模糊网络计划工期成本优化方法①

张宏国，苏鸣鸣

(哈尔滨理工大学 计算机科学与技术学院，哈尔滨 150080)

摘　要：工程项目管理中项目工期的确定包括许多不确定因素，传统的网络计划方法不能解决此类不确定问题，基于模糊集合理论对工程项目工期的不确定性进行了分析论证，将三角模糊数引入到项目工期分析中，给出了工期的隶属度函数。建立一个基于遗传算法的工期－成本综合模糊优化模型，将模糊理论和遗传算法结合起来，提出一种模糊网络计划的工期－成本问题的优化方法。实验结果表明，该方法对模糊网络计划的工期－成本的优化有一定的灵活性和适应性。

关键词：模糊集合论；三角模糊数；隶属度函数；遗传算法；网络计划

Optimization of Construction Time-cost Management in Fuzzy Network Planning

ZHANG Hong-Guo, SU Ming-Ming

(Computer Science and Technology College, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Estimating the time of projects in the engineering project management involves some sort of imprecision. Traditional network planning methods cannot solve problems of uncertainty. Based on fuzzy set theory, an analysis of the uncertainty is made in this paper. Triangular fuzzy number is introduced to the project duration analysis, and subjectd degree function of dutation is given. An optimal construction time-cost trade-off method integrating fuzzy theory and genetic algorithms (GAs) is proposed in this paper. A fuzzy model for optimizing the fuzzy network on time-cost is established. Experimental results indicate that the method of fuzzy network planning of time-cost optimization of a certain degree of flexibility and adaptability.

Key words: fuzzy set theory; triangular fuzzy number; subjectd degree function; genetic algorithms; network planning

网络计划的不确定性因素具有复杂性，未可知性，影响程度相对性等特点。复杂性是指产生不确定性的环境一般相当复杂，未可知性是指产生不确定性的原理的不可知，影响程度相对性是指不确定性因素产生的影响随着它所处的路线不同而不同。所以用模糊数学的方法去研究网络计划的工序时间更为切合实际，更能反映计划工序的本质。模糊理论的特长在于逻辑推理能力，容易进行高阶的信息处理，将模糊技术[1]引入网络计划中，可使其能处理模糊或其他非精确性的信息。作为具有处理定性与定量的技术与方法，模糊网络可充分利用模糊逻辑所具有的较强的结构性知识表达能力和网络的定量计算能力。与概率论相比，模糊理论更简单，数据要求更少，可以分析网络计划问题的主要特征，如：最早和最迟开始时间等，最小工期、时差、关键线路等。

本文综合利用模糊集合论与遗传算法来解决不确定的工期－成本综合优化问题，目标是建立一个基于遗传算法[2]的工期－成本综合模糊优化模型，模型中的任务时间用一个模糊数来描述一个可接受的风险水平（例如取 λ 水平）作为允许的最低条件。然后利用遗传算法在模糊解空间里寻找最优或近似最优解[3]。

① 基金项目:哈尔滨市后备带头人基金(2004AFXXJ039)
收稿时间:2010-12-23;收到修改稿时间:2011-04-02

1 问题描述

1.1 问题的提出

目前现有的很多方法论和模型都假定了将项目的工期和成本的关系定义为确定性，但是在实际项目中，存在着许多不确定因素和不可预见因素的影响[4]，例如环境因素，包括天气，场地，生产力水平等因素都影响到工期。项目中的工期和成本关系不再是单调的递减关系。

某项目任务工期的模糊分析如图 1 所示，图中给出了一个任务的通常工期和压缩工期的隶属度函数。工期是用根据可变因素而确定的一个模糊数来表述的。建立隶属度函数[5]的关键是确定出任务工期的三个估计时间：最乐观时间，最可能时间，最悲观时间，分别对应于三角形函数的三个顶点。将某一风险水平（即水平λ）被初步确定为可以接受的最低条件。工期可以分成三个区间：压缩区，重叠区，通常区，在图 1 中由α，β，γ 分别表示。对于压缩工期，任务将以压缩模式完成，就是说，要尽力使得工期尽可能达到最小值。对于通常工期，任务将以通常模式完成。因为需要较多的资源投入以便尽早完成任务，所以压缩模式的成本一般要多于通常模式[6]。当工期位于重叠区间上(图 1 中β)，这个任务既可以采用压缩模式，又可以采用通常模式。然而，在工期－成本权衡的原则下，应该以最低成本的方式来完成任务。因此，工期在重叠区间上的任务要采取通常模式。实际上，假设λ在 0 和 1 之间变化，如果工期位于通常工期隶属度曲线上乐观边界(图 1 中区间α和β的交界点)的右边，那么该任务一般采用通常模式[7-9]。

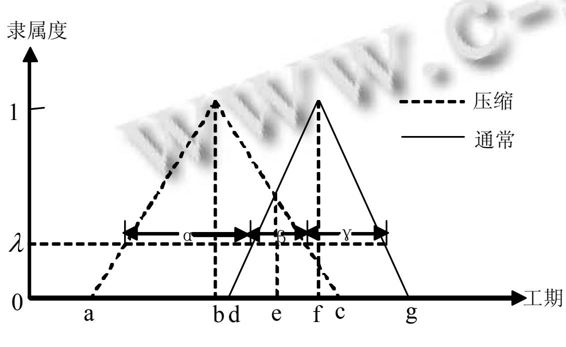

图 1 工期的隶属度函数

1.2 遗传算法的优势

遗传算法[10]在解决大型工程的复杂优化问题中有很大优势，利用遗传算法基本原理，设计带有修复算子的约束优化问题求解方法，用于网络计划优化，实践证明，该法解题速度快，结果的精确度也高。将遗传算法引入到模糊网络计划优化中，用遗传算法优化工期和成本也得到广泛应用，用线性规划方法优化工期和成本是以工期－成本关系为线性做前提的，由于工期－成本关系一般不是线性的，因此前述规划方法实际上是近似优化方法。对于非线性的工期－成本优化问题可以用非线性规划方法求解。求解非线性规划的方法有很多，但它们都存在一定的局限性，如有时只能找到局部最优解。利用遗传算法在求解过程中不需要导数等辅助信息，而且容易得到全局最优解，因此值得推广使用。

2 算法设计

2.1 适应度函数

适应度[11]是衡量遗传算法个体优劣的依据，也是驱动群体进化的动力。用一个染色体串表示任务的工期，染色体的每一个基因代表一个任务相应的工期。工期的具体大小是在可接受的水平基础上，在乐观边界和悲观边界范围之内确定下来的。根据前面所求得任务工期以及各任务的逻辑关系，确定出总工期的乐观边界和悲观边界，即可能范围。根据乐观边界和悲观边界的范围内选定的总工期，搜索到项目的最小成本。利用公式(1)工期－成本综合模糊优化数学模型的计算目标函数计算得出的项目总成本，定义适应度函数，来决定染色体是否遗传到下一代。

适应度函数定义为：

$$\min \ M_T^{\lambda} = \sum_{i=1}^{n} M_{t_i}^{\lambda} \tag{1}$$

$$T^{\lambda} = \max_{i=1,2,\ldots,n} O_i^{\lambda} \tag{2}$$

$$\text{S.T.} \quad O_i^{\lambda} - O_j^{\lambda} - t_i^{\lambda} \ge 0, \forall j \in P_i \tag{3}$$

$$t_i^{\lambda}(m) \le t_i^{\lambda} \le t_i^{\lambda}(n), O_i^{\lambda}, t_i^{\lambda} \ge 0, i = 1,2,\ldots n \tag{4}$$

我们假设，每个任务的工期和成本都具有某种关系，并且通常模式和压缩模式的成本已知，并且具体值是独立的。

其中 M_T^{λ} 为在λ水平下项目的总成本；T^{λ} 为在λ水平下项目的工期；O_i^{λ} 为任务 i 在λ水平下的结束时间；t_i^{λ} 为在λ水平下任务 i 的工期；P_i 为任务 i

的紧前任务的集合；$M_{t_i}^{\lambda}$ 为一任务 i 对应工期 t_i^{λ} 为成本；$t_i^{\lambda}(m)$ 为任务 i 在 λ 水平下的压缩工期；$t_i^{\lambda}(n)$ 为任务 i 在 λ 水平下的通常工期；n－任务数。

2.2 算法流程

遗传算法有下述 4 个运行参数需要提前设定：

pop-size：群体大小，即群体中所含的个体的数量。

q：遗传运算的终止进化代数，一般为 100-500。

Pc：交叉概率，一般为 0.4-0.99。

Pm：变异概率，一般为 0.0001-0.1。

本文的算法流程如下：

步骤 1. 给定群体规模 pop-size，交叉和变异操作时的参数 Pc，Pm 和终止规则中的 q；令迭代计数器 n=0。

步骤 2. 随机产生 pop-size 个染色体作为初始种群 pop(0)，计算各染色体的目标函数值，确定任务 i 在 λ 水平下的工期 t_i^{λ} 。令初始最优解 S=fmin，并令 p=0。

步骤 3. 计算出染色体的适应函数值，采用轮盘赌方法进行群体选择，选定工期 t_i^{λ} 对应最小成本 $\min M_{t_i}^{\lambda}$，同时实施精英保留策略。

步骤 4. 重新计算染色体的目标函数值，采用贪心交叉算子（Greedy Crossover）以交叉概率 Pc 执行 GA 算法的交叉操作，同时实施精英保留策略。

步骤 5. 重新计算染色体的目标函数值，按变异概率 Pm 执行遗传算法的变异操作，同时实施精英保留策略。

步骤 6. 计算出新一代群体的目标函数值，令 S’=fmin。

步骤 7. 判断 t_i^{λ} 是否在 $t_i^{\lambda}(m)$ 到 $t_i^{\lambda}(n)$ 之内，如果是，转到步骤 8，否则转到步骤 3。

步骤 8. 进行 λ 水平校验，判断工期 t_i^{λ} 的大小是否在可接受的 λ 水平基础上，如果是，则以 S 作为最终解输出。并停止计算。否则，返回步骤 3。

2.3 收敛性分析

该网络计划问题存在很多具体实例。如果完全根据适应度采取轮盘法进行常规的优胜劣汰，实际测试则发现几乎得不到全局最优解(共进行 10 轮以上的运算测试)。通过对遗传运算过程的跟踪，发现在中间的迭代中，曾搜索到全局最优解，由于遗传操作的特点，这些全局最优解基本上在后续运算过程中被破坏掉了。分别对每轮实际运算的最后结果进行统计分析表明：

1）从每一次遗传运算的迭代过程看，随着运算的推移，群体平均适应度、最优个体适应度的发展趋势及群体的收敛性符合一般遗传算法问题的特征；

2）该问题属于典型的自变量多(每道工序的完工时间都是变量，并直接体现在编码上)、取值离散的非单调性类型。从适应度及个体编码上分析，该问题又属于欺骗性问题[12]。在文献[12]中提到可采用编码调整技术如 Grey 编码或适应度调整技术化解和避免欺骗性问题。

虽然搜索到全局最优解几率不高，遗传算法还是概率性的收敛于比较接近全局最优解的次优解。而且，从大样本统计来看，明显以某些次优解为中心分布。对于这些收敛频率高的次优解进行分析发现，它们有一个共同的模式：

收敛频率高的次优解模式：0111 000 * * * * * * * * 0111

全局最优解为：1000 0000 010 10 100 1000

针对对文献[12]提到的欺骗性问题解决技术方案，本文认为，实际应用中往往而对的是动态模型，问题的解域是未知的。因此，进行适应度调整或改进遗传操作比调整编码更有实际价值。

在采用最优个体直接遗传技术后，从统计结果可以明显观察到两点改变：收敛频率高的次优解已明显向全局最优解方向逼近，而且模式上局部次优解和全局最优解出现了部分相似性;虽然全局最优解的收敛性不强，但已经搜索到，并在一轮运算测试中出现 240 次。

3 实验

3.1 实验环境

为便于算法研究、代码复用及适应长时间运算需要，本文基于 windows 2003server 系统，用标准 JAVA 面向对象方法编制程序，并以表 1 所描述的网络计划为例进行了实际计算，为对该类问题进行算法研究及参数优化，本文研究将网络计划的资料，遗传算法有关参数及运算结果存入 SQL SERVER 2005 数据库中，并设计了多因素（参数、运算策略等）交义运算。

3.2 实验结果与分析

本实验用一个包含 12 个任务的网络计划来说明算法的流程并对结果进行分析。任务之间的逻辑关系如图 2 所示，采用双代号网络来表示。每个任务的工

期是不确定的，并分别用各自的三角形隶属度函数来表示，表 1 中给出了两种模式下各任务的最乐观时间、最可能时间，最悲观时间，分别对应于三角形隶属度函数的 a，b，c 三点，见本文第 2 部分所阐述的内容。表 1 中每个任务在压缩模式和通常模式下的成本是对应于最可能时间的成本，这个成本应根据以往项目的成本数据及定额、劳动生产率等相关资料得出。

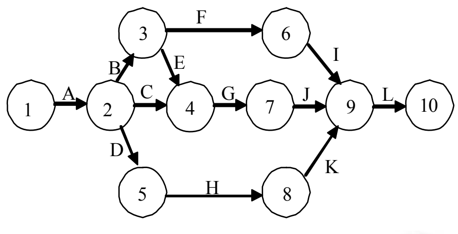

图 2 任务的网络关系

根据前面提出的算法，项目工期在不同水平下的乐观边界和悲观边界应该首先确定下来，如表 2 所示。因为项目工期都是整数，所以当入水平从 0.85 变化到 1 时，乐观边界和悲观边界都保持不变。由乐观边界和悲观边界包围起来的部分就是项目工期的可能范围。

表 1 两种模式下各任务的最乐观时间

任务	压缩模式				通常模式			
	乐观时间	可能时间	悲观时间	成本(万元)	乐观时间	可能时间	悲观时间	成本(万元)
A	20	23	26	17	28	30	33	13
B	34	38	42	22	40	45	52	20
C	22	25	28	12.4	27	28	30	10
D	34	35	36	23	39	40	41	19
E	45	47	49	27	48	50	54	23
F	32	34	36	17.5	37	38	39	13
G	46	52	58	31	55	60	67	25
H	34	37	40	21	42	43	45	18
I	40	43	46	30	48	50	52	24
J	32	35	38	16	37	39	40	12.8
K	26	30	34	21.3	33	35	38	15
L	46	48	50	21	48	50	53	20

为了获得好的搜索结果，确定 GA 的参数，如交叉概率，变异概率等，是非常必要的。针对本文所研究的问题分别采用了 30 组不同参数来检验结果的优劣，通过测试发现，当交叉概率和变异概率分别为 0.5 和 0.02 时，优化结果是最好的。同时本文利用由 Kolisch 等设计的问题生成器 ProGen 生成的问题对算法进行了测试，对实验结果的统计情况进行分析可知，在有效运行时间内，PopSize = 50, GEN = 40 的组合下求得的准有效解的比例最大。模型的优化结果表示在图 3 中。

表 2 压缩和通常模式下项目的工期

λ	压缩		通常	
	Min	Max	Min	Max
1	241	241	278	278
0.75	241	241	275	280
0.50	236	247	270	286
0.25	230	254	263	292
0	223	263	256	299

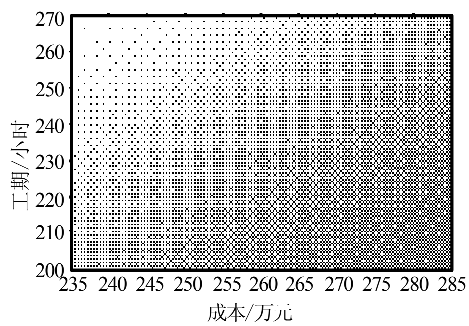

图 3 工期—成本曲线

根据前面分析可以看出，影响模型结果的因素有：网络计划关系，任务的工期在压缩模式和通常模式下的隶属度函数，压缩模式和通常模式的成本之间的差距，完成项目的方式。当λ水平增加时，不管工期怎么变化，项目的成本也增加。一般来说，λ水平增加，工期的可能范围会变窄。因此，给每一道任务选择一个对应可能工期的较低成本来达到减少成本的目的是不太可行的。如前所述，工期－成本优化的目标就是要确定在一定工期下对应的最小成本。项目工期要根据网络计划关系来确定。其中各任务之间的逻辑关系是一个极其重要的影响因素，它决定了关键路径的建立和非关键路径上任务的工期变动范围。因此，项目的网络计划关系的建立和分析将会影响到工期－成本权衡曲线。本实例中，各任务的工期用不同的隶属度函数描述，并由此得出项目总工期的变化情况。显而易见，隶属度函数曲线形状的变化会对工期－成本权

衡曲线产生影响。考虑一个简单的情况，如果每个任务都对应相同的隶属度函数，不管λ水平怎么变化，工期－成本权衡曲线都保持不变，实际上就成为一个确定性的权衡问题。另一个复杂情况，如果每个任务对应不同的隶属度函数，工期－成本权衡曲线就会变得不规则。如果不考虑λ水平的变化，工期－成本权衡曲线的倾斜度会随着两种模式的成本差距加大而增加，这种情况和确定性的工期－成本权衡曲线是一样的。这是因为压缩模式下生产成本较高，项目总成本相应增加，而曲线倾斜度在同样的工期范围上就会变大。λ水平作为允许的最低条件，表示某种程度的风险水平。应该根据项目的实际情况和决策者提出的预定目标，由专家进行调研和分析，特别是要考虑到风险的管理和控制水平，包括风险因素识别、风险发生的概率和损失值、风险规对策等，确定出适应于项目的λ水平。当采用总价合同时，在工期的某一范围内，成本可能保持不变，或者变化非常小。也就是说，工期的变化可能不会对成本产生大的影响。在实际项目中，情况可能不同于本文中给出的案例。但是，这种变化的趋势对于实际项目是有指导意义的。

4　结语

本文提出了一种工期－成本综合模糊优化模型，该模型不仅具有有效的搜索模式和良好的计算效率，还找到一种能反映优化问题中不确定性的表达方式。和传统的工期－成本优化方法相比较，该模型有较大改进。采用模糊集合论给不确定性的工期－成本优化问题建立了一个大框架，利用模糊数来反映各因素的不确定性。和传统方法只给出一条优化曲线相区别，本模型能得出多条在不同水平（决策者确定的风险水平）的优化曲线。这样就为决策者提供了更多的选择，更深人的分析和比较，从而可以选择一个好的优化方案。模型不必遵守任何特殊的启发式规则。因为这样，在解决复杂的工期－成本权衡优化问题时，模型具有更大的灵活性和适应性。虽然模型和启发式算法一样，不保证最后能得到最优解，但是从应用角度来说，可行解或近似最优解同样能够为决策者提供全面详尽的信息。

参考文献

1 郭静,颜鑫,殷捷.模糊网络计划中模糊工期成本优化方法的研究.山西建筑,2007,33(18):251–252.

2 张文修,梁怡.遗传算法的数学基础.西安:西安交通大学出版社,2003.

3 张连营,骆刚,鹿丽宁.遗传算法在工程项目资源优化中的应用.天津大学学报,2001,34(2):188–191.

4 闫文周,高琳.基于模糊理论的不确定性网络计划工期研究.山西建筑,2007,33(9):1–2.

5 张猛,曹德成.GA 及模糊理论在资源优化配置中的应用.土木工程学报,2004,37(6):105–110.

6 刘春林,何建敏.模糊计划网络最关键路浅的求取算法.系统工程学报, 2000,15(2):136–141.

7 Lorterapong P, Moselhi O. Project-network analysis using fuzzy sets theory. Journal of Construction Engineering and Management, December, 1996:308–317.

8 Chanasa S, Zielinski P. Critical path analysis in the network with fuzzy activity times. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 12(2):195–204.

9 Yakhchali SH, Ghodsypour H. A hybrid genetic algorithm for computing the float of an activity in networks with impricise durations. IEEE Intenational Conference on Fuzzy Systems, 2008:1789–1794.

10 傅颖勋.遗传算法的研究与改进.北京:北京邮电大学,2010.

11 梁国希.遗传算法在最优网络计划中的应用.软件导刊,2010,9(7):120–121.

12 王小平,曹立明.遗传算法理论、应用与软件实现.西安:西安交通大学出版社,2002.