

# 如何利用模態分析設計傑出的振動感測器外殼（下）

■作者：Richard Anslow / ADI 系統應用工程師

## 具有 21 kHz 諧振頻率的三軸 10 kHz MEMS 感測器

相較於單軸感測器，跨三個軸控制外殼設計的固有頻率更加困難，特別是當需要 21 kHz 性能時。

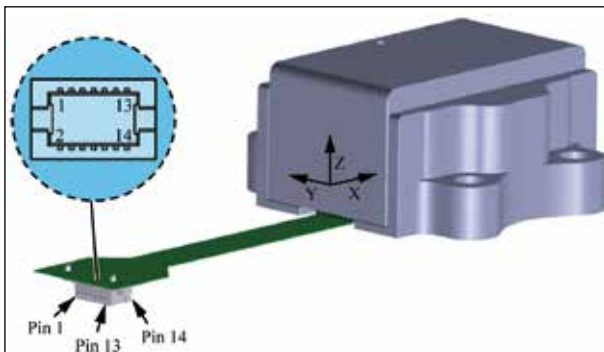
### ADcmXL3021

幸運的是，ADI 開發出 ADcmXL3021  $\pm 50g$ 、10 kHz 三軸數位輸出 MEMS 振動感測模組，如圖 21 所示。ADcmXL3021 採用 23.7 mm  $\times$  27.0 mm  $\times$  12.4 mm 鋁制封裝，配有四個安裝法蘭，可使用標準 M2.5 機器螺絲進行安裝。ADcmXL3021 封裝的鋁材和幾何形狀支援 x、y 和 z 軸上高於 21 kHz 的諧振頻率。

### 將 ADcmXL3021 附加到 IP67 等級的外殼上

在工業環境中部署 ADcmXL3021 時，需要使用 IP67 等級（防水和防塵）的外殼和連接器。此外，ADcmXL3021 的 SPI 輸出不適合與長電纜搭配使

圖 21：ADcmXL3021 三軸數位輸出 MEMS 感測器，採用鋁材封裝和柔性連接器。

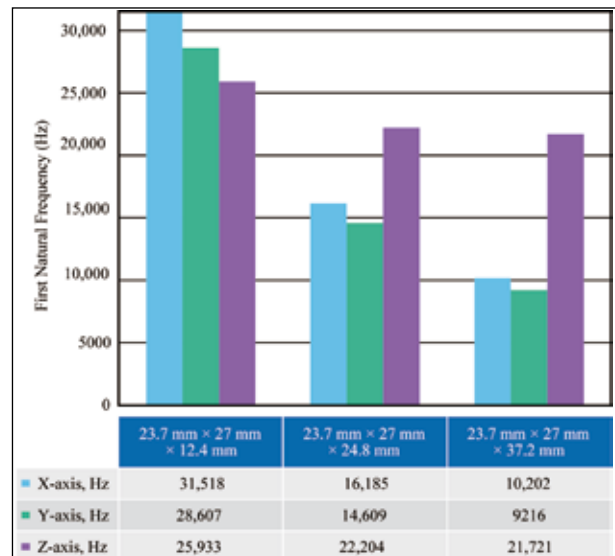


用。需要使用工業乙太網路或 RS-485 收發器電路來轉換 SPI 輸出，以實現長電纜驅動。

基於本文中的研究，無法將 ADcmXL3021、RS-485 或乙太網路 PCB 以及一個連接器部署在同一個外殼中，並在所有三個軸（x、y 和 z）上實現 21 kHz 諧振頻率。透過元件組合，可以盡可能縮小外殼尺寸，如前面圖 2 所示（40 mm  $\times$  43 mm  $\times$  37 mm）。圖 2 顯示，三個軸上的一級有效固有頻率在約 10 kHz 至 11 kHz 之間。此外，圖 2 中的模擬未使用連接器，而連接器會使實際高度增加，且會進一步降低固有頻率。

如果使用 FEM 模擬簡單的矩形鋁材外殼，其尺寸為 23.7 mm  $\times$  27 mm  $\times$  12.4 mm（比如 ADcmXL3021），壁厚為 2 mm，那麼所有軸上的一級有效固有頻率會超過 21 kHz。

圖 22：增加一個形狀（例如 ADcmXL3021）的高度。



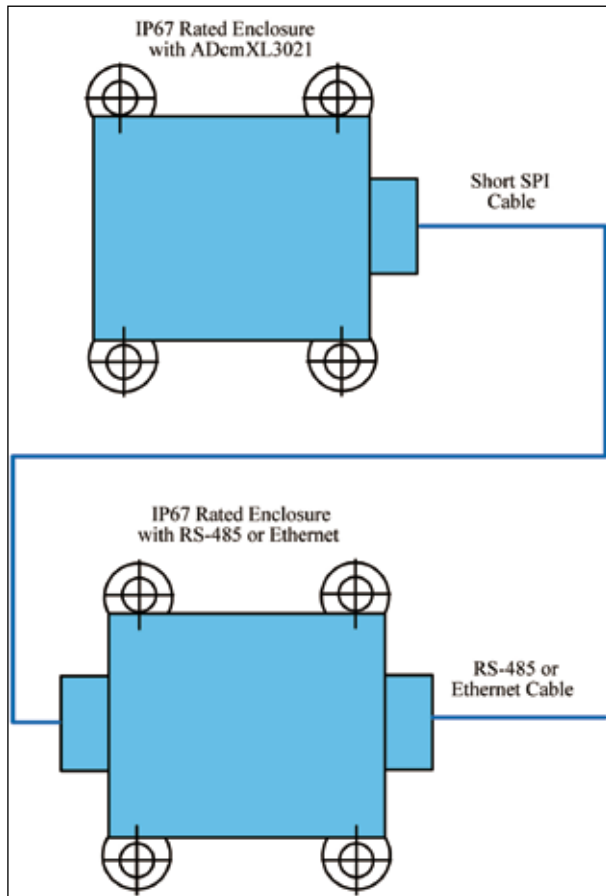
如果將 12.4 mm 高度增加一和兩倍，以便為額外的電路提供空間，那麼固有頻率會大幅下降，如圖 22 所示。即使只留下 12.4 mm 的空間來容納額外的電路，一級有效固有頻率也會降到低於 15 kHz。

### 分散式系統

我們建議使用圖 23 所示的分散式系統，而不是嘗試將所有元件整合到一個矩形外殼中。根據此概念，ADcmXL3021 被封裝到一個 IP67 等級的外殼中，SPI 資料在短距離（不到 10 cm）內路由到一個單獨的 IP67 等級的外殼中，該外殼中整合了電纜介面 PCB、乙太網路或 RS-485 收發器，以及相關的電源 IC 和其他電路。

使用此方法時，幾何外形大幅減小，也可明顯簡化將外殼的固有頻率與 ADcmXL3021 的固有頻率匹配的問題。

圖 23: ADcmXL3021 和介面電路封裝在單獨的外殼中。



### 設計和模態分析

如之前所示，相較於圓柱形，矩形是一種可以在三個軸上實現相似固有頻率性能的好方法。在圖 23 中，ADcmXL3021 封裝在一個精巧尺寸的空心矩形外殼中，在 ADcmXL3021 柔性電纜和工業連接器之間使用微型 PCB 進行連接。該模型可以使用小型 M8 介面，例如 TE 7-1437719-5。矩形外殼具有 4 個 M2.5 安裝孔，用於固定安裝到設備上。外殼的總尺寸為 40.8 mm × 33.1 mm × 18.5 mm。重要的是，z 軸高度為 18.5 mm，這有助於實現更高頻率模式。

在圖 24 中，y、x 面和 4 個 M2.5 孔是受約束的，用於進行模態模擬。z 方向是整個設計中最弱的一環，即使高度在 20 mm 以下。圖 25 顯示 FEM 模態模擬的主導模式之一，該圖顯示外殼頂部的相對結構變形程度更大。

可以透過增加壁厚來增大 z 方向的剛度。例如，如果使用 2 mm 壁厚，z 方向的一級有效固有頻率為 14.76 kHz。使用 3 mm 壁厚時，該頻率將增加

圖 24: 用於封裝 ADcmXL3021 的空心外殼。

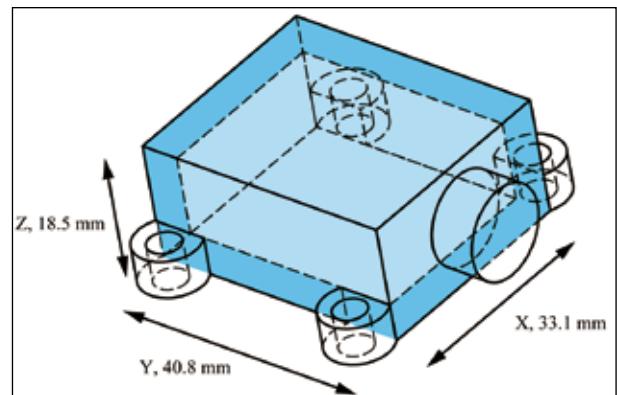
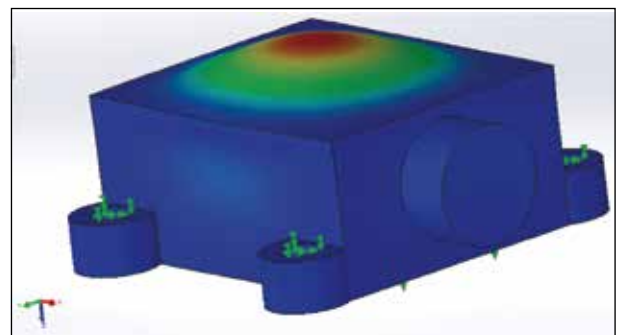
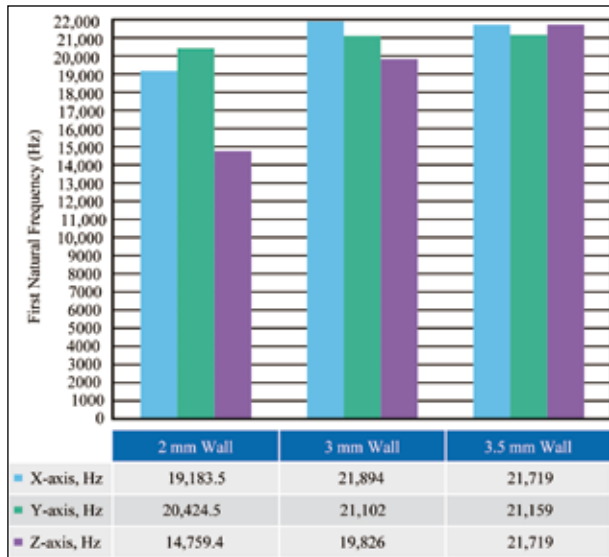


圖 25: 用於封裝 ADcmXL3021 的空心外殼模擬的主導模式。



到 19.83 kHz。如圖 26 所示，使用 3.5 mm 壁厚時，z 方向的固有頻率會超過 21 kHz。

圖 26: z 軸的一級有效固有頻率與壁厚的關係。



### 在外殼中加入環氧樹脂

可以在振動感測器外殼中加入環氧樹脂，將硬體 PCB 保持在固定位置，並防止連接器和內部接線移動。

為研究環氧樹脂對外殼固有頻率的影響，採用固定壁厚為 2 mm 的 40 mm × 40 mm 空心不銹鋼立方體來創建簡單的 FEM 模型。立方體中填充 36 mm × 36 mm 環氧樹脂。將外殼高度從 40 mm 增加到 80 mm，再到 100 mm，在填充和不填充環氧樹脂的情況下，交互進行模擬。進行 FEM 模擬時，將 x、y 面作為固定約束條件。

表 7 顯示模擬結果，其中有些發現非常有趣：

表 7: 壁厚為 2 mm、40 mm (長) × 40 mm (寬) 的不銹鋼立方體的高度 (mm)、環氧樹脂填充 (是 / 否) 和一級有效固有頻率

高度 (mm)	是否填充環氧樹脂	X 軸頻率 (Hz)	Y 軸頻率 (Hz)	Z 軸頻率 (Hz)
40	否	8547	8450	9291
40	是	8586	8585	16,259
80	否	3943	3943	9716
80	是	3567	3530	11,272
120	否	2208	2208	9293
120	是	1906	1906	8045

■當感測器高度較低，且高度等於長度 / 寬度時，環氧樹脂使得懸臂軸 (z) 的一級有效固有頻率增加 75%。

■當感測器高度為 80 mm，為長度 / 寬度的 2 倍時，如果使用環氧樹脂填充，懸臂軸 (z) 的一級有效固有頻率增加 16%。但是，x 和 y 徑向軸的頻率降低 10%。

■當高度增加到長度 / 寬度的 3 倍時，環氧樹脂會使一級有效固有頻率降低。

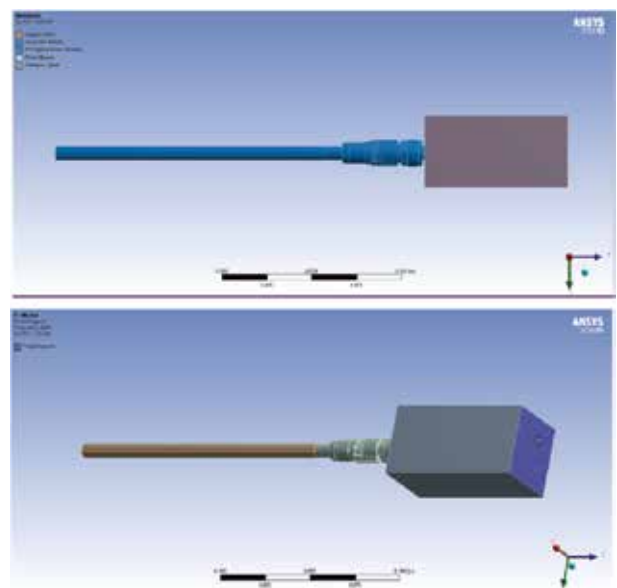
當高度增加時，品質增加、剛度下降。在某個點，品質增加帶來的影響比環氧樹脂增加的剛性更大。在給定的模擬示例中，這個反曲點對應的高度大於 80 mm。但是，大多數感測器的高度一般都低於 80 mm。由此可以得出結論，在大多數情況下，加入環氧樹脂可協助改善振動感測器外殼解決方案的固有頻率性能。

### 外部電纜模擬

在機器表面安裝振動感測器後，應將電纜固定，以降低電纜終端的應力，防止電纜振動導致的錯誤訊號。固定電纜時，留下足夠的鬆弛度，以自由移動加速度計。<sup>7</sup>

此部分模擬振動電纜對系統回應的影響，並指

圖 27: 電纜和感測器模型，包含材料屬性和 0.15 m 電纜長度。



導應在何處夾緊電纜 (在什麼電纜長度)。

按照圖 27 所示的材料屬性創建模擬模型。TE 提供連接器和電纜模型，例如 TAA545B1411-002，可將其用作基準。纜線連接器由尼龍 (尼龍 6/6) 製成，採用銅芯線和 PVC 絕緣層。連接的感測器採用不銹鋼設計，並填充了環氧樹脂。該模擬模型支援在感測器連接處有一個固定約束條件，且 0.15 m 電纜的整個長度可以自由振動。為了進行模擬，可以將 0.15 m 電纜長度增加到 1 m。

表 8 顯示模擬結果，其中有些重要發現：

- 如果電纜在短於 0.15 m 的長度夾緊，那麼電纜對振動感測器頻率響應的影響最小。無論有沒有 0.15 m 電纜，感測器外殼的頻率響應都高於 11 kHz。
- 如果為感測器連接 1 m 電纜，並且允許該電纜沿整個長度自由移動和振動，那麼增加的電纜重量將會決定系統的頻率響應。500 Hz 電纜頻率響應將成為主導模式。

表 8: 在連接和不連接振動感測器外殼時的電纜長度 (m) 和一級有效固有頻率 (Hz)

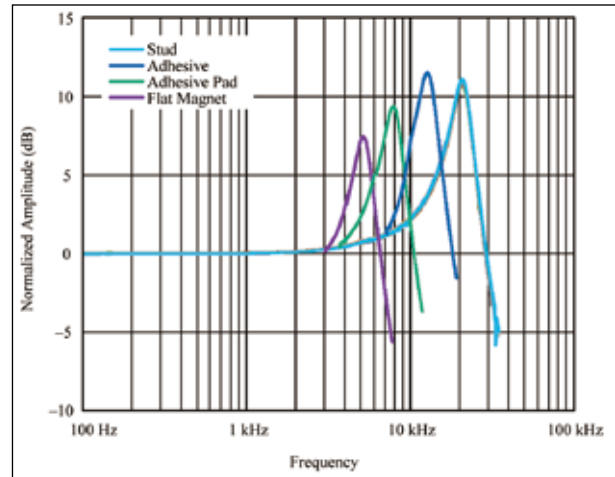
電纜長度 (m)	模擬中使用的感測器 ?	Z 頻率 (Hz)
1	是	464
1	否	508
0.15	是	11,272
0.15	否	11,568

事實上，不可能整根 1 m 電纜都會振動，因為振動會隨電纜長度增加而減弱。但是，本模擬示例顯示，在約 0.15 m 的位置固定有助於實現精準的系統回應。

## 振動感測器安裝

圖 28 顯示對安裝諧振的影響，以及圖 29 所示的螺栓、黏合劑、黏合劑安裝墊以及扁平磁鐵技巧的典型可用頻率範圍。螺栓和黏合劑安裝可使感測器盡可能接近機器，在機器和 MEMS 感測器之間實現傑出的振動信號耦合。使用具有黏合劑安裝墊的夾具時，會在機器和感測器之間加入額外的金屬材料。這些額外材料會減弱感測器解決方案中的頻率

圖 28: 安裝技巧對感測器諧振的影響。



響應。扁平磁鐵安裝也會減弱頻率響應，且在固定連接到設備時，不如其他方法可靠。

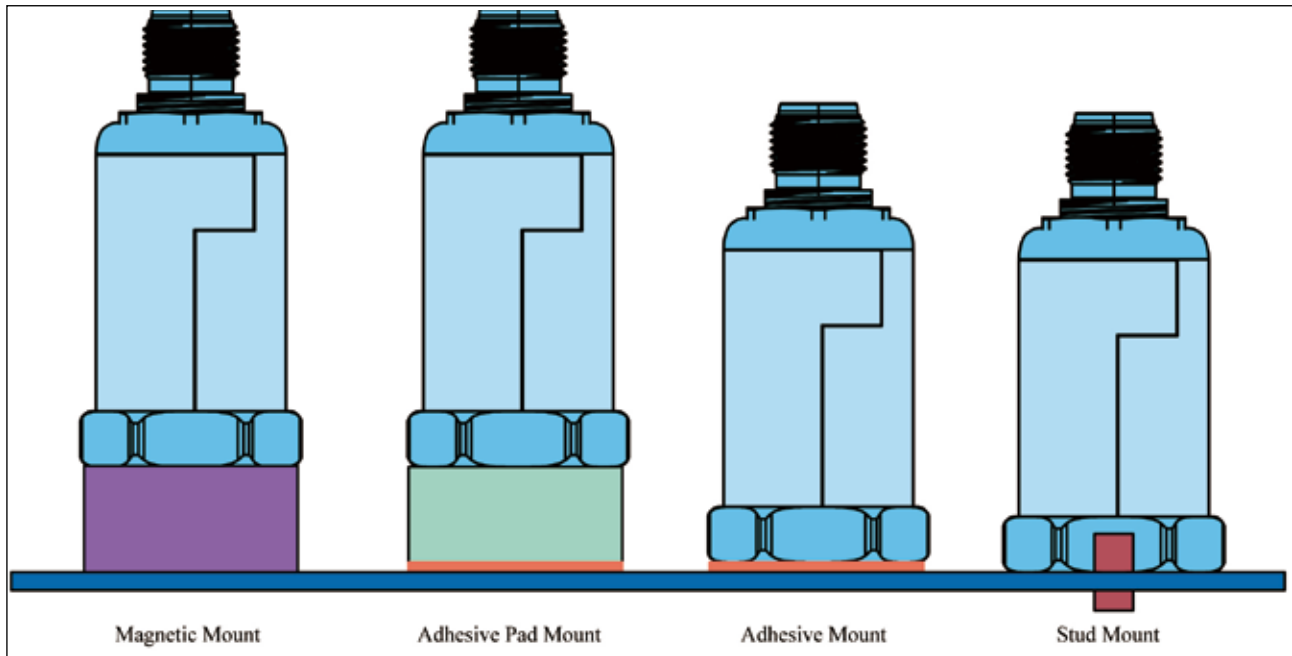
圖 28 僅提供典型指南，應透過實驗室測量或模擬確定每個感測器的特徵。

使用默認的黏結接觸約束條件，透過 ANSYS 模態分析來模擬螺栓安裝。此時，振動感測器底部，特別是 ¼" -28 英寸安裝孔被指定為使用 ANSYS 時的固定約束條件。約束條件類型為默認的黏結或螺栓連接。

對黏結接觸進行模擬是一個進階話題，需要使用 ANSYS 內聚力建模 (CZM)，還需要瞭解接觸力學。為了確保準確性，ANSYS CZM 要求輸入的參數以實驗室測試資料為基礎。例如，可以將文章「使用剛性雙懸臂樑技術直接測量黏合劑內聚力關係」8 作為 ANSYS 的輸入。如果您未找到針對選擇的黏合劑發佈的實驗資料，您將需要做一些實驗室測量。此外，需要在 ANSYS 中設定正確的接觸公式，並提供短課程指導，例如接觸力學基本主題。9 最後，需要在 ANSYS 工作台中結合使用 CZM 和模型技術。

可以使用 ANSYS Maxwell10 來模擬磁場。但是，由於磁力是非接觸力 (其推動或拉動物體，但沒有「實際」接觸)，所以無法產生相應的接觸約束條件，以進行數值模態分析。可以在有黏結、無摩擦、有摩擦和無分離接觸的情況下進行模態分析。如之前所述，也許能夠實現 CZM 接觸。

圖 29: 振動感測器的安裝技術。



## 結論

為 MEMS 加速度計設計一個良好的機械外殼，確保從受監控資產中擷取高品質的 CbM 振動資料。

理解模態分析是為 MEMS 加速度計設計出良好機械外殼的必要條件。模態分析提供振動感測器外殼在相關軸上的固有頻率。此外，設計人員可以利用模式參與因數 (MPF) 來確定在設計中是否可以忽略某個頻率。

在設計振動感測器外殼以滿足固有頻率目標時，需要考慮材料特性和幾何形狀。需要盡可能降低外殼高度，以實現更高的固有頻率。降低壁厚或外殼直徑會對外殼的固有頻率產生次要影響。

相較於矩形，圓柱形的橫截面積更大，其設計更有助於在所有軸上實現更高的剛度和固有頻率。與圓柱形相比，矩形提供更多的感測器安裝方向和設備連接選項。矩形有助於在三個軸上保持類似的固有頻率性能。

在大多數情況下，加入環氧樹脂可協助改善振動感測器外殼解決方案的固有頻率性能。使用螺絲或黏合劑安裝可以為振動感測器提供卓越的可用頻率範圍，而使用磁鐵或黏合劑墊則會降低感測器性能。

## 參考電路

- <sup>1</sup> ANSYS 創新課程：模態分析。ANSYS，2021 年。
- <sup>2</sup> Stephen Timoshenko。工程中的振動問題，第 4 版。John Wiley and Sons Inc.，紐約，1974 年。
- <sup>3</sup> Leszek Majkut。「由單差分方程式描述的 Timoshenko 樑的自由振動和強迫振動」。理論與應用力學學報，第 47 卷第 1 期，2009 年 1 月。
- <sup>4</sup> Mohammad Hossein Abolbashari、Somayeh Soheili、Anoshirvan Farshidianfar。「使用分散式集總建模技術的驅動軸的彎曲振動」。第 16 屆國際聲音與振動大會，克拉科夫，2009 年。
- <sup>5</sup> Saida Hamioud、Salah Khalfallah。「Timoshenko 樑的自由振動譜元素分析」。國際工程雜誌，2018 年。
- <sup>6</sup> Olivier A. Bauchau、James I. Craig。結構分析：航空航太結構應用，斯普林格，2009 年。
- <sup>7</sup> TN17：振動感測器安裝，Wilcoxon Sensing Technologies，2018 年。
- <sup>8</sup> A. Khayer Dastjerdi、E. Tan、F. Barthelat。「使用剛性雙懸臂樑技術直接測量黏合劑內聚力關係」。實驗力學學會，2013 年 5 月。
- <sup>9</sup> ANSYS 創新課程：接觸力學基本主題。ANSYS，2021 年。
- <sup>10</sup> Ansys Maxwell：低頻率 EM 場模擬。ANSYS，2021 年。