

瞭解地震訊號 檢測網路的基礎知識

地震對人口密集的商业和住宅區、以及所有類型的建築物構成了重大威脅。隨著這些區域越來越大，建築物越來越多，地震監測需要實現一個廣泛的感測器網路。由於成本高且複雜，傳統儀器不能勝任，而使用微機電系統 (MEMS) 加速度計和堅固耐用的小型地震檢波器，則可開發低成本的物聯網 (IoT) 解決方案。主動元件和轉換器的最新技術，使這些感測器能夠達到現代儀器標準，而 ADI 公司也為地震感測器網路應用提供了簡單、但可靠的儀器設計解決方案。

■作者：Jesse Santos/ADI 系統開發部的產品應用工程師

Angelo Nikko Catapang/ 系統開發部的產品應用工程師

Erbe D. Reyta / 硬體應用工程師

簡介

隨著世界相互聯繫和相互依存的程度越來越高，中型和大型地震可能會造成重大的經濟破壞和損失。發生在任何脆弱城市中心地區的大地震，都會對中心地區的國民經濟及其企業提供服務和全球參與的能力產生連鎖反應¹。人們應認識到地震風險是一個全球性問題，而提高地震監測能力以減輕這種風險，則是至關重要的責任。

改良地震監測的一個關鍵因素，是地震感測器網路的實現，這需要廣泛部署地震儀器並將其互連²。然而，安裝大量傳統地震儀器的成本和複雜性均很高³。整合物聯網技術可提供低成本解決方案，同時維持標準地震資料品質⁴。本文將討論地震和地動感測器的物理原理、遵循的現代儀器標準以及它們提取的特徵。此外，針對不同地震感測器網路應用，我們也開發了一個採用 ADI 解決方案的系統設計。

地震

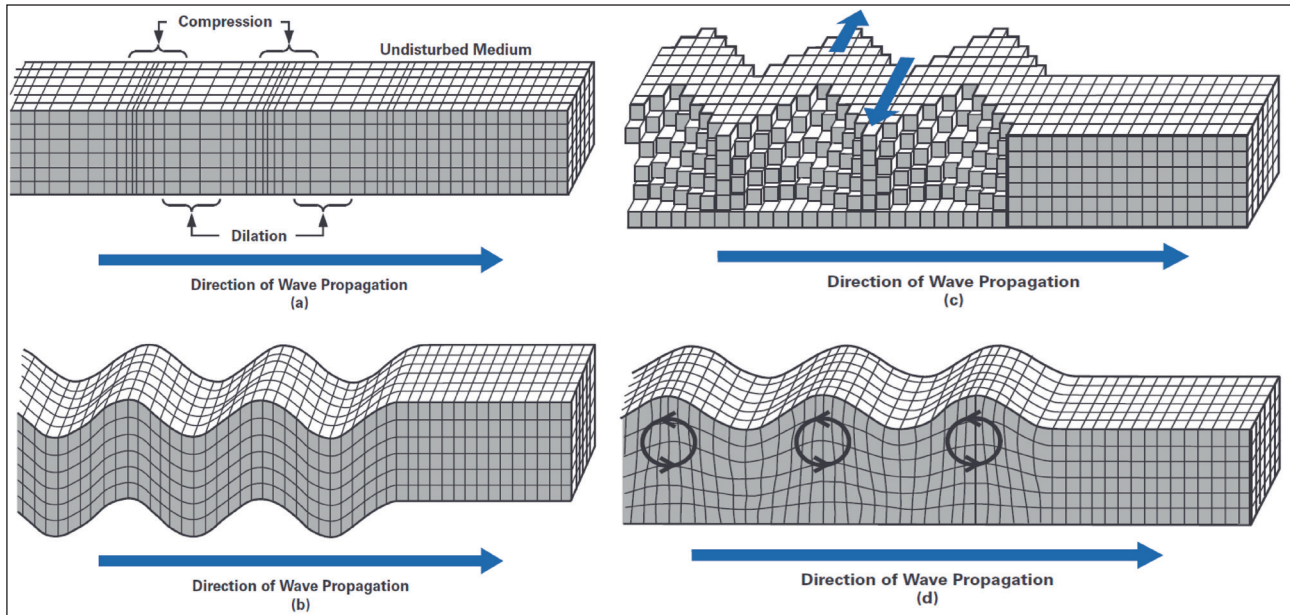
地震是由構造板塊的運動和碰撞引發的事件。碰撞產生的能量以地震波的形式在地球內部表面周圍傳播。這些波有多個方向，分為體波 (body waves) 和面波 (surface waves)。

體波有兩種類型：縱波 (P 波) 和橫波 (S 波)。

P 波以一系列壓縮波和稀疏波的形式沿傳播方向行進。由於其傳播的性質，P 波呈球面發散。雖然其波能衰減在所有類型的波中是最大的，但其速度最快，介於 5 km/s 至 8 km/s 之間。快速能量衰減也使其成為破壞性最小的一類波。P 波不僅可以透過表面傳播，還可以透過水或流體傳播。

S 波也稱為剪切波，緊隨 P 波之後到達。其沿地球表面傳播的速度約為 P 波的 60% 至 70%。此類波垂直於傳播方向和地球表面行進。S 波的能量衰減較少，比 P 波更具破壞性。P 波和 S 波統稱為體波。

面波比體波慢 10%，但破壞力最大。值得注意的是，地震波的傳播速度與其經過的土壤類型有很大關係⁶。面波由瑞利波 (Rayleigh waves) 和勒夫波 (Love waves) 組成。瑞利波是一種以紋波形式在地表附近傳播的面波，它會引起順行 (沿傳播方向) 或逆行 (與傳播方向相反) 旋轉。由於其運動性質，它也被稱為地滾波。勒夫波的行進方向與傳播方向正交，但與地球表面平行。圖 1 顯示了不同類型的波及其對地球本體的影響。

圖 1: 地震波的類型: (a) 縱波; (b) 橫波; (c) 勒夫波; (d) 瑞利波⁵

震級、強度和頻譜強度

地震震級和地震強度常常被相互混淆。二者有一定的相關性，但卻是兩個不同地震參數的度量。

地震強度

地震強度 (簡稱強度) 在很大程度上取決於測

量位置的特性。它描述地震對特定區域的影響，在世界範圍內普遍使用，是一種量化振動方式和破壞程度的傳統方法。因此，地震強度沒有一個真實的值。地震強度值遵循修正的 Mercalli 強度量表 (1 至 12) 或 Rossi-Forel 量表 (1 至 10)。不過，修正的 Mercalli 強度 (MMI) 現已成為世界的主導標準。表 1

表 1: 簡易版修正 Mercalli 強度量表

MMI	影響描述
I	基本無感，只有極少數人在特別有利的條件下才會感覺到。
II	只有少數人休息時會感覺到，尤其是在建築物的較高樓層。
III	室內的人，尤其是建築物較高樓層中的人們，感覺相當明顯。許多人不會意識到這是地震。靜止的汽車可能會輕微搖晃。振動類似於卡車透過引起的振動。持續時間預計很短。
IV	若在白天，室內會有很多人感覺到，室外感覺到的人較少。若在晚上，會使某些人驚醒。盤子、窗、門會受到擾動；牆壁發出撕裂聲。感覺像重型卡車撞擊建築物。靜止的汽車搖晃明顯。
V	幾乎每個人都感覺到；許多人被驚醒。一些盤子、窗戶破裂。不穩定的物體被掀翻。擺鐘可能會停止。
VI	所有人都會感覺得到，使許多人感到驚恐。一些重型傢俱發生移動；會有一些石膏掉落。損壞輕微。
VII	設計和建造良好的建築物中的損壞可忽略不計、精心建造的普通建築物受到輕微至中等的損壞，而建造不良或設計不良的結構則會受到相當大的損壞、一些煙道斷裂。
VIII	特別設計的結構受到輕微損壞、普通的堅固建築物受到相當大的損壞，部分造成坍塌。建造不良的建築物受到重大破壞。煙道、工廠煙囪、圓柱、紀念碑和牆壁倒塌。重型傢俱則被掀翻。
IX	特別設計的結構受到相當大的損壞；精心設計的框架結構發生傾斜。堅固建築物損壞嚴重，部分坍塌。建築物偏離地基。
X	一些精心建造的木質結構被損毀；大多數磚石和框架結構連同基礎被損毀。鐵軌扭曲。
XI	幾乎沒有 (磚石) 結構保留下來。橋樑被毀。鐵軌扭曲嚴重。
XII	全面破壞。視線和水平線變形。物體會被拋到空中。

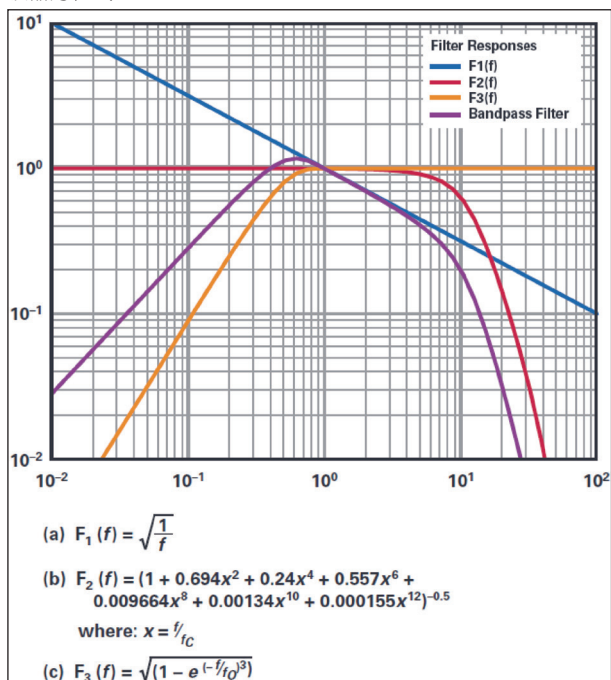
列出了美國地質調查局 (USGS) 提供的修正 Mercalli 量表中的強度值及其相應的影響描述。

確定地震強度的方法有很多⁷。這些方法使用從以往地震中收集的資料，創建自己的地震動預測方程式 (GMPE) 來預測強度值。推導出的方程式至少使用一個地震動參數或地震動參數的組合，即峰值地震動位移 (PGD)、峰值地震動速度 (PGV) 和峰值地震動加速度 (PGA)。早期方程式主要基於 PGA，有幾種使用了 PGV 和 PGD。雖然 GMPE 使用多個資料庫中的資料來建立相關性，但不同模型得出的值仍然差異很大。例如，使用 Wald 的 GMPE，10 cm/s² 的 PGA 值得出的 MMI 值為 3.2。而根據 Hershberger 的 GMPE，10 cm/s² 的 PGA 值對應的 MMI 值為 4.43。請注意，大多數 GMPE 遵循冪律，MMI 值每增加一級，PGA 值需要指數式增加。式 1 給出了 Wald 和 Hershberger 創建的相關性方程式。

式 1 顯示了地震動預測方程式：(a) Wald；(b) Hershberger。⁸

$$\begin{aligned} MMI &= 2.2\log(PGA_{max}) + 1 \\ MMI &= 2.33\log(PGA) + 1.5 \end{aligned} \quad (1)$$

圖 2：計算 JMA 強度所用加速度計輸出訊號的帶通濾波器：(a) 週期效應濾波器方程式；(b) 高截止濾波器方程式；(c) 低截止濾波器方程式。⁹



日本氣象廳 (JMA) 設計了一種地震強度量表，它可以根據強運動三軸加速度數據來計算⁹。每個軸的加速度時間訊號都資訊傳立葉轉換。圖 2 所示的帶通濾波器 (由週期效應濾波器、高截止和低截止濾波器組成) 應用於每個軸的頻率訊號。圖中還給出了每個子篩檢程式的數學表示。

對每個軸的濾波後頻率訊號進行傅立葉逆變換之後，計算所有三個軸的相應時域訊號向量和的大小。累計持續 0.3 秒或更長時間的最高加速度值被指定為 a_0 。然後使用式 2 從 a_0 計算儀器地震強度，即利用持續時間至少為 0.3 秒的最高加速度求解 JMA 地震強度方程式⁹。

$$I/JMA = 2\log a_0 + 0.94$$

其中：

$$I/JMA = JMA \text{ 地震強度} \quad (2)$$

$a_0 = \text{持續 0.3 秒或更長時間的最高加速度}$

地震頻譜強度

地震強度衡量特定位置感受到的地震的影響，而頻譜強度 (SI) 則衡量地震對特定結構施加的破壞性能量的大小¹⁰。SI 值利用式 3 所示方程式根據速度響應譜來計算。高剛性結構的速度法向週期為 1.5 s 至 2.5 s。SI 值針對的是震動速度譜，因此能夠輕鬆區分地震活動與地震或其他來源。所以，SI 值可以用作地震對建築物結構健康影響的標準。此外，與 JMA 地震強度相比，SI 值涉及的計算較為簡單，這使其更適合低功率應用。

式 3 給出了頻譜強度方程式，即震動速度響應譜對建築物法向速度週期的積分¹¹。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv(T, h) dT$$

其中：

$$SI = \text{頻譜強度} \quad (3)$$

$Sv(T, h) = \text{頻率範圍 } h \text{ 和週期 } T \text{ 的震動速度譜}$

地震震級

地震震級 (簡稱震級) 表示地震在震源處釋放

的能量。其值不取決於測量位置。實際上，它只有一個真實值，即按照裡氏量表指定的數位。有記錄的最強地震是 1960 年代襲擊智利瓦爾的維亞的地震，震級為 9.4 至 9.6。

地震震級與強度之間的相關性尚未完全界定清楚。明確界定二者之間的關係取決於許多因素，包括震源的深度、震源周圍的地質組成、震中與測量設備之間的地形類型、設備位置或其距震中的距離等。例如，2017 年 5 月發生在俄勒岡州海岸附近的地震被確定為 4 級。根據 2017 年 7 月的 USGS 震動圖¹²，蒙大拿州感到的地震強度為 5 至 6 級，愛達荷州也感到了相同的地震，但強度只有 2 至 3 級。這表明，即使愛達荷州比蒙大拿州更靠近震中，但這並不一定意味著前者感到的地震影響會更強烈。

地震感測

地震感測是指測量和分析地震波的過程。地震波不僅指地震產生的運動，施加在地面上的任何力，即便是人在地面上走路那麼小的力，都可能引起足以產生地震波的擾動。地震監測應用感興趣的地動範圍非常大。地震產生的地動可能像紙一樣薄，也可能像房屋一樣高。

地動可以透過位移、速度和加速度來表徵。地動位移透過地球表面行進的距離來衡量。位置變化可以是水準的，也可以是垂直的。地動速度指地表面移動的速度，而地動加速度指地動速度相對於時間的變化速度。地動加速度是確定地震過程中引起結構應力的最重要因素。GeoSIG 的一份演示材料中顯示了震級、地震動和強度之間的關係¹³。

用於地震感測的設備屬於專用設備。涉及地震感測的應用可以根據其頻率範圍進行分類。因此，儀器的頻率響應曲線必須適合其使用場景。GeoSIG 的一張圖表顯示了不同地震感測應用及其涵蓋的頻率¹³。

現代地震儀和地震動感測器概述

地震感測設備通常稱為地震儀，已經從使用傳

統的筆和擺錘發展到使用電子和機電感測器。這些感測器的設計進步產生了具有不同工作頻率範圍、感測機制和測量不同地震動參數的儀器。

應變地震儀

歷史上的地震儀器只能記錄地動位移。技術的進步使得透過不同機制來測量地動位移成為可能。應變地震儀或應變儀一般是指記錄和測量兩個地地點之間位移的儀器¹⁴。傳統模型使用埋入或安裝在鑽孔中的實心杆。杆通常注入石英和其他對長度和應變變化高度敏感的材料。長度的變化歸因於地動引起的小位移。

另一種實現方式稱為體積應變儀，它使用帶有充液管的安裝在鑽孔中的圓柱體¹⁵。容器體積的變形會引起液位元變化，再透過電壓位移感測器轉換為地動位移。由於不需要傳統模型所需的特殊材料，體積應變儀在該領域得到了更廣泛的應用。

雷射技術的最新發展使得人們製作出了鐳射干涉儀，它大幅提高了應變儀的精度。此類應變儀使用與不等臂長邁克爾遜 (Michelson) 干涉儀相同的原理，一點是感測器、鐳射源和短臂，另一點是反射器，該反射器位於一定距離之外。設備將反射器運動引起的干涉條紋變化轉換為地動位移。這種位移測量方法的靈敏度和精度與測量距離的長度成正比。因此，鐳射應變儀需要非常深的地下設施。

應變儀的精度可以達到十億分之一。這些設備通常用於測量斷層運動和火山活動引起的地球變形或地殼運動。它們可以測量頻率非常低的地震波訊號。但是，與懸吊品質塊相對於地面的運動相比，應變儀的差分地面運動非常小。因此，不建議使用應變儀來檢測地震引起的地面運動³。

慣性地震儀

慣性地震儀確定相對於慣性參考的地動參數，慣性參考通常是一個懸吊品質塊³。具體來說，地震動參數指的是懸吊品質塊的線速度和位移。雖然合成的地震動包括線性和角度分量，但地震波的旋轉

效應可以忽略不計。這些速度和位移值是從感測器獲得的，感測器將懸吊品質塊的運動轉換為電訊號。控制運動的機械懸架與作用在懸吊品質塊上的慣性力相關。速度和位移感測器與機械懸架是慣性地震儀的兩個主要組成部分。為這兩個部分開發精密儀器是現代慣性地震儀的主要設計工作。

力平衡加速度計

機械懸架需要一個較小的恢復力以提高靈敏度，如此較小的加速度也能在懸吊品質塊上產生較大位移。但是，當強地震運動產生的大加速度作用於懸吊品質塊時，較小恢復力將無法平衡所產生的運動。因此，被動機械懸架的精度和靈敏度只適用於有限範圍的地震動加速度。力平衡加速度計 (FBA) 透過向機械懸架增加負反饋環路來消除此限制。

電磁感測器根據懸吊品質塊的位置產生補償力。該位置由位移感測器轉換為電訊號，訊號隨後透過一個積分器模組，產生與地震動加速度成比例的輸出電壓。FBA 的動態範圍明顯大於採用被動機械懸架的地震儀。因此，該設備通常用於強地震應用。但是，回饋迴路所引起的延遲則會限制設備的頻寬。

速度寬頻 (VBB) 地震儀

車輛運動和人為擾動 (例如採礦) 引起的地震波具有高頻地震動加速度。在非常低的頻率下，地動加速度以不平衡的懸架、地面傾斜和熱效應為主。因此，使用地震動加速度的地震儀的頻寬以具體帶通響應為限。地震動加速度的帶通響應等效於地震動速度的高通響應。因此，為了獲得更寬的地震儀頻寬，地震訊號是以地震動速度記錄的。VBB 地震儀基於 FBA，但不是將懸吊品質塊的加速度作為回饋，而是使用其速度和位置。該設備的響應與傳統慣性地震儀的理論響應非常相似，但是對於更廣泛的作用力，其靈敏度和精度不會降低。

地震檢波器和微機電系統 (MEMS) 加速度計

日益增多的地震應用的趨勢是發展地震儀或地震感測器網路和陣列，例如用於地震監測、石油勘探和結構健康監測方面。地震儀的實施、遮罩和安裝是這些應用的三個常見約束條件。設備的規模生產和快速部署能夠直接克服這三個常見限制，為此要求地震儀的尺寸和成本相應地縮減。當前有兩類感測器技術能夠檢測地震動；與 FBA 和 VBB 相比，它們的尺寸非常小，而且成本低。

地震檢波器

地震檢波器是一種地震動速度感測器，其重量輕，堅固耐用，不需要任何電源即可工作。現代地震檢波器的外殼上固定有一塊磁鐵，並被一個線圈包圍¹⁶。線圈被彈簧懸掛起來，可以在磁體上移動。此運動相對於磁鐵的速度會感生一個輸出電壓訊號。

圖 3 所示為 4.5 Hz 地震檢波器的模擬頻率響應。對於高於其諧振頻率的頻率範圍，地震檢波器的頻率響應在速度上是平坦的，而對於此頻率以下的頻率則是下降的。小型且低成本的地震檢波器的諧振頻率通常高於 4.5 Hz。

根據地震檢波器的機械規格可以創建等效電氣

圖 3: 模擬 4.5 Hz 地震檢波器頻率響應，阻尼係數為 0.56

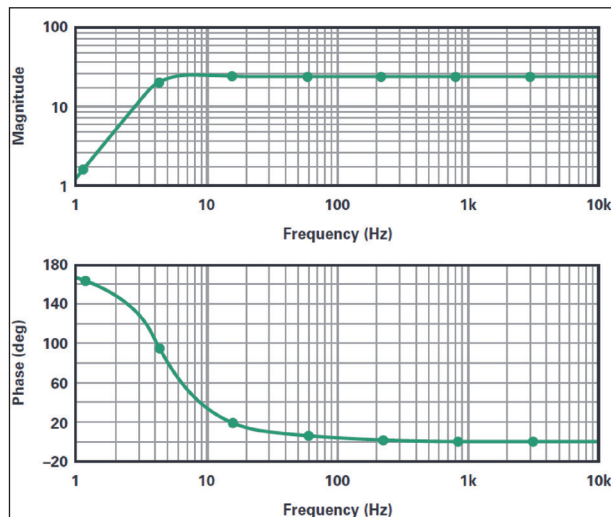
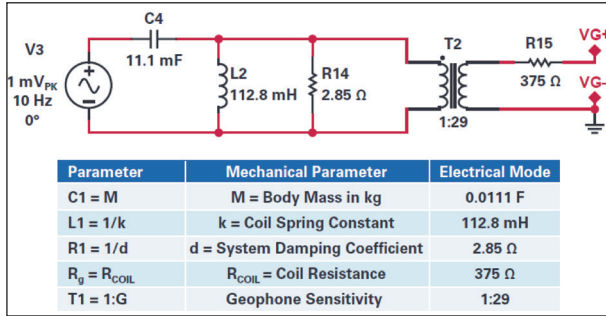


圖 4：使用產品資料表中的機械參數得出的 SM-6 4.5 Hz 地震檢波器的等效電氣模型¹⁷



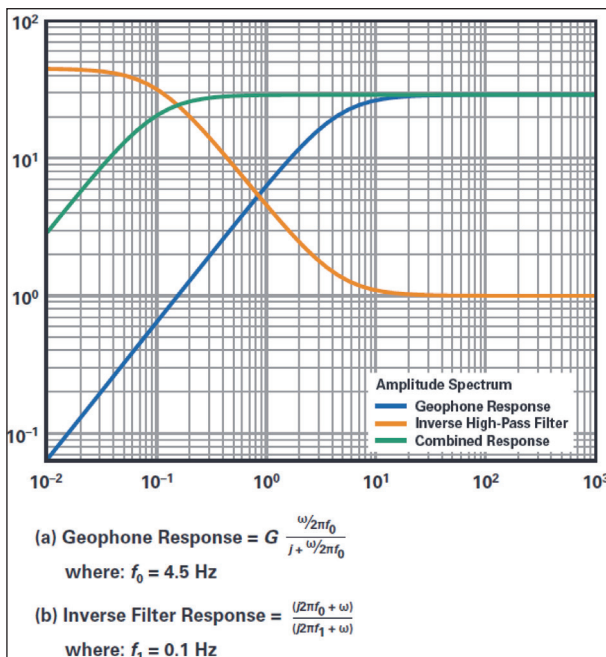
模型。圖 4 顯示了使用 SM-6 4.5 Hz 地震檢波器的機械參數的電氣模型。¹⁷

為了擴展頻寬以覆蓋適用於地震檢測的較低頻率，可以使用週期擴展器。低頻響應擴展的三種最常見方法是逆濾波器、正回饋和負回饋。¹⁸

逆濾波器

在低於諧振頻率的頻率上，逆濾波器會補償地震檢波器的滾降。透過級聯諧振頻率的反相高通濾波器和截止頻率為所需降低值的低通濾波器，可以構建逆濾波器。圖 5 顯示了逆濾波器的響應以及應用時得到的轉換函數。此方法有很多缺點，使得總

圖 5：逆濾波器轉換函數的頻率響應及其對模擬 4.5 Hz 地震檢波器頻率響應的影響



體結果的訊噪比 (SNR) 較低。粉紅雜訊會被逆濾波器放大，而且其低頻熱穩定性很差。

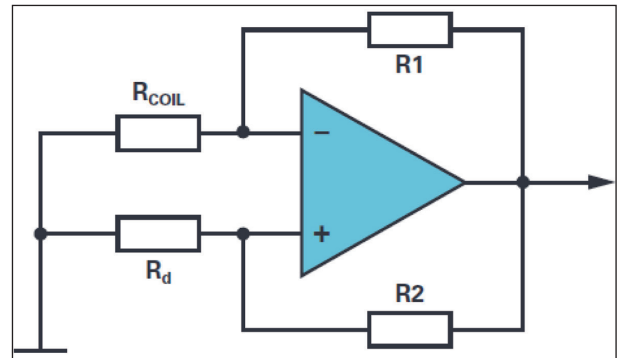
正回饋

正回饋是將外部電流饋入地震檢波器線圈來實現的，電流會產生一個力作用在懸吊品質塊上。此外部電流訊號是透過正回饋濾波器（例如積分濾波器）從地震檢波器的輸出訊號中匯出的，它會放大低頻懸吊品質塊的運動。在實際情況中，正回饋濾波器的設計很難保持穩定。

負回饋

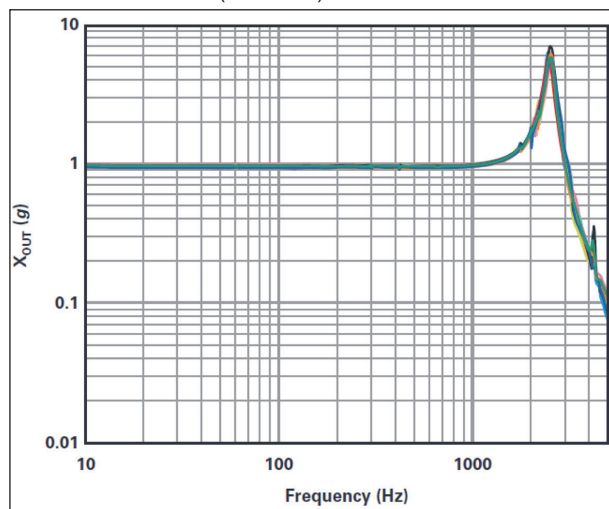
與正回饋相反，負回饋會減弱內部懸吊品質塊的運動。一種方法是透過降低阻尼電阻來使流過地震檢波器線圈的電流過阻尼。但是，這會受到線圈電阻的物理限制。為將阻尼電阻減小到顯著低於線圈電阻的值，應添加一個負電阻。負電阻可以透過負阻抗轉換器 (NIC) 等主動元件來實現。這可以透過使用運算放大器（運放）來實現，如圖 6 所示。可以添加帶通濾波器和高增益濾波器來對頻率響應進行整形並使之穩定。

圖 6：使用運算放大器的負阻抗轉換器的基本架構



MEMS 加速度計

MEMS 加速度計是採用單個 IC 元件封裝的運動感測器。典型結構是使用一對電容和一個微小的矽品質塊，中間有金屬板¹⁹。非常薄的矽區域將品質塊懸吊在中間。品質塊位置的變化會導致元件電容發生變化，進而轉換為與懸吊品質塊的加速度成比例的電壓訊號。MEMS 元件需要電源才能工作，

圖 7: MEMS 加速度計 (ADXL354) 在 X 軸上的頻率響應²⁰

某些 MEMS 加速度計內置數位化儀，可消除不必要的雜訊，而且無需匹配感測器和記錄器。如圖 6 所示，MEMS 加速度計的頻率響應就像一個截止頻率為諧振頻率的低通濾波器。

由於失調漂移，MEMS 加速度計在諧振頻率以下的較高頻率時表現更好²¹。相反，地震檢波器由於其機械結構，在較低頻率（但仍高於諧振頻率）時表現更好。可以實現一個小型低成本的地震儀，以同時利用地震檢波器和 MEMS 加速度計來獲得更高的元件頻寬。當與適當的感測器轉換函數進行卷積運算時，地震檢波器和 MEMS 加速度計的感測器輸出可以轉換為不同的地動參數。論文「地震檢測：使用實驗室和現場資料比較地震檢波器與加速度計」(Seismic Sensing: Comparison of Geophones and Accelerometers Using Laboratory and Field Data)，基於每種感測器的常見轉換函數，討論了針對相同地震動位移 Ricker 子波的地震檢波器和 MEMS 加速度計感測器輸出²¹。

地震感測器儀器指南

為了提供可重複性和一致性，並支援採用地震儀陣列或地震感測器網路進行地震訊號分析，需要對所用的儀器制定一套標準和規範。USGS 已為其主要部署在國家先進地震系統 (ANSS) 中的儀器設定了

標準²²。本部分根據 USGS 提到的經驗和技術趨勢，討論廣泛應用實現期望元件性能所需的不同規格。

資料獲取系統 (DAS) 標準

USGS 將現代地震儀歸類為資料獲取系統。與傳統地震儀相比，標準 DAS 包括地震感測器、資料獲取單元以及周邊和通訊硬體。根據設備性能可將其分為 A、B、C、D 四類儀器。A 類儀器接近最先進的地震儀，而 D 類儀器可與傳統地震儀相媲美。有關規格的詳細討論，請參見《儀器指南》²²。

儀器頻寬

對於測量速度和加速度的地震感測器，其額定頻寬和頻率響應是不同的。儀器等級越高，其頻寬越寬，頻率響應越好。寬頻感測器全都是 A 類儀器，頻寬至少為 0.01 Hz 至 50 Hz。在 0.033 Hz 至 50 Hz 的頻率範圍內，其對速度的頻率響應是平坦的。²²

短週期 A 類傳感器具有 0.2 Hz 至 50 Hz 的低頻寬。只有在 1 Hz 至 35 Hz 的頻率範圍內，其對速度的頻率響應才是平坦的²²。

A 類加速度計在 0.02 Hz 至 50 Hz 範圍內具有平坦的頻率響應，而 B 類加速度計僅在 0.1 Hz 至 35 Hz 範圍內具有平坦的頻率響應。²²

強震動、弱震動和寬頻感測器

DAS 使用的感測器按其捕獲的地震訊號的幅度和頻率範圍進行分類。強震動感測器可測量大幅度地震訊號，通常是加速度計。強震動加速度計可測量高達 3.5 g 的加速度，而且系統雜訊水準低於 $1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ²²。

弱震動感測器可測量幅度非常低的地震訊號，雜訊水準低於 $1\text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ ²²。然而，寬頻感測器已經能夠測量低幅度的地震訊號，因此很少使用弱震動感測器。

感測器動態範圍和削波位準

寬頻速度感測器的靈敏度為 1500 Vs/m。當最

大輸出電壓為 $\pm 20 \text{ V}$ 時，輸出削波位準或最大可測速度為 $\pm 0.013 \text{ m/s}$ 。²²

在較小頻率範圍內，短週期速度感測器比寬頻感測器更靈敏。對於 1 Hz 訊號頻率，削波位準通常為 $\pm 0.01 \text{ m/s}$ 。²²

A 類加速度計的削波位準大於 $\pm 3.5 \text{ g}$ ，而 B 類加速度計的削波位準為 $\pm 2.5 \text{ g}$ 。²²

感測器動態範圍是指最大可測量地震訊號的均方根值與均方根自雜訊之比。但是，感測器的均方根自雜訊會隨其頻寬而變化。表 2 列出了不同地震感測器在不同頻率範圍下的動態範圍。

表 2: 不同類型感測器的動態範圍：寬頻感測器²²

頻率範圍 (Hz)	寬頻感測器動態範圍 (dB)
0.01 至 0.05	131
1 至 10	126
10 至 15	116

表 3: 不同類型感測器的動態範圍：短週期感測器²²

頻率範圍 (Hz)	短週期感測器動態範圍 (dB)
1 至 10	138
10 至 15	128

表 4: 不同類型感測器的動態範圍：加速度計²²

頻率範圍 (Hz)	加速度計動態範圍 (dB)	
	A 類	B 類
0.02 至 2	145	
2 至 50	130	
0.1 至 35		87.3

感測器通道和方向

地震波產生的線性地震動分量於所有三個笛卡爾軸中均存在。三軸地震感測器的傳統標準方向是朝東、朝北和朝上。但是，對於水準和垂直感測器，傳統（甚至某些現代）地震儀的結構是不同的，因為垂直感測器必須考慮重力作用。同質三軸排列支援使用結構類似的感測器來確定笛卡爾坐標軸上的線性地震動分量³。感測器位於一個以儀器為中心的圓的三個均等間隔點上，並向其傾斜 54.7° （相對於垂直方向）。使用式 4 所示的方程式可將修改的坐標軸轉換回笛卡爾坐標軸。

式 4 展示了將同質三軸排列轉換為笛卡爾坐標系的轉換矩陣。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} \quad (4)$$

然而，大部分現代感測器已被封裝和設計成支援三軸測量。這些感測器具有非常小的固有跨軸耦合效應。儀器指南要求跨軸耦合必須小於輸出訊號的 -70dB 。²²

解析度和採樣速率

在非常低的頻率下，地震引起的地震動幅度可能非常小。用於地震儀器的資料記錄儀能夠以高解析度記錄各種採樣速率的訊號。寬頻地震儀至少需要 20 位元資料解析度，採樣速率為最低 0.1 SPS（樣本 / 秒）至最高 200 SPS。短週期速度感測器和 A 類加速度計至少需要 22 位元資料解析度，採樣速率為 1 SPS 至 200 SPS。B 類加速度計對資料解析度的要求較低，至少 16 位即可。²²

採樣速率規格考慮了儀器及其內部資料儲存。但是，高級地震儀配備了更多的儲存空間，並且可以存取大型網路資料空間（例如雲端資料服務），因此可以支援超過額定規格的採樣速率，這樣便可展開更準確的資料分析和地震研究。

時間和位置資訊

地震訊號僅與特定的測量位置和時間有關。每台地震儀器的資料都有時間戳記和已知全球位置，這是標準。每台地震儀器的每次記錄都必須能夠附加上其位置，要麼透過手動用戶輸入，要麼透過全球定位系統（GPS）設備或服務。現代地震儀還有內建即時時脈，或者可以透過線上網路時間協定（NTP）伺服器與精確參考時間同步。

輸出資料格式

全球地震儀器主要使用兩種資料格式：SEG-Y 和 SEED。SEG-Y 格式是由勘探地球物理學家協會（SEG）開發的一種開放標準，用於處理三維地震訊號之類的地球物理資料²³。每個記錄都包括時間戳記、採樣間隔和實際測量的座標位置。格式規範和

修訂的詳細資訊可以在該組織的網站上查看。還應注意的是，有多種使用 SEG-Y 格式的地震分析開源軟體，但大多數軟體並未嚴格遵循規範。

地震資料交換標準 (SEED) 格式旨在簡化機構之間和儀器之間交換未處理的地震資料並確保準確性²⁴。雖然它主要用於地震記錄存檔，但有不同版本的 SEED (例如 miniSEED 和無數據 SEED) 用於資料分析和處理。miniSEED 僅包含波形資料，而無數據 SEED 包含有關地震儀器和測站的資訊。

ADI 系統設計

為了快速部署和實現地震網路，特別是針對城市和結構監測站，必須改變傳統地震儀的設計。遠端儀器必須符合當前儀器指南，以使現代地震訊號測量符合既有資料標準並與之相關聯。但是，方案的成本和規模應大大縮小。將小型地震檢波器和 MEMS 加速度計用作地震動感測器，再加上高性能 ADC 和數位訊號處理器 (DSP)，是一種合理的解決方案。⁵

類比數位轉換器 (ADC) 考慮

DAS 的資料獲取單元 (DAU) 的主要設計考慮因素是類比數位轉換器 (ADC)。傳統上，這是由數位現場系統 (DFS) 來執行的，該系統用作線性逐次逼近寄存器 (SAR) 型 ADC 和暫態浮點 (IFP) 放大器。圖 8 所示為傳統 DFS 的框圖。

前置放大器 (PA)、低截止 (LC)、高通濾波器、陷波濾波器 (NF)、抗混疊 (AA) 高通濾波器和 IFP 放大器的分立實施會增加系統雜訊和功耗。多工器的使用會增加開關、串擾和諧波失真。最重要的是，

SAR ADC 引起的量化誤差會限制系統的動態範圍和解析度²⁵。因此，最好使用其他架構和其他轉換器來設計 DAU。

Sigma-Delta ($\Sigma - \Delta$) 型轉換器

$\Sigma - \Delta$ 型轉換器利用訊號中的變化並將其添加到原始訊號中。這樣可以減少 SAR ADC 固有的量化誤差，並能實現更高的解析度和動態範圍。有了現代 $\Sigma - \Delta$ 型 ADC，便不再需要以分立方式實現訊號調理濾波器。這些 ADC 具有豐富且可配置的數位濾波器，它們可以執行與傳統訊號鏈相同的功能。而有效降低了系統雜訊和設計複雜性。此外，高階精密 $\Sigma - \Delta$ 型 ADC 能夠以至少 24 位元解析度同時檢測多個通道。

使用 ADI 解決方案的現代 DAS 設計

圖 9 給出了一種低成本地震感測器節點實施方案的一般框圖，這種節點可靈活適應不同的應用。

支援地震成像功能的 ADI 三軸加速度計解決方案有 ADXL354 和 ADXL356。其數位輸出版本分別為 ADXL355 和 ADXL357，整合了 20 位元 ADC，可以直接與處理器連接²⁰。

低成本精小型地震檢波器僅檢測單個通道，諧振頻率通常大於 4.5 Hz，靈敏度大於 25 V/m/s。同質三軸排列允許將三個類似的單通道地震檢波器組合成一個三軸地震動感測器。需要一個週期擴展器來向下擴展地震檢波器頻寬，以達到寬頻感測器的標準儀器規格。當設計採用單電源供電時，週期擴展器還可以用作增益放大器，並將輸入訊號的偏置設置為 ADC 範圍的中心。

圖 8: 使用 IFP 放大器系統的傳統 DFS 的框圖

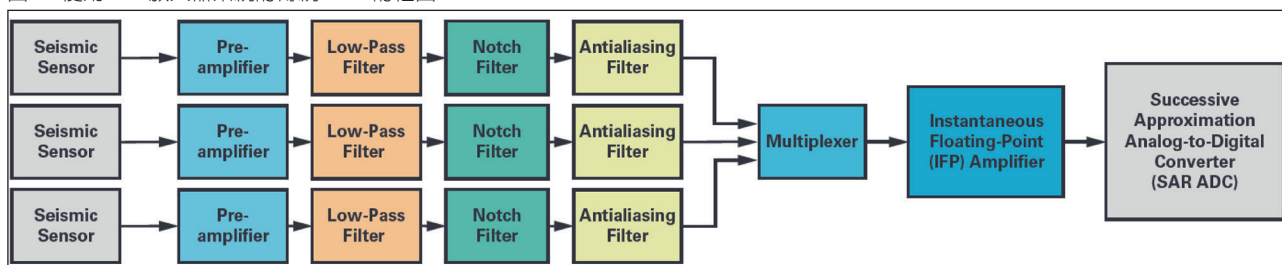
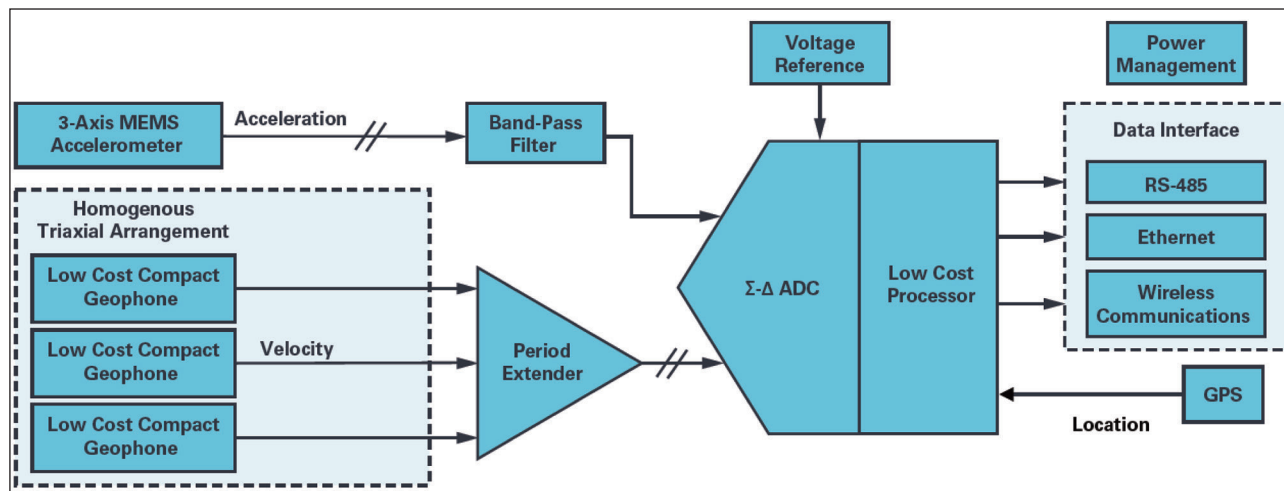


圖 9：採用三個同質三軸排列的地震檢波器和一個三軸 MEMS 加速度計的低成本地震儀的一般框圖



MEMS 加速度計固有的頻率響應使其容易受到失調漂移和高頻雜訊的影響。帶通濾波器可改善局部地震學感興趣的頻率範圍內的加速度訊號。地震檢波器週期延長器和加速度計帶通濾波器都需要低雜訊、低失調電壓和低輸入偏置電流的精密運算放大器，例如 ADA4610-1²⁶。

基準電壓設定 ADC 的測量範圍和週期擴展器的輸出訊號擺幅。如果使用模擬輸出感測器，基準電壓值還應考慮三個加速度訊號的電壓擺幅。基準電壓的失調電壓溫漂必須非常低，特別是對於室外社施（通常在 0°C 至 50°C）。ADI 公司的超低雜訊和高精度基準電壓源 ADR45xx 系列是業界標杆，可以輕鬆滿足這些要求²⁷。

對於具有電力線的設施，例如建築物和測站，地震感測器的電源可以從有線直流電源轉換器獲取；對於遠端和現場設施，電源可以從電池獲取。從有線直流電源轉換器獲取時，低雜訊開關穩壓器和低雜訊、低壓差 (LDO) 穩壓器適合應用。ADI 的 LDO 穩壓器（例如 ADM717x 系列）具有高電源電壓抑制比 (PSRR)、低溫漂和低雜訊特性²⁸。電池供電的設計需要高負載效率且低功耗的充電控制器和電池充電器，以便維持儀器長期運行而無需維護。此外，如果儀器能夠從容易獲得的能源（例如太陽能 and 熱能）中收集能量，那麼便更好。ADP5091 超低功耗能量採集器具有最大功率點追蹤和遲滯模式，可確

保能量傳輸效率最高²⁹。它有電源路徑管理功能，可以在收集器、充電電池或原電池之間切換，使得自供電儀器能夠可靠地運行。

如果使用類比輸出加速度計， $\Sigma - \Delta$ 型轉換器會接收來自週期擴展器的三個通道速度訊號和另外三個通道加速度訊號。該設計需要至少有六個輸入通道的轉換器。如果可能，速度和加速度訊號須同時採樣。對於採樣時在通道之間切換的多通道 ADC，採樣速率需要更高。地震的目標訊號最大頻率為 100 Hz。對於這些訊號，無混疊的採樣頻率應為至少 200 Hz 或每週期 5 ms。每個加速度和速度通道應以至少 1.2 kSPS 的採樣速率採樣。地震訊號的分析推動了每個通道的過採樣。因此，應選擇採樣速率遠高於 1.2 kSPS 的 ADC。AD7768 為一款 8 通道 24 位元 $\Sigma - \Delta$ ADC，支援同步採樣，無需更高採樣速率³⁰。其最大採樣速率為 256 kSPS，但在低功耗模式下，採樣速率可降至 32 kSPS。它非常靈活，支援以不同方式實施和應用地震儀器設計，並能輕鬆達到 A 類資料獲取單元的標準要求。

低成本處理器的功能因應用而異。對於使用外部計算設備進行資料分析的遠端節點，處理器是一個資料記錄儀，它將所有通道的地震資料儲存並打包為標準格式 (SEED 或 SEG-Y)，然後透過資料介面將其發送到計算設備。此應用的處理要求較低，因此可以使用低功耗微控制器。ADuCM4050 是一

款超低功耗 AR Cortex -M4 微控制器，推薦用於物聯網應用³¹。它有低功耗模式，休眠模式功耗為 650 nA，快速喚醒關斷模式功耗為 200 nA。此外，它還有兩個即時時脈 (RTC) 周邊用於計時和時間同步資料採樣。

對於內建資料分析功能的獨立儀器，DSP 會根據應用計算地震特徵和其他參數，例如用於結構健康監測的建築物健康指標。地震資料分析需要計算各種數學和統計函數。例如，地震強度的計算需要對數函數和用於加速度和速度的峰值檢測視窗。此外，處理時間應足夠短，以便能連續進行資料採樣和處理。ADSP-BF706 是一款低成本、低功耗 DSP，處理速度高達 400 MHz，是現場儀錶應用的業界首選 DSP³²。它提供多個無縫週邊介面，使得連接資料介面和 ADC 等外部元件更容易。

儀器的位置資料可以從 GPS 模組中提取，或者在安裝過程中手動設定。對於時間資料，低成本 DSP 可以使用其內部 RTC 周邊，或透過資料介面使用 NTP。資料介面有多種選擇，具體取決於安裝類型。儀器可以使用工業 RS-485 介面進行有線通信（尤其是在建築物內部），或使用乙太網介面輕鬆將設備連接到現有資料網路。對於無線通訊，儀器可以使用 Wi-Fi 設備或 ADI 公司 SmartMesh IP³³，後者可在動態環境中實現全面的資料可靠性。

應用

隨著各個位置部署的地震感測器數量的增加，地震資料的可靠性也會提高。從地震資料中可以提取大量資訊，這些資訊可用於廣泛的應用，例如結構健康監測、地球物理研究、石油勘探、甚至工業和家庭安全。本部分概要地介紹了地震感測器網路的三種常見應用。

遠端地震網路

火山學和地震學研究將地震感測器部署在險峻（有時甚至危險）的地形中³⁴。監測火山內部過程需要在多點進行地震動監測。在火山活動的某些階段

之後，這些位置可能會變得危險，並使地震感測器無法取回。低成本、低功耗地震感測器將會降低研究成本，同時保持很長的使用壽命。另一個類似情況是板塊運動的特徵，這也需要沿著斷層線部署大量地震感測器。

地震預警系統

S 波和面波是更具破壞性的地震波，但其傳播速度比破壞性最小的 P 波要慢。利用這種特徵可以實現一種檢測地震早期跡象的地震預警系統。如此，所有類型的系統都有一個很短的時間來作出響應，防止地震造成重大破壞。在劇烈地面震動發生前的一刻，住宅和商業建築將能夠關閉電力系統和天然氣管道。使用受保護區域周圍多個位置部署的地震感測器網路，將有助於增加允許的反應時間。另外，非地震源引起的誤報也會降到最低。圖 10 顯示了用於保護特定區域或結構的地震預警系統的可能設定。

預警系統允許的響應時間與地震感測器距受保護結構的徑向距離成比例，如式 5 所示。假設 P 波以 3.5 mi/s 或 5.6 km/s 的速度行進，而 S 波以 2.0 mi/s 或 3.2 km/s 的速度行進，則可以計算出，地震感測器與保護區的距離每增加 7.51 km，響應時間就會增加一秒。此外，以較短の間距放置多個地震感測器將能為響應時間提供更高的時間解析度。

式 5 展示了預警系統響應時間與地震感測器距保護區的徑向距離之間的關係。

$$t_{\text{response}} \times (7.51 \text{ km/s}) = d_{\text{radial}}$$

其中：

$$t_{\text{response}} = \text{允許響應時間 (單位為秒)} \quad (5)$$

$$d_{\text{radial}} = \text{地震感測器距保護區的徑向距離}$$

結構健康監控

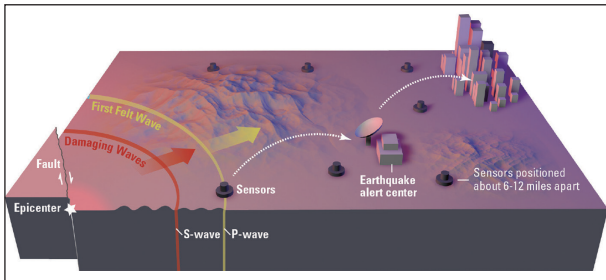
透過監測建築物對受迫振動測試的響應並建模，可以提高建築物的地震安全性。在建築物中安裝地震感測器將有助於地震災後評估、響應和恢復。在廣泛損壞的情況下，廣泛分佈的地震感測器網路可以定位結構損壞區域，從而降低目視檢查的風險和成本。一項關於強震動儀器的研究將此應用於 20

層鋼制 MRF 建築——Atwood 大樓，使用部署在 10 個層級的 32 個基於加速度計的地震感測器來精準監測大樓的結構健康狀況³⁶。

結論

地震感測器網路在工業技術、地震研究和結構健康監測中應用廣泛。應用需求已改變地震儀的感測器和系統需求，使其更青睞遠端系統和較低運行成本。現代低成本地震動檢測技術的測量能力已經能夠與傳統儀器相媲美。採用 ADI 的各種產品將可實現一種滿足不同地震檢測應用的檢測設備。

圖 10：使用地震感測器網路的地震預警系統，感測器部署在相距 6 英里至 12 英里的多個位置。圖片由 Erin Burkett (USGS) 和 (Orange County Register) 製作。由美國地質調查局 ShakeAlert 專案提供³⁵。



參考文獻

- ¹ Hiroo Hanamori、Egill Hauksson 和 Thomas Heaton。“即時地震學與地震危害減輕”。自然，第 390 期，第 461-464 頁，1997 年 12 月。
- ² “地震預警”。美國地質調查局，2019 年。
- ³ Erhard Wielandt。“測震學”。國際地震與工程地震學手冊，A 部分，Elsevier B.V.，第 283-304 頁，2002 年。
- ⁴ Ana María Zambrano、Israel Pérez-Llopis、Carlos E. Palau 和 Manuel Esteve Domingo。“物聯網技術應用於地震預警系統”。Future Generation Computer Systems，第 75 卷，2017 年。
- ⁵ Giuseppe Olivadoti，“在地震的最初時刻進行檢測、分析並採取行動”。《類比對話》，第 35 卷，2001 年 1 月。
- ⁶ Ruwan Rajapakse。“地震學短期課程”。樁設計和施工經驗法則，第 241-245 頁，2016 年。
- ⁷ John Douglas。“地震動預測方程式 1964–2019”。University of Strathclyde，2019 年。
- ⁸ Lepolt Linkimer。“哥斯大黎加峰值地震動加速度與修正 Mercalli 強度之間的關係”。中美洲地質學報，第 38 卷，第 81-94 頁，2008 年。
- ⁹ Khosrow T. Shabestari 和 Fumio Yamazaki。“根據三分量加速度記錄評估的與 MMI 相容的儀器地震強度量表的提案”。Earthquake Spectra，第 17 卷，第 4 期，第 711-723 頁，2001 年 11 月。
- ¹⁰ 關於地震監測系統的一切”。IMV Corporation，2019 年 6 月。
- ¹¹ Brendon A. Bradley、Misko Cubrinovski、Gregory A. MacRae 和 Rajesh P. Dhakal。“基於頻譜加速度方程式的 SI 地震動預測方程式”。美國地震學會通報，GeoScienceWorld，2009 年 2 月。
- ¹² M 5.8 - 蒙大拿州林肯市東南 11 公里”。美國地質調查局，2017 年 7 月。
- ¹³ 地震訊號與感測器”。GeoSIG，2009 年 9 月。
- ¹⁴ Neil R. Gouly。“地球物理學中的應變儀和傾斜儀”。Tectonophysics，第 34 卷，第 3-4 期，第 245-256 頁，1976 年 9 月。
- ¹⁵ “監測儀器”。美國地質調查局，2019 年。
- ¹⁶ Yong-hui Zhao、Li-ming Wang 和 Xiao-ling Yan，運動線圈速度檢測器的原理與模擬”。第二屆國際電子電氣會議：Techniques and Applications (EETA)，2017 年。
- ¹⁷ “SM-6 地震檢波器”。Input/Output, Inc.，2003 年 10 月。
- ¹⁸ Dieter Stoll。“地震儀、擴展響應”。地震工程百科全書，Springer-Verlag Berlin Heidelberg，2015 年。
- ¹⁹ B. John Merchant。“MEMS 在地震學中的應用”。地震儀器技術研討會。桑迪亞國家實驗室，2009 年 11 月。
- ²⁰ “低雜訊、低漂移、低功耗 3 軸 MEMS 加速度計：ADXL354/ADXL355”。ADI 公司，2016 年。
- ²¹ Michael S. Hons。“地震檢測：使用實驗室和現場資料比較地震檢波器與加速度計”。University of Calgary，2008 年 9 月。
- ²² ANSS 技術集成委員會工作組 D。“國家先進地震系統儀器指南”。美國地質調查局，2008 年 9 月。
- ²³ “地震資料格式 (SEG-Y 格式)”。美國地質調查局，2001 年。
- ²⁴ Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)。“SEED”。國家科學基金會，2019 年。
- ²⁵ Norman M. Cooper。“地震儀器——有何新聞？... 是否真實？”Recorder，第 21 卷，第 10 期，加拿大勘探地球物理學家學會，2002 年 12 月。
- ²⁶ “低雜訊、精密、軌到軌輸出、JFET 單 / 雙 / 四運算放大器：ADA4610-1/ADA4610-2/ADA4610-4”。ADI 公司，2019 年 6 月。
- ²⁷ “超低雜訊、高精度基準電壓源”。ADI 公司，2018 年 12 月。
- ²⁸ “6.5 V、500 mA、超低雜訊、高 PSRR、快速瞬態響應 CMOS LDO：ADM7170”。ADI 公司，2019 年 9 月。
- ²⁹ “整合 MPPT 和充電管理功能的超低功耗能量採集器 PMU”。ADI 公司，2017 年 5 月。
- ³⁰ “8/4 通道、24 位元同步採樣 ADC，具備功耗調節功能、110.8 kHz 頻寬”。ADI 公司，2018 年 7 月。
- ³¹ “集成電源管理的超低功耗 ARM Cortex-M4F MCU”。ADI 公司，2019 年 4 月。
- ³² “Blackfin+Core 嵌入式處理器：ADSP-BF70x”。ADI 公司，2019 年 2 月。
- ³³ “SmartMesh IP 應用筆記”。ADI 公司，2017 年 2 月。
- ³⁴ Vyacheslav M. Zobin。“火山活動的地震監測與火山噴發預測”。《火山地震學導論》(第二版)，第 407-431 頁，Elsevier，2011 年 12 月。
- ³⁵ Robert de Groot。“ShakeAlert：美國西海岸地震預警系統”。ShakeAlert，2019 年。
- ³⁶ Z. Yang, U. Dutta、M. Celebi、H. Liu、N. Biswas、T. Kono 和 H. Benz。“阿拉斯加州安克雷奇市中心 Atwood 大樓的強震動儀器與結構響應”。第 13 屆世界地震工程大會，2004 年 8 月。