

文章编号:1671-8879(2006)01-0038-05

基于 Petri 网的公路施工资源瓶颈识别和消除

张绍阳¹, 王选仓²

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

摘 要: 施工资源优化对于保证施工进度、降低施工成本具有重要的作用。对沥青路面机械化施工过程建立了面向对象的 Petri 网仿真模型, 利用 Petri 网关联矩阵分析法研究了基于资源生产周期的资源瓶颈识别方法。根据施工特点给出了瓶颈消除的 4 种方法: 简单调整方法、考虑生产能力储备系数的调整策略、以主要设备为核心的调整策略、改变施工方法的调整策略, 可形成了基于 Petri 网的资源瓶颈识别和消除方法。工程实例表明, 该方法能有效提高施工质量和效率。

关键词: 道路工程; 公路施工; 资源瓶颈; Petri 网

中图分类号: U415.2 **文献标识码:** A

Bottle-neck Identification of Resources in Highway Construction and Its Elimination Methods Based on Petri Nets

ZHANG Shao-yang¹, WANG Xuan-cang²

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

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Resource optimization has an important effect on ensuring schedule and reducing cost in highway construction. The object-oriented Petri nets model for asphalt pavement mechanization construction is built. With Petri nets incidence matrix analysis method, resource bottle-neck identification based on resource circle time is studied. Four methods for bottle-neck elimination, including simple adjustment method, method on throughput redundancy, method on core plants, method on construction process changing, are given according to construction characteristic. An asphalt pavement construction project is presented to show this method can increase the quality and efficiency of highway construction. 3 figs, 6 refs.

Key words: road engineering; highway construction; resource bottle-neck; Petri net

0 引 言

施工资源的优化配置已有许多文献进行了研究, 文献[1-2]对施工网络图进行优化, 对从总体上优化工程资源起到了重要的作用。但是这些方法的基础是网络图的工序分配, 而网络图的工序分配经

常过于粗糙, 其资源的需求也比较主观或经验化, 因此计算结果可靠性很差。文献[3-4]利用数学模型对工程的资源和费用目标进行优化, 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, 并且数学建模求解复杂, 这给数学建模方法的应用带来了很大的局限。文献[5]利用循环网

收稿日期: 2005-04-20

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2001AA42013)

作者简介: 张绍阳(1971), 男, 山西襄汾人, 高级工程师, 工学博士研究生。

络施工仿真的方法对路面施工资源进行了研究,但资源的调整只能根据仿真结果手动调整,具有很大的随意性,并且不能寻找到最优解。本文利用 Petri 网进行建模,与循环网络施工仿真方法相比, Petri 网能够很好地解决工程中普遍存在的多个状态变化同时发生的状况,而且具有事件驱动的特性,丰富的语义以及完整的数学分析工具;与对施工网络图进行优化的方法比较,仿真建模方法可以深入到原子工序的内部;与数学建模方法相比较,仿真建模方法具有建模直观、约束条件少的特点^[6]。

1 施工过程 Petri 网建模

1.1 Petri 网方法

一个基本 Petri 网是一个三元组

$$\Sigma = (P, T, F)$$

其中, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 为有限非空库所集, 集合元素在网中以圆圈表示状态, 例如挖土机是否准备好。

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 为有限非空变迁集, 集合元素在网中以方框表示状态的改变。例如挖土机挖土的过程可以使用一个变迁表示。

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是有向弧集, 使用有向箭头表示, 表示资源的流动方向。

1.2 施工过程建模

施工中的资源可看做是一系列的循环,通过对循环的研究可实现对资源的优化配置,发现资源配置中的瓶颈,图1是典型的沥青路面机械化施工工艺流程;图2是利用面向对象的Petri网(Object-Oriented Petri Nets, OOPN)对图1建立的仿真模型。



图1 沥青路面施工工艺流程

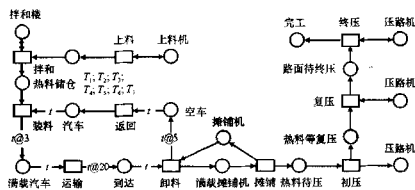


图 2 沥青路面机械化施工 OOPN 模型

在图2所示的施工模型中,包含了“上料机”与“上料”组成的上料循环,“拌和楼”与“拌和”组成的拌和循环,“装料”、“满载汽车”、“运输”、“到达”、“卸料”、“空车”、“返回”、“汽车”组成的运输循环,以及

摊铺循环、初压循环、复压循环、终压循环等。

1.3 模型说明

(1) 为了便于说明问题以及限于篇幅,该模型只包含了沥青路面施工的主要机械设备,在实际工程中,还可以对工程中所关心的其他资源进行建模,例如人力资源、原料供应、拌和过程等。

(2) 为了图形简洁,只在“运输循环”上标出了有代表性的一些参数。 t 表示在运输循环上传递的汽车对象; $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7$ 是“汽车”库所的初始资源,表示共有7辆车参与运输;“装料—满载汽车”弧上的表达式 $t@3$ 中的3表示装料过程需要3个时间单位。由此可见,该模型表现了评估施工过程性能的几个基本要素:施工过程,参与者的数量,耗时。因此,利用该模型可以对施工过程的性能进行评估。

(3)图2模型中的时间参数都为定值,基于统计或估计得到,还可以使用随机事件的分布密度来表示,使得建模更加方便。

2 瓶颈识别

定义 1 关联矩阵。

对于一个具有 n 个变迁和 m 个库所的 Petri 网, 关联矩阵定义为

$$A = [a_{ij}]_{n \times m} \quad (1)$$

关联输入矩阵定义为

$$\mathbf{A}^{-} = [a_{ij}^{-}]_{n \times m} \quad (2)$$

式中: $a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-$; $a_{ij}^+ = w(i, j)$ 为从变迁 i 到库所 j 弧上的权重; $a_{ij}^- = w(j, i)$ 为从库所 j 到变迁 i 弧上的权重。

在普通 Petri 网中弧上的权重为 1 或为整数, 用式(1)便可建立关联矩阵。在 OOPN 中弧上传递的是对象, 本文对对象进行数量化来构造其关联矩阵, 其主要思想是屏蔽对象其他属性而只考虑其数量关系, 例如在图 2 中的弧上的一个汽车对象 T , 设其权重为 1。与关联矩阵相对应的是模型初始情态 M_0 的构造; 同样, 以对对象数来表示库所的初始情态, 例如, 在图 2 中汽车库所的初始情态为 7。从而得到 OOPN 的关联矩阵 M 。

定义 2 S 不变量和最小支持 S 不变量。

如果一个 m 维整数向量 \mathbf{y} 满足

$$A\mathbf{y} = 0 \quad (3)$$

那么这个向量称为 S 不变量。简单来说,如果一个 S 不变量不能由其他 S 不变量通过线性组合得到,则该不变量称为最小支持 S 不变量。

定义 3 生产周期 τ 。

Petri 网中将周期 τ 定义为经过一个变迁发生序列后,网的状态又回到初始状态 M_0 所经过的时间。假设网具有一致性,即

$$\exists x > 0, A^T x = 0 \quad (4)$$

式中: A 为 Petri 网的关联矩阵; x 为通向向量。于是,对于每个最小支持 S 不变量 y_k ,周期 τ 就可以定义为^[4]

$$\tau_k \geq y_k^T (A^-)^T D x / y_k^T M_0 \quad (5)$$

式中: $D = \text{diag}(d_i)$ 为每个变迁的延时组成的对角矩阵; M_0 为系统的初始情态; A^- 为关联输入矩阵。

对于施工环节类似的工作流系统,可以在完工库所与原料库所之间加一个虚变迁,使该工作流变为强连接系统,便可返回到初始状态。对于强连接系统,网具有一致性,于是式(4)成立,从而可以利用式(5)求出每个 S 不变量对应的 τ 值。

对于图 2 所示的 Petri 网,每个库所只有一个输入和一个输出,这类网称为标记图。由于在标记图中,每类资源组成了一个循环,并且每个循环对应一个最小支持 S 不变量,因此资源和最小支持 S 不变量对应的 τ 之间存在一一对应关系。本文将该 τ 值定义为对应资源在此生产过程中的生产周期,则生产周期最大的资源便是系统的瓶颈。

3 调整方法

理想状态下,应使 $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k$,则系统不存在瓶颈。当模型确定后,在式(5)中, $y_k^T A^- D x$, M_0 都是定值,设 $N = y_k^T (A^-)^T D x / y_k^T$, 所以有 $\tau_k \geq N / M_0(y_k)$, 可见,周期与资源数量成反比,对资源的调整可利用这种反比关系完成。

3.1 简单调整

简单调整仅仅使各个循环涉及资源利用率均衡。可利用式(6)、式(7)进行。

$$\tau = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tau_i \quad (6)$$

则调整后的资源数量为

$$M'_0(i) = \tau_i M_0(i) / \tau \quad (7)$$

3.2 考虑生产能力储备系数的调整策略

生产能力储备系数是指在施工环节中,为了保证第 $i+1$ 环节的正常运转,要求第 i 环节有一定的能力储备,称为第 i 环节的储备系数。例如对于连续式摊铺机,要求料车的供应能力大于摊铺能力,料车应有一定储备。设每个循环的生产能力储备系数为 $\tau_c(i)$, τ 取值同式(6),则调整后的资源数量为

$$M'_0(i) = \prod_{k=0}^{i-1} \omega(k) \tau_k M_0(i) / \tau \quad (8)$$

3.3 以主要设备为核心的调整策略

在施工环节中,有些设备无法进行调整,例如在沥青路面施工过程中,摊铺设备的最大生产能力决定了施工工期,几乎无法进行调整。因此,对施工现场的调整可以这些设备的循环周期为基准,对其他设备进行调整。例如以第 k 种设备为基准,在式(6)中,令 $\tau = \tau_k$,式(7)、式(8)不变。

3.4 改变施工方法的调整策略

3.4.1 模型调整

在资源有限的情况下,通过合理的调配,使资源参与到不同的施工环节,可以提高资源的利用率,该方法需要调整系统模型。例如将图 2 中 3 个压路机库所合并为 1 个,选用适合于初压、复压和终压的压路机,从而减少压路机的数量和种类,减少维护和维修的成本。

3.4.2 模型参数调整

通过改变施工方法可以改变模型参数,例如在有效碾压时间允许范围内,改变碾压作业段的长度,将改变压路机碾压完成一个作业段所需时间,摊铺形成一个碾压作业段所需的时间等多个参数,从而对设备的利用率进行调整。

4 实例分析

某施工单位进行高速公路某路面标段的施工,路面宽度为 12 m,厚度 5 cm,配备拌和楼一座,实际生产能力为 300 ($t \cdot h^{-1}$),摊铺机 2 台,初压机 2 台,15 t 料车 7 辆,满载车运料平均速度为 25 ($km \cdot h^{-1}$),空车返回平均速度为 40 ($km \cdot h^{-1}$),摊铺机摊铺速度为 2 ($m \cdot min^{-1}$),每台摊铺机的摊铺宽度为 6 m,2 台摊铺机前后相隔 20 m 并行工作。气温为 8 $^{\circ}C$,碾压作业段定为 30 m,选用 CC21 型振动压路机初压 2 遍,碾压速度选用 3 ($km \cdot h^{-1}$),要求料车在摊铺机前的平均等待时间为 5 min。求运料距离约为 5 km 处的资源配置瓶颈。

4.1 建模

为了便于计算和说明问题,只对其中的料车、摊铺机、初压机三类施工设备进行建模并进行分析。首先求出主要的时间参数。

(1) 每台摊铺机摊铺完一车料需要时间 $T_{\#}$ 。设压实后的沥青混合料容质量为 2.30 ($t \cdot m^{-3}$),则摊铺一车料需要时间为

$$T_{\#} = \frac{C_{\#}}{v_{\#} b_{\#} d_{\#}} = \frac{15}{2 \times 6 \times 0.05 \times 2.3} = 10.8 \text{ min}$$

只需要建立施工模型便可求出有关的解,模型用图形的方式表达直观、易操作。进一步还可以对该模型进行仿真求出其他需要的参数。在下一步的工作中,作者将对模型匹配等算法及相关的工具进行研制,最终形成高速公路施工仿真系统。

参考文献:

References:

- [1] 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.
- [2] 张伟波. 大型地下洞室群施工系统仿真理论与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
ZHANG Wei-bo. Research on System Simulation Theory and Application for Construction Processes of Large-Scale Underground Structure Group[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [3] 毕玉峰, 王选仓, 孙立军. 公路工程中多种资源均衡优化的遗传算法设计[J]. 中国公路学报, 2004, 17

(1): 86-89.

- BI Yu-feng, WANG Xuan-cang, SUN Li-jun. GA's Design of Multi-Resources Equilibrium Optimization in Highway Engineering[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 86-89.
- [4] 冯 勇, 侍克斌. 多资源均衡的模糊综合相似选择法研究[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(1):106-108.
FENG Yong, SHI Ke-bin. Resources Equilibrium Base on Fuzzy Comprehensive Similar Selection Method[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004, 30(1):106-108.
- [5] 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.
- [6] 李潘武, 李慧民. 链杆平衡模型在建筑施工管理中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24 (3):66-69.
LI Pan-wu, LI Hui-min. Application of Chain-pole Equilibrium Model to Construction Management[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24 (3):66-69.

(上接 23 页)

- [3] 钟才根, 丁文其, 王茂和, 等. 神经网络模型在高速公路软基沉降预测中的应用[J]. 中国公路学报, 2003, 16 (2):31-34.
ZHONG Cai-gen, DING Wen-qi, WANG Mao-he, et al. Application of Artificial Neural Network in Settlement Prediction of Highway Soft Foundation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16 (2): 31-34.
- [4] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
SHE Xue-sen. Settlement Calculation for Soft Foundation[M]. Beijing: People's Communications Press, 1998.
- [5] 叶观宝, 司明强, 赵建忠, 等. 高速公路沉降预测的新方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 540-543.
YE Guan-bao, SI Ming-qiang, ZHAO Jian-zhong, et al. New Prediction Method on Final Settlement in Express Highway[J]. Journal of Tongji University: Natural

Science Edition, 2003, 31(5):540-543.

- [6] 杨志法, 尚彦军, 刘 英. 关于岩土工程类比法的研究[J]. 工程地质学报, 1997, 5(4):299-305.
YANG Zhi-fa, SHANG Yan-jun, LIU Ying. Study on the Analogism in Geotechnical Engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(4):299-305.
- [7] 刘沐宇, 朱瑞德. 基于模糊相似优先的边坡稳定性评价范例推理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1188-1193.
LIU Mu-yu, ZHU Rui-geng. Case-based Reasoning Approach to Slope Stability Evaluation Based on Fuzzy Analogy Preferred Ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8):1188-1193.
- [8] 冯仲仁, 陈向阳, 鄢恒珍. 基于范例推理的公路软基处理方案决策模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(11):1779-1781.
FENG Zhong-ren, CHEN Xiang-yang, YAN Heng-zhen. Decision Method of Soft Ground Improvement of Expressways Using Case-based Reasoning[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11):1779-1781.