

Engineer's Circle

加速度計の正しいタイプの選択

Anthony Chu

エンジニアリングにとって、正しいツールの選択は測定結果にかなり重大な影響を及ぼします。下記の説明が正しい加速度計を選択するのに役立つことを望みます。それでは基本的分類とそれらのテクノロジーの解説から始めましょう。

基本的な加速度計のタイプ

一般的に加速度計は2つのクラスに分けられます。:

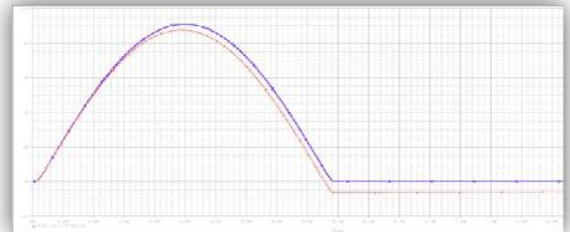
- AC-レスポンス
- DC-レスポンス

AC-レスポンス加速度計は、その名称が示すように、出力がAC結合です。AC結合デバイスは、例えば、重力や一定の遠心加速度のような静的加速度の測定には使えません。これは動的現象の測定にだけ適します。他方、DC-レスポンス加速度計はDC結合で、ゼロヘルツまで対応します。従って、静的と合わせて動的加速度の測定に使用できます。しかしながら、DC-レスポンス加速度計を選択するのは静的加速度の測定だからという理由だけではありません。

加速度、速度、変位

振動試験の大半は、エンジニアが構造の設計や実証をする際に、加速度、速度、変位などの変数を知ることが重要となります。一般的に言って、G-値は優れた基準を提供します。しかし、速度と変位は大抵の設計計算で必要になる変数です。加速度出力から速度と変位を引き出すためには、加速度計からの信号が、アナログまたはデジタルの出力で、それぞれ、積分と二重積分が行われます。

ここがAC-レスポンス加速度計を使用した場合、問題となるところです。下図は、この問題を図解するために、AC-レスポンス加速度計が長期間のハーフサインの入力パルスを測定するのに使用されたときのグラフです。このデバイスの出力は、RC回路(抵抗器・コンデンサ)の時定数によって課せられた本質的制限のために、ハーフサインの入力のピークに完全には追従できていません。ハーフサインパルスの終わりに、AC結合加速度計の出力は、全く同じ理由で、アンダーシュート(オフセット)を作ります。下図の赤色線は長期間のハーフサインの入力の後にAC結合デバイスの出力を描画しています。



これらの一見ささいに思える小さな振幅偏差が数値積分法¹の中で重大な誤差を生む結果となります。DC-レスポンス・デバイスは、速度の遅い入力を正確にフォローできるのでそのような問題がありません。実際、通常のアプリケーションでは、物理的入力にはハーフサインの衝撃はあり得ないでしょうが、速度の遅い動きを追跡する必要がある時、AC結合デバイスではこのような基本的な問題が残ります。さて、これから、さまざまな一般の加速度計技術を検討しましょう。

Engineer's Circle

AC-加速度計

最も一般的なAC-レスポンス加速度計は受感機構に圧電素子を使います。加速度時、加速度計のセイスミック・マス(seismic mass)は圧電素子に電荷の変位を起こさせます。そして、加速度に比例した電気出力を発生します。電気的に通常、圧電素子は 10^{x9} ohms程度の有限内蔵抵抗の付いたソースコンデンサに似ています。これがデバイスのハイパス(高域)特性を定義するRC回路(抵抗器・コンデンサ)の時定数(RC time constant)を形成します。このため、圧電加速度計は静的現象の測定には使用できません。圧電素子には天然または人工のものがあります。それらは変換効率の程度と線形性特性が違います。2つのタイプの圧電加速度計が売り出されています。つまり、荷電出力タイプと電圧出力タイプの2つのタイプがあります。

電荷出力 圧電加速度センサ

圧電センサの大半は、大変広い温度レンジ、広いダイナミックレンジ、および広い帯域幅(>10kHzで使用できる)、チタン酸ジルコン酸鉛セラミック(圧電性)に基づいています。ハーメチックの溶接された金属ケースに収納されると、電荷モード加速度計は厳しい環境条件に耐えることのできる能力を持つことから、最も耐久性のあるセンサの一つと見なすことができます。高インピーダンス特性により、電荷モードのデバイスは低ノイズで、できれば、同軸シールドケーブルを使って使用されねばなりません。



低ノイズとは、ケーブル自体からでる動きによって誘導されるスプリアス出力の低い摩擦電気ノイズ²のことを指します。これらのノイズ対応のケーブルは通常、ケーブルメーカーから入手できません。チャージアンプは一般的に、並列ケーブル容量に伴った問題を避けるために電荷モード加速度計とのインターフェースに使用されます。チャージアンプを使って、電荷モードセンサの広いダイナミックレンジ(>120 dB)が簡単に実現できます。圧電セラミック製品の広い使用温度範囲によって、いくつかの電荷モードデバイスは-200°Cから+400°Cまたはそれ以上まで使用できます。それらは高温での振動測定、例えば、タービンエンジンのモニタリングなどでの使用に適しています。

電圧出力 圧電加速度センサ

その他の圧電加速度計は電荷の代わりに電圧出力を提供します。これは加速度計の筐体内部に電荷増幅器を統合することにより遂行されます。電圧モードデバイスは、3-線式(信号、アース、電源)モードまたは2-線式(電源/信号、アース)モードが特徴です。2-線式モードはまた、Integral Electronics PiezoElectric (IEPE)としても知られています。IEPEはAC信号がDC電力ラインに重なる便利な同軸(2-線)形状であるので、最も人気があります。センサ信号出力からDCバイアスを除去するために直流阻止コンデンサが必要です。多くの最近の信号解析器には、IEPE 加速度計に直接インターフェースできるIEPE/ICP³ input optionがあります。IEPE power optionが利用できない場合は、このタイプのデバイスとのインターフェースにシグナルコンディショナ/定電流電源が必要です。

Engineer's Circle

3-線式モードデバイスは正しく使用するために別にDC電源ラインを必要とします。セラミックの感受素子だけを含む電荷モードセンサとは異なり、電圧モードセンサは超小型電子回路を含んでいて、それがセンサの使用温度を制限します。通常エレクトロニクス最高使用温度である+125°Cに制限されます。設計によっては、限度を+175°Cまで押し上げるものもあります。しかし、これらは性能枠のどこかで妥協の必要が出てきます。



使用可能なダイナミックレンジに関して一言述べると、圧電セラミック素子が非常に広いダイナミックレンジであるため、フルスケールレンジを外付けのチャージアンプから調整できるので、電荷モード加速度計がスケラビリティの点で最もフレキシブルです。他方、電圧モード加速度計は工場内で蔵された増幅器によって事前に決定された独自のフルスケールレンジを持つために変更ができません。

圧電加速度計は小型であるため軽量構造物での動的測定に理想的です。

DC-加速度計

2つの良く知られたセンシング技術がDC-加速度センサの製造に使用されます。:

- 容量型 (Capacitive)
- ピエゾ抵抗型 (Piezoresistive)



容量型

(加速度時のセイスミック・マスの容量変化に基づく) 容量型タイプが、今日、加速度計で使用されている最も一般的な技術です。それらはエアーバッグとモバイル(携帯)機器の決定的に重要なセンサとして人気があります。製造コストが安くなるMEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) の加工技術を採用しているため、大量生産のアプリケーションでメリットをもたらします。しかし、このクラスの低価格の容量加速度計は通常、信号対ノイズ比が良くなく、ダイナミックレンジに制限があります。すべての容量性デバイスで固有なひとつの特性はその内部クロックです。クロック周波数(~500kHz) は電流検出回路の一部として、内部漏洩により出力信号に常に存在します。高周波ノイズは関心のある加速度測定レンジを外れますが、信号には常に存在します。3-線式 (または 差動出力用の4-線式) の電気的なインターフェースは、増幅器/ICが組み込まれているために簡単で、電源に安定したDC電圧源を必要とするだけです。

容量加速度計の帯域幅は、物理的構造とガスダンピングによって、大抵、数百ヘルツに限定されます。容量センサ構造により、加速度測定の低いレンジに適しています。最大レンジは通常、100g's以下に制限されます。これらの制限以外に、最新の容量加速度計、特に、計装グレードのデバイスは、優れた線形性と高出力の安定性を提供します。

Engineer's Circle

コストが主要要素となるところでは、容量タイプの加速度計が搭載モニタリングのアプリケーションに最も適しています。例えば、土木関係での振動測定のようなgレベルの低いところでの低周波運動を測定するのにも理想的です。



ピエゾ抵抗

ピエゾ抵抗がDC-レスポンス加速度計に一般的に使われるもう一つのセンシング技術です。(容量性デバイスのように)セイスミック・マスの中の容量変化を感受する代わりに、ピエゾ抵抗加速度計が加速度計のセイスミックシステムの一部である歪ゲージに抵抗変化を生みます。ほとんどのエンジニアは歪ゲージに詳しく、その出力とのインタフェースの仕方を良く知っています。大部分のピエゾ抵抗の出力は大概、温度変化に敏感です。従って、ピエゾ抵抗の出力は内部的または外部的に温度補償を適用する必要があります。最近のピエゾ抵抗加速度計はあらゆる形態の信号調整と温度補償のためにASICを内蔵しています。ピエゾ抵抗加速度計は5,000 Hz以上まで使用できます。ピエゾ抵抗型は、ガスダンピング(MEMSタイプ)または流体ダンピング(接着方歪ゲージタイプ)のいずれかです。ダンピング特性が加速度計を選ぶ上で重要な要素となります。機械的入力が大変高い周波数入力を含む場合、(または高周波応答を発生する場合)のアプリケーションでは、ダンピングされた加速度計はセンサの共振を防ぎ、ダイナミックレンジを維持または良くします。

ピエゾ抵抗センサ出力は差動で抵抗であるので、信号対ノイズ特性は一般的に極めて優れています。;つまり、そのダイナミックレンジは直流ブリッジ増幅器の性能によってのみ制限されません。極めて高いg衝撃測定の場合、いくつかのピエゾ抵抗型は10,000g's以上の加速度レベルも取扱うことができます。

ピエゾ抵抗タイプの加速度計は、その広い帯域幅の能力により、周波数レンジとgレベルが通常高いところの力積(impulse)/衝撃(impact)の測定に最も適しています。DC-レスポンス・デバイスであるので、その加速度出力から希望の速度と変位の情報を積分誤差なしで導くことができます。ピエゾ抵抗加速度計は通常、車両の安全テスト、武器テスト、および地震(seismic)測定に使われます。

まとめ

加速度計のセンシング技術はそれぞれ利点と妥協点があります。選択を行う前に、さまざまなタイプの基本的な違いとテストで要求される内容を理解することが重要です。静的な極めて低い周波数(<1Hz)の加速度を測定するときは、まず真っ先に、DC-レスポンス加速度計を選んで下さい。DC-レスポンス加速度計もAC-レスポンス加速度計も両方とも動的現象を測定する能力があります。動的測定のみを取扱うときは、DC-レスポンスのデバイスとAC-レスポンスのデバイスの間の選択は実際上、好み上の問題となります。

Engineer's Circle

あるユーザはDC-レスポンスセンサのゼロオフセットの扱いを好まず、AC結合、圧電タイプのシングルエンド出力を好みます。他のユーザはゼロオフセットと4-線(または シングルエンドモードの場合の3-線)の取扱いを気にせずに、DC-レスポンス加速度計のシャント校正と機能テスト(2g turnover)を好みます。要約すれば:

電荷モード圧電型はそのシンプルな構造と丈夫な材料の特性により最も耐久性のある加速度計です。高温 (>125°C) の動的測定アプリケーションの場合は、電荷モード圧電型が明らかな選択肢と言えます。;あるいはほとんどのケースで唯一の選択肢と言えます。電荷モード加速度計の場合、その高インピーダンス出力のために、低ノイズ同軸ケーブルが使用されるべきです。また、その電荷出力を調整するために、リモートのチャージ増幅器(またはインラインのチャージコンバータ)が使用されるべきです。

電圧モード圧電型は動的測定のための最も人気の高いタイプの加速度計です。このタイプは、小型で、広い帯域幅であること、また多くの信号解析器とデータ収録システム(内蔵のIEPE/ICP電源を提供するもの)との直接インタフェースを可能にするチャージコンバータを内蔵しています。電圧モード圧電型は通常、<125°C のアプリケーションに限定されます。しかし、これは低インピーダンス出力のために、もはや、低ノイズ同軸ケーブルを使用する必要がありません。

容量型は低周波数測定に役立つ強く減衰された応答を特色とします。低コストの表面実装型デバイス(SMD=Surface Mount Device)が、高精度を要求しない大量生産の自動車と民生用アプリケーションに理想的です。

もっと高価な計装グレードのシリコンMEMS容量型加速度計は、バイアス安定性が優れていて、ノイズが極めて低いです。容量型加速度計は低インピーダンス出力と2 ~ 5V フルスケール出力を持ちます。大部分のセンサは調整されたDC電圧を電源として必要となります。

ピエゾ抵抗加速度計は周波数とダイナミックレンジの面で用途が広いです。DC-レスポンス・デバイスであるので、静的加速度を計測でき、精密な速度と変位のデータを生成します。ピエゾ抵抗加速度計の広い帯域幅は大抵の動的測定のニーズをカバーします。ピエゾ抵抗型はさまざまな減衰度($\xi = 0.1$ から 0.8まで)の応答を提供します。そのためこれは、衝撃テストを含むさまざまなテスト条件での使用に理想的です。(エレクトロニクスを装備しない)簡素なピエゾ抵抗加速度計は小型で軽量であり、中間の(<5000 Ω) 出カインピーダンスを有し、100 ~ 200 mV フルスケール出力を提供します。(特定用途向け集積回路(ASIC=Application Specific Integrated Circuits)の組み込まれた)増幅モデルは、低出カインピーダンス(<100 Ω)と2 ~ 5V フルスケール出力を特色とします。

引用

1. A. G. Piersol, T.L. Paez, *Harris' Shock and Vibration Handbook 6th Ed.*, p.10.9, McGraw-Hill, 2010
2. A. G. Piersol, T.L. Paez, *Harris' Shock and Vibration Handbook 6th Ed.*, p.15.19, McGraw-Hill, 2010
3. ICP is a registered trademark of PCB. Other popular trade names from various suppliers exist.