

基于遗传算法和 Pareto 排序的工期-费用-质量权衡模型

陈勇强, 高明, 张连营

(天津大学 管理学院, 天津 300072)

摘要 工期、费用和质量是工程项目管理和控制的三个基本目标, 其中任何一个因素的变动都可能对其它两个产生影响. 对工期-费用-质量进行全面的权衡, 将对项目决策者管理和控制项目的运作有着重要意义. 通过建立完整的质量衡量体系对工程项目的质量水平进行量化评估, 利用 Pareto 最优的原理, 设计了一套基于遗传算法和 Pareto 排序法的运算程序, 从而建立起工期-费用-质量的权衡模型, 决策者在由该模型得到的 Pareto 解集中寻求满意的资源配置方案. 最后将模型应用于一个案例对其可行性和适用性进行了验证分析.

关键词 工期-费用-质量; 权衡; 遗传算法; Pareto 排序

Time-cost-quality trade-off model based on genetic algorithms and Pareto ranking

CHEN Yong-qiang, GAO Ming, ZHANG Lian-ying

(School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Time, cost and quality are three basic objectives in engineering project management. They are interacting with each other. Taking time, cost and quality into account systemically is significant for project decision-maker to management and control project. In this paper, project quality is measured through a quality measurement system. According to Pareto optimal theory, a computation procedure is designed based on genetic algorithms and Pareto ranking, thus the time-cost-quality trade-off model is built. The optimal resource utilization options can be obtained from Pareto solutions calculated by this model. At the end of this paper, a case study is given to verify the feasibility and practicability of the model.

Keywords time-cost-quality; trade-off; genetic algorithms; Pareto ranking

1 引言

工期、费用和质量是工程项目管理和控制的三个基本目标, 这三个目标之间既相互对立又相互统一. 有许多学者对工期和费用的权衡问题进行了研究, 而很少有涉及质量目标的数学模型. 近年来只有少数讨论工期-费用-质量的综合权衡优化问题的文献. Babu 和 Suresh^[1] 认为工程项目施工进度加快会影响到工程完成的质量, 并建立了线性模型来研究工期、费用和质量之间的平衡关系. Khang 等^[2] 将 Babu 和 Suresh 提出的研究工期、费用和质量平衡关系的方法应用到一个实际的水泥厂工程项目中, 来评价这种方法的实用性. Khaled 等^[3] 针对高速公路项目的工期-费用-质量权衡问题, 利用遗传算法建立了数学模型, 并作了案例分析和验证. 王健等^[4] 利用多属性效用函数理论, 建立了的工期-费用-质量的综合均衡优化模型, 利用网络计划技术和遗传算法对模型进行求解, 并通过一个案例检验了该模型的可行性.

收稿日期: 2008-07-03

资助项目: 国家自然科学基金 (70772057)

作者简介: 陈勇强 (1964-), 男, 汉, 河北冀县人, 副教授, 管理学博士, 英国皇家特许营造师学会会员 (MCIOB), 中国建设工程造价管理协会教育专家委员会委员, 商务部项目评标专家, 研究方向为国际工程项目管理、合同管理、现代信息技术在工程建设项目管理中的应用, E-mail: symbolpmc@vip.sina.com.

本文在上述文献研究的基础上, 利用遗传算法这种搜索寻优技术, 结合 Pareto 排序的方法, 在可行解空间内搜索 Pareto 最优解或近似最优解, 建立起工期-费用-质量的优化模型, 并通过一个案例对该模型进行了检验.

2 遗传算法

遗传算法 (Genetic algorithms) 在本质上是一种模拟生物进化过程的随机性搜索方法, 采用多路径搜索, 对变量进行编码处理, 用对位串的遗传操作代替对变量进行直接操作. 遗传算法中, 问题的潜在解以一个群体表示, 而群体中的每一个个体表示一个可行解. 群体中个体的数目表示该群体的规模. 这些个体经过不断地选择、交叉和突变等遗传算子操作得到不断进化. 每一代中, 个体由各自的适应度函数 (即目标函数) 评估. 适应度较大的个体存活的可能性就比较高. 这样, 下一代的群体性能 (即适应值) 总是优于上一代. 经过若干次迭代, 遇到终止条件后, 得到的就是问题的最优解或者近似最优解. 遗传算法较好的搜索特性以及本质并行性的特点, 对于处理工程项目中工期-费用-质量的权衡优化这样的多目标优化问题, 无疑十分适用^[5].

3 问题描述和模型的建立

3.1 假设条件

为简化工期-费用-质量的权衡问题中的次要因素, 对该问题做如下假设:

1) 各项工序及其先后次序已知. 在每道工序完工时间已知的情况下, 用传统的关键路径法 (CPM) 即可计算出工程完工的总时间. 项目总费用就是各道工序费用之和.

2) 文中质量值指的是相对质量水平, 取值 0-1 之间. 0 值表示达到基本质量标准 (国家标准、公司质量规范等) 的最低质量水平, 1 值表示满足业主要求的最高质量水平. 整个项目的质量由各道工序的质量加权平均得到.

3.2 质量的衡量

工程项目的质量的衡量较之工期和费用来说, 通常较为主观. 一般各道工序的质量由现场管理人员给出评价, 不同的人从不同的角度, 对同样工作的质量的评价可能有很大的差异. 为了减小这种主观性, 有必要制定一套完整的质量衡量体系, 通过该体系对质量进行客观的评价和综合量化. 该体系的建立需要考虑以下几个基本因素: 根据工程实际情况设定操作性强的质量评价标准, 对每道工序都设置详细的质量因子, 然后根据类似工程的资料和专家打分对各个质量因子评分, 最后根据各道工序的权重加权得到总的质量水平.

在参考以往工程资料同时, 要注意以下几条原则^[2]:

1) 根据该体系得出的结果并不是相应的质量水平的绝对值, 而是在项目不同的施工方式下各道工序的相对质量水平.

2) 相对质量水平可以反映出这些问题: ①有些工作 (如粉刷) 在项目进度加速时质量下降的可能性比较大; ②有些工作 (如焊接、电气) 在整个工程中非常关键, 因此这些工序在质量上的一丁点降低就有可能导致整个项目质量的大幅下降; ③有些工作受费用的影响比较大 (如采购费用降低造成混凝土质量的下降, 从而可能导致整个结构的性能大幅下降).

3) 如果一个工作组不止有一道工序, 那么其质量由各道工序质量加权平均求出, 其权重与各工序的合同值成比例.

3.3 质量的衡量

该模型的目的在于寻求工期最短条件下的最低费用和最高质量. 可以用如下三个目标函数来表达:

$$\min T = \sum_{i=1}^J T_i^n \quad (1)$$

$$\min C = \sum_{i=1}^I C_i^n \quad (2)$$

$$\max Q = \sum_{i=1}^I \omega_i \left(\sum_{k=1}^K \omega_{ik} Q_{ik}^n \right) \quad (3)$$

其中, T_i^n = 使用资源配置方案 n 时关键路径上的工序 i 的工期, 而根据前述假设, 关键工序由 CPM 法确

定; C_i^n = 使用资源配置方案 n 时工序 i 所需费用; Q_{ik}^n = 使用资源配置方案 n 时工序 i 第 k 个质量因子的质量水平; ω_i = 工序 i 在整个项目中的权重, 且 $\sum \omega_i = 1$; ω_{ik} 为质量因子权重, $\sum_{k=1}^K \omega_{ik} = 1$; I = 全部工序的数目, J = 关键工序的数目, K = 质量因子的数目.

4 模型求解

为帮助决策者寻求最优工期、费用和质量, 该模型用遗传算法求解. 根据基本遗传算法运算的步骤, 将该模型的求解过程分为六个模块: 确定初始参数、生成初始群体、计算目标值、Pareto 排序、遗传算子操作、输出. 下面分别对这几个模块详细加以说明.

4.1 确定初始参数

初始参数确定包括两部分:

1) 项目参数: 项目的规模、工序优先次序、每道工序在不同资源配置方案下的持续时间 T_i^n 、费用 C_i^n 和质量水平 Q_i^n 以及各道工序在整个项目中的权重 ω_i 和质量因子权重 ω_{ik} .

2) 遗传参数: 位串长度 L 、群体规模 p 、迭代次数 g 、交叉概率 p_c 、突变概率 p_m .

个体是由每道工序资源配置方案的代号构成, 因此一般采用二进制编码, 位串长度 L 根据项目中工序的数目选取. 根据位串长度 L 和运算的强度, 选取适当的迭代次数 g 和群体规模 p . 而交叉策略采用单点交叉算子, 突变策略采用均匀突变算子. 由于本模型利用 Pareto 排序法确定选择概率, 而随着解空间的逐步优化, Pareto 排序值的重复概率必然越来越大, 此时应当调整为较大的交叉概率和突变概率, 以保持群体的多样性, 避免近亲繁殖.

4.2 随机生成初始群体

初始群体中的个体一般是随机产生的. 在不具有任何关于问题解空间的先验知识的情况下, 很难判定最优解在可行解空间的分布状况. 因此可以在问题解空间均匀采样, 随即生成 p 个个体构成初始群体.

4.3 计算目标值

根据公式 (1)、(2)、(3), 分别求出每一代中每一个个体的目标值, 即工期、费用和质量值. 首先求出每个个体对应的时间、费用和质量值, 将关键路径上的工序的持续时间相加, 求出第 g 代中解 s 的工期 T_g^s , 然后将各工序费用累加求出相应的费用 C_g^s , 并加权求出总质量 Q_g^s .

4.4 Pareto 排序

如果在所有解空间里, 解 S_1 优于解 S_2 , 或者说 S_1 非劣于 S_2 , 那么称解 S_1 支配解 S_2 , 称 S_1 为非支配解. 由 S_1 构成的解空间称为非支配解集或 Pareto 最优解集. Pareto 最优解和任何其它解的冲突最小, Pareto 排序正是基于此给出的定义: 设第 g 代目标向量 u_i 对应的可行解个体为 s_i , n_i 为第 g 代群体中非劣于 s_i 的个体数, 则称 $r(s_i, g) = 1 + n_i$ 为个体 s_i 的序. 得到个体的序位之后, 从最好到最差对群体进行排序, 再根据排序值对个体分配选择概率^[6]. 个体的分配概率由式 $p_k = q - (k - 1) \times f$ 求得. 其中, p_k 表示排序后群体中第 k 个个体的选择概率, q 是最好个体的选择概率. 设 q_0 是最差个体的选择概率 (确定方法见遗传算法与工程优化^[6]), K 是群体中最后一个次序的数值, 参数 f 由下式确定:

$$f = \frac{q - q_0}{K - 1}$$

根据 3.3 节得到目标值后对每个个体进行 Pareto 排序, 由排序值对各个个体赋予选择概率. 由 Pareto 排序的定义可知, 不同个体的排序值可能相等, 而在运算的后期, 随着解之间的逐步趋近, 排序值的相等概率会越来越大.

在遗传算法反复迭代过程中, 为了让群体朝 Pareto 前沿的方向上收敛且均匀分布在 Pareto 前沿而不陷入前沿的某个局部, 即避免得到的最优工期 - 费用和质量值是局部最优解, 就要增强算法的全局搜索能力, 要有专门措施保持群体的多样性和解的质量. 这是用遗传算法求解工期 - 费用 - 质量权衡优化问题的关键. 因此, 本文对每一代中解的设定质量量度函数 r 来对解的质量作出检测. 记第 g 代群体中所有个体的序的平均值为 $\bar{r} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p r(s_i, g)$ (p 为群体规模), 则 $r = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (r(s_i, g) - \bar{r})^2$ 表示第 g 代群体的质量量度函数. 当 r 越趋近于 0 时, 解的质量越好^[7].

4.5 遗传算子操作并生成下一代群体

由 Pareto 排序得出个体选择概率后, 采用轮盘赌准则的选择策略, 对群体进行选择, 复制出适应度较强的个体, 然后根据 3.1 节所确定的交叉策略和突变策略依次进行交叉和突变操作, 这样就得到下一代群体, 再

返回至步骤 3.3, 依次迭代, 直到满足终止条件为止.

4.6 输出

经过上述五个步骤之后, 如果迭代次数 g 达到指定的代数 G , 满足终止条件, 则输出结果, 即 Pareto 最优解集. 将最优解对应的目标值, 即工期-费用-质量值求出, 并转化为图形输出, 这样就得到了最终的工期-费用-质量的权衡曲面, 为下一步的分析提供直观的工具.

5 案例应用分析

下面将该模型应用于一个实际工程项目中. 选取的案例为一栋三层混合结构办公楼的工程项目^[4], 该项目有 19 道工序, 其网络图如图 1 所示.

表 1 给出了各道工序在不同施工方式下的持续时间、费用和质量权重, 并根据专家打分给出各质量因子下的质量水平. 根据 Goldberg 等^[5] 给出的有关遗传算子的建议以及张连营等^[8] 研究工程资源优化中的参数选择方法, 以及本案例中离散性和资源配置选项较少的特点, 采用一位二进制编码, 由资源配置选项代号构成个体, 选取工序数目为位串长度, 即 $L = 19$, 群体规模 $p = 300$. 而根据初步的计算, 在运算初期个体的 Pareto 序值的重复情况就较多, 因此在一开始就选取较大的交叉概率和突变概率: $p_c = 0.8, p_m = 0.1$. 为了避免交叉概率和突变概率过大, 在运算过程中并未对其进行调整. 随机抽取 300 个个体构成初始群体, 其分布状况如图 2 所示.

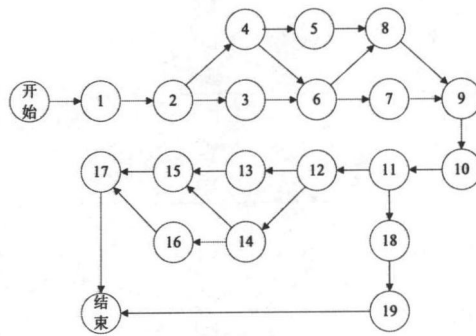


图 1 案例项目网络图

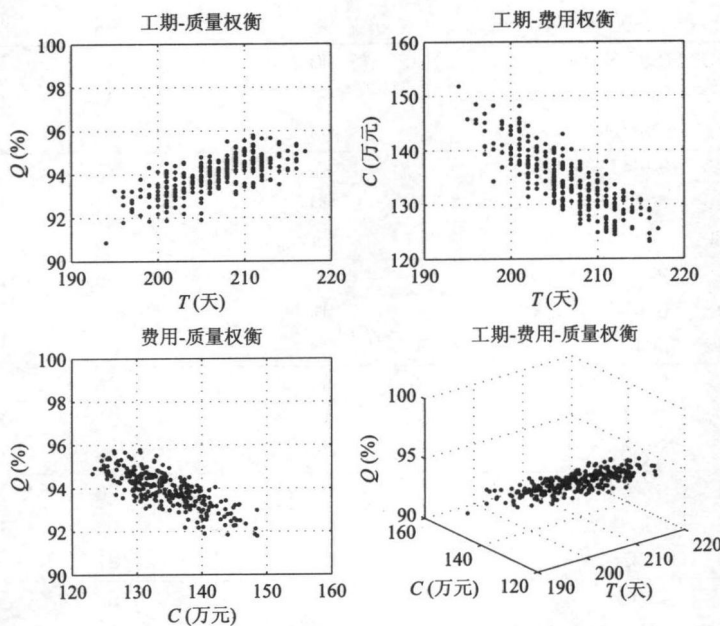


图 2 初始群体分布图

表 1 案例项目的资源配置方案

工序 代号 (i)	资源配 置方案 (n)	持续 时间 (天)	费用 (元)	权重 (%) ω_i	质量因子 1		质量因子 2		质量因子 3	
					因子权重	质量水平	因子权重	质量水平	因子权重	质量水平
					ω_{i1}	Q_{i1}^n	ω_{i2}	Q_{i2}^n	ω_{i3}	Q_{i3}^n
1	1	20	154608	8.75		90		89		89
	2	22	132440		50	98	30	94	20	93
	3	24	110527			100		96		98
2	1	15	119788	7.72		87		94		
	2	17	107233		60	96	40	94	0	-
	3	18	85563			98		96		
3	1	25	189816	6.37		86		88		
	2	28	155874		70	94	30	97	0	-
	3	30	135581			100		98		
4	1	12	13813	5.57		89		86		76
	2	13	10876		50	94	35	95	15	94
	3	14	9867			96		97		96
5	1	5	13667	3.56		87				
	2	6	12003		100	96	0	-	0	-
	3	7	9762			100				
6	1	15	119788	6.78		89		94		
	2	16	104038		60	92	40	94	0	-
	3	18	85563			94		96		
7	1	25	189816	6.09		86		85		
	2	27	135581		70	97	30	91	0	-
	3	30	119567			100		96		
8	1	12	13813	5.33		88		86		80
	2	13	12430		50	94	35	93	15	95
	3	15	9867			100		98		99
9	1	20	140007	6.61		88		90		
	2	22	100003		60	97	40	94	0	-
	3	20	76890			98		98		
10	1	15	189816	5.94		90		84		
	2	17	135581		70	95	30	93	0	-
	3	18	123994			99		96		
11	1	25	88641	4.76		85		85		
	2	28	63315		80	90	20	94	0	-
	3	30	58790			100		98		
12	1	12	95195	3.16		86		88		92
	2	13	67977		35	91	35	94	30	98
	3	14	60124			98		97		100
13	1	5	21086	5.08		85		88		91
	2	6	19876		40	94	20	95	40	96
	3	7	15062			100		98		99
14	1	15	91464	3.31		88		90		92
	2	16	65332		35	94	35	96	30	98
	3	18	54678			98		97		100
15	1	25	21086	5.23		86		92		89
	2	27	16555		40	93	40	98	20	97
	3	30	15062			99		100		98

16	1	12	91464	3.38	35	88	90	92		
	2	13	87940			95	35	93	30	96
	3	15	65332			98	97	100		
17	1	15	21086	5.09	40	90	92	90		
	2	16	16004			94	40	96	20	98
	3	18	15062			99	100	99		
18	1	25	79342	3.67	65	86	84	-		
	2	27	56246			94	35	89	0	-
	3	30	43902			98	99	-		
19	1	12	7708	3.60	50	87	88	-		
	2	13	5505			96	50	96	0	-
	3	15	4430			99	100	-		

根据本文建立的模型利用 Matlab 编程对该问题求解, 大约在 200 代左右可以得到 Pareto 最优解集, 其分布状况如图 3 所示. 从运算的过程中可以看出, 群体逐步向最优曲面趋近, 说明该算法收敛性良好. 在运算过程中, 设定的 Pareto 解质量衡量指标 r 值在运算过程中基本呈现单调递减趋势, 在第 0 代、50 代、100 代、150 代、200 代分别为 302.2506、54.5641、3.9272、1.5164、0.5060, 这也表明群体是朝最优解的方向进化. 表 2 所列的是最终的 Pareto 解集中部分解的情况.

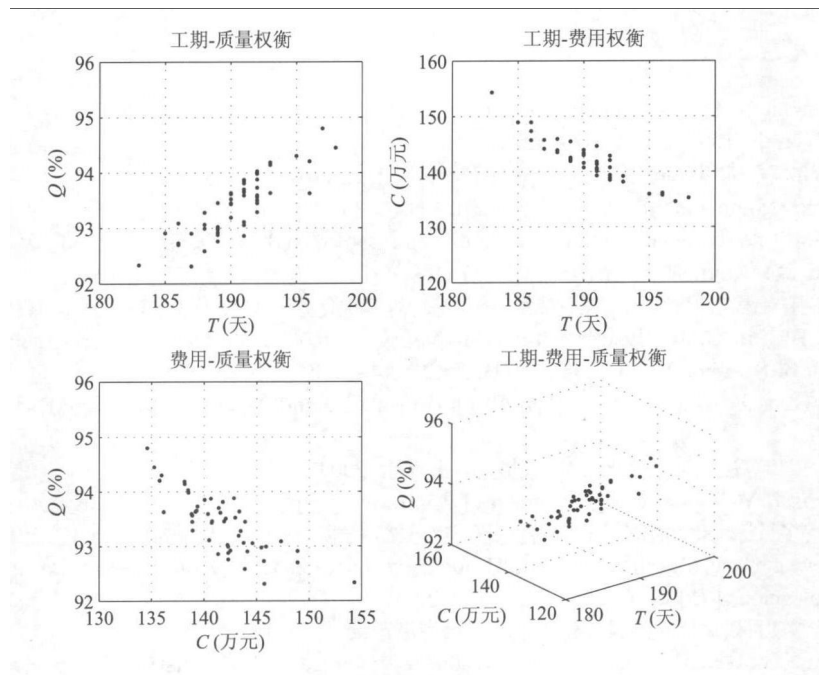


图 3 迭代 200 次时群体分布状况

表 2 部分 Pareto 解

序号 (i)	Pareto 解	工期 T_i (天)	费用 C_i (万元)	质量 Q_i (%)
1	{2113322322111131133}	189	141.9073	93.4550
2	{2213312322111131133}	190	142.2268	93.6956
3	{2113322322211131122}	192	139.3747	93.7311
3	{2213322322111131133}	191	140.6518	93.8719
4	{2113121322111131133}	187	147.7213	92.4137
5	{2323322322111131133}	195	135.0906	94.5550

从图 2 和图 3 可以看出中可以看出, 工期和费用直接呈现明显的线性递减关系, 这与 Feng 等^[9] 的工期 - 费用权衡模型的研究结果相同; 通常情况下, 工期的压缩势必会降低工程的质量, 因此工期和质量也显

现出线性递增的关系。而从整体上看,质量却随着费用的增加而降低,这与现实通常情况下的质量和费用的关系有所不同。其原因主要在于:①该项目的规模较小(工期约 200 天,造价 130 万元左右);②本模型中忽略了间接费用的影响。因此单项工作的赶工费用要远高于正常费用,这就造成了较高费用下的较低质量的情况(见表 1),从而导致总费用和总质量的递减趋势,该问题还有待于进一步研究。另一方面,这也证明了工期-费用-质量三者之间有着相互影响的作用。决策者从图 3 显示的 300 个 Pareto 最优解(包括重复解)中选取适合于决策者偏好的实施方案,这为决策者在尽可能小的可选择的决策范围内提供了最优的方案。

6 结论

1) 本文针对工程中单项工作质量评价的客观性较差的特点,结合专家打分和以往类似工程资料,制定统一的评价标准,并根据单项工作的权重加权求出整个工程的质量,建立了完整的质量衡量体系,从而得到更加符合工程实际的质量水平。

2) 工程项目的工期-费用-质量权衡问题中变量的离散特性,利用遗传算法这种搜索寻优技术可以迅速方便地解决该问题。而作为多目标优化问题,在模糊的决策者偏好信息的前提下,其目标值的评价比较困难。Pareto 排序的思想则是解决多目标评价的有效手段,本文将 Pareto 排序法与遗传算法结合建立起的工期-费用-质量权衡模型克服了 3 个优化目标难于兼顾的困难,取得了良好的效果。

3) 本文中采用的 Pareto 排序法设置了解的质量衡量指标 r ,而未对解的均匀性进行衡量。若将距离法或者小生境技术引入该模型对均匀性和收敛性进行控制,相信会取得更加精确的结果。而由此带来的运算速度的降低问题也有待将来进一步研究。

参考文献

- [1] Babu A J G, Suresh N. Project management with time, cost and quality considerations[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 88(2): 320-327.
- [2] Khang D B, Myint Y M. Time, cost and quality trade-off in project management: A case study[J]. *International Journal of Project Management*, 1999, 17(4): 249-256.
- [3] El-Rayes K, Kandil A. Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2005, 131(4): 477-486.
- [4] 王健, 刘尔烈, 骆刚. 工程项目管理中工期-费用-质量综合均衡优化 [J]. *系统工程学报*, 2004, 19(2): 148-153.
Wang J, Liu E L, Luo G. Analysis of time-cost-quality tradeoff optimization in construction project management[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2004, 19(2): 148-153.
- [5] Goldberg D E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*[M]. USA: Addison-Wesley, 1989.
- [6] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化 [M]. 清华大学出版社, 2004.
Xuan G N, Cheng R W. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*[M]. Tsinghua University Press, 2004.
- [7] 刘淳安. 一种求解多目标优化问题的新遗传算法 [J]. *宝鸡文理学院学报: 自然科学版*, 2004, 24(2): 92-94.
Liu C A. A new genetic algorithm for multi-objective optimization[J]. *Journal of Baoji College of Arts and Science: Natural Science Edition*, 2004, 24(2): 92-94.
- [8] 张连营, 骆刚. 工程项目资源优化的遗传算法 [J]. *中国港湾建设*, 2001(1): 48-51.
Zhang L Y, Luo G. Genetic algorithms in resource optimization of construction project[J]. *China Harbour Engineering*, 2001(1): 48-51.
- [9] Feng C W, Liu L, Burns S A. Stochastic construction time-cost trade-off analysis[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2000, 14(2): 117-126.