

基于 NSGA-II 的模糊多目标产品开发项目调度*

张连营, 查 鸿

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 针对具有模糊持续时间的项目开发项目工期-成本均衡调度问题, 进一步考虑了模糊环境下决策者风险偏好(可接受风险水平与乐观指数)对工期-成本均衡的影响, 并运用 NSGA-II 算法结合项目实例, 对该问题进行了求解和分析。研究表明, 通过调整决策者的可接受风险水平或乐观指数, 可以获得一系列不同的 Pareto 解, 以便决策者从中选择其偏好的调度方案。

关键词: 项目调度; 模糊; 工期-成本均衡; 风险偏好; NSGA-II

中图分类号: TP301 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)01-0064-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.015

NSGA-II based fuzzy multi-object product development project scheduling approach

ZHANG Lian-ying, ZHA Hong

(Dept. of Management & Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the time and cost tradeoff problem in product development project scheduling with fuzzy durations, this paper considered the effect of decision-makers' risk preference on time and cost tradeoff in fuzzy environment further, and it introduced NSGA-II to solve the problem in project example. The results show that by means of adjusting the values of risk acceptance level and optimism index, different Pareto sets are obtained, from which the decision can choose the preferred scheduling alternative.

Key words: project scheduling; fuzzy; time-cost tradeoff; risk preference; NSGA-II

产品开发已成为创新型制造企业生存和发展的关键, 需要实施科学合理的项目管理。而在产品开发项目管理中, 工期与成本是一对相互竞争的重要控制指标, 因此研究以工期和成本均衡为目标的产品开发项目调度问题具有重要意义^[1]。

一些学者针对确定条件下的产品开发项目调度问题进行了研究^[2,3]。然而很多产品开发项目中各活动的持续时间很难被准确预测, 只能由专家根据经验估计出模糊的持续时间值。在此情况下, 产品开发项目调度问题本质上隶属于模糊资源受限的项目调度问题 (fuzzy resource-constrained project scheduling problem)。Maciej 等人^[4]运用启发式算法求解了以工期为优化目标的模糊项目调度问题; Tarun 等人^[5]则进一步考虑到不确定条件下决策者可接受风险水平(α)的影响, 并提出一种新的优先规则, 以求解工期最小的调度问题。王宏^[6]则探讨了给定模糊交货期条件下延期风险最小的调度问题; Wang^[7]则在研究中进一步考虑到决策者乐观指数(β)的影响, 运用 Beam Search 算法求解了项目延期风险最小的产品开发项目调度问题。以上研究只涉及到工期及相关目标的优化, 并没有从工期与成本均衡的角度考虑项目调度问题。刘士新^[8]进一步探讨了模糊资源受限项目调度问题中的多目标优化问题, 涉及到了项目工期和成本的均衡。但是上述研究中并未考虑到在决策者可接受风险水平(α)和乐观指数(β)影响下 Pareto 解的可能变化, 所得 Pareto 解不能反映出决策者的风险偏好。

针对上述研究的不足, 本文进一步考虑决策者风险偏好(α 和 β)的影响, 探讨了模糊条件下以工期和成本均衡为目标的产品开发项目调度问题, 并运用经典多目标算法 NSGA-II, 结合具体产品开发项目算例对该问题进行了求解和分析。

1 模糊多目标产品开发项目调度问题

产品开发项目调度问题涉及一个项目网络 $G = (V, E)$, 网络中节点 V 和箭线 E 分别代表项目中各活动及活动间紧前关系。在该网络中, 共有 J 个节点, 其中节点 0 和 1 各自代表项目唯一开始和结束的虚活动。完成项目需要 K 种可更新资源, 其中资源 k ($k \in K$) 的容量为 R_k 。各活动具有一个或多个执行模式 M_j , 当活动 j 以模式 m ($m \in M_j$) 执行时, 持续时间为三角模糊数 \tilde{d}_{jm} , 单位时间需要资源 k 的量为 r_{jmk} 。在考虑可接受风险水平(α)和决策者乐观指数(β)的基础上, 本文从工期 \tilde{T} 和成本 \tilde{C} 均衡的角度研究了产品开发项目调度问题。

1) 模糊工期 \tilde{T} 的计算

$$\tilde{T} = \tilde{es}_J \quad (1)$$

由式(1)可知, \tilde{T} 为项目网络中虚活动 J 的最早开始时间 \tilde{es}_J 。当 $j=1$ 时, $\tilde{es}_j = [0, 0, 0]$; 当 $j \neq 1$ 时, 活动 j 的最早开始时间 \tilde{es}_j 为

$$\tilde{es}_j = \min \{ \tilde{t}_j \} \quad (2)$$

收稿日期: 2012-05-18; 修回日期: 2012-06-26 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70871088)

作者简介: 张连营(1965-), 男, 河北景县人, 教授, 博士, 主要研究方向为工程项目管理、工程项目多目标综合优化(tjzly126@126.com); 查鸿(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为不确定条件下的项目调度与智能优化算法。

$$\text{s. t. } \max \{ \tilde{t}_j, \rho s_j + \tilde{d}_{im} \} = \tilde{t}_j \quad (i, j) \in E \quad (3)$$

$$\sum_{i,j} \tilde{t}_j + \tilde{d}_{jm} \sum_{m \in M_j} r_{jmk} \leq R_k \quad (4)$$

式(2)~(4)表明 ρs_j 是由活动 j 的紧前约束关系和资源约束条件共同决定的。其中, 在项目网络中 i 为 j 的紧前活动, 则必满足 $\tilde{e}s_j > \tilde{e}s_i + \tilde{d}_{im}$ 。另外, 活动 j 在内执行还必须符合资源约束。在模糊产品开发项目调度过程中, 涉及到模糊时序参数的比较。本文分别采用强比较准则和弱比较准则对模糊时间参数进行比较。

a) 强比较准则。对于模糊数 \tilde{A} 和 \tilde{B} , $a_\alpha^+, a_\alpha^-, b_\alpha^+$ 和 b_α^- 依次为 \tilde{A} 和 \tilde{B} 在 α -水平下的截集上下界。当且仅当 $\forall \alpha \in [0, 1]$, $a_\alpha^+ \geq b_\alpha^+$ 且 $a_\alpha^- \geq b_\alpha^-$, 则称 \tilde{A} 严格大于或等于 \tilde{B} , 记做 $\tilde{A} >> = \tilde{B}$ 。

b) 弱比较准则。对于不能用强比较准则进行比较的情形, 本文采用 Chen 等人^[9] 所提出的弱比较准则进行比较。如图 1 所示, 对于模糊数 \tilde{A} 和 \tilde{B} , 当 $0 \leq \alpha \leq k \leq 1$ 时, a_k^+, a_k^-, b_k^+ 和 b_k^- 依次为 \tilde{A} 和 \tilde{B} 在 k -水平下的截集上下界。

在该弱比较准则中, 令

$$D^L(\tilde{A}, \tilde{B}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n (a_k^- - b_k^-) \quad (5)$$

$$D^R(\tilde{A}, \tilde{B}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n (a_k^+ - b_k^+) \quad (6)$$

$$D(\tilde{A}, \tilde{B}) = \beta \cdot D^L(\tilde{A}, \tilde{B}) + (1 - \beta) \times D^R(\tilde{A}, \tilde{B}) \quad (7)$$

该准则考虑了决策者可接受风险水平 (α) 和乐观指数 (β) 对模糊数比较的影响。在式(7)中, $\beta \in [0, 1]$, 如果决策者越乐观, 则 β 值越大, 比较时越偏重左边的比较结果 $D^L(\tilde{A}, \tilde{B})$; 反之 β 值越大, 比较时越偏重右边的比较结果 $D^R(\tilde{A}, \tilde{B})$ 。根据上述准则可知, 当 $D(\tilde{A}, \tilde{B}) \geq 0$ 时, $\tilde{A} \geq \tilde{B}$; 而当 $D(\tilde{A}, \tilde{B}) < 0$ 时, $\tilde{A} < \tilde{B}$ 。

2) 模糊成本 \tilde{C} 的计算

$$\tilde{C} = \sum_{j=1}^J \sum_{m \in M_j} \sum_{k=1}^K c_k r_{jmk} \tilde{d}_{jm} x_{jm} + c_{in} \tilde{T} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \sum_{m \in M_j} x_{jm} = 1 \quad (9)$$

由式(8)可知, \tilde{C} 由资源使用造成的直接成本和与 \tilde{T} 相关的间接成本构成。其中 c_k 为资源 k 的价格, c_{in} 为间接费率。 X_{jm} 为 0-1 决策变量, 活动 j 有且仅有一种执行模式, 当 $X_{jm} = 1$ 时, 表示活动 j 以 m 模式执行; 反之则不以 m 模式执行。

2 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法在 2002 年由 Deb 等人^[10] 提出, 是一种性能优异、应用广泛的多目标进化算法。该算法采用非劣排序、拥挤距离比较和种群合并机制, 使种群向多目标优化问题的 Pareto 前沿移动。NSGA-II 算法包括以下七个主要步骤:

a) 种群初始化。随机生成种群规模为 m 的种群 P 。种群中个体采用双链表结构 $I = (\lambda, \pi)$ 进行编码^[11], 如图 2 所示。其中, 链表 $\lambda = (j_1, \dots, j_j)$ 表示一组可行的活动列表, 对应着各活动在调度中的先后顺序; 而链表 $\pi = (m_1, \dots, m_j)$ 则依次对应 λ 中各活动的施工模式。

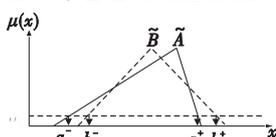


图 1 \tilde{A} 和 \tilde{B} 在 k 下的截集

1	2	4	3	8	5	7	6	11	9	10	12
1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1

图 2 个体的双链表编码结构

b) 非劣排序和拥挤距离计算。本文采用串行进度生成机制 (SGS)^[12] 对种群中个体解码, 得到 \tilde{T} , 并计算出 \tilde{C} 。根据重心法^[13] 对 \tilde{T} 和 \tilde{C} 去模糊化, 如式(10)所示。

$$x^* = \frac{\beta \int_{V\alpha} (x \mu_A^L) dx + (1 - \beta) \int_{V\alpha} (x \mu_A^R) dx}{\beta \int_{V\alpha} (\mu_A^L) dx + (1 - \beta) \int_{V\alpha} (\mu_A^R) dx} \quad (10)$$

$$V\alpha = \{ x \in V | \mu_A(x) \geq \alpha \}$$

在去模糊化的目标空间中对 P 中个体进行非劣排序和拥挤距离计算。种群中个体按从高到低的顺序进行非劣排序, 流程为: (a) 从 P 中找出非劣个体, 保存至非劣层级 F_R 中, $R = 1$; (b) 若 P 中剩余个体数为零, 则终止排序, 反之则转 (c); (c) 继续从剩余个体中找出非劣个体, 放入 F_R 中, $R = R + 1$, 转 (b)。拥挤距离计算则是用于估计个体在目标函数空间的密集程度, 对于个体 I 而言, 对于处于相同非劣层级的个体按各目标值进行排序, 计算出两个紧邻个体在构成立方体的平均边长, 然后将个体 I 在各目标下的平均边长求和即得到拥挤距离 $CD(I)$; 而当个体的某个目标函数值为最大或最小值时, $CD(I)$ 被定义为 Inf 。

c) 锦标赛选择。随机选择 P 中两个个体进行比较, 若两个个体处于不同非劣层级, 非劣层级高的个体保留至子代种群 Q 中; 反之, 拥挤距离大的个体保留至 Q 。反复执行此过程, 直至达到设定的规模为止。

d) 交叉操作。随机从 Q 中选择父代个体以交叉概率 P_c 两两进行交叉操作。当父代个体 $I^F = (\lambda^F, \pi^F)$ 和 $I^M = (\lambda^M, \pi^M)$ 发生交叉时, 个体的活动列表和模式列表会先后进行交叉操作, 产生子代个体 $I^S = (\lambda^S, \pi^S)$ 和 $I^D = (\lambda^D, \pi^D)$ 。在 λ^F 和 λ^M 进行交叉时, 随机产生一个正整数 q_{coss1} ($1 \leq q_{\text{coss1}} < J$), λ^S 和 λ^D 再从 1 至 q_{coss1} 的基因位置分别继承 λ^F 和 λ^M 上的等位基因, 剩余基因则分别按其在 λ^M 和 λ^F 上的顺序依次填入。随后 λ^F 和 λ^M 进行交叉, 随机产生一个正整数 q_{coss2} ($1 \leq q_{\text{coss2}} < J$), π^S 和 π^D 再从 1 至 q_{coss2} 的基因位置分别按 π^F 和 π^D 为各活动分配执行模式, 其余基因位置上的执行模式则分别参照 π^M 和 π^F 分配执行模式^[14]。

e) 变异操作。随机从 Q 中选择个体以变异概率 P_m 进行变异操作。在对个体 $I = (\lambda, \pi)$ 进行变异操作时, 随机生成一个正整数 q_{mut1} ($1 \leq q_{\text{mut1}} < J$)。若将 λ 中 q_{mut1} 和 $q_{\text{mut1}} + 1$ 位置上基因互换后仍满足紧前关系, 则交换 q_{mut1} 和 $q_{\text{mut1}} + 1$ 位置上的基因; 反之则生成新的 q_{mut1} 以保证变异后的活动列表依然可行。同时, 在对 π 进行变异操作时, 则为 q_{mut1} 位置上的基因分配一个不同的执行模式^[14]。

f) 种群合并。形成种群 $N = P \cup Q$, 将 N 中个体按非劣层级从高到低分层, 同层之间则按照拥挤距离从大到小排序。选择其中最好的 m 个个体保留至新的种群 P 中。

g) 终止判定。在该算法中, 当达到设定的进化代数 n 时, 运算终止, 输出结果; 否则, 转步骤 b) 继续迭代。

3 算例分析

1) 产品开发项目算例。某机电产品开发项目共包括 12 个活动, 完成这些活动需要调用机械工程师和电器工程师。而在该项目中, 每天能调用的机械和电器工程师的数量又是有限的, 其中机械工程师不超过 $R_1 = 70$ (人/天), 机电工程师不超过 $R_2 = 50$ (人/天)。项目中各活动在不同模式下对应的资源需求量与模糊持续时间如表 1 所示。

表 1 某机电产品开发项目中各活动的不同执行模式数据

j	紧后活动	M_j	持续时间	R_1	R_2	j	紧后活动	M_j	持续时间	R_1	R_2
1	2, 3, 4	1	[0, 0, 0]	0	0	7	10	1	[37, 40, 46]	3	0
2	6, 7	1	[58, 60, 61]	0	5	2		2	[49, 60, 69]	2	0
		2	[74, 90, 105]	7	0	3		3	[76, 90, 95]	0	3
3	5, 8, 11	1	[35, 40, 46]	0	3	8	9, 10	1	[16, 20, 23]	0	4
		2	[39, 40, 43]	7	0	2		2	[26, 30, 34]	0	2
		3	[66, 70, 83]	6	0	3		3	[89, 90, 93]	7	0
4	6, 7, 8	1	[27, 30, 30]	0	5	9	12	1	[41, 50, 55]	0	4
5	7, 9	1	[58, 60, 69]	7	0	10	12	1	[8, 10, 11]	5	0
		2	[64, 80, 93]	0	5	2		2	[17, 20, 22]	4	0
		3	[65, 80, 83]	4	0	3		3	[46, 50, 52]	2	0
6	9, 10, 11	1	[76, 90, 98]	4	0	11	12	1	[17, 20, 23]	7	0
		2	[97, 99, 113]	2	0	2		2	[48, 50, 53]	6	0
						12		1	[0, 0, 0]	0	0

该项目的成本由直接成本和间接成本构成。直接成本为机械工程师和电器工程师的项目薪酬之和，其中机械工程师的薪酬 $c_1 = 200$ (元/天)，电器工程师的薪酬为 $c_2 = 300$ (元/天)。而项目间接成本费率为 $c_m = 1000$ (元/天)。

2) 结果与讨论 本文采用 NSGA-II 算法，结合上述实例对模糊多目标产品开发项目调度问题进行求解。在算法参数设定中 $m = 50$ $\mu = 2000$ 。经计算，得到该问题在不同的决策者可接受风险水平 (α) 和乐观指数 (β) 下去模糊化的 Pareto 前沿如图 3 所示，其中 α 分别为 0.1, 0.4, 0.8 和 1， β 分别为 0.1, 0.5 和 0.9。而当 $\alpha = 1$ 时，模糊调度问题转变为确定条件下的调度问题。对比可知，当 α 一定、 β 增大时，Pareto 前沿整体向左下方移动，这是因为随着决策者乐观指数 (β) 增大，通过重心法所得的去模糊化工期和成本值均会变小；而当 β 一定、 α 增大时，Pareto 前沿的整体移动情形需要分类讨论。当 $\beta < 0.5$ ($\beta = 0.1$) 时，随着决策者可接受风险水平 (α) 的提高，通过重心法所得的去模糊化目标值均会变小，相应的 Pareto 前沿会整体向左下方移动；当 $\beta = 0.5$ 时， α 的变化对去模糊化的工期和成本值不产生影响，Pareto 前沿不会发生整体移动；当 $\beta > 0.5$ ($\beta = 0.9$) 时，伴随着决策者可接受风险水平的提高，采用重心法去模糊化的目标值会变大，Pareto 前沿会整体向右上方移动。在 α 和 β 的调整过程中，除了会发生 Pareto 前沿的整体移动外，还会出现局部的 Pareto 解变动，这是由于在调度过程中， α 和 β 的变化会影响某些模糊时序参数比较结果，导致项目关键路径的变动与模糊目标值的变化，从而产生新的 Pareto 解。

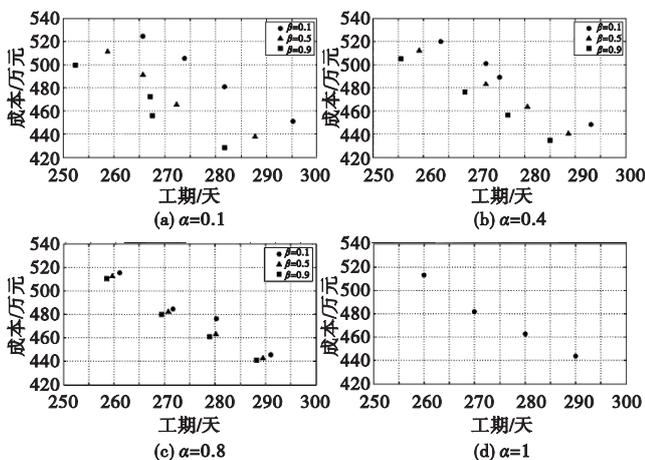


图 3 不同 α 和 β 下的去模糊化 Pareto 前沿

综上所述，在求解模糊多目标产品开发项目调度问题时，决策者的可接受风险水平 (α) 和乐观指数 (β) 的调整，不但会使去模糊化的 Pareto 前沿发生移动，也会使 Pareto 解产生变

化。在给定 α 和 β 的条件下，可以获得一系列符合决策者风险偏好的 Pareto 解，以便决策者从中选择其偏好的调度方案。

4 结束语

本文对模糊产品开发项目调度过程中的工期与成本均衡问题进行了研究，在已有研究的基础上进一步考虑了在模糊优化中决策者风险偏好 (可接受风险水平和乐观指数) 的影响，并运用 NSGA-II 算法，结合项目实例求解了在不同的决策者可接受风险水平和乐观指数下的 Pareto 解。研究表明：通过调节可接受风险水平或乐观指数，不但可以使去模糊化的 Pareto 前沿发生移动，也能产生新的 Pareto 解。在给定决策者可接受风险水平和乐观指数的条件下，可以获得一系列不同的 Pareto 解，以便决策者从中选择其偏好的调度方案。

未来的研究将进一步考虑资源柔性的影响，继续探讨具有柔性资源的模糊产品开发项目调度问题，并针对由此提高的计算复杂性改进算法，以提升求解效率。

参考文献:

- [1] PENG Wu-liang, WANG Chen-gen. A multi-mode resource-constrained discrete time-cost tradeoff problem and its genetic algorithm based solution [J]. International Journal of Project Management, 2009, 27(6): 600-609.
- [2] 彭武良. 产品开发项目的离散时间/成本/质量平衡问题研究 [J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 423-428.
- [3] 黄敏镁. 柔性资源约束下的产品开发项目优化调度研究 [J]. 管理工程学报, 2010, 24(4): 143-154.
- [4] MACIEJ H, SLOWINSKI R. Fuzzy priority heuristics for project scheduling [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 83(3): 291-299.
- [5] TARUN B, PAL M N, PAL A K. A heuristic method for RCPSP with fuzzy activity times [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 208(1): 57-66.
- [6] 王宏. 求解模糊资源受限项目调度问题的遗传算法 [J]. 系统工程学报, 2006, 21(3): 322-327.
- [7] WANG J. A fuzzy project scheduling approach to minimize schedule risk for product development [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 127(2): 99-116.
- [8] 刘士新. 模糊多目标资源受限项目调度问题的优化方法 [J]. 系统工程学报, 2008, 23(6): 744-750.
- [9] CHEN L H, LU Hai-wen. An approximate approach for ranking fuzzy numbers based on left and right dominance [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2001, 41(12): 1589-1602.
- [10] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [11] MOUMENE K, FERLAND J A. Activity list representation for a generalization of the resource-constrained project scheduling problem [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199(1): 46-54.
- [12] KOLISCH R. Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: theory and computation [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 90(2): 320-333.
- [13] EHSAN E, AFSHAR A, ABBASIAN R. Fuzzy-based MOGA approach to stochastic time-cost trade-off problem [J]. Automation in Construction, 2009, 18(5): 692-701.
- [14] SONDA E, FORTEMPS P. A hybrid rank-based evolutionary algorithm applied to multi-mode resource-constrained project scheduling problem [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 205(1): 31-41.