

工期—成本—质量的模糊均衡优化及其 Pareto 解

张连营, 岳岩

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 针对实际工程项目中存在的 uncertain 因素, 通过对工期、成本、质量 3 个目标函数相互关系的模糊描述, 以工序持续时间为决策变量, 建立了基于三者的模糊均衡优化模型. 为了求解该模型, 在微粒群算法的基础上提出遗传免疫微粒群算法, 通过测试函数的 Matlab 仿真验证了算法的有效性, 并用于实际工程项目模糊均衡优化问题的计算, 得到多组模糊的 Pareto 最优解, 同时绘制相应的 3 维散点图, 为决策者的选择提供准确和直观的依据. 研究表明, 所构建的工程项目工期—成本—质量的模糊均衡优化模型构建的合理性, 同时表明遗传免疫微粒群算法在求解该模型方面的有效性.

关键词: 工程项目; 工期—成本—质量模糊均衡优化; 遗传免疫微粒群优化算法; 模糊最优解

中图分类号: F224; F281

文献标志码: A

Fuzzy Trade-off of Time-cost-quality in Construction Project and Pareto Solution

ZHANG Lianying, YUE Yan

(College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the fuzzy description of the interrelation among the three goal functions of time, cost and quality, a fuzzy trade-off model is established by using activity duration time as decisive variable. In addition, the immune genetic particle swarm optimization (IGPSO) is proposed to solve the model on the basis of particle swarm optimization. In order to test the effectiveness of IGPSO, the Matlab simulation is adopted to test different benchmark functions and it is applied to solving the fuzzy trade-off problem of real construction projects. As a result, the different fuzzy Pareto optimum solutions and their relevant three-dimensional scatter diagram illustrate the model's feasibility and the effectiveness of IGPSO, which can be used by decision makers to make a reasonable decision.

Key words: construction project; time-cost-quality fuzzy

trade-off optimization; genetic immune particle swarm optimization; fuzzy optimum solution

工程项目工期—成本—质量的均衡优化问题 (time-cost-quality trade-off problem, TCQTP) 一直是国内外学者研究的热点. EI-Rayes^[1] 最早提出离散的工程项目工期—成本—质量的优化模型, Tareghian^[2] 提出采用穷举法对离散的 TCQTP 模型进行优化, 并给出实际操作中的简化计算方法; 刘晓峰^[3]、Afshar^[4] 和 Iranmanesh^[5] 等人分别提出利用微粒群算法、蚁群算法和遗传算法对工程项目的工期成本和质量进行综合优化; San Cristóbal 等^[6] 将所建立的模型用于公路项目上, 通过实例的最优解计算验证了均衡优化模型的有效性. 但在前人的质量模型中, 都需要对某些参数进行专家打分, 增加了模型应用的局限性和主观性. 本文采用钟形曲线模拟工期—质量模型, 可以有效地克服这一缺点, 使得模型结果更加合理.

目前针对 TCQTP 的研究大多是在确定环境下进行的, 而在工程项目实际中却存在大量的不确定因素^[7]. 比如作业机械的供应, 施工场地的条件, 管理人员的水平, 工程外部环境等都可能对项目产生影响, 使得相关决策变量和优化目标具有模糊性. 由此可见, 工程项目模糊工期—成本—质量的模糊均衡优化问题 (fuzzy time-cost-quality trade-off problem, FTCQTP) 更加符合工程项目的实际情况. 杨耀红等^[8] 利用模糊多属性群决策效用函数建立了工期成本质量模糊均衡优化模型, 并采用自适应遗传算法求得满意解; Zhang 等^[9] 结合模糊多属性效用方法, 采用模糊多目标粒子群优化算法, 求解得到模糊的工期成本质量均衡优化问题的方案.

这些关于模糊优化的研究均是对多模式的优化问题进行探讨, 各工序工期、成本和质量的变化相对

有限,不能很好反映出工程项目实际的复杂情况,而且关于模糊均衡优化问题的求解,都是通过效用函数将多目标转化为单目标,从而只给出了一组最优方案,而在实际工程项目的决策中,需要决策者综合考虑很多方面的因素,只有给出多组备选方案,才能满足这一要求.结合金朝光等^[10]提出的全模糊(即系数、约束条件、决策变量均为模糊数的形式)概念,本文在现有的工程项目工期、成本和质量的模型基础上构建了全模糊的多目标均衡优化模型,将各工序的实际持续时间作为决策变量,更为符合工程项目的实际情况.由于这种模糊多目标优化问题属于模糊非线性优化问题,且解空间是连续的,传统的优化方法在求解过程中会遇到计算时间上的困难,且容易陷入局部最优解甚至不可解^[11].因此,本文在分析该模糊优化问题特点的基础上,采用遗传免疫微粒群算法对其求解,得到一组可供决策者参考的Pareto模糊最优解,最后,通过一个工程算例验证了模糊均衡优化模型的合理性和求解算法的有效性.

1 模糊集理论的相关概念

模糊数是定义在实数域上的一类特殊模糊集,最常用的模糊数为梯形模糊数和三角模糊数,本文采用三角模糊数,可表示为 $\tilde{A} = (l, m, u)$.根据Zadeh的模糊理论,定义三角模糊数运算公式如下:

$$\tilde{A}(+) \tilde{B} = [l_{\tilde{A}} + l_{\tilde{B}}, m_{\tilde{A}} + m_{\tilde{B}}, u_{\tilde{A}} + u_{\tilde{B}}] \quad (1)$$

$$\tilde{A}(-) \tilde{B} = [l_{\tilde{A}} - u_{\tilde{B}}, m_{\tilde{A}} - m_{\tilde{B}}, u_{\tilde{A}} - l_{\tilde{B}}] \quad (2)$$

$$\tilde{A}(\times) \tilde{B} = [l_{\tilde{A}} \times l_{\tilde{B}}, m_{\tilde{A}} \times m_{\tilde{B}}, u_{\tilde{A}} \times u_{\tilde{B}}], \\ l_{\tilde{A}} \geq 0, l_{\tilde{B}} \geq 0 \quad (3)$$

$$\tilde{A}(\div) \tilde{B} = [l_{\tilde{A}} \div u_{\tilde{B}}, m_{\tilde{A}} \div m_{\tilde{B}}, u_{\tilde{A}} \div l_{\tilde{B}}], \\ l_{\tilde{A}} \geq 0, l_{\tilde{B}} \geq 0 \quad (4)$$

然而,在工程项目实际中,完全按照这种运算方式并不能很好地处理关于模糊减法的问题,因为这样计算会导致在工期计算当中出现许多无谓的负数,影响了实际的计算^[12],所以对模糊减法运算进行修改,得到如下公式:

$$\tilde{A}(-) \tilde{B} = [l_{\tilde{A}} - l_{\tilde{B}}, m_{\tilde{A}} - m_{\tilde{B}}, u_{\tilde{A}} - u_{\tilde{B}}] \quad (5)$$

在模糊运算过程中,针对模糊数的不确定性,学者们进行了很多的探讨,主要有以下方法:一是利用模糊数的质心作为模糊数比较的依据进行排序^[13];二是利用模糊偏好的满意度函数,根据满意度值进行比较^[14];三是定义可能度公式,并基于可能度对模糊数的大小关系进行确定^[15].由于前两种方法是

模糊数转化为确定数进行排序,容易丢失一定的已知信息,不能很好地利用模糊数的描述处理问题,因此本文采用三角模糊数相互比较的可能度公式,并基于可能度值进行模糊数排序.

对于三角模糊数 $\tilde{A} = (l_{\tilde{A}}, m_{\tilde{A}}, u_{\tilde{A}})$ 和 $\tilde{B} = (l_{\tilde{B}}, m_{\tilde{B}}, u_{\tilde{B}})$, $\tilde{A} \geq \tilde{B}$ 的可能度定义为

$$P(\tilde{A} \geq \tilde{B}) = \\ \lambda \min \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{m_{\tilde{A}} - l_{\tilde{B}}}{m_{\tilde{A}} - l_{\tilde{A}} + m_{\tilde{B}} - l_{\tilde{B}}}, 0 \right\}, 1 \right\} + \\ (1 - \lambda) \min \left\{ \max \left\{ \frac{u_{\tilde{A}} - m_{\tilde{B}}}{u_{\tilde{A}} - m_{\tilde{A}} + u_{\tilde{B}} - m_{\tilde{B}}}, 0 \right\}, 0 \right\}$$

类似地, $\tilde{A} \leq \tilde{B}$ 的可能度可以定义为

$$P(\tilde{A} \leq \tilde{B}) = \\ \lambda \min \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{m_{\tilde{B}} - l_{\tilde{A}}}{m_{\tilde{A}} - l_{\tilde{A}} + m_{\tilde{B}} - l_{\tilde{B}}}, 0 \right\}, 1 \right\} + \\ (1 - \lambda) \min \left\{ \max \left\{ \frac{u_{\tilde{B}} - m_{\tilde{A}}}{u_{\tilde{A}} - m_{\tilde{A}} + u_{\tilde{B}} - m_{\tilde{B}}}, 0 \right\}, 0 \right\}$$

其中, $\lambda \in [0, 1]$, λ 值的确定取决于决策者的风险态度,这里为计算简便,可以取 $\lambda = 0.5$.

基于以上的三角模糊数的可能度定义,容易证明以下定理:① $0 \leq P(\tilde{A} \geq \tilde{B}) \leq 1, 0 \leq P(\tilde{A} \leq \tilde{B}) \leq 1$; ② 若 $l_{\tilde{A}} \geq u_{\tilde{B}}$,则 $P(\tilde{A} \geq \tilde{B}) = 1$;类似地,若 $u_{\tilde{A}} \leq l_{\tilde{B}}$,则 $P(\tilde{A} \leq \tilde{B}) = 1$;③ 若 $u_{\tilde{A}} \leq l_{\tilde{B}}$,则 $P(\tilde{A} \geq \tilde{B}) = 0$;类似地,若 $l_{\tilde{A}} \geq u_{\tilde{B}}$,则 $P(\tilde{A} \leq \tilde{B}) = 0$;④ $P(\tilde{A} \geq \tilde{B}) + P(\tilde{A} \leq \tilde{B}) = 1$;特别地, $P(\tilde{A} \geq \tilde{A}) = \frac{1}{2}$.

2 模糊均衡优化模型的建立

2.1 决策变量

本文将工序的实际持续时间作为决策变量.针对模糊多目标优化模型,对决策变量采用模糊数编码,即每个变量用3个实数(分别对应三角模糊数的 l, m, u)表示,具体编码方式可以表示为

$$p_i: l_1^{(i)} m_1^{(i)} u_1^{(i)} l_2^{(i)} m_2^{(i)} u_2^{(i)} \cdots l_n^{(i)} m_n^{(i)} u_n^{(i)} \cdots$$

式中, $(l_j^{(i)} m_j^{(i)} u_j^{(i)})$ 为满足 $l_j^{(i)} \leq m_j^{(i)} \leq u_j^{(i)}$ 的三角模糊数.其中, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为种群中的微粒个数; $j = 1, 2, \dots, n$, n 为决策变量的个数.

2.2 目标函数

在工程项目工期—成本—质量的模糊均衡优化中, $\tilde{T}, \tilde{C}, \tilde{Q}$ 均为模糊目标.对于工程项目中确定的施工方案,每个工序的持续时间也是确定的,工期可

以根据关键路径法 (critical path method, CPM) 计算得出. 然而, 当各工序的实际持续时间为模糊的 (这里指三角模糊数) 时候, 传统的 CPM 方法在求解项目工期时, 需要进行一定的调整.

在确定性的单代号网络图中, 工程的工期是指从工程开始到结束的最长路线所需的时间. 当网络图模糊时, 工期的计算涉及到模糊加法和模糊比较的运算, 对于网络图中某一节点 i , $E_t(i) = E_s(i) + \tilde{T}(i)$ (其中, E_t, E_s 分别表示节点的最早完成时间和最早开始时间). 工期的目标函数可表示为

$$\min \tilde{T} = \sum_{i \in P} \tilde{T}_i \quad (6)$$

式中: \tilde{T}_i 为工序的模糊持续时间; P 为关键路径上的工序的集合.

工程项目的总成本包括直接成本和间接成本. 其中, 直接成本包括人工费、材料费、机械台班费等, 在一定的工序持续时间范围内, 直接成本与工序的持续时间近似成反比关系; 间接成本包括对项目进行管理、审查等工作的费用, 一般与工序的持续时间成正比例关系. 可建立如下的成本目标函数:

$$\min \tilde{C} = \sum_{i \in U} (\tilde{b}_0 + \tilde{\gamma}_i (\tilde{T} - \tilde{T}_0)^2) \quad (7)$$

式中: \tilde{T}_i 为工序 i 的模糊持续时间; \tilde{T}_0 为工序 i 的最长模糊持续时间; \tilde{b}_0 为工序 i 最长模糊持续时间下的模糊完工成本; $\tilde{\gamma}_i$ 为边际成本模糊递增因子.

本文对工程项目的质量分析认为, 当工序持续时间接近赶工持续时间或最长持续时间时, 都不能达到最优工程质量, 而只有在其间某一持续时间段内, 工程质量可以维持在较高的层次并只产生微小变动. 由于钟形模糊数的形状基本满足以上特征, 可以据此构建各工序的工期—质量关系函数为

$$\tilde{q}_i = \frac{1}{1 + \left| \frac{\tilde{T}_i - \tilde{T}_0}{a} \right|^{2b}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: \tilde{T}_i 为工序 i 的模糊持续时间; \tilde{T}_0 为工序 i 的最长模糊持续时间; \tilde{q}_i 为工序 i 的模糊质量; a 一般取为最大模糊持续时间之差; b 一般取为 1.5; n 为工程项目中工序的个数.

因此, 在已知的工序工期—质量函数关系的基础上, 参考网络系统可靠度模型, 可以得到工程项目中每个工序的质量

$$\tilde{Q}_i = \left[1 - \prod_{j \in \text{pre}_i} (1 - \tilde{Q}_j) \right] \tilde{q}_i \quad (9)$$

式中: pre_i 表示工序 i 的紧前工序的集合; \tilde{Q}_i 表示

工序 i 的模糊系统质量, 且 $\tilde{Q}_i = \tilde{q}_i$.

质量的目标函数可表示为

$$\max \tilde{Q} = \tilde{Q}_n \quad (10)$$

3 模型优化的遗传免疫微粒群算法

微粒群算法由 Kennedy 博士和 Eberhart 博士基于鸟类觅食的群集现象提出, 因其概念简单, 易于实现和搜索速度快、搜索范围广等优点而在许多领域得到了广泛的应用^[16-17]. 作为一种随机搜索算法, 它的主要步骤有随机初始化种群, 使用适应度值来对个体进行评价, 根据适应度值选择演化操作的个体等, 而微粒群算法具有自身独特的方面, 比如微粒个体通过“个体认知项”具有记忆能力, 整个搜索过程跟随种群当前最优解移动.

标准的微粒群算法 (PSO) 将种群中每个个体看作 D 维搜索空间中的一个微粒, 在空间中以一定的速度按照某个方向飞行, 这个速度和方向根据自身的飞行经验和其他同伴的飞行经验进行动态调整. 种群中的第 i 个微粒可以表示为 $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})$, 它自身经历的最好位置可以记为 $p_i = (p_{i1}, \dots, p_{id}, \dots, p_{iD})$, 即 p_{best} ; 种群中所有微粒经历的最好位置可以记为 $p_g = (p_{g1}, \dots, p_{gd}, \dots, p_{gD})$, 即 g_{best} ; 这个微粒的速度可以表示为 $v_i = (v_{i1}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$, 在标准的 PSO 算法中, 速度和位置公式表示如下:

$$v_{id}^{(k+1)} = wv_{id}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^{(k)}) \quad (11)$$

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \quad (12)$$

式中: w 为惯性权重因子; c_1 和 c_2 分别为个体学习因子和社会学习因子; r_1 和 r_2 均为 0 到 1 之间均匀分布的随机数.

然而, 根据无免费午餐定理^[18], 标准微粒群算法在某些方面也存在着不足, 它虽然模拟了个体认知和社会认知, 但是缺乏个体之间的信息共享和竞争, 它在一般问题中虽然能够迅速达到较好的解, 但由于缺乏很好的多样性保留机制, 使得其容易陷入局部最优, 即所谓的“早熟”. 为了改进微粒群算法, 从而使得其更加适合工程项目模糊多目标优化问题, 借鉴了遗传算法中的选择、交叉和变异的思想^[19], 以及免疫算法中的克隆抑制和免疫记忆^[20], 形成了新的混合智能算法——遗传免疫微粒群算法 (IGPSO).

每次迭代过程中, 整个种群中的微粒按照适应

度值排序,将最优个体保留至记忆库中,每个个体根据群体最优位置和个体自身最优位置进行调整,或者按照“适者生存”的原理,继承上一代的优良性状,淘汰不利性状,逐步朝更优解的方向进化.具体的算法步骤如下:① 初始化.产生一个初始种群 p_{op} 和相同规模的空的记忆库 M_{base} (Memory base). ② 适应度值计算.通过动态加权法计算 p_{op} 中所有个体的适应度值. ③ 更新记忆库.将 p_{op} 中 Pareto 最优个体保存至 M_{base} 中,比较 p_{op} 中最优个体适应度值和 M_{base} 中最劣个体适应度值,将二者中较优的个体保存至 M_{base} 中,如果二者均为 Pareto 最优,则都保存至 M_{base} 中. ④ “早熟”判断.预设一个“早熟”判断阈值 δ ,如果连续 10 次适应度值变化量小于阈值 δ ,那么认为算法陷入“早熟”. ⑤ 微粒群优化.对 p_{op} 中每个微粒,将其当前适应度值与其个体历史最好位置的适应度值进行比较,如果当前的适应度值更高,则用其更新历史最优位置 p_{best} ;对 p_{op} 中每个微粒,将其当前适应度值与全局最优位置 g_{best} 对应的适应度值进行比较,如果当前的适应度值更高,则用其代替全

局最优位置 g_{best} ;并根据微粒群的位置和速度方程更新微粒的速度和位置. ⑥ 遗传算子.对于陷入“早熟”的种群,随机用记忆库中一半的微粒替换当前种群中的一半微粒,然后从新形成的种群中,根据适应度值的排序,采用轮盘赌方法选择微粒放入配对库中;按照一定的交叉概率在配对库中随机选取 2 个微粒进行交叉,交叉位置随机确定;变异操作则是按照一定的变异概率随机地改变微粒的某些位置的值.

本文选用 4 组多目标测试函数对遗传免疫微粒群算法进行测试,测试函数如表 1 所示.设置算法中用到的参数:交叉概率 $p_c=0.9$,变异概率 $p_m=0.1$,种群个数 $p_{opsize}=200$,每个问题运行 100 次,仿真结果如图 1—4 所示.从以上 4 组多目标测试函数的仿真结果可以看出,对于随机产生的种群个体,利用遗传免疫微粒群算法迭代有限次可以得到较好的 Pareto 前沿,各测试函数均收敛且个体粒子均匀分散,进一步验证了该算法在多目标求解方面的有效性.

表 1 多目标测试函数

Tab.1 Multi-objective test functions

函数名称	变量维数	取值范围	目标函数	注释
MOP1	1	$[-10^5, 10^5]$	$f_1(x) = x^2$ $f_2(x) = (x-2)^2$	
MOP2	3	$[-5, 5]$	$f_1(x) = \sum_{i=1}^3 (-10e^{-0.2\sqrt{x_i^2+x_{i+1}^2}})$ $f_2(x) = \sum_{i=1}^3 (x_i ^a + 5\sin(x_i)^b)$	$a=0.8$ $b=3$
MOP3	2	$[0, 1]$	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = (1+10x_2) \left[1 - \left(\frac{x_1}{1+10x_2} \right)^a - \frac{x_1}{1+10x_2} \sin(2\pi q x_1) \right]$	$q=4$ $a=2$
MOP4	2	$[-30, 30]$	$f_1(x) = 0.5(x_1^2 + x_2^2) + \sin(x_1^2 + x_2^2)$ $f_2(x) = \frac{(3x_1 - 2x_2 + 4)^2}{8} + \frac{(x_1 - x_2 + 1)^2}{27} + 15$ $f_3(x) = \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2 + 1)} - 1.1e^{-(x_1^2 - x_2^2)}$	

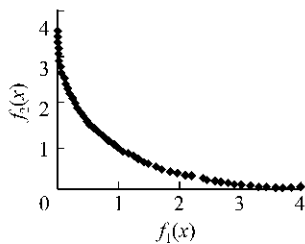


图 1 测试函数 MOP1 的 Pareto 前沿曲线
Fig.1 Pareto front of test function MOP1

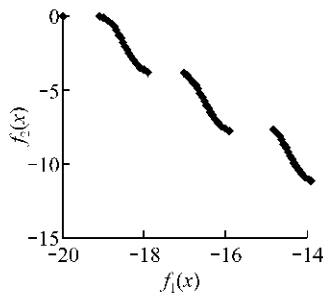


图 2 测试函数 MOP2 的 Pareto 前沿曲线
Fig.2 Pareto front of test function MOP2

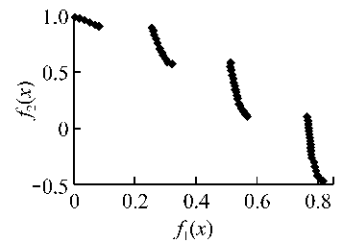


图 3 测试函数 MOP3 的 Pareto 前沿曲线
Fig.3 Pareto front of test function MOP3

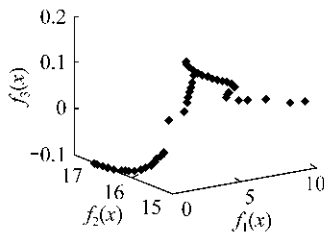


图 4 测试函数 MOP4 的 Pareto 前沿曲线
Fig.4 Pareto front of test function MOP4

4 算例分析

某工程项目网络计划图如图5所示,该工程项

目各工序活动的名称及相关参数见表 2.

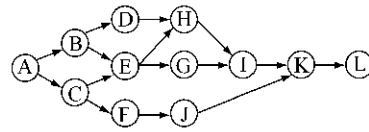


图 5 工程项目的网络计划图
Fig.5 Activity on node network of construction project

其他参数设置如下:种群大小 $p_{\text{opsize}} = 20$, 最大进化代数 $G_{\text{en}} = 100$, 惯性权重 $w = 0.5$. 为了计算种群中个体的适应度值,本文在计算过程中采用动态加权方法,使各目标函数的权重系数随公式(13), (14), (15)进行调整.

表 2 工程项目中相关参数及数据

Tab.2 Related parameters and data in construction project

工序名称	\tilde{T}_i/d	\tilde{T}_0/d	$\tilde{b}_0/\text{万元}$	$\tilde{\gamma}$
A	(40,44,48)	(50,54,58)	(300,320,340)	(0.61,0.64,0.67)
B	(26,28,30)	(34,36,38)	(250,270,290)	(0.81,0.84,0.87)
C	(36,40,44)	(46,50,54)	(260,280,300)	(0.54,0.56,0.58)
D	(46,50,54)	(56,60,64)	(330,350,370)	(0.67,0.70,0.73)
E	(28,30,32)	(42,44,46)	(220,240,260)	(0.22,0.24,0.26)
F	(81,86,91)	(96,101,106)	(540,580,620)	(0.49,0.52,0.55)
G	(34,37,40)	(42,46,50)	(230,250,270)	(0.60,0.62,0.64)
H	(25,27,29)	(34,36,38)	(270,300,330)	(0.71,0.74,0.77)
I	(60,64,68)	(74,78,82)	(450,480,510)	(0.47,0.49,0.51)
J	(46,49,52)	(57,60,63)	(360,400,440)	(0.63,0.66,0.69)
K	(62,65,68)	(75,78,81)	(340,370,400)	(0.42,0.44,0.46)
L	(15,17,19)	(21,23,25)	(110,120,130)	(0.65,0.67,0.69)

$$w_1(t) = \left| \sin\left(\frac{\pi t}{2R}\right) \right| \quad (13)$$

$$w_2(t) = (1 - w_1(t)) \left| \sin\left(\frac{\pi t}{2R}\right) \right| \quad (14)$$

$$w_3(t) = 1 - w_1(t) - w_2(t) \quad (15)$$

利用加权得到的结果作为种群进化的向导,对种群中个体进行非劣排序,通过免疫记忆机制,对 Pareto 最优个体进行保留,从而形成 Pareto 最优解集.

本算例通过 Matlab 编程,在 Genuine Intel 1.73 GHz,内存 2G 的兼容机上经过运行至满足最大迭代次数时终止,运算共得到 62 个模糊的 Pareto 最优解.本文分别从工期较短、成本较低和质量较高 3 个方面列举 3 组不同 Pareto 最优解,其对应目标函数值如表 3 所示.同时,为了将 3 维的计算结果形象地展示出来,本文根据三点估计法将由计算机程序运行出来的 Pareto 最优解所对应的目标函数值转化为实数,结果如图 6 所示.

从 3 维散点图中可以看出,通过遗传免疫微粒群算法求解得到的 Pareto 解较为分散,工期、成本的变动范围较广,质量水平均较高,它们从不同维度指

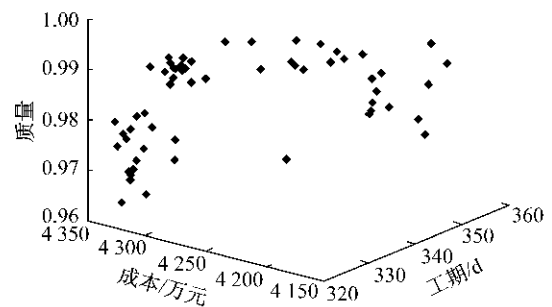


图 6 工程项目的 3 维 Pareto 最优解的散点图
Fig.6 Three-dimensional scatter plot of Pareto optimal solutions for construction project

示了工程项目最优方案的目标值,其中,根据对其单一目标进行优化得到的工期和成本变动范围发现,本文算法所求得的 Pareto 解的覆盖范围基本达到两目标的变动范围边界,更有利于决策者根据不同的考虑因素侧重选择.由于该算例采用模糊优化模型进行求解,计算得到的各个目标均为模糊数,不仅能够表示各个目标所处于的数量水平,也能标识项目不同目标的模糊程度,比确定型优化模型的计算结果更加符合工程项目的实际情况,能够为决策者提

表 3 不同方案的模糊 Pareto 最优解及对应目标值

Tab.3 Fuzzy Pareto optimal solutions and corresponding function values for different plans

项目	方案 1	方案 2	方案 3
A	(40, 51, 44, 51, 48, 51)	(46, 80, 50, 80, 54, 80)	(43, 01, 47, 01, 51, 01)
B	(32, 88, 34, 88, 36, 88)	(28, 16, 30, 16, 32, 16)	(30, 28, 32, 38, 34, 28)
C	(42, 84, 46, 84, 50, 84)	(41, 83, 45, 83, 49, 83)	(44, 29, 48, 29, 52, 29)
D	(52, 52, 56, 52, 60, 52)	(53, 76, 57, 76, 61, 76)	(53, 86, 57, 86, 61, 86)
E	(41, 38, 43, 38, 45, 38)	(33, 48, 35, 48, 37, 48)	(39, 88, 41, 88, 43, 48)
F	(86, 32, 91, 32, 96, 32)	(94, 12, 99, 12, 104, 12)	(88, 82, 93, 82, 98, 82)
G	(34, 60, 37, 60, 40, 60)	(39, 45, 42, 45, 45, 45)	(36, 45, 39, 45, 42, 45)
H	(31, 83, 33, 83, 35, 83)	(29, 45, 31, 45, 33, 45)	(31, 87, 33, 87, 35, 87)
I	(65, 73, 69, 73, 73, 73)	(71, 63, 75, 63, 79, 63)	(68, 09, 72, 09, 76, 09)
J	(56, 33, 59, 33, 62, 33)	(55, 59, 58, 59, 61, 59)	(55, 75, 58, 75, 61, 75)
K	(66, 62, 69, 62, 72, 62)	(71, 72, 74, 72, 77, 72)	(68, 04, 71, 04, 74, 04)
L	(16, 60, 18, 60, 20, 60)	(17, 70, 19, 70, 21, 70)	(19, 08, 21, 08, 23, 08)
工期/d	(297, 32, 335, 32, 373, 32)	(310, 77, 348, 77, 386, 77)	(302, 84, 340, 84, 378, 84)
成本/万元	(3 709, 81, 4 132, 97, 5 206, 97)	(3 779, 17, 4 066, 92, 4 992, 83)	(3 731, 94, 4 106, 86, 5 128, 91)
质量	(0.915 8, 0.984 2, 0.986 0)	(0.953 1, 0.988 0, 0.994 9)	(0.967 4, 0.993 2, 0.998 7)

供更多有益的信息. 表 3 分别从工期较短、成本较少和质量较高的角度选取了 3 个不同的模糊 Pareto 最优方案, 根据工期、成本和质量的侧重, 决策者可以从中进行方案决策.

5 结语

针对工程项目管理目标的不确定性, 建立了工程项目模糊工期—成本—质量的均衡优化模型, 并采用遗传免疫微粒群优化算法对该优化模型进行求解, 得到了一组 Pareto 模糊最优解, 在此基础上, 生成了 3 维 Pareto 散点图. 通过测试函数的 Matlab 仿真和工程项目模糊工期—成本—质量三目标的均衡优化模拟, 验证了遗传免疫微粒群算法求解工程项目模糊均衡优化的有效性. 通过对 Pareto 解集的有效性及其分布状态分析, 从而为项目管理决策者的工程项目多目标的计划与控制提供决策支持.

由于模糊多目标优化问题的复杂性和特殊性, 在算法设计与优化应用方面仍有值得研究之处: ① 针对本文提出的遗传免疫微粒群优化算法, 探索在不同参数下的求解效率和优化结果有利于完善算法的研究并更有效地应用于工程项目实际. ② 对工期、成本、质量优化模型的模糊化, 是对实际工程项目不确定因素的体现, 从实际角度出发探究三者或者其他目标之间的关系, 建立更加符合工程项目实际的模型, 对于进一步增加求解结果在实际决策中的作用有重要影响. ③ 在此研究的基础上, 研究如何将工程项目的环境和安全等管理目标纳入到工程项目多目标优化过程中来, 是进一步研究该问题的方向.

参考文献:

- [1] El-Rayes K, Kandil A. Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction[J]. Journal of construction engineering and management, 2005, 131(4): 477.
- [2] Tareghian H, Taberi S. On the discrete time, cost and quality trade-off problem[J]. Applied mathematics and computation, 2006, 181(2): 1305.
- [3] 刘晓峰, 陈通, 张连营. 基于微粒群算法的工程项目质量、费用和工期综合优化[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 122. LIU Xiaofeng, CHEN Tong, ZHANG Lianying. Application of PSO to multiple-objective project optimization[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 122.
- [4] Afshar A, Kaveh A, Shoghli O. Multi-objective optimization of time-cost-quality using multi-colony ant algorithm[J]. Asian Journal of Civil Engineering: Building and Housing, 2007, 8(2): 113.
- [5] Iranmanesh H, Skandari M, Allahverdiloo M. Finding pareto optimal front for the multi-mode time, cost quality trade-off in project scheduling [J]. International Journal of Computer, Information, and Systems Science, and Engineering, 2008, 2(2): 118.
- [6] Ramon J, Cristobal S. Time, cost, and quality in a road building project[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2009, 135(11): 1271.
- [7] 杨湘, 张连营, 张杰. 工程项目工期—成本综合模糊优化[J]. 土木工程学报, 2003, 36(3): 46. YANG Xiang, ZHANG Lianying, ZHANG Jie. Fuzzy comprehensive optimization of construction time-cost trade-off [J]. China Civil Engineering Journal. 2003, 36(3): 46.
- [8] 杨耀红, 汪应洛, 王能民. 工程项目工期成本质量模糊均衡优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 7(7): 112. YANG Yaohong, WANG Yingluo, WANG Nengmin. Fuzzy tradeoff optimization of time-cost-quality in construction project [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2006, 7(7): 112.

(下转第 316 页)