

效率改善與能源需求： 動態生產模型之定性分析

陸怡蕙*

長期以來，經濟學家普遍認為價格與所得是決定能源需求的主要因素，而這兩個因素確實也為能源需求在 1973 至 1985 年高能源價格期間的價格反應提供了合理的解釋；但自 1986 年原油價格下跌之後，能源需求並未如經濟理論所預期的進行反向的調整。傳統的能源需求模型利用家計單位追求效用極大的問題來檢視能源使用對價格與所得的反應，在這樣的架構下，能源使用成爲一種引申的需求，而據此估算而得的彈性值自然具有對稱的性質（不論價格上升或下降，能源使用會以相同的幅度做相對應的調整），亦無法對 1986 年原油價格下跌後的能源需求反應提供一合理解釋。有鑑於此，晚近能源經濟文獻的一個主要發展方向是應用時間序列的計量模型來分析能源需求價格反應的非對稱性，或將重點放在效率改善與能源需求之間的關係，進行實證估計。這類研究的共通點是純粹讓資料說話而缺乏理論的支撐。本文的主要目的在利用動態生產模型的比較靜態與動態分析，重新評估效率改善對於能源需求的影響。由於動態生產模型能夠刻劃一個與跨期利潤現值總和極大化行爲一致的投資模式，因此，可以爲產業能源需求的研究提供一個體理論的支撐。

關鍵詞：效率改善、能源需求、動態生產模型、定性分析

* 國立臺灣大學農業經濟學系教授。聯繫地址：台北市 106-17 羅斯福路四段 1 號。電話：(02) 3366-2651；傳真：(02)2362-8496；E-mail：yirhueihluh@ntu.edu.tw。本文承行政院國家科學委員會專題研究計畫補助（計畫編號：NSC93-2415-H-007-005）。作者感謝兩位審查人的寶貴意見，文中任何謬誤悉爲作者之責。

I、前言

長期以來，經濟學家普遍認為價格與所得是決定能源需求的主要因素，而這兩個因素確實也為能源需求在 1973 至 1985 年高能源價格期間的價格反應提供了合理的解釋；但自 1986 年原油價格下跌之後，能源需求並未如經濟理論所預期的進行反向的調整（高能源價格時期的觀察可參考 Pindyck，1979；1986 年後則可參考 Hogan & Rahmani，1987）。傳統的能源需求模型利用家計單位追求效用極大的問題來檢視能源使用對價格與所得的反應（如 Hausman，1979；Quigley，1984；Dubin、Miedemam & Chandran，1986），在這樣的架構下，能源使用成爲一種引申的需求，而據此估算而得的彈性值自然具有對稱的性質（不論價格上升或下降，能源使用會以相同的幅度做相對應的調整），亦無法對 1986 年原油價格下跌後能源需求的反應提供一合理解釋。有鑑於此，學界逐漸出現一些嘗試從實證或理論角度討論這個問題的文獻。以下就文獻中探討的主要問題分三方面進行說明。

首先，文獻中的討論集中於檢視能源需求的價格反應是否具不可逆性，若具此特性，其原因又爲何。例如，Wirl（1988）曾從交易成本、價格預期與技術進步的不可逆性等三種觀點來解釋能源需求爲何在汽油價格下跌與實質所得增加的同時未能有回升的反應。Wirl（1991）則進一步在價格預期的假設下檢視能源需求對價格反應的非對稱性，但發現價格預期的解釋能力不佳。此外，其他從實證角度來解釋這種能源需求不可逆現象的研究還包括 Dargay（1992）與 Gately（1992、1993）等，這類研究將不可逆需求視爲物理學中所謂的“磁滯現象”（hysteresis）—描述一種當影響因素已不存在時，效果或影響仍存在的現象，並以分解價格的方式檢視價格調整與最高歷史價格的影響；Hogan（1992）、Greene（1992）與 Jones（1993）等則應用時間序列計量模型分析美國與 OECD 各國的原油需求。

其次，能源經濟相關研究除了探討價格與所得對能源需求的影響，也有不在少數的文獻將重點放在效率改善與能源需求之間的關係，這就是能源經濟文獻中所謂的反彈效果（rebound effect）。通常在一些節省能源的設備出現之後，我們可以觀察到能源利用的效率改善，而反彈效果即是在描述效率改善之後，能源使用未如預期減少（Khazzoom, 1980、1987；Brookes, 1990；Wirl, 1997）或不減反增（Radermacher, 1997）的一種現象。在 1980 年代，*The Energy Journal* 上曾有一場針對反彈效果是否顯著的精彩辯論（Lovins, 1988；Khazzoom, 1987、1989），不過，相關的實證研究多獲得反彈效果並不顯著的結論，並且估計該種效果僅約為以工程方法計算之能源節省值的 10%（Dubin、Miedemam & Chandran, 1986；Henly、Ruderman & Levine, 1988；Schwarz & Taylor, 1995）。

最後，在 Walker 與 Wirl（1993）以效率改善之不可逆性解釋能源需求的非對稱反應之後，相關文獻逐漸將研究的焦點從需求對價格的反應與反彈效果的估計移轉至尋求理論的支撐。Walker 與 Wirl（1993）強調技術專門技能的不可逆性，並將價格效果分解為兩個組成來說明。Walker 與 Wirl（1993）認為必須從兩種不同的價格效果來解釋能源需求這種明顯的非對稱性，第一種效果由於隱藏在技術效率中，因此大部分是不可逆的，而第二種效果則與消費者的決策有關，因此應該是可逆的。Walker 與 Wirl（1993）針對公路運輸的實證分析也證實了這種價格效果二分法的解釋能力。Haas 與 Schipper（1998）亦認為效率改善的不可逆性是造成 1986 年原油價格下跌後能源需求未大幅增加的主因。Haas 與 Schipper（1998）認為在高能源價格時所發出的效率改善是不可逆的，因此即使在價格下跌時仍會發生作用，致使能源需求未能呈現大幅增加，這論點與 Gately（1992）提出能源需求磁滯的現象相當一致。Haas 與 Schipper（1998）的實證分析雖進一步加入結構改變與效率指標的考量，而其所得的結果亦說明技術效率在估計與預測能源需求的重要性，但採用的仍是主觀的價格分解。此外，Thompson（2002）回歸

Lancaster 的新消費理論，強調在檢視效率改善對於能源需求的影響時應將家計部門中可能發生的替代效果納入考量。Thompson 的研究雖有其理論基礎，但實證分析仍有其基本的困難，因此未能提出實證的結果來解釋觀察的現象。

綜合以上的討論，我們可以發現晚近能源經濟文獻的一個主要發展方向是應用時間序列的計量模型來分析能源需求價格反應的非對稱性，或將重點放在效率改善與能源需求之間的關係，進行實證估計。這類研究的共通點是純粹讓資料說話而缺乏理論的支撐。反觀文獻的另一個發展—以效率改善的不可逆性來說明能源需求的磁滯現象，雖然因此提供了一個理論的基礎，但進行實證分析時或許由於所採用的價格分解法流於主觀，又或許由於無法處理非對稱的價格反應，因此亦有其基本的困難。

本文的主要目的是針對前述文獻的缺失，提出一個具有理論基礎的動態生產模型，重新評估效率改善對於能源需求的影響。由於動態生產模型能夠刻劃一個與跨期利潤現值總和極大化行為一致的投資模式，因此，可以為產業能源需求的研究提供一個體理論的支撐。全文架構為本節的前言，第二節的動態生產模型比較靜態與動態分析，以及最後一節的結論。

II、動態生產模型的定性分析

動態生產理論過去在農業經濟領域的應用多偏向於實證分析，透過價值函數與生產函數之間的對偶關係，以及跨期的 Hotelling 輔助定理，便可建立實證應用所需的計量模型。就本研究的研究目的而言，我們希望能為產業能源需求的研究提供一個體理論的支撐，因此我們採取定性分析 (qualitative analysis) 方法來討論生產單位在效率改善之後，對於能源需求的調整方向。為簡化分析，以檢視效率改善之後能源的使用狀況，本文沿用 Kamien 與 Schwartz (1991) 中的設定，將動態生產模型表示為一理性生產

者在資本累積的限制下，其追求跨期利潤現值總合極大化的問題

$$\begin{aligned} & \text{Max} \int_0^{\infty} e^{-rt} [F(K) - C(I)] dt \\ & \text{s.t. } \dot{K} = I - bK, K(0) = K_0 \geq 0, I \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

上式中， r 代表折現率， $F(K)$ 為生產單位以資本存量 K 所能獲取的毛利潤率（未扣除投資成本）； $F(K)$ 除了具有單調遞增以及凹向原點的性質，在資本存量水準為零時，生產者仍可獲得正的邊際利潤。 $C(I)$ 代表生產者的投資成本函數，為與資本緩慢調整的觀察一致，投資成本函數具有凸向原點的特性。投資成本與毛投資 (I) 之間的函數關係可以圖 1 表示。

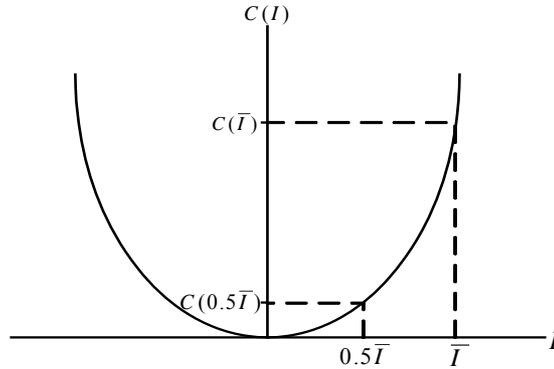


圖 1 投資成本函數

式(1) 限制式中的 \dot{K} 與 b 分別為淨投資與折舊率，所有加了上標「 \cdot 」的變數，皆用來代表該變數的時間變動率。(1) 式的限制式即為一般最適控制問題中所謂的運動方程式 (equation of motion)，用來描述資本存量的累積過程。定義當期值 Hamiltonian 函數 (current-value Hamiltonian function) 為

$$H^{CV} = F(K) - C(I) + \lambda(I - bK) \quad (2)$$

跨期效用現值極大的必要條件為

$$\frac{\partial H}{\partial I} = -C'(I) + \lambda = 0 \Rightarrow \lambda = C'(I) \quad (3)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial K} + r\lambda = \dot{\lambda} = -(F'(K) - \lambda b) + r\lambda = (r+b)\lambda - F'(K) \quad (4)$$

(2)式中 λ 為當期值共狀態變數 (current-value costate variable)。共狀態變數與靜態求最適問題中的 Lagrange 乘數有相同的功用—保證限制式成立，因此，如果 I^* 與 K^* 為(1)式跨期利潤現值極大化問題的解，我們必然可尋得一連續可微分的共狀態變數 $\lambda^*(t)$ ，使得(1)式中的運動方程式成立（詳見蔡攀龍，1996，頁239）。

2.1 比較靜態分析

進行比較靜態分析前，必須先了解相圖 (phase diagram) 上兩條等斜線 (isoline) 的相對位置 (如斜率的正負，以及是否通過原點等)。就位於 $K-\lambda$ 象限上的相圖而言， $\dot{K}=0$ 與 $\dot{\lambda}=0$ 兩條等斜線分為

$$\dot{K}=0 \Rightarrow I = g(\lambda) = bK \quad (5)$$

$$\dot{\lambda}=0 \Rightarrow (r+b)\lambda = F'(K) \quad (6)$$

在 $\dot{K}=0$ 的等斜線中，函數 $g(\cdot)$ 為邊際投資成本函數的反函數，即 $(C')^{-1}$ ，其性質如下：

- (A) 由於 $C'(0)=0$ ，因此， $g(0)=0$ ；
- (B) 由(3)式， $C''(I)dI = d\lambda$ 而 $C''(I)>0$ ，因此， $g'(\lambda)>0$ 。

我們假設 $g(0)=0$ ，而 $g'(\lambda)>0$ ，所以 $\dot{K}=0$ 的等斜線通過原點，且為正斜率。此外，由於 $F'(0)>0$ 且 $F''(K)<0$ ，所以 $\dot{\lambda}=0$ 的等斜線為負斜率且並不通過原點。

基於前述的兩條等斜線為非線性微分方程式，因此，在我們討論通往長期均衡（long-run equilibrium）的路徑以前，必須先檢視非線性微分方程組的特性根以決定均衡點屬於何種型式。首先，我們以 λ_s 代表長期均衡的共狀態變數數值，並以 K_s 代表長期均衡的資本存量，再將 $\dot{K} = 0$ 與 $\dot{\lambda} = 0$ 的微分方程式做泰勒展開，

$$\dot{K} = -b(K - K_s) + g'(\lambda_s)(\lambda - \lambda_s) \quad (7)$$

$$\dot{\lambda} = -F''(K_s)(K - K_s) + (r + b)(\lambda - \lambda_s) \quad (8)$$

令 $ROOT$ 代表特性根，則(7)(8)兩式聯立求解的特性方程式為

$$\begin{vmatrix} -b - ROOT & g'(\lambda_s) \\ -F''(K_s) & (r + b) - ROOT \end{vmatrix} \\ = ROOT^2 - rROOT + [g'(\lambda_s)F''(K_s) - b(r + b)] \quad (9)$$

特性根即為以上方程式的解。(9)式的解為

$$ROOT = \frac{r}{2} \pm \frac{[(r + 2b)^2 - 4F''(K_s)g'(\lambda_s)]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (10)$$

在投資成本函數為凸向原點的假設下， $ROOT_1 > 0 > ROOT_2$ ，因此， (K_s, λ_s) 為一馬鞍點（saddle point）均衡。

動態模型中的比較靜態分析是在外在條件改變後，檢視長期均衡點的變動。因此，可以分(1)折現率變動；(2)折舊率變動；(3)邊際投資成本變動；以及(4)效率改善等四種情形進行比較靜態分析，但以下只針對效率改善的個案，討論長期均衡的資本存量水準以及毛投資水準的變動。

效率改善代表生產單位能在相同的資本存量水準下，經由生產效率的提

昇，而達到更高的邊際利潤率。以本文的設定來看，這代表整條 $F'(K)$ 曲線上移。因此，效率改善對於兩條等斜線的影響為

(A) 由 $\dot{K} = g(\lambda) - bK$ ，效率改善不會影響 $\dot{K} = 0$ 的等斜線；

(B) 由 $\dot{\lambda} = (r+b)\lambda - F'(K)$ ，當 $F'(K)$ 曲線上移， $\dot{\lambda} = 0$ 的等斜線將上移。

圖 2 中之 SS_1 與 SS_2 分別代表外在條件改變前與改變後之長期均衡或穩定狀態 (steady state)。比較圖中的長期均衡可知，效率改善之後，長期均衡的資本存量與投資水準均上升，因此，生產單位對能源的需求不減反增。故文獻中所謂的反彈效果確實與家計單位追求跨期效用現值總合極大的理性行為吻合。

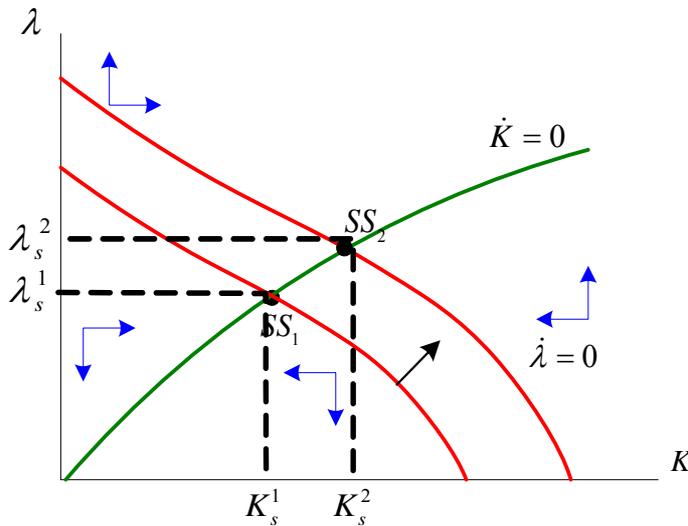


圖 2 效率改善的比較靜態分析

2.2 比較動態分析

動態模型中的比較動態分析可用來檢視外在條件改變後，對於最適路徑

的影響。根據 Kamien 與 Schwartz (1991)，比較動態分析的基本概念—趨向長期均衡之路徑不可相交—可用來進行起始資本存量相同的調整路徑分析。我們先讓最適路徑相交，再比較其斜率，以說明如果相交會產生的矛盾，再據此說明外在條件改變之後，生產單位投資速度的改變。依循之前的分析，由於生產效率的提昇，生產單位可達到更高的邊際利潤率，這代表整條 $F'(K)$ 曲線上移，因此也使得 $\dot{\lambda}=0$ 的等斜線向上移動。由於經濟體系之特性根存在一正根、一負根，當外在因素變動後，經濟體系會由安定鞍臂 (stable arm) 走向新均衡點。

如果以 SA_1 以及 SA_2 分別代表生產效率提昇前與生產效率提昇後的安定鞍臂，而變動前後的安定鞍臂相交於 $(K^\#, \lambda^\#)$ ，則由

$$\frac{d\lambda}{dK} = \frac{d\lambda/dt}{dK/dt}$$

可推得安定鞍臂 (即最適路徑) 位於該點的斜率 (詳見蔡攀龍, 1996, 頁 166-170; Kamien 與 Schwartz, 1991, 頁 169)。因此，最適路徑的斜率為

$$\frac{d\lambda}{dK} = \frac{\lambda(r+b) - F'(K)}{g(\lambda) - bK} \quad \begin{matrix} d\lambda < 0 \\ dK > 0 \end{matrix}$$

由上式與圖 3 可知，如果兩條最適路徑相交於 $(K^\#, \lambda^\#)$ ，趨向 SS_1 的最適路徑斜率小於趨向 SS_2 的最適路徑斜率。若 $F_1'(K)$ 與 $F_2'(K)$ 分別代表變動前與變動後之邊際利潤率，則隱含

$$(r+b)\lambda - F_1'(K) < (r+b)\lambda - F_2'(K) \Rightarrow F_1'(K) > F_2'(K)$$

這與效率改善的假設，即 $F'(K)$ 曲線上移，是明顯矛盾。因此，當 $K_0 < K_s$ ，效率改善將使家計單位以較快的速度進行耗久財的投資。

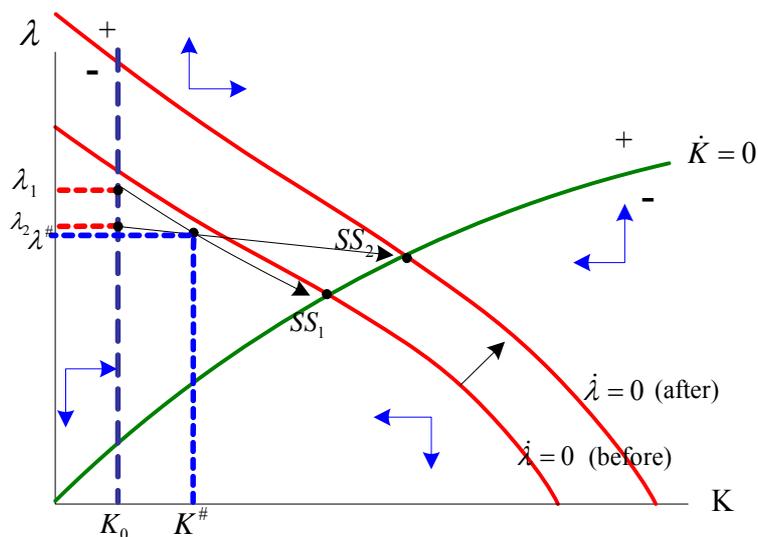


圖 3 初始資本存量小於長期均衡水準

我們可以進一步就效率改善之後，毛投資調整路徑的整條下移來說明效率改善為何可能產生反彈效果。由圖 4，如果在起始點即發生邊際利潤的改變，則即便生產者擁有相同的資本存量，其對資本的邊際評價已發生改變，因此圖 4(a) 顯現其狀態變數由原 λ_1 的值跳躍至 λ_2 ，而在圖 4(b) 的毛投資亦呈現對應的跳躍。之後，在 $\lambda-K$ 的平面上，該經濟個體沿著穩定鞍背 SA_2 達到長期均衡，如果與原毛投資的調整路徑比較，則可見每期毛投資額的增加，因此，在效率改善之後，不僅會導致長期均衡的資本存量上升，亦會導致生產者以較快的速度累積資本量。準此，效率改善除了改變生產者的投資行為，因此而造成的產出效果 (output effect)，亦會導致生產單位對於能源的需求不減反增，不過由於隨時間過去，資本累積的速度將下降，因此，這類的反彈效果將漸趨和緩。

到長期均衡，因此，在效率改善之後，雖然一開始毛投資額大幅度上升，之後亦維持資本累積 ($I > 0$)，但生產者卻會逐漸降低其資本存量的調整幅度 ($dI < 0$)，因此，伴隨而來的產出效果雖會導致生產單位對於能源的需求不減反增，但隨時間過去，這類的反彈效果將漸趨和緩。

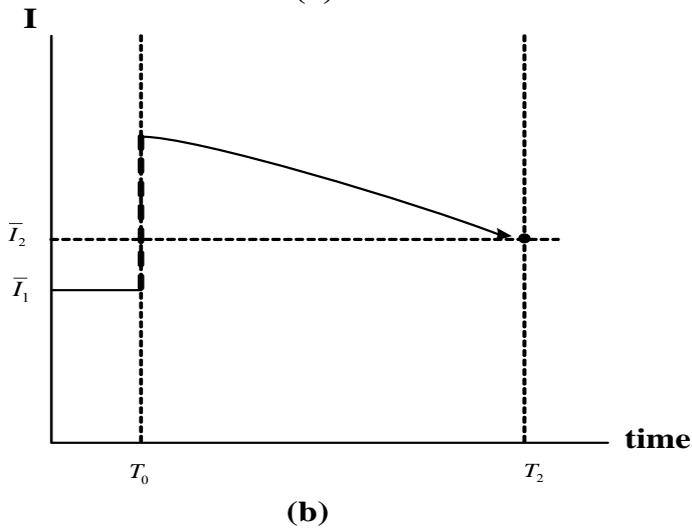
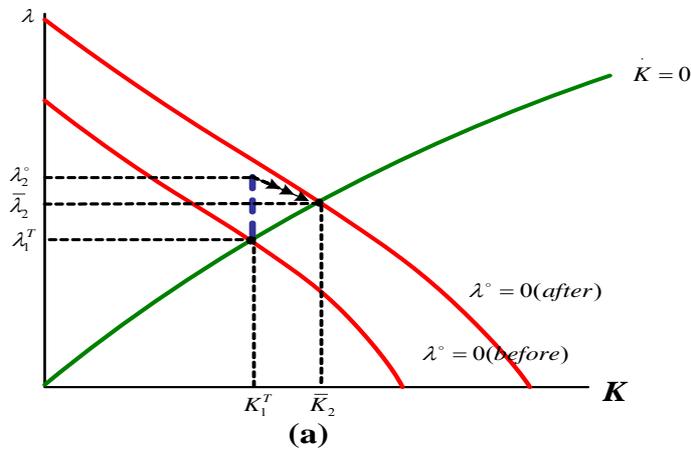


圖 5 以原均衡點為起始點的調整路徑

III、結 論

晚近能源經濟文獻的一個主要發展方向是應用時間序列的計量模型來分析能源需求價格反應的非對稱性，或將重點放在效率改善與能源需求之間的關係，進行實證估計。這類研究的共通點是純粹讓資料說話而缺乏理論的支撐。反觀文獻的另一個發展——以效率改善的不可逆性來說明能源需求的磁滯現象，雖然因此提供了一個理論的基礎，但進行實證分析時或許由於所採用的價格分解法流於主觀又或許由於無法處理非對稱的價格反應，因此亦有其基本的困難。本文提出一個既具有理論基礎又實證可行的動態生產模型，重新評估效率改善對於產業能源需求的影響。

本文的重點雖是在檢視效率改善後對能源需求的影響，但為了進行動態的定性分析，設定的動態生產模型較為簡化；不過，即便在模型設定中將能源投入自其他變動投入獨立出來，並不會影響定性分析的結果，亦即效率改善在短期雖會降低生產者對能源的需求，但由於效率改善導致長期均衡的資本存量上升，以及因此帶來的產出效果，有可能使得生產單位對於能源的需求不減反增。如果純粹以靜態生產模型的架構分析，則前述反彈效果的存在將明顯的與經濟理論預期不符，故本文實際上是藉由效率改善所導致的資本存量變動來為相關實證研究提供一個體理論的支撐。

動態對偶理論一直是近年來分析廠商生產行為的主要工具，雖然 Cooper 與 McLaren (1980、1993) 與 Cooper、Madan 與 McLaren (1995) 已將動態對偶理論應用在消費者追求效用極大的問題上，但並未在家計生產函數的架構下進行討論，亦缺乏實證的應用。本文建立的動態生產模型除了能夠刻劃一個與跨期利潤現值總和極大化行為一致的投資模式，為產業能源需求的研究提供一個體理論的支撐，未來並可進一步延伸，擴展至家計部門追求跨期效用現值總和極大化的架構，透過價值函數與家計生產函數之間的對偶關係，建立實證應用所需的計量模型。

附 註

1. 本文原只以維持相同起始資本存量的調整路徑進行比較動態分析，但一審查人指出，許多總體的文獻（如 Dornbusch，1976、Gray & Turnovsky，1979、以及 Blanchard，1981 等），其動態分析均以原均衡點為出發點，因此，本文分以維持相同起始資本存量的調整路徑與以原均衡點為起始點的調整路徑兩種情形，說明比較動態分析的過程。

參考文獻

- 蔡攀龍，1996。『經濟學數學方法導論（動態分析）』。台灣：茂昌圖書有限公司。
- Blanchard, O. J., 1981. "Output, the Stock Market, and Interest Rates," *American Economic Review*. 71: 132-143.
- Brookes, L., 1990. "Energy Efficiency and Economic Fallacies," *Energy Policy*. 1: 783-785.
- Cooper, R. J. and K. McLaren, 1980. "Atemporal, Temporal and Intertemporal Duality in Consumer Theory," *International Economic Review*. 21: 599-609.
- Cooper, R. J. and K. McLaren, 1993. "Approaches to the Solution of Intertemporal Consumer Demand Models," *Australian Economic Papers*. 32: 20-39.
- Cooper, R. J., D. B. Madan, and K. McLaren, 1995. "Approaches to the Solution of Stochastic Intertemporal Consumption Models," *Australian Economic Papers*. 34: 86-103.
- Dargay, J. M., 1992. "The Irreversible Effects of High Oil Prices: Empirical Evidence for the Demand for Motor Fuels in France, Germany and the UK," In *Energy Demand: Evidence and Expectations*. Edited by Cullen, R. Surrey University Press, Surrey.
- Dornbusch, R., 1976. "Expectations and Exchange Rate Dynamics," *Journal of Political Economy*. 84: 1161-1176.
- Dubin, J. A., A. K. Miedemam, and R.V. Chandran, 1986. "Price Effect of Energy-efficient Technologies: a Study of Residential Demand for Heating and Cooling," *Rand Journal of Economics*. 17: 310-325.
- Gately, D., 1992. "Imperfect Price-reversibility of U.S. Gasoline Demand: Asymmetric Response to Price Increases and Declines," *The Energy Journal*. 13(4): 179-207.
- Gately, D., 1993. "The Imperfect Price-reversibility of World Oil Demand," *The Energy Journal*. 14: 163-182.
- Gray, M. R. and S. J. Turnovsky, 1979. "The Stability of Exchange Rate Dynamics under Perfect Myopic Foresight," *International Economic Review*. 20: 643-660.
- Greene, D. L., 1992. "Vehicle Use and Fuel Economy: How Big Is the 'Rebound' Effect?" *The Energy Journal*. 13(1): 117-143.

- Haas, R. and L. Schipper, 1998. "Residential Energy Demand in OECD-countries and the Role of Irreversible Efficiency Improvements," *Energy Economics*. 20: 421-442.
- Hausman, J. A., 1979. "Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-using Durables," *Bell Journal of Economics*. 10: 33-54.
- Henly, J., H. Ruderman, and M. D. Levine, 1988. "Energy Saving Resulting from the Adoption of more Efficient Appliances: a Follow-up," *The Energy Journal*. 9: 163-170.
- Hogan, W. W. and B.M. Rahmani, 1987. "Energy Security Revisited," In *Harvard International Energy Studies 2*. Edited by Energy and Environmental Policy Center: Harvard University.
- Hogan, W. W., 1992. "OECD Oil Demand Dynamics: Trends and Asymmetries," Special Issue in Memory of D.O. Wood," *The Energy Journal*. 14: 125-157.
- Jones, C. T., 1993. "Another Look at US Passenger Vehicle Use and the Rebound Effect from Improved Fuel Efficiency," *Energy Journal*. 14: 99-110.
- Kamien, M. I. and N. L. Schwartz, 1991. *Dynamic Optimization 31: The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management*, Advanced Textbooks in Economics, Elsevier: North Holland, New York.
- Khazzoom, D. J., 1980. "Economic Implications of Mandated Efficiency Standards for Household Appliances," *The Energy Journal*. 1: 21-40.
- Khazzoom, D. J., 1987. "Energy Saving Resulting from the Adoption of More Efficient Appliances," *The Energy Journal*. 8: 85-89.
- Khazzoom, D. J., 1989. "Energy Saving Resulting from the Adoption of More Efficient Appliances: a Rejoinder," *The Energy Journal*. 10: 157-166.
- Lovins, A.B., 1988. "Energy Saving from More Efficient Appliances: another View," *The Energy Journal*. 9: 155-162.
- Pindyck, R. S., 1979. *The Structure of World Energy Demand*. Cambridge: MIT Press.
- Quigley, J. M., 1984. "The Production of Housing Services and the Derived Demand for Residential Energy," *Rand Journal of Economics*. 15: 555-567.
- Radermacher, F. J., 1997. "Building the Information Society," In *Information Society and the Regions in Europe*. Edited by Sturm, R., Weinman, G., and O. Will (Eds.). Tagungsband No. 14, Univeristy of Tübingen, Tübingen.

- Schwartz, P. M. and T. N. Taylor, 1995. "Cold Hands, Warm Hearth?: Climate, Net Takeback and Household Comfort," *The Energy Journal*. 16: 41- 54.
- Thompson, P. B., 2002. "Consumer Theory, Home Production, and Energy Efficiency," *Contemporary Economic Policy*. 20: 50-59.
- Walker, I. O. and F. Wirl, 1993. "Irreversible Price-induced Efficiency Improvements: Theory and Empirical Application to Road Transportation," *The Energy Journal*. 14: 183-205.
- Wirl, F., 1988. "Asymmetrical Energy Demand Pattern: some Theoretical Explanations," *OPEC Review*. 12: 345-359.
- Wirl, F., 1991. "Energy Demand and Consumer Price Expectations: an Empirical Investigation of the Consequences from the Recent Oil Price Collapse," *Resource Energy*. 13: 241-262.
- Wirl, F., 1997. *The economics of conservation programs*. Dordrecht: Kluwer.

Efficiency Improvements and Energy Demand: A Qualitative Analysis Based on the Dynamic Production Model

Yir-Hueih Luh*

Traditional economic theory well explains the tremendous fuel substitution during the 12 years of high energy prices from the year 1973 to 1985, however, the observation that energy demand growth did not surge despite the much lower energy prices since 1986 remains an unsolved puzzle. The past literature has evolved around three key questions -- is energy demand's price responsiveness reversible, how big is the rebound effect if it does exist, and can irreversible efficiency improvement better describe the irreversibility of energy demand. Digressing from the questions raised in the literature, this study attempts to provide a theoretical justification for the observation of the rebound effect. Built on the intertemporal optimization framework, the present study constructs a theoretical model capable of examining the effect of energy efficiency improvements on energy consumption. Comparative statics and dynamics analyses of a simplified dynamic production model suggest the existence of the rebound effect is actually in line with firms' intertemporal optimization behavior.

Keywords: Efficiency improvements, Energy demand, Dynamic Production Model, Qualitative Analysis

* Professor, Department of Agricultural Economics, National Taiwan University. This research was supported by the National Science Council of the Republic of China (Project number: NSC93-2415-H-007-005). The author is grateful to the two anonymous referees for their valuable comments.