

# 基于信息排队理论的指挥效能评估

张兆栋, 张明智

(国防大学信息作战与指挥训练教研部, 北京, 100091)

**摘要:** 指挥过程一定意义上说就是信息流动的过程, 即利用信息优势, 形成决策优势, 最终转换为行动优势的过程。战场信息大量涌现, 可把信息比如“顾客”, 把指挥平台比作“服务台”, 本文利用排队论的基本理论, 从单层指挥机构服务台并联和多层指挥机构服务台串联的角度分析指挥信息传输效率, 对指挥效能进行定量评估。

**关键词:** 信息流动 指挥效能 排队论 服务台

## 0 引言

信息化条件下的现代战争, 指挥过程一定意义上说就是信息流动的过程, 即利用信息优势, 形成决策优势, 最终转换为行动优势的过程。在现代战争中, 战场信息大量涌现, 而指挥机构信息处理能力有限, 必然会有部分信息等待处理, 在这种情况下, 影响指挥效能的因素包括主要包括指挥机构的层级数量和单层指挥机构信息处理时间等。

本文基于排队论的基本理论, 把信息比如“顾客”, 把指挥平台比作“服务台”, 从信息横向处理(单层指挥机构的服务台并联)和信息纵向处理(多层指挥机构的服务台串联)的角度对指挥效能进行定量评估。

## 1 模型的提出

### 1.1 指挥工作流程

指挥的对象就是信息, 其实质就是指挥主体根据作战目标运用自己的知识和智慧对信息进行科学加工的过程。按照指挥工作的流程划分, 指挥手段分为信息获取、信息传递和信息处理。首先信息获取手段从战场获取信息, 然后信息处理手段对所获取的信息进行处理并形成决策, 最后利用信息传递手段将决策信息传递给指挥对象。信息传递过程如图 1 所示。

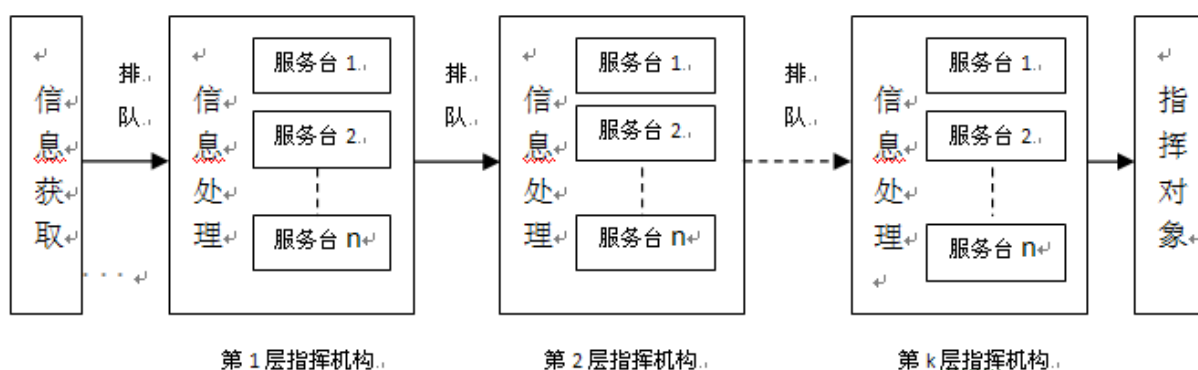


图 1 指挥工作流程

可见, 对于信息转化过程而言, 各层指挥机构之间是串联关系, 单层指挥机构的各服务台之间是并联关系。信息在横向处理和纵向传递过程中, 信息经过多层指挥机构的处理最后到达基本战斗单位, 战斗单位做出行动反应, 完成指挥周期。

### 1.2 排队系统的分类和组成

D.G.Kendall 于 1953 年提出的排队系统的分类方法被广泛的使用, 他采用的符号形式是:

$$X/Y/Z/A/B \quad (2-1)$$

其中, X-表示顾客输入过程的分布, 即相继到达间隔时间的分布; Y-表示服务时间的分布; Z-表示并列的服务台的数目; A-表示系统容量的限制; B 表示顾客源数目。在本文中, 我们采用 M/M/s/k 的排队系统分析问题, 表示信息相继到达间隔时间为负指数分布、服务时间为负指数分布、有 s 个服务平台、系统容量为 k 的排队系统。根据需要, 在分析多层指挥机构效能时, 为方便研究问题, 将 M/M/s/k 排队系统变换为 s 个 M/M/1/k 模型进行研究。

根据排队论, 排队系统有三个基本组成部分:即输入过程、排队规则和服务规则[1]。

输入过程指顾客到达排队系统的规律。可用到达时间间隔或单位时间内顾客到达数的概率分布描述。我们认为信息的输入过程是服从于泊松分布的最简单流, 它服从参数为  $\lambda$  的负指数分布, 最简单流具有以下特点。一是平稳性, 是指在一定的时间间隔内, 来到指挥机构的信息数量只与这段时间间隔的长短有关, 而与这段时间间隔的起始时刻无关。二是独立性, 是指信息的到达率与系统的状态无关, 无论系统中有多少信息, 信息的到达率不变。三是唯一性, 指在一个充分小的时间间隔里不可能有两个或两个以上的信息到达, 只能有一个信息到达。

排队系统的排队规则一般分等待制、损失制和混合制。不同的排队规则适应不同的排队状况。(1) 等待制: 顾客到达系统时, 如果服务台没有空闲, 则顾客排队等待服务。(2) 损失制: 顾客到达系统时, 如果服务台没有空闲, 则顾客离去。(3) 混合制: 它是介于等待制和损失制之间的形式, 方式有:①队伍长度有限②等待时间有限③逗留时间(等待时间与服务时间之和)有限, 顾客在系统中的逗留时间不得超过确定的时间。根据信息的时效性要求, 我们采用混合制排队规则。

服务规则指排队系统中服务台的个数、排列及服务方式。排队系统中服务台的个数可以是一个或多个, 多个服务台可以是串联或并联。实际战争中, 信息传递的按照多服务台混联的方式, 在分析单层指挥机构效能时, 采用多服务台并联的服务规则; 在分析多层指挥机构效能时, 采用多服务台串联的服务规则。

### 2.3 评估方法

一是单层指挥机构效能评估。评估方法是设定逗留时间上限  $\Delta t$ 、 $\Delta t$  时间内信息输入数量 n、服务台数 s, 在单个平台服务时间 T 变动的情况下, 评估信息得到服务的概率 P 和期望值 N。

二是多层指挥机构效能评估。评估方法是设定各层指挥机构的平均服务效率  $\mu_i$ , 单位时间内到达系统的信息数  $\lambda$ , 在指挥层次数量 k 变动的情况下, 评估总体服务时间 S 和信息通畅率 P。

## 2 单层指挥机构效能评估

### 2.1 模型建立

首先介绍一下评估指标, 一是信息得到服务的概率 P, 即设信息的到达服从负指数分布的情况下, 在逗留时间上限  $\Delta t$  时间内信息得到服务的概率; 二是在逗留时间上限  $\Delta t$  时间内, 多个信息得到服务的期望值 N。

由于单层指挥机构服务台数量有限, 当信息输入时, 设信息数量为 n、信息逗留时间为  $\Delta t$ 。在  $\Delta t$  时间内, 信息的到达可认为是泊松流, 服从负指数分布, 其密度函数为:

$$a(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

其中,  $\lambda$  为信息的到达率, 即单位时间内到达信息的数量。计算公式为:

$$\lambda = \frac{n}{\Delta t} \quad (3-2)$$

因为战场信息的时效性很强, 在  $\Delta t$  时间内, 信息若得不到处理, 信息就会失效, 这一过程可用多服务台混合制模型  $M/M/s/s$  加以近似描述。

设信息处理的平均时间为  $T$ , 指挥平台对每个信息的处理相对独立, 其长短服从于负指数分布, 分布密度函数为:

$$b(t) = \begin{cases} \mu e^{-\mu t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

其中,  $\mu$  为各信息处理平台对信息的服务率, 计算公式为:

$$\mu = \frac{1}{T} \quad (3-4)$$

多服务台混合制排队模型  $M/M/s/k$  中, 当  $s$  等于  $k$  时, 表示信息到达时间间隔服从相同的负指数分布、服务时间为负指数分布、有  $s$  个服务台、系统容量为  $s$  的混合制排队模型。对于混合制系统, 有:

$$P_n = \frac{\rho^n}{n!} P_0 \quad (3-5)$$

其中,  $P_n$  为系统在平衡状态下的分布,  $\rho$  为系统服务强度  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ ,  $P_0$  为无信息到达的概率, 计算公式为:

$$P_0 = \left[ \sum_{n=0}^s \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1} \quad (3-6)$$

信息损失率为:

$$B(s, \rho) = \frac{\rho^s}{s!} \left[ \sum_{n=0}^s \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1} \quad (3-7)$$

信息损失率  $B(s, \rho)$  即为信息到达后系统空间已被占满而不能进入系统空间的信息百分比, 因此指挥机构对多信息成功处理的概率  $P$  为[2]:

$$P = 1 - B(s, \rho) = 1 - \frac{\rho^s}{s!} \left[ \sum_{n=0}^s \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1} \quad (3-8)$$

多个信息处理中, 能够被成功处理信息数量的期望值为  $N$ , 计算公式为:

$$N = P * n \quad (3-9)$$

通过对  $P$  和  $N$  的分析, 可对单层指挥机构效能进行评估。

## 2.2 模型验证

设逗留时间上限  $\Delta t$  为 10 分钟、 $\Delta t$  时间内信息输入数量为  $n$  为 2、3、4, 服务台数  $s$  为 2, 在服务时间  $T$  为分别为 6 分钟和 3 分钟, 评估信息在  $\Delta t$  时间内得到服务的概率  $P$  和  $N$ , 结果见表 1。

从计算结果可以看出, 减少处理信息时间可以有效地提高信息得到服务的概率和信息服务数量的期望值。

表 1 信息处理时间变化对 P 和 N 的影响分析

信息数量 信息处理时间	n=2		n=3		n=4	
	P	N	P	N	P	N
T=6	0.76	1.52	0.63	1.89	0.52	2.08
T=3	0.90	1.80	0.85	2.55	0.78	3.12
提高比例	18%		35%		50%	

### 3 多层指挥机构效能评估

#### 3.1 模型建立

首先介绍一下评估指标,一是总体服务时间 S,即信息经第一层指挥机构到最后一层指挥机构所需要的总体时间。二是信息通畅率 P,即信息到达系统后无需排队而依次畅通的通过各指挥机构的概率。

信息到达第 1 层指挥机构后,如果发现信息处理通道被占用,指挥机构忙,则排队等待服务。在完成服务后,信息进入到第 2 层指挥机构排队等待服务。整个过程持续到完成第 k 层指挥机构的服务为止,整个系统被称为 k 阶段串行排队系统。由于各层指挥机构的信息处理能力、指挥控制范围及要综合考虑的战场情况有所不同,导致各层指挥机构所需的服务时间不同,设第 i 层指挥机构平均服务效率为  $\mu_i$ ,即单位时间内第 i 层指挥机构处理完毕的指挥信息数。

根据 Jackson 定理, k 阶段串行排队系统可以分解为 k 个 M/M/1/ $\infty$  系统,即输入过程为泊松流、单个服务机构提供服务、服务时间服从速率为  $\mu_i$  的负指数分布的等待制排队系统。

根据 M/M/1/ $\infty$  系统模型,当系统处于稳定状态下时,服务强度为  $\rho_i$  的第 i 层指挥机构中有 n 个信息的概率  $P_i(n)$  为:

$$P_i(n) = \rho_i^n (1 - \rho_i), \text{ 其中 } n \geq 0, i \leq k \quad (4-1)$$

可得到第 i 层指挥机构的平均排队长  $L_i$  和平均停留时间  $S_i$  分别为:

$$L_i = \frac{\lambda^2}{\mu_i(\mu_i - \lambda)}, S_i = \frac{1}{\mu_i - \lambda}, \text{ 其中 } i \leq k \quad (4-2)$$

因为各指挥机构之间相互独立,则整个系统总体服务时间 S 为信息在各层平均停留时间之和,总体服务时间必须小于指挥信息有效期 T,否则指挥失效:

$$S = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\mu_i - \lambda}, S < T \quad (4-3)$$

设系统平均服务强度  $\rho$ ,即为单位时间间隔内到达系统的信息数与单位时间内接受完服务的信息数的比值,  $\rho$  为:

$$\rho = \frac{k\lambda}{\sum_{i=1}^k \mu_i} \quad (4-4)$$

信息通畅率 P 为:

$$P - P_1(0)P_2(0)\dots P_k(0) = \prod_{i=1}^k (1 - \rho_i), k > 0 \quad (4-5)$$

### 3.2 模型验证

设输入信息需要 6 层指挥机构能够到达战斗单元, 即  $k=6$ , 当  $\lambda=2$  (个/小时), 各层指挥通信机构的平均服务效率为  $\mu_i: \{2.5, 2.3, 2.9, 3.2, 3.4, 3.6\}$ 。

根据评估模型可以求得:

$$S_i: \{3.5, 2.3, 1.7, 1.3, 1.1, 0.9\}$$

则总体服务时间  $S=10.8$ (小时), 信息畅通率  $P=8\%$ 。

设取消第 2 层和第 5 层指挥机构, 即  $k=4$ , 当  $\lambda=2$ (个/小时), 各层指挥通信机构的平均服务效率为  $\mu_i: \{2.5, 2.9, 3.2, 3.6\}$ 。

根据评估模型可以求得:

$$S_i: \{3.5, 2.2, 1.5, 1.3\}$$

则总体服务时间  $S=8.5$  小时, 信息畅通率  $P=12\%$ 。

从计算结果可以看出, 减少指挥层次是缩短指挥周期、提高指挥效率的重要方法。

## 4 结束语

本文利用信息排队理论对指挥效能进行评估, 从信息的横向处理效率和信息的纵向传输效率入手, 对单层指挥机构效能和多层指挥机构的效能进行定量评估。通过评估, 我们得出了通过减少指挥层次、减少信息处理时间等方法可以有效地提高指挥效能。但是, 由于指挥信息内部流动的复杂性和和外部环境的多样性, 影响指挥效能的因素还很多, 需要进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] 李乃奎, 崔同生. 军事运筹学基本理论教程[M].北京: 国防大学出版社.2011.7.
- [2] 范少伟, 严振华, 么建永. 基于排队论的战略预警指挥手段效评估研究[M].舰船电子工程.2011 (7) .
- [3] 严必虎.基于排队论的预警机对突击飞机指挥引导能力评估.军队信息化建设与军队运筹研究(上册).2009.