

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

抽油煙機之流場模擬與氣動噪音分析

**An investigation of flow field and acoustic noise of
a range hood**

研究生：王俊傑

指導教授：傅武雄 博士

中華民國九十七年七月

抽油煙機之流場模擬與氣動噪音分析

**An investigation of flow field and acoustic noise of
a range hood**

研 究 生： 王 俊 傑

Student: Chun-Chieh Wong

指 導 教 授： 傅 武 雄

Advisor: Wu-Shung Fu

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

抽油煙機之流場模擬與氣動噪音分析

研究生：王俊傑

指導教授：傅武雄

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究主要在於探討抽油煙機之流場與氣動噪音，在數值計算上使用有限體積法與 LES 紊流模式計算抽油煙機之流場，利用 Ffows Williams-Hawkings 聲場方程式計算其氣動噪音。針對抽油煙機之流場與聲場作分析，利用計算結果求出抽油煙機噪音源產生的位置。

綜合模擬結果與分析，抽油煙機的聲場能量分佈與流場中壓力擾動有關，具有較高聲場能量分佈的區域，乃是噪音源產生的位置。從聲壓位準圖中，可以得知抽油煙機的氣動噪音是由窄頻噪音與寬頻噪音所組成。其最高峰值頻率大約為 5800Hz，處於人耳的敏感範圍內，因此抽油煙機所產生的噪音會對人們造成一定程度的影響。

An investigation of flow field and acoustic noise of a range hood

Student : Chun-Chieh Wong

Advisor : Wu-Shung Fu

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

The major purpose of this paper is to study the flow field and acoustic noise of a range hood by numerical methods. In the numerical calculation, a finite volume method and LES turbulent model are adopted to solve the flow. For acoustic noise analysis, Ffowcs-Williams and Hawkings formulation is used to predict the sound pressure level of the range hood.

The results show that the acoustic noise level is related with the pressure fluctuation of the flow. The acoustic noise of range hood is composed of narrow-band noise and broad-band noise. It is dominant at 5800Hz which is in the sensitive area of human hearing. Therefore, the reduction of the range hood noise is essential.

誌謝

衷心感謝指導老師傅武雄教授兩年來給予課業與研究上的悉心指導，以及在工作上的關心與教誨，在此謹致最高的感謝與敬意。同時也感謝機械系諸師長在課業方面的指導，連信宏學長與李崇綱學長在研究上的協助；國家高速網路中心提供相關的研究設備，使本研究能夠順利完成。

更要感謝父母親二十餘年來含辛茹苦的養育之恩與無微不至的關懷，家人和親友的鼓勵與支持，讓我能順利無憂的完成碩士學業。最後，僅將此喜悅與所有關心我的人分享。



目錄

中文摘要	.....	I
英文摘要	.....	II
誌謝	.....	III
目錄	.....	IV
表目錄	.....	V
圖目錄	.....	VI
符號索引	.....	IX
第一章 緒論	.....	1
1-1 前言	.....	1
1-2 文獻回顧	.....	2
1-3 研究目的	.....	4
第二章 物理模式	.....	8
2-1 物理模型	.....	8
2-2 分析假設與統御方程式	.....	8
2-3 邊界條件	.....	10
2-4 Large Eddy Simulation	.....	11
2-5 Ffowcs Williams-Hawkings 方程	.....	13
2-6 分貝值計算	.....	15
第三章 數值方法	.....	22
3-1 數值方法	.....	22
3-2 PISO 數值計算	.....	24
3-3 暫態滑動網格	.....	26
3-4 網格品質	.....	26
第四章 結果與討論	.....	34
第五章 結論	.....	91
參考文獻	.....	92

表目錄

表 2-1	標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式係數值.....	17
表 4-1	抽油煙機風扇轉速與通風量.....	41
表 4-2	接收點位置.....	84
表 4-3	各個接收點之聲壓位準.....	90



圖目錄

圖 1-1	噪音型態.....	6
圖 1-2	振動噪音示意圖.....	7
圖 1-3	氣動噪音示意圖.....	7
圖 2-1	抽油煙機模型示意圖.....	18
圖 2-2	抽油煙機前視圖.....	18
圖 2-3	抽油煙機側視圖.....	19
圖 2-4	抽油煙機俯視圖.....	19
圖 2-5	抽油煙機風扇示意圖.....	20
圖 2-6	A 加權曲線示意圖.....	21
圖 3-1	相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖.....	28
圖 3-2	計算流程圖.....	29
圖 3-3	對流通量示意圖.....	30
圖 3-4	PISO 示意圖.....	31
圖 3-5	滑移網格進行方式說明示意圖.....	32
圖 3-6	抽油煙機風扇網格示意圖.....	33
圖 4-1	抽油煙機示意圖.....	35
圖 4-2	抽油煙機之計算流場示意圖.....	36
圖 4-3	抽油煙機流場截面 A 與截面 B 示意圖.....	37
圖 4-4	抽油煙機流場截面 C 與截面 D 示意圖.....	38
圖 4-5	抽油煙機流場徑線示意圖.....	42
圖 4-6	抽油煙機流場徑線前視圖.....	43
圖 4-7	抽油煙機外殼壓力分佈示意圖.....	44
圖 4-8	抽油煙機外殼壓力分佈前視圖.....	45
圖 4-9	抽油煙機外殼壓力分佈後視圖.....	45
圖 4-10	抽油煙機外殼壓力分佈俯視圖.....	46
圖 4-11	抽油煙機外殼壓力分佈仰視圖.....	46
圖 4-12	抽油煙機流場 A 截面壓力分佈示意圖.....	47

圖 4-13	抽油煙機流場 A 截面速度分佈示意圖.....	47
圖 4-14	抽油煙機流場 A 截面速度向量示意圖.....	48
圖 4-15	抽油煙機流場 B 截面壓力分佈示意圖.....	49
圖 4-16	抽油煙機流場 B 截面速度分佈示意圖.....	49
圖 4-17	抽油煙機流場 B 截面速度向量示意圖.....	50
圖 4-18	抽油煙機流場 C 截面壓力分佈示意圖.....	51
圖 4-19	抽油煙機流場 C 截面速度分佈示意圖.....	51
圖 4-20	抽油煙機流場 C 截面速度向量示意圖.....	52
圖 4-21	抽油煙機流場 C 截面左邊風扇速度向量局部放大圖.....	53
圖 4-22	抽油煙機流場 C 截面右邊風扇速度向量局部放大圖.....	53
圖 4-23	抽油煙機流場 D 截面壓力分佈示意圖.....	54
圖 4-24	抽油煙機流場 D 截面速度分佈示意圖.....	54
圖 4-25	抽油煙機流場 D 截面速度向量示意圖.....	55
圖 4-26	抽油煙機風扇表面壓力分佈示意圖.....	56
圖 4-27	抽油煙機風扇表面壓力分佈前視圖.....	56
圖 4-28	抽油煙機熱源模擬示意圖.....	58
圖 4-29	抽油煙機熱源模擬之流場示意圖.....	59
圖 4-30	熱源溫度為 400°C，向上速度為 0.1m/s.....	60
圖 4-31	抽油煙機熱源模擬 X 方向截面示意圖.....	61
圖 4-32	抽油煙機熱源模擬 Z 方向截面示意圖.....	62
圖 4-33	抽油煙機熱源模擬流場徑線示意圖.....	63
圖 4-34	抽油煙機熱源模擬流場徑線前視圖.....	64
圖 4-35	熱源模擬 Z 方向截面溫度分佈圖.....	65
圖 4-36	熱源模擬 Z 方向截面溫度分佈局部放大圖.....	65
圖 4-37	熱源模擬負 X 方向截面溫度分佈圖.....	66
圖 4-38	熱源模擬正 X 方向截面溫度分佈圖.....	66
圖 4-39	熱源處放置鍋子模擬示意圖.....	67
圖 4-40	熱源處放置鍋子之流場示意圖.....	68
圖 4-41	熱源處放置鍋子之模型前視圖.....	69
圖 4-42	熱源處放置鍋子之模擬 X 方向截面示意圖.....	70

圖 4-43	熱源處放置鍋子之模擬 Z 方向截面示意圖.....	71
圖 4-44	熱源處放置鍋子之流場徑線示意圖.....	72
圖 4-45	熱源處放置鍋子之流場徑線前視圖.....	73
圖 4-46	熱源處放置鍋子之 Z 方向截面溫度分佈圖.....	74
圖 4-47	熱源處放置鍋子之 Z 方向截面溫度分佈局部放大圖.....	74
圖 4-48	熱源處放置鍋子之負 X 方向截面溫度分佈圖.....	75
圖 4-49	熱源處放置鍋子之正 X 方向截面溫度分佈圖.....	75
圖 4-50	抽油煙機外殼聲場能量分佈示意圖.....	78
圖 4-51	抽油煙機外殼聲場能量分佈前視圖.....	79
圖 4-52	抽油煙機外殼聲場能量分佈後視圖.....	79
圖 4-53	抽油煙機外殼聲場能量分佈俯視圖.....	80
圖 4-54	抽油煙機外殼聲場能量分佈仰視圖.....	80
圖 4-55	抽油煙機 A 截面聲場能量示意圖.....	81
圖 4-56	抽油煙機 B 截面聲場能量示意圖.....	81
圖 4-57	抽油煙機 C 截面聲場能量示意圖.....	82
圖 4-58	抽油煙機 D 截面聲場能量示意圖.....	82
圖 4-59	抽油煙機風扇表面聲場能量分佈示意圖.....	83
圖 4-60	抽油煙機風扇表面聲場能量分佈前視圖.....	83
圖 4-61	抽油煙機接收點位置示意圖.....	85
圖 4-62	抽油煙機接收點位置側視圖.....	86
圖 4-63	接收點 1 之聲壓位準圖.....	87
圖 4-64	接收點 2 之聲壓位準圖.....	87
圖 4-65	接收點 3 之聲壓位準圖.....	88
圖 4-66	接收點 4 之聲壓位準圖.....	88
圖 4-67	接收點 5 之聲壓位準圖.....	89
圖 4-68	接收點 6 之聲壓位準圖.....	89

符號索引

A	面積	[m ²]
$C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}, C_{\varepsilon 4}$	k- ε 紊流模式經驗係數	
F_j	在 x_j 方向上之能量擴散通量	
\sqrt{g}	特定公制張量	
k	紊流動能	
p	壓力	[Nm ⁻²]
p'	遠場中的聲壓	[Nm ⁻²]
P_{ij}	壓縮張量	
T_{ij}	Lighthill 壓力張量	
s_i	動量源項	
s_{ij}	剪應變率張量	
s_ϕ	來源係數	
t	時間	[sec]
x_i	卡式座標 (i=1, 2, 3)	
x_j	卡式座標 (j=1, 2, 3)	
u	流體切線速度	[ms ⁻¹]
u_i	流體在 x_i 方向之速度分量	[ms ⁻¹]
u_n	垂直於表面之速度分量	[ms ⁻¹]
\tilde{u}_i	流體與座標系統之相對速度	[ms ⁻¹]
u_w	壁面速度	[ms ⁻¹]
v_i	流體在 x_i 方向上之表面速度分量	[ms ⁻¹]
v_n	垂直於表面之表面速度分量	[ms ⁻¹]
a_0	遠場中的聲速	[ms ⁻¹]
V	體積	[m ³]



C_s	smagorinsky 常數	
L_s	次格點之混合長度	[m]
d	距離壁面的長度	[m]
d	距離壁面的長度	[m]
P_{ref}	參考聲壓	[Pa]
I	聲強	[W/m ²]
I_{ref}	參考聲強	[W/m ²]
$P_{A,ref}$	參考能量	[W/m ²]
L_T	總分貝值	[dB]
W_A	加權值	[dB]
f	頻率	[Hz]

希臘符號

Γ_ϕ	擴散係數	
μ_t	紊流黏滯係數	[Nsm ⁻²]
μ	黏滯係數	[Nsm ⁻²]
ρ	密度	[kgm ⁻³]
σ_{ij}	剪應力張量	
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	k-ε 紊流模式經驗係數	
$\sigma_{h,t}$	紊流 Prandtl 數	
τ_{ij}	黏滯應力張量	
ϕ	代表任一獨立物理量	



第一章 緒論

1-1 前言

近年來，各項產業的快速發展帶給人們更方便、舒適的生活空間，然而伴隨而來的卻是對環境造成各種不同程度的破壞。在環保意識、勞工安全意識以及產品品質意識的提升下，人們不僅希望可以製造性能好效率佳的產品，同時也希望可以製造更環保的產品。現今，工業產品對環境所造成的污染已成為不可忽視的問題。其中，噪音污染的控制是為最困難與嚴重的。

一般人在日常生活中都有機會暴露在各種不同程度的噪音中，而聽力已經受到噪音的傷害卻往往不自覺。噪音對人體的影響可分為身體與心理方面的傷害。噪音對人體的危害乃聲音之物理能量透過聽覺神經而產生，不僅對耳朵、聽力有損，更會透過神經系統對人體產生非聽覺性的影響。長期處於高音量噪音中或極高音量，即使是時間很短，都將引起聽力的損失。包括暫時性聽力損失或永久性聽力損失。聽力喪失，大都是無法醫療的。一定音量以上的嘈雜環境將影響到日常生活上，工作上的談話、學校教師的教學，使人提高音量、大聲嚷叫，而容易引起喉嚨的沙啞。噪音的掩蓋，使人不易聽到各種警告性的聲響，如走近的車輛、機械聲音、喊叫的聲音，失去警覺，產生危險，可能使人會逃避現實、想搬家，甚至引起激烈抗議行動。人群集合、聚會，也常受噪音干擾而感困難等，引起社會性行為的不良效果。噪音會影響睡眠、妨礙交談、工作效率低落、厭惡、生氣等心理作用，久而久之，因心理反應、失眠而導致生理功能失調的現象，如頭痛、頭暈、精神無法集中等均為噪音直接與間接的影響。兒童如長時期暴露在高噪音的環境下，會採用一種使自己聽不見噪音環境的調適方法來對抗噪音，這將造成兒童在吵雜的環境下變得不注意聲音訊號的不良作用，尤其是兒童不易區分聲音的重要性，將對兒童學習及認知的發展有相當的影響。雖然噪音的影響或許不是立即的，但卻是潛在的、長期而深遠的。因此，噪音診斷與防治在未來工程應用上將會扮演重要的角色。

要做好噪音防治工作，最首要的事就是要正確的辨識音源與其機制，同時評估其相對的重要性。一般噪音之型態依其位準隨時間的變化狀況，可分為穩定的(stationary)與非穩定的(non-stationary)，其中非穩定噪音又可分為變動噪音(fluctuating noise)、間歇噪音(intermittent noise)與衝擊噪音(impulsive noise)，如圖 1-1 所示。穩定噪音之聲壓位準在一定值附近只作小幅度的變動，如馬達、輸送帶噪音皆屬於此類噪音。變動噪音之聲壓位準隨時間有大幅度的變動，如交通噪音、焊接、電動工具屬於此類噪音。間歇噪音的聲壓位準改變量與變動噪音相同，而變動過程中其聲壓位準回降到背景噪音不只一次，而且間隔大於一秒。如壓縮機、自動化生產線、切削加工噪音皆屬於此類噪音。衝擊噪音的聲壓位準變動量最大，而兩次衝擊時間間隔小於一秒，如沖壓床、氣動工具、鉗擊噪音皆屬此類噪音。

噪音依其產生的機制可分為兩大類：振動噪音(vibration noise)與氣動噪音(acoustic noise)，振動噪音是由結構表面振動推擠鄰近介質所產生的聲波幅射，圖 1-2 所示，如結構元件、傳動機構等，因傳動或振動所產生的噪音，由於噪音產生的機制較容易預測，因此在污染控制上已獲得相當程度的改善。氣動噪音主要是來自於移動物體或流體內部的擾動，這些擾動對於可壓縮介質造成壓力或密度波動，並且由聲源處以聲速傳遞出去，圖 1-3 所示，如內部流場的壓力擾動、紊流漩渦擾動等所產生的噪音。因其有著不可預測性，所以在控制上較為困難。

1-2 文獻回顧

在過去，探討氣動噪音的文獻極多，其中以 Lighthill 於 [1,2] 所提出的理論而有著開創性的貢獻。Lighthill 將連續方程式與動量方程式結合以推導出非齊性聲學波動方程式，為 Lighthill 方程式，並提出流場中的聲源為四極聲源(quadrupole sources)，即紊流產生的聲源。Lighthill 將聲源部份利用實驗或計算流體力學方法求得，在利用波動方程式計算其傳遞過程。Lighthill 方程式

是在自由空間下假設下得到的方程式，對於受邊界影響較不顯著的區域，如噴射流問題上，Lighthill 的理論是適用的。接著 Curle[3]將 Lighthill 推廣到考慮靜止固體邊界的影響，探討聲波在固體邊界上的反射與衍射，並提出靜止表面處的壓力擾動所產生的聲源為偶極聲源 (dipole sources)。接著，Ffowcs-Williams 等人 [4] 重新整理 Lighthill 方程式，由於推導過程是根據 Navier-Stokers 方程式而來且未有任何簡化，方程式中包含了單極聲源項、偶極聲源項以及四極聲源項。因此，Ffows Williams-Hawkings 方程式的適用範圍比原始的 Lighthill 方程式更加廣泛。

隨著電腦運算速度的增快，便有越來越多的文獻利用 Lighthill analogy 的方法結合 CFD 對氣動噪音做出合理的預測與改善。William 在[5]中將氣動噪音與計算流體力學的結合做出合理的預測與整理，其中包括有找出適合 CFD 應用的統御方程式、定義 CAA (Computational Aero Acoustic) 的適用範圍與方法、CAA 中的邊界條件的定義。因此，其應用範圍也越來越廣，從小型冷卻風扇到飛機機翼都可以利用此方法來計算氣動噪音。在實際應用方面，Kenji 等人在 [6]中以計算車輛在高速行駛下，車前柱與後照鏡所產生的氣動噪音，計算結果與風洞實驗結果吻合。其氣動噪音主要原因是紊流邊界層產生分離時，所伴隨的壓力擾動以及渦流產生的噪音。最後在重新設計車前柱與後照鏡的外型，成功降低了氣動噪音。Maidi 在[7]中以相同的方法計算亞音速與超音速圓柱噴流的氣動噪音，並發現噴流噪音主要受到上游設計參數與入口條件的影響。

除了以 Lighthill analogy 的方法外，也有文獻使用 Kirchhoff 方程式、Linear Euler Equation(LEE)、Acoustic Perturbation Equation(APE) 等方法計算聲場，Sarigul-Klijn 等人在[8]中利用 CFD 方法計算近場 (near-field) 暫態流場的壓力擾動，將近場壓力擾動結果帶入 Kirchhoff 方程式中以計算遠場噪音(far-field noise)。Addad 等人在[9]中以商業軟體 Star-CD 計算暫態流場，接著利用 LEE 計算聲場，並對渦流產生的機制與聲源的關係做比較，發現流

場中渦流所產生的位置與聲源所產生的位置幾乎相同。Ewert 等人在[10]中計算機翼尾端的渦流噪音(vortex shedding noise)，以 LES 紊流模式計算可壓縮流之紊流暫態流場，接著利用 APE 計算噪音。

在轉動機械噪音方面，Lowson 在[11]中考慮運動固體邊界與流體相互作用的影響，以 Lighthill 方程式推導出求解任意運動之聲場方程式，並考慮渦流噪音，對於轉動機械 (rotating machinery)，如風扇、直升機螺旋槳等的噪音預測問題上均取得良好的結果。Hodgson 等人在[12]中以實驗(test plenum)量測三種電腦冷卻風扇在不同空氣流量及電壓下的噪音，並發現風扇噪音跟壓力成正比，與空氣流量成反比。Maaloum 等人在[13]中探討入口條件對風扇在噪音與氣動力方面的影響，發現以輪廓型管道(contoured duct)入口與在風扇前方加裝球狀平滑裝置 (lack thereof) 可以降低風扇入口處之紊流強度，並減少了風扇噪音，但風扇的流量與壓降不受影響。Jiang 等人在[14]中結合 CFD 與 Fukano model 計算分離式冷氣機的風扇噪音，利用商業軟體 Fluent 計算風扇葉片分離區的尾流寬度(wake width)與相對速度，重新帶入 Fukano model 計算噪音，其結果比原始的 Fukano model 更加準確。Wu 等人在[15]中根據 Lowson 的聲場方程式推導出在自由空間下預測風扇噪音的半經驗方程式，並在垂直式葉片、前頃後頃式葉片之軸流風扇的噪音預測上都取得不錯的效果。Huang 在[16]中，推導出風扇輻射噪音之計算方程式，並利用經驗公式計算風扇支柱 (strut) 對風扇噪音影響，並發現風扇支柱數量對總聲壓強度的影響比葉片數量還來得明顯。

1-3 研究目的

噪音危害健康、干擾作息，嚴重影響到人們的生活品質。噪音的種類很多，其中影響最大、範圍最廣的就是交通運輸工具所發出的噪音。其次，工業所製造的噪音也很嚴重；而其他如娛樂場所、抗議遊行、中式快炒餐廳以及家庭電器設備等所發出的噪音，更是破壞環境安寧的主要因素。在廚房中，為了減少烹飪所產生的油煙，抽油煙機為必備的工具。抽油煙機總是強調吸力強、通風量大，

其在高速運轉下的聲音則成為廚房主要的噪音來源。雖然探討氣動噪音的文獻眾多，在實際的應用如風扇、車輛噪音改善上都取得不錯的成果。對於抽油煙機噪音的研究則相對較少，然而抽油煙機是必備的工具，因此對於其噪音的改善則是必要的。

本文的研究目的在於探討抽油煙機之流場與氣動噪音，以數值計算方法對抽油煙機進行模擬與分析。首先，利用 LES 紊流模式計算紊流暫態流場，接著以 Ffows Williams-Hawkings 聲場方程式計算其氣動噪音。針對抽油煙機流場與聲場作分析，利用計算結果找出抽油煙機噪音源產生的位置，以作為改善抽油煙機噪音之參考。



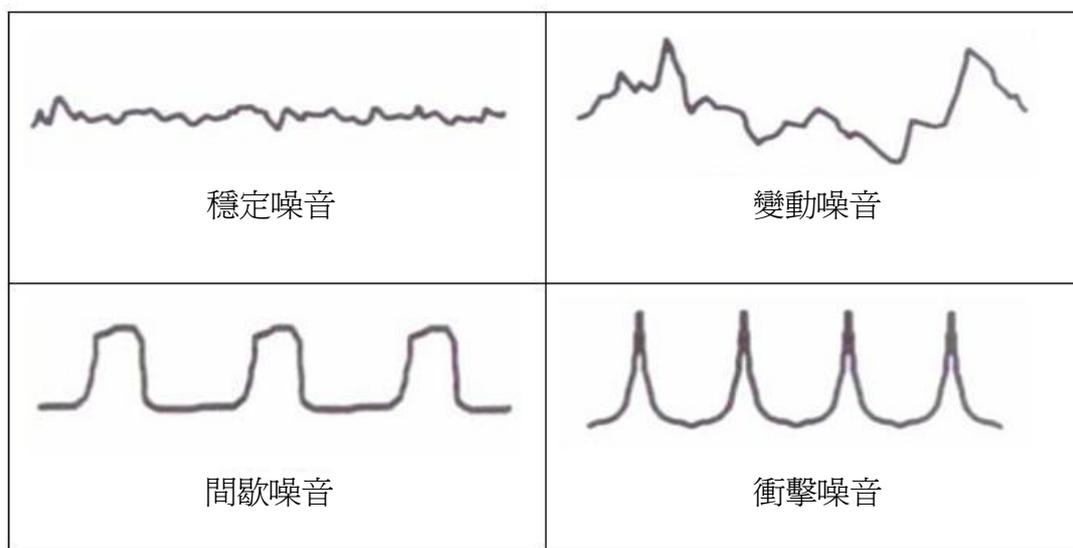


圖 1-1 噪音型態

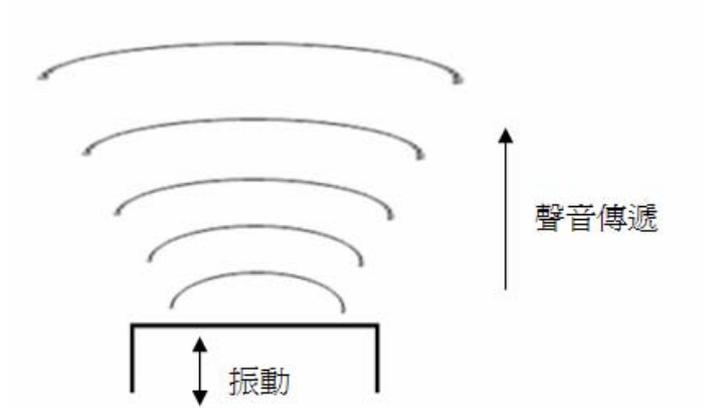


圖 1-2 振動噪音示意圖

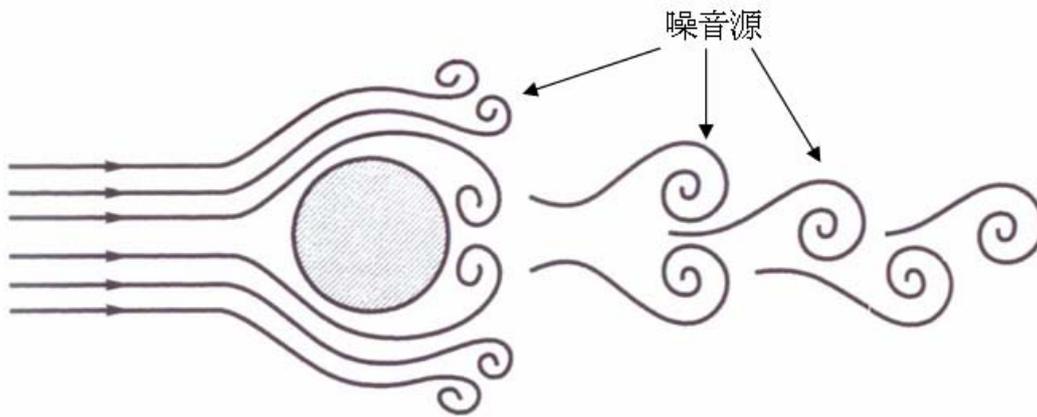
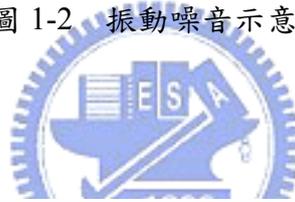


圖 1-3 氣動噪音示意圖

第二章 物理模式

2-1 物理模型

一般抽油煙機的主要零件為外殼、集油裝置、風扇與旋轉馬達。其中風扇與旋轉馬達為抽油煙機之噪音源，但本文只對抽油煙機之氣動噪音做分析，因此不考慮由馬達旋轉振動所產生的噪音。在計算氣動噪音之前，則必須先算出抽油煙機之內部流場。

抽油煙機風扇在旋轉時，空氣由入口處吸入，經由風扇旋轉加速，空氣被葉片帶動流向出口。由於葉片是做等角度速旋轉運動且葉片本身為不規則曲率之圓弧曲面，造成空氣粒子不是單純的沿著某方向運動，還包括了旋轉運動。因此，在進行數值模擬時，則需考慮包含旋轉在內的複雜三維流場。

本文使用的抽油煙機模型為雙風扇式抽油煙機，如圖 2-1 至圖 2-4 所示，長度為 900mm，高度為 765mm，寬度為 500mm。煙囪出口長度與寬度為 250mm 與 180mm，入口直徑為 150mm。抽油煙機風扇本體直徑為 200mm，軸心長度為 100mm，葉片數量為 12 片，如圖 2-5 所示。

2-2 分析假設與統御方程式

本文選擇 $k-\varepsilon$ 紊流模式模擬抽油煙機流場，為簡化數值分析，流場做以下假設：

1. 空氣密度為定值。
2. 工作流體為空氣，流體性質為牛頓流體(Newtonian fluid)，黏滯係數(viscosity)為等方向性。
3. 忽略重力效應影響。
4. 不考慮溫度變化，亦不考慮因黏滯生成熱量問題；所有壁面均為絕熱、不可滑移條件(no-slip condition)。
5. 不考慮葉片、流場迴流及擾動此三者造成之振動現象；所有固體物質均為剛體。

流場的統御方程式則有連續方程式、動量方程式、紊流動能方程式、紊流動量消耗方程式，能量方程式，分別如下：

連續方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j) = 0 \quad (2-1)$$

動量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p_s}{\partial x_i} + s_i \quad (2-2)$$

$$\text{式(2-2)中之 } \tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j} \quad (2-3)$$

$$\text{式(2-2)中之 } s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-4)$$

紊流動能方程式 (k-equation)：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \tilde{u}_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \mu_t (p + p_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2-5)$$

其中：

$$p \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2-6)$$

$$p_B \equiv -\frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (2-7)$$

σ_k 為經驗值。

紊流動量消耗方程式 (ε -equation)：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \tilde{u}_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t (p + p') - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t p_B - C_{\varepsilon 2} (1 - 0.3e^{-R_i^2}) \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2-8)$$

其中：

$$p' \equiv 1.33 \left[1 - 0.3e^{-R_t^2} \right] \left[P + 2 \frac{\mu}{\mu_t} \frac{k}{y^2} \right] e^{-0.00375 \text{Re}_y^2} \quad (2-9)$$

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (2-10)$$

$$f_\mu = \left[1 - e^{-0.0198 \text{Re}_y} \right] \left(1 + \frac{5.29}{\text{Re}_y} \right) \quad (2-11)$$

$$\text{Re}_y = \frac{y\sqrt{k}}{\nu} \quad (2-12)$$

$$R_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad (2-13)$$

σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$, $C_{\varepsilon 4}$ 為經驗值各係數值如表 2-1 所示。

能量方程式 (energy equation) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j h - F_{h,j}) = \frac{\partial}{\partial t}(p) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{u}_j p) - p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_h \quad (2-14)$$

其中：

$F_{h,j}$: 熱通量

s_h : 熱源項

2-3 邊界條件

本文的流場是由抽油煙機風扇的旋轉，產生壓力差，而將流體由入口吸入，出口吹出。因此，在本文中，邊界條件設定是將入口與出口外設為大氣壓力。因不可滑移條件，各固體邊界則設速度為零。在風扇葉片以及旋轉軸上，則設為固定轉速。

1. 入口與出口壓力邊界：

本文出入口壓力設定為大氣壓力。

$$p = 0$$

2. 固體邊界：

壁面設為無滑移條件 (no-slip condition)。

$$U = 0, V = 0, W = 0$$

一般而言固體邊界適用於無法移動的邊界設定，如天花板、壁面、地板、阻礙物的接觸面，均可使用此設定。

k 與 ε 則採用 near-wall model 處理

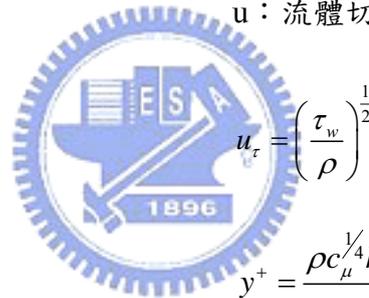
$$u^+ = \begin{cases} y^+ & , \quad y^+ \leq y_m^+ \\ \frac{1}{k} \ln(Ey^+) & , \quad y^+ \geq y_m^+ \end{cases} \quad (2-15)$$

其中式 (2-15) 中

$$u^+ : (u - u_w) / u_\tau$$

u : 流體切線速度

$$u_w : \text{壁面速度}$$



$$u_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\tau_w : \text{壁面剪應力}$$

$$y^+ = \frac{\rho c_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu}$$

k : von Kármán 常數，0.4187

E : 為經驗係數，9.793

而 y_m^+ 滿足右列方程式

$$y_m^+ - \frac{1}{k} \ln(Ey_m^+) = 0$$

3. 葉片與旋轉軸：

角速度 $\omega = 3000 \text{rpm}$ 。

2-4 Large Eddy Simulation(LES)

為了要計算抽油煙機的氣動噪音，必需先得到暫態流場中時變量之物理量。因此，可利用 LES 紊流模式來解抽油煙機之暫態流場。LES 將流體中的物理量區分為大尺度(Large-scale)與次格點尺度(subgrid scale(SGS))兩部分。在 LES 中，流場中的大尺度物理量直接由 Navier-Stokes 方程式求解，而次格點尺度物

理量則需要模式化。LES 利用過濾法(filtering process) 來劃分流場中的大小渦流，過濾之物理量(filtered variable)的定義如下：

$$\bar{\phi}(x, t) = \int_D \phi(x', t) G(x, x') dx' \quad G(x, x') \text{ 為 filter function} \quad (2-16)$$

filter function 如以下定義：

$$G(x, x') = \begin{cases} \frac{1}{\Delta} & x - \frac{\Delta}{2} < x' < x + \frac{\Delta}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-17)$$

利用 filter function 對 Navier-Stokes 方程式過濾，則可得：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (2-18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2-19)$$

其中式(2-19)中

$$\sigma_{ij} \text{ 為剪應力張量(stress tensor): } \sigma_{ij} \equiv \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (2-20)$$

$$\tau_{ij} \text{ 為次格點剪應力項(subgrid-scale stress): } \tau_{ij} \equiv \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2-21)$$

為了讓 LES 方程式成為封閉系統(close system)，因此需要對(2-21)式做模式化，則可得：

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (2-22)$$

$$\text{其中 } \bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-23)$$

根據 Smagorinsky 所提出的 SGS 模式，次格點渦流黏滯項可模式化為

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (2-24)$$

其中 $|S| \equiv \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$ ，次格點之混合長度 L_s 可由下式求得。

$$L_s = \min(kd, C_s V^{1/3}) \quad (2-25)$$

在(2-25)中， k 為 von Kármán 常數， d 為距離壁面的長度， C_s 為 smagorinsky 常數，一般為 0.1。

2-5 Ffowcs Williams-Hawkings 方程式(FW-H 方程式)

FW-H 方程式是經由推導連續方程式以及 Navier-Stokes 方程式所求出的非齊次波方程式，方程式中包含了單極聲源項、偶極聲源項以及四極聲源項。FW-H 方程式可以表示如下式：

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (T_{ij} H(f)) - \frac{\partial}{\partial x_i} [P_{ij} n_{ij} + \rho u_i (u_n - v_n) \delta(f)] + \frac{\partial}{\partial t} [(\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)) \delta(f)] \quad (2-26)$$

其中

u_i ：在 x_i 方向上之速度分量

u_n ：垂直於表面之速度分量

v_i ：在 x_i 方向上之表面速度分量

v_n ：垂直於表面之表面速度分量

a_0 ：遠場中的聲速

$\delta(f)$ ：Dirac function

$H(f)$ ：Heaviside function

p' 是遠場中的聲壓 ($p' = p - p_0$)。而 T_{ij} 為 Lighthill 壓力張量，定義如下式

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (2-27)$$

P_{ij} 為壓縮張量 (compressive stress tensor)。由 Stokesian 流體可表示為

$$P_{ij} = P \delta_{ij} - \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (2-28)$$

在 FW-H 方程式的聲源項中，第一項為四極聲源項，通常為來自於尾流與剪應力層中的紊流擾動。第二項為偶極聲源項，其聲源是由於固體表面上的壓力擾動所造成的。最後一項為單極聲源項，主要為移動邊界造成流體位移所產生的聲源。FW-H 方程式的解是利用自由空間的 Green's function 求得的，其中包含了面積分與體積分項。面積分項為單極與偶極聲源以及部份四極聲源的解，而體積分項則是聲源表面外的四極聲源解。在低流速時，體積分項可以被忽略，所以其解可以寫成：

$$p'(\vec{x}, t) = p'_T(\vec{x}, t) + p'_L(\vec{x}, t) \quad (2-29)$$

其中

$$4\pi p'_T(\vec{x}, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 (\dot{U}_n + U_{\dot{n}})}{r^2 (1 - M_r)^3} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 U_n (r\dot{M}_r + a_0 (M_r - M^2))}{r^2 (1 - M_r)^3} \right] dS \quad (2-30)$$

$$4\pi p'_L(\vec{x}, t) = \frac{1}{a_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{L}_r}{r^2 (1 - M_r)^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{L_r - L_M}{r^2 (1 - M_r)^2} \right] dS + \frac{1}{a_0} \int_{f=0} \frac{L_r (r\dot{M}_r + a_0 (M_r - M^2))}{r^2 (1 - M_r)^3} dS \quad (2-31)$$

$$U_i = v_i + \frac{\rho}{\rho_0} (u_i - v_i) \quad (2-32)$$

$$L_i = P_{ij} \hat{n}_j + \rho u_i (u_n - v_n) \quad (2-33)$$

在式(2-30)與式(2-31)中的方括號為在延遲時間(retarded time)下的積分項。由於聲源所產生的壓力波會經過一段時間後才會傳到某觀察點處，所以在觀察點處聽到的聲音會比聲源產生聲音的時間較慢，因此考慮延遲時間可以使結果更加符合實際現象。延遲時間 τ 定義如下：

$$\tau = t - \frac{r}{a_0} \quad (2-34)$$

t 為實際時間， r 為聲源與觀察點之間的距離。

2-6 分貝值(dB, decibel)計算

一般上，聲音量測的尺度為分貝，其符號為 dB。分貝值基本上為一個對數尺度，採用對數尺度的主要原因是聲音的動態範圍非常廣，同時人耳對於音量的感知也比較接近對數尺度。聲音分貝值的表示式如下：

聲強位準(sound intensity level):

$$IL = 10 \times \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \text{ dB} \quad (2-35)$$

其中:

I : 聲強(sound intensity)

I_{ref} : 參考聲強(reference sound intensity), $I_{ref} = 1 \times 10^{-12} (W/m^2)$

聲壓位準(sound pressure level):

$$SPL = 20 \times \log_{10} \left(\frac{P'}{P_{ref}} \right) \text{ dB} \quad (2-36)$$

其中:

P' : 聲壓(sound pressure)

P_{ref} : 參考聲壓(reference pressure intensity), $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} (Pa)$

聲場能量(acoustic power):

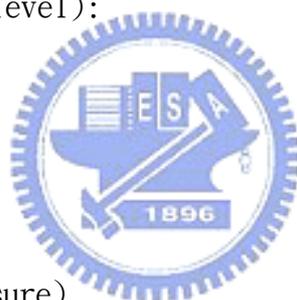
$$L_p = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_A}{P_{A,ref}} \right) \text{ dB} \quad (2-37)$$

$$P_A = \alpha \rho \left(\frac{u^3}{l} \right) \frac{u^5}{a_0^5} \quad (2-38)$$

其中:

α : 常數, 0.1

l : 紊流尺度



$P_{A,ref}$: 參考能量(reference acoustic power), $P_{A,ref} = 1 \times 10^{-12} (W/m^2)$

總分貝值的計算則是將各頻率上的分貝值轉回線性尺度相加, 再取分貝值, 如下式所示:

$$L_T = 10 \times \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right) \text{ dB} \quad (2-39)$$

其中:

L_T : 總分貝值

L_i : 第 i 個頻率成份的聲壓或聲強分貝值

N : 總頻率成份

人耳所能聽見的聲音, 其頻率範圍大約在 20Hz 到 20kHz 之間。由於人耳對不同頻率的聲音有不同的敏感度, 測量儀器都會對所量測到的聲場物理量作加權轉換, 其目的在於將量測訊號轉換為人所能夠感受的聲音大小。在一般噪音量測中, 最為廣泛使用的加權方法為 A 加權, 如圖 2-6 所示, 其方程式如下式:

$$W_A = 10 \log \left[\frac{1.562339 f^4}{(f^2 + 107.65265^2)(f^2 + 737.86223^2)} \right] + 10 \log \left[\frac{2.242881 \times 10^{16} f^4}{(f^2 + 20.598997^2)^2 (f^2 + 12194.22^2)^2} \right] \quad (2-40)$$

其中:

W_A : 加權值(dB)

f : 頻率

與其它不同的加權方法比較, 此種加權方式與人耳的感覺最接近。

表 2-1 標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式係數值

C_μ	σ_k	σ_ε	σ_h	σ_m	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 4}$
0.09	1.0	1.22	0.9	0.9	1.44	1.92	-0.33

* $C_{\varepsilon 3} = 1.44$ for $p_B > 0$ and is zero otherwise



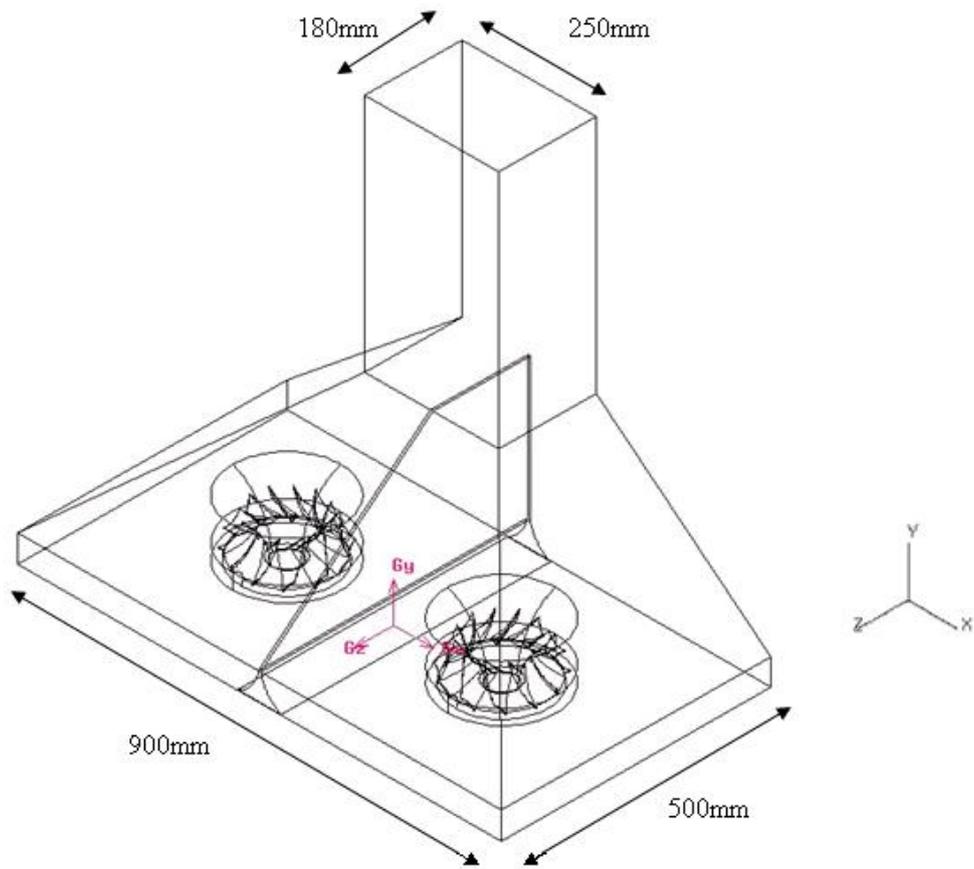


圖 2-1 抽油煙機模型示意圖

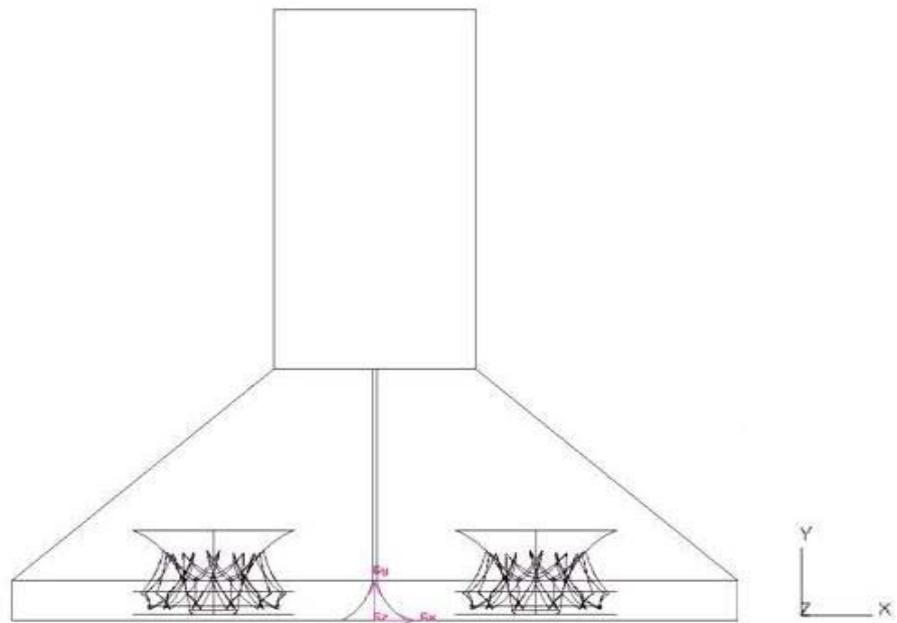


圖 2-2 抽油煙機前視圖

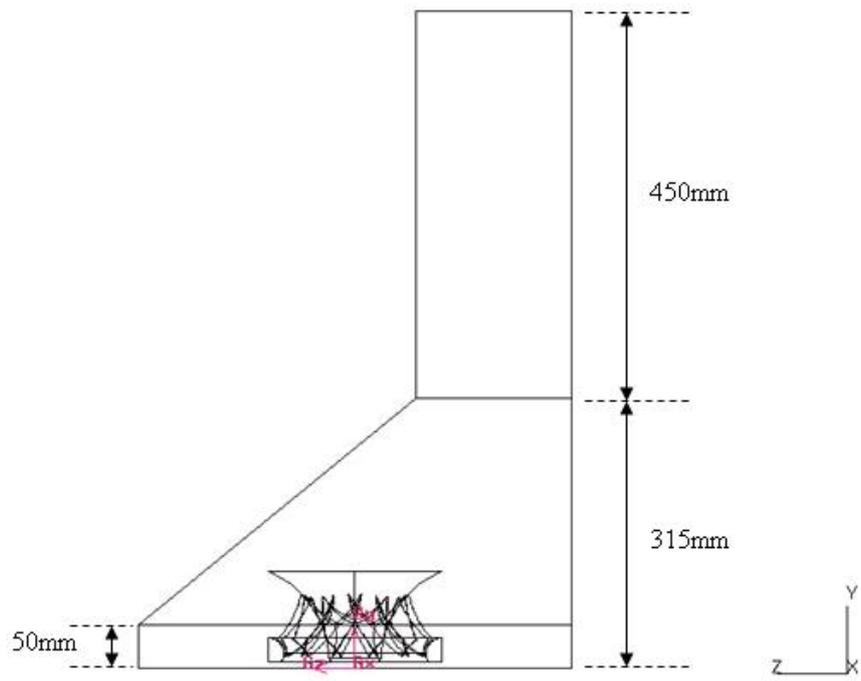


圖 2-3 抽油煙機側視圖

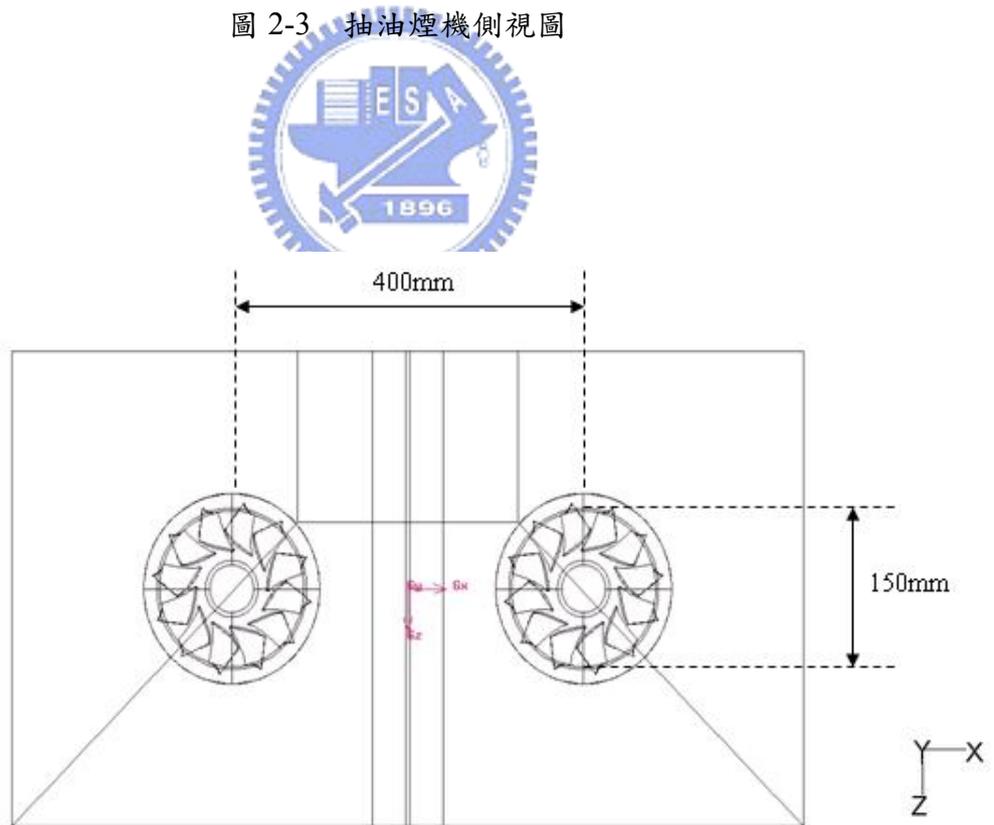


圖 2-4 抽油煙機俯視圖

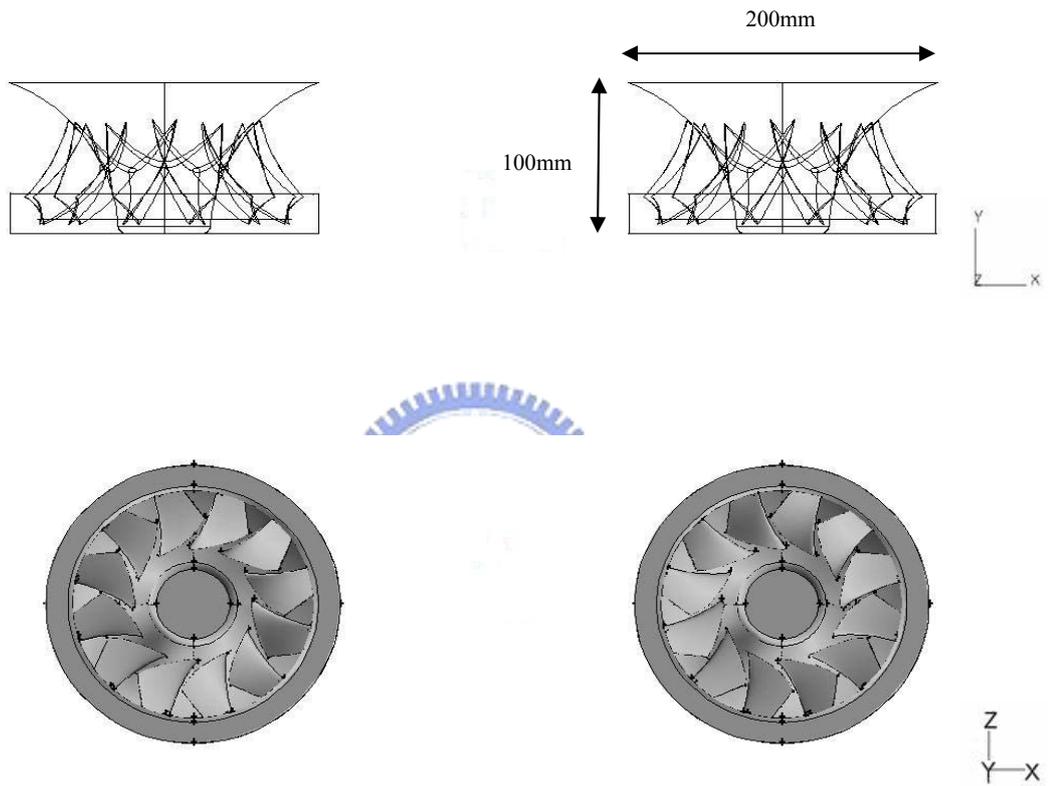


圖 2-5 抽油煙機風扇示意圖

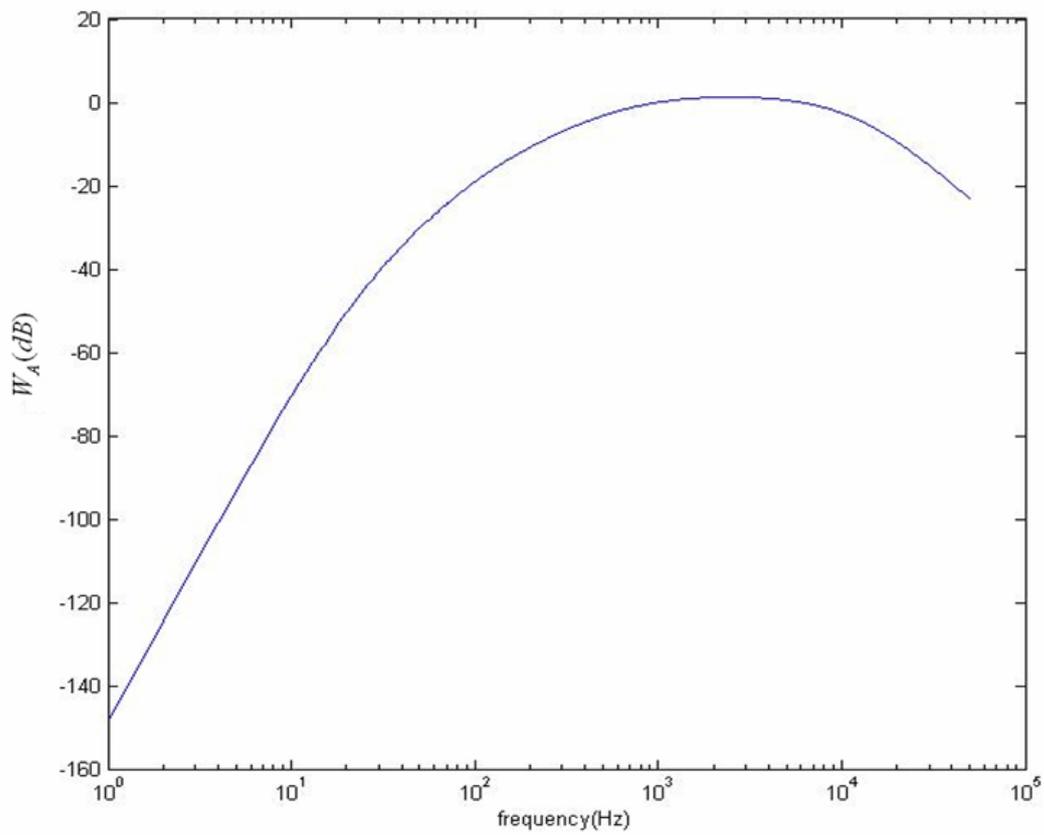


圖 2-6 A 加權曲線示意圖

第三章 數值方法

3-1 數值方法

本文中利用數值方法，求解抽油煙機內部之流場變化，此數值方法乃是應用流體力學輔助軟體 Fluent 作為計算平台。利用有限容積法(finite-volume)疊代解三維 Navier-Stokes equations，以及分別用 SIMPLE 演算法計算穩態流場與 PISO 演算法來計算暫態流場。各物理量變數定義於每個控制容積的中央，離散方程式則是將統御方程式對每一個控制容積做積分而求得，如圖 3-1 所示，計算過程流程圖示於圖 3-2。

有限體積法的守恆方程式(conservation equation)可表示如下：

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \sum_j \int_{A_j} (\rho \phi \vec{v} - \Gamma_\phi \nabla \phi) \cdot d\vec{A} = \int_V S_\phi dV \quad (3-1)$$

其中 ϕ 為任意相關變數， Γ_ϕ 為擴散係數及 S_ϕ 為來源係數。

式(3-1)中的第一項可以離散如下式：

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV \approx \frac{(\rho \phi V)_p^n - (\rho \phi V)_p^o}{\delta t} \quad (3-2)$$

式(3-1)中的第二項可以將其分成對流項(convection)以及擴散項(diffusion)

$$\sum_j (\rho \vec{v} \phi \cdot \vec{A})_j - \sum_j (\Gamma_\phi \vec{\nabla} \phi \cdot \vec{A})_j \equiv \sum_j C_j - \sum_j D_j \quad (3-3)$$

擴散項用中點近似法可下列來表示：

$$D_j \approx \Gamma_{\phi,j} \left[f_j^l (\phi_P - \phi_N) + (\vec{\nabla} \phi \cdot \vec{A} - f_j^l \vec{\nabla} \cdot \vec{d}_{PN})_j \right] \quad (3-4)$$

其中 f_j 為幾何因子， \vec{d}_{PN} 為 P 到 N 之向量， $\Gamma_{\phi,j}$ 為面擴散係數。

對流項以 Upwind Scheme 處理，根據(3-3)式的推導，對流項可由下列表示：

$$C_j \equiv F_j \begin{cases} \phi_P & , F_j \geq 0 \\ \phi_{N+} & , F_j < 0 \end{cases} \quad (3-5)$$

$$F_j \equiv (\rho \vec{v} \cdot \vec{A})_j \quad (3-6)$$

F_j 為通過面 j 和 ϕ_j 的質通量如圖 3-3 所示。

式(3-1)中的第三項為來源項(source term)

$$\int_V S_\phi dV \approx s_1 - s_2 \phi_p \quad (3-7)$$

綜合上述，(3-1)式可表示為：

$$a_p \phi_p^n = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb}^n + s_1 + B_p \phi_p^o \quad (3-8)$$

其中

$$a_p \equiv \sum_{nb} a_{nb} + s_2 + B_p \quad (3-9)$$

$$B_p \equiv (\rho V)^o / \delta t \quad (3-10)$$



PISO 數值計算

1. 基本方程式：

(1) 有限容積動量方程式：

$$a_p u_{i,p}^n = H(u_{i,nb}^n) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^n - P_{N-}^n) \quad (3-11)$$

其中

$$H(u_{i,nb}^n) \equiv \sum_{nb} a_{nb} u_{i,nb}^n \quad (3-12)$$

而 $D_p (P_{N+}^n - P_{N-}^n)$ 近似於有限容積法的壓力梯度 $\partial p / \partial x_i$ ， D_p 為幾何係數，如圖 3-4。

(2) 有限容積連續方程式：

$$B_p^n - B_p^0 + \sum_j (\rho^n u_j^n A_j) = 0 \quad (3-13)$$

u_j 為格點單位面積 A_j 的正向速度

為了計算質通量(mass flux)以及推導壓力方程式，方程式改用點表示法，

由(3-11)式可推導出：

$$\bar{a}_p u_j^n = \overline{H(u_{i,nb}^n)} + \bar{B}_p^0 u_{i,p}^0 + \bar{s}_1 + \bar{D}_p (P_P^n - P_{N+}^n) \quad (3-14)$$

將(3-14)式代入(3-13)式可推導出壓力方程式：

$$a_p P_P^n = \sum a_{nb} P_{nb}^n + s_1 \quad (3-15)$$

其中 s_1 為來源項(source term)，為點速度 u_i^n 和 u_i^0 的函數。

2. 解析過程：

(1) 預測計算階段(predictor term)：

$$a_p u_{i,p}^{(1)} = H(u_{i,nb}^{(1)}) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^{(0)} - P_{N-}^{(0)}) \quad (3-16)$$

其中 $P^{(0)}$ 為剛開始計算時的壓力值，初步暫時解 $u_j^{(1)}$ 可由方程式(3-14)得到。

(2) 第一次修正計算階段(first corrector stage)：

動量方程式的運算可用以下表示：

$$a_p u_{i,p}^{(2)} = H(u_{i,nb}^{(1)}) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^{(1)} - P_{N-}^{(1)}) \quad (3-17)$$

壓力方程式可表示為：

$$a_p P_p^{(1)} = \sum_{nb} a_{nb} P_{nb}^{(1)} + s_1 \quad (3-18)$$

可解得壓力場 $P^{(1)}$ ，其中 s_1 為已知點速度 $u_i^{(1)}$ 和 $u_i^{(0)}$ 的函數，下次運算速度 $u_i^{(2)}$ 和 $u_j^{(2)}$ 可以(3-17)計算得到。

(3) 外加修正計算階段(additional corrector stage)

$$a_p u_{i,nb}^{(q+1)} = H(u_{i,nb}^{(q)}) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^{(q)} - P_{N-}^{(q)}) \quad (3-19)$$

$$a_p P_p^{(q)} = \sum_{nb} a_{nb} P_{nb}^{(q)} + s_1 \quad (3-20)$$

$q=1,2,3\dots$ 為修正計算等級，其中 a_p 為常數，只要增加 q 值即可完成數值解析得到的近似值。



計算流場時是以下兩項作為收斂條件：

1. 每一個時間步階(time step)的疊代次數。
2. 每一次疊代後所有控制容積內的殘值改變率小於給定值，即：

$$C_\phi^k = \sum (|B_p^n \phi_p^n| - |B_p^o \phi_p^o|) < (\text{給定值}) \quad (3-21)$$

本文在解流場時，所給的值為 0.001。

3-2 暫態滑移網格(sliding mesh)

本文主要分析抽油煙機內部之流場變化，抽油煙機風扇葉片轉動的處理方式則使用滑移網格進行。如圖 3-5 所示。

由圖 3-5 可知，靠近交界面上的網點 (vertex number) 分別為 1-6 點及 11-16 點。而在網格中心的編號則為上下交界面定義的上下交界面編號，其分別為 1-5 及 6-10。在滑移過程中，則以 Δt 時間乘上對應的角速度或移動速度(視移動為等角速度移動或是平移移動)，則此值為位移距離。首先移動下面從屬網格之後改變各網點位置連接關係，之後再移動交界面位置，最後再次移動下面從屬網格以恢復原本因移動而扭曲的網格，並更新上下邊界的連接關係，如原本 (1) 部分 1 和 6 之邊界相接，之後至(4) 則改為 2 和 6 相接臨。網點亦是如此。而在每一步進時均計算整個區域內流場關係，以達到暫態轉動的效果。

此暫態滑移網格計算方式於每一次時間步進時， Δt 不可過大，否則位移距離會過大，否則造成網格修正的困難度及扭曲過於嚴重，使得流場發散而無法收斂。



3-3 網格品質

在求解流場的過程中，必需建立流場計算網格，以其設定邊界作為計算的迭代。而網格品質的好壞卻可以直接影響於電腦計算速度之快慢與流場收斂的趨向及穩定性。更甚者其流場結果之正確性與否也和網格建立有極大的影響。

一般網格可分為結構(structure)網格與非結構(unstructured)網格，不論是圓柱或是不規則形狀，均可以非常適當的表現出實際形狀。好的網格品質必需具備下列條件：一、平滑，二、正交性好，三、適合物理模式足夠網格數。由於抽油煙機風扇的幾何外形複雜變化大，風扇葉片梯度變化較大的區塊採用較密集的網格。由於抽油煙機風扇葉片數量較多，因此對於這部份的網格處理也需要非常的小心。此區域的網格大小必需小於空間的尺寸，否則在葉片與葉片之間的區域無法建立品質好的網格。

本文配合抽油煙機風扇之形狀，在風扇區域採用較密集的非結構網格，如圖 3-6 所示，在抽油煙機內部區域則採用結構與非結構網格兩種，以避免正交性差以及網格品質差所造成計算誤差及計算時間增長。



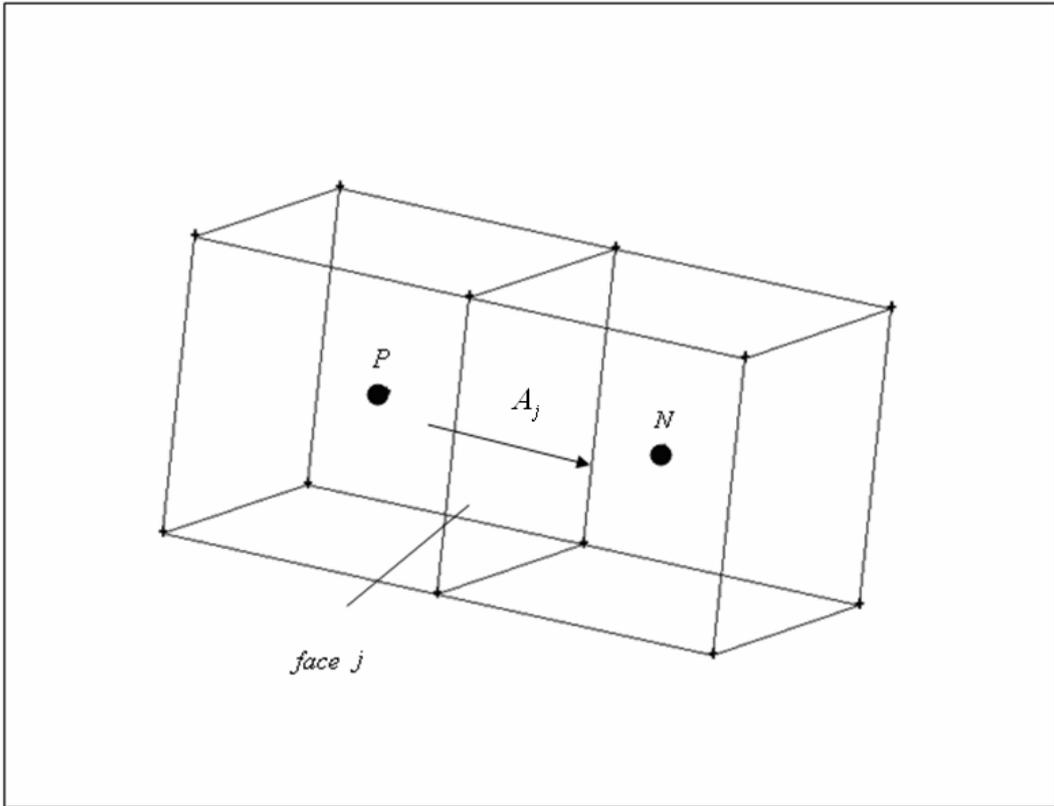


圖 3-1 相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖

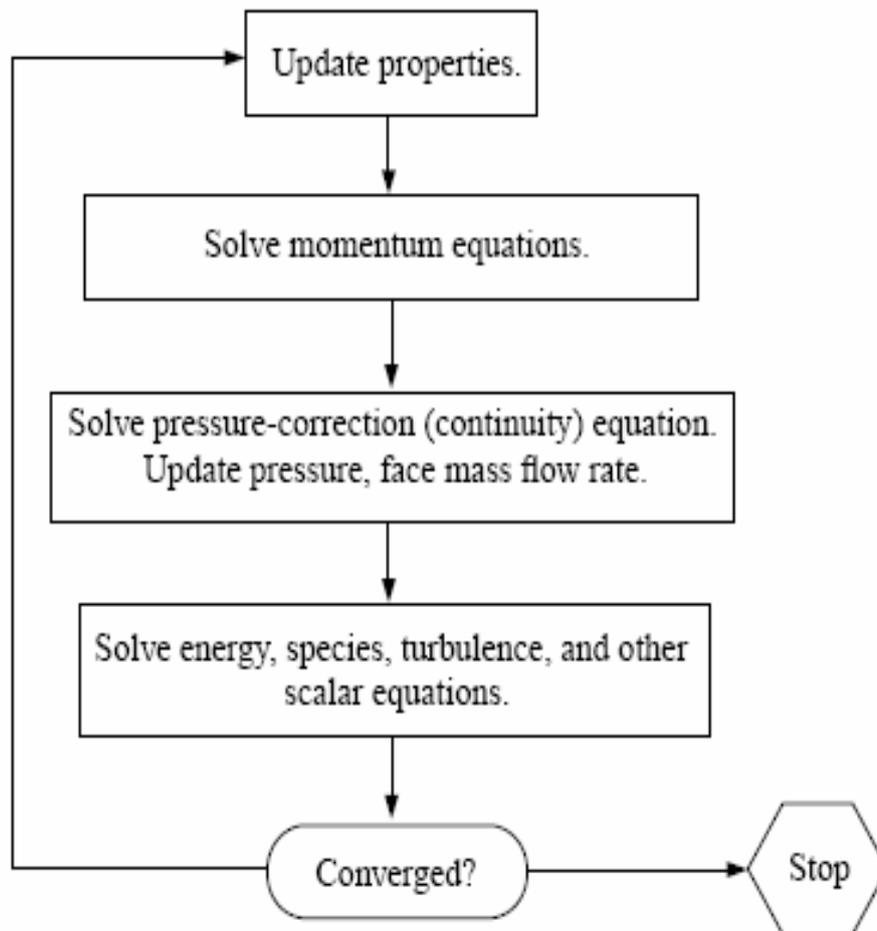


圖 3-2 計算流程圖

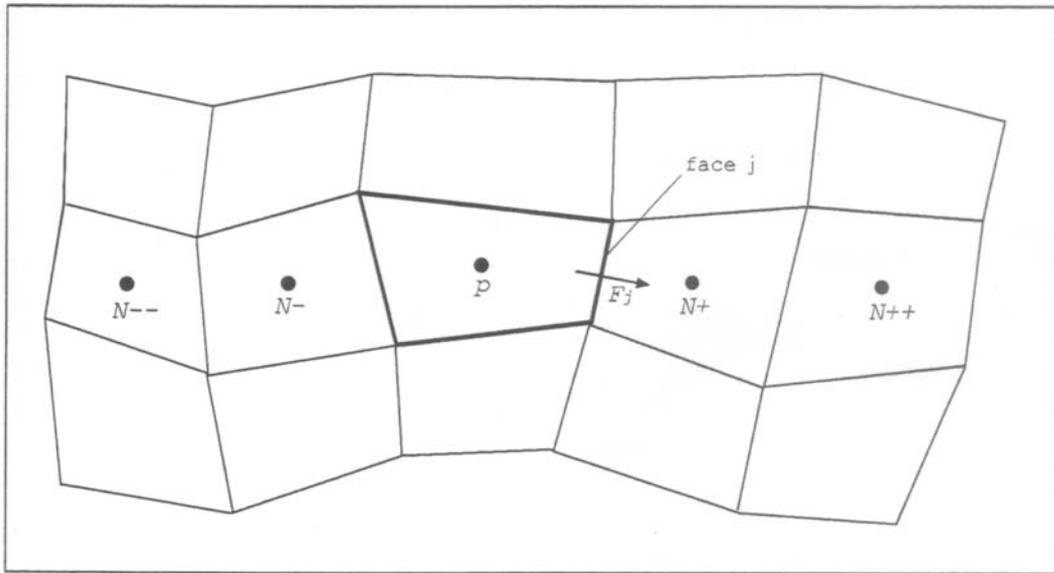


圖 3-3 對流通量示意圖

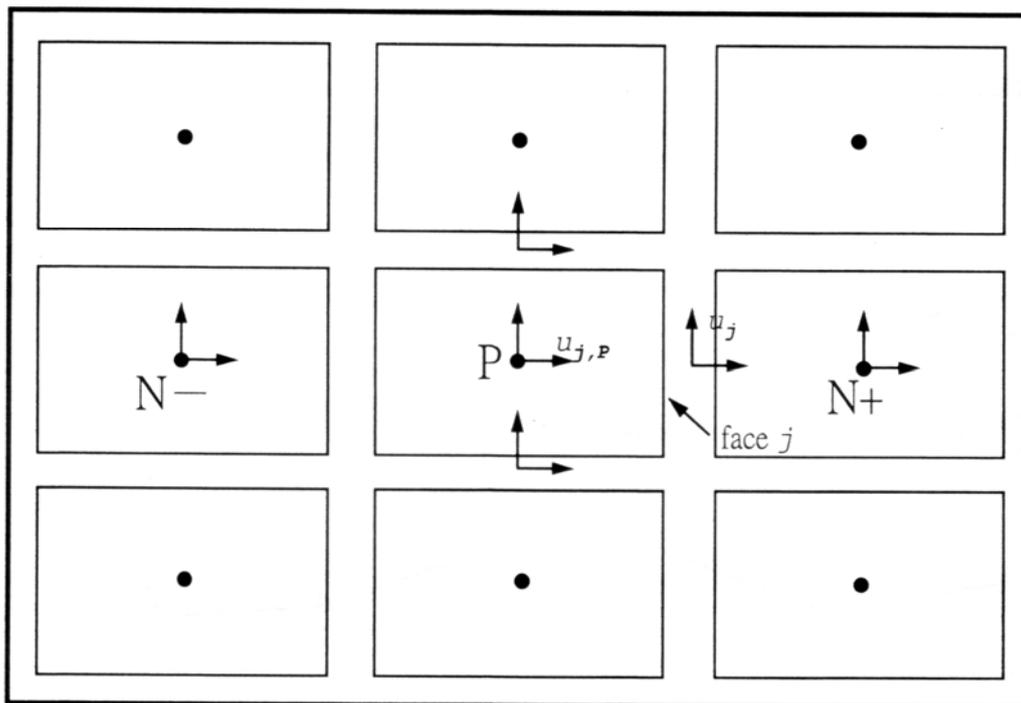


圖 3-4 PISO 示意圖

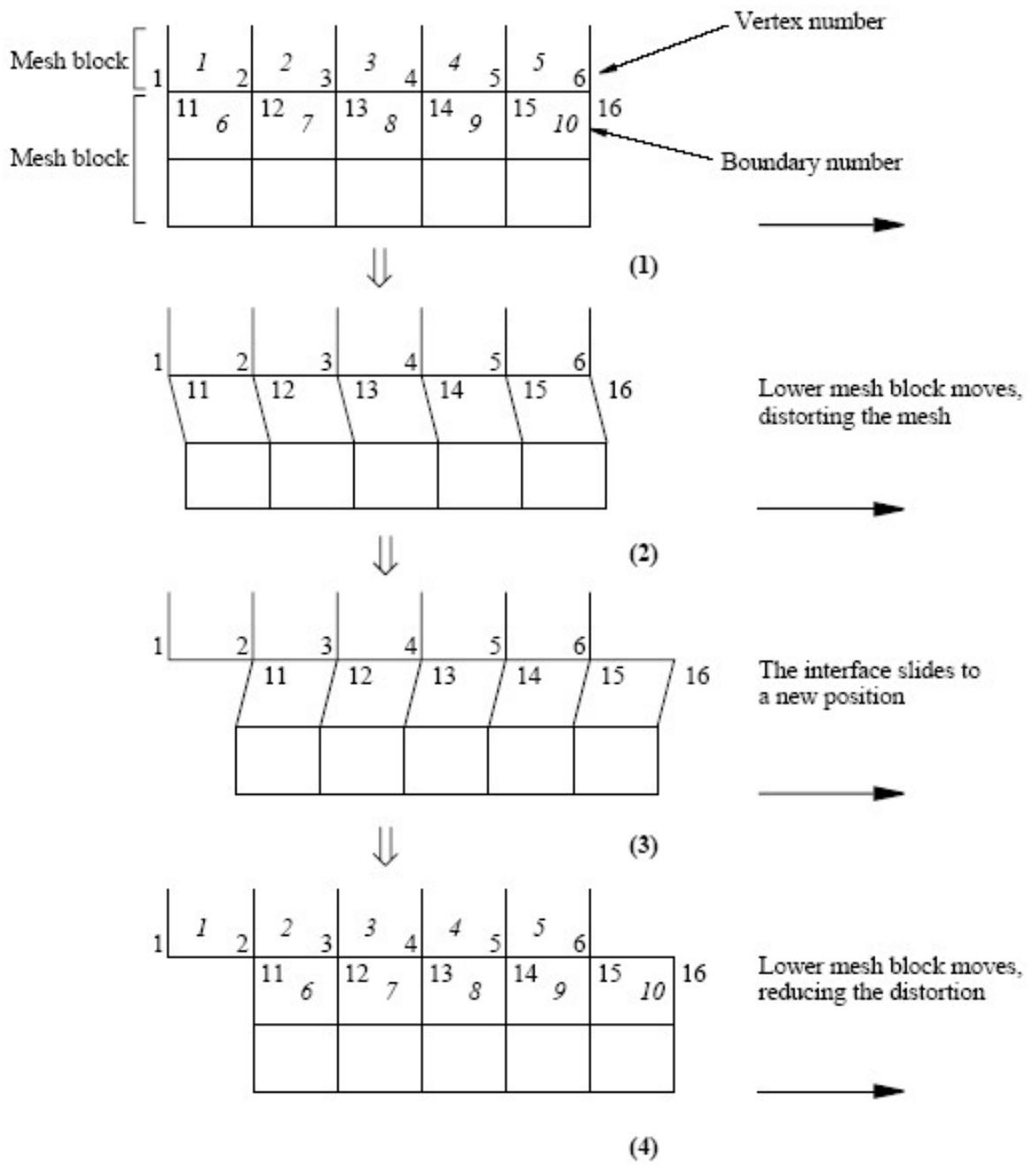


圖 3-5 滑移網格進行方式說明示意圖

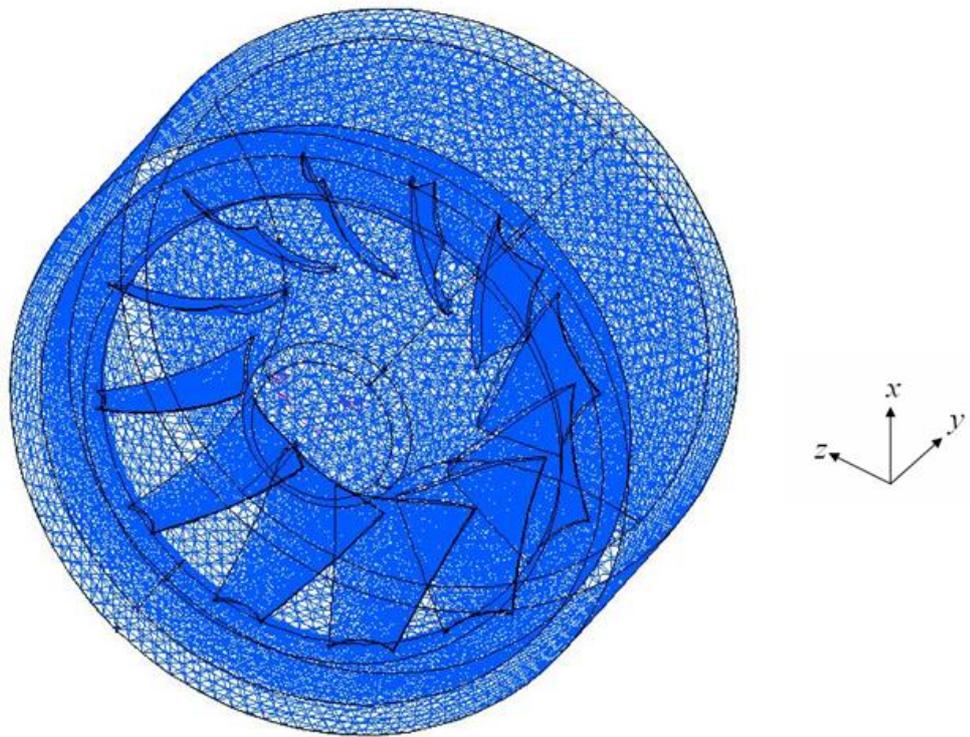


圖 3-6 抽油煙機風扇網格示意圖

第四章 結果與討論

本章將對數值計算所得結果做分析，其可分為兩部份，4-1 為流場模擬分析，4-2 為聲場模擬分析。流場部份的觀察重點為抽油煙機內部整體流場結構之分析與內部壓力變化對抽油煙機外殼的影響。聲場部份則是抽油煙機內部與外殼之聲場能量與噪音頻譜之分析。

抽油煙機的模型如圖 4-1 所示，其包含五個部份，爐台、風扇、抽油煙機、煙囪以及通風管道。為了簡化計算，不考慮爐台部份的結構，流場模型則如圖 4-2 所示。

由於抽油煙機數值模型相當複雜，無法以三維表面來顯示計算結果，且內部流場結果的呈現也是一件非常困難的事。因此在做流場分析的時候，必須做截面切割的動作，選取幾個代表性的截面來呈現，藉由截面顯示之結果來呈現抽油煙機的內部流場結構，以利於流場的分析。

圖 4-3 為抽油煙機流場截面 A 與截面 B 之示意圖，截面 A 為抽油煙機風扇所處的位置上選取的一個截面，其目的在於從 Y 方向上觀察因風扇旋轉所造成的流場表現。為了觀察流體在抽油煙機流動的情況，因此在 X 方向上選取一個觀察截面，即截面 B。本文所使用的抽油煙機模型為雙風扇模型，且兩個風扇之間設有擋板，以避免風扇之間的相互干擾，因此抽油煙機之內部流場是屬於左右對稱的。在切割截面 B 時，由於中間擋板的關係，選於 $X=50\text{mm}$ 的位置處進行切割的動作。

圖 4-4 則為抽油煙機流場截面 C 與截面 D 之示意圖，截面 C 同時切割在抽油煙機入口處與風扇上，透過此截面可以明顯地觀察到流體被抽油煙機吸入，以及經過風扇加壓排出後的情況。而截面 D 則是選擇在風扇後方，即 $Z=-150\text{mm}$ 處進行切割的動作，這個部份能夠清楚地從 Z 方向觀察到經由風扇旋轉帶動的流體從抽油煙機內部排出的情況。以上的四個截面主要是用以觀察抽油煙機內部流場中之速度與壓力的變化。

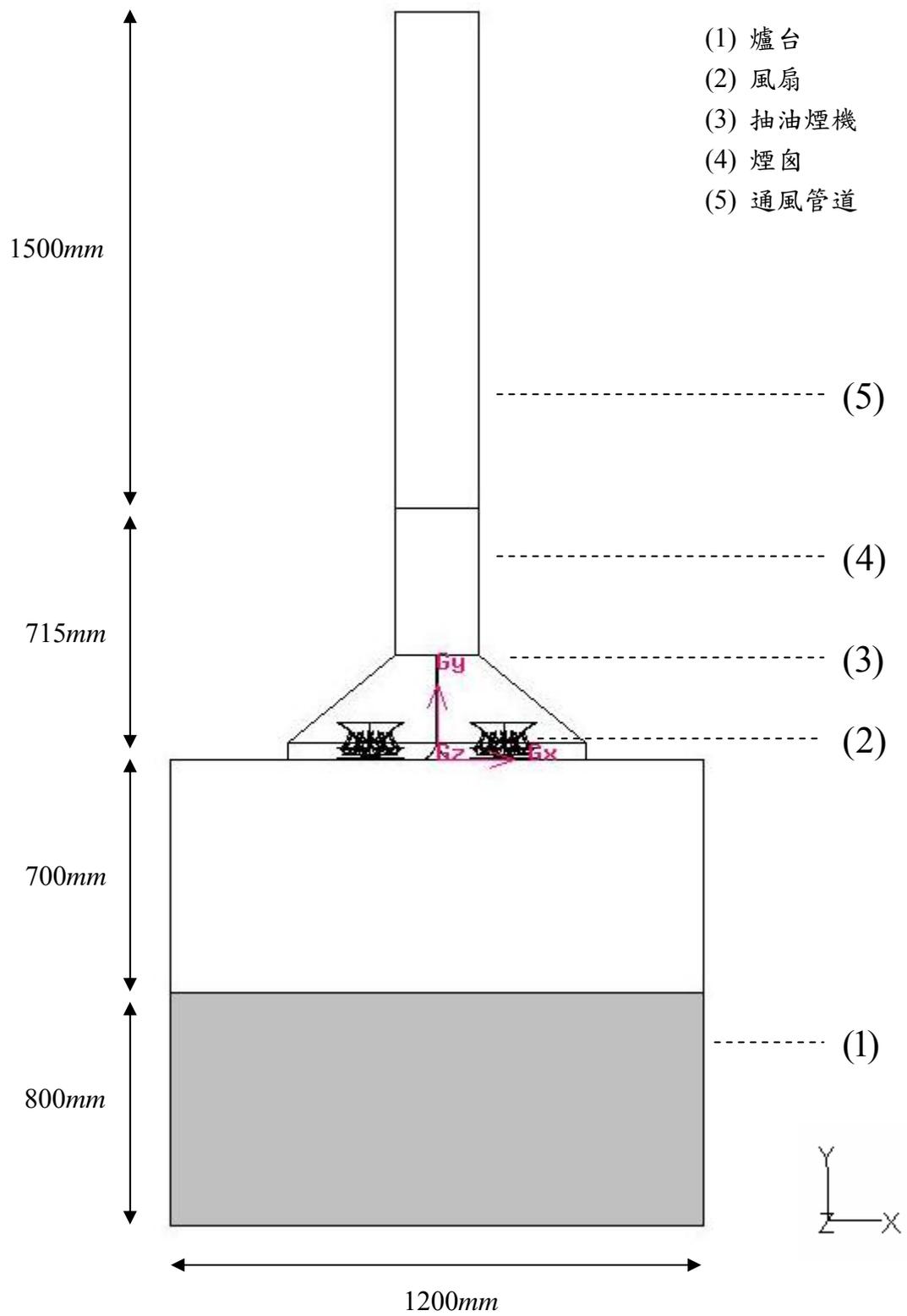


圖 4-1 抽油煙機示意圖

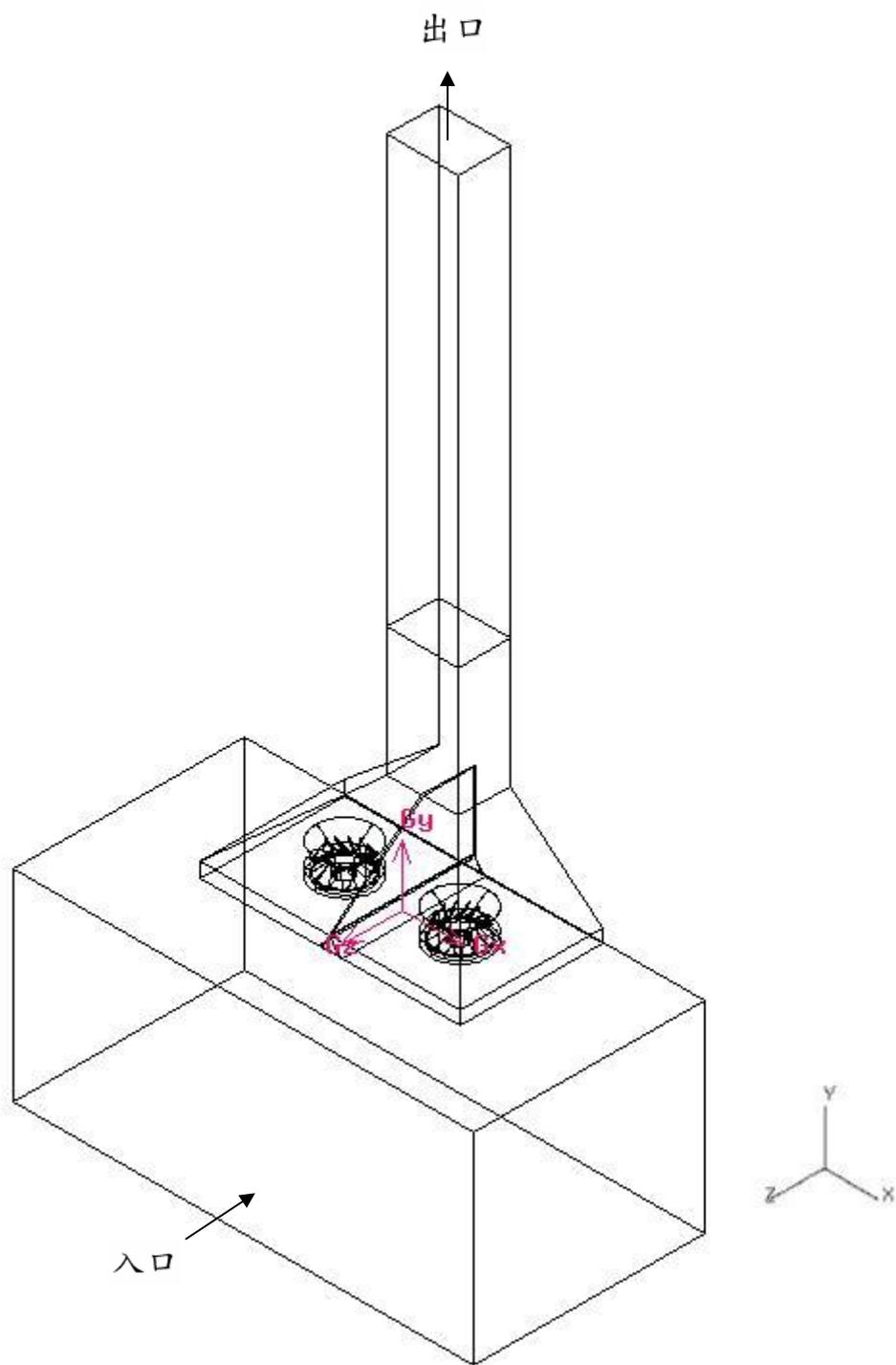


圖 4-2 抽油煙機之計算流場示意圖

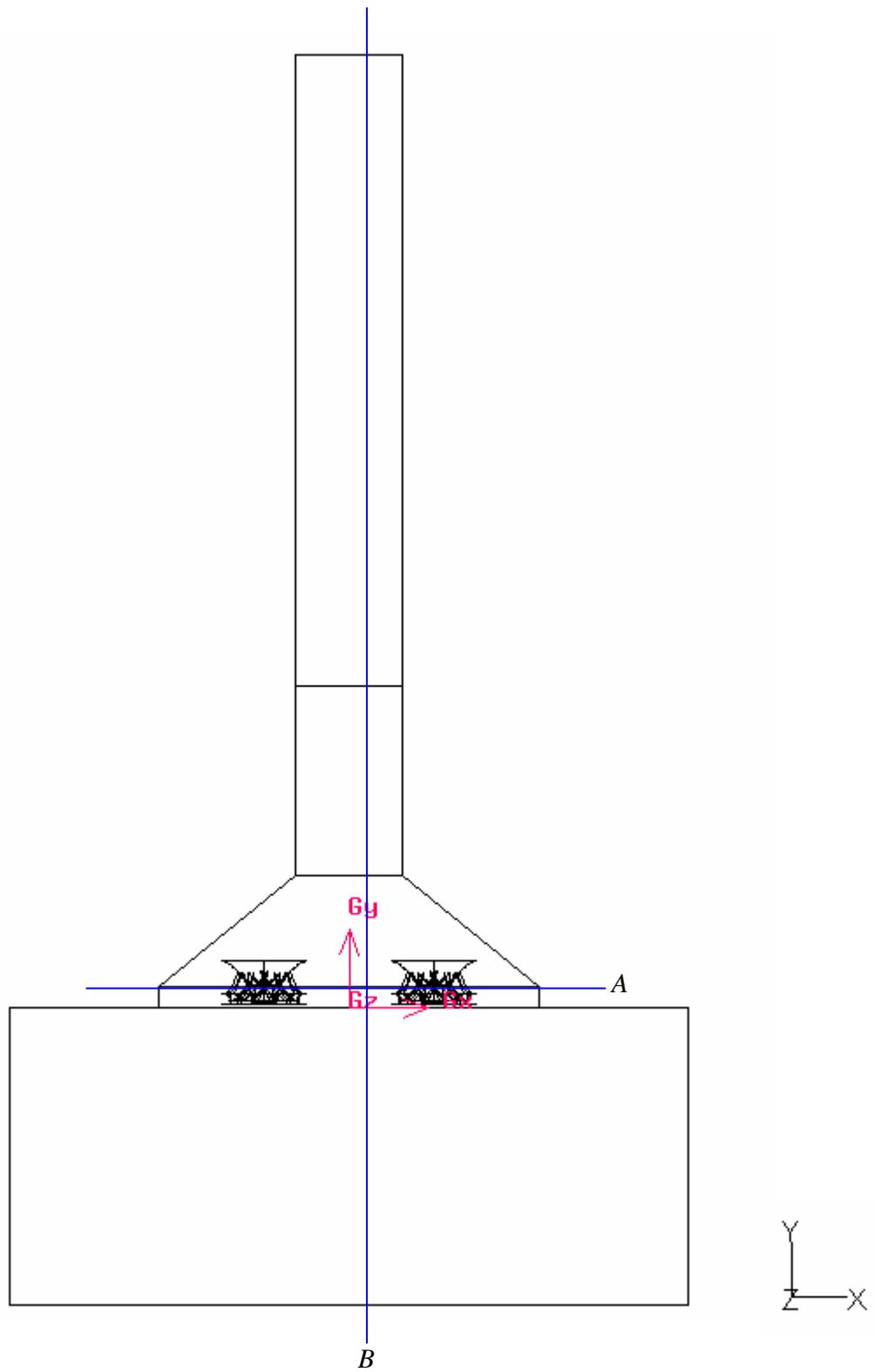


圖 4-3 抽油煙機流場截面 A 與截面 B 示意圖

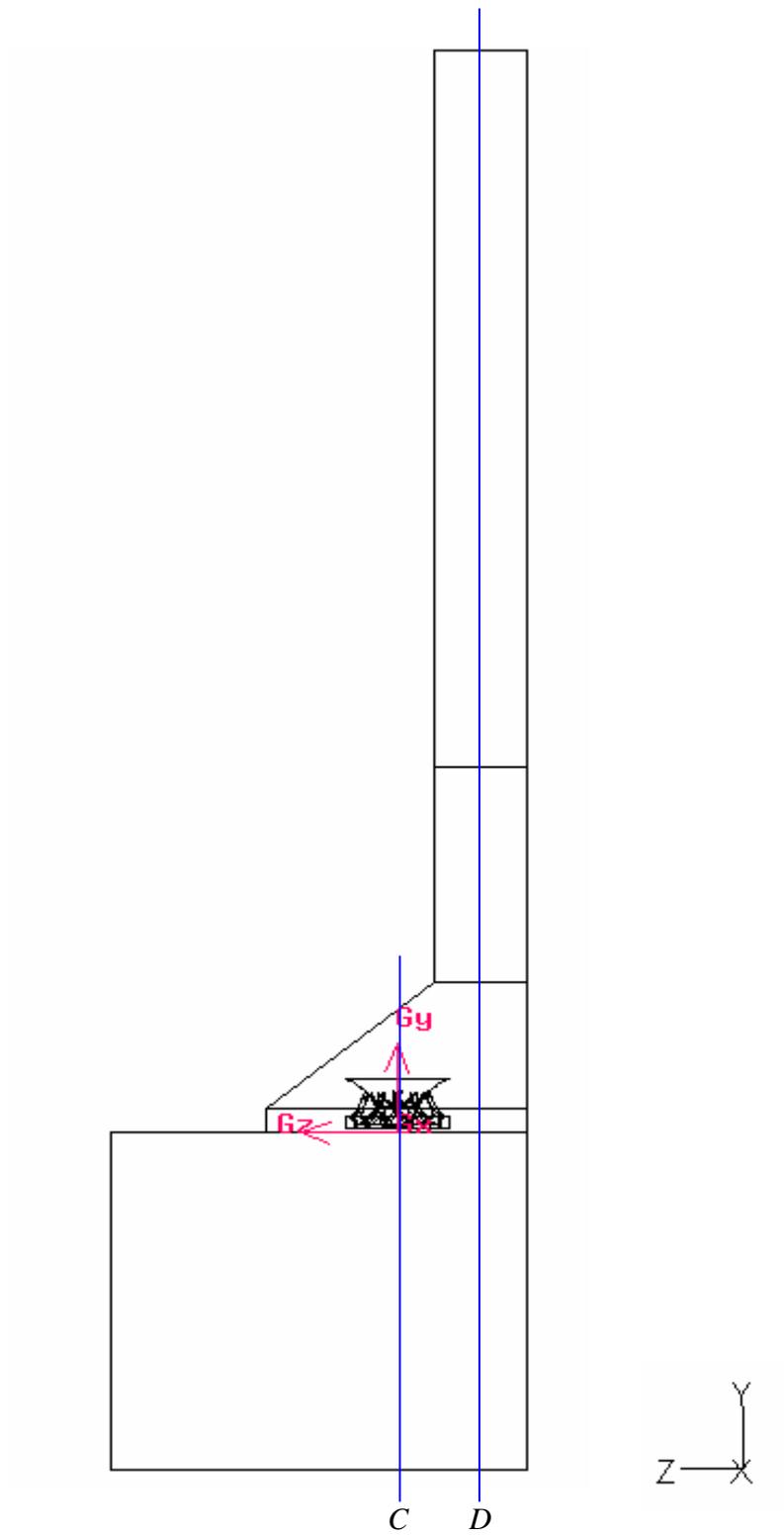


圖 4-4 抽油煙機流場截面 C 與截面 D 示意圖

4-1 抽油煙機流場模擬分析

在啟動抽油煙機後，流體會從入口處被吸入，經過風扇旋轉加壓後，吹向抽油煙機出口。抽油煙機風扇轉速為 3000rpm，兩個風扇轉速相同，總通風量為 $989.33\text{ m}^3/\text{hr}$ ，如表 4-1 所示。圖 4-5 到圖 4-6 為抽油煙機流場徑線(path line)觀測圖形，從這個圖形中可以清楚觀察到流體在整個抽油煙機流場中流動的情況。當流體被吸入到抽油煙機後，由於抽油煙機結構複雜、內部空間狹小以及風扇的高速旋轉，造成內部流場變得非常混亂，接著流體會往出口方向排出。

圖 4-7 到圖 4-11 為抽油煙機外殼壓力分佈圖，觀察外殼壓力分佈的主要原因是去了解外殼壓力分佈的狀況，找出外殼部份壓力變化較高的區域，因為聲場中壓力變動劇烈的區域也是噪音源所產生的地方。在這幾個圖中可以知道，外殼壓力較高的區域為流體經由風扇旋轉吹出後直接碰撞到壁面的區域，由於風扇是在高速下旋轉，因此所排出的流體也是以很高的速度撞擊抽油煙機外殼而形成高壓力分佈的區域。風扇在旋轉時會產生負壓效應將流體吸入，所以在抽油煙機入口處的風扇表面及其周圍均為負壓分佈，如圖 4-9 所示。

從圖 4-12 到圖 4-14 為抽油煙機內部 A 截面流場示意圖。在圖 4-12 中可以看出在風扇周圍所產生的負壓區域，因兩個風扇旋轉的方向不同，其流場壓力分佈會成對稱分佈。圖 4-13 與圖 4-15 為速度分佈圖及速度向量圖，透過這兩張圖可以看出抽油煙機內部的旋轉流場。而圖 4-15 到圖 4-17 則是抽油煙機內部 B 截面區域，從這幾張圖中可以清楚知道抽油煙機內部具有複雜速度與壓力變化，然而在出口部份則是較平順的流場。

圖 4-18 至圖 4-20 為從抽油煙機正面的方向去觀察其流場的情況，即 C 截面圖。由於風扇的高速旋轉以及抽油煙機內部狹小的空間，造成抽油煙機內部的流場變的非常混亂，流體被風扇吸入後會在抽油煙機內部打轉，因風扇旋轉的時候在會壓力面處形成高壓力區域，籍由此高壓力的能量將流體以高速吹出。在圖 4-20 中則可以觀察到流體被吸入的情況，從圖形中可以發現，在入口處部份的

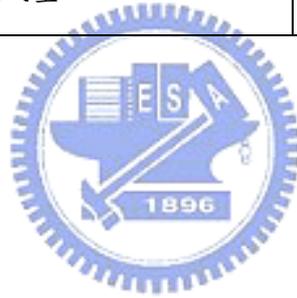
流場會整體往風扇處移動，當被吸入時流體的速度會明顯的增加，經過風扇加壓後會提升至其最大速度值，吹出後其速度則會慢慢降低。圖 4-21 到圖 4-22 為 C 截面速度向量於風扇區域之局部放大圖，從圖中可以明顯的看出由風扇吹出的流體在內部打轉所產生的渦流。

圖 4-23 至圖 4-25 為抽油煙機風扇後方 $Z=-150\text{mm}$ 的流場截面圖，這幾張圖形顯示由風扇旋轉帶動的流體從抽油煙機內部排出的情況。在抽油煙機之煙囪部份屬於漸縮的區域，因此在進入煙囪區域會有渦流的產生，之後則為較平滑的流場。圖 4-26 與圖 4-27 為風扇表面的壓力分佈圖，風扇表面的壓力分佈在吸入面處為負壓分佈，利用負壓效應將流體吸入；在壓力面則為正壓力分佈，以高壓狀態將流體吹出。



表 4-1 抽油煙機風扇轉速與通風量

	轉速(rpm)	通風量(m^3/hr)
左邊風扇	3000	496.22
右邊風扇	3000	493.10
總通風量		989.33



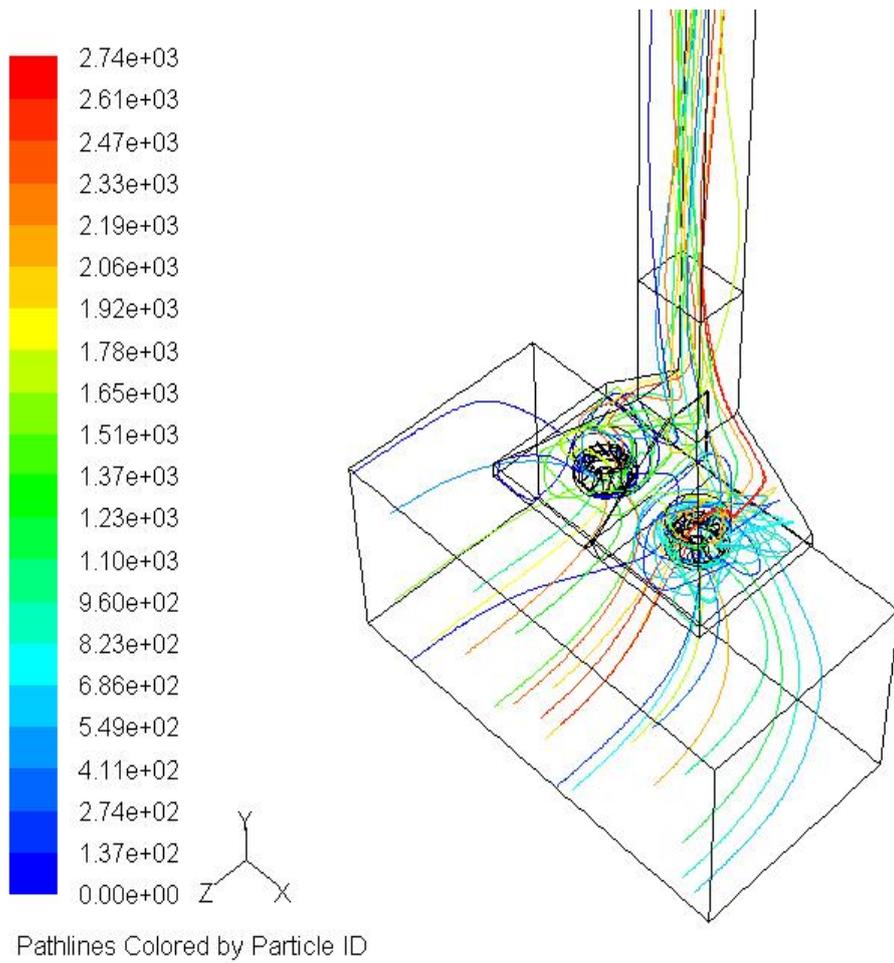


圖 4-5 抽油煙機流場徑線示意圖

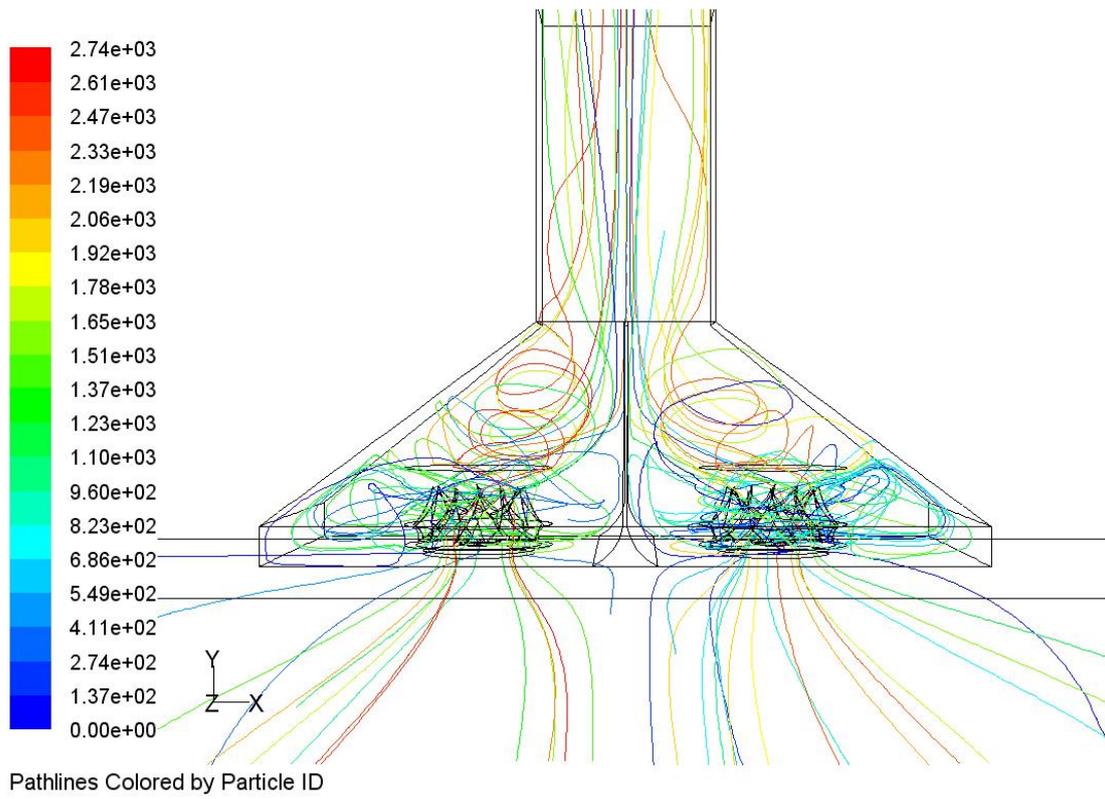


圖 4-6 抽油煙機流場徑線前視圖

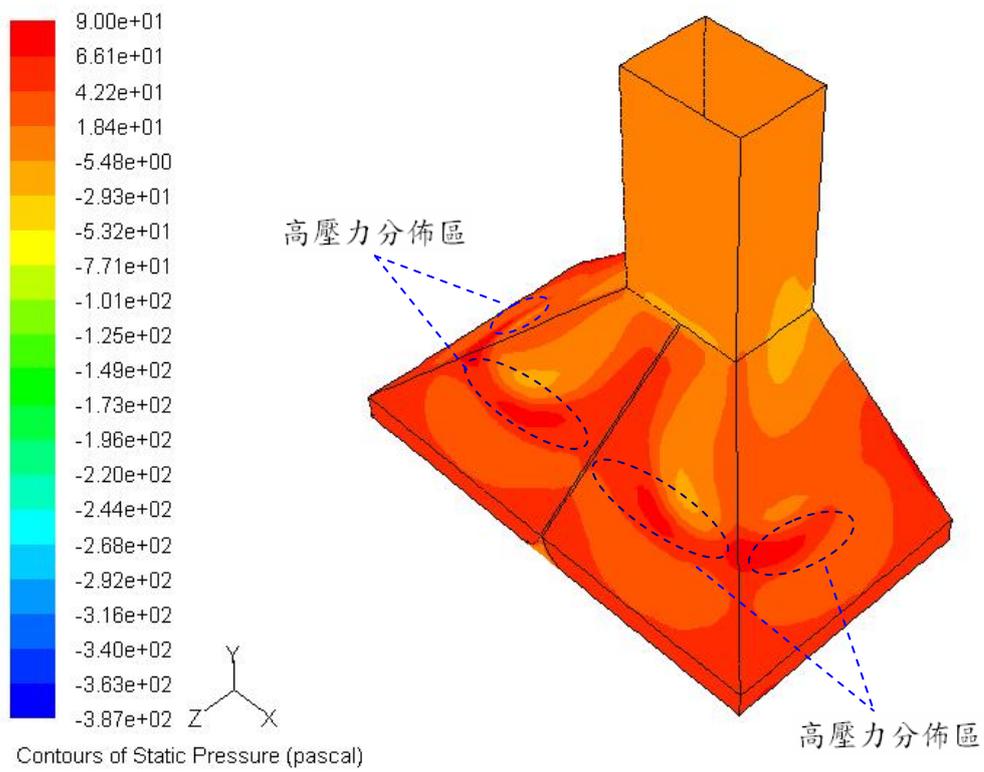


圖 4-7 抽油煙機外殼壓力分佈示意圖

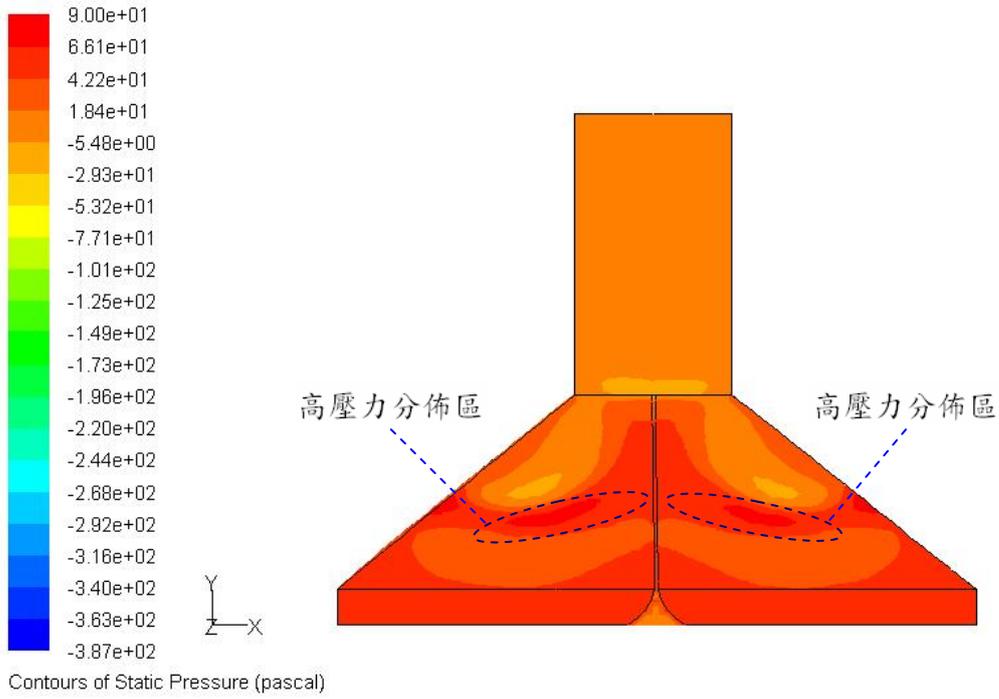


圖 4-8 抽油煙機外殼壓力分佈前視圖

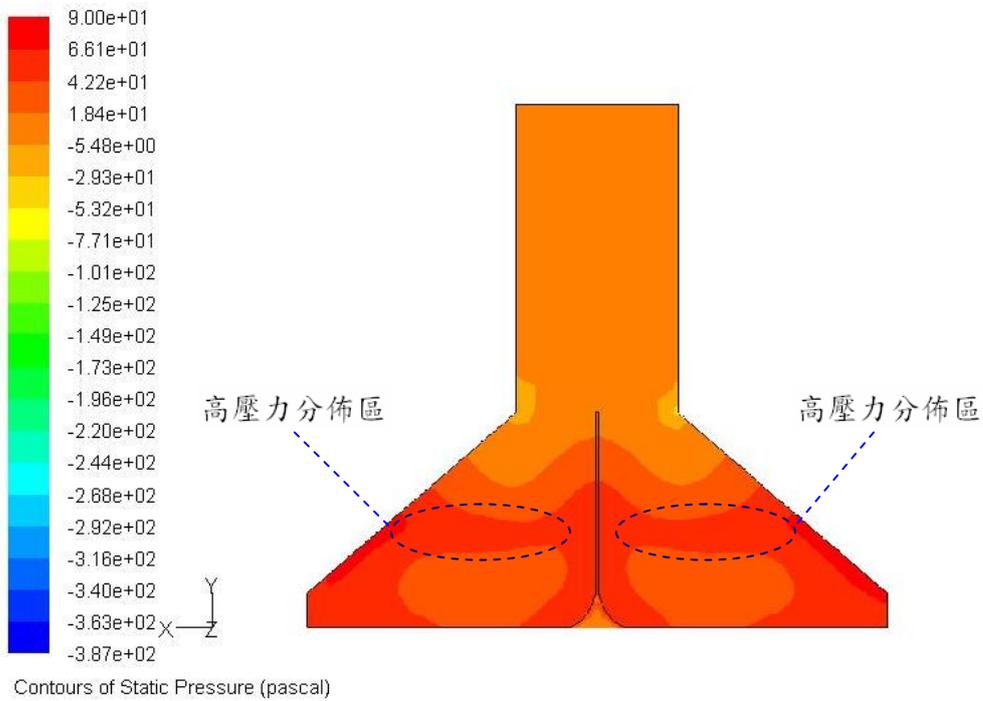


圖 4-9 抽油煙機外殼壓力分佈後視圖

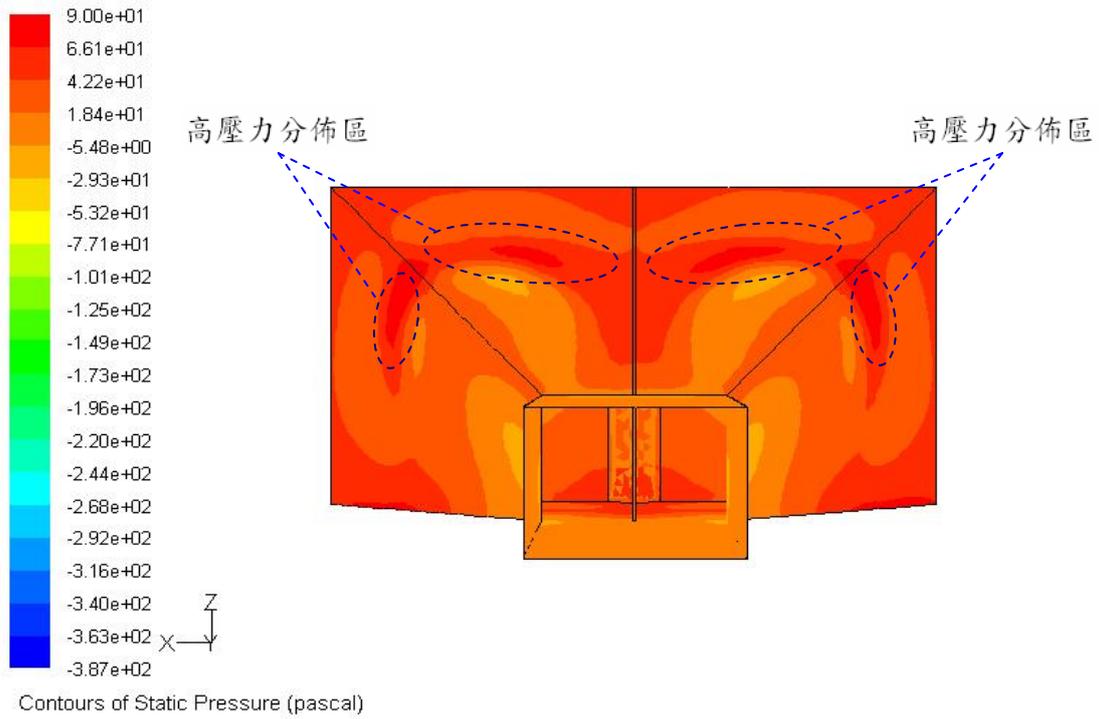


圖 4-10 抽油煙機外殼壓力分佈俯視圖

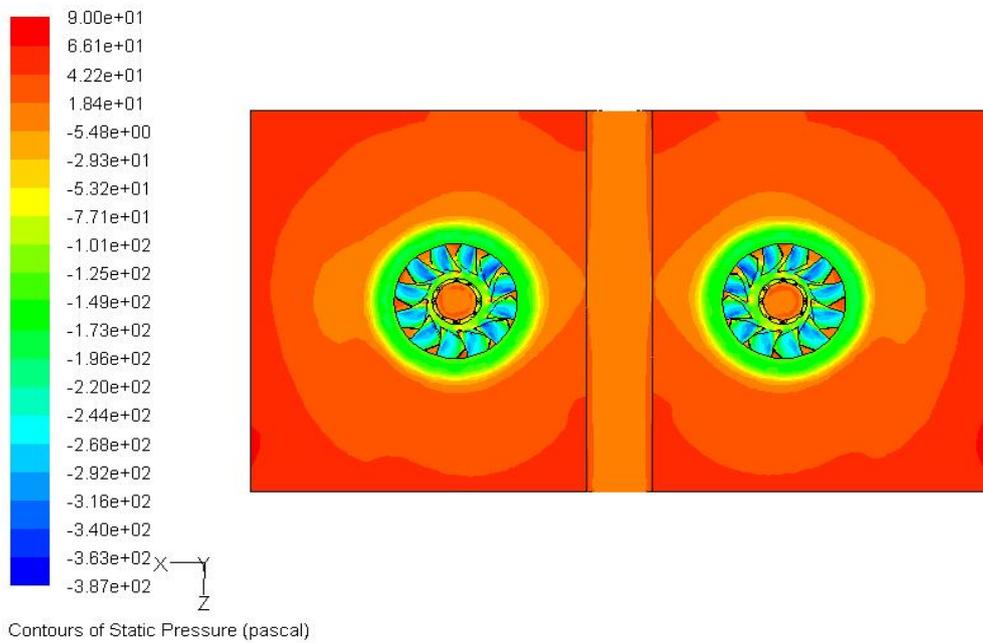


圖 4-11 抽油煙機外殼壓力分佈仰視圖

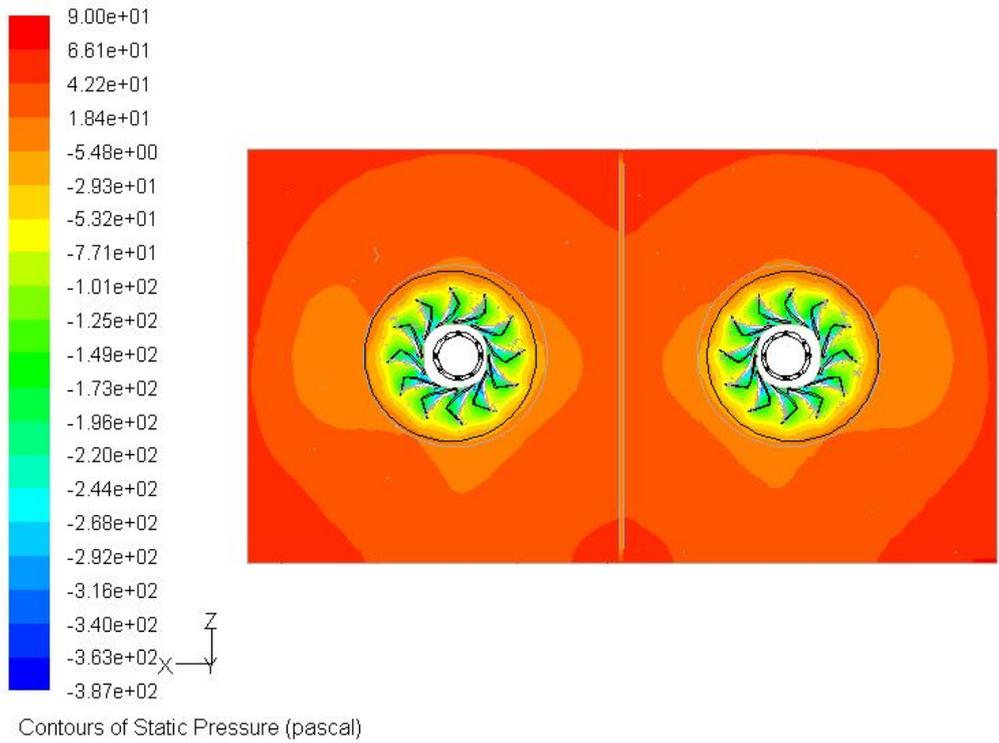


圖 4-12 抽油煙機流場 A 截面壓力分佈示意圖

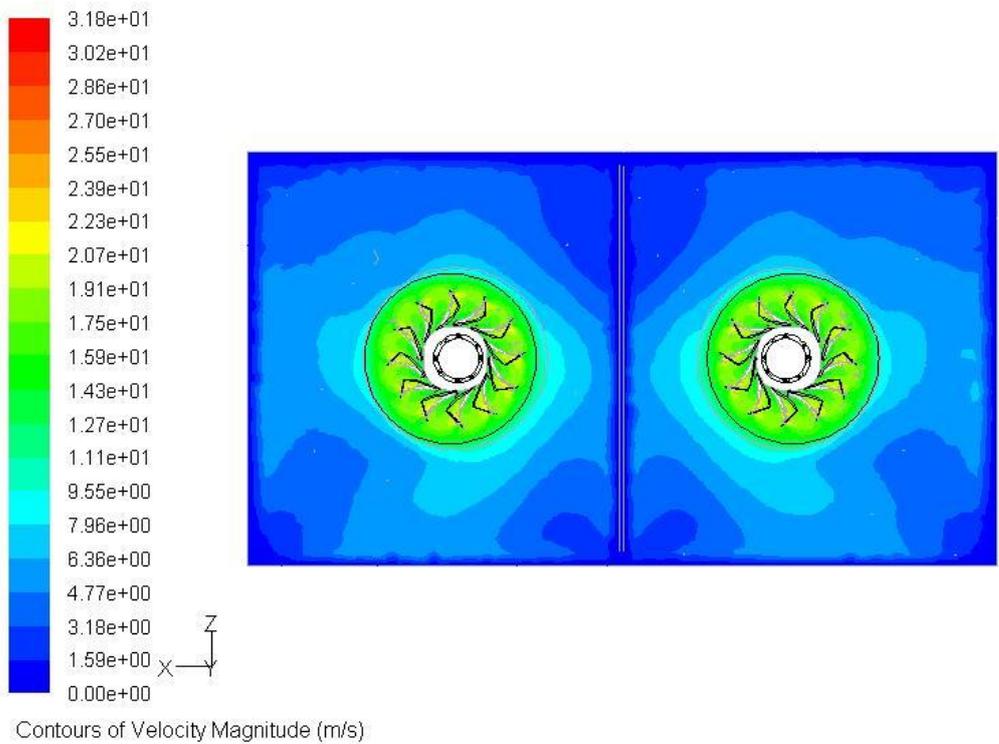


圖 4-13 抽油煙機流場 A 截面速度分佈示意圖

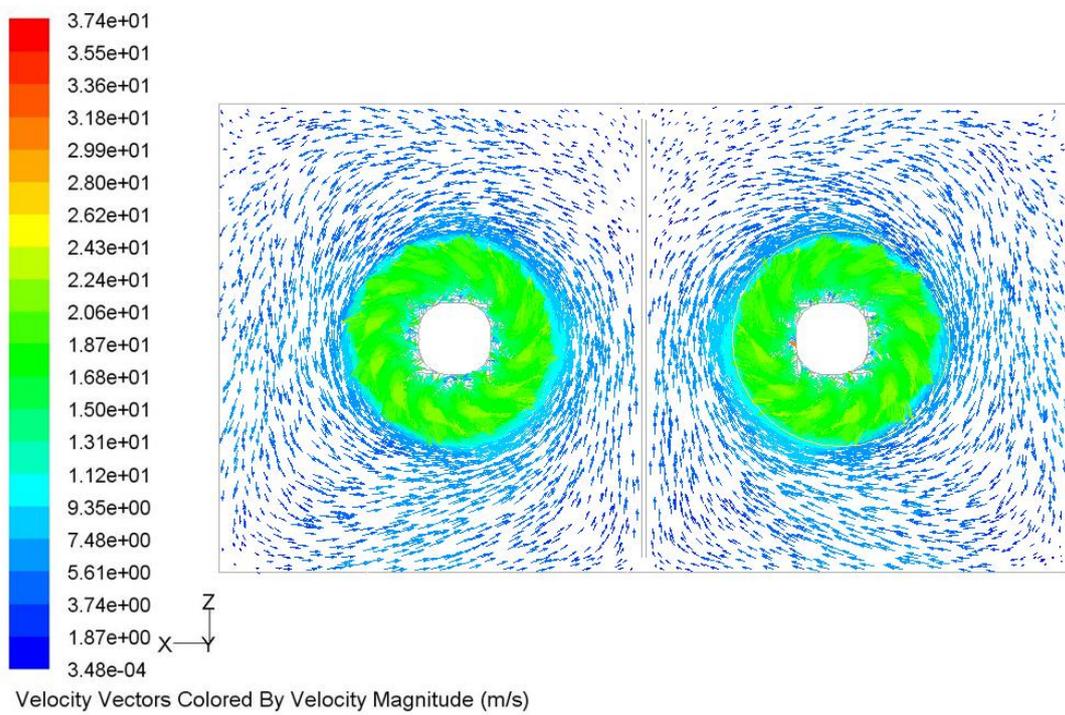


圖 4-14 抽油煙機流場 A 截面速度向量示意圖

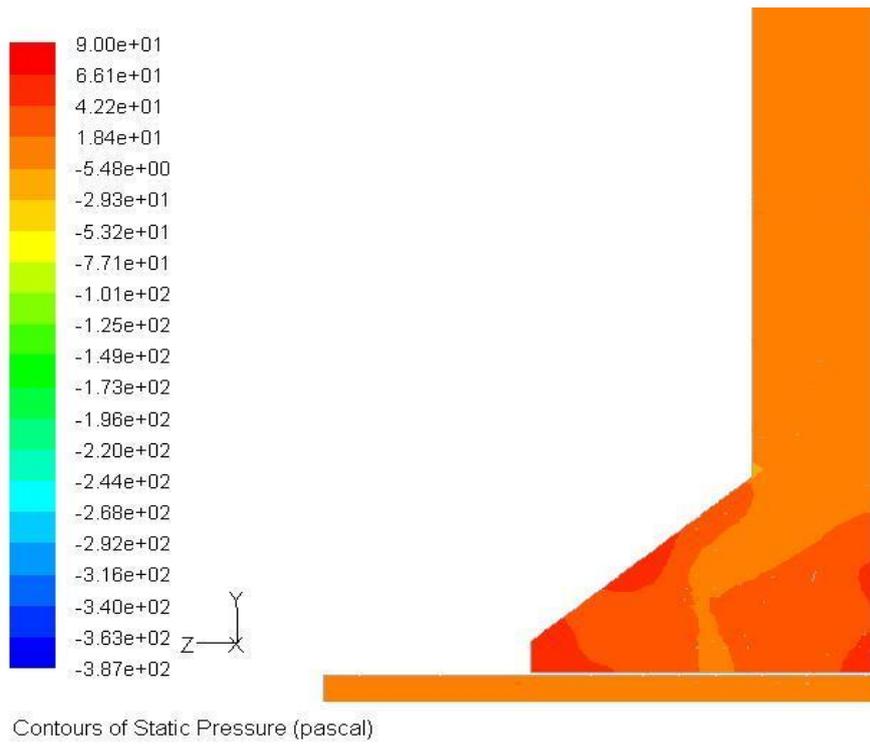


圖 4-15 抽油煙機流場 B 截面壓力分佈示意圖

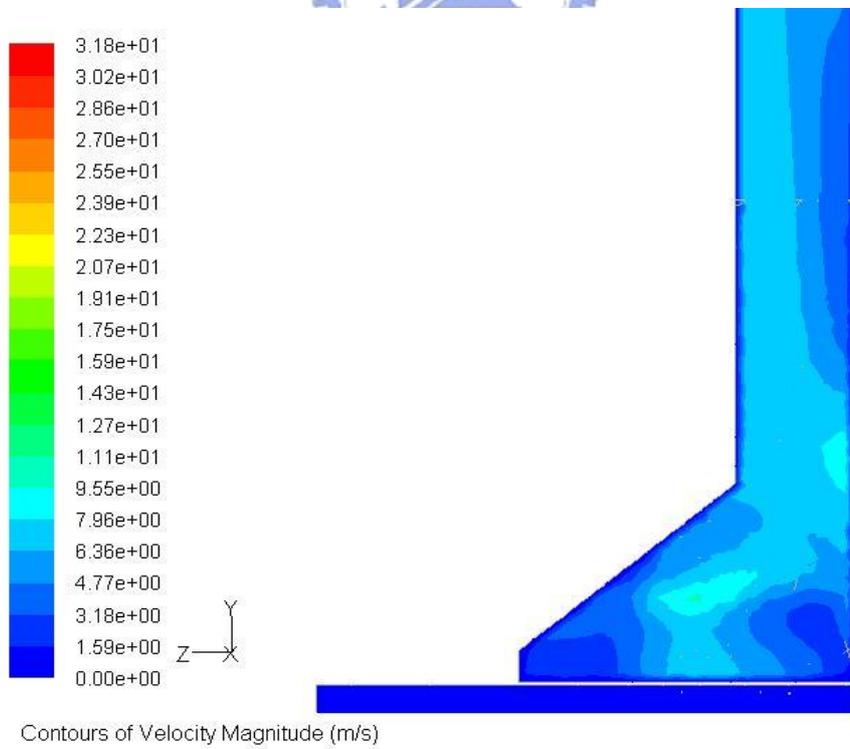


圖 4-16 抽油煙機流場 B 截面速度分佈示意圖

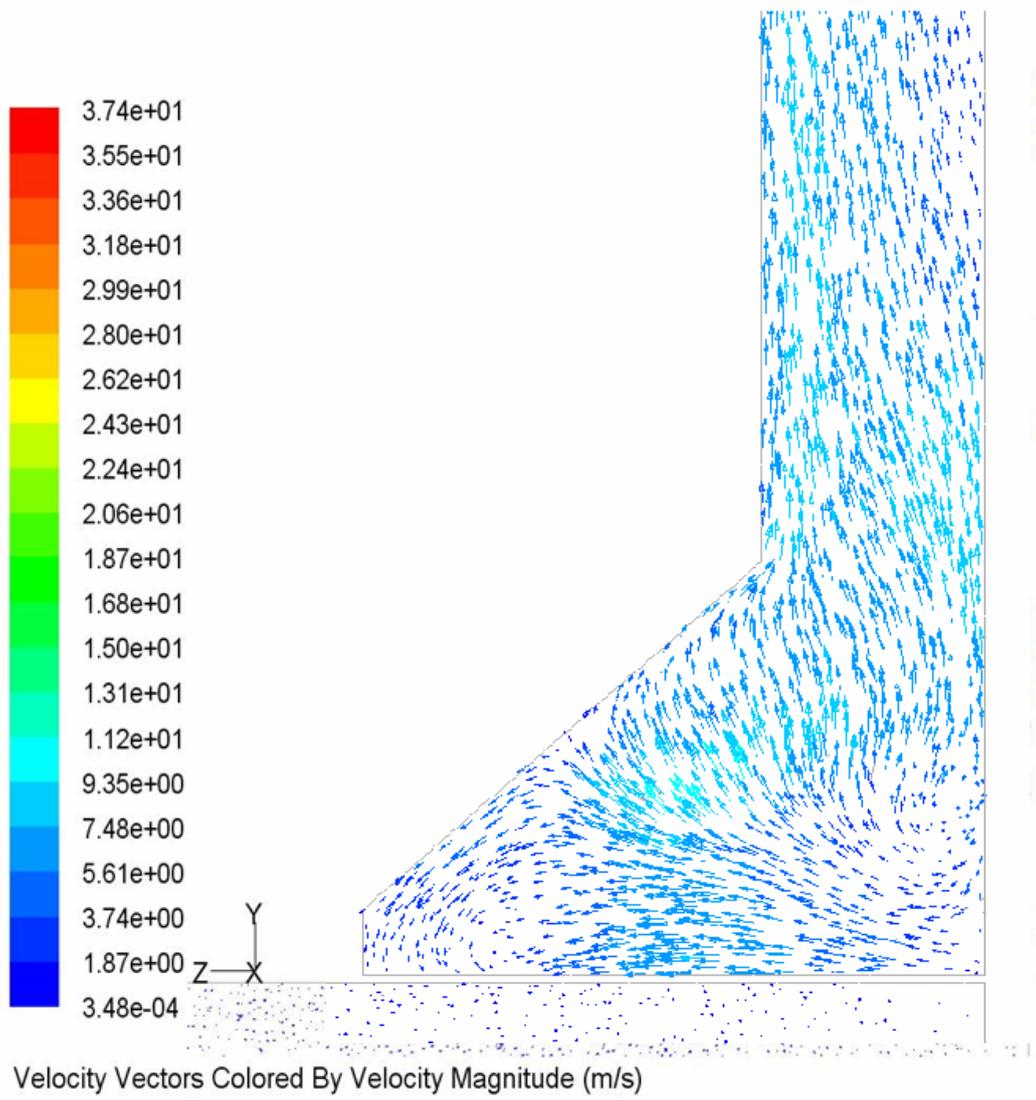
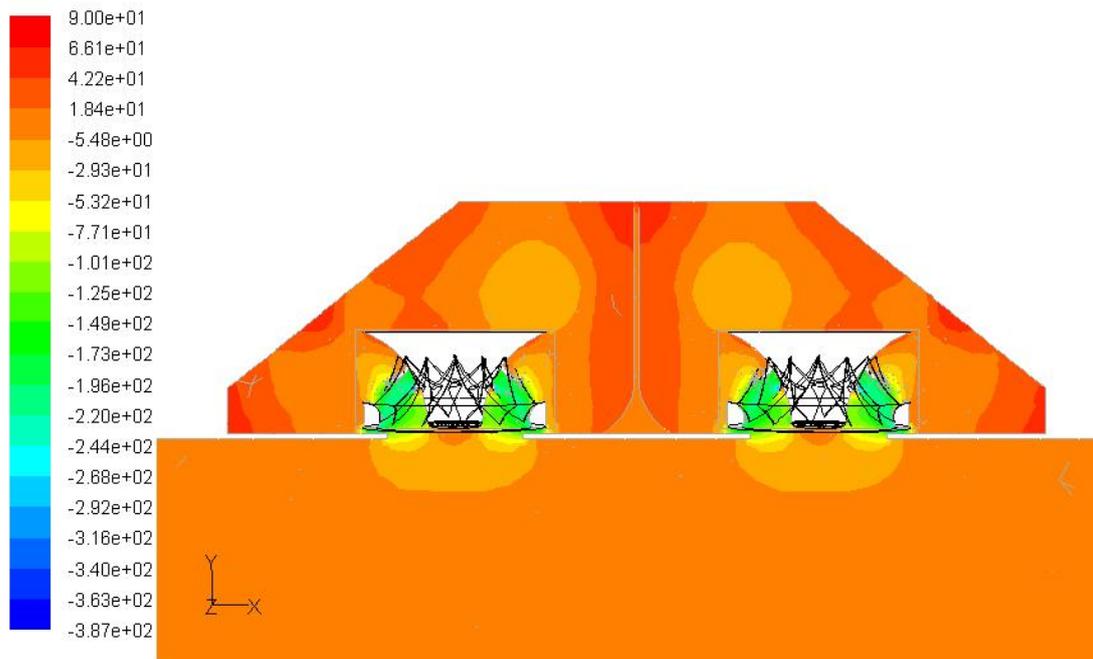
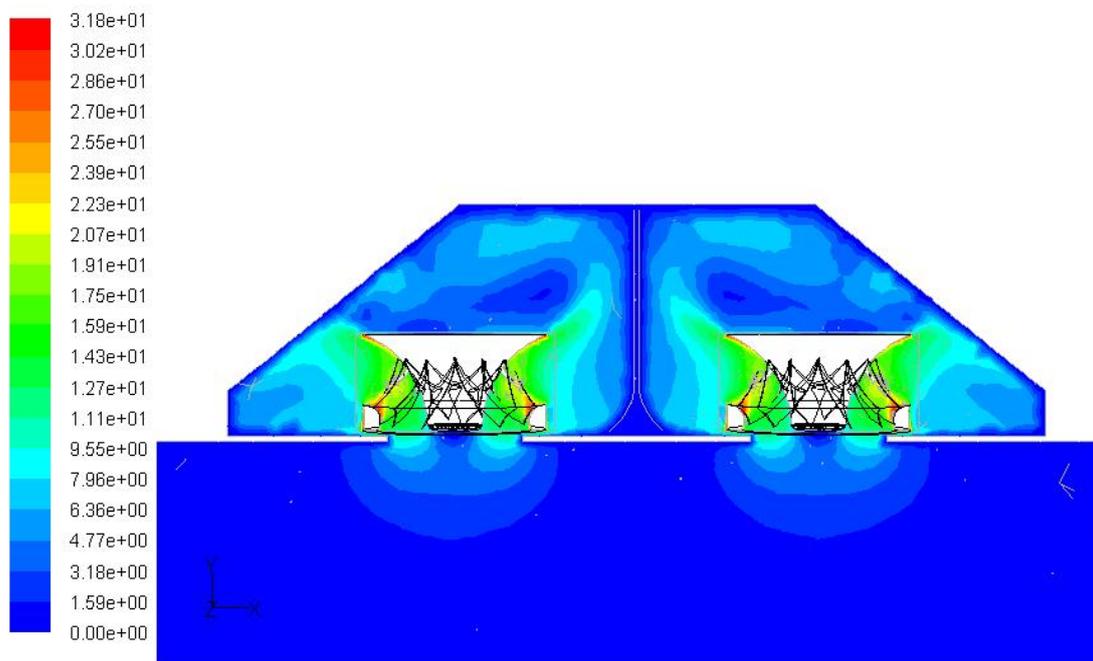


圖 4-17 抽油煙機流場 B 截面速度向量示意圖



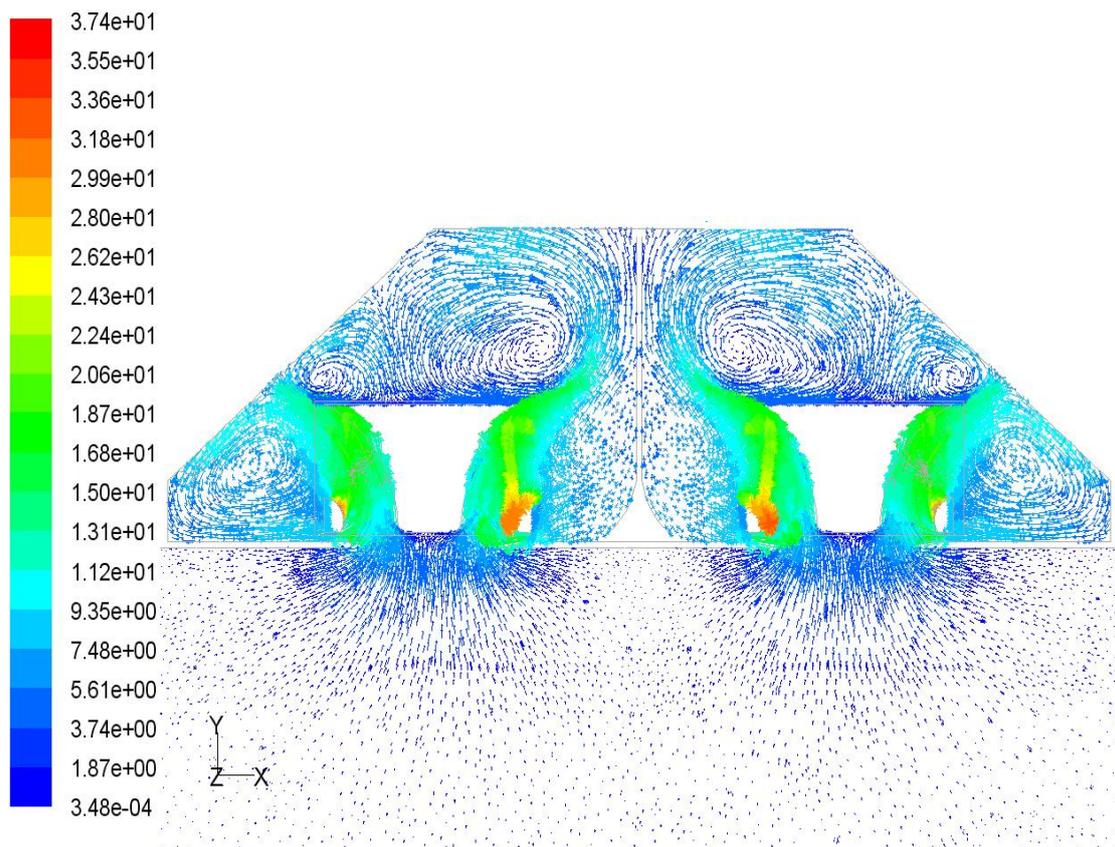
Contours of Static Pressure (pascal)

圖 4-18 抽油煙機流場 C 截面壓力分佈示意圖



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

圖 4-19 抽油煙機流場 C 截面速度分佈示意圖



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

圖 4-20 抽油煙機流場 C 截面速度向量示意圖

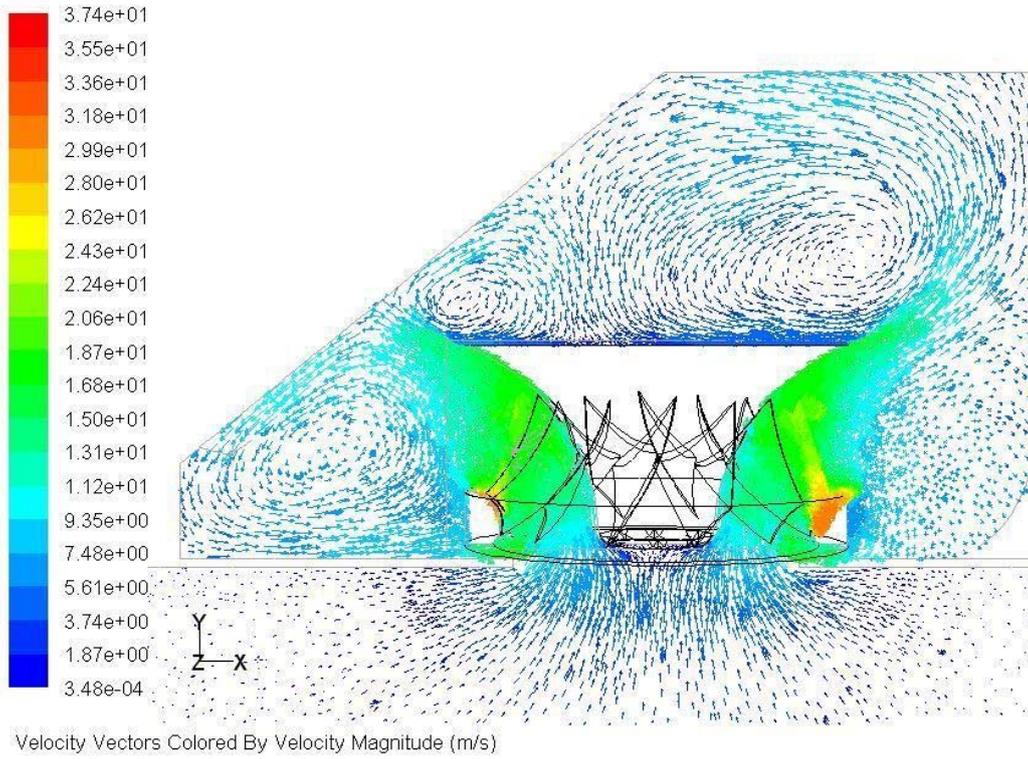


圖 4-21 抽油煙機流場 C 截面左邊風扇速度向量局部放大圖

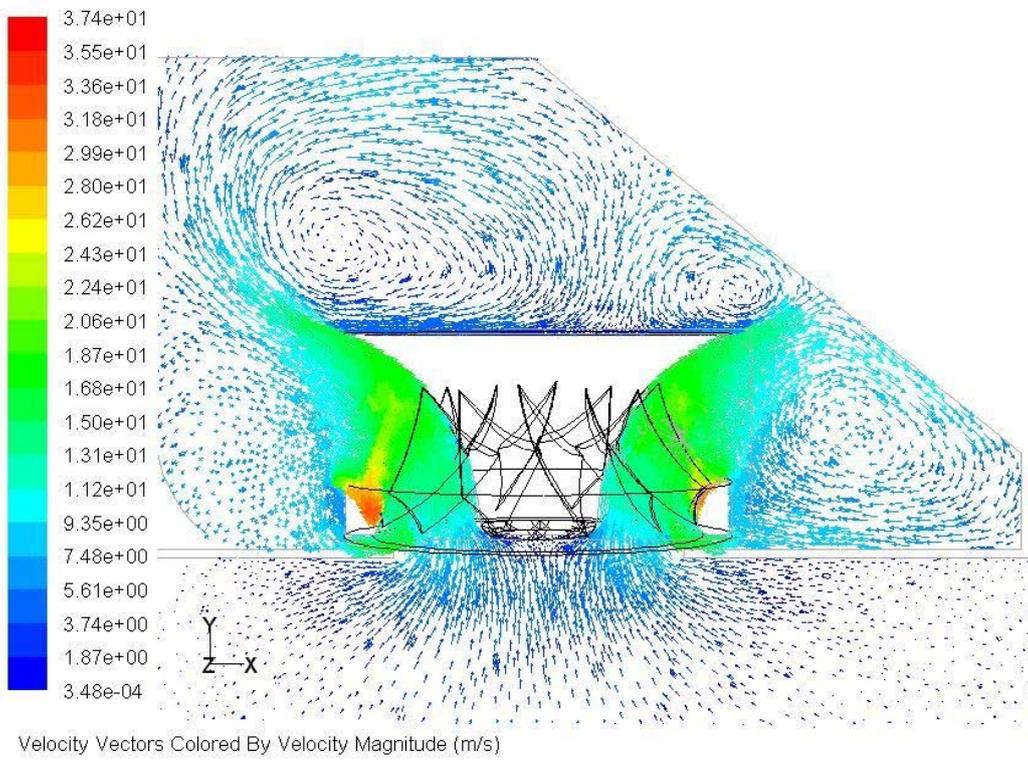


圖 4-22 抽油煙機流場 C 截面右邊風扇速度向量局部放大圖

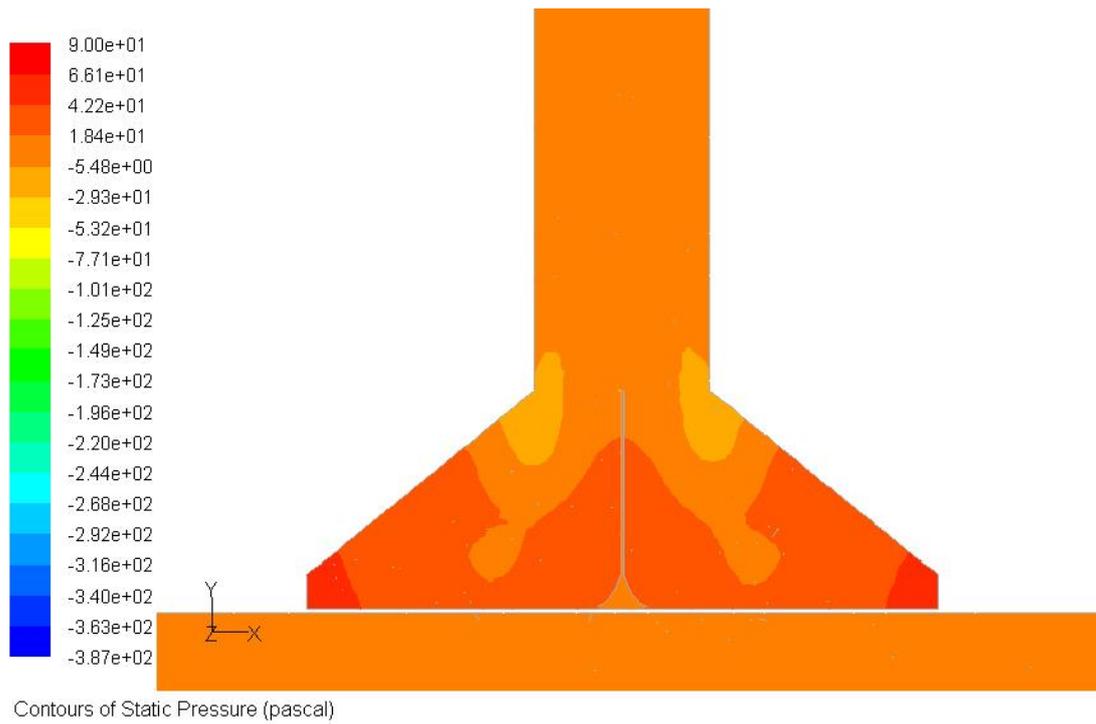


圖 4-23 抽油煙機流場 D 截面壓力分佈示意圖

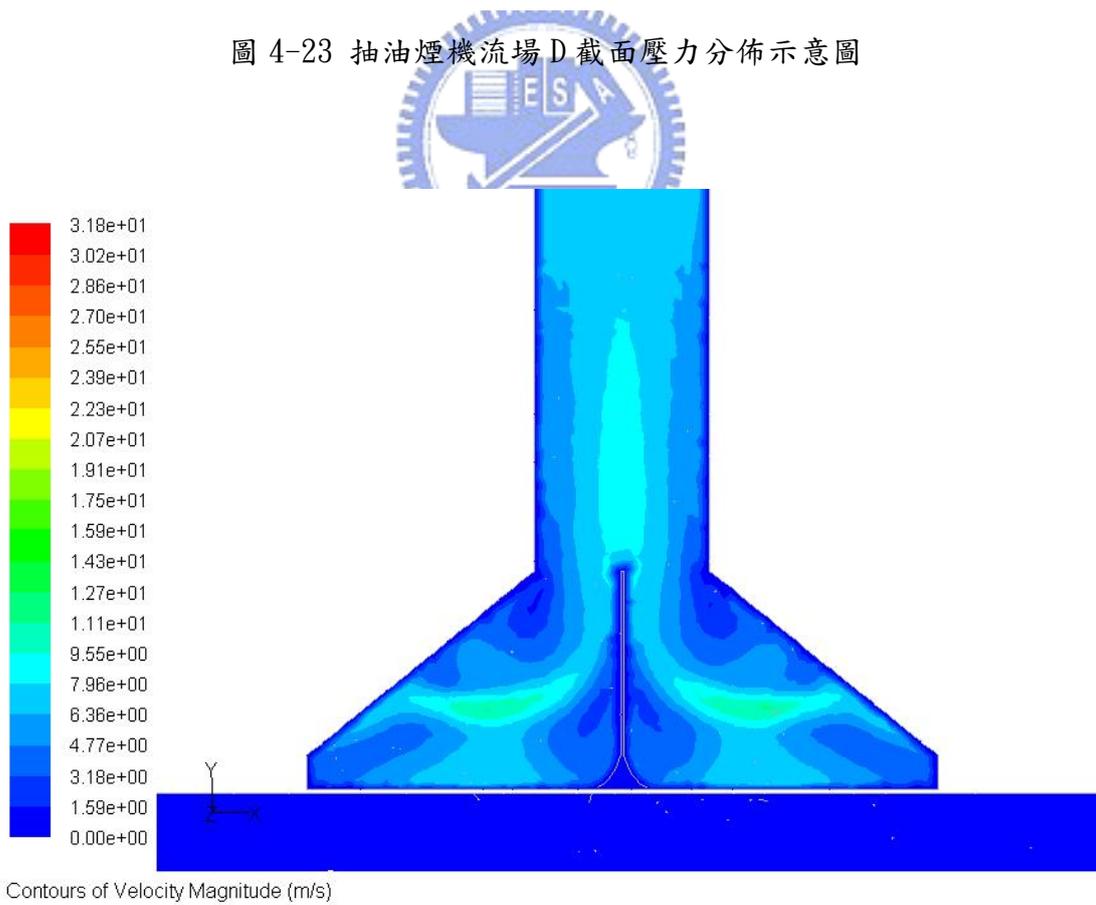


圖 4-24 抽油煙機流場 D 截面速度分佈示意圖

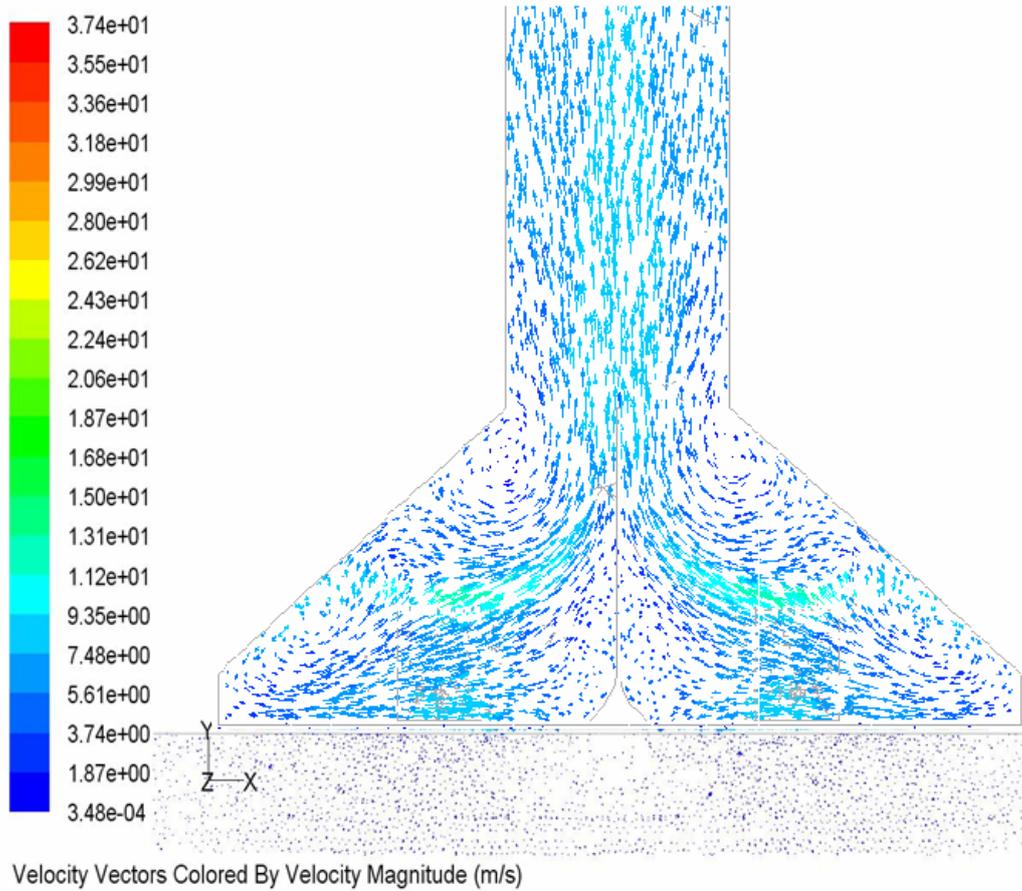


圖 4-25 抽油煙機流場 D 截面速度向量示意圖

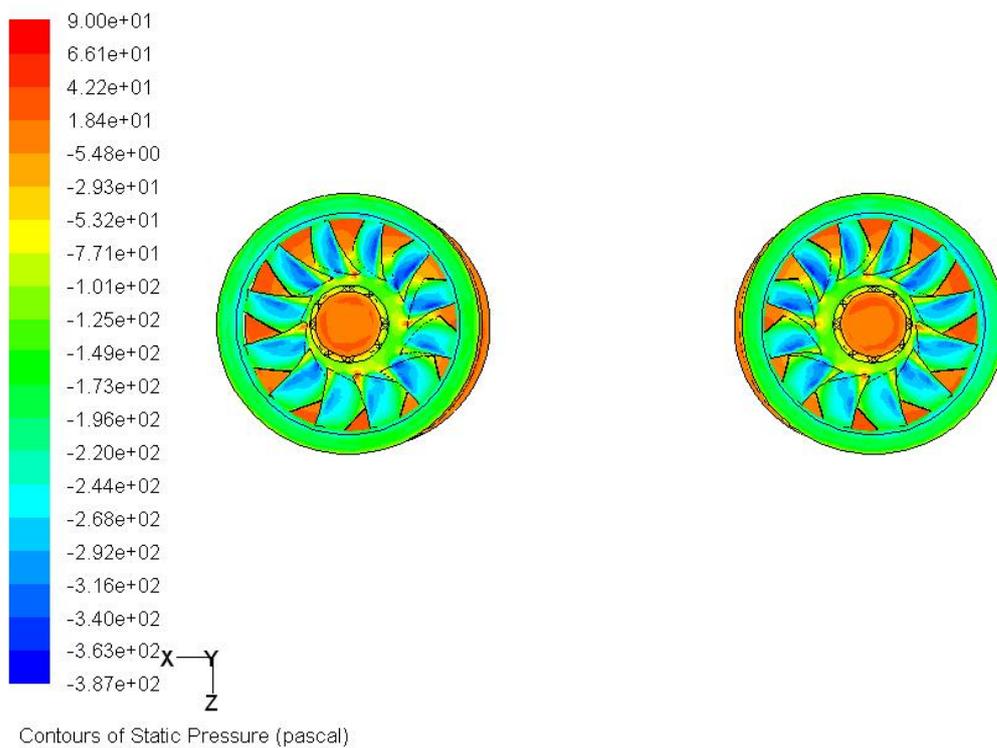


圖 4-26 抽油煙機風扇表面壓力分佈示意圖

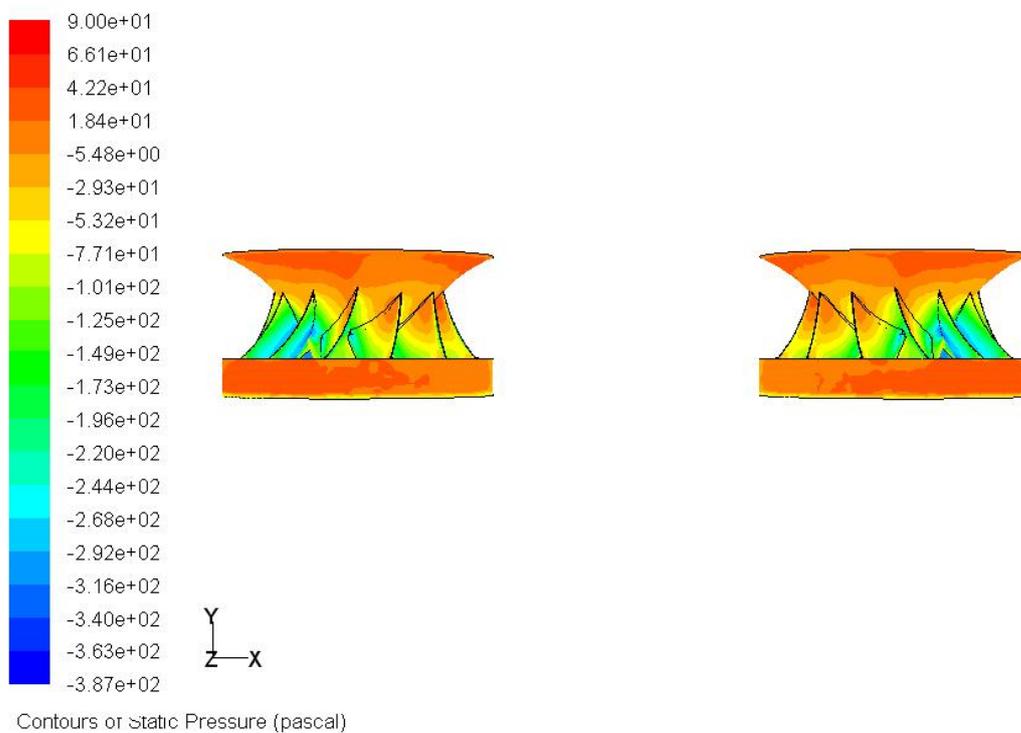


圖 4-27 抽油煙機風扇表面壓力分佈前視圖

為了使數值分析結果更加符合實際的情況，在抽油煙機下方加入兩個熱源，設置熱源的目的主要是希望模擬實際烹飪的時候，抽油煙機將油煙吸入的情形。圖 4-28 抽油煙機熱源模擬示意圖，圖 4-29 與圖 4-30 為抽油煙機熱源模擬之流場示意圖，兩個熱源的溫度為 400°C ，向上速度為 0.1m/s ，其內部溫度場截面圖，如圖 4-31 至圖 4-32 所示。

圖 4-33 與圖 4-34 為加入熱源後之流場徑線觀測圖形，從這兩張圖形中可以清楚觀察到熱源處之上升流體被抽油煙機吸入的情況。當啟動抽油煙機之後，在入口處與熱源處的流體會同時被吸入。由於受到入口處流入的流體所影響，熱源處上升的流體並不是垂直的被吸入。圖 4-35 到圖 4-38 為內部溫度場分佈，圖 4-35 中的截面是從 Z 方向觀察內部溫度場，圖 4-37 與圖 4-38 則是從負 X 與正 X 方向觀察溫度場變化，這兩張圖中可以明顯看出溫度場會受到入口流體所影響，因此其溫度分佈會偏向壁面方向。

接著熱源處放置一般烹飪所用的鍋子，如圖 4-39 所示，圖 4-40 與圖 4-41 為其流場模擬示意圖。其內部溫度場截面圖，如圖 4-42 至圖 4-43 所示。為了簡化計算，把鍋子部份設定成絕熱狀態，以觀察從熱源處流出的流體被抽油煙機吸入的情況。圖 4-44 與圖 4-45 為放置鍋子後的流場徑線觀測圖形，圖 4-46 與圖 4-49 為溫度場分佈圖。從這幾張溫度分佈圖中可以知道，其溫度變化也會入口流體影響而偏向壁面方向分佈。

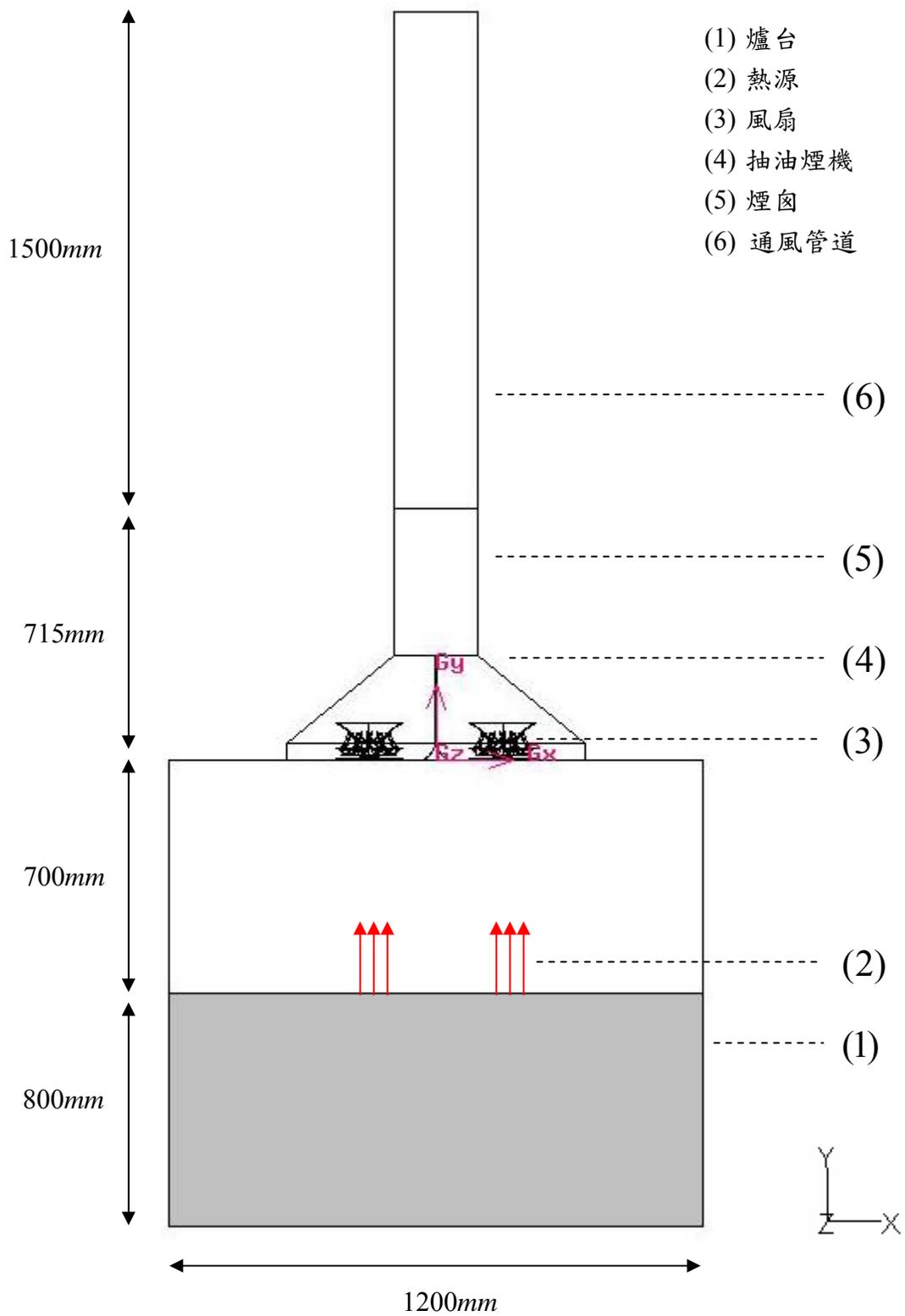


圖 4-28 抽油煙機熱源模擬示意圖

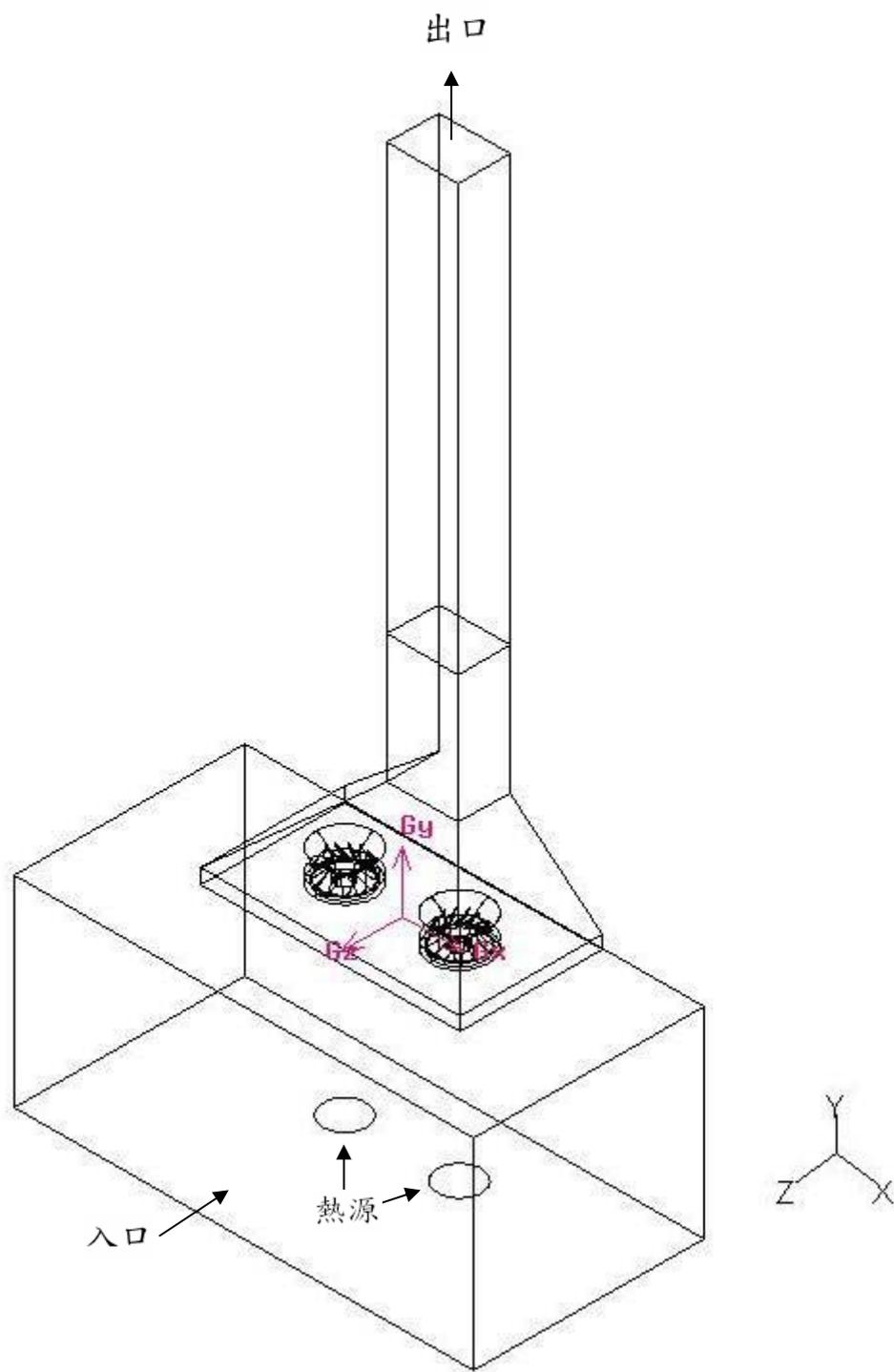


圖 4-29 抽油煙機熱源模擬之流場示意圖

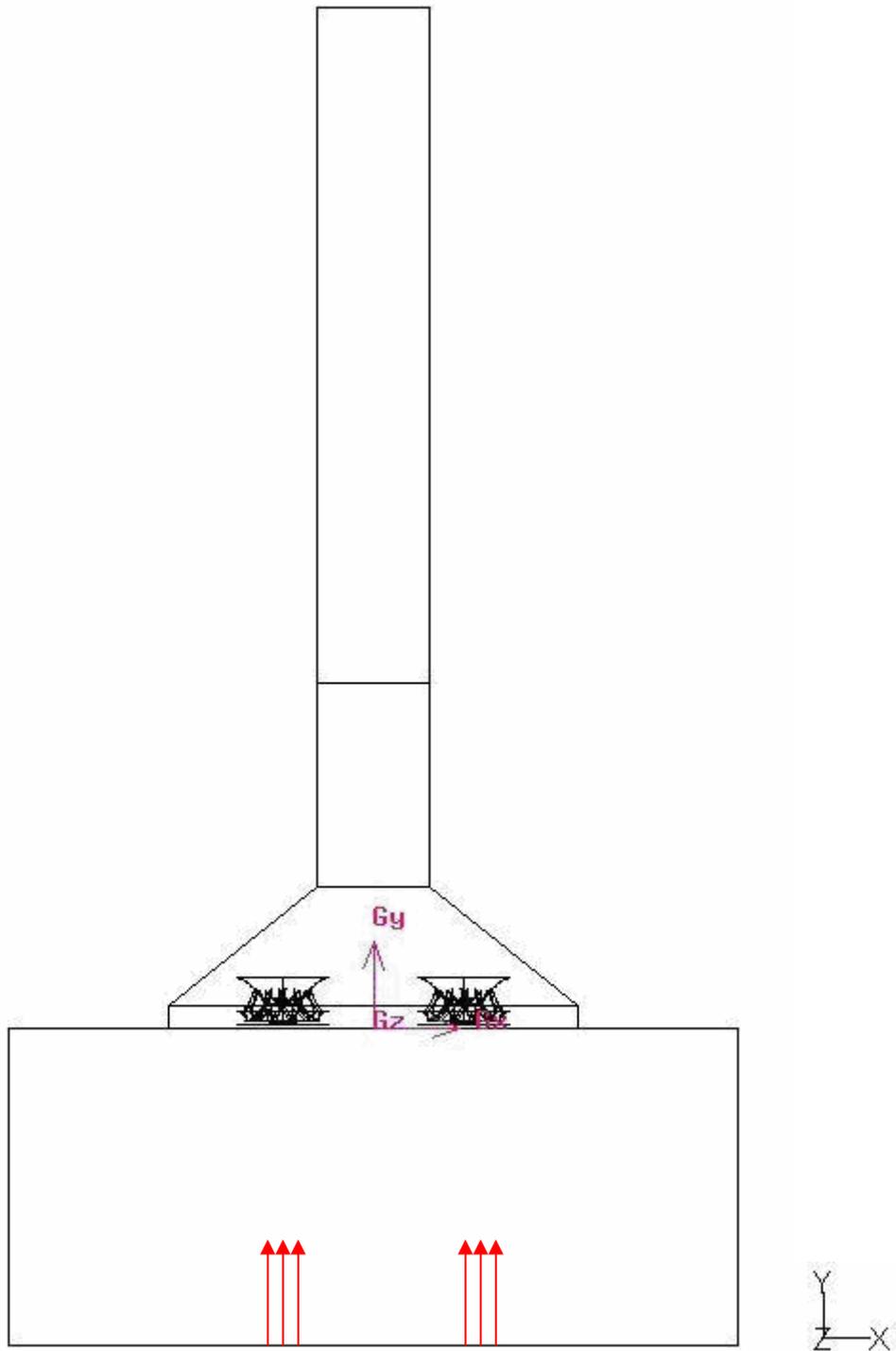


圖 4-30 熱源溫度為 400°C ，向上速度為 0.1m/s

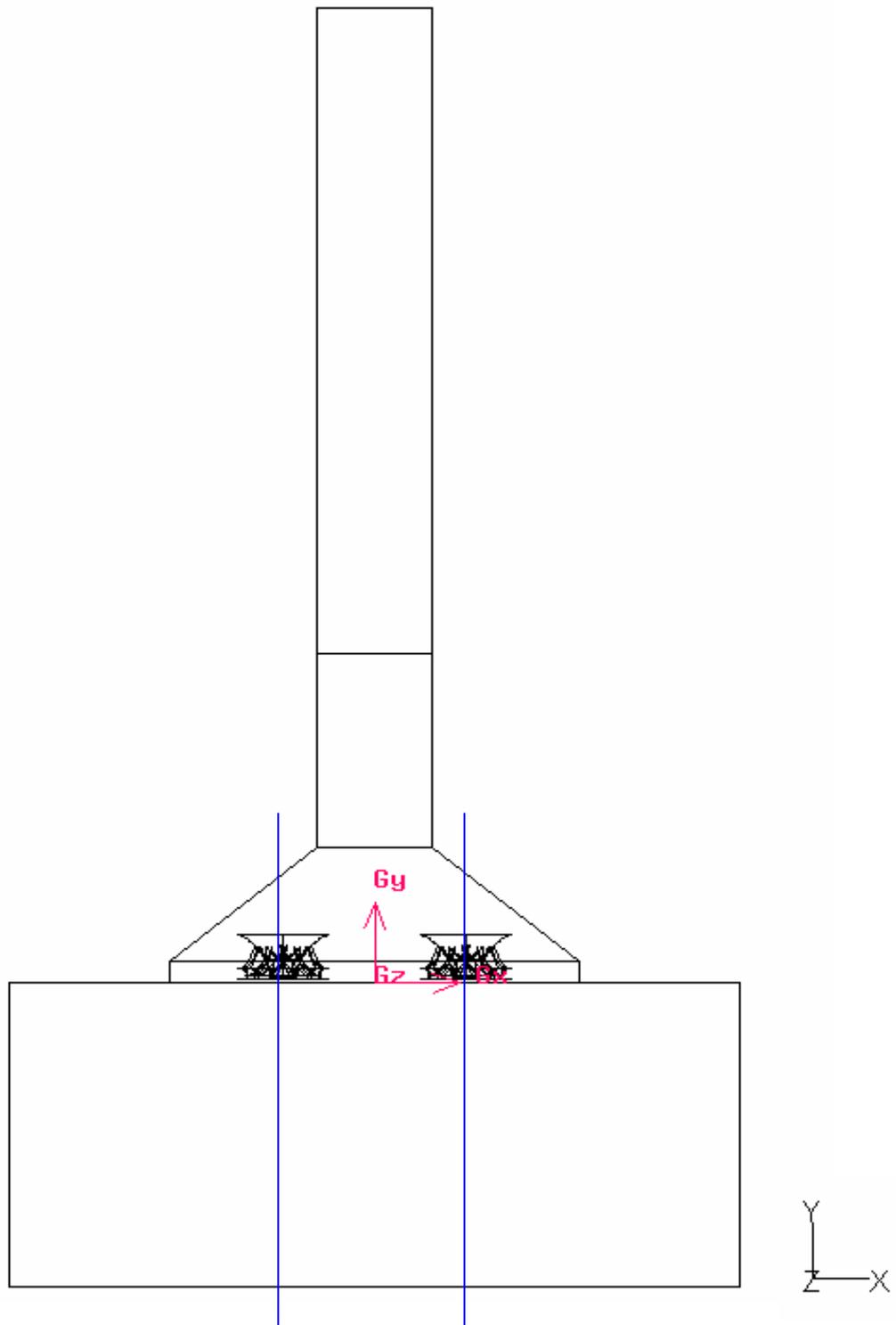


圖 4-31 抽油煙機熱源模擬 X 方向截面示意圖

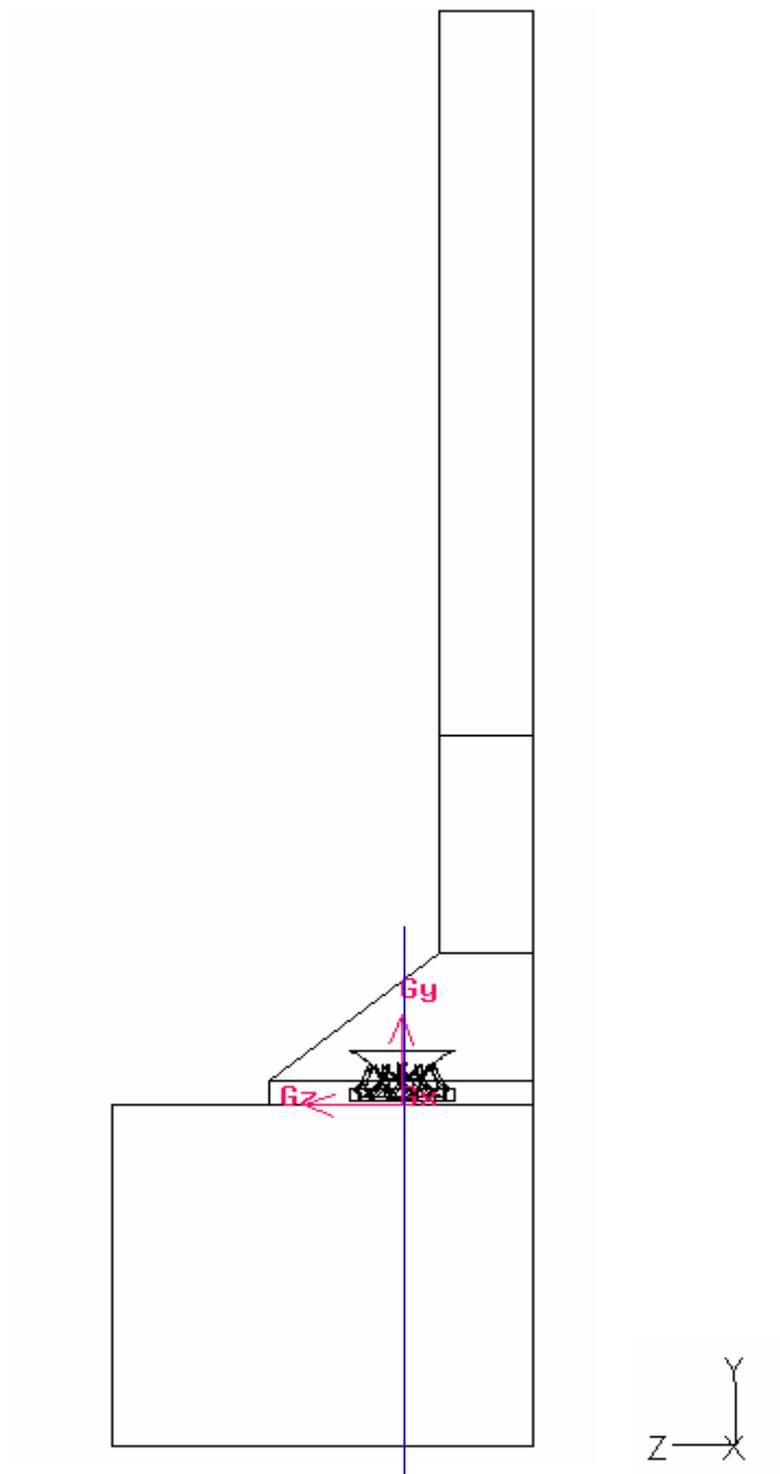


圖 4-32 抽油煙機熱源模擬 Z 方向截面示意圖

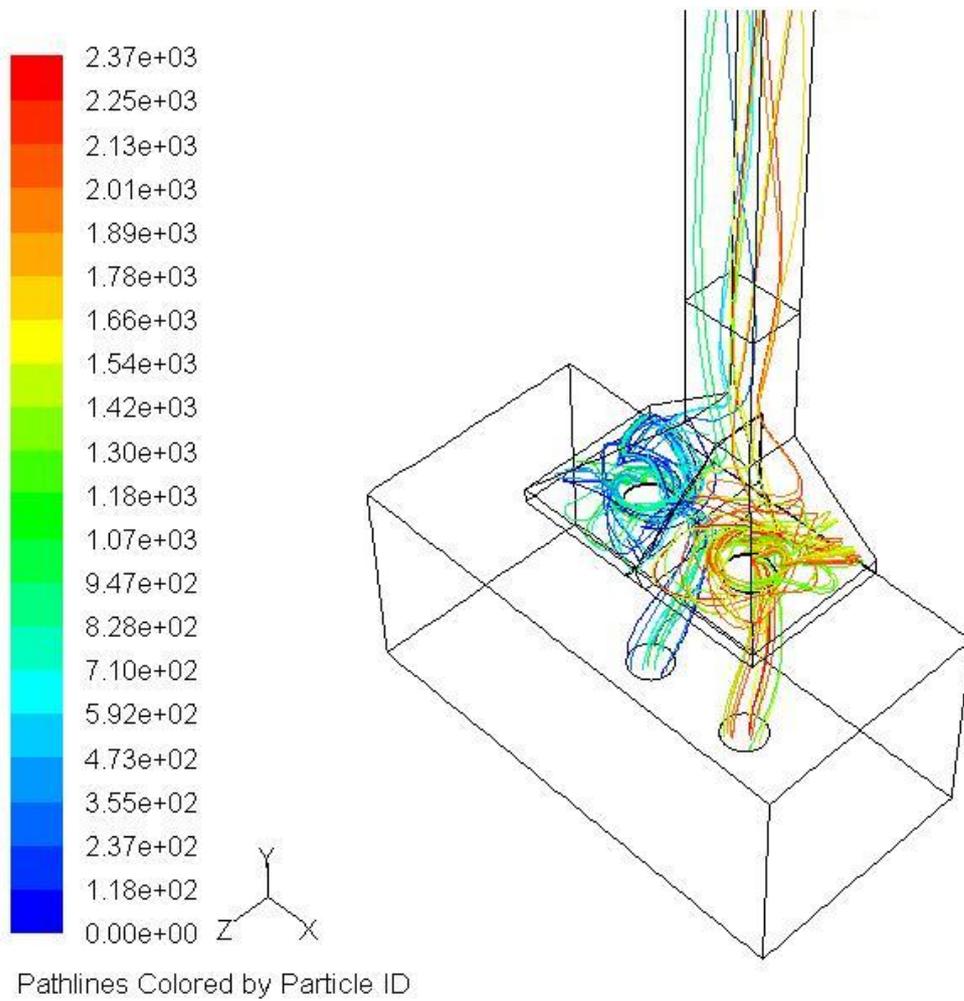


圖 4-33 抽油煙機熱源模擬流場徑線示意圖

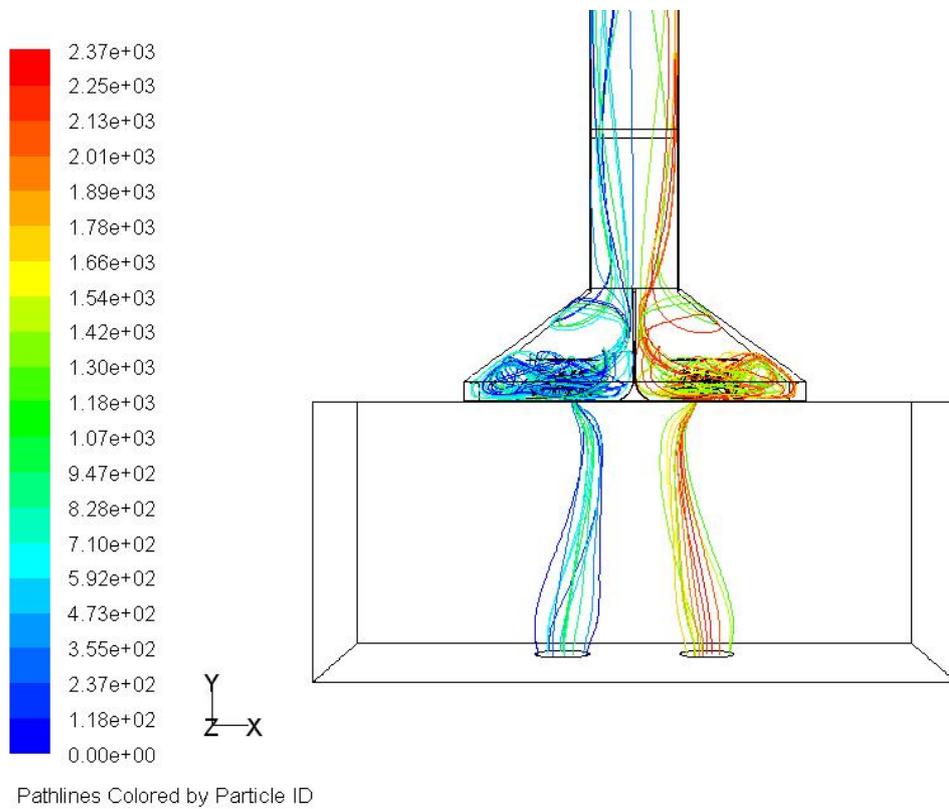


圖 4-34 抽油煙機熱源模擬流場徑線前視圖

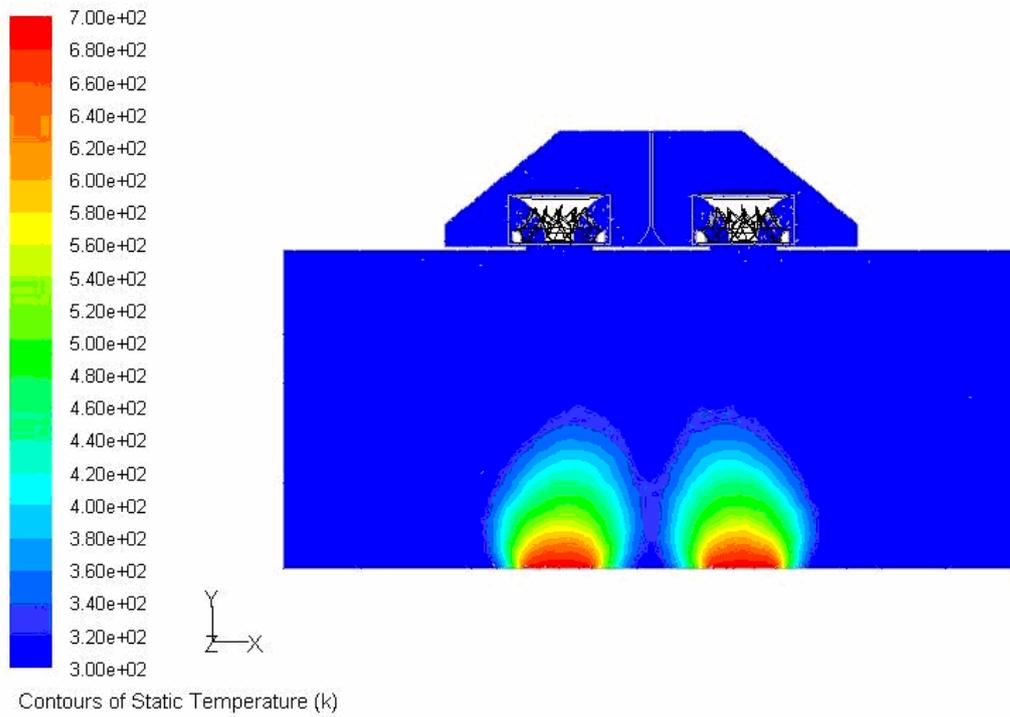


圖 4-35 熱源模擬 Z 方向截面溫度分佈圖

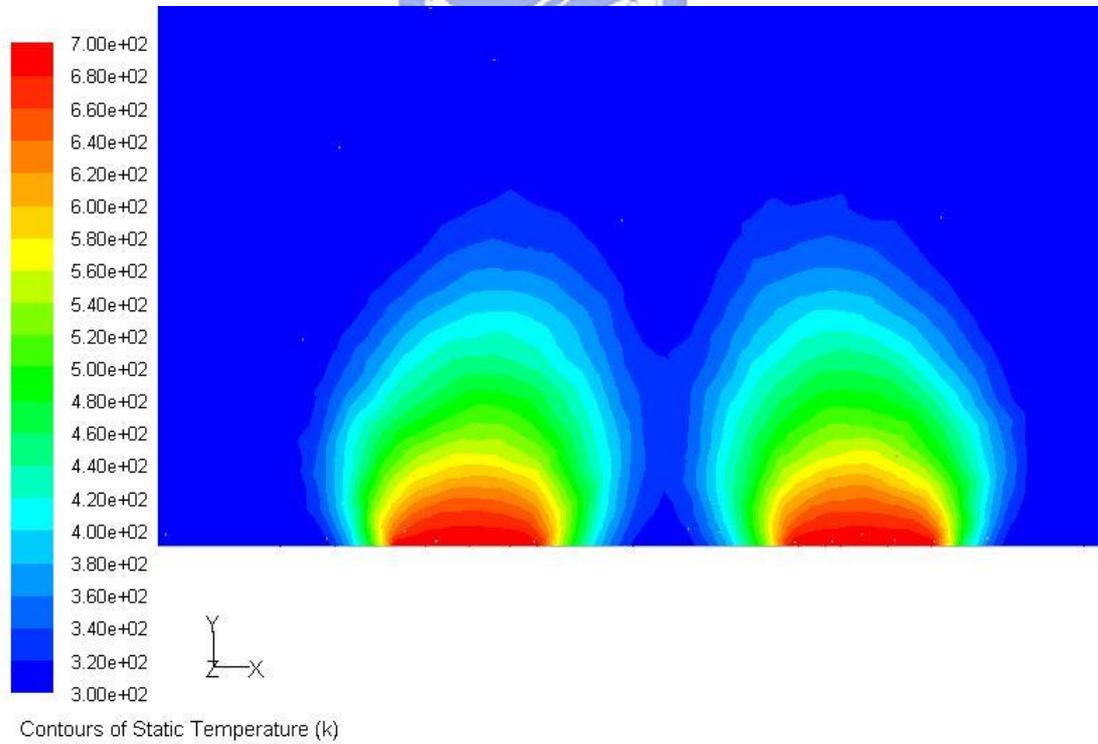


圖 4-36 熱源模擬 Z 方向截面溫度分佈局部放大圖

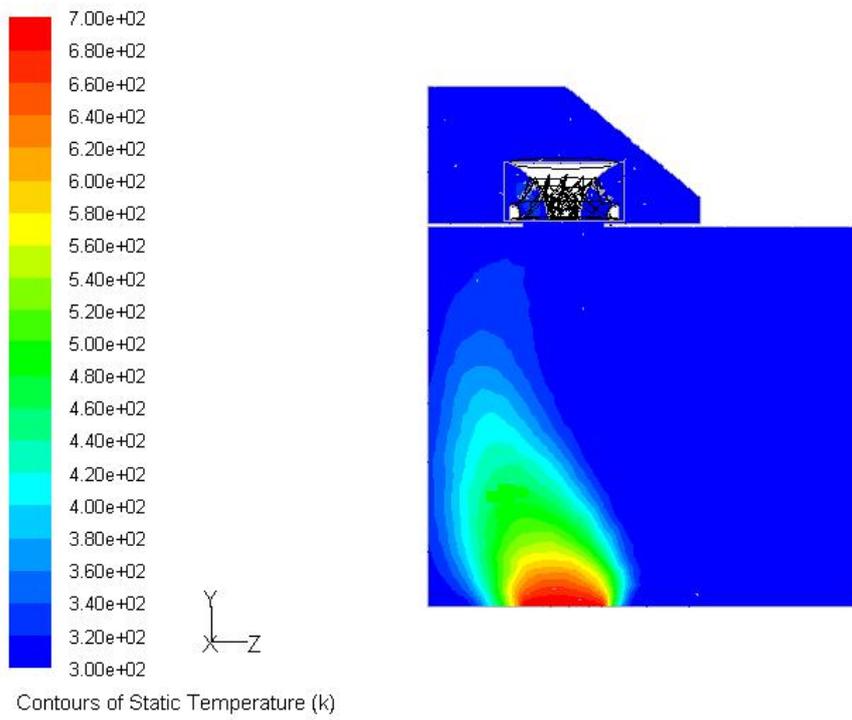


圖 4-37 熱源模擬負 X 方向截面溫度分佈圖

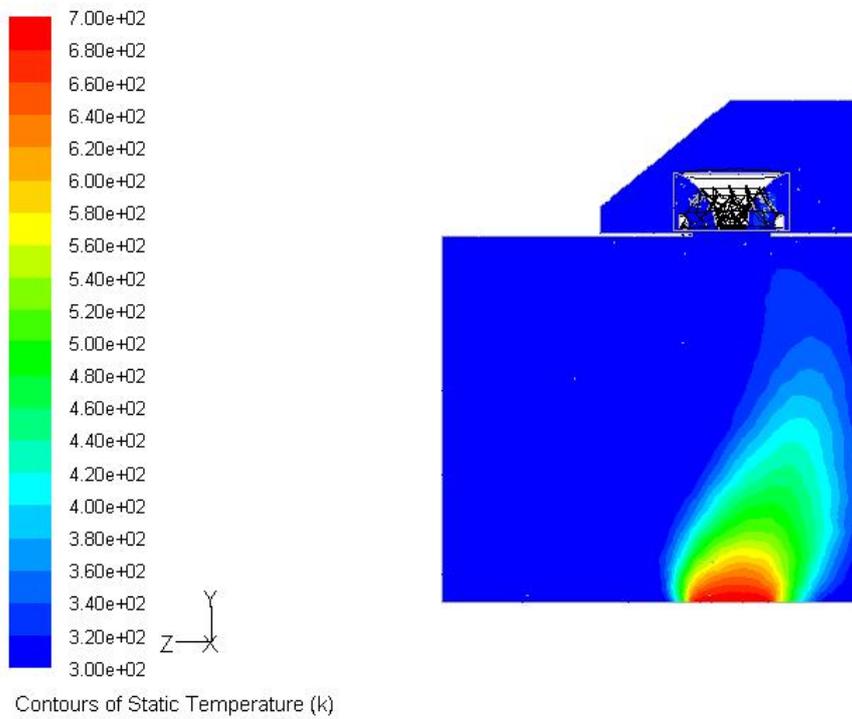


圖 4-38 熱源模擬正 X 方向截面溫度分佈圖

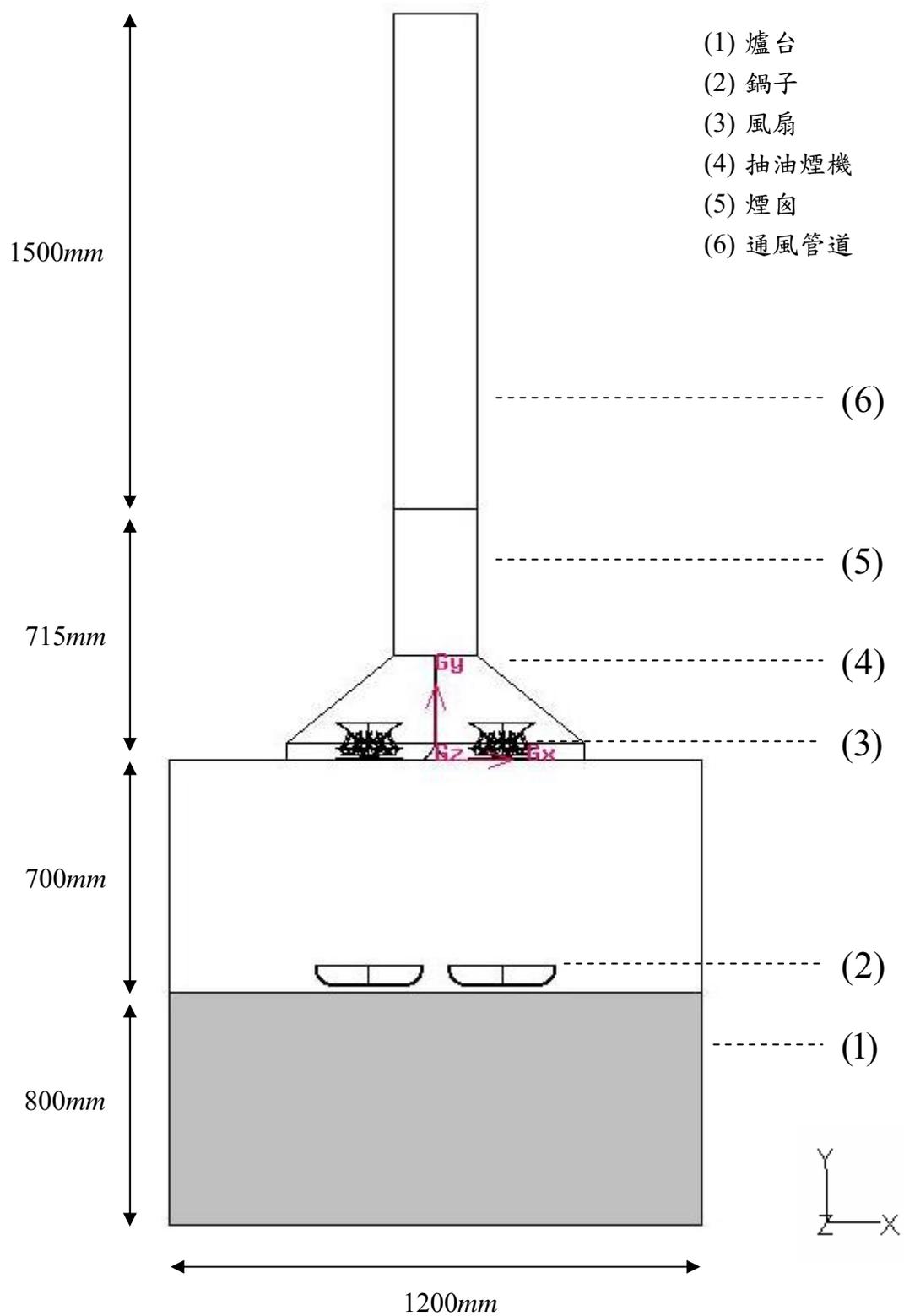


圖 4-39 熱源處放置鍋子模擬示意圖

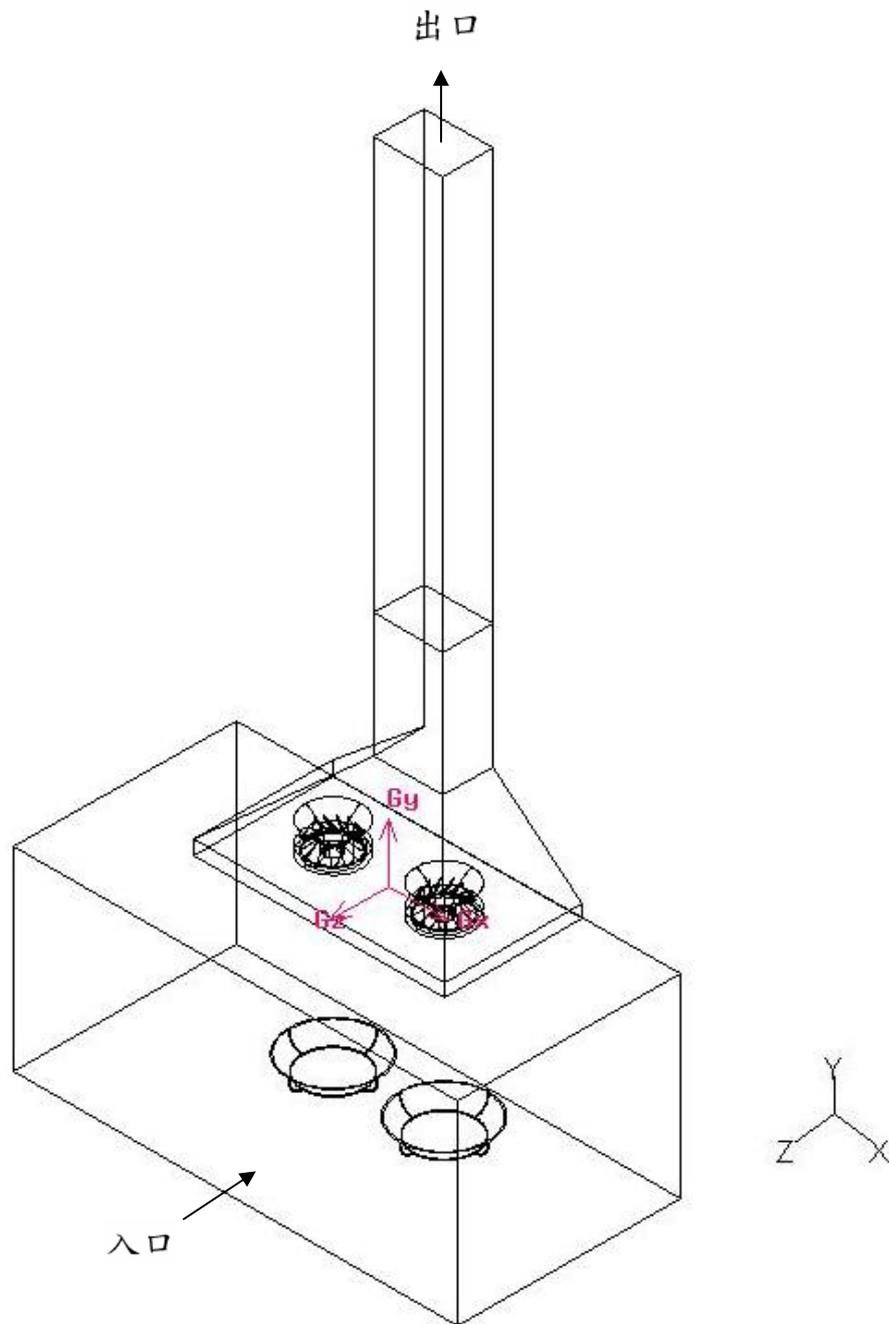


圖 4-40 熱源處放置鍋子之流場示意圖

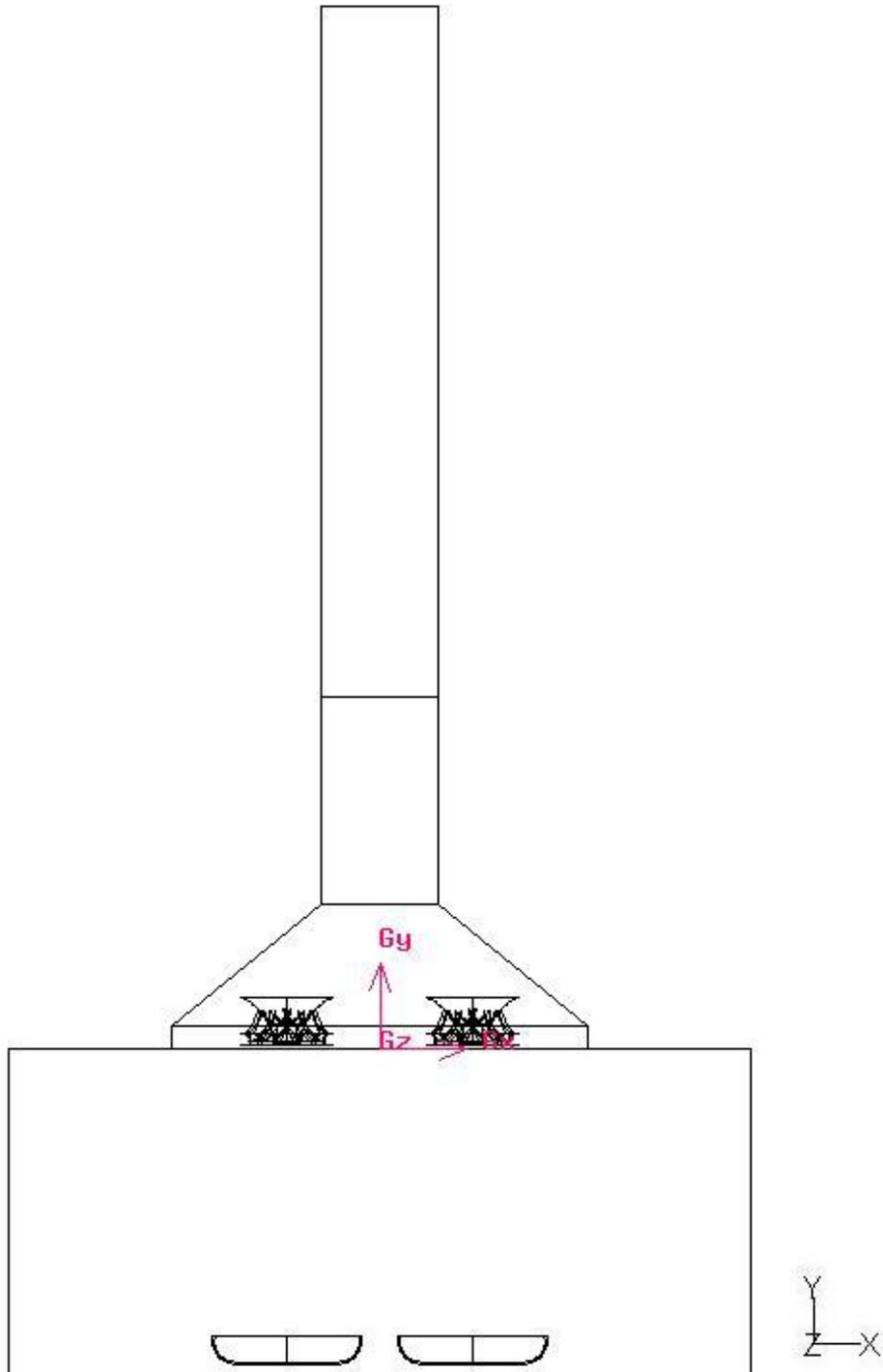


圖 4-41 熱源處放置鍋子之模型前視圖

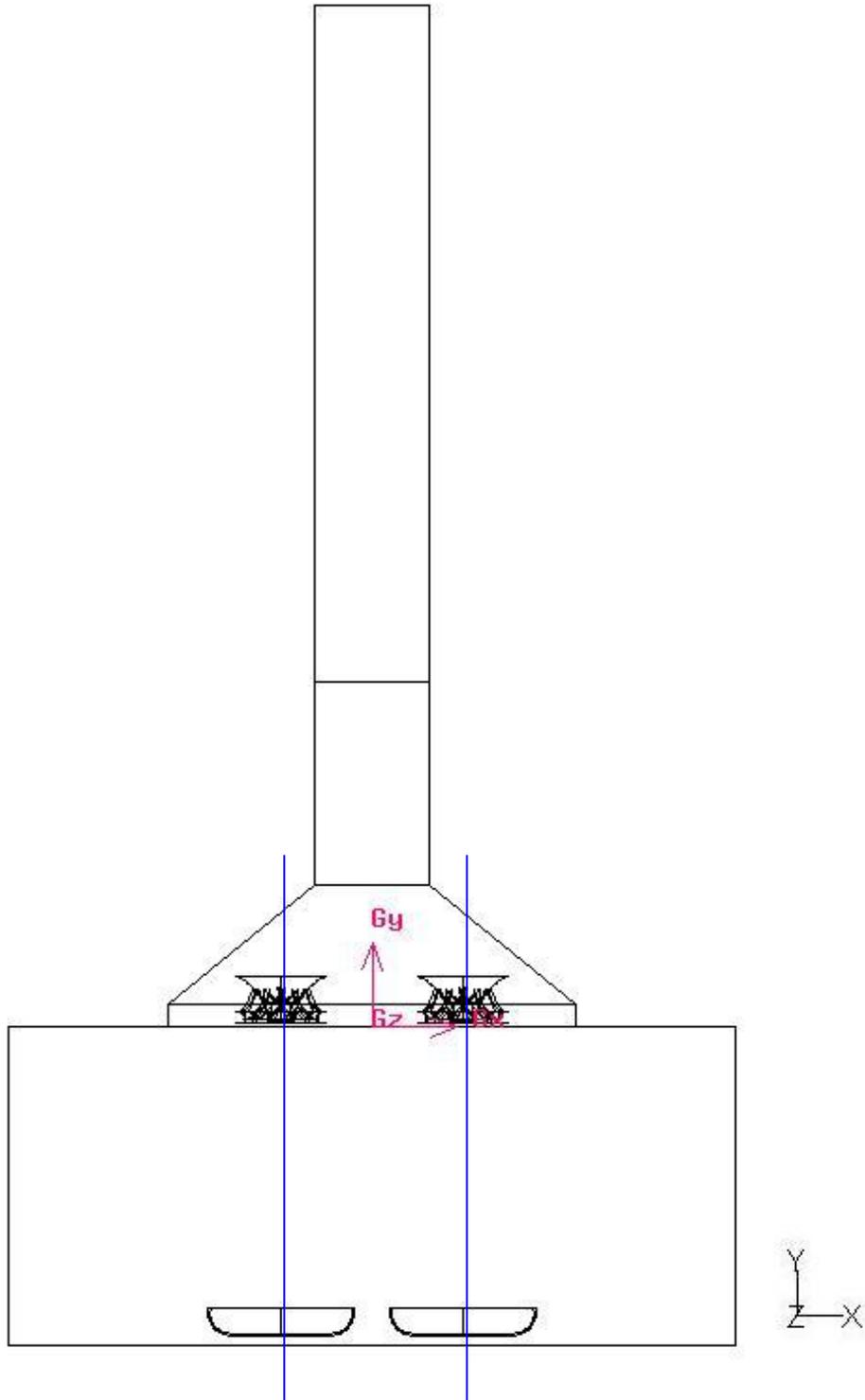


圖 4-42 熱源處放置鍋子之模擬 X 方向截面示意圖

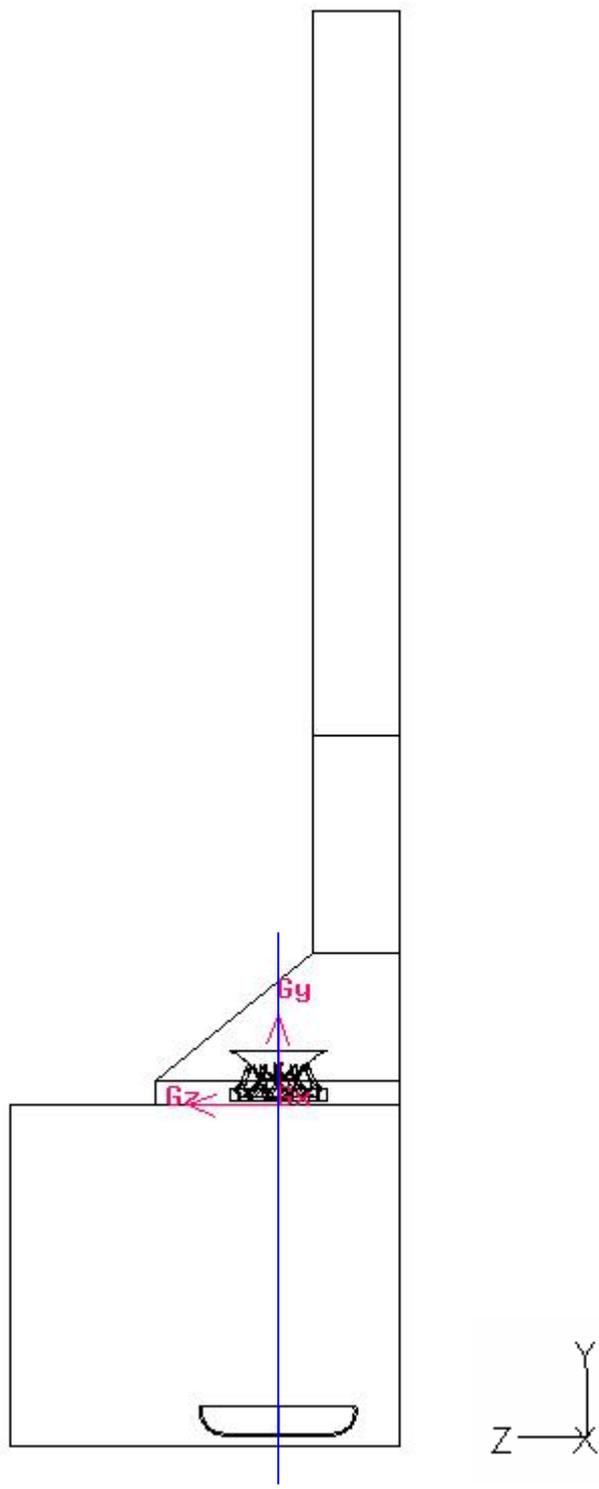


圖 4-43 熱源處放置鍋子之模擬 Z 方向截面示意圖

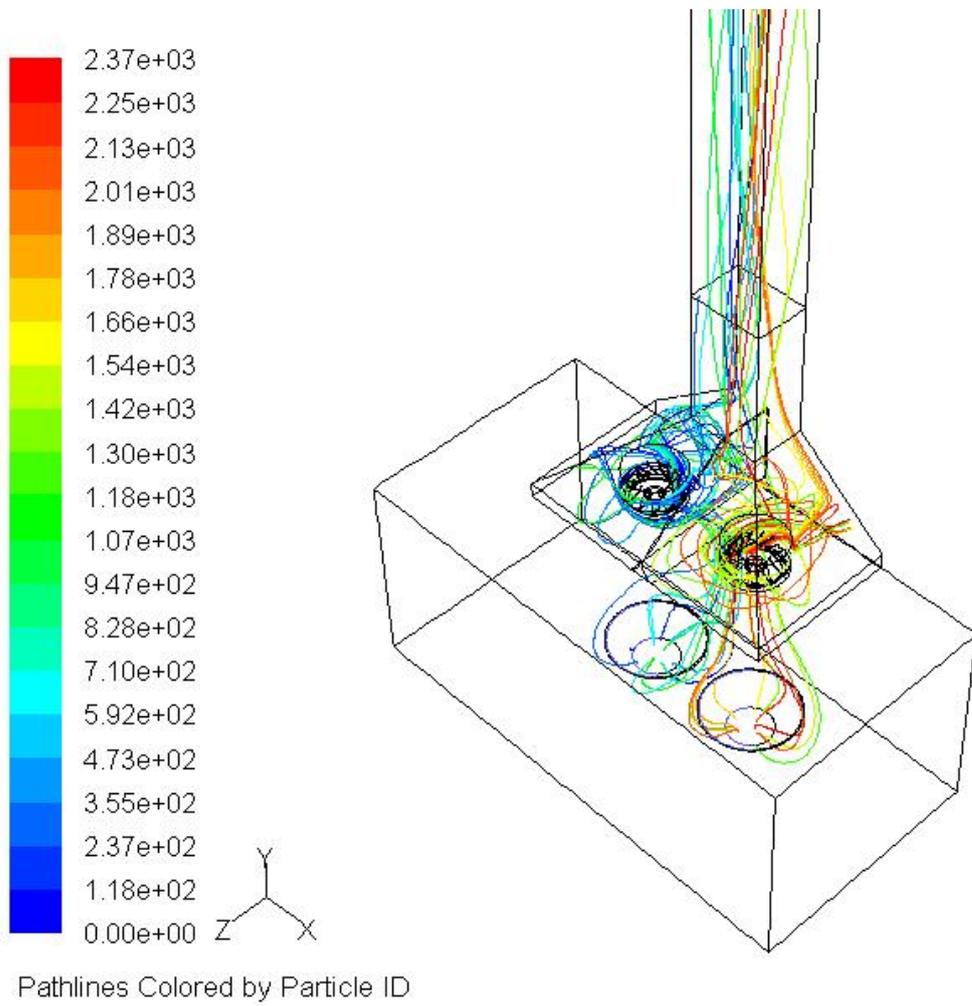


圖 4-44 熱源處放置鍋子之流場徑線示意圖

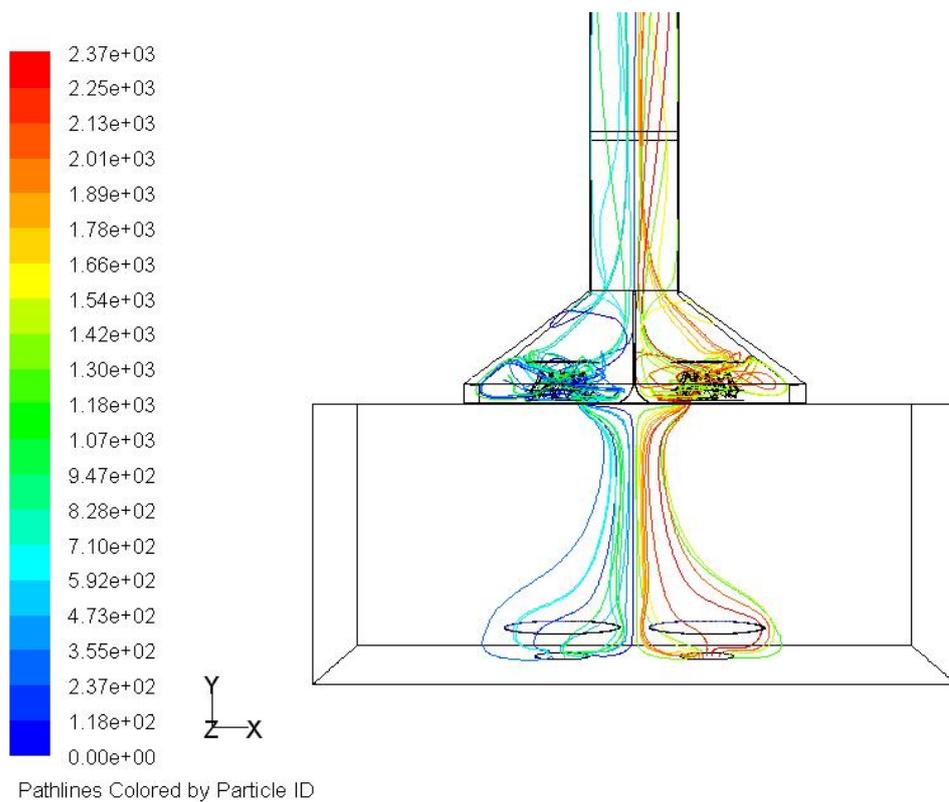


圖 4-45 熱源處放置鍋子之流場徑線前視圖

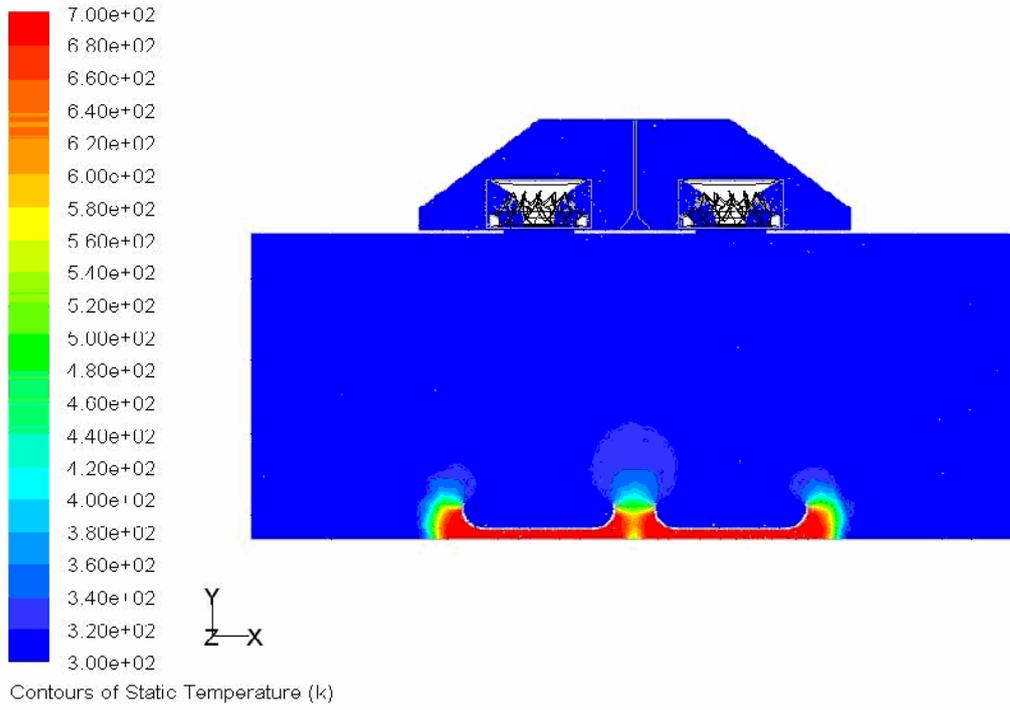


圖 4-46 熱源處放置鍋子之 Z 方向截面溫度分佈圖

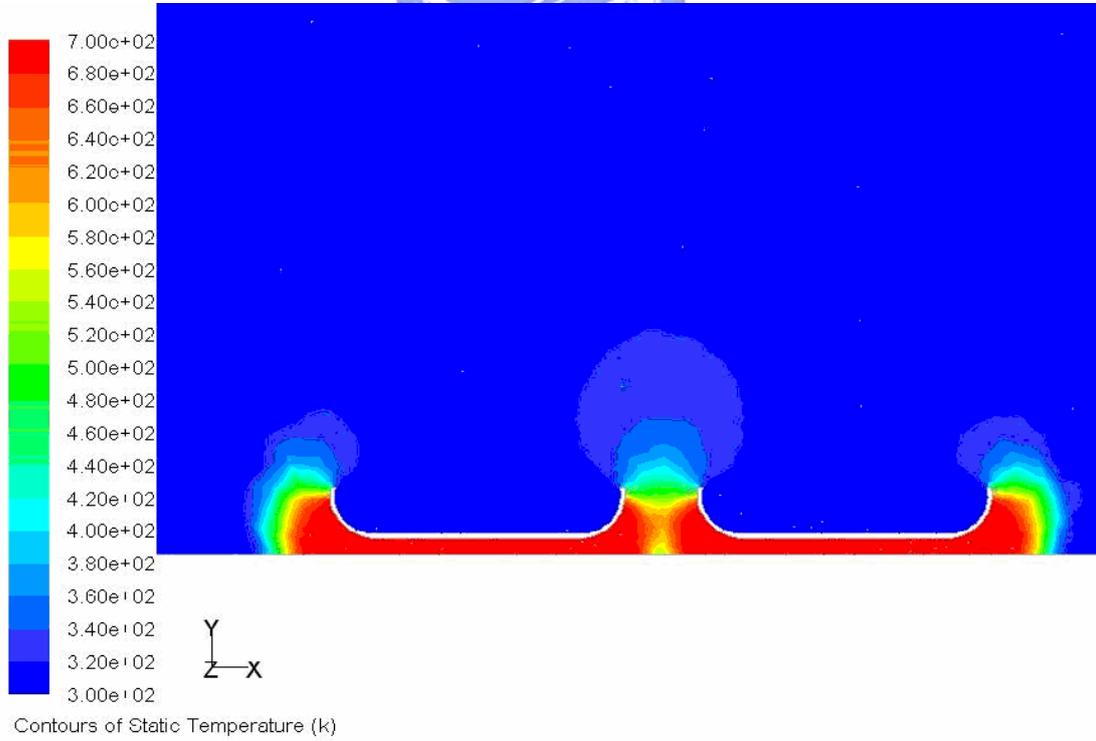


圖 4-47 熱源處放置鍋子之 Z 方向截面溫度分佈局部放大圖

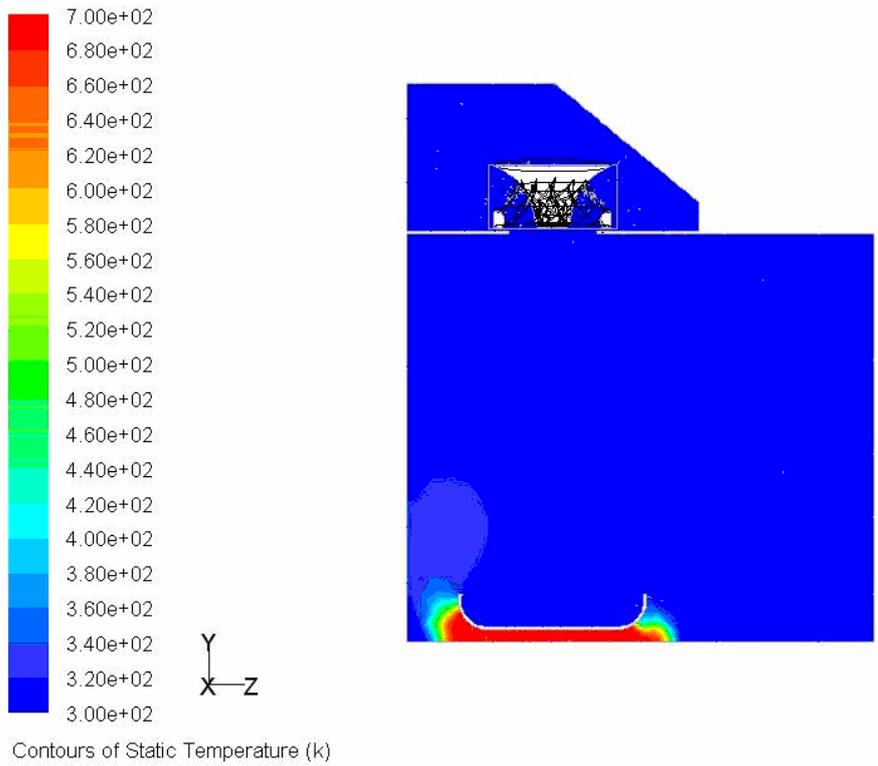


圖 4-48 熱源處放置鍋子之負 X 方向截面溫度分佈圖

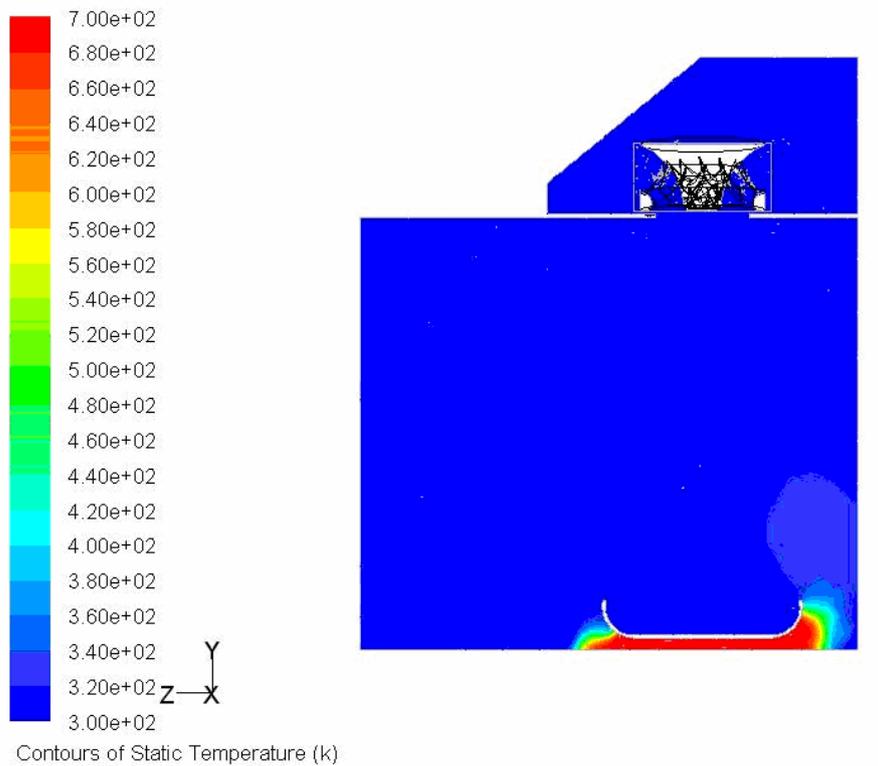


圖 4-49 熱源處放置鍋子之正 X 方向截面溫度分佈圖

4-2 抽油煙機聲場模擬分析

圖 4-50 到圖 4-54 為抽油煙機外殼聲場能量分佈圖，從這幾張圖中可以知道，外殼表面中受風扇旋轉吹出的流體直接撞擊的區域出現較高聲場能量分佈，此區域的壓力變動量激烈，乃是噪音源所產生的地方。圖 4-54 為從底部觀察外殼聲場能量分佈，由於風扇高速旋轉下吸入的流體在進入抽油煙機的時候會直接跟風扇表面碰撞，加上風扇本身也在旋轉；因此區域的壓力變動量為最激烈，所產生的噪音能量最高。

為了要分析抽油煙機內部聲場能量分佈，仍然以截面圖來顯示其內部聲場，截面的切割則如流場相同，分為 ABCD 四個面。圖 4-55 為 A 截面聲場能量流場示意圖，由於風扇在高轉速下旋轉而造成風扇區域出現非常劇烈的壓力擾動，因此在風扇區域的聲場能量值最高。圖 4-56 則 B 截面區域的能量分佈，透過這個圖可以看出，內部複雜流場的區域具有較高的聲場能量，而在出口處的聲場能量則相對較低。圖 4-57 與圖 4-58 則是從 Z 方向觀察內部聲場，其高聲場能量的區域主要集中在風扇周圍，從抽油煙機入口處一直延伸到整個內部結構。圖 4-59 與圖 4-60 為風扇表面能量分佈圖，風扇吸入面的聲場能量較高；高能量區域主要出現在葉片部份，而壓力面則較低。從流場與聲場的數值模擬結果中可以知道，在流場中出現劇烈壓力變動與渦流產生的區域，其具有較高的聲場能量，即流場中噪音源所產生的位置。

為了要進行聲壓頻譜分析，於抽油煙機外部設置接收點，以擷取在不同時階下的聲壓變化，接收點的位置如表 4-2 所示。圖 4-61 與圖 4-62 為接收點位置圖，本文選擇在抽油煙機入口處的正下方設置兩個接收點；在兩個入口之間設置另一個接收點，其目的在於分析抽油煙機入口區域的聲壓頻譜。另外於抽油煙機正前方設置三個接收點，此位置是一般人在烹飪時所處的位置，為了分析人耳所聽到的聲音強度。

圖 4-63 到圖 4-68 為各個接收點的聲壓位準圖，從聲壓位準圖中可以知道抽

油煙機的氣動噪音是由窄頻噪音與寬頻噪音所組成。窄頻噪音為風扇旋轉吹出的流體直接撞擊壁面以及流體被吸入時與風扇碰撞所引起的週期性噪音，其分佈在較窄的頻帶內且有噪音峰值產生。而寬頻噪音則是抽油煙機內部複雜的流場結構所產生的噪音，聲壓位準圖中除去窄頻噪音後，剩下的則為寬頻噪音。從表 4-3 中，可以清楚的知道接收點 1 與接收點 3 的總聲壓位準值最高，分別為 97.08dBA 與 97.35dBA，因為這兩個接收點的位置最接近抽油煙機。位於抽油煙機正前方的另外三個接收點處的總聲壓位準值則較低，而接收點 5 的總聲壓位準值較接收點 4 與接收點 6 高，其原因是接收點 5 同時能夠接收到兩個出口傳來的聲壓變化，因此處於這個位置人會聽到較高分貝的噪音。一般人耳對不同頻率的噪音有不同的敏感度，對 2000Hz 至 6000Hz 頻率範圍的噪音最為敏感。從表 4-3 中，最高峰值頻率大約為 5800Hz，處於人耳的敏感範圍內，因此抽油煙機所產生的噪音會對人們造成一定程度的影響。



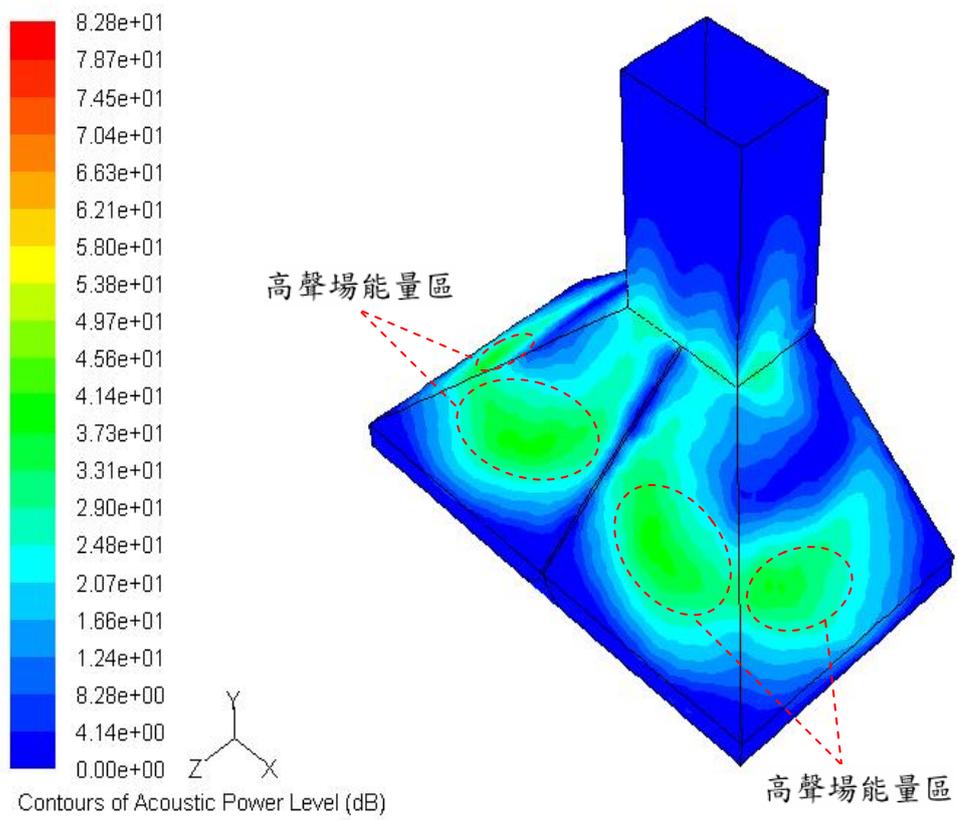


圖 4-50 抽油煙機外殼聲場能量分佈示意圖

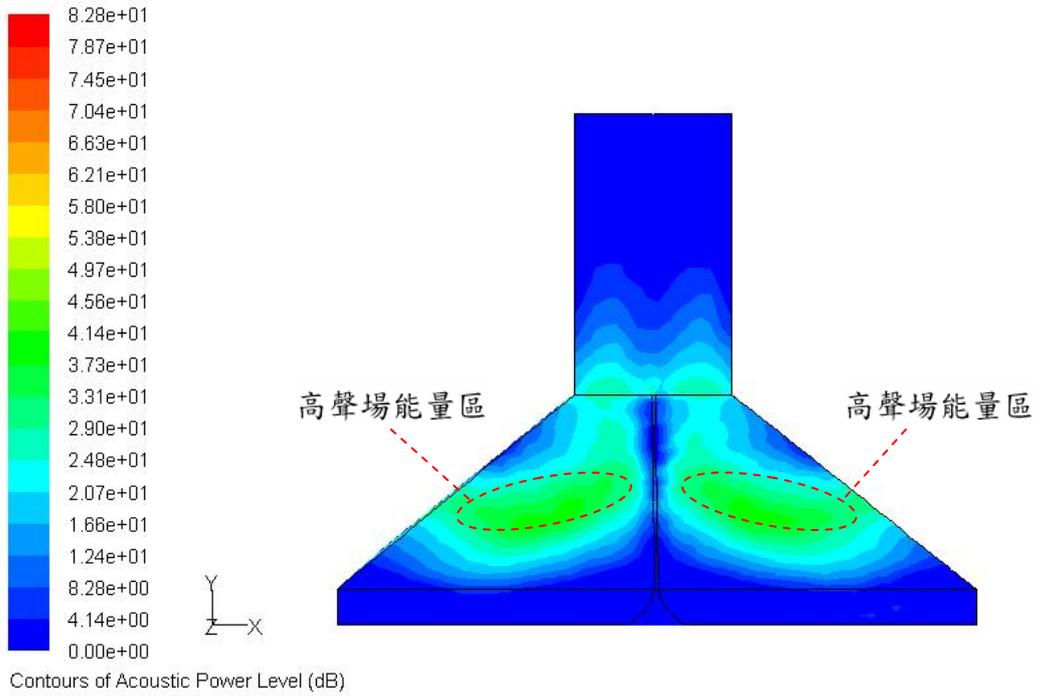


圖 4-51 抽油煙機外殼聲場能量分佈前視圖

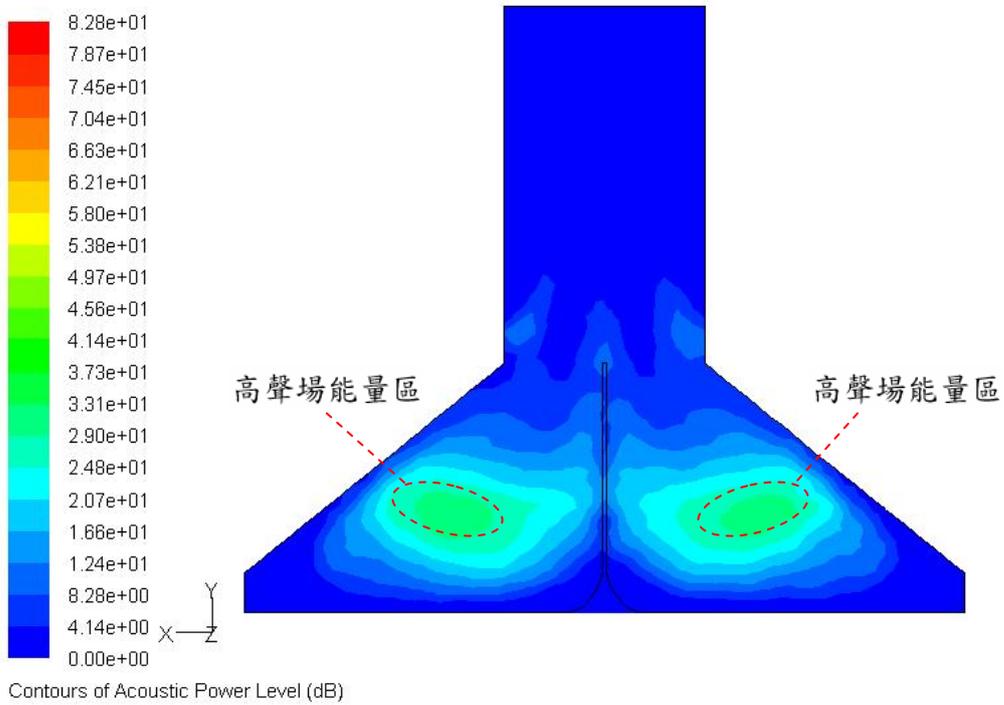


圖 4-52 抽油煙機外殼聲場能量分佈後視圖

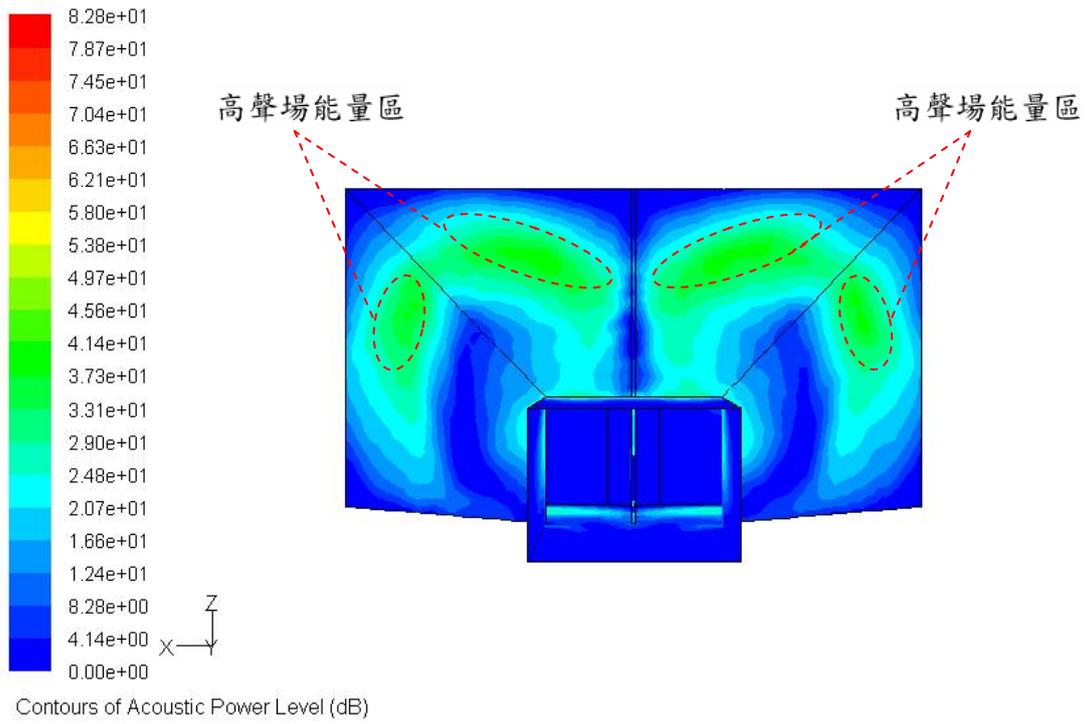


圖 4-53 抽油煙機外殼聲場能量分佈俯視圖

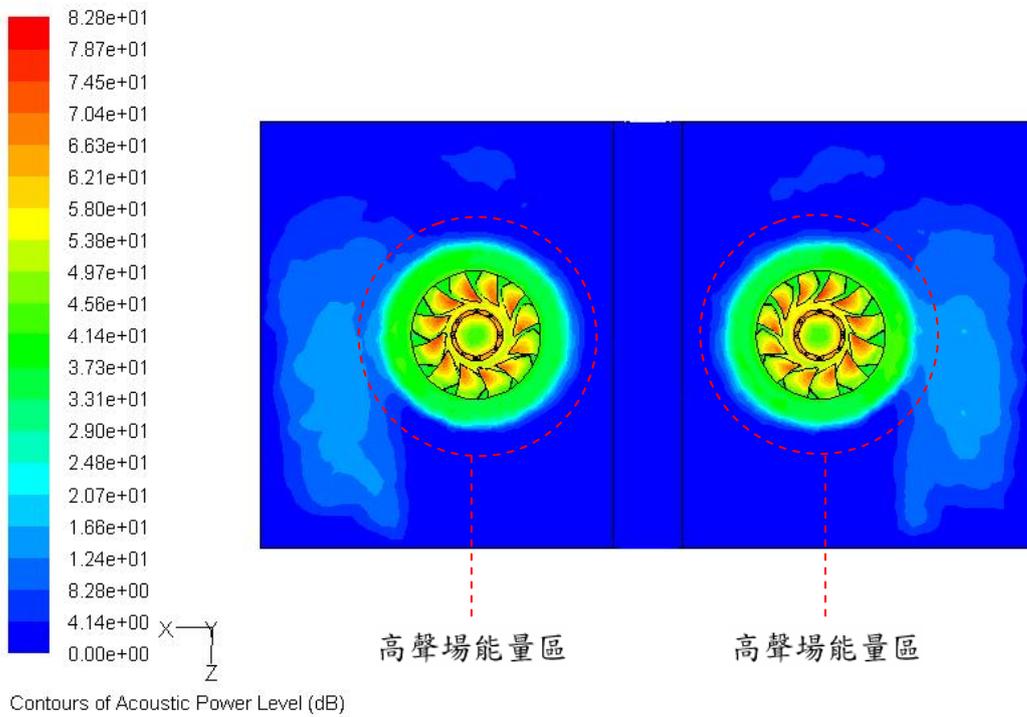


圖 4-54 抽油煙機外殼聲場能量分佈仰視圖

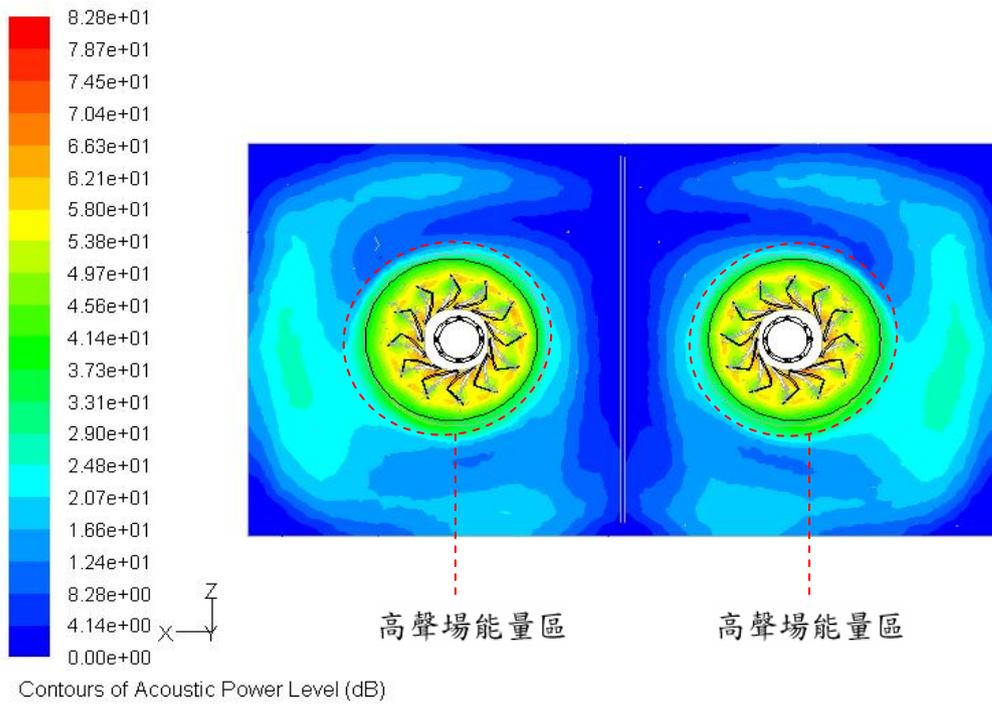


圖 4-55 抽油煙機 A 截面聲場能量示意圖

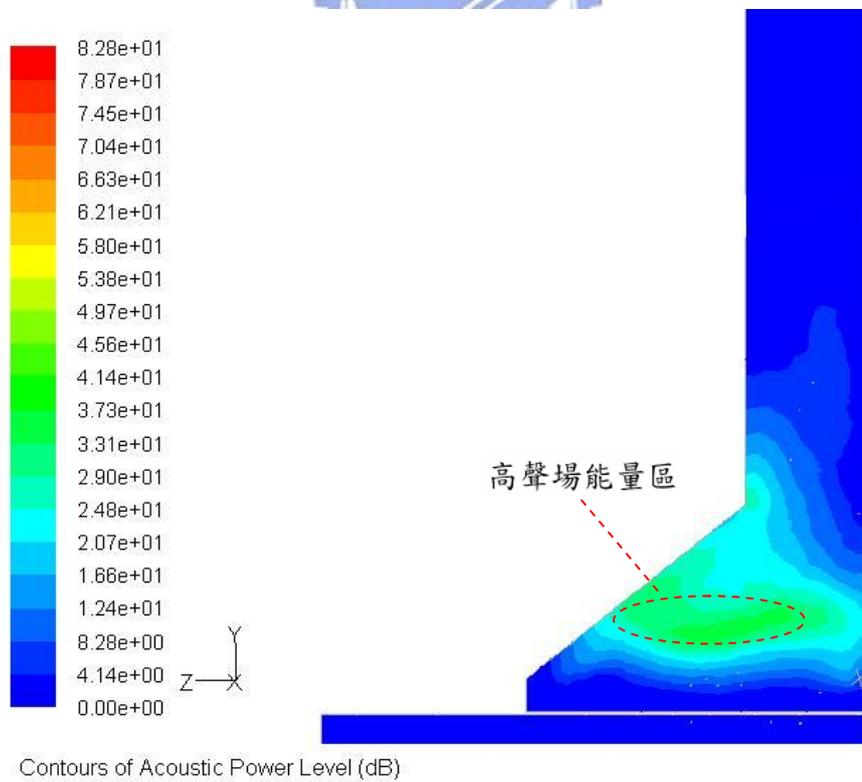


圖 4-56 抽油煙機 B 截面聲場能量示意圖

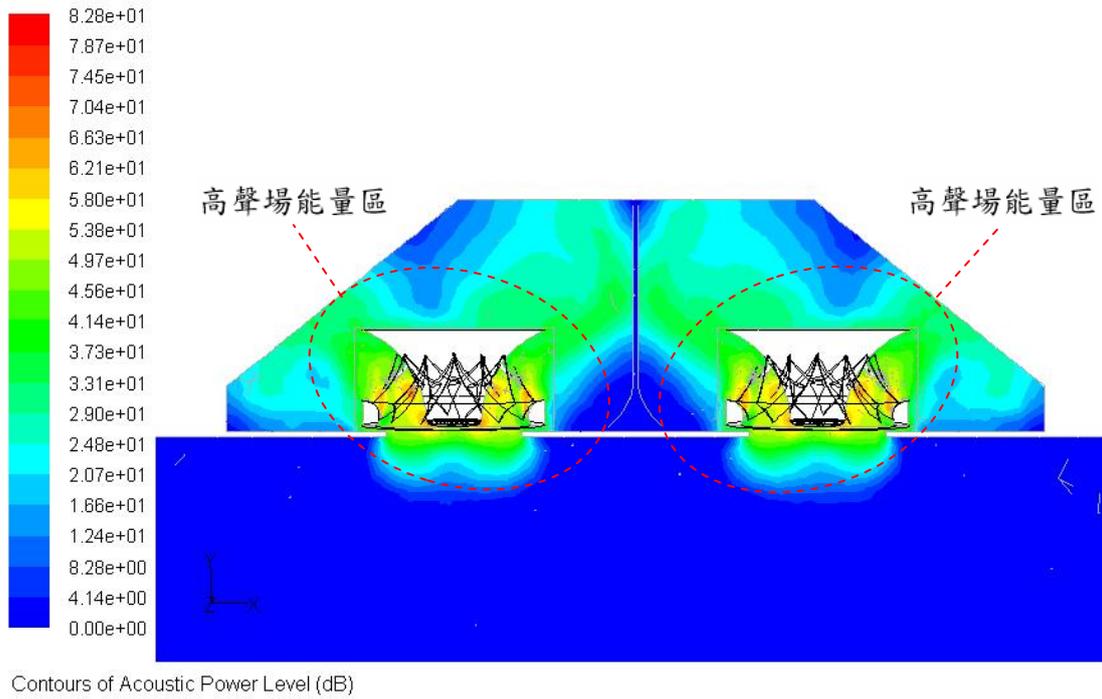


圖 4-57 抽油煙機 C 截面聲場能量示意圖

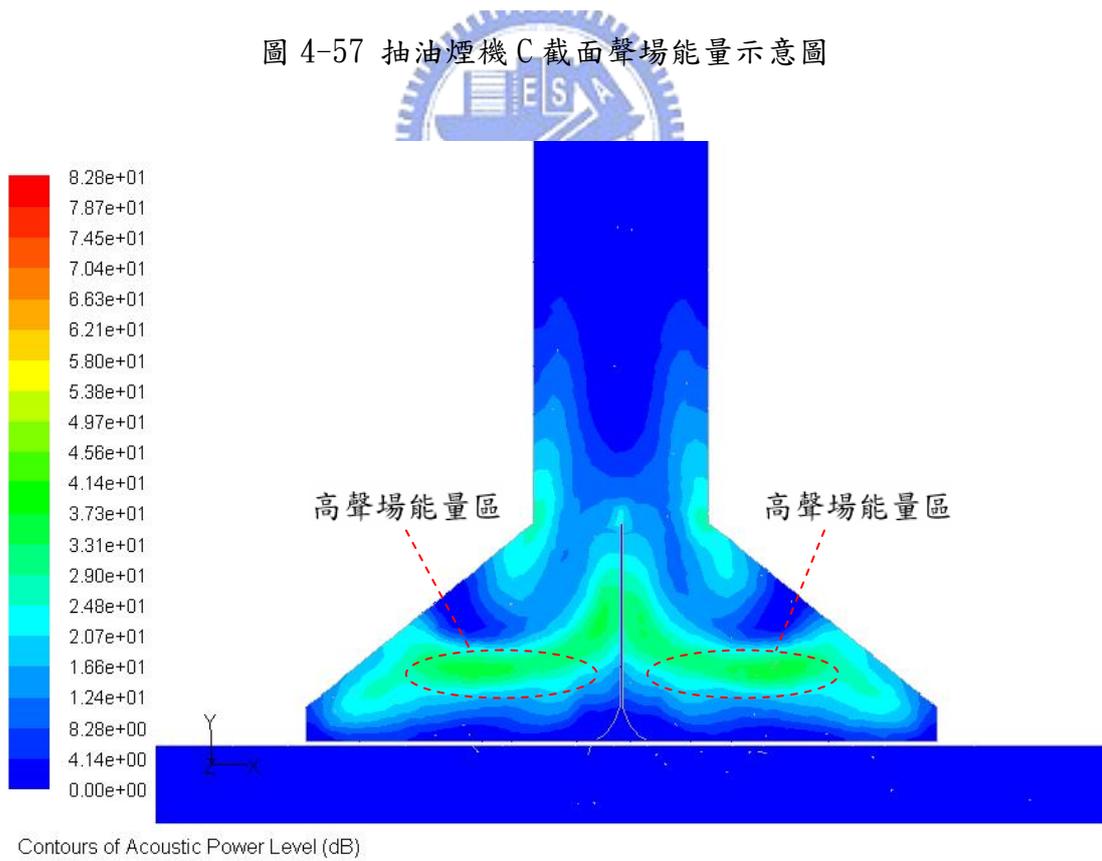


圖 4-58 抽油煙機 D 截面聲場能量示意圖

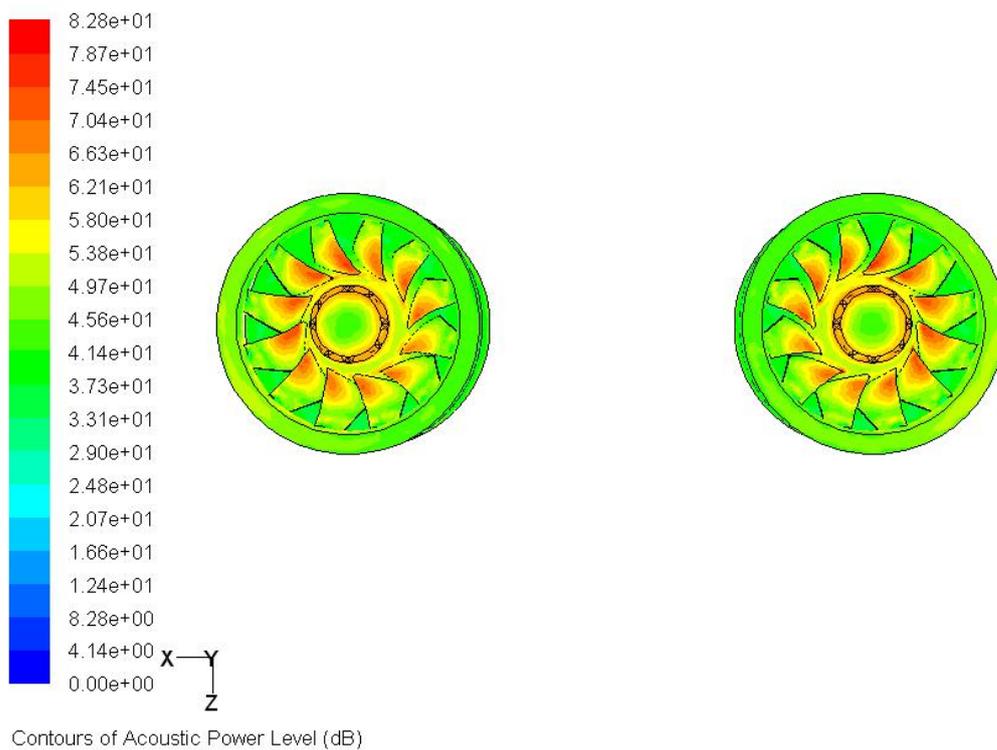


圖 4-59 抽油煙機風扇表面聲場能量分佈示意圖

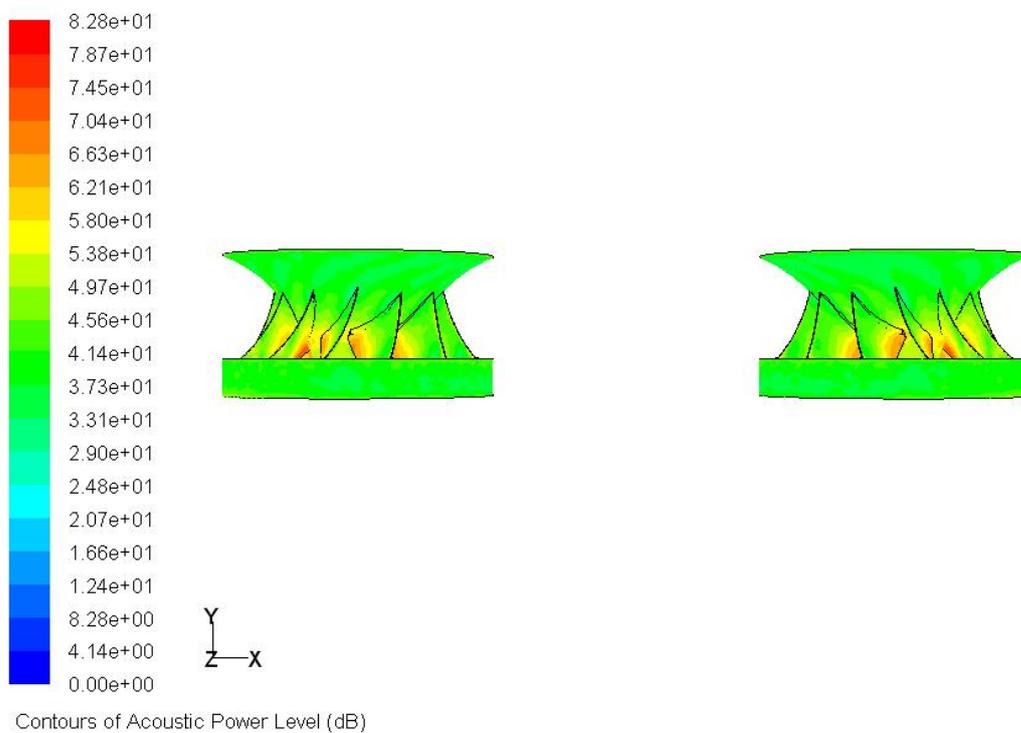


圖 4-60 抽油煙機風扇表面聲場能量分佈前視圖

表 4-2 接收點位置

接收點	位置 (mm)
1	(-200, -100, 0)
2	(0, -100, 0)
3	(200, -100, 0)
4	(-200, -100, 400)
5	(0, -100, 400)
6	(200, -100, 400)

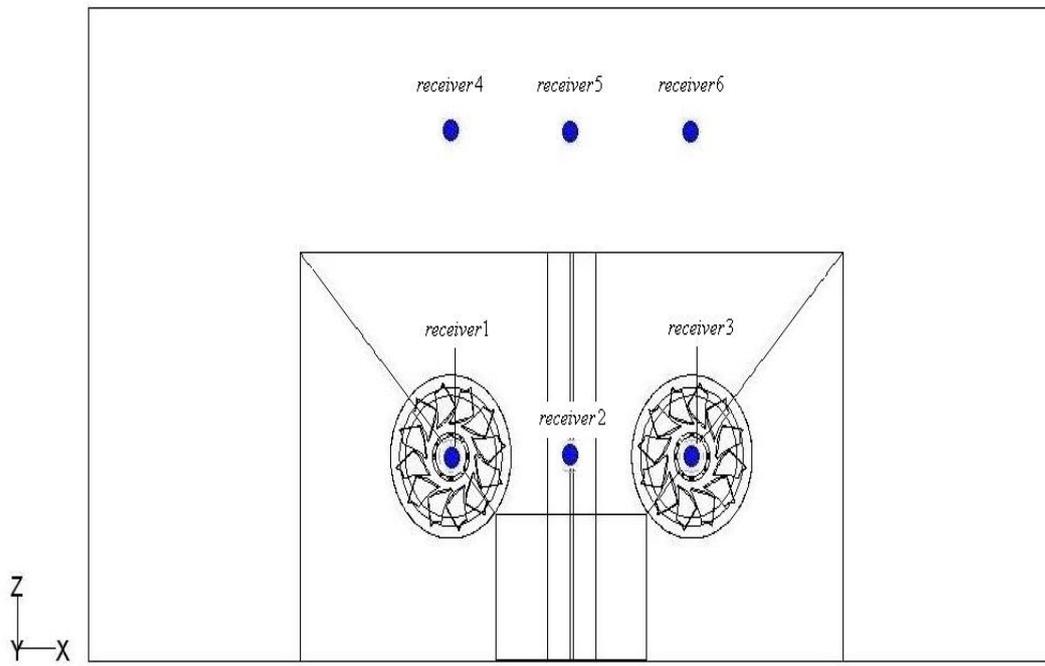


圖 4-61 抽油煙機接收點位置示意圖

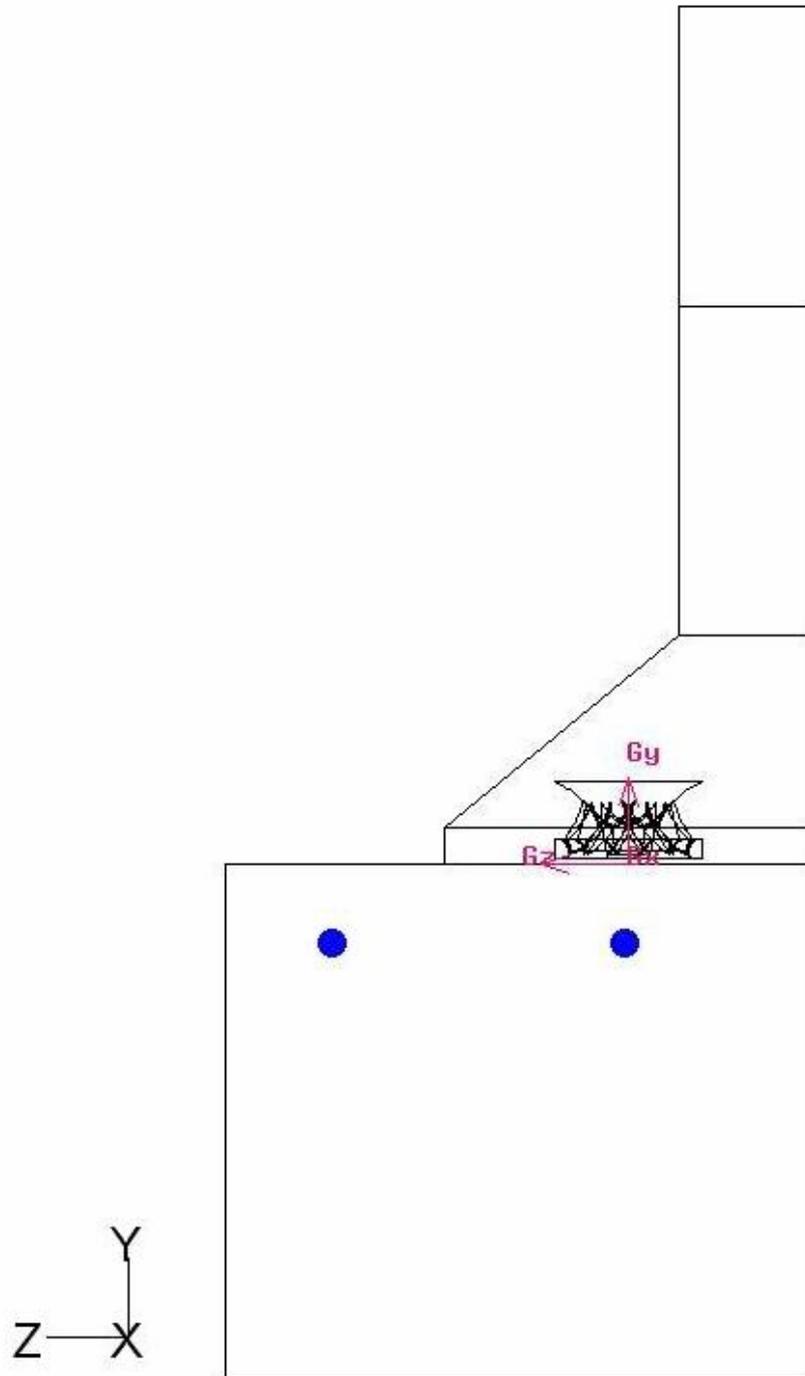


圖 4-62 抽油煙機接收點位置側視圖

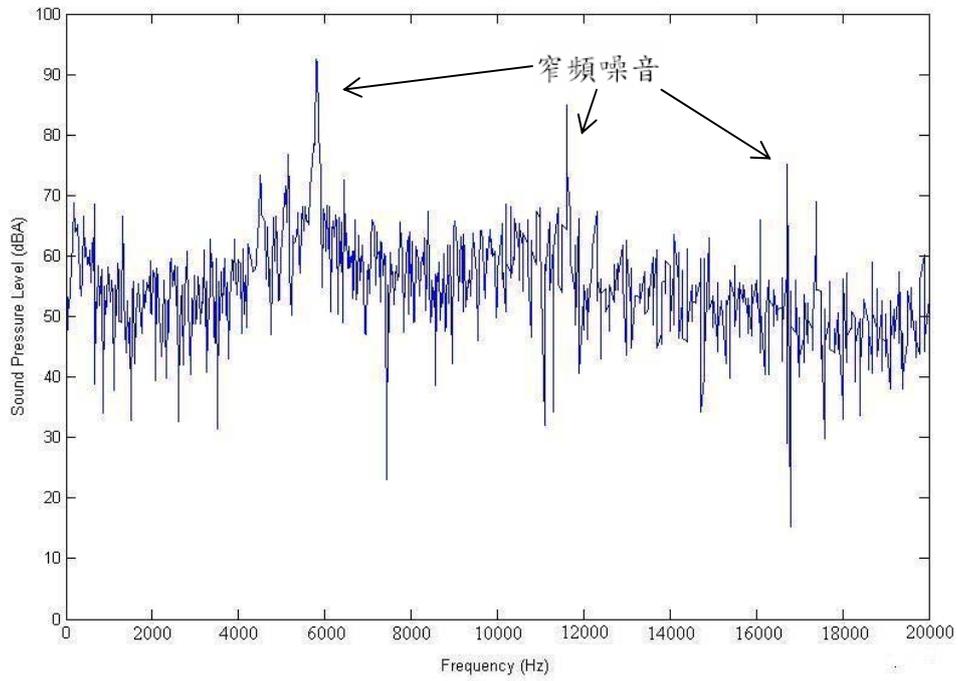


圖 4-63 接收點 1 之聲壓位準圖

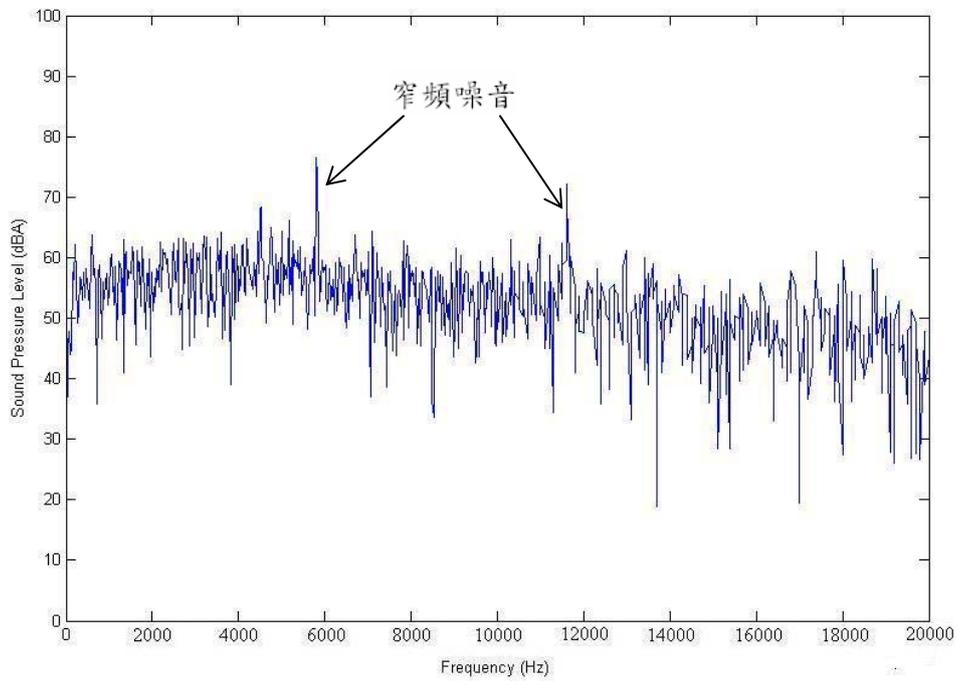


圖 4-64 接收點 2 之聲壓位準圖

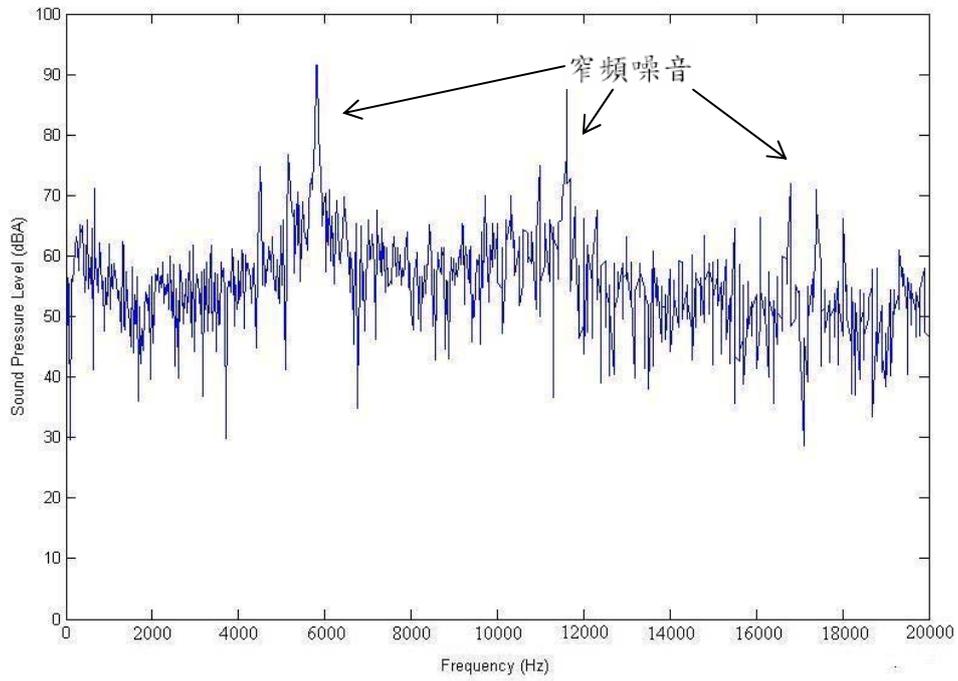


圖 4-65 接收點 3 之聲壓位準圖

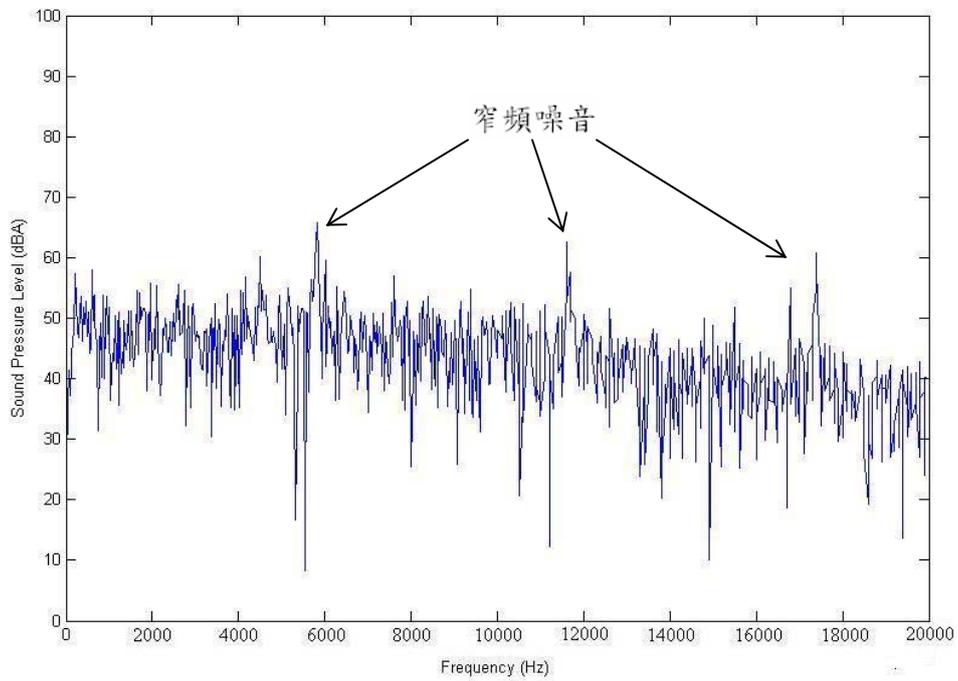


圖 4-66 接收點 4 之聲壓位準圖

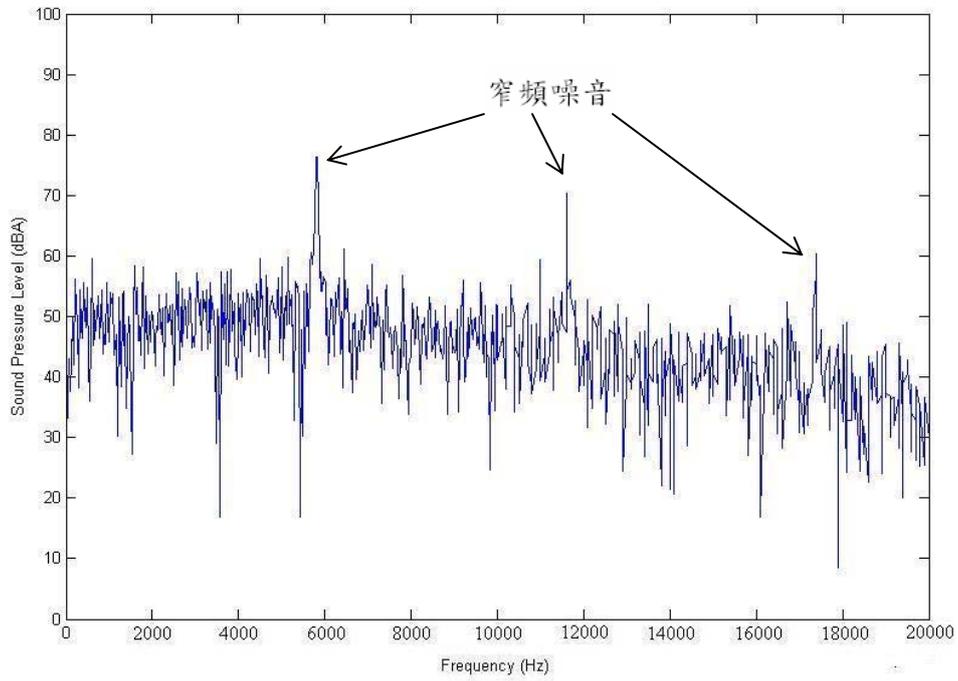


圖 4-67 接收點 5 之聲壓位準圖

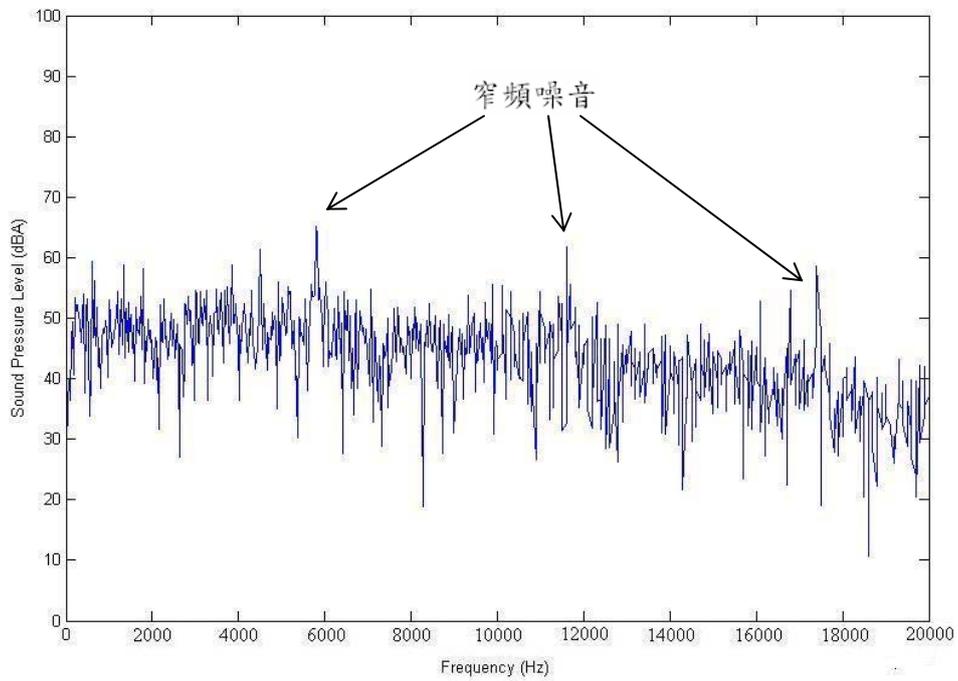
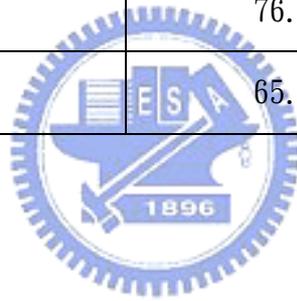


圖 4-68 接收點 6 之聲壓位準圖

表 4-3 各個接收點之聲壓位準

接收點	最高峰值頻率(Hz)	最大聲壓位準(dBA)	總聲壓位準(dBA)
1	5790	92.50	97.08
2	5790	76.50	86.04
3	5790	91.60	97.35
4	5820	65.80	77.24
5	5820	76.40	82.67
6	5790	65.10	77.27



第五章 結論

本研究主要在於探討抽油煙機之流場與氣動噪音，以數值計算方法對抽油煙機進行模擬與分析，並利用聲場方程式計算其氣動噪音。針對抽油煙機之流場與聲場作分析並求出抽油煙機噪音源產生的位置，最後結果歸納如下：

1. 當流體被吸入到抽油煙機後，由於抽油煙機結構複雜、內部空間狹小以及風扇的高速旋轉，造成內部流場變得非常混亂。
2. 抽油煙機外殼壓力變化較高的區域為流體經由風扇旋轉吹出後直接碰撞到壁面的區域，由於風扇是在高速下旋轉，所排出的流體也是以高速撞擊外殼而形成高壓力分佈區域。
3. 抽油煙機熱源模擬結果顯示，當啟動抽油煙機之後，在入口處與熱源處的流體會同時被吸入。因受到入口處流入的流體所影響，熱源處上升的流體並不是垂直的被吸入。
4. 抽油煙機外殼表面中受風扇旋轉吹出的流體直接撞擊的區域出現較高聲場能量分佈。在內部流場中，因風扇在高轉速下旋轉而造成風扇區域出現非常劇烈的壓力擾動，此區域的聲場能量值最高，乃是噪音源所產生的地方。
5. 從聲壓位準圖中可以得知抽油煙機的氣動噪音是由窄頻噪音與寬頻噪音所組成。其最高峰值頻率大約為 5800Hz，處於人耳的敏感範圍內，因此抽油煙機所產生的噪音會對人們造成一定程度的影響。

參考文獻

1. Lighthill, M. J., “ On sound generated aerodynamically. I. General theory, ” Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 211, pp.564-587, 1952.
2. Lighthill, M. J., “ On sound generated aerodynamically. I. Turbulence as a source of sound,” Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 222, pp.1-32, 1954.
3. Curle, N., “ The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound, ” Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 231, pp.505-514, 1955.
4. Ffowcs Williams, J. E., and Hawking, D. L., “Sound generation by turbulence and by surfaces in arbitrary motion, ” Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A 264, pp.321-342, 1969.
5. William, E. Z., “Class theoretical approaches to computational aeroacoustic,” Mail Stop 461, NASA Langley Research Center Hampton, Virginia 23681-0001, 1992.
6. Kenji, O. et al., “Prediction of wind noise radiated from Passenger cars and it’s evaluation based on auralization,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.81, pp.403-419, 1999.
7. Maldi, M. , “ Estimation of aerodynamic noise generated by forced compressible round jets,” C. R. Mecanique, 334, pp. 285-291, 2006.
8. Sarigul-klijn, N. and Karnopp, D., “ A computational aeroacoustic method for near and far field vehicle noise predictions,” AIAA Journal, 2001.
9. Addad, Y. et al., “ Large eddy simulation of a forward-backward facing step for acoustic source identification,” Int. Journal of Heat and Fluid Flow, 24, pp.562-571, 2003.
10. Ewert, R. and Schrode, W., “ On the simulation of trailing edge noise with a hybrid LES/APE method,” Journal of Sound and Vibration, 270, pp.509-524, 2004.

11. Lawson, M. V., “ The sound field for singularities in motion,” Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 289, pp.559-572, 1965.
12. Hodgson, M. and Li, I., “ Experimental study of the noise emission personal computer cooling fans,” Applied acoustic, 67, pp.849-863, 2006.
13. Maaloum, A., “Effect of inlet duct contour and lack thereof on the noise generated of an axial fan,” Applied Acoustic, 64, pp.999-1010, 2003.
14. Jiang, C. L. et al., “ Experimental and numerical study on aeroacoustic sound of axial flow fan in room air conditioner,” Applied Acoustics, 68, 458-472, 2007.
15. Wu, S. F., Su, S. G., and Shah, H. S., “ Modeling of the noise spectra of axial flow fans in a free field,” Journal of Sound and Vibration, 200(4) , pp.379-399, 1997.
16. Huang, L., “ Characterizing computer cooling fan noise, ” Journal of Acoustics Society of America, 114(6), pp.3189-3200, 2003.
17. 葉時行, “散熱基座的熱傳性能分析”, 國立交通大學, 碩士論文, 2001.
18. 黃東億, “長隧道通風之實用化”, 國立交通大學, 碩士論文, 2005.
19. 李崇綱, “黏性流體之全域速度場數值解法研究”, 國立交通大學, 碩士論文, 2006.
20. 白明憲, “聲學理論與應用-主動是噪音控制”, 全華科技圖書股份有限公司, 90年9月.