

旋轉磁頭/磁帶界面間之分子稀薄效應分析

林俊源
機械工程系

摘要

本文主要在建立一維磁頭/磁帶界面間之粗糙度與稀薄氣體效應磨潤模式，利用 Christensen 統計膜厚平均的概念考慮粗糙度效應，與 Hwang 等人針對分子平均自由徑的高階邊界條件，考慮稀薄氣體效應修正廣義雷諾方程式。並結合磁帶彎曲方程式與半經驗接觸模式，再使用有限差分法來模擬計算磁頭/磁帶的間隙值、空氣軸承壓力值與磁頭/磁帶之間的接觸壓力。為加快數值收斂，疊代時吾人引進一虛擬勁度參數。結果將與 Talke 之實驗值和數值模擬比較，但本研究壓流率模式結合粗糙度效應分析，估計之磁帶變形間隙值將更符合 Talke 量測實驗值。同時，配合降低磁帶速度與提高磁帶張力，將有助於最小間隙值的獲得，以減少磁頭/磁帶之間摩擦，對發展更高紀錄密度的磁帶，將有所助益。經數值模擬之結果，獲得結論如下：

1. tape head 磁頭，當磁帶之出粗糙度考量時，相對的空氣軸承壓力大，使得磁頭/磁帶間間隙越靠遠磁頭外形表面。
2. slot head 磁頭，當磁帶之出粗糙度考量時，相對的空氣軸承壓力大，使得磁頭/磁帶間間隙越靠遠磁頭外形表面。；兩種磁頭在間隙的變化上與空氣軸承壓力值，趨勢一致。

壹、緒論

一、研究動機

由於資訊工業的進展，資料儲存系統的容量不斷擴增，然而要增加磁性資料儲存系統的密度，就必需提高磁頭的磁感應解析度，因此降低磁頭/磁帶的間隙，以增加磁感應解析度，但此也增加磁頭/磁帶間接觸的可能性，導致彼此間的磨耗，故如何使磁頭/磁帶間之間隙降低，提高記錄磁密度的應用。

二、研究目的

又不使磁頭或磁帶損壞，因此研究方法最關鍵處，就是整合雷諾方程式、磁帶變形方程式與接觸壓力方程式而發展出的空氣軸承表面(Air Bearing Surface, A.B.S)系統，將降低磁頭/磁帶之間的間隙模擬結果，應用在增加磁感應解析度，並且減少磁頭/磁帶間接觸磨耗的可能性，達到增加磁性資儲存系統容量的目的。

三.文獻回顧

一般在磁頭/磁帶系統中，針對磁頭系統的動作方式，如圖 1 所示。Stahl (1974)等人建立一維磁頭/磁帶界面的模式，使用數值方法中的有限差分法，求解可壓縮之雷諾方程式與磁帶方程式，並藉由猜測磁帶的初始位置，得到收斂後之穩定狀態的磁帶位置。

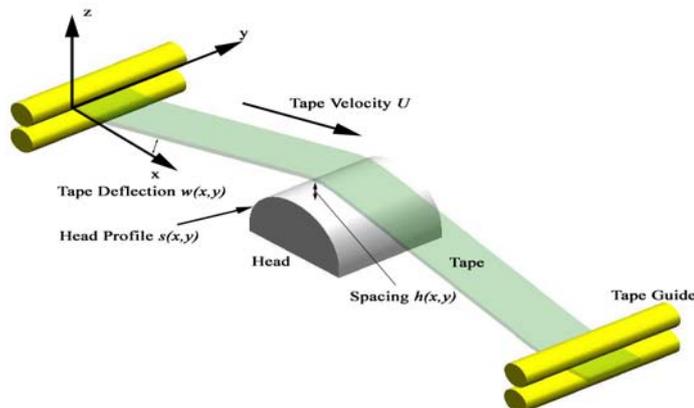


圖 1 磁頭/磁帶界面關係

為了改良上述方法的缺點，Lacey 與 Talke (1990)使用一個新的演算法，來求解穩定狀態的飛行高度，而此演算法主要合併空氣軸承的勁度近似值到磁帶方程式中，以得到更快、更穩定的收斂值；此法進階也可使用於更複雜的磁頭外形。之後，Lacey 與 Talke (1992)指出由於磁頭/磁帶界面，在局部的接觸過程中，將造成表面的粗糙度被壓縮，故原來的方程式需重新修正；而藉由多次的實驗量測後，經過數據整理得知一接觸壓力的經驗方程式模擬接觸壓力值，另外利用雷射干涉法來進行磁頭/磁帶間間隙值的實驗量測，最後將數值模擬的結果與實驗值互相比對之，本文主要也是以此論文結果做比對。

Heinrich 與 Connolly (1992)使用有限元素法來模擬三維磁頭/磁帶的模型，求解出穩態可壓縮的雷諾方程式與磁帶運動方程式，並和二維模型互相比對數值，發現空氣軸承的效應與磁頭/磁帶之間間隙，會隨著磁帶的高速運轉而更加明顯。而現實的情況中，磁頭/磁帶的接觸瞬間，將會發生磨耗現象，故 Lacey 與 Talke (1992)將磨耗因素加以探討分析。Lacey 與 Talke (1993)進一步考量磁帶所造成的剪力效應，並利用有限元素法(Finite Element Method, FEM)求解磁帶運動方程式。Wu 與 Talke (1996)將表面粗糙度的效應考慮在一維磁頭/磁帶的界面中，並研究隨著不同表面粗糙度之特性，對典型磁頭外形的影響。Wu 與 Talke (1998)利用 FEM 的不同網格化方法與數值法，來求解於二維線性磁頭/磁帶之間間隙、空氣軸承壓力與接觸壓力。

由於 Fukui 與 Kaneko (1990) 的壓流率三條修正式在逆納生數(inverse Knudsen number) $D=0.01, 0.15$ 和 5.0 處有不連續，故 Hwang (1996)等人利用高階滑移邊界條件來加以修正，得到一含 a, b, c 三項修正係數，具稀薄氣體效應的壓流率方程式，對模擬可壓縮流體潤滑作用，可運用到更廣泛的 Knudsen Number 範圍。Li 與 Weng (1997)則將此含稀薄氣體效應的壓流率修正式，結合穩態雷諾方程式，得到廣義雷諾方程式，運用到模擬磁頭/磁碟上的壓力分佈情形，其結果與實驗值相當吻合，Hsu (2004) 等人結合 Hwang (1996) 等人的高階滑移模式與 Christensen (1971) 膜厚平均法的粗糙度效應，應用在模擬磁頭/磁片的磨潤行為，並得好的結果。因此本研究主要建立一維磁頭/磁帶界面間之磨潤模式，探討粗糙度與稀薄氣體效應，對間隙值與空氣軸承壓力值之影響。藉由求解此一維廣義雷諾方程式，求出空氣軸承壓力與間隙關係式，進而配合磁帶彎曲方程式，模擬出磁頭/磁帶之間間隙值、空氣軸承壓力值與接觸壓力值，以期能更了解不同形式磁頭/磁帶的磨潤行為。

貳、研究方法、進行步驟

一. 理論分析

一維磁頭/磁帶之界面模式，如圖 2 所示。介於磁頭/磁帶界面間之空氣軸承，若考慮粗糙度效應與稀薄氣體效應下，其穩態可壓縮之雷諾方程式為：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho E(h^3)}{12\mu} Q_p(D) \frac{\partial P}{\partial x} - \rho U E(h) \right] = 0 \quad (1)$$

其中， μ 為空氣黏度， h 為空氣軸承間隙， $E(h)$ 為對高度取期望值考慮 Christensen (1971) 膜厚平均法的粗糙度效應， P 為空氣軸承壓力，而 U 為磁帶速度；並定義 x 方向為磁帶移動方向。 Q_p 為壓流率(Hwang, 1996)，定義如下：

$$Q_p = 1 + 3\sqrt{\pi} \cdot a \cdot D^{-1} + 6 \cdot b \cdot D^c \quad (2)$$

a , b , 和 c 為三項修正係數，其數值分別為

$$a = 0.01807, b = 1.35355, c = -1.17468 \quad (3)$$

而 D 為 Inverse Knudsen Number，定義為

$$D = \sqrt{\pi} / 2K_n \quad (4)$$

其中 $K_n = \lambda/h$ 為 Knudsen number， λ 為一大氣壓下的空氣分子平均自由徑。

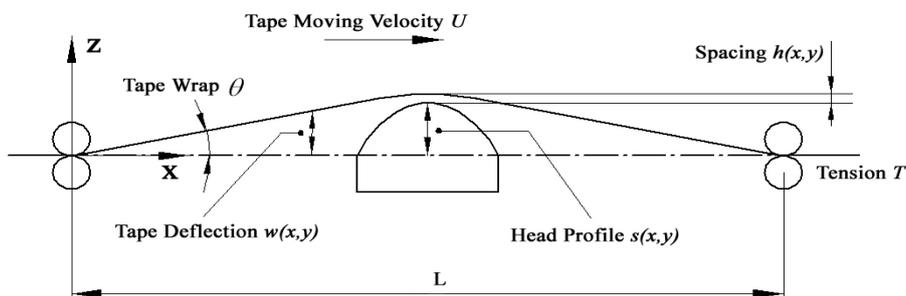


圖 2 一維磁頭/磁帶之界面關係

假設磁帶為一簡支型之無限寬度平板，而其變形量 w ，可由磁帶彎曲方程式得之 (Lacey 與 Talke, 1992)：

$$K \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - (T - \rho U^2) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k \Delta w = P - P_{am} + P_c \quad (5)$$

其中， T 為磁帶張力， ρ 為磁帶密度， P_{am} 為一大氣壓力， $k \Delta w$ 為一耦合條件式， P_c 為界面間因間隙值不同而存在之接觸壓力；而磁帶彎曲勁度(bending stiffness) K 為

$$K = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (6)$$

其中， E 為楊氏模數、 t 為磁帶厚度與 ν 為蒲松比。當磁頭/磁帶之間的接觸情況不符合接觸條件，則此時的接觸壓力 P_c 為 0；而在本研究中，接觸壓力的計算方式，採用兩種方法來運算。首先由 Lacey 與 Talke (1992) 的研究文獻中可知，當磁頭/磁帶界面的間隙小於其半經驗公式下的間隙值，會於此界面間產生不同大小的接觸壓力值 P_c ，故經驗上的非線性接觸模式為

$$P_c = \begin{cases} 0 & h \geq \alpha \\ \beta(1 - \frac{h}{\alpha})^2 & h < \alpha \end{cases} \quad (7)$$

其中， α 為磁頭/磁帶初始接觸之間隙值， β 為磁頭/磁帶接觸之間隙值為零時，所存在之接觸壓力值常數。空氣薄膜間隙 h 與磁頭 s ，磁帶外形 w 的關係式，如圖 2 所示：

$$h = w - s \quad (8)$$

二. 數值方法

使用有限差分法來離散化穩態可壓縮之雷諾方程式與磁帶彎曲方程式，再配合 Matlab 程式語言的撰寫，以完成模擬一維磁頭/磁帶界面模式之建立。先求出收斂的空氣軸承壓力，再帶入磁帶彎曲方程式中，得到收斂的磁帶位置；若不收斂，則重複疊代，直到收斂為止，以完成一維磁頭/磁帶界面模式之建立。經化簡後的雷諾方程式如下：

$$\bar{A}_i P_{i+1} + \bar{B}_i P_i + \bar{C}_i P_{i-1} = R_i \quad (9)$$

其中

$$\bar{A}_i = P_{i+1} h_{i+1/2}^3 + 6a \lambda P_{i+1} h_{i+1/2}^2 + 6b(\sqrt{\pi}/2)^c P_{i+1} h_{i+1/2}^{3+c} / \lambda^c - 3\mu U \Delta x h_{i+1/2}$$

$$\begin{aligned} \bar{B}_i = & -P_i h_{i+1/2}^3 - 6\lambda P_i h_{i+1/2}^2 - 6b(\sqrt{\pi}/2)^c h_{i+1/2}^{3+c} / \lambda^c - P_i h_{i-1/2}^3 \\ & - 6\lambda P_{i-1/2} h_{i-1/2}^2 - 6b(\sqrt{\pi}/2)^c P_{i-1/2} h_{i-1/2}^{3+c} / \lambda^c - 3\mu U \Delta x h_{i+1/2} + 3\mu U \Delta x h_{i-1/2} \end{aligned}$$

$$\bar{C}_i = P_{i-1} h_{i-1/2}^3 + 6\lambda P_{i-1} h_{i-1/2}^2 - 6b(\sqrt{\pi}/2)^c P_{i-1/2} h_{i-1/2}^{3+c} / \lambda^c - 3\mu U \Delta x h_{i-1/2}$$

而簡化後的磁帶彎曲方程式為

$$A_i w_{i+2} + B_i w_{i+1} + C_i w_i + E_i w_{i-1} + F_i w_{i-2} = Q_i \quad (10)$$

其中

$$A_i = \frac{\mathbf{K}}{\Delta x^4}$$

$$B_i = \frac{-4\mathbf{K}}{\Delta x^4} + \frac{\rho U^2 - T}{\Delta x^2}$$

$$C_i = \frac{6\mathbf{K}}{\Delta x^4} - 2 \frac{\rho U^2 - T}{\Delta x^2} + k_i$$

$$E_i = B_i$$

$$F_i = A_i$$

$$Q_i = P_i - P_{atm} + P_c + k_i w_i$$

為了避免磁帶彎曲方程式在求解過程中的不穩定性，故在方程式中加入一近似於空氣軸承勁度的虛擬勁度 k ，以加速收斂， k 之定義為：

$$k_i = \frac{|P_i - P_{atm}|}{h_i} \quad (11)$$

此虛擬勁度等同於在磁頭/磁帶間，加入一個彈簧，可使磁帶不會移動太大的距離。當程式收斂時，此彈簧力 $k\Delta w$ 近似於 0 值。故虛擬勁度並不能影響最終的求解，其目的主要增加磁頭/磁帶之間的耦合效應，以達到迅速收斂的結果。磁帶變形量為

$$\Delta w = w_i^{j+1} - w_i^j \quad (12)$$

本程式中的收斂條件如下：

1. 空氣軸承壓力的收斂判斷式為

$$\left| \frac{P_i^{j+1} - P_i^j}{P_i^j} \right| \leq 0.001 \quad (13)$$

2. 磁帶彎曲方程式的收斂判斷式為

$$\left| w_i^{j+1} - w_i^j \right| \leq 0.01 \times h_i \quad (14)$$

當磁帶變形量未達收斂標準，則需使用磁帶調整公式，來重新調整磁帶的新位置，以協助程式的求解。磁帶調整公式如下式

$$w_i^{j+1} = w_i^j + c \cdot r (w_i^{j+1} - w_i^j) \quad (15)$$

其中 c 與 r 稱為可變動的鬆弛係數，其值各為 1.0 與 0.5。鬆弛係數 r 在每一次疊代時，單調遞減 10% 直到磁帶收斂位置，亦即非加權平均變形量 Δw 改變符號。 c 為一額外之鬆弛係數，用於當 w 產生負的間隙值或者在任一節點的間隙值超過兩倍等特殊情況。此時，吾人必須計算 c 值，使得在任一節點間隙值的改變因子，不會超過比例係數 r 。

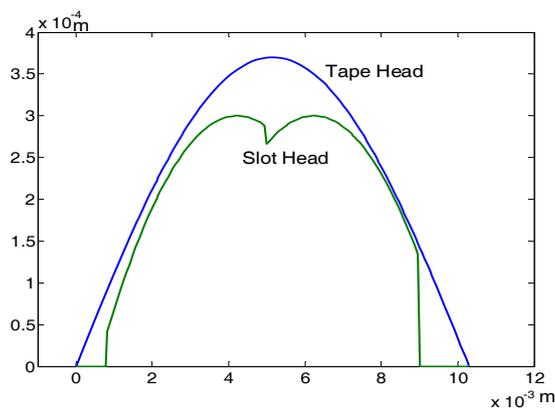


圖 3 磁頭幾何外型圖

參. 結果與討論

本研究與 Talke[2]學者的結果比對，該學者於磁頭/磁帶的模擬分析，相關的參數條件列在表 1 所示，本研究 tape head 磁頭比對如圖 4(a)、圖 4(b)所示，slot head (狹縫) 磁頭比對如圖 5(a)、圖 5(b)所示，間隙圖形與空氣軸承壓力圖中可知，本論文的模擬結果，與 Talke[2]學者的結果所模擬之分析結果磁帶變形趨勢符合空氣軸承壓力接近。

本研究進一步探討改變係數會有什麼影響，所以針對這些假設性的係數，先做一些合理性的改變，相關係數如表 3 所示，經過整合分析後，如下：

1. tape head 磁頭比對如圖 4(a)、圖 4(b)所示，間隙圖形與空氣軸承壓力圖中可知，當磁帶之出

粗糙度考量時，相對的空氣軸承壓力大，使得磁頭/磁帶間間隙越靠遠磁頭外形表面。

2. slot head 磁頭比對如圖 5(a)、圖 5(b)所示，間隙圖形與空氣軸承壓力圖中可知，當磁帶之出粗糙度考量時，相對的空氣軸承壓力大，使得磁頭/磁帶間間隙越靠遠磁頭外形表面。；兩種磁頭在間隙的變化上與空氣軸承壓力值，趨勢一致。

肆. 結論

本文經研究數值模擬之結果，獲得結論如下：

1. tape head 磁頭，當磁帶之出粗糙度考量時，相對的空氣軸承壓力大，使得磁頭/磁帶間間隙越靠遠磁頭外形表面。
2. slot head 磁頭，當磁帶之出粗糙度考量時，相對的空氣軸承壓力大，使得磁頭/磁帶間間隙越靠遠磁頭外形表面。；兩種磁頭在間隙的變化上與空氣軸承壓力值，趨勢一致。

參考資料

- Fukui, S. and Kaneko, R., 1990, A Database for Interpolation of Poiseuille Flow-rate for High Knudsen Number Lubrication Problem, ASME Journal of Tribology, Vol. 112, pp. 78-83.
- Heinrich, J. C. and Connolly, D., 1992, Three- dimensional finite element analysis of self-acting foil bearings, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 100, pp. 31-43.
- Hwang, C. C., Fung, R. F., Yang, R. F., Weng, C. I. and Li, W. L., 1996, A new modified Reynolds equation for ultra-thin film gas lubrication, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 32, pp. 344-347.
- Lacey, C. and Talke, F. E., 1990, A Tightly Coupled Numerical Foil Bearing Solution, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 6, pp. 3039-3043.
- Lacey, C. and Talke, F. E., 1992, Measurement and Simulation of Partial Contact at the Head/Tape Interface, Journal of Tribology, Vol. 114, pp. 646-652.
- Lacey, C. and Talke, F. E., 1992, Simulation of Wear of Tape Head Contours, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 5, pp. 2554-2556.
- Lacey, C. and Talke, F. E., 1993, The Effect of Head Wear and Tape Shear on the Head/Tape Interface, STLE, Tribology Transactions, Vol. 36, pp. 387-392.
- Li, W. L. and Weng, C. I., 1997, Modified average Reynolds equation for ultra-thin film gas lubrication considering roughness orientations at arbitrary Knudsen number, Wear, Vol. 209, pp. 292-300.

Stahl, K. J. White, J. W. and Deckert, K. L., 1974, A Tightly Coupled Numerical Foil Bearing Solution, IBM J. Res. Dev., pp. 513-520.

Wu, Y. and Talke, F. E., 1996, The Effect of Surface Roughness on The Head-Tape Interface, Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 376-381.

Wu, Y. and Talke, F. E., 1998, Finite Element Based Head-Tape Interface Simulation Include Head-Tape Surface Asperity Contacts, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 4, pp. 1783-1785.

Tze-Chi Hsu, Hsiu-Lu Chiang and Chun-Yuan Lin, 2004 "Application of modified Reynolds equation

for gas lubrication on air bearing analysis", Industrial Lubrication and Tribology. (SCI, accepted to be print)

H. Christensen, and K. Tonder, 1971, "The Hydrodynamic Lubrication of Rough Bearing Surfaces of Finite Width," ASME Journal of Lubrication Technology, Vol.93, pp.324-330.

圖表

表 1 Talke[4]模擬參數之條件表

磁頭幾何外型：	
磁頭半徑 (R)	$2.04 \times 10^{-2} \text{ m}$
支撐架兩端距離 (L)	$8.43 \times 10^{-2} \text{ m}$
磁頭左端距離	$3.47 \times 10^{-2} \text{ m}$
磁頭右端距離	$4.97 \times 10^{-2} \text{ m}$
最大滲透距離	$6.35 \times 10^{-3} \text{ m}$
磁帶參數：	
楊氏模數 (E)	$5.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
密度 (ρ)	$2.07 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$
張力 (T)	$2.77 \times 10^2 \text{ N/m}$
速度 (U)	2.54 m/s
空氣軸承參數：	
空氣黏度 (μ)	$1.81 \times 10^{-5} \text{ N-s/m}^2$
氣體分子平均自由徑 (λ)	$6.35 \times 10^{-8} \text{ m}$
大氣壓力 (P_{atm})	$0.84 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
數值參數：	
平均間隔的節點數	665

表 2 Talke[4] 狹縫磁頭模擬參數之條件表

磁頭幾何外型：	
磁頭半徑 (R)	$2.25 \times 10^{-2} \text{ m}$
支撐架兩端距離 (L)	$10.3 \times 10^{-2} \text{ m}$
磁頭左端距離	$0.824 \times 10^{-3} \text{ m}$
磁頭右端距離	$8.96 \times 10^{-3} \text{ m}$
最大滲透距離	$0.30 \times 10^{-3} \text{ m}$
磁帶參數：	
楊氏模數 (E)	$5.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
密度 (ρ)	$2.07 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$
張力 (T)	$2.77 \times 10^2 \text{ N/m}$
速度 (U)	2.54 m/s
空氣軸承參數：	
空氣黏度 (μ)	$1.81 \times 10^{-5} \text{ N-s/m}^2$
氣體分子平均自由徑 (λ)	$6.35 \times 10^{-8} \text{ m}$
大氣壓力 (P_{atm})	$0.84 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
數值參數：	
平均間隔的節點數	201

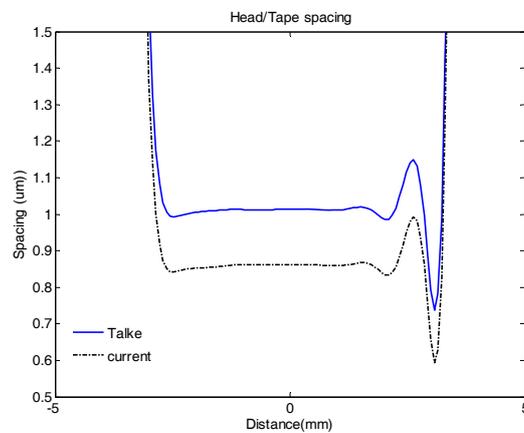
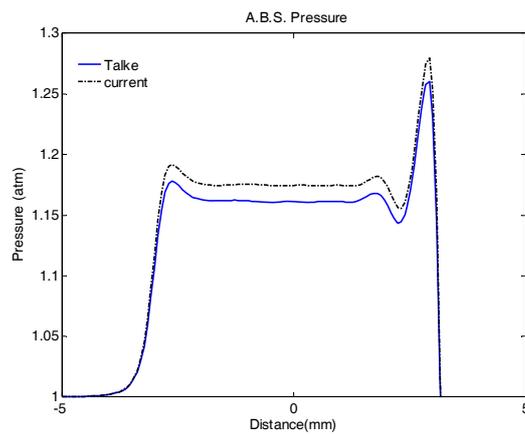


圖 4(a) 模擬值與 Talke 的 tape head 結果值之間隙比較；(b) 模擬值與 Talke 的 tape head 結果值之間隙比較圖

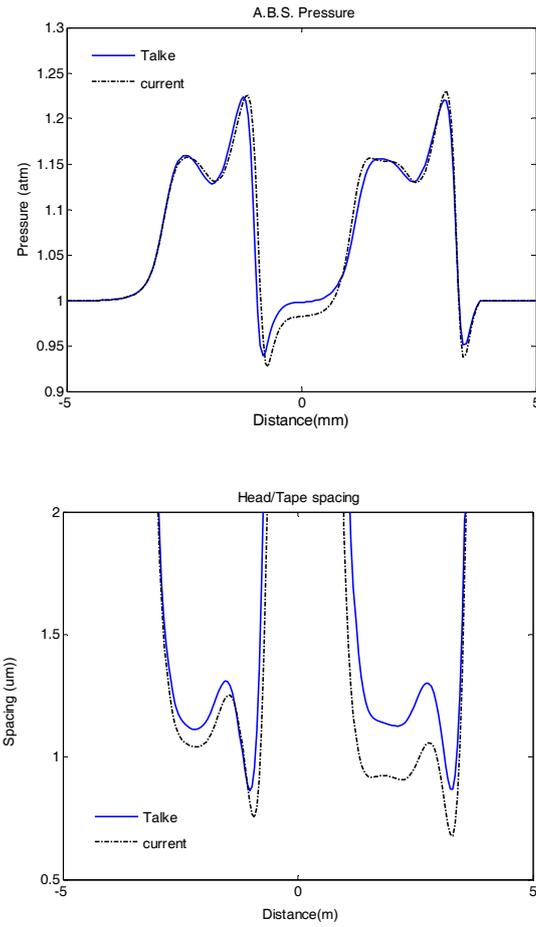


圖 5 (a) 模擬值與 Talke 的 slot head 結果值之間隙比較圖：(b) 模擬值與 Talke slot head 的結果值之間隙比較圖