

## 第二章 文獻回顧

以下為軌跡預測及航機衝突相關文獻探討，包括衝突之定義、衝突偵測與排解模式及模擬模式、ATP 88 飛航管制程序及台北飛航情報區飛航指南等。

### 2.1 衝突之定義

中華民國交通部民用航空局[24]於CNS/ATM相關名詞解釋中對衝突之相關定義如下：將發生於二架或二架以上飛機之間、飛機與空域之間以及飛機與地形之間，無法達到最小適當的隔離時，稱為衝突(Conflict)；衝突偵測(Conflict Detection)則是將飛機飛行軌跡投射至平面上以計算出衝突是否會發生的判定程序，亦就是判定是否無法維持所需要之最小隔離；衝突排解(Conflict Resolution)為決定一架或多架飛機間如何動作，以避免衝突發生或降低衝突可能性的程序；衝突探測(Conflict Probe)則是以飛航計畫書的飛行路徑投射至平面以計算出是否違反最小的平面隔離。Vink et al. [14] 認為當航機可能之位置與另一航機或禁航區之距離低於最小隔離標準，或飛行高度低於可使用狀態時稱為衝突。Prandini et al. [9] 也指出航機間距小於允許距離就是衝突，若高於FL290之航路階段，允許之水平隔離為5海浬、垂直隔離為2000呎；低於FL290時之水平隔離為5海浬、垂直隔離為1000呎，當航機位於終端雷達近場管制 (Terminal Radar Approach Control, TRACON) 區內，水平隔離可降為3海浬。雖然文獻對衝突的定義不一致，但仍可歸納為二者：一方面認為二航機實際違反隔離標準時衝突發生，另一說法則認為航機間預測之距離可能違背標準隔離時稱為衝突，也就是二航機在未來某一時點衝突可能發生。後者之定義說明衝突預測模式存在之理由。

### 2.2 衝突偵測與排解模式 (Conflict Detection and Resolution, CDR)

衝突偵測與排解模式之目的在於預測未來是否可能發生衝突，若預測衝突將發生，被偵測到衝突事件之操作者與空域管理者即會進行訊息交流，以協助排解衝突。其內容包括即時監控空域環境與評估空中交通狀況，稱狀態評估(State Estimation)，將此狀態經動態軌跡模型投影至未來，求得未來狀態。當下和未來的狀態將交由特定之衝突矩陣(Conflict Metrics)預測及

判斷衝突是否發生，若是，則執行衝突偵測與排解之動作[6, 7]。此過程示如圖2.1。

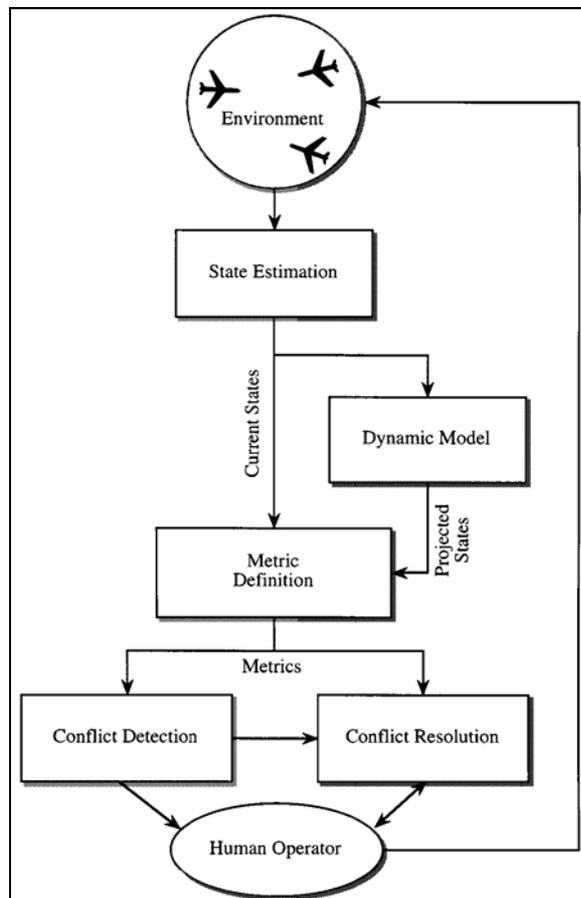


圖2.1 衝突偵測與排解過程

資料來源: [6, 7]

### 2.2.1 短程、中程及長程之衝突偵測與排解模式

安全為發展先進飛航管理系統之首要目的，也是衝突預測及排解模式發展的理由。將預測時間長短分為短程、中程及長程三種衝突偵測與排解模式，Prandini et al. [9]將其分類說明如下：(1)短程：於航機內完成之數秒至數分鐘偵測與排解模式，為排解航機衝突最終之憑藉依據，如TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System)；(2)中程：航管所仰賴之數十分鐘模式，若預測到衝突發生則修改航機飛航計畫以維持空域安全；(3)長程：持續數小時之模式，包含航機執行任務前事先決定之飛航計畫及班表，用於確保航機數目符合航空站及空域之容量水準。

### 2.2.2 模式之分類

衝突偵測與排解模式好壞仰賴未來狀態預測結果的可信度，因此不同模式之間最具體的差異就是將目前狀態投射至未來狀態的方法，按照狀態之傳遞方式 (State Propagation Methods) 不同，Kuchar與Yang [6,7]將68種學者提出的衝突偵測與排解模式區分為三大類：名目(Nominal)、最糟情況(Worst-case)及機率模型(Probability Models)，圖2.2中由左而右依序表示對應此三類模式之航機圖形。

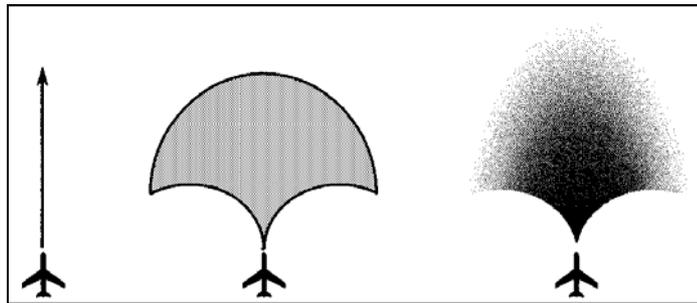


圖2.2 狀態傳遞方式(State Propagation Methods)

資料來源:[6, 7]

摒除不確定因素，將現況狀態投射至未來狀態所形成的單一軌跡稱名目的狀態傳遞方式。用於預測短時間內之軌跡準確性高，但無法解釋航機於長期的未來可能發生之偏移，因此不確定性在此模式裡通常引入最小誤失距離、安全之緩衝區、或航機間距離最近之時間點。最糟情況模式的軌跡是假設航機可以任何安全之操作方式到達的可能範圍而生成，屬於三種分類裡最保守的一種。機率模型之軌跡包含航機軌跡之不確定性，建立方式可分為二種，如：(1)URET(User Request Evaluation Tool)及CTAS，軌跡是以名目軌跡加上位置誤差所組成。(2)預測軌跡包含機率密度函數的概念，以包含不確定性之預測軌跡導出衝突之機率。機率模型的想法因介於名目及最糟情況二種方式概念而建構，此模式優點為採取機率方法可求得衝突之基本概似度(Fundamental Likelihood of Conflict)與求得誤報率(False Alarm Rate)。

## 1. 名目模式

建構衝突排解時之中心思想必須盡可能與現今航管系統概念相近似：無衝突環境下之航機軌跡仍考慮航機之特性與飛行員表現，預測之軌跡也須考慮如速度等不確定性因素，尤其垂直方向速度之不確定性格外重要。航管自動化系統的發展使管制員能夠輕易地預測航機之軌跡，並且讓飛行員了解並遵從管制員下達之指示。Durand & Alliot [2]除尋求無衝突之航機預測軌跡，同時要求航機能夠採取最少操作(Maneuver)、衝突排解時程最短之模式，此模式作者稱為 Solver。考慮航路(En-Route)中航機速度之不確定性，根據目前航機位置與飛航計畫預測航機軌跡，航機可達到請求飛航空層及要求的時間，Solver 模式也可排解任何偵測到之衝突。

Wallace et al. [15] 指出 RTCA CDR Working Group 對單一航機同時定義二個保護區，雙重確保航機安全，若其他航機侵入時對這二個保護區給予不同程度之警戒：一為保護空域區(Protected Airspace Zone, PAZ)，為航機間標準隔離之空域範圍；另一為空中接近碰撞區(Near Mid-air Collision Zone, NMAC Zone)，與保護空域區相比為較近距離包圍航機之範圍，當其他航機進入此區則屬高度警戒。以即時狀態向量(Instantaneous State Vectors)及圓柱形之保護區為衝突偵測模式的基礎，分別進行水平及垂直區域之衝突分析。二航機「名目」軌跡為時間的函數，計算未來某一時點是否存在違反隔離標準。水平及垂直區域之預測模式基本上擁有相同概念：亦即若違反安全隔離則預測會有衝突事件發生。

## 2. 最糟情況之模式

EATCHIP(European ATC Harmonization and Integration Programme)屬於階段性計畫，中程衝突偵測模式(Medium Term Conflict Detection, MTCD)為EATCHIP第三階段包含之工作項目。中程衝突偵測模式內之FDP(Flight Data Processing and Distribution Function)使用飛航計畫與航管指示資料產生即時航機軌跡，考慮航機不確定行為，中程衝突偵測模式於航機軌跡周圍給定預設值建構不確定區域，航機很可能發生之位置範圍為水平與垂直軌跡，此方法屬於幾何(Geometric)而非機率模型。Vink et al. [14] 認為在一段時間內由幾何模式建構之軌跡較機率模式可

行，且較為管制員所接受，因而選擇幾何模式作為航跡軌跡預測之基礎。另外中程衝突偵測模式包含EDP(Environment Data Processing and Distribution)，用於產生空域結構、航機隔離標準或禁航區等周邊資訊。FDP及EDP之資料作為輸入，中程衝突偵測模式計算出二航機(含不確定區域)彼此距離是否小於隔離標準，將可能發生衝突之訊息經由人機介面(Human Machine Interface)傳遞給管制員。

### 3. 機率模式

Isaacson et al. [3] 指出預測衝突由三步驟組成：軌跡預測、成對航機衝突辨別與衝突機率分析，並且說明 CTAS 如何建立四維之航機軌跡，並依此軌跡預測未來之衝突。衝突發生之機率是透過估計衝突機率而評估潛在之衝突，協助管制員排解之。Prandini et al. [9] 則考慮航機軌跡不確定性及航管雷達本身之誤差，建立中程衝突預測機率模式。Paielli 與 Erzberger [10, 11] 模式中將預測之軌跡誤差視為常態分配，與航機航向垂直之誤差(RMS Error)為定值、與航向平行之誤差(RMS Error)隨時間增長而增加。模式由合併之誤差共變異數(Combined Error Covariance)、座標轉換(Coordinate Transformation)及解析解(Analytical Solution)等三步驟求得衝突機率。二架航機之預測軌跡誤差結合後指定給其中一架航機(Stochastic Aircraft)，另一架航機(Reference Aircraft)則無軌跡誤差，此為結合誤差共變異數步驟。經座標轉換步驟與給定隔離標準後，積分即得衝突機率。

#### 2.2.3 幾何模式與機率模式之比較

Bakker et al. [1] 分析幾何模式、Paielli與Erzberger之衝突機率模式、重疊機率模式(Overlap Probability Approach)及概率模式(Novel Probabilistic Approach)四種衝突探測模式，認為幾何模式對航機行為之不確定性的處理過於保守，但使用適當之機率模式則可克服幾何模式過於保守之限制。其模擬並比較四種不同模式於二維空間之預測能力彈性，以及軌跡的不確定性大小對預測結果之影響程度；變動不確定性大小後，預測結果愈敏感者，愈能區分出安全及不安全狀態，則此等方法愈佳。表現最佳者為重疊機率模式與概率模式，次為衝突機率模式、最後為幾何模式。

## 2.3 衝突偵測與排解模擬模式

Odoni et al. [8] 說明衝突模擬模式應具備的三個基本要項：航機軌跡、衝突偵測及衝突排解模式，不同衝突模擬模式可能包含三個基本要項之部份或全部。衝突分析須借助航機軌跡，容量及航機之延遲模式也需借重航機軌跡。飛航流量模式用以決定衝突發生之頻率及其形態，如衝擊發生的地點或衝突包含之航機架數，而發生衝突的次數多寡及衝突嚴重程度則為管制員是否介入維持隔離標準的指標。衝突探測之目的是警告飛行員或管制員衝突是否發生，若可能發生則應該採取適當的防範措施，因而衝突偵測模式決定衝突探測的效率(如誤報率)。一旦偵測到航機衝突，衝突排解之方式就順勢產生，也就是衝突排解模式。衝突排解模式必須有效維持標準隔離及決定衝突對整體流量的影響，也必須考慮到人為的績效表現(如管制員管制能力)。

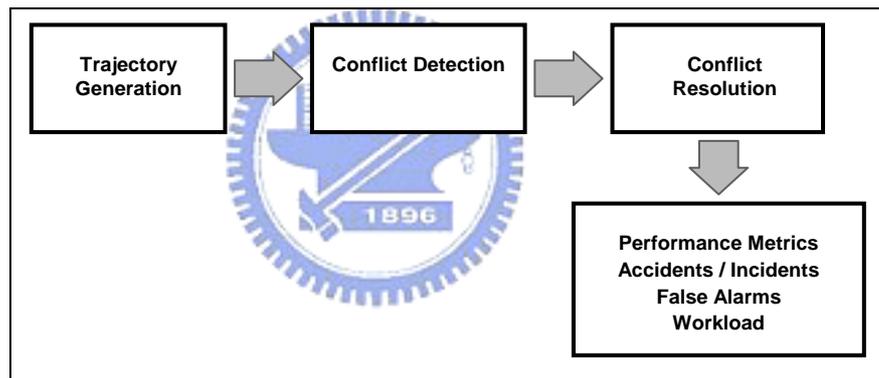


圖 2.3 基本衝突模式要項

資料來源: [8]

Odoni et al. [8] 比較說明九種模擬模式：ARC2000、ASIM、BDT、FLOWSIM、NARSIM、RAMS、SIMMOD、TAAM 及 TMAC。模擬模式將空域視為由「節點-節線」或「3D」所組成。「節點-節線」將空域劃分為數個節點與節線，航機以節點-節線-節點的方式飛行，偵測是否於節點發生衝突，發生衝突時將以航機延遲方式排解。3D 模擬模式以三度空間模擬航機飛行，因此更貼近真實狀況，航機依照特定的飛航計畫(Flight Plans)直線飛行或產生動態航機偏移。依 Odoni et al.[8]及飛航流量管理系統發展計畫結案報告[18]簡述九種模擬模式如下：

## 1. ARC 2000 (Automation Radar Control for the years beyond 2000)

Eurocontrol Experimental Center 發展用於評估自動化隔離系統的可行性，目標為呈現自動化航管系統能夠在沒有管制員時確實維持空域內無衝突的狀態。輸入為空域描述與水平垂直之隔離標準；而輸出則為空域中航機密度、衝突的密度、軌跡偏移、未排解的衝突、額外的飛行距離及其他所欲觀察之參數。Krella et al. [4] 認為 ARC 2000 可執行航機軌跡最佳化的動作，但無法求得最佳解，且系統依賴四維的 FMS，航機速度不確定性也無法模擬。

## 2. ASIM (Airspace SIMulation)

英國 Defence Research Agency(DRA)發展用於評估新的航路結構下對空域操作的影響，亦可評估空域之複雜度，但無法對終端管制區或是一萬呎以下作模擬。

## 3. BDT (Banc De Test)

為 AGACER 計畫的輔助工具，模擬產生航機軌跡及測試自動化衝突排解演算法。BDT 採取飛行計畫書及簡化的動力學模擬航機軌跡，可單獨用於偵測及計算衝突發生的次數。輸入航機基本特性、飛行計畫書，模式即可輸出離到場時間及延遲、每五分鐘空域內的航機數目及航機高度、發生衝突時的位置及航機速度等。

## 4. FLOWSIM (Traffic Flow Planning Simulation)

FAA 新發展，模擬因機場容量限制之航機延滯。使用者輸入增強交通管理系統(Enhanced Traffic Management System, ETMS)中的飛行計畫資料與機場容量模式後，FLOWSIM 決定延遲及 Ripple Delay 之程度。無法模擬空域中實際航機交通管制之方法。其假設每個節線均有無限制之容量，且航機之飛行由預定航班時刻表模擬，而非反映實際航機起飛時間。機場由其幾何外形及天氣狀況來決定容量。航管控制策略則由塔台地面控制程序、起飛限制等方法模擬。

## 5. NARSIM (NLR ATC Research Simulator)

即時航管模擬，用於研究及發展先進航管自動化系統，如 EATCHIP 中之 PHARE 計畫。

## 6. RAMS (Reorganized ATC Mathematical Simulator)

由 Eurocontrol Experimental Center 及 CACI Incorporated 發展，模擬航路及終端管制空域及管制員工作負荷，包含衝突偵測及排解、管制員工作量之模擬，可應用於探討管制員的工作量、自由飛行及空域之容量及密度等。模擬時輸入空域的範圍、衝突排解系統(Rule-based resolution system)、飛行計畫書、管制員的任務(如分析工作量)及天候條件；輸出管制員工作量分佈、交通量、航機軌跡、衝突開始及結束時間。

## 7. SIMMOD

可分析機場及空域整體系統之運作，並提供多種功能與彈性。惟其所需輸入之資料量相當龐大，故在資料蒐集與輸入需要花費相當多的人力與時間。本模式為一隨機、事件掃描模擬模式，所有的處理都是依據事件排程表來進行。SIMMOD 在空間的處理上為節點、節線之網路型態。此一模擬模式將機場節點與空域節點視為不同的兩個群體。機場節點包括登機門、離場等候線、跑道、滑行道之交接點。空域節點則包括固定通報點、空中等候線，航機匯流分流點以及空域空邊交界點。

## 8. TAAM (Total Airspace and Airport Modeller)

由 The Preston Group(TPG)及 Australian Civil Aviation Authority (CAA)共同發展出模擬空域及空邊的快速模擬套裝軟體，用作規劃或是分析先進航管系統的可行性，其中包含衝突偵測及排解的模擬。輸入資料包含機場特性、機場航線及節線、地形資料、航管程序、機場規則 (Airport Usage Rules)、航班時刻表(Traffic Timetables)、雷達定位及離到場航線、航機特性、航機衝突發生時之解決策略等。而其輸出資料如延滯時間、衝突程度、跑道、滑行道動線描述、空域航線、噪音等值線、航機耗油量、飛航費用、航管人員工作量、各型航機飛航記錄、二度或三度空間繪圖輸出等。

## 9. TMAC

分析流量管理策略及不同操作概念下之系統評估。輸入航機航路資料、飛行計畫、動力學、地面延遲、航管策略及機場容量，決定旅行時間、延遲及衝突，其中可模擬航機於雷達定位系統操作之軌跡之不確定

性，但未提供衝突排解的演算法。

## 2.4 標準儀器到場及離場程序

航機依循台北飛航情報區飛航指南中之離到場程序並且配合管制員下達的指令順利到場或離場，董吉利[19]整理中正機場儀器飛航程序，條列各種儀器離到場程序之名稱、使用的跑道及各程序可銜接之航路，更分別依05/06及23/24跑道方向的不同區分常用之儀器離到場程序。航機飛航計畫中不可缺少特定之離到場程序，以用來指引航機爬升或下降，因而衝突偵測與排解模式中，飛航計畫通常為主要輸入之一，顯見其足以表示航機正常運作下之路徑。

## 2.5 ATP 88 飛航管制程序-雷達管制隔離

依據ATP88飛航管制程序[17]說明雷達管制隔離標準如下：

### 1. 垂直隔離

航空器飛航空層290或以下採1000呎之高度隔離，290以上則為2000呎之高度隔離。於指定之縮減垂直隔離(Reduced Vertical Separation Minimum, RVSM)空域及高度範圍內作業者，或於指定之縮減垂直隔離轉換空域高度範圍內作業且進入或離開縮減垂直隔離空域者，可採取1000呎之隔離。台北飛航情報區飛航空層310至飛航空層410間垂直隔離縮減為1000呎，南北向主要航路高度為飛航空層320、340、360、380、400；東西向使用高度東向為飛航空層330、370、410，西向為310、350、390，但因終端區域管制以低於飛航空層200以下，因而不考慮縮減垂直隔離的部分。

### 2. 左右隔離

二航空器距離雷達設施40哩以內隔離3哩。二航空器距離雷達設施40哩以上，隔離5哩。

### 3. 前後隔離

基本前後隔離為3哩。但若目標距雷達設施40哩以上隔離5哩。

若考慮機尾亂流，則小型機在大型機之後，隔離4浬；重型機在重型機之後，隔離4浬；小型機在重型機之後，隔離5浬；大型機在重型機之後，隔離5浬

## 2.6 文獻評析

分析衝突之對象分為三種：航機與航機、航機與禁航區、航機與地形。由於二航機為動態之物體，航機與航機間之衝突分析必然較另外二種情況複雜，因而航機「衝突」文獻多屬航機與航機間衝突偵測與排解之研究。衝突偵測與排解最重要之步驟為軌跡之預測模式，正是文獻所謂狀態傳遞方式，分為短程、中程或長程之預測模式。若將航機視為依照航圖於定位點間飛行之直線軌跡，會忽略航機本身性能與因氣候等因素所發生偏移之情形；以航機未來所有可能之位置視為軌跡，雖考慮不確定成份，但卻過於保守。最佳之軌跡預測模式為機率模式，考慮不確定因素後，航機軌跡依機率分配在特定空間範圍內各點有其出現之機率，軌跡不再由空間中一點或航機操作範圍內出現之機率視為均等所組成。

URET 與 CTAS 包含終端管制區內衝突偵測之探討，目前以構建之模式應用於實際空域內進行參數校估等工作，二者預測之軌跡皆以名目軌跡加上位置誤差所構成，以名目軌跡為出發點限制航機必須在二定位點間以直線路徑飛行。此外 Prandini et al. [9]雖已將衝突偵測模式推廣至可改變飛航空層之航機使用，但實際數據之驗證過程仍侷限於航路階段。電腦模擬衝突分析結果雖可提供使用者欲分析之參數，但若能夠將實際航機之飛航資料作為衝突分析之輸入，其結果將比電腦模擬模式更能真實反應空域內衝突之情形。