

可靠度技術手冊

熱環境設計技術



彭鴻霖 編著

中華民國八十九年十二月十八日

熱環境設計技術

目 錄

1	前言	1
2	熱應力效應	1
2.1	高溫環境因子效應	1
2.2	低溫環境因子效應	2
2.3	溫度變化環境因子效應	2
2.4	溫度與其它環境因子之複合效應	3
3	熱應力分析	5
3.1	熱來源	5
3.2	熱傳方式	5
3.2.1	熱傳導	5
3.2.2	熱對流	6
3.2.3	熱輻射	6
3.3	熱分析	7
4	熱設計	8
4.1	零組件熱設計	9
4.2	印刷電路板熱設計	10
4.3	零件佈置與安裝	11
4.4	機箱熱設計	12
4.5	強迫冷卻風扇設計	12
4.6	低溫防護措施	12
4.7	電子裝備熱設計程序	13
5	熱管理	13
	參考文獻	15

熱環境設計技術

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。溫度是影響產品可靠度最重要的環境因素之一，本章主要是就可靠度的觀點，探討熱環境對於一般物品可能造成的效應、熱環境(高溫、低溫、溫度變化)的應力分析方法、以及其相對之防護與防制方法等課題。

2 熱應力效應

熱應力主要來自溫度環境，溫度環境一般又可分為高溫、低溫及溫度變化等，這些溫度環境因子所產生的應力對物品會造成相當程度的影響，以下分別加以說明：

2.1 高溫環境因子效應

高溫因子對物品所產生之效應計有：

- (1). 不同材料的不同膨脹特性而使零件卡死。
- (2). 因潤滑劑變得較無黏性，使潤滑劑流失而導致接點失去潤滑作用。
- (3). 試件全體或部份改變尺寸。
- (4). 由於包裝、墊圈、密封、軸承和主軸變得歪斜、卡死和失效而引起機械或全部的失效。
- (5). 墊圈永久變形(膠狀)。
- (6). 氣密功能退化。
- (7). 電阻值改變。
- (8). 電路穩定狀況隨溫度梯度和不同材料的不同膨脹特性而有所改變。
- (9). 變壓器和機電組件過熱。

- (10). 改變繼電器及以磁性與熱起動元件之作用/不作用裕度。
- (11). 縮短操作壽命時間。
- (12). 固體材料內部晶體結構產生分離。
- (13). 密閉試件內部產生高壓。
- (14). 加速炸藥和推進器燃燒。
- (15). 炸藥鑄造外殼膨脹。
- (16). 炸藥熔解和滲出。
- (17). 有機材料變質及破裂。

2.2 低溫環境因子效應

低溫環境對物品所產生之效應計有：

- (1). 使材料硬化及脆化。
- (2). 不同材料的不同收縮特性而使零件卡死。
- (3). 由於潤滑劑增加黏性而失去潤滑作用。
- (4). 電性改變(如電阻、電容等)。
- (5). 變壓器和機電組件功能改變。
- (6). 衝擊基座變硬。
- (7). 爆炸物破裂，如鉍硝酸。
- (8). 使試件產生裂痕、脆化並改變耐衝擊強度及減低強度。
- (9). 玻璃產生靜力疲勞。
- (10). 使水凝結和冰凍。
- (11). 減低人的靈巧性及使聽力和視力退化。
- (12). 改變燃燒速率。

2.3 溫度變化環境因子效應

溫度變化環境對物品所產生之效應計有：

- (1). 玻璃製品和光學裝備破裂。
- (2). 可動零件卡死或鬆動。
- (3). 結構產生分離。
- (4). 電性改變。
- (5). 由於急速凝結水或結冰造成電子或機械失效。
- (6). 以顆粒狀或紋狀產生破裂。

- (7). 不同材料之不同收縮或膨脹特性。
- (8). 組件變形或破裂。
- (9). 表面塗料之龜裂。
- (10). 密閉艙間之漏氣。

2.4 溫度與其它環境因子之複合效應

表 1：溫度因子主要效應與失效模式

環境因子	主要效應	引起的典型失效模式
高溫	熱老化： 氧化 結構變化 化學反應	絕緣失效 電氣特性變化
	軟化、溶化與昇華	結構失效
	黏度降低與蒸發	失去潤滑性
	體積膨脹	結構失效 機械應力增加 活動零件的磨損增加
低溫	黏度增加與凝固	失去潤滑性
	結冰	電氣特性改變
	脆化	喪失機械強度 破裂、裂縫
	體積收縮	結構失效 活動零件的磨損增加
溫度衝擊	機械應力	結構毀壞或強度降低 密封損壞

表 2：溫度因子與其他環境因子之複合效應

複合環境		效應
高溫	濕度	高溫往往提高濕氣的穿透速度，在高溫作用下濕氣的整體破壞作用增大。
	低壓	這兩種環境互相依賴，例如，當壓力降低，材料成份的除氣增加；當溫度提高，除氣率提高。任何一種環境因子都加劇另一種的影響。
	鹽霧	高溫往往提高鹽霧引起的腐蝕速度。
	太陽輻射	這是一個與人無關的複合，它增加了對有機材料的影響。
	霉菌	高溫在一定程度上是霉菌和微生物生長的必需條件，但是，160°F (71°C) 以上霉菌和微生物不能發育成長。
	砂塵	高溫可能加速砂塵的磨損速度，但是高溫降低砂塵的穿透性。
	振動和衝擊	由於這兩類環境因子影響材料共同特性，它們會加劇彼此的影響。影響加劇的程度取決於複合中各種環境因子的大小。除非是處於極高溫狀況中，塑膠材料和聚合物比金屬對這種複合更敏感。
	加速度	這種複合產生像高溫與振動和衝擊相同的影響
	爆炸大氣	溫度對於爆炸大氣的點燃影響甚少，但是它影響空氣霧化比，這個比值是一個特別應考慮的問題。
	臭氧	溫度從 300°F (150°C) 開始，臭氧減少。在正常氣壓下，溫度超過 520°F (270°C) 時，臭氧無法存在。
低溫	濕度	濕度隨溫度降低而降低，但是低溫引起水汽凝結，如果溫度足夠低，則出現霜或冰。
	太陽輻射	低溫往往降低太陽輻射的影響，反之亦然。
	低壓	這種環境因子複合可能加速通過焊縫的洩漏等。
	鹽霧	低溫降低鹽霧的腐蝕速度。
	砂塵	低溫增加塵土的浸透作用。
	霉菌	低溫減少生霉，溫度為零下時，霉菌處於假死狀態。
	衝擊和振動	低溫往往加劇衝擊和振動的影響。但是，僅僅在很低的溫度下才需要考慮。
	加速度	這種環境因子複合產生的影響和低溫與衝擊和振動相同。
	爆炸大氣	溫度對於點燃爆炸大氣的影響很小。但是它影響空氣霧化率，應予以重視。
	臭氧	在較低的溫度下，臭氧的影響降低；但是隨著溫度降低，臭氧的濃度增加。

3 熱應力分析

現代新型電子裝備不斷地推陳出新，不但具有先進性、多角化用途與能量增強等特色之外，並且逐漸朝向短小輕薄的趨勢發展，然而這些能力提高受到了系統尺寸、重量和功率等因素的限制，而這些限制大多只能靠減小尺寸來克服。因此，近年來電子技術的發展幾乎都是在於高密度電子零件的組裝技術。難而尺寸減小的發展結果通常很少甚至於完全沒有考量及系統的熱需求。只有當發生熱問題時才開始進行熱設計評估，或著手規劃相關熱試驗以驗證原設計的耐熱能力。

溫度設計是現代裝備與系統產品設計工作中不容忽視的項目。特別是電子裝備，溫度是影響物品失效特性最主要的因素之一，根據資料顯示，對於電子系統及零件而言，操作溫度每增加 10℃，其失效率分別增加 1.25 倍至 2 倍，所以溫度應力的消除和防制為電子裝備設計時必須考慮的基本問題之一，特別是在今日電子科技朝向體積縮小、功率增高、研發壽命週期縮短的時代，溫度更是讓工程人員與管理決策頭痛的問題。

裝備、組件和材料的失效有很大的比率是由於溫度及與溫度有關的環境因素所造成的，因此在設計時週詳地考量有關溫度方面的重要性是不能忽視的。由於溫度與濕度的組合環境是裝備性能衰退的主因，因此對於在高溫高濕氣候環境區域使用的裝備而言，在設計時也應該著重於溫度環境保護方法的考慮。

裝備中各部位的溫度分佈資料，只有進行熱傳分析(heat transfer analysis)或量測才能知道。熱分析(thermal analysis)為一項仔細而複雜的科學，其主要目的在經熱傳理論分析裝備中重要位置之溫度資料，例如計算積體電路與半導體之接面溫度(junction temperature)。

3.1 熱來源

一般裝備的熱來源大致可歸納為自然與誘發兩大類，自然環境熱來源主要是大氣溫度與太陽輻射兩種，這些資料可參考氣象相關的文件；而誘發環境主要是裝備本身操作使用時所產生的，例如電流通過高功率電子元件時因熱阻而升高元件溫度、飛行體在大氣中飛行因氣動磨擦而加熱，此部份必須根據實際設計規劃的任務輪廓配合熱傳分析而獲得。

3.2 熱傳方式

一般熱傳有傳導、對流、輻射與蒸發等四種方式，以下從一般工程實務應用觀點就前三種熱傳方式簡要說明其原理。

3.2.1 熱傳導

熱傳導是指物品各部位藉由直接接觸進行熱能交換的現象，熱傳導的基本定律為：

$$q = kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2) = \frac{\Delta T}{R}$$

式中：q = 熱傳導的熱流量(W)；

- k = 材料的熱傳導係數($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$, $\text{cal}/\text{sec cm}^{\circ}\text{C}$) ;
 A = 沿熱傳導方向的橫截面積(m^2) ;
 x = 熱流動路徑(m) ;
 L = 熱傳導路徑長度(cm) ;
 ΔT = 溫度差($^{\circ}\text{C}$) ;
 R = 熱阻($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)。

熱傳導方式是電子裝備防熱設計的重要關鍵，有利於熱傳導的主要措施如下幾點：

- (1). 選用熱傳導係數大的材料製造熱傳導零件；
- (2). 加大熱傳導面積和傳導零件之間的接觸面積；
- (3). 儘量縮短熱傳導路徑，且在熱傳導路徑中應有絕熱或隔熱元件。

3.2.2 熱對流

熱對流是依靠物品周圍的流動介質的流動將熱量轉移的過程，可分為自然對流和強迫對流兩種類型。熱對流所傳遞的熱流量一般可以用下式表示：

$$\Phi = \alpha A \Delta T$$

式中： Φ = 熱對流的熱流量(W)；

α = 熱交換係數，為溫差為 1°C 時的單位面積熱傳量($\text{W}/\text{m}^2^{\circ}\text{C}$)；

A = 固體壁面換熱面積(m^2)；

ΔT = 溫度差($^{\circ}\text{C}$)。

有利於熱對流換熱的主要措施有下列幾點：

- (1). 儘量增大溫差，即儘量降低周圍對流介質的溫度；
- (2). 加大與對流介質的接觸面積，如散熱器做成肋片、直尾形、叉指型；
- (3). 增大周圍介質的流動速度，以帶走更多的熱量。

3.2.3 熱輻射

熱輻射是一種以電磁波方式傳遞能量的方式，一個物體不僅是不斷地在輻射出能量，而且還在不斷地吸收能量，這種熱能量之間的雙重交變(熱能-輻射能-熱能)的現象，就是熱輻射傳遞的過程。一個物體的總熱輻射量是放熱還是吸熱，取決於該物體在同一時間內放射與吸收輻射熱能量之間的差值，此一差值稱為熱輻射能力，絕大多數物體的輻射能力可以表示為：

$$E = \epsilon c (T/100)^4 (\text{W}/\text{m}^2)$$

式中：E = 熱輻射能量(W)；

ε = 黑率，表示實際物體熱輻射能力與同溫度下黑體熱輻射能力之比值；

c = 黑體的熱輻射係數($W/m^2 \cdot ^\circ K^4$)；

T = 黑體表面溫度($^\circ K$)。

在工程應用上，物體因輻射而放出來的熱流量可用下式表示：

$$\Phi = CA \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]$$

式中：C = 熱輻射係數($W/m^2 \cdot ^\circ K^4$)；

A = 物體熱輻射表面積(m^2)；

T_1 、 T_2 = 物體及空氣之熱力學溫度($^\circ K$)。

有利於熱輻射的主要措施說明如下：

- (1). 發熱物體表面越粗糙熱輻射的能力越強，一般常將發熱元件的外殼漆上有色漆，散熱片表面塗黑色或有色粗糙的漆；
- (2). 加大輻射體的表面面積；
- (3). 加大輻射體與周圍環境的溫差，即周圍介質溫度越低越好。

3.3 熱分析

在進行裝備熱分析時，有些重要的因素在事前必須充份瞭解，以確保能獲得預期的結果：

- (1). 熱分析之重要參數為消耗功率、熱阻和溫度。
- (2). 熱散逸量控制零件的溫度升值與操作溫度。
- (3). 熱依熱傳導、熱對流、熱輻射與熱蒸發等四種方式傳遞，熱阻最大的途徑傳送最多的熱量。
- (4). 熱設計應該與電性設計和機械設計同時開始，在經常發現硬品失效現象後，才執行熱傳分析及熱量測工作，勢必影響設計研發時程與成本。
- (5). 冷卻系統的數學分析應在設計之初，當電性設計和熱設計還在紙上作業時，與電性應力分析一起儘早完成。
- (6). 熱分析需考慮的因子包括尺寸、重量、熱散逸、零件溫度限制、線路形態、溫度環境、熱源與熱沉條件、與成本。

一般進行熱分析的步驟包括：

- (1). 仔細研究可應用的規範、標準、及其他與進行熱分析的裝備有關的文件，完全瞭解熱規格與限制條件。決定裝備的最大環境溫度範圍、散熱表面、以及熱沉和冷媒。
- (2). 決定所用的冷卻技術種類及其限制條件，如溫度、壓力、流量等。

4 熱設計

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；MIL-HDBK-251「可靠度/設計熱應用」，被認為是有關熱設計的最佳現行技術手冊。

多數電子零件的失效率隨工作溫度的增高而迅速下降，對於尺寸小、密集度高的現代半導體產品而言，溫度控制更是重要，但溫度也不宜降低至太低，否則會引致低溫效應的困擾。

溫度應力的防護與控制可以循由下述兩項原理進行，其一為藉由材料與設計構造的適當選擇，以適應熱環境，另一為利用溫度調節裝置改善週圍環境的冷熱程度。前者為積極式，後者為消極式，在實用上通常是兩者混合使用。

設計時要想成功地處理溫度問題，必須對於溫度與工程方面的知識有相當程度的瞭解，其中包括：

- (1). 所遭遇的溫度環境應力的強度與程度，
- (2). 溫度效應對於所考慮材料特性的影響，
- (3). 材料與設計構造選擇的想像力。

裝備所必須考慮的溫度環境包括週圍的溫度環境與內部溫度環境兩類，其間的關係可能是個別存在或組合存在，有可能是依次出現存在的。對於溫度與濕度兩種環境依次存在的組合情形特別嚴重，特別是在冷熱交替出現的情形下，例如：密封材料存在著不該存在的多孔性，會因為熱脹冷縮的效應，引起很大的凝結水積聚問題。此一問題對於空用裝備特別重要，在地面時潮濕的空氣擴散進入密封的裝備內部，由於高度變化而發生壓力變化，在高空壓力低，空氣由裝備內部向外擴散，然而此時所逃逸出的為乾燥的空氣，並不含水汽，因而增加裝備內部空氣的含水量，亦即增加裝備內部的濕度，一旦遇到低於露點溫度的環境時，水汽即在裝備內部凝結，附著在零組件表面而開始產生腐蝕作用。

除了選擇適當的材料之外，消極式的防護與控制方法包括下列數種：

- (1). 減少生熱零組件數量，
- (2). 使用絕熱材料及絕熱技術，
- (3). 應用熱傳原理(包括熱沉及傳熱通路的安排)，
- (4). 對於所產生熱的散逸設計。

對於電子裝備而言，由於小型化的需求，往往容易造成過熱的機會，此一現象為設計時必須考慮的防護重點。控制裝備的熱或冷程度，可以選用散熱或冷卻設備的設計，以改變存在的熱量，一般熱傳機構設計時要充分利用熱傳導、熱對流、熱輻射和蒸發等四種程序，各種材料的熱傳導係數如表 1 所示。

4.1 零組件熱設計

溫度是直接影響零組件性能與可靠度的主要因素，因此在進行零組件層級的熱設計時，一定要確保零組件的最高溫度低於零組件的額定溫度。一般常用零件之表面允許工作溫度如表 2 所示，常用絕緣材料之最高工作溫度如表 3 所示。

表 1：各種材料之熱傳導係數

材料 (室溫)	英制 (BTU/hr ft °F)	公制 (cal/sec cm °C)	材料 (室溫)	英制 (BTU/hr ft °F)	公制 (cal/sec cm °C)
金屬			非金屬		
鋁			空氣	0.0153	0.000063
純鋁	125	0.52	礬土	17.0	0.070
5052	83	0.34	電木	0.11	0.00045
6061T6	90	0.37	碳	4.0	0.0016
2024T4	70	0.29	樹脂		
7075T6	70	0.29	無填劑	0.12	0.00049
356T6	87	0.36	高填劑	1.25	0.0051
鈹	95	0.39	樹脂玻璃纖維	0.15	0.00062
鈹銅合金	50	0.21		20	0.083
銅				2	0.0082
純銅	230	0.95	玻璃	0.50	0.0021
抽線銅	166	0.68	玻璃棉	0.023	0.00009
青銅	130	0.54	冰	1.23	0.0051
紅銅	64	0.26	雲母	0.41	0.0017
黃銅	54	0.22		0.11	0.00045
5%磷化青銅	30	0.12	尼龍	0.14	0.00058
金	170	0.70			

表 2：常用零件允許工作溫度

零件名稱	表面允許溫度(deg C)	零件名稱	表面允許溫度(deg C)
矽電晶體	150~200	塗釉繞線電阻器	225
鍺電晶體	70~100	低介質電容器	75~85
矽控整流器	75~85	電解電容器	60~85
電子管	15~200	薄膜電容器	60~130
碳膜電阻器	120	陶瓷電容器	82~85
金屬膜電阻器	100	玻璃陶瓷電容器	200
複合繞線電阻器		變壓器	95

表 3：常用絕緣材料最高工作溫度

材料名稱	最高工作溫度(deg C)	材料名稱	最高工作溫度(deg C)
環氧樹脂	140	聚四氟乙烯	250
有機矽橡膠	180	硬橡膠	80
聚苯乙烯	70	聚脂氨(尼龍)	140
聚氯乙烯	85~90	浸漬棉織品	110

大功率電晶體是熱設計中的重點零件，它單靠引線及管殼本身散熱已不能滿足要求，必須借助散熱器。一般在選擇散熱器時應注意：

- (1). 在保證散熱前提下，儘量選用體積小、重量輕的散熱器。
- (2). 安裝時要減小接觸電阻，例如增大接觸面積與壓力，降低表面粗糙度，另外在表面塗矽膠可使其接觸熱阻降低約 22%~35%，對於無法做到完全接觸的部位可墊入銅箔可降低熱阻約 20%~45%。常用的 G 型槽、B 型槽、U 型槽與楔夾槽及其接觸面之熱阻值如圖 1 所示。
- (3). 零件散熱器表面應粗糙，必要時塗成黑色，可加強散熱效果。
- (4). 當電晶體與外殼必須絕緣時，不能在外殼下墊絕緣片，應該採用散熱器與機架絕緣的方法。

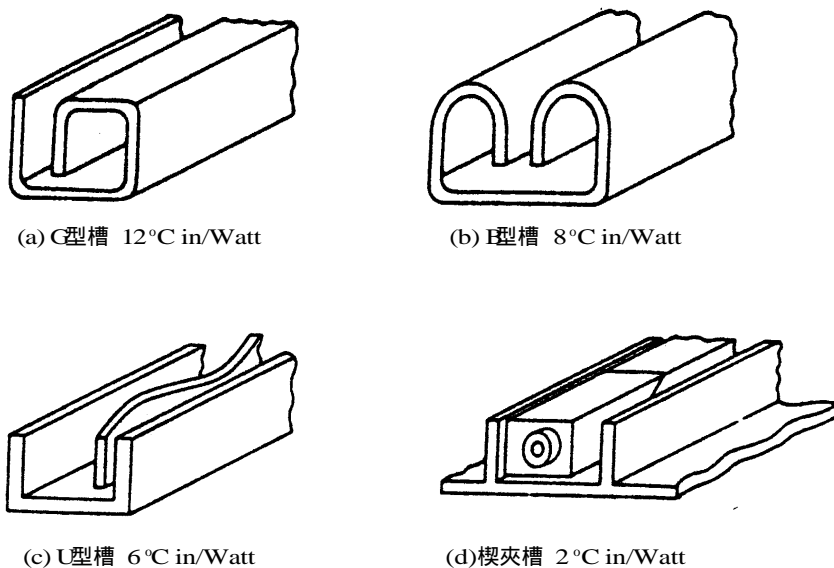


圖 1：夾持槽種類與接觸面熱阻

4.2 印刷電路板熱設計

目前電子裝備的設計製造趨勢為大量採用積體電路，並且朝向小型化提高安裝密度的方向發展，從而使印刷電路板的生熱量增大。

印刷電路板上的佈線可分為：電源線、接地線、和信號線三種，其中以電源線和接地線所流過的電流較大，因此可能產生較多的熱量。進行熱設計時應該考慮確保導線的載流容量，所選用電線的直徑必須適合電流的傳導，而不致引起超過允許的溫升與壓降。

4.3 零件佈置與安裝

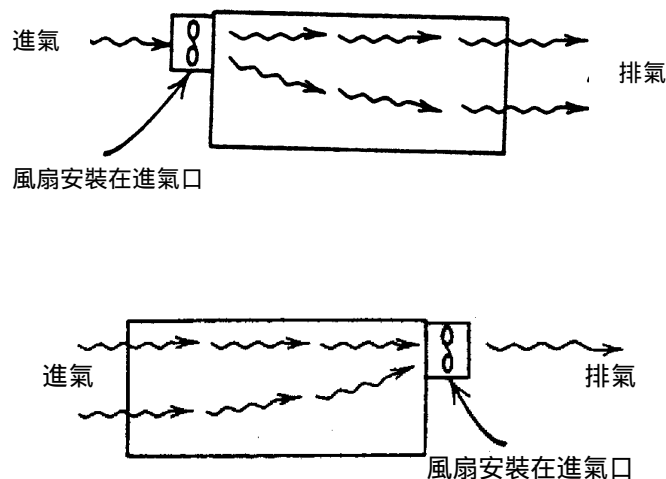
電子裝備中零件的佈置安排會影響零件的操作溫度與承受應力，零件安排得當會提高裝備可靠度，一般零件佈置與安裝的準則說明如下：

- (1). 功率消耗件間儘可能有最大的間隔
 - A. 避免將溫度敏感件彼此擠在一起，或安排在高功率消耗件或熱點旁邊。
 - B. 利用自由對流冷卻的裝備，避免將其他零件安排在高功率消耗件的上方，正確的作法應該是參差水平排列。
- (2). 溫度敏感件應該佈置在裝備中最冷的位置以提高裝備可靠度
 - A. 使用自由對流冷卻時，將溫度敏感件放在最底層，其他依次放在上面。
 - B. 使用強迫對流冷卻時，將溫度敏感件放在最接近冷媒入口的一方，不敏感的零件則安排在出口的一方。
 - C. 使用冷牆冷卻的線路板，將敏感件佈置在靠近板的邊緣。
- (3). 使用最短通路，以減小傳導熱阻，同時減小零件與模板或冷板的粘貼膠厚度。
- (4). 使用較大的安裝面積，加大熱傳導路徑的面積，以及零件與熱沉間的介面，減小傳導的熱阻。
 - A. 使用自由對流及輻射或吹冷空氣冷卻時，高功率件應安裝在熱傳散熱片上，以增加傳導路徑的面積。
 - B. 安裝高散熱件時，避免只靠導線作為零件到熱沉之間的傳導路徑。
 - C. 使用自由對流冷卻時，避免使用太密的散熱片。
- (5). 使用高熱傳導體材料以減低傳導熱阻
 - A. 使用銅、鋁等金屬作為熱傳導路徑及安裝支架。
 - B. 在空氣稀薄的高空或太空應用，自由對流冷卻是沒有效用的，應該將所有熱傳導路徑的間隙填滿熱傳導材料。
 - C. 多層板有很好的接地面與散熱熱傳路徑，使用多層印刷電路板時可採用電鍍穿孔，以減少穿過板厚方向的傳導熱阻。
 - D. 在熱傳路徑間的介面避免乾接觸的設計，其間應充填熱膠材料(如充填氧化鋅料的矽膠)以降低熱阻。
- (6). 在有接觸面的設計，可採用下列方法減低接觸熱阻：
 - A. 儘可能使用大接觸面積。
 - B. 確保平滑的接觸面。
 - C. 使用軟性接觸材料。
 - D. 所有螺桿加扭力以加高接觸壓力。
 - E. 使用足夠的扣件以確保均勻的接觸壓力。
 - F. 使用冷牆冷卻板時，避免使用彈簧加壓導槽產生接觸壓力，應該使用栓柄或凸輪固定式夾持板設計的導槽。

4.4 機箱熱設計

機箱或機殼除了作為承受機械與環境應力的結構件之外，就是可以將內部熱量散發出去的散熱件。所以電子裝備中包括機箱有利於熱的設計，其設計原則是以最佳的對流、傳導、與輻射等熱傳方式，把最大的熱量散發出去。其方法計有：(1). 採用自然散的熱機箱熱設計、採用通風散熱的機箱熱設計、採用強迫冷卻的機箱熱設計等。

4.5 強迫冷卻風扇設計



4.6 低溫防護措施

低溫防護措施的選用主要可從低溫可能造成的效應著手：

- (1). 不同收縮量
 - A. 仔細選用材料；
 - B. 活動件間提供適當的間隙；
 - C. 控制電纜採用彈簧張緊器和深滑輪；
 - D. 殼體採用重材質的散熱材料。
- (2). 潤滑凝固
 - A. 選用適當的潤滑濟；
 - B. 採用矽潤滑脂化合物；
 - C. 儘可能排除使用液體潤滑劑。
- (3). 液壓系統洩漏
採用低溫矽橡膠作為密封和包裝材料。
- (4). 液壓系統凝固

採用合適的低溫液壓液體。

(5). 凝聚水汽冰凍造成損壞

通過下述方法排除濕氣：

- A. 提供出氣口；
- B. 足夠的水排放裝置；
- C. 消除容易留滯濕氣的空間；
- D. 適當加熱、密封、或提供乾燥空氣或氣態氮。

(6). 材料特性降低與元件可靠度降低

仔細選用材料與零組件，使其具備令人滿意的各種低溫特性。

4.7 電子裝備熱設計程序

一般電子裝備之熱設計程序說明如下：

- (1). 確定設計條件，例如裝備的功能，發熱量，允許溫度範圍等。
- (2). 決定裝備的冷卻方式，其程序如圖 2 所示。
- (3). 分別對零組件、線路、印刷電路板、佈線與安裝、機箱等進行熱設計。從發的觀點研究它們的實際安裝方案，並考量機械應力環境，使設計出來的裝備既可滿足熱設計需求，又能滿足機械應力環境。

5 熱管理

溫度是影響產品可靠度最重要的因素之一，將產品各部位的溫度控制在選定的範圍內的設計技術稱為產品熱設計(thermal design)，它是使產品具有最小壽命周期成本和最大效能性的可靠度設計中重要的設計技術之一；為了保證產品達到預定的熱要求，所進行的一系列管理程序則稱為熱管理(thermal management)。

由於許多管理人員及技術人員沒有深刻體會熱設計及熱管理對產品可靠度可能造成的影響，大部分工程設計人員包括可靠度工程人員缺乏熱設計的技術，絕大部分的管理人員缺乏熱管理的知識，其結果是造成產品壽命周期成本不必要的增加。實際上，只要在熱設計及熱管理上作不大的投資就可以取得相當大的經濟效益。

一般在設計時，在零件設計與選用上通常都會花很多的工夫，小心地分析零件的工作溫度後決定選用那一種等級的零件，因此有些關鍵零件的工作溫度甚至高達 $80^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 仍然可以可靠地正常工作，相對地在整機設計時，對於熱設計方面顯然就沒有下同樣的工夫。事實上，在合理的熱設計條件下，關鍵零件應該可以大大降低工作溫度，如此將可提高零件的可靠度與壽命。

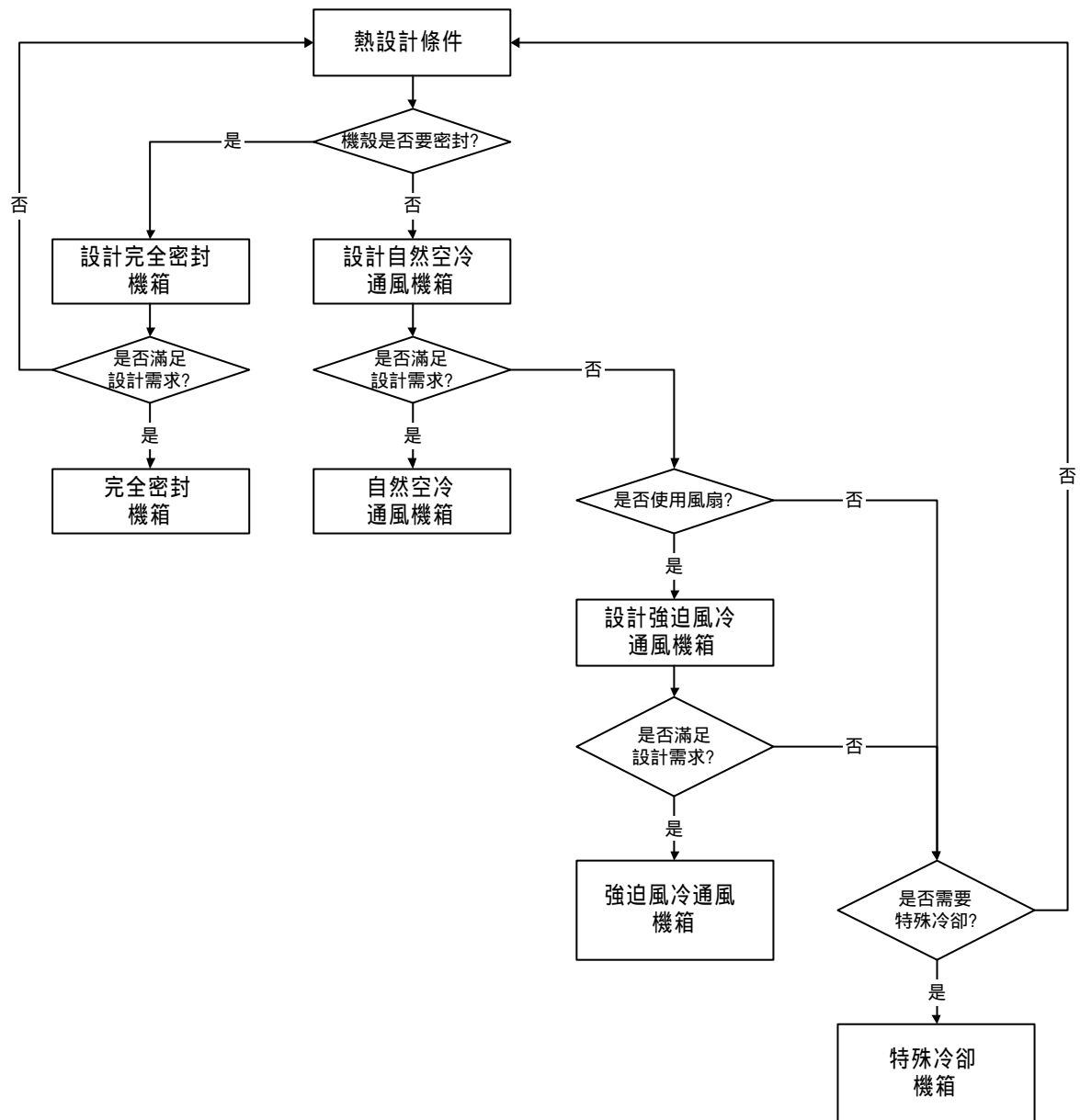


圖 2: 裝備冷卻方式設計程序

參考文獻

1. MIL-HDBK-251,
2. MIL-HDBK-338-1,
3. Steinberg, Dave S., Cooling Techniques for Electronic Equipment, John Wiley & Sons, Inc., 1980.
- 4.