

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

LCD 面板垂直輸送時之動態氣流分析

**An investigation of flow field of LCD panel under
vertical transporting**

研究生：許友維

指導教授：傅武雄 博士

中華民國九十七年七月

LCD 面板垂直輸送時之動態氣流分析

**An investigation of flow field of LCD panel under
vertical transporting**

研 究 生： 許友維

Student: You-Wei Hsu

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

LCD面板垂直輸送時之動態氣流分析

研究生：許友維

指導教授：傅武雄

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究應用數值模擬套裝軟體 STAR-CD，模擬 LCD 面板垂直輸送時之流場分佈，垂直通道上置有風機濾網機組(FFU)提供均勻氣流，並直接吹向面板以防止微塵粒子附著於玻璃面板上；面板下方則有排氣管道以排出空氣，主要是觀察面板在垂直輸送過程時，面板相對壓力與支撐架輸送面板速度是否會造成面板產生飄浮現象。

綜合模擬結果與分析，支撐架輸送面板速度較慢時，面板受流場影響的相對壓力，並不會使面板產生飄浮現象，因為面板上方的壓力大於面板下方的壓力；而排氣管道的寬度增加則會適當的改善面板的飄浮現象。

An investigation of flow field of LCD panel under vertical transporting

Student: You-Wei Hsu

Advisor: Wu-Shung Fu

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

A commercial code is adopted in this study to simulate the flow field when transporting the LCD panel vertically in a vertical channel. Some FFUs are installed on the top of the vertical channel to prevent particles stay on the panels. Exhausting pipes are installed to discharge the gas. Mainly purpose in this study is to obtain the relative pressure or the velocity of supports will result in the panels float.

When the velocity is slow, the pressure difference will not cause the panels float. And increasing the width of the exhausting pipes will improve the floating.

誌謝

感謝老師傅武雄教授這兩年來的指導與鼓勵，才能讓我突破瓶頸，完成碩士論文，得以順利畢業；也要感謝研究室學長在模擬上提供很大的幫助，以及教導我如何去面對問題，再一一克服，而研究室同學給予互相勉勵及樂趣，才能堅持到底。最後必須要感謝的就是父母，有他們的精神上的支持才能熬過這兩年，然後順利畢業，要感謝的人眾多，謹在此致上最高的謝意。



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	.....	X
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	.....	6
2.1 物理模型	.....	6
2.2 分析假設與統禦方程式	.....	7
2.3 邊界條件	.....	9
2.4 面板的飄浮現象	.....	10
第三章 數值方法	.....	20
3.1 數值方法	.....	20
3.2 PISO 數值計算	.....	22
3.3 暫態滑移網格	.....	24
第四章 結果與討論	.....	30
4.1 靜態模擬分析	.....	30
4.2 動態模擬分析	.....	31
第五章 結論	.....	87
參考文獻	.....	88

表目錄

表 1-1	Fed-Std-209E 潔淨度定義.....	5
表 2-1	標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式係數值.....	13



圖目錄

圖 2-1	模擬面板之模型.....	14
圖 2-2	支撐架位移之關係圖.....	15
圖 2-3	週期為 1 秒的速度與加速度.....	16
圖 2-4	週期為 2 秒的速度與加速度.....	17
圖 2-5	週期為 4 秒的速度與加速度.....	18
圖 2-6	週期為 1.42 秒的速度與加速度.....	19
圖 3-1	相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖.....	25
圖 3-2	計算流程圖.....	26
圖 3-3	對流通量示意圖.....	27
圖 3-4	PISO 示意圖.....	28
圖 3-5	滑移網格進行方式說明示意圖.....	29
圖 4-1	排氣管道 0.1m 之靜態流場圖.....	37
圖 4-2	排氣管道 0.1m 之靜態相對壓力分佈圖.....	38
圖 4-3	排氣管道 0.2m 之靜態流場圖.....	39
圖 4-4	排氣管道 0.2m 之靜態相對壓力分佈圖.....	40
圖 4-5	排氣管道 0.4m 之靜態流場圖.....	41
圖 4-6	排氣管道 0.4m 之靜態相對壓力分佈圖.....	42
圖 4-7	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = 0$ 之流場示意圖.....	43
圖 4-8	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{1}{8}$ 之流場示意圖.....	44
圖 4-9	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{2}{8}$ 之流場示意圖.....	45
圖 4-10	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{3}{8}$ 之流場示意圖.....	46
圖 4-11	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{4}{8}$ 之流場示意圖.....	47

圖 4-12	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{5}{8}$ 之流場示意圖.....	48
圖 4-13	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{6}{8}$ 之流場示意圖.....	49
圖 4-14	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{7}{8}$ 之流場示意圖.....	50
圖 4-15	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = 1$ 之流場示意圖.....	51
圖 4-16	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板上總受力.....	52
圖 4-17	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板下總受力.....	53
圖 4-18	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板上下總受力差.....	54
圖 4-19	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板實際受力.....	55
圖 4-20	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖.....	56
圖 4-21	排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之飄浮現象判斷圖.....	57
圖 4-22	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = 0$ 之流場示意圖.....	58
圖 4-23	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{1}{8}$ 之流場示意圖.....	59
圖 4-24	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{2}{8}$ 之流場示意圖.....	60
圖 4-25	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{3}{8}$ 之流場示意圖.....	61
圖 4-26	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{4}{8}$ 之流場示意圖.....	62
圖 4-27	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{5}{8}$ 之流場示意圖.....	63
圖 4-28	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{6}{8}$ 之流場示意圖.....	64
圖 4-29	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{7}{8}$ 之流場示意圖.....	65
圖 4-30	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = 1$ 之流場示意圖.....	66
圖 4-31	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖.....	67

圖 4-32	排氣管道 0.1m，週期為 4 秒之飄浮現象判斷圖.....	68
圖 4-33	排氣管道 0.1m，週期為 1.42 秒之面板加速度與支撐架加速度位移 關係圖.....	69
圖 4-34	排氣管道 0.1m，週期為 1.42 秒之飄浮現象判斷圖.....	70
圖 4-35	排氣管道 0.1m，週期為 2 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關 係圖.....	71
圖 4-36	排氣管道 0.1m，週期為 2 秒之飄浮現象判斷圖.....	72
圖 4-37	排氣管道 0.2m，週期為 1 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關 係圖.....	73
圖 4-38	排氣管道 0.2m，週期為 1 秒之飄浮現象判斷圖.....	74
圖 4-39	排氣管道 0.2m，週期為 1.42 秒之面板加速度與支撐架加速度位移 關係圖.....	75
圖 4-40	排氣管道 0.2m，週期為 1.42 秒之飄浮現象判斷圖.....	76
圖 4-41	排氣管道 0.2m，週期為 2 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關 係圖.....	77
圖 4-42	排氣管道 0.2m，週期為 2 秒之飄浮現象判斷圖.....	78
圖 4-43	排氣管道 0.2m，週期為 4 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關 係圖.....	79
圖 4-44	排氣管道 0.2m，週期為 4 秒之飄浮現象判斷圖.....	80
圖 4-45	排氣管道 0.4m，週期為 1 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關 係圖.....	81
圖 4-46	排氣管道 0.4m，週期為 1 秒之飄浮現象判斷圖.....	82
圖 4-47	排氣管道 0.4m，週期為 1.42 秒之面板加速度與支撐架加速度位移 關係圖.....	83
圖 4-48	排氣管道 0.4m，週期為 1.42 秒之飄浮現象判斷圖.....	84

圖 4-49 排氣管道 0.4m，週期為 2 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖.....	85
圖 4-50 排氣管道 0.4m，週期為 2 秒之飄浮現象判斷圖.....	86



符號索引

$C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}, C_{\varepsilon 4}$	$k-\varepsilon$ 紊流模式的經驗係數	
$F_{h,j}$	於 x_j 方向上的能量擴散通量	
\sqrt{g}	特定公制張量	
k	紊流動能	
s_i	動量源項	
s_{ij}	剪應變率張量	
s_ϕ	來源係數	
x_i	卡式座標 ($i=1, 2, 3$)	
A	面板面積	$[m^2]$
t	時間	$[s]$
u	流體切線速度	$[m/s]$
u_i	流體在 x_i 方向的絕對速度	$[m/s]$
\tilde{u}_i	流體與座標系統的相對速度	$[m/s]$
u_w	壁面速度	$[m/s]$
m	面板重量	$[kg]$
w_i	排氣管道寬度	$[mm]$
L	面板位移	$[m]$
l_c	振幅	$[m]$
f_c	頻率	$[Hz]$
v	支撐架速度	$[m/s]$
a_r	支撐架加速度	$[m/s^2]$
a_b	面板加速度	$[m/s^2]$



P_u	面板上方壓力	[Pa]
P_d	面板下方壓力	[Pa]
F_u	面板上總受力	[N]
F_d	面板下總受力	[N]
F_{net}	面板上下總受力差	[N]
F_b	流場作用於面板之實際作用力	[N]
F_g	面板重力	[N]
F^*	虛幻力	[N]

希臘符號

Γ_ϕ	擴散係數	
μ	黏滯係數	
μ_t	紊流黏滯係數	
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	$k-\varepsilon$ 紊流模式的經驗係數	
τ_{ij}	黏滯應力張量	
ϕ	代表任一獨立物理量	
τ	週期	
ρ	面板密度	[kg/m ³]



第一章 緒論

1.1 前言

隨著數位化技術的推進，因勢而起的電子數位應用產品為人類生活帶來極佳的便利性與樂趣，而所有數位產品皆需透過一顯示介面來呈現內容，因此，顯示介面已成為產業的關注焦點，不同的顯示技術在其中角逐，相關廠商投注資源開發新技術、新應用，並為提昇人類視覺享受而努力。以往電視機與電腦顯示器採用的映射管(CRT)顯示器為主流，均有著體積大、重量重、螢幕尺寸大小受限制等缺點，而電子科技的發展，對移動顯示的要求越來越多，映射管顯示器先天的限制，更讓其小型化、行動化及耐候性受到影響，替代映射管顯示器開發新一代的顯示器技術變得有其必要性與先決性。隨著平面顯示器(FPD)產品陸續投入市場後，顯示器之發展更加多元化，技術更替也更加快速，其中薄膜電晶體液晶顯示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display 簡稱 TFT-LCD)之產品具有輕、薄、省能源、低輻射、平面直角畫面顯示不變形及同時要與現有的影像信號技術相容之優點，已被視為主流顯示技術。根據工研院 IEK-ITIS 計畫統計，2007 年台灣平面顯示器總產值達新台幣 1 兆 7501.2 億元，比 2006 年成長了 37.6%，其中面板產業產值約新台幣 1 兆 2849 億元，主力為大型 TFT-LCD 面板產業，產值約 1 兆 870.3 億元，相較於 2006 年，產值成長 42%；其次為中小型 TFT-LCD 面板產業，產值約 1271.2 億元，比 2006 年成長了 69.3%，是整個顯示器產業成長最快的部份。展望 2008 年，台灣平面顯示器總產值將達新台幣 2 兆 1454.8 億元，比 2007 年成長 22.6%，其中面板產業產值為新台幣 1 兆 5913 億元，比 2007 年成長 23.8%，大型 TFT-LCD 面板產業產值約新台幣 1 兆 3700 億元，其次為中小型 TFT-LCD 面板產業，產值約為新台幣 1560 億元。在 2008 年中，大尺寸 TFT-LCD 面板產業產值成長將更為迅速，將使整體營業利益更往上提升，因此預期未來幾年，台灣大尺寸 TFT-LCD 面板產值之附加價值將持續成長。

薄膜電晶體液晶顯示器的發展，提供人類更寬大的視覺介面與更高解析度的色彩，而製造出此顯示器的各世代廠房之間的差異在於面板的尺寸，1990 年 TFT-LCD 產業崛起於日本，當時日本建造 1 代廠(1G)，其面板大約為 0.3m×0.4cm，可做成一片 15 吋面板，到了 1996 年進入產業，當時技術已進步到 3.5 代廠(3.5G)，其面板約為 0.6m × 0.72m，近期技術更提升至 7.5 代廠(7.5G)，而面板 則達到 1.95m × 2.25m，可提供 40 吋以上面板的最佳切割以生產大尺寸的液晶電是用面板，一路成長到 8.5 代廠(8.5G)，其面板更達到 2.2m× 2.5m，其厚度更不到 1mm，主要是用來生產 46 吋以上的大型面板。由於大尺寸面板的需求與日俱增，越新世代的廠房，其面板越大，大尺寸的面板可切割更大及更多的面板，已達到降低成本及擴大經濟效益的目的。生產製程中，其搬運過程稍有不慎就易碎裂，因此很難以人工去搬運單片玻璃，均需要利用卡匣(cassette)做為面板之搬運及儲放，以防操作人員在生產製造過程中對面板製程品質造成傷害，卡匣再藉助於自動倉儲系統之存放或暫存，而自動倉儲系統的主要目的為增加儲存容量、提高空間使用率、維持庫存品之優良品質並節省空間及人力、提供乾淨的儲存環境，而使生產之玻璃面板達到安全、無塵之要求。由此可知，面板倉儲系統對於潔淨度要求很高，因此潔淨室成為大家致力研究的重點之一。

1.2 文獻回顧

Whyte[1]在潔淨室設計方面研究最為詳盡，潔淨室必須具備以下要素：能快速去除空氣中微塵粒子，能有效防止微塵粒子的沉積，須對溫度、壓力及溼度做妥善控制，對於結構、噪音、震動和能源都要有一定的考量。而在無塵等級規範中，業界多採用美國聯邦潔淨室之規格 Federal Standard No. 209，現在最新的版本為 FS209E，如表 1-1 所示。而面板要求的潔淨等極多為 Class100 0.3 μ m。Cheng 等人[2]利用數值軟體 Star-CD 的標準 k- ϵ 紊流模型模擬均勻流潔淨室 (unidirectional airflow cleanroom) 的流場，並探討室內高架地板高度與開孔率、進口速度和潔淨室寬度對氣流分佈的影響。其模擬結果可發現，高架地板的

高度和開孔率以及入口分佈對氣流速度均勻影響最大，尤其是當潔淨室寬度較窄時更為明顯，當進口速度均勻時，潔淨室內氣流的不均勻度會隨寬度增加而降低，而當室內高架地板高度增加時，均勻度也會越高，但基於成本考量，控制入口速度及高架地板開孔率為較可行辦法。Murakami 等人[3]以數值方法來分析潔淨室中使用頂置進氣單元(flow unit)噴流方式的潔淨室流場，並研究改變進氣口與出氣口個數以及位置對流場之影響，其分析結果可以發現在此類問題中使用數值分析比利用實驗分析為佳，原因為實驗中由於邊界條件不易控制，但利用數值模擬可快速改變邊界參數。此外進氣口對流場的影響會比排氣口對流場之影響顯著，而棋盤式排列的進氣口效果會比縱列式排列效果佳。Hu 等人[4]以實驗利用三維超音波風速計(three-dimensional ultrasonic anemometer)量測潔淨室內的速度向量、紊流強度與紊流動能，文中結論瞭解到以超高效率過濾網(ULPA)組成之風機濾網機組(fan-filter unit 簡稱 FFU)所提供均勻氣流的能力。而工作臺對潔淨室內的氣流影響很大，且可能產生迴流造成粒子堆積，要盡量予以避免，此外實驗結果不僅對實際設計潔淨室設備有助益，且可幫助利用數值方法模擬潔淨室流場的研究。至於潔淨技術應用於儲放 TFT-LCD 面板倉儲系統之研究，Chiang[5]利用數值模擬分析軟體 FLUENT 來模擬測向入風的面板儲放區之流場，先設計分析出內部流場之均勻度與粒子沉積情形，再以調整入風口面積加以改善。其模擬的結果可得知，空間中產生迴流會造成流場分佈不均勻，使得塵埃粒子沉積與滯留現象發生。可利用增加左右兩側入風口面積進而增加氣流分佈均勻度，並以不同入口面積配置不同入口速度的設計方法，來改善迴流現象，且可減少總流量供應而達到節省之效果。Huang[6]主要目的為以紊流高雷諾數 $k-\epsilon$ 模式做數值計算並改善新一代面板倉儲系統之流場，此倉儲系統為與傳統利用兩側設置大量風機濾網機組(FFU)相比更符合經濟效益的上置 FFU 模型，主要是觀察面板卡匣中的流場速度與自動搬運台車行進時對流場的影響。綜合模擬結果與分析，以改良後兩側分風道入口分流的模型效果最好，面板卡匣的流場速度可達標準。

1.3 研究目的

在面板的運送過程中，利用滾輪將玻璃面板輸送到製程所需位置，滾輪與面板的接觸為點接觸狀態，當面板垂直輸送時，因受重力作用影響，接觸點位置極易形成應力集中現象，此外，面板上方有風機濾網機組(FFU)將潔淨室空氣吹向面板，以防止微塵粒子附著於玻璃面板上。垂直輸送過程中，潔淨氣流於面板上下側分佈會隨時間做動態變化，導致上下側壓力亦為動態變化，此上下側壓力的動態變化是否會惡化應力集中現象，甚至引起面板飄浮現象發生，或因FFU下壓於面板表面之氣流，與面板於快速下降時產生之向上氣流阻力不均時，是否會造成面板表面應力集中致面板破裂是極為關注的問題。因此本文主要目的為以紊流高雷諾數 $k-\epsilon$ 模式做數值計算模擬，來瞭解面板在不同條件下及加速度下，垂直輸送過程的受力狀況以應力分佈圖、氣流壓力分佈圖及氣流速度分佈圖等圖形使此飄浮現象問題更為明朗化。



Class Limits											
Class name		$\geq 0.1\mu\text{m}$		$\geq 0.2\mu\text{m}$		$\geq 0.3\mu\text{m}$		$\geq 0.5\mu\text{m}$		$\geq 5\mu\text{m}$	
		Volume units		Volume units		Volume units		Volume units		Volume units	
SI	English	(m^3)	(ft^3)	(m^3)	(ft^3)	($m^3$)	($ft^3$)	($m^3$)	($ft^3$)	($m^3$)	($ft^3$)
M 1		350	9.91	75.7	2.14	30.9	0.875	10.0	0.283	—	—
M 1.5	1	1240	35.0	265	7.50	106	3.00	35.3	1.00	—	—
M 2		3,500	99.1	757	21.4	309	8.75	100	2.83	—	—
M 2.5	10	12,400	350	2,650	75.0	1,060	30.0	353	10.0	—	—
M 3		35,000	991	7,570	214	3,090	87.5	1,000	28.3	—	—
M 3.5	100	—	—	26,500	750	10,600	300	3,530	100	—	—
M 4		—	—	27,700	2,140	30,900	875	10,000	283	—	—
M 4.5	1000	—	—	—	—	—	—	35,300	1,000	247	7.00
M 5		—	—	—	—	—	—	100,000	2,830	618	17.5
M 5.5	10000	—	—	—	—	—	—	353,000	10,000	2,470	70.0
M 6		—	—	—	—	—	—	1,000,000	28,300	6,180	175
M 6.5	100000	—	—	—	—	—	—	3,350,000	100,000	24,700	700
M 7		—	—	—	—	—	—	10,000,000	283,000	61,800	1,750

表 1-1 Fed-Std-209E 潔淨度定義

第二章 物理模式

2.1 物理模型

本文將使用電腦模擬在不同垂直輸送速度下，面板上下側的氣流壓力變動分佈，利用此分佈結果在進行面板承受之應力分析，瞭解受力狀態，進而改善上下側動態變化所產生的應力集中是否使面板產生飄浮現象之問題。

此模擬將使用 8 代 LCD 面板來進行數值計算，此外，面板上方有風機濾網機組(FFU)將潔淨室空氣吹向面板，向下吹的風速固定為 0.4 m/s ，而面板的支撐架呈上下移動，分別移動一循環所需時間為 1 秒、2 秒及 4 秒，並利用排氣管道寬度的不同，所產生的迴流也不盡相同，模擬出最適當的排氣管道寬度對於飄浮現象影響最低，排氣管道在模擬時的寬度 w_i 有三種尺寸，分別為 100 mm 、 200 mm 及 400 mm ，並畫出模擬面板的物理模型圖(圖 2-1)。利用不同的條件下所模擬出的結果，加以探討出產生飄浮現象的臨界點。本文採二維直角座標系統來模擬此面板流場，因此，此模擬面板尺寸長 l 為 1000 mm 、寬 w 為 2300 mm 、高 h 為 0.7 mm ，面板密度為 2600 kg/m^3 ，面板的重量則可由下式算出：

$$\begin{aligned} m &= l \cdot w \cdot h \cdot \rho & (2-1) \\ &= 1000\text{mm} \cdot 2300\text{mm} \cdot 0.7\text{mm} \cdot 2600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= 4.186\text{kg} \end{aligned}$$

面板主要由支撐架所帶動，而支撐架與面板假設有 6 個支撐點，每一個支撐點設為 50 mm 。最後結果則由模擬流場與面板物理現象綜合計算出是否會產生使面板飄浮，並針對使面板飄浮的條件下加以討論。

2.2 分析假設與統御方程式

本文選擇使用高雷諾數 k- ϵ 紊流模式來模擬流場。為了簡化分析，本研究對流場做了以下的假設：

1. 空間為二維直角座標系統。
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，為不可壓縮紊流流場。
3. 流體與物體之介面滿足無滑移條件 (no-slip condition)。
4. 不考慮因黏滯性生成熱量問題。
5. 面板支撐架不崩潰。
6. 考慮面板的重力影響。

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，分別如下：

連續方程式：

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

動量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p_s}{\partial x_i} + s_i \quad (2-3)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \quad (2-4)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-5)$$

紊流動能方程式 (k-equation)：

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \tilde{u}_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] =$$



$$\mu_t(p + p_B) - \rho\varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2-6)$$

其中：

$$p \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2-7)$$

$$p_B \equiv -\frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (2-8)$$

σ_k 為經驗值。

紊流動量消耗方程式：

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \tilde{u}_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] =$$

$$C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t (p + p') - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t p_B - C_{\varepsilon 2} (1 - 0.3e^{-R_t^2}) \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2-9)$$

其中：

$$p' \equiv 1.33 \left[1 - 0.3e^{-R_t^2} \right] \cdot \left[P + 2 \frac{\mu}{\mu_t} \frac{k}{y^2} \right] e^{-0.00375 \text{Re}_y^2} \quad (2-10)$$

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (2-11)$$

$$f_\mu = \left[1 - e^{-0.0198 \text{Re}_y} \right] \cdot \left(1 + \frac{5.29}{\text{Re}_y} \right) \quad (2-12)$$

$$\text{Re}_y = \frac{y \sqrt{k}}{\nu} \quad (2-13)$$

$$R_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad (2-14)$$

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。

2.3 邊界條件

本文流場主要是由 FFU 風機組送風，氣流為單一方向往下，面板置於支撐架上，隨著支撐架呈垂直方向輸送，藉由流體流動帶走塵埃粒子。以下敘述主要邊界條件，分別為入口條件、出口壓力邊界與支撐架移動的速度。

1. 入口條件：

$$U = 0, V = V_{in}$$

2. 出口壓力邊界：

本文出口壓力設定為大氣壓力。

$$p = 0, \frac{\partial k}{\partial n} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$$

3. 支撐架移動的速度：

支撐架移動呈弦波位移，使支撐架上下移動，並畫出位移的關係圖(圖 2-2)，其中 A 為原點，向上移動到上始點 B，然後回到原點 A，再移動到下始點 C，又回到原點 A，稱為一循環。分別移動一循環所需時間為 1 秒、2 秒及 4 秒，其位移、速度及加速度表示如下：

$$L = l_c \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (2-15)$$

$$v = \frac{dL}{dt} = 2\pi f_c \cdot l_c \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (2-16)$$

$$a_r = \frac{dv}{dt} = -4\pi^2 f_c^2 \cdot l_c \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (2-17)$$

其中：

L ：支撐架位移

l_c ：振幅 (m)

f_c : 頻率 (Hz)

v : 支撐架速度 (m/s)

a_r : 支撐架加速度 (m/s^2)

可利用式(2-16)、式(2-17)算出支撐架的最大速度與加速度，其週期分別為 1 秒(圖 2-3)、2 秒(圖 2-4)及 4 秒(圖 2-5)。此外，假設面板飄浮後開始掉落，掉落的加速度為重力 g ，也就是 $9.81 m/s^2$ ，而方向為向下，因此為負值，支撐架的向下加速度必須比重力還大，否則就會產生飄浮現象，所以把重力 g 代入式(2-17)，計算如下所示：

$$-9.81 \leq -4\pi^2 f_c^2 \cdot 0.5 \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (2-18)$$

$$f_c \leq 0.705 \quad (2-19)$$

其中：

$l_c = 0.5$ m；正弦波最大為 1，因此取正弦波為 1。

所得的頻率必須小於 0.705，才不會有飄浮現象，因此就取臨界值 0.705 為一個支撐架移動速度的邊界條件，頻率的倒數即為週期，所以 0.705 的倒數約為 1.42 秒，週期為 1.42 秒就是支撐架移動速度的其中一個邊界條件。即可算出週期為 1.42 秒的支撐架最大速度與加速度(圖 2-6)。

2.4 面板的飄浮現象

面板在受支撐架帶動的同時，也受到流場作用面板的作用力，因此使面板產生作用力加速度，相對於支撐架移動的加速度並不一樣，但面板始終受重力的影響，所以先算出流場給予面板的作用力與重力相互關係，以重力方向為負，如下例所示：

$$F_{net} = -F_u + F_d \quad (2-18)$$

式(2-18)再加上面板所受的重力，因為重力方向向下，所以表示為負，須減掉

F_g ，即為流場作用於面板的作用力 F_b 。

$$F_b = F_{net} - F_g \quad (2-19)$$

$$\begin{aligned} a_b &= \frac{F_b}{m} \\ &= \frac{F_{net} - F_g}{m} \\ &= \frac{-F_u + F_d - F_g}{m} = \frac{-P_u A + P_d A - mg}{m} = \frac{P_d - P_u}{m} \cdot A - g \quad (2-20) \end{aligned}$$

其中：

P_u ：面板上方壓力 (Pa)

P_d ：面板下方壓力 (Pa)

F_u ：面板上總受力 (N)

F_d ：面板下總受力 (N)

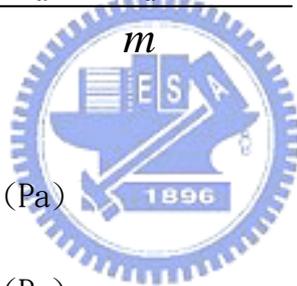
F_g ：面板重力 (N)

F_b ：流場作用於面板之實際作用力 (N)

F_{net} ：面板上下總受力差 (N)

A ：面板面積 (m^2)

a_b ：流場作用於面板之加速度 (m/s^2)



1. 支撐架帶動面板向上移動

當支撐架帶動面板向上移動時，支撐架本身有加速度 a_r ，以重力方向為負，如果 $a_r > a_b$ 時，支撐架移動比面板還快，所以並不會產生飄浮現象，反之，如果 $a_r < a_b$ 時，支撐架移動比面板還慢，所以有可能會產生飄浮現象。

2. 支撐架帶動面板向下移動

當支撐架帶動面板向下移動時，以重力方向為負，如果 $a_r > a_b$ 時，支撐架移動比面板還慢，所以並不會產生飄浮現象，反之，如果 $a_r < a_b$ 時，支撐架移動比面板還快，所以有可能會產生飄浮現象。

根據上述兩點，即可判斷出面板是否會脫離支撐架而產生飄浮現象。



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

表 2-1 標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式係數值

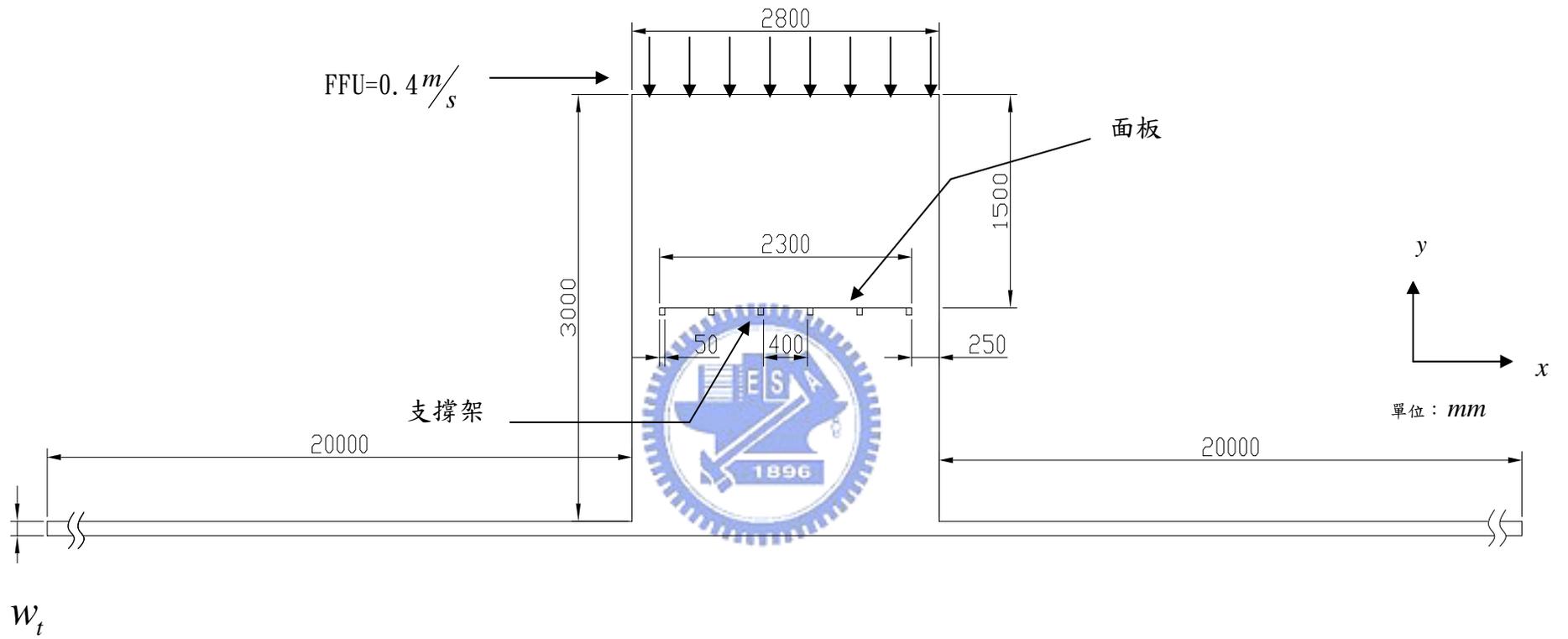


圖 2-1 模擬面板之模型

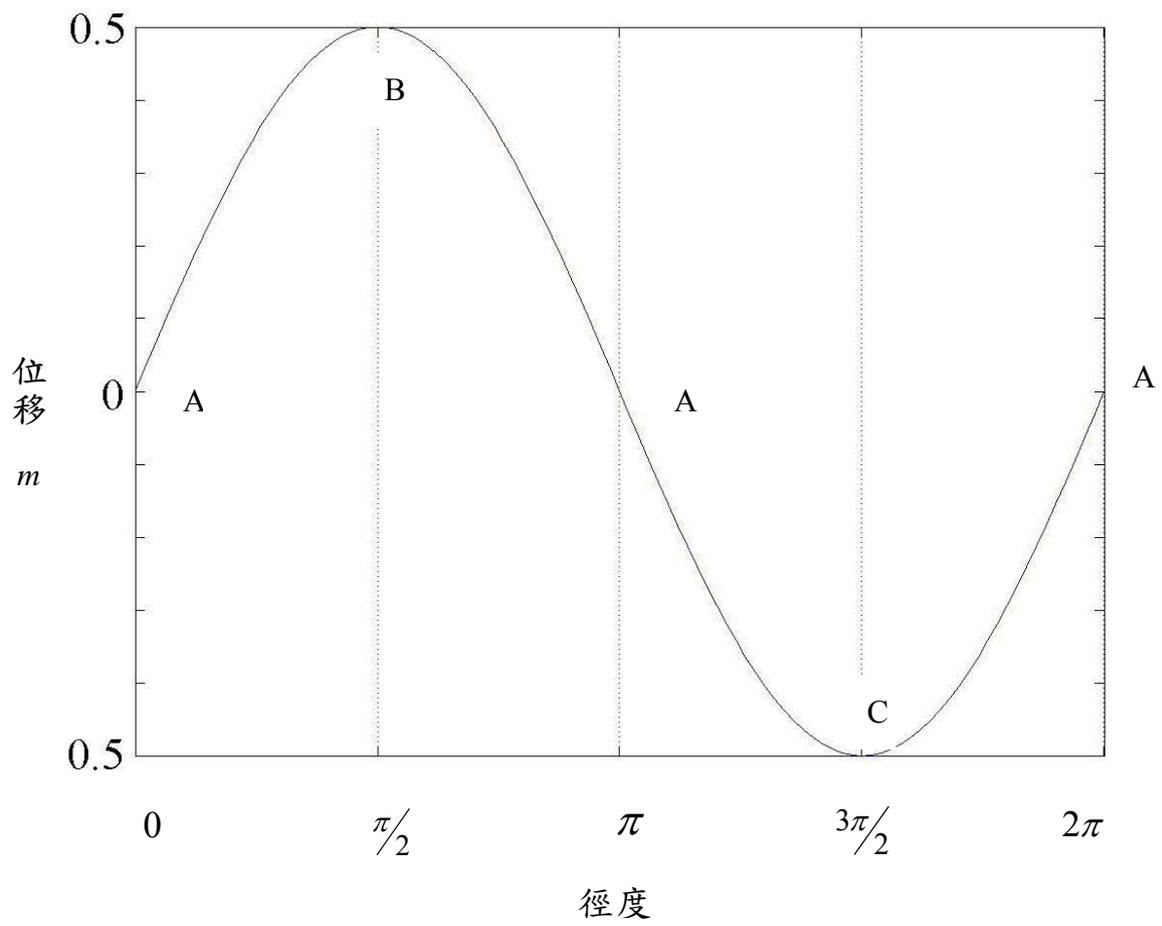


圖 2-2 支撐架位移之關係圖

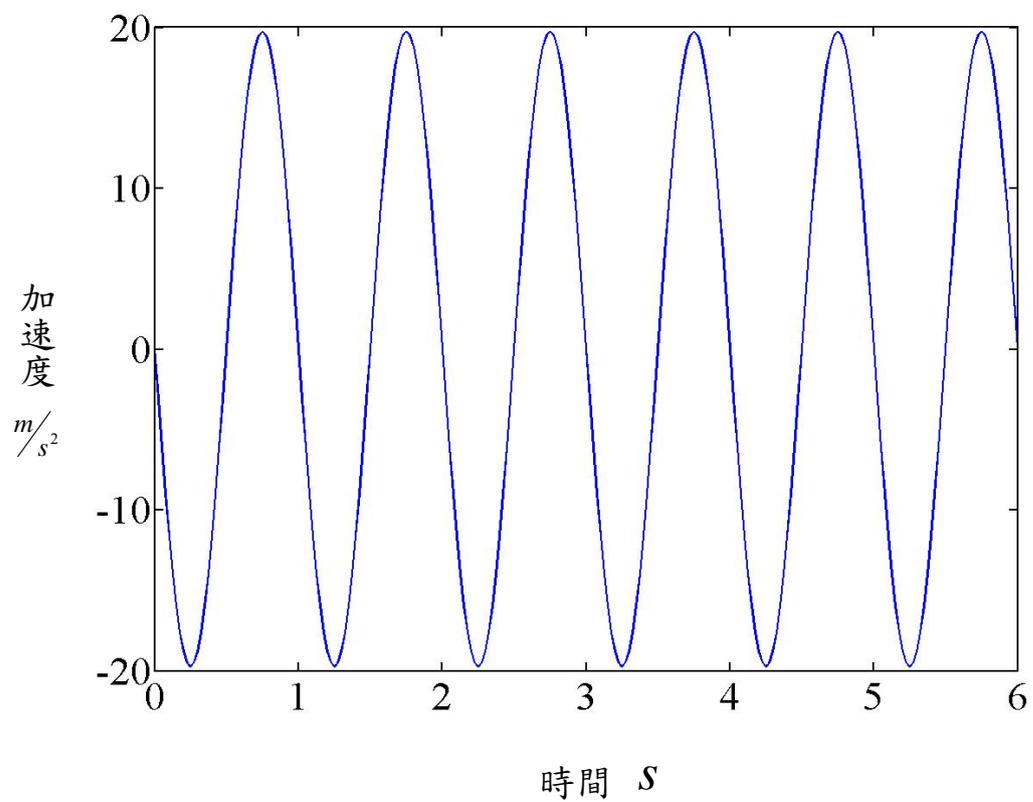
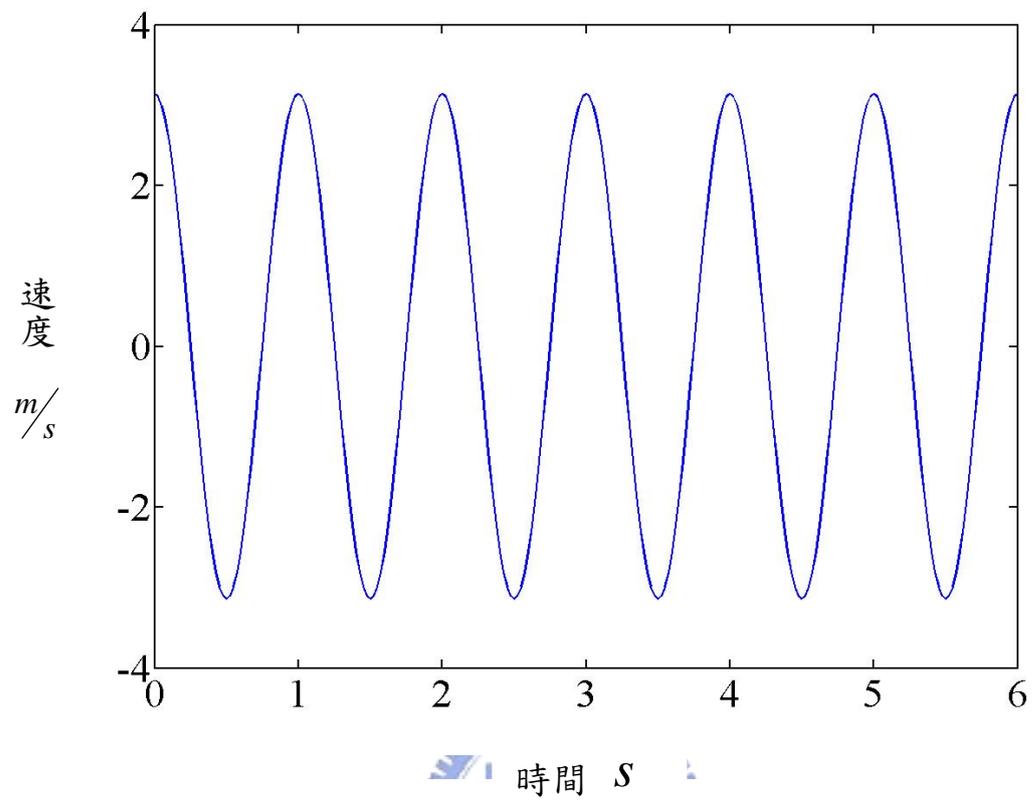


圖 2-3 週期為 1 秒的速度與加速度

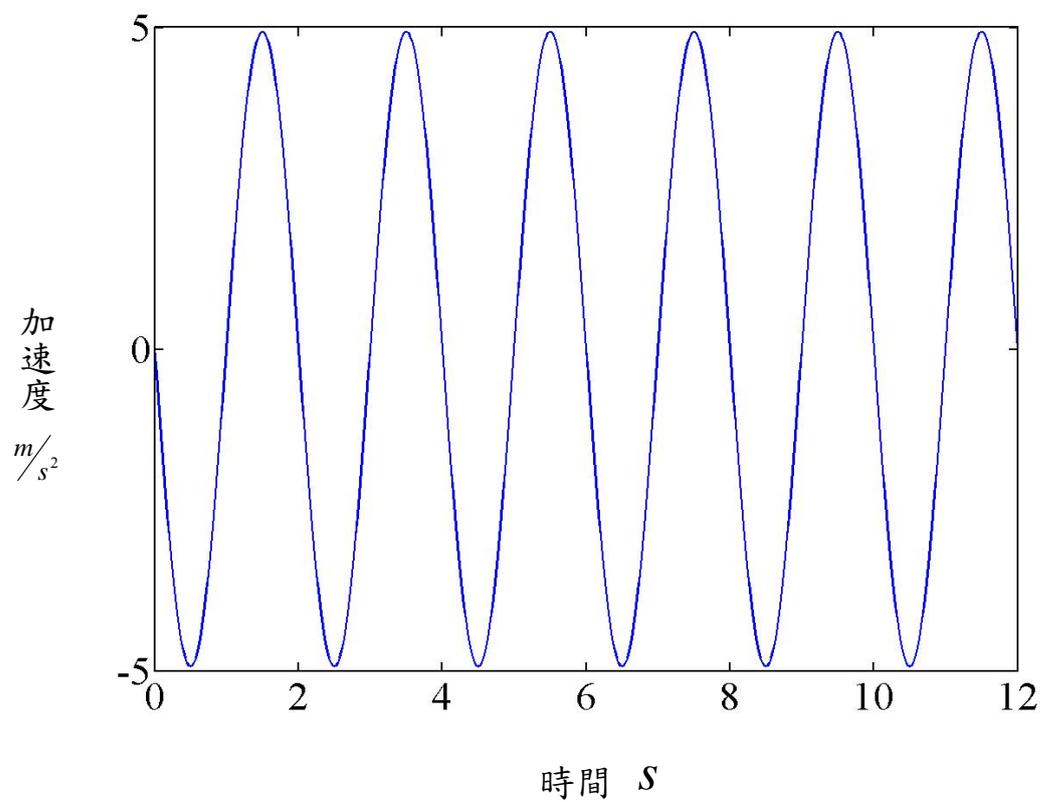
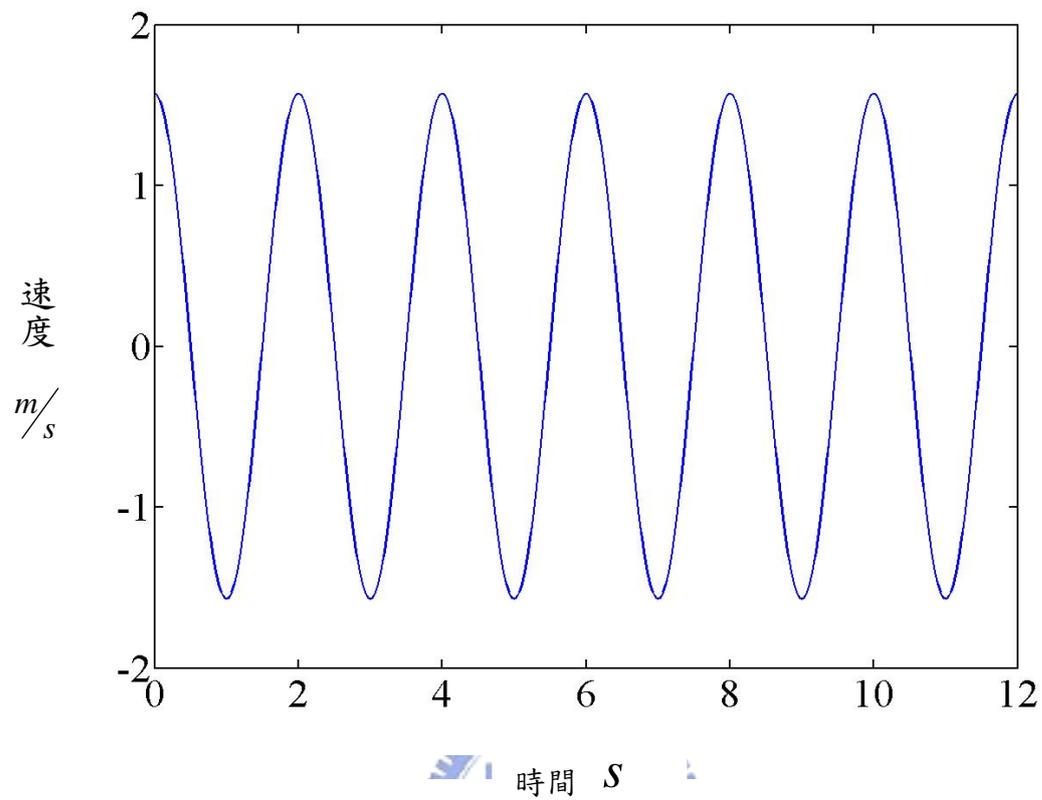


圖 2-4 週期為 2 秒的速度與加速度

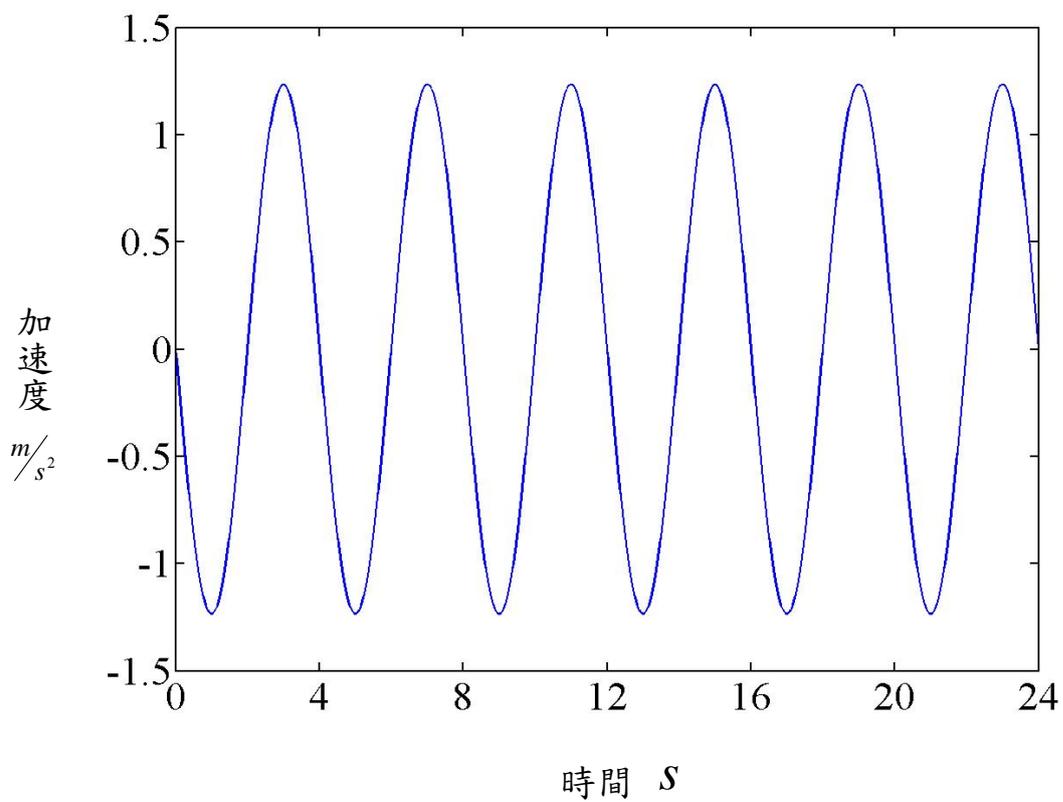
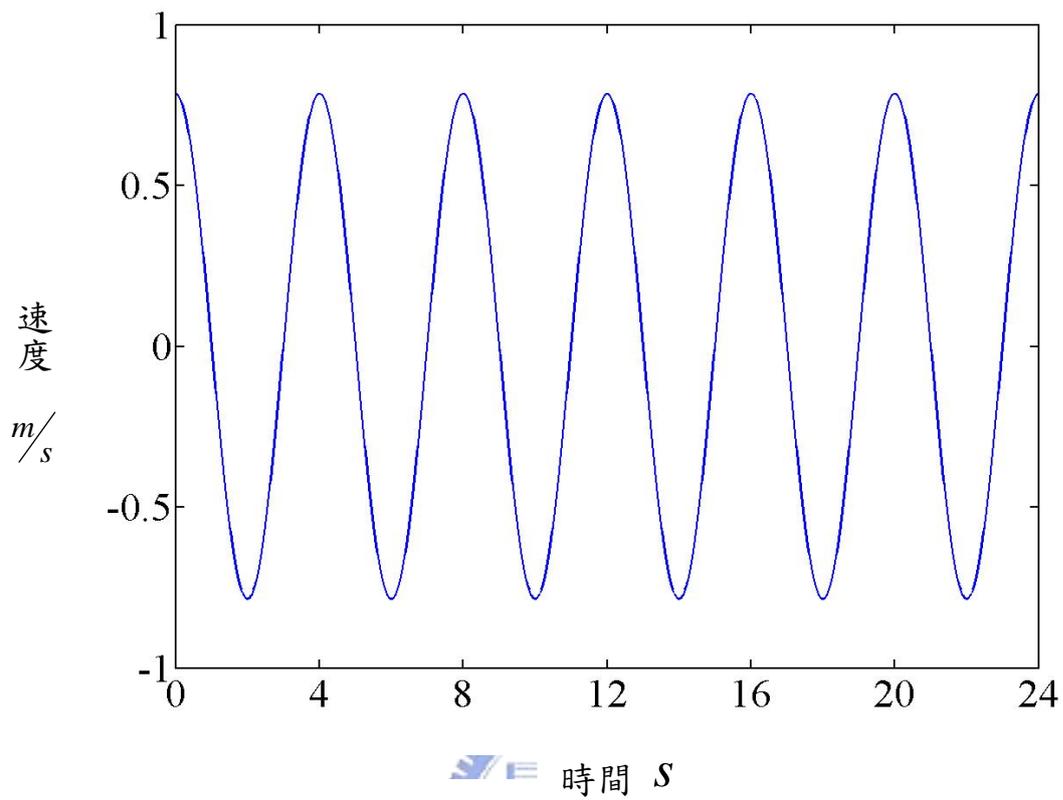


圖 2-5 週期為 4 秒的速度與加速度

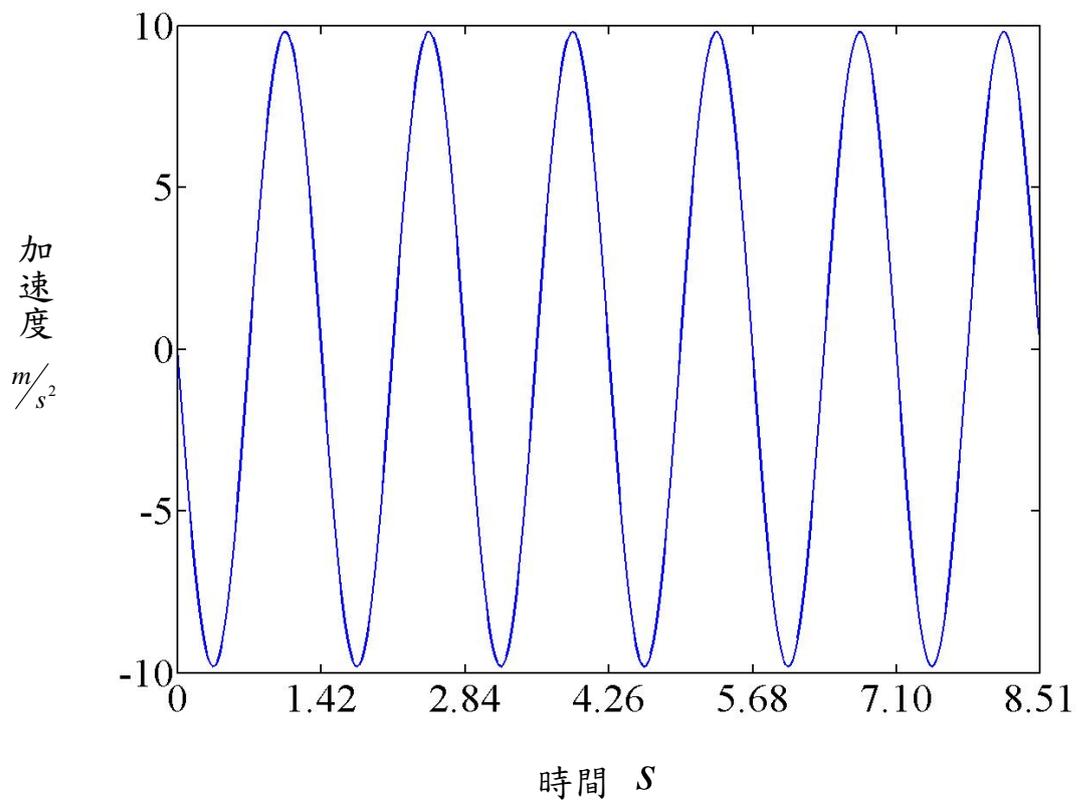
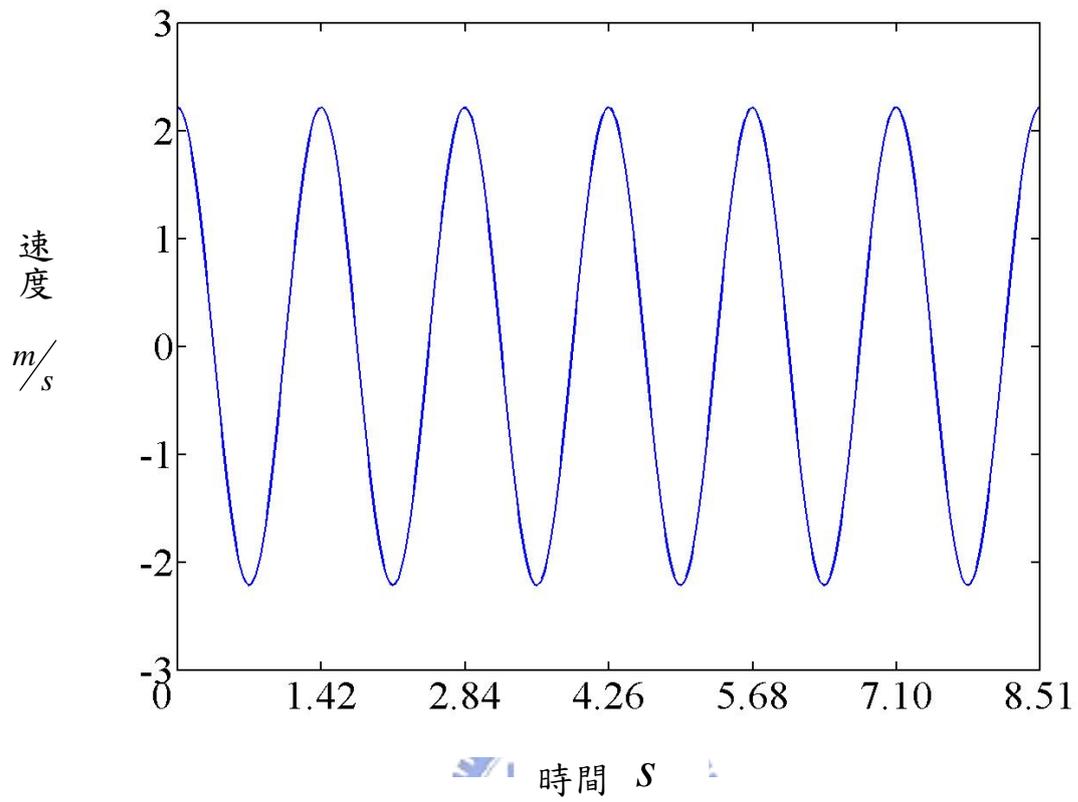


圖 2-6 週期為 1.42 秒的速度與加速度

第三章 數值方法

3.1 數值方法

本文利用數值方法，求解移動物體其周圍流場的變化，此數值方法乃是應用流體力學輔助軟體 STAR-CD 作為計算平臺，紊流流場 $k-\varepsilon$ 模式及不可壓縮流模式，解二維穩態與暫態 Navier-Stokes equations，並利用有限容積法(finite-volume) 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，物理變數定義於每個控制容積中心做積分而求得，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 equations)可表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{u}_r\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) = s_\phi \quad (3-1)$$

其中 $\vec{u}_r = \vec{u} - \vec{u}_c$ 為流體速度 \vec{u} 與局部速度 \vec{u}_c 之相對速度， ϕ 為任意相關變數， Γ_ϕ 和 s_ϕ 分別為擴散係數(diffusion)和來源係數(source)。

將(3-1)式積分後可得：

$$\frac{d}{dt} \int_{V_p} \rho\phi dV + \sum_j \int_{S_j} (\rho\vec{u}_r\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) \cdot d\vec{S} = \int_V s_\phi dV \quad (3-2)$$

$T_1 \qquad \qquad \qquad T_2 \qquad \qquad \qquad T_3$

根據 (3-2)式，對各項作離散：

1. 擴散項(diffusion terms)

$$T_2 \approx \sum_j (\rho\vec{u}_r\phi \cdot \vec{S})_j - \sum_j (\Gamma_\phi \overline{\text{grad}\phi} \cdot \vec{S})_j \equiv \sum_j C_j - \sum_j D_j \quad (3-3)$$

擴散項用中點近似法可下列來表示：

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

其中 f_j 為幾何因數， d_{PN}^{\rightarrow} 為 P 到 N 之向量， $\Gamma_{\phi,j}$ 為面擴散係數。

2. 來源項(source term)

$$T_3 \approx s_1 - s_2 \phi_P \quad (3-5)$$

3. 對流項

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

$$C_j^{UD} \equiv F_j \begin{cases} \phi_P & , F_j \geq 0 \\ \phi_{N+} & , F_j < 0 \end{cases} \quad (3-6)$$

其中

$$F_j \equiv (\rho \vec{u}_r \cdot \vec{S})_j \quad (3-7)$$

F_j 為通過面 j 和 ϕ_j 的質通量如圖 3-3 所示，輔助值 ρ 和 Γ 由線性內插得到。

綜合上述，(3-2)式可表示為：

$$\frac{(\rho V)^n - (\rho V)^0}{\delta t} + \sum F_j = 0 \quad (3-8)$$

或

$$A_P \phi_P^n = \sum_m A_m \phi_m^n + s_1 + B_P \phi_P^0 \quad (3-9)$$

和

$$A_P \equiv \sum_m A_m + s_2 + B_P \quad (3-10)$$

其中

1. A_m 為對流或擴散的影響。
2. 計算通量為所有相鄰點的總和。
3. $B_P \equiv (\rho V)^0 / \delta t$

3.2 PISO 數值計算

1.基本方程式：

(1)有限容積動量方程式：

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

其中

$$H(u_{i,m}) \equiv \sum_m A_m u_{i,m} \quad (3-12)$$

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：

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

u_j 為格點單位面積 S_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：

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

將(3-14)式代入(3-13)式可推導出壓力方程式：

$$A_p P_p^n = \sum_m A_m P_m^n + s_1 \quad (3-15)$$

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)：

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

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：

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

壓力方程式可表示為：

$$A_p P_p^{(1)} = \sum_m A_m P_m^{(1)} + s_1 \quad (3-18)$$

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)

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

$$A_p P_p^{(q)} = \sum_m A_m P_m^{(q)} + s_1 \quad (3-20)$$

$q=1,2,3\dots$ 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。

STAR-CD 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：

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

3.3 暫態滑移網格(sliding mesh)

本文主要分析空間中移動物體其周圍流場的情形，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(boundary number)，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)部份 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(不可超過一個網格距離)，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。

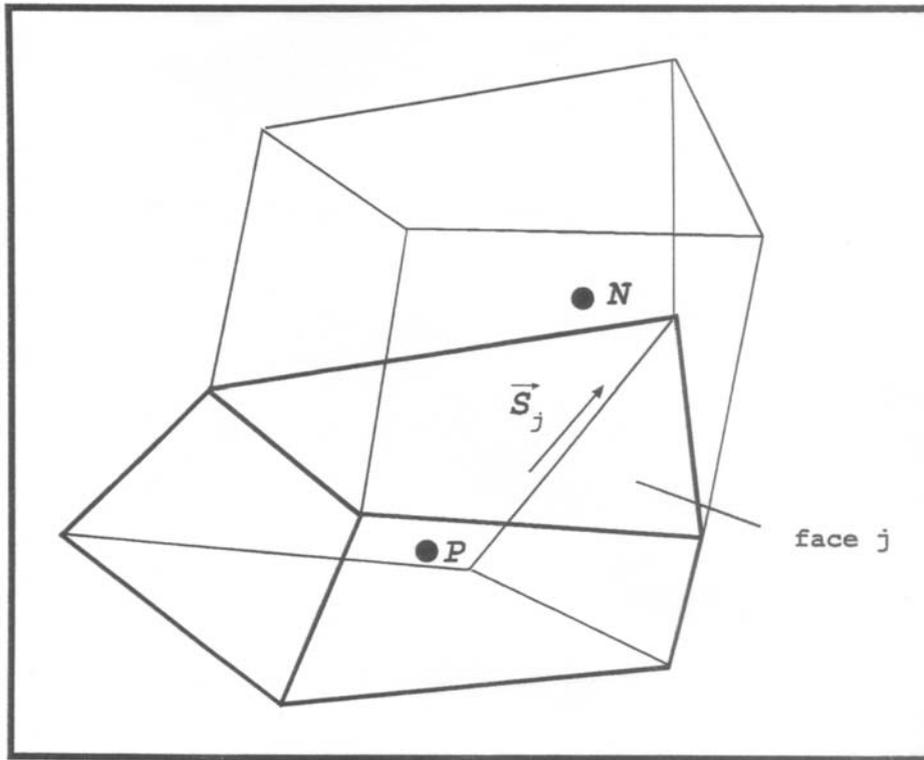


圖 3-1 相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖

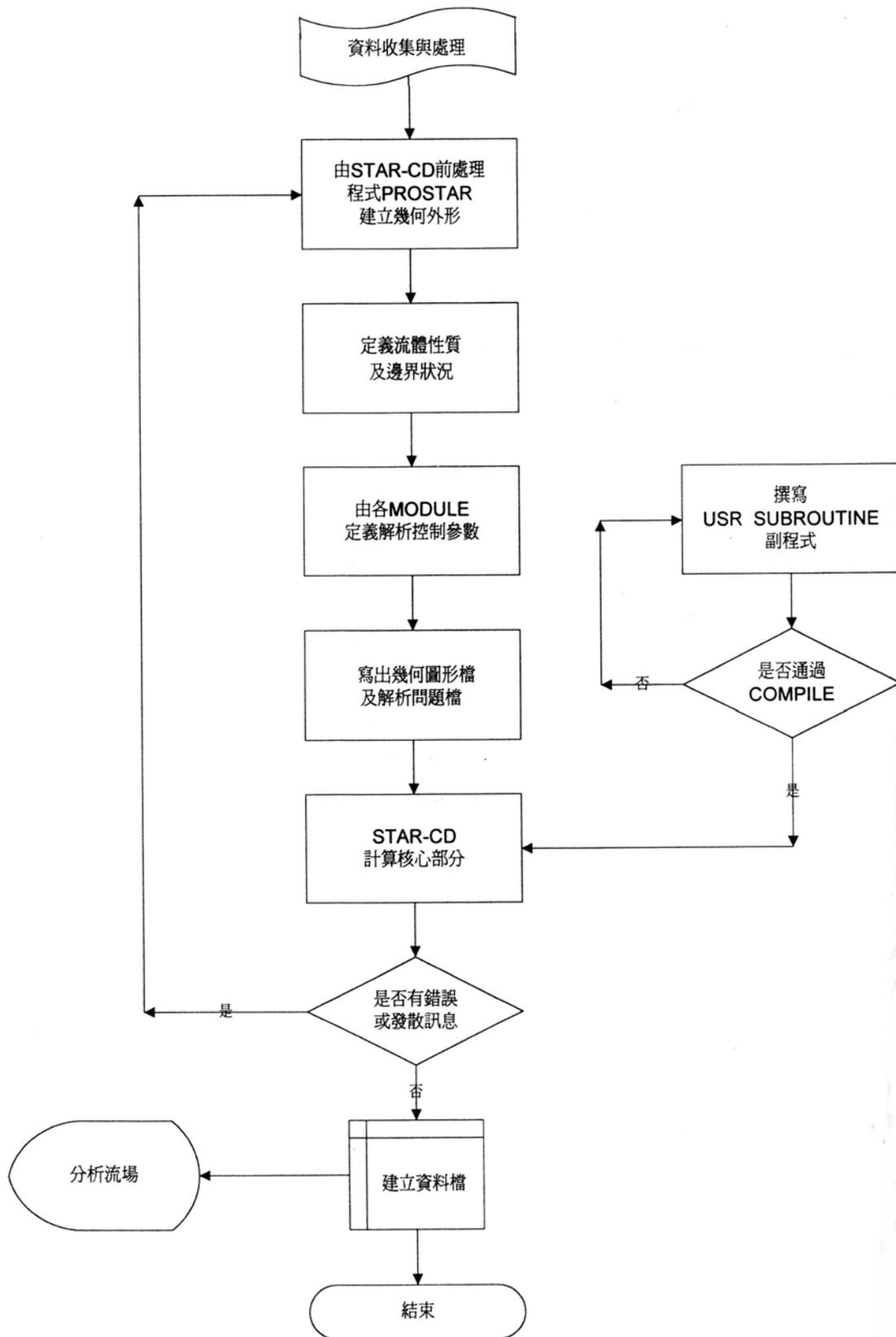


圖 3-2 計算流程圖

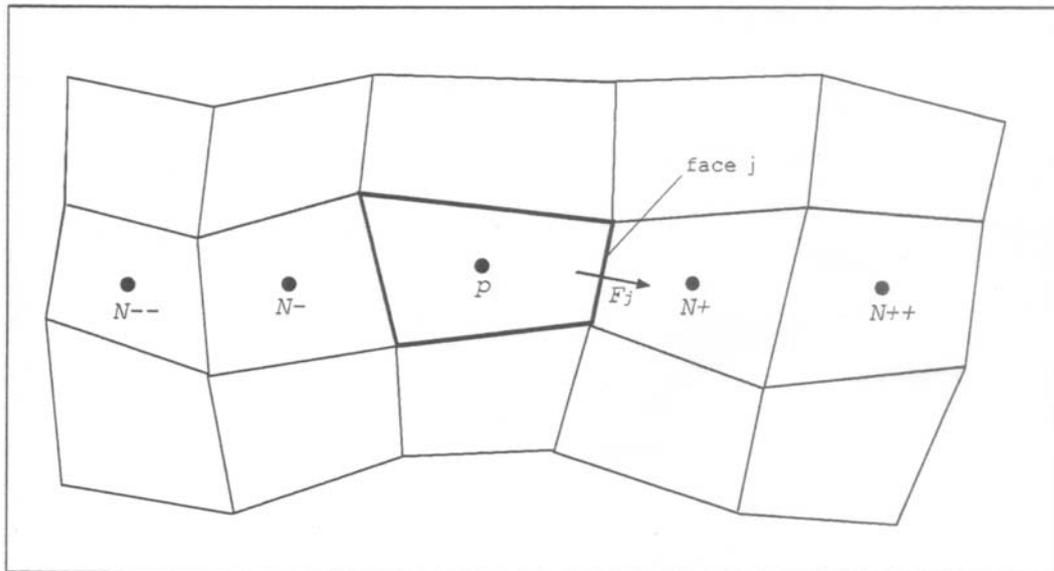


圖 3-3 對流通量示意圖

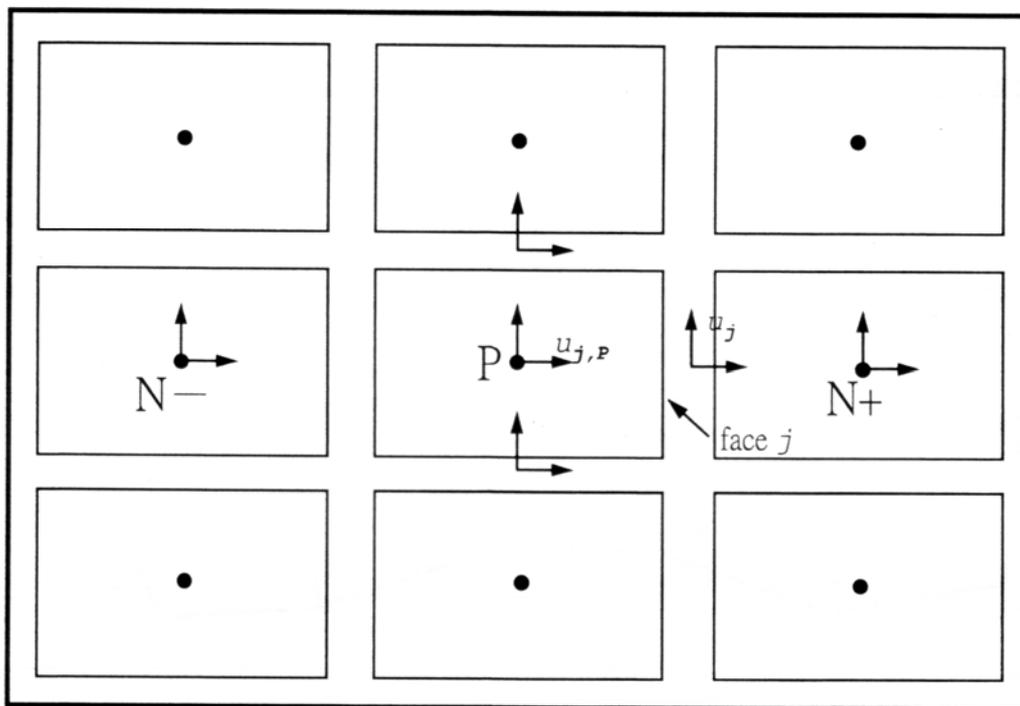


圖 3-4 PISO 示意圖

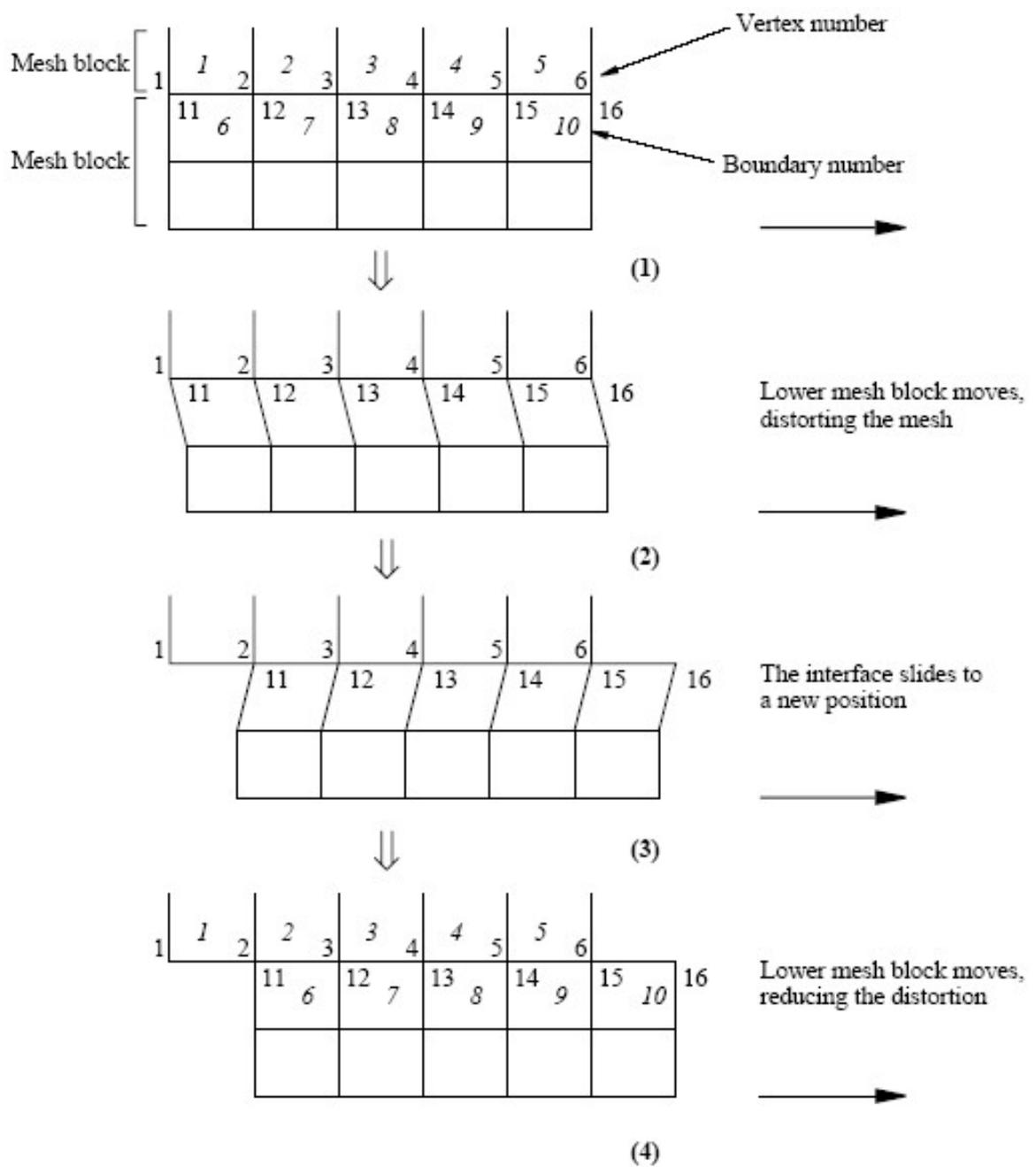


圖 3-5 滑移網格進行方式說明示意圖

第四章 結果與討論

本研究是利用二維直角座標系統並使用高雷諾數 $k-\varepsilon$ 紊流模式來模擬流場，針對不同的排氣管道及不同的輸送面板速度，以計算出在不同的條件下面板受力的情形，及面板受力後所產生的加速度是否會使面板飄浮，並比較在不同條件下的面板受力差異。數值計算所得的結果分析，觀察重點分為靜態與動態部份，靜態部份為觀察整體的流場趨勢與流場的壓力分佈，而動態部份則是觀察面板在不同速度的輸送下產生的迴流而使面板飄浮的影響。

4.1 靜態模擬分析

靜止的面板距離上方 FFU 入口為 1.5m，FFU 固定速度為 0.4 m/s ，支撐架與面板接觸有 6 個支撐點，在靜態模擬中，支撐架並不會造成面板移動，面板所受的力完全由 FFU 及所產生的迴流影響，數值模擬結果所得排氣管道 0.1m 之靜態流場圖(圖 4-1)及排氣管道 0.1m 之靜態相對壓力分佈圖(圖 4-2)。當 FFU 以固定的入口速度吹向面板時，因為受到面板阻擋，空氣往兩旁快速流經面板，到達面板下方時，因受到排氣管道突然束縮影響，在面板下方產生迴流現象，而排氣管道入口處空氣流速更高達約 8 m/s ，因此在排氣管道長度部份，一開始就設定的長度夠使流場發展為完全發展流(fully developed flow)，並在出口處到達大氣壓力，此模擬模型為左右對稱，因此數值模擬計算的流場也是左右對稱，由排氣管道 0.1m 靜態流場圖(圖 4-1)可以清楚看出流場分佈為左右對稱，如果迴流所產生在面板下方的向上受力大於面板上方的向下受力時，面板就會有飄浮現象，相對的如果迴流所產生在面板下方的向上受力小於面板上方的向下受力時，面板就不會有飄浮現象。由靜態相對壓力分佈圖(圖 4-2)可以明顯看出，面板下方的受力小於面板上方的受力，因此面板在排氣管道 0.1m 之靜態模擬分析時，並不會有飄浮現象。

當排氣管道加寬為 0.2m，數值模擬結果所得排氣管道 0.2m 之靜態流場圖(圖 4-3)及靜態相對壓力分佈圖(圖 4-4)，排氣管道加寬使得空氣更容易排出，在排氣管道入口處空氣流速下降為約 5 m/s ，由質量流率的流進體積等於流出體積來探討，在排氣管道入口處的空氣流速會隨著排氣管道加寬而下降，而面板下方的壓力比排氣管道 0.1m 減少很多，相對的面板下方的向上受力也會減小，而不會造成面板產生飄浮現象。排氣管道在加寬到 0.4m，數值模擬結果所得排氣管道 0.4m 之靜態流場圖(圖 4-5)及靜態相對壓力分佈圖(圖 4-6)，此時在排氣管道入口處空氣流速下降為約 4 m/s ，而面板下方的壓力又比排氣管道 0.1m 及 0.2m 減少很多，幾乎要等於大氣壓力。所以在靜態模擬時，並不會因為流場造成的迴流而使面板產生飄浮現象，因為 FFU 以固定的入口速度向下吹向面板產生的面板上方壓力永遠比迴流作用於面板下方壓力還要大，也就是說向下壓的受力永遠比向上頂的受力還要大，因此面板在靜態模擬時並不會產生飄浮現象。

4.2 動態模擬分析

在動態模擬中，主要是分析面板在輸送過程中輸送的速度快慢是否會產生飄浮現象，及排氣管道的寬度造成整體流場的影響，延續靜態模擬之模型，FFU 的風速也並無更動，面板的起始位置在距離 FFU 入風處 1.5m，開始輸送時，先上升到上始點，再下降經起始位置到下始點，再回到起始位置，此一循環稱為一週期，總共模擬 4 種不同週期，分別為 1 秒、1.42 秒、2 秒及 4 秒，並與 3 個不同的排氣管道寬度相互組合，模擬多個週期直到數值達到穩定，在此稱 1 個週期為 1τ ，藉由不同條件所模擬計算後的結果，討論出在何種條件下，面板不會因為受到向上頂的受力而產生飄浮現象。

首先模擬計算排氣管道為 0.1m 而週期為 1 秒，當面板上升至上始點時，因為面板上升移動的關係，使得空氣流速在通過面板時的速度遽增，然而到達面板下方時又受到排氣管道束縮的影響，在面板下方產生較大的迴流，擷取面板從起

始位置移到上始點的流場示意圖，分別為 $\tau = 0$ (圖 4-7)、 $\tau = \frac{1}{8}$ (圖 4-8) 及 $\tau = \frac{2}{8}$ (圖 4-9) 秒，其支撐架的速度在 $\tau = 0$ 時為最大值，方向向上，而在 $\tau = \frac{2}{8}$ 時為 0，也就是在上始點處，支撐架的速度為 0，此時面板上方壓力比下方壓力還要大，而所施加在面板上的力，向下壓的受力要比向上頂的受力還要來得大，作用在面板上時，因為面板上下受力的互相抵扣，因此面板在上升至上始點時，面板承受較大向下壓的力，並不會有飄浮現象發生，位移對照在受力圖(圖 4-16~圖 4-19)上，由起始位置 A 移動到上始點 B。

面板從上始點逐漸移動經起始位置到下始點時，因為面板向下移動而擠壓到面板下方的流場，導致在面板上方開始產生較大的迴流，擷取面板從起上始點移到下始點的流場示意圖，分別為 $\tau = \frac{3}{8}$ (圖 4-10)、 $\tau = \frac{4}{8}$ (圖 4-11)、 $\tau = \frac{5}{8}$ (圖 4-12) 及 $\tau = \frac{6}{8}$ (圖 4-13)，其支撐架的速度在 $\tau = \frac{4}{8}$ 時為向下最大，而在 $\tau = \frac{6}{8}$ 時為 0，也就是在下始點處，支撐架的速度為 0，此時面板上方壓力比下方壓力還要小，而施加在面板上的力，向下壓的受力要比向上頂的受力還要來得小，作用在面板上時，因為面板上下受力的互相抵扣，因此面板從上始點移動到下始點時，面板承受較大向上頂的力，這時候面板已經脫離支撐架並有破裂危險，因此面板從上始點下降至下始點時，會有飄浮現象發生，位移對照在受力圖(圖 4-16~圖 4-19)上，由上始點 B 經起始位置 A 移動到下始點 C。面板在從下始點上升至起始位置時，面板逐漸向上移動，在面板下方開始產生較大的迴流。

最後 $\tau = 1$ 的流場示意圖並與 $\tau = 0$ 的流場示意圖相同，擷取面板從起下始點移到起始位置的流場示意圖，分別為 $\tau = \frac{7}{8}$ (圖 4-14) 及 $\tau = 1$ (圖 4-15)，其支撐架的速度在 $\tau = 1$ 為最大值，方向向上，此時面板上方壓力比下方壓力還要大，而所施加在面板上的力，向下壓的受力要比向上頂的受力還要來得大，作用在面板上時，因為面板上下受力的互相抵扣，面板承受較大向下壓的力，因此面板在

上升至起始位置時，並不會有飄浮現象發生。

位移對照在受力圖(圖 4-16~圖 4-19)上，由下始點 C 移動到起始位置 A。此模擬計算 6 個循環，而達到動態穩定，擷取出面板上下的壓力，再乘以面積，即可得面板受空氣作用之上總受力 F_u (圖 4-16)、下總受力 F_d (圖 4-17)及上下總受力差 F_{net} (圖 4-18)，而重力為負值，再加上面板本身重力 F_g ，可得面板實際受力 F_b (圖 4-19)。

面板實際受力除以面板本身重量，即為面板加速度，並畫出面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-20)。圖中為會產生飄浮現象的支撐架位移，為從上始點 B 經起始位置 A 到下始點 C，與前文所提到的支撐架位移標示相同，此時面板加速度大於支撐架加速度，相對的面板位移是當面板從上始點移動到下始點時，會產生飄浮現象，而面板從起始位置移動到上始點時，面板的加速度比支撐架的加速度要小，因此並不會產生飄浮現象，另外面板從下始點移動到起始位置時，面板的加速度也比支撐架的加速度要小，所以也不會產生飄浮現象。

但是當面板從起始位置 A 向上移動還未到達上始點 B 時，就開始產生飄浮現象，主要是因為支撐架輸送面板時，會帶動整個流場，而支撐架已減速時，空氣並未減速，並有氣體慣性力把面板向上頂，因此在即將到達上始點 B 時，有些微的飄浮現象，此外當面板從上始點 B 還未到達下始點 C 時，就不會產生飄浮現象，主要也是因為支撐架輸送面板時，會帶動整個流場，而支撐架已減速時，空氣並未減速，並有氣體慣性力把面板向下壓，因此在即將到達下始點 C 時，就不會產生飄浮現象。

為簡化評斷飄浮現象，本文提出一判斷式，如下式(4-3)所示，面板受到流場影響所產生的加速度應等於支撐架輸送面板的加速度，如此才能使面板服貼在支撐架上，而不會有飄浮現象，因此如果需要一個向下壓的虛幻力(F^*)才能使面板產生的加速度等於支撐架的加速度的話，那面板就會有飄浮現象，此一向下的力與重力方向相同，因此為負值，即表示有負值的力就會有飄浮現象，而正值

的力表示為向上頂的力，面板實際受到向下壓的力較大，因此正值的力是不需要作用面板一個向下壓的力，所以不會產生飄浮現象，最後畫出飄浮現象之判斷圖（圖 4-21）。

$$a_r = \frac{F_b + F^*}{m} \quad (4-1)$$

$$ma_r = -P_u A + P_d A - mg + F^* \quad (4-2)$$

$$F^* = ma_r + P_u A - P_d A + mg \quad (4-3)$$

週期增加到 4 秒時，當面板從起始位置移動到上始點時，流場在面板下方依然有迴流產生，但是面板上方因為移動速度慢，所以並沒有產生迴流，而且流場流速相較於週期為 1 秒慢很多，擷取面板從起始位置移到上始點的流場示意圖，分別為 $\tau = 0$ （圖 4-22）、 $\tau = \frac{1}{8}$ （圖 4-23）及 $\tau = \frac{2}{8}$ （圖 4-24），其支撐架的速度在 0τ 時為最大值，方向向上，而在 $\tau = \frac{2}{8}$ 時為 0，也就是在上始點處，支撐架的速度為 0，此時面板上方壓力比下方壓力還要大，而所施加在面板上的力，向下壓的受力要比向上頂的受力還要來得大，因此面板從起始位置移動到上始點時，並不會產生飄浮現象。面板從上始點逐漸移動經起始位置到下始點時，因為面板向下移動而擠壓到面板下方的流場，面板上方開始形成較小的迴流，擷取面板從起上使點移到下始點的流場示意圖，分別為 $\tau = \frac{3}{8}$ （圖 4-25）、 $\tau = \frac{4}{8}$ （圖 4-26）、 $\tau = \frac{5}{8}$ （圖 4-27）及 $\tau = \frac{6}{8}$ （圖 4-28），其支撐架的速度在 $\tau = \frac{4}{8}$ 時為向下最大，而在 $\tau = \frac{6}{8}$ 時為 0，也就是在下始點處，支撐架的速度為 0，此時面板上方壓力仍然比下方壓力還要大，而所施加在面板上的力，向下壓的受力要比向上頂的受力還要來得大，因此面板從上始點移動到下始點時，還是不會產生飄浮

現象。面板在從下始點上升至起始位置時，面板逐漸向上移動，慢慢擠壓面板上方的流場，而面板上方的小迴流，也慢慢消失，最後與 0τ 的流場示意圖相同，擷取面板從起下始點移到起始位置的流場示意圖，分別為 $\tau = \frac{7}{8}$ (圖 4-29)及 $\tau = 1$ (圖 4-30)，其支撐架的速度在 $\tau = 1$ 為最大值，方向向上，而流場作用在面板上方的受力依舊比面板下方的受力還要大，因此面板從下始點移動到起始位置時，不會產生飄浮現象，由面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-31)可以看出，面板的加速度永遠比支撐架的加速度還要小，因此並不會有飄浮的現象發生，飄浮現象之判斷圖(圖 4-32)也說明瞭並不需要向下壓的力才能使面板服貼在支撐架上，所以當週期增加到 4 秒時，並不會產生飄浮現象。

另外在流場示意圖中，週期為 1 秒的空氣流速比週期為 4 秒的空氣流速高出甚多，主要是支撐架使面板快速移動而擠壓到面板周圍的空氣，帶動周圍的空氣進而使空氣的流速也增快，且因為模型為左右對稱，流場也應為左右對稱，週期為 1 秒的流場大致上均為左右對稱，而週期為 4 秒的流場並沒有完全的左右對稱，此為模擬計算時的誤差所造成。

排氣管道 0.1m，週期為 1.42 秒時，流場影響面板下方所產生的面板受力，相對於週期 1 秒明顯下降很多，飄浮現象也相對改善，但是面板還是處於會飄浮的危險條件之下，因為面板受到流場影響產生的加速度在上始點逐漸移動經起始位置到下始點時，仍然大於支撐架的加速度，由排氣管道 0.1m，週期為 1.42 秒的面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-33)可以清楚看出來，但是飄浮現象比排氣管道 0.1m 明顯改善很多，另外從飄浮現象之判斷圖(圖 4-34)來探討，為了使面板能服貼在支撐架上，所需要向下壓的力也下降很多。

當週期為 2 秒時，面板的加速度又明顯下降很多，但是在上始點逐漸移動經起始位置到下始點時，面板加速度仍大於支撐架加速度，還是會有飄浮現象發生，從週期 2 秒的面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-35)可看到面板從上始點移動到下始點時，雖有飄浮現象，但是已經快接近支撐架的加速度，

而週期 2 秒的飄浮現象之判斷圖(圖 4-36)表示出需要向下壓的力改善許多，並沒有週期為 1 秒及 1.42 秒那麼大。

排氣管道加寬到 0.2m，週期為 1 秒時，當面板從上始點逐漸移動經起始位置到下始點時，面板的加速度仍然大於支撐架的加速度，因此會有飄浮現象發生，由面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-37)可清楚看出，與排氣管道 0.1m，週期為 1 秒比較並無太大差異，只是稍微的下降而已，而飄浮現象之判斷圖(圖 4-38)中，向下壓的力也只是稍微改善一些。週期為 1.42 秒的面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-39)與飄浮現象之判斷圖(圖 4-40)，也只是稍微下降，此週期仍然會有飄浮現象。

週期為 2 秒的面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-41)與飄浮現象之判斷圖(圖 4-42)，可看出還是有飄浮現象，數值也均稍微下降。週期為 4 秒的面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-43)與飄浮現象之判斷圖(圖 4-44)，並不會產生飄浮現象，數值也均稍微下降。

排氣管道再加寬到 0.4m，週期為 1 秒時，面板從上始點移動到下始點時，仍然會有飄浮現象，由面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-45)可清楚看出，但是面板加速度又下降一些，而飄浮現象之判斷圖(圖 4-46)也說明向下壓的力改善一些。週期為 1.42 秒的面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-47)與飄浮現象之判斷圖(圖 4-48)，也因為排氣管道加寬的關係，有獲得相當的改善，但是此週期仍然會有飄浮現象。週期為 2 秒的面板加速度與支撐架加速度之位移關係圖(圖 4-49)與飄浮現象之判斷圖(圖 4-50)，可看出還是有飄浮現象，不過因為排氣管道加寬的關係，面板加速度還是有下降一些，而向下壓的力亦有改善。

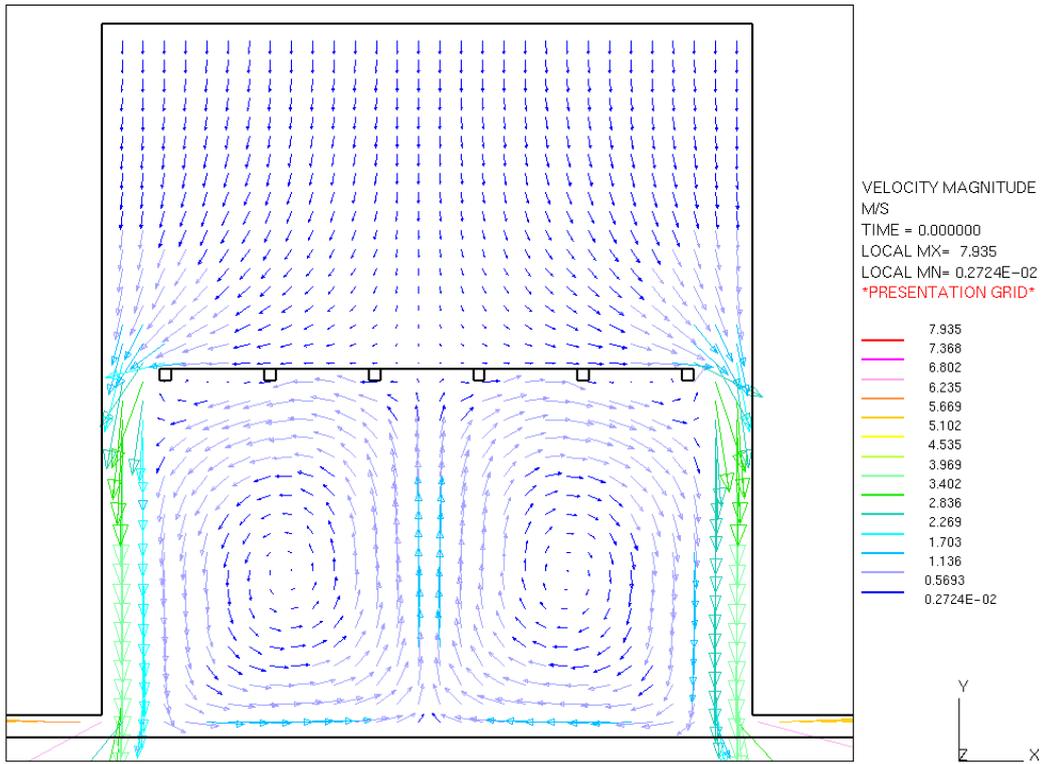


圖 4-1 排氣管道 0.1m 之靜態流場圖

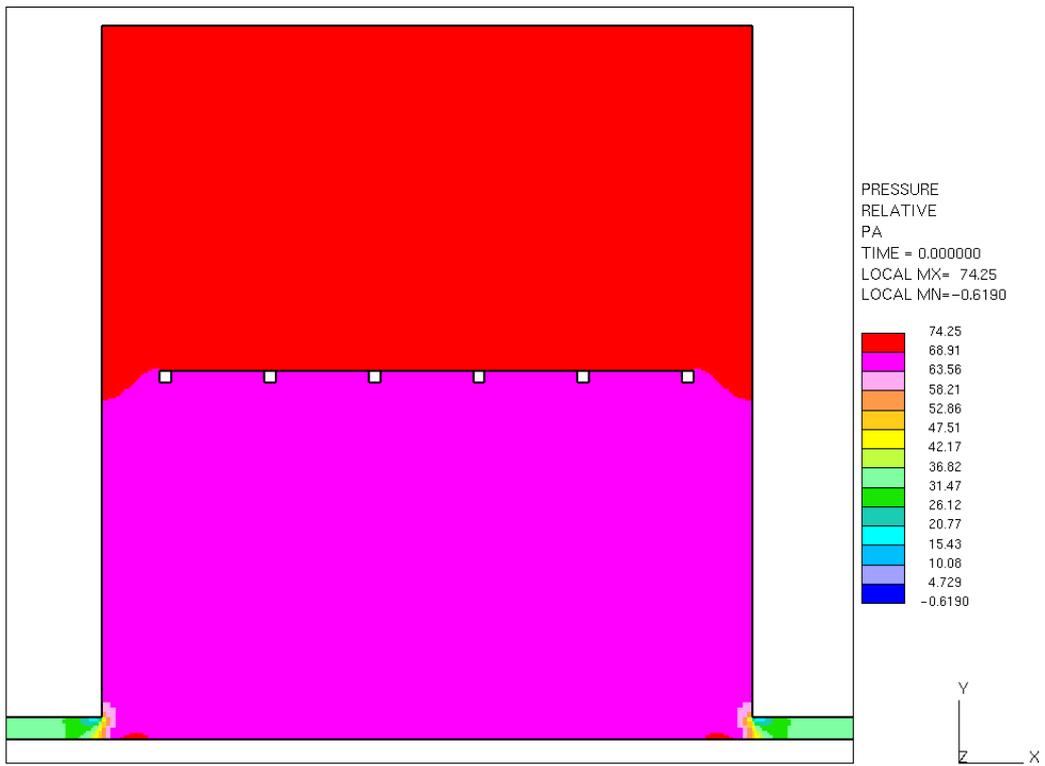


圖 4-2 排氣管道 0.1m 之靜態相對壓力分佈圖

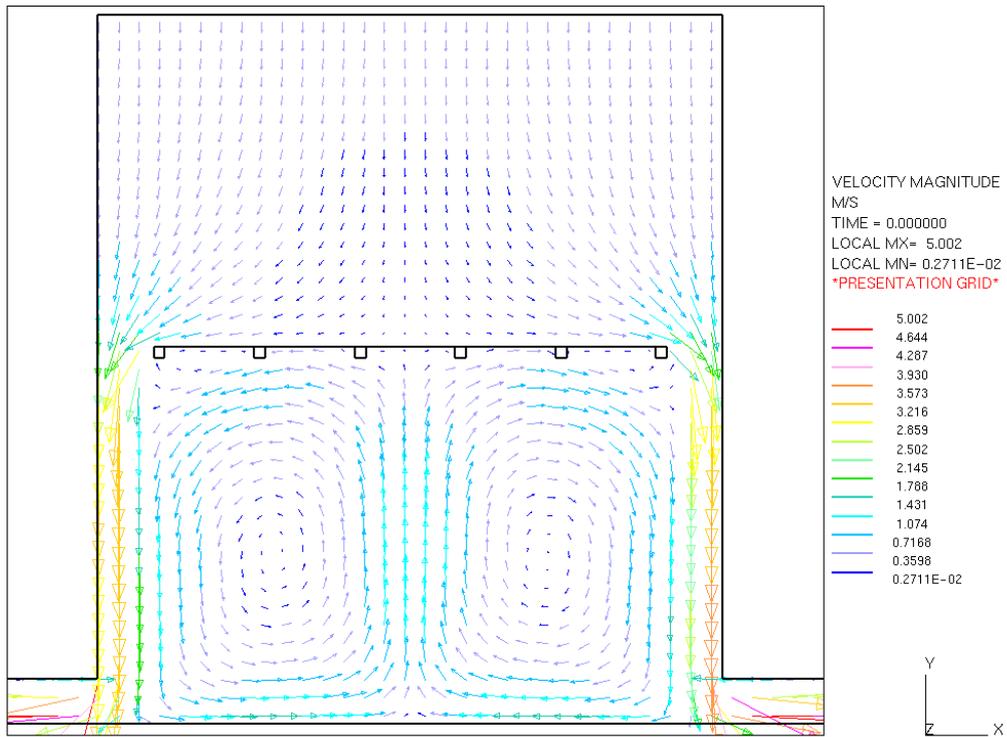


圖 4-3 排氣管道 0.2m 之靜態流場圖

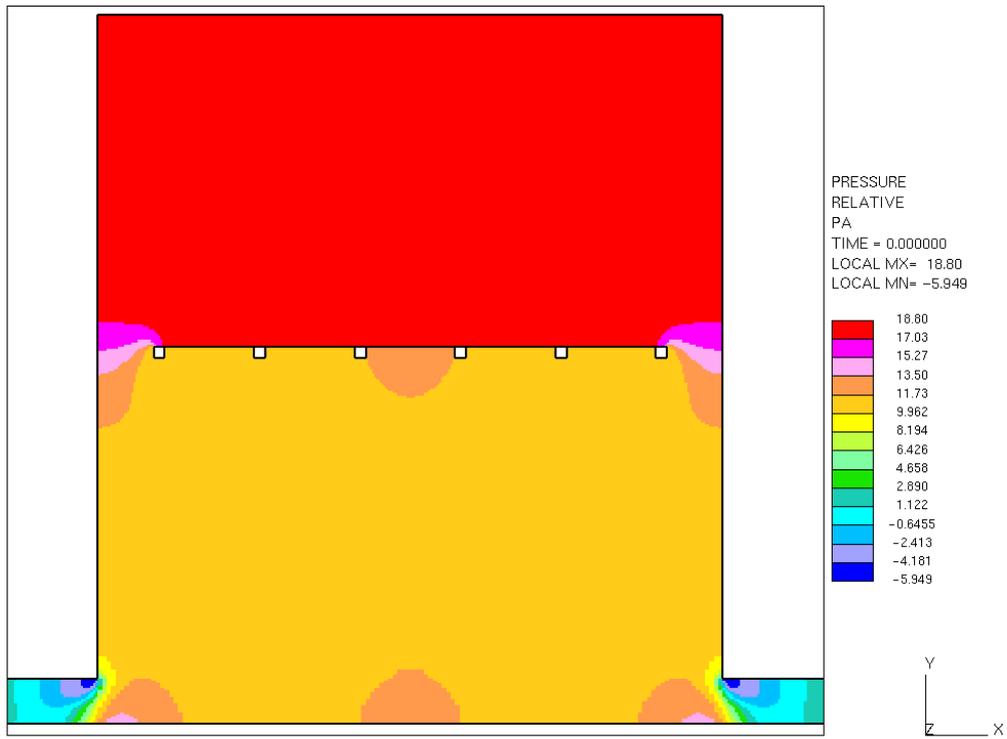


圖 4-4 排氣管道 0.2m 之靜態相對壓力分佈圖

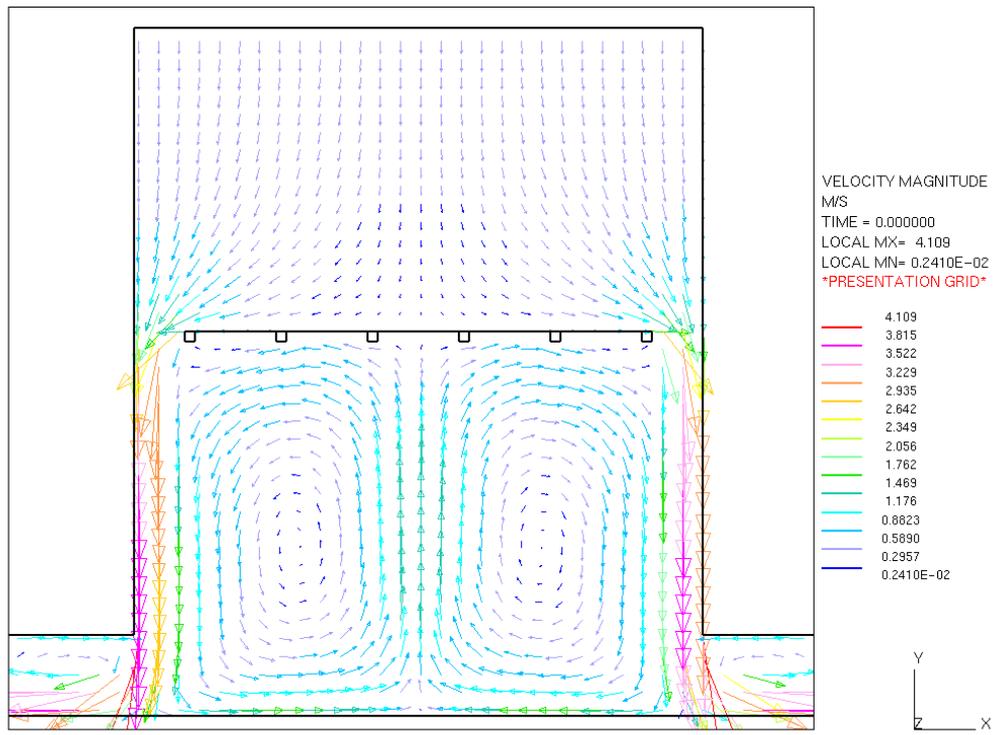


圖 4-5 排氣管道 0.4m 之靜態流場圖

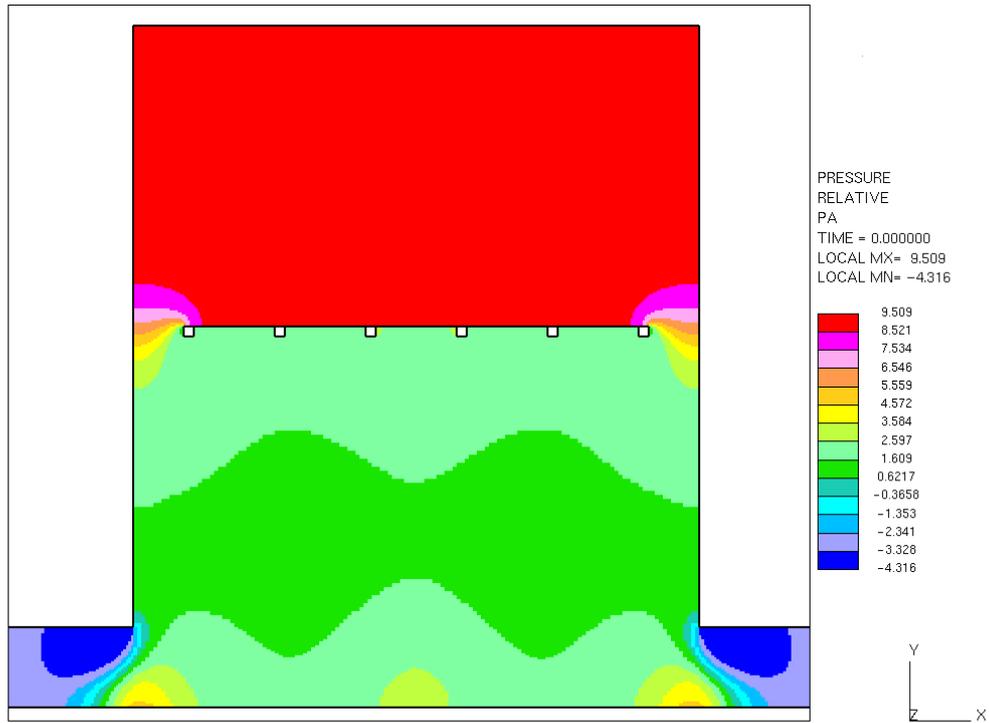


圖 4-6 排氣管道 0.4m 之靜態相對壓力分佈圖

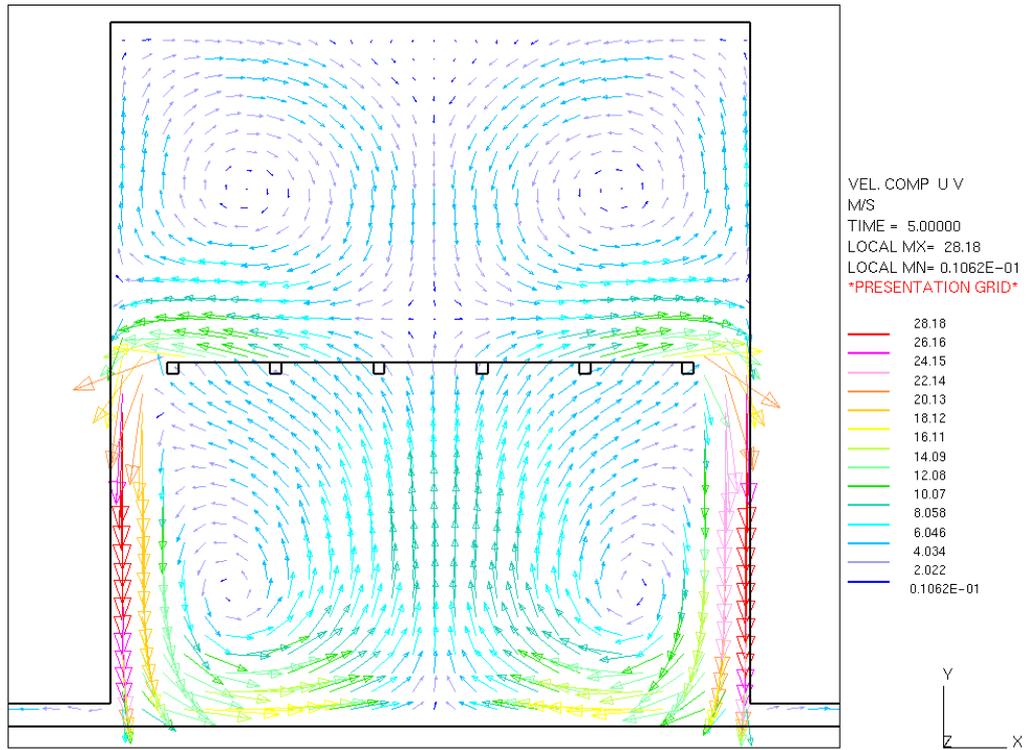


圖 4-7 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = 0$ 之流場示意圖

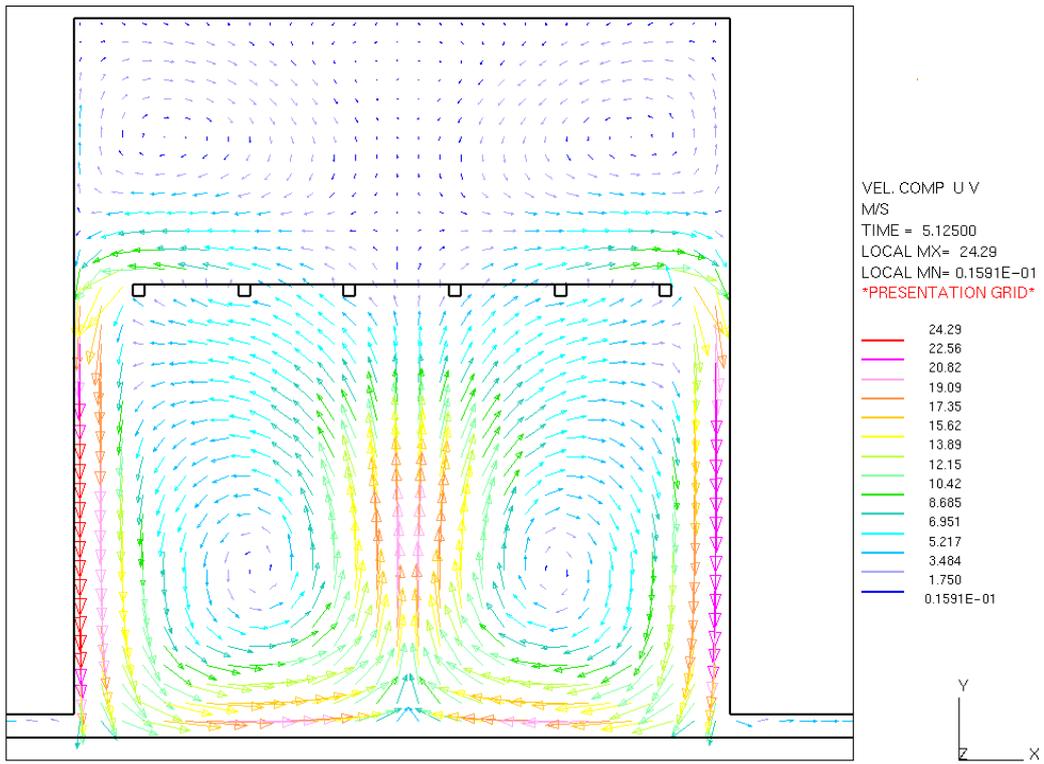


圖 4-8 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{1}{8}$ 之流場示意圖

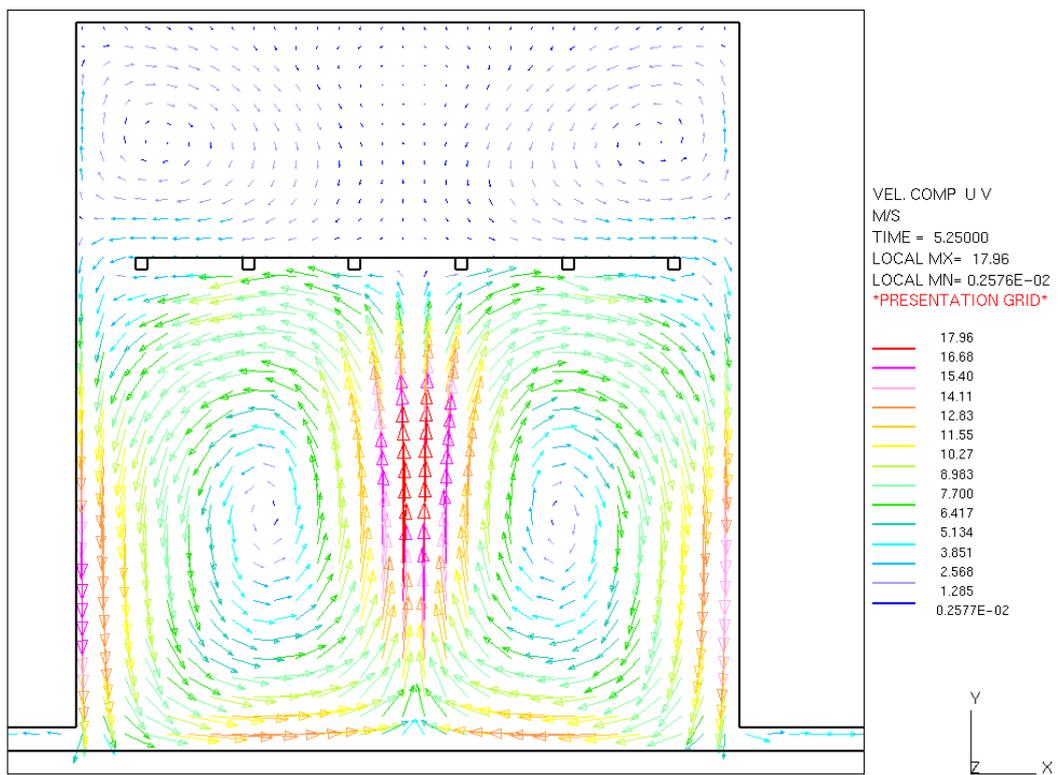


圖 4-9 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{2}{8}$ 之流場示意圖

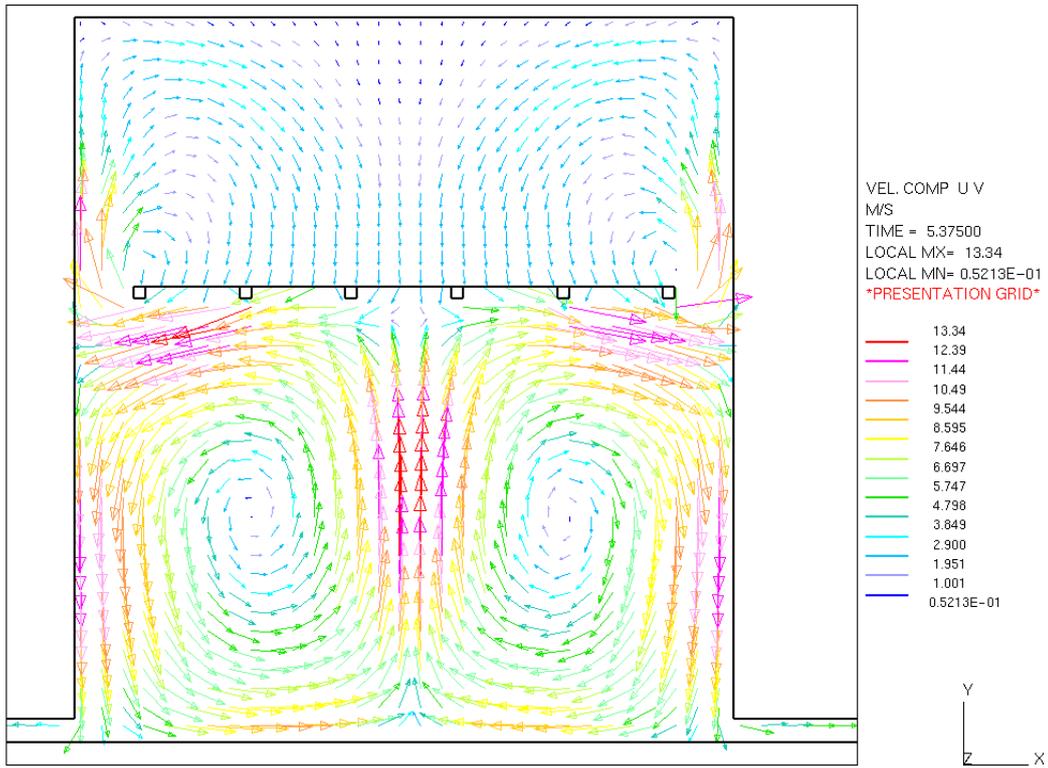


圖 4-10 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{3}{8}$ 之流場示意圖

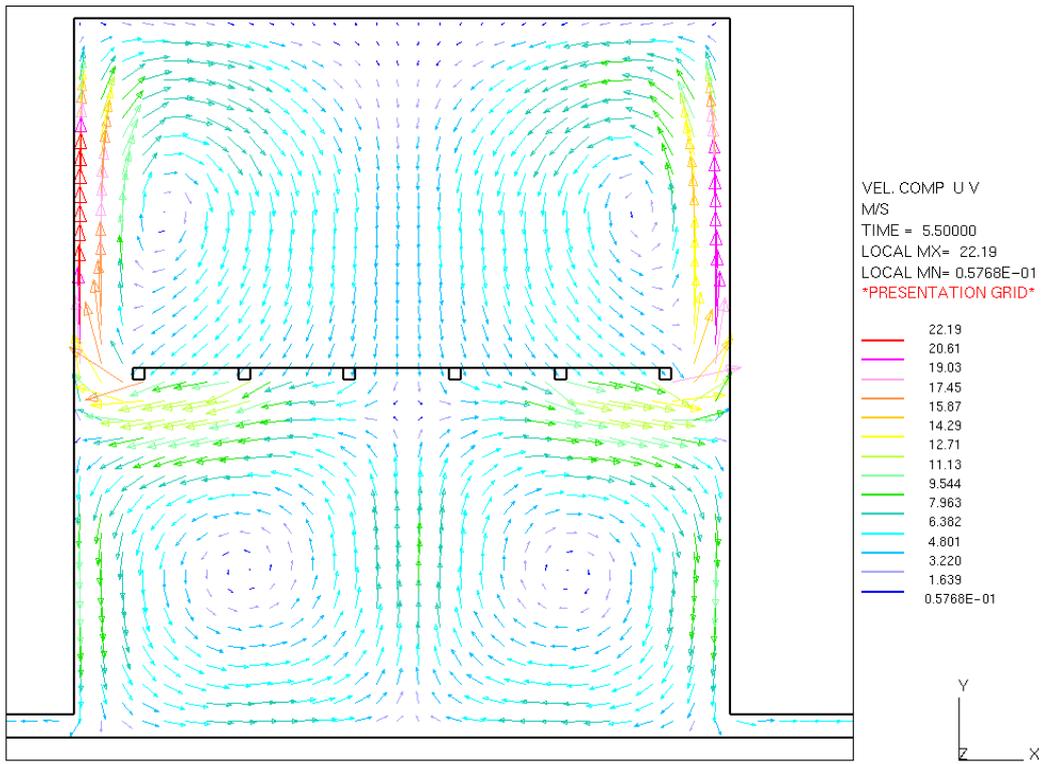


圖 4-11 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{4}{8}$ 之流場示意圖

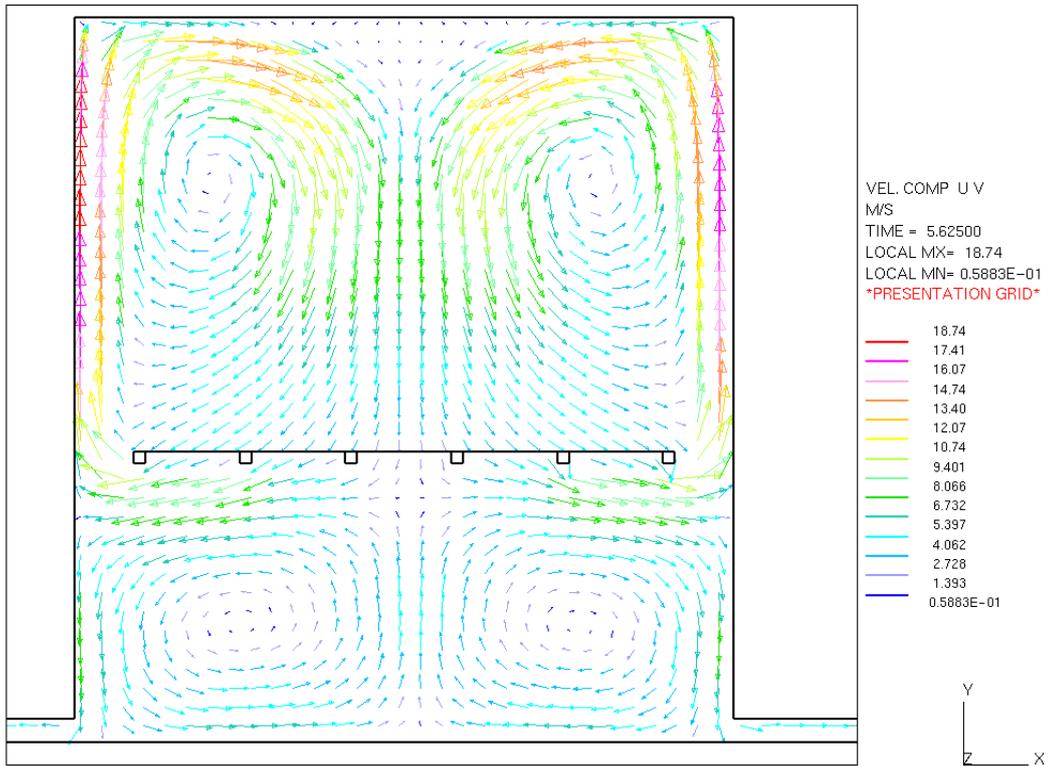


圖 4-12 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{5}{8}$ 之流場示意圖

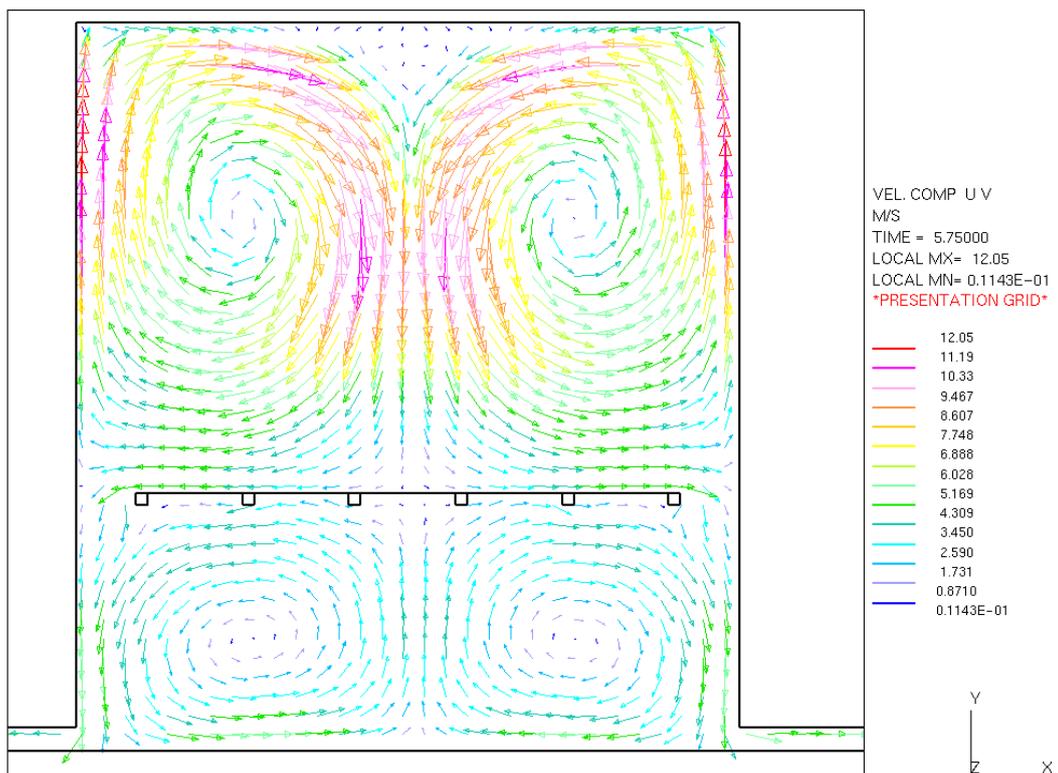


圖 4-13 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{6}{8}$ 之流場示意圖

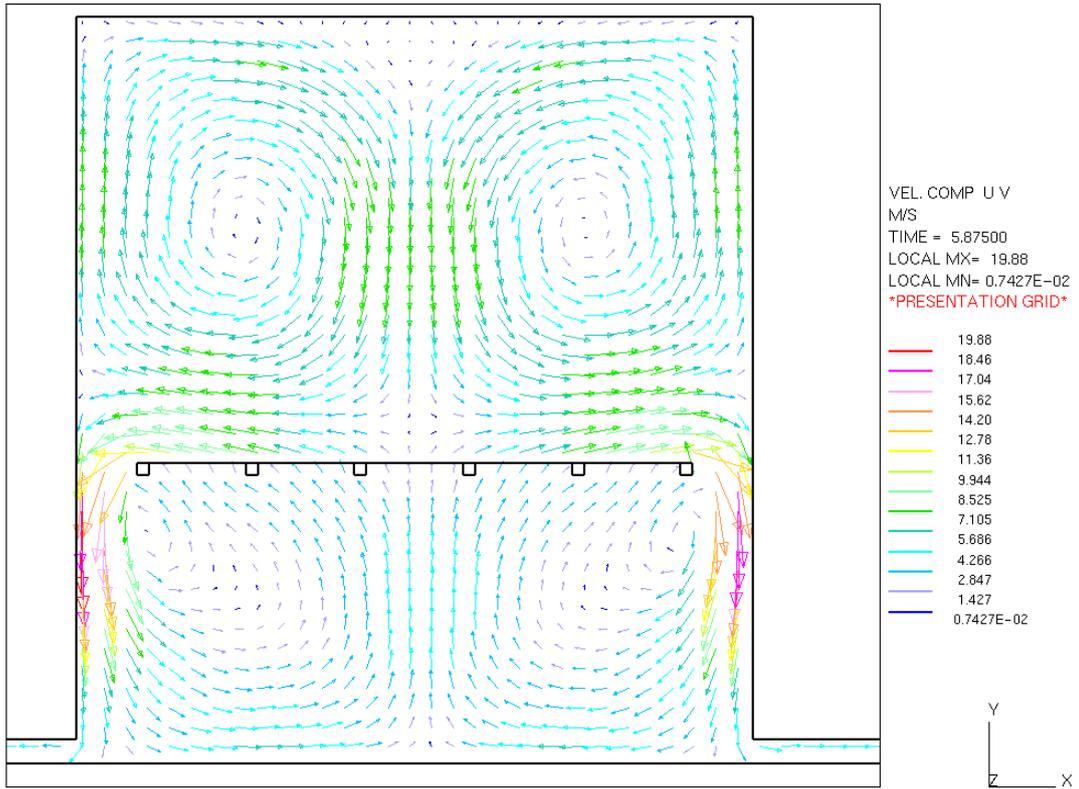


圖 4-14 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau = \frac{7}{8}$ 之流場示意圖

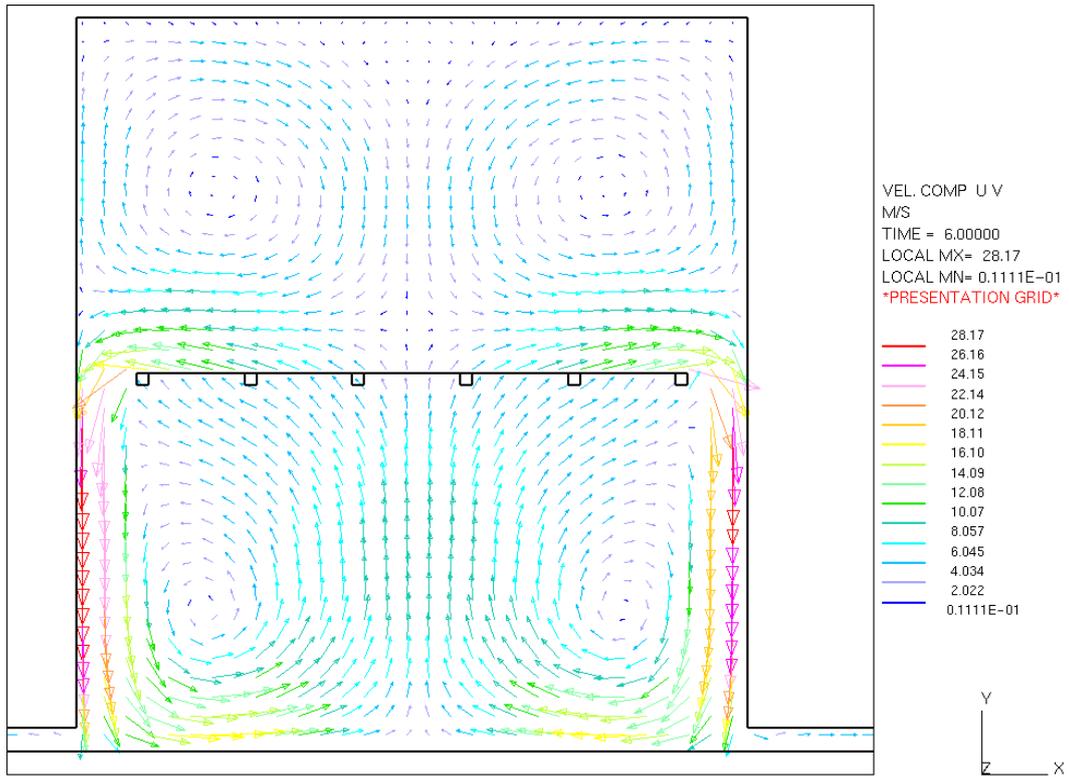


圖 4-15 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒， $\tau=1$ 之流場示意圖

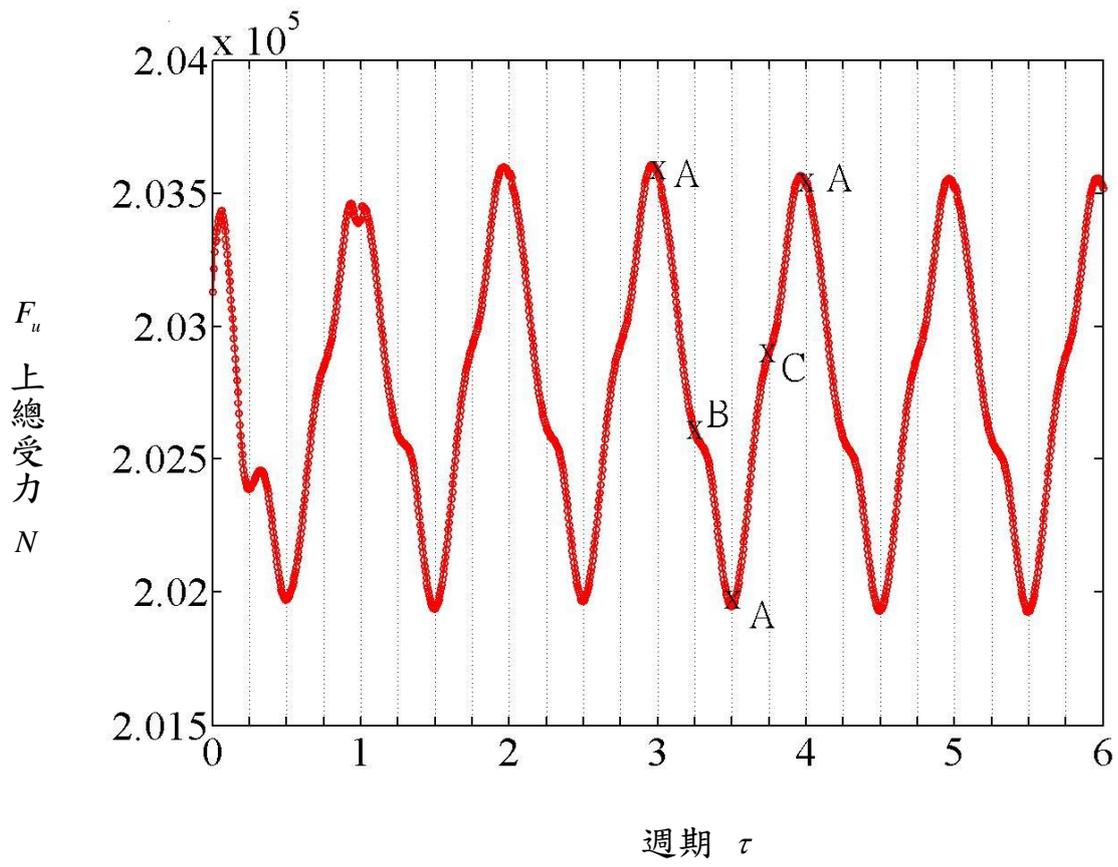


圖 4-16 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板上總受力

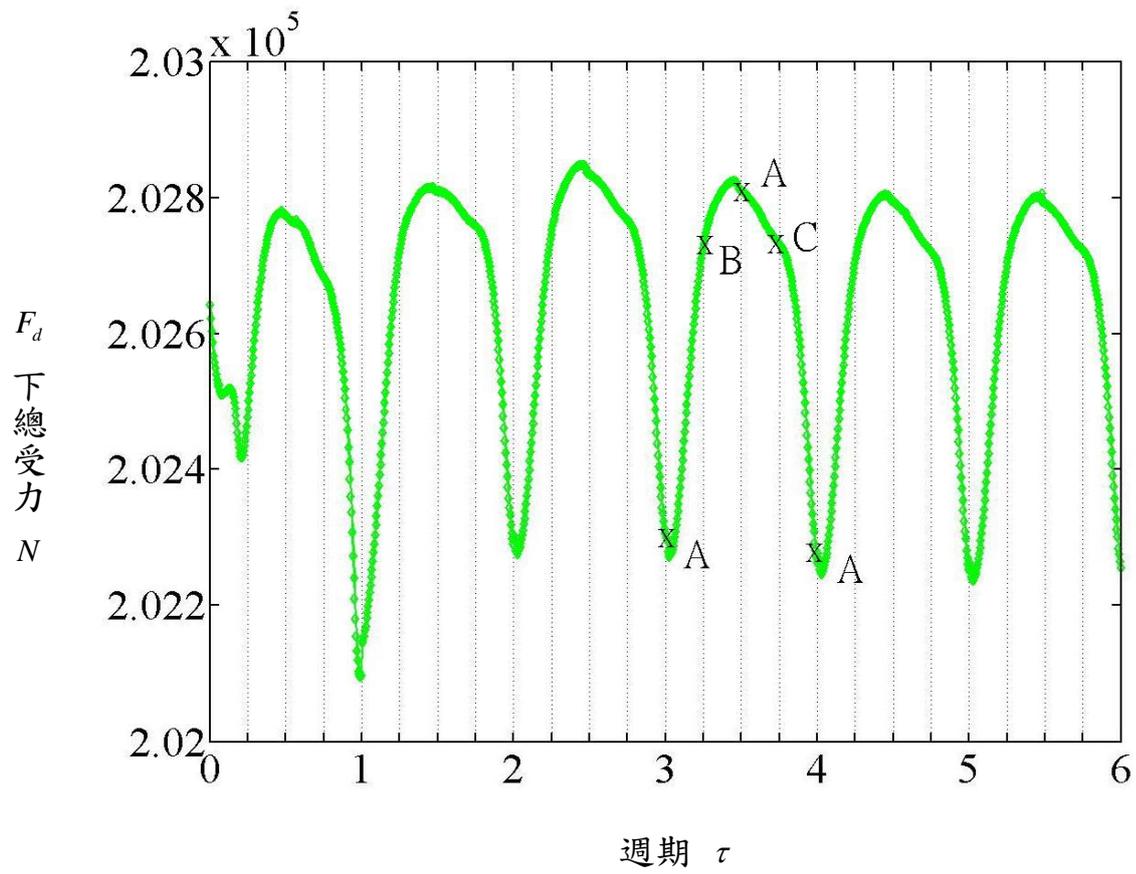


圖 4-17 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板下總受力

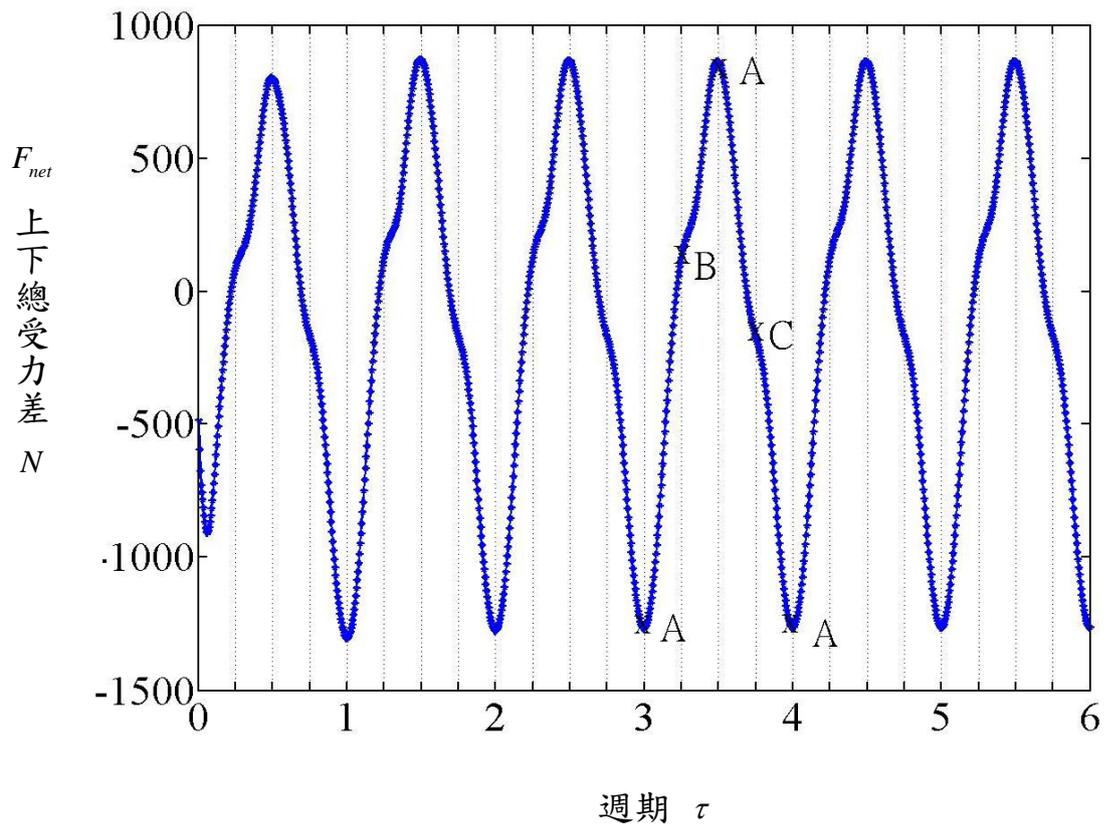


圖 4-18 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板上下總受力差

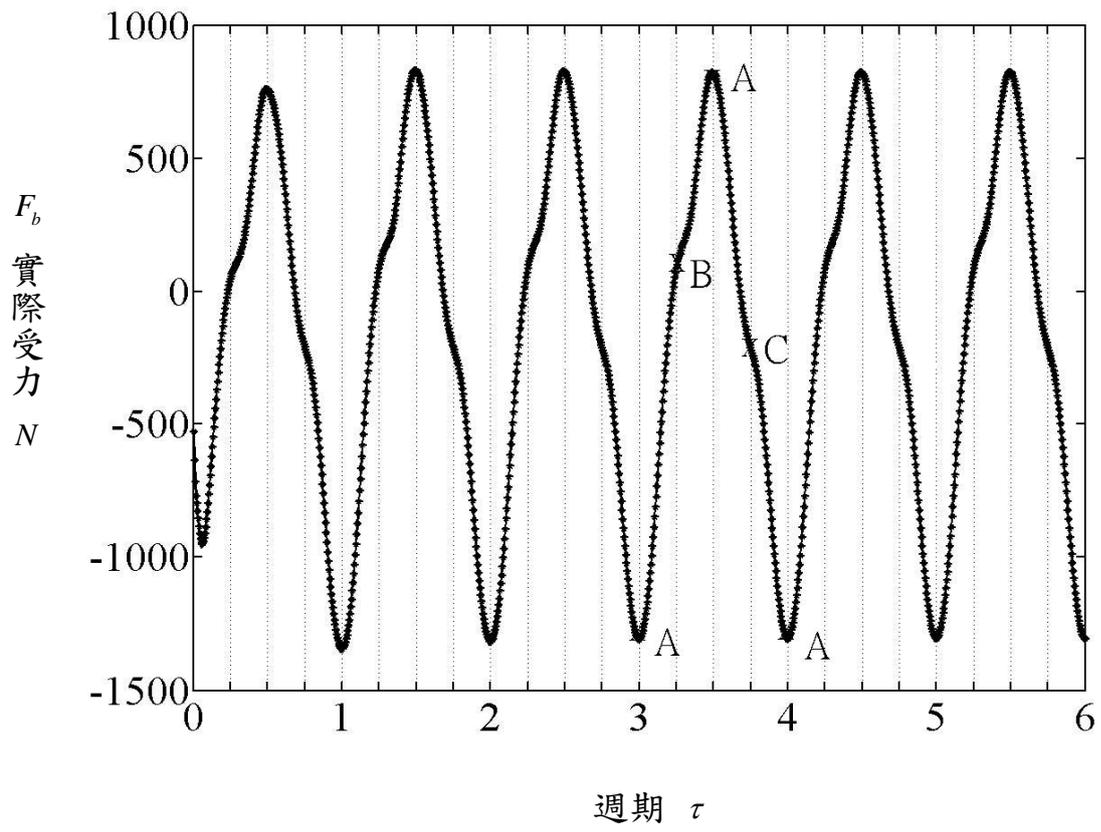


圖 4-19 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板實際受力

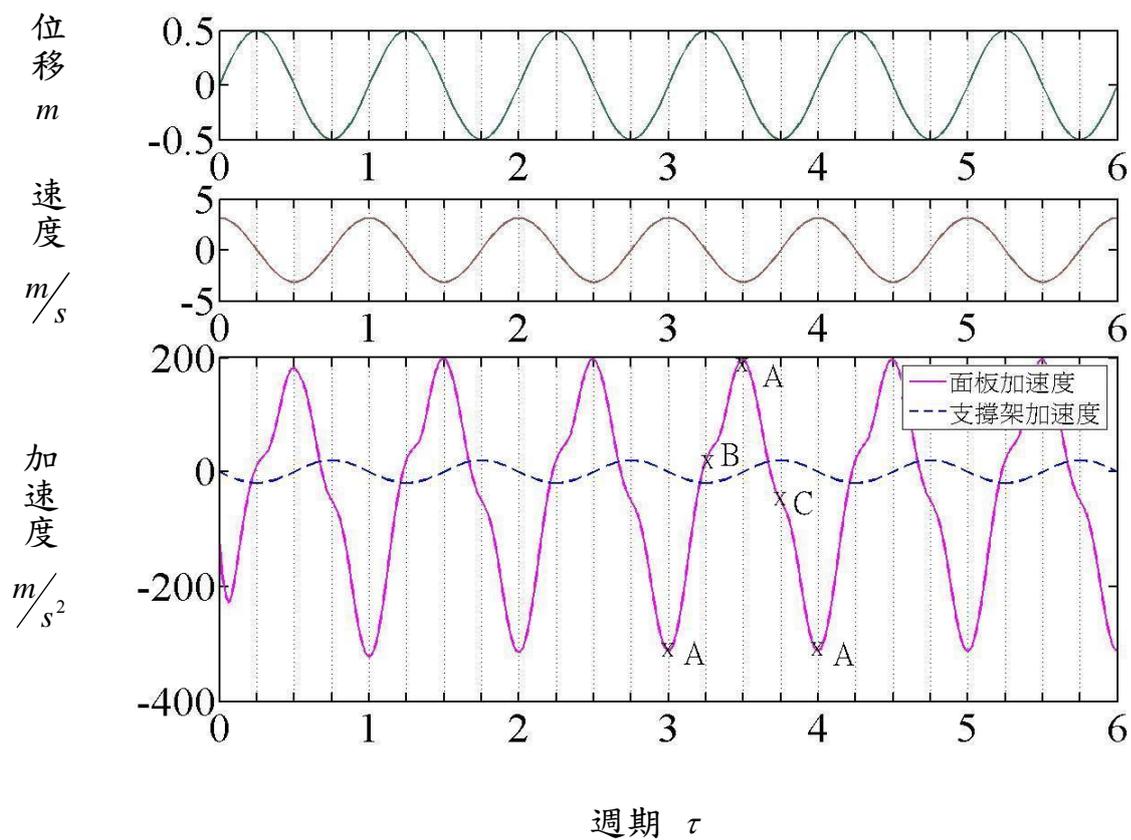


圖 4-20 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖

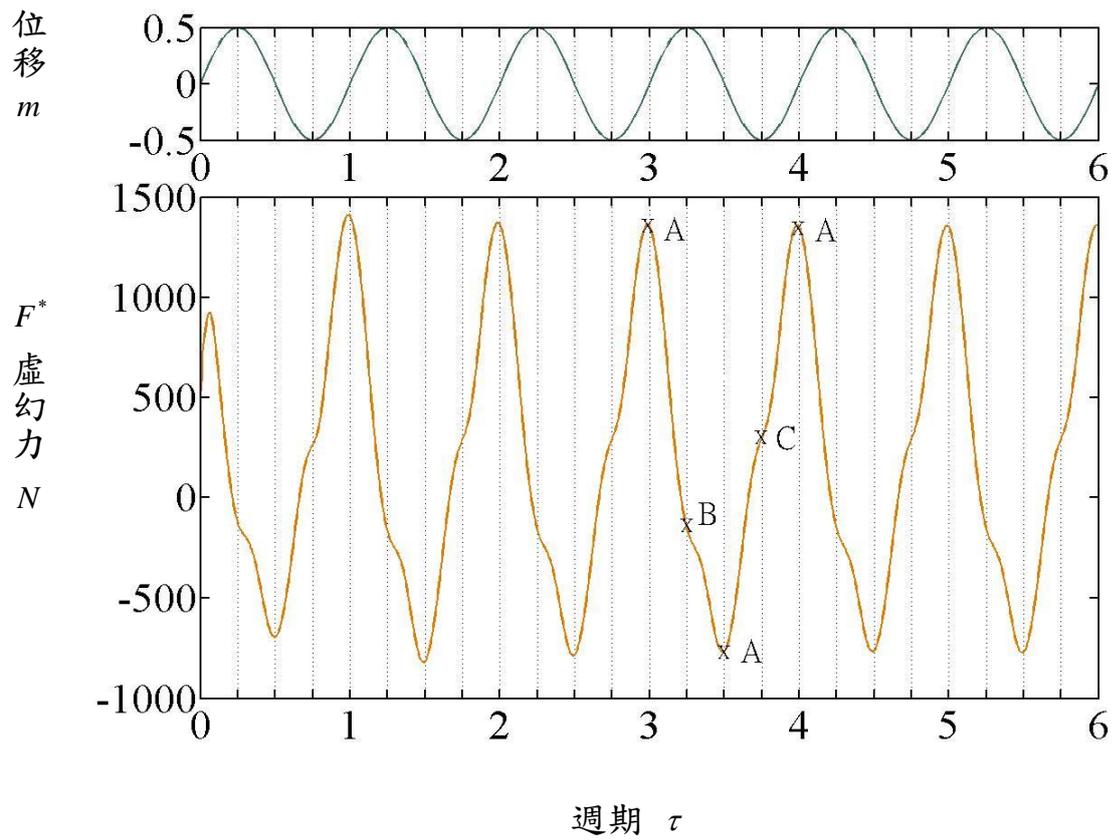


圖 4-21 排氣管道 0.1m，週期為 1 秒之飄浮現象判斷圖

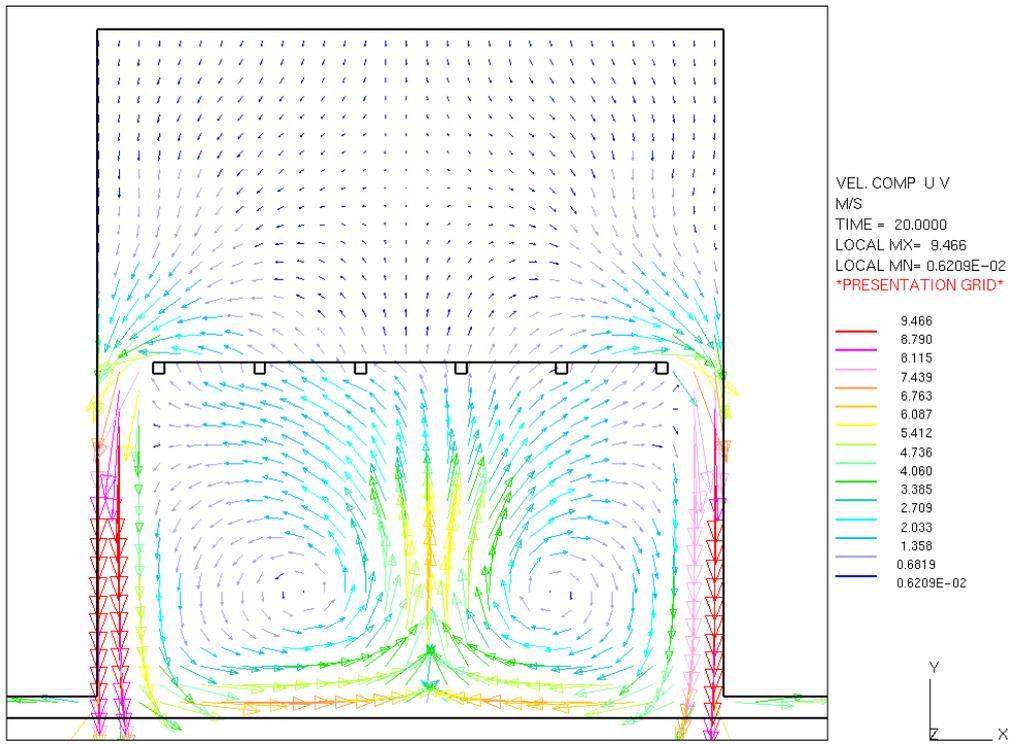


圖 4-22 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = 0$ 之流場示意圖

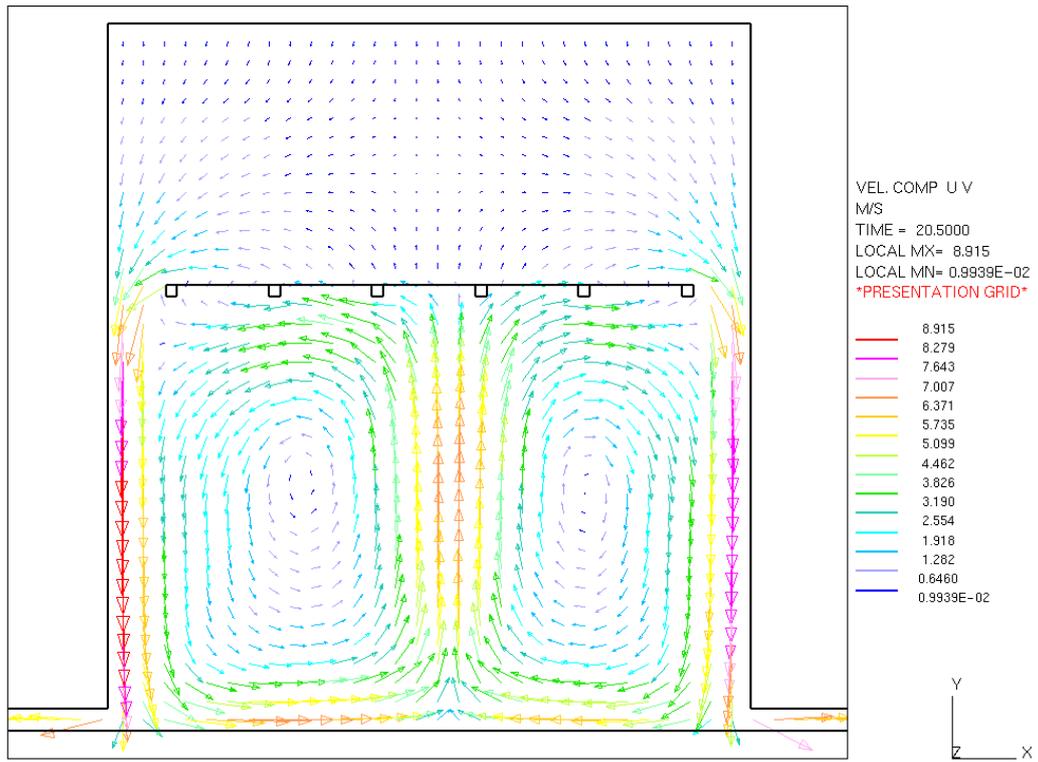


圖 4-23 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{1}{8}$ 之流場示意圖

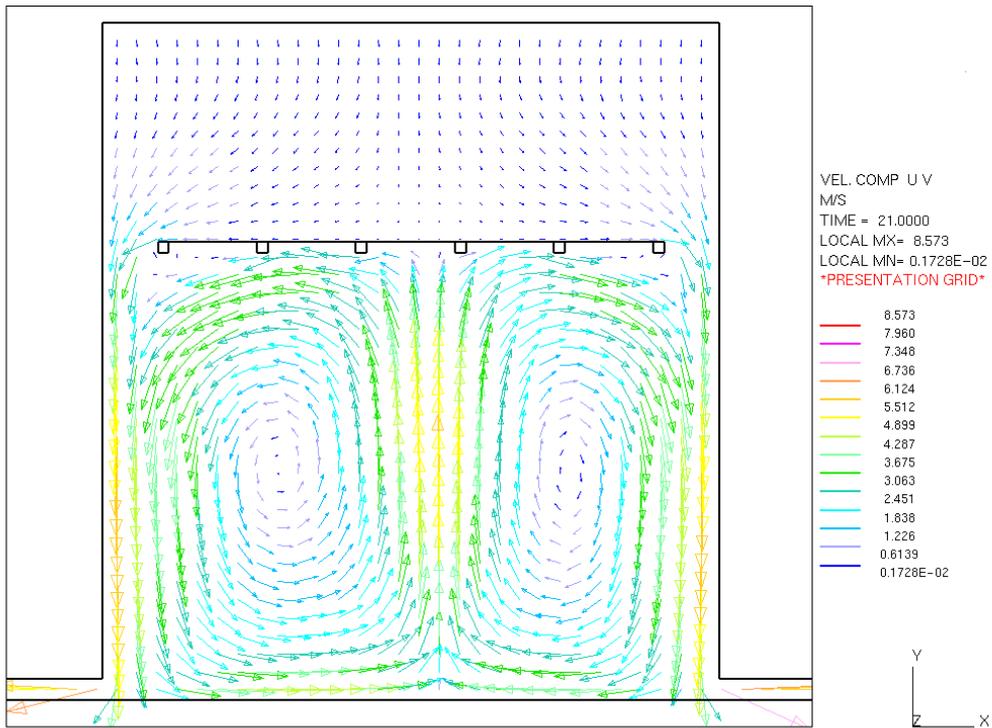


圖 4-24 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{2}{8}$ 之流場示意圖

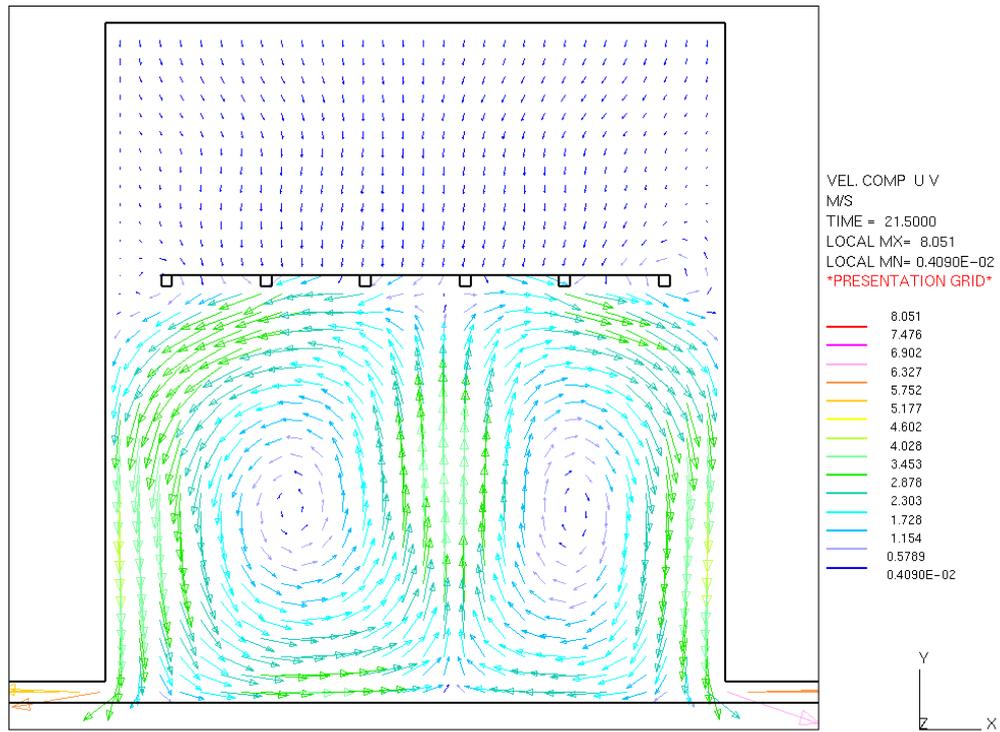


圖 4-25 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{3}{8}$ 之流場示意圖

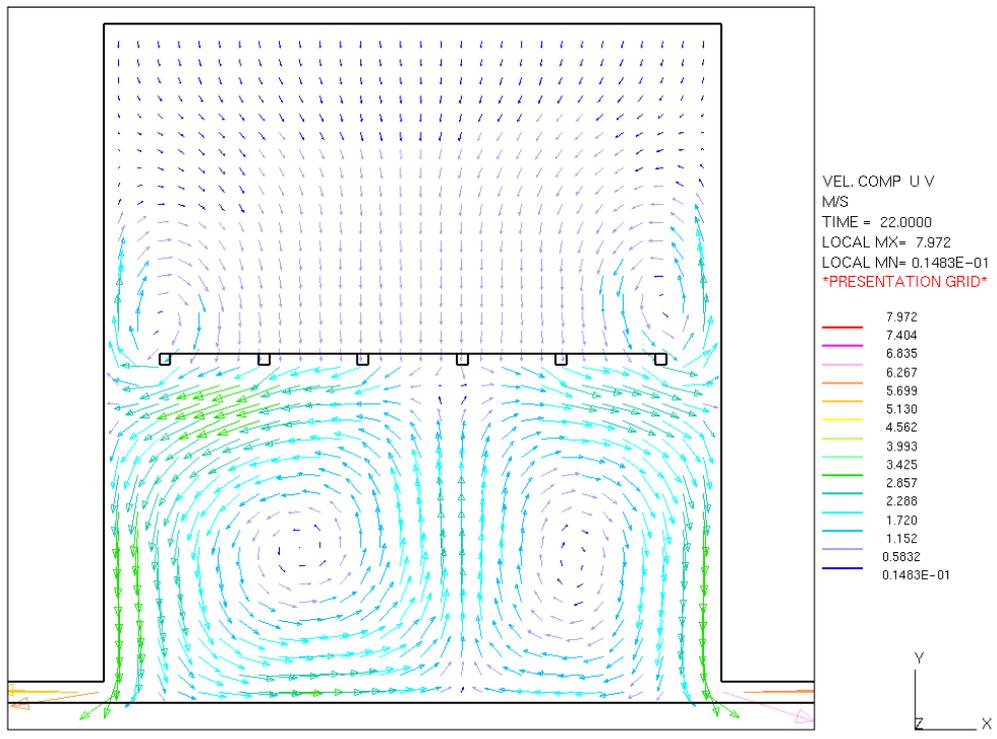


圖 4-26 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{4}{8}$ 之流場示意圖

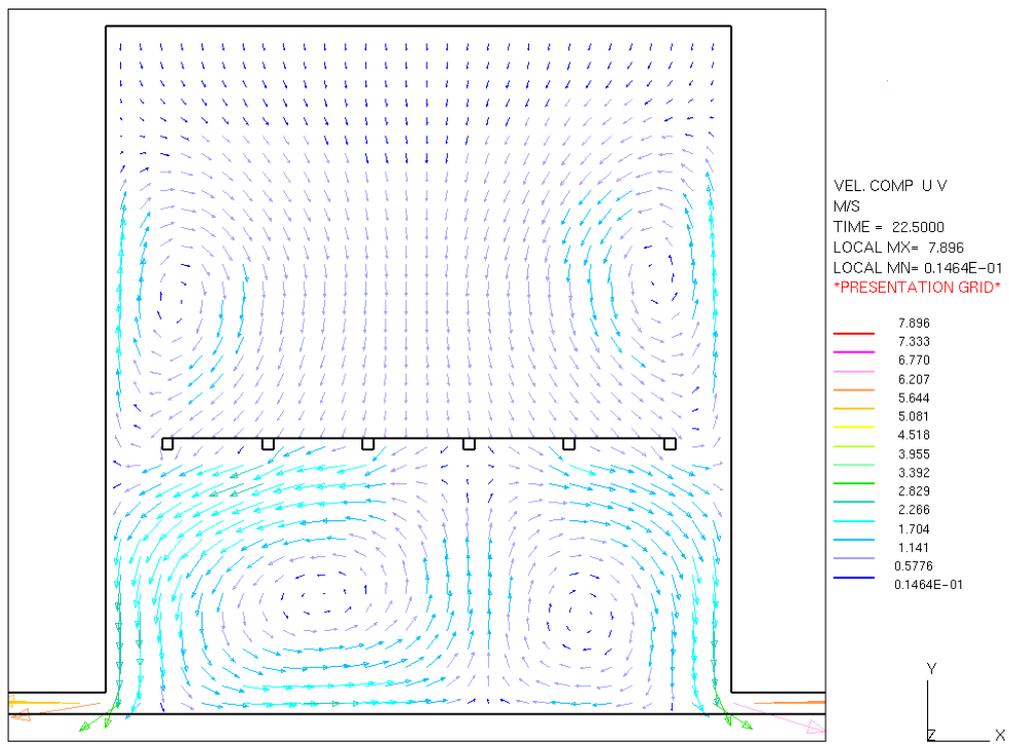


圖 4-27 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{5}{8}$ 之流場示意圖

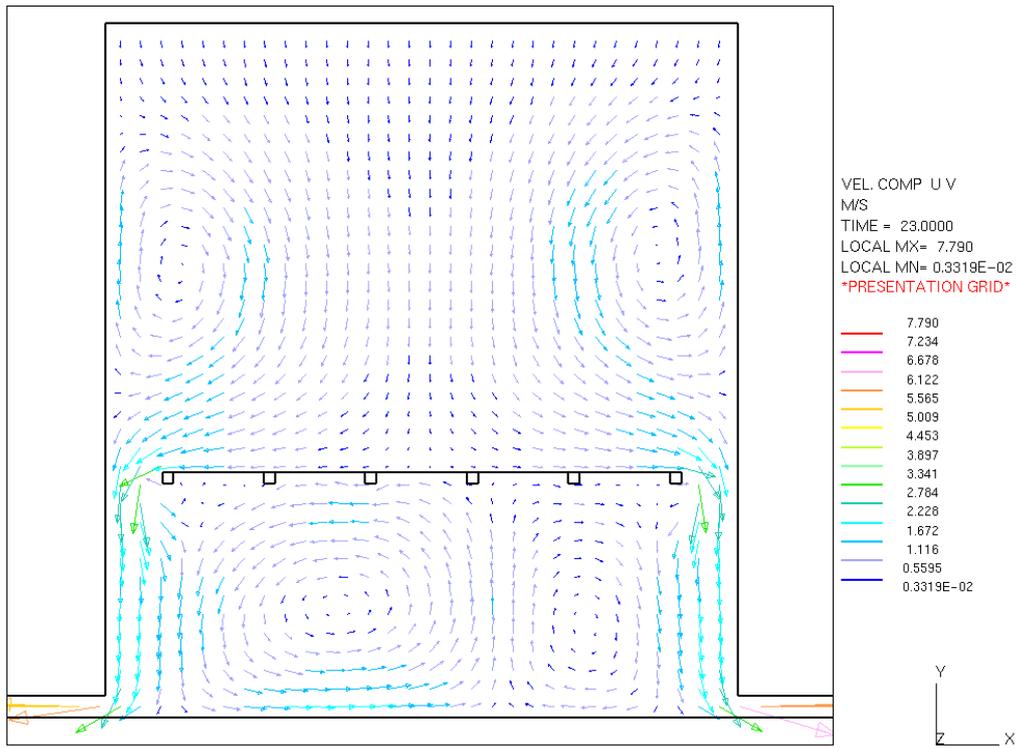


圖 4-28 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{6}{8}$ 之流場示意圖

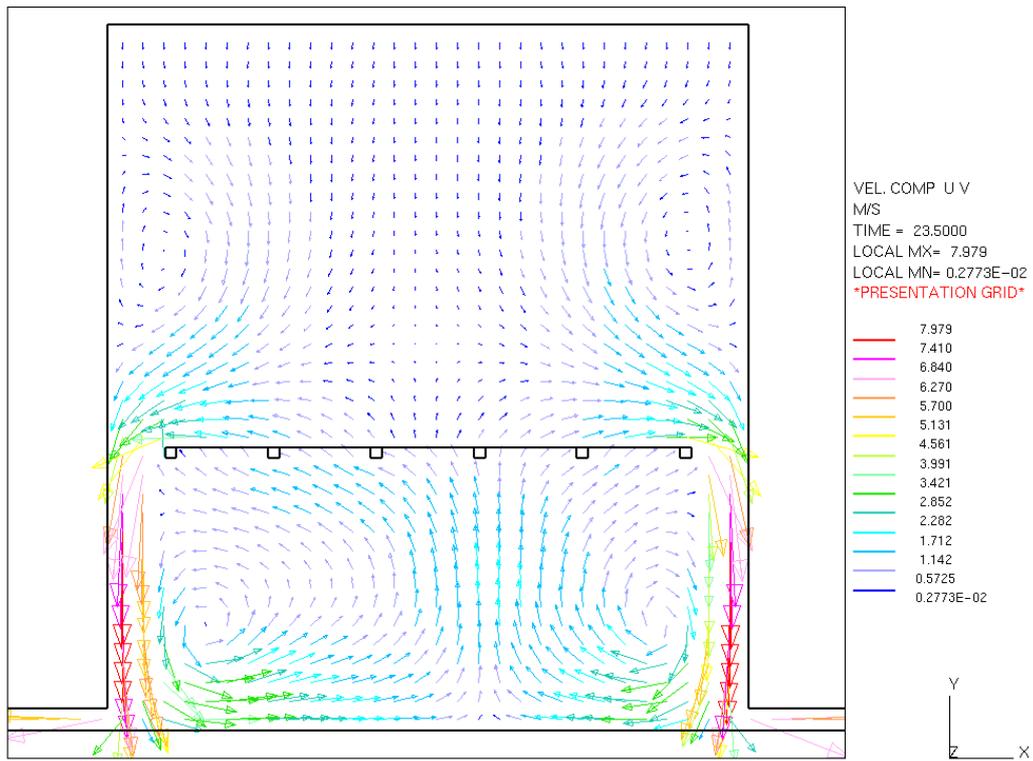


圖 4-29 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau = \frac{7}{8}$ 之流場示意圖

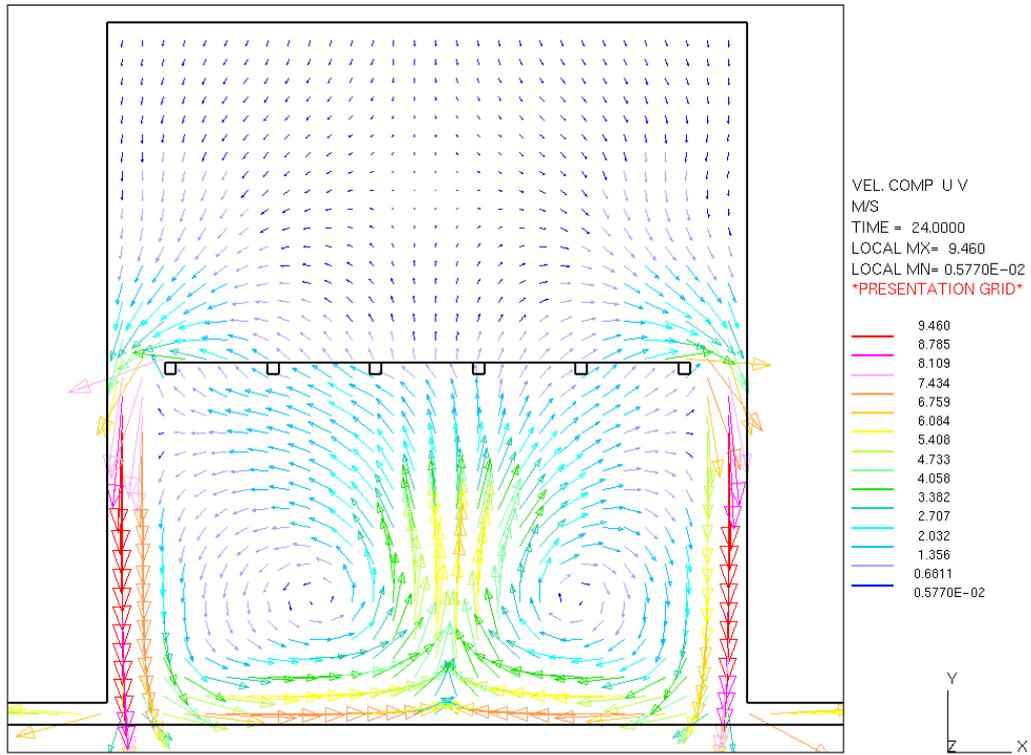


圖 4-30 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒， $\tau=1$ 之流場示意圖

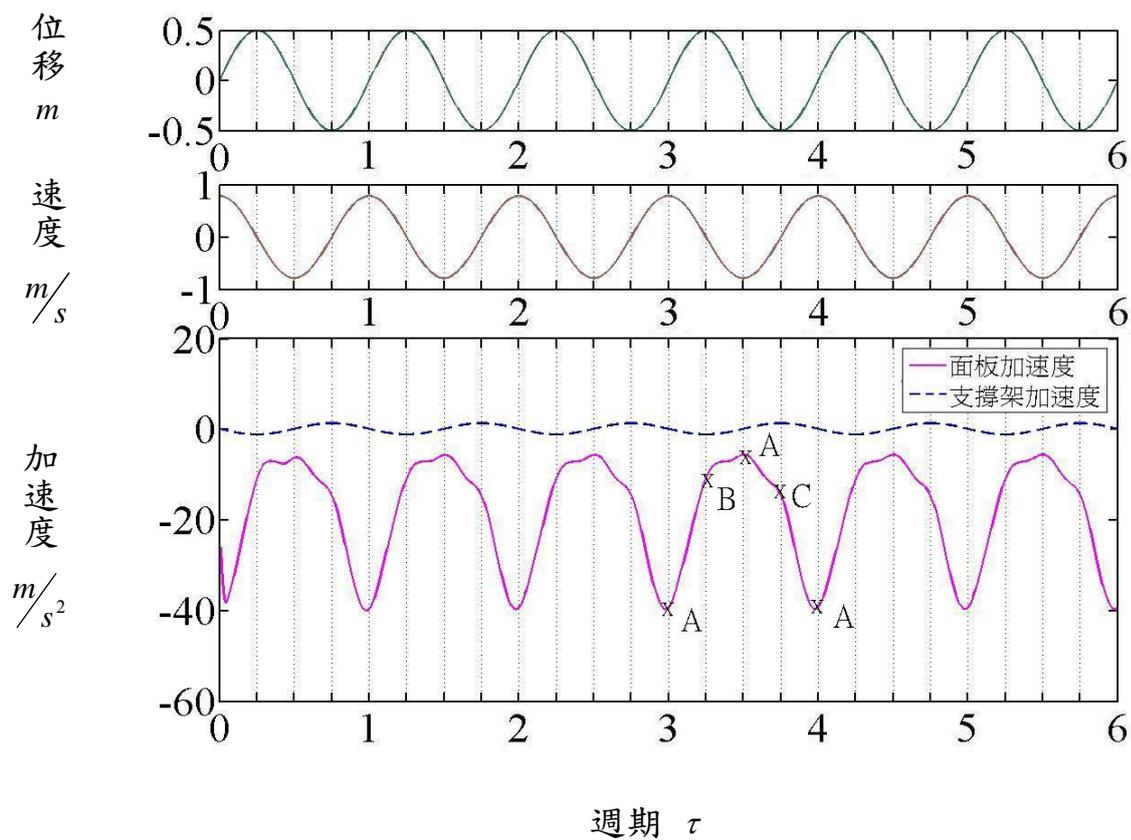


圖 4-31 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖

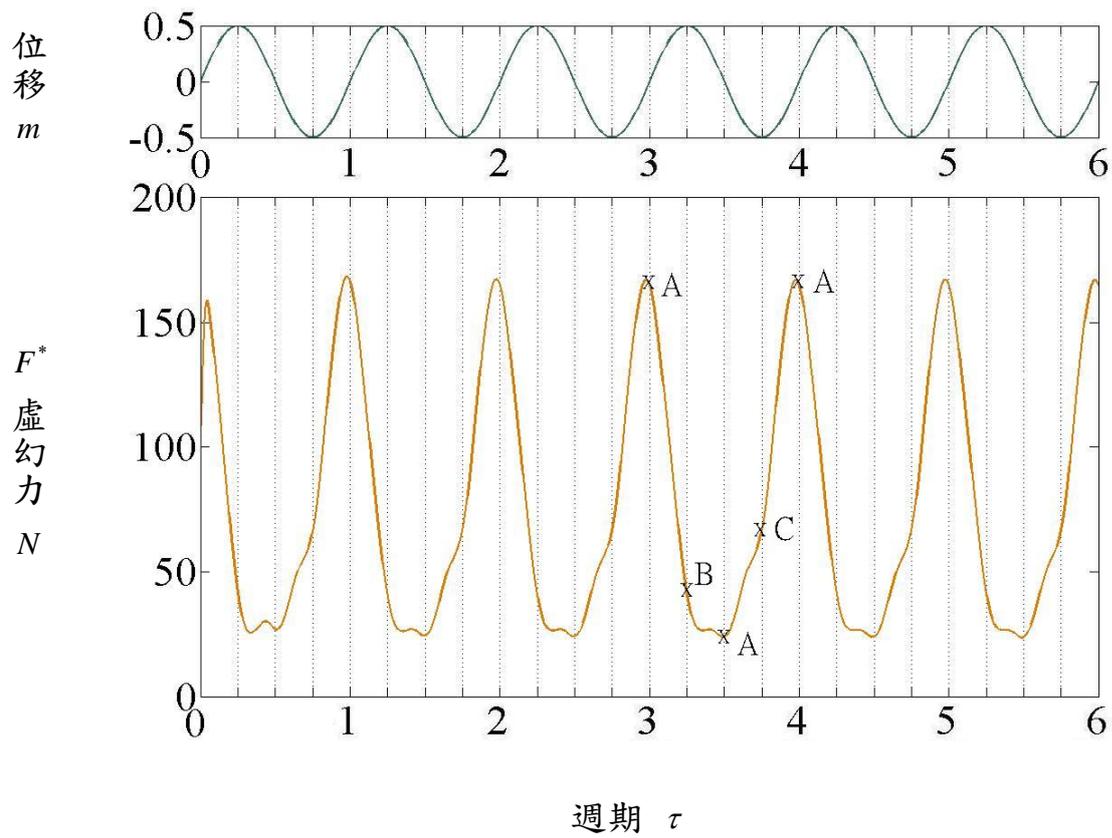


圖 4-32 排氣管道 0.1m，週期為 4 秒之飄浮現象判斷圖

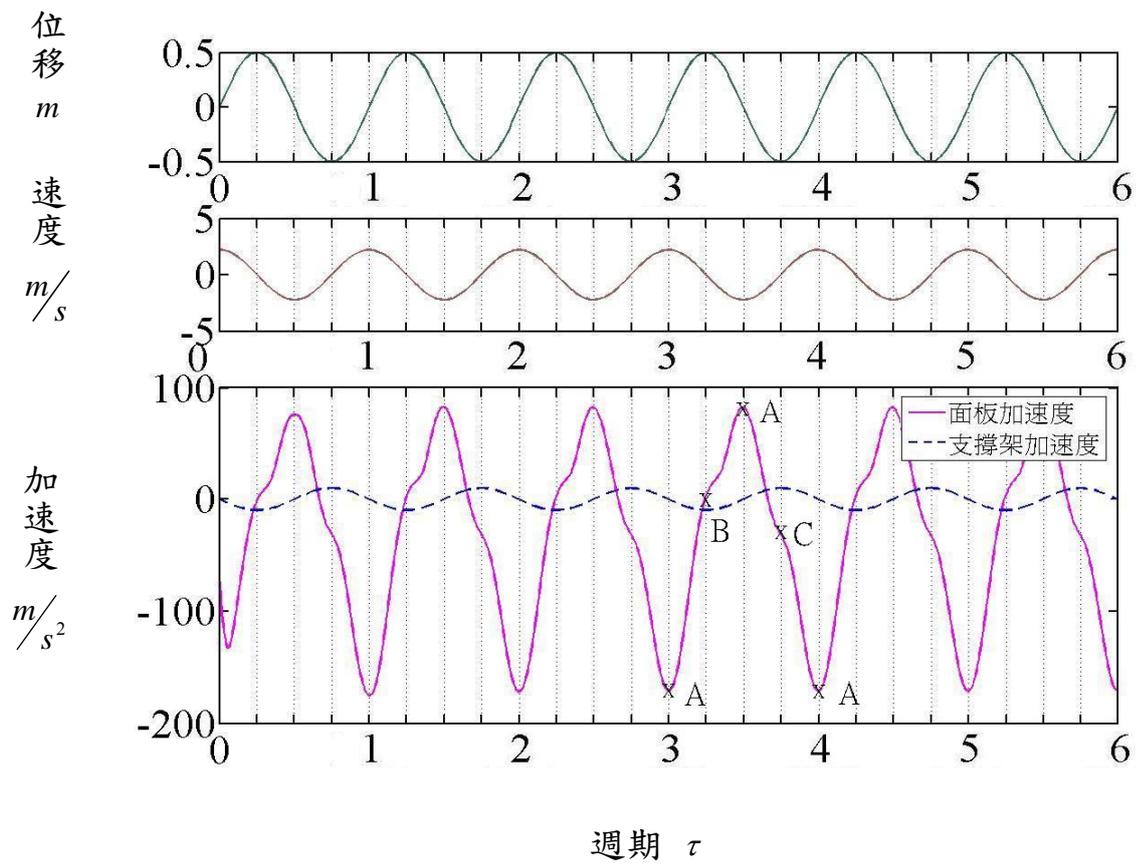


圖 4-33 排氣管道 0.1m，週期為 1.42 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係

圖

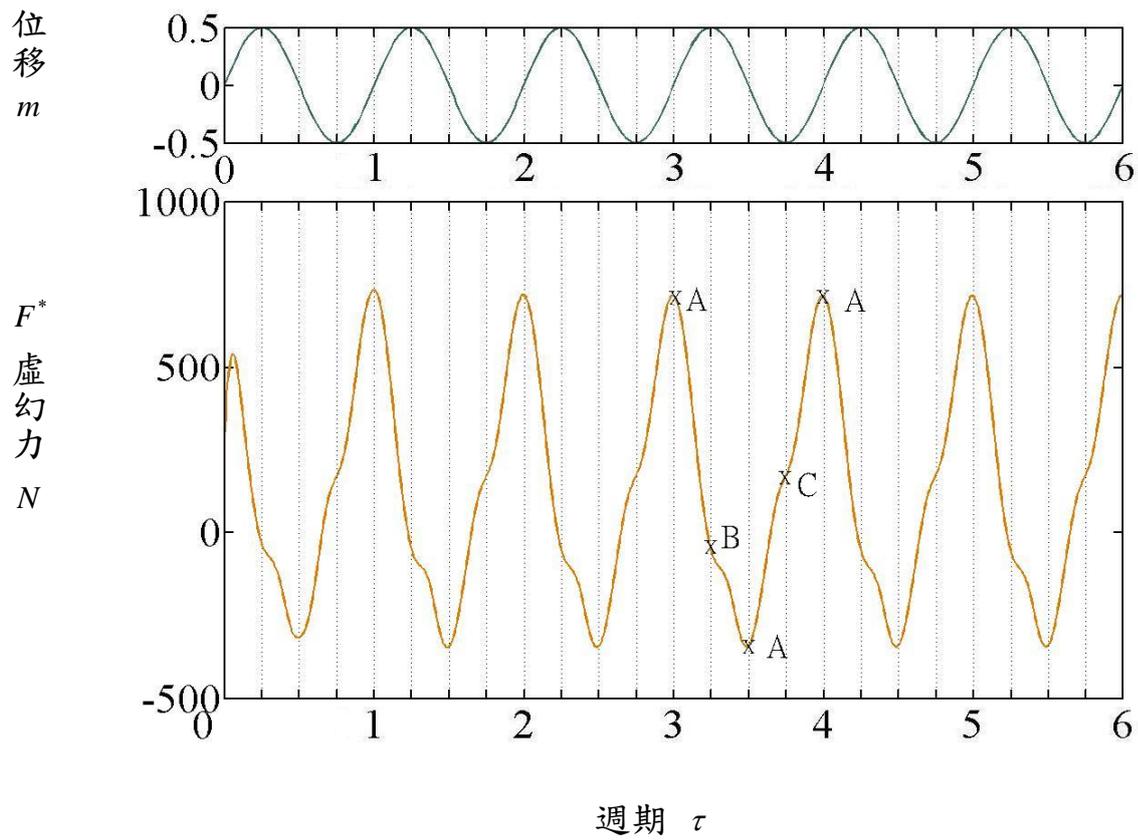


圖 4-34 排氣管道 0.1m，週期為 1.42 秒之飄浮現象判斷圖

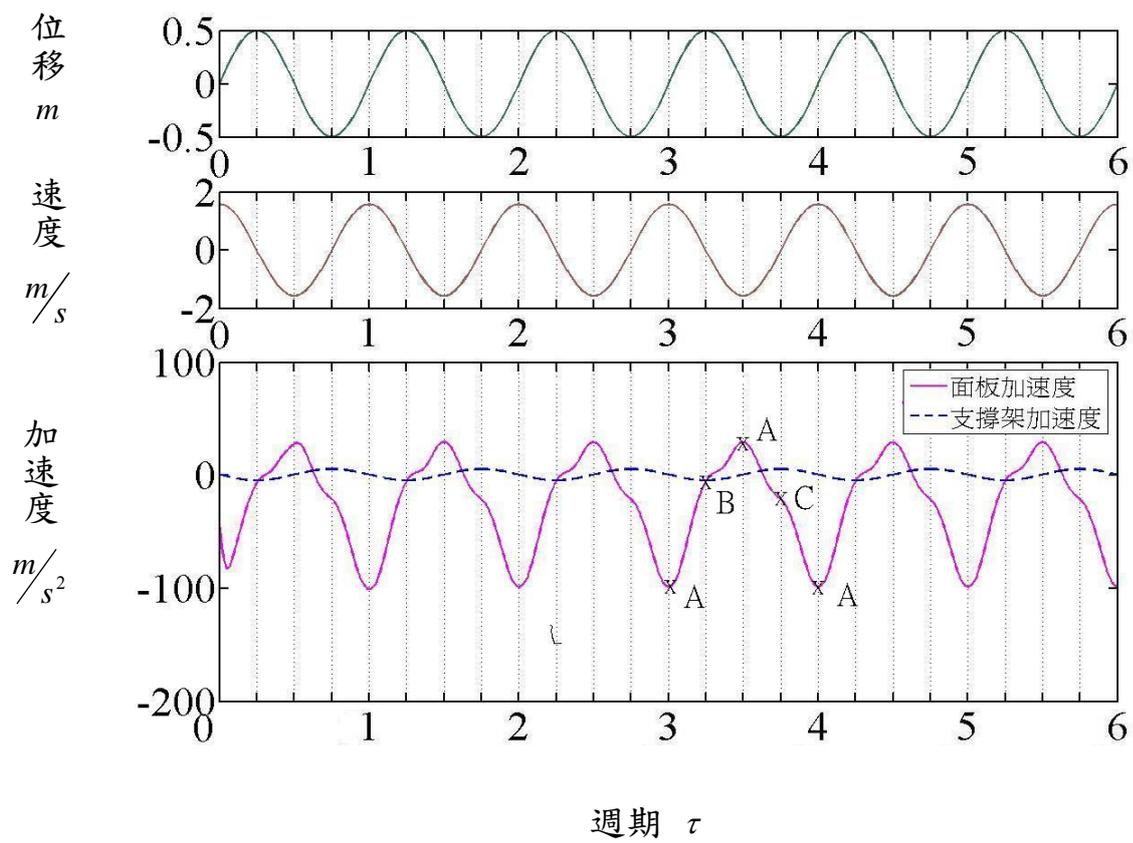


圖 4-35 排氣管道 0.1m，週期為 2 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖

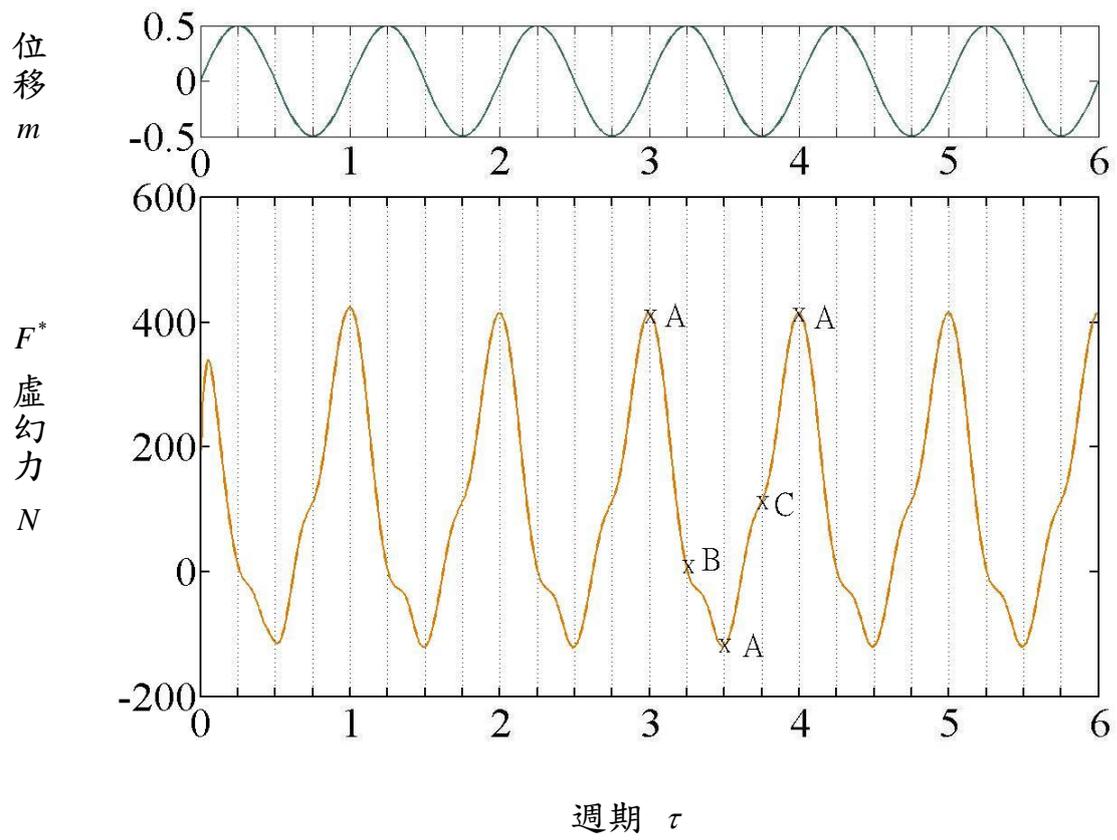


圖 4-36 排氣管道 0.1m，週期為 2 秒之飄浮現象判斷圖

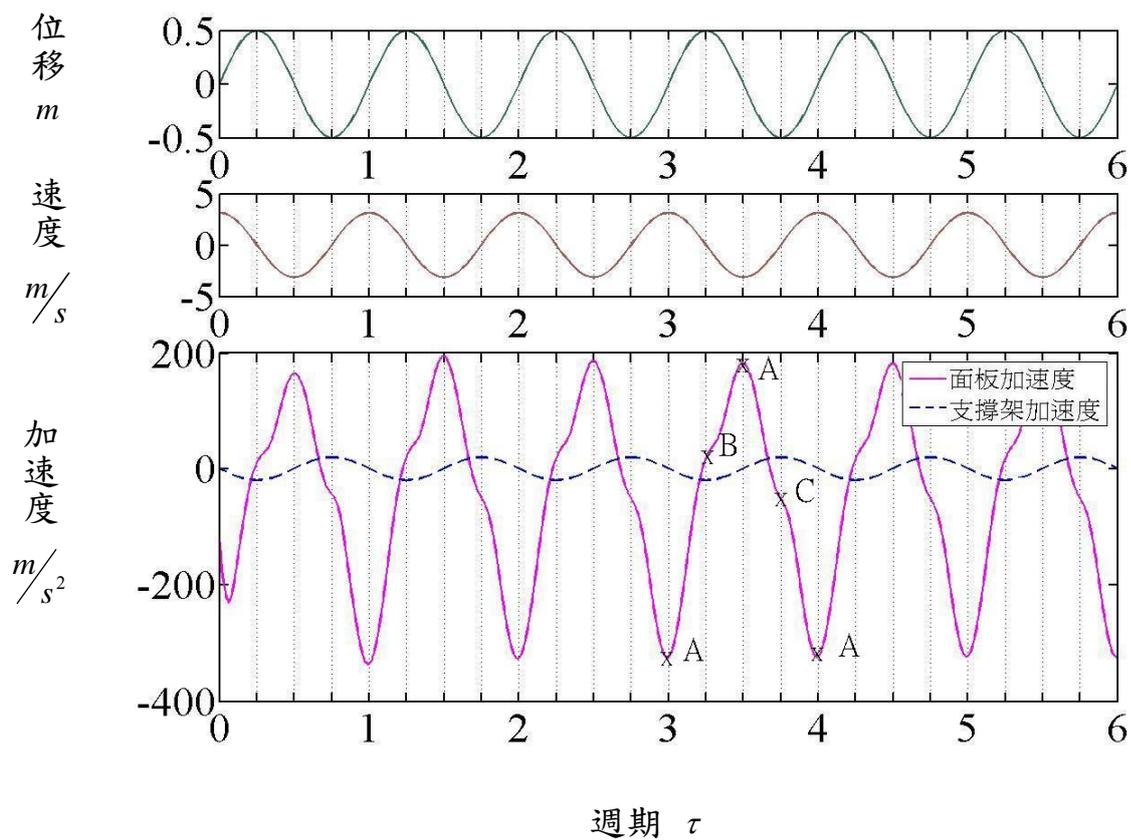


圖 4-37 排氣管道 0.2m，週期為 1 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖

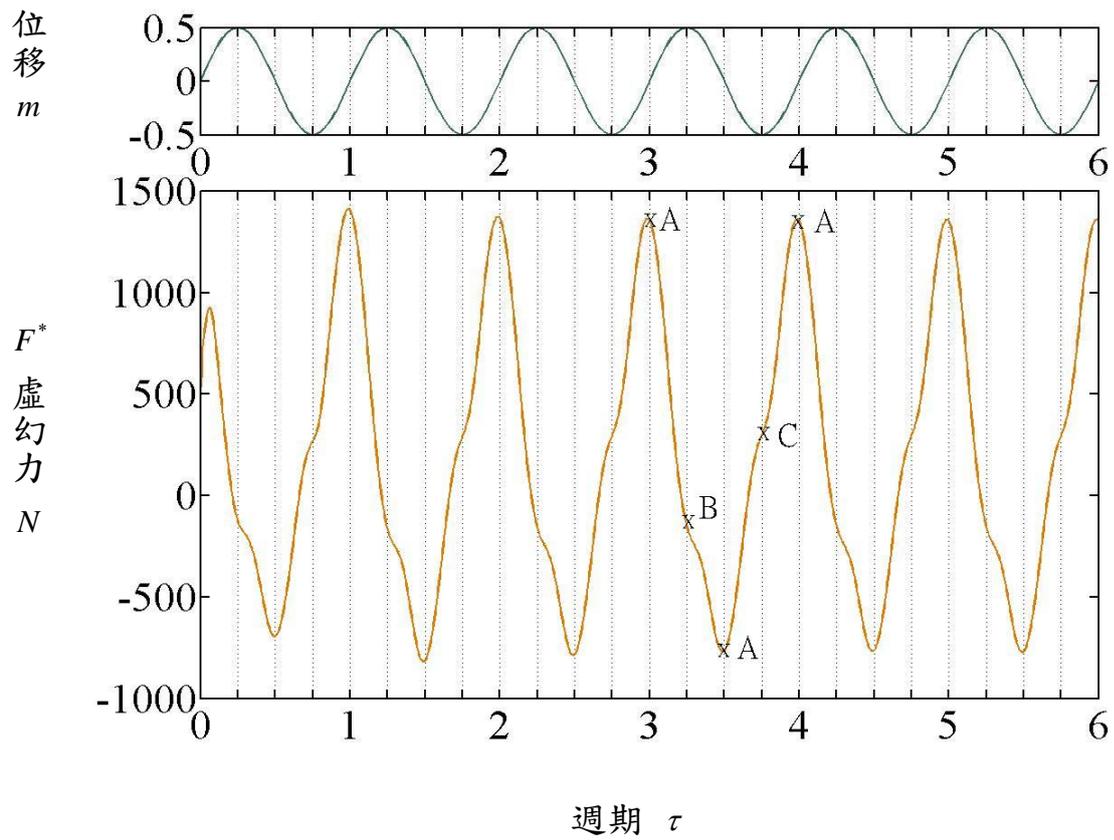


圖 4-38 排氣管道 0.2m，週期為 1 秒之飄浮現象判斷圖

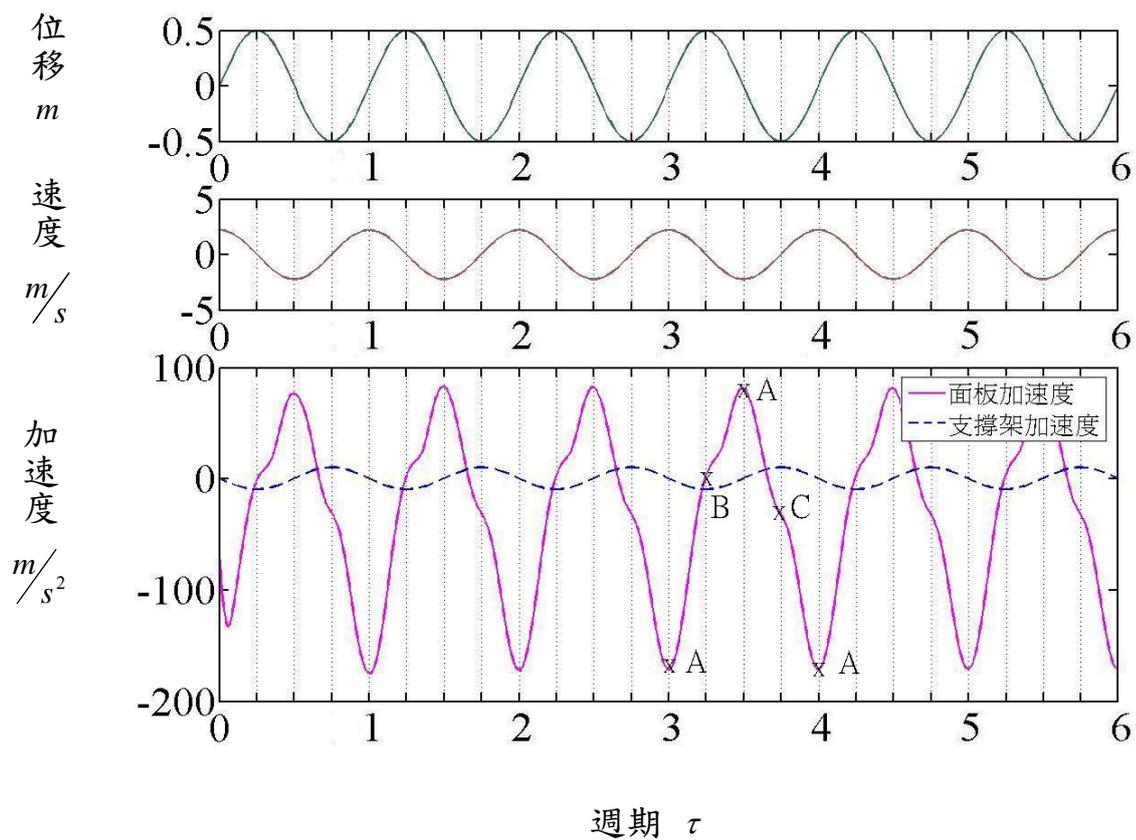


圖 4-39 排氣管道 0.2m，週期為 1.42 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係

圖

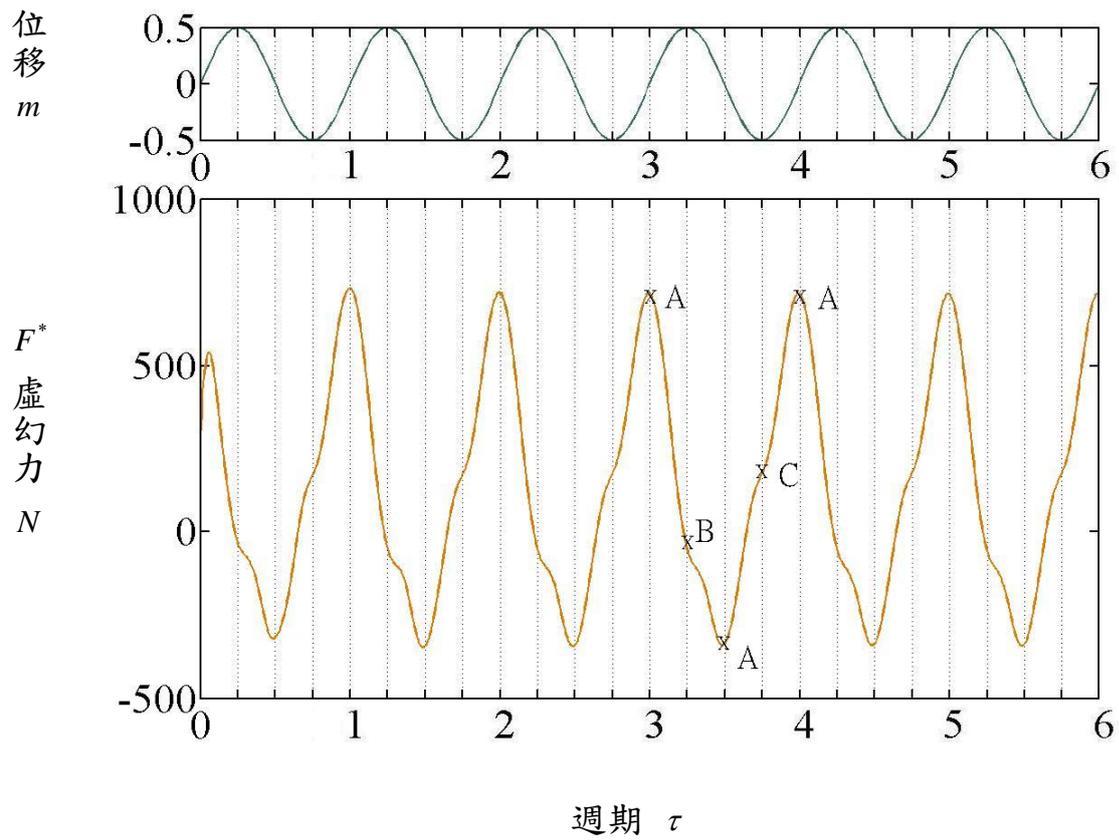


圖 4-40 排氣管道 0.2m，週期為 1.42 秒之飄浮現象判斷圖

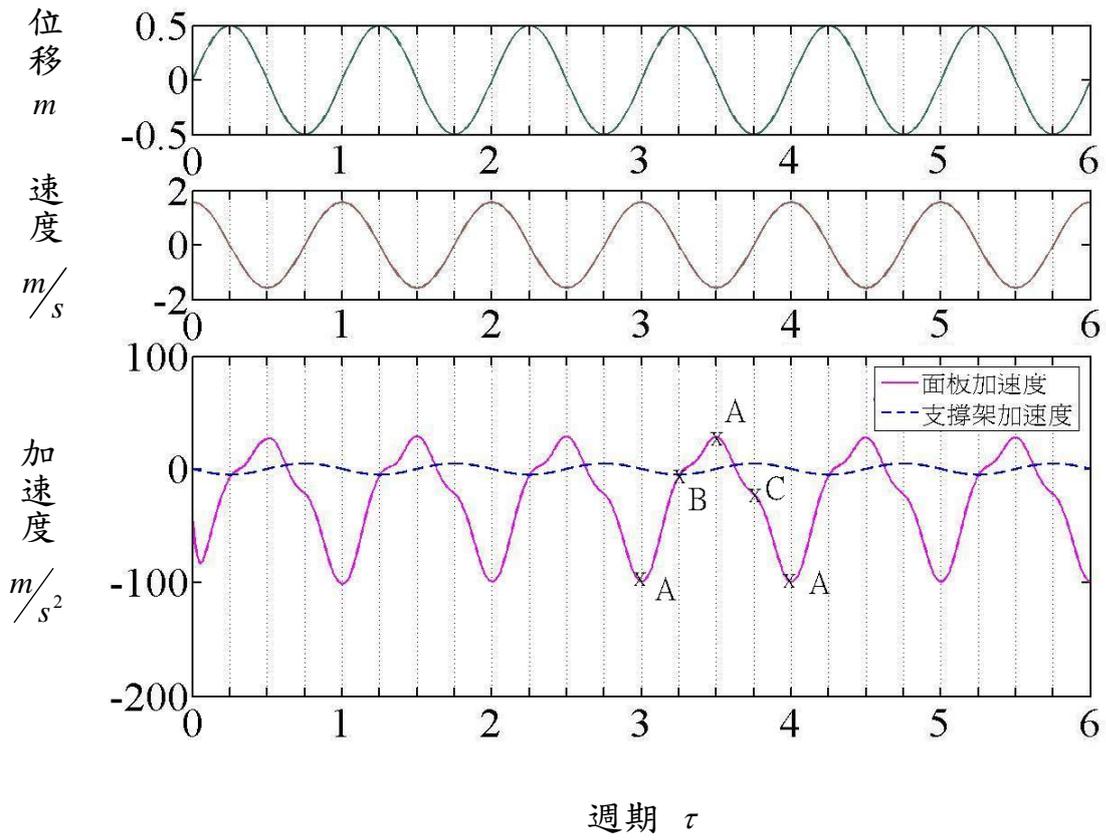


圖 4-41 排氣管道 0.2m，週期為 2 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖

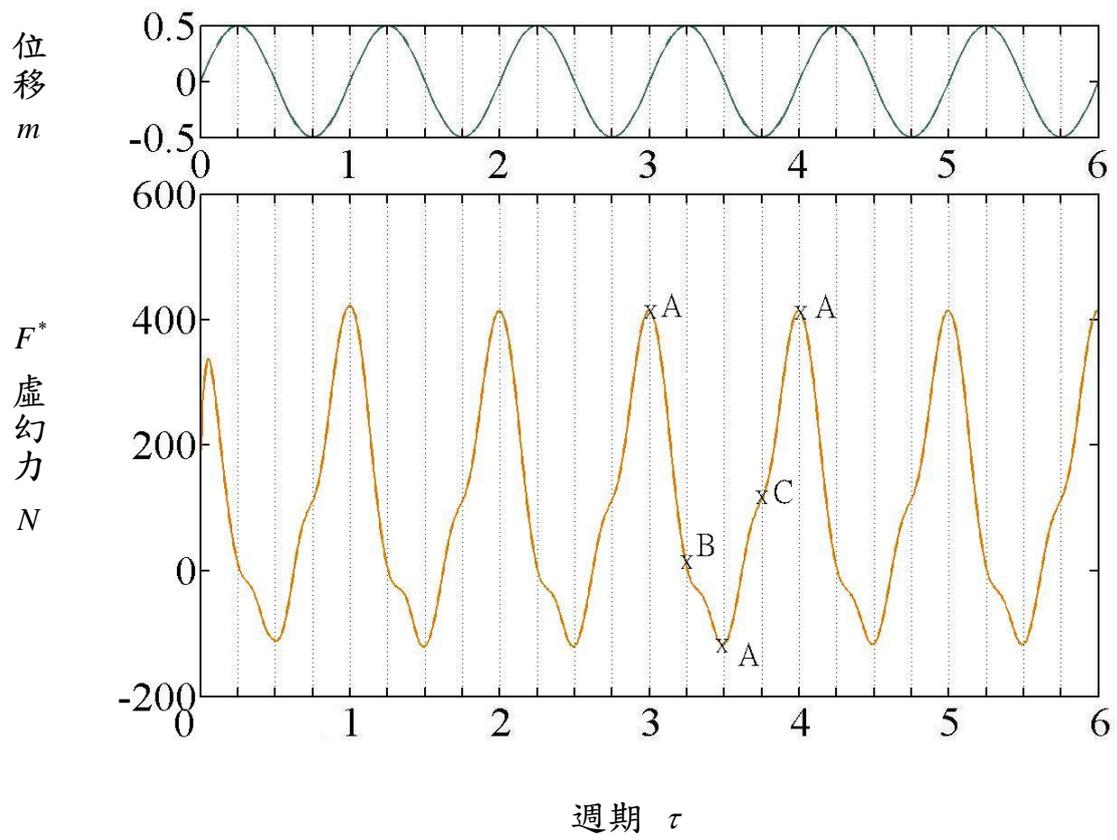


圖 4-42 排氣管道 0.2m，週期為 2 秒之飄浮現象判斷圖

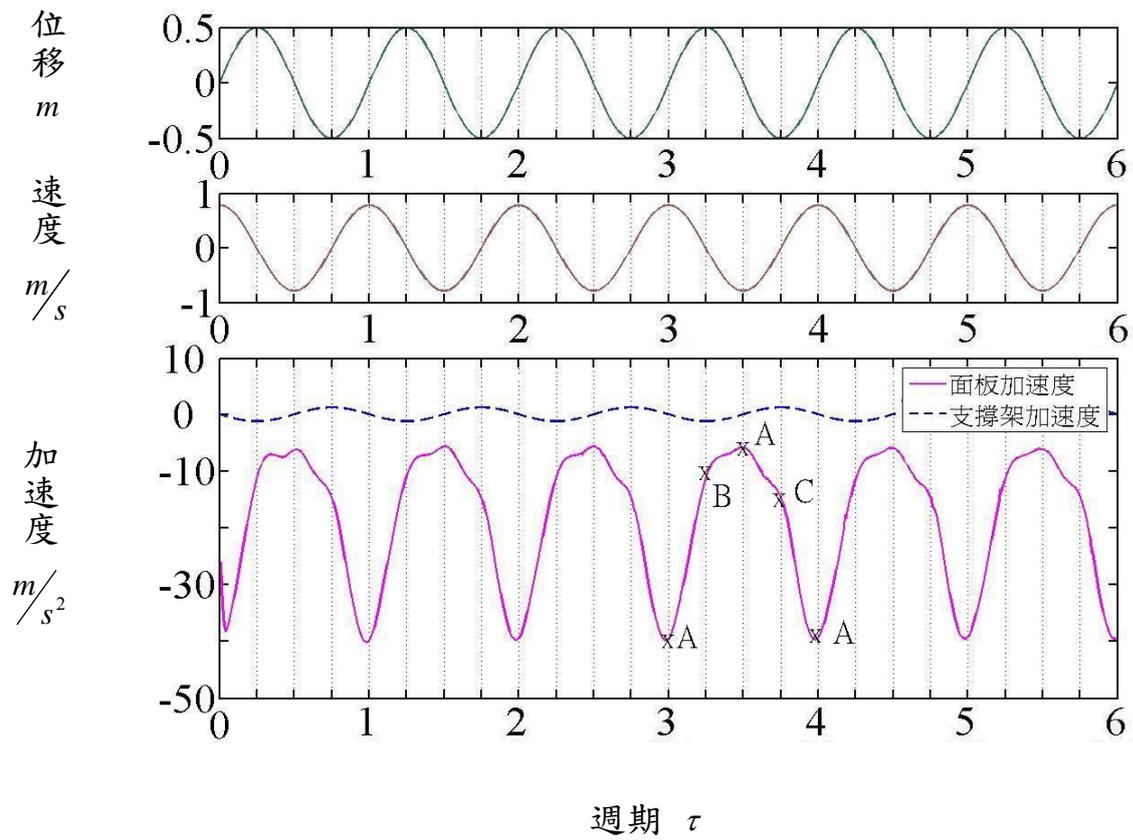


圖 4-43 排氣管道 0.2m，週期為 4 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖

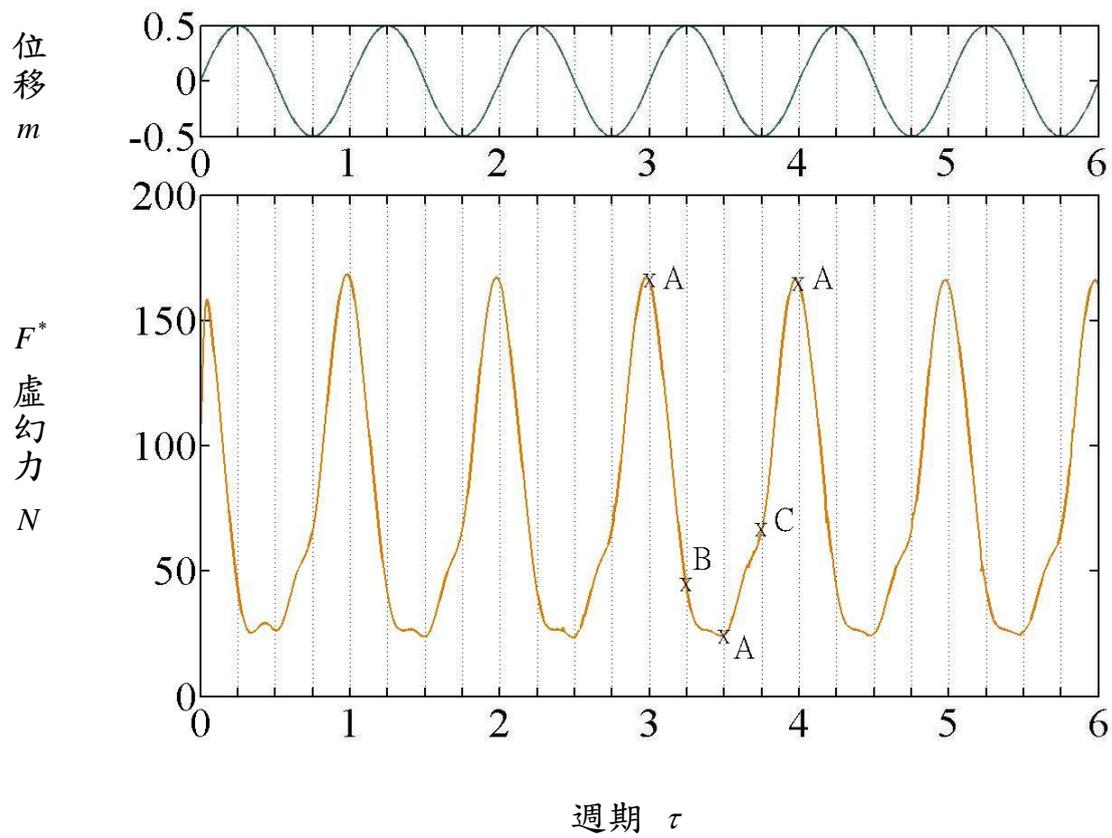


圖 4-44 排氣管道 0.2m，週期為 4 秒之飄浮現象判斷圖

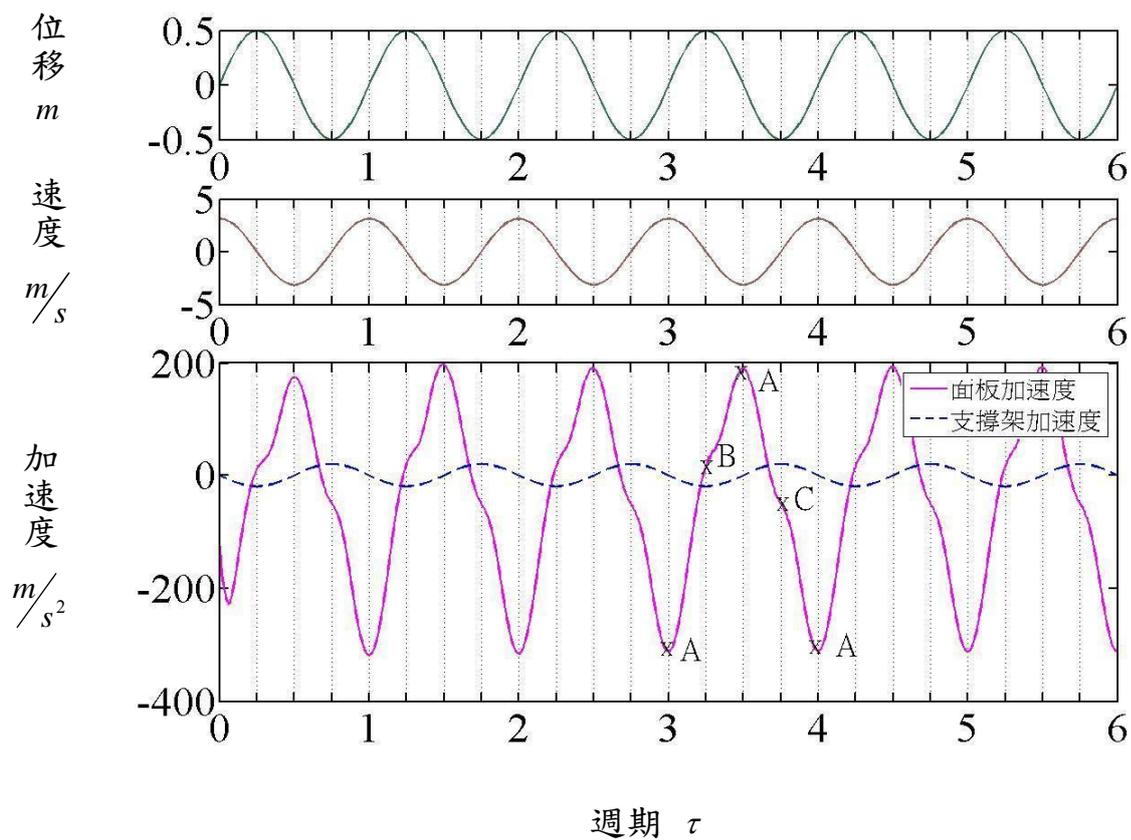


圖 4-45 排氣管道 0.4m，週期為 1 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖

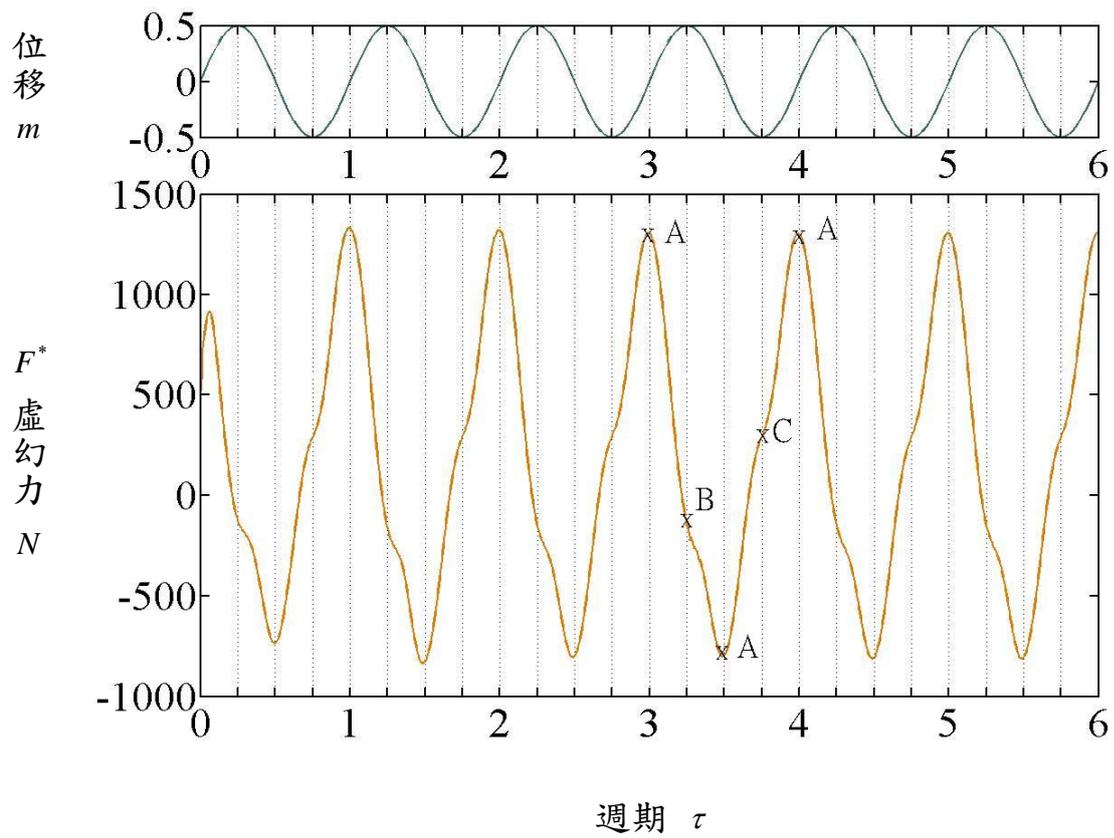


圖 4-46 排氣管道 0.4m，週期為 1 秒之飄浮現象判斷圖

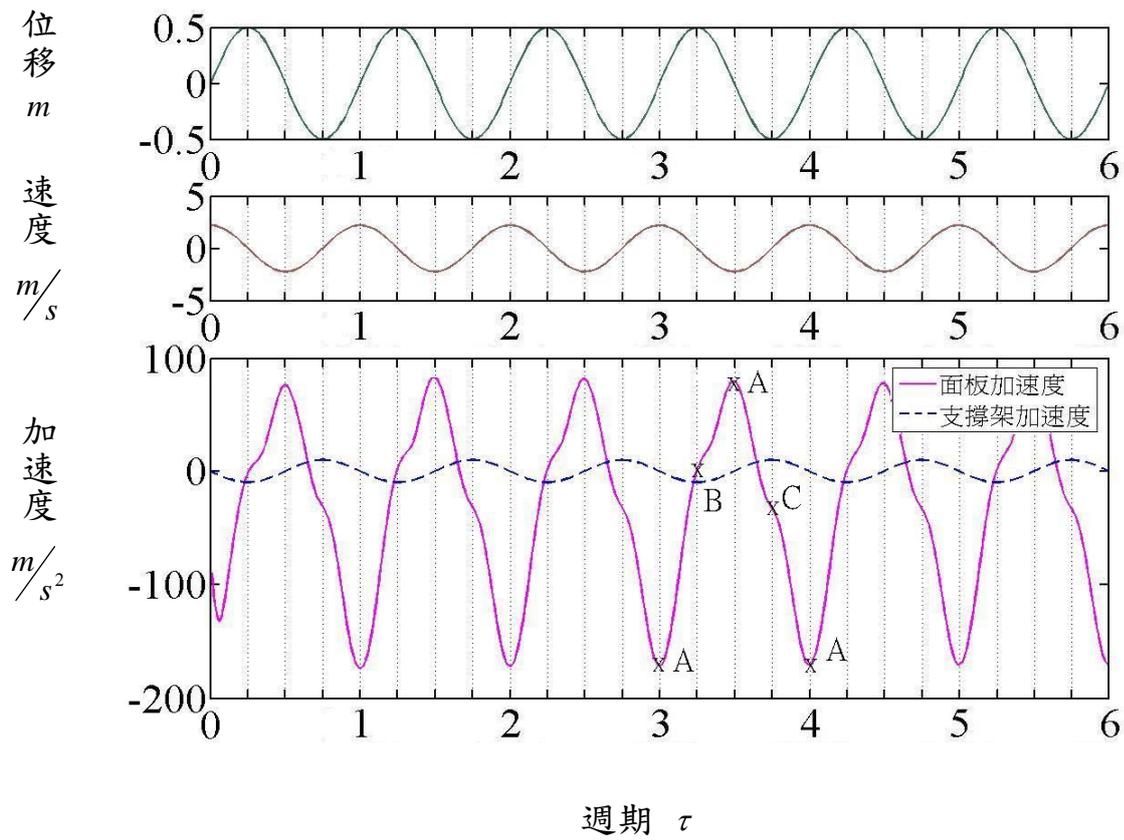


圖 4-47 排氣管道 0.4m，週期為 1.42 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係

圖

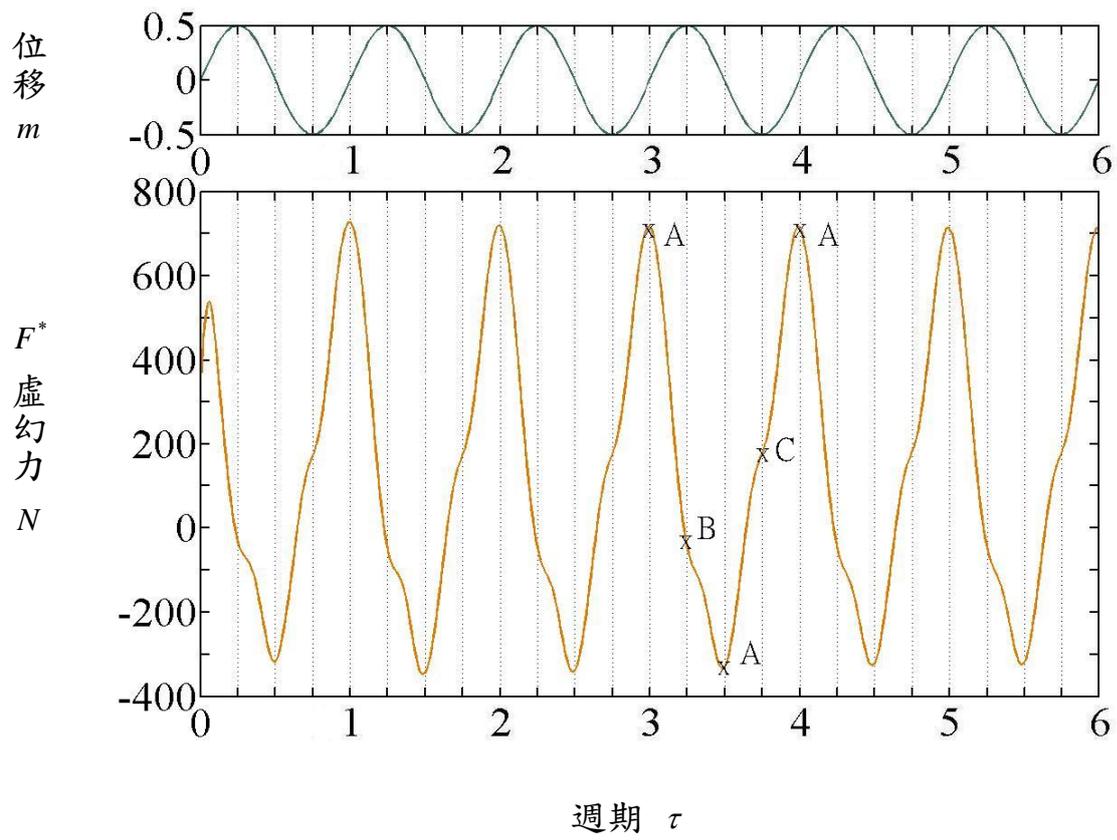


圖 4-48 排氣管道 0.4m，週期為 1.42 秒之飄浮現象判斷圖

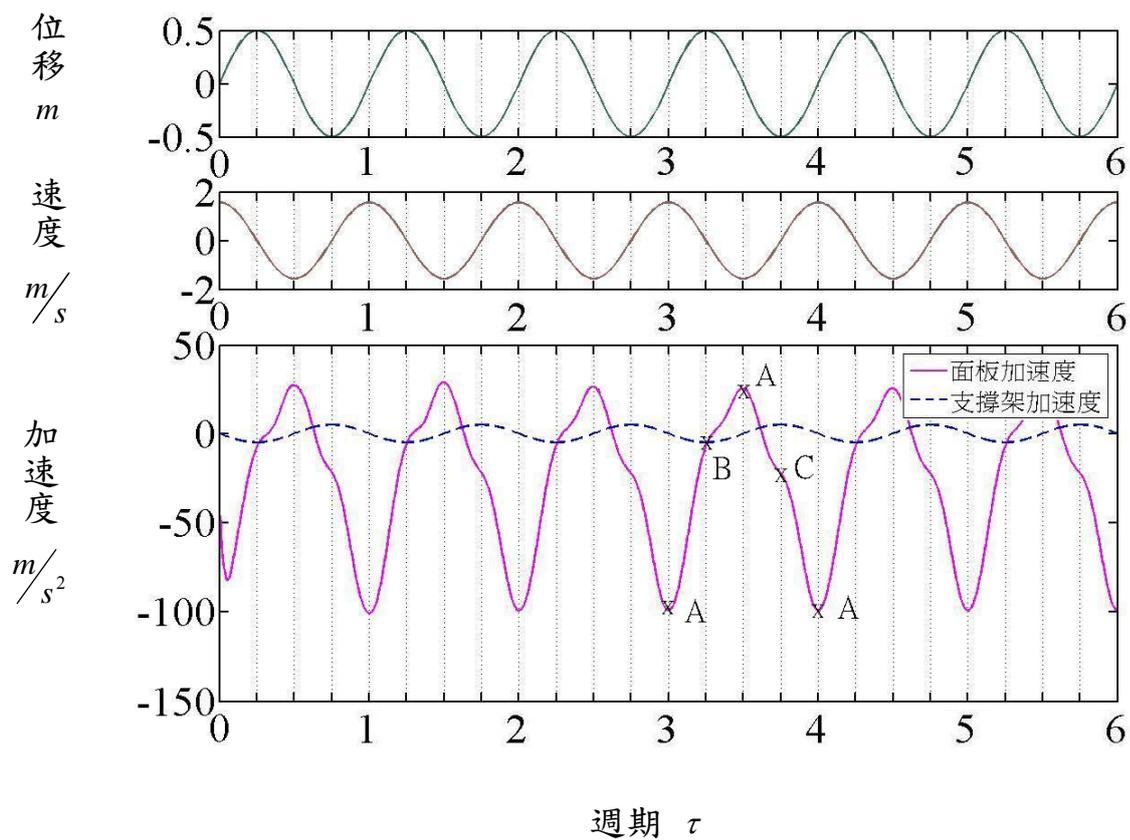


圖 4-49 排氣管道 0.4m，週期為 2 秒之面板加速度與支撐架加速度位移關係圖

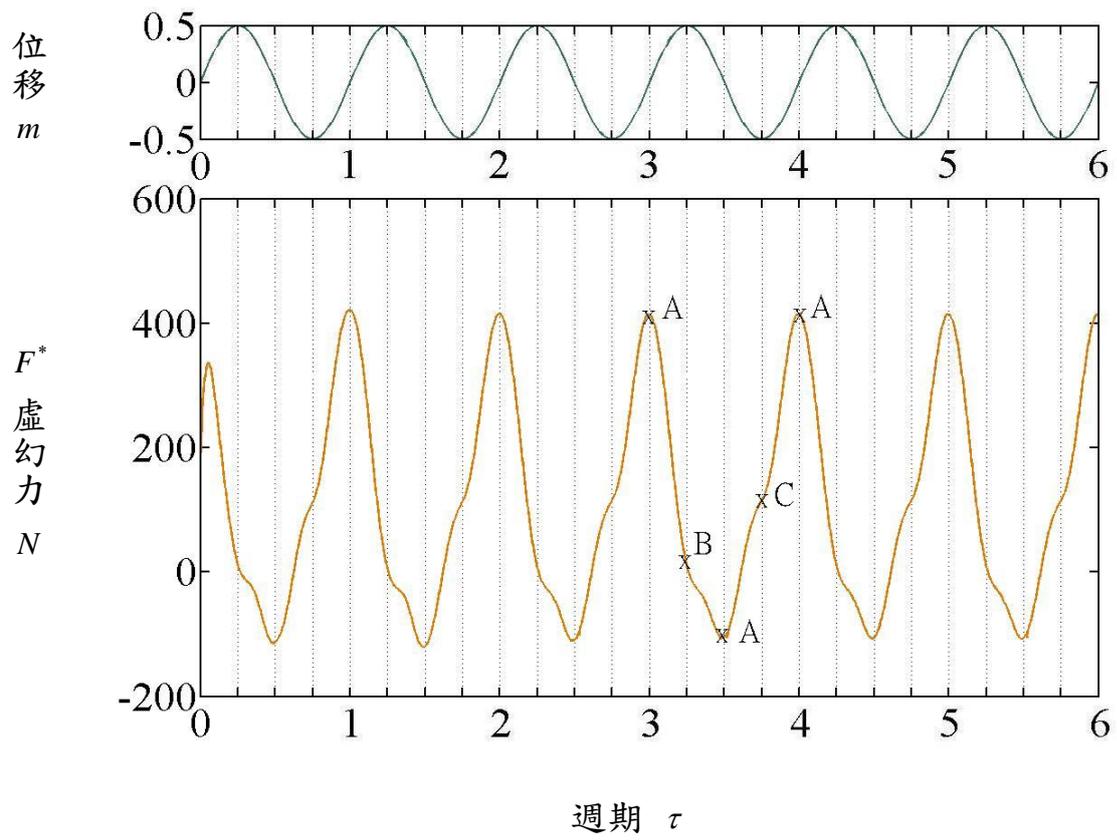


圖 4-50 排氣管道 0.4m，週期為 2 秒之飄浮現象判斷圖

第五章 結論

本研究是針對面板垂直輸送裝置，並利用數值計算模擬其流場及相對壓力分佈，判斷出面板受流場作用所產生的加速度及支撐架的輸送速度，是否使面板產生飄浮現象，而排氣管道的寬度對於流場的影響，使流場作用於面板後是否有改善飄浮現象，其目的均在於避免面板產生飄浮現象而有破裂的危險，最後結果歸納如下：

1. 支撐架的輸送速度在週期為 4 秒時，均不會產生飄浮現象，因此支撐架的輸送速度降低，可以有效的防止飄浮現象產生。
2. 排氣管道加寬，可使面板受流場作用所產生的加速度獲得改善，排氣管道為 0.4m 中其面板加速度比其他排氣管道寬度的面板加速度有適當的降低。



參考文獻

1. W. Whyte, "Cleanroom design, Second edition, John Wiley & Sons Ltd, "October 1999.
2. M. Cheng, G. R. Liu, K. Y. Lam, W. J. Cai, and E. L. Lee, "Approaches for Improving Airflow Uniformity in Unidirectional Flow Cleanrooms," Building and Environment, Vol. 34, Issue 3, pp. 275-284, 1998.
3. S. Murakami, S. Kato, and Y. Suyama, "Numerical Experimental Study on Turbulent Diffusion Fields in Convective Flow Type Clean Rooms," ASHRAE Transactions, Vol. 95, NO. 2, pp. 469-493, 1989.
4. S. C. Hu, Y. Y. Wu, and C. J. Liu, "Measurement of Air Flow Characteristics in A Full-scale Clean Room," Building and Environment, Vol. 31, No. 2, pp. 119-128, 1996.
5. 江文琪, "潔淨室面板儲存區之動態流場分析", 國立台灣科技大學機械工程研究所碩士論文, 2005 年.
6. 黃玠超, "LCD 面板倉儲系統之流場均勻化研究", 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 2007 年.