

文章编号:1671-8879(2007)04-0033-04

# 基于 Petri 网的公路施工资源总体优化方法

张绍阳<sup>1</sup>, 王选仓<sup>2</sup>

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**基于施工资源局部优化建立的 Petri 网模型输出和资源能力之间的关系,采用施工资源强度柔化的总体优化方法调整工序所需资源,使工序的持续时间加长或缩短,从而降低资源平衡性指标,给出了柔化的取整准则、方向准则和幅度准则,并进行了证明。最后以工程实例与最小方差法进行了优化效果的对比研究。结果表明,柔化方法与工程管理习惯一致,能够大幅降低传统方法优化时的计算工作量,得到更加优化的平衡性指标。

**关键词:**道路工程;公路施工;Petri 网;资源优化

**中图分类号:**U415.2 **文献标志码:**A

## General resources optimization in highway construction based on Petri nets

ZHANG Shao-yang<sup>1</sup>, WANG Xuan-cang<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;  
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the relation of Petri nets output and resource capacity, a general resources optimization method named resource intensity flatting is put forward, which lowers the balanced index of resources through adjusting the resources number of activities so as to lengthen or shorten their durations. The integer conversion rule, direction rule and range limitation rule of flatting are presented and proved. Finally, an example is optimized for the comparison with the current method. The result shows that this method is consistent with engineering management, and can lower the calculation load to get a better balanced index of resources. 1 tab, 4 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; highway construction; Petri nets; resource optimization

## 0 引言

公路施工资源传统优化方法一般基于施工网络图工序的资源数量需求估计,按照工期不变、资源配置均衡和资源有限、工期最短的原则,对资源进行优化。常用的方法有基于资源强度图的削峰填谷法、

最小方差法及遗传算法等<sup>[1-5]</sup>。其共同的特点是将工序看作原子单位,利用非关键工序的自由时差对开工时间进行调整,从而达到优化的目的。这种调整过于理想化,只能在“事前”和“事后”起作用,在施工过程中,当施工进度与计划不相符合时(工程中经常发生),资源优化便失去了效果,因此难以实用。

收稿日期:2006-08-10

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200531881213)

作者简介:张绍阳(1971-),男,山西襄汾人,副教授,博士,E-mail:zhshy@chd.edu.cn。



文献[6-7]利用数学建模的方法对施工资源进行优化。数学建模的方法对于求解特定的问题具有良好的效果,但对用户要求较高,并且求解复杂,这给数学建模方法的应用带来了很大的局限。

文献[8]利用 Petri 网建模的方法对资源进行了局部优化,基于 Petri 网的建模方法可以深入到网络图原子工序内部进行建模,对循环过程进行研究。当实际进度和计划不符时,可以及时调整资源,具有“事中”的调整作用,但文献[8]对总体优化没有进行研究。本文基于文献[8]局部优化研究的基础,利用其建立的模型输出和资源能力之间的关系,提出一种基于 Petri 网的资源强度柔化方法的总体优化方法,重新计算了文献[2]中的实例,并对优化效果进行了比较。

## 1 模型输出与资源数量

设网  $N_i$  为工序  $P_i$  的描述模型。假设网具有一致性,即  $\exists x > 0, A^T x = 0, x$  称为通向向量。对于每个最小支持  $s$  不变量  $y_k$ ,对应的周期  $\tau_k^{[8]}$  为

$$\tau_k \geq y_k^T (A^-)^T D x / y_k^T M_0 \quad (1)$$

式中:  $A^-$  为  $N_i$  的关联输入矩阵;  $D = \text{diag}\{d_j\}$ , 为变迁延时对角矩阵,  $d_j$  为网中第  $j$  个变迁的延时;  $M_0$  为网初始情态,即初始参与的资源数量。

于是,网的循环周期  $C_i$  为

$$C_i = \max\{\tau_k\}, \quad k = 1, \dots, s \quad (2)$$

其中,  $s$  为模型包含的最小支持不变量的总数。在不考虑外界随机因素的影响下,可以得到工序持续时间  $T_i$  为

$$T_i = n_i C_i \quad (3)$$

对于一个特定的工序,  $n_i, y_k, A, D, x$  都是定值,因此可以建立工序持续时间  $T_i$  与资源数量的函数关系。在进行总体优化时,可以利用工序的自由时差对  $T_i$  进行调整,从而实现对资源数量  $M_0$  的调整,恰当的调整方法可以达到对资源优化的目的。

## 2 基于模型的资源强度图

设  $C$  为工程工序集,  $C = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , 其中,  $n$  为工程仿真模型中工序的总数。

设  $r_{ji}$  为第  $j$  种资源在第  $i$  个工序中的需求量。通过对模型的一次仿真运行可以得到工序持续时间、开工时间和完工时间的一个样本。取  $T_i$  为其持续时间分布的均值或者其模型多次仿真所得样本的均值,取开工时间  $T_i^{\text{ES}}$  为多次仿真所得开工时间的样本均值,取完工时间  $T_i^{\text{EF}} = T_i^{\text{ES}} + T_i$ 。于是,可以得到第  $t$  天的第  $j$  种资源的需求量

$$Q_{jt} = \sum_{i=1}^n q_i \quad (4)$$

$$\text{其中, } q_i = \begin{cases} r_{ji} & T_i^{\text{ES}} \leq t \leq T_i^{\text{EF}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

资源强度曲线图使用时间  $T$  作为横坐标,单位为  $d$ ,第  $j$  种资源每日的需求量  $R$  作为纵坐标。

## 3 资源强度的柔化方法

资源强度柔化方法是基于最小方差法所提出的,单资源的最小方差法的目标可以描述为:设  $\bar{R}$  为整个项目工期  $T$  内的该资源平均需要量,  $R_i$  为在时间  $t$  上的资源需求量,则资源的均方差  $\sigma^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (R_i - \bar{R})^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T R_i^2 - \bar{R}^2$ , 其中,  $\bar{R} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T R_i t_i$ 。由于  $T, \bar{R}$  均为一个定值,只有  $\sum_{i=1}^T R_i^2$  是

变量,故令  $H_R = \sum_{i=1}^T R_i^2$ , 称为平衡性指标。资源越均衡,平衡性指标  $H_R$  越小。对应于资源强度图,则使图中的资源峰值得到消减,可以证明,峰值消减将使得总体方差减小,因此资源趋向均衡。本文使用“柔化”的方法使峰值消减。

**定义 1 柔化。**柔化是增加(减少)非关键工序的资源数量,在其自由浮时之内,按照式(3)使其工期尽量缩短(加长),从而使资源强度图中的峰值得以消减,平衡性指标降低。

柔化的 3 个准则如下:

**柔化准则 1, 取整准则。**由于资源一般使用整数表示,因此在进行柔化时,既要考虑柔化幅度,也要考虑柔化精度,资源的数量按照现有资源数量的  $1/2, 1/3, 2/5, 3/7$  等幅度进行调整,对于数量较多的资源,如果以上因子运算不能得到整数值,则取  $1/2$  进行计算并取整。

**柔化准则 2, 方向准则。**当资源需求量  $R_i < \bar{R}$  时,资源强度图出现下峰,消除峰值需将工序资源数量增加;反之,资源强度图出现上峰时,工序资源数量应减少。

**柔化准则 3, 幅度限定准则。**不恰当的柔化可能使方差加大,设拟柔化的工序时段  $t_1$  内的资源需求量为  $R_1$ , 柔化时资源数量变化幅度为  $R$ , 柔化后影响后续工程时段为  $t_2$ ,  $t_2$  时段原资源需求量为  $R_2$ , 于是当柔化幅度  $|R| > |R_1 - R_2|$ , 才可以进行柔化,否则不能柔化。

柔化准则 1 和柔化准则 2 都容易理解,下面只对柔化准则 3 进行证明。



证明:柔化前后资源方差之差  $\omega = [(R_1 - \bar{R})^2 + (R_2 - \bar{R})^2] - [(R_1 - R - \bar{R})^2 + (R_2 + R - \bar{R})^2]$ ,化简得  $\omega = R[R - (R_1 - R_2)]$ 。当  $R < 0$ ,当且仅当  $R < R_1 - R_2$ ,才有  $\omega > 0$ ;当  $R \geq 0$ ,当且仅当  $R > R_1 - R_2$  时,有  $\omega > 0$ ,合并两式可以得到,当  $|R| > |R_1 - R_2|$  时,有  $\omega > 0$ ,即方差变小。

得证。

柔化过程完成后,可以按文献[2]中的方法再次调整,从而进一步缩小方差,使资源配置更加均衡。

柔化的思想与实际工程的管理习惯较为符合。例如,在工程中,如果一个非关键工序有自由时差,并且该工序计划劳动力的需求造成了所在时段劳动力需求总量增加,则在管理决策中,一般不会增加劳动力,而是对工序的自由时差进行估计,在不影响关键工序的情况下使用现有的劳动力完成该工序。

柔化也与现在的公路施工管理思想发展相一致。同中国的经济发展轨迹类似,公路施工企业由“大而全”的计划经济特色向“小而专”的市场经济特色转变,形成各具特色、专业化的操作层施工队伍。在许多大型企业内部形成了独立核算的单项工程施工主体,例如运输队、拌和机组等,这使得公路施工过程成为一个多智能体组成的活动。在多智能体中,各部分的能力总是趋于平衡的,也就是说,各智能体部分总是会使自己尽量“柔和”,与整个系统能力相匹配。在工程中,反映为各施工主体自主调整资源数量,以适应整个工程系统的运转速度,即尽量减少时差,提高资源效率。

4 工程实例及比较

下面利用柔化方法对文献[2]中的工程实例进行对比分析。该实例对西安—宝鸡南线改建工程王寺—沔河桥东的第一施工段进行工期限定、资源均衡的优化。图 1 是该工程的网络计划图,其关键路径为:1→2→4→10→13→17→22→27→29→30→31。图 2 是基于图 1 的资源强度曲线图。在该图中资源 R 仅仅指每个工序所需的劳动力,资源优化前的平衡性指标  $H_R = 6\ 331$ ,利用文献[2]中的方法对其优化后的资源平衡性指标  $H_R = 6\ 155$ 。

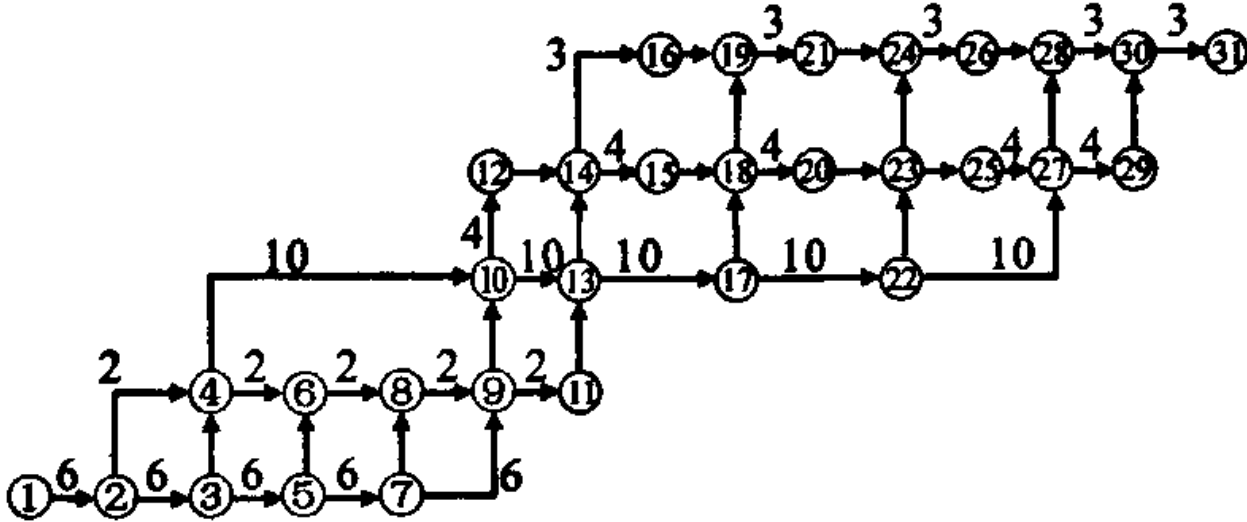


图 1 资源优化前的第一施工段网络

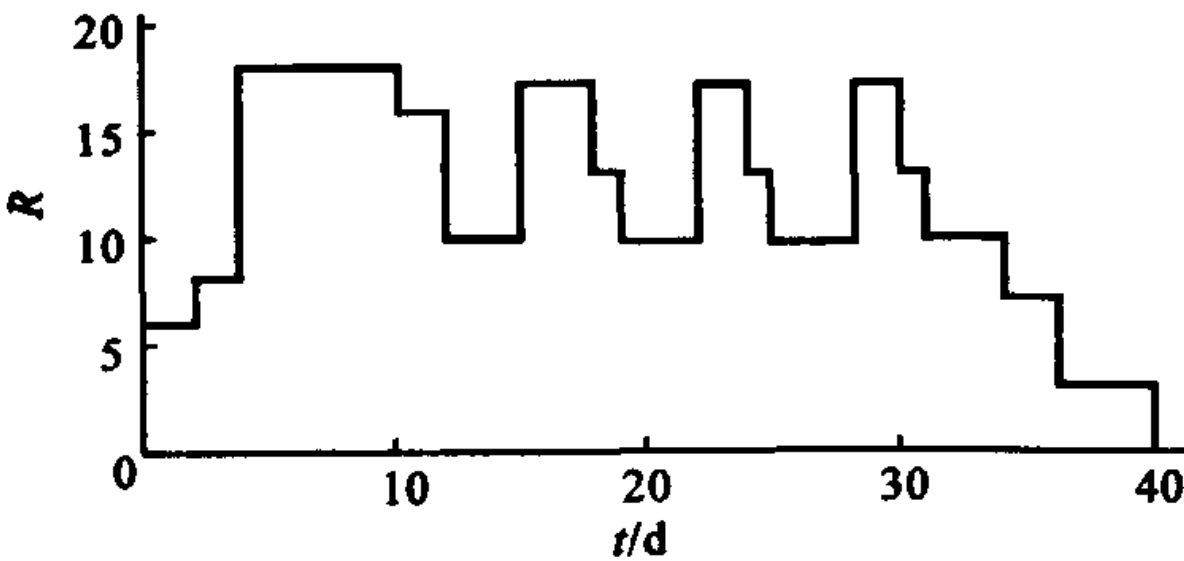


图 2 优化前的资源强度曲线

利用 Petri 网可以得到比图 1 中网络计划更加清晰的施工网络模型,通过该模型能够直接得到更加准确的资源、延时等参数。由于本文重点讨论资源强度柔化方法,Petri 网建模过程不再演示。为了增加可比性,在 Petri 网建模时,工序采用与该实例中相同的划分,资源数量和工序时间参数也使用该例中现有的参数,这样,按照前文所述的资源强度图的建立方法,可以得到与图 2 类似的资源强度曲线图。下面使用本文建立的柔化方法对该实例中的资源进行优化。

为简便起见,此处假设工序的持续时间与资源数量成正比关系。对于实际工程中的复杂工序,工序的持续时间与资源数量之间的关系可由式(3)确定。由于在文献[2]中没有对自由时差进行计算,此处假设工序柔化造成的总时差的减少不影响后续工序的柔化。另外,对在文献[2]中未列出的非关键工序也没有进行柔化处理。

对表 1 中的非关键工序的资源数量  $R_n$  按照柔化的 3 个准则进行改变,最早开工时间  $T^{ES}$  不变,最早完工时间  $T^{EF}$  按照资源数量变化线性比例进行改变,变化幅度限制在工序总时差的范围内。柔化后的资源强度曲线见图 3。柔化后的平衡性指标  $H_R$  为

$$\begin{aligned} H_R = & 2 \times 6^2 + 2 \times 8^2 + 6 \times 18^2 + 4 \times 13^2 + \\ & 2 \times 10^2 + 3 \times 14^2 + 1 \times 13^2 + 2 \times 10^2 + \\ & 3 \times 14^2 + 1 \times 13^2 + 2 \times 10^2 + 3 \times 14^2 + \\ & 1 \times 13^2 + 2 \times 10^2 + 98 + 36 = 6\ 025 \end{aligned}$$

可见,资源柔化后的平衡性指标比文献[2]中的优化方法有了较大的改善,并且计算量也大幅减小。

表 1 工序资源柔化前后参数对照

非关键 工序代号	资源柔化前				资源柔化后				推迟一天平衡性指标 $H_R$ 的变动值
	$T^{ES}$	$T^{EF}$	$T^F$	$R_n$	$T^{ES}$	$T^{EF}$	$T^F$	$R_n$	
9→11	10	12	4	2	10	14	2	1	$H_R = 2 \times 1 \times (11 - (13 - 1)) = -2 < 0$
10→12	10	12	13	4	10	14	11	2	$H_R = 2 \times 2 \times (12 - (13 - 2)) = 4 > 0$
14→15	16	18	10	4	16	20	8	2	$H_R = 2 \times 2 \times (12 - (14 - 2)) = 0$
14→16	16	19	9	3	16	20	8	2	$H_R = 2 \times 2 \times (12 - (14 - 2)) = 0$
18→20	22	24	7	4	22	26	5	2	$H_R = 2 \times 2 \times (12 - (14 - 2)) = 0$
19→21	22	25	6	3	22	26	5	2	$H_R = 2 \times 2 \times (12 - (14 - 2)) = 0$
23→25	28	30	4	4	28	32	2	2	$H_R = 2 \times 2 \times (12 - (14 - 2)) = 0$
24→26	28	31	3	3	28	32	2	2	$H_R = 2 \times 2 \times (12 - (14 - 2)) = 0$
27→29	34	36	1	4	34	36	1	4	$H_R = 2 \times 4 \times (7 - (7 - 4)) = 24 > 0$

注:  $T^{ES}$ 为最早开工时间;  $T^{EF}$ 为最早完工时间;  $T^F$ 为工序总时差;  $R_n$ 为工序的资源需求量。



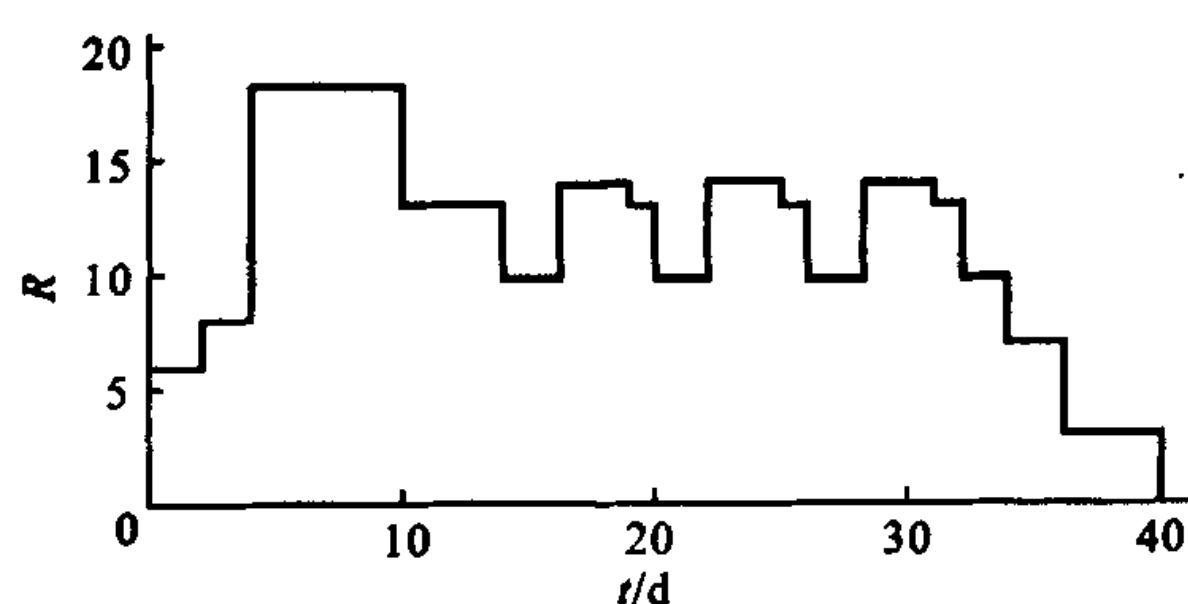


图3 柔化后的资源强度曲线

在表1中,对非关键工序推迟1d后计算平衡性指标的变化,只有工序9→11可以后移,这也说明,两种方法的目标是一致的,只不过柔化方法效果更好一些。再次优化后计算得其平衡性指标为

$$H_R = 2 \times 6^2 + 2 \times 8^2 + 6 \times 18^2 + 2 \times 12^2 + 2 \times 13^2 + 2 \times 11^2 + 3 \times 14^2 + 1 \times 13^2 + 2 \times 10^2 + 3 \times 14^2 + 1 \times 13^2 + 2 \times 10^2 + 3 \times 14^2 + 1 \times 13^2 + 2 \times 10^2 + 98 + 36 = 6\ 017$$

其资源强度曲线见图4。

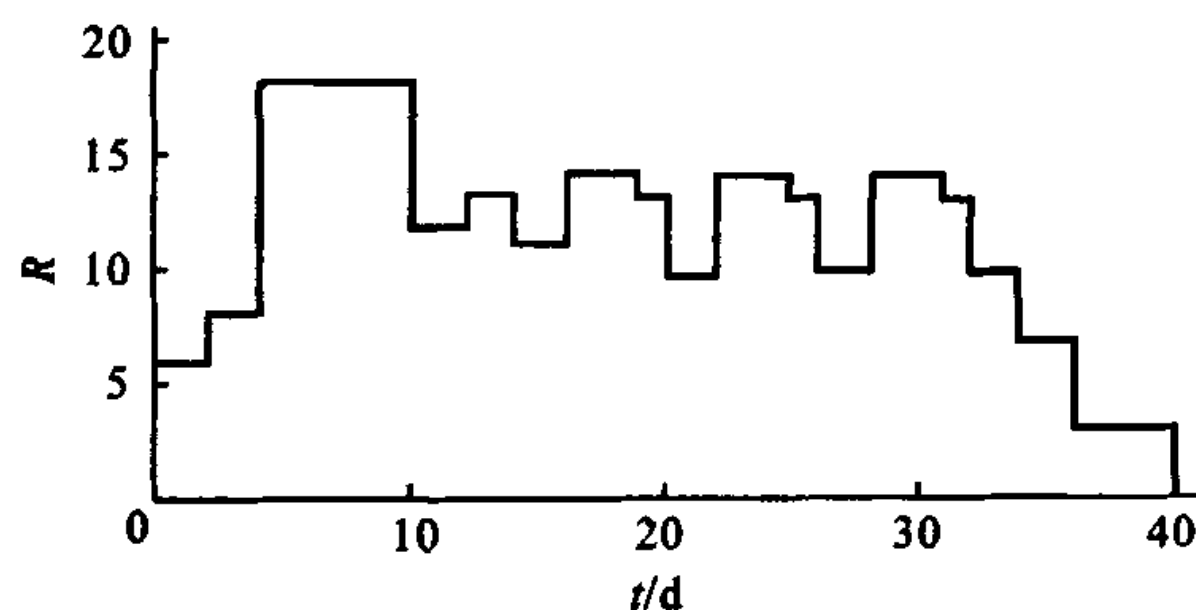


图4 再次优化后的资源强度曲线

## 5 结 语

(1)提出了基于Petri网的施工资源强度柔化的总体优化方法,给出了Petri网的资源强度图的产生方法,对柔化进行了定义,提出柔化的3个准则,并进行了证明。

(2)对文献[2]中的工程实例进行了对比优化。优化效果表明,本文建立的方法操作简单,并且效果较优。在后续的扩展研究中,将借鉴多智能体理论建立施工模型,从理论上更好地证明本文提出的优化方法。

### 参考文献:

### References:

- [1] Kandil A A. Multi-objective optimization for large-scale highway construction projects [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.
- [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] 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.
- [4] 姚玉玲, 贺晋荣. 基于非关键工序组的资源均衡优化方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(1):101-104.
- YAO Yu-ling, HE Jin-rong. Resources optimization based on non-key-work-processes-unit[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1):101-104.
- [5] 李 平, 顾新一. R&D项目进度费用风险优化的研究[J]. 管理工程学报, 2006, 20(2):14-18.
- LI Ping, GU Xin-yi. Research on optimization of schedule-cost risk for R&D project [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2006, 20(2):14-18.
- [6] 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.
- [7] 陆绍凯, 武振业. 固定资源约束下的网络计划进度优化方法研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(4):88-92.
- LU Shao-kai, WU Zhen-ye. Study on approach to optimize network planning schedule for fixed resources constraint [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(4):88-92.
- [8] 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.