

後掠型 UAV 螺槳設計分析

陳世雄¹、陳柏仲¹、馬淮龍²、崔永懋²

¹成功大學航空太空工程學系

²中山科學研究院第一研究所

摘要

本研究為提升現有 UAV 螺槳於起飛以及極速條件下的性能，以速度型螺槳的外型為基礎，設計並開發一隻後掠型螺槳，改善原速度型螺槳的氣動力性能，提升螺槳起飛與極速下的推力和效率，並利用螺槳後掠的優勢減低翼尖馬赫數來提升效能並降低噪音。後掠螺槳的外型設計乃是基於葉片各截面攻角以及沖角的優化來達成，而螺槳氣動力性能的計算乃使用計算流體力學軟體來縮短開發時程。經過本研究對於後掠螺槳外型與氣動力性能參數之間的優化與平衡，最後達成起飛推力增加 11.2%，極速推力增加 18.6%，且螺槳效率皆高於原本速度型螺槳，並能夠滿足螺槳所需馬力小於 85% 引擎最大輸出馬力的條件。

關鍵字：UAV、螺槳、後掠、計算流體力學

The Design and Analysis of Backswept Propeller for UAV

Shih-Hsiung Chen and Po-Chung Chen

Department of Aeronautics and Astronautics Engineering,
National Cheng Kung University

Abstract

This study has designed and developed a backswept propeller which the geometry is based on a speed type propeller. This backswept propeller has improved the performance of existing UAV propeller under take-off and also maximum-speed condition. It has increased both of thrust force and efficiency and decreased both of tip Mach number and noise by backswept design. The geometry design of backswept propeller was achieved by optimization between flow angle and blade angle of each blade section. For reducing the consumption of developing period, the software of computational fluid dynamics has applied to analyze the aerodynamic performance of propeller and get the optimization result between different types. Finally, the result shows that a 11.2% improvement for take-off thrust and 18.6% improvement for maximum-speed thrust were achieved, and the efficiency of both condition were higher than the original type, furthermore, the horse power consumption of both condition were also satisfied the requirement of less than 85% maximum engine power.

Keywords: UAV, Propeller, Backswept, CFD

1. 前言

現在戰爭中，高科技水平的精準打擊與低人員傷亡已是先進軍事強國的作戰趨勢。其中，無人作戰系統不但可以避免人員傷亡、降低訓練成本，更可以達成許多複雜且危險的任務需求。UAV，亦稱無人機，就是在這樣環境下發展出來的空中作戰載具。舉凡從以色列、美國、英國、俄國乃至新崛起的中國，都已積極在無人戰機(CUAV)上投入發展，並已有良好的應用實例。

UAV的動力系統是整個系統的關鍵基礎，其中推進用的螺槳又是動力系統中的關鍵。高效率的螺槳能夠降低油耗、增加航程並減少引擎重量，低噪音的設計能夠避免敵人提早察覺，複合材料的使用更能在不增加重量的前提下提升螺槳結構強度，避免材料破壞。在許多成熟的應用中，後掠型的螺槳能夠在高轉速與高航速下降低翼尖馬赫數而提升效率並減少噪

音，又可避免前掠型的結構發散問題，最為廣用於先進螺槳推進系統中。然而我國尚無充足的碳纖維後掠型螺槳設計與製造測試經驗，因此需要投入發展。

本研究乃是配合中科院一所之後掠型碳纖維螺槳開發計畫，計畫之目的是提升UAV空用螺槳的動力效能與結構強度，設計並開發製作固定螺距一體二葉之後掠型碳纖維空用螺槳雛型件，並具備載具氣動力整合、低噪音高效率等優點，應用於UAV引擎動力系統，達成自主研發設計以及自主製造與測試的技術能量。

研究計畫的關鍵在於後掠型螺槳的外型設計與氣動力性能計算分析，目前國內在螺槳設計分析上有成大航太所陳世雄教授帶領的研究團隊具備豐富的螺槳設計與分析經驗。國外方面，NASA(1988)在高效率先進螺槳已有豐富的研究成果可以借鏡[1]；

NACA(1950)對螺槳後掠設計的討論，指出後掠設計的要點因素可供參考[2]；Gur O. and Rosen A.(2009)針對電動小型 UAV 的低噪音螺槳設計提出低噪音螺槳的外型設計要點[3]；Sinibaldi G. and Marino L. (2013)針對小型 UAV 的螺槳噪音研究，指出不同螺槳外型設計如何影響噪音程度[4]。在 CFD 計算分析方面，尚有 Denton J. D. (2002)以數值模擬研究葉扇後傾及後掠設計對性能的影響[5]；Nomura S. (2004)以 CFD 方法研究螺槳後掠對性能的影響[6]。以上的研究皆指出後掠型設計對螺槳效率提升以及噪音降低都有很好的貢獻，後掠設計亦可以使飛行器擁有更高的巡航速度。

本研究之後掠型螺槳設計在性能上須符合二項最佳需求：

1. 起飛條件：載具飛行高度 1,000 英尺、引擎轉速 7200rpm 以及空速 195km/hr 條件下，螺槳有足夠推力（至少能與速度型螺槳相同），且螺槳所需馬力必須在引擎所能提供最大馬力的 85% 範圍內。
2. 極速條件：載具飛行高度 5,000 英尺、引擎轉速 7600rpm 以及空速 250km/hr 條件下，螺槳有良好效率（優於速度型螺槳）。

2. 研究方法

2.1 螺槳外型設計

後掠型螺槳設計參考 Halter YR7022FA 速度型螺槳翼型截面以及 Halter YR7022FF 後掠型螺槳外型，並依據螺槳設計理論來進行優化設計。螺槳的三維幾何外型由商用繪圖軟體 CATIA 來進行處理。螺槳氣動力計算與分析方面使用商用計算流體力學求解器與後處理軟體來計算與分析螺槳氣動力性能，並探討各主要參數，例如螺槳各翼型截面之攻角、安裝角、沖角等參數對螺旋槳推力、馬力、效率等主要性能的影響。計算分析之結果再回饋至外型設計作為調整依據，逐步調整外型至螺槳性能與結構能夠確實達到所要求的性能規格為止。

2.2 氣動力性能計算

螺槳氣動力計算上，以 CAD 工具針對後掠式螺槳外形繪製三維模型，以商用 CFD 軟體求解三維 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 方程式，配合 $k-\epsilon$ 紊流模型與非結構性網格模擬螺槳於不同前進比下的流場特性與氣動力性能。本研究所探討的流場為三維、非定常、具黏性的不可壓縮流場。對於不可壓縮流，能量方程式並不與速度項耦合，因此獨立於連續方程式與動量方程式之外。在不考慮系統溫度變化的工程問題上，由於無需求解能量方程式，因此常將基於慣性直角座標下的連續方程與動量方程合稱 N-S 方程組，構成求解不可壓縮流場的基本方程式組。

3. 後掠螺槳之設計分析

3.1 後掠型螺槳設計

基本上，在螺槳葉片安裝角不變之下，螺槳的前掠或後掠並不會因此使攻角增加而增進推力或是效率。然而，在高轉速與高航速下，螺槳翼尖經常處於穿音速或是局部超音速狀況，一旦在翼面上發生超音速流動而生成震波，將使得螺槳失去部分推力並產生噪音且造成效率下降。所以，高速下的高效率螺槳，一般設計成後掠型，以降低翼尖相對馬赫數，並以後掠取代前掠來避開空氣彈性力學上的結構發散問題。本次後掠型螺槳設計所採用的外型乃根據圖(3.1) Halter 的速度型螺槳翼型截面並參考圖(3.2) Halter 後掠型螺槳的 20 度後掠角來進行設計工作。其中，20 度的後掠角可以降低約 6% 的螺槳翼尖馬赫數。

3.2 設計參數流程

基於 Halter 速度型螺槳三維逆向外型的基本設計參數如下，其中，螺槳翼型截面的各角度定義如圖(3.3)：

1. 螺槳各截面翼型的相對氣流角度 (flow angle)
2. 螺槳各截面翼型的安裝角 (stagger angle)
3. 螺槳各截面翼型的攻角 (AOA : angle of attack)
4. 螺槳各截面翼型的沖角 (incidence angle)
5. 螺槳各截面翼型的弦長與半徑比 (c/R)
6. 螺槳各截面翼型的最大厚度與半徑比 (t_{max}/R)
7. 螺槳各截面翼型的最大厚度與弦長比 (t_{max}/c)

由於本研究計畫的螺槳設計目標需滿足兩個航速與轉速皆不同的設計點，因此，上述七個基本外型參數中的相對氣流角度、攻角以及沖角在兩個設計點下並不同，而需在兩個設計點間做一平衡與妥協，找出能夠同時滿足兩個設計點的外型參數，這也是本研究的重點。

螺槳外型設計流程如下：

1. 找出 Halter 速度型螺槳的外型參數以及 Halter 後掠型螺槳的後掠角度
2. 將 Halter 速度型螺槳外型加上 20 度後掠角做出後掠型螺槳外型
3. 調整後掠型螺槳各截面安裝角來滿足兩個設計點的性能需求

4. 經由數值模擬計算驗證設計外型是否有滿足需求
5. 重複上一步直到滿足設計目標規格

本研究螺槳外型設計的基本參考尺寸：(以貴單位提供的Halter速度型螺槳逆向外型以及Halter後掠型螺槳的上視圖為基準)

1. 槳數：2
2. 直徑：27.5 inch (69.85 cm)
3. 螺距：22度
4. 後掠角：20度

3.3 螺槳氣動力性能計算

螺槳氣動力性能計算使用商用計算流體力學軟體ANSYS CFX為求解工具。計算區域與邊界條件設定如圖(3.4)所示，圓柱型計算區域由螺槳所在位置向上游延伸6倍螺槳半徑，向下游延伸10倍螺槳半徑，徑向延伸5倍螺槳半徑。

4. 結果與討論

4.1 螺槳外型設計分析

後掠型螺槳外型乃經由速度型螺槳的翼型截面而來，故以下所提到的各版後掠型螺槳的各截面翼型與速度型相同，唯獨在翼尖因為後掠設計的調整而使該處截面翼型與速度型螺槳略為不同，但其差距屬於可以忽略的程度，如圖(4.1)所示。第一版後掠型螺槳(YR7022FA-BK+1)乃將翼尖後掠27mm，約7.73%螺槳半徑，且各截面攻角皆加大1度，後掠角度20度為螺槳四分之一弦線於翼尖的延伸方向與螺槳中軸線的夾角，如圖(4.2)所示。由於第一版外型雖然已經滿足起飛推力增加以及極速效率提升，然而起飛所需馬力卻超過引擎最大馬力的85%，因此有第二版後掠外型(YR7022FA-BK-FINAL7)的產生。

圖(4.3)及圖(4.4)顯示速度型(簡稱baseline)、第一版(簡稱BK+1)以及第二版(簡稱FINAL7)螺槳在起飛以及極速狀態下的螺槳氣動參數，可以看出速度型螺槳在翼展0.36以下為負攻角，且各翼展截面都具有負沖角，尤其在0.5翼展以下的負沖角偏高。負攻角部分對螺槳推進而言不是好的設計，而負沖角偏高代表氣流衝擊損失高，對螺槳效率以及噪音都是不良的貢獻。然而分析外型後發現這是由於螺槳採用複合材料製成，為求結構完整及一體性，故捨棄典型翼型截面以利複材製程及結構強度，而犧牲中間翼展以下的氣動力優勢。

第二版外型的產生乃是以第一版為基礎，調整螺

槳葉片於0.2翼展到翼尖的安裝角，使對應的攻角(AOA)及沖角(incidence angle)能夠有較好分布。調整設計過程乃是透過增加中間翼展以下的攻角來降低該處的負沖角，減小衝擊損失，並逐漸降低由中間翼展到翼尖的攻角，使其在翼尖回到原本速度型螺槳的相同攻角，避免消耗馬力過大，如此逐步調整到能夠滿足起飛馬力小於引擎最大馬力的85%，且起飛推力和極速效率依舊大於速度型螺槳。其中，為求能夠使後掠型螺槳外型與原本速度型螺槳的輪轂有良好銜接以及匹配現有UAV輪轂傳動機構，在0.2翼展以下的外型參數皆保持不變，因此第二版後掠外型依舊犧牲部分氣動力性能以滿足複材製程以及機構限制。

4.2 螺槳氣動力性能分析

基於起飛與極速兩個設計點的氣動力性能計算結果如圖(4.6)，結果顯示第一版後掠外型的起飛推力增加16%，起飛效率持平；極速的推力增加27%、極速效率提升3%，雖然第一版效果顯著，但起飛所需的馬力也同時增加，並超過引擎最大馬力的85%，達到88%。第二版外型是經過多次微調螺槳外型參數的成果，並將起飛所需馬力下修到只佔引擎最大馬力的84%來增加可靠裕度，而起飛推力提升11.2%、起飛效率略為增加0.5%；極速推力增加18.6%、極速效率提升2.7%，恰可同時滿足兩個設計點，為本研究所產出的最終版本後掠型螺槳(FINAL7)。

後掠型螺槳(FINAL7)與速度型螺槳(YR7022FA)的性能曲線如表(4.1)，後掠型螺槳(FINAL7)除了在兩個設計點皆優於速度型螺槳外，可以看出後掠型螺槳在高前進比可以有更好效率，這也滿足後掠型螺槳本身適合高前進比操作區間的特性。雖然第二版後掠外型依舊在氣動力性能方面有所侷限和犧牲，然而其效能低落處皆在0.36翼展以下，日後將被鼻錐機構覆蓋而不顯重要。其中，速度型螺槳(YR7022FA)與後掠型螺槳(FINAL7)的詳細氣動力性能數據分別如表(4.2)與表(4.3)所示。

5. 結論

經過本研究對於後掠螺槳外型和氣動力性能參數之間的優化與平衡，最後達成起飛推力增加11.2%，極速推力增加18.6%，且螺槳效率皆高於原本速度型螺槳，並能夠滿足螺槳所需馬力小於85%引擎最大輸出馬力的條件。研究結果顯示計畫研究工作已順利達成設定目標，並得到優化過後的後掠型螺槳外型以及設計條件下的氣動力性能數據，建立螺槳自主研发設計與分析製作的能力。

6. 誌謝

感謝協助本研究計畫的所有相關人員，因為有你們的幫助，研究工作才能順利進行。

7. 參考文獻

- [1] Groeneweg, J. F., and Bober, L. J., 1988, "NASA Advanced Propeller Research," NASA Technical Memorandum, 101361.
- [2] Whitcomb, R. T., 1950, "A Discussion of the Design of Highly Swept Propeller Blades," NACA Technical Memorandum, L50A23.
- [3] Gur, O., and Rosen, A., 2009, "Design of Quiet Propeller for an Electric Mini Unmanned Air Vehicle," Journal of Propulsion and Power, 25(3), pp. 717-728.
- [4] Sinibaldi, G., and Marino, L., 2013, "Experimental Analysis on the Noise of Propellers for Small UAV," Applied Acoustics, 74, pp. 79-88.
- [5] Denton, J. D., 2002, "The Effects of Lean and Sweep on Transonic fan Performance - A Computational Study," Task Quarterly, 6(1), pp. 7-23.
- [6] Nomura, S., and Paxton, C., 2004, "Investigation of Sweep Configuration Effects on Propeller Performance," 42nd AIAA Aerospace Science Meeting.

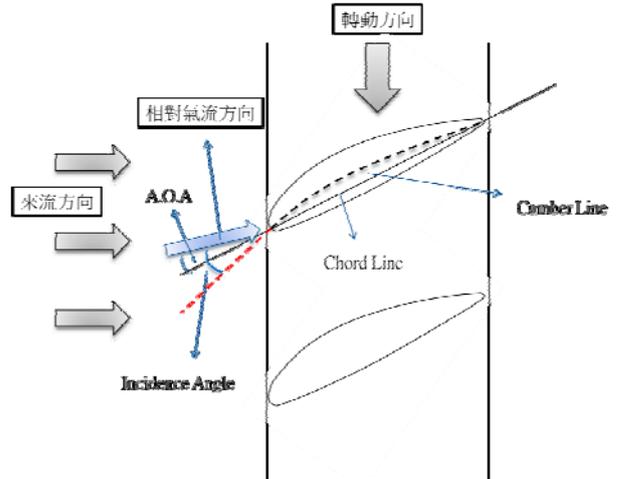
8. 圖表彙整



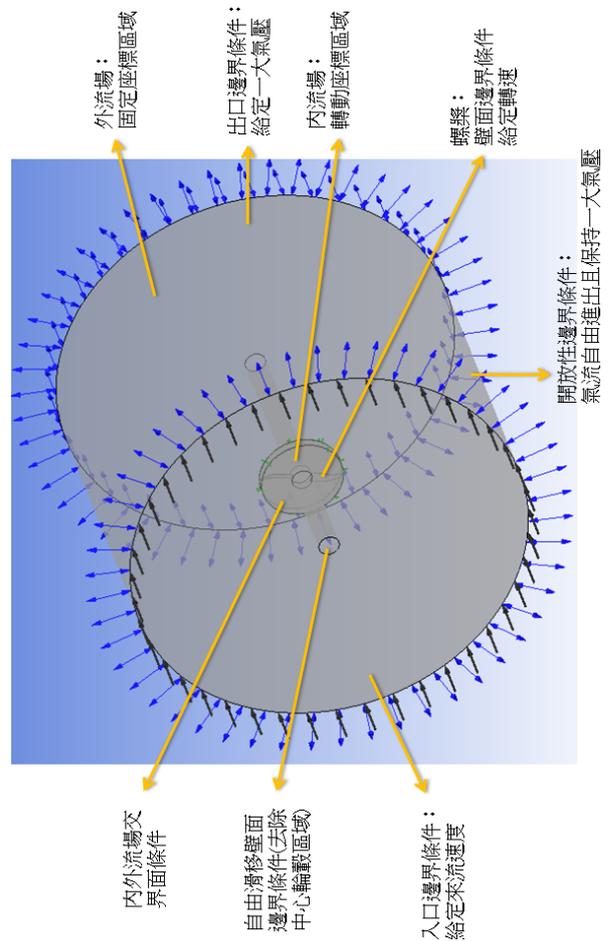
圖(3.1) Halter 速度型螺槳



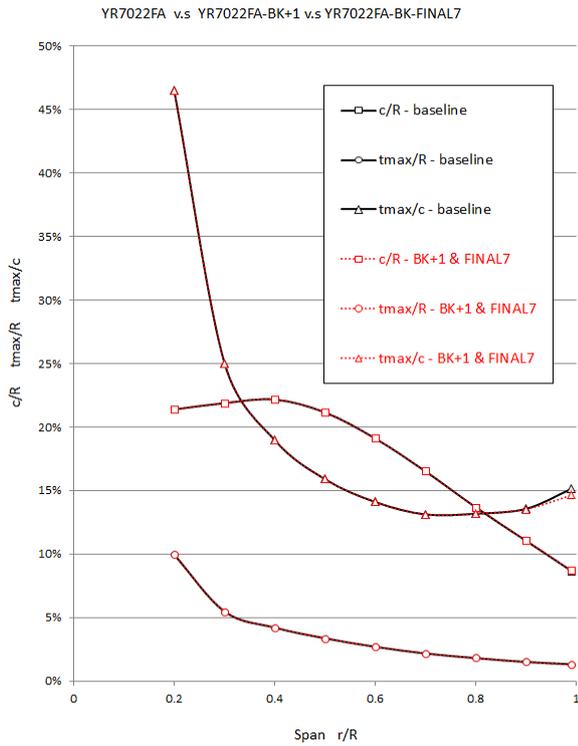
圖(3.2) Halter 後掠型螺槳



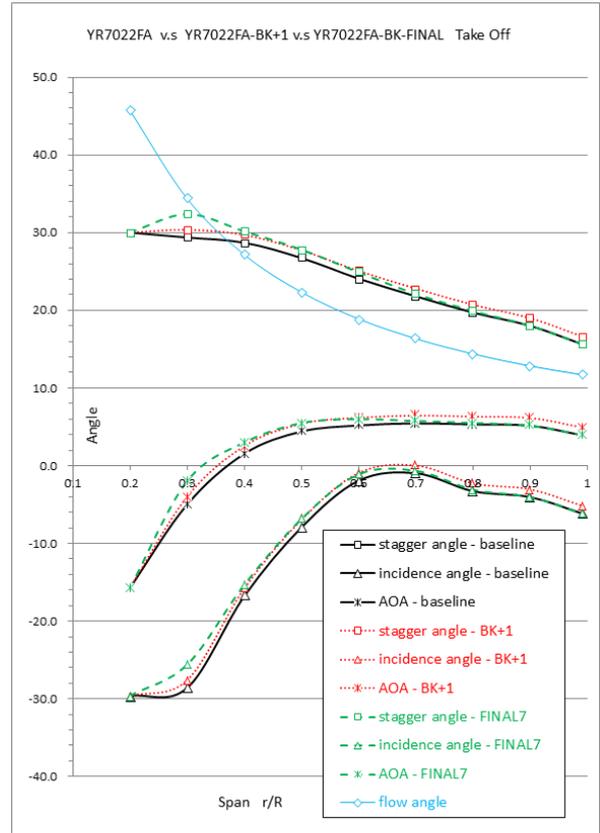
圖(3.3) 螺槳翼型截面角度定義說明



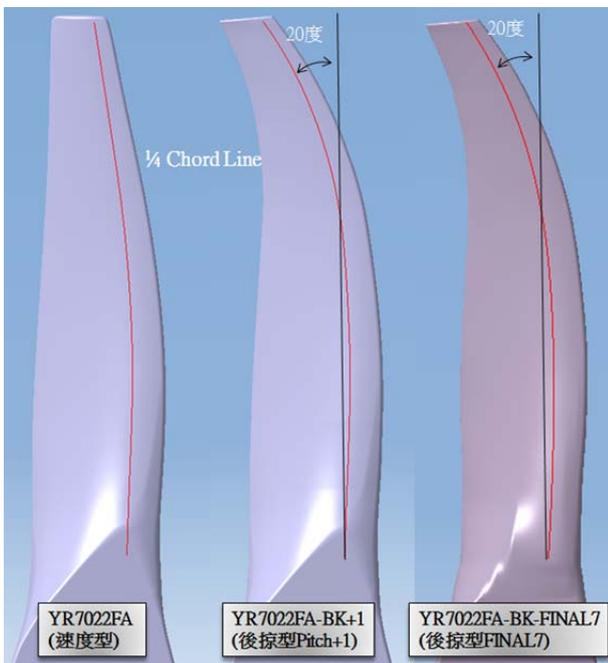
圖(3.4) 螺槳計算區域與邊界條件設定



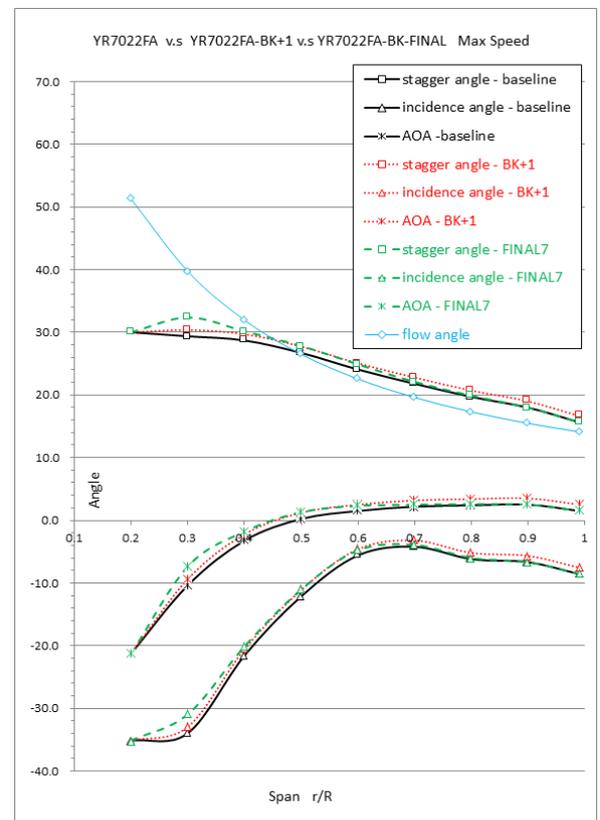
圖(4.1) 三款螺槳外型幾何參數比較



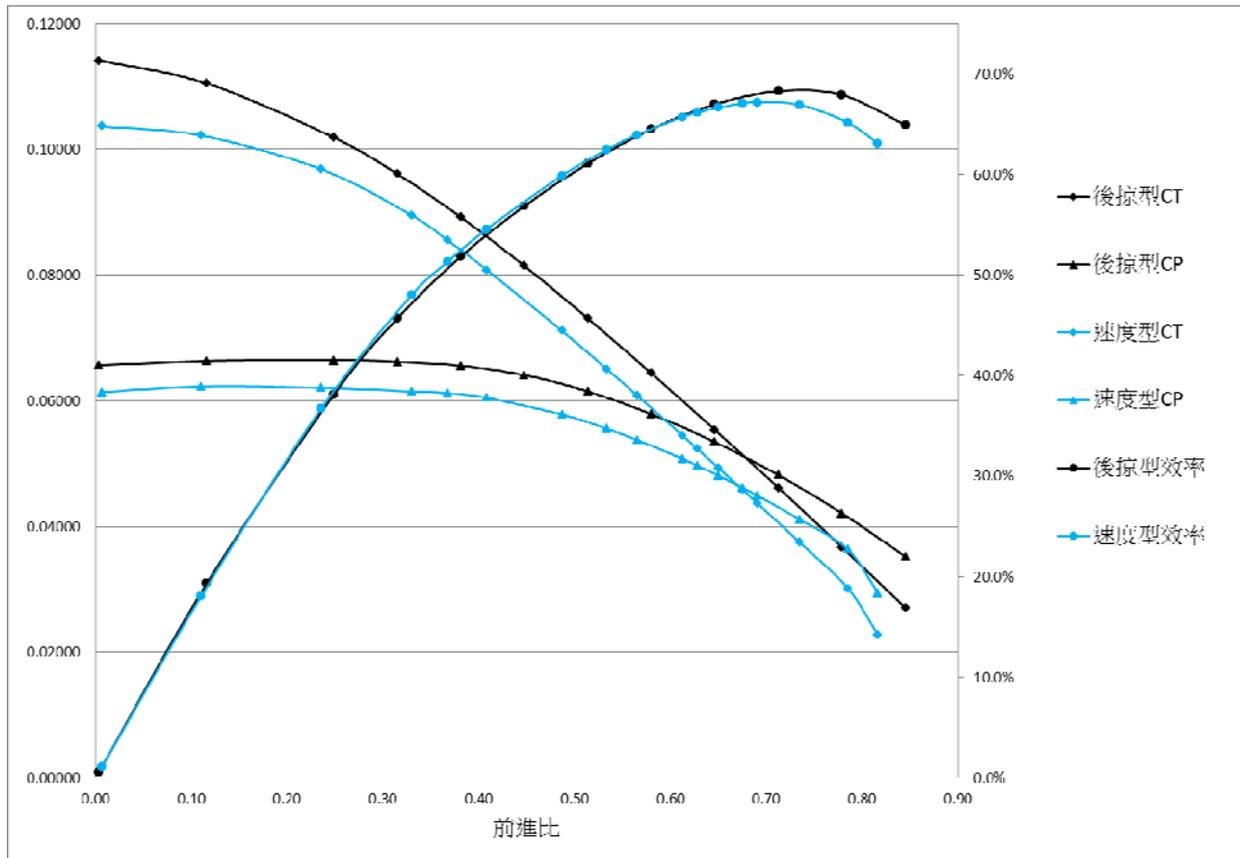
圖(4.3) 三款螺槳外型起飛氣動參數比較



圖(4.2) 三款螺槳外型比較



圖(4.4) 三款螺槳外型極速氣動參數比較



圖(4.6) 速度型與後掠型螺槳(第二版)的性能曲線

		YR7022FA	BK+1	FINAL7
	高度 ft	1000	1000	1000
	空氣密度 kg/m ³	1.190	1.190	1.190
	時速 km/hr	195	195	195
	轉速 RPM	7200	7200	7200
起飛	前進比	0.65	0.65	0.65
	推力 lb	45.7	53.0	50.8
	馬力 HP	22.16	25.68	24.49
	螺槳效率	66.5%	66.6%	67.0%
	引擎最大馬力 HP	29.1	29.1	29.1
	%引擎最大馬力	76%	88%	84%
	高度 ft	5000	5000	5000
	空氣密度 kg/m ³	1.056	1.056	1.056
	時速 km/hr	250	250	250
	轉速 RPM	7600	7600	7600
極速	前進比	0.78	0.78	0.78
	推力 lb	27.4	34.8	32.5
	馬力 HP	17.4	21.17	19.85
	螺槳效率	65.0%	68.0%	67.7%
	引擎最大馬力 HP	29.75	29.75	29.75
	%引擎最大馬力	58%	71%	67%

表(4.1) 三款螺槳起飛與極速設計點下的氣動力性能

航速(km/hr)	轉速(rpm)	前進比(i)	推力(N)	推力(lb)	扭力(Nm)	功率(W)	馬力(hp)	推力係數CT	功率係數CP	效率
2	7600	0.01	471.2	106.0	31.0	24687.9	33.1	0.1037	0.0614	1%
35	7600	0.11	464.5	104.5	31.5	25030.1	33.6	0.1022	0.0622	18%
75	7600	0.24	440.0	99.0	31.4	24950.5	33.5	0.0968	0.0620	37%
105	7600	0.33	406.8	91.5	31.1	24719.7	33.2	0.0895	0.0615	48%
117	7600	0.37	388.5	87.4	30.9	24608.3	33.0	0.0855	0.0612	51%
130	7600	0.41	367.3	82.6	30.5	24305.9	32.6	0.0808	0.0604	55%
155	7600	0.49	323.2	72.7	29.2	23242.4	31.2	0.0711	0.0578	60%
170	7600	0.53	295.4	66.5	28.1	22324.2	29.9	0.0650	0.0555	62%
180	7600	0.57	276.4	62.2	27.2	21616.5	29.0	0.0608	0.0538	64%
195	7600	0.61	247.6	55.7	25.7	20414.1	27.4	0.0545	0.0508	66%
200	7600	0.63	237.9	53.5	25.1	19975.6	26.8	0.0523	0.0497	66%
207	7600	0.65	224.1	50.4	24.3	19333.9	25.9	0.0493	0.0481	67%
215	7600	0.67	208.4	46.9	23.3	18558.7	24.9	0.0458	0.0462	67%
220	7600	0.69	198.4	44.6	22.7	18050.3	24.2	0.0437	0.0449	67%
234	7600	0.73	170.3	38.3	20.8	16534.8	22.2	0.0375	0.0411	67%
250	7600	0.78	121.7	27.4	16.3	12972.7	17.4	0.0302	0.0364	65%
260	7600	0.82	103.4	23.3	14.9	11840.3	15.9	0.0228	0.0294	63%

圖(4.2) 速度型螺槳(YR7022FA)的氣動力性能

航速(km/hr)	轉速(rpm)	前進比(i)	推力(N)	推力(lb)	扭力(N-m)	功率(W)	馬力(hp)	推力係數CT	功率係數CP	效率
1	7200	0	465.4	104.7	29.8	22438.5	30.1	0.11411	0.06563	1%
35	7200	0.12	450.6	101.4	30.1	22664.7	30.4	0.11048	0.06629	19%
75	7200	0.25	415.5	93.5	30.1	22709.9	30.5	0.10186	0.06643	38%
95	7200	0.31	391.8	88.1	30.0	22627.0	30.3	0.09606	0.06618	46%
115	7200	0.38	363.8	81.8	29.7	22413.2	30.1	0.08919	0.06556	52%
135	7200	0.45	332.2	74.7	29.1	21910.9	29.4	0.08144	0.06409	57%
155	7200	0.51	298.1	67.1	27.9	21013.6	28.2	0.07309	0.06146	61%
175	7200	0.58	262.5	59.0	26.2	19783.4	26.5	0.06436	0.05787	65%
195	7200	0.65	225.8	50.8	24.2	18262.9	24.5	0.05536	0.05342	67%
215	7200	0.71	188.2	42.3	21.8	16467.7	22.1	0.04615	0.04817	68%
235	7200	0.78	149.7	33.7	19.1	14391.0	19.3	0.03670	0.04209	68%
255	7200	0.85	110.3	24.8	16.0	12028.5	16.1	0.02703	0.03518	65%

圖(4.3) 後掠型螺槳(FINAL7)的氣動力性能