

基於 DSP 晶片的一維納米定位控制系統研製

Development of a one-dimensional nano-positioning control system based on DSP chip

李瑞君* 何園濤 王鵬宇 范光照
合肥工業大學儀器科學與光電工程學院
E-mail: rj-li@hfut.edu.cn

摘要

研製了一套以 DSP 晶片為主控制器的高精度一維納米定位控制系統。該系統主要由驅動平臺、微型邁克爾遜干涉儀、DSP 控制器等三個模組組成。其中驅動平臺模組由線性滑軌、超聲波馬達 HR4 和驅動器 AB2 組成。超聲波馬達 HR4 配合其專用驅動器 AB2 利用摩擦力來驅動側面貼有陶瓷片的線性滑軌，微型邁克爾遜干涉儀用來感測滑軌的位移值。基於 BP 神經網路的 PID 控制演算法和邁克爾遜干涉儀的相位計算全部由主控制器 DSP 晶片完成。實驗結果表明，該定位系統行程為 20 mm，定位精度優於 10 nm，重複定位標準差為 7 nm。該定位系統具有系統架構簡單，定位精度高、優點，可用于大行程高精度定位應用場合。

關鍵詞：納米定位；DSP；邁克爾遜干涉儀；壓電陶瓷驅動；BP 神經網路；

Abstract

A high-precision one-dimensional nano-positioning control system based on DSP controller is presented in this paper. The system is mainly composed of a driving platform, a miniature Michelson interferometer and a DSP controller. The driving platform module is made of a linear guide, an ultrasonic motor (HR4) and its driven (AB2). The HR4 and AB2 are used to move the ceramic wafer on the linear guide by the friction. The miniature Michelson interferometer is used to detect the platform's displacement. Both the PID control algorithm based on BP neural network and the phase calculations of the sensor are finished by the DSP controller. The experimental results show that the positioning accuracy of the nano-positioning system is better than 10 nm within 20 mm range, and the standard deviation is 7 nm. The positioning system has the advantages of simple structure, high positioning

accuracy, and can be used on the occasion of high-precision positioning.

Keywords: nanopositioning; DSP; Michelson interferometer; Piezoelectric ceramics driver; BP neural network;

1. 前言

當前，納米科技、微電子加工、先進製造業、生物醫學等領域均需要大行程（指毫米級）納米級定位^[1,2]，用於大面積樣品測量的原子力顯微鏡和半導體工業中的光刻機也需要對工作臺在毫米行程上實現納米或亞納米精度的定位控制。因此，開發毫米行程納米或亞納米精度的定位系統已成為相關領域各國科學家競相研究的熱點。

壓電陶瓷是新型的微位移器件，具有結構簡單、體積小、分辨力高、控制簡單、沒有發熱問題等優點，是理想的微位移器件^[3]。使用壓電陶瓷元件實現大行程的途徑是構成超聲波馬達，壓電陶瓷元件組在共振信號作用下，形成彎曲和伸縮兩種變形模式，兩種運動合成為橢圓形運動軌跡，通過摩擦力驅動平臺，其解析度小於1nm，行程由陶瓷片長度和滑軌長度決定。

DSP晶片因其運算速度快、即時性強、功耗低、抗干擾能力強等特點，愈來愈多地被應用在控制和檢測領域，是理想的微控制器。

因此，以DSP作為主控制器，壓電陶瓷作為微位移器件設計了一套高精度一維納米定位控制系統。

2. 系統總體結構及原理

一維納米定位控制系統結構圖如圖1所示。

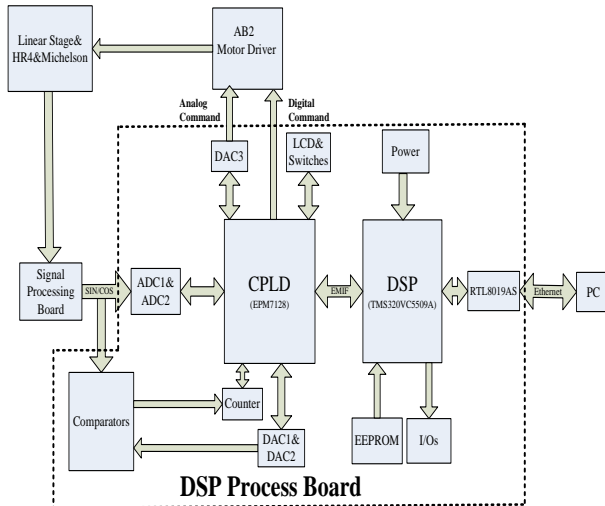


圖1 系統結構框圖

PC軟體通過乙太網向DSP處理板下達位移指令，微型納米位移感測器---偏振邁克爾遜鐳射干涉儀（後邊簡稱Michelson干涉儀）感測滑軌實際移動的位移，DSP將目標位移與滑軌實際移動位移進行比較，在BP神經網路模型的說明下計算出最佳PID控制參數，進而由PID控制演算法計算出控制量，由DAC3輸出相應的類比電壓，AB2驅動控制器將類比電壓轉換成對應驅動超聲波馬達HR4的波形，從而保證線性滑軌平穩準確的運行。

3. 系統硬體設計

3.1 驅動平臺設計

驅動平臺由三個部分組成：線性滑軌、陶瓷片、超聲波馬達HR4、驅動器AB2。圖2為線性滑軌與HR4的安裝模型圖。

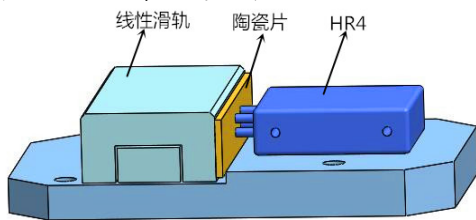


圖2 安裝模型圖

3.1.1 線性滑軌的選擇

線性滑軌的直線度直接影響定位系統運動過程的平緩性和定位精度。本系統選擇米思米公司生產型號為CRU3080交叉滾子型滑軌，該滑軌往復行程45 mm，滑軌中央部平行度平行度為2 μm，側面平行度5 μm。

3.1.2 位移驅動器件的選擇

高解析度的驅動方式是實現精確定位的前提。Nanomotio公司利用壓電效應設計並製造了超聲波電機HR4。Nanomotio公司在HR4單個接觸端子上放置四個壓電陶瓷片元件，利用四組電極放置於壓電陶瓷片的表面可以產生伸縮和彎曲兩種狀態，這兩種狀態經過合成後可以形成圓形或者橢圓形運動軌跡。HR4的示意結構及運動模態圖如下圖所示：

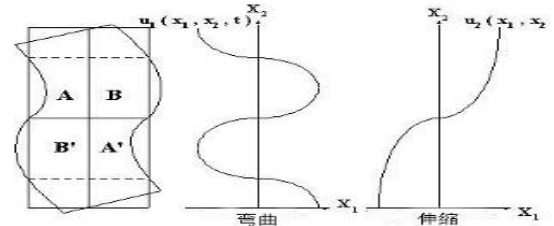


圖3 HR4結構及其工作模態圖

當兩組電極A、A'和B、B'一組伸長一組縮短並加以不同方向驅動時產生彎曲模態的運動，而如果兩組同時伸長或縮短時則產生伸縮運動。如果固定其中一組對另一組加以弦波驅動時，則會往某一方向運動。HR4堆疊了四個接觸端子，可以有效的提高驅動力，增加穩定度。Nanomotio公司根據壓電陶瓷元件工作模態的不同組合，開發出多種電機驅動模式。

3.1.3 HR4的驅動器選擇

HR4正常工作需要配有專門的驅動器。本系統選用Nanomotio公司生產的驅動器AB2，它提供了三種驅動模式，用以滿足超聲波馬達不同行程的需求，AC模式，用於長行程毫米級驅動；GATE模式，用於中行程微米級驅動；DC模式，用於短行程納米級定位驅動。超聲波電機HR4與驅動器AB2的配合可以組成三種不同的驅動模式，實現大行程高解析度的驅動控制^[4,5]，這是高精度定位系統實現納米級定位的硬體基礎。

3.2 位移感測單元設計

只有即時準確感測出滑軌的位移值，將此位移與目標位移進行相關運算才能得出AB2準確的輸出量。本系統位移感測單元選用作者所在團隊自發研製的微型邁克爾遜干涉儀。

3.2.1 邁克爾遜干涉儀結構及其原理

該邁克爾遜干涉儀由鐳射二極體、偏振分光稜鏡、非偏振分光稜鏡、四分之一波片、固定

不動的平面參考鏡、固定在運動物體上的測量鏡以及感測干涉信號的光電池構成，其結構圖如圖4所示^[6]。

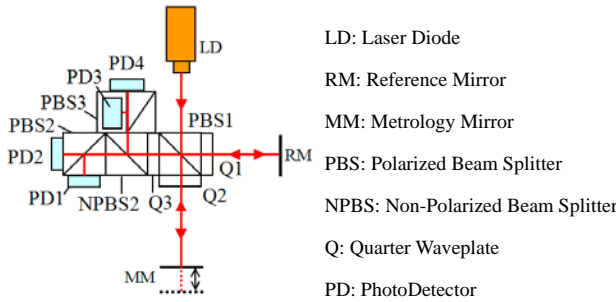


圖4 Michelson鐳射干涉儀結構圖

雷射器LD發出的偏振光，經過偏振分光鏡PBS1和四分之一波片Q1、Q2，分別變成旋向相反的兩束圓偏振光，一束打在測量鏡MM上返回，一束打在參考鏡RM上返回，返回的兩束光再次經過以上Q1、Q2和PBS1，又變成線偏振光（o光和e光），再經過四分之一波片Q3變成旋向相反的兩束圓偏振光，兩束光重合並發生干涉；最後再經過非偏振分光鏡NPBS2及後面的偏振分光鏡PBS2、PBS3組成的鑒相模組，提取出相位分別是0度，90度，180度，270度的干涉信號，四個光電池PD1-PD4分別感測干涉條紋的光強變化。因此，測量鏡位移變化可通過對干涉條紋明暗變化規律進行計數和細分，便可以同步轉換出運動的位移量。將測量鏡固定於線性滑軌的一端，則滑軌移動的位移即可通過測量鏡移動的位移間接得出。

3.2.2 邁克爾遜干涉儀信號處理電路

理論上PD1-PD4输出的為四路兩兩正交的弦波電流信號，但實際使用中，信號存在三種典型的失真^[7]，分別是背景光強變化和光電探測器差異性造成的直流漂移，機台處於不同位置時造成的幅值變化和安裝誤差導致的兩路信號不完全相差90度，為消除誤差需要將信號進行硬體處理，處理過程如圖5所示。經信號處理板最終输出的兩路信號為一組完全正交的弦波信號，對正交弦波信號進行計數和細分，便可得出運動物體的位移量。

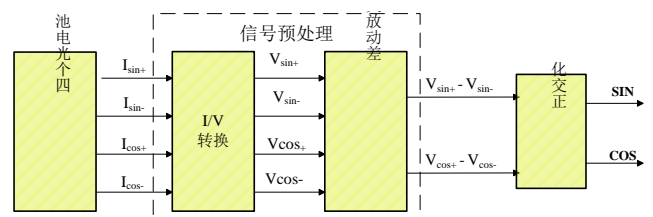


圖5 弦波信號處理流程圖

3.3 主控制器 DSP 單元設計

DSP 處理板內部結構緊湊複雜，集結了 DAC、ADC、電壓比較器 AD790、雙向可逆正交脈衝計數器 HCTL2022、RTL8019AS、CPLD、DSP 等器件。PC 機通乙太網控制器 RTL8019AS 實現通信，來獲取使用者指令。正交弦波信號進入 DSP 處理板後，同時送至 ADC1/ADC2 和比較器。ADC1/ADC2 將弦波信號轉換成數位量，通過 CPLD 的介面轉換傳輸到 DSP 中。DSP 計算出兩路弦波信號的直流偏量，再經 CPLD 寫給 DAC1/DAC2，轉換成類比電壓信號作為電壓比較器的參考電壓，此參考電壓可以有效消除信號中的直流偏量。比較器再將當前的弦波信號轉換成正交脈衝信號，輸入到雙向可逆正交脈衝計數器中，計數大數位移。而對 ADC1/ADC2 轉換的數位量進行相關運算，可以進行相位細分。將大數計數和相位細分結合起來，就可以得到當前精確位移。由當前位移和歷史位移以及目標位移可以計算出對 AB2 的控制量，通過操作 CPLD 上控制 AB2 的介面，即可完成運動控制。

4. 系統軟體設計

4.1 位移感測軟體設計

位移測量軟體流程圖如圖 6 所示

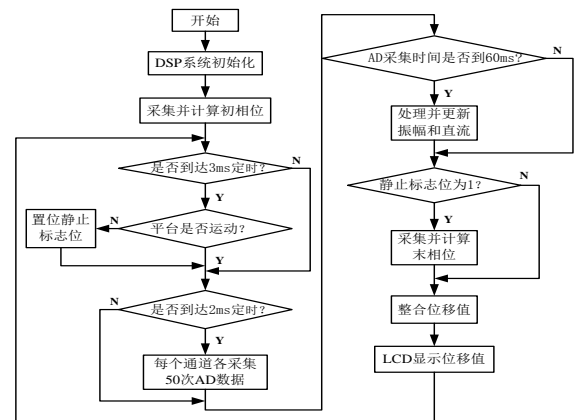


圖 6 位移測量軟體流程圖

系統初始化之後，採集一次資料計算初始相位，在單次運動過程中，只會計算一次初相位。接下來會每 3 ms 檢查一次計數器 HCTL2022 的讀數，是否與上次讀數一致，如果讀數一致，表示機台處於停止狀態，則置位元標誌位元，同時每 2 ms 對各通道採樣 50 次，如果採樣時間達到 60 ms 後，更新振幅和直流偏量。接下來讀取 HCTL2022 的完整計數值，通過判斷上述機台靜止標誌位元決定是否進行末相位的採集與計算，然後整合總位移值，並通過 LCD 液晶屏顯示。

4.2 運動控制軟體設計

系統運動控制流程圖如圖 7 所示。

為使定位系統達到快速、穩定和準確的定位效果，將滑軌的一次定位分為三個階段：開始使用 AC 模式驅動平臺以 0.5 mm/s 的速度快速逼近目標點 3 um 處，BP 神經網路的輸入為期望速度減去真實速度的誤差；接著用 Gate 模式以 20-50 nm 的步距逼近目標點 50 nm，此時 BP 神經網路的輸入為目標步距減去當前步距的差值；最後使用 DC 模式鎖位元，此時 BP 神經網路的輸入為目標位置減去當前位置的差值。

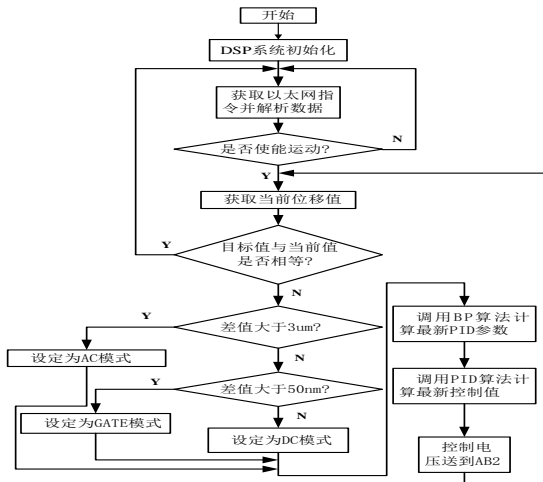


圖 7 運動控制軟體流程圖

4.3 基於 BP 神經網路的 PID 控制演算法

PID 控制演算法是工程中最為常用的控制演算法，具有結構簡單、易於理解等優點，但應用時需要事先整定好合適的參數，整定過程比較困難，且參數為固定值。對於納米定位系統，需要保證滑軌在高速運動下的穩定性和低速運

動下的精確性，但滑軌不可避免存在直線度誤差且與超聲波電機接觸的各處摩擦力係數不同，所以系統數學模型是複雜多變的，為了保證滑軌運行的穩定性與準確性，就要求 PID 控制參數可以即時調整。因此，本系統選擇基於 BP 神經網路的 PID 控制演算法。

系統所用倒傳遞 BP 神經網路如圖 8 所示，它由輸入層、隱藏層和輸出層組成，輸入層由 $err(k)-err(k-1)$ 、 $err(k)$ 、 $err(k)-2err(k-1)+err(k-2)$ 三個神經元組成，輸出層作為 PID 控制演算法中 K_p 、 K_i 和 K_d 三個參數的值。通過 BP 神經網路演算法可以即時自動調整 PID 演算法中的三個參數的值，具體演算法參考文獻^[8,9,10]

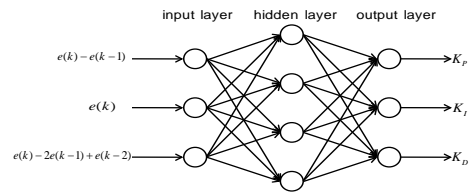


圖 8 BP 神經網路結構圖

5. 實驗結果

對該一維定位系統進行 5 組不同的實驗測試，平臺移動位移設定值分別為：1 mm、6 mm、10 mm、15 mm、20 mm，每組實驗重複進行 10 次。實驗結果如表 1 所示，平臺實際移動位移由 HP5529A 鐳射干涉儀讀取，在全量程內平臺定位精度優於 10 nm，重複定位標準差為 7 nm。

表 1 實驗測試結果

次數	位移/mm				
	1	6	10	15	20
1	0.999997	5.999998	9.999990	15.000005	20.000005
2	0.999999	5.999998	9.999990	15.000003	19.999996
3	0.999996	5.999995	9.999996	14.999993	19.999996
4	1.000006	5.999996	9.999993	14.999996	20.000007
5	1.000003	5.999998	9.999994	15.000001	19.999992
6	0.999996	6.000007	10.000002	15.000005	20.000007
7	1.000001	5.999995	9.999995	14.999997	20.000008
8	0.999998	6.000003	9.999996	14.999998	20.000001
9	0.999999	6.000001	10.000001	14.999998	19.999992
10	0.999997	5.999996	10.000003	14.999996	19.999998
平均值/mm	0.999992	5.999991	9.999996	14.999999	20.000002
標準差/nm	3	4	5	5	7
最大誤差/nm	6	7	10	5	8

6. 結論

設計了一套以微處理器 DSP 為主控制器的
一維納米定位控制系統，該納米定位系統行程
為 **20mm**，實驗結果表明：在全量程內平臺定
位精度優於 **10 nm**，重複定位標準差為 **7 nm**。
該系統具有定位精度高、重複性好、集成度高、
功耗低等優點，對於當前納米科技、半導體領
域、微納機械加工等均有較大的實用價值。

7. 致謝

國家自然科學基金專案支助 (51475131)。

8. 參考文獻

- [1] 夏瑞雪，陳曉懷，盧榮勝等。“新型納米三座標測量機誤差檢定方法的研究”，*電子測量與儀器學報*. J.,vol. 24,2010,pp250-256.
- [2] HAITJEM A H, “Achieving traceability and sub-nanometer uncertainty using interferometric techniques”, *Measurement Science and Technology. J.*, vol. 19,2008,pp1-6.
- [3] B .賈菲著，林聲和譯.壓電陶瓷[M] .北京，科學出版社，1979 .
- [4] Steinmetz C. R.. Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometer[J]. *Prec. Eng.*, 1990, 12(1): 12–24.
- [5] Nanomotion Ltd. HR4 Ultrasonic Motor User Manual. P/N MSP4-M00-M00-30. www.nanomotion.net.
- [6] 張友良. 納米三座標測量機共平面二維平臺的改進及關鍵傳感技術的研究[D]. 合肥工業大學碩士論文，2013.
- [7] Heydemann P. L. M.. Determination and Correction of Quadrature Fringe Measurement Errors in Interferometers.J. , *Applied Opt* vol. 20 (19),1981, pp 3382-3384.
- [8] Sirisena H , Teng F. “Multivariable pole-zero placement selftuning controller”,*International Journal of Systems Science. J.*,vol. 17,1986, pp 345-352.
- [9] Wang J ,Kang L Y ,Cao B G. “ Neural network PID control of a distributed power generation system based on renewable energy”,*Journal of*

Applied Sciences. J.,vol. 5(10),2005, pp 1772-1776.

- [10] 程方. 納米三座標測量機測控系統關鍵技術研究[D]. 合肥工業大學博士論文，2010.