E[(V_t - I)e^{-\rho T}], 0\} \\ \text{s. t. } \quad dV_t &= \alpha_V V_t dt + \sigma_V V_t dz_t + V_t dq_t \\ p(dq = 0) &= 1 - \lambda dt \\ p(dq = \eta) &= \lambda dt \\ \delta &= \rho - \alpha_V > 0 \end{aligned} \tag{7}$$

利用动态规划求解模型(7). 由于不连续创新项目研发成功后产生的投资机会直到不连续创新项目产业化投资前不产生现金流, 连续时间段的 Bellman 方程为

$$\rho F dt = E[dF] \tag{8}$$

利用 Itô 引理展开 dF , 即 $dF = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial V} dV + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial V^2} (dV)^2$, 注意到 $E[dz] = 0$, 有

$$\begin{aligned} \rho F dt &= \alpha_V V F'(V) dt + \frac{1}{2} \sigma_V^2 V^2 F''(V) dt - \\ &\quad \lambda \{F(V) - F[(1 + \eta)V]\} dt \end{aligned} \tag{9}$$

将 $\alpha_V = \rho - \delta$ 代入得

$$\begin{aligned} \rho F dt &= (\rho - \delta) V F'(V) dt + \frac{1}{2} \sigma_V^2 V^2 F''(V) dt - \\ &\quad \lambda \{F(V) - F[(1 + \eta)V]\} dt \end{aligned} \tag{10}$$

其中 $F(V)$ 需要满足的边界条件为

$$\begin{cases} F(0) = 0 \\ F(V^*) = V^* - I \\ F'(V^*) = 1 \end{cases} \tag{11}$$

式中: 3 个等式分别为初值条件、价值匹配条件 (V^* 为最优投资决策时的项目收益临界值) 和平滑粘贴条件, 解的形式须满足

$$\begin{cases} F(V) = AV^\beta \\ V^* = \frac{\beta}{\beta - 1} I \\ A = \frac{V^* - I}{(V^*)^\beta} = \frac{(\beta - 1)^{\beta - 1}}{\beta^\beta I^{\beta - 1}} \end{cases} \tag{12}$$

其中常数 $\beta > 1$, 其数值取决于参数 σ_V 、 ρ 和 δ . 由式(12), 令临界投资强度 $i = \frac{\beta}{\beta - 1}$, 由 $\beta > 1$ 知 $i > 1$, i 是投资成本 I 的乘数, 即需要项目价值的期望净现值 V 达到投入成本的 i 倍 V^* 时, 企业才采取产业化投资策略.

将式(12)代入式(10)得

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \sigma_V^2 \beta (\beta - 1) + (\rho - \delta) \beta - (\rho + \lambda) + \\ &\lambda (1 + \eta)^\beta = 0 \end{aligned} \tag{13}$$

2.2 结果讨论

式(13) 表明了各主要参数对产业化投资策略的影响. 说明: (1) 不连续变化的发生频率与最

优投资临界值的关系. 随着 λ 递增, i 递减, V^* 递减, 表明不连续创新项目的产业化成功率越高, 企业越愿意进行产业化投资. (2) 不连续变化的跳跃幅度与最优投资临界值的关系. 随着 η 递增, i 递减, V^* 递减, 表明不连续创新导致的项目价值跳跃幅度越大, 企业越愿意进行产业化投资. (3) 不连续变化跳跃幅度的波动性与最优投资临界值的关系. 随着不连续变化跳跃幅度的波动性递增, β 递增, i 递减, V^* 递减, 表明不连续创新导致的项目价值跳跃幅度的波动性越大, 企业越愿意进行产业化投资. (4) 不连续创新项目价值的波动性与最优投资临界值的关系. 随着 σ_V 递增, β 递减, i 递增, V^* 递增, 表明不连续创新项目价值的波动性越大, 企业越不愿意进行产业化投资. (5) 市场贴现率与临界投资强度的关系. 随着 ρ 递增, β 递减, V^* 递增, 即贴现率 ρ 越高, 企业越不愿意进行产业化投资.

3 模型模拟

为了深入考察项目期权价值与项目价值、投资成本和漂移率、波动率及跳跃强度等参数之间的动态关系, 采用蒙特卡罗模拟方法对不连续创新项目的期权价值进行敏感性分析.

3.1 参数设定

首先假设 $t \leq T_0$ 时, $dV = \alpha_1 V dt + \sigma_1 V dz$, $\alpha_1 = 0.15, \sigma_1 = 0.25$; $t > T_0$ 时, $dV = \alpha_2 V dt + \sigma_2 V dz$, $\alpha_2 = 0.23, \sigma_2 = 0.40$. 令 $\eta = 10$, 且 $V_0 = 10$, 得到不连续创新项目价值的一个模拟路径(图 1). 从图 1 可以直观看出: 泊松跳跃对于项目价值的变化影响较大, 漂移率 α 、波动率 σ 直接影响了项目价值变化的区间和幅度, 在不连续创新项目研发成功时点 T_0 后, 随着 α 、 σ 的增加, 项目价值的变化波动增加明显.

3.2 敏感性分析

(1) 漂移率对期权价值的影响

取 $F_0(V) = 12.64$, α_V 从 0.15 增加到 1.95, 根据漂移率 α_V 的不同取值对期权价值 $F(V)$ 的形态进行 10 000 次模拟, 分布形态显示 $F(V)$ 与 α_V 无显著相关关系, 见图 2.

(2) 波动率对期权价值的影响

取 $F_0(V) = 7.88$, σ_V 从 0.25 增加到 1.25, 对项目价值变化的波动率 σ_V 与期权价值 $F(V)$ 的关系进行模拟, 图形显示 σ_V 对 $F(V)$ 存在显著正相关影响, 见图 3.

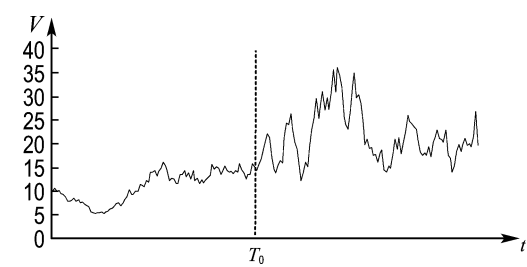


图1 不连续创新项目研发完成前后项目价值演化的样本路径

Fig. 1 A sample path of discontinuous innovation project value before and after finish

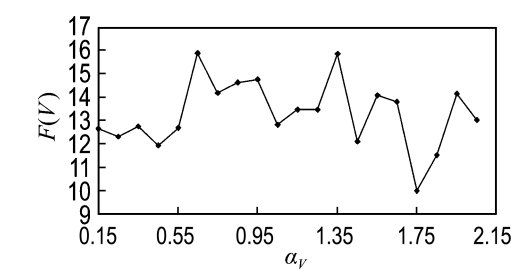


图2 成长期权价值与其漂移率的敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis between growth options value and α_V

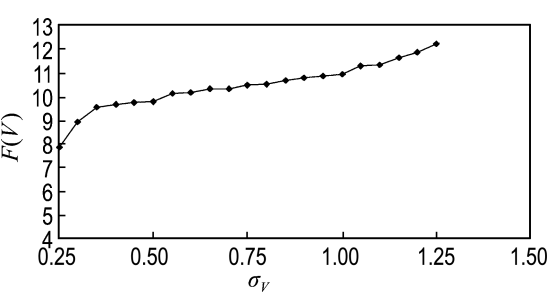


图3 成长期权价值与其波动率的敏感性分析

Fig. 3 Sensitivity analysis between the growth options value and σ_V

(3) 泊松跳跃强度对期权价值的影响

取 $F_0(V) = 9.24$, λ 从 3 增加到 25, 考察离散的随机跳跃对项目期权价值的影响. 随着泊松跳跃强度 λ 的增加, 单位时间发生泊松跳跃的可能性增加, 不连续创新项目的期权价值也随之增加. 总体上看, 两者呈正相关, 见图 4.

(4) 投资成本与项目价值、期权价值的关系

假设研发完成时刻 T_0 . 前项目价值和投资成本均符合几何布朗运动, 投资初始值为 5, 即 $t \leq T_0$ 时, $dV = \alpha_V V dt + \sigma_V V dz$, $\alpha_V = 0.15$, $\sigma_V = 0.25$; $dI = \alpha_I I dt + \sigma_I I dz$, $\alpha_I = 0.01$, $\sigma_I = 0.30$; $I_0 = 5$. 在研发完成时刻 T_0 . 前, 不连续创新的项目价值 V 、投资成本 I 与期权价值 $F(V)$ 的关系如图

5 所示.

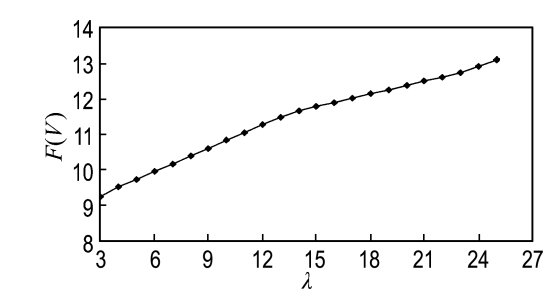


图4 成长期权价值与跳跃强度的敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity analysis between the growth options value and λ

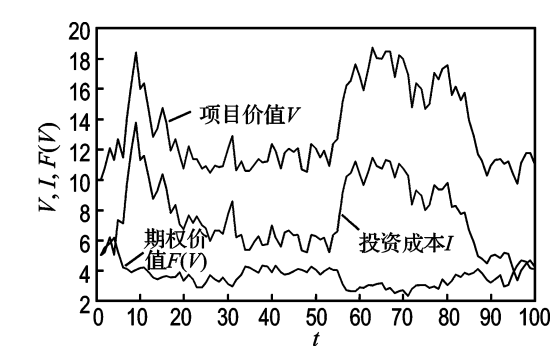


图5 项目价值、投资成本与期权价值的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of project value, investment cost and options value

4 结 语

本文关注的问题是不确定性因素如何影响不连续创新项目期权价值进而影响企业的投资策略. 通过引入泊松跳跃过程表达不连续变化建立了一个期权价值优化模型, 解决了不连续创新项目价值难以定量模拟的问题, 并通过考虑投资成本不确定性的约束条件扩展了现有研究. 蒙特卡罗模拟结果显示了不连续创新项目价值、投资成本及主要跳跃参数对项目期权价值的影响效应, 可为不连续创新项目投资提供有益的决策参考, 对创新型企业的价值与风险评估也具有一定的实践指导意义. 进一步可通过实证研究对模型进行分析, 另外还可将本模型扩展到多代不连续技术创新以及多个企业竞争的情形.

参考文献:

[1] 谭 跃, 何 佳. 实物期权与高科技战略投资——中国 3G 牌照的价值分析[J]. 经济研究, 2001(4): 58-66

- [2] 陈黎明,邱苑华. 不确定环境下新技术投资策略模型研究[J]. 管理科学学报, 2005(4):9-14
- [3] 李 虹,王大树,韩广智. 实物期权视角下的创新路径[J]. 经济科学, 2007(2):112-119
- [4] 王艺祥. R&D项目的现实期权定价模型及实证研究[J]. 科研管理, 2007, **28**(2):85-92
- [5] BERK J B, GREEN R C, NAIK V. Optimal investment, growth options, and security returns [J]. *The Journal of Finance*, 1999, **54**(5):1553-1607
- [6] JAGLE A J. Shareholder value, real options, and innovation in technology-intensive companies [J]. *R&D Management*, 1999, **29**(3):271-288
- [7] BLACK F, SCHOLES M. The pricing of options and corporate liabilities [J]. *Journal of Political Economy*, 1973, **81**(3):637-654
- [8] BRACH M A, PAXSON D A. A gene to drug venture: Poisson options analysis [J]. *R&D Management*, 2001, **31**(2):203-214
- [9] PENNINGS E, LINT O. The option value of advanced R&D [J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, **103**(1):83-94
- [10] MERTON R C. Option pricing when underlying stock returns are discontinuous [J]. *Journal of Financial Economics*, 1976, **3**(1-2):125-144
- [11] MCDONALD R, SIEGEL D. The value of waiting to invest [J]. *Quarterly Journal of Economics*, 1986, **101**(4):707-727
- [12] 游达明,杨晓辉,程 健. 基于期权博弈的企业突破性技术创新决策分析[J]. 系统工程, 2010(11):26-32
- [13] 杨海生,陈少凌. 不确定条件下的投资:基于“跳”过程的实物期权模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009(12):175-185
- [14] 李 强,曾 勇. 基于实物期权的技术创新非效率投资行为[J]. 系统工程理论与实践, 2009(2):18-29
- [15] WU M C, YEN S H. Pricing real growth options when the underlying assets have jump diffusion processes: the case of R&D investments [J]. *R&D Management*, 2007, **37**(3):269-276
- [16] PENNINGS E, SERENO L. Evaluating pharmaceutical R&D under technical and economic uncertainty [J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, **212**(2):374-385
- [17] RICE M P, OCONNOR G C, PETERS L S, *et al.* Managing discontinuous innovation [J]. *Research Technology Management*, 1998, **41**(3):52-58
- [18] 阿维纳什·迪克西特,罗伯特·平迪克. 不确定条件下的投资[M]. 朱 勇,黄立虎,丁新娅,等译. 北京:中国人民大学出版社, 2002

Optimization model for option value of discontinuous innovation project under uncertainty

WANG Hai-long*, XIAO Jian-jie, ZHANG He-lun

(21st Century Development Research Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To investigate the effects of uncertainties on the option value and investment strategy of discontinuous innovation (DI) project, an optimization model for option value of DI project is proposed with Possion jump processes to simulate discontinuous change of the project value. In this model, the technology, market, organization and resources uncertainties are respectively identified as uncertain industrialization success, uncertain project value and uncertain fixed investment cost. The impacts of the jump-rate, jump-range and its instantaneous expected return of discontinuous change etc. on DI investment strategies are analyzed and the dynamic relations between uncertainties and option value are exhibited, and the validation of the model is examined by Monte Carlo simulation. Through extending its application to investment cost uncertainty which is seldom considered in prior studies, the model provides a practical method to estimate the value and risk of DI project for investment decision-makers.

Key words: discontinuous innovation; uncertainty; option value; optimization model; Monte Carlo simulation