

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

探針掃描式顯微鏡中探針控制法則之探討(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2213-E-002-042-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：顏家鈺

計畫參與人員：張景翔、黃仲尹

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 6 月 14 日

一、摘要：

原子力顯微鏡(AFM)是目前達到原子級解析度的重要量測工具之一，該系統利用保持探針與試片間的固定接觸力以追蹤試片的表面形變；因此，保持固定相互作用力的控制器在量測精度上便扮演極重要的角色。本篇實驗報告針對經由系統識別所建的控制系統來加以設計 PID 控制器，並且討論經由控制器後的實驗結果。

關鍵詞：原子力顯微鏡、系統識別、PID 控制器

Abstract

Atomic Force Microscope (AFM) is one of the most important tools to measure atomic resolution. AFM system keeps constant force between a tip and the sample to track the sample topography. The controller that maintains the constant interaction force plays a significant role on the measurement accuracy. This paper presents a PID controller design to treat the system identification and then discuss the results.

二、前言

原子力顯微鏡(AFM)是目前達到原子級解析度的重要量測工具之一，為掃描探針顯微技術(SPM)的代表儀器，其在科學上的應用已非侷限於奈米尺度表面影像的量測，更廣為應用於探索奈米尺度下，微觀的物性(光、力、電、磁)量測，對奈米科技有直接的助益。原子力顯微鏡(AFM)是由 Binnig 等人於 1986 年所發明的，具有原子級解像能力，可應用於多種材料表面檢測，並能在真空、氣體或液體環境中操作。原子力顯微鏡(AFM)之探針一般由成份為 Si 或 Si₃N₄ 懸臂樑及針尖所組成，針尖尖端直徑介於 20 至 100nm 之間。主要原理係藉由針尖與試片間的原子作用力，使懸臂樑產生微細位移，以測得表面結構形

狀，其中最常用的距離控制方式為光束偏折技術。原子力顯微鏡(AFM)操作模式可區分為接觸式(contact)、非接觸式(non-contact)及間歇接觸式(或稱為輕敲式, intermittent contact or tapping)三大類，不過若要獲得真正原子解析度，必須以非接觸式的操作模式在真空環境下方能得到。目前原子力顯微鏡(AFM)的應用範圍十分廣泛，包括表面形貌量測、粗糙度分析及生醫樣品檢測等。原子力顯微鏡(AFM)屬於掃描探針顯微技術(SPM)的一支，此類顯微技術都是利用特製的微小探針，來偵測探針與樣品表面之間的某種交互作用，如穿隧電流、原子力、磁力、近場電磁波等等，然後使用一個具有三軸位移的壓電陶瓷掃描器，使探針在樣品表面做左右前後掃描(或樣品做掃描)，並利用此掃描器的垂直微調能力及迴饋電路，讓探針與樣品間的交互作用力在掃描過程中維持固定，此時兩者距離在數至數百 Å (10^{-10} m) 之間，而只要記錄掃描面上每點的垂直微調距離，我們便能得到樣品表面的等交互作用圖像，這些資料便可用來推導出樣品表面特性。原子力顯微鏡(AFM)的主要結構可分為探針、偏移量偵測器、掃描器、迴饋電路及電腦控制系統五大部分。距離控制方式為光束偏折技術，光係由二極體雷射產生出來後，聚焦在鍍有金屬薄膜的探針尖端背面，然後光束被反射至光電二極體感測器，在經過放大電路轉成電壓訊號後，垂直部份的兩個電壓訊號相減得到差分訊號，當電腦控制 X Y 軸驅動器使樣品掃描時，探針會上下偏移，差分訊號也跟著改變，因此迴饋電路便控制 z 軸驅動器調整探針與樣品距離，此距離微調或其他訊號送入電腦中，記錄成為 X Y 的函數，便是 AFM 影像。原子力顯微鏡(AFM)的探針是由針尖附在懸臂樑前端所組成，當探針尖端與樣品表面接觸時，由於懸臂樑的彈性係數與原子間的作用力常數相當，因此針尖原子與樣品表面原子的作用力便會使探針在垂直方向移動，簡單的說就是樣品表面的高低起伏使探針作上下偏移，而藉著調整探針與樣品距離，便可在掃描過程中維持固定的

原子力，此垂直微調距離，或簡稱為高度，便可當成二維函數儲存起來，也就是掃描區域的等原子力圖像，這通常對應於樣品的表面地形，一般稱為高度影像。原子力顯微鏡(AFM)的操作模式可大略分為以下三種：(1) 接觸式：在接觸式操作下，探針與樣品間的作用力是原子間的排斥力，這是最早被發展出來的操作模式，由於排斥力對距離非常敏感，所以接觸式 AFM 較容易得到原子解析度。在一般的接觸式量測中，探針與樣品間的作用力很小，約為 10^{-6} 至 10^{-10} N (Newton)，但由於接觸面積極小，因此過大的作用力仍會損壞樣品表面，但較大的的作用力通常可得到較佳的解析度。因此選擇適當的作用力，接觸式的操作模式是十分重要的。(2) 非接觸式：為了解決接觸式原子力顯微鏡(AFM)可能損壞樣品的缺點，便有非接觸式原子力顯微鏡(AFM)發展出來，這是利用原子間的長距離吸引力『凡德瓦爾力』來運作。凡德瓦爾力對距離的變化非常小，因此必須使用調變技術來增強訊號對雜訊比，便能得到等作用力圖像，這也就是樣品的高度影像。一般非接觸式原子力顯微鏡(AFM)只有約 50nm (10^{-9} m) 的解析度，不過在真空環境下操作，其解析度可達原子級的解析度，是原子力顯微鏡(AFM)中解析度最佳的操作模式。(3) 輕敲式：第三種輕敲式原子力顯微鏡(AFM)則是將非接觸式加以改良，其原理係將探針與樣品距離加近，然後增大振幅，使探針在振盪至波谷時接觸樣品，由於樣品的表面高低起伏，使得振幅改變，再利用類似非接觸式的迴饋控制方式，便能取得高度影像。由於原子力顯微鏡(AFM)具有原子級的解析度，是各種薄膜粗糙度檢測，及微觀表面結構研究的重要工具，並且也很適合與掃描電子顯微鏡相搭配，成為從微米(mm)至奈米(nm)尺度的表面分析儀器；而原子力顯微鏡(AFM)亦可在液體環境中操作，更可用來觀測材料表面在化學反應過程中的變化，以及生物活體的動態行為，可廣泛應用於生物科技及醫學科技上。另外就是原子力顯微鏡(AFM)亦可應用於奈米結構之製作與加工，目前已有多種可行方

法，應用於超高密度記憶裝置及次微米電子元件的製作。

三、研究動機與簡介

本實驗所用的原子力顯微鏡(AFM)是屬於接觸式的操作模式，利用保持探針與試片間的固定接觸力以追蹤試片的表面形變；因此，使保持固定相互作用力的控制器在量測精度上便扮演極重要的角色。

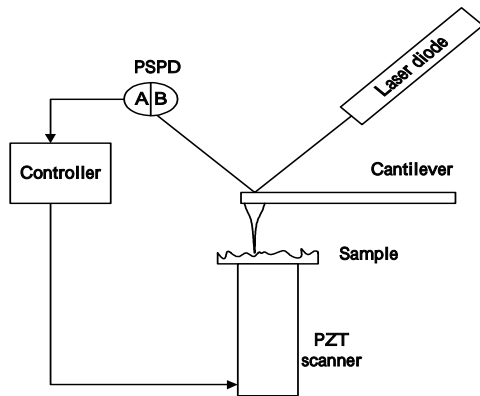
原子力顯微鏡(AFM)的解析度取決於控制系統保持探針與試片間相互作用力的好壞，故本實驗之目的在於設計一性能更為優良之控制器以提昇原子力顯微鏡的效能。

本實驗所用的原子力顯微鏡系統是利用雷射光於掃描探針懸臂樑反射後的角度變化以量測探針的微小形變後，再以壓電致動器改變探針或試片位置以保持試片與探針間的固定作用力，因此控制掃描探針移動的控制器在量測精度上即為最重要的課題。其中，探針是否能隨受測物的表面變化立即反應將直接影響掃描速度的快慢，所以一個高性能的控制器設計是有所必要的，而就直接影響量測結果的控制誤差而言，高性能控制器將更形重要。由於對於壓電致動器並沒有施加任何的設限，所以控制器對控制誤差的影響將直接呈現在量測解析度上。目前已有的相關研究多集中於模擬與控制探針問題。本實驗利用 PID 控制器針對作用力誤差容限進行原子力顯微鏡的控制設計，對於 Z 方向做閉迴路的控制，以確保在表面接觸力上的穩定性。

文中所提到的系統識別係針對整個系統採用 curve-fitting methods，包含二象限光位移感測器(position sensitive photo detector (PSPD))、壓電掃描裝置、探針-試片間交互作用、懸臂樑的動態模態。

四、研究方法與過程

(I) 系統描述：



圖一 AFM 示意圖

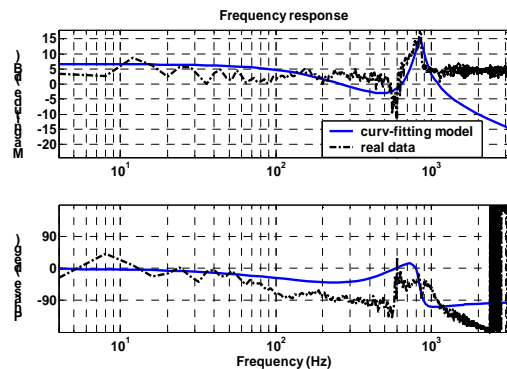
原子力顯微鏡利用探針掃描試片表面，探針附著於具彈性、450 μm 長的懸臂端，針尖半徑小於 10nm，承載試片的壓電管可以提供立體三軸的運動。當探針接觸試片將造成懸臂樑隨試片表面起伏彎曲，利用雷射光反射回光位移感測器將可以量測出懸臂樑的形變以進行控制。控制器接受懸臂樑的形變量後，其輸出將用以改變載物平台的 Z 軸高度以使得探針與試片間可以保持固定作用力，平台 Z 軸的高度變化即試片表面的高低變化。當試片與探針間保持小於一奈米的間距，相互作用力為斥力，稱為接觸模式。本篇論文所使用為 Park Scientific Instrument 出品的商業用 AutoProbe LS 原子力顯微鏡(如圖二所示)，採上述接觸模式；顯微鏡已經過修改，硬體為 Pentium 電腦加上 Adventech 的 AD/DA 介面卡，可利用 C++ 程式自行修改控制器並存取資料，數據則利用 MATLAB 軟體進行分析。



圖二 AutoProbe LS 原子力顯微鏡

(II) 系統識別

利用 HP3563A 動態訊號分析儀進行模型識別，以壓電致動器的電壓值為輸入，光位移感測器的訊號為輸出，接觸力設定為 20nN，圖三所示為實驗所得頻率響應與 curve fitting 系統模型。



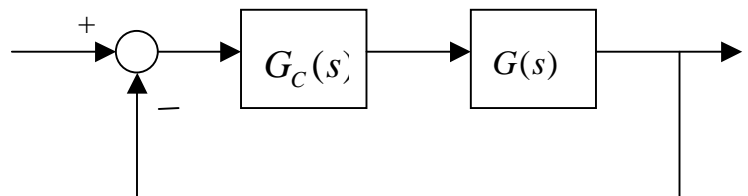
圖三 實際頻率響應與 curve fitting 結果

系統識別所得為三階系統，一穩定實根於 140Hz，另有一對複數虛根於 850Hz；高頻區域的系統識別並不理想，將視為未模型化的動態因素，列入不確定度考量。值得注意的是，因為系統頻率響應隨著不同的接觸力而有所改變，故針對不確定性進行系統修正補償有其必要。

(III) 設計 PID 控制器

PID 控制器的轉移函數為

$$G_C = K_p + K_D S + \frac{K_I}{S}$$



圖四 利用 PID 控制器所設計的閉迴路系統

其中 K_p 、 K_D 、 K_I 各為比例控制器 (proportional controller)、積分控制器 (integral controller) 與微分控制器 (derivative controller) 的參數：

比例控制動作(*proportional control action*) :

比例控制動作是一個可變增益的元件，藉由增益的改變可調整系統的相對穩定度及穩態誤差。通常增益變大可降低穩態誤差，但破壞相對穩定度，反之增益變小可增加相對穩定度，但增加穩態誤差。

積分控制動作(*integral control action*) :

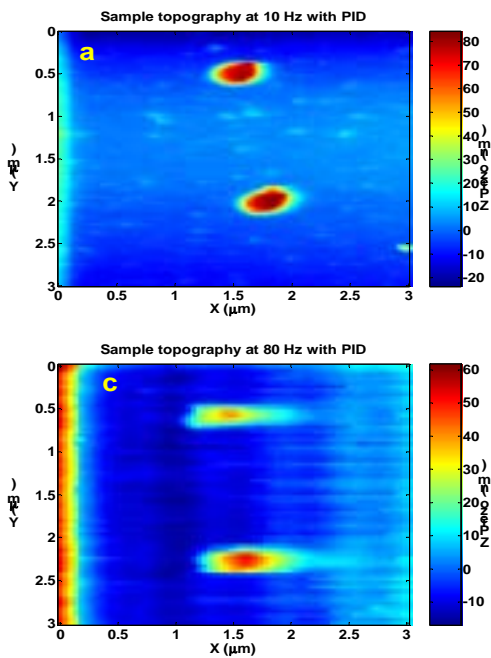
積分控制動作增加一個在原點的極點，可以消除穩態誤差，並且有利於雜訊抑制。但積分控制動作卻也可能讓系統不穩定，即使系統仍維持穩定，暫態響應性能通常會變得較差。

微分控制動作(*derivative control action*) :

微分控制動作可改善系統的阻尼特性即暫態響應，並且能增加相對穩定度。但微分控制動作不利於高頻雜訊干擾，且無法改善穩態的誤差。

五、結果討論：

以下是經過 PID 控制器後所實際用原子力顯微鏡(AFM)所掃描出來的影像：



圖五 以 PID 控制器於 10Hz 與 80Hz 掃描速度所得影像

上圖中所使用的試片為矽基堆疊的氮化矽薄片，薄片上為 $1\ \mu\text{m}$ 平方小點，點與點間隔 $2\ \mu\text{m}$ ，小點高 75nm 。由上圖可以發現，在高頻(80Hz)時候的解析度明顯的變差，因此接下來的實驗重點則會放在克服高頻雜訊以及減少系統的不確定性方面來做研究。

六、計畫成果自評

本實驗已就現有的原子力顯微鏡系統建立出系統的數學模型，並且做出 Z 方向的閉迴路控制系統以達到表面間固定接觸力的維持。PID 控制理論順利被應用於控制器設計，由結果可看出雖然已經有不錯的效果，但是對於非線性、未模型化的動態特性等系統不確定因素，仍有改善的空間。未來會把重點放在如何克服不確定度，並且嘗試其他的控制理論，以達到更佳的控制結果。

七.參考文獻

- [1]. "The National Technology Roadmap for Semiconductors, Technology Needs, 2001 Edition," Semiconductor Industry Association (2001)
- [2]. G. Schitter, P. Menold, H. F. Knapp, F. Allgower, and A. Stemmer, "High performance feedback for fast scanning atomic force microscopes," Review of Scientific Instruments, Vol. 72, No. 8, Aug (2001)
- [3]. F. M. Battiston, M. Bammerlin, C. Loppacher, R. Luthi, E. Meyer, and H.-J. Guntherodt, "Fuzzy controlled feedback applied to a combined scanning tunneling and force microscope," Appl. Phys. Lett. 72 (1), 5 January 1998

- [4]. Youngchung Fan, Matthew G. Feemster, Darren M. Dawson, and Nader Jalili, "Nonlinear Control Techniques for the Atomic Force Microscope System," Proceedings of IMECE2002, ASME Internal Mechanical Engineering Congress & Exposition, Nov. 17-22, 2002
- [5]. Osamah M. El Rifai, and Kamal Youcef-Toumi, "Dynamics of Contact-mode Atomic Force Microscopes," Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois June 2000
- [6]. M. Ashhab, M. V. Salapaka, M. Dahleh, and I. Mezic, "Control of Chaos in Atomic Force Microscopes," Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, New Mexico June 1997
- [7]. Osamah M. El Rifai, and Kamal Youcef-Toumi, "In-contact Dynamics of Atomic Force Microscopes," IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings 8-12 July 2001
- [8]. D. Maugis, "Adhesion of Spheres: The JKR-DMT Transition Using a Dugdale Model," J. Colloid and Interface Sci., Vol. 150 (1), pp. 243-269, 1992
- [9]. Gary J. Balas, John C. Doyle, Keith Glover, Andy Packard, and Roy Smith, "μ-Analysis and Synthesis Toolbox," MUSYN Inc. & The Math Works Inc., 2001
- [10]. Richard Tymerski, "Worst Case Stability Analysis of Switching Regulators Using the Structured Singular Value," IEEE Transactions on Power Electronics, 11, 5 (Sept. 1996), 723-730
- [11]. Gene F. Wallis Richard Tymerski, "Generalized Approach for μ Synthesis of Robust Switching Regulators," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. 36, No. 2, April 2000