

考虑消费者需求特征的颠覆性创新与产业演化

郁培丽¹, 石俊国^{2*}, 姜 坤¹, 郭艳婷³

(1. 东北大学工商管理学院, 辽宁 沈阳 100819;

2. 江苏大学财经学院, 江苏 镇江 212013;

3. 厦门大学管理学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 市场需求是颠覆性创新推动产业演化的重要因素. 通过构建考虑消费者产品更换频率和消费者学习能力的颠覆性创新与产业演化多主体仿真模型, 考察消费者需求特征在颠覆性创新与产业演化中的作用. 研究发现, 在消费者产品更换频率加快以及消费者学习能力较弱的情况下, 颠覆性创新企业进入市场的概率大大提高, 企业市场份额变动较大, 产业演化动态变化加剧.

关键词: 颠覆性创新; 产业演化; 消费者需求特征; 产品更换频率; 学习能力

中图分类号: F062.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2021)02-0256-08

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2021.02.010

Disruptive innovation and industry evolution considering characteristics of consumer demand

Yu Peili¹, Shi Junguo^{2*}, Jiang Kun¹, Guo Yanting³

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 100819, China;

2. School of Finance & Economics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This paper sets up a multi-agent simulation model on disruptive innovation and evolution of industrial organization which considers the frequency of product replacement and consumer learning capabilities, to examine the role of demand characteristics in disruptive innovation and industrial organization evolution. The study finds that under the conditions of frequent product replacement and poor consumer learning ability, the probability for disruptive innovative companies entering the market increase greatly, and the distribution of corporate market share changes dramatically.

Key words: disruptive innovation; industrial evolution; characteristics of consumer demand; product replacement frequency; learning ability

1 引言

颠覆性创新是指新进入企业通过强化产品的“附属属性”吸引细分市场顾客, 并不断改进产品技术性能, 使得“焦点属性”的性能也能满足主流客户需求, 最终侵入主流市场对在位企业构成颠覆性威胁的一种创新

收稿日期: 2019-03-31; 修订日期: 2020-11-30.

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(19BJY176); 高等学校青年骨干教师出国研修资助项目(201808695019); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(20720201022)

*通信作者

模式^[1-4], 颠覆性创新在响应市场需求、满足消费者偏好方面极具特点, 伴随着颠覆性创新的发生与发展, 市场规模、市场竞争结构、企业的市场竞争地位等发生重大变化. 因此, 从消费者需求角度揭示颠覆性创新驱动产业共生演化成为广泛关注的重大现实问题与理论问题.

国内外学者一致认为颠覆性创新企业对目标市场的选择是通过满足目标市场的消费者偏好来实现的^[5-9]. Adner^[10]通过构建考虑消费者偏好的博弈模型, 回答了颠覆性创新何时发生的问题, 指出只有当存在不对称偏好时, 颠覆性创新企业进入主流市场进行竞争才具有竞争优势, 市场颠覆才会发生. Adner等^[11]指出在颠覆性创新影响下, 不同细分市场的消费者对产品质量的感知程度会影响产业均衡的结果. Huang等^[12]将能力因素引入到颠覆性创新与维持性创新的竞争模型中, 考察了市场规模、消费者价值获取等因素对产业均衡条件的影响. 吴佩等^[13]分析了消费者剩余、价格和外部性对细分市场消费者转移的影响, 指出当颠覆性创新企业相对于维持性创新企业提供更多的消费者剩余时, 主流市场的消费者将会转移到细分市场. 颠覆性创新企业不仅要识别主流市场机会, 还要降低生产成本以创造更多的消费者剩余, 从而扩大颠覆性创新企业在主流市场的份额. 王天宇等^[14]基于网络游戏产业, 考察了消费者外部性等消费者偏好因素在产品动态定价方面的策略问题. 石俊国等^[15]构建了颠覆性创新行为与市场绩效模型, 分别考察了战略业务单元建立、产品改进、顾客教育等创业行为激励, 并指出在不同创业期, 这些行为影响消费者偏好并进而提高市场绩效的作用机理是不同的.

现有关于颠覆性创新的模型从不同角度揭示了消费者需求在颠覆性创新及其驱动产业演化中的作用, 对于认识颠覆性创新及其影响具有重要意义. 然而, 现有研究还存在一些不足之处. 首先, 现有模型大多是在构建博弈论均衡模型基础上, 通过比较静态分析, 对颠覆性创新的相关因素进行考察, 这种分析范式难以揭示现实经济中的产业动态竞争过程. 与以上模型不同, 文献[16, 17]构建了颠覆性创新多主体计算机仿真模型, 分析了市场需求与技术体制在产业组织演化中的作用; 其次, 颠覆性创新大多发生在新兴产业, 或者新技术驱动的产业竞争中, 在这样的产业中, 伴随着技术升级, 消费者存在“等待”购买现象^[18], 消费者产品更换现象明显. 同时, 消费者对产品的认知是有限理性的^[19], 因此, 消费者对产品的学习能力会随着对产品的使用时间而提高. 这些因素会通过影响产品的生命周期或者市场竞争程度, 进而不同程度地影响产业演化(如文献[20]). 基于以上两点考虑, 本文构建考虑消费者需求因素的颠覆性创新与产业演化模型, 考察消费者学习能力和产品更换频率的作用, 进一步从消费者需求角度加深颠覆性创新驱动产业发展的理论认识.

本文研究发现在产品更换频率较快的短周期市场和消费者学习能力较弱的情况下, 颠覆性创新进入市场的概率增加, 产业演化动态加剧. 这一结论从需求角度解释了颠覆性创新更容易在新兴产业发生发展的原因. 另外, 本文也进一步深化了颠覆性创新驱动产业演化的相关研究, 对创新驱动战略决策的制定具有一定的参考意义.

2 颠覆性创新与产业演化模型

2.1 产品空间与消费者偏好

本文通过构建考虑颠覆性创新企业、维持性创新企业和消费者三类主体的多主体计算机仿真模型, 分析消费者需求特征在颠覆性创新与产业演化中的作用. 其中维持性创新企业是市场上已有的在位企业, 沿着特定的技术轨道进行产品研发. 颠覆性创新企业是新进入企业, 通过对市场上现有企业的产品性能进行模仿改进进入市场. 进入市场之后, 颠覆性创新企业根据市场销售情况, 对特定产品性能进行研发投资, 并不断与维持性创新企业展开竞争. 企业和消费者按照一定的行为惯例进行决策. 当某个企业在一段时间内没有销售量时将退出市场. 模型构建主要基于文献[21], 以下将阐述模型的主要公式.

假设每个企业提供并销售一种产品, 每个产品都由不同的产品特征组成. 假定消费者进入市场的顺序遵循S型扩散曲线. 消费者根据产品特征对市场中的所有产品进行综合评价, 选择效用最高的产品. 根据有限理性理论, 消费者在进行产品特征评价时会存在一定的局限性, 但通过不断学习, 消费者的识别能力

也会不断提高. 消费者对产品特征的评价结果服从正态分布, 均值为该产品特征的真实性能水平, 方差为 $(1 - L_{t-1}M)D$, 其中 M 是消费者学习能力的上限, D 为消费者的期望误差. 学习能力为

$$L_t = \rho L_{t-1} + (1 - \rho)(2 - L_{t-1}), \quad (1)$$

其中 ρ 是消费者学习能力的变化系数.

伴随着技术不断升级, 新产品会不断推出, 消费者尝试购买新的产品来替代旧产品, 以获得新的功能或者适应新的基础设施, 在模型中, 消费者存在重复购买行为, 假定重复购买的时间间隔在 $[t_1, 2t_1]$ 内均匀分布.

2.2 企业研发行为

假定市场上存在维持性创新企业和颠覆性创新企业两类企业. 企业通过研发可以提高产品特征 i 的性能水平, 由 $V_t^i = sV_{t-1}^i R_t^i C_i$ 表示, 其中 s 是该产品市场销售量, V_{t-1}^i 是上一期产品特征的性能水平, R_t^i 是企业投入到产品特征 i 上的研发份额, C_i 表示企业在该产品特征方面的研发能力.

颠覆性创新企业整合现有的产品特征优势, 通过提供价格低廉、操作简单的产品进入市场. 假定颠覆性创新企业在每一期进入市场的概率为 α . 颠覆性创新企业的某个产品特征的性能水平为市场上现有企业在该产品特征上的最大性能水平 $(\bar{V})$ 减去一个随机值, 即

$$V_E^i = \bar{V} - l(\bar{V} - G)\xi, \quad (2)$$

其中 ξ 表示在区间 $(0, 1)$ 内服从均匀分布的随机数, l 代表技术溢出系数, 当 $l = 0$ 时, 技术溢出较大, 新进入企业可以完全吸收在位企业的技术. 随着 l 不断增加, 技术溢出不断降低.

颠覆性创新企业通过增加技术研发, 不断缩短与技术前沿的差距, 企业在特定产品特征方面的技术水平为

$$G_t = (1 - \tau)G_{t-1} + \tau\bar{V}, \quad (3)$$

其中 τ 表示技术进步的速度. 式(3)表示随着颠覆性创新企业进入市场的时间越长, 对技术前沿的模仿能力越强.

企业在特定产品特征方面的研发存在累积性特点, 即企业在特定产品特征方面的研发经验会随着其在该特征方面投入的研发资源的增加而增加, 但是, 当连续一段时间不在特定特征上进行研发投资时, 企业在该产业特征方面的研发经验也会随之消失.

3 结果分析

3.1 模型初始值及仿真环境设置

通过构建仿真模型, 对消费者产品更换频率和消费者学习能力进行仿真, 其中, 假定产品由 10 个产品特征组成, 运行期间为 0 到 600, 其它主要参数及变量的初始值设定见表 1.

表 1 计算机仿真模型主要参数初始值设定
Table 1 The computer simulation model main parameter initial value setting

参数	初始值	参数	初始值
L	0.99	G	1
ρ	0.01	δ	2
α	0.30	—	—

在分析消费者产品更换频率的作用时, 假定消费者的学习能力 $M = 0.99$, 分别对比产品更换频率参数 $t_1 = 10, 20, 40, 80$ 时的产业演化结果. 然后, 分别调整学习能力参数 M 的值, 进一步考察产品更换频率和消费者学习能力的综合作用. 通过考察企业市场份额和产业集中度的变化来分析产业演化情况. 与产业演化研究文献一致, 使用赫芬达尔指数的倒数(以下称赫芬达尔指数等同数)表示产业集中度.

3.2 仿真结果

3.2.1 消费者产品更换频率

消费者在购买某产品之后的一段时间 $[t_1, 2t_1]$ 进行新的一次产品购买决策. 图1展示了当 t_1 分别等于10, 20, 40, 80时, 各企业市场占有率的演化结果.

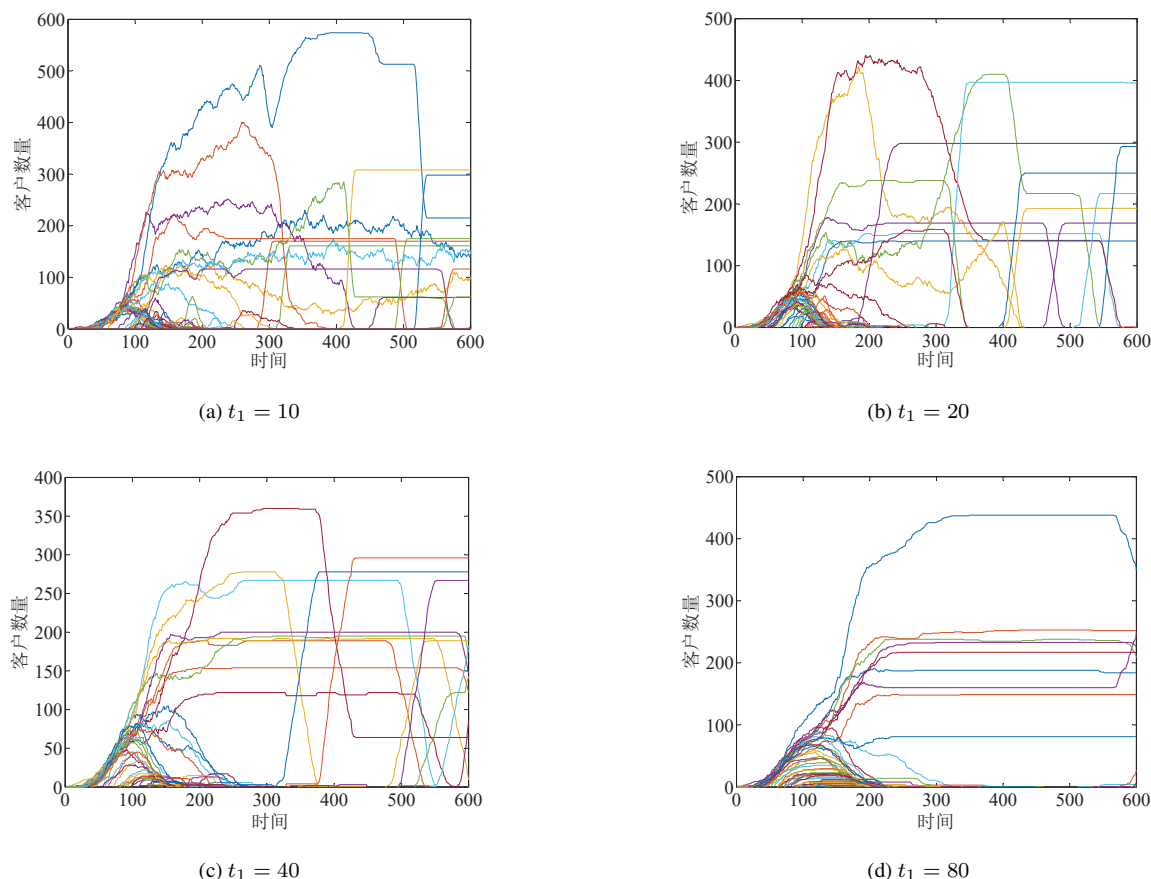


图1 消费者产品更换频率不同时各企业市场份额演化结果

Fig. 1 The market share evolution results of each enterprise when the frequency of consumer product replacement is different

由图1可知, 当消费者对产品的更换频率较快时, 颠覆性创新企业进入市场的可能性更大. 当消费者对产品的更换频率非常慢时($t_1 = 80$), 维持性创新企业形成各自的细分市场, 颠覆性创新企业难以进入市场, 因此, 在这种条件下, 难以发生市场颠覆现象. 随着消费者产品更换频率加快, 企业更容易进入市场, 市场颠覆效果更加明显. 有趣的是, 当消费者产品更换频率非常快时($t_1 = 10$), 在产业发展很长的一段时间, 尽管颠覆性创新企业进入市场并对其它企业进行颠覆的现象很明显, 但市场领先企业的市场份额并未受到太大影响. 这说明在这段时间颠覆性创新企业尚未能够进入领先企业所主导的高端细分市场. 这一仿真结果也说明了, 尽管消费者产品更换频率加快有利于颠覆性创新企业的进入, 但是, 更换频率的加快也使得颠覆性创新企业很容易丧失前期的知识积累, 不利于其形成具有影响力的技术创新成果, 难以与具有多年研发积累经验的维持性创新企业进行竞争. 当然, 仿真结果显示, 当较大的不连续性技术出现时, 市场领导企业的技术能力也会受到摧毁, 其市场份额急剧下降.

图2展示了以上结果对应的赫芬达尔指数等同数的市场演化结果. 由图2可知, 在消费者更换产品频率较慢($t_1 = 80$)的情况下, 在模型仿真的200期以前, 市场竞争比较激烈, 这种市场竞争状态相比于其他情况下维持时间相对较长; 但是, 200期之后, 伴随着产品主导设计的出现和消费者对产品质量识别能力的提高, 市场结构趋于稳定, 并且市场处于相对集中的状态. 在消费者更换产品频率较快的情况下($t_1 = 10$), 市

市场竞争程度相对激烈, 市场集中度的变动幅度也相对较高, 这是因为在这种情况下产品更新换代加速, 企业领导地位和市场占有率在不断变化.

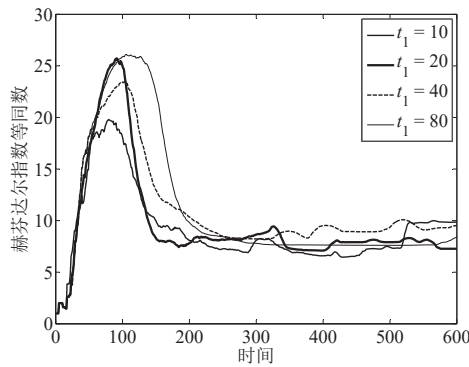


图 2 不同消费者产品更换频率下赫芬达尔指数等同数演化

Fig. 2 Evolution of the reciprocal of the Herfindal index under different consumer product replacement frequencies

结论 1 随着消费者产品更换频率的加快, 颠覆性创新企业进入市场的可能性增大, 市场颠覆效果明显, 市场竞争相对激烈.

结论 1 与 Lee^[20]在分析后发企业进行技术赶超时强调的短周期技术论点不谋而合. 其研究表明, 在技术或产品更新换代频率较高的短周期产品市场, 后发企业不必极大地依赖于在位企业主导的现有技术, 因为在这样的市场中, 在位企业的主导优势更容易被打破, 而且不断出现的新技术总是能给后发企业带来机遇, 这种对现有技术的低依赖性和新技术带来的机遇可以使后进入企业发挥知识创造机制; 另外, 在这样的市场中, 后发企业进入门槛更低, 可以减少与在位企业的技术碰撞, 使用更少的专利费用, 甚至后进入企业可以发挥先发/快发优势, 实现产品差异化, 进而实现较高的盈利能力. Lee 等^[22]进一步指出, 当后进入企业尚未积累一定技术能力时, 技术更新换代的频率加快将成为阻碍后发企业成长与赶超的因素. 通过对比电信行业中实现技术赶超比较成功的中国和韩国与不太成功的巴西和印度, 得到了技术更新频率对后进入企业的双重影响的结果. 本文的仿真模型进一步证实了这一观点.

3.2.2 消费者学习能力

图 1 和图 2 都是消费者学习能力 M 等于 0.99 时的演化结果. 图 3 为当 $M = 0$, 且消费者更换频率系数分别等于 10 和 80 时各企业市场占有率的演化结果.

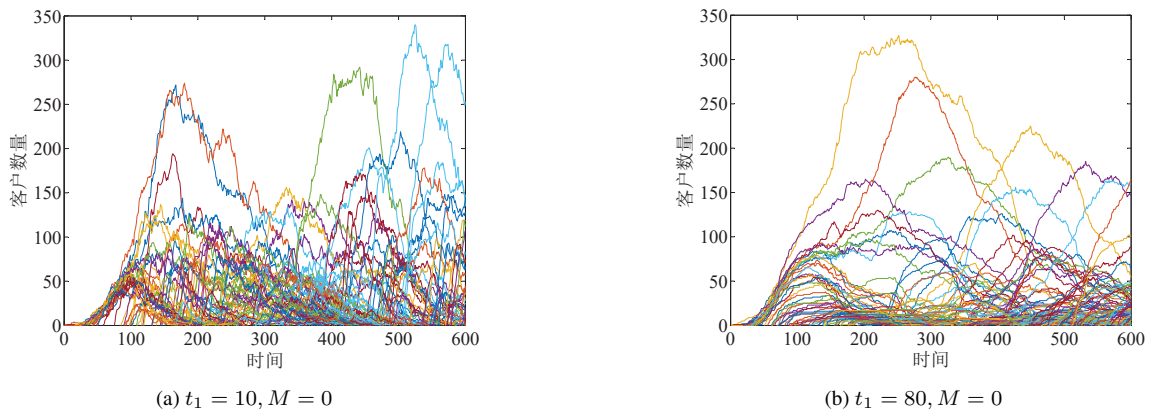


图 3 消费者产品更换频率和消费者学习能力不同时市场份额演化

Fig. 3 Market share evolves when consumer product replacement frequency and consumer learning ability are different

由图 1 和图 3 可知, 当消费者不存在学习能力的(极端)情况下($M = 0$), 在产品购买时会出现“尝试性”的购买决策, 这为性能水平相对较低的颠覆性创新产品提供了市场机会, 此时, 颠覆性创新企业进入市

场机会增加, 市场动态更加显著. 在消费者产品更换频率较快时, 企业进入与退出会更加频繁. 可见, 消费者产品更换频率加快和消费者对产品识别能力的降低对于颠覆性创新企业进入市场并对维持性创新企业进行颠覆创造了机会. 随着消费者学习能力的提高, 产品性能水平较低的颠覆性创新产品被消费者接受的可能性相对下降, 其进入市场的概率和成长的机会大大减少, 此时, 市场环境更利于维持性创新企业的成长.

图4展示了消费者产品更换频率和消费者学习能力不同时赫芬达尔指数等同数的演化规律.

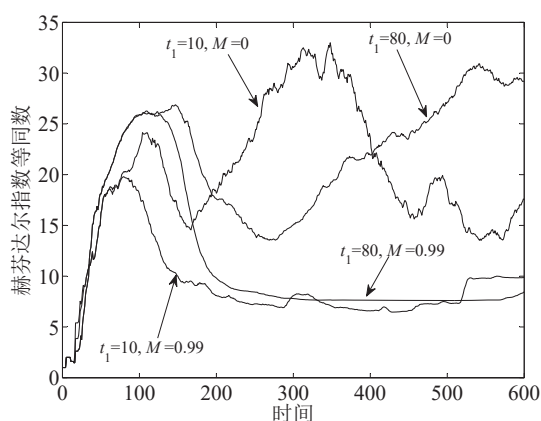


图4 不同消费者产品更换频率和消费者学习能力下赫芬达尔指数等同数演化

Fig.4 Evolution of the reciprocal of the Herfindal index under different consumer product replacement frequency and consumer learning ability

由图4可知, 当消费者学习能力较低时, 市场竞争趋于激烈, 而当消费者学习能力较高时, 可以很好的筛选出适合自己的高质量产品, 因此, 相比于缺乏学习能力的情况, 市场结构相对集中.

结论2 当消费者学习能力较低时, 颠覆性创新企业进入市场概率增加, 产业动态显著. 在消费者产品更换频率较快的市场上, 较低的学习能力会进一步巩固产业颠覆效果.

4 结束语

本文通过构建颠覆性创新与产业演化多主体仿真模型, 考察了消费者产品更换频率和消费者学习能力在颠覆性创新与产业演化中的作用. 研究发现, 随着消费者产品更换频率加快, 颠覆性创新企业进入市场更加容易, 对维持性创新企业的颠覆效果更加显著. 但是, 更换频率的加快也使得颠覆性创新企业很容易丧失前期的知识积累, 不利于其形成具有影响力的技术创新成果, 难以与具有多年研发积累经验的市场领先企业进行竞争. 在消费者的学习能力较弱的情况下, 颠覆性创新企业进入市场的机会增加, 市场动态更加显著. 本文对我国创新驱动政策制定具有以下启示: 1) 从产品更换频率角度讲, 一方面, 在消费者更换频率较快、产品周期较短的产业, 更有利于后发企业颠覆性创新的实现, 技术追赶的可能性大大提高. 但是, 另一方面, 短周期市场中, 原有知识容易过时, 尽管新进入企业借此机会进入市场并获得较高的市场份额, 也容易被其它新进入企业以同样的方式被颠覆. 2) 从消费者学习能力角度讲, 创新驱动政策的制定需要考虑产业的发展阶段. 具体地, 在产业发展的初级阶段, 市场主导技术尚未形成, 消费者学习能力较低, 有利于各企业的发展和技术的进步, 也有利于培育颠覆性创新企业. 当进入成熟阶段, 应通过培训等方式, 提高消费者的学习能力, 引导消费者选择高质量产品, 淘汰落后技术. 这种政策驱动下有利于后发经济体从以成本竞争的生产模式向以质量竞争的高质量发展转变.

参考文献:

- [1] Christensen C M. The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail. Boston: Harvard Business School Press, 1997.

- [2] Christensen C M, Raynor M E. *The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth*. Boston: Harvard Business School Press, 2003.
- [3] 吴贵生, 谢伟. “破坏性创新”与组织响应. 科学学研究, 1997, 12(4): 35–39.
Wu G S, Xie W. Disruptive innovation and organization response. *Studies in Science of Science*, 1997, 12(4): 35–39. (in Chinese)
- [4] 张洪石, 陈劲. 突破性创新的组织模式研究. 科学学研究, 2005, 23(4): 566–571.
Zhang H S, Chen J. The study about organizational mode for radical innovation. *Studies in Science of Science*, 2005, 23(4): 566–571. (in Chinese)
- [5] Schmidt G M. Low-end and high-end encroachment strategies for new products. *International Journal of Innovation Management*, 2004, 8(2): 167–191.
- [6] Ray S, Ray P K. Product innovation for the people's car in an emerging economy. *Technovation*, 2011, 31(5/6): 216–227.
- [7] 程鹏, 柳卸林, 李洋, 等. 本土需求情景下破坏性创新的形成机理研究. 管理科学, 2018, 31(2): 33–44.
Cheng P, Liu X L, Li Y, et al. Research on formation mechanism of disruptive innovation in the context of local demand. *Journal of Management Science*, 2018, 31(2): 33–44. (in Chinese)
- [8] 郁培丽, 石俊国, 窦姗姗. 破坏性创新企业市场进入与策略选择. 软科学, 2013, 27(8): 26–30.
Yu P L, Shi J G, Dou S S. The choices between market entry of disruptive innovation firm and strategy selection. *Soft Science*, 2013, 27(8): 26–30. (in Chinese)
- [9] Govindarajan V, Kopalle P K, Danneels E. The effects of mainstream and emerging customer orientations on radical and disruptive innovations. *Journal of Product Innovation Management*, 2011, 28(S1): 121–132.
- [10] Adner R. When are technologies disruptive: A demand-based view of the emergence of competition. *Strategic Management Journal*, 2002, 23(8): 667–688.
- [11] Adner R, Zemsky P. Disruptive technologies and the emergence of competition. *The RAND Journal of Economics*, 2005, 36(2): 229–254.
- [12] Huang X, Sosis G. Analysis of industry equilibrium in models with sustaining and disruptive technology. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(1): 238–248.
- [13] 吴佩, 陈继祥, 史玉婷. 颠覆性创新产品低端市场进入最优定价研究. 系统管理学报, 2014, 23(1): 149–152.
Wu P, Chen J X, Shi Y T. On optimal pricing for disruptive innovation production's penetration into low-end market. *Journal of Systems & Management*, 2014, 23(1): 149–152. (in Chinese)
- [14] 王天宇, 南国芳, 陈林. 考虑消费者偏好的网络游戏产品动态定价策略. 系统工程学报, 2019, 34(1): 1–11.
Wang T Y, Nan G F, Chen L. Dynamic pricing of online games considering consumer preferences. *Journal of System Engineering*, 2019, 34(1): 1–11. (in Chinese)
- [15] 石俊国, 郁培丽, 孙广生. 颠覆性创新行为、消费者偏好内生与市场绩效. 系统管理学报, 2017, 26(2): 287–294.
Shi J G, Yu P L, Sun G S. Disruptive innovation behavior, endogenous consumer preference and the market performance. *Journal of Systems & Management*, 2017, 26(2): 287–294. (in Chinese)
- [16] 郁培丽, 石俊国, Sadowski B, 等. 考虑技术体制和需求结构下破坏性创新与产业演化. 系统管理学报, 2019, 28(3): 485–493.
Yu P L, Shi J G, Sadowski B, et al. Disruptive innovation and industry evolution considering technological regimes and demand structure. *Journal of Systems & Management*, 2019, 28(3): 485–493. (in Chinese)
- [17] 石俊国, 郁培丽, 向涛. 破坏性创新技术体制与产业演化. 科学学研究, 2016, 34(7): 1096–1102.
Shi J G, Yu P L, Xiang T. Technological regimes of disruptive innovation and industry evolution. *Studies in Science of Science*, 2016, 34(7): 1096–1102. (in Chinese)
- [18] 许明辉, 孙康泰. 考虑战略顾客行为的制造商成本削减及定价策略. 系统工程学报, 2019, 34(2): 238–251.
Xu M H, Sun K T. Optimal cost reduction and pricing strategy for a manufacturer with strategic customers behavior. *Journal of System Engineering*, 2019, 34(2): 238–251. (in Chinese)
- [19] 李海南, 邱晗光. 基于有限理性的需求模型与承诺交付时间研究. 系统工程学报, 2018, 33(4): 453–460.
Li H N, Qiu H G. Bounded-rationality-based demand and promised delivery time. *Journal of System Engineering*, 2018, 33(4): 453–460. (in Chinese)
- [20] Lee K. *Schumpeterian Analysis of Economic Catch-up: Knowledge, Path-creation, and the Middle-income Trap*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [21] Valente M. *Consumer Behavior and Technological Complexity in the Evolution of Markets*. Aalborg: University of Aalborg, 1999.
- [22] Lee K, Malerba F. Catch-up Cycles and Changes in Industrial Leadership: Windows of Opportunity and Responses of Firms and Countries in the Evolution of Sectoral Systems. *Research Policy*, 2017, 46(2): 338–351.

作者简介:

郁培丽(1964—), 女, 河北南宫人, 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向: 创新经济学, 战略管理, Email: plyu@mail.neu.edu.cn;
石俊国(1987—), 男, 山东滨州人, 博士, 讲师. 研究方向: 创新经济学, 产业组织理论, Email: chinabrent@163.com;
姜 坤(1990—), 男, 山东临沂人, 硕士生. 研究方向: 产业组织理论, Email: tendanger@qq.com;
郭艳婷(1990—), 女, 福建福州人, 博士, 助理教授, 研究方向: 创新与战略管理, Email: gyt@xmu.edu.cn.

(上接第 246 页)

- [9] Raubenheimer L, Van D M A J. Bayesian control chart for conconformities. *Quality and Reliability Engineering International*, 2015, 31(8): 1359–1366.
- [10] Kumar N, Chakraborti S. Bayesian monitoring of times between events: The shewhart t(r)-chart. *Journal of Quality Technology*, 2017, 49(2): 136–154.
- [11] Lee J, Wang N, Xu L S, et al. The effect of parameter estimation on upper-sided bernoulli cumulative sum charts. *Quality and Reliability Engineering International*, 2013, 29(5): 639–651.
- [12] Bain L J. *Statistical Analysis of Reliability and Life-Testing Models: Theory and Methods*. New York: Marcel Dekker, 1978.
- [13] Joarder A, Krishna H, Kundu D. Inferences on Weibull parameters with conventional type-I censoring. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2011, 55(1): 1–11.
- [14] Zhang M, Megahed F M, Woodall W H. Exponential CUSUM charts with estimated control limits. *Quality and Reliability Engineering International*, 2014, 30(2): 275–286.

作者简介:

曹程明(1993—), 男, 安徽安庆人, 硕士生, 研究方向: 统计过程控制, Email: 15251836867@163.com;
马义中(1964—), 男, 河南泌阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 质量管理与质量控制, Email: yzma-2004@163.com.

(上接第 255 页)

- [23] Zhou Y, Kou G. Sequential imperfect preventive maintenance model with failure intensity reduction with an application to urban buses. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, 198: 1–11.
- [24] Jiang R. Performance evaluation of seven optimization models of age replacement policy. *Reliability Engineering and System Safety*, 2018(180): 302–311.
- [25] Zhang M, Gaudoin O, Xie M. Degradation-based maintenance decision using stochastic filtering for systems under imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(2): 531–541.
- [26] Burnham K, Anderson D. Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research*, 2004, 33(2): 261–304.

作者简介:

周 瑜(1984—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 研究方向: 商务智能, 系统可靠性, 维修理论, Email: zhouyu738@126.com;
寇 纲(1975—), 男, 江西上饶人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 商务智能, 信用评分, Email: kougang@swufe.edu.cn;
白 杨(1994—), 女, 蒙古族, 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士生, 研究方向: 维修理论, Email: nmgdxby@163.com;
尔古打机(1976—), 男, 彝族, 四川越西人, 博士, 教授, 研究方向: 多目标决策, 应急管理, Email: ergudaji@163.com.