

doi: 10.7690/bgzdh.2018.07.001

基于排队网络的 AE CR 情报处理系统效能评估

范鹏程, 祝利, 安永旺

(电子工程学院 301 教研室, 合肥 230037)

摘要: 针对航天电子对抗侦察情报处理系统中情报处理任务, 以及系统内处理单元组合模式对系统效能的影响问题, 提出一种基于排队网络模型的 AE CR 情报处理系统效能评估方法。分析 AE CR 情报处理系统的基本架构, 提出 AE CR 情报处理系统的效能评估指标体系, 运用排队网络理论对 AE CR 情报处理系统进行效能评估与仿真分析。评估结果表明: 将排队网络理论运用于 AE CR 情报处理系统效能评估是可行的; 对于同一项情报处理任务, 不同的情报处理单元组合模式所产生的效能不同; 同一种情报处理单元组合模式在执行不同情报处理任务时的系统效能不同。

关键词: 排队网络; 航天电子对抗侦察; 情报处理系统; 效能评估

中图分类号: TP311.562 **文献标志码:** A

Effectiveness Assessment of AE CR Information Processing System Based on Queuing Network

Fan Pengcheng, Zhu Li, An Yongwang

(No. 301 Staff Room, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Aiming at the influence of the intelligence processing task and the intra-system processing units combination model on the system effectiveness of the aerospace electronic countermeasure reconnaissance (AE CR) information processing system, an effective evaluation method of AE CR information processing system based on queuing network model is proposed. The basic architecture of the AE CR information processing system is analyzed. The effectiveness evaluation index system is put forward. The performance evaluation and simulation analysis of AE CR information processing system is carried out by using queuing network theory. The evaluation results show that it is feasible to apply the queuing network theory to the AE CR intelligence processing system, the performance of the different intelligence processing unit combination mode is different for the same intelligence processing task, and the same intelligence processing unit combination mode is different. The performance of the information processing tasks is different.

Keywords: queuing network; AE CR; information processing system; effectiveness assessment

0 引言

航天电子对抗侦察 (aerospace electronic countermeasure reconnaissance, AE CR) 情报处理系统是航天电子对抗侦察情报生产的重要功能体, 能够对电子侦察卫星侦察数据进行处理、分析、整编、存储以及分发, 是航天电子对抗侦察情报生成的关键系统。正确评价与估量该系统在运用过程中的有效程度, 能够为挖掘系统作战潜能、提升系统处理水平以及推动系统改进升级提供决策依据。

当前, 对于 AE CR 情报处理系统效能评估的相关研究尚处于发展阶段。文献[1-4]提出了评价情报处理能力的指标, 并利用群组层次分析法评估该情报处理系统的效能。上述文献提出的系统时延、系统可靠性、系统可修复性、系统处理精度、系统容量等性能指标, 基于灰色关联分析、DEA 交叉评

价以及群组层次分析等模型, 较为完整地描述了情报处理系统的效能。但所设计的指标体系与评估模型也存在不足: 1) 对主观判断的依赖性较强, 难以反映出系统的客观指标要求; 2) 对系统是否情报生产与分发需求的满足程度考虑不足, 忽视了对信息流的动态性研究; 3) 系统任务与系统内部处理单元对系统效能影响的研究有待深入。

排队网络模型又称随机服务系统模型, 是分析评价服务类系统的性态与最优问题的有效方法之一, 在实际应用过程中具有可用性好、求解简单、费效比高、拓展性强和应用广泛等特点。文献[5]基于排队系统理论, 建立了云计算中心近似分析模型, 获得了用户响应时间分布函数等性能指标; 文献[6-7]应用排队理论进行医院相关门诊流程的效率分析, 提出了资源优化配置方案; 文献[8-10]基于

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-04-19

作者简介: 范鹏程(1991—), 男, 山西人, 硕士, 从事情报支援与效能评估研究。

排队理论建立了分析与评估模型，实现对银行服务窗口设置与职员弹性排班的优化。上述文献阐明了排队系统效能与系统内服务时间分布参数、系统服务台数量等因素的关系，为基于排队论的效能评估问题奠定了基础。

笔者针对情报处理任务与系统内处理单元组合模式对 AECR 情报系统效能的影响问题，基于有限等待的多级排队网络构建相应的效能评估模型，通过数值仿真验证模型的可行性，并探讨了系统内处理单元组合模式与情报处理任务同系统效能间的关系。

1 AECR 情报处理系统及效能评估指标体系

1.1 系统构成分析

AECR 情报处理系统包括标准情报处理单元与高级情报处理单元。标准情报处理单元主要对地面接收站接收的侦察原始数据进行预处理，生成标准化的侦察情报产品，为数据库更新、信息共享、态势显示以及专业处理提供侦察数据；高级情报处理单元主要对标准情报产品进行专业化的多级处理，根据作战任务需求来提供相应的目标情报以及战场态势情报。其系统组成如图 1 所示。

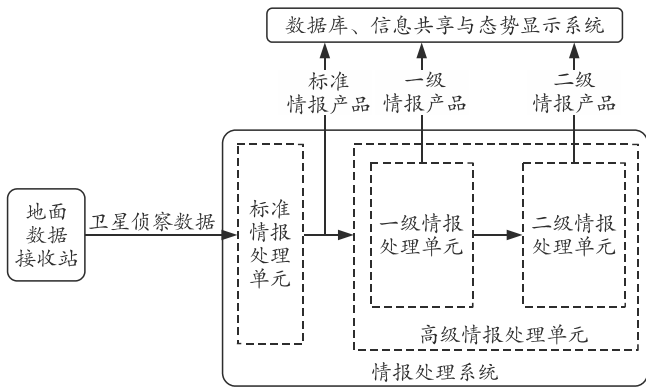


图 1 AECR 情报处理系统组成

1.2 系统效能评估指标

结合 AECR 情报处理系统在情报价值、任务时间、系统负载、处理精度以及系统固有效能等方面的需求，建立了情报处理系统效能评估指标体系(见图 2)。该指标体系共包括 6 个方面的指标：情报价值是指系统对于卫星侦察数据进行处理后所产生多级情报产品的总体价值；响应时效性是指侦察数据在系统中等待处理与接受处理的时间之和；系统服务率是指在侦察数据失效的前提下，处理系统对侦察数据的实际处理能力；系统负载是指处理系统中所有单元参与数据处理的比例；处理精度与系统

可靠性是系统的固有指标，表示系统的数据处理误差与可靠程度。

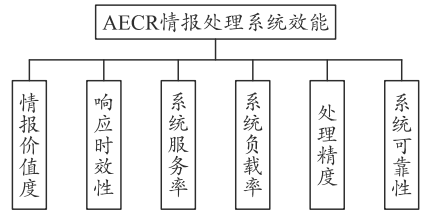


图 2 AECR 情报处理系统效能评估指标体系

2 AECR 情报处理系统排队网络模型

2.1 模型描述

借鉴文献[10]中针对空间信息处理系统效能评估所构建的排队网络模型，AECR 情报处理系统中的标准情报处理与高级情报处理系统(含多级处理单元)能够组成一个多服务台排队系统,从而可以将 AECR 情报处理系统简化为一个整体串联、局部并联的 M/M/n/∞/∞/F 模式的排队网络。该排队网络具有以下性质。

1) 输入过程：地面接收站推送的卫星侦察数据以 GB 为单位进入情报处理系统。单位时间进入系统的顾客流为最简流，即顾客进入系统的时间间隔相互独立并服从同一负指数分布。具体而言，卫星侦察数据到达标准处理系统服从参数为 λ 的泊松分布，标准情报产品离开数据标准情报处理系统亦服从参数为 λf_1 的泊松过程，其中： f_1 为标准情报处理系统服务率；经过预处理后的标准情报产品将根据情报处理任务需求，以一定比例 p 进入高级情报处理系统。高级情报处理系统内又分为若干不同等级情报处理单元，其输入过程也均为泊松过程。

2) 排队规则：假设系统缓冲区无限制，地面接收站推送的数据均能进入系统；推送的卫星侦察数据为单列队，服从先到先服务规则，按先后顺序依次接受处理；定义侦察数据在系统内滞留总时间的平均值为 t ，考虑到侦察数据的时间敏感性，系统排队规则服从有限等待原则，超期数据将不再接受处理。

3) 服务机构：情报处理系统为混合联接的排队网络，标准情报处理系统与高级情报处理单元系统内处理单元并行排列，同时标准情报处理系统与高级情报处理系统构成串行关系，每个处理单元可作为一个服务台，各服务台工作相对独立。

2.2 标准情报处理系统模型

标准情报处理系统包含 n 个服务台，服务时间

服从参数为 μ_1 的负指数分布，通过上述假设易知，该系统的服务速率同系统中服务顾客的数量有关。当系统中的顾客数量 k 满足 $0 < k \leq n$ 条件，即顾客数量不大于标准情报处理系统服务台个数时，系统中的顾客全部能够进入系统接受服务，此时系统的服务速率为 $k\mu_1$ ；当系统中的顾客数量 k 满足 $k > n$ 条件，即顾客数量大于标准情报处理系统服务台个数时，系统中正在接受服务的顾客数为 n ，此时系统的服务速率为 $n\mu_1$ ，其余顾客在缓冲区等待服务，并存在数量为 $v_1 = 1/t$ 的流失现象。为求得系统的状态概率，先画出系统的状态转移图，见图 3。

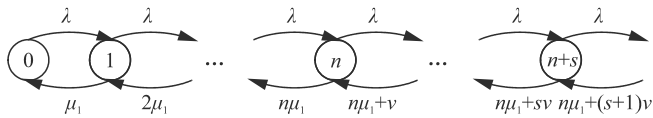


图 3 标准情报处理系统状态转移

由图可得系统状态的稳态方程：

$$\left. \begin{aligned} \lambda P_0 &= \mu_1 P_1, \quad k=0, \\ (\lambda + k\mu_1)P_k &= \lambda P_{k-1} + (\mu_1 + k\mu_1)P_{k+1}, \\ &0 < k \leq n, \\ (\lambda + n\mu_1 + (k-n)v_1)P_k &= \lambda P_{k-1} + \\ (n\mu_1 + (k-n+1)v_1)P_{k+1}, &k > n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

将 $\sum_{k=1}^{\infty} P_k = 1$ 代入式(1)，可以解得，

$$P_0 = \left\{ \sum_{m=0}^n \frac{(\lambda/\mu_1)^m}{m!} + \frac{(\lambda/\mu_1)^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(\lambda/\mu_1)^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\lambda/v_1)} \right\}^{-1},$$

$$P_k = \begin{cases} \frac{(\lambda/\mu_1)^k}{k!} P_0, & 1 \leq k \leq n \\ \frac{(\lambda/\mu_1)^k}{n! \prod_{m=1}^{k-n} (n+m\lambda/v_1)} P_0, & k > n \end{cases} \quad (2)$$

至此，可得该排队系统的各项指标，如表 1。

表 1 标准情报处理排队系统性能指标

排队系统性能指标	指标计算值
平均数据量	$L_1 = \sum_{k=1}^{\infty} kP_k$
平均等待时间	$W_1 = L_1/\lambda$
平均服务时间	$T_1 = 1/\mu_1$
系统服务概率	$f_1 = 1 - \frac{v_1}{\mu_1} \sum_{k=n+1}^{\infty} (k-n)P_k$
系统负载系数	$\eta_1 = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n kP_k + \sum_{k=n+1}^{\infty} nP_{k-n} \right)$

2.3 高级情报处理系统模型

高级情报处理系统内又分为若干不同等级情报处理单元。各个情报处理单元也可看作相互独立的排队系统。在各级情报处理单元中，数据到达服从参数为 $\lambda \prod_{j=1}^J f_j p_j$ 的泊松分布，其中 J 为高级情报产品的处理级别，取值 $J=1, 2, \dots, n_1$ ，各级情报产品服务台对应服务时间服从参数为 μ_{2j} 的负指数分布。为简化问题，笔者针对两级情报处理单元进行讨论，其中，一、二级情报处理单元分别包含 l_1 、 l_2 个服务台的排队系统。

一级情报处理各个处理单元服务时间服从参数为 μ_{21} 的负指数分布，平均数据量为 L_{21} ，平均等待时间为 W_{21} ，平均服务时间为 T_{21} ， v_{21} 为标准情报产品没有得到一级情报生产服务而离开系统的平均数据量，取值为 $v_{21} = 1/(t - W_1 - T_1)$ ；二级情报处理单元各个处理单元服务时间服从参数为 μ_{22} 的负指数分布，平均数据量为 L_{22} ，平均等待时间为 W_{22} ，平均服务时间为 T_{22} 。 v_{22} 为对应情报产品没有得到二级情报生产服务而离开系统的平均数据量，取值为 $v_{22} = 1/(t - W_1 - T_1 - W_{21} - T_{21})$ 。根据串联系统的独立性，可知 L_{21} 与 L_{22} 、 W_{21} 与 W_{22} 、 T_{21} 与 T_{22} 均相互独立。根据 2.2 节的求解原步骤，可建立对应的状态转移图与稳态方程。

将 $\sum_{k=1}^{\infty} Q_{jk} = 1, j=1, 2$ 依次代入，可以解得，

$$Q_{j0} = \left[\sum_{m=0}^n \frac{1}{m!} (\lambda \prod_{j=1}^J f_j p_j / \mu_{2j})^m + \frac{1}{l_j!} (\lambda \prod_{j=1}^J f_j p_j / \mu_{2j})^{l_j} \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(\lambda \prod_{j=1}^J f_j p_j / \mu_{2j})^s}{\prod_{m=1}^s (l_j + m\lambda \prod_{j=1}^J f_j p_j / v_{2j})} \Gamma^{-1} \right]^{-1},$$

$$Q_{jk} = \begin{cases} \frac{(\lambda \prod_{j=1}^J f_j p_j / \mu_{2j})^k}{k!} Q_{j0}, & 1 \leq k \leq l_j \\ \frac{(\lambda \prod_{j=1}^J f_j p_j / \mu_{2j})^k}{l_j! \prod_{m=1}^{k-l_j} (l_j + m\lambda \prod_{j=1}^J f_j p_j / v_{2j})} Q_{j0}, & k > l_j \end{cases} \quad (3)$$

式中 $j=1, 2$ 。

至此可得高级情报处理系统内各处理单元的各项指标，如表 2 所示。

表 2 高级情报处理排队系统性能指标

排队系统性能指标	指标计算值	
	一级情报处理单元	二级情报处理单元
平均数据量	$L_{21} = \sum_{k=1}^{\infty} kQ_{1k}$	$L_{22} = \sum_{k=1}^{\infty} kQ_{2k}$
平均等待时间	$W_{21} = L_{21} / \lambda f_1 p_1$	$W_{22} = L_{22} / \lambda f_1 f_2 p_1 p_2$
平均处理时间	$T_{21} = 1 / \mu_{21}$	$T_{22} = 1 / \mu_{22}$
系统服务概率	$f_{21} = 1 - \frac{v_{21}}{\mu_{21}} \sum_{k=l_1+1}^{\infty} (k-l_1)Q_{1k}$	$f_{22} = 1 - \frac{v_{22}}{\mu_{22}} \sum_{k=l_2+1}^{\infty} (k-l_2)Q_{2k}$
系统负载系数	$\eta_{21} = \frac{1}{l_1} (\sum_{k=1}^n kQ_{1k} + \sum_{k=l_1+1}^{\infty} l_1 Q_{1k-l_1})$	$\eta_{22} = \frac{1}{l_2} (\sum_{k=1}^n kQ_{2k} + \sum_{k=l_2+1}^{\infty} l_2 Q_{2k-l_2})$

2.4 系统效能聚合模型

将标准情报处理系统与高级情报处理系统效能首先进行指标层面的聚合，依次可得系统效能评估的情报价值度 σ 、响应时效性 τ 、系统服务率 f 以及系统负载率 η 指标。

1) 情报价值度 σ 。

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_1 + p_1 \sigma_2 + p_1 p_2 \sigma_3) \quad (4)$$

式中 σ 为情报价值度，其计算值越大，表明系统生产的情报总体价值越高。

2) 响应时效性 τ 。

系统对侦察数据的平均等待时间

$$W = \frac{1}{2} [W_1 + p_1 (W_1 + W_{21}) + p_1 p_2 (W_1 + W_{21} + W_{22})] \quad (5)$$

系统对侦察数据的平均处理时间

$$T = \frac{1}{2} [T_1 + p_1 (T_1 + T_{21}) + p_1 p_2 (T_1 + T_{21} + T_{22})] \quad (6)$$

综上所述，可得系统的响应时效性

$$\tau = 1 - \frac{W + T}{t} \quad (7)$$

式中 τ 为响应时效性，其计算值越大，表明系统对于数据的处理时间越短，则时效性越好。

3) 系统服务率 f 。

$$f = \frac{1}{2} (f_1 + p_1 f_1 f_{21} + p_1 p_2 f_1 f_{21} f_{22}) \quad (8)$$

式中 f 为系统服务率，其计算值越大，表明系统对于数据整体的处理比例越大。

4) 系统负载率 η 。

$$\eta = \frac{(n\eta_1 + l_1 \eta_{21} + l_2 \eta_{22})}{n + l_1 + l_2} \quad (9)$$

式中 η 为系统负载率，其计算值越大，表明系统的资源利用率越高。

可得，系统总体效能为

$$E = \frac{1}{3} (\tau \sigma + f + \eta) \varepsilon \omega \quad (10)$$

式中： ε 为系统数据处理精度； ω 为系统可靠性，两者取值均在(0,1]范围内。

3 案例仿真与结论分析

已知某 AECR 情报处理系统包括 5 个标准情报处理单元、4 个一级情报处理单元和 1 个二级情报处理单元，依次按照标准情报处理单元、一级情报处理单元和二级情报处理单元的顺序连接，执行侦察数据的处理任务。地面接收站所推送的侦察数据到达情报处理系统服从参数为 $\lambda=5$ G/h 的泊松过程，单个标准情报处理单元服务率 $\mu_1=2$ G/h，单个一级情报处理单元服务率 $\mu_{21}=1$ G/h，单个二级情报处理单元服务率 $\mu_{22}=0.8$ G/h，数据在系统中的平均滞留时间 $t=3$ h。

根据情报处理任务需求，标准情报产品按照 $p_1=0.6$ 的比例进入高级情报处理系统，一级情报产品按照 $p_2=0.3$ 的比例进入二级情报处理单元，标准情报产品、一级情报产品和二级情报产品对应的情报价值度分别为 $\sigma_1=0.6$ ， $\sigma_2=0.8$ ， $\sigma_3=0.95$ 。根据专家预先评估，该系统数据处理精度的评估值 $\varepsilon=0.9$ ，系统可靠性 $\omega=0.85$ 。

根据建立的模型，依次对标准情报处理系统与高级情报处理系统的一、二级情报产品单元的相关性能参数进行求解，如表 3 所示。

表 3 排队系统性能指标求解

排队系统性能指标	指标计算值		
	标准情报处理单元	一级情报处理单元	二级情报处理单元
平均数据量 L	0.915 1	0.942 7	0.682 0
平均等待时间 W	0.183 0	0.314 3	0.762 6
平均服务时间 T	0.500 0	1.000 0	1.250 0
系统服务概率 f	0.999 7	0.993 9	0.768 2
系统负载系数 η	0.613 8	0.666 8	0.851 5

将表 3 中各项指标能力值代入指标聚合模型，对系统效能进行求解。

$$E = \frac{1}{3}(\tau\sigma + f + \eta)\varepsilon\omega = \frac{1}{3}(0.5661 \times 0.6255 + 0.8667 + 0.6588) \times 0.90 \times 0.85 = 0.4794.$$

至此，求解得该条件下 AECR 情报处理系统的效能为 0.479 4。

表 4 处理单元不同组合模式时系统效能

处理单元组合模式	标准处理单元数 n	一级处理单元数 l_1	二级处理单元数 l_2	情报价值度 σ	响应时效性 τ	系统服务率 f	系统负载率 η	系统效能 E
1	7	2	1	0.625 5	0.567 4	0.859 5	0.683 4	0.484
2	6	3	1	0.625 5	0.566 4	0.864 4	0.681 8	0.485
3	6	2	2	0.625 5	0.567 7	0.874 7	0.709 2	0.494
4	5	4	1	0.625 5	0.566 1	0.866 7	0.658 8	0.479
5	5	3	2	0.625 5	0.566 9	0.881 9	0.713 2	0.497
6	4	4	2	0.625 5	0.566 7	0.882 3	0.706 1	0.495
7	4	3	3	0.625 5	0.567 1	0.883 3	0.725 4	0.501

如图 4 所示，对于该情报处理任务，组合模式系统效能的高低排序为：模式 7 > 模式 5 > 模式 6 > 模式 3 > 模式 2 > 模式 1 > 模式 4。

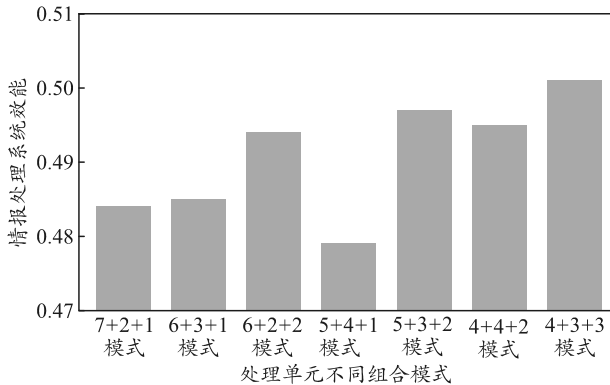


图 4 处理单元不同组合模式时系统效能

表 5 对不同情报处理任务时的系统效能

情报处理任务需求	一级处理比例 $p_1/\%$	二级处理比例 $p_2/\%$	情报价值度 σ	响应时效性 τ	系统服务率 f	系统负载率 η	系统效能 E
1	60	30	0.625 5	0.567 1	0.883 3	0.725 4	0.501
2	60	40	0.654 0	0.531 3	0.911 2	0.738 4	0.509
3	60	50	0.682 5	0.496 6	0.937 9	0.739 9	0.514
4	60	60	0.825 0	0.471 7	0.969 7	0.740 8	0.535
5	40	30	0.602 5	0.661 0	0.757 4	0.700 9	0.473
6	50	30	0.571 3	0.613 4	0.820 6	0.717 7	0.482
7	70	30	0.679 8	0.521 7	0.945 6	0.727 7	0.517

如图 5 所示，该组合模式执行处理任务时系统效能的高低排序为：任务 4 > 任务 7 > 任务 3 > 任务

为更直观评价系统效能的优劣，进一步对模型分析讨论。在系统固有性能、系统处理单元总数以及系统各项性能参数保持不变的提前下，该 AECR 情报处理系统内标准情报处理单元接入数 $n \leq 7$ 、一级情报处理单元接入数 $n \leq 4$ 、二级情报处理单元接入数 $n \leq 3$ ，且因系统容量限制，处理单元的总数不超过 10 个。针对不同情报处理任务对系统内处理单元的数量进行增减调整，讨论系统效能变化情况。

1) 已知在此次情报处理任务中，要求标准情报产品按 $p_1=0.6$ 的比例进入高级情报处理系统，一级情报产品按 $p_2=0.3$ 的比例进入二级情报处理系统，探讨系统内单元组合模式对系统效能的影响，如表 4 所示。

结论 1：对于同一项情报处理任务，不同的情报处理单元组合模式所产生的效能不同。在该条件下，采用模式 7 进行处理单元组合，能使系统效能达到最高，当采用模式 4 进行处理单元组合时，系统效能最低。进一步分析这 7 种模式发现：一、二级情报处理单元数取较大值时，系统效能相对较大；当二级情报处理单元数较小时，系统效能普遍降低。

2) 已知系统内各情报处理单元数量固定，标准情报处理单元数 $n=4$ 、一级情报处理单元数为 $l_1=3$ 、二级情报处理单元数 $l_2=3$ ，探讨该单元组合模式下系统执行不同情报处理任务时的系统效能，如表 5 所示。

2 > 任务 1 > 任务 6 > 任务 5。

结论 2：同一种情报处理单元组合模式在执行

不同情报处理任务时的系统效能不同,一定条件下系统效能同情报处理任务量呈正相关。该模式能够最大限度地满足任务 5 的情报处理需求,使系统效能达到最大。进一步分析发现:在 1、2、3、4 组中,随着二级情报处理比例 p_2 的增高,系统效能呈上升趋势;在 1、5、6、7 组中,也能得到相似的结论,随着一级情报处理比例 p_1 的增高,系统效能呈上升趋势,说明该模式对于任务的满足度随着情报分析比例的增加而升高。

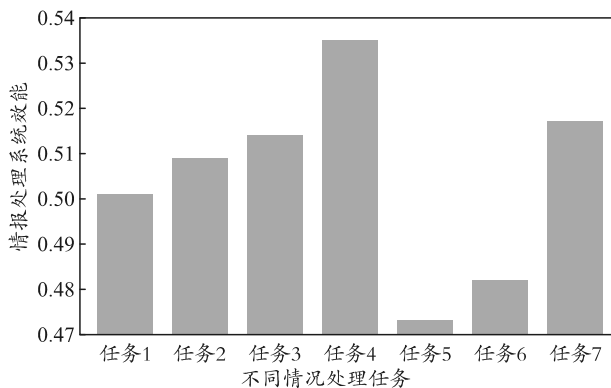


图 5 对不同情报处理任务时的系统效能

4 结束语

笔者围绕 AECR 情报处理系统效能评估进行分析研究,建立了系统效能评估指标体系,根据有限等待排队理论建立了标准情报处理系统与高级情报处理系统模型以及系统效能聚合模型,从整体上构建了基于排队网络的系统效能评估模型。通过案例仿真分析了系统内处理单元组合模式与情报处理任务对系统效能的影响,得到如下结论:对于同一项

情报处理任务,不同的情报处理单元组合模式所产生的效能不同;同一种情报处理单元组合模式在执行不同情报处理任务时的系统效能不同,从而验证了模型的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 陈杨,王立平. 灰关联分析在情报处理系统效能评估中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(4): 153-155.
- [2] 周含冰,唐忠,刘东玉. 基于理想解的情报处理系统灰关联评估算法[J]. 计算机与数字, 2013, 41(1): 38-39, 68.
- [3] 郭清娥,苏兵,张桂琴. 不完全权重信息下情报处理系统评估方法研究[J]. 现代情报, 2016, 36(2): 43-45.
- [4] 林岳峥,祝利,程晓雷. 基于群组层次分析法的情报保障系统效能评估[J]. 兵工自动化, 2012, 31(8): 57-61.
- [5] 何怀文,傅瑜,杨毅红,等. 基于 M/M/n/n+r 排队模型的云计算中心服务性能分析[J]. 计算机应用, 2014, 34(7): 1843-1847.
- [6] 宋文琪,李启亮,金芳,等. 基于排队论的门诊化验服务效率评估与改进[J]. 中国医院管理, 2014, 34(1): 51-53.
- [7] 李朴,欧文斌,叶苓,等. 基于排队论模型的口腔科门诊医师配置量化分析[J]. 医学研究生学报, 2014(8): 863-865.
- [8] 蔡文婧,葛连升. 基于排队论的银行业务窗口设置优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(3): 23-29.
- [9] 程元军,罗利. 基于排队论和整数规划的银行柜员弹性排班模型[J]. 管理学报, 2010, 7(10): 1558-1565.
- [10] 王建江,邱涤珊,彭黎. 基于排队网络的空间信息数据处理系统效能评估[J]. 计算机应用, 2012, 32(3): 870-873.