

可靠度技術手冊

功能分析與設計技術



彭鴻霖 編著

中華民國八十九年十二月十二日

目 錄

1	前言	1
2	系統設計	2
2.1	功能定義	2
2.2	功能水準	3
2.3	功能主要特性	3
2.4	功能分類	5
2.5	功能定義方法	6
2.6	功能需求訂定	8
2.7	功能項目整理	8
2.8	功能方塊圖建立	8
3	參數設計	9
4	容差設計	10
4.1	敏感度分析	11
4.2	最惡狀況分析法	11
4.3	容差分析	12
4.4	蒙地卡羅模擬法	13

功能設計與分析技術

1 前言

基本上，可靠度為產品的重要品質特性之一，也是產品的設計參數之一。在產品壽命週期的整個研發設計過程中，由設計人員努力所建立植入產品中。基於現代產品對可靠度的重視與要求，特別是現代精密的產品，缺乏完善的可靠度設計與分析技術和作業能量，是無法在競爭激烈的市場上佔有一席之地的。為達到此一目標，首先要確定產品的可靠度需求，然後運用各種適切的設計方法與程序，導入各種分析手法，在產品的設計過程中將可靠度需求轉換成各層次的設計特性參數，如此才能事先預防在使用時可能發生的失效現象，達到確保產品可靠度水準的目的，此即所謂「可靠度是設計入產品的」。本章主要就可靠度的觀點，對功能分析與設計等課題加以討論。

基本上，顧客對一個產品的要求是在於滿足某一特定功能需求，產品研發設計基本工作就是執行功能分析與設計。當然整個設計工作，除必須要功能好之外，尚須考量可靠度高和成本低等之要求，不個這些還是要以基本功能資訊為基礎。在進行功能分析與設計時，首先必須對顧客的需要進行分析，瞭解產品所必須具備的功能需求，接著就是設計符合此一需求的系統及所需之構成元件，並且分析建立系統功能與元件性能參數之間的定性關係，這種設計分析技術稱為系統設計(system design)，又稱功能分析(functional analysis)或品級設計。

系統除了基本功能之外，尚有許多特性參數，而這些功能與特性參數當然取決於其構成元件的特性參數。系統特性參數標稱值與元件特性參數標稱值之間的定量關係，一般稱為功能效能函數(functional performance function)。若是要考量所有的元件特性參數，則所建立的函數將是一個非常複雜的型式，不符合工程實務原則。因此，必須進行擇適分析，分析各種元件參數的組合，尋求一組能滿足系統功能需求的最佳基本元件性能參數組合，保證當系統的內部參數(元件參數)和外部參數(輸入信號)環境條件等發生變化時，系統的性能參數變化為最小。這種設計分析技術稱為參數設計(parameter design)。參數設計又稱為品質設計，目前常被採用的方法包括：工程分析、經驗法則、直交表或其他組合方式。

系統組成任何一層次的參數都必然有一定的容差，這些變異必然會對影響系統功能，造成功能漂移現象，當影響程度超過了某一特定的極限值(設計極限)，系統就會失效。為了減少或克服這種失效，除了採用高品質零件減少公差的漂移之外，還要在設計過程下工夫，使參數漂移對系統的影響降至最低，這種設計分析技術稱為容差分析(tolerance design)，又稱為裕度設計或敏感度分析。

系統設計、參數設計及容差設計三者合在一起，就是所謂的堅韌性或強健性設計(robust design)的三階段工作，這些是保證系統可靠度非常重要的工作。功能設計與分析之基本架構如圖 1 所示。

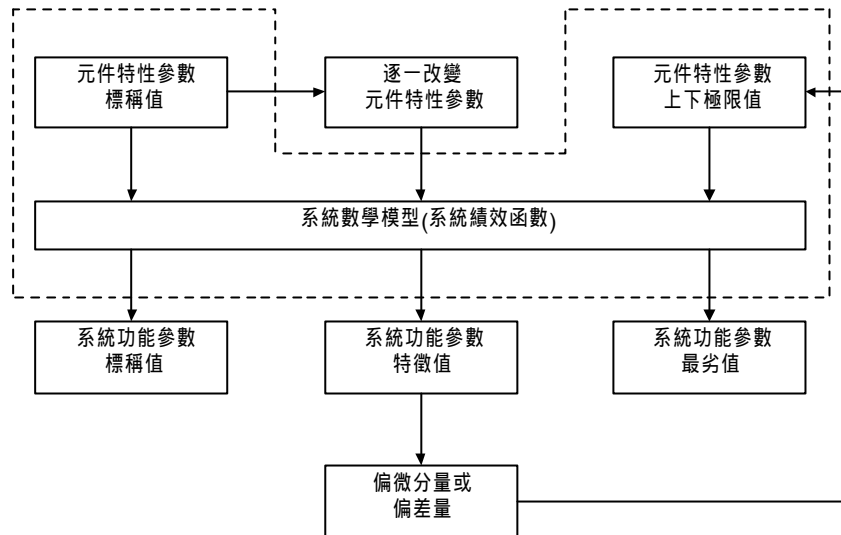


圖 1：功能設計與分析基本架構

2 系統設計

系統設計亦稱功能分析，其任務是確定系統的功能、建立構成元件的架構與定性關係、以及各個元件參數的初始值，使系統各方面的功能均符合顧客的要求。系統設計乃針對產品功能需求所進行的各項分析作業，是可靠度設計與分析的基礎。通過系統設計，可以加深對設計產品的理解，明確功能的類別，從而訂定出產品合理的功能架構。對於新開發產品而言，系統設計就是產品功能需求項目的掌握，雖然此階段的設計對象還沒有具體的實體形態，但可以事先確定它所應該具備的功能項目，根據這些功能要求及各項拘束條件即可開始構思實現這些功能需求所需的手段與方法。系統設計的主要工作包括：功能需求訂定、功能項目整理、及功能方塊圖建立。當然要順利完成這些工作，必須先瞭解功能定義、功能水準、功能主要特性及功能定義方法等基本原理解。

2.1 功能定義

不同對象的功能有不同的含義：對於物品而言，功能就是它的用途或效用；對作業或方法而言，功能就是它們所起的作用或要達到的目的；對人而言，功能就是他應當完成的任務；對於企業而言，功能就是它所提供的產品和創造的利益。總之，功能就是設計對象能夠滿足某種需要的一種屬性。

產品基本設計工作是以功能為設計對象，以功能分析為核心。因此，有必要對功能定義做進一步瞭解。美國國防部對功能定義是：「功能是指任何一種物品預期要達到的特定目的或用途」；日本對功能的定義為：「功能是事物構成因子所具有的任務、功用、作用或用途」，「功能是通過設計或規劃分配給某種設計對象的東西」，「功能是產品以一定的實體形態表現出來的本質特性」；德國對功能的定義為：「一個對象為實現一項業務的抽象作用」。簡而言之，功能就是設計對象可以作功的能力，是滿足某種需求的一種屬性。

此處所討論的功能是指物品而言，人們購買某一物品的目的，僅僅是為了獲得它的功能，此外無別的目的。比如買瓦斯是買它燃燒以後所發出的熱量，而不是購買瓦斯的實體形態或重量；又買電視機是要買它所提供的畫面與聲音，而不是要買它的線路、零組件、外殼等實體部份。只要能夠具備顧客所需要的功能，不同的物品彼此之間是可以相互替換的，這也造成了競爭的壓力。因此，對於顧客的功能需求有必要做進一步的瞭解與掌握，功能分析就是要達到此一目的所需的技術項目。

2.2 功能水準

所謂功能水準是對功能的定性或定量描述，訂定功能水準的主要目的是為了便於功能之間的相互區別與比較。顧客為了獲得某種特定的功能，可以選擇多種設計對象，例如交通工具有腳踏車、機車、汽車、公共汽車、火車、飛機等，它們都具有運輸的功能，但是進行較深入的功能分析時，是否可以說它們具有相同的功能呢？顯然這是不可能的，這幾種交通工具在時間效益上有高低優劣的分別。不僅如此，即使同樣是汽車，不同製造廠所生產者，其功能也可能不盡相同。如何區分設計對象功能的高低優劣，顯然只提需求是不夠的，還需要分析「設計對象」功能滿足其「需求」的能力或程度，亦即設計對象的功能水準。以汽車為例，每一種汽車都具有提供運輸的功能，但加速性能、扭力、耗油量、煞車距離，甚至安全保護，各種功能的水準卻各不相同。所以功能只是一般性的概念，分析具體問題時必須要以功能水準為基礎。分析設計對象的功能水準時，大體可分為必要功能項目、功能等級及功能完成度等三方面，來探討有無過剩或不足情形，確定其提高或降低的方向與程度。

- (1). 功能等級：功能等級即功能水準的級別，如同樣是電視機有黑白、彩色、高畫質電視機的區別，這是屬於三個不同的功能等級。同樣是彩色電視機，螢幕尺寸不同，功能等級亦不相同。其它如工具機、發動機、電腦、家電產品等，都有其區別功能等級的功能項目。
- (2). 必要功能項目：同一類型產品對象的設計中，其基本功能一般是相同的，但可能包含有不同的輔助功能項目，必要功能項目不同，功能等級的高下自可予以區分。
- (3). 功能完成度：功能完成度是指滿足功能項目的特性值，基本上此一特性值與設計對象的性能指標或品質指標是相通的。

2.3 功能主要特性

功能主要具有雙重性、系統性及載體替代性等三方面的特性，分別說明如下：

(1). 雙重性

根據定義，功能是設計對象能夠滿足某種需要的一種屬性，此一定義說明了功能具有客觀與主觀雙重性的本質特性。功能作為一種屬性，也就是設計對象本身固有的性質。這種設計對象本身所固有的性質是客觀存在的，不隨時間、空間及人員的主觀感受而變化；而作為滿足某種需要的一種屬性，又與人員的主觀感受有關，因此有是主觀的，此即為功能具有主觀與客觀的雙重性。由於客觀功能是可以計量的功能，因

此可以用一定的數值來表示功能的高低、大小。主觀功能則是不易計量的功能，不易用一定的數值來表示其高低、大小。主觀功能取決於人們的精神感受和器官感受，含有一定的心理因素，與客觀功能相比，它具有不確定性，但也不能任由主觀隨意認定，仍然可以採用某種方式進行判斷。例如功能重要度即與人們的主觀感受有關，對同一功能的重要度，不同的人可能有不同的看法，自然不會完全相同。而且，隨著時間、地點的不同，人們的主觀感受也可能發生變化，例如在沙漠及在水邊，水的重要度即是很明顯可以體會的。雖然人的主觀感受具有無法明確識別和判斷的模糊特徵，但是功能需求的訂定並不是依據某一個人的意向，而是一個適當群體的判斷，因此採用適當的方法，仍然可以得到某個整體性的識別結果，並具有一定程度的穩定性。

總之，功能與設計對象的客觀物質屬性有關，因設計對象客觀屬性的不同而不同，同時，功能又與顧客的主觀感受有關。具體設計對象功能的高低、大小，以顧客的需要為前題，以顧客得到需求後的滿足程度為目標。因此瞭解功能的雙重性，自然可以掌握定性與定量兩方面的功能需求。

(2). 系統性

功能基本是由相互區別、相互關聯而又相互作用的要素所組成的，是一個有機結合體，具有系統的一般特性。由於功能必須依附於一定的對象、一定的結構，因此，功能的系統性分析應結合具體的對象、具體的結構進行。

功能按等級序列可分為總體功能與局部功能，各局部功能有可按等級序列再予以細分。整體功能不是各局部功能的簡單集合或疊加而成的，而是各局部功能的有機組合。總體功能以各局部功能為基礎，又具有各局部功能均不能呈現的新特性 - 整體性。總體功能與局部功能、各局部功能之間又是相互關聯、相互制約的。總體功能是局部功能的目的，而局部功能又是總體功能的手段。局部功能的目的是為了達成總體功能，而總體功能的目的則是為了滿足顧客的需求。因此，不論是總體功能或是局部功能，都必須要適應市場的變化，根據顧客的要求調整設計對象的功能。

功能系統性的表現方式是設計對象的功能方塊圖，在功能方塊圖中，以目的功能為上位功能，手段功能為下位功能，同一功能既是其下位功能的目的，也是其上位功能的手段，根據此一原則構成功能的等級序列。目的可能只有一個，手段卻可以有多方面的選擇。

(3). 載體替代性

一般常說替代功能，其實指的是功能載體的替代性，顧客對於物品的需求本質是設計對象的功能，而可能有許多載體可以提供此一功能。要達成同一目的的功能，也可能具有多種手段。因此，具有相同功能的載體是可以互相替代的。

目前，功能的載體替代性著眼於資源的替代，特別在能源危機及環境保護的壓力下，重點項目應該放在較低層次的局部結構或零組件探討載體替代，以創新功能的更換替代原有功能。

2.4 功能分類

顧客需要的本質是功能，功能是透過生產者製造的物品向顧客提供的。產品功能往往不是單一的，因此，應具體分析產品的功能組成架構。產品功能大致可按功能重要程度、功能性質特點及使用需求等原則加以分類，如圖 2 所示。各種分類原則說明如下：

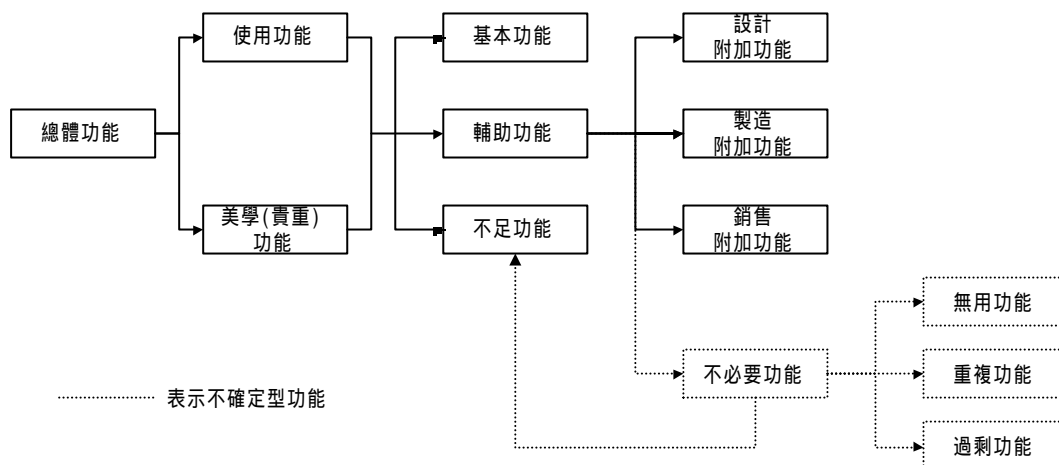


圖 2：產品功能分類

(1). 按功能重要程度分類

物品的功能按其重要程度可分為基本功能和輔助功能兩類。

- A. 基本功能：基本功能是與產品的主要目的直接有關的功能項目，它是產品得以存在並被製造的主要依據，也是顧客購買它的主要原因。一個產品如果不能實現它應當具備的基本功能，則這個產品也就失去了存在的理由。例如：手錶的基本功能是顯示時間，作為手錶這類產品如果不具備顯示時間的功能，則它還能夠稱為手錶嗎？由此可見，基本功能是決定產品類型的功能，不可以隨意地加以改變，基本功能改變了，產品的類型也就變了。產品的基本功能可以只有一項，也可以不只一項。如多功能車床、多功能電腦等，它們的基本功能都在一項以上。
- B. 輔助功能：輔助功能是除了產品的基本功能，出於各種原因附加給產品的功能，其設置目的有的是為了更容易、更方便或更有效地實現基本功能，有的是便於加工、維修，有的則是基於競爭的需要。

以目前的產品開發與工藝水準而言，改進輔助功能是要擁有競爭力相當重要的課題。基本功能是產品生產的目的和顧客購買的原因，除非是過剩的基本功能，否則只能保持和加強，不能輕易地加以削減。相反的，產品的輔助功能是可以隨著設計方案的變更而改變。另外，隨科技的進展、市場的變化與顧客喜好的轉變，基本功能與輔助功能的劃分是相對的，有時輔助功能可能會轉化為產品的基本功能。

(2). 按功能性質特點分類

物品的功能項目，按其性質特點可分為使用功能與美學功能兩類：

- A. 使用功能：使用功能是顧客在工作或應用時，產品所提供的功能項目，也就是與產品用途有直接關聯的功能，一般多表現為產品內在的品質和性能指標等。
- B. 美學功能：美學功能亦稱貴重功能，有時稱之為品位功能。它是在滿足顧客對使用功能要求的前提下，為了吸引顧客、達到產品的理想狀態、提高產品的競爭力，而在外觀、裝飾、藝術風格、色彩、結構形式等美學或貴重要求方面所提供的功能，一般多表現為產品外在的品質和性能指標等。

有些產品只要求使用功能，不講求美學功能，例如礦產資源、能源以及其它無須外觀要求的產品。有些產品則以提供美學或貴重功能為主，例如工藝美術品、裝飾品等。但是，大多數產品則是要求使用功能和美學功能兩者兼備，尤其是與日常生活有密切關聯的民生用品更是如此，例如家電產品、紡織品、住家建築等。另外，美學功能有著較強的時代性和民族性，生產者必須注意市場調查，隨時掌握顧客需求與愛好的轉移。

(3). 按使用需求分類

產品的功能項目，按照使用需求的角度可以分為必要功能、不必要功能和不足功能三類：

- A. 必要功能：所謂必要功能就是為了滿足使用者的需要而必須具備的功能項目，在設計分析時必須保證充分、可靠地的表現在設計的產品中，如此才能充分滿足顧客的要求。
- B. 不必要功能：相對於必要功能則是不必要功能，不必要功能就是顧客沒有要求的功能，也不是為了更能夠表現基本功能等原因所必須附加的功能，而是設計者或生產者由於資訊不足、或是基於主觀猜測或主觀認定而附加給產品的功能，是與滿足顧客需求無關的功能。不必要功能的存在，勢必產生不必要的成本，因此，對產品中的不必要功能應該予以剔除。在不必要功能中，除了完全無用的功能之外，還包括重複功能與過剩功能，重複功能是指同一功能多次實現，即兩各結構都具備同一功能，但只有一個發揮了作用。過剩功能則是指必要功能的功能水準超過了顧客要求的程度。
- C. 不足功能：必要功能的功能水準未達到顧客所需要的程度，稱為不足功能。產品中若發現不足功能，則應設法補足。

2.5 功能定義方法

功能定義亦即功能的命名，通常是由一個動詞與一個名詞所組成的，當然也不是一成不變的，必要時可以加上形容詞作補助說明。總之，功能定義不宜太長。例如：傳動軸的功能是傳遞轉矩、電燈的功能是提供光亮、潤滑劑的功能是減少磨擦、熱水瓶的功能是保持水溫、柱子的功能是支撐重量等等。

功能定義看起來很簡單，但要做到適切是相當困難的，這取決於功能分析人員的知識經驗以及語文造詣。例如傳動軸，它的功能定義是傳遞轉矩，也有人將之定義為承受轉矩，初看之下，前者並無不可，其實是不正確的，因為傳遞說明了把轉矩由一端傳遞到另一端，軸體本身必然有旋轉運動，而承受就不能表達此一特性。就承受轉矩而言，其結果有可能是軸體的一端受到扭轉而另一端固定的結構，如此是支撐軸，根本不是傳動軸。

除上述動詞加名詞組合的功能定義形式外，還有一些實際存在的形式，例如：色澤鮮豔、音色清晰、造型美觀、維修簡便、性能穩定、安全可靠等。對功能定義的這些形式或其它型式的描述，不必太過於拘泥，因為我們的目的是進行功能定義，只要能夠以簡明、準確的文字描述設計對象的功能，就不必硬性規定該採取何種表達方式。

進行功能定義時，大體上有以下幾點要求：

- (1). 動詞要準確而概括：只有準確才不會引起不必要的誤解，只有概括才不會使思路受到限制。例如，要確定機器上一個孔的功能，如果將其功能定義為「鑽孔」，人們直覺的就想到是利用鑽床製作的，如此因為太具體反而容易限制分析的思路；若是定義為「切削孔」，則還可以聯想到以車床、鏜床、拉床等一系列其他的加工機器來製作；如果定義是「加工孔」，則除了鑽、車、鏜、拉等切削機器外，還可聯想到沖床、電弧切割、氧乙炔氣切割、雷射加工等；如果再概括為「形成孔」，則可能包括鑄、鍛等一切可以形成孔的方法與設備。動詞的概括是一種抽象的過程，動詞抽象化主要是為了擴展思路，而不是毫無目的的。一般在功能定義時常用的動詞用語包括：支(保)持、預防、安裝、使接觸、保證、決定、保護、固定、傳遞(導)、改變、裝飾、壓、減少、停止、驅動、控制、退回、定住、發生、供給等。
- (2). 名詞須貼切而且容易加以定量：功能定義的名詞部份，應該儘量採用可以用計量的表達的名詞，這樣有利於後續的功能評價與設計方案的選定工作。例如：桌腳的功能是支承重量，不能定義為支承桌面，因為桌面的大小重量各式各樣，難以估量。在設計桌腳尺寸時，主要是依據它支撐重量的多少，而且在估算成本時也比較容易。當然並不是所有的名詞都是可以計量的，例如美學、貴重功能等的功能定義，所使用的是一些抽象名詞、不可數名詞等，很難計量表達，此時只要表達貼切就可以了。常用的可計量名詞，例如：重量、力、熱量、長度、電流、磁場強度、溫度、純度等；不好計量的名詞，例如：紡織品的手感、飲料的口感等；美學貴重功能的名詞，常用者例如：華麗、典雅、鮮豔、新穎、莊重等。
- (3). 一個功能一個定義：對產品或零組件進行功能定義，首先必須明確表達功能要求，為了對各種功能加以區分和限定，要求每項功能都有自己的定義。有時，一個零件幾項功能，則必須對不同的功能分別予以定義，不能把幾項功能寫在一個定義中，如此容易把不必要的功能或沒有充分利用的功能掩蓋住，而造成功能過剩。例如金屬鍍鉻加工有兩種功能，一是防止金屬銹蝕，另一是美化外觀。如果我們我要求的功能僅僅是防銹，那麼就不一定非鍍鉻不可，塗上一層防銹漆也能滿足此一需求。同樣，當若干零件實現同一功能時，就有可能存在過剩功能或重複功能。經由功能定義的過程，可以逐步瞭解及掌握設計中存在的一些問題，當問題能夠解釋清楚，問題就解決一半了。

2.6 功能需求訂定

當確定設計對象之後，首先就要明確地訂定設計產品所應具備的功能項目和所應達到的功能水準，亦即各種技術性能指標，以便分辨各類功能的情況，例如那些功能過剩、那些功能不足，那些是必要的、那些是不必要等。當然，這不是一件容易的事，往往很難一下得出結論，而需要在不斷的深入討論過程中逐步得到確定。正因為鑑別功能的情況比較困難，更顯現出功能需求訂定的重要性。

訂定功能需求，首先根據顧客需要和可能提供兩方面進行考量，既要考慮顧客的要求，又要考慮企業本身的能力、條件與經營方針。

從顧客方面考慮的包括使用目的和使用環境兩項，為完成使用條件分析後所進行的後續分析工作。使用目的是功能分析的工作內容，主要在確定功能類別、功能水準和其它條件。例如顧客要求提供的是一種光源，則它是用來照明還是指示？是裝飾環境還是作為某種信號？目的不同，功能要求也不同。此外，對於外觀、價格、交貨期等技術以外的條件也要加以訂定。

從企業方面而言，主要考慮是否符合企業的經營方針和技術方針。此外還應考慮設計能力、試驗條件、供應條件、產品價位和營利目標等拘束條件，以及技藝水準、材料科學等發展的限制條件。

2.7 功能項目整理

功能項目整理就是把已經完成定義的功能項目，按照它們之間的邏輯關係進行有系統的整理。功能項目整理的目的大體有以下幾個方面：(1).確定功能間的相互關係；(2).發現不必要功能；(3).檢查功能定義的正確性；(4).方便劃分功能區域；(5).確定改善部位。

功能項目整理的方法一般稱之為功能分析系統技術，依照目的與手段的關係，尋找實現產品總體功能的直接手段功能，然後按照分系統、單機、模組、組件，一層一層找下去。另外，也可以反過來進行，即以手段尋找目的，一層一層往上推。前者稱為正向工程手法，後者稱為逆向工程手法，當然兩者的順序是可以交替、互補的進行的。

目的功能又叫上位功能，手段功能又叫下位功能，但目的與手段、上位與下位又是相對的，一個功能對其上游功能來說是手段、是下位，而對其下游功能而言，則是目的、上位。若有兩個以上的功能處於同等地位，都是為了實現同一目的功能，則它們的關係即為相互獨立的並聯關係，稱為同位功能。滿足一個產品的總體功能，往往需要同時具備幾個手段功能，而每個手段功能又自成系統，稱為功能區域或功能分系統。

2.8 功能方塊圖建立

功能項目整理之後就可開始建立功能項目的系統架構圖，此一架構圖稱為功能方塊圖(functional block diagram)。根據功能方塊圖可以直觀地看出分析對象所具備的功能類

別、各類功能之間的關係和位置、以及原來的設計思路。這對後續的產品整體功能分析、改善目標的選定、改善範圍的確定是很有幫助的。

在實際應用上，功能方塊圖可以很詳細也可以很簡略，根據產品設計的需要而定。同一個產品，若從不同的角度分析，則可以有不同的功能方塊圖。產品的使用目的不同，分析的內容自然也不一樣。因此，建立功能方塊圖時，必須根據實體情況確定目的，使之能說明一定的問題。功能方塊圖的用途包括：(1).執行功能設計，建立顧客需要的功能系統；(2).表達設計分析時所使用的邏輯與原理；(3).分析建立局部手段功能。

3 參數設計

一個系統的存在除了基本功能參數之外，還有許多特性參數。系統是由許多元件所構成，這些元件本身亦各有其功能參數與特性參數。無論是系統功能與特性參數，或是元件的功能與特性參數，都各有其標稱值。因此，系統的功能參數與特性參數之標稱值，當然取決於其構成元件的功能參數與特性參數之標稱值。系統功能參數與系統設計時所選用各個元件的特性參數之間的關係，一般稱為功能效能函數(functional performance function)。功能分析與設計之對象當然是以系統功能參數為主，不同的系統特性參數一般也會反應在系統功能參數上。

若系統的功能參數為 y (可以是功率、電壓、電流、力或傳遞函數)，元件特性參數值 x_1, x_2, \dots, x_n 的函數，一般表示如下：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

一般又稱 y 為系統的響應或系統的效能函數。

參數設計工作的目的主要在決定系統功能參數與重要的構成元件特性參數之間的定量關係，以及決定系統功能參數與元件特性參數之標稱值，亦稱品級設計。由系統功能分析所建立的功能方塊圖可知，系統功能取決於元件的功能，要使系統功能指標達到規定的要求，系統中各元件的功能參數往往有多種搭配方式。但是，若要考量每一個元件的所有特性參數，則所建立的系統功能效能函數將是一個非常複雜型式，不符合工程實務原則。功能參數標稱值設計的任務就是要在這許多種參數搭配方式中找出一組最合理的搭配組合，使系統中各項功能參數不僅在標準狀態之下能滿足指標要求，而且在各種條件變化之下，如各元件參數變化、輸入負載或輸出訊號等變化，對這些功能參數影響最小，這種最佳搭配的尋找，通常必須掌握以下資訊：

- (1). 了解各元件參數的分佈規律，以及當它們受到現場使用中可能出現的各種應力及時間的組合情況下，這些參數的變化規律。
- (2). 了解系統功能參數與各元件之間的關係，如果用 Y 這個 m 維向量來表示系統的各種功能參數；用 X 這個 n 維向量表示在系統種與各功能參數有關的 n 個組件參數，則它們之間的關係為 $Y=f(X)$ 組成一個多維空間曲面。

參數設計工作的任務就是：

- (1). 尋找該曲面的極值點，即性能最佳點；
- (2). 尋找有一定高度而斜率又小的平坦區，即具有好功能的穩定區域。

如果裝備性能與 13 種元件參數有關，每種元件參數有可分為 3 個水準，則它們之間的搭配方案就有 $3^{13} = 1594323$ 種。以電晶體為例，在電腦輔助設計程序裡，一個電晶體就要用 18 個參數來描述其功能。所以要為複雜的裝備選擇諸元件參數的最佳搭配方案，若不使用適切的方法是很難輕易完成的。

電腦的使用已為此提供了方便，尋找多維向量 $Y=f(X)$ 的極值點和斜率極小值區的方法已有多種，如隨機佈點蒐索法、斜率蒐索法、正交試驗法等，還有許多現成的專供電路設計用的電腦輔助設計程序的套裝軟體，對此讀者可閱讀有關的專用資料。近年來在國內相當風行的田口 (Taguchi) 品質工程，即為參數設計的主要技術。根據豐田 (Toyota) 汽車公司的統計，在該公司的某一車型提高產品設計可靠度所使用的方法中，參數設計的效能佔 50%，缺陷樹分析 (FTA) 佔 35%，而失效模式、效應與關鍵性分析 (FMEA) 則佔其餘之 15%，由此可見參數設計在可靠度設計之重要地位。

4 容差設計

當完成系統設計之後，可以決定系統功能與元件特性之間關係，經過參數設計之後，則決定所決定此一關係的最適組合，此一函數為容差設計工作的基礎。系統功能不穩定或發生漂移、退化等現象，主要原因大致有以下三種：第一是裝備構成元件的特性參數一般是以標稱值 (nominal) 表示的，而實際上卻存在著容差，如一電阻標稱值為 1000Ω ，精度為 $\pm 10\%$ 的電阻器，其實際電阻值在 $990 \sim 1100$ 的範圍之間。其次是環境條件效應，例如溫度的變化會元件特性參數發生漂移現象。三是退化效應，隨著時間的積累，元件特性參數會發生變化。一般而言，元件固有容差是固定不變的，環境效應所產生的偏差在許多情況下是可逆的，亦即隨著條件而改變的參數，當環境條件變溫和之後，參數可能會恢復到原來的數值，而退化效應所產生的偏差通常是不可逆的。

由於元件特性參數的固有容差，加上環境漂移及時間劣化的效應，元件的特性參數實際是變動的，加上各個層次元件特性參數變異的累積，即使每一個零件的特性都在規格內，但是在電路、模組、單機、或裝備的特性，都可能會超出規格而成為不可接受的數值，使裝備無法使用。

在這種情形下，採用一般的失效隔離方法是無法確定究竟是元件失效或輸入資料有問題的。為排除這種狀況的存在，應該執行元件與裝備之容差匹配效應，檢查在元件連接介面、輸入與輸出位置，容差與參數變化所造成的效應。這種分析技術已經證明是一種符合成本效益的方法，可在進入生產前的設計階段能夠及早採取適切的措施加以改正，有效的發現裝備的功能與可靠度問題，並將之消除。

容差設計除了考慮元件容差與系統容差之間的關係外，同時還考慮製造產生的固有變異、環境的漂移效應、以及時間的劣化現象等預期會造成元件特性值變異的情形，為使這些變異的影響最小必須進行各種特性參數變異的方法，常用者有敏感度分析 (sensitivity analysis)、最惡狀況分析 (worst case analysis)、容差組合效應分析等。

4.1 敏感度分析

敏感度(sensitivity)又稱為靈敏度，它是說明元件(或分系統)特性參數變化對系統功能參數的影響程度的一個係數。敏感度在容差設計扮演著極為重要的角色，其原理說明如下。若系統功能效能函數 y 對 x_i 的偏微分 $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ 存在，根據多變量函數全微分的近似公式，將此函數在其標稱值處進行泰勒級數展開，取其第一項、略去高位階項，即可得到功能參數的變化量 Δy 與元件特性參數變化量 Δx_i 之間的線性關係式為：

$$\Delta y \approx \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_0 \Delta x_i$$

式中下標“0”表示標稱值。定義第 i 個元件特性參數 x_i 對 y 的敏感度 S_i 為：

$$S_i = \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_0$$

為應用方便起見，有時以 y 和 x_i 的常態化差異量來定義敏感度，亦即：

$$S_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln x_i}$$

根據上式可分別求得系統功能參數變異量 Δy 的正負界限值為

。若是將上式近似等號的雙方除以 y ，則可得到：

$$\frac{\Delta y}{y} \approx \sum_{i=1}^n S_{x_i} \frac{\Delta x_i}{x_i}$$

裝備的功能受到影響的敏感度隨不同部位的元件各有差別。因此對元件精度的合理安排，即在敏感度小的部位配置精度低的元件(即容差可以大)；在敏感度大的部位配置精度高的元件(即容差要小)，使得系統功能的穩定性滿足要求，而且又使裝備的成本最低，這就是容差設計的任務，這一任務通常可用電腦輔助網路分析來完成。

4.2 最惡狀況分析法

最惡狀況分析方法，乃是利用已知元件特性參數的變化極限來預測系統性能參數的變化是否超過了允許範圍。假設所有的元件都取最惡劣值，分析計算系統的響應，如果預測的系統性能參數變化都在規定的範圍時，則可以確信該系統具有相當高的穩定性。如果預測值超出了允許的變化範圍，則系統就隨時有可能發生漂移失效。由於最惡狀況分析法一種非統計方法，因此並不能確定這種失效的機率。

不過所謂的最惡狀況，有時候並不是簡單地取最大、最小值，而是使系統出現最惡劣狀況的元件極限取值。此種方法要求對元件取值有恰當的組合，才能在元件取最大誤差時系統出現最惡劣值，對於簡單的系統可以很方便地求得解答，但是當元件很多時，利用人工計算就很難求得解答，必須利用電腦技術求解，不過這種應用程式無法編寫成通用軟體，因此，在使用上頗費功夫，而且這種所有元件都取最大誤差的作法並不符合實際。實用價值逐漸減退。

4.3 容差分析

若已知某一物理量之機率分佈特性時，可求得在某一特定可靠度需求下該物理量之上限或下限(單邊規格)，或上下限規格值(雙邊規格)。

例如某一物理量 X 為常態分佈 $X \sim N(\mu_X, \sigma_X^2)$ ，此項功能之可靠度需求為 R ，且規格要求為不得小於 L ，此一下限規格可由下式計算得：

$$L = \mu_X - z_{1-R} \sigma_X$$

式中 z_{1-R} 為標準常態變數， $z_{1-R} = \Phi^{-1}(1-R)$ ，可由一般常態分佈表查得。

表 1: 標準常態分佈表

R	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995	0.999	0.9995	0.9999	0.99995
z_R	1.2816	1.6449	1.9600	2.3263	2.5759	3.0902	3.2905	3.7195	3.8906

若物理量要求不得大於 U ，此上限規格之計算式為：

$$U = \mu_X + z_R \sigma_X$$

而雙邊規格之上下限分別為：

$$U = \mu_X + z \left(\frac{1+R}{2} \right) \sigma_X$$

$$L = \mu_X - z \left(\frac{1+R}{2} \right) \sigma_X$$

一般物品的功能是由其構成數個功能分項所構成的，這些功能分項可能是按加法原則所組合而成，有的則是按乘法原則，依其構成特性而定。不論使用何種組合方式，容差分析的方法也因而所不同。根據統計理論，兩個隨機變數(X_1 與 X_2)相加(或相減)之和(或差)也是隨機變數，此一新變數(Y)的平均值為兩個原來變數的平均值的和(或差)，而不論兩者為相加或相減，新變數的變異數為原來兩個隨機變數的變異數的和，亦即：

$$\mu_Y = \mu_{X_1} \pm \mu_{X_2}$$

$$\sigma_Y^2 = \sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2$$

另外常態機率理論也證明若兩個變數均為常態分佈，則其和(或差)亦為常態分佈。一般物理量大都可假設其為常態分佈亦即：

$$Y = X_1 + X_2$$

若物理量的機率分佈特性為未知，但已知其為或可近似假設為常態分佈，則須先選取 n 個具代表性的樣本，經測試得到觀測值 $x_i, i=1,2,\dots,n$ ，求得樣本平均值 \bar{x} 與樣本標準差 s ，然後利用中值定理或大數定理，先求得群體平均值的推定值 $\hat{\mu}$ ：

$$\hat{\mu} = \bar{x} \pm t_{\alpha/2}(n) \frac{s}{\sqrt{n}}$$

其中 n 為樣本數， α 為抽樣誤差的顯著水準， $t_{\alpha/2}(n)$ 為自由度為 n 、顯著水準 α 的 t 分佈。將上式代入原容差式中，可得：

$$\begin{aligned} (L, U) &= \bar{x} \pm \left(\frac{t_{\alpha/2}(n)}{\sqrt{n}} + z_R \right) s \\ &= \bar{x} \pm k(R, n, \alpha) s \end{aligned}$$

上式中之 $k(R, n, \alpha)$ 又稱為容差因子或公差因子(tolerance factor)，可以查表或由上述式求得。

4.4 蒙地卡羅模擬法

蒙地卡羅模擬法是最惡狀況分析法的改進方法，根據每個元件參數已知或假設的機率分佈，利用隨機變數產生器(random number generator)，在參數容差範圍內隨機產生一組元件互相獨立的參數值，將這組元件參數值代入系統效能函數即可計算得到系統性能參數，按此隨機抽樣原則重複進行模擬抽取元件參數與計算工作，直到達一定樣本數為止，根據計算結果的機率分佈情形可以瞭解系統性能參數的變異範圍，並且可以獲得元件參數如何影響系統性能參數的資訊。利用此一方法計算出系統的影響比較實際，但是為了要使模擬結果擁有一定信賴水準，必須要有足夠多的模擬樣本數才能達到，因此這樣繁瑣的工作一定要使用電腦來協助模擬分析的進行。