

電化學產氣裝置應用於水下潛體之微氣泡減阻實驗

吳聖儒* 歐陽寬** 夏曉文*

*國防大學理工學院動力及系統工程學系

**國防大學理工學院國防科學研究所

摘要

本實驗利用電化學產氣裝置於水下潛體的表面產生微氣泡，藉以降低潛體的表面摩擦阻力。首先設計一簡易電化學產氣模組，用以瞭解各產氣參數對氣泡產氣率的影響，討論的參數包括電解質的種類、陰陽兩極的間距及鎂金屬片幾何形狀，並求得電流量與氣泡產氣率間的關係式。再將電化學反應產氣裝置安裝於水下潛體模型表面，利用水平式環流水槽來進行微氣泡於紊流場的減阻試驗。實驗結果顯示，在均勻流場的最佳減阻效果可達 28.4%，而在艤跡流場更可高達 46.9%。最後，利用田口式直交表法分析實驗數據，以獲得微氣泡減阻的最佳穩健參數水準設計，可估計減阻效果約為 40%。此外，使用變異數分析可得知流場速度對微氣泡的減阻效果影響最鉅，而微氣泡的產氣率越高則減阻效果越佳。

關鍵字：微氣泡，減阻，電化學，田口方法

Drag Reduction on a Submerged Body by Electrochemistry Generated Micro-Bubbles in Turbulent Boundary Layer Flow

Sheng-Ju Wu*, Kwan Ouyang**, and Sheau-Wen Shiah*

**Department of Power Vehicle and Systems Engineering, Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University*

*** Graduate School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

ABSTRACT

In this experiment, the electrochemistry was implemented to generate microbubbles on the surface of the model of a submerged body to reduce the frictional drag of the model in turbulent flow. In the beginning stage, this work investigated the effect of parameters related to the rate of gas generation by using a simply electrochemical module for generating gas bubbles. These parameters studied here were the kinds of electrolyte, the gap between anode and cathode poles, and shapes of metals. Additionally, the relationship between the amperage and the rate of the gas bubbles generation was found out. Furthermore, applying with an electrochemical device on the surface of a submerged model, the experiment of the microbubble drag reduction in turbulent flow was carried out in a horizontal circulating water channel. Experimental results revealed that the best effect on the drag reduction was up to 28.4% in a uniform flow; furthermore, in a wake flow it could be up to 46.9%. At last, the method of Taguchi's orthogonal array was adopted to analyze the results of the experiment in order to get the optimum and robust parametric level for the micro-bubble drag reduction. It is about 40% to estimate the result of the drag reduction on the robust conditions.

Keywords: Microbubble, Drag reduction, Electrochemistry, Taguchi method

一、前言

為滿足現代人類大量移動的需求，交通載具如船舶、汽車或飛機，已成為地球能量耗損最鉅的來源之一。影響交通載具阻力較重要者有形狀阻力(form drag)及表面摩擦阻力(frictional resistance)，在載具幾乎已達極盡流線化的程度下，減少形狀阻力的改善程度有限；反之，如何降低表面摩擦阻力以節省能量耗損，仍有可供努力的空間。影響摩擦阻力的因素之一為流體黏滯性，由於水的密度與黏滯係數均比空氣大，所以水中載具所遭遇的摩擦阻力會比於陸上或空中運動的交通載具為大，因此如何降低水中載具的摩擦阻力，在面臨能源危機的今天顯得更為重要。就目前針對減少表面摩擦阻力的研究而言，下列各項技術較為大家所應用，包括表面塗裝減阻、微壕溝(riblet)減阻、微噴流減阻，微氣泡減阻、奈米技術減阻；若同時考量減阻效果、施工的簡易度以及對環境的低污染，利用微氣泡以達減阻效果的方法當為首選。微氣泡減阻技術係於載具表面產生微小氣泡，並使微氣泡分佈於物體表面邊界層內以降低表面摩擦阻力。在紊流場中，物體的摩擦阻力為分子黏滯力(molecular viscosity)和渦流應力(eddy stress)—即雷諾應力(Reynolds stress)——的效應總和，由於氣體的密度和黏滯係數均遠小於液體，因此當物體表面佈滿微小氣泡時，液-氣混合流體的平均密度和黏滯係數的減小導致阻力的減小；另外，藉由氣泡與液體於紊流邊界層內的交互作用，亦能降低雷諾應力。因此，使用微氣泡減阻技術時，需使所產生的氣泡必須小到可以在液-氣介面達到穩定平衡，使其能持續維持在紊流邊界層內；一般而言，其減阻效率會隨邊界層內微氣泡量的增加而提高。

McCormick 和 Bhattachryya [1]首先發現藉由電解方式所產生的微氣泡可減少軸對稱體在水槽運動時所產生的表面摩擦阻力，尤其是在低雷諾數下有可觀的減阻效果，也因此展開了一連串有關微氣泡減阻的研究。Dubnischew 等人[2]使用 LDV (Laser Doppler Velocimeter) 和熱膜(hot film)測速儀測量氣泡容積與流場的速度分佈。實驗結果顯示在黏滯性次層(viscous sublayer)其氣泡濃度為零，而最大氣泡濃度分佈發生於 $\bar{y} = y/2H = 0.1$ ，其中 y 為距壁面的距離、 H

為測試斷面的高度。Madavan 等人[3]以微氣泡噴入平板邊界層內，在流場速度 4.2~17.4m/s 之間改變測試平板的方向進行實驗。實驗結果指出：在低雷諾數下及測試平板安裝於上側時，因浮力的影響使氣泡較集中地分佈在平板表面附近，而獲得很好的減阻效果，並且隨著氣泡噴入量的增加而減阻成效增加，其減阻效果最高可達 80%。Merkle 與 Deutsh [4]探討氣泡在紊流邊界層內與液體的交互作用，認為微氣泡必須分佈於緩衝層(buffer layer)內，以類似於高分子的作用來減小表面阻力。Latorre [5]曾將微氣泡減阻技術應用於船模實驗上，結果顯示隨著空氣流量的增加，減阻效能越加顯著，能使高速平底船與平底雙體船船速提高 7~12 節，惟空氣流量增加至某一臨界值後，就無法再提高其減阻效果。Takahashi 等人[6]也曾以微氣泡減阻技術分別應用於 12 公尺及 50 公尺的船模上，前者實驗可減少 50%的船模阻力，後者可達 32%的減阻效果。Kato 等人[8]使用多孔介質平板產生微氣泡以減少平板的表面阻力，最佳減阻效果可達 60%；該作者並使用 LDV 量測系統，量測氣泡注入紊流邊界層內時，隨時間改變的平均流速及紊流強度的分佈。Moriguchi 和 Kato [9]在一寬高比 10:1 之二維渠道中，透過多孔介質平板的方式生成氣泡，結果顯示在平均空泡比(Mean Void Fraction)12%的情形下，減阻結果可達到 40%。Kawamura 等人[10]利用空蝕(Cavitation)作用產生氣泡，探討氣泡尺寸對於減少表面摩擦阻力的影響及減阻效果的持續性。作者指出粒徑較大之氣泡用於長距離載具上，有持續降低黏性阻力的效果，因此建議在實際船舶運用上可使用有狹縫的平板(Slit Plate)之產氣方式，有效地降低表面摩擦阻力。Wu 等人[11]以不同孔隙大小的多孔介質產生微氣泡，探討船模在不同流速條件下的減阻效應，實驗結果顯示較小孔隙的介質所產生的較小粒徑氣泡有較佳的減阻效應，於流速 7 m/s 條件下可減少阻力 26%。

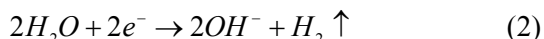
產生微氣泡的方式主要有兩種：一為以高壓空氣通過孔隙介質形成微小氣泡、一為利用電解水的方式產生氣泡群。採用前者方式可產生較為大量的微氣泡群以提高減阻效率，且吾人可簡易的藉由調控空氣注入量以控制產生氣泡群的多寡，此亦為何自 McCormick 和 Bhattachryya [1]以降，大多數的學者均採用高壓空氣以生成氣泡的因素。然而，有學者指出

經由孔隙介質所產生的氣泡粒徑較大，尺寸分布大致在 600-800 μm [8]，於低流速流場環境下常易因浮力效應而造成氣泡的堆疊(內流場)或逸出(外流場)；且當供氣量過大時，微氣泡注入流場時所產生的垂向速度可能會破壞邊界層的形成，以致影響減阻效率。若採用電解方式，所產生的氣泡粒徑較小，例如 Wedin [13]以電解方式產生氣泡，觀察實驗結果顯示其粒徑約 $100 \pm 50 \mu\text{m}$ ，且氣泡於導線表面生成，直接藉由流場將氣泡往下游處帶走而分布於物體表面，故無垂向速度的困擾，惟其氣泡供應量遠小於由高壓空氣通過孔隙介質者。若欲產生較多的氣泡群，必須增強電流的大小，此時會產生熱對流效應的問題。有鑑於此，本研究改良電解水產氣供應量不足的缺點，改使用電化學方式產生氣泡，其原理為結合電解方式及化學反應以加速生成大量氣泡。本實驗裝置以鎂合金作為陽極、銅片作為陰極，分別通入直流正負極電源。電解反應時，在陰極銅片上會佈滿負電荷，負電荷會吸附電解液中的氫離子而產生氫氣泡群；在化學反應中，陽極上的鎂合金為活性極高的金屬，能於電解液中自行產生化學變化，使得電解液釋放出氫離子，進而在陽極鎂合金表層產生氫氣泡群及氫氧化物，故陰陽兩極皆有氫氣泡產生。陰陽兩極的電化學反應可表示如下：

陽極(化學反應)：



陰極(電解反應)：



以電化學方式產氣為一種較新的微氣泡減阻方式，就作者所蒐集到的文獻中尚無對該產氣機制作完整的研究。為了獲得較佳的減阻效果，本研究初期先設計一簡易的電化學產氣模組，探討其控制參數特性，以利設計出適用於水下潛體的產氣模組。另外，雖然電化學產氣的多寡可藉由讀取量筒的刻度求得，但為了更加方便計量氫氣的生成量，本實驗也分別求得鎂合金的耗重及電流大小對產氣率的關係式。

關於水下潛體模型的阻力量測方式，本實驗亦有所改良，使其能更精確量測到模型本身的阻力。以往在國防大學理工學院環流水槽實驗室中進行水下潛體模型的阻力量測時，常以一扁橢圓形支撐桿連接於模型本身，支撐桿上端由固定架固定於水槽測試區上方，固定架之

兩側設計有軌道式滑動架，並於滑道內安裝可平順滑動之轉輪。量測阻力值的負荷計固定於水槽測試區上方，其感應器連接支撐桿上端，當水槽中的水流動時，潛體模型受到水流之沖力，即可平順地沿著流向被帶動，並將阻力反應於負荷計上。此時所得到的阻力值為模型本身阻力及由支撐桿所引起的額外阻力，故需單獨計算出支撐桿的阻力效應並於總阻力中將之剔除，方能得到模型本身阻力，這樣的實驗數據往往會有所誤差。於本實驗中，除重新製作一低興波阻力支撐桿外，所設計的模型可讓負荷計和感測器直接安裝於模型本身，所量測到的阻力值即為模型本身於流場中所受的阻力，可完全剔除支撐桿所引起的額外阻力。

通常水下載具大多在均勻的流場中運動，但是目前中共從俄國購入的 Kilo 級潛艦所配備的「追跡魚雷」是潛伏在水面船艦的艉跡流區中運動，以躲避聲納的搜尋，對水面船艦產生甚大的威脅；故水下兵器在艉跡流區的阻力及其減阻特性，亦是值得去探討的課題。一般有關微氣泡減阻的文獻通常僅考慮均勻流場，甚少探討在艉跡流場的減阻特性，因此本文的微氣泡水下減阻實驗研究，所考慮的流場除了均勻流場之外，亦將艉跡流場一併納入考量。

在眾多的微氣泡減阻研究中，大多著重於定性上的探討，很少就定量上的結果有系統的分析各因子對反應值(response)的影響效應大小，並提出一個最佳參數水準(optimum parameter levels)，以利於實際應用時各參數水準的選擇。藉由因子實驗(factorial experiment)或部分因子實驗(fractional factorial experiment)有系統的探討各種參數水準組合對反應值的效應，是為實驗設計法(Design Of Experiment, DOE)。若能將產品在設計、製造過程的差異，或外在環境干擾等因素考量入內，從而求得有最佳品質特性及最小變異的參數水準組合，稱為穩健的(robust)參數設計。由田口玄一(Taguchi Genichi)博士所推廣的「田口式直交表法」(Taguchi's orthogonal array method)即為工業上常被採用的穩健參數設計方法。使用田口法常以部分因子做實驗設計，其優點在能以較全因子實驗(full-factorial experiment)為少的實驗次數，獲得明確的穩健參數水準；至於採用部分因子實驗可能導致因子之間的混淆(confounding)，可藉由直交表的妥善設計而降至最低，得到足夠精確的結果，因此廣被注重

成本的工業界所採用。本文即使用田口式直交表法分析上述水下潛體實驗所得數據，將流場速度及微氣泡的生成率當作影響減阻效果的控制因子，將均勻流場及艇跡流場視為外界不可控制的干擾因子，以最小阻力為目標，尋求最為穩健的因子水準組合，並以變異數分析法(ANALYSIS OF VARIANCE, ANOVA)探討各控制因子對阻力大小的影響。

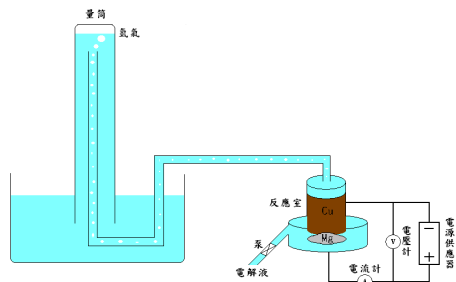


圖 1. 電化學產氣收集裝置示意圖。

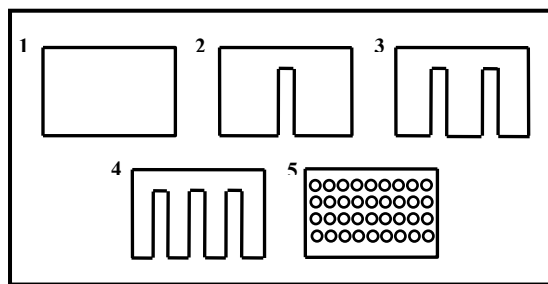


圖 2. 鎂金屬片幾何形狀示意圖。

二、實驗設備與量測方法

本研究實驗部份分成兩個階段，首先設計一個簡易的電化學產氣裝置，探討各產氣參數對微氣泡產氣率的影響，並求得電流量和產氣率的關係式，以便於後續進行水下潛體微氣泡減阻實驗時的產氣率估算。參考第一階段所獲得的結果設計一電化學產氣模組，安裝於水下潛體模型表面，於水平式環流水槽進行微氣泡減阻實驗。本節對電化學產氣參數探討及水下潛體微氣泡減阻實驗的實驗設備與量測方法、步驟分別說明如下。

2.1 電化學產氣參數探討

電化學產氣收集裝置示意圖如圖 1 所示，利用泵將電解液送入反應室內，反應室內部放置陽極鎂合金及陰極銅片，採用可調變電

壓之電源供應器(Input: AC 110V, Output: DC 110V, 10A)提供直流電流，並在電源供應器輸出端同步加裝一並聯電壓計及串連電流計，量測真實輸出電壓及電流，可排除因電源供應器內部線路所產生的損耗。假設氫氣不溶於水，電化學反應時兩極生成的氫氣泡以排水集氣法經由導管通入量筒內，最後讀取量筒刻度得知所排出的水量即為產生的氫氣量，其相對不準確度(uncertainty)為 $\pm 0.5\%$ 。在電解過程中，所生成的氫氧化鎂濃度會影響電解液中的電導值，故在實驗中需不斷的補充新的電解液，並適量地帶走陽極鎂合金上的沉積物，以維持良好的產氣效率。

本文所討論的電化學產氣參數包括電解液種類、陰陽兩極間距和鎂合金金屬片幾何外型共三種參數。一般而言，水中載具多行駛於內河或海上，故本實驗所探討的電解質種類為淡水及海水兩種。討論陰陽兩極間距對產氣多寡的影響時，兩極間距從相距 1 mm 開始，每次以 1 mm 增加至距離 10 mm。有關鎂金屬片幾何形狀對產氣率的影響實驗，吾人將金屬片製作成五種不同的幾何形狀，討論何者能有較佳的產氣效果。選定的五種幾何形狀示意圖如圖 2 所示，第一種幾何形狀為整片鎂合金；第二至第四種幾何形狀為將相同面積的鎂合金金屬片切割成柵欄條狀，其欄數分別為二、三、四；最後一種幾何形狀則於金屬片上沖出 36 孔，並以 9×4 矩陣排列。此外，因為當模型處於外流場時，不易量測氫氣的產量，需要另外有量測方式取代，因此本文試圖尋找出電流大小與氫氣產氣率關係，以方便實驗時可藉由電流大小換算成氫氣的產氣率。

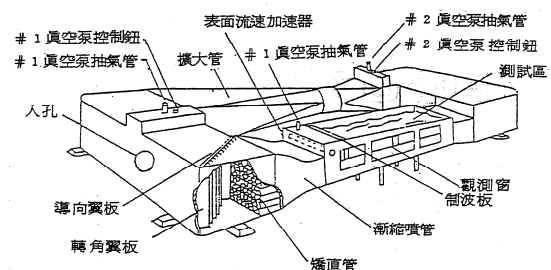


圖 3. 水平式環流水槽平面示意圖(摘錄至莊佳璋[14])。

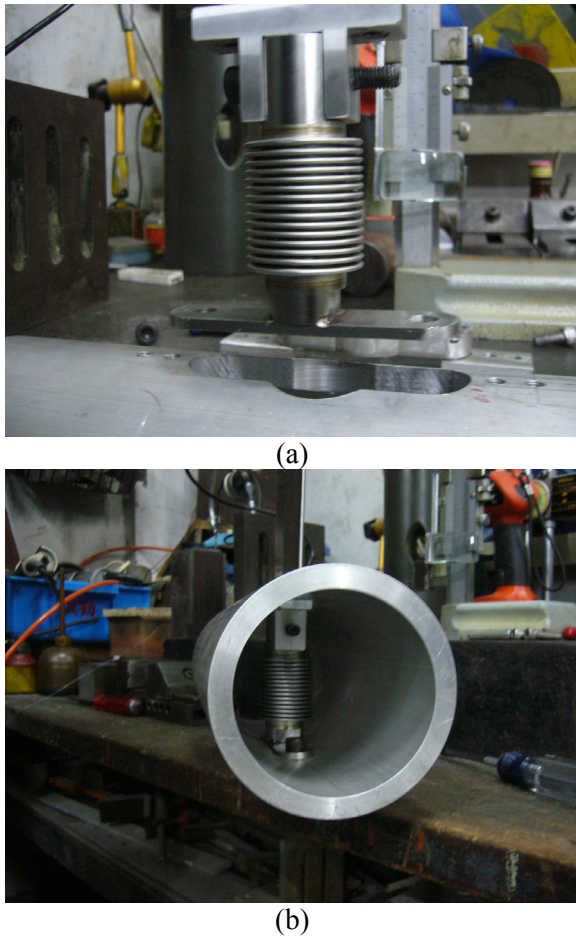


圖 4. 負荷計的安裝：

- (a) 負荷計上端連接支撐桿，下端固定於模型本體；
- (b) 支撐桿、負荷計與模型中段的連結。

2.2 水下潛體模型微氣泡減阻實驗

水下潛體模型的減阻實驗以水平式環流水槽為實驗平台(圖3)[14]，水槽長14 m、寬5.325 m、高2.2 m、水容量為80 ton，測試區域長為5.5 m、寬為1.5 m、水深1.1 m，測試段水流速度可藉由調整軸向式主馬達轉速來調變。流場平均速度可利用SV-101螺槳式探測器(flow meter)量測，並經由C-501AP流速記錄器(pulse counter)記錄。SV-101螺槳式探測器之螺槳為四葉式，在流場中每轉動一圈，便對發光二極體之光源產生四次脈衝數，並藉由單位時間的脈衝數反映出流速之快慢。再使用皮托管(Pilot tube)實施流速計校準工作以獲得單位時間脈衝數與流速的關係式。皮托管校準工作須同時選取兩個測試點進行測試，避免因單一測試點造成的不準確性。校準時主馬達轉速自200 rpm起每增加100

rpm量測流速結果乙次，直至1150 rpm(極速)為止。因皮托管反應速度緩慢，為求得準確結果，每一轉速均需經過三十分鐘以上時間方記錄量測結果。分別在主馬達各轉速下獲得流速計平均脈衝數並計算相對應的皮托管流速，以最小平方方法線性迴歸找出流速計脈衝數與流場流速間之關係式，以供後續實驗的流速量測使用，估算流速之總不準確度為 $\pm 0.73\%$ 。

水下潛體模型為一全長1.325 m、直徑0.12 m之鋁合金流線形魚雷模型，在模型鼻端後方約為0.12 m水平段之處安裝電化學產氣模組，潛體長度之相對不準確度為 $\pm 0.05\%$ 。由於本文所探討的是微氣泡在紊流場中對水下潛體的減阻效應，於模型前段所安裝的產氣模組亦可當作激紊裝置，促使流過模型表面的水流成為紊流邊界層狀態。阻力量測裝置為一防水型負荷計，額定負載最高為5000 g，所量測之阻力值經由高取樣率(每秒可擷取50筆實驗數據)之數據擷取系統(GWinstruments)記錄及統計分析。模型與支撐桿的連結和固定方式如前言所述，惟彈體經過改良將中間段部分切割開口成中空，以方便容納支撐桿下端與負荷計，並將負荷計直接固定安裝於支撐桿和模型之間(圖4)，如此，負荷計即可直接量測到模型於流場中所受的阻力值。實驗前需先進行負荷計校準工作，並於每次實驗前重複校準，其校準程序為：負荷計開機後10至15分鐘，待電壓到達穩定狀態後，再以數據擷取系統自身校正功能(calibrate)將系統在未有任何訊號時做歸零校準；再以標準砝碼由0至5000 g每次以100 g依序增加，再依序遞減，並利用數據擷取軟體系統調整其阻力值以符合標準砝碼的實際重量，負荷計之相對不準確度為 $\pm 0.29\%$ 。進行減阻實驗時，將潛體模型於水槽的深度設定於 $H/d=4.58$ (水槽深度/潛體直徑)處，以避免自由液面效應影響。於水槽模擬外流場時需避免槽壁效應，因測試區寬度與模型直徑比達 $W/d=12.5$ ，故槽壁效應可忽略不計。

本實驗同時探討潛體於均勻流場和艤跡流場的微氣泡減阻效果。於模擬艤跡流場時，在模型鼻端上游100 cm處架設一垂直於水面的木條，用以在下游處產生艤流，木條長為190 cm，截面積大小為4 cm $\times$ 5 cm。由於真實的潛體在水下運動時常非定速，故本實驗分別在不同流場速度下，探討微氣泡產氣率對潛體的減阻效果，所探討的流場速度範圍從1.3

m/s 到 2.1 m/s。在討論電化學參數的系列實驗中吾人可求得電流大小和微氣泡產氣率的關係式，故可藉由電流大小換算成產氣率。實驗所使用的電流大小設定為 30A、40A 和 50A 三種，相對應的產氣率分別為 0.328 L/min、0.439 L/min 及 0.550 L/min。實施阻力值量測時，流速由低速逐漸增至高速；在同一流速條件下，先量測無氣泡生成時的模型阻力值，再藉由增強電流大小逐漸增加產氣率並量測其阻力值；獲得所有數據後，再從低流速低產氣率至高流速高產氣率依序重複一次實驗。每一組實驗量測以每秒 50 筆的取樣速率，連續紀錄 30 秒，可獲得 1500 筆阻力數據，再以 FORTRAN 電腦程式計算其平均值、標準偏差量，不準確度等資料，利用 Chauvenet 法則，將量測值與平均值差異出現機率小於 $1/2n$ (n 為取樣數) 的數據剔除，再將其餘數據重新計算求得阻力平均值，阻力值之相對不準確度為 $\pm 1.34\%$ 。由於實驗所使用的支撐桿具有低興波阻力特性，加上彈體的流線形化，故模型於流場所受的阻力可視為表面摩擦阻力。

將所得之各項數據無因次化，轉化成摩擦阻力比 (DR)、雷諾數 (Re) 及微氣泡注入比 (C_v)，各無因次化參數定義為：

$$DR = \frac{D}{D_0} \quad (3)$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (4)$$

$$C_v = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} \quad (5)$$

(3)式中 D 為氣泡注入流場時潛體所受的阻力值， D_0 表示流場無氣泡時的阻力量測值；(4)式中 V 為流場速度(m/s)、 L 為模型長度(m)、 ν 為運動黏滯係數(m^2/s)；(5)式中 Q_a 為氣泡生成率(L/min)、 Q_w 為潛體表面邊界層內的流體流率(L/min)，可由下式計算求得：

$$Q_w = \pi \times d \times (\delta - \delta^*) \times V \times 60000 \quad (6)$$

其中 d 為潛體模型直徑(m)、 δ 為邊界層厚度(m)、 δ^* 為邊界層位移厚度(displacement thickness, m)。 δ 可由(7)式計算求得：

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.382}{Re_x^{0.2}} \quad (7)$$

其中 x 為流向水平位置(m)，而 $(\delta - \delta^*)$ 項本文採用 δ 的 7/8 估算，其可適用於 $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$ 。上述各參數中， Q_w 之相對不準確度為 $\pm$

0.73%， DR 之相對不準確度為 $\pm 1.90\%$ ， Re 之相對不準確度為 $\pm 1.39\%$ ， C_v 之相對不準確度為 $\pm 0.88\%$ 。

表 1. 田口式直交表法之控制因子及水準

因子	水準一	水準二	水準三
A-流速(m/s)	1.3	1.7	2.1
B-產氣率(L/min)	0.328	0.439	0.550

三、田口式直交表法的穩健設計

本節採用田口式直交表法分析上述之實驗數據，以尋求最穩健的因子水準組合。參照前面的實驗結果，假設影響微氣泡減阻效率之控制因子為流場速度(因子 A)及電化學產氣裝置的產氣率(因子 B)，將均勻流場和艤跡流場視為外在的變異環境(干擾因子)，將潛體模型在流場中所量測到的阻力值轉換成摩擦阻力比值並當作欲最小化的反應值，因此屬於望小(smaller-the-better)問題。再利用變異數分析法檢驗各控制因子及因子之間的交互作用對阻力比值的影響；最後，以最為穩健的因子水準組合做重複實驗，比對以田口法所預測的結果。

從水下潛體模型減阻實驗的結果顯示，即使電化學產氣模組的產氣率相同時，模型在不同流場速度下的減阻效果有明顯的差異；在均勻流場或艤跡流場，微氣泡的減阻結果亦大不相同。本文採用田口式直交表法，以流場速度和電化學產氣模組的產氣率當作影響潛體阻力比值的控制因子，將均勻流場或艤跡流場視為外在不可控制的干擾因子，尋求一最為穩健(robust)的因子水準組合，即在外在的環境干擾下(無論流場為均勻流場或艤跡流場)，由該因子水準組合條件下所得到的減阻結果，會有較小的變異及較好的減阻效果。

直交表原本允許各控制因子間的水準數不相等，但若考量直交表能有高解析度(resolution)，控制因子的水準數最好一致。由於原實驗數據之產氣率僅有三個水準($G_a=0.328$ 、 0.439 、 0.550 L/min)，為配合產氣率的水準數，因此從原來實驗的五個流場速度水準中選擇三者，分別為 $V=1.3$ 、 1.7 和 2.1 m/s，各控制因子及水準如表 1。依據控制因子數和水準數，本文選擇使用 $L_9(3^4)$ 直交表(表 2)，其中上標數字 4 表示該表最多可放

置四個控制因子、數字 3 表示每個控制因有三個水準、下標數字 9 表示總共需要九組實驗。控制因子的放置順序有其一定的法則，以儘量減少混淆的錯誤結果產生[16]，以 $L_9(3^4)$ 直交表為例，左邊第一、二欄位所放置的控制因子需無交互作用，第三、四欄位所放置的控制因子可為與前二者有弱交互作用之控制因子。因本實驗的控制因子僅有兩個，因此將流場速度（因子 A）及產氣率（因子 B）置於第一、二欄位，將因子 A 和因子 B 的交互作用（標示為 A x B）置於第三、四欄位；再將干擾因子（均勻流場和鯨跡流場）置於 $L_9(3^4)$ 直交表延伸的右上方，則原 $L_9(3^4)$ 直交表稱做內直交表，有別於延伸部分的外直交表。內直交表的數字表示因子的水準，各因子水準相對應之參數值可參考表一。

表 2. 微氣泡減阻穩健設計之 $L_9(3^4)$ 直交表

Exp.	A	B	A×B	A×B	均勻流		鯨跡流		平均	S/N
					DR ₁	DR ₂	DR ₁	DR ₂		
1	1	1	1	1	0.851	0.845	0.824	0.817	0.834	1.572
2	1	2	2	2	0.805	0.774	0.748	0.689	0.754	2.434
3	1	3	3	3	0.716	0.607	0.495	0.569	0.597	4.382
4	2	1	2	3	0.942	0.893	0.888	0.868	0.898	0.932
5	2	2	3	1	0.896	0.843	0.826	0.840	0.851	1.393
6	2	3	1	2	0.822	0.775	0.668	0.791	0.764	2.305
7	3	1	3	2	0.983	1.006	0.971	0.919	0.970	0.261
8	3	2	1	3	0.961	0.973	0.959	0.906	0.950	0.444
9	3	3	2	1	0.939	0.988	0.889	0.879	0.924	0.676
平均									0.838	1.600

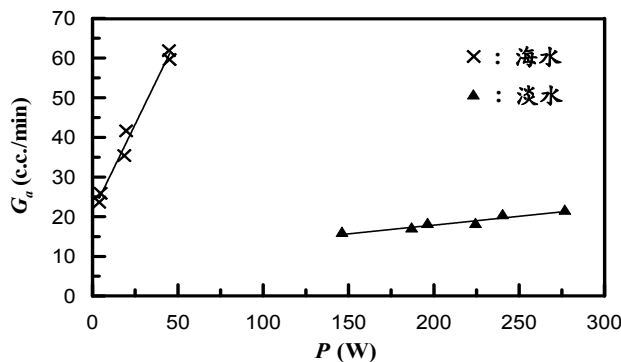


圖 5. 不同電解液對產氣率的影響。

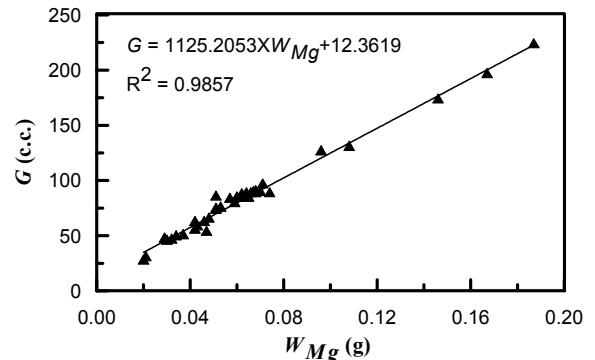


圖 6. 鎂合金消耗量與氫氣生成量關係圖。

四、結果與討論

4.1 電化學產氣參數探討

4.1.1 電解液對產氣率的影響

首先討論淡水和海水兩種電解液對產氣率的影響，模擬海水乃於純水中加入食鹽。將陰陽兩極的金屬片面積大小和兩極間距保持不變，每一種電解液各使用不同電流大小（1.855 至 6.35 安培）及電壓（2.1 至 7.05 伏特）組合，共 6 種電功率大小實施電化學產氣實驗，每組實驗時間均為 60 秒，最後紀錄量筒的排水量（即產氣量）。將電流大小乘以電壓可獲得電功率大小(P)，將產氣量除以時間可得產氣率，各電解液的產氣率與電功率大小的關係如圖 5 所示。由圖中可看出：兩種電解液的產氣率均隨著電功率的增加而增加，兩者幾乎呈線性關係；當以海水為電解液時，即使電功率遠小於以淡水為電解液之電功率，其產氣率仍大於淡水者許多，顯示以海水為電解液可獲得較佳的產氣率。因此，於第二階段實施水下潛體減阻實驗時，均採用海水為電解液，以期能獲得較佳的減阻效果。另外，在實驗過程中，吾人觀察到當氫氣的產氣量越多時，陽極鎂金屬的消耗量越多，此現象促使吾人欲探究鎂合金耗重與產氣量的關係。若能找出兩者之間的關係式，則實驗後即可直接量測金屬的耗重，可省略量筒簡化裝置。

將鎂金屬片面積大小固定，銅片使用大小兩種面積，並使用多組不同的電功率輸入，實驗時間長短不定，紀錄鎂金屬實驗前後的耗重 W_{Mg} (g) 和量筒的排水量，即氫氣產量 G (c.c.)，將結果表示於圖 6，圖中縱座標為氫氣的產量，橫座標表示鎂金屬實驗前後的耗重。

從圖 6 可看出，氫氣產量與鎂金屬的耗重成線性關係，不受銅片面積大小和電功率輸入的影響。以線性迴歸方式找出兩者的關係式如下：

$$G = 1125.2053 \times W_{Mg} + 12.3619 \quad (8)$$

經由 t 統計量檢定[17]，斜率與截距均為顯著，因此兩項係數皆不可省略。此迴歸式之判定係數 (coefficient of determination) R^2 為 0.9857，表示產氣量變異的 98.57% 可被鎂金屬消耗重量之變異所解釋；而相關係數 (correlation coefficient) R 為 0.9928，可窺知 G 與 W_{Mg} 兩變數間呈現非常高度的正向線性關係；在 95% 信心水準 (confidence level) 下，斜率與截距之信賴區間 (confidence interval) 分別為 ± 45.0954 及 ± 3.2740 。值得注意的是 (8) 式在實際的產氣減阻應用上，鎂金屬的消耗重量遠大於 0.1 g 以上，故其斜率值所扮演的角色就顯得較為重要，即表示鎂金屬消耗重量每增加 1 g，產氣量的平均值則會增加 1125.2053 c.c.。

4.1.2 陰陽兩極間距對產氣率的影響

固定兩極金屬片面積及電功率大小，將銅-鎂兩極的間距從 1 mm 開始逐漸增至 10 mm，每組實驗時間為 60 秒，並量測鎂合金實驗後的耗重。10 組數據量測完畢後，增加電功率大小，再從兩極間距 1 mm 開始重複如上實驗。每種間距所得到的兩組數據求其平均值，將鎂的單位時間耗重與兩極間距的關係以圖 7 表示，橫座標為銅-鎂兩極的間距，縱座標為鎂合金實驗前後的重量差。參考圖 7，除兩極間距等於 1 mm 時的鎂合金耗重可能因為實驗誤差而小於間距等於 2 mm 時的鎂合金耗重，其餘結果均顯示鎂的耗重會隨著兩極間距的增大而減少，表示兩極間距越小，產氣率越大，最好是在兩極未形成短路條件下相距最短距離，才會有最佳的產氣率。

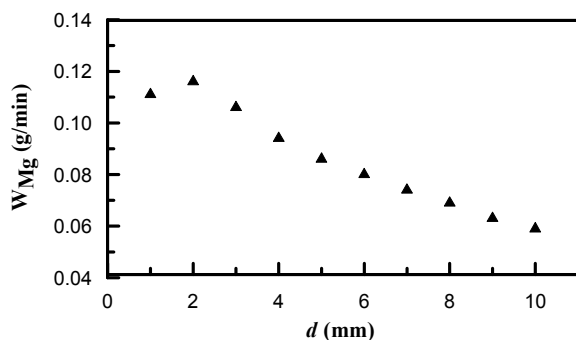


圖 7. 銅-鎂兩極間距對產氣率的影響。

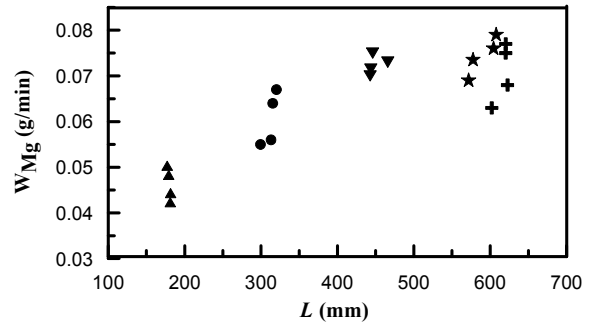


圖 8. 鎂金屬片外緣邊長與耗重率關係圖。▲：整片金屬片；●：二欄條狀金屬片；▼：三欄條狀金屬片；★：四欄條狀金屬片；+：36 沖孔金屬片。

4.1.3 鎂金屬片幾何形狀對產氣率的影響

參考圖 2，五種不同幾何形狀的鎂金屬片各製作四片。固定銅金屬片及兩極間距大小，分別從五種幾何形狀鎂金屬各取一片，於相同的電功率條件下進行實驗，共重複實驗四次。由於電化學反應會使鎂消耗，故每次重複實驗時需採用新的金屬片。先計算鎂金屬片各幾何形狀的外緣邊長 L_{Mg} (mm)，再將金屬片外緣邊長與實驗後鎂的耗重率 (g/min) 關係表示於圖 8。從圖中可看到每一種幾何形狀金屬片的鎂耗重率值各有所差異，此誤差導因於重複實驗時電壓與電流大小的變異。金屬片的外緣邊長定義為鎂合金與銅片交接處的總長度，計算結果以 36 沖孔金屬片 (圖 2 標示 5 者) 的外緣邊長最長、整片鎂合金 (圖 2 標示 1 者) 的外緣邊長最短。從結果可以看出四欄條狀金屬片的耗重率最高，表示有最佳的產氣率，但因考慮在潛體模型上施工的難易度，故於第二階段的水下潛體減阻實驗時，鎂金屬片的幾何形狀採用耗重率僅稍小於四欄條狀金屬片的 36 沖孔金屬片。

4.1.4 電流大小與氫氣產氣率關係

微氣泡的減阻效果受邊界層內的氣泡量多寡影響甚鉅，故一般相關的文獻多會探討減阻效率與氣泡供氣率的關係。雖然於 3.1.1 節已獲得供氣量與鎂金屬耗重量關係，但是當吾人在實施水下潛體減阻實驗時，卻不方便每次實驗之後都將模型上的產氣模組拆解、進行耗重量測。為了量化出產氣率與減阻效應的對應關係，需建立方便即時估算產氣率的關係式。吾人檢視以上一系列產氣參數探討的所有實驗數據後，發現產氣率僅為電流大小的函數。

將電流大小與產氣率的關係呈現於圖 9，由圖中可看出兩者大致呈線性的關係，將數據以線性迴歸後經由 t 統計量檢定，發現其截距項為不顯著可予以省略，故常數設為零重新做迴歸分析，可得到如下列的迴歸關係式：

$$G_a = 10.5948 \times I \quad (9)$$

上式中產氣率 G_a 之單位為 c.c./min； I 為電流，單位為 A。此迴歸式之判定係數 R^2 為 0.9437，表示產氣率變異的 94.37% 可被電流之變異所解釋；而相關係數 R 為 0.9714，可得知 G_a 與 I 兩變數間呈現非常高度的正向線性關係；此外，在 95% 信心水準下，斜率之信賴區間為 ± 0.3063 。

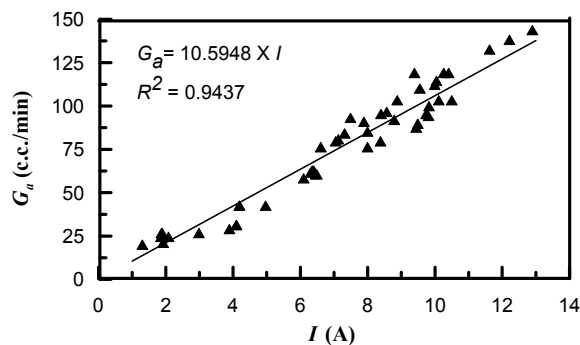


圖 9. 電流輸入與產氣率關係圖。

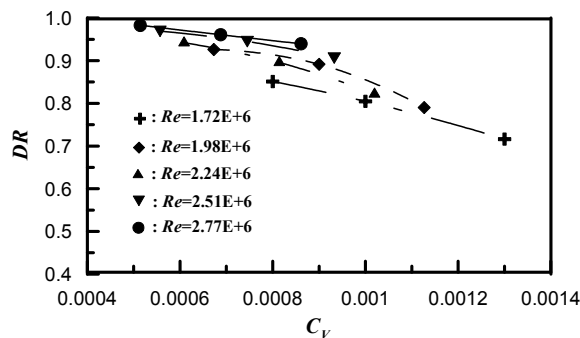


圖 10. 水下潛體減阻實驗在均勻流場中阻力比與氣泡注入比關係圖。

4.2 水下潛體模型之微氣泡減阻實驗

本節實驗所探討的流速為 1.3 m/s、1.5 m/s、1.7 m/s、1.9 m/s 及 2.1 m/s，使用的電流大小為 30 A、40 A 及 50 A 三種，換算成產氣率分別為 0.328 L/min、0.439 L/min 及 0.550 L/min，並分別於均勻流場和鯨跡流場實施實驗。每一組實驗均重複兩次，並求得平均值。

將均勻流場中所量測的平均阻力值與相對應之無因次參數摩擦阻力比 (DR) 記錄於表 3。參考表 3，在未產生氣泡之前 ($G_a=0$) 潛體

表 3. 水下潛體模型於均勻流場的微氣泡減阻結果

V (m/s)	$G_a=0$		$G_a=0.328$		$G_a=0.439$		$G_a=0.550$	
	D_0	DR	D	DR	D	DR	D	DR
1.3	296.64	1	252.48	0.851	238.70	0.805	212.48	0.716
1.5	375.40	1	347.62	0.926	334.69	0.892	296.65	0.790
1.7	533.14	1	502.01	0.942	477.44	0.896	438.07	0.822
1.9	678.00	1	656.86	0.969	640.58	0.945	614.40	0.906
2.1	943.12	1	926.83	0.983	906.08	0.961	886.04	0.939

表 4. 水下潛體模型於鯨跡流場的微氣泡減阻結果

V (m/s)	$G_a=0$		$G_a=0.328$		$G_a=0.439$		$G_a=0.550$	
	D_0	DR	D	DR	D	DR	D	DR
1.3	227.17	1	186.33	0.820	163.39	0.719	120.69	0.531
1.5	337.42	1	289.92	0.859	286.51	0.849	241.51	0.716
1.7	357.58	1	313.68	0.877	297.94	0.833	262.39	0.734
1.9	489.89	1	442.53	0.903	427.58	0.873	410.91	0.839
2.1	832.61	1	784.45	0.942	773.82	0.929	735.72	0.884

模型阻力隨著流速的增加而增加，一旦電化學產氣裝置產生氣泡後，阻力值下降 ($DR < 1$)。在相同流速條件下，產氣率越高，紊流邊界層內的氣泡量越多，阻力值越小、減阻效果越好。當產氣率一定時，低流速流場的減阻效果較為明顯，此趨勢和 McCormick 和 Bhattacharyya [1] (電解)、Madavan 等人 [3] (高壓空氣) 所得到的結論相同。當 $V=1.3$ m/s、 $G_a=0.550$ L/min 時， $DR=0.716$ ，減阻效果可達 28.4%。將不同雷諾數條件下，微氣泡注入比 (C_v) 與摩擦阻力比 (DR) 的關係表示於圖 10。如圖所示，各雷諾數下 DR 均隨著 C_v 的增加而減少，二者約略呈負斜率的線性關係。很明顯的，在低雷諾數流場微氣泡的減阻效果較好，在高雷諾數流場 ($Re = 2.77 \times 10^6$) 微氣泡的減阻效果很不顯著。仔細檢視氣泡注入比與流速的關係，參考 (5) 式和 (6) 式，當流速 V 增大時將導致邊界層內的流體流率 Q_w 增加，因此在相同的產氣率 Q_a 條件下，流速越高， C_v 值越小，故減阻效果減小。在高速流場若欲達到高減阻效率，勢必增強電流、增加產氣率的大小。

模型於鯨跡流場的平均阻力值與相對應的摩擦阻力比如表 4 所示。從實驗結果可以看

出減阻趨勢與均勻流場相同：產氣率越大減阻效果越好，在低速流場的減阻效果比高速流場佳，於 $V=1.3 \text{ m/s}$ 、 $G_a=0.550 \text{ L/min}$ 條件下， $DR=0.531$ ，減阻效果可高達 46.9%。對照表 3 及表 4，可發現在相同流速與產氣率條件下，艤跡流場的減阻效果大於均勻流場，此原因為：表中所標示的流速為潛體上游處的流場速度，在相同的上游流速條件下，於艤跡流場中的流體抵達潛體表面時，其軸向速度分量大小會因為艤流效應而減小，導致 Q_w 減小而 C_v 增大，因而有較佳的減阻效果。圖 11 為 C_v 與 DR 之關係圖， DR 會隨著 C_v 的增加而減小，且在低雷諾流場的減阻效果較佳，原因與均勻流場所敘述者相同。

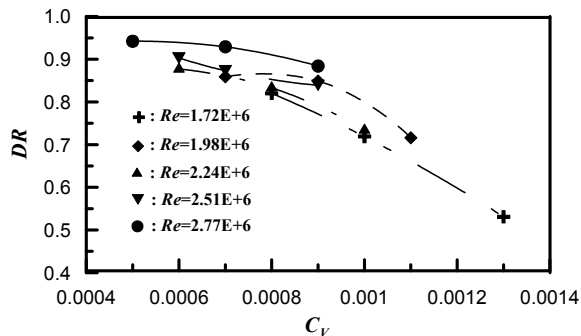


圖 11. 水下潛體減阻實驗在艤跡流場中阻力比與氣泡注入比關係圖。

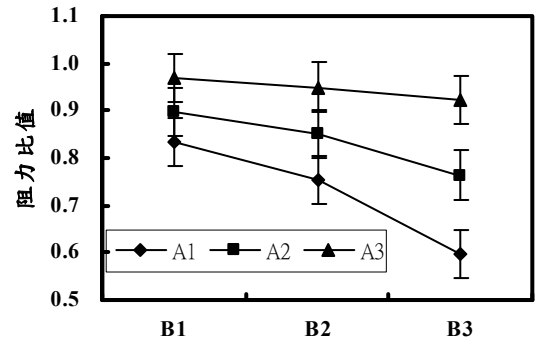
4.3 田口式直交表法之穩健參數

依照表 2 所設定之因子水準組合的順序，從 4.2 節所得的實驗結果將相對應之數據填入該表並計算平均值和訊噪比 (Signal-to-Noise-ratio, S/N)，表中的 DR_1 及 DR_2 為兩次重複實驗的摩擦阻力比值。對於望小的問題，S/N 可由下式計算所得[16]：

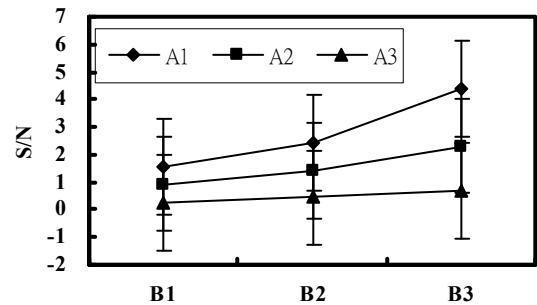
$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (10)$$

上式 y_i 為每一次實驗結果的反應值、 n 為總實驗次數。從表中可知摩擦阻力比總平均值為 0.838；在第三組實驗（流速等於 1.3 m/s，產氣率等於 0.550 L/min），有最小平均摩擦阻力比值 0.597 及最大 S/N 值 4.382。

圖 12 為各因子水準對阻力比值和 S/N 值的效應，圖中 A1 表示因子 A 的水準為一，其餘變數符號以此類推。參考圖 12 (a)，當流場速度（因子 A）固定時，因子 B 的水準數越高（高產氣率）其阻力比值越小，表示減阻效



(a)



(b)

圖 12. 因子水準效應圖：

(a) 水準對阻力比值的效應；

(b) 水準對 S/N 值的效應。

水準較低時（低流速）會有較好的減阻效果。因此，A1 B3 的因子水準組合具有最小的阻力比值。再觀察圖 12 (b)，吾人可明顯看出，當因子水準組合為 A1 B3 時，反應值具有最大的 S/N 值，表示在此因子水準組合條件下，反應值具有最小的變異。綜合言之，同時考量均勻流場和艤跡流場，無論是從最小阻力比值或最大 S/N 值觀點來看，A1 B3 都是最佳的因子水準組合，即在流速 $V=1.3 \text{ m/s}$ 、產氣率 $G_a=0.550 \text{ L/min}$ 條件下，有最為穩健的反應值，平均阻力值可減少 40.3%。

再使用變異數分析法檢驗各因子對反應值及 S/N 值的影響程度（貢獻率），其結果整理於表 5，表中變數 SS 為變異平方和、 DOF 為自由度、 F 為 F 檢定值、 MS 為均方根 (mean square) 等於變異平方和除以自由度、 ρ 表示對反應值的貢獻度以百分比表示，各變數的詳細計算公式可參考黃信皇[18]。表中 F 檢定值可視為因子變異量相對於誤差變異量的關係， F 值越大則表示該因子水準的變異對反應值的影響越為重要，即該因子越為顯著。另外，

表 5. 變異數分析表

(a) 阻力比值的變異數分析

Factor	SS	DOF	MS	F	$F_{0.05}$	ρ (%)
A-流速	0.289	2	0.144	58.170	3.354	55.25%
B-產氣率	0.119	2	0.060	24.058	3.354	22.29%
A × B	0.038	4	0.010	3.870	2.728	5.55%
Error	0.067	27	0.002			16.91%
Total	0.514	35				100.00%

(b) S/N 值的變異數分析

Factor	SS	DOF	MS	F	$F_{0.1}$	ρ (%)
A-流速	8.200	2	4.100	10.63	4.325	55.41%
B-產氣率	3.664	2	1.832	4.75	4.325	21.57%
A × B	(1.543)	(4)	(0.386)	—	—	—
Error	1.543	4	0.386			23.02%
Total	13.407	8				100.00%

表 6. 最佳因子水準組合(A1B3)之確認實驗

DR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	AVE.	S	S/N
均勻流	0.694	0.66	0.706	0.718	0.769	0.735	0.743	0.642	0.724	0.711	0.620	0.704	0.655	0.675	0.666			
鮑跡流	0.404	0.464	0.612	0.627	0.644	0.628	0.554	0.570	0.590	0.395	0.532	0.602	0.479	0.551	0.498	0.619	0.099	4.055

Error 一項表示除了因子 A 和 B 之外，其他可能尚未被解析、討論到的各因素變異效應，加上因實驗誤差引起的變異之總和。先討論阻力比值的變異數分析（表 5 (a)）。表中因子 A、因子 B 和兩因子交互作用(A x B)的 F 檢定值均大於 $F_{0.05}$ ，表示在 95% 的信心水準下，三者均為顯著，其中又以因子 A（流速）對阻力比值的影響最大（貢獻率達 55.25%），因子 B 的影響次之（22.29% 貢獻率），A x B 的貢獻率僅為 5.55%，顯示兩因子間有弱交互作用。配合表 2 的討論結果，可預測在最佳因子水準組合，A1 B3，條件下的阻力比值如下式：

$$\begin{aligned} (y)_{DR, pred.} &= \bar{y} + (\bar{A1} - \bar{y}) + (\bar{B3} - \bar{y}) + \left[(\bar{A1B3} - \bar{y}) - (\bar{A1} - \bar{y}) - (\bar{B3} - \bar{y}) \right] \\ &= 0.597 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\bar{y}$ 為阻力比平均值，變數 $\bar{A1}$ 表示當因子 A 水準固定為一時，所有數據的平均值，其餘變數定義以此類推。再討論 S/N 值的變異數分析。初始實施 S/N 值變異數分析時，發現

因子 A 的 F 檢定值， $(F)_A > F_{0.05}$ ，可視為顯著因子； $F_{0.05} > (F)_B > F_{0.1}$ ，故因子 B 可視為準顯著因子；而(A x B)的 F 檢定值 $< F_{0.1}$ ，意謂著相較於其他因子，A x B 對 S/N 值的變異效應很小，可視為因實驗誤差所造成，表示在 90% 的信心水準下，僅因子 A 及因子 B 對 S/N 值的影響被認為是顯著的，故將 A x B 所產生的變異統合(pooling)到 Error 項，但為了方便比較，仍將此項數據留於表中，並以括弧表示，以示區別，統合後的結果整理如表 5 (b) 所示。從表中可明顯看出，因子 A 和 B 的均方根各為 4.100 及 1.832，而 A x B 的均方根僅為 0.386。此外，流速水準的變動對 S/N 值的影響高達 55.41%，產氣率次之為 21.57%，A x B 對 S/N 值的影響可忽略不計。因此，S/N 值的預測值為：

$$\begin{aligned} (y)_{S/N, pred.} &= \bar{y} + (\bar{A1} - \bar{y}) + (\bar{B3} - \bar{y}) \\ &= 3.651 \end{aligned} \quad (12)$$

將預測值與表 2 中第三組實驗的 S/N 值(4.382)

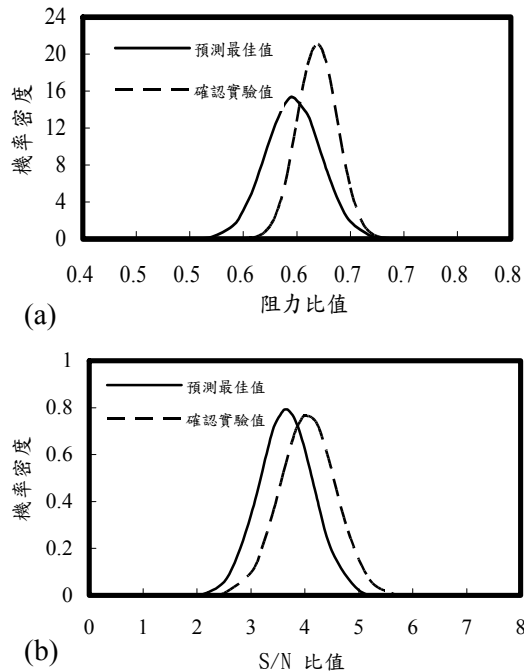


圖 13. 預測值與確認實驗之機率密度分布圖：

- (a) 阻力比值的機率分佈；
(b) S/N 比的機率分佈。

比較，可知所預測的 S/N 值偏低，此因為計算時未將 A x B 的效應估算在內。

信賴區間採用 student 的 t 分布法則，可由(13)式計算求得。在 95%信心水準下，預測之最佳平均阻力比值和 S/N 值的信賴區間分別為 0.051 和 1.285。

$$CI = t_{\alpha/2}(f_E) \times \frac{S}{\sqrt{m_e}} = 0.051 \quad (13)$$

其中 α 代表顯著水準(significance level)、 m_e 為有效樣本大小(effective sample size)、 f_E 表示誤差的自由度。當信心水準為 95%，取 $\alpha = 0.05$ 。有效樣本大小 m_e 定義為：

$$m_e = \frac{\text{總實驗數據個數}}{\text{預測值式中各因子的自由度總和}} \quad (14)$$

綜合言之，當因子水準選擇 A1 B3($V=1.3$ m/s、 $G_a=0.550$ L)，在 95%信心水準下，其預測最佳平均阻力比為 0.597 ± 0.051 ，平均減阻效果可達 40%左右。

以最佳因子水準組合 A1 B3，分別在均勻流場及艤跡流場重複作十五組確認實驗，以確認由分析所得結果的再現性(reproducibility)。確認實驗的量測結果如表

6，無論流場為均勻流或艤跡流，平均阻力比為 0.619，比預測值 0.597 ± 0.051 略高，但尚在誤差範圍之內，表示預測值有其可信度。將確認實驗的阻力比值和 S/N 值以機率密度表示於圖 13，並和預測值比較。圖 13 (a)顯示在最佳水準因子組合條件下預測結果與確認實驗的阻力比值機率密度分佈，從圖中可明顯看出確認實驗結果的阻力比值雖略高於預測值，但其變異減小。再從 S/N 值的機率密度分佈來看(圖 13 (b))，確認實驗的 S/N 比較大，符合圖 13 (a)的阻力比值變異變小。另外，從 (a)、(b)兩圖的預測值和確認實驗之機率密度分佈範圍大部分重疊來看，也證實了預測值的再現性很高、用田口式直交表法所預測的結果是可信的。

五、結論

本研究主要是以電化學產氣裝置應用於水下潛體，探討微氣泡於紊流邊界層內摩擦阻力的減阻特性。如眾所周知，微氣泡注入量的大小對減阻效果有很大的影響。電化學產氣裝置以銅為陰極、鎂合金為陽極，因為鎂為活性較高的金屬，因此不僅於陰極能因電解作用而產生氫氣泡群，同時陽極的鎂合金也會因化學作用而產生氫氣泡，改良了以往僅靠電解方式產氣率不足的缺點，以提高微氣泡的減阻效率。

本文首先對電化學產氣參數做一系列的因子特性探討，包括電解液的種類、陰陽兩極的間距、鎂金屬的幾何形狀。實驗結果顯示電化學裝置在海水的產氣效果遠大於淡水，陰陽兩極間距在不發生短路的前提下距離愈近愈好。此外，由於鎂金屬片產生化學反應後會失去金屬光澤而生成白色氫氧化鎂，吾人觀察反應後的鎂金屬片，發現化學反應大多發生在銅片和鎂片最短距離處，因此建議鎂金屬片最好能製作成柵欄條狀或沖孔狀，用以增加鎂合金的外緣邊長，使鎂的化學反應機率增加。本研究也用線性迴歸的方法，推導出電流大小和產氣率的關係式，方便爾後實驗時可以很容易的估算出產氣率大小。

接著，將電化學產氣裝置安裝於水下潛體模型實施減阻實驗，結果顯示無論是在均勻流場或艤跡流場，潛體的阻力都會隨著產氣率的增加而減少；在相同的產氣率條件下，於低速流場會有較好的減阻效果。當均勻流場時之最

佳減阻效果可達 28.4%，而在艇跡流場中更可高達 46.9%。

最後，利用田口式直交表法分析實驗數據，以流速和產氣率當作控制因子，均勻流場和艇跡流場視為干擾因子，尋求最佳的穩健參數水準組合。分析顯示當 $V=1.3$ m/s、 $G_a=0.550$ L/min 時，在 95%信心水準下，所預測之最佳平均阻力比為 0.597，亦即其減阻效果約為 40%。依照此因子水準組合重複確認實驗，亦可得到平均阻力比為 0.619，顯示田口法預測值的可信度頗高。本文亦使用變異數分析方法，解析各控制因子及其間交互作用對減阻效率的影響。分析結果可窺知流速的大小對阻力比值和 S/N 值均有極大的影響，貢獻率都超過 50%以上，此顯示當利用微氣泡對潛體減少阻力時，潛體的行進速度甚為關鍵，最好潛體在紊流的情況下以較適當的低速度行進。

電化學產氣裝置雖能顯著地提高減阻效率，然而因陽極的鎂合金於化學變化時會耗損。當欲提高產氣率以降低阻力時，所需提高的電流大小將導致鎂的急速耗損。因此，用電化學產生微氣泡以降低阻力的方式，比較適合不需考量成本、短時間使用，例如競速艇或水下兵器。

誌謝

感謝國防部軍備局中山科學研究院第四所吳貞欽博士的指導，以及唐國泉先生熱心地提供儀器、材料及實驗上技術的協助，由於他們的鼓勵及支持，才能使本實驗研究順利的完成，謹致感謝之意。

符號說明

CI	信賴區間
C_v	微氣泡注入比， $C_v = Q_a / (Q_a + Q_w)$
D	氣泡注入流場時潛體於流場中所受阻力，[g]
D_0	無氣泡時潛體於流場中所受阻力，[g]
DOF	自由度
DR	阻力比， $DR = D / D_0$
d	潛體模型之直徑，[m]
F	F 檢定值
f_E	誤差的自由度

G	氫氣產量，[c.c.]
G_a	氫氣產氣率，[c.c./min]
H	自由液面至潛體模型中心線之浸水深度，[m]
I	電流，[A]
L	潛體模型之長度，[m]
L_{Mg}	鋁金屬片外緣邊長，[mm]
MS	均方根
m_e	有效樣本大小
P	電功率，[W]
Q_a	氣泡生成率，[L/min]
Q_w	潛體表面邊界層內的流體流率，[L/min]
R	相關係數， $-1 \leq R \leq 1$
R^2	判定係數， $0 \leq R^2 \leq 1$
Re	雷諾數， $Re = VL/\nu$
S	標準偏差
SS	變異平方和
V	流場平均流速，[m/s]
$Var.$	變異量
W	水槽測試區寬度，[m]
x	水平座標位置，[m]
$\bar{y}$	平均阻力比
$(y)_{DR, pred}$	預測之阻力比
$(y)_{S/N, pred}$	預測之 S/N
α	顯著水準
δ	邊界層厚度，[m]
δ^*	邊界層位移厚度，[m]
ρ	貢獻度

參考文獻

- [1] McCormic, M.E., and Bhattacharyya, R., "Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis," Naval Engineers Journal, Vol. 85, pp. 11-16, 1973.
- [2] Dubnischchev, Y. N., Evseev, A. R., Sobolev, V. S., and Utkin, E. N., "Study of Gas-Saturated Turbulent Streams Using a Doppler Velocimeter," Journal of Applied Mechanical Technology Physics, Vol. 16, No. 1, pp. 114-119, 1975.

- [3] Madavan, N. K., Deutsch, S., and Merkle, C. L., "Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles," *Physical Fluids*, Vol. 27, pp. 356-363, 1984.
- [4] Merkle, C. L., and Deutsch, S., "Drag reduction. *Frontiers in Experimental Fluid Mechanics*," edited by M Gad-el-Hak, *Lecture Notes in Engineering*, Vol. 46, pp. 291-335, 1986.
- [5] Latorre, R., "Ship Hull Drag Reduction Using Bottom Air Injection," *Ocean Engineering Journal*, Vol. 24, No. 2, pp. 161-175, 1997.
- [6] Takahashi, T., Kakugawa, A., Kawashima, H., and Kodama, Y., "Drag Reduction Experimental by Means of Micro Air Bubbles Using a Ship Model with a Flat Bottom," *Proceeding of 66th General Meeting of SRI*, 1995.
- [7] Takahashi, T., Kakugawa, A., Makino, M., Yanagihara, T., and Kodama, Y., "Brief Report on Microbubble Experiments Using 50m-Long Flat Plate Ship," *Proceeding of 74th General Meeting of SRI*, 2000.
- [8] Kato, H., Iwashina, T., Miyanaga, M., and Yamaguchi, H., "Effect of Microbubbles on the Structure of Turbulence in a Turbulent Boundary Layer," *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 4, pp. 155-162, 1999.
- [9] Moriguchi, Y., and Kato, H., "Influence of Microbubble Diameter and Distribution on Frictional Resistance Reduction," *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 7, pp. 79-85, 2002.
- [10] Kawamura T., Fujiwara A., Takahashi T., Kato H., Matsumoto Y., and Kodama Y., "The Effects of the Bubble Size on the Bubble Dispersion and Skin Friction Reduction," In: *Proceedings of the 5th Symposium on Smart Control of Turbulence*, Tokyo, pp.145-151, 2004.
- [11] Wu, S.J., Hsu, C.H., and Lin, T.T., "Model Test of the Surface and Submerged Vehicles with the Micro-Bubble Drag Reduction," *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 83-93, 2007.
- [12] Kodama, Y., "Effect of Micro-bubbles Distribution on Skin Friction Reduction," *Proc. of the Int. Sympo. on Seawater Drag Reduction*, Newport, pp. 331-334, 1998.
- [13] Wedin, R., Davoust, L., Cartellier, A., and Byrne, P., "Experiments and Modeling on Electrochemically Generated Bubbly Flows," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, pp. 685-696, 2003.
- [14] 莊佳璋，特殊塗料對水面及水下載具之減阻效應評估，國防大學理工學院碩士論文，1999。
- [15] 陳耀茂，實驗計劃與解析法，高立圖書有限公司出版，台北，2001。
- [16] 李輝煌，田口方法－品質設計的原理與實務，高立圖書有限公司出版，台南，2000。
- [17] Holman, J. P., Experimental Methods for Engineers, 7th Edition, Chap. 13, pp. 99-106, McGraw-Hill Book Company, New York, 2001.
- [18] 黃信皇，微氣泡對渠道內液體紊流場減阻參數之實驗設計，國防大學理工學院碩士論文，2007。