

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

翼尖渦流下飛機最佳飛行軌跡之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2212-E-032-004-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：淡江大學航空太空工程學系

計畫主持人：宛同

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 11 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※

※

※ 翼尖渦流下飛機最佳飛行軌跡之研究 ※

※ Optimum Flight Trajectory Study under the ※

※ Influence of Wake Vortices ※

※

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2212-E-032-004

執行期間：94年8月1日至95年7月31日

計畫主持人：宛 同

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：淡江大學航空太空工程學系

中華民國 95年 7月 30日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

翼尖渦流下飛機最佳飛行軌跡之研究

Optimum Flight Trajectory Study under the Influence of Wake Vortices

計畫編號：NSC 94-2212-E-032-004

執行期限：94年8月1日至95年7月31日

主持人：宛同 淡江大學航空太空工程學系

計畫參與人員：邱德溢 淡江大學航空太空工程學系

一、中文摘要

現今大型航空器的使用及生產已趨於成熟，所以翼尖渦流的影響也越來越受到重視，但在現今的法規中，僅用較為寬鬆的法規來制定飛行器之間的安全飛行距離。本研究最主要的目的，是藉由所新定義的 WV 參數來找出最佳的閃避軌跡，以訂出更為嚴謹的安全飛行間距。

第一步我們使用 MATLAB 來建立不同大小的翼尖渦流，並且從參考文獻中選擇二架不同大小的飛行器做為受影響的飛行器，使用剛體運動方程式建立飛行模型，並用四階的 Runge-Kutta 解法來解飛行力學方程式，以求得飛行器受到翼尖渦流後應有的飛行姿態及飛行軌跡。

其次，我們所建立一新的 WV 參數，其中分別為第一項，風場對於垂直運動的危害程度，第二項為風場對於水平運動的危害程度，第三項為風場對於旋轉運動的影響。在之前所計算出的飛行姿態及飛行軌跡，將其轉變為 WV 參數，這可以將翼尖渦流對於飛行器的影響做參數化的研究。

最後，為了要求出飛行器在翼尖渦流中的最佳逃離飛行軌跡，我們使用最佳化的方法來求解，我們所選用的方法為基因演算法(GA)。在本論文中所採用的基因演算法是實數型基因演算法，理由是實數型的基因演算

法的計算效率較高，且對系統的環境要求較不嚴苛。本文中所訂定的目標函數有二：其一是 WV 參數值，其二是三個方位角大小限制，分別針對飛行安全與同時考慮飛安和飛行品質二者。用上述的兩種方法求兩個目標函數的最小值即為最佳飛行軌跡。

本研究中此方式所找出之最佳飛行軌跡，能達到飛行安全及飛行舒適的二項要求，並且能有效的減少飛行間距，使得越來越繁忙的空中交通得到舒緩。

關鍵詞：渦流、翼尖渦流、基因演算法、WV 參數

Abstract

In modern airline's operation, the larger aircraft's procreation and usage is a common practice. So the influence of wake vortices is more important upon flight safety. But the rules of flight separation distance are legislating somewhat outdated. In our study, the principal purpose is use the newly created WV-factor to find the optimum flight trajectory, so that the separation distance between two flights could be greatly reduced.

First, we use the MATLAB tool to create three kinds of wake vortices, and two aircrafts (major transport and

business jet) are chosen to regard as the aircraft that encounter the wake vortices. And the classical rigid body, mass/mass distribution fixed flight dynamics equations are solved by standard 4th order Runge-Kutta method. It can found the flight path and flight posture when the aircrafts encounter the wake vortices.

Secondly, we are inventing a new factor, the WV-factor. In this factor, it has three parts. First part is the harm of vertical direction of the wake vortices, second part is the harm of horizontal direction of the wake vortices, and third part is the harm of rotation motion of the wake vortices. Thus we could implement this new factor to fully investigate the effects of the flight path and flight posture when aircraft encounter wake vortices.

Finally, in order to achieve an optimum flight trajectory of wake vortex, a steering tool has been employed, namely, the genetic algorithm. In our work the real-value GA approach is chosen due to its computation efficiency and the similarity to the natural world. Our GA process is implemented as follow: both WV-factor and Euler angle values are assigned as the objective functions. The optimum flight trajectory thus computed is conforming to flight safety and flight comfort. It is believed that the concepts and procedures developed will be effective to reduce flight separation distance, and increase the airline's operation efficiency.

Keywords: Wake, Vortices, Genetic Algorithm, WV-Factor

二、緣由與目的

在 1903 年時，人們發明了飛行器，從那時開始，飛行安全就成為了重要的研究課題。會危害到飛行安全的因素我們可以將其分類為三種：人類因素、機械失效以及天氣。在其中人類因素可以制定更為嚴格且完善的法規來減少它的發生，而機械失效也能研發更為安全的機械來避免，只有天氣所產生的危害是無法事先預知的。

在飛機起飛及降落的期間，會對飛機產生危害的天氣有下列幾種：翼尖渦流、低空風切及側風。在本研究之中，其所要研究的現象為翼尖渦流，在近三十年內，對其所產生的危害越來越受到重視，所以制定了不少的法規來限定前後兩架飛機之間的飛行距離。在早期，有 L. Roberts[1]在飛行器撞擊到翼尖渦流的研究和在減少翼尖渦流的危害方面做了些貢獻，還有 McCormick[2]在翼尖渦流的測量及亂流的影響上所做的研究。

在這之後，NASA Ames[3][4]的研究人員，聘用飛行員操作飛機，來模擬飛機進入真實的翼尖渦流的情形，以及建立起翼尖渦流的危害規範。翼尖渦流的傳輸及潰散亦被延伸到平行跑道及不同階層的環境影響[5][6]。

1960 年代波音公司開始發展 747 飛機時，即與 FAA 以及 NASA 合作研究翼尖渦流對飛行的危害程度，並且開始著手訂定飛行間隔的標準，波音公司對這方面的研究從 60 年代一直持續到今日。

在 1988 年的一份報告中提到，在某次飛行實驗中，一架重量約 100001b 的 Lear jet-23 小型噴射機，飛進重量約 380001b 的 C-5A 銀河式運輸機的渦流中心，Lear jet-23 竟被渦流帶著滾轉足足 360 度。

有鑑於此，尖翼渦流在飛行安全方面占有相當重要之地位，也是導致意外發生的重要原因之一。為了避免翼尖渦流造成飛安意外，歐美各國均訂定了一個要求飛機安全間隔的標準，由於此一標準是以實驗及觀察為依據，無法確切得知各種飛機翼尖渦流影響的距離，為了安全起見，各國規定的安全間隔均從寬考量，以求增加其安全，直到現在，所有的飛行器都必須遵

守著 FAA 和 ICAO 所制定的規則來保持飛機之間的飛行間距。但是其所制定的安全飛行間距，其所規定的間距，有些簡略以至於其制定的距離有些過長，這對於現今的機場而言，無疑是減少了機場的使用效率。

在 1987 年時，Bowles 提出使用飛機的四個物理量，其中有水平及垂直方向的相對風場、飛行器的空速和重力加速度，以這四個物理量來計算出飛機在經過低空風切時的相對應參數。使用這個參數，我們可以非常簡單且非常明確的找出飛機在經過低空風切時，飛機性能減少的情形。而這種方法稱之為 "wind shear hazard factor" or "F-factor"。

然而，飛行器的能量特性包含著動能及位能，而在 F-factor 之中，將轉動動能的部份除去。在我們的研究之中，將轉動動能的部份加入 F-factor，重新定義一個新的參數，我們將其命名為 WV-factor。而利用此新的參數，我們可以計算出翼尖渦流對於飛行器的危害，更一進步的，我們能加入基因演算法，配合此參數來計算出飛行器逃離翼尖渦流的最佳飛行軌跡。且有效的減小安全的飛行間距。

三、結果與討論

我們將分為二個方向來討論。第一個為不加入最佳化模型，也就是不控制飛行器，任其進入渦流風場，找出其飛行姿態，和 WV-factor。這部份主要是用來，找出飛行器由不同的位置進入相同的風場時，其所產生的危害程度的差異。第二個部份，加入最佳化模型 GA，用其來操控飛行器，使其能以最佳的飛行軌跡來逃離風場。此為本研究之最終目標。

在本研究中，我們僅能從 Airplane Flight Dynamics 中取得 747-100 及 business jet 在某一狀態下的飛行參數。而且在書中，沒有提供飛行姿態及控制面的角度和推力大小。所以我們只能假設控制面參數及飛行姿態及控制面角度，並且將飛機在無控制的狀態下，飛行一段時間，使其能水平飛行，即飛行器的合力及合力矩為零，此參數及為配平後的控制面參數。用其參數和姿態當作我們飛行器進

入風場的初始參數。

3.1 不加入最佳化模型計算 WV-factor

使用 747-100 及 business jet 進入相同的風場，將其分為不同的位置進入，其分別為原點，上方，下方，左邊，右邊。將結果整理為表 1。

Coordinates		origi	ri	lef	uppe	dow
		n	t	t	r	n
=150 0 ft/sec ² K=5 ft ²	Boeing 747-100	3.4	3.2	2.5	2	1.6
	19-perso n business jet	7.1	6.8	11. 6	2.8	2.4

表1 相同風場不同位置的WV-factor

由此表格我們可以發現，最小的危害為飛行器由渦流的上方進入風場。在 747-100 中可以發現到最大的危害的位置是在原點。但小飛機卻是發生在由風場的右方進入時有最大的危害度。由圖 2 (a)~(c)中可以發現到，由右方進入風場的組合，它在前 5 秒的時位置的改變量遠大於由左方進入風場的組合。我們可以發現最大值主要是由 Acceleration Change Factor 這一項所提供的。由方程式；

$$\text{Acceleration Change Factor} =$$

其中 g 為常數，所以我們可以知道這個參數是由 \dot{w} 所主導的。由此可知，其位置變動越大，所產生的 \dot{w} 值越大，也造成 Acceleration Change Factor 變的極端。這即為小飛機在右方進入風場時，其 WV-factor 值大於左方及原點的原因。

(a)

(b)

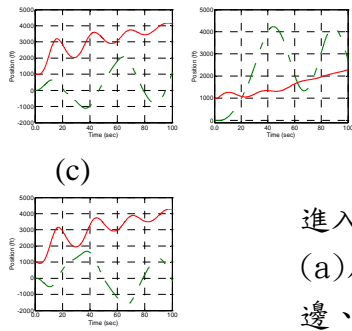


圖 2 19 人座

進入風場位置
(a)原占、(b)左
邊、(c)右邊

第二種為組合為，二架不同的飛機，由相同的位置進入不同大小的風場。以此來找出不同的風場對於二架飛行器的影響趨勢，我們將其結果建立為表 2。

Coordinates			origin
Boeing 747-100	$\Gamma_0 = 1500 \text{ ft/sec}^2$ $K = 5 \text{ ft}^{-2}$	Max. WV-factor	3.4
	$\Gamma_0 = 2500 \text{ ft/sec}^2$ $K = 5 \text{ ft}^{-2}$	Max. WV-factor	7.7
	$\Gamma_0 = 4000 \text{ ft/sec}^2$ $K = 40 \text{ ft}^{-2}$	Max. WV-factor	2.2
19-person business jet	$\Gamma_0 = 1500 \text{ ft/sec}^2$ $K = 5 \text{ ft}^{-2}$	Max. WV-factor	7.1
	$\Gamma_0 = 2500 \text{ ft/sec}^2$ $K = 5 \text{ ft}^{-2}$	Max. WV-factor	18.2
	$\Gamma_0 = 4000 \text{ ft/sec}^2$ $K = 40 \text{ ft}^{-2}$	Max. WV-factor	3.6

表2 不同風場相同位置的WV-Factor

由表 2 可知 WV-factor 的極大值是隨著風場的大小改變而改變。我們也能將不同大小的風場想成不同的飛行間距，風場越大表示其飛行間距越短。由此可得，飛機越接近前導飛機時，其所受到尾流的影響就越大。

3.2 加入基因演算法

為了找出在進入渦流後的最佳飛行軌跡，我們使用的模型為：GA。在 GA 之中最重要的即為目標函數，其也是我們最佳化的參考依據。在研究的過程之中，我們發

現到，僅只有 wv-factor 收斂，並不代表飛機是安全的，因為其 euler angler 並不符合安全值，而且就算其符合在安全範圍內，其並不表示，它的飛行是舒服的。為了要在飛行安全與飛行舒適二個條件下，找尋最佳飛行軌跡。我們必需在 wv-factor 之上再加入 eluer angler 的限制條件，但第二個條件並不需要做收斂判定，只要符合舒適的範圍內即可。

在此章節裡，為了要找出在真實翼尖渦流中，最佳的飛行軌跡，我們必需要建立更為真實的風場，故在已知的風場模型中加入消散的模擬。

在研究過程中，假設飛行器由不同的位置進入風場。由第三節的結果中，我們已知原點所產生的危害度最大，故我們以原點做為依據，由不同的初始飛行間距進入風場，找出最短且能符合我們所設定的目標函數的飛行間距，其結果我們將其整理如下表：

wake vortex aircraft	$\Gamma_0 = 1500 \text{ ft}^2/\text{se}$ c	$\Gamma_0 = 2500 \text{ ft}^2/\text{se}$ c	$\Gamma_0 = 4000 \text{ ft}^2/\text{se}$ c
Boeing 747-100	1.5mile	2.5mile	X
19-person business jet	3.25mile	3.5mile	4.01mile

表3 最短飛行安全間距

在表中，我們將不同大小的風場模擬為不同大小的飛行器，從小飛機方面來看，其飛行間距與現今的規範來比減少了 1~2mile，由此可知在原本的規定之中，其實還有不小的改善空間，加入了最佳化的方法，真的能有效的減少其飛行間距。

但是在 Boeing 747-100 中，在其遭遇大風場時，我們無法找到收斂的結果，其原因我們認為，應該是在於飛行力學參數無法隨飛機姿態的改而改變，所以在進入大風場時，其所加入的力與力矩超過我們所使用的飛行力學參數的容許範圍，導致飛行器所計算出來的飛行姿態不可能在真實情況下發生。而小飛機因為其穩定性較

差，所以它所能容許的範圍較大，故在遭遇大風場時，還能找到安全的逃離軌跡。

在最佳飛行軌跡方面，我們可以發現二個現象，第一個，在大部的結果之中，其所計算出來的最佳飛行軌跡，都是由上方逃離風場，所以可知其結果符合 3.1 節的結果，由風場上方進入風場其所受到的影響最小。

第二個現象，只要是由相同的位置進入風場，其所產生的結果，均會有相同的趨勢，這個現象我們可以由 WV-factor 的分量來討論，在這 CASE 之中，我們可以發現在 WV-factor 之中，由風場所產生的垂直方向的影响站最大的比例，

四、計劃成果自評

在本研究之中，我們發現其飛行間距是有明顯的減少。而且最佳的飛行軌跡也大都符合我們所假設的結果。但是在某些結果的計算之中，無法計算出應有的結果，由之前的討論我們可以知道，其原因出現在飛行力學參數。在未來我們如果能加入隨著飛行器的姿態改變而改變的飛力參數。用以更準確的模擬出所應有的飛行姿態和飛行軌跡。而且若能加入真實狀態下的飛行力學參數，在不同的風場之中，所能加以控制的控制面更多，能使飛行器以更安全及更為舒適的方式逃離翼尖渦流的影響。

五、參考文獻

- [1] Roberts, L., *On Wake Vortex Alleviation*, NASA University Conference on Aeronautics-Theme: The Future of Aeronautics, Univ. of Kansas, October 1974.
- [2] McCormick, B. W., *Aircraft Wakes: A Survey of the Problem*, FAA Symposium on Turbulence, Washington, D.C., March 1971.
- [3] Sammonds, R. I. And G. W. Stinnett, Jr., *Hazard Criteria for Wake Vortex Encounters*, NASA TM X-62473, Aug. 1975.
- [4] Sammonds, R. I., G. W. Stinnett, Jr. and W. E. Larsen, *Wake Vortex Encounter Hazard Criteria for Two Aircraft Classes*, NASA TM X-73113, June, 1976.
- [5] Kantha, L. H., *Empirical Model of Transport and Decay of Wake Vortices Between Parallel Runways*, *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 4, July-August, 1996.
- [6] Switzer; G. F., and F. H. Proctor, *Wake Vortex Prediction Models for Decay and Transport within Stratified Environments*, AIAA-2002-0945.
- [7] Wan, T., and H.F. Huang, *Clear Air Turbulence Avoidance Strategy Analysis via Genetic Algorithm and Neural Network Methods*, AIAA- 2002-0941.
- [8] Roskam, J., *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls*, Part II , Roskam Aviation and Engineering Corporation, Kansas, 1979.
- [9] Visser, H. G., *Optimal Lateral-Escape Maneuvers for Microburst Encounters During Final Approach*, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 17, 1994.
- [10] Arbuckle, D. P., M. S. Lewis, and D. A. Hinton, *Airborne Systems Technology Application to the Windshear Threat*, *Proceedings of the 20th ICAS*, Sorrento, Napoli, Italy, 1996.
- [11] Descatoire, F., D. Guffond, and H.T. Huynh, *Parametric Study of Performance of Aircraft Equipped with Airborne Reactive and Forward Looking Sensor During Microburst Encounter Including Raining Effect*, *Proceedings of the 20th ICAS*, Sorrento, Napoli, Italy 1996.
- [12] Nelson, R. C., *Flight Stability and Automatic Control*, 2nd ed., WCB/McGraw-Hill, 1998.
- [13] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [14] 周鵬程, *遺傳演算法原理與應用—活用 Matlab*, 全華科技圖書股份有限公司, 2005. 12.