

振動知多少？

舉凡會動的機器、設備、產品等都會有振動的現象，就連不動的建築物都會受到地震的影響，振動可以說是無所不在。

■王栢村



圖片來源：李明

提到振動，會想到的相關名詞有哪些呢？頻率、振幅、共振、周期、吸振、隔振等，或者與振動有關的事物，例如地震時建築物的搖晃、行駛中汽車的振動、飛機起飛或降落時的強烈振動、鐵路附近或道路旁車輛通過時的地面振動，或冷氣機、電扇、電腦、洗衣機、抽油煙機等各種家電用品的振動，只要會動的機器或設備都有振動的現象。

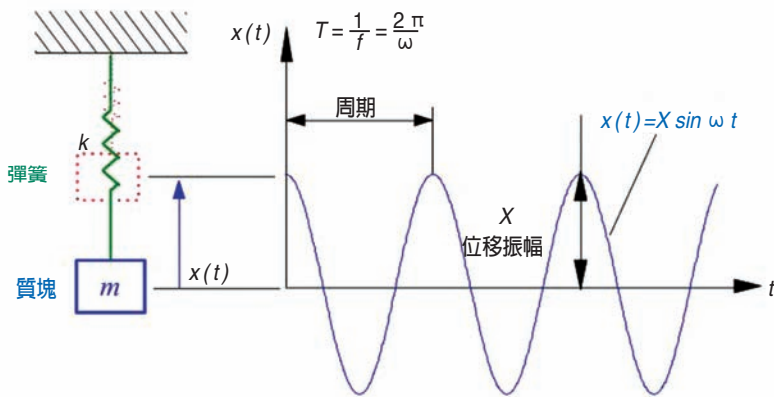
周期、頻率及位移振幅

假設有一個質塊掛在一個彈簧下面，如果連接這質塊的彈簧先被壓縮或拉伸一段距離再釋放，質塊會上下來回擺盪。質塊擺盪一次的時間，稱為「周期」，單位通常以秒表示，周期的倒數就是「頻率」，單位是赫茲（Hz）。而質塊擺盪的距離，也就是質塊振動的幅度，稱為「位移振幅」，單位通常以公尺表示。

當質塊每秒上下來回擺盪 1 次，振動頻率就是 1 赫茲，每秒擺盪 5 次，振動頻率就是 5 赫茲。當觀察到質塊的振動頻率時，取頻率的倒數就是周期，例如頻率 1 赫茲，周期是 1 秒，頻率 5 赫茲，周期就是 0.2 秒。當觀察到質塊來回擺盪的速度很快時，通常都會說：質塊的「振動速度」很快。但這種說法有必要加以糾正，應該說成：質塊的「振動頻率」很高。

什麼是自然頻率

再以質塊掛在彈簧下的系統來看，如果連接質塊的彈簧被壓縮或拉伸的距離愈長，是否質塊的振動頻率就愈大？答案是「No」。事實上，質塊的振動頻率是固定不變的，因為質塊的振動頻率恰好是這個質塊彈簧系統的「自然頻率」。當連接質塊的彈簧被壓縮或拉伸的距離愈長時，質塊



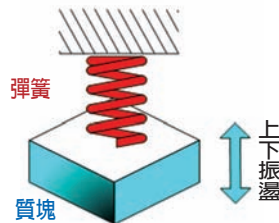
當彈簧受壓縮釋放後，掛在彈簧下的質塊位移示意圖，其中 T 是「周期」，單位是「秒」； X 是「位移振幅」，單位是「公尺」； ω 是「角頻率」，單位是「每秒強度」； f 是「頻率」，單位是「每秒次數」或「赫茲」。

的位移振幅也愈大，但振動頻率並不會改變。

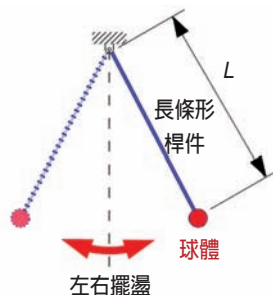
質塊彈簧系統的自然頻率與質塊質量的平方根成反比，而與彈簧的彈簧常數的平方根成正比。如果質量與彈簧常數維持不變，系統的自然頻率也不會改變，因此也稱作「固有頻率」。一個重要的觀念是：振動頻率大，不代表振動大，振動大小指的是振幅大小。

每一個結構系統都有它的自然頻率，而且是固定不變的，但這個頻率會因為結構形狀、尺寸、材料性質，甚至結構邊界狀態而有所差異。鐘擺就是利用左右擺動的周期來計時，透過鐘擺長度及鐘擺頭質量的適當設計，可以使得鐘擺的周期恰好是 1 秒。

可以做一個簡單的物理實驗，以一根細線吊著一個已知質量的物體，讓物體自由地左右擺盪，記錄一次振動的時間，並且試著調整細線的長度，觀察其振動周期的變化。應該可以發現，細線的長度愈長，它的振動周期愈長。因為頻率是振動周期的倒數，所以細線愈長它的自然頻率就愈低。事實上，線單擺的自然頻率與線



當連接質塊的彈簧被壓縮或拉伸的距離改變時，質塊的位移振幅也會跟著改變，但振動頻率並不會改變。質塊的振動頻率是這個質塊彈簧系統的「自然頻率」，它與質塊質量的平方根成反比，而與彈簧的彈簧常數的平方根成正比。



每一個結構系統都有它的自然頻率，而且是固定不變的，鐘擺就是利用左右擺動的周期來計時。



舊式的掛鐘利用鐘擺左右擺動的周期計時

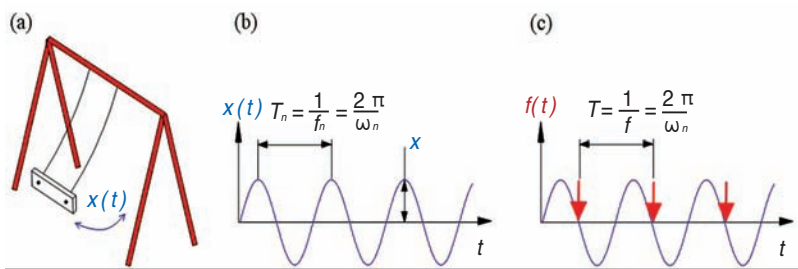
長度的平方根成反比。

同樣的線單擺實驗，可以在相同的細線長度下做不同位移振幅的擺動，並記錄其振動周期，如果振幅不太大，可以發現振動周期不會隨著位移振幅不同而有差異。細線長度固定，則其線單擺的自然頻率與振動周期也就維持不變。

為什麼鞦韆會愈盪愈高

每個人都有盪鞦韆的經驗，鞦韆要盪得高，就要順勢在每一個下降的瞬間使力盪。小朋友在還沒有掌握到要領前，常會因為時間點掌握不好而盪不高。其實盪鞦韆要盪得高，就是利用共振的原理。當結構受外力作用時，若外力的「施力頻率」，或稱「激振頻率」，與結構的自然頻率相等或相近，就會使它的結構有「振動大」的現象，稱為「共振」。

鞦韆本身就是一個單擺系統，也有它的自然頻率，鞦韆要盪得高，使力的時間點要掌握得剛好，當施力頻率與擺盪頻率相等或相近時，就會使鞦韆盪得高。也可



適時對鞦韆施力可以使鞦韆愈盪愈高——共振的應用。(a) 盪鞦韆： $x(t)$ 是鞦韆隨時間變動的盪盪位移。(b) 鞦韆位移與時間的關係：鞦韆盪盪的周期是 $T_n = 1/f_n$ ，其中 f_n 是鞦韆的自然頻率，也就是盪盪頻率。(c) 施加外力示意圖：紅色箭頭代表施力的時間點， T 相當於施力的周期，簡單推算施力的頻率是 $f = 1/T$ 。盪鞦韆時的「施力頻率」 f 與鞦韆盪盪的「自然頻率」 f_n 相等或相近時，或說盪鞦韆時盪盪的「自然周期」 T 與鞦韆的「盪盪周期」 T_n 相等或相近時，就會使鞦韆盪得高，也就是鞦韆的盪盪「位移振幅」大，這種現象就



圖片來源：李金駁

鞦韆要盪得高，就要順勢在每一個下降的瞬間使力盪，小朋友常因為時間點掌握不好而盪不高。

以說盪鞦韆時的「施力周期」與鞦韆的盪盪周期相等或相近時，就會使鞦韆盪得高。對盪鞦韆而言，這個共振現象是好的，因為要盪得高。但是對一般的機器而言，共振現象的發生大都是造成機器或結構破壞的主要原因，因此通常都要儘量避免。

再舉一個例子，一個吊扇或立式風扇通常可設定不同的段數，以調整它的轉速。若轉速的單位是每分鐘迴轉數 (RPM)，把它除以 60 就可換算成以赫茲



吊扇有它的自然頻率，在設計時要避免「共振」現象的發生。

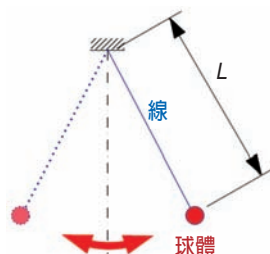
為單位的頻率，這個頻率可視為風扇系統的「外力激振頻率」。

吊扇或風扇本身就是個結構系統，一定有它的自然頻率，在設計風扇結構的時候，就要評估其系統的自然頻率，務必使風扇轉速所對應的外力激振頻率與風扇系統的自然頻率不相近，以避免「共振」現象的發生。否則會使整個風扇振動得很大，對風扇而言當然不好，而且是相當危險的。因此在產品設計時，必須考慮到振動的問題。

自然頻率只有一個嗎

在前面介紹的例子中，不管是質塊彈簧、單擺、鞦韆等系統，似乎都只有一個自然頻率，是不是所有的結構或系統都只有一個自然頻率呢？答案是 No！

一個任意幾何形狀的結構，其系統的自然頻率有無限多個，但比較重要的通常是頻率較低的，為什麼呢？因為自然頻率較低的振動現象較為顯著，所以在理論分析或實驗量測中，都優先考慮較低範圍的自然頻率。



左右擺盪

以一根細線吊著一個已知質量的物體，讓物體自由地左右擺動，若細線的長度愈長，它的振動周期愈長，也就是自然頻率愈低。事實上，線單擺的自然頻率與線長度的平方根成反比。

當結構受外力作用時，若外力的「施力頻率」，或稱「激振頻率」，與結構的自然頻率相等或相近，就會使它的結構有「振動大」的現象，稱為「共振」。對一般的機器而言，共振現象的發生大都是造成機器或結構破壞的主要原因。

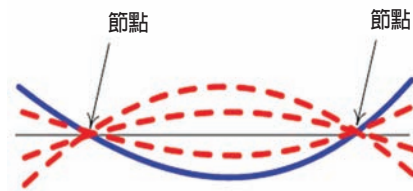
以一部汽車為例，它的自然頻率在理論上、且事實上就有無限多個，不過人們感受得到的頻率相當低。以 ISO2631 為例，這是國際標準組織針對人體全身受振動影響的評估，也只做到 80 赫茲而已。因此，從振動觀點來評估汽車的舒適度時，只需考慮這個頻率範圍所產生的影響就可以了。

但是對一部汽車結構的設計而言，就不能只探討 80 赫茲的頻率範圍，還需要顧及更高的頻率。簡單來說，一般汽車在怠速時，引擎轉速約在 600 ~ 800 RPM。踩油門加速時可能高達 3,000 RPM，有的車甚至可達 6,000、7,000 RPM，可以換算一下，3,000 RPM = 50 Hz，6,000 RPM = 100 Hz。再則汽車都有變速箱，大都由齒輪變換檔位，由於齒輪齒數的關係，換算下來的「齒輪嚙合頻率」可能高達數千赫茲。因此，對汽車而言，其外力激振頻率就相當高，必須分析觀察高頻率的振動問題。

什麼是振動模態

就結構的振動特性而言，除了自然頻率外，另一個很重要的名詞是「模態振型」。結構的每一個自然頻率都有一個對應的模態振型，合稱為「振動模態」，也可簡稱「模態」，所謂「對應」是指模態頻率與模態振型二者是成對出現的。模態振型是結構受到與自然頻率相同的外力激振頻率作用時，所呈現的振動型態。結構在不同的自然頻率下，會有不同的模態振型，因此結構在不同頻率下激振會顯現不同的振動型態。

以一個梁結構為例，梁結構受到外力作用時會呈現上下振動，當外力激振頻率與梁結構的自然頻率相同或相近時，梁的



當梁結構呈現上下振動時，有兩個不動的停滯點，稱為「節點」。模態振型是結構受到與自然頻率相同或相近的外力激振頻率作用時，結構振動的型態。結構在不同的自然頻率下振動，會有不同的模態振型。

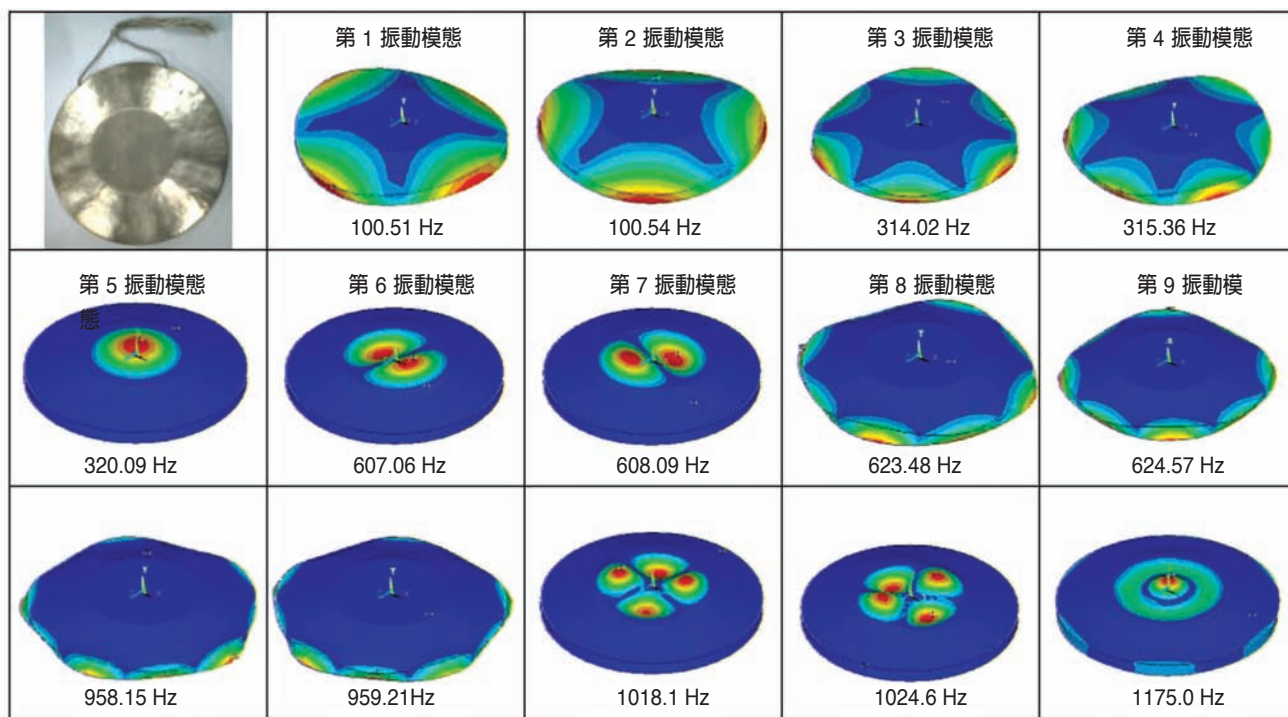
有限元素分析				
	99.27Hz	206.2Hz	361Hz	847Hz
實驗量測觀察				
	101Hz	187Hz	392Hz	883Hz

平板的自然頻率及其對應的模態振型 根據有限元素分析所得到的結果，綠色區是位移接近零的區域，這些停滯區在平板結構上呈現連續的停滯線，因此稱為「節線」。由於「節線」位置附近是停滯區，因此透過實驗會觀察到沙子聚集在節線位置。

振動型態就是該自然頻率所對應的模態振型。梁結構的某些模態振型會呈現不動的停滯點，稱為「節點」。一般而言，自然頻率愈高，節點數愈多，結構正負交錯的振動現象也愈複雜。

又以一平板結構的振動為例，當平板在對應於該平板的某一自然頻率下激振，平板會出現垂直於平板表面的側向振動。平板在振動時，也會有不動的停滯點，由於這些停滯點在平板結構上呈現連續的停滯線，因此稱為「節線」。在振動的實驗觀察中，可以把細沙灑在平板上，由於平板會呈現上下往復振動，唯有在節線位置附近是不動的停滯區，因此沙子會聚集在節線位置，最後沙子聚集形成的線條就是節線。

再以一個銅鑼為例，銅鑼的自然頻率有無限多個，其對應的模態振型也有無限多個。自然頻率愈高，所對應呈現的模態



銅鑼的自然頻率及其對應的模態振型 在振動學上，每個「自然頻率」都有一個對應的「模態振型」，合稱為「振動模態」，也可簡稱「模態」。這個銅鑼在 1,200 赫茲 (Hz) 頻率範圍內共有 14 個自然頻率，通常自然頻率由小排到大，如圖由左至右、由上而下，第 1 個自然頻率在 100 赫茲左右。每一個自然頻率都有一對應的模態振型，如圖示，紅色是振動振幅最大處，藍色區域是大致不動的區域。模態振型有邊緣振動或中心區域振動的不同振動型態。以第 5 個「振動模態」為例，它的自然頻率是 320.09 赫茲，而其「模態振型」主要在中心圓形區域呈現上下振動。對銅鑼而言，第 5 個振動模態的自然頻率，其實是敲擊銅鑼時銅鑼發出聲音的主頻率，也就是說銅鑼聲音的產生機制與振動有極大的關聯。振動模態數愈高，除了自然頻率愈高外，對應呈現的模態振型正負交錯的振動現象也愈多。



圖片來源：李金駁

銅鑼的自然頻率有無限多個

振型正負交錯的振動現象更多。敲擊銅鑼的聲音產生機制與銅鑼的振動有極大關聯，某個特定的自然頻率與對應的模態振型是銅鑼的主頻率與振動型態。

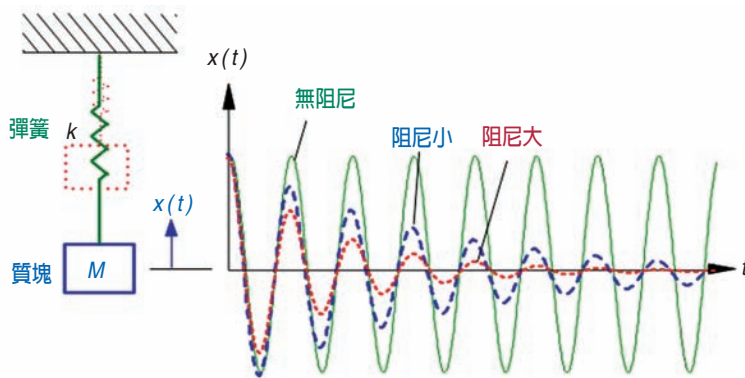
模態振型對結構設計相當重要，在節點或節線附近因為位移振幅小，可做挖洞或減小厚度方式處理，以減輕結構重量。



動物靠器官的振動發聲，蟋蟀也是一樣。

一個材料構件因為變形使得材料分子之間產生摩擦而導致能量損失，這就是「阻尼效應」。

阻尼可以做為降低振動的一種機制，因此有許多科學家致力於發展高阻尼材料，主要目的就是要增加材料本身的阻尼效應，以抑制結構的振動。



彈簧在 3 種不同阻尼狀況下的振盪情形 一種彈簧是「無阻尼」材料：能量不會消耗，質塊會一直持續擺盪不停。第 2 種彈簧是「阻尼小」材料：能量消耗得慢，質塊的擺盪振幅衰減較緩慢。另一種彈簧是「阻尼大」材料：能量消耗得快，質塊的擺盪振幅衰減較快。

這樣對結構的振動變形不會有太大的改變，但對結構有「輕量化」的效果。反之，在模態振型的最大變形處，可以作適當的補強，例如加大厚度或加入肋骨補強。在這裡要強調的是，模態振型是結構在對應的自然頻率下振動時的型態，可做為結構設計者在減重或補強結構時的參考依據。

什麼是阻尼

「阻尼」(damping) 是一種消耗能量的機制，一般材料本身都有阻尼效應。從微觀角度來說，可以想像一個材料構件，因為變形使得材料分子之間產生摩擦而導致能量損失，這就是「阻尼效應」。

以質塊彈簧系統來做說明，若彈簧材料是「無阻尼」效應時，振動能量不會消耗，質塊會一直持續擺盪不停。但是大家都了解，在現實世界裡，一個掛在彈簧下端的質塊，它的振動不會永遠不停，實際上，質塊的擺盪幅度會逐漸衰減到趨近於零。如果彈簧是「阻尼小」的材料時，因為振動能量消耗得慢，所以擺盪振幅衰減較緩慢。當彈簧是「阻尼大」的材料時，由於振動能量消耗得快，質塊的振盪很快

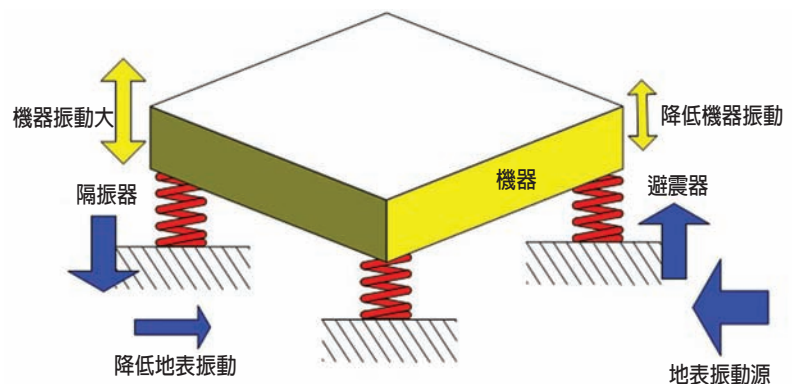
就趨於停止。

由上面說明可知，阻尼可以做為降低振動的一種機制，因此有許多科學家致力於發展高阻尼材料，主要目的就是要增加材料本身的阻尼效應，以抑制結構的振動。另外，也有發展具有阻尼效果的油壓缸，這類阻尼元件稱為「阻尼器」，可應用於諸如各種車輛的避震器上。

隔振器與避震器

常聽到如「隔振」、「避震」等名詞，譬如說，越野車上的彈簧，大都通稱「避震器」，機車上的稱為「緩衝器」，這些名詞在意義上其實是相通的，只是用語略有不同。另外，在英文中，isolation 或 vibration isolation 是指隔振、避震這件事，isolator 是指「隔振器」、「避震器」，是一種可隔開振動或避開震動的機構元件。車輛上使用的避震器或緩衝器，常稱為緩衝墊層或懸吊裝置。

假設有一部機器，正常運轉時的轉速



隔振與避震的差別 隔振器：減少機器振動的振動力傳遞到地面，降低地板的振動。避震器：避免地板的振動直接傳遞到機器，以降低機器的振動。

假設有一部機器，正常運轉時的轉速已知，如果要適當地安裝這部機器，避免機器運轉時的振動傳遞到地面，造成不良的地表振動，就得選擇適當的隔振器。若以彈簧做為隔振器，這個隔振彈簧選用的設計理念是避免共振的產生。

已知，如果要適當地安裝這部機器，避免機器運轉時的振動傳遞到地面，造成不良的地表振動，就得選擇適當的隔振器。若以彈簧做為隔振器，這個隔振彈簧選用的設計理念是避免共振的產生。

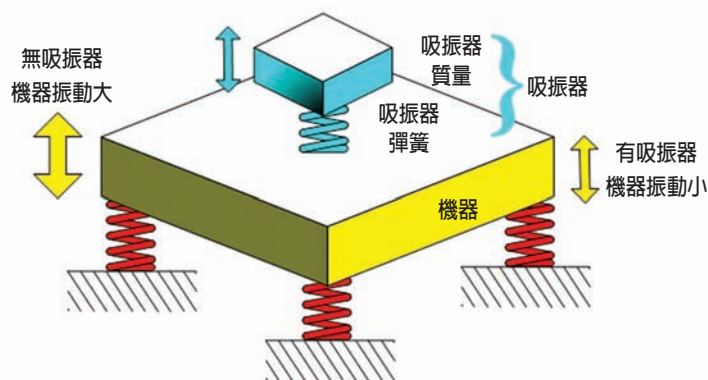
隔振彈簧的彈簧常數選擇，必須使得這機器與隔振彈簧合成的系統，所具有的自然頻率「不等於」這機器正常運轉下所對應的外力激振頻率，以避免形成共振而使得機器位移振幅太大，同時也可以降低由機器振動傳遞到地面的振動力。

從另一個角度來看，如果地板有來自於外界的振動，例如高速鐵路車輛行駛經過所引起地表振動，而地面上的機器是極精密的儀器，不能因地表振動而影響儀器的精度，這時就要適當地選擇避震器，使得地板的振動對機器的影響愈小愈好。這種狀況是為避震，因此彈簧是做為避震彈簧使用，以發揮「避震器」的效果。

振動吸收器的工作原理

由前述的阻尼效應可知，除了來自材料本身的能量消耗機制外，其實也可以使用外加於整體結構系統上的附件，以達到阻尼的效果。也就是說能使結構具有消耗或吸收振動能量的功能，以至於能減緩結構系統的振動。能達到這種機制的元件，可稱為阻尼元件或「阻尼器」。

台北 101 大樓在 87 樓至 91 樓之間建置了一個「質量阻尼調節器」，它是針對 101 大樓的需求而量身定做的被動阻尼系統，主要目的是調諧及減低大樓受風吹襲時的擺動，確保大樓人員工作時的舒適



吸振器的功能 無吸振器：若機器的隔振或避震彈簧設計不良且無法再行變更，機器振動甚大。有吸振器：可引導原機器結構的振動能量轉移到吸振器，允許吸振器振動，使得機器本體的振動減少。

度。它可減少整棟建築物因風所引起的擺動量的 40%，也可以減緩大樓因地震而引起的振動。

振動吸收器簡稱吸振器。假設一部已經安裝好的機器，機器運作時的振動振幅

過大，但是機器及附設的隔振或避震彈簧已經無法做設計變更，為改善機器的振動，可在機器上外加一個包含了吸振器質量及吸振器彈簧的典型吸振器。藉由適當的設計，選擇吸振器質量及吸振器彈簧，可引導原機器結構的振動能量轉移到吸振器上，也就是允許吸振器振動，而使得機器本體的振動量減少，以達到減振的目的。

101 大樓的質量阻尼調節器與這裡所說的吸振器，基本原理應是相同的。根據報導，這個質量阻尼調節器總重達 680 公噸，其中金色球體質量塊是一直徑 5.5 公尺，由 41 層 12.5 公分厚的實心鋼板堆疊焊接而成，重量達 660 公噸，它相當於吸振器質量。這個球體質量塊由 8 支直徑 9 公分、長度 42 公尺的鋼索並聯懸吊於 92 樓，這鋼索相當於吸振器彈簧。

本文介紹了振動的周期、頻率及表示振動大小的位移振幅，說明各種典型結構的振動特性，包括自然頻率、模態振型與阻尼效應，以及造成共振的原因與現象，同時介紹隔振器與避震器的差異，以及振動吸收器（吸振器）的動作原理。希望能讓讀者對生活周遭的各種振動現象以及因應措施有所了解。 □

王栢村

屏東科技大學機械工程系