

文章编号:1671-8879(2007)03-0042-05

# 资源受限条件下公路工程进度计划优化方法

姚玉玲, 王秉纲

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**针对资源限制条件下的公路工程进度安排问题,讨论了资源分配的优先准则和工作调整步骤,对比分析了优先系数方法和资源调配方法的优化结果,在优先系数计算公式中考虑“工作最早完成时间”参数,对优先系数计算公式进行了改进,以提高模型的适应性;应用“约翰逊-贝尔曼”法则,对新参数的合理性作了进一步论证。分析结果表明,改进后的模型能够更合理地确定发生资源冲突时各项工作的先后顺序,可迅速有效地得到资源限制条件下的最短工期计划。

**关键词:**道路工程;公路项目;进度;计划;资源限量;优先系数;优化

**中图分类号:**U415.1 **文献标志码:**A

## Optimization method for highway project scheduling under limited resources condition

YAO Yu-ling, WANG Bing-gang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To resolve the problems in highway project scheduling under limited resources condition, the priority and adjustment principle of resources allocation was studied. The optimization results of resources based on priority coefficient method and resources scheduling method were compared. In priority coefficient method, the earliest finished time should be taken into account to improve the computing formula for developing the adaptability of computing model. This improvement was discussed with the Johnson-Bellman rule. The results show that this method can quickly determine the sequence of working steps, and can quickly achieve the project scheduling with the shortest time under limited resources condition. 3 tabs, 5 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; highway project; progress; scheduling; limited resources; priority coefficient; optimization

## 0 引 言

工程进度安排问题是一类广泛存在的管理决策问题,资源受限的工程进度安排问题一直吸引着国内外众多学者的关注和研究。由于资源分配的优先准则较多,因此形成了多种优化方法。对基于优先准则的启发式算法,文献[1-3]分别考虑了各项工作的持续时间、资源需要量、总时差、工作的紧后工作

数、不考虑资源约束时工作的紧后线路的最大长度以及网络计划的总工期、计划中某种资源的单位时间供应量和网络中工作的总数目等因素,给出了确定各项工作先后顺序的“优先安排准则”及计算“优先系数”的数学模型,比较全面地反映了网络参数和资源对工程工期的影响。但“资源有限工期最短”问题涉及因素众多,这些准则及其计算模型并不能解决所有的问题<sup>[4]</sup>。为此,本文结合资源调配法和解

收稿日期:2006-04-10

作者简介:姚玉玲(1962-),女,陕西泾阳人,副教授,博士研究生, E-mail: glyyl@chd.edu.cn。



决施工任务排序问题的“约翰逊-贝尔曼”法则,研究给出改进的优先系数计算模型,以便更合理地确定发生资源冲突的各项工作的先后开工顺序,提高优化模型的适应性。

1 优先系数计算模型分析

1.1 优先安排准则及数学模型

对于资源分配的优先安排准则,通常考虑以下几个人们普遍接受的因素:

(1)如果工作的持续时间  $t_{ij}$  长,则它对工程工期的作用相对大一些,其优先系数就大。

(2)如果工作的结束节点  $j$  距离网络图的终点节点较远,则该工作提前或推迟完成对工程工期产生直接影响,因而应给予足够的重视,也即优先系数要大。

(3)如果工作的资源需要量大,则它在带资源约束的工程进度安排中应具有较高的地位,其优先系数就大。

(4)工作的紧后工作数  $n_{ij}$  越多,则网络结构就越复杂,它对工程工期的制约更不可低估。

(5)因为任一网络系统都可以看作更大系统的子系统,所以把以网络图终点节点作为结束节点的工作放在大系统中考虑,并约定大系统的工作总数为该网络工序总数  $n$  的 2 倍,  $n_{ij} = 1$ ,因而对这些工作,其  $n_{ij}$  与网络工序总数  $n$  的比值为  $1/2n$ 。

为了便于将每项工作的优先顺序定量化,将上述的排序原则通过优先系数  $\delta_{ij}$  来综合表达。

$$\delta_{ij} = \alpha \sqrt{\frac{t_{ij}}{T_{CP} - L_{ij}}} + \beta \sum \frac{R_{ij}^k}{R(k)} + \gamma e^{\frac{n_{ij}}{n}} \quad (1)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma$  均为权重系数,且  $0 \leq (\alpha, \beta, \gamma) \leq 1, \alpha + \beta + \gamma = 1$ ;  $t_{ij}$  为工作  $(i-j)$  的持续时间;  $T_{CP}$  为网络计划未考虑资源约束时的计算工期;  $L_{ij}$  为工作  $(i-j)$  的结束节点  $j$  距离网络图终点节点的最长时间(不考虑资源约束);  $R_{ij}^k$  为工作  $(i-j)$  的第  $k$  种资源单位时间需要量;  $R(k)$  为网络计划中第  $k$  种资源的单位时间供应量;  $n_{ij}$  为工作  $(i-j)$  的紧后工作数。

1.2 调整步骤

(1)根据工作的最早开始时间绘制时标网络图,并计算每时间单位的资源需要量。

(2)从网络图的起点节点开始,依次自左向右调整。若在某一段时间内资源需要量没有超过限定额,则所有的工作均可按原计划进行;若资源需要量超过限定额,就需要对原计划进行调整。

(3)对调整时段内的各项工作,即在同一时间段对同一资源提出要求的所有工作,称为资源冲突

集。计算  $\delta_{ij}$ ,然后将  $\delta_{ij}$  从大到小按序进行编号,编号小的工作优先安排。如果工作具有相同的优先系数,则在资源的供应量范围内,选取资源需要量较大的工作优先安排,以提高资源的利用率。

(4)根据编号顺序,以不超过资源限定额为准,顺次对每一时间单位的资源需要量进行累加,直至达到资源限定量为止,余下的工作推迟到下一个时间段重新参加排队。在这一安排过程中,若安排了  $N$  项工作后,剩下的资源不够安排第  $(N+1)$  项工作,还需判断能否安排  $(N+1)$  后的工作。即某项工作的优先系数虽大,但剩余资源量不能满足该工作需求时,应考虑安排资源冲突集合中优先系数小、资源需求量也小的工作,这样做有利于缩短工程工期。

(5)假定计算至  $[t_k, t_{k+1}]$  时段,其资源总需要量超过了限定额,则对  $[t_k, t_{k+1}]$  时段内的工作(即在  $t_k$  之前或在  $t_k$  开始,而在  $t_{k+1}$  之后或在  $t_{k+1}$  结束的工作),根据以下原则进行安排:①对于内部不允许中断的工作,先对  $t_k$  之前开始而在  $t_k$  之后结束的工作,计算新的总时差  $F_{ij}^T$  与其开始时间  $T_{ij}^{ES}$  至  $t_{k+1}$  (距离)之差  $[F_{ij}^T - (t_{k+1} - T_{ij}^{ES})]$ ,其值较小的工作优先安排。对上述差值相等的工作,选取每单位时间资源需要量较大的工作优先安排,然后对时段  $[t_k, t_{k+1}]$  内余下的工作按优先系数从大到小的顺序进行安排;②对于内部允许中断的工作,对在  $t_k$  之前开始而在  $t_k$  之后结束的工作,把其在  $t_k$  之前和之后部分当作两个独立的工作处理。

(6)按照上述步骤和原则从左至右进行调整,直至全部工作满足要求为止。

1.3 示例分析

某小型工程按节点最早时间画出的时标网络计划如图 1 所示。图中带箭头线表示工作,箭头线上数字为该项工作每天所需的劳动人数;波形线表示工作的自由时差;阶梯线表示工程的资源需要量。假定施工现场每天可使用的劳动力总量为 10 人,现进行资源有限工期最短优化分析。

(1)在图 1 中,关键线路为 ①→③,工程工期为 12 d,即  $T_{CP} = 12$ ,最大资源消耗量为 11。

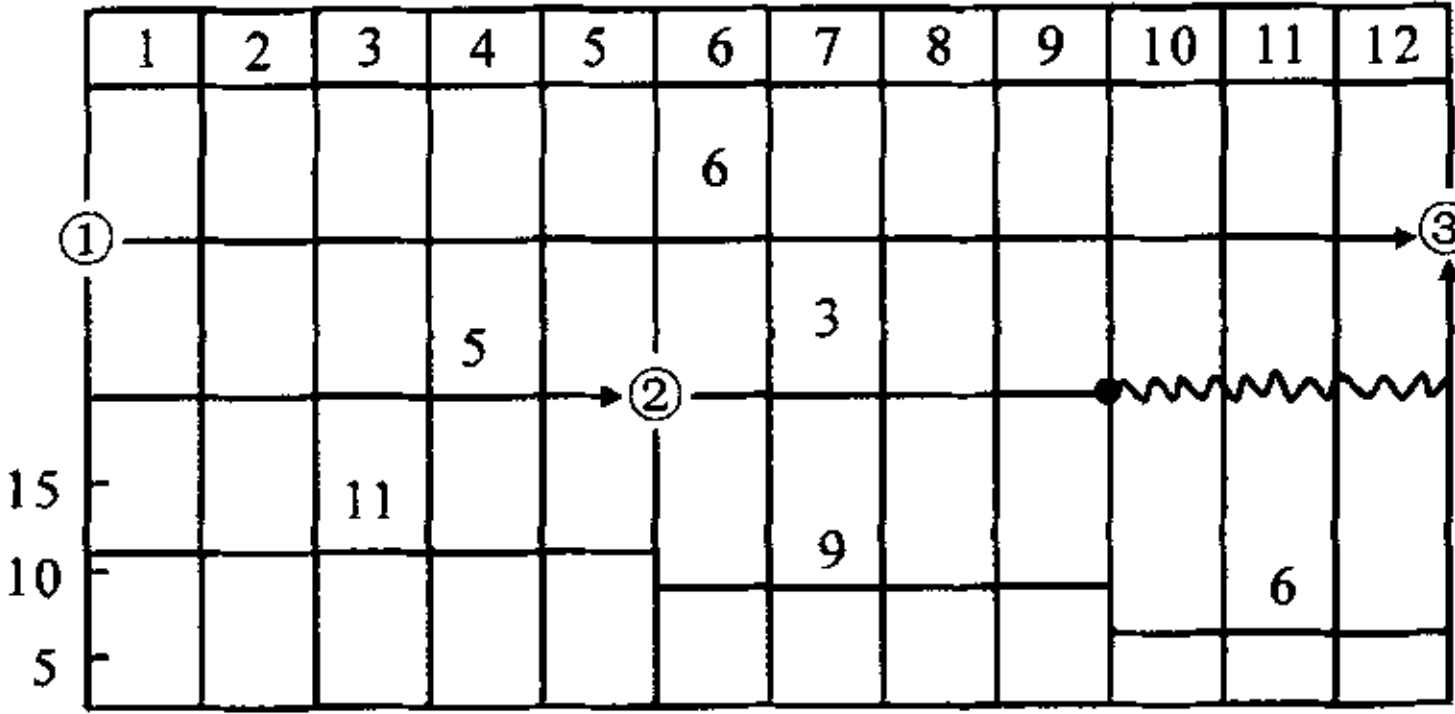


图 1 初始时标网络图及资源需要量曲线



(2) 按照进度逐日进行优化。在(0,5)时间段内,可能开工的工作为 1-2、1-3,资源需要量为 11,超过限定额 10,计算优先系数,如表 1 所示。取 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3, T_{CP} = 12, R(k) = 10, n = 3$ 。

表 1 优先系数的计算

工作名称	工作代号	$t_{ij}$	$L_{ij}$	$R_{ij}$	$n_{ij}$	$\delta_{ij}$	排序
A	1-3	12	0	6	1	0.927 1	1
B	1-2	5	4	5	1	0.895 4	2

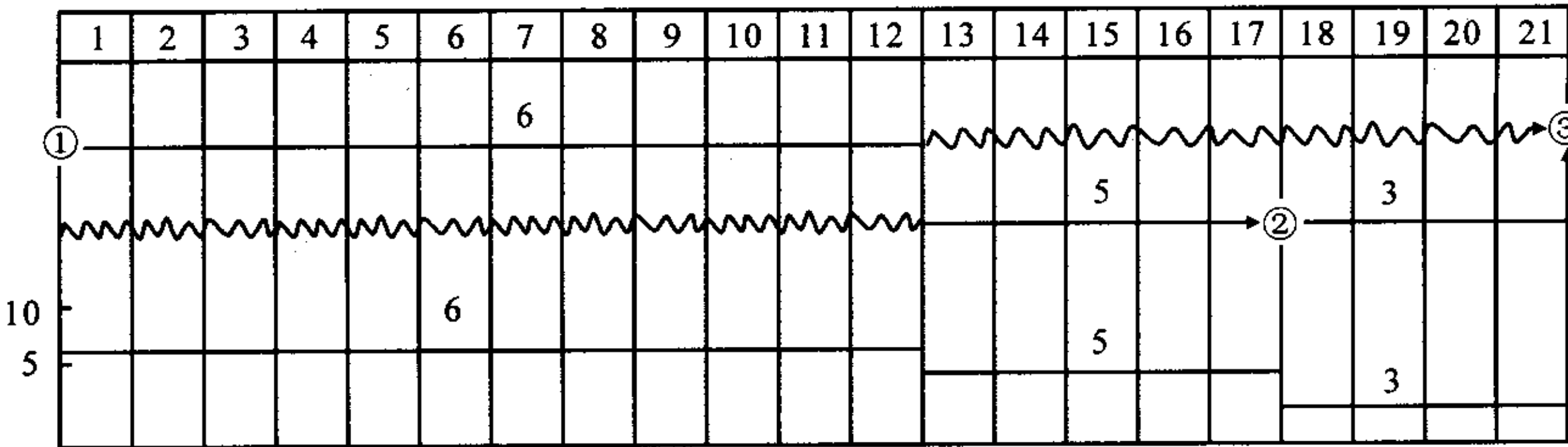


图 2 优先系数法优化后的时标网络图及资源需要量曲线

2 资源调配法

资源调配法(RSM)是解决资源冲突问题的一种较好方法,其对资源冲突集合中的工作做新的排序时,选择标准为工期延长时间最短,其值按式(2)、式(3)计算<sup>[5]</sup>。

对双代号网络计划,则有

$$\Delta D = \min\{\Delta D_{m,i,j}\} \tag{2}$$

$$\Delta D_{m,i,j} = T_{m,n}^{EF} - T_{i,j}^{LS} \tag{3}$$

式中: $\Delta D$ 为在各种排序中,最佳排序所对应的工期延长时间的最小值; $\Delta D_{m,i,j}$ 为在资源冲突集中,工作(i-j)安排在工作(m-n)后进行,工期所延长的时间; $T_{m,n}^{EF}$ 为工作(m-n)的最早完成时间; $T_{i,j}^{LS}$ 为工作(i-j)的最迟开始时间。

2.1 优化步骤

(1) 计算网络计划中每“时间单位”的资源需要量。

(2) 从计划开始日期起,逐个检查每个“时间单位”资源需要量是否超过资源限量,分析超过资源限量的时段,按式(2)计算 $\Delta D$ ,确定新的排序。

(3) 当最早完成时间 $T_{m,n}^{EF}$ 的最小值和最迟开始时间 $T_{i,j}^{LS}$ 的最大值同属一个工作时,应找出最早完成时间 $T_{m,n}^{EF}$ 为次小,最迟开始时间 $T_{i,j}^{LS}$ 为次大的工作,组成两个排序方案,再从中选取较小者进行调整。

(4) 绘制调整后的网络计划,重复步骤(1)~(3),直到满足要求。

2.2 示例分析

以图 1 为例,RSM 法的优化步骤为:

(1) 确定各个工作的时间参数,见表 2。

(3) 根据表 1 排序先后对各工作逐一安排。由于工作 1-2 和 1-3 的资源需要量之和为 11,故在(0,5)时段内只安排工作 1-3,将工作 1-2 推迟到工作 1-3 结束后开始。调整后的时标网络图及资源需要量如图 2 所示。

(4) 检查图 2,每个时间段内资源需要量均未超过限定额。但整个工程的工期延长了 9 d,即为 21 d。

表 2 工作时间参数的计算

工作名称	工作代号	$t_{ij}$	$R_{ij}$	$T_{ij}^{ES}$	$T_{ij}^{EF}$	$T_{ij}^{LS}$	$T_{ij}^{LF}$	$F_{ij}^T$
A	1-3	12	6	0	12	0	12	0
B	1-2	5	5	0	5	3	8	3
C	2-3	4	3	5	9	8	12	3

(2) 按照进度逐个时段进行检查。在(0,5)时间段内,可能开工的工作为 1-2、1-3,资源需要量为 11,超过限定额 10。

(3) 对于工作 1-2 和 1-3,查工作时间参数计算表 2,由式(3)得

$$\Delta D_{12,13} = T_{12}^{EF} - T_{13}^{LS} = 5 - 0 = 5$$

$$\Delta D_{13,12} = T_{13}^{EF} - T_{12}^{LS} = 12 - 3 = 9$$

(4) 由式(2)得

$$\Delta D = \min\{\Delta D_{12,13}, \Delta D_{13,12}\} = \Delta D_{12,13} = 5$$

所以选工作 1-3 推迟在工作 1-2 后进行。

调整后的时标网络图及资源需要量曲线如图 3 所示。总工期延长了 5 d,即为 17 d。

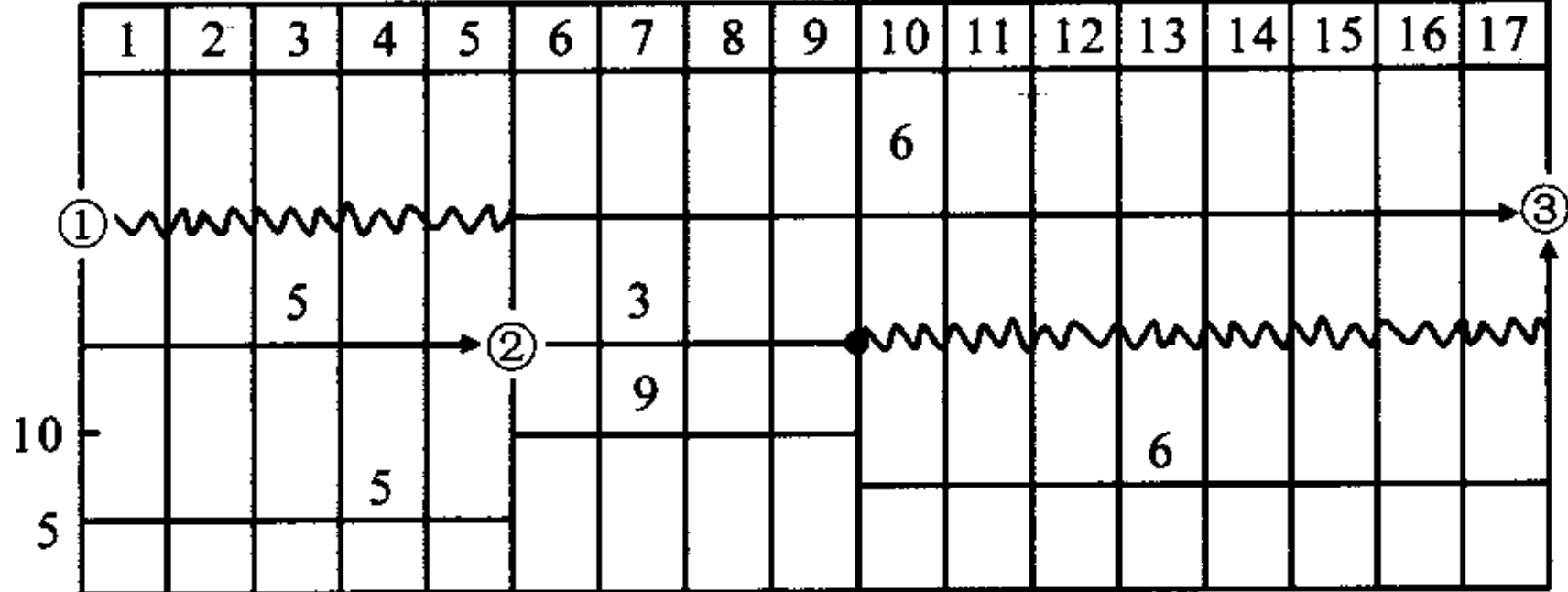


图 3 RSM 优化后的时标网络图及资源需要量曲线

3 优先系数计算公式的改进

从上面的分析可知,优先系数法和 RSM 都能解决资源冲突问题,不过由于考虑问题的侧重点不同,而导致计算结果不同。RSM 的优化结果使工程工期延长了 5 d,而优先系数法的优化结果使工程工



期延长了 9 d。显然在本例中,RSM 比优先系数法效果好。

3.1 两种优化方法分析

RSM 的优化准则是以时间为主导,明确规定,工作(m-n)的最早完成时间与工作(i-j)的最迟开始时间的差值越小,它们的优先级别就越高;缺点是把注意力仅仅放在时间上,忽略了资源需求量、网络构成参数(如工作的紧后工作数、网络总工作数)等可能对工程工期的影响。

优先系数方法比较全面地反映了网络参数和资源对工程工期的影响;其不足之处是未能把工作的主要时间参数(如最早开始和完成时间、最迟开始和完成时间等)考虑在优先系数的计算模型中。

3.2 优化模型的改进

在原优先系数的计算模型中,引入 RSM 的优化准则,即考虑工作的最早完成时间。

在图 1 中,依据 RSM 的优化结果,先安排工作 1-2,它按最早完成时间( $T_{12}^{EF}=5$ )完成后,在第 6 d 就有可能安排工作 1-3 和 2-3。而如果依据优先系数法的优化结果,要等到第 13 d 才可能安排。

因此,工作的最早完成时间越早,其对后续工作的开展及最优工程工期的取得越有利,其优先系数就应越大。考虑原优先系数计算模型中的内容均是局部与全体的比值,故在式(1)中,增加工作最早完成时间  $T_{ij}^{EF}$  与网络计划未考虑资源约束的总工期  $T_{CP}$  的关系项。其改进后的模型为

$$\delta_{ij} = \alpha \sqrt{\frac{t_{ij}}{T_{CP} - L_{ij}}} + \beta \sum_{k=1}^s \frac{R_{ij}^k}{R(k)} + \gamma e^{\frac{n_{ij}}{n}} + \mu \frac{T_{CP} - T_{ij}^{EF}}{T_{CP}} \quad (4)$$

式中: $\mu$  为权重系数。

3.3 改进模型的应用

仍以图 1 为例,取  $\alpha = \beta = \gamma = \mu = 0.25, T_{CP} = 12, R(k) = 10, n = 3$ ,按式(4) 计算优先系数,结果如表 3 所示。

表 3 优先系数的计算

工作名称	工作代号	$t_{ij}$	$L_{ij}$	$R_{ij}$	$n_{ij}$	$T_{ij}^{EF}$	$\delta_{ij}$	排序
A	1-3	12	0	6	1	12	0.695 4	2
B	1-2	5	4	5	1	5	0.817 4	1

表 3 的计算结果为,工作 1-2 在工作 1-3 之前安排,结果如图 3 所示。

4 新参数合理性的论证

根据解决施工任务排序问题的“约翰逊 - 贝尔

曼”法则,分析在优先系数的计算公式中增加“工作最早完成时间”项的合理性。

假定工程只有两项工作,即在  $m$  个工程或施工段上的每个施工段均需要完成 A 和 B 两项工作,A 为先行工作,B 为后续工作。设  $t_{ij}$  为第  $i$  工作面上完成工作  $j$  所需的时间,若所有工作面均应先完成工作 A 再完成工作 B,则此任务的横道计划见图 4。

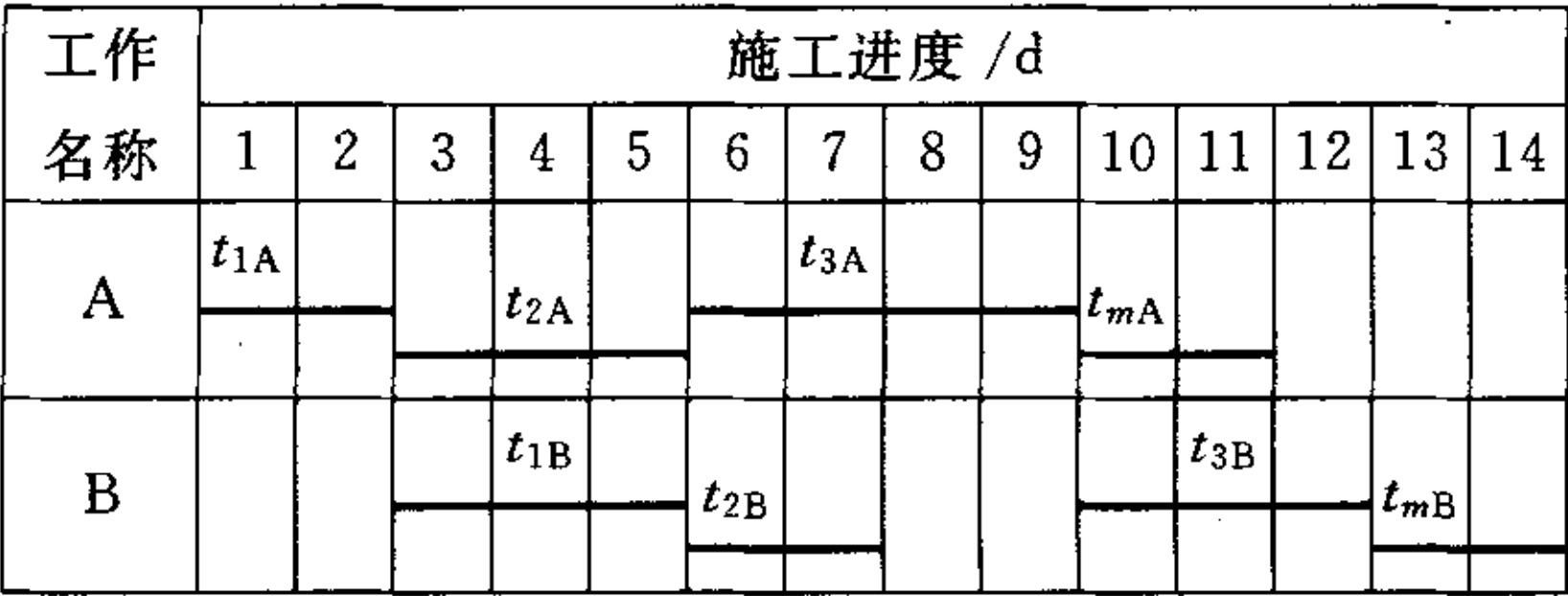


图 4 施工进度横道计划

从图 4 可看出,工程总工期对工作 A 应为

$$T_A \geq \sum_{i=1}^m t_{iA} + t_{mB}$$

其中,第一项表示工作 A 在所有施工段上作业时间之和(为常数);第二项为工作 B 在第  $m$ (最后)施工段上的施工时间。同理,对工作 B 来说,工程总工期应为

$$T_B \geq \sum_{i=1}^m t_{iB} + t_{1A}$$

其中,第一项为工作 B 在所有施工段上作业时间之和(为常数);第二项为工作 B 开工必须等待时间。

可见,总工期至少应为  $T_A$  和  $T_B$  中的较大值。

为达到总工期最短的目的,可以用“约翰逊 - 贝尔曼”法则解决。其基本原理是:在  $t_{mB}$  和  $t_{1A}$  中选择最小值,先行工作排在前面,后续工作排在最后。选出一个后,任务数量减少一项,但仍可列出上述关系,只是任务项数为  $(m - 1)$  个。排序方法按此顺序进行,最终可得到最佳施工顺序<sup>[6]</sup>。

将图 1 的网络图绘制成横道计划如图 5 所示。

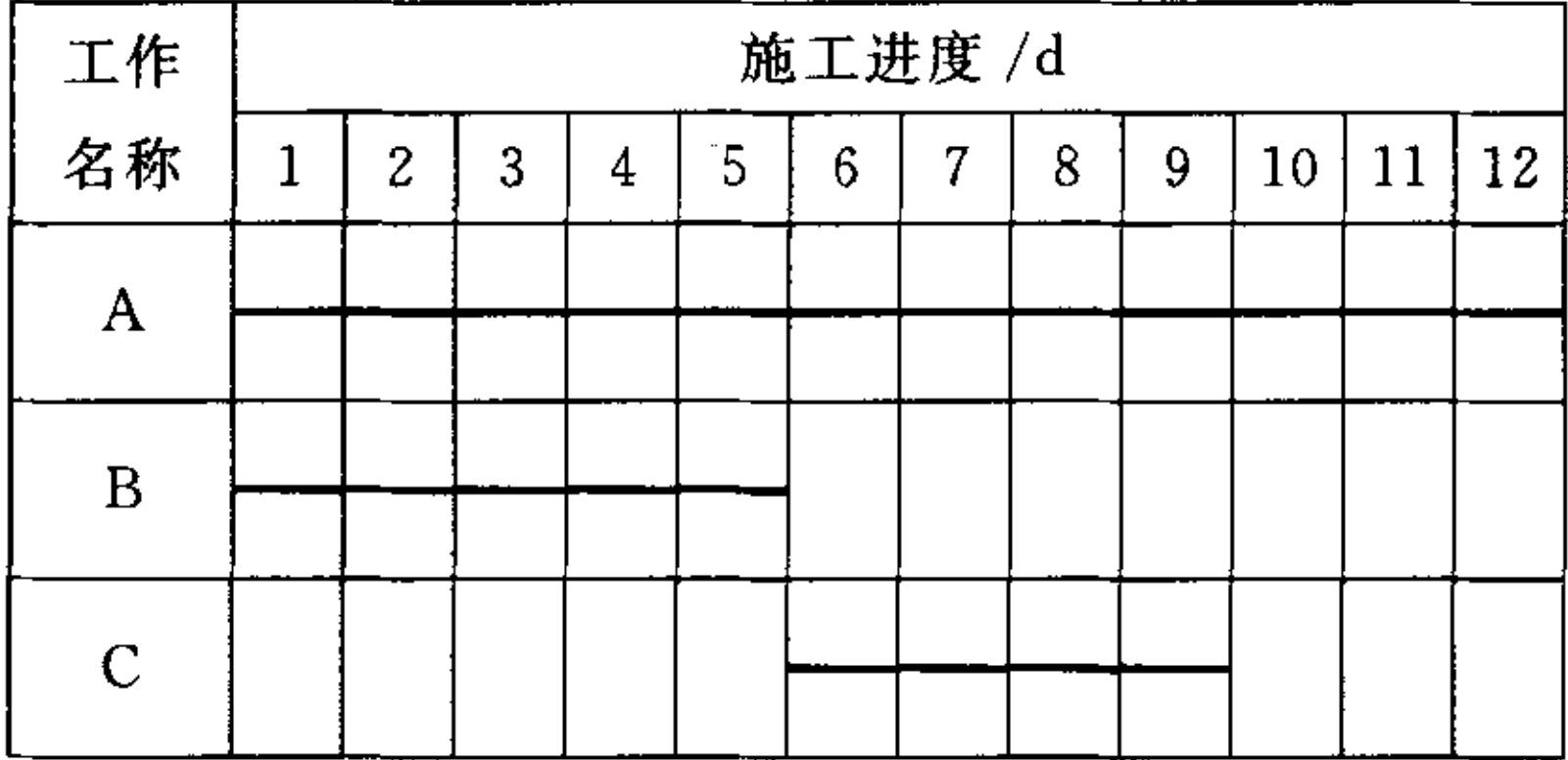


图 5 工程进度横道计划

上述法则的中心思想是:先行工作施工时间短的施工段要排在前面施工,后续工作施工时间短的施工段要排在后面施工。在图 5 中,可以将工作 A 和 B 看成是先行工作,因为: $t_B = 5 < t_A = 12$ ,所以应将工作 B 安排在前面施工,这里“先行工作施工时间



短的施工段要排在前面施工”的原则,与前述“把资源冲突集合中最迟开始时间(LS)最晚的工作移至其他最早完成时间(ES)最早的工作之后进行”的调整规则是一致的,从而进一步说明了改进后的优化模型的合理性<sup>[7-10]</sup>。

## 5 结 语

(1)将资源调配法的工作调整准则引入到优先系数计算模型中,提高了基于优先准则的启发式算法的适应性。

(2)应用“约翰逊-贝尔曼”法则分析了新参数的合理性,进一步论证了改进优先系数计算模型优化结果的可靠性。

(3)资源限制下的工程进度计划涉及因素较多,改进优先系数计算模型是否能解决所有的问题,还需进一步通过工程实际应用对其进行验证,但从新模型的产生与算例看,它确实是解决此类问题的一种有效的方法。

## 参考文献:

## References:

- [1] 张天学. 一种资源约束下工程进度安排的高效探索准则[J]. 系统工程理论与实践, 1993, 13(3): 16-21.  
ZHANG Tian-xue. An efficient heuristic rule for resource constrained project scheduling[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1993, 13(3): 16-21.
- [2] 季 节, 胡长顺, 郭黎明. 公路施工组织网络资源优化的启发式算法[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(1): 37-41.  
JI Jie, HU Chang-shun, GUO Li-ming. Heuristic algorithms of the network resource optimization for highway construction[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(1): 37-41.
- [3] 毕玉峰, 刘 斌, 杨晓明. 公路工程中多资源受限时工期最短优化问题分析[J]. 华东公路, 2003, (2): 78-80.  
BI Yu-feng, LIU Bin, YANG Xiao-ming. An analysis of optimization of the shortest schedule under the condition of resources constraint [J]. East China Highway, 2003, (2): 78-80.
- [4] 姚玉玲. 公路工程施工组织学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [5] JGJ/T 121-99, 工程网络计划技术规程[S].
- [6] 黎 谷, 郎荣荣. 建筑施工组织与管理[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1987.
- [7] 邬晓光, 冯 祁, 郭 扬. 基于遗传算法的桥梁施工资源有限优化[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(6): 33-36.  
WU Xiao-guang, FENG Qi, GUO Yang. Finite optimization of bridge construction resources based on genetic algorithms[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 33-36.
- [8] 马荣国, 刘艳妮. 公路建设项目综合评价权重确定方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 110-112.  
MA Rong-guo, LIU Yan-ni. Weight value determination method of highway construction comprehensive evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 110-112.
- [9] 袁剑波, 刘伟军, 张建仁. 考虑多种随机因素的公路工程网络计划技术[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 104-107.  
YUAN Jian-bo, LIU Wei-jun, ZHANG Jian-ren. Network planning technique for highway engineering considering influence of random factors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 104-107.
- [10] 张绍阳, 王选仓. 基于 Petri 网的公路施工资源瓶颈识别和消除[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 38-42.  
ZHANG Shao-yang, WANG Xuan-cang. Bottle-neck identification of resources in highway construction and its elimination methods based on petri nets[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 38-42.