

# 含学习效应技术采纳时间的优化模型及模拟

代宏坤, 徐玖平

(四川大学工商管理学院, 成都 610064)

**摘要:** 针对企业技术采纳时间决策的问题, 考虑企业内部学习效应和外部技术演进对企业技术采纳时间的影响, 并重点考虑学习效应因素, 建立了一个含学习效应技术采纳时间的优化模型; 给出了企业技术采纳最优时间的决策准则; 分析了企业最优技术采纳时间与固定采纳成本、市场容量、学习效率、外部技术进步率和需求弹性等因素之间的关系; 模型模拟验证了模型的有效性和采纳决策准则的合理性。

**关键词:** 技术采纳; 优化模型; 学习效应; 模型模拟; 技术战略

**中图分类号:** F113.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007 - 9807(2007)05 - 0021 - 07

## 0 引言

新技术采纳时间是企业技术战略决策的关键内容, 对企业通过技术采纳来获取竞争优势、提升经营业绩至为重要。国外针对技术采纳时间的研究已取得了以下成果, 一般的研究得到两个结论: 企业会滞后采纳新技术和新技术会随着时间扩散<sup>[1~6]</sup>。对于企业滞后采纳新技术可以从技术获利能力的不确定性和技术本身的不确定性这两个方面来解释<sup>[7~12]</sup>。现有的研究普遍只考虑影响技术采纳时间的单一的因素。考虑技术获利能力不确定性因素的研究表明, 企业根据技术获利能力的不确定性来寻找最优的采纳时点。例如: Dixit 和 Pindyck 用实物期权方法研究了产品市场不确定环境下的企业投资决策问题, 认为增加市场不确定性会增加将来技术和现有技术的实物期权价值<sup>[13,14]</sup>; 考虑技术不确定性这一因素的研究表明技术的不确定性会导致企业滞后采纳技术。例如 Farzin 和 Doraszelski 研究了涉及新技术到达时间和技术本身价值两个方面都不确定的采纳时间决策问题, 结果表明: 当新技术的价值超过一定的值

时就会被采用<sup>[15~18]</sup>; 国内的研究把技术进步状态描述为随机目标追踪系统, 导出了不同技术环境下技术采用时机的概率模型, 并对实证结果进行了理论解释<sup>[19~21]</sup>。也有学者考察了两代未来技术创新的情况, 通过假定技术进步状态服从几何布朗运动, 得到了现有创新和第一代未来创新均出现情况下企业采纳时机的概率模型<sup>[22]</sup>。

纵观国内外技术采纳时间决策问题的研究, 只是从技术、市场等单一因素来分析它们对于技术采纳时间的影响, 很少同时考虑两个以上的因素。再者, 现有的模型假设企业采纳技术的成本是固定的, 没有考虑企业内部的学习效应带来的后续采纳成本的下降。然而, 在实际的情形中, 除了技术、市场的因素外, 企业在技术采纳时间决策时还需要考虑学习效应这一重要因素。本文在考虑企业外部技术进步、市场因素的基础上, 重点考虑企业内部的学习效应对于技术采纳时间的影响, 建立了含学习效应技术采纳时间的优化模型; 通过模型分析得到最优技术采纳时间决策准则, 学习效应、技术进步及其他因素对企业技术采纳时间的影响效应; 最后, 通过模拟来检验模型的有效性。

收稿日期: 2005 - 02 - 28; 修订日期: 2005 - 08 - 15。

作者简介: 代宏坤 (1973—), 男, 云南玉溪人, 博士, 副教授。Email: daihongkun@126.com

# 1 模型构建

考虑外部技术进步、内部学习效应及折扣率等因素的基础上,提出了技术采纳时间的概念模型.在对技术采纳前后每个阶段收益流和采纳成本度量的基础上,给出含学习效应技术采纳时间的优化模型.

## 1.1 建模思路及概念模型

企业在进行技术采纳决策时,面临着两类风险,一类是不及时采纳新技术而遭受到效率的损失;另一类是因过早的采纳而导致不能采纳更高效的技术而带来的机会成本,因此,企业面对的是一个最优技术采纳时间的决策问题.最优采纳时间就是指企业在这—时点上采纳新技术可以得到的最大化的利润.以往的模型只考虑了单一的影响因素,而且没有考虑存在学习进步的情形.例如 Farzin的研究假设采纳成本是固定的,仅考虑了技术进步的影响,而不考虑企业经生产经验的累积带来的成本的下降的学习效应<sup>[15]</sup>,本文考虑存在学习效应和技术进步的情形.根据上述建模思路,考虑影响期望利润的因素,包括市场规模、产出率、需求弹性、折扣率、初始成本等,给出企业采纳技术期望利润的概念模型,如图 1.

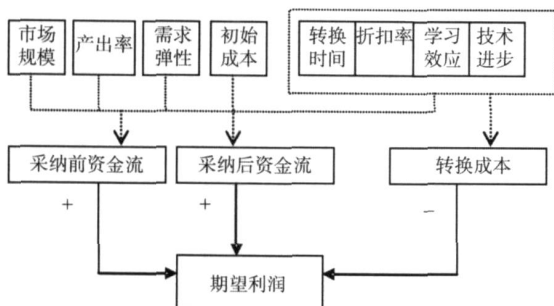


图 1 概念模型

Fig 1 Concept model

期望利润包括采纳技术前的资金流、采纳技术后各个阶段的资金流及转换成本.企业期望利润是这三个部分折现后的总和.这三个部分的资金流都要受到技术进步、学习效应、折扣率和采纳时间的影响.采纳前和采纳后的资金流受到市场规模、企业产出率、市场需求弹性、初步成本的影响.

## 1.2 数学模型

为了建立模型,针对概念模型中期望利润的

各个影响因素,做出如下的假设:

假设 1 企业生产单一产品.

假设 2 产品的需求函数是线性的.

假设 3 学习效应对生产成本呈固定的影响,学习效率是  $(0 < < 1)$ ,  $(1 - )$  是经过一个阶段的学习后,边际成本下降的幅度.

假设 4 技术进步的效率固定,为外部技术进步率.

假设 5 转换成本为线性函数.

企业在开始时以旧技术进行生产,此时,阶段数  $n = 0$ ,生产边际成本为  $C$ .随着时间的推移,企业在第  $T$ 阶段采纳新技术,根据概念模型,期望利润的现值可表达为采纳技术前  $(n < T)$ 的期望利润现值加上采纳后  $(t = T)$ 期望利润现值,减去转换成本现值.

### 1) 采纳技术前的期望利润现值

在采纳发生前,公司以产出率  $R$ 进行生产并以市场出清的价格销售产品.需求函数斜率为  $-$ ,市场规模为  $M$ ,则产品每单位的价格是  $(M - R)$ ,在单一阶段生产得到的收益是  $R(M - R)$ .

企业以旧技术进行生产,生产边际成本为  $C$ .随后以学习效率  $\alpha$ 累积生产经验,第  $n$ 阶段的单位边际成本下降为  $C^n (n < T)$ ,第  $n$ 阶段的生产成本为  $RC^n$ .

第  $n$ 阶段的收益  $\pi_n$ 为第  $n$ 阶段收入减去第  $n$ 阶段的生产成本,即

$$\pi_n = RM - R^2 - RC^n \tag{1}$$

在阶段  $n$ 中, $M$ 、 $C$ 、 $\alpha$ 作为状态变量相对固定.式(1)对  $R$ 求导,得到阶段收益最大产出率  $R^* = (M - C^n) / 2$ ,把  $R^*$ 代入式(1),得到单一阶段的最大收益为

$$\pi_n^* = \frac{(M - C^n)^2}{4} \tag{2}$$

记折现率为  $\delta$ ,把各个阶段的收益折现到起点  $n = 0$ ,得到采纳前的期望收益为.

$$\sum_{n=0}^{T-1} \frac{(M - C^n)^2}{4} \delta^n$$

### 2) 采纳技术后的期望利润现值

企业在阶段  $T$ 采纳技术,此时的生产边际成本是  $C$ ,此时,外部的技术以技术效率  $\beta$ 演化到了阶段  $T$ ,外部技术的生产边际成本为  $C^T$ .采纳

技术后,企业在阶段  $T$  的边际成本从  $C^T$  变为  $C^T$ ,随后,在此边际成本的基础上不断累积生产经验,第  $n$  阶段的单位边际成本下降为  $C^{T-n}$  ( $n < T$ ),采纳技术后第  $n$  阶段的生产成本是  $RC^{T-n}$ . 采纳技术后第  $n$  阶段的生产收益仍为  $R(M - R)$ . 第  $n$  阶段的收益 为第  $n$  阶段收入减第  $n$  阶段的生产成本,即

$$= RM - R^2 - RC^{T-n} \tag{3}$$

在阶段  $n$  中,  $M$ 、 $C$ 、 $R$  作为状态变量相对固定. 式 (3) 对  $R$  求导,得到阶段收益最大产出率  $R^* = (M - C^{T-n})/2$ ,把  $R^*$  代入式 (3),得到单阶段的收益为

$$* = \frac{(M - C^{T-n})^2}{4} \tag{4}$$

把采纳技术后每个阶段收益折现到阶段  $T$ ,得到收益的折现值为  $\frac{(M - C^{T-n})^2}{4} \cdot \tau^n$ ,再把阶段  $T$  每个阶段的收益折现到起点,得到了采纳技术后的期望收益为  $\sum_{n=0}^{T-1} \frac{(M - C^{T-n})^2}{4} \cdot \tau^n$ .

### 3) 转换成本的现值

企业在阶段  $T$  采纳新技术要支出一定的转换成本  $K$  转换成本包括固定成本  $k$  和可变成本,可变成本与转换时企业内外部的成本差距有关,这个成本差距为  $C(T - T)$ ,考虑每单位成本下降与技术的市场价格相关的参数  $s$ ,得到可变成本为  $sC(T - T)$ ,因此,转换成本  $K$  可表示为  $K(T) = k + sC(T - T)$ . 把转换成本  $K(T)$  折现到起点,采纳成本流现值为  $K(T) \cdot \tau^T$ .

记  $\phi(T)$  为在  $T$  阶段采纳技术时的期望利润现值,得到企业采纳技术的优化问题

$$\max \phi(T) = - K(T) \tau^T + \sum_{n=0}^{T-1} \frac{(M - C^{T-n})^2}{4} \tau^n + \sum_{n=0}^{T-1} \frac{(M - C^{T-n})^2}{4} \tau^n \tag{5}$$

求解上述优化问题,可以得到一个最优的采纳阶段  $T$ ,使得期望利润的现值  $\phi(T)$  最大化.

## 2 模型分析

### 2.1 采纳时间的唯一性及准则

观察参数值和阶段  $n$  的变化,在某点采纳技

术的净利润现值呈上升或下降的趋势. 为了使这个模型具有经济意义,设定外部技术进步率大于企业内部学习率 ( $0 < \tau < 1$ ),折扣率小于 1 ( $0 < \tau < 1$ ). 因此,在一定的假设下,可以直接得到唯一性定理.

**唯一性定理** 当  $C > 4/(1 - \tau)^2$  和  $M > 2C\{ (1 - \tau)^2 + (1 - \tau)^2 \} / (1 - \tau)(1 - \tau)^2$  时,在某点采纳技术的净利润现值是唯一的.

此定理表明企业在阶段  $t$  采纳技术,期望利润现值  $\phi$  达到最大. 定理等价于如果  $\phi$  在  $(t, t + 1)$  单调下降,则  $\phi$  在  $(t + 1, t + 2)$  也是单调下降的.

证明可以得到,如果第 1 阶段的净利润现值大于 0,且第 1 阶段的净利润现值大于第 2 阶段的净现值 ( $\phi(1) > 0$ ) 且  $\phi(1) > \phi(2)$ ,则在时刻第 1 阶段采纳技术是最优的. 如果第 2 阶段的净利润现值大于第 1 阶段的净利润现值 ( $\phi(2) > \phi(1)$ ),则应该比较第 2 阶段净利润现值 ( $\phi(2)$ ) 和第 3 阶段的净利润现值 ( $\phi(3)$ ),来决定是否在时刻 2 采纳. 其他各个阶段的情形类似.

**决策准则** 企业技术采纳时间是净利润现值大于 0 ( $\phi(t) > 0$ ),且连续两个阶段的净利润现值差大于 0 的阶段 ( $\Delta(t) > 0$ ).

连续两个阶段净利润现值的差  $\Delta(t)$  定义为

$$\begin{aligned} \Delta(t) &= \phi(t) - \phi(t + 1) \\ &= \sum_{n=0}^t \frac{(M - C^{t-n})^2}{4} \tau^n + \sum_{n=0}^t \frac{(M - C^{t-n})^2}{4} \tau^n - K(t) \tau^t - \left[ \sum_{n=0}^{t+1} \frac{(M - C^{t+1-n})^2}{4} \tau^n + \sum_{n=0}^{t+1} \frac{(M - C^{t+1-n})^2}{4} \tau^n - K(t + 1) \tau^{t+1} \right] \end{aligned} \tag{6}$$

整理式 (6) 得到

$$\Delta(t) = A \tau^t + B \tau^t + D \tau^{2t} + E \tau^{2t} + (\tau - 1)k \tag{7}$$

其中:  $A = \frac{(1 - \tau)MC}{2(1 - \tau)} + (1 - \tau)sC$ ;

$$B = \frac{2MC}{4} + (\tau - 1)sC$$

$$D = \frac{(1 - \tau^2)C^2}{4(1 - \tau^2)}; E = \frac{C^2}{4}$$

因此,企业技术采纳的准则表达为  $\phi(t) > 0$  且  $\phi'(t) > 0$

### 2 2 影响采纳时点的因素分析

对式 (7) 进行分析,找出企业学习效应、外部技术进步、企业初始生产成本等因素如何影响采纳时间,可以得到命题 1.

**命题 1** 最佳采纳阶段  $T$  随  $k, M$  和  $\rho$  的增加而延迟. 当市场容量  $M$  足够大时,最佳采纳阶段随  $\rho$  的增加而延迟,随  $k$  的增加而加快.

这个结论可以从采纳技术的固定成本、市场容量、需求弹性、折现效应、学习率和外部技术进步率多个方面来解释.

1) 无论何时发生转换,都要支付转换成本的固定部分 ( $k$ ). 由于存在折扣,在未来支付  $k$  更具吸引力.  $\phi(t)$  是  $k$  的递减函数,增加技术转换的固定成本  $k$  会减少  $\phi(t)$ ,从而延迟了采纳时间.

2) 在较大的市场上,单位生产成本的下降会创造更大的利润. 在一个大的市场中,即使生产成本小的变化也会带来较大的利润,因此,公司会等到  $C(t - t')$  最大化后采纳. 每单位价格是  $(M - R)$ ,增加需求弹性  $\rho$  与减少市场规模具有相同的效果.  $\phi(t)$  是  $M$  的递减函数,增加市场容量  $M$  会减少,从而延迟了采纳时间.  $\phi(t)$  是  $\rho$  的递增函数,减少需求弹性  $\rho$  会减少  $\phi(t)$ ,从而延迟了采纳时间. 增加市场容量和减少需求弹性对于最优采纳阶段有相同的效应.

3) 在不考虑折现的情形下,每个阶段成本的下降趋于无限,企业能够一直延迟采纳,直到这个成本的下降尽可能的大.  $\phi(t)$  是  $\rho$  的递减函数,当折扣率  $\rho$  增加时会增加  $\phi(t)$ ,从而延迟了采纳.

4)  $\phi(t)$  是  $\rho$  的递减函数,当学习效率 ( $\rho$ ) 增加时会减少  $\phi(t)$ ,从而延迟了采纳.  $\phi(t)$  是  $\rho$  的递增函数,当外部技术进步率 ( $\rho$ ) 增加时,  $\phi(t)$  会增加,从而加速了采纳.

## 3 模型模拟

为了深入研究企业最优技术采纳时间决策准则及企业技术采纳时间与其他参数之间的关系,使用 Matlab 数学软件来对模型进行模拟,以检

验模型的有效性、明确各个参数对技术采纳时间的影响,进而验证最优采纳决策准则的结论.

### 3 1 参数设定

考虑一个拟进行技术采纳的企业,设定该企业产品的市场容量的相对值为  $M = 1\ 000$ ,市场每年的增长率在 10%,以这个值作为需求弹性的变化量  $\rho = 0.1$ ,企业初始生产成本相对值为  $C = 50$ ,相对转换成本为  $k = 50$  和  $s = 10$ . 企业在第一期项目实施后,企业产品的单位成本下降 50,下降率为 10%,因此,设置学习率为  $\rho = 90\%$ ,与此同时,企业外部技术的发展也相当迅速,同等的技术水平,估计能够带来企业单位成本下降 20% 的效果. 因此,设置企业外部技术进步率为  $\rho = 80\%$ ;考虑到公司是风险中性的,设置折现率为  $\rho = 10\%$  是合适的. 因此,以上参数的设置是合理的.

### 3 2 模拟图形及分析

用这些参数来解方程 (5),得到结果如表 1. 计算结果表明了设置  $T$  的值为 1 到 9 的变化时得到的结果. 第 1 栏的  $T$  为在转换前公司使用旧技术的阶段数. 第 2 栏是转换前所有净收益的现值. 第 3 栏是转换发生后获得收益的现值. 转换成本的现值显示在第 4 栏里. 最后一栏是总利润值.

表 1 一次采纳时的利润和转换成本

Table 1 Profit and switch cost of single adoption

阶段	转换前利润	转换后利润	转换成本	总利润
1	188	2 010	47	2 500
2	327	4 723	55	5 132
3	486	8 930	62	10 000
4	534	13 267	75	15 000
5	679	14 353	89	16 944
6	1 397	17 604	108	18 892
7	2 133	16 209	115	18 224
8	2 873	14 887	114	17 548
9	3 506	13 635	106	17 235

计算方程 (7) 后得到的学习效应和外部技术的成本差、期望利润及转换点的模拟见图 2 和图 3.

从计算列表和模拟图形,可以得到如下结果:

1) 实际的情形复合最优技术采纳时间决策的准则. 在此例中,  $\phi(6) > 0$  且  $\phi'(6) = \phi(6) -$

$\phi(7) > 0$ , 在阶段 6 处采纳技术是最优的, 这符合模型分析中得到的决策准则, 即净利润现值大于 0 ( $\phi(t) > 0$ ), 且连续两个阶段的净利润现值差大于 0 ( $\phi'(t) > 0$ ).

2) 企业采纳技术时, 要综合考虑学习效应、技术进步和折现之间的相互作用. 数值分析的结果表明, 在阶段 6 转换是最优的. 从图形中可以看到,  $C$  和  $C'$  之间的差距在阶段 7 实际上达到了峰值. 按照一般的直觉, 似乎应该在外部技术进步效应与内部学习效率之间成本差距最大处来采纳技术. 然而, 等待的边际收益被增加的成本、需求函数的凹性和折现的效应抵消了. 这表明: 如果只考虑一次技术转换, 企业一直等待直到成本的差距最大后采纳技术这一直觉上的结论不是一个最优的决策. 企业采纳技术时, 要综合考虑学习效应、技术进步和折现之间的相互作用, 这就得到了一个与直觉相反的结果, 增加的学习效应和下降的技术进步率可能会引发早期的采纳.

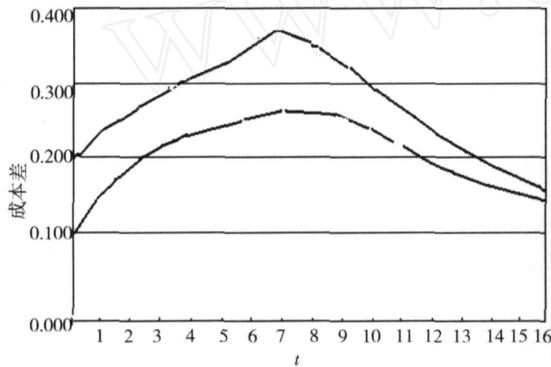


图 2 学习效应和外部技术的成本差

Fig 2 Cost gap of learning effect and outside technology

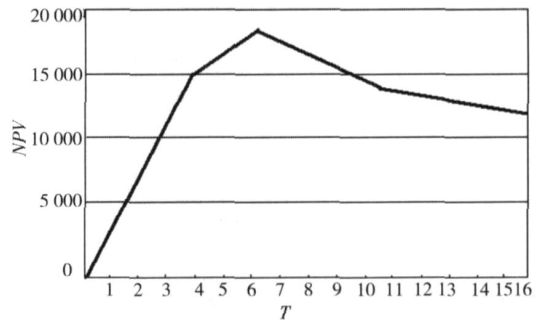


图 3 NPV 和转换点

Fig 3 Total NPV and switch point

### 4 结 论

本文讨论了含学习效应的技术采纳时间的决策问题. 把一直被忽略的企业的学习效应纳入到模型中来, 研究了学习效应对于技术采纳时间的影响. 了解企业技术采纳的决策模式及影响因素, 可指导技术提供商制定相应的销售策略, 指导技术采纳者选择适当的时间进行技术投资. 研究表明, 技术采纳最优决策准则是净利润现值大于 0, 且连续两个阶段的净利润现值差大于 0. 最佳采纳阶段随采纳技术的固定成本、市场容量和需求弹性的增加而延迟. 当市场容量足够大时, 最佳采纳阶段随折现率的增加而延迟, 随外部技术进步率和内部学习率的增加而加快. 用更符合实际情况的函数来替代市场容量、需求弹性, 考虑多次技术采纳的时间情形及学习效应和外部技术进步率的随机化等, 都将是后继研究的重点.

### 参考文献:

[1] NigeI Meadea, Towhidul Islam. Modelling the dependence between the times to international adoption of two related technologies[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2003, 9: 759—778.

[2] Comina D, Hobijn B. Cross-country technology adoption: Making the theories face the facts[J]. Journal of Monetary Economics, 2004, 6: 39—83.

[3] Thomas F, Golob A, Amelia C, et al. Trucking industry adoption of information technology: A multivariate discrete choice model[J]. Transportation Research Part C, 2002, 10: 205—228.

[4] Luis H R, Alvarez, Rune Stenbacka. Adoption of uncertain multi-stage technology projects: A real options approach [J]. Journal of Mathematical Economics, 2001, 35: 71—97.

- [5] Soren T, Anderson, Richard G, Newell Information programs for technology adoption: The case of energy-efficiency audits[J]. *Resource and Energy Economics*, 2004, 26: 27—50.
- [6] James P, Gander Technology adoption and labor training under uncertainty[J]. *Economics of Education Review*, 2003, 22: 285—289.
- [7] Donna K, Fishera, Jonathan Norvellb, *et al* Understanding technology adoption through system dynamics modeling: Implications for agribusiness management[J]. *International Food and Agribusiness Management Review*, 2000, 3: 281—296.
- [8] Mark Huggett, Sandra Ospina Does productivity growth fall after the adoption of new technology? [J]. *Journal of Monetary Economics*, 2001, 48: 173—195.
- [9] William L Dougan, James W, Bronson Sub-optimal technology adoption: The case of computer reservation systems in the travel industry[J]. *Journal of High Technology Management Research*, 2003, 14: 289—305.
- [10] Georg Gotz Strategic timing of adoption of new technologies under uncertainty: A note[J]. *International Journal of Industrial Organization*, 2000, 18: 369—379.
- [11] McDodd R, Siegel D. The value of waiting to invest[J]. *Journal of Business*, 1986, 101 (4): 707—728.
- [12] Grenadier S, Weiss A. Investment in technological innovations: An option pricing approach[J]. *Journal of Financial Economics* 1997, 44: 397—416.
- [13] Dixit A K, Pindyck R S Investment Under Uncertainty[M]. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- [14] Luis H R, Alvarez, Rune Stenbacka Adoption of uncertain multi-stage technology projects: A real options approach [J]. *Journal of Mathematical Economics*, 2001, 35: 71—97.
- [15] Farzin Y, Huisman K, Kort P. Optimal timing of technology adoption[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1998, 22: 779—199.
- [16] Doraszelski U. The net present value method versus the option value of waiting: A note on Farzin[J]. *Economic Dynamics and Control*, 2001, 23 (7): 78—100.
- [17] Doraszelski Innovations, improvements, and the optimal adoption of new technology[J]. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 2004, 28: 1461—1480.
- [18] Chester Chambers Technological advancement, learning, and the adoption of new technology[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 152: 226—247.
- [19] 赵秀云, 李敏强, 寇纪淞. 风险项目投资决策与实物期权估价方法[J]. *系统工程学报*, 2000, 15 (3): 243—246.  
Zhao Xiuyun, Li Minqiang, Kou Jisong The invest decision of risk project and real option evaluation method[J]. *Journal of System Engineering in China*, 2000, 15(3): 243—246. (in Chinese)
- [20] 简志宏, 李楚霖. 高新技术产业化的实物期权分析[J]. *管理工程学报*, 2002, 16 (4): 76—79.  
Jian Zhihong, Li Chulin The real option analysis of high-tech industrialized[J]. *Journal of Industrial Engineering & Engineering Management*, 2002, 16 (4): 76—79. (In Chinese)
- [21] 安瑛晖, 张 维. 期权博弈理论的方法模型分析与发展[J]. *管理科学学报*, 2001, 4 (2): 38—44.  
An Yinghui, Zhang Wei Model analysis and development of option game theory[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2001, 4(2): 38—44. (in Chinese)
- [22] 何 佳, 曾 勇. 技术创新速度对新技术购买行为的影响—两代未来创新的情况[J]. *管理科学学报*, 2003, 2: 13—19.  
He Jia, Zeng Yong The effect of technology innovation speed to new technology buying behavior—the case of two generation innovation[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 2: 13—19. (in Chinese)

## Optimal model of technology adoption time with learning effect and its simulation

DAI Hong-kun, XU Jiu-ping

School of Business and Administration, Sichuan University, Chengdu 610064, China

**Abstract:** This paper focuses on the problem of enterprise's technology adoption time decision. Constructs an optimal model of enterprise technology adoption time with learning effect, considering influence of enterprise inner learning effect and outer technology evolution on the adoption time decision, mainly describing the learning effect. Gives the decision-making rules of enterprise optimal adoption time. Analyses the relations between the optimal technology adoption time and fixed adoption cost, market volume, technology progress rate and needs elasticity. Model simulation tests the validity of the model and the rationality of adopting decision rules.

**Key words:** technology adoption; optimal model; learning effect; model simulation; technology strategy.

(上接第 20 页)

## Escalating evolutionary algorithm with application to bi-objective flow shop scheduling problems

SHI Rui-feng<sup>1,2</sup>, ZHOU Hong<sup>2</sup>

1. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100083, China

**Abstract:** An escalating multi-objective evolutionary algorithm (EMEA), which aims at solving bi-objective flow shop scheduling problem, is proposed in this paper. The new algorithm takes a new elite duplication strategy and an innovative escalating evolutionary structure, which improved the convergence and efficiency of the algorithm and reduced its computational cost. Besides, the proposed algorithm combines those meta-heuristic algorithms, which are adept at solving specific objective optimization with flow shop scheduling problems, into a tournament variable Pareto local search strategy at the end of each generation. 31 typical bi-objective flow shop case studies have been employed for demonstration. The optimization results have shown that, EMEA has gotten outstanding Pareto frontiers in all test problems by contrast to those of a well-known algorithm NSGA-II, which revealed its efficiency and effectiveness in solving bi-objective flow shop scheduling problems.

**Key words:** multi-objective evolutionary algorithm; escalating evolution; tournament neighborhood search; meta-heuristic local search; flow shop