

可靠度技術手冊

動力環境分析與設計技術



彭鴻霖 編著

中華民國八十九年十二月十二日

動力環境分析與設計技術

目 錄

| | | |
|-------|-----------------|---|
| 1 | 前言 | 1 |
| 2 | 動力環境效應 | 2 |
| 2.1 | 振動環境效應 | 2 |
| 2.2 | 衝擊環境效應 | 2 |
| 3 | 動力環境防制 | 2 |
| 3.1 | 材料選用與結構設計 | 3 |
| 3.2 | 裝備組件之安裝 | 3 |
| 1.3 | 振動環境控制 | 5 |
| 1.3.1 | 阻振 | 6 |
| 1.3.2 | 避振 | 6 |
| 1.3.3 | 隔振 | 6 |
| 1.4 | 運輸衝擊環境設計 | 6 |

動力環境分析與設計技術

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」。

在系統與裝備的生命週期中，系統硬品會遭遇到各種環境條件，一但系統中存在著較弱的部位，這些環境因素隨時都有可能侵襲和損傷裝備及其零組件，而影響系統的可靠度。因此，設計及可靠度工程人員必須充分瞭解設計品可能遭遇的環境因子及其效應，在設計時細心的選擇與應用可以忍受或抵抗這些惡劣環境的材料與設計、或採用可以改變或控制環境的方法，使之在可接受的範圍內，以減低或消除這些惡劣環境所造成的效應，如此即可提高物品的可靠度。

設計人員除必須掌握明顯的環境項目之效應外，對於所選擇的設計與材料在裝備內部可能產生的微環境(Micro-environments)亦不容忽視，例如：襯墊和密封材料在高溫及低壓使用狀況下會析釋出有腐蝕性或退化作用的揮發物；鐵弗龍(Teflon)會析釋出氟，PVC 塑膠材料會析釋出氯；長久下來存在系統與裝備內部，將侵蝕材料。這些內部微環境不經意的設計入物品中，極可能會嚴重影響系統與裝備的可靠度。

為完全掌握可靠度導向的物品，在設計之初就必須考量裝備所必須具備的環境強度，不論是設計本身能夠忍受、或是採用特定的設計特徵，都可決定裝備在操作時抵抗環境所施加的惡劣應力的能力。確定及詳細說明裝備操作時之環境項目為決定必備環境強度的第一個步驟，因此必須依據系統與裝備的生命週期定義進行仔細的環境分析。其次是決定材料與零件暴露在這些環境應力時的性能，一但發現性能不足或在邊際範圍時，則必須採用減額定、複聯、保護設計、或選擇具有較高環境抵抗能力的材料與零件等改正的措施，以滿足裝備的可靠度需求。

雖然顧客對產品所要求的只是功能，但是要提供此一功能勢必要實體物品做為功能的載體。功能載體是產品的有形部份，也就是顧客購買實際所得到的。由於顧客使用產品時，必然是在一定地理位置及載體上使用，因此有必要瞭解這些使用條件與載體環境條件對物品所造成的各種應力。

除了透過各種分析方法瞭解動力環境負載條件所產生的內部應力之後，接著的設計工作就是針對這些條件應力尋求適切的對策方法，常用者不外乎「莊敬自強」與「處變不驚」兩種基本原則。前者乃是使設計品具備足夠的強度，以便承受這些應力；後者則是提供適當的防護措施，以減低應力的傷害程度。美軍手冊 MIL-HDBK-338「電子裝備可靠度設計手冊」，詳細地論述了許多環境應力的預測與防制設計方法與作業程序，反映了 80 年代的環境設計技術水準。

本章主要是就可靠度的觀點，探討動力環境(振動、衝擊)所誘發之應力分析方法、此類應力對於一般物品可能造成的效應、以及其相對之防護與防制方法等課題。

2 動力環境效應

2.1 振動環境效應

振動環境對物品所產生之效應計有：

- (1). 致使導線磨損；
- (2). 導致固定件鬆動，螺絲鬆脫；
- (3). 產生電性間歇性接觸不良；
- (4). 導致元件接觸短路；
- (5). 封合體產生變形；
- (6). 致使組件破損；
- (7). 導致光學儀器校準失真；
- (8). 使硬品壓碎與破裂；
- (9). 導致電子件及機械件鬆脫；
- (10). 產生過大之噪音與電器雜訊。

2.2 衝擊環境效應

衝擊環境對物品所產生之效應計有：

- (1). 鄰近組件因衝擊而互相干擾；
- (2). 改變電介質強度、電磁特性、破壞絕緣；
- (3). 結構過度負載而生永久變形；
- (4). 加速材料疲勞破壞。

3 動力環境防制

在裝備壽命週期中使用階段不可避免的會遭遇到一些振動或衝擊環境，這些環境是裝備承受機械應力的主要來源。動態機械應力防制技術的效果，主要是取決於這些方法是否能對機械損壞應力提供保護的能力，保護物品以免在遭受嚴厲的振動與衝擊環境應力時造成損壞。此類動態環境應力所造成裝備機械性損壞的防制，一般採用的方法包括適切的管制動力環境來源，選用合適的材料、適當的結構設計，正確的安裝方法，或加裝隔振或緩衝裝置以隔離這些環境。

在大部份的例子中，除了疲勞效應以外，振動與衝擊環境的防制需求與可靠度精進需求之間的關係並不如溫度保護那麼顯著。在疲勞的作用下，保護的水準對於可靠度的影響很顯著，事實上，疲勞是裝備正常壽命中的主要失效機構。

當針對振動與衝擊環境進行防制設計時，必須注意下述基本考慮事項：

- (1). 組件與支撐結構之間的相對位置(亦即是在支撐結構的邊緣、角落或者中心位置)。

- (2). 零組件相對於預期衝擊和振動力量作用方向的方位。
- (3). 零組件安裝的方法。

3.1 材料選用與結構設計

對於振動和衝擊的保護方法，主要是根據這些環境對於裝備結構本身或其支撐結構所產生的變形量和機械應力分析資料而決定。一般是決定裝備的自然頻率和評估衝擊與振動環境在組件和材料內部所產生的機械應力，假如所產生的機械應力遠低於所選用材料允許的安全工作應力，並不需要直接保護的方法。另一方面，假如應力超過安全水準，則必須採用一些改正的方法，例如：加強、減低慣性矩與彎曲矩效應、或者更進一步的加上支撐構件。假如這些方法不能將應力減低至安全水準以下，更進一步減低應力的可能方法為採用減震裝置。

除了結構負載應力之外，另外有一項常被忽視的因素，亦即兩個組件之間或者是兩個互相隔離的分系統之間的振動位移量，假如設計人員對於最大變形量或振動量沒有作適當的評估的話，常會因而發生意想不到的碰撞情形。

疲勞這種失效模式是金屬受到低於拉強度的循環應力負載而斷裂的趨勢，為衝擊和振動環境造成裝備可靠度問題的主要原因，需要特別關心的範圍包括：低循環疲勞、噪音疲勞、以及複合應力疲勞。多軸向疲勞與其他環境因子，例如：溫度極值、溫度變動和腐蝕等之間的相互作用，必須小心作研究，組件的應力強度分析與參數變異分析等技術對於這些效應特別適合，破壞性試驗方法對於這些範圍也相當有用，對於單發功能件，可以用一些很有效用的非破壞性評估(non-destructive evaluation, NDE)方法，例如：X 光、中子輻射線、染色液滲透等可用於確定發生裂痕的部位。事實上，發展一個簡單又可靠的設計，比為了可靠度而重新設計，並且經過複雜的修正然後再作次序試驗的情形要高明多了。

3.2 裝備組件之安裝

除了選用合適的材料與結構設計形態外，管制裝備所遭受到的衝擊和振動值也是振動與衝擊設計的重點工作之一。不過，對有些案例而言，即使是對衝擊和振動可能造成物品的損壞作最合適的絕緣和隔離，反複的施力也會使裝置的扣件鬆動，明顯地，一但當裝置的扣件鬆動到造成額外的運動時，裝置會承受增加的外力，因而可能破壞而失效。許多特殊設計的自鎖扣件現在大多商品化了，同時扣件製造廠商在選擇最佳的扣件方法時也樂於提供一些有用的諮詢服務。

電子裝備所用的機械扣件有許多不同的型式，包括螺絲、螺帽、夾子等。在現場失效的案例中，有很大的比例是歸因於扣件。雖然扣件大量使用於電子裝備已經有多年的歷史，大部份的應用都是基於靜態安裝的考量。機械扣件結合技術的特色為安裝容易、價格大眾化，但是在嚴厲的衝擊和振動環境下則常無法達到扣緊的目的，原因之一乃是因為扣件只是一件很小物品，在應用時常自然而然的以一般常識來選擇，而忽視了扣件的主要強度，在選用機械螺釘時特別是如此，例如選用較大型螺釘者往往是與汽車或飛機工業有關者，因為這些工業很少使用極小型螺釘。

由於機械扣件在整個電子裝備可靠度中扮演著相當重要的角色，在選用這些扣件時應該特別注意考量下列事項：

- (1). 根據環境、強度、維修、及成本等因素，擇優選用合適的扣件類型，例如螺釘、鉚釘等；
- (2). 根據結構的動態負載與幾何形狀，選擇正確的扣件尺寸與位置；
- (3). 使用螺絲與螺帽時，選擇正確的鎖緊裝置；
- (4). 選擇正確的安裝技術。

大部份的電子裝備製造者是基於生產形態的特色選用螺絲和鉚釘，當選用螺釘時，通常是根據公差需求與組合容易的原則選擇螺釘的尺寸及鎖緊裝置；而在安裝時，根據生產人員的自我判斷決定扣件安裝的正確與否。這些情形的結果造成使用錯誤的扣件，使用錯誤的尺寸，使用錯誤的鎖緊墊圈，以及使用錯誤的安裝扭力。

經驗顯示，一般說來，冷抽桿膨脹鉚釘是相當不錯的扣件，在電子裝備中應該盡量使用這種扣件。同時也發現，選用螺釘時，應該使用比依照習慣考量來得大的尺寸，並且用更好的材料製造。許多常用鎖緊裝置的使用結果都不是讓人很滿意，有些還是許多嚴重問題的根源。另外，經驗也告訴我們，根據技術人員的判斷來鎖緊機製螺釘通常都是錯誤的。

電子裝備中有許多失效是因為螺桿變鬆所造成的結果，試想一件裝有大型變壓器的敏感電子裝備的底座變鬆，當振動時的震盪晃動會產生怎樣的後果是可想而知的。

為了研究螺桿與螺帽鬆動現象，雖然已經利用高速影片和應變規作了許多的調查，但是對於造成這種鬆動現象的機構仍然不是很清楚。然而，明顯的在動態負載的作用下螺桿會輕微的伸長，因而螺桿接觸面積的界面磨擦力突然且顯著的下降。當增加些微的時間，因為螺絲或螺帽有回復至其原有形狀的趨勢，這些微小的幾何變形成為使螺絲或螺帽變鬆的驅動力。

下述一些建議事項可以採用，以便改進電子裝備中所使用扣件的品質：

- (1). 所有螺絲扣件應該使用鋼材，至少應該具備 SAE 1010 的特性。
- (2). 螺絲應該使用可以設定需求數值的扭力扳手鎖緊。
- (3). 螺絲的鎖緊扭力應該為扭斷螺絲頭所需扭力的 60 - 80%。各種典型的鋼螺絲頭的扭斷扭力如表 5 所示。
- (4). 螺絲頭應該允許板手正向防滑的設計，同時能夠抵抗鎖緊扭力，最好使用內六角機製螺釘。同時儘量避免使用一字或十字槽螺釘頭，以免使用螺絲起子拆裝時切削釘頭而掉削，在裝備中到處飄移，容易造成電子部份短路問題。
- (5). 在所有穿孔的應用場合，應該使用自鎖螺帽取代自鎖墊圈。
- (6). 應該儘量避免使用盲推拔孔的設計，可能的話，在螺釘頭底下墊以自鎖墊圈，以防在振動環境下鬆動，鎖緊扭力應該適度增加，以抵抗自鎖裝置的磨擦力距。
- (7). 裝備的鎖緊螺釘應該均勻分佈，以免一個扣件失效而造成裝備鬆動或功能異常。即使是很小的裝置，至少也要使用兩個鎖緊扣件。

表 5: 螺絲尺寸與鎖緊扭力關係

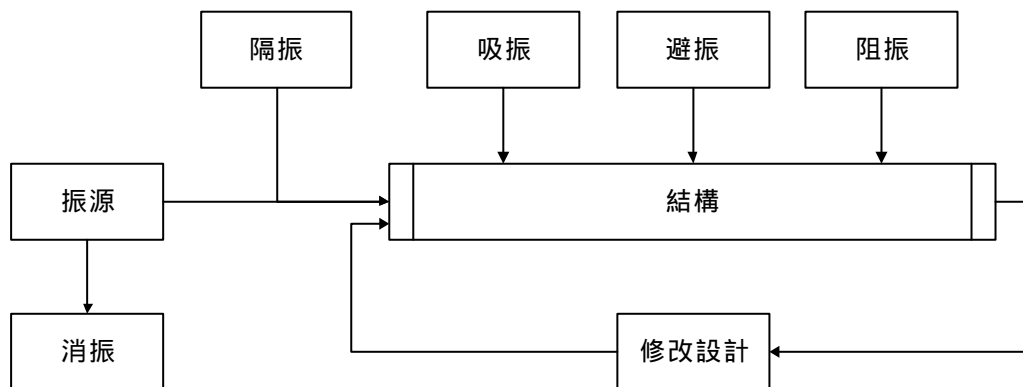
| 螺絲尺寸 | 扭力(in-lb) | 螺絲尺寸 | 扭力(in-lb) |
|---------|-----------|----------|-----------|
| 2 - 64 | 3 - 3.5 | 12 - 24 | 45 - 56 |
| 4 - 40 | 5 - 6.5 | 12 - 28 | 50 - 64 |
| 6 - 32 | 10 - 12 | 1/4 - 20 | 65 - 80 |
| 8 - 32 | 22 - 24 | 1/4 - 28 | 85 - 100 |
| 10 - 24 | 22 - 27 | 3/8 - 16 | 250 - 320 |
| 10 - 32 | 34 - 42 | 3/8 - 24 | 330 - 415 |

3.3 振動環境控制

在初看之下，有些結構件可能具有足夠的耐性承受預期的振動或衝擊力量，而不需要加裝額外的隔離器或絕緣器。然而，這些表面觀察結果可能會造成誤導，因為零組件安裝的姿態、與其他組件的相對位置、在系統中的位置，以及零組件本身的扣件或其他零組件的扣件鬆動的可能性，都會顯著的改變所承受的力量，甚而有的零組件會因為其他組件變鬆而被碰撞、或改變作用在這些組件上力量，因而造成失效。

在一短時間或長時間振動環境中，機械結構功能正常與否，端視使用材料的能力而定。減少機械結構在此振動環境中所受的影響稱之為振動控制(vibration control)，主要是控制機械系統中的結構特性，例如：慣性、剛性、及阻尼性質，使振動的能量傳遞性減少或是減少振動傳遞至材料之效應。

基本上，振動控制有消振、隔振、吸振、避振、阻振與修改設計等五種方式，典型的動力環境防制措施如圖 1 所示。其中吸振、減振與阻振是保護安裝在結構上的裝備或元件的方法，消振與隔振係就系統整體觀點考量，而修改結構設計則有可能是從結構系統或是從安裝在結構上的元件的結構設計觀點來考量。



HLP:vibctrl.vsd, 1997/11/10

圖 1: 典型的動力環境防制措施

一般而言，有許多技術可以消除或減弱振動，但最明顯的、也是最有效的一種方法為從根源消除或減弱振動的環境，換言之，就是消除或減弱振源。這種控制方法有時比改變材料以增強結構強度，或者提高結構耐振性還來得容易。

但是，如果不能在使用的環境中消除或減低振源，則必須減低振動環境對於結構的影響，而阻尼器是一項可以使振動振幅減低的裝置，其主要原因為，由於振動能量

隨著時間或距離的磨擦損失而造成系統能量消散所引起的。避振利用振動絕緣(isolation)的原理，所用的裝置簡稱避振器；阻振則利用阻尼吸收(asorption)振動的原理，因此所用的裝置簡稱阻振器。一般而言，避振器適合於控制簡諧振動、週期性振動及頻寬較大的隨機振動；而阻振器的效應是用於控制單一頻率的振動。

3.3.1 阻振

阻振器是一種用以消耗振動能量的彈性支撐裝置，採用阻尼減振方法以達到控制振動位準的目的。在應用時，阻振器是安裝在零組件與處於振動狀態的基礎之間，零組件的質量由阻振器所支撐著，阻振器一般包括具有剛性及阻尼性質的兩種基本元件。由上述之說明可知，在一般電子裝備的振動控制應用上，還是以振動絕緣器或阻振器為主。

3.3.2 避振

避振器安裝在基礎與零組件之間，可改變需要減振的結構或系統的振動狀態，因而防止零組件所產生的振動傳遞到靜止的基礎上，例如：防止飛機上的發動機產生的振動傳到其他結構上，在發動機安裝底座就要安裝避振器。

3.3.3 隔振

除了隔離需要保護的組件外，也可以在產生振動與衝擊的源頭使用隔離系統，同時考慮使用這兩種方式當然會得到最佳的效果。阻尼裝置可以用來減低振盪峰值，而當含有不穩定的形態時，則可採用特殊的穩定器。典型的減震器例子包括使用黏性遲滯、磨擦和空氣阻尼等原理。常見的振動隔離器所用的元件與避震器所用者一樣，例如：橡膠、螺旋彈簧、金屬紡織布等，衝擊隔離器與振動隔離器最大的區別在於衝擊需要較強的彈簧和較高的自然頻率避震元件，至於隔離安裝系統有些是下裝式，有些是上下式，有些則是傾斜隔離式。

3.4 運輸衝擊環境設計

一般裝備的運輸衝擊來源是不可能消除的，欲克服此一問題有兩種方法：(1).使用適當的包裝與裝載方法以隔離衝擊力；(2).設計裝備使其有能力承受衝擊環境。由經濟的觀點來看，第(1).種方法較優。

物品的脆度值(fragility rating)為該物品忍受衝擊力量而不致損壞的能力量度。脆度值以加速度 G 值表示，其定義為物品能承受並且仍然可以正常工作的最大衝擊強度。因此，若估算之運輸與搬運衝擊環境大於該物品之脆度值，則必須考慮使用各種衝擊緩和系統。

在包裝設計時，選用具可壓縮性及回彈性的緩衝材料以吸收衝擊與振動能量，以保護物品不會受到物理及機械上之損壞。為適當地選用各種緩衝材料，必須先瞭解緩衝的功能，其主要項目說明如下：

- (1). 減低移動及振動：適當的緩衝可控制物品在包裝容器內部的移動量，以及包裝材料對於振動的衰減量。

- (2). 保護脆弱組件：若物品中只包含有一脆弱組件，其餘均甚堅固，則可分解而個別包裝，若不允許分解，則須使用緩衝以保護脆弱組件。
- (3). 防止包裝容器破裂：有些物品具有尖銳邊角或突出部位，可能會刺破包裝容器，而導致濕氣或水之入侵。對尖銳邊角和突出部位設計緩衝可防止前述情形之發生。
- (4). 分散作用力：緩衝材料可將破壞力分散至較大的面積，以減低能量集中在物品表面任何一點的情形。
- (5). 防止擦傷：物品的精密加工表面可能因堵塞、捆紮與包裝容器內其他物品接觸，以致受到擦傷。此現象可使用緩衝防止，一般僅需少量及相當薄的緩衝材料即可達到目的。
- (6). 吸收衝擊能量：緩衝最常使用、同時也是最重要的功能就是，當包裝箱受到碰撞時，緩衝材料會受物品壓縮而吸收能量。
- (7). 多用途緩衝：前述各項緩衝功能不應個別考慮，因為同一包裝箱常須具備數種緩衝功能才能滿足需要。用以保護物品的緩衝材料，可能必須同時能減低移動、防止擦傷、保護容器及包覆尖銳邊角。有些緩衝材料須同時為良好的絕熱材料，以保護物品承受溫度劇變。當在一具有防水或防濕功能的包裝袋中使用緩衝材料時，該材料必須儘可能的乾燥及具有防腐蝕性。若在物品外表塗保護劑時，物品須先置於防潮油袋中。