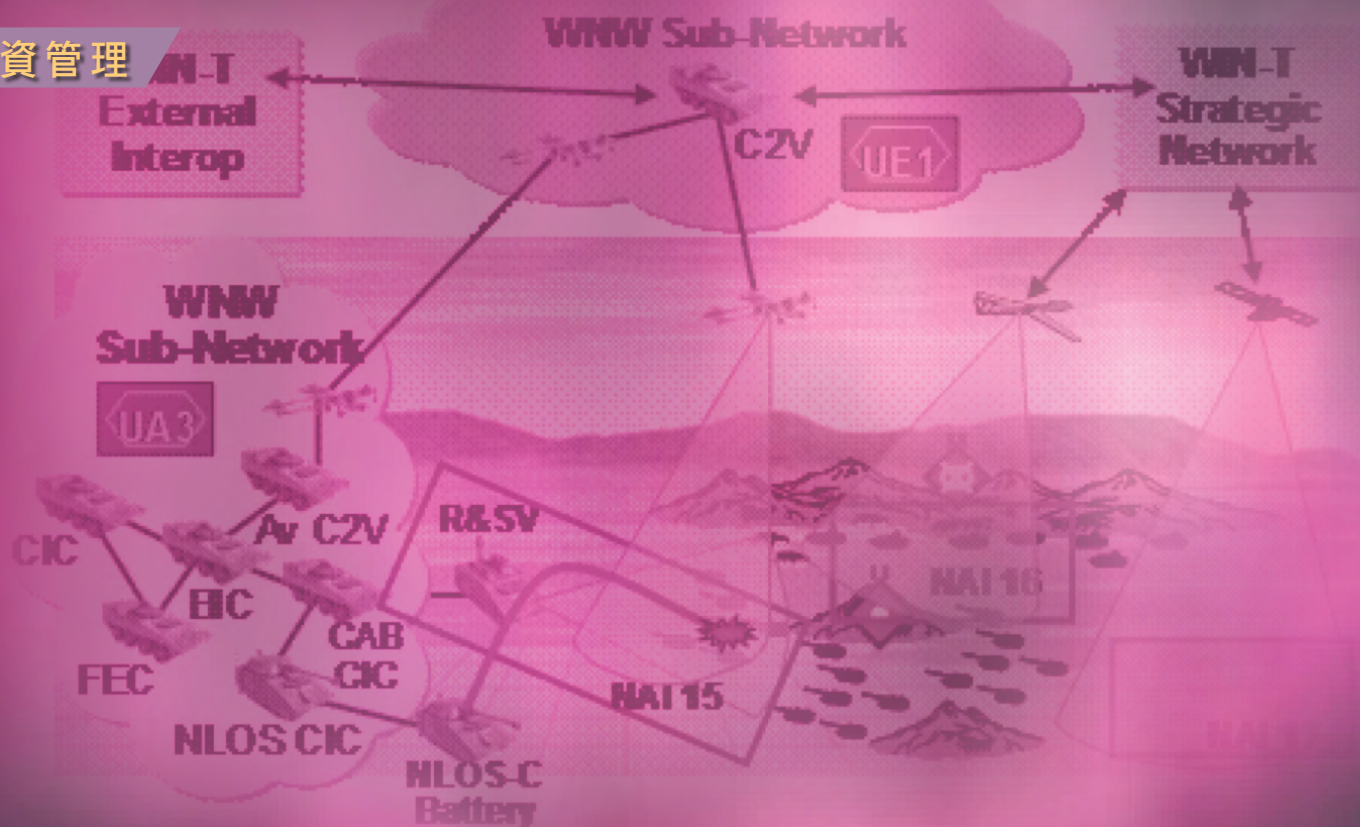




以馬可夫鏈分析網狀化作戰環境中通資網路系統可靠度

提要

李建璋

- 一、資通訊科技的發展，影響了現代戰爭型態，網狀化作戰的概念也應運而生，資訊優勢的創造與掌握是網狀化作戰之關鍵因素，作戰時藉由資通訊科技的輔助支援，可有效提升與發揮整體戰力。
- 二、通資網路系統為網狀化作戰之核心基礎，資料鏈路的連結讓指管系統、指揮者、武器載台間異質平臺相互構連，快速地進行資訊傳遞、處理與分享，以達成即時性、同步性之協同合作目標。
- 三、網狀化作戰環境之通資網路系統拓模結構，在指管與資訊交換作為上有關鍵性之影響，網路系統可靠度在達成作戰目標上更為重要。本研究提出一個以馬可夫鏈為基礎之可靠度分析模式，來說明在靜態模式下網路系統架構可靠度在節點與連結規劃上，對網狀化作戰整體效益之影響。

關鍵詞：網狀化作戰、資訊優勢、可靠度、馬可夫鏈模式

壹、前言

當前，資通訊技術在軍事領域廣泛應用，正推動戰爭形態由機械化向資訊科技化加速轉變，科技資訊化戰爭是一種立體化作戰，戰場空間廣闊，作戰手段多樣，情況複雜多變，物資消耗巨大，而現代戰爭具有高消耗、節奏加快、作戰地域縱深長、範圍大等特點，在戰場上訊息的快速正確傳送對戰場狀況掌握、作戰指管作為、戰場資訊分享具有高度影響，而要達到此一目的，通資網路基礎架構是決定勝敗關鍵性重要因素。

網路系統為通信、資訊系統之基礎建設，建構安全、可靠、效率及彈性的網路系統，在作戰指管通情上佔有舉足輕重的角色。在網狀化作戰環境下，指管通情系統必須有效率、有效能地整合各類異質平臺及裝備，武器系統及通信裝備亦需具備高效率的可移動性，才能符合現代軍事作戰的需求，因此發展『可移動式』的網路系統，並能彈性地連結各式各樣可移動式裝備，是現今發揮指管通情系統戰力之重要關鍵。在戰場中大量不同類型資料(如影像、語音等資料)在網路上傳輸，通資網路系統必須提供穩定的傳輸能力才能確保指管程序順暢，故網路系統的可靠度對資訊優勢的掌握有重要性的影響，而網路系統整體架構在可靠度分析上又為系統整體運作核心基礎。

可靠度分析的主要目的在希望能透過數

學模式運算下，了解在網狀化作戰場景中，在通資網路系統的架構設計階段，能先加以評估資源的配置效益，並能提供決策者不同規劃方案，減少錯誤發生，影響整體指管效能與資訊優勢的掌握，基於這樣的動機，本研究主要目的在運用馬可夫鏈模式，對靜態模式通資網路系統架構作可靠度計算，同時找出整體系統中那些節點為系統弱點，造成系統可靠度降低，作為國軍未來在通資網路系統建置上參考依據。

貳、文獻探討

一、網狀化作戰

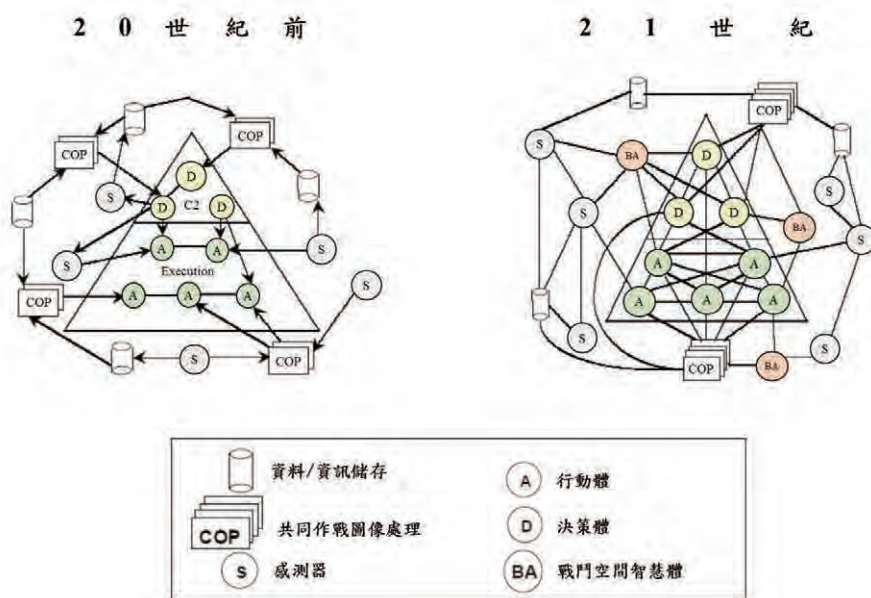
網狀化作戰(Network-Centric Warfare, NCW)，也可稱Network-Centric Operations, NCO)，是相對於傳統的平臺中心戰(Platform-Centric Warfare)而提出的一種新作戰概念。所謂平臺中心戰，是指各平臺主要依靠自身探測器和武器進行作戰，其主要特點是平臺之間的資訊共用非常有限。而網狀化作戰是通過各作戰單元的網路化，把資訊優勢變為作戰行動優勢，使各分散配置的部隊共同感知戰場態勢，從而自主地協調行動，發揮出最大整體作戰效能的作戰模式，它使作戰重心由過去的平臺轉向網路。不言而喻，網狀化作戰能夠幫助作戰部隊創造和利用資訊優勢並大幅度提高戰鬥力。它具有戰場態勢全維感知能力，作戰力量一體化，作戰行動即

時性、部隊協調同步性等特點¹。網狀化作戰係一種提升「資訊優勢」的作戰概念，藉鏈結偵測系統、指管系統與武器系統成為網狀結構來倍增戰力，以達成情資共享、共同戰況體認、加快指揮速度、提高作戰效能、精確打擊、增加殺傷力、提高存活率以及相當程度的自我同步行動性²。

網狀化作戰是資訊優勢的呈現，不同於以往的平臺中心化作戰，網狀化作戰需要靠安全穩定的通資網路來達成指揮管制，由於現代戰爭形態逐漸變成科技化戰爭，戰場空間轉為多維空間，戰場資訊(聲音、影像、數據、圖像等)的傳輸需求變大，所以要如何能快速、即時、安全、穩定的將前方資訊傳送後方指揮中心，完成決策分析，將作戰命令下達前方，都需仰賴完備的網路架構與技術來達成。傳統的以單一載台為主的作戰型態中，發現僅能單獨的完成作戰任務，系統或武器載台間無法有效的進行資訊交換，達成協同合作目標，

在現今戰場資訊質與量大幅增加的需求下，作戰個體不再僅限於自身的資訊，必須分享交換其他個體的資訊，達到作戰協同合作及提升戰場空間知覺，在戰場上創造出所謂的共同作戰圖像(Common Operational Pictures, COPs)。

圖一所示為在傳統平臺化與未來網狀化作戰中，作戰個體間相互協調合作情況，而共同作戰圖像概念也是將傳統載台化作戰轉變為網狀化作戰的驅動力；圖二則為網狀化作戰中透過通資網路的鏈結，各作戰平臺間指管機制之關連示意圖，在網狀化作戰環境下，感測器(sensors)、戰士(warfighter)、武



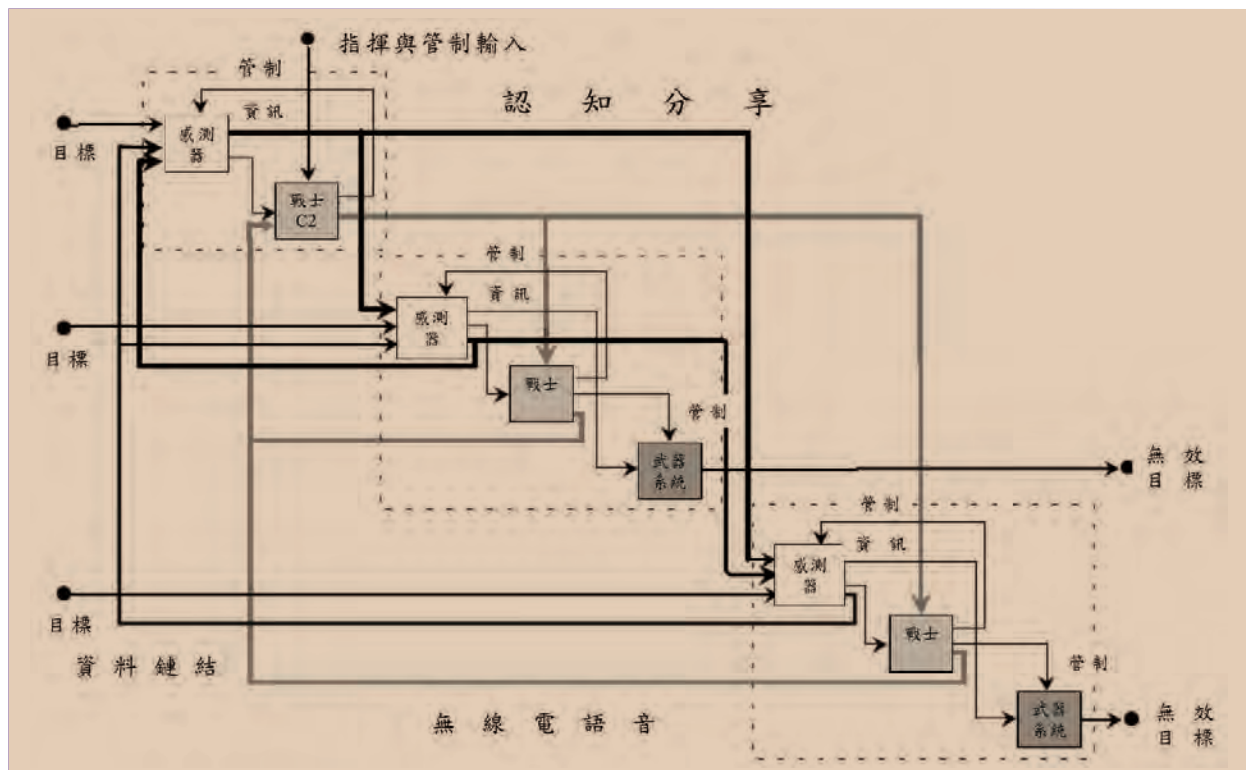
圖一 網狀化作戰戰場空間作戰個體關連圖(資料來源：參考修改自註1)

- 1 David S. Alberts and John J. Garstka and Frederick P. Steink "Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority", CCRP Publ., 2nd Edition, 1999.
- 2 劉廣華譯，D. Richardson原著，“網狀化作戰-變革與風尚”，國防譯粹，第32卷第8期，頁19-29，2005。

器系統(weapon)三者作戰個體，當感測器發現目標，透過網路提供目標資訊給戰士，戰士再對武器系統下達指揮管制命令進行攻擊，而此時武器載台感測器將攻擊結果以影像/聲音數據形式回傳給戰士，瞭解攻擊結果，在此時其他感測器、戰士同步接收到戰場資訊，如果屆時需相互支援，在分散式網路架構下應用通資網路技術來進行資料、語音等數據鏈路連結，達成作戰任務執行，共同完成接戰程序，這也是所謂的"sensor-to-shooter"模式³。

(一)資訊優勢

隨著資訊科技的迅速發展及其在軍事領域的廣泛應用，一些新的作戰理念和作戰樣式便應運而生，在70年代軍事變革大潮中，美軍資訊優勢(Information Superiority, IS)概念應運而生，1996年12月頒布資訊作戰相關準則，正式明確了資訊優勢的概念。在現代作戰觀念改變下，利用資訊科技的技術來攻擊對方，同時保護我方，其中關鍵要素在於“資訊優勢”。資訊優勢是現代和未來戰爭中重要致勝關鍵因素，美國國防部亦明確指出資訊優勢能力是美軍實施資訊攻防作戰的支撐。資訊優勢、科技創新亦自1990年代起成為美



圖二 網狀化作戰指管資料鏈結示意圖(資料來源：參考修改自註1)

3 楊溫利，“以網路為中心的未來戰場？”，全球防衛誌 249 期，2005年5月。

軍2010-2020年聯戰願景的基石，其主要概念包含優勢機動(Dominant Maneuver)、精準接戰(Precision Engagement)、全方位防護(Full dimensional Protection)及聚焦後勤(Focused Logistics)等四種新型作戰概念，目前已成為現代化部隊發展戰力時，奠定戰場全面優勢及致勝的基礎；而資訊優勢的有無，則視雙方誰能守護資訊基礎建設，以及誰能充分應用與發揮高效能的資訊基礎建設⁴。

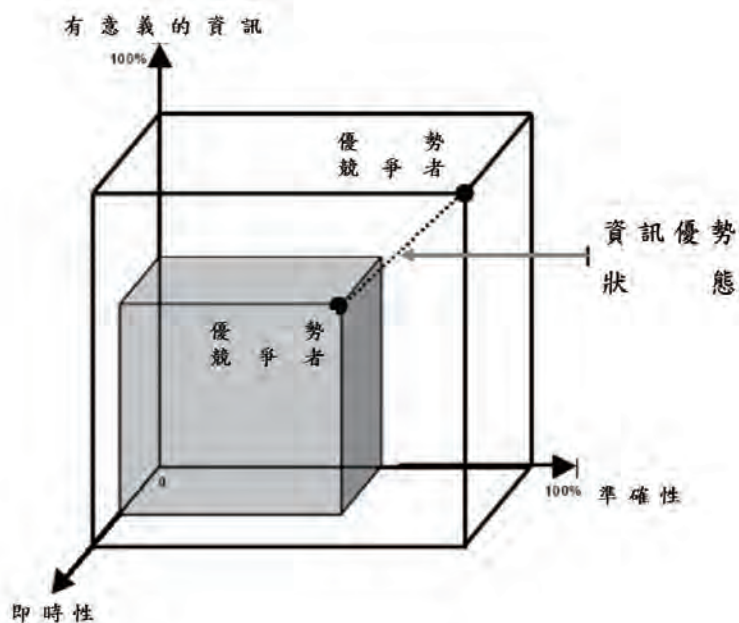
資訊優勢的根本目的是追求系統的高效能，作戰需求是資訊優勢的根本動因，擁有資訊優勢能力對作戰的真正意義在於掌握時空主動權。美《2020空軍願景》⁵指出，隨著

航空航太能力一體化程度的提高和網路化的發展，空軍將能夠在任何地區發現、鎖定、評估、跟蹤、瞄準和攻擊任何有軍事價值的目標；將把完成上述任務的時間從數小時縮短到幾分鐘。而資訊優勢則是資訊作戰獲得上述能力的關鍵。只有提高資訊優勢能力，才能使作戰決策的品質更高、速度更快，使敵人來不及反應，以確保對敵擁有決策優勢。

創造資訊優勢是網狀化作戰致勝關鍵，透過通資網路的建構，讓各作戰個體能即時掌握戰場狀況，分享戰場情資，但網狀化作戰環境的資訊優勢重點，應聚焦在整體作戰個體，亦即通資網路中所傳遞的資訊與指管

模式，對作戰個體是否有實質上的幫助，如圖三所示，作戰環境中的競爭者，要能處在資訊優勢狀態下，資訊的即時性、準確性與意義性三者必須兼顧，才能真正發揮資訊優勢特性。

網狀化作戰中資訊優勢的取得、作戰功能的發揮，主要以通資網路為核心基礎，通資網路基礎建設是推動網狀化作戰之根本，亦為取得資訊優勢、創造作戰勝利之重要關鍵。國軍在提升整體資訊作戰效能中，



圖三 資訊優勢條件面向關係圖(資料來源：參考修改自註1)

4 曾章瑞、陳志誠、張榮鋒，“認識資訊戰、資訊作戰及政府應有軍政作為”，資通安全專論，2006年12月。

5 Gen. John A. Shaud and Adam B. Lowther, “An Air Force Strategic Vision for 2020-2030,” Strategic Studies Quarterly 5.1, 2011.

除積極建立戰力之優勢，確保指管、通信、作戰、武器系統能量外，亦將應用網路技術，構連各式通資、通信網路鏈路，整合各類指管、作戰、武器平臺，強化整體作戰戰力。

(二)資訊網格

資訊網格(Information Grid)是網狀化作戰的核心基礎，全球資訊網格(Global Information Grid, GIG)概念也是美國防部在支援網路作戰行動上基本技術架構，如圖四所示，在網格中包含所有先進的武器平臺(Shooters)、感測器系統(Sensors)及指揮管制中心(C2)三個基本元件，在全球資訊網格中又包含了資訊網格(Information Grid)、感測器網格(Sensor Grid)與交戰網格(Engagement

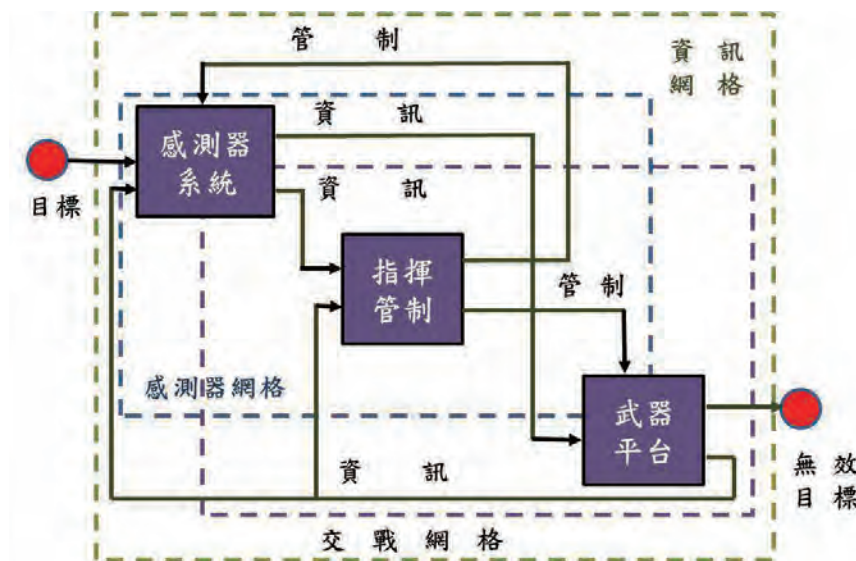
Grid)⁶，每個網格所具備功能與特性不同。例如資訊網格，係指通資網路基礎建設與處理系統，感測器將所接收的資訊進行傳輸、處理後，分別送回指揮控制中心與武器系統，在交戰網格中，指揮控制中心依所接收資訊進行分析研判，將攻擊命令下達至武器系統。

圖五所示為全球資訊網格功能架構⁷，從下層功能可以看出，通資網路的資料鏈結為基礎核心，傳輸資料包含聲音、影像與資料，而通資網路也因不同功能而有不同模式的網路類別，像是區域網路、作戰網路等，在這些網路上再提供相關的服務功能。

(三)小結

由前述文獻探討可知，網狀化作戰的核

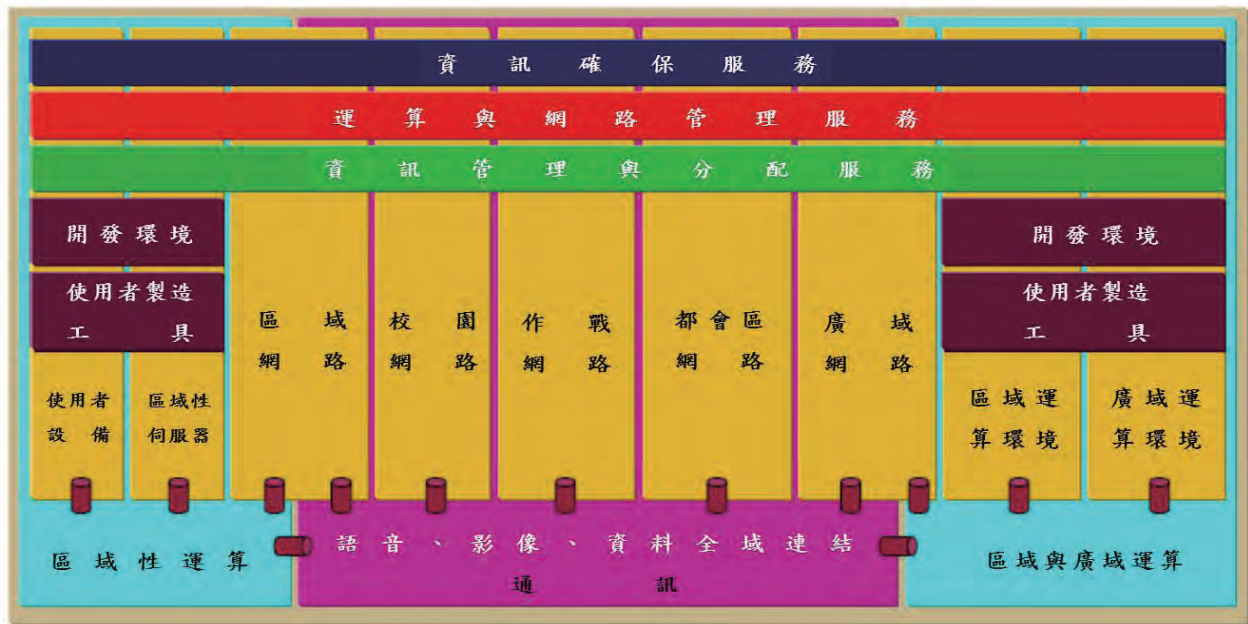
心要素在通資網路的建立，在異質平臺的構連上，包括感測裝置、指管系統、武器載台、作戰個體等，都需仰賴通資網路的資訊傳遞、溝通與處理，在網狀化作戰整體運作下，藉由資料鏈路的連結，可提高對戰場訊息的感知能力，增加戰場透明度，掌握戰場情勢；在戰場資訊即時分享的狀況



圖四 全球資訊網格運作示意圖(資料來源：參考修改自註6)

6 A. Cebrowski and J. Gartska, "Network-Centric Warfare: Its Origins and Future," Naval Institute Proceedings, Jan 1998.

7 "Network Centric Warfare", Department of Defense Report to Congress, 27 July 2001.



圖五 全球資訊網格功能架構圖(資料來源：參考修改自註7)

下，可縮短作戰決策時程，達成快速反應能力，進而提升作戰效能，贏得戰場資訊優勢，一旦通資網路遭受破壞，勢將影響作戰指管作為，喪失戰場優勢，嚴重可能導致作戰失敗，故通資網路系統的規劃與可靠度將影響網狀化作戰成敗與否之關鍵因素。

二、可靠度

可靠度(Reliability)觀念起源於二次大戰時期，技術發展則始於1950年代，美國為解決戰場之極低的裝備開箱存活率與過高的維修備份零件需求，於1952年特別成立電子裝備可靠度顧問小組(Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment，簡稱AGREE)處理軍品的可靠度問題，AGREE對「可靠度」的定義為：「物品於既定的時間

內，在特定的工作與環境條件下，執行特定性能或功能，圓滿成功達成任務的能力或機率」⁸，後續將就系統可靠度基本概念與相關研究作概要說明。

(一)系統可靠度

所謂系統可靠度(System Reliability)係指：「一系統在指定的使用時間內，依其設定模式，發揮應有功能的機率」，或是：「該系統在指定的使用時間內，不發生故障的機率」。從前述說明可知，系統可靠度可以機率的觀念來進行評估，由於「可靠度」以「不發生故障」之機率來作為基礎，因此機率計算在系統可靠度分析上佔有重要地位。

通資網路系統在架構設計上主要有串聯式、並聯式、串並聯系統、鏈式結構系統及

8 台灣大百科全書網站，[http:// http://taiwanpedia.culture.tw/web/index](http://http://taiwanpedia.culture.tw/web/index)，文化部，2012年12月。

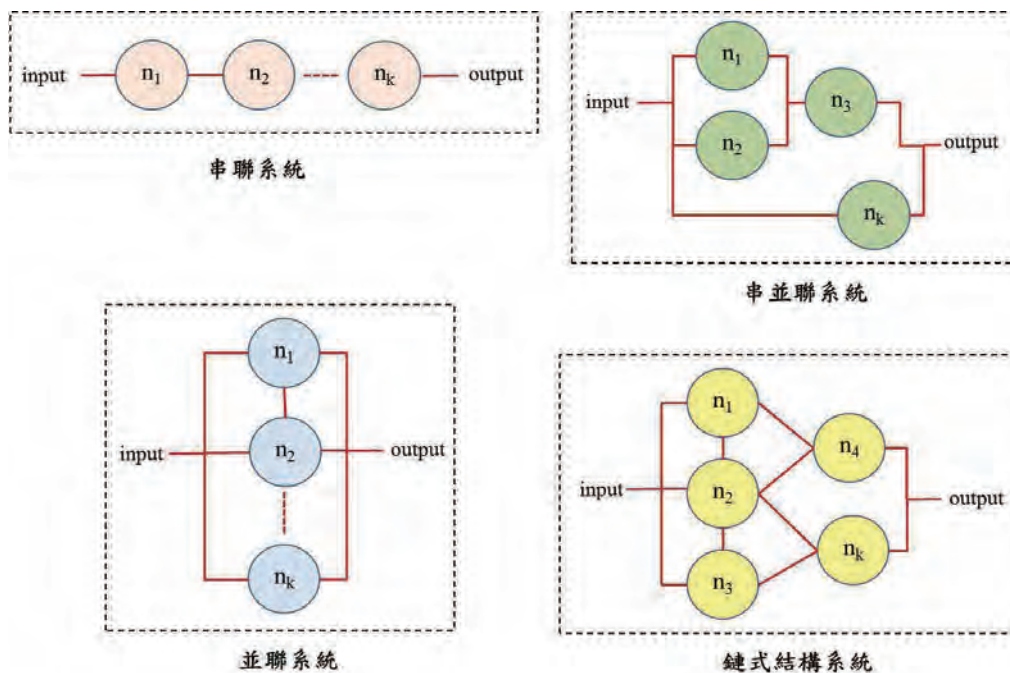
m-out-of-n(m/n)系統等模式，各系統模式有其優缺點，從結構體來看，串聯、並聯及串並聯系統並不符合網狀化作戰中通資網路模式，僅鏈式結構系統較符合(如圖六)，故本研究以鏈式結構為主要探討模式，以符合網狀化作戰環境特性。

鏈式結構系統在可靠度評估方法上有真值表法、貝氏定理(完全機率)法及裴氏網路法，以貝氏定理法為例，主要在說明假設X發生的前題為 Y_1 或 Y_2 ， Y_1 或 Y_2 獨立事件之一發

生，則X發生的機率為 $P(X)=P(X|Y_1)P(Y_1)+P(X|Y_2)P(Y_2)$ ， $1-P(X)$ 即為系統可靠度。

(二)可靠度相關研究

謝孟霖(2005)以小世界網路模型為基礎，以實驗設計方式探討網路可靠度、存活度與強健性⁹；黃婉婷(2005)則以馬可夫模式進行分散式系統設計可靠度分析，提出一個適用於機率型分散式系統的任務配置決策模式¹⁰；林坤佑(2005)針對藍芽模組，在美軍軍規標準及美國商業標準下進行可靠度預估¹¹，



圖六 各式系統架構圖(資料來源：本研究繪製)

- 9 謝孟霖，“基於小世界網路模型之網路可靠度、存活度與強健性研究”，國立臺北科技大學電機工程所碩士論文，2005年7月。
- 10 黃婉婷，“限制條件下的機率型分散式系統任務配置決策模式”，淡江大學資訊管理學系碩士論文，2005年6月。
- 11 林坤佑，“可靠度預估與可靠度試驗之研究-以藍芽模組(BTM)產品為例”，朝陽科技大學工業工程與管理系碩士論文，2005年1月。

張桂琥(2000)等人則就新武器系統，在訊息不完全狀況下，運用含糊集合之 α -cut及含糊集合之區間算術運算，找出影響系統可靠度最劇的基本元件，作為新型武器裝備維修策略的依據¹²。

(三)小結

經探討相關資料，可靠度研究多用在產品分析方面，較少用於通資網路拓樸結構評估，在網狀化作戰情境下，通資網路的架構設計對資訊優勢的掌握有著關鍵性影響，網路系統建置後的可靠率與存活率，決定戰時指管作為與資訊共享成功與否，本研究將以馬可夫鏈模式為基礎，來對靜態模式通資網路拓樸結構規劃結果作可靠度分析，以為未來網狀化作戰環境中網路規劃之參考。

三、馬可夫鏈模式(Markov Chains Model)

1907年馬可夫提出馬可夫鏈(Markov chain)理論，主要精神在藉由過去各階段系統所呈現的狀態，運用機率推測未來系統各階段的狀態以及發生的可能性。是一種特殊的隨機過程預測方法，換言之是說該事件則會受到前一事件的狀況影響，後續將就其基本概念與本研究應用論點作簡要說明。

(一)馬可夫鏈基本概念¹³

1.馬可夫鏈兩個基本前提如下：

(1) 一個整體系統中，系統中的事件只

存在於一種狀態內。

(2) 事件由一種狀態轉換到另一種狀態時的機率，決定於前一事件機率。

2. 考慮一序列的試行(trial)，滿足下列二條件的隨機過程稱為馬可夫鏈：

(1) 每一出象均為有限集合 $S=\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ ， S 稱為狀態空間(state space)。例如第 n 次試行的出象為 S_i ，則稱於時間 n 或第 n 步在狀態 S_i 。

(2) 任何試行的出象至多與其緊鄰的前一試行的出象相關，而與其他任何以前出象無關，對於每一對狀況 (S_i, S_j) 有一已知機率 p_{ij} 表示前一試行的出象為 S_i 時，其緊鄰後一試行的出象為 S_j 的機率，稱為轉換(移)機率(transition probability)。

從定義上來看，一組值在 S 中的隨機變數 $X_0, X_1, X_2, \dots$ 稱為馬可夫鏈。如果它滿足以下的條件：

$$P(X_{n+1}=x_{n+1}|X_0=x_0 \dots X_n=x_n) = P(X_{n+1}=x_{n+1}|X_n=x_n) \quad (1)$$

其中 $x_0, x_1, \dots, x_{n+1}$ 皆屬於 S

(1)式表示若以 P_{xy} 或 $P(x, y)$ 表示 $P(X_{n+1}=y|X_n=x)$ ，而 $P(x, y)$ 又可稱為轉換(移)機率(由 x 轉換成 y)或稱條件機率(conditional probability)，而轉換(移)機率 $p(x, y)$ 又稱為轉

12 張桂琥、廖述賢、鄭景俗，“新型武器裝備之系統可靠度分析”，第八屆國防管理學術暨實務研討會論文集。

13 廖慶榮，“作業研究”，華泰文化，第2版，2009年6月。

換(移)矩陣,因為 $p(x,y)$ 可以用一個 $n \times n$ 的矩陣表示,且這個矩陣滿足下列2個條件:

$$A. 0 \leq p(x,y) \leq 1, \forall x,y \in S$$

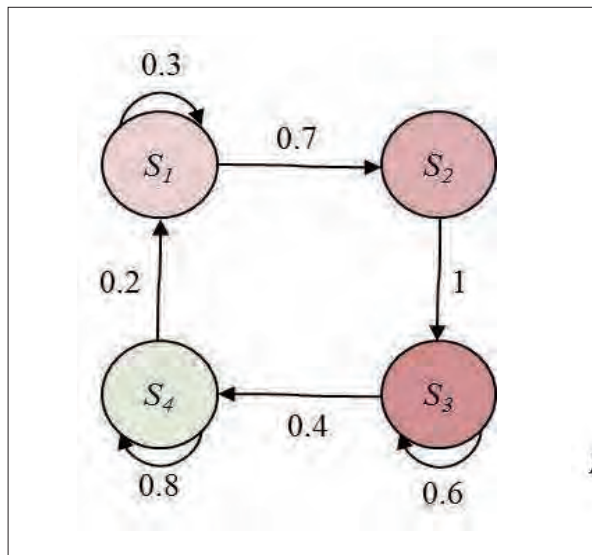
$$B. y \in S, \text{對每一個 } x \in S \text{ 來說, } \sum p(x,y) = 1$$

馬可夫鏈亦可以利用轉移圖、樹狀圖等形式表示,如圖七、八所示。

另外亦可利用矩陣來計算馬可夫鏈的數值,透過反覆的計算,例如計算第 k 步時停留在 S_k 狀態的機率,達到一個程度的預測,矩陣表示法如(2)式。

(二)馬可夫鏈模式連續性質¹⁴

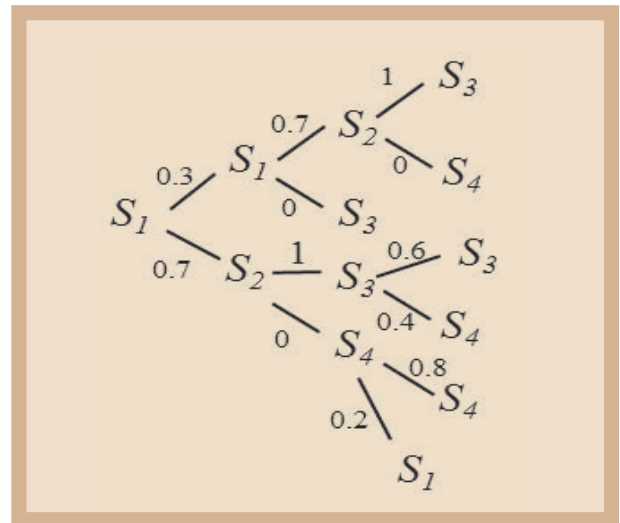
從前述探討可簡單了解馬可夫鏈基本模式,但狀態的轉移可能不只一次,從複雜的網路環境來看,網路系統所受到的威脅與攻擊將可能是連續性的,且其本身的脆弱性也



圖七 馬可夫鏈轉移圖範例(資料來源:本研究繪製)

不只一個,所以接著探討多重轉換情況的機率計算。從假設要經過 n 步轉換做考量,假設在狀態 x_j 時經過 n 次轉換才轉換至 x_k ,亦即: $x_j \rightarrow x_{j1} \rightarrow x_{j2} \rightarrow \dots \rightarrow x_{jn-1} \rightarrow x_k$

如果這種轉換是經由以上的過程,則其機率很顯然是 $P(j,j_1)P(j_1,j_2)\dots P(j_{n-1},k)$ 。若我們把所有的可能過程加起來則得到第 r 步在 x_j 但第 $r+n$ 步在 x_k 的機率,我們用 $P_{jk}^{(n)}$ 表示。因此,當 $n=1$ 時,我們得到 $P_{jk}^{(1)}=P(j,k)$,當 $n=2$ 時,



圖八 馬可夫鏈樹狀圖範例(資料來源:本研究繪製)

$$P = [P_{ij}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0.8 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

14 同註13。

$P_{jk}^{(2)} = \sum_{y \in S} P_{jy} P_{yk}$ ，若用歸納法，可得以下公式：

$$P_{jk}^{(n+1)} = \sum_{y \in S} P_{jy}^n P_{yk} \text{ 或 } P_{jk}^{(m+n)} = \sum_{y \in S} P_{jy}^m P_{yk}^{(n)} \quad (3)$$

由上述可知，轉移機率即為試驗中由某一狀態轉移至另一狀態的機率，其值是固定的，在每個試驗過程中都會相同(Andrilli & Hecker, 2003)。在實務應用上，如公式(3)所示，多以一階馬可夫過程為主。

$$P\{X_{t+1} = x_{t+1} | X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_t = x_t\} = P\{X_{t+1} = x_{t+1} | X_t = x_t\} \quad (4)$$

(三)小結

本研究將利用馬可夫鏈狀態間相互關連、事件間機率相互影響等特性，來計算通資網路拓樸結構可靠度，作為在網狀化作戰情境下網路架構規劃之參考。

參、通資網路拓樸結構可靠度

本研究所提可靠度模式係應用馬可夫鏈，用來分析網狀化作戰環境中通資網路系統拓樸結構規劃可靠度，據以評定所規劃之網路系統在結構上是否可行，避免因規劃錯誤影響後續整體作戰效能，造成資料鏈路因遭受破壞而無法傳遞資訊。

一、系統可靠度模式

本段先將模式中運用到的數學符號作說明(表一)。

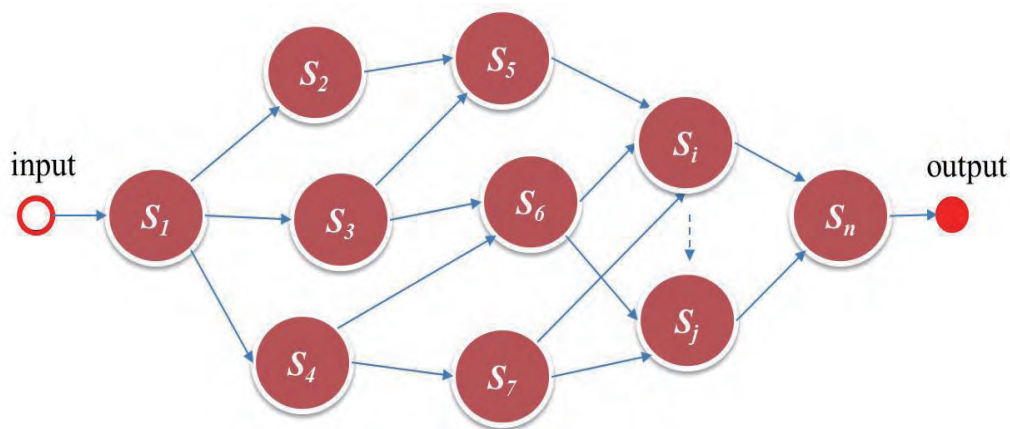
假設有一靜態模式通資網路系統，其為一有方向性圖形 G ，節點數有 n 個，總連線數為 $E = \sum (n_i, n_j)$ ， $i=1 \sim n-1$ ， $j=1 \sim n$ ，此階段每個節點所產生的狀態為 S_i ，其中： $S = \{S_1 \sim S_i\}$ ， $i=1 \sim n$ ， $S_0 = X_0$ ， $S_1 = X_1$ ， $\dots$ ， $S_n = X_n$

此時網路拓樸結構可表示如圖九。

表一 數學符號說明表

符號	符號說明
G	網路拓樸結構圖形
S	網路系統節點集合
S_i	網路節點 i 狀態
E	總連線數
e_i	網路節點 i 連接鄰點連線數
n	網路節點數
(n_i, n_j)	兩節點連線路徑
P_i	網路節點 i 可靠度
$1-P_i$	網路節點 i 故障(損壞)率
P_{ij} 或 $p(i,j)$	網路節點 i 轉移至節點 j 的轉移機率
R	網路系統可靠度
$v^{(k)}$	k 階段後馬可夫鏈機率分配

(資料來源：本研究整理)



圖九 通資網路系統拓模結構圖(資料來源:本研究繪製)

假設節點 i 可靠度為 P_i ，該網路系統節點可靠度為 $P=[P_i] = \{P_1, P_2 \sim P_n\}$ ， $i=1 \sim n$ ，故障損壞度為 $1-P=[1-P_i]=\{1-P_1, 1-P_2 \sim 1-P_n\}$ ， $i=1 \sim n$ ，此時馬可夫鏈可表示如下：

$$P\{X_i = P_i | X_1 = P_1, X_2 = P_2, \dots, X_{i-1} = P_{i-1}\} = P\{X_m = P_m | X_{m-1} = P_{m-1}, X_{m-2} = P_{m-2}\} = P_{ij}$$

$$i = 1 \sim n-1, j = 2 \sim n \quad (5)$$

另節點與節點間機率轉移或連線與否可透過狀態轉移矩陣來呈現，狀態轉移矩陣可表示如(6)式。

$$P = [P_{ij}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & \dots & S_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1-P_1 & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ 0 & 1-P_2 & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1-P_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

從狀態轉移矩陣得知，節點1的狀態 S_1 轉移至節點2的狀態 S_2 的機率為 P_{12} ，亦可說明節點1與節點2之間相連，其路徑值為 P_{12} ，此時節點1與節點2間連線正常，可靠度為 P_{12} ； $1-P_1$ 則表示節點1發生故障或損壞，該節點狀態故障率為 $1-P_1$ ；若 P_{ij} 值為0，則表示該兩點之間無連線，以此類推。

完成狀態轉移矩陣，可利用轉移圖來完

整呈現通資網路拓模結構狀態移轉，產出連續機率結果(如圖十所示)。

二、系統可靠度分析

本段將分別就節點運作完全正常狀況下與節點故障損壞狀況下之系統可靠度分析說明。

(一)節點正常狀況下可靠度分析

通資網路系統中所有節點均正常運作狀

況下，表示每條連線狀態均成立，此時先建立網路系統節點連線統計表，由於節點與節點間靠鏈結連結，故整體網路系統可靠度分析需參考連線數來加以計算(如表二所示)，應用馬可夫鏈模式求出 $n_1 \sim n_n$ 各連線數狀態轉移後機率總和， P 為一個馬可夫鏈轉移矩陣，經過 k 階段後的馬可夫鏈機率分配為

$v^{(k)} = v^{(k-1)}P$ ，使用馬可夫鏈機率分配運算目的在每個節點其輸入與輸出連線不只一條，所產生的傳輸過程組合過多，無法單純使用一次性馬可夫鏈轉移機率計算，故整體系統可靠度為 $R = \sum P_{ij}$ ， $i=1 \sim n-1$ ， $j=2 \sim n$ 。

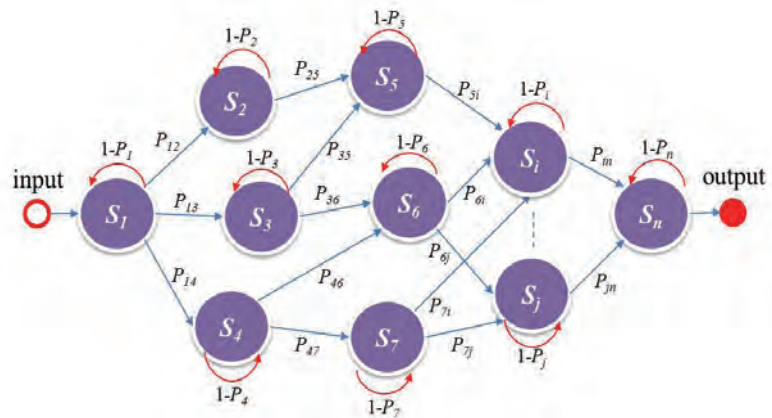
表二 網路系統節點連線統計表

節點	相鄰節點	連線數	節點可靠度
n_1	$\{n_2 \sim n_k\}$	$e_i = k$	P_i/e_i
$\vdots$			
n_n			

(資料來源：本研究整理)

(二)節點故障損壞狀況下可靠度分析

通資網路系統中節點故障損壞對系統可靠度產生影響，而故障損壞的節點佈置的結構對整體可靠度高低更有重要影響。假設某節點 n_b 發生故障損壞，統計網路系統節點連線統計表如表三所示，應用馬可夫鏈模式求出 $n_1 \sim n_n$ 各連線數狀態轉移後機率總和，再利用 k 階段後的馬可夫鏈機率分配 $v^{(k)} = v^{(k-1)}P$ ，計算



圖十 通資網路系統馬可夫鏈模式轉移圖(資料來源：本研究繪製)

表三 節點故障損壞網路系統連線統計表

節點	相鄰節點	連線數	節點可靠度
n_1	$\{n_2 \sim n_k\}$	$e_i = k$	P_i/e_i
$\vdots$			
n_b			
$\vdots$	0	$e_b = 0$	$1 - P_b$
n_n			

(資料來源：本研究整理)

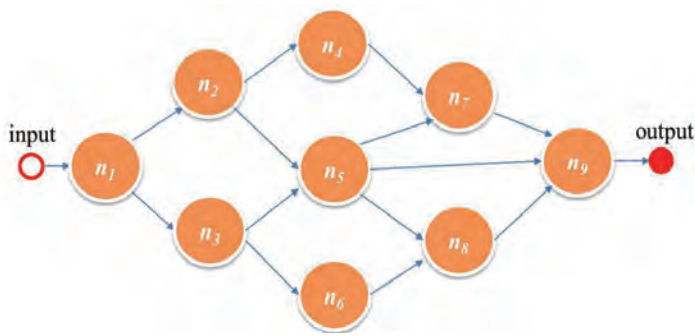
整體系統可靠度為 $R = \sum P_{ij} + (1 - P_b) \sum P_{ab}$ ， $i=1 \sim n-1$ ， $j=2 \sim n$ ，此時 $\sum P_{ij}$ 為連線正常可靠度總和， $\sum P_{ab}$ 為節點 n_b 與其向前相連節點狀態轉移可靠度總和。

肆、案例說明

本段將以一個案例來實際說明如何藉由可靠度模式來分析通資網路系統可靠度，並以一個節點故障案例來作對照，了解所規劃之網路系統拓樸結構可靠程度。

一、通資網路系統可靠度分析

某單位規劃一個靜態模式通資網路系統拓模結構，其為一有方向性圖形G(拓模結構如圖十一所示)，節點數有9個，此階段每個節點所產生的狀態為 $S=\{S_1\sim S_9\}$ ， $S_0=X_0$ ， $S_1=X_1$ ， $\dots$ ， $S_9=X_9$ ，假設每個節點可靠度為0.9，故障損壞率為0.1，該網路系統節點可靠度集合為 $P=[P_i]=\{P_1=0.9, P_2=0.9, \sim P_9=0.9\}$ ， $i=1\sim 9$ ，故障損壞度為 $1-P=[1-P_i]=\{1-P_1=0.1, 1-P_2=0.1, \sim 1-P_9=0.1\}$ ， $i=1\sim 9$ 。



圖十一 通資網路拓模結構圖(資料來源：本研究繪製)

接著就系統連線數與轉移機率進行計算，其中每個節點所分支的可靠度須符合總數=節點可靠度條件，亦即節點 n_1 ，其所在狀態為 S_1 ，可靠度為0.9，此時轉換到下一節

表四 通資網路系統節點連線統計表

節點	相鄰節點	連線數	節點可靠度
n_1	$\{n_2, n_3\}$	$e_1 = 2$	$P_1/e_1 = 0.9/2 = 0.45$
n_2	$\{n_4, n_5\}$	$e_2 = 2$	$P_2/e_2 = 0.9/2 = 0.45$
n_3	$\{n_5, n_6\}$	$e_3 = 2$	$P_3/e_3 = 0.9/2 = 0.45$
n_4	$\{n_7\}$	$e_4 = 1$	$P_4/e_4 = 0.9/1 = 0.9$
n_5	$\{n_7, n_8, n_9\}$	$e_5 = 3$	$P_5/e_5 = 0.9/3 = 0.3$
n_6	$\{n_8\}$	$e_6 = 1$	$P_6/e_6 = 0.9/1 = 0.9$
n_7	$\{n_9\}$	$e_7 = 1$	$P_7/e_7 = 0.9/1 = 0.9$
n_8	$\{n_9\}$	$e_8 = 1$	$P_8/e_8 = 0.9/1 = 0.9$
n_9	$\emptyset$	0	0

(資料來源：本研究整理)

點路徑計有2條，該節點每個分支可靠度為 $0.9/2=0.45$ ，依此類推，所得計算結果如表四所示。

上表計算出每一路徑機率值，在實際計算過程中較為不便且容易發生漏失，故表示成(7)式之狀態轉移矩陣，作不同階段狀態機率轉移運算。

依據系統狀態轉移矩陣及連線統計表，進行馬可夫鏈模式連續計算，其初始機率為 $v^{(0)}=[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ，利用k階段後的馬

$$P = [P_{ij}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 & S_8 & S_9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.1 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

可夫鏈機率分配 $v^{(k)} = v^{(k-1)}P$ 運算($k=1\sim 4$)，利用 Mathcad 13 軟體計算所得機率分配如(8)式，結果顯示當節點1經不同路徑轉換至節點9後機率為0.705。

從上述系統可靠度分析過程，可從馬可夫鏈狀態轉移圖來顯示完整網路系統架構(如圖十二所示)，其中 $R_{(k)}$ 表示經過第 k 階段馬可夫鏈機率分配值。藉由(8)式得知節點9機率分配為0.705，亦即該網路系統架構可靠度值為 $R=0.705$ 。

二、通資網路系統節點故障損壞可靠度分析

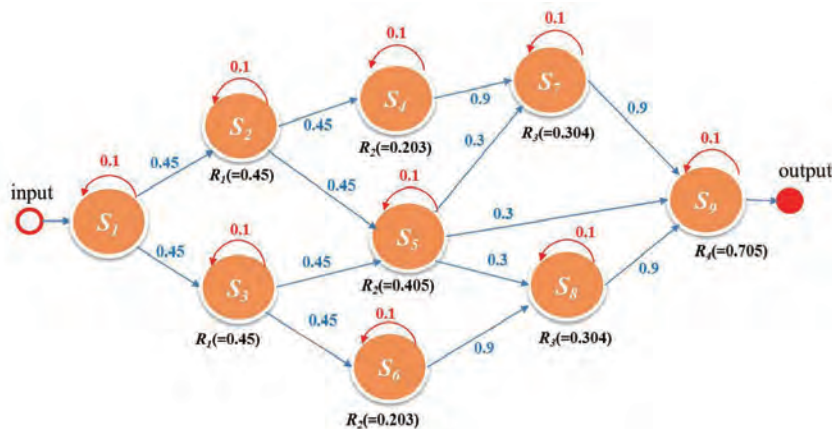
本段另以一個案例來說明當系統中某節

點因故障損壞，其可靠度分析結果，來對照節點均正常運作狀況下可靠度之差異。

假設上述通資網路系統因故造成節點5故障損壞(拓樸結構如圖十三所示)，節點數有8個，此階段每個節點所產生的狀態為 $S=\{S_1\sim S_9\}$ ， $S_5=0$ ， $S_0=X_0$ ， $S_1=X_1$ ， $\dots$ ， $S_9=X_9$ ，假設每個節點可靠度為0.9，故障損壞率為0.1，該網路系統節點可靠度集合為 $P=[P_i]=\{P_1=0.9, P_2=0.9, \dots, P_9=0.9\}$ ， $i=1\sim 9$ ，故障損壞度為 $1-P=[1-P_i]=\{1-P_1=0.1, 1-P_2=0.1, \dots, 1-P_9=0.1\}$ ， $i=1\sim 9$ 。

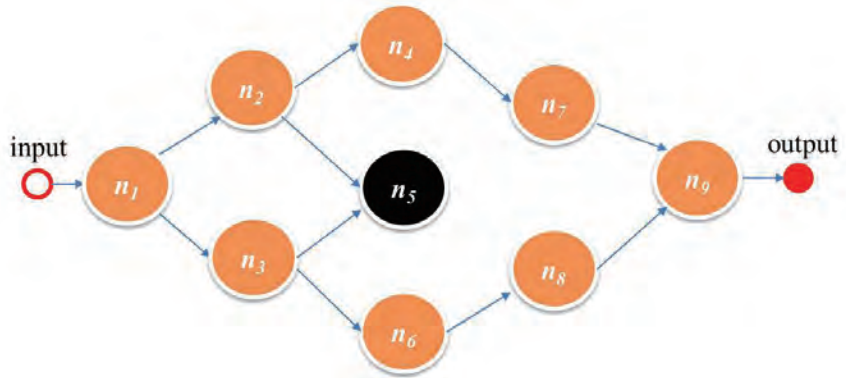
接著就系統連線數與轉移機率進行計算，其中每個節點所分支的可靠度須符合總

$$(1 \times 10^{-3} \ 0.014 \ 0.014 \ 0.061 \ 0.122 \ 0.061 \ 0.304 \ 0.304 \ 0.121) \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (1 \times 10^{-4} \ 1.85 \times 10^{-3} \ 1.85 \times 10^{-3} \ 0.012 \ 0.025 \ 0.012 \ 0.122 \ 0.122 \ 0.705) \quad (8)$$



圖十二 通資網路系統狀態轉移圖(資料來源:本研究繪製)

數=節點可靠度條件，亦即節點 n_1 ，其所在狀態為 S_1 ，可靠度為0.9，此時轉換到下一節點路徑計有2條，該節點每個分支可靠度為 $0.9/2=0.45$ ；另節點 n_5 此時為故障損壞狀態，故無相鄰節點，連線數為0，節點可靠度為0.1，所得計算結果如表五所示。



圖十三 節點5故障損壞之通資網路系統圖(資料來源：本研究繪製)

上表計算出每一路徑機率值，可表示成(9)式之狀態轉移矩陣，作不同階段狀態機率轉移運算。

依據節點5故障損壞系統狀態轉移矩陣及連線統計表，進行馬可夫鏈模式連續計算，其初始機率為 $v^{(0)}=[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ，利用k階段後的馬可夫鏈機率分配 $v^{(k)}=v^{(k-1)}P$ 運算($k=1\sim 4$)，同樣利用Mathcad 13軟體計算所得機率分配如(10)式，結果顯示在節點5故障損壞狀況下，節點1轉移至節點9的機率為0.329。

從上述系統可靠度分析過程，可從馬可

表五 節點5故障損壞通資網路系統連線統計表

節點	相鄰節點	連線數	節點可靠度
n_1	$\{n_2, n_3\}$	$e_1 = 2$	$P_1/e_1=0.9/2=0.45$
n_2	$\{n_4, n_5\}$	$e_2 = 2$	$P_2/e_2=0.9/2=0.45$
n_3	$\{n_5, n_6\}$	$e_3 = 2$	$P_3/e_3=0.9/2=0.45$
n_4	$\{n_7\}$	$e_4 = 1$	$P_4/e_4=0.9/1=0.9$
n_5	$\varnothing$	$e_5 = 0$	$1-P_5=0.1$
n_6	$\{n_8\}$	$e_6 = 1$	$P_6/e_6=0.9/1=0.9$
n_7	$\{n_9\}$	$e_7 = 1$	$P_7/e_7=0.9/1=0.9$
n_8	$\{n_9\}$	$e_8 = 1$	$P_8/e_8=0.9/1=0.9$
n_9	$\varnothing$	0	0

(資料來源：本研究整理)

$$P = [P_{ij}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 & S_8 & S_9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.1 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

$$(1 \times 10^{-2} \ 0.014 \ 0.014 \ 0.061 \ 0.486 \ 0.061 \ 0.183 \ 0.183 \ 0) \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (1 \times 10^{-4} \ 1.85 \times 10^{-3} \ 1.85 \times 10^{-3} \ 0.012 \ 0.499 \ 0.012 \ 0.073 \ 0.073 \ 0.329) \quad (10)$$

夫鏈狀態轉移圖來顯示完整網路系統架構(如圖十四所示),其中 $R_{(k)}$ 表示經過第 k 階段馬可夫鏈機率分配值。藉由(10)式得知節點9機率分配為0.329,亦即該網路系統架構可靠度值為 $R=0.329$ 。

三、小結

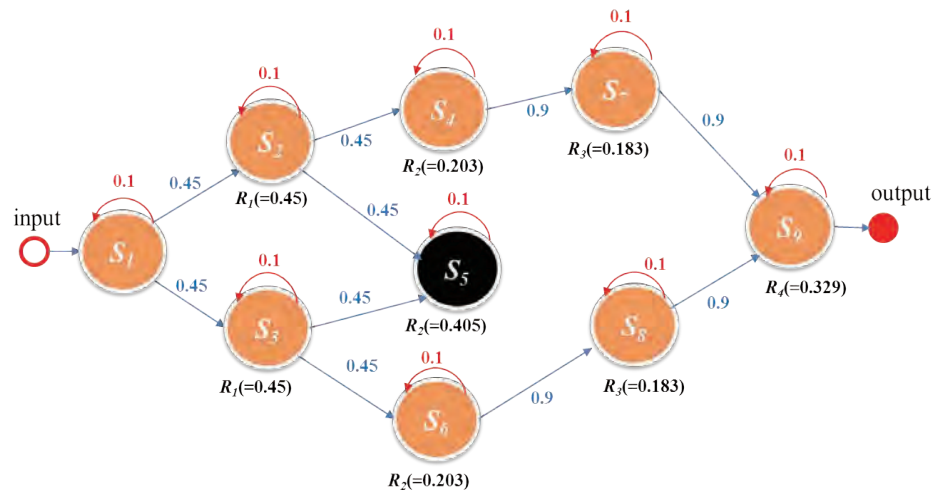
經過2個案例分析,可分別找出在網路系統中節點全數運作正常與某節點故障損壞狀況下,其可靠度呈現下降狀況,顯示節點穩定與否,對網路系統在運作上有一定程度影響。

從不同節點故障損壞在可靠度分析上,前述已就節點5損壞之系統可靠度進行分析(可靠度=0.329),假設在節點6損壞狀況下,經馬可夫鏈連續機率運算分配,找出系統可靠度為0.54(計算模式及過程同節點5),兩者比較下,發現節點5損壞的系統可靠度比節點6來得低,顯示節點5在網路系統整體架構規劃上比節點6來得重要,若從系統架構圖亦可發現,節點5

的連線數在所有節點中與相鄰節點連線數最多,以此模式可計算出當每個節點分別損壞狀況下,其個別系統可靠度的值,可提供通資單位在通資網路系統架構規劃上之參考。

伍、結論

網狀化作戰中資訊優勢的創造與獲取,有賴通資網路系統的規劃、整合與運用,而網路拓模架構對系統可靠度高低更有關鍵性影響,網路系統中節點的配置規劃良窳與設計模式,在安全、傳輸可靠度、可用度、流量控制、管理能力等面向上,對網狀化作戰在



圖十四 節點5故障損壞通資網路系統狀態轉移圖(資料來源:本研究繪製)

指管、異質平臺間構連與資訊傳輸，有著決定性之影響，讓戰場環境中各主體能達成即時情資分享、同步協同合作之目標。

本研究提出一個網路系統可靠度分析模式，運用馬可夫鏈為計算基礎，提供未來網狀化作戰環境中，通資網路系統拓樸結構建置之實際參考數據，利用本分析模式，通資單位可規劃出較佳之網路架構，將節點佈署作更有效規劃與配置；另本研究以2個不同案例作對照比較，說明在網路系統中所有節點運作正常與某一節點損壞的狀況下，對網路

系統的影響，藉由系統可靠度的分析，可以衡量通資網路系統存活的程度，以提升與發揮未來網狀化作戰之整體戰力。

作者簡介

李建璋中校，國防管理學院資訊管理學系81年班，曾任職連長、教參官、教官，現為國防大學管理學院戰略班學員。

參考文獻

1. 方金龍，網狀化戰爭型態，國防譯粹，第32卷第8期，2005年。
2. 杜映，網狀化作戰與決策判斷，國防譯粹，第32卷第2期，2005年。
3. 楊千、彭祖乙、傅振華，鏈路負載平衡演算法使用於企業網路環境之研究，資訊管理學報，第13卷第3期，頁177-195，2006年7月。
4. 劉熙海、劉齊祥、吳維揚、吳榮芳、楊惠婷，一種改良SDP最少項數的網路可靠度演算法，華岡工程學報，第13期，頁81-94，1999年。
5. 雷定中，通資網路存活率之研究，臺灣大學電信工程學研究所碩士論文，2004年6月。
6. 施大千，美軍網狀化作戰能力之研究：以兩次波灣戰爭發展為例，淡江大學國際事務與戰略研究所碩士論文，2005年。
7. 楊善國，可靠度工程概論，全華圖書，第4版，2012年7月。
8. 廖慶榮，作業研究，華泰文化，第2版，2009年6月。
9. Nitschke S., "Network-Centric Warfare-The European Initiatives", Military Technology, 2004.
10. Xiao Fan Wang, Guanrong Chen, "Complex Networks: Small-World, Scale-Free and Beyond," IEEE, Circuits and Systems Magazine, Vol. 3, Issue 1, pp. 6-20, 2003.
11. L. B. Page, J. E. Perry, "A Practical Implementation of the Factoring Theorem for Network Reliability," IEEE, Transaction on Reliability, Vol. 37, No. 3, pp. 259-267, Aug 1988.