

航電產品動態學習效果之推估

—伸縮最小平方法之應用

林灼榮、徐啟升、黃泰得

摘要

本文旨在利用國內某航太業者在民國 82 年年至民國 89 年，生產四項空用電子產品之資料，推估並解析航電產品之動態學習效果。我們首先以普通最小平方法 (Ordinary Least Squares, OLS) 及伸縮最小平方法 (Flexible Least Squares, FLS) 估計學習曲線，並比較推估結果之優劣。隨後依據 FLS 方法所估計之動態係數向量，檢定產品設計修改、製程精進及組織變動前後之學習率，是否存在顯著差異；實證結果發現：(1)伸縮最小平方法非但可降低殘差項序列相關程度，同時更能掌握學習效果之動態調整歷程，提供較佳的資料適配結果。(2)四種航電產品存在顯著學習效果，但皆拒絕「80%曲線」之虛無假設；亦即「80%曲線」不能一體適用在飛機相關產業。(3)以名目成本估計學習率未必會高估學習效果，端視總體環境及個案生產特性而定。(4)學習率於產品設計修改、製程精進與組織變動前後存在顯著差異，即學習率並非固定常數；顯示應用學習曲線概念時，應將動態因素納入考慮。

關鍵字：航電產品、學習曲線、伸縮最小平方法、80%曲線。

1.緒論

自從 Wright (1936) 發表學習曲線(Learning Curve)現象及計算方式以來，航太工業已廣泛將此概念納入決策制定過程中，舉凡標準工時的建立、人力資源配置、成本估算與控制、採購與投標之評估等，均將學習曲線納入參考準據之一 (Yelle, 1979)。傳統學習曲線之推估均假設在生產過程中並無外在干擾現象，即無設計變更且製程穩定的情況下，同一產品的累積產量倍增時，其平均單位成本呈現特定比例的下降，此一比例稱為學

習率(Learning Rate)。而平均單位成本與累積產量在對數座標平面上為一線性的關係；此即業界所熟知的 Wright「80%曲線」，即學習率為 80%之謂。

但在實際應用上，廠商的生產過程並非一成不變，有時產品可能更改設計，或生產步序的精進而更節省成本，或投資更具效率的生產機具以節省人工、或經營體制之變革等¹；此等因素將使原生產情況產生停頓(Interruption)，作業人員必需適應新的產品型態、製程、新機具的操作等，而有所謂「學習—遺忘—學習」的現象產生(Jaber and Bonney, 1996, 1997)；此時，原有的學習曲線必需加以修正，否則可能無法再作為預估成本之參考依據。另外，受限於生產資料的取得不易，或資料並非刻意按學理之研究架構所記錄，一般研究的資料多為短期，或在實驗設計的控制狀態下記錄而得；而過去文獻，在推估學習曲線之「成本—產量」關係時，往往並未考慮物價膨脹或緊縮，而使名目與實質成本產生不一致之現象，進而可能高估(或低估)學習效果。另外，有關學習曲線之產品研究範疇中，過去在航空工業的應用研究，主要集中在機體(Airframe)的製造上，雖然學者多同意學習曲線的觀念可應用在其他產品的生產，但未見針對飛機相關次系統組件方面之實證研究。整合上述值得進一步探究之課題，即為本文所構思之研究動機。

基於上述之研究背景，本文旨在檢視航空工業中，機體以外產品生產的學習曲線現象。除推估實際案例的學習效果外，並將考量生產全程中所發生之產品設計修改、製程精進及經營體制改變等對學習曲線的影響及其所代表的管理涵義。具體而言，本文有三項主要研究目的：(1)檢視四種飛機空用電子產品的生產是否存在學習效果，並檢定其學習率是否符合「80%曲線」假說。(2)探討產品設計修改及製程精進，對學習曲線的影響。(3)考量於生產期間之工資調整與經營體制改變，其對應學習曲線是否存在顯著差異。在章節安排上，本文除了第壹章之緒論外，擬在第貳章回顧學習曲線之相關文獻，並引伸本文擬進一步探討此主題之重心；第參章為實證模型之設定，並推導伸縮最小平方法(Flexible Least Square, FLS)之理論特性；第肆章為實證結果，包括模型適用性評估、學習曲線估計與待證假說之檢定；第伍章為結論與研究限制。

¹本文所研究之公司，在 1996 年由任務導向型之國營企業改制為利潤導向之準民營企業(因尚未完全民營化)。

2. 文獻回顧

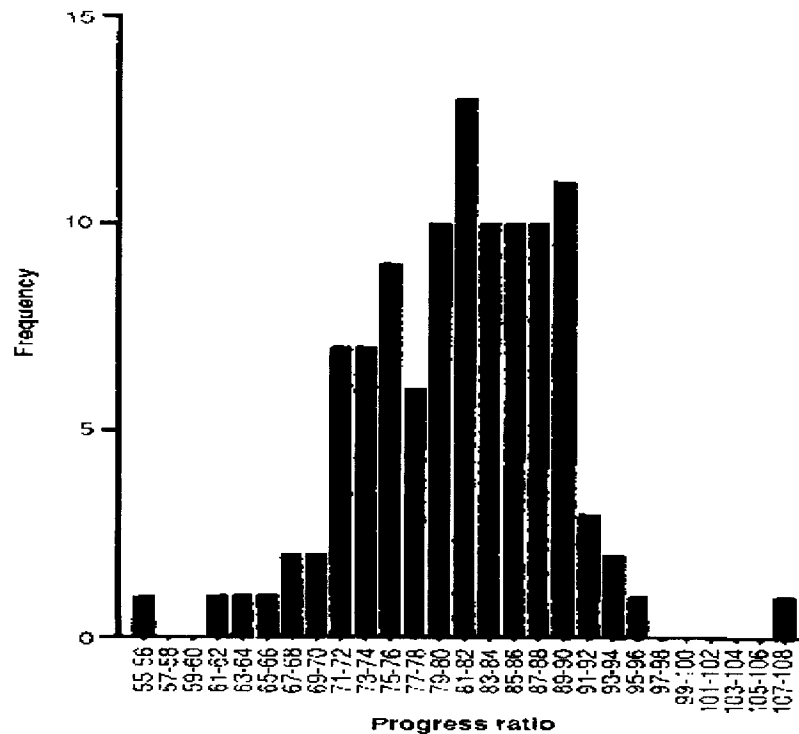
本章首先在一節說明學習曲線之意義與特性；其次，在二節回顧國內外之相關文獻，第三節簡扼評述現有文獻，並引伸本文繼續研究此課題之理念。

2.1 學習曲線之意義與特性

Wright(1936)最先提出學習曲線並加以公式化，但當時 Wright 所闡述的現象稱為進步曲線 (Progress Curve)²。Wright 發現飛機機體的累積產量為 2 倍時，其平均單位成本為累積產量的 0.8 倍，此即學習率 (Learning Rate, 簡稱 r) 為 0.8，即「80%曲線」的由來，此曲線在對數座標軸上成一負斜率的直線，故亦稱雙對數線性模式 (Double Log Linear Model)。

雖然「80%曲線」之說廣受業界引為管理決策的參考，但 Hirsch (1956) 及 Alchian (1963) 實證指出學習率並非一特定的常數，故實無「80%曲線」的通則。眾多研究均肯定學習效果廣泛的出現在各產業，但並未歸納出一穩定、合理且可準確預測未來學習率的結果。Dutton and Thomas (1984) 根據 22 項行業共 108 個個案的研究 (包含電子、工具機、資訊系統、造紙、飛機、鋼鐵、成衣、汽車等行業) 整理出其學習率的分佈情況，如《圖 1》所示。從圖中可看出其學習率分佈，從 55% 到無學習效果的情況皆可能出現。作者更進一步指出不僅不同的產業、製程或產品有不同的學習率，在相似的產品或製程間亦有不同之學習率，甚至在同一廠房的同一產品在連續的批量生產下，亦有很大的差異。

²學習曲線，又稱進步曲線 (Progress Curve)、經驗曲線 (Experience Curve)、改善曲線 (Improvement Curve) 或邊作邊學 (Learning by Doing) (Argote and Eapple, 1990)。



資料來源：Dutton and Thomas (1984)

《圖 1》學習率的分佈情況

2.2 文獻回顧

在國內外，有相當多的文獻，針對學習曲線的型態及參數估計進行研究；而就學習曲線之推估模型觀之，大抵可分為單變數及多變數模式等二種類型，茲分別回顧國內外相關文獻如下：

2.2.1 單變數模式

單變數模式大多以 Wright 的模式為基礎，再加入適當之調整因子；各模式之因變數多半為平均直接工時、平均直接人工成本、或平均產品成本，而自變數則多為累積產量，再加入如曲線修正因子、不可壓縮因子 (Incompressible Factor)、平台常數、工作初始因子等調整變數 (Asher, 1956; De Jong, 1957; Levy, 1965; Glover, 1966; Pegels, 1969; Calson, 1973; Knecht, 1974; Yelle, 1979)。茲將單變數模式的主要內容，整理在《表 1》。

《表 1》 學習曲線單變數模式

模 式	說 明
Log-Linear Model : Cumulative Average Curve $C_x = C_1 X^b$ C_x : 生產第X個單元的累積平均成本 C_1 : 生產首件單元的成本 X : 累積產量 b : 進步係數	此即Wright所提出的模式，主張直接人工成本會隨著生產數量加倍而呈等比例下降的趨勢。由於直接人工成本是由直接人工工時乘以工資率而得，故亦常以累積平均工時與首件直接工時來分別取代 C_x 及 C_1 。
Log-Linear Model : Unit Curve $Y_i = a X_i^b$ Y_i : 生產第i個單元的直接人工工時 a : 生產首件單元的直接人工工時 X_i : 生產至第i個單元時之累積產量 b : 進步係數	由Crawford (Asher, 1956) 所提出，主張生產特定單元的直接人工工時會隨著生產數量加倍而呈等比例下降的趨勢。
Standford-B Model $Y_i = a(X_i + B)^n$ Y_i : 生產第i個單元的直接人工工時 a : 生產首件單元的直接人工工時 X_i : 生產至第i個單元時之累積產量 n : 進步係數 B : 修正因子，介於 1 至 10 之常數	為 Stanford Research Institute (Asher, 1956) 於 1949 年針對二次大戰期間共 29 型飛機生產之 Unit Progress Curve 提出修正，增加修正因子 B，代表在製程開始前之相當經驗產量或相當於生產首件允收前所生產的數量。
S-curve $C_x = C_1 [M + (1-M)(x+B)^b]$ C_x : 累積平均成本 C_1 : 首件成本 M : 不可壓縮因子 B : 修正因子 b : 進步係數	Carlson (1973) 基於生產的初期通常是不穩定的，如工模具、製程方法、物料、產品設計、人員等經常變更，而假設生產初期的曲線應是緩慢上升的型態，呈鐘形曲線。其後才轉為一般進步曲線的型態。Carlson 結合了 Stanford-B 及 De Jong 的模式，其曲線呈 S 型變化。

《表 1》 學習曲線單變數模式 (續 1)

模 式	說 明
Levy's Adaptation Function $C_x = \left[\frac{1}{\beta} - \left(\frac{1}{\beta} - \frac{x^b}{C_1} \right) K^{-kx} \right]^{-1}$ C_x : 累積平均成本 β : 首件生產指數 x : 累積產量 b : 學習係數 C_1 : 首件成本 k : 當 x 很大時用來使曲線變平的常數	Levy (1965) 認為當產量累積至一定數量時，就會有所謂的「平台」現象。但對數-線性模式曲線則一直遞減，且未考慮產出率及其他影響學習效果的因素，故加入首件生產指數 β 及平台常數 K 。
Glover's Learning Formula $\sum_{i=1}^n Y_i + a = C_1 \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^m$ Y_i : 累積產量或時間 a : 工作初始因子 C_1 : 首件成本 X_i : 累積產量或時間 m : 模式參數 n : 曲線index(通常為 $1+b$)	Glover (1966) 提出的模式加進了工作初始因子，並以bottom-up的方式結合個別作業員的學習曲線，作為整廠學習曲線的基礎。
Pegel's Exponential Function $MC_x = \alpha a^{x-1} + \beta$ MC_x : 生產第 x 件的邊際成本 x : 累積產量 α 、 a 、 β 由實際資料分析而得	Pegel (1969) 所提出的是使用指數型態的模式，藉由實際經驗的資料分析得各項參數，並藉以導出總成本。

《表 1》 學習曲線單變數模式 (續 2)

<p>Knecht's Upturn Model</p> $C_x = C_1 x^b e^{cx}$ <p>C_x: 生產第x件的累積平均成本 C_1: 首件成本 b: 學習係數 x: 累積產量 c: 常數項</p>	<p>Knecht (1974) 的模式主要是表示在 $x > 200$ 時, 實際的成本與學習曲線有相當的差異, 且有平台的現象。因傳統學習曲線在 x 很大時, 累積平均成本趨近於 0, 但不合理。為避免此問題且使曲線在 x 很大時呈現平台現象, 故提出左列模式。</p>
<p>Yelle's Combined Product Learning Curve</p> $C_x = K_1 X_1^{b_1} + K_2 X_2^{b_2} + \dots + K_n X_n^{b_n}$ <p>C_x: 生產第 x 單位的成本 n: 產品製程的總數 $K_i X_i^{b_i}$: 為第 i 製程的學習曲線</p>	<p>Yelle (1979) 將產品製程分成數段, 各段製程分別有其學習曲線, 然後將各學習曲線結合成產品的學習曲線。其估計方法是將產製資料以最小平方方法適配至對數線性函數而得。</p>

資料來源：本研究整理。

2.2.2 多變數模式

單變數模式將複雜的生產過程簡化, 冀求以單一變數函數來闡述學習曲線現象, 但實際生產過程中有眾多的因素將影響學習效果(如不良率、資源利用率、產出率、產品價格、成本因素), 故遂有多變數模式的提出, 茲將相關實證文獻列示在《表 2》中 (Alchian, 1963; Goldberger, 1968; McIntyre, 1977; Womer, 1979; Gullledge and Khoshnevis, 1987; 王佳鎮, 2000; 吳文智, 2001)。然而多變數模式在實務上較少被應用, 原因可能是模式設定過於複雜, 且變數間的共線性(Multicollinearity)一直是應用時的主要障礙。

《表2》 學習曲線多變數模式

模 式	說 明
<p>Alchain's RAND Experiments</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $\log m = \alpha_2 + \beta_2 T$ 2. $\log m = \alpha_3 + \beta_3 T + \beta_4 \Delta N$ 3. $\log m = \alpha_4 + \beta_5 (\log T) + \beta_6 (\log \Delta N)$ 4. $\log m = \alpha_5 + \beta_7 T + \beta_8 (\log \Delta N)$ 5. $\log m = \alpha_6 + \beta_9 T + \beta_{10} (\log N)$ 6. $\log m = \alpha_7 + \beta_{11} (\log N) + \beta_{12} (\log \Delta N)$ <p>m：生產每磅機體的直接工時 N：累積產量 T：時間 ΔN：每月的產出率</p>	<p>Alchian (1963) 根據二次世界大戰期間的資料，用傳統進步函數(即對數線性函數)來預估生產每磅機體所需之工時，並比較預測值與實際值之差異，結果發現平均之誤差介於20至25%之間。為了驗證學習曲線可用對數線性函數來表示，Alchian於累積產量(N)之外，加入T(時間)及ΔN(產出率)等變數，如左列6個模式。但實證結果並未比傳統的單變數模式優異，原因是在變數間有高度的相關。Camm et al. (1987) 及Badiru (1992) 亦指出，共線性至今仍是應用多變數模式的主要問題。</p>
<p>Cobb-Douglas Multiplicative Power Model</p> $C = b_0 X_1^{b_1} X_2^{b_2} \dots X_n^{b_n} \varepsilon$ <p>C：預估的成本 b₀：模式的係數 X_i：第i個獨立變數(i=1,2...n) b₀：第i個變數的指數 ε：誤差項 $\varepsilon = e^u, u \sim N(0, \sigma^2)$</p>	<p>左列一般化的Cobb-Douglas乘冪模式已於Goldberger (1968) 與Gulledge and Khoshnevis (1987) 的文獻中進行相當的討論，國內如王佳鎮(2000)、吳文智(2001)亦應用此模式於產品不良率的研究。其做法是應用對數轉換及多元迴歸以估計成本。另外，Waller and Dwyer(1981)對左列函數稍做修改提出下列模式：</p> $C = C_1 X_1^{b_1} + C_2 X_2^{b_2} + \dots + C_n X_n^{b_n} + \varepsilon$ <p>其中C為成本，C_i則是獨立變數X_i的係數，並稱已成功的運用在飛彈的工具及測試裝備的成本上。然而Camm et al. (1987)認為應用迴歸方式來進行乘冪模式的適配結果可能會誤導，因為變數間可能存在著共線性的問題，而無法適切的代表生產者的行為。</p>
<p>McIntyre's General Nonlinear Models: Multiskill Model :</p> $P = p \sum_{i=1}^n X_i - c \sum_{i=1}^n a_i X_i^{b_i+1} - f$ <p>X_i：某特定時段內第i次生產的產量 a_i、b_i：第i次生產平均技術層次的參數</p>	<p>由於參與生產的作業員可能有不同的技術層次，各有其不同的學習參數。因此，在一定時間內所生產的批次n中，以$a_i X_i^{b_i+1}$表示在第i次生產中的學習曲線(即Labor Unit Curve)，在各個生產批次的學習曲線或有不同。</p>

《表2》 學習曲線多變數模式 (續1)

<p>Womer's Variable Production Rate Models</p> $q(t) = AQ^\delta(t)x^{1/\gamma}(t)$ <p>q(t)：時間t時的產出率 A：常數 Q(t)：時間t時的累積產量 δ：學習係數 γ：returns to scale 參數 x(t)：時間t時的各項資源利用率</p>	<p>Womer (1979) 提出多變數模式包含了累積產量、產出率及資源利用率等變數，其作法是先假設生產函數q(t)如左，並定義成本函數如下：</p> $C = \int_0^T X(t)e^{-pt} dt$ <p>假設某接單生產計畫的生產期間是T，而V是T的計畫累積產量（即Q(T)=V），則規劃此計畫的最小成本即求解下列函數：</p> $\min \int_0^T X(t)e^{-pt} dt$ <p>s.t $q(t) = AQ^\delta(t)x^{1/\gamma}(t)$ $x(t) \geq 0$ $Q(0)=0$ $Q(T)=V$ 解出成本函數C(t V,T)。</p>
<p>McIntyre's General Nonlinear Models: Basic Profit Function :</p> $P = pX - C(aX^{b+1}) - f$ <p>P：利潤 p：產品單位價格 X：累積產量 C：單位時間的人工成本 f：固定成本 b：學習係數 a：首件工時</p>	<p>McIntyre (1977) 提出非線性的cost-volume-profit模式，其中的成本項引進了作業員的學習效應，並藉敏感度分析探討學習率與生產時間的預測誤差對所估計的利潤與損益兩平產量的影響。McIntyre除提出Basic Profit Function外，亦提出 Multiprocess Model 及 Multiskill Model。</p>
<p>McIntyre's General Nonlinear Models: Multiprocess Model :</p> $P = pX - nca\left(\frac{X}{n}\right)^{b+1} - f$ <p>P、p、c、a、f同Basic Profit Function。 n：表示參與生產的工作群體數目</p>	<p>在Basic Profit Function中加入n表示參與生產的工作群體數目，並假設每個群體均生產 (X/n) 單位。</p>

資料來源：本研究整理

2.3 文獻評述與本文研究中心

整合《表 1》及《表 2》之國內外文獻，發現過去在推估學習曲線時，往往忽略產品的設計變更(Garg and Milliman, 1961)、通貨膨脹(Roser and Sundby, 1985)、組織變革等因素，對直接人工工時及成本的影響。然而在產製過程中，產品設計變更經常發生；在長時期的生產計畫中，通貨膨脹可能會影響產品的成本與市場競爭力；而組織變革，則可能影響人力的預估與控制等。

在實證模型之選擇上，若採單變數模式而直接以普通最小平方法(Ordinary Least Square, OLS)推估固定學習率，則非但無法反應上述三大因素對學習曲線之影響，且可能產生殘差項存在高度序列相關問題；但若改採多變數模式，則僅能利用虛擬變數(Dummy Variables)設定法，粗略反應此訊息。整合上述優缺點，本文在實證模型設定上，仍然採用簡易之單變數模式；但在推估方法上，則採伸縮最小平方法(Flexible Least Square, FLS)推估變動參數(Time-Varying Parameters)，以期能探究此三因素對學習效果之影響。

3. 實證模型、推估方法與資料來源

本章擬在第一節建構本文之實證模型；第二節介紹伸縮最小平方法之理論特性；最後，於三節說明資料來源與處理。

3.1 實證模型

依循 Wright 模式，將簡易單變數學習曲線設定如下：

$$Y = aX^{\beta} \dots\dots\dots (1)$$

式(1)中， Y 為累積平均直接工時或累積平均成本， a 為首件直接工時或首件成本， X 為累積產量， β 為進步係數(Progress Coefficient)。將式(1)取自然對數，可轉換為雙對數線性模式，並導入誤差項(Error Term)如下：

$$\ln Y = \ln a + \beta \cdot \ln X + \varepsilon \dots\dots\dots (2)$$

我們可採用最小平方法(OLS 或 FLS)，推估式(2)之進步係數(β)，並據

以計算學習率及進步率(Progress Rate)如下：

$$\text{學習率 } r = 2^{\hat{\beta}} \dots\dots\dots (3a)$$

$$\text{進步率 } P = 1 - r \dots\dots\dots (3b)$$

整合式(2)(3)之訊息，當在 $\hat{\beta} = -0.322$ ，則 $r = 0.8$ 而 $P = 0.2$ ，即 Wright 之「80%曲線」。

為了進一步評估通貨膨脹因素對學習效果之影響，本文實際設定之實證模型，分別為：

$$\ln L = \ln L_1 + \beta_L \ln Q + \varepsilon_1 \dots\dots\dots (4a)$$

$$\ln N = \ln N_1 + \beta_N \ln Q + \varepsilon_1 \dots\dots\dots (4b)$$

$$\ln R = \ln R_1 + \beta_R \ln Q + \varepsilon_1 \dots\dots\dots (4c)$$

式(4a)、(4b)、(4c)中：

- L ：組裝測試第 Q 件產品的累積平均直接工時
- L_1 ：組裝測試首件產品的直接工時
- Q ：累積產量
- N ：組裝測試第 Q 件產品的累積平均名目成本
- N_1 ：組裝測試首件產品的成本
- R ：組裝測試第 Q 件產品的累積平均實質成本
- R_1 ：組裝測試首件產品的實質成本
- β_L ：累積平均直接工時的進步係數
- β_N ：累積平均名目成本的進步係數
- β_R ：累積平均實質成本的進步係數

式(4)之對應的學習率及進步率，分別為：

$$r_L = 2^{\beta_L} \quad P_L = 1 - r_L \dots\dots\dots (5a)$$

$$r_N = 2^{\beta_N} \quad P_N = 1 - r_N \dots\dots\dots (5b)$$

$$r_R = 2^{\beta_R} \quad P_R = 1 - r_R \dots\dots\dots (5c)$$

3.2 伸縮最小平方法簡介

我們可採普通最小平方法(OLS)，分別推估式(4)之三條迴歸參數，並計算對應固定不變之學習率與進步率。基於採OLS方法可能遭受迴歸係數固定及誤差項序列相關之限制，本文擬另採用Kalaba and Tesfatsion (1989, 1996)所提出的伸縮最小平方法(Flexible Least Squares, FLS)，FLS旨在反應迴歸參數隨時間變動之特性，故又稱為Time-Varying Regression，FLS具備無需假設誤差項分配情況，即可就時間變動參數值進行變動參數

推估之特性，可解決最小平方法的固定係數限制與殘差項序列相關問題，更切合本文之實證需求。FLS的基本目的是在既定的模式準則下，決定其效率邊界(Efficient Frontier)，亦即是求得一組與模式準則偏離最小 (Minimum Incompatible) 的估計值(簡立賢，2001)；假設觀察值 y_1 、 y_2 、--- y_N 係依時間所記錄某生產過程之歷史資料結果 (以 y_N 向量表示)，且可由一線性迴歸模式加以解釋； x_N 代表已知解釋變數的向量； b_N 代表迴歸係數，傳統的迴歸模式假設 y_N 、 x_N 、 b_N 呈現以下關係：

$$y_n - x_n^T b_n \approx 0, n=1, \dots, N \dots\dots\dots (6a)$$

$$b_{n+1} - b_n \approx 0, n=1, \dots, N-1 \dots\dots\dots (6b)$$

式(6a)(6b)中， $x_n^T = (x_{n1}, \dots, x_{nk})$ 為 $1 \times k$ 的已知變數向量， $b_n = (b_{n1}, \dots, b_{nk})^T$ 為 $k \times 1$ 的迴歸係數向量。式(6a)稱為量測(線性)關係，式(6b)稱為動態(係數穩定性)關係。

當迴歸參數 b_n 會隨時間變動，則 $b = (b_1, \dots, b_n)$ 可能無法滿足式 (5a) 及 (5b) 的準則。FLS方法假設其偏差，可拆解成平方量測誤差和 (Sum of Square Measurement Errors, 簡稱SSM) 及平方動態誤差和 (Sum of Square Dynamic Errors, 簡稱SSD)，即：

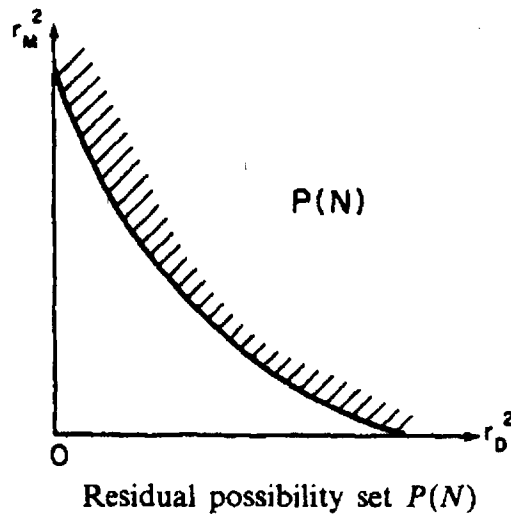
$$SSM = r_M^2(b; N) = \sum_{n=1}^N [y_n - x_n^T b_n]^2 \dots\dots\dots (7a)$$

$$SSD = r_D^2(b; N) = \sum_{n=1}^{N-1} [b_{n+1} - b_n]^T [b_{n+1} - b_n] \dots\dots\dots (7b)$$

而於觀察時間內，誤差項的所有可能組合的集合，可定義為：

$$P(N) = \{r_D^2(b; N), r_M^2(b; N) | b \in E^{NK}\} \dots\dots\dots (8)$$

式 (8) 所定義的誤差項之所有可能組合，如《圖 2》所示。



資料來源：Kalaba and Tesfatsion(1989)
 《圖 2》 殘差項之可能組合

當迴歸式滿足式 (6a)、(6b) 之特性，則其誤差為 0，即《圖 2》之原點。然而因 SSM 與 SSD 的存在， $P(N)$ 將離開原點，其下緣為一凸向原點的邊界，代表於時間 N 時所可能獲得的最小誤差組合，此邊界以 $P_F(N)$ 表示，而在此邊界之參數估計值，稱為 FLS 迴歸係數。FLS 方法，旨在求取為消除 SSM 與 SSD 兩種不同來源的誤差，所必須付出的非容受成本 (Incompatibility Cost) 達到極小化，此關係式可表示如下：

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C(b; \mu, N) &= \mu \cdot r_D^2(b; N) + r_M^2(b; N) \\ &= \mu \cdot SSD + SSM \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

式(9)中， $\mu \geq 0$ 代表 SSD 的權數，而其對應效率邊界為：

$$P_F(N) = \{r_D^2(\mu; N), r_M^2(\mu; N) | 0 \leq \mu < \infty\} \dots\dots\dots (10)$$

當 $\mu = 0$ 時，式 (9) 之 SSD 權數等於 0，因此不管 SSD 為何，可將 SSM 降為 0，而以 SSD 為其容受成本；當 $\mu \rightarrow \infty$ ，則儘可能使 SSD 為 0，僅考慮 SSM 以獲得最小容受成本之係數向量，此時式 (9) 代表普通最小平方法之參數之殘差平方和，故可將 OLS 視為 FLS 的特殊情況。

為了便於計算，Tefatsion and Veitech (1990) 取 δ 為 μ 值之一般化平滑權數：

$$\delta = \frac{\mu}{1 + \mu}, \text{ 即 } \mu = \frac{\delta}{1 - \delta} \dots\dots\dots (11)$$

式 (11) 中， $\delta \in [0,1)$ ；則非容受成本可簡化為：

$$C(b; \mu, N) = \frac{1}{1-\delta} [\delta \cdot SSD + (1-\delta) \cdot SSM] \dots\dots\dots (12)$$

3.3 資料來源與特性分析

3.3.1 原始資料

本文所研究之樣本公司(以下簡稱，甲公司)將產品發工製造的流程分為零件 (Piece Parts)、次組件 (Shop Replacement Unit, 簡稱 SRU)、成品 (Line Replacement Unit, 簡稱 LRU) 等三階。甲公司按步序發工製作 SRU，每個 SRU 有一工號；等到 LRU 所需的 SRU 均完工後，再以另一工號發工組裝 LRU 並執行測試，完工後即繳庫除帳。甲公司實施報工制度，以為記錄及管理所需。其報工的作法是依單一工號報工，再由會計系統計算管理成本及單一工號的總成本，但對於個別的 LRU 並未統計其產品的總成本，且於報工系統中無法追溯個別 LRU 所含的 SRU 工號，至於對外報價時則以該產品全部工號的成本平均後，加總成單一產品的總成本。因此，欲求出各別產品的生產成本，必需以人工方式從工令 (Shop Order) 文件中去統計個別 LRU 所含的 SRU 工號，方可計算出個別產品所實際投入的料、工、費記錄。

由於資料來源的限制，本文所蒐集的資料為甲公司於 81 年至 89 年間 LRU 組裝測試至繳庫的生產記錄。所謂 LRU 組裝測試，是將已繳庫備用的 SRU 組合成成品，經系統功能測試及品保檢驗後包裝繳庫的流程，其製程包含了生管人員備料發工、製造人員進行總組裝、測試人員進行功能測試、環境試驗、系統試驗等；品保人員則於每個工作站完工時進行檢驗。甲公司對案例產品的物料成本，是以零件包的合約價格計算，並未依實際物料的使用情況記錄，因此有同生產階段內 SRU 或 LRU 的物料成本均相同的不合理情況。故本研究只取直接人工工時、直接人工成本及製造費用等資料進行分析，每筆資料中包括發工時間、完工時間、工號、直接工時、直接人工成本、製造費用等。直接人工成本，由實際投入的員工之工時乘以個別工資率加總而得；製造費用，則包含了以工作中心為基礎所計算之攤提費、生管費用及行政管理費，均以個別員工之工時乘以個別之費用率加總而得。各筆資料均為當年度的記錄，成本則由會計系統所提供之帳面

(名目)資料。

3.3.2 資料特性分析

甲公司四項產品的生產過程大致可由重大工程修改與製程精進為分界點分為三個階段，各階段的生產資料筆數如《表 3》所示，包括：(1)階段 I：STARTUP 階段，從生產開始至重大工程修改前為止的階段；(2)階段 II：以重大工程修改為起點，至製程精進前為止的階段；(3)階段 III：以製程精進為起點，至生產結束為止的階段。由《表 3》顯示，A 與 B 兩項產品在生產開始後 4 個月內即進行重大工程修改，僅分別累積 5、6 具的經驗；相對於 C、D 產品而言，本研究假設 A、B 產品在階段 I 之生產為製程不穩定的情況，不列入後續之資料分析。而 C 產品則在生產開始後 11 個月才進行重大工程修改，D 產品則在生產開始後 6 個月才進行重大工程修改，二者在階段 I 已累積相當經驗，故仍計列其資料。

《表 3》各階段的生產資料筆數

產品	生產各階段					
	階段 I		階段 II		階段 III	
	期間	觀察值	期間	觀察值	期間	觀察值
A	82.10 ~ 83.03	5	83.03 ~ 84.03	35	84.03 ~ 89.12	86
B	83.03 ~ 83.05	6	83.05 ~ 84.03	32	84.03 ~ 88.09	76
C	81.11 ~ 82.10	23	82.10 ~ 83.12	34	83.12 ~ 88.12	86
D	82.11 ~ 83.05	50	83.05 ~ 84.04	28	84.04 ~ 88.12	175

資料來源：本研究整理

另外為了比較名目成本與實質成本對推估學習效果的差異，本研究參考經濟部統計的「運輸工具製造修配業受雇員工每人每月平均薪資」，自民國 81 年 7 月至 89 年 12 月之月資料，以 85 會計年度（民國 84 年 7 月至 85 年 6 月）為基期，計算各年度的平減比例，再將原始名目成本加以平減，據以計算實質成本。茲將式(4a)(4b)(4c)待推估之學習曲線，所對應實際資料特性，以 A 產品為例，繪製在《附圖 1》中(為節省篇幅，省略 B、C、D 產品之趨勢圖)；由《附圖 1》之趨勢圖波動情況，可客觀發現學習率並非固定常數；換言之，FLS 相對於 OLS 方法，較適合作為本文之實證方法論。

4. 實證結果

依循第參章所設定之實證模型與資料來源，本章擬在第一節為 OLS 與 FLS 之推估結果與適用性評估；第二節進行「80%曲線」之虛無假設檢定；第三節進行名目成本及實質成本估計學習率之差異檢定；第四節進行生產三階段學習率的比較檢定；第五節進行改制前後學習率的差異檢定。

4.1 參數推估結果與模型適用性評估

4.1.1 迴歸參數推估結果

首先，以普通最小平方法(OLS)依式(4a)~(4c)推估四項產品之學習曲線，實證結果列在《表4》中。實證結果顯示，無論就直接工時(L)、名目成本(N)及實質成本(R)，其迴歸係數(β_i , $i=L,N,R$)均顯著小於0；換言之，此四項產品均存在顯著學習效果。然而由 DW 值顯著不等於2(P值皆小於5%)及接近1之一階自我相關係數(ρ , $i=L,N,R$)，顯示殘差項存在嚴重序列相關問題。

《表4》 OLS 推估結果

產品	項目	$\hat{\beta}_i$ 估計		殘差項檢定		
		$\hat{\beta}_i$	t ratio	DW 值	DW p value	$\hat{\rho}$ 值
A	LnL	-0.169	-25.52*	0.107	0.000*	0.944
	LnN	-0.173	-26.16*	0.182	0.000*	0.822
	LnR	-0.195	-33.19*	0.209	0.000*	0.808
B	LnL	-0.148	-24.67*	0.197	0.000*	0.885
	LnN	-0.074	-5.55*	0.070	0.000*	0.956
	LnR	-0.094	-8.05*	0.081	0.000*	0.951
C	LnL	-0.192	-34.02*	0.094	0.000*	0.880
	LnN	-0.092	-9.82*	0.056	0.000*	0.912
	LnR	-0.190	-71.99*	0.066	0.000*	0.966
D	LnL	-0.232	-33.30*	0.047	0.000*	0.969
	LnN	-0.166	-26.12*	0.074	0.000*	0.960
	LnR	-0.198	-30.04*	0.065	0.000*	0.957

註：*代表5%判定水準顯著。

其次，以伸縮最小片方法推估四項產品之學習曲線，而其關鍵程序在於本文應用敏感度分析的概念，在 δ 的值域內(即0至1之間)，由0.001至

0.999 平均選取 999 個不同的 δ 值測試模型的績效，結果顯示當時，其非容受成本最小³，故以進行FLS變動參數之推估。茲以A產品為例(省略B、C、D產品)，將FLS參數推估結果列在《附圖 2》中，並計算 4 項產品之參數其平均值及對應t值，列在《表 5》中；由《附圖 2》及《表 5》小於 0 之及顯著之t值，顯示本文所研究之航電產品，確實存在顯著學習效果，且其學習率並非一成不變。

《表 5》 FLS 變動參數結果($\delta=0.001$)

產品	迴歸式	$\hat{\beta}_i$ 平均值	t 值
A	LnL	-0.212	-6.625*
	LnN	-0.286	-6.177*
	LnR	-0.295	-6.876*
B	LnL	-0.188	-7.833*
	LnN	-0.203	-4.134*
	LnR	-0.206	-4.725*
C	LnL	-0.263	-9.326*
	LnN	-0.217	-4.876*
	LnR	-0.191	-12.993*
D	LnL	-0.197	-5.811*
	LnN	-0.153	-4.274*
	LnR	-0.165	-4.609*

註：*代表 5%判定水準顯著。

4.1.2 模型適用性評估

茲將 OLS 與 FLS 之模型適用性評估，列在《表 6》中，顯示：(1)以 R2 而言，FLS 之 R2 皆近 1 且皆大於 OLS，顯示 FLS 方法之迴歸配適度優於 OLS 方法；(2)以均方根誤差(RMSE)而言，FLS 之 RMSE 趨於 0 且皆小於 OLS，顯示 FLS 之模擬能力優於 OLS；(3)以非容受成本而言，FLS 之非容受成本趨於 0 且皆小於 OLS，故 FLS 的推估結果明顯優於 OLS；(4)以 A 產品為例(省略 B、C、D 產品)，本文將 A 產品之實際值、OLS 模擬值及 FLS 模擬值，繪置在《附圖 3》中；由《附圖 3》之趨勢線，更可清晰看出 FLS 方法之模擬能力相對優於 OLS 方法。換言之，採存在序列相關且模擬能力較差之 OLS 方法，將會高估 A、B、C 產品及低估 D 項產品

³本文以SHAZAM計算各 δ 所對應之SSM、SSD及非容受成本，經實際比較數據並繪圖後發現，以 $\delta \rightarrow 0$ 時其非容受成本最小(=SSD)，詳如附錄B。當 δ 由0往1增大時，FLS的模擬值逐漸拉向OLS的模擬值；當 δ 趨近於1時(即 $\mu \rightarrow \infty$)，FLS的模擬值等於OLS的模擬值。

之學習率；故本文後續之待證假說，皆以 FLS 推估結果作為判定準據。

《表 6》 OLS 與 FLS 之適用性評估

產品	依變數	R ²		RMSE		非容受成本	
		OLS	FLS	OLS	FLS	OLS	FLS
A	LnL	0.846	1.000	0.068	0.821E-05	0.548	0.117E-04
	LnN	0.852	1.000	0.068	0.106E-04	0.546	0.158E-04
	LnR	0.903	1.000	0.060	0.106E-04	0.431	0.157E-04
B	LnL	0.852	1.000	0.058	0.992E-05	0.354	0.166E-04
	LnN	0.225	1.000	0.046	0.952E-05	1.764	0.149E-04
	LnR	0.379	1.000	0.060	0.945E-05	1.357	0.142E-04
C	LnL	0.891	1.000	0.063	0.574E-05	0.569	0.106E-04
	LnN	0.406	1.000	0.105	0.588E-05	1.578	0.116E-04
	LnR	0.974	1.000	0.030	0.165E-05	0.124	0.153E-05
D	LnL	0.851	1.000	0.106	0.127E-04	2.833	0.353E-04
	LnN	0.731	1.000	0.054	0.132E-04	2.348	0.431E-04
	LnR	0.782	1.000	0.056	0.132E-04	2.548	0.429E-04

註：1. $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$ ；

2. 由於 OLS 為 FLS 的極端情況(當 $\mu \rightarrow \infty$)，其非容受成本即為 SSE(Sum of Square Errors)。

4.2 80%曲線之檢定

茲將 FLS 所推估之學習率與 80%曲線($\beta = -0.322$)進行之差異檢定，例在《表 7》中。表中顯示四項產品之學習率，介於 81.5%至 89.9%之間，且均顯著大於 80%，故拒絕「80%曲線」的現象；即「80%曲線」概念不能一體套用於飛機相關產業。此等訊息顯示，本文之案例產品的進步率顯著低於 20%；換言之，其生產效率與競爭力並沒有相像中高。

4.3 工資平減與否之差異性檢定

本文另一待證假說，在於檢定通貨膨脹因素對學習效果是否存在顯著衝擊；茲將名目成本及實質成本所估計的學習率及其差異檢定，列在《表 8》中。檢定結果顯示：(1)產品A與產品B之學習率，受通貨膨脹之影響不顯著；(2)產品C之名目成本學習率小於實質成本學習率，即以名目成本所

推估之迴歸式，會高估進步率(學習效果)；(3)產品D之名目成本學習率則大於實質成本學習率，即低估進步率(學習效果)。⁴

一般而言，平均工資理應隨通貨膨脹而逐年上漲，若未考慮此因素，則可能高估學習效果。但由於本研究所依據的平減比率，在民國 87 至 89 年度並非逐年上漲；且由《表 8》實證結果，似乎並無一定規則可循。因此，以名目成本推估學習曲線，是否會高估學習效果，仍必需就個案之生產特性及在總體物價變動率而定。

《表 7》 個案學習率與 80%曲線之差異性檢定

產品	迴歸式	FLS 推估結果		與 80%曲線比較 t 值
		$\hat{\beta}_i$ 平均	學習率	
A	LnL	-0.212	0.864	37.432*
	LnN	-0.286	0.820	9.892*
	LnR	-0.295	0.815	7.211*
B	LnL	-0.188	0.878	56.427*
	LnN	-0.203	0.869	24.493*
	LnR	-0.206	0.867	26.971*
C	LnL	-0.263	0.833	24.890*
	LnN	-0.217	0.860	27.729*
	LnR	-0.191	0.876	100.131*
D	LnL	-0.197	0.873	58.536*
	LnN	-0.153	0.899	74.637*
	LnR	-0.165	0.892	68.831*

註：H₀：r_{FLS} = r_{80%}，

H₁：r_{FLS} ≠ r_{80%}；*表 5%判定水準顯著。

《表 8》 名目成本與實質成本學習率差異性 t 檢定

產品	FLS 所推估之學習率		t 值
	名目成本	實質成本	
A	0.8203	0.8150	1.672
B	0.8689	0.8672	0.473
C	0.8601	0.8762	-6.850*
D	0.8994	0.8918	4.045*

註：H₀：r_N = r_R，H₁：r_N ≠ r_R；*表 5%判定水準顯著。

⁴所謂「高估」，意指實際的學習率較大；實際於產量備增後，其成本下降的幅度較小。

4.4 生產三階段學習率之差異性檢定

FLS 的係數向量計算學習率向量，再根據 3.3.2 節《表 3》所敘述的三個生產階段，比較檢定各階段學習率的差異。其中，產品 A 與產品 B 於階段 I 之資料並不計列，故只檢定階段 II 與階段 III 之學習率差異；產品 C 與產品 D 則可同時檢定階段 I 與階段 II(反應製程修改前後)、階段 II 與階段 III(反應製程精進前後)的學習率差異。茲將檢定結果，列在《表 9》中。

《表 9》 各階段學習率差異性檢定

產品	依變數	學習率			t 值	
		階段 I	階段 II	階段 III	I vs. II	II vs. III
A	LnL	—	0.850	0.869	—	-5.959*
	LnN	—	0.793	0.832	—	-10.523*
	LnR	—	0.790	0.826	—	-10.271*
B	LnL	—	0.864	0.884	—	-8.300*
	LnN	—	0.837	0.883	—	-10.832*
	LnR	—	0.838	0.880	—	-11.017*
C	LnL	0.811	0.826	0.842	-3.316*	-19.576*
	LnN	0.816	0.854	0.875	-8.157*	-8.513*
	LnR	0.881	0.871	0.877	2.648*	-17.934*
D	LnL	0.872	0.898	0.869	-3.828*	15.681*
	LnN	0.900	0.921	0.896	-2.575*	19.876*
	LnR	0.898	0.915	0.887	-2.257	23.181*

註：1.階段 I 與階段 II 比較：

$H_0: r_I=r_{II}$ ，*表示 5%判定水準顯著。

2.階段 II 與階段 III 比較：

$H_0: r_{II}=r_{III}$ ，*表示 5%判定水準顯著。

《表 9》顯示：(1)產品 C 及產品 D 之累積平均工時(lnL)與累積平均名目成本(lnN)於重大工程變更後(由階段 I 調整至階段 II)，其學習率上升而進步率下降，原因可能是工程修改增加了製程的項目而必需重新學習；然而，可能因投入的人工及製造費用等單位成本較低，故產品 C 之累積平均實質成本(lnR)的進步率卻是上升，而產品 D 之累積平均實質成本的進步率並無顯著差異。(2)產品 A、B、C 於第 III 階段之進步率均顯著低於第 II 階段，顯示雖然製程精進有助於效率的提升，然而在第 III 階段中人員流動頻繁，加上非直線部門人員支援生產，其人工及製造費用等單位成本較高，使得整體的效率下降。(3)產品 D 於階段 III 之進步率則顯著比階段 II

為高，顯示雖然階段 III 有改制的影響因素，但產品 D 於階段 III 持續生產了 175 具，遠大於其他產品個別的總生產量；故綜合製程精進因素所提昇之學習效果大於改制之影響。

4.5 改制前後學習率之差異性檢定

以^{*}FLS 係數向量計算各產品之學習率，再依改制時點比較改制前後學習率，如《表 10》所示。《表 10》顯示：(1)產品 A 之累積平均直接工時並不顯著，表示改制前後員工的技術水平相當；但其累積平均名目成本及累積平均實質成本的進步率均顯著下降，顯示改制後投入的人工與製造費用單位成本上升，原因可能是高攤提費部門的員工支援生產所致；(2)產品 B 之進步率於改制後均顯著下降，其原因可能是員工流動及以其他部門員工支援生產，部份員工必需重新學習相關技術所致；(3)產品 C 之累積平均直接工時、累積平均名目成本的進步率於改制後均顯著下降；其原因亦可能為員工流動而影響學習的效果；然而其下降程度不高，可能係因所投入的人工與製造費用單位成本比改制前低，故其累積平均實質成本的進步率於改制後並無顯著變化；(4)產品 D 的進步率於改制後均顯著上升，其原因可能是產品 D 於改制後共生產 123 具，相當於其他產品的總生產量，故其學習效果得以持續且大於改制之影響。

《表 10》 改制前後學習率差異性 t 檢定

依變數 產品	lnL			lnN			lnR		
	r _B	R _A	t 值	r _B	R _A	t 值	r _B	R _A	t 值
A	0.863	0.865	-0.709	0.811	0.836	-5.957*	0.808	0.828	-5.099*
B	0.875	0.882	-2.540*	0.855	0.892	-7.999*	0.856	0.886	-7.032*
C	0.828	0.845	-7.248*	0.849	0.884	-9.282*	0.876	0.878	-1.169
D	0.881	0.865	7.113*	0.904	0.895	3.628*	0.899	0.884	6.125*

註：H₀: r_B = r_A ; r_B: 85 年 7 月前學習率之平均值，r_A: 85 年 7 月後學習率之平均值。*表 5%判定水準顯著。

5. 結論與研究限制

本文以簡易之單變數學習曲線模型，輔以可以反應迴歸參數隨時間變動之伸縮最小平方法(FLS)，推估台灣某航太公司所生產之四項航電產品，在民國 82 年 10 月至 89 年 12 月間之學習率與對應進步率；並檢定該公司之學習曲線，是否接受「80%曲線」之命題，及是否顯著受到通貨膨脹、製程修改、製程精進及體制變革之影響。茲將重要發現，歸納如下：

1. 當學習率存在動態變化時，採變動參數之伸縮最小平方法，其模適用性相對優於固定參數之普通最小平方法(OLS)。換言之，當產品生產受到通貨膨脹、產品研改、製程精進與公司改制之影響時而改變學習率時，以 OLS 進行學習曲線之推估將產生偏誤的推估結果。
2. 四項產品均具顯著學習效果，學習率約介於 81%至 90%之間，且學習效果顯著低於「80%曲線」；亦即「80%曲線」概念，不能一體適用於飛機相關產業。此等訊息顯示該公司所生產之四項產品的進步率，皆顯著低於 20%；換言之，其生產效率與競爭力低於普遍之認知數據。
3. 以名目成本估計學習率，未必會高估學習效果；換言之，通貨膨脹因素對學習率之影響，仍需就當時的總體經濟情況與個案生產特性而定。
4. 產品重大工程修改(階段 I 至階段 II)，可能增加製程的項目而必需重新學習，故累積平均工時與累積平均名目成本的進步率於階段 II 皆顯著下降；但可能因所投入的人工與製造費用實質成本較階段 I 為低，故於階段 II 的累積平均實質成本的進步率，有些產品呈現顯著上升現象。
5. 製程精進(由階段 II 至階段 III)雖然有助於提高生產效率，然而因在階段 III 有改制因素的影響，人員流動頻繁，加上非線上部門人員支援生產，其人工及製造費用等單位成本較高，使得整體效率下降；故產品 A、B、C 於第 III 階段之進步率，均顯著低於第 II 階段。產品 D 於階段 III 之進步率則顯著比階段 II 為高，可能肇因於階段 III 生產了 175 具，遠大於其他產品個別的總生產量，學習效果得以持續，加上製程精進因素，其學習淨效果大於改制的影響。
6. 於改制前後，人事的更動較為頻繁，加上製造人員短缺，故以其他部門人員支援生產，其人工與製造費用的成本較高，可能影響產品生產的

學習率。整體言(產品 D 除外), A、B 及 C 產品, 在 85 年 7 月改制後之學習率相對低於改制前。

7. 實證結果顯示, 案例產品生產的學習率於產品設計修改、製程精進與組織變動前後存在顯著差異, 即學習率並非固定常數; 故應用學習曲線概念時, 應將動態因素納入考慮。

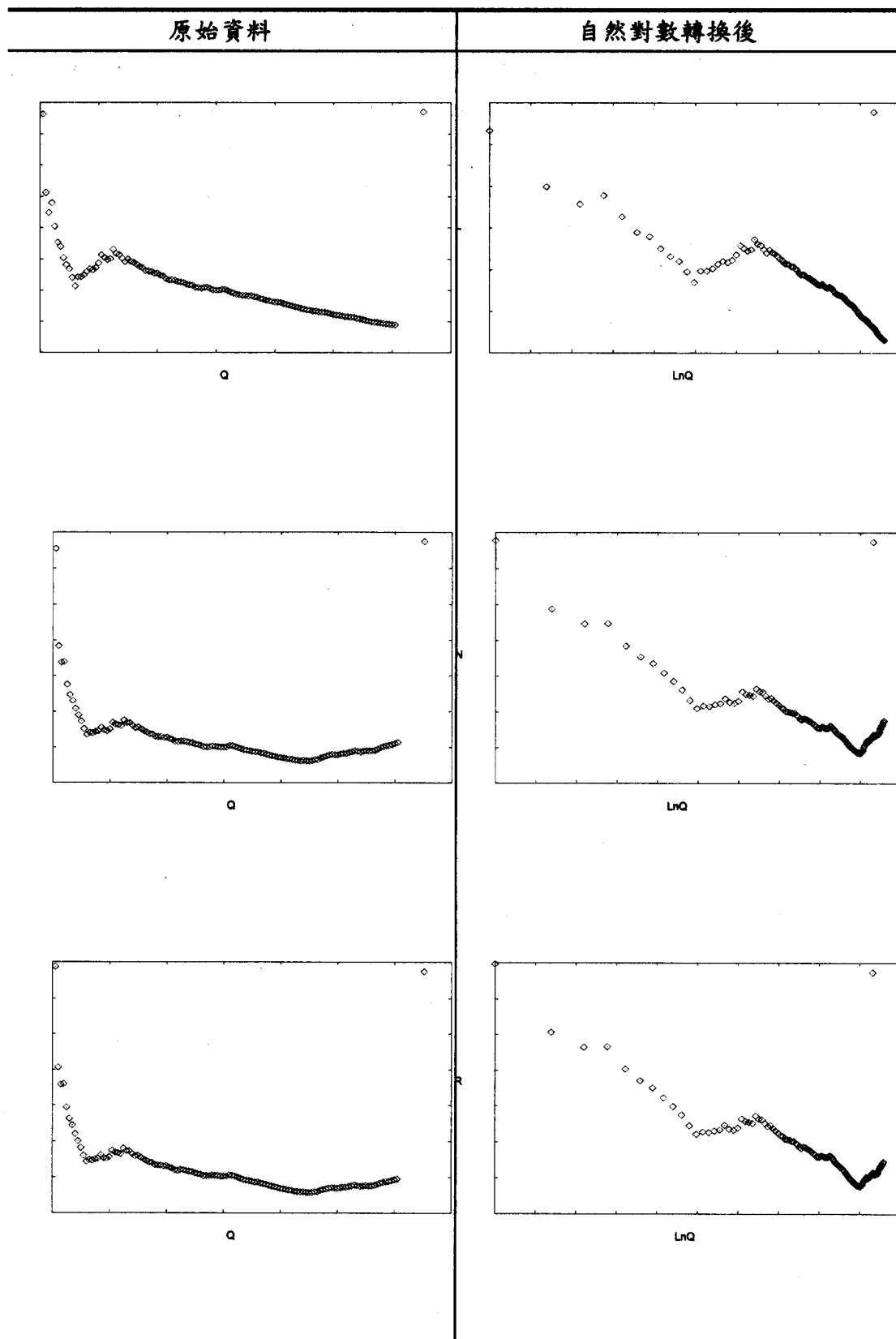
本文雖已客觀評估 OLS 與 FLS 方法的適用性, 然而在學習曲線模型的選擇上仍採用 Wright 之最簡易模式, 且在製程修改與製程精進之階段選擇, 均採主觀之經驗認定, 未來應可朝下列方向進行研究: (1) 本研究於進行各階段學習率的比較時, 主觀認定各階段的區分時點, 並未採取統計方法檢測結構性變化(Structural Change), 是為研究限制之一。(2) 於觀測時間內同時有數項同性質的產品進行生產, 但本研究並未探討其間之交互影響; 換言之, 應可利用聯立方程式同時推估生產類似產品部門間之學習曲線。(3) 本研究採用 Wright 單變數學習曲線模式, 未來應可就實際情況增加解釋變數, 以期提供更多有助於經營管理之訊息。

參考文獻

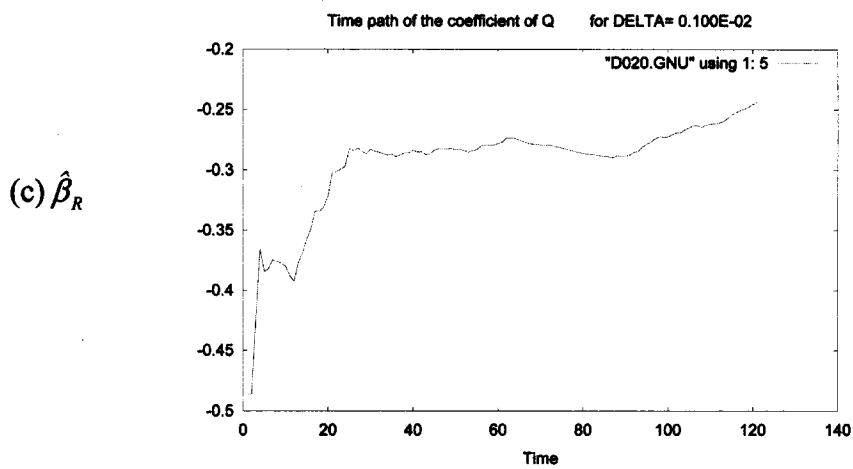
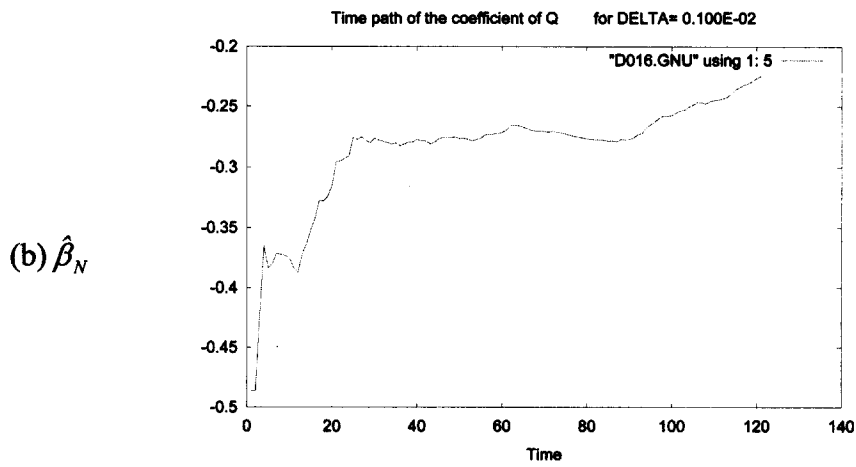
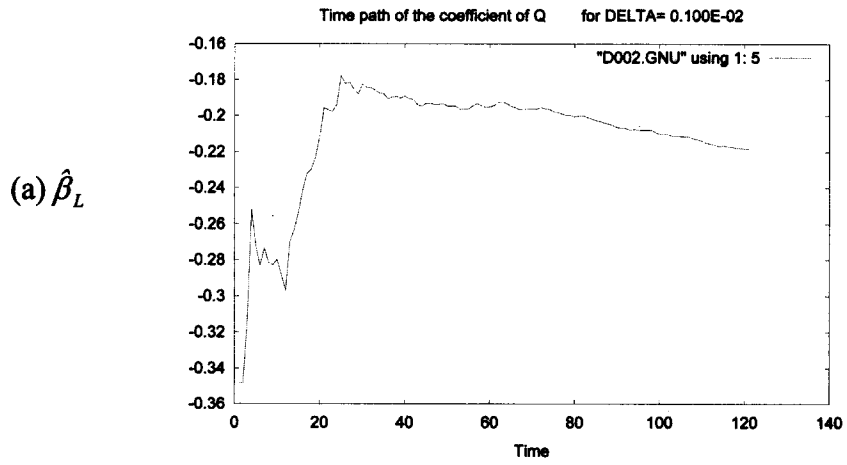
- 王佳鎮(2000), 「學習曲線在通訊產業之應用—個案研究」, 國立交通大學工業工程與管理研究所碩士論文。
- 吳文智(2001), 「學習曲線在 TFT-LCD 產業之應用研究」, 國立交通大學工業工程與管理研究所碩士論文。
- 陳冠羽(1998), 「IC 製造業應用學習曲線於成本模式之研究」, 國立交通大學工業工程與管理研究所碩士論文。
- 簡立賢(2001), 「美國穀物價格風險估測之研究—伸縮最小平方法之應用」, 農產運銷論叢, 第 6 期, 263~277 頁。
- Alchian, T.K.(1963), "Reliability of Progress Curves in Airframe Production." *Econometrica*, Vol.31, No.4, pp.679~693
- Argote, L. And D. Eapple(1990), "Learning Curves in Manufacturing." *Science*, No.247, pp.920~924
- Arrow, K.J. (1962), "The Economic Implications of Learning by Doing." *Review of Economic Studies*, Vol.29, pp.166~170.

- Arzi, Y. and A. Shtub (1997), "Learning and Forgetting in Mental and Mechanical Tasks: A Comparative Study." *IIE Transactions*, No.29, pp.759~768.
- Asher, H. (1956), " Cost-Quantity Relationships in the Airframe Industry," *RAND Rep.*, No. R~291.
- Badiru, A.B.(1992), "Computational Survey of Univariate and Multivariate Learning Curve Models." *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol.39, No.2, pp. 176-188.
- Camm, J.D., T.R. Gullledge, and N.K. Womer (1987), "Production Rate and Contractor Behavior." *Journal of Cost Analysis*, Vol.5, No.1, pp.27~38.
- Carlson, J.G.(1973), " Cubic Learning curves : Precision Tool for Labor Estimating" *Manufacturing Engineering and Management*, Vol.71, No.5, pp.22~25.
- De Jong, J.R. (1957), "The Effects of Increasing Skill on Cycle Time and Its Consequences for Time Standards." *Ergonomics*, pp.51~60,
- Dutton, J. M. and A. Thomas (1984), "Treating Progress Functions as a Managerial Opportunity." *Academy of Management Review*, Vol.9, No.2, pp.235-247.
- Garg, A. and P. Milliman(1961), " The Aircraft Progress Curve Modified for Design Changes." *Journal of Industry Engineering*, Vol.12, No.1, pp.23~27.
- Glover, J.H.(1966), "Manufacturing progress functions : An Alternative Model and Its Comparison with Existing Functions." *International Journal of Production Research*, Vol.4, No.4, pp.279~300.
- Goldberger, A.S.(1968), "The Interpretation and Estimation of Cobb-Douglas Functions." *Econometrica*, Vol.35, Nos.3-4, pp.464~472.
- Gullledge, T.R. and B. Khoshnevis(1987), "Production Rates, Learning and Program Costs: Survey and Bibliography." *Engineering Costs and Production Economics*, Vol.11, pp.223~236.
- Hall, G. and S. Howell (1985), "The Experience Curve from the Economist's Perspective." *Strategic Management Journal*, Vol.6, pp.197-212.
- Hirsch, W.Z.(1956), "Firm Progress Ratios." *Econometrica*, Vol.24, No.2, pp.136~143.
- Jaber, M. Y. and M. Bonney(1996), "Production Breaks and the Learning Curves: The Forgetting Phenomenon." *Appl. Math. Modelling*, Vol.20, pp.162~169.
- Jaber, M. Y. and M. Bonney (1997), "A Comparative Study of Learning Curves

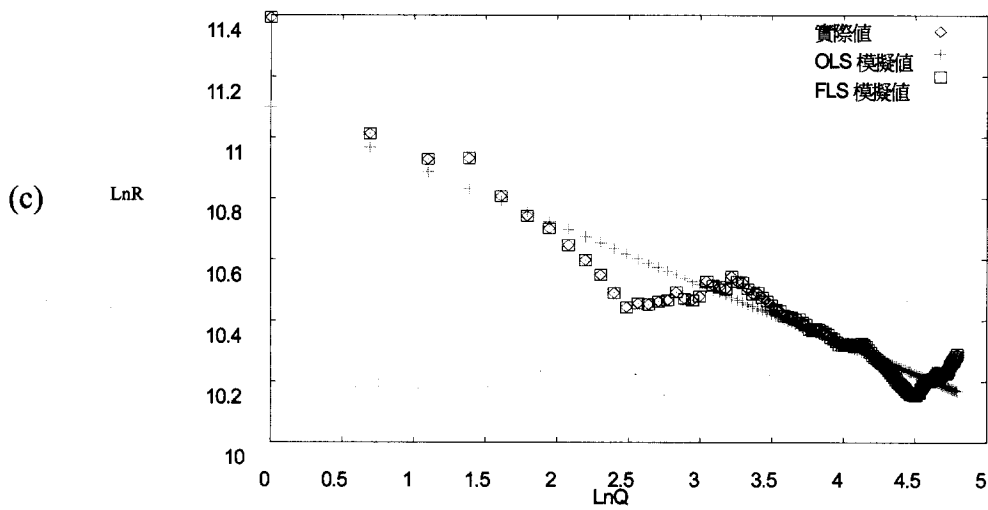
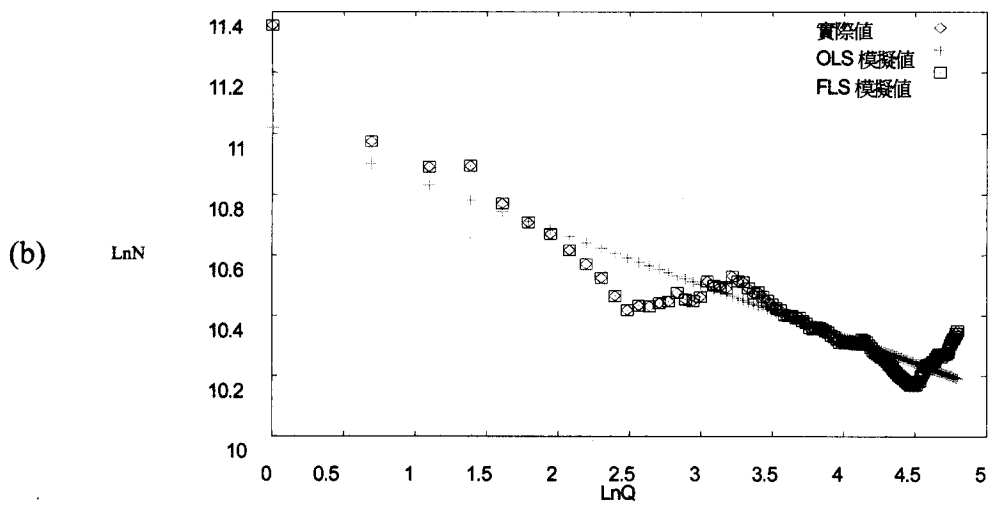
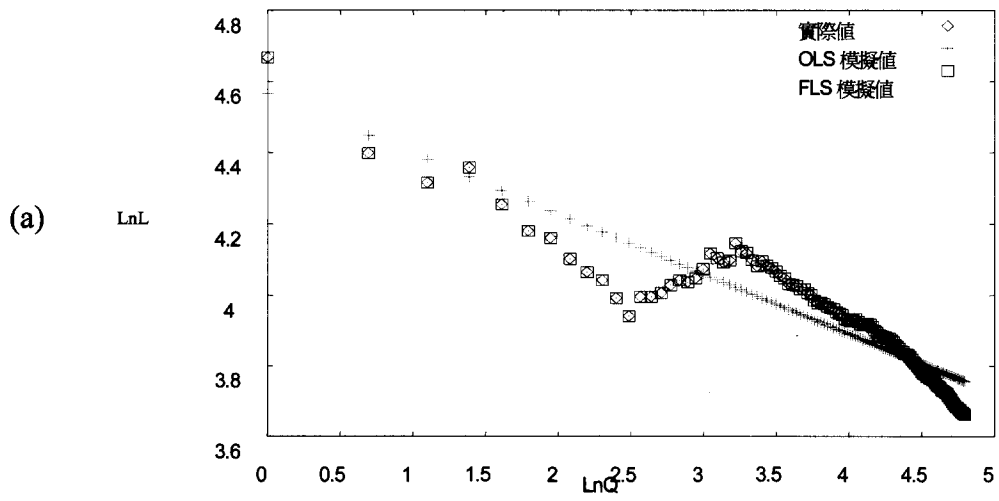
- with Forgetting.” *Appl. Math. Modelling*, Vol.21, pp.523~531.
- Kalaba, R. and L. Tesfatsion(1989), “Time-varying Linear Regression via Flexible Least Squares” *Computers Math. Applic.*, Vol. 17, No. 8/9, pp.1215~1245.
- Kalaba, R. and L. Tesfatsion(1996), “A Multicriteria Approach to Model Specification and Estimation ” *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 21, pp.193~214.
- Knecht, G.R.(1974), “Costing, Technological Growth and Generalized Learning Curves.” *Oper. Res. Quart.*, Vol.25, No.3, pp.487~491.
- Levy, F.K.(1965), “Adaptation in the Production Process.” *Management*, Vol.4, No.1, pp.136~154.
- McIntyre, E.V.(1977), “Cost-Volume-Profit Analysis Adjusted for Learning.” *Management Science*, Vol.10, pp.149~160.
- Pegels, C.C.(1969), “ On Startup or Learning Curves: An Expanded View.” *AIIE Transactions*, Vol.1, No.3, pp.216~222.
- Roser, S. R. and L. C. Sundby(1985), “Learning Curves and Inflation.” *Cost and Management*, Vol.59, No.4, pp.30~34.
- Tanner, J. P.(1985), “The Learning Curve.” *Production Engineering*, Vol.32, No.5, pp.72~79.
- Tesfatsion, L. and M. Veitch(1990), “U.S. Money Demand Instability- A Flexible Least Squares Approach” *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 14, pp.151~173.
- Waller, E.W. and T. J. Dwyer(1981), “ Alternative Techniques for Use in Parametric Cost Analysis.” *Concepts-Journal of Defense Systems Acquisition Management*, Vol.4, No.2, pp.48~59.
- Womer, N.K.(1979), “Learning Curves, Production Rate, and Program Costs.” *Management Science*, Vol.25, No.4, pp.312~319.
- Wright, T.P.(1936), “Factors Affecting the Cost of Airplanes.” *Journal of Aeronautical Sciences*, Vol.3, No.4, pp.122~128.
- Yelle, L.E.(1979), “The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey.” *Decision Sciences*, Vol.10, pp.302~328



〈附圖 1〉產品 A 之資料型態



《附圖 2》產品 A 之 FLS 參數推估值



《附圖 3》產品 A 實際值與模擬值之比較

The Dynamic Learning Effects of Avionics Equipment Manufacturing

— An Application of Flexible Least Squares Approach

Juw-Rong Lin Chi-Sheng Hsu Tai-Te Huang

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the learning curve and its dynamic aspect of a local avionics-manufacturing firm, which was formerly a non-profit organization run by the military. Four avionics equipment of last 8 years production data was fitted to the Wright's Equation that was reported in 1936. Both "Ordinary Least Squares" (OLS) and "Flexible Least Squares" (FLS) approach are used to investigate the feasibility of model fitting to this specific case. The FLS approach is proved to be able to track the dynamics of production, and to check whether or not the OLS solution provides a good description of the production data. The FLS estimates are used to test the difference of learning rate among 3 consecutive production periods, which is categorized by design change and process improvement. The FLS estimates are also used to check the learning rate movement after the firm changed into a government-owned, profit-seeking enterprise. The study shows: (1) The FLS approach provides a good description of the observation that was dynamic in its nature, and the OLS solution is unlikely to indicate the system movement of the learning rate. (2) The four avionics equipment manufacturing exhibit the learning effect, but statistics evidence shows no conformity to the "80% curve". (3) Integrating the price-level index to reflect the real cost in the learning curve model does not necessarily provide enough information for learning curve estimation. Further factors need to be considered in implementing the learning curve concept. (4) Evidence shows the learning rate is not necessarily constant in the course of production. Dynamic factors should be considered when estimating the learning curve.

Keywords: Avionics Product, Learning Curve, Flexible Least Squares, 80% Curve.

