

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.03.011

混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派方法

曾 强,王孟华,袁明明,张进春

(河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000)

摘要:针对一类混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派问题,提出了一种基于遗传算法的优化方法。对混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派问题进行了描述,并设计了遗传算法对问题进行求解。提出了基于承包商工作日历的时间推算机制,设计了时间推算函数作为混合工作日历下工程项目工期推算的基础;算法采用“基于承包商号的整数编码方式”对个体进行编码和“拒绝策略”产生初始可行种群,使用“交叉算子改进策略”和“两点交叉方式”进行交叉以保证交叉后子个体可行,采用“拒绝策略”和“单点变异方式”进行变异以保证变异后子个体可行,解码过程中基于“关键路径法”和“正向推算函数 FC”推算项目工期。通过案例分析验证了所提方法的有效性。

关键词:工程项目任务指派;混合工作日历;单目标优化;遗传算法;时间推算

中图分类号:C93-03;TP391

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)03-099-18

Task assignment optimization method of getting shortest project duration for engineering project with capital limit under mixed work calendars

ZENG Qiang, WANG Menghua, YUAN Mingming, ZHANG Jinchun

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China)

Abstract: This paper presents an optimization method using a genetic algorithm to solve the task assignment problem of achieving the shortest project duration for an engineering project with capital limit under mixed work calendars. Firstly, the problem was described. Then, a genetic algorithm was designed to solve the researched problem. A time reckoning mechanism based on the contractor's work calendar was proposed and related time reckoning functions were designed as the basis of calculating project duration for an engineering project under mixed work calendars. An integer coding method based on contract number was used to encode the chromosome. The refusal strategy was used in the population initialization to ensure the feasibility of chromosomes. To ensure the feasibility of offspring chromosomes, an improved crossover operator was used in the crossover operation based on the two-point crossover method, and a refusal strategy was used in the mutation operation based on the single-point mutation method. Finally based on the critical path method, the forward reckoning function FC was used to get the shortest project duration. The effectiveness of the proposed method was verified by a case study.

Keywords: task assignment for engineering project; mixed work calendars; single objective optimization; genetic algorithm; time reckoning

收稿日期:2018-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774113),河南省高等学校重点科研资助项目(19A410001)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51774113) and the Research Fund for University of Henan Province, China(19A410001).

作者简介:曾强(1975—),男,副教授,博士,主要从事生产调度研究,(E-mail) zqzengqing@hpu.edu.cn。

随着社会的快速发展,国家经济建设和公共事业中出现了大量的大型工程项目。大型工程项目具有工期长、任务多、费用高等特点,单一承包商因受人力、物力、财力等因素限制,无法独立、较好地将其完成,故工程实践中往往需要将大型工程项目的任务指派给多个承包商,以达到缩短工期、降低成本等目的。现有关于工程项目优化的研究聚焦于项目调度^[1-4],优化目的聚焦于工期、成本、质量和资源均衡等方面^[5-7],而对于项目任务指派的研究极少。在工程项目任务指派问题中,工期最短化是决策者最为关注的优化目标。一个工程项目在将任务指派给多个承包商时存在两类成本,一类是委托方支付给承包商的委托成本,另一类是承包商的执行成本。工程实践中,委托方的资金往往受限,故不能为了缩短工期而只选择任务时间短的承包商,否则,可能导致委托成本超过委托方资金上限;同理,承包商的资金往往受限,故不能无限制地将多个任务指派给同一个承包商,否则会导致任务执行成本超过承包商资金上限。工程实践中,不同承包商由于工作习惯等不同,可能采用不尽相同的工作日历(混合工作日历)。基于此,混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派研究具有重要意义。

混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派本质上属于单目标任务指派问题。单目标任务指派问题的常用求解方法有精确方法和近似方法。精确方法能找到问题的最优解,主要有匈牙利法^[8]、削高排除法^[9]、缩阵分析法^[10]、Munkers 法^[11]、一次分配算法^[12]、目标值子矩阵法^[13]、生长树法^[14]、分枝定界法^[15]、单调迭代算法^[16]等,但仅适用于求解小规模指派问题。近似方法基于启发式原理寻找问题的近优解(满意解),主要有遗传算法^[17]、蚁群算法^[18]、粒子群算法^[19]等智能搜索算法,可用于求解较大规模指派问题。

混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派又不同于传统单目标任务指派问题,它比传统单目标任务指派问题更复杂,主要表现在两个方面:1)项目工期的确定过程复杂。在承包商采用混合工作日历的情况下,项目工期的确定需基于“关键路径法”,根据任务时间和承包商各自的工作日历进行准确推算。现有研究对项目工期的确定方法未考虑工作日历^[20-22],不能用于确定混合工作日历下的项目工期。2)资金受限约束增加了指派难度。究竟如何指派任务既能保证各承包商执行成本不超过其资金上限、项目委托成本不超过委托方资金上限,又能使项目工期最短,这是一个高度复杂的 NP 难问题。基于以上原因,解决单目标任务指派问题的精确方法并不适用于求解混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派问题,而近似方法无疑才是求解该问题的有效方法。其中,遗传算法作为一种有效的全局搜索方法,具有鲁棒性、并行性,以及在求最优化问题时可以不必给出目标函数的解析式等优点,可以作为求解混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派的理想方法。

文中针对一类混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派问题,考虑委托方、承包商资金受限约束,提出了一种基于遗传算法(GA, genic algorithm)的优化方法。

1 问题描述

某工程项目有 n 项任务 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$, 要将其指派给 m 个承包商 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ 执行。假设:①一项任务由一个承包商独立执行,一个承包商在技术可行、资金充足的情况下可执行多项任务。②各项任务由不同承包商执行的时间、委托成本、执行成本事先已被确定,并分别用时间数组、委托成本数组、执行成本数组给出;若某项任务不能由某个承包商执行,则时间数组、委托成本数组、执行成本数组中对应元素被赋为空值。③任务的执行不能违反任务之间的紧前紧后约束关系。④各承包商被指派任务的执行成本总额不能超过其资金上限。⑤项目委托成本总额不能超过委托方资金上限。⑥承包商能做好随时开工的准备,指派给某承包商的任务一旦满足开始执行条件(紧前任务已被完成),则该承包商应立即开始执行该任务。⑦任务一旦开始执行则不可中断去执行另一项任务。⑧各承包商按自己的工作日历(工作制和工作时段的合称)施工。工作制表征承包商在工程周期内哪些日期是工作日、哪些日期是休息日;工作时段表征工作日各个工作时段的工作、停工起止时间段。⑨当承包商按其工作日历停工时,正在执行的任务停止执行,待承包商重新开工时继续执行此任务后续未完成的工作。⑩项目的开始时刻不能早于委托方指定的项目起始时刻。要求:在以上假设条件下进行合理指派使项目工期最短。显然,该问题是一个复杂的巨组合优化问题,适合采用智能搜索算法求解。

2 遗传算法设计

针对研究问题的特点,以 Excel VBA 为平台设计了遗传算法(GA,genetic algorithm)对其求解。

2.1 类型及变量、数组定义

根据算法需要,定义了如图 1 所示的自定义类型 Chrom 及表 1 所示的变量及数组。其中, T 、 EC 、 IC 为 $n \times (m + 1)$ 的数组,第 1 列为任务代码; N 为 $n \times 4$ 的数组,从左到右依次为任务代码、任务名称、以逗号分隔的紧前任务列表、紧前任务数; E 为 $m \times 5$ 的数组,从左到右依次为承包商号、名称、资金上限、工作制、工作时段; GZZ 为工作制数组,用于存储调度承包商用到的所有工作制,每种工作制占 2 列,第 1 列第 1 行元素为工作制名称、其他行元素为非周末休息日,第 2 列第 1 行元素为空、其他各行元素为周末加班日; $GZSD$ 为工作时段数组,用于存储调度承包商用到的所有工作时段,每种工作时段占 7 列,第 1 列第 1 行元素为工作时段名称、第 2 行元素为周一的工作时段个数、其他相邻两行元素对应一个工作时段的工作时刻和停工时刻,第 2 列第 1 行元素为空、第 2 行元素为周二的工作时段个数,其他相邻 2 行元素对应一个工作时段的工作和停工时刻,依此类推。

表 1 变量及数组定义

Table 1 Definition of variables and arrays

变量	含义	变量	含义
n	任务数	GZZ	工作制数组
m	承包商数	GZSD	工作时段数组
bt	项目起始时刻	zjsx	委托方资金上限
T	任务时间数组	popsize	种群规模
EC	任务委托成本数组	pc	交叉率
IC	任务执行成本数组	pm	变异率
N	网络计划表数组	maxgen	最大进化代数
E	承包商数组	ds	正的大数

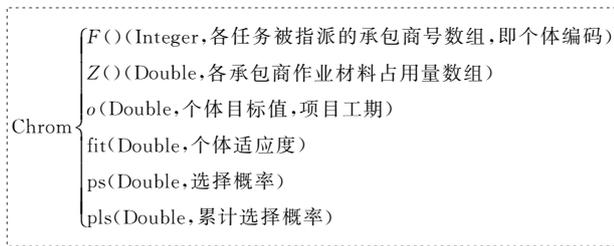


图 1 自定义类型

Fig. 1 Customized types of chromosomes

2.2 基于承包商工作日历的时间推算机制及函数设计

按照假设条件⑧,用 Excel 设计了“工作制”“工作时段”工作表,表中内容将在算法中分别赋给数组 GZZ 和 GZSD,其结构如图 2 和图 3 所示。在“承包商”工作表中,将工作制和工作时段名称指定给承包商。如图 4 所示,以 M 承包商为例,当前被指定的工作制为“X 工作制”,工作时段名称为“A”。最后,利用 VBA 编写函数实现基于工作日历的时间推算,分别是 Isworkday、Nextworkday、Getsd、Forwardwd、Backwd、Getat1 和 Getat2。

	A	B	C	D	E	F
1	X 工作制		Y 工作制		Z 工作制	
2	2017/1/2	2017/1/7	2017/1/2	2017/1/7	2017/1/2	
3	2017/1/27	2017/1/14	2017/1/27	2017/1/14	2017/1/27	
...

图 2 “工作制”工作表

Fig. 2 ‘Working system’ sheet

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	A							B	
2	3	3	3	3	3	1	1	2	...
3	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	...
4	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	...
5	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00			13:00	...
6	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00			17:00	...
7	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00				
8	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00				

图 3 “工作时段”工作表

Fig.3 Spreadsheet of work-time periods

	A	B	C	D	E
1	承包商号	名称	资金上限	工作制	工作时段
2	1	M 承包商	3000	X 工作制	A
3	2	N 承包商	2500	Y 工作制	B
...

图 4 “承包商”工作表

Fig.4 Spreadsheet of contractors

2.2.1 Isworkday 函数

该函数有 2 个参数即 md(Date 型)和 wds(String 型),其作用是根据承包商工作制 wds 判断日期 md 是否为其工作日,若是工作日则返回 1,否则返回 0。

2.2.2 Nextworkday 函数

该函数有 3 个参数即 md(Date 型)、x(Integer 型)和 wds(String 型),其作用是获得根据承包商工作制 wds 从日期 md 推算 x 天后的工作日,x>0 时为正向推算,x<0 时为反向推算。

2.2.3 Getsd 函数

该函数有 3 个参数即 t(Double 型)、cbsh(Integer 型)、xqj(Integer 型),其作用是根据某承包商 cbsh 的工作时段名称,获得时间 t 在该承包商某工作日(一周内第 xqj 天)的 0:00—24:00 时间段所处的位置,其返回值为数组 A。该数组有 2 个元素,A(2)是标志元素,其值为 0 表示时间 t 属于承包商 cbsh 某工作日第 A(1)个非工作时段,其值为 1 则表示时间 t 属于承包商 cbsh 某工作日第 A(1)个工作时段。在图 5 中,该承包商某工作日有 2 个工作时段,8:00—12:00(编号为 1)和 13:00—17:00(编号为 2),把时间 0:00—24:00 划分成 5 个时间段,另外 3 个时间段为非工作时段(编号为 0、1、2)。

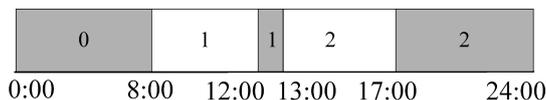


图 5 某承包商某工作日的工作时段与非工作时段

Fig. 5 Work-time and non-work-time periods of a contractor's work day

2.2.4 Forwardwd 函数

该函数有 3 个参数即 mdt(Date 型)、tt(Double 型)和 cbsh(Integer 型),其作用是根据承包商 cbsh 的工作日历获得从某个工作时刻 mdt 正向推算 tt 小时后的工作时刻。

2.2.5 Backwd 函数

该函数有 3 个参数即 mdt(Date 型)、tt(Double 型)和 cbsh(Integer 型),其作用是根据承包商 cbsh 的工作日历获得从某个工作时刻 mdt 反向推算 tt 小时后的工作时刻。

2.2.6 Getat1 函数

该函数有 2 个参数即 mdt(Date 型)和 cbsh(Integer 型),其作用是根据承包商 cbsh 的工作日历获得从

某个时刻 mdt 正向推算得到的最早工作时刻。

2.2.7 Getat2 函数

该函数有 2 个参数即 mdt(Date 型)和 cbsh(Integer 型),其作用是根据承包商 cbsh 的工作日历获得从某个时刻 mdt 反向推算得到的最早工作时刻。

2.3 算法流程

文中设计的算法流程如图 6 所示。算法中用 Opt1 存放迭代到每代为止的最优个体,用 Optarray 对象数组记录迭代过程中每代对应的 Opt1。

2.4 获取参数

设计工作表“网络计划表”“承包商”“任务时间”“任务委托成本”“任务执行成本”“其他参数”。算法分别从这些工作表读取相应数据赋给数组 N 、 E 、 T 、 EC 、 IC 、 GZZ 、 $GZSD$ 和表 1 中的其他变量。

2.5 编码方式

采用“基于承包商号的整数编码方式”对个体进行编码。式(1)中属性 F 即为个体 $Chr(i)$ 的一种编码,表示任务 $1\sim n$ 依次被指派给承包商号为 $3,2,2,1,2,4,5,6\cdots$ 的承包商。

$$Chr(i).F = (3\ 2\ 2\ 1\ 2\ 4\ 5\ 6\cdots)。(1)$$

2.6 种群初始化

按照图 7 所示的流程产生规模为 popsize 的初始随机种群 OldPop。其中,判断任务 i 是否可指派给承包商 k 的方法如下:若 $T(i, k+1)$ 、 $EC(i, k+1)$ 、 $IC(i, k+1)$ 为空值,则不可指派,否则,若承包商已被指派任务的执行成本与任务 i 由承包商 k 执行的执行成本之和大于承包商 k 的资金上限,则不可指派,否则可指派。当把任务 i 指派给承包商 k 后,需累计承包商 k 的执行成本。图 7 中自定义函数 Getic 用于获得任务 i 由承包商 k 执行的执行成本。当产生了 F 之后,需根据 F 利用自定义函数 Getwtcb 获得项目委托成本总额 wtcb,若 $wtcb \leq zjsx$,表明项目委托成本总额不超过委托方资金上限,将 F 、 Z 赋给 $Ch.F$ 、 $Ch.Z$ 并将 Ch 加入种群 Oldpop,否则需重新产生 F 。从图 7 可见,通过 While 循环保证数组 F 的每个元素是可行承包商号,从而保证个体 Ch 是可行的,进而保证初始种群 OldPop 的所有个体均是可行个体。

2.7 遗传操作

通过选择、交叉、变异操作产生规模为 popsize 的子代种群 Newpop,遗传操作流程如图 8 所示。用轮盘赌随机选择 2 个个体 $P1$ 、 $P2$,让 $P1$ 、 $P2$ 进行交叉操作得到 2 个个体 $Ch1$ 、 $Ch2$,先让 $Ch1$ 变异将得到的子代个体加入 Newpop,计数器 i 增加 1,若 Newpop 中个体数不足 popsize,则继续让 $Ch2$ 变异并将得到的子代个体加入 Newpop,计数器 i 增加 1,进入下一循环,直到 $i = popsize$ 时退出循环,从而得到规模为 popsize 的子代种群 Newpop。

2.7.1 交叉操作

针对编码特点,采用“交叉算子改进策略”和“两点交叉方式”进行交叉。虽然交叉前个体可行,考虑到资金受限约束,直接交叉后的个体不一定可行。为保证交叉后的个体仍是可行个体,算法采取的策略是在对换某基因值之前,判断 2 个父代个体对换基因值之后对应承包商执行成本是否超过其资金上限且 2 个子代个体的总成本是否超过委托方资金上限,若不超过,则将其对换,否则不对换。具体方法如下:首先,产生 2 个不相等的 $1\sim n$ 的随机整数 $k1, k2$,若 $k2 < k1$ 则彼此交换使 $k1 < k2$;然后,令 $k = k1, k1+1, \dots, k2$,依次对基因座 k 进行如下处理:从父体 1 的属性 F 中取出基因值 a ,从父体 2 的属性 F 中取出基因值 b ,判断 a 和 b

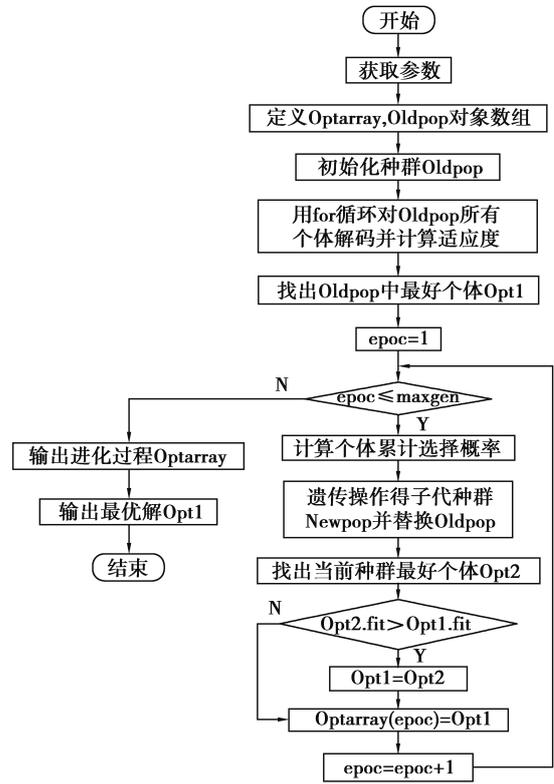


图 6 算法流程

Fig. 6 Flow chart of the algorithm

是否相等,若相等,不对换基因值,否则,判断父体 1 中承包商 b 的执行成本与任务 k 由承包商 b 执行的执行成本之和是否超过承包商 b 的资金上限,且父体 2 中承包商 a 的执行成本与任务 k 由承包商 a 执行的执行成本之和是否超过承包商 a 的资金上限,且父体 1 和 2 对换基因座 k 之后各自的委托成本总额是否超过委托方资金上限 $zjsx$,若以上条件都不超过,则对换基因座 k 的值,更新父体 1、2 中承包商 a 、 b 的执行成本;最后,返回 2 个子个体 Ch1、Ch2。如式(2)所示的 2 个父代个体 $P1$ 、 $P2$,若交叉点分别为 3、5,若经判断交叉后 2 新个体中承包商的执行成本均不超过对应的资金上限,则交叉后的 2 个子代个体如式(3)所示。

$$P1.F = (2\ 1\ 2\ 2\ 1\ 3\ 1\ 3), \tag{2}$$

$$P2.F = (1\ 1\ 3\ 4\ 2\ 4\ 2\ 1),$$

$$Ch1.F = (2\ 1\ 3\ 4\ 2\ 3\ 1\ 3), \tag{3}$$

$$Ch2.F = (1\ 1\ 2\ 2\ 1\ 4\ 2\ 1).$$

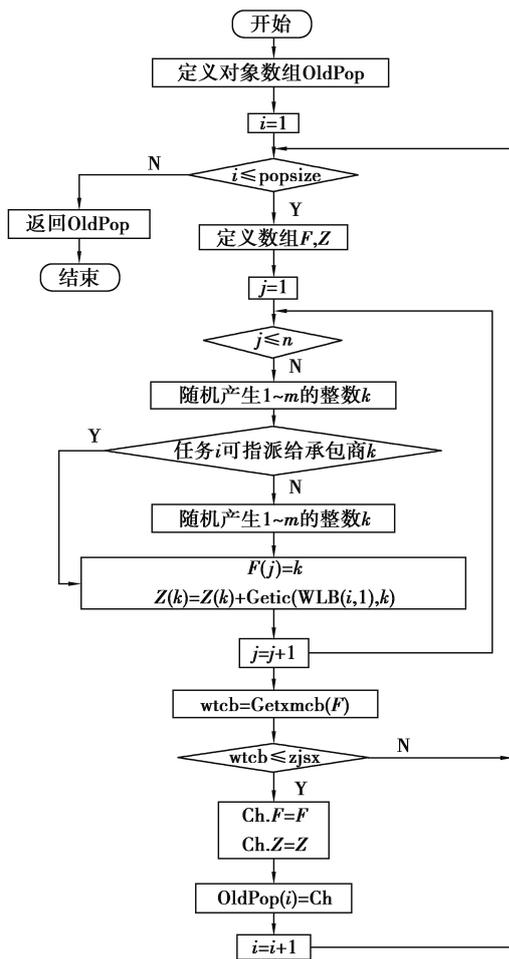


图 7 种群初始化

Fig. 7 Population initialization

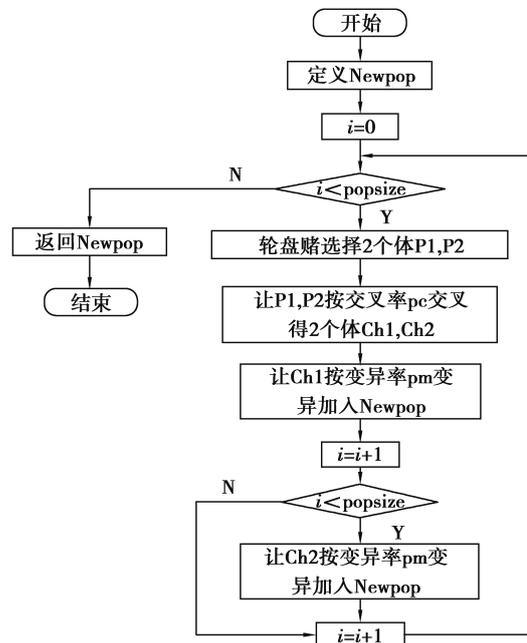


图 8 遗传操作

Fig.8 Genetic operation

2.7.2 变异操作

针对编码特点,采用“拒绝策略”和“单点变异方式”进行变异。以 Ch1 为例,具体变异方法如下:产生 1 个 $1 \sim n$ 的随机整数 mp 作为变异点,再产生 $1 \sim m$ 且不等于 $\text{Ch1}.F(mp)$ 的随机整数 k ,判断任务 mp 是否能指派给承包商 k ,若任务 mp 不能指派给承包商 k (承包商已被指派任务的执行成本与任务 mp 由承包商 k 执行的执行成本之和超过承包商 k 的资金上限,或变异后的项目委托成本总额超过委托方资金上限 $zjsx$),则重新产生 k 直到可以指派为止;此时,将 $\text{Ch1}.F(mp)$ 变为 k ,更新承包商 $\text{Ch1}.F(mp)$ 和 k 的执行成本,更新项目委托成本。如式(3)所示的父代个体 Ch1,若变异点 $mp=3$,若产生的可行承包商号 $k=5$,则变异后的新

个体 OFF 的 F 属性如式(4)所示。需要说明的是,变异后需要重新解码,然后将其返回。

$$\text{OFF}, F = (2\ 1\ 5\ 4\ 2\ 3\ 1\ 3)。 \tag{4}$$

2.8 解码操作

以个体 Ch 为例说明解码操作过程。基于“关键路径法”,根据指派数组 Ch.F 采用正向顺推函数 FC 获得矩阵 R (共 9 列,1~9 列依次为任务代码、承包商号、任务时间、任务委托成本、任务执行成本、紧前任务列表、紧前任务数、任务最早开工时刻、任务最早完工时刻);用 R 第 9 列的最大值减去第 8 列的最小值得到项目工期赋给 Ch.o。函数 FC 的流程如图 9 所示,其中用到了 2.2 节设计的时间推算函数进行时间推算。矩阵 R 第 3 列的任务时间由自定义函数 Getjt 获取。该函数有 2 个参数即 $jb(\text{String}), cbsh(\text{Integer})$,其作用是在任务时间数组 T 中查出并返回任务代码为 jb 的任务由承包商 $cbsh$ 执行的时间;同理,矩阵 R 第 4 列的任务委托成本由自定义函数 Getjec 获取;矩阵 R 第 5 列的任务执行成本由自定义函数 Getjic 获取。自定义函数 Getpofbina 有 3 个参数即 $a(\text{String}), b(\text{String}), k(\text{Integer})$,其作用是返回非空字符串 a 中第 k 次出现字符串 b 的位置,若没有找到,则返回字符串 a 的长度。

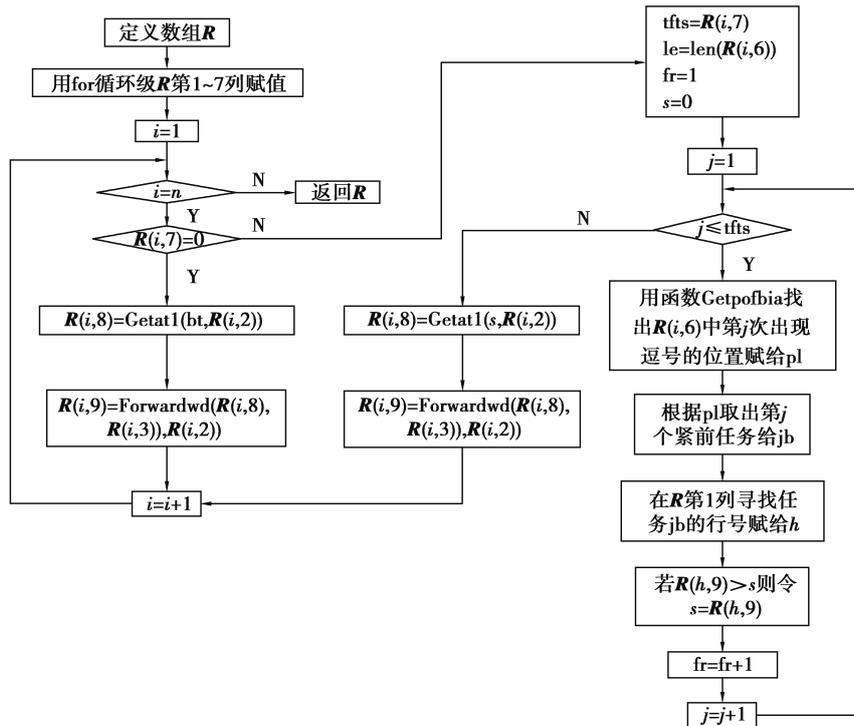


图 9 FC 函数流程

Fig. 9 Flow chart of function FC

2.9 计算适应度

本文优化目标是求工期的最小值,故需采用某种转化方法将其转化为最大化值从而得到适应度。转化的方法通常有 2 种,一种是取倒数,另一种是用足够大的正数减去目标值。文中采用第二种方法计算适应度,用大数 ds 减去目标值 Ch.o 得到适应度,即令 $Ch.fit = ds - Ch.o$ 。

2.10 输出进化过程和最优解

将算法得到的进化过程数组 Optarray 输出到工作表“进化过程”;根据最优解 Opt1 推算矩阵 R 并将其输出到工作表“指派表”。其中,推算矩阵 R 的步骤如下:首先,根据指派数组 Opt1.F 采用函数 FC 进行正向推算得到矩阵 R 的第 1~9 列;然后,根据 R 采用函数 BC 进行逆向推算得到 R 的 10~13 列,依次是任务最迟开工时刻、任务最迟完工时刻、时差(单位:h)、关键任务标志(若为关键任务则置符号“*”,否则置空)。函数 BC 的流程如图 10 所示,其中用到了 2.2 节设计的时间推算函数进行时间推算。

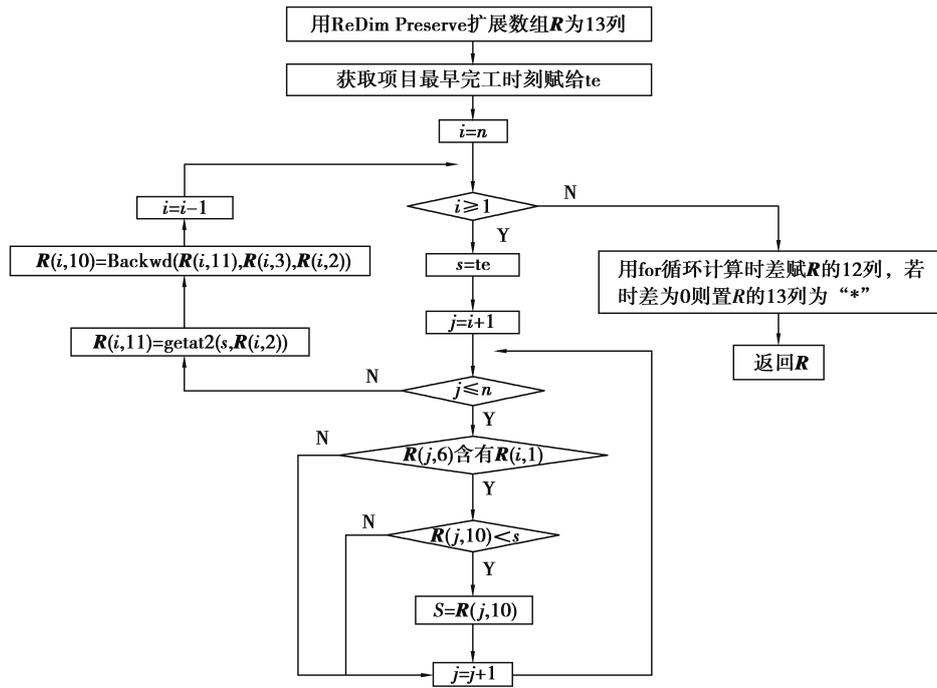


图 10 BC 函数流程

Fig. 10 Flow chart of function BC

3 案例分析

某工程项目网络计划图如图 11 所示。该项目共有 26 项任务,要将其指派给 7 个承包商,使得项目工期最短。根据图 11 转化得到的网络计划表如表 2 所示,承包商信息如表 3 所示,任务时间如表 4 所示,任务委托成本如表 5 所示,任务执行成本如表 6 所示,其他参数如表 7 所示。承包商所用工作制共有 3 个,即“5 天工作制”“6 天工作制”和“7 天工作制”,“工作制”工作表的设置内容如图 12 所示。承包商所用工作时段共有 3 个,即“A”“B”和“C”,“工作时段”工作表的设置内如图 13 所示。

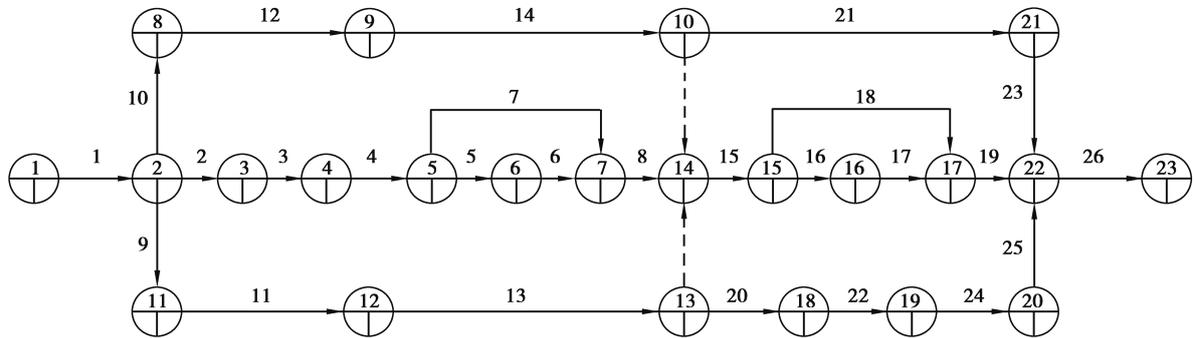


图 11 项目网络计划图

Fig. 11 Project network plan

表 2 网络计划表

Table 2 Network schedules

任务代码	任务名称	紧前任务	紧前任务数
01	J1		0
02	J2	01	1
03	J3	02	1
04	J4	03	1
05	J5	04	1
06	J6	05	1
07	J7	04	1
08	J8	06,07	2
09	J9	01	1
10	J10	01	1
11	J11	09	1
12	J12	10	1
13	J13	11	1
14	J14	12	1
15	J15	08,13,14	3
16	J16	15	1
17	J17	16	1
18	J18	15	1
19	J19	17,18	2
20	J20	13	1
21	J21	14	1
22	J22	20	1
23	J23	21	1
24	J24	22	1
25	J25	24	1
26	J26	19,23,25	3

表 3 承包商

Table 3 Contractors

承包商号	名称	资金上限	工作制	工作时段
1	A 承包商	30 000	5 天工作制	A
2	B 承包商	30 000	7 天工作制	B
3	C 承包商	30 000	6 天工作制	C
4	D 承包商	30 000	5 天工作制	A
5	E 承包商	30 000	7 天工作制	C
6	F 承包商	30 000	5 天工作制	A
7	G 承包商	30 000	7 天工作制	C

表 4 任务时间

Table 4 Task time

h

任务代码	承包商号						
	1	2	3	4	5	6	7
01			143	138	124	145	106
02		127	142	147	146	131	139
03		106	103	102	82	101	104
04		123	132	133	127	138	128
05	100	98	87	72	92	95	78
06	111	107	97		91		114
07	94	100	110		100		92
08	127	103	129	126	107	116	103
09	136	122	143	144		122	
10	89	82	80	70		97	

续表4

任务代码	承包商号						
	1	2	3	4	5	6	7
11	83	105	85		86		87
12	73	100	84		85		82
13	119	110	128	112		121	
14	82	100	83	72		76	
15	83	89	109		88		85
16	128	115	129		143		147
17	101			99	120	116	92
18	103			104	104	106	94
19	76	85	93			86	76
20	107	101	89			112	123
21	119	111	117	113	115		
22	128	94	128	100	120		
23		94	79		73	82	94
24		92	86		108	108	90
25	125		116	127		123	116
26	90		95	87		86	90

表 5 任务委托成本

Table 5 Task commission cost

万元

任务代码	承包商号						
	1	2	3	4	5	6	7
01			670	920	980	900	800
02		790	550	600	830	580	700
03		980	520	960	990	700	800
04		960	830	750	880	700	800
05	610	670	640	760	510	600	700
06	960	560	680		540		500
07	780	670	730		820		750
08	870	700	900	730	780	730	700
09	600	560	770	680		800	
10	780	820	970	650		700	
11	650	600	580		560		600
12	610	670	640		510		450
13	960	560	680	540		600	

续表5

任务代码	承包商号						
	1	2	3	4	5	6	7
14	780	670	730	820		760	
15	870	700	900		730		780
16	600	560	770		680		600
17	780			650	700	600	750
18	650			600	560	550	660
19	610	670	640			760	510
20	960	560	680			600	540
21	780	670	730	750	820		
22	870	700	900	730	780		
23		560	770		680	650	600
24		820	970		650	670	600
25	650		580	600		600	560
26	870		900	730		700	780

表 6 任务执行成本

Table 6 Task execution cost

万元

任务代码	承包商号						
	1	2	3	4	5	6	7
01			613	804	923	825	702
02		676	489	535	779	493	604
03		869	411	863	879	632	744
04		852	755	679	802	635	732
05	527	562	537	664	410	512	582
06	849	497	578		489		439
07	697	566	680		724		640
08	759	608	802	663	675	648	591
09	515	503	657	619		727	
10	674	744	918	592		610	
11	542	517	491		458		510
12	517	583	588		460		388
13	852	500	580	443		524	
14	722	558	680	757		705	
15	750	588	833		632		674
16	511	465	664		627		483

续表6

任务代码	承包商号						
	1	2	3	4	5	6	7
17	720			552	584	537	683
18	546			540	459	500	546
19	545	590	589			661	390
20	867	485	598			530	433
21	667	614	663	694	706		
22	775	640	804	640	693		
23		494	703		590	574	543
24		704	902		550	561	494
25	556		500	531		487	461
26	766		797	657		604	697

表 7 计算参数

Table 7 Calculation parameters

参数	值	参数	值
<i>n</i>	26	pc	0.7
<i>m</i>	7	pm	0.1
bt	2017/3/1 8:00:00	maxgen	400
zjsx	20000	ds	10000
popsize	50		

	A	B	C	D	E	F
1	7天工作制		6天工作制		5天工作制	
2	2017/1/2	2017/1/7	2017/1/2	2017/1/7	2017/1/2	
3	2017/1/27	2017/1/14	2017/1/27	2017/1/14	2017/1/27	
4	2017/1/30	2017/1/21	2017/1/30	2017/1/21	2017/1/30	
5	2017/1/31	2017/2/4	2017/1/31	2017/2/4	2017/1/31	
6	2017/2/1	2017/2/18	2017/2/1	2017/2/18	2017/2/1	
7	2017/2/2	2017/2/25	2017/2/2	2017/2/25	2017/2/2	
8	2017/4/3	2017/3/4	2017/4/3	2017/3/4	2017/4/3	
9	2017/4/4	2017/3/11	2017/4/4	2017/3/11	2017/4/4	
10	2017/5/1	2017/3/18	2017/5/1	2017/3/18	2017/5/1	
11	2017/5/29	2017/3/25	2017/5/29	2017/3/25	2017/5/29	
12	2017/5/30	2017/4/1	2017/5/30	2017/4/1	2017/5/30	
13	2017/10/2	2017/4/8	2017/10/2	2017/4/8	2017/10/2	
14	2017/10/3	2017/4/15	2017/10/3	2017/4/15	2017/10/3	
15	2017/10/4	2017/4/22	2017/10/4	2017/4/22	2017/10/4	
16	2017/10/5	2017/5/6	2017/10/5	2017/5/6	2017/10/5	
17	2017/10/6	2017/5/13	2017/10/6	2017/5/13	2017/10/6	
18		2017/5/20		2017/5/20		
...			
49		...		2017/12/30		
...		...				
95		2017/12/31				

图 12 “工作制”工作表设置内容

Fig. 12 Spread sheet of working systems

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	A																			
2	3	3	3	3	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
3	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
4	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
5	13:00	13:00	13:00	13:00			13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00
6	17:00	17:00	17:00	17:00			17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00
7	18:00	18:00	18:00	18:00									13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00
8	22:00	22:00	22:00	22:00									17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00

图 13 “工作时段”工作表设置内容

Fig.13 Spreadsheet of work-time periods

表 8 最优指派方案对应的指派表

Table 8 The assignment table of the optimal assignment schemes

任务代码	承包商号	任务时间	任务委托成本	任务执行成本	紧前任务列表	紧前任务数	最早开工时刻	最晚开工时刻	最早完工时刻	最晚完工时刻	时差	关键标志
01	7	106	800	702	0	0	2017/3/19 00:00	2017/3/8 10:00	2017/3/19 00:00	2017/3/8 10:00	0	*
02	7	139	700	604	01	1	2017/3/8 10:00	2017/3/17 15:00	2017/3/8 10:00	2017/3/17 15:00	0	*
03	5	82	990	879	02	1	2017/3/17 15:00	2017/3/23 5:00	2017/3/17 15:00	2017/3/23 5:00	0	*
04	5	127	880	802	03	1	2017/3/23 5:00	2017/3/31 14:00	2017/3/23 5:00	2017/3/31 14:00	0	*
05	7	78	700	582	04	1	2017/3/31 14:00	2017/4/8 17:00	2017/3/31 14:00	2017/4/8 17:00	0	*
06	5	91	540	489	05	1	2017/4/9 0:00	2017/4/15 1:00	2017/4/9 0:00	2017/4/15 1:00	0	*
07	5	100	820	724	04	1	2017/3/31 14:00	2017/4/10 7:00	2017/4/8 6:00	2017/4/15 1:00	184	
08	7	103	700	591	06,07	2	2017/4/15 1:00	2017/4/21 16:00	2017/4/15 1:00	2017/4/21 16:00	0	*
09	3	143	770	657	01	1	2017/3/8 10:00	2017/3/20 2:00	2017/3/11 0:00	2017/3/22 8:00	62	

续表 8

任务代码	承包商号	任务时间	任务委托成本	任务执行成本	紧前任务列表	紧前任务数	最早开工时刻	最早完工时刻	最迟开工时刻	最迟完工时刻	时差	关键标志
10	2	82	820	744	01	1	2017/3/8 10:00	2017/3/18 12:00	2017/3/25 15:00	2017/4/7 17:00	413	
11	1	83	650	542	09	1	2017/3/20 8:00	2017/3/28 21:00	2017/3/22 8:00	2017/3/30 21:00	48	
12	5	85	510	460	10	1	2017/3/18 13:00	2017/3/24 6:00	2017/4/8 4:00	2017/4/13 16:00	495	
13	6	121	600	524	11	1	2017/3/28 21:00	2017/4/13 22:00	2017/3/30 21:00	2017/4/17 22:00	48	
14	4	72	820	757	12	1	2017/3/24 8:00	2017/3/31 22:00	2017/4/13 16:00	2017/4/21 16:00	488	
15	7	85	780	674	08,13,14	3	2017/4/21 16:00	2017/4/27 10:00	2017/4/21 16:00	2017/4/27 10:00	0	*
16	5	143	680	627	15	1	2017/4/27 10:00	2017/5/10 2:00	2017/4/27 10:00	2017/5/10 2:00	0	*
17	7	92	750	683	16	1	2017/5/10 2:00	2017/5/16 4:00	2017/5/10 2:00	2017/5/16 4:00	0	*
18	5	104	560	459	15	1	2017/4/27 10:00	2017/5/7 8:00	2017/5/9 5:00	2017/5/16 4:00	283	
19	7	76	510	390	17,18	2	2017/5/16 4:00	2017/5/21 5:00	2017/5/16 4:00	2017/5/21 5:00	0	*
20	3	89	680	598	13	1	2017/4/14 0:00	2017/4/20 16:00	2017/4/18 1:00	2017/4/24 17:00	97	
21	5	115	820	706	14	1	2017/4/1 0:00	2017/4/11 11:00	2017/5/8 1:00	2017/5/15 12:00	889	
22	4	100	730	640	20	1	2017/4/20 16:00	2017/5/3 21:00	2017/4/24 18:00	2017/5/5 22:00	98	
23	3	79	770	703	21	1	2017/4/11 11:00	2017/4/17 16:00	2017/5/15 13:00	2017/5/20 17:00	818	
24	7	90	600	494	22	1	2017/5/4 0:00	2017/5/9 17:00	2017/5/7 10:00	2017/5/13 10:00	82	
25	7	116	560	461	24	1	2017/5/10 0:00	2017/5/17 12:00	2017/5/13 10:00	2017/5/21 5:00	82	
26	7	90	780	697	19,23,25	3	2017/5/21 5:00	2017/5/27 5:00	2017/5/21 5:00	2017/5/27 5:00	0	*

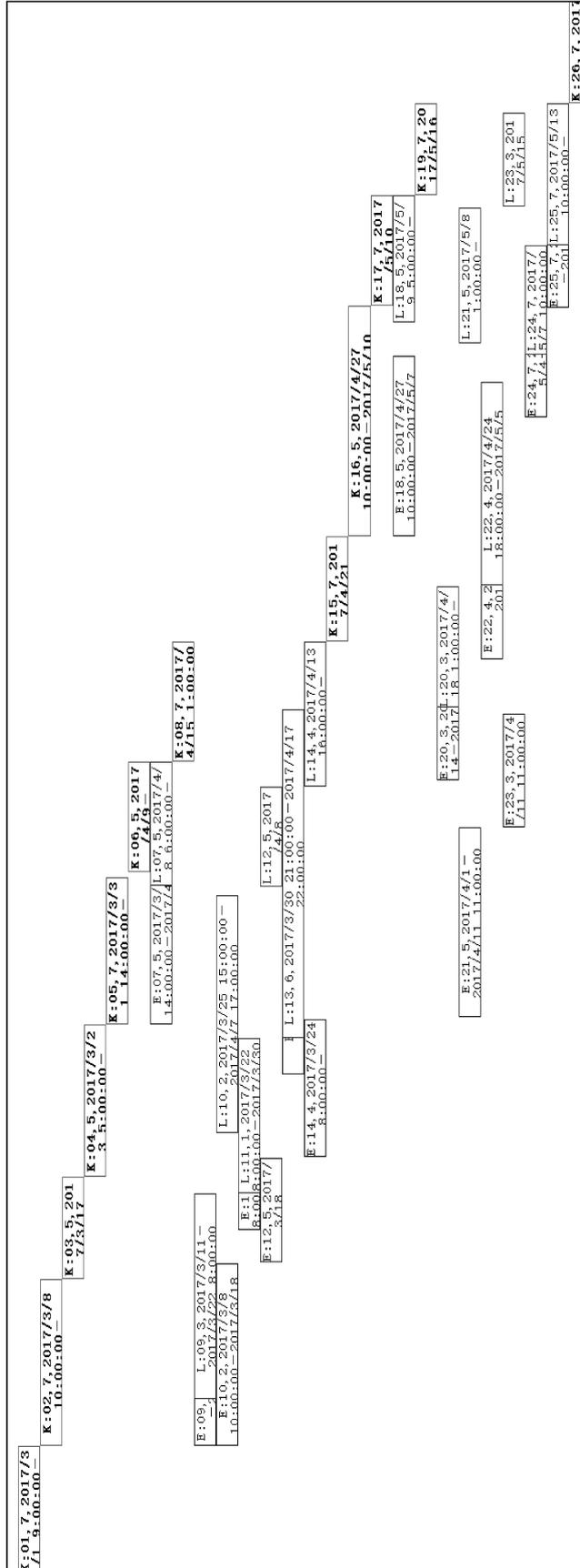


图14 最优指派方案对应的任务甘特图
Fig.14 The Gantt chart of the optimal assignment scheme

利用算法独立运行 20 次, 均能得到收敛值(最短工期)86.875 d, 表明算法收敛效果好。图 15 是某次进化过程图, 表 8 是本次进化得到的最优指派方案对应的指派表, 图 14 是最优指派方案对应的任务甘特图。

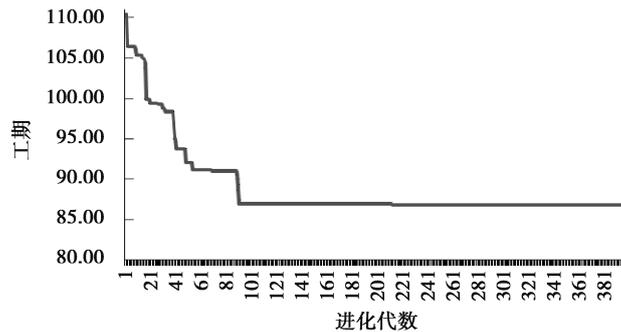


图 15 某次进化过程图

Fig.15 Evolutionary process

图 14 中, 带 E 标识符的方框表示任务最早开工时刻与完工时刻之间的时间段, 带 L 标识符的方框表示任务最迟开工时刻与最迟完工时刻之间的时间段, 带 K 标识符的方框表示时差为 0 的关键任务的开工时刻与完工时刻之间的时间段。左上角第 1 个方框中“01, 7 2017/3/1 9:00:00—2017/3/8 10:00:00”(方框短未显示完全, 从表 8 可以看出)表示任务 01 被指派给承包商号为 7 的承包商, 最早(最迟)开工时刻为 2017/3/1 9:00:00, 最早(最迟)完工时刻为 2017/3/8 10:00:00。由表 3 可知承包商 7 采用“7 天工作制”、工作时段采用“C”。由表 4 或表 8 知, 任务 01 由承包商 7 执行的时间为 106 h, 虽然 2017/3/1 9:00:00—2017/3/8 10:00:00 之间的日历时间为 169 h, 但由承包商 7 的工作时历可知, 2017/3/1 9:00:00—2017/3/8 10:00:00 之间的工作时间正好为 106 h。这表明任务 01 的最早(早迟)开工时刻、最早(最迟)完工时刻是按承包商 7 的工作日历进行准确推算的。可以检验, 其他任务的最早(早迟)开工时刻、最早(最迟)完工时刻也是按相应承包商的工作日历进行准确推算的。从表 8 可见, 最优指派方案中体现了“能者多劳”的特点, 即在任务时间、委托成本、执行成本方面具有优势的承包商可能被指派较多的任务, 如承包商 7 被指派了 10 项任务, 而在任务时间、委托成本、执行成本方面不具优势的承包商可能被指派较少的任务, 如承包商 1、2、6 仅各自被指派了 1 项任务。

将表 3 中承包商的资金上限分别设置为 3 000、2 000、4 000、3 000、3 000、4 000、3 000, 重新计算得到最短工期为 92.96 d, 比 86.875 d 延长了 6.085 d。表明在承包商资金上限越小的情况下, 指派空间缩小, 最优解的质量劣化。

进一步, 将委托方资金上限由 20 000 万元减少为 18 500 万元, 重新计算得到最短工期为 95.25 d, 比 92.96 d 又延长了 2.29 d。表明委托方资金上限越小的情况下, 指派空间进一步缩小, 最优解的质量进一步劣化。

4 结 论

为解决混合工作日历下资金受限工程项目工期最短化任务指派的困难, 提出了一种基于遗传算法的优化方法。

1) 提出时间推算方法, 能在项目指派过程中准确推算任务的最早(最迟)开工时刻、最早(最迟)完工时刻, 从而保证工期按各承包商对应的工作日历进行准确推算, 保证了最优指派方案的有效性。

2) 承包商资金上限、委托方资金上限的约束使得解空间缩小, 导致最优解的质量劣化。对于大型工程项目, 增加委托方资金并选择具有资金实力的承包商进行指派是确保项目工期目标得以改善的有效途径。

利用文中提出的方法可有效解决承包商采用混合工作日历的情况下资金受限工程项目工期最短化任务

指派问题。在工程实践中,从优化目标的角度看,决策者除了考虑工期最短化外,还可能考虑成本低、质量高、资源均衡等目标;从约束条件的角度看,除了资金受限外,还可能存在其他资源约束,下一步研究方向为混合工作日历下资源受限工程项目多目标任务指派问题研究。

参考文献:

- [1] 寿涌毅,彭晓峰,李菲,等. 抢占式资源受限项目调度问题的遗传算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(8): 1473-1480.
SHOU Yongyi, PENG Xiaofeng, LI Fei, et al. Genetic algorithm for the preemptive resource-constrained project scheduling problem [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2014, 48(8): 1473-1480. (in Chinese)
- [2] 靳金涛, 聂兰顺, 战德臣, 等. 基于人工蜂群的空间资源受限项目调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5): 1088-1098.
JIN Jintao, NIE Lanshun, ZHAN Dechen, et al. Spatial-resource constrained project scheduling algorithm based on artificial bee colony [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(5): 1088-1098. (in Chinese)
- [3] Beşikci U, Bilge Ü, Ulusoy G. Multi-mode resource constrained multi-project scheduling and resource portfolio problem[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 240(1): 22-31.
- [4] Almeida B F, Correia I, Saldanha-Da-gama F. Priority-based heuristics for the multi-skill resource constrained project scheduling problem [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 57: 91-103.
- [5] 何立华, 张连营. 基于资源波动成本的工程项目资源均衡优化[J]. 管理工程学报, 2015, 29(2): 167-174.
HE Lihua, ZHANG Lianying. Resource leveling optimization based on resource fluctuation cost in construction projects[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2015, 29(2): 167-174. (in Chinese)
- [6] 张连营, 岳岩. 工期: 成本: 质量的模糊均衡优化及其 Pareto 解 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 303-308, 316.
ZHANG Lianying, YUE Yan. Fuzzy trade-off of time-cost-quality in construction project and pareto solution [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(2): 303-308, 316. (in Chinese)
- [7] Chakraborty R K, Sarker R A, Essam D L. Multi-mode resource constrained project scheduling under resource disruptions[J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 88: 13-29.
- [8] Kuhn H W. The Hungarian method for the assignment problem [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2(1-2): 83-97.
- [9] 周良泽. 削高排除法求解指派问题 [J]. 系统工程学报, 1992, 7(2): 97-105.
ZHOU Liangze. Solving assignment problem with the method of cutting top and exclusion [J]. Journal of Systems Engineering, 1992, 7(2): 97-105. (in Chinese)
- [10] 丁文仁. 缩阵分析法——求解指派问题的新方法 [J]. 系统工程理论与实践, 1988, 8(3): 38-86.
DING Wenren. New method to solve assignment problem-reduced matrix analyzing method [J]. Systems Engineering theory & Practice, 1988, 8(3): 38-86.
- [11] Zhu H B, Liu D N, Zhang S Q, et al. Solving the Many to Many assignment problem by improving the Kuhn-Munkres algorithm with backtracking [J]. Theoretical Computer Science, 2016, 618: 30-41.
- [12] 周莉, 张维华, 徐射雕. 求解指派问题的一次性分配算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(18): 135-138, 152.
ZHOU Li, ZHANG Weihua, XU Shediao. One-time assignment algorithm to solve assignment problem [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(18): 135-138, 152. (in Chinese)
- [13] 赵洪刚, 杨竹君, 孟庆华, 等. 指派问题新解法: 目标值子矩阵法 [J]. 浙江大学学报(理学版), 2010, 37(5): 501-504.
ZHAO Honggang, YANG Zhujun, MENG Qinghua, et al. New method of solving assignment problem-target value submatrix method [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2010, 37(5): 501-504. (in Chinese)
- [14] 李珍萍, 王亮. 最短时限缺省指派问题的一种解法 [J]. 运筹与管理, 2000, 9(2): 55-61.
LI Zhenping, WANG Liang. The absent assignment problem to the shortest time limit and its algorithm [J]. Operations

- Research and Management Science, 2000, 9(2): 55-61. (in Chinese)
- [15] Mazzola J B, Neebe A W. Resource-constrained assignment scheduling [J]. Operations Research, 1986, 34(4): 560-572.
- [16] 郭强. 人数少于任务数的全指派问题的迭代算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(24): 91-93,103.
GUO Qiang. Iterative algorithm of total assignment problem on persons less than jobs [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(24): 91-93,103. (in Chinese)
- [17] Choi K, Kim G, Suh Y, et al. Assignment of collaborators to multiple business problems using genetic algorithm[J]. Information Systems and e-Business Management, 2017, 15(4): 877-895.
- [18] Myszkowski P B, Skowroński M E, Olech Ł P, et al. Hybrid ant colony optimization in solving multi-skill resource-constrained project scheduling problem [J]. Soft Computing, 2015, 19(12): 3599-3619.
- [19] Myszkowski P B, Skowroński M E, Olech Ł P, et al. Hybrid ant colony optimization in solving multi-skill resource-constrained project scheduling problem [J]. Soft Computing, 2015, 19(12): 3599-3619.
- [20] 王维博, 冯全源. 基于改进粒子群算法的工程项目综合优化[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 76-83.
WANG Weibo, FENG Quanyuan. Synthesis optimization for construction project based on modified particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of SouthWest JiaoTong University, 2011, 46(1): 76-83. (in Chinese)
- [21] Gonçalves J F, Mendes J J M, Resende M G C. A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(3): 1171-1190.
- [22] Ma W M, Che Y Y, Huang H, et al. Resource-constrained project scheduling problem with uncertain durations and renewable resources [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2016, 7(4): 613-621.

(编辑 詹燕平)