

多針狀電極電液動通道流之電流場三維發展探討

The studies of 3-D electrical and flow fields development of EHD channel flow with
Multi-needle electrodes

呂金生^{a*}、張錦裕^b、吳懿軒^b、周炳煌^a

Jin-Sheng Leu^{a*}, Jiin-Yuh Jang^b, Yi-Hsuan Wu^b

^a 空軍航空技術學院飛機工程系

^b 成功大學機械工程系

^{a*}Department of Aircraft Engineering, Air Force Institute of Technology

^bDepartment of Mechanical Engineering, National Cheng-Kung University

摘要

本文利用數值方法分析具陣列式針狀電極之電液動流場及電場特性，採用理論為三維紊流流場及 Maxwell 電場方程式。數值結果將探討陣列式針狀電極電場產生的電液動效應對流場及水蒸汽蒸發率的影響，重點在描述沿流場流動方向不同位置剖面的電壓場、速度場以及濃度場，藉著觀察電流場的發展變化了解電液動效應對質傳效率提昇的機制。結果顯示電液動效應所產生的庫倫力會造成流場相當程度的擾動，會使流場形成一對渦旋產生二次流動，此渦旋沿著流場的流動方向逐漸成長穩定，提高流場的混合而提高水面的蒸發能力。

關鍵字：電液動技術、針狀電極、質傳

Abstract

The work numerically investigated the flow and electric fields characteristics of an EHD-induced forced convection channel flow with a needle-arrayed electrode system. Three-dimensional turbulent model and Maxwell equation were used to analyze the flow field. The results emphatically studied the electrical and flow fields around the needle electrode and their developments along the streamwise direction. It showed that the Coulomb force induced significant disturbances to the flow and formed a pair of vortex in the streamwise direction. The vortex was growing and enlarging along the stream, thus promoted the flow mixture and increased the water evaporating performance.

Keywords: EHD, needle electrode, mass transfer

一、前言

熱傳增強技術主要分為主動式及被動式兩類，被動式包含各式鰭片、渦旋產生器，主動式熱傳增強技術包含電液動 EHD (Electrohydrodynamic) 技術、磁液動技術、外加風扇、泵等設備。電液動技術利用置入的高電壓、低電流電場產生流場的第二驅動力—電

力，使得邊界層受到更強的擾動，大幅提昇熱傳效率。

2007 年 Laohalertdech et al. [1] 曾對 EHD 在熱傳增強的研究文獻做一完整的回顧，清楚描述 EHD 應用在單相(空氣及液體)及具相變化(凝結、沸騰)情況的熱傳增加效果。2012 年 Ashutosh et al. [2] 則對電液動技術應用在食品

及生物製程乾燥之相關文獻做一廣泛的介紹。Shakouri 和 Esmaeilzadeh [3] 以實驗的方式探討不同電極排列方式於水平通道內置放三維形狀熱源之電液動增強效應。Huang et al. [4] 利用四組針狀陣列電極以實驗探討有效的 EHD 熱傳增強冷卻系統，發覺在電極使用負電時的電暈效應較強，當電暈電流高於 $1\mu\text{A}$ 時就會產生明顯的熱傳增強效果。Chen et al. [5] 設計一針狀電極(4~11kV)，探討電極極性、傾斜角度、電極高度及接地型式對 EHD 使用於 LED 散熱問題之效益，實驗發現 0 到 20 度的電極傾斜角可使熱傳能力稍許增加；網格式的接地電極產生較大的熱傳增強效益。Yamamoto et al. [6] 使用三維層流及紊流模式分析具針狀電極的靜電集塵器內部流場。

電液動技術應用在食品及生物製程乾燥的研究中，Hashinaga et al. [7] 使用針狀電極以交流電產生電暈效應應用於提昇蘋果切片之乾燥速率，發現針狀電極所產生的離子風可提供比一般常溫空冷高 4.5 倍的乾燥效率。Lai et al. [8] 以實驗方法探討不同電極對水膜蒸發及食品乾燥的問題，實驗結果具 EHD 電場的薛吾爾德數(Sh)可提升 3-4 倍。Huang 和 Lai [9] 以數值方法探討線電極二維水平通道之 EHD 強制對流水膜蒸發問題，探討不同進口速度及供電電壓對水槽蒸發速率的增強情況。Leu et al. [10] 以利用數值模擬及實驗方法研究三維紊流場探討線電極在不同供電電壓、電極間距下，電液動效應對一強制對流通道流場質傳能力的影響。並利用最佳化方法-簡易共軛梯度法(SCGM)，以單位功率之下電液動質傳增益作為其目標函數，搜尋最佳的電極間距、電極高度值。

從以上之文獻回顧可看出目前在電液動技術有關質傳性能之研究，主要以實驗及二維之電液動數值分析來探討，電極都以一根或數根來產生電液動效應。本文使用三維數值方法分析具陣列式針狀電極系統的電液動問題，沿流場流動方向觀察速度場及濃度場的發展情況，透過了解其發展機制探討電液動效應對流場及蒸發效率的影響。

二、理論分析

本文探討一通道內的強制對流流場，空氣流經一個溼水面(wetted surface)，圖 1 為探討的物理模型示意圖。進口空氣流速及水蒸汽濃度分別為 u_{in} 、 C_{in} 。水面上方設置一 3×5 的陣列式針狀電極系統($SL=50\text{ mm}$, $ST=40\text{ mm}$)，電極距離水面高度為 $H=15\text{ mm}$ ，水面長度與寬度分別為 L_x ($L_x=330\text{ mm}$)、 L_z ($L_z=130\text{ mm}$)，風洞高度為 L_y ($L_y=100\text{ mm}$)。由於電場、流場及濃度場同時存在，需同時求解 Maxwell 電場、連續、動量及濃度場方程式等，方能正確描述流場及熱質傳特性受電場影響的情況。

為簡化問題，吾人作以下合理之假設：

- (1) 流體物理性質視為常數。
- (2) 電場方程式與流場方程式是單向耦合問題，即電場參數會影響流場，但電場不受流場參數的影響。
- (3) 流場中僅充滿中性原子及帶正電離子，電子並不會影響電場中之電位。

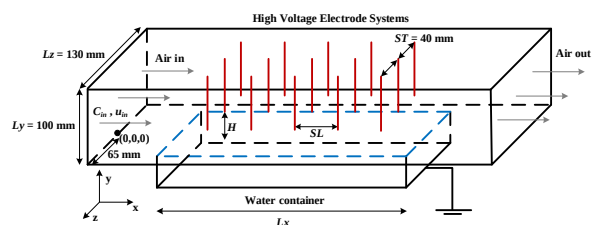


圖 1 物理模型示意圖

Maxwell 電場統御方程式如下：

Poisson 方程式：

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (1)$$

由電場 E 和電壓 V 的關係可整理成

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (2)$$

結合(1)、(2)可得

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (3)$$

電流連續方程式：

$$\nabla \cdot \vec{i} = 0 \quad (4)$$

電流定義方程式：

$$\vec{i} = \rho_c b_{ion} \vec{E} \quad (5)$$

結合(2)、(5)可得

$$\nabla \cdot (\rho_c b_{ion} \nabla V) = 0 \quad (6)$$

展開後得到

$$\frac{\rho_c^2}{\varepsilon_0} = \nabla \rho_c \cdot \nabla V \quad (7)$$

流場統御方程式如下：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) + \frac{\rho_c}{\rho} E_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i \bar{C} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - \bar{u}_j' \bar{C} \right) \quad (10)$$

其中 ε_0 是介電常數 ($\text{coul}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$)， $\bar{E}$ 是電場強度 (V/m)， ρ_c 是單位體積正離子及負離子電荷的總和，又稱為電荷密度 (coul/m^3)， D 為質傳擴散係數 (m^2/s)，方程式(9)右邊之最後一項為庫倫力。另外， $\bar{u}_i' \bar{u}_j'$ 稱為雷諾應力項(Reynolds stress)， $\bar{u}_j' \bar{C}$ 稱為雷諾質傳量(Reynolds mass flux)。κ-ε 紊流方程式則使用於求解雷諾應力項及雷諾質傳量。根據 Launder 和 Spalding[11]所建議之值為， $c_\mu=0.09$ 、 $c_1=1.44$ 、 $c_2=1.92$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。至於質傳係數與薛吾爾德數的計算方式採用下列方程式：

平均質傳係數 $\bar{h}_m$ 可定義為：

$$\bar{h}_m = \frac{1}{L_x L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_z} \frac{-D \frac{\partial C}{\partial y}}{C_{\text{water}} - C_\infty} dx dz \quad (11)$$

平均薛吾爾德數 Sh 可由下式求得：

$$Sh = \frac{\bar{h}_m L_x}{D} \quad (12)$$

其中 $\bar{m}_{ws}$ 為水面水蒸發質量流率， C_{water} 、 C_∞ 分別為水面、無窮遠處的水蒸汽濃度。

邊界條件：

假設進口速度 $u_{in}=1 \text{ m/s}$ ，進口濃度為相對溼度 40%(絕對溼度 0.009)。出口邊界條件為所有物理量梯度均為零， $\partial \phi / \partial n = 0$ 。固體表面邊界條件在風洞內壁設定為非滑動性邊界條件， $u=v=w=0$ ，電壓 $\partial V / \partial n = 0$ ，電荷密度 $\rho_c = 0$ 。電極側固定電壓($V=12 \text{ kV}$)，電荷密度在電極處假設為 ρ_∞ 其值為未知，且會隨著電極的置放位置不同而有所變化，濕水面固定電壓($V=0 \text{ V}$)，電荷密度 $\rho_c = 0$ ，濕水面濃度為相對濕度 100%。

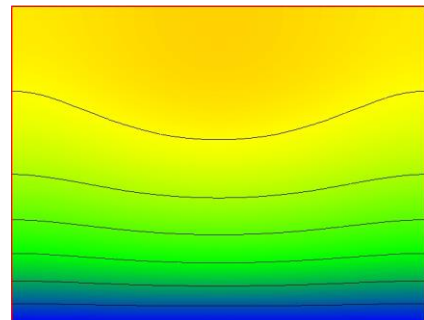
三、數值方法

本文數值模擬使用 CFD-RC 軟體。數值求解步驟先假設初步的電壓值及電荷密度分佈，再以電場 Poisson 方程式(3)式與電流連續方程式(7)式求出非均勻電荷密度分佈 ρ_c 及電場 E 。求得之電場所對應之庫倫力代入流場動量方程式(9)再以流場 SIMPLEC 法求出壓力場、速度場及濃度場。數值方法求解步驟如參考文獻[10]所示，在此不再贅述。本文物理模型之網格數為 850,542。數值計算區域為 x 方向入口區 200 mm，中段濕水面區 330 mm，出口區 200 mm。本文所選取之收斂條件為以整個計算區域兩次疊代之殘值最大相對誤差小於 10^{-4} 為基準。

四、結果與討論

圖 2 至圖 4 是數值模擬供電電壓 12 kV，電極高度 15 mm 時，沿流動方向(x 方向)的 y - z 剖面電壓分佈、流場速度分佈及水蒸汽濃度分佈。圖 3 可看出電壓分佈從針狀電極處的最高電壓以橢圓球型漸次往外擴散至下方水面的接地處，在圖 2(b)、圖 2(c)、圖 2(d)的電極處及電極間區域是電壓分佈最強的區域。也就是說電液動效應較強的區域是在針狀電極分佈的區域，這個區域呈現不均勻的電壓分佈，尤其在電極附近更是劇烈的不均勻現象，因此在這附近會產生較強的電場及庫倫力。但是在無電極的區域，如圖 2(a)、圖 2(e)，電壓分佈則明顯的減弱，所以這些區域的電液動效應不明顯。

圖 3 是表示與圖 2 相同參數及剖面位置的速度分佈發展情況。流場進口條件為進口速度 1 m/s，進口相對濕度 40%。流體由上游($x=0 \text{ mm}$)流至下游。圖 3(a)為流體在入口區的發展情況，尚未進入電極區，此時流場均勻流動，無明顯的渦漩或擾動，只有因壁面存在造成的邊界層及小規模的渦漩。當流體進入電極區後，



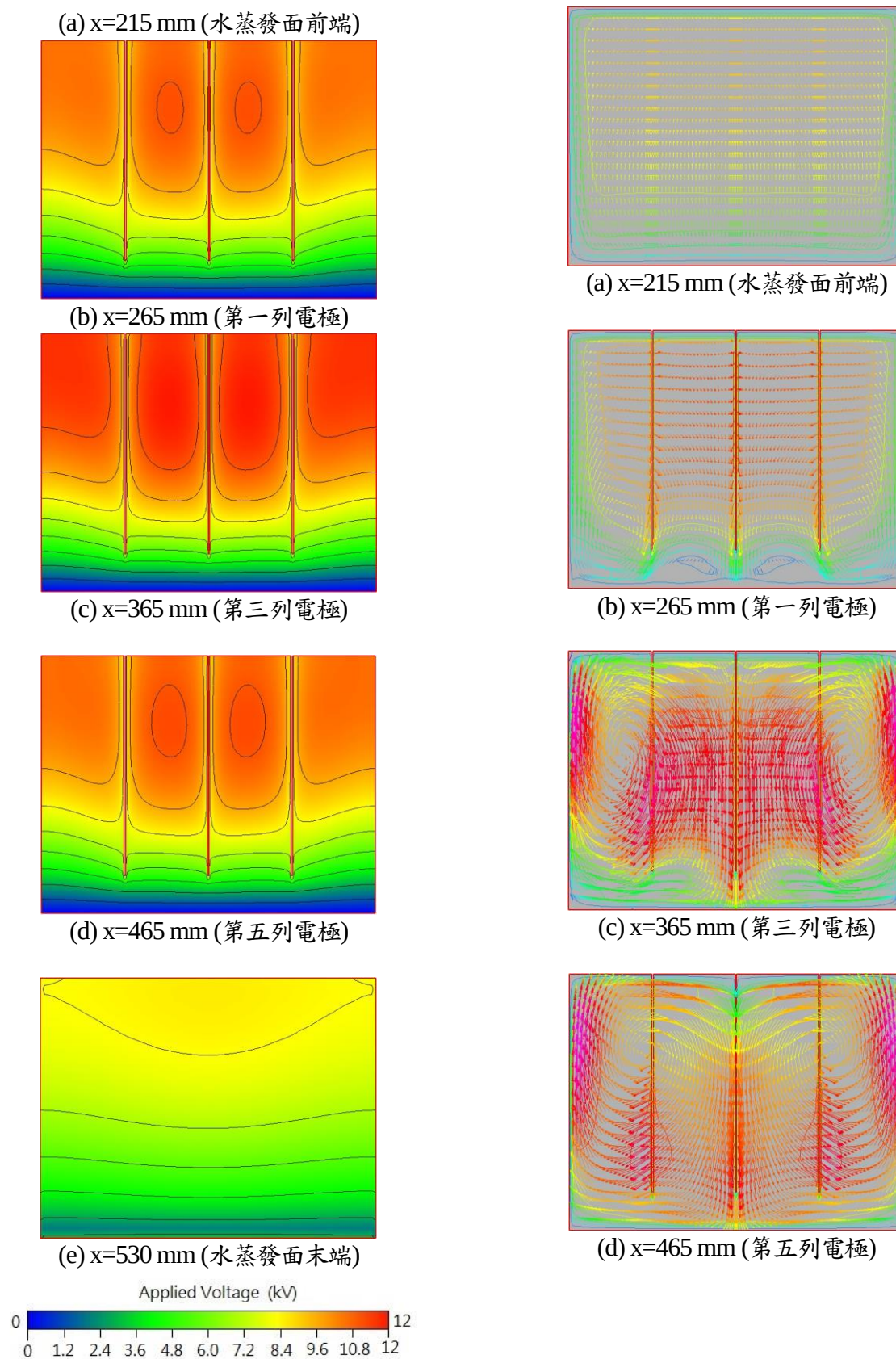
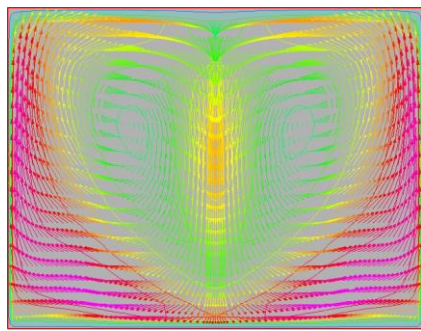


圖 2 沿流動方向(x 方向)剖面的電壓分佈



(e) $x=530$ mm (水蒸發面末端)

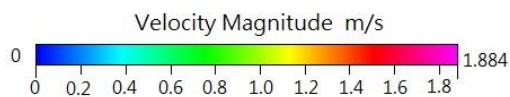


圖 3 沿流動方向(x 方向)剖面的流場速度分佈

如圖 3(b)、圖 3(c)、圖 3(d)，圖中明顯顯示電極對流體的驅動力，流體從電極處噴流至底部，增加水面的擾動，在第三列電極處(圖 3(c))可看出明顯的一對渦旋，其實這對渦旋從第一列電極處即開始形成，經過陣列式的電極區渦旋的規模愈來愈大，在第五列電極處(圖 3(d))時，渦旋已發展的很具體很大，在圖 3(e)則顯示更清楚但速度分佈更均勻的渦旋。

圖 4 為電液動效應對流場水蒸汽濃度影響，在沒有提供電場時(圖 4(a))，可看出水蒸汽濃度在壁面附近呈現明顯的邊界層現象，濃度值由濕水面側的高濃度向自由流區域遞減。在施加電場後，如圖 4(b)，4(c)，4(d)中可以看出在電極處和濕水面間形成的渦流增加了空氣的對流程度，順勢提高電極下游區域的水蒸汽濃度。因此增強空氣側的水蒸汽蒸發能力。但是由於下游的濕度逐漸增高，所以濃度梯度降低，水面的蒸發量會逐次減少(如圖 4(e)，4(f))。

五、結論

本文以數值方法分析電液動效應在一個三維紊流通道流場中對濕水面的蒸發能力的影響，數值結果顯示流場中不同位置的 y - z 剖面的電壓場、速度場以及濃度場。並藉由對電極附近的流場、濃度場及電壓場特性的觀察，了解 EHD 對質傳效率提昇的機制。結果顯示電液動效應所產生的庫倫力會造成流場相當程度的擾動，會使流場形成一對渦旋，沿著流場的

流動方向逐漸成長穩定，提高流場的混合而提高水面的蒸發能力。

誌謝

本論文為科技部計畫編號 MOST 104-2221-E-006-170-MY2 之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] Laohalertdecha S., Naphon P., and Wongwises S., A review of electrohydrodynamic enhancement of heat transfer, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.11, pp.858-876, 2007.
- [2] Ashutosh S., Valerie O., and Vijaya R., "A Comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food and bio-processing", *Drying Technology*, Vol. 30, No. 16, pp.1812-1820, 2012
- [3] Shakouri P. M., Esmaeilzadeh E., "Experimental investigation of convective heat transfer enhancement from 3D-shape heat sources by EHD actuator in duct flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.35, pp.1383-1391, 2011.
- [4] Huang R. T., Sheu W. J., and Wang C. C., "Heat transfer enhancement by needle-arrayed electrodes - An EHD integrated cooling system", *Energy Conversion and Management*, Vol.52, pp.1789-1796, 2009.
- [5] Chen I. Y., Guo M. Z., Yang K. S., and Wang C. C., "Enhanced cooling for LED lighting using ionic wind", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp.285-291, 2013.
- [6] Yamamoto T., Morita Y., Fujishima H., and Okubo M., "Three-dimensional EHD simulation for point corona electrostatic precipitator based on laminar and turbulent models", *Journal of Electrostatics*, Vol.64, pp.628-633, 2006.
- [7] Hashinaga F., Bajgai T. R., Isobe S., and Barthakur N. N., "Electrohydrodynamic (EHD) drying of apple slices", *Drying Technology*, Vol.17, No.3, pp.479-495, 1999.

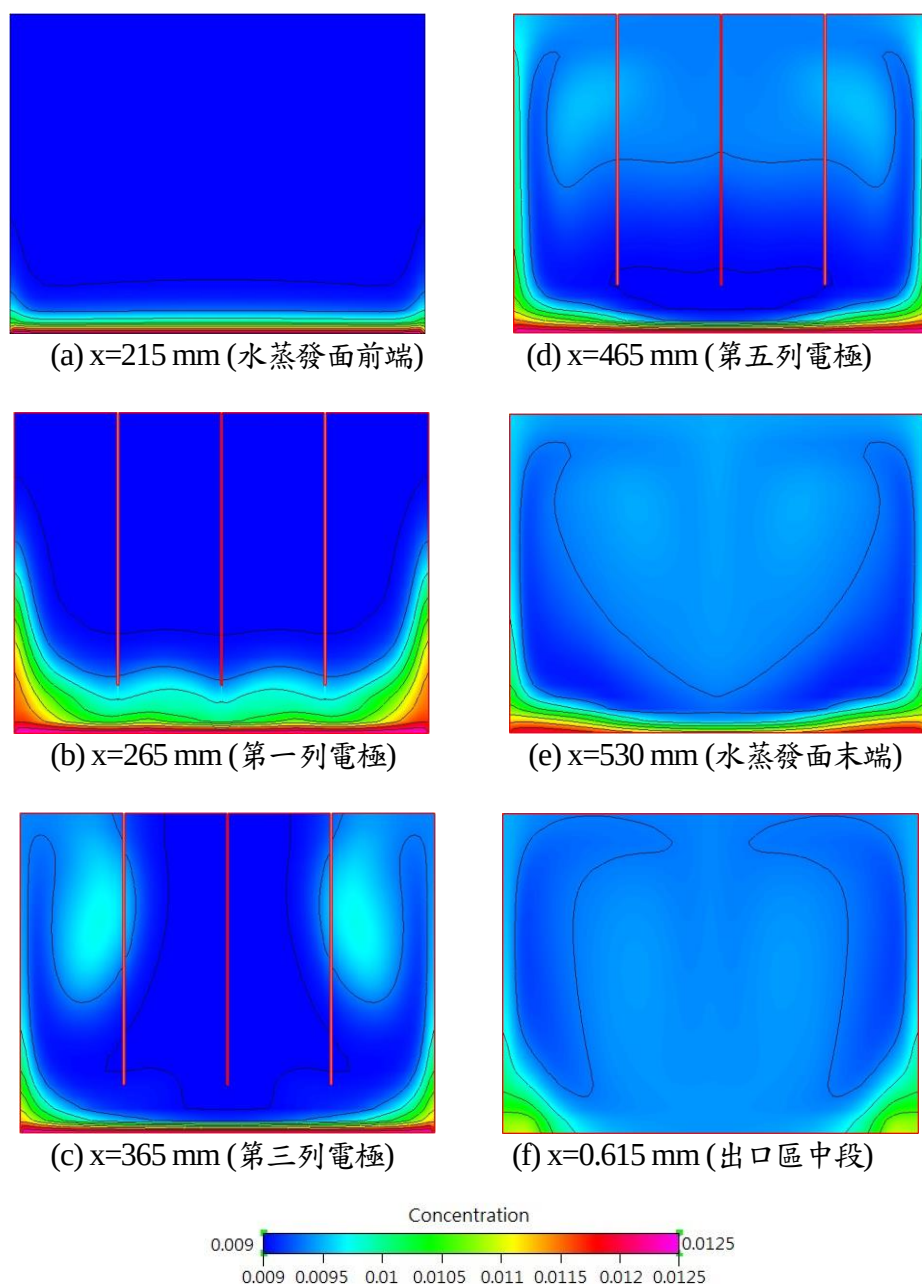


圖 4 沿流動方向(x 方向)剖面的流場水蒸汽濃度分佈

- [8] Lai F. C., and Sharma R. K., “EHD-Enhanced drying with multiple needle electrode”, *Journal of Electrostatics*, Vol.63, pp.223-237, 2005.
- [9] Huang M., and Lai F. C., “Numerical study of EHD-enhanced water evaporation”, *Journal of Electrostatics*, Vol.68, pp.364-370, 2010.
- [10] Leu J. S., Jang J. Y., and Wu Y. H., “Optimization of the wire electrode height and pitch for 3-D Electrohydrodynamic enhanced water evaporation”, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.118, pp.976-988, 2018.
- [11] Launder, B.E., and Spalding, D.B., “The numerical computation of turbulent flows”, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.