

# 建築風洞紊流場能力建立及應用

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國九十八年十二月

ISBN:978-986-02-2236-4

# 建築風洞紊流場能力建立及應用

研究主持人：林組長建宏

協同主持人：苗君易

研 究 員：周榮華

研究助理：黃信文、方忠浩

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國九十八年十二月

## 目次

目次 .....	I
圖次 .....	V
表次 .....	XIII
摘要與建議 .....	XV
第一章、緒論 .....	1
第二章、國內外文獻回顧 .....	3
第一節 風洞種類 .....	3
第二節 國內外風洞發展 .....	4
第三節 自然風場 .....	12
第三章、研究理論介紹 .....	13
第一節 流體漩性理論 .....	13
第二節 紊流理論簡介 .....	14
第三節 重要文獻 .....	15
第四章、研究方法說明 .....	17
第一節 網格簡介 .....	17

第二節 格柵與紊流 .....	18
第三節 紊流擾動分析 .....	18
第四節 紊流強度 .....	18
第五節 紊流積分尺度 .....	19
第六節 流場模擬 .....	20
第五章、實驗設備 .....	24
第一節 網格架設示意圖 .....	24
第二節 架設過程 .....	26
第三節 移動機構 .....	30
第四節 實驗儀器與設備 .....	31
第六章、實驗流程 .....	37
第一節 量測簡介 .....	37
第二節 量測流程 .....	38
第三節 儀器校正 .....	42
第四節 訊號分析 .....	43
第五節 模型流場測試比較.....	51

第七章、結論 .....	59
參考文獻 .....	61
附錄-期末審查意見回覆表 .....	67
附圖 .....	69



## 圖次

圖 3- 1 梯形截面鈍形體尾流，在雷諾數 2000 情況下拍攝[11] ...	14
圖 3- 2 渦流能量傳遞示意[13].....	16
圖 4- 1 方柱下游水平速度變化.....	21
圖 4- 2 方柱下游紊流強度 T. I. ....	21
圖 4- 3 圓柱下游水平速度變化.....	22
圖 4- 4 圓柱下游紊流強度 T. I. ....	22
圖 4- 5 文獻實際方網格(Harder 2007)[27].....	23
圖 5- 1 Open area ratio=0.335 格柵示意圖 .....	24
圖 5- 2 Open area ratio=0.512 格柵示意圖 .....	25
圖 5- 3 Open area ratio=0.632 格柵示意圖 .....	25
圖 5- 4 風洞預留縫隙擋版拆除 .....	26
圖 5- 5 擋版內預留縫隙約 12cm .....	27
圖 5- 6 框架墊片.....	27
圖 5- 7 側邊框架.....	28
圖 5- 8 框架溝槽.....	28
圖 5- 9 網格架設固定角材.....	29

圖 5- 10 網格架設所用木料 .....	29
圖 5- 11 移動機構與熱線測速儀量測點 .....	30
圖 5- 12 建研所風洞外觀 .....	31
圖 5- 13(a)直線型皮托靜壓管 (b)直角型皮托靜壓管 .....	32
圖 5- 14 大氣壓力計 .....	32
圖 5- 15 壓力轉換器 .....	33
圖 5- 16 熱線測速儀主機、示波器與資料擷取系統 .....	34
圖 5- 17 IEEE-488 .....	35
圖 5- 18 NI-DAQ 數據擷取系統 .....	35
圖 6- 1 流程示意圖 .....	37
圖 6- 2 單一截面量測位置 .....	38
圖 6- 3 風洞格柵 .....	38
圖 6- 4 柵格尺寸圖 .....	39
圖 6- 5 格柵量測示意圖 .....	39
圖 6- 6 格柵架設示意圖 .....	40
圖 6- 7 量測截面位置 .....	40



圖 6- 8 實際架設圖.....	41
圖 6- 9 熱線儀器校正.....	42
圖 6- 10 校正曲線.....	43
圖 6- 11 均勻流場之瞬時速度分布.....	43
圖 6- 12 均勻流之平均速度分布.....	44
圖 6- 13 均勻流速度分布之標準差.....	44
圖 6- 14 空流場邊界層流場之 FFT.....	45
圖 6- 16 5W 與 50W 瞬時速度之擾動(A 點).....	46
圖 6- 15 15W 與 50W 瞬時電壓值之擾動(A 點).....	46
圖 6- 17 5W 與 50W 速度之 FFT(A 點).....	47
圖 6- 18 15W 與 50W 速度之 FFT (A 點).....	47
圖 6- 19 網格中心後方平均速度(A 點).....	48
圖 6- 20 網格底部中心後方平均速度(A' 點).....	48
圖 6- 21 網格中心後方紊流速度(A 點).....	49
圖 6- 22 底部網格中心後方紊流速度(A' 點).....	49
圖 6- 23 第二測試段皮托管量測之平均速度.....	50

圖 6- 24 紊流場擾動之自相關 .....	51
圖 6- 25 有限高圓柱座標軸定義示意圖 .....	52
圖 6- 26 垂直式 Giromill 風力機之實驗架設 .....	54
圖 6- 27 不同流況中之垂直式風機轉速(1) .....	57
圖 6- 28 不同流況中之垂直式風機轉速(2) .....	58

## 附圖

圖 1	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(1).....	71
圖 2	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(2).....	71
圖 3	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(3).....	72
圖 4	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(4).....	72
圖 5	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(5).....	73
圖 6	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(6).....	73
圖 7	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(1).....	74
圖 8	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(2).....	74
圖 9	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(3).....	75
圖 10	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(4).....	75
圖 11	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(5).....	76
圖 12	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ 前後端速度擾動(6).....	76
圖 13	$Y=1.5\text{m}, Z=0.5\text{m}$ 前後端速度擾動(1).....	77
圖 14	$Y=1.5\text{m}, Z=0.5\text{m}$ 前後端速度擾動(2).....	77
圖 15	$Y=1.5\text{m}, Z=0.5\text{m}$ 前後端速度擾動(3).....	78

圖 16	$Y=1.5m, Z=-0.5m$ 前後端速度擾動(4)	78
圖 17	$Y=1.5m, Z=-0.5m$ 前後端速度擾動(5)	79
圖 18	$Y=1.5m, Z=-0.5m$ 前後端速度擾動(6)	79
圖 19	$Y=1.5m, Z=0m$ 無因次擾動(1)	80
圖 20	$Y=1.5m, Z=0m$ 無因次擾動(2)	80
圖 21	$Y=1.5m, Z=0m$ 無因次擾動(3)	81
圖 22	$Y=1.5m, Z=0m$ 無因次擾動(4)	81
圖 23	$Y=1.5m, Z=0m$ 無因次擾動(5)	82
圖 24	$Y=1.5m, Z=0m$ 無因次擾動(6)	82
圖 25	$Y=0.105m, Z=0m$ 無因次擾動(1)	83
圖 26	$Y=0.105m, Z=0m$ 無因次擾動(2)	83
圖 27	$Y=0.105m, Z=0m$ 無因次擾動(3)	84
圖 28	$Y=0.105m, Z=0m$ 無因次擾動(4)	84
圖 29	$Y=0.105m, Z=0m$ 無因次擾動(5)	85
圖 30	$Y=0.105m, Z=0m$ 無因次擾動(6)	85
圖 31	$Y=1.5m, Z=0.5m$ 無因次擾動(1)	86

圖 32	$Y=1.5\text{m}, Z=0.5\text{m}$ 無因次擾動(2)	86
圖 33	$Y=1.5\text{m}, Z=0.5\text{m}$ 無因次擾動(3)	87
圖 34	$Y=1.5\text{m}, Z=-0.5\text{m}$ 無因次擾動(1)	87
圖 35	$Y=1.5\text{m}, Z=-0.5\text{m}$ 無因次擾動(2)	88
圖 36	$Y=1.5\text{m}, Z=-0.5\text{m}$ 無因次擾動(3)	88
圖 37	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(1)	89
圖 38	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(2)	89
圖 39	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(3)	90
圖 40	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(4)	90
圖 41	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(5)	91
圖 42	$Y=1.5\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(6)	91
圖 43	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(1)	92
圖 44	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(2)	92
圖 45	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(3)	93
圖 46	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(4)	93
圖 47	$Y=0.105\text{m}, Z=0\text{m}$ FFT(5)	94

圖 48	$Y=0.105m, Z=0m$	FFT(6)	94
圖 49	$Y=1.5m, Z=0.5m$	FFT(1)	95
圖 50	$Y=1.5m, Z=0.5m$	FFT(2)	95
圖 51	$Y=1.5m, Z=0.5m$	FFT(3)	96
圖 52	$Y=1.5m, Z=-0.5m$	FFT(1)	96
圖 53	$Y=1.5m, Z=-0.5m$	FFT(2)	97
圖 54	$Y=1.5m, Z=-0.5m$	FFT(3)	97

## 表次

表 2- 1 國內外中大型低速風洞設備整理[3] .....	7
表 2- 2 國內外中大型低速風洞設備整理(續)[3] .....	8
表 2- 3 國內外中大型低速風洞設備整理(續)[3] .....	9
表 2- 4 國內外中大型低速風洞設備整理(續)[3] .....	10
表 2- 5 風洞流場品質與國內外風洞對比[3] .....	11
表 2- 6 建研所實驗場空洞流場特性[3] .....	11
表 2- 7 蒲福氏風級表[9] .....	12
表 6- 1 第一測試區旋轉盤上方流場特性 .....	50
表 6- 2 有限高度圓柱阻力係數文獻結果及本研究風洞測試結果	53
表 6- 3 有限高度圓柱升力係數風洞測試結果 .....	54
表 6- 4 紊流場中垂直式風力機之轉速 .....	55
表 6- 5 均勻流場中垂直式風力機之轉速 .....	56





## 摘要

關鍵字：建築物附屬結構物、紊流強度

### 一、研究緣起

建築研究所風洞目前有建構邊界層流能力，能夠造成一定程度的大氣邊界層擾動，大型建築物的模型可使用此流場建構條件進行實驗。但在在颱風等惡劣高氣流擾動之下，建築附屬結構之耐風強度遠不如建築物本身。例如巨型看板、水塔、鐵門等，本紊流建構目的為提供高擾動流場檢測環境，探討建築物附屬結構之受力問題。

### 二、研究方法及過程

在風洞入口處建立網格，藉此產生下游的擾動流場。並藉由熱線測速儀量測流場的擾動，以調整不同的網格大小而改變紊流強度，以達到所要求之紊流強度約 15%。在建立紊流之流場後，並以三維圓柱與垂直式風力發電機置於此流場中，藉此觀察不同流況下之氣動力差異。

### 三、重要發現

紊流場提供一個較接近真實環境風場中之流場擾動，且高紊流強度所模擬的風場為建築附屬建構物的流場。在三維圓柱中的測試中，發現紊流場之阻力係數明顯的下降，垂直式風力發電機在紊流場也有較高的轉速表現。

### 四、主要建議事項

立即可行建議：

- 1.進行網格架設後，紊流場之邊界層的量測。
- 2.增加同一截面所量測之點數，藉此計算流場之均勻度。
- 3.以二維熱膜探針進行量測，藉此得知不同方向之擾動值。

中長期建議：

- 1.網格所使用之木質材料雖具有輕便之優點，但經長時間置放會有變形，組裝上將更為困難，應儘早進行更換或改良。
- 2.網格之架設皆需多人協助，拆裝均約二至三小時以上，未來若成本允許，可進行自動之流場干擾的裝置架設研發。
- 3.若未來將繼續進行風力機之研究，應進行發電機的改良，藉此改善發電效率，進行發電量的探討。

## Abstract

ARBI wind tunnel is capable of providing the testing conditions simulating the atmospheric boundary layer flows, which are allowed for testing building models. In practice, flow around buildings could be subjected to high incoming-flow disturbances. Under such a condition, the ability of subsidiary structures, i.e., giant billboards, water tower, wind turbine, and so on, sustaining the unsteady wind loads could be much inferior to that of the building itself. Therefore, the purpose of this study is to produce the artificial turbulent flow conditions in the wind tunnel in order to simulate such flow conditions, under which the tests of subsidiary structures can be performed.

Keywords: subsidiary structure, high-turbulence intensity



## 第一章、緒論

內政部建築研究所低速循環式環境風洞(Environment Wind Tunnel)主要探討包含橋樑等建築物等，在風力作用下的氣動力現象，包含渦旋等流動特徵、流場誘發的震動(flow-induced vibration)、噪音等。並透過本土氣象資料為實驗因素，使研究結果更趨近真實情況，藉以得知建築或建築群在設計與配置對於風環境的特性關係，以提供建築本身與都市計畫等所需的開發環境參數。

除建築物空氣動力學研究，本所風洞實驗室之測驗區具有較大截面積與空間，此特性可解決一般小型風洞實驗量測上的空間解析不足問題，並更深入的探討細部現象，並與學術單位合作從事相關流體力學探討。

建築風洞測試除了橋樑及建築物，尚包含建築物上的附屬結構，如：水塔、太陽能板及小型風力發電機等。對於建築本身具有更特徵的外型稱為附屬結構，所在實際流場多是高紊流強度，若將縮尺模型置於均勻流場中測試，並不符合真實情況。在紊流與穩流分別流經建築常有的鈍形體研究，已發現流場特性不同。在空氣污染擴散研究中，空氣污染物自污染源進入大氣環境，既受到大氣紊流邊界層的擴散效應控制，紊流邊界層的擴散效應為控制品質的重要步驟。本所風洞測試區除均勻流場外，尚有邊界層模擬不同地況的邊界層流場，尚缺乏高紊流強度的流場環境進行模型測試。



## 第二章、國內外文獻回顧

### 第一節 風洞種類

風洞運用範圍相當廣泛，涵蓋領域如：建築工程、航太與汽車工業、大氣環境工程、火箭、船舶等，因要求不同而發展出不同功能風洞，以下就風洞結構、測試區風速範圍及使用目的等三方向分類[1]：

#### 一、以風洞結構分類：

##### (1)開迴路風洞(Open circuit wind tunnel)：

開迴路風洞中的氣流與外界大氣的氣流相通，穿過風洞的氣流不會再回收，依風洞設置位置又可分下吹式(blow-down type)與吸入式(suction type)。開迴路優點為：1.造價低。2.佔地小。3.適合煙霧視流或燃燒高溫等實驗，不必考慮清潔問題。缺點為：1.入口與出口直接相通，流場容易受外界因素干擾，流場品質不易控制 2.運轉消耗能量較高 3.容易造成噪音污染。

##### (2)閉迴路風洞(Closed circuit wind tunnel)：

閉迴路風洞亦稱為循環式風洞，風洞中氣流與外界隔絕，通過測試區的氣流可於風洞內不斷循環再利用。優點有：1.由於轉角處加裝的導流片及紗網，內部流不容易受外界環境影響。2.與同尺寸開迴路風洞比較，達到相同速度所需的能量小很多，能量效率高 3.噪音問題小。

#### 二、依風速範圍來分類

1.低音速風洞(Low speed wind tunnel)  $Ma \leq 0.3$

2.穿音速風洞(Transonic wind tunnel)  $Ma \cong 0.7 \sim 1.2$

3.超音速風洞(Supersonic wind tunnel)  $Ma \geq 1 \sim 5$

4.極音速風洞(Hypersonic wind tunnel)  $Ma \leq 5$

5.三音速風洞(Tri-sonic wind tunnel)：速度涵蓋低音速、穿音速及超音速等三風速。

### 三、依使用目的來分類

風洞因不同領域實驗目的，因此發展許多特殊用途的風洞[1-3]，可改變氣體密度或壓力的高雷諾數風洞(High-Reynolds- Number Tunnels)、可模擬大氣邊界層的環境風洞(Environmental or Boundary Layer Wind Tunnels)、可測試建築物、橋樑模型的建築風洞(Architecture and Building Tunnels)、提供空氣動力分析的氣動力風洞(Aerodynamic Tunnels)、水為工作流體的水洞(Water Tunnels)、可為煙霧視流的煙霧風洞(Smoke Tunnels)、低紊流風洞(Low-Turbulence Wind Tunnels)、高空結冰等飛安研究風洞(Icing Wind Tunnels)、汽車風洞(Automobile Tunnels)等。

針對本計畫之環境風洞，高義明[3]整理出以下幾項特點：

- 1.在測試區內模擬大氣邊界層  $\delta$ ，測試區須有足夠的長度使邊界層達到一定厚度，一般測試區的長度約  $10\sim 20\delta$ ，高度大於或等於  $2\delta$ ，寬度則在  $2\sim 4\delta$  之間。
- 2.測試區截面積須大，形狀一般為扁矩形，為了讓模型具有足夠的模擬寬度，減少側壁之影響(wall- interference)，保持氣流流場的二維性。
- 3.流速屬於低流速，一般為  $0.2\text{m/s}$  到  $30\text{m/s}$ ，根據不同縮尺實驗，模型所要符合之相似性參數亦不同。
- 4.測試區上蓋板為可調整式，可消除因放置模型所產生之阻塞效應及軸向壓力梯度。

## 第二節 國內外風洞發展

歷史記載[3]第一座風洞在 1871 年，由長 12 英尺、截面 18 英尺 $\times$ 18 英尺兩開口大木箱、下吹式風扇及蒸汽動力引擎帶動上游風扇，由大英航空協會成員 Frank H. Wenham(1824-1908)架設。

1901 年底，由萊特兄弟所製作的風洞，測試區截面  $103.23\text{cm}^2$ 、風速最高  $12\text{m/s}$  的自製風洞設備，進行了兩百多種機翼及上千次風洞實驗，在 1903 年 12 月 17 日飛行成功，為航空重要突破，也是風洞發展的轉捩點，此後因航空科技大量需求，風洞製作及量測技術因而急速進步。



1915 年美國成立國家航空諮詢委員會(National Advisory Committee for Aeronautics, NACA)，積極發展航太科技。1920 建造了 NACA 第一座風洞，為提高實驗雷諾數，NACA 在 1923 加壓式風洞(Pressurized wind tunnel)，可提昇密度 20 倍。

俄羅斯首座風洞由 D. Riabouchinsky 於 1904 年所建，該測試區為圓形，直徑約 1.2m，測試區上游有一圓柱型頂蓋，用以穩定氣流及降低紊流強度。

瑞士 G.Ackttet 於 1932 年建立世界上第一座超音速風洞，美國第一座超音速風洞於 1942 年由 Von Kármán 設計製造。1958 年美國太空總署 NASA 建立馬赫數(Mach number) 大於 5 的極音速風洞。

上述以航空用發展為主，另外 Cermak [4]回顧環境風洞的發展過程，1929 年 Abe 在風洞底板放置乾冰模擬邊界層的流動，1934 年 Prandtl 與 Reichardt 在風洞中以冷水冷卻底板，以蒸汽加熱頂版，形成穩定的邊界層流，研究氣流密度對亂流特性的影響，1941 年 Sherlock 和 Stalker 在風洞中研究地形及建築物對煙囪所排放出廢棄擴散的影響。

風洞在風工程方面之應用，可追溯至 1940 年代美國西雅圖南方一座長兩千八百英尺、寬三十九英尺的大型吊橋 Tacoma Narrow 在時速四十英里強風吹襲下，略低於當時設計風速的一半，橋上鋼索斷裂，路面劇烈晃動，導致橋樑整體震動崩毀。1955-1957 年間，Colorado State University 的設計首座模擬邊界層之風洞 Cermak[5]，命名為氣象風洞(Meteorological Wind Tunnel)，於 1962 年落成，此實驗設備以從事環境評估及建築設計等為主要用途，並為著名高層建築物設計及橋樑提供測試。

依據 Marshall [6]，亞洲中日本之邊界層風洞及風工程相關技術發展較早且具規模，首座為 1964 年建立於長崎科技學院，其中測試區截面為 2.5m×1m、風速範圍 0-15m/s，主要從事於大氣擴散實驗。首座國家級邊界層風洞於 1973 年在筑波科學市建築研究學院路程，該風洞截面 3m×2.5m，可切換為開或閉迴路，風速範圍 0.5-24.4m/s。

國內風洞相關技術以中科院的風洞為首，民國 63 年，中科院二所飛行力學與氣動力試驗實驗室[7]建造台灣首座大型風洞設備：TVM-500 三音速風洞，風洞為下吹式風洞，測試區為 50cm×50cm×120cm，馬赫數範圍 0.4-3.9，每次測試時間為 75-100 秒。中科院一所接著於民國 67 年成功建造一大型低速水平循環式風洞，測試區截面積 2.3m×3.2m，操作速度 0-85m/s。而國內首座大氣邊界層風洞於民國 72 年由中研院物力

## 建築風洞紊流場能力建立及應用

所規劃設計，該風速為低速、開放、吸入式，長 29m、寬 3m、高 2.2m 的一個環境低速風洞，此風洞目前位在國立中央大學土木系。隨後淡江大學、海洋大學，陸續出現大型的環境低速風洞設備，其中最大且設備齊全、佔地面積最大且功能完善屬於位於成功大學航太中心的內政部建築研究所環境風洞。

現今風洞已成為國內外各研究機構及大學非常普遍且重要的環境模擬設施，Cermak [8]曾對邊界層風洞發展做一系列之回顧，在 1980-1995 之間，世界上出現幾座代表性可模擬邊界層風洞，如加拿大西安大略大學的 BLWT II、澳洲 Monash University 的邊界層多功能風洞、美國 EPA 氣象、日本筑波市的邊界層風洞等，而內政部建築研究所計畫之風洞與上述之大型環境風洞屬同等規模，因此將國內外較著名、特色之風洞做比較，如表 2-1 所示[3]，主要為國內外大型低速風洞之特徵及基本性能。

表 2-1 國內外中大型低速風洞設備整理[3]

Location	Facility Name	Test Section L×H×L(m)	Velocity Range (m/s)	T.I. (%)	Fan Prower	Remark
內政部建築研究所 (成功大學歸仁校區-航 太科技中心)	ABRI 環境風洞 -2001	(L)4×2.6×36.5 (S) 6×2.6×20	(L)1.15~36 (S)0.77~22	<0.35	500kw	建築物、橋樑等風工程實驗 及流體力學研究
中央大學土木系	大氣環境風洞 Indraft-1983	3.05×2.13×18.5	1~20	0.6	200hp	大氣邊界層模擬，環境紊流 擴散
淡江大學 風工程研究中心	邊界層風洞	3.2×2.0~2.4×1.8	1~17	1.0	175hp	風工程研究、大氣邊界層厚 度達 1.7m
台灣海洋大學	環境風洞	2*1.4*12.6	1~20	0.5	75hp	環境風場、污染擴散
Colorado State University, USA	1.MWT[C] -1958	1.83×1.83×26.8	0.6~37	0.1	400hp	氣象研究
	2.IWT[C]	1.83×1.83×18.3	0~25	0.5	75hp	工業空氣動力學
	3.EWT[O]	3.66×18.3	0.3~12	1.0	50hp	大氣環境
The University of Western Ontario, Canada	BLWT I [O] Indraft-1965	2.4×1.5~2.1×33	0~15	N/A	30kw AC motor	Aeroelastic Tests of Buildings, Bridges
	BLWT II [C]-1984	(L) 3.4×2.5×39 (S) 5×4×52 (W)5×2×52	(L) 10.5 (S) 27	N/A	215kw DC motor	同上，模擬大氣邊界層

[C]Closed type, [O]Open type, [L]Large test section, [S]Small test section, [W]Wave Tank, 1hp=0.745kw

(資料來源：高義明[3])

表 2-2 國內外中大型低速風洞設備整理(續)[3]

Location	Facility Name	Test Section L×H×L(m)	Velocity Range (m/s)	T.I. (%)	Fan Prower	Remark
中山科學研究院一所	7 呎×10 呎低速風洞	2.3×3.2	0~85	N/A	1500hp	航空氣動力學研究
Environmental Protection Agency, EPA, U.S.	Meteorological Wind Tunnel[O] Indraft	2.1×3.7×18.3	1.5~8	0.5	75kw,max= 1675rpm	邊界層可達 2m
Department of Engineering Science, Oxford University	4m×2m Industrial Awrodynamics WT [C]	4×2×14	0~30	<0.6	280kw	建築及工業用途 速度均勻度 0.75%~1%
Danish Maritime Institute, Denmark	New Boundary Layer WT [O]	2.6×1.8×20.8	0~26	<0.5	160kw	噪音<90db(1m)、 高屏溪大橋
Nation University of Singapore	NUS-HDB WT[O] Blowdown	2.85×1.8~2.3×19	0~15	<1.0	110kw	模擬大氣邊界層
上海同濟大學土木工程 防災國家重點實驗室	1.TJ-1 [O] Indraft	1.1.8×1.8×12	1.0.5~30	<1.0	N/A	主要進行橋樑測試
	2.TJ-2 [C]	3×2.5×15	0.5~68	<0.46	N/A	建築與汽車風洞
	3.TJ-3 [C]	15×2×14	0.2~17.6	<2.0	45kw×7	世界第二大 BLWT
北京大學湍流研究國家 重點實驗室	大型低速風洞[C]	φ2.25×3.65	0~50	0.2	N/A	建築工程與航空用
	大氣邊界層風洞[O]	3×2×32	0.2~15	0.2	160KW	風工程研究

[C]Closed type, [O]Open type, [L]Large test section, [S]Small test section, [W]Wave Tank, 1hp=0.745kw

(資料來源：高義明[3])

表 2-3 國內外中大型低速風洞設備整理(續)[3]

Location	Facility Name	Test Section L×H×L(m)	Velocity Range (m/s)	T.I. (%)	Fan Prower	Remark
西南交通大學[17]	XNJD-1 工業風洞[C]	(L) 3.6×3×8 (S) 2.4×2×16	(L) 0.75~21 (S) 1.5~45.5	(L) <0.5 (S) <0.11	200kw	工業用途 如橋樑、汽 車... 等。
南京航空航天大學 空氣動力研究所[53]	NH2 WT[C]	(L) 5. ×4.25×7 (S) 3×2.5×17.5	(L) 34 (S) 95	N/A	N/A	高層建築、 橋樑試驗
Building Research Establishment, Gt. Britain[10]	Boundary Wind Tunnel[O] Indraft-1974	2×1×8	0~20	0.6	56kw-DC	建築物 空氣動力學
Politecnico di Milano, University, Milan, Italy[14]	New large WT[C]	(L)13.8×3.8×30 (S) 4×3.8×5	(L)0~15 (S)0~50	(L)<2 (S)<0.2	1.5mw	(L)氣動力分 析(S)風工程 研究
UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Brazil[15]	TV2 Wind Tunnel [C]	1.3×0.9×9.32	0~42	<0.5	74.5kw	建築物氣動 力分析、工業 研究
Nation University of Singapore[20]	NUS-HDB WT[O] Blowdown	2.85×1.8~ 2.3×19	0~15	<1.0	110kw	模擬大氣邊 界層
Northeast National University, Argentina.[21]	UNNE WT[O] Indraft-1996	2.4×1.8×22.8	0~27	1.0	92kw at 720rpma	主要用途在 模擬大氣邊 界層及建築 物分析

[C]Closed type, [O]Open type, [L]Large test section, [S]Small test section, [W]Wave Tank, 1hp=0.745kw

(資料來源：高義明[3])

表 2-4 國內外中大型低速風洞設備整理(續)[3]

Location	Facility Name	Test Section L×H×L(m)	Velocity Range (m/s)	T.I. (%)	Fan Prower	Remark
建築研究所 筑波市(Tsukuba), 日本[4]	BLWT[C]、[O]	3×2.5×25	[C]0.5~24.4 [O]2.3~62.2	0.14	350kw	模擬大氣邊界層及風工 程研究
Public Works Research Institute, 筑波市(Tsukuba), 日本[4]	Diffusion and Aerodynamics Wind Tunnel[O]	6×3×27	0.2~15	<1.0	320kw	主要進行大氣擴散及氣 動力實驗，可調頂蓋及 側壁
Monash University[6]	BLWT[C]	(L)12×4×40 (S)10×5×20 (O)8×4×14	(L)20 (S)60 (O)6	N/A	N/A	(L)航空與風工程 (S)環境與擴散測 (O)open jet <75dBA
Korea Aerospace Research Institute, Korea[22]	KARI LS WT [C]	3×4×10	117	<0.13	N/A	航空太空用途
North Carolina State University, U.S.[49]	NCSU Low Speed WT [O]	1×0.5×7	5~33	<1.0	60hp	大氣環境實驗

[C]Closed type, [O]Open type, [L]Large test section, [S]Small test section, [W]Wave Tank, 1hp=0.745kw

(資料來源：高義明[3])

表 2-5 風洞流場品質與國內外風洞對比[3]

校驗項目與結果		國內、外環境風洞	ABRI
速度均勻度%		0.5~2.5	<0.37
紊流強度%		0.1 ~ 1.0	<0.3
平均偏向角	$\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$	$\pm 0.3^\circ \sim 1.0^\circ$	$\pm 0.415^\circ \sim 0.97^\circ$
最高轉速一小時升溫( $^\circ\text{C}$ )		5.5~15	2.96
能量比(循環式)		0.53~2	0.939

(資料來源：高義明[3])

表 2-6 建研所實驗場空洞流場特性[3]

風扇轉速(rpm)	入口流速(m/s)	紊流強度 T.I.(%)
90	7.72	0.15
110	9.58	0.21
160	14.2	0.21
220	19.94	0.29
260	23.8	0.25
300	27.61	0.29
320	29.73	0.24

(資料來源：高義明[3])

### 第三節 自然風場

紊流場建置目的為使本實驗場風洞更趨近於真實流場。以下為風速與自然環境下的描述。

表 2-7 蒲福氏風級表[9]

敘述	蒲福風級	平均風速 (公里/小時)	每秒公尺 m/s	地面狀態
無風	0	< 2	不足 1	煙直向上升
輕微	1	2 - 6	1-3	煙能表示風向，但風向標則不動
輕微	2	7 - 12	4-7	人面感覺有風，樹葉微響，風向標會轉動
和緩	3	13 - 19	8-12	樹葉及微枝搖動不息，旌旗展開
和緩	4	20 - 30	13-16	能吹起地面灰塵和紙張，樹的小枝搖動
清勁	5	31 - 40	17-21	有葉的小樹搖擺，內陸的水面有微波
強風	6	41 - 51	22-27	大樹枝搖動，電線呼呼有聲，舉傘困難
強風	7	52 - 62	28-33	全樹搖動，迎風步行感覺不便
烈風	8	63 - 75	34-40	微枝折毀，人行向前感覺阻力甚大
烈風	9	76 - 87	41-47	建築物有小損壞
暴風	10	88 - 103	48-55	陸上少見，可使樹木拔起或使建築物損壞嚴重
暴風	11	104 - 117	56-63	內陸很少見，會引起廣泛損壞
颶風	12	≥118	64-71	內陸很少見，會引起廣泛損壞

(資料來源：中央氣象局[9])



## 第三章、研究理論介紹

### 第一節 流體漩性理論

流體運動由許多流體粒子所組成，各個流體粒子速度可能不同，因此流體粒子之間存在相對運動，因相對運動而產生了表面力[10]。根據 Stokes 假設，表面力造成應力，剪應力與流體的剪應變率成正比，與固體受力產生應變有所不同。流體的旋轉來自於剪應力(剪應變率)，可將此剪應變率表示為一對稱分量與一反對稱分量的和，以二維座標  $x, y$  及所對應的速度  $u, v$  為例：

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3-1)$$

(3-1)式等號右方兩項分別為對稱與反對稱量，當  $(\partial v / \partial x) > 0$  造成流體粒子  $x$  軸逆時針方向旋轉， $(\partial u / \partial y) > 0$  造成流體粒子  $y$  軸順時針方向旋轉，總和以上兩種作用，(3-1)式等號右邊第一項代表流體粒子受兩剪應變率造成形變，但逆時針與順時針旋轉作用有相互抵消之結果。第二項代表流體粒子應變率所導致的旋轉率，此項即角速度(angular velocity)，乃流體粒子兩主軸旋轉角速度的平均。定義流體粒子的渦量(vorticity)為：

$$\omega_z = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3-2)$$

$\omega_z$  值為角速度值的兩倍，依據右手定則，流體粒子在  $xy$  平面上旋轉率以  $\omega_z$  定義之，稱為  $z$  方向(表垂直  $xy$  平面之方向)渦量值，定義逆時針方向旋轉為正。

應變率造成流體粒子變形與旋轉，在三維流場中，因有剪應變率而產生旋轉，其旋轉可分解為三個方向分量，定義渦量(Vorticity)為一向量如下

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v} \quad (3-3)$$

根據渦量定義  $\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$  檢視流體運動是否具有旋性，乃  $\vec{\omega}$  是否為零。

根據向量分析恆等式得到：

$$\nabla \cdot \vec{\omega} = \nabla \cdot \nabla \times \vec{v} \equiv 0 \quad (3-4)$$

關於運動方程式，可改寫為渦量方程式，本實驗場風洞為低速風洞，假設不可壓縮流運動，數學運算：

$$\frac{D\bar{\omega}}{Dt} = \bar{\omega} \cdot \nabla \bar{v} + \nu \nabla^2 \bar{\omega} \quad (3-5)$$

$\nu$  定義為  $\mu/\rho$ ，為動粘滯係數。(3-5) 稱為不可壓縮流之渦量方程式(vorticity equation)。等號左邊表示流體粒子在運動過程中，渦量隨時間改變的變化率，等號右邊兩項為造成該渦量變化率的因素，第一項稱為渦量的拉伸及傾斜的作用(vorticity stretching and tilting effect)，第二項乃渦量的粘滯擴散作用。

## 第二節 紊流理論簡介

紊流為一自然現象，常見於工程問題，紊流運動具三維性，就微觀而言，流體粒子之間相對運動複雜且不可預測 [10]。由第一節流體運動具有漩性的角度，討論紊流場中主宰紊流擾動演變的機制。以下為鈍型體尾流照片：

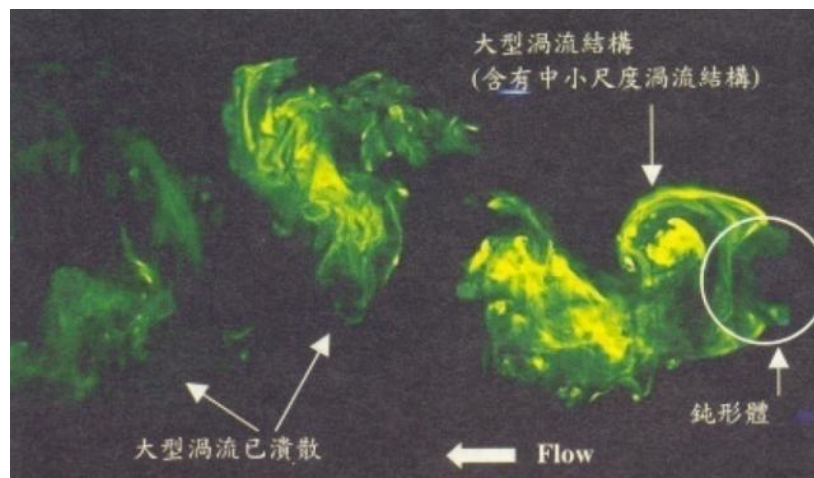


圖 3-1 梯形截面鈍形體尾流，在雷諾數 2000 情況下拍攝[11]

(資料來源：81 年楊啟昌[11])

圖中鈍形體流體方向由右向左，可見的在鈍型體下游造成尾流，尾流運動藉由螢光染料激發的亮光明顯呈現出來。基本上在緊鄰鈍形體下游(照片右邊)有明顯的大型渦流產生，在較遠的下游處(照片左邊)則不再有明顯而完整的渦流結構。因此可知渦流往下的運動過程中(由右到左)有顯著的變化，其主要特徵為渦流在往下游的運動過程中，轉

變為紊流，含有相當多擾動，造成螢光液的潰散。在照片右邊區域螢光染液呈現的大型渦流結構實際上包含許多較小尺度結構，小尺度結構又包含更小尺度結構，依此類推。既使左邊區域雖螢光染液已潰散，仍可想像流體運動包含不同大小尺度結構，若由流體的角度說明，可想像流場流體粒子的運動軌跡相當複雜不一致，其運動是三維且非定常的。

流體漩性來自流場的剪應變率，剪應變率來自於流場中速度不均勻，以此推論在紊流狀態下，流場中個流體粒子在運動過程應具有漩性。在紊流流場中，每流體粒子的渦量隨時間改變，受渦量拉伸及傾斜作用以及渦量的粘滯擴散作用主宰。且紊流三維特性相當明顯，實際上拉伸及傾斜作用較粘滯擴散作用強，可假設粘滯擴散作用並不重要，(3-5)可簡化為：

$$\frac{D\vec{\omega}}{Dt} = \vec{\omega} \cdot \nabla \vec{v} \quad (3-6)$$

(3-6)說明流體粒子在運動過程渦量隨時間的變化率乃由該粒子受周遭環境的渦量拉伸及傾斜作用所造成。由以上說法，進一步想像整個流場由無數個流體粒子組成，因此每個流體粒子之間的相互運動造成流體粒子的尺度及渦量不斷地改變，隨著時間，流體粒子的尺度可能受不斷拉伸作用而越來越細，渦量越來越強。當渦流尺度小到某程度，流體的粘滯作用將不再可忽略(因尺度小至足以使速度梯度很大)，此時應回到(3-5)式把流體粘滯運動的粘滯作用納入考慮。另一方面，流體粘滯性對小尺度的紊流擾動造成顯著的消散作用，而抑制渦量增加。

流體運動的渦量拉伸角度說明紊流動態演變過程，關鍵是流體運動的尺度隨時間改變，紊流場中的流體運動包含不同尺度且不同方向的擾動，其尺度與方向隨時間改變，主要的機制為渦流拉伸與傾斜作用。

### 第三節 重要文獻

紊流場的研究在流體力學上佔有非常重要的地位，紊流是指流體的運動可能是一個不規則、不穩定，以一種混沌的模式進行著，一般稱之為紊流(turbulent flow)。均勻流場與紊流場之間差異的研究早在 Reynolds [12]就開始，在紊流場中的物理量，例如：速度、壓力等，隨時間及空間分布上，都會呈現不規則的擾動(擾動)。紊流流場結構通常

為三維非穩態（3-D unsteady）結構，而且包含著渦旋（vorticity），因此對流場中熱、質量或是動量的傳遞都較均勻流場強。一般渦流尺度都尺度包含相當複雜：

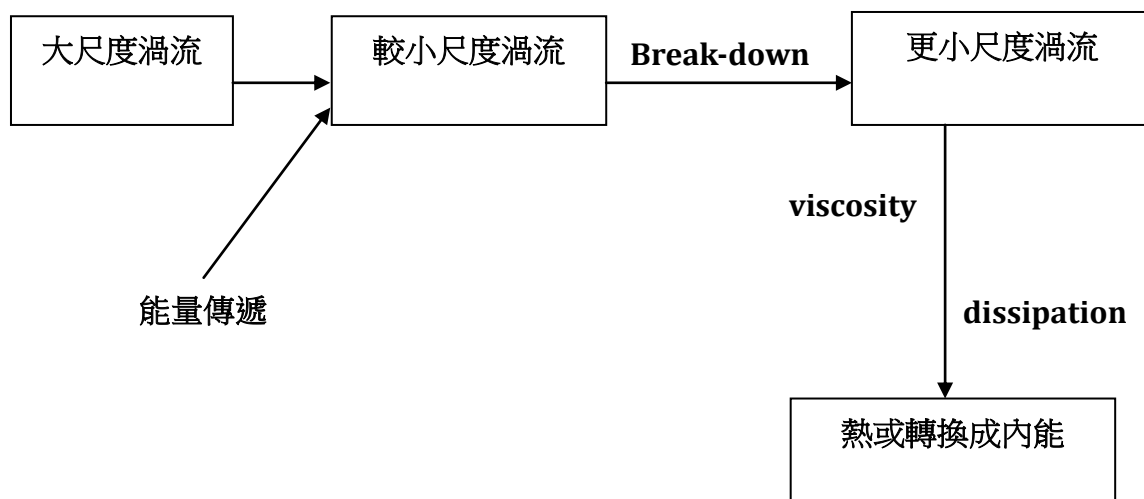


圖 3-2 渦流能量傳遞示意[13]

（資料來源：96 年成功大學紊流學講義[13]）

目前針對紊流場的特性的描述包含紊流強度及積分尺度等相關數學模型都有相當完整的描述 Laws 與 Livesey[14]，其中包含了探討紊流場中渦流尺度，能量傳遞等，紊流場一般的特性。而紊流場的描述一邊是採用統計性的描述，其物理性質會分成平均與擾動值進行敘述運動特性。研究所設定的紊流強度為主流向（U），預定設置的格柵可產最大紊流強度 15%。

有關紊流場的應用研究相當廣泛，探討紊流場與均勻流場之間對於不同物理模型之間的差異。Miau 等[15、16]探討過因為上游流場不同而對於二維鈍形體下游非旋性速度擾動在停滯點附近影響。曾雅祺[17]也探討過紊流場中鈍形體渦流溢放的影响，文中就針對不同的紊流強度對鈍形體渦流溢放的影响做相關實驗及探討。Hunt [18]探討紊流流過鈍形體之氣動力相關特性的變化，Roshko [19]對於混合層流中紊流發展提出相關理論，Bearman 與 Morel[20]也探討過自由流場為紊流的狀況下，流體流經鈍形體其氣動力的表現。以上的文獻是眾多紊流研究中的一小部分，因此可知紊流場能力的建立對於本風洞而言是相當需要而且迫切的，除了研究外亦可擴大對產業界相關的服務。

## 第四章、研究方法說明

### 第一節 網格簡介

紗網常被用在改變下游流場狀況的工具，且通常使用很密的網格[21]，在此狀態下網格主要目的為穩定流場，使流場更為均勻，但在密網格情況下，紗網容易有沙子與灰塵堆積，並增加流場的不均勻性。早期研究流場的實驗通常將通過網格的流場假設為均勻流，再開始研究不同網格大小下流場的不均勻性與網格的係數等。經 Laws 與 Livesey [14]研究結果顯示，流場通過網格會造成壓降，壓降與速度平方成正比，在增加流場混合效應下，邊界層厚度下降，使流場更為均勻。也能使傾斜的流向導正，整個流場紊流強度降低。

當流體流向垂直於網格，網格上的阻力 $F_D$ 是由各網格孔上產生的壓損累積而成。先考慮流場通過一個單一的網格(mesh)，無因次化的阻力係數 $C_D$ 為 $C_D = \frac{F_D}{0.5\rho V_{in}^2 S}$ ，其中 $V_{in}$ 為未架設網格下的流場速度， $S$ 為特徵網格面積。

$\beta$ 為 open-area ratio，在方形網格中 $\beta = (1 - d/L)^2$ ， $d$ 為使用格柵直徑， $L$ 為格柵的間距。阻力係數或壓損係數 $K_\theta = C_D(1 - \beta) = K_0 \cos^2 \theta$ ，正向 $\theta=0$ 時阻力係數為 $K_0$ 。早期的研究對於 $K_0$ ，觀察網格的損失與阻力等現象，已有相當多的量測。

Owen 與 Zienkiewicz [21]將不同的網格產生的速度分布做出整理，但他們主要在於二維的網格，柱體為平行放置，不同的放置方法量測下游速度分布。對於網格下游速度與格柵間隙之關係，可由阻力係數與擾動係數描述。網格後方，紊流結構影響平均流速的分布，後方的剪力與速度不均勻性將會漸漸消散(decay)。Laws 與 Livesey[14]呈現出消散速率(decay rate)，此為下游相當重要的現象，以模擬技巧重現出速度分布與完整的紊流結構消散趨勢分布。但複雜的計算，還是有許多假設，而實際量測卻更為直接。關於網格的壓力損失係數(Pressure-drop Coefficients of Screens)  $K$ 。Borda-Carnot[22]一維經驗方程式 $K = (1 - \beta)/\beta^2$ 適用於高雷諾數情況下。

阻塞比(Open-area ratio)  $\beta$ ，當 $\beta$ 小於 0.58 流場不穩定，依據 Owen 與 Zienkiweicz [21]。當 $\beta$ 在 0.3 至 0.57 之間，不穩定由渦旋(Vortices)主導。當 $\beta$ 小於 0.3 流場會有 Overshoot

現象，此現象由接近邊界層的流線的傾斜變化主導。

## 第二節 格柵與紊流

使用格柵產生紊流擾動，描述紊流特性的兩項基本指標值為紊流強度(intensity)與紊流尺度(scale)。在抑制紊流的考慮下，下游的紊流強度與尺度，絕對比上游還來得低，抑制紊流的網格通常很密，紊流強度與尺度必須夠小，且在下游處能快速的消散(decay)。

在紊流產生器中，下游的紊流為高強度，一般在 10%或是更高，且由格柵的寬(或圓柱的直徑)、排列的網格(mesh)、雷諾數的控制紊流強度的主要參數。當高雷諾數時，以粗糙的網格(coarser mesh)與較高阻塞比(higher solidity)下操作。Laws 與 Livesey [14]指出紊流剛形成時，紊流強度比上游大，之後紊流強度會消散(decay)，尺度會增加(scale grows)。

## 第三節 紊流擾動分析

本實驗主要架設粗網格使建研所風洞測試區具有高紊流擾動之自由流場為主要目的。紊流結構與影響錯綜複雜，在時間與空間上均存在不同尺度、方向擾動的量。基於實驗分析角度，則以紊流強度(turbulence intensity)與紊流積分尺度(turbulence integral length scale)，作為描述紊流結構之特色[21]。

## 第四節 紊流強度

紊流場中，擾動之速度分量常具有三維非等向運動特性。因此，可將流場瞬時速度以下列方式表示： $u=U+u'$ ； $v=V+v'$ ； $w=W+w'$  其中  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分別為流場中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向之瞬時速度，而  $U$ 、 $V$ 、 $W$  與  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  則為其中流場各方向之平均與擾動速度。由此藉由擾動速度( $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$ )之均方根值(root-mean-square value,  $u_{rms}$ 、 $v_{rms}$ 、 $w_{rms}$ )量化紊流擾動狀態，並將均方根值與主流場平均參考速度( $U$ )之比值定義為紊流強度(Turbulence intensity) [20]：

$$T. I. = \frac{\sqrt{(u_{rms}^2 + v_{rms}^2 + w_{rms}^2)}/3}{\bar{U}} \times 100\% \quad (3-1)$$

$$\text{其中 } u_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{u'^2}}; v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v'^2}}; w_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{w'^2}} \quad (3-2)$$

本研究主要探討自由流軸向之紊流強度，因此採用軸向速度之均方根值( $u_{\text{rms}}$ )與自由流場主要平均參考速度( $U_{\infty}$ )之比值代表紊流強度：

$$\text{T.I.} = \frac{u_{\text{rms}}}{U_{\infty}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_{\infty}} \times 100\% ; u_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{u'^2}} = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - u_{\text{mean}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-3)$$

其中由於考量紗網下流場具有紊流三維特性，以架設於風洞測試端入口處之皮托管，量測之自由流場速度為參考速度( $\overline{U_{\infty}}$ )，並直接利用一維熱線探針量測實驗流場中軸向速度( $u$ )變化，藉以求出軸向紊流強度。

### 第五節 紊流積分尺度

紊流擾動中常具有無數複雜之漩渦結構，並以不同能量大小、不同尺度範圍做拉伸旋轉之運動。因此許多研究學者針對紊流中各種結構，分別以相對之紊流尺度代表其物理特性，例如：Integral length scale、Microscale、Kolmogorov length scale 等[25]。其中因積分尺度(Integral length scale)可視為紊流擾動中能量最強之平均結構大小[20]，並描述流場速度變化仍然具有相關性之最遠距離，由此即可定義出流場中軸向與側向之積分長度(longitudinal & transverse integral length,  $L_x$ ,  $L_y$ )：

$$L_x = \int_0^{\infty} R_{u_A u_B}(\Delta x, 0, 0, 0) d(\Delta x) \quad (3-4)$$

$$L_y = \int_0^{\infty} R_{u_A u_B}(\Delta y, 0, 0, 0) d(\Delta y) \quad (3-5)$$

其中 $R_{u_A u_B}$ 為流場中 AB 兩點位置的速度相關係數(cross-correlation)。而本實驗中就實驗規劃以一維熱線探針量測流場中軸向之瞬時速度( $u$ )，因此主要將分析紊流場中軸向積分長度( $L_x$ )。其中若假設實驗中之紊流場在統計分析上屬於均勻結構(homogeneous)，可藉由泰勒假說(Taylor's hypothesis)： $\frac{\partial}{\partial t} = -\overline{U_{\infty}} \frac{\partial}{\partial x}$ ，將流場中軸向之紊流長度積計算由對空間之積分轉換為對時間積分：

$$L_x = \overline{U_{\infty}} \int_0^{\infty} R_{uu}(\Delta t) d(\Delta t) \quad (3-6)$$

其中 $R_{uu}$ 為流場中任一點軸向量測速度對本身之相關係數(auto-correlation coefficient)， $\Delta t$ 表自相關對應的時間延遲，由此對定點之瞬時速度量測即可得到紊流軸向積分長度，並同時可簡化實驗之量測設計。對於隨機亂度之紊流場，若要以統計方式

求出積分尺度，依據紊流本身之物理之特性，須保守完整涵蓋紊流擾動之影響時間或發展區域，將流場中速度擾動之自相關位數由時間延遲積分。但在實際情況中難以實行，因此可再進一步簡化其積分方式[26]：

$$L_x = \overline{U_\infty} \int_0^{t_c} R_{uu}(0,0,0, \Delta t) d(\Delta t) \quad (3-7)$$

其中  $t_c$  為  $R_{uu}(0,0,0, \Delta t)$  最早為零的時間。然而在本實驗數據分析中，發現在取 1 分鐘以上之自由流場速度訊號依(3-7)所得  $L_x$  達到某一收斂數值，並由此界定其自由流場中該點之紊流軸向積分長度[17]。

### 第六節 流場模擬

以下為計算軟體 Fluent 進行計算風洞內流場穩定後的速度與紊流強度分布狀況，由於 3 維計算相當耗時複雜，先以二維流場簡易模擬，以低中高 3m/s、10m/s、20m/s 觀測下游流場擺動情況。在建研所風洞現場架設上，方柱在網格交叉處較容易固定，比較圓柱與方柱的差別為本次模擬的目的。在模擬的環境條件設定為：

Case1:圖(4-1)為入口風速 3m/s，方形截面積邊長  $D=0.08\text{m}$ ，網格間隔為 1D 下之網格流場水平速度分佈，只顯示水平速度分布是否相差過大，流場混亂度以紊流強度表示。右方顏色尺度單位為 m/s。此模擬並非全尺寸計算，僅以五個柱體排列且二維的流場觀察方柱與圓柱的差別。在入口所設定之紊流模式(Viscous Model)選為 K-epsilon Model，且考慮壁面上的 no-slip 假設等，入口留為均勻流體，網格設在入口後 1D 處。圖(4-2)為下游紊流強度[T.I.]的顏色示意圖，顏色尺度為百分比。實際上的網格並不會只間隔 1D，選許 1D 的原因為我們實際架設的最密尺度，在紊流實際的量測上，會因應不同的紊流強度而進行調整，本模擬為比較不同截面的差別。所顯示計算結果表示流場已達到收斂，既紊流物理特性以時間平均的方式顯示。以下水平速度與紊流強度皆是收斂後的平均分布。



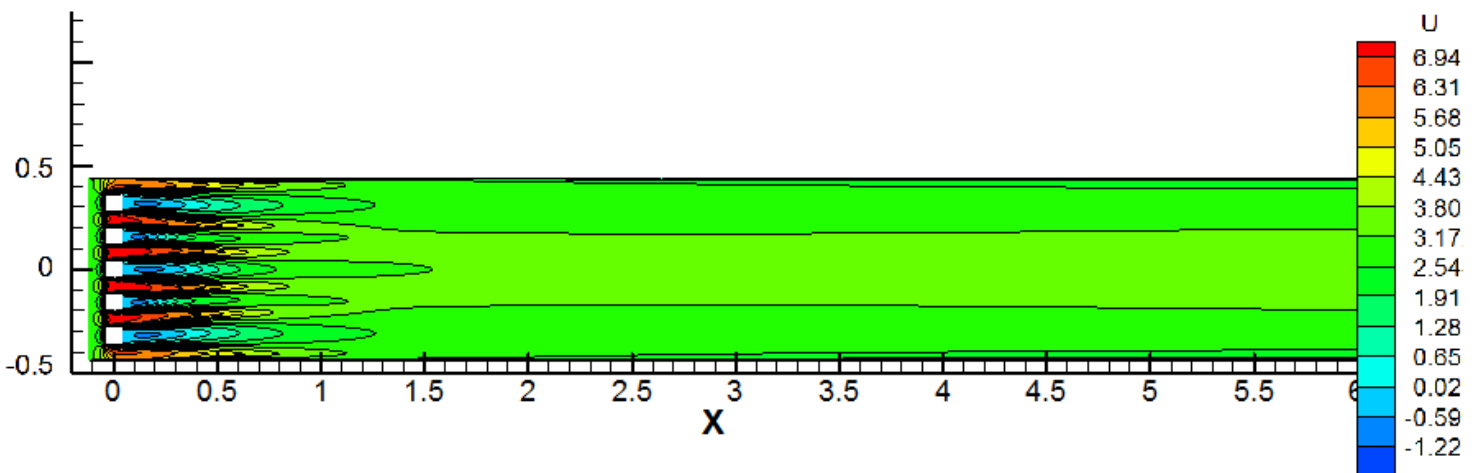


圖 4-1 方柱下游水平速度變化

(資料來源：本研究整理)

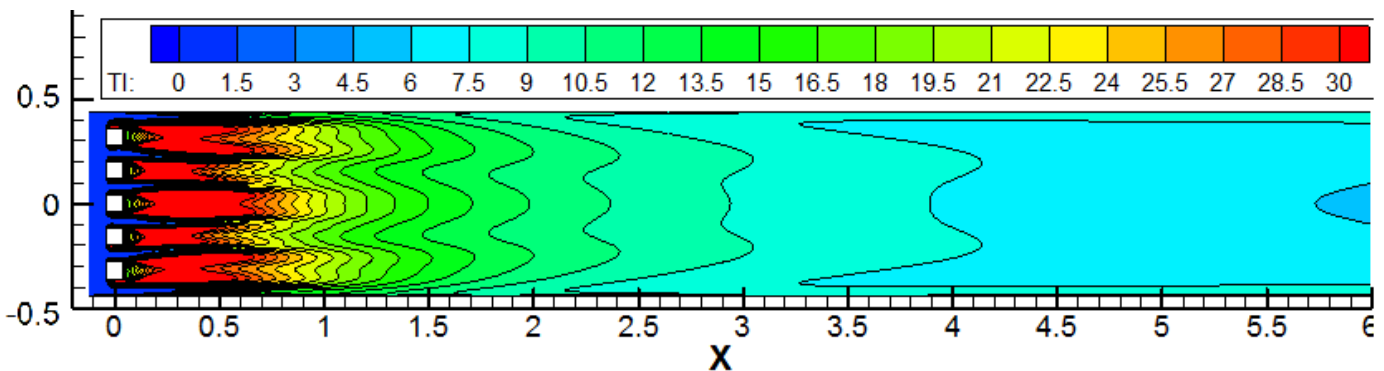


圖 4-2 方柱下游紊流強度 T.I.

(資料來源：本研究整理)

Case2：圖(4-3)(4-4)為相同邊界條件下，圓柱直徑  $D$  為  $0.15\text{m}$  下，柱體間隔相同為  $1D$ ，5 個圓柱二維模擬。在圓柱 Strouhal number 分布約  $0.21$ ，方柱 Strouhal number 分布在  $0.15$  以下[27]，Strouhal number 可當作渦流溢放(Vortex Shedding)的指標，並影響 Turbulence Intensity，圓柱後方渦流擺動頻率較大。圓柱模擬的直徑為  $D=0.15\text{m}$ ，方形模擬的邊長  $D=0.08\text{m}$ ，圓柱擾動應更為放大，在實際的架設上，方形截面較利於安裝。由模擬結果預測本所風洞的第一次測試區距離入口為  $3\text{m}$  的截面紊流強度可達到  $10\%$  以上。

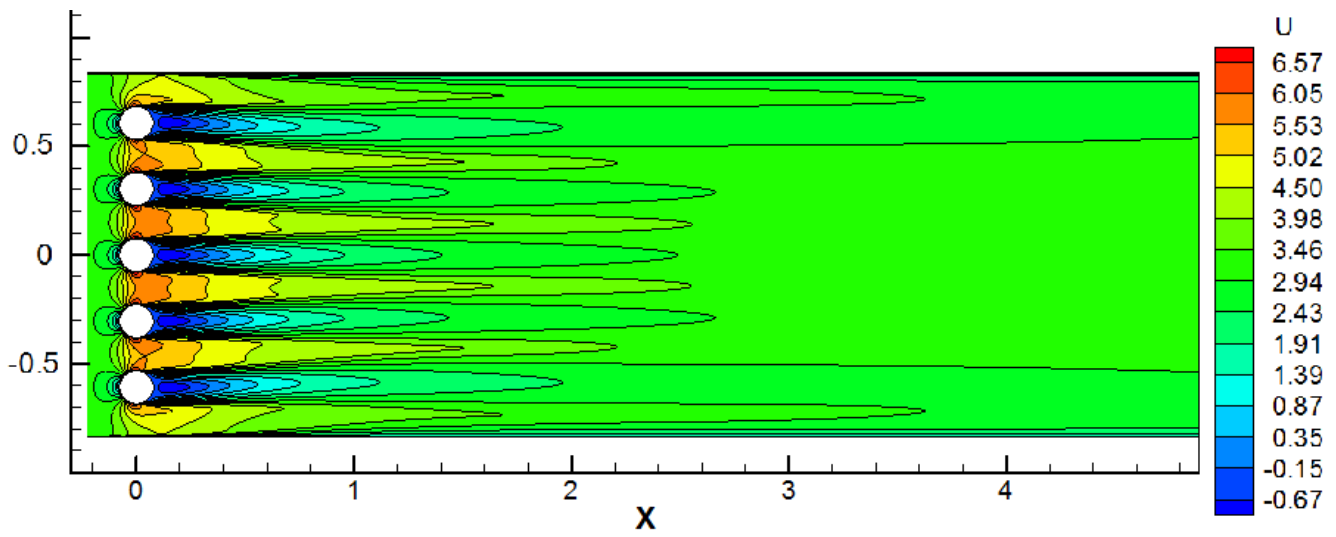


圖 4-3 圓柱下游水平速度變化

(資料來源：本研究整理)

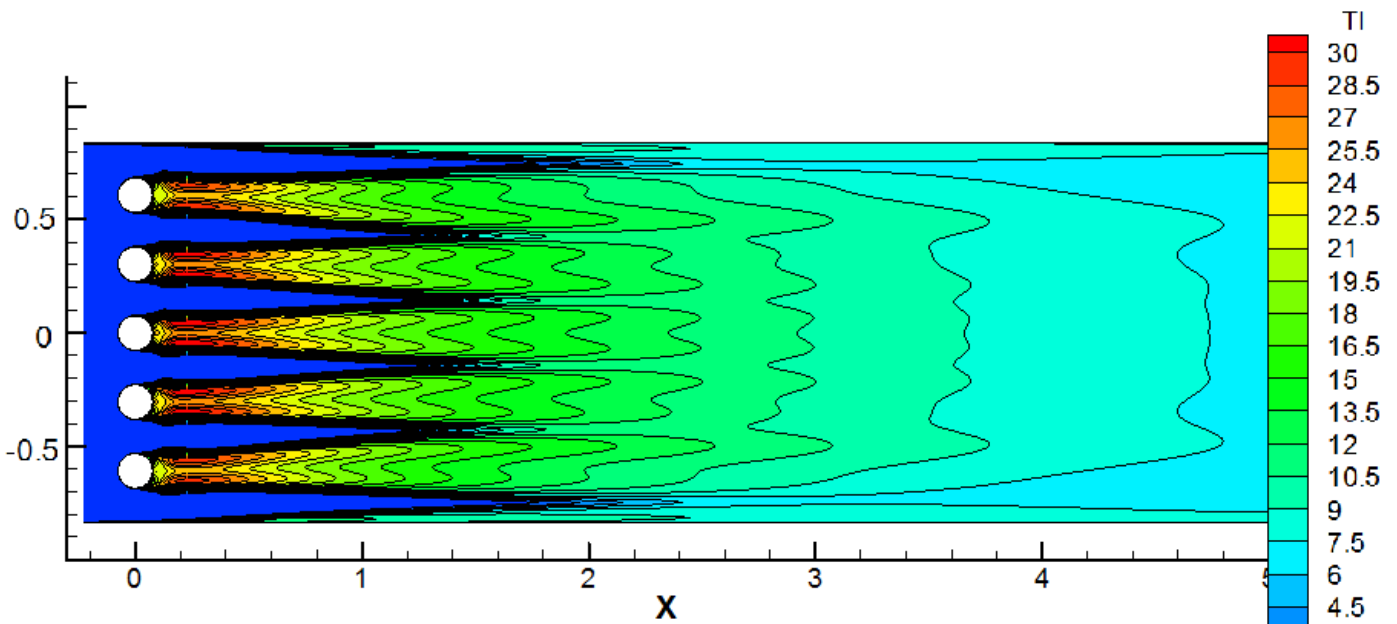


圖 4-4 圓柱下游紊流強度 T.I.

(資料來源：本研究整理)

在此模擬的主要目的為判定方柱是否合乎本研究之網格設計所需，在早期文獻中，常以圓形截面為格柵編織，此原因或許為早期小型風洞中，認為圓柱尾流渦流溢放頻率

比鈍形體高，流場後擺動頻率快，認為圓截面較容易達到高紊流狀況。但在大型風洞中，圓柱並不容易於編織成平順的網格，圓柱彼此間交叉的接合點施工過於繁雜，後期也有許多文獻以方柱與不同網格方式產生紊流：紊流事實上為一流場的速度擾動，以何種方式編織並無特定要求，流體流經任何模型，自然產生紊流。Harder [28]以方形網格架設紊流產生格柵，如下圖：

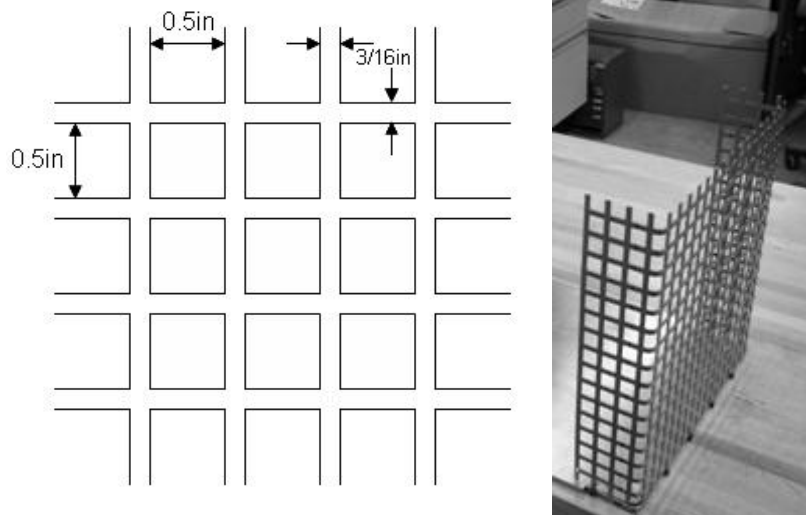


圖 4-5 文獻實際方網格 [28]

(資料來源：本研究整理)

由文獻中可見，以不同的方式干擾原本均勻的流場，即使方或圓柱都是以格柵方式去產生紊流，情況相差並不大。在不同的方法去產生下游紊流場中，主要的考慮指標值為紊流積分尺度及紊流強度，用不同的擾動方式，可產生不同的積分尺度、強度之紊流流場。

## 第五章、實驗設備

### 第一節 網格架設示意圖

依照目前規劃可架設三種格柵疏密組合，在每支撐柱上，均有可調整固定的孔洞，其 open-area ratio 不同，在初期的量測計畫，會比較這三種狀況下的壓力損失係數，而格柵的疏密對紊流強度會有影響[29]。

在實驗的架設上，使用直徑  $D$  與間隔  $L$  的比約  $L/D=4$ ，二維模擬之紊流強度可達 10%，由調整網格與量測區距離可改變目標區域的紊流強度。格柵的大小，將影響紊流積分尺度，網格越小者可以擊潰越小的渦流，但 Open-area ratio 太小，會使網格後方造成噴流。Open-area ratio 太小的情況下，會有 Overshoot 加速的作用，造成流速分布更不均勻，且造成更大的壓力損失。以下為所使用之網格示意圖：

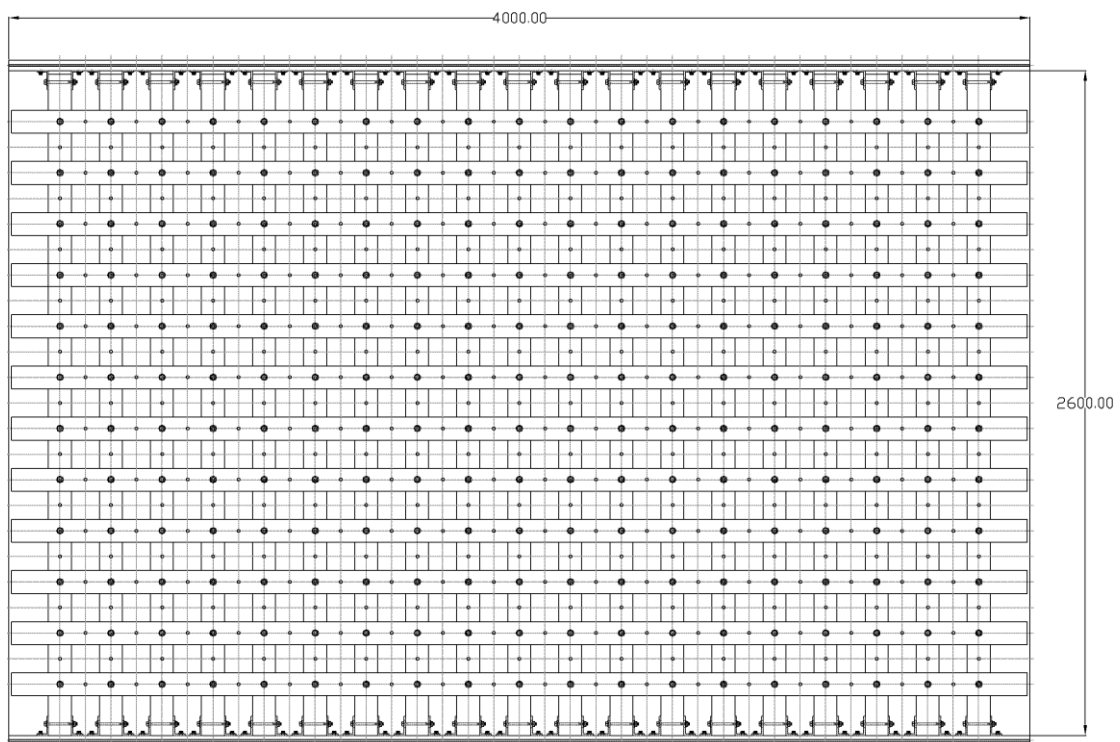


圖 5-1 Open area ratio=0.335 格柵示意圖

(資料來源：本研究整理)

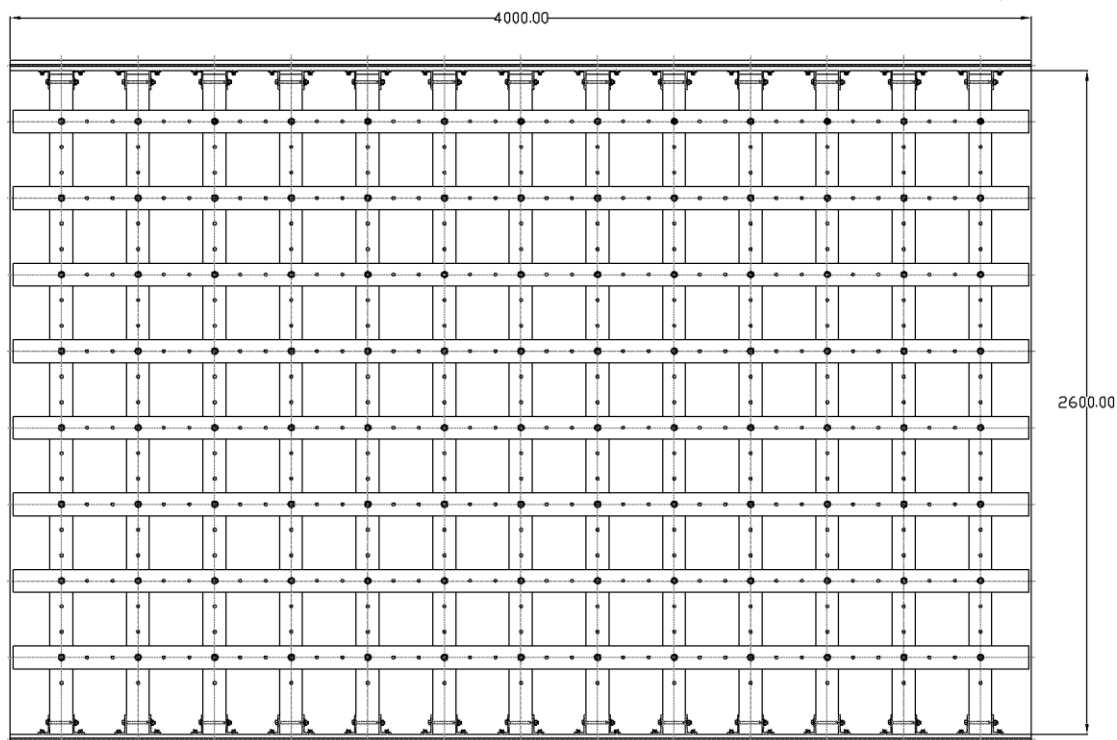


圖 5-2 Open area ratio=0.512 格柵示意圖

(資料來源：本研究整理)

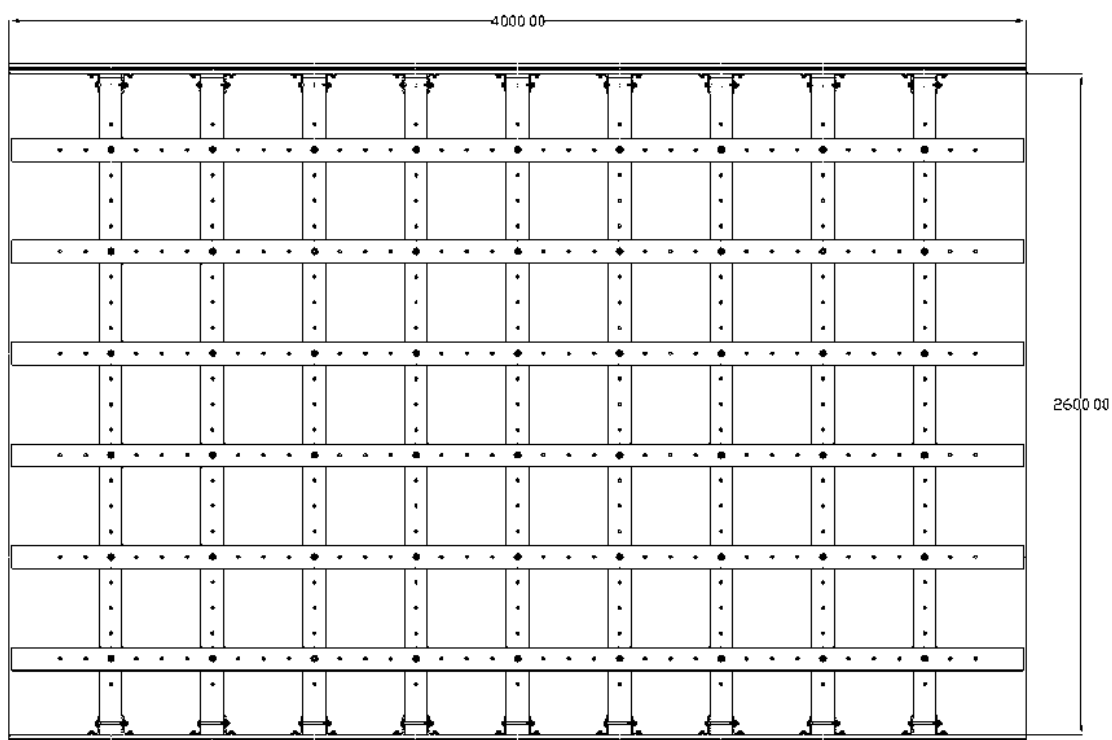


圖 5-3 Open area ratio=0.632 格柵示意圖

(資料來源：本研究整理)

## 第二節 架設過程

本研究使用鋁擠型框架固定，框架架設於風洞收縮段與測試區間隔之縫隙。當初風洞設計規劃時，此部分間隙為預留空間供安置框架，然而風洞外型製造材料經久受熱變形，寬四公尺的測試區寬度，地上與收縮段的接線直線誤差在中心處約 2cm，此預留空間為 12cm，最後決定使用寬 8cm 的鋁擠型，不用顧慮此變形量而進行。拆除此預留空間的擋板，此擋板為本所風洞設計之初所預留之縫隙，高度距離地面 1.5m 以上，且頗具重量，我們焊接上兩把手以便擋板扶持。(圖 5-4)



圖 5-4 風洞預留縫隙擋版拆除

(資料來源：本研究整理)

本所風洞主體為鋼鐵材料構成，收縮段與測試區縫隙外圍鋼鐵因熱因素有些許變形。平均量測寬度為 12cm。



圖 5-5 擋版內預留縫隙約 12cm

(資料來源：本研究整理)

在此預留縫隙只有單邊為開放式，其餘三側為厚 1cm 鐵板層，在頂板與底板縫隙中心線上間隔約鑽孔已將鋁擠型框架固定。我們以截面積 4cmx8cm 鋁擠型加一鐵塊墊片將框架固定在風洞上下側。



圖 5-6 框架墊片

(資料來源：本研究整理)



圖 5-7 側邊框架

(資料來源：本研究整理)

框架架設完畢，在內部溝槽預留大量螺絲，以便後人實驗架設(圖 5-8)。在格柵材料的選取上，選擇木料因素為其表面較為粗糙，搬運較鋁擠型鋼架輕，成本也便宜許多。



圖 5-8 框架溝槽

(資料來源：本研究整理)



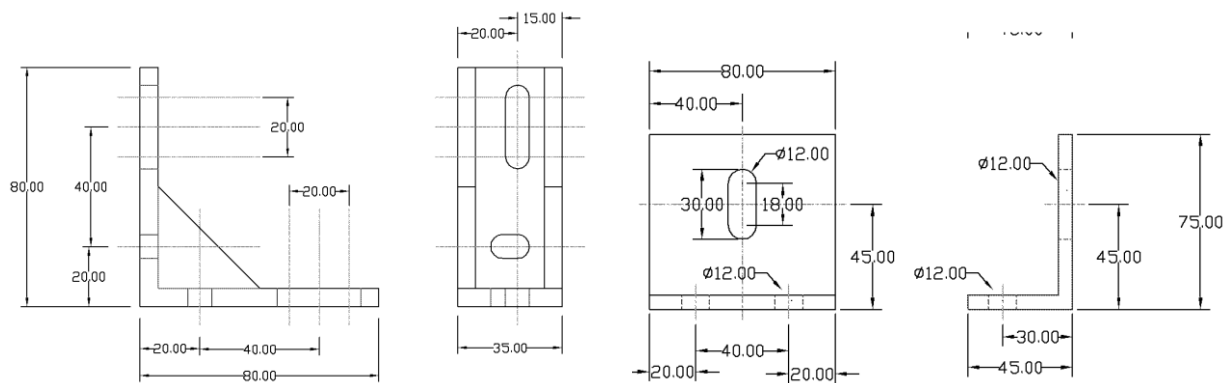


圖 5-9 網格架設固定角材

(資料來源：本研究整理)



圖 5-10 網格架設所用木料

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 移動機構

為求量測方便，將建築研究所原本擁有之移動機構加以進行改良及校正(圖 5-11)，使之後在流場的量測較為迅速方便。此移動機構搭配伺服馬達與訊號線搭配電腦以程式控制，訂定一座標原點，以程式控制熱線測速儀在儀動機構上的移動，將座標輸入後，移動機構將自動移動到所要求之量測位置，並自動擷取流場訊號。

由於目前移動機構只能在單一平面上移動，在風洞的軸向方向需由人工移動，日後若能有較長的時間使用建研所風洞，將會加上第三軸的移動。在大型風洞的量測中，訊號的干擾為一課題，因接線與小型風洞不同的是，接線是暴露於流場之中，受流場的流動而晃動，此些微的改變都將可能造成訊號的干擾。在實驗的流程當中，將接線固定，或減少與流場的接觸而避免雜訊產生。

移動機構上所固定之熱線測速探針，可量測二維瞬時流速，並作  $90^{\circ}$  的旋轉及重復量測，可進一步進行第三方向的瞬時速度量測。

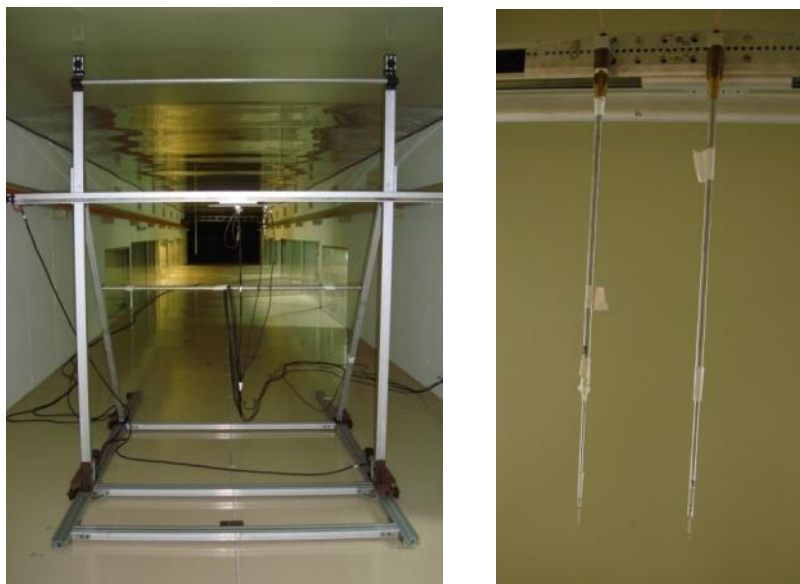


圖 5-11 移動機構與熱線測速儀量測點

(資料來源：本研究整理)

## 第四節 實驗儀器與設備

### 內政部建研所環境風洞

本實驗風洞為內政部建築研究所(Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior) (圖 5-12)之環境風洞進行,此風洞於成功大學歸仁校區,為低速循環式大氣邊界層風洞,總體大小長寬高為 77.9m×7.4m×15.2m,主體佔地面積約為 12m×80m。風洞設有兩個測試區,第一測試區之截面積為 4m×2.6m,長為 36.5m,速度最高可達 35m/s,適合進行建築物模型氣動力實驗、一般高樓建築承受風力及建築物週遭環境風場之實驗;第二測試區之截面積為 6m×2.6m,長為 21m,速度最高約 20m/s,由於展弦比較大,適合進行模型較寬或範圍較大之實驗。本實驗計畫將於第一測試區入口處進行風力發電機的相關測試。本實驗所使用之設備儀器與高義明[3]所述相同。

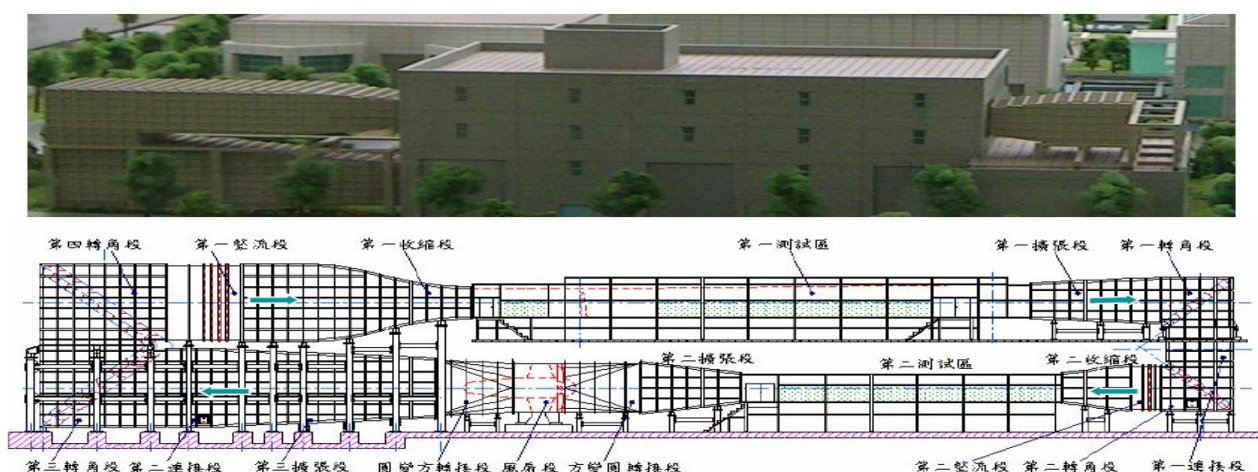


圖 5-12 建研所風洞外觀

(資料來源：本研究整理)

### 皮托靜壓管(Pitot static tube)

實驗所使用之皮托管分為直線型皮托管及直角型皮托管圖(5-13),管身最前緣(停滯區位置)有一全壓孔,距全壓孔下游約  $8d$ ( $d$ :管徑)處之側壁共環繞 6 個參考靜壓孔,透過全壓管及靜壓管連至薄膜式壓力轉換器,可量測一維的平均速度分量(streamwise velocity)。直角型皮托管需注意量測靜壓孔與彎角之相對距離,若相距太近會受到管身影響而造成量測速度上的誤差,一般標準皮托管距離約  $16d$ 。



圖 5- 13(a)直線型皮托靜壓管 (b)直角型皮托靜壓管

(資料來源：本研究整理)

### 大氣壓力計

本實驗所使用之 DPI 141 數位壓力指示儀採用 Druck 高性能矽諧振壓力傳感器，其精度為 $\pm 15\text{Pa}$ ，具備高度單位顯示功能，並擁有理想的氣壓精密測量及傳遞標準，壓力測量範圍由 80kPa 至 1150kPa 之絕對壓力。本大氣壓力計用以測量風洞之壓力，再透過溫度的量測，可以得到所對應之密度值。



圖 5- 14 大氣壓力計

(資料來源：本研究整理)

### 壓力轉換器

本實驗 Validyne Dp-103 型可變磁阻式壓力轉換器(Variable Reluctance Pressure Transducer) 圖(5-15)，利用以金屬薄膜上的應變規量測兩端輸入壓力管的壓差，再以類比電壓訊號輸出。其工作原理為利用應變規隨著因金屬薄膜片隨壓差產生形變，使電磁感應線圈造成不同的電感，讓交流電橋產生不同交流電壓，再經由訊號放大調變後以直流電壓訊號輸出到資料擷取系統，放大後的電壓在 $\pm 10V$ 之間。

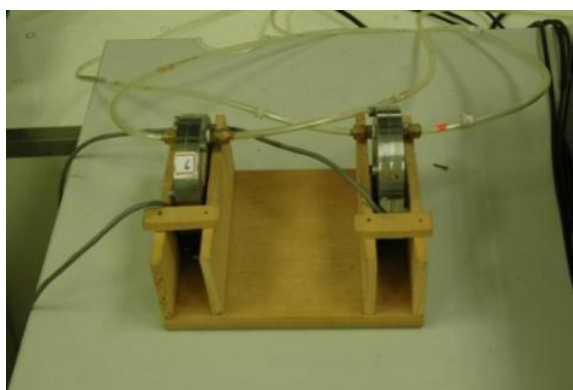


圖 5-15 壓力轉換器

(資料來源：本研究整理)

### 熱線測速儀量測系統

本實驗使用丹麥 DANTEC 公司製造之 Streamline 定溫型熱線測速儀(constant temperature hot-wire anemometer)系統從事流場瞬間流速量測，如圖 5-16 所示，此儀器具 50KHz 高頻響應能力，由於熱線測速儀之電子回授線路可能有飄移(drifting)發生，所以每次使用之前都必須校正以避免造成實驗誤差，Hot-wire 每次校驗後約可維持兩個小時。熱線測速儀依其操作原理不同，可分為定電流熱線測速儀(CCA)及定溫測速儀(CTA)兩種，其量測原理乃利用惠斯通電橋(Wheatstone's bridge)之平衡作用，CCA 是利用保持通過感測器的電流為定值，而得到電阻與熱散失的關係，為維持熱線溫度在一定值，當氣流通過此熱線表面帶走熱量使溫度降低時，必須補充相當的電流，因此流速越快會得到越高的電壓值，CTA 是利用回授線路保持感測器的溫度(或電阻)為定值，而由回授放大器的輸出電壓得到與熱散失間的關係。





圖 5-16 熱線測速儀主機、示波器與資料擷取系統

(資料來源：本研究整理)

熱線材料主要由 90% 的白金(platinum)和 10% 的銠合金(rhodium)組成，直徑為  $5\mu\text{m}$ 。在使用前，以校驗過的壓力轉換器校驗之。由於熱線測速儀之靈敏度及特性會隨流場溫度與本身電阻而有所改變，因此校驗後之探針使用一段時間後，就必須重新校驗一次，以得到較準確之校驗係數。

#### 資料擷取系統

實驗中所使用的資料擷取系統，主要是由 IOTech 廠牌的數位類比轉換器(analog to digital converter)透過 IEEE-488 介面與電腦連接所組成，此數位類比轉換器共有八組差動式訊號輸入端，並有同步取樣功能(sample and hold)，每個訊號數入端具有個別之同步取樣放大器，其取樣時差降低至 10nsec 以內，最高取樣速率(sample rate)為 100KHz 並具有 16bit 解析度，精確度最高達 0.02%。本實驗所量測得到的類比訊號先透過 IOTech ADC-488/8SA 資料收集系統轉換成數位訊號，再經由 IEEE-488 介面以大於 200kb/s 的速率傳回電腦，經由 Visual Basic 6.0 程式進行處理並儲存。

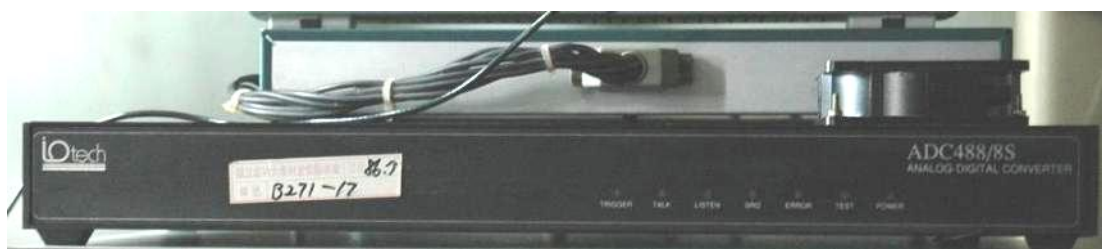


圖 5- 17IEEE-488

(資料來源：本研究整理)

### NI-DAQ 數據擷取系統

DAQ 系統與 IOTech 的數位類比轉換器的主要差異為具有較快速的傳輸速度，在實驗的進行上，大量點數的流場量測使用 NI-DAQ 系統搭配 Labview 軟體進行訊號擷取，風力機的數據的量測上使用 IOTech 擷取系統。本實驗所量測電壓輸出範圍為 $\pm 10V$ ，電壓輸出解析度可達  $0.15mV$ 。



圖 5- 18 NI-DAQ 數據擷取系統

(資料來源：本研究整理)





## 第六章、實驗流程

### 第一節 量測簡介

在前章節中，第三節所介紹之儀器大多為建研所原本擁有之儀器。在第二節所規劃之移動機構的組裝與熱線測速儀架設為近期工作，旨在使數據的取得更加便利。第一測試區第一移動轉盤距離建研所風洞收縮段接口，此為本計畫特別重視的流場紊流量測位置，因在空氣動力的實驗上，研究的模型經常使用此位置，且距離所架設之網格較為接近，紊流強度尚未顯著消散。在實驗的流程上：



圖 6-1 流程示意圖

(資料來源：本研究整理)

網格以理想狀態架設，首先量測中心位置(圖 6.2)，若不達理想的紊流強度，重新調整網格，反覆測試，直到紊流強度達到理想，再擷取整個平面的流場擾動。與風洞邊界約 60cm，為避免邊界層作用，由移動機構將熱線移動進行一整個面的量測。

訊號擷取使用熱線測速儀，使用二維熱膜探針與二維熱線探針，可得  $u$ 、 $v$  或  $u$ 、 $w$  兩組速度訊號，本研究團隊採用長時間量測，進行平均及擾動量的計算，目前量測取樣頻率為 2048Hz，取樣時間為 30 秒。熱線測速儀搭配小型移動機構進行擷取訊號。

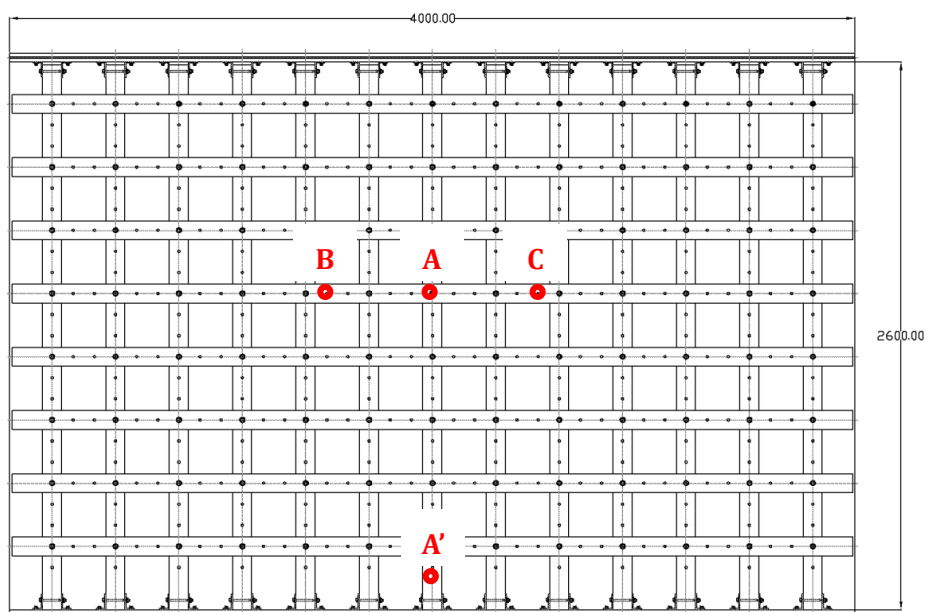


圖 6-2 單一截面量測位置

(資料來源：本研究整理)

## 第二節 量測流程

本次量測 Open area ratio=0.512 的格柵，在先前所架設的框架上已有預留大量螺絲孔，搭配鋼片將木頭格柵固定於風洞測試區入口處，完成圖如下。



圖 6-3 風洞格柵

(資料來源：本研究整理)

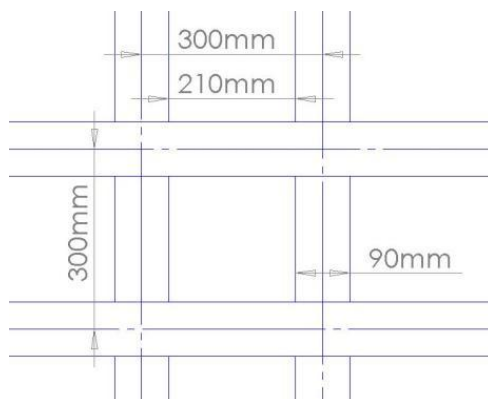


圖 6-4 柵格尺寸圖

(資料來源：本研究整理)

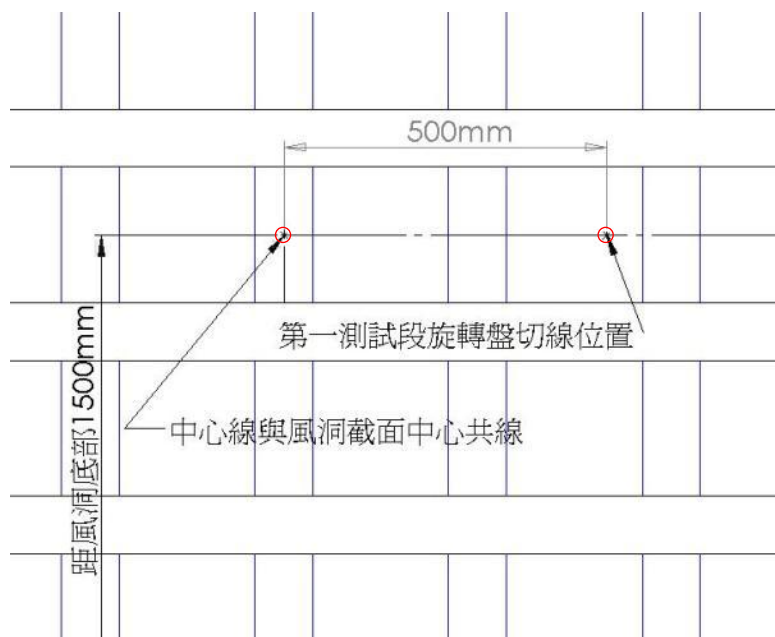


圖 6-5 柵格量測示意圖

(資料來源：本研究整理)



圖 6-6 格柵架設示意圖

(資料來源：本研究整理)

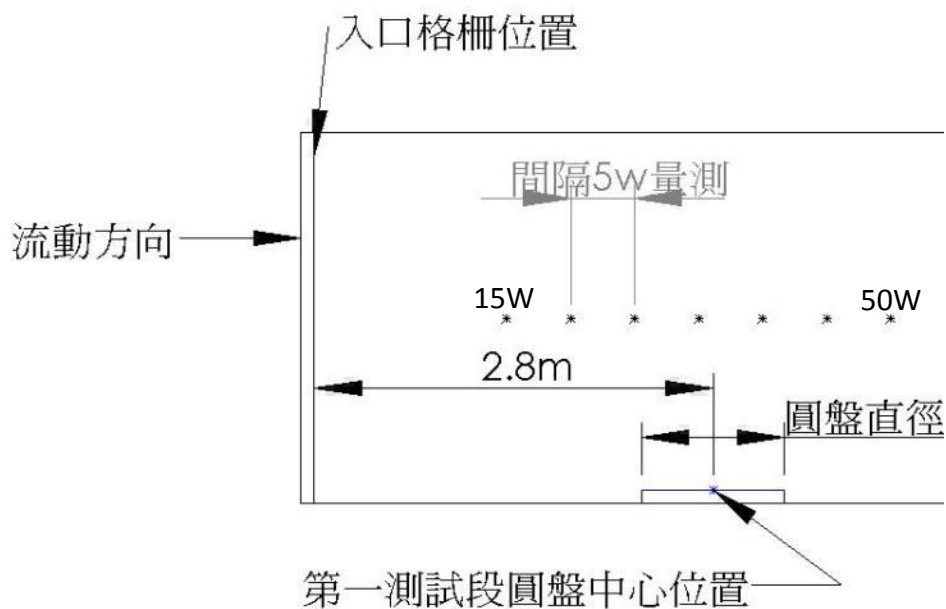


圖 6-7 量測截面位置

(資料來源：本研究整理)

單一截面下的量測位置如圖 6-7 圖示，在本次實驗，另格柵木條寬 90mm 為特徵長度，將間隔 5W 既 0.45m 進行量測，在第一測試段的模型置放區距格柵為 2.3m 至 3.3m，為 25W 至 40W 範圍內。下圖為本次實驗量測示意圖。



**圖 6-8 實際架設圖**

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 儀器校正

熱線測速儀量測值為電壓，本次實驗以一維熱線探針與二維熱膜探針進行量測。二維熱膜測速儀能測量流場主流方向速度擾動，兩條 45 度交叉的熱線構成，雙方量測之電壓擾動經換算可得主流場擾動與另一垂直方向擾動，本次實驗為 Z 方向的量測。

在實驗進行之前，必須將一維熱線探針與二維熱膜探針量測之電壓與流場速度進行校正，求其關係式，本次實驗利用電壓與速度成四次曲線的校正公式為轉換工具。在校正的工具，以校正儀器產生固定速度之流場，並將一維熱線探針與二維熱膜探針固定其流場出口，進行 5m/s 至 20m/s 之電壓與速度校正。

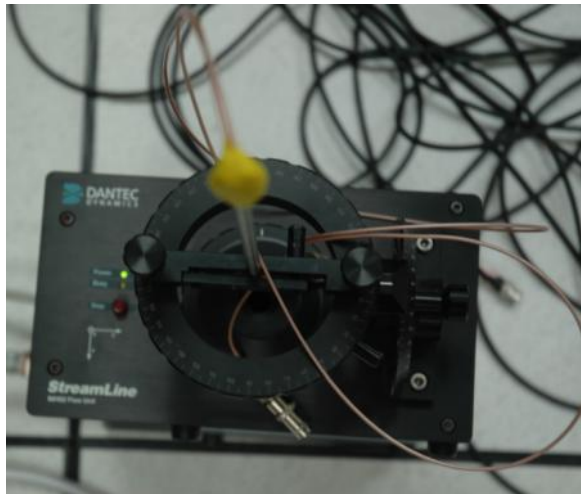


圖 6-9 熱線儀器校正

(資料來源：本研究整理)

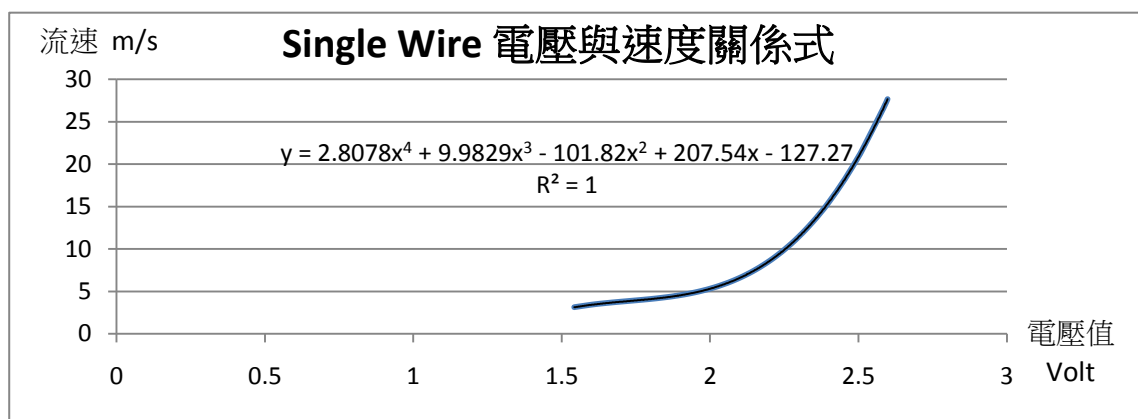


圖 6-10 校正曲線

(資料來源：本研究整理)

#### 第四節 訊號分析

先進行空流場量測，以便與紊流場之擾動差異比較。量測之取樣頻率為 2k 每秒，時間長度為 30 秒。下圖為均勻流下之瞬時速度分布，主要觀察的是距離底部之流場受邊界層影響有較大的擾動。入口皮托管量測之入口流速為 10m/s，量測位置為距離風洞收縮段 2.2m, X=2200mm 處 Z= 0mm, ±500mm, ±750mm，Y 軸為距離風洞底部之垂直高度，由 40mm-2100mm 進行量測。

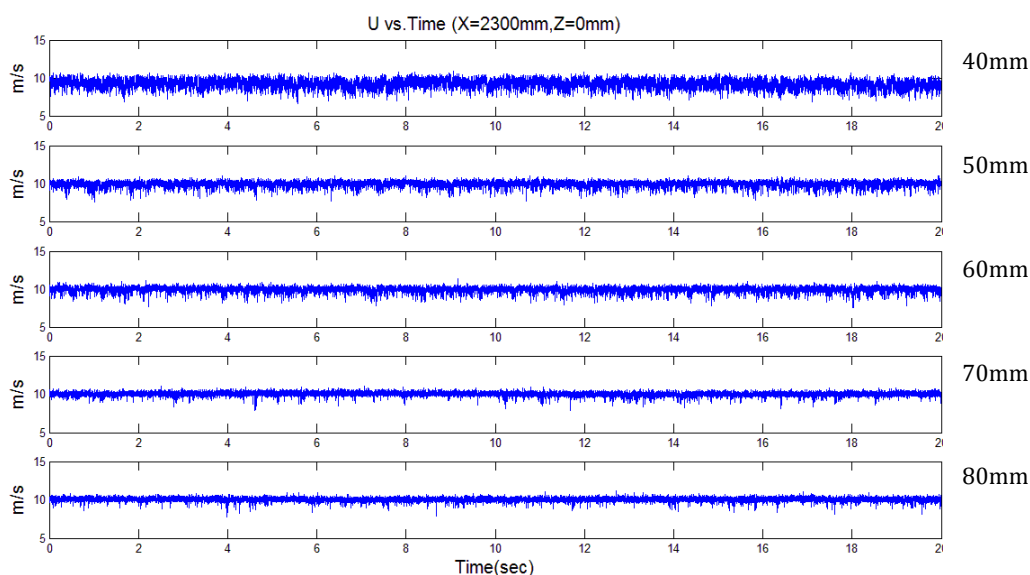


圖 6-11 均勻流場之瞬時速度分布

(資料來源：本研究整理)

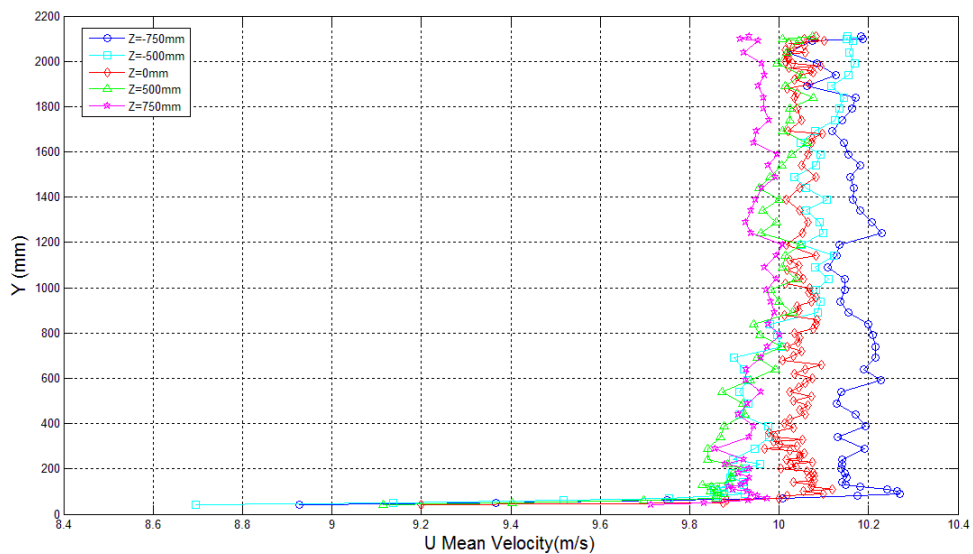


圖 6-12 均勻流之平均速度分布

(資料來源：本研究整理)

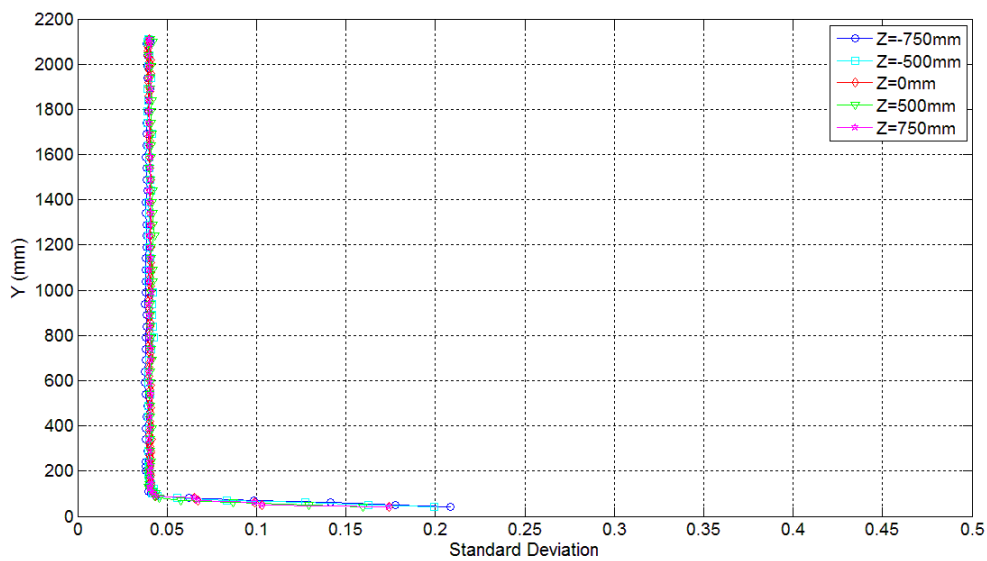


圖 6-13 均勻流速度分布之標準差

(資料來源：本研究整理)



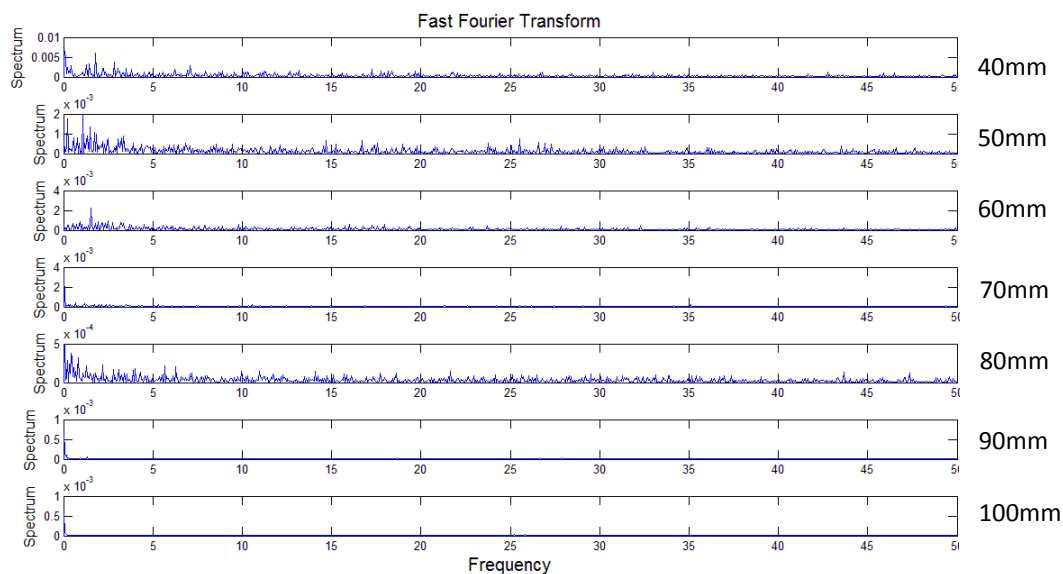


圖 6-14 空流場邊界層流場之 FFT

(資料來源：本研究整理)

均勻流之量測主要目的為觀察邊界層的厚度，分別由平均速度分布、標準差、流場擾動之頻譜圖找出 Y 軸各點距離底部不同距離之差異。由以上三種方法，可判別出邊界層厚度約 60mm-90mm，在第一測試段所安裝之圓盤內，流場推測因干擾關係，有較大的邊界層 90mm，離開此圓盤外之流場，邊界層約 60mm。

以下為 150rpm 風扇轉速下，風洞流速之瞬時擾動，網格後方 A 點 15W 與 50W 處之訊號為範例，簡介訊號處理之流程。圖 6-15 為電壓值之擾動，圖 6-16 為經校正公式所求得之速度擾動。圖 6-17 與 18 為對速度擾動值進行快速傅立葉轉換，藉此檢測實驗之取樣頻率是否具備足夠解析度擷取流場擾動。實驗之取樣頻率為 2k 在快速傅立葉轉換之結果，X 軸之頻率最大解析度 1024Hz，此為傅立葉轉換公式中將其不具意義之負值忽略之結果，由結果得知明顯的擾動頻率低於 200Hz，由此結論判定 2048Hz 之取樣頻率解析度足以擷取流場之擾動值。前端 15W 最高之頻率為 14Hz，50W 最高頻頻率為 4.5Hz。將所量測之速度擾動取頻譜分析，發現各有一主要頻率，此頻率代表流場的擾動特徵，可計算出無因次化頻率。值得一提的是，在前端 15W 位置得到的無因次頻率值 0.2，代表流體從網格所產生之渦流溢放頻率[19]。

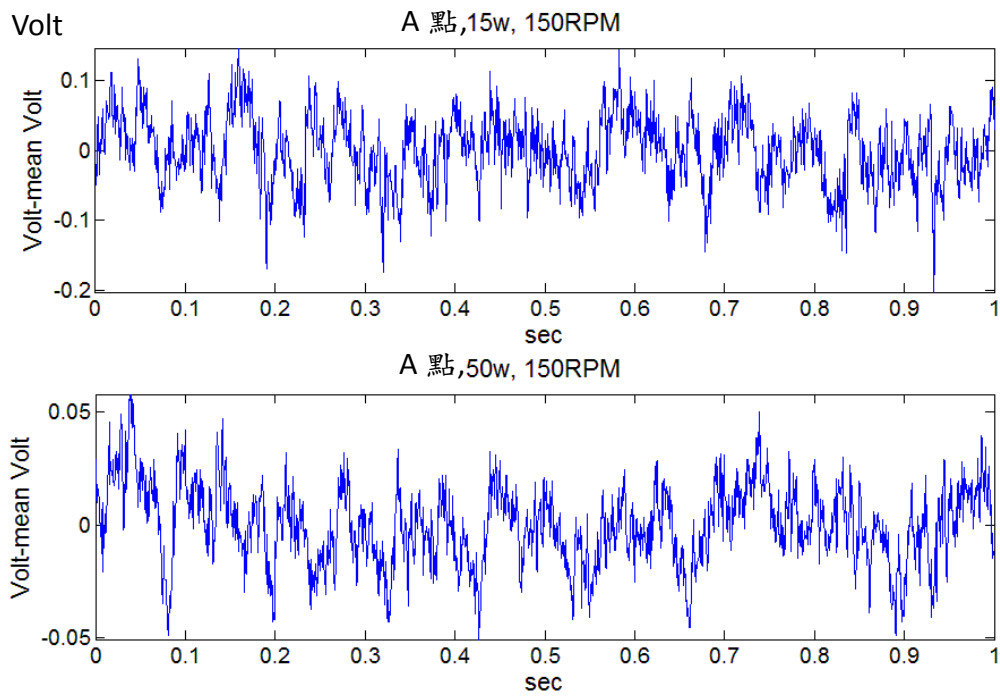


圖 6- 15 15W 與 50W 瞬時電壓值之擾動(A 點)

(資料來源：本研究整理)

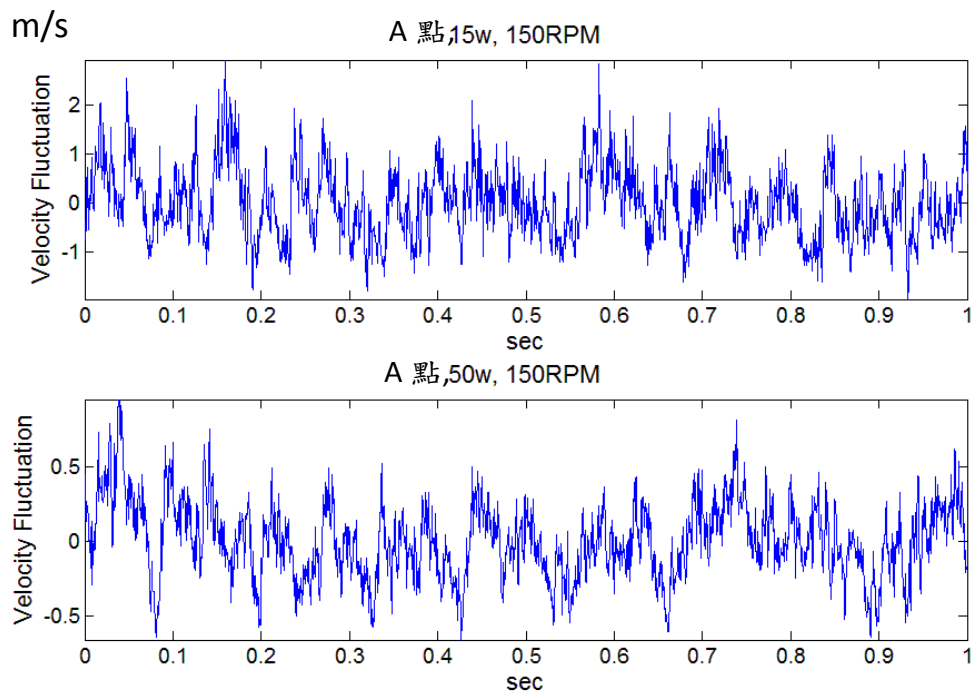


圖 6- 16 5W 與 50W 瞬時速度之擾動(A 點)

(資料來源：本研究整理)

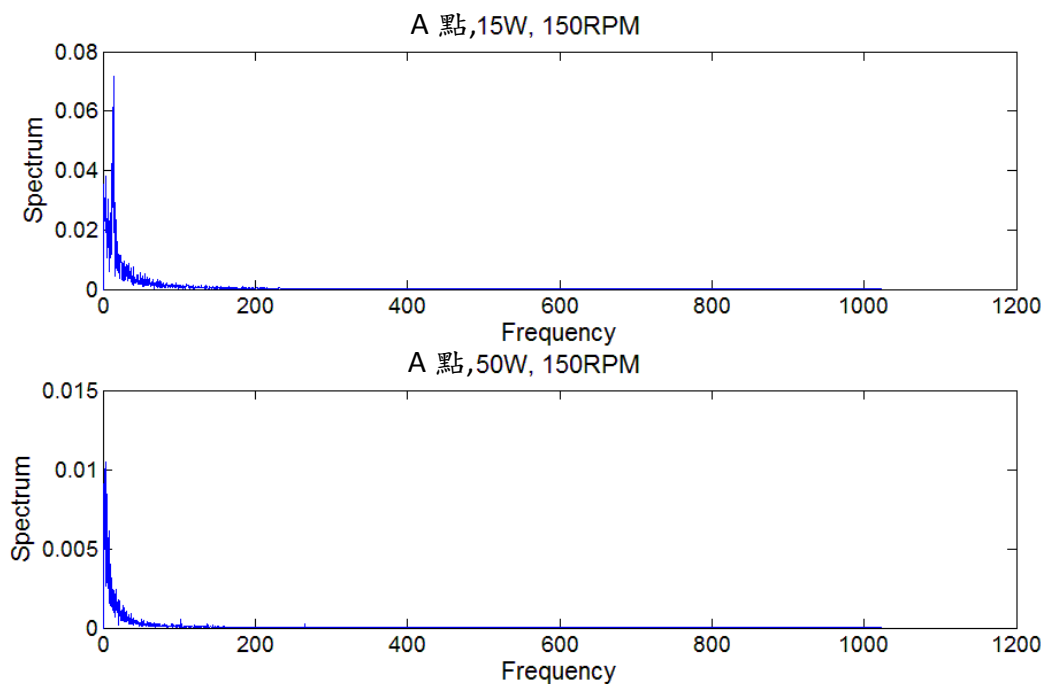


圖 6- 17 5W 與 50W 速度之 FFT(A 點)

(資料來源：本研究整理)

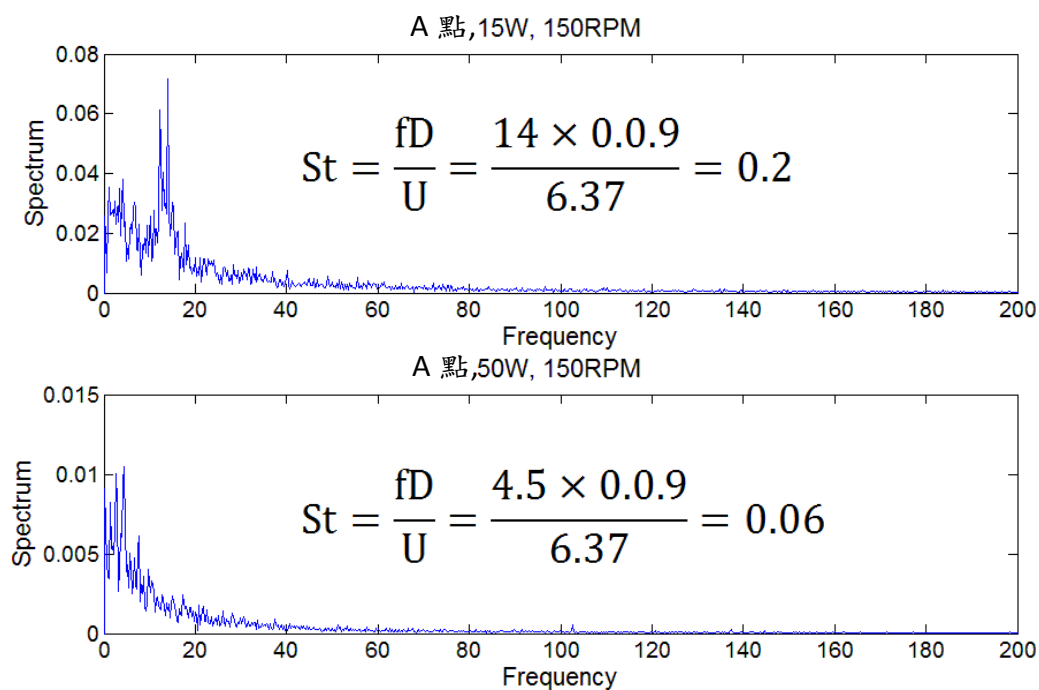


圖 6- 18 15W 與 50W 速度之 FFT (A 點)

(資料來源：本研究整理)

由原始電壓經校正供事後得各位置之平均速度值如下：

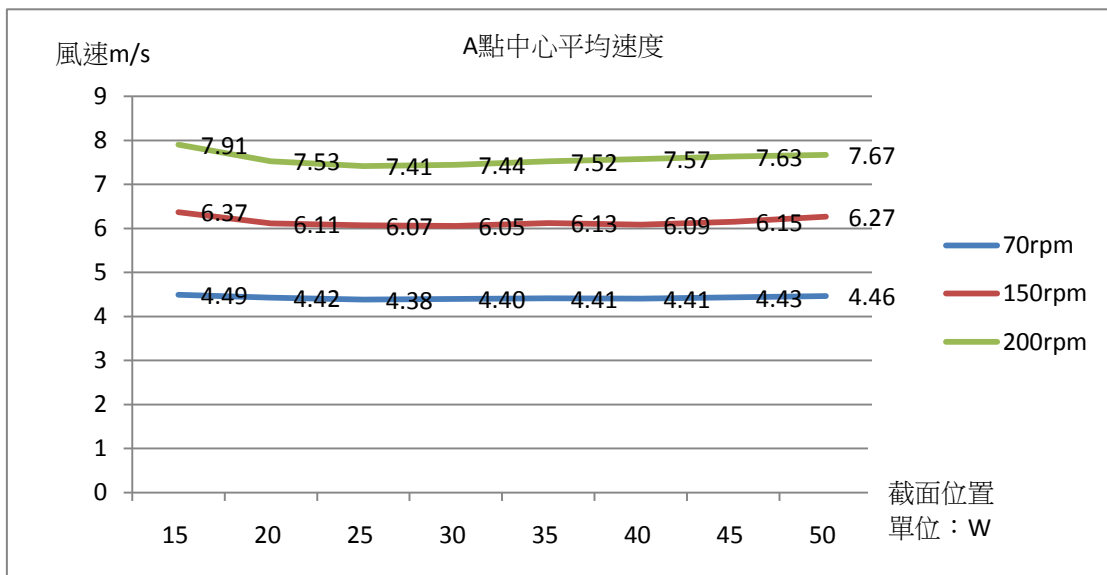


圖 6-19 網格中心後方平均速度(A 點)

(資料來源：本研究整理)

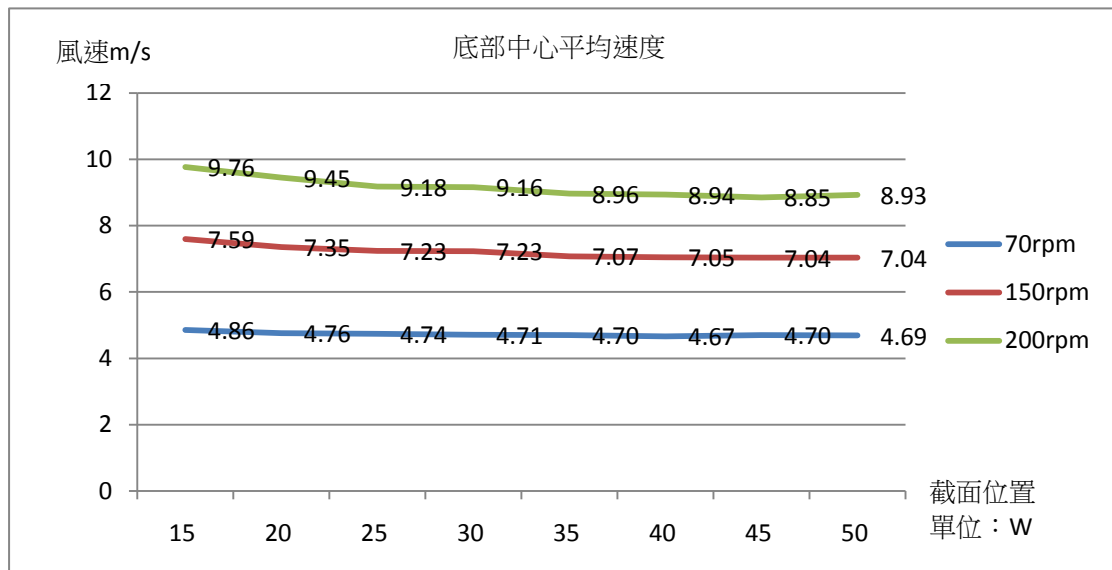


圖 6-20 網格底部中心後方平均速度(A'點)

(資料來源：本研究整理)

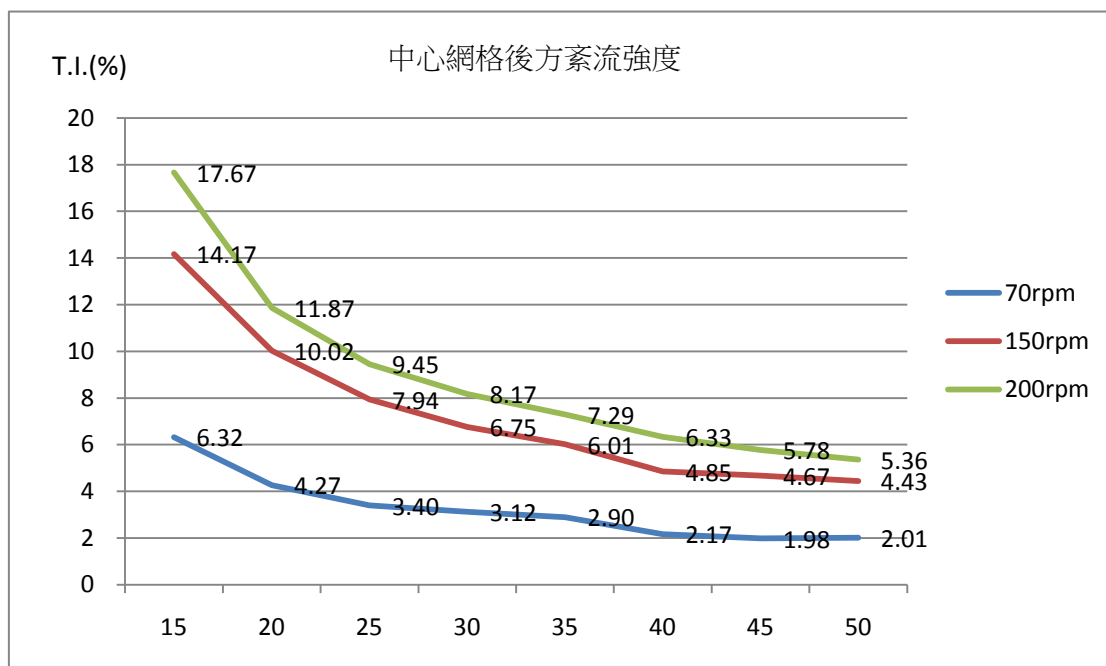


圖 6-21 網格中心後方紊流速度(A點)

(資料來源：本研究整理)

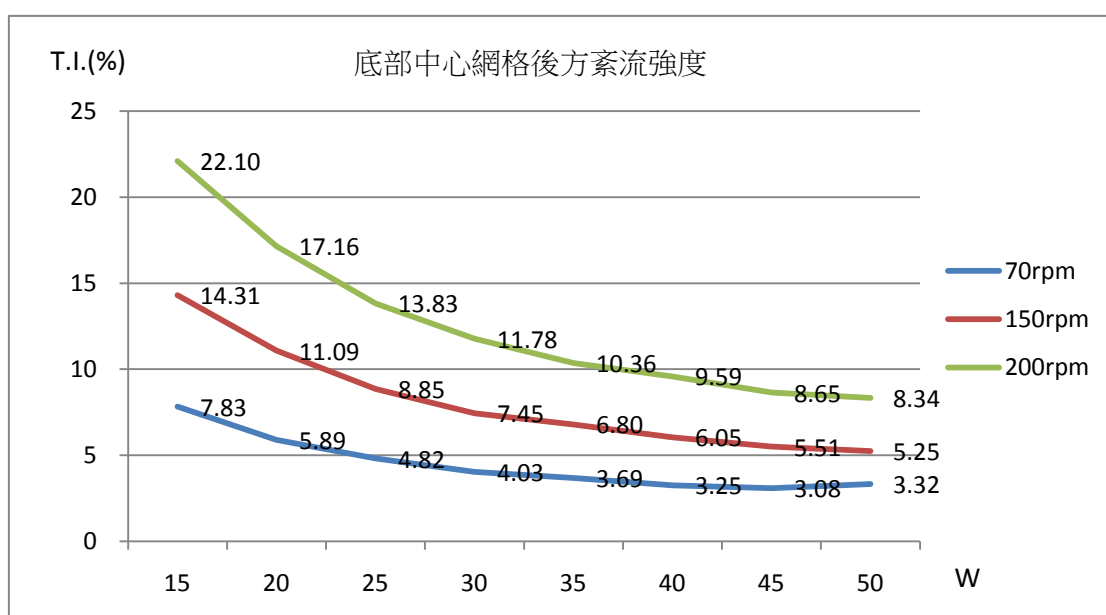


圖 6-22 底部網格中心後方紊流速度(A'點)

(資料來源：本研究整理)

表 6-1 第一測試區旋轉盤上方流場特性

風洞轉速	均勻流速 (m/s)	均勻流紊流強度 (%)	中心紊流平均速度 (m/s)	中心平均紊流強度 (%)	底部紊流平均速度 (m/s)	底部平均紊流強度 (%)
70rpm	5.27	0.44	4.43	2.90	4.69	3.95
150rpm	12.76	0.43	6.15	6.39	7.09	7.29
200rpm	17.32	0.42	7.59	7.81	8.97	11.39

(資料來源：本研究整理)

網格對流場速度造成極大損失，以 200rpm 旋轉盤內為例，Y=1.5m 處速度減少為 0.44 倍。在低速 70rpm 減少之幅度較小，約為 0.83 倍。距離網格越近，擾動幅度越大，底部因邊界層現象，擾動幅度更微幅增加。當 X=15W, Y=1.5m 平均紊流強度可至 17.67%。網格後方下游，因能量減少，擾動幅度降低，在第一測試段圓盤 Y=1.5m 處，平均紊流強度為 7.81%，底部可至 11.39%。本網格架設 open area ratio 為 0.512，以均勻之方形格柵排列，目的為擾動量較為均勻分布之紊流流場，由數據顯示，在 25W 至 40W 間紊流強度值可達相似。在均勻流與高紊流情況下，網格對風洞產生顯著的速度損失，風洞相同的風扇轉速相對之平均速度如圖 6-19 所示。由於風洞之風扇在高轉速之下會產生震動，本次實驗所使用之最高轉速為 225rpm。

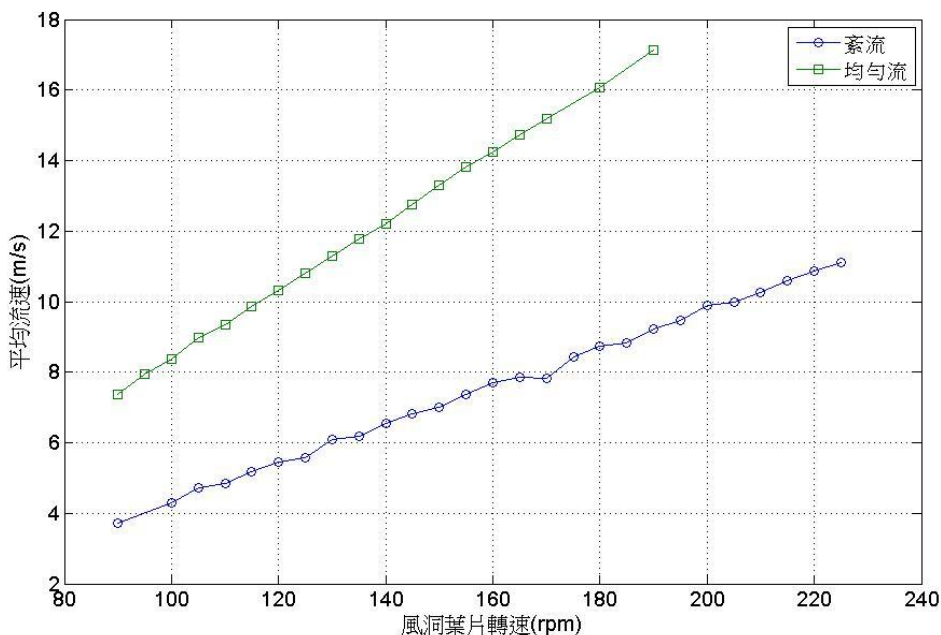


圖 6-23 第二測試段皮托管量測之平均速度

(資料來源：本研究整理)

除了紊流強度外，紊流場之另一表示方法為紊流積分尺度，可視為紊流擾動中能量最強之平均結構大小，若假設實驗中紊流場在分析上屬均勻結構，可藉由泰勒假說將軸向紊流長度積分轉換為對時間的積分，以下已風扇轉速 70rpm 之紊流場為例觀察其積分尺度隨網格距離之變化。由下圖觀察出，紊流積分尺度與紊流強度對於網格的距離有不一樣的表現，紊流積分尺度隨越下游的距離逐漸增大，距離網格處較接近為較小的積分尺度表現。在平均風速為 4.43m/s 之紊流場如下圖，其紊流積分尺度分別為：47mm、50mm、165mm，由數據可觀察出，距離網格 0.45m、1.35m 處，瞬時速度擾動較大，渦流結構較小，在下游處，擾動較為消散，渦流結構較為明顯。

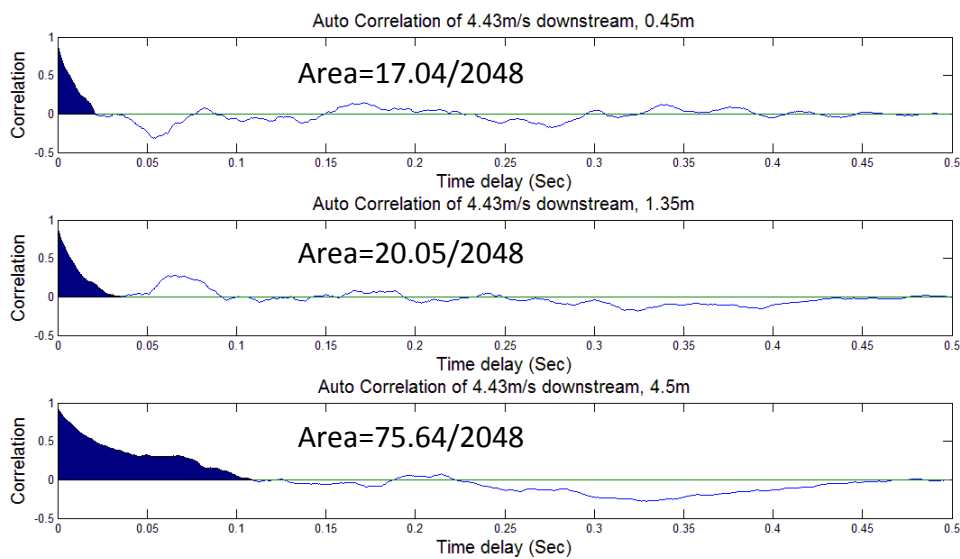


圖 6-24 紊流場擾動之自相關

(資料來源：本研究整理)

## 第五節 模型流場測試比較

流體流動可分為層流與紊流，造成不同的氣動力現象。當物體邊界層流的流況為紊流時，因紊流具有較大的動能，故能沿著物體表面運動至較長距離，才發生分離現象。分離點位於物體的後半部，因此所產生的分離區及形狀阻力亦較小。本實驗以三維圓柱與垂直式風力機比較其在網格架設前後氣動力之差異。在裝置網格的測試中，第一測試段之流場受紊流干擾，本研究在第二測試段架設一皮托管，藉此參考模型之測試中流場的平均速度。

產生紊流的格柵及第一測試區紊流強度確認後，本研究利用有限高之圓柱進行紊流場及均勻流場下氣動力相關量測，比較三種不同高寬比之三維圓柱在兩種不同流場狀況下紊流強度對升阻力係數影響。本次實驗架設於風洞第一測試區之第一迴轉盤上，迴轉盤中心距離風洞入口約為 3 公尺，圓柱模型的寬度為 150mm，座標軸定義如圖 6-25 所示，量測儀器為六力平衡儀，利用 NI 資料擷取系統進行數據擷取。測試區入口流況分為均勻流場及紊流場，實驗雷諾數分別為  $1.85 \times 10^5$  及  $1.01 \times 10^5$ ，取樣頻率為 4096HZ，取樣時間為 300 秒。表 6-2 為有限高度圓柱阻力係數文獻結果及本研究風洞測試結果，由實驗結果可以觀察出在均勻流場狀況下，阻力係數隨模型高寬比增加由 0.61 增加至 0.85，文獻中寬高比由 3 增加至 9，阻力係數也由 0.61 增加至 0.81，與文獻比較結果相近。當風洞流場為紊流場時，阻力係數為 0.62 至 0.68。因模型左右對稱，側向力係數應為零，實驗結果如表 6-3 所示，均勻流場時側向力係數稍高約為 0.0065 至 0.0082，當來流狀況改為紊流場時，側向力係數降至約為 0.002。

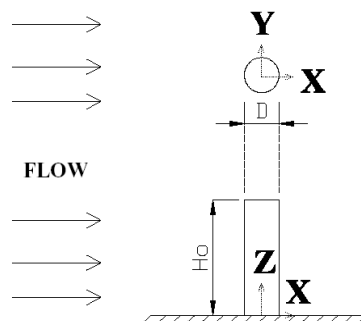


圖 6-25 有限高圓柱座標軸定義示意圖

(資料來源：本研究整理)



$$C_d = \frac{F_x}{0.5\rho V_x^2 A} \quad (6-1)$$

$$C_l = \frac{F_y}{0.5\rho V_x^2 A} \quad (6-2)$$

$C_d$ ：阻力係數， $C_l$ ：側向力係數， $\rho$ ：空氣密度， $V_x$ ：參考風速， $A$ ：模型投影面積

表 6-2 有限高度圓柱阻力係數文獻結果及本研究風洞測試結果

	Re	H <sub>0</sub> /D	Cd
Farivar (1981)[30]	7×10 <sup>4</sup>	5	0.67
Farivar (1981)[30]	7×10 <sup>4</sup>	3	0.63
Okamoto and Sunabashiri (1992)[31]	2.5×10 <sup>4</sup>	7	0.87
Sakamoto and Oiwake(1984)[32]	6×10 <sup>4</sup>	3	0.68
Taniguchi et al. (1981)[33]	0.3×10 <sup>4</sup> ~6×10 <sup>4</sup>	5	0.76
D. Sumner, et al. (2004)[34]	6×10 <sup>4</sup>	3	0.61
D. Sumner, et al. (2004)[34]	6×10 <sup>4</sup>	5	0.74
D. Sumner, et al. (2004)[34]	6×10 <sup>4</sup>	7	0.78
D. Sumner, et al. (2004)[34]	6×10 <sup>4</sup>	9	0.81
Present study (2009)	1.85×10 <sup>5</sup>	2	0.65
Present study (2009)	1.85×10 <sup>5</sup>	4	0.75
Present study (2009)	1.85×10 <sup>5</sup>	6	0.85
Present study (2009)*	1.01×10 <sup>5</sup>	2	0.62
Present study (2009)*	1.01×10 <sup>5</sup>	4	0.68

(\*代表於紊流場下實驗結果)

(資料來源：本研究整理)

表 6-3 有限高度圓柱升力係數風洞測試結果

	Re	H <sub>0</sub> /D	Cl
Present study (2009)	1.85×10 <sup>5</sup>	2	0.0075
Present study (2009)	1.85×10 <sup>5</sup>	4	0.0065
Present study (2009)	1.85×10 <sup>5</sup>	6	0.0082
Present study (2009)*	1.01×10 <sup>5</sup>	2	0.0025
Present study (2009)*	1.01×10 <sup>5</sup>	4	0.0023

(\*代表於紊流場下實驗結果)

(資料來源：本研究整理)

另外以垂直式 Giromill 風機為流場氣動力差異之比較測試，其轉速、扭力數據由扭力計與扭力傳感器擷取，將其類比訊號藉由 IOtech ACD488/8S 資料系統(數位類比轉換器)儲存至電腦。風力發電機葉片尺寸：弦長 C 為 0.09 m、半徑 R 為 0.6 m、高度 H 為 1.2 m。

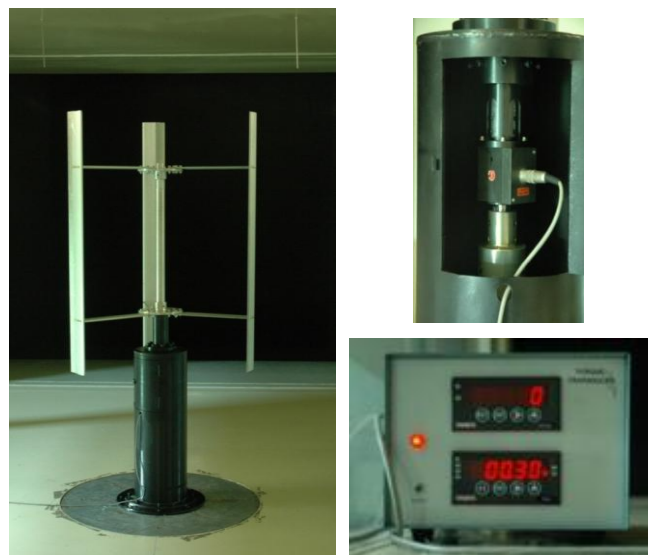


圖 6-26 垂直式 Giromill 風力機之實驗架設

(資料來源：本研究整理)

表 6-4 紊流場中垂直式風力機之轉速

風洞風扇轉速 rpm	平均速度 m/s	風機轉速 rpm
145	6.82	38
150	7.00	41
155	7.38	46
160	7.69	50
165	7.83	52
170	7.86	57
175	8.44	61
180	8.73	66
185	8.84	73
190	9.23	76
195	9.47	81
200	9.89	85
205	9.97	89
210	10.27	92
215	10.58	96
220	10.86	100
225	11.11	103

(資料來源：本研究整理)

表 6-5 均勻流場中垂直式風力機之轉速

風洞風扇轉速 rpm	平均速度 m/s	風機轉速 rpm
90	7.37	27
95	7.94	30
100	8.38	34
105	8.97	38
110	9.35	42
115	9.87	46
120	10.32	49
125	10.79	54
130	11.30	57
135	11.79	62
140	12.19	68
145	12.74	74
150	13.29	83
155	13.83	93
160	14.25	101
165	14.74	110
170	15.18	136
180	16.06	148
190	17.14	164

(資料來源：本研究整理)

若平均風速為 4.3m/s，均勻流與紊流場皆能使垂直式 Giromill 風力發電機開始轉動，但前提條件是，由靜止開始吹動的角度必須為容易啟動之迎風角，再此低風速下，兩不同流況之風力發電機轉速皆為 2-4rpm。

若起始角度為停滯區(dead band)，均勻流場風速至 15m/s 仍無法啟動(若啟動後卻可至 136rpm)。紊流場中，即使垂直式 Giromill 風力發電機為難以加速之停滯區，紊流場卻還能以些微速度通過，到了容易加速的角度，風力發電機便開始轉動。

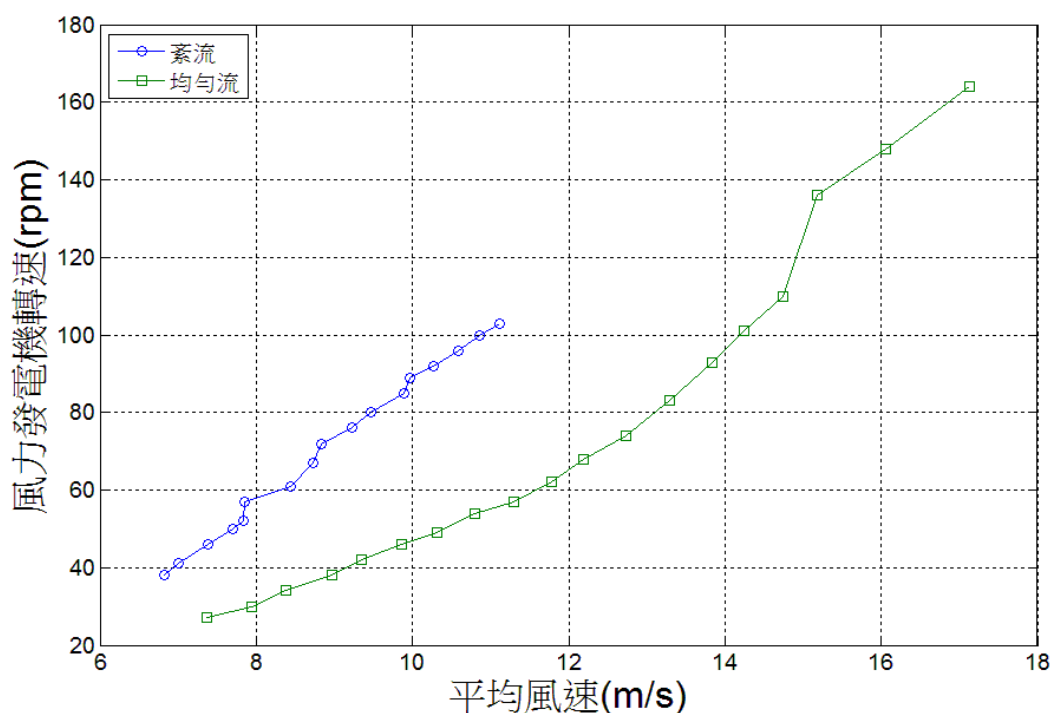


圖 6-27 不同流況中之垂直式風機轉速(RPM)

(資料來源：本研究整理)

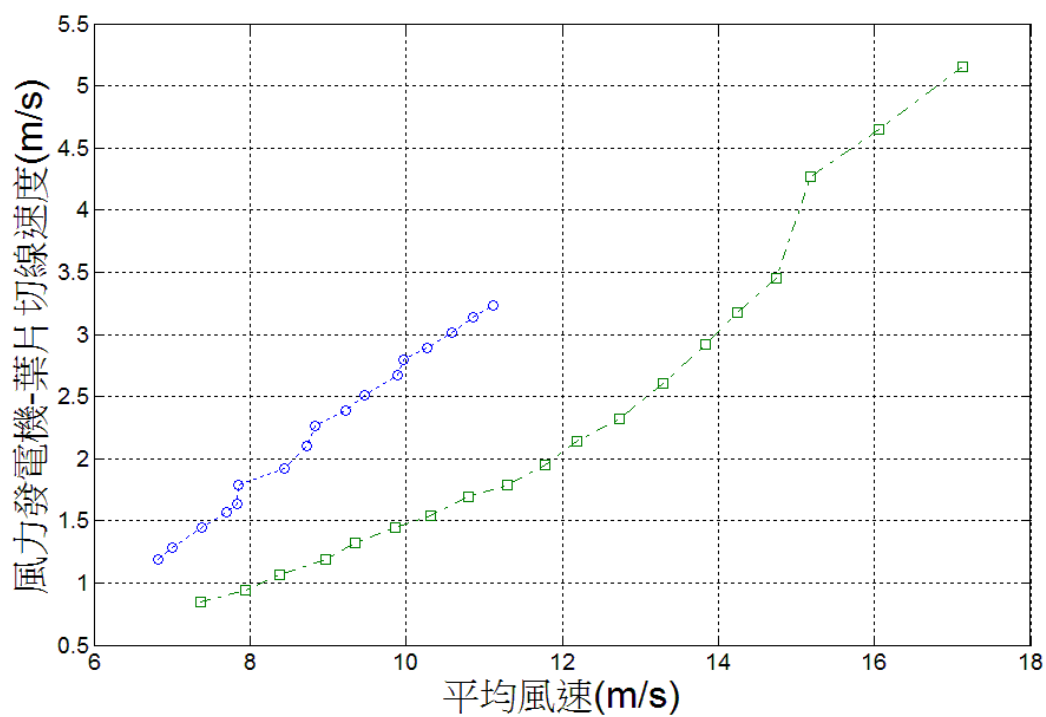


圖 6-28 不同流況中之垂直式風機轉速(切線速度)

(資料來源：本研究整理)

## 第七章、結論

實驗的規劃乃以網格產生紊流擾動，的確能使流場產生穩定之擾動的紊流場。且以兩種不同的應用模型在流場中的測試中，均勻流與紊流場中的確也有不一樣的氣動力現象，以下將依實驗結果所得列出幾項結論。

1. 網格對風洞流場造成相當大的壓力與速度損失，但也能造成相當幅度的擾動。
2. 速度擾動隨網格後方距離逐漸消散，量測最大之紊流強度為底部 22%，第一測試段所量測最大值為底部 13.8%。依不同的量測位置，已超越原目的要求 15%之紊流強度。
3. 紊流積分尺度與網格的距離成正比，較下游處積分尺度較大，本實驗所量測之積分尺度在低速 4.43m/s，網格下游 4.5m 約 160mm，在較高速之流場之擾動中，紊流積分尺度均低於 100mm。
4. 有限高圓柱量測中，均勻流場狀況下，阻力係數隨模型高寬比增加由 0.61 增加至 0.85，流場改為紊流場時，阻力係數為 0.62 至 0.68，最大值由 0.85 降至 0.68。
5. 有限高圓柱量測中，均勻流場時側向力係數約為 0.0065 至 0.0082，當來流狀況改為紊流場時，側向力係數降至約為 0.002，表示圓柱側向受力更為對稱。
6. 紊流場的擾動對垂直式 Giromill 風力機造成較多的擾動動能，使其能加速經過停滯區。相對於均勻流況下，此擾動動能對垂直式 Giromill 風力機造成更高的轉速。
7. 若垂直式 Giromill 風力機不在停滯區，均勻流與紊流皆能使其轉動，轉速約 2-4rpm，經過停滯區會微幅減速。在容易加速的角度之下，垂直式 Giromill 風力機會快速通過此區域。若垂直式風機靜止時已在停滯區，均勻流即使加速至 15m/s，因負扭力區域之關係，造成靜力平衡，無法通過此區域。但紊流場卻因速度為擾動值，具有較大動能，使其通過此停滯區。





## 參考文獻

- [1]Barlow, J.B., Rae, W.H. and Pope, A., "Low Speed Wind Tunnel Testing", 3<sup>rd</sup> John Wiley, 1999.
- [2]陳信賓, "低速低亂度閉迴路風洞之研製與測試", 國立台灣大學應用力學研究所碩士論文, 1994.
- [3]高義明, "內政部建研所環境風洞校驗及二維鈍形體空氣動力流場實驗研究", 國立成功大學碩士論文, 2005.
- [4]Cermak, J.E., "Applications of Fluid Mechanics to Wind Engineering", A Freman Scholar Lecture, Asme J. Of Fluids Engineering, Vol.97, No.1, pp.9-38, 1975.
- [5]Cermak, J.E., "Aerodynamics of Building", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.8, pp.75-106, 1976.
- [6]Marshall, R.D., "Wind Tunnel Applied to Wind Engineering in Japan", Journal Of Structural Engineering, Vol.110, No.6, pp.1203-1221, 1984.
- [7]汪群從, 黃榮鑑, "大氣邊界層風洞之規劃與設計研究", 行政院國家科學委員會研究報告, Aewt001, 中央研究院物理研究所, 1983.
- [8]Cermak, J.E., "Wind-Tunnel Development and Trends in Applications to Civil Engineering", Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, Vol.91, pp.355-370, 2003.
- [9]中央氣象局全球資訊網, "蒲福風級(Beaufort Scale)".
- [10]苗君易, "流體力學知多少", 國立成功大學出版中心, 2003.
- [11]楊啟昌, "延長平板對鈍形體所產生渦流溢放之影響", 國立成功大學碩士論文, 1992.
- [12]Reynolds, O., "An Experimental Investigation of The Circumstances Which Determine Whether The Motion Of Water In Parallel Channels Shall Be Direct Or Sinuous And Of The Law Of Resistance

In Parallel Channels” Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol.174,pp.935-982,1883.

- [13]苗君易,“紊流學講義”,國立成功大學航太系,2007.
- [14]Livesey, J. L. and Turner, J. T. “The Generation of Symmetrical Duct Velocity Profiles Of High Uniform Shear”, Journal Of Fluid Mechanics. Vol.20, pp.201-208, 1964.
- [15]Miau, J. J. and Chen, M.H., “Flow Structures Behind a Vertically Oscillating Fence Immersed in a Flat-Plate Turbulent Boundary Layer”, Experiments In Fluids, Vol.11, pp.118-124, 1991.
- [16]Miau, J.J., Yang, C.C., Chou, J.H., and Lee, K.R., “A T-Shaped Vortex Shedder For A Vortex Flowmeter”, J. Flow Meas. And Inst., Vol.4, No.4, pp.259-267, 1993.
- [17]曾雅祺,“紊流場中鈍形體渦流溢放之三維非定常擾動行為”,國立成功大學碩士論文,2007.
- [18]Hunt, J.C.R., “A Theory of Turbulent Flow Round Two-Dimensional Bluff Bodies”, J. Fluid Mech., Vol.61, Pt.4, pp.625-706, 1973.
- [19]Roshko, A., “On Density Effects And Large Structure In Turbulent Mixing Layers”, Journal Of Fluid Mechanics, Vol.64, pp.775-816,1974.
- [20]Bearman, P.W. and Morel, T., “Effect of Free Stream Turbulence on the Flow Around Bluff Bodies”, Prog. Aerospace Sci., Vol.20, pp.97-123, 1983.
- [21]Owen, P.R. and Zienkiewicz, H.K., “The Production of Uniform Shear Flow in A Wind Tunnel”, J. Fluid Mech. Vol.2, pp.521-31, 1957.
- [22]Baines, W.D. and Peterson, E.G., “An Investigation Of Flow Through Screens”, Trans. ASME, Vol73, pp.467-80, 1951.
- [23]Laws, E.M. and Livesey, J.L., “Flow Through Screens”, Ann. Rev. Fluid Mech. Vol.10,pp.247-266, 1978.
- [24]Wieghardt, K.E.G., “The Resistance to Airflow of wire Gauzes”, Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol.57, pp.141, 1953.

- [25]Tennekes, H., and Lumley, J. L., "A First Course In Turbulence", Mit Press, pp.273, 1994.
- [26]Comte, G.and Corrsin, S., "Simple Eulerian Time Correlation Of Full and Narrow-Band Velocity Signals In Grid-Generated Isotropic Turbulence", J. Fluid Mech., Vol. 48, pp.273-337, 1971.
- [27]Okajima, A., "Strouhal Numbers Of Rectangular Cylinders", Journal Of Fluid Mechanics Digital Archive, Vol.123, pp.379-398, 1982.
- [28]Harder, A.D., "Experimental Characterization Of Turbulent Flow Around Cylinder Arrays", Afit/Gae/Eny/07-M12, 2007.
- [29]Wolochuk, M.C., Plesniak, M.W. and Braun J.E., "The Effects Of Turbulence And Unsteadiness On Vortex Shedding From Sharp-Edged Bluff Bodies", Transactions Of The Asme, Vol. 118, pp.18-25, 1996.
- [30]Farivar, D., "Turbulent Uniform flow around cylinders of finite length", AIAA, Vol.19, pp.275-281, 1981.
- [31]Okamoto, S. and Sunabashiri, Y., "Vortex shedding from a circular cylinder of finite length placed on a ground plane", J. Fluid Eng., Vol.114, pp. 512-521, 1992.
- [32]Sakamoto, H. and Arie, M., "Vortex shedding from a rectangular prism and circular cylinder placed vertically in a boundary layer", J. Fluid Mech, Vol.126,pp. 147-165, 1983.
- [33]Taniguchi, S., Sakmoto, H. and Arie M., "Flow around circular cylinders of finite heigh placed vertically in turbulence boundary layers" JASME. Vol. 24, pp.37-44, 1981.
- [34] Sumner, D., Heseltine, J.L. and Dansereau, O.J.P., "Wake structure of a finite circular cylinder of small aspect ratio" Experiments in Fluids, Vol.3, pp.720-730, 2004.



## 附錄



## 附錄-期末審查意見回覆表

本所 98 年度委託研究計畫「構造物耐風設計簡易分析法之研擬」及協同研究計畫「建築風洞紊流場能力建立及應用」等二案期末審查會議紀錄

一、時間：98 年 11 月 19 日(星期四) 上午 9 時 30 分

二、地點：本所簡報室

三、主席：林組長建宏

記錄：劉文欽

委員提問	研究團隊之回覆
<p><b>中華民國結構工程技師公會全國聯合會陳技師冠雄</b></p> <p>1. 可否考慮風力機葉片造型之改變，讓風力機更容易啟動。</p>	<p>1. 葉片絕對影響風機之啟動風速，本研究將風機作為紊流場與均勻流場之比較測試用，未來將進行葉片設計的探討。</p>
<p><b>蔡教授益超</b></p> <p>1. 增加紊流強度可使風機容易起動，但整個風機所產生的電能可能更小。(可能是風速更小)</p> <p>2. 一般風機排成一排，後面風機因高紊流所能產出的風能一般可能降低 30%，而此種紊流與用格柵作出的紊流是否相似？</p>	<p>1. 建構本紊流之目的為模擬自然界風場的擾動，若風速因網格造成大幅度之速度差與壓力差，將加快風洞葉片轉速以與原風速相符，發電量將建議為未來之研究繼續探討。</p> <p>2. 格柵產生的紊流目的在模擬真實情況，而真實風力機效能之衰減在於前排風力機之遮蔽效應，而非紊流影響。</p>
<p><b>蕭教授葆義</b></p> <p>1. 報告內容，已達到預期成果。</p> <p>2. 報告提及國內相關風洞設備，但表 2-1 疏漏海洋大學，表中相關資料如下，應補充在修正版之報告。</p> <p>3. 格柵產生之紊流強度在橫向、垂向之變化範圍，建議在修正版之報告納入。</p>	<p>1. 以網格產生紊流的方法皆驗證可行，本實驗也達到紊流產生之目的。</p> <p>2. 已將其海洋大學風洞資料數據補上。</p> <p>3. 期末報告後所進行之實驗為三維圓柱的量測，橫向與垂直向之擾動將建議未來之研究繼續進行。</p>
<p><b>本所黎國防訓儲研究員益肇</b></p> <p>1. P.28 中，熱線量測風速代號 W 與特徵長度代號 W 相同，容易造成混淆。</p> <p>2. 實驗中定義之參考風速為自由流流場，文中並未交代確切位置，煩請說明之。</p> <p>3. 報告書中提及要針對 A、B、C 以及 A' 點等位置進行量測，但討論中僅見 A 點位置之結果，請於成果報告中補齊。</p>	<p>1. 後部分的圖示皆盡量以中英文全名寫出其所代表的意思，減少使用代號，以免造成誤解。</p> <p>2. 補上之說明在第六章第五節，主要說明量測的位置。</p> <p>3. 補上之數據為圖 6-18，A' 點之紊流擾動值。</p>
<p><b>劉約聘助理研究員文欽</b></p> <p>1. 期末報告格式與本所規定不符，請於正式報告中改正。</p> <p>2. 本研究尚有 3D 圓柱氣動力模型試驗未做，請儘速安排時間進行。</p>	<p>1. 本正式報告將參照範例訂定格式。</p> <p>2. 3D 圓柱氣動力模型之數據，在第六章第五節已補上。</p>



## 附圖



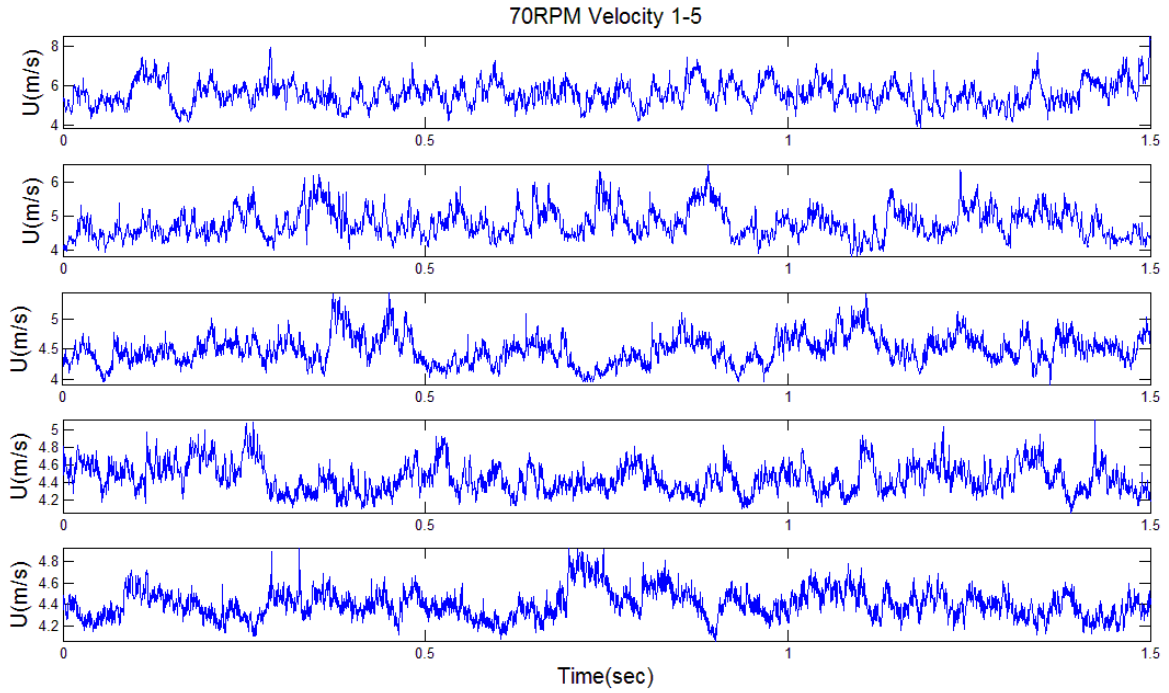


圖 1 Y=1.5m,Z=0m 前後端速度擾動(1)

(資料來源：本研究整理)

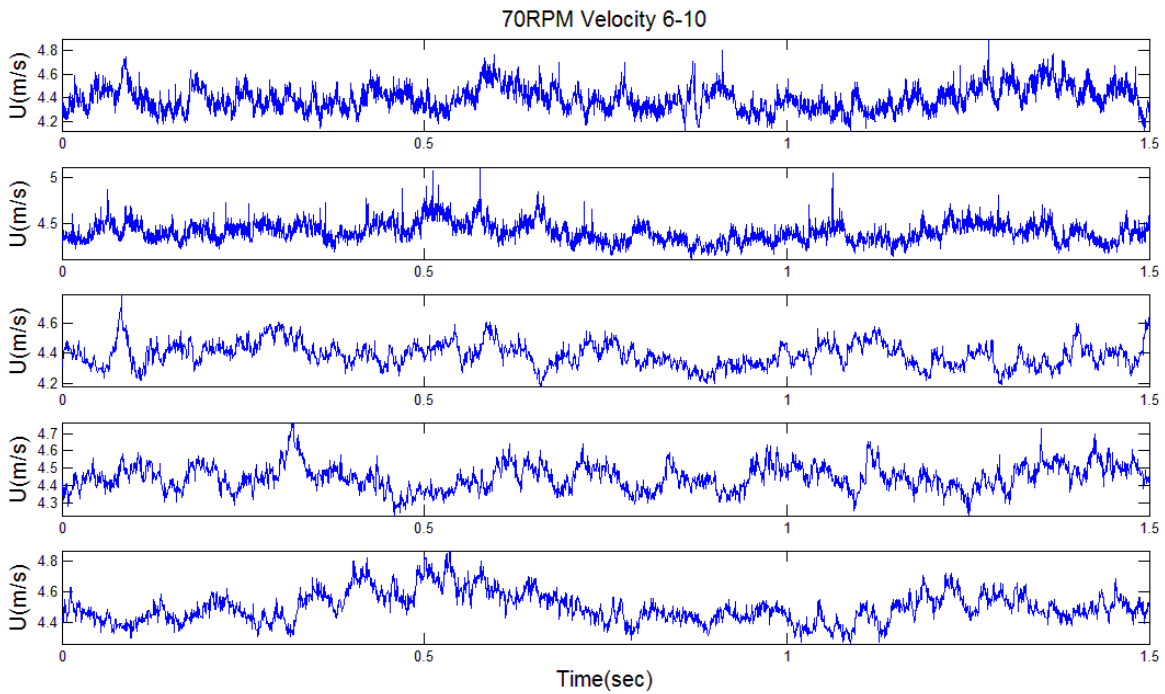


圖 2 Y=1.5m,Z=0m 前後端速度擾動(2)

(資料來源：本研究整理)

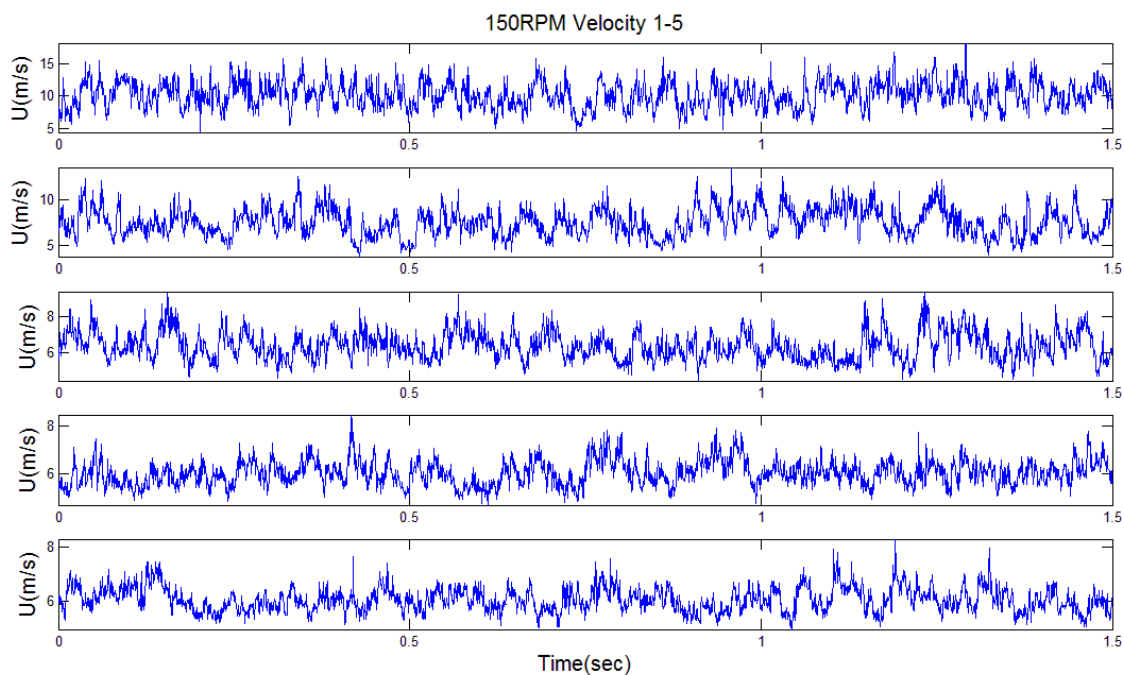


圖 3  $Y=1.5m, Z=0m$  前後端速度擾動(3)

(資料來源：本研究整理)

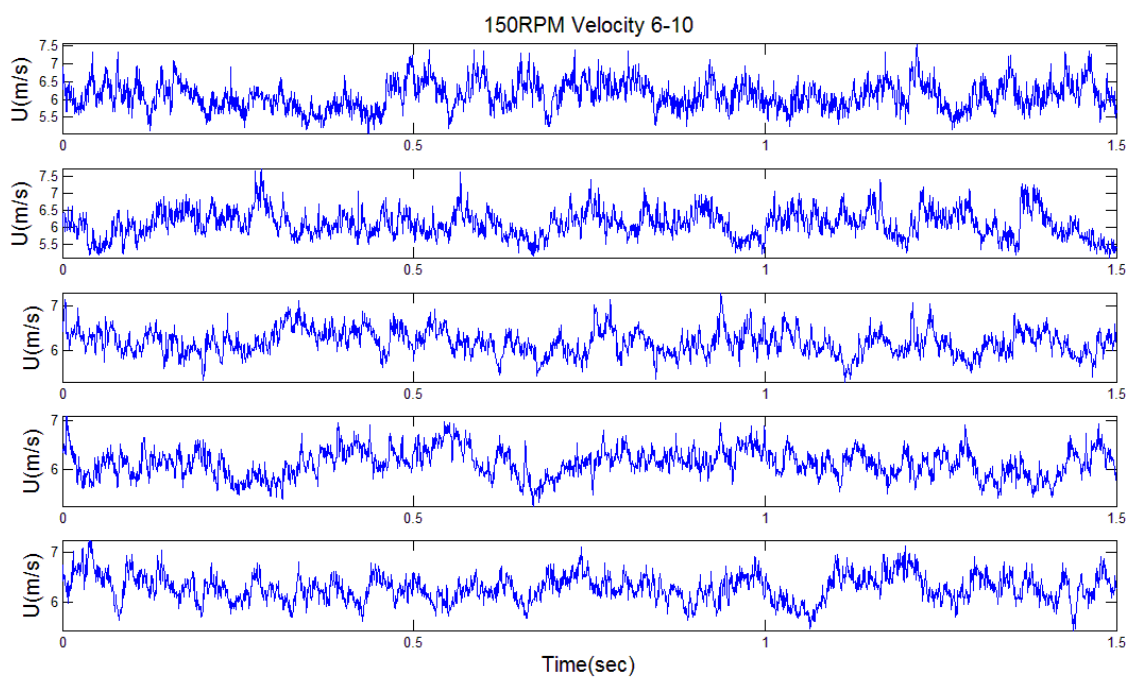


圖 4  $Y=1.5m, Z=0m$  前後端速度擾動(4)

(資料來源：本研究整理)

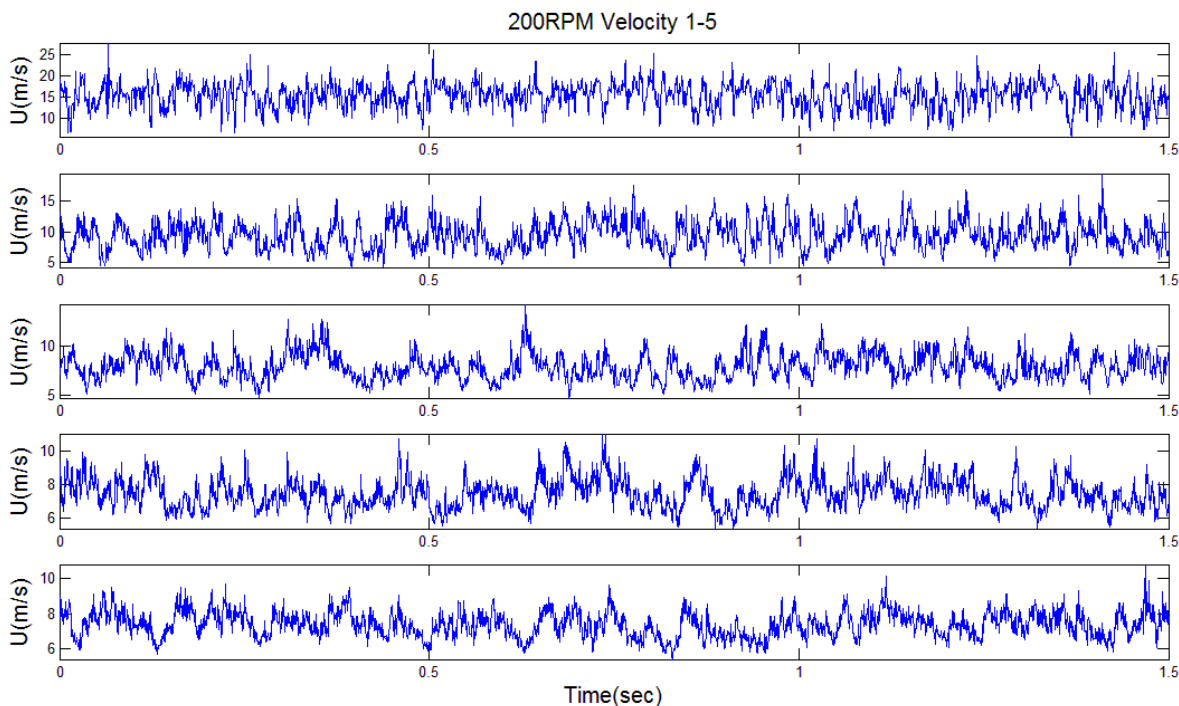


圖 5  $Y=1.5m, Z=0m$  前後端速度擾動(5)

(資料來源：本研究整理)

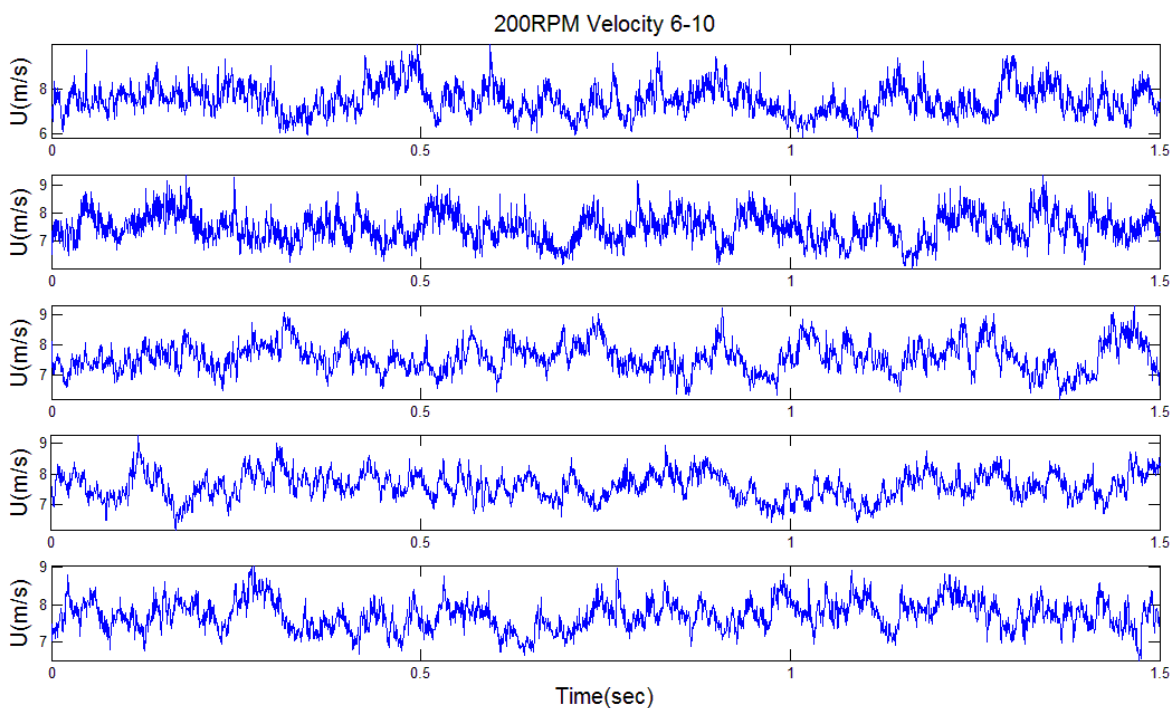


圖 6  $Y=1.5m, Z=0m$  前後端速度擾動(6)

(資料來源：本研究整理)

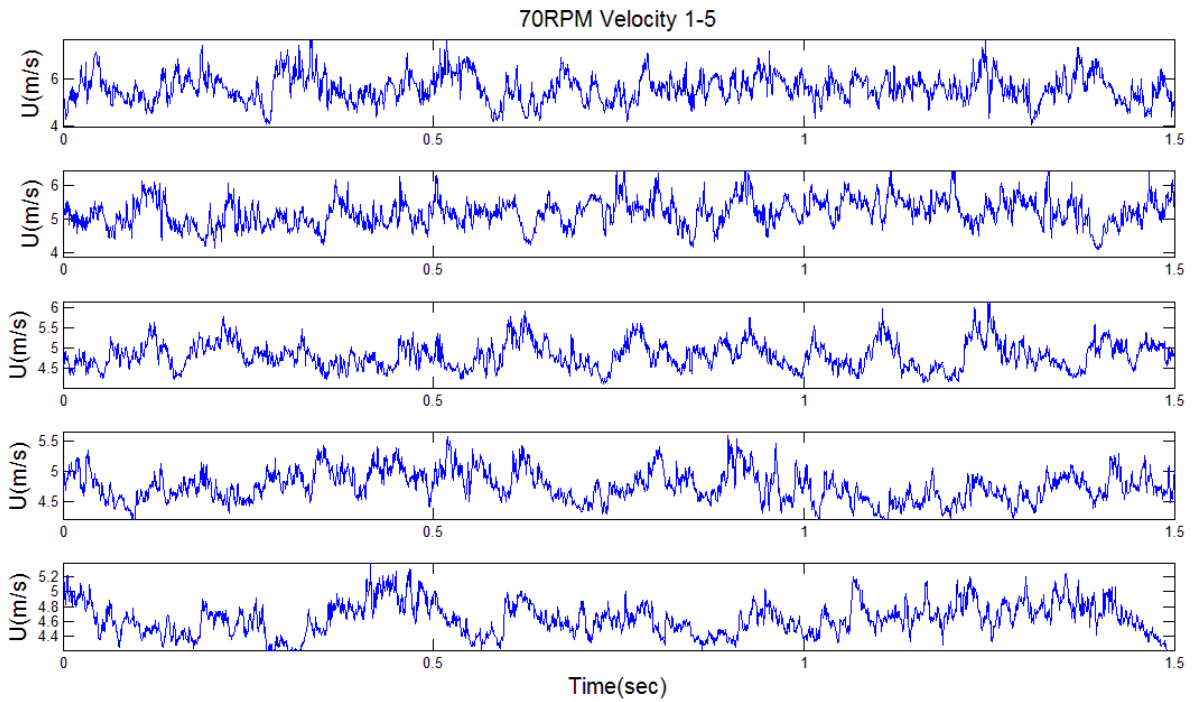


圖 7 Y=0.105m,Z=0m 前後端速度擾動(1)

(資料來源：本研究整理)

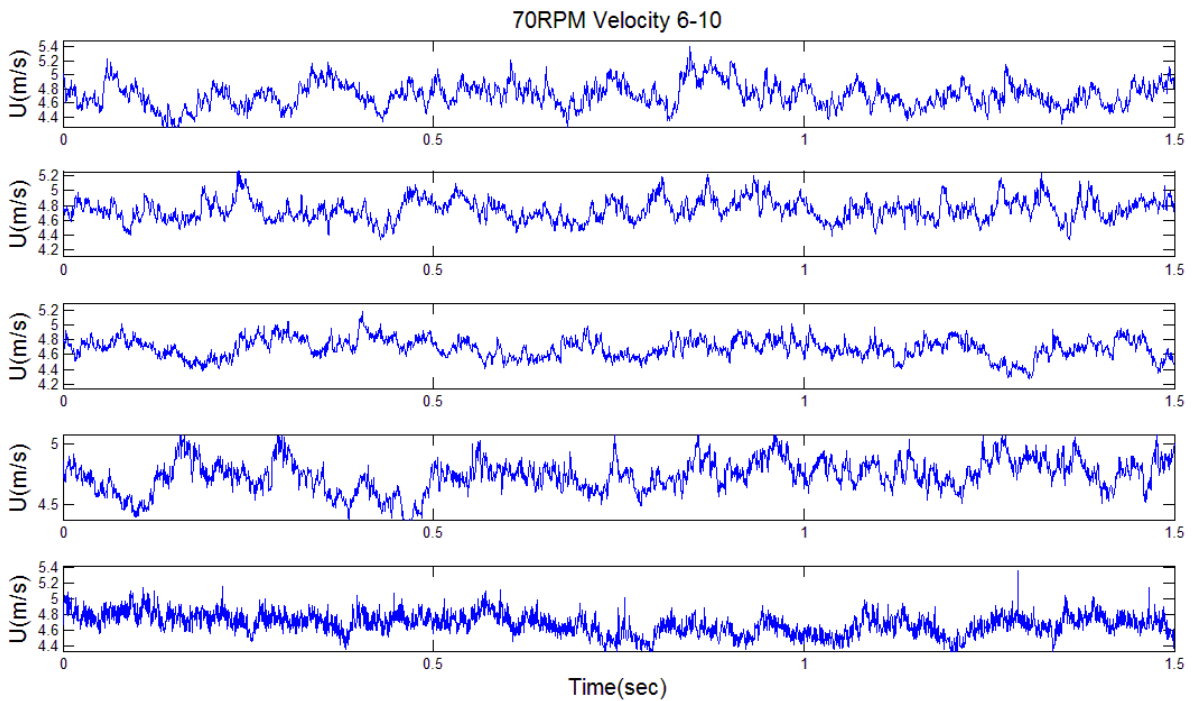


圖 8 Y=0.105m,Z=0m 前後端速度擾動(2)

(資料來源：本研究整理)

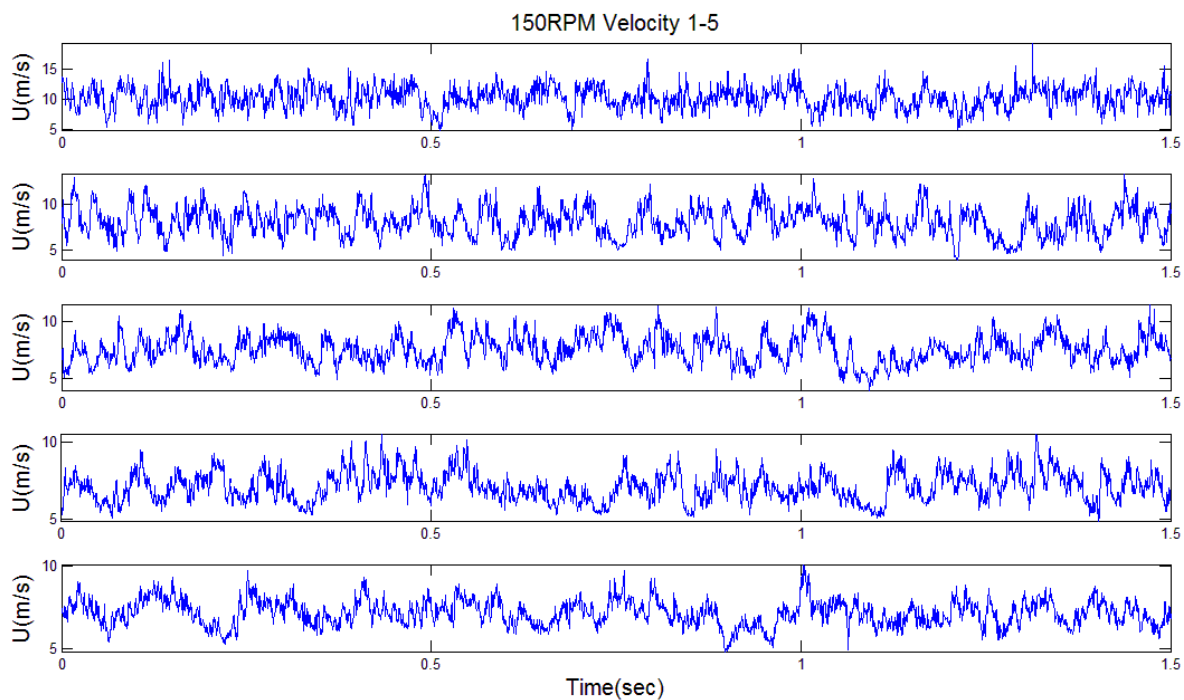


圖 9 Y=0.105m,Z=0m 前後端速度擾動(3)

(資料來源：本研究整理)

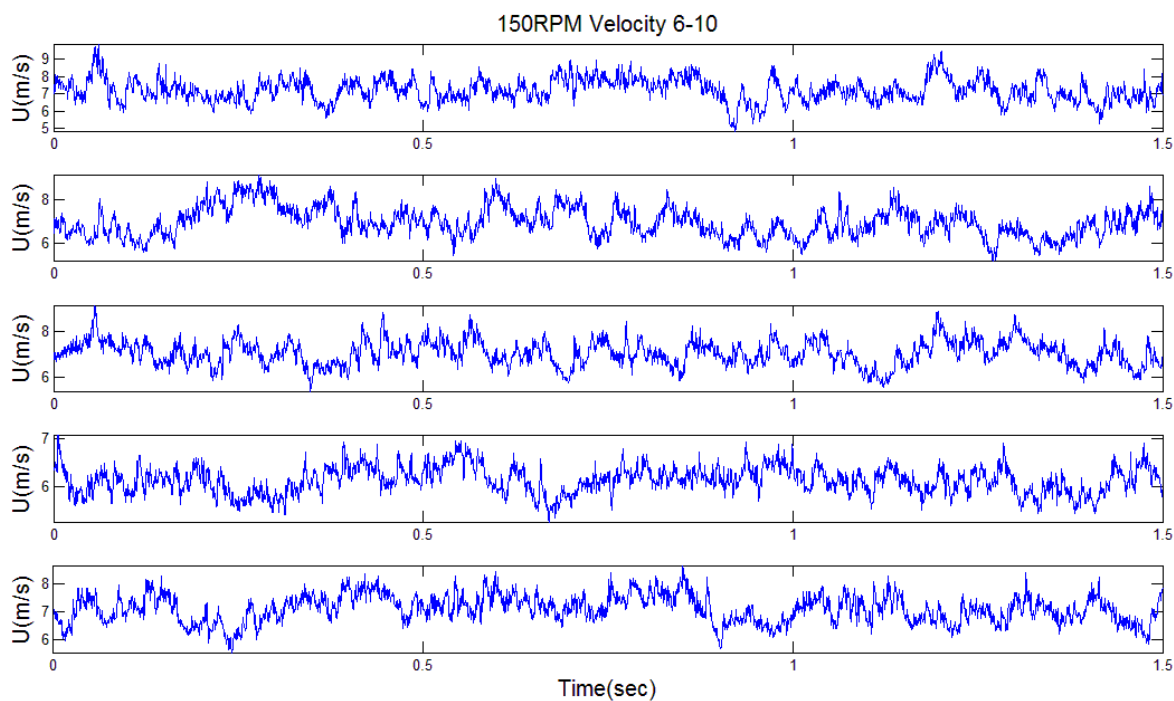


圖 10 Y=0.105m,Z=0m 前後端速度擾動(4)

(資料來源：本研究整理)

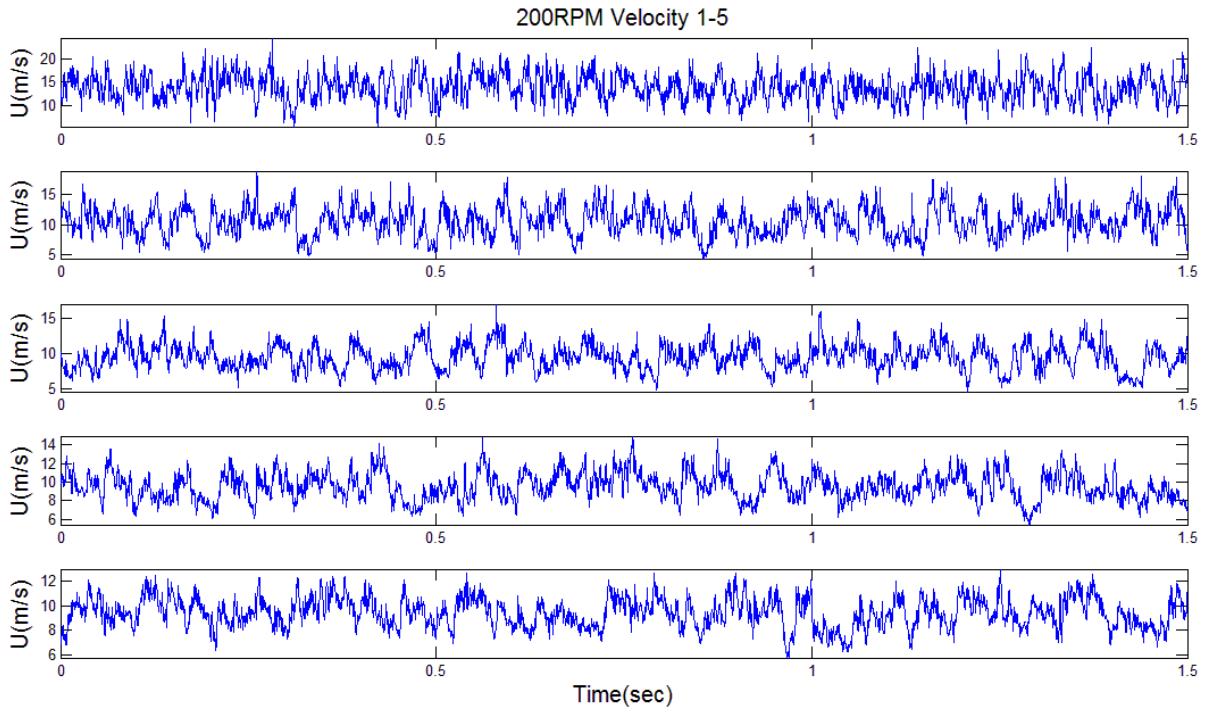


圖 11  $Y=0.105m, Z=0m$  前後端速度擾動(5)

(資料來源：本研究整理)

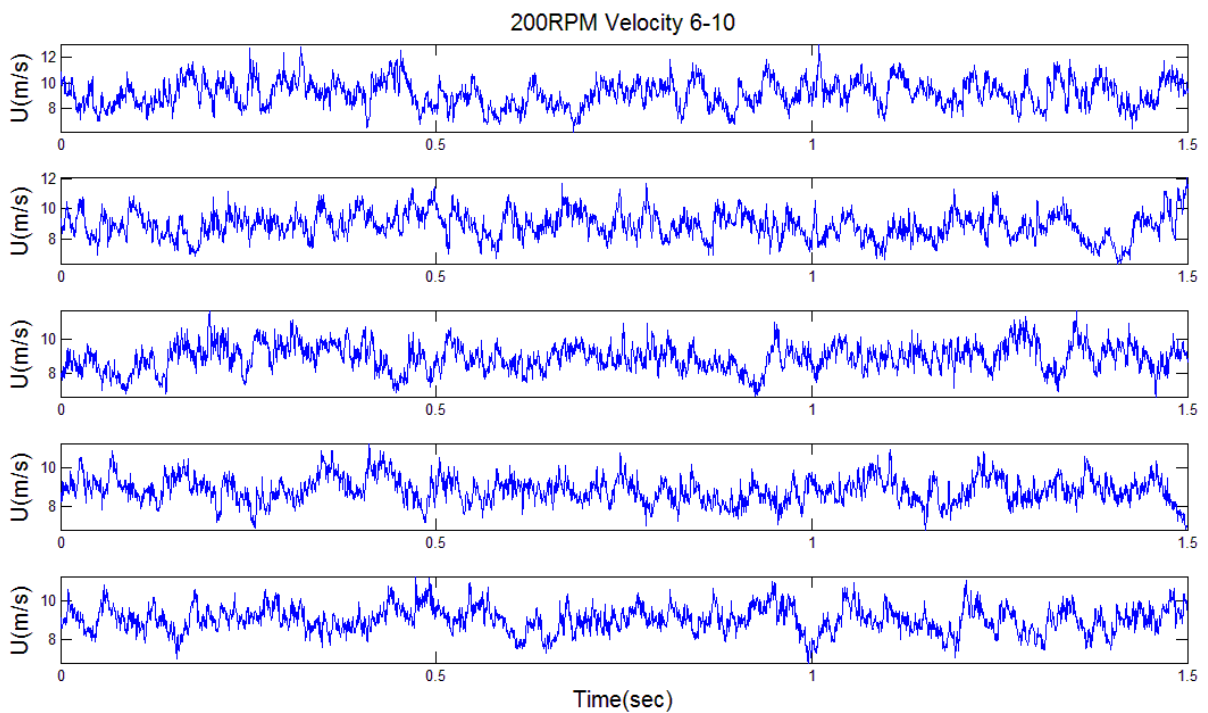


圖 12  $Y=0.105m, Z=0m$  前後端速度擾動(6)

(資料來源：本研究整理)



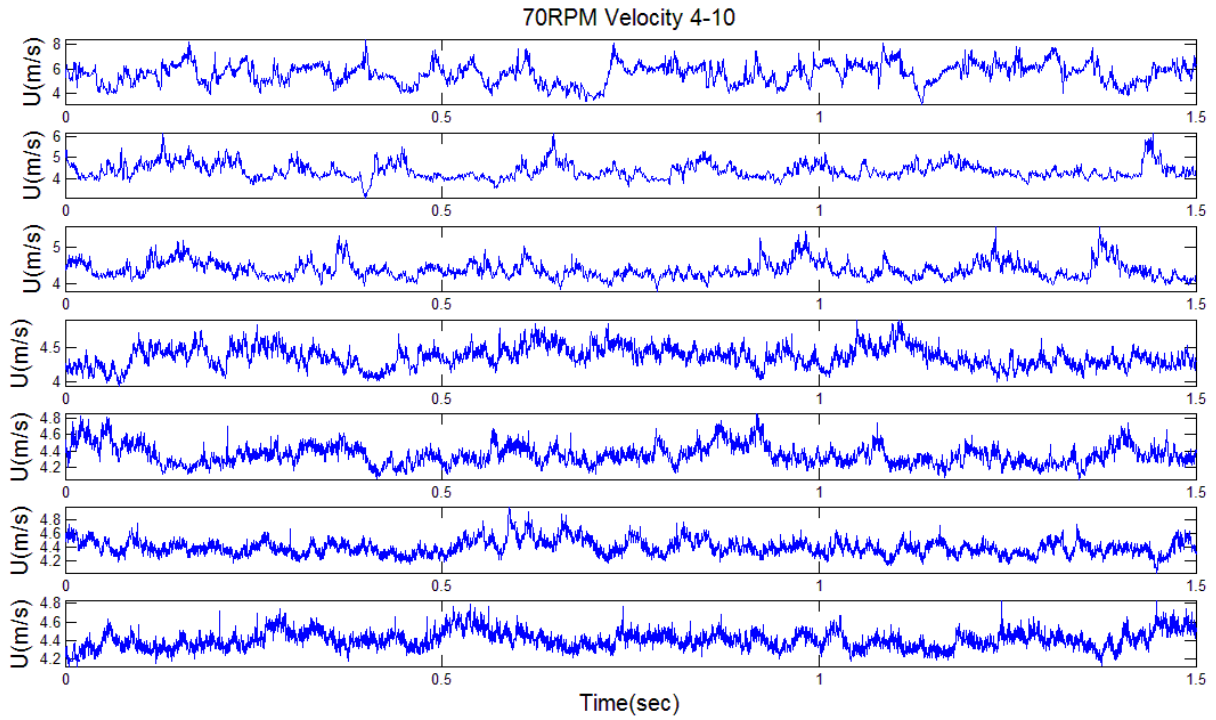


圖 13 Y=1.5m,Z=0.5m 前後端速度擾動(1)

(資料來源：本研究整理)

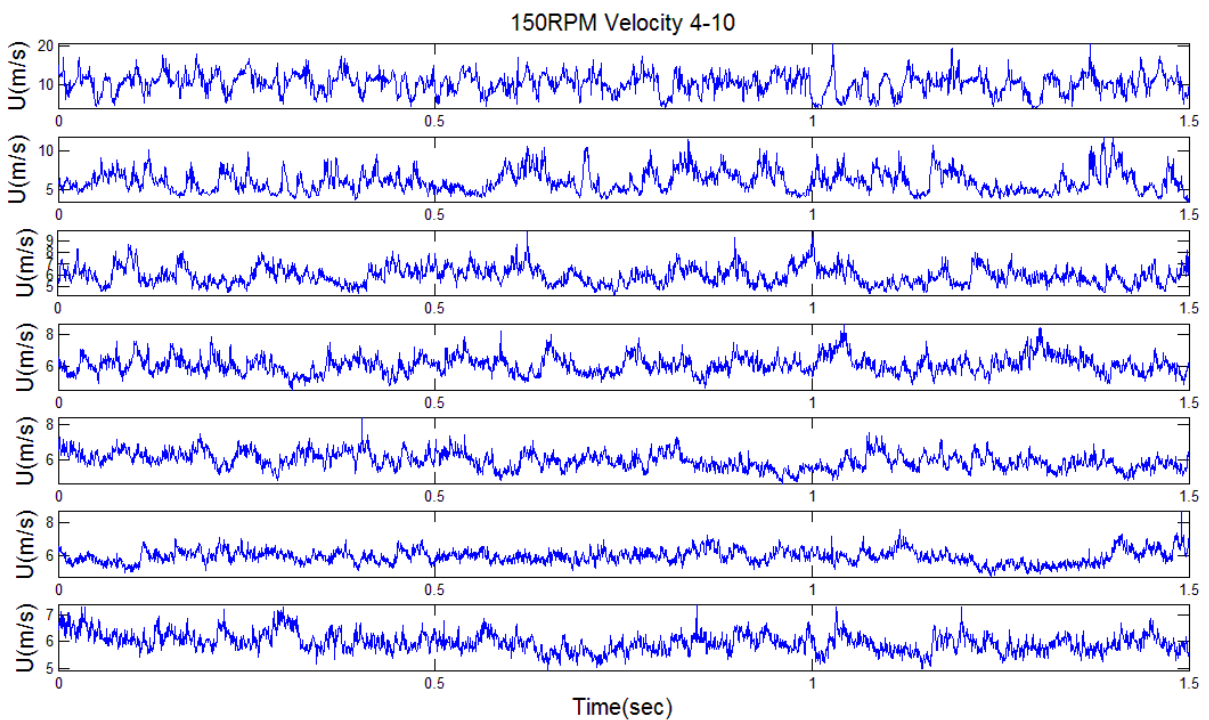


圖 14 Y=1.5m,Z=0.5m 前後端速度擾動(2)

(資料來源：本研究整理)

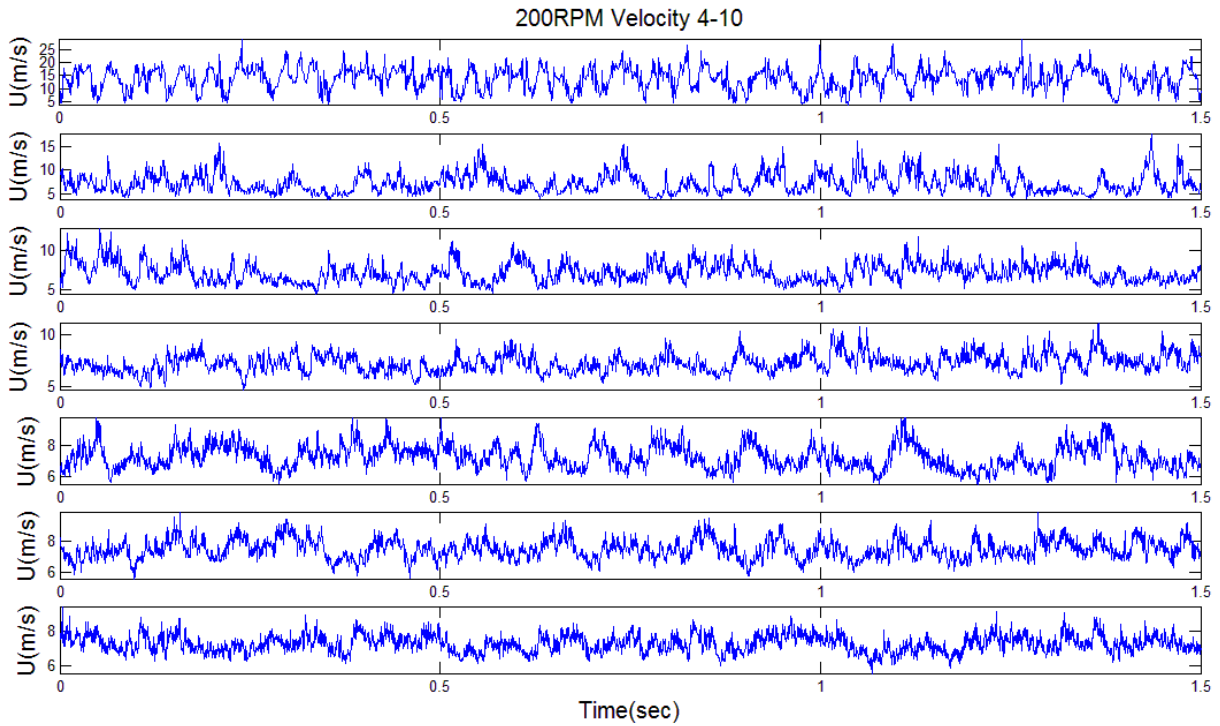


圖 15 Y=1.5m,Z=0.5m 前後端速度擾動(3)

(資料來源：本研究整理)

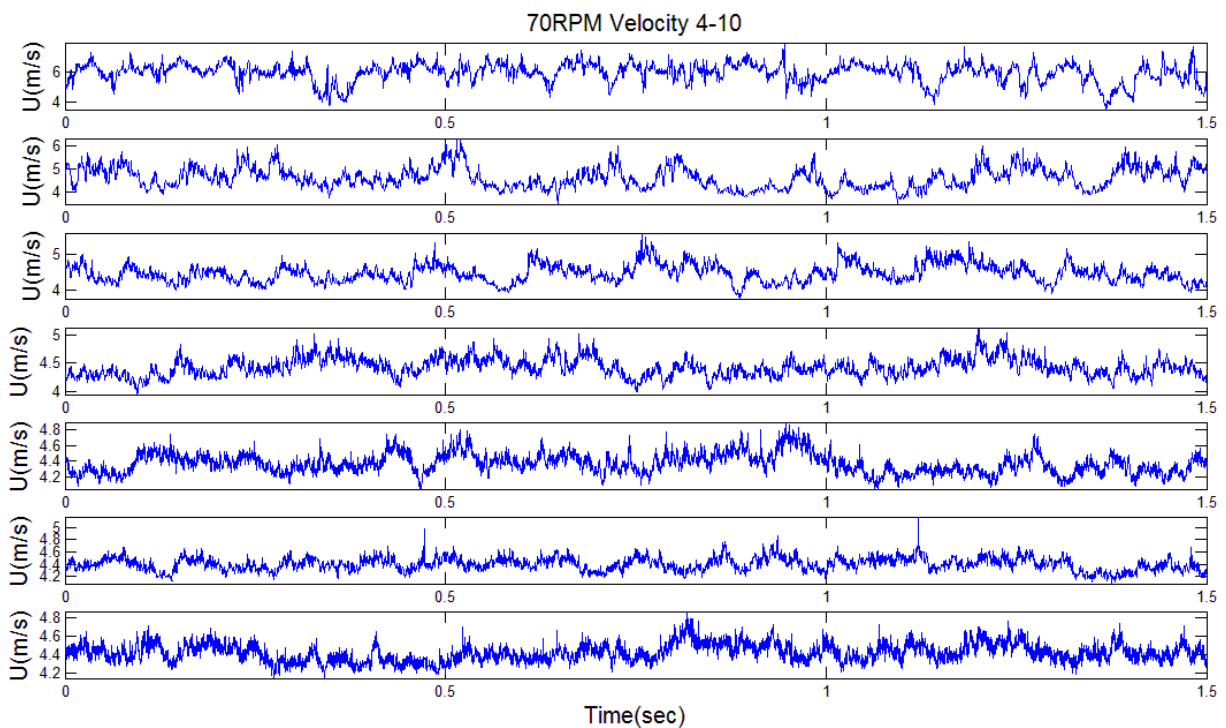


圖 16 Y=1.5m,Z=-0.5m 前後端速度擾動(4)

(資料來源：本研究整理)

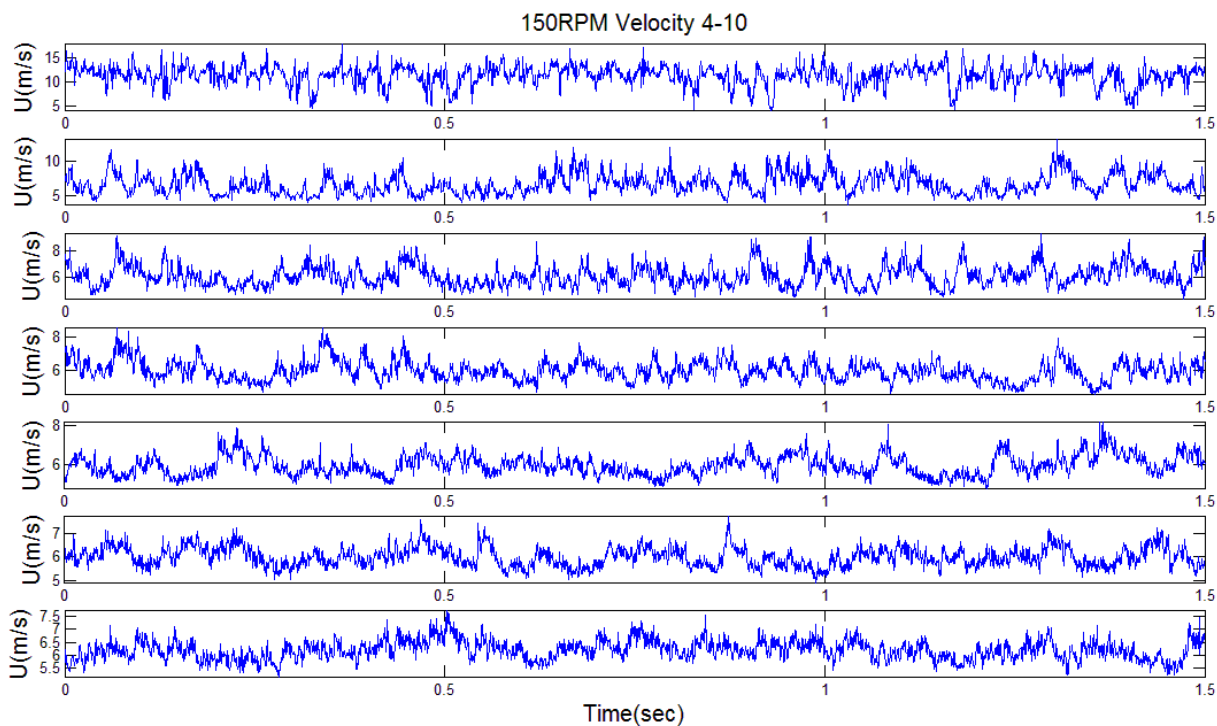


圖 17  $Y=1.5m, Z=-0.5m$  前後端速度擾動(5)

(資料來源：本研究整理)

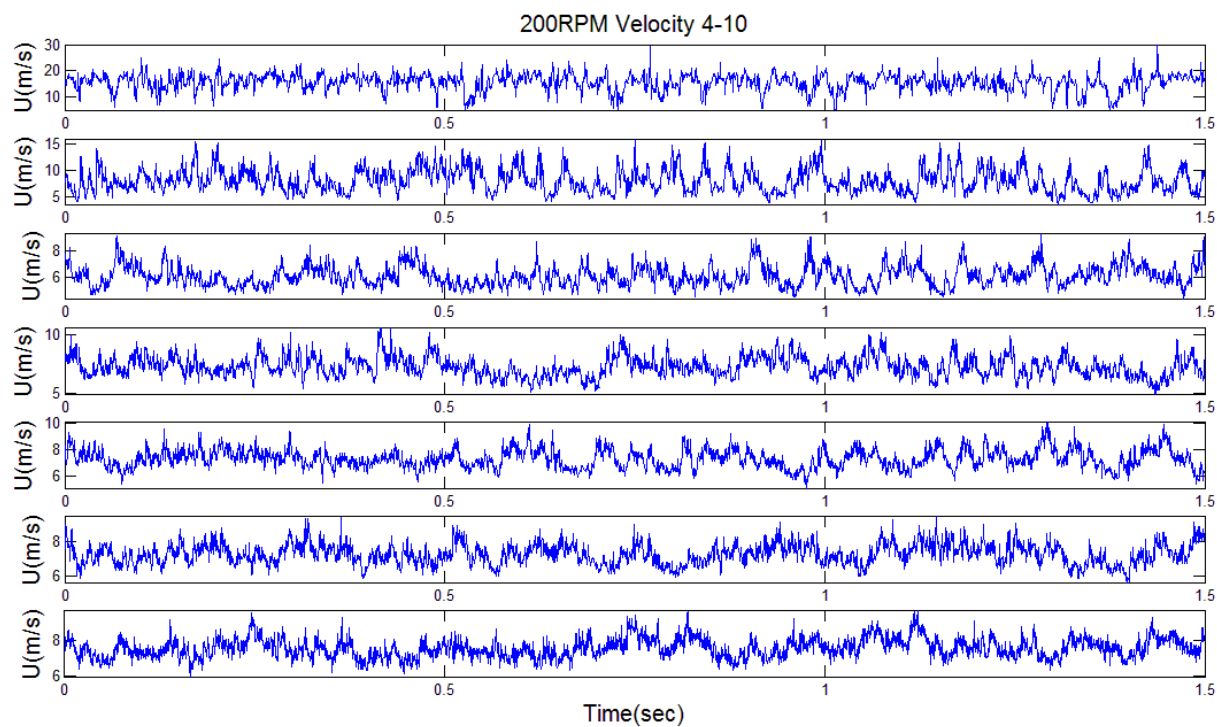


圖 18  $Y=1.5m, Z=-0.5m$  前後端速度擾動(6)

(資料來源：本研究整理)

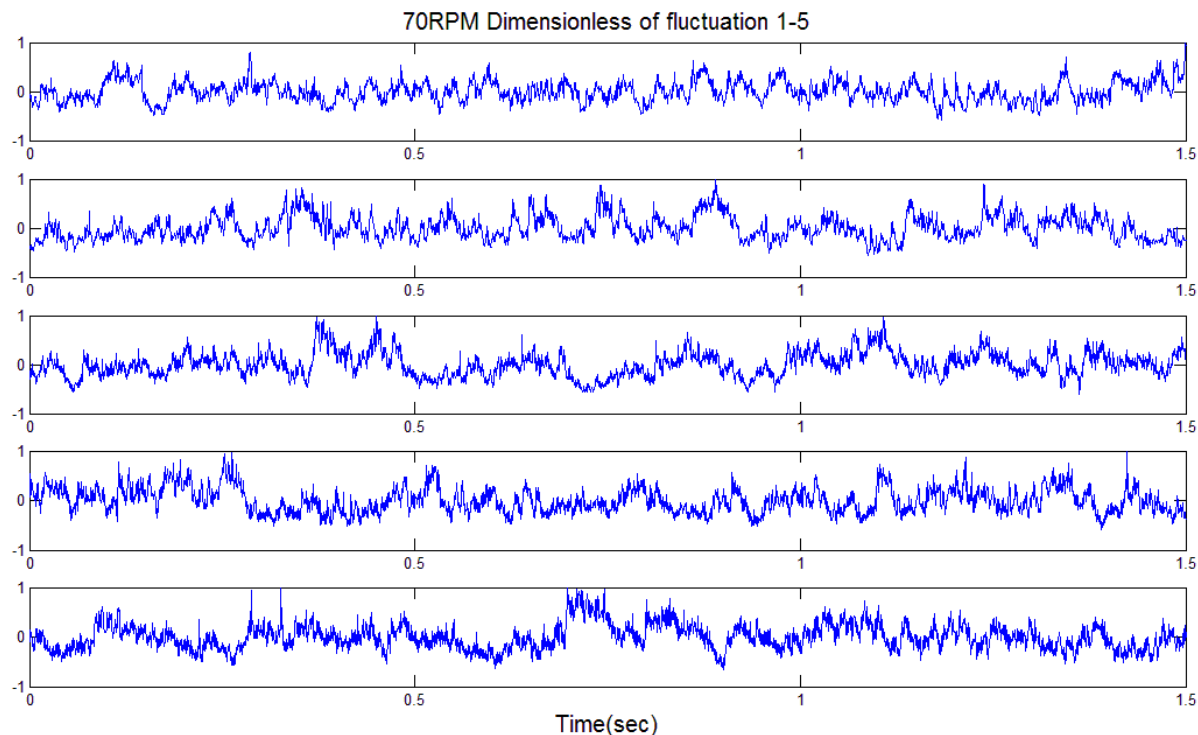


圖 19 Y=1.5m,Z=0m 無因次擾動(1)

(資料來源：本研究整理)

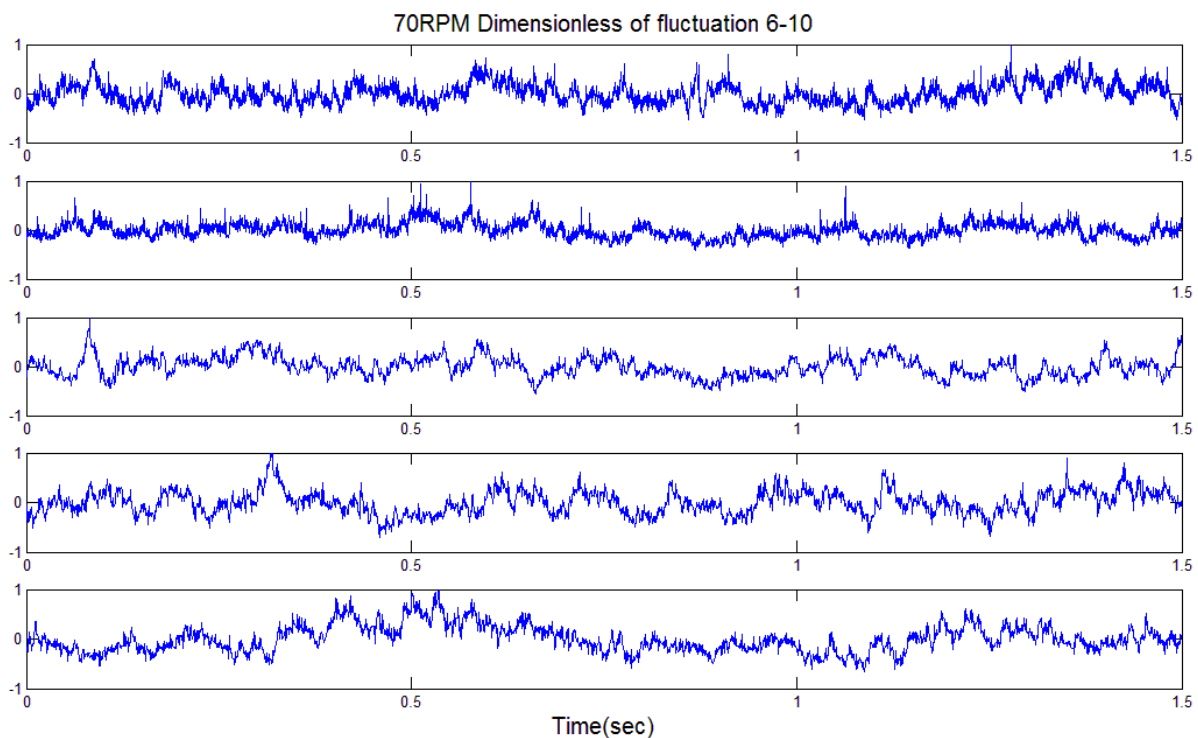


圖 20 Y=1.5m,Z=0m 無因次擾動(2)

(資料來源：本研究整理)

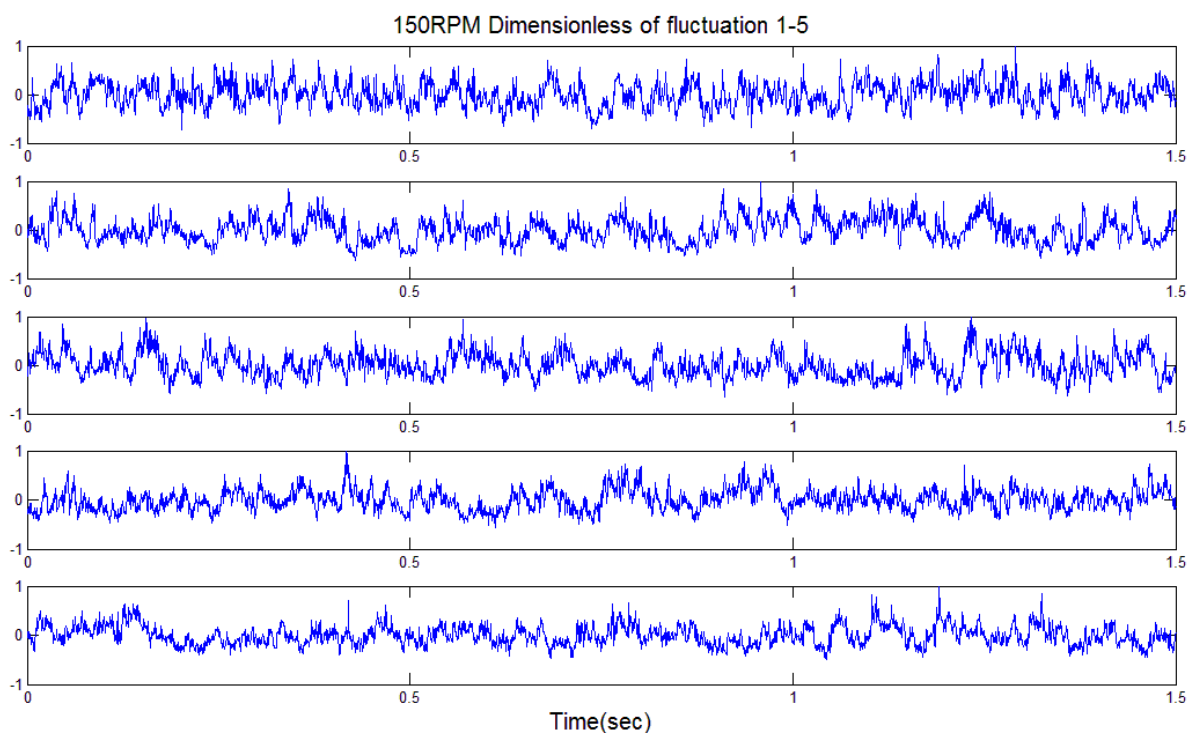


圖 21 Y=1.5m,Z=0m 無因次擾動(3)

(資料來源：本研究整理)

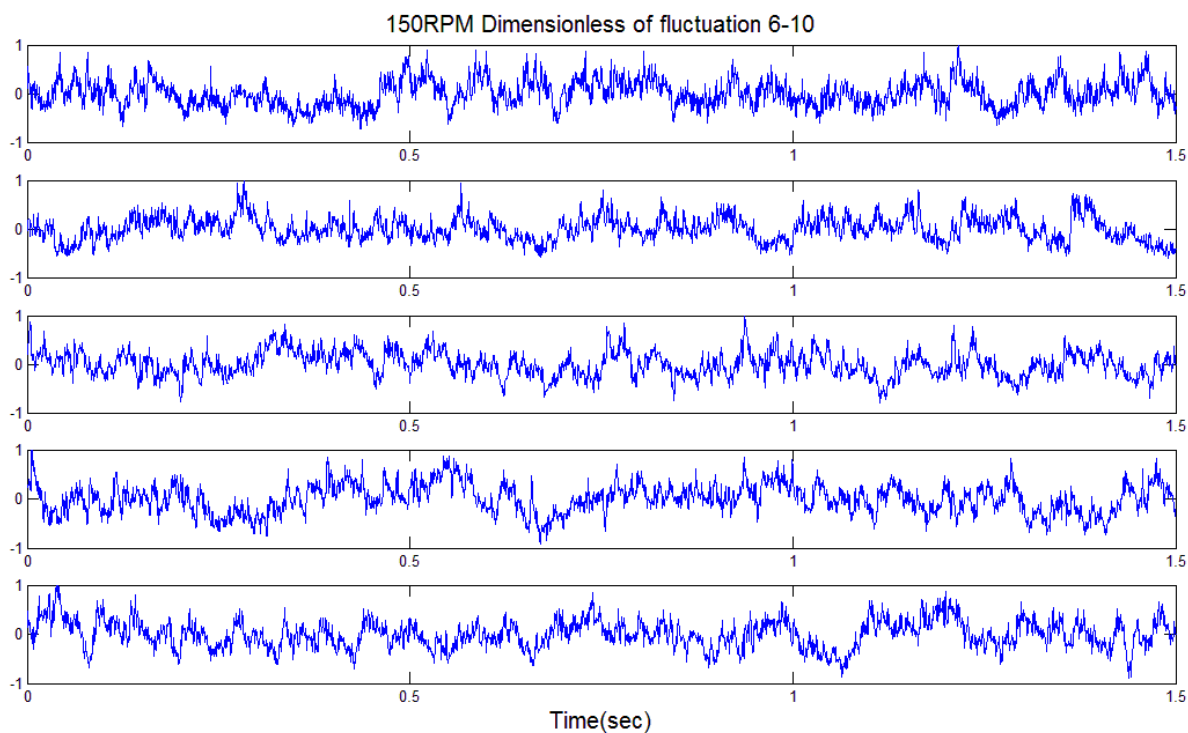


圖 22 Y=1.5m,Z=0m 無因次擾動(4)

(資料來源：本研究整理)

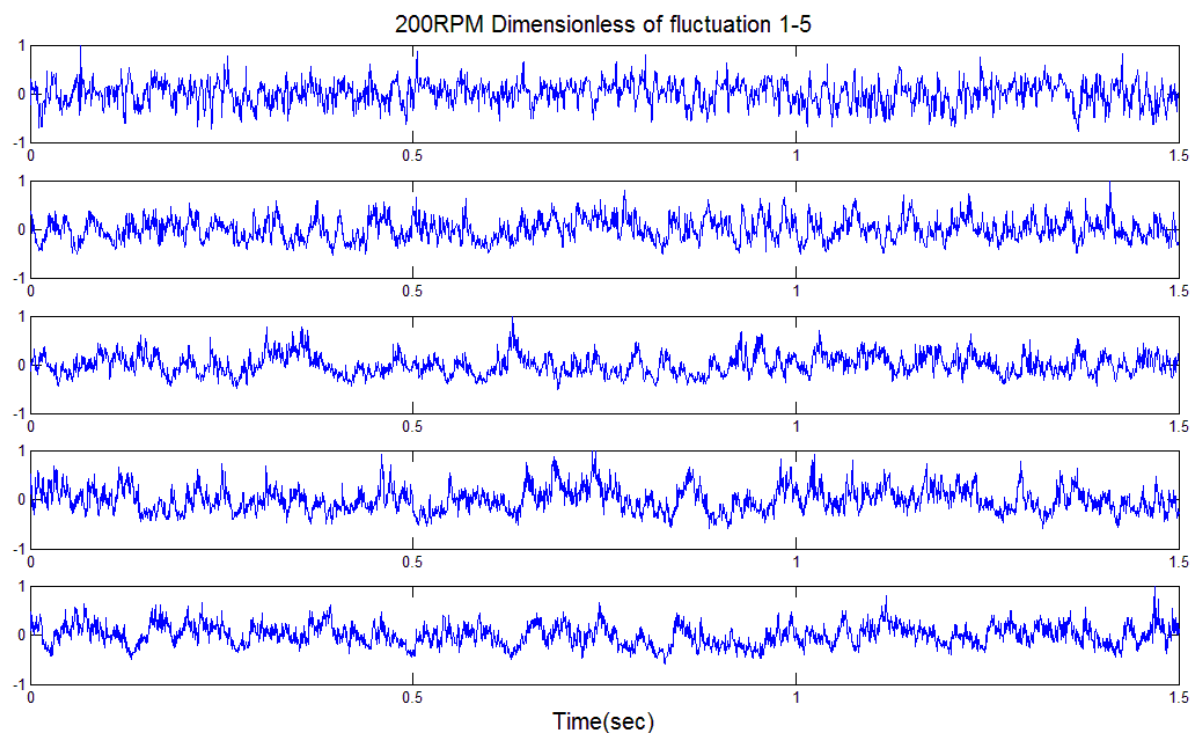


圖 23 Y=1.5m,Z=0m 無因次擾動(5)

(資料來源：本研究整理)

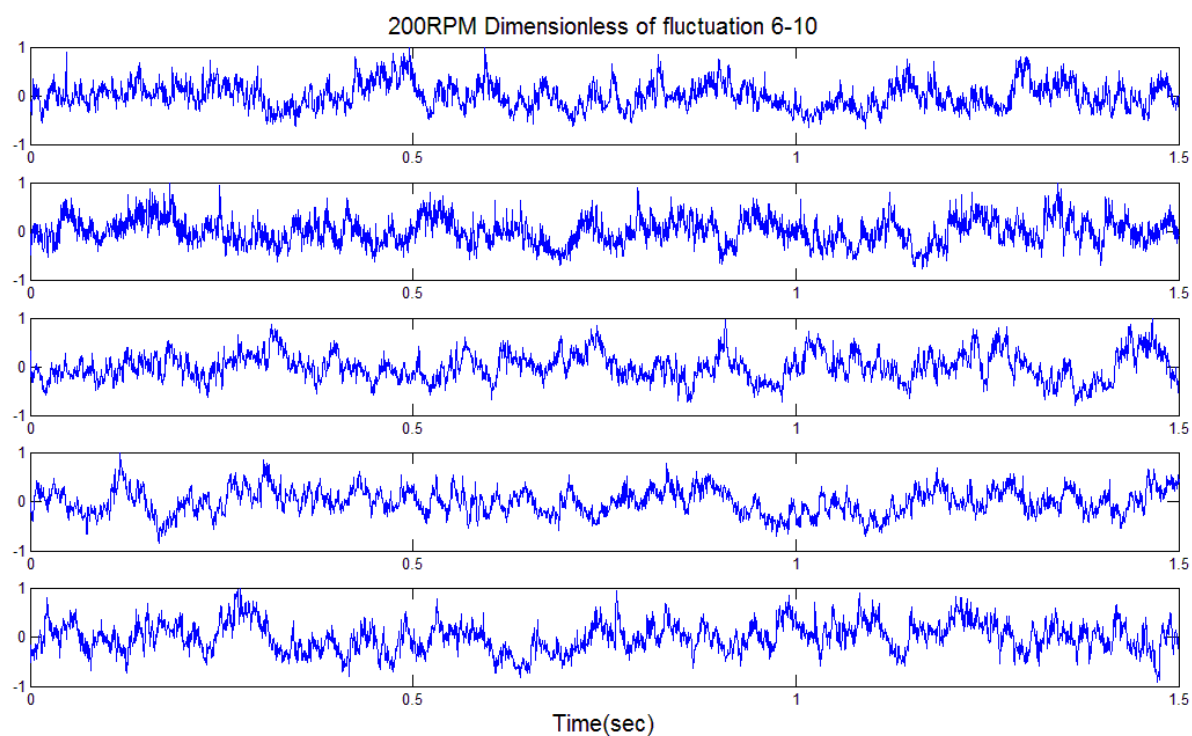


圖 24 Y=1.5m,Z=0m 無因次擾動(6)

(資料來源：本研究整理)

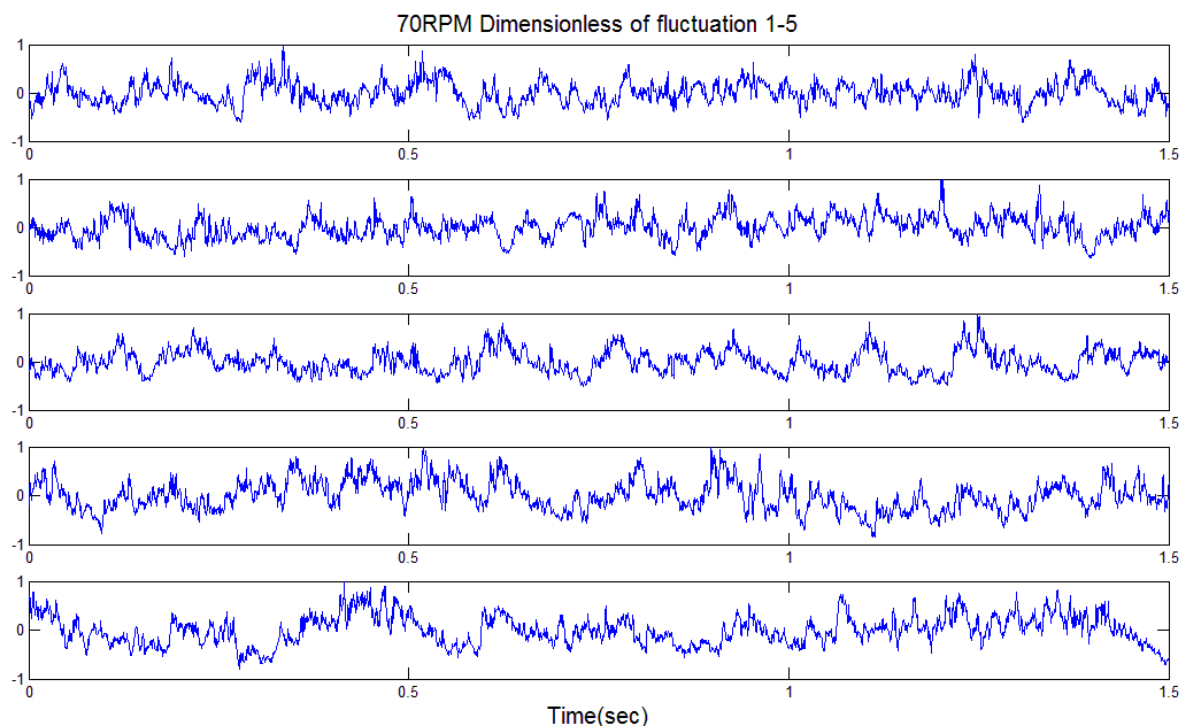


圖 25  $Y=0.105m, Z=0m$  無因次擾動(1)

(資料來源：本研究整理)

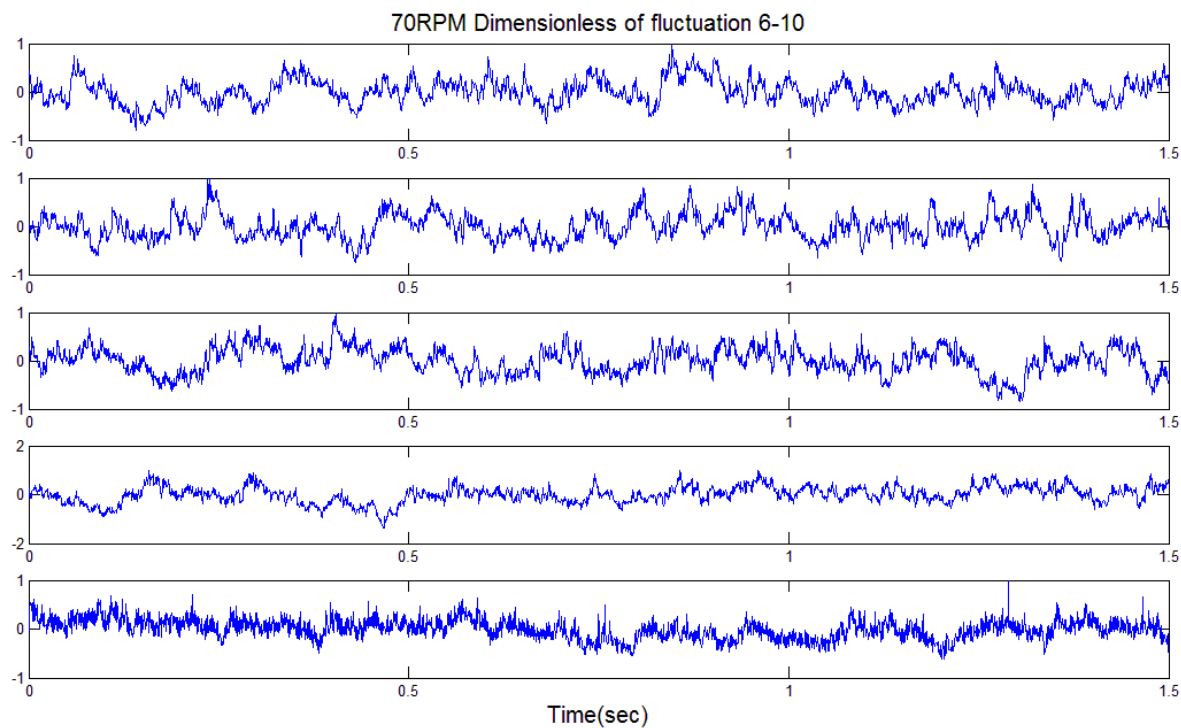


圖 26  $Y=0.105m, Z=0m$  無因次擾動(2)

(資料來源：本研究整理)

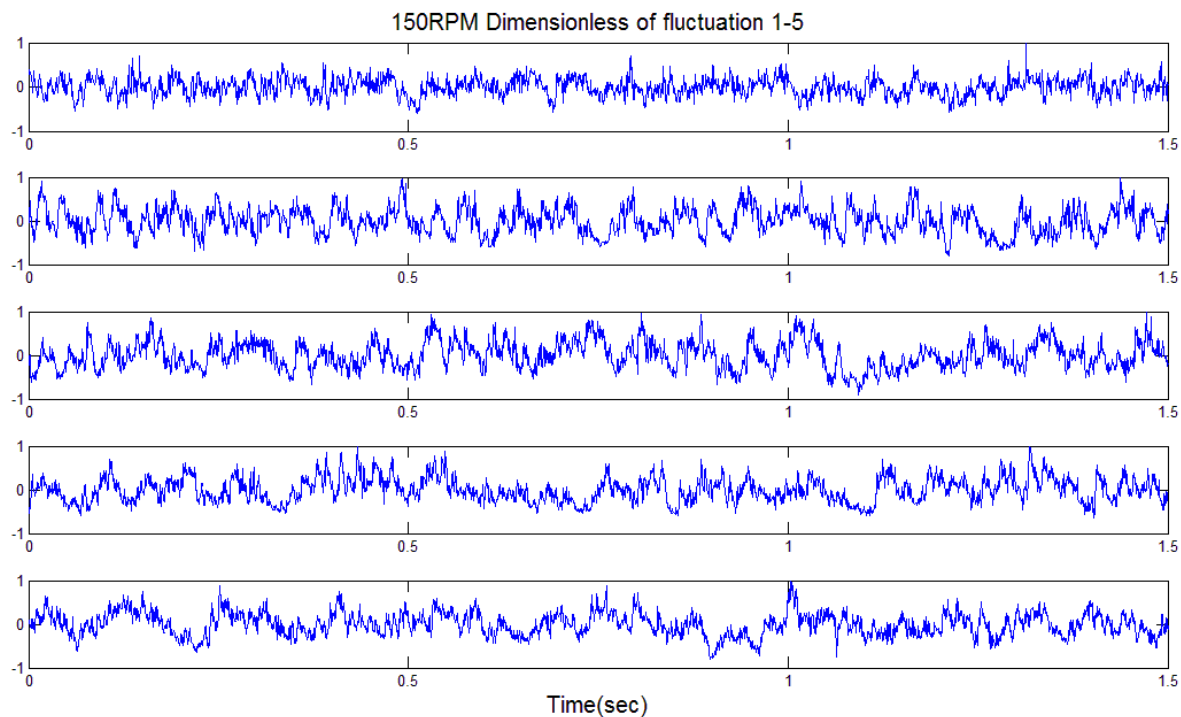


圖 27 Y=0.105m,Z=0m 無因次擾動(3)

(資料來源：本研究整理)

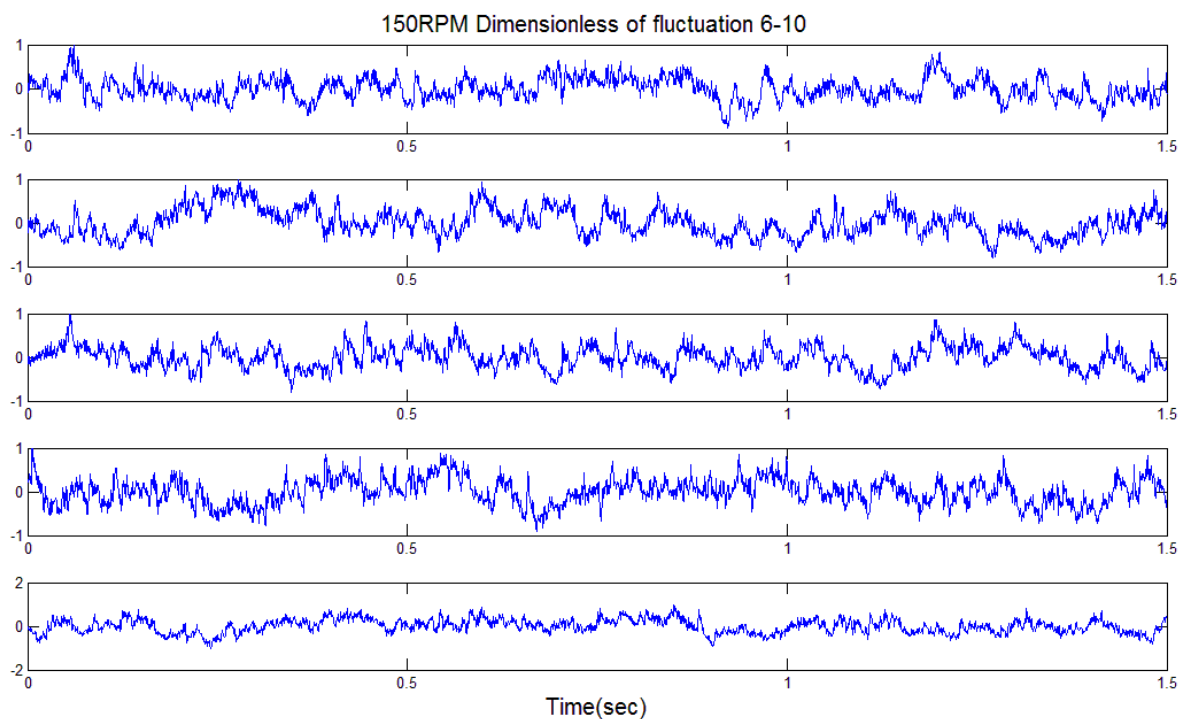
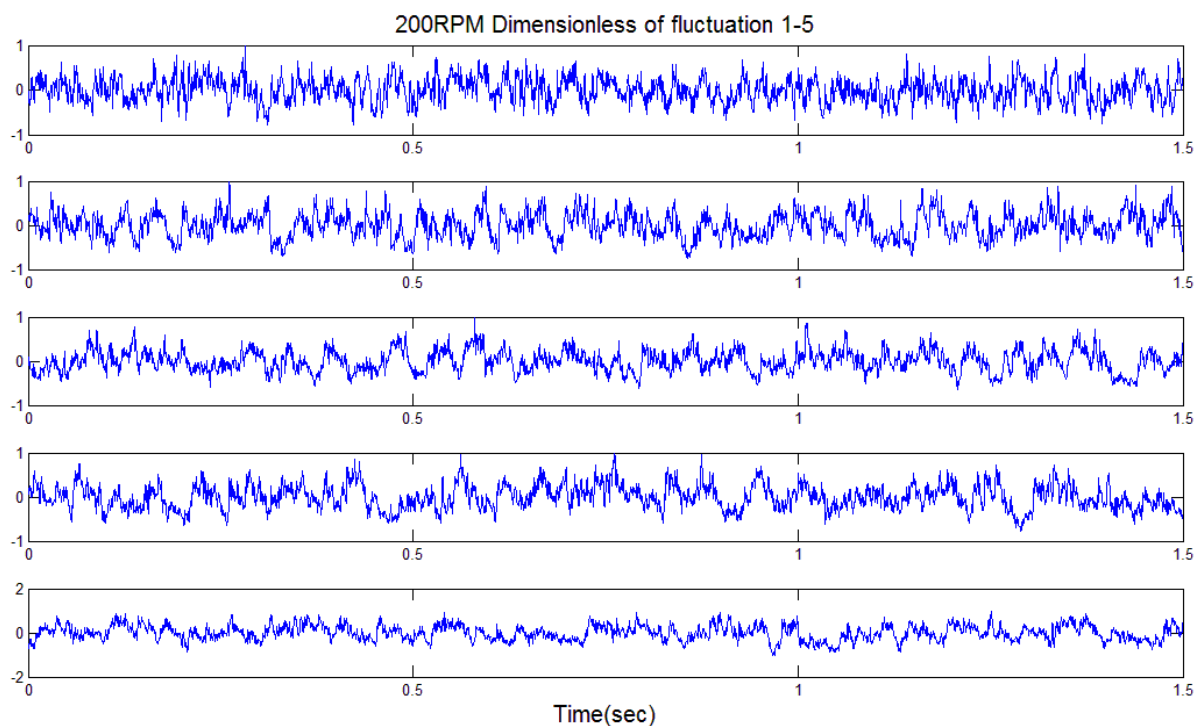


圖 28 Y=0.105m,Z=0m 無因次擾動(4)

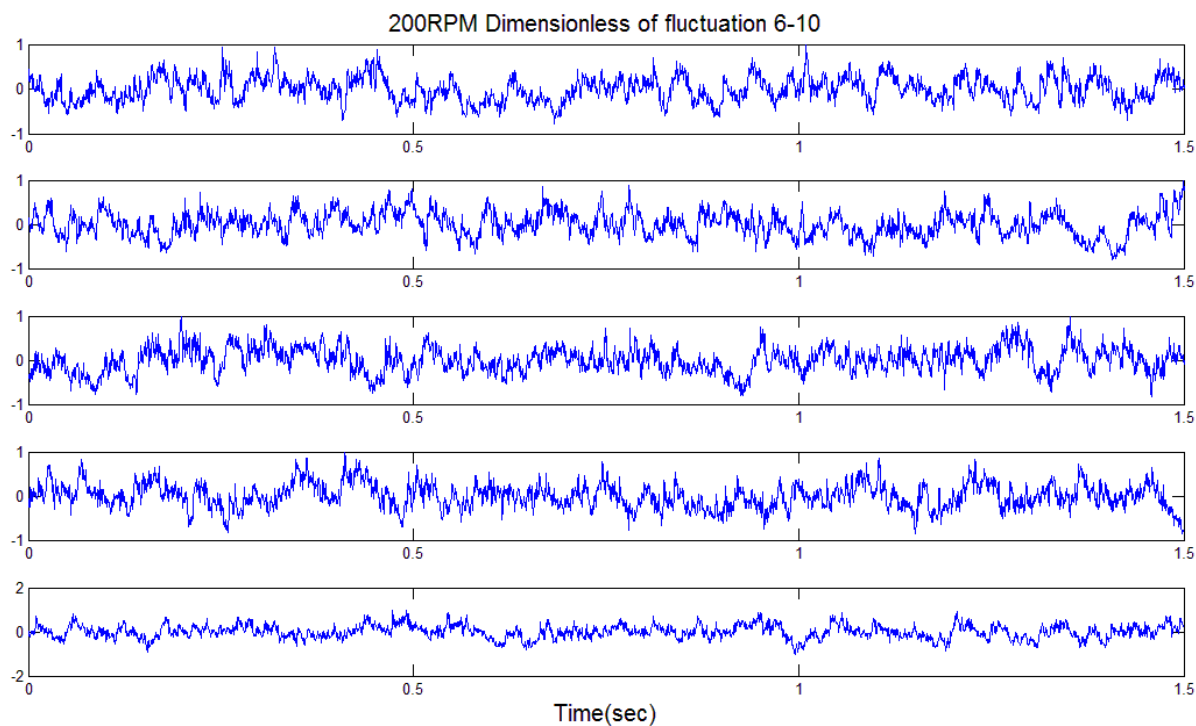
(資料來源：本研究整理)





**圖 29**  $Y=0.105m, Z=0m$  無因次擾動(5)

(資料來源：本研究整理)



**圖 30**  $Y=0.105m, Z=0m$  無因次擾動(6)

(資料來源：本研究整理)

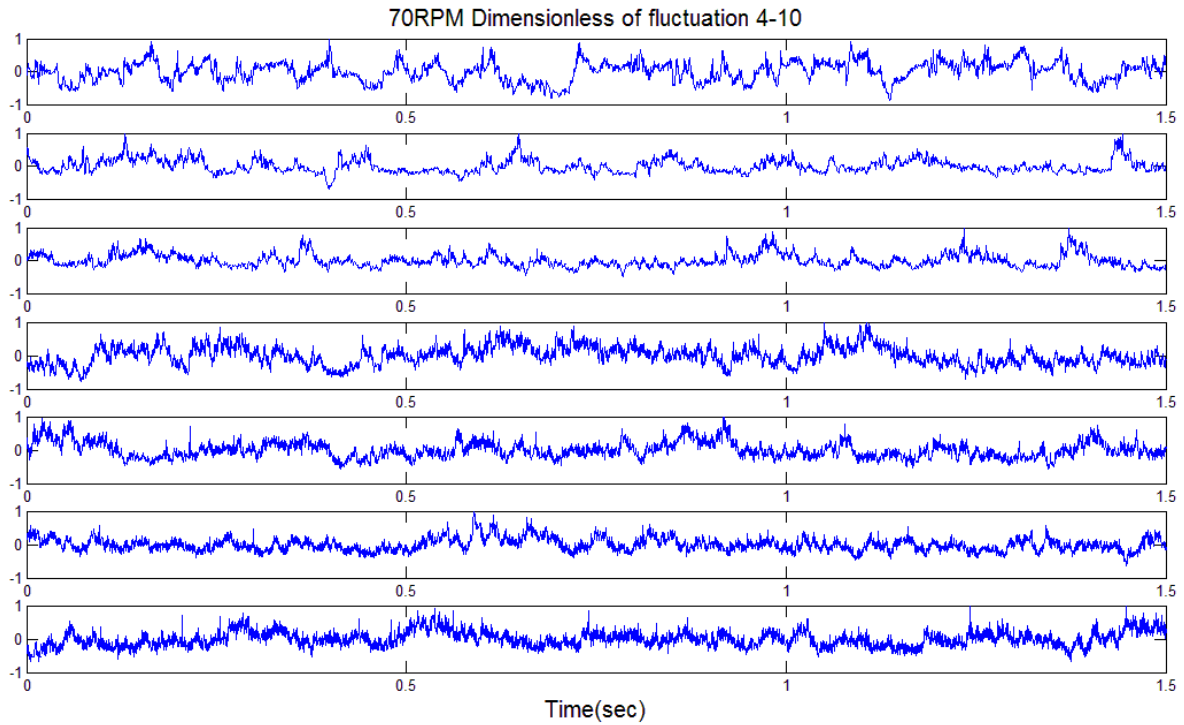


圖 31  $Y=1.5m, Z=0.5m$  無因次擾動(1)

(資料來源：本研究整理)

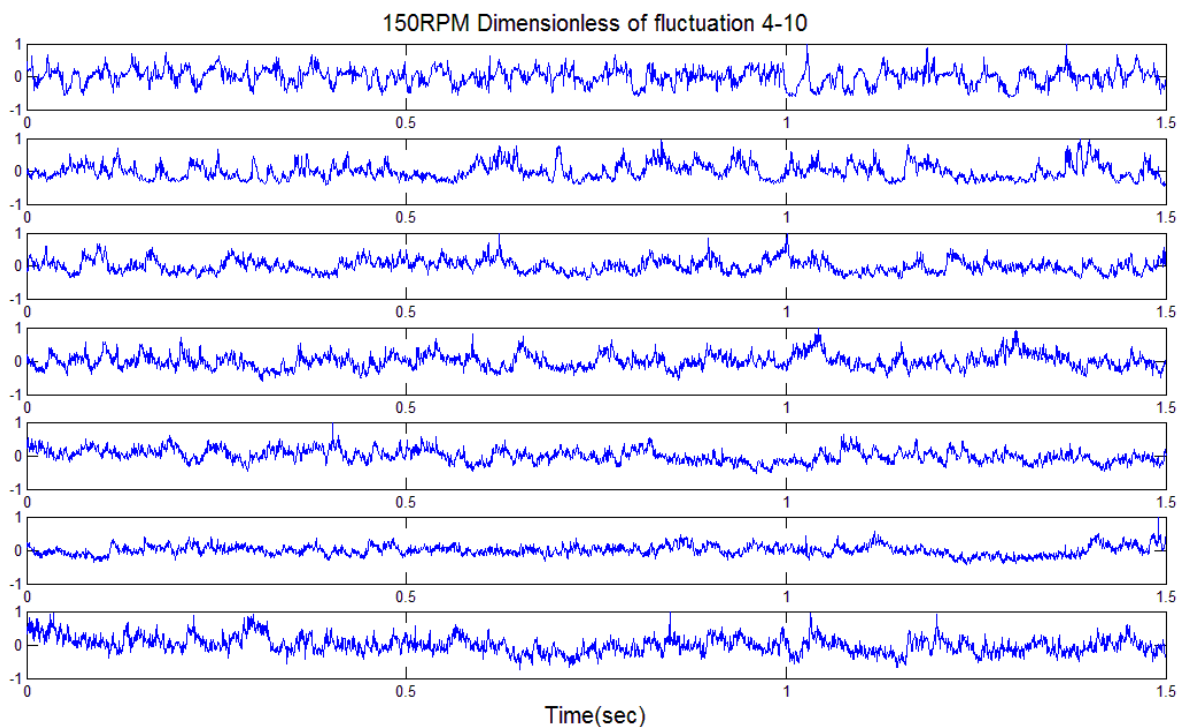


圖 32  $Y=1.5m, Z=0.5m$  無因次擾動(2)

(資料來源：本研究整理)

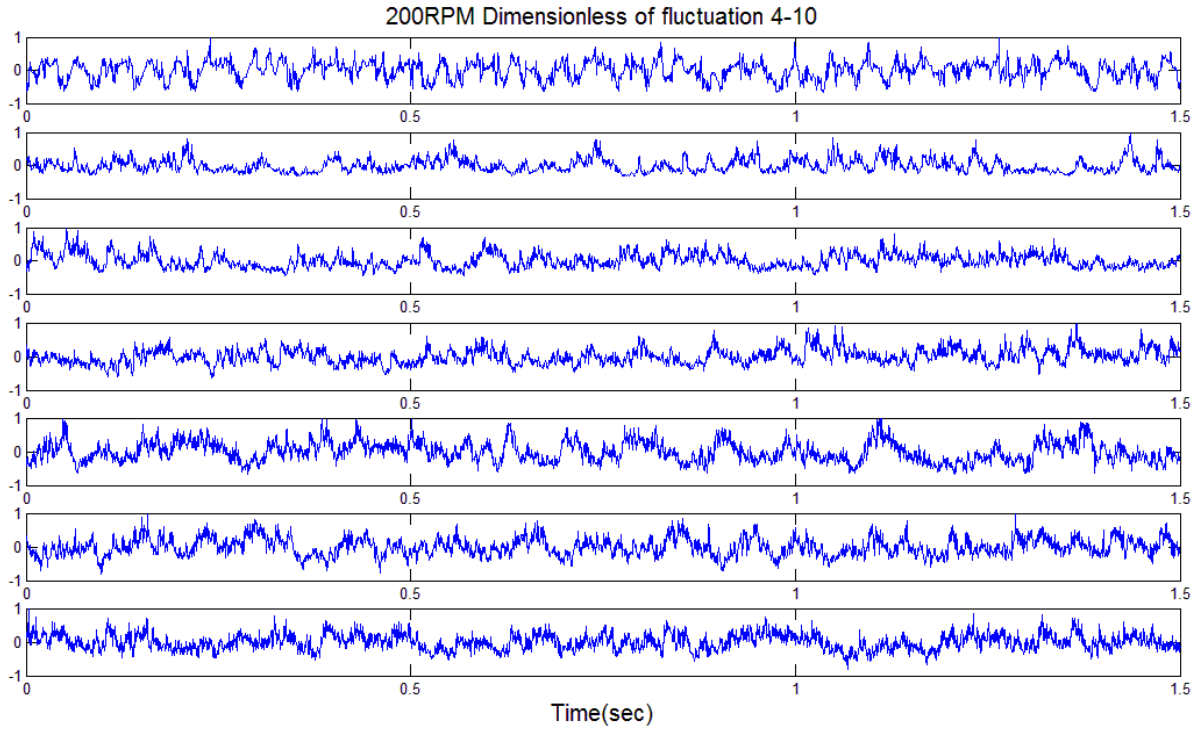


圖 33 Y=1.5m,Z=0.5m 無因次擾動(3)

(資料來源：本研究整理)

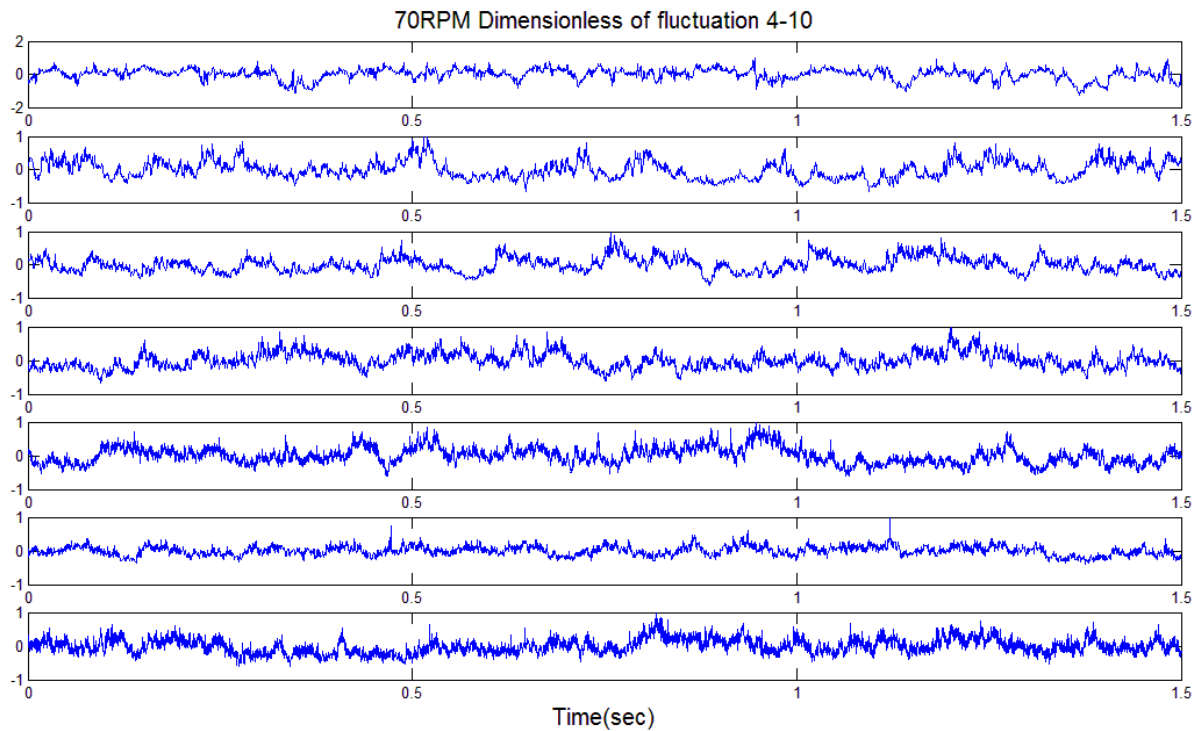


圖 34 Y=1.5m,Z=-0.5m 無因次擾動(1)

(資料來源：本研究整理)

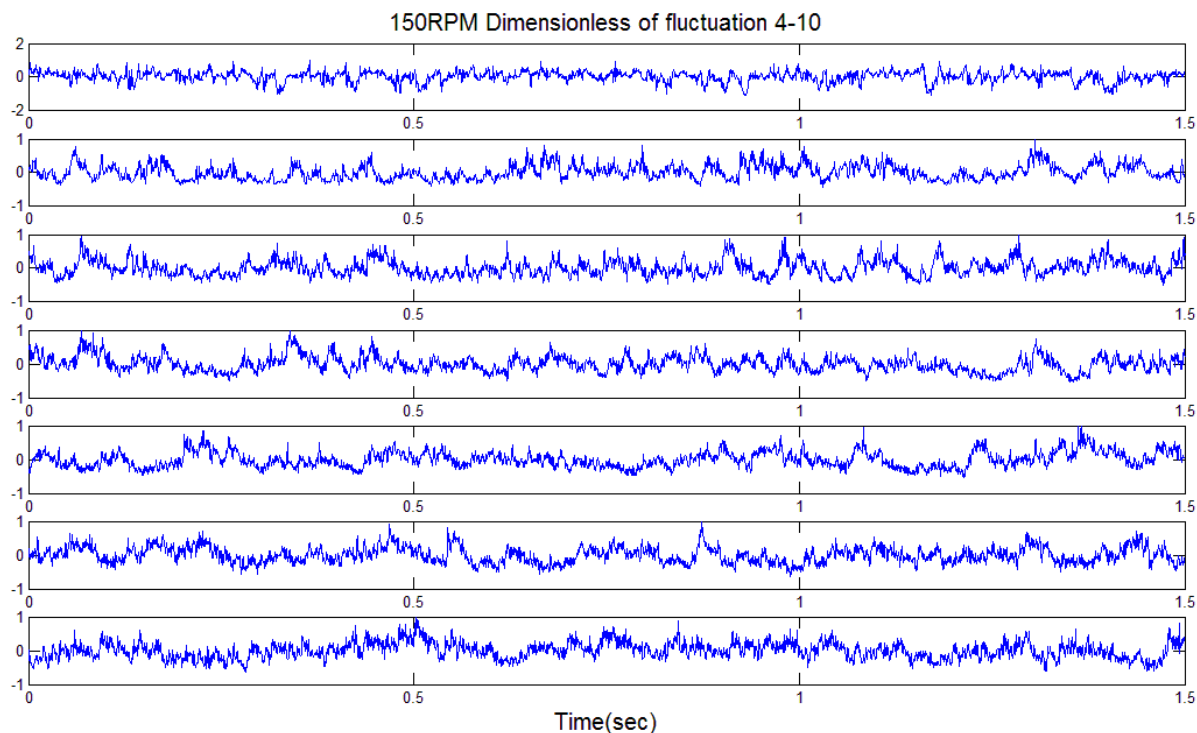


圖 35 Y=1.5m,Z=-0.5m 無因次擾動(2)

(資料來源：本研究整理)

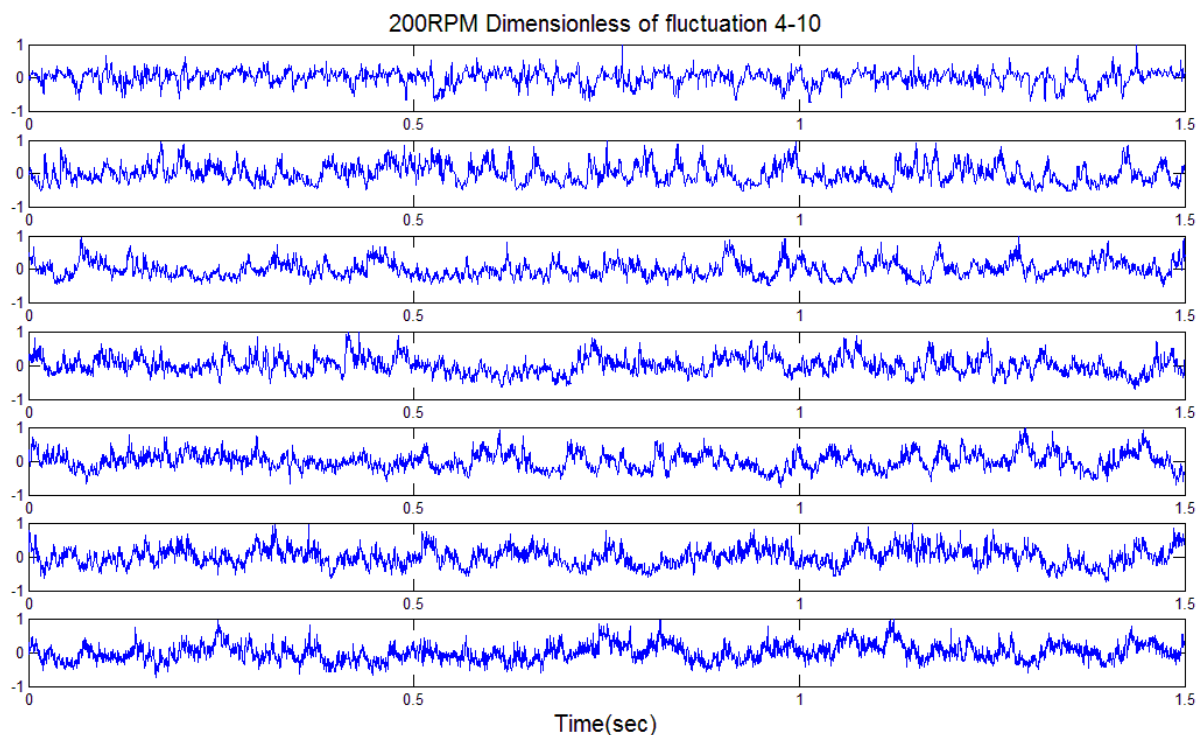
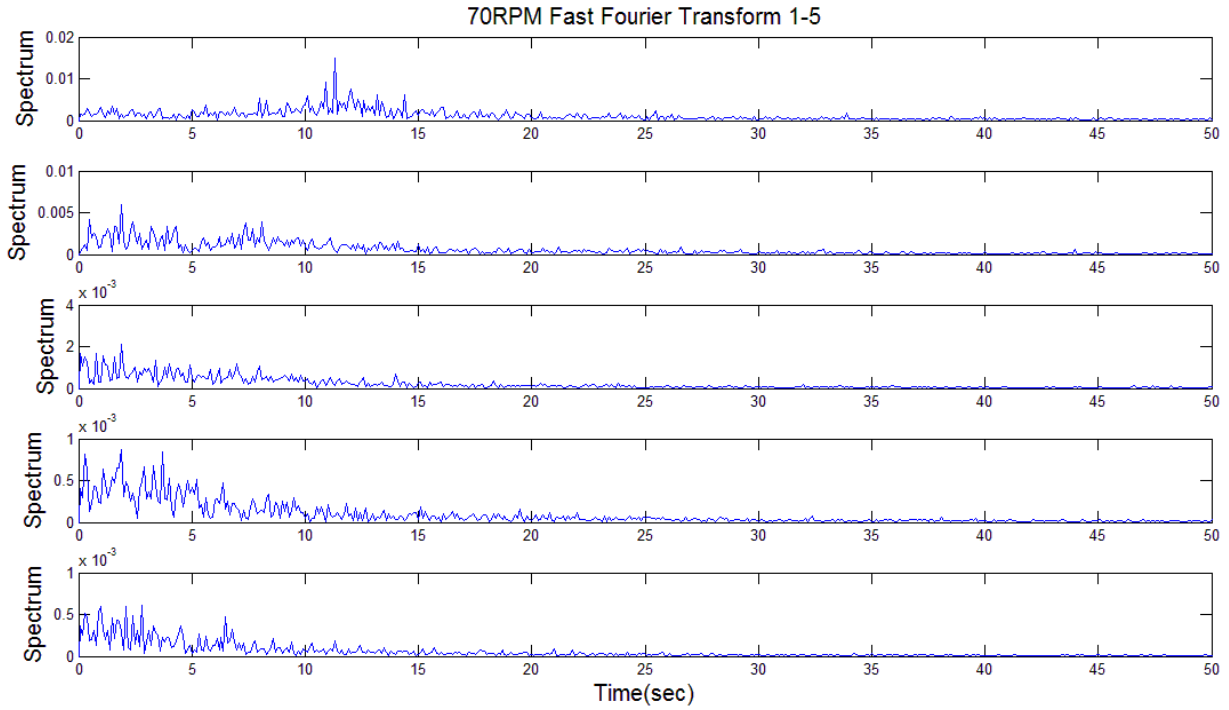


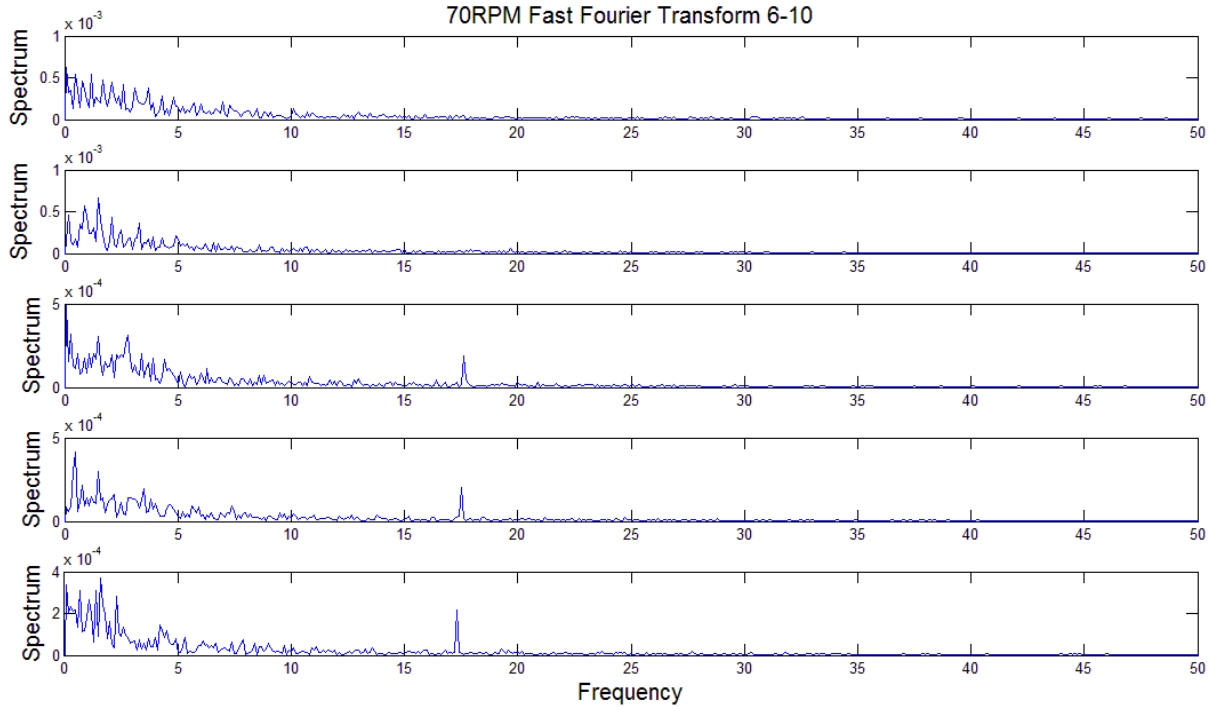
圖 36 Y=1.5m,Z=-0.5m 無因次擾動(3)

(資料來源：本研究整理)



**圖 37 Y=1.5m,Z=0m FFT(1)**

(資料來源：本研究整理)



**圖 38 Y=1.5m,Z=0m FFT(2)**

(資料來源：本研究整理)

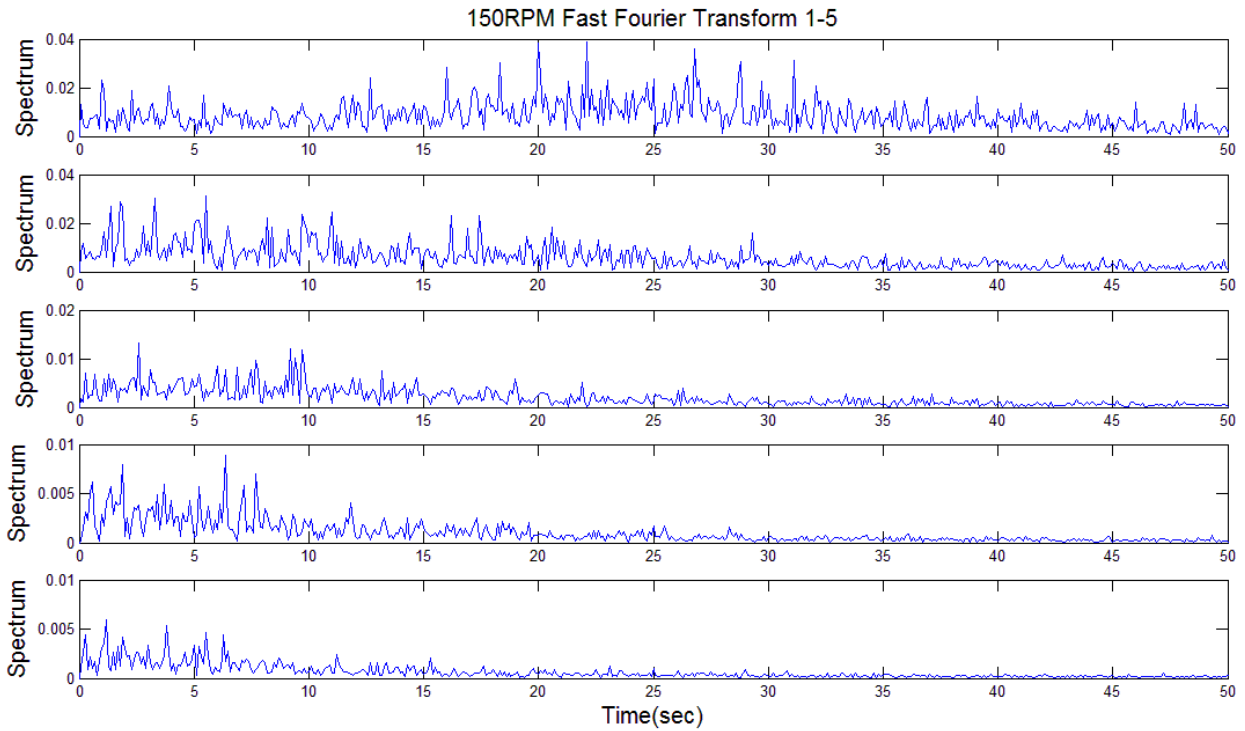


圖 39 Y=1.5m,Z=0m FFT(3)

(資料來源：本研究整理)

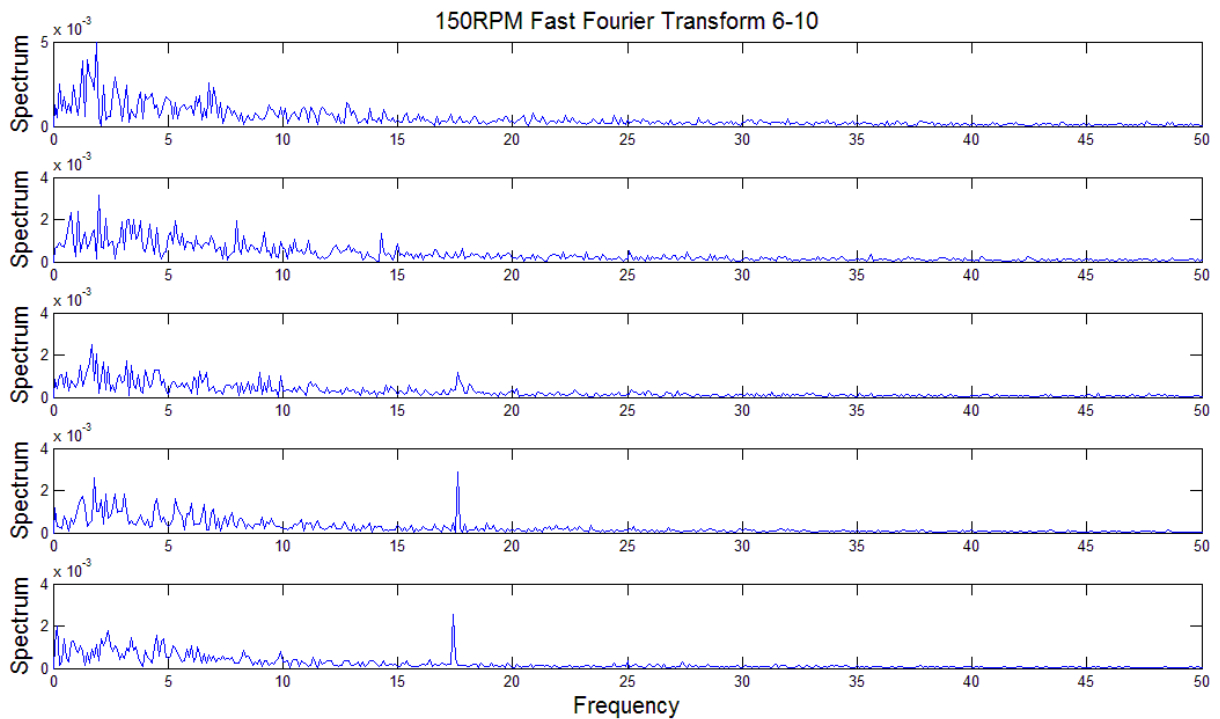


圖 40 Y=1.5m,Z=0m FFT(4)

(資料來源：本研究整理)

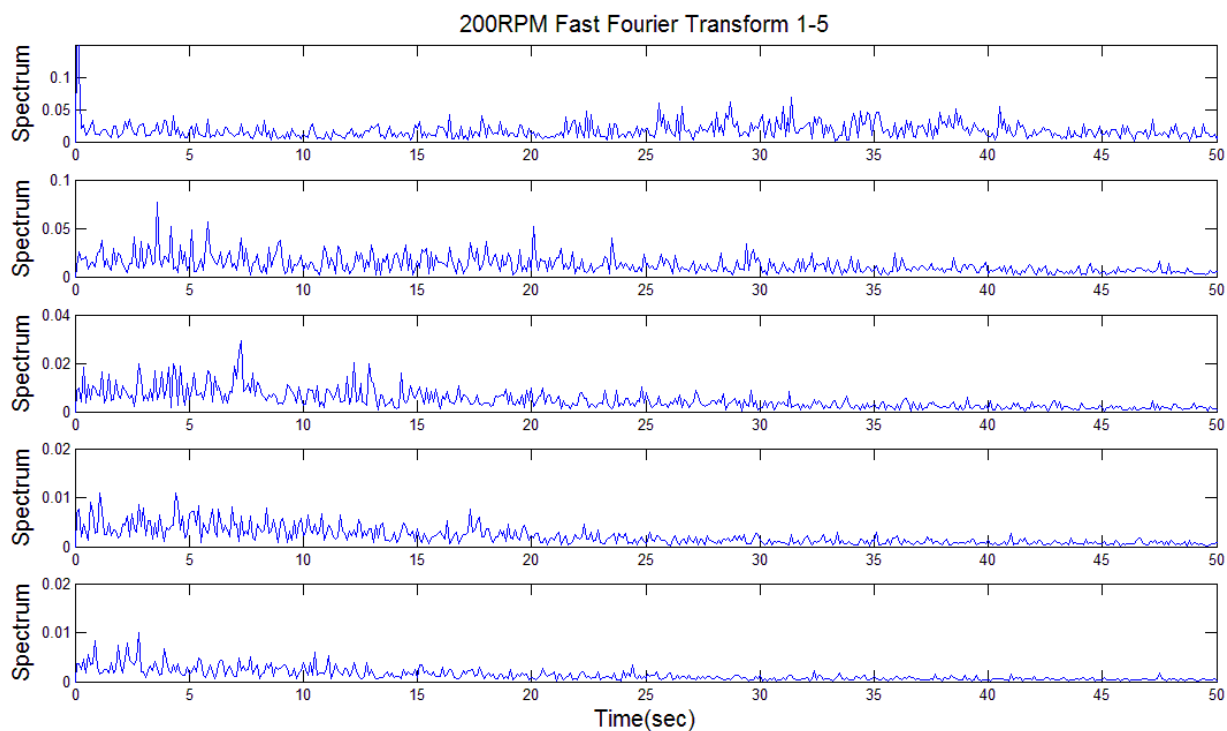


圖 41 Y=1.5m,Z=0m FFT(5)

(資料來源：本研究整理)

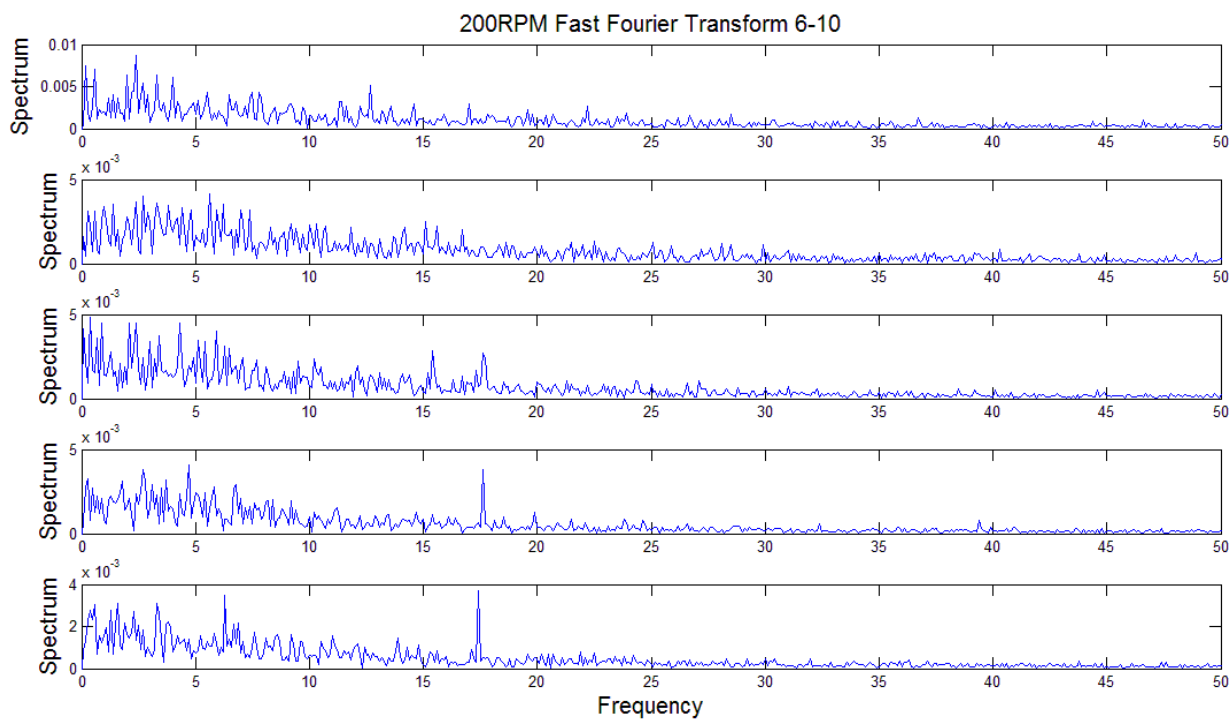


圖 42 Y=1.5m,Z=0m FFT(6)

(資料來源：本研究整理)

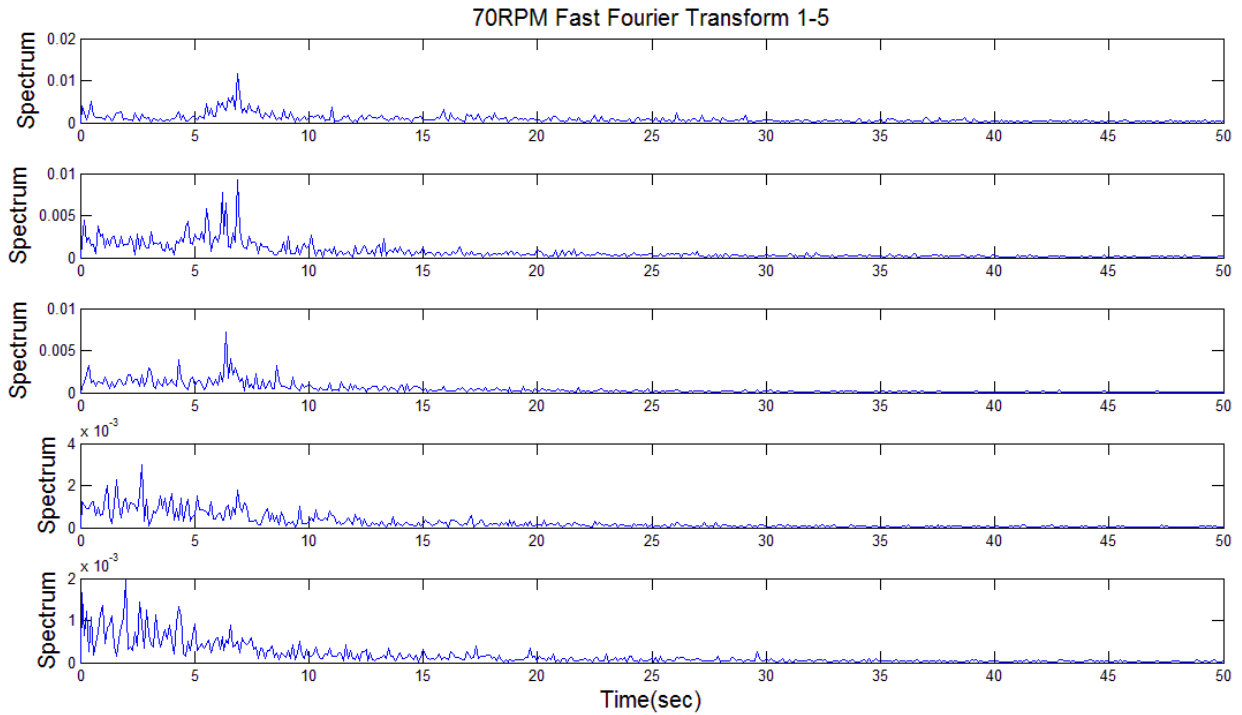


圖 43 Y=0.105m,Z=0m FFT(1)

(資料來源：本研究整理)

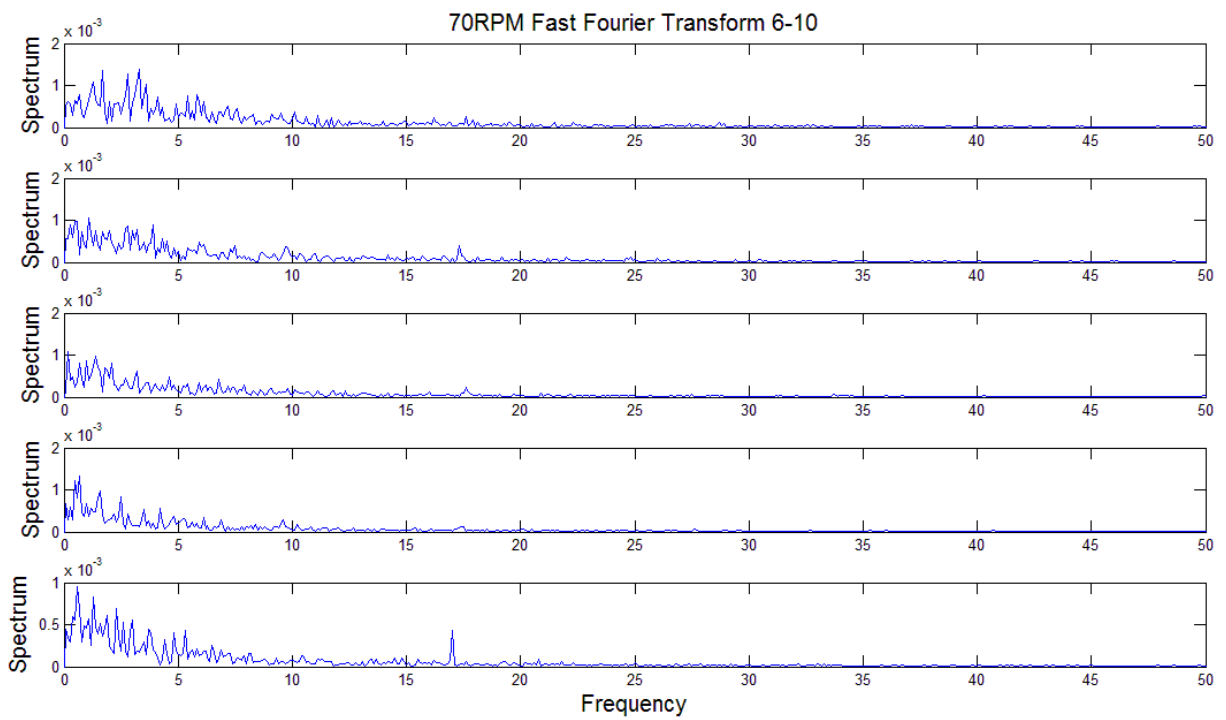


圖 44 Y=0.105m,Z=0m FFT(2)

(資料來源：本研究整理)



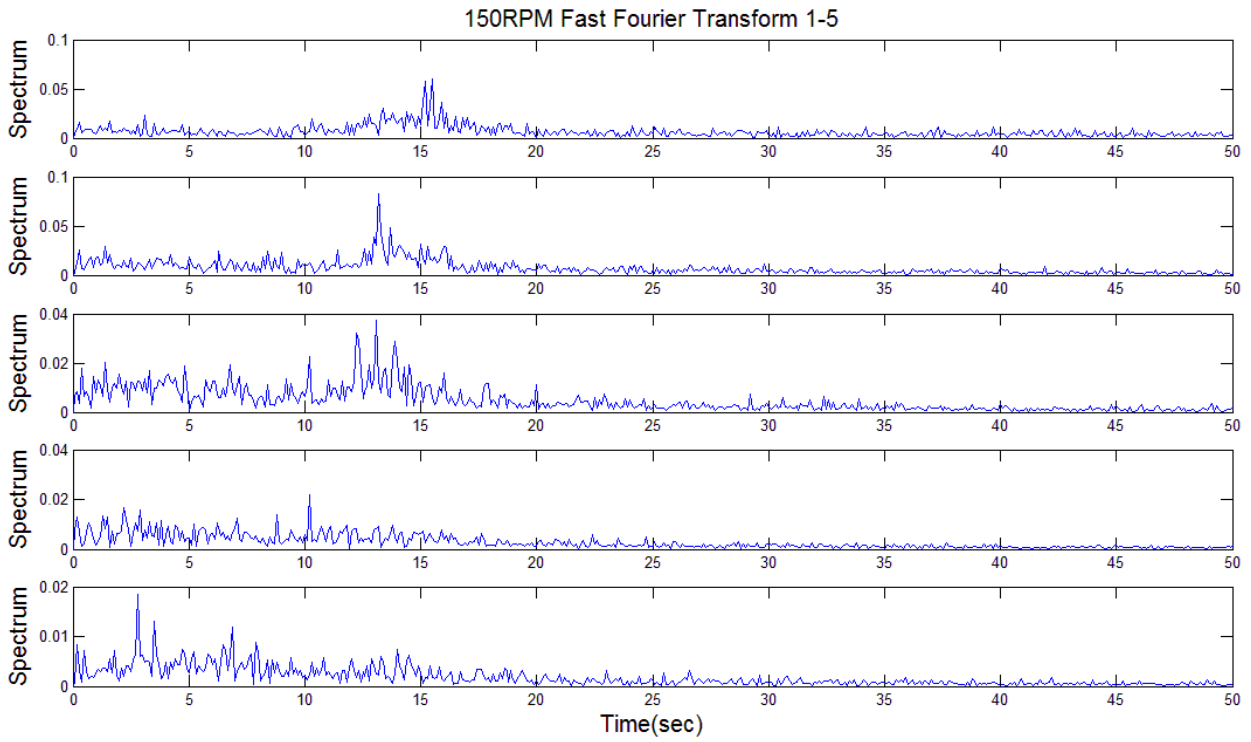


圖 45 Y=0.105m,Z=0m FFT(3)

(資料來源：本研究整理)

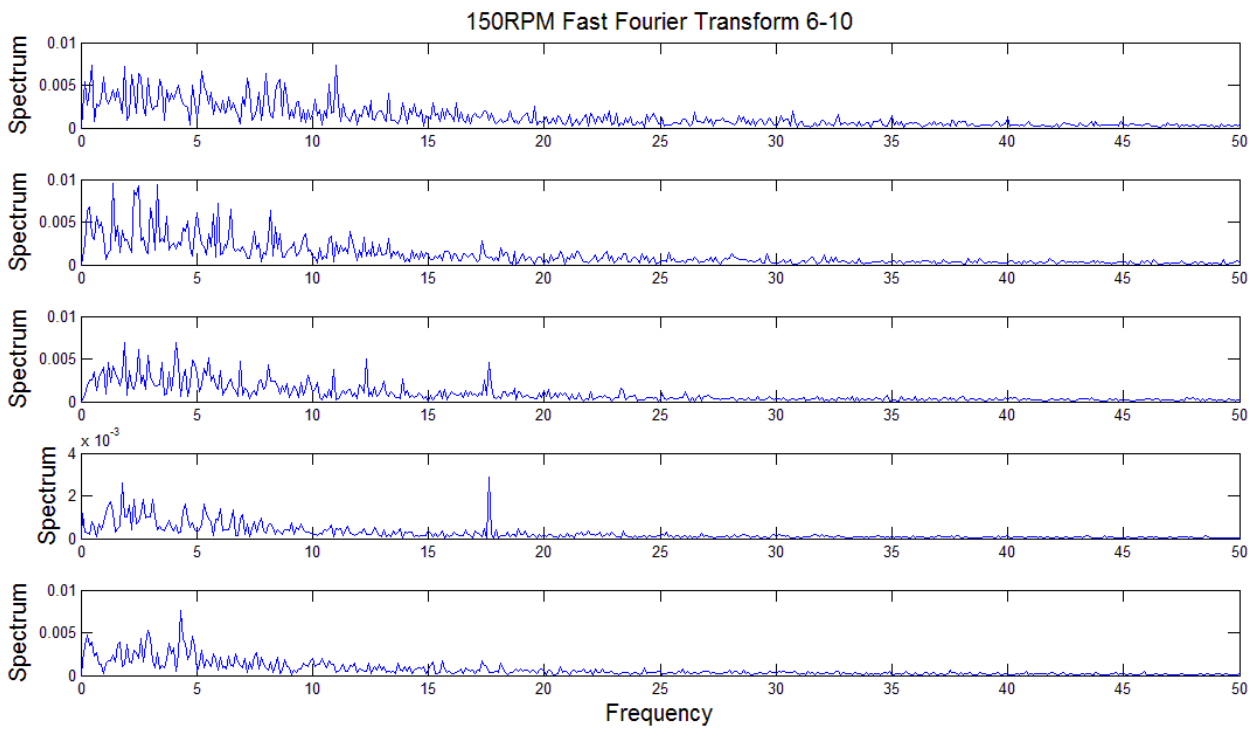


圖 46 Y=0.105m,Z=0m FFT(4)

(資料來源：本研究整理)

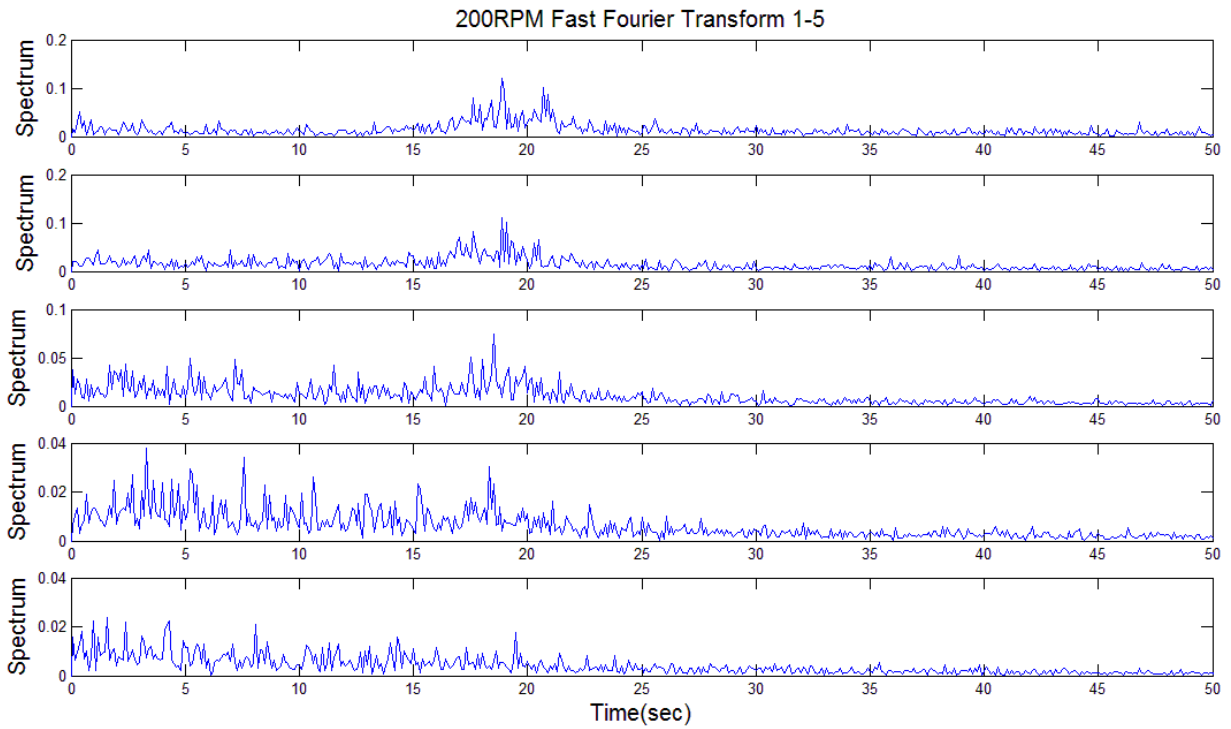


圖 47 Y=0.105m,Z=0m FFT(5)

(資料來源：本研究整理)

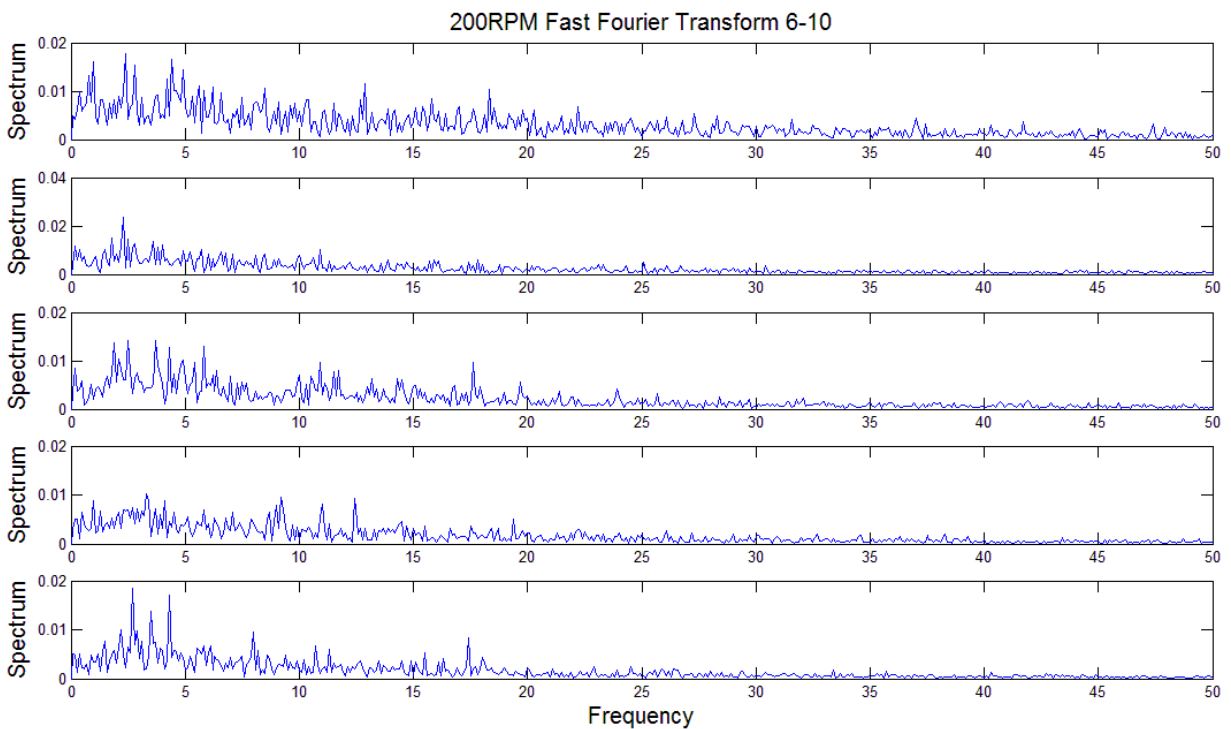


圖 48 Y=0.105m,Z=0m FFT(6)

(資料來源：本研究整理)

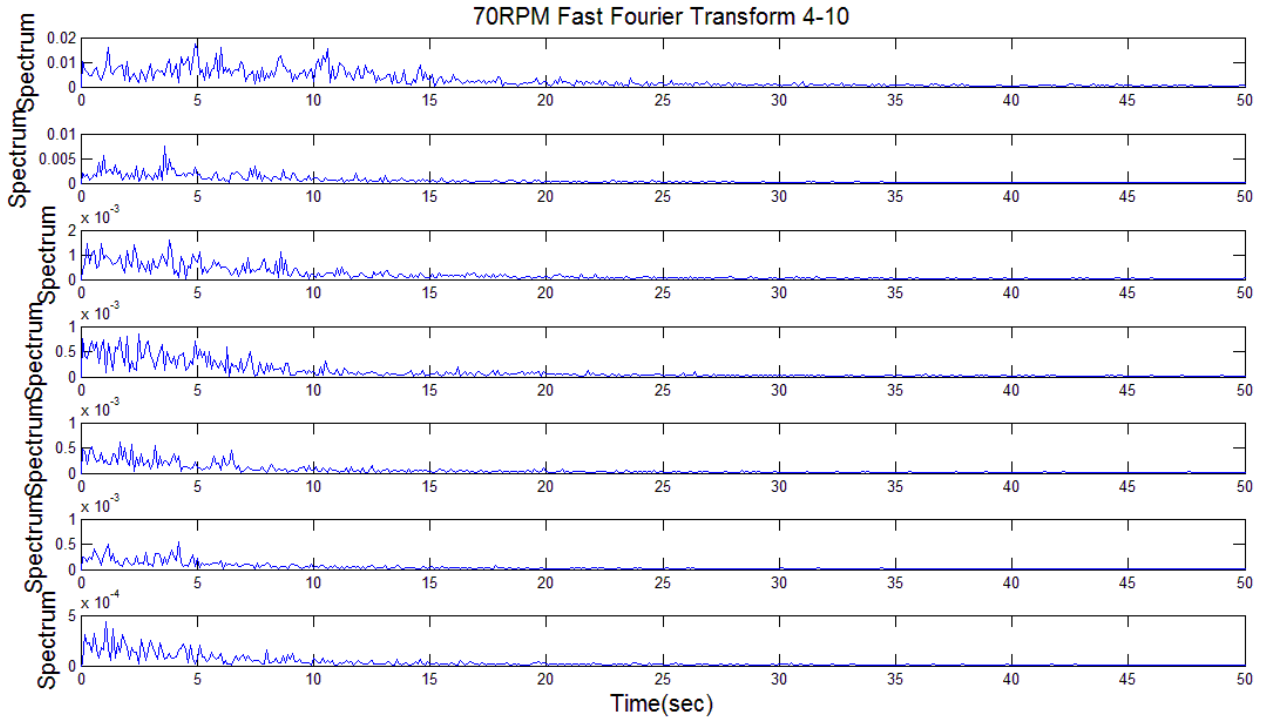


圖 49 Y=1.5m,Z=0.5m FFT(1)

(資料來源：本研究整理)

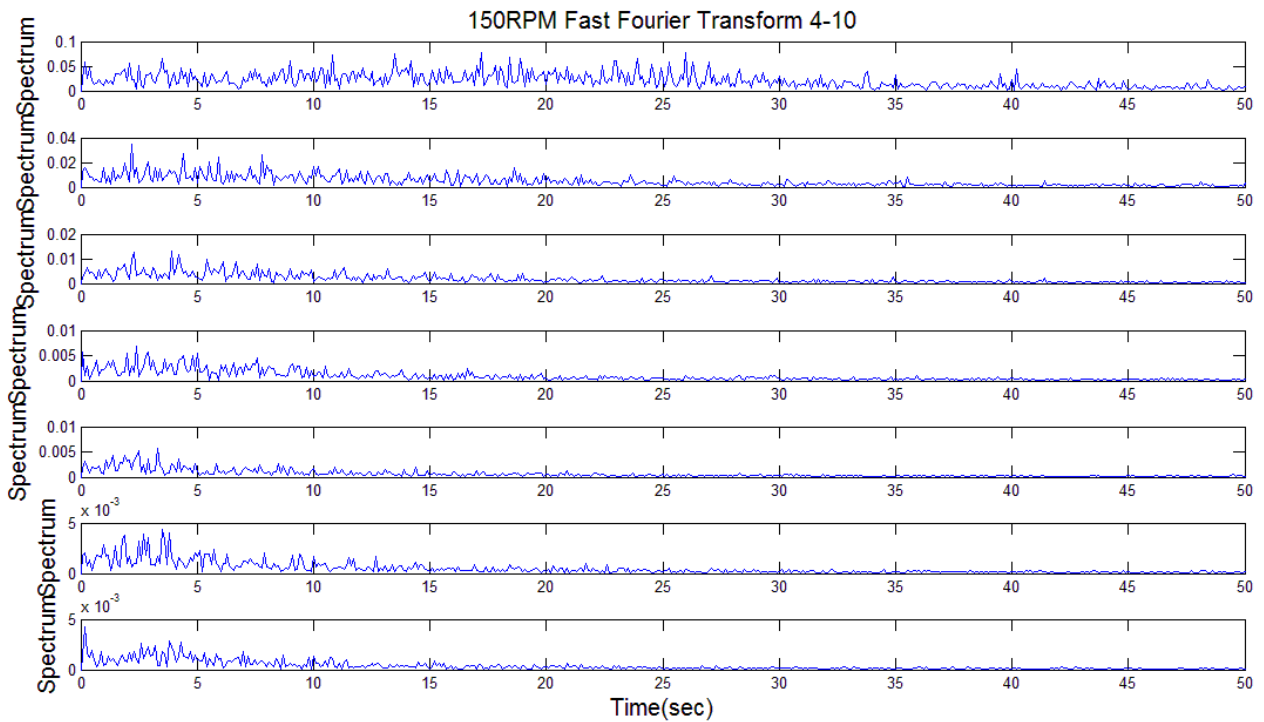


圖 50 Y=1.5m,Z=0.5m FFT(2)

(資料來源：本研究整理)

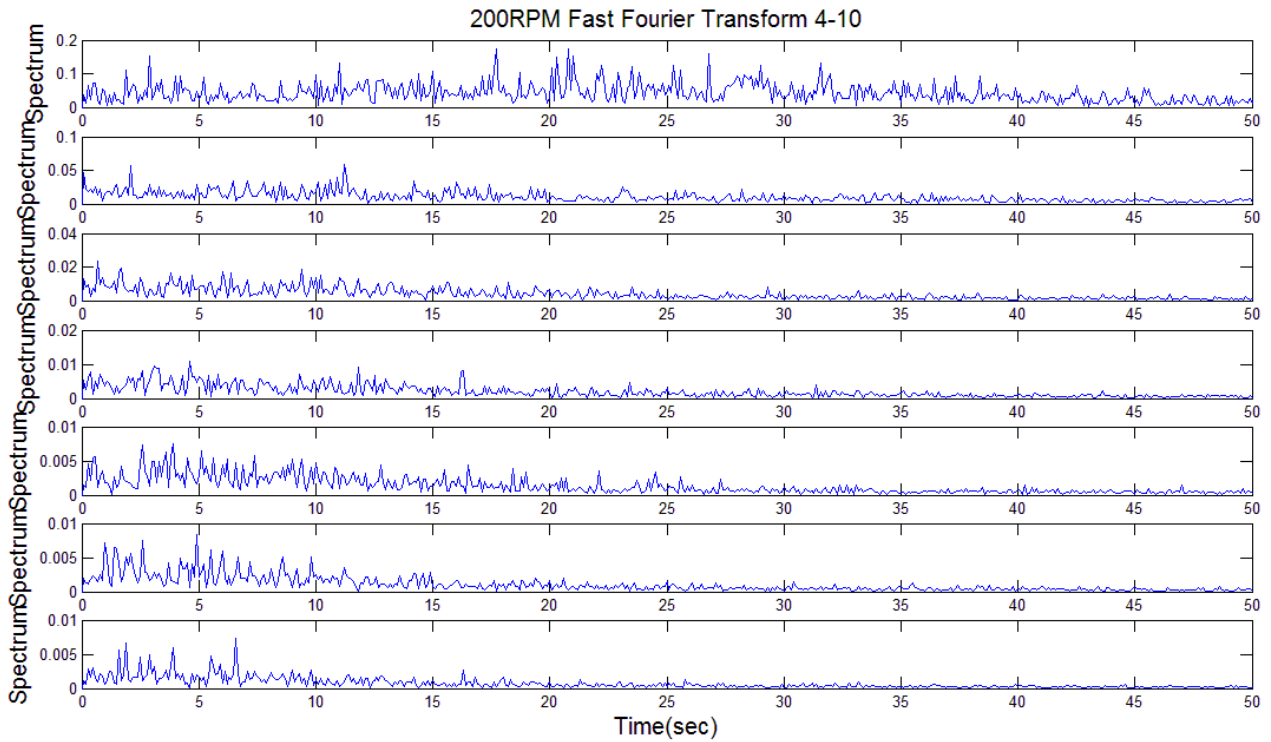


圖 51 Y=1.5m,Z=0.5m FFT(3)

(資料來源：本研究整理)

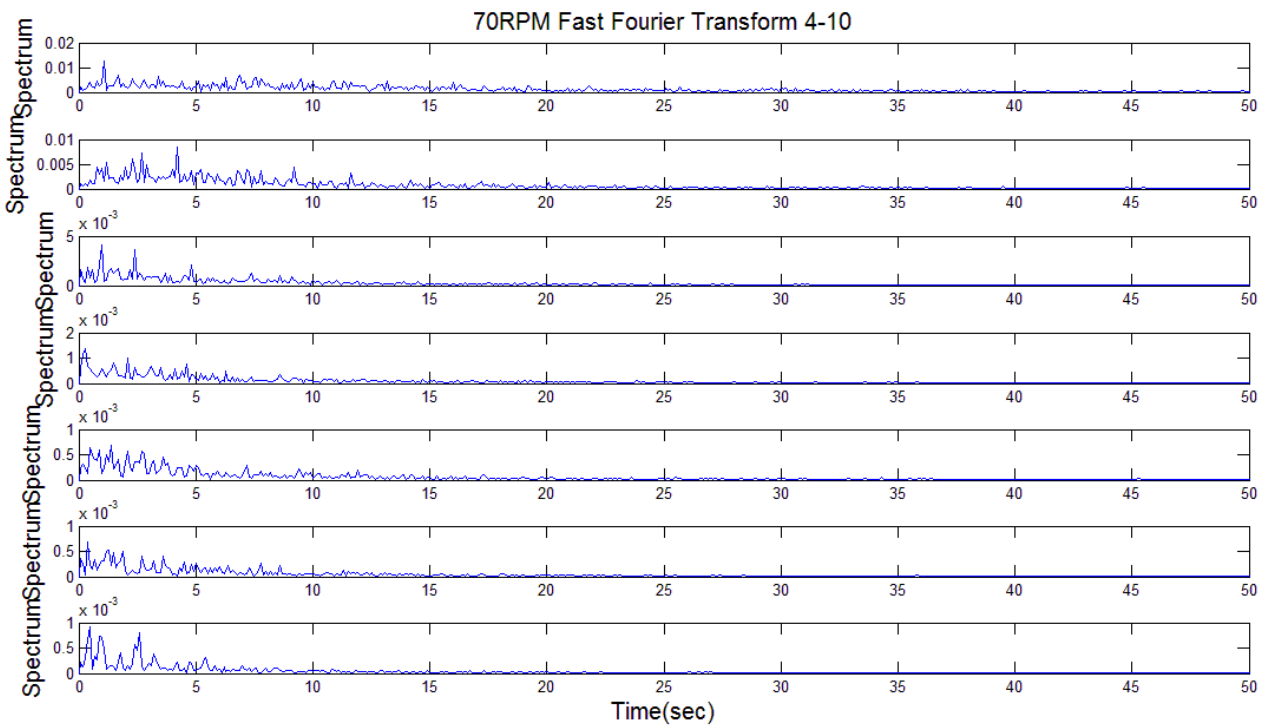


圖 52 Y=1.5m,Z=-0.5m FFT(1)

(資料來源：本研究整理)

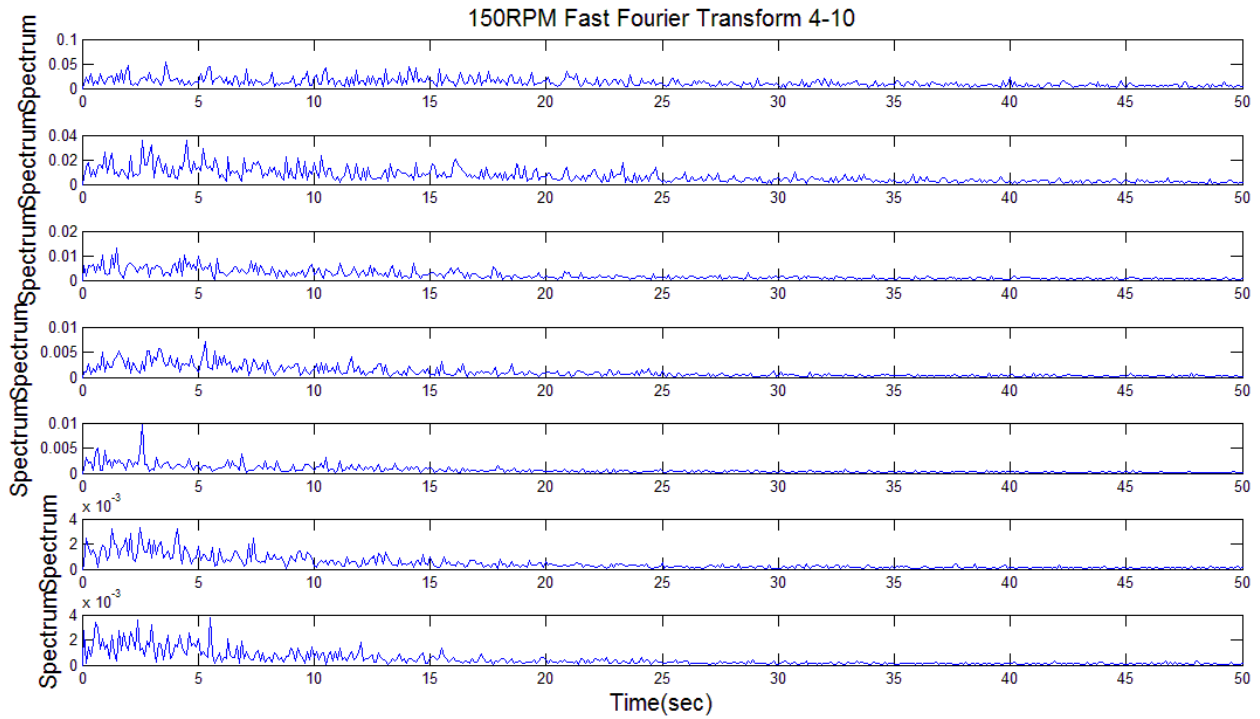


圖 53 Y=1.5m,Z=-0.5m FFT(2)

(資料來源：本研究整理)

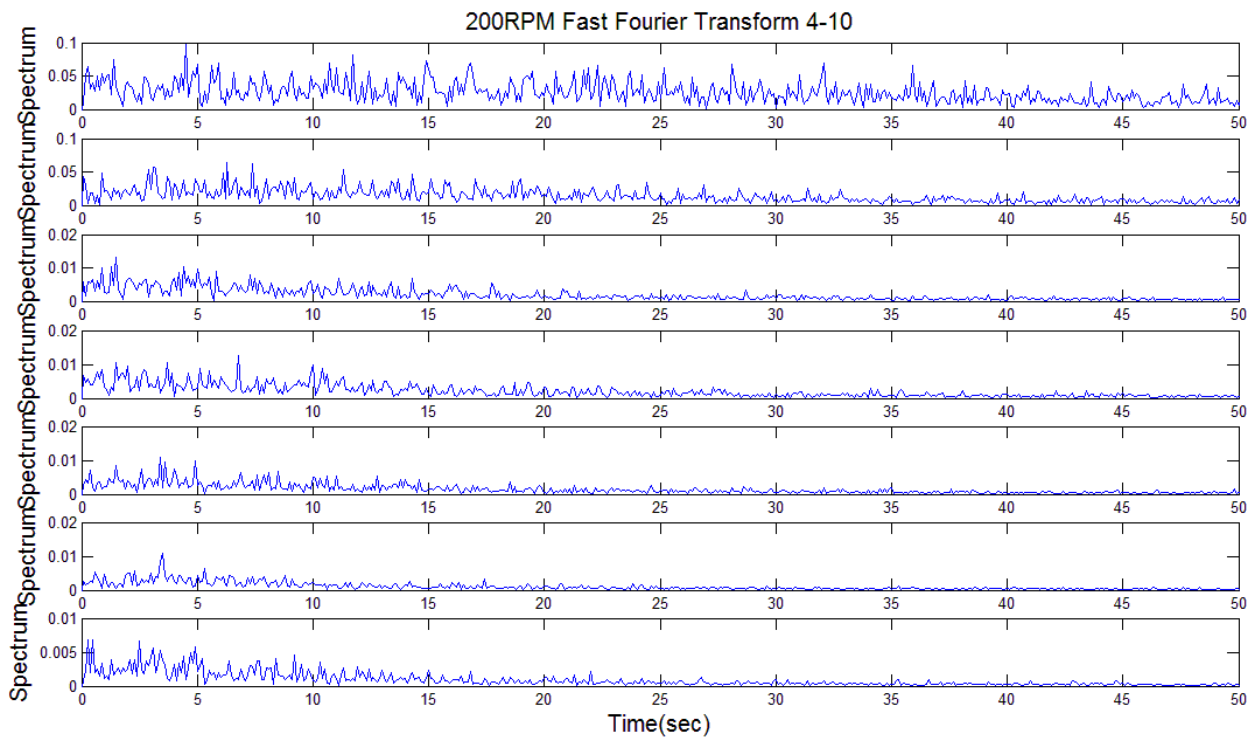


圖 54 Y=1.5m,Z=-0.5m FFT(3)

(資料來源：本研究整理)



98 年度：建築風洞紊流場能力建立及應用

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02)89127890

地址：台北縣新店市北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

出版年月：98 年 12 月

版(刷)次：第一版

工本費：

GPN:

ISBN:978-986-02-2236-4