

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※

※

※ 表面加粗對磁碟機滑橇飛行特性的影響 ※

※

※※※

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-109

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

計畫主持人：盧中仁

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：台灣大學機械系

中華民國 90年 9月 28日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

表面加粗對磁碟機滑橇飛行特性的影響

Effects of Textured Surfaces on the Flying Characteristics of the Slider of Hard Drives

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-109

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：盧中仁 台灣大學機械系

計畫參與人員：邱顯森 台灣大學機械系

中文摘要

現今的硬碟碟片大都具有非常平滑的表面以增加貯存密度。為了降低滑橇和平滑碟片間的黏滯力在滑橇的ABS上加上一些凸起。用傳統的數值方法分析這些凸起對滑橇飛行特性的影響必需在整個ABS面使用非常細的網格，這樣的網格大幅的降低計算效率。本計畫發展了一套具有局部加密功能的自調適性多重網格程式，比較其和傳統多重網格法的計算效能。最後利用這個程式分析表面加粗對滑橇飛行特性的影響。

關鍵詞：滑橇、飛行特性、硬碟、多重網格法

Abstract

Modern hard-disk drives employ very smooth disks to increase the areal density. Some asperities are put on the ABS to reduce the stiction force between the slider and disk. Traditional numerical methods must use globally fine mesh in order to accurately analyze the pressure distribution. However, this kind of fine mesh significantly deteriorates the computation efficiency. In this project, we developed an adaptive multigrid program for solving the Reynolds equation under complex ABS.

This program only refines the mesh around the grid points where the local truncation exceeds the given tolerance. An *H*-shaped slider is used to show the efficiency of this program. Finally, the effect of the asperities on the flying characteristics is examined.

Keywords: slider, flying characteristics, hard disk, multigrid method

緣由與目的

硬碟機是今日電腦系統中儲存數位資料最迅速有效的設備。硬碟機的主要操作原理是利用在磁片上方飛行的讀寫頭將資料寫入（讀出）磁片上的磁性記錄層。讀寫頭位於滑橇（slider）的尾端。當磁碟機運轉時，碟片和滑橇間的相對運動使得流經兩者間的空氣產生足夠的壓力將滑橇托起，這樣的機制稱為自啟動式的空氣軸承（self-acting air bearing）。滑橇和空氣軸承的接面稱為空氣軸承面，簡稱ABS（air bearing surface）。ABS的形狀對讀寫頭的飛行高度和穩定性有決定性的影響。

ABS的設計必須仰賴正確有效的數值模擬方法。過去已有許多研究者從事這樣的模擬程式的開發（Castelli and Pirvics, 1968; White and Nigam, 1980; Garcia-Suarez et al., 1984），也

獲得相當的成功，但這些程式仍然有其限制。目前新的磁碟機的設計，為了減少滑橈和碟片間的吸附力，在磁片或 ABS 上加工製造一些微小的凸起。加工的方法有光蝕刻(Kasamatsu et al., 1995)和雷射脈衝(Ranjan et al., 1991; Baumgart et al., 1995)等。現存的程式並無法有效的模擬這些小凸起對滑橈飛行特性的影響，問題的癥結在於所用的網格以及求數值解的流程。

空氣軸承的行為主要是由雷諾方程式(Reynolds equation)所描述。雷諾方程式為一非線性偏微分方程式，必需用數值方法求解。常用的數值方法之一為有限差分法。近十年來廣為採用的多重網格法更大幅增進有限差分法的計算效率。Hu 和 Bogy (1997)以及 Hu (1999)利用多重網格法分析表面凸起的效應。但是用有限差分法處理圓形凸起時，如果所用的程式不具有局部加密網格的功能，就必需在整個分析區域內都使用極細的網格，因而大幅的降低計算的效率，甚至影響結果的正確性。

本計畫以多重網格法為基礎，發展一套可局部加密網格的自調適程式。這個程式在給定容許誤差後，可自行在誤差較大處將網格局部加密。利用這個程式，我們可以定量的研究表面凸起對滑橈飛行特性的影響。此外，雷諾方程式是潤滑理論的核心程式，有效的解雷諾方程式的數值方法也可應用在各種潤滑、軸承的分析設計上。

研究方法

滑橈的動態行為分析可為三部分：支撐臂的振動分析、滑橈的運動分析和空氣軸承的分析。這三部分的

析和空氣軸承的分析。這三部分的運動方程式互相關聯。支撐臂的振動可用商用的有限元素軟體得到振動模態後，再用模態分析法求解；滑橈方面因為滑橈的振動基頻(fundamental frequency)遠高於支撐臂和空氣軸承的振動基頻，所以可視為剛體。最困難的部分為空氣軸承的分析以及三個藕合方程組的求解。

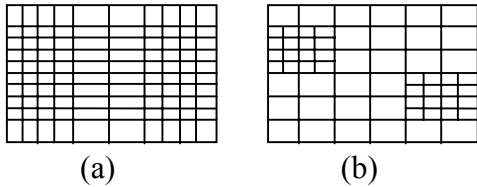
滑橈的飛行分析依所求解的不同可分為兩類：一為給定滑橈的飛行姿態後，求得壓力分佈及壓力的合力和合力矩，稱為正向問題；另一為給定加在滑橈上的預壓力，支撐臂的特性，求解飛行姿態，稱為反向問題。正向問題與支撐臂的特性無關，較為簡單，同時也是解反向問題的基礎。在解反向問題時，我們先給定一組飛行姿態的猜值，利用半牛頓法遞迴求解，直到滑橈達到力平衡為止。

所謂正向問題即是在給定的邊界條件上解廣義雷諾方程式：

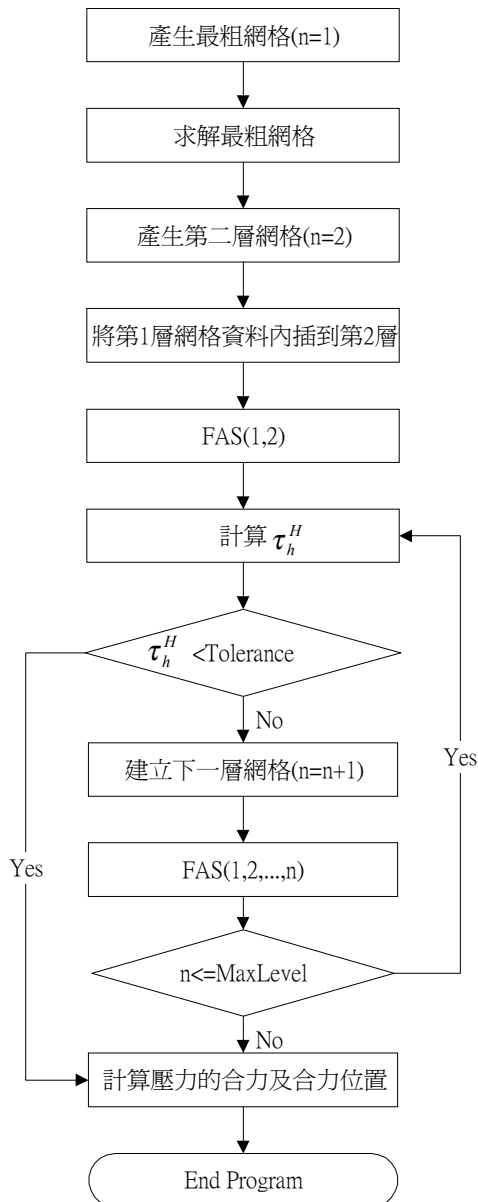
$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda_x PH \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial P}{\partial Y} - \Lambda_y PH \right) = \Lambda_t \frac{\partial(PH)}{\partial t}$$

為了求得上式的數值解，首先將方程式在空間上利用 Patanker 的控制體積法(Patanker, 1983; Cha and Bogy, 1995)離散化得到非線性聯立方程組，接著以多重網格法(Hutchinson and Raithby, 1986; Shyy and Sun, 1993; Press et al., 1992)為基礎求解。除了計算效率高之外，多重網格法的另一個優點為，在不同粗細網格求解的過程中可以得到數值解的誤差的估計值。利用這個估計值，我們可以判斷那些節點上的誤差太大，應該加密。換言之，由此可以建立具自調適性的多重網格法。除此之外，我們希望當

重網格法。除此之外，我們希望當節點 (i, j) 上誤差太大時，不需要將第 i 列及第 j 行的節點都加密(圖一(a))，相反的只需在 (i, j) 點加密即可，亦即我們希望能作到修補式的局部加密如圖一(b)所示。這個方式可以大幅降低節點的數目，提高程式的效率。



圖一、(a)傳統式加密，(b)修補式局部加密

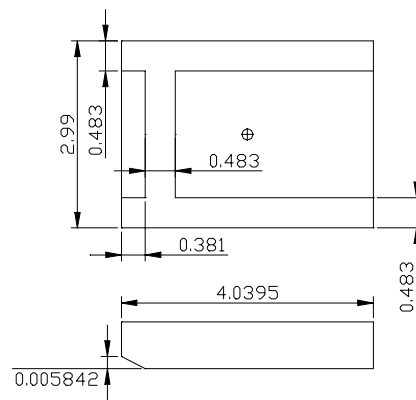


圖二、流程圖

本計畫所開發的程式的流程所圖二所示。首先由兩層網格得到局部誤差的估計值 τ_h^H ，如果這個誤差值大於容許值，則產生新一層的加密網格，重覆這個過程直到誤差小於容許值為止。這裏所用的多重網格法為 FAS (Fast Approximate Scheme)。

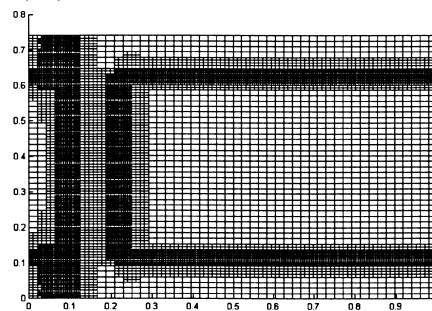
結果與討論

我們用負壓式的H型滑橇(圖三)為例說明所開發自調式多重網格程式的優點和表面加粗對滑橇飛行特性的影響。

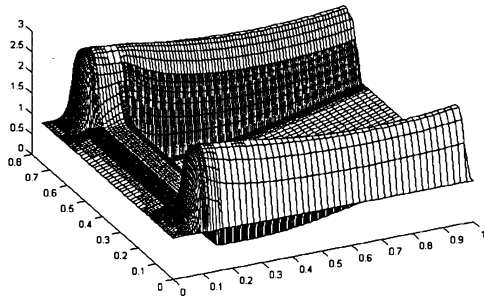


圖三、H型滑橇尺寸(單位: mm)

在固定的飛行姿態： $h_{\min}=0.2296 \mu\text{m}$ 、 $\text{Pitch}=50.5 \mu\text{rad}$ 、 $\text{Roll}=0.0\text{rad}$ ；以及碟片速度： $u_x=40.64$ 、 $u_y=0.0$ 下。設定最大網格層為5層時所得到的最細網格圖如圖四；相對的壓力分佈圖如圖五所示。(其中 Refine Criterion(Tr)=5 MaxLevel=5)

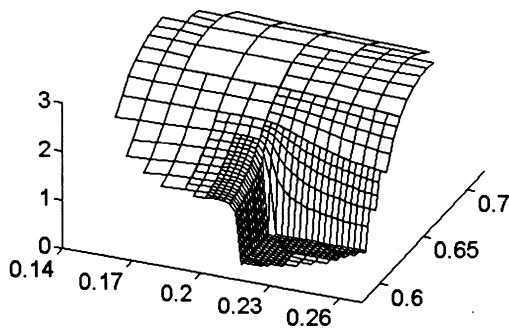


圖四、H型滑橇局部加密網



圖五、H型滑橇的壓力分佈

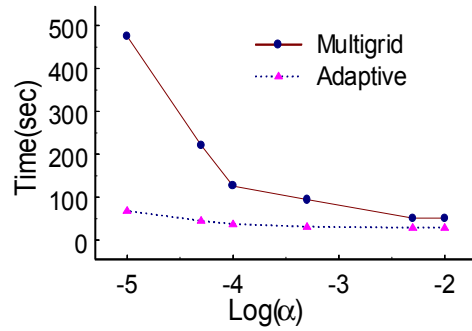
由圖四可知自調適性多重網格法加密的區域都是圍繞在滑橇的不連續面或是壓力變化比較劇烈的區域。為了更清楚看出網格加密的情形，我們將不連續面附近的網格和壓力分佈放大如圖六所示。



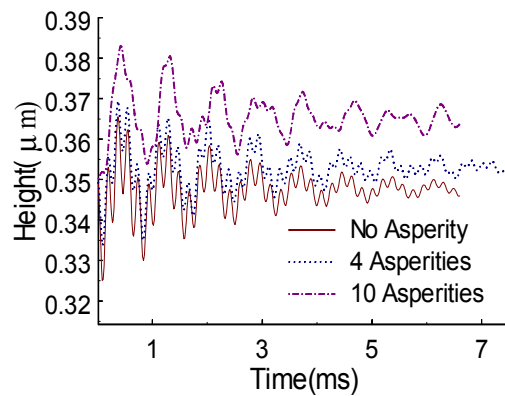
圖六、局部區域壓力分佈

多重網格法與自調適性多重網格法的比較結果如圖七所示。由圖可知，誤差愈小，自調適性多重網格法的效率愈好，這是因為誤差愈小，加密的區域就相對變小，相較於多重網格法的全部加密，減少了許多格點。

接著討論在H型滑橇兩軌的小突起對滑橇飛行姿態的影響。圖八、九、十分別是不同數目凸起對滑橇中心、仰角（pitch角）和最低飛行高度的影響。圖八顯示由於突起的關係，使得

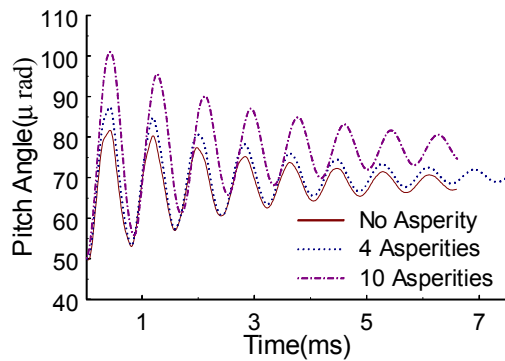


圖七、不同容許誤差下多重網格法與自調適性多重網格法效率比較

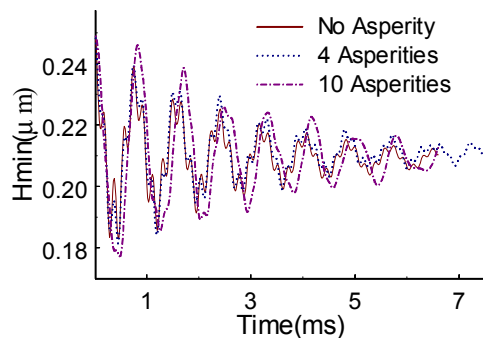


圖八、滑橇中心與時間的關係

滑橇的正向力變大，所以滑橇中心高度較高；突起愈多，飛行高度愈高。圖九表示當滑橇的突起愈多時，平衡飛行姿態的仰角就愈高，而且仰角的振幅也比H型滑橇大。圖十表示滑橇最低飛行高度與時間變化的情形，我們發現最低飛行高度與突起的數目並沒有很大的關係，而且滑橇高頻的振動會隨著小突起的數目增加而消失，這是因為小突起的增加使得壓力分佈變得複雜，導致較大的黏滯阻尼，這說相當於在滑橇的高度方向上加了一個阻尼。但是因為在仰角方向上的振動較大，而且無法藉由空氣的黏滯性把振幅降低，所以10個小突起的滑橇的最低飛行高度最後只剩Pitch方向的振動。



圖九、滑橈仰角與時間的關係



圖十、滑橈最低高度與時間的關係

參考文獻

- Baumgart, P., Krajnovich, D. J., Nguyen, T. A., and Tam, A. C., 1995, "A New Laser Texturing Technique for High Performance Magnetic Disk Drive," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, pp. 2946-2951.
- Castelli, V. and Pirvics, J., 1968, "Review of Numerical Methods in Gas Bearing Film Analysis," *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 90, No. 4, pp. 777-792.
- Cha, E. and Bogy, D. B., 1995, "A Numerical Scheme for Static and Dynamic Simulation of Subambient Pressure Shaped Rail Sliders," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 117, pp. 36-46.
- Garcia-Suarez, C., Body, D.B. and Talke, F.E., 1984, "Use of an Upwind Finite Element Scheme for Air Bearing Calculations," *ASLE Special Publication*, SP-16, pp. 90.
- Hu, Y., 1999, "Design and Analysis of Slider's Landing Pads for Fast Take-Off Performance in Magnetic Hard Disk Drives," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 121, pp. 955-960.
- Hu, Y. and Bogy, D.B., 1997, "Flying Characteristics of a Slider over Textured Surface Disks," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 3196-3198.
- Hutchinson, B.R. and Raithby, G.D., 1986, "A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy," 1986, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 9, pp. 511-537.
- Kasamatsu, Y., Yamamoto, T., Yonelia, S. and Mizoshita, Y., 1995, "Stiction Free Slider for the Smooth Surface Disk," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 2961-2963.
- Patankar, S. V., 1983, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York: McGraw-Hill, 1980.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., 1992, *Numerical Recipes*, 2nd Ed., Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Ranaja, R., Lambeth, D. N., Tromet, M., Goglia, P., and Li, Y., 1991, "Laser Texturing for Low-Flying-Height Media," *Journal of Applied Physics*, Vol. 69, No. 8, pp. 5745-5747.
- Shyy, W. and Sun, C.S., 1993, "Development of a Pressure-correction Staggered Based Multi-Grid Solver for Incompressible Recirculating Flows," *Computers and Fluids*, Vol. 22, pp. 51-75.
- White, J. M. and Nigam, A., 1980, "A Factored Implicit Scheme for the Numerical Solution of the Reynolds Equation at Very Low Spacing," *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 484-490.