

最佳化新產品設計開發流程規劃方法之研究

柯耀宗

東海大學 工業設計學系

mike.ko@thu.edu.tw

摘要

新產品設計開發是一項複雜的系統工程，是多種專業設計知識及技術的有效整合和執行的過程，在同步工程概念的基礎上，提出了基於加權有向圖和數值設計結構矩陣的同步流程規劃方法，將整個規劃方法劃分為整體規劃和局部規劃兩大階段，針對同步設計活動的定耦與解耦的問題提出新的規劃演算法，對於設計開發活動間的訊息依賴程度進行了定量表示，透過對設計活動進行分解類聚、層級劃分和割裂重組，以實現新產品設計開發同步流程的最佳規劃。本研究最主要的目的希望能透過數值設計結構矩陣的分析幫助設計師和管理者更能掌握新產品開發各項設計活動因子間的訊息交流、互動的情形，以提高新產品開發管理效率，減少設計工作的反覆迭代次數，進而縮短產品開發時程和成本，增加產品的競爭力。最後以一個液晶電視的新產品設計開發過程為例，驗證了上述方法的有效性和實用性。

關鍵字：新產品設計開發、同步工程、加權有向圖、數值設計結構矩陣

一、緒論

新產品設計開發已被視為是消費市場成功的關鍵要素，更是企業追求永續生存與持續成長所必須採取的重要措施及手段，新產品設計開發是在滿足各種設計需求及限制條件下所進行的創造性工作，通過一系列設計開發活動的執行以完成產品開發專案，其執行過程充滿交互、反覆和迭代，因此設計開發的執行工作需進行合理的規劃，同時企業為快速反應市場需求，提高全球競爭力，在保證品質和不增加成本的情況下，應盡可能縮短產品設計開發週期，因此，基於同步工程的概念(Yassine and Braha 2003；王俊仁 1993)，企業需對產品設計開發流程進行有效的規劃、管理和重組，以減少設計迭代及反覆重工，提高設計開發過程的同步程度。

以同步工程觀點而言，新產品設計開發過程是一項複雜的系統工程，是多種專業設計知識及技能的有效整合和執行的過程，設計開發過程的本質具有目的、階段、層次、協同、迭代、時序等特性，需對執行的結構性做適當的流程規劃設計，才能達到同步工程的目標；同時許多學者(Beheshiti 1993；Susman 1992)也曾提出產品設計開發過程是一種訊息傳遞及訊息處理的程序，需經過多次的設計反覆迭代才能獲得滿意及合理的結果，基本上，新產品設計開發是一項動態的訊息處理過程，它包括了技術行為，組織因素的互動，整體產品開發專案的成功依賴不同階段設計活動之間適度的訊息傳遞與流通，而訊息處理的目的在於降低模糊度以及提供執行產品設計開發專案中所需的充分訊息量，基於產品開發工程設計活動的循環特性，使得上下游活動間具有依賴特性，下游設計活動的執行成效有賴於上游活動所提供的訊息，若訊息的處理不完整，模糊度高，則將導致執行不良的結果。綜合言之，新產品設計開發活動是一種訊息處理過程，其目的在降低訊息的不確定性，在產品開發過程中，前一個活動的訊息處理或問題解決可以為下一個活動減少不確定性，增加執行成效，進而逐漸降低產品開發風險。

目前使用於工作流程的規劃方法主要包

括：有向圖 (Directed graph)、Petri-Nets 法 (Ellis and Nutt 1993)、計畫評核術 (PERT)、IDEF0 法 (Mayer, et al. 1993) 和設計結構矩陣 (Design Structure Matrix; DSM) (Eppinger 1994; Browning and Eppinger 2002) 等方法，其中有向圖和 Petri-Nets 法雖能具體直接的表示設計活動間的關係但不能表示出設計開發過程的層屬結構和規則性，當節點和有向弧數目增多時，會形成一個相互交叉的混亂網路；計畫評核術採用要徑法 (CPM) 來進行設計活動的規劃，該方法雖然可明確地反應特定複雜設計過程中活動間的訊息依賴關係及次序，但它無法完整地描述具有回饋訊息及迭代特徵的設計過程，IDEF0 方法亦有此缺點，此項為同步工程的規劃重點；反觀設計結構矩陣則能有效地分析出產品設計開發過程中訊息反覆迭代的情形，是一種簡單而有效的分析規劃方法，能幫助管理者進行設計開發活動的分解和排序，以得到最佳同步開發流程規劃，但傳統的二元 DSM 不能有效地表示出實際設計活動間的訊息關聯程度(強度)，這將不利於設計活動解耦操作的進行，當規劃活動數目變大時，傳統 DSM 的路徑搜尋法 (Steward 1981) 將變得沒有效率，同時目前仍然沒有一個最佳化的 DSM 解耦割裂方法被提出 (Kusiak and Wang 1993)，因此為解決這些問題，本研究基於同步工程的概念，提出一種基於加權有向圖 (Weighting Directed Graph; WDG) 和數值設計結構矩陣 (Numerical Design Structure Matrix; NDSM) 的同步流程規劃方法以幫助設計經理人清楚地解析出新產品設計開發過程中訊息反覆迭代的情形以進一步做同步工程規劃，此為本研究方法最主要的特點，同時本研究最主要的貢獻是提出一種具量化及可計算的矩陣規劃方法，讓傳統的規劃過程更加透明及明箱化；此規劃方法首先通過加權後的有向圖來表示設計活動間的訊息依賴程度，進而映射為一個數值設計結構矩陣，對設計活動交互關係進行量化的描述，並提出相關流程規劃新的矩陣演算法，包括分解算程 (Partitioning algorithm)、層級算程 (Hierarchy algorithm) 以及割裂算程 (Tearing algorithm)，然後通過對設計開

發活動的分解類聚、層級劃分和割裂重組以得到一個最佳化的新產品設計同步開發流程；整個研究架構如圖 1 所示。

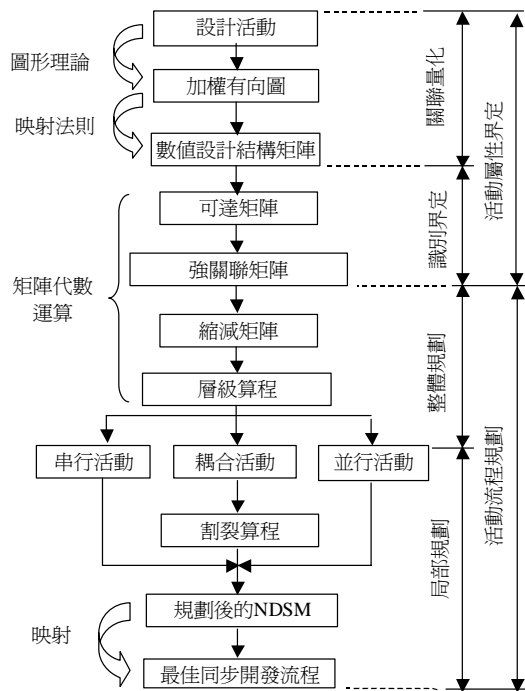


圖 1. 研究架構

二、設計活動交互關係的基本形式

以活動訊息流的角度而言，在建立反應設計開發過程本質的關聯矩陣模型之前，應先分析設計開發活動之間關係的基本形式，設計開發活動間交互關係主要可歸納為 3 種形式 (圖 2)：

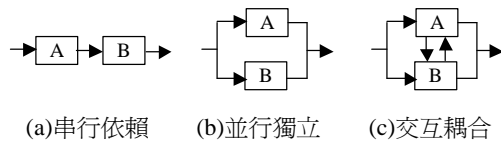


圖 2. 設計開發活動間的三種關聯形式

- (1) 串行依賴關係 (圖 2 (a)): 是兩個設計活動間只存在單向依賴關係的一種作用方式，其動態特徵表現為 A 與 B 活動的串行。
- (2) 並行獨立關係 (圖 2 (b)): 是一種兩活動間無訊息交互，完全獨立的作用方式，其動態特徵表現為 A 與 B 兩活動可以同時進行。
- (3) 交互耦合關係 (圖 2 (c))，是兩活動間存在訊息交互，A 與 B 的信息關係是雙向的，即 A 活動需要 B 活動的訊息，同時 B 活動也需

要 A 活動的訊息，其動態特徵表現為經過 A 與 B 間訊息的多次迭代和反覆，才能完成設計開發工作。

在新產品設計開發流程中，這三種基本關聯形式可以同時存在，而傳統的新產品開發流程是以第一種串行依賴方式做為設計活動因子間關聯的主要方式，而同步工程則是以第三種作用方式為主，反應新產品設計開發流程中各個環節間的耦合交互作用，但交互耦合活動間頻繁的訊息交流會增加設計開發過程的複雜性，也將使得管理者對於新產品設計開發的管理，控制與規劃產生更大的困難。

三、加權有向圖映射至設計結構矩陣

3.1 有向圖的加權

在新產品設計開發過程中，設計訊息在活動間不斷地進行傳遞流通，基於圖形理論(Roberts 1976)，使用有向圖來表示設計開發過程實為一種最簡單清楚的表示方法，有向圖是節點和連接節點的有向弧所組成的集合，記為 $G = \langle O, P \rangle$ ，其中 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 是節點的集合， n 表示設計活動的數目； $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 是 m 條有向弧的集合，表示訊息的傳遞路徑和方向， P 中的每個元素都有 O 中的兩個節點做連結對應。以有向圖表示設計開發過程主要有以下缺點：(1) 無法明確表達設計活動間關係強弱程度 (2) 不能明確表示活動間的層屬關係，以建立合理的活動執程序。基於此，本文提出對於有向圖進行加權以表達活動間的訊息依賴程度，對其強弱以 { 極強, 很強, 強, 中, 弱, 很弱, 極弱 } 等級別尺度來描述，並設定其對應值為 {1,0.9,0.7,0.5,0.3,0.1,0}，加權後的有向圖對設計活動間訊息關聯的程度提出了定量的表示。

3.2 加權有向圖的矩陣映射

根據圖形理論，設計活動間的關係可以由有向圖映射為一個矩陣形式，矩陣的行跟列對應設計活動，稱為設計結構矩陣 (Design Structure Matrix ; DSM) (圖 3)。設計結構矩陣是一個二元布林矩陣，元素值 只能為 0 或 1，其值定義如下：

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i = j \text{ or } a_j \rightarrow a_i \\ 1 & \text{if } a_j \rightarrow a_i \end{cases} \quad (1)$$

		訊息向後回饋							
		X ←	A	B	C	D	E	F	G
訊息向前傳遞 ↓	A	0	0	1	1	0	0	0	0
	B	0	0	0	0	0	0	0	1
	C	1	1	0	0	0	1	1	0
	D	0	1	0	0	0	0	0	0
	E	0	0	0	0	0	0	0	0
	F	0	0	0	0	0	0	0	0
	G	0	0	0	1	0	1	0	0
		Y							

圖 3. 設計結構矩陣

矩陣中對角線上元素 $a_{ii} = 0$ ，另若 $a_j \rightarrow a_i$ ，即表示活動 a_j 向活動 a_i 提供訊息輸入 $a_{ij} = 1$ ，則元素 $a_{ij} = 1$ ，否則 $a_{ij} = 0$ 。設計活動的三種基本形式可由有向圖對應至矩陣表達形式如圖 4 所示，其中符號“●”表示兩個活動間具有訊息相互傳遞的關係。

三種設計活動關係基本形式																														
屬性	獨立	依存	交互																											
關係	並行	串行	耦合																											
有向圖形式																														
矩陣形式	<table border="1" style="width: 100px; height: 100px;"> <tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr> <tr><td>A</td><td style="background-color: #cccccc;"></td><td></td></tr> <tr><td>B</td><td></td><td style="background-color: #cccccc;"></td></tr> </table>		A	B	A			B			<table border="1" style="width: 100px; height: 100px;"> <tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr> <tr><td>A</td><td style="background-color: #cccccc;"></td><td></td></tr> <tr><td>B</td><td style="text-align: center;">●</td><td style="background-color: #cccccc;"></td></tr> </table>		A	B	A			B	●		<table border="1" style="width: 100px; height: 100px;"> <tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr> <tr><td>A</td><td style="background-color: #cccccc;"></td><td style="text-align: center;">●</td></tr> <tr><td>B</td><td style="text-align: center;">●</td><td style="background-color: #cccccc;"></td></tr> </table>		A	B	A		●	B	●	
	A	B																												
A																														
B																														
	A	B																												
A																														
B	●																													
	A	B																												
A		●																												
B	●																													

圖 4. 有向圖對應矩陣形式

將加權有向圖映射至設計結構矩陣，使設計活動間的訊息關聯程度映射成為設計結構矩陣中的元素，為了定量表示出活動間的訊息依賴程度，規定矩陣中除了元素 [0,1]外，尚可以[0~1]

的任意正實數來表示，即成為一個數值化的設計結構矩陣(Numerical Design Structure Matrix ; NDSM)，其映射原則如下：(1) 加權有向圖的每個節點對應於 NDSM 中的每一個活動 (2) NDSM 中元素 a_{ij} 定量表示活動 a_i 依賴於活動 a_j 訊息輸入的程度 (3) NDSM 中，第 i 列不等於 0 的數目等於加權有向圖中相對應節點輸入弧數，第 j 行不為 0 的數目等於相對應節點輸出弧數。NDSM 中元素 a_{ij} 定量表示了活動 a_i 和 a_j 間

的訊息依賴程度，其元素 a_{ij} 的值定義如下：

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i = j \text{ or } a_j \rightarrow a_i \\ V & \text{if } a_j \rightarrow a_i \end{cases} \quad (2)$$

其中 $V \in \{1,0.9,0.7,0.5,0.3,0.1,0\}$ ，由加權有向圖直接映射成數值設計結構矩陣有效地表達了設計活動間訊息關聯程度，圖 5 為 WDG 映射 NDSM 的規劃過程。

NDSM 建立了設計開發過程結構化模型，但不能表示設計活動的最佳執行順序，需利用有效的活動分解類聚及解耦重組方法對設計活動進行有效的執行次序規劃，以減少整個設計開發過程中的設計迭代及重工，降低反覆迭代所導致的设计開發風險，規劃後的 NDSM 可以再映射回一個層屬結構分明的有向圖，此映射後的有向圖可反映出設計活動最佳執行次序、層屬結構以及耦合活動集合，以利整個新產品設計開發同步流程的規劃。

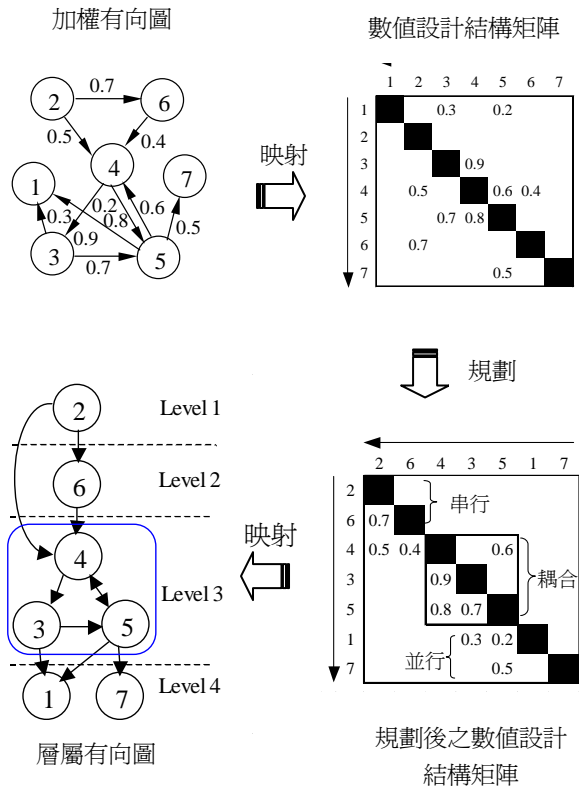


圖 5. WDG 映射至 NDSM 的規劃過程

四、數值設計結構矩陣規劃方法

在活動訊息傳遞的基礎上，對設計活動流程進行最佳化重組，以實現設計開發過程最小迭代，最大並行，即對設計活動進行界定，解耦和層級劃分，以得到最佳的设计流程，整個規劃方法將分為兩大部分：整體規劃和局部規劃，詳述如下：

4.1 整體規劃

根據第二章節所述，設計活動基本上可劃分為三種形式，在设计流程規劃初期需先針對設計活動做獨立及耦合的識別界定，我們稱之為獨立操作及定耦操作，獨立操作的目的是要判別出哪些活動是可以最先執行以及哪些活動是可以較晚執行的，獨立操作的規劃方法是找出 NDSM 中空列所對應的活動排在首位最先執行，空行所對應的活動排在最後面執行，以此原則來作流程規劃，矩陣中剩餘的元素即為耦合活動，我們必須針對這些耦合活動進行界定識別，我們稱之為定耦操作，其目標是要將整個設計開發流程由大的耦合區域規劃成小區域的耦合活動集合，這將有助於同步工程的規劃。

4.1.1 定耦操作

交互耦合活動是存在訊息交互的活動集合，活動間存在相互依賴訊息，構成訊息迴路，耦合活動的界定可透過矩陣的二維代數運算 (Warfield 1994) 來進行識別，本文利用可達矩陣和強關聯矩陣的概念，界定出 NDSM 中所隱含的耦合活動，相關定義如下：

定義 1： 矩陣 P 是設計結構矩陣 A 的可達矩陣，令 $P = (p_{ij})_{n \times n}$ ，其中

$P = (A \oplus I_n)^n = (p_{ij})_{n \times n}$ ， A 為相鄰矩陣， I_n 為 n 維單位矩陣， \oplus 為布林代數運算法則加法符號，當 $P = (A \oplus I_n)^n = (A \oplus I_n)^{n+1}$ (公式 3) 時，則稱 P 為可達矩陣。

定義 2： 強關聯矩陣 Q 是可達矩陣 P 的強關聯性判斷矩陣：

$$Q = P \cap P^T$$

$$= \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & \cdots & p_{n1} \\ p_{12} & p_{22} & \cdots & p_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1n} & p_{2n} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} p_{11}^2 & p_{12} \cdot p_{21} & \cdots & p_{1n} \cdot p_{n1} \\ p_{21} \cdot p_{12} & p_{22}^2 & \cdots & p_{2n} \cdot p_{n2} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ p_{n1} \cdot p_{1n} & p_{n2} \cdot p_{2n} & \cdots & p_{nn}^2 \end{bmatrix}$$

式中 P^T 為 P 的轉置矩陣，若 Q 中某一列存在非零元素，則這些元素形成一個強關聯子集合，即子集合中所包含的元素構成耦合活動集合。

在此，筆者以一個 5×5 的矩陣來做可達矩陣及強關聯矩陣的推算說明，假設 A 是一個具有 5 個元素的矩陣，其可達矩陣的推算過程如下所示，根據定義 1. 令

$$R = A \oplus I_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R^2 = R \otimes R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R^3 = R^2 \otimes R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R^4 = R^3 \otimes R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R^5 = R^4 \otimes R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

最後筆者發現 $R^4 = R^5$ ，因此根據定義 1 筆者可以得到下列可達矩陣 P :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同時強關聯矩陣 Q 也可由下列計算式推算得出:

$$Q = P \cap P^T$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

定義 3: 矩陣 P' 是可達矩陣 P 的縮減矩陣，通過可達矩陣對耦合活動相對應矩陣中的行、列進行單一化處理，即將每一個強關聯耦合活動集合等價於其中某一單一活動所獲得的矩陣，其對應的活動集合 $S' = \{a'_1, a'_2, \dots, a'_m\}$ ，其中 $1 \leq m \leq n$ 。

縮減矩陣 P' 表達了以 $i \sim j$ 能在 n 步內到達的所有路徑，以此縮減矩陣，本文提出以下矩陣層級演算法 (Hierarchy algorithm)，以進一步地明確界定出活動執行的順序層次和結構特徵，此即為對設計開發過程中所有耦合活動集合進行層級的劃分。

定義 4: 第 0 級耦合活動集合 $L_0 = \emptyset$ ， m 維列向量 $D_0 = (1, 1, \dots, 1)^T$ ，計算

$$P^l D_{l-1} = (p_1, p_2, \dots, p_m)^T, \text{ 其中, } l \geq 1,$$

$1 \leq m \leq n$ ，並確定 $D_l = (d_1, d_2, \dots, d_m)^T$ 的向量值，若 $p_i \in \{0, 1\}$ 則 $d_i = 0$ ，否則 $d_i = 1$ ，若 $e_i = 1$ ，則第 j 級活動 $a'_i = L_j$ ，即

$$L_j = \{a'_i \in S - L_0 - L_1 - \dots - L_{j-1} | e_i = 1\} \quad (5)$$

經過層級劃分後， L_1 為第一層級活動， L_2 為第二層級活動，...， L_{j-1} 為最後一個層級活動。

在 NDSM 中，位於對角線上方的非零元素反應了活動間訊息的回饋現象，將導致設計開發過程的迭代與重工，依照同步工程的概念，應盡量

減少設計過程的訊息回饋，因此，對設計開發活動進行分解類聚，重新排列 NDSM 的活動行列，將有助於得到較佳的同步流程規劃，分解算程的目標是要使矩陣下三角化，其演算方法如下：

步驟 1: 將空列元素活動排至矩陣最前執行，空行元素活動排至矩陣最後執行，重複操作直至所有空行、空列元素都已被規劃完成為止。

步驟 2: 對沒有空行及空列的元素活動實施定耦操作，即對矩陣進行可達矩陣 P 及強關聯矩陣 Q 的計算，界定出耦合活動集合，運用單一化操作將耦合活動集合視為一個單一活動，利用層級算程，進行耦合活動層級規劃。

步驟 3: 重複步驟 1、2，直至全部活動規劃完成。

步驟 4: 設計活動分解類聚結束。

接著我們必須針對耦合活動集合中的設計開發活動進行解耦操作，以找出初始耦合活動。

4.2 局部規劃

局部規劃是建立在整體規劃的基礎上，通過割裂算程對耦合活動集中的活動進行執行優先順序的解耦規劃，以使其設計迭代次數最少。目前尚無一種最佳化的割裂算程被提出，一般規劃原則為對上游活動具有最小訊息輸入，以及對下游活動具有最大訊息輸出活動有比較高的執行優先權，用輸入與輸出之比值 R 來進行耦合活動執行優先次序的評估；因此割裂算程的核心是基於活動間關聯強度對活動執行優先次序的綜合評估問題。

由於主對角線上方的活動表示了訊息的回饋和迭代，而且越在後面的活動，其回饋所引起的重覆設計範圍也越廣，在實際的設計開發過程中，期望訊息回饋的情形越少越好。因此對於主對角線上的活動 $A_{ij} (i < j \leq S)$ ，其輸入、輸出的權重 W_u ，以它到相對應主對角線上活動 A_{ii} 的距離 $|j-i|$ 來表示；對於主對角線下方的元素，其輸入、輸出的權重 $W_d=1$ 。此外，導入關聯強度的概念，在 NDSM 中，活動 i 與活動 j 之間的訊息輸入與輸出關係可通過對 a_{ji} 和 a_{ij} 來描述，其強

度判別尺度依 3.1 節所提議，由強至弱依次 1,0.9,0.7,0.5,0.3,0.1,0 尺度加以區別，以此界定方法來表示設計活動間相互影響的程度，對於任一設計活動 A_i ，其訊息輸入(II)和訊息輸出(IO)加權運算公式如下所示：

$$II_i = \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} \cdot W_d + \sum_{j=i+1}^n C_{ij} \cdot W_u \quad (i, j \leq n) \quad (6)$$

$$IO_i = \sum_{i=1}^{i-1} C_{ij} \cdot W_u + \sum_{i=j+1}^n C_{ij} \cdot W_d \quad (i, j \leq n) \quad (7)$$

$$R_i = II_i / IO_i \quad (i, j \leq n) \quad (8)$$

式中， n 為耦合活動集中活動的數目， W_u 和 W_d 是相對應元素的權重值。割裂算程的具體步驟如下：

- (1) 計算活動 A_i 的 II_i 和 IO_i 。
- (2) 計算各活動的輸入輸出加權比值 $R_i = II_i / IO_i$ 。
- (3) 比較 R_i 的大小， R 值最小的對應的活動應具有優先執行權。
- (4) 依 R 值大小，重新排列耦合活動集合內活動的執行順序。
- (5) 割裂程序完成。

整個新產品設計開發流程經過 NDSM 的分解以及割裂算程後，我們可得到一個最佳流程規劃。

五、實例應用

此實例應用，我們與 A 公司合作，A 公司是台灣一家國際性的電子公司，主要產品為液晶電視，我們期望透過此模式的應用能幫助 A 公司規劃出具執行效率的新產品設計開發程序。再經由與 A 公司新產品開發相關單位主管做深度訪談後，訂定出 A 公司在進行新產品開發時，所需的設計開發活動因子共 22 項，如下表 1 所示：

$$P'D_0 = (1, 3, 2, 4, 5, 6, 7, 8)^T, \quad L_1 = S_1 = \{a, b\}$$

$$D_1 = (0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T,$$

$$P'D_1 = (0, 2, 1, 3, 4, 5, 6, 7)^T, \quad L_2 = S_2 = \{f, g, h\}$$

$$D_2 = (0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1)^T,$$

$$P'D_2 = (0, 1, 0, 2, 3, 4, 5, 6)^T, \quad L_3 = S_3 = \{c, d, e\}$$

$$D_3 = (0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1)^T,$$

$$P'D_3 = (0, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 5)^T,$$

$$L_4 = S_4 = \{i, j, k, l, m, p\}$$

$$D_4 = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1)^T,$$

$$P'D_4 = (0, 0, 0, 0, 1, 2, 3, 4)^T, \quad L_5 = S_5 = \{n, o\}$$

$$D_5 = (0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1)^T,$$

$$P'D_5 = (0, 0, 0, 0, 0, 1, 2, 3)^T, \quad L_6 = S_6 = \{q, r, s, v\}$$

$$D_6 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1)^T,$$

$$P'D_6 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 2)^T, \quad L_7 = S_7 = \{t\}$$

$$D_7 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T,$$

$$P'D_7 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T, \quad L_8 = S_8 = \{u\}$$

根據層級運算結果，我們可以推導出耦合活動集合的優先執行順序如下圖 7 所示，其次需針對各個耦合活動集合內的活動進行割裂運算，以得出初始耦合活動執行次序，本文以耦合活動集合 6 為例來做運算推演。根據上述割裂方法，利用公式(6,7,8)，我們可得到以下割裂運算結果：

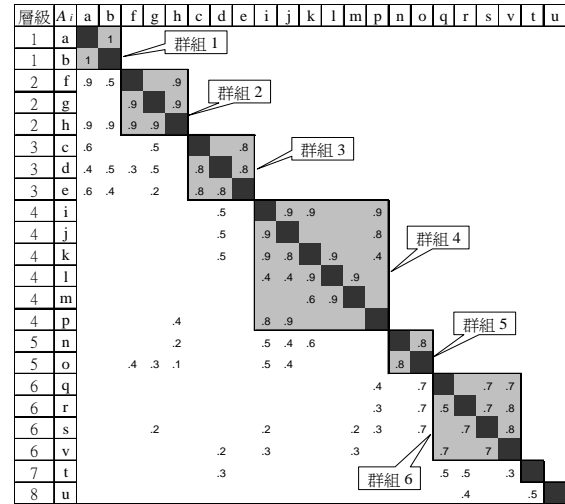


圖 7. A 公司之耦合活動集合分佈及執行順序

群組	階段	活動名稱	a	b	f	h	g	c	e	d	j	i	p	k	l	m	n	o	v	s	q	r	t	u	
C1	設計企劃	產品企劃	a	1																					
		市場分析	b	1																					
C2	概念設計	新產品構想發展	f	.9	.5		.9																		
		產品造型設計	h	.9	.9	.9		.9																	
		評估選擇最佳方案	g	.9	.9																				
C3	成本評估	成本預算分析	c	.6			.5		.8																
		銷售量及利潤目標	e	.6	.4		.2	.8		.8															
		產品規格訂定	d	.4	.5	.3	.5	.8	.8																
C4	設計開發	內部元件layout	j						.5		.9	.8													
		機構設計	i						.5		.9	.9	.9												
		包裝設計	p			.4				.9	.8														
		電子設計	k					.5		.8	.9	.4		.9											
		IC 設計	l						.4	.4	.9			.9											
		軟體開發	m								.6	.9													
C5	後工程	功能模型製作測試	n				.2		.4	.5	.6						.8								
		模具開發	o			.4	.1	.3		.4	.5						.8								
C6	試產驗證	檢驗規範	v						.2	.3			.3						.7	.7					
		生產設備開發	s				.2		.2	.3		.2	.7	.7	.7				.7	.7					
		小量試產測試	q						.4		.3		.7	.7	.7				.7	.7					
		大量試產測試	r						.3		.7	.8	.7	.5					.5	.5					
產品量產	客戶認證	t					.3											.3	.5	.5					
		量產行銷	u																	.4	.5				

圖 8. 重新規劃後之新產品設計開發 NDSM

表 2. 割裂運算結果表

活動	I_i	IO_i	R_i	排序
q	3.5	1.2	2.92	3
r	2.8	0.7	4	4
s	1.5	2.1	0.71	2
v	1.4	2.3	0.61	1

由表 2 可得知，活動 v 具有最小的 R 值，應規劃至最前面執行，其次為活動 s ，再其次為活動 q 最後為活動 r ，依此割裂方法，可以將所有耦合集內的活動規劃完成，整個設計開發過程經過 NDSM 的分解類聚、層級分析及割裂重組等算程後，我們可以得到規劃後的 NDSM 如圖 8。

規劃後的 NDSM 呈現出一種近似下三角形的形式，具有最少的反饋信息，圖 8 表明了這一規劃過程體現了按照活動任務間耦合程度的不同，以小的、多個具有信息反饋的設計環路代替原先整個設計過程混亂的耦合狀態，即以產品生命週期中，小的局部過程的反覆與迭代來克服傳統串行設計中，大的全局的反覆與迭代，這正是同步工程所倡導的產品及其相關開發過程一體化設計的本質。最後我們可以將規劃後的 NDSM 再映射回一個有向圖(圖 9)，藉此可以得到一個層屬分明的設計流程架構，這將有助於新產品設計開發同步流程的規劃。

經由上述分解與割裂運算所獲得的結果，再配合公司或產品特性及其他限制條件的綜合考量，我們將 A 公司新產品開發流程重新規劃建立起來，下圖 10 為重新規劃的新產品開發流程；利用數值設計結構矩陣(NDSM)，將設計活動因子的耦合群集推導出來，發現在設計因子 $[a,b]$ ， $[cde]$ ， $[f,g,h]$ ， $[i,j,k,l,m,p]$ ， $[n,o]$ 與 $[q,r,s,v]$ 中產生耦合現象，如圖 10 灰色區塊所顯示，代表該區域的因子訊息是相互影響的，屬於交互耦合的流程關係，設計師與管理者在此區域要注意訊息傳遞與回饋過程的掌握，必須考量每個相關因子間的交互關係複雜性，應盡可能的予以簡化。

我們將規劃後的數值設計結構矩陣轉化成一個同步設計流程圖(圖 10)，據此我們將推導出每個耦合群組(chunk)，分別定義為 chunk 1--產品企劃， chunk 2--概念設計， chunk 3--成本評估， chunk 4--設計開發， chunk 5--後工程， chunk 6--試產驗證及最後的量產階段共 7 個階段，形成一個同步設計的程序，該公司因導入 CAD/CAM 系統，因此在設計開發階段至後工程設計階段產生聚類耦合的現象，使產品開發流程變得更緊湊與密切，經由矩陣法的決策推論，可以明確看出耦合複雜的區塊的關連，這對產品設計師及經理者而言，將提供一套新的同步設計決策法則，並有助於新產品開發的管理，控制與實施，經由同步設計決策的推論，將設計流程訊息的傳遞做了明確的界定。

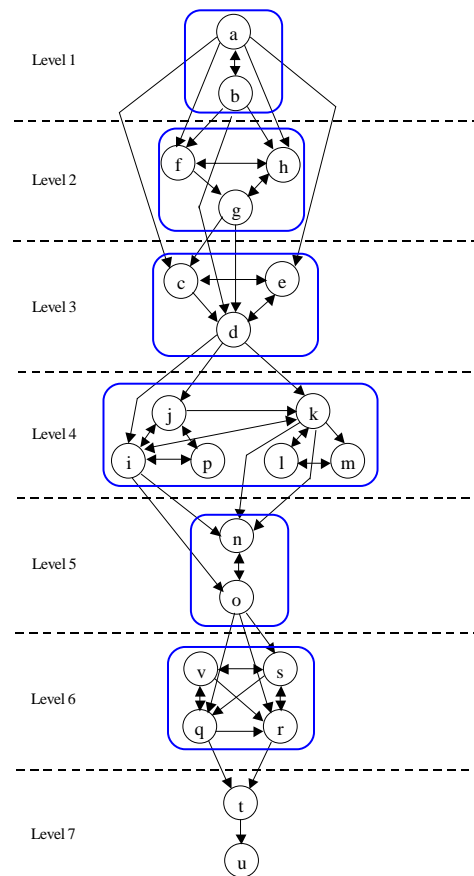


圖 9. 最佳設計活動因子層屬關係結構圖

5.1 產品開發設計策略

我們在矩陣耦合區域必須考量設計因子訊息的流動，因此運用適當設計方法，將耦合區域的訊息以明箱化方式傳遞，我們可以從發散、轉換與收斂的角度出發，在概念設計至原型設計階段，經歷構想的發散與轉換，因此結合型態學圖表與層級分析法的策略，可有效控制概念發散的數量並提供明箱化的推演過程，在此建議上述幾個重要的開發設計階段可使用的設計策略方法(宋同正、蔡登傳 1997) 如下所示:

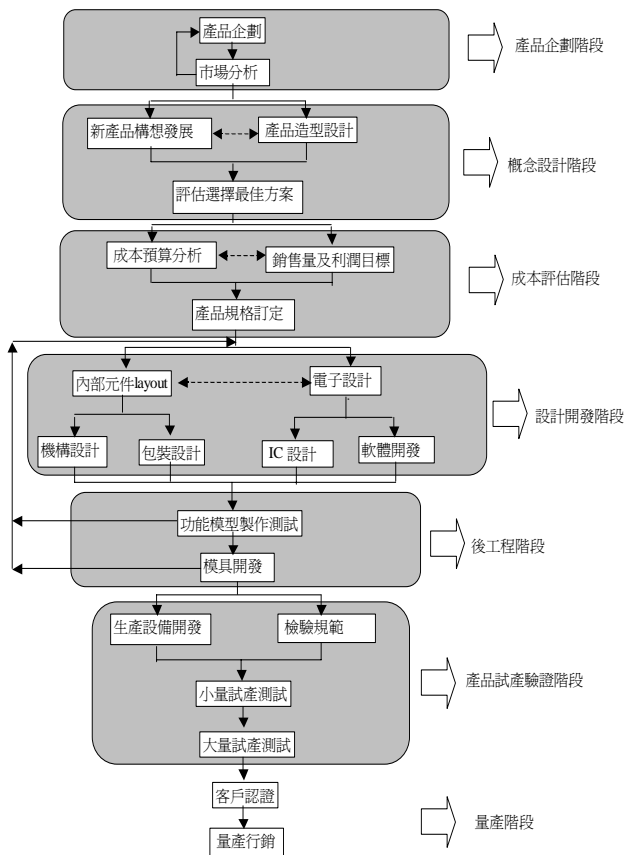


圖 10. 規劃後新產品設計開發同步流

1. 首先從產品企劃開發開始：可以層級分析法(hierarchy)推算出設計規範的權重，作為後續概念設計的發展依據。
2. 概念設計階段：可藉由型態學圖表(Morphology)的發散與 Pugh 概念選擇的收斂，將設計訊息予以明箱化。
3. 開發成本評估階段：可採用 WBS 法將設計開發各個階段所需花費的成本計算出來，以作為設計決策的參考依據。

4. 開發設計階段：可利用 DFA& DFM 組裝檢測方式來驗證機構組裝設計的優劣。
5. 後工程階段：可運用電腦輔助設計製造 CAD/CAM 工具，以加速產品開發的速度。
6. 試產驗證階段：可利用 QFD & DEFEMA 來驗證及排除試產所遇到的量產問題。

此外在產品設計開發程序進行當中，考量同步流程中人員資訊溝通管道的因素，建立起產品資訊溝通的介面，將產品、人員、環境的關係做一個系統化的連結；而整個開發流程的執行主要是靠對設計訊息流動的掌握，進而運用合適的方法與工具來解決設計流程中不明確的訊息流動，以減少設計開發流程的複雜度；在同步程序中，如將這些複雜的設計訊息呈現出來，將有助於提供設計師及管理者對產品設計問題的解決；耦合區域內的設計因子表示彼此有強烈的訊息交流，一般耗費在此階段設計反覆的時間也最多，因此在產品設計開發實施之前，需先對流程本身的架構、規則做一個系統化的規劃，使設計程序中的問題提前浮現，以達成設計訊息一體化的目標。

六、結論

新產品設計開發同步規劃方法揭示了設計開發過程內部的層屬結構特性，為提高設計開發同步性提出有效的解決方法，本文提出的加權有向圖，定量地描述了設計活動間訊息的依賴關聯程度，並將其映射至數值設計結構矩陣，使得新產品設計開發過程更加清晰透明，通過對設計活動進行耦合活動界定識別、分解類聚、層級劃分和割裂重組等運算，合理有效地規劃出最佳設計活動執行次序，上述方法經實例應用，驗證了此數值矩陣規劃方法的實用性及可行性，具有良好的應用價值。

以同步工程的觀點而言，需對整個產品生命週期進行整體性規劃，要求考慮產品生命週期所有環節之間大量有效的訊息傳遞交流，這將有利於縮短整個產品設計開發的時程並提高產品設

計品質，但同時勢必增加整個設計開發過程的耦合強度和複雜性，因此，以同步設計過程作為一個多目標決策過程，建議應在不同的設計開發階段應採取不同的設計策略；此外，同步工程絕不是考慮所有的設計活動都同時進行，而是必須思考在哪些時間階段需同時進行哪些設計活動為最合適的問題，這些都需對同步設計過程進行規劃，亦即須發掘出同步設計過程的層屬結構，對同步設計過程本身進行設計規劃，而本文所提議的數值設計結構矩陣為此提供了量化的數學指導工具，具有重要的應用價值，本文最主要的貢獻如下：

- (1) 此研究提供了一個有效的量化矩陣規劃方法，使原本雜亂無章的新產品開發流程，經由此矩陣方法規劃後，可以得到一個井然有序，層屬結構分明的程序，以減少設計開發工作的反覆迭代，進而縮短新產品設計開發時程，以提升產品市場競爭力。
- (2) 此方法不僅提供一個類聚及排序的方法，其中也蘊含著各個活動因子間所需的動態訊息流量及方向的揭示，以利產品設計開發同步工程的規劃。
- (3) 此方法為傳統直覺式設計流程規劃提供了一個可計算的明箱化規劃方式，讓規劃過程更趨於透明及合理化。
- (4) 此方法最後所推導出的層屬關係圖，可進一步顯示出各個設計活動因子的上下層屬關係，將有利於管理者作更進一步的同步程序規劃。
- (5) 此方法便於電腦程式的開發與運算，可進一步的發展成為一套“設計程序規劃系統”(DPPS)，以利日後協同設計開發(collaborative design)的導入。

未來更進一步的研究可將重點著重於整個設計開發流程中各個階段所需的人力、時間及成本的最佳規劃上。

參考文獻

1. 王俊仁，(1993)，「新產品發展過程中應用同步工程與循序工程之比較」，國立中興大學企業管理研究所碩士論文。
2. 宋同正，蔡登傳合譯，(1997)，產品設計與開發，華泰文化出版，台北。
3. Beheshiti, R. (1993). "Design Decisions and Uncertainty", *Design Studies*, 14(1), 85-93.
4. Browning, T. R., and Eppinger, S. D. (2002). "Modeling impacts of process architecture on cost and schedule risk in product development", *IEEE Transactions On Engineering Management*, 49(4), 428-442.
5. Ellis, C.A. and Nutt, G.J. (1993). "Modeling and Enactment of Workflow Systems", In: *Application and Theory of Petri-Nets*, Springer-Verlag, Berlin, 691: 1-16.
6. Eppinger, S. D., Whitney, D. E., Smith, R. P., and Gebala, D. A. (1994). "A Model-based method for organizing tasks in product development", *Research in Engineering Design*, 6(1), 1-13.
7. Kusiak, A., and Wang, J., (1993). "Efficient organizing of design activities", *International Journal of Production Research*, 31, 753-769.
8. Mayer, R., Painter, M. and Witte, P. (1993). *IDEF Family of Methods for Concurrent Engineering and Business Re-engineering Applications*, College Station, TX: Knowledge Based Systems.
9. Roberts, F. S. (1976). *Discrete Mathematical Models*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
10. Steward, D. V. (1981). "The design structure system: a method for managing the design of complex systems", *IEEE Transactions on Engineering Management*, 28 (3), 71-74.
11. Susman, G. I. (1992). *Integrating Design and Manufacturing for Competitive Advantage*. New York: Oxford University Press.
12. Warfield, J. N. (1994). *A science of generic design: Managing complexity through systems design*. Iowa: Iowa State University Press.
13. Yassine, A., and Braha, D. (2003). "Complex Concurrent Engineering and the Design Structure Matrix Method", *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 11(3), 165-176.

A planning method of optimal workflow for new product design and development

Yao-Tsung Ko

Department of Industrial Design, Tunghai University

mike.ko@thu.edu.tw

ABSTRACT

New product design and development is a complex systematic engineering. Based on graph theory and design structure matrix (DSM), this paper presents a systematic workflow planning method for optimizing new product development from an informational structure perspective. Focused on coupling and decoupling theses in concurrent engineering (CE), the workflow planning was divided into two phases of global planning and local planning. In the global planning phase, coupled activities are recognized by algebraic operation of binary Boolean matrix. In the local planning phase, the hierarchical graph can be obtained by comparing the correlation strength of numerical design structure matrix (NDSM). An advantage of the proposed method is that the mapping from design structure matrix to hierarchical workflow graph can be automatically realized, which greatly improves the efficiency of workflow planning for new product development. Eventually, a case study of LCD TV is employed to illustrate the method and the results validate that it can shorten the product development time and reduce the iterations of design process.

Key words: new product development (NPD), concurrent engineering (CE), weighting directed graph (WDG), numerical design structure matrix (NDSM).