

# 公路施工项目网络计划多目标综合优化

姚玉玲

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘要:**为了科学地解决公路施工项目网络计划的综合优化问题,通过系统综合评价方法对工期、成本、质量三者之间关系进行分析。分析认为,在网络计划综合优化中,应按质量优先的原则,将质量指标作为约束条件,把综合优化指标确定为工期、成本和资源;同时为了使综合优化方法更具实用性、可操作性和易接受性,以单目标优化方法为基础,提出了综合优化理论和方法,并结合工程实例进行了验算。

**关键词:**交通工程;公路项目;网络计划;多目标综合优化

**中图分类号:**F540.33

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-6248(2008)03-0043-06

工程网络计划综合优化,就是使计划方案的工期、成本和资源等多个目标同时达到最优,即寻找工期最佳、成本最低和资源配置最合理的方案。为此,众多学者在优化目标的选择、优化模型的建立和求解等方面作了大量的研究工作。刘尔烈等<sup>[1]</sup>提出了考虑工期、成本和质量目标的优化模型,对质量目标是假定工作的完成质量与工作持续时间成线性关系,用工作的正常时间和临界时间对质量指标进行量化处理,用模糊决策方法求解出最优方案;张海涛等<sup>[2]</sup>提出了考虑工期、质量、成本、资源目标的优化模型,对质量目标用工作持续时间进行量化,优化方法是先进行工期成本优化,再进行资源均衡优化;周树发、王海文等<sup>[3-4]</sup>提出了考虑工期、成本、资源目标的优化模型,优化方法是首先考虑工期成本优化和资源的限制,然后进行资源均衡的优化,并用遗传算法进行求解。

从以往综合优化方法研究成果的分析中可知,对质量指标的量化采用工作时间与质量线性模型的理论依据不充分。为此,本文将对网络计划综合优化问题的指标设置进行研究,考虑到各个工程项目

的控制重点不同。为了使综合优化方法更具实用性、可操作性和易接受性,本文将以单目标优化方法为基础来研究综合优化方法。

鉴于工程项目施工网络计划优化问题的复杂性,采用系统工程的思路和方法进行分析是十分必要的。进行系统综合评价有几项关键技术,即评价指标体系的建立、评价指标的量化、指标权系数的确定和评价指标的合成。本文拟从这四个方面对网络计划多目标综合优化问题进行研究。

## 一、评价指标体系的建立

评价指标体系的建立是系统综合评价方法的应用基础,也是综合评价的关键环节之一。指标体系的选择关系到综合评价的结论,因此建立一个能够客观、全面地描述系统特征的综合评价指标体系是科学评价的前提。在公路施工网络计划综合优化中,通常采用工期、成本、资源和质量等指标对项目计划进行评价。通过对质量指标及其与工期、成本指标关系的分析,研究在网络计划综合优化中如何

收稿日期:2007-12-25

作者简介:姚玉玲(1962-),女,陕西泾阳人,副教授。

确定质量指标。

### (一) 质量指标

工程项目质量是指工程产品适合于某种规定的用途,满足人们要求所具备的质量特性的程度,是国家现行有关法律、法规、技术标准、设计文件及工程合同中对工程安全、适用、经济、美观等特性的综合要求。因此,工程质量始终是考察和评价项目成功与否的首要尺度。

工期、成本和质量是一个既统一又矛盾的目标系统。在确定每一个目标值时,都要考虑到对其他目标的影响。但是,工程安全可靠性和使用功能目标以及施工质量合格目标,必须预先予以保证,并要求最终达到目标系统最优。

### (二) 质量与工期的关系

质量与工期是关联度很高的两个指标。质量与工期的关系是:加快进度可能影响质量。但一般来说,无论工期有多紧张,工程质量的标准是不能降低的;而严格控制质量,避免返工,进度则会加快。因此,合理的选择应该是:坚持质量优先原则,在保证质量的前提下,考虑加快进度以缩短工期。

### (三) 质量与成本的关系

质量与成本的关系是:当工程项目设计正确、合理,初期的预算可行,则质量和成本之间就不存在直接的联系。但是,在很多情况下,项目组织为了压缩成本,采取了降低质量的手段,导致工程质量下降。如果质量降到规定标准以下,不能通过项目业主对项目最终产品的验收,项目组织就必须返工,从而增加项目成本。另外,工程所达到的最佳水平,并不是工程质量越高越好,而是指满足项目业主要求施工成本最低的质量水平。因此,通常是确定适宜的质量成本,以不造成因质量过剩而提高工程成本为宜。在保证工程质量的前提下,考虑减低成本的可能才是最佳选择。

### (四) 综合优化指标体系的确定

从以上对工期、成本和质量三者关系的分析可以得出:即使以缩短工期和减低成本为出发点,也应当首先考虑保证工程质量。因此,本文认为,对工程项目的三大目标,虽然不能说哪个是最重要的,但在任何情况下,都必须将质量目标按照质量标准要求,在计划优化时看成是一个事先规定了固定值,即看成一个优化时的约束条件。对一个工程项目,要达到质量好、成本低、工期短的优化目标,这里的质量只能选择“好”,不能是“不好”;而成本“低”和工

期“短”就可以是一个范围,可以在这个合理的范围内进行优化。因此,这里将优化指标确定为工期、成本和资源。

## 二、评价指标的量化

### (一) 多目标优化方法

经典的多目标规划方法是根据各目标的权重将多目标问题转化为单目标问题进行求解<sup>[5]</sup>,但由于组合优化问题具有计算复杂度随着计算规模呈指数增长的特点,在实际应用中这种方法仅适用于工序不多的中小型网络计划。另外,由于各个工程项目的控制重点不同,为了使综合优化方法更具实用性、可操作性和易接受性,本文以单目标优化方法为基础来研究简单、易行的综合优化方法。其具体过程分以下三个阶段:(1)在满足质量要求的条件下,首先对网络计划进行工期与成本优化,得到一系列工期、成本方案;(2)若存在资源约束,则进行各方案的资源与工期优化,此时又得到一系列满足资源约束条件的工期、成本方案;(3)针对每一个方案,进行工期与资源均衡优化。这样,各个方案均有了工期指标、成本指标和资源均衡性指标,即构成了指标特征值矩阵。

### (二) 指标特征值矩阵的建立

经过工期与成本优化、资源约束优化和资源均衡优化后,可以得到 $n$ 个可行方案组成的方案集,以 $m$ 个目标对方案进行评价,则 $n$ 个方案 $m$ 个指标的特征值矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = x_{ij} \quad (1)$$

式中: $x_{ij}$ 为方案 $j$ 目标 $i$ 的特征值, $i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n$ 。

### (三) 评价指标的量化

评价指标体系中各定量指标因度量不一致,具有不可公度性。为便于比较,必须对各指标值进行一致化处理,即通过规范化换算统一在 $[0,1]$ 范围内。将方案集评价目标的绝对量值转化为相对量值,成本型指标(如生产费用、工期等)的变换函数如式(2)所示。

$$r_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

式中: $r_{ij}$ 为第 $j$ 方案第 $i$ 项指标的相对量值; $x_{ij}$ 为第 $j$

方案第  $i$  项指标的指标值(绝对量值);  $\max x_{ij}$  为  $x_{ij}$  中的最大值;  $\min x_{ij}$  为  $x_{ij}$  中的最小值。

应用式(2) 可以将特征值矩阵  $X$  变换为对应的相对值矩阵  $R$ , 即

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = r_{ij} \quad (3)$$

#### (四) 工程网络计划综合优化指标及其量化方法

##### 1. 工期指标

网络计划经过工期与成本优化后, 可以得到一系列工期成本方案, 设为(包括初始方案):  $(T_1, C_1)$ 、 $(T_2, C_2)$ 、 $\cdots$ 、 $(T_n, C_n)$ 。对上述方案, 再经过资源有限与工期最短优化后(资源有限制时), 按工期从长到短顺序排列得到方案集为:  $(T_1', C_1')$ 、 $(T_2', C_2')$ 、 $\cdots$ 、 $(T_n', C_n')$ 。如果只考虑工期指标, 则工期较短的方案较优。因此, 单目标工期达到最优的相对值  $r_{1j}$  根据式(2) 可得

$$r_{1j} = \frac{T_n' - T_j'}{T_1' - T_n'} \quad (4)$$

##### 2. 成本指标

根据工期与成本优化原理, 与工期方案  $(T_1', T_2', \cdots, T_n')$  相对应的成本方案  $(C_1', C_2', \cdots, C_n')$  是项目的直接费用, 考虑项目的间接费用后, 可相对应地得到另一组总成本方案  $(C_1'', C_2'', \cdots, C_n'')$ 。在此方案中, 令  $C_{\max} = \max(C_1'', C_2'', \cdots, C_n'')$ ,  $C_{\min} = \min(C_1'', C_2'', \cdots, C_n'')$ 。因为总成本指标在正常情况下是越小越好, 所以根据式(2) 得到成本目标的相对值  $r_{2j}$  为

$$r_{2j} = \frac{C_{\max} - C_j''}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (5)$$

##### 3. 资源指标

在上述工期与成本优化及资源有限与工期最短优化后得到的方案基础上, 进行工期固定与资源均衡优化, 则工期与成本优化方案  $(T_1', C_1')$ 、 $(T_2', C_2')$ 、 $\cdots$ 、 $(T_n', C_n')$  对应的资源均衡优化方案为  $(V_1, V_2, \cdots, V_n)$ 。令  $V_{\max} = \max(V_1, V_2, \cdots, V_n)$ ,  $V_{\min} = \min(V_1, V_2, \cdots, V_n)$ 。因为在工期固定与资源均衡的优化模型中, 资源需要量的方差值越小, 表明资源使用越均衡。因此, 根据式(2) 可以得到资源目标的相对值  $r_{3j}$

$$r_{3j} = \frac{V_{\max} - V_j}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (6)$$

### 三、指标权重的确定

权重是主、客观综合量度的结果, 往往反映了专家和决策人员对问题的偏好或重视程度, 以及评判指标之间的相互关系及其在决策中作用的大小。权重的确定既要符合客观的需要, 又关注主观认识, 由于这种主客观认识一致性的要求, 确定权重变得难以把握。因此, 合理的估计权重是综合评价的关键, 决定了多目标综合的精度<sup>[6]</sup>。

通过相关研究资料的分析、归纳, 本文认为在公路工程项目网络计划综合优化模型中, 对工期、成本、资源等优化指标的权重系数, 应根据工程项目的实际情况采用专家评分法, 即主观赋权法来确定较为合理。设方案  $j$  目标  $i$  具有不同的权重, 则权重矩阵  $W$  为

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \cdots & w_{mn} \end{bmatrix} = w_{ij} \quad (7)$$

式中:  $w_{ij}$  为方案  $j$  目标  $i$  的权重。

如果目标  $i$  对方案集中所有方案的权重相同, 则权重矩阵简化为目标权重向量, 即

$$W = (w_1, w_2, \cdots, w_m)^T \quad (8)$$

要求满足归一化条件, 即  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

### 四、最优方案的选择

系统评价的目的就是在对各个方案进行定量和定性分析的基础上选择总体最优的方案。因此, 要将系统的多个目标合成为总体目标, 以便对方案进行排序。在评价指标已经量化, 权重已经确定后, 就可以用指标合成技术建立总体性能评价函数。本文采用最大隶属度模型作为综合评价的合成模型。

根据相对隶属度定义, 目标相对隶属度最大值组成的方案为正理想方案; 最小值组成的方案为负理想方案。采用加权欧氏距离作为方案差异度的测量。  $j$  方案与正、负理想方案的差异度分别用  $d_j^+$  和  $d_j^-$  表示<sup>[7]</sup>, 则

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (w_i | r_{ij} - 1 |)^2} \quad (9)$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (w_i | r_{ij} - 0 |)^2} \quad (10)$$

设方案 $j$ 对正理想方案的相对隶属度为 $u_j$ ,对负理想方案的相对隶属度为 $u_j^-$ ,按模糊集合的余集定义有 $u_j^- = 1 - u_j$ ,将隶属度定义为权重,则方案 $j$ 与正理想方案之间权距离 $D_j^+$ 为: $D_j^+ = u_j d_j^+$ ,方案 $j$ 与负理想方案之间权距离 $D_j^-$ 为: $D_j^- = u_j^- d_j^- = (1 - u_j) d_j^-$ 。

为求得 $u_j$ 的最优解,建立优化准则为:方案 $j$ 与正、负理想方案的权距离的平方和最小,即 $[F(u_j)]_{\min} = (D_j^+)^2 + (D_j^-)^2$ ;  $\frac{dF(u_j)}{du_j} = 0$ ,从而得到:
$$u_j = \frac{(d_j^-)^2}{(d_j^+)^2 + (d_j^-)^2} \quad (11)$$

对所有备选方案,以隶属度极大原则选择最优方案,即取 $D = (u_j)_{\max}$ 所对应的方案为最优解。

五、实例分析

(一) 初始方案

某项目各工作的正常时间和正常费用、临界时间和临界费用及其费用率见表1。工程间接费用为每周 $1.6 \times 10^4$ 元。初始时标网络及资源需要量情况如图1所示,图中箭线上数字为该工作的资源需要量,箭线下括号内数字为关键工作的费用率。初始方案工期为11周;由表1可知初始方案工程直接费用为 $1.99 \times 10^6$ 元,再将直接费用、间接费用的数据分别填入表2。

(1) 初始方案的资源均衡性优化。在图1中,对非关键工作从左至右进行调整。结果为工作7-9右移1周;工作3-7右移4周。调整后的网络及资源需要量动态情况见图2。继续对图2进行分析,结果是工作4-8和2-3均可右移1周,虽然移动无助于均衡性的改善,但可以推迟资源进场的时间,不过也失去了可以利用的机动时间,结果是各有利弊,可以根据具体情况决定<sup>[8-10]</sup>。

(2) 初始方案的方差计算。

$$\bar{R}_0 = \frac{1}{11}(2 \times 3 + 2 \times 5 + 4 + 2 \times 5 + 3 + 2 \times 5 + 4) = 4.273$$
$$\sigma_0^2 = \frac{1}{11}(2 \times 3^2 + 2 \times 5^2 + 4^2 + 2 \times 5^2 + 3^2 + 2 \times 5^2 + 4^2) - 4.273^2 = 0.741$$
将计算得出的方差值填入表2中。

(二) 方案 I

(1) 工期成本优化。从图1中可知计划的关键工作是:1-2、2-4、5-6、8-9和9-10;工作5-6的费用率

表1 各工作时间与费用数据表

工作代号	工作名称	正常施工时间 $t_n$ /周	正常施工费用 $c_n/10^3$ 元	临界施工时间 $t_c$ /周	临界施工费用 $c_c/10^3$ 元	费用率 $e/10^3$ 元·周 <sup>-1</sup>
1-2	A	2	200	1	218	18
2-4	B	3	280	1	304	12
4-8	C	2	180	1	198	18
2-3	D	2	210	1	225	15
5-6	E	3	300	1	320	10
8-9	F	2	260	1	275	15
3-7	G	1	140	1	140	
7-9	H	1	230	1	230	
9-10	K	1	190	1	190	
总计			1 990		2 100	

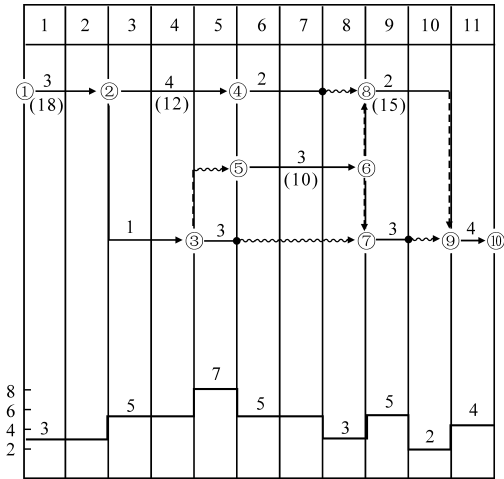


图1 初始时标网络及资源需要量动态

表2 各种方案下的工期、成本及资源需要量方差

优化项目	方案						
	初始方案	I	II	III	IV	V	VI
工期/周	11	10	9	8	7	6	5
直接费用/10 <sup>3</sup> 元	1 990	2 000	2 012	2 027	2 045	2 072	2 100
间接费用/10 <sup>3</sup> 元	176	160	144	128	112	96	80
总成本/10 <sup>3</sup> 元	2 166	2 160	2 156	2 155	2 157	2 168	2 180
资源需要量方差	0.741	2.960	6.004	5.250	2.699	10.333	22.240

最小,又因为网络图中次关键线路的总长度为10周,因此,将工作5-6压缩1周,增加的直接费用为 $1 \times 10^4$ 元;而间接费用的减少值为 $1.6 \times 10^4$ 元;总工期为10周。工期、成本计算结果见表2。时标网络及资源需要量动态见图3。在图3中,工作5-6的持续时间由3周变为2周,采取的压缩措施是从计划外增加资源,如增加机械设备、运输车辆和劳动力等,来

缩短关键工作的作业时间。因此,其每周资源需要量应变为: $R_{5,6} = (3 \times 3 \text{ 周})/2 \text{ 周} = 4.5$ 。这里,假定所需的资源为劳动力,则取  $R_{5,6} = 5$ 。

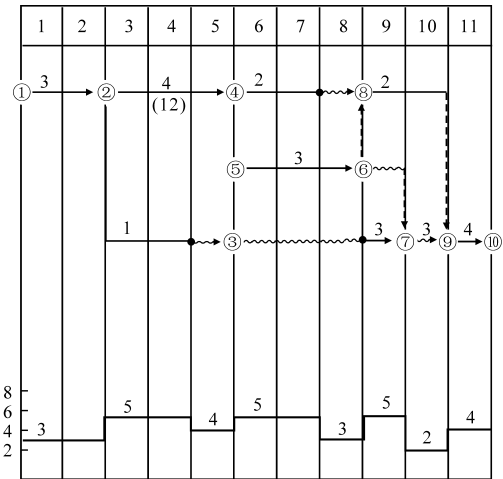


图2 工作3-7右移4周后网络及资源需要量动态

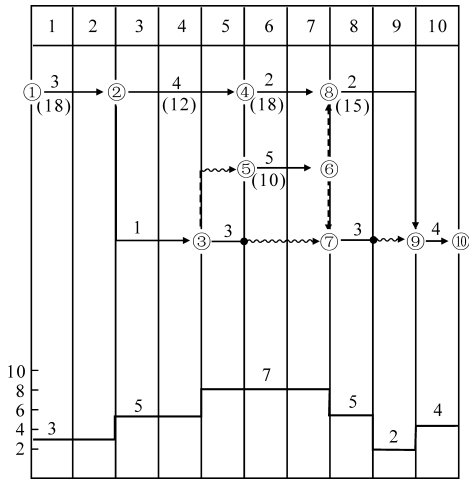


图3 方案 I 工期成本优化后网络

(2) 资源均衡优化。在图3中,只有工作7-9按资源均衡优化原理可右移1周,但移动无助于均衡性的改善,只可以推迟资源进场的时间,不过同时失去了可以利用的机动时间。因此,这里决定工作7-9不右移。图3即为方案 I 经工期、成本、资源优化后的网络图。资源需要量方差计算为

$$\bar{R}_1 = \frac{1}{10}(2 \times 3 + 2 \times 5 + 3 \times 7 + 5 + 2 + 4) = 4.800$$

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{10}(2 \times 3^2 + 2 \times 5^2 + 3 \times 7^2 + 5^2 + 2^2 + 4^2) - 4.8^2 = 2.960$$

将计算出的结果填入表2中。继续以上的步骤,得到工期、成本、资源优化后的其他不同方案。其最终结果见表2所示。

(三) 最优方案的确定

(1) 目标特征值矩阵的确定。方案数  $n = 7$ , 目标数  $m = 3$ , 则根据表2可以得出目标特征值矩阵  $X_{ij}$  为

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} 11 & 10 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 \\ 2.166 & 2.160 & 2.156 & 2.155 & 2.157 & 2.168 & 2.180 \\ 0.741 & 2.960 & 6.004 & 5.250 & 2.699 & 10.333 & 22.240 \end{bmatrix}$$

(2) 目标相对值矩阵的确定。应用式(4)、(5)和(6)将目标特征值矩阵变换为相对值矩阵  $r_{ij}$ , 即

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.167 & 0.333 & 0.500 & 0.667 & 0.833 & 1.000 \\ 0.560 & 0.800 & 0.960 & 1.000 & 0.920 & 0.480 & 0.000 \\ 1.000 & 0.897 & 0.755 & 0.790 & 0.909 & 0.554 & 0.000 \end{bmatrix}$$

(3) 权重向量的确定。对于各评价目标的权重,实际应用中应根据各工程项目的具体情况,采用专家咨询等方式确定。本文根据相关研究文献,经综合分析后取定的工期、成本、资源权重向量为: $W = (0.4 \ 0.4 \ 0.2)^T$ 。

(4) 最优方案的确定。根据式(9)、(10)和(11)分别计算各方案与正、负理想方案的差异度  $d_j^+$ 、 $d_j^-$  和相对隶属度  $u_j$ 。对初始方案,则有

$$d_0^+ = [0.4 \times (0 - 1)^2 + 0.4 \times (0.56 - 1)^2 + 0.2 \times (1 - 1)^2]^{\frac{1}{2}} = 0.619$$

$$d_0^- = [0.4 \times (0 - 0)^2 + 0.4 \times (0.56 - 0)^2 + 0.2 \times (1 - 0)^2]^{\frac{1}{2}} = 0.570$$

$$u_0 = \frac{0.570^2}{0.619^2 + 0.570^2} = 0.459$$

所有方案的计算结果如表3所示,则最优方案为  $D = (u_j)_{\max} = u_4 = 0.927$ , 从而得出方案IV, 即总工期为7周、总成本为  $2.16 \times 10^6$  元、资源需要量方差为2.699的方案为综合最优方案。

表3 各种方案相对隶属度计算

方案	初始	I	II	III	IV	V	VI
$d_j^+$	0.629	0.544	0.437	0.330	0.220	0.399	0.775
$d_j^-$	0.570	0.654	0.726	0.790	0.826	0.657	0.632
$u_j$	0.459	0.591	0.734	0.851	0.927*	0.731	0.399

六、结 语

将项目网络计划视作一个系统,以系统综合评价方法为架构,确定工程网络计划综合优化评价指标及优化模型,符合工程实际情况。以单目标优化

为基础的多目标优化方法,使综合优化模型更具实用性、可操作性和易接受性。

#### 参考文献:

- [1] 刘尔烈,张艳海. 建筑施工项目进度、成本和质量目标的综合优化[J]. 天津理工学院学报,2001,17(2):90-93.
- [2] 张海涛,刘超英,何亚伯,等. 网络计划多目标优化问题研究[J]. 基建优化,2005,26(1):20-23.
- [3] 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):10-13.
- [4] 王海文,陈荣秋,刘晓平,等. 一种网络计划的综合优化模型[J]. 华中科技大学学报,2001,29(2):62-64.
- [5] 盛克苏,王德玲,沈疆海,等. 网络计划优化的决策支持系统研究[J]. 武汉理工大学学报,2001,23(3):73-76.
- [6] 宣以政. 工程项目网络计划的综合优化及其动态优化管理[J]. 成都大学学报,1996,15(2):38-42.
- [7] 唐 明. 施工进度网络计划综合优化法[J]. 江西水利科技,1998,24(2):97-103.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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):104-107,112.

## Multi-goal synthesized optimization for network planning in highway construction projects

YAO Yu-ling

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of synthesized optimization of network planning in highway item, the author, with the help of systematic appraisal method, analyzes the relationship among project duration, cost and quality. The results show that in the comprehensive optimization of network planning, quality should be put at the first place and also taken as the restricting requirement for quality index, and the comprehensive optimization index should also contain project duration, cost and quality. To make the synthesized optimization approach more practical, operable and flexible, the author ends the paper by proposing simple and feasible approaches after the study of single-goal optimization method.

**Key words:** traffic engineering; highway item; network planning; multi-goal comprehensive optimization