

## 結合資料包絡分析法及主成份分析法應用於武器裝備系統 之性能評估－以低空防禦飛彈系統為例

鄧世剛\* 賴志強\*\* 林谷燁\*\*\*

\*國防大學中正理工學院兵器系

\*\*國防大學中正理工學院國科所

\*\*\*海軍戰鬥系統工廠

### 摘 要

在武器裝備系統獲得的過程中，往往會對於不同國家（或廠商）生產製造之同一種作戰任務類型的武器系統當中，來評估選擇一套最好、最有效益的武器系統。而本研究的目的主要是提供一套客觀、公平及符合成本效益的方法，對不同之武器系統裝備的各項性能諸元作綜合評估比較，來選擇一套最佳、最有效益的武器系統。本研究結合主成份分析法及資料包絡分析法作為評估的方法，並針對不同國家生產製造型式之低空防禦飛彈進行比較分析。首先，由主成份分析法對於投入產出資料進行壓縮合併及簡化，再由資料包絡分析法進行效益評估分析，評估的結果可以提供決策者一個選評及採購之參考依據。

**關鍵字：**主成份分析法，資料包絡分析法，武器裝備系統比較

## Evaluation of Weapon System Evaluation Using Data Envelopment Analysis with Principal Component Analysis —An Application to Low Range Air Defenses Missiles

Shigan Deng\*, Chih-Chiang Lai\*\*, and Ku-Yeh Lin\*\*\*

\**Department of Weapon System Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

\*\**Graduate School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

\*\*\**Naval Combat System Facility*

### ABSTRACT

During the process of weapon system acquisition, it usually needs to assess the best and the most effective one among the same operation weapon systems manufactured by different countries or companies. The main purpose of this study is to provide an objective and impartial method, for effecting general assessment and comparison among different systems, in order to chose the optimal and effective weapon system. This study has an application on Data Envelopment Analysis combining with Principal Component Analysis, to compare and analyze different types of low range air defenses missiles manufactured by different countries. At first using the PCA to merge and simplify input and output data, then followed by DEA to proceed the assessment, then the result can provide the decision maker a reference basis for the acquisition of the weapon system.

**Keywords:** principal component analysis, data envelopment analysis, weapon system comparison

文稿收件日期 93.9.17; 文稿修正後接受日期 94.5.20.

Manuscript received September 17, 2004; revised May 20, 2005.

## 一、前言

Digital 國家之安全仰賴國防武器裝備系統的不斷提升。而目前國軍於武器裝備系統獲得過程中，在評選與決策上因考慮到許多錯綜複雜的因素及特性，諸如成本、性能、作戰能力、後勤補給與政治等等。而導致武器裝備系統往往無法發揮其最大作戰效益。在面臨諸多複雜的因素下，選評作業需能夠避免受到人為因素之影響，確保所選擇之武器裝備系統可以符合作戰任務需求及成本效益。並提供決策者在整個選評過程中之參考依據，成為一個很重要的研究課題。資料包絡分析法 (Data Envelopment Analysis, DEA) 可以同時處理多個不同單位的投入與產出，且 DEA 不受人為主觀因素影響，為目前受大眾重視之效率評估方法。然而 DEA 在遇到少數的決策單位 (Decision Making Unit, DMU)，卻有多投入及多產出項目的情況下，求出之效率值會有失真現象之問題。因此，本研究首先利用主成份分析法 (Principal Component Analysis, PCA)，對於受評之武器系統之投入產出性能資料項目，進行資料的壓縮合併及簡化，在資料的簡併過程後，仍然保有原始資料之特性。再利用 DEA，將簡併後之投入產出資料項目，進行效益評估分析，求出最有效率之武器系統。最後本研究將針對不同國家生產製造型式之低空防禦飛彈，作為實例進行比較分析。

本研究結合 PCA 與 DEA 之目的，為解決 DEA 之決策單位過少而導致失真問題。並對不同武器系統裝備之各項性能諸元進行綜合性評估比較，評選出一套能夠符合作戰任務需求與最有效益的武器裝備系統。期以提供國軍一套客觀、公平及符合成本效益的選評方法。並讓決策單位於選評及採購時，可參考評估結果進

行決策，降低人為主觀性之影響，使得整個選評過程更客觀，更符合實際狀況。

## 二、文獻探討

### 2.1 國內武器系統評估作業之文獻

在決策選評的領域當中，學者專家提出許多不同的效率評估方法，回顧過去相關效率評估文獻，歸納出比例分析法 (Ratio Analysis)、迴歸分析法 (Regression Analysis)、多準則決策分析法 (Multiple Criteria Decision Making)、分析層級法 (Analytic Hierarchy Process) 與資料包絡分析法五種常用之評估方法 [1]。在評估武器系統應用上，張正文於 2000 年在模糊多屬性決策分析上以梯形模糊數予以量化求解的一種簡單群體決策評估武器系統，提供決策者能應用在評選武器系統上的方法之參考 [2]。賀克勤等人於 2000 年提出多層級、多準則、可由多人同時評估，及涵蓋計量與非計量 (語意) 評估準則的模糊評估模式作為武器系統建案分析的評估模式 [3]。鄧國祥於 2003 年以三種不同國家但同一口徑之自走砲武器系統評選為例，利用模糊多準則決策 (Fuzzy Multiple Attribute Decision Making) 方法評選武器系統，並針對評估準則的關聯性及模糊數排序的方法加以深入研究 [4]。劉家熙等人於 2003 年提出武器系統支援度作戰測試評估模式。首先建立武器系統支援度的層級架構，並透過專家訪談、德爾菲法、問卷調查及模糊德爾菲法，決定具體的目標構面與評估準則。運用模糊多屬性決策方法，將各軍種及研發單位對支援度主觀及模糊之評估意見，轉換成一綜合評估指標值與重視度排序 [5]。荊濤及曾祥雲於 2003 年應用 CCR 模式來評估 12 款飛彈系統 [6]，隨後再利用 L-R 區間模式，增列一新型飛彈與前 12 款飛彈一同比

較，求出其最適當採購金額，並選擇最大射程、最大射高、最大速度、最大機動過載及單發殺傷率等 5 項作為投入項，採購費用作為產出項。評估結果，以 CCR 模式計有 6 款飛彈系統有效率，以 L-R 區間模式求出新增飛彈之合理價格為 60 萬美元。

由於資料包絡分析法可同時處理不同衡量單位的多項投入與多項產出之效率衡量。且具單位不變性，又無須事先假設生產函數關係的型式，可避免參數估計問題。投入與產出項的權數值由數學模型產生，不受人為因素影響。可以提供受評單位資源適用狀況，及效率改善資訊，建議管理決策者參考。適用於多項投入與多項產出問題[1]。因此採用資料包絡分析法作為本研究評選之方法。

## 2.2 資料包絡分析法在選評應用之文獻

Doyle & Green 於 1991 年應用 CCR 模式評估 37 款電腦列表機[7]。選擇採購成本作為唯一投入項；以處理能力、列印品質、可靠度、噪音、列印延遲、方便組合性及佔有 CPU 時間等 7 項作為產出項。評估的結果計有 11 款列表機有效率，26 款列表機無效率。Shafer 和 Bradford 於 1995 年應用 BCC 模式來評估 47 款工廠加工單元之效率[8]，選擇工作人員數及機器數等 2 項作為投入項，平均處理之工作程序、平均運動時間及平均使用之作業員等 3 項作為產出項。評估的結果計有 9 款工業機器人有效率，18 款工業機器人無效率。Odeck 和 Hjalmarsson 於 1996 年應用 CCR 和 BCC 模式評估 72 輛 16.5 噸平板卡車之效率[9]，選擇採購成本、耗油量、輪胎成本及維修成本等 4 項作為投入項，每年行駛總里程數作為唯一產出項。評估結果計有 4 款加工單元有效率，43 款加工單元無效率。Braglia & Petroni 於 1999 年應用 CCR 和交叉效

率評估 13 款工業機器人[10]，並選擇總成本為投入項，處理能力、負載能力、速度及可重複性等 4 項作為產出項。評估結果，以 CCR 模式有 5 輛平板車有整體相對效率，以 BCC 模式有 13 輛平板車有相對技術效率。方楠於 2000 年應用 CCR 模式來評估 21 款電腦數位控制車床[11]，並選擇採購成本作為投入項，主軸最大轉速、主軸轉速範圍、刀塔刀具數、x 軸快速行程及 z 軸快速行程等 5 項作為產出項。評估結果計有 4 款電腦數位控制車床有效率。Adler and Golany 於 2001 年結合主成份分析法與資料包絡分析法來評估西歐航空網路的營運效率[12]，因為過多的投入產出項目，因此首先應用 PCA 壓縮簡併原始投入與產出資料，再以 DEA 之 BCC 模式評估在 34 座歐洲及北美的機場之間的 320 組西歐的航空網路的營運效率。Sun 於 2002 年應用 BCC 模式及交叉效率模式來評估 21 款電腦數位控制車床[13]，並選擇採購成本作為投入項，主軸最大轉速、刀塔刀具數、x 軸快速進給行程、z 軸快速進給行程、加工直徑及加工長度等 6 項作為產出項。評估結果，以 BCC 模式有 12 款電腦數位控制車床物超所值有技術效率，再應用交叉效率模式，其中受評第 4 款電腦數位控制車床為最佳方案。上述文獻除了方楠[11]及 Sun[13]之電腦數位控制車床選評為實證研究外，其餘文獻僅作選評方法的展示，未從事任何實證之研究。

綜合上述相關文獻，一般學者及專家都相當贊同以 DEA 的模式來進行設備評選的方法。且大部分學者採用 CCR 模式來進行評比，而 CCR 模式假設固定規模報酬(constant returns to scale, CRS)，即增加部分投入會使得部分產出增加。然而，在進行武器系統採購之選評時，增加部分投入(如採購成本)，未必會得到部分產出的增加(如武器系統的火力、作戰性能等)。

本研究選評採用之 DEA 模式，運用

Charnes、Cooper and Rhode 之 CCR 模式[14]、Banker, Charnes and Cooper [15]之 BCC 模式，及 Doyle and Green [16]之交叉效率模式。以 CCR 與 BCC 模式先識別物超所值之裝備，再以交叉效率模式用來找出最佳方案之裝備。DEA 有一條件限制，即受評估項目數總和，必須大於投入及產出項目總和的兩倍，因為投入及產出項目過多會造成 DEA 的鑑別能力降低，如假設投入及產出項目總和為 10，則受評估項目數必須大於 20。而本研究所將應用之低空防禦飛彈系統選評，投入與產出總和個數的兩倍大於受評系統數。因此，本研究結合 PCA，將原始之投入產出項目資料進行壓縮合併之後，再用 DEA 模式分析。

本研究因部分低空防禦飛彈系統之火力作戰性能資料未公開，以及無法獲得各飛彈系統之真實報價資料，故本研究係針對低空防禦飛彈系統作一結合 PCA 及 DEA 選評方式之展示。

### 三、研究方法

#### 3.1 主成份分析法

主成份分析於 1901 年由 Karl Pearson 首創。Harold Hotelling 於 1933 年根據 Pearson 的理論加以發展[17]，成為今日廣為通用之統計分析方法。PCA 是尋找少數幾個解釋變數  $X_i$  的線性組合。PCA 保有原來變數的資訊，且主成份間不能重疊，並能以少數幾個主成份代替多個解釋變數。因此具有代表性、獨立性及精簡性的特徵。利用 PCA 進行資料壓縮及合併求之主成份值乃是取決於原始資料之共變異矩陣 (Covariance Matrix) 或關聯矩陣 (Correlation Matrix)。然兩者求出主成份值的步驟不盡相同，以下針對兩者之計算步驟進行說明。

#### 3.1.1 主成份分析之共變異矩陣計算步驟

(a) 假設有  $n$  個變數， $p$  個資料點數， $X$  矩陣代表品質特性的觀測矩陣值， $X$  矩陣如下所示：

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{ip} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i=1 \sim n, j=1 \sim p$$

(b) 將資料矩陣平均置中

$$\tilde{X}_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1j} & \cdots & \tilde{x}_{1p} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2j} & \cdots & \tilde{x}_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \cdots & \tilde{x}_{ij} & \cdots & \tilde{x}_{ip} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \cdots & \tilde{x}_{nj} & \cdots & \tilde{x}_{np} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i=1 \sim n, j=1 \sim p$$

$$\text{其中 } \tilde{x}_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_j \quad \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$$

(c) 利用置中資料矩陣求出共變異矩陣：

$$S = \text{cov}(\tilde{X}) = \frac{\tilde{X}^T \tilde{X}}{n-1} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1j} & \cdots & S_{1p} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2j} & \cdots & S_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{i1} & S_{i2} & \cdots & S_{ij} & \cdots & S_{ip} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nj} & \cdots & S_{np} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(d) 計算共變異矩陣之特徵值(eigen-value)及特徵向量(eigen-vector)，對於一個  $p \times p$  階的共變異矩陣或關聯矩陣，其特徵方程式為：

$$|S - \lambda I| = 0 \quad (4)$$

其中  $I$  為單位矩陣

(e) 解此  $p$  次方程式可得到  $p$  個特徵值，並依大小順序排列  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_i \geq \dots \geq \lambda_p$  相對於第  $j$  個特徵值的特徵向量  $P_p$  可由下式求得：

$$[S - \lambda p I] P_p = 0 \quad (5)$$

(f) 原始資料點可以由下式轉換到由主成份軸所組成的新座標中，設原始資料列向量  $x$

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_p] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Y_1 &= P'_1 x = p_{11}x_1 + p_{21}x_2 + \dots + p_{p1}x_p \\ Y_2 &= P'_2 x = p_{12}x_1 + p_{22}x_2 + \dots + p_{p2}x_p \\ &\vdots \\ Y_i &= P'_i x = p_{1i}x_1 + p_{2i}x_2 + \dots + p_{pi}x_p \\ &\vdots \\ Y_p &= P'_p x = p_{1p}x_1 + p_{2p}x_2 + \dots + p_{pp}x_p \end{aligned} \quad (7)$$

最後求出之  $Y_i$  即為  $x$  之第  $i$  個主成份值。

### 3.1.2 主成份分析之關聯矩陣計算步驟

(a) 由前述公式(3)求出平均置中平方和矩陣對角線值

$$\text{令 } D^{-1/2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{s_{11}}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{s_{22}}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sqrt{s_{pp}}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

則關聯矩陣  $R$ ：

$$R = \frac{1}{n-1} (D^{1/2} S D^{-1/2}) \quad (9)$$

(b) 計算關聯矩陣之特徵值及特徵向量。對於一個  $p \times p$  階的關聯矩陣，其特徵方程式為：

$$|R - \lambda I| = 0 \quad (10)$$

其中  $I$  為單位矩陣

(c) 解此  $p$  次方程式可得到  $p$  個特徵值，並依大小順序排列  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_i \geq \dots \geq \lambda_p$  相對於第  $j$  個特徵值的特徵向量  $P_p$  可由下式求得：

$$[R - \lambda p I] P_p = 0 \quad (11)$$

(d) 由原始資料列向量  $x$ ，行向量平均數  $\bar{x}$  及平均置中平方和矩陣對角線值  $S_{pp}$  求出標準化變數  $W$ ：

$$\begin{aligned} W &= [W_1 \quad W_2 \quad \dots \quad W_p] \\ &= \left[ \frac{(x_1 - \bar{x}_1)}{\sqrt{S_{11}}} \quad \frac{(x_2 - \bar{x}_2)}{\sqrt{S_{22}}} \quad \dots \quad \frac{(x_p - \bar{x}_p)}{\sqrt{S_{pp}}} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $x = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_p]$ ,  $\bar{x} = [\bar{x}_1 \quad \bar{x}_2 \quad \dots \quad \bar{x}_p]$

資料之單位不盡相同時，宜將資料標準化。標準化變數以矩陣方式表示如後：

$$W = (D^{1/2})^{-1} (X - \bar{X}) \quad (13)$$

(e) 再藉由特徵向量  $P_p$  與標準化變數  $W$ ，由下式轉換到由主成份軸所組成的新座標中：

$$\begin{aligned} Y_1 &= P'_1 W = p_{11}W_1 + p_{21}W_2 + \dots + p_{p1}W_p \\ Y_2 &= P'_2 W = p_{12}W_1 + p_{22}W_2 + \dots + p_{p2}W_p \\ &\vdots \\ Y_i &= P'_i W = p_{1i}W_1 + p_{2i}W_2 + \dots + p_{pi}W_p \\ &\vdots \\ Y_p &= P'_p W = p_{1p}W_1 + p_{2p}W_2 + \dots + p_{pp}W_p \end{aligned} \quad (14)$$

最後求出之  $Y_i$  即為該列向量  $x$  之第  $i$  個主成份值。

### 3.1.3 共變異矩陣與關聯矩陣之差異

有關共變異矩陣與關聯矩陣求主成份值之差別在於：

(a) 共變異矩陣(Covariance Matrix)：

1. 原始資料不須進行標準化。
2. 在大量  $p$  個原始變數中，所求出之前 2 至 3 個主成份值中，包含了 90% 以上的原始資料變異量(variance)，即可代表原始  $p$  個變數。

(b) 關聯矩陣(Correlation Matrix)：

1. 原始資料須進行標準化並求標準化變數。
2. 關聯矩陣求出之特徵值相加等於主成份總個數。
3. 在大量  $p$  個原始變數中，無法在前 2 至 3 個主成份值內包含 90% 以上的原始資料。

求出之主成份值，帶入到 DEA 模式求出各受評單位效率值。要特別注意的一點，主成份值有可能是負值，而在 DEA 模式之中之投入與產出項目數值必須為正。Ali and Seiford 於 1996 年證明出 DEA 之 BBC 模式具有不變量轉換的特性(translation invariant)[18]。因此，當主成份值為負值時，須加上係數  $b$  以確保主成份值為正，其中：

$$b = \left| \text{Min}(Y_p) \right| + 1 \quad (15)$$

$$\text{主成份值 } \tilde{Y}_p = Y_p + b \quad (16)$$

最後再決定主成份個數；對  $p$  個變數  $x_i$ ，要選取多少個主成份才適合？選取個數多其解釋能力高，但不能達成精簡的目標；選取個數少則解釋能力差。一般是當資料變異比例超過某一水準時(通常為 0.8 或 0.9 以上，由使用者自行決定)即認定該等主成份足以代表原有變

數之變異，並決定主成份  $Y_p$  的個數。

## 3.2 資料包絡分析法

DEA 是一種數學規劃的模型，係由生產前緣作為衡量效率的基礎，並以數學模式求得生產邊界。目前有眾多學者提出 DEA 之相關模式；本研究以 DEA 中較多學者引用之 CCR、BCC 模式進行評選武器系統裝備。

### 3.2.1 CCR 模式

1978 年 Charnes、Cooper 及 Rhodes 將 Farrell[19] 多項投入與產出效率衡量的觀念轉換為數學比率模式[14]，以線性規劃模式估計效率前緣，衡量決策單位(DMU)在固定規模報酬下的相對效率，被稱為 CCR 模式。以產出觀點而言，其產出導向 CCR 模式如下：

該模式假設有  $n$  個 DMU，每個 DMU 使用  $m$  個投入項  $X$ ， $s$  個產出項  $Z$ ，在同時比較  $n$  個 DMU 上，則估計第  $o$  個目標 DMU 效率值為：

$$\text{minimize } h_o = \frac{\sum_{i=1}^m V_i X_{io}}{\sum_{r=1}^s U_r Z_{ro}} \quad (17)$$

$$\text{subject to } \frac{\sum_{i=1}^m V_i X_{ij}}{\sum_{r=1}^s U_r Z_{rj}} \geq 1 \quad (18)$$

$$i=1, \dots, m; j=1, \dots, n; r=1, \dots, s \quad U_r, V_i \geq \varepsilon$$

$h_o$  = 目標 DMU 之效率值；

$Z_{rj}$  = 第  $j$  個 DMU 之第  $r$  個產出項數量；

$X_{ij}$  = 第  $j$  個 DMU 之第  $i$  個產出項數量；

$U_r$  = 第  $r$  產出的權重值

$V_i$  = 第  $i$  投入的權重值

$\varepsilon$  = 非阿基米德常數 (non-Archimedean constant)。

由於(17)式之分數規劃模式為非線性規劃模式，不易求解；因而將之轉換為線性規劃模式。令  $\sum_{r=1}^s U_r Z_{rj} = 1$ ，再加入限制式中。

$$\text{minimize } h_o = \sum_{i=1}^m V_i X_{io} \quad (19)$$

$$\text{subject to } -\sum_{r=1}^s U_r Z_{rj} + \sum_{i=1}^m V_i X_{ij} \geq 0 \quad (20)$$

$$\sum_{r=1}^s U_r Z_{rj} = 1 \quad (21)$$

$$U_r, V_i \geq \varepsilon$$

由於目標函數中的限制式個數(n+s+m+1)比變數(m+s)個數還多，為了求解的方便及效率，再對(19)、(20)、(21)式取對偶轉換：

$$\text{maximize } h_o = \theta + \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+ \right) \quad (22)$$

$$\text{subject to } 0 = \theta Z_{ro} - \sum_{j=1}^n Z_{rj} \lambda_j + S_r^+ \quad (23)$$

$$X_{io} = \sum_{j=1}^n X_{ij} \lambda_j + S_i^- \quad (24)$$

$$\lambda_j, S_i^-, S_r^+ \geq 0, i=1, \dots, m; j=1, \dots, n; r=1, \dots, s$$

$\theta$  = 強度因子(intensity factor)；

$\lambda_j$  = 第 j 個 DMU 之權重數；

$S_i^-$  = 第 i 個投入項之差額變數；

$S_r^+$  = 第 r 個產出項之差額變數

當投入與產出項目總數過多時，需經由 PCA 壓縮簡併時，上述(23)式可表示成(25)與(26)，假設以產出項目部分進行 PCA 壓縮：

共變異矩陣：

$$0 = \theta P_{ro} x_j - \sum_{j=1}^n P_{rj} x_j \lambda_j + S_r^+ \quad (25)$$

關聯矩陣：

$$0 = \theta P_{ro} W_j - \sum_{j=1}^n P_{rj} W_j \lambda_j + S_r^+ \quad (26)$$

受評估 DMU<sub>o</sub> 的 CCR 效率可能會出現下列三種結果：

(1) 若  $\theta < 1$ ，則判定 DMU<sub>o</sub> 無 CCR 效率。

(2) 若  $\theta = 1$ ，但  $S_i^-$  或(且)  $S_r^+$  不為 0，則 DMU<sub>o</sub>

具發散效率(radial efficiency)或弱效率(weak efficiency)，不具 CCR 效率。

(3)  $\theta = 1$  且  $S_i^-$ 、 $S_r^+$  為 0，DMU<sub>o</sub> 具 CCR 效率。

### 3.2.2 BCC 模式

1984 年 Banker、Charnes 及 Cooper 提出 BCC 模式，擴大了 CCR 模式的比率與運用範圍[15]。其產出導向 BCC 模式 (output-oriented BCC primal：以產出觀點而言，求產出最大) 基本模式：

$$\text{minimize } h_o = \frac{\sum_{i=1}^m V_i X_{io} - V_o}{\sum_{r=1}^s U_r Z_{ro}} \quad (27)$$

$$\text{subject to } \frac{\sum_{i=1}^m V_i X_{ij} - V_o}{\sum_{r=1}^s U_r Z_{rj}} \geq 1 \quad (28)$$

$$i=1, \dots, m; j=1, \dots, n; r=1, \dots, s \quad U_r, V_i \geq \varepsilon$$

將(27)式之分數規劃模式轉換為線性規劃模式。令  $\sum_{r=1}^s U_r Z_{rj} = 1$ ，再加入限制式中，即可得 BCC 線性規劃模式。

$$\text{minimize } h_o = \sum_{i=1}^m V_i X_{io} - V_o \quad (29)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^m V_i X_{ij} - \sum_{r=1}^s U_r Z_{rj} - V \geq 0 \quad (30)$$

$$\sum_{r=1}^s U_r Z_{rj} = 1 \quad (31)$$

$$i=1, \dots, m; j=1, \dots, n; r=1, \dots, s \quad U_r, V_i \geq \varepsilon$$

在 BCC 的對偶型式中，為了允許變動規模報酬之存在，多加了一個限制條件  $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ ，使 DMU 在生產函數上之參考點必須為有效率，其對偶型式如下：

$$\text{maximize } h_o = \theta + \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+ \right) \quad (32)$$

$$\text{subject to } 0 = \theta Z_{ro} - \sum_{j=1}^n Z_{rj} \lambda_j + S_r^+ \quad (33)$$

$$X_{io} = \sum_{j=1}^n X_{ij} \lambda_j + S_i^- \quad (34)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (35)$$

$$\lambda_j, S_i^-, S_r^+ \geq 0, i=1, \dots, m; j=1, \dots, n; r=1, \dots, s$$

當投入與產出項目總數過多時，需經由 PCA 壓縮簡併時，上述(33)式可表示成(36)與(37)，假設以產出項目部分進行 PCA 壓縮：

共變異矩陣：

$$0 = \theta P_{ro} x_j - \sum_{j=1}^n P_{rj} x_j \lambda_j + S_r^+ \quad (36)$$

關聯矩陣：

$$0 = \theta P_{ro} W_j - \sum_{j=1}^n P_{rj} W_j \lambda_j + S_r^+ \quad (37)$$

### 3.2.3 交叉效率模式(Cross Efficiency)

Sexton 於 1986 年首先提出交叉效率評量 (Cross Efficiency Measure, CEM)[20]，並由 Doyle & Green 於 1994 年提出修正[16]，主要目的是用來區隔真正有效率的 DMUs。交叉效率模式之線性規劃式如下：

Minimize

$$B_k = \sum_{r=1}^s \left( U_{rl} \sum_{i \neq k} Z_{rk} \right) - \sum_{i=1}^m \left( V_i \sum_{l \neq k} X_{ik} \right) \quad (38)$$

subject to

$$E_{kl} = \frac{\sum_{r=1}^s U_{rl} Z_{rk}}{\sum_{i=1}^m V_{il} X_{ik}} \leq 1, \forall l \neq k \quad (39)$$

$$\sum_{i=1}^m V_{ik} X_{ik} = 1 \quad (40)$$

$$\sum_{r=1}^s U_{rk} Z_{rk} - \theta_{kk} \sum_{i=1}^m V_{ik} X_{ik} = 0 \quad (41)$$

$$U_{rj}, V_{ij} \geq 0, \forall i, r, j = 1, \dots, n$$

其中 DMU<sub>k</sub> 為目標 DMU、 $\theta_{kk}$  為 DMU<sub>k</sub> 的 CCR 效率、 $\sum_{r=1}^s \left( U_{rl} \sum_{i \neq k} Z_{rk} \right)$  與  $\sum_{i=1}^m \left( V_i \sum_{l \neq k} X_{ik} \right)$  為綜合 DMU 的加權產出與加權投入組合。

經由上述模式計算，可求得各個投入／產出項的權重數，將權重數帶入目標函數式中，即可求得 DMU<sub>1</sub> 以 DMU<sub>k</sub> 為目標的交叉效率  $E_{kl}$ 。運用 CEM 導入同儕比較，可使 DMU 間差異更加顯著與客觀。計算交叉效率的目的在使自我評估效率最大及平均同儕相互評估效率最小。CEM 法具有選擇最佳方案之功能，於全盤考量變數屬性後，再作最佳選擇。透過 CEM 計



算平均同儕相互評估效率值，選擇最大效率值作為選擇DMU<sub>s</sub>優先順序參考。

#### 四、實證分析

本章節主要的目的是在於以PCA結合DEA模式，建立一套客觀、公平及符合成本效益的武器系統選評方法，以提供決策者作為一個選評及採購之參考依據。而本研究將針對不同國家生產製造型式之低空防禦飛彈，作為實例來進行比較分析。

##### 4.1 研究範圍與限制

近幾十年來低空防禦飛彈系統的發展，主要有三個種類：肩射式，自走式及拖曳式防空飛彈系統。本研究所要選評之低空防禦飛彈系統為自走式系統。雖然有些低空防禦飛彈同時具有上述兩種之型式，但是DEA模式在受評估對象之間的同質性必須高，否則結果會有失真，因此未將上述三種型式之低空防禦飛彈系統一起納入評估。而選擇自走式系統之主因係機動性高及戰術應用較廣。本研究之範圍僅著重於飛彈系統投資作業面之檢討，注重其性能與採購成本之比較。而研究限制在於部分飛彈系統之資料取得困難，如部分火力、作戰性能資料未公開，以及無法獲得各飛彈系統之真實報價資料，因此本研究主要係針對空防禦飛彈系統作一結合PCA及DEA選評方式之展示。

投入及產出項之選擇為 DEA 模式的第二個步驟。所謂投入項目即是對產出有貢獻的生產要素，而產出項目則代表受評估 DMU 的具體成效。故投入產出項目之選擇必須慎選，否則亦會影響 DEA 之正確性。本研究參考鄭景

俗、廖述賢、鄧國祥及王佳文等探討武器系統的評選策略[21]文獻中，整理歸納出影響武器系統性能的重要因素計有成本、性能諸元、作戰能力、後勤補給、獲得期程及科技先進性等六項。其中，後勤補給、獲得期程及科技先進性等三項因素本研究未納入投入產出項目，說明如後：

- (1)後勤補給：無法確切獲得系統之零附件壽期、操作維修人員數、可靠度等相關資料。
- (2)獲得期程：與系統本身之性能，未造成直接之影響，故未納入。
- (3)科技先進性：無法獲得系統複雜度及系統相關電子設備等技術資料。

因此本研究選擇成本、性能諸元及作戰能力等三項因素作為投入產出項目之選擇，並依據低空防禦飛彈系統之性能，選擇投入產出項目如表1，投入產出項目性能資料統計表如表2。本研究期用現有最少之投入成本獲得最大之飛彈系統產出項目，因此於DEA模式採用產出導向模式。

表1. 投入與產出項目表。

	影響武器性能因素	投入/產出別	項目名稱
1	成本	投入	採購成本
2	性能諸元	產出	長度
3		產出	直徑
4		產出	翼展
5		產出	全彈重量
6		產出	彈頭重量
7		產出	聯裝彈藥數量
8	作戰能力	產出	最大有效射程
9		產出	最小有效射程
10		產出	最大接戰高度
11		產出	最小接戰高度
12		產出	飛行速度
13		產出	最大目標搜索範圍
14		產出	單發命中率

表2. 各式低空防禦飛彈性能資料統計表。

項次	飛彈系統	製造國	成本	性能諸元						作戰能力						
			採購成本(枚/美元)	長度(M)	直徑(M)	翼展(M)	全彈重量(KG)	彈頭重量(KG)	聯裝彈藥數量(枚)	最大有效射程(M)	最小有效射程(M)	最大接戰高度(M)	最小接戰高度(M)	飛行速度(馬赫)	最大目標搜索範圍(M)	單發命中率
1	ADATS, MK II	瑞美	400000	2.05	0.152	0.330*	51	12.5	8	10000	500	7000	15*	3	25000	85
2	FM-90	中國	260000	3	0.162	0.55	84.5	14	4	15000	700	6000	15	2.6	25000	80
3	PL-9C	中國	300000	2.99	0.167	0.81	120	11.8	4	15000	1000	4500	30	2	18000	80
4	VL MICA	法國	500000	3.1	0.16	0.48	112	12	8	10000	500	10000	15*	3	30000*	85*
5	CROTALE NG	法國	450000	2.29	0.165	0.36*	75	13	8	11000	500	6000	10	3.6	30000	85
6	MISTRAL 1	法國	380000	1.86	0.0925	0.2	19	3	6	6000	300	4500	5	2.5	30000*	90*
7	ROALAND 3	法德	460000	2.4	0.16	0.5	75	9.2	2	8000	500	6000	10	1.68	30000*	85
8	BARAK	以色列	440000	2.175	0.17	0.685	88	22	8	12000	600	10000	5	2	30000*	85*
9	PEGASUS	韓國	400000	2.3*	0.165*	0.36*	86.2	12	8	10000	500*	5000*	10*	2.6	20000	80*
10	SA-8B	俄國	400000	3.158	0.2096	0.65	126.3	15	6	10000	1500	5000	25	1.57	30000	70*
11	SA-13	俄國	330000	2.223	0.12	0.36	41	5	4	5000	800	3500	10	1.6	30000	60
12	SA-15	俄國	450000	2.9	0.24	0.695	165	15	8	12000	1500	6000	10	2.04	25000	80*
13	SA-19	俄國	380000	2.63	0.076	0.2	42	9	8	8000	1500	4000	15	2.6	25000*	80*
14	CACTUS 1000	南非	400000	3.13	0.18	0.4	115	20	4	12000	800	7500	30	3.5	25000*	95
15	天劍 I 型	台灣	350000	2.87	0.127	0.64	90	12.6	4	9000	500*	3000	15	1.5	30000	85*
16	STARSTREAK	英國	320000	1.397	0.127	0.37	43*	6*	8	7000	300	5000*	10*	3.5	25000*	80*
17	AVENGER	美國	180000	1.52	0.07	0.091	10.1	1	8	4500	200	3800	1	2.2	25000*	80*
18	CHAPARRAL	美國	300000	2.91	0.127	0.63	86.2	12.6	4	9000	500	3000	15	1.5	22000	60
19	SAVA	南斯拉夫	250000	2.2	0.12	0.4	40	3	4	5000	800	3500	25	1.5	10000	60

備註  
 1. 實際採購成本無法獲得，故數據資料為自行賦予，非真實值。  
 2. \*資料未公開，無法獲得，故數據資料為自行賦予，非真實值。  
 3. 餘資料參考來源：詹氏年鑒之陸基防空系統 2001~2002 年。

## 4.2 PCA簡化資料

本研究分析共計有 19 個受評估 DMU，及 1 個投入與 13 個產出項進行效率選評。投入與產出項數總和的兩倍明顯的大於 DMU 數， $(1+13) \times 2 = 28 > 19$ 。因此利用 PCA 對 13 個產出項目進行資料壓縮合併，分別求出其共變異矩陣與關聯矩陣之特徵值與特徵向量，如表 3 與表 4 所示。

在主成份個數的選取，從表 3 可觀察共變異矩陣之主成份個數選取至第 5 個主成份值時，其特徵值及特徵向量包含了原始資料 99.999% 的變異量；另從表 4 可觀察關聯矩陣之主成份個數選取至第 8 個主成份值，其特徵值及特徵向量包含了原始資料 95.515% 的變異量，且第 8 個主成份值是主成份值最大的選取

量。由 PCA 選取後之投入與產出項，其總數合之兩倍不會超過 DMU 個數。在確定選取之主成份個數後，利用(7)及(14)式分別求出其主成份值，如表 5 與表 6 所示。並代入 DEA 產出導向之 CCR 與 BCC 模式，求出各 DMU 之效率值。

## 4.3 DEA效率分析

本研究應用 FRONTIER ANALIST 專業計算軟體，求出 CCR 模式相對效率值、BCC 模式技術效率值與交叉效率值。

### 4.3.1 效率分析

當計算的結果等於 1 時，表示該低空防禦

系統是相對有效率，而當效率值小於 1 時，表示該低空防禦系統是相對無效率。如表 7 所示，以共變異矩陣主成份值計算之低空防禦飛彈相對效率值可以觀察出，計有 FM-90、PL-9C、SA-8B、SA-15、AVENGER、SA-19、CHAPARRAL 及 SAVA 等 8 種飛彈系統同時具有 100%之規模效率、整體相對效率與技術效率。另 VL MICA、CROTALE NG、MISTRAL 1、ROALAND 3、BARAK、SA-13、天劍 I 型

及 STARSTREAK 等 8 種飛彈系統具有技術效率，不具整體效率；於固定規模報酬下，若減少部分投入即可達到整體效率。其餘 ADATS 等 3 套飛彈系統整體效率、技術效率及規模效率均不佳，顯示不符合成本效益，須降低投入項之採購成本及提昇部分產出項之性能，方可提升整體效率值。

表3. 產出項目之共變異矩陣特徵值與向量。

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$	$\lambda_{11}$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{13}$
特徵值	5.3293	2.9683	1.2090	1.0817	0.7418	0.401	0.370	0.3162	0.207	0.1588	0.1534	0.0542	0.0094
變異量百分比	40.994	22.833	9.2997	8.3211	5.7065	3.081	2.846	2.432	1.595	1.22	1.18	0.417	0.0727
百分比累加	40.994	63.828	73.128	81.449	87.1555	90.237	93.083	95.515	97.110	98.331	99.511	99.927	100
特徵向量	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$
A	0.3633	-0.1511	-0.010	-0.0995	0.3468	0.3066	0.0374	-0.0939	-0.6231	-0.1738	-0.0653	0.0588	0.4295
B	0.3730	0.0835	-0.0538	0.1592	-0.1845	-0.3407	-0.1519	0.5698	0.1423	-0.2548	-0.1089	0.3611	0.3170
C	0.3558	-0.1557	-0.2566	-0.0266	-0.3704	-0.0284	0.1191	-0.0429	0.0948	0.4817	0.3366	-0.3740	0.3665
D	0.4101	-0.0003	-0.0587	0.1202	-0.0364	-0.1740	0.0630	0.2590	-0.4102	0.0978	-0.1474	-0.2899	-0.6539
E	0.3678	0.1867	-0.0595	-0.0017	-0.0703	0.2987	0.0184	-0.2782	0.3918	0.0054	-0.6988	-0.1116	0.0136
F	-0.0726	0.3597	0.1911	0.6655	-0.0828	0.0314	0.1192	-0.1507	-0.2483	0.4268	-0.0545	0.2857	0.1128
G	0.3683	0.1301	0.1340	-0.1060	-0.1642	0.1137	0.5261	-0.2390	0.1313	-0.2693	0.3994	0.3694	-0.2422
H	0.2382	-0.2078	0.1240	0.4806	0.5402	-0.2879	-0.0457	-0.2292	0.3183	-0.1627	0.1878	-0.2468	0.0211
I	0.1904	0.4290	-0.0040	-0.0134	-0.1541	0.1206	-0.7261	-0.2485	-0.0806	-0.1617	0.3259	-0.0752	-0.0885
J	0.2468	-0.2634	0.4753	-0.2544	0.2022	0.1239	-0.2872	0.1224	0.1655	0.5187	0.0375	0.3292	-0.1386
K	-0.0205	0.4374	0.5004	-0.0686	0.1230	0.2380	0.2014	0.4262	0.0894	-0.0580	0.1144	-0.4574	0.1597
L	0.0201	0.3146	-0.6138	-0.0094	0.4942	0.2529	0.0504	0.2557	0.1709	0.2212	0.1738	0.1653	-0.1095
M	0.0576	0.4218	0.0351	-0.4414	0.2293	-0.6498	0.1056	-0.2532	-0.0970	0.1862	-0.1089	0.0145	0.1285

表4. 產出項目之關聯矩陣特徵值與向量。

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$	$\lambda_{11}$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{13}$
特徵值	2.85E+7	1.07E+7	2.48E+4	136562	635.92	114	45.300	32.373	6.634	3.241	1.869	0.091	0.012
變異量百分比	68.213	25.541	5.916	0.326	0.002	2.71E-4	1.08E-4	7.74E-5	1.59E-5	7.75E-6	4.47E-6	2.18E-7	2.97E-8
百分比累加	68.213	93.755	99.671	99.997	99.999	99.999	99.999	99.999	99.999	100	100	100	100
特徵向量	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$
A	5.04E-6	9.83E-5	-0.0001	0.0005	0.0071	0.0029	0.0041	0.0323	-0.0023	-0.0731	-0.1125	-0.2323	0.9628
B	1.07E-4	0.0009	5.37E-5	0.0033	0.0799	0.0301	-0.0463	-0.0228	-0.0050	0.9770	0.1595	-0.0633	0.0778
C	-2.1E-5	0.0037	-0.0033	0.0068	0.4253	-0.7816	0.3919	-0.2158	-0.0138	-0.0105	0.0815	0.0254	0.0196
D	7.2E-3	0.0089	-0.0035	0.0362	0.8955	0.4068	-0.1459	0.0205	-0.0294	-0.0856	-0.0323	0.0045	-0.0172
E	2.93E-4	0.0014	0.0001	0.0021	0.0401	-0.0216	-0.0012	0.0807	0.9950	0.0106	-0.0327	0.0151	7.62E-5
F	6.59E-5	2.41E-5	0.0005	0.0008	-0.0203	0.0441	-0.1437	-0.1126	0.0464	-0.1794	0.9465	-0.1750	0.0592
G	0.0359	0.9244	-0.3754	-0.0570	-0.0086	-6.6E-6	-0.0015	0.0002	-0.0008	1.22E-5	-0.0002	-0.0001	-8.7E-5
H	-0.0078	0.0331	-0.0697	0.9962	-0.0370	-0.0065	0.0050	-0.0078	-0.0002	1.32E-4	-0.0012	0.0008	1.87E-5
I	0.1569	0.3686	0.9147	0.0529	-0.0013	-0.0026	-0.0003	0.0004	-0.0008	-0.0003	-0.0005	1.05E-5	-4.4E-5
J	-0.0007	0.0010	-0.0008	0.0066	0.0465	0.0203	0.4392	0.8771	-0.0660	0.0079	0.1695	-0.0409	-0.0213
K	2.3E-05	6.13E-5	0.0001	-0.0005	-0.0115	0.0350	-0.0125	0.0242	-0.0100	0.0151	0.1631	0.9533	0.2494
L	0.9869	-0.0920	-0.1323	0.0015	-0.0004	-2.9E-4	-4.2E-5	0.0007	-0.0002	1.59E-5	9.93E-5	-2.2E-5	-2.5E-5
M	0.00099	0.0010	0.0016	-0.0065	-0.0712	0.4675	0.7805	-0.4030	0.0482	0.0104	0.0445	-0.0083	0.0134

表5. 共變異矩陣選取後之投入與產出項。

DMU	飛彈系統種類	投入	產出 1	產出 2	產出 3	產出 4	產出 5	產出 6	產出 7
1	ADATS, MK II	400000	26126.6	9542.507	3946.286	336.8329	30.92542	24.27299	56.94014
2	FM-90	260000	26147.55	13802.74	1140.475	199.5064	21.75539	18.53644	50.32847
3	PL-9C	300000	19001.36	13903.84	673.5444	410.2366	58.41954	17.88572	65.09509
4	VL MICA	500000	31532	10189.21	6028.533	505.2103	86.40709	27.95308	52.70815
5	CROTALE NG	450000	30940.24	9638.697	1994.484	235.2003	44.5809	32.02989	49.86301
6	MISTRAL 1	380000	30527.02	4456.695	2513.586	239.4649	38.4648	29.94926	61.54257
7	ROALAND 3	460000	30832.62	6865.638	3120.63	406.2669	75.54654	26.48036	69.17626
8	BARAK	440000	31602.97	12041.13	5270.804	490.0243	52.76787	1	57.33678
9	PEGASUS	400000	20878.16	9265.342	2778.347	224.9566	68.19482	40.8076	47.78532
10	SA-8B	400000	30739.71	8379.386	1385.181	1237.845	78.01268	19.91078	56.1937
11	SA-13	330000	30330.34	3180.488	1939.257	742.8742	59.16986	11.5816	48.42441
12	SA-15	450000	26033.77	11056.89	2210.588	1170.562	96.49345	35.9996	50.2169
13	SA-19	380000	25576.36	6620.855	1883.338	1288.037	1	29.8556	58.53979
14	CACTUS 1000	400000	26274.52	11586.13	3631.7	550.5287	62.77745	46.17382	63.14097
15	天劍 I 型	350000	30397.78	6684.308	1	191.3325	91.02092	24.29661	65.63709
16	STARSTREAK	320000	25706.7	6025.434	3257.002	202.5867	60.93356	22.45387	57.97977
17	AVENGER	180000	25429.48	3268.422	3105.019	180.5777	45.30955	34.53446	51.6969
18	CHAPARRAL	300000	22502.31	7419.885	1059.561	179.5087	91.75157	14.49918	47.87922
19	SAVA	250000	10591.72	5019.609	4585.681	713.3277	67.30111	16.23722	60.17822

表6. 關聯矩陣選取後之投入與產出項

DMU		投入	產出 1	產出 2	產出 3	產出 4	產出 5	產出 6	產出 7
1	ADATS, MK II	400000	5758.425	12210.08	3650.772	841.0283	9315.748	4309.401	5992.912
2	FM-90	260000	7480.665	12374.78	4292.924	272.9628	8819.097	2087.599	8583.241
3	PL-9C	300000	7135.07	9413.951	8558.264	1	5932.202	1	7933.655
4	VL MICA	500000	6476.273	15082.73	655.2579	1136.255	11141.54	6961.168	5750.284
5	CROTALE NG	450000	6056.881	13530.77	735.3516	1015.317	11698.76	4153.127	7572.935
6	MISTRAL 1	380000	3841.637	12309.95	58.2948	1587.631	12637.39	4812.955	5836.299
7	ROALAND 3	460000	4955.04	13148.77	351.1974	1409.891	12160.53	5084.935	6195.335
8	BARAK	440000	7236.309	15316.72	914.0645	915.813	10877	6322.57	6655.762
9	PEGASUS	400000	5277.683	9753.847	6647.521	558.4322	7300.94	2265.629	5885.39
10	SA-8B	400000	5770.162	12759.27	759.4592	1630.371	12566.27	3705.763	7267.374
11	SA-13	330000	3415.439	11641.13	1	1973.285	13230.44	4444.335	5633.063
12	SA-15	450000	6603.857	11828.96	4039.575	1066.366	9711.789	2900.773	7050.793
13	SA-19	380000	4669.57	10485.02	3533.082	1589.517	10711.27	2930.3	5917.761
14	CACTUS 1000	400000	6700.669	12610.9	3958.45	708.8026	9083.258	3944.899	6670.151
15	天劍 I 型	350000	4759.732	12006.61	439.5184	1293.497	12529.84	2899.403	7678.157
16	STARSTREAK	320000	4213.722	11027.42	3213.779	1159.835	10020.89	4025.341	5339.705
17	AVENGER	180000	3008.182	10231.32	2872.38	1450.394	10575.74	4076.676	4626.261
18	CHAPARRAL	300000	4578.278	9414.658	5281.971	824.3157	8742.162	1652.361	6431.285
19	SAVA	250000	2974.65	5182.771	12108.19	771.0244	3776.77	1296.766	2491.648

表7. 共變異矩陣主成份值之相對效率值表。

DMU	飛彈系統種類	效率指標		
		整體效率 CCR (%)	技術效率 BCC (%)	規模效率 CCR/BCC (%)
1	ADATS, MK II	75.61	85.4	88.54
2	FM-90	100	100	100
3	PL-9C	100	100	100
4	VL MICA	78.55	100	78.55
5	CROTALE NG	58.74	100	58.74
6	MISTRAL 1	58.73	100	58.73
7	ROALAND 3	64.67	100	64.67
8	BARAK	88.97	100	88.97
9	PEGASUS	75.83	91.3	83.06
10	SA-8B	100	100	100
11	SA-13	93.66	100	93.66
12	SA-15	100	100	100
13	SA-19	100	100	100
14	CACTUS 1000	94.89	100	94.89
15	天劍 I 型	90.92	100	90.92
16	STARSTREAK	76.72		83.04
17	AVENGER	100	100	100
18	CHAPARRAL	100	100	100
19	SAVA	100	100	100
	平均值	87.22	98.37	88.67

表8. 關聯矩陣主成份值之飛彈相對效率值表。

DMU	飛彈系統種類	效率指標		
		整體效率 CCR (%)	技術效率 BCC (%)	規模效率 CCR/BCC (%)
1	ADATS, MK II	65.78	81.52	80.69
2	FM-90	100	100	100
3	PL-9C	100	100	100
4	VL MICA	69.04	100	69.04
5	CROTALE NG	59.54	100	59.54
6	MISTRAL 1	58.59	91.68	63.91
7	ROALAND 3	56.2	81.25	69.17
8	BARAK	79.95	100	79.95
9	PEGASUS	61.54	63.61	96.75
10	SA-8B	70.11	100	70.11
11	SA-13	74.21	100	74.21
12	SA-15	61.33	100	61.33
13	SA-19	63.73	100	63.73
14	CACTUS 1000	70.31	97.28	72.28
15	天劍 I 型	75.62	100	75.62
16	STARSTREAK	66.52	72.94	91.20
17	AVENGER	100	100	100
18	CHAPARRAL	79.86	93.08	85.80
19	SAVA	100	100	100
	平均值	74.33	93.76	79.28

如表 8 所示，以關聯矩陣主成份值計算之低空防禦飛彈相對效率值，計有 FM-90、

PL-9C、AVENGER 及 SAVA 共 4 種飛彈系統具有 100%之整體相對效率、技術效率及規模效率。此外，其餘 ADATS, MK II、MISTRAL 1、ROALAND 3、CACTUS 1000、STARSTREAK 與 CHAPARRAL 等 8 種飛彈系統整體效率及規模效率均欠佳，不符合成本效益，須降低投入項之採購成本及提昇部分產出項之性能，方可提升整體效率值。其餘 7 種飛彈系統具有技術效率，但不具整體效率，亦均處於固定規模報酬下，故減少投入項即可達到整體效率。

#### 4.3.2 參考群體分析

參考群體分析之目的在於檢視物超所值之飛彈系統，作為無物超所值飛彈系統改善效率的參考對象與頻率。本研究採用CCR與BCC之參考群體進行飛彈系統效率分析。

由表9得知SA-15、SA-19被無效率單位參考一次、SA-8B與CHAPARRAL被參考2次、CHAPARRAL被參考3次、SAVA與PL-9C被參考5次、FM-90被參考7次、AVENGER被參考11次。AVENGER、FM-90、PL-9C與SAVA飛彈系統是較符合物超所值的飛彈系統，因為其邊際投入與產出在效率評估上有較大的效率貢獻。

由表 10 得知 FM-90、VL MICA、ROALAND 3、BARAK、SA-15、天劍 I 型被無效率單位參考一次、SAVA被參考2次、AVENGER與CACTUS 1000被參考3次。AVENGER與CACTUS 1000飛彈系統是較符合物超所值的飛彈系統，因為其邊際投入與產出在效率評估上有較大的效率貢獻。PL-9C、CROTALE NG、MISTRAL 1、SA-8B、SA-13、SA-19與CHAPARRAL被無效率單位參考0次，顯示該7種飛彈系統具有經營利基。

表9. CCR模式下共變異矩陣主成份值之飛彈參考群體及頻率表。

DMU	飛彈系統種類	參考群體	參考頻率
1	ADATS, MK II	2, 17, 19	0
2	FM-90	無	7
3	PL-9C	無	5
4	VL MICA	2, 17, 19	0
5	CROTALE NG	2, 3, 17	0
6	MISTRAL 1	2, 10, 17	0
7	ROALAND 3	3, 17, 18, 19	0
8	BARAK	2, 17, 19	0
9	PEGASUS	2, 3, 17	0
10	SA-8B		2
11	SA-13	10, 17	0
12	SA-15	無	1
13	SA-19	無	1
14	CACTUS 1000	2, 3, 12, 13, 17	0
15	天劍 I 型	17, 18	0
16	STARSTREAK	3, 17, 18, 19	0
17	AVENGER	無	11
18	CHAPARRAL	無	3
19	SAVA	無	5

表10. BCC模式下共變異矩陣主成份值之飛彈參考群體及頻率表。

DMU	飛彈系統種類	參考群體	參考頻率
1	ADATS, MK II	2, 8, 14, 17, 19	0
2	FM-90	無	1
3	PL-9C	無	0
4	VL MICA	無	1
5	CROTALE NG	無	0
6	MISTRAL 1	無	0
7	ROALAND 3	無	1
8	BARAK	無	1
9	PEGASUS	12, 14, 17	0
10	SA-8B	無	0
11	SA-13	無	0
12	SA-15	無	1
13	SA-19	無	0
14	CACTUS 1000	無	3
15	天劍 I 型	無	1
16	STARSTREAK	4, 7, 14, 15, 17, 19	0
17	AVENGER	無	3
18	CHAPARRAL	無	0
19	SAVA	無	2

由表11得知PL-9C與SAVA被無效率單位參考一次、FM-90被參考14次、AVENGER被參考15次。FM-90與AVENGER飛彈系統是較符合物超所值的飛彈系統，因為其邊際投入與產出在效率評估上有較大的效率貢獻。

表11. CCR模式下關聯矩陣主成份值之飛彈參考群體及頻率表。

DMU	飛彈系統種類	參考群體	參考頻率
1	ADATS, MK II	2, 17	0
2	FM-90	無	14
3	PL-9C	無	1
4	VL MICA	2, 17	0
5	CROTALE NG	2, 17	0
6	MISTRAL 1	2, 17	0
7	ROALAND 3	2, 17	0
8	BARAK	2, 17	0
9	PEGASUS	2, 17, 19	0
10	SA-8B	2, 17	0
11	SA-13	17	0
12	SA-15	2, 17	0
13	SA-19	2, 17	0
14	CACTUS 1000	2, 17	0
15	天劍 I 型	2, 17	0
16	STARSTREAK	2, 17	0
17	AVENGER	無	15
18	CHAPARRAL	2, 3, 17	0
19	SAVA	無	1

表12. BCC模式下關聯矩陣主成份值之飛彈參考群體及頻率表。

DMU	飛彈系統種類	參考群體	參考頻率
1	ADATS, MK II	2, 8, 17, 19	0
2	FM-90	無	6
3	PL-9C	無	2
4	VL MICA	無	0
5	CROTALE NG	無	0
6	MISTRAL 1	2, 8, 11, 17	0
7	ROALAND 3	2, 8, 11, 15	0
8	BARAK	無	6
9	PEGASUS	2, 8, 17, 19	0
10	SA-8B	無	0
11	SA-13	無	2
12	SA-15	無	1
13	SA-19	無	1
14	CACTUS 1000	2, 3, 8, 12, 19	0
15	天劍 I 型	無	2
16	STARSTREAK	2, 8, 17, 19	0
17	AVENGER	無	5
18	CHAPARRAL	3, 13, 15, 17	0
19	SAVA	無	4

由表12得知SA-15與SA-19被無效率單位參考一次、PL-9C、SA-13與天劍 I 型被參考2次、SAVA被參考4次、AVENGER被參考5次、FM-90與BARAK被參考6次。FM-90與BARAK

飛彈系統是較符合物超所值的飛彈系統，因為其邊際投入與產出在效率評估上有較大的效率貢獻。VL MICA、CROTALE NG與SA-8B被無效率單位參考0次，顯示該3種飛彈系統具有經營利基。

#### 4.3.3 交叉效率分析

經計算共變異矩陣及關聯矩陣主成份值各 DMU 之交叉效率及其排名順序，分別如表 13 及表 14。藉由交叉效率平均值可從整體效率 100%之受評 DMU 中，再區分出來找出最佳方案之飛彈系統。因此，從表 13 可觀察其 AVENGER、FM-90、PL-9C 與 SAVA 飛彈系統為較佳且符合成本效益之低空防禦飛彈系統，因為於共變異矩陣主成份值之交叉效率平均值較高。而以關聯矩陣主成份值計算之相對效率值，進行比較各 DMU 差異的交叉效率，從表 14 可觀察出較佳且符合成本效益之低空防禦飛彈系統為 AVENGER 與 FM-90 飛彈系統。綜合上述結果，以共變異矩陣及關聯矩陣主成份值計算之交叉效率值，選評結果得到較佳方案之低空防禦飛彈系統為 AVENGER 與 FM-90 飛彈系統。

研究結果顯示，以 PCA 結合 DEA 模式計算之結果，不論以 DEA 效率值分析、參考群體分析及交叉效率分析，結果顯示最佳方案為 AVENGER 飛彈系統。

#### 4.4 管理意涵

本研究主要之目的在於以 PCA 結合 DEA 模式，建立一套客觀、公平及符合成本效益的武器系統選評方法，提供國防部決策人員作為一個選評及採購之參考依據。

表13 共變異矩陣主成份值之飛彈相對效率及交叉效率。

DMU	飛彈系統種類	整體效率 CCR	技術效率 BCC	平均交叉效率
17	AVENGER	100	100	95.81
19	SAVA	100	100	93.28
3	PL-9C	100	100	89.01
2	FM-90	100	100	87.94
12	SA-15	100	100	79.26
14	CACTUS 1000	94.89	100	77.77
10	SA-8B	100	100	75.80
18	CHAPARRAL	100	100	74.87
8	BARAK	88.97	100	67.52
4	MICA VL	78.55	100	67.1
16	STARSTREAK	76.72	92.39	66.34
15	天劍 I 型	90.92	100	63.52
9	PEGASUS	75.83	91.3	63.47
11	SA-13	93.66	100	60.76
1	ADATS	75.61	85.4	58.75
13	SA-19	100	100	57.23
7	ROLAND 3	64.67	100	55.54
5	CROTALE NG	58.74	100	51.82
6	MISTRAL 1	58.73	100	47.13

表14. 關聯矩陣主成份值之飛彈相對效率及交叉效率。

DMU	飛彈系統種類	整體效率 CCR	技術效率 BCC	平均交叉效率
17	AVENGER	100	100	98.83
2	FM-90	100	100	91.60
3	PL-9C	100	100	69.42
8	BARAK	79.95	100	64.04
16	STARSTREAK	66.52	72.94	62.18
14	CACTUS 1000	70.31	97.28	61.41
11	SA-13	74.21	100	60.35
18	CHAPARRAL	79.86	93.08	60.06
10	SA-8B	70.11	100	59.74
15	天劍 I 型	75.62	100	57.74
1	ADATS	65.78	81.52	57.58
19	SAVA	100	100	57.38
6	MISTRAL 1	58.59	91.68	53.81
4	MICA VL	69.04	100	54.92
13	SA-19	63.73	100	54.74
12	SA-15	61.33	100	53.56
5	CROTALE NG	59.54	100	52.77
7	ROLAND 3	56.2	81.25	49.67
9	PEGASUS	61.54	63.61	49.24

##### 4.4.1 對國防部而言

本研究可提供國軍系統分析作業中選評方案的技術參考，以一套客觀、公平及符合成本效益的武器系統選評方法，找出最佳武器裝備

的方案供決策者參考。期能使所選之方案為符合物超所值之最佳武器系統。且此研究亦可應用於國軍採購各類型軍事裝備評選時之參考依據，確保運用最少國防預算，選擇最適之方案。

#### 4.4.2 對賣方而言

可將本研究分析之結果作為企業彼此競爭之參考準則，對較差之武器系統製造業者可進行產品缺失改善。而對被評選出物超所值之武器系統業者而言，有其評選依據，將有利於市場推銷。

### 五、結論與建議

本研究可確認DEA模式進行選評作業時，如遭遇投入與產出項目過多，會影響到DEA效率值失真。此時可藉由PCA模式，先行對原始結合投入與產出項目資料壓縮合併後，在以DEA模式進行選評。

本研究係針對低空防禦飛彈系統實例作結合PCA及DEA選評方式之展示，因為鑒於分析資料之採購成本均非真實值，且部分飛彈系統性能資料無法獲得，所以研究之結果並不等於實際真實的結果。因此，在資料獲得的上面如能越完整越詳細，以PCA結合DEA模式計算出來的效率值會越驅近於實際值。

由於部分須納入投入或產出項目為文字敘述，或是無法明確量化之資料，導致資料不完整性，將影響評選結果。為確保選評作業能夠考量到全面的影響因素，以及選評作業的完整性，建議後續能結合模糊理論之方法，將無法明確表示的選評影響因素，明確的以數學變數模式表達出來。

本研究僅針對CCR與BCC模式進行測試，

且僅採用一階段方式評估武器系統做探討，尚有多種DEA評估模式與循序漸進的程序未進行測試研究，未來研究可針對目前已提出之相關模式進行測試探討，擷取其各自之優點，使整個研究更趨近完善。

### 參考文獻

- [1] 孫遜，資料包絡分析法—理論與應用，楊智文化出版社，台北，pp. 187-197，2004。
- [2] 張正文，模糊多屬性決策分析—一種簡單群體決策方法評估武器系統，國防管理學院資源管理研究所碩士論文，2000年。
- [3] 賀克勤、唐國銘、吳典勳、古思明、吳炎崑，“武器系統建案分析多層級多準則模糊評估模式”，2000年科技與管理學術研討會論文集，第103-114頁，2000年。
- [4] 鄧國祥，武器系統評選決策模式之研究—應用模糊認知圖及新的相對測度排序法，國防管理學院資源管理研究所碩士論文，2003。
- [5] 劉家熙、謝立德、蘇祖欽，“武器系統支援度作戰測試評估模式建立”，第一屆台灣作業研究學會學術研討會暨2004年科技與管理學術研討會，第68-74頁，2004年。
- [6] 荊濤、曾祥雲，“DEA系統及其在武器系統裝備採辦中的應用研究”，系統工程與電子技術，第二十五卷，第三期，第295-298頁，2003。
- [7] Doyle, J. R. and Green, R. H., “Comparing Products Using Data Envelopment Analysis,” Annals of Operation Research, Vol. 19, NO. 6, pp. 631-638, 1991.
- [8] Shafer S. M. and Bradford, J. W., “Efficiency Measurement of Alternative Machine Component Grouping Solutions



- Via Data Envelopment Analysis,” IEEE Transactions of Engineering Management, Vol. 42, No.2, pp. 159-165, 1995.
- [9] Odeck, J. and Hjalmarsson, L., “Data Envelopment Analysis: The Assessment of Performance,” Transportation Planning and Technology, Vol. 20, pp.49-66, 1996.
- [10] Braglia, M. and Petroni, A., “Evaluating and Selecting Investments in Industrial Robots,” International Journal of Production Research, Vol. 37, No.18, pp. 4157-4178, 1999.
- [11] 方楠，應用資料包絡分析法於軍工廠車床選定之研究，國防管理學院資源管理研究所碩士論文，2000。
- [12] Adler, N. and Golany, B., “Evaluation of Deregulated Airline Networks Using Data Envelopment Analysis Combined with Principal Component Analysis with an Application to Western Europe,” European Journal of Operational Research, Vol. 132, No. 2, pp. 260-273, 2001.
- [13] Sun, S., “Assessing computer numerical control machines using data envelopment analysis,” International Journal of Production Research, Vol. 40, No. 9, pp. 2011-2039, 2002.
- [14] Charnes, A., Cooper, W. W., and Rhodes, E. L., “Measuring the Efficiency of Decision Making Units,” European Journal of Operational Research, Vol. 2, No. 6, pp. 429-444, 1978.
- [15] Banker, R. D., Charnes, A., and Cooper, W. W., “Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis,” Management Science, Vol. 30, No. 9, pp. 1078-1092, 1984.
- [16] Doyle, J. R. and Green, R. H., “Efficiency and cross-efficiency in DEA: Derivations, Meanings and Uses,” Journal of the Operational Research Society, Vol. 45, No. 5, pp. 567-538, 1994.
- [17] Hotelling, H., “Analysis of a Complex of Statistical Variables into Principal Components”, Journal of Education Psychology, Vol. 24, pp. 498-520, 1933
- [18] Ali, A. I. and Seiford, L. M., “Translation Invariance in Data Envelopment Analysis,” Operations Research Letters, 9, pp. 403-405, 1990.
- [19] Farrell, M. J., “The Measurement of Productive Efficiency,” Journal of the Royal Statistical Society, Vol. 120, Part. 3, pp. 253-290, 1957.
- [20] Sexton, T. R., The Methodology of Data Envelopment Analysis,” San Francisco, Jossey-Bass Publishers, 1986.
- [21] 鄭景俗、廖述賢、鄧國祥、王佳文，“應用模糊認知圖法探討武器系統的測評策略”，九十二年度國防整體後勤支援年會暨研討會論文集，第 671-679 頁，2003 年。