



不确定性打击链的闭环时间表征和评估

陆军*, 张瑶, 乔永杰

中国电子科学研究院, 北京 100041

* 通信作者. E-mail: ljswsx@163.com

收稿日期: 2016-06-27; 接受日期: 2016-08-16; 网络出版日期: 2016-12-09

摘要 打击链对于形成基于信息系统的体系作战能力、提升作战效能具有重要的意义. 打击链的闭环时间是衡量打击链效能的重要指标之一. 实际作战过程中存在着大量的不确定因素, 如何形式化表征不确定因素, 对打击链效能进行评估是开展打击链研究的基础. 本文依据典型作战体系和作战过程, 构建了3类打击链模型, 分别是链路模型、无回路网络模型和有回路网络模型. 用随机方法来形式化表征完成时间、完成状况和转移状况等不确定因素, 研究并给出了3类打击链模型闭环时间的计算评估方法. 本文的研究结果为开展不确定性打击链的建模、效能评估与生成等提供了一定的理论基础和技术支撑.

关键词 打击链, 闭环时间, 评估, 不确定性, 图示评审技术

1 引言

现代战争是陆、海、空、天、电多维一体的多军种联合作战, 呈现出作战节奏加快、敌我对抗激烈、不确定因素增加等特点. 在这种作战环境下, 运用信息系统把各种作战单元和作战要素集成为整体作战能力, 形成作战要素无缝衔接、作战平台自主协同的一体化作战体系是赢得战争优势的关键, 具体来说, 就是要构建打击链.

打击链 (kill chain) 是指探测目标、瞄准目标、与敌方交战、并评估交战结果的闭环过程, 可以分为6个基本环节, 分别是发现、定位、跟踪、瞄准、交战与评估 (find-fix-track-target-engage-assess, F2T2EA) [1,2]. 构建有效的打击链, 对于提升作战效能作用显著. 打击链的构建涉及需求分析、体系结构、信息流、信息处理、打击链生成等多方面的问题. 文献 [3~5] 从打击链的需求、概念和特征、作战过程、体系结构、指挥控制模式等方面进行了探索性的研究. 文献 [6] 以打击链的各环节最后完成时间为优化目标, 通过运用数学规划对平台进行合理的调度来生成打击链, 旨在缩短打击链闭环时间, 提高作战能力. 此外, 通过对打击链的分析, 可以发现哪里存在能力缺陷, 采取措施弥补缺陷, 优化过程, 提高完成任务的可靠度. 文献 [7] 利用打击链的分析方法研究舰船遭受反舰导弹攻击时的生存概率. 文献 [8,9] 利用打击链分析时敏目标作战体系的能力.

引用格式: 陆军, 张瑶, 乔永杰. 不确定性打击链的闭环时间表征和评估. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 207-220, doi: 10.1360/N112016-00157
Lu J, Zhang Y, Qiao Y J. Representation and evaluation of the closed-loop time of the kill chain under uncertainties (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 207-220, doi: 10.1360/N112016-00157

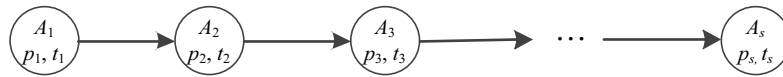


图 1 链路模型示意图

Figure 1 The sketch map of chain model

对于打击链的构建与分析, 闭环时间是最基本的和最重要的效能指标之一, 能够在很大程度上衡量打击链的作战效能. 打击链的闭环时间是指从发现目标到完成评估所需要的时间. 在美国最近发动的几次局部战争中, 美军凭借包括信息技术在内的强大的高新技术优势, 使得打击链的时间不断缩短, 海湾战争是 80~101 min, 科索沃战争缩短到 30~45 min, 阿富汗战争缩短到 15~19 min, 伊拉克战争则缩短至 10 min 左右^[10]. 美军仍在对打击链进行优化, 以进一步缩短打击链的闭环时间^[11]. 然而, 实际作战过程中存在着大量的不确定因素, 例如, 打击链各活动的完成时间、完成状况, 以及活动之间的转移状况在每次作战中几乎都是不确定的, 这些也是有代表性的不确定因素. 不确定因素的存在, 极大地增加了打击链闭环时间计算的难度. 目前, 尚缺乏不确定环境下打击链闭环时间的有效计算方法.

根据作战体系和作战过程, 打击链可以分为链状结构和网状结构, 分别对应不同的打击链模型. 不确定环境下打击链闭环时间的计算依赖于打击链的模型, 不同的模型需要不同的计算方法.

本文构建 3 类打击链模型, 分别是链路模型、无回路网络模型和有回路网络模型, 它们是研究打击链闭环时间的典型模型. 在此基础上, 对于打击链中各个活动的完成时间、完成状况和转移状况等不确定因素, 运用随机方法, 分别研究这 3 类打击链模型闭环时间的计算方法, 特别是对于有回路模型, 运用网络计划 GERT 方法, 实现闭环时间的计算.

本文第 2~4 节分别给出了打击链的链路模型、无回路网络模型、有回路网络模型及相应的闭环时间计算方法, 并分别给出了算例; 第 5 节对全文进行总结展望.

2 打击链的链路模型及闭环时间计算方法

2.1 链路模型

打击链的链路模型假设打击链的各个活动(或步骤)都是串联的, 图 1 为有 s 个活动的打击链的链路模型. 在图 1 中, 第 i 个活动用点 A_i 来表示, A_i 的完成概率设为 p_i , 完成 A_i 所需要的时间用 t_i 来表示, $i = 1, \dots, s$.

2.2 链路模型闭环时间计算方法

在图 1 所示的链路模型中, 由于各个活动是串联的, 因此闭环时间 T 是各个活动时间之和, 即 $T = \sum_{i=1}^s t_i$. 若 t_i 是一个随机变量, 则闭环时间 T 也是随机变量. 为了简化计算, 假设 t_i ($i = 1, \dots, s$) 是相互独立的.

那么, 打击链的实现概率 P 为各个活动完成概率之积, 即

$$P = \prod_{i=1}^s p_i. \quad (1)$$

设 t_i 的期望是 μ_i , 方差是 σ_i^2 , 那么打击链的闭环时间 T 的期望为

$$E(T) = \sum_{i=1}^s \mu_i, \quad (2)$$

方差为 $\text{var}(T) = \sum_{i=1}^s \sigma_i^2$, 标准差为

$$\text{std}(T) = \sqrt{\sum_{i=1}^s \sigma_i^2}. \quad (3)$$

设 t_i 的概率密度函数为 $f_i(x)$, $i = 1, \dots, s$, 那么, $t_1 + t_2$ 的概率密度函数为

$$f_{t_1+t_2}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(z-x)f_2(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x)f_2(z-x)dx. \quad (4)$$

从而 $T = \sum_{i=1}^s t_i$ 的概率密度函数可根据式 (4) 迭代地进行计算, 计算公式如下:

$$f_T(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t - x_{s-1} - x_{s-2} - \cdots - x_1) f_2(x_1) dx_1 f_3(x_2) dx_2 \cdots f_s(x_{s-1}) dx_{s-1}.$$

特殊地, 如果 t_i 均服从正态分布 $t_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$, $i = 1, \dots, s$, 那么, T 服从正态分布: $T \sim N(\sum_{i=1}^s \mu_i, \sum_{i=1}^s \sigma_i^2)$, 从而打击链的闭环时间 T 不超过 T_0 的概率为

$$P(T \leq T_0) = P\left(\frac{T - \sum_{i=1}^s \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^s \sigma_i^2}} \leq \frac{T_0 - \sum_{i=1}^s \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^s \sigma_i^2}}\right) = \Phi\left(\frac{T_0 - \sum_{i=1}^s \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^s \sigma_i^2}}\right), \quad (5)$$

打击链的闭环时间 T 介于 T_1 与 T_2 之间 (不妨设 $T_1 < T_2$) 的概率为

$$P(T_1 < T \leq T_2) = P(T \leq T_2) - P(T \leq T_1) = \Phi\left(\frac{T_2 - \sum_{i=1}^s \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^s \sigma_i^2}}\right) - \Phi\left(\frac{T_1 - \sum_{i=1}^s \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^s \sigma_i^2}}\right), \quad (6)$$

其中 $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 为标准正态分布的概率分布函数, 可通过查标准正态分布表得到.

2.3 链路模型闭环时间算例

现有链路模型打击链, 如图 2 所示. 在图 2 中, 打击链含有 14 个活动. 设 $p_i = 0.98$, 则根据式 (1), 该打击链的实现概率为 $P = 0.7536$.

设 t_i 均服从正态分布 $t_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$, $i = 1, \dots, 14$. t_i 的参数取值如表 1 所示.

根据式 (2), 该打击链的闭环时间期望值为: $E(T) = \sum_{i=1}^{14} E(t_i) = 8.8$ min; 根据式 (3), 标准差为 0.7781 min, 则 $T \sim N(8.8, 0.7781^2)$.

T 的概率密度函数曲线如图 3 所示, 分布函数曲线如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 闭环时间不超过 8, 9, 10 min 的概率分别为 0.1519, 0.6014, 0.9385, 闭环时间介于 (8, 9], (9, 10] min 的概率分别为 0.4495, 0.3371.

3 打击链的无回路网络模型及闭环时间计算方法

3.1 无回路网络模型

将打击链抽象成一个无回路网络模型, 其中节点 A_i 表示各个活动, 有向边表示活动与活动之间的先后关系, 如图 5 所示. 每个点上有两个参数: 该节点所代表的活动的处理时间 t_i 和活动完成概率 p_i . 活动处理时间可以是常数, 也可以是一个随机变量, 服从某种概率分布. 当然, 除了时间参数外, 还

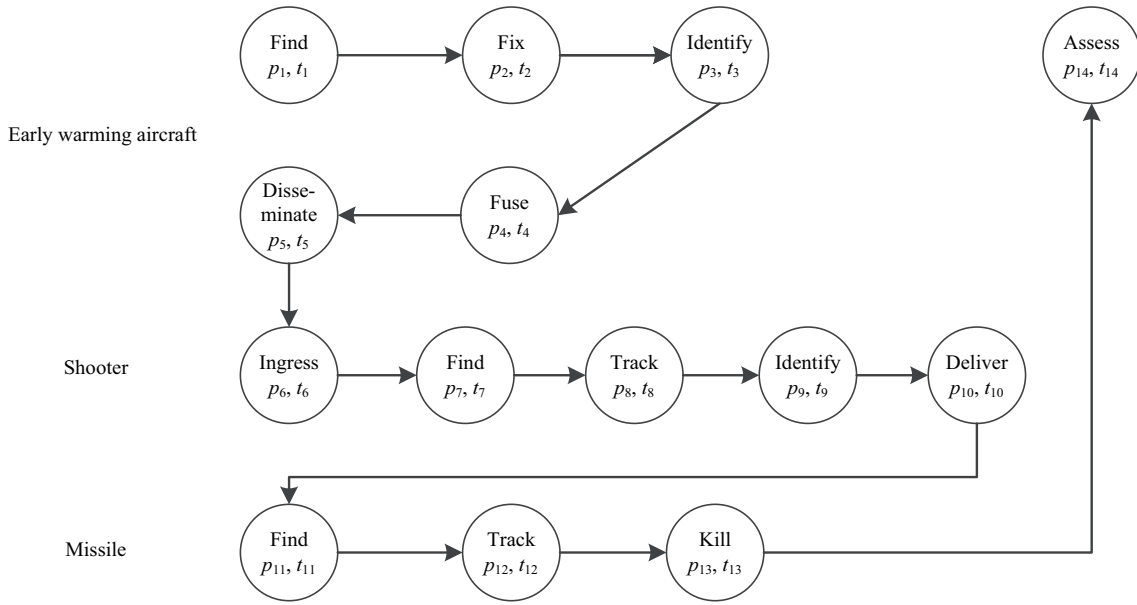


图 2 打击链的链路模型
Figure 2 A chain model of kill chain

表 1 链路模型时间参数取值表 (分钟)

Table 1 The parameters of time of the chain model (min)

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
μ_i	1	1	0.8	0.8	0.8	2	0.5	0.5	0.3	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1
σ_i	0.5	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.02	0.05	0.1	0.1	0.05

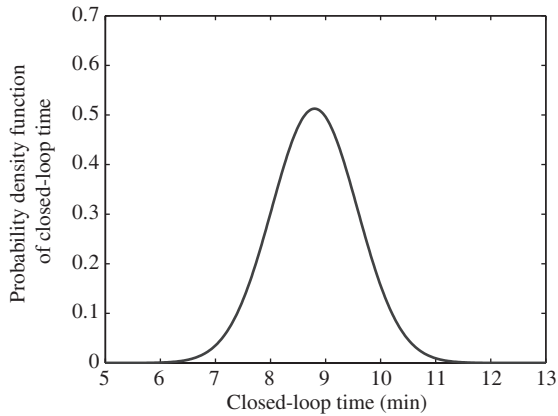


图 3 闭环时间的概率密度函数曲线

Figure 3 The probability density function curve of closed-loop time

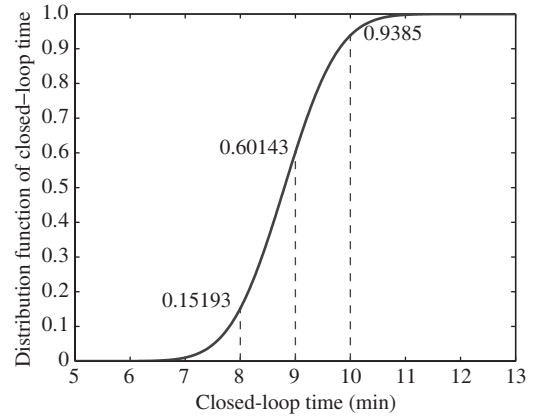


图 4 闭环时间的分布函数曲线

Figure 4 The distribution function curve of closed-loop time

可以有成本、收益或费用等参数. 每条边 $e_j = (i_1, i_2)$ 上有一个参数: 转移概率 q_j , 表示从活动 i_1 到活动 i_2 的转移概率, 即活动 i_1 完成后下一步进行活动 i_2 的概率.

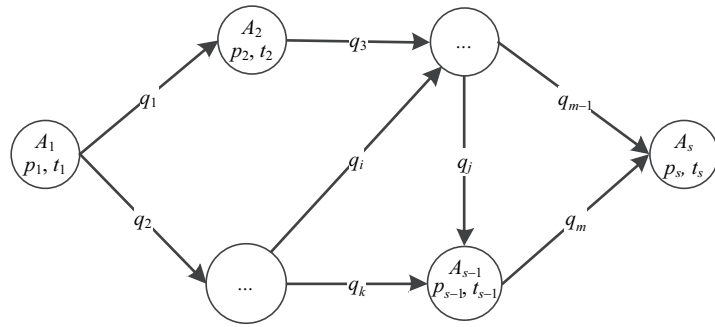


图 5 无回路网络模型 (点表示活动) 示意图

Figure 5 The sketch map of network without circuits model with the activities as nodes

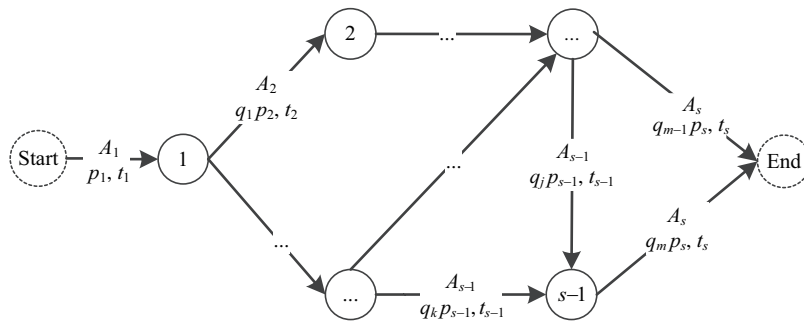


图 6 无回路网络模型 (边表示活动) 示意图

Figure 6 The sketch map of network without circuits model with the activities as edges

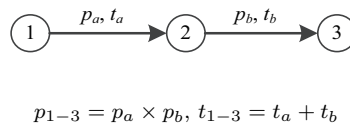


图 7 串联示意图

Figure 7 The sketch map of series connection

易见, 链路模型是无回路网络模型的一个特例. 当无回路网络模型中的转移概率均为 1 时, 无回路网络模型即为链路模型.

3.2 无回路网络模型闭环时间计算方法

为了便于计算, 将以点表示活动的网络 (图 5) 转换成以边表示活动的网络 (如图 6 所示). 边的两个节点分别表示该活动的开始和结束. 边上有两个参数: 该边所表示的活动的实现概率和该活动的处理时间, 其中该活动的实现概率是指在前一活动完成的条件下该活动完成的概率, 它等于从前一活动至该活动的转移概率乘以该活动的完成概率, 例如, 图 6 中活动 A_2 的实现概率等于 $q_1 \cdot p_2$.

一般网络图中, 活动与活动之间有串联的情形也有并联的情形. 对于串联的情形, 串联活动的时间是相加的, 概率是相乘的, 如图 7 所示.

对于并联的情形, 有向边的发出节点有 3 种类型: “或”型节点, “与”型节点, 以及“异或”型节

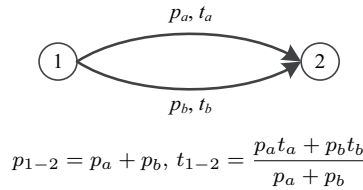


图 8 并联示意图

Figure 8 The sketch map of parallel connection

点. 其中“或”型节点是指通向该节点的任一活动实现, 该节点即实现. “与”型节点是指通向该节点的所有活动都实现, 该节点才实现. “异或”型节点是指通向该节点的活动有且只有一个能实现. 在打击链的过程中, 多种可能的情形只有一种能在现实中实现, 因此无回路网络模型中的并联情形的节点均为“异或”型节点. “异或”型节点并联的概率是相加的, 时间计算公式如图 8 所示.

值得注意的是, “异或”型节点与“或”型节点的区别在于, “异或”型节点中通向该节点的活动有且只有一个能实现, 如果活动 a 实现则活动 b 不能实现, 反之亦然, 因此 $p_{1-2} = p_a + p_b$. 根据时间的期望相等, 得到 $p_{1-2}t_{1-2} = p_a t_a + p_b t_b$, 从而 $t_{1-2} = \frac{p_a t_a + p_b t_b}{p_a + p_b}$. 而对于“或”型节点, 则有 $p_{1-2} = p_a + p_b - P(a \cap b)$. 如果活动 a 与活动 b 是相互独立的, 那么, $p_{1-2} = p_a + p_b - p_a p_b$, 且有 $p_{1-2}t_{1-2} = p_a(1 - p_b)t_a + p_b(1 - p_a)t_b + p_a p_b \min\{t_a, t_b\}$, 从而 $t_{1-2} = \frac{p_a t_a + p_b t_b - p_a p_b (t_a + t_b - \min\{t_a, t_b\})}{p_a + p_b - p_a p_b}$.

根据以上并联和串联情形的计算, 打击链的无回路网络模型的闭环时间可以按照如下方法进行计算:

找出从“开始”节点至“结束”节点的所有路径, 设为 L_1, L_2, \dots, L_k . 每条路径实现的概率为该路径所经过的所有边的概率之积, 每条路径实现的时间为该路径所经过的所有边的时间之和. 设第 i 条路径 L_i 所经过的边为 e_1, e_2, \dots, e_r , 边 e_j 上的参数为 $t_j, p_j, j = 1, 2, \dots, r$. 设 t_j 的期望为 $E(t_j) = \tilde{t}_j$, 则路径 L_i 实现的概率和实现时间期望值分别为

$$p(L_i) = \prod_{j=1}^r p_j, \quad t(L_i) = \sum_{j=1}^r \tilde{t}_j. \quad (7)$$

则从“开始”节点至“结束”节点的实现概率 p 和实现时间 T 的期望分别为

$$p = \sum_{i=1}^k p(L_i), \quad E(T) = \frac{\sum_{i=1}^k p(L_i) \cdot t(L_i)}{p} = \frac{\sum_{i=1}^k p(L_i) \cdot t(L_i)}{\sum_{i=1}^k p(L_i)}. \quad (8)$$

3.3 无回路网络模型算例

现有无回路网络模型打击链, 如图 9 所示. 将图 9 转换成以边表示活动的网络, 如图 10 所示. 参数的取值如表 2 所示. 首先计算从“发现”活动开始到“融合”活动完成的参数.

从“发现”活动开始到“融合”活动完成, 即从“开始”节点到节点 4, 共有 2 条路径: 1-2-3-4, 1-4. 根据式 (7), 可得每条路径的实现概率和期望实现时间如表 3 所示. 那么, 根据式 (8), 可得从“发现”活动开始到“融合”活动的完成概率和期望实现时间分别为

$$P = P_1 + P_2 = 0.4612 + 0.4802 = 0.9414,$$

$$E(t) = (P_1 \cdot T_1 + P_2 \cdot T_2)/P = (0.4612 \times 3.6 + 0.4802 \times 1.8)/0.9414 = 2.6818 \text{ min}.$$

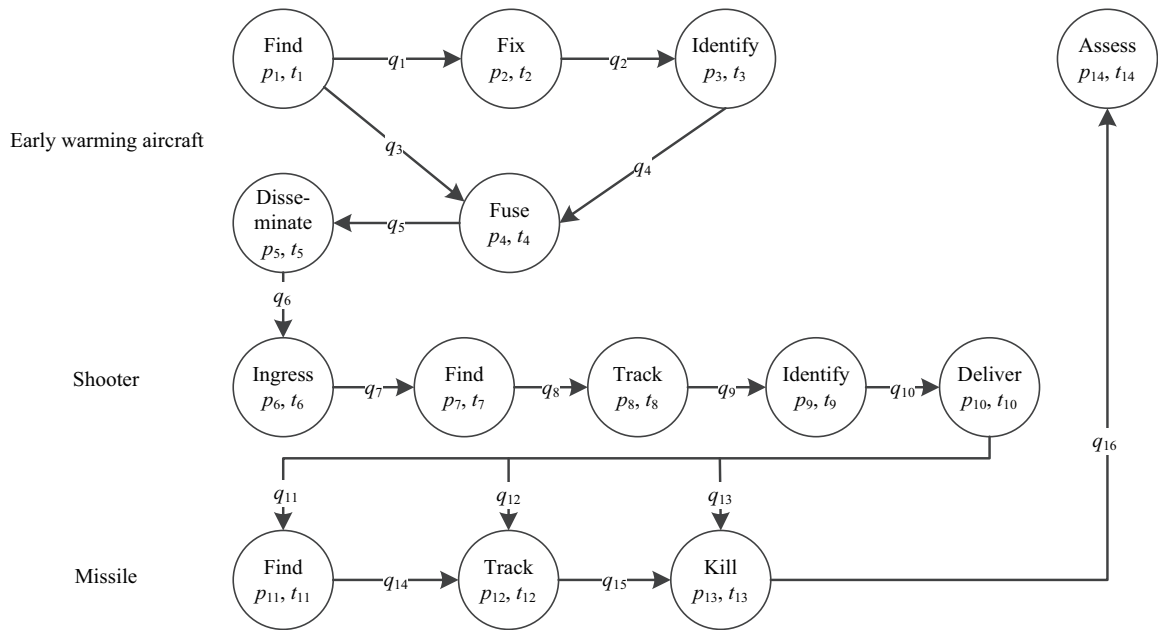


图 9 打击链的无回路网络模型 (点表示活动)

Figure 9 A network without circuits model of kill chain with the activities as nodes

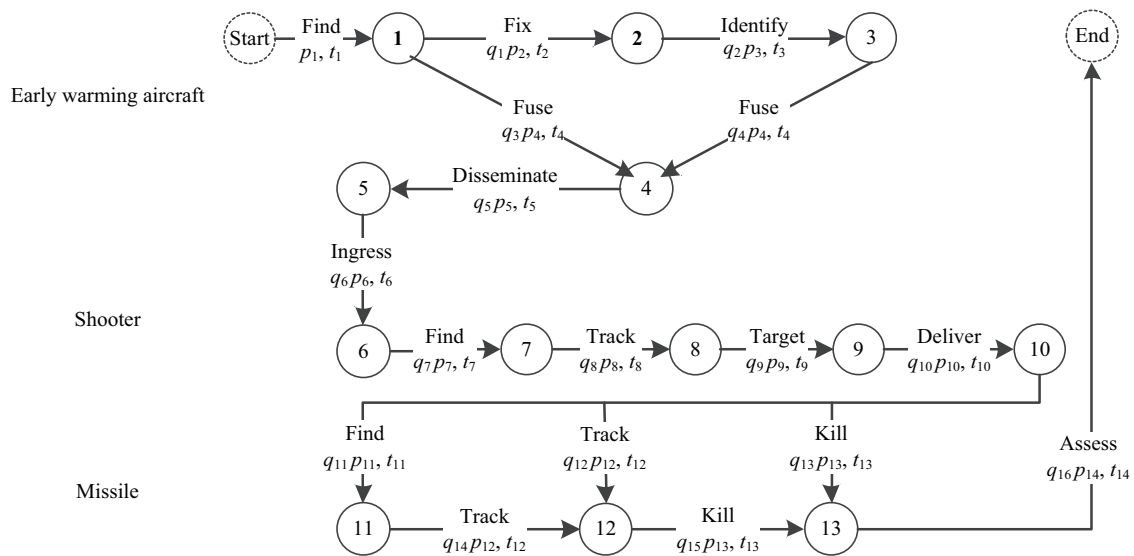


图 10 打击链的无回路网络模型 (边表示活动)

Figure 10 A network without circuits model of kill chain with the activities as edges

类似地, 可以求得从“发现”活动开始到“评估”活动完成的参数: 实现概率为 0.7754; 期望实现时间为 7.6680 min.

表 2 无回路网络模型参数取值表

Table 2 The parameters of the network without circuits model

Number	Edge	Activity	Transition probability	Complete probability	Achieve probability	Time distribution	Distribution parameter (min)
1	0-1	Find	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 1, \sigma = 0.5$
2	1-2	Fix	0.5	0.98	0.49	Normal	$\mu = 1, \sigma = 0.2$
3	2-3	Identify	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.2$
4	1-4	Fuse	0.5	0.98	0.49	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.3$
5	3-4	Fuse	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.3$
6	4-5	Disseminate	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.3$
7	5-6	Ingress	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 2, \sigma = 0.2$
8	6-7	Find	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$
9	7-8	Track	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$
10	8-9	Target	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.3, \sigma = 0.1$
11	9-10	Deliver	1	0.98	0.98	Constant	0.1
12	10-11	Find	0.4	0.98	0.39	Normal	$\mu = 0.1, \sigma = 0.05$
13	10-12	Track	0.3	0.98	0.29	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$
14	10-13	Kill	0.3	0.98	0.29	Normal	$\mu = 0.3, \sigma = 0.1$
15	11-12	Track	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$
16	12-13	Kill	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.3, \sigma = 0.1$
17	13-14	Assess	1	0.98	0.98	Constant	0.1

表 3 路径实现概率和期望实现时间表

Table 3 Achieve probability and expectation of achieve time of paths

Number	Path	Achieve probability of path	Expectation of achieve time (min)
1	1-2-3-4	$P_1 = p_1 \cdot q_1 \cdot p_2 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_4 = 0.4612$	$T_1 = E(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) = 3.6$
2	1-4	$P_2 = p_1 \cdot q_3 \cdot p_4 = 0.4802$	$T_2 = E(t_1 + t_4) = 1.8$

4 打击链的有回路网络模型及闭环时间计算方法

4.1 有回路网络模型

打击链的有回路网络模型与无回路网络模型相似, 区别在于有回路网络模型中是含有回路的, 如图 11 所示.

为了便于计算, 将以点表示活动的网络 (图 11) 转换成以边表示活动, 并且只有边上有参数的网络模型 (如图 12 所示). 转换方法与无回路网络模型相同. 由于实际作战过程中, 多种可能的情形只有一种能在现实中实现, 因此有回路网络模型中的并联情形的节点也均为“异或”型节点.

易见, 链路模型和无回路网络模型均为有回路网络模型的特例. 当有回路网络模型中的反向弧的转移概率为 0 时, 有回路网络模型即为无回路网络模型. 可以看出, 有回路网络模型更具有一般性.

4.2 有回路网络模型闭环时间计算方法

有回路网络模型的闭环时间可以利用 GERT (graphical evaluation and review technique) 方法^[12]

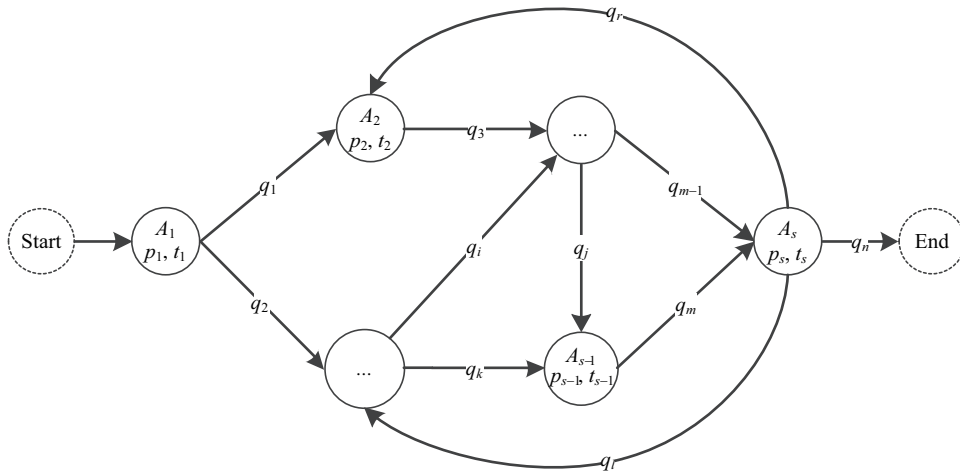


图 11 有回路网络模型 (点表示活动) 示意图

Figure 11 The sketch map of network with circuits model with the activities as nodes

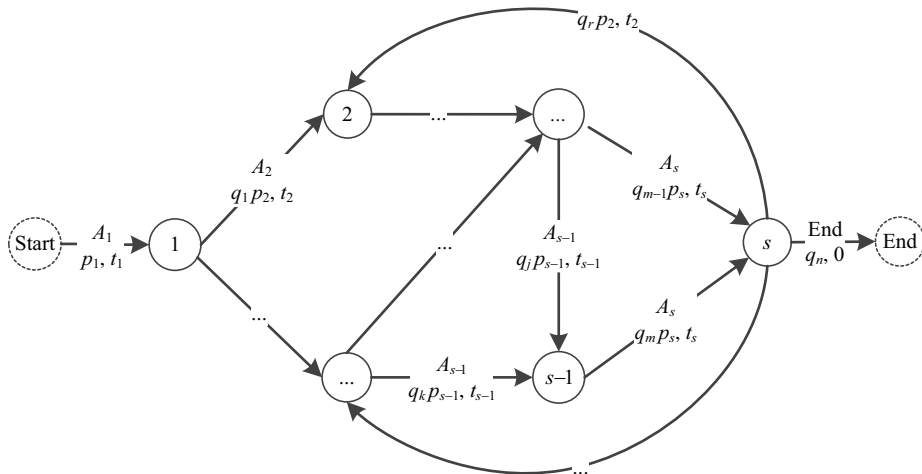


图 12 有回路网络模型 (边表示活动) 示意图

Figure 12 The sketch map of network with circuits model with the activities as edges

进行计算. GERT 方法, 又称图示评审技术, 是对不确定条件下活动分析的有效方法, 尤其是存在回路的情形. GERT 方法是 1962 年由 Eisner 提出并经 Elmaghraby 和 Pritsker 等逐步改进完善形成的, 广泛应用于工程技术、生产组织和项目管理系统^[12]. 20 世纪 60 年代, 美国在阿波罗登月计划中成功运用 GERT 分析方法来确定系统的最终发射时间. 近年来, GERT 方法主要应用在装备保障时间^[13]、可靠性研究^[14]、武器装备技术风险量化评估^[15]等方面. GERT 网络图中可以包含具有不同逻辑特征的节点, 节点的出发端允许有多个概率分支, 网络中允许有回路. GERT 方法同时利用概率论中的矩母函数以及控制论中的信号流图和传递函数理论来进行研究.

在 GERT 方法中, 网络等效传递函数是用 Mason 公式^[12] 计算的, 比较复杂. 本文采用传递函数的矩阵形式理论^[16] 来计算等效传递函数.

打击链的有回路网络模型的闭环时间可以用如下方法进行计算.

设打击链的流程图的开始节点为 x_0 , 结束节点为 x_n , 其余节点为 x_1, \dots, x_{n-1} . 给定打击链流程图上每条边 (x_i, x_j) 上的参数: 概率 p_{ij} 和时间 t_{ij} . 时间 t_{ij} 的矩母函数为

$$M_{ij}(s) = E(e^{st_{ij}}) = \int e^{st_{ij}} f(t_{ij}) dt_{ij}.$$

首先, 定义边 (x_i, x_j) 上的传递系数 $w_{ij}(s)$:

$$w_{ij}(s) = p_{ij} M_{ij}(s) = p_{ij} E(e^{st_{ij}}).$$

其次, 根据打击链流程图构造矩阵 $\tilde{W}(s) = (\tilde{w}_{ij}(s))_{n \times n}$, $i, j = 1, \dots, n$, 其中

$$\tilde{w}_{ij}(s) = \begin{cases} w_{ij}(s), & \text{如果 } (x_i, x_j) \text{ 之间有边,} \\ 0, & \text{如果 } (x_i, x_j) \text{ 之间无边.} \end{cases}$$

然后, 按照信号流图的传递函数的矩阵形式理论, 等效传递系数满足如下关系:

$$X = \tilde{W}(s)^T X + \alpha x_0,$$

$$W(s) = X/x_0 = (I - \tilde{W}(s)^T)^{-1} \alpha,$$

设 $W(s)$ 的向量形式为

$$W(s) = (w_1(s), w_2(s), \dots, w_n(s))^T,$$

其中 x_0 表示开始节点, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 表示其余节点 (包括结束节点 x_n), $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T$, $\alpha_j = w_{0j}(s)$ 表示开始节点 x_0 到节点 x_j 的边 (x_0, x_j) 上的传递系数, $W(s)$ 表示从开始节点到其余各个节点的等效传递系数. 则从开始节点 x_0 到结束节点 x_n 的等效传递系数为 $w_n(s)$.

最后, 计算结束节点实现的概率为

$$p = w_n(0), \quad (9)$$

结束节点实现的期望时间为

$$E(t) = \left(\frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{w_n(s)}{w_n(0)} \right] \right) \Big|_{s=0}, \quad (10)$$

方差为

$$\text{var}(T) = E(T^2) - (E(T))^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W(s)}{W(0)} \right] \right) \Big|_{s=0} - \left[\left(\frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W(s)}{W(0)} \right] \right) \Big|_{s=0} \right]^2, \quad (11)$$

标准差为 $\text{std} = \sqrt{\text{var}}$.

4.3 有回路网络模型算例

现有有回路网络模型打击链, 如图 13 所示. 将图 13 转换成以边表示活动的网络模型 (如图 14 所示). 参数的取值如表 4 所示, 其中 TP 表示转移概率, CP 表示完成概率, AP 表示实现概率, TF 表示传递函数, TFN 表示传递函数的编号.

打击链的有回路网络模型的闭环时间可以用如下方法进行计算.

首先, 计算每条边上的传递系数, 见表 4.

其次, 构造矩阵 $\tilde{W}(s)$:

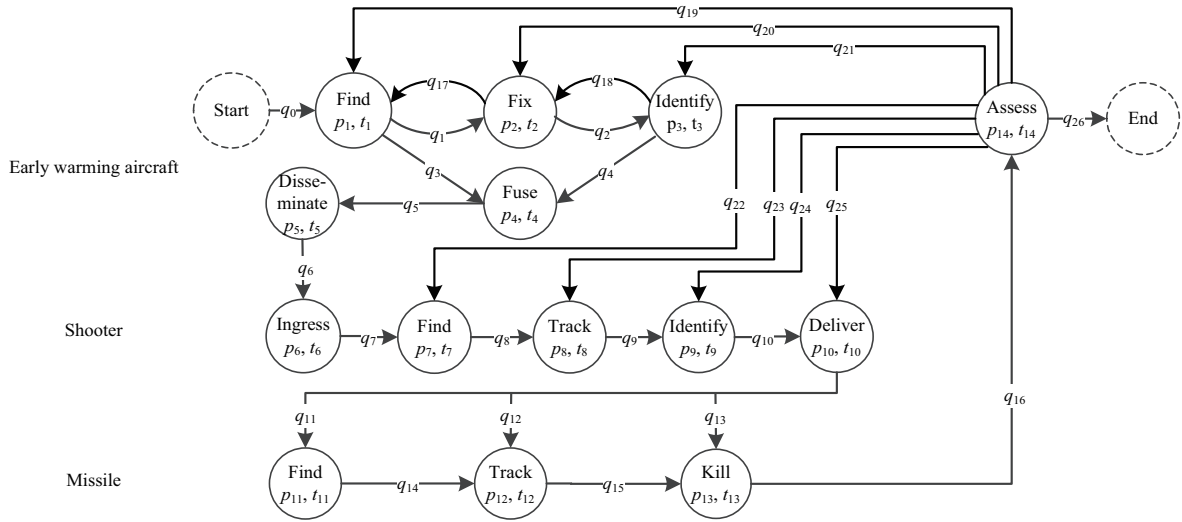


图 13 打击链的有回路网络模型 (点表示活动)

Figure 13 A network with circuits model of kill chain with the activities as nodes

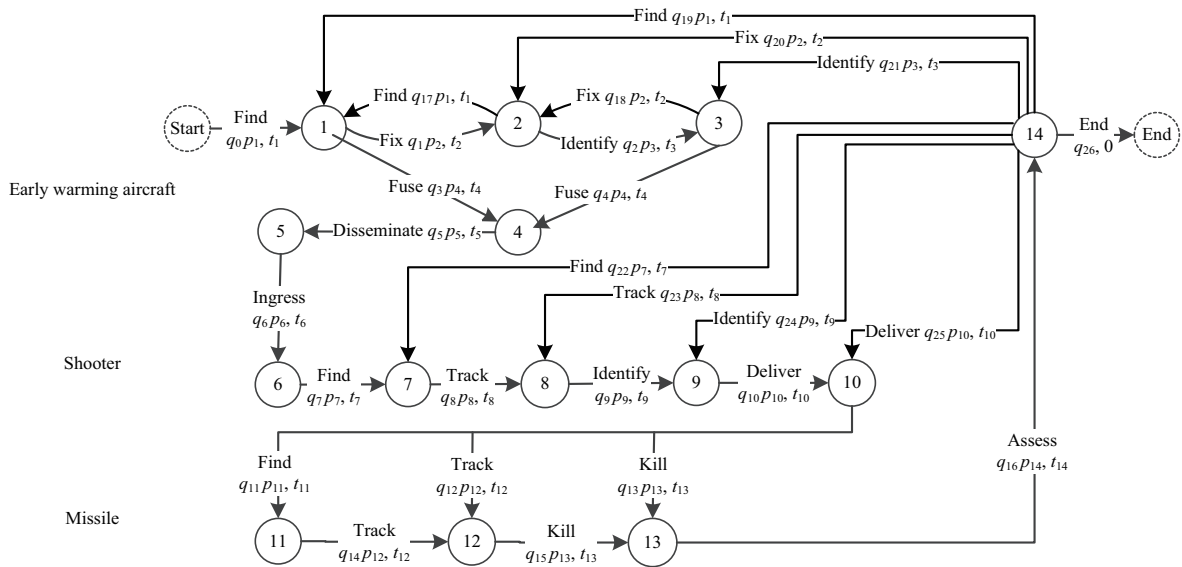


图 14 打击链的有回路网络模型 (边表示活动)

Figure 14 A network with circuits model of kill chain with the activities as edges

$$\tilde{W}(s) = (\tilde{w}_{ij}(s))_{15 \times 15} = \begin{pmatrix} 0 & w_1 & 0 & w_3 & 0 & \dots & 0 \\ w_{17} & 0 & w_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{18} & 0 & w_4 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{19} & w_{20} & w_{21} & 0 & 0 & \dots & w_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

表 4 有回路网络模型参数取值表
Table 4 The parameters of the network with circuits model

Edge	Activity	TP ^{a)}	CP ^{b)}	AP ^{c)}	Time distribution	Distribution parameter	TF ^{d)}	TFN ^{e)}
0-1	Find	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 1, \sigma = 0.5$	$0.98e^{s+0.125s^2}$	w_0
1-2	Fix	0.5	0.98	0.49	Normal	$\mu = 1, \sigma = 0.2$	$0.49e^{s+0.02s^2}$	w_1
2-3	Identify	0.9	0.98	0.88	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.2$	$0.88e^{0.8s+0.02s^2}$	w_2
1-4	Fuse	0.5	0.98	0.49	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.3$	$0.49e^{0.8s+0.045s^2}$	w_3
3-4	Fuse	0.9	0.98	0.88	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.3$	$0.88e^{0.8s+0.045s^2}$	w_4
4-5	Disseminate	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.3$	$0.98e^{0.8s+0.045s^2}$	w_5
5-6	Ingress	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 2, \sigma = 0.2$	$0.98e^{2s+0.02s^2}$	w_6
6-7	Find	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$	$0.98e^{0.5s+0.005s^2}$	w_7
7-8	Track	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$	$0.98e^{0.5s+0.005s^2}$	w_8
8-9	Identify	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.3, \sigma = 0.1$	$0.98e^{0.3s+0.005s^2}$	w_9
9-10	Deliver	1	0.98	0.98	Constant	0.1	$0.98e^{0.1s}$	w_{10}
10-11	Find	0.4	0.98	0.39	Normal	$\mu = 0.1, \sigma = 0.05$	$0.39e^{0.1s+0.00125s^2}$	w_{11}
10-12	Track	0.3	0.98	0.29	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$	$0.29e^{0.5s+0.005s^2}$	w_{12}
10-13	Kill	0.3	0.98	0.29	Normal	$\mu = 0.3, \sigma = 0.1$	$0.29e^{0.3s+0.005s^2}$	w_{13}
11-12	Track	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$	$0.98e^{0.5s+0.005s^2}$	w_{14}
12-13	Kill	1	0.98	0.98	Normal	$\mu = 0.3, \sigma = 0.1$	$0.98e^{0.3s+0.005s^2}$	w_{15}
13-14	Assess	1	0.98	0.98	Constant	0.1	$0.98e^{0.1s}$	w_{16}
2-1	Find	0.1	0.98	0.098	Normal	$\mu = 1, \sigma = 0.5$	$0.098e^{s+0.125s^2}$	w_{17}
3-2	Fix	0.1	0.98	0.098	Normal	$\mu = 1, \sigma = 0.2$	$0.098e^{s+0.02s^2}$	w_{18}
14-1	Find	0.05	0.98	0.049	Normal	$\mu = 1, \sigma = 0.5$	$0.049e^{s+0.125s^2}$	w_{19}
14-2	Fix	0.05	0.98	0.049	Normal	$\mu = 1, \sigma = 0.2$	$0.049e^{s+0.02s^2}$	w_{20}
14-3	Identify	0.05	0.98	0.049	Normal	$\mu = 0.8, \sigma = 0.2$	$0.049e^{0.8s+0.02s^2}$	w_{21}
14-7	Find	0.05	0.98	0.049	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$	$0.049e^{0.5s+0.005s^2}$	w_{22}
14-8	Track	0.05	0.98	0.049	Normal	$\mu = 0.5, \sigma = 0.1$	$0.049e^{0.5s+0.005s^2}$	w_{23}
14-9	Identify	0.05	0.98	0.049	Normal	$\mu = 0.3, \sigma = 0.1$	$0.049e^{0.3s+0.005s^2}$	w_{24}
14-10	Deliver	0.05	0.98	0.049	Constant	0.1	$0.049e^{0.1s}$	w_{25}
14-End	End	0.65	1	0.65	Constant	0	0.65	w_{26}

a) Transition probability; b) complete probability; c) achieve probability; d) transition function; e) transition function number

然后, 按照信号流图的传递函数矩阵形式理论, 等效传递系数满足如下关系:

$$X = \tilde{W}(s)^T X + \alpha x_0,$$

$$W(s) = X/x_0 = (I - \tilde{W}(s)^T)^{-1} \alpha,$$

设 $W(s)$ 的向量形式为

$$W(s) = (w_1(s), w_2(s), \dots, w_{15}(s))^T,$$

其中 x_0 表示开始节点, $X = (x_1, x_2, \dots, x_{15})^T$ 表示其余节点, $\alpha = (w_0, 0, \dots, 0)^T$, 利用编程计算可得 $W(s)$, 从而可得 $w_{15}(s)$.

最后, 根据式 (9)~(11) 分别计算, 得到结束节点实现的概率为

$$p = 0.7215,$$

结束节点实现的期望时间为

$$E(t) = 9.4406 \text{ min},$$

结束节点实现的时间的标准差为

$$\text{std} = 3.8730 \text{ min}.$$

5 总结与展望

当前打击链的研究还停留在哲学思想和概念层次上, 更多的是定性分析, 缺乏合理有效的打击链形式化表达模型和定量分析, 本文在打击链的形式化表达模型和定量分析上做了初步尝试.

本文构建了 3 类打击链模型, 分别是链路模型、无回路网络模型和有回路网络模型. 用随机方法来形式化表征完成时间、完成状况和转移状况等不确定因素, 给出了 3 类打击链模型闭环时间的计算评估方法. 本文的研究对开展不确定性打击链的建模、效能评估与生成等提供了帮助.

不确定性除了随机性以外, 还有模糊性等, 在后续研究中, 可以基于模糊性等不确定性, 进一步研究打击链. 打击链的链路模型中已经对闭环时间与概率的关系做了初步分析, 但是网络模型中还没有进行相关的分析. 在后续研究中, 可以对网络模型分析闭环时间与概率的关系. 打击链的效能评估指标不仅有闭环时间, 还有其他参数, 如毁伤率等. 毁伤率与闭环时间以及概率的关系也值得进一步研究. 在作战过程中, 如何对资源进行合理地动态调配, 满足时序、任务等多约束条件, 也是需要研究的问题, 可以通过网络模型对资源动态调配进行研究.

参考文献

- 1 Cheater J C. Accelerating the kill chain via future unmanned aircraft. Dissertation for M.S. Degree. Alabama: Air University, 2007
- 2 Marzolf G S. Time-critical targeting: predictive versus reactionary methods: an analysis for the future. Dissertation for M.S. Degree. Alabama: Air University, 2002
- 3 Gao Y, Liang W T, Ao Z G. Research on time-sensitive targets strike system of architecture. *Comput Tech Dev*, 2012, 22: 77-80, 84 [郜越, 梁维泰, 敖志刚. 时间敏感目标打击系统体系结构研究. *计算机技术与发展*, 2012, 22: 77-80, 84]
- 4 Wang S D. Cooperative engage link structuring method aiming at time critical target striking. *Comm Contrl Simul*, 2013, 35: 43-46, 59 [王圣东. 时敏目标协同打击链的构建. *指挥控制与仿真*, 2013, 35: 43-46, 59]
- 5 Zhang K D, Zhao S B. The command and control technology of time critical strike. *Comm Contrl Simul*, 2006, 28: 1-5 [张开德, 赵书斌. 时敏打击指挥控制技术初探. *指挥控制与仿真*, 2006, 28: 1-5]
- 6 Bloye B A. Optimizing the air-to-ground kill chain for time-sensitive targets. Dissertation for M.S. Degree. California: Naval Postgraduate School, 2009
- 7 Smith R M. Using kill chain analysis to develop surface ship CONOPS to defend against anti-ship cruise missiles. Dissertation for M.S. Degree. California: Naval Postgraduate School, 2010
- 8 Brickner W K. An analysis of the kill chain for time critical strike. Dissertation for M.S. Degree. California: Naval Postgraduate School, 2005
- 9 Zhao Z. Research on the modeling and evaluation method of weapon system of systems for striking time-sensitive-target. Dissertation for Ph.D. Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2009 [赵焯. 时敏目标打击体系建模与评估方法研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2009]

- 10 Ran J H, Liang J. Analysis on demands of “C4KISR” for new data link technology. *Ship Electr Eng*, 2010, 30: 22–23, 40 [冉建华, 梁军. “杀伤链”对数据链新技术的需求分析. *舰船电子工程*, 2010, 30: 22–23, 40]
- 11 Hebert A J. Compressing the kill chain. *Air Force Mag*, 2003, 86: 50–55
- 12 Pritsker A B. GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Santa Monica: Rand Corporation, 1966
- 13 Wu Y, Pan X, Kang R, et al. Aircraft support process time analysis based on graphic evaluation and review technique. *Acta Armam*, 2013, 34: 1611–1615 [吴勇, 潘星, 康锐, 等. 基于图示评审技术的舰载机航空保障时间分析. *兵工学报*, 2013, 34: 1611–1615]
- 14 Liu F Y. On the application of GERT method in reliability of some reliability systems. Dissertation for M.S. Degree. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008 [刘飞燕. GERT 方法在系统可靠度计算中的应用研究. 硕士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2008]
- 15 Xu Z, Wu J J, Yao L G. Quantitative appraisal model of technical risk for weapon system based on GERT simulation technique. *J Syst Simul*, 2008, 20: 1655–1664 [徐哲, 吴瑾瑾, 姚李刚. 基于 GERT 仿真的武器装备技术风险量化评估模型. *系统仿真学报*, 2008, 20: 1655–1664]
- 16 Chen H C. The matrix expression of signal flow graph and its application in system analysis software. *Chinese J Electron*, 2002, 11: 361–363

Representation and evaluation of the closed-loop time of the kill chain under uncertainties

Jun LU*, Yao ZHANG & Yongjie QIAO

China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

*Corresponding author. E-mail: ljswsx@163.com

Abstract The kill chain is important for forming system-combat capabilities based on an information system and improving combat effectiveness. The closed-loop time is one of the most important indexes characterizing the efficiency of the kill chain. The combat process has considerable uncertainties; the expression of the uncertainties and evaluation of the efficiency of the kill chain provide basic groundwork in kill chain research. In this paper, we construct three types of kill chain models based on the typical combat system and process, which are chain, network without loop, and network with loop. We then introduce three different closed-loop time calculations for the three models based on stochastic methods to express the uncertainties in the completion time, completion situation, and transformation situation of the activities in the kill chain. The results of this paper provide a theoretical basis and technical support with respect to problems in modeling, evaluating the effectiveness, and constructing the kill chain.

Keywords kill chain, closed-loop time, evaluation, uncertainty, GERT



Jun LU was born in 1964. He received his Master's degree from the University of Science and Technology of China, Hefei, in 1988. Currently, he is a senior researcher at the China Academy of Electronics and Information Technology. His research interests include information systems and electronic information systems.