

軍事模式模擬淺釋

劉達生

網路安全與決策推演研究所

壹、前言

現代軍事模式模擬（Modeling and Simulation, M&S）源於二戰時，英國科學家研究作戰議題。¹經年演變，歐美地區於六至八十年代普遍開設「作業研究」（Operations Research, OR）科系，將成果應用於戰後的民生發展，促成管理科學（management science）興起。經多年努力，作業研究成果已廣泛影響各領域，帶來豐富科學價值。

「模擬」為作業研究中廣泛應用的方法，也被戲稱為「最後手段」（Method of Last Resort）。²隨電腦技術發展，模擬工具、程式語言和平台日益完善，不僅在工程領域應用廣泛，亦在社會科學領域受重視。³

軍事作業研究領域包含數學模型（如藍徹斯特方程式、定量判定模型）、各類模擬方法（如離散事件、系統動態學、代理人模擬等）及演算法（涉及最佳化、機器學習等）應用。本文關注模型、模擬及模式模擬的定義，釐清名詞含意與關聯性，為跨領域模式模擬研究奠定基礎。

貳、模型

「模型」一詞既包含實體、縮小、簡化等概念，也涵蓋數學和複雜性。中文裡的「模型」意指模式、樣式、代表等，而英文「model」則表示代表、縮小、可計算的描述、邏輯的、數學的、模

¹ “The Origins of OR,” *INFORMS*, <https://www.informs.org/Explore/History-of-O.R.-Excellence/Bibliographies/The-Origins-of-OR>.

² Averill M. Law, *Simulation Modeling and Analysis* 5e (NY: McGraw-Hill Education, 2014), p. 5.

³ Ramzi Suleiman, Klaus G. Troitzsch and Nigel Gilbert, ed., *Tools and Techniques for Social Science Simulation* (Physica-Verlag, 2000); Gigel Gilbert and Klaus G. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist* 2e (Open University Press, 2005).

仿、類比和描述等。

將這些意象（或是概念）整理後，我們可以大致歸納出以下兩個特徵：

- 一、 模型涉及一個想要代表、描述、呈現或類比的「對象」。例如，若想要描述某人的行事風格，該行事風格即為「對象」。又或者想要呈現人與人之間的社會網絡，這個欲呈現的社會網絡便成為「對象」。
- 二、 模型具有其形象或樣貌。形象可能是實體的、縮小的、描述的、類比的、模仿的，或是數學的、邏輯的。例如，要描述某人的行事風格，可能是一句話「謹慎行事」，亦可是一篇詳細的分析。對於人際網絡，呈現方式可能是一段文字敘述，也可能是一個矩陣，或者是視覺化後的網絡圖。此處的敘述（文字）、矩陣（數學）和圖形（視覺）均屬於「模型」，因此模型會以不同形象或樣貌呈現。

根據「模型」的這兩個特徵，我們可以總結出：

模型是一種針對「對象」的描述。⁴

在上述定義中，「對象」可以是實體的、概念的，甚至是事態的。這樣的定義或許能作為不同領域建立模型的基礎。以下舉兩個例子說明：

假設想要描述某人，這個某人便成為「對象」，而描述本身就是模型。描述可以是一句話來形容某人：「他非常踏實」，這便是該人的一種「模型」。同樣地，可以用一本傳記或一部紀錄片來描述某人（對象），這樣的傳記或紀錄片也同樣是「模型」。

又假如想要分析防空系統對抗無人機的作戰效能，此時防空系

⁴ Nigel Gilbert, *Agent-Based Models* (Sage Publications, 2008), p. 4. 這麼解釋「模型」：A model is intended to represent or simulate some real, existing phenomenon, and this is called the target of the model.

統與無人機之間的對抗情境或態勢便成為了待描述的「對象」。分析人員可以透過實兵演練讓無人機與防空系統進行對抗。根據前述定義，這個實兵演練或其內容的陳述就是「模型」。

若該防空系統或無人機尚處於概念或研發階段，尚未實際存在，則可能會採用兵棋推演的方式來釐清和評估防空系統對抗無人機的各種情境與結果，兵棋推演及其所產生的報告就是「模型」。

分析人員還可以利用程式語言在電腦中構建一個能夠充分呈現對抗過程的電腦程式，將這個情境中重要的程序與邏輯整合在一起。這組電腦程式也是一個「模型」。

「模型」既然是對「對象」的描述，兩者之間自然存在差異。例如，針對某人的陳述、傳記或紀錄片，這些都只反映了該人的部分表現，並非完整的真實面貌，所以模型與對象存在差距。因此，我們需考慮模型的有效性（validity）和可靠性（reliability）。有效性指模型是否能適切呈現對象特徵與本質；可靠性則關注模型的穩定性和一致性。有時，我們用忠實度（fidelity）來衡量模型效度和信度的綜合表現。

對於模型的有效性、可靠性或忠實度，要求達到足夠的程度即可；過分追求模型的忠實度往往意味著資源和時間不成比例的投入。

參、系統

研究的對象可能具有多種面向，並可能與其他實體或現象存在相互關聯。因此，需要根據研究問題來確定探討對象的「邊界」，使邊界涵蓋所需探討的面向或範疇。位於「邊界」內的部分即為已確定的「系統」。

系統邊界之外被視為「環境」，而系統與環境之間則通過「輸入」和「輸出」來表示彼此的相互影響。在系統邊界內，我們需要確定要研究的「元件」以及需要考慮的元件「屬性」。同時，還需

確定屬性之間以及元件彼此之間的「關聯性」，如圖 1 所示。

例如，若要探討「國家安全」這一議題，由於範疇廣泛，很難全面地進行研究與論述。可能會先確定一些概念，如：從國家內部穩定的角度來看，或從國家外部環境的角度來看。若選擇後者，可以從與假想敵之間的雙邊關係來看，或從區域安全的多邊角度來看。這樣的思考就是在確定與「國家安全」相關的系統，明確研究內涵。

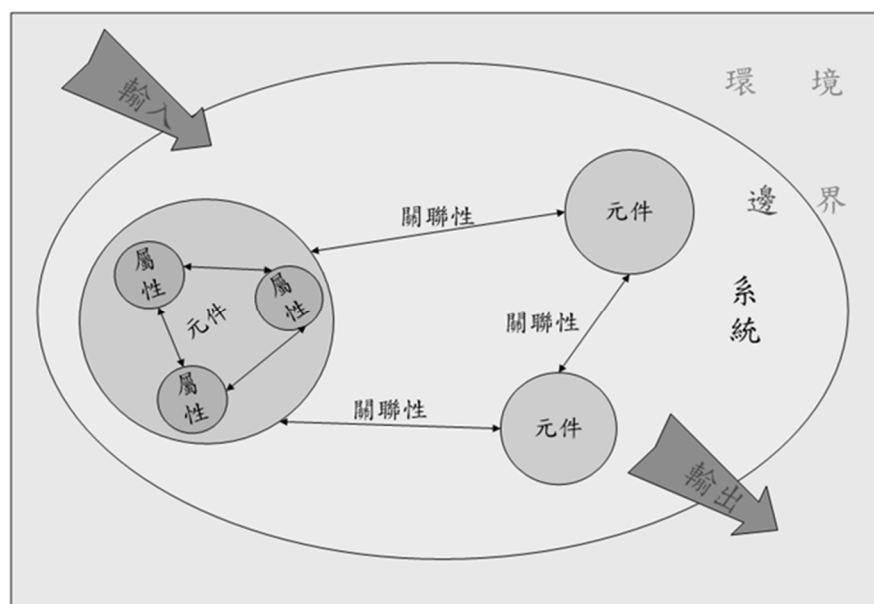


圖 1、定義系統

肆、實驗

「實驗」是我們瞭解對象的重要方法，它可以回答「what-if」問題，並且是探討「因果關係」的主要手段。使用實驗方法研究系統的分類如圖 2 所示。

在情況允許時，使用實際系統進行實驗應該是首選方案。然而，若實際系統尚不存在（如月球基地）、使用實際系統進行實驗可能會中斷系統的服務功能（例如想瞭解某電力節點損壞的影響）、成本過高或時間過長，或涉及研究倫理的社會實驗等情況，則無法以實際系統進行實驗。在這些情況下，可以選擇使用模型進

行實驗。

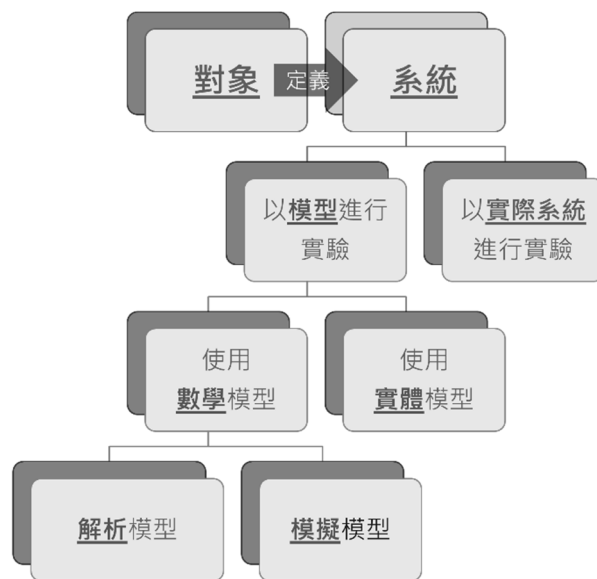


圖 2、研究系統的實驗方法分類

資料來源：Averill M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, p. 4。

模型可分為實體模型和數學模型。在無法建立實體模型、實體模型成本過高或無法涵蓋必要細節的情況下，就可能選擇數學模型。例如，風洞以及風洞內的飛機模型是常見的實體模型。也曾有一個以玻璃管和容器組成的結構，水會在結構中流動，呈現出類似現金流受利率調整而流動的現象；⁵這也是一種實體模型。

數學模型可根據對實驗結果的理解方式區分為解析模型和模擬模型。解析模型的概念是通過相對簡單的數學關係，將想要實驗的資料輸入模型，然後透過數學關係得出明確的答案。下面舉兩個例子說明數學模型中的解析模型與模擬模型。

當海軍艦艇在海面航行時，雷達偵測距離會受地球曲率和雷達與目標高度影響。透過經驗公式，只需輸入雷達高度和反艦飛彈飛行高度，便能計算出雷達對該飛行高度的反艦飛彈偵測距離。此為解析模型的例子，因其可藉特定參數（雷達高度及反艦飛彈飛行高度）得出確定結果（偵測距離）。這類解析模型簡單明確，易於計

⁵ “MONIAC (Monetary National Income Analogue Computer),” *Wikipedia*, <https://en.wikipedia.org/wiki/MONIAC>.

算與理解，對快速估算和決策有很大幫助。

在模擬模型中，我們需要反覆地將資料輸入模型，通過觀察大量的實驗數據，才能大致掌握模型輸出的輪廓。這裡所謂的「輪廓」意指輸出的結果不是一個確定的數值，而是一個範圍。這個範圍需要讓模型運行許多次，才會比較清楚地呈現出來。

以防空系統應對亞音速與超音速巡弋飛彈的防禦效能分析為例。假設有六枚巡弋飛彈來襲，來襲飛彈的時間間隔為 2 秒。現在想知道不同來襲飛彈速度對防空系統的效能有何影響。

實務上，雷達是否能偵測到目標會受到天候環境的影響，而且偵測的結果需要經過判讀。因此，來襲飛彈進入雷達偵測範圍時不一定會被立即偵獲或立即判定為目標，偵獲與判定會有時間上的延遲，且延遲是不確定的、是隨機的，可能是三秒、可能是五秒。即使偵測到了目標，要攔截目標，還需要建立目標的飛行軌跡、航速及航向；這個過程稱為追蹤，對目標完成追蹤也需要時間，時間也是隨機的、長短不一的。此外，防空飛彈若需要射控雷達導引，則會受限於射控雷達可導引飛彈數量的限制。頻道數量在來襲飛彈數量較多時會產生不可預期的影響。

當以較為接近真實的程序與細節來考慮防空問題時，涵蓋的因素較複雜，且有較多隨機的、不確定的因素。建立好一個複雜的、包含隨機性的模型後，在運用模型時，需要針對不同的系統參數（如不同的來襲飛彈速度、可能的延遲時間等）進行模擬。由於具有高度的隨機性，因此每次模擬的結果都不一樣（比如第一枚飛彈的偵測延遲時間可能是 3 秒，第二枚則可能是 5 秒；下一次模擬的時候，延遲時間又都不一樣了），需要模擬許多次，將模擬結果進行統計之後，才能大致瞭解防空系統的效能。

等模型建立好之後，假設模擬結果的統計發現：某型防空飛彈對速度 0.75 馬赫的巡弋飛彈的防禦效果是：來襲 6 枚，且時間間隔

為 2 秒時，可攔截 2~5 枚，平均可攔截 4 枚。但對 2 馬赫的巡弋飛彈（其他條件相同）只能攔截 0~3 枚，平均是 2 枚。統計結果顯示來襲飛彈速度越快，越會壓縮防空系統的反應時間。即使不考慮高速目標會導致防空飛彈攔截成功率下降的因素，僅憑對反應時間的壓縮，也能很大程度地削弱防空系統的防禦效能。

在第一個例子中，只要給模型輸入參數（雷達高度與反艦飛彈飛行高度）就能得到雷達可偵測到反艦飛彈的距離，模型算出來的距離是確定，這種模型稱為「解析模型」。

在第二個例子中，由於隨機性的影響及不可預期的不確定性，即使輸入的參數是固定的，得到的結果也可能有所不同。因此需要反覆地、多次地以相同的參數進行模擬，然後對模擬結果進行統計分析，才能大致瞭解模擬對象的特性。這種模型被稱為「模擬模型」。

伍、模擬

一般對於「模擬」的解釋大概都會有「模仿」的意思，比如模仿一個對象，或是模仿一個環境（虛擬實境）。在作業研究領域關於「模擬」大概是這樣界定的：

使用電腦來模仿一個過程或系統的運作，藉以產生系統可能結果的概況。⁶

這樣的界定隱含了對象和模擬模型的輸出結果不是固定的，需要反覆的運行模型，才能對結果有所瞭解。如前面反艦飛彈防禦問題由於問題複雜且具有隨機性，因此需要反覆的運行模型，才能對防禦效能有所瞭解。這個界定的方式標識了「電腦」是模擬的重要工具，但也排斥了非電腦的模仿操作，如推演。

將範圍再縮小到模擬領域去看的話（模擬被認為是作業研究的

⁶ Frederick S. Hillier and Gerald J. Lieberman, *Introduction to Operations Research* 9e (McGraw-Hill, 2010), p. 934.

方法之一），⁷會得到這樣的界定：

給模型輸入與問題相關的數值，然後觀察輸出表現。⁸

此一界定更簡單直接，基本上是給模型不同的輸入值，然後觀察輸出結果，如前面反艦飛彈防禦的例子。但是，這裡將輸入限定為「數值」。這裡界定的「模擬」是相對於「解析」（analytical）而言；如果模型無法獲得確切（exact）、封閉（closed-form）的解析解（analytical solution），而需要使用到數值方法（numerical methods）的話，就是模擬。然而，這樣的界定並不能包含非數值的輸入，比如情境、邏輯或規則這些非數值的輸入。

前述對模擬的界定或多或少都有些可以再補足的面向，接著以美軍對「模擬」的解釋來涵蓋這些重要的面向。

陸、模式模擬

我們經常提到的「模式模擬」實際上是指美軍的「Modeling and Simulation, M&S」這一概念。

一、Modeling：

美軍將這個詞語理解為「建立並驗證模型」：

運用標準化、嚴謹且結構化的方法論，對系統、實體、現象或程序進行建模，創建實體、數學或其他邏輯表述，並對其進行驗證。⁹

這一定義涵蓋了建模對象（系統、實體、現象或程序）、描述方式（實體、數學或邏輯），並對方法論提出了要求（標準化、嚴謹且結構化），同時強調對所建立的模型進行驗證（validate）。

二、Simulation：

⁷ Frederick S. Hillier and Gerald J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, p. 934.

⁸ Averill M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, p. 5. "..., numerically exercising the model for the inputs in question to see how they affect the output measures of performance."

⁹ "DoD Modeling and Simulation (M&S) Glossary," *Under Secretary of Defense for Acquisition Technology*, January 1998, pp. 2, 13, 23.

美軍的解釋中並未明確表示「模仿」的意思：

一種隨時間推移運用模型的方法。¹⁰

這個詞語強調「模型的應用」，其內涵與模擬領域的定義相似（對模型輸入，並觀察結果）。

三、Modeling and Simulation：

美軍的解釋：

運用靜態或隨時間變化的模型來獲取數據，作為管理或技術決策的基礎。¹¹

這裡的「模型」包含了，如模仿器（emulators）、原型（prototypes）、模擬器（simulators）和刺激器（stimulators）。並指出 modeling 和 simulation 兩個術語經常互換使用。

本文認為美軍「模式模擬」的概念主要包括：

建立並驗證符合需求的模型；

反覆運用模型收集數據；

分析數據以輔助決策。

這樣的定義體現了對模型的需求、模型的使用、數據的獲得與分析，最終以「輔助決策」作為模式模擬的目的。

柒、結語

本文從界定「模型」為「對對象的描述」開始，嘗試為「模型」建立一個較為廣泛的概念。在建立模型之前，我們必須明確界定「系統」的範疇與邊界、元件與屬性，以及它們之間的關聯性，作為建立模型的基礎。在討論「模擬」的部分，本文嘗試說明數學模型中「解析」模型和「模擬」模型的差異。最後，以美軍「模式模擬」的概念作為總結：模式模擬從模型需求開始，經過模型建

¹⁰ Averill M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, pp. 2, 19, 20.

¹¹ Averill M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, pp. 2, 13, 24.

構、模型使用、數據獲得與分析，最終以「輔助決策」體現模式模擬的目的與價值。

本文作者劉達生為國防大學中正理工學院國防科學研究所博士，現為國防大學管理學院兼任助理教授及財團法人國防安全研究院網路安全與決策推演研究所委任研究員。研究領域為軍事作業研究、系統模擬在軍事上的應用。

Military Model Simulation Explained

Ta-Sheng, Liu

Division of Cyber Security and Decision-Making Simulation

Abstract

This study aims to provide an in-depth introduction to the fundamental concepts of military modeling and simulation, along with its applications in the fields of operations research and social sciences, underscoring its importance in these areas. The article begins by reviewing the history and development of military modeling and simulation, starting from the Second World War when the United Kingdom assembled scientists to conduct research on combat-related issues. It then traces the evolution to the rapid advancements in modern computer hardware and software technologies that have facilitated the widespread application of simulation methods in not only engineering but also social sciences.

The paper then delves into the basic concepts of models, systems, simulations, and modeling and simulation, examining their interrelationships. Models are defined as “descriptions of target,” and it clarifies that defining a “system” is necessary before creating a model. Simulation is identified as a critical method for understanding systems. Lastly, the paper elaborates on the definition of modeling and simulation, outlining a process that starts with model requirements, followed by model construction, model usage, data acquisition, and analysis. This process ultimately achieves the purpose of “decision support,” thereby showcasing the value and significance of modeling and simulation.

Keywords: Military operations research, Models, Systems, Simulation, Modeling and Simulation