

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

機械設計程序之工程分析與評估

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2212-E-002-069-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：傅增棟

計畫參與人員：吳逸楓、唐世豪、廖家慶

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 92 年 10 月 21 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

機械設計程序之工程分析與評估

Technical Evaluation of Mechanical Design Processes

主持人：傅增棣

國立台灣大學機械工程學系

中文摘要

一項機械產品的成功，除了要在性能上滿足設計目標的要求之外，也必須要能妥善地安排完成此項設計所需工作之次序、時程以及相關成本，才能確保產品在市場上的競爭力。由於機械設計程序具有複雜與多變之特性，不容易進行客觀量化的比較。藉由訊號流程圖模型的改良與導入，本研究旨在建立一個機械設計流程的量化模型，運用此模型之特性及電腦模擬程式的輔助，以及業界實際設計程序之分析，期望能夠彌補傳統排程方式的不足，提供業界專案設計工程師在安排設計流程時，更多的如風險與成本之相關指標的分析與依據，並可藉以尋求設計程序之最佳化，以作為規劃設計流程工作時之參考。

關鍵詞：設計程序、評估方法、設計方法學

Abstract

The success of a product design in the market depends not only on the achievement of original design goals, but also on careful arrangement of the schedule for the design activities. Owing to the nature of complexity and variety, it is difficult to make a quantitative and general comparison between mechanical design processes. Based on the modifications of signal flow graphs, this project is aimed to establish a

framework of quantitative evaluation for the mechanical design processes. By the simulations in computer, it is hoped to provide project engineers with more insights like risk and cost from the design process than the traditional approach. A case study from the industry was collected to ensure that this model is practical enough for the evaluation and optimization of the design processes in the work of design management.

Keywords: design process, evaluation method, design methodology

1. 計畫前言與研究目的

隨著科技的進步與市場的開放，機械產品的功能需求日漸增加，而其系統之複雜度與所需考量的因素也逐漸增多，連帶使得機械產品的設計程序與目標也隨之複雜與多變。傳統的機械設計程序已愈來愈難以應付逐漸升高的系統競爭、與成本降低之要求。為了提升設計程序的工作效率及品質，於是而有設計程序之研究，期望能從機械設計程序之特質與內涵中，尋求改進與最佳化的途徑。在一項研究〔Pawar, et al., 1994〕的統計中即顯示，由於日本在產品發展階段所做的改進，日本車廠發展新款車型平均所需的時間，比美國車廠少了約 1/3 左右，而工時則少了一半，因而形成對美國企業之強大威脅。由此

可見，設計程序在產品競爭力中的關鍵地位。

在一般傳統的設計程序中，通常是由資深的專案工程師，依其以往的設計經驗，規劃出一套設計流程，以供其他相關工程師在後續設計工作執行時的依據。然而，隨著產品競爭需求與系統複雜度之升高，再加上新的設計方法及設計工具之導入，此種基於過往經驗的傳統排程方式，已無法適應現代設計程序的變化，容易造成設計資源的浪費與設計程序中反覆（iteration）情況之增加。此外，在設計執行期間所可能遭遇到的資源競爭及時間不確定性等因素，也會造成設計時程與成本的難以掌握，間接地影響到產品之設計品質與市場競爭力。因此，需要一套有系統且量化的評估工具，來協助專案工程師確保其設計流程安排之週延與效率，並藉此模型尋求設計程序最佳化之可能性。

2. 文獻理論簡介

機械產品成功的關鍵，除了在性能上必須滿足設計目標之外，也須要能夠及時地投入市場並降低系統的成本。因此，設計工程師除了要有豐富的經驗，以尋求合適的解決方案外；也須要能妥善地安排與掌握完成此項設計所需工作之次序、時程以及相關的成本，才能確保該項產品在市場上的競爭力。如何能在達到設計目標的同時，使得設計工作也能夠有效率且及時地完成，就成為在設計方法學的領域中所致力研究的重點之一。

在設計方法學的研究當中，已有許多有關機械設計程序的模型被建構和討論（French, 1985; Pahl *et al.*, 1988; Pugh, 1990; Cross, 1995; Ullman, 1997; Wallace, 1997）其中被廣泛引用的 Pahl & Bertz 之設定式模型（prescriptive model），係將一個典型的機械設計程序分成：計劃與釐清工作目標、概念設計、具體化設計及細部設計等四個階段，並探討各個階段中的重要工作及可應用的改進方法。然而，由於設計程序的多變性，在實際應用時還得根據產品之特性發展出適合的程序模型。例如，張建斐〔1998〕以 IDEF0 模式技術為理論基礎，將複雜的立式綜合切削加工機加以層級化分析，以整合設計活動與設計因子，建立此型工具機之設計程序；

此研究在設計流程層級化分解的方法，與分析所收集的資料方面具有參考的價值。而單承剛〔1996〕則引用近年來使用於電腦科學領域的「物件導向」之概念來建構設計溝通工具，以發展適用於工業產品之系統化設計程序。其重點在於呈現設計問題內在的複雜面貌，並且以物件導向之技術來重新分析問題與陳述概念，此模型之優點為將設計程序模型建構在物件導向概念之應用軟體上，使電腦能以模擬真實世界的方式來處理設計問題，而有助於設計自動化過程之推行。

此外，由提升製造效能的觀點出發，安排在設計程序當中提前考量製造程序的要求，因此而產生了同步工程（concurrent engineering）的觀念，也對設計程序模型的變化造成影響。如王俊仁〔1993〕利用問卷配合統計分析，探討同步工程與循序工程在新產品發展績效之關係，發現設計與製造階段硬體設計比重較高的產品，在導入同步工程後，其績效提高的效果將比較顯著。而李家賢〔1998〕和王宜婷〔1999〕皆從同步工程的理念切入，將各設計活動之間所產生的訊息予以量化，並運用同步設計法則將傳統設計流程重新組合，建立同步設計的程序模型，以作為產品開發流程中管理及擬定策略的參考。Badiru〔1993〕則深入地探討了在同步工程中任務之間次序關係變化的四種可能情形，並提出改良之設計流程分析模型。

在同步工程的系列研究當中，針對機械設計程序之特性，還有重合（overlapping）條件及其適用狀況之探討與評估〔Krishnan, *et al.*, 1997〕；運用改良後 DSM（design structure matrix）法於設計反覆（iteration）特性之解析，並提出評估指標與改善途徑之研究〔Smith, *et al.*, 1997〕；以及將同步工程之訊息回饋由製造程序推廣到組裝、回收、維修及耐久等其他方面，因此而有 DFX（Design for X）之研究〔Jo, *et al.*, 1993〕等。在其中，由於設計成果無法達到原先設立的標準，或新資訊的加入所造成設計程序中的反覆特性，更是此程序效率提升的重要關鍵。在一項針對半導體產品設計的研究中〔Osborne, 1993〕發現，設計反覆的時間約佔產品總發展時間的三分之一到三分之二，而

且非預期性的設計反覆是造成產品發展時程改變的主要原因。

另一方面，在作業研究的領域裏，亦有許多常見的方法可以應用在機械設計程序的分析當中，如甘梯圖 (Gantt chart) 網路分析法 (network analysis) CPM (critical path method)、PERT (program evaluation and review technique) [高孔廉等, 1994] 等，但這些方法都具有無法在設計程序中考慮工作反覆特性之共同缺點。為了改進此項缺點，Eppinger, *et al.* [1997] 將其中網路圖 (亦即訊號流程圖, signal flow graphs, SFG) 之概念加以改進與延伸，使其可以應用在具有反覆流程之設計程序的分析之中。修改後的訊號流程圖法，具有更大之彈性，還可以為設計程序之分析提供有用之程序變化影響評估、程序執行風險評估、及計劃時程管制分析等資訊。此法在其後更被應用在一個設計流程是否應該導入 CFD (computational fluid dynamics) 軟體的實際研究之中 [Isaksson, *et al.*, 2000]。然而，在此法的相關文獻中，則尚未有探討設計程序時間為不確定之機率分佈狀況，而此特性，卻往往是在實務上收集業界相關資訊時，經常會遇到的資料型態。

因此，在本計劃中擬以 Eppinger, *et al.* [1994] 的訊號流程圖法為基礎，修改其模型，使其演算處理方式更加簡潔；並納入設計活動相關成本與時間不確定性之研究，以切合實際設計程序中可能面對的情況；而由於此種時間不確定特性之加入，必須運用數值模擬方法取代原有的解析解法。此外，本研究也將收集廠商實際的設計程序為案例，檢討改良後的設計程序模型之可行性及應用效能，以為設計管理者提供一個量化客觀的設計程序評估工具。

3. 研究方法之介紹

訊號流程圖法本來是在電子學中迴授控制系統分析時所使用的工具，最早是由 Mason [1953] 所提出，原先主要應用在電機的領域中，是為一種線性系統因果關係之表示方式。此法的涵意可以定義為：以一組線性代數方程式之間的輸出入關係，用圖解的方式說明的一種方法。如圖一所示，若狀態變數之輸入節點 (node) 以 y_1 來表示，輸出節點為 y_2 ，二者之間連接的線段與箭頭稱為

由 y_1 至 y_2 之分支 (branch)，每個分支都具有增益 (gain, a_{12}) 及方向二層含意。根據 Kuo [1982]，訊號流程圖法的基本特徵為：

- (a) 訊號流程圖只能用於線性系統。
- (b) 訊號流程圖所根據的方程式，必須是因果函數型式的代數方程式。
- (c) 其節點代表變數，通常順序是由左到右，依照系統之因果關係排列。
- (d) 訊號沿著分支傳送時，只可沿著分支上箭頭所指的方向傳送。
- (e) 由節點 y_1 至 y_2 的分支方向，表示變數 y_2 依 y_1 而變，但反之不成立。
- (f) 沿著節點 y_1 至 y_2 的分支所傳送的訊號 y_1 ，將被乘上分支增益 a_{12} ，所以節點 y_2 處所傳得的訊號是 $a_{12}y_1$ 。

Eppinger, *et al.* [1994] 將訊號流程圖應用於設計程序的分析與評估，並對此模型作了新的定義及賦予新的用法。如圖二所示，分支 j 到 k 表示由節點 j 的流程狀態 (state of process) 開始到節點 k 流程狀態結束的一個設計活動。在此訊號流程圖中的每一個分支都被賦予一個特別的參數，名為分支傳輸 (branch transmission, P_{jk})。此參數包含了兩種重要的資訊：亦即設計活動之執行機率 (p_{jk}) 及完成此設計活動所需要的時間 (t_{jk})，而其關係式則可表示為：

$$P_{jk} = p_{jk} z^{t_{jk}} \quad (1)$$

其中 z 稱為轉換變數，目的是用來區隔設計活動的機率與時間，其訊號則根據分支機率的分配來決定往任一個分支前進之可能性。於是，在一個路徑中當分支傳輸相乘時，機率項為相乘，而時間項則為相加。若定義在開始節點到結束節點之間，沿某一路徑之所有分支傳輸的乘積為路徑傳輸 (path transmission)，在整個系統中所有可能路徑傳輸的和，即稱為圖形傳輸 (graph transmission, T_{sf})。此圖形傳輸可以用一個 z 的函數式來表示，今令 $T_{sf} = P^g(z)$ ，將此式對 z 微分並代入 $z=1$ ，即可得到此程序設計完成時間之期望值 ($E[L]$)，其意即為各分支機率與時間乘積之和，以算式表示如下：

$$E[L] = \left. \frac{dT_{sf}}{dz} \right|_{z=1} \quad (2)$$

據此，如圖三(a)所示之設計程序，

便可運用訊號流程圖法將所有的流程資訊表示於圖三(b)訊號流程圖的模型中，以利後續之量化計算與評估。

對於一個設計案或是一項專案計劃，除了設計工作完成所需時間的考量之外，成本的控管亦為必須關心的主題之一。此成本主要包含兩個部分：一為各項設計活動或作業的直接成本，例如人工費用、設備費用及材料費用等；另一部分是整個設計案或計劃之間接成本，例如管理費用或會計費用等。由於直接成本才能忠實反映出設計流程變化的影響，本研究將以直接成本之估算為依據，而前述之分支傳輸關係式即可修正為：

$$P_{jk} = p_{jk} y^{m_{jk}} z^{t_{jk}} \quad (3)$$

式中 p_{jk} 與其在(1)式所代表的意義相同，而 y 亦為轉換變數，設計活動 jk 所需的成本 m_{jk} 即放在 y 指數項的位置。 m_{jk} 的計算方式如下：

$$m_{jk} = \sum_{i=1}^n b_i c_i t_i \quad (4)$$

在此式中，設計活動 jk 所需之工程師或設備總共有 n 類， b_i 代表其中第 i 類工程師的人數或設備個數， c_i 則為該類工程師或設備之單位時間成本， t_i 為其實際工作的時間。此式之建構是基於在一個設計活動當中，所需配合的工程師或設備可能不只一種，而人員薪資或設備購置後的折舊成本亦不相同；此外，也有可能工程師只是兼職配合，並不是自始至終都參與工作，造成實際的工時不等於設計活動的時間。因此，設計活動成本在計算上就需要有較大之彈性，以容納各種可能的情况，並考慮多樣成本之因素，如工程師人數或設備個數、單位成本以及時間等。經由(4)式之計算，即可合併傳統訊號流程圖法中對設計完成時間的分析方式，進行設計成本方面的評估。

另一方面，在同步工程的觀念中，設計流程將會導入並行與部份重疊之情況。此在傳統的訊號流程圖中，會造成節點向外的所有分支機率的和必須大於 1 的現象 [Eppinger, *et al.*, 1997]。為了解決此問題，可以將設計活動開始或結束的時間點作為分割之依據，先對整個流程進行拆解，再將拆解後同時間進行之數個部分之設計活動，組合成為

一新的設計活動。此種拆解法在使用時，若同時存在有設計反覆的情形，則需搭配使用訊號流程圖之化簡原則與計算 [Mason, 1953]。

4 案例分析

本案例研究進行之步驟如圖四，在問卷進行之前，先與可能的研究對象接洽，並以從事機械設計相關之公司為優先考量。在確定以車廠的設計流程作為分析的對象之後，考慮到全車設計範圍所包含的系統與元件種類繁多，因此，將此案例的研究範圍集中在車輛底盤系統設計中的出圖與相關部品開發階段的設計流程上。

4.1 實例設計流程

在問卷中所收集的資料包括：設計的目的與範圍、設計流程圖示、設計活動與其所需時間及可能變動的範圍、配合之工程師類別與其人數、實際工作時數、工作內容、平均薪資、抽調或請假之機率、設備種類與其數目、用途、購置成本及折舊時間等。

由於設計流程中的資料涉及受訪廠商之內部機密，因此，各設計活動之真實名稱均以代號表示；例如計劃圖 1、計劃圖 2 或部品 d、部品 e 等。受訪者將設計流程以甘梯圖的型式表示，如圖五，並說明設計活動之間的因果關係。

根據問卷調查之結果，此甘梯圖包含計劃圖 1 到 5 單品圖 1 到 5 部品 d、e、f、g、h、i 及 j 的開發與構造檢討會等共 18 項設計活動。其中的構造檢討會，由於進行的時間較短且分散在各個部品的開發之前進行，因此在甘梯圖中以菱形圖示表示之；其餘的設計活動則是以實心橫條表示，並且以橫條的長度代表進行時間之長短。

在此流程中，依據設計活動之間的因果次序關係，可以再細分成三條主要路徑。第一條路徑是從計劃圖 1 開始，在進行了 35 天之後，可以提前開始單品圖 1 之工作，此時將會出現計劃圖 1 與單品圖 1 並行的現象，而在計劃圖 1 完成之後，單品圖 1 將繼續進行；單品圖 1 完成之後，接著是構造檢討會與部品 d 的開發，其中部品 d 的開發進行 20 天之後，會有 60% 的機率因為設計變更而需要修改單品圖 1，而修改此單品圖需要 5 天的時間，造成設計流程之延後。此外，在路徑中還有另外一條並行

的路徑，此路徑為計劃圖 4 需等待計劃圖 1 完成之後才開始進行，接著是單品圖 4、構造檢討會與部品 i 的開發；其中在部品 i 的開發過程中，亦會有類似前述因設計變更而須修改單品圖的情形出現。

第二條路徑則是由設計活動中的計劃圖 2 開始，接著是單品圖 2 及部品 e 的開發，在部品 e 的開發進行 20 天之後，會有 80% 的機率因為設計的變更而需要修改單品圖 2。而在單品圖 2 完成之時，另外還有一條並行的設計流程，即等待外包軟體之開發工作，其後則有一個構造檢討會，然後進行部品 f 的開發。在此路徑中尚存在另一條並行路徑，其為計劃圖 5 在等待計劃圖 2 完成之後才開始，而在計劃圖 5 進行 20 天之後，先開始單品圖 5 的工作，因而出現同步設計的情形；計劃圖 5 之後段與單品圖 5 同時完成，接下來就是構造檢討會與部品 j 的開發，在部品 j 的開發進行 20 天之後，有 50% 的機率會因為設計變更而需要修改單品圖 5。

第三條路徑則是由設計活動之計劃圖 3 開始，接下來是單品圖 3 與構造檢討會，然後分成兩條並行流程，分別是部品 g 與 h 的開發，兩者都在進行 20 天之後，有 30% 的機率因為設計變更而需要修改其單品圖。

根據以上設計活動之間的因果關係，配合問卷所得各個設計活動的資料，可以運用本研究所提出之拆解化簡法將此設計流程轉化成為訊號流程圖的型式，其成果如圖六所示。

4.2 電腦模擬模式之建構

以訊號流程圖為基礎，運用電腦製程模擬分析軟體 eM-Plant 即可建構設計流程之電腦模擬模式 [Anon, 2000]。其中係以移動單元 (moving unit) 類比為設計任務，而設計活動則以機台單元來代表，此模式的主要架構如圖七。

在主架構之中，依據設計開發工作之程序，還可再細分成四個次架構。第一個次架構「設計任務來到」的功能是產生設計任務，第二個次架構「計劃圖與單品圖」則是設計流程真正開始進行的階段。各個設計任務進入此次架構之後，根據設計流程中每個設計活動之間的因果次序關係，進行計劃圖與單品圖各自的設計工作。在離開第二個次架構

之後，接著進入第三個次架構「部品開發與構造檢討會」之中，此次架構是設計任務進行構造檢討，並開始部品實際開發的階段，每一個部品將分別進入個別之開發流程，其流程均可一一對應到前述之訊號流程圖。最後，所有的部品將被匯整輸出至第四個次架構「設計完成」，其主要功能是在控制整個模擬程序之結束，並進行模擬數據成果的統計分析。

5. 結果與討論

5.1 要徑分析

在此設計流程中，由於部品 f 所需要的時間最長，而且需要等待外包廠商的軟體完成之後才可以進行開發，其控制權是在配合外包廠商的合約上，依據合約是不會有提前或延後完成的情形發生，因而導致其他部品開發流程所需的時間無法影響到整體設計流程時間。換句話說，整體設計流程的平均完成時間即由部品 f 完全決定，共需 160 天。所以，本設計流程之要徑即為：由計劃圖 2 開始，經計劃圖 5、單品圖 5，接著等待軟體開發完成後舉行構造檢討會，最後是部品 f 的開發，如圖六中的粗黑路徑所示，亦即若要縮短計劃之時程，首先必須考慮的即是如何使部品 f 的開發提早完成。

若再進一步分析此流程，假設部品 f 可提前完成，或排除完全外包之設計活動 f，則可以觀察到此流程中之次要徑為：由計劃圖 1 開始，經計劃圖 4、單品圖 4 與構造檢討會，最後是部品 i 開發的這條路徑，如圖六的粗黑虛線所示。在此路徑中，部品 i 的開發有可能因為設計變更而需要修改單品圖 4，其機率約為 60%。所以，設計流程的完成時間有兩種可能性，一為有 40% 的機會在 136 天內完成，而有 60% 的機會需要 141 天才能完成。

由以上的分析可知，若想縮短設計完成時間，改善設計流程，就需要縮短要徑中各項活動所需的設計時間，或提前開始工作。但是所能改善的幅度亦有其限制，例如在本案例中，如果第一要徑上的設計活動總時間縮短超過 19 天的話，將導致次要徑的產生，設計流程所需時間即由次要徑所決定；此時，就算對原來第一要徑作更進一步的改善，也無法縮短整體設計流程的時間。

5.2 敏感度分析

針對本案例第一要徑上的設計活動進行敏感度分析，其結果可如表一。由表中可見時間敏感度最高的設計活動是部品 f 的開發，這是由於部品 f 的開發在此要徑中所佔的時間比例最高，對整體流程所需時間造成最大的影響；相對而言，時間敏感度最低的是構造檢討會，由於在流程中只佔一天的時間，就算其所需時間增加一倍，對整體流程的影響也十分有限。換句話說，如果要縮短整體設計完成的平均時間，從部品 f 的開發來改進就可以得到最大的效果。

另外，由表一設計活動成本的敏感度分析中可見，成本的敏感度皆非常的低，其中最高者也是部品 f 的開發，但只有約 0.01。其主要原因是由於本案例之設計流程具有同步的型式，在同一時間中有多個設計活動一起進行，因此，造成個別設計活動的成本佔總成本的比例相對較低的結果。

表二為工程師與軟硬體設備成本，對於整體設計流程平均成本之敏感度。由表中可見，技術部工程師的敏感度最高為 0.46，這是由於技術部工程師在整個設計流程中需要工作的時間最長，單位時間所需薪資成本亦最高所致。而最低的是個人電腦，其敏感度近於 0，主要原因是其單位時間成本較低。但值得注意的是 CAD 軟體的敏感度為 0.27，高於開發部工程師的敏感度 0.07，雖然 CAD 軟體的單位時間成本低於開發部工程師，但由於開發部工程師在此案例中的工作時間很短，導致敏感度相對較低，反之由於 CAD 軟體在此案例中之使用時間較長，所以具有較高的敏感度。

5.3 時間不確定性之分析

在運用電腦模擬模式進行流程時間的不確定性風險分析時，發現不論將設計活動時間的不確定特性設定為均勻分佈、常態分佈或是以平均值來分析，所得到的平均時間與成本結果均極為接近，只有在機率的分佈上有所差異。因此，如果時間的變動風險不是分析的重點時，可以將設計活動時間直接設定為變化範圍的平均值進行分析，以簡化評估分析之過程。

6. 結論

本研究針對設計流程進行量化評估與分析，將實務設計流程轉換成訊號流程圖，可以有助於清楚地表現出設計流程中的因果次序關係與全貌，使設計管理者更能掌握整個設計的進行，而參與的設計工程師亦能了解其工作的地位與重要性，對設計流程的改進將有其具體實用之價值。

此外，將原來用於生產系統模擬的電腦軟體，應用在設計流程的模擬分析當中，可以有效處理設計活動時間不確定性的問題；並且當設計流程日趨複雜的時候，亦可以提供一個比較有效率的方式，來評估不同的參數設定之下，設計流程的各種可能表現。

7. 計畫成果自評

經由前節各種分析的結果顯示，本研究所提出的拆解方法及電腦模擬模式，提供了以量化的方法進行設計流程之分析與評估，並且可據以得到許多深入有用的結果。

在本研究中，依據計劃之各項工作目標，把訊號流程圖模型推廣至包含設計成本的情形，使其更切合來自業界之實務需求。並且嘗試自廠商尋求實際的設計案例加以探討，以檢驗此模型之實用價值及各個設計流程變數的敏感度。其成果將可供進一步之學理發展；在實務上，亦可提供工程師在應用規劃時的參考，並增進設計專案工程師對設計流程之評估與決策的能力，而為整體設計程序之最佳化建立基礎。

參考文獻

- 王俊仁，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，1993。
- 王宜婷，新產品開發流程動態模型之建構，國立成功大學企業管理研究所碩士論文，1999。
- 李家賢，同步工程策略在產品開發上的應用研究，國立成功大學工業設計研究所碩士論文，1998。
- 高孔廉及張緯良，作業研究，五南圖書

- 出版公司, 1993。
- 張建斐, 工具機設計程序系統之研究, 私立朝陽科技大學工業工程與管理研究所碩士論文, 1998。
- 單承剛, 以物件導向概念發展之設計程序研究, 國立成功大學工業設計研究所碩士論文, 1996。
- Anon, eM-Plant, ver. 4.6, Tecnomatix Technologies, Ltd., 2000.
- Badiru, A.B., Scheduling of concurrent manufacturing projects, in *Concurrent Engineering*, edited by Parsaei, H.R. and Sullivan, W.G., Chapman & Hall, pp.93-109, 1993.
- Cross, N., *Engineering Design Methods*, John Wiley & Sons, 1995.
- Eppinger, S.D., Whitney, D.E., Smith, R.P., Gebala, D.A., A model-based method for organizing tasks in product development, *Research in Engineering Design*; Vol. 6, No. 1, pp.1-13, 1994.
- Eppinger, S.D., Nukala, M.V. and Whitney, D.E. Generalized models of design iteration using signal flow graphs, *Research in Engineering Design*, No.9, pp.112-123, 1997.
- French, M.J., *Conceptual Design for Engineers*, Design Council, London, 1985.
- Isaksson, O., Keski-Seppälä, S., and Eppinger, S.D., Evaluation of design process alternatives using signal flow graphs, *Journal of Engineering Design*, Vol. 11, No. 3, pp.211-224, 2000.
- Jo, H.H., Parsaei, H.R., and Sullivan, W.G., Principles of concurrent engineering, in *Concurrent Engineering*, edited by Parsaei, H.R. and Sullivan, W.G., Chapman & Hall, pp.3-23, 1993.
- Krishnan, V., Eppinger, S.D., and Whitney, D.E., A model-based framework to overlap product development activities, *Management Science*, Vol. 43, No. 4, pp.437-451, 1997.
- Kuo, B.C., *Automatic Control Systems*, Prentice-Hall, 1982.
- Mason, S.J., Feedback theory - some properties of signal flow graphs, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Vol. 41, No.9, pp.1144-1156, 1953.
- Osborne, S.M., Product development cycle time characterization through modeling of process iteration, Masters Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- Pahl, G., and Beitz, W., *Engineering Design*, The Design Council, London, 1988.
- Pawar, K.S., Unny, M. & Riedel, J.C.K.H, Time to market, *Integrated Manufacturing Systems*, pp. 14-22, 1994.
- Pugh, S., *Total Design*, Addison-Wesley, 1990.
- Smith, R.P., and Eppinger, S.D., Identifying controlling features of engineering design iteration, *Management Science*, Vol. 43, No. 3, pp.276-293, 1997.
- Ullman, D.G., *The Mechanical Design Process*, McGraw-Hill, 1997.
- Wallace K.M., Product development and design research, *Proc. International Conference of Engineering Design*, Tampere, Finland, 1997.

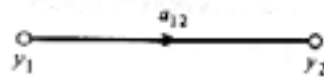
表及圖

表一 第一要徑上設計活動之敏感度分析

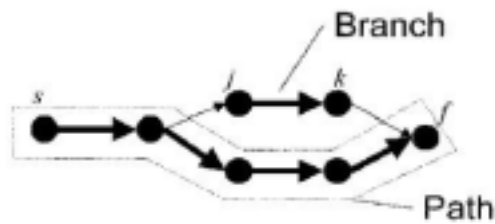
設計活動	計劃圖2	單品圖2	軟體開發	構造檢討會	部品f開發
時間之敏感度	0.19	0.06	0.31	0.01	0.44
成本之敏感度	0.005	0.003	本案例中不計此項成本	0.001	0.01

表二 設計人員薪資與設備成本對於流程平均成本之敏感度

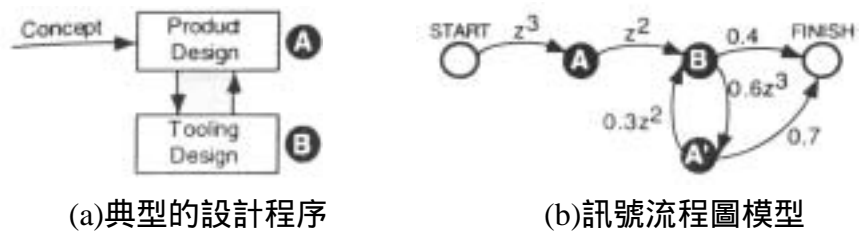
項目	技術部工程師	開發部工程師	PC	CAD軟體
敏感度	0.46	0.07	0.003	0.27



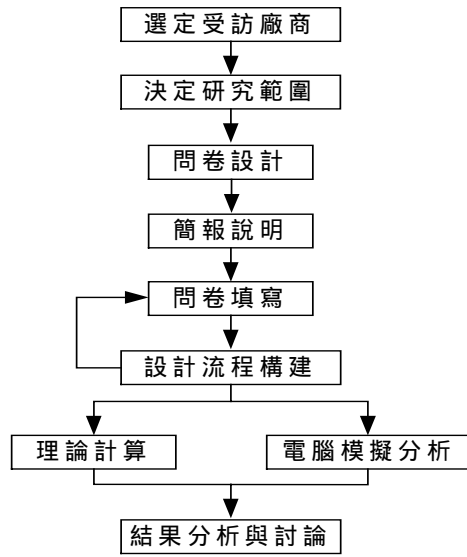
圖一 $y_2 = a_{12}y_1$ 的訊號流程圖



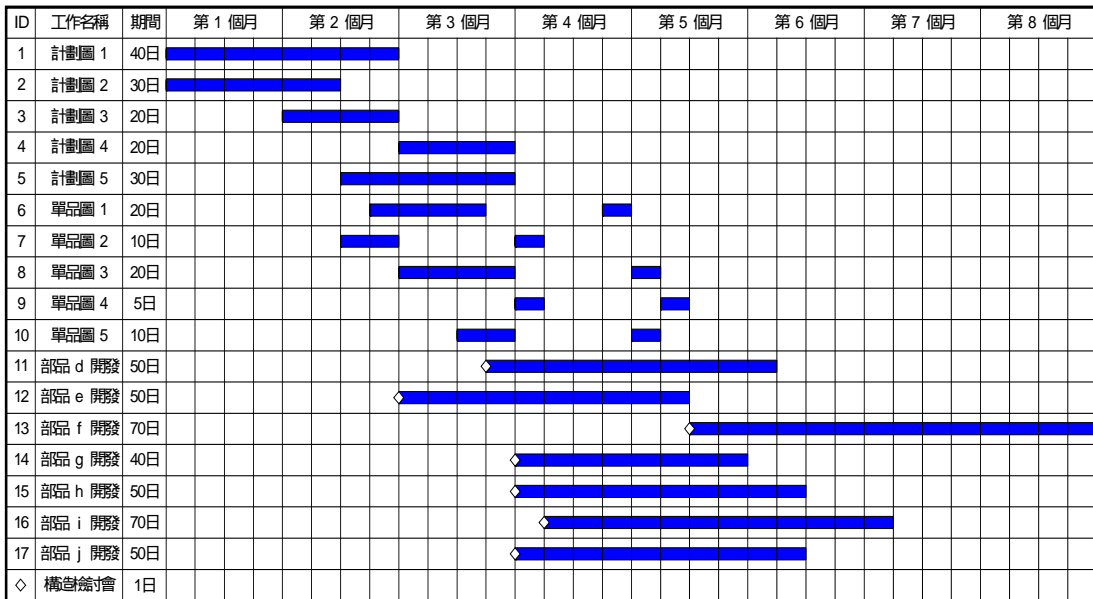
圖二 訊號流程圖用於設計程序之示意圖 [Isaksson, *et al.*, 2000]



圖三 典型的設計程序及其訊號流程圖 [Eppinger, *et al.*, 1997]



圖四 實際案例研究進行步驟



圖五 案例研究之時程甘梯圖

