

文章编号:1671-8879(2005)01-0088-05

## 再生工程机械化施工系统的运行规律

刘晓婷, 陈海伟, 焦生杰

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**以沥青混凝土路面再生工程机械化施工系统为研究对象,应用随机服务系统理论,研究了系统中铣刨、搅拌、摊铺和压实子系统的运行状态。依据再生工程中铣刨机、搅拌设备、摊铺机和压路机等主要机械的运行规律,分析了各子系统的组成和运行特征,对其运行状态进行定量计算,得到各子系统在稳态时的状态概率表达式,从而推导出子系统中需要服务的运输车数、等待服务的运输车数、运输车辆的等待服务时间等状况指标。最后,基于施工系统的理想工作状态,建立了施工系统初配机群配置方案合理性的数值判断标准。研究表明,各子系统的运行规律和机群合理性判断标准可为建立再生工程机械化施工系统优化配置模型提供理论依据。

**关键词:**机械工程;沥青混凝土;路面;再生工程;机械化施工;运行规律;配置

**中图分类号:**U415.6 **文献标识码:**A

### Operating law of mechanized construction system in recycling engineering

LIU Xiao-ting, CHEN Hai-wei, JIAO Sheng-jie

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of  
Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Taking the mechanized construction system as object, this paper studies the working state of milling, mixing, asphalt paving and rolling sub-system in asphalt concrete pavement recycling engineering using the theory of random service system. According to the operating law of main machinery such as milling machine, mixing equipment, asphalt paver and roller in recycling engineering, this paper analyzes the composition and feature of sub-systems, and calculates their operating states quantitatively, and gets their probability properties expressing equations in stable state. Therefore, the number of vehicles required service and waiting for service, the time waiting for service of vehicles is given. Based on the ideal operating situation of the mechanized construction system, this paper establishes the numerical judge standard about rationality of the construction configuration. The operating law of sub-systems and judge standard of tentative configuration can provide the basis for establishing optimized configuration model in the future.

**Key words:** mechanical engineering; asphalt concrete; pavement; recycling engineering; mechanized construction; operating law; configuration

收稿日期:2004-01-07

基金项目:西安市工业科技攻关项目(GG04015)

作者简介:刘晓婷(1962-),女,山西神池人,长安大学副教授,博士研究生。



0 引言

沥青混凝土路面再生技术是公路建设可持续发展战略的重要组成部分,机械资源的合理配置以及适当的施工工艺是提高作业质量的重要因素。本文基于中国各种路面建设工程中机械化施工组织的研究成果,对目前尚未展开系统研究的沥青混凝土路面再生工程机械化施工系统运行规律进行了分析与探讨。基于理想状态的假设应用随机服务系统理论,对各道工序机械之间的动态匹配规律进行了分析,推导出机群配置方案的合理性评判标准,为进一步建立再生工程机械化施工系统优化配置模型提供理论依据。文中讨论的沥青混凝土路面再生工程采用厂拌热再生技术,是由旧路面铣刨-旧料运输-破碎筛分-搅拌-运输(转运)-摊铺-压实等环节及相应的铣刨机、再生搅拌设备、自卸汽车、摊铺机、轻重型压路机等机械所组成的机械化施工系统<sup>[1]</sup>,分为铣刨、搅拌、摊铺和压实等 4 个子系统进行分析与探讨。

1 厂拌再生工程的施工工艺

施工系统理想的工作情况是:当铣刨机为一辆自卸车装满旧料时,下一辆车刚好到达铣刨现场等待装料;当搅拌设备刚拌制完一车料时,就有一辆自卸车到达拌和机处;自卸车向摊铺机卸完一车料时,下一辆车刚好到达摊铺现场等待卸料;混合料经摊铺机摊铺后,轻重型压路机立即分别进行压实<sup>[2]</sup>。

本文以理想工作情况为系统目标,以机械运行数据的分析资料为基础,提出接近理想目标时所应采用的数学模型及分析方法,同时有下列约束条件:

- (1) 汽车运距应大于 1 km;
- (2) 在正常施工情况下,沥青混合料在移动过程中温降在允许范围内;
- (3) 装料与卸料原则为先到汽车先装卸;
- (4) 由于机械事故、原料短缺等原因引起工作中断不予考虑。

整个系统工艺流程可以抽象为图 1 所示。

从图中可以看出,铣刨子系统相对于后面的搅拌、摊铺及压实子系统有一定的独立性,它的工作要先于其他子系统,工程中一般要有 1 km 的铣刨后路面供后续系统工作。但它并不是完全独立的,必须保持铣刨工作面与摊铺工作面的距离基本恒定。距离太小,则摊铺工作将无法正常工作;距离太大,则可能出现雨天积水等问题,增加工程量<sup>[3]</sup>。

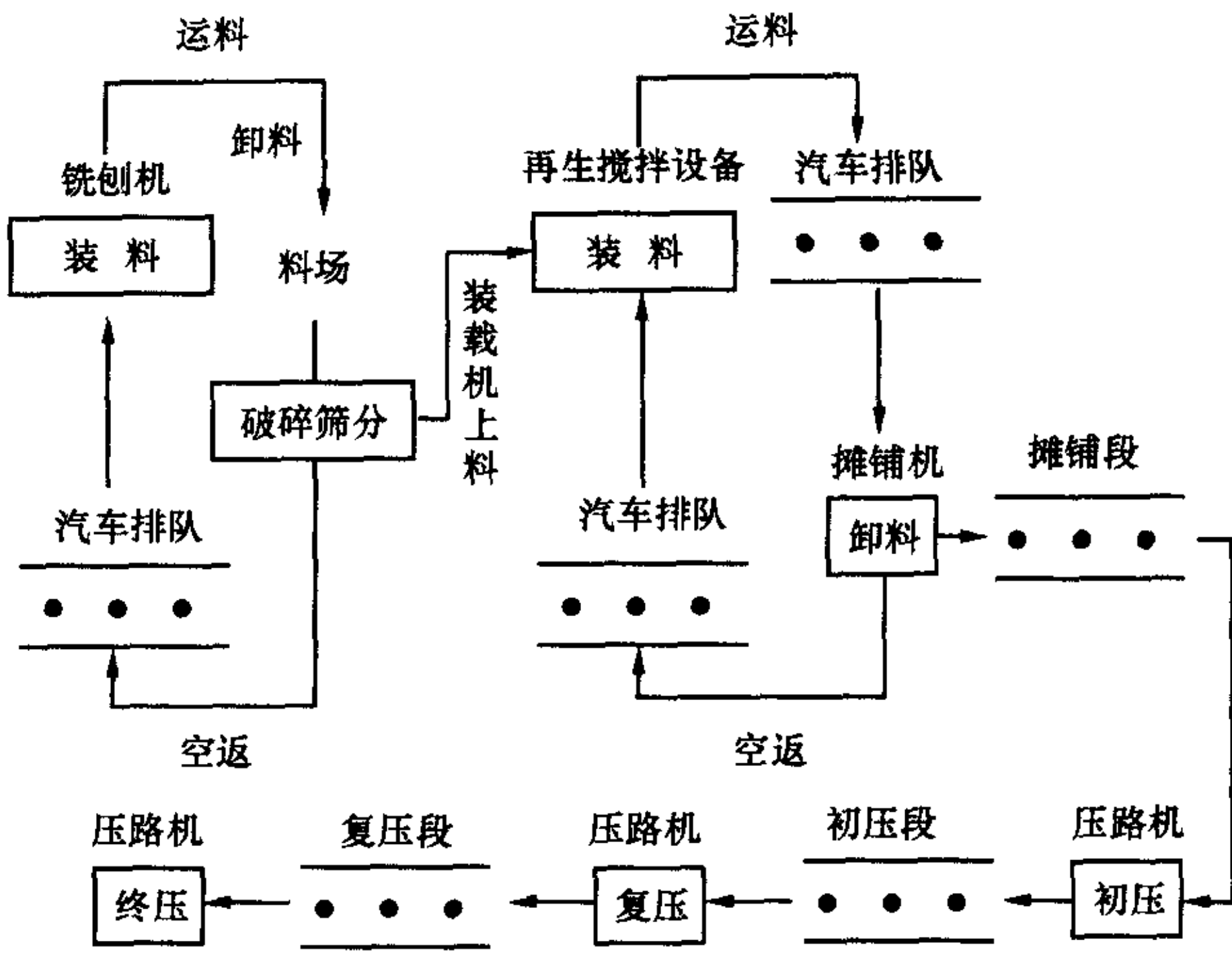


图 1 系统工艺流程

2 随机服务系统理论

随机服务系统理论通过建立数学模型,描述随机服务系统的概率特性,研究如顾客平均排队时间、排队顾客平均数、服务台接待顾客的平均数量等规律,从而估计系统服务质量,为确定系统参数提供定量分析依据,或为系统最优设计提供决策依据<sup>[4]</sup>。

2.1 随机服务系统的组成和特征

输入过程:顾客到达规律,包括顾客数量、到达类型和间隔分布;

排队规则:顾客接受服务的先后次序,如先到先服务;

服务机构:服务台的数目和工作情况,服务时间的分布。

2.2 排队模型的表示

目前较通用的排队模型类别表示形式为  $X/Y/Z/A/B/C$ 。

其中, $X$  为顾客相继到达间隔时间的分布,如  $M$  为泊松流; $Y$  为服务台服务时间的分布类型,如  $M$  为服从负指数分布; $Z$  为服务机构中的服务台数; $A$  为系统的容量,即可容纳的最多顾客数; $B$  为顾客源的数目; $C$  为服务规则,如先到先服务 FCFS,后到后服务 LCFS 等。

2.3 排队问题的求解

第一,根据原始资料做出顾客到达间隔和服务时间的经验分布,然后按照统计学方法确定它符合哪种理论分布,并估计它的参数值。

第二,列出系统状态概率表达式  $P_n(t)$ 。

第三,以  $P_n(t)$  为基础,求出用以判断系统运行优劣的数量指标的概率分布。判断随机服务系统运行优劣的数量指标通常有队长、顾客等待时间和服



务台忙期等。

### 3 机械化施工系统运行规律

由于机械化施工系统的各子系统均属于随机服务系统,本文所研究的系统运行状态是指系统内服务台为顾客提供服务的状况,即各服务台前等待服务的队长、等待服务的时间等<sup>[5~7]</sup>。假设该系统由  $C_x$  台铣刨机、 $C_b$  台搅拌设备、 $C_t$  台摊铺机、 $C_y$  台压路机和  $m+k$  辆运输车(其中铣刨子系统里的  $m$  辆、拌和与摊铺子系统内的  $k$  辆)组成。

#### 3.1 铣刨子系统

##### 3.1.1 铣刨子系统的组成及运行特点

铣刨子系统由等待装旧料的运输车队列、正在接受装料的运输车和  $C_x$  台正在工作的铣刨机组成。其运行特点是:每辆运输车到达铣刨现场的时间间隔服从参数为  $\lambda_1$  的泊松分布;铣刨机为每辆车服务时间服从参数为  $\mu_1$  的负指数分布;整个子系统的服务规则是  $C_x$  台铣刨机实行先到先服务(FCFS)的等待服务制排队规则,且为  $m$  辆运输车提供循环装料服务,子系统内运输车最多不超过  $m$  辆。根据随机服务系统理论,该服务系统符合顾客为有限源的  $M/M/C_x/\infty/m/FCFS$  排队模型。

该模型的特点是:

(1)输入过程为顾客有限,相互独立,到达时间间隔服从参数为  $\lambda_1$  的泊松分布。

(2)排队规则为单队,队的长度没有限制,先到先服务。

(3)服务机构为  $C_x$  个服务台,各服务台工作相互独立,对各顾客服务时间相互独立,服从相同的参数为  $\mu_1$  的负指数分布,即  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{C_x} = \mu$ 。系统容量不限,但在顾客有限的情况下,其容量实际上也不会超过顾客总数。

##### 3.1.2 铣刨子系统的运行状态定量计算

根据铣刨子系统的排队模型特点,铣刨机工作状态概率、运输车在铣刨机前等待服务的队长、等待时间等运行指标的计算过程为:

首先,假设铣刨子系统内的运输车辆数为  $m$ 。

其次,根据一般施工工艺要求和铣刨机配置规则,取铣刨机数  $C_x = 1$ ,即仅存在 1 个服务台,则存在两种工作状态:顾客数  $n_1 = 0$  或  $1 \leq n_1 \leq m$ ;  $P_{n_1}$  为稳态时铣刨机处有  $n_1$  辆运输车的状态概率; $\lambda_1$  为到达率,即单位时间内到达铣刨机处的平均车辆数; $\mu_1$  为服务率,即单位时间内铣刨机的平均装车数;则铣刨子系统为稳态时(设  $\rho_1 = \lambda_1 / \mu_1$ ) 状态概率表达

式为

$$P_0 = 1 / \left[ \sum_{n_1=0}^m \frac{m!}{(m-n_1)!} \rho_1^{n_1} \right] \quad n_1 = 0 \quad (1)$$

$$P_{n_1} = \frac{m!}{(m-n_1)!} \rho_1^{n_1} P_0 \quad 1 \leq n_1 \leq m \quad (2)$$

求得子系统的各项指标为:

(1)子系统中需要服务的平均运输车数(队长期望值)

$$L_{S1} = \sum_{n_1=0}^m n_1 P_{n_1} = m - \frac{1-P_0}{\rho_1} \quad (3)$$

(2)在队列中等待的平均运输车数(队列长度期望值)

$$L_{q1} = \sum_{n_1=1}^m (n_1 - 1) P_{n_1} = m - (\lambda_1 + \mu_1) \cdot (1 - P_0) / \lambda_1 = L_{S1} - (1 - P_0) \quad (4)$$

(3)运输车在子系统中逗留时间的期望值(等待服务时间+接受服务时间)

$$W_{S1} = \frac{m}{\mu_1 (1 - P_0)} - \frac{1}{\lambda_1} \quad (5)$$

(4)在子系统中运输车等待服务时间的期望值

$$W_{q1} = W_{S1} - 1/\mu_1 \quad (6)$$

#### 3.2 搅拌子系统

##### 3.2.1 搅拌子系统的组成及运行特点

搅拌子系统由等待装料的空返运输车队列、正在接受装料的运输车和  $C_b$  台正在装料的搅拌设备组成。其运行特点是每辆空返车到达搅拌站时间间隔服从参数为  $\lambda_2$  的泊松分布;搅拌设备为每辆车服务时间服从参数为  $\mu_2$  的负指数分布;整个子系统的服务规则是  $C_b$  台搅拌设备实行先到先服务(FCFS)的等待服务制排队规则,为  $k$  辆运输车提供循环装料服务,子系统内运输车最多不超过  $k$  辆。根据随机服务系统理论,该服务系统符合顾客为有限源的  $M/M/C_b/\infty/k/FCFS$  排队模型。

##### 3.2.2 搅拌子系统的运行状态定量计算

根据搅拌子系统的排队模型特点,搅拌设备工作状态概率、运输车在搅拌设备前等待服务的队长、等待时间等运行指标的计算过程为:

首先,假设整个子系统内的运输车辆数为  $k$ 。

其次,根据一般施工要求和搅拌设备配置规则,取搅拌设备数  $C_b = 1$ ,即仅存在 1 个服务台,则存在两种工作状态:顾客数  $n_2 = 0$  或  $1 \leq n_2 \leq k$ ;  $P_{n_2}$  为稳态时搅拌设备处有  $n_2$  辆运输车的状态概率; $\lambda_2$  为到达率,即单位时间内到达搅拌站处的平均空返车辆数; $\mu_2$  为服务率,即单位时间内搅拌设备的平均装



车数;则搅拌子系统为稳态时(设  $\rho_2 = \lambda_2/\mu_2$ ) 状态概率表达式为

$$P_0 = 1 / \left[ \sum_{n_2=0}^k \frac{k!}{(k-n_2)!} \rho_2^{n_2} \right], \quad n_2 = 0 \quad (7)$$

$$P_{n_2} = \frac{k!}{(k-n_2)!} \rho_2^{n_2} P_0, \quad 1 \leq n_2 \leq k \quad (8)$$

求得子系统的各项指标为:

(1) 子系统中需要服务的平均运输车数(队长期望值)

$$L_{S2} = \sum_{n_2=0}^k n_2 P_{n_2} = k - \frac{1-P_0}{\rho_2} \quad (9)$$

(2) 在队列中等待的平均运输车数(队列长度期望值)

$$L_{q2} = \sum_{n_2=1}^k (n_2 - 1) P_{n_2} = k - (\lambda_2 + \mu_2) \cdot (1 - P_0) / \lambda_2 = L_{S2} - (1 - P_0) \quad (10)$$

(3) 运输车在子系统中逗留时间的期望值(等待服务时间+接受服务时间)

$$W_{S2} = \frac{k}{\mu_2(1-P_0)} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (11)$$

(4) 在子系统中运输车等待服务时间的期望值

$$W_{q2} = W_{S2} - 1/\mu_2 \quad (12)$$

### 3.3 摊铺子系统

#### 3.3.1 摊铺子系统的组成及运行特点

摊铺子系统由等待卸料的运输车队列、正在卸料的运输车和  $C_t$  台正在摊铺混合料的摊铺机组成。其运行特点是每辆运输车到达摊铺现场的时间间隔服从参数为  $\lambda_3$  的泊松分布;摊铺机为每辆车的服务时间服从参数为  $\mu_3$  的负指数分布;整个子系统的服务规则是  $C_t$  台摊铺机为  $k$  辆运输车提供循环卸料服务;先到先服务的等待制排队规则;子系统内运输车最多不超过  $k$  辆。通过分析,该服务系统同样符合顾客为有限源的  $M/M/C_t/\infty/k/FCFS$  排队模型。

#### 3.3.2 摊铺子系统的运行状态定量计算

根据摊铺子系统排队模型特点,摊铺机状态概率及其运行指标计算为:

首先,假设整个子系统内的运输车辆数为  $k$ ;  $C_t$  为摊铺机数,根据施工工艺要求,一般  $C_t = C \geq 1$ ,即存在多个服务台,则存在 3 种工作状态:顾客数  $n_3 = 0, 1 \leq n_3 \leq C, C+1 \leq n_3 \leq k$ ;  $P_{n_3}$  为稳态时摊铺机处有  $n_3$  辆运输车的状态概率;  $\lambda_3$  为到达率,即单位时间内到达摊铺机处的平均车数;  $\mu_3$  为服务率,即单位时间内摊铺机处的平均卸车数。

摊铺子系统稳态时(设  $\rho_3 = \lambda_3/\mu_3, \rho_{e3} = \lambda_3/$

$(C\mu_3)$ ) 状态概率为

$$P_{n_3} = \frac{k!}{(k-n_3)!n_3!} \rho_3^{n_3} P_0 \quad 1 \leq n_3 \leq C \quad (13)$$

$$P_{n_3} = \frac{k!}{(k-n_3)!C!C^{(n_3-C)}\rho_3^{n_3}} P_0 \quad C+1 \leq n_3 \leq k \quad (14)$$

$$P_0 = \frac{1}{k! \left( \sum_{n_3=0}^C \frac{1}{n_3!(k-n_3)!} \rho_3^{n_3} + \frac{C^C}{C!} \sum_{n_3=C+1}^k \frac{1}{(k-n_3)!} \rho_3^{n_3} \right)} \quad n_3 = 0 \quad (15)$$

其次,运行指标计算式。 $\lambda_{e3}$  为有效到达率,  $\lambda_{e3} = \lambda_3(k - L_{S3})$ 。

求得子系统的各项指标为:

(1) 子系统内的平均运输车数(队长期望值)

$$L_{S3} = \sum_{n_3=1}^k n_3 P_{n_3} \quad (16)$$

(2) 在队列中等待的平均运输车数(队列长度期望值)

$$L_{q3} = \sum_{n_3=C+1}^k (n_3 - C) P_{n_3} \quad (17)$$

(3) 运输车在子系统中逗留时间的期望值

$$W_{S3} = L_{S3} / \lambda_{e3} \quad (18)$$

(4) 在子系统中运输车等待服务时间的期望值

$$W_{q3} = L_{q3} / \lambda_{e3} \quad (19)$$

### 3.4 压实子系统

#### 3.4.1 压实子系统的组成及运行特点

压实子系统由  $C_t$  台摊铺机和  $C_y$  台压路机组成。其运行特点是摊铺机摊铺完每车沥青混合料时间间隔服从参数为  $\lambda_4$  的负指数分布;压路机压实完每车沥青混合料所摊铺面积的服务时间服从参数为  $\mu_4$  的负指数分布;服务规则是先到先服务的等待服务制排队规则,子系统内摊铺面积的当量车数没有限制。根据随机服务系统理论,该服务系统符合顾客为无限源的  $M/M/C_y/\infty/\infty/FCFS$  排队模型。

#### 3.4.2 压实子系统的运行状态定量计算

根据压实子系统排队模型特点,压路机状态概率及其运行指标计算为:

首先,假设  $C_y$  为压路机数,根据施工工艺要求,一般取  $C_y = C > 1$ ,即存在多个服务台,则存在 3 种工作状态:顾客数  $n_4 = 0, 1 \leq n_4 \leq C, n_4 \geq C+1$ ;  $P_{n_4}$  为稳态时压路机处等待压实和正在接受压实的沥青混合料平均当量车数为  $n_4$  的状态概率;  $\lambda_4$  为到达率,即单位时间内摊铺机摊铺完的沥青混合料平均当量车数;  $\mu_4$  为服务率,即单位时间内压路机压实完的沥青混合料的平均当量车数。



压实子系统稳态时(设  $\rho_4 = \lambda_4 / \mu_4$ ,  $\rho_{e4} = \lambda_4 / (C\mu_4)$ )状态概率为

$$P_0 = 1 / \left[ \sum_{n_4=0}^{C-1} \frac{\rho_4^{n_4}}{n_4!} + \frac{\rho_4^C}{C!(1-\rho_{e4})} \right] \quad n_4 = 0 \quad (20)$$

$$P_{n_4} = \frac{\rho_4^{n_4}}{n_4!} P_0 \quad 1 \leq n_4 \leq C \quad (21)$$

$$P_{n_4} = \frac{\rho_4^{n_4}}{C!C^{n_4-C}} P_0 \quad n_4 \geq C+1 \quad (22)$$

求得子系统的各项指标为:

(1) 子系统内的摊铺沥青混合料的平均当量车数(队长期望值)

$$L_{s4} = \frac{\rho_4^C \rho_{e4}}{C!(1-\rho_{e4})^2} P_0 + \rho_4 \quad (23)$$

(2) 在队列中等待压实的摊铺沥青混合料的平均当量车数

$$L_{q4} = L_{s4} - \rho_4 \quad (24)$$

(3) 摊铺混合料的当量车数在子系统中逗留时间的期望值

$$W_{s4} = L_{s4} / \lambda_4 \quad (25)$$

(4) 摊铺沥青混合料的当量车数等待服务时间的期望值

$$W_{q4} = L_{q4} / \lambda_4 = W_{s4} - \frac{1}{\mu_4} \quad (26)$$

## 4 系统合理性判断标准

合理的施工系统在此处主要是指施工机群的工作状态趋向于理想时的系统,也就是说,只有在任意工作时刻各服务设备前都保证有适量的待服务对象时,才能实现系统的良性工作循环。据此建立系统合理性判断标准为:

(1) 铣刨机前等待装料的平均运输车数(队列长期期望值) $L_{q1}$  长度合理

$$0 \leq L_{q1} \leq 2 \quad (27)$$

(2) 搅拌机前等待装料的平均运输车数(队列长期期望值) $L_{q2}$  长度合理

$$0 \leq L_{q2} \leq 2 \quad (28)$$

(3) 摊铺机前等待卸料的平均运输车数(队列长期期望值) $L_{q3}$  长度合理

$$0 \leq L_{q3} \leq 2 \quad (29)$$

(4) 压路机前等待压实的混合料当量车数(队列长期期望值) $L_{q4}$  长度合理

$$0 \leq L_{q4} \leq 2 \quad (30)$$

## 5 结 语

实际施工过程中,施工机械的初步配置方案通

常是依据设备配置的基本原则、基本公式和经验系数,由主导施工机械的生产能力推导出各工作面上所用施工机械的数量和其他基础参数而得到的,缺乏最优性考证和合理性判断。根据本文各子系统运行规律的描述及初配机群合理性判断标准,可建立使整个机群的设备台班费综合利用率达到最大的机群配置优化模型。

## 参考文献:

## References:

- [1] 陈启宗. “工厂热法”沥青混凝土路面再生技术[J]. 工程机械, 2001, (5): 27-29.  
CHEN Qi-zong. “In Plant Heating” reclamation technology of asphalt concrete road[J]. Construction Machinery and Equipment, 2001, (5): 27-29.
- [2] 郭小宏, 郭嘉银, 杜真德. 高等级沥青砼路面机械化施工的理论及实践(Ⅲ)[J]. 重庆交通学院学报, 1995, (1): 56-65.  
GUO Xiao-hong, GUO Jia-yin, DU Zhen-de. Theory and practice on asphalt concrete pavement mechanized construction for high-graded roadway(Ⅲ)[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1995, (1): 56-65.
- [3] 郭桂平. 高等级公路养护技术与养护机械[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
GUO Gui-ping. High-grad roadway maintenance technology and maintenance machinery[M]. Beijing: People's Communication Press, 2001.
- [4] 胡运全. 运筹学教程(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
HU Yun-quan. A Course in operational research (second edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [5] 陈海伟. 沥青混凝土路面再生工程机械化施工组织研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.  
CHEN Hai-wei. Research on mechanized construction organization of asphalt concrete pavement recycling engineering[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [6] 李剑斌. 高等级公路沥青路面机械化施工机群配置原理及其技术经济效益分析[D]. 西安: 长安大学, 1996.  
LI Jian-bin. Asphalt pavement mechanized construction system configuration principle and analysis of technical-economic-efficiency for high-graded roadway [D]. Xi'an: Chang'an University, 1996.
- [7] 吴永平. 机械化养护作业的技术经济评价模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(5): 59-60.  
WU Yong-ping. Evaluation model on pavement maintenance of mechanization[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(5): 59-60.