

SEA 方法及其在 C^3I 系统效能分析中的应用(II) ——交战模型

吴晓锋 周智超

(海军广州舰艇学院, 广州 广东 510431)

摘要 本文采用 SEA 方法建立了 C^3I 系统在一种典型交战环境下的系统效能模型及其分析程序, 举例说明了系统效能计算结果的战术涵义。由于 C^3I 系统所处的交战环境是千变万化的, 因此采用 SEA 方法建立一般交战情形下通用的 C^3I 系统效能模型仍是十分困难的工作。然而, 本文的分析过程可起到一定的示范作用。

关键词 系统分析 系统效能 SEA 方法 C^3I 系统评估 兰彻斯特方程

SEA Method and Its Application in Effectiveness Analysis of C^3I System (II) —— Combat Model

Wu Xiaofeng Zhou Zhichao

(Guangzhou Naval Academy, Guangzhou 510431)

Abstract In this paper, SEA method is applied to set up effectiveness model and its analysis steps of C^3I system under the condition of a typical combat. The tactical content of system effectiveness results is described by an example. Because combat condition which C^3I system stands in is changeable, it's very difficult to set up the general effectiveness model of C^3I system. Nevertheless, the analytical process in this paper will play the role of demonstration.

Keywords system analysis; system effectiveness; SEA method; C^3I system evaluation; Lanchester equation

1 问题描述

考虑红方和蓝方在各自 C^3I 系统作用下的交战问题。红方拥有一局域分布的 C^3I 系统, 它由前方指挥所(FC), 后方指挥中心(BC), 前方观察站(FD)以及通信网(CN)等组成。其中 FD 与 FC、FD 与 BC 之间的通信手段有 I 种, FC 与 BC 之间的通信手段有 J 种, 在使用中的优先排序分别为 i_1, i_2, \dots, i_I , 和 j_1, j_2, \dots, j_J 。系统内部的指挥关系如下: BC 是红方的战场指挥者, 它作出红方全局性的作战决策和指挥, 并向 FC 发布命令; FC 接受 BC 的命令, 并具体指挥除电子战部队之外的红方兵力的战斗行动, 同时, 及时向 BC 通报战况; FD 由 FC 和 BC 指

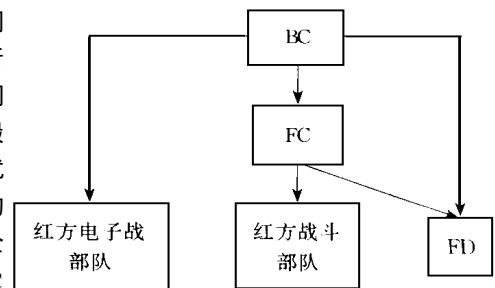


图1 红方指挥关系

挥,它同时向 FC 和 BC 传递战场情报;红方电子战部队由 BC 直接指挥。红方指挥关系如图 1 所示,其中,箭头指向表示“指挥”。

假想红方的假想敌——蓝方为达到某种战争目的,对红方的某些重要军事目标(如交通枢纽、能源基地、指挥中心等)发动进攻。红方部队受命对敌进行打击和拦截,对红方 C³I 系统提出的任务要求(即使命)是:有效地指挥红方兵力消灭来袭敌人,以实现红方的作战意图,具体包括:

- 1) 为防止蓝军对红方军事目标的攻击,必须设法把蓝军阻挡在其可发射武器(如导弹)摧毁红方军事目标范围之外(简称阻挡目标);
- 2) 必须指挥红方应战兵力在与来袭蓝军交战过程中取胜(简称交战取胜)。

本文采用 SEA 方法建立在上述对抗条件下,红方 C³I 系统效能分析的模型,其中借鉴了文献[1, 2]的部分工作,并进一步考虑不同兵力失败边界情形下的 MOP 选择及其数学证明,给出了生成 C³I 系统信息结构的规范方法,以及交战结束时间的解析结果。本文最后给出采用 SEA 方法分析 C³I 系统效能的程序框图,并举例说明从 {MOP} 空间的系统轨迹与使命轨迹上可获得的战术涵义。

2 性能量度(MOP)的确定

考虑度量红方 C³I 系统完成“阻挡目标”与“交战取胜”两个任务的品质的量 MOP。上述“阻挡目标”的实质意义是:从红方 C³I 系统发现目标,一直到指挥红军与蓝军交战结束(红方取胜)的整个期间,不能使蓝军接近红方军事目标 A_0 的距离小于或等于其发射武器的最大距离 R_d 。

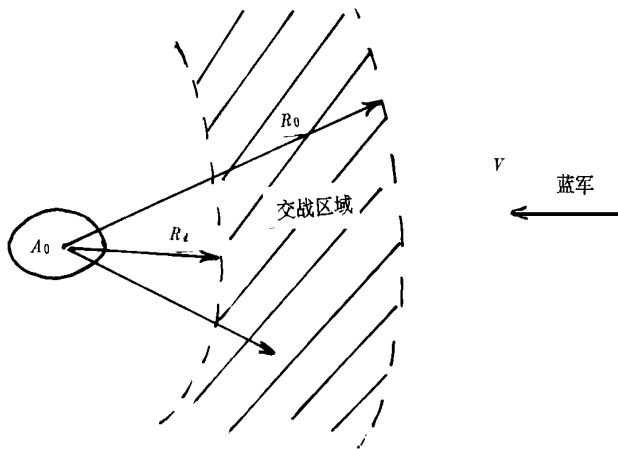


图 2 交战态势

参见图 2,其中 R_0 为红方 C³I 系统以 A_0 为中心的最大探测距离, v 为蓝军向 A_0 逼近的平均速度。假设交战结束时间为 T_f 。则根据“阻挡目标”的意义可知,蓝军被阻挡与否取决于交战结束时,蓝军相对 A_0 的距离 $R_T = R_0 - v \cdot T_f$ 与 R_d 的关系。因此,关于“阻挡目标”的性能量度 MOP₁ 可取为:

$$MOP_1 = \frac{R_T}{R_d} = \frac{R_0 - v \cdot T_f}{R_d} \quad (1)$$

显然,蓝军被阻挡的充要条件为 $MOP_1 > 1$ 。

为了引出关于“交战取胜”的 MOP₂,假设交战双方的初始投入兵力 x_0 (红方)、 y_0 (蓝方),在均无兵力增援条件下,双方的兵力 (x, y) 随战斗进程而逐渐减少。现今红、蓝双方的兵力失败边界为 (x_E, y_E) , 其中 $x_E > 0, y_E > 0$ 。

“交战取胜”的实质意义是:在己方兵力大于失败边界的条件下,敌方兵力达到其失败边界。这个时刻经历的交战时间即为交战结束时间 T_f 。因此,红军取胜可定义为:

$$x(T_f) > x_E, \quad y(T_f) = y_E \quad (2)$$

蓝军取胜定义为:

$$x(T_f) = x_E, y(T_f) > y_E \tag{3}$$

若双方平局, 则有

$$\begin{cases} x(T_f) = x_E \\ y(T_f) = y_E \end{cases} \quad \text{或} \quad T_f \tag{4}$$

交战结束时间可定义为:

$$T_f = \min\{T_{xE}, T_{yE}\} \tag{5}$$

其中

$$T_{xE} = \begin{cases} T_{xe} = \{t: x(t) = x_E\} & \text{方程有解} \\ & \text{方程无解} \end{cases} \tag{6}$$

$$T_{yE} = \begin{cases} T_{ye} = \{t: y(t) = y_E\} & \text{方程有解} \\ & \text{方程无解} \end{cases} \tag{7}$$

现考虑两种交战模式下的MOP₂选择:

1) $x_E = y_E = 0$, 这种模式是交战双方均以“战斗到底”为决心, 在下一节将证明: 当交战双方的战斗进程满足一定规律时,

$$MOP_2 = \frac{x_0(\sqrt{\alpha^2 + 4\rho\beta} - \alpha)}{2\rho y_0} \tag{8}$$

其中, α β ρ 分别表示“红军对己方的误伤率”, “红军对蓝军的毁伤率”和“蓝军对红军的毁伤率”。

2) $x_E > 0, y_E > 0$, 这种模式是交战双方均规定了一个完成预定作战任务的最低兵力界限, 此时, 令

$$\tau_x = x(T_f)/x_E, \quad \tau_y = y(T_f)/y_E \tag{9}$$

显然, $\tau_x \geq 1, \tau_y \geq 1$, 则MOP₂由如下命题确定。

命题 1 假设 $x_E > 0, y_E > 0$, 则红军取胜的充要条件是:

$$MOP_2 = \tau_x/\tau_y > 1 \tag{10}$$

蓝军取胜的充要条件是:

$$MOP_2 = \tau_x/\tau_y < 1 \tag{11}$$

证明 由(9)式可把(2)(3)等价于: 红军取胜时,

$$\tau_x > 1, \tau_y = 1 \tag{12}$$

蓝军取胜时,

$$\tau_x = 1, \tau_y > 1 \tag{13}$$

现证明(10), 先证充分性。已知MOP₂ > 1, 即

$$\tau_x > \tau_y \tag{14}$$

令 $t = T_f$, 因此必有 $\tau_x = 1$ 或 $\tau_y = 1$ 。如果 $\tau_x = 1$, 由(14)可知 $\tau_y < 1$, 这与 τ_y 的定义矛盾, 因此必有 $\tau_y = 1$, 此时 $\tau_x > \tau_y > 1$, 由(12)可知红军取胜。

再证必要性。已知红军取胜, 则由(12)可知MOP₂ = $\tau_x/\tau_y > 1$ 。

同理可证蓝军取胜的条件(11)。 证毕。

3 系统映射

考虑红方C³I系统结构、行为及原始参数与性能量度(MOP₁, MOP₂)的关系映射。这里需要建立C³I系统影响作战过程的模型, 即所谓的C³I系统建模。目前, 在理论界仍未获得足够精确的C³I系统建模方法^[3]。现有的方法都是在某个侧面或经适当简化后近似地反映C³I系统对作战的影响, 其中有: Lanchester方程及其改进^[1, 4]; 概率逻辑模型^[5]; 马尔可夫模型^[6]; 突变论模型^[7]; 系统动力学模型^[8]; 离散事件动态模型(如Petri网方法)^[9, 10]等。在这里, 我们采用文献[1]推荐的一种Lanchester改进模型, 即所谓的Logicon模型, 它的特点是可以较好地反映C³I系统结构、行为及其参数对作战过程的影响, 且这种影响是非线性的。

假设红、蓝双方兵力在各自的 C³I 系统指挥引导下交战射击, 其射击关系是: 多对多格斗, 并且可以火力转移或集中。此外, 考虑红方 C³I 系统在交战过程中可能出现识别“错误”而导致误伤己方的现象。因此, 交战双方的兵力损耗满足如下 Lanchester 方程:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\rho y - \alpha x & x(0) = x_0 \\ \frac{dy}{dt} = -\beta x & y(0) = y_0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, α, β, ρ 的涵义如(8)式所述, 不难求得(15)的解:

$$x(t) = \frac{A}{2k} \{x_0(k + \omega) + 2\rho y_0 + [x_0(k - \omega) - 2\rho y_0]e^{kt}\} \quad (16)$$

$$y(t) = \frac{A}{2k} \{y_0(k - \omega) + 2\beta x_0 + [y_0(k + \omega) - 2\beta x_0]e^{kt}\} \quad (17)$$

$$A = \exp\{- (\alpha + k)t/2\} \quad (18)$$

$$k = \sqrt{2\alpha^2 + 4\rho\beta} \quad (19)$$

令 p_y 和 p_x 为红方 C³I 系统引导其单位兵力与敌交战和与己交战的概率, T_s 为红方 C³I 系统一个运行周期所费的时间(即系统反应时间), 则有

$$\beta = p_y/T_s, \quad \alpha = p_x/T_s \quad (20)$$

根据红方 C³I 系统各节点间的指挥关系(如图 1 所示), 考虑一种简化的 C³I 系统操作过程(即运行周期), 由图 3 描述。由此可进一步获得红方 C³I 系统的信息处理过程(简称系统信息结构), 如图 4, 图 5 所示。显然, 红方兵力与目标(敌或我)交战的概率 p_y, p_x 等于系统信息结构中各交战通道畅通的概率之和, 而每个交战通道畅通的概率等于通道中各信息处理节点的处理概率之积, 因此令

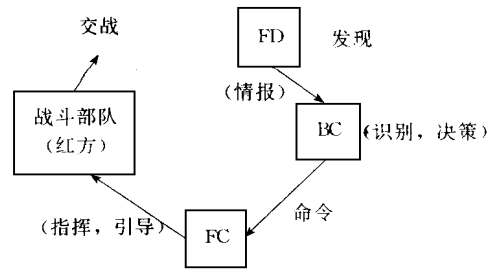


图 3 红方 C³I 系统操作过程

$$p_i = \sum_{i=1}^{i_j} p_i \cdot \prod_{k=0}^{i_1} (1 - p_k) \quad p_0 = 0 \quad (20)$$

$$p_j = \sum_{j=1}^{j_1} p_j \cdot \prod_{n=0}^{j_1} (1 - p_n) \quad p_0 = 0 \quad (21)$$

其中 p_k (或 p_n) 表示第 ik 种 (或第 j_n 种) 通信手段畅通的概率。则

$$p_y = p_{发现} \cdot p_i \cdot p_{(ih/hd)} \cdot p_{决策} \cdot p_j \cdot p_{引导} \cdot p_{交战} \quad (23)$$

$$p_x = p_{发现} \cdot p_i \cdot p_{(ih/fd)} \cdot p_{决策} \cdot p_j \cdot p_{引导} \cdot p_{交战} \quad (24)$$

其中, $p_{(ix/yd)}$ 表示已知真目标为 y , 红方 C³I 系统识别为 x 的概率, $(x, y) = \{敌(h) 或友(f)\}$ 。

现给出关于(8)式的证明。

命题 2 假设 $x_E = y_E = 0$, (x, y) 的交战过程满足(15), 则红方取胜的充要条件是:

$$MOP_2 = B = \frac{x_0(k - \omega)}{2\rho y_0} > 1 \quad (25)$$

蓝方取胜的充要条件是

$$MOP_2 = B = \frac{x_0(k - \omega)}{2\rho y_0} < 1 \quad (26)$$

证明 先证明(25)。假设 $B > 1$, 则由(16)可知, 对于任一 $t > 0$, 恒有 $x(t) > 0$, 即有 $x(T_f) > x_E = 0$ 。又因为恒有

$$2\rho/(k - \omega) = (\alpha + k)/2\beta \quad (27)$$

因此(17)中的 e^{kt} 项系数 $y_0(k + \omega) - 2\beta x_0 < 0$, 则必存在一个 $t = T_f > 0$, 使得 $y(T_f) = y_E = 0$, 即红方取胜。

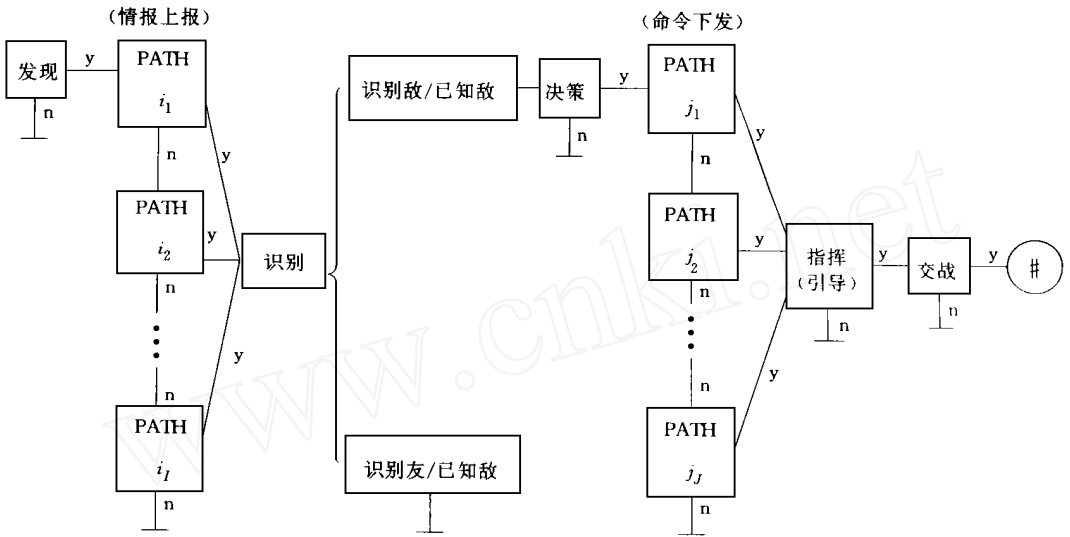


图 4 已知真目标为敌

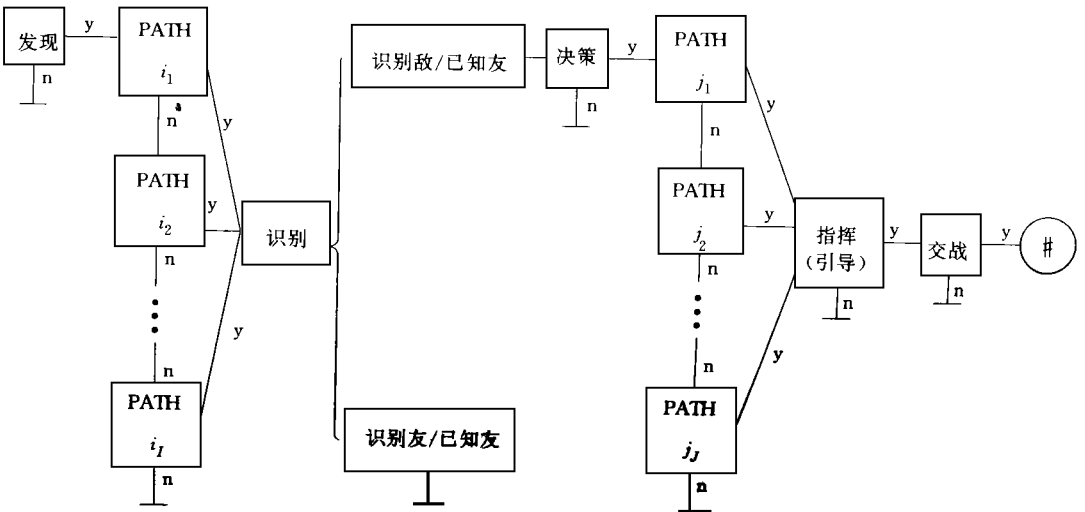


图 5 已知真目标为友

现设红方取胜, 且 $B > 1$, 则由 (17) 和 (27) 可知, 对于任一有限的 $t > 0$, 恒有 $y(t) > y_E = 0$, 这与假设红方取胜矛盾, 因此必有 $B > 1$ 。

同理可证 y 方取胜的条件 (26)。证毕。

下面讨论交战结束时间 T_f 的解。假设交战过程必须进行到某一方兵力达到失败边界 (x_E, y_E) 为止, 因此有

命题 3 令 $x_E = y_E = 0$, (x, y) 的交战过程满足 (15), 则

$$T_{y_0} = \frac{1}{k} \ln \left[\frac{y_0(k - \alpha) + 2\beta x_0}{2\beta x_0 - y_0(k + \alpha)} \right] \quad B > 1 \quad (28)$$

$$T_{x_0} = \frac{1}{k} \ln \left[\frac{x_0(k + \alpha) + 2\beta y_0}{2\beta y_0 - x_0(k - \alpha)} \right] \quad B < 1 \quad (29)$$

$$B = 1 \quad (30)$$

证明 当 $B > 1$ 时, 由命题 2 可知红方取胜, 由 T_f 的定义式(5)可得

$$T_f = T_{y_E} = \{T_{y_0}; y(T_{y_0}) = 0\}$$

又由(17) 可知 $y(T_{y_0}) = 0$ 等价于

$$y_0(k - \alpha) + 2\beta x_0 - [2\beta x_0 - y_0(k + \alpha)]e^{kT_{y_0}} = 0$$

整理后得到(28)。同理可证(29)。

若 $B = x_0(k - \alpha) / 2\rho y_0 = 1$, 由(26)可得 $2x_0\beta / y_0(k + \alpha) = 1$ 。因此(16)(17) 变为

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2k} [x_0(k + \alpha) + 2\rho y_0] e^{-\frac{1}{2}(k + \alpha)t} \\ y(t) &= \frac{1}{2k} [y_0(k - \alpha) + 2\beta x_0] e^{-\frac{1}{2}(k + \alpha)t} \end{aligned}$$

显然, 只有当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x(t) \rightarrow x_E = 0, y(t) \rightarrow y_E = 0$, 即 $T_f \rightarrow \infty$ 。证毕。

现已知 $x_E > 0, y_E > 0$, 下面命题是在确定 T_f 时需要引用的。

命题 4 假设 (x, y) 满足交战过程(15), T_{x_0} 和 T_{y_0} 如(28)(29) 所定义, 则当 $B > 1$ 时, 对于 $t \in [0, T_{y_0}]$, $x(t)$ 和 $y(t)$ 均关于 t 严格递减; 当 $B < 1$ 时, 对于 $t \in [0, T_{x_0}]$, $x(t)$ 和 $y(t)$ 均关于 t 严格递减。

证明 令 $B > 1$, 则由(16)可知, 对于任一 $t > 0, x(t) > 0$ 。考虑 $x(t)$ 的极值点 T_x , 因此

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{T_x} = \{-\rho y(t) - \alpha x(t)\} \Big|_{t=T_x} = 0$$

或者

$$y(T_x) = -\frac{\alpha}{\rho} x(T_x) < 0$$

又由(15)可得

$$\left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{T_x} = -\rho \left. \frac{dy}{dt} \right|_{T_x} = \rho \beta x(T_x) > 0$$

可知 T_x 为 $x(t)$ 的极小值点, 且 $x(t)$ 在 $[0, T_x]$ 内严格递减。

又因为此时恒有 $\frac{dx}{dt} = -\beta x < 0$, 即 y 关于 t 严格递减, 因此必有

$$T_{y_0} = \{t; y(t) = 0\} < T_x = \left\{ t; y(t) = -\frac{\alpha}{\rho} x(t) \right\}$$

由此可知 $y(t)$ 在 $[0, T_{y_0}]$ 内严格递减。

同理可证, 当 $B < 1$ 时, $x(t)$ 和 $y(t)$ 在 $t \in [0, T_{x_0}]$ 内严格递减。证毕。

命题 5 令 $x_E > 0, y_E > 0, x(t)$ 和 $y(t)$ 满足(15), 又设 $x_T = x(T_{y_0}), y_T = y(T_{x_0}), T_{x_0}$ 和 T_{y_0} 由(28)(29) 所定义, T_{x_e} 和 T_{y_e} 由(5)(6) 所定义, 则当 $B > 1$ 时,

$$T_f = \begin{cases} T_{y_e} & x_E < x_T \\ \min\{T_{x_e}, T_{y_e}\} & x_E > x_T \end{cases} \quad (31)$$

当 $B < 1$ 时,

$$T_f = \begin{cases} T_{x_e} & y_E < y_T \\ \min\{T_{x_e}, T_{y_e}\} & y_E > y_T \end{cases} \quad (32)$$

证明 假设 $B > 1$, 由命题 4 可知, 此时 $T_f \in [T_{y_0}, \infty)$, 且在 $t \in [0, T_{y_0}]$ 内, 有解 $T_{y_e} = \{t; y(t) = y_E\}$ 。而当 $x_E < x_T$ 时, $x(t) > x_T > x_E$, 因此 $T_{x_e} = \{t; x(t) = x_E\}$ 无解, 这时由 T_f 的定义式(5)可知 $T_f = T_{y_e}$ 。

当 $x_E = x_T$ 时, 解 $T_{x_e} = \{t; x(t) = x_E\} = T_{y_0}$, 由于 $T_{y_e} > T_{y_0}$, 因此按 T_f 的定义(5), 仍有 $T_f = T_{y_e}$ 。当 $x_E > x_T$ 时, 解 $T_{x_e} = \{t; x(t) = x_E\} < T_{y_0}$ 存在, 因此, 由(5)式可得 $T_f = \min\{T_{x_e}, T_{y_e}\}$ 。得证(31)。

同理可证(32)。证毕。

现在可以勾画关于红方 C³I 系统的系统映射过程, 它由图 6 所示的四级映射组成。第一级映射为物理过程, 它由图 1, 3, 4, 5 所描述, 有关系统设备性能与系统信息结构中的参数(如 $p_{发现}$ 等) 关系则涉及众多的

物理原理, 本文没有深入涉及之。第二级映射为信息过程, 由(21)~ (24)组成, 它是通过系统信息流程分析获得的。第三级映射为交战过程, 由(16)~ (19), (28)~ (32)组成, 它取决于交战过程分析。第四级映射为指标定义过程, 由(1), (8)~ (11)组成, 它是通过对性能量度MOP 的抽象分析获得的。

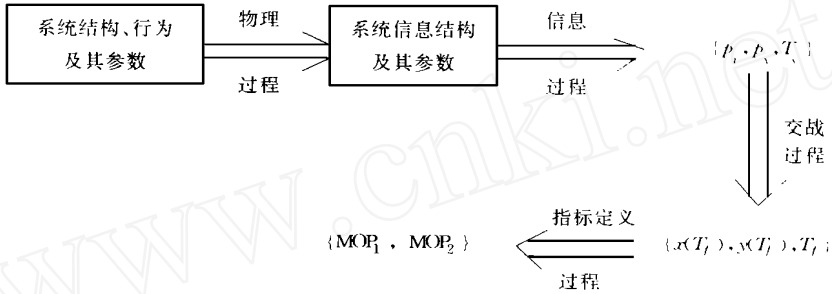


图6 系统映射过程

4 使命映射

系统的使命(或任务)可以通过对描述系统使命特征的使命原始参数的值域要求表现出来。使命映射就是把使命原始参数的值域要求转化为对性能量度{MOP}的值域要求的一种映射。本文的命题1和命题2事实上已描述了红方C³I系统关于交战取胜的使命映射。关于阻挡目标的使命映射分析如下。

设使命要求红军在交战过程中“阻止”蓝军的位置相对A₀的距离为R_T, 则关于阻挡目标的MOP₁为

$$MOP_1 = R_T / R_d \tag{33}$$

其中R_T为使命原始参数。按照本文第一节描述的红方C³I系统的使命要求, 有R_T > R_d。此外, R_T显然不可能大于红方C³I系统的最大探测距离R₀。因此, R_T ∈ (R_d, R₀]。由(33)可得到相应的MOP₁值域:

$$MOP_1 \in [1, R_0 / R_d]$$

5 程序框图与举例

图7描述了系统效能分析SEA方法的程序框图。其中参数输入子程序用于输入与系统效能计算有关的参数值, 包括系统原始参数值(如R₀, p_{发现}, T_s等), 环境原始参数值(如x₀, y₀, v, R_d等), 使命原始参数值(如R_T等)。系统映射子程序通过已建立的系统映射模型求解系统{MOP}_s, 如果系统原始参数在某值域内变化, 那么{MOP}_s是一个值集。使命映射子程序用于计算与使命要求对应的{MOP}_m, 它通常也是值集。图形处理子程序用于把值集{MOP}_s和{MOP}_m生成{MOP}空间上的系统轨迹L_s和使命轨迹L_m。系统效能计算子程序采用一定的数值方法求解系统效能指标E(见前文), 其中, 如果E = √(L_s · L_m) / √(L_s), 则需要计算欧氏空间{MOP}上的测度√(L_s · L_m)和√(L_s)。主程序用于确定上述各子程序的启动时机和顺序, 并决定全程序的终止。

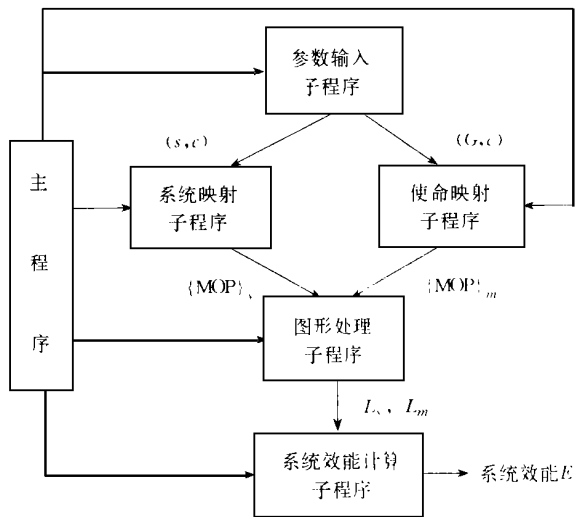


图7 SEA 程序框图

图 8 为采用本文模型获得的一种典型结果, 其中曲线部分表示系统轨迹, 方形部分表示使命轨迹。从它们的交合关系可以进行如下的战术分析:

1) 当 $MOP_2 > 1$ 时 (即红方取胜), 若 MOP_2 值越大, 表明红方相对实力越强, 则消灭蓝方的时间 T_f 越短, 相应的系统 MOP_1 值即越大。因此, 系统轨迹成递增趋势。

2) 当 $MOP_2 < 1$ 时 (即红方失败), 若 MOP_2 值越小, 表明红方相对实力越弱, 这时被蓝方击败的时间 T_f 越短, 被蓝方突破防线的系统 MOP_1 值越大, 因此系统轨迹成递减趋势。

3) 在 $MOP_2 = 1$ 附近时, 表明交战双方势均力敌, 因此交战结束时间 T_f 较长, 所对应的系统 MOP_1 值即较小, 从而出现系统轨迹的内凹现象。

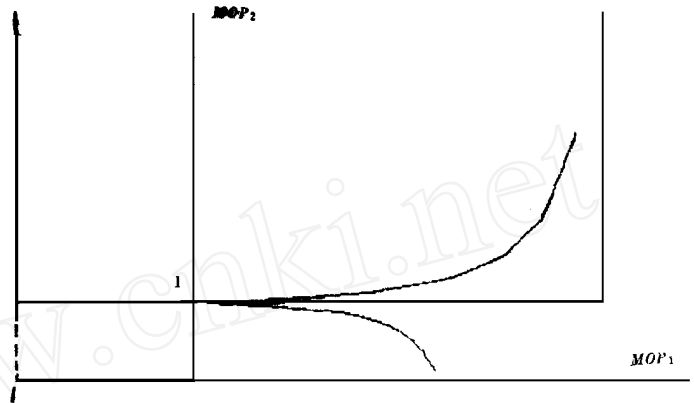


图 8 一个典型结果

参考文献

- 1 Martin P J F. Large Scale C^3 System: Experiment Design and System Improvement L DS- TH- 1580, 1986
- 2 Bouthonnier V and Levis A H. Effectiveness A nalysis of C^3 System. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1984, SMC- 14(1)
- 3 Athans M. Command and Control (C^2) Theory: A Challenge to Control Science, 1987, AC- 32(4)
- 4 Moose P N. Evolution Equation of C^3I Canonical Forms and Their Properties Naval postgraduate School Monterey California, NPS- 62- 83- 059, AD- A 135293, 1983
- 5 Anthony R N. Probabistic Logic Model of Military Conflict and C^3I Development Proceedings of the 8 - th MIT/ONR Workshop on C^3 System, Cambridge, MA. June 1985: 1~ 6
- 6 Rubin I and Mayk I M. Markovian Modeling of Canonical C^3 System s Components Proceeding of the 8 - th MIT/ONR Workshop on C^3 System, Cambridge, MA, June, 1985: 15~ 33
- 7 Dockery J and Chiatti S. Application of Catastrophe Theory to the Problems of Military Analysis European Journal of OR, 1986, 24: 46~ 53
- 8 罗雪山, 苏建志. C^3I 系统性能与作战效能之间的联系. 国防科技大学《科技论文资料》1991: 91~ 7014
- 9 张最良等. 军事运筹学. 军事科学出版社, 1993
- 10 吴枕江, 刘雨. 指挥控制系统分析概论. 国防科技大学出版社, 1992