

國立交通大學
機械工程學系
碩士論文

往復式冷卻渠道之熱流實驗

An experimental study of a cooling channel under
reciprocating motion

研究生：余政倫

指導教授：傅武雄 博士

中華民國九十五年七月

往復式冷卻渠道之熱流實驗

An experimental study of a cooling channel under
reciprocating motion

研究生：余政倫
指導教授：傅武雄

Student : Cheng-Lun Yu
Advisor : Wu-Shung Fu

國立交通大學
機械工程學系
碩士論文



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 2006
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年七月

往復式冷卻渠道之熱流實驗

研究生：余政倫

指導教授：傅武雄 博士

國立交通大學機械工程學系

摘 要

本研究於層流模式下進行U型渠道的往復運動，以觀察其流場可視化，並於紊流模式下搭配不同的振動頻率與雷諾數進行分析，探討渠道頂部的熱傳效率，最後並將實驗結果與數值計算相互驗證，以完備實驗結果的可信度。

當U型渠道進行往復運動時，將導致內部的渠道流與頂部壁面相互撞擊，此為增進熱傳效率的主要機制，從實驗的結果可得知，渠道頂部的熱傳效率皆以前段加熱區域為最佳、中段加熱區域次之、後段加熱區域為最差。此外在固定的振動振幅下，渠道頂部的熱傳效率並不會因為振動頻率增加而提高，故推斷渠道內部流場存在一自然頻率，因此必須利用頻率共振的原理才能有效地提升渠道頂部的熱傳效率。

An experimental study of a cooling channel under reciprocating motion

Student : Cheng-Lun Yu

Advisor : Wu-Shung Fu

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate heat transfer rate of a cooling \square -shaped channel when reciprocating motion experimentally. Three separate heat regions are selected at former, middle and later position and used to indicate variations of heat transfer phenomenon. A method of flow visualization is adopted to indicate the flow field in the cooling channel qualitatively. The parameters of Reynolds number, frequency are varied and the amplitude is fixed due to the experimental apparatus. The results show that at the frequency being equal to 0.05 the maximum heat transfer rate is obtained. Both the experimental and numerical results are consistent well under the conditions conducted in this study.

誌謝

我由衷地感謝指導老師傅武雄教授二年來在學業與論文上的悉心指導，在此謹致最高的謝忱與敬意，並感謝機械系諸師長在課業上的提攜；感謝連信宏學長及傳門同窗在實驗與數值計算上的協助，致使研究得以順利完成。

最後我更要感謝父母親無私付出的養育之恩，使我至今在求學的生涯中能無後顧之憂，至今方能順利完成學業，謹將此喜悅與所有關心我的人共同分享。



目錄

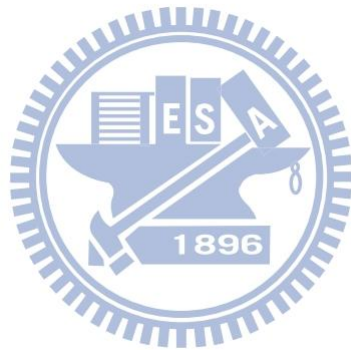
摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
符號說明.....	ix
第一章 緒論.....	1
第二章 往復式冷卻渠道之熱流實驗.....	8
2.1 物理模式.....	8
2.2 實驗設備.....	8
2.2.1 架設機構.....	8
2.2.2 往復運動機構.....	12
2.2.3 發煙器原理.....	18
2.2.4 加熱與溫度量測裝置.....	18
2.3 實驗步驟.....	23
2.3.1 啟動往復運動.....	23
2.3.2 冂型渠道流場可視化之觀察.....	23
2.3.3 冂型渠道頂部壁面溫度量測.....	26
第三章 結果與討論.....	29
3.1 冂型渠道於層流模式下之流場可視化.....	29
3.1.1 驗證渠道上移流場與廖[10]的數值計算.....	30
3.1.2 驗證渠道下移流場與廖[10]的數值計算.....	30
3.2 冂型渠道頂部之熱傳效率分析.....	31

3.2.1 靜止狀態下雷諾數對熱傳之影響.....	31
3.2.2 往復運動下無因次振動頻率對熱傳之影響.....	32
3.2.3 往復運動下雷諾數對熱傳之影響.....	40
第四章 結論.....	44
參考文獻.....	45
附錄：實驗不準度分析.....	47



表目錄

表 2-1 步進馬達運動參數表	14
表 3-1 實驗參數組合表	37
表 3-2 $Re_h = 700$ 與 $\Delta T_w = 10^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ ($25^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$) 實驗數據表	38
表 3-2 $Re_h = 800$ 與 $\Delta T_w = 10^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ ($26.2^\circ\text{C} - 36.2^\circ\text{C}$) 實驗數據表	38



圖目錄

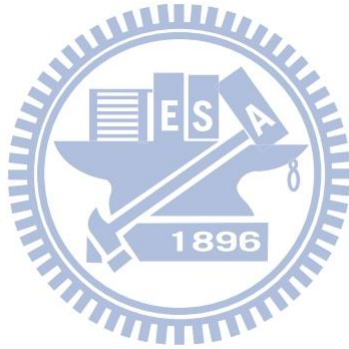
圖 1-1 歷年 Sulzer 柴油引擎動力輸出圖.....	5
圖 1-2 Suzler RTA90 機型之活塞冠斷面示意圖	6
圖 1-3 引擎活塞機構示意圖	7
圖 2-1 冂型渠道物理模式圖.....	9
圖 2-2 實驗設備組合圖	10
圖 2-3 實驗架設機構圖.....	11
圖 2-4 傳動組件組合上視圖	15
圖 2-5 連桿尺寸證明示意圖.....	16
圖 2-6 往復機構實體之上視圖	17
圖 2-7 冂型渠道置於往復機構之側視圖.....	17
圖 2-8 發煙器裝置圖.....	21
圖 2-9 加熱片結構示意圖	22
圖 2-10 冂形渠道從底部進行擷取 Z 軸截面之 Z 向速度分佈圖	24
圖 2-11 發煙器於冂型渠道頂部位置圖.....	25
圖 2-12 加熱片於冂型渠道頂部位置圖.....	27
圖 3-1 廖[10]數值計算冂型渠道上移之流線圖	33
圖 3-2 冂型渠道上移之流場可視化圖.....	33
圖 3-3 廖[10]數值計算冂型渠道下移之流線圖	35
圖 3-4 冂型渠道下移之流場可視化圖.....	35
圖 3-5 靜止狀態下不同溫差範圍對 $Re_h = 700$ 之熱傳影響圖.....	39
圖 3-6 靜止狀態下不同溫差範圍對 $Re_h = 800$ 之熱傳影響圖.....	39
圖 3-7 $Re_h = 700$ 與 $F_c = 0.01$ 之實驗重複性測試圖.....	42
圖 3-8 往復運動下 F_c 對 $Re_h = 700$ 之熱傳影響圖.....	42
圖 3-9 往復運動下 F_c 對 $Re_h = 900$ 之熱傳影響圖.....	43

圖 3-10 往復運動下 Re_h 與 F_c 對熱傳之影響圖43

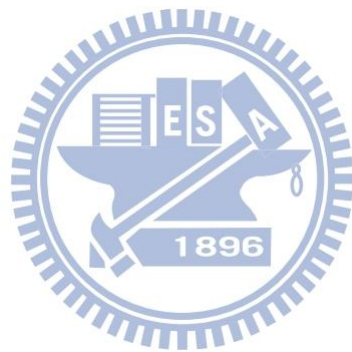


符號說明

A	冂型渠道截面積	$[m^2]$
A_h	加熱片銅箔表面積	$[m^2]$
A_b	加熱片巴沙木表面積	$[m^2]$
f_c	冂型渠道振盪頻率	$[s^{-1}]$
F_c	無因次振動頻率	
g	重力係數	$[m/s^2]$
Gr	Grashof number	
h	冂型渠道寬度	$[m]$
I	輸入電流	$[A]$
k_a	空氣熱傳導係數	$[W^2/m^{\circ}C]$
k_b	巴沙木熱傳導係數	$[W^2/m^{\circ}C]$
l_c	冂型渠道振動振幅	$[m]$
L_c	無因次振動振幅	
\overline{Nu}	壁面平均紐塞數	
r	振幅元件半徑	$[m]$
Re_h	雷諾數 (以渠道寬度為特徵長度)	
s	連桿軸心移動距離	$[m]$
t	時間	$[sec]$
T	溫度	$[K]$
T_w	冂型渠道頂部壁面溫度	$[K]$
T_{∞}	流體進口溫度	$[K]$
u_0	流體平均速度	$[m/s]$
v_c	冂型渠道振盪速度	$[m/s]$
V	輸入電壓	$[Volt]$
P	輸入電能	$[W]$
Q	空氣流量	$[m^3/s]$



x, y, z	卡氏座標	[m]
θ	角度	[rad]
ν	動黏滯係數	[m ² /s]
-	時均值	
Δ	純量差值	
β	空氣熱膨脹係數	[K ⁻¹]



第一章 緒論

為因應全球石油危機，節約能源的政策已經得到諸多先進國家的共識與注意，舉船舶引擎的動力輸出源為例，船舶引擎的發展將朝向低轉速與高溫高壓之熱力循環方向來邁進，以提升船舶引擎的輸出功率進而降低燃油成本，因此機械元件所必需承受的熱負載量也逐年增加，為確保機器能夠承受更高熱力循環溫度與壓力，以維持其正常的使用壽命期限，其改善之道，除了發展能夠承受更高溫度與壓力的熱機構材料外，另一個有效率的解決方法則為發展高性能的冷卻散熱系統。依照目前船舶柴油推進引擎的規格為例，其內部燃燒室之最大循環壓力與溫度（Maximum cycle pressure and temperature）已高達 120 bar 及 1500°C，位於引擎燃燒室附近的機械元件，更因長期處在高溫與高壓的負載狀態下，而容易發生故障損壞，尤其是燃燒室內部的活塞，其頂部直接與汽缸內之火焰接觸，除了承受爆炸瞬間的極大壓力外，亦從燃氣中吸收了大量的熱量，若活塞頂部溫度過高又不能及時冷卻，使用日久將造成活塞燒損而龜裂，致使引擎無法正常運轉而降低其經濟競爭力，同時維修的營運成本也因此增加，所以對一長期處於高溫環境下運作的機械元件而言，如何有效地降低其工作溫度一直是工業界與學術界一致努力研究的方向。

目前船舶柴油引擎的活塞冷卻系統種類繁多，以蘇撒（SULZER）的大型柴油引擎為例，圖 1-1 為蘇撒大型柴油引擎從 1968 至 1998 年每單位活塞面積上所能承受的引擎最大輸出功率，與其所對應時間之活塞內部的冷卻系統發展過程，從中可知柴油引擎在這 30 年的發展過程中，其每單位活塞面積所能負載的最大功率由 0.34 增加至 0.78 (kW /cycle cm²)，這個結果顯示活塞內部所因應的冷卻系統更有效率，但也導致其設計逐年複雜。在 1969 至 1979 年間，蘇撒大型柴油引擎的冷卻系統主要為在活塞冠內之冷卻室設計一些冷卻孔道，當活塞進行往復運動時，加壓的冷卻流體

經由在冷卻室下方的伸縮管進入此孔道內，俟其完成熱交換後，再藉由另一伸縮管將冷卻流體送出引擎外，完成冷卻系統的循環。為了能使活塞承受更大的輸出功率，1980 年後，蘇撒採用了另一種冷卻系統，此種冷卻系統保留之前的冷卻室，但額外在活塞冠下方加裝少許的密封管道，稱之為往復運動熱管，即是利用其往復運動的特性來增加冷卻效果，此冷卻管道又非常接近受熱表面，故冷卻效果大增，其詳細結構斷面如圖 1-2 所示，至於在最近這幾年，更出現以衝擊噴射 (jet impingement) 來提昇活塞內的熱傳性能，雖然此技術有助於冷卻效率的提昇，卻也因此無形中增加了製造上的困難。

探討引擎活塞熱負載的問題相當複雜，由於內容牽涉到垂直向的活塞往復運動與燃燒室激烈的流場變化，所以早在過去就曾有人簡化此類複雜的物理模式來初步研究之，Grassmann 和 Tuma [1]在 1979 年以實驗探討於紊流模式下，一受脈動力之平滑管流的質傳特性，結果證明其 Sh. no. (Sherwood number)相較一般穩態管流增加 250%，Kim [2]等人利用數值計算，發現遭受脈動力影響的流場，其熱傳特性亦受其所施的脈動力大小而有所差異，Mackley, Tweddle 和 Wyatt [3]利用脈衝流 (pulsatile flow) 流經內有嵌入擋板的管道中，結果發現 Nu. no. (Nusselt number) 能有效地增加，Patera 和 Mikic [4]利用擁有凹槽結構的管道來刺激內部流場的不穩定性 (hydrodynamics instability)，結果發現當流場接近臨界雷諾數時，流體的振盪擾動會導致流場產生頻率共振 (resonant)現象，進而提高熱傳效率，Tatsuo Nishimura、Shingho Araka、Shinichiro Murakami 和 Yuji Kawamura [5]利用振盪流 (oscillating flow) 流經一正弦波型管道與弧型管道，發現管壁的幾何結構對渦流型態影響不大，但是在高雷諾數，渦流在弧形管道中 (三維渦流)較正弦波型管道中(二維渦流)來的不穩定許多，Mackley 和 Ni [6]利用振盪流(oscillation flow)流經安插週期性擋板的管道，結果發現軸向混合 (radial mixing)效果相當良好，此外 Chang and Su、Hwang 和 Yangz [7]

利用充份展開流流經安插週期性助條(rib)結構的垂直向方形管道，實驗中並搭配上往復狀態(reciprocating)的活塞運動，結果發現 Nu (reciprocating Nusselt number)/ Nu_0 (nonreciprocating Nusselt number) 正比於 Re 值，並在 Pu (Pulsating number) 值為 10.5 時 Nu/Nu_0 可達 165%，Fu et al.[8] 在加熱壁面上裝置移動薄塊，並藉由薄塊在加熱壁面上快速地往復運動，造成壁面上邊界層的掃除，進而增加管道內的熱傳效率，其結果顯示熱傳最大可以增加 98%。

對於如何改善活塞頂面溫度，在實際物理模式下廖[10]曾對於活塞頂部高溫面下方加裝一冷卻流道如圖 1-3 所示，並採取二維 ALE 方法進行數值分析，針對不同噴入氣流的雷諾數、活塞頻率和活塞振幅，比較其冷卻熱傳效應，其結果顯示當雷諾數越高，工作流體所能帶走的熱量也就越多；另外當活塞振動頻率越高時，隨時間的平均熱傳率也會提高，值得注意的是當振幅增大時，循環週期內的最高熱傳率也會伴隨著增高，連[11]則是延續廖[10]所作的計算，更進一步在冷卻渠道上加上一層多孔性介質以探討其熱傳效應，結果顯示加入多孔性介質後的確能有效改善活塞頂部高溫壁面的熱傳，連[11]歸納的結果為活塞開始振動時，在低浮力效應下的平均紐塞數變化較大，但其對整體時間平均的紐塞數而言還是比高浮力狀況下來的大，這也就說明浮力效應加強將會使冷卻熱傳效應降低，然而相關的實驗文獻卻極少，故難以驗證廖[10]與連[11]理論的正確性。

所以此次實驗的重心將專注於活塞的實際物理模式，並分成兩個部分來著手討論，首先進行流場可視化的部分，先選定適當流量的送風機構，並設計輸送工作流體的管線配置，再將 U 型測試管道水平放置並給予振動頻率與層流模式下的流量，等待機構運轉呈穩定狀態，並利用 Star-CD 軟體事先計算出 U 型渠道的二維流場區域，再塗佈白脂油於直徑 5 微米的鎳鉻絲表面上，爾後放置鎳鉻絲於欲觀察之二維區域，電源供應器提供電能使鎳鉻絲加熱，使鎳鉻絲表面上的白脂油瞬間蒸發，蒸發後的乳白色香脂

油氣體即形成觀察流場可視化的煙線，藉由煙線的走向便可與廖[10]所做數值計算流場兩相比較驗證，以完備活塞頂部的冷卻熱傳分析。

待完成流場可視化後，再討論往於復運動下口型管道頂部的熱傳效率分析，機構大抵上還是沿用流場可視化的送風機構與輸送流體的管線配置，風機於此供給紊流模式下的流量，並安置加熱片於渠道頂部作為加熱面，於此所使用的加熱片元件是利用巴沙木與銅片來製作之，用途為估計出渠道頂部強制對流所帶走的熱量值，實驗過程中會搭配上不同的振動頻率與雷諾數，進而得到此渠道頂部的冷卻熱傳效率分析，最後再將實驗結果與 Star-CD 所做出的數值計算相互驗證，以完備活塞頂部的冷卻熱傳分析。

期望這次研究的實驗數據結果能有一定性分析，對於未來工業界實務應用、活塞冷卻熱傳分析與高性能熱交換器設計等，能有一設計參考的依據。



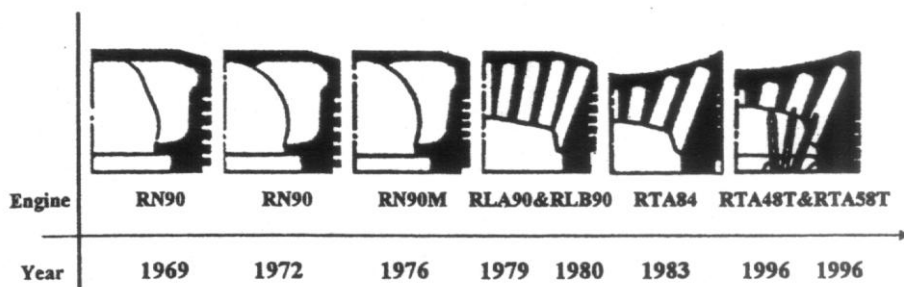
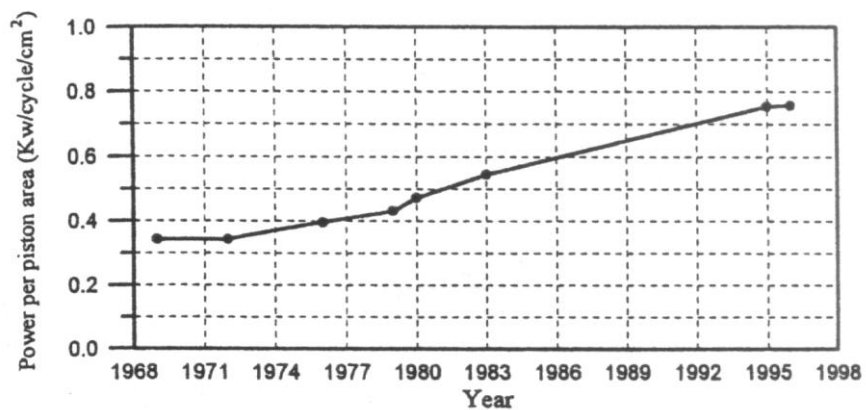


圖 1-1 歷年 Sulzer 柴油引擎動力輸出圖

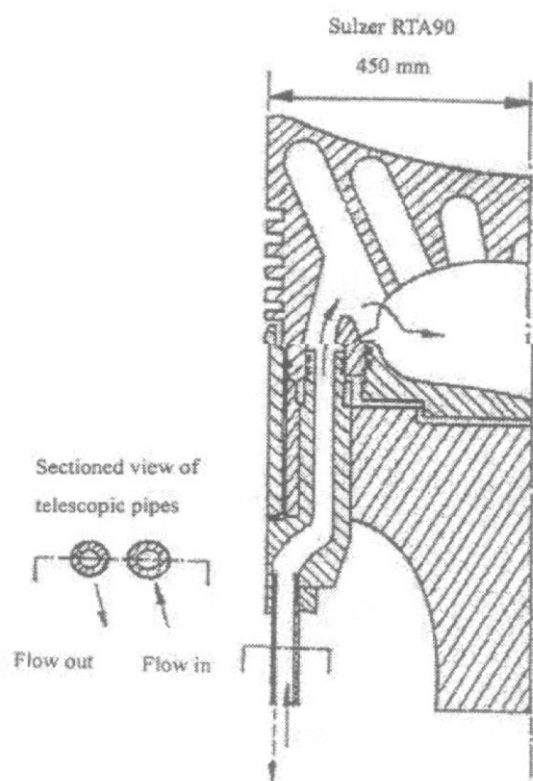
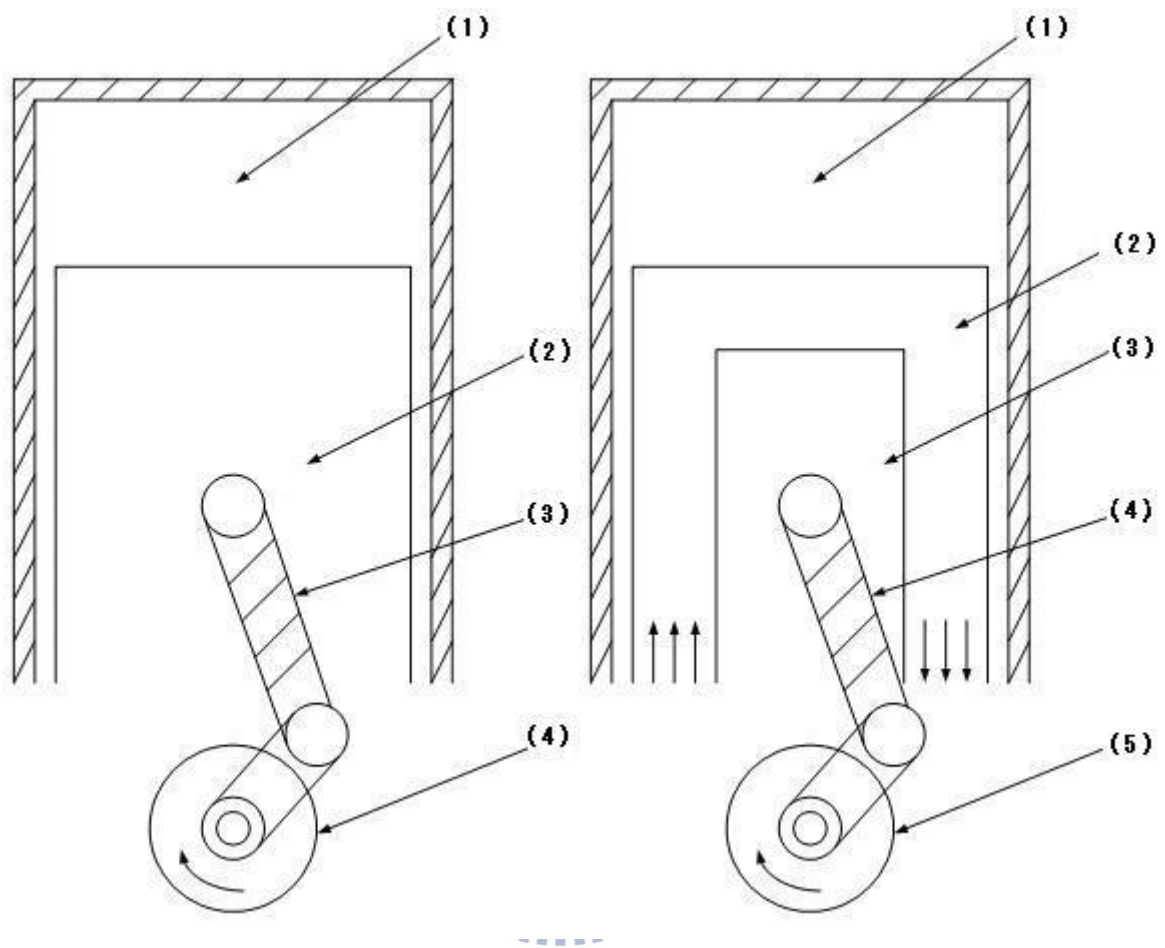


圖 1-2 Suzler RTA90 機型之活塞冠斷面示意圖



(1)汽缸燃燒室 (2)活塞
(3)曲柄軸 (4)飛輪

(1)汽缸燃燒室 (2)冷卻渠道
(3)活塞 (4)曲柄軸
(5)飛輪

(a) 一般引擎示意圖

(b) 加裝冷卻渠道示意圖

圖 1-3 引擎活塞機構示意圖

第二章 往復式冷卻渠道之熱流實驗

2.1 物理模式

本研究將以實驗的方法進行U型渠道往復運動，並探討於層流模式下渠道內部的流場可視化與紊流模式下渠道頂部的熱流場冷卻分析，其實際物理模式如圖 2-1 所示，在一個長度為 12cm、寬度為 3cm、高度(垂直紙面方向)為 9cm 的U型三維渠道中，放置發煙器與加熱片於渠道頂部內面Z速度向量不顯著處，以利將研究簡化成二維流場，當時間為零時，U型渠道為靜止狀態，俟流量穩定後給定一振動頻率 f_c 與振動振幅 l_c ，使U型渠道平行進口處流場的方向來進行往復運動，所以渠道的振動速度換算則為 $v_c = 2\pi \cdot f_c \cdot l_c \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t)$ 。

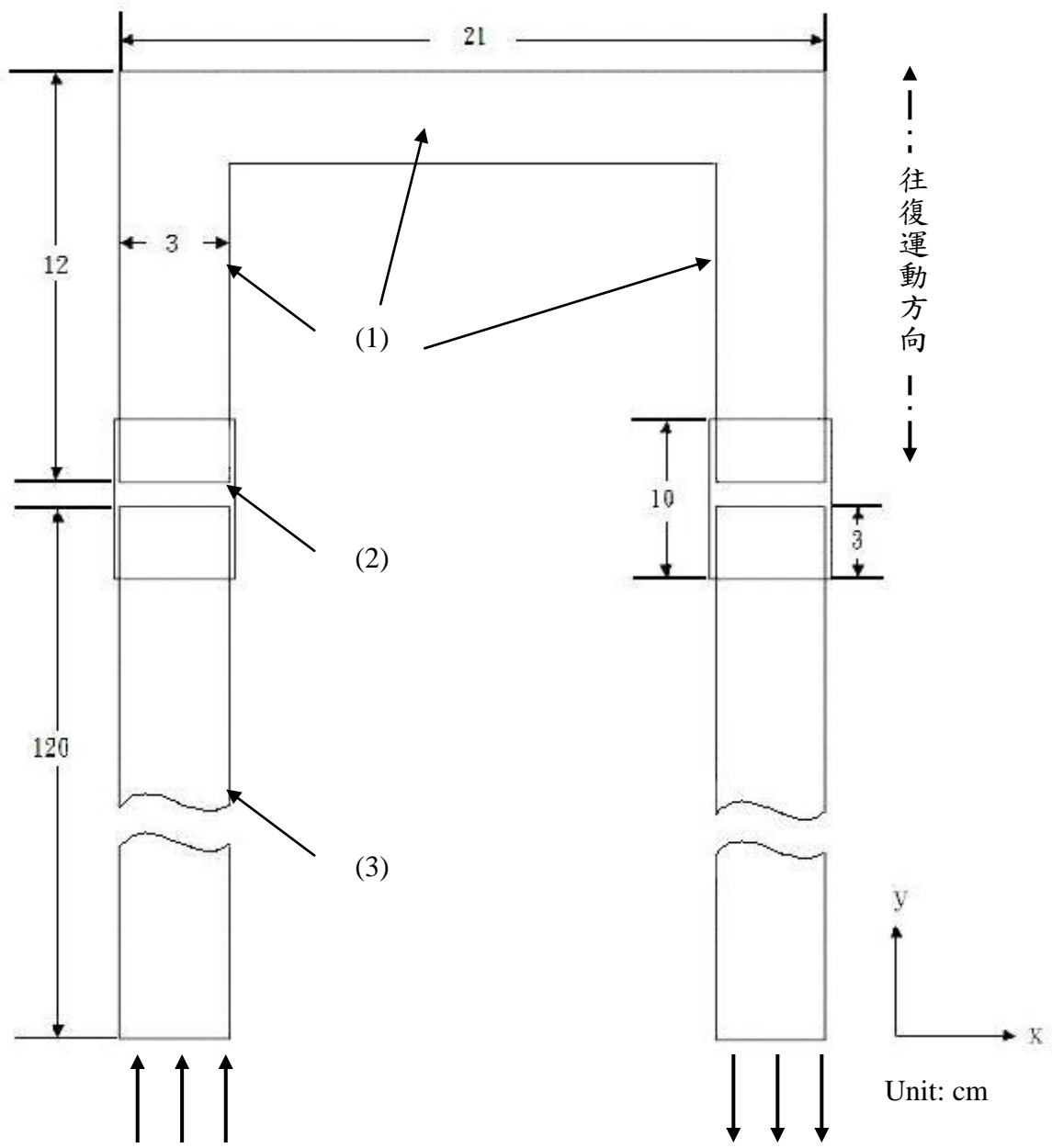
為了防止U型渠道在進行往復運動時流體不慎逸出，所以設置一個全長為 10cm 的方形套管與U形渠道和延長渠道相連接，至於在連接處的縫隙則採取一塑膠套來封閉之，方形套管的後方保留 3cm 距離與延長渠道相連接並採取固定式，至於前方 7cm 距離則保留予U型渠道往復運動所需之空間，所以採取為非固定式。

2.2 實驗設備

實驗設備組合方面分為加熱與溫度量測裝置、往復運動機構、架設機構、發煙器和個人電腦等五個部分，如圖 2-2 所示，其中實驗機構內包括往復運動機構、架設機構、與加熱裝置。

2.2.1 架設機構

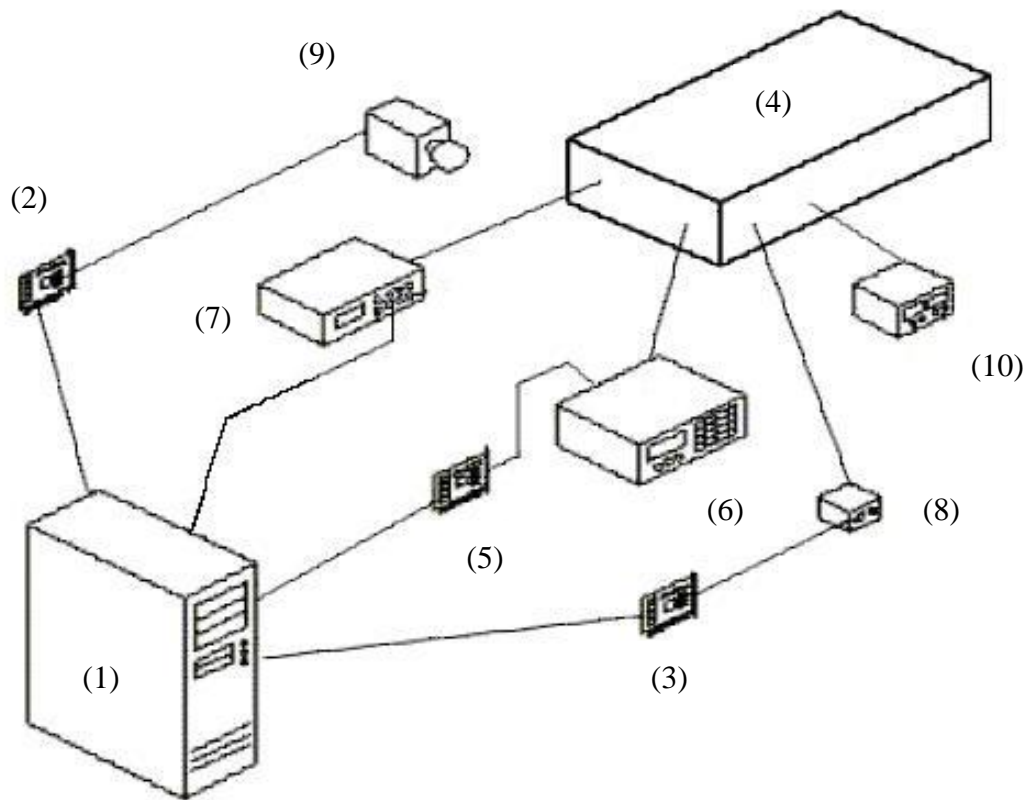
本實驗選擇多翼式風機作為工作流體輸送的動力源，流體從風機輸出後先經由圓管傳輸，途中經過流量計與方型轉接頭後，再經由方管輸送到U型渠道來進行流場可視化與熱傳效率分析，其架設機構如圖 2-3 所示。



(1) ㄇ型渠道
(2) 方形套管

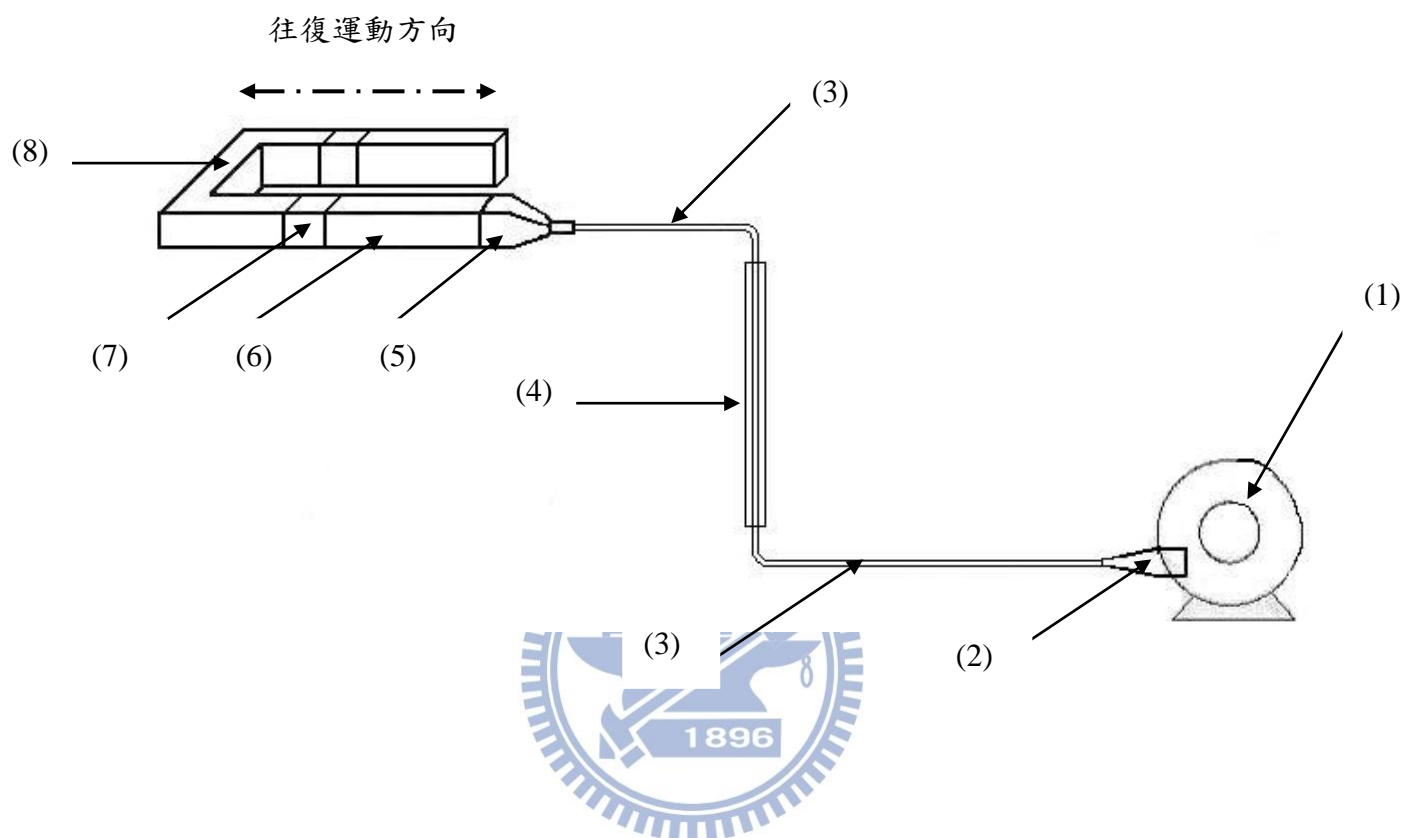
(3) 延長渠道

圖 2-1 ㄇ型渠道物理模式圖



- | | |
|-----------|------------|
| (1) 個人電腦 | (7) 發煙器供應器 |
| (2) 影像擷取卡 | (8) 馬達驅動器 |
| (3) 介面卡 | (9) 高速攝影機 |
| (4) 實驗機構 | (10) 電源供應器 |
| (5) 資料擷取卡 | |
| (6) 溫度擷取器 | |

圖 2-2 實驗設備組合圖



- | | |
|------------|------------|
| (1) 多翼式鼓風機 | (5) 方型管轉接頭 |
| (2) 風機轉接頭 | (6) 延長渠道 |
| (3) 圓形管道 | (7) 方形套管 |
| (4) 流量計 | (8) ㄇ型渠道 |

圖 2-3 實驗架設機構圖

2.2.2 往復運動機構

往復運動機構區分為傳動組件配合上步進馬達及驅動器，其組合詳述如下：

(a) 傳動組件：

傳動組件如圖 2-4 所示，馬達傳動軸 (1) 背面與步進馬達 (8) 相連，而正面則與振幅元件 (2) 相接，振幅元件 (2) 為圓柱狀結構，其上設置二個孔洞裝置，位於中心處的孔洞與馬達傳動軸 (1) 相接合，至於靠邊緣處的孔洞則是留予連桿 (3) 並與其接合，至於連桿 (3) 在設計上則是期望在往復運動機構可容許的尺寸下，設計愈長愈能符合實際之餘弦波振盪條件，其原理證明列式如下所示：

物理長度代號如圖 2-5 所示

$$-r \leq s \leq +r$$

s : 連桿軸心 (9) 上下移動的距離

r : 振幅元件 (2) 半徑

$$s = lc * \sin \theta + \sqrt{l^2 - (lc * \cos \theta)^2} - l$$

$$\theta = 0^\circ, s = \sqrt{l^2 - lc^2} - l$$

$$\theta = 90^\circ, s = +lc : \text{位於上頂點}$$

$$\theta = 180^\circ, s = \sqrt{l^2 - lc^2} - l$$

$$\theta = 270^\circ, s = -lc : \text{位於下頂點}$$

$$\theta = 360^\circ, s = \sqrt{l^2 - lc^2} - l \quad \text{故 } l \cong \infty, \text{ 連桿波形愈近似正弦波振盪}$$

當連桿 (3)、馬達傳動軸 (1) 與振幅元件 (2) 組裝完成後，藉由步進馬達運轉帶動振幅元件產生偏心作用，進而使連桿拉動移動滑軌 (5)，又因受限於固定軌道 (4) 的因素，故移動滑軌 (5) 只能作直線往復運動，而振幅元件 (2) 上所設置之二個孔洞的直線距離，即為移

動滑軌 (5) 進行往復運動的振幅，為了確保往復運動機構在作動時能夠平穩不受應力壓迫而變形，所以機構的材質上全部選用不鏽鋼作為材質，機構實體如圖 2-6 所示，爾後再將 U 型渠道 (7) 安置於移動滑軌 (5) 之上，其實體如圖 2-7 所示，如此 U 型渠道 (7) 便可藉由移動滑軌 (5) 而達成往復運動的物理條件。

(b) 步進馬達及驅動器：

步進馬達必須提供馬達傳動軸一個旋轉轉速，因此選用 SANYO DENKI 公司型號 103H8223-5111 的步進馬達，其解析度與相關的馬達運動參數如表 2-1 所示，同時利用個人電腦，透過 RS-232 介面卡與 Parker 公司型號 OEM650 的馬達控制器相連結，以控制步進馬達的作動行為。

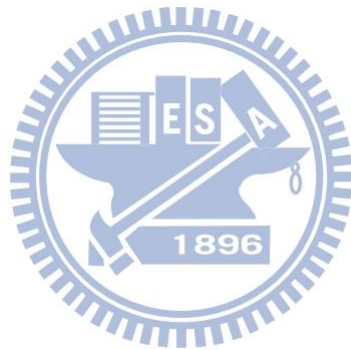
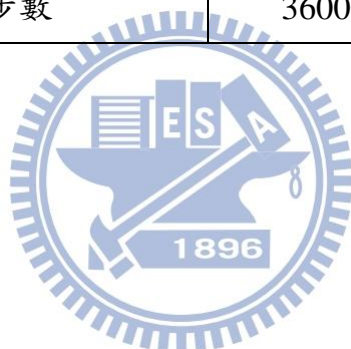
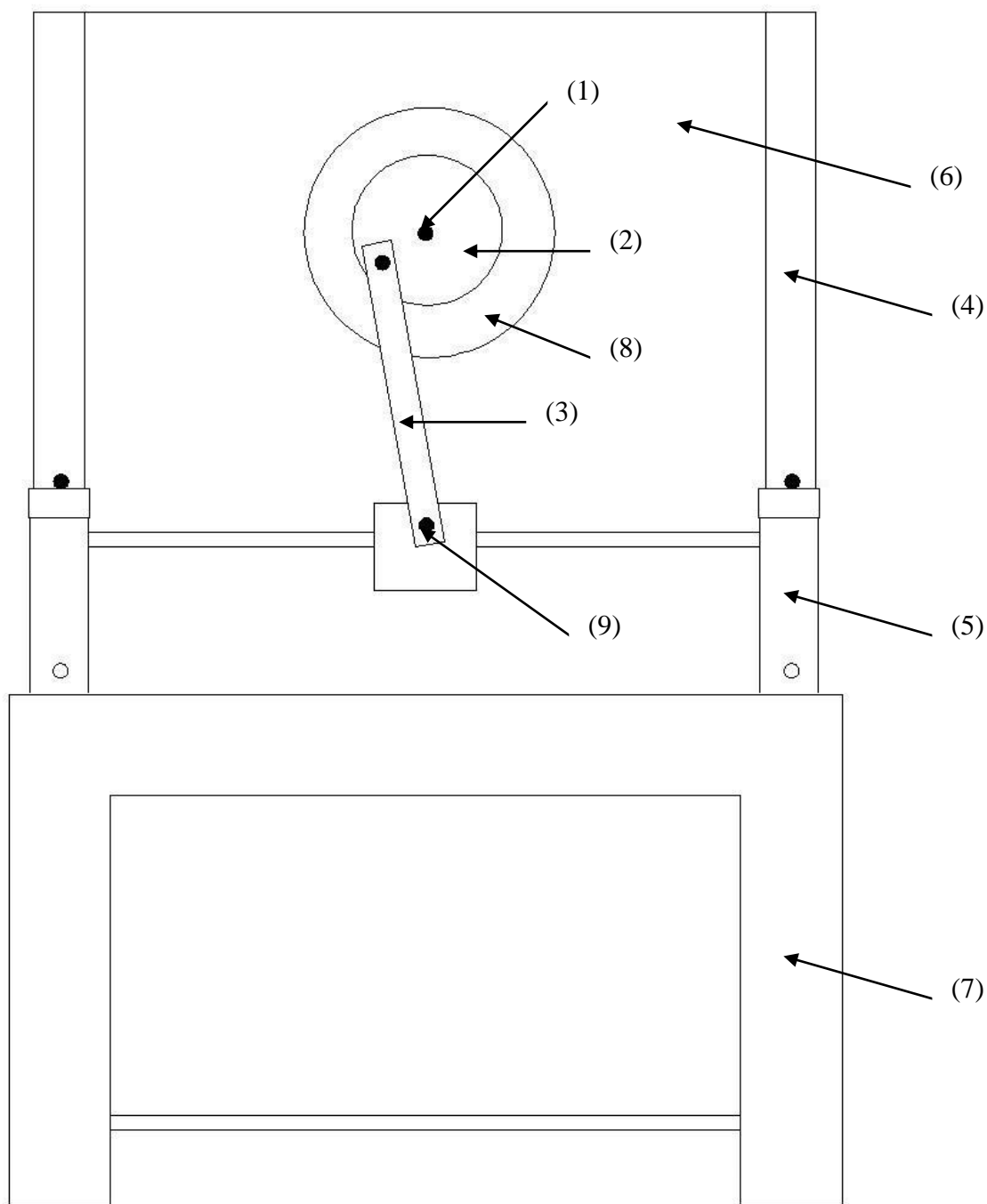


表 2-1 步進馬達運動參數表

解析度 (step)	36000
轉速 (rev/s)	0~20
角加速度 (rad/s^2)	0~10
轉動步數	36000





- | | |
|-----------|----------|
| (1) 馬達傳動軸 | (6) 底板 |
| (2) 振幅元件 | (7) ㄇ型渠道 |
| (3) 連桿 | (8) 步進馬達 |
| (4) 軌道 | (9) 連桿軸心 |
| (5) 移動滑軌 | |

圖 2-4 傳動組件組合上視圖

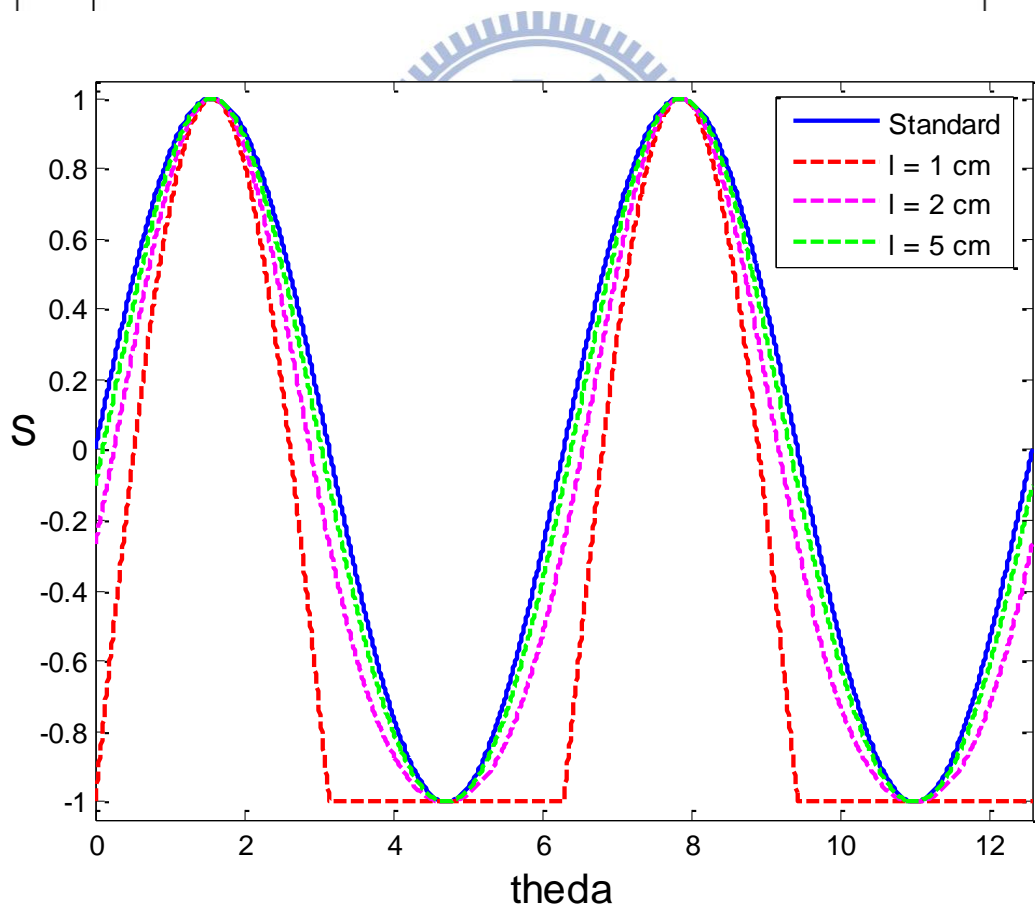
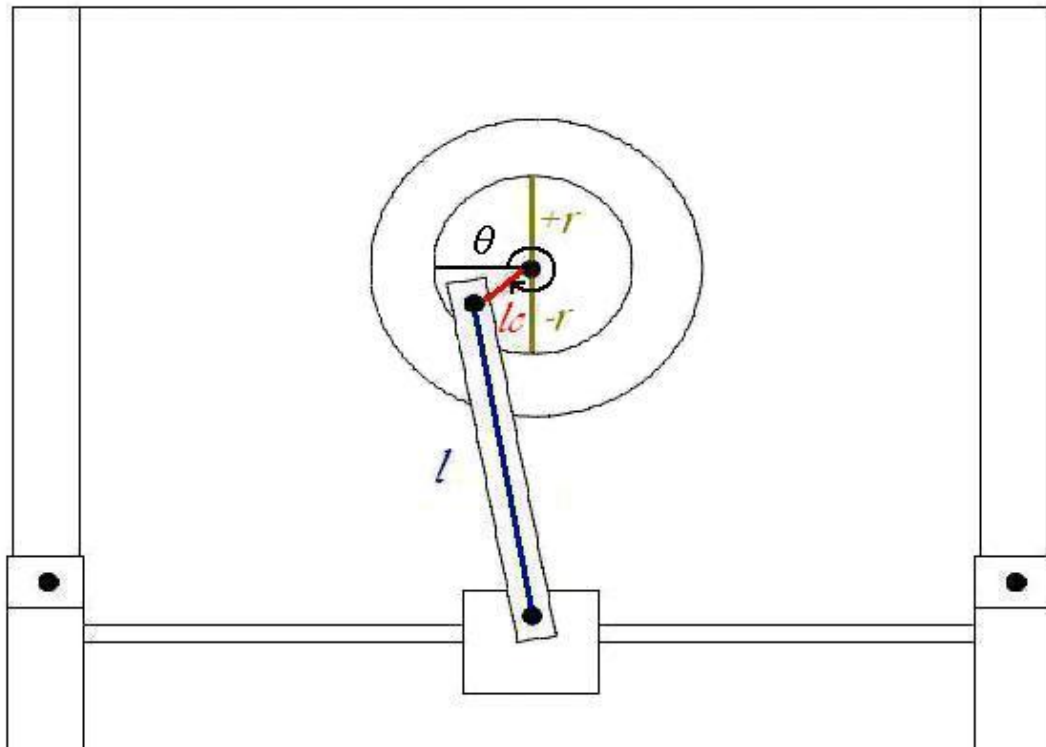


圖 2-5 連桿尺寸證明示意圖



圖 2-6 往復機構實體之上視圖

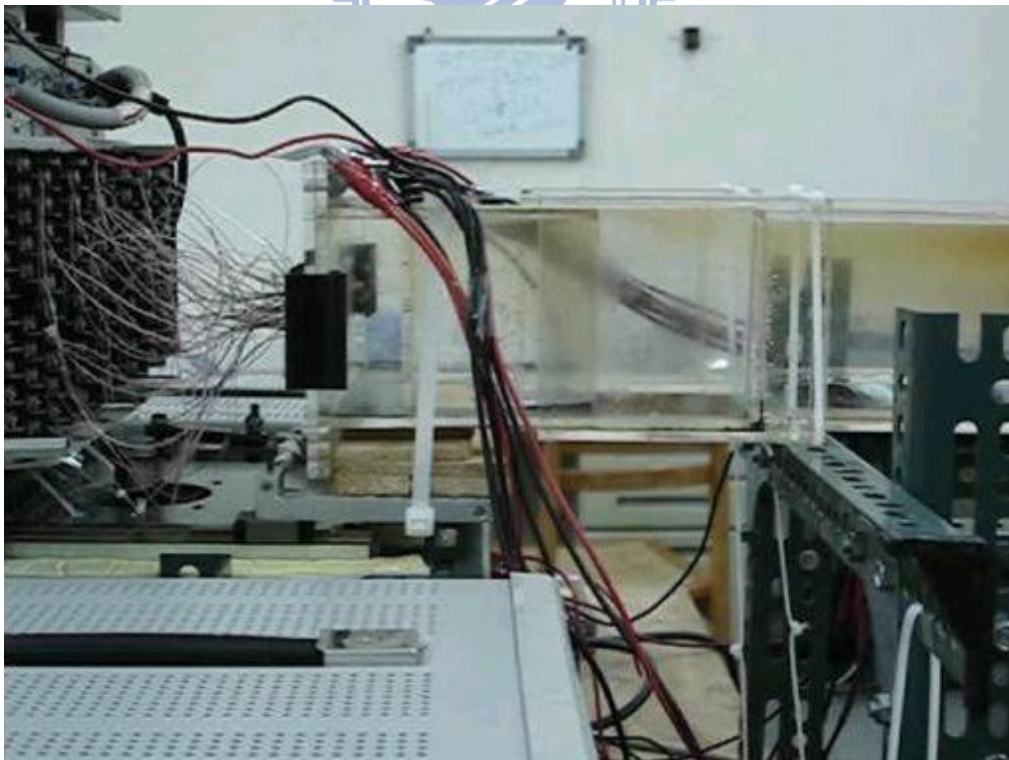


圖 2-7 U型渠道置於往復機構之側視圖

2.2.3 發煙器原理

將白脂油塗佈於鎳鉻絲表面，利用電源供應器提供鎳鉻絲電能，待鎳鉻絲發熱後，熱能便可將塗佈其表面之白脂油瞬間蒸發，白脂油蒸發後產生之乳白色蒸氣，即口型渠道流場可視化中所欲觀察之煙線，發煙器機構如圖 2-8 所示。

2.2.4 加熱與溫度量測裝置

為得到較佳的等溫面，以銅箔、天然雲母、鎳鉻絲及巴沙木等材料來製作加熱片，每片加熱片上均黏有七條熱電偶線，藉此量測出加熱片的各點溫度，其詳細的製作過程如下：

(a) 材料準備：

銅箔（厚度 0.15mm）、天然雲母片、電路板（厚度 1.3mm）、直徑 0.17mm 之鎳鉻絲、AB 膠，電氣絕緣膠布、巴沙木、線徑 0.005inch 之 J-TYPE 熱電偶線與快乾膠等。

(b) 雲母片夾層製作：

取平整且厚度適當的天然雲母片，切出寬度 13.2mm，長度 32mm 之長條型。將天然雲母片剝離，取出厚度約 0.5mm 者兩片。取厚度 1.3mm 之電路板，切出寬度 13.2mm，長度 32mm 之長條形，並於裁好的電路板上繞以細密且均勻間隔之鎳鉻絲（圖 2-9 (5)），電路板上的鎳鉻絲不可相互重疊以避免短路，並將鎳鉻絲穿過電路板最外側的適當孔位。以快乾膠將纏繞之鎳鉻絲固定於電路板上，再將剪裁好的兩片 0.5mm 厚之雲母片包覆在繞線電路板的正反兩面，用以絕緣鎳鉻絲與銅箔避免漏電，並用電氣絕緣膠布固定。於長度方向鑽三個孔徑 1mm 之通孔，以利熱電偶線穿過（圖 2-9 (2)(3)）。

(c) 銅箔處理：

切取尺寸為 32mm×24.2mm 厚度 0.15mm 之銅箔，並且於寬度方

向距邊緣 5.5mm 處輕微切出折痕，將銅箔折成寬度為 13.2mm 之 U 字型（圖 2-9 (1)），測試面盡量保持平坦。並將穿過雲母片夾層之三條熱電偶線黏貼於銅箔與雲母片內側通孔對應的位置（圖 2-9 (6)~(8)）。

(d) 巴沙木處理：

切取 32mm×13.2mm×1.1mm 的巴沙木（圖 2-9 (4)），在巴沙木內側距離中心點約 8mm 處黏貼兩條熱電偶線（圖 2-9 (9)），並在巴沙木上鑽五個直徑 1mm 之通孔，中間三個通孔各用來通過先前黏貼的三條熱電偶線，另兩個通孔距離巴沙木邊緣 1mm，用來穿過與固定鎳鉻絲。最後在巴沙木的背面距離中心點約 8mm 處再黏貼兩條熱電偶線。（圖 2-9 (9)）

(e) 加熱片成形：

將步驟 (b) 之繞線雲母片夾層以 AB 膠黏貼於步驟 (c) 之銅箔內側，使銅箔成為發熱體，再以 AB 膠緊貼在步驟 (d) 之巴沙木內側。組裝時，將各熱電偶線與鎳鉻絲分別由巴沙木上的各通孔拉出，至此完成加熱片的組裝工作。製作過程中務必保持加熱面銅箔的平整，以達到均溫的效果以利計算熱損失值，最後在凸塊底部再加裝一 32mm×13.2mm×6mm 的巴沙木，以及為了減低熱量由加熱片背面散失產生的熱損失，故在加熱片露於外界的部分再貼附厚度為 25mm 之絕熱泡棉，故加熱片尺寸為 32mm×13.2mm×10mm 如圖 2-9 所示。

(f) 加熱片測試：

將完成後的加熱片之兩條鎳鉻絲連接電源供應器，由電源供應器提供一電位差，鎳鉻絲通電後發熱，使銅箔溫度上升。量測黏貼於銅箔背面三條熱電偶線之溫度，若彼此溫度差均能維持在 0.1°C 內則通過測試。

至於另外八塊 32mm×13.2mm×10mm 之加熱片，其詳細製作方法也如同上述 (a) ~ (f) 的步驟，在每塊加熱片上都有七條熱電偶線，其中三條熱電偶線黏貼於銅片背面，兩條熱電偶線預埋在巴沙木內側，另兩

條熱電偶線則黏貼在巴沙木背面，故九塊加熱片所含量測環境溫度的熱電偶線，共有六十三組。

為準確的控制每個加熱片之輸入熱量，將每一加熱片分別連接至 Good Will 公司型號 GPC-3030D 的電源供應器，並且利用 TES 公司型號 2201 的三用電表量測電壓與電流值，溫度量測部分則利用 OMEGA 公司 TT-J-36 熱電偶線(線徑為 0.005inch 之 J-TYPE 熱電偶線)，配合 Yokogawa 公司型號 DA-2500E 的資料擷取器，讀取各熱電偶線溫度值。並以 National Instruments 公司 AT-GPIB 資料擷取卡，將熱電偶線所量得的溫度值讀入個人電腦進行分析。



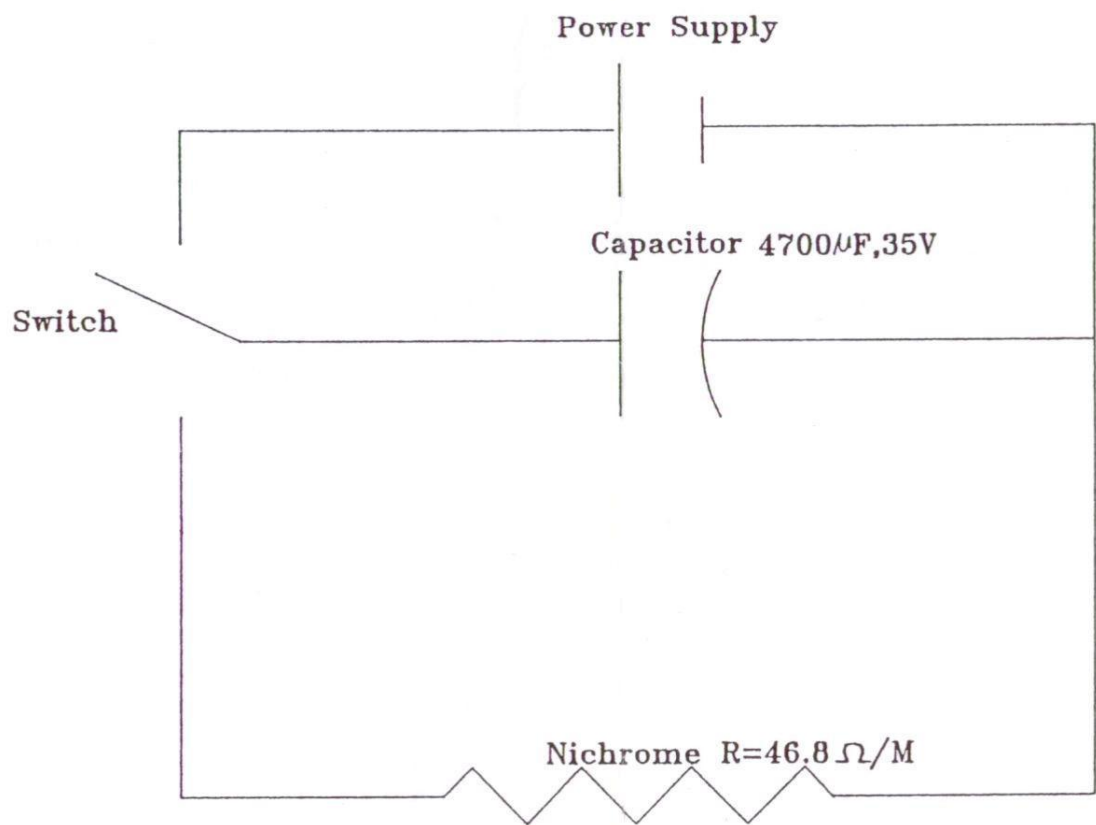
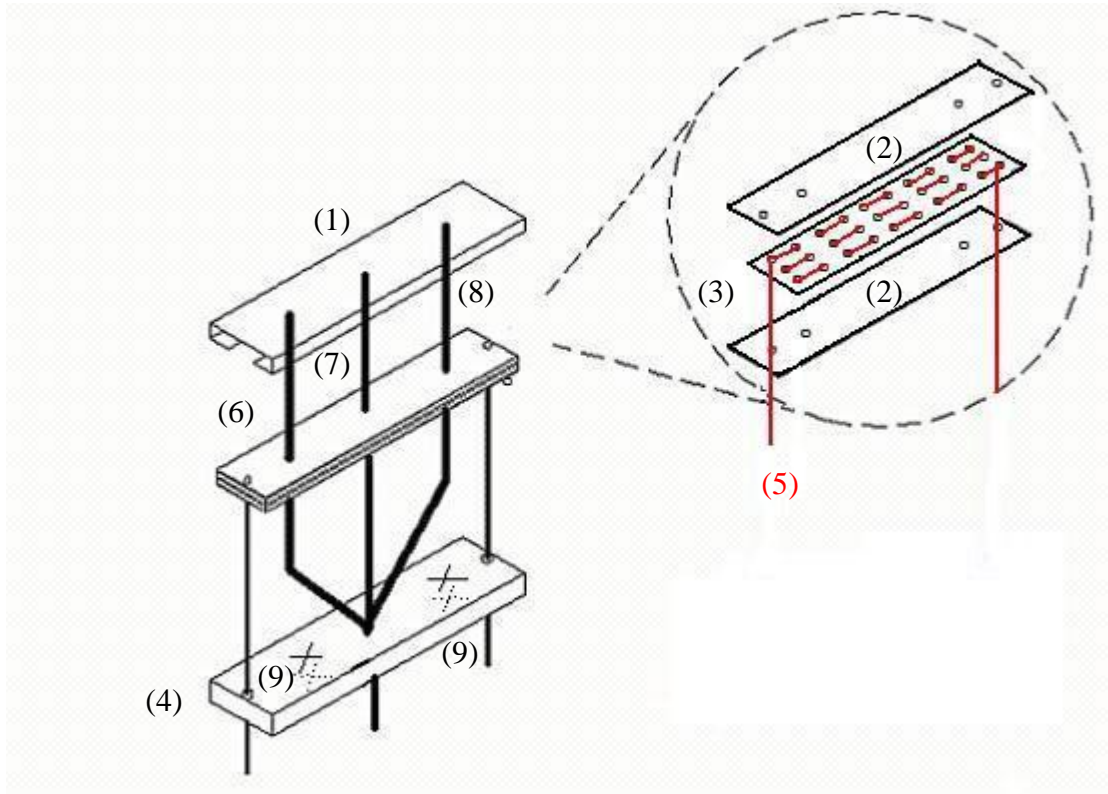


圖 2-8 發煙器裝置圖



- (1) 銅箔
- (2) 雲母片
- (3) 電路板
- (4) 巴沙木
- (5) 鎳鉻絲
- (6)~(8) 黏貼於銅箔背面之熱電偶
- (9) 黏貼於巴沙木上下之熱電偶

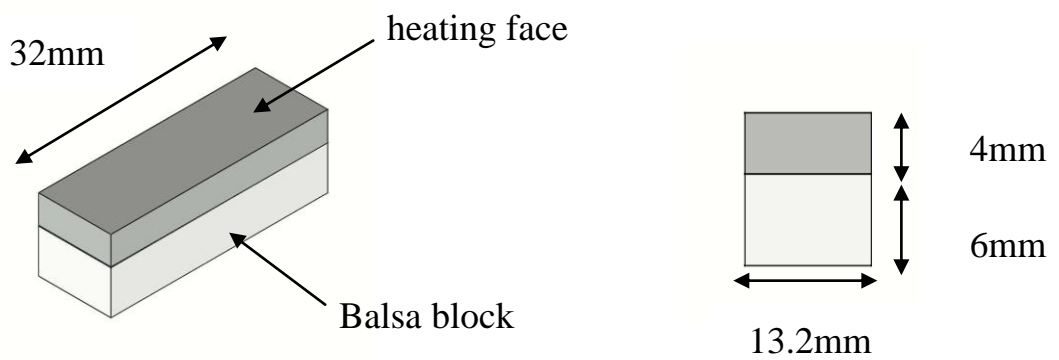


圖 2-9 加熱片結構示意圖

2.3 實驗步驟

本研究之主要目的在於以實驗的方法，進行口型渠道往復運動於層流模式下之流場可視化，並於紊流模式下，驗證渠道頂部之熱傳實驗與數值計算的差異，所以實驗的步驟可分為三部份：

1. 啟動往復運動。
2. 口型渠道流場可視化之觀察。
3. 口型渠道頂部壁面溫度量測。

2.3.1 啟動往復運動

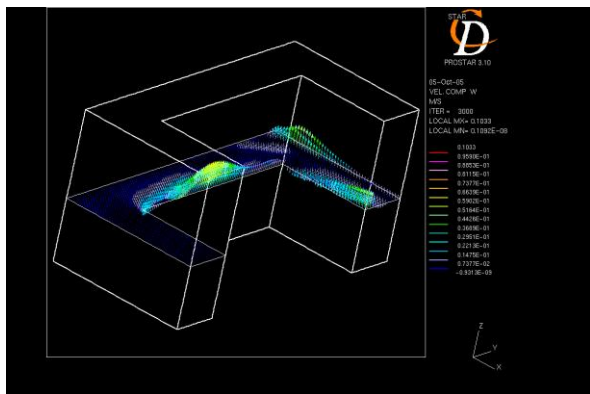
藉由電腦內部的控制器去調整步進馬達的轉速 (revs/sec)，以形成口型渠道的振動頻率 (f_c)，因為步進馬達轉一圈 (rev) 即為口形渠道前後來回振盪一次，為求精準故利用碼錶量測口型渠道振盪 120 次所歷經的時間 (t)，並換算成頻率與控制器所輸入的頻率值作比較，發現誤差極小極為精準，但因步進馬達扭力無法負載移動滑軌快速移動所導致的力矩，所以轉速不能太大，而口形渠道的往復速度 (v_c) 因步進馬達等速度的轉動而呈現週期性的變化，可經由下式求得

$$v_c = 2\pi \cdot f_c l_c \cos(2\pi \cdot f_c t) \quad (2-1)$$

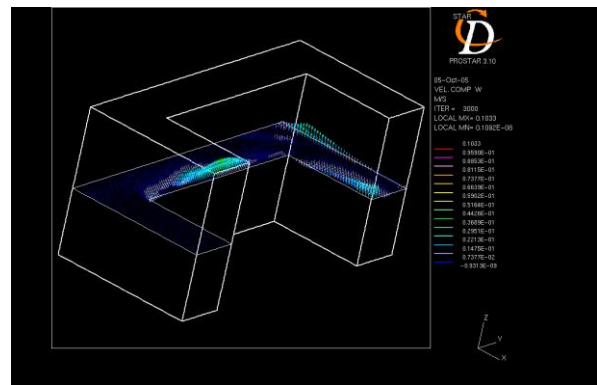
式中 t (sec) 為轉動的時間

2.3.2 口型渠道流場可視化之觀察

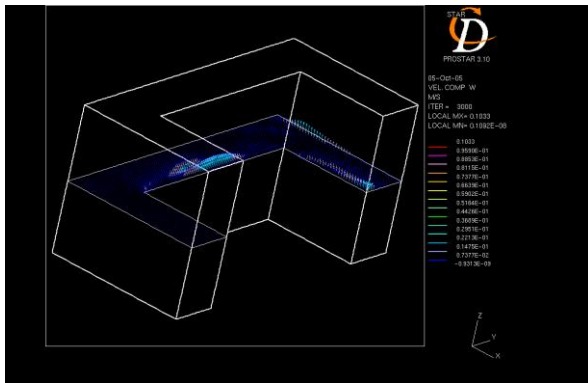
為將實驗合理地簡化成二維的流場，所以先藉由 Star-CD 軟體計算出口型渠道的內部流場分布，並擷取出 Z 軸各截面的 Z 速度向量分佈，如圖 2-10 所示，發煙器必須選擇內部 Z 速度向量較微弱的區域來放置，二維流場的假設才能成立，由計算結果可知發煙器應放置於從底部算起高度約為 4 至 5cm 處，至於發煙器實際安裝的位置如圖 2-11 所示，其中紅色表示坳成一個迴路型的發煙器以方便橫向觀察。



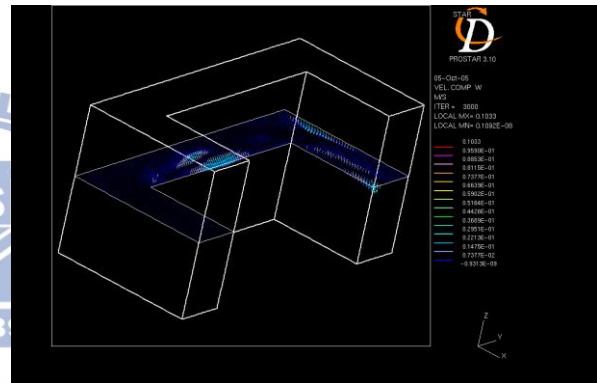
(a)



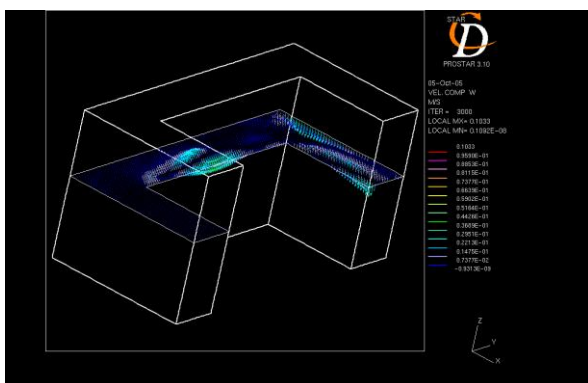
(b)



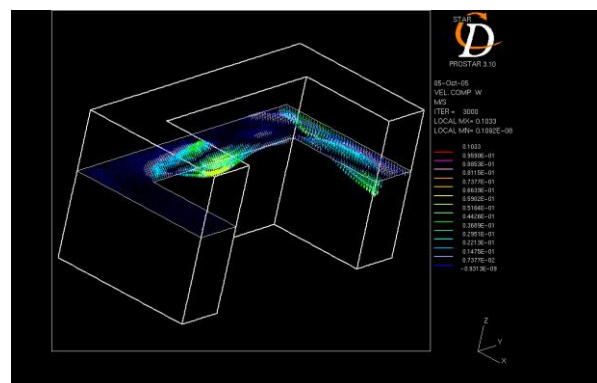
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 2-10 冂形渠道從底部進行擷取 Z 軸截面之 Z 向速度分佈圖

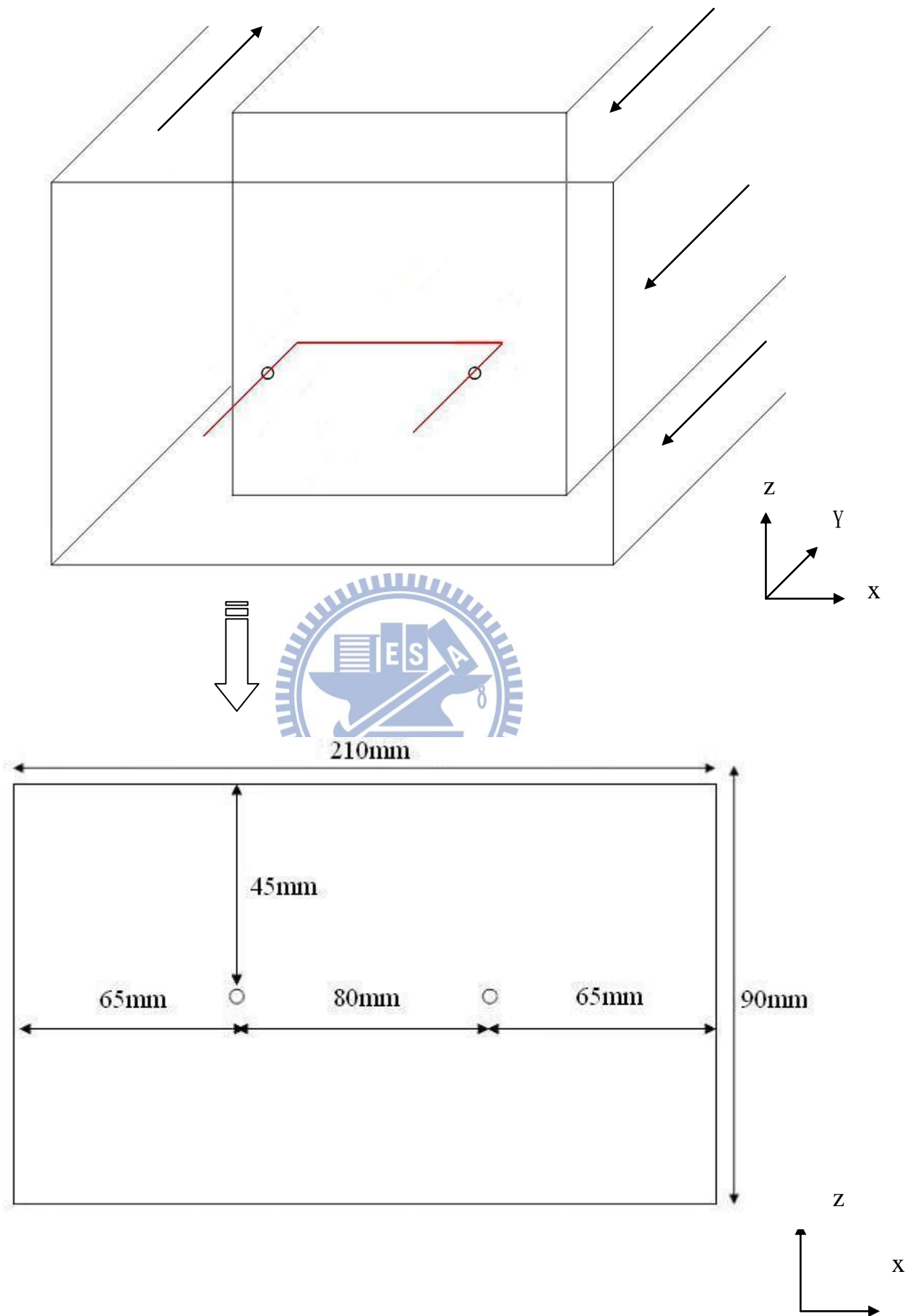


圖 2-11 發煙器於U型渠道頂部位置圖

2.3.3 口型渠道頂部壁面溫度量測

如同上述將加熱片安置於渠道頂部內面之 Z 速度向量較微弱區域，以利簡化實驗成為二維流場，並將加熱片與渠道頂部內表面緊密結合無縫隙與凸起如圖 2-12 所示，其中以每三片加熱片為一群組，分為前段加熱區域、中段加熱區域、後段加熱區域，在每一個加熱區域裡靠左側與靠右側的兩個加熱片其作用為熱保護功能，所以中間的加熱片為實際換算平均紐塞數的依據，實驗時口型管道會先進行靜態量測，待實驗數據與數值計算值吻合後，再進行口型渠道之往復動態量測，由於 Yokogawa 公司型號 DA-2500E 的資料擷取器掃描速度較慢，故無法配合口型渠道的往復運動速度來進行暫態溫度的量測。因此以個人電腦每 60 秒求得各量測點的溫度，觀察其平均溫度的變化。溫度量測的實驗步驟如下：

1. 將管道流體雷諾數調整至實驗所需的數值。
2. 啟動往復運動機構。(靜態量測可忽略此步驟)
3. 等待流場與實驗設備運轉穩定。
4. 啟動電源供應器並個別調整加熱片的輸入功率，使各加熱片表面溫度不僅皆相同(即溫差 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$)，且銅箔表面與進口流體的平均溫差還必須維持在 $10\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。
5. 取一小時為量測的時間單位，若在量測的時間內，各加熱片表面溫度皆相同(即溫差 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$)，且銅箔表面與進口流體平均溫差持續維持 $10\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，則可判定溫度場趨於穩定，故可開始分析實驗數據，反之繼續實驗。

利用電源供應器的電能轉換來模擬熱源時，最理想的狀況為所有熱量皆傳遞到銅箔上，但實驗中熱量損失無可避免，在忽略熱輻射的前提下，當熱量輸入加熱片後，有三種傳遞的途徑，一為經由表面的銅箔傳入流場，此為計算紐塞數的主要部分。另一為經由巴沙木向後方散逸，第三部分則為加熱片彼此間的熱傳。

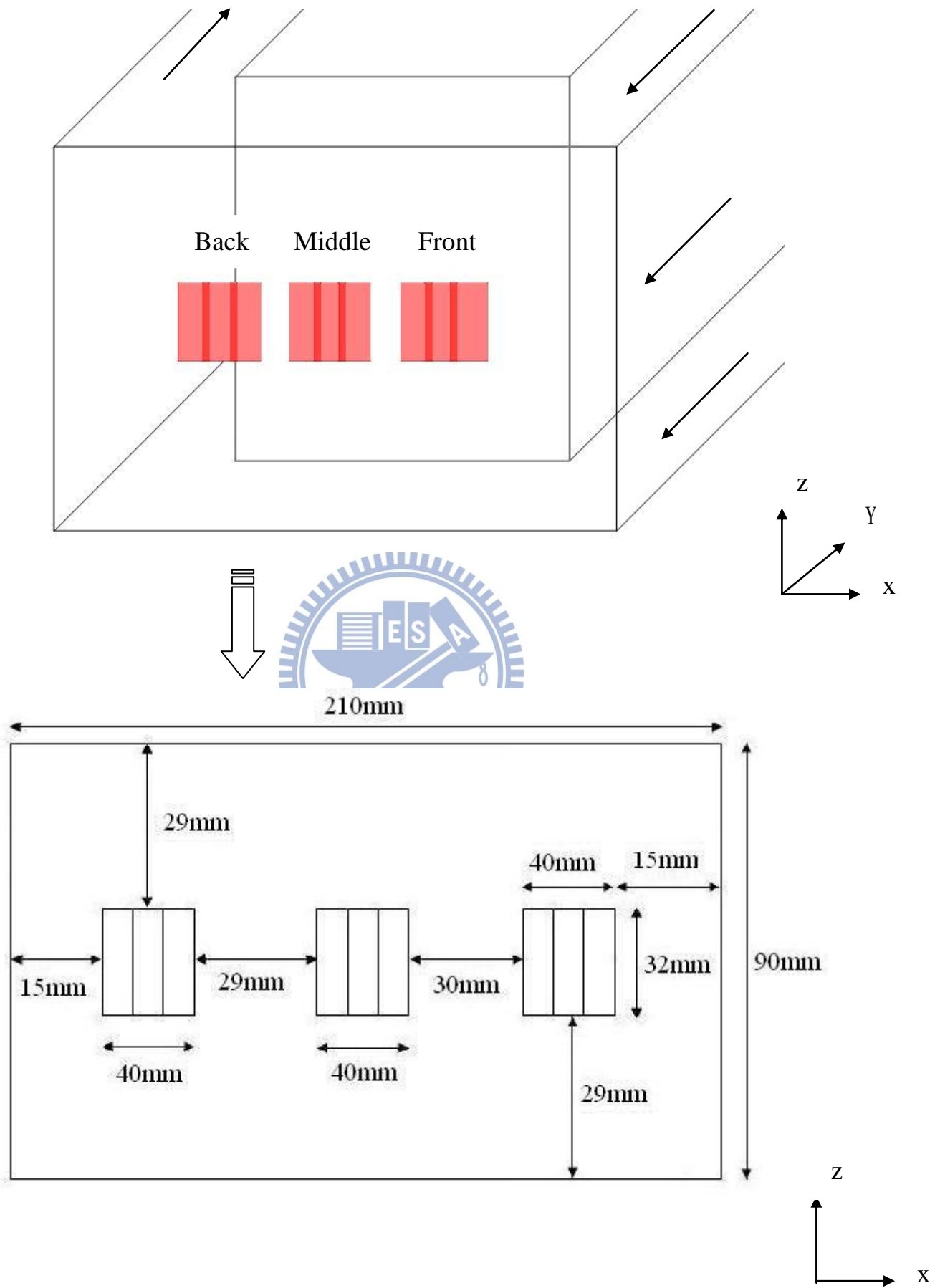


圖 2-12 加熱片於U型渠道頂部位置圖

加熱片元件的熱量計算原理與其紐塞數之定義如下述(a)至(e)所示：

(a) 輸入加熱片的能量：

電源供應器提供加熱片能量，輸入能量為輸入電壓與電流乘積

$$Q_{in} = V \times I \quad (2-2)$$

(b) 散逸的能量：

雖然巴沙木背面加有絕熱泡棉，但仍有熱量由此散逸

$$Q_{lose} = k_b \times A_b \times dT/dy \quad (2-3)$$

式中 k_b 為巴沙木熱傳導係數=0.055 (W/m°C)

A_b 為巴沙木面積=0.032×0.0132=4.2×10⁻⁴ (m²)

dT 為巴沙木兩端溫度差 (°C)

dy 為巴沙木厚度=0.0011 (m)

(c) 加熱片間熱傳：

因加熱片有熱保護措施防護其中，故加熱片間彼此的熱傳效應幾乎微乎其微，故可以忽略不計。

(d) 口型渠道頂部壁面平均紐塞數 Nu 估算：

由加熱片傳入流場的總能量為

$$Q_{air} = Q_{in} - Q_{lose} \quad (2-4)$$

根據紐塞數定義計算凸塊高溫加熱片的平均值

$$\overline{Nu} = \frac{Q_{air}}{A_h \Delta T_w} \cdot \frac{h}{k_a} \quad (2-5)$$

式中 A_h 為加熱片總表面積=0.032×0.0132=4.2×10⁻⁴ (m²)

ΔT_w 為加熱片銅箔表面與進口流體平均溫差=10°C±0.1°C

h 為管道寬度=0.03 (m)

k_a 為空氣熱傳導係數=0.025 (W/m°C)

第三章 結果與討論

本研究所討論的實驗參數，其定義如下：

$$(a) \text{雷諾數: } Re_h = u_0 \cdot h / \nu \quad (3-1)$$

h 為 U 型渠道寬度

Q 為空氣流量

A 為渠道截面積

$u_0 = \frac{Q}{A}$ 為流體平均速度

ν 為空氣動黏滯係數

$$(b) \text{無因次振動振幅: } L_c = l_c / h \quad (3-2)$$

l_c 為 U 型渠道進行往復運動的振幅

$$(c) \text{無因次振動頻率: } F_c = f_c \cdot h / u_0 \quad (3-3)$$

f_c 為 U 型渠道進行往復運動的頻率

$$(d) \text{參數 } Gr / Re_h^2 = g \times \beta \times \Delta T_w \times h / u_0^2 \quad (3-4)$$

β 為空氣熱膨脹係數

g 為重力係數

ΔT_w 為加熱片銅箔表面 T_w 與流體進口溫度 T_∞ 的平均溫差

$$(e) \text{參數 } v_c / u_0 = 2\pi \cdot l_c \cdot f_c \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) / u_0 \quad (3-5)$$

v_c 為 U 型渠道進行往復運動的速度

經由上述可得知 F_c 是經由 f_c 與 u_0 換算得到的，所以 F_c 會因 Re_h 而改變，往復運動機構在設計時已將振動振幅 l_c 固定為 15mm，故 $L_c = l_c / d = 0.5$ 為一常數，無須討論之。

3.1 U 型渠道於層流模式下之流場可視化

實驗首先啟動 U 型渠道於層流模式下之往復運動，於此選定一組 $Re_h = 180$ 與 $F_c = 0.1$ ($v_c / u_0 = 0.31$)，即流體的平均速度大於 U 型渠道的往

復速度條件，來進行流場可視化，並著手驗證相同的物理條件下，廖[10]所作之數值計算的正確性。

3.1.1 驗證渠道上移流場與廖[10]的數值計算

圖 3-1 為廖[10]數值計算於 U 型渠道向上移動之流線圖，至於發煙器原理已陳述於章節 2.2.3，實驗首先將鎳鉻絲放置於 U 型渠道內部二維效應區之底處，並於 U 型渠道向上移動過程中拍攝流場可視化如圖 3-2-(a)所示，可以發現當 U 型渠道向上移動時，鎳鉻絲瞬間所產生的煙線走向為向上，此為 U 型渠道向上移動的過程中，使得渠道內部之流體也擁有一個向上之動量所導致的結果，並與廖[10]之數值計算流線圖作比對，流場走向結果相當吻合。

爾後再將鎳鉻絲放置於 U 型渠道內部二維效應區之頂處，並於 U 型渠道向上移動過程中拍攝流場可視化如圖 3-2-(b)所示，可以發現 U 型渠道向上移動時，鎳鉻絲瞬間所產生的煙線因走向也為向上，故造成煙線撞擊 U 型渠道頂處而反彈，此為 U 型渠道向上移動的過程中，使得渠道內部之流體也擁有一個向上之動量所導致的結果，並與廖[10]之數值計算流線圖作比對，流場走向結果也相當吻合。

最後鎳鉻絲放置於延長渠道內部之流體出口處，並於 U 型渠道向上移動過程中拍攝流場可視化，如圖 3-2-(c)所示，可以發現當 U 型渠道向上移動時，鎳鉻絲瞬間所產生的煙線走向為向上，即流體產生回吸現象，此為 U 型渠道向上移動的過程中，U 型渠道與方形套管間因腔室體積變大而壓力變小，使得延長渠道內部之流體擁有一個大於原本流動動量之向反向動量所導致的結果。

3.1.2 驗證渠道下移流場與廖[10]的數值計算

圖 3-3 為廖[10]數值計算於 U 型渠道向下移動之流線圖，實驗先將鎳

鉻絲放置於U型渠道內部二維效應區之底處，並於U型渠道向下移動過程中拍攝流場可視化如圖 3-4-(a)所示，可以發現當U型渠道向下移動時，鉻絲瞬間所產生的煙線因為走向為向下，故造成煙線撞擊U型渠道底處而反彈，此為U型渠道向下移動的過程中，使得渠道內部之流體也擁有一個向下之動量所導致的結果，並與廖[10]之數值計算流線圖作比對，流場走向結果相當吻合。

爾後再將鉻絲放置於U型渠道內部二維效應區之頂處，並於U型渠道向下移動過程中拍攝流場可視化如圖 3-4-(b)所示，可以發現當U型渠道向下移動時，鉻絲瞬間所產生的煙線走向也為向下，此為U型渠道向下移動的過程中，使得渠道內部之流體也擁有一個向下之動量所導致的結果，並與廖[10]之數值計算流線圖作比對，流場走向結果也相當吻合。

最後將鉻絲放置於延長渠道內部之流體出口處，並於U型渠道向下移動過程中拍攝流場可視化，如圖 3-4-(c)所示，可以發現當U型渠道向下移動時，鉻絲瞬間所產生的煙線走向為向下且加速，此為U型渠道向下移動的過程中推擠腔內流體，故延長渠道內部流體因此動量增加所導致的結果。

3.2 U型渠道頂部之熱傳分析(紊流模式)

本章節為探討往復式運動，對於U型渠道頂部壁面的熱傳效率影響，共分為靜態結果與動態結果，實驗參數的組合情形如表 3-1 所示，而實驗各項參數之不準度分析則說明於附錄。

實驗首先量測靜止狀態下U型渠道頂部壁面溫度，並換算成紐塞數與數值計算做比對，以驗證實驗機構的完備性，隨後再著手討論U型渠道於往復運動狀態下頂部的熱傳效率分析，參數 Gr/Re_h^2 為流場強制對流與自然對流效應強弱的判定值，從表 3-1 中可知所有實驗組別的 Gr/Re_h^2 值都相當微小，故可判斷本實驗為強制對流為主的流場，至於工作流體則選擇為

空氣，並於此取加熱片銅箔表面溫度 T_w 與進口流體溫度 T_∞ 之平均溫差 $\Delta T_w = 10^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

3.2.1 靜止狀態下雷諾數對熱傳之影響

口型渠道於靜止狀態下，先分別進行雷諾數為 700 與 800 之實驗，而其頂部的實驗紐塞數與數值計算結果如表 3-2 與 3-3 所示，因實驗上所量取的溫度為平均溫度，故表 3-2 與表 3-3 中溫度的顯示為取到小數第二位，並探討輸入加熱片的熱能，發現從加熱片後方巴沙木以熱傳導帶走的熱比率以前段加熱區為最小，中段加熱區域次之而後段加熱區域為最大，依照熱能散逸的比率，可以發現口型渠道頂部之強制對流熱傳效率以前段加熱區域為最好、中段加熱區域次之、後段加熱區域為最差。

前段加熱區域因位處流體首當其衝的區域，所以平均紐塞數為最大，至於中段加熱區域則位處於流體平滑流過的區域，所以平均紐塞數為次之，而後段加熱區域因位處於流體迴流區域，於此幾乎可說是自然對流效應與強制對流效應影響相當，所以平均紐塞數為最差，因此後段加熱區域輸入熱能從後方巴沙木散逸的比例為最大得到印證，故實驗所量測的結果相當合理。

再者利用實驗重複性測試的方法來確保數據的可信度，所以在雷諾數為 700 與 800 的狀態下，分別再進行了二組與一組不同溫差範圍的實驗，其結果將顯示於圖 3-5 與圖 3-6，並且比較雷諾數為 700 與 800 的情況下，頂部各段加熱區域彼此平均紐塞數的差異，其結果顯示皆為 7% 以內，此現象可說明本實驗的重複性測試相當良好，最後比對實驗與計算的結果，誤差約略 10% 左右，一致性相當良好。

再者比較雷諾數 700 與 800 的實驗結果，可發現當雷諾數提升，渠道頂部的熱傳效率也有增加的趨勢，但幅度並不明顯。

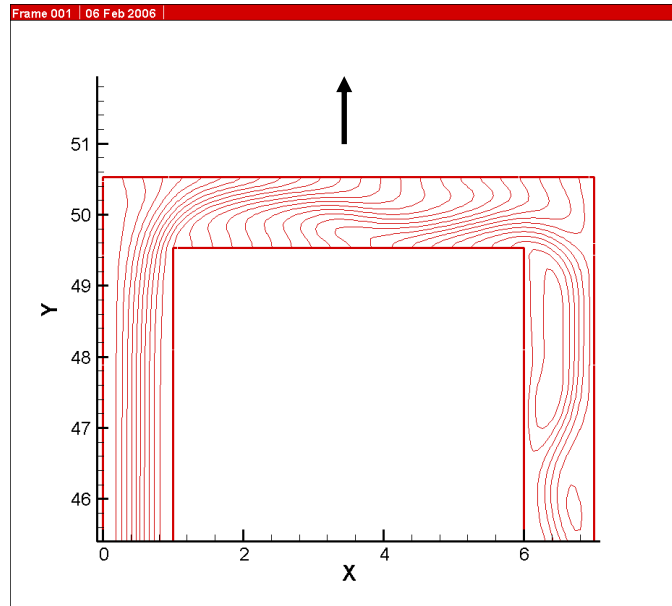
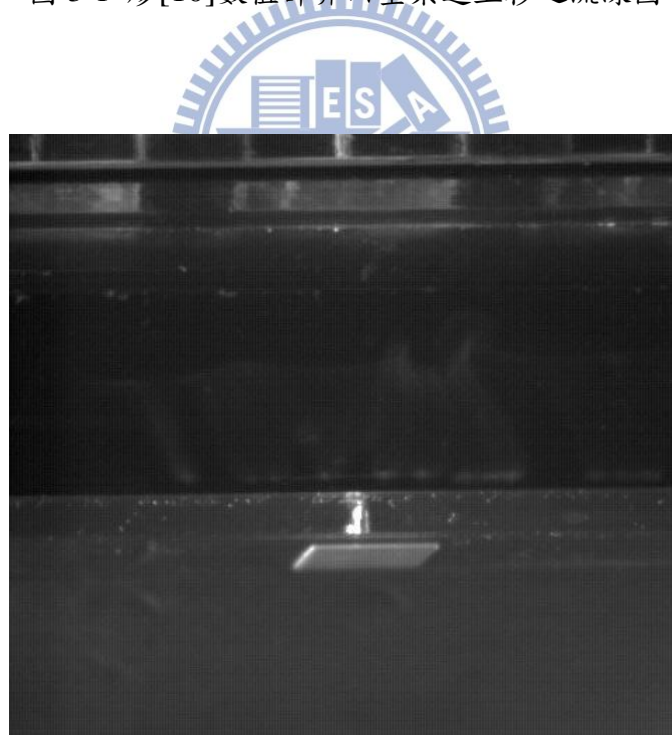
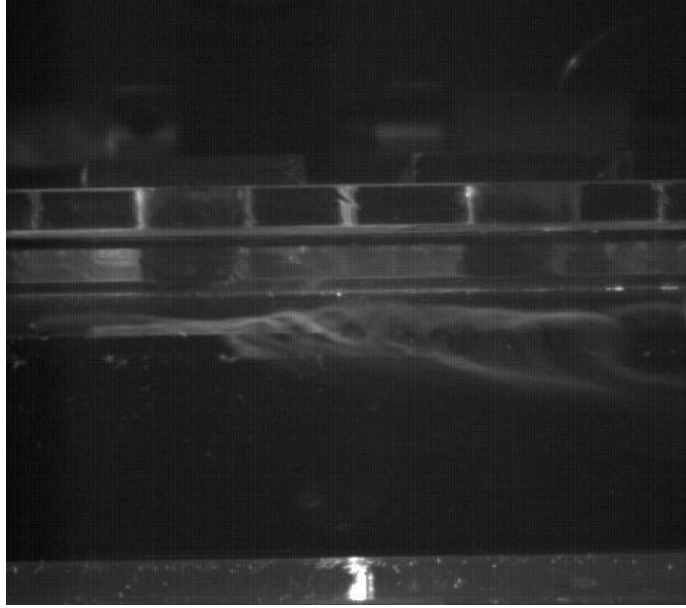


圖 3-1 廖[10]數值計算U型渠道上移之流線圖



(a) 鎳鉻絲放置於U型渠道內部二維效應區之底處

圖 3-2 U型渠道上移之流場可視化圖



(b) 鎳鉻絲放置於U型渠道內部二維效應區之頂處



(c) 鎳鉻絲放置於延長渠道內部流體出口處

圖 3-2 U型渠道上移之流場可視化圖

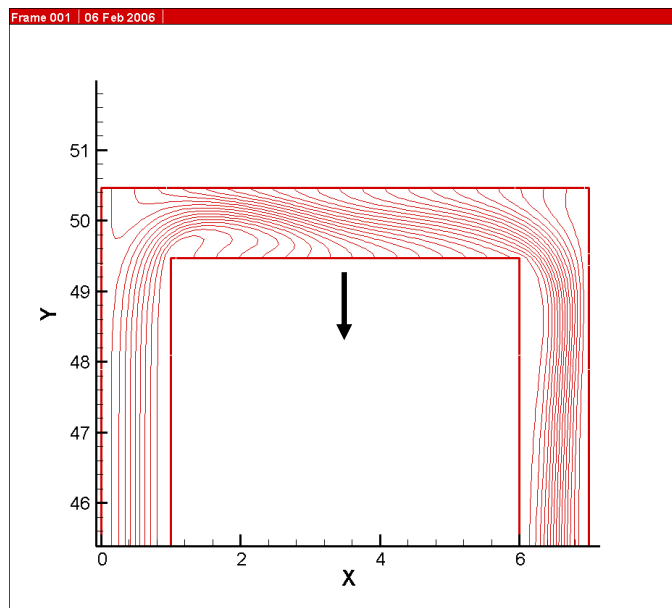
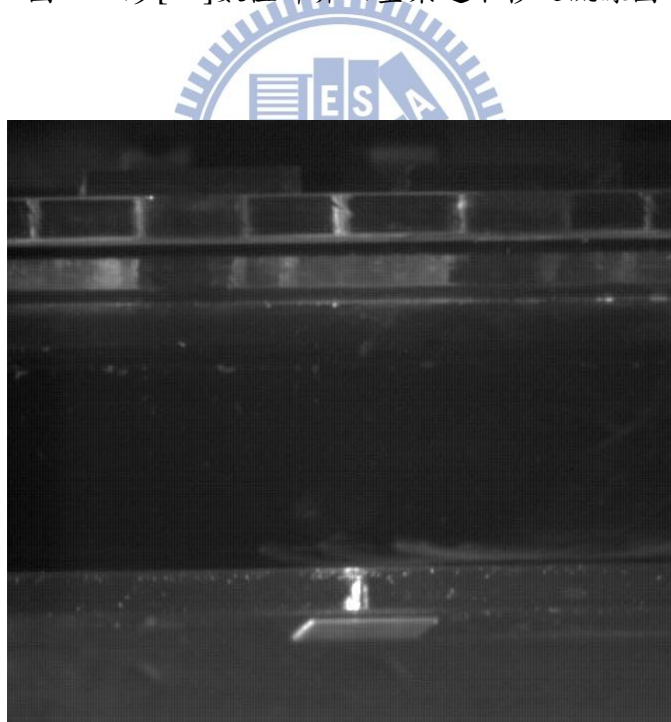
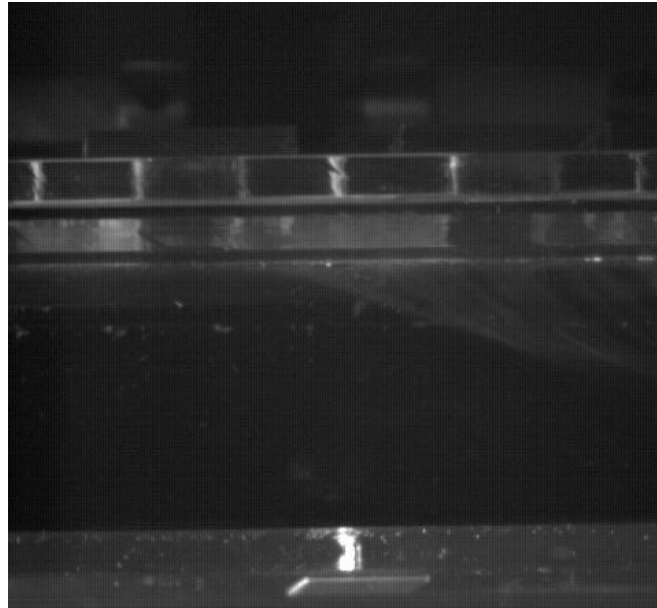


圖 3-3 廖[10]數值計算口型渠道下移之流線圖



(a) 鎳鉻絲放置於口型渠道內部二維效應區之底處

圖 3-4 口型渠道下移之流場可視化圖



(b) 鎳鉻絲放置於U型渠道內部二維效應區之頂處



(c) 鎳鉻絲放置於延長渠道內部流體出口處

圖 3-4 U型渠道下移之流場可視化圖

表 3-1 實驗參數組合表

組數	Re_h	F_c	L_c	v_c/u_o	Gr/Re_h^2
Case1	700	0.0	0.0	0.0	0.08
Case2	700	0.0	0.0	0.0	0.08
Case3	700	0.0	0.0	0.0	0.08
Case4	800	0.0	0.0	0.0	0.07
Case5	800	0.0	0.0	0.0	0.07
Case6	700	0.01	0.5	0.08	0.08
Case7	700	0.01	0.5	0.08	0.08
Case8	700	0.05	0.5	0.15	0.08
Case9	700	0.1	0.5	0.31	0.08
Case10	900	0.01	0.5	0.06	0.05
Case11	900	0.05	0.5	0.16	0.05
Case12	900	0.1	0.5	0.31	0.05

表 3-2 $Re_h = 700$ 與 $\Delta T_w = 10^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ 之實驗數據表(室溫 25°C)

加熱片溫度	前段加熱區域 F	中段加熱區域 M	後段加熱區域 B
銅片溫度	35.10°C	35.10°C	35.20°C
巴沙木上方溫度	35.05°C	34.70°C	35.00°C
巴沙木下方溫度	33.95°C	33.80°C	33.90°C
輸入電壓 V	0.978V	0.791V	0.676V
輸入電流 I	106mA	86mA	73mA
輸入熱量 $QI=P*V$	0.103668W	0.068026W	0.049348W
巴沙木熱傳導 QB	0.02541W	0.02079W	0.02541W
QB/QI	24.5%	30.6%	51.5%
實驗 Nu no	20.1	12.2	6.1
數值 Nu no	21.5	11.3	6.8
誤差	7.0%	7.4%	11.5%

表 3-3 $Re_h = 800$ 與 $\Delta T_w = 10^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ 之實驗數據表(室溫 26.2°C)

加熱片溫度	前段加熱區域 F	中段加熱區域 M	後段加熱區域 B
銅片溫度	36.17°C	36.17°C	36.17°C
巴沙木上方溫度	36.10°C	35.85°C	36.00°C
巴沙木下方溫度	35.20°C	35.25°C	35.30°C
輸入電壓 V	0.972V	0.767V	0.656V
輸入電流 I	105mA	83mA	71mA
輸入熱量 $QI=P*V$	0.10206W	0.063661W	0.046576W
巴沙木熱傳導 QB	0.02079W	0.01386W	0.01617W
QB/QI	20.4%	21.8%	34.7%
實驗 Nu no	21.2	13	7.9
數值 Nu no	23.1	12.2	7.7
誤差	9.0%	6.2%	2.5%

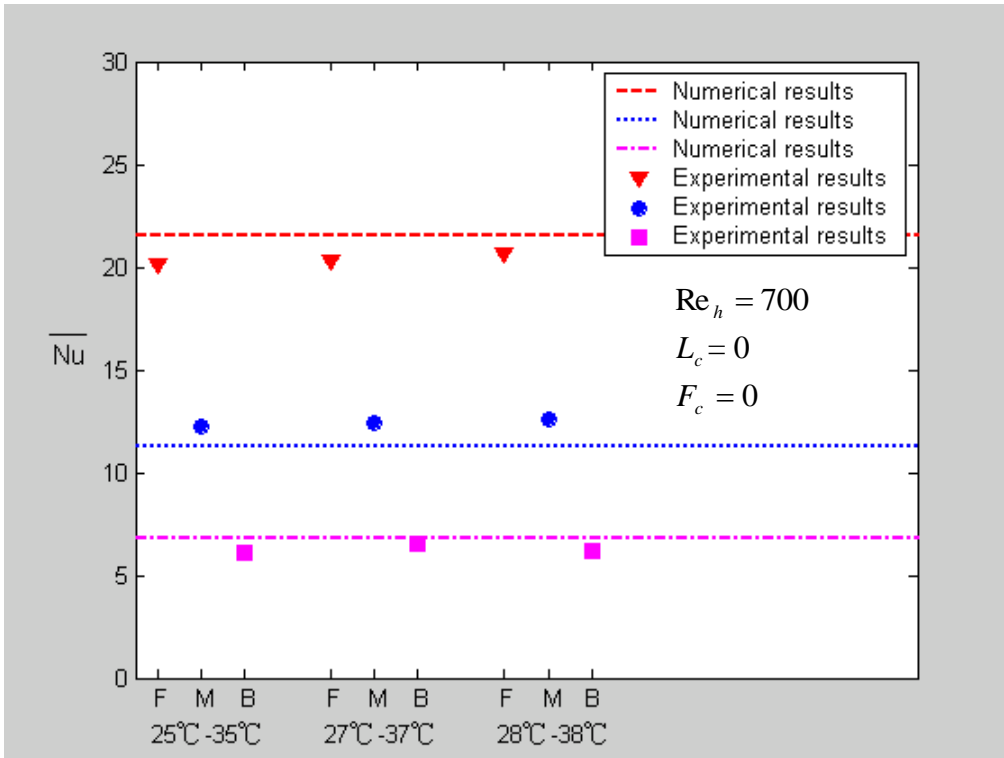


圖 3-5 靜止狀態下不同溫差範圍對 $Re_h = 700$ 之熱傳影響圖

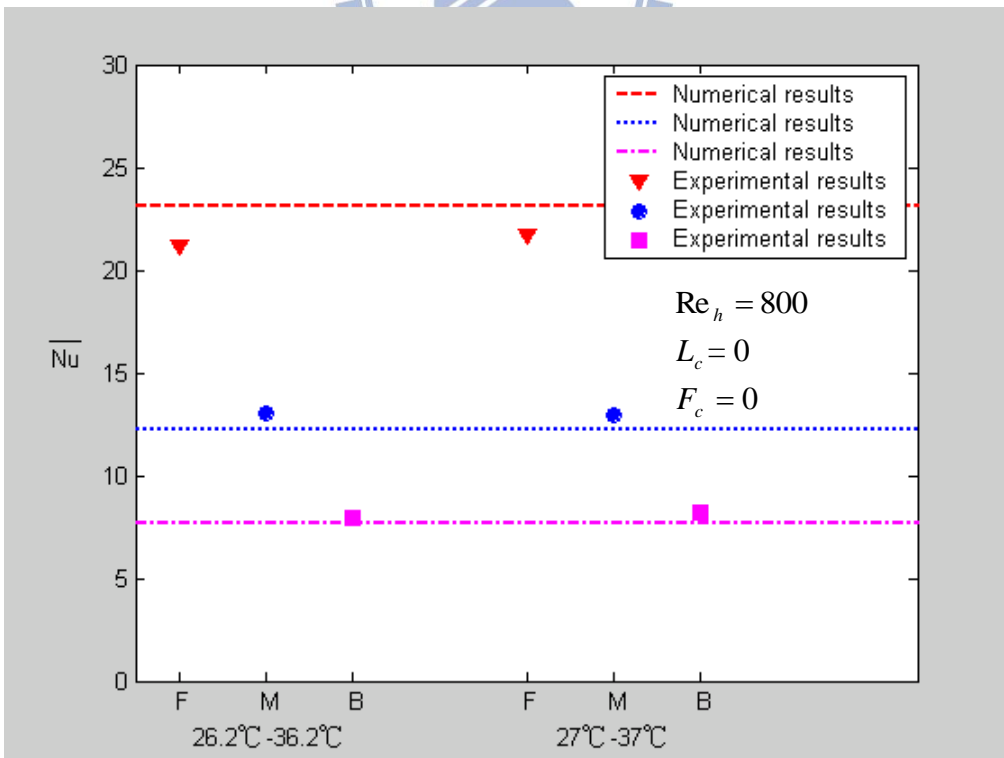


圖 3-6 靜止狀態下不同溫差範圍對 $Re_h = 800$ 之熱傳影響圖

3.2.2 往復運動下無因次振動頻率對熱傳之影響

本節內容為探討U型渠道往復運動對於渠道頂部熱傳效率的影響，分為雷諾數與無因次振動頻率等兩部份來討論，實驗首先進行二組雷諾數 $Re_h = 700$ 、 $L_c = 0.5$ 、 $F_c = 0.01$ 之重複性測試，如圖 3-7 所示，從數據中比對實驗重複性測試，各段加熱區域的平均紐塞數差異約略 4% 以內，至於實驗與計算的比對結果，誤差則約略 10% 左右。

進一步將 $Re_h = 700$ 與 $F_c = 0.01$ 、 0.05 、 0.1 作組合，來探討U型渠道頂部的熱傳效率，並將其實驗結果與 $F_c = 0$ (靜止狀態) 作比較，如圖 3-8 所示，在 $F_c = 0.01$ 的狀況下U型渠道頂部前段與中段加熱區域熱傳效率與 $F_c = 0$ 差異不大，但是在後段加熱區域卻有 32.8% 的熱傳效率提升，此為後段加熱區域的強制對流效應較不顯著，故往復運動所造成的流場不穩定性於此對熱傳效率的影響相對重要，所以當U型渠道由靜止狀態轉換成往復運動狀態的同時，對於強制對流效應較不顯著的區域能有較明顯的熱傳提升效果。

由 $F_c = 0.01$ 、 0.05 、 0.1 的實驗的結果得知，U型渠道頂部熱傳效率並不會因無因次振動頻率升高而增加，特別是在 $F_c = 0.05$ 的狀況下，熱傳效率為最佳，其前段加熱區域之熱傳效率較靜止狀態增加 17%，中段加熱區域為增加 4%，後段加熱區域為增加 30%，故可推斷U型渠道的振動頻率與其內部流場的自然頻率有一相依關係，若想要大幅度地提升U型渠道頂部熱傳，即必須設法找出U型渠道內部流場的自然頻率，並利用頻率共振的原理來達成之，最後比對實驗與計算的結果，一致性相當良好，誤差約略 10% 左右。

3.2.3 往復運動下雷諾數對熱傳之影響

選取 $Re_h = 900$ 與 $F_c = 0.01$ 、 0.05 、 0.1 作組合如圖 3-9 所示，從圖中可發現在 $F_c = 0.01$ 、 0.05 的情況下，實驗與計算結果顯示前段加熱區域誤差

較大，約略 10% 左右，而中段與後段加熱區域一致性良好，至於 $F_c = 0.1$ 時三段加熱區域兩者幾乎一致，再者將 $F_c = 0.01$ 、 0.05 、 0.1 的實驗結果，與 $F_c = 0$ (靜止狀態) 作比較，同樣也能發現 U 型渠道頂部熱傳並不因無因次振動頻率提升而增加，其中在 $F_c = 0.05$ 的狀況下熱傳效率最佳，前段與後段加熱區域的熱傳效率較靜止狀態增加 6% 幅度為最大，由此可得知在高雷諾數與低無因次振動頻率下，其熱傳效率較不顯著，即熱傳效率與靜止狀態下差異無幾。

最後匯整 $Re_h = 900$ 、 700 對 $F_c = 0.01$ 、 0.05 、 0.1 之實驗數據，並探討雷諾數與無因次振動頻率對於往復運動狀態的熱傳效率關係，如圖 3-10 所示可以發現，不論在何種無因次振動頻率下，高雷諾數的差異對於前段、中段與後段加熱區域皆有熱傳提升的作用，由其是在 $F_c = 0.01$ 的條件下，其前段加熱區域提升約略 15% 左右為最顯著，此為高雷諾數與低無因次振動頻率的組合時，將導致 v_c/u_o 值小，即 U 型渠道往復速度對於流體平均速度影響有限，故前段加熱區域因進口流體直接碰撞壁面所造成的熱傳效果會更加明顯。

本實驗雷諾數之不準度為 1.09%，紐塞數之不準度為 3.34%，無因次振動振幅之不準度為 0.19%，無因次振動頻率之不準度為 1.05%，參數 Gr/Re_h^2 之不準度為 2.88%，參數 v_c/u_o 之不準度為 1.06%，其詳細內容敘述於附錄中。

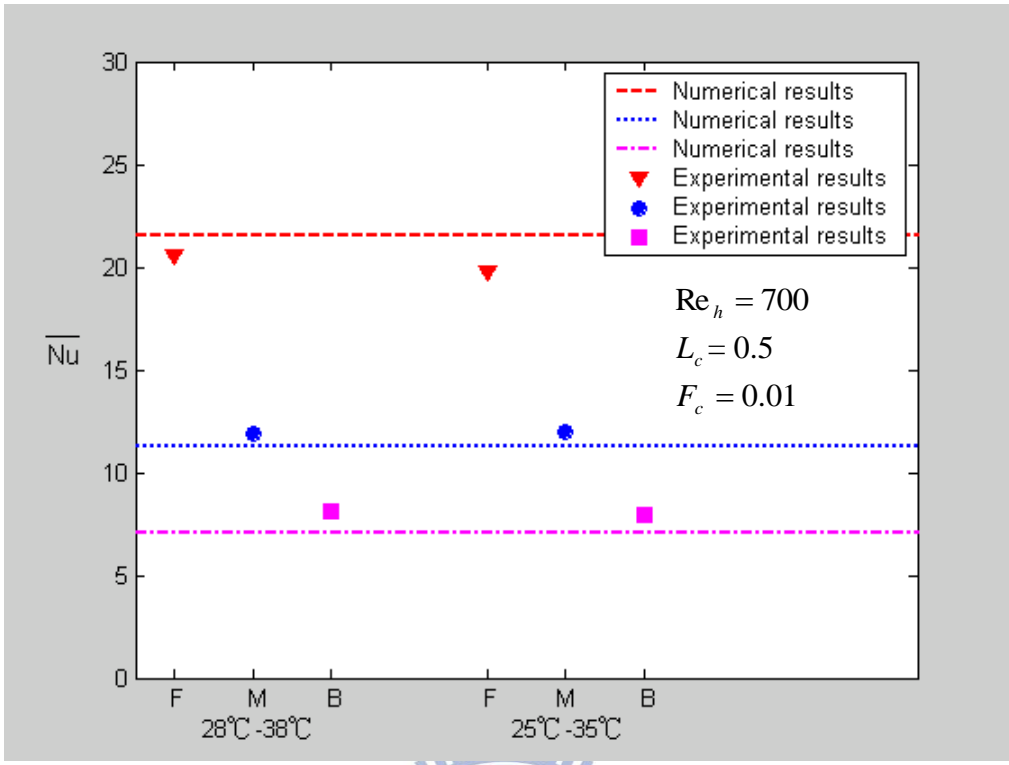


圖 3-7 $Re_h = 700$ 與 $F_c = 0.01$ 之實驗重複性測試圖

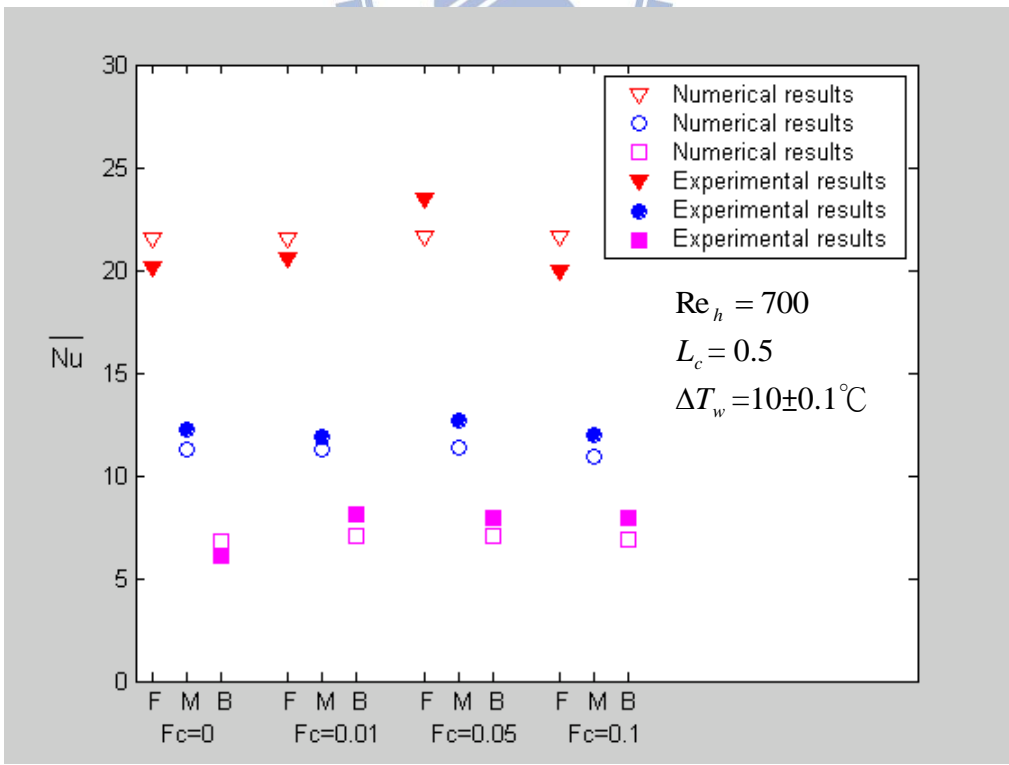


圖 3-8 往復運動下 F_c 對 $Re_h = 700$ 之熱傳影響圖

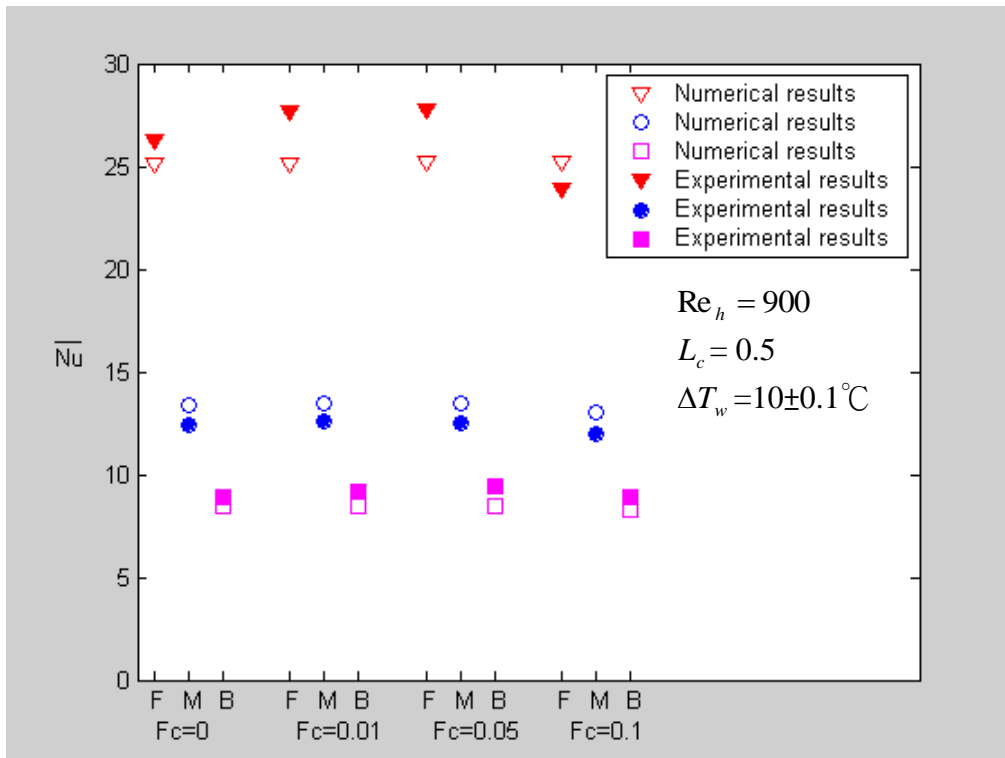


圖 3-9 往復運動下 F_c 對 $Re_h = 900$ 之熱傳影響圖

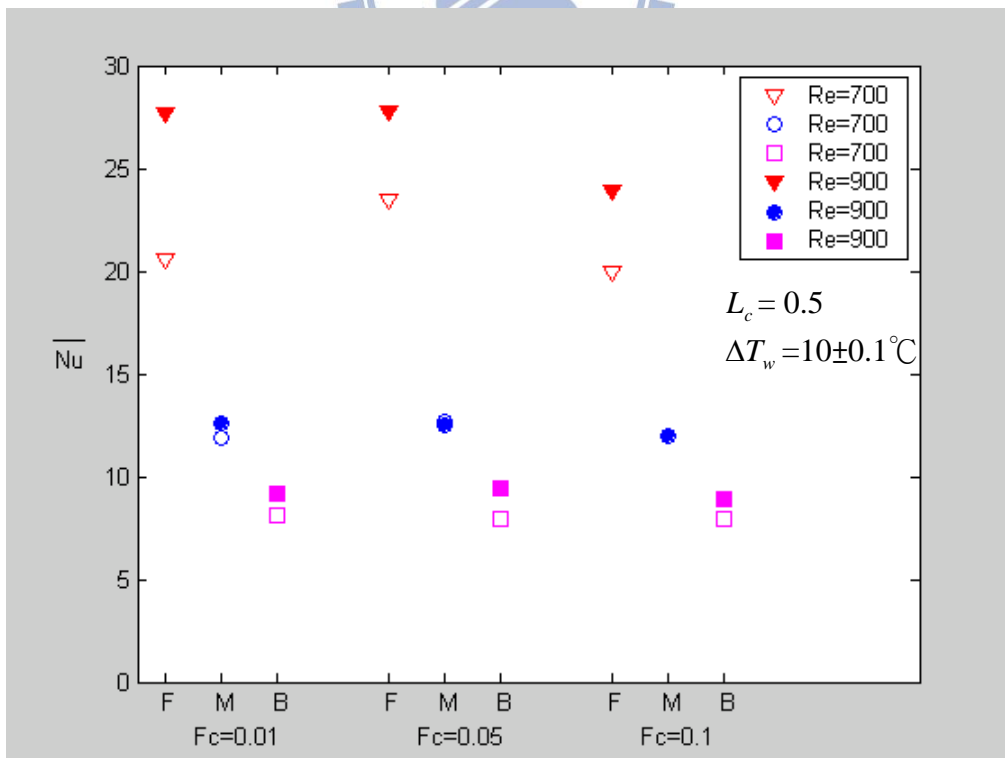


圖 3-10 往復運動下 Re_h 與 F_c 對熱傳之影響圖

第四章 結論

為有效提升U型渠道頂部熱傳效率，本研究利用實驗方法於U型渠道上裝設一往復移動機構，並藉由往復運動造成渠道頂部壁面與內部流動流體相互撞擊，以此達成提升熱傳效率的目的，本研究對U型渠道於靜止與往復運動狀態下，探討多組雷諾數與無因次振動頻率的組合，並將其實驗結果與數值計算比對，以驗證實驗的可信度，最後對於往復式冷卻渠道之熱流實驗結果，歸納成以下五個結論：

1. U型渠道處於靜止狀態下，由於噴流效果的影響，所以前段加熱區域熱傳效率最好、中段加熱區域次之、後段加熱區域最差。
2. U型渠道處於低雷諾數狀態下，後段加熱區域的強制對流效應較不顯著，故因往復運動所造成流場的不穩定於此對熱傳效率有增加的趨勢。
3. U型渠道處於高雷諾數狀態下，低無因次振動頻率對其熱傳效率影響較不顯著。
4. U型渠道處於無因次振動頻率 $F_c = 0.05$ 狀態下，其熱傳效率所增加的趨勢最為顯著。
5. U型渠道處於相同的無因次振動頻率狀態下，其熱傳效率會因雷諾數的提升而有增加的趨勢。

參考文獻

- [1] P. P. Grassmann, and M. Tuma, “Applications of the Electrolytic Method- II. Mass Transfer within a Tube for Steady, Oscillating and Pulsating Flows,” International Journal of Heat and Mass Transfer., Vol. 22, pp. 799-804, 1979.
- [2] S. Y. Kim, B. H. Kang, and A. E. Hyun, “Heat Transfer in the Thermally Developing Region of a Pulsating Channel Flow,” International Journal of Heat and Mass Transfer., Vol. 36, No. 17, pp. 1257-1266, 1993.
- [3] M. R. Mackley, G. M. Tweddle, and I. D. Wyatt, “Experimental Heat Transfer Measurements for Pulsatile Flow in Baffled Tubes,” Chem. Eng. Sci., Vol. 45, No. 5, pp.1237-1242, 1990.
- [4] A. T. Patera and B. B. Mikic, “Exploiting Hydrodynamic Instabilities Resonant Heat Transfer Enhancement,” Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 29, No. 8, pp. 1127-1138, 1986.
- [5] T. Nishimura, A. Taurmoto, and Y. Kawamura, “Flow and Mass Transfer Characteristics in Wavy Channels for Oscillatory Flow,” Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 30, pp.1007-1015, 1987.
- [6] M. R. Mackley and X. Ni, “Mixing and Dispersion in a Baffled Tube for Steady Laminar and Pulsatile Flow,” Chem. Eng. Sci., Vol. 46, No. 12, pp. 3139-3151, 1991.
- [7] S. W. Chang and L. M. Su, “Influence of Reciprocating Motion on Heat Transfer Inside a Ribbed Duct with Application to Piston Cooling in Marine Diesel Engines,” J. Ship Res., Vol. 41, No. 4, pp. 332-339, 1997.
- [8] Wu-Shung Fu, Wen-Wang Ke, Ke-Nan Wang, “Laminar Forced Convection in a Channel with a Moving Block,” International Journal of

Heat and Mass Transfer. Vol. 44(13), pp. 2385-2394, 2001.

- [9] S.J. Kline, “The Purpose of Uncertainty Analysis,” Journal of Heat Transfer- Transactions of the ASME., Vol. 117, pp.153-160, 1985.
- [10] 廖英皓，” 活塞頂部之熱傳分析” ，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，2003.
- [11] 連信宏，” 利用多孔性介質增強活塞頂部之熱效率分析” ，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，2005.



附錄：實驗不準度分析

為提供有效的測試結果，並說明當次測試結果的信賴度，所以實驗不準度的計算和分析是必要的，一般不準度的表示方式有絕對不準度與相對不準度兩種，本文採用 Kline[9]之相對不準度來分析第四章實驗結果，根據 Kline 之研究

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

$$\begin{aligned} \delta R &= \left\{ \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} \right) \delta X_1 \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_2} \right) \delta X_2 \right]^2 + \dots + \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_n} \right) \delta X_n \right]^2 \right\}^{1/2} \\ \frac{\delta R}{R} &= \left\{ \left[\left(\frac{\partial \ln R}{\partial \ln X_1} \right) \left(\frac{\delta X_1}{X_1} \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial \ln R}{\partial \ln X_2} \right) \left(\frac{\delta X_2}{X_2} \right) \right]^2 + \dots + \left[\left(\frac{\partial \ln R}{\partial \ln X_n} \right) \left(\frac{\delta X_n}{X_n} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (A-1) \end{aligned}$$

若 $R = X_1^a \cdot X_2^b \cdot X_3^c \cdot \dots$

則其相對不準度可由式(A-1)求得

$$\frac{\delta R}{R} = \left\{ \left[a \times \left(\frac{\delta X_1}{X_1} \right) \right]^2 + \left[b \times \left(\frac{\delta X_2}{X_2} \right) \right]^2 + \left[c \times \left(\frac{\delta X_3}{X_3} \right) \right]^2 + \dots \right\}^{1/2} \quad (A-2)$$

一、壁面紐塞數之不準度分析

由式(2-5)，壁面紐塞數 $\overline{Nu} = \frac{Q_{air}}{A_h \Delta T_w} \cdot \frac{h}{k}$ ，根據式(A-2)其不準度為

$$\frac{\delta \overline{Nu}}{\overline{Nu}} = \left[\left(\frac{\delta Q_{air}}{Q_{air}} \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left(-\frac{\delta A_h}{A_h} \right)^2 + \left(-\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} \right)^2 + \left(-\frac{\delta k}{k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A-3)$$

(1) 熱傳量 Q_{air} 之不準度：

由 3.2.1 節表 3-1 的前段加熱區域得知

$$Q_{air} = Q_{in} - Q_{lose} = 0.103668 - 0.02541 = 0.078258 \text{ (W)},$$

$$\text{故 } Q_{air} \text{ 之不準度為：} \frac{\delta Q_{air}}{Q_{air}} = \left[\left(\frac{Q_{in}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{in}}{Q_{in}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{lose}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{lose}}{Q_{lose}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(2) 輸入能量之不準度：

$$\text{由式 (2-2) } Q_{in} = V \times I = 0.978 \text{ (V)} \times 0.106 \text{ (A)} = 0.103668 \text{ (W)}$$

且三用電表電壓與電流量測之最小刻度各為 0.001V 與 0.001A

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{in}}{Q_{in}} = \left[\left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{0.0005}{0.978} \right)^2 + \left(\frac{0.0005}{0.106} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.47\%$$

(3) 熱量散逸之不準度：

$$\text{由式 (2-3) } Q_{lose} = k_b \times A_b \times dT/dy$$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{lose}}{Q_{lose}} = \left[\left(\frac{\delta k_b}{k_b} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_b}{A_b} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dy}{dy} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(i) 巴沙木熱傳導係數由查表得知 $K_b = 0.055 \text{ W}^2/\text{m}^\circ\text{C}$ ，其最小的顯示單位為 $0.001 \text{ W}^2/\text{m}^\circ\text{C}$

$$\frac{\delta K_b}{K_b} = \left[\left(\frac{0.001}{0.055} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.91\%$$

(ii) 巴沙木尺寸 $32.25\text{mm} \times 13.25\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{32.25} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{13.25} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.2\%$$

(iii) 溫度差最大範圍 $35.05 - 33.95 = 1.1^\circ\text{C}$ ，DA2500E 之準確度為 0.1°C

$$\frac{\delta dT}{dT} = \left[\left(\frac{0.05}{1.1} \right)^2 \right]^{1/2} = 4.55\%$$

(iv) 巴沙木厚度 1.12mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta dy}{dy} = \left[\left(\frac{0.025}{1.12} \right)^2 \right]^{1/2} = 2.23\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{lose}}{Q_{lose}} = \left[(0.91\%)^2 + (0.2\%)^2 + (4.55\%)^2 + (-2.23\%)^2 \right]^{1/2} = 5.15\%$$

即熱傳量 Q_{air} 之不準度為

$$\frac{\delta Q_{air}}{Q_{air}} = \left[\left(\frac{0.103668}{0.078258} \times 0.47\% \right)^2 + \left(\frac{0.02541}{0.078258} \times 5.15\% \right)^2 \right]^{1/2} = 1.78\%$$

(4) 冑形渠道寬度 h 之不準度:

冑形渠道寬度 29.75mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{0.025}{29.75} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

(5) 加熱片面積 A_h 之不準度:

加熱片面積 32.25mm×13.25mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta A_h}{A_h} = \left[\left(\frac{0.025}{32.25} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{13.25} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.2\%$$

(6) 溫度差 ΔT_w 之不準度:

加熱片與室溫溫度差最大範圍 35.1–25.0=10.1°C，DA2500E 之準確度為 0.1°C，平均溫差容許的誤差為 0.2°C

$$\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} = \left[\left(\frac{0.2}{10.1} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.98\%$$

(7) 空氣之熱傳導係數不準度:

經由查表得知 $K_a = 0.025 \text{ W}^2/\text{m}^\circ\text{C}$ ，其最小的顯示單位為 0.001 $\text{W}^2/\text{m}^\circ\text{C}$

$$\frac{\delta K_a}{K_a} = \left[\left(\frac{0.0005}{0.025} \right)^2 \right]^{1/2} = 2\%$$

將相關數據代入式 (A-3)，得壁面紐塞數之不準度為

$$\begin{aligned} \frac{\delta \overline{Nu}}{\overline{Nu}} &= \left[(1.78\%)^2 + (0.08\%)^2 + (-0.2\%)^2 + (-1.98\%)^2 + (-2\%)^2 \right]^{1/2} \\ &= 3.34\% \end{aligned}$$

二、雷諾數之不準度分析

$$\text{由式 (3-1)，雷諾數 } Re_h = \frac{u_o \cdot h}{\nu}$$

根據式 (A-2) 其不準度為

$$\frac{\delta Re_h}{Re_h} = \left[\left(\frac{\delta u_0}{u_0} \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left(-\frac{\delta v}{v} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A-4})$$

(1) 流體平速度之不準度:

$$u_0 = \frac{Q}{A} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(-\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad A = h.z$$

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， h 為渠道寬度 29.75mm

z 為渠道高度 89.7mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_0}{u_0} = \left[\left(\frac{10}{960} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.75} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{89.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.05\%$$

(2) 冑形渠道寬度之不準度:

入口高度 29.75mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{0.025}{29.75} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

(3) 動黏滯係數之不準度:

空氣之動黏滯係數由查表得知 $\nu = 0.000015 \text{m}^2/\text{s}$ ，其最小的顯示單位為 $0.000001 \text{m}^2/\text{s}$

$$\frac{\delta \nu}{\nu} = \left[\left(\frac{0.0000005}{0.000015} \right)^2 \right]^{1/2} = 3.33\%$$

將相關數據代入式(A-4)，得雷諾數之不準度為

$$\frac{\delta Re_h}{Re_h} = \left[(1.05\%)^2 + (0.08\%)^2 + (-3.33\%)^2 \right]^{1/2} = 3.49\%$$

三、無因次振動振幅之不準度分析

由式 (3-2)，無因次振動振幅 $L_c = l_c/h$

根據式 (A-2) 其不準度為

$$\frac{\delta L_c}{L_c} = \left[\left(\frac{\delta l_c}{l_c} \right)^2 + \left(-\frac{\delta h}{h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A-5})$$

(1) 振動振幅之不準度:

振動振幅 14.85mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta l_c}{l_c} = \left[\left(\frac{0.025}{14.85} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.17\%$$

(2) 冑形渠道寬度之不準度:

入口高度 29.75mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{0.025}{29.75} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

將相關數據代入式(A-5)，得無因次振動振幅之不準度為

$$\frac{\delta L_c}{L_c} = \left[(0.17\%)^2 + (-0.08\%)^2 \right]^{1/2} = 0.19\%$$

四、無因次振動頻率之不準度分析

由式(3-3)，無因次振動頻率 $F_c = f_c \cdot h/u_o$

根據式(A-2)其不準度為

$$\frac{\delta F_c}{F_c} = \left[\left(\frac{\delta f_c}{f_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left(-\frac{\delta u_o}{u_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A-6})$$

(1) 振動頻率之不準度:

是利用量測渠道連續往復振盪 120 次所需要的時間來估算，其所花費的時間為 120 秒而馬錶最小刻度 0.1 秒

$$\frac{\delta f_c}{f_c} = \left[\left(\frac{0.05}{120} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.04\%$$

(2) 冑形渠道寬度之不準度:

入口高度 29.75mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{0.025}{29.75} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

(3) 流體平速度之不準度：

$$u_o = \frac{Q}{A} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(-\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad A = h \cdot z$$

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， h 為渠道寬度 29.75mm

z 為渠道高度 89.7mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_o}{u_o} = \left[\left(\frac{10}{960} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.75} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{89.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.05\%$$

將相關數據代入式(A-6)，得無因次振動頻率之不準度為

$$\frac{\delta F_c}{F_c} = \left[(0.04\%)^2 + (0.08\%)^2 + (-1.05\%)^2 \right]^{1/2} = 1.05\%$$

五、參數 Gr/Re_h^2 之不準度分析

由式 (3-4)，參數 $Gr/Re_h^2 = g \times \beta \times \Delta T_w \times h / u_o^2$

根據式 (A-2) 其不準度為

$$\left[\left(\frac{\delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{\delta \beta}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + 2 \times \left(-\frac{\delta u_o}{u_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A-7)$$

(1) 重力係數之不準度：

重力係數由查表得知 $g=9.81\text{m/s}^2$ ，其最小的顯示單位為 0.01m/s^2

$$\frac{\delta g}{g} = \left[\left(\frac{0.005}{9.81} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.05\%$$

(2) 空氣熱膨脹係數之不準度：

空氣熱膨脹係數由查表得知 $\beta=0.0034\text{K}^{-1}$ ，其最小的顯示單位為

0.0001K^{-1}

$$\frac{\delta\beta}{\beta} = \left[\left(\frac{0.00005}{0.0034} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.47\%$$

(3) 溫度差 ΔT_w 之不準度:

加熱片與室溫溫度差最大範圍 $35.1 - 25.0 = 10.1^\circ\text{C}$ ，DA2500E 之準確度為 0.1°C ，平均溫差容許的誤差為 0.2°C

$$\frac{\delta\Delta T_w}{\Delta T_w} = \left[\left(\frac{0.2}{10.1} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.98\%$$

(4) 冑形渠道寬度之不準度:

入口高度 29.75mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{0.025}{29.75} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

$$= 1.98\%$$

(5) 流體平速度之不準度:

$$u_o = \frac{Q}{A} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(-\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad A = h \cdot z$$

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， h 為渠道寬度 29.75mm

z 為渠道高度 89.7mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_o}{u_o} = \left[\left(\frac{10}{960} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.75} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{89.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.05\%$$

將相關數據代入式(A-7)，得參數 Gr / Re_h^2 之不準度為

$$\left[(0.05\%)^2 + (1.47\%)^2 + (1.98\%)^2 + (0.08\%)^2 + 2 \times (-1.05\%)^2 \right]^{1/2} = 2.88\%$$

六、參數 v_c / u_o 之不準度分析

由式 (3-5)，參數 $v_c / u_o = 2\pi \cdot f_c l_c \cos(2\pi \cdot f_c t) / u_o$

根據式 (A-2) 其不準度為

$$\left[\left(\frac{\delta l_c}{l_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta f_c}{f_c} \right)^2 + \left(-\frac{\delta u_o}{u_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A-8})$$

(1) 振動振幅之不準度:

振動振幅 14.85mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta l_c}{l_c} = \left[\left(\frac{0.025}{14.85} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.17\%$$

(2) 振動頻率之不準度:

是利用量測渠道連續往復振盪 120 次所需要的時間來估算，其所花費的時間為 120 秒而馬錶最小刻度 0.1 秒

$$\frac{\delta f_c}{f_c} = \left[\left(\frac{0.05}{120} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.04\%$$

(3) 流體平速度之不準度:

$$u_o = \frac{Q}{A} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(-\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad A = h \cdot z$$

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， h 為渠道寬度 29.75mm

z 為渠道高度 89.7mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_o}{u_o} = \left[\left(\frac{10}{960} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.75} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{89.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.05\%$$

將相關數據代入式(A-8)，得參數 v_c / u_o 之不準度為

$$\left[(0.17\%)^2 + (0.04\%)^2 + (-1.05\%)^2 \right]^{1/2} = 1.06\%$$