

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.011

# 基于 Petri 网的防空兵群指挥信息结构建模分析

杨志华, 刘顺利, 刘己斌

(防空兵学院研究生管理大队, 郑州 450052)

**摘要:** 针对防空兵群决策组织结构的合理性问题, 运用 Petri 网方法对防空兵群指挥信息结构进行建模分析。从指挥信息流程的角度出发, 结合基本决策单元的指挥信息结构模型和防空兵群指挥组织结构, 对其时延性、信息流路径和最大流通过率进行分析。结果表明: 该方法能得到按级指挥体制下的防空兵群指挥信息结构的 Petri 网模型, 为防空兵群决策组织结构的设计和完美提供参考。

**关键词:** 决策组织结构; 信息结构模型; 防空兵群

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Modeling Analysis on Information Structure of Air Defense Group Based on Petri Net

Yang Zhihua, Liu Shunli, Liu Jibin

(Administrant Brigade of Postgraduate, Air Defense Forces Command Academy, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Aiming at the rationality of air defense group decision structure, use Petri net method to carry out modeling analysis for air defense group command information structure. Based on command information process, combine command information structure model of basic decision unit and air defense group command structure, analyze time delay, information flow path and maximal flow ration. The result shows that the method can acquire air defense group Petri net model under level command system, and provide reference for air defense group decision structure and completion.

**Key words:** decision structure; information structure model; air defense group

### 0 引言

防空兵指挥信息系统是一个具有分布、并发、异步等特性的复杂系统。为了分析、评价、开发防空兵指挥信息系统, 必须首先用某种恰当的数学模型对其功能、结构、动态行为、各部分之间及其与环境之间的交互作用进行描述, 而 Petri 网方法被认为是描述具有分布、并发、异步特征最有效的建模方法。因此, 笔者采用 Petri 网方法对防空兵群指挥信息结构进行建模分析, 进而为防空兵指挥信息系统的分析和改进提供理论支撑。

### 1 基于 Petri 网的指挥信息结构建模

#### 1.1 Petri 网的基本模型

Petri 网系统可用六元组  $\Sigma = (P, T, F, K, W, M_0)$  表示, 其中  $N = (P, T, F)$  是  $\Sigma$  的基网, 它由库所 ( $P$ ) 和变迁 ( $T$ ) 组成,  $F = P \times T \cup T \times P$  为连接库所和变迁的有向弧集合 (不能为变迁之间或库所之间), Petri 网用库所、变迁和弧的连接表示系统的静态功能和结构, 通过变迁“点火”和令牌的移动描述系统的

动态行为;  $K, W, M_0$  分别是  $N$  的容量函数、权函数和标识。

#### 1.2 基本决策单元的指挥信息结构模型

依据指挥信息流程, 在决策单元的结构模型中对信息的处理过程分为 4 个处理级: 态势评估级  $SA$  (situation assess)、信息融合级  $IF$  (information fuse)、命令解释级  $CI$  (command interpre)、响应选择级  $RS$  (response select)。基本决策单元  $DM$  (decision module) 的指挥信息结构可以表示为一个 4 级 Petri 网模型, 用 Petri 网将其表示如图 1。

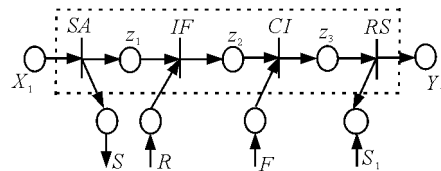


图 1 基本决策单元的 Petri 网模型

其中: 决策元通过  $SA$  级接收探测器、观察哨和上级通报空情等外部信息  $X_1$ , 经过  $SA$  级处理后得到情况评估  $Z_1$ , 也可以输出信息  $S$  与其他决策元进行

收稿日期: 2011-11-01; 修回日期: 2011-12-19

作者简介: 杨志华(1986—), 男, 河南人, 硕士研究生, 从事防空兵作战指挥自动化研究。

信息共享; 情况评估结果  $Z_1$  与其他决策组织送来的信息  $R$  经 IF 级处理融合在一起, 形成一个综合的态势评价  $Z_2$ ; 在 CI 级接收其他组织的命令  $F$  并对其进行解释, 而后再将  $Z_2$  和  $F$  融合产生  $Z_3$  到 RS 处理级产生响应  $S_1$ 、系统响应  $Y_2$ 。

## 2 基于 Petri 网的防空兵群指挥信息结构模型

### 2.1 简化的防空兵群指挥信息流程

防空兵群通常由 2 个高炮营和 1~2 个导弹营组成, 各营为并列关系, 接受防空兵群指挥部统一指挥<sup>[1]</sup>。根据防空兵群指挥组织结构: 防空兵群-防空兵营-高炮连(发射站), 防空兵群指挥信息流程中的决策元可分为: 群观察员、群作战指挥首长、群作战参谋、营观察员、营指挥员、连(站)指挥员及号手 7 级决策元。笔者假设防空兵群实施的是集中指挥下的按级指挥。群观察员(包括警戒雷达和上级空情)为防空兵群提供情报保障; 群作战指挥首长是作战行动的指挥者和负责人, 对全群负全面管理、领导和指挥责任, 在群指挥层中处于统帅地位; 群作战参谋主要负责计划、组织、指挥和控制所属部队的作战行动和其它活动, 为群首长实施作战指挥提供保障; 营观察员(包括警戒雷达、火控雷达和上级空情)负责搜集目标信息, 确定目标参数并报告营指挥员; 营指挥员在群首长的直接领导下, 接受群指挥所的命令, 并按其意图对目标实施射击, 在完成上级任务的情况下有一定的自主权, 对营观察员所发现的目标, 可自行组织对其射击; 连(站)是营指挥员的直接下属, 直接实施作战计划。简化的群指挥组织结构及信息处理分发流程如图 2。

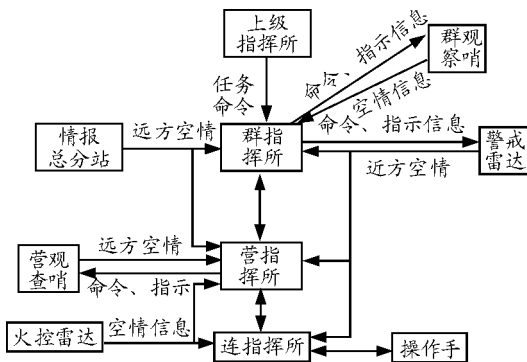


图 2 简化的群指挥组织结构及信息处理分发流程

### 2.2 防空兵群指挥信息结构的 Petri 网模型

结合基本决策单元的指挥信息结构 Petri 网模型和防空兵群指挥组织结构, 得到按级指挥体制下

的防空兵群指挥信息结构的 Petri 网模型<sup>[2]</sup>, 如图 3。

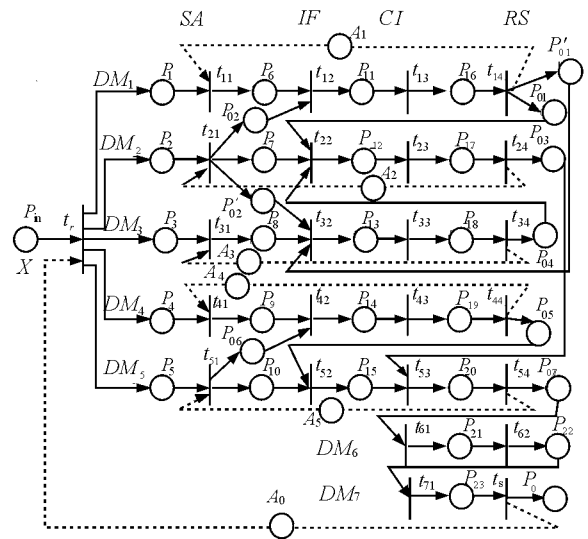


图 3 按级指挥的防空兵群指挥信息结构 Petri 网络层

其中:  $DM_1$  为群观察员;  $DM_2$  为群指挥员;  $DM_3$  为群作战参谋人员;  $DM_4$  为营观察员;  $DM_5$  为营指挥员;  $DM_6$  为连指挥人员;  $DM_7$  为操作号手(炮手)。指挥信息结构的输入变迁用  $t_r$  表示, 输出变迁用  $t_s$  表示, 其余变迁用  $t_{ki}$  表示, 其中  $i$  表示指挥信息的处理级;  $k$  表示决策元的编号。X 为由上级分发的远方空情、警戒雷达获得的空情信息以及群观察哨观察到的空情所组成的战场情况。A<sub>0</sub>、A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub>、A<sub>5</sub> 为位置资源, 它们体现了决策者本身对信息处理能力的限制, 它们与其他库所和变迁构成一个有向回路<sup>[3]</sup>。

在图 3 中, 可以清楚地看出防空兵群指挥信息结构中不同决策元之间的信息交互和上下级关系。群观察员通过侦察战场获得情报经过态势评估级 ( $t_{11}$ ) 后, 接受群指挥员的初步评估信息 ( $t_{12}$  通过  $P_{04}$  接受  $t_{21}$  输入) 进行信息融合, 而后进行命令解释、决策响应, 最后将最终结果分别通过  $P_{01}$  和  $P'_{01}$  送至群指挥首长信息融合级  $t_{22}$  和群作战参谋信息融合级  $t_{23}$  进行信息分享。群指挥员一方面在态势评估级将评估信息发送到群观察员 ( $t_{21}$  通过  $P_{02}$  向  $t_{12}$  输出) 和群作战参谋 ( $t_{21}$  通过  $P'_{02}$  向  $t_{32}$  输出) 的信息融合级进行信息分享; 另一方面分别接收来自群观察员的侦察结果信息 ( $t_{22}$  通过  $P_{01}$  接收  $t_{12}$  输入) 和来自群作战参谋的辅助决策信息 ( $t_{22}$  通过  $P_{01}$  接收  $t_{34}$  输入) 进行信息融合, 将结果发送到营指挥员的信息融合级 ( $t_{24}$  通过  $P_{01}$  向  $t_{53}$  输入) 进行信息融合。群作战参谋在信息融合级分别接收群指挥员的初步评估信息

( $t_{32}$  通过  $P'_{02}$  接收  $t_{21}$  输入)和来自群观察员的侦察结果信息( $t_{32}$  通过  $P'_{01}$  接收  $t_{14}$  输入)进行信息融合, 将结果发送到群指挥员的信息融合级( $t_{34}$  通过  $P_{04}$  向  $t_{22}$  输出)进行信息融合<sup>[4]</sup>。营级决策元和营观察员级间的信息交互与群级决策元和群观察员的信息交互类似, 但营指挥员将最终结果传递给连指挥员( $t_{54}$  通过  $P_{07}$  向  $t_{61}$  输出), 各号手接受连指挥员<sup>[5]</sup>的命令, 直接实施作战。

### 3 基于 Petri 网的防空兵群指挥信息结构分析

#### 3.1 防空兵群指挥信息的时延性分析

信息化条件下的防空战争, 空袭兵器的速度越来越快, 防空兵指挥信息系统的实时性和时延性, 将在很大程度上影响防空兵对空袭兵器进行抗击的有效性<sup>[6]</sup>。而防空兵群指挥信息结构的决策时间在很大程度上是由防空兵指挥信息系统的时延性来决定的。随着防空兵指挥信息系统不断列装部队, 对防空兵指挥系统的实时性和时延性的分析有着很现实的意义。下面以基于 Petri 网的防空兵群指挥信息结构(图 3)为例, 简述时延性分析的方法。

假设各个变迁的时间用常数  $t_{11}, \dots, t_{71}$  表示, 则群、营和连 3 级决策元的决策时间分别为:

$$T_{\text{群}} = \max\{t_{11}, t_{21}, t_{31}\} + \max\{t_{12} + t_{13} + t_{14}, t_{32} + t_{33} + t_{34}\} + t_{22} + t_{23} + t_{24},$$

$$T_{\text{营}} = \max\{t_{41}, t_{51}\} + t_{42} + t_{43} + t_{44} + t_{52} + t_{53} + t_{54},$$

$$T_{\text{连}} = t_{61} + t_{62} + t_{71},$$

则防空兵群的决策时间是:

$$T_{\text{总}} = t_r + T_{\text{群}} + T_{\text{营}} + T_{\text{连}} + t_s,$$

假设各变迁的时间如表 1。

表 1 各变迁发生所需要的时间 s

变迁时间	$t_r$	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{21}$	$t_{22}$	$t_{23}$	$t_{24}$	$t_{31}$	$t_{32}$	$t_{33}$	$t_{34}$
时间	1	5	15	5	10	10	20	5	15	5	15	5	15
变迁时间	$t_{41}$	$t_{42}$	$t_{43}$	$t_{44}$	$t_{51}$	$t_{52}$	$t_{53}$	$t_{54}$	$t_{61}$	$t_{62}$	$t_{71}$	$t_s$	
时间	5	10	5	10	10	15	20	10	10	25	30	20	

将表 1 中数据代入上述公式得:

$$T_{\text{群}} = \max\{5, 10, 5\} + \max\{15 + 5 + 10, 15 + 5 + 15\} + 20 + 5 + 15 = 85 \text{ (s)}$$

$$T_{\text{营}} = \max\{5, 10\} + 10 + 5 + 10 + 15 + 20 + 10 = 80 \text{ (s)}$$

$$T_{\text{连}} = 10 + 25 + 30 = 65 \text{ (s)}, \quad T_{\text{总}} = 1 + 85 + 80 + 65 + 20 = 251 \text{ (s)}$$

假设由空情信息获得敌空袭兵器的飞行速度为  $V_{\text{敌}}=300 \text{ m/s}$ , 那么在防空兵群的决策时间里, 敌空袭兵器飞过的距离为  $75.3 \text{ km}$ 。通过分析空袭兵器的飞行距离, 可以判断出防空兵群决策的时效性差, 需要对其进行改进, 一方面可以使决策者之间尽量同步, 另一方面由人机交互来完成决策, 而不仅仅由人来完成决策。

#### 3.2 防空兵群指挥信息结构的信息流路径分析

依据防空兵群指挥信息结构 Petri 网模型简述其分析方法, 下面只对群决策元这个模块(包括群观察员、群作战指挥首长和群作战参谋)进行分析, 如图 4。

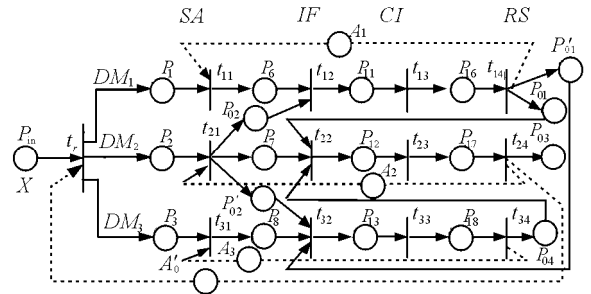


图 4 群决策元 Petri 网络层

1) 确定其源节点和汇接点, 其源节点为  $P_{in}$ , 其汇节点为  $P_{03}$ ;

2) 该 Petri 网的关联矩阵  $C$ 。其关联矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3) 确定初始矩阵  $E_0 = [I|C]$ , 并对其进行计算,

得到完全信息流路径:  $[X_i] = \{T_i, P_i, \dots, T_j, P_j\} (i, j, k = 1, 2, \dots)$ 。

群决策元决策组织的完全信息流路径为:

$$[X_1] = [P_{in}, t_r, P_1, t_{11}, P_6, t_{12}, P_{11}, t_{13}, P_{16}, t_{14}, P_{01}, t_{22}, P_{12}, t_{23}, P_{17}, t_{24}, P_{03}]$$

$$[X_2] = [P_{in}, t_r, P_1, t_{11}, P_6, t_{12}, P_{11}, t_{13}, P_{16}, t_{14}, P_{01}, t_{22}, P_{12}, t_{23}, P_{18}, t_{34}, P_{04}, P_{18}, t_{22}, P_{12}, t_{23}, P_{17}, t_{24}, P_{03}]$$

$$[X_3] = [P_{in}, t_r, P_2, t_{21}, P_7, t_{22}, P_{12}, t_{23}, P_{17}, t_{24}, P_{03}]$$

$$[X_4] = [P_{in}, t_r, P_2, t_{21}, P_7, t_{22}, P_{11}, t_{13}, P_{16}, t_{14}, P_{01}, t_{22}, P_{12}, t_{23}, P_{17}, t_{24}, P_{03}]$$

$$[X_5] = [P_{in}, t_r, P_2, t_{21}, P_7, t_{22}, P_{11}, t_{13}, P_{16}, t_{14}, P_{01}, t_{32}, P_{13}, t_{33}, P_{18}, t_{34}, P_{04}, P_{18}, t_{22}, P_{12}, t_{23}, P_{17}, t_{24}, P_{03}]$$

$$[X_6] = [P_{in}, t_r, P_2, t_{21}, P_7, t_{22}, P_{13}, t_{32}, P_{13}, t_{33}, P_{18}, t_{34}, P_{04}, t_{22}, P_{12}, t_{23}, P_{17}, t_{24}, P_{03}]$$

$$[X_7] = [P_{in}, t_r, P_3, t_{31}, P_8, t_{32}, P_{13}, t_{33}, P_{18}, t_{34}, P_{04}, t_{22}, P_{12}, t_{23}, P_{17}, t_{24}, P_{03}]$$

所计算出来的完全信息流路径，就是从获取情报开始，到形成战斗方案，再下达到作战分队的有群决策元模块信息的完整传输过程，其它模块可运用同样方法对其分析。通过分析这些完全信息路径，可以迅速得到影响系统决策时间的环节，从而对防空兵群决策组织结构需要改进的地方进行改进。

### 3.3 防空兵群指挥信息结构的最大流通率分析

最大流通率是指指挥信息结构处理外部输入的最大流率，反映决策组织系统的决策处理力<sup>[7]</sup>。这里只讨论确定型 Petri 网的防空兵群决策模型，具体步骤为：

1) 求 Petri 网的最小  $S$  不变支撑。继续对群决策元进行分析，确定其关联矩阵为  $C$ ，通过  $X^T \cdot C = 0$  计算可以得到  $S$  不变量，这样得到所有有向回路  $\rho_i (i=1,2,\dots)$ ；由图 4 和关联矩阵可以得到所有有向回路：

$$a(\rho_1) = 35 / M_1^0, a(\rho_2) = 50 / M_2^0, a(\rho_3) = 40 / M_3^0, a(\rho_4) = 76 / M_0^0, a(\rho_5) = 11 / M_0^0$$

$$a(\rho_6) = 51 / M_0^0, a(\rho_7) = 81 / M_0^0, a(\rho_8) = 116 / M_0^0, a(\rho_9) = 86 / M_0^0, a(\rho_{10}) = 81 / M_0^0$$

3) 求最大平均回路时间  $a$ ， $a = \max(a(\rho_1), a(\rho_2), \dots, a(\rho_n), t_{\max})$ ，则防空兵群指挥信息结构 Petri 网模型的最大流通率为： $\varphi = 1/a$ 。在获得系统资源数的条件下，利用上述公式易得 Petri 网模型决策元的最大流通率，进而对防空兵指挥结构做出评价。

### 4 结束语

防空兵群决策组织结构中各个决策元的处理过程均与时间因素有关，而且处理过程中的时延以及一些与时间有关的性能对防空兵群整个决策过程是至关重要的，因为这些性能越好，决策指挥的效率就越高，群响应时间也就越短，那么在战场上取得胜利的可能性就越大。笔者正是基于此思想利用 Petri 网模型对防空兵群的决策组织结构进行建模，

$$\rho_1 = (t_{11} P_6 t_{12} P_{11} t_{13} P_{16} t_{14} A_1)$$

$$\rho_2 = (t_{21} P_7 t_{22} P_{12} t_{23} P_{17} t_{24} A_2)$$

$$\rho_3 = (t_{31} P_8 t_{32} P_{13} t_{33} P_{18} t_{34} A_1)$$

$$\rho_4 = (t_r P_{11} P_6 t_{12} P_{11} t_{13} P_{16} t_{14} P_{01} t_{22} P_{12} t_{23} P_{17} t_{24} A'_0)$$

$$\rho_5 = (t_r P_{11} P_6 t_{12} P_{11} t_{13} P_{16} t_{14} P'_{01} t_{32} P_{13} t_{33} P_{18} t_{34} P_{04} P_{18} t_{22} P_{12} t_{23} P_{17} t_{24} A'_0)$$

$$\rho_6 = (t_r P_2 t_{21} P_7 t_{22} P_{12} t_{23} P_{17} t_{24} A'_0)$$

$$\rho_7 = (t_r P_2 t_{21} P_{02} t_{12} P_{11} t_{13} P_{16} t_{14} P_{01} t_{22} P_{12} t_{23} P_{17} t_{24} A'_0)$$

$$\rho_8 = (t_r P_2 t_{21} P_{02} t_{12} P_{11} t_{13} P_{16} t_{14} P'_{01} t_{32} P_{13} t_{33} P_{18} t_{34} P_{04} P_{18} t_{22} P_{12} t_{23} P_{17} t_{24} A'_0)$$

$$\rho_9 = (t_r P_2 t_{21} P'_{02} t_{32} P_{13} t_{33} P_{18} t_{34} P_{04} t_{22} P_{12} t_{23} P_{17} t_{24} A'_0)$$

$$\rho_{10} = (t_r P_3 t_{31} P_8 t_{32} P_{13} t_{33} P_{18} t_{34} P_{04} t_{22} P_{12} t_{23} P_{17} t_{24} A'_0)$$

2) 计算平均回路处理时间  $a(\rho_i)$ ；

$$a(\rho_i) = \frac{\sum t_j}{\sum M_j^0}$$

其中： $t_j$  为变迁的处理时间； $M_j^0$  为回路的令牌总量，它由资源位置  $A_k (k=0,1,2,\dots)$  中的资源令牌来限制，设群决策元的资源位置为  $A'_0, A_1, A_2$  和  $A_3$  的资源数分别为  $M_1^0, M_2^0, M_3^0$ ， $A'_0$  的资源数为  $M_0^0$ ，则各路径平均处理时间为：

通过对其时延性、信息流路径以及最大流通率进行分析和探讨，为防空兵群决策组织结构的设计和 optimization 提供了依据。

### 参考文献：

- [1] 胥少卿. 基于 Petri 网的防空群决策信息传输能力分析[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005(1): 59-62.
- [2] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [3] 李曙东, 王运峰. 指挥自动化系统建模与仿真技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] 王景光, 甘仞初. 基于 Petri 网的信息系统建模[J]. 中国管理科学, 2000, 8(2).
- [5] 任春雷, 蒋里强, 王桂花, 等. 防空兵指挥员决策能力[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(3): 60.
- [6] 路建伟. 信息化条件下地面防空信息链建设研究[R]. GF 报告, 2007.
- [7] 程启月. 作战指挥决策运筹分析[M]. 北京: 军事科学出版社, 2004.