

# 公理設計方法於產品設計決策之實證研究： 以警報圖像設計為例

## An Empirical Study of the Axiomatic Design Method for Product Design Decisions: A Case Study on Alarm Icon Design

梁曉帆 Sheau-Farn Max Liang 范國順 Kuo-Shunn Fan 盧大平 Ta-Ping Lu  
國立臺北科技大學工業工程與管理系

Department of Industrial Engineering and Management, National Taipei University of  
Technology

(Received October 1, 2007; Final Version December 23, 2007)

**摘要：**產品的成功與否取決於其開發流程中之決策制定。而產品人機介面中圖像設計的決策問題特性在於圖像設計的決策目標沒有明確與有效的衡量方法以及可能的備選方案數量太多。因此，本研究嘗試以使用者對於圖像元件之偏好程度為基礎，結合公理設計方法，以程序控制系統中之警報圖像設計為例，對圖像設計的決策問題提出新的決策方法，使其能明確與有效的衡量決策目標，並能控制備選方案的數量，使決策者能根據此方法所預測的後果選取最好的方案。除了說明此方法的決策過程與步驟之外，再以一實驗驗證其預測後果之準確性。此實驗先透過問卷調查 80 位化學工程系的大學生對於警報圖像元件之偏好程度，再以此為基礎產生六組警報圖像設計之備選方案，並應用公理設計方法對此六組方案進行篩選與排序，最後以另外 96 位化學工程系大學生為實驗的受測者，依六組圖像設計之備選方案分為六組，即每一組有 16 位受測者，以電腦測驗方式紀錄受測者對於備選方案圖像辨識的正確率與答題時間，再以統計分析方式得到實驗結果。實驗發現在考慮圖像辨認正確率與答題時間下，實驗結果與以公理設計方法所得到的結果一致。因此，公理設計方法應能有效地應用於程序控制系統之警報圖像設計決策問題。最後討論有關此方法之精鍊與應用範圍之擴展的可能未來研究方向。

---

\* 本研究由國科會計畫編號 NSC 95-2221-E-027-081-MY3 經費補助，謹此致謝。

**關鍵詞：**圖像設計、決策分析、公理設計、人機介面

**Abstract :** The success of a product depends on decision makings in its development process. The characteristics of the decision problem about icon designs in human machine interfaces are no effective tools for explicitly measuring decision objectives and too many possible alternatives. Thus, a new approach was proposed to solve these problems. A case study on alarm icon design for process control systems was used to demonstrate how the axiomatic design method with users' preferences on icon elements as inputs works for measuring the decision objectives, eliminating undesired alternatives, and suggesting the optimal alternative. Finally, this approach was verified by an experiment. Six set of icon designs were generated based on the preferences on icon elements from 80 undergraduate students majoring in chemical engineering, then the priority of these six sets was suggested by applying the axiomatic design method. An experiment with other 96 chemical engineering undergraduate students as subjects in six groups was conducted to verify the method. It was found that the experiment result was consistent with the outcome from the axiomatic design method in terms of the correctness rate of icon identification and the time spent for judgment. Therefore, the axiomatic design method was concluded to be useful as a decision tool for designing alarm icons in process control systems. The refinement of the method and the extension of its applications were discussed as further research directions.

**Keywords:** Icon Design, Decision Analysis, Axiomatic Design, Human Machine Interface

## 1. 緒論

如何推出一個好的產品一直是產品開發的核心課題。一般來說，產品的開發主要與行銷 (marketing)、設計 (design) 以及製造 (manufacturing) 這三大功能息息相關，而通常是透過一個跨功能的計畫團隊 (project team) 來執行 (Ulrich and Eppinger, 1995)。這其中包含了林林總總的決策問題：在行銷面向主要考慮如產品的屬性與價格等；在設計面向主要考慮如產品的形狀大小、功能與組態 (configuration) 等；在製造面向主要考慮如產品製造流程與物料供應等；在組織面向主要考慮如開發流程與計畫團隊架構等 (Krishnan and Ulrich, 2001)。而產品的成功與否則取決於這些決策的制定。本研究探討產品之人機介面 (human machine interface) 中有關圖像 (icon) 設計的決策問題，進而提出一個新的決策方法，並以一實際案例對此方法的效果做驗證。

在圖像設計的決策問題中，設計者是決定所有在人機介面出現之圖像應如何設計的決策

者，而主要受此決策影響的人則為使用者。決策的目標主要在於設計出能讓使用者容易分辨並了解其意義的一組圖像 (Huang *et al.*, 2002)。目前一般圖像設計的做法是設計者參考相關的設計準則 (guidelines)、標準 (standards) 或是自己的經驗來做設計，但是這些準則或是標準僅強調什麼 (what) 是重要的，例如分辨性與意義的傳遞性等，並沒有更進一步的定義與解釋如何 (how) 衡量。而以自身的經驗來設計圖像，在快速變動的產業環境中，往往最後變成一種不斷嘗試錯誤 (trail and error) 的過程。在這過程中，每一次設計者設計好一組圖像後，通常以使用者實際測試 (usability test) 來了解設計的好壞並做改進。然而這種方式往往耗時費力，而且無法在設計初期就能發現問題 (Liang, 2007)。換言之，圖像設計的決策目標沒有明確與有效的方法來衡量達成的程度。圖像設計的另一個決策問題在於近於無限的可能備選方案。圖像可由不同的形狀、顏色、圖形、符號或是文字組成。雖然不同類型的人機介面中，這些組成圖像的元件有一定的取捨準則，但是其可能之組合數量還是會相當的多。換言之，圖像設計的備選方案不患寡，而患太多。

由於決策目標沒有明確與有效的衡量方法以及可能的備選方案數量太多，圖像設計一般被視為是一種藝術 (art) 而不是科學 (science)。但 Hazelrigg (1998) 認為產品設計或是工程設計是一個決策制定的過程，所以應以決策科學的理論為基礎。而 Suh (1990) 也認為設計是可以透過科學的方法來達成的。因此，根據此決策問題的特性，本研究嘗試以使用者對於圖像元件之偏好程度為基礎，結合公理設計 (axiomatic design) 方法 (Suh *et al.*, 1978; Suh, 1984)，提出新的決策方法，使其能明確與有效的衡量圖像設計的決策目標，並能有效地控制備選方案的數量，使決策者能根據預期後果選取最好的可能方案。以下就公理設計方法做詳細描述。

## 2. 公理設計方法

公理設計以兩項公理為其理論基礎與法則，引導設計者架構與制定設計方面的決策問題。此方法已廣泛應用在電腦軟硬體、消費性產品、製造系統與決策支援系統的設計上 (Suh, 2001)。公理設計包含的四個概念：(1)域 (domains) 的概念，(2)階層 (hierarchies) 的概念，(3)曲折對應 (zigzagging) 的概念，以及(4)設計公理 (design axioms) 的概念 (Suh, 1990)。以下分別就其內容與對應之決策分析概念列述如下：

### 2.1 域的概念

公理設計方法的導入觀點是採一連串的顧客域 (customer domain)、功能域 (functional domain)、實體域 (physical domain) 與程序域 (process domain) 的對映 (mapping)。在顧客域強調的是顧客屬性 (Customer Attributes, CAs)，對映到功能域則為設計方案的功能需求 (Functional Requirements, FRs)，而對映到實體域則為設計方案的設計參數 (Design Parameters, DPs)，最後

對映到程序域則為程序變數 (Process Variables, *PVs*)。對映的方向是從左至右，左邊的域為要達成的目的 (what)，而右邊的域則是達成的手段 (how)，各域之間的對映關係恰與產品開發之三大功能做呼應，如圖 1 所示。在不同的應用領域中各域考慮的項目會有所不同。以軟體設計為例，*CA* 可為使用者的需求，*FR* 為軟體系統的需求規格，*DP* 可為程式碼，而 *PV* 為子程序 (subroutine) 或是機器碼 (Suh, 2001)。雖然公理設計方法可包括產品開發之三大功能，但還是以產品設計為其主要應用範圍，即功能域與實體域的對映關係。

## 2.2 層級與曲折對映的概念

公理設計四個域中之顧客屬性、功能需求、設計參數，以及程序變數是可以層級結構的方式由上而下拆解 (decomposition)。而較低層的项目與較高層的项目是一個「部分－整體」(part-whole) 的相對關係。公理設計通常以特徵向量 (characteristic vector) 方式來表示層級結構中最底一層之项目，以利後續的分析與計算。而各域的層級結構是由相鄰兩域間由上而下之曲折對映 (zigzagging) 所產生，即以為何 (what) 與如何 (how) 之間層層分析而成。對於新產品或系統的開發，曲折對映可確保各層級功能需求的獨立性。而既有的產品或系統其各域的層級架構已經存在，有時可用由下而上的整合 (synthesis) 方式達成，並可以曲折對映的方式檢視各域的層級架構的適切性與各層級功能需求的獨立性。如圖 2 所示，以功能域與實體域間為例，先確定功能域中之主要功能需求 (*FR*)，再考慮達成此功能需求的设计參數 (*DP*)。由此设计參數再考慮下一層的功能需求 (*FR*<sub>1</sub>; *FR*<sub>2</sub>)，再考慮達成此層級之每個功能需求的设计參數 (*DP*<sub>1</sub>;

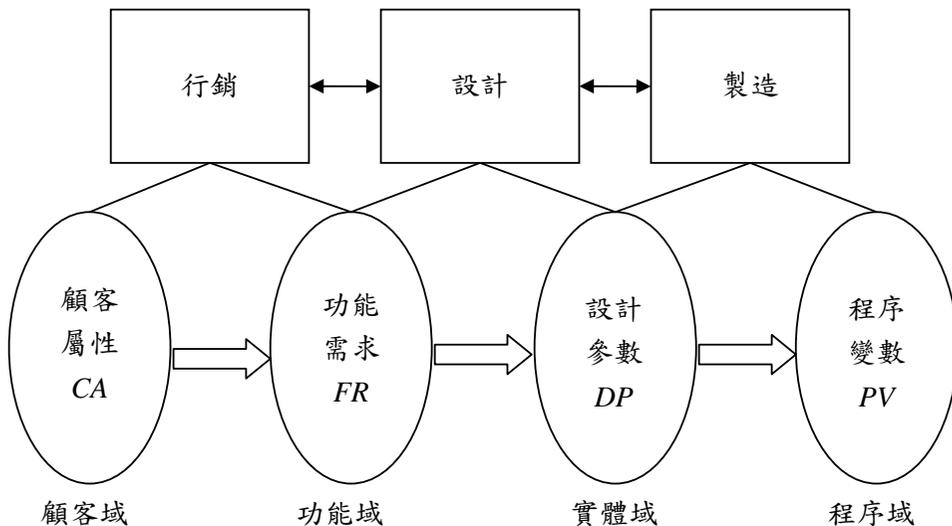


圖 1 公理設計的四個域 (Domains)

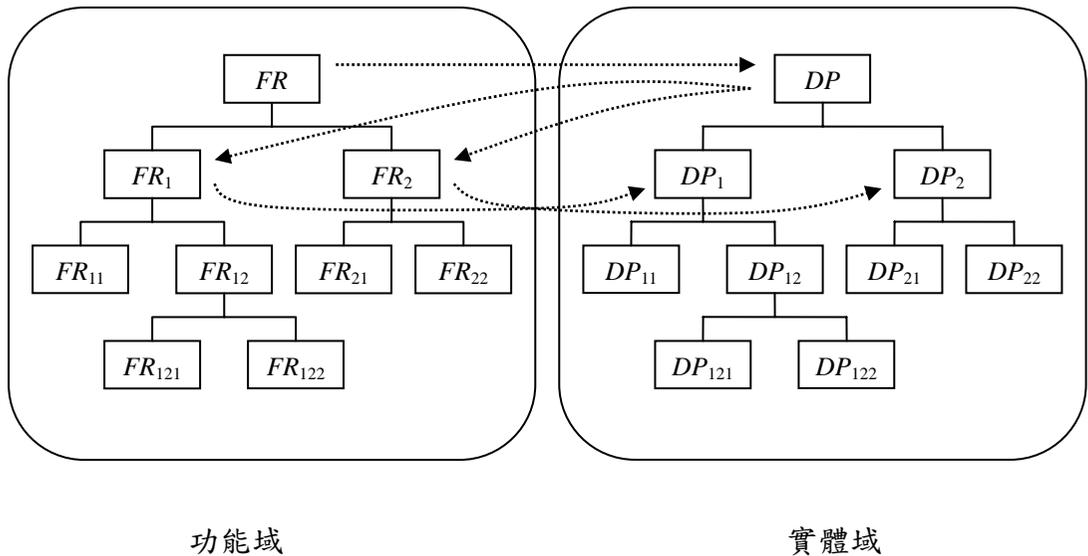


圖 2 功能域與實體域的曲折對映

$DP_2$ )，以此類推。例如從甲地至乙地的運輸需求 ( $FR$ ) 可以汽車 ( $DP$ ) 運送方式達成。而汽車又需要有前進、後退、左右轉等功能需求 ( $FR_1, FR_2, \dots$ )，這些需求可以傳動裝置與方向盤等 ( $DP_1, DP_2, \dots$ ) 達成，由此繼續拆解至最底層。此方式類似於決策分析中之根本目標 (fundamental objectives) 與工具目標 (means objectives) 的設定 (Keeney, 1992)。

### 2.3 設計公理的概念

因為在公理設計最常應用於功能域與實體域的對映，故其設計公理也以此兩域為例。主要公理設計原則區分為公理設計原則 1「獨立公理」(independence axiom) 與公理設計原則 2「資訊公理」(information axiom)，其定義如下：

公理設計原則 1「獨立公理」：維持功能需求 ( $FRs$ ) 的獨立性。

公理設計原則 2「資訊公理」：最小化設計的資訊內容 (information content)。

獨立公理說明功能需求與設計參數間的對映必須讓每個功能需求被滿足，並且不影響到其他的功能需求，也就是要求功能需求的獨立性。資訊公理指出最佳的設計為保持最小的資訊內容，此與資訊理論相關 (Shannon and Weaver, 1949)，簡單的說就是要求設計方案能夠盡量的符合功能需求。功能域與實體域的對映方式，可以下列公式表示：

$$\{FR_n\} = [A]_{nm} \bullet \{DP_m\} \quad (1)$$

式中  $\{FR_n\}$  為功能域中功能需求之  $n$  維特徵向量，而  $\{DP_m\}$  為實體域中設計參數之  $m$  維特徵向量。 $[A]_{nm}$  為一  $n \times m$  之矩陣，稱為設計矩陣 (design matrix)，表示  $n$  個功能需求受  $m$  個設計參數的對映。同樣若以  $\{DP_m\}$  為實體域中設計參數之  $m$  維特徵向量，而  $\{PV_k\}$  為程序域中程序變數之  $k$  維特徵向量。 $[B]_{mk}$  為對應之  $m \times k$  設計矩陣，則其關係可以下列公式表示：

$$\{DP_m\} = [B]_{mk} \bullet \{PV_k\} \quad (2)$$

而可得：

$$\{FR_n\} = [A]_{nm} \bullet [B]_{mk} \bullet \{PV_k\} \quad (3)$$

即域與域之間可以此矩陣運算做轉換。在公理設計原則的考量下，可以將功能需求與設計參數之設計矩陣，分類為三種型態，現以一  $3 \times 3$  之設計矩陣說明如下：

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中  $FR_1, FR_2, FR_3$  為功能域中之三個功能需求， $DP_1, DP_2, DP_3$  為實體域中之三個設計參數，而  $a_{ij}$  為設計矩陣之各元素 (element)。各元素值的大小代表相對應之功能需求與設計參數之間的關連性，範圍從 0 至 1。0 代表不相關，即改變相對設計參數的值並不能改變相對功能需求的值。1 代表完全相關，即改變相對設計參數的值可同時改變相對功能需求等比例的值。在公理設計方法中，原始的設計矩陣中之各元素不為 0 就為 1，但已被相關研究擴展至可介於 0 與 1 之間的任何數值 (Su *et al.*, 2003)。

若要使各功能需求與各設計參數間能夠一對一的對映，則除了設計矩陣對角線之元素可不為 0 之外，其餘元素均須等於 0，如下矩陣所示：

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

此時  $FR_1 = a_{11}DP_1$ ； $FR_2 = a_{22}DP_2$ ； $FR_3 = a_{33}DP_3$ ，稱為「非耦合設計」 (uncoupled design)。若設計矩陣之下三角形元素不為 0，其餘元素(上三角形)等於 0 時，則稱為「半耦合設計」 (decoupled design)，如下矩陣所示：

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

此時  $FR_1 = a_{11}DP_1$ ； $FR_2 = a_{21}DP_1 + a_{22}DP_2$ ； $FR_3 = a_{31}DP_1 + a_{32}DP_2 + a_{33}DP_3$ 。若設計矩陣不是非耦合設計，也不是半耦合設計，則稱之為「耦合設計」(coupled design)。如下之設計矩陣即是一例：

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

此時  $FR_1 = a_{11}DP_1 + a_{13}DP_3$ ； $FR_2 = a_{21}DP_1 + a_{22}DP_2 + a_{23}DP_3$ ； $FR_3 = a_{31}DP_1 + a_{32}DP_2$ 。

此三種型態只有非耦合設計符合第一個設計公理，即獨立公理。即更改任何一個設計參數只會改變一個相對映的功能需求。因此，整個設計符合各功能需求各自獨立的要求。其目的在於使整個設計或是系統的複雜性降低，進而容易操作。而半耦合設計則在設計參數的調整上有一定的順序，如果順序不對，則系統將變得難以控制。如半耦合設計的例子，透過設計矩陣可知  $DP_1$  必須先調整使  $FR_1$  達到所需之值，然後調整  $DP_2$ ，使  $FR_2$  達到所需之值，最後調整  $DP_3$ ，以達到  $FR_3$  所需之值。若順序不對，例如先調整  $DP_2$ ，此時受影響的有  $FR_1$  與  $FR_2$ ，若  $FR_1$  與  $FR_2$  可經  $DP_2$  調整而達到最佳值，則當設定  $FR_1$  時（即調整  $DP_1$ ）， $FR_1$  與  $FR_2$  將會變動，因而勢必要再設定一次，造成操作的複雜度提高。耦合設計則是不管如何，其複雜性相對來說都比非耦合設計與半耦合設計來得高。耦合設計沒有一對一的對映，也沒有一定的設計參數調整順序。如上例，調整任何一個設計參數，都會影響兩個以上的功能需求。因此，獨立公理說明非耦合設計為較佳的設計，半耦合設計為次佳的設計，而耦合設計為較差的設計。例如扳手設計的水龍頭以扳手上下 ( $DP_1$ ) 控制水量 ( $FR_1$ )，以扳手左右 ( $DP_2$ ) 控制水溫 ( $FR_2$ )，為非耦合設計，符合獨立公理。其操作上要比傳統兩個冷熱水旋鈕 ( $DP_1$  與  $DP_2$ ) 來的容易，因為轉動任何一個旋鈕，水量與水溫將同時改變，此即耦合設計，會使得功能需求的設定變得困難。

以下說明第二個公理：資訊公理。資訊公理中之資訊內容是以資訊量來衡量。資訊量則是以能滿足特定功能需求的機率來定義。若滿足功能需求  $FR_i$  的機率為  $P_i$ ，則其資訊內容( $I_i$ )定義如下式：

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P_i} = -\log_2 P_i \quad (8)$$

此公式是以 2 為底之對數，單位為位元 (bits)，若以自然對數( $e$ )為底，則單位為奈特 (nats)，

一般資訊內容的計算較常採用位元為單位。由此公式可知，當機率  $P_i$  為 1 時，資訊內容  $I_i$  為 0，即功能需求  $FR_i$  會被百分之百的滿足。當機率  $P_i$  趨近於 0 時，資訊內容  $I_i$  將趨近於無限大，即功能需求  $FR_i$  幾乎不可能被滿足。也就是說，當滿足功能需求的機率愈低，即滿足功能需求所需要的資訊內容愈高，則此系統之複雜度愈高 (Suh, 2005)。當設計為非耦合設計時，其整體之資訊內容 ( $I_{Overall}$ ) 即為個別資訊內容之總合，表示如下式：

$$I_{Overall} = \sum_{i=1}^n I_i = -\sum_{i=1}^n \log_2 P_i \quad (9)$$

滿足功能需求的機率可由系統範圍 (system range)、設計範圍 (design range)、共同範圍 (common range) 等三個概念來推得。如圖 3 所示，系統範圍代表系統的能力，可以系統機率密度函數 (Probability Density Function, PDF) 來表示。設計範圍則是設計的需求規格，以一功能需求的區間來表示。而共同範圍則是系統範圍與設計範圍所重疊之處，若以在系統機率密度函數下之範圍為 1，則共同範圍區域 ( $A_{cr}$ ) (見圖 3) 即為滿足功能需求的機率。因此，上述之資訊內容公式可改寫成：

$$I = \log_2 \frac{1}{A_{cr}} = \log_2 \left( \frac{1}{\frac{\text{Common Range}}{\text{System Range}}} \right) = \log_2 \left( \frac{\text{System Range}}{\text{Common Range}} \right) \quad (10)$$

由上式可知，當設計範圍愈大或系統範圍愈小時，其重疊之處愈多，即其資訊內容愈小，表示愈容易達成功能需求。現以設計公差與系統能力來說明此一概念 (Suh, 1990)。若今需要裁切一段 1 公尺長的鋼板，設計公差愈大 (例如  $1 \pm 0.1\text{m}$ ) 表示設計範圍愈大，即愈容易達成需求，如此時只需用一般裁切機器即可達成需求。若設計公差愈小 (例如  $1 \pm 0.000001\text{m}$ )，即設計範圍愈小，則可能需要提升系統能力，如使用精密儀器裁切，使系統範圍縮小，才能增加成功的機率。由上述可知，使資訊內容最小化的方法就是儘量讓系統範圍在設計範圍之內。若設計範圍不變，則可依設計範圍來訂定系統範圍 (準度) 或提升系統能力 (精度) 來達成。

此兩個設計公理可應用於新產品、製程，或是系統的開發，亦可運用在既有產品、製程，或是系統的評估與改善。其決策方式分為兩階段：先以第一個獨立公理過濾掉耦合設計與半耦合設計的方案，有效地控制備選方案的數目。若還有兩個以上的備選方案，則以第二個資訊公理找出資訊內容最小的方案為最佳方案。

由上述可知，以獨立公理可衡量圖像設計是否讓使用者容易分辨，即非耦合設計會比耦合設計與半耦合設計更容易分辨。而使用者了解圖像意義的程度可以資訊公理中之資訊內容來衡量。可以設定一資訊內容大小的門檻，排除資訊內容大於此門檻的圖像設計，使得可能之備選

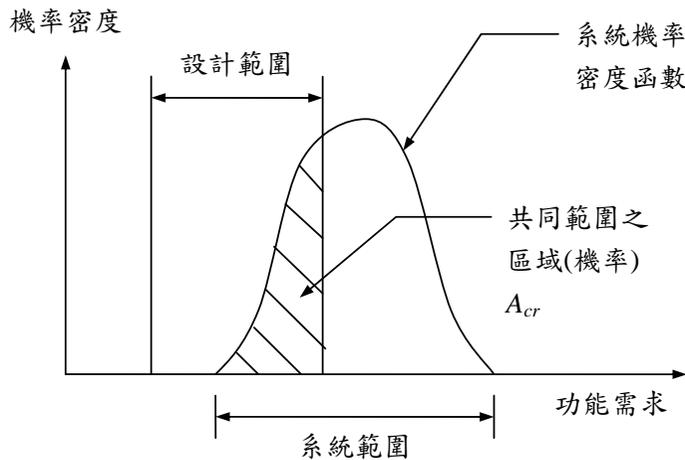


圖 3 系統範圍、設計範圍與共同範圍之關係 (Suh, 2005)

方案數目不致過大，而資訊內容最小的圖像設計為建議之最佳備選方案。

以下將以程序控制系統 (process control systems) 之警報圖像 (alarm icons) 設計為例，說明公理設計方法在的警報圖像設計的決策程序與如何以使用者對於圖像元件之偏好程度來求得圖像設計(即可能備選方案)的資訊內容大小，並以一實驗驗證其決策結果之準確性，最後說明研究結果及討論後續研究方向。

### 3. 警報圖像設計

程序控制系統之警報圖像屬於異常狀況管理的一環，其目的在於使操作員從控制室之監控銀幕上接收到特定的系統設備異常資訊，以便採取對策。警報的發生一般與系統設備的刻度指針有關，例如溫度太高或太低，或是壓力超出了容許範圍等。當然也可能有假警報 (false alarm) 的發生，例如警報傳遞線路失效或是刻度指針本身的問題。若是無法在控制室處理異常狀況，則可通知現場操作員 (field operator) 在設備的現場處理。通常警報圖像會顯示此警報已被認定 (acknowledgement) 與否，以及警報的狀態。警報的狀態通常分為仍在警示中 (in alarm)、已關閉 (disabled)，或是回復正常 (return to normal) 等 (Liang *et al.*, 2000)。

由於圖像的目的在於傳遞其意義，在公理設計的架構下，可將所需要傳遞的意義視為功能需求 (FR)，而構成圖像之元素，例如文字、符號、形狀與顏色等視為設計參數 (DP)。獨立公理對應一組圖像的分辨程度，而資訊公理對應一組圖像意義的了解程度 (Liang, 2007)。因此，若是公理設計之決策程序正確，則最後可以找出一組最好的警報圖像設計。其相對之研究假設

列於下：

假設一：非耦合設計之圖像較耦合設計好（獨立公理）。

假設二：具有最小資訊量之非耦合設計圖像最好（資訊公理）。

爲了驗證此兩個研究假設，本研究將以不同的設計參數（*DP*）組合，產生五組資訊內容大小不同的非耦合圖像設計與一組耦合圖像設計，做爲備選方案，依公理設計方法產生備選方案之先後排序，再以一實驗驗證其準確性。備選方案之產生與排序將敘述如下，實驗方法將於下一章說明。

獨立公理說明功能需求（*FR*）與設計參數（*DP*）間的對映必須讓每個功能需求被滿足，並且不影響到其他的功能需求，也就是要求功能需求的獨立性，因此本研究使用一組功能需求來證明公理設計是可以被運用到圖像設計的領域，而這一組功能需求，即爲程序控制中常使用之三種警報狀態，其狀態種類如下列所示：

*FR*<sub>1</sub>：警示 (alarm)

*FR*<sub>2</sub>：關閉 (disabled)

*FR*<sub>3</sub>：正常 (normal)

本研究以最常出現的圖像元素－形狀與顏色－來設計圖像，因此每一組備選方案會有三個形狀與顏色組合而成的圖像代表三種警報狀態。根據多維度判斷（*multidimensional judgment*）理論，形狀與顏色互爲分離的維度（*separable dimensions*），即不論其中一種以何種樣式傳遞意義，並不會影響另一種傳遞意義的成功機率，互相之間爲獨立關係（*Wickens and Hollands, 2000*）。若同時表現同一義意時，稱爲重複設計（*redundant design*），重複設計一般都能提高意義傳遞的成功機率（*Wickens and Hollands, 2000*）。本研究以先前之研究結果（*Liang et al., 2004*）爲基礎，各選取五種不同之形狀與顏色，做爲可能之設計元素，這些形狀與顏色可視爲備選之設計參數（*DP*），如表 1 所示。

由此，若不同警報狀態以相同的形狀或顏色表示，則爲耦合設計。反之，若不同警報狀態均以不同的形狀或顏色表示，則爲非耦合設計。接下來將說明非耦合圖像設計資訊內容之計算方式。

每一個圖像資訊內容的大小由其形狀與顏色所能成功傳遞意義的機率來決定。由於單一圖像的資訊內容（*I<sub>i</sub>*）定義如下：

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P_i} = \log_2 \frac{1}{a_i + b_i - (a_i \times b_i)} \quad (11)$$

式中 *P<sub>i</sub>* 爲圖像成功傳遞意義的機率，而 *a<sub>i</sub>* 爲單獨由形狀成功傳遞意義的機率；*b<sub>i</sub>* 爲單獨由顏色成功傳遞意義的機率。因爲形狀與顏色是兩個獨立的維度，所以 *P<sub>i</sub> = a<sub>i</sub> + b<sub>i</sub> - (a<sub>i</sub> × b<sub>i</sub>)*，*i = 1, 2*,

表 1 設計參數 (DP)

形狀		顏色	
	$DP_1$ ：方形		$DP_1$ ：紅色
	$DP_2$ ：圓形		$DP_2$ ：橙色
	$DP_3$ ：三角形		$DP_3$ ：黃色
	$DP_4$ ：星形		$DP_4$ ：綠色
	$DP_5$ ：菱形		$DP_5$ ：藍色

3。若三種圖像設計為非耦合設計，表示是以三種不同的形狀以及三種不同的顏色來表示三種警報狀態。其總資訊內容為：

$$\sum_{i=1}^3 I_i = \sum_{i=1}^3 \log_2 \frac{1}{P_i} = \sum_{i=1}^3 \log_2 \frac{1}{a_i + b_i - (a_i \times b_i)} \quad (12)$$

每一種形狀與顏色其成功傳遞意義的機率以電腦問卷 (如圖 4) 的方式求得。此問卷以 80 位化學工程系的大學生為受測者，依照自己的偏好對於每一警報狀態分別從五種形狀或是顏色中選擇出自己認為最適合代表此警報狀態的形狀或顏色。因此，每種形狀或顏色傳遞意義的成功機率即可定義為其被選擇的百分比，其結果如表 2 與表 3 所示。

以形狀和顏色傳遞意義的成功機率分別做排序，依圖 5 之設計參數(DP)組合方式設計共 5 組非耦合圖像(A-E)與 1 組耦合圖像(F)，成為 6 組備選方案。

圖 5 中「最適」代表成功機率最高，「中等」代表成功機率居中，而「最差」代表成功機率最低。在非耦合設計中三種警報狀態需由三種不同的形狀與顏色所組成，有時並不能保證符合圖 5 之組合方式。例如警示與關閉警報狀態均以紅色為最適顏色，若要符合非耦合設計的條件，在比較機率高低後，A 組圖像以紅色代表警示狀態，而以次高機率之藍色代表關閉狀態。反之，耦合設計並無此限制，故均以最適形狀與顏色來設計。因此，F 組圖像之警示狀態與關閉狀態均以紅色表示。由此規則得出之各組警報圖像設計列於表 4。

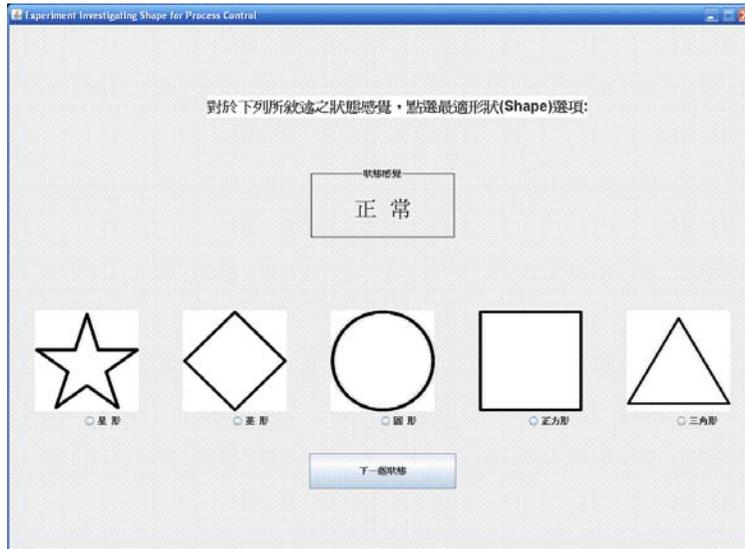


圖 4 電腦問卷畫面一例

表 2 各形狀傳遞各意義的成功機率

	警示	關閉	正常
三角形	67.50%	28.75%	3.75%
星形	12.50%	16.25%	18.75%
菱形	10.00%	20.00%	10.00%
圓形	7.50%	21.25%	56.25%
方形	2.50%	13.75%	11.25%

表 3 各顏色傳遞各意義的成功機率

	警示	關閉	正常
紅色	67.50%	42.50%	7.50%
黃色	15.00%	15.00%	20.00%
橙色	10.00%	12.50%	8.75%
綠色	5.00%	11.25%	36.25%
藍色	2.50%	18.75%	27.50%

非耦合設計		形狀		
		最適	中等	最差
顏色	最適	A		E
	中等		B	
	最差	D		C
耦合設計			F	

圖 5 設計參數 (DP) 組合

表 4 六組圖像設計之備選方案

	警示	關閉	正常
A	 三角形;紅色	 菱形;藍色	 圓形;綠色
B	 菱形;橙色	 星形;黃色	 方形;藍色
C	 圓形;藍色	 方形;綠色	 三角形;紅色
D	 三角形;藍色	 菱形;綠色	 圓形;紅色
E	 圓形;紅色	 方形;藍色	 三角形;綠色
F	 三角形;紅色	 圓形;紅色	 圓形;綠色

由各組之總資訊內容大小可知，若不考慮獨立公理，依資訊公理，F 組為最佳設計。但依公理設計之決策方式，F 組是最先被淘汰的，而最後 A 組為最佳設計。接下來將以一實驗驗證這個結果。

## 4. 實驗驗證

之前 80 位受測之化學工程系大學生除外，以另外 96 位化學工程系大學生為受測者，依六組圖像設計之備選方案分為六組，即每一組有 16 位受測者，以電腦測驗方式 (如圖 6) 紀錄受測者對於備選方案圖像辨識的正確率與答題時間，資料隨後進行組間之統計分析。

### 4.1 實驗結果

各組的圖像辨認正確率與答題時間之平均值與標準差列於表 5。非控制變項，如性別、年級等經過檢定，各組之間並沒有顯著的差異。

以 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 檢定法發現圖像辨認正確率與答題時間之各組數據不完全符合常態分布( $p < 0.2$ )，資料經轉換後仍然無法完全符合常態分布，故此二因變數均採無母數之 Mann-Whitney U 方法做檢定，其結果如圖 7 所示。

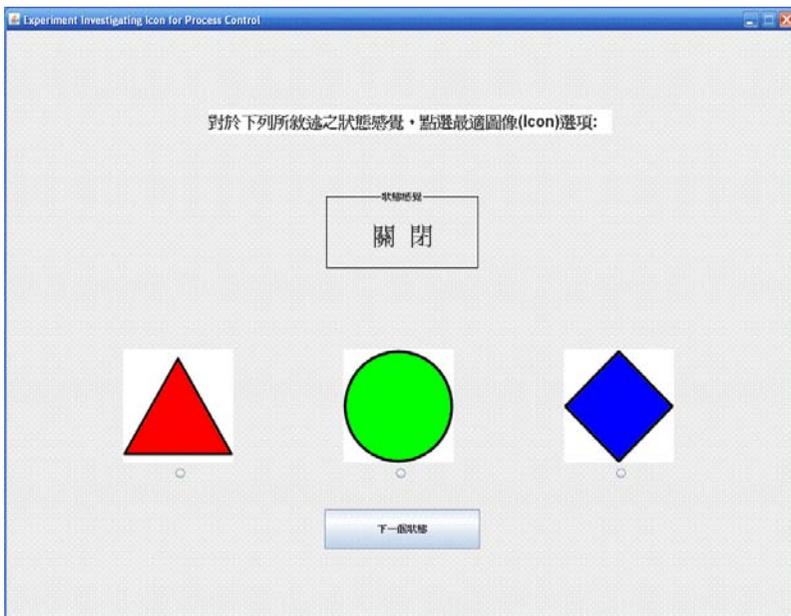


圖 6 電腦測驗畫面一例

表 5 各組圖像辨認正確率與答題時間之平均值與標準差

	圖像辨認正確率		答題時間(秒)	
	平均數	標準差	平均數	標準差
A	0.79	0.24	13.59	3.39
B	0.35	0.31	17.86	5.30
C	0.23	0.20	16.11	5.76
D	0.31	0.41	18.43	5.48
E	0.35	0.23	16.75	7.07
F	0.33	0.32	20.89	6.25

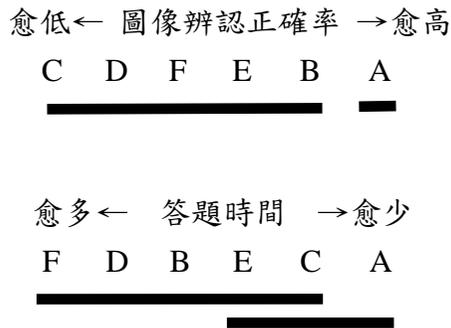


圖 7 圖像辨認正確率與答題時間之各組差異

圖 7 中底線相連之各組表示沒有顯著的差異 ( $p > 0.05$ )。因此，A 組之圖像辨認正確率顯著高於其他各組，但其他各組間並無顯著的差異。在答題時間上，A 組顯著少於 B、D 及 F 組，但與 C 及 E 組之間無顯著的差異。除 A 組外，其他各組間的答題時間無顯著的差異。

## 4.2 假設驗證

由實驗結果可得，假設一（非耦合設計之圖像較耦合設計好）部分成立。因為無論在圖像辨認正確率與答題時間上非耦合設計之 A 組都比耦合設計之 F 組來的好，但其他非耦合設計（B-E 組）卻與 F 組無顯著的差異。

在圖像辨認正確率上，假設二（具有最小資訊量之非耦合設計圖像最好）完全成立，因為具有最小資訊量之 A 組優於其他各組。但在答題時間上，假設二部分成立。因為雖然 A 組平均答題時間最少，但與 C 及 E 組間無顯著的差異。

整體來看，在考慮圖像辨認正確率與答題時間下，實驗結果以 A 組為最佳選項，此與公理設計所得到的結果一致。因此，公理設計方法應用於程序控制系統之警報圖像設計決策上得到實際的驗證。

## 5. 討論

實驗分別以圖像辨認正確率與答題時間為兩個因變數，反映了分辨圖像並了解其意義的效果 (effectiveness) 與效率 (efficiency)。以耦合設計 F 組來說，雖然單獨圖像元素均是最佳，但組合後卻在效果與效率上都比不過非耦合設計的 A 組。其原因即在於不同的意涵之間重複部分相同的圖像元素，造成分辨的不易與意義的混淆，此即獨立公理之概念。資訊公理以效果 (成功機率) 為主要考量，但似乎對效率不甚強調，驗證假設二的結果也反映出在效果上的區隔程度要比在效率上來的大。

以一決策制定的工具來看，公理設計方法並沒有賦予目標屬性權重的機制，如三種警報狀態並沒有重要順序。但這可能與事實相違背，例如警示狀態可能要比正常狀態重要。因此，後續研究可以考慮如何將目標屬性權重的機制加入公理設計方法中，像是結合公理設計方法與分析層級程序 (analytic hierarchy process) 方法 (Saaty, 1980)，或是以品質機能展開 (quality function deployment) 法 (Hauser and Clausing, 1988)，在顧客域與功能域對映時即給予各功能需求權重。當然其他方法也可做為借鏡，已有文獻探討公理設計方法與其他設計方法的比較 (Chen, 1999)，以及與萃思 (TRIZ) 法的比較 (Mann, 2002; Yang and Zhang, 2000)。此外，公理設計方法著重於產品設計之效果與效率的需求，但無涵蓋有關使用者情感 (affective) 上的需求。這對於如警報系統人機介面之類的應用領域尚無太大的影響，因為此類應用領域不需要太考慮使用者的情感需求，所以經過公理設計方法篩選後之備選方案，一般都能滿足產品設計的需求。但是對於如網頁人機介面之類的應用領域，除了效果與效率的需求之外，尚需考慮使用者的情感需求，才能滿足整體產品設計的需求。

公理設計方法應用於人機介面設計尚屬於起步階段。人機介面設計之應用領域中主要探討資訊的顯示與系統的操控，本研究對於公理設計方法應用於人機介面之顯示設計部份提供了一個實證研究，而應用在人機介面之操控部份也已進行 (Liang and Lin, 2006)。未來研究將以此為基礎，擴展公理設計方法在人機介面設計方面應用之深度與廣度。

## 參考文獻

- Chen, K.-Z., "Identifying the Relationship among Design Methods: Key to Successful Applications and Developments of Design Methods," *Journal of Engineering Design*, Vol. 10, No. 2, 1999, pp. 125-141.
- Hauser, J. R. and Clausing, D., "The House of Quality," *Harvard Business Review*, Vol. 66, No. 3, 1988, pp. 63-73.
- Hazelrigg, G. A., "A Framework for Decision-based Engineering Design," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 120, No. 4, 1998, pp. 653-658.
- Huang, S., Shieh, K., and Chi, C., "Factors Affecting the Design of Computer Icons," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 29, No. 4, 2002, pp. 211-218.
- Keeney, R. L., *Value-focused Thinking*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992.
- Krishnan, V. and Ulrich, K. T., "Product Development Decisions: A Review of the Literature," *Management Science*, Vol. 47, No. 1, 2001, pp. 1-21.
- Liang, S.-F. M., "Analyzing Icon Design with Axiomatic Method: A Case Study of Alarm Icons in Process Control Displays," *Asian Journal of Ergonomics*, Vol. 7, No. 1-2, 2007, pp. 11-28.
- Liang, S.-F. M., Khalid, H. M., Taha, Z., and Plocher, T., "In Search of Internationalized Operator Interface Displays in Process Control: A Comparison among Malaysian, Singaporean and Chinese," In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Work With Computing Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004, pp. 253-258.
- Liang, S.-F. M. and Lin, C.-W., "Applying Axiomatic Method to Consumer Product Usability Evaluation: A Case Study of a Developing MP3 Player," In *Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Computer-Human Interaction*, Taipei, Taiwan, 2006, ID 038 (CD-ROM), 10 pp.
- Liang, S.-F. M., Plocher, T. A., Lau, W. C., Chia, Y. T. B., Rafi, N., and Tan, T. H. R., "Usability Evaluation on Honeywell Process Control Workstations," In *Proceedings of the 5th Annual International Conference on Industrial Engineering- Theory, Applications and Practice*, Hsin-Chu, Taiwan, 2000, ID 202 (CD-ROM), 6 pp.
- Mann, D., "Axiomatic Design and TRIZ: Compatibilities and Contradictions," In *Proceedings of ICAD2002 the Second International Conference on Axiomatic Design*, Cambridge, MA, 2002, ICAD 011, 7 pp.
- Saaty, T. L., *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill, 1980.
- Shannon, C. E. and Weaver, W., *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana, IL: University

- of Illinois Press, 1949.
- Su, J. C.-Y., Chen, S., and Lin, L., "A Structured Approach to Measuring Functional Dependency and Sequencing of Coupled Tasks in Engineering Design," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 45, No. 1, 2003, pp. 195-214.
- Suh, N. P., "Development of the Science Base for the Manufacturing Field through the Axiomatic Approach," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 1, No. 3/4, 1984, pp. 399-455.
- Suh, N. P., *The Principles of Design*, New York: Oxford University Press, 1990.
- Suh, N. P., *Axiomatic Design: Advances and Applications*, New York: Oxford University Press, 2001.
- Suh, N. P., *Complexity: Theory and Applications*, New York: Oxford University Press, 2005.
- Suh, N. P., Bell, A. C., and Gossard, D. C., "On An Axiomatic Approach to Manufacturing Systems," *Journal of Engineering for Industry, Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 100, No. 2, 1978, pp. 127-130.
- Ulrich, K. T. and Eppinger, S. D., *Product Design and Development*, New York: McGraw-Hill, 1995.
- Wickens, C. D. and Hollands, J. G., *Engineering Psychology and Human Performance*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.
- Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y., and Gordon Becker, S. E., *An Introduction of Human Factors Engineering*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.
- Yang, K. and Zhang, H., "A Comparison of TRIZ and Axiomatic Design," In *Proceedings of ICAD2000 the First International Conference on Axiomatic Design*, Cambridge, MA, 2000, ICAD56, 9 pp.