

科技文化

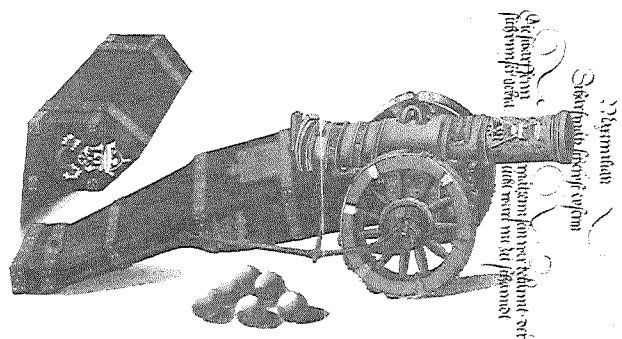
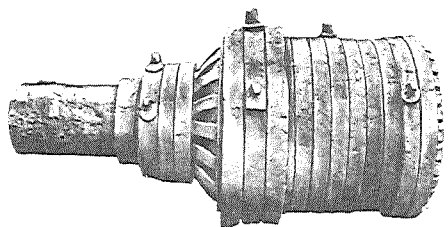
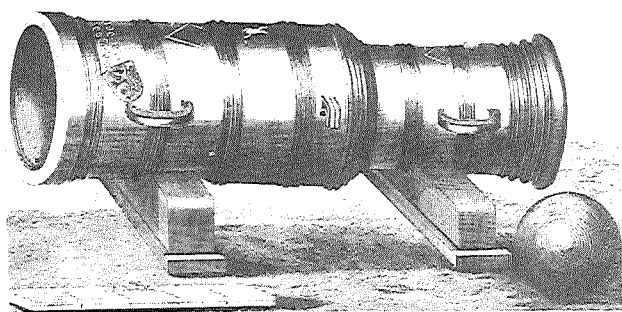
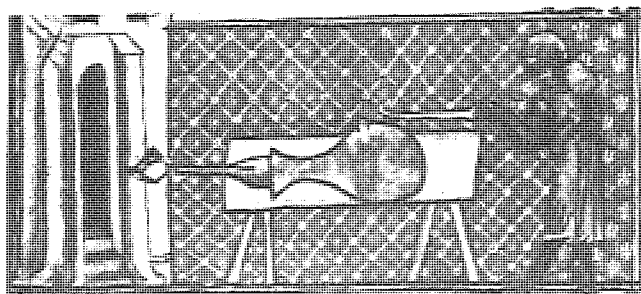
# 精益求精：機床的智能化

• 吳賢銘 遺作

## 前言

十五、六世紀大炮在西歐的出現，是世界軍事史上一個重大突破：它改變了戰爭形式，間接促成了近代君主集權國家的出現，這是大家知道的。較少為人注意的是，十八世紀中葉發生的大炮革命。這革命對拿破崙之所以能縱橫歐洲，是有重大關係的。

原來從十五至十八世紀這三百年間，大炮一直用倒模澆鑄(其始用青銅，後來用鐵)方式製造，因此炮管總不能十分精確。十八世紀30年代中葉，瑞士



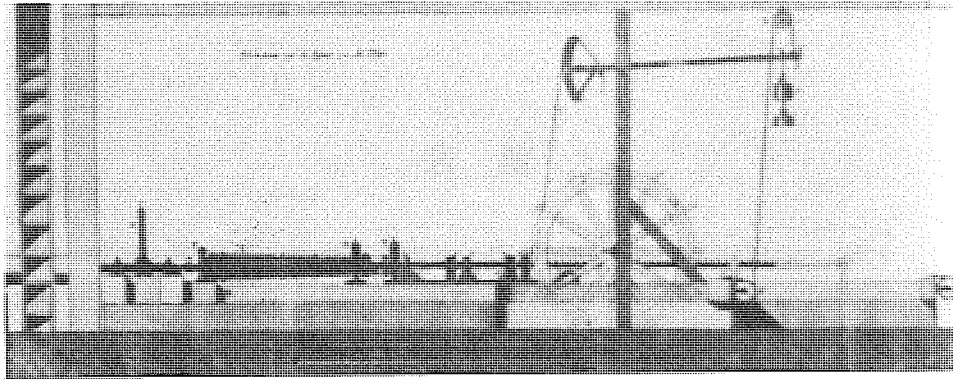
Berhard Rathgen, *Das Geschütz im Mittelalter* (Berlin: VDI, 1928), Tafel 4, Abbildung 12 (above); Tafel 7, Abbildung 22 (below).

A. Essenwein, *Quellen zur Geschichte der Feuerwaffen* (Leipzig: F. A. Brockhaus, 1877), vol. 2, pl. A. XXI-XXII (above); pl. A. LXXII-LXXIII (below).

火藥大約在十三世紀由蒙古人或阿拉伯人傳入西歐，其始以類乎玩具的「火箭」形式在紀載中流傳(左上，1326年)，但到十五世紀則蛻變在戰爭中廣泛應用的銅鑄(右上，約1411年)和鐵鑄(左下，約1425年)發石炮，到十六世紀初更發展成發射鐵彈並且可以靈活移動的重要野戰武器(右下，1500-1510年)。所有這些大炮都是倒模澆鑄製造的。(轉載自McNeill，註①，頁84-85)

工程師馬里茲父子(Jean Maritz and junior)在法國里昂開始試驗應用鏟削方法把實心鐵柱製成炮管。經過二十年試研，他們終於成功製出了精確和輕便得多的火炮，它的射程和準確性都因此獲得突破<sup>①</sup>。而這，也可以說就是近代機床工業的開端。

馬里茲父子所發明用以製造精確炮管的鏟削機器：右側是用以保持管材轉動和控制其進給(feed)速度的懸錘和齒輪，固定的割削刀具則伸入左側的管材內錘。(轉載自 McNeill, 註<sup>①</sup>, 頁168)



Gaspard Monge, *Description de l'art de fabriquer les canons*, Imprimée par Ordre du Comité de Salut Public, Paris, An 2 de la République française, pl. XXXXI.

### 精確與效能的關係

大炮的效能與炮管的精確程度有密切關係，因為炮彈之所以能達到高速是靠火藥點燃後所化成的氣體推動。炮管不精確那就必須在炮彈與炮管之間留下較多空隙（這稱為漏隙windage），而且炮管壁亦須加厚，以免炮彈發射時一旦受到阻塞而導致炮管爆炸。這樣一來，不但推動炮彈的氣體會從漏隙逃逸，因而大大減少炮彈的速度與射程，而且炮身亦會變得更為笨重；至於炮彈落點欠準，更不在話下。

同樣，蒸氣機的動力是由汽缸中膨脹的蒸氣推動活塞而來。汽缸孔不精確，則蒸氣會從活塞與孔壁之間的空隙泄漏出去，因而減少活塞的推動力。廣而言之，所有把流體動力轉變為機械動力的機器，例如內燃機、噴射機、渦輪機、發電機等等，其效能之發揮顯然都有賴於精密管道的製造，也就是說，有賴於先進的機床技術。

所謂機床(machine tool)，泛指用以把原材料(大多數是金屬)塊塊製造成形的機器，種類繁多，恐怕不下千百種，但大體上依運作方式可以分為車床(lathe)、刨床(shaper and planer)、鑽床(drilling machine)、剉床(milling machine)、磨床(grinding machine)、鋸床(power saw)、壓床(press)等七大類。像小馬里茲在1750年代所發明的機床，就是車床的一種。它的刀具是固定不動的，作為炮管材塊的實心鐵柱則用懸錘和變速齒輪維持穩定速率旋轉(材塊的質量惰性對這大有幫助)。這樣，只要保持刀具和材塊之間的壓力固定，刀具就能夠精確地削出炮管內壁的圓柱面來。

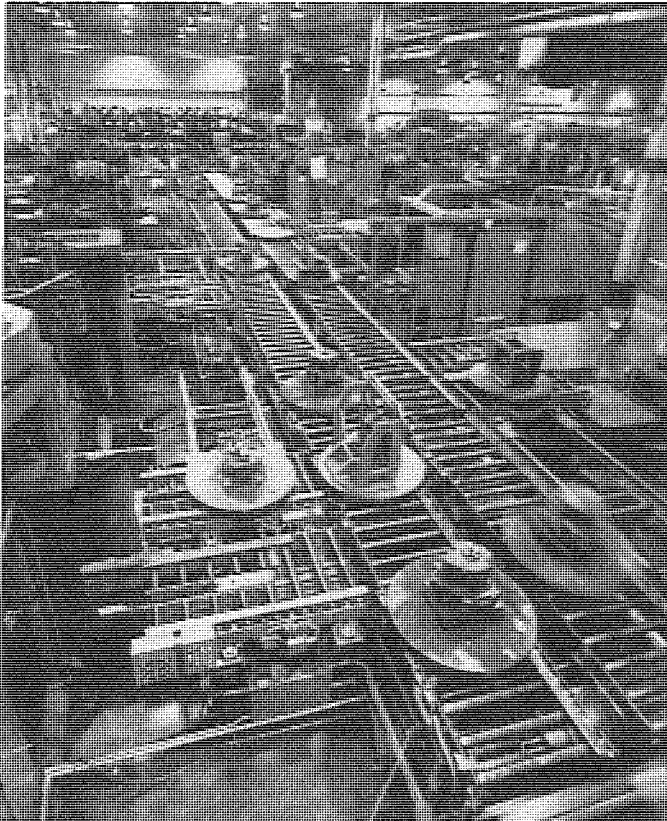
在差不多同一個時候，瓦特(James Watt)發明了蒸氣機，這對機床帶來了兩個重大影響：第一，它為機床提供強大和穩定動

力，比懸錘或水力優勝得多；第二，蒸氣機本身需要精密和大口徑汽缸孔的製造技術，這又反過來為機床的改良提供了強烈動機。1774年，英國的威堅遜(John Wilkinson)藉着他發明的新式車床製出了空前精密的汽缸，翌年瓦特則應用這種新汽缸為威堅遜的機床工廠製出強力蒸汽機，這正好說明機床和蒸氣機之間極其密切的關係，而兩者都可以視為工業革命的起點②。

在馬里茲和威堅遜之後二百多年間，機床技術不斷進步，相繼為標誌機械文明的火車、輪船、汽車、飛機、渦輪發電機的出現提供了基礎。這進步基本上是由機械設計的改進、新型材料(例如高速鋼)的發展以及工件測量方法的革新所帶動的。到本世紀60年代，激光(laser)和電子計算機(computer)的出現，再一次刺激了機床的革命性改良：在過去三十年間，它們的綜合應用使機床的靈活和精確度達到又一個新高水平。這可以說是機床從機械性運作逐漸轉向近乎智能運用的過程，正就是本文所要討論的主題。

## 一 從調控到運用經驗

把計算機引入機床技術大體上可分兩個緊密相關，但不完全相同的階段。第一個階段是通過計算機軟件而不再是機械性調校來控制機床的工作。例如所



### 自動化和數控的彈性生產系統

美國 Sunstrand公司在1972年為維爾珍尼亞州 Ingersoll-Rand公司所發展以IBM360/30計算機自動控制的重型加工中心 (heavy machining center)，它一共具有六部數控的多軸床和鑽床，有200餘件排列在轉盤上的刀具供機床自動選用。多個工件可由中央輸送帶送至各個機床上同時多種不同順序的自動加工。這中心的功能已相當於一個有30部人手操作機床的工場。它特別能適應小批量生產需要，而仍然能維持高效率。

謂計算機數控(numerical control)、精練生產(lean production)、靈活製造 agile manufacturing)、彈性製造系統(flexible manufacturing system)乃至計算機整合製造系統(computer integrated manufacturing system)的出現，都可以說是這一階段的產物。它們的特色就在於通過軟件語言控制機床，使它製造指定形狀和尺寸的工件，自動按既定程序作各種不同性質的加工(例如刨平、鑽孔、磨光等等)，甚至整體地按宏觀指示調節生產過程。那也就是說，用計算機把人所訂定的製造目標(這可以有許多不同層次)轉化為一系列指令，並控制一個或多個機床協同執行。在這一階段，機床的作用變得更靈活、複雜、自動化，但每一台機床最基本的性能，即精確度和生產率，則還沒有太大變化。

我們現在所要集中討論的，是計算機在機床技術上應用的第二個階段，也就是改進上述機床基本性能的階段。

十多年前，作者就提出了「精密加工不用精密機床」(Precision Machining without Precision Machinery, 或簡稱 PMOPM) 的概念<sup>③</sup>。這個概念源於一個疑問：為甚麼有經驗的技工能夠比教加工方法的教授製出更好的工件？顯然，這是由於技工的經驗使他能更好地控制加工過程。技工是用鼻子嗅、耳朵聽和手摸來感覺加工過程的。他有意或無意地在自己心中建立加工過程的模型，並隨時對這過程實行必要調整。因此，問題是：如何用傳感器、計算機和執行器來把「經驗」加以數量化並且替代，以便能經常地和有效地利用這經驗。也就是說：怎樣能把技工的經驗客觀化和整合於機床本身，使機床轉向智能化。

#### 在線、離線與實時

在線(on-line)指在廣義流程作業(例如電子計算機之中的數據處理程序)中與作業線同時快速進行的工序，與離線(off-line)或脫線相對，後二者指脫離流水作業線另外進行的工序，耗時往往較長。實時(real-time)指在流程作業實際進行的時間內發生的事情，或完成的工序，往往與「在線」互相換用。

實現PMOPM有三個關鍵步驟：第一，利用傳感器，例如激光干涉儀和熱電偶等，來測量加工過程的誤差、機床的不精確度和溫度狀態；第二，用計算機進行「在線」數學模擬，以對加工過程或機床狀態作出預測；第三，採用「實時」控制的執行動作，例如預報補償控制 (forecasting compensatory control) <sup>④-⑧</sup>，以校正或補償機床或工件的誤差。

PMOPM的中心概念在於憑經驗不斷進行預測性誤差補償，這正符合「以粗幹精」那句俗語。

採用PMOPM的主要動機是應付研究和開發工作中面臨的挑戰。七年前，美國通用汽車公司計劃發展世界上最大、最先進的模具製造單元，用以切削20噸重以上的工件。這單元要配備一對3.4米×2.4米×1.0米的斜置工作台。機床的結構龐大，X、Y和Z方向的行程分別超過10米、3米和1米，而規定要達到的空間誤差限度則是每軸向±12微米(10<sup>-6</sup>米)。單靠改進機械構件是很難

保證這樣巨大的機械結構可以達到規定精確度的，看來只有採用離線和在線誤差補償技術才是達到所需精確度的有效途徑。

## 二 誤差補償技術

### (甲) 測量上的應用

目前座標測量機(coordinate measuring machine)已廣泛應用誤差補償技術。這技術的基礎是先用「離線」方式確定座標測量機本身的幾何誤差。一台3座標測量機，幾何誤差總共有21項分量(component)，這21項分量在座標測量機整個工作空間的數值可以用激光干涉儀、電子差動水平儀和球棒等分別測定。由此所得的機器幾何誤差數據，可以用參數方程或者表格形式存貯在計算機中。這樣，機器探測頭頂端(probe tip)的位置誤差就可以根據齊次座標轉換矩陣導出的誤差綜合數學模型計算出來，並且用以校正座標測量機位移傳感器測出的讀數。像雪菲爾測量公司(Sheffield Measurement，現改稱Giddings and Lewis Measurement Systems)為其3座標測量機而開發的「微處理器精準度系統」(microprocessor enhanced accuracy，即MEA<sup>TM</sup>)，就是這類以軟件為基礎的誤差補償系統，它能夠以低成本顯著提高3座標測量機的精確度。

### (乙) 在機床上的應用

對金屬切削機來說，誤差補償技術目前卻還未能好好利用：主要障礙是熱變形誤差，因為它的影響往往遠大於幾何誤差，並且處理起來較為複雜。但是，密芝根大學的製造研究實驗室在一台15馬力的數控「加工中心」(machining center)上的研究已經成功表明，在對幾何誤差和熱變形誤差進行補償後，機床的空間位置精確度能夠提高10倍，即誤差不超過±10微米，同時加工後工件的精確度能夠提高5倍<sup>⑨</sup>。

圖1為這台加工中心的機械結構和設定的座標系統。裝在立柱上的主軸滑板可以沿y軸移動，使刀具作上下運動；工件在x-z平面上的運動由裝在機床底座的兩層滑板實現，而z軸的橫滑板則裝在x軸的床鞍上。4個座標系統A、B、C和D則分別設定在底座和3個可動滑板上。

對這台臥式加工中心的結構進行分析後可以看出，常用的21個誤差分量還不足以表達全部由熱效應引致的誤差。因此，更全面的空間誤差模型要用到32個誤差分量，這才能完全綜合幾何和熱變形這兩類誤差。換言之，加工中心的某些熱效應為我們添增了11個誤差分量。

空間誤差模型中第一組附加熱變形誤差分量是刀具端部的熱漂移。假定圖2中虛線所示為機床結構在冷態時的形狀，實線是熱變形後的形狀，那麼即

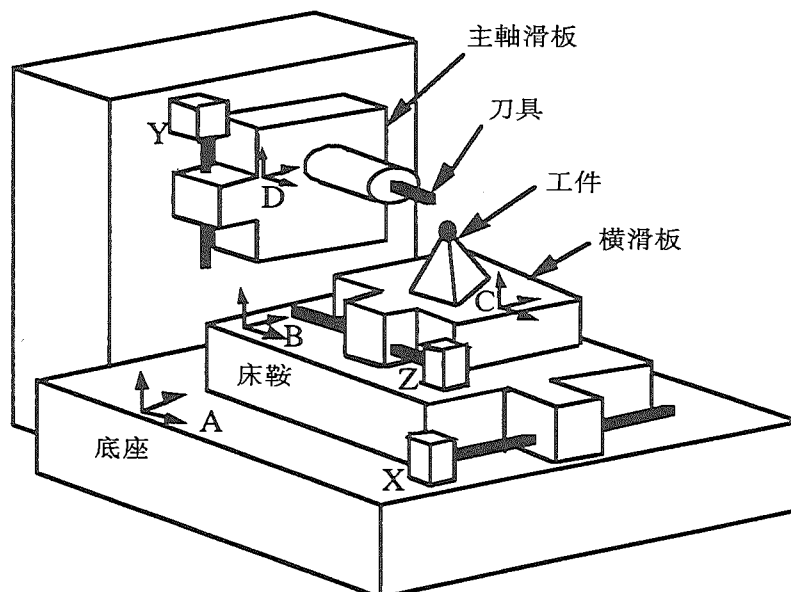


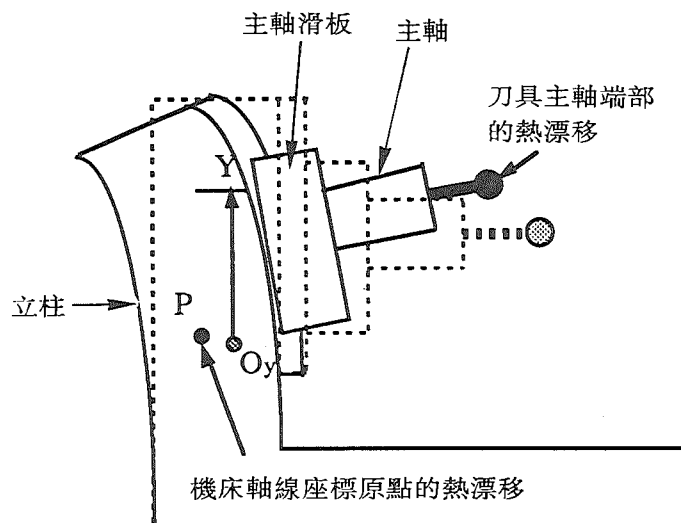
圖1 臥式加工中心的座標系統

使主軸滑板沒有(名義上的)移動, 刀具端部的位罝也會因主軸和立柱的熱變形而逐漸改變。這熱效應在理論上應能使刀具端部產生6個誤差分量, 但由於主軸本身的旋轉對刀具端部的位罝不發生影響, 因此只有5個誤差分量需加考慮。

第二組附加熱變形誤差是機床軸線座標原點的熱漂移。假設圖2中y軸座標原點在冷態(例如在標準溫度 $20^{\circ}\text{C}$ )位於 $O_y$ , 則機床工作時由於結構的熱變形, 這座標原點將逐步移到P點。熱漂移對於加工中心的3座標共可產生9個附加誤差分量, 但如將某一軸線定為其他兩軸線的基準, 則只需考慮6個分量。

由於動態效應, 熱變形誤差須在加工時實時測定。但直接測定這些誤差分量是有困難的, 所以要預先建立聯繫熱變形誤差和溫度場的經驗模型, 然後再

圖2 空間誤差模型中的附加熱變形誤差分量



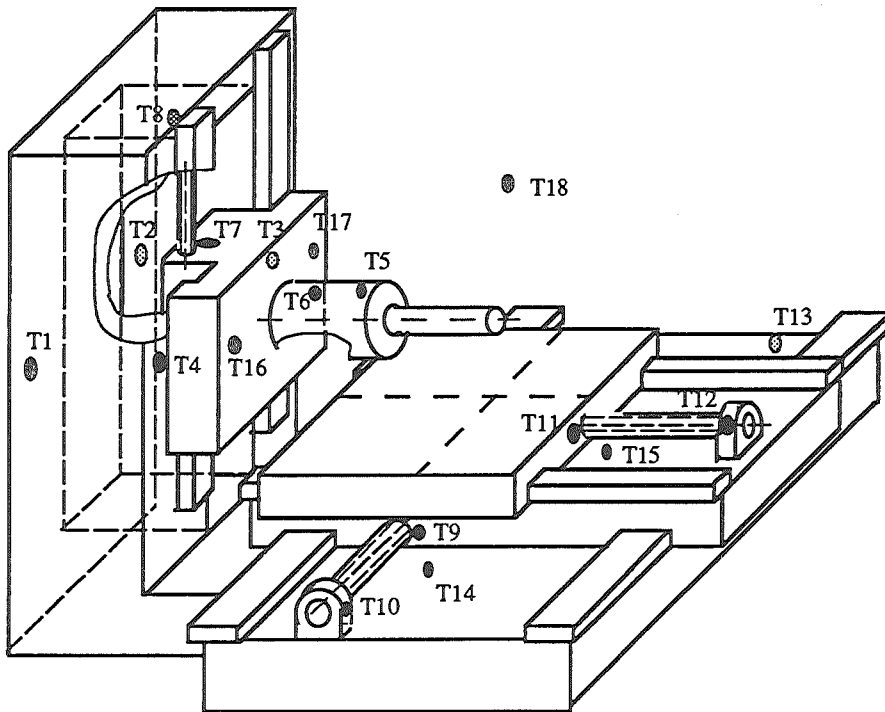


圖3 熱電偶在加工中心上的安裝

根據經驗模型和實測機床溫度場「在線」地確定各個熱變形誤差分量。我們經過初步試驗後，決定採用17個熱電偶，其在加工中心上的安裝位置如圖3所示，至於溫度傳感器T18，則是用以測量環境溫度。

全部32個變形誤差分量可以分為三組（詳見後頁方塊說明）：

- (a) 純粹由熱變形引致的上述11個誤差分量  $\delta^a$ ，它們各由圖3所示測溫點實時測得的溫差  $\Delta T_i$  決定。
- (b) 與機床3塊滑板位置相關的18個熱誤差分量  $\delta^b$ ，它們包含兩部分：一部分 ( $\delta_i^b$ ) 純粹由滑板位移決定，另一部分 ( $\delta_j^b$ ) 則與溫差和位移都有關係。
- (c) 由於機床非剛體性質所產生的直交軸耦合效應而引致的3個誤差分量  $\varepsilon$ ，這純粹由位移決定。

如加工中心誤差補償系統的整體流程圖（圖4）所示：機床溫度場由測溫系統在線檢測，滑板座標由激光檢測，檢測數據實時地輸送到熱誤差模型和運動學模型，用以決定上述32個誤差分量，至於模型中的回歸係數（它們代表了累積的經驗）則是脫線決定，並且已經貯存在微處理器數據庫中的。誤差決定之後，通過數字輸出口，發出補償信號給控制器。控制器每10毫秒左右，從輸出口拾取補償信號一次，然後據之作出座標參考原點的改變，修正空間誤差。

我們預期，這項技術將會把加工精確度提高一個數量級，並且在五年內可以用於實際生產。今後的至終目標則是一個在線測量和在線補償誤差的系統。目前這項技術應用的限制主要來自環境（如冷卻液、削屑等）對在線測量系統的

### 變形誤差分量的模型

文中所提及的純熱變形誤差  $\delta^a$  形式如下：

$$\delta = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i \Delta T_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \Delta T_i \Delta T_j + \dots \quad (1)$$

其中  $\Delta T_i$  是由熱電偶實測的溫差； $a_0, b_i, c_{ij}$  是回歸係數 (regression coefficient)。這是一個多變量非線性回歸模型，它已將機床多個不同位置的溫差對主軸端點的影響包括在內。

至於位置相關的熱誤差  $\delta^b$  可視為靜態幾何誤差  $\delta_G^b$  與有時間變化的熱致誤差  $\delta_T^b$  之和： $\delta^b = \delta_G^b + \delta_T^b$ ，其中

$$\begin{aligned} \delta_G^b &= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \\ \delta_T^b &= K_T x \\ K_T &= b_0 + \sum_{i=1}^n c_i \Delta T_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \Delta T_i \Delta T_j + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$x$  是滑板位置， $a_0, a_1, a_2$  是幾何模型誤差係數； $b_0, c_i, d_{ij}$  是熱誤差實驗擬合模型係數。這裏必須提及的是： $\delta_G^b$  與  $\delta_T^b$  的分離是通過計算誤差曲線斜率的與時變化決定，因為  $\Delta T_i$  和  $K_T$  是隨着溫度與時間變化，但  $\delta_G^b$  項只取決於  $x$ ，所以沒有時間與溫度效應。

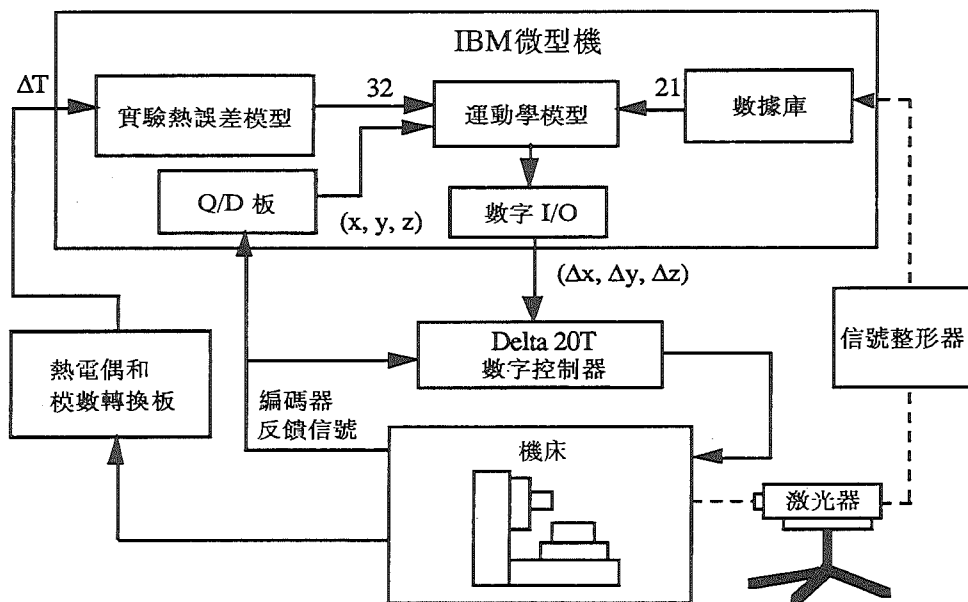
軸耦合誤差  $\epsilon$  起源於即使沒有熱效應的時候，機床亦不能視為剛體 (rigid body)，也就是說，一軸 (例如  $z$ -軸) 的行程會對另一軸 (例如  $x$ -軸) 引起誤差  $\epsilon_{zx}$ ，其形式大致上是

$$\epsilon_{zx} = e_1 x + e_4 x^4 + e_5 x^5 + e_6 x^6 + e_7 xz \quad (3)$$

其中  $e_i$  是模型中的係數。

上述三種擬合 (fitted) 模型的係數都是離線決定，並且預先貯存於微處理器的數據庫之中的。

圖4 誤差補償原理框圖





影響問題還未解決，而且，成本也是一個問題。隨着傳感器的開發和應市，這些限制當會很快消除。

### 三 顫振：從抑制到消除

倘若要達到高生產率而仍又保持高精確度，就需得解決高速加工、在線監測、預防性診斷、在線測量等一連串問題。這裏，我們僅討論加工顫振(chatter)的控制問題。

顫振研究已有近半世紀的歷史。當機床在滿負荷下工作時，顫振是主要問題之一。由於它出現的隨機性和突發性，目前還不能預測顫振。所以，現有研究只是努力於更有效地檢測和抑制顫振，以減少加工面的振紋。由是，或需採用很保守的切削速度和進給量，或需花費大量時間決定動力學不穩定區域並使機床在工作中避開這些區域。而當刀具、夾具、工件有變化時，又得重新識別不穩定區，這是非常不合算的。

其實，研究控制加工顫振的方向不應在於抑制，而應是預防。也就是說，要發展在線顫振預防技術，甚至對批量加工的第一個工件或各種單件加工情況，也都要能實現無顫振加工，而且，還要不致因為花費時間識別不穩定工作區而降低生產率。由於顫振出現的突發性、機床與加工過程的時變性，這在過去是很難實現的。但是，由於隨機(stochastic)模型和數字訊號處理器的進步，近來密芝根大學對動力系統的在線識別已經取得突破性進展。這突破使我們能在毫秒( $10^{-3}$ 秒)量級時間內識別出時變動態系統，它實際等於把「突發性」的顫振在時間上「放大」，使之可以被視為機床不穩定性的漸增過程。因此，動態系統的在線識別和顫振的早期預報已經成為可能。

初步試驗表明，利用這技術，在8毫秒之內我們就能識別由高達8階微分方程描述的任意動態系統的動態特性；通過軟件改進，識別時間最近再縮短到2毫秒。在上述時間內，利用數字信號處理器就可以重新判定系統階次和動態參數的變化。顯然，一旦顫振可以預報和控制，高速加工所面臨的主要困難就迎刃而解了。

這項技術的發展再次有力地說明，通過微處理器，我們已經能夠把人類智力的成果(例如對動態系統穩定性的了解)，在毫秒級的「真實時間」之內，與機床由傳感器所得的「感覺」相結合，從而改變其施工動作——也就是說，機床不再是單純的「機械」，而已經獲得某種相當於智能判斷與調控的初步能力了。

### 四 中國機床工業的展望

上述種種令人矚目的進步都發生於歐美。回顧中國，在過去200年間是大

大落伍了。但在此之前，中國曾經遠比其他民族走在前頭。我們早在兩千多年前，就已經使用原始的壓鑽床和車床，在漢朝初年（約公元前220年左右），就能加工出複雜的齒輪傳動裝置，裝備在指南車上。大約在同一時期，又建立了全國統一的測量標準。公元1668年，中國又採用畜力機械加工天文儀器上的主要零件。

今日又怎樣呢？我相信中國的機床工業是大有前途的，問題是如何達到這一目標。我認為，因素雖多，關鍵卻仍在於技術改進。在這方面，我們甚至會需要跳躍前進。下面我嘗試對中國大陸和台灣的機床工業作一個回顧，也順便宏觀地分析三個工業先進國家，美國、日本和德國的機床工業特點。

### （甲） 中國大陸

我1948年離國時，中國幾乎沒有甚麼機床工業可言，而1976年我第一次回去時，發現從50年代以來相當規模的機床工業已建立起來了。就我所知，現在中國已建成18個大型骨幹機床廠，350多個中小機床廠，從業人員約四十萬人。我覺得，中國工程師的技術素質和訓練都非常紮實，而工人的平均技能與世界水平相當。上海機床廠就是一個很好的例子。

1991年我再訪問中國，發現他們雖然一直在進步，但步子還不夠大：中國1990年機床工業的年產值還不到10億美元，而且，似乎並沒有長遠發展的戰略性觀點。同年美國芝加哥舉辦的國際機床展覽會上，中國展出的，大都只是沒有多少淨增值的低檔品。

另一方面，中國設有機床、機械製造、或相關專業的大學和學院總共有幾百所，每年畢業生超過一萬人，他們到與機床相關的單位工作，進行大量研究項目。這支隊伍大概是世界上從事機床研究或技術工作最龐大的生力軍了。所以，只要能立下宏遠的目標，決心精益求精，中國機床工業的前途是寬廣光明的。

### （乙） 台灣

台灣機床工業起步較晚。1954年我離開台灣時，那裏還沒有甚麼重要的機床廠。1978年我回台時，他們剛開始發展。目前，台灣機床工業從業人員約一萬六千多人。

台灣着手發展機床工業時，主要生產低檔品。當時，美國市場上有許多家庭地下室用的鑽床就是台灣造的。而今天，美國的中小型製造廠使用的中等精確度的數控加工中心，也來自台灣。確實，台灣機床工業進展之快給人以十分深刻的印象。按照美國機床製造者協會的最新報告，台灣已成為美國機床第三大供應國，僅次於日本和德國。台灣1990年機床年產值接近10億美元，與中國相若，但約有40%產品供出口之用。

比起大陸，台灣機床工業起步晚，從業人員僅及大陸的4%，而本身的市場又小。可是，為了出口，它要適應國際競爭的需要，因此比中國大陸進展快，這個經驗是值得中國大陸學習的。

### (丙) 美國、日本和德國

二次世界大戰以後，美國成為世界生產中心。1980年，美國機床工業達到顛峰，年產值(以發貨產值計算)達56億美元，但現在已經一落千丈：1990年它機床工業年產值比十年前下降超過一半，僅剩26億美元，居世界第五位，不如日本、德國、蘇聯，甚至意大利。當然，美國仍然是世界上最大機床市場之一，消耗額名列世界第四位，從世界各地都有進口。

美國富有技術創造力，許多新觀念、新思想都來自美國，例如數字控制、適應控制、彈性製造系統等等，可說不勝枚舉。由於它長遠的文化背景，以及大學和研究所研究的雄厚力量，今後大部分新發明恐怕仍將出自於美國。

日本的機床工業是在60年代才起飛的。今天，它已取得令人驚訝的進展，成為世界機床生產王國，1990年年產值已超過109億美元。日本的機床約在1970年才打入美國市場，其後短短二十年中，就逐漸「吃掉」了美國的機床工業。日本機床工業的成就，關鍵並不在於產品質量高超，而在於生產效率、銷售、服務、價格等等綜合因素。而且，日本對機床工業大量投資，對長期性機床研究也經常予以資助。

綜合機床的質量和產量而言，德國領先於世界。德國機床工業的特色，是工業和學術界聯繫密切。在許多著名大學，如阿亨(Aachen)工業大學、柏林(Berlin)工業大學、斯圖嘉特(Stuttgart)大學等，都設有研究實驗室，從工業界得到充裕資助，以進行與機床相關的研究項目。這種情況，美國比不上，甚至日本也不如。這一點非常重要，是中國機床工業要學習的。

雖然日本和德國都已經是機床大國，但他們的長遠目標並不在此。這兩個國家在不久的將來，會把技術重心轉移到新領域，諸如電子、生物技術、計算機等等上去。這樣，自然就會出現機會，使中國機床工業有躍居前列的可能。

## 五 比較和展望

把中國機床工業和機床領先國，特別是日本比較，我認為應當注意下面兩點：

(1) 日本發展機床工業起步時期的基礎，還不如今天中國機床工業的情況。

(2) 日本資源、市場有限，工人技術水平也不見得比中國高。

日本既然可以在二十年時間內成為世界機床製造的領先國，那麼沒有理由中國

不可以在相同時間取得領先地位。其實，中國所缺乏的是技術，而這不像其他因素，例如資源、市場、工人素質；只要有決心，技術是可以趕上去的。

總的來說，我對中國和中國機床工業有三個期望：第一，它應當向台灣學習，與台灣聯手合作；它也應當設法與美國結成密切的伙伴關係。這對雙方都大有好處。第二，中國必須盡力在技術上趕上世界前列，並且力求取得突破，這可以靠研究發明和成果推廣來達到。

第三，也是最重要的：中國人力資源豐富，特別是，中國人的腦力資源並不缺乏，而腦力資源是技術進步的關鍵。我深切希望，中國領導人能認真注意激發腦力工作者的積極性，並且認真創造、提供相應的體制，以發揮這種積極性。這樣，中國機床工業的前景，肯定是十分光明的。

#### 註釋

- ① William H. McNeill: *The Pursuit of Power* (Chicago Univ. Press, 1984), pp. 167–170.
- ② Paul Mantoux: *The Industrial Revolution in the Eighteenth Century* (Chicago Univ. Press, 1983), p. 309.
- ③ Rao, S.B. and Wu, S.M.: “Compensatory Control of Roundness Error in Cylindrical Chuck Grinding”, *Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry*, Vol. 104 (1982).
- ④ Huang, K. and Wu, S.M.: “Forecasting Compensatory Control (F.C.C.) of Roundness in Boring”, *ASME Intern'l Computers in Engineering Conference & Exhibit*. (Las Vegas, Nevada, 1984), pp. 378–383.
- ⑤ Moon, E.J., Eman, K. and Wu, S.M.: “Implementation of Forecasting Compensatory Control for Machining Straightness”, *ASME Winter Annual Meeting, Computer-Integrated Manufacturing & Robotics* (Dec. 9–13, 1984, New Orleans, Louisiana).
- ⑥ Kim, K., Eman, K. and Wu, S.M.: “In-Process Control of Cylindricity in Boring Operations”, *Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry*, Vol. 109, No. 4 (1987), p. 291.
- ⑦ Wu, S.M. and Ni, J.: “New Approaches to Achieve Better Machine Performance”, *Proceeding of the USA-Japan Symposium on Flexible Automation* (Minneapolis, Minnesota, 1988), p. 1063.
- ⑧ Wu, S.M. and Ni, J.: “Precision Machining without Precise Machinery”, *Annals of CIRP*, Vol. 38/1 (1989), pp. 533–536.
- ⑨ Chen, J.S., Yuan, J.X., Ni, J. and Wu, S.M.: “Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Error on a Machining Center”, *Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry* (to appear in the November 1993 issue).

## 後 記

本文原係吳賢銘教授1991年12月於香港第一屆國際製造技術會議上接受蔣震基金會所頒的蔣氏科技成就獎之後的演說辭，嗣經楊振寧教授建議，由本刊請求吳教授補充發表。由於翌年吳教授不幸因心臟病手術去世，經吳夫人同意，本刊商請吳教授在密芝根大學的同事倪軍教授代為補充，並安排譯成中文發表。除倪教授外，中國機械工業部繆滿榮博士、大連理工大學袁景霞教授以及北京密雲機床研究所潘桂森高級工程師都曾對此稿的整理、擴充及翻譯作出許多貢獻，我們謹在此向以上四位學者以及楊教授、吳夫人表示衷心感謝。

為了適應一般讀者需要，本刊編輯部在本文開頭補充了歷史背景，並對內文專業性強的部分作了調整和補充說明，倘有錯誤，當由本刊負責。

**吳賢銘** 1924年生於浙江，1945年畢業於上海交通大學財務管理學系，其後進入美國威斯康辛大學(麥迪遜校園)，轉修機械工程學，於1958年及1962年分別取得學士及博士學位。曾任教威斯康辛大學(麥迪遜校園)凡三十餘年，然後於1987年出任密芝根大學(安娜堡校園)J. Reid and Polly Anderson製造技術講座教授，以迄1992年因心臟手術不幸去世。吳教授為機械工程專家，對隨機動力系統之實時識別、在線誤差補償機床系統之發展以及鑽床動力過程之研究，均曾作出卓越貢獻，兼且熱心提掖後進，平生所造就之研究生不下七十餘人，對中國大陸及台灣機械工業之發展亦曾發揮重要影響。吳教授為中央研究院院士、美國機械工程學會及製造工程學會院士，並於1991年獲香港蔣震基金會頒予首屆蔣氏科技成就獎。