

Mesures Vibratoires : Les capteurs piézoélectriques

Introduction

Les mesures de chocs et de vibrations se démocratisent, les mesures d'accélération, de vitesses et de déplacements peuvent être corrélées lorsque la vibration est une sinusoïde simple ne contenant qu'une fréquence. Comme la plupart du temps les vibrations sont complexes et que les mesures font apparaître plusieurs harmoniques, même dans le cadre de manip de labo, la mesure vibratoire devient essentielle dans bien des cas.

La fonction de base, exprimée en variation de déplacement, vitesse ou accélération en fonction du temps, conduit à s'intéresser à la force destructrice qui s'exprime sous la forme $F=M\gamma$ poussée jusqu'à $F_s = M\gamma_{\max}$ ou F est la force, M , la Masse, F_s la masse du spécimen et γ_{\max} l'accélération maximale.

D'où il découle que les mesures de chocs et de vibrations font appel à des capteurs spécifiques dont la compréhension permet le choix.

Ce qui suit traite essentiellement de capteurs de mesures vibratoires dynamiques excluant les mesures accélérométriques linéaires et angulaires ainsi que leurs dérivées comme les mesures angulaires.

Piézo électrique

Cette notion est parfaitement explicable comme étant le principe de l'éponge. Certains matériaux ont la propriété, comme les éponges, de relâcher ce qu'ils contiennent lorsque sollicités. A l'inverse, l'éponge changera de volume lorsque qu'un liquide viendra à son contact. Un élément piézoélectrique est une sorte d'éponge qui délivre un signal lorsque soumis à une sollicitation sous forme de contrainte externe et se déforme lorsqu'excité par un phénomène, en l'occurrence une tension électrique. La propriété des matériaux piézoélectriques est éphémère. Une sollicitation mécanique ou une sollicitation produit un effet immédiat qui s'estompe avec le temps. Capteurs ou actionneurs piézoélectriques sont, en conséquence, des éléments dynamiques dont il ne faut attendre aucune réaction durable à terme.

Les éléments piézoélectriques sont d'origine naturelle comme les quartz cristallins. L'intervention humaine a permis de créer des quartz de synthèse à partir de céramiques piézoélectriques puis avec des plastiques piézoélectriques traités comme le PVF₂. Dans tous les cas, le comportement du matériau n'est perceptible qu'à l'aide d'électrodes permettant de percevoir son signal.

En utilisant un élément sensible il est donc possible de mesurer une vibration, encore faut-il créer un capteur.

Montages de capteurs

L'élément sensible pour réagir à une sollicitation doit subir l'accélération devant être mesurée. Pour obtenir cette réaction, l'élément sensible est lié à une masse sismique. Une masse connue va être soumise au phénomène et transmettre cette sollicitation à l'élément sensible.

Il existe plusieurs moyens de créer un capteur. Le plus simple est d'immobiliser une barre à l'une de ses extrémité, de disposer sur cette barre un élément sensible et de mesurer les sollicitation subies par le barreau. Ce concept ressemble à celui utilisé pour mesurer les déformations avec des jauges de contraintes mais permet d'obtenir des sollicitations importantes créant des signaux de sortie très puissants. L'inconvénient est, bien sur, le mouvement physique du corps d'épreuve, sa sensibilité aux sollicitations transverses, aux températures et une fragilité du montage. Par ailleurs, l'ensemble ressemble plus à une mesure de déformation liée au déplacement et est sujet à controverses quand aux précisions des résultats et à la fiabilité dans le temps.

Un autre concept consiste a utiliser un élément sensible contraint entre une masse sismique et une embase. La précontrainte permet de mesurer les phénomènes lors de l'appui de la masse sismique sur l'élément sensible mais aussi les phénomènes inverses lorsque la masse sismique a tendance a se désolidariser de l'élément sensible laissant ce dernier ' respirer ' et générer un signal inverse.

Cette technologie permet de réaliser des instruments moins sensibles mais plus robustes. Si les sensibilités sont moindres, la mesure est moins sujette aux phénomènes physiques indésirables et la tenue thermique est accrue.

Enfin, comme cette technologie, comme toute, imparfaite, induit des erreurs liées aux transverses, les spécialistes ont pensé au mode cisaillement. Dans ce cas, l'élément sensible est scindé en deux éléments tronconiques précontraints par un anneau de cerclage. Le phénomène aura tendance a exercer une sollicitation sur l'un et l'autre des deux morceaux d'éléments générant un résultat, sans doute moindre mais plus représentatif de la vibration et moins sujet aux transverses.

De ces trois concepts, un seul est exploitable avec les plastiques piézoélectriques et les jauges d'élongation conçues sur le même principe, il s'agit, bien sur du système à poutre. Les deux autres concepts font appel au quartz cristallin ou à la céramique de synthèse.

La réponse électrique

Quartz et matériaux de synthèse, lorsque sollicités donnent des charges électriques en Coulombs ou pico Coulombs. Le lien avec la tension électrique étant $Q=CV$ ou Q est la charges délivrée, C la capacité en Farad et V la tension en Volt.

Pour, d'un assemblage base / quartz / masse sismique obtenir un signal consistant et répété d'un capteur à un autre, il convient d'utiliser des moyens sérieux d'usinages des éléments sensibles. La qualité de l'élément et la qualité de son usinage seront la première garantie de capteurs identiques. La réalisation de masses sismiques et les valeurs de précontraintes doivent aussi être les mêmes d'un capteur à l'autre. Ceci permet de visualiser les outillages indispensables à la fabrication de capteurs. Si l'on ajoute à cela le contrôle qualité de niveau militaire, il est facile d'imaginer que toute la fabrication doit être réalisée en interne.

La réponse en charge est définie à partir d'une calibration de la sensibilité en micromicroCoulombs / g crête. Cette sensibilité, S peut être obtenue d'une équation E si la capacité de shunt C_s est connue :

$$S = S'(Ca+C_s).10^{-3} \text{ (Coulombs) (g crête) ou}$$

S' est la tension de sortie divisée par l'accélération en valeur de gravité,

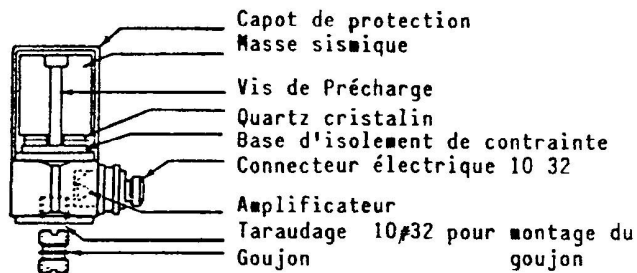
C_s est la capacité de shunt de $100 \mu\mu$ Farad

C_a la capacité du cristal.

En remplaçant C_s par sa valeur, on obtient $S=S'(Ca+100). 10^{-3} \text{ (Colombs) (crête de g)}$.

La sensibilité en tension électrique repose sur la même valeur de C_s .

Naturellement, si le capteur n'est pas immédiatement conditionné au travers d'un convertisseur de charge et d'un amplificateur, la capacité des câbles de liaison transportant les pico Coulombs doit être prise en compte.



Le schéma ci-dessus montre la construction d'un capteur en mode compression muni d'un convertisseur électronique de charge qualifié d'amplificateur.

Habillage du capteur

Le montage base / élément sensible / masse sismique doit être habillé. En règle général, l'empilage est inséré dans un boîtier de protection mécanique, de préférence en métal. Suivant la fonction de l'instrument, la base du capteur possèdera, ou non une isolation électrique et la sortie sera réalisée par un connecteur sur la partie supérieure ou sur le côté. D'ordinaire, les connecteurs Microdot 10#32 sont utilisés mais de petits capteurs utilisent des connecteurs plus petits, des capteurs plus volumineux et industriels des connecteurs plus imposants. Les mini capteurs peuvent être fournis avec des broches à souder, fragiles et sujettes aux parasites, des câbles intégrés tout aussi fragiles au droit de leur pénétration dans le boîtier ou des micro-connecteurs. A noter que les broches à souder sont souvent utilisées pour des capteurs dont la conversion charge / tension est déjà réalisée.

L'attache du capteur à la structure devant être mesurée doit être particulièrement étudiée. En effet, ce mode de liaison transmettra plus ou moins bien le phénomène vibratoire. L'ensemble capteur se conduit comme un assemblage masse ressort calibré pour minimiser l'effet ressort. La fréquence de résonance attendue répond à l'équation $f=1/2\pi \sqrt{K/M}$ ou K est le coefficient d'effet ressort du cristal et M la masse de l'élément sismique.

Toute liaison atténuée cette fréquence et les précautions sont nombreuses, du montage par goujon à visser avec pellicule de graisse pour éviter les erreurs liées aux imperfections de la surface, en passant par le collage à la cyanoacrylate, le plâtre dentaire, les cires et montages par interfaces magnétiques. A supposer que dans tous les cas la surface de montage soit plane, les différents types de montages ajouteront plus ou moins d'effets masse ressort limitant la fréquence de résonance de l'ensemble. Le meilleur type de montage est sans doute celui utilisant le goujon à visser (facile à démonter) ou le plâtre dentaire, le plus mauvais demeurant l'embase magnétique additionnant une masse importante à l'effet ressort parasite inhérent à l'interface.

Dans tous les cas, l'habillage du capteur est conçu en fonction d'une application comme sa solidarisation à la surface à mesurer.

Avant d'aborder l'électronique interne ou externe et le cheminement du signal, il convient de s'intéresser à la calibration.

Étalonnage

Les capteurs sont livrés, la plupart du temps avec une fiche d'étalonnage. Chaque capteur, individuellement, subit une série de tests permettant de définir ses caractéristiques dont la plus importante est sa sensibilité.

L'étalonnage est réalisé sur un pot vibrant ou dispositif générateur de vibration. Le pot est excité de sorte à fournir une vibration d'amplitude fixe à une fréquence donnée. Plusieurs balayages en fréquences à des fréquences différentes permettent de valider amplitude et bande passante. Comme pour tout référentiel, il convient de vérifier la validité du phénomène mécanique avec un capteur étalon. Le type d'étalonnage, qualifié de 'back to back' vérifie la véracité de la sortie du capteur par rapport au capteur de référence.

Cette méthode permet un étalonnage d'instruments dans des plages classiques d'amplitude et de fréquence.

Les méthodes d'étalonnage pour les capteurs de chocs sont voisines mais font appel à d'autres moyens d'excitation comme une barre sollicitée brièvement en choc. Pour les très basses fréquences, le référentiel 'continu' n'est pas forcément le mieux adapté, la sollicitation en basse fréquence peut être réalisée avec des pots vibrants fabriqués à partir de nouveaux concepts comme celui des pots en matériaux magnétostrictifs s'appuyant sur les terres rares alliées.

Dans tous les cas, l'étalonnage est une phase essentielle de la production d'un capteur.

Électroniques

L'électronique intégrée a envahi le monde de la mesure vibratoire, le 'chip' convertisseur traduit le picoCoulomb en tension et offre l'avantage d'une sortie 'haut niveau' tension affranchissant le capteur des perturbations liées aux bruits triboélectriques des câbles. Mais pas seulement, le capteur sans électronique est relativement imprécis, sa sensibilité diffère d'un capteur à l'autre parce qu'en prise directe avec le paramètre. Le capteur à électronique intégrée permet de 'tricher', par réglage, sur la sensibilité.

Le vieil amplificateur de charge ou la sensibilité en picoCoulomb était réglable et la conversion adaptée n'est plus au goût du jour. Pourtant, la traduction du signal était plus précise et plus fine. Aujourd'hui, le convertisseur de charge déporté permet une conversion sommaire. L'amplification est, dès lors comme pour les capteurs à amplificateurs incorporés, très sommaire. La traduction du signal charge en tension est amplifiée avec amplification des bruits et autres parasites donnant lieu à des erreurs.

Les capteurs à électronique intégrées avec gain unitaire évitent ces dérives d'amplifications de signaux non-souhaités mais ne supportent pas, comme les capteurs 'basiques' des températures extrêmes.

En revanche, les électroniques miniaturisées installées proches des capteurs limitent les bruits triboélectriques en dissociant le capteur et l'électronique pour permettre l'emploi des dits capteurs dans des zones inaccessibles aux électroniques.

L'usage de ces convertisseurs de charge se démocratise et de là découlent les convertisseurs / amplificateurs de charges embarqués pour engins militaires ou machines tournantes. L'avantage de l'électronique intégrée, à part la possibilité de transférer le signal sur des câbles sans risque de perturbations, est lié aux possibles fonctionnement en pseudo continu avec accord des circuits LC du capteur et du conditionneur permettant un ' maintien du signal pour offrir une mesure pseudo-continue.

Autre avantage notoire, le coût lors d'applications classiques ou la précision est toute relative et les températures raisonnables, ce type de technologie offre une possibilité d'économie, moins liée au capteurs, moins performants, qu'aux électroniques de conditionnement plus simples.

Dans tous les cas, la sortie en tension V est égales à la charge sur la capacité.

Conclusions

La mesure vibratoire et de chocs prend en considération, pour les phénomènes dynamiques, des mesures de quelques Hz à plusieurs KHz. Sans ou avec électronique icorporée ... Pico Coulombs ou ICP, les accéléromètres doivent être choisis avec soin.

La fabrication, son suivi, le contrôle qualité et l'étalonnage relève de compétences et d'équipements particuliers.

Dans tous les cas, l'expertise vibratoire n'est pas innée et l'aide de spécialistes toujours bonne à utiliser.

./

Giacintec Measure, Télémessure, Equipement
7 rue Gounod - 94 400 Vitry sur Seine – France
Tel : 33 (0) 1 46 80 96 91 - Mobile : 33 (0) 6 84 61 15 46
Courriel : giacintec@aol.com

T.C.E. Télémessure, Capteurs, Electronique
708 Av. de Caupos - 40 600 Biscarrosse - France
Tel : 33 (0) 5 58 78 16 48 - Mobile : 33 (0) 6 71 33 55 77
Courriel : tce40@hotmail.fr