

# 军用物资装卸搬运作业系统建模与仿真研究

王志敏, 李振克

(军事交通学院, 天津 300161)



**摘 要:** 在军用物资作业组织、装备编配、保障方案拟制等工作中, 通常需要对给定系统完成给定任务的能力和各环节装备配置的合理性等进行评估。通过对军用物资装卸搬运系统的作业分析, 在 EXTEND 仿真平台上建立了物资装卸搬运系统作业仿真模型; 利用随机试验方法, 获得系统作业的完成时间、各个作业环节服务台的排队长度、等待时间及各装载设备的利用率等仿真结果统计数据, 可为评估系统保障能力、科学制定设备配置方案提供依据。

**关键词:** 装卸搬运; 系统仿真; EXTEND 评估

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-731X (2007) 06

## Modeling and Simulation Research on Military Material Handling System

WANG Zhi-min, LI Zhen-ke, CHEN Qiang, GAO Wen-wei, LIU Wei

(Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China)

**Abstract:** System efficiency evaluation and equipment configuration rationality are usually required in military activities, such as organizing operations, configuring equipments and making supply plans. By analysing the process of military material handling system, a simulation model of the military material handing process was built in Extend simulation software. By means of statistical experiments, some key performance results were obtained including the time in finishing the system process, queue length, waiting time and the utilization of loading/unloading equipments of the service platform in the process. The information provides solid evidence for evaluating the system efficiency to help construct equipment configuration plan.

**Key words:** Military Material Handling System; system simulation; Extend; Evaluate

## 引 言

我军的物资保障系统是一个庞大的系统工程, 物资的装卸搬运是其中一个极其重要的环节。军用物资从产地到部队, 要经过多次周转, 每经过一个物流终端, 每转换一次运输方式都必须进行一次装卸搬运作业。装卸搬运作业的工作量和所花费的时间, 耗费的人力、物力在整个物资保障过程中都占有很大的比重。物资装卸搬运活动渗透到物资保障系统各环节, 各领域, 往往成为整个物资保障系统的“瓶颈”, 是物资保障系统各功能之间能否形成有机联系和紧密衔接的关键, 它将对整个物资保障系统的效率产生十分重大的影响, 甚至影响军事战略的实现。因此在军用物资装卸搬运作业的作业组织、装备编配、保障方案拟制等工作中, 需要对作业系统完成给定任务的保障能力和各环节装备配置的合理性进行评估。

本文以典型的仓库物资装卸搬运作业为对象, 在美国 Imagine That 公司研制的离散事件仿真平台 (EXTEND) 上, 建立了作业系统的图形化仿真模型, 并给出了各环节作业时间参数的测算方法和取值分布, 为此问题的解决提供了一种

可行的技术途径。

## 1 系统构成与作业分析及解决途径

### 1.1 系统构成

物资装卸搬运作业系统, 是指由物资及物资发送平台、接收平台、装卸搬运机械作业线构成的物资搬运装卸作业链, 简称作业系统。N 种物资由发送平台, 通过机械作业线上 M 个环节机械的贯序作业, 到达接收平台。系统结构单

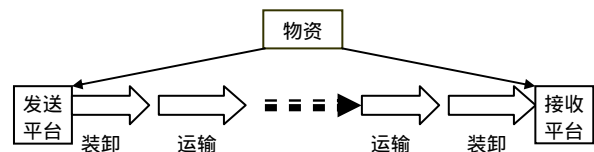


图 1 装卸搬运基本作业系统模型

元的相互关系见图 1。

作业系统的实体为物资、物资发送和接收平台、装卸作业机械、运输工具, 简称为物资、发送平台、接收平台、机械、车队。其中: 物资和车队为临时实体, 机械为永久实体; 发送和接收平台, 为运输工具如铁路棚车、运输车、飞机、船舶等时, 属临时实体; 为洞库、货场、库房等时, 属永久实体。发送和接收平台、机械、车队又称为作业实体。

### 1.2 系统分析

这里以仓库弹药收发作业为例对系统进行分析, 仓库弹

收稿日期: 2005-09-19

修回日期: 2006-07-03

基金项目: 军交运输保障装备效能评估 (交 030107)

作者简介: 王志敏(1956-), 男, 湖北武汉人, 教授, 研究方向为装备效能评估; 李振克(1981-), 男, 青海西宁人, 硕士, 研究方向为离散系统建模与仿真。

药收发作业流程如图 2 所示。

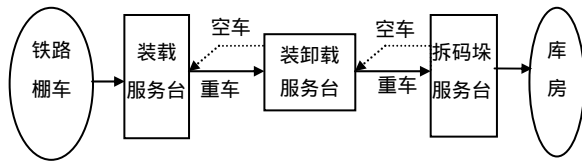


图 2 仓库弹药收发作业流程

该排队服务系统有三级服务台,运送弹药的车辆首先经过站台装载服务台的装载,到达洞库的卸载服务台,此时当且仅当洞库口卸载服务台空闲且有空的搬运列车到达时,才能进行弹药的卸载、装载作业。作业完成后,运输车辆返回站台装载服务台继续作业,搬运列车运送弹药至洞库内拆码垛服务台,卸载完毕后返回。运输车辆及搬运车辆循环作业,直至铁路棚车内弹药完全转移至洞库。

由以上流程分析可以看出三级服务台的作业状态相互影响、制约并高度相关,同时物资装载、搬运、短途运输、卸载作业时间随机波动,装卸设备和运输车辆出现故障的时机也是随机的。根据经典的排队论方法很难测算上述作业参数,而对其建立数学模型进行测算又过于复杂,当前我军在组织物资装卸搬运作业、拟制物资保障计划时,基本上没有考虑随机因素,单凭经验或者简单的计算来确定,这样做虽然简便易行,但是时常出现由于对装卸作业系统保障能力评估不准或者装卸设备与运输车辆之间编配不当,导致整个作业系统的军事经济效益低下。

### 1.3 解决途径

离散事件系统仿真是解决此类问题的一种有效途径。就离散事件系统仿真而言,当前有两种解决办法:

一种是以通用语言编程方法完成相应的建模、仿真和结果分析工作。采用此方法要求使用人员的编程能力较强,不仅会建模,而且要用程序准确的表示出来,工作量大、模型调试困难,模型的通用性、适应性和可借鉴性较差。另外一种是采用通用的仿真软件进行建模与仿真,采用此种方法,建模人员不需要编写程序、调试模型,可以把精力更多地放在系统研究、模型建立、参数确定等重要工作上,而且模型完成后,便与推广和交流。因此本文采用通用仿真平台对物资装卸搬运系统进行建模与仿真。

## 2 基于 EXTEND 平台的系统仿真建模

在专用离散系统仿真平台 EXTEND 上建立作业系统仿真模型的主要步骤为:确定作业规则、构建实体关系模型并确定作业时间参数、明确系统输出、仿真试验设计、仿真模型验证与确认、运行仿真、仿真结果分析。

### 2.1 作业规则

根据图 1 所示系统的作业过程,可确定本作业系统中各类实体的作业规则为:

- (1) 装卸服务台为等待制服务台,先到先服务(FIFO),

服务台前有排队队列,服务时间独立;道路服务台为非等待制服务台,服务台前无排队队列,服务时间为车辆在相应道路上的行驶作业时间,各车相互独立;

(2) 车辆实体在前后两级装卸服务台间运行,在前级服务台装载,重驶至后级服务台,卸载后空车返回前级服务台等待装截,每次作业均达到其额定装载质量;

(3) 物资实体,由源依次经过各服务台、车辆实体、到达汇;当给定量物资全部到达终点(汇)时,作业结束。

### 2.2 实体关系模型与作业时间参数

在 EXTEND 平台上建立的物资装卸搬运系统实体关系模型如图 3 所示。



图 3 实体关系模型

主要实体及输入参数、作业时间参数说明如下:

- (1) “铁路棚车”是物资源,实体的输入参数为物资总量,单位为吨(散件装)或托盘(集装)。
- (2) “运输车辆”和“搬运列车”是车辆实体,实体的输入参数为车辆或列车组总数。
- (3) “站台装载服务台”、“库房地装卸服务台”、“库房地内码垛服务台”均为装卸服务台实体,实体的输入参数为:机械单次作业时间分布范围和分布类型、设备数量、单机作业量。其中:

机械单次作业时间,是指机械完成一次装(卸)载作业的全部时间,记为 $t$ ,单位秒,为作业周期 $t_0$ 和波动时间 $t_r$ 之和。 $t_0$ 为机械完成1次作业并回复至下次可抓取物资的标准时间,不同机械在不同作业环境下的作业周期时间取值见文献[1,2]; $t_r$ 为装卸作业时间受人员操作、相互作业干扰、机械故障发生与排除等随机因素影响的变化值,通常为服从某种分布的随机变量,变化范围记为 $\Delta t$ ,可据经验或实测结果标定。故有:

$$t \in [t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t] \tag{1}$$

输入的作业时间分布范围为 $[t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t]$ ,分布类型可根据实际作业条件标定。

单机作业量是指1台设备1次作业可以装卸搬运物资的数量,分为装卸机械单机作业量和车辆单机作业量,可按文献[1]提出的测算方法,依设备作业性能参数进行测算。

- (4) “库内短途运输”和“库房地内短途搬运”均为道路服务台,实体的输入参数为单程运输(或搬运)时间分布范

围和分布类型、车辆故障发生概率和平均修复时间。其中：

令单程运输（或搬运）时间为  $T_t(\text{min})$ ，运输（或搬运）距离为  $S(\text{km})$ 、车辆在给定道路上满载（或空驶）时的平均技术速度为  $V_0$ （测算方法见文献[1]， $\text{km/h}$ ）；车辆平均技术速度受人员操作、交通状况、车辆技术状态等随机因素影响的波动值为  $V_r(\text{km/h})$ ，应有：

$$T_t = \frac{60 \times S}{V_0 + V_r} \quad (2)$$

由于  $V_r$  通常为服从某种分布的随机变量，变化范围记为  $\Delta V$  [3]。故可由(2)式确定单程运输（或搬运）时间分布范

围为： $T_t \in \left[ \frac{S}{V_0 + \Delta V}, \frac{S}{V_0 - \Delta V} \right]$  (min)，分布类型根据实际作业条件标定。

记车辆故障发生概率为  $R$ ，由于车辆完成初驶且处于正常工作期，应有：

$$R = 1 - e^{-\frac{S}{MMBF}} \quad (3)$$

式中， $S$  为运输（或搬运）距离，定义同式(2)； $MMBF$  为车辆的平均故障间隔里程，单位  $\text{km}$ ，为车辆技术性能参数。

记车辆故障平均修复时间为  $MTTR$ ，单位  $\text{Min}$ ，为车辆技术性能参数。

令车辆单程运输（或搬运）作业总时间为  $T$ ，包括作业时间和故障排除时间。应有：

$$T = T_t + \begin{cases} MTTR & x \geq R(\text{发生故障}) \\ 0 & x < R(\text{不发生故障}) \end{cases} \quad (4)$$

式中， $x$  为服从(0,1)均匀分布的随机变量。

(5) “队列 1”、“队列 2”、“队列 3”及“队列 4”分别为等待制服务台前的队列。

(6) “Exit”是物资汇。

### 2.3 系统输出

作业系统仿真试验的输出参数为：任务完成时间平均值、各装卸服务台的平均排队长度、台前车辆的平均等待时间、各作业环节装备的平均利用率。

### 2.4 试验设计

#### 2.4.1 系统仿真运行时间长度确定

根据研究目的和系统特征不同，系统仿真分为两种不同类型：终止型仿真和非终止型仿真。终止型仿真是由一个“固有事件”来确定仿真运行时间长短的一类仿真。固有事件  $E$  发生的时刻记为  $T_E$ 。被仿真的系统满足一定的初始条件，在零时刻开始运行，在  $T_E$  时刻结束运行；非中止型仿真是没有可以确定运行时间长短的固有事件的一类仿真。仿真对象是连续运行的系统，或至少在很长时间内运行的系统。

由物资装卸搬运系统的研究目的及特征可知，该系统属于终止型仿真，决定仿真结束的“固有事件” $E$  为“库房内码垛服务台”完成最后一个托盘物资的码垛作业。

#### 2.4.2 系统独立仿真运行次数确定

仿真试验是一种随机抽样试验方法，一次试验将在随机

变量值的基础上，得到评价参数的一个样本值。只有进行多次仿真试验，才可由样本值估计相应的评价参数。令可使评价参数达到给定精度的最低试验次数为  $N_{\min}$ ，置信水平为  $1-\alpha$ ，相对估计精度为  $\varepsilon$ ，均值和均方差为  $\mu_x$ 、 $\sigma_x$ ， $t$  分布参数值为  $t_\alpha$ ，系统仿真次数的计算公式如下：

$$N_{\min} = (\sigma_x / \mu_x)^2 \cdot (t_\alpha / \varepsilon) \quad (5)$$

应用该公式时，可视情进行 20~30 次试验，估计出  $\mu_x$ 、 $\sigma_x$ ，然后查表求出  $t_\alpha$ ，确定最低仿真试验次数  $N_{\min}$ 。

### 2.5 仿真模型验证与确认

仿真模型的验证主要采用软件工程中的程序检测方法。EXTEND 仿真软件提供了二维动态显示仿真运行过程的功能，因此采用动画来观察仿真模型在计算机上的运行过程，检验所建立的仿真模型(包括系统组成的假设、系统结构、参数及其取值、对系统的简化和抽象)是否被准确地计算机上运行。

仿真模型的确认主要通过对比仿真模型运行结果与真实数据的偏差来判断仿真模型的可信性，因此需要搜集关于系统高质量的数据和信息。

### 2.6 仿真结果分析

对计算机模拟运行所获得的输出结果从以下几方面进行分析：

通过计算样本均值、均值方差以及置信区间等指标分析模拟结果的统计特征(例如平均队长、平均等待时间等)。

对统计结果进行分析，对照仿真目标考察仿真结果是否满意。如果不满意，例如某服务台前排队长度太长或者设备利用率太低，即系统存在明显的瓶颈环节，可通过优化系统流程或改变系统输入参数中的可调整参数，然后重新运行仿真得到新的仿真结果，再次对照仿真目标进行考察，直至达到满意的仿真结果为止。

如果有系统运行相关的成本数据，可利用 Extend 提供专门的优化模块，选择某些系统参数，定义目标函数方程；然后用拖拉方式将可以变化的绩效指标和参数输入到优化器模块中，通过运行模型中的最优化选项，对系统进行费效分析，寻找统计学上的最佳配置方案。

## 3 案例分析

### 3.1 案例<sup>[4]</sup>

某部需在 120min 内，由货场卸载 1 节 60 吨棚车所装物资至库中。物资为托盘集装，总量为 60 个托盘。作业环境为：火车站台长 140m；站台至库区 8km；库内运距为 0.8km。各环节机械配备为：站台装卸采用 3 台 1T 叉车，库区短途运输采用 6 台 5T 运输车，库房口装卸采用 3 台 1T 叉车，库内搬运采用 3 组 10T 搬运列车。库房内拆码垛采用 3 台 1T 电瓶叉车。

根据案例所给数据,由式(1)~(4)及相应的参数测算方法,可确定本模型各主要实体的输入参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型各主要实体输入参数

主要实体	主要输入参数
铁路棚车 (物资源)	物资总量为 60 个托盘
运输车辆	运输车辆 6 台
搬运列车	搬运列车 3 组
站台装卸 服务台	叉车 3 台,单机作业量为 1 个托盘,单次作业时间服从区间(2.07, 2.2)(min)上的均匀分布; 车辆单机作业(装载)量为 5 个托盘。
库区短途运输 服务台	单程运输时间服从区间(12,16)(min)上的均匀分布; 故障发生概率 R=0.006,平均修复时间 MTTR=112min。
库房口装卸 服务台	叉车 3 台,单机作业量为 1 个托盘,单次作业时间服从区间(1.27, 1.47)(min)上的均匀分布; 车辆单机作业(卸载)量为 5 个托盘; 搬运列车单机作业(装载)量为 10 个托盘。
库房内短途 搬运服务台	单程搬运时间服从区间(4.8, 8)(min)上的均匀分布; 故障发生概率 R=0.0,平均修复时间 MTTR=0。
库房内拆码 垛服务台	叉车 3 台,单机作业量为 1 个托盘,单次作业时间服从区间(1.0, 1.2)上的均匀分布; 搬运列车单机作业(卸载)量为 10 个托盘。

### 3.2 系统输出

系统仿真结果输出界面如图 4。

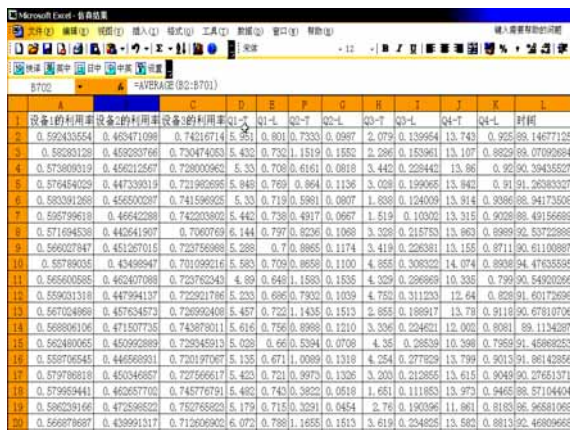


图 4 仿真输出界面

### 3.3 仿真运行长度及试验次数的确定

#### 3.3.1 仿真运行长度的确定

由于系统完成作业的时间为一随机数值,因此在此实例中使用一 Stop 模块,当“库房内码垛服务台”完成最后一个托盘物资的码垛作业时,Stop 模块终止该次仿真。

#### 3.3.2 仿真试验次数的确定

在初始试验 50 次的基础上,取置信水平 95%,相对精度 5%, $t_a$  由查表取 2.021,由公式(5)可计算出达到此精度要求的最低试验次数见表 3.3.2.1,取为 700 次。

表 2 最低试验次数计算表

指 标	任务完成时间	服务台一	服务台二	服务台三	服务台一	服务台二	服务台三	服务台一	服务台二	服务台三	服务台一	服务台二	服务台三
		的利	的利	的利	的等	的排	的等	的排	的等	的排	的等	的排	的等
		用率	用率	用率	待时	队长	待时	队长	待时	队长	待时	队长	待时
					间	度	间	度	间	度	间	度	间

$\mu x$	99.88	0.556	0.292	0.234	5.275	0.678	0.236	0.031	13.27	0.844
$\sigma x$	30.51	0.097	0.057	0.047	0.356	0.148	0.129	0.019	0.796	0.158
Nmin	150	49	61	65	7	76	478	601	6	56

### 3.4 仿真模型的验证与确认

(1) 通过 EXTEND 的二维仿真动画观察物资的动态装卸搬运过程,该仿真模型与实际物资装卸搬运作业流程吻合,该仿真模型可用。

(2) 该仿真模型经过 700 次的仿真试验,任务完成时间平均值约为 92min,与实际情况基本相符,误差为 8%,该仿真模型可信。

### 3.5 仿真试验结果统计分析与优化

700 次仿真试验后使用 Extend 内置的数据拟合软件 Stat:Fit 对任务完成时间进行数据拟合,在置信水平为 95%时,任务完成时间服从区间为(76.5, 269),分布参数为  $K1=1.05, K2=11.1$  的 Beta 分布,完成时间的平均值为 91.7min。其它作业参数经过数据拟合,服从正态分布,统计结果见表 3(均值,方差)。

表 3 作业系统仿真试验结果统计

作业名称	设备利用率	平均等待时间	平均排队长度
站台装卸 服务台	(0.582, 0.073)	(5.314, 0.352)	(0.723, 0.112)
库房口装 卸服务台	(0.309, 0.043)	(0.263, 0.133) (卸运输车)	(0.036, 0.019) (卸运输车)
库房内拆 码垛服务台	(0.249, 0.035)	(0.021, 0.057) (装搬运列车)	(0.0014, 0.004) (装搬运列车)

由完成时间的统计分析表及表 3 所列仿真试验结果可知:

(1) 该仿真模型经过 700 次的仿真试验,任务完成时间平均值约为 92min,因此系统能够在任务规定时限内完成任务。

(2) 作业完成时间服从 Beta 分布,其变化幅度较大,最大值与最小值相差 3.5 倍。主要原因是系统总体作业时间较短,而运输车辆途中故障修复时间相对过长,故导致任务完成时间波动较大。因此,组织此类作业时,应注重运输车辆准备工作,避免因故障而无法按时完成任务。

(3) 库房口装卸服务台和库房内码垛服务台的设备利用率偏低,均不超过 31%,应适当减少相应的叉车数量。

经分析优化,可将库房口装卸服务台的叉车数由 3 台减为 2 台、库房内码垛服务台的叉车数由 3 台减为 1 台,其它不变。新系统 700 次仿真试验后,在置信水平为 95%时,任务完成时间服从区间为(85.8, 281),分布参数为  $K1=0.614, K2=8.38$  的 Beta 分布,完成时间的平均值为 97.1min。其它作业参数服从正态分布,统计结果见表 4(均值,方差);

表 4 设备调整后的系统仿真试验结果统计

作业名称	设备利用率	平均等待时间	平均排队长度
站台装卸 服务台	(0.557, 0.066)	(5.426, 0.332)	(0.696, 0.104)
库房口装 卸服务台	(0.438, 0.059)	(0.753, 0.294) (卸运输车)	(0.096, 0.036) (卸运输车)

		(13.82, 3.1) (装搬运列车)	(0.876, 0.04) (装搬运列车)
库房内拆 码垛服台	(0.705, 0.095)	(2.952, 0.802)	(0.192, 0.059)

由表 4 可知,设备调整后的任务完成作业时间平均值仅比调整前增加了 5min 多,但仍在任务完成时限内,而叉车数量减少了 3 台,占现用总量的 1/3,单机作业效能明显提高,各服务台前的平均排队时间及长度没有明显增加,总体上更为合理。

#### 4 结论

(1) 通过实例验证,本文所建立的直接转运作业系统的图形化仿真模型,其结果可行、可信;物理意义明确、直观,便于决策;

(2) 该仿真模型不仅能测算给定系统的保障能力,而且能灵活地调整系统结构和装备编配方案,并对新方案的保障效果进行评估,辅助决策者确定最佳方案。

(3) 军用物资装卸搬运作业系统分析与优化,平时应考虑作业费用的影响,战时应考虑系统抗毁伤及自救恢复能力

的影响,这些问题将在模型的进一步改进中加以考虑。

(4) 如果将有关分析延伸,给出作业时限以及一些必要的约束,可以确定该作业线系统中装备的最佳编配;给出作业线中某个环节所能提供的某型号装备的最大数量,可以确定该作业线其它各环节的装备型号、数量以及系统效能。

(5) 如果综合考虑有关费用和军事应用实际进行进一步的分析,本文所进行的工作更加具有现实指导意义,可以为装备的招标、采购以及其他重大决策提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 王志敏. 物资装卸系统保障效能评估模型研究报告[R]. 天津, 2004.
- [2] 王志敏. 叉车作业能力测算模型研究[J]. 天津军事交通学院学报, 2004.
- [3] 杨宇航. 战场机动维修分队效能分析评价模拟 [C]//军事运筹学应用研究与人才培养\_95 军事运筹学学术年会. 北京: 军事科学出版社, 1995.
- [4] 刘先锋. 军交运输装备系统效能评估模型研究[D]. 军事交通学院, 天津, 2004.