

第四章 STAR-CD 模擬結果

4.1 幾何外型及網格的建立

本研究以計算流體力學軟體 STAR-CD 進行風力機整體氣動力學性能分析。初步風扇設計由彈頭部及三片葉片所組成。彈頭部由圓柱及半球體組成，圓柱半徑 300 mm，長度 500 mm，半球體半徑 300 mm。單一葉片的幾何外型如圖 4-1 所示，翼剖面選用 NACA-4412 [14]，葉片前端橫剖面弦長(chord line)為 775 mm，末端橫剖面弦長為 300 mm，葉片長度(blade length)為 6.7 m(自旋轉軸中心計算)。葉片根部扭轉角為 25° ，其後以近似平方反比曲線至葉片末端扭轉角為 0° ，整體風扇外觀如圖 4-2 所示。

葉片網格的建立由 STAR-CD 自動建網格的功能來建立，如圖 4-3 及所示，葉片根部至尖端網格數約為 131，在葉片前緣及後緣網格較緻密。外圍流體網格型式如圖 4-4 所示，由俯視圖來看，半徑 8 m，徑向的網格數為 43，圓周方向的網格數為 216，採用 0-grid 的網格分佈。由側視圖來看，葉片距離入口端 7.5 m，距離出口端 8.5 m，縱向的網格數為 56。總計網格數為 108 萬。

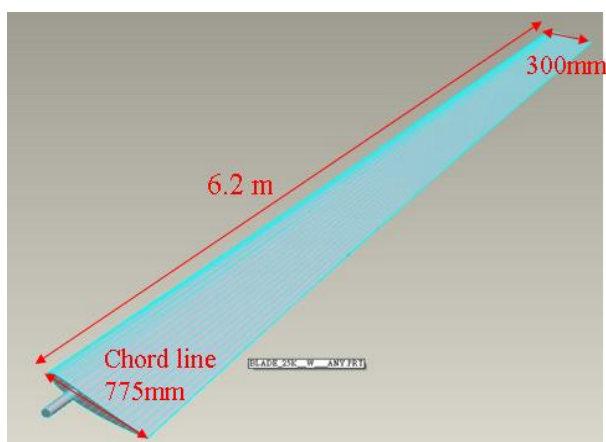


圖 4-1 單一葉片幾何外型

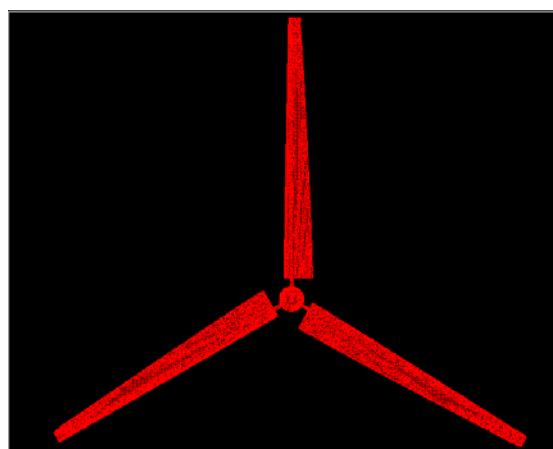


圖 4-2 風扇整體圖

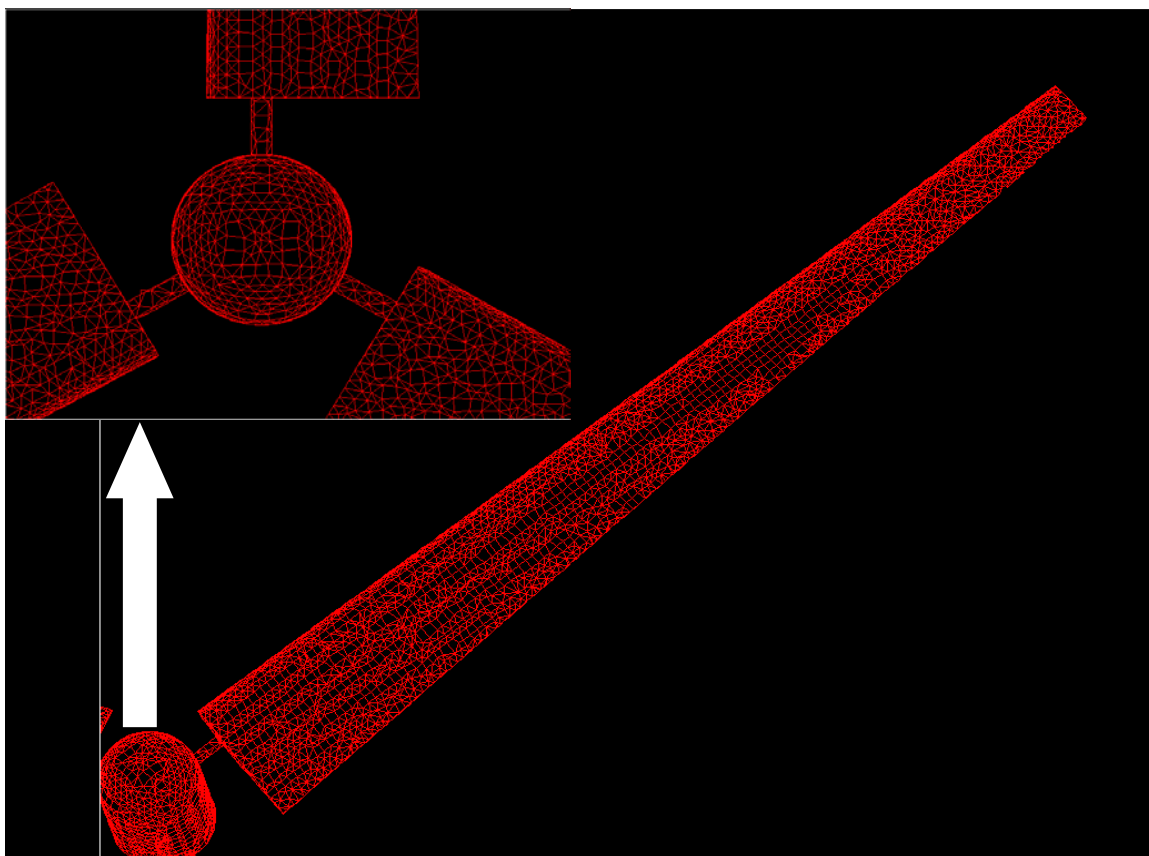


圖 4-3 葉片網格

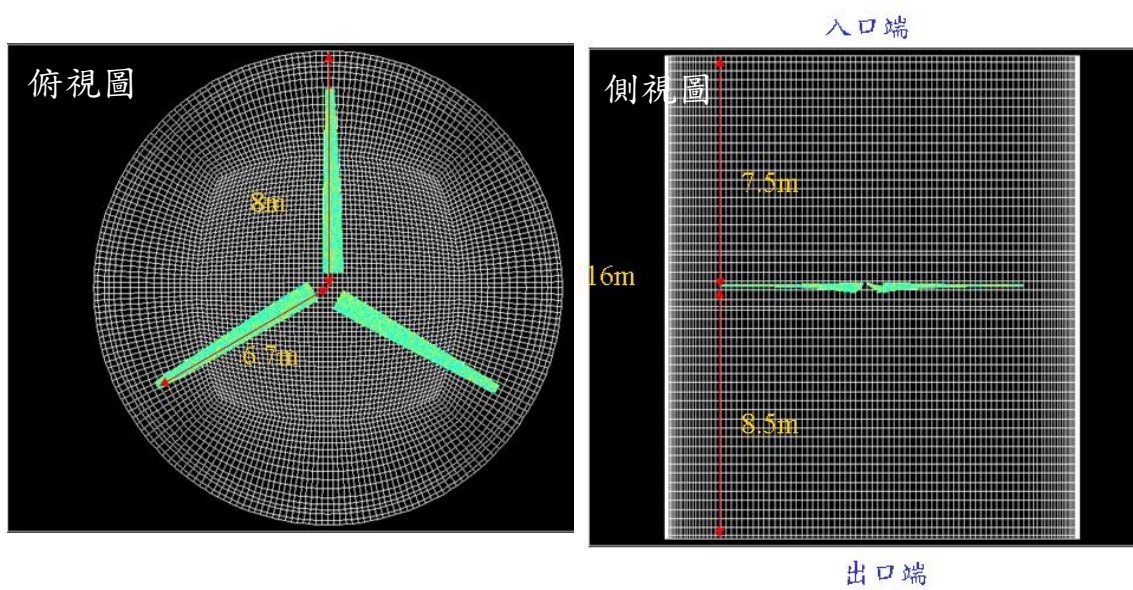


圖 4-4 外圍流體網格

4.2 基本假設與條件設定

本研究基本假設風機在穩態下運轉，空氣的密度為 1.205 kg/m^3 ，分子黏滯力(molecular viscosity)為 $1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ ，紊流模式採用 K-Epsilon/high Reynolds Number 及 Spalart-Allmaras/high Reynolds Number 兩種，詳細的設定值如圖 4-5 所示。紊流強度(turbulent intensity)設定為 0.05，紊流混合長度(turbulent mixing length)設定為 0.00014。以 SIMPLE 演算法求解，最大殘值容忍度為 0.001。計算時給定不同入口風速、不同轉速，可求得作用於葉片上的轉矩，經由旋轉體動力公式(4-1 式)計算出風機機械功率 P_m 。風機最大功率 C_p 可由 4-2 式求得，其中 ρ 為空氣密度， R 為葉片旋轉半徑， V_{wind} 為條件給定的風速。

上面的做法是給定不同風速及轉速兩變數去求得最大輸出功率，另外也仿造文獻[18]，以固定轉速 72 rpm 下，給定不同風速求得輸出功率，紊流模式採用 K-Epsilon/high Reynolds Number 及 Spalart-Allmaras 兩種來進行模擬。

$$P_m \text{ (Watt)} = 2 \times 3.14 \times \text{轉矩 (N-m)} \times \text{轉速 (rad/s)} \quad (4-1)$$

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V_{wind}^3 \quad (4-2)$$

C-Mu	0.09
C-Eps1	1.44
C-Eps2	1.92
C-Eps3	1.44
C-Eps4	-0.33
CAPPA	0.419
Prandtl(K.E.)	1
Prandtl(Eps)	1.219
Prandtl(Enth)	0.9

K-Epsilon/high Reynolds

C-B1	0.1355
C-B2	0.622
Prandtl(v)	0.666
C-v1	7.1
C-w2	0.3
C-w3	2
CAPPA	0.41

Spalart-Allmaras/high Reynolds

圖 4-5 K-Epsilon 和 Spalart-Allmaras 參數設定值

4.3 案例分析

4.3.1 不同風速和轉速下的最大輸出

採用 K-Epsilon/high Reynolds Number 紊流模式模擬的結果，可得出 C_p - λ 無因次化曲線，雖然各風速各有一條曲線，但隨著風的增加，愈來愈趨近一條曲線，取 10m/s 的 C_p - λ 曲線當此風機的 C_p - λ 關係曲線，如圖 4-6 所示。根據貝茲理論[4]，風機的最大效率不會超過 59.3%，由圖顯示當此風機的 λ 約為 7.8 時，具有最大的 C_p 值 45%。各風速下，轉速對轉矩和轉速對輸出的關係圖如圖 4-7、4-8 所示，圖 4.8 中顯示出某風速、某轉速下，風機具有最大的輸出，趨勢和 1.3 節 1-3 圖一致。此最大輸出下的風速及轉速之值如表 4.1 所示。在最大輸出下，轉速對輸出和風速對輸出的關係如圖 4-9、4-10 所示，結果顯示隨著風速及轉速的增加，輸出呈現上升趨勢，和 1.3 節和圖 1-4 曲線的趨勢一樣。風速和輸出的關係，可用三次方關係式 $P_{out}=39.471V^3-57.67V^2+482.55V-825.51$ 表示。

採用 Spalart-Allmaras/high Reynolds 紊流模式模擬的結果， C_p - λ 曲線和 K-Epsilon/high Reynolds Number 紊流模式模擬的結果相似，只是 Spalart-Allmaras 紊流模式在 λ 約為 8 時，具有最大的 C_p 值 50 %，比 K-Epsilon/high Reynolds Number 紊流模式的 C_p 值高 5%，如圖 4-11 所示。在最大輸出下的風速及轉速之值如表 4.2 所示，風速和輸出的關係，可用三次方關係式 $P_{out}=0.0412V^3+0.0384V^2-0.7382V+3.5513$ 表示。

比較 K-Epsilon/high Reynolds 及 Spalart-Allmaras/high Reynolds 兩種紊流模式輸出和 C_p 值，如圖 4-12、4-13 所示，可看出 Spalart-Allmaras 紊流模式輸出和 C_p 值皆比 K-Epsilon 紊流模式來的高。輸出的差距上，低風速時誤差小，高風速時誤差大。 C_p 值的誤差上，Spalart-Allmaras 比 K-Epsilon 紊流模式高約 5%。

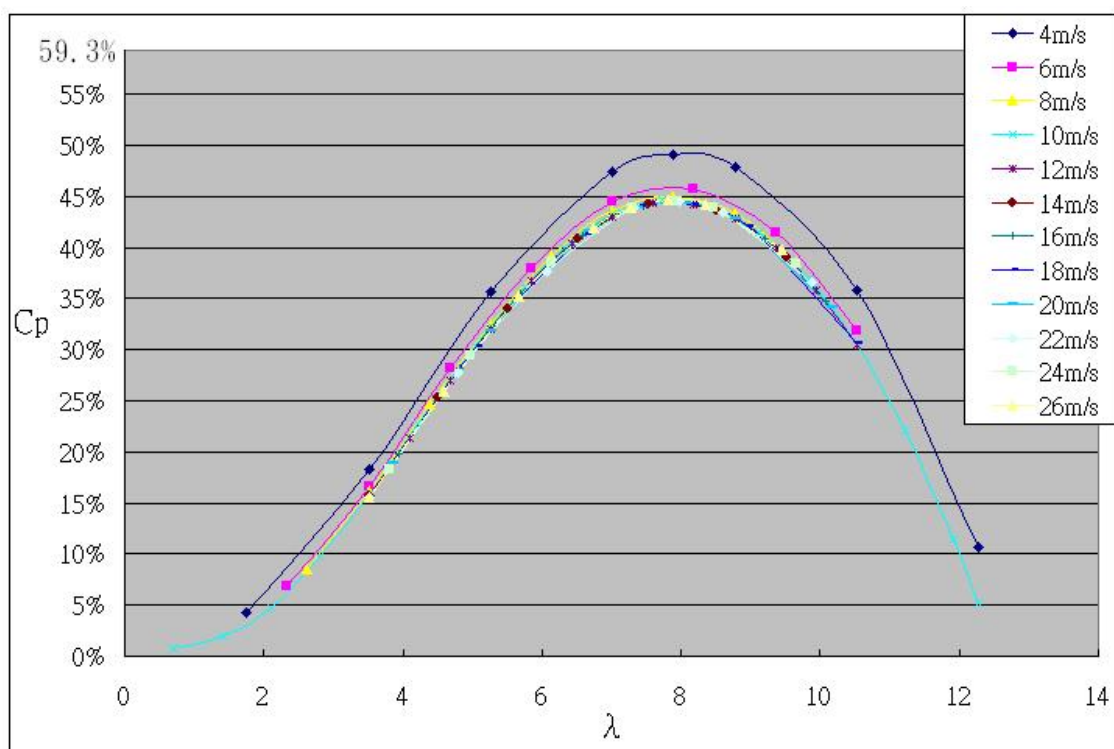


圖 4-6 各風速下 C_p - λ 曲線

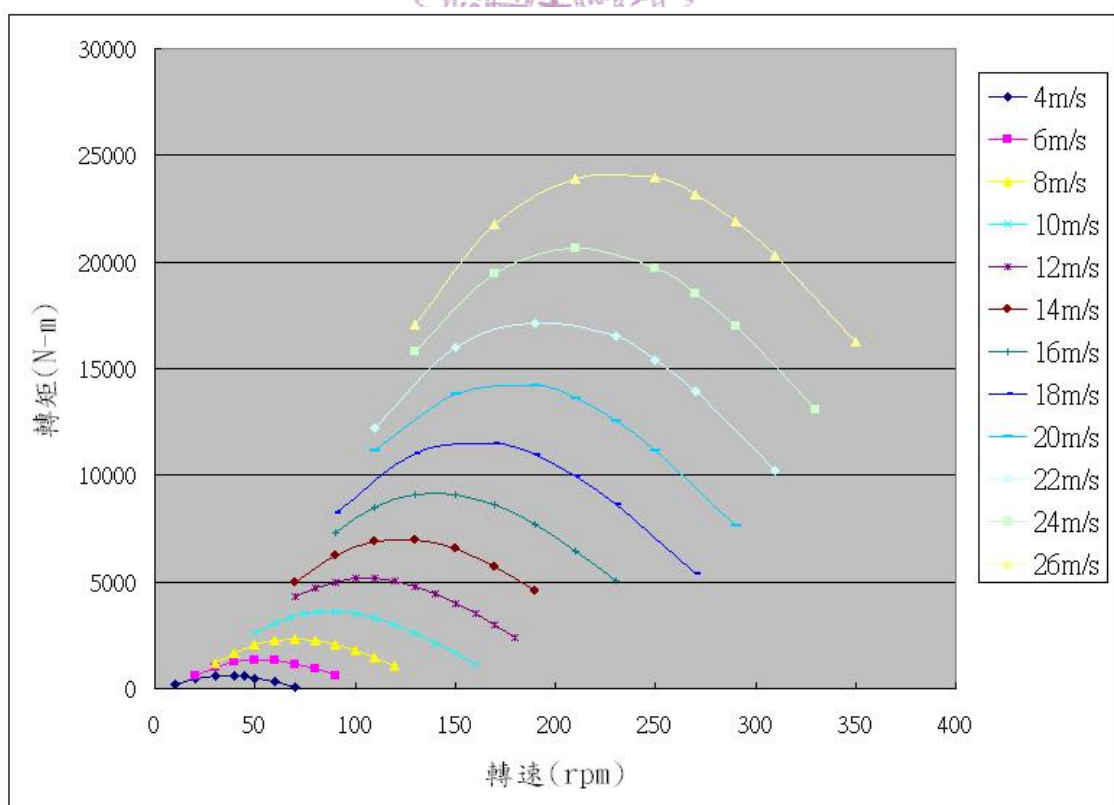


圖 4-7 轉速和轉矩關係圖

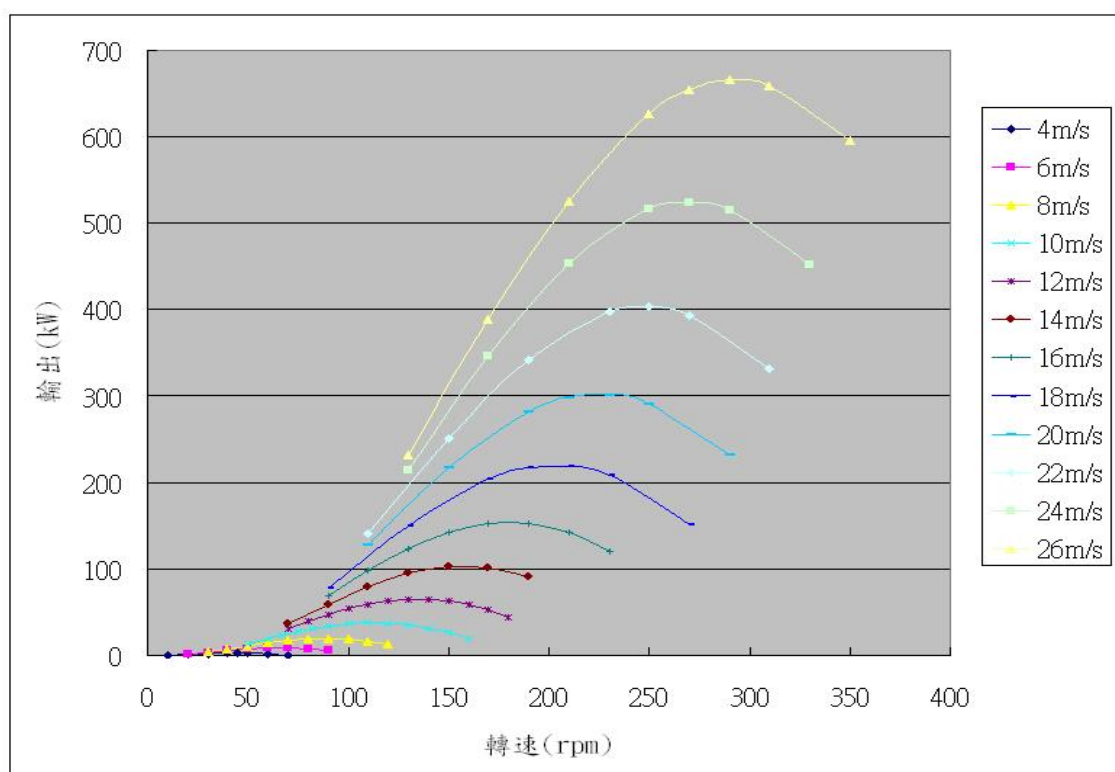


圖 4-8 轉速和輸出關係圖

表 4-1 最大 C_p 值之風速、轉速及輸出

velocity(m/s)	rpm	torque(N-m)	power(kW)	C_p
4	45	567	2.7	0.49
6	70	1,145	8.4	0.46
8	90	2,078	19.6	0.45
10	110	3,291	37.9	0.45
12	130	4,786	65.2	0.44
14	150	6,564	103.1	0.44
16	170	8,623	153.5	0.44
18	190	10,967	218.2	0.44
20	230	12,536	301.9	0.44
22	250	15,384	402.8	0.45
24	270	18,515	523.5	0.45
26	290	21,933	666.1	0.45

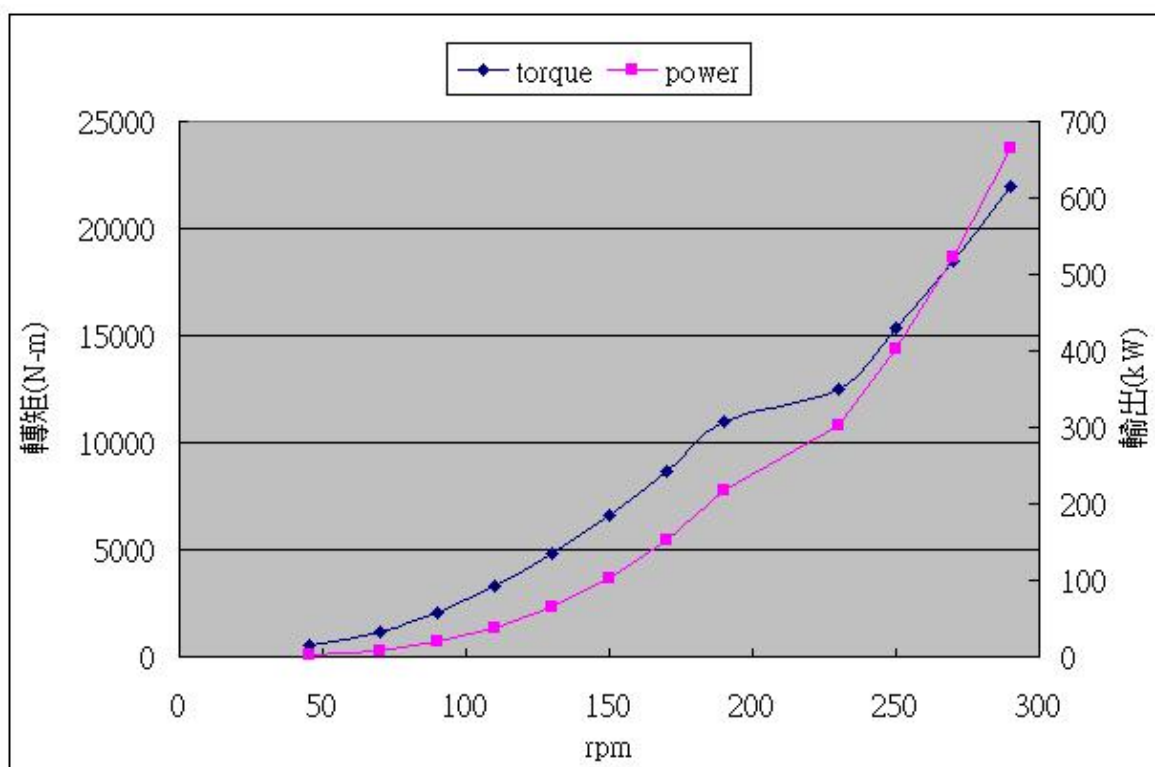


圖 4-9 轉速和最大轉矩、輸出關係圖

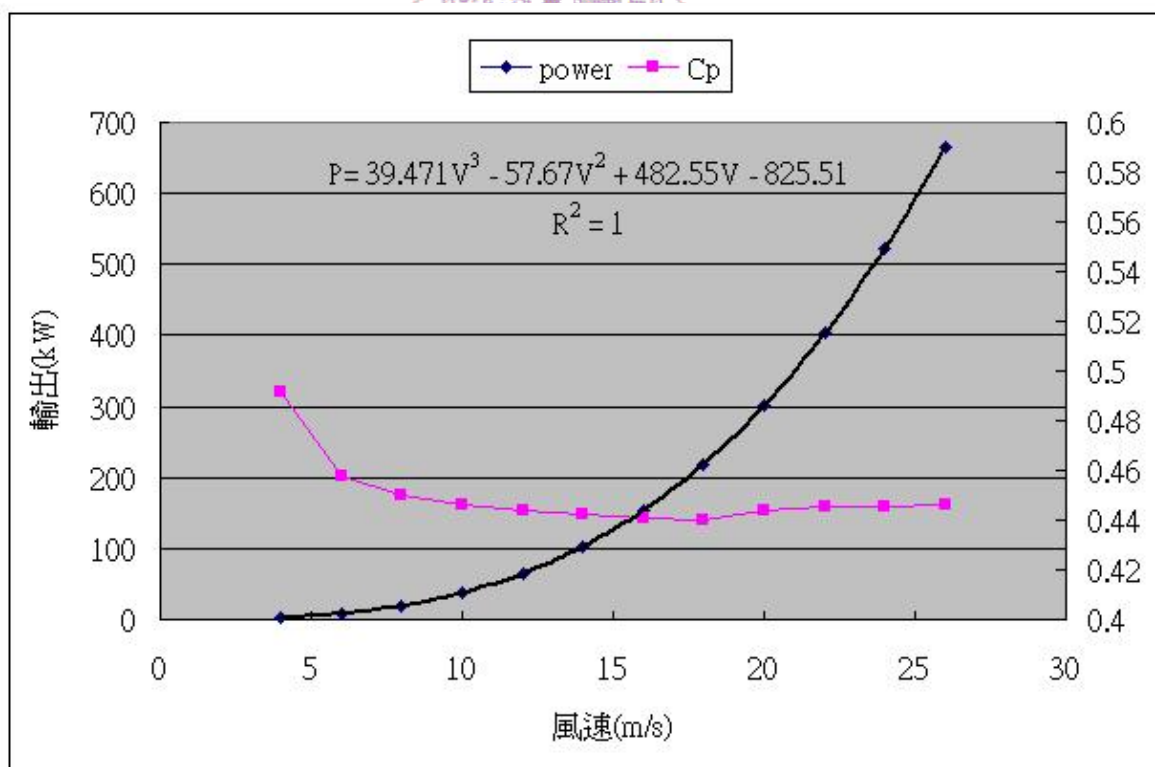


圖 4-10 風速和輸出、Cp 值關係圖

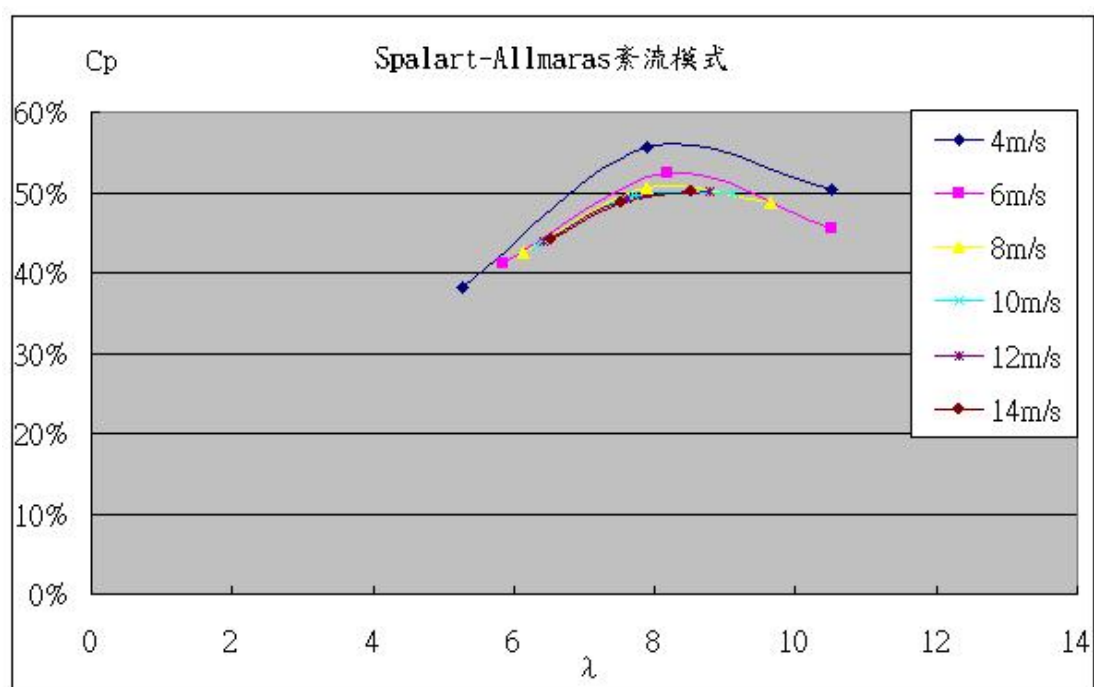


圖 4-11 Spalart-Allmaras 紊流模式 C_p - λ 圖



表 4-2 Spalart-Allmaras 紊流模式最大 C_p 值之風速、轉速及輸出

velocity(m/s)	rpm	torque(N-m)	power(kW)	C_p
4	45	642	3.0	0.56
6	70	1,310	9.6	0.52
8	90	2,338	22.0	0.51
10	110	3,669	42.3	0.50
12	130	5,301	72.2	0.49
14	150	7,236	113.7	0.49
16	170	9,472	168.6	0.48
18	190	12,010	239.0	0.48
20	230	13,996	337.1	0.50
22	250	17,081	447.2	0.49
24	270	20,465.9	578.7	0.49
26	290	24,154.5	733.5	0.49

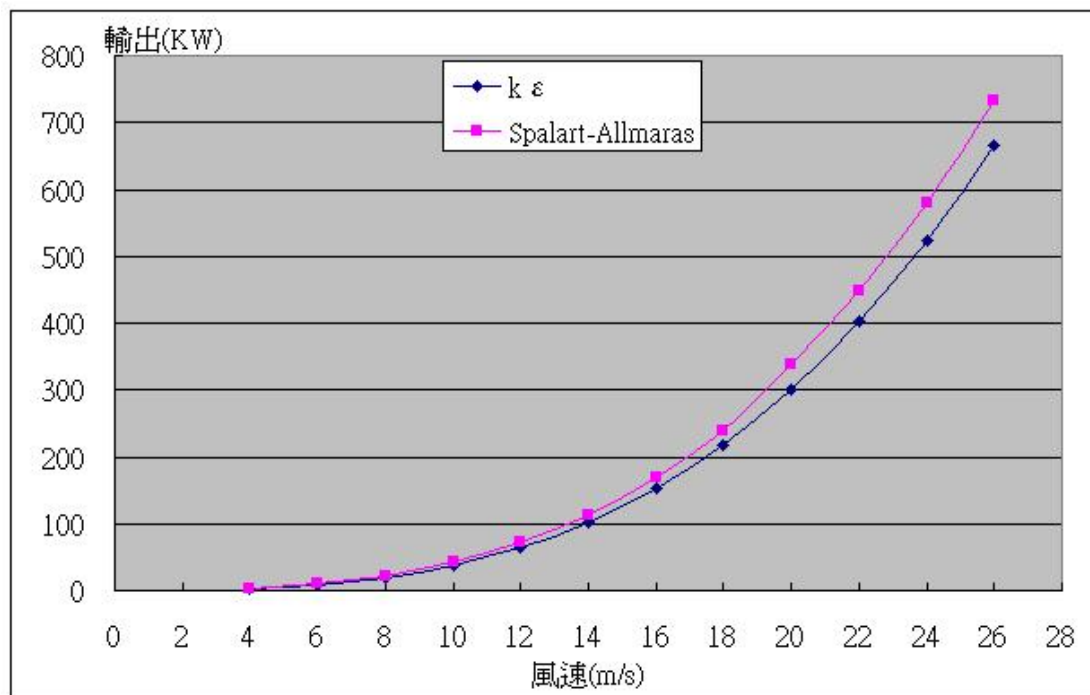


圖 4-12 K-Epsilon 及 Spalart-Allmaras 輸出比較圖

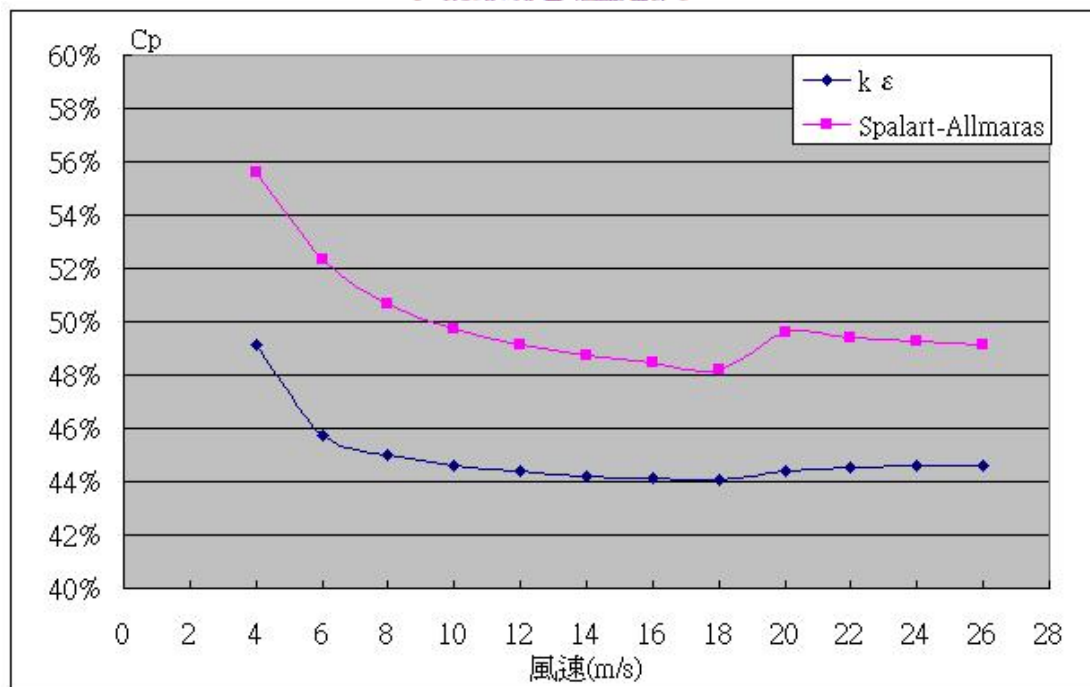


圖 4-13 K-Epsilon 及 Spalart-Allmaras C_p 比較圖

4.3.2 固定轉速 72rpm，不同風速下的輸出

根據文獻[18]，本研究以固定轉速 72 rpm，給定不同風速求得輸出功率，紊流模式採用 K-Epsilon/high Reynolds Number 及 Spalart-Allmaras/high Reynolds Number 兩種。計算的結果如表 4-3 所示，Spalart-Allmaras 紊流模式比 K-Epsilon 紊流模式輸出值差距皆在 2 kw 以內，差距不算大。Cp 值在風速 4~10 m/s 時差距較大，隨著風速的增大，Cp 值差距極小。

表 4-3 轉速 72rpm，K-Epsilon 及 Spalart-Allmaras 輸出和 Cp 值

velocity	rpm	k ϵ		Spalart-Allmaras	
		power(kw)	Cp(%)	power(kw)	Cp(%)
4.5	72	2.0	25.8	3.3	42.6
6	72	8.3	45.3	9.6	52.5
6.7	72	11.6	45.3	12.9	50.4
8.9	72	21.4	35.7	23.1	38.6
10	72	25.9	30.5	27.5	32.4
11.2	72	30.4	25.5	31.7	26.6
13.9	72	38.5	16.9	39.4	17.3
16	72	43.2	12.4	44.3	12.7
18	72	47.0	9.5	47.9	9.7
20	72	50.0	7.3	50.4	7.4
22	72	52.1	5.8	52.1	5.8
24	72	53.5	4.6	53.5	4.6
26	72	55.4	3.7	55.6	3.7

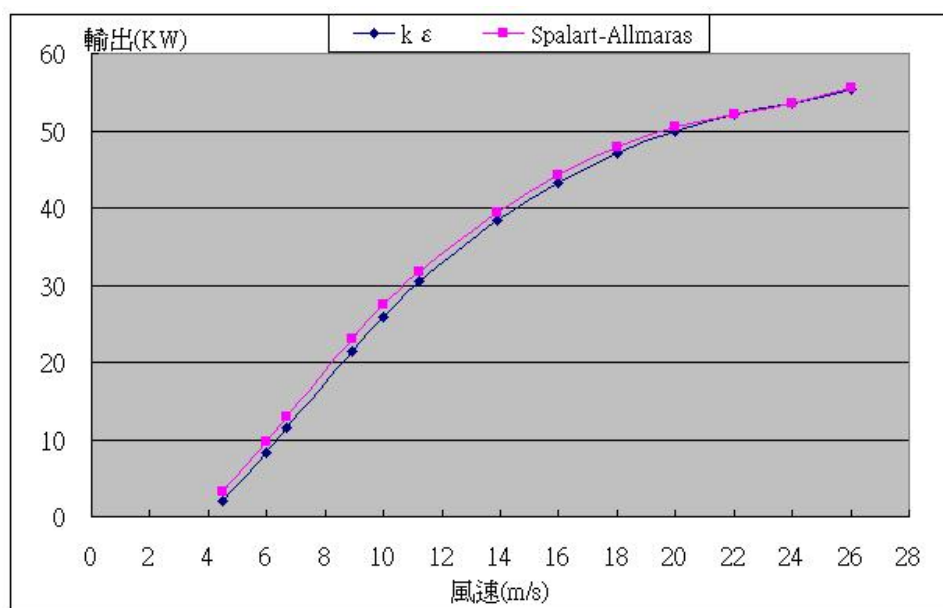


圖 4-14 轉速 72rpm，K-Epsilon 及 Spalart-Allmaras 輸出比較圖

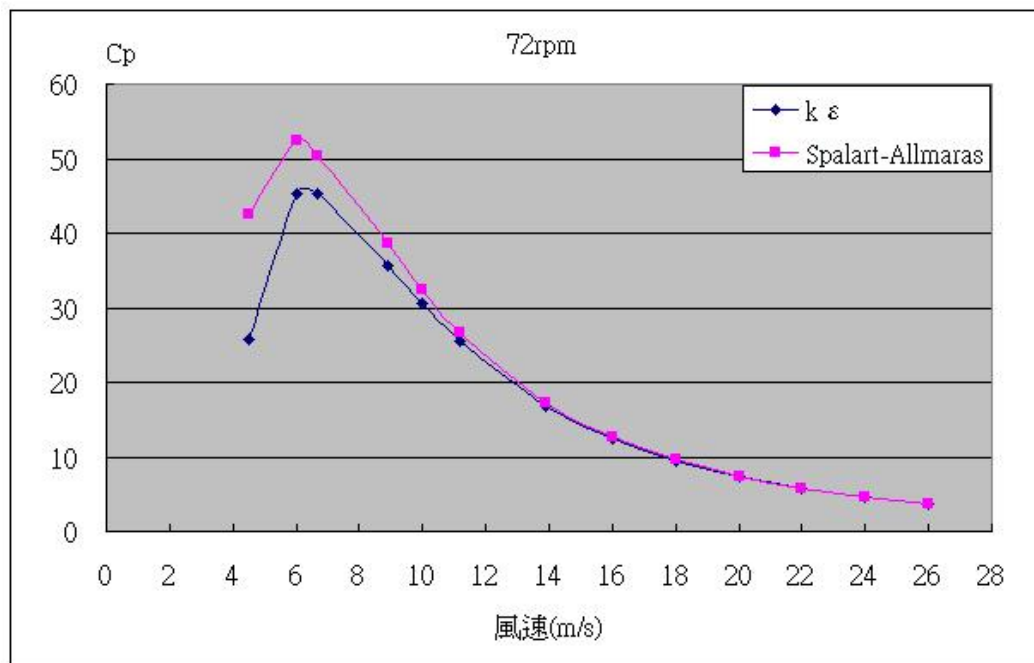


圖 4-15 轉速 72rpm，K-Epsilon 及 Spalart-Allmaras Cp 比較圖



4.4 速度場的變化、葉片上壓力分佈及流線圖

在此所呈現的皆為給定某風速、轉速下，求得最大輸出的案例。所有觀察速度場、葉片壓力分佈，流線圖的圖只取風速 4、6、8、10、12 m/s 的狀況來探討。

4.4.1 出口端的速度場

由圖 4-16~4-20 風扇出口端的速度場可看出渦流(Vortex Stream)的存在，渦流所有之動能也是來自於空氣流動能之減少，這證明了真正的風力機是無法達到貝茲(Betz)中最大功率係數 59.3%。圖形中速度場的分佈一致，顏色的顯示也一樣，但要注意右方速度值不同。隨著風速的增加，後端渦流的速度也不同，最慢的速度約為入口速度的一半。中心轉軸後端的速度場也有明顯的變慢，大約比入口速度減少約 2 m/s 的風速。

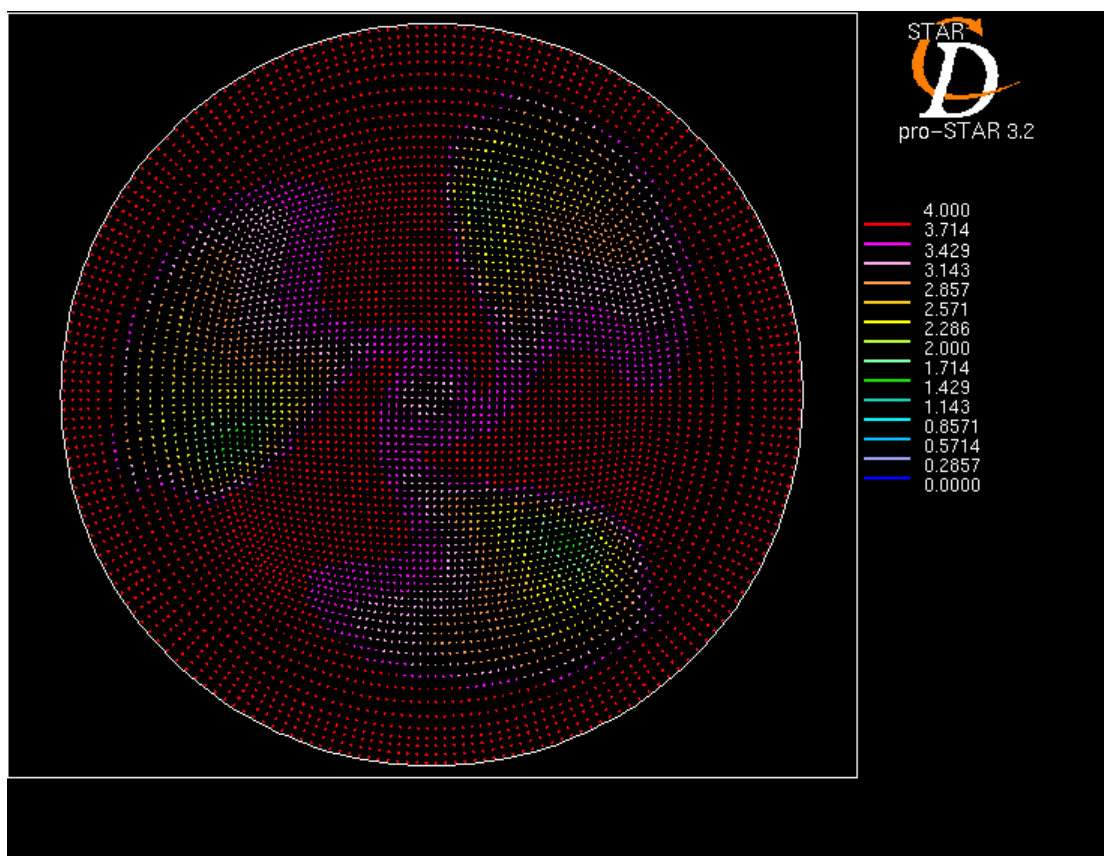


圖4-16 4m/s，45rpm 出口端速度場

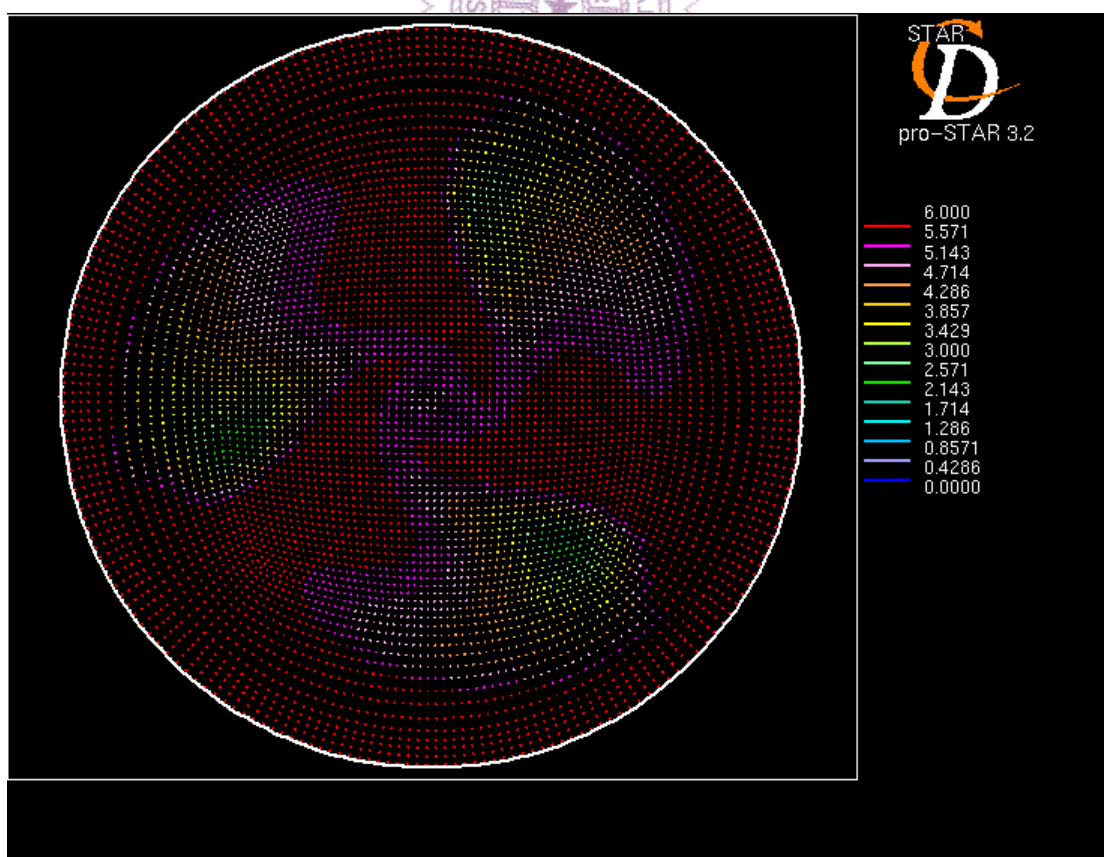


圖4-17 6 m/s，70 rpm 出口端速度場

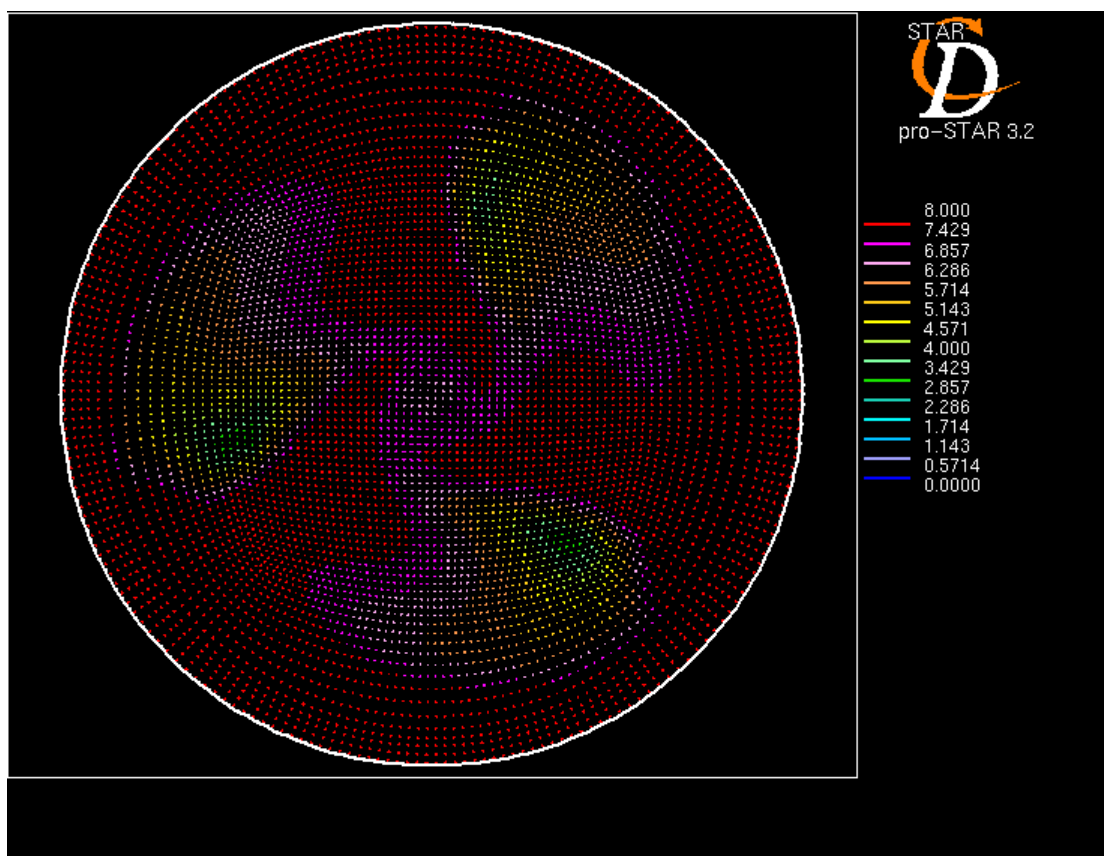


圖4-18 8 m/s，90 rpm 出口端速度場

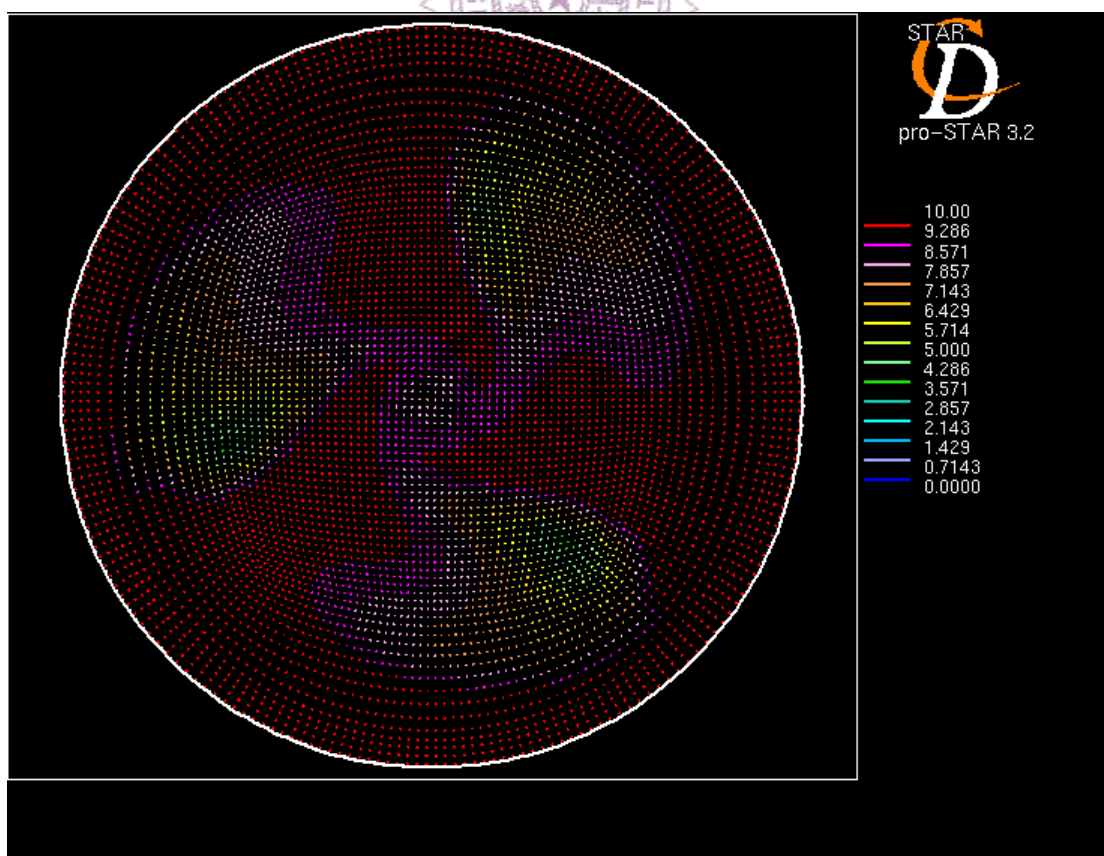


圖4-19 10 m/s，110 rpm 出口端速度場

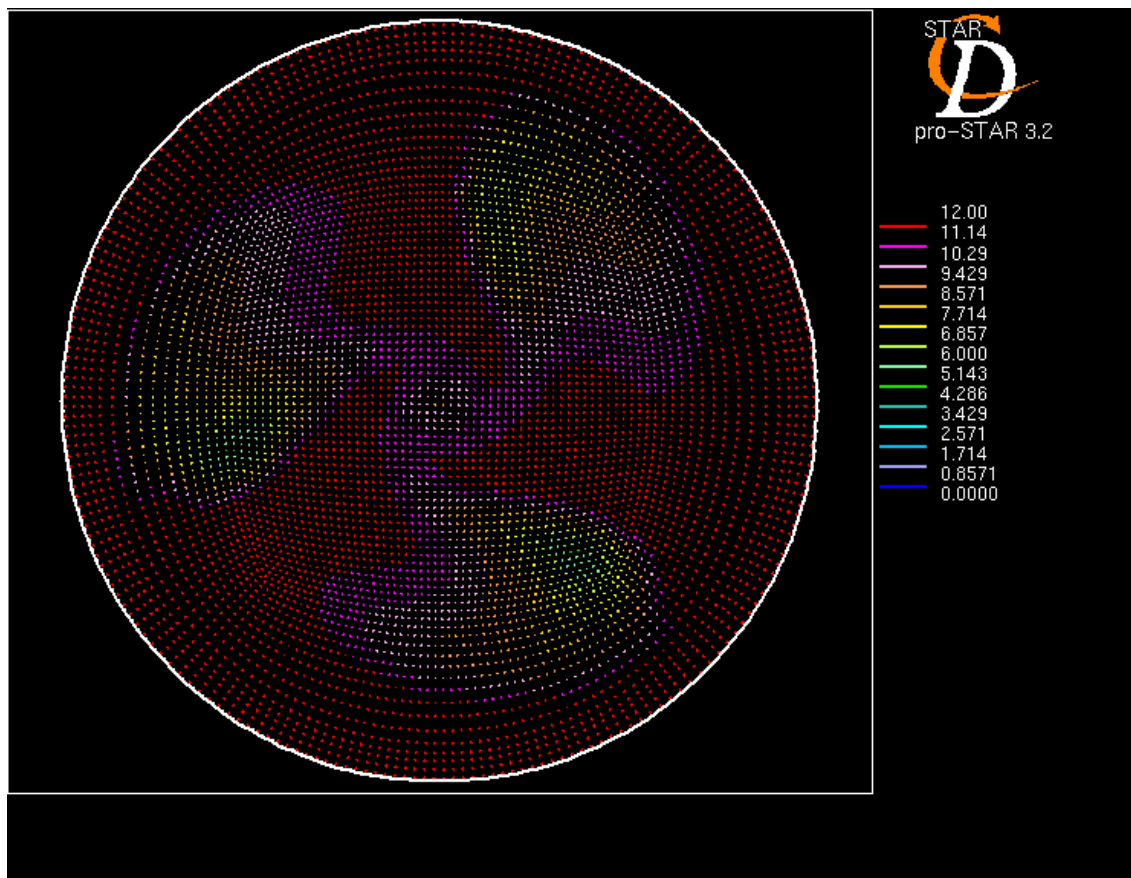


圖4-20 12m/s，130 rpm 出口端速度場

4.4.2 葉片上壓力變化

圖 4-21～4-25 顯示各風速、轉速下葉片上的壓力增加值，壓力單位為 Pa(N/m²), 海平面常溫下，一大氣壓力的值為 1.013×10^5 Pa。

葉片迎風面表面壓力增加值的分佈隨半徑增加而增加，尤其在葉片末端前緣迎風面的壓力值最大，隨風速的增加而愈大。風速由 4 m/s 至 12 m/s 最大值分別為：943.6、2276、3772、5632、7855 Pa。

葉片背風面表面壓力增加值亦隨半徑增而增加，葉片末端的壓力值最大。整體而言，背風面的壓力值明顯比迎風面的壓力值低。最低的壓力值發生在中心轉軸後方，風速由 4 m/s 至 12 m/s 最小值分別為：-30.11、-64.33、-120.7、-195.5、-292.8 Pa，比一大氣壓力還低。

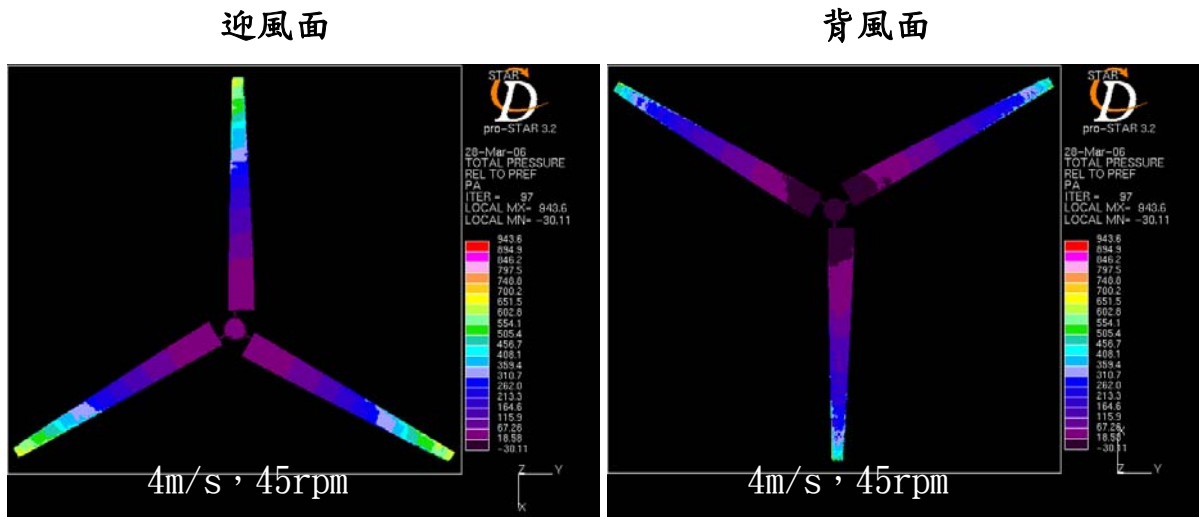


圖4-21 4 m/s, 45rpm 葉片壓力分佈

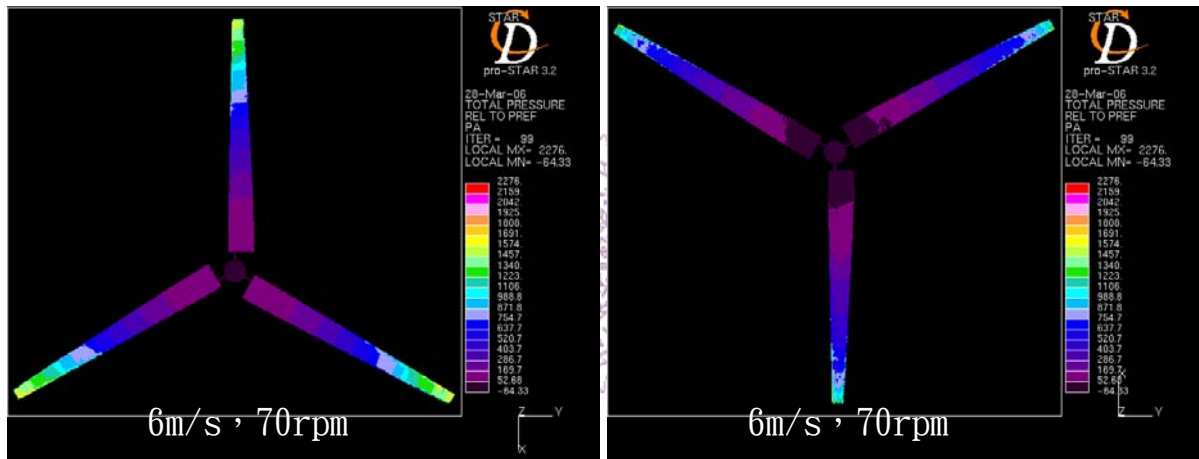


圖4-22 6 m/s, 70rpm 葉片壓力分佈

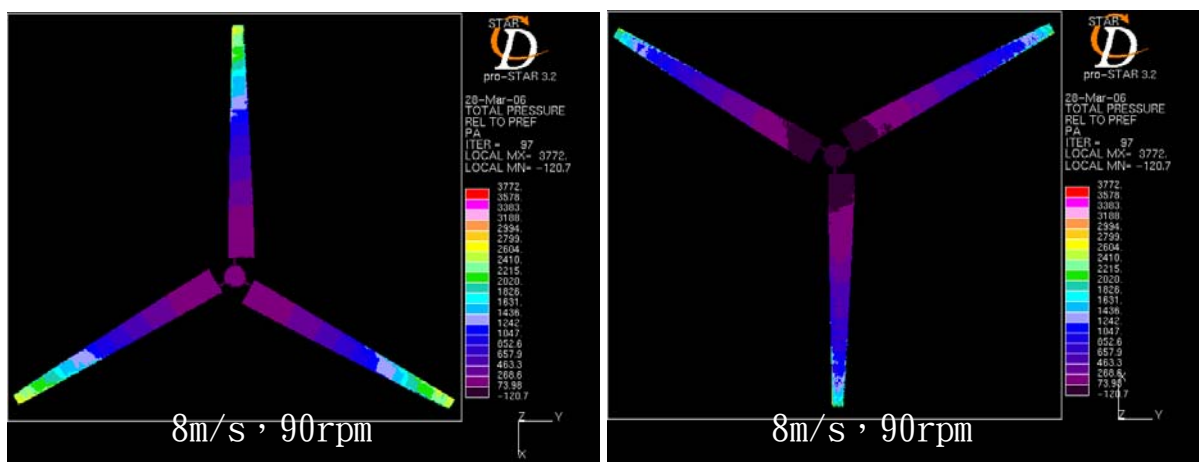


圖4-23 8 m/s, 90rpm 葉片壓力分佈

迎風面

背風面

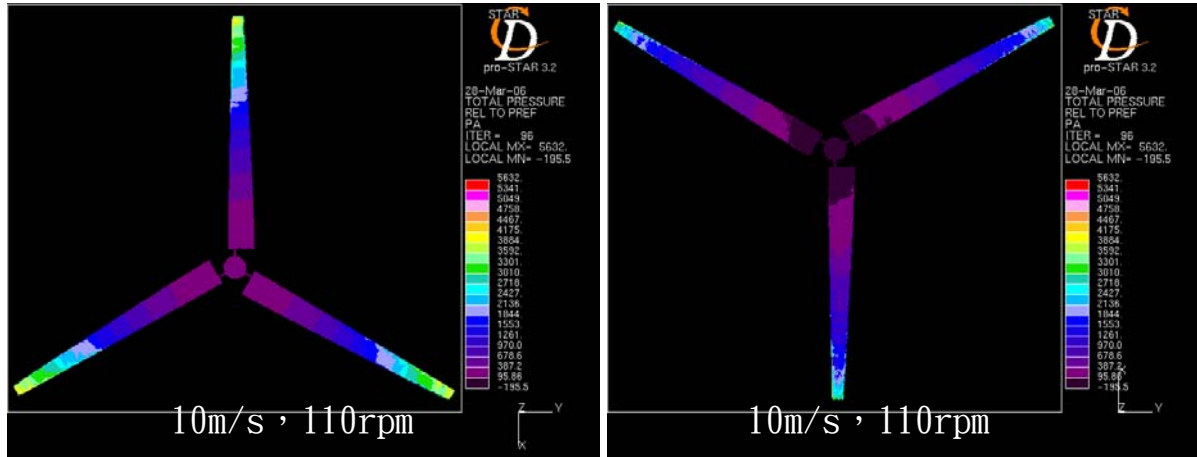


圖4-24 10 m/s, 110rpm 葉片壓力分佈

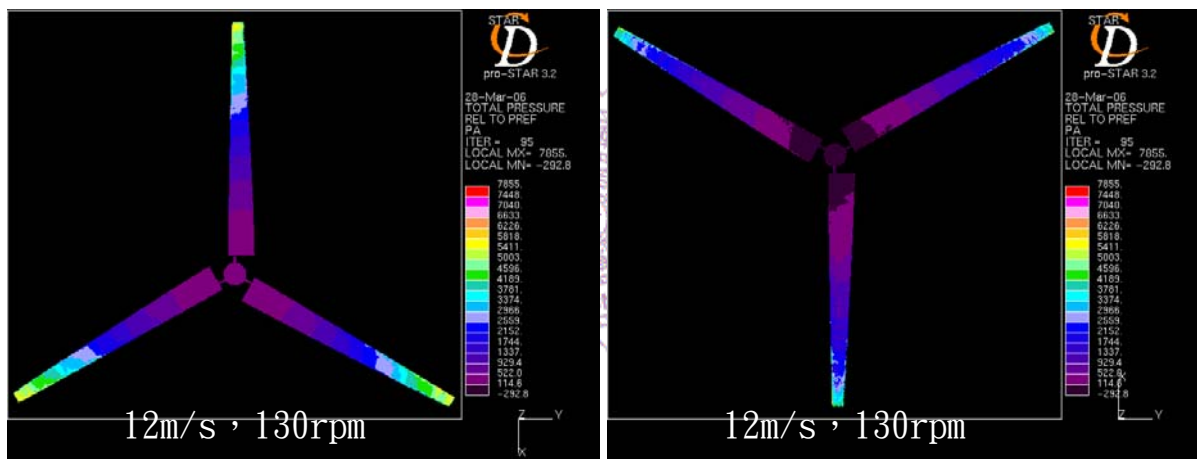


圖4-25 12 m/s, 130rpm 葉片壓力分佈

4.4.3 流線圖

圖 4-26~4-30 顯示各風速、轉速下的流線圖，由俯視圖及側視圖可觀察出風流動大致的狀況為入口端至葉扇前以直線的方向行進，經風扇後，後端產生渦流，直至出口端。在此由於是二維的呈現，無法真實表現出三維的現象。後端渦流的大小隨著遠離葉片有縮小及分離的現象發生。

俯視圖

側視圖

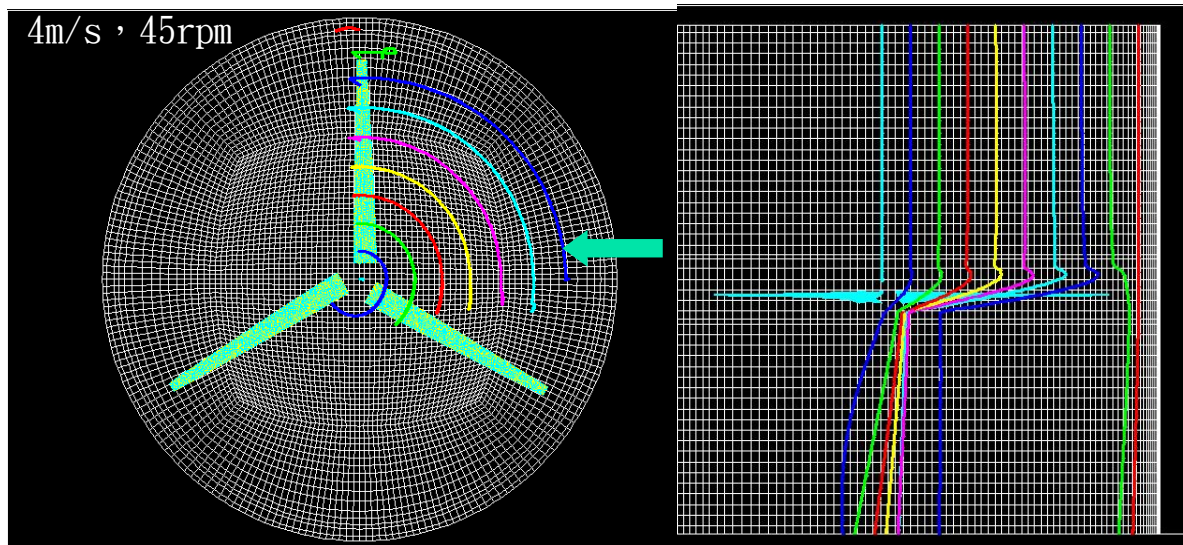


圖4-26 4 m/s, 45rpm 流線圖

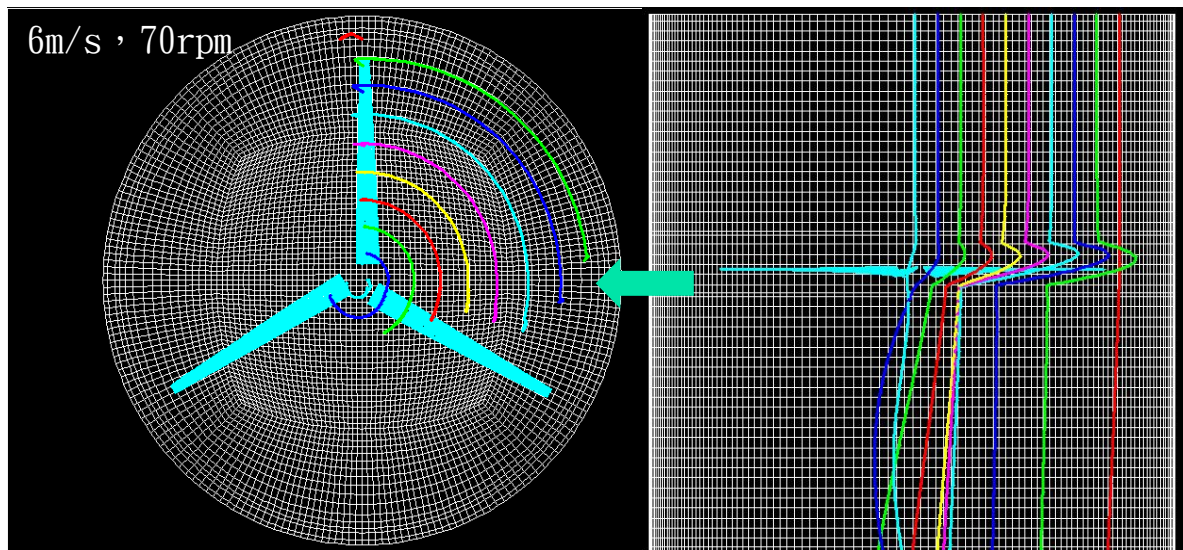


圖4-27 6 m/s, 70rpm 流線圖

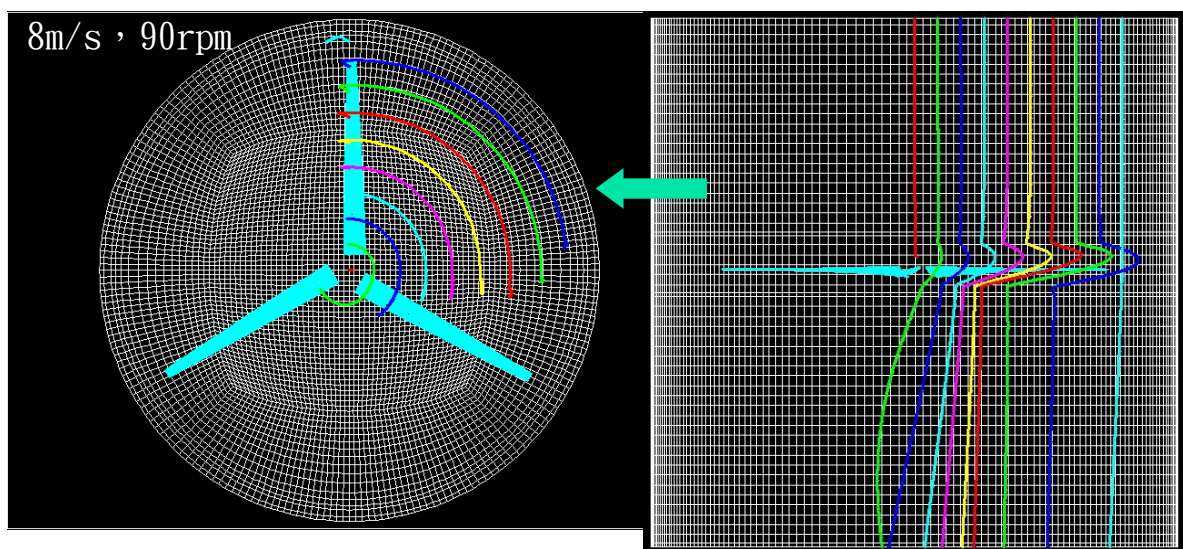


圖4-28 8 m/s, 90rpm 流線圖

俯視圖

側視圖

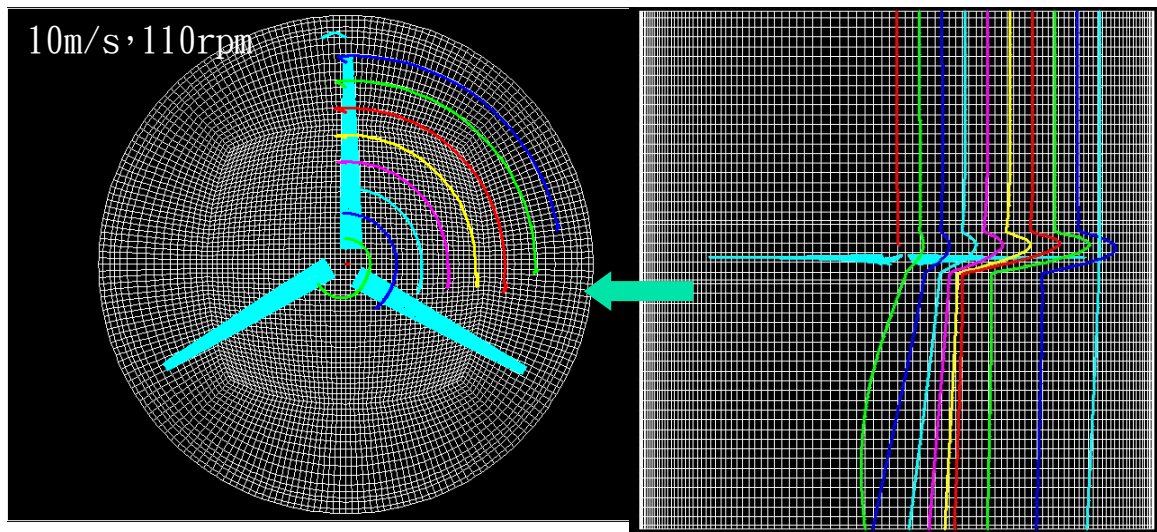


圖4-29 10 m/s, 110rpm 流線圖

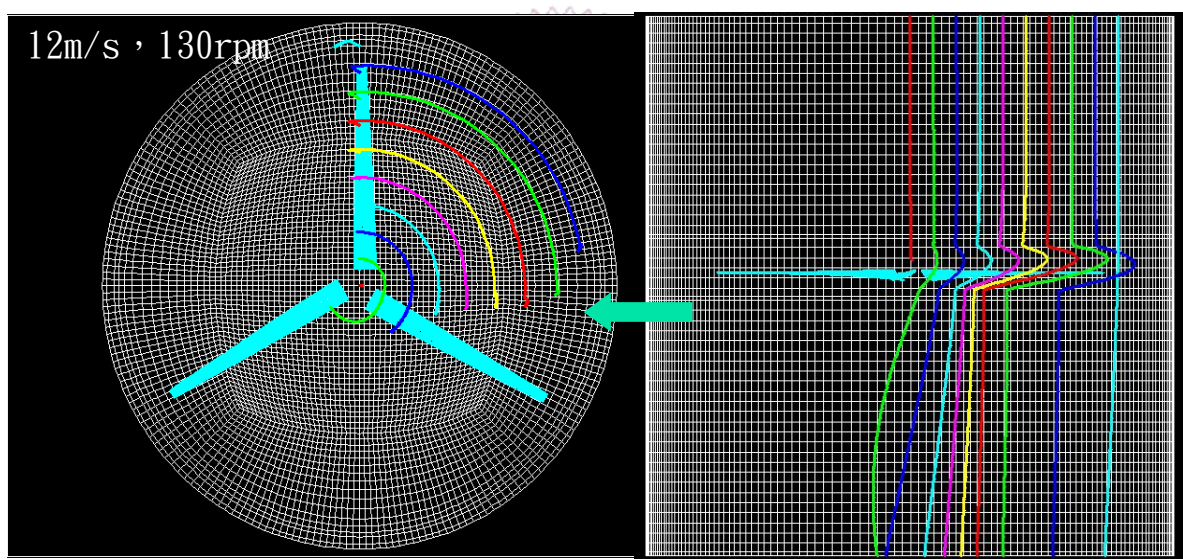


圖4-30 12 m/s, 130rpm 流線圖