

基于遗传算法的两阶段建筑工程多目标优化

张光明¹, 刘东峰¹, 刘春锋²

(1. 江苏科技大学经济管理学院, 江苏 镇江 212003; 2. 南阳理工学院软件学院, 河南 南阳 473000)

摘要: 由于现阶段对资源的均衡操作大都侧重于对工期-资源同时优化, 很少涉及质量和成本, 所以这里提出了一个两阶段优化模型, 第一阶段是基于工期、质量和成本三个目标为非线性关系, 建立三个目标的综合优化模型; 第二阶段是从上阶段对所得到的非劣解中由决策者选择一个或多个满意的解输入到本阶段进行资源均衡优化, 两阶段均用遗传算法求解, 最后通过一个实例证明了两阶段模型的可行性与优越性。

关键词: 综合优化; 建筑工程; 遗传算法; 资源均衡

中图分类号: TU-9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)03-0410-07

以往对建筑工程的优化大都是对工期-资源、工期-成本的综合优化, 很少把工期、质量、成本和资源这四个目标综合起来考虑。近年来随着人们对质量目标越来越重视, 人们开始提出了对工期、质量和成本三个目标的综合优化, 并且取得了良好的结果。如杨耀红^[1]、王建^[2]、高兴夫^[3]建立的对三个目标综合优化的模型都是先对各个单目标赋予一定的权重, 然后通过加权法得到的, 其缺点是: 在一定程度上受人的主观影响较大。但是它们都没考虑求解后资源是否均衡, 而现实中, 如果在某个时间内资源投入量过多会造成不必要的浪费, 所以我们要考虑资源在使用过程中的均衡性。

近年来对资源优化的模型很多, 如张连营^[4]、骆刚^[5]等分别提出了资源均衡模型并用遗传算法进行求解, 但是这些方法都是针对工期-资源的优化, 而没有考虑质量和成本。Po-Han Chen^[6]、Daisy X. M. Zheng^[7]分别提出了在资源合理分配条件下的工期-成本综合和优化模型, 但这些模型没有考虑质量目标, 这显然满足不了现实的需要。因此在参考前人研究成果的基础上提出了一个两阶段综合优化模型, 即先求解工期、成本和质量三目标的综合优化模型, 然后在对所求得的结果非关键线路上的各项工序进行资源均衡。

1 各目标函数建立

模型建立的目标就是在资源有限的条件下, 使工期尽可能短、成本尽可能低、质量尽可能高, 同时还要保证单位时间内资源用量的均衡性。在建筑施工中, 每个工序都可能有不同的资源使用计划, 而不同的资源使用计划对应着不同的工期、质量和成本, 我们把不同的资源使用计划成为模式, 因此每个工序都有若干个模式, 每个模式都对应不同的时间、质量和成本。

1.1 工期、成本、质量目标函数的建立

工期我们可以通过关键线路法求得, 质量和成本我们可以通过把网络计划中所有工序所选择的模式对应的时间、费用和质量加总得到。其目标函数如下:

$$T = \sum_{i \in k} D_{ij}$$
$$i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

D_{ij} 为关键线路上第 i 项工序所耗用的时间, k 为网络计划图中关键线路上所有工序的集合(关键线路也

就是网络计划图中所有线路中工期最长的一条)。

$$C = \sum_{i=1}^n C_{ij} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_{ij} \quad (3)$$

其中 C 为项目的总成本, C_{ij} 为第 i 项工序使用第 j 种模式的成本; Q 为项目的总质量, Q_{ij} 为第 i 项工序使用第 j 种模式的质量; n 为项目中所有的工序数, m_i 为每个工序的模式数;

1.2 工期、质量和成本综合优化函数的建立

由上面所建立的目标函数可以看出, 质量、成本和工期都与各个工序所所用的时间直接相关, 可以把各工序的时间作为自变量, 建立一个综合优化函数. 为了把三个单目标联系到一起, 并使其具有可比性, 我们对 Daisy^[7] 提出的设定权重的方法进行改进建立了一个综合优化函数. 设 (z^+) 分别为当前种群中成本、工期和质量三个目标的最大值; (z^-) 分别为当前种群中成本、工期和质量三个目标的最小值,

$$z^+ = \{z_c^{\max}, z_t^{\max}, z_q^{\max}\} \quad (4)$$

$$z^- = \{z_c^{\min}, z_t^{\min}, z_q^{\min}\} \quad (5)$$

设定各个目标权重的步骤如下:

(1) 如果在相同进化代数的种群中各个目标的最大值与其相应的最小值均不相等, 那么

$$v_c = z_c^{\min} / (z_c^{\max} - z_c^{\min}) \quad (6)$$

$$v_t = z_t^{\min} / (z_t^{\max} - z_t^{\min}) \quad (7)$$

$$v_q = z_q^{\min} / (z_q^{\max} - z_q^{\min}) \quad (8)$$

$$v = v_c + v_t + v_q \quad (9)$$

$$w_c = v_c / v \quad (10)$$

$$w_t = v_t / v \quad (11)$$

$$w_q = v_q / v \quad (12)$$

$$w_c + w_t + w_q = 1 \quad (13)$$

(2) 如果 $z_c^{\max} = z_c^{\min}, z_t^{\max} = z_t^{\min}, z_q^{\max} = z_q^{\min}$

$$w_c = w_t = w_q = \frac{1}{3} \quad (14)$$

如果 $z_c^{\max} = z_c^{\min}, z_t^{\max} \neq z_t^{\min}, z_q^{\max} \neq z_q^{\min}$

$$w_t = w_q = 0.1, w_c = 0.8 \quad (15)$$

如果 $z_c^{\max} \neq z_c^{\min}, z_t^{\max} = z_t^{\min}, z_q^{\max} \neq z_q^{\min}$

$$w_c = w_q = 0.1, w_t = 0.8 \quad (16)$$

如果 $z_c^{\max} \neq z_c^{\min}, z_t^{\max} \neq z_t^{\min}, z_q^{\max} = z_q^{\min}$

$$w_t = w_q = 0.1, w_c = 0.8 \quad (17)$$

其综合优化函数如下:

$$f(x) = w_c \frac{z_c^{\max} - z_c - \gamma}{z_c^{\max} - z_c^{\min} - \gamma} + w_t \frac{z_t^{\max} - z_t - \gamma}{z_t^{\max} - z_t^{\min} - \gamma} + w_q \frac{z_q^{\max} - z_q - \gamma}{z_q^{\max} - z_q^{\min} - \gamma} \quad (18)$$

γ 是为了防止适应度函数为零而随机选取的一个介于 $(0, 0.01)$ 之间的小数; z_c, z_t, z_q 是当前种群中各个染色体所对应的工期、成本和质量; $f(x)$ 为第 x 代个体的目标函数。

1.3 资源均衡目标

资源均衡分为单资源均衡和多资源均衡, 本文主要考虑单资源均衡, 衡量资源均衡的指标有多种形

式, 这里采用标准方差作为目标函数, 其表示如下:

$$\min F = \sigma^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T R_i^2 - R_m^2$$
$$R_m = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T r_i D_i$$
$$\text{s. t. } t_i - ES_i \leq TF_i$$

(19)

R_i 为所有工序在第 t 天的资源需求量; r_i 为工序 i 每天的资源需要量; D_i 为工序 i 的持续时间; t_i 为作业 i 的开始时间; ES_i 为作业 i 的最早开始时间; TF_i 为作业 i 的总时差; T 为工期; 因为目标函数值是越小越好, 所以我们对此作一下变化, 即

$$\max F = M - \sigma^2$$

(20)

其中 M 为一个较大的整数, 保证式子值为正。
由于公式(4) 优化函数与公示(6) 所采用的染色体的构成方式不一样, 所以我们把综合优化模型分为两个阶段, 即先对工期、成本和质量这三个目标进行遗传运算, 此时得到若干组非劣解, 然后把这些非劣解所对应的参数作为已知变量进行资源均衡运算。

2 两阶段模型的求解流程

2.1 算法的操作流程

在实际应用中, 遗传算法存在早熟现象、局部寻优能力差等缺点, 因此这里我们采用赵志鹏^[8]提出的一种新的适应度函数来克服这种缺点。

2.2 资源均衡操作流程

工期、成本和质量综合优化之后输出的每个染色体所对应的工期以及染色体中每个工序的持续时间都已经确定, 此时决策者可以根据自己的偏好选择一个满意的染色体进行资源均衡操作. 通过这个被选择染色体我们可以得到各个工序的最早开始时间(ES)、最早结束时间(EF)、最迟开始时间(LS)、最迟结束时间(LF)和总时差(TF)这些进行资源均衡必须参数。

2.2.1 染色体的形成

染色体的构成采用实值编码的方式, 其基因位上的值为每个工序的开始时间, 工序的开始时间是在 ES 和 LS 之间随机产生的. 如下图所示:

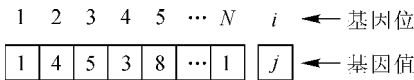


图 1 染色体结构

Fig.1 The structure of chromosome

图中, 染色体上每个基因位的取值与本工序的开始时间有关, 初始个体的每个基因位上工序 i 的值是在取值范围 (ES_i, LS_i) 内随机产生的, 如当 i 为 5 时, 代表第五个工序的开始时间为第 8 天。

2.2.2 选择算子

选择操作使用改进的轮盘赌选择方法, 它可以有效地抑制早熟收敛的发生, 具体操作步骤是将种群中所有个体按其目标函数值的大小进行降序排列, 这种基于排序的适应度函数表示为:

$$f(X_r) = \frac{1}{\sqrt{r}}, r = 1, 2, \dots, N$$

(21)

式中: X_r 为种群按目标函数值排序后的第 r 个个体; N 为种群规模。

2.2.3 交叉和变异操作

本文采用单点交叉, 即根据设定的概率(P_c) 在母体选择一个交叉点, 然后交换交叉点的右边部分, 得到两个子染色体. 变异操作是以一定的变异(P_m) 概率在个体中随机选择一个基因位, 并在这个基因位所对应的模式个数的取值范围中任选择一个数值来代替此数值。

2.2.4 终止准则

当运算进行最大进化代数 N 时, 即停止.

2.3 工期-成本-质量综合优化算法的实现

遗传操作的原理同上, 染色体的构成采用实数编码的方式, 初始个体基因位上工序 i 的模式是在取值范围 $(1, 2, \dots, m_i)$ 内随机产生的, 其选择、交叉和变异操作, 同上面所定义操作方式.

两阶段优化模型的实现流程如下图所示:

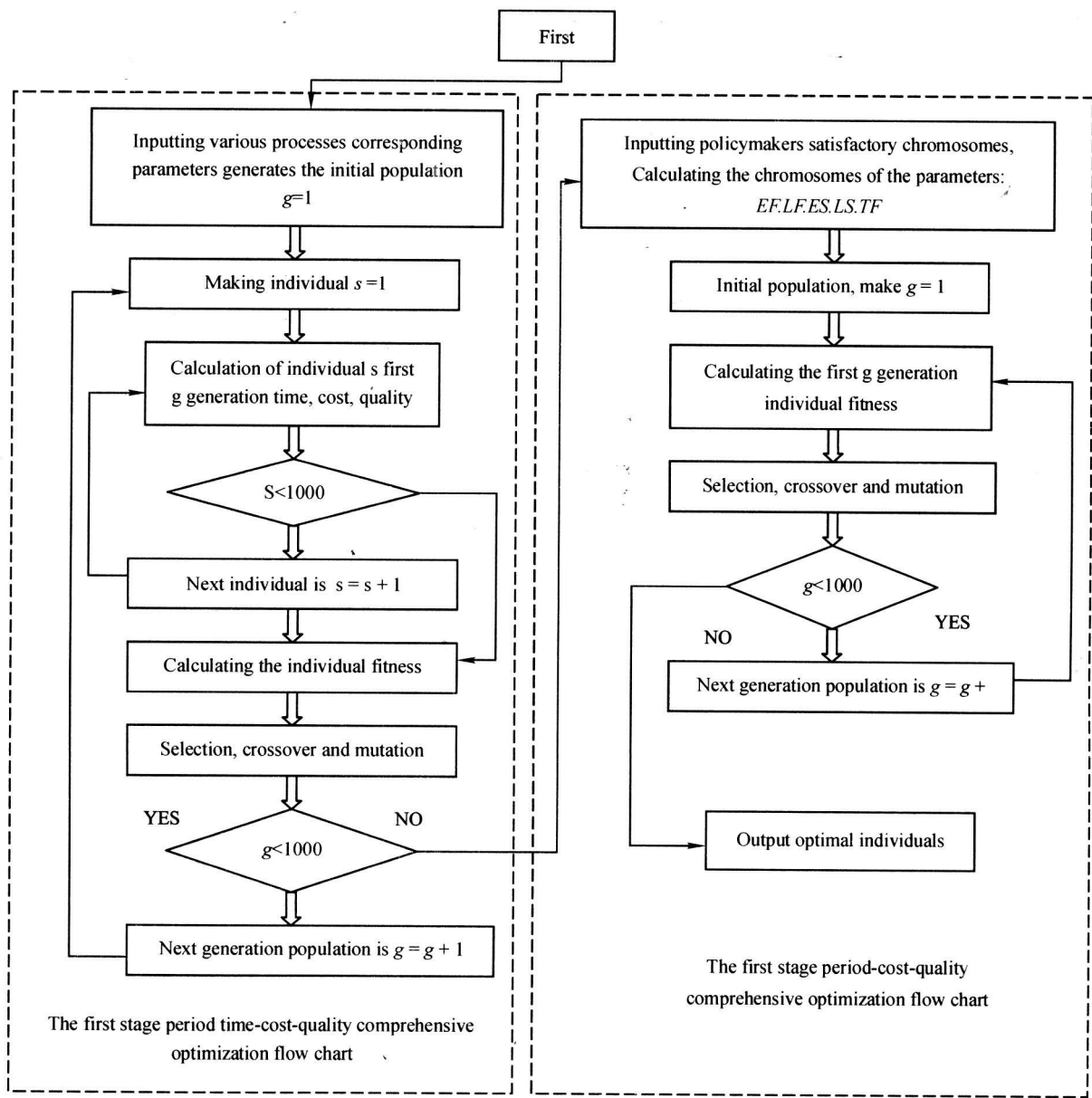


图 2 两阶段优化模型流程图

Fig. 2 Flow chart of the two-phase optimization model

3 实例验证

3.1 实例计算

下面举一个有 10 个工序的工程实例来验证本算法, 为了表达方便各工序都用序号来表示, 其网络图如图 3 所示, 其中 0 工序为虚工序, 没有时间、工期、质量和资源参数.

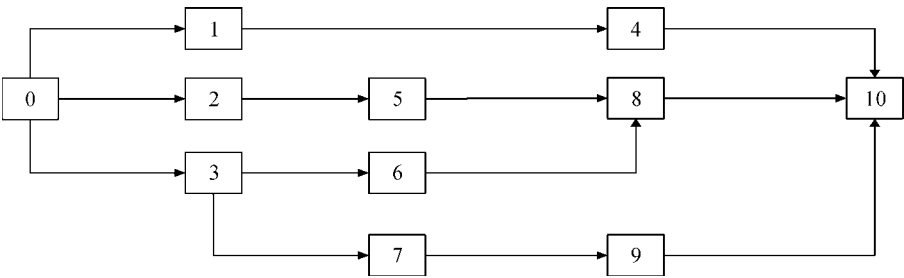


图 3 实例网络计划图

Fig. 3 Activity network of the sample project

各工序的参数如表 1 所示:

3.1 工期-成本-质量综合优化

设种群大小为 1 000, 最大进化代数为 1 000, 交叉概率为 $P_c=0.6$, 变异概率为 $P_m=0.05$, $\gamma=0.005$. 用 C 语言编程运行八分钟之后得到 1 000 个个体, 我们选择几个个体如下:

表 2 输出染色体样例

Tab. 2 The sample of excellent chromosomes

| Chromosome | Cost | Quality | Time |
|---------------|---------|---------|------|
| 1 113 122 331 | 130 300 | 0.955 | 45 |
| 1 133 222 211 | 132 400 | 0.924 | 46 |
| 1 112 332 131 | 123 300 | 0.915 | 47 |
| 1 112 332 311 | 121 400 | 0.955 | 49 |
| 1 123 432 311 | 117 400 | 0.974 | 51 |
| 1 232 432 331 | 115 900 | 0.984 | 53 |

为了方便对比我们把运用关键线路法优化之后每天所对应的工期、成本和质量的 结果列出如下:

表 3 网络计划法所得结果

Tab.3 The solution achieved from Network plan

| Time | 53 | 51 | 49 | 47 | 46 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Quality | 0.913 | 0.933 | 0.924 | 0.902 | 0.905 |
| Cost | 124 100 | 123 600 | 123 700 | 127 200 | 132 700 |

3.1.2 资源均衡优化

在资源均衡阶段, 如果决策者对成本和 质量看的很重, 而工期次之, 那么我们可以选择“1232432331”这个解作为例子进行下阶段优化. 求解其 各工序参数如下(见表 4):

种群为 500, 最大进化代数 1 000, 交叉概率为 $P_c=0.6$, 变异概率为 $P_m=0.05$, $M=1\,000$. 用 C 语 言编程运行 7 分左右所得优化结果趋于稳定, 输出一个染色体, 其中每个工序的开始时间分别为[25 0 0 35 6 10 14 34 30 50], 其 $\sigma=3.42$; 用时标网络图优化之后得到的各工序的开始时间分别为[0 0 0 30 6 10 19 34 30 50], 其 $\sigma=8.38$, 而在资源均衡前 $\sigma=12.98$.

表 1 各工序的数据

Tab. 1 Activity data of the sample project

| Process <i>i</i> | Mode <i>j</i> | Time <i>D_#</i> | <i>Q</i> (<i>Q_{ij}</i>) | <i>C</i> (<i>C_{ij}</i>) | Resource right amount |
|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 5 | 1 | 7 500 | 15 |
| | 1 | 4 | 0.85 | 6 400 | 16 |
| 2 | 2 | 6 | 0.88 | 6 000 | 10 |
| | 3 | 8 | 0.94 | 5 600 | 7 |
| | 4 | 9 | 1 | 5 400 | 6 |
| 3 | 1 | 6 | 0.9 | 7 800 | 13 |
| | 2 | 8 | 0.97 | 7 200 | 9 |
| | 3 | 10 | 1 | 7 000 | 7 |
| 4 | 1 | 12 | 0.68 | 19 200 | 16 |
| | 2 | 15 | 0.96 | 15 000 | 10 |
| | 3 | 18 | 1 | 14 400 | 8 |
| 5 | 1 | 22 | 0.84 | 39 600 | 18 |
| | 2 | 24 | 0.87 | 38 400 | 16 |
| | 3 | 26 | 0.92 | 36 400 | 14 |
| | 4 | 28 | 1 | 33 600 | 12 |
| 6 | 1 | 14 | 0.91 | 28 000 | 20 |
| | 2 | 18 | 0.96 | 27 000 | 15 |
| | 3 | 24 | 1 | 19 200 | 8 |
| 7 | 1 | 9 | 0.91 | 15 300 | 17 |
| | 2 | 10 | 1 | 14 000 | 14 |
| 8 | 1 | 14 | 0.52 | 9 800 | 7 |
| | 2 | 15 | 0.64 | 9 000 | 6 |
| | 3 | 16 | 1 | 6 400 | 4 |
| 9 | 1 | 15 | 0.92 | 7 500 | 5 |
| | 2 | 18 | 0.97 | 7 200 | 4 |
| | 3 | 20 | 1 | 6 000 | 3 |
| 10 | 1 | 3 | 1 | 1 200 | 4 |
| | 2 | 5 | 0.83 | 1 000 | 2 |

表 4 输出染色体样例

Tab. 4 The example of excellent chromosomes

| Processi | D_i | r_i | ES_i | EF_i | LS_i | LF_i | TF_i |
|----------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 5 | 15 | 0 | 5 | 30 | 35 | 30 |
| 2 | 6 | 10 | 0 | 6 | 0 | 6 | 0 |
| 3 | 10 | 7 | 0 | 10 | 0 | 10 | 0 |
| 4 | 15 | 10 | 5 | 20 | 35 | 50 | 30 |
| 5 | 28 | 12 | 6 | 34 | 6 | 34 | 0 |
| 6 | 24 | 8 | 10 | 34 | 10 | 34 | 0 |
| 7 | 10 | 14 | 10 | 20 | 20 | 30 | 10 |
| 8 | 16 | 4 | 34 | 50 | 34 | 50 | 0 |
| 9 | 20 | 3 | 20 | 40 | 30 | 50 | 10 |
| 10 | 3 | 4 | 50 | 53 | 50 | 53 | 0 |

3.2 模型分析

- (1)从第一个阶段和第二阶段优化的结果明显可以看出模型的优越性,而且运算效率也很高.
- (2)在计算量方面来说,模型大大减少了人工计算量.
- (3)模型在三大目标综合优化的基础上加入了资源均衡这个操作,使模型更加贴近现实.

4 结 论

本文建立了新的能够同时对工程多目标进行综合优化的目标函数,并把遗传算法运用到所构建的模型中,为施工方对工期、成本、质量和资源同时进行控制提供了可行的方法,其优点如下:

- (1)文中建立的两阶段综合优化模型,为以后对多目标函数综合优化的研究做出了一定的贡献.
- (2)模型中的综合优化函数是根据各单目标函数在当前种群中的最大值和最小值构建的,在一定程度上减少了专家在设定权重时所产生的误差.
- (3)模型所需的估测数据较少,客观上减少了人的主观因素所造成的误差.在模型实际运行时,只要施工人员计算出各个工序所对应的数据便能求解,因而具有较好的实用性.
- (4)模型考虑的影响因素不太全面,相信随着对此研究的深入,会使模型更加贴近现实.

参考文献 References

[1] 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): 112-117.
YANG Yao-hong, WANG Ying-luo, WANG Neng-min. Fuzzy Tradeoff Optimization of Time-Cost-Quality in Construction Project [J]. Systems Engineering theory & Practice, 2006(7): 112-117.

[2] 王 健,刘尔烈,骆 刚. 工程项目管理中工期-成本-质量综合均衡优化[J]. 系统工程学报, 2004, 19(2): 148-153.
WANG Jian, LIU Er-lie, LUO Gan. Analysis of time-cost-quantity tradeoff optimization in Construction project management[J]. JOURNAL OF SYSTEMS ENGINEERING, 2004, 19(2): 148-153.

[3] 高兴夫,胡程顺. 工程项目管理的工期-费用-质量综合优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 10: 112-117.
GAO Xing-fu, HU Chengshun, ZHONG Denghua. Study Synthesis Optimization of Time-Cost-Quality in Project Management[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2007, 10: 112-117.

[4] 张连营,张金平,王 亮. 工程项目资源均衡的遗传算法及其 MATLAB 实现[J]. 管理工程学报, 2004, 1: 52-55.
ZHANG Lian-ying, ZHANG Jin-ping, WANG Liang. Genetic Algorithms Based on MATLAB of Construction Project Resource Leveling [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2004, 1: 52-55.

[5] 骆 刚,刘尔烈,王 健. 遗传算法在网络计划资源优化中的应用[J]. 天津大学学报, 2004, 37(2): 179-183.
LUO Gang, LIU Er-lie, WANG Jian. Resource Planning Optimization in Network Schedule Using Genetic Algorithm[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(2): 179-183.

- [6] CHEN Po-Han, WENG Hai-jie. A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling[J] . Automation in Construction, 2009, 18 : 485-498.
- [7] ZHENG Daisy X M, THOMAS S Ng, KUMARASWAMY Mohan M. Applying a Genetic Algorithm-Based Multiobjective Approach for Time-Cost Optimization[J] . Journal of Construction Engineering and Management, 2004, 4: 168-176.
- [8] 赵志鹏, 董红斌. 一种新的基于遗传操作的改进型遗传算法[J] . 计算机应用与软件, 2008, 1: 235-237.
ZHAO Zhi-peng, Dong Hong-bin. A NEW IMPROVED GENETIC ALGORITHM BASED ON GENETIC OPERATION[J] . Computer Applications and Software, 2008, 1: 235-237.
- [9] Khaled El-Rayes. Time-Cost-Quality trade-off analysis for highway construction[J] . Journal of Construction Engineering and Management, 2005, 131(4): 477-486.
- [10] 周树发, 刘 莉. 工程网络计划中的多目标优化问题[J] . 华东交通大学学报: 2004, 21(2): 11-13.
ZHOU Shu-fa, ZHOU Li. Problems of Multi-objectives in Network project[J] . Journal of East China Jiaotong University, 2004, 21(2): 11-13.
- [11] 陈砚祥, 刘晓君. 既有居住建筑节能改造筹资问题探讨[J] . 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(6): 841-845.
CHEN Yan-xiang, LIU Xiao-jun. Study on the financing for the energy saving reconstruction of residential building[J] . J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(6): 841-845.

Comprehensive optimization for multiple objectives in construction based on GA

ZHANG Guang-ming¹, LIU Dong-feng¹, LIU Chun-feng²

(1. Jiangsu University of Science and Technology school of economics and management, Jiangsu Zhenjiang 212003;

2. Nanyang College of science and technology school of software, Henan Nanyang 473000)

Abstract: As most of the way of resource leveling is focused on time-resource trade off, very little is involved in the quality and cost, a two-stage optimization model is proposed; synthesis optimization models is established based on the relationship of the time, the quality. The cost is the misalignment, and it uses chromosomes which are built up by mode to carry on the heredity operation. The second stage is to choose a non-poor solution obtained from the decision-maker from the first stage inputs to this stage to carry on the resource leveling optimization. It takes time in resources variance minimum as the objective function, and the gene value which is non-critical process's beginning time to make up the chromosome to carry on the heredity operation. An application example is analyzed to illustrate the use of the model and demonstrate its capabilities in generating and visualizing optimal tradeoffs during construction time, cost, quality, and resource.

Key words: comprehensive optimization; construction engineering; GA; resource balance