

文章编号: 1001-0920(2004)05-0520-05

微粒群优化算法在相关新产品组合投入的应用

万福才^{1,2}, 汪定伟², 李彦平¹

(1. 沈阳大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110044; 2 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 引入新产品最佳投入期和相关收益的概念, 在产品生命周期量化描述前提下, 提出一个非线性半无限规划的相关新产品组合投入模型, 并用微粒群优化算法(PSO)求解. 仿真实例表明, 微粒群优化算法在求解组合优化问题时简便且易于实现, 具有很强的实用性.

关键词: 新产品投入计划; 半无限规划; 组合投入; 微粒群优化

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Particls swarm aptimization of correlative product combinatorial introduction model

WAN Fu-cai^{1,2}, WANG Ding-w ei², LI Yan-ping¹

(1. College of Infomation Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2 School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China Correspondent: WAN Fu-cai, Email: wfcmail@mail sy. ln. cn)

Abstract: The conceptions of optimal introduction period and correlative profit are introduced. Based on the quantitative description of product life cycle, a non-linear semi-infinite programming model of new product introduction is proposed. The new model is solved through improved particle swarm optimization (PSO) algorithm. Optimal solution of a given example shows that particle swarm optimization has excellent performance and is simple for implement in solving combined optimization problems.

Key words: new product introduction planning; semi-infinite programming; combinatorial introduction; particle swarm optimization

1 引 言

微粒群优化算法(PSO)是一种基于群智能方法的演化计算技术, 由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出^[1,2]. 它来源于一个简化社会模型的模拟. 许多学者构造了计算机模拟组织运动算法, 如鸟群和鱼群^[3,4]. 这些模拟很大程度上依赖于个体内部的距离调整, 也就是说, 这种群体的同步被认为是群体努力保持最优距离的结果. 理论上, 至少在迷失过程中, 群体中的个体成员得益于群体中其他个体的发

现和以前的经验. 这种优势是具有决定性的, 超过了个体之间觅食竞争所带来的不利, 而不管食物资源以什么方式分布^[5,6]. PSO 能够求解大多数优化问题, 如多目标优化, 模式识别, 信号处理以及工作调度等. 本文将利用该算法求解组合优化问题.

目前已有很多新产品开发的研究方法. 早期的研究主要针对一些特殊产品的开发和引入^[7], 缺乏统计和有效分析, 此后有学者开始研究大量成功和不成功的例子^[8,9]. 经研究发现, 新产品的拖期投入

收稿日期: 2003-05-05; 修回日期: 2003-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70171056; 60274027).

作者简介: 万福才(1967—), 男, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士生, 从事系统建模与优化、新产品投入等研究; 汪定伟(1948—), 男, 江西彭泽人, 教授, 博士生导师, 从事建模与优化、生产计划与调度方法等研究.

会造成至少 5-25% 的产品收益损失^[10], 并且会增加投入成本, 降低产品的市场份额及边际效益^[11,12]; 而过早投入, 又会造成资金积压。电子商务的发展, 使得产品生命周期缩短, 透明度增加, 许多产品同时在一个网站销售时, 就要考虑它们之间的相关性及相关收益。如彩电和 DVD, 电子图书和相应的阅读器等互补产品, 共同投入收益会相互促进; 而另一些互为替代产品, 如 DVD 和 VCD, 电子图书和印刷图书等, 共存市场时, 就会削弱彼此销售额。所以, 制定新产品投入计划时, 产品的投入时间和相关性是企业需要考虑的关键因素之一。

文献[13]提出了一个多任务相关的产品开发和投入模型; 文献[14]提出一个 0-1 半无限规划模型, 以最小成本选择新产品投入来满足企业的目标收益; 最近, 汪定伟等^[15]提出一个带有资源约束的新产品投入计划模型, 用来确定产品的投入时间及投放量。本文把焦点放在带有最佳投入期的相关产品投入上, 建立了新产品组合投入模型, 并设计了针对该模型的 PSO 算法。

2 基本 PSO 算法

假设在一个 D 维的目标搜索空间中, 有 m 个微粒组成一个群落, 其中第 i 个微粒表示为一个 D 维的向量 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, 即第 i 个微粒在 D 维的搜索空间中的位置是 X_i 。将 X_i 带入一个目标函数就可以计算出其评价价值, 再根据评价价值的大小衡量 X_i 的优劣。第 i 个微粒的“飞翔”速度也是一个 D 维向量, 记为 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}\}$ 。记第 i 个微粒迄今为止搜索到的最优位置为 $P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}\}$, 整个微粒群迄今为止搜索到的最优位置为 $P_g = \{p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD}\}$ 。

PSO 算法^[1]采用下列公式对微粒操作:

$$v_{id} = v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}), \quad (1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2)$$

其中: 学习因子 c_1, c_2 是非负常数; r_1, r_2 为介于 $[0, 1]$ 之间的随机数; $v_{id} \in [v_{min}, v_{max}]$, v_{min}, v_{max} 为常数, 由用户设定。

迭代中止条件根据具体问题一般选为最大迭代次数或(和)微粒群迄今为止搜索到的最优位置满足预定最小适应阈值。因为 P_g 是整个微粒群的最优位置, 所以上述 PSO 算法当 $r_1 = 0$ 时被称为全局版 PSO; 当 $r_2 = 0$ 时又被称为局部版 PSO。局部版 PSO 收敛速度快, 但有时会陷入局部最优; 而全局版 PSO 收敛速度稍慢, 但相对而言不易陷入局部最

优。

文献[3]对式(1)作了如下的改动:

$$v_{id} = w v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}), \quad (3)$$

其中 w 是非负数, 称为惯性因子。

而文献[4]对式(2)作了以下改动:

$$x_{id} = x_{id} + \delta v_{id}, \quad (4)$$

其中 δ 为约束因子, 目的是控制速度的权重。

目前, 也有许多学者把方程(3), (4) 视作基本的 PSO 算法。基本 PSO 算法需要用户确定的参数并不多, 而且操作简单, 故使用起来比较方便。但它的缺点是易陷入局部极小点, 搜索精度不高, 因此人们对其作了各种各样的改进。

3 新产品投入模型

3.1 产品收益曲线

产品的生命周期分为 4 个阶段, 即投入期, 增长期, 成熟期和衰退期。对于产品 i , 其收益函数可表达为(如图 1 所示)。

$$f_i(t) = a_i t^2 e^{-t/b_i}, t \in [0, T], i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

其中 a_i 和 b_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为待定参数。给定峰值 p_i 和达到峰值时间 r_i , 便可确定参数 a_i 和 b_i 如下:

$$a_i = p_i e^2 / 4b_i^2, b_i = p_i / 2$$

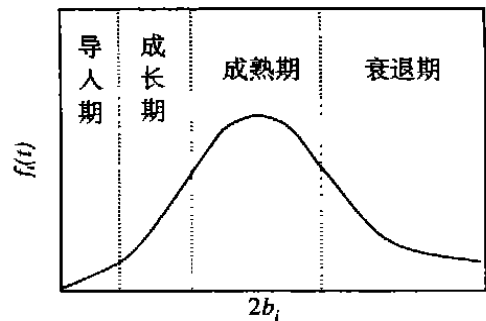


图 1 新产品的收益曲线

3.2 新产品组和投入模型

设有 n 种新产品待投入, 第 i 种产品 ($i = 1, 2, \dots, n$) 的投入成本为 c_i , 收益曲线为 $f_i(t)$, 最佳投入期为 $[d_{i1}, d_{i2}]$ 。如果产品 i 在此之前投入, 则会有单位时间的提前惩罚率 α (可以理解为投资贴现率); 在此之后投入, 则会有单位时间的拖期惩罚率 β , 产品之间的相关系数(相关收益率)为 r_{ij} ($|r_{ij}| < 1$)。当 $r_{ij} > 0$ 时, 表示产品 i, j 是互补产品; $r_{ij} = 0$ 时, 表示两个产品不相关; $r_{ij} < 0$ 时, 表示产品 i, j 是互为替代产品, 且有 $r_{ji} = r_{ij}$ 。

如果计划期为 T , 即 t 的变化区间为 $[1, T]$, 定义整型变量 x_i 为产品 i 的投入时间, 即

$$x_i = \begin{cases} N_i & [1, T], \text{产品 } i \text{ 在时刻 } N_i \text{ 投入;} \\ 0 & \text{产品 } i \text{ 不在计划期内投入} \end{cases} \quad (6)$$

并定义 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 及符号函数

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0; \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

考虑到拖期惩罚, 产品 i 的实际收益曲线为:

$$f_{ti}(t) = [1 - \beta(x_i - d_{i2})^+] f_i(t - x_i), \quad (8)$$

其中 $(x - y)^+ = \text{sgn}(x - y)$. 令

$$S r(x_i, x_j, t) = \text{sgn}(x_i) \text{sgn}(x_j) \text{sgn}(t - x_i) \text{sgn}(t - x_j), \quad (9)$$

则产品间相关收益为:

$$f r(t, X) = \sum_{i < j} S r(x_i, x_j, t) r_{ij} (f_{ti}(t) + f_{tj}(t)). \quad (10)$$

企业的目标收益曲线为 $S(t)$, 现有产品的收益曲线为 $p(t)$, 其中 $S(t) = s(1 + r)^t$ (s 为当年收益目标, r 为增长率).

由于开始投入时间定在现有产品的成熟期, 于是现有产品的收益曲线可表示为:

$$p(t) = a \exp(-t^2/2b^2) / b \sqrt{2\pi}$$

如果用 p 表示现有产品当年利润额, q 表示 T 年内总利润额的预测值, 则很容易得出:

$$a = 2q, b = 2q/p \sqrt{2\pi}$$

令 $g(t) = S(t) - p(t)$, 并考虑到提前惩罚, 则组合投入模型为

$$\min \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_i) [1 + \alpha(d_{i1} - x_i)^+] c_i, \quad (11)$$

$$\text{s t } \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_i) f_{ti}(t) + f r(t, X) - g(t), \quad \forall t \in [1, T]; \quad (12)$$

$$x_i \text{ 为 } 0 \text{ 或 } [1, T] \text{ 间的整数,} \\ i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式(11) ~ (13) 是一个非线性的半无限规划模型 即当 t 在区间 $[1, T]$ 中取无限个值时, 式(12) 有无限个约束 文献[16] 给出的非精确法提供了一条处理无限约束的途径; 文献[10] 则介绍了一种用免疫遗传算法解非线性半无限规划的方法

4 组合投入模型的 PSO 算法结构

4.1 编码方法

本问题中编码方法采用投入时间向量作为微粒表达方式, 即用 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 代表一个微粒 其中 x_i 由式(6) 定义, 且 x_i 允许重复

4.2 评价函数

采用动态标定方法 设 F_{\max} 为本代微粒中目标函数的最大值, 将目标函数转化为:

$$z_{\max} = \max \left(F_{\max} - \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_i) [1 + \alpha(d_{i1} - x_i)^+] c_i \right)$$

为满足约束, 取罚函数

$$h(X) = \min_{t \in [0, T]} \left(\sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_i) f_{ti}(t) + f r(t, X) - g(t) \right),$$

则评价函数为

$$F(X) = \{z_{\max} + M h(X), 0\}. \quad (14)$$

其中 M 为一个随迭代次数变化的参数: 迭代开始时 M 较小, 即对不可行解的惩罚较小, 可以保证微粒的多样性; 随着迭代数的增加, M 逐渐增大, 即对不可行解的惩罚加大, 以保证算法向最优解方向收敛

4.3 微粒运动公式

本算法中的微粒向量是由整数构成的, 所以采用下列公式对微粒操作:

$$v_{id} = v_{id} + \begin{cases} \text{Int}(c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id})), & r_0 < c_0; \\ \text{Int}(\text{Random}(0, T)), & r_0 > c_0; \end{cases} \quad (15)$$

$$x_{id} = \text{Mod}(|x_{id} + v_{id}|). \quad (16)$$

其中: c_0 为 $[0, 1]$ 之间的常数, 用来确定采取传统运动或是随机扰动; 学习因子 c_1, c_2 是非负常数; r_0, r_1, r_2 为介于 $[0, 1]$ 之间的随机数; $\text{Int}(\cdot)$ 为取整函数; $\text{Random}(0, T)$ 为取 0 到 T 之间的随机数, 是一个随机扰动, 能起到遗传算法中变异的作用; 整数 T 表示计划期; $\text{Mod}(\cdot)$ 表示以 T 为模求余数, 其目的是防止微粒向量元素超出边界; 函数中的绝对值是保证非负性

式(15) 的含义为: 当产生的随机数小于 c_0 时进行如下操作:

$$v_{id} = v_{id} + \text{Int}(c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id})), \quad (17)$$

否则

$$v_{id} = v_{id} + \text{Int}(\text{Random}(0, T)). \quad (18)$$

4.4 最优选择与终止准则

保存历史最好解, 指定最大代数作为停止准则 即选一个大的正整数 PG 为最大的代数, 若迭代指标 k 大于 PG , 则停止迭代并输出历史最好解作为最终的结果

5 组合投入模型的 PSO 算法

算法步骤如下:

Step 1: 设置终止代数 PG, 微粒群规模 PS, 学习因子 c_0, c_1, c_2 ; 置 $k = 0$; 随机生成初始微粒群 $POP(0) = \{X^1, X^2, \dots, X^m\}$; 设置初始历史最好解 $X(*)$ 以及初始历史最优目标值 $F(*)$.

Step 2: 计算每个微粒的评价函数值, 经过比较, 得到微粒自身经历过的最好位置 P_i 以及全局经历过的最好位置 P_g .

Step 3: 按运动公式(15) 进行 PSO 操作

Step 4: 如果 $k < PG, k = k + 1$; 否则, 结束计算, 输出全局历史最好解

6 仿真实例

设 15 个待投入产品, 考虑在未来的 12 个季度中投入 通过市场预测得到如表 1 的结果, 为计算方便, 所有数值均不计单位

表 1 待投入新产品的参数

序号	峰值 $4a_i b_i^2 e^2$	峰值时间 $2b_i$	最早投入 时间 d_{i1}	最迟投入 时间 d_{i2}	投入成本 c_i
1	185	2.6	1	5	80.0
2	150	5.0	3	6	180.0
3	175	2.0	2	8	147.5
4	156	1.5	1	4	85.0
5	105	2.5	6	9	40.0
6	120	1.3	4	8	50.0
7	180	2.6	3	7	70.5
8	195	1.5	8	12	50.0
9	85	4.4	2	8	92.0
10	50	2.2	4	9	45.0
11	125	1.8	1	6	60.0
12	165	2.3	2	6	88.0
13	155	1.5	4	9	76.6
14	175	1.1	5	10	65.0
15	185	2.5	3	8	100.0

现有产品投入当季度的利润额为 180, T 时间内总利润额的预测值为 1 000; 企业当季度的目标收益为 180, 季度增长率为 0.1

去掉全是 0 的行和列, 简化后的产品相关系数矩阵如表 2 所示

表 2 产品相关系数阵

产品序号	1	4	5	9	15
1	0	0.2	-0.15	-0.1	0.2
4	0.2	0	-0.1	-0.12	0.2
5	-0.15	-0.1	0	0.2	-0.1
9	-0.1	-0.12	0.2	0	-0.1
15	0.2	0.2	-0.1	-0.1	0

设提前惩罚系数 $\alpha = 0.1$, 拖期惩罚系数 $\beta =$

0.01. 给定 $PG = 100, c_0 = 0.9, c_1 = c_2 = 2$, 及微粒群规模 $PS = 80$, 经过几次运算, 得到如表 3 的最好解

表 3 计算结果

最好解	最优目标值
5 0 0 1 0 11 7 10 0 0 1 8 0 0 3	583.50

计算结果显示: 仅一次计算不一定能够得到满意解, 而经过多次计算得到的满意解不劣于传统遗传算法的计算结果, 且由于算法简单, 其计算速度要比遗传算法快得多; 另外, 在考虑了产品相关系数后, 只有两个产品在最佳投入期之外投入, 产品 5 和 9 因为与其他几个产品是互为替代产品, 所以被淘汰 而由于产品 1, 4, 15 是互补产品, 收益相互促进, 使得在满足企业收益目标的前提下, 总的投入成本降低 由此可见, 产品的最佳投入期和相关系数都是新产品投入需要考虑的重要因素

7 结 论

根据大量仿真实验获得如下几点结论:

1) 提出一种考虑产品相关收益及最佳投入期的新产品投入计划方法, 该方法尤其在当今产品生命周期不断缩短, 产品相关性日益加强的市场经济条件下具有较强的实用性;

2) 针对该模型设计的 PSO 算法能够处理大规模非线性半无限规划, 并且计算速度优于遗传算法;

3) PSO 算法对求解组合优化问题是一个简单且有效的方法

参考文献(References):

[1] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. Proc the 1995 IEEE Int Conf on Neural Networks [C]. Perth, 1995. 1942-1948

[2] 谢小峰, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述[J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 129-134
(Xie X F, Zhang W J, Yang Z L. Overview of particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 129-134.)

[3] Reynolds C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model[J]. Comput Graph, 1987, 21(4): 25-34

[4] Heppner F, Grenander U. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks[A]. The Ubiquity of Chaos [C]. Washington DC: AAAS, 1990

[5] Brandstatter B, Baumgartner U. Particle swarm optimization mass-spring system analogon [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2002, 38(2): 997-1000

- [6] 李爱国, 覃征, 鲍复民, 等. 粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(21): 1-3
(Li A G, Qin Z, Bao F M, et al Particle swarm optimization algorithms[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 38(21): 1-3)
- [7] Morison E. *Men, Machines and Modern Times* [M]. Cambridge: MIT Press, 1966 17-24
- [8] Zirger B J, Maidique M A. A model of product development: An empirical test [J]. *Management Science*, 1990, 36(7): 867-883
- [9] Ali A, Kalwani M U, Kovenock D. Selecting product development projects: Pioneering versus incremental innovation strategies [J]. *Management Science*, 1993, 39(3): 255-274
- [10] Hendricks K B, Singhal V. Delays in new product introductions and the market value of the firm: The consequences of being late to the market [J]. *Management Science*, 1997, 43(4): 422-436
- [11] Nevens T M, Summe G L, Uttl B. Commercializing technology: What the best companies do [J]. *Harvard Business Review*, 1990, 68(3): 154-163
- [12] Datar S, Jordan C, Kekre S, et al New product development structures and time-to-market [J]. *Management Science*, 1997, 43(2): 452-464
- [13] Glennan T K, Marschak T, Summers R. Issues in the choice of development policies [A]. *Strategy for R & D, A Rand Corporation Research Study* [C]. New York: Springer-Verlag, 1967. 13-48
- [14] 万福才, 汪定伟. 基于 0-1 半无限规划的新产品开发计划方法[J]. 管理科学学报, 2002, 5(4): 28-33
(Wan F C, Wang D W. 0-1 Semi-infinite programming approach for new product development planning [J]. *J of Management Sciences*, 2002, 5(4): 28-33)
- [15] 汪定伟, 于海斌. 免疫遗传算法及在新产品投入计划中的应用[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 725-730
(Wang D W, Yu H B. Immune-genetic algorithm and its application to introduction planning of new products [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(5): 725-730)
- [16] Fang S C, Wu S Y. An inexact approach to solving linear semi-infinite programming problems [J]. *Optimization*, 1994, 28(8): 291-299

(上接第 519 页)

参考文献(References):

- [1] Tsay A A, Nahmias S, Agrawal N. Modeling supply chain contracts: A review [A]. *Quantitative Models for Supply Chain Management* [C]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999 299-336
- [2] 赵天智, 金以慧. 供需链协调控制机制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(10): 123-126
(Zhao T Z, Jin Y H. Coordination mechanism of supply chain management [J]. *J of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2001, 41(10): 123-126)
- [3] Lariviere M. Supply chain contracting and coordination with stochastic demand [A]. *Quantitative Models for Supply Chain Management* [C]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999 233-268
- [4] Lariviere M, Porteus E. Selling to the newsvendor: An analysis of price-only contracts [J]. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2001, 3(4): 293-305
- [5] Corbett C, Tang C. Designing supply contracts: Contract type and information asymmetry [A]. *Quantitative Models for Supply Chain Management* [C]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999 269-297
- [6] Ha A Y. Supplier-buyer contracting: A symmetric cost information and cut-off level policy for buyer participation [J]. *Naval Research Logistics*, 2001, 48(1): 41-64
- [7] Lau A, Lau H. Some two-echelon style-goods inventory models with asymmetric information [J]. *European J of Operational Research*, 2001, 134(1): 29-42
- [8] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海三联书店/上海人民出版社, 1996
- [9] Tirole J. *The Theory of Industrial Organization* [M]. Cambridge: MIT Press, 1988 169-203