

網狀化武器系統架構及任務效能分析

Networked Weapon Systems Architecture and Mission Effectiveness Analysis

郭壽齡

國防部軍備局生產製造中心第二〇九廠

Shou-Ling Kuo

The 209th Plant, Materiel Production Center, AB, MND

Email: g990402@gmail.com

摘要

軟體及網路的普及增加了武器系統的分散性及強健性，尤其當系統具有自我回復及變更結構的能力時更是如此，但這也導致有可能發生系統性能正常但卻無法執行任務的狀況。因此，要計算出一個網狀化武器系統（集成系統）的任務效能是件困難的工作。本研究應用類似更新理論，針對集成系統的特性提出在多次攻擊下之操作任務效能計量模型，可以評估集成系統在遭受多次攻擊的狀況下仍能有效完成任務的能力，有效排除系統結構不斷變動及性能正常卻無法執行任務的問題。

1. 前言

高科技資訊武器廣為運用於戰場之上，使得武器系統的規模愈來愈龐大且複雜，也改變了作戰型態。2001年，美國國防部向國會報告書中提出網狀化作戰(NCW, Network Centric Warfare)及以網路為中心的行動(NCO, Network Centric Operations)，作為軍力轉型戰略計畫的基本指導原則[1]。我國國防部亦於民國97年出版的國防報告書中提出[2]：「網狀化作戰」已是21世紀的作戰形態，國軍將在既有C4ISR系統能力基礎上，持續精進指、管、通、資、情、監、偵系統整合，運用先進戰術數據鏈路系統，鏈結國軍主要感測器、新一代武器載台與重要指管機構，建構與強化「網狀化作戰」能力。

網狀化武器系統與傳統武器最大的不同在於各作戰人員及組織可以藉由分散但緊密連結的武器系統，達到資訊分享、自我同步行動的目的，也就是從現階段「載台為中心(Platform Centric)」演變為「網路為中心(Network Centric)」的武器系統(如圖1)。由於網狀化作戰必須靠可信賴的通信網路來達成，因此對作戰的殺傷概念已由人員、裝備的殺傷性破壞轉變為對網路通信及資訊系統實施阻絕、衰退、破壞或摧毀的失能性攻擊。因此，在失效及受攻擊的影響下，單一武器或系統是否妥善已非必要，整個集成系統執行任務的效能才是我們最為關心的議題，必須因應網狀化作戰的新思維而改以多個系統整合而成的「集成系統(SoS, System of Systems)」來建立架構[3]，其重點在於以技術手段確保集成系統在面對大規模

攻擊時仍能在要求的時間內完成任務，維持整個武器系統的任務效能(Mission Effectiveness)，使得聯合作戰任務在受攻擊的情況下仍能有效遂行。

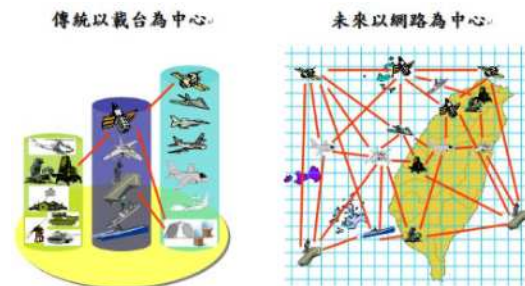


圖 1 聯合作戰武器系統連結架構演進

本研究定義集成系統任務效能是指系統在發生內部失效(受系統可靠度、惡劣環境、人為疏失影響)及外部攻擊(天然災害、意外事故、蓄意破壞)的狀況下，仍然可於規定(要求或容許)的時間內完成任務的能力。集成系統具有的特性因子如下[4]：

- 大規模與高複雜度的整合
- 協同和動態工程
- 工程的不確定性
- 著重設計最佳化
- 不斷進行架構重建
- 意外事件發生時的同步模式模擬
- 嚴格的介面設計和管理

以任務為導向的任務效能計量模型，係考量有效滿足集成系統完成任務(服務)的能力，可以排除系統結構不斷變動及性能正常卻無法執行任務的問題。因此，部分學者專家[5-9]開始以系統執行任務或服務的能力為考量基礎，來評估整個系統的各项效能。本研究建構一個在多次攻擊下的任務效能隨機數學模型，數值計算分析的結果可以作為集成系統設計及獲得時之決策參考。

2. 集成系統任務效能概念及模型

2.1 集成系統任務效能概念

集成系統包含硬體、軟體、介面、網路以及通訊，在平時必須能有效率地完成任務；在遭受攻擊的狀況下，更要能夠確保有效達成任務。集成

系統的任務效能有賴於事件發生時系統的反應，這取決於系統的結構(configuration)、遭受攻擊及自我防護的強度以及回復率(resiliency)。即使集成系統被損壞、滲透或遭受危害，任務都必須能夠在要求的時間之內完成；若無法在要求(容許)的時間之內完成任務，就算是集成系統仍然可以使用，其任務效能仍然為0。

影響集成系統任務效能的因素包括：(a)集成系統完成每個個別任務或次任務的能力(受系統可靠度、惡劣環境、人為疏失影響)；(b)任務或次任務在整個任務中的權重(重要程度)；(c)被攻擊的強度(天然災害、意外事故、蓄意破壞)；(d)防護強度(隱蔽、掩蔽、偽裝、電磁防護、防毒軟體、防火牆...等)；(e)被攻擊後的回復力—包括硬體維修(repair)、備援(redundancy)，軟體恢復(restoration)、回復(recovery)及韌體重置(reset)。

2.2 集成系統任務效能模型

本研究基於以下假設建構集成系統任務效能數學模型：

1. 集成系統可以自行回復或修復。
2. 所有任務/次任務相互獨立。
3. 操作任務效能與遭受攻擊強度及自我防護強度有關。
4. 攻擊作用時間均忽略不計。
5. 同一時間點僅有一個事件發生。

符號說明

A	受攻擊強度， $0 \leq A \leq 1$
C_i	參數 $(\tau_i, T_i, r_i, A_i, P_i)$ 的集合
e_n	在第 n 段時間 $(t_n - t_{n-1})$ 內完成任務的效能值
m	集成系統執行關鍵性任務數
n	集成系統執行非關鍵性任務數
P	防護強度， $0 \leq P \leq 1$
q	系統失效次數/SoS 遭受攻擊次數
r	回復時間，若 $\tau \leq r$ ，則 $(\tau - r) = 0$

$$E(t) = e_1(F_M(t_1) - F_M(t_0)) + e_2(F_M(t_2) - F_M(t_1)) + e_3(F_M(t_3) - F_M(t_2)) + \dots$$

$$= \sum_{i=1}^n e_n(F_M(t_n) - F_M(t_{n-1})) \quad (1)$$

其中 $n \in N$ ， $t_0 = 0$ ， $0 \leq e_n \leq 1$ 。

假設集成系統在任務完成要求時間 τ 內完成任務時，其任務的效能值為1，則 $e_a = \tau$ ，且 $e_1 = e_2 = e_3 \dots = e_a = 1$ ；若無法在任務完成要求時間 τ 內完成，但可在任務完成容許時間 T 內完成時，其任務的效能值為 $(T - \tau)/T$ ，則 $t_b = T$ ，

$$E(t) = \sum_{i=1}^a 1 \cdot (F_M(t_i) - F_M(t_{i-1})) + \sum_{j=a+1}^b (T - \tau/T) \cdot (F_M(t_j) - F_M(t_{j-1})) + \sum_{k=b+1}^{+\infty} 0 \cdot (F_M(t_k) - F_M(t_{k-1}))$$

t	任務執行時間
T	任務完成容許時間， $\tau \leq T$
u, v	惡化參數
W_c	關鍵性任務權重
W_u	非關鍵性任務權重
w_k	非關鍵性次任務權重
τ	任務完成要求時間
$Ei(\tau, T)$	固有任務效能函數(Inherent Mission Effectiveness Function, IMEF)
$Eo(\tau, T, r, A, P)$	操作任務效能函數(Operational Mission Effectiveness Function, OMEF)
$F_{X_n}(t)$	第 n 次失效的累積機率函數
$f_{X_n}(t)$	第 n 次失效的機率密度函數
$F_M(t)$	在時間 t 內完成任務之累積機率函數。
$f_M(t)$	在時間 t 內完成任務之機率密度函數。
$F_R(r)$	在時間 r 內完成回復之累積機率函數。
$z(t)$	系統失效率
$\phi(t)$	任務完成率
$(A - P)$	損傷程度，若 $A \leq P$ ，則 $(A - P) = 0$

首字母縮略字

Cdf	累積機率函數(Cumulative distribution function)
pdf	機率密度函數(Probability density function)

考慮某集成系統完成任務的機率服從某機率分配 $F_M(t)$ ，在第 n 段時間 $(t_n - t_{n-1})$ 內完成任務的效能值為 $e_n \in \{e_1, e_2, e_3, \dots\}$ ，則系統任務效能可表示為

$e_{a+1} = e_{a+2} = \dots = e_{b-1} = e_b = (T - \tau)/T$ ；又若在任務完成容許時間 T 內也無法完成時，其任務的效能值為0，則 $t_{+\infty} = +\infty$ ， $e_{b+1} = e_{b+2} = e_{b+3}, \dots = e_{\infty} = 0$ 。故(1)式可表示為

$$\begin{aligned}
&= 1 \cdot \sum_{i=1}^a (F_M(t_i) - F_M(t_{i-1})) + (T - \tau/T) \sum_{j=a+1}^b (F_M(t_j) - F_M(t_{j-1})) + 0 \cdot \sum_{k=b+1}^{+\infty} (F_M(t_k) - F_M(t_{k-1})) \\
&= 1 \times (F_M(t_a) - F_M(0)) + (T - \tau/T) \times (F_M(t_b) - F_M(t_a)) + 0 \times (F_M(+\infty) - F_M(t_b)) \\
&= 1 \times (F_M(\tau) - F_M(0)) + (T - \tau/T) \times (F_M(T) - F_M(\tau)) + 0 \times (F_M(+\infty) - F_M(T)) \quad (2)
\end{aligned}$$

其中 $a, b \in N$, $a < b$ 。

在(2)式中，當系統無法在任務完成要求時間 τ 內完成，但可在任務完成容許時間 T 內完成時，將其執行任務的效能值訂為 $(T - \tau)/T$ 具有以下 2 個優點：

(1) 符合建模需求：當系統完成任務的時間大於 τ 且小於 T 時，其完成任務的效能值應該介於 1 與 0 之間，以 $(T - \tau)/T$ 表示可以依不同系統、不同任務、不同要求及不同情境而改變，有利於計量模型之建立。

(2) 符合現實狀況：當 $T \rightarrow \tau$ 時， $(T - \tau)/T \rightarrow 0$ ，表示容許系統完成任務的時間只能比要求時間寬鬆一點點；若 $T = \tau$ 時，則

$$Ei(\tau, T) = [F_M(\tau) \times 1] + \left[(F_M(T) - F_M(\tau)) \times \frac{T - \tau}{T} \right] + [(F_M(+\infty) - F_M(T)) \times 0] \quad (3)$$

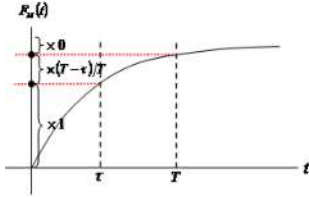


圖 2 以累積機率函數計算系統固有任務效能

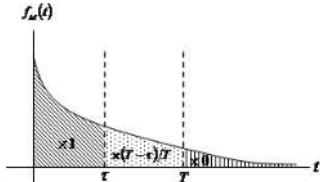


圖 3 以機率密度函數計算系統固有任務效能

$(T - \tau)/T = 0$ ，表示不容許系統完成任務的時間超過 τ 。而當 $T \rightarrow +\infty$ 時， $(T - \tau)/T \rightarrow 1$ ，表示容許系統完成任務的時間沒有限制，故於任何時間完成任務，其效能值均為 1。

2.3 集成系統任務效能定義

定義 1：固有任務效能 (Inherent Mission Effectiveness) 是指系統在發生內部失效的狀況下 (受系統可靠度、惡劣環境、人為疏失影響)，仍然可以於規定 (要求或容許) 的時間內完成任務的機率。依據定義，固有任務效能的數學模型如下 (圖 2 及圖 3 可以說明如何計算固有任務效能)：

定義 2：操作任務效能 (Operational Mission Effectiveness) 是指系統在發生內部失效 (受系統可靠度、惡劣環境、人為疏失影響) 及外部攻擊 (天然災害、意外事故、蓄意破壞) 的狀況下，仍然可以於規定 (要求或容許) 的時間內完成任務的機率。操作任務效能聚焦於在無邊界的環境中即使系統被破壞 (damaged)、滲透 (penetrated) 或遭受危害 (compromised)，仍然可以維持執行任務的必要能力。依據定義，操作任務效能的數學模型如下：

$$\begin{aligned}
Eo(\tau, T, r, A, P) &= (1 - (A - P)) \times \left\{ [F_M(\tau - r) \times 1] + \left[(F_M(T - r) - F_M(\tau - r)) \times \frac{(T - r) - (\tau - r)}{(T - r)} \right] \right. \\
&\quad \left. + [(F_M(+\infty - r) - F_M(T - r)) \times 0] \right\} \times \left\{ \frac{1}{1 - (A - P)} \times F_R \left(r \times \left(\frac{P}{A} \right) \right) \right\} \quad (4) \\
&= \begin{cases} \left\{ [F_M(\tau - r) \times 1] + \left[(F_M(T - r) - F_M(\tau - r)) \times \frac{(T - \tau)}{(T - r)} \right] \right\} \times F_R \left(r \times \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } r \leq \tau, P < A. \\ [F_M(T - r) \times 1] \times F_R \left(r \times \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } \tau < r \leq T, P < A. \\ [F_M(\tau) \times 1] + \left[(F_M(T) - F_M(\tau)) \times \frac{T - \tau}{T} \right], & \text{when } P \geq A. \end{cases}
\end{aligned}$$

定義3：若個別次任務在執行任務中是必要的，則該次任務稱為**關鍵性任務/次任務(critical mission/submission)**。

由關鍵性任務/次任務所構成的集成系統任務效能數學模型為相乘的型態：

$$Ei_s = \prod_{j=1}^m Ei_j(\tau_j, T_j), \quad m \in N \quad (5)$$

$$Eo_s = \prod_{j=1}^m Eo_j(\tau_j, T_j, r_j, A_j, P_j), \quad m \in N \quad (6)$$

若集成系統只執行關鍵性任務，且對其中一項次任務的任務效能為0，則整個集成系統的任務效能為0。

定義4：若個別次任務在執行任務中不是必要的，則該次任務稱為**非關鍵性次任務(uncritical mission/submission)**。

由非關鍵性任務/次任務所構成的集成系統任務效能數學模型為相加的型態：

$$Ei_s = W_c \prod_{j=1}^m Ei_j(\tau_j, T_j) + W_u \sum_{k=1}^n w_k Ei_k(\tau_k, T_k), \quad m, n \in N \quad (9)$$

$$Eo_s = W_c \prod_{j=1}^m Eo_j(\tau_j, T_j, r_j, A_j, P_j) + W_u \sum_{k=1}^n w_k Eo_k(\tau_k, T_k, r_k, A_k, P_k), \quad m, n \in N \quad (10)$$

其中 $W_c + W_u = 1$, $\sum_{k=1}^n w_k = 1$.

根據定義5，集成系統在遭受攻擊並具有防護及回復能力的環境下，我們可以由系統完成任務之累積機率函數 $F_M(t)$ 及完成回復之累積機率函數 $F_R(r)$ 來表示集成系統的固有任務效能及操作任務效能。

3. 應用類似更新過程分析集成系統在多次攻擊下之任務效能

本節將介紹類似更新理論，並且討論集成系統在多次攻擊下之操作任務效能。

3.1 類似更新過程

Wang and Pham[10,11]定義類似更新過程如下：

定義6：若失效發生為一隨機可數的連續過程 $\{N(t), t \geq 0\}$ ，在第 $q-1$ 次與第 q 次失效發生的時間長度為 X_q ， $q \geq 1$ 。觀察此連續非負的隨機變數 $\{X_1, X_2, X_3, \dots\}$ ，若有一定數 $u > 0$ 使得 $X_1 = Z_1$ ， $X_2 = uZ_2$ ， $X_3 = u^2Z_3, \dots$ ，其中 Z_i 為相同獨立分配(independent and identically distribution, iid)的隨機變數。則稱此連續過程 $\{N(t), t \geq 0\}$ 為具有可靠度成長參數 u 及第1次失效發生的時間長度 X_1 之類似更新過程。

根據定義6，我們可以第1次失效發生時間的

$$Ei_s = \sum_{k=1}^n w_k Ei_k(\tau_k, T_k), \quad n \in N \quad (7)$$

$$Eo_s = \sum_{k=1}^n w_k Eo_k(\tau_k, T_k, r_k, A_k, P_k), \quad n \in N \quad (8)$$

其中 w_k 為非關鍵性次任務權重，且 $\sum_{k=1}^n w_k = 1$ 。

然而，集成系統通常被要求同時執行許多任務及次任務，一個任務可能包含許多次任務及再細分的任務。因此，我們必須依據實際的狀況，決定每個次任務是否為關鍵性次任務以及對整個任務的重要性權重，據以計算出集成系統執行整個任務的效能。

定義5：若集成系統同時執行許多關鍵性及非關鍵性任務或次任務時，集成系統的任務效能數學模型如下：

Cdf、*pdf* 及失效率(failure rate)來表示符合類似更新過程之軟體失效模型 *Cdf*、*pdf* 及失效率如下：

$$F_{X_q}(t) = F_{X_1}(u^{-(q-1)}t) \quad (11)$$

$$f_{X_q}(t) = \frac{f_{X_1}(u^{-(q-1)}t)}{u^{q-1}} \quad (12)$$

$$z_{X_q}(t) = \frac{z_{X_1}(u^{-(q-1)}t)}{u^{q-1}}. \quad (13)$$

3.2 多次攻擊下之操作任務效能分析

應用類似更新過程的概念，考慮某集成系統完成任務的機率服從某機率分配 $F_M(t)$ ，且每次遭受攻擊後系統完成任務的機率將造成惡化，假設惡化參數為 u ，系統執行任務時遭受攻擊次數為 q ，則系統完成任務的行為模型之 *Cdf*、*pdf* 及完成率如下：

$$F_{M, X_q}(t) = F_{M, X_1}(u^{-(q-1)}t) \quad (14)$$

$$f_{M, X_q}(t) = \frac{f_{M, X_1}(u^{-(q-1)}t)}{u^{q-1}} \quad (15)$$

$$\phi_{X_q}(t) = \frac{\phi_{X_1}(u^{-(q-1)}t)}{u^{q-1}}. \quad (16)$$

其中 $u \geq 1$ ， $q \in N$

將(14)式帶入(4)式，可得系統遭受 q 次攻擊後的操作任務效能為

$$\begin{aligned}
Eo &= (1 - (A - P)) \times \left\{ \left[F_{M, X_q}(\tau - r) \times 1 \right] + \left[\left(F_{M, X_q}(T - r) - F_{M, X_q}(\tau - r) \right) \times \frac{(T - r) - (\tau - r)}{(T - r)} \right] \right. \\
&\quad \left. + \left[F_{M, X_q}(\infty - r) - F_{M, X_q}(T - r) \right] \times 0 \right\} \times \left\{ \frac{1}{1 - (A - P)} \times F_R \left(r \times \left(\frac{P}{A} \right) \right) \right\} \\
&= \begin{cases} \left\{ \left[F_{M, X_q}(\tau - r) \times 1 \right] + \left[\left(F_{M, X_q}(T - r) - F_{M, X_q}(\tau - r) \right) \times \frac{(T - \tau)}{(T - r)} \right] \right\} \times F_R \left(r \times \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } r \leq \tau, P < A. \\ \left[F_{M, X_q}(T - r) \times 1 \right] \times F_R \left(r \times \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } \tau < r \leq T, P < A. \\ \left[F_{M, X_q}(\tau) \times 1 \right] + \left[\left(F_{M, X_q}(T) - F_{M, X_q}(\tau) \right) \times \frac{T - \tau}{T} \right], & \text{when } P \geq A. \end{cases} \\
&= \begin{cases} \left\{ \left[F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (\tau - r)) \times 1 \right] + \left[\left(F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (T - r)) - F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (\tau - r)) \right) \times \frac{T - \tau}{T - r} \right] \right\} \times F_R \left(r \times \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } r \leq \tau, P < A. \\ \left[F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (T - r)) \times 1 \right] \times F_R \left(r \times \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } \tau < r \leq T, P < A. \\ \left\{ \left[F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot \tau) \times 1 \right] + \left[\left(F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot T) - F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot \tau) \right) \times \frac{T - \tau}{T} \right] \right\}, & \text{when } P \geq A. \end{cases} \quad (17)
\end{aligned}$$

若每次遭受攻擊後系統回復能力亦造成惡化，假設回復能力惡化參數為 v ，則系統遭受 q 次攻擊後的操作任務效能為

$$\begin{aligned}
Eo &= \begin{cases} \left\{ \left[F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (\tau - r)) \times 1 \right] + \left[\left(F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (T - r)) - F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (\tau - r)) \right) \times \frac{T - \tau}{T - r} \right] \right\} \times F_{R, Y_1} \left(v^{-(q-1)} \cdot r \cdot \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } r \leq \tau, P < A. \\ \left[F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (T - r)) \times 1 \right] \times F_{R, Y_1} \left(v^{-(q-1)} \cdot r \cdot \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } \tau < r \leq T, P < A. \\ \left\{ \left[F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot \tau) \times 1 \right] + \left[\left(F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot T) - F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot \tau) \right) \times \frac{T - \tau}{T} \right] \right\}, & \text{when } P \geq A. \end{cases} \quad (18)
\end{aligned}$$

3.3 數值計算結果及分析

本節我們討論集成系統遭受多次攻擊後之操作任務效能計算。若已知系統完成任務之累積機率函數 $F_M(t)$ 服從韋伯分配，其參數 $\eta=3$ ， $\beta=4$ ，惡化參數 $u=1.1$ ；遭受攻擊後完成回復之累積機率

函數 $F_R(r)$ 服從常態分配，其參數 $\mu=4$ ， $\sigma=2$ ，惡化參數 $v=1.1$ 。假設任務完成要求時間 $\tau=17$ 秒，任務完成容許時間 $T=20$ 秒，受攻擊強度 $A=0.8$ ，防護強度 $P=0.7$ ，根據(18)式，系統遭受 q 次攻擊的操作任務效能計算如下：

$$\begin{aligned}
Eo &= \begin{cases} \left\{ \left[F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (\tau - r)) \times 1 \right] + \left[\left(F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (T - r)) - F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (\tau - r)) \right) \times \frac{T - \tau}{T - r} \right] \right\} \times F_{R, X_1} \left(v^{-(q-1)} \cdot r \cdot \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } r \leq \tau. \\ \left[F_{M, X_1}(u^{-(q-1)} \cdot (T - r)) \times 1 \right] \times F_{R, X_1} \left(v^{-(q-1)} \cdot r \cdot \left(\frac{P}{A} \right) \right), & \text{when } \tau < r \leq T. \end{cases} \\
&= \begin{cases} \left\{ \left[\left(1 - e^{-\frac{(u^{-(q-1)}(\tau-r))^\beta}{\eta}} \right) \times 1 \right] + \left[\left(\left(1 - e^{-\frac{(u^{-(q-1)}(T-r))^\beta}{\eta}} \right) \right) \times \frac{15-10}{15-r} \right] \right\} \times \left(\int_0^{v^{-(q-1)}r(P/A)} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\xi \right), & r \leq 10. \\ \left[\left(1 - e^{-\frac{(u^{-(q-1)}(T-r))^\beta}{\eta}} \right) \times 1 \right] \times \left(\int_0^{v^{-(q-1)}r(P/A)} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\xi \right), & 10 < r \leq 15. \end{cases}
\end{aligned}$$

因為任務完成容許時間為一固定常數，若系統執行回復時間增加，雖然可完成回復的機率增加，但是所剩可以執行任務的時間卻減少，導致在容許時間內完成任務的機率變小。因此，必須權衡出最

佳系統回復時間及執行任務時間，以使系統獲得最大操作任務效能。系統遭受不同次數攻擊的最大操作任務效能剖面圖 $Eo(q=1 \sim 5)$ 如圖 4，最大操作任務效能數值計算結果如表 1。由表 1 數值分析

結果可知，系統操作任務效能 在遭受第 1 次攻擊時為 0.976433；當系統遭受第 5 次攻擊時，其操作任務效能降為 0.860735；而當系統遭受第十次攻擊時，其操作任務效能更降為 0.305891。此外，若增加任務完成容許時間，理論上系統操作任務效能亦會隨著增加，但是由圖 5 我們可以發現，當系統遭受第 5 次攻擊時，若只將任務完成容許時間延長至 22 秒，系統最大操作任務效能並未比原來 $T=20$ 時的值 0.860735 來得大，而必須延長至 22.31 秒以上，才能有效增加操作任務效能。當任務完成容許時間延長至 23 秒且回復時間 $r=17$ 秒時，SoS 具有最大操作任務效能 $Eo_{max}=0.946202$ 。

表 1 系統遭受不同次數攻擊最大操作任務效能數值計算結果

q	r	Eo
1	11.91	0.976433
2	11.73	0.972476
3	11.54	0.958625
4	11.33	0.924425
5	11.10	0.860735
6	10.86	0.766332
7	10.60	0.649933
8	10.33	0.526003
9	10.04	0.408330
10	9.72	0.305891

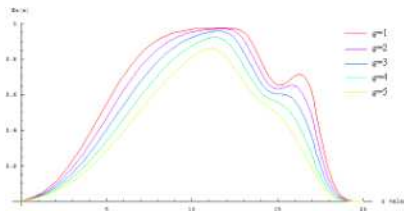


圖 4 系統遭受不同次數攻擊的最大操作任務效能剖面圖

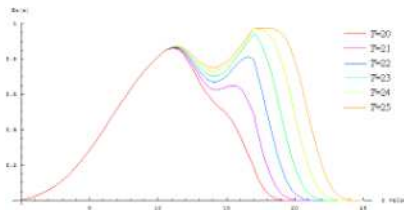


圖 5 系統增加任務完成容許時間的最大操作任務效能剖面圖 ($q=5, T=20,21,22,23,24,25$)

4. 結論及未來工作

本研究應用類似更新理論，針對集成系統的特性提出在多次攻擊下之任務效能計量模型，有效排除系統結構不斷變動及性能正常卻無法執行任務的問題，可以評估集成系統在遭受不同攻擊次數的狀況下仍能有效完成任務的能力。

後續可以結合系統工程與分析 (System

Engineering and Analysis)方法，利用「功能分析流程圖(Function Analysis Flow Diagram)」及「工作分解結構(WBS, Work Breakdown Structure)」分析出與任務相關之設施或組織(不同任務或次任務可能會由相同的設施或組織來執行)，依照其可能遭受攻擊的次數多寡決定優先加強其防護強度或回復能力，並依據研發、製造及維持成本計算集成系統任務效能最佳化之設計；亦可以在規定的任務效能下，預估不同設計的最小成本。對於龐大、複雜系統的架構設計、資源分配、效益分析及成本預估等作業提供一個切實可行的計量方法。

5. 參考文獻

- [1] Office of the Secretary of Defense, Office of Force Transformation, *Network Centric Warfare: Department of Defense Report to Congress*, US Government Printing Office, Washington DC, 2001.
- [2] “中華民國九十七年國防報告書”，中華民國國防部，第177頁，民國97年。
- [3] *Systems Engineering Guide for Systems of Systems*, Version 1.0, Washington, DC: ODUSD(A&T)SSE, p. 17, 2008.
- [4] *Defense Acquisition Guidebook*, Defense Acquisition University, Chapter 4, p. 101, 2006, <http://akss.dau.mil/dag>.
- [5] Sherif M. Yacoub and Hany H. Ammar, “A methodology for architecture-level reliability risk analysis,” *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 529-547, June 2002.
- [6] Sherif M. Yacoub, Bojan Cukic and Hany H. Ammar, “A scenario-based reliability analysis approach for component-based software,” *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 53, No. 4, pp. 465-480, December 2004.
- [7] Abidin E. Olmez, “Mission centric reliability analysis of C4ISR architectures using Petri Nets,” *Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 587-592, 2003.
- [8] Yuan-Shun Dai, Gregory Levitin and Xiaolong Wang, “Optimal task partition and distribution in grid service system with common cause failures,” *Future Generation Computer Systems*, Vol. 23, pp. 209-218, 2007.
- [9] Gregory Levitin and Yuan-Shun Dai, “Service reliability and performance in grid system with star topology,” *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, pp. 40-46, 2007.
- [10] Hong-Zhou Wang, Hoang Pham, “A quasi-renewal process and its applications in imperfect maintenance,” *International Journal of Systems Science*, Vol. 27, pp. 1055-1062, 1996.
- [11] Hong-Zhou Wang, Hoang Pham, Changes to: “A quasi-renewal process and its applications in imperfect maintenance,” *International Journal of Systems Science*, Vol. 28, pp. 1329, 1997.