

# 预拌混凝土泵送施工系统的排队仿真与配置优化

何新华<sup>1</sup>, 胡文发<sup>2</sup>, 郭淑婷<sup>2</sup>, 陈继红<sup>1</sup>

(1. 上海海事大学 经济管理学院, 上海 201306; 2. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于排队理论研究预拌混凝土泵送施工系统的综合性能与配置优化. 运用仿真工具建立混凝土泵送施工系统排队仿真模型, 探讨混凝土泵车数量变化对系统综合性能的影响规律, 发现随着泵车数量的增大, 系统性能逐渐变好, 泵车繁忙率降低, 排队队长和排队时间降低, 可服务的混凝土运输车数量增多, 且存在一个最优泵车数量值. 通过构建混凝土泵送系统最优配置模型, 探讨泵车数量、泵车效率、混凝土运输车间隔时间之间的关系, 指出提高混凝土泵送施工系统性能的措施. 该排队系统仿真模型与实验结果对施工管理具有一定的理论和实践意义.

**关键词:** 预拌混凝土; 泵送; 排队理论; 仿真; 优化

**中图分类号:** F 224 **文献标志码:** A

## Queuing Simulation and Deployment Optimization of Ready-mix Concrete Pumping Construction System

HE Xin-hua<sup>1</sup>, HU Wen-fa<sup>2</sup>, GUO Shu-ting<sup>2</sup>, CHEN Ji-hong<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The comprehensive performance and deployment optimization of the ready-mix concrete pumping conveyance and construction system based on queuing method were focused on. The main parameters of the concrete pumping conveyance system were set on the basis of construction engineering practices. An  $M/M/m$  queuing model for the concrete pumping conveyance system was established and its performance indicators were analyzed. By applying simulation tools to establish a queuing simulation model for the concrete pumping conveyance system, influences of the number of concrete pumps on the system performance were discussed. It is revealed that while adding more concrete pumps, the system performance is improved, the pumping working time declines, the truck queuing length and time decrease, and more concrete trucks are serviceable. It is observed that an optimal number of pumps exists for the system. An optimal model for deploying the concrete pumping conveyance system was presented, and the relationships among the number of concrete pumps, the efficiency of concrete pumps, and the arrival frequency of concrete trucks were investigated. Several means were suggested to improve the performance of concrete pumping construction system.

**收稿日期:** 2013-10-30

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71102043, 71371145, 71473162, 51409157); 上海市教委科研创新基金资助项目(14ZS123, 14YZ109); 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(11YJC630153); 上海海事大学科研基金资助项目(20120054); 教育部-中国移动科研基金资助项目(MCM20125021)

**第一作者:** 何新华(1973-), 女, 副教授. 研究方向: 管理科学与系统工程. E-mail: xhhe@shmtu.edu.cn

**Key words:** *ready-mix concrete; pumping conveyance; queuing method; simulation; optimization*

预拌混凝土也称为商品混凝土,一般是由专业公司在混凝土搅拌站经计量拌制后,通过混凝土运输车在规定时间内运输至工地的混凝土.预拌混凝土具有质量稳定可靠、减少施工场地占用、减少材料浪费、便于机械化施工、缩短施工工期、改善劳动条件和减少环境污染等优点<sup>[1-2]</sup>,目前已经得到广泛应用.选择距离施工现场较近的预拌混凝土的搅拌站可以缩短混凝土路面运输时间,如果距离施工现场较远,则可能无法保证预拌混凝土经历从混凝土搅拌站到施工现场的长距离地面运输,以及现场排队等候后具有足够的时间完成泵送和振捣密实.由于混凝土初凝时间较短,预拌混凝土的运输、排队和泵送等过程必须在较短时间内完成<sup>[3-4]</sup>.为了少留或不留施工缝,施工现场在短时间内所需混凝土量比较集中,因此大量混凝土运输车通常需要在施工现场排队等待泵送服务.

预拌混凝土供应、运输与使用形成一个排队系统,建筑工地根据工程建设进度和现场混凝土用量选择预拌混凝土供应商地点、混凝土运输车辆配置和混凝土泵车数量等<sup>[5]</sup>.预拌混凝土施工系统性能与以下两个关键时间参数密切相关:运输车辆的等待时间;混凝土浇筑时间.上述时间参数对施工系统的机械设备配置和人员安排具有明显影响,直接影响混凝土泵送系统的经济性、效率和可靠度.

预拌混凝土生产、运输(泵送)、浇筑等过程的仿真和优化,一直是工程领域的研究热点之一.比如 Lin 等<sup>[6]</sup>根据施工系统的非连续循环作业特点,研究预拌混凝土车辆的调度问题,将此问题模型建立在车间调度问题基础之上. Yan 等<sup>[7]</sup>将预拌混凝土的生产与调度排队问题假定在整体的框架中进行分析 and 构建模型,通过考虑实际调度排队过程中时常出现的加班情况,将预拌混凝土的生产与调度排队问题演化为带有边界条件的混合整数网络流问题,主要讨论单个预拌混凝土生产厂供应多个施工工地的的问题,以及添加预拌混凝土生产点出现故障的紧急情况问题. Zayed 等<sup>[8]</sup>基于 microcyclone(微气旋)研究混凝土搅拌站的供应优化与运输成本和时间优化问题. Anson 等<sup>[9]</sup>通过预拌混凝土系统仿真研究指出混凝土运输车数量有限性和交通状况的不确定性会导致混凝土供应不准时. Schmid 等<sup>[10]</sup>研究了基于多个预拌混凝土生产点供应多个施工工地问题,这里的多个预拌混凝土包括供应多种规格的混

凝土,而车辆类型包括砼车和泵车,且车辆的规格和装载量都不尽相同. Chua 等<sup>[11]</sup>将施工过程和施工资源融合提出一个施工资源交互仿真模型,可以分析各种复杂资源和简单资源的运输仿真问题. Park 等<sup>[12]</sup>从混凝土供应商角度构建预拌混凝土的供应链仿真模型,分析混凝土运输车辆调度与排队时间的关系,求解混凝土车辆最佳数量.

通过对相关文献研究分析,可以发现国内外学者长期对混凝土生产与运输设备的配置问题开展研究,已经提出了一系列仿真模型,且取得了不少研究成果.但是,随着预拌混凝土商业模式的改变,前期文献研究成果已经不适应以泵送为中心的混凝土施工系统,缺少针对不同作业任务的仿真系统研究.本文基于排队理论建立混凝土泵送施工系统排队仿真模型,从建筑工地混凝土泵送施工管理角度分析预拌混凝土泵送施工系统的特征和性能指标,通过构建混凝土泵送施工系统的优化模型,提出预拌混凝土运输车辆和现场混凝土泵车数量的最优配置解决方法.

## 1 基本假设和模型参数

### 1.1 基本假设

某高层建筑所需混凝土全部由预拌混凝土搅拌站供应,由多辆混凝土运输车负责远距离的地面运输.预拌混凝土送达施工现场后,由混凝土泵车和管道组成的泵送系统完成从地面至高层建筑施工层的垂直高度运输.假设该预拌混凝土泵送施工过程为一个排队系统,混凝土泵车及其管道系统为服务台,混凝土运输车为顾客,混凝土的泵送过程就是服务台所提供的服务.预拌混凝土泵送施工的排队服务原则是:当混凝土运输车到达建筑工地后,如果混凝土泵车空闲,则该泵车将运输车的混凝土泵送至高层建筑的施工层;如果有多台混凝土泵车及其混凝土管道系统,则形成多服务台排队系统,每个混凝土泵车提供无差异的服务质量;只有当所有混凝土泵车都忙碌时,混凝土运输车在建筑工地附近排队等候,直到前一台混凝土运输车接受服务离开,此时空闲的混凝土泵车可以为其提供服务.混凝土泵可以连续提供服务,也可以间断提供服务,但是服务间断时间必须小于预拌混凝土初凝的规定时间.据此,预拌混凝土泵送施工系统的排队假设为:

- a. 混凝土运输车在道路上正常行驶,没有任何交通意外事故,混凝土运输车到达建筑工地服从泊松分布,混凝土泵车的服务能力也服从泊松分布;
- b. 建筑工地及其周边道路可以为混凝土运输车提供足够大的等候空间,即排队等待的混凝土运输车可以无穷大;
- c. 建筑工地的所有混凝土泵送及其管道系统的工作效率与作业时间无区别;
- d. 所有混凝土运输车的几何容积相同,即每车的预拌混凝土运输量相同;
- f. 混凝土运输车从建筑工地附近等待区行驶

至混凝土泵车的时间忽略不计,即不考虑混凝土泵车等待混凝土运输车的必须空闲时间。

根据上述假定,该混凝土泵送施工系统为混合作业路模式.该泵送施工系统有  $m$  台泵车,所有混凝土运输车在建筑工地及其附近排队等待,可以为任何一台空闲的混凝土泵车供应预拌混凝土,那么该泵送服务系统可以描述为  $M/M/m$  的排队系统,如图1所示.该排队系统比较符合实际工程作业条件,其作业能力和效率显然优于单作业路模式下的  $m$  个  $M/M/1$  的排队系统。

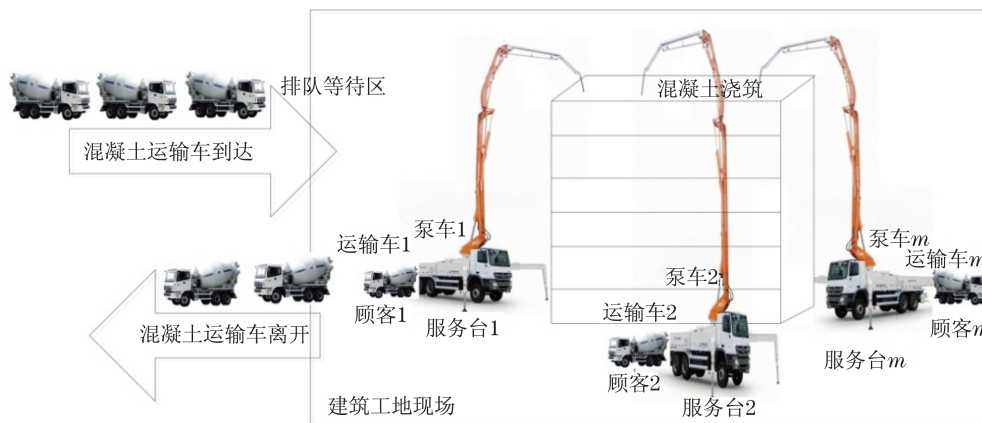


图1 预拌混凝土泵送施工排队系统的  $M/M/m/\infty$  模型

Fig.1  $M/M/m/\infty$  queuing model of ready-mix concrete pumping construction system

## 1.2 基本模型参数

预拌混凝土泵送施工排队系统中,混凝土运输车(即顾客)单个相继到达建筑工地,运输车到达时间间隔服从参数为  $\lambda$  的负指数分布;建筑工地有  $m$  台混凝土泵车(即服务台),每个混凝土泵车的服务时间相互独立,且服从参数为  $\mu$  的负指数分布,即

$$b(t) = \begin{cases} \mu e^{-\mu t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

令  $N(t)$  为时刻  $t$  系统中的混凝土运输车数,那么  $\{N(t), t \geq 0\}$  是一个随机的齐次马尔科夫链,是一个生灭过程,系统处于状态  $n$  时的参数为

$$\begin{cases} \lambda_n = \lambda, & n = 0, 1, 2, \dots \\ \mu_n = \begin{cases} n\mu, & n = 0, 1, 2, \dots, m \\ m\mu, & n = m, m+1, m+2, \dots \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_n$  是系统处于状态  $n$  时单位时间内混凝土运输车的平均到达数量;  $\mu_n$  是系统处于状态  $n$  时单位时间内系统可以服务的容量。

预拌混凝土泵送施工排队系统的瞬时强度转移图如图2所示。

根据生灭过程排队系统,可求出平稳公式为

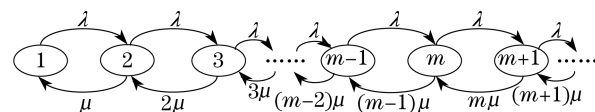


图2 预拌混凝土泵送施工排队系统瞬时强度转移图

Fig.2 Diversion of instantaneous intensity of ready-mix concrete pumping construction system

$$P_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0, & n \leq m \\ \frac{1}{m! m^{n-m}} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0, & n > m \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $P_n$  为任意时刻系统中有  $n$  个混凝土运输车的概率,  $P_0 = \left[ \sum_{n=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^n}{n!} + \frac{(m\rho)^m}{m!(1-\rho)} \right]^{-1}$ . 令  $\rho = \frac{\lambda}{m\mu}$  为服务台处于忙的状态的概率,可得

$$P_n = \begin{cases} \frac{(m\rho)^n}{n!} P_0, & n \leq m \\ \frac{m^m \rho^n}{m!} P_0, & n > m \end{cases} \quad (4)$$

混凝土运输车在建筑工地必须排队等待的概率为

$$C(m, \frac{\lambda}{\mu}) = \sum_{n=m}^{\infty} P_n = \frac{P_m}{1-\rho} \quad (5)$$

$N$  为系统达到平稳状态后的队长,当  $N \geq m$

时,系统才会出现混凝土运输车排队等待现象,设  $L_q$  为混凝土运输车的平均等待队长,则

$$\bar{L}_q = \sum_{n=m}^{\infty} (n-m)P_n = \sum_{n=m}^{\infty} (n-m)P_m \rho^{n-m} = \frac{P_m \rho}{(1-\rho)^2} \quad (6)$$

混凝土泵车数为

$$\bar{m} = \sum_{n=0}^{m-1} nP_n + m \sum_{n=m}^{\infty} P_n = \sum_{n=0}^{m-1} n \frac{(m\rho)^n}{n!} P_0 + \sum_{n=m}^{\infty} m \frac{m^m \rho^n}{m!} P_0 = \frac{\lambda}{\mu} \quad (7)$$

设  $L_s$  为混凝土泵车数服务的平均队长,则

$$\bar{L}_s = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \bar{m} + L_q \quad (8)$$

假定混凝土泵车的服务规则是先到先服务模式,所有到达工地的预拌混凝土运输车全部进入泵送施工系统接受服务,因此混凝土运输车进入率等于到达率.在平衡状态下,任意时刻系统中有  $n$  个混凝土运输车的概率为  $P_n$ .假设混凝土运输车在任意时间进入建筑工地排队等待区,  $W_q$  为混凝土运输车的等待时间,  $W_q(t)$  是其概率分布函数,则

$$W_q(t) = P(W_q \leq 0) = P(W_q = 0) + P(0 < W_q < t) = W_q(0) + \sum_{n=0}^{\infty} P_n P(0 < W_q < t | N = n) \quad (9)$$

式(9)说明所有混凝土泵车忙碌时( $N \geq m$ ),所有新到达的混凝土运输车必须等待前面  $N - m + 1$

$$w_s(t) = w_q(t)b(t) = \begin{cases} \mu e^{-\mu t} + \frac{(m\mu - \lambda)t - 1}{1-\rho} \mu P_m e^{-\mu t}, & m\rho = m-1 \\ \mu e^{-\mu t} + \frac{m\mu P_m e^{-\mu t}}{(m - \frac{\lambda}{\mu})(m - \frac{\lambda}{\mu} - 1)} - \frac{m\mu P_m e^{-(1-\rho)m\mu t}}{m - \frac{\lambda}{\mu} - 1}, & m\rho \neq m-1 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $V$  为逗留时间与平均逗留时间之差.

每辆混凝土运输车在建筑工地的逗留时间概率分布函数为

$$W_s(t) = \begin{cases} 1 - \mu e^{-\mu t} [1 + m\mu t P_m], & m\rho = m-1 \\ 1 - \frac{mP_m}{(m - \frac{\lambda}{\mu})(m - \frac{\lambda}{\mu} - 1)} \cdot \frac{1}{\mu}, & \\ (e^{-\mu t} - e^{-(1-\rho)m\mu t}) - e^{-\mu t}, & m\rho \neq m-1 \end{cases} \quad (15)$$

每辆混凝土运输车平均逗留时间为

$$\bar{W}_s = \bar{W}_q + \bar{V} = \frac{P_m}{m\mu(1-\rho)^2} + \frac{1}{\mu} \quad (16)$$

通过 Little 公式,可得

$$\bar{W}_s = \frac{\bar{L}_s}{\lambda}; \bar{W}_q = \frac{\bar{L}_q}{\lambda} \quad (17)$$

个混凝土运输车服务完后才能接受服务,服务时间服从负指数分布.混凝土泵车工作时,假设每个混凝土泵车的输出流服从参数为  $\mu$  的泊松流,  $m$  个混凝土泵车组成的合计输出流服从参数为  $m\mu$  的泊松流.因此,混凝土运输车离开服务系统之后的时间间隔应服从参数为  $m\mu$  的负指数分布,输出  $N - m + 1$  个混凝土运输车的时间应服从  $N - m + 1$  阶爱尔朗分布.可得

$$W_q(t) = W_q(0) + \sum_{n=m}^{\infty} \frac{m^m \rho^n}{m!} P_0 \cdot \int_0^t \frac{m\mu (m\mu u)^{n-m}}{(n-m)!} e^{-m\mu u} du = 1 - \frac{P_m}{1-\rho} e^{-(1-\rho)m\mu t} \quad (10)$$

其密度函数为

$$w_q(t) = \begin{cases} 1 - \frac{P_m}{1-\rho}, & t = 0 \\ P_m m\mu e^{-(1-\rho)m\mu t}, & t > 0 \end{cases} \quad (11)$$

分布函数  $W_q(t)$  也可以写成为

$$W_q(t) = 1 - C(m, \frac{\lambda}{\mu}) e^{-(1-\rho)m\mu t} \quad (12)$$

平均等待时间为

$$\bar{W}_q = E(w) = \frac{P_m}{m\mu(1-\rho)^2} = \frac{C(m, \frac{\lambda}{\mu})}{m\mu(1-\rho)} \quad (13)$$

为了得到逗留时间的密度函数,根据卷积公式推导可得到混凝土运输车在建筑工地的逗留时间  $W = W_q + V$  的密度函数为

## 2 混凝土泵送施工系统排队仿真模型

### 2.1 排队系统仿真模型设计

用 ExtendSim 仿真软件建立  $M/M/m$  排队系统的仿真模型,设混凝土运输车到达服从泊松流,其到达间隔时间服从负指数分布,均值为  $1/\lambda$ ;混凝土泵车及其管道系统有  $m$  个,混凝土泵车服务时间服从负指数分布,均值为  $1/\mu$ ;服务规则为先到先服务模式.使用 ExtendSim 软件的 Creat 模块模拟混凝土运输车的到达行为,混凝土运输车到达间隔时间服从负指数分布.用 Queue 模块模拟混凝土运输车的排队行为,其输出模式选择为 FIFO(first in,

first out). 用 Activity 模块模拟泵车工作行为,设置容量为 1,即每次只能为一辆混凝土运输车提供服务. 用 Select Item Output 模块设置混凝土运输车的路径选择规则: a. 选择 Select output based on: sequential; b. 选择 If output is blocked; item will

try unblocked outputs,使混凝土运输车按顺序轮流发送到  $m$  个泵车接受服务. 用 Exit 模块把接受完服务的混凝土运输车送出系统. 建筑工地预拌混凝土泵送服务排队系统的 ExtendSim 仿真模型设置界面如图 3 所示.

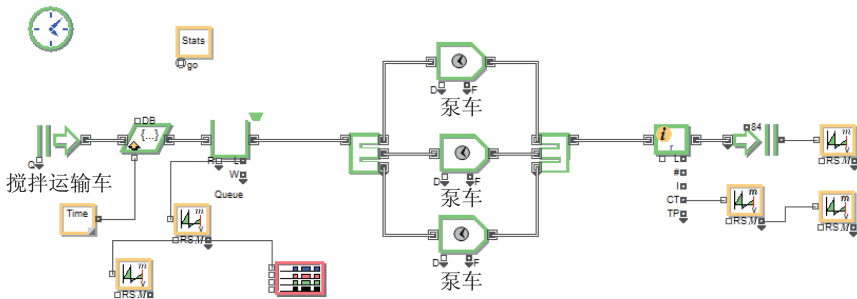


图 3 建筑工地预拌混凝土泵送施工服务系统模型 ( $M/M/m$  模型)  
Fig. 3  $M/M/m$  queuing model of ready-mix concrete pumping construction system

根据前述的各个指标,构建 ExtendSim 仿真实验,可以动态观察预拌混凝土运输车和泵送施工系统的总体性能,包括混凝土运输车在系统中的平均逗留时间、系统平均排队队长、平均排队时间、混凝土泵车空闲率等指标. 通过模型设置、运行控制、重复实验控制、报告控制、重复设置等步骤,完成仿真实验.

2.2 仿真实验分析

在预拌混凝土泵送施工系统仿真实验中,平均到达间隔时间  $1/\lambda = 2$ ,平均服务时间  $1/\mu = 10$ . 混凝土泵车数量  $m$  为变量,取值范围为  $3 \leq m \leq 8$ ,  $m \in N$ . 假设考察时间段为 8 h,即每次运行仿真时间  $8 \times 60 = 480$  min. 对每个  $m$  值均采用不同的随机数重复实验 10 次,由统计分析得到各指标结果.

为减少仿真实验受随机数取值的影响,取 10 次重复实验的均值作为本次仿真实验的最终结果. 该预拌混凝土泵送施工排队系统的仿真实验结果如表 1 所示.

表 1  $M/M/m$  预拌混凝土泵送施工排队系统仿真实验结果  
Tab.1 Simulation results by  $M/M/m$  queuing method for ready-mix concrete pumping construction system

| 泵车数/个 | 泵车空闲率/% | 平均排队队长/辆 | 平均排队时间/min | 逗留时间/min | 混凝土运输车总数/辆 |
|-------|---------|----------|------------|----------|------------|
| 3     | 3.4     | 42.79    | 85.23      | 95.23    | 236.9      |
| 4     | 6.1     | 29.29    | 55.17      | 65.17    | 348.6      |
| 5     | 31.8    | 5.76     | 11.20      | 21.20    | 413.2      |
| 6     | 58.8    | 2.28     | 4.36       | 14.36    | 441.8      |
| 7     | 83.7    | 0.57     | 1.12       | 11.12    | 437.0      |
| 8     | 94.1    | 0.17     | 0.34       | 10.34    | 444.2      |

- 仿真实验结果表明:
- a. 随着混凝土泵车数量增加,排队系统的性能逐渐变好,混凝土泵车繁忙率降低,排队队长和排队时间降低,混凝土运输车数量增多.
  - b. 混凝土泵车数量从  $m = 3$  开始逐渐增加时,系统性能变化幅度很大,但是当泵车数量增加到一定数量(例如  $m = 5$ )后,各个指标的变化趋势变缓. 从系统各个性能指标变化规律可知,泵车数量  $m = 5$  为系统效率的关键点.
  - c. 混凝土泵车的空闲率变化随泵车数量增加也逐渐增加,说明混凝土泵车资源浪费逐渐增大,不经济.
  - d. 综合考虑混凝土运输车和泵车利用率,该  $M/M/m$  泵送施工排队系统仿真实验的最佳泵车配置数量是  $m = 5$ .

3 混凝土泵送系统配置优化分析

3.1 优化模型建立

影响  $M/M/m$  排队系统性能的主要变量是混凝土泵送效率( $\mu$ )、混凝土运输车到达建筑工地的时间间隔( $\lambda$ )和混凝土泵车及其管道系统数量( $m$ ). 因此,预拌混凝土泵送系统最优配置问题就是通过分析上述 3 个变量之间的关系寻求泵送施工效率最大化. 建筑工程现场泵送施工系统优化目的是以最短的时间泵送最多的预拌混凝土,以缩短施工工期. 因此,预拌混凝土泵送系统最优配置问题的目标函数可以设为固定时间段内的混凝土量. 系统最优目标就是在  $\mu, \lambda$  变化时,求  $M/M/m$  系统的

最佳泵车配置数量  $m$ , 使得泵送施工排队系统的泵车总服务的混凝土运输车数量最大.

混凝土泵送系统配置优化的目标函数为  $Z$ , 则其数学描述为

$$\begin{aligned} Z &= \max m \\ \text{s. t. } &\begin{cases} N_c = 1/\lambda = \{N_c | 1 \leq N_c \leq 50, N_c \in N\} \\ N_s = 1/\mu = \{N_s | 1 \leq N_s \leq 50, N_s \in N\} \\ m = \{m | 1 \leq m \leq 10, m \in N\} \end{cases} \quad (20) \end{aligned}$$

使用 Exit 模块计算混凝土运输车的数量, 每次仿真运行时间设置为 480 min, 运行次数 10 次, 混凝土运输车数量仿真模块的参数设置如图 4 所示. 仿真模型中的 2 个整数型变量  $N_s$  和  $N_c$  分别表示泵车服务时间的随机分布均值 ( $1/\mu$ ) 和混凝土运输车到达间隔时间的随机分布均值 ( $1/\lambda$ ).

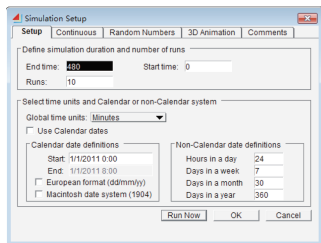


图 4 混凝土运输车数量仿真参数设置

Fig.4 Defining of simulation parameters for duration and number of runs

### 3.2 模型运行结果

以混凝土泵车数  $m$  为横坐标, 以混凝土运输车数为纵坐标, 分别绘制  $N_c$ ,  $N_s$  值随混凝土泵车数变化的曲线图. 当  $(N_c, N_s) = \{(1, 1), (1, 2), (1, 3), (1, 4), (1, 5), (1, 6), (1, 7), (1, 8), (1, 9), (1, 10)\}$  时, 混凝土运输车数随泵车数  $m$  变化的曲线如图 5(a) 所示. 当  $(N_c, N_s) = \{(2, 2), (2, 3), (2, 4), (2, 5), (2, 6), (2, 7), (2, 8), (2, 9), (2, 10)\}$  时, 变化曲线图如图 5(b) 所示.

仿真结果表明: 预拌混凝土运输车数量曲线的变化趋势均呈现随泵车数快速增长, 而后增幅变缓的规律. 说明曲线上存在一个拐点, 此拐点就是混凝土泵送系统的最优配置点. 在此最优配置点之前, 混凝土运输车数量随着混凝土泵车数增加而大幅度增大; 在此最优配置点之后, 混凝土运输车数量随着混凝土泵车数增加而变化幅度不大.

确定曲线拐点的方法有很多, 本文判定方法采用切线法, 从曲线的快速增长段所引切线与平缓段所引切线的交点即为拐点. 横坐标泵车台数和纵坐标运输车数量都是离散的整数, 常用的连续函数所

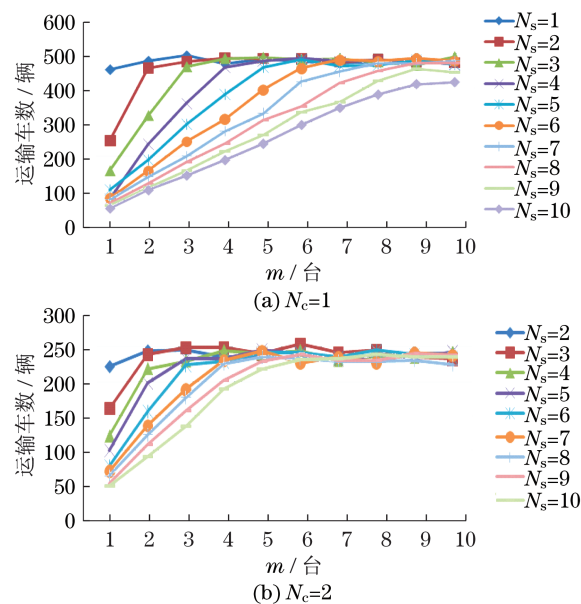


图 5 仿真结果

Fig.5 Simulation results

采用的微分方法在此不合适. 混凝土泵车的最优数量是一个整数, 是拐点附近的一个近似整数.

### 3.3 结果分析

通过混凝土泵送系统配置优化模型分析, 可以观察到混凝土泵车系统的规律:

a. 在泵车及其管道系统的混凝土泵送传输效率固定不变时, 预拌混凝土泵送施工系统的服务能力取决于泵车数量, 混凝土泵车数量越充足, 则泵送施工系统的服务能力就越大.

b. 当混凝土泵车及其管道数量超过系统最佳泵车数量后, 泵送施工系统的服务能力主要取决于混凝土运输车到达建筑工地的频率, 混凝土运输车到达间隔时间越短, 则泵送系统服务能力就越大. 此时, 提高混凝土泵送系统效率或者增加混凝土泵车及其管道数量, 对提高泵送施工系统服务能力的贡献有限, 是不科学的泵送系统配置方法.

c. 当混凝土泵车的泵送效率和泵车数量固定不变时, 可以通过合理配置和调度混凝土运输车辆, 调节混凝土运输车到达建筑工地现场的到达间隔, 达到施工现场混凝土泵送施工系统最优状态, 减少混凝土运输车排队等待, 降低建筑工地附近交通拥挤和预拌混凝土材料浪费. 因此, 混凝土泵送施工系统的最优配置必须综合考虑混凝土泵车及其管道系统的效率和数量, 并且科学设计混凝土运输车辆的调度策略, 提高泵送系统综合效率.

## 4 结 论

本文基于排队理论,构建预拌混凝土泵送施工排队系统模型,应用仿真软件模拟混凝土运输、泵送过程的系统综合性能,并进行系统优化配置研究.结合建筑工地预拌混凝土常见施工安排,确定混凝土运输车辆安排和混凝土泵车及其管道系统的主要参数,建立  $M/M/m$  排队系统模型.通过对影响  $M/M/m$  排队系统性能的混凝土泵送效率、混凝土运输车到达时间间隔和混凝土泵车数量等3个主要参数分析,构建预拌混凝土泵送系统最优配置模型,探讨泵送施工系统3个变量之间的关系以达到施工效率最大化,并且通过回归分析发现泵车数与  $N_s/N_c$  之间的线性相关性.通过理论分析和仿真模拟,得到如下结论和建议:

a. 通过预拌混凝土泵送施工  $M/M/m$  排队系统模型分析,发现随着混凝土泵车数量增大,泵送施工系统整体性能逐渐提升,混凝土泵车及其管道系统繁忙率降低,混凝土运输车辆的排队队长和排队时间降低,泵送施工系统服务能力和混凝土运输车数量都可增加.

b. 泵送施工系统仿真实验发现,混凝土泵车数量配置存在一个最优点,最优配置数量就是混凝土泵车数量变化曲线的拐点.

c. 通过对泵送施工系统优化仿真结果分析发现,混凝土泵车最佳配置数量与混凝土运输车到达时间间隔和泵车服务时间比值之间存在较好的线性关系,并得到三者之间的关系方程.

d. 混凝土泵车数量不是泵送施工系统能力提高的充分条件,还必须考虑混凝土泵车工作效率和混凝土运输车辆到达建筑工地的时间间隔.

f. 确定混凝土泵车数量后,可以通过合理配置和调度混凝土运输车,以提高泵送施工系统的效率、减少混凝土运输车排队和因此引起的建筑工地附近道路堵塞现象.

g. 混凝土泵送施工系统仿真模型与实验结果对建筑施工现场管理具有重要意义,排队建模方法和优化方法对建筑施工管理的其它活动与优化具有一定的理论指导和借鉴意义.

### 参考文献:

- [1] 易莉,李玉云,彭波,等.预拌混凝土能源消耗现状及节能潜力分析[J].混凝土,2012(11):87-90.
- [2] 夏远英,陈景,熊晓辉,等.绿色混凝土发展途径的探讨[J].混凝土,2011(4):101-105.
- [3] 张希黔,华建民.预拌混凝土施工期间裂缝预防及处理技术[J].施工技术,2007,36(4):70-72.
- [4] 张德榆,钱兴泉.采用预拌混凝土施工的几个问题[J].建筑机械化,2001,22(6):40-42.
- [5] 罗伟,刘全,胡志根.基于工序排队的RCC坝施工Petri网耦合模型仿真[J].系统仿真学报,2009,21(19):6280-6283.
- [6] Lin P C, Wang J H, Huang S H, et al. Dispatching ready mixed concrete trucks under demand postponement and weight limit regulation [J]. Automation in Construction, 2010, 19(6): 798-807.
- [7] Yan S Y, Lin H C, Liu Y C. Optimal schedule adjustments for supplying ready mixed concrete following incidents[J]. Automation in Construction, 2011, 20(8): 1041-1050.
- [8] Zayed T, Halpin D. Simulation of concrete batch plant production[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2001, 127(2): 132-141.
- [9] Anson M, Tang S, Ying K. Measurement of the performance of ready mixed concreting resources as data for system simulation [J]. Construction Management and Economics, 2002, 20(3): 237-250.
- [10] Schmid V, Doerner K F, Hartl R F, et al. Hybridization of very large neighborhood search for ready-mixed concrete delivery problems [J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(3): 559-574.
- [11] Chua D, Li G. RISim: resource-interacted simulation modeling in construction[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2002, 128(3): 195-202.
- [12] Park M, Kim W Y, Lee H S, et al. Supply chain management model for ready mixed concrete [J]. Automation in Construction, 2011, 20(1): 44-55.
- [13] 何胜学,范炳全,严凌.公交网络最优路径的一种改进求解算法[J].上海理工大学学报,2006,28(1):163-167.

(编辑:丁红艺)