

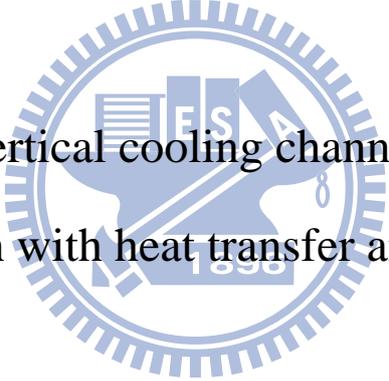
國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

U型槽往復運動之熱傳分析

A U type of vertical cooling channel reciprocating
motion with heat transfer analysis



研究生：侯泳良

指導教授：傅武雄 博士

中華民國九十九年七月

U型槽往復運動之熱傳分析

A U type of vertical cooling channel reciprocating
motion with heat transfer analysis

研究生：侯泳良

Student: Yong-Liang Hou

指導教授：傅武雄

Advisor: Wu-Shung Fu

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

U型槽往復運動之熱傳分析

研究生：侯泳良

指導教授：傅武雄

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

本研究主要目的在以實驗方法去探討混合對流在一振動U型渠道內對壁面熱傳效率之影響情形，並搭配數值模擬來提高實驗之可信度。實驗設備大致上可以分為三部份：冷卻渠道、往復運動機構、溫度控制系統，工作流體為空氣。另外使用放煙線法進行流場可視化的拍攝，以實際流場變化情形與數值模擬之流線圖互相驗證，兩者結果非常吻合。

實驗主要針對不同的渠道振幅來進行討論，由結果得知熱傳效率會因為渠道振幅減小而降低。原因在於縮小振幅後導致對加熱區的擾動程度降低，流體所能帶走的熱也變少。至於熱傳增益則是動態優於靜態，所得到最大熱傳增益約在48.6%左右。

A \square type of vertical cooling channel reciprocating motion with heat transfer analysis

Student : Yong-Liang Hou

Advisor : Wu-Shung Fu

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

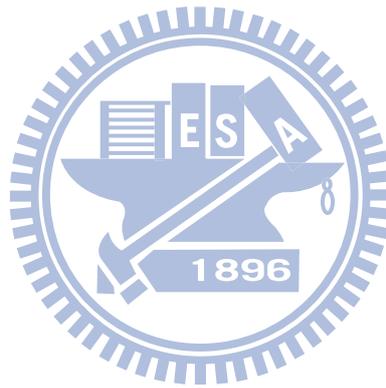
Abstract

In order to investigate the heat transfer phenomena in a U-shaped channel with reciprocating motion, an experimental work is conducted and validated by an auxiliary computational procedure simultaneously. The experimental apparatus consist of three parts, a cooling channel, reciprocating mechanism and heating control. The working fluid is air and the parameters of Reynolds number , temperature and oscillating frequency are varied. In addition, a flow visualization using the Smoke-wire method is adopted to indicate the flow field and compared with the streamline of the numerical results. The comparisons between experimental and numerical results are consistent well.

The main experiment for different channel amplitude to discuss the results that heat transfer efficiency, channel amplitude decreased resulting in heat transfer efficiency lower. The reason is that after reducing the amplitude of the fluid disturbance to the reduction in heating zone, the fluid can take away the heat has become less. The dynamic heat transfer gain is better than the static, and the heat transfer gain of about 48.6%

誌謝

經過了漫長且辛苦的努力，論文終於完成了，能完成這本論文要感謝的人很多，首先要感謝傅武雄教授兩年來在學業與論文上的悉心指導，再來要感謝研究室同學和學長，他們給于我相關專業知識諮詢與建議使得論文才能順利的完成，最後要感謝我的家人，有他們給我的經濟援助我才能在這兩年無憂慮投注在研究上，總而言之我一個人不可能完成這本論文，有大家的幫忙我才能完成，謹將此喜悅與所有關心我的人共同分享。



目錄

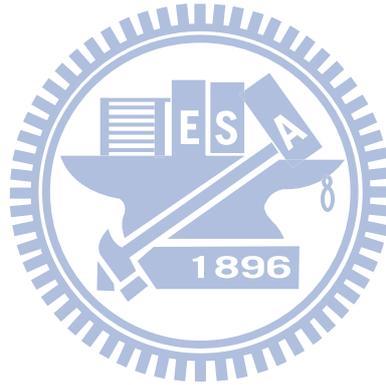
	頁
摘要	i
Abstract	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
符號說明	viii
第一章 緒論	1
第二章 垂直往復式冷卻渠道之熱流實驗	9
2.1 實驗設備	9
2.1.1 冷卻渠道與流量量測裝置	9
2.1.2 往復運動機構	11
2.1.3 高溫壁面加熱裝置與溫度量測裝置	12
2.2 實驗步驟	16
2.2.1 進口流體雷諾數量測	16
2.2.2 啟動往復運動機構	16
2.2.3 U型渠道底部壁面溫度量測	17
2.3 流場可視化設備	19
2.3.1 流場可視化步驟	20
第三章 無因次參數與不準度分析	34
第四章 結果與討論	39
4.1 冂型渠道頂部熱傳分析	39
4.2 冂型渠道靜止之頂部壁面熱傳分析	40
4.3 冂型渠道往復運動之頂部壁面熱傳分析	41
4.4.1 不同頻率下對於冂型管道熱傳之影響	42
4.4.2 不同振幅下對於冂型管道熱傳之影響	42
4.5 流場可視化結果	43

第五章	結論.....	60
參考文獻	61
附錄一	實驗不準度分析.....	65
附錄二	目前主流的 Sulzer 大型柴油引擎之轉速與輸出功率.....	83
附錄三	Q_{lose} / Q_{in} 比.....	85



表目錄

表 2-1	步進馬達運動參數表.....	21
表 3-1	在雷諾數 300 下之各參數之不準度分析.....	37
表 3-2	在雷諾數 150 下之各參數之不準度分析.....	38
表 4-1	實驗參數表.....	44
表 4-2	$Re_w = 300, F_c = 0.0, L_c = 0.75, \Delta T_w = 10$ 重複性測試之溫度分佈	45
表 4-3	靜態模擬與實驗結果.....	46
表 4-4	渠道振盪速度表.....	47
表 4-5	動態實驗與數值模擬之結果.....	48



圖目錄

圖 1-1	Suzler RTAT6 柴油引擎之活塞冠斷面示意圖.....	7
圖 1-2	歷年 Sulzer 柴油引擎動力輸出圖.....	8
圖 2-1	引擎活塞機構示意圖.....	22
圖 2-2	實驗設備總圖.....	23
圖 2-3	冷卻渠道實際尺寸.....	24
圖 2-4	往復運動機構.....	25
圖 2-5	往復運動機構和冷卻渠道側視圖.....	26
圖 2-6	渠道振盪速度圖.....	27
圖 2-7	加熱片結構圖.....	28
圖 2-8	加熱區段位置圖.....	29
圖 2-9	加熱片測試各點溫度.....	30
圖 2-10	熱損失估計原理.....	31
圖 2-11	發煙器裝置圖.....	32
圖 2-12	流場可視化設備示意圖.....	33
圖 4-1	$Re_w = 300, F_c = 0.0, L_c = 0.75, \Delta T_w = 10$ 重複性測試之實驗紐賽數分佈.....	51
圖 4-2	$Re_w = 300, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}$ 流線圖.....	52
圖 4-3	$Re_w = 300, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}$ 等溫線分佈圖.....	53
圖 4-4	$Re_w = 300, Gr/Re_w^2 = 0.40, \Delta T_w = 10^\circ\text{C}, F_c = 0.2$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈.....	54
圖 4-5	$Re_w = 300, Gr/Re_w^2 = 0.81, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}, F_c = 0.2$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈.....	54
圖 4-6	$Re_w = 300, Gr/Re_w^2 = 1.21, \Delta T_w = 10^\circ\text{C}, F_c = 0.4$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈.....	55
圖 4-7	$Re_w = 300, Gr/Re_w^2 = 1.62, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}, F_c = 0.4$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈.....	55
圖 4-8	$Re_w = 200, Gr/Re_w^2 = 0.91, \Delta T_w = 10^\circ\text{C}, F_c = 0.2$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈.....	56
圖 4-9	$Re_w = 200, Gr/Re_w^2 = 1.82, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}, F_c = 0.2$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈.....	56
圖 4-10	$Re_w = 200, Gr/Re_w^2 = 2.73, \Delta T_w = 10^\circ\text{C}, F_c = 0.4$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈.....	57
圖 4-11	$Re_w = 200, Gr/Re_w^2 = 3.64, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}, F_c = 0.4$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈.....	57
圖 4-12	$Re_w = 300, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}, F_c = 0.2$, 動態 $t=3/4$ 時入口之流場可視化與模擬比較.....	58
圖 4-13	$Re_w = 300, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}, F_c = 0.2$, 動態 $t=3/4$ 時出口之流場可視化與模擬比較.....	59

符號說明

A	渠道截面積	$[m^2]$
A_b	巴沙木面積	$[m^2]$
A_h	加熱片表面積	$[m^2]$
A_{m1}	左右兩邊熱保護加熱片接觸面積	$[m^2]$
A_{m2}	上下兩邊熱保護加熱片接觸面積	$[m^2]$
En	不同振動頻率下紐塞數增加率	
f_c	渠道振盪頻率	$[s^{-1}]$
F_c	無因次渠道振盪頻率 ($F_c = f_c W / u_0$)	
g	重力加速度	$[ms^{-2}]$
Gr	Grashof 數 ($Gr = g\beta\Delta TW^3 / \nu^2$)	
I	輸入加熱片電流	$[A]$
k_a	空氣熱傳導係數	$[Wm^{-1}\text{C}^{-1}]$
k_b	巴沙木熱傳導係數	$[Wm^{-1}\text{C}^{-1}]$
k_m	加熱片間 OB200 導熱膠之熱傳導係數	$[Wm^{-1}\text{C}^{-1}]$
ℓ	連桿長度	$[m]$
ℓ_c	渠道振動幅度	$[m]$
L	無因次連桿長度 ($L = \ell / W$)	
L_c	無因次振動幅度 ($L_c = \ell_c / W$)	
Q	空氣流量	$[m^3s^{-1}]$
Q_{air}	傳入流場之熱量	$[W]$
Q_{in}	輸入加熱片之總熱量	$[W]$
Q_{lose}	熱經由巴沙木散逸之損失	$[W]$
$Q_{2\rightarrow 1}$	熱由加熱片 2 傳到加熱片 1 之熱量	$[W]$
$Q_{2\rightarrow 3}$	熱由加熱片 2 傳到加熱片 3 之熱量	$[W]$
$Q_{2\rightarrow 4}$	熱由加熱片 2 傳到加熱片 4 之熱量	$[W]$
$Q_{2\rightarrow 5}$	熱由加熱片 2 傳到加熱片 5 之熱量	$[W]$
R	鎳鉻絲電阻	$[\Omega]$
\overline{Nu}	平均紐塞數	

Re_w	雷諾數 (以渠道寬度為特徵長度)	
s	滑塊與連桿接點至套筒圓心之距離	[m]
S	無因次渠道運動位置方程式 ($S = s/W$)	
S_p	新座標之無因次渠道運動位置方程式 ($S_p = S + L$)	
t	往復運動週期	[s]
T_w	壁面溫度	[°C]
T_∞	流體進口平均溫度	[°C]
ΔT_w	加熱片銅片表面與進口流體平均溫差	[°C]
u_0	流體進口平均速度	[ms ⁻¹]
V	輸入加熱片電壓	[Volt]
v_c	渠道振盪速度	[ms ⁻¹]
V_c	無因次渠道振盪速度	
W	渠道入口寬度	[m]
$x, y,$	卡式座標	[m]
希臘符號		
β	空氣熱膨脹係數	[°C ⁻¹]
ν	空氣動黏滯係數	[m ² s ⁻¹]
τ	無因次時間	
ε	模擬與實驗的差異度	

第一章 緒論

近年來因應許多工程上的需要，機械元件所需承受的熱負載也是不斷增加，當元件處於高溫高壓下會縮短其使用的年限並且容易發生破損的現象，為解決此現象所衍生的元件損害與故障，機構熱傳效率的提昇一直是重要的研究課題。在許多機器運轉操作前，事前熱機一方面是工作安全起見，另一方面是為了使機器有更高的熱效率，而為解決機器所能承受的高熱力循環壓力與高溫以確保使用壽命，除了使用能承受更高溫高壓的材料外，更有效率的冷卻散熱系統也是一件刻不容緩的工作。

舉例來說，船舶的引擎為船舶推進的動力來源，假設引擎發生故障，將造成船舶無法正常繼續運作。而位於引擎燃燒室附近之機械元件，因長期處在高溫高壓的熱負載狀態下，容易且經常發生故障。燃燒室內之活塞，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，將造成活塞燒損或龜裂，這不只使引擎無法正常運轉，發揮其最大效率，引擎結構複雜，維修不易，也會使維修營運成本增加。

為因應全世界都面臨嚴重的能源危機，除了致力於發展替代能源之外，節約能源政策已在全世界所有國家努力下執行。對於船舶引擎來說，不斷攀升的石油價格增加燃油成本的花費，因此為了降低燃油成本在航運成本所佔的高比例，船舶引擎的發展將朝向低引擎轉速、高溫高壓之熱力循環等方向邁進。為了使船舶

的引擎效率提昇，以最少的消耗油量產生最大的輸出動力，勢必要提高燃燒壓力，也因此增加了燃燒溫度。目前船舶柴油主機推進引擎，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，活塞在此高溫高壓工作環境下，經常會有損壞的情形。為因應船舶引擎的馬力輸出再提高，所造成引擎活塞熱負載增高的問題，活塞之冷卻技術必須配合提昇，以便能將瞬間達到高溫的部分熱量帶走，降低其溫度，使得活塞材料能夠承受更高的溫度與壓力。因此對活塞內更有效之冷卻系統熱傳性能的研究，實為現代造船工業朝向低耗油率、輸出馬力大等發展趨勢之重要研究焦點。

目前船舶用柴油主機的活塞冷卻系統種類繁多，以蘇撒（SULZER）的大型柴油主機為例，如圖 1-1，其活塞的冷卻大多採用孔道式冷卻系統。圖 1-2 為從 1968 至 1998 年，蘇撒之大型柴油機每單位活塞面積上所能承受的引擎最大輸出功率，與其相對應時間之活塞內部的冷卻系統發展過程。如圖裡所示，在這 30 年期間，柴油機內之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)，除了表示活塞內部冷卻系統更有效率外，也因此使得其設計逐年複雜。在 1969 至 1979 年間，蘇撒大型柴油機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，當活塞作往復運動時，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，待其完成熱交換後，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，但額外再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，又因此冷卻管道可盡量接近受熱表面，使冷卻效果大增。在最近幾年，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。

由於冷卻通道內之冷卻流體需隨活塞作往復運動，因此其流場之熱傳特性與冷卻管道的幾何形狀有關，同時也受系統往復運動時所引生之往復力所影響，形成流場隨著邊界作往復運動之特殊流場。相關此類流場熱傳性能之數值模擬文獻

尚屬少見，值得加以深入研究。

由於活塞冷卻通道內之冷卻流體會隨活塞作往復運動，其流場與其熱傳特性除與管道的幾何形狀有關外，也會受系統往復運動時所產生的往復力影響，形成脈衝流(pulsatile flow)。在過去，Grassmann and Tuma[1]在 1979 年以實驗量測一受脈動力之平滑管流，於紊流狀態下之質傳特性。結果證明其 Sh No. (Sherwood number)可增加至一般穩態管流的 250%。Patera and Mikic[2]指出此現象是因為流體受脈動力影響，自壁面處產生分離(separation)及回流(flow reversal)兩種混合(mixing)現象，進而增加了流場的不穩定性(hydrodynamics instability)所造成的效果。Kim[3]等人更利用數值模擬方法，發現受脈動力影響之流場，其熱傳特性也會受其所施的脈動力大小不同而有所差異。Nishimura[4-6]實驗與模擬，利用波浪形管道取代平滑管道研究脈動流的熱傳變化，發現隨著雷諾數增加熱傳率也有顯著的增加，其流動的型態則直接影響熱傳速率，且與往復頻率有關。Bergles[7]在 1996 年的美國國家熱傳會議邀請演講中，指出近年來工業界提昇熱傳性能的技術有環形管流(coiled tubes)、表面粗糙法(rough surface)、衝擊噴射(jet impingement)等實用技術。其中以表面粗糙法之內設凸起物(rib)較被廣泛採用，於工業應用中，很多熱交換器及燃器渦輪葉片內，即利用各種不同形式之凸起物來提昇熱傳性能，因凸起物本身穿透流場次邊界層(sub-layer)，並引生渦流(eddy)及增加紊流強度(turbulence intensity)，使得熱傳性能得以提昇。而自 60 年代即有許多有關此方面的研究，例如 Webb[8]以實驗量測來探討於平滑管中加裝凸起物對熱傳性能的影響，結果證明其熱傳效果都遠比平滑管來得好。Han[9]以雷諾數從 7000 至 9000 之紊流流場在內設凸起物之方管中進行實驗，發現因加裝凸起物所受的影響，其局部 St 數(local Stanton number)可增加至平滑管的 150% -220%，往後持續性的研究大都朝向改變入口區的形狀、長度，以及改變凸起物的幾何形狀與裝設位置等方面進行。Mackley、Tweddle and Wyatt[10]利用脈衝流流經內有嵌入擋板的管道中，結果發現 Nu. no. (Nusselt number)跟穩流流經光滑的管壁相比明顯地增加，Mackley and Ni[11]利用脈衝流

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，Chang and Su[12]利用實驗量測方法，比較內設凸起物之靜止流場與受往復運動之動態流場的熱傳性能。結果發現往復運動下的熱傳效果，會隨著往復運動速度的增加而提昇，當達到其實驗中的最高往復運動速度時，熱傳效果可比在靜止流場中增加 45%。之後 Chang and Liou[13]又對往復平滑面反重力式盲管進行熱傳實驗，發現於往復管中慣性力相對強度提升可提高熱傳但亦增加無因次壁溫，視管壁區間及往復數範圍，增加往復力相對強度可提高或降低無因次壁溫。

比較上述各種增加熱傳量的方法，利用被動式方法是由於受到流場在熱傳面上形成的速度與溫度邊界層妨礙熱量傳出的影響，因此熱傳效率的增加受到限制。根據熱傳導的傅利葉定律，在溫度梯度小的情況下，熱傳量也比較小。因此，溫度邊界層的存在將限制壁面所能傳出之熱傳量。為了大幅提高高溫壁面的熱傳效率，必須移除熱傳面上的邊界層，使高溫壁面直接與低溫流體接觸，進而提高壁面與流體之間的溫度梯度，達到增加壁面熱傳量的目的。因此，Fu et al.[14]採用在加熱壁面上裝置移動薄塊的方式，藉由薄塊在加熱壁面上快速地往復運動有效掃除壁面的邊界層，有效增加管道內的熱傳效果，結果顯示最大的熱傳可以增加98%；之後Florio[15]也做過類似的模擬，利用一個平板在凸塊前往復振動探討自然對流熱流的變化，發現熱傳效益在凸塊前有平板振動比沒有平板振動的情況下提升了52%。但是利用薄塊掃除溫度邊界層以增加熱傳效果的方法，由於受限於往復機構必須在溫度邊界層內才能達到要求的熱傳效益，因此無法有效的應用在具有凹槽、凸塊以及複雜幾何形狀外型的管道內壁。以上是利用振動讓熱傳增加，所以有人提出振動對熱傳的影響。例如Fu et al.[16-17]即針對密閉環境中變動加速度和振動對自然對流的影響加以探討，並發現簡明的修正公式以預測共振頻率及紐塞數的變化。Kim[18]在實驗中，發現了振動頻率變化會影響熱傳的傳遞，但是往往熱傳率的最大值不一定是在頻率最大的時候，而是會在一個特定的自然頻率下產生共鳴，稱之為共振頻率。Fu 與Huang[19-20]利用數值分析的方法探討垂直通道中，加熱振動面之振動頻率、振幅以及雷利數 (Rayleigh

number) 對於自然以及混合對流的影響；在相同的雷利數下，加熱面以不同的振動頻率與振動幅度之組合下，其熱傳速率有可能會小於固定不動的狀態，也就是在不同的振動頻率與雷利數組合之下可以找到一臨界振動頻率，並可利用振幅與雷利數來表示之。

對於如何改善活塞頂面溫度，在實際物理模式下廖[21]對於活塞頂部高溫面下方加裝一冷卻流道，並採取二維 ALE 方法進行數值分析，並針對不同噴入氣流的雷諾數，活塞震盪頻率，活塞振幅，比較其熱傳效益。其結果顯示當雷諾數愈高，流體可以帶走愈多的熱；另外當活塞振動頻率愈高時，隨時間的平均熱傳率會增高；當振幅增高時，一個週期內的最高熱傳率會增高。賴[22]的研究認為，實際的活塞頂部受到引擎室爆炸的影響溫度非常之高，該區流場受溫度效應影響的比例非常大，因此自然對流效應不容忽視。因此賴模擬的過程中，加入了溫度對於自然對流的影響，並針對不同噴入氣流的雷諾數、活塞震盪頻率、活塞振幅、重力方向，比較其熱傳效益。其結果顯示當重力方向和進口流相反時，活塞頂部的流體容易由於高溫而形成溫度層化，導致活塞頂部熱傳效率降低；當進口流體雷諾數變大時，除了導致流體衝擊高溫壁面的現象更加明顯外，流體隨活塞做往復運動期間，流道內部流場的擾動也會隨著雷諾數增加而變大，因此活塞頂部高溫壁面的熱傳效益會明顯的隨著流體雷諾數的增加而增加；而當重力方向和流體的進口方向相同時，由於浮力效應會將高溫流體帶離高溫壁面，因此增加了管道內冷流體接觸高溫壁面的機會，而有使熱傳效率增加的情形。連[23]則是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确能有效改善活塞頂部高溫壁面的熱傳；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。

余[24]跟陳[25]將廖[21]的模擬做實驗的驗證，其管道與地面水平放置，所對應之 Gr/Re^2 值範圍為 0.03~0.23 之間，未考慮重力影響之自然對流，主要以強制對流為主，靜止的狀態下其頂部之強制對流熱傳效率以前段最好、中段次

之、後段加熱區最差；在相同的雷諾數下，熱傳效率並不會因為震動頻率升高而呈現逐漸增加或減少的趨勢，但是內部流場存在一個自然頻率，在此頻率下可以大幅度的提升頂部熱傳；在相同的振動頻率下，熱傳效率會因雷諾數的提升有增加的趨勢。

林[29]將賴[22]的模擬做實驗的驗證，也考慮到實際引擎運轉方向也與地面垂直，將根據自然對流引發的浮力效應做混合對流之實際的驗證，並與模擬相互對照，且在考慮重力的影響下 Gr/Re^2 值的範圍為 0.8~6.47 之間，將 U 型渠道垂直擺置，探討進口流體與重力方向同向來進行熱傳效率分析，實驗結果可發現渠道振動之後依然是前段最好、中段次之、後段加熱區最差，且在各個振動頻率下，隨著雷諾數增加其紐賽數也增大，熱傳效益也更好。

比較林[29]和陳[25]的實驗，林[29]有考慮重力影響下之實驗，故自然對流與強制對流效應皆列入考慮與陳[25]的實驗比較，其實驗設備水平放置重力影響較小，且溫度差範圍只有 5°C ，故自然對流效應更小，主要為強制對流，結果得知在開放流道同一雷諾數下，自然對流對於紐賽數的變化有增益的效果，故考慮重力影響之垂直渠道混合對流的散熱效果，比不考慮重力影響之水平實驗較為理想。

而劉[30]將陳[25]與林[29]的實驗做比較，將 U 型管道轉 180 度變成 Γ 型管道做垂直擺置，實驗結果可發現渠道振動之後依然是前段最好、中段次之、後段加熱區最差，且在各個振動頻率下，隨著雷諾數增加其紐賽數也增大，熱傳效益也更好，實驗由於進口流體與重力反向且加熱區在上方，受自然對流效應影響，其熱傳效率低於 U 型管道。

而本研究主要是根據劉[30]之 Γ 型渠道垂直擺置，改變振幅大小藉以探討不同振幅大小對進口流體與重力方向反向來進行熱傳效率分析並與劉[30]之 Γ 型渠道做比較，將原先振幅尺寸 30mm 改為 22.5mm，期望得到一個較客觀的結果。藉由此分析結果，希望能得到一個最佳的設計參數，對於未來工業界實務應用上有所幫助並提供管道利用冷卻流體往復運動進行壁面散熱之設計參考。

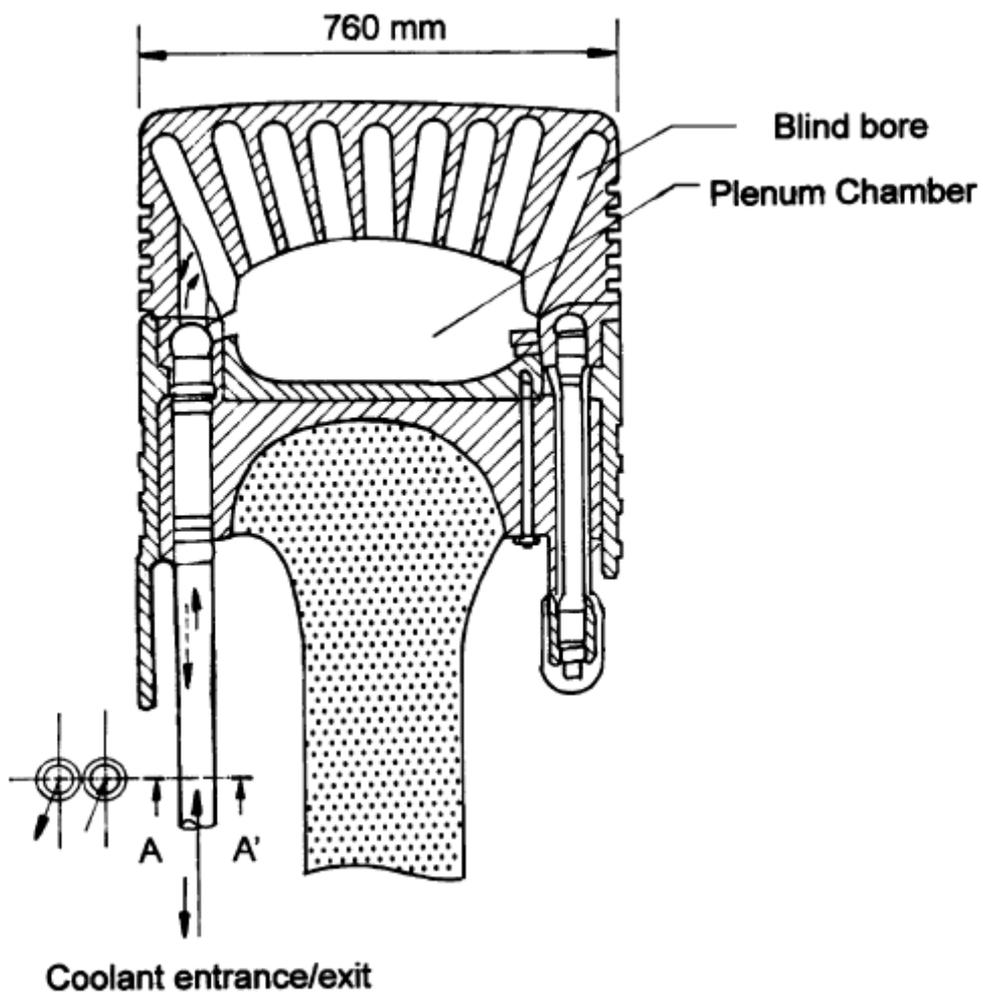


圖 1-1 Suzler RTAT6 柴油引擎之活塞冠斷面示意圖〔13〕

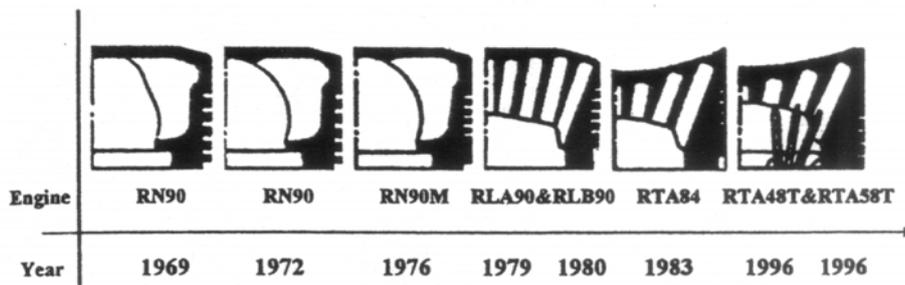
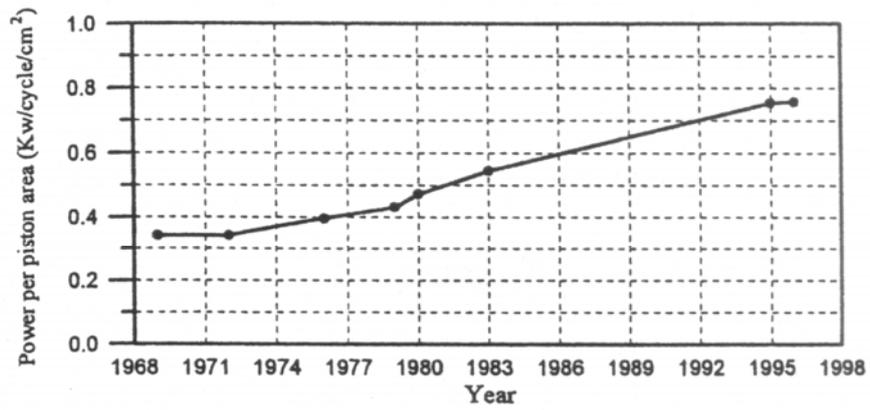


圖 1-2 歷年 Sulzer 柴油引擎動力輸出圖

第二章 垂直往復式冷卻渠道之熱流實驗

2.1 實驗設備

本實驗將探討活塞內部冷卻渠道之冷卻流體隨活塞進行往復運動對活塞壁面散熱效率影響情形，圖 2-1 為活塞加裝一冷卻渠道在汽缸內作往復運動之示意圖，由於活塞會上下進行往復運動，在壁面附近留有一冷卻渠道會隨著活塞進行運動，所以本實驗將實驗設備架設與地面垂直，進一步考慮了重力的影響，從流體進口速度與重力方向同向觀察，希望藉此往復機制可以增加活塞高溫壁面的熱傳效率。為了進行此實驗分析，實際架設一設備如圖 2-2 所示，進行進口速度與重力方向同向之實驗，首先是冷卻流體部份，利用送風機（1）提供穩定且連續的空氣來作為工作流體，用以冷卻高溫壁面，空氣經由風機送出以後，利用圓管輸送經方形轉接頭進入冷卻渠道（4），冷卻渠道分為延長渠道（41）、方形套管（42）和 U 型渠道（43），其中 U 型渠道為本實驗之測試段，因此在渠道的頂部壁面放置自製加熱片，用以提供熱量作為模擬活塞內部的高溫壁面，並方便於實驗時計算壁面紐塞數，進而了解壁面的熱傳效率，並將此部份渠道固定在一往復機構（5）上，當往復機構開始運作時，渠道會隨之進行往復運動，此時裡面的冷卻流體受到振動影響，對壁面散熱也會有不同的效果，最後利用個人電腦擷取各項所需數據，經過處理以後進行壁面的熱傳分析。以下將實驗設備分為冷卻渠道與流量量測裝置、高溫壁面加熱裝置與溫度量測裝置、往復運動機構與個人電腦等四部份詳加討論。

2.1.1 冷卻渠道與流量量測裝置

(A) 風機

考慮本實驗為低雷諾數低風速實驗並且渠道開口口徑較小，因此選用全風公司出產的環形鼓風機（Ring Blower）作為工作流體輸送的動力源，型

號為 RB-200A，輸出功率 0.18KW，開口口徑為一英吋。其優點為高風壓、低噪音、低震動，並且開口管徑較小方便配置管線。為了控制風機輸入的風量及改善送風的穩定度，採用東元電機公司出產的 N2 系列變頻式馬達控速器，此為整個實驗送風的部份。

(B) 冷卻渠道

本實驗之冷卻渠道以透明壓克力材料製作，方便於之後進行流場可視化，考慮整個實驗之規劃，將渠道設計為開放吹氣型。實際渠道尺寸如圖 2-3 所標示，大致上分為三個部份，第一部份為 U 型渠道 (43)，這部份與渠道其他部份分開，將之固定在往復運動機構上，可進行上下往復運動，渠道的入口寬度為 30mm*90mm，高度為 120mm，渠道頂部為加熱面 (61)，分別有三組相同面積為長 86mm × 寬 36mm 之加熱區塊位於圖中所標示之位置，為了使實驗接近模擬簡化的三維流場，需將加熱區塊置於 z 方向之中間區段，以求與數值模擬條件相符。第二部份為延長渠道 (41)，工作流體由風機送出在此進入渠道，並在渠道內流體進口處擺放數個蜂巢 (honeycomb) 和整流網 (screen)，以降低由風機產生之流場紊亂的強度，形成均勻流 (uniform flow)，符合數值計算之入口條件，另外在延長渠道進口的末端將與 U 型渠道銜接的地方處鑿穿一個直徑 1mm 的小孔，作為熱電偶線伸入口，此熱電偶線量得的溫度即為測試區之入口空氣溫度。為了防止 U 型渠道往復運動時和延長渠道產生太大的間隙，造成氣體嚴重外洩，所以用方形套管 (42) 將兩端連接，方形套管的後方保留 30mm 距離與延長渠道相連接並採取固定式，至於前方 120mm 距離則保留予 U 型渠道往復運動所需之空間，形成一個完整的渠道，此為冷卻渠道第三部份。

(C) 流量量測

流體由風機送出後經由圓管輸送，為了計算流體的速度 (u_0)，必須量測入口流量 (Q)，若管道面積 (A) 為已知，由 $Q/A = u_0$ 即可求得流速，並得以確定實驗所需之流體進口雷諾數。本實驗選用浮子流量計(圖 2-2 之

(2))來量測工作流體流量，此流量計量測範圍為 200 c.c/s ~2000 c.c/s。為求浮子流量計量測準確，基本上流量範圍最好處於刻度的中段區域，並且工作流體進入流量計之前的入口長度須為管徑的 20 倍以上。最後流體經過流量計藉由方型轉接頭進入方型的冷卻渠道來進行流場熱傳效率分析。

2.1.2 往復運動機構

往復運動機構(圖 2-2 之 (5))在實驗中為帶動渠道進行往復運動，並且藉由馬達轉速的不同來改變實驗參數(無因次振動頻率)，分為傳動組件配合步進馬達及驅動器，其組合詳述如下：

(A) 傳動組件：

傳動組件機構設計如圖 2-4 所示，圖 2-5 為其側視圖，以不鏽鋼材質製造一機構可以利用步進馬達的旋轉帶動 U 型渠道進行來回振盪的運動。此機構設計為將 U 型渠道 (43) 固定在可移動的滑塊 (53) 上，滑塊固定只能在滑軌 (55) 上移動，限制其移動為一維方向，另一方面將步進馬達之傳動軸 (56) 鎖上一圓形套筒 (57)，並在套筒上距離圓心 22.5mm 處鑽孔，此距離即為渠道振動幅度 (l_c)，利用連桿 (54) 將套筒與滑塊連接，當馬達轉動時，由於偏心作用，渠道因此來回運動，在實驗中可藉由調整步進馬達轉動頻率，即可控制渠道往復運動之速度。

由於數值模擬部份設定渠道進行正弦波之往復運動，以下說明為渠道進行正弦波往復運動之原理：

如圖 2-4 所標示

s ：滑塊與連桿接點至套筒圓心之距離

渠道運動位置方程式

$$S = \frac{s}{W} = L_c \sin(2\pi F_c \tau) - \sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2} \quad (2-1)$$

S 的運動範圍為 $-L_c - L \leq S \leq L_c - L$

定義新的座標： $S_p = S + L$

$$S_p = S + L = L_c \sin(2\pi F_c \tau) - \sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2} + L \quad (2-2)$$

S_p 的運動範圍為 $-L_c \leq S_p \leq L_c$

將位置方程式對時間取一次微分可得渠道運動速度方程式

$$V_c = \frac{v_c}{u_0} = 2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau) - 2\pi F_c L_c^2 \frac{\cos(2\pi F_c \tau) \sin(2\pi F_c \tau)}{\sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2}} \quad (2-3)$$

圖 2-6 為式 (2-3) 之結果，橫座標為時間軸，縱座標為無因次渠道振盪速度，當 l/l_c 趨近於無限大，也就是說連桿長度無限長，渠道往復運動將會呈現正弦波 $S = L_c \sin(2\pi F_c \tau)$ 振盪，一次微分的無因次振盪速度方程式則為 $V_c = 2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau)$ 。 $l/l_c = 4.0$ 為劉[30]所作的實驗值，此實驗機構 $l/l_c = 4.89$ ，由圖觀察得知與正弦波振盪差異甚小。

(B) 步進馬達及控制器

由於渠道往復運動需由馬達傳動軸來提供一個轉速，因此選用 SANYO DENKI 公司型號 103H8223-5111 的 1.8 度 2 相步進馬達，如圖 2-6 所示，最大驅動力為 70kg-cm，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 通訊埠與 Parker 公司型號 OEM750X 的馬達控制器連接來啟動馬達和設定馬達運轉參數，以控制步進馬達的作動行為。

2.1.3 高溫壁面加熱裝置與溫度量測裝置

為得到較佳的高溫壁面與方便量測各點溫度用以計算此實驗之紐塞數，以銅片、鎳鉻絲及巴沙木等材料製成加熱片，並由電源供應器提供電能使鎳鉻絲發熱產生熱量，加熱片的組成如圖 2-7 所示。每片加熱片上均黏有熱偶線，用以量測該點溫度。

渠道頂面之加熱板主要做法為分別將三塊表面積為長 62mm × 寬 12mm 及兩塊長 36mm × 寬 12 mm 之加熱片緊密結合為一組長 86mm × 寬 36mm 之加熱區塊後，再將三組加熱區塊置於一長 200mm × 寬 120mm 且厚度為 10mm 之組合巴沙木板，在組裝時需注意保持加熱區塊表面與巴沙木板表面維持同一平面，各組加熱區塊詳細位置如圖 2-8 所示，依流體入口方向加熱區分為前、中、後段加熱區，各個加熱區塊僅中間加熱片為實驗計算所用，上下左右四塊加熱片則為熱保護用。為了減低熱量從組合間縫隙散失，在加熱區塊周圍及後方貼附絕熱泡棉。

(A) 加熱片原理：

將鎳鉻絲纏繞於孔洞分布均勻的電路板，並且連接電源供應器通以電流使其均勻發熱，外面包覆高熱傳導係數的銅片藉此形成一個表面均溫且對於熱反應快速的發熱體。在其側邊利用相同製作過程的銅片夾層緊靠來達成熱保護的效果，當這些銅片夾層都加熱到相同溫度時，彼此間就不會有熱傳，藉此降低無法估計的熱損，但是實際上銅片上的表面溫度極難調到等溫，所以加熱片間的熱傳也無法忽略。銅片的上表面置於流場中，熱量由流場的流體經熱對流方式帶走，下表面則緊貼巴沙木用以計算下方熱傳導帶走的熱損失，其餘的部份則貼覆絕熱泡棉使其熱損失降到最低。

(B) 加熱片的製作方法：

(1) 材料準備：

銅片（厚度 0.05mm）、電路板（厚度 1.6mm）、直徑 0.17mm 之鎳鉻絲，鐵氟龍絕緣膠帶、巴沙木（厚度 1.5mm 和 6mm）、直徑 0.001mm 之 J-TYPE 熱電偶線、OMEGA 公司的 OB-200 導熱膠、AB 膠等。

(2) 熱電偶線之焊接：

將直徑 0.001mm 之 J-TYPE 熱電偶線，去掉外面包覆的絕緣皮後，利用點焊機將熱電偶兩條不同的金屬線端點焊接起來，然後接上型號 MV100 的資料擷取機去讀取，放置在室溫中一段時間，再去觀察不同條

間熱電偶線是否溫度差在 0.3°C 之內，符合在溫差內就通過測試，沒有則重新焊接直到符合所需要的標準。

(3) 製作銅箔夾層 (65)：

將厚度 1.6mm 之電路板裁成長度 62mm ，寬度 11mm 之長條型，其內部有 96 個孔洞 (24×4)，表面有金屬的部份用砂紙磨去，並取中間且均勻分佈鑽通孔以便於放置熱偶線；於裁好的電路板上繞以細密且均勻間隔之鎳鉻絲，其纏法如圖 2-7 中 (62) 所示，注意鎳鉻絲需保持平整避免在電路板表面發生高突而與銅片間隙太大，接著再將鐵氟龍絕緣膠帶包覆於纏好鎳鉻絲的電路板外用以與銅片絕緣；切取尺寸為 $62\text{mm}\times 24\text{mm}$ 厚度 0.05mm 之銅片，將銅片折成寬度為 11mm 之 U 字型，包覆於巴沙木外且銅片表面需盡量保持平坦。並將穿過電路板夾層之熱電偶線黏貼於銅片內側通孔對應的位置。

(4) 製作巴沙木夾層 (66)、(67)：

為了減少同組五塊加熱片間因為組合時產生的接觸熱阻，因此把一組加熱區塊所需的五個巴沙木夾層一起製作，將巴沙木（厚度 1.5mm 和 6mm ）裁成一塊長度 62mm ，寬度 36mm 之長方體，也就是五塊銅片夾層組合起來的大小，對照銅片夾層適當的位置鑽通孔用來穿過所有的熱偶線。為求估算經由巴沙木的熱損失，在巴沙木（厚度為 1.5mm ）上下放置熱偶線以量測溫度，用以求得藉由熱傳導耗散的熱量。

(5) 加熱片成形：

組裝時，如圖 2-7 中所示，最上層為銅片夾層，中間為厚度 1.5mm 之巴沙木夾層，下層則為 6mm 之巴沙木夾層，熱偶線分別由各通孔拉出，熱偶線的位置如 (68) 所示，主要量測的銅片夾層六條，熱保護銅片夾層三條，中間巴沙木上下各六條，接著再將各層之間均勻塗上導熱膠，組合夾緊放置 24 小時待其乾燥固定，即可完成組裝工作。製作過程中需注意加熱面銅片保持平整，以達到均溫效果。另外需注意加熱片有無縫隙，

須以導熱膠或 AB 膠於適當的地方填補。圖 2-8 為完成後之加熱區段位置圖。

(C) 加熱片測試：

將完成後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，使銅片溫度上升，因其加熱片的面積為待其加熱片溫度穩定後擷取黏貼於銅片背面六條熱電偶線之溫度，若彼此溫度差均能維持在 0.3°C 內則通過測試，圖 2-9 即為一測試結果，加熱的溫度設定為高於室溫 10°C ，圖中標示的溫度為加熱面銅片表面各點的溫度。

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 MOTTECH 公司型號 LPS305 的直流電源供應器，並且利用 UNI-T 公司型號 UT60E 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 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 GPIB-USB 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。

(D) 量測溫度裝置

溫度在工業界上扮演著重要的角色，而準確溫度的量測對工業界更是重要，目前工業界常用的溫度量測裝置為電子式溫度感測器，電子式溫度感測器大致尚可分為接觸式（非輻射型）與非接觸式（輻射型），常見的接觸式感測器有熱電偶，電阻式、與熱敏電阻式，其中熱電偶式的溫度量測廣泛的被應用在工業中，如航空機具、核能急火力電廠、石化工業等，因其具有可以提供精確、可靠、及連續的溫度記錄之優點，且適用溫度範圍相當的廣。

熱電偶量測溫度原理為利用兩種不同的金屬或合金線，在兩不同線端點處焊接在一起，當此焊接點與待測高溫面接觸時，會產生電壓差而造成熱電流運動現象，而其大小則依據焊接點與另一端參考點之溫差，此參考點溫度必須為一定值，藉由熱電流運動力，可推算出焊接點之溫度，依據電壓大小

來判斷被測物之溫度，而其準確度與範圍就和材質有非常大的關係，目前業界常見的有 E、J、T、K 等 TYPE 的熱電偶。

本實驗溫度量測部份採用 OMEGA 公司出產 J-TYPE 熱電偶，利用 Yokogawa DA2500E 資料擷取器將熱電偶的電壓類比訊號取出並轉換成溫度值，並利用 National Instruments GPIB 介面卡將資料傳輸置個人電腦，最後經過個人電腦將資料處理並加以儲存。

2.2 實驗步驟

本研究主要目的在以實驗的方法，進行 U 型渠道往復運動之頂部熱傳效應分析，實驗共分為三部分：進口流體雷諾數量測、啟動往復運動機構與壁面溫度量測。

2.2.1 進口流體雷諾數量測

為了探討 U 型渠道頂部熱傳效率與進口流體雷諾數之關係，故工作流體進口平均速度需確定，由 $u_0 = \frac{Q}{A}$ 此式得知，當渠道截面積 A 已知，平均速度 u_0 則可以由流量計讀數 Q 代入前式計算求得，藉由調整風機控速器來調整進口流量，即可得到實驗所設定之雷諾數。

2.2.2 啟動往復運動機構

本實驗以解析度 36000 步/轉之步進馬達帶動往復運動機構，其運動狀態可由馬達轉動求得，相關的馬達運動參數如表 2-1 所示，渠道振盪頻率可以經由控制器調整步進馬達轉速得到，因為步進馬達轉動一圈則 U 型渠道前後來回振盪一次。為確認其精準度，利用碼表量測 U 型渠道振盪 120 次所歷經時間，並換算成頻率與控制器所輸入之頻率作比較，發現誤差極小，控制極為精準，但因步進馬達扭力無法負載滑軌快速移動所需要的力矩，故轉速不能過高。

2.2.3 冂型渠道底部壁面溫度量測

本實驗藉由量測 U 型渠道壁面溫度，進而計算壁面平均紐塞數，由於 Yokogawa 公司型號 DA-2500E 的資料擷取器掃描速度較慢，無法配合冂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 30 秒求得各點的溫度，連續量測一小時，加以平均觀察其溫度的變化。實驗步驟如下：

1. 將管道流量調整以符合實驗所需的雷諾數。
2. 啟動電源供應器使加熱片溫度上升。
3. 啟動往復運動機構並調整至所需振動頻率。
4. 等待流場與實驗設備運轉穩定。
5. 個別調整加熱片的輸入功率，使各加熱片表面溫度皆相同（即溫差 $\leq 0.3^{\circ}\text{C}$ ）。

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片上，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，一為經由表面的銅片傳入流場，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，詳細熱損計算原理如下：

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(D)所示：

(A) 輸入加熱片的能量：

電源供應器提供加熱片能量，由於電阻為溫度的函數，會隨著溫度變化而變化，不是定值，所以輸入能量採取輸入電壓與電流的乘積來計算

$$Q_m = V \times I \quad (2-4)$$

(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

$$Q_{lose} = k_b \times A_b \times dT / dy \quad (2-5)$$

式中 k_b 為巴沙木熱傳導係數=0.055 (W/m $^{\circ}\text{C}$)

A_b 為巴沙木面積=0.062×0.012= 7.4×10⁻⁴ (m²)

dT 為巴沙木兩端溫度差 (°C)

dy 為巴沙木厚度=0.0015 (m)

(C) 加熱片間熱傳：

由於溫差範圍在 10°C、20°C、30°C、40°C，因此表面溫度梯度較大，表面溫度變化劇烈，不易將各加熱片表面溫度調為完全相同，使得加熱片間有些微的熱傳量(圖 2-9 有標示加熱片的編號)

$$Q_{2 \rightarrow 1} = k_m \times A_m \times dT / dx \quad (2-6)$$

式中的 k_m 為加熱片間 OB200 導熱膠熱傳導係數 = 2.3 (W/m°C)

A_{m1} 為左右加熱片接觸面積=0.062×0.002=1.24×10⁻⁴ (m²)

A_{m2} 為上下加熱片接觸面積=0.012×0.002=2.4×10⁻⁵ (m²)

dT 為兩加熱片間溫度差 (°C)

dy 為 OB200 導熱膠之厚度約為 0.001 m

因此 $Q_{2 \rightarrow 1}$ 可求得

同理由加熱片 2 傳至加熱片 3 之能量 $Q_{2 \rightarrow 3}$ 可求得

同理由加熱片 2 傳至加熱片 4 之能量 $Q_{2 \rightarrow 4}$ 可求得

同理由加熱片 2 傳至加熱片 5 之能量 $Q_{2 \rightarrow 5}$ 可求得

(D) 口型渠道頂部壁面平均紐塞數估算：

由加熱片傳入流場的總能量為

$$Q_{air} = Q_{in} - Q_{lose} - Q_{2 \rightarrow 1} - Q_{2 \rightarrow 3} - Q_{2 \rightarrow 4} - Q_{2 \rightarrow 5} \quad (2-7)$$

根據紐塞數定義計算高溫加熱片的平均值

$$\overline{Nu} = \frac{Q_{air}}{A_h \Delta T_w} \cdot \frac{W}{k_a} \quad (2-8)$$

式中 A_h 為加熱片表面積=0.062×0.012=7.4×10⁻⁴ (m²)

ΔT_w 為加熱片銅片表面與進口流體平均溫差

W 為管道寬度=0.03 (m)

k_a 為空氣熱傳導係數 (W/m°C)

2.3 流場可視化設備

在低速的空氣流場中，使用放煙線法 (Smoke-Wire Techniques) 來進行流場可視化，是被廣為採用的方法之一。此方法是在測試段中放置塗上煙油之金屬線，並將金屬線通以電流使之發熱，則金屬線上的煙油會揮發形成煙，而煙在流場中則形成煙線，如此一來就可以實際觀察流場瞬間變化情形。Yang[26]中提到，放煙線法是 Raspert 與 Moore 於 1950 年代所發展，最早應用在觀測邊界層的速度分佈。之後，歷經許多改進與發展，放煙線法的技術已經非常成熟。因此，本實驗採用放煙線法來觀測流場結構並選用線徑 0.17mm 之鎳鉻絲和白脂油來進行流場可視化。

本實驗發煙器放置於 z 方向中間區域，在此區域二維效應最明顯，為本次觀察的重點，發煙器之裝置如圖 2-11 所示，當 switch 瞬間打開時，整個線路會有電流通，鎳鉻絲因而發熱，促使煙油揮發。

在渠道底部依欲觀察流場之位置鑽孔，以利鎳鉻絲通過置於流場內部，將鎳鉻絲穿入，並且固定之，如圖 2-11 所示，鎳鉻絲穿過壓克力管壁後與電源供應器連接，接頭處需利用絕緣膠帶將之固定，避免實驗進行中渠道振動時，接頭地方鬆脫或滑落。放煙油採用競輪企業有限公司之白脂油，並加入少許中性清潔劑，在實驗中以人工方式使用藥用長綿籤來塗抹煙油。

拍攝放煙過程使用 JVC 公司出品的 DV 數位攝影機，動態攝影每秒鐘可以擷取約 30 格畫面(frame)，拍攝過程中設定為黑白攝影，拍攝完畢以後經由 1394 傳輸埠將影片傳至電腦進行處理。拍攝流場實需局部打光凸顯煙粒子，為了避免背景色或壓克力反光影響拍攝，將非觀測面以黑色不反光紙貼覆，以利於觀察，光源擺置的位置如圖 2-12 所示，由 U 型渠道的側面向另一邊打光，照亮渠道內

部欲拍攝的範圍，光源的方向必須與拍攝方向垂直，才能捕捉到最清楚的畫面，拍攝範圍為圖中虛線部份。

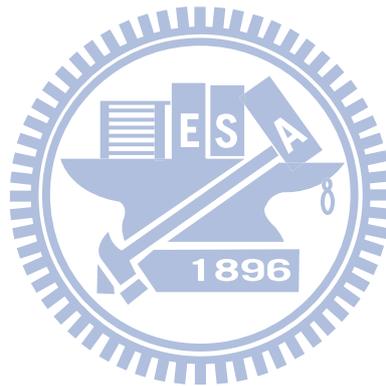
2.3.1 流場可視化步驟

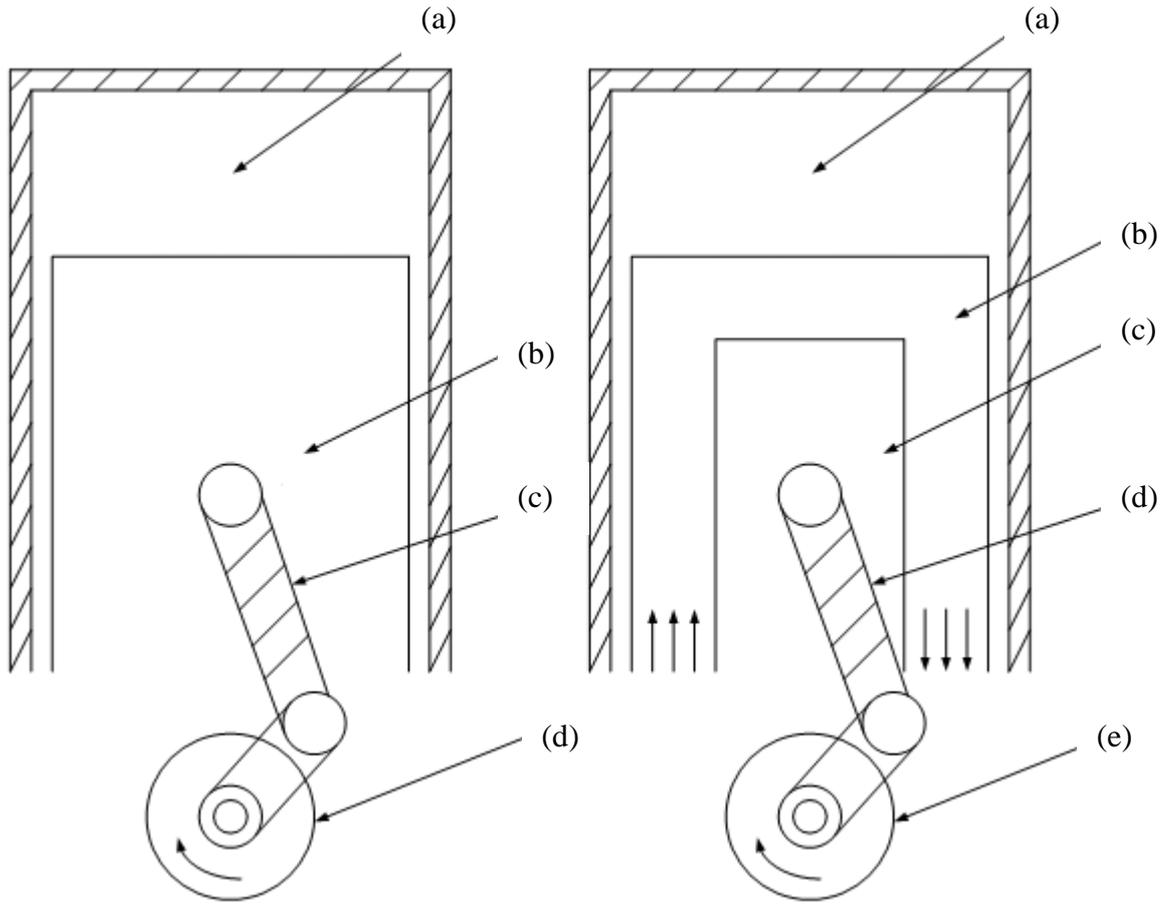
1. 將 DV 手動設定為黑白攝影模式，並確認畫面範圍。
2. 開啟風機並調整流量至所需之雷諾數。
3. 設定往復運動機構至所需的振動頻率。
4. 設定電源供應器電流值約為 0.8A，在放煙裝置的鎳鉻絲上適當的位置塗抹適量的煙油。
5. 經由 DV 螢幕確認打光效果。
6. 開始錄影，啟動電源供應器加熱鎳鉻絲並且配合渠道往復運動。
7. 拍攝完畢，將 DV 磁帶檔案轉至電腦處理。



表 2-1 步進馬達運動參數表

解析度 (step)	36000
轉速 (rev/s)	0~3
角加速度 (rad/s ²)	0~10
轉動步數	36000





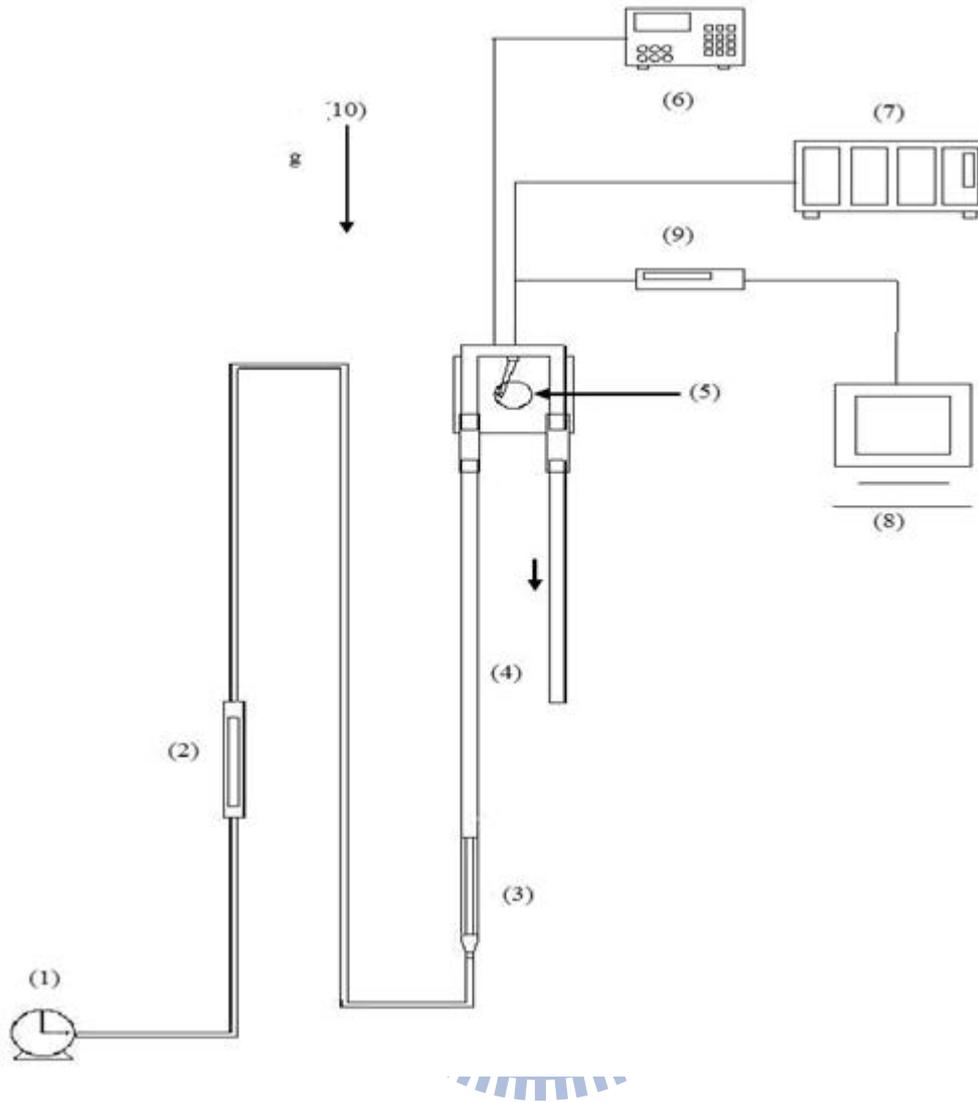
- (a) 汽缸燃燒室
- (b) 活塞
- (c) 曲柄軸
- (d) 飛輪

- (a) 汽缸燃燒室
- (b) 冷卻渠道
- (c) 活塞
- (d) 曲柄軸
- (e) 飛輪

(a) 一般引擎示意圖

(b) 加裝冷卻渠道示意圖

圖 2-1 引擎活塞機構示意圖



- | | |
|-----------|-------------|
| (1) 風機 | (5) 往復機構 |
| (2) 浮子流量計 | (6) 電源供應器 |
| (3) 蜂巢及篩網 | (7) 溫度記錄器 |
| (4) 冷卻渠道 | (8) 個人電腦 |
| | (9) 步進馬達控制器 |
| | (10) 重力方向 |

圖 2-2 實驗設備總圖

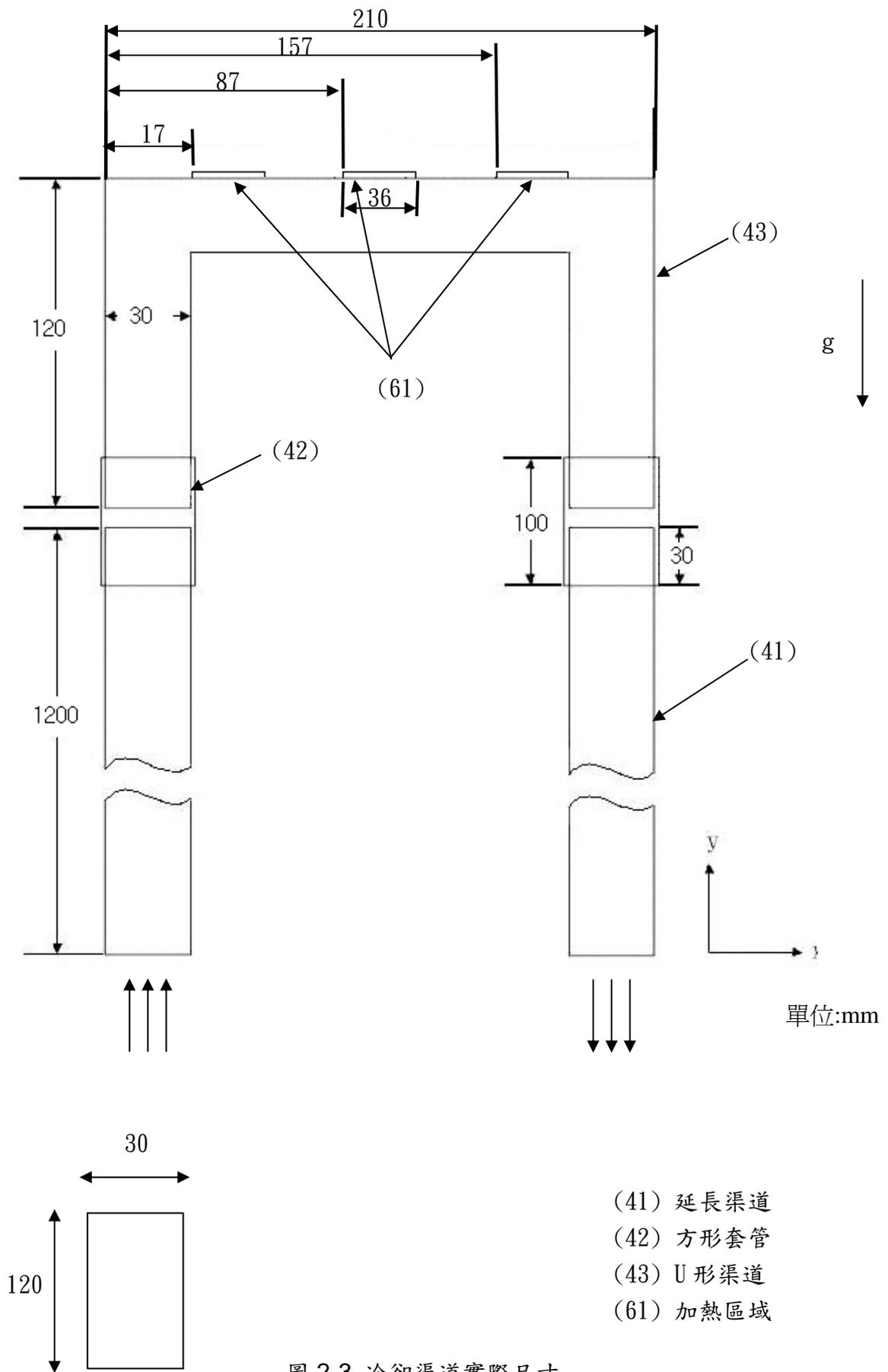
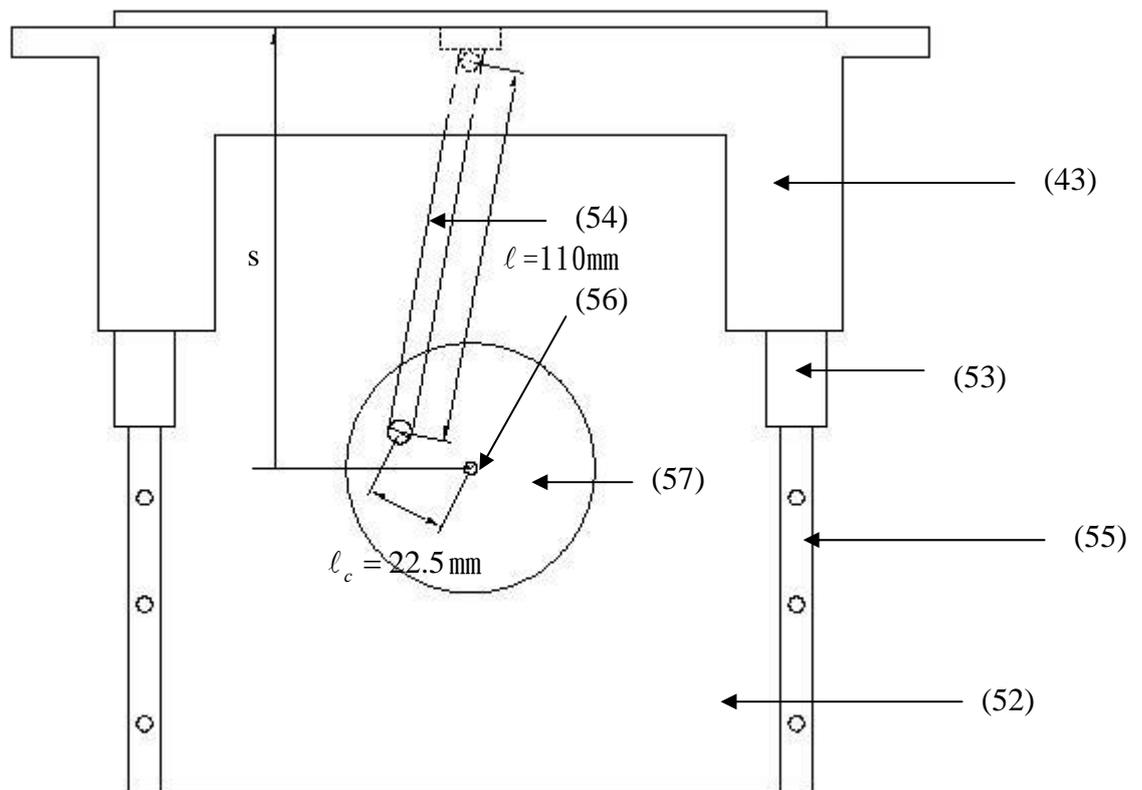
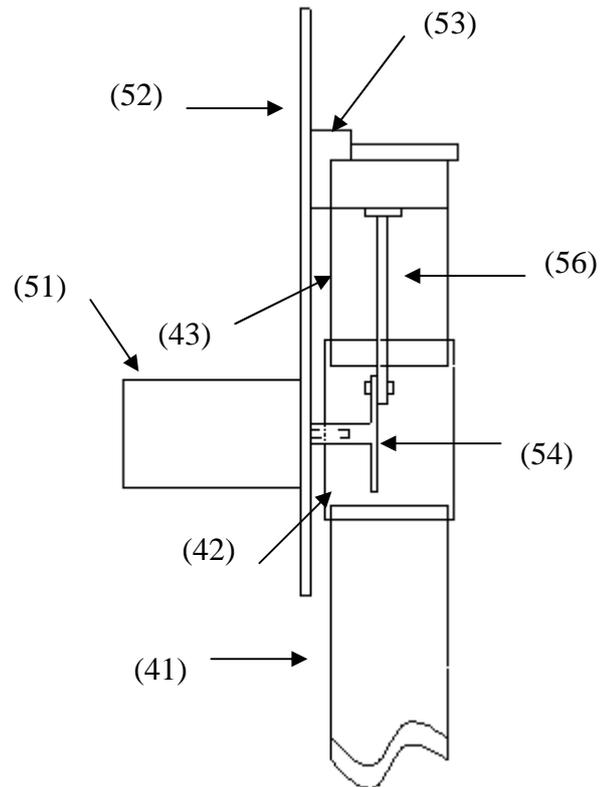


圖 2-3 冷卻渠道實際尺寸



- (52) 基座 (57) 圓形套筒
 (53) 滑塊 (43) U型渠道
 (54) 連桿
 (55) 滑軌
 (56) 馬達傳動軸

圖 2-4 往復運動機構



- | | |
|-------------|-----------|
| (41) 延長渠道 | (53) 滑塊 |
| (42) 方形套管 | (54) 連桿 |
| (43) U型渠道 | (56) 圓形套筒 |
| (51) 步進馬達 | |
| (52) 往復機構基座 | |

圖 2-5 往復運動機構和冷卻渠道側視圖

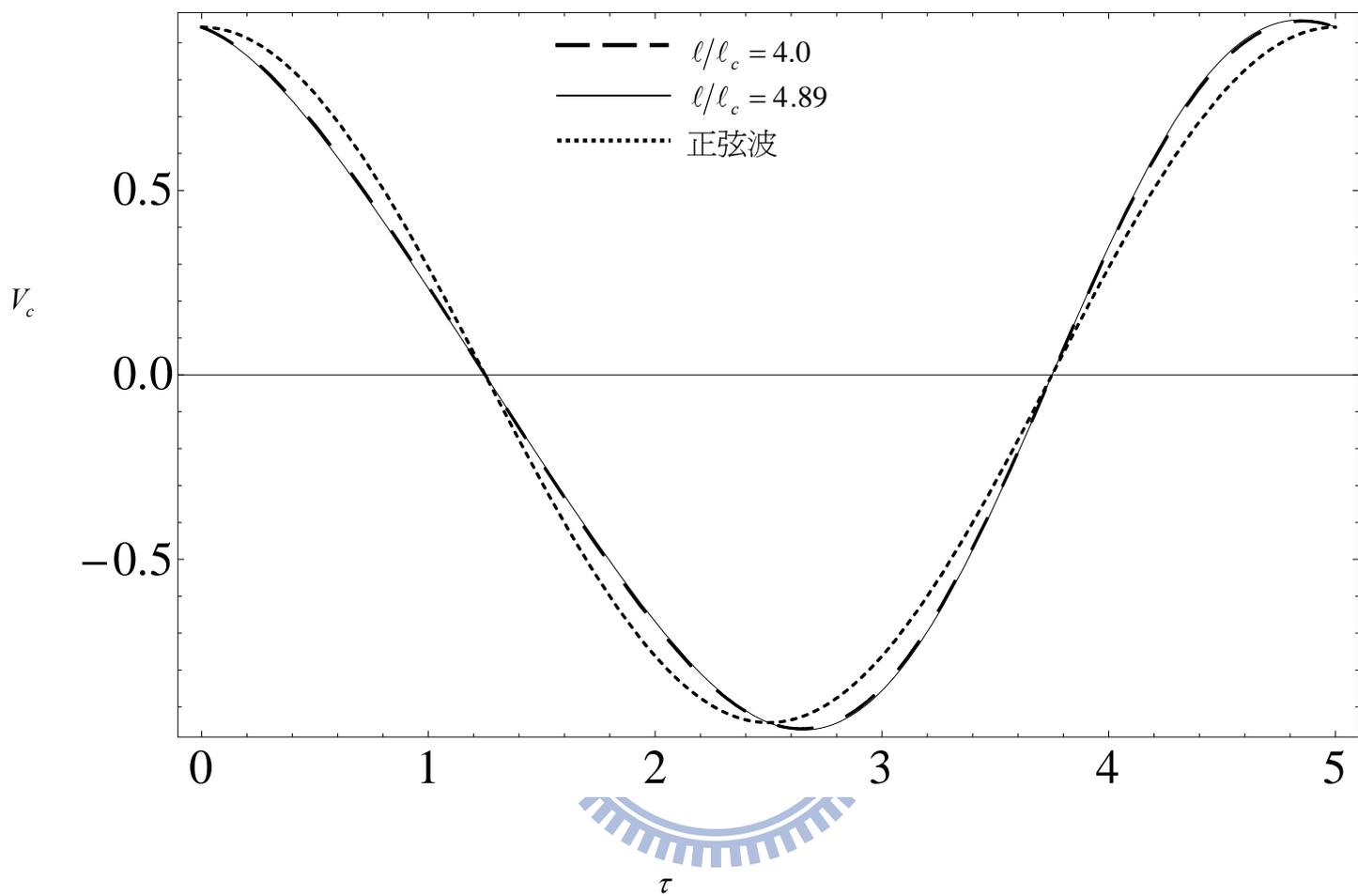
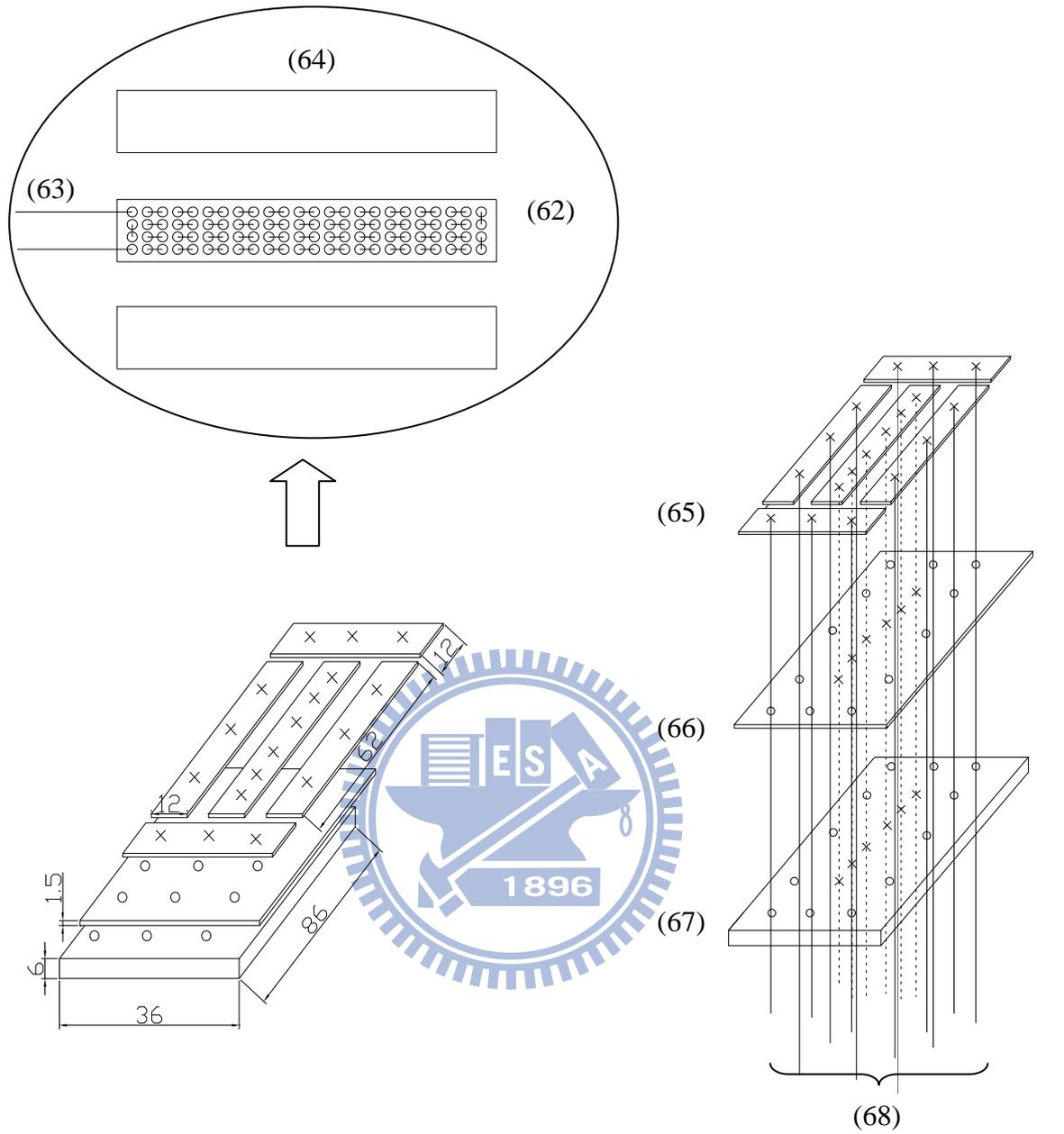


圖 2-6 渠道振盪速度圖



- (62) 發熱區
- (63) 鎳鉻絲
- (64) 鐵氟龍膠帶
- (65) 銅片
- (66) 1.5 mm 巴沙木
- (67) 6 mm 巴沙木
- (68) 熱偶線

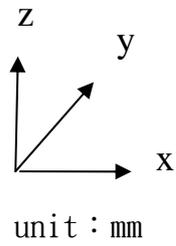
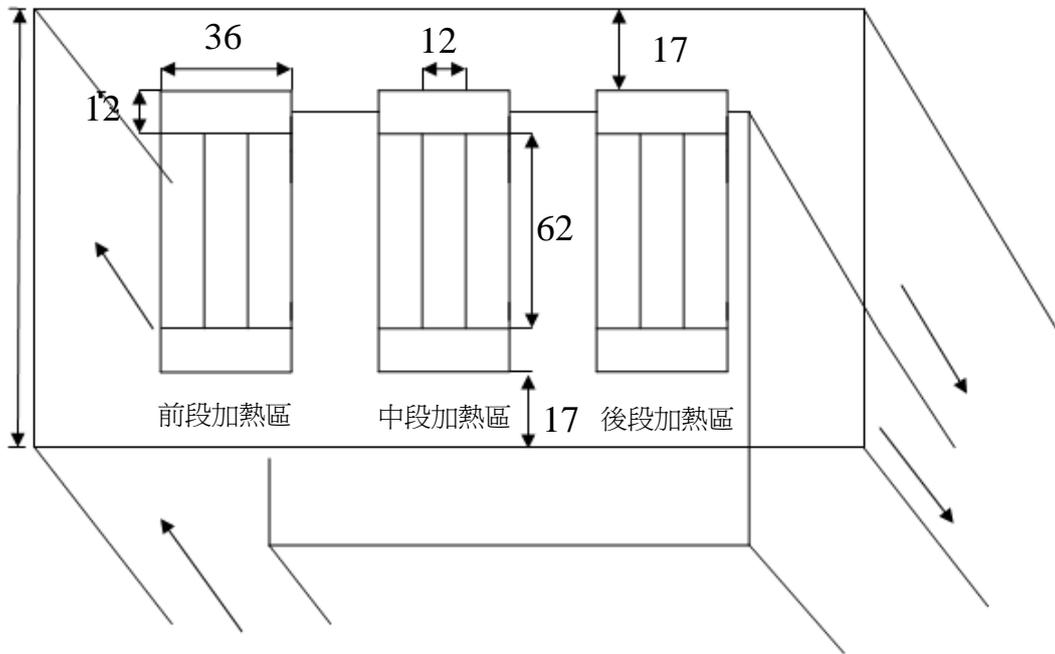


圖 2-7 加熱片結構圖



單位：mm

圖 2-8 加熱區段位置圖

(1)前段加熱區

(2)中段加熱區

(3)後段加熱區

35.2°C 35.3°C 35.3°C (4)		
34.9°C	35.3°C	35.2°C
	35.3°C	
35.3°C	34.8°C	35.0°C
	35.3°C	
35.2°C	34.7°C	35.1°C
	35.1°C	
(1)	(2)	(3)
34.9°C 35.3°C 35.1°C (5)		

35.2°C 34.8°C 35.0°C		
35.2°C	34.7°C	35.1°C
	35.3°C	
35.0°C	34.9°C	35.3°C
	35.3°C	
35.2°C	35.1°C	34.7°C
	35.2°C	
35.3°C 35.3°C 35.0°C		

34.8°C 35.3°C 35.2°C		
35.0°C	35.2°C	35.0°C
	34.9°C	
35.3°C	34.9°C	35.0°C
	35.3°C	
35.1°C	34.8°C	35.0°C
	35.2°C	
35.2°C 34.2°C 35.0°C		

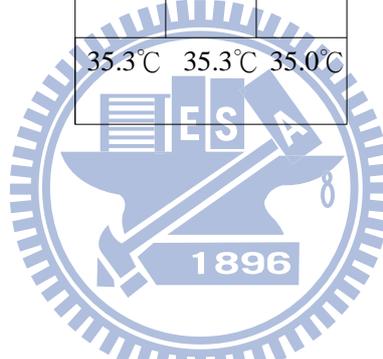


圖 2-9 加熱片測試各點溫度

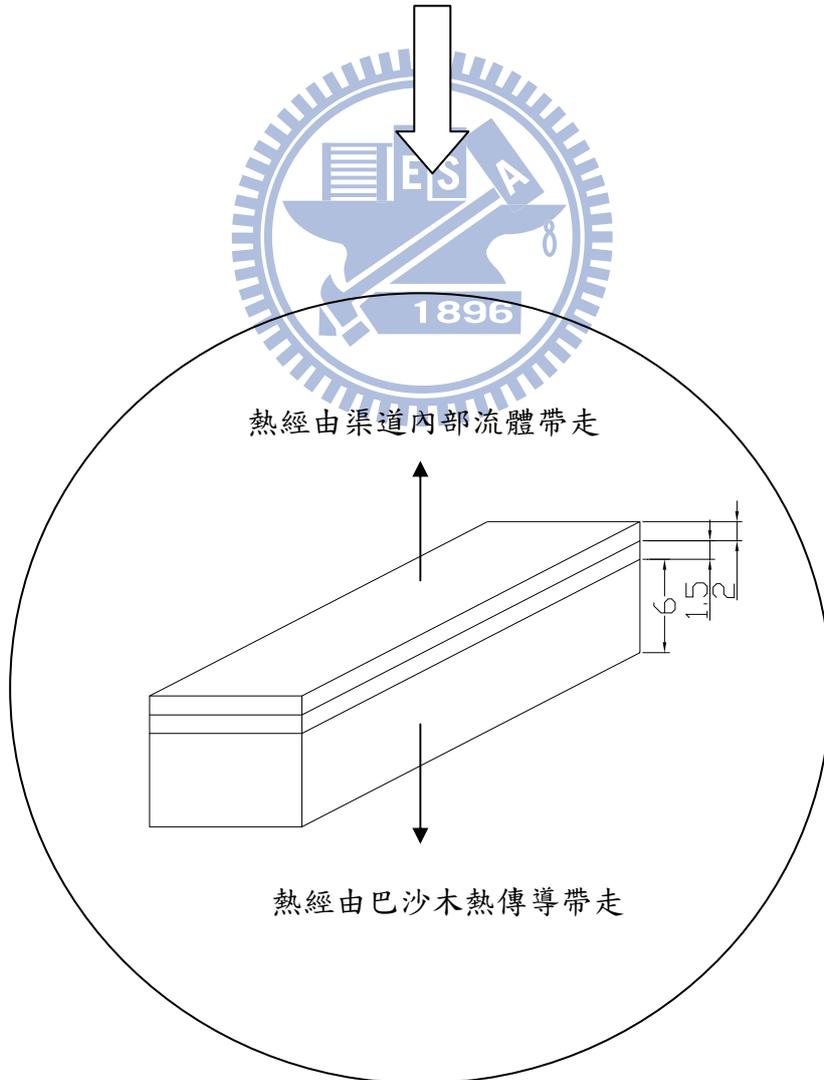
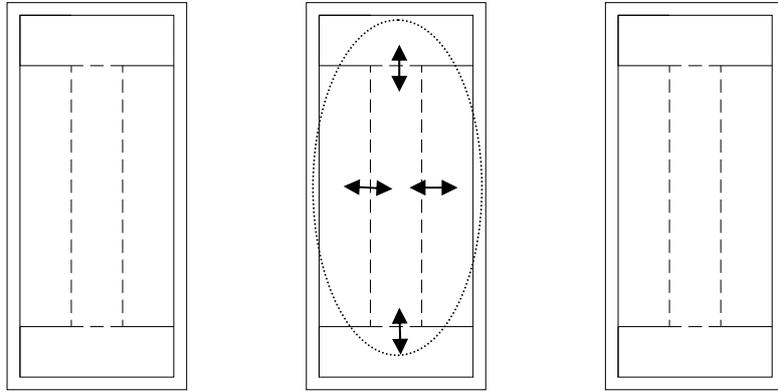


圖 2-10 熱損失估計原理

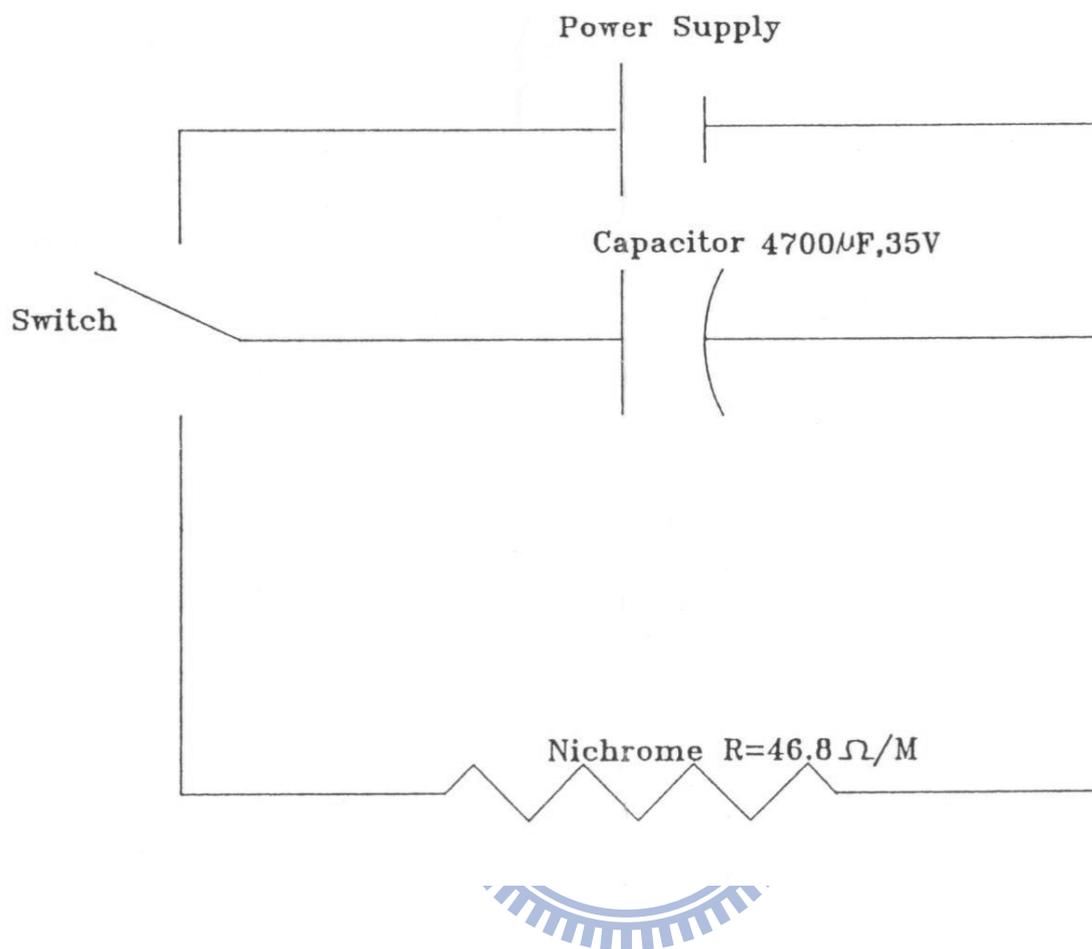


圖 2-11 發煙器裝置圖

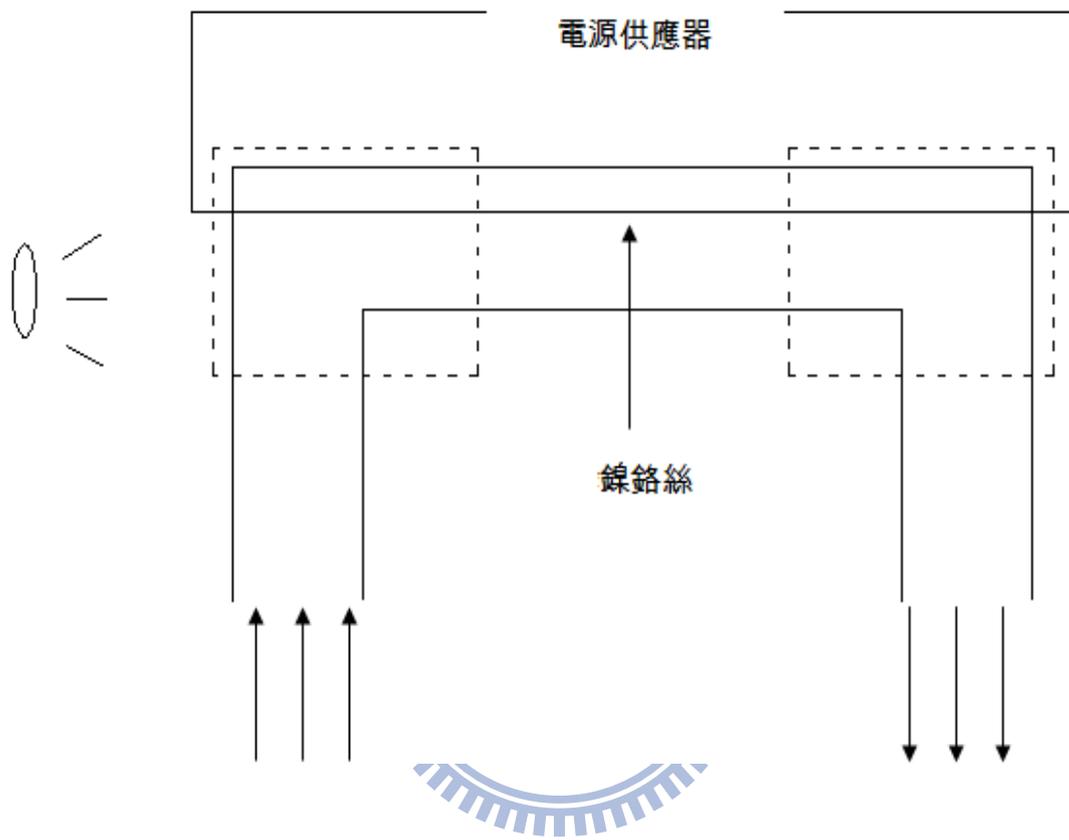


圖 2-12 流場可視化設備示意圖

第三章 無因次參數與不準度分析

(一) 無因次參數

本研究討論的實驗參數，其定義如下：

(a) 進口流體雷諾數: $Re_w = u_0 \cdot W / \nu$ (3-1)

W 為 \square 型渠道寬度

$u_0 = Q/A$ 為流體平均速度

Q 為空氣流量

A 為渠道截面積

ν 為空氣動黏滯係數

(b) 無因次振動幅度: $L_c = \ell_c / W$ (3-2)

ℓ_c 為 \square 型渠道進行往復運動的振幅

(c) 無因次振動頻率: $F_c = f_c \cdot W / u_0$ (3-3)

f_c 為 \square 型渠道進行往復運動的頻率

(d) 參數 $V_c = \frac{v_c}{u_0} = \frac{2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau) - 2\pi F_c L_c^2 \frac{\cos(2\pi F_c \tau) \sin(2\pi F_c \tau)}{\sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2}}}{u_0}$ (3-4)

v_c 為 \square 型渠道進行往復運動的速度

(e) 參數 $Gr / Re_w^2 = g \times \beta \times \Delta T_w \times W / u_0^2$ (3-5)

β 為空氣熱膨脹係數

g 為重力係數

ΔT_w 為加熱片銅片表面 T_w 與流體進口溫度 T_o 的平均溫差

參數 Gr / Re_w^2 用來判斷流場是否為強制對流或是自然對流主導。當

$Gr / Re_w^2 \ll 1$ 時，表示浮力效應不顯著，因此流場為強制對流主導的狀態；如果

$Gr / Re_w^2 \gg 1$ ，表示浮力效應不可忽略，流體慣性力較無影響力；如果此值接近 1，

表示浮力及慣性力都不可忽略，則視為混合對流。

(二)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[27]之相對不準度來分析實驗結果，根據 Kline 之研究

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

$$\delta R = \left\{ \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} \right) \delta X_1 \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_2} \right) \delta X_2 \right]^2 + \dots + \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_n} \right) \delta X_n \right]^2 \right\}^{1/2}$$

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

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

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

為了說明本實驗不準度之範圍，以雷諾數 300 溫差 10°C 振動頻率 0.2 之動態實驗數據作分析為例，如表 3-1 3-2。

一、壁面紐塞數之不準度分析

由式 (2-8)，壁面紐塞數 $\overline{Nu} = \frac{Q_{air}}{A_h \Delta T_w} \cdot \frac{W}{k_a}$ ，根據式(A-2)其不準度為

$$\frac{\delta \overline{Nu}}{\overline{Nu}} = \left[\left(\frac{\delta Q_{air}}{Q_{air}} \right)^2 + \left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(-\frac{\delta A_h}{A_h} \right)^2 + \left(-\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} \right)^2 + \left(-\frac{\delta k_a}{k_a} \right)^2 \right]^{1/2}$$

二、雷諾數之不準度分析

由式 (3-1)，雷諾數 $Re_w = \frac{u_0 \cdot W}{\nu}$

根據式 (A-2) 其不準度為

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

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 $L_c = l_c / W$

根據式 (A-2) 其不準度為

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

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 $F_c = f_c \cdot W / u_0$

根據式 (A-2) 其不準度為

$$\frac{\delta F_c}{F_c} = \left[\left(\frac{\delta f_c}{f_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(-\frac{\delta u_0}{u_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A-6})$$

五、參數 Gr/Re_h^2 之不準度分析

由式 (3-4)，參數 $Gr/Re_w^2 = g \times \beta \times \Delta T_w \times W / u_0^2$

根據式 (A-2) 其不準度為

$$\left[\left(\frac{\delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{\delta \beta}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left((-2) \times \frac{\delta u_0}{u_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A-7})$$

而其詳細計算過程列於本文最後之附錄上。

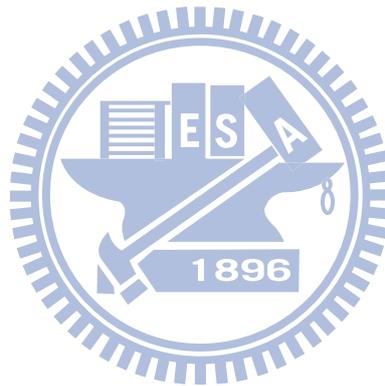
表 3-1 在雷諾數 300 下溫差 10°C 振動頻率 0.2 振幅 0.75 前段加熱區之各
參數之不準度分析

參數	不準度
L_c	$\pm 0.19\%$
F_c	$\pm 1.79\%$
Re_w	$\pm 1.78\%$
\overline{Nu}	$\pm 3.25\%$
Gr / Re_w^2	$\pm 4.68\%$



表 3-2 在雷諾數 200 下溫差 10°C 振動頻率 0.2 振幅 0.75 前段加熱區之各
參數之不準度分析

參數	不準度
L_c	$\pm 0.19\%$
F_c	$\pm 2.68\%$
Re_w	$\pm 2.68\%$
\overline{Nu}	$\pm 3.07\%$
Gr / Re_w^2	$\pm 6.14\%$



第四章 結果與討論

4.1 冂型渠道底部熱傳分析

本章節為探討渠道靜止狀態下及渠道進行往復運動，對於冂型渠道頂部壁面的熱傳效率影響比較，各項實驗參數的組合情形如表 4-1 所示，而各項參數之不準度分析已於前一章討論，詳細結果則說明於附錄。

實驗完成後先量測靜止狀態下冂型渠道頂部壁面溫度，並換算成紐賽數與數值計算做比對，以驗證實驗機構的完備性且增加實驗可信度，隨後再著手討論冂型渠道於往復運動狀態下頂部的熱傳效率分析，靜態實驗的流體進口雷諾數範圍從 300、200，配合溫差 10°C~40°C，每增加 10°C 進行一次實驗；動態實驗的部分，進口流體雷諾數則分別為 300、200，配合溫差 10°C 及 40°C，再搭配無因次振動頻率為 0.2、0.4 進行實驗。由於步進馬達此機構當初設計時的限制故不能進行太高馬達轉速之實驗，最高的轉速大略估計為一秒鐘運轉 3 圈左右，換算成進口流體雷諾數 300 時，無因次頻率為 0.4 已是極限，其他雷諾數因為相對的無因次振動頻率其實際上的渠道振盪速度較快，機構強度不足無法負荷長時間的運轉，若是要再加快頻率，機構強度不足，不堪長時間運轉可能會造成往復機構損壞。

另外表 4-1 中的參數 Gr/Re_w^2 為流場強制對流與自然對流效應強弱的判定值，其物理意義為浮力與慣性力的比值，當 $Gr/Re_w^2 \ll 1$ 時，表示浮力效應不顯著，因此流場為強制對流主導的狀態；如果 $Gr/Re_w^2 \gg 1$ ，表示浮力效應不可忽略，流體慣性力較無影響力；如果此值接近 1，表示浮力及慣性力都不可忽略，則視為混合對流。從所有實驗組別參數得知 Gr/Re_w^2 值介於 0.40~3.64 之間，主要以混合對流為主，所以強制對流與自然對流效應都不可忽略。

為說明實驗的可信度，在進入實驗之前首先進行重複性測試，選擇參數為

$Re_w = 300, F_c = 0.0, L_c = 0.75, \Delta T_w = 10^\circ\text{C}$ 進行三次實驗，壁面溫度實驗量測結果附於表 4-2，表格中為穩態後的三次溫度分布，渠道上方加熱面依流體的入口方向依序分為前段 (Front)、中段 (Middle) 和後段 (Back) 加熱區，每片銅片表面中間為主要實驗區，必須讓流體進口溫度差 (ΔT_w) 達到實驗所需要的溫差，主要實驗區和熱保護之間的熱損失不可忽略，巴沙木上表面和下表面溫度差則用以計算藉由熱傳導方式損失之熱量，輸入總功率是根據電源供應器電流值和電壓值所計算得到，由上述結果計算得到高溫壁面紐塞數，觀察此參數增益情形可以用來判斷熱傳效率是否改善，三次重複性測試之實驗結果紐塞數整理於圖 4-1，各段加熱區的平均紐塞數差異度甚小，此結果說明本實驗重複性測試良好。

4.2 口型渠道靜止運動之頂部壁面熱傳分析

實驗首先進行渠道處於靜止狀態下之頂部壁面熱傳分析，此結果用以與渠道進行振動下相互比較以了解振動對於渠道內部熱傳增益情形，多組實驗結果整理於表 4-3，進口流體雷諾數從 300、200，配合溫差由 10°C 增至 40°C ，每增加 10°C 進行一次實驗，在表格中分別記錄數值模擬和實驗所得到之平均紐塞數。表中的數值模擬是由實驗室利用 StarCD 以 $k-\varepsilon$ model，紊流強度 (turbulent intensity) 1% 計算得到，最後則比較模擬與實驗的差異度。差異度 (ε) 的定義為

$$\varepsilon = (\text{實驗所得之紐塞數} - \text{模擬所得之紐塞數}) / \text{實驗所得之紐塞數} \times 100\%$$

此外，在渠道的幾何形狀限制影響下，可以發現口型渠道頂部之熱傳效率以前段加熱區最好，中段加熱區次之，後段加熱區為最差。為了瞭解其原因由數值模擬得到 $Re_w = 300, F_c = 0.0, \Delta T_w = 40^\circ\text{C}$ 之流場的流線圖及等溫線分布圖，如圖 4-2 4-3 所示，觀察其原因得知，前段加熱區位於流場入口的位置，受到流體進

口直接衝擊的影響且加上浮力的效應，有效的破壞此區域的溫度邊界層，移除熱傳面上的邊界層，使高溫壁面直接與低溫流體接觸帶走了大部分的熱量，壁面與流體之間的溫度梯度增加，達到增加壁面熱傳量的目的，故熱傳效果為三片中最為理想的，平均紐塞數最大；中段加熱區為流體轉彎後較為平順的流過，雖可平穩的帶走熱，但無法破壞熱邊界層，熱傳效果相較第一片較差，平均紐塞數降低；後段加熱區則處於流體將要轉向流向出口，在途中將會發生與壁面分離的現象，在渠道角落的地方則發生迴流現象，當此迴流一旦發生會導致的結果，迴流在角落盤旋且浮力效應，熱也跟著流體在此滯留囤積，導致U型渠道後段熱無法被流體帶走，此區域的流體速度也較低，自然對流效應增強，此時的流場的強制對流效應該無法發揮功用，故熱量只能藉由空氣和巴沙木熱傳導散逸。

4.3 U型渠道往復運動之頂部壁面熱傳分析

為了解渠道進行往復運動下對壁面熱傳增益情形，針對不同進口流體雷諾數和不同溫差及渠道往復運動之無因次振動頻率來探討，其實驗組數已於表 4-1 詳細列出，渠道振動速度於表 4-4 所示， u_0 為進口流體之進口速度， v_c 為渠道往復運動之平均速度。

由數值模擬結果得知，在渠道進行往復運動時，當渠道上升過程中，因為流體的運動方向也是向上，故因相對運動的概念相對速度變小，造成流體衝擊力道減小，且渠道向上所以受到壁面牽引向上填補因為壁面移動所產生的空洞，當渠道上升到最高點時；而渠道體積一直在擴大，故造成頂部壁面加熱區域附近滯留的流體無法排出，熱邊界層開始累積，此時底部壁面熱傳效率降低；當渠道開始下降時，壁面向下移動，因相對速度的增加，造成流體衝擊力道增強，且使得在壁面附近的高溫流體被牽引向下離開高溫壁面，並且將熱量一起帶走，故熱效率提升，週而復始此為大致上每個循環渠道壁面的散熱機制。

以不同加熱區位置來看，前段加熱區位於流體入口衝擊區，當渠道振動時可以視為壁面與流體的相對速度改變，故隨著振動頻率增加，其瞬間相對速度越

大，此區域的熱傳效率會越來越好；後段加熱區於渠道靜止時，會有迴流發生在此區域，造成熱量累積無法被流體帶走，熱邊界層無法被破壞；當渠道向上時，因為管內體積膨脹，產生出口流體回補的現象，此時迴流已不復存在，熱邊界層遭到破壞，熱傳效果將獲得改善，中段加熱區則須視情況而定，較無明顯的增益情形。

4.4.1 不同頻率下對於U型管道熱傳之影響

表 4-5 (a)為進口流體雷諾數 300，無因次振動頻率在 0.2 及 0.4 下之數值模擬和實驗結果之平均紐塞數，並且比較其差異度將其列出，表 4-5(b)-(d)為其他組數數值模擬與實驗數據比較後得到各加熱區之差異度，如表所示。

以往復運動下的結果來看，渠道振動之後仍然維持跟靜態時的趨勢一樣，前段散熱最好，中段次之，後段最差，表 4-6 為不同雷諾數下各無因次振動頻率之紐塞數增加率 (En)，其計算方式為

$$En = (\text{振動下之平均紐塞數} - \text{靜態下之平均紐塞數}) / \text{靜態下之平均紐塞數} \times 100\%$$

表 4-6 說明了當提高振動頻率時熱傳效率有增加的趨勢，由此可見提高振動頻率對於渠道壁面散熱有良好的增益。從表中可發現，在低振動頻率下，雷諾數 200, $Gr/Re_w^2 = 3.64$ 的熱傳增益最好，其結果可得知在此條件下因為其浮力效應較其他條件下最為顯著，且在與重力相反的情況下，渠道向上時會回吸了較多熱無法帶走，故當渠道向下振動時，迴流區破壞後所能帶走的熱也大幅提升。

4.4.2 不同振幅下對於U型管道熱傳之影響

本實驗之U型管道振幅為 22.5mm，無因次震動幅度為 0.75，與劉[30]的實驗比較起來，劉[30]的U型管道振幅為 30mm，無因次震動幅度為 0.75。圖 4-4

至圖 4-11 為在動態實驗下本次實驗和劉[30]在雷諾數 300、200， $\Delta T_w = 10^\circ\text{C}$ 和 40°C 實驗的紐賽數分佈，觀察圖表可發現當無因次震動幅度為 0.75 時其紐賽數大部分都小於無因次震動幅度為 1.0 時的紐賽數，主要原因在於降低無因次震動幅度也會跟著降低渠道的震盪速度 v_c ，如表 4-4 所示，使得 U 型管振幅變小最後導致對加熱區的擾動程度降低，流體所能帶走的熱也變少了。

4.5 流場可視化結果

為了印證模擬之真實性，使用放煙線法來進行流場可視化，觀看實際流場是否與數值模擬有相同的現象，而數值模擬是由實驗室 STAR-CD 計算，我們隨機選定 $Re_w = 300$ ， $F_c = 0.2$ ， $\Delta T_w = 40^\circ\text{C}$ 之流場，來進行流場觀測並配合數值模擬在相同狀況下，所得到之流線圖來討論當渠道進行往復運動時流場瞬間變化情形，渠道的振動由最低點到最高點在到最低點為一個週期。

由圖 4-12 (b) 所示，從數值模擬得知當渠道從最高處向下運動時($t=3/4$)，渠道因向上移動所以靠近 U 型渠道上部附近流體會因為渠道的移動，流體受壁面牽引而去填補因偏離所造成的空洞區域，所以當渠道向下時空洞中會產生流體填補的作用，此時也因流體的流動，而能帶走熱。另外由圖 4-12 (a) 所示流場中之煙線之空洞區與填補之流體現象與數值模擬之流線非常吻合。

再來我們來看渠道右邊出口的現象，由圖 4-13(b) 可以看出，當渠道向下振動($t=3/4$)時，因壁面向下擠壓使流體向右運動，流線可以明顯看出往出口方向流動，此時為往復運動熱傳效益最好得時機，可大量的帶走囤積的熱量。對應的實驗結果為圖 4-13 (a)，由以上各個數值與實驗結果的對照，可說明實驗與數值的結果互相吻合。

表 4-1 實驗參數表

組數	Re_w	Gr/Re_w^2	ΔT_w (°C)	F_c	L_c	v_c/u_o
Case1	300	0.40	10	0.0	0.75	0.0
Case2	300	0.81	20	0.0	0.75	0.0
Case3	300	1.21	30	0.0	0.75	0.0
Case4	300	1.62	40	0.0	0.75	0.0
Case5	200	0.91	10	0.0	0.75	0.0
Case6	200	1.82	20	0.0	0.75	0.0
Case7	200	2.73	30	0.0	0.75	0.0
Case8	200	3.64	40	0.0	0.75	0.0
Case9	300	0.40	10	0.2	0.75	0.94
Case10	300	1.62	40	0.2	0.75	0.94
Case11	300	0.40	10	0.4	0.75	1.88
Case12	300	1.62	40	0.4	0.75	1.88
Case13	200	0.91	10	0.2	0.75	0.94
Case14	200	3.64	40	0.2	0.75	0.94
Case15	200	0.91	10	0.4	0.75	1.88
Case16	200	3.64	40	0.4	0.75	1.88

表 4-2 $Re_w = 300, F_c = 0.0, L_c = 0.75, \Delta T_w = 10^\circ\text{C}$ 重複性測試之實驗溫度分佈

Front	Middle	Back
35.4°C, 35.6°C, 35.3°C	35.5°C, 35.4°C, 35.5°C	35.3°C, 35.4°C, 35.4°C
35.4°C, 35.3°C, 35.3°C 35.5°C	35.3°C, 35.4°C, 35.6°C 35.5°C	35.4°C, 35.4°C, 35.6°C 35.6°C
35.4°C, 35.5°C, 35.4°C 35.5°C	35.4°C, 35.5°C, 35.5°C 35.4°C	35.4°C, 35.6°C, 35.5°C 35.5°C
35.5°C, 35.4°C, 35.6°C 35.5°C	35.4°C, 35.5°C, 35.4°C 35.4°C	35.3°C, 35.5°C, 35.5°C 35.4°C
35.5°C, 35.5°C, 35.6°C	35.5°C, 35.3°C, 35.3°C	35.5°C, 35.5°C, 35.4°C

Front	Middle	Back
35.1°C, 35.4°C, 35.2°C	35.4°C, 35.4°C, 35.5°C	35.3°C, 35.4°C, 35.4°C
35.4°C, 35.3°C, 35.2°C 35.2°C	35.3°C, 35.2°C, 35.3°C 35.2°C	35.4°C, 35.4°C, 35.4°C 35.3°C
35.2°C, 35.3°C, 35.4°C 35.3°C	35.2°C, 35.2°C, 35.5°C 35.3°C	35.4°C, 35.3°C, 35.3°C 35.5°C
35.3°C, 35.3°C, 35.4°C 35.3°C	35.4°C, 35.4°C, 35.4°C 35.3°C	35.3°C, 35.5°C, 35.1°C 35.4°C
35.5°C, 35.5°C, 35.4°C	35.3°C, 35.3°C, 35.2°C	35.1°C, 35.2°C, 35.2°C

Front	Middle	Back
35.1°C, 35.0°C, 35.0°C	35.0°C, 35.1°C, 35.2°C	35.0°C, 35.1°C, 35.1°C
34.8°C, 34.9°C, 35.2°C 34.9°C	35.1°C, 35.2°C, 35.2°C 35.1°C	34.9°C, 35.2°C, 35.1°C 35.1°C
35.0°C, 35.0°C, 35.4°C 35.0°C	35.1°C, 35.1°C, 35.2°C 35.0°C	35.0°C, 35.1°C, 35.0°C 35.1°C
35.1°C, 35.0°C, 35.4°C 35.1°C	34.9°C, 35.1°C, 35.0°C 35.1°C	35.0°C, 35.0°C, 34.9°C 35.1°C
35.3°C, 35.2°C, 35.0°C	35.0°C, 35.0°C, 35.1°C	35.1°C, 35.0°C, 35.2°C

表 4-3 靜態模擬與實驗結果

Re_w	Gr/Re_w^2	ΔT_w (°C)	\overline{Nu} (numerical results)			\overline{Nu} (experimental results)			ε (deviation)		
			F	M	B	F	M	B	F	M	B
300	0.40	10	12.33	5.97	3.40	13.60	6.66	3.57	9.3%	10.3%	4.8%
	0.81	20	12.28	5.96	3.40	14.42	6.49	3.83	14.9%	8.1%	12.2%
	1.21	30	12.16	5.86	3.24	14.37	6.60	3.68	7.8%	-1.8%	11.9%
	1.62	40	12.08	5.80	3.16	14.44	6.54	4.12	16.3%	11.2%	23.2%
200	0.91	10	9.72	4.93	2.95	10.37	5.57	3.11	6.2%	11.4%	5.1%
	1.82	20	9.68	4.79	2.84	10.66	5.45	3.08	9.2%	12.1%	7.8%
	2.73	30	9.62	4.73	2.75	10.84	5.31	3.01	11.3%	10.9%	8.6%
	3.64	40	9.58	4.69	2.67	11.16	5.26	3.11	14.1%	10.8%	14.1%

表 4-4 渠道振盪速度表

$u_0(m/s)$	$v_c(m/s)$	$F_c = 0.2$	$F_c = 0.4$
$Re_w = 200 \quad L_c = 1.0$		0.12	0.25
		0.10	0.10
$Re_w = 300 \quad L_c = 1.0$		0.20	0.40
		0.16	0.16
$Re_w = 200 \quad L_c = 0.75$		0.094	0.188
		0.10	0.10
$Re_w = 300 \quad L_c = 0.75$		0.15	0.30
		0.16	0.16

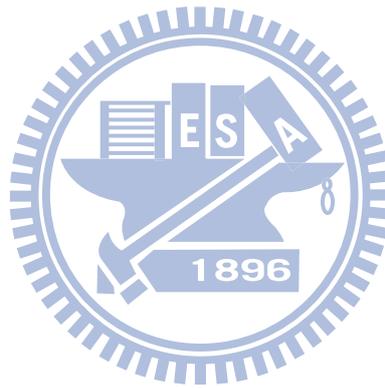


表 4-5 動態實驗與數值模擬之結果

(a)

$Re_w = 300$ $F_c = 0.2$ $L_c = 0.75$	Gr/Re_w^2	0.40			1.62		
	ΔT_w (°C)	10			40		
	heat region	F	M	B	F	M	B
	\overline{Nu} (numerical results)	13.87	6.52	4.53	13.48	5.86	3.92
	\overline{Nu} (experimental results)	14.97	7.94	5.28	15.54	6.11	4.57
	ε (deviation)	7.3%	17.9%	14.2%	13.3%	4.1%	14.2%

(b)

$Re_w = 200$ $F_c = 0.2$ $L_c = 0.75$	Gr/Re_w^2	0.91			3.64		
	ΔT_w (°C)	10			40		
	heat region	F	M	B	F	M	B
	\overline{Nu} (numerical results)	13.67	5.71	4.06	13.15	6.32	3.86
	\overline{Nu} (experimental results)	14.52	6.16	4.75	14.97	7.24	5.31
	ε (deviation)	5.9%	7.3%	14.5%	12.0%	12.7%	27.3%

(c)

$Re_w = 300$ $F_c = 0.4$ $L_c = 0.75$	Gr/Re_w^2	0.4			1.62		
	ΔT_w ($^{\circ}C$)	10			40		
	heat region	F	M	B	F	M	B
	\overline{Nu} (numerical results)	13.32	7.17	4.28	14.14	6.73	4.12
	\overline{Nu} (experimental results)	15.07	8.29	5.35	16.13	7.94	5.08
	ε (deviation)	11.6%	13.5%	20.0%	12.3%	15.2%	18.9%

(d)

$Re_w = 200$ $F_c = 0.4$ $L_c = 0.75$	Gr/Re_w^2	0.91			3.64		
	ΔT_w ($^{\circ}C$)	10			40		
	heat region	F	M	B	F	M	B
	\overline{Nu} (numerical results)	13.62	5.95	4.16	14.23	7.01	4.51
	\overline{Nu} (experimental results)	14.71	6.67	4.82	15.74	7.62	5.67
	ε (deviation)	7.4%	10.8%	13.7%	9.6%	8.0%	20.5%

表 4-6 渠道在振動下平均紐塞數增益情形

(a)

$Re_w = 300$	F_c	0.2	0.4
$Gr/Re_w^2 = 0.40$ $\Delta T_w = 10^\circ C$ $L_c = 0.75$	Total nusselt number	9.4	9.57
	En (enhancement)	18.34%	20.52%

(b)

$Re_w = 200$	F_c	0.2	0.4
$Gr/Re_w^2 = 0.91$ $\Delta T_w = 10^\circ C$ $L_c = 0.75$	Total nusselt number	8.48	8.64
	En (enhancement)	33.4%	36.01%

(c)

$Re_w = 300$	F_c	0.2	0.4
$Gr/Re_w^2 = 1.62$ $\Delta T_w = 40^\circ C$ $L_c = 0.75$	Total nusselt number	9.17	9.72
	En (enhancement)	4.42%	16.09%

(d)

$Re_w = 200$	F_c	0.2	0.4
$Gr/Re_w^2 = 3.64$ $\Delta T_w = 40^\circ C$ $L_c = 0.75$	Total nusselt number	8.74	9.68
	En (enhancement)	40.91%	48.64%

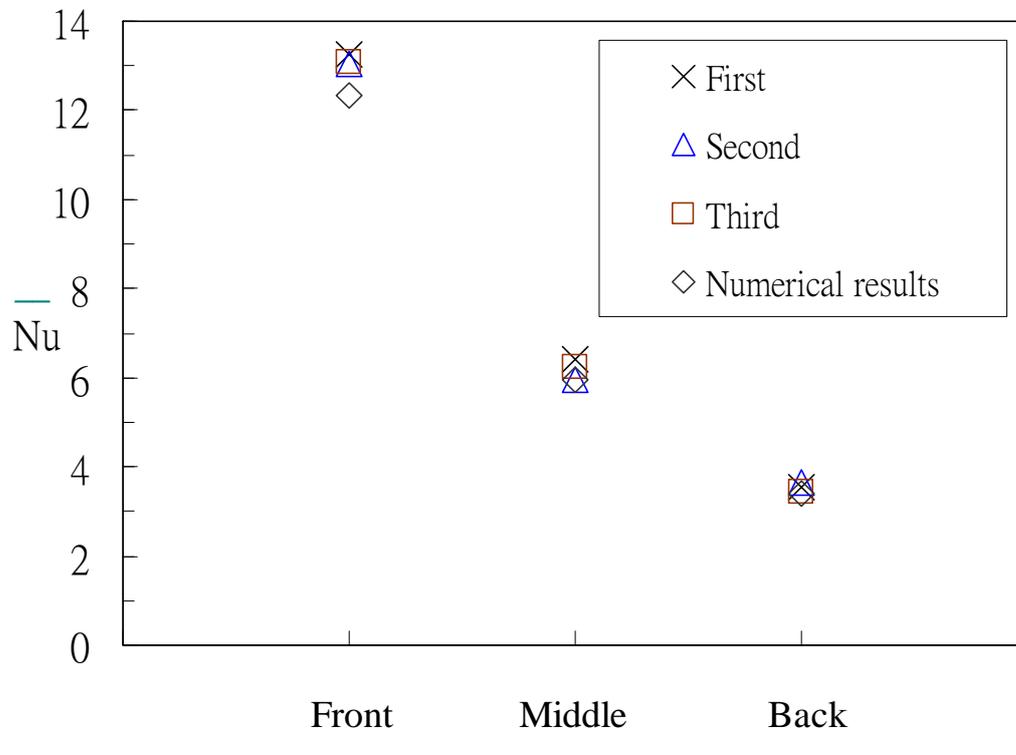


圖 4-1 $Re_w = 300, F_c = 0.0, L_c = 0.75, \Delta T_w = 10^\circ\text{C}$ 重複性測試實驗紐賽數(\overline{Nu})分佈

Front heat region Middle heat region Back heat region

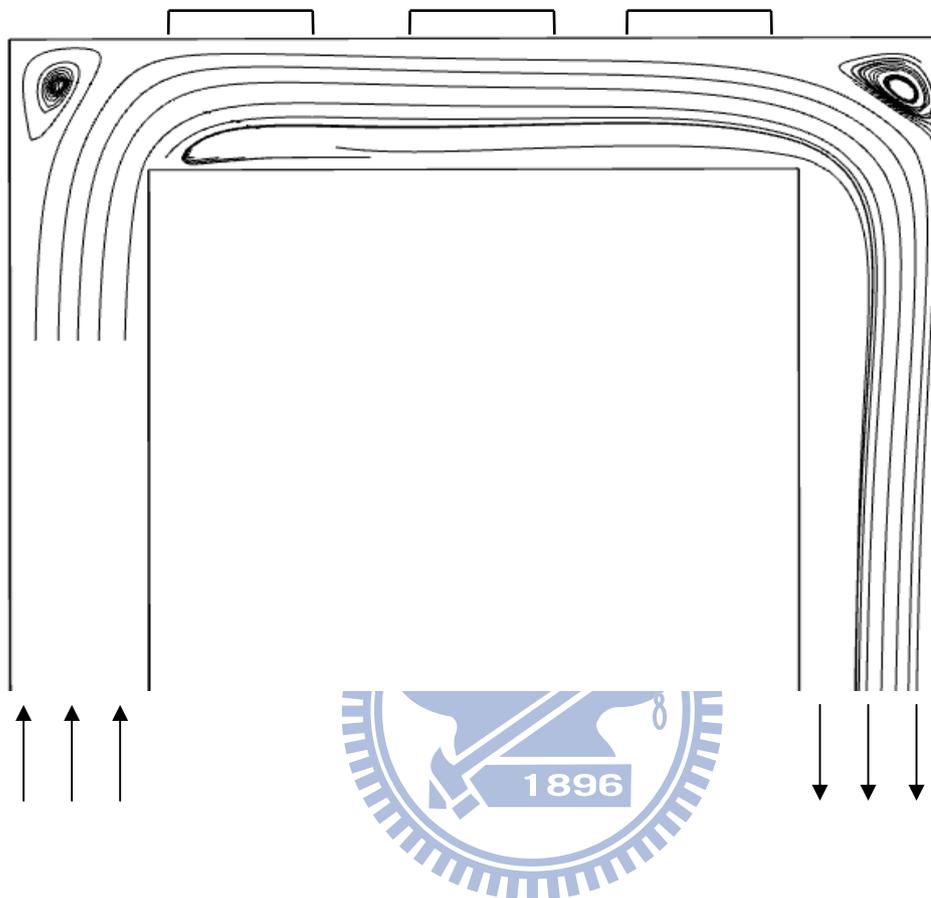


圖 4-2 $Re_w=300$, $\Delta T_w=40^\circ\text{C}$ 流線圖

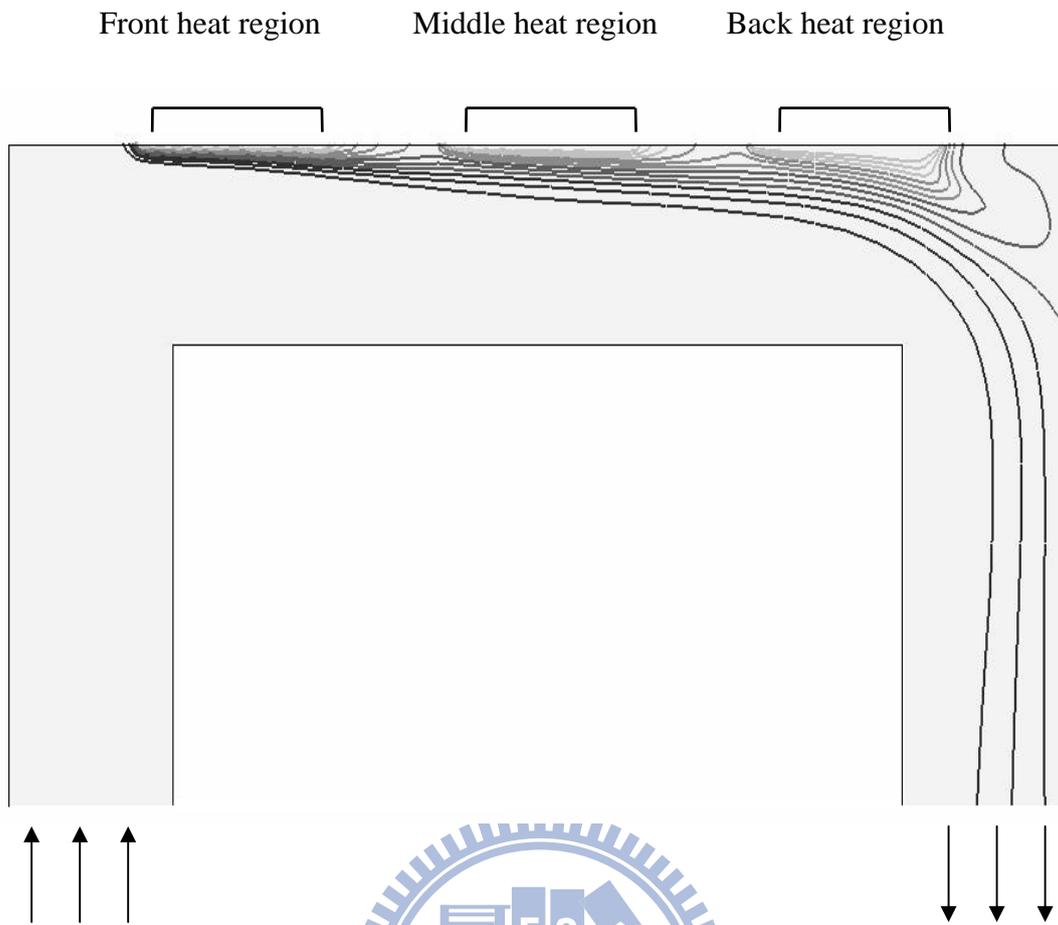
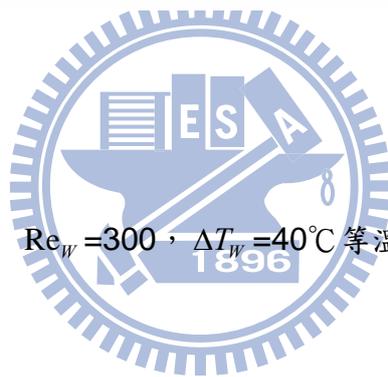


圖 4-3 $Re_w = 300$, $\Delta T_w = 40^\circ\text{C}$ 等溫線分佈圖



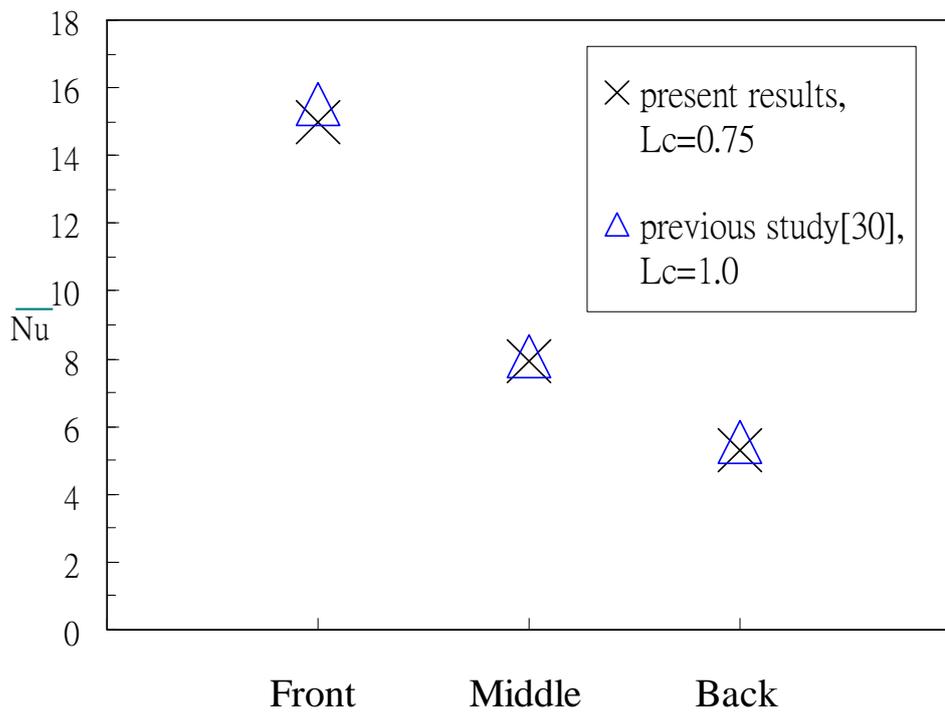


圖 4-4 $Re_w = 300$ ， $Gr/Re_w^2 = 0.40$ ， $\Delta T_w = 10^\circ\text{C}$ ， $Fc = 0.2$ ，不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈

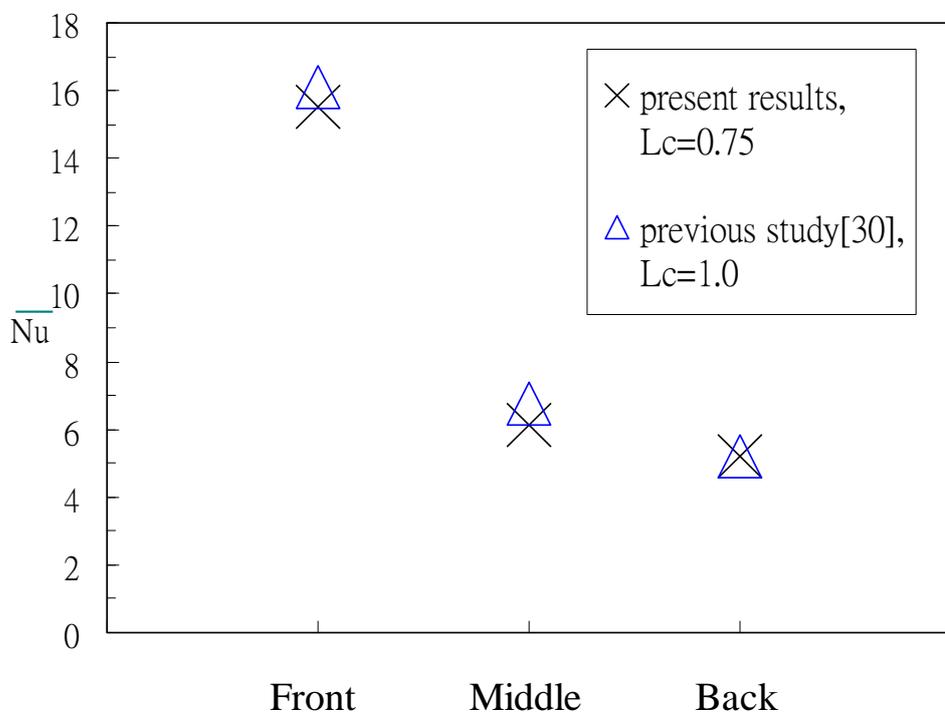


圖 4-5 $Re_w = 300$ ， $Gr/Re_w^2 = 0.81$ ， $\Delta T_w = 40^\circ\text{C}$ ， $Fc = 0.2$ ，不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈

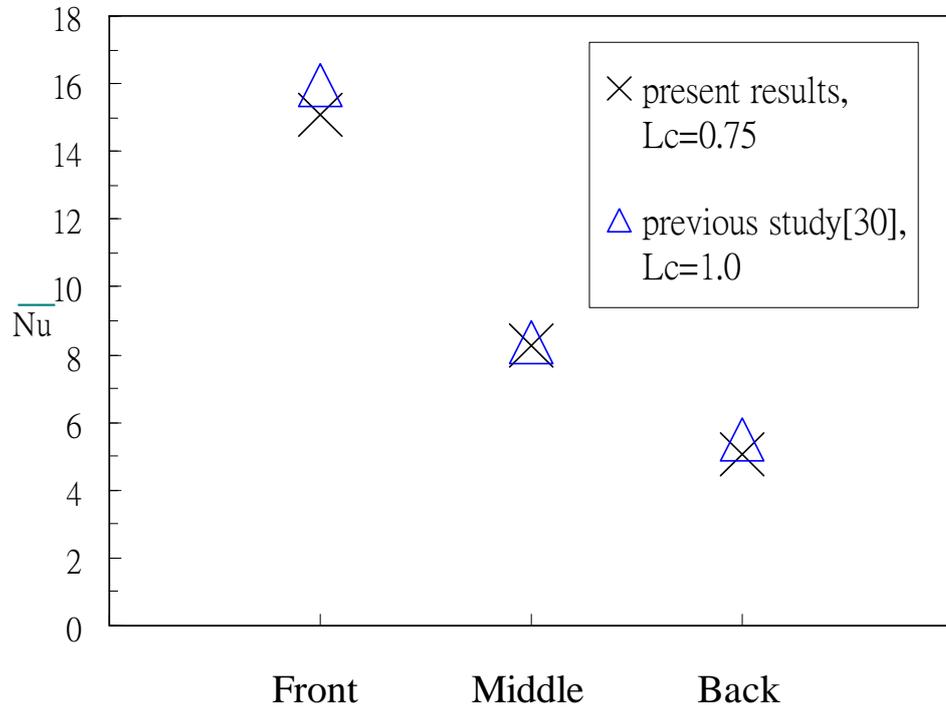


圖 4-6 $Re_w = 300$, $Gr/Re_w^2 = 1.21$, $\Delta T_w = 10^\circ\text{C}$, $Fc = 0.4$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈

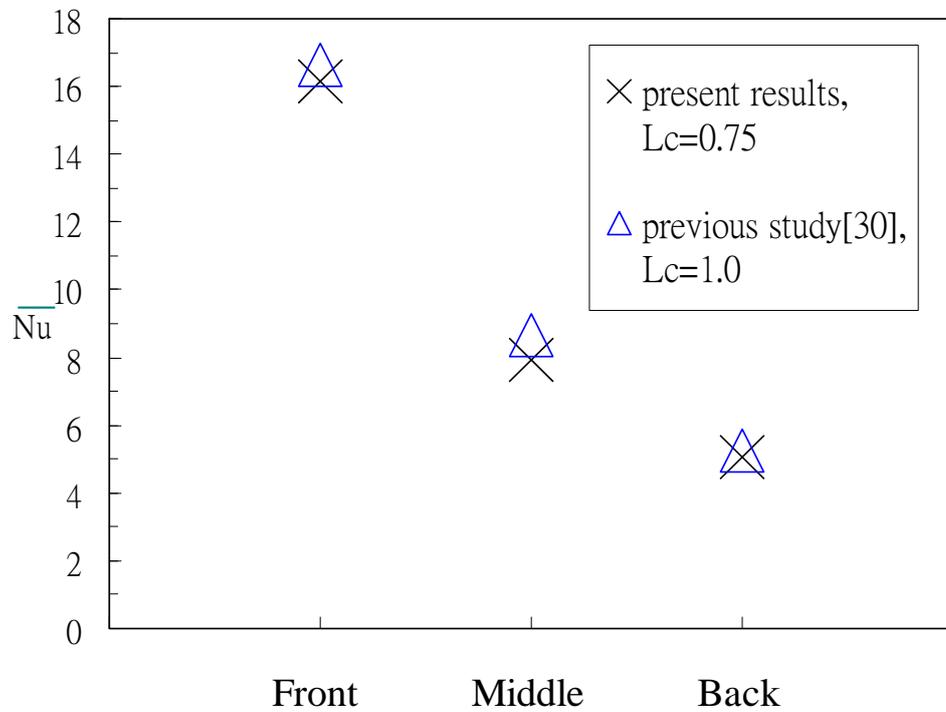


圖 4-7 $Re_w = 300$, $Gr/Re_w^2 = 1.62$, $\Delta T_w = 40^\circ\text{C}$, $Fc = 0.4$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈

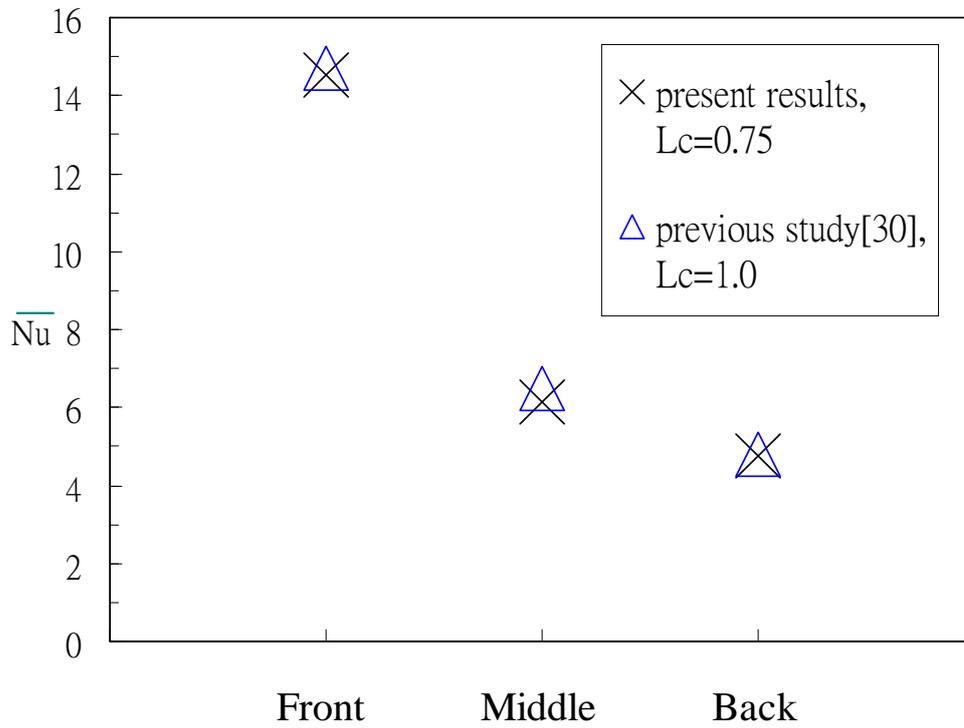


圖 4-8 $Re_w = 200$, $Gr/Re_w^2 = 0.91$, $\Delta T_w = 10^\circ\text{C}$, $Fc = 0.2$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈

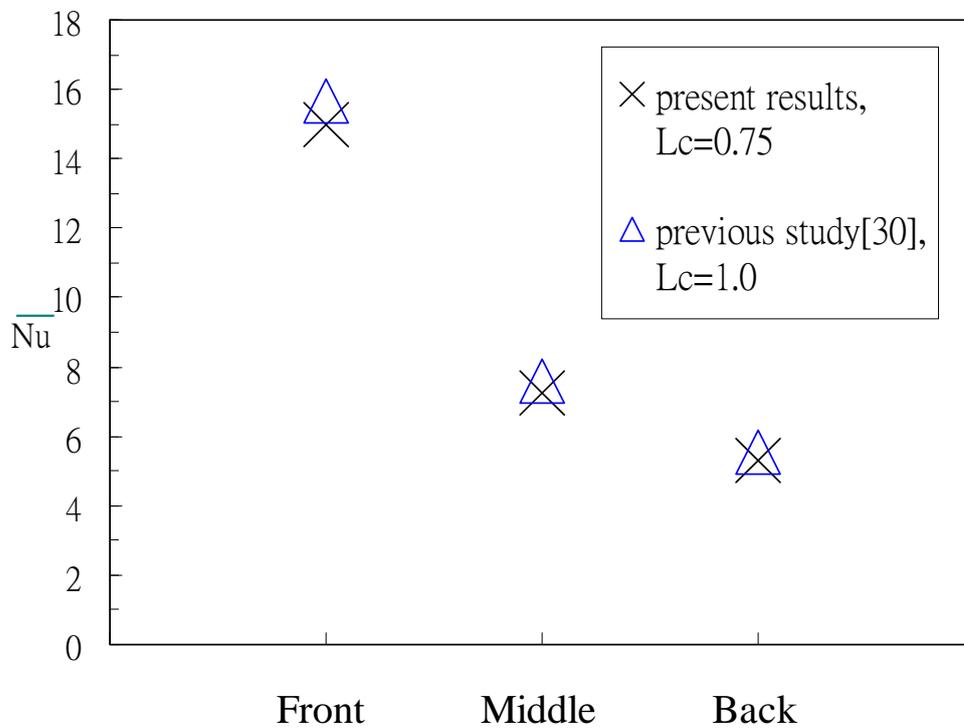


圖 4-9 $Re_w = 200$, $Gr/Re_w^2 = 1.82$, $\Delta T_w = 40^\circ\text{C}$, $Fc = 0.2$, 不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈

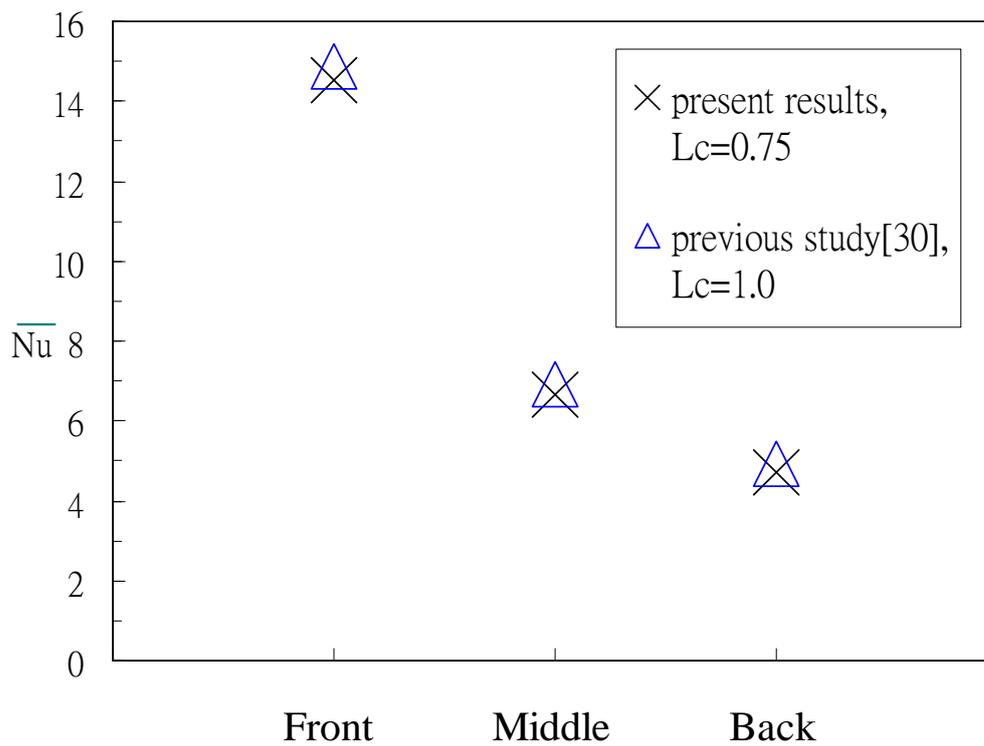


圖 4-10 $Re_w=200$ ， $Gr/Re_w^2=2.73$ ， $\Delta T_w=10^\circ\text{C}$ ， $Fc=0.4$ ，不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈

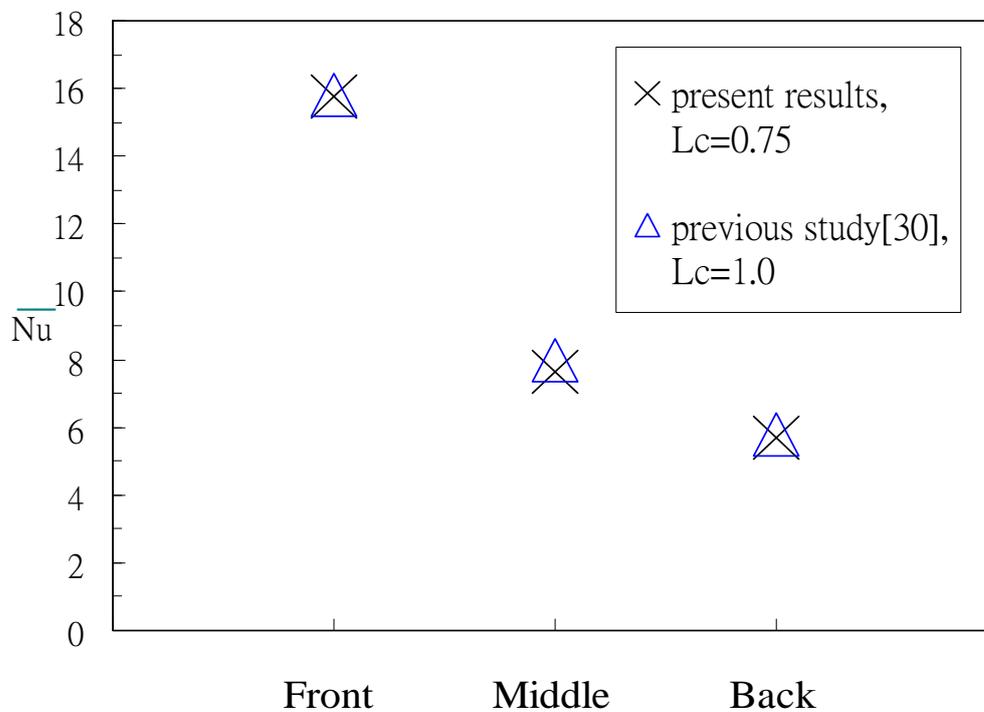
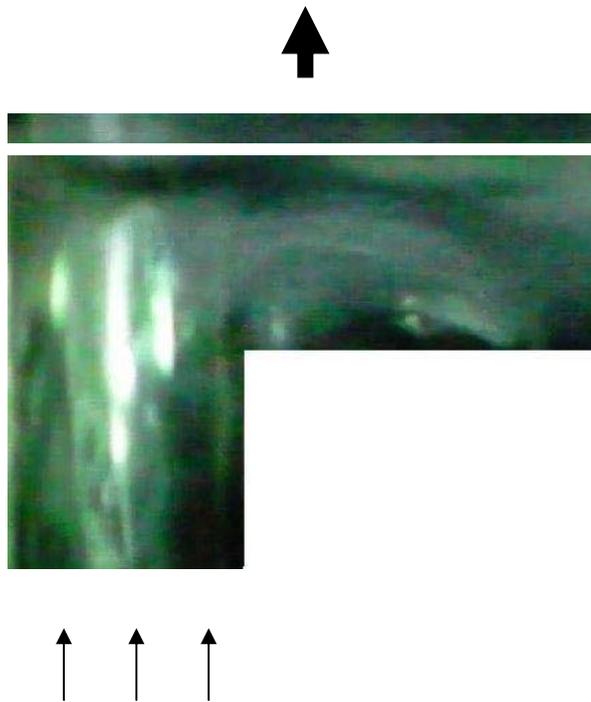
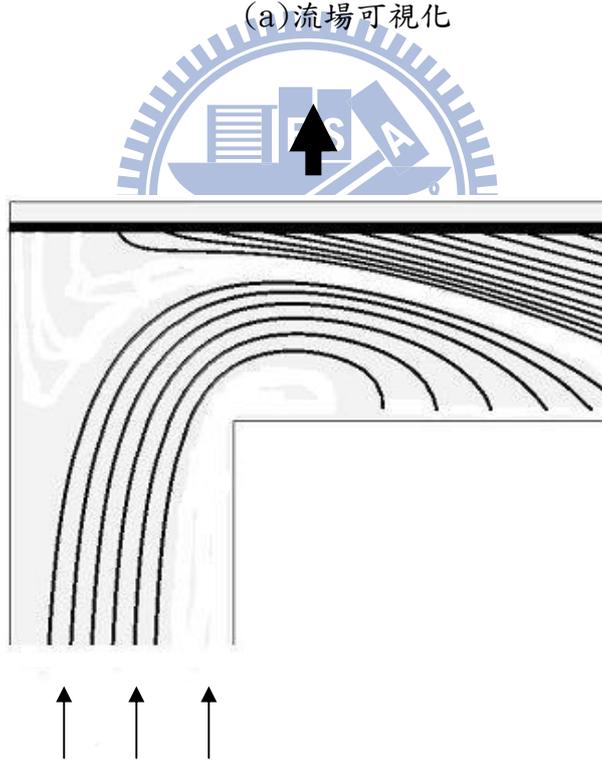


圖 4-11 $Re_w=200$ ， $Gr/Re_w^2=3.62$ ， $\Delta T_w=40^\circ\text{C}$ ， $Fc=0.4$ ，不同振幅下紐賽數(\overline{Nu})分佈

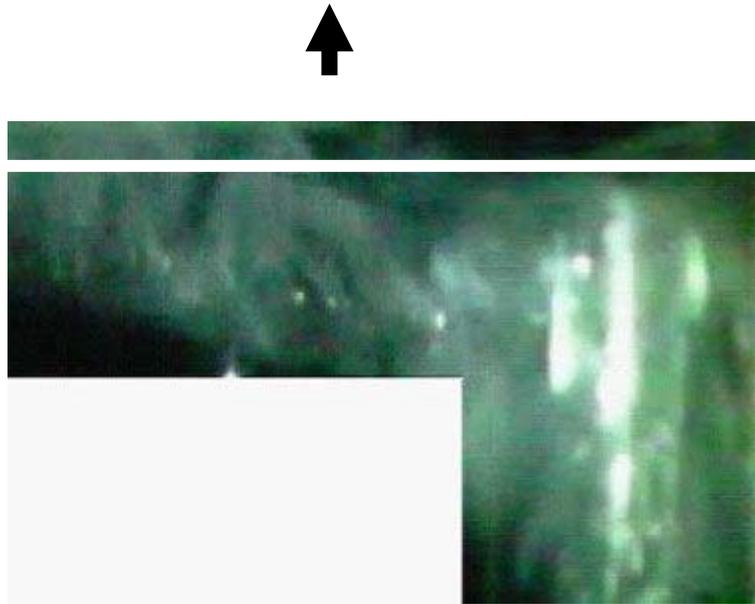


(a) 流場可視化

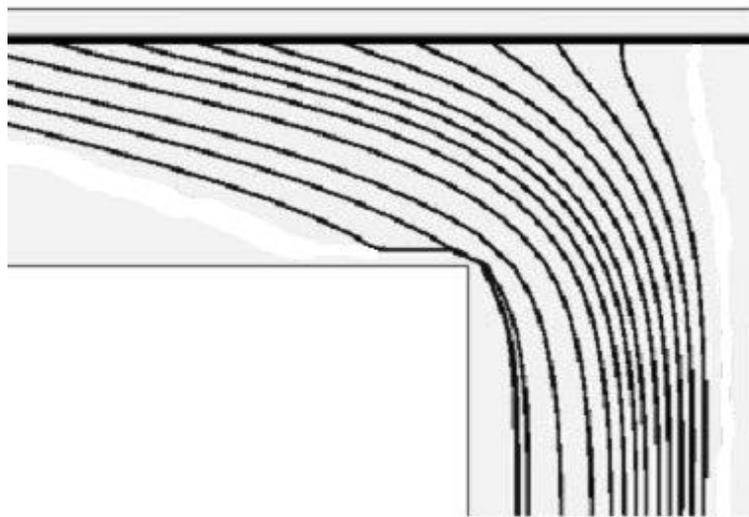


(b) 模擬之流場

圖 4-12 $Re_w = 300$, $\Delta T_w = 40^\circ\text{C}$, $F_c = 0.2$, $L_c = 0.75$, 動態 $t = 3/4$ 時入口之流場可視化與模擬比較



(a) 流場可視化



(b) 模擬之流場

圖 4-13 $Re_w=300$, $\Delta T_w=40^\circ C$ $F_c=0.2$, $L_c=0.75$, 動態 $t=3/4$ 時出口之流場可視化與模擬比較

第五章 結論

為瞭解一冷卻渠道進行往復運動下，混合對流對口型渠道頂部的熱傳效率影響，實際架設一組實驗設備來進來實驗，對口型渠道於靜止與往復運動狀態下，探討不同振幅下的組合，並以數值模擬比對，提高實驗結果的可信度。最後將結果歸納成以下結論：

1. 口型渠道處於靜止狀態下時，由於受渠道幾何形狀及自然對流的影響，所以前段加熱區熱傳效率最佳、中段加熱區次之、後段加熱區最差。
2. 當渠道進行振動時，壁面熱傳效率較靜止狀態時改善許多，在本實驗中最大熱傳增益約為 48.6%。
3. 本實驗與文獻劉[30]中的實驗比較，本實驗熱傳效率較差，說明在口型渠道中相同雷諾數，相同溫差，相同振動頻率，不同振幅下，振幅越高對於熱傳效率有一定的助益。



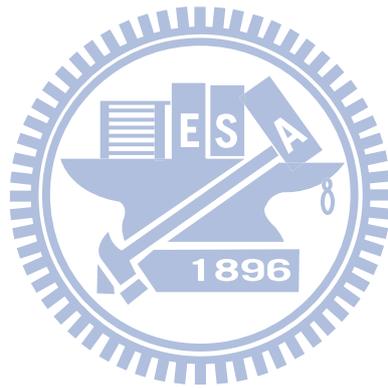
參考文獻

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. A. T. Patera, and B. B. Mikic, “Exploiting Hydrodynamic Instabilities Resonant Heat Transfer Enhancement,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.29, No.8, pp.1127-1138, 1986.
3. 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.
4. T. Nishimura, A. Taurmoto, and Y. Kawamura, “Flow and Mass Transfer Characteristics in Wavy Channels for Oscillatory Flow,” International Journal of Heat Mass Transfer, Vol.30, pp.1007-1015, 1987.
5. T. Nishimura, S. Arakawa, D. Murakami, and Y. Kawamura, “Oscillatory Viscous Flow in Symmetric Sinusoidal Wavy-Walled channels”, Chemical Engineering Science, Vol. 44, pp. 2137-2148, 1989.
6. T. Nishimura, S. Arakawa, D. Murakami, and Y. Kawamura, “Oscillatory Flow in a Symmetric Sinusoidal Wavy-Walled Channel at Intermediate Strouhal Numbers,” Chemical Engineering Science, Vol. 46, pp. 757-771, 1991.
7. A. E. Bergles, “Heat Transfer Enhancement – The Encouragement and Accommodation of High Heat Fluxes,” ASME Journal of Heat Transfer, Vol.119, pp.8-19, 1997.
8. R. L. Webb, E. R. G. Eckert, and R. J. Goldstein, “Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness,” International Journal of Heat and Mass

- Transfer, Vol.14, No.4, pp.601-617, 1971.
9. J. C. Han, "Heat Transfer and Friction in Channels with Two Opposite Rib-Roughed Walls," ASME Journal of Heat Transfer, Vol.106, pp.774-781, 1984.
 10. M. R. Mackley, G. M. Tweddle, and I. D. Wyatt, "Experimental Heat Transfer Measurements for Pulsatile Flow in Baffled Tubes," Chemical Engineering Science, Vol.45, No.5, pp.1237-1242, 1990.
 11. M. R. Mackley, and X. Ni, "Mixing and Dispersion in a Baffled Tube for Steady Laminar and Pulsatile Flow," Chemical Engineering Science, Vol.46, No.12, pp.3139-3151, 1991.
 12. 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," Journal of Ship Research, Vol.41, No.4, pp.332-339, 1997.
 13. S. W. Chang, L. M. Su, W. D. Morris, and T. M. Liou, "Heat Transfer in a Smooth-Walled Reciprocating Anti-Gravity Open Thermosyphon," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 1089-1103, 2003.
 14. Wu-Shung Fu, Wen-Wang Ke, and Ke- Nan Wang, "Laminar forced convection in a channel with a moving block," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.44 pp.2385-2394,2001
 15. L.A. Florio, "Use of a plate to enhance natural convection cooling of a discrete heat source in a vertical channel," Applied Thermal Engineering, Vol.27, pp.2276-2293, 2007
 16. Wu-Shung Fu, and Wen-Jiann Shieh, "A study of thermal convection in an enclosure induced simultaneously by gravity and vibration," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.35 , No.7, pp1695-1710, 1992
 17. Wu-Shung Fu, and Wen-Jiann Shieh, "Transient thermal convection in an

- enclosure induced simultaneously by gravity and vibration,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.36, No.2, pp437-452, 1993
18. Sung Ki Kim, Seo Young Kim, and Young Don Choi, “Resonance of natural convection in a side heated enclosure with a mechanically oscillating bottom wall,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, pp3155-3162, 2002
 19. Wu-Shung Fu, and Chien-Ping Huang “Effects of a vibrational heat surface on natural convection in a vertical channel flow “ International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006) 1340–1349
 20. Wu-Shung Fu, and Chien-Ping Huang “Limitation enhancement of a mixed convection by a vibrational heat surface in a vertical channel” Heat mass transfer
 21. 廖英皓，“活塞頂部之熱傳分析”，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2003。
 22. 賴昱志，“增進活塞熱傳效益之數值模擬”，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2004。
 23. 連信宏，“利用多孔性介質增強活塞頂面之熱傳效率”，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2005。
 24. 余政倫，“往復式冷卻渠道之熱流實驗”，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2006。
 25. 陳沅佑，“實驗探討門型振動管之熱傳現象”，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2007。
 26. W. J. Yang, Handbook of Flow Visualization, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
 27. S. J. Kline, “The Purpose of Uncertainty Analysis,” ASME Journal of Heat Transfer, Vol.117, pp.153-160, 1985.

28. W. S. Fu, S. H. Lian, and Y. H. Liao, "An investigation of heat transfer of a reciprocating piston," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.49, pp.4360-4371, 2006.
29. 林敬倫，"垂直往復式冷卻渠道之混合對流實驗"，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2008。
30. 劉益舟，"加熱區在上方之垂直往復式冷卻渠道混合對流實驗"，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2009。



附錄一：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[27]之相對不準度來分析第四章實驗結果，根據 Kline 之研究

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

$$\delta R = \left\{ \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} \right) \delta X_1 \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_2} \right) \delta X_2 \right]^2 + \dots + \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_n} \right) \delta X_n \right]^2 \right\}^{1/2}$$

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

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

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

為了說明本實驗不準度之範圍，故取雷諾數 300 之靜態實驗數據作分析，以求得一不準度區間。

當雷諾數 300，溫差(ΔT)= 10°C 時，取前段加熱區振動頻率
0.2，振幅 0.75

一 壁面紐塞數之不準度分析

由式 (8)，壁面紐塞數 $\overline{Nu} = \frac{Q_{air}}{A_h \Delta T_w} \cdot \frac{W}{k_a}$ ，根據式(A-2)其不準度為

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

1.1 熱傳量 Q_{air} 之不準度:

$$Q_{air} = Q_{in} - Q_{lose} - Q_{2 \rightarrow 1} - Q_{2 \rightarrow 3} - Q_{2 \rightarrow 4} - Q_{2 \rightarrow 5} = 0.1324 \text{ (W)},$$

故 Q_{air} 之不準度為

$$\frac{\delta Q_{air}}{Q_{air}} = \left[\left(\frac{Q_{in}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{in}}{Q_{in}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{lose}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{lose}}{Q_{lose}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2 \rightarrow 3}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 3}}{Q_{2 \rightarrow 3}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2 \rightarrow 4}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 4}}{Q_{2 \rightarrow 4}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2 \rightarrow 5}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 5}}{Q_{2 \rightarrow 5}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

A. 輸入能量之不準度:

$$\text{由式 (4)} \quad Q_{in} = V \times I = 2.17 \times 0.12 = 0.2604 \text{ (W)}$$

且三用電表電阻與電流量測之最小刻度各為 0.001V 與 0.001A

$$\text{故} \quad \frac{\delta Q_{in}}{Q_{in}} = \left[\left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{0.0005}{2.17} \right)^2 + \left(\frac{0.0005}{0.12} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.42\%$$

B. 熱量散逸之不準度:

$$\text{由式 (5)} \quad Q_{lose} = k_b \times A_b \times dT/dy$$

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 $K_b = 0.055 \text{ W}^2/\text{m}^\circ\text{C}$ ，其不準度趨近於零

(ii) 巴沙木尺寸 $62.00\text{mm} \times 12.00\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{62.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{12.00} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.21\%$$

(iii) 溫差最大範圍 $45.775 - 44.875 = 0.9^\circ\text{C}$ ，DA2500E 之準確度為 0.1°C

$$\frac{\delta dT}{dT} = \left[\left(\frac{0.05}{0.9} \right)^2 \right]^{1/2} = 6.23\%$$

(iv) 巴沙木厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta dy}{dy} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.66\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{lose}}{Q_{lose}} = \left[(0)^2 + (0.21\%)^2 + (6.23\%)^2 + (-1.66\%)^2 \right]^{1/2} = 6.47\%$$

C. 加熱片 2 與加熱片 1 間熱傳量之不準度

$$\text{由式(6)} \quad Q_{2 \rightarrow 1} = k_m \times A_m \times dT / dx$$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[\left(\frac{\delta k_m}{k_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_m}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dx}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(i) OB200 導熱膠熱傳導係數由說明書得知，其不準度趨近於零。

(ii) 加熱片接觸面積 $62.00\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{62.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.25\%$$

(iii) 溫度差在 0.3°C 之內皆視為等溫，故此項趨近於零。

(iv) OB200 導熱膠厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta dx}{dx} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.67\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[(0)^2 + (1.25\%)^2 + (-1.67\%)^2 \right]^{1/2} = 2.08\%$$

D. 加熱片 2 與加熱片 3 間熱傳量之不準度

$$\text{由式(6)} Q_{2 \rightarrow 3} = k_m \times A_m \times dT / dx$$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 3}}{Q_{2 \rightarrow 3}} = \left[\left(\frac{\delta k_m}{k_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_m}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dx}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(i) OB200 導熱膠熱傳導係數由說明書得知，其不準度趨近於零。

(ii) 加熱片接觸面積 $62.00\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{62.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.25\%$$

(iii) OB200 導熱膠厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta dx}{dx} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.67\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 3}}{Q_{2 \rightarrow 3}} = \left[(0)^2 + (1.25\%)^2 + (-1.67\%)^2 \right]^{1/2} = 2.08\%$$

E. 加熱片 2 與加熱片 4 間熱傳量之不準度

$$\text{由式(6)} Q_{2 \rightarrow 4} = k_m \times A_m \times dT / dx$$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 4}}{Q_{2 \rightarrow 4}} = \left[\left(\frac{\delta k_m}{k_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_m}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dx}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(i) OB200 導熱膠熱傳導係數由說明書得知，其不準度趨近於零。

(ii) 加熱片接觸面積 $12.00\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{12.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.27\%$$

(iii) OB200 導熱膠厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta dx}{dx} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.67\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[(0)^2 + (1.25\%)^2 + (-1.67\%)^2 \right]^{1/2} = 2.08\%$$

F. 加熱片 2 與加熱片 5 間熱傳量之不準度

由式(6) $Q_{2 \rightarrow 1} = k_m \times A_m \times dT / dx$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[\left(\frac{\delta k_m}{k_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_m}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dx}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(i) OB200 導熱膠熱傳導係數由說明書得知，其不準度趨近於零。

(ii) 加熱片接觸面積 $12.00\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{12.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.27\%$$

(iii) OB200 導熱膠厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta dx}{dx} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.67\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[(0)^2 + (1.25\%)^2 + (-1.67\%)^2 \right]^{1/2} = 2.08\%$$

即熱傳量 Q_{air} 之不準度為

$$\frac{\delta Q_{air}}{Q_{air}} = \left[\left(\frac{0.2604}{0.1324} \times 0.42\% \right)^2 + \left(\frac{0.0749}{0.1324} \times 6.47\% \right)^2 + \left(\frac{0.0001}{0.1324} \times 2.08\% \right)^2 + \left(\frac{0.0456}{0.1324} \times 2.08\% \right)^2 + \left(-\frac{0.0033}{0.1324} \times 2.08\% \right)^2 + \left(-\frac{0.0032}{0.1324} \times 2.08\% \right)^2 \right]^{1/2} = 1.42\%$$

1.2 冂形渠道寬度 W 之不準度:

冂形渠道寬度 29.90mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

1.3 加熱片面積 A_h 之不準度:

加熱片面積 62.00mm×12.00mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta A_h}{A_h} = \left[\left(\frac{0.025}{62.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{12.00} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.21\%$$

1.4 溫度差 ΔT_w 之不準度:

加熱片與室溫溫度差最大範圍 35.1—25.8=10.3℃，DA2500E 之準確度為 0.1℃，平均溫差容許的誤差為 0.3℃

$$\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} = \left[\left(\frac{0.3}{10.3} \right)^2 \right]^{1/2} = 2.91\%$$

1.5 空氣之熱傳導係數 k_a 之不準度:

空氣之熱傳導係數 k_a 經由查表得知，其不準度趨近於零

根據上述計算將相關數據代入式 (A-3)，得壁面紐塞數之不準度為

$$\frac{\delta \overline{Nu}}{\overline{Nu}} = \left[(1.42\%)^2 + (0.08\%)^2 + (-0.21\%)^2 + (-2.91\%)^2 + (0\%)^2 \right]^{1/2} = 3.25\%$$

二 雷諾數之不準度分析

$$\text{雷諾數 } Re_w = \frac{u_0 \cdot W}{\nu}$$

根據式 (A-2) 其不準度為

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

2.1 流體進口平均速度之不準度:

$$u_0 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{W \cdot z}, \quad A = W \times z$$

根據(A-3)其不準度為]
$$\frac{\delta u_0}{u_0} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(-\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(-\frac{\delta z}{z} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， W 為渠道寬度 29.90mm

z 為渠道高度 120.7mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_0}{u_0} = \left[\left(\frac{10}{560} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.90} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{120.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.78\%$$

2.2 冂形渠道寬度之不準度:

入口高度 29.90mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

2.3 動黏滯係數之不準度:

空氣之動黏滯係數由查表得知，其不準度趨近於零

將相關數據代入式(A-4)，得雷諾數之不準度為

$$\frac{\delta Re_w}{Re_w} = \left[(1.78\%)^2 + (0.08\%)^2 + (0\%)^2 \right]^{1/2} = 1.78\%$$

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 $L_c = l_c/W$

根據式 (A-2) 其不準度為

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

3.1 振動振幅之不準度：

振動振幅 23.05mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta l_c}{l_c} = \left[\left(\frac{0.025}{23.05} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.11\%$$

3.2 冑形渠道寬度之不準度：

入口高度 29.90mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

將相關數據代入式(A-5)，得無因次振動振幅之不準度為

$$\frac{\delta L_c}{L_c} = \left[(0.11\%)^2 + (-0.08\%)^2 \right]^{1/2} = 0.19\%$$

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 $F_c = f_c \cdot W/u_0$

根據式 (A-2) 其不準度為

$$\frac{\delta F_c}{F_c} = \left[\left(\frac{\delta f_c}{f_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(-\frac{\delta u_0}{u_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A-6})$$

(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 29.90mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

(3) 流體平均速度之不準度:

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

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， W 為渠道寬度 29.90mm

z 為渠道高度 120.7mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_o}{u_o} = \left[\left(\frac{10}{560} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.90} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{120.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.79\%$$

將相關數據代入式(A-6)，得無因次振動頻率之不準度為

$$\frac{\delta F_c}{F_c} = \left[(0.04\%)^2 + (0.08\%)^2 + (-1.79\%)^2 \right]^{1/2} = 1.79\%$$

五 參數 Gr/Re_w^2 之不準度分析

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

根據式 (A-2) 其不準度為

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

(1) 重力係數之不準度:

重力係數由查表得知 $g=9.81\text{m/s}^2$ ，其不準度趨近於零

(2) 空氣熱膨脹係數之不準度:

空氣熱膨脹係數由查表得知 $\beta=0.0034\text{K}^{-1}$ ，其不準度趨近於零

(3) 溫度差 ΔT_w 之不準度:

加熱片與室溫溫度差最大範圍 $35.7 - 25.8 = 10.3^\circ\text{C}$ ，DA2500E 之準確度為 0.1°C ，平均溫差容許的誤差為 0.3°C

$$\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} = \left[\left(\frac{0.3}{10.3} \right)^2 \right]^{1/2} = 3.01\%$$

(4) 冑形渠道寬度之不準度:

入口高度 29.90mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

(5) 流體平均速度之不準度:

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

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， W 為渠道寬度 29.90mm

z 為渠道高度 120.7mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_0}{u_0} = \left[\left(\frac{10}{560} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.90} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{120.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.78\%$$

將相關數據代入式(A-7)，得參數 Gr / Re_h^2 之不準度為

$$\left[(0)^2 + (0)^2 + (3.0\%)^2 + (0.08\%)^2 + ((-2) \times 1.78\%)^2 \right]^{1/2} = 4.68\%$$

當雷諾數 200，溫差(ΔT)= 10°C 時，取前段加熱區振動頻率
0.2，振幅 0.75

一 壁面紐塞數之不準度分析

由式 (8)，壁面紐塞數 $\overline{Nu} = \frac{Q_{air}}{A_h \Delta T_w} \cdot \frac{W}{k_a}$ ，根據式(A-2)其不準度為

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

1.1 熱傳量 Q_{air} 之不準度:

$$Q_{air} = Q_{in} - Q_{lose} - Q_{2 \rightarrow 1} - Q_{2 \rightarrow 3} - Q_{2 \rightarrow 4} - Q_{2 \rightarrow 5} = 0.1852 \text{ (W)},$$

故 Q_{air} 之不準度為

$$\frac{\delta Q_{air}}{Q_{air}} = \left[\left(\frac{Q_{in}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{in}}{Q_{in}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{lose}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{lose}}{Q_{lose}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2 \rightarrow 3}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 3}}{Q_{2 \rightarrow 3}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2 \rightarrow 4}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 4}}{Q_{2 \rightarrow 4}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2 \rightarrow 5}}{Q_{air}} \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 5}}{Q_{2 \rightarrow 5}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

D. 輸入能量之不準度:

$$\text{由式 (4) } Q_{in} = V \times I = 2.04 \times 0.15 = 0.306 \text{ (W)}$$

且三用電表電阻與電流量測之最小刻度各為 0.001V 與 0.001A

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{in}}{Q_{in}} = \left[\left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{0.0005}{2.04} \right)^2 + \left(\frac{0.0005}{0.15} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.33\%$$

E. 熱量散逸之不準度:

$$\text{由式 (5) } Q_{lose} = k_b \times A_b \times dT/dy$$

因此其不準度為

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

(v) 巴沙木熱傳導係數由查表得知 $K_b = 0.055 \text{ W}^2/\text{m}^\circ\text{C}$ ，其不準度趨近於零

(vi) 巴沙木尺寸 $62.00\text{mm} \times 12.00\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{62.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{12.00} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.21\%$$

(vii) 溫差最大範圍 $45.775 - 44.875 = 0.9^\circ\text{C}$ ，DA2500E 之準確度為 0.1°C

$$\frac{\delta dT}{dT} = \left[\left(\frac{0.05}{0.9} \right)^2 \right]^{1/2} = 6.23\%$$

(viii) 巴沙木厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta dy}{dy} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.66\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{lose}}{Q_{lose}} = \left[(0)^2 + (0.21\%)^2 + (6.23\%)^2 + (-1.66\%)^2 \right]^{1/2} = 6.47\%$$

F. 加熱片 2 與加熱片 1 間熱傳量之不準度

$$\text{由式(6)} \quad Q_{2 \rightarrow 1} = k_m \times A_m \times dT / dx$$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[\left(\frac{\delta k_m}{k_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_m}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dx}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(v) OB200 導熱膠熱傳導係數由說明書得知，其不準度趨近於零。

(vi) 加熱片接觸面積 $62.00\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{62.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.25\%$$

(vii) 溫度差在 0.3°C 之內皆視為等溫，故此項趨近於零。

(viii) OB200 導熱膠厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta dx}{dx} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.67\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[(0)^2 + (1.25\%)^2 + (-1.67\%)^2 \right]^{1/2} = 2.08\%$$

D. 加熱片 2 與加熱片 3 間熱傳量之不準度

由式(6) $Q_{2 \rightarrow 3} = k_m \times A_m \times dT / dx$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 3}}{Q_{2 \rightarrow 3}} = \left[\left(\frac{\delta k_m}{k_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_m}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dx}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(iii) OB200 導熱膠熱傳導係數由說明書得知，其不準度趨近於零。

(iv) 加熱片接觸面積 $62.00\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{62.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.25\%$$

(iv) OB200 導熱膠厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta dx}{dx} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.67\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 3}}{Q_{2 \rightarrow 3}} = \left[(0)^2 + (1.25\%)^2 + (-1.67\%)^2 \right]^{1/2} = 2.08\%$$

G. 加熱片 2 與加熱片 4 間熱傳量之不準度

由式(6) $Q_{2 \rightarrow 4} = k_m \times A_m \times dT / dx$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 4}}{Q_{2 \rightarrow 4}} = \left[\left(\frac{\delta k_m}{k_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_m}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dx}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(ii) OB200 導熱膠熱傳導係數由說明書得知，其不準度趨近於零。

(iv) 加熱片接觸面積 $12.00\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{12.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.27\%$$

(v) OB200 導熱膠厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta dx}{dx} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.67\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[(0)^2 + (1.25\%)^2 + (-1.67\%)^2 \right]^{1/2} = 2.08\%$$

H. 加熱片 2 與加熱片 5 間熱傳量之不準度

由式(6) $Q_{2 \rightarrow 1} = k_m \times A_m \times dT / dx$

因此其不準度為

$$\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[\left(\frac{\delta k_m}{k_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta A_m}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta dT}{dT} \right)^2 + \left(-\frac{\delta dx}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(iii) OB200 導熱膠熱傳導係數由說明書得知，其不準度趨近於零。

(iv) 加熱片接觸面積 $12.00\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta A_b}{A_b} = \left[\left(\frac{0.025}{12.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.27\%$$

(iii) OB200 導熱膠厚度 1.5mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\text{因此 } \frac{\delta dx}{dx} = \left[\left(\frac{0.025}{1.5} \right)^2 \right]^{1/2} = 1.67\%$$

$$\text{故 } \frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1}} = \left[(0)^2 + (1.25\%)^2 + (-1.67\%)^2 \right]^{1/2} = 2.08\%$$

即熱傳量 Q_{air} 之不準度為

$$\frac{\delta Q_{air}}{Q_{air}} = \left[\left(\frac{0.306}{0.1852} \times 0.33\% \right)^2 + \left(\frac{0.0708}{0.1852} \times 6.47\% \right)^2 + \left(\frac{0.0004}{0.1852} \times 2.08\% \right)^2 + \left(\frac{0.0316}{0.1852} \times 2.08\% \right)^2 + \left(-\frac{0.0132}{0.1852} \times 2.08\% \right)^2 + \left(-\frac{0.0048}{0.1852} \times 2.08\% \right)^2 \right]^{1/2} = 0.95\%$$

1.2 冂形渠道寬度 W 之不準度:

冂形渠道寬度 29.90mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

1.3 加熱片面積 A_h 之不準度:

加熱片面積 62.00mm×12.00mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta A_h}{A_h} = \left[\left(\frac{0.025}{62.00} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{12.00} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.21\%$$

1.4 溫度差 ΔT_w 之不準度:

加熱片與室溫溫度差最大範圍 35.1—25.8=10.3℃，DA2500E 之準確度為 0.1℃，平均溫差容許的誤差為 0.3℃

$$\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} = \left[\left(\frac{0.3}{10.3} \right)^2 \right]^{1/2} = 2.91\%$$

1.5 空氣之熱傳導係數 k_a 之不準度:

空氣之熱傳導係數 k_a 經由查表得知，其不準度趨近於零

根據上述計算將相關數據代入式 (A-3)，得壁面紐塞數之不準度為

$$\frac{\delta \overline{Nu}}{\overline{Nu}} = \left[(0.95\%)^2 + (0.08\%)^2 + (-0.21\%)^2 + (-2.91\%)^2 + (0\%)^2 \right]^{1/2} = 3.07\%$$

二 雷諾數之不準度分析

$$\text{雷諾數 } Re_w = \frac{u_0 \cdot W}{\nu}$$

根據式 (A-2) 其不準度為

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

2.1 流體進口平均速度之不準度:

$$u_0 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{W \cdot z}, \quad A = W \times z$$

$$\text{根據(A-3)其不準度為} \left] \frac{\delta u_0}{u_0} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(-\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(-\frac{\delta z}{z} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， W 為渠道寬度 29.90mm

z 為渠道高度 120.7mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_0}{u_0} = \left[\left(\frac{10}{373} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.90} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{120.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 2.68\%$$

2.2 冂形渠道寬度之不準度:

入口高度 29.90mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

2.3 動黏滯係數之不準度:

空氣之動黏滯係數由查表得知，其不準度趨近於零

將相關數據代入式(A-4)，得雷諾數之不準度為

$$\frac{\delta Re_w}{Re_w} = \left[(2.68\%)^2 + (0.08\%)^2 + (0\%)^2 \right]^{1/2} = 2.68\%$$

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 $L_c = l_c/W$

根據式 (A-2) 其不準度為

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

3.1 振動振幅之不準度：

振動振幅 23.05mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta l_c}{l_c} = \left[\left(\frac{0.025}{23.05} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.11\%$$

3.2 冑形渠道寬度之不準度：

入口高度 29.90mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

將相關數據代入式(A-5)，得無因次振動振幅之不準度為

$$\frac{\delta L_c}{L_c} = \left[(0.11\%)^2 + (-0.08\%)^2 \right]^{1/2} = 0.19\%$$

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 $F_c = f_c \cdot W/u_0$

根據式 (A-2) 其不準度為

$$\frac{\delta F_c}{F_c} = \left[\left(\frac{\delta f_c}{f_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(-\frac{\delta u_0}{u_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A-6})$$

(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 29.90mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

(3) 流體平均速度之不準度:

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

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， W 為渠道寬度 29.90mm

z 為渠道高度 120.7mm，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_o}{u_o} = \left[\left(\frac{10}{373} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.90} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{120.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 2.68\%$$

將相關數據代入式(A-6)，得無因次振動頻率之不準度為

$$\frac{\delta F_c}{F_c} = \left[(0.04\%)^2 + (0.08\%)^2 + (-2.68\%)^2 \right]^{1/2} = 2.68\%$$

五 參數 Gr/Re_w^2 之不準度分析

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

根據式 (A-2) 其不準度為

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

(1) 重力係數之不準度:

重力係數由查表得知 $g=9.81\text{m/s}^2$ ，其不準度趨近於零

(2) 空氣熱膨脹係數之不準度:

空氣熱膨脹係數由查表得知 $\beta=0.0034\text{K}^{-1}$ ，其不準度趨近於零

(3) 溫度差 ΔT_w 之不準度:

加熱片與室溫溫度差最大範圍 $35.7 - 25.8 = 10.3^\circ\text{C}$ ，DA2500E 之準確度為 0.1°C ，平均溫差容許的誤差為 0.3°C

$$\frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} = \left[\left(\frac{0.3}{10.3} \right)^2 \right]^{1/2} = 3.01\%$$

(4) 冑形渠道寬度之不準度:

入口高度 29.90mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta W}{W} = \left[\left(\frac{0.025}{29.90} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.08\%$$

(5) 流體平均速度之不準度:

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

Q 為流量計之流量，其最小刻度 20cc/s

A 為渠道截面積， W 為渠道寬度 29.90mm

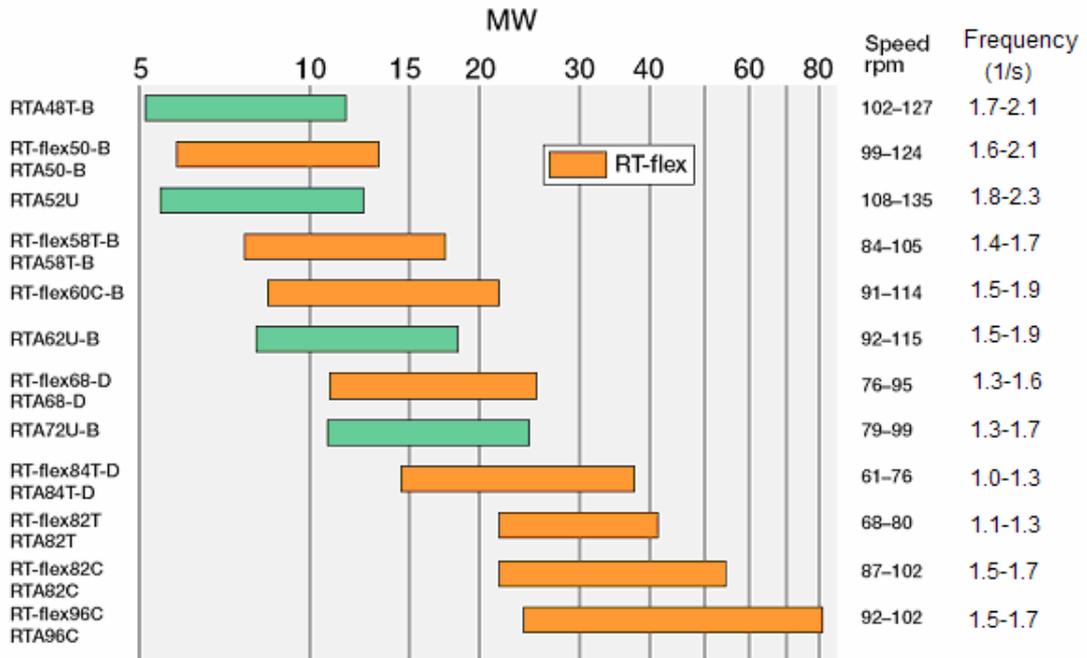
z 為渠道高度 120.7mm ，游標尺最小刻度 0.05mm

$$\frac{\delta u_0}{u_0} = \left[\left(\frac{10}{373} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{29.90} \right)^2 + \left(-\frac{0.025}{120.7} \right)^2 \right]^{1/2} = 2.68\%$$

將相關數據代入式(A-7)，得參數 Gr / Re_h^2 之不準度為

$$\left[(0)^2 + (0)^2 + (3.0\%)^2 + (0.08\%)^2 + ((-2) \times 2.68\%)^2 \right]^{1/2} = 6.14\%$$

附錄二



目前主流的 Sulzer 大型柴油引擎之轉速與輸出功率

REF: <http://www.wartsila.com/>

附錄三

		Q_{lose} / Q_{in} (Fc=0.2 Lc=0.75)		
Re_w	ΔT_w (°C)	F	M	B
300	10	0.0749/0.2604 =28.76%	0.0587/0.1811 =32.41%	0.0508/0.1158 =43.87%
	40	0.0801/0.3549 =22.57%	0.0691/0.2401 =28.78%	0.0511/0.1167 =43.86%
200	10	0.0708/0.306 =23.25%	0.0637/0.1842 =34.58%	0.0501/0.1155 =43.38%
	40	0.0832/0.3258 =25.54%	0.0704/0.1985 =35.47%	0.0502/0.1207 41.6%

		Q_{lose} / Q_{in} (Fc=0.4 Lc=0.75)		
Re_w	ΔT_w (°C)	F	M	B
300	10	0.0807/0.306 =26.37%	0.0638/0.1892 =33.72%	0.0441/0.1121 =39.34%
	40	0.0809/0.3306 =24.47%	0.0697/0.1894 =36.81%	0.0446/0.1208 =36.92%
200	10	0.0781/0.3102 =25.18%	0.0698/0.1837 =38.00%	0.0387/0.1128 =34.30%
	40	0.0787/0.3297 =23.87%	0.0752/0.1872 =40.17%	0.0467/0.1203 38.82%

Q_{lose} / Q_{in} 比