

二、 文獻回顧

2.1 儀器飛航程序

所謂「儀器飛航」，係指航空器駕駛員依照機載或地面電子儀器裝備指示之飛航。相對於駕駛員保持目視地標地貌飛行的「目視飛航」，儀器飛航可以不受大部分天氣條件及飛行高度限制，藉助適當電子儀器裝備完成飛行。而這些電子儀器也就是導航設施，包含無方向性電台(NDB, None-Directional Radio Beacon)、多向導航台(VOR, VHF Omni-directional Range)、儀器降落系統(ILS, Instrument Landing System)、雷達(RADAR)、慣性導航系統(INS, Inertial Navigation System)及全球衛星定位系統(GPS, Global Positioning System)等裝備。

而航空器自起飛機場飛航至目的地機場，為了能利用適當儀器裝備所提供之電子訊號，協助飛機在無需目視外在地標地貌，安全地與障礙物保持適當隔離，準確的飛達目的地，便需仰賴經由特殊規範所設計的儀器飛航程序。簡單來說，「儀器飛航程序」就是由飛航主管機關依照特殊規範，參考導航設施功能所設計頒佈的一系列預設且有順序性之飛航程序與航線。

目前全世界儀器飛航程序的設計規範共分兩大體系，一為美國聯邦航空總署 FAA 所頒佈的 Order 8260.3B 終端儀航程序(TERPS, Terminal Instrument Procedures)[3]，使用國家為美國、日本及我國為主要代表；另一體系為國際民航組織 ICAO 所發佈的 Doc.8168 空中導航服務程序(PANS-OP, Procedures for Air Navigation- Aircraft Operation) 第二冊 目視及儀器飛航程序製作(Construction of Visual and Instrument Flight Procedures)[10]，主要使用國家為歐盟、澳洲、紐西蘭、中國大陸等除美國及日本以外的國際民航組織會員國。雖然儀器飛航程序的設計規範分為兩大體系，然而兩大體系間設計原則的差異並不大，其主要的不同點在國際民航組織的規範對航空器採取較美國嚴苛的保護。

儀器飛航程序依飛行階段區分，主要包括下列四種程序，以構築航空

器自起飛機場飛航至目的地機場之飛行路線：

1. 標準儀器離場(SID, Standard instrument Departure): 參考導航設施功能所設計頒佈的飛航航線，以提供自終端(起飛機場)至航路之轉換程序。
2. 航路(Airway): 通道式之管制區域，其中心線係按無線電助航設施之導航信號訂定。
3. 標準終端到場(STAR, Standard Terminal Arrival Route): 參考導航設施功能所設計頒佈的飛航航線，以提供從航路結構至終端區域內之儀器進場定位點之過渡程序。
4. 儀器進場程序(IAP, Instrument Approach Procedure): 最初進場定位點至落地或至目視機場之一系列預設飛航程序，如 ILS 進場程序，NDB 進場程序等。

由上可知，航空器飛航標準儀器離場程序時多屬爬升階段，飛航航路時多屬巡航階段，而飛航標準終端到場及儀器進場程序時則屬下降階段。程序與程序間因空域使用或其它因素，皆可能產生航線交叉情形。

另外，儀器飛航程序儀器飛航程序依導航特性區分，可分為下列兩種類型：

1. 傳統導航設施程序：即是參考如無方向性電台(NDB)、多向導航台(VOR)、儀器降落系統(ILS)等傳統電台無線電信號所設計之程序，其飛航航線之構成係接收直線發射之無線電信號，或以距該電台特定距離之圓弧(ARC)來飛行。此等程序受導航電台無線電特性之限制，不易大幅更改或調整。
2. 區域航行(RNAV, Area Navigation)程序：是利用慣性導航系統(INS)或全球衛星定位系統(GPS)等機載導航裝備所設計之程序，此等程序不受地面導航設施限制，為點對點(Point to Point)飛行，調整程序結構容易，為未來儀器飛航程序之設計趨勢。

不論是標準儀器離場、航路、標準終端到場或儀器離場程序，皆可採

用傳統導航設施程序方式或區域航行程序方式來構建。

2.2 飛航模擬模式

2.2.1 主要飛航模擬模式的介紹

全球飛航管理(ATM, Air Traffic Management)系統正面臨一個重要的轉換期，由於新科技的發展促使航空器的飛行距離、導航性能等大幅提昇，全球航空業者殷切企盼能對現行飛航管理系統進行全面性的檢視與檢討，並積極引進新的觀念，以提升運作效率，降低時間及飛航成本。為了能夠全面檢討現行飛航管理系統，並能評估新觀念的成效，則必須仰賴許多的模式與工具，這些模式與工具必須能廣泛包含許多範圍，而不僅僅侷限於某一特定領域。Odoni[7]等人就現行歐美使用之模擬模式與工具進行研究，評量各個模式的優點與缺點，並指出未來亟需積極發展模式的優先順序。

Odoni[7]等人依照跑道容量與延誤模式涵蓋的範圍(coverage)及詳細程度(detail)分類如表 2.1

表 2.1 跑道容量與延誤模擬模式分類表

詳細程度	模式涵蓋範圍			
	機坪及滑行道	跑道與最後進場	終端區空域	航路空域
巨觀 (Macroscopic) (政策分析,成本效益分析)		LMI Runway Capacity Model FAA Airfield Capacity Model DELAYS AND		ASIM SDAT DORATASK
中觀 (Mesoscopic) (航行量分析,成本效益分析)		NASPAC TMAC FLOWSIM ASCENT		
微觀 (Microscopic) (細部分析)	T A A M SIMMOD			

有關跑道容量與延誤模擬模式的相關介紹簡述如後：

1. LMI Runway Capacity Model :

LMI 跑道容量模式主要用來計算單一跑道使用作為離場、到場或離到場混合時的跑道容量，依據四種情境作分析，即(a)僅作到場使用(b)到場間可隨機穿插離場(c)到場與離場數目一致，彼此互相穿插(d)僅作離場使用。本模式尚無法使用於多條跑道情形，屬初期發展階段，距離實際運用仍有距離。

2. FAA Airfield Capacity Model :

FAA 機場容量模式亦為一計算機場跑道最大容量之分析模式，其不僅可以處理單一跑道之情形，最多可以處理達四條跑道之架構。其分析方式為依據離到場比例(0%離場/100%到場遞增/遞減至 100%離場/0%到場)，計算最大容量。本模式早期為供 FAA 制訂機場容量時使用，但近期已很少被運用。

3. AND, Approximate Network Delays :

AND 模式為一網路等候模式(network queuing model)，用以分析當班機發生延誤後對位於區域性網所產生之衝擊及改變。然而本模式僅處理區域性終端地區所造成之延誤，而不處理跨區域的航路部分所造成之延誤。本模式仍屬實驗性工具，主要目的為提供決策者可以用非模擬之方式，作快速預測，在短時間內決定政策制訂之參考工具。

4. The Airport Machine :

本模式可以詳盡模擬機場內跑道、滑行道、機坪之運作，其模擬範圍自航機落地前數分鐘之空域至機場在至航機起飛後數分鐘之空域，不包括其它終端空域及航路空域階段，其輸出結果包括航機流量、延誤、跑道容量等機場研究所需之資訊。其基本架構為節點-節線(Node-Link)方式，與 SIMMOD 模式極為類似。本模式因為商業軟體，其長處在於提供使用者良好之使用者介面，經

評價使用者介面優於 SIMMOD，然而其價位亦為極其昂貴的 2 萬美金。

5. SIMMOD：

SIMMOD 模式不但可以詳盡模擬機場內跑道、滑行道、機坪之運作，亦可模擬機場附近終端空域及區域系統中包含之鄰近機場與空域，評估單位時間內之流量、航機飛行時間、航機耗油情形、航情延誤及機場容量等因素。本模式採節點-節線(Node-Link)架構，仰賴非常詳細的機場及空域資料輸入，而航機資料庫則設有 19 種機型之航機性能特性。由於本模式可以輸出所模擬的每架航機相當精細的統計數據，故本模式為現今世界上最廣為使用的模擬模式。

6. TAAM, Total Airspace & Airport Modeler

TAAM 模式可以詳盡的模擬整體的飛航系統，從離開機坪起飛至落地進入機坪(gate to gate)所有飛航階段皆在其模擬分析範圍內，包括飛航中的衝突偵測。更有甚者，其還可以提供空域中及機場內模擬航行狀況之 2D 或 3D 顯示圖形，範圍由 30 公尺至 40,000 公里。本模式所分析之資料輸出包含飛航系統延誤、飛航衝突偵測、機場容量、跑滑道與機坪運作、空域使用效率、噪音分佈、耗油情形、直接及間接成本、航管員工作量、航空器飛航軌跡、情境模擬等，更可模擬一天高達 16,000 架次之航行量。本模式經 Odoni[7]等人評估為現今最全方位之飛航管理模擬模式，其使用價格高達數百萬台幣。

7. HERMES, Heuristic Runway Movement Event Simulation：

HEREMS 模式用以評估平行跑道之跑道容量，亦可用來評估塔台管制員之工作量。本模式經 Odoni[7]等人評定在跑道容量的評估方面，其精度優於 SIMMOD 模式。由於本模式為英國 CAA 獨力發展，除跟英國 CAA 有協議外，無法獲得及使用該工具。

8. NASPAC, National Airspace System Performance Capability：

NASPAC 模式是第一套用來評估大區域性飛航流量及延誤的模擬模式，屬於巨觀流量管理策略績效評量工具，由美國 FAA 所擁有。本模式操作介面較差，需投入大量人力與經費來訓練操作者。

9. TMAC :

TMAC 是由數個模式所組成，為用來評估流量管理策略績效之評量工具，亦可提供模擬衝突偵測之功能，其內建有航機飛航軌跡資料。TMAC 目前僅供美國 MITRE 公司內部使用。

10. FLOWSIM :

FLOWSIM 模式模擬各主要機場間的流量，並分析因機場容量限制對航機所造成的連鎖性延誤，但不考慮空域及航路區域的問題。本模式仍為發展中之原型(prototype)，其與實際運用階段仍有差距。

11. ASCENT, ATFM System Concept Evaluator for New Technologies :

ASCENT 模式為評量依現行作業獲未來新觀念所實施之飛航流量管理(ATFM)策略，其實施結果將對整個區域性或全國性的飛航系統造成怎樣的衝擊，其可依不同的情境設定(scenario)評估各種情境下之結果。本模式的有效性(validation)仍維持於一致性測試(consistency test)階段，尚未有後續進展。

Odoni[7]等人分析現有衝突偵測模式的功能(capability)，列出比較表如表 2.2 及各模式的輸出結果如表 2.3。

表 2.2 衝突偵測模式的功能比較

模式	軌跡產生	軌跡模擬	衝突解決	多機衝突
ARC2000	輸入產生	3D	Rule-Based	二機衝突
ASIM	自動產生	節點-節線	None	無
BDT	輸入產生	3D	Algorithmic	多機衝突
FLOWSIM	輸入產生	節點-節線	Delay	無
NARSIM	輸入產生	3D	Human	Human
RAMS	自動產生	3D	Rule-Based	二機衝突
SIMMOD	輸入產生	節點-節線	Delay	無
TAAM	輸入產生	3D	Rule-Based	二機衝突
TMAC	輸入產生	3D	None	無

表 2.3 衝突偵測模式的輸出結果

模式	輸出
ARC2000	衝突密度, 未解決之衝突, 軌跡偏移, 時間/油料損失
ASIM	衝突數目 / 地點
BDT	衝突數目, 接近距離, 地理位置, 航機狀態 (速度, 高度, etc.)
FLOWSIM	延誤 (地點 & 時間)
NARSIM	衝突偵測
RAMS	衝突開始 / 結束時間, 軌跡
SIMMOD	延誤, 航行量(地點 & 時間)
TAAM	延誤, 衝突數目 & 嚴重程度, 未解決之衝突
TMAC	延誤, 衝突數目(地點 & 時間)

有關衝突偵測模式的相關介紹簡述如後：

1. RAMS, Reorganized ATC Mathematical Simulator：

過去十五年來，RAMS 模式一直是歐洲 EuroControl 用以評估歐

洲地區空域結構 (Airspace Structure) 及席位架構 (Sector Configuration) 的模擬工具；RAMS 模式可以處理自起飛開始至落地為止的所有飛航階段，提供包含提供 4D 飛航狀態、衝突偵測、衝突解決機制、工作量模組等功能。RAMS 的使用者有其特定群組，EuroControl 以個案方式評估其申請者，故不易獲得。

2. ARC2000, Automatic Radar Control for the year beyond 2000 :

ARC2000 工具是歐洲 EuroControl 發展用以評估在西元 2015 年以後是否有可能以地面的自動化裝備，來達成自動引導航機避免碰撞，並在高航行量的情形下順序、安全地引導飛機落地，也必須能處理突發狀況，完全以電腦取代飛航管制員。本模擬工具的航機產生模組之航機飛航軌跡即是採用 EuroControl 自行發展的航空器資料庫(BADA, Base of Aircraft Data)。ARC2000 目前僅供 EuroControl 內部使用及供美國 FAA 依協議使用，其他人員無法獲得。

3. BDT, Banc de Test :

BDT 模式用來產生航機的軌跡，並偵測航機間的衝突。其運用簡單的空氣動力模式在特定的空域範圍內產生航機飛行的水平及垂直軌跡，並偵測與提供航機間可能產生衝突的次數、發生地點、航機間的距離、速度、高度等資訊。其模式假設為(a)航機以固定的速度與爬升率/下降率來爬升或下降(b)航機平飛時空速與高度為常數(c)終端區域的限制與機場容量不予考慮(d)航機軌跡的偏移情形以隨機方式產生。本模式目前仍由法國的 CENA 進行驗證測試及評估中。

4. NARSIM, NLR ATC research Simulator

NARSIM 模式是一即時的模擬模式(Real Time Simulation)，需有飛航管制員與飛航管制系統的參與，用以評估飛航管制人員與航管系統機器間的互動情形，藉由產生航機的飛航軌跡、偵測衝突情形等來判斷人與機器間的互動是否良好。本模式目前僅使用於

荷蘭 NLR (National Aerospace Laboratory, Netherlands)。

5. ASIM, Airspace SIMulation :

ASIM 模式為英國民航局 CAA 發展之工具，目的為研究英國空域內有任何航路結構調整時，所造成的衝擊和影響會是如何。但目前 ASIM 的功能尚無法涵蓋終端及 10,000 呎以下的空域，亦無法詳細模擬流量管理功能。模式的主要輸出為航機間的接近程度。英國民航局 CAA 以個案方式評估其申請者，故此模式不易獲得。

6. RATSG, Robust air traffic Situation generator :

RATSG 模式為麻省理工學院航太系統實驗室所研發，允許使用者設計假目標航機(Pseudo Aircraft)的 4D 軌跡以供模擬用。假目標航機可自動改變航向、高度、速度以產生衝突情形。本模擬模式可以有飛航管制員的參與，做即時模擬 (Real Time Simulation)；然而，本模式亦可排除飛航管制員的參與，做快速模擬(Fast Time Simulation)。本模式航機飛行模組參數係依公布的航空器性能資要來設計，然而這些性能資料並未經有效驗證。

7. TOPAZ, Traffic Organization and Perturbation AnalyZer :

TOPAZ 是一組彈性的模組用來對未來的飛航管理 ATM 概念作安全與風險分析的工具。其採取的步驟包括：(a)以高階 Petri Net 模擬及 Monte Carlo 模擬，評估與安全極為相關的非名目事件 (non-nominal event)發生的頻率(b)以多個不同的數學模組來評估與飛航管理有關之致命意外事件發生的機率(c)用工作表組合前述兩項評估結果，成為飛航管理安全風險量表。與前面所簡述的 6 個模式比較，TOPAZ 比較屬於風險分析工具，而較不屬於飛航衝突偵測模式。

2.2.2 SIMMOD 模擬模式的運用

SIMMOD 模擬模式可以說是現今世界上最廣為使用的機場容量與延誤模擬模式。國內外已有許多學術研究或實際應用採用 SIMMOD 進行模擬，成效相當良好，茲將 SIMMOD 模式運作架構 [8]簡單說明如下：

1. SIMMOD 是不連續事件(Discrete-event)模擬模式，系統狀態的改變是因事件的發生而產生，因此又被稱為”事件步驟(event stepped)”模擬；其模擬步驟的進行事由一個事件進入下一個事件，對於兩事件中經過的時間不論長短皆予以忽略，嚴謹地一個步驟接一個步驟依序進行，當同時有兩個事件發生時，模式會依重要性先處理一個事件，再處理另一個事件，然而在事件時間紀錄上則兩事件皆紀錄同一時間。
2. 節點與節線是 SIMMOD 模式的最基本組成原件。SIMMOD 使用一串連續節點及節點間連接的節線來表示機場與空域系統。節點是一個座標系統中的點用以供 SIMMOD 評估一架航機在系統中與其它航機相對應之位置。節線則是定義為兩節點間之路徑。SIMMOD 將機場節點節線與空域節點節線區分為兩個群組，各有不同之運作特性。由於 SIMMOD 是一個預測模式，因此會產生隨機變數以模擬每一天飛航環境不同的變化，因此執行 SIMMOD 模擬通常需對同一情境作多次重複的模擬才有辦法建立統計上地顯著趨勢。
3. SIMMOD 對飛機模組的定義採用 FAA 整合噪音模式(INM, Integrated Noise Model)第 9 號資料庫之航機資料，主要使用參數為航機起飛重量，該起飛重量值被用來計算跑道使用距離、油量損耗等結果。
4. 航機的高度及水平隔離不被 SIMMOD 所模擬，SIMMOD 亦不會對高度進行偵測或調整來解決衝突情形，僅會將高度資訊用作油

料耗損及空速的計算。SIMMOD 是依照兩架航機同時到達同一節點之情形來偵測衝突事件。

5. 航機的推進邏輯依照下列三種策略執行：

策略一：節點到達控制(Node Arrival Control)，又可細分為三種型態(a)QFIFO(b)SpeedFit(c)MultiFit。

策略二：總量管制(Metering Control)

策略三：流量管制(Flow Control)

6. 詳細模擬機場場面之活動，以節點節線表示每一條滑行道、跑道及跑滑道交叉點，並依據節線之距離與航機分類來計算航機佔用機坪、滑行道及跑道的時間。

鑑於飛航延誤造成的飛航運作成本問題日益嚴重，Kleinman [16] 等人提出以同步擾動推測趨近法 (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation) 來探討航機地面等待排程(ground hold schedule)的最佳化，也就是探討如何最佳化安排航機地面等候以應對延誤問題，使總成本最小。其對同步擾動推測趨近法驗證的方式為採取 SIMMOD 設定一個以四個機場組成的航路網進行模擬，其驗證最佳結果最多可節省 10.3% 的成本。其它國外有關 SIMMOD 的研究與運用非常多，在此不予贅述。

國內有關 SIMMOD 模式的運用研究，首先有陳朝文[24]用 SIMMOD 模式來進行松山機場跑到容量的推估，並以松山為個案研究來檢驗 SIMMOD 於我國飛航環境的適用性。而戚文豪[21]也以松山機場為個案研究對象，除探討跑道容量問題以外，亦探討空域模擬的適用性問題，其採用的是較早期的 SIMMOD2.2 版模擬引擎，結論為 SIMMOD 模擬模式在我國之飛航環境運用確實可行。郭權鋒 [20]進一步將 SIMMOD 模擬範圍擴大為以松山機場及高雄機場所形成之北高線路網進行探討，分析有關跑道容量、航路結構調整及航機延誤等問題。

近期國內運用 SIMMOD 模式進行的研究有吳世偉[26]採用最新的 SIMMOD PLUS 工具，以松山機場為路網中心，並以延誤情形為評估基準，詳細的探討正常情形及有突發狀況(如跑道更換、天氣突變、或機場關閉後開放)時，對機場運作及航情所產生的影響及衝擊。

2.2.3 ANS 模擬模式的運用

戴佐敏[22]等人考量國內空域狹小、機場林立、管制區域容量不足且航路與各種標準離到場程序間關係錯綜複雜，覺得有必要發展一套符合國內特性之終端管制區域微觀模擬模式，作為進行空域績效評估及提升空域整體運作效率之評量工具，稱為 ANS(Air Net Simulation)模擬模式。

ANS(Air Net Simulation)模擬模式[22]為一隨機、事件掃瞄之模擬模式，以物件導向之程式語言 Visual C++撰寫主體程式，並採視窗化之輸出使用者介面，以方便使用者操作。其程式資料庫主要分五大部分：(1)網路節點資料庫：參考民用航空局飛航指南(AIP)所發佈之儀器飛航離到場程序及航路架構所建立之資料庫。(2)隔離時間資料庫：參考民用航空局頒佈之飛航管制程序(ATP)對航機間隔離之時間標準所建立之資料庫。(3)班表資料庫：依國內及國際班機時刻表所建立之資料庫。(4)節線運行時間資料庫：利用航管自動化系統資料庫(SAR Tape)，推算各機型航機於不同航線所需之在空時間；另利用實地觀察統計，獲得各機型在不同機場地面滑行所需之時間。(5)機型資料庫：參考 FAA 對機型之分類，將機型依重量概分為 A、B、C、D 四類所建立之資料庫。

戴佐敏等人[22]於建立完成 ANS(Air Net Simulation)模擬模式後，驗證探討於不同進場隔離下，松山機場與中正機場之運作容量，以總延滯成本最小為評估指標探討最佳進場航機隔離策略。其結果

為松山機場以採 3 分鐘進場隔離間格時為最佳，跑道容量可達 40 架次/小時；中正機場則以採 4 分鐘進場隔離間格時為最佳，跑道容量可達 60 架次/小時。

李昫諭[23]運用 ANS 模擬模式為基礎，修正節線運行時間模組之運作邏輯，並加入可探討天候條件改變之功能，以便於分析除一般正常情形之運作外，諸如跑道方向變換、跑道或機場臨時關閉等不同情境下航機之運作情形，並藉此評估機場容量和因應對策。在應用分析時，以中正機場為例，在兩條跑道為獨立運作的前提下，獲得的跑道容量最高可達 90 架次/小時之理想值，如以現行將兩條跑道視為一條跑道的情形下，獲得的跑道容量最高為 77 架次/小時。這兩項結果都明顯遠高於實際中正機場跑道運作情形。

俞瑞華[25]亦運用 ANS 模擬模式為基礎，討論三種策略對航機擁擠情形的改善績效：(1)總量控制策略(metering)：採預測某時段進入某一空域之航機數量將超過其空域容量時，則於空域入口(meter node)採數量管制方式，控制進入航機數量。(2)流量管制策略(flow control)：透過針對空域邊界節點(flow node)，調整通過航機之間的距離與速度，以達到限制進入擁擠空域航機流量之目的。(3)近場台管制策略：為以航管人員依其所受訓練，調整到場航機的速度與空中等待時間，並合理安排離到場順序，以消化空域內之擁擠。俞瑞華[25]研究結果認為近場台管制策略對降低擁擠航情之實施績效優於採取流量管制策略，亦優於採取交通量控制策略。

由於 ANS 模擬模式主要模擬範圍為終端空域，對航路部分則著墨不多，對大區域之模擬較無適用之能力。張仁達[19]遂以參考 SIMMOD 的節點節線模擬模式為主架構，納入 ANS 模擬模式所考量台北飛航情報區之特性，重新撰寫程式，為 ANS 2.0 (Air Net Simulation version 2.0)模擬模式。其輸出結果為節點、節線，席位與航機模擬結果資料，可用以評估空域績效。節點輸出資料

包括航機到達數、航機延滯時間與機場起降架次；節線輸出資料包含單位時間內之航機離到數、最高通過架次與平均每分鐘通過架次；席位輸出資料包含單位時間內之航機離到達數，最高管制架次與平均每分鐘管制架次；航機輸出資料包含各航機的飛行時間、空中等候時間。ANS 2.0 可稱為國內自行發展最為完整之模擬模式。

2.3 飛航特性分析

2.3.1 飛航軌跡

Ralf H. Mayer[12]依航機高度之不同區分十種飛行的階段(如圖 2.1)，其中每一階段除起飛與落地外，認為每一階段中航機的加減速及垂直速率等參數基本上是屬線性變化。

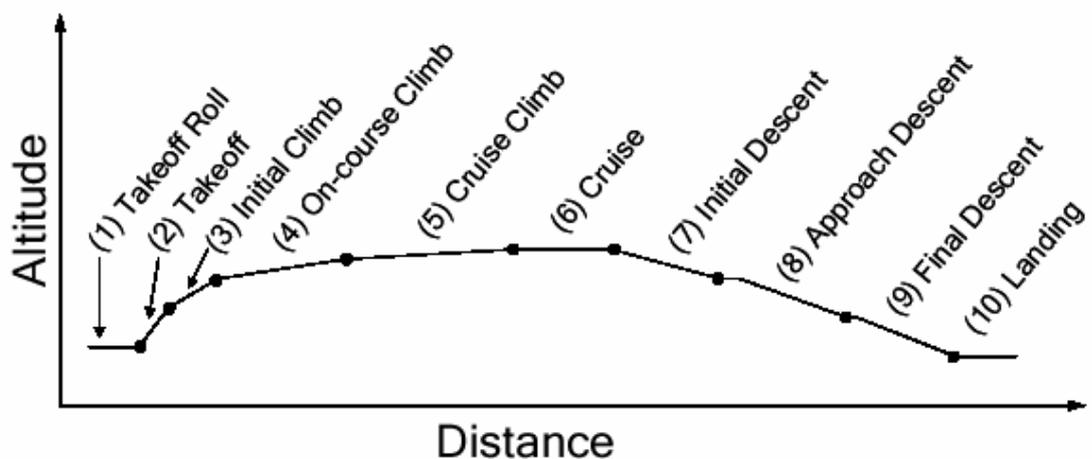


圖 2.1 航機十種飛行階段

Patric Hagelauer[18]等人以動態規劃方法，探討航機飛航時面對儀器飛航程序及飛航管制人員所訂定或頒發的高度限制時，以油料耗損為指標，如何能獲得最佳的垂直飛航軌跡。

R.A.A. Wijnen[17]等人以荷蘭阿姆斯特丹機場為個案研究對象，運用 INM(Integrated Noise Model)模式，進行離場航機飛航軌跡對鄰近地區噪音的影響，結論為適度的調整儀器離場程序(SID,

Standard Instrument departure)的水平飛航軌跡或垂直飛航軌跡，可以降低航機噪音對機場鄰近地區的衝擊。

2.3.2 加速離場路徑(EDP, Expedite Departure Path)

美國航空暨太空總署 Ames 研究中心所發展的加速離場路徑(EDP, Expedite Departure Path)，主要目的為提供飛航管制於終端空域空中交通有效的技術性(Tactical)與策略性(Strategic)建議之決策支援工具(DST, Decision Support Tool)。一般而言，離場航機起飛後通常被限制爬高高度在到場航機以下，以取得離到場交錯航機間之隔離，而加速離場路徑 EDP 主要功能之一就是能提供飛航管制員讓離場航機不受到場航機限制，直接爬升的建議。

美國航空暨太空總署 Ames 研究中心的 Yoon C. Jung 及 Douglas R. Isaacson [19]強調加速離場路徑 EDP 能不能夠發揮其效益，取決於是否能正確的預測離場爬升的飛航軌跡，因為唯有能準確的預測飛航軌跡，方能判斷與到場航機間是否有衝突影響，才能提出適當之建議。

加速離場路徑 EDP 採用一軟體模組，稱為軌跡合成器(TS, Trajectory Synthesizer)來產生航機預測的飛航軌跡。軌跡合成器 TS 納入許多飛機製造商所提供的參數，包括發動機推力、機載重量範圍、翼展面積....等，採用簡化的空氣動力方程式來求算垂直飛航軌跡。如固定速度，可以求得爬升率，如固定爬升率，則可以求得速度。其方程式如下：

For constant CAS condition:

$$\frac{dh}{dt} = V_t \sin \gamma$$

$$\gamma \cong \arcsin\left(\frac{T-D}{W}\right)$$

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{dV_t}{dh} \frac{dh}{dt}$$

$$\frac{dV_t}{dh} = \frac{V_t(h+\Delta h) - V_t(h)}{\Delta h}$$

For constant climb rate condition:

$$\frac{dh}{dt} = \text{const}$$

$$\frac{dV_t}{dt} \cong \frac{(T-D)g}{W} - g \sin \gamma$$

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{dh/dt}{V_t}\right)$$

資料來源：參考文獻[19] page 5

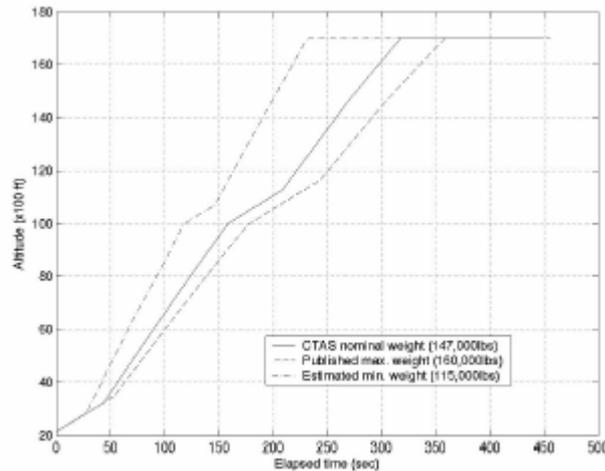
軌跡合成器 TS 同時也納入航空器操作及飛航法規及離場程序的限制來預測飛航軌跡，如此更能真實反映出實際飛航軌跡的狀況。軌跡合成器 TS 納入的階段與策略如下表：

Integration stage	Constant	Capture cond.	Converged
PATH DISTANCE THEN SPEEDUP	d(TAS)/dt (1.8)	DIST (-254,667)	DIST (-254,667)
		CAS (250)	
PATH DISTANCE THEN CLIMB	RC (25)	DIST (-225,817)	CAS (250)
		CAS (250)	
		ALT (10,000)	
PATH DISTANCE THEN CLIMB	CAS (250)	DIST (-225,817)	DIST (-225,817)
		ALT (10,000)	
PATH DISTANCE THEN CLIMB	CAS (250)	DIST (0)	ALT (10,000)
		ALT (10,000)	
PATH DISTANCE THEN CLIMB	RC (25)	DIST (0)	CAS (280)
		ALT (17,000)	
		CAS (280)	
PATH DISTANCE THEN CLIMB	CAS (280)	DIST (0)	ALT (17,000)
		ALT (17,000)	
PATH DISTANCE	CAS (280)	DIST (0)	DIST (0)

(Units: RC (ft/sec), CAS (Kts), DIST (ft), ALT (ft), d(TAS)/dt (ft/sec²))

資料來源：參考文獻[19] page 4

軌跡合成器 TS 可以產生的航機垂直飛航軌跡舉例如下圖，其 X 軸為經過時間，Y 軸為航機高度。航機垂直飛航軌跡之產生結果會因假設該航機之重量不同而異。



資料來源：參考文獻[19] page 7

Yoon C. Jung 及 Douglas R. Isaacson [19]針對 2003 年美國 Dallas/Fort Worth (DFW)機場的 4240 架離場航機之垂直飛航軌跡進行分析，依 6 種機型研究每一機型的爬升下降率平均值(mean)與標準差(standard deviation)，並與軌跡合成器 TS 所產生的飛航軌跡作比對，發現其中仍有差異存在。主要的差異為不易精準預測航空器實際重量、航空器動力差異(同機種不同引擎型號)、大氣氣候、航空公司政策、駕駛員與航管人員的互動...等，皆是重要因素。

2.3.3 航空器基礎資料(BADA, Base of Aircraft Data)

歐洲 EuroControl 的 EEC(Eurocontrol Experimental Center)發展了一組以 ASCII 檔所組成的資料，稱為 BADA，共包含了 267 種機型航空器有關操作性能參數及航空公司程序參數等數據。這些資料是被設計用來在飛航管理領域(Air Traffic Management Domain)中進行航機飛航軌跡模擬與預測使用。

在 BADA 使用者手冊[13]中，按照主要影響航空器飛航特性的

因素，說明 BADA 資料檔的組成與設計模式。茲簡述如下：

1. 操作性能模式(Operation Performance Model)：其中包括十個子項，

- (1) 全能量模式(Total energy Model)：這是最主要的一個數學模式，計算航機的空速、爬升下降率、航機動能(推力/阻力)間的關係。當空速及航機動能得以控制時，便能計算求得爬升下降率，亦即只要能控制其中兩項因素，便能求得第三項因素。
- (2) 標準大氣(Standard Atmosphere)：因高度不同，大氣的屬性隨之變更，而大氣屬性影響大氣升力、阻力及校正空速(CAS)及真空速間(TAS)的換算。本項說明大氣及空速換算計算公式。
- (3) 機型(Aircraft Type)：本項將航機引擎種類區分為三種，亦將航機產生的機尾亂流分成三種。
- (4) 質量(Mass)：將航機依載重情形，區分為四種重量，單位以噸表示。
- (5) 飛航限度(Flight envelope)：本項說明航機所能飛行之最高高度、最大速度、最低速度之計算公式。
- (6) 空氣動力(Aerodynamics)：本項說明航機在不同階段、不同外型所產生之阻力計算公式。
- (7) 引擎推力(Engine Thrust)：說明航機在起飛、爬升、巡航、下降階段引擎推力的計算公式。
- (8) 減低爬升力(reduced Climb Power)：為了延長引擎壽命並減低成本，許多航機在例行飛行中都採取減低爬升力設定來爬升。本項說明減低爬升力之計算公式。
- (9) 燃油消耗(Fuel Consumption)：說明飛航油料耗損之計算公式。

- (10) 地面活動(Ground movement)：提供最大起飛距離、最大落地距離、翼展、機身長度的四項參數供地面活動模擬使用。
2. 航空公司程序(Airlines Operation Procedures)：分別說明在爬升、巡航、下降三個階段中，航空公司限制駕駛員在每一個階段不同高度下控制飛機飛行空速的操作程序。
3. 航空器共通參數(Global Aircraft Parameters)：除了將前述兩項所提到的公式與參數外，尚有其他諸如航機加速、轉彎傾斜角、等待航線空速、地面活動速度等航空器通用參數或係數加以說明。
4. 資料檔案架構(File Structure)：

BADA 提供一共通參數檔(GPF file)，提供計算航空器特性所需使用的共通參數。

BADA 對每一種航空器提供三個與性能有關的資料檔，分別為：

- (1) 操作性能檔(OPF file)：包括所有前述操作性能模式所需使用的參數。
- (2) 航空公司程序檔(APF file)：包括所有前述航空公司程序所需使用的參數。
- (3) 性能總表檔(PTF file)：列出依參考值計算所得之航空器性能結果。

EEC 為了讓 BADA 使用者能依個別需求運用 BADA 各項參數及係數，以求取所需之結果，撰寫了 BADA Excel 試算表設計使用手冊[14]。使用手冊指導使用者如何設計 Excel 試算表及相關計算公式，因其內容有一定程度之複雜性，故初始建立過程預期將可能耗費相當之時間，然而一旦正確地建立完成，則可以於短時間內求得所需之資料。

2.4 小結

目前使用於飛航管理領域的模擬模式眾多且主要運用層面為容量與延誤分析及衝突偵測分析，然而除了 SIMMOD 模擬模式及國人自行發展的 ANS 模擬模式外，不是價格過於昂貴就是因處於發展階段或限制授權使用而不易獲得；況且，多數國外發展使用的模擬模式在我國飛航環境的適用性亦未經過驗證。

而 SIMMOD 及 ANS 模擬模式雖經研究符合我國飛航環境的使用，卻是屬於機場容量及延誤方面的應用。其節點-節線的模式運作架構、航空器分類、飛航性能與飛航軌跡的模擬過於單純，對離、到場航線最主要考量的爬升下降與高度因素無法進行處理及預測。

加速離場路徑 EDP 工具的飛航軌跡合成器 TS 可以進行飛航軌跡的預測，然而此為美國航空暨太空總署 Ames 研究中心仍在發展中之工具，不易取得。

因此，依照飛航我國的各機型飛航特性，尋求符合我國飛航環境之航空器飛航軌跡模式(Flight Trajectory Model)，以供未來飛航管理領域分析使用應有其必要性。歐洲發展的 BADA 如能經驗證適用於我國之飛航環境，將為一可供未來研究運用的良好飛航軌跡分析預測工具。