

magnete e coppa, che danno origine a una risposta del second'ordine della forma

$$\frac{\theta_o}{\omega_i(D)} = \frac{K}{D^2/\omega_n^2 + 2\zeta D/\omega_n + 1} \quad (4.109)$$

In tali unità si può raggiungere una non-linearità dello 0.3%.

4.5 Misura di accelerazioni relative

La quarta edizione di questo libro ha considerato un trasduttore commerciale per misurare accelerazioni relative, ma nel momento della scrittura di questa edizione, tale dispositivo non si trova più in commercio. Dal momento che sono disponibili molti trasduttori di accelerazione *assoluta* collaudati e con prestazioni ben conosciute, probabilmente la mancanza di dispositivi specifici per rilevare accelerazioni relative, non rappresenta un problema pratico. Poiché i sensori con magneti o bobine mobili di Figura 4.74 forniscono segnali di velocità solitamente piuttosto "puliti", essi possono essere differenziati elettricamente per ottenere segnali utilizzabili di accelerazione.

4.6 Sensori di spostamento (assoluti) sismici

Il movimento più generale di un corpo rigido coinvolge traslazioni e rotazioni nello spazio, di solito però non si possono effettuare misure dirette delle quantità *vettoriali*. Perciò bisogna utilizzare un *array di trasduttori monoassiali* orientati lungo le direzioni degli assi selezionati per misurare le componenti ortogonali dei vettori, che vengono poi combinate, in sede di calcolo, per definire le ampiezze e le direzioni del vettore totale. I sensori o trasduttori chiamati "sismici" (basati su un sistema di massa/molla) sono ampiamente utilizzati in misurazioni di eventi impulsivi o vibrazioni. Esempi significativi comprendono studi di dinamica strutturale che portano a modelli dinamici (frequenze proprie, modi di vibrare, smorzamento) per veicoli e strutture di macchine utensili, ponti e costruzioni e anche per monitorare la "salute" del macchinario¹⁷⁶, avvertendo il personale dello stabilimento in merito a malfunzionamenti incipienti della macchina, come per esempio il danneggiamento dei cuscinetti. Variabili vibratorie di interesse sono lo spostamento, la velocità e l'accelerazione di punti selezionati sulla struttura o sulla macchina. In applicazioni specifiche, una di queste variabili può risultare più significativa delle altre, per questo motivo si possono trovare trasduttori di tipo sismico per tutte e tre queste grandezze. Anche il campo di frequenza delle vibrazioni influenza la scelta dello strumento, dal momento che vibrazioni ad alta frequenza sono caratterizzate da piccoli spostamenti (forse neppure misurabili) e da alte accelerazioni, mentre vibrazioni a bassa frequenza presentano ampi spostamenti e accelerazioni molto piccole. Queste considerazioni derivano direttamente dall'equazione fondamentale dei movimenti di tipo vibratorio

$$x = X_0 \sin \omega t \quad v = \omega X_0 \cos \omega t \quad a = -\omega^2 X_0 \sin \omega t$$

Per esempio, un'accelerazione ampia (per esempio 20 g) alla frequenza di 5000 Hz avrebbe uno spostamento associato di soli 2 μm , mentre uno spostamento ampio (per esempio 1 mm) a 1 Hz mostrerebbe un'accelerazione di solo 0.004 g. Mentre a questo punto si potrebbe ritenere che le sonde per la misura di *velocità* costituiscano un buon compromesso nell'affrontare la situazione di misura, altri fattori ancora non menzionati rendono la situazione meno semplice¹⁷⁷ di quanto non possa apparire e, infatti, esistono ancora questioni non risolte tra gli esperti professionisti e i fornitori degli strumenti. Infine, le vibrazioni degli alberi sostenuti da cuscinetti a sostentamento idrodinamico vengono spesso misurate da sensori di spostamento *relativo* senza contatto, *non sismici*¹⁷⁸, come le sonde a correnti parassite presentate in precedenza (Figura 4.31). Sonde sismiche fissate alla sede del cuscinetto sarebbero soggette a uno spostamento molto piccolo dal momento che il fluido "poco rigido" permette lo spostamento dell'albero senza che si verifichi un movimento rilevante della carcassa.

Le Figure 4.77a, b mostrano la realizzazione generale di una sonda di spostamento di tipo sismico, per movimenti traslatori e rotatori monoassiali. Questi dispositivi vengono utilizzati quasi esclusivamente per misurare vibrazioni in termini di spostamento in quei casi (molti) dove non è disponibile un riferimento fisso, per rilevare lo spostamento relativo. Ciò significa che la vibrazione di un corpo può essere misurata con uno qualsiasi dei trasduttori di movi-

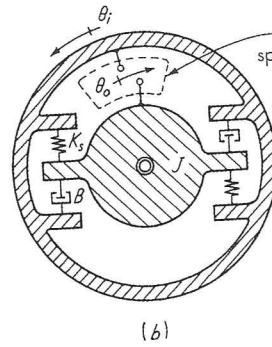
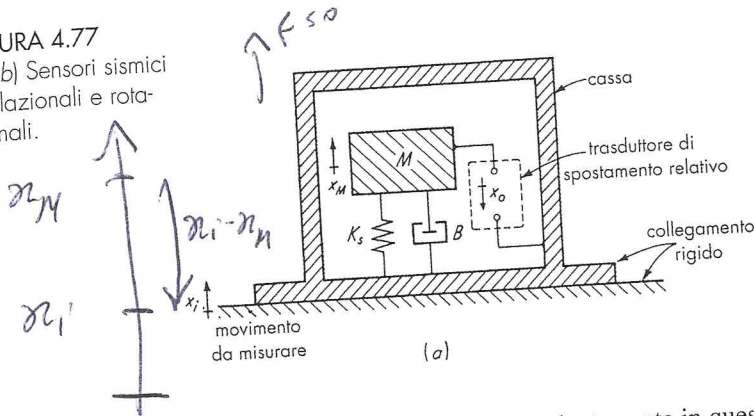
176 J. S. Mitchell, "The History of Condition Monitoring and Condition Based Maintenance", *Sound and Vibration*, nov. 1999, pp. 21-28.

177 M. Gilstrap, "Acceleration vs. Velocity as Absolute Vibration Measurement Transducers", *Sensors*, ago. 1984, pp. 16-20; R. M. Barrett, Jr., "Low Frequency Machinery Monitoring: Measurement Considerations", Wilcoxon Research, Inc., Gaithersburg, MD, 1993; P. Kapteyn, "Low Frequency Vibration Sensing", *Sound and Vibration*, feb. 1984, pp. 6-12.

178 Bently Nevada Corp., 775-782-3611 (www.bently.com).

→ Esempio reale
↓
Esempio encoder.
per misure di vibraz
relative tra due corpi

FIGURA 4.77
a) b) Sensori sismici traslazionali e rotazionali.



no è possibile per accoppiamento dei due trasduttori

mento relativo, illustrati precedentemente in questo capitolo, a patto che un capo del trasduttore possa essere collegato a un riferimento stabile. In genere tali riferimenti non sono disponibili quando si effettuano misurazioni su veicoli in movimento, e in altre situazioni, nelle quali risulta più conveniente e semplice ottenere la misurazione di movimenti assoluti. Il principio su cui si basano le sonde di spostamento (assolute) sismiche è semplicemente quello di misurare (con un trasduttore di movimento relativo appropriato) lo spostamento relativo di una massa connessa per mezzo di una molla cedevole, al corpo vibrante. Per frequenze superiori alla frequenza di risonanza, questo spostamento relativo è molto vicino allo spostamento assoluto, dal momento che la massa tende a rimanere ferma.

Per ottenere una misura quantitativa della prestazione di questi sistemi, viene analizzata la configurazione di Figura 4.77a. La configurazione rotazionale è del tutto analoga. Per la massa M vale la legge di Newton:

$$K_s x_0 + B \dot{x}_0 = M \ddot{x}_M = M(\ddot{x}_i - \ddot{x}_0) \tag{4.110}$$

ove x_i e x_M sono gli spostamenti assoluti e il riferimento per lo spostamento relativo x_0 è tale per cui x_0 vale zero quando la forza di gravità (peso di M) agisce lungo l'asse x in condizioni statiche. Riordinando

$$\frac{x_0}{x_i}(D) = \frac{D^2/\omega_n^2}{D^2/\omega_n^2 + 2\zeta D/\omega_n + 1} \tag{4.111}$$

dove

$$\omega_n \triangleq \sqrt{\frac{K_s}{M}}$$

$$\zeta \triangleq \frac{B}{2\sqrt{K_s M}}$$

Dal momento che la sonda è principalmente considerata come un sensore per la misura di vibrazioni, risulta di fondamentale importanza la sua risposta in frequenza:

$$\frac{x_0}{x_i}(i\omega) = \frac{(i\omega)^2/\omega_n^2}{(i\omega/\omega_n)^2 + 2\zeta i\omega/\omega_n + 1} \tag{4.112}$$

Essa è rappresentata graficamente in Figura 4.78. Si noti che il sistema non risponde a ingressi di spostamento statici e per ottenere una misura di spostamento accurata ω_n dovrebbe essere molto inferiore alla più bassa pulsazione dove c'è ω . Per frequenze molto al di sopra di ω_n , $(x_0/x_i)(i\omega) \rightarrow 1 \angle 0^\circ$, il che indica una misurazione che tende alla perfezione. Bisogna considerare anche le caratteristiche del trasduttore di spostamento relativo, durante la conversione di x_0 nel valore di tensione e_0 . Dal momento che la forza che agisce sulla molla K_s è direttamente proporzionale a x_0 , se vengono impiegati estensimetri a resistenza elettrica, questi possono essere applicati direttamente alla molla, che può essere realizzata per mezzo di lamine elastiche. Per ottenere un valore di ω_n basso, bisogna impiegare, o una massa grande, oppure una molla cedevole (o entrambe). Al fine di contenere al minimo le dimensioni del sistema (e quindi l'effetto di carico sul sistema misurato) si preferisce scegliere molle cedevoli, piuttosto che masse grandi. Vengono spesso volutamente impiegati smorzamenti nel campo di valori che va da $\zeta = 0.6$ a 0.7 , questo per minimizzare la risposta in risonanza nel caso di transitori lenti.

Un' unquenz mento che si lativo centes conse risona L' di ser

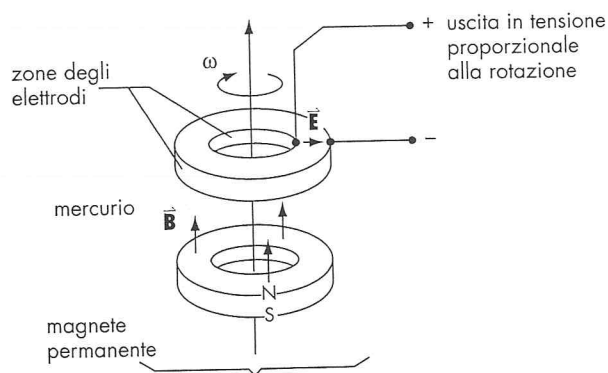
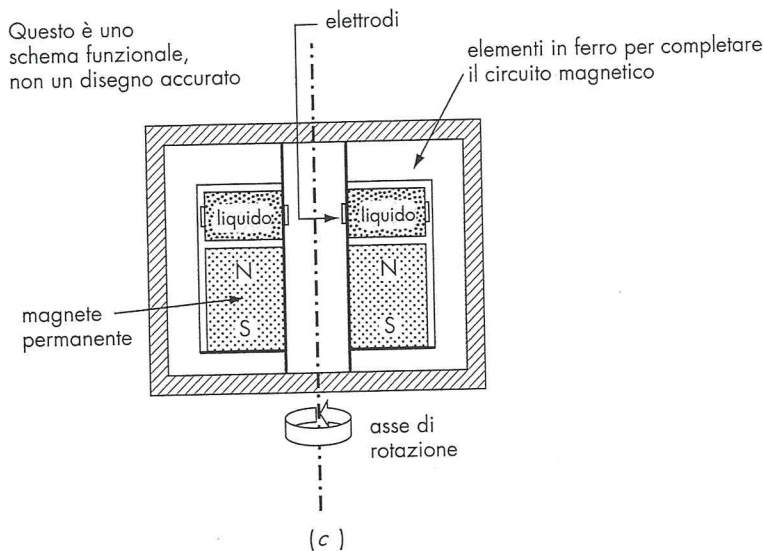


FIGURA 4.77
(c) Sensori sismici traslazionali e rotazionali.
(Continua)



Un'unità disponibile in commercio¹⁷⁹ utilizza un sistema di massa/molla a flessione con frequenza propria di circa 7 Hz. Uno smorzamento a correnti parassite (equivalente a uno smorzamento viscoso, ma meno sensibile alla temperatura), può essere ricavato con un piatto metallico che si muove nell'apertura praticata in un magnete permanente. Un sensore di spostamento relativo LVDT è in grado di fornire segnali utilizzabili per valori che raggiungono il campo dei centesimi di millimetro. Il comportamento meccanico ed elettrico è sufficientemente buono da consentire una *compensazione dinamica* realizzata per via elettrica al di sotto della frequenza di risonanza, che estende il tratto di ampiezza costante ($\pm 3\%$) fino a 3 Hz.

La Figura 4.77d mostra un sensore di spostamento angolare inerziale¹⁸⁰ con caratteristiche di sensibilità e risoluzione estreme, che viene utilizzato nelle applicazioni più critiche, come

179 Indikon Co., Inc., Somerville, MA, 617-625-3604

(www.indikon.com); P. Kapteyn, "Low Frequency Vibration Sensing", *Sound and Vibration*, feb. 1984, pp. 6-12.

180 Model 8301, Systron Donner, Concord, CA, 1-800-227-1625

(www.systron.com); H. D. Morris, "The Inertia Angular Displacement Sensor", *Theory and Application*, 1987.

Schema a blocchi del sensore di rotazione inerziale modello 8301

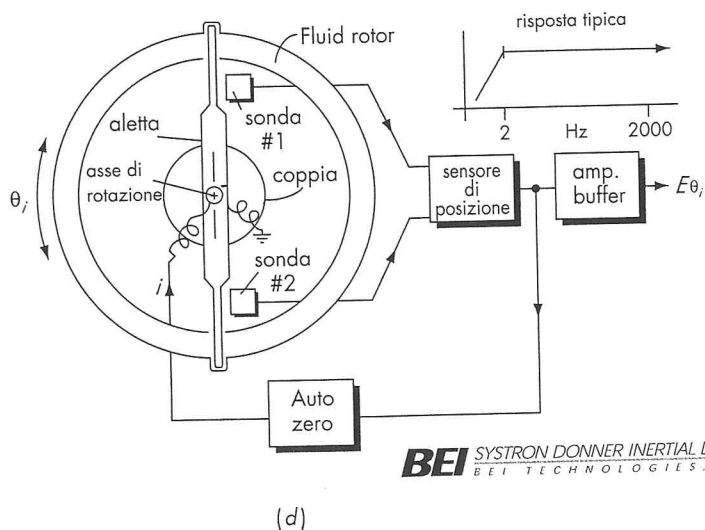
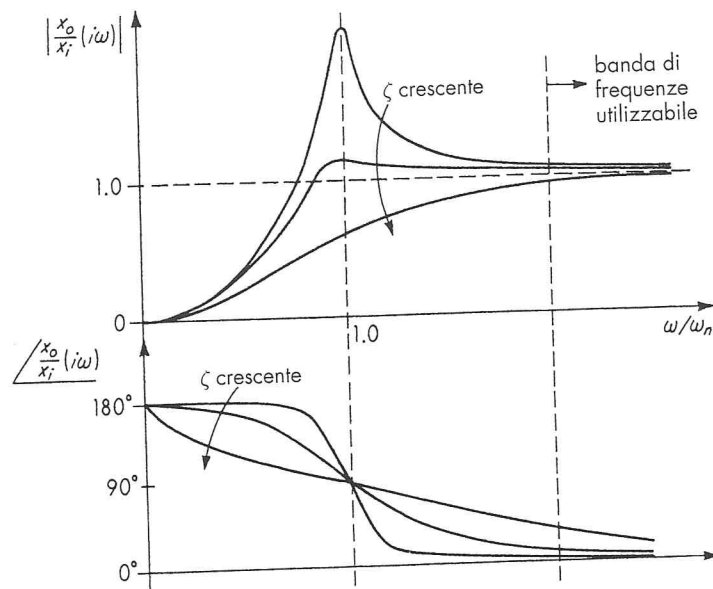


FIGURA 4.77
(d) Sensori sismici traslazionali e rotazionali.
(Conclusione)

FIGURA 4.78
Risposta in frequenza
della sonda di spostamento sismico.



nei sistemi di puntamento super accurati delle telecamere dei satelliti, per la ripresa di immagini terrestri. Una massa inerziale liquida in una camera anulare tende a rimanere in quiete mentre il contenitore oscilla. Una aletta sottile immersa nel fluido tende a muoversi con il fluido stesso e funge da bersaglio per due sensori di posizione induttivi. Il campo di misura del dispositivo previsto dal progetto è talmente piccolo ($10 \mu\text{rad}$) da provocare talvolta la chiusura della sottile luce misurata dai sensori induttivi, vanificando in tal modo la misura. Un sistema servo assistito di autozero, progettato per rispondere molto lentamente, impiega un sistema di torsione per mantenere la posizione media a zero, senza reagire alle oscillazioni più rapide che sono invece oggetto della misura. La versione più sensibile mostra un'uscita di $1 \text{ V}/\mu\text{rad}$ e una risposta in frequenza piatta che si spinge oltre 2 Hz . Il rumore d'uscita su una larghezza di banda che va da 2 a 500 Hz è meno di $0.03 \mu\text{rad}$. L'articolo di Morris è molto dettagliato, e include l'impiego della *fusione di sensori* (senza fusione filtraggio complementare) che combina un giroscopio con questo sensore, per estendere le misurazione anche al caso delle frequenze nulle.

4.7 Sonde sismiche per la misura di velocità (assoluta)

Anche quest'applicazione è dedicata alle velocità di vibrazione e la configurazione di base è la stessa di Figura 4.77a. Per prima cosa un segnale di tensione proveniente dalla sonda di spostamento potrebbe essere derivato, ma quest'approccio risente del problema generale di amplificazione del rumore, che riguarda il processo di derivazione, sia che esso venga effettuato con un circuito analogico, sia che avvenga numericamente. Un approccio più pratico¹⁸¹ consiste nel costruire una sonda di spostamento come mostrato in Figura 4.77a, ma sostituendo il sensore di spostamento relativo con un sensore di velocità relativa, di solito del tipo a bobina mobile (Figura 4.74). Un'unità di questo genere potrebbe essere caratterizzata da un rapporto d'ampiezza costante ($\pm 5\%$) da 8 a 100 Hz con sensibilità di $4 \text{ V}/(\text{m/s})$ e un campo di spostamento di $\pm 6.35 \text{ mm}$. Un altro schema¹⁸² attuabile consiste nel costruire un accelerometro (si veda la Sezione 4.8) al quale viene aggiunto, nell'amplificatore che è già presente nella gran parte degli accelerometri piezoelettrici, un circuito integratore. Le specifiche potrebbero essere: un rapporto d'ampiezza piatto ($\pm 10\%$) da 2 a 3500 Hz , una sensibilità di $4 \text{ V}/(\text{m/s})$ e una velocità massima di 1.3 m/s . Questa società fornisce anche sensori "multifunzionali" con uscite doppie (spostamento e accelerazione, spostamento e velocità), tutte basate su un accelerometro piezoelettrico.

La Figura 4.77c mostra un sensore di velocità rotatorio inerziale¹⁸³ chiamato *sensore di velocità angolare magnetoidrodinamico*, che non fa uso di un vincolo a molla. Questo principio, che è brevettato, si può trovare solo presso il fabbricante citato nel riferimento. L'unica parte interna in movimento è costituita da un corpo a forma di ciambella riempita di liquido conduttivo, spesso mercurio, che funge da massa inerziale rotante, meccanicamente accoppiato all'involucro per attrito viscoso. Se l'involucro viene fatto ruotare attorno all'asse molto

¹⁸¹ CEC Vibration Products, Pomona, CA, 800-468-1345 (www.cecvp.com).

¹⁸² Wilcoxon Research, Gaithersburg, MD, 800-945-2696 (www.wilcoxon.com).

¹⁸³ ATA Sensors, Albuquerque, NM, 505-823-1320 (www.atasensors.com); M. Hawes, "Testing Crash Dummies with an Angular Motion Sensor", *Sensors*, set. 1989, pp. 32-40; D. R. Laughlin, et al., "Inertial Angular Rate Sensors: Theory and Application", *Sensors*, ott. 1992.

lentamente, il fluido tende a ruotare con l'involucro, quindi senza riportare alcun movimento relativo. Se, invece, l'involucro viene fatto ruotare rapidamente in modo oscillatorio, per inerzia il liquido tende a rimanere in quiete, generando un movimento relativo tra involucro e liquido, che corrisponde al movimento assoluto dell'involucro. Pertanto il fluido conduttivo agisce come un "filo metallico" che attraversa un campo magnetico, producendo una tensione proporzionale alla velocità angolare e che può essere resa disponibile agli elettrodi che toccano la superficie più interna e la superficie più esterna della ciambella di fluido. Mentre vengono perse le frequenze più basse, esiste un ampio campo in cui il rapporto di ampiezza si mantiene costante e l'angolo di fase nullo, tipicamente a partire da circa 1 Hz fino a superare 1000 Hz. La tensione d'uscita del sensore viene talvolta collegata a un trasformatore che fa aumentare la tensione, in modo da raggiungere sensibilità ancora più alte mantenendo basso il livello del rumore. Un progetto alternativo utilizza una circuiteria basata su un amplificatore operazionale per aumentare la sensibilità e/o per elaborare il segnale di velocità e ottenere segnali di spostamento o di accelerazione. Un sensore di base (ARS-04) fornisce $1 \mu\text{V}/(\text{rad/s})$ per dimensioni dell'apparato di circa $2.05 \times 10^3 \text{ mm}^3$, mentre un'unità con amplificatore operazionale (ARS-03) ha $0.5 \text{ V}/(\text{rad/s})$ e un campo di $\pm 20 \text{ rad/s}$ in circa $2.46 \times 10^4 \text{ mm}^3$. Mentre la risposta del sensore base rimane piatta oltre i 1000 Hz, se non ci sono particolari esigenze che richiedano alte frequenze, il circuito con l'amplificatore operazionale viene impiegato per svolgere un'azione di filtro passa-basso oltre i 1000 Hz, permettendo una riduzione del rumore ad alta frequenza.

4.8 Sonde sismiche (assolute) di accelerazione (accelerometri)

La sonda più importante per rilevare le vibrazioni¹⁸⁴, gli urti e per misurazioni di movimento assolute con finalità generali è l'accelerometro. Questo strumento si trova in commercio in svariate tipologie per soddisfare diverse richieste applicative. Di seguito vengono elencati gli aspetti di base che caratterizzano gli accelerometri e ne decretano il grande successo:

1. La risposta in frequenza va da zero a un valore limite elevato. Possono essere misurate le accelerazioni statiche (tranne che nei tipi piezoelettrici).
2. Lo spostamento e la velocità possono essere ottenuti facilmente per integrazione elettrica, operazione di gran lunga preferibile alla derivazione.
3. Questi sensori sono più adatti a fornire misurazioni di urti (shock) rispetto alle sonde di spostamento o di velocità.
4. Le forze che provocano danni nei macchinari ecc., sono legate all'accelerazione piuttosto che alla velocità o allo spostamento.

La preferenza accordata agli accelerometri, rispetto alle sonde di spostamento e di velocità sismiche, è testimoniata da un gran numero di fabbricanti e di modelli disponibili. Pur avendo espresso questa preferenza, bisogna ammettere che alcuni esperti di vibrazioni prediligono i misuratori di velocità, in modo particolare per le applicazioni di monitoraggio della "salute del macchinario" nel campo delle basse frequenze. In queste applicazioni, possono anche esserci vibrazioni ad alta frequenza, ma esse non apportano alcuna utile informazione aggiuntiva. Infatti, le accelerazioni ad alta frequenza possono saturare e sovraccaricare l'amplificatore che è presente in molti accelerometri. La risposta dell'amplificatore al sovraccarico è rappresentata da un fenomeno a bassa frequenza, tale per cui un analizzatore di spettro può mostrare un'ampia (e falsa) componente vibratoria (talvolta chiamata "ski-slope"¹⁸⁵ o pista da sci) a bassa frequenza, che può essere scambiata per informazione utile se il sovraccarico non viene riconosciuto.

La configurazione base di un accelerometro è anch'essa mostrata in Figura 4.77a. Il principio di funzionamento è il seguente: si supponga che l'accelerazione \ddot{x}_i che si vuole misurare sia costante. Quindi, in condizioni stazionarie, la massa M sarà in quiete rispetto all'involucro e pertanto la sua accelerazione assoluta sarà pure uguale a \ddot{x}_i . Se la massa M viene accelerata al valore \ddot{x}_i , deve esistere una qualche forza che ha generato quest'accelerazione e, se M non si muove rispetto all'involucro, la forza può provenire esclusivamente dalla molla. Dal momento che la deformazione della molla x_0 è proporzionale alla forza, che a sua volta è proporzionale all'accelerazione, x_0 è una misura dell'accelerazione \ddot{x}_i . Pertanto la misurazione

¹⁸⁴ G. Buzdugan, E. Mihailescu e M. Rades, "Vibration Measurement", M. Nijhoff, Boston, 1986; V. Wowk, "Machinery Vibration: Measurement and Analysis", McGraw-Hill, New York, 1991; K. G. McConnell, "Vibration Testing: Theory and Practice", Wiley, New York, 1995; P. L. Walter, "The History of the Accelerometer", *Sound and Vibration*, marzo 1997, pp. 16-22.

¹⁸⁵ R. M. Barrett, Jr., "Low Frequency Machinery Monitoring: Measurement Considerations", Catalog W-14, p. 10, Wilcoxon Research, Inc., Gaithersburg, MD, 800-945-2696.

dell'accelerazione assoluta si riduce a una misurazione della forza richiesta per accelerare una massa nota (talvolta chiamata massa "di prova" o "proof mass"). Questa dipendenza dalla massa conduce all'insorgere di problemi (principalmente nei sistemi di guida inerziali, non nelle misure di vibrazioni), dal momento che una massa è soggetta anche a forze di tipo gravitazionale. Perciò, un accelerometro non è in grado di distinguere tra una forza dovuta a un'accelerazione e la forza dovuta alla gravità.

La maggior parte degli accelerometri può essere classificata in due categorie: accelerometri del tipo a deflessione, oppure accelerometri del tipo ad azzeramento. I tipi a deflessione vengono di solito impiegati per misure di vibrazioni e di urti, mentre per le misurazioni dei movimenti in grande dei veicoli (sottomarini, aerei, velivoli spaziali ecc.) vengono utilizzati entrambi, con una forte preferenza per quelli ad azzeramento, quando è richiesta un'accuratezza estrema.

Accelerometri del tipo a deflessione

Un'ampia categoria di accelerometri di uso comune presenta la configurazione di Figura 4.77a e si differenzia soltanto nei dettagli, per esempio per quanto riguarda il tipo di molla utilizzato, il trasduttore di movimento relativo impiegato e il tipo di smorzamento fornito. Dal momento che l'uscita di interesse è \ddot{x}_i , si può riscrivere di conseguenza l'Equazione (4.111)

$$D^2 x_i(D) = \frac{x_o}{\ddot{x}_i}(D) = \frac{K}{D^2/\omega_n^2 + 2\zeta D/\omega_n + 1} \quad (4.113)$$

dove $K \triangleq \frac{1}{\omega_n^2} \text{ cm}/(\text{cm}/\text{s}^2)$ (4.114)

Considerato che la tensione d'uscita è $e_o = K_e x_o$ per molti trasduttori di movimento, l'Equazione (4.113) ha la forma corretta anche per la funzione di trasferimento accelerazione-tensione. Si può notare che l'accelerometro è un tipico strumento del second'ordine; perciò si possono applicare tutte le considerazioni già svolte per questi tipi di strumenti. La risposta in frequenza si estende da zero a una qualche frazione di ω_n , a seconda dell'accuratezza richiesta e dello smorzamento. Poiché la sensibilità vale $K = 1/\omega_n^2$, la risposta alle alte frequenze è frutto di un compromesso con la sensibilità. Poiché le caratteristiche dinamiche degli strumenti del second'ordine sono già state ampiamente illustrate, questa sezione è principalmente dedicata alle caratteristiche degli strumenti che si possono trovare in commercio.

Gli accelerometri del tipo a deflessione possono essere classificati come segue:

1. Tecnologia classica

- (a) risposta dc
 • con potenziometro
 • con LVDT
 • con estensimetri incollati
 • con estensimetri non incollati
 • a variazione di capacità
- (b) risposta non dc
 • piezoelettrici.

2. Tecnologia MEMS (sistema microelettromeccanico)

- (a) risposta dc
 piezoresistivi
 capacitivi.

La tecnologia classica (non MEMS) assembla l'accelerometro manualmente a partire dai suoi componenti. Il MEMS (si veda il Capitolo 14) utilizza la tecnologia dei circuiti integrati per produrre piccolissimi strumenti completi in grande quantità, a basso costo, su un piatto di silicio. Fino a oggi gli accelerometri MEMS sono stati utilizzati principalmente in prodotti di largo consumo come le automobili, dove l'ampio mercato e le prestazioni modeste incontrano perfettamente le caratteristiche dei MEMS. Per la richiesta crescente destinata a impieghi di carattere più ingegneristico e per applicazioni di monitoraggio dei macchinari, le prestazioni dei MEMS possono o non possono risultare adeguate e quindi devono essere esaminate in

nodo accurato. Per "risposta dc " si intende la capacità di riuscire a eseguire misure a partire dalla frequenza zero (accelerazione statica) fino a un qualche valore di frequenza limite più alto. La risposta dc è importante in alcune applicazioni (per esempio, nelle misurazioni delle prestazioni dei veicoli), ma non è necessaria nella maggior parte degli studi di urti e di vibrazioni.

Gli accelerometri non-MEMS con risposta dc si differenziano principalmente nel trasduttore di spostamento relativo utilizzato. I potenziometri vengono adottati principalmente per basse frequenze; un'unità caratteristica¹⁸⁶ ha una frequenza propria di circa 100 Hz, un'accuratezza dell'1.5% del fondo scala (FS) e una soglia dello 0.8% del FS. Una famiglia¹⁸⁷ di accelerometri che sfrutta estensimetri non incollati ha campi variabili da $\pm 5 g$ a $\pm 500 g$, con frequenze proprie da 300 a 2900 Hz, sensibilità di circa 20 mV FS, sensibilità trasversale dell'1% e risoluzione infinitesimale. Sono disponibili unità con estensimetri a semiconduttore incollati¹⁸⁸ con campi di misura simili, ma con sensibilità più alte (circa 100 mV FS). Mentre nell'edizione del 1990 di questo testo si è fatto riferimento agli accelerometri con LVDT, non sono più stati trovati produttori di accelerometri con LVDT all'atto della stesura della presente edizione.

Gli accelerometri piezoelettrici trovano un'ampia applicazione nelle misurazioni di urti e vibrazioni. In generale, essi non forniscono alcuna uscita in risposta ad accelerazioni costanti a causa dei principi di base della misura di spostamento per via piezoelettrica. Essi presentano, però, ampi segnali di tensione in uscita, piccole dimensioni e possono avere frequenze proprie molto alte, caratteristica necessaria per ottenere accurate misurazioni di fenomeni impulsivi. Non è previsto alcuno smorzamento intenzionale, lasciando l'isteresi del materiale quale unica fonte di dissipazione energetica. Questo comporta un rapporto adimensionale di smorzamento molto basso (circa 0.01), valore accettabile dato che la frequenza propria è molto elevata. La funzione di trasferimento è una combinazione delle Equazioni (4.70) e (4.113):

$$\frac{e_o}{\ddot{x}_i}(D) = \frac{[K_g/(C\omega_n^2)]\tau D}{(\tau D + 1)[D^2/\omega_n^2 + 2\zeta D/(\omega_n + 1)]} \quad (4.115)$$

La risposta alle basse frequenze è limitata dalla caratteristica piezoelettrica $\tau D/(\tau D + 1)$, mentre quella alle alte frequenze è limitata dalla risonanza meccanica. Il rapporto adimensionale di smorzamento ζ degli accelerometri piezoelettrici non viene in genere riportato dai fabbricanti, ma nella maggior parte delle applicazioni pratiche può essere posto uguale a zero. La banda in frequenza in cui l'accelerometro fornisce misure accurate (con un 5% di tolleranza verso l'alto, alle frequenze più alte e un 5% verso il basso, all'estremo inferiore della banda della risposta in frequenza) è $3/\tau < \omega < 0.2 \omega_n$. Una risposta accurata a bassa frequenza richiede un τ ampia, che si ottiene solitamente utilizzando amplificatori di tensione ad alta impedenza, oppure amplificatori di carica. Sistemi progettati per una risposta al di sotto di 1.0 Hz e sottoposti a transitori di temperatura possono presentare errori a causa dell'effetto piroelettrico cui va soggetta la maggior parte dei materiali piezoelettrici. In questo caso si genera in uscita una carica, in risposta a un ingresso di temperatura. Per i sistemi che presentano una risposta trascurabile alle basse frequenze, questi segnali indotti dalla temperatura (dal momento che sono transitori "lenti") generano un'uscita piccola. Si possono verificare errori significativi se τ viene scelta elevata, al fine di misurare accelerazioni a bassa frequenza, o se l'accelerometro non è stato progettato per minimizzare gli effetti termici.

I dettagli realizzativi degli accelerometri piezoelettrici possono essere modificati per enfatizzare particolari prestazioni richieste per applicazioni specifiche. Non esiste una configurazione unica che sia ideale per tutte le situazioni a causa dei compromessi che caratterizzano qualsiasi progetto ingegneristico. La Figura 4.79 mostra diverse soluzioni fornite dal medesimo costruttore. Il progetto di base, a compressione (Figura 4.79a), è il più semplice e robusto e presenta il miglior rapporto massa/sensibilità; dal momento che l'involucro agisce come parte integrante del sistema massa/molla, questo tipo si dimostra più sensibile agli ingressi spuri: [Per gli accelerometri piezoelettrici questi includono temperatura¹⁸⁹, rumore acustico, flessione della base o "base bending"¹⁹⁰ (deformazioni superficiali indotte dalla flessione della superficie di montaggio), movimento trasversale all'asse di misura e campi magnetici.] La molla in genere viene precaricata per far lavorare il materiale piezoelettrico nella porzione più lineare della sua curva di carico/deformazione. Questo precarico permette anche misura-

186 Humphrey Inc., San Diego, CA, 619-565-6631 (www.humphrey-inc.com).

187 CEC Vibration Products, Pomona, CA, 800-468-1345 (www.cecvp.com).

188 Sensotec, Inc., Columbus, OH, 800-848-6564 (www.sensotec.com).

senza proprio per risolvere il problema delle $\omega \rightarrow \infty$ $K \rightarrow 0$

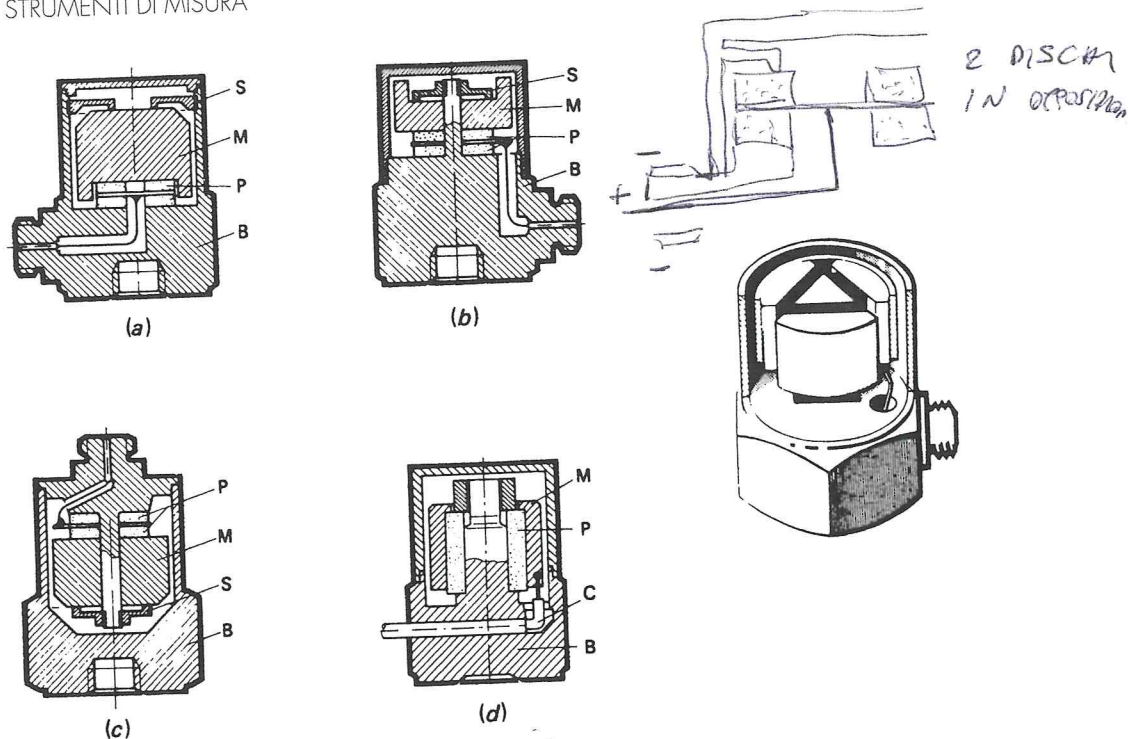
EFFETTO DI CARICO

189 C. F. Vezzetti e P. S. Lederer, An Experimental Technique for the Evaluation of Thermal Transient Effects on Piezoelectric Accelerometers, NBS Tech. Note 855, gennaio 1975.

190 Tech. Data A510, 508A, 509A, Endevco Corp., San Juan Capistrano, CA, 877-362-3826 (www.endevco.com)

FIGURA 4.79

Disegni di accelerometri piezoelettrici. (a) Progetto di un tipo a compressione con molle periferiche. (b) Progetto di un tipo a compressione con molle al centro. (c) Progetto di un tipo a compressione con molle al centro invertite. (d) Progetto di un tipo a taglio.

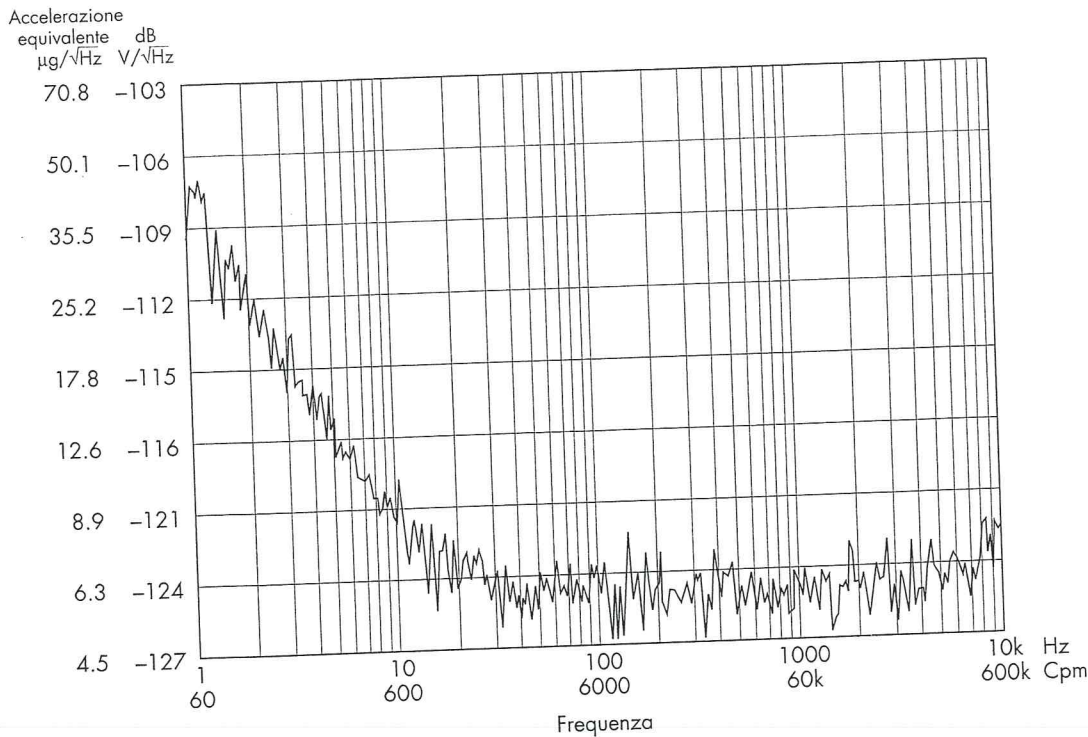


zioni di accelerazione sia positive sia negative, senza mai portare il materiale piezoelettrico a lavorare in trazione. Vale a dire che il precarico iniziale provoca una tensione d'uscita con una certa polarità. Tuttavia, questa immediatamente decade e la polarità legata alla differenza di potenziale prodotta successivamente dall'accelerazione, che è l'oggetto della misura, seguirà la direzione del movimento, dal momento che la polarità della carica dipende dalla *variazione di deformazione* e non dal suo valore. Il precarico viene scelto sufficientemente grande in modo da non annullarsi mai, anche in presenza delle accelerazioni di ingresso più ampie.

L'attenuazione di ingressi spuri è realizzata nei progetti "single-ended compression" o a fissaggio centrale di Figura 4.79b e 4.79c. La configurazione invertita di Figura 4.79c è particolarmente adatta per ridurre gli effetti di sollecitazione dovuti al "base-bending", come pure il tipo a taglio, o "shear design" di Figura 4.79d. Quest'ultimo tipo, equipaggiato con pile imbullonate di dischi piatti, è stato introdotto di recente per conseguire prestazioni migliori. L'unità Delta Shear di Figura 4.79 è una variazione che applica un anello montato a caldo al posto dei bulloni, per tenere fissi gli elementi costruttivi.

L'elettronica microcircuitale ha permesso la realizzazione di accelerometri piezoelettrici con amplificatori di carica (Integrated Circuit Piezoelectric (ICP); si veda Capitolo 10), posti all'interno dell'involucro dello strumento. Un singolo cavo a due fili che trasmette contemporaneamente sia il segnale di potenza da fornire all'amplificatore sia quello di misura, connette lo strumento a un semplice alimentatore a corrente costante. Viene fornito un segnale d'uscita di livello elevato (qualche volt) direttamente a un oscilloscopio, oppure a un analizzatore di segnale. Questo sistema consente di ottenere una *sensibilità maggiore* con un accelerometro più piccolo, capace di misurare a frequenze più elevate e nel contempo è in grado di ridurre il *rumore generato dal cavo e i limiti sulla sua lunghezza massima*, a costi più bassi. Questi vantaggi si conseguono a spese di un ridotto campo di temperature di utilizzo (l'elettronica microcircuitale soffre di limitazioni legate alla temperatura più strette rispetto a quelle del solo accelerometro) e di un condizionamento del segnale meno versatile (gli amplificatori integrati permettono pochi o nessun adattamento). Il *rumore di fondo* della combinazione accelerometro amplificatore potrebbe aver bisogno di attenzione specifica, in particolare alle basse frequenze, in cui l'ampiezza dell'accelerazione potrebbe risultare piccola, quindi essere mascherata dal rumore. La Figura 4.80¹⁹¹ mostra un tipico spettro di frequenza (in termini di radice quadratica media "root-mean-square" o rms), $(\mu g)/(\sqrt{\text{Hz}})$, per il rumore di natura casuale del sensore. Usando questi dati, se l'analisi spettrale dell'accelerazione misurata utilizzasse un'ampiezza di banda del filtro, per esempio, di 4 Hz centrata su 10 Hz, ci si aspetterebbe che il segnale del rumore abbia un'ampiezza di circa $(9 \mu g)(\sqrt{4}) = 18 \mu g$ rms. Se l'accelerazione effettiva fosse vicina a questo valore, essa però non potrebbe essere misu-

¹⁹¹ Machinery Monitoring Catalog W-14, p. 9, Wilcoxon Research, Inc., Gaithersburg, MD, 800-945-2696 (www.wilcoxon.com); F. Schloss, "Accelerometer Noise", *Sound and Vibration*, marzo 1993, pp. 22-23; D. Formenti e T. Norsworthy, "Accelerometer Dynamic Range", *Sound and Vibration*, giugno 1999, pp. 6-10.

FIGURA 4.80
Rumore di fondo per
l'accelerometro.

rata in modo affidabile. Il Catalogo W-14 suggerisce che il rapporto segnale-rumore debba essere almeno pari a circa 10. Se l'elaborazione del segnale non utilizzasse un filtraggio in banda stretta, ma registrasse il segnale "totale" (banda larga), sarebbe di interesse considerare il corrispondente valore di rumore rms totale; tipicamente circa $700 \mu g$ rms per l'unità appena descritta. Tali considerazioni sul rumore di fondo dovrebbero essere effettuate per l'utilizzo di qualsiasi sensore; comunque, non sempre sono disponibili dati come quelli di Figura 4.80.

In commercio si trova un'ampia varietà di accelerometri piezoelettrici. Il compromesso tra sensibilità e risposta in frequenza è evidente nelle comuni specifiche fornite per lo strumento; un accelerometro impiegato per rilevare urti può fornire $0.004 pC/g$ e mostrare una frequenza propria di $250\,000$ Hz, mentre un'unità progettata per misurazioni sismiche di livello contenuto è caratterizzata da $1000 pC/g$ e da una frequenza propria di 7000 Hz. Le unità più piccole (necessarie per ridurre gli effetti di carico legati alla massa aggiunta del sensore, nelle misurazioni su strutture leggere) sono circa di 3×3 mm di sezione in pianta con una massa di 0.5 g includendo anche il cavo. La risposta a ingressi spuri di natura termica e dovuti alla flessione dell'appoggio, per i modelli isolati a taglio sono di circa 200 volte inferiore rispetto ai modelli non ottimizzati per questi scopi. Si trovano anche unità triassiali piccole come un cubo con lato pari a 7 mm di massa pari a 1 g. Strumenti non raffreddati e che possano essere impiegati in un campo di temperatura da -40 a 815 °C presentano tipicamente una variazione di sensibilità di $\pm 10\%$ nel passare da -40 a 815 °C e sono progettati per resistere in ambienti radioattivi tipici dei reattori nucleari. Un sistema di accelerometri, di cablaggio e di condizionamento del segnale, progettato per eseguire in modo economico prove di vibrazioni multicanale, impiega trasduttori a film piezoelettrico di basso costo, come moduli plug-in per disporre di punti di misura monoassiali, biassiali o triassiali nel caso si operi in un ambiente non particolarmente severo, come un laboratorio¹⁹².

Gli accelerometri piezoelettrici dimostrano una sensibilità trasversale maggiore degli altri tipi; tuttavia questa viene tipicamente mantenuta attorno al 2-4% e di solito non questo rappresenta un fattore critico. Alcuni produttori indicano l'asse di minor sensibilità trasversale, consentendo quindi all'utilizzatore di orientare lo strumento in fase di installazione, in modo da minimizzare quest'effetto. Gli accelerometri possono essere montati con perni filettati (metodo preferito), con colle o cera adesiva, o ancora con fissaggi magnetici. L'effetto principale dei diversi metodi di montaggio è una riduzione della frequenza propria a un valore più basso di quello che l'accelerometro mostra quando non è ancora stato montato, per effetto delle caratteristiche elastiche e inerziali del sistema di fissaggio. La frequenza di risonanza ad accele-

192 Structcel System,
PCB Piezotronics, De-
pew, NY, 716-684-0001
(www.pcb.com).

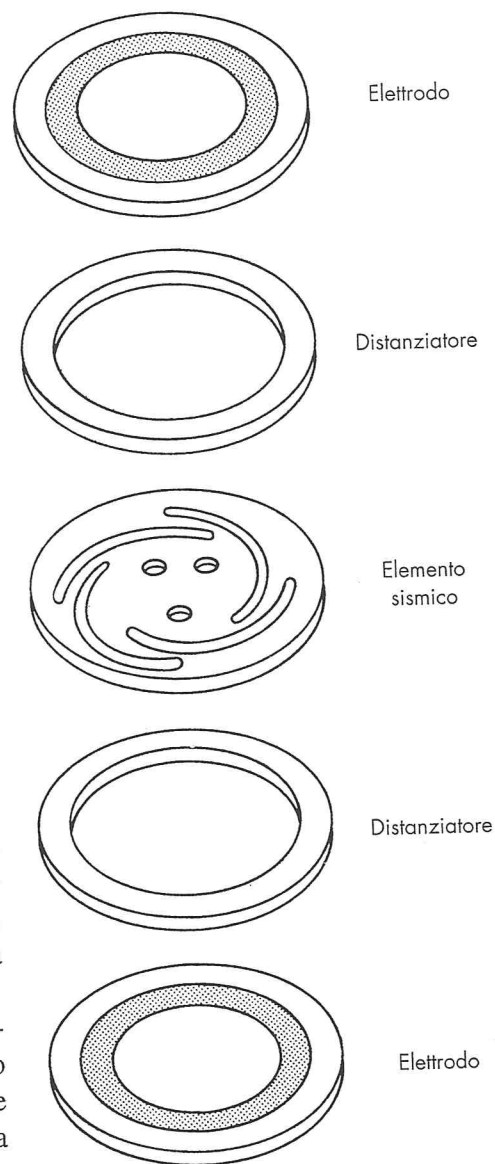
MONFAGGIO!

FIGURA 4.81
Progetto di accelerometri capacitivi.

rometro non montato viene misurata lasciando oscillare liberamente l'accelerometro appeso al suo cavo, eccitando l'elemento piezoelettrico per via elettrica (sinusoidalmente), e trovando la frequenza per cui corrente e tensione sono in fase. La frequenza propria del dispositivo montato è la frequenza alla quale il segnale di uscita mostra un picco, quando l'accelerometro viene posto meccanicamente in vibrazione secondo una legge armonica. Per fissaggio con un perno filettato d'acciaio (sistema di montaggio ottimo), la frequenza propria ad accelerometro montato vale circa il 60% di quella del dispositivo non montato. L'esperienza dimostra che per misurazioni superiori a 5 kHz, il montaggio con perni d'acciaio viene migliorato in modo significativo quando viene applicata una goccia d'olio di bassa densità tra le superfici di accoppiamento, prima di avvitare il pezzo e garantire il serraggio dovuto. Apparentemente si ottiene un accoppiamento elastico più rigido riempiendo di olio le lacune microscopiche all'interfaccia tra accelerometro e pezzo. Quando vengono utilizzati perni isolati elettricamente, per ridurre i problemi di rumore elettrico che vengono dai loop di massa, la rigidità più bassa del materiale di isolamento genera una risposta in frequenza più ridotta. In letteratura¹⁹³ si possono trovare i dati relativi a questo e ad altri problemi di montaggio.

La Figura 4.81 mostra un accelerometro che utilizza un trasduttore di spostamento di tipo capacitivo come quello di Figura 4.38. Un diaframma sottile con lamine a flessione avvolte a spirale costituisce la molla, la massa di misura e l'armatura mobile di una capacità differenziale. Il movimento del piatto tra gli elettrodi "pompa" aria parallelamente alla superficie del piatto che trafila attraverso i fori praticati nel piatto garantendo il necessario smorzamento. Dal momento che la viscosità dell'aria risente meno delle variazioni di temperatura rispetto all'olio, il rapporto di smorzamento desiderato di 0.7 cambia soltanto del 15% per una variazione di temperatura di 38 °C. È disponibile una famiglia di questi dispositivi con valori di fondo scala che vanno da ± 2 g (200 Hz di risposta piatta) a ± 600 g (3000 Hz), sensibilità trasversale inferiore all'1% e uscita al fondo scala di ± 1.5 V, con dimensioni di circa 16 cm³ e peso di 0.5 N.

Le "scoperte" relative agli accelerometri di tipo MEMS risalgono al periodo tra il 1974 e il 1985 e hanno raggiunto la piena commercializzazione dal 1997¹⁹⁴, mentre le scoperte riguardanti i sensori di pressione MEMS riguardano gli anni tra il 1954 e il 1985 e si è avuta la piena commercializzazione a partire dal 1990. Gli accelerometri MEMS (di solito con un campo di 50 g) vengono ampiamente utilizzati nei sistemi di attuazione degli air bag delle automobili, rimpiazzando precedenti sensori che fornivano soltanto un segnale di tipo on/off quando si verificava un urto di entità considerevole. Altre applicazioni automobilistiche includono i sistemi anti-bloccaggio dei freni, l'incremento di stabilità, la sospensione attiva e gli allarmi antifurto. L'antifurto (per evitare che l'automobile venga rimorchiata via) utilizza la "sensibilità gravitazionale" di tutti questi gli accelerometri per misurare l'inclinazione dell'auto. Se l'angolazione di assetto si modifica più velocemente di 0.5°/min, l'allarme incomincia a suonare¹⁹⁵. Gli accelerometri MEMS impiegano il consueto sistema massa/molla, ma in forma miniaturizzata e vengono ottenuti con processi di microlavorazione che avvengono a basso costo. La rilevazione delle deformazioni avviene con sensori capacitivi: un produttore li utilizza in una linea di prodotti¹⁹⁶ che include sensori ad asse singolo o a due assi con campo di misura limitato (da 2 a 10 g) ed elevato (da 25 a 50 g). Gli accelerometri per air bag possono tollerare un rumore di



¹⁹³ G. K. Rasamen e B. M. Wigle, "Accelerometer Mounting and Data Integrity", *Sound & Vib.*, pp. 8-15, novembre 1967; S. V. Bowers et al., "Real-World Mounting of Accelerometers for Machinery Monitoring", *Sound and Vibration*, feb. 1991, pp. 14-23.

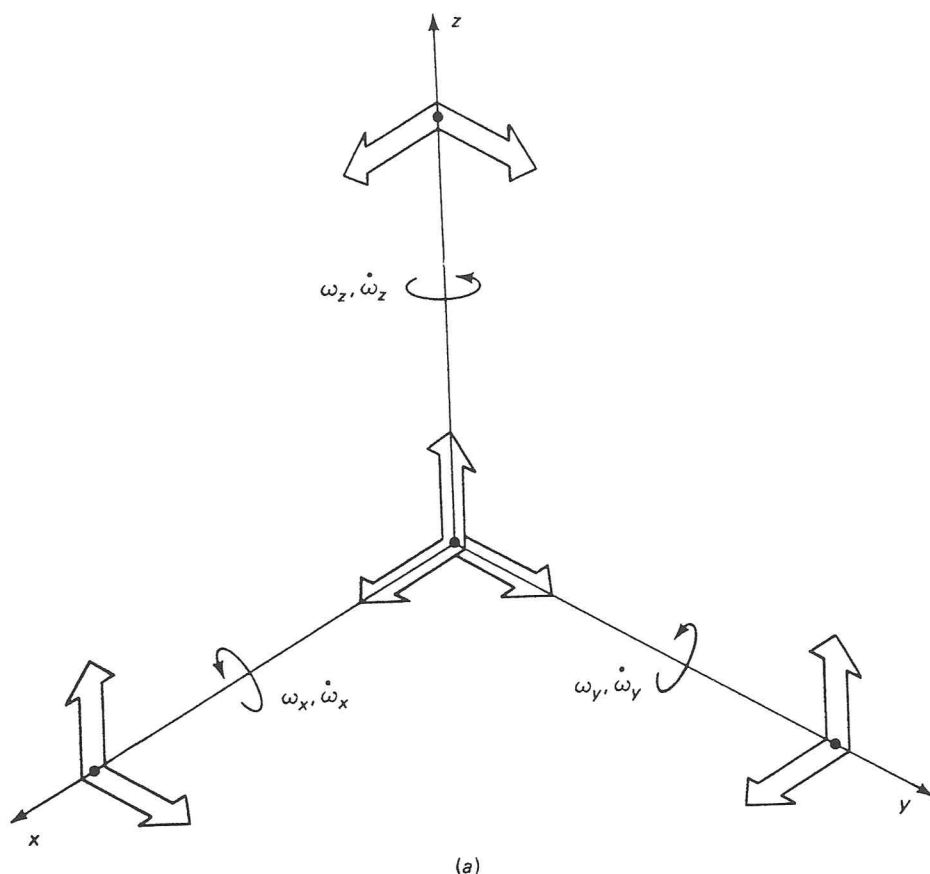
¹⁹⁴ R. H. Grace, "The New MEMS and Their Killer Apps", *Sensors*, luglio, 2000, pp. 4-8.

¹⁹⁵ H. Weinberg, "Accelerometers - Fantasy & Reality", *Analog Dialogue*, vol. 33-8, 1999, pp. 25-26; Analog Devices, Inc., Cambridge, MA, 800-262-5643 (www.analog.com/imems). Discute alcuni aspetti pratici di numerose applicazioni da parte di utilizzatori.

¹⁹⁶ Analog Devices, Inc.

FIGURA 4.82

Array di nove accelerometri (si ringrazia Endevco Corp., San Juan Capistrano, CA).



fondo relativamente alto che non sarebbe invece accettabile in altre applicazioni di monitoraggio delle macchine. Per venire incontro a queste specifiche più stringenti, si sono modificati i progetti, sia i processi di produzione¹⁹⁷. Una tipologia da 5 g ha un'ampiezza di banda di 10 kHz e un rumore di fondo di $(225 \mu\text{g})/(\sqrt{\text{Hz}})$ rms (in passato sistemi da 50 g presentavano $6500 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$). La densità del rumore è anche *costante* con la frequenza, laddove per i piezoelettrici il rumore tende ad aumentare alle basse frequenze e causa problemi quando si integra il segnale per determinare velocità o spostamento. Il tensore (massa/molla) è di dimensioni 0.5×0.4 mm, spesso $2 \mu\text{m}$ e ha una massa di soli $0.5 \mu\text{g}$ (la dimensione aumenta considerevolmente quando l'unità viene assemblata per impieghi pratici). La deformazione dovuta a $1 g$ è 1 nm e la minima deformazione rilevabile è di 210 fm . Un sensore di temperatura integrato sul chip permette di compensare gli effetti termici.

La tecnologia piezoresistiva viene utilizzata in un accelerometro per urti fino a $2000 g$ ¹⁹⁸ con una sensibilità di 0.2 mV/g . La frequenza di risonanza al montaggio è pari a 28 kHz , che fornisce una risposta in frequenza piatta ($\pm 5\%$) fino a 5000 Hz . Una volta assemblata per uso pratico, l'unità diventa di $10 \times 12 \times 5 \text{ mm}$ e pesa 0.8 g . Un ponte di Wheatstone dotato di due resistenze da 500Ω e di due estensimetri trattati con boro, utilizza una tensione di alimentazione *dc* di 10 V . Alcuni accelerometri per misure di urti utilizzano un filtro meccanico (si veda la Figura 10.29).

Sebbene si trovino accelerometri angolari che si basano sulla configurazione di Figura 4.77b, esiste però una minor varietà di modelli e il numero di produttori è molto più limitato rispetto a quanto accade per le unità traslazionali. Accelerometri angolari di tipo "servo" si possono trovare presso un certo numero di produttori e saranno trattati nella prossima sezione. Per misurare movimenti rotatori si possono utilizzare anche array di accelerometri per misure di traslazioni. La Figura 4.82 mostra la situazione più generale, dove nove accelerometri per misure lineari sono fissati a un'apparecchiatura che è a sua volta solidale al corpo rigido di cui si deve misurare il movimento rotatorio. Effettuando un'elaborazione opportuna dei segnali provenienti dai nove accelerometri, è stato mostrato¹⁹⁹ che si possono calcolare le tre componenti ortogonali della velocità e dell'accelerazione angolare relative agli assi solidali al corpo e mostrati nella figura. L'accelerometro PiezoBEAM²⁰⁰ utilizza laminette di flessione piezoelettriche, come mostrato in Figura 4.83 per generare due segnali d'uscita: uno proporzionale all'accelerazione in traslazione e l'altro all'accelerazione angolare, ognuno attorno a un asse singolo definito. I convertitori di carica interni all'accelerometro trasformano

¹⁹⁷ A. J. Doscher, "ADXL105: A Lower Noise, Wider Bandwidth Accelerometer Rivals Performance of More Expensive Sensors", Analog Dialogue, vol. 33-6, 1999, pp. 27-29.

¹⁹⁸ J. Suminto, "Measuring Acceleration in Automotive Safety Systems", Sensors, ago. 1996, pp. 16-22;

"A Rugged, High Performance Piezoresistive Accelerometer", Endevco, San Juan Capistrano, CA, 949-493-8181 (www.endevco.com).

¹⁹⁹ A. I. King, A. J. Padgaonkar e K. W. Krieger, "Measurement of Angular Acceleration of a Rigid Body Using Linear Accelerometers", Biomechanics Res. Center Rep., Wayne State University, Detroit, MI, 6 dicembre, 1974.

²⁰⁰ Kistler, Amherst, NY, 888-547-8537

(www.kistler.com); M. D. Insalaco, "The Art of Fabricating a Rotational Accelerometer", Sensors, sett. 2000, pp. 114-119.

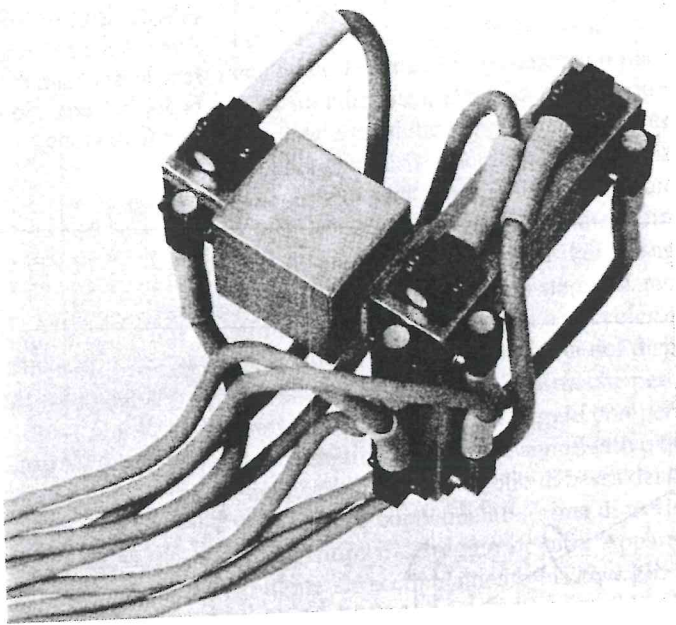


FIGURA 4.82
Array di nove accelerometri (si ringrazia Endevco Corp., San Juan Capistrano, CA).
(Conclusioni)

(b)

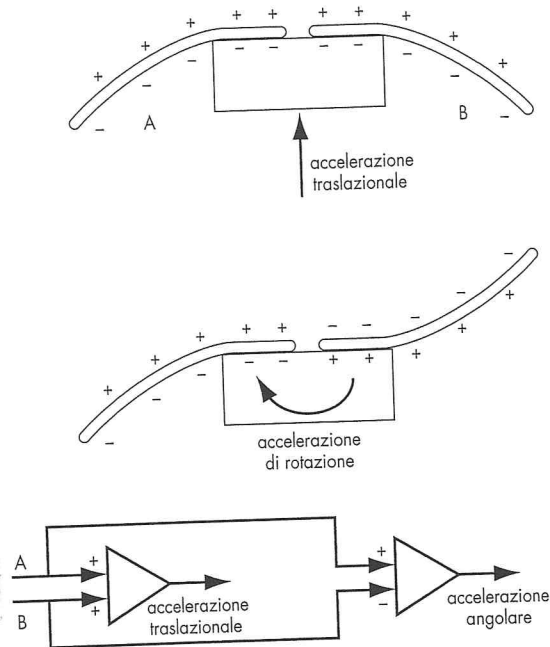


FIGURA 4.83
Accelerometro PIEZOBEAM per misurare sia le accelerazioni traslazionali che angolari.

la carica in tensione. Quindi una serie di amplificatori sommatore esterni operano somme (segnale di traslazione) e sottrazioni (segnale di rotazione) per fornire uscite di $\pm 10 g$, $1 V/g$, $\pm 18\,000 \text{ rad/s}^2$ da 0.5 a $50 \text{ mV}(\text{rad/s}^2)$, risposta piatta da 1 a 2000 Hz e soglia di $300 \mu g \text{ rms}$ e $0.6 \text{ rad/s}^2 \text{ rms}$. Prove eseguite in esperienze reali²⁰¹ documentano le prestazioni di questi strumenti.

La sezione viene completata con la Figura 4.84, che fornisce una guida per la scelta dell'accelerometro adatto per soddisfare alle richieste specifiche in termini di risposta dinamica.

Accelerometri di tipo (Servo) ad azzeramento²⁰²

I cosiddetti servo accelerometri, che sfruttano il principio della retroazione, sono stati sviluppati per applicazioni che richiedono un'accuratezza maggiore rispetto a quella che si può ottenere con gli strumenti che impiegano come trasduttori da forza a spostamento molle meccaniche. In questi strumenti ad azzeramento, la massa sensibile all'accelerazione viene mantenuta molto vicino alla posizione di spostamento nullo, rilevando tale spostamento e generando una forza magnetica a esso proporzionale e in grado di opporsi in ogni circostanza al movimento della massa stessa rispetto alla posizione di riferimento. Questa forza di richiamo svolge la stessa funzione della forza meccanica che si sviluppa nella molla di un accelerometro di tipo convenzionale. Quindi, si può pensare di aver sostituito la molla meccanica con una "molla" elettrica. I vantaggi che derivano da questo approccio sono una maggior linearità e l'assenza di comportamento isteretico della molla elettrica rispetto a quella meccanica. Inoltre, in alcuni casi, si può sfruttare lo smorzamento di natura elettrica (che spesso può essere reso meno sensibile alla temperatura di quanto non accada con lo smorzamento meccanico).

Si possono anche valutare le prestazioni statiche e dinamiche del dispositivo, prima di effettuare prove, introducendo nel sistema delle forze di test, generate elettricamente. Questo metodo di autoverifica rapido e conveniente si dimostra abbastanza importante in prove complesse e costose dove è decisamente importante che tutti i sistemi funzionino correttamente prima che il test incominci. Questi servo accelerometri di solito vengono utilizzati per misurazioni di movimento a carattere generale e in presenza di vibrazioni a bassa frequenza. Essi si dimostrano particolarmente utili nei sistemi di controllo dell'accelerazione, dal momento che il valore di accelerazione di interesse può essere imposto al sistema introducendo una corrente proporzionale i_a generata da una sorgente esterna.

²⁰¹ A. L. Wilks et al., "Acceleration Measurements on a Free-Free Beam", Sensors, sett. 1989, pp. 59-66.

²⁰² E. J. Jacobs, "New Developments in Servo Accelerometers", Proc. Inst. of Environ. Sci., 14th Meeting Ann., 29 aprile, 1968, St. Louis (Endevco Corp., Reprint); C. E. Bosson e D. W. Busse, "Autonetics Microminiature Digital Accelerometer", Proc. Inst. of Navig., Natl. Space Nav. Mtg., Boston, 21-22 aprile, 1966 (Autonetics Corp., Reprint); H. K. P. Neubert, "Instrument Transducers", cap. 5, Oxford University Press, London, 1963.

La l
tato
opp
For:
stru
La c
l'alt
sior
che
e in
valc
200
d'ir
nett
da t
per
cori
in u
un c
tico

Un'asta sottile sostiene due sensori capacitivi, uno per lato, per ottenere misure di intercapedini con compensazione della posizione della sonda. Per applicazioni a posizione fissa è disponibile un modello con misura da un solo lato. I sensori per i freni a disco⁶⁹ vengono utilizzati sia sui veicoli operativi sia su dispositivi di prova di laboratorio, per misure dinamiche. I sensori singoli o doppi permettono l'analisi del runout dei rotori, la variazione di spessore del meato, la conicità del rotore, l'orientazione da estremo a estremo, gli svergolamenti e le espansioni termiche fino a temperature di 850°C.

Trasduttori piezoelettrici

Quando certi materiali solidi vengono deformati, internamente a essi vengono generate cariche elettriche. Questo effetto è reversibile, cioè se viene applicata una carica, in risposta il materiale si deformerà meccanicamente. Questi fenomeni prendono il nome di *effetti piezoelettrici*⁷⁰. Questo principio di conversione elettromeccanica dell'energia viene utilizzato in entrambe le direzioni. Nella direzione da ingresso meccanico a uscita elettrica tale effetto è la base di molti strumenti usati per misurare accelerazioni, forze e pressioni. Può essere anche utilizzato come modo di generare potenze elettriche ad alta tensione e bassa intensità, come nei motori a combustione interna ad accensione comandata e nei filtri elettrostatici per la polvere. L'effetto con direzione da ingresso elettrico a uscita meccanica viene utilizzato in piccoli eccitatori di vibrazioni, nei sistemi sonar per l'esplorazione attraverso rilievi acustici e per la determinazione della direzione, negli strumenti di prova industriali non distruttivi, di tipo ultrasonico, negli ugelli delle stampanti a getto, nei misuratori di portata ultrasonici e nei microattuatori⁷¹.

Ci sono tre principali gruppi di materiali che mostrano un effetto piezoelettrico significativo e utilizzabile: cristalli naturali (quarzo, sali di Rochelle) e sintetici (solfato di litio, fosfato di ammonio biidrogenato), ceramiche ferroelettriche polarizzate (titanato di bario ecc.) e certe pellicole di polimeri⁷². Grazie alla loro asimmetria naturale, i cristalli mostrano l'effetto senza nessuna ulteriore elaborazione. Le ceramiche ferroelettriche devono essere polarizzate artificialmente tramite l'applicazione di un forte campo elettrico al materiale (mentre questo viene riscaldato a una temperatura superiore al punto di Curie di quel materiale) e poi lentamente raffreddato, mentre il campo è ancora applicato. (La *temperatura di Curie* è la temperatura sopra la quale un materiale perde le sue proprietà ferroelettriche; quindi questo limita la temperatura massima alla quale questo materiale può essere utilizzato.) Quando il campo esterno viene rimosso dal materiale ormai raffreddato, questo mantiene una polarizzazione residua e manifesta l'effetto piezoelettrico.

L'effetto piezoelettrico può essere sfruttato per rispondere a (o per causare) una deformazione meccanica del materiale in molti modi differenti, come la dilatazione nello spessore, la dilatazione trasversale, il taglio nello spessore e il taglio sulle facce. Il tipo di movimento prodotto dipende dalla forma e dall'orientamento del pezzo relativamente all'asse del cristallo, e della posizione degli elettrodi. Gli elettrodi metallici sono posizionati sopra alcune facce specifiche del materiale piezoelettrico, cosicché i fili principali possano essere collegati per portare o estrarre le cariche elettriche. Siccome i materiali piezoelettrici sono isolanti, gli elettrodi diventano anche le armature di una capacità. Un elemento piezoelettrico utilizzato per convertire movimenti meccanici in segnali elettrici deve essere pensato come un generatore di cariche e una capacità. Le deformazioni meccaniche generano una carica; questa carica quindi produce una determinata differenza di potenziale tra gli elettrodi, che, secondo la comune legge delle capacità, vale $E=Q/C$. L'effetto piezoelettrico è sensibile alla direzione, poiché una trazione produce una tensione con una certa polarità, mentre la compressione produce una tensione di polarità opposta.

Di seguito si mostrano le principali caratteristiche dei trasduttori piezoelettrici che effettuano la trasformazione da movimento a differenza di potenziale considerando solo un tipo comune di deformazione, la dilatazione nello spessore. Per questa modalità, la configurazione fisica è come in Figura 4.40b. Vi sono parecchie costanti fisiche numeriche che descrivono il fenomeno, espresse con doppio pedice. Per convenzione il primo pedice si riferisce alla direzione dell'effetto elettrico e il secondo a quella dell'effetto meccanico, utilizzando il sistema di numerazione degli assi di Figura 4.40a.

⁶⁹ S. Muldoon e R. Sandberg, "Using Capacitive Probes in Automotive Brake Component Testing", *Test Engineering and Management*, agosto-settembre 1997, pp. 10-12.

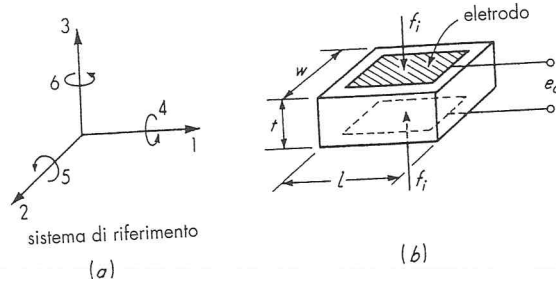
⁷⁰ Harris e Crede, op. cit., cap. 16, parte 2.

⁷¹ Inchworm Translator, Burleigh Instruments, Fisher, NY, 716-924-9355.

(www.burleigh.com)

⁷² R. Brown, "Piezo Film for Vibration Monitoring", *Sensor*, pp. 20-26, gennaio 1988; J. V. Chagny e L. E. Robb, "Piezo Film Sensors", *Sensors*, pp. 6-18, maggio 1986; Kynar Piezo Film Technical Manual, Pennwalt Corp., King of Prussia, PA.

FIGURA 4.40
Trasduttore piezoelettrico.



Si considerano due famiglie principali di costanti, le costanti g e le costanti d . Per uno strumento che sfrutta la dilatazione dello spessore, in titanato di bario, la costante g utile è g_{33} , che è definita come

$$g_{33} = \frac{\text{campo prodotto in direzione 3}}{\text{sforzo applicato in direzione 3}} = \frac{e_0/t}{f_i/(wl)} \quad (4.57)$$

Quindi se si conosce g per un dato materiale e la dimensione t , si può calcolare la tensione di uscita per unità di sforzo applicato. Valori tipici di g sono $12 \times 10^{-3} \text{ (V/m)/(N/m}^2\text{)}$ per il titanato di bario e $50 \times 10^{-3} \text{ (V/m)/(N/m}^2\text{)}$ per il quarzo. Quindi, per esempio, un cristallo di quarzo spesso 2.54 mm avrà una sensibilità di $127 \text{ V/(N/mm}^2\text{)}$, il che mostra l'elevata tensione di uscita che si ottiene anche per piccoli sforzi, fatto questo tipico degli strumenti piezoelettrici.

Per mettere in relazione la forza applicata alla carica generata, le costanti d possono essere definite come:

$$d_{33} = \frac{\text{carica generata in direzione 3}}{\text{forza applicata in direzione 3}} = \frac{Q}{f_i} \quad (4.58)$$

Oltretutto, d_{33} può essere calcolata a partire da g_{33} se è nota la costante dielettrica ϵ del materiale, dal momento che

$$C = \frac{\epsilon wl}{t} \quad (4.59)$$

$$g_{33} \triangleq \frac{\text{campo}}{\text{sforzo}} = \frac{e_0 wl}{t f_i} = \frac{e_0 C}{\epsilon f_i} = \frac{Q}{\epsilon f_i} = \frac{d_{33}}{\epsilon} \quad (4.60)$$

$$d_{33} = \epsilon g_{33} \quad (4.61)$$

La costante dielettrica del quarzo è circa $4.06 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ mentre per il titanato di bario vale $1.250 \times 10^{-11} \text{ F/m}$. Quindi per il quarzo

$$d_{11} = \epsilon g_{11} = (4.06 \times 10^{-11})(50 \times 10^{-3}) = 2.03 \text{ pC/N} \quad (4.62)$$

(Il pedice 11 viene usato perché nel quarzo la modalità di deformazione dello spessore è lungo l'asse cristallografico chiamato convenzionalmente asse 1.) Alcune volte si preferisce esprimere la carica o la tensione di uscita in termini di deformazione del cristallo (piuttosto che in termini di sforzo o forza), perché nella realtà è proprio la deformazione che causa la generazione di cariche. Per far questo, bisogna conoscere il modulo di elasticità, che vale 86 GPa per il quarzo e 120 GPa per il titanato di bario.

Tenendo presente la breve introduzione appena fatta, si procede a considerare gli elementi piezoelettrici come trasduttori di spostamento. Lo scopo finale è di solito misurare forze, pressioni, o accelerazioni, ma qui consideriamo solo la conversione da spostamento a tensione. A scopo di analisi è necessario considerare come un unico insieme il trasduttore, il cavo di connessione e l'amplificatore associato. Normalmente l'impedenza del trasduttore è molto elevata; quindi di solito l'amplificatore è del tipo a elevata impedenza, utilizzato come buffer (adattatore di impedenza) piuttosto che come amplificatore del livello in tensione. Spesso si utilizzano anche amplificatori di carica (vedi Capitolo 10). La capacità del cavo può essere significativa, soprattutto per cavi lunghi. Considerando il solo trasduttore, se viene applicato uno spostamento statico x_i e questo viene mantenuto a un valore costante, si genererà una ten-

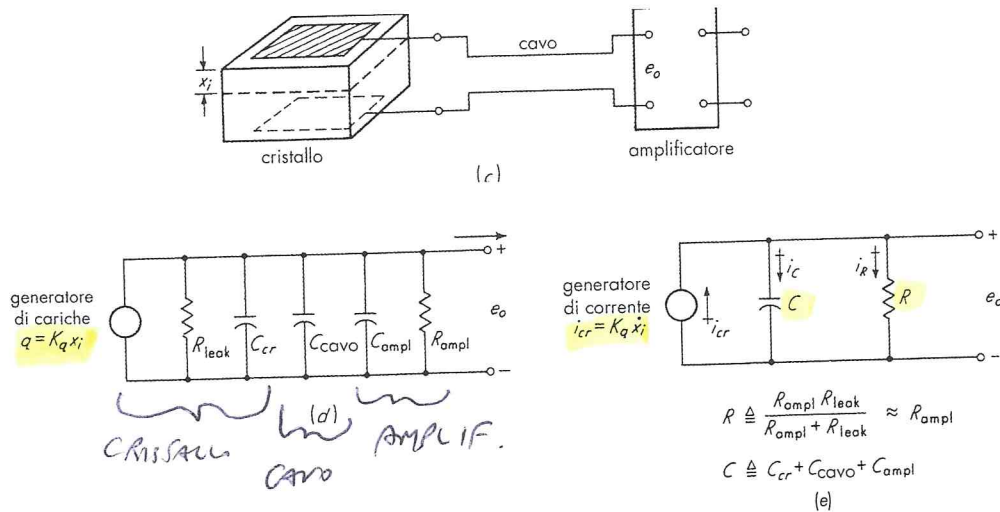


FIGURA 4.40
Circuito equivalente per il trasduttore piezoelettrico.
(Conclusion)

sione ai terminali del trasduttore, ma la carica diminuirà lentamente scaricandosi attraverso la resistenza di leakage (dispersione) del trasduttore. Siccome R_{leak} di solito è molto elevata (dell'ordine di $10^{11} \Omega$), questo calo sarà molto lento, magari tale da permettere di osservare almeno una risposta quasi statica. Comunque, quando esternamente al trasduttore viene collegato uno strumento di misura della tensione con bassa impedenza di ingresso, la carica svanisce molto rapidamente, impedendo la misura di spostamenti statici. Anche gli amplificatori di relativa alta impedenza di solito non permettono misure statiche. Alcuni sistemi disponibili in commercio⁷³ che usano trasduttori al quarzo (resistenza di leakage molto elevata) e amplificatori galvanometrici in ingresso (impedenza di ingresso molto elevata) raggiungono una resistenza totale effettiva di $10^{14} \Omega$, che fornisce un decadimento del segnale sufficientemente lento per permettere in certe situazioni misure statiche.

Per mettere la discussione appena fatta in termini quantitativi, si consideri la Figura 4.40c. La carica generata del cristallo può essere espressa come

$$q = K_q x_i \tag{4.63}$$

dove si definiscono

$$K_q \triangleq C/cm \tag{4.64}$$

$$x_i \triangleq \text{spostamento, cm} \tag{4.65}$$

Le resistenze e le capacità di Figura 4.40d possono essere combinate come in 4.40e. Si converte, inoltre, il generatore di carica in un generatore di corrente più familiare, secondo l'espressione

$$i_{cr} = \frac{dq}{dt} = K_q \left(\frac{dx_i}{dt} \right) \tag{4.66}$$

Si può quindi scrivere

$$i_{cr} = i_C + i_R \tag{4.67}$$

$$e_o = e_C = \frac{\int i_C dt}{C} = \frac{\int (i_{cr} - i_R) dt}{C} \tag{4.68}$$

$$C \left(\frac{de_o}{dt} \right) = i_{cr} - i_R = K_q \left(\frac{dx_i}{dt} \right) - \frac{e_o}{R} \tag{4.69}$$

$$\frac{e_o}{x_i}(D) = \frac{K \tau D}{\tau D + 1} \tag{4.70}$$

dove si è definito

$$K \triangleq \text{sensibilità} = \frac{K_q}{C}, V/cm \tag{4.71}$$

$$\tau \triangleq \text{costante di tempo} = RC, s \tag{4.72}$$

⁷³ Kistler Instrument Corp., Amherst, NY 14228, 888-547-8537, www.kistler.com.

Come già era nello strumento capacitivo di Figura 4.33, si vede che la risposta a regime a uno schiacciamento costante x_i vale zero; non si possono quindi effettuare misure di spostamento statiche. Per una risposta con ampiezza piatta entro una tolleranza di almeno il 5%, la pulsazione deve essere superiore a ω_1 , dove

$$0.95^2 = \frac{(\omega_1 \tau)^2}{(\omega_1 \tau)^2 + 1} \tag{4.73}$$

$$\omega_1 = \frac{3.04}{\tau} \tag{4.74}$$

Quindi una τ elevata fornisce una risposta accurata a basse frequenze.

La risposta di questi trasduttori è ulteriormente illustrata considerando l'ingresso in spostamento di Figura 4.41. L'equazione differenziale è

$$(\tau D + 1)e_o = (K\tau D)x_i \tag{4.75}$$

Siccome $x_i = A$ per $0 < t < T$, questa diventa

$$(\tau D + 1)e_o = 0 \tag{4.76}$$

Ora per $t = 0^+$ lo spostamento x_i vale A , e quindi la carica aumenta *immediatamente* al valore $K_q A$. Quindi la condizione iniziale è

$$e_o = \frac{K_q A}{C} \text{ a } t = 0^+ \tag{4.77}$$

Risolvendo l'Equazione (4.76) con la condizione iniziale (4.77) si ottiene

$$e_o = \frac{K_q A}{C} e^{-t/\tau} \quad 0 < t < T \tag{4.78}$$

L'Equazione (4.78) vale finché $t = T$. Da quest'istante si deve interrompere il suo impiego a causa del cambiamento di x_i . Per $T < t < \infty$ l'equazione differenziale è

$$(\tau D + 1)e_o = 0 \tag{4.79}$$

Per $t = T^-$, l'Equazione (4.78) è ancora valida e

$$e_o = \frac{K_q A}{C} e^{-T/\tau} \tag{4.80}$$

Ora, per $t = T$, x_i varia istantaneamente di una quantità A , causando un'improvvisa diminuzione di carica, pari a $K_q A$, e un'improvvisa diminuzione di e_o di una quantità $K_q A/C$ rispetto al valore assunto a $t = T^-$. Quindi a $t = T^+$, e_o è dato da

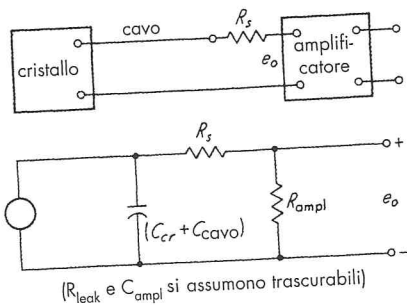
$$e_o = \frac{K_q A}{C} (e^{-T/\tau} - 1) \tag{4.81}$$

che diventa la condizione iniziale per l'Equazione (4.79). La soluzione quindi diventa

$$e_o = \frac{K_q A}{C} (e^{-T/\tau} - 1) e^{-(t-T)/\tau} \quad T < t < \infty \tag{4.82}$$

FIGURA 4.42

Uso di una resistenza in serie per elevare la costante di tempo.



(R_{leak} e C_{ampl} si assumono trascurabili)

$$K \cong \frac{K_q}{C} \left(\frac{R_{ampl}}{R_{ampl} + R_s} \right)$$

$$\tau \cong (R_{ampl} + R_s) C$$

$$C \cong C_{cr} + C_{cavo}$$

La Figura 4.41 mostra l'intero processo per tre valori differenti di τ . Si capisce che è preferibile un valore di τ grande, per una migliore riproduzione di x_i . Se la riduzione per $t = T$ va mantenuta entro il 5% del valore vero, τ deve essere almeno 20 T. Se per una specifica applicazione è richiesto un incremento di τ , questo si può ottenere aumentando R o C , separatamente, oppure entrambi. Si può facilmente ottenere un incremento di C collegando ai terminali del trasduttore una capacità esterna in parallelo, dato che le capacità in parallelo si sommano direttamente. Il prezzo da pagare per questo incremento di τ è una perdita di sensibilità secondo la legge $K = K_q / C$. Spesso questo può essere tollerato a causa dell'elevata sensibilità iniziale dei dispositivi piezoelettrici. Un incremento di R di solito richiede un amplificatore con una resistenza di ingresso maggiore. Se si può sacrificare la sensibilità, si può utilizzare una resistenza collegata in serie connessa esternamente all'amplificatore, come mostrato in Figura 4.42: in tal caso τ aumenterà senza il bisogno di utilizzare un altro amplificatore.

An
cor
cur
Qu
tip
un:
tre
mi
fic
de:
co:
de
sir
foi
sp
nie
l'i
po
va
tra
gl
zi
m
qu
cc
ri
zc
dc

zi
sp
G
ri
ci
bi
v:
n
tr
n
n
li
s:
p
s

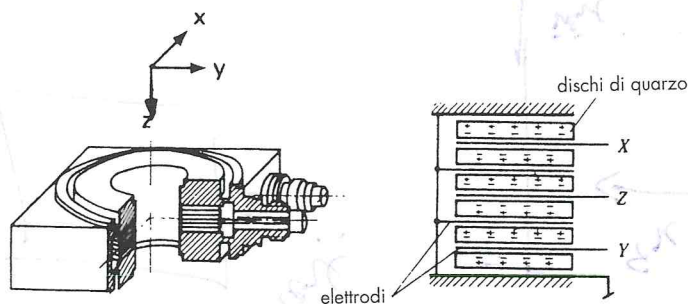


FIGURA 4.43
Trasduttore di forza
piezoelettrico a tre
componenti.

Anche se forse non sono altrettanto versatili nelle operazioni di calcolo e di compensazione come la combinazione estensimetri/circuito a ponte, gli elementi piezoelettrici forniscono alcune funzioni simili, come mostrato dal trasduttore di forza a tre componenti di Figura 4.43⁷⁴. Qui vengono utilizzati due tipi di elementi sensibili costituiti da dischi in quarzo sottile. Un tipo viene tagliato per essere sensibile alla trazione/compressione, l'altro al taglio. Si utilizza una coppia di dischi di trazione/compressione per misurare la componente z della forza, mentre due coppie di dischi adatti a lavorare a taglio, ciascuno opportunamente orientato, serve per misurare le componenti in x e y . L'uso di coppie di dischi, al posto di dischi singoli, semplifica il fissaggio degli elettrodi, elimina il bisogno di strati isolanti che ridurrebbero la rigidità, e aumenta la sensibilità. Si noti che le coppie di dischi sono elettricamente in parallelo cosicché le cariche prodotte da ciascun elemento vengono sommate. Il meccanismo di somma dei segnali può essere esteso a più di due elementi e non è limitato agli elementi interni a un singolo trasduttore. Quindi, per esempio, si può sommare elettricamente la componente x della forza da un trasduttore, con la componente y di un altro. Mentre gli elementi piezoelettrici rispondono sia a deformazioni positive che negative (con cariche di polarità opposta), è meccanicamente difficile applicare sforzi di trazione negli stessi elementi, dal momento che l'incollaggio di solito non è sufficientemente affidabile. La procedura più comune è quella di porre gli elementi (come i dischi sopra menzionati) sotto un precarico di compressione elevato, sufficiente per impedire l'annullamento del precarico sotto qualsiasi azione esterna di trazione prevista, e abbastanza grande per consentire il trasferimento delle componenti di taglio x e y senza slittamenti. In questo caso la graduale scomparsa della carica per l'applicazione di azioni statiche è un vantaggio, poiché il precarico viene mantenuto meccanicamente, ma produce una tensione di uscita nulla. Carichi positivi e negativi applicati in direzione z , quindi, producono tensioni corrispondenti positive e negative, dato che la tensione di uscita corrisponde alla *variazione* di deformazione a partire dalla condizione di precarico. Per quanto riguarda i dati relativi alle caratteristiche statiche e dinamiche, specifiche dei trasduttori piezoelettrici, si rimanda alle rispettive sezioni sulle misure di forza, pressione e accelerazione, dove questi dati avranno maggiore significato.

In precedenza si è brevemente parlato dell'uso della tecnologia piezoelettrica per la creazione di *microattuatori*, piuttosto che per strumenti di misura. Siccome questi attuatori sono spesso una parte vitale di un *sistema* di misura, si parlerà ora di queste applicazioni. Il sensore GyroChip, che verrà discusso più avanti in questo capitolo, utilizza il principio di un doppio risuonatore a forchetta (diapason) piezoelettrico di quarzo miniaturizzato, montato su un braccio tarato, per misurare la velocità angolare assoluta. Un primo risuonatore viene forzato a vibrare per applicazione di una tensione di alimentazione armonica. La rotazione del sensore fa vibrare il secondo risuonatore con un movimento legato alla velocità angolare; questo movimento è causa una tensione di uscita di origine piezoelettrica. Spesso gli attuatori piezoelettrici trovano impiego nella generazione di minuscoli movimenti di traslazione e rotazione necessari a posizionare specchi, fibre ottiche ecc., in vari sistemi di misura. Gli attuatori mono- o multi-assiali sono disponibili in molte diverse configurazioni e spesso vengono utilizzati con sistemi in retroazione per eliminare l'isteresi presente nei materiali piezoelettrici. I sensori di spostamento utilizzati in questi sistemi possono essere capacitivi, LVDT, a correnti parassite, o del tipo a estensimetri. Una tipica piattaforma di posizionamento xy ⁷⁵ che utilizzi sensori capacitivi ha un campo di misura di 50 μm una risoluzione di 0.5 nm, e una frequenza

⁷⁴ G. H. Gautschi, Piezoelectric Multicomponent Force Transducers and Measuring Systems, Kistler Instrument Corp., Amherst, NY, 1978, 888-547-8537.
(www.kistler.com)

⁷⁵ Polytec PI, Inc., 23 Midstate Dr., Suite 212, Auburn, MA 01501, 508-832-3456
(www.polytec.com), modello P-730.20.

76 Polytec PI, Products for Micropositioning. Queensgate Instruments Inc., The Nanopositioning Book.

77 E. O. Doebelin, "System Dynamics", Marcel Dekker, 1998, pp. 277-282, 306-310 e 686-688.

78 A. E. Hatheway Inc., Pasadena, CA, 818-795-0514.

79 Rubicon Actuator, Schaeffer Magnetics Div., Moog, Inc., Chatsworth, CA, 818-341-5156.

80 "New Dimensions in Optical Gaging", *Inst. Tech.*, p. 9, giugno 1980.

81 C. Menadier, C. Kissinger e H. Adkins, "The Fotonic Sensor", *Inst. & Cont. Syst.*, p. 114, giugno 1967; Mechanical Technology Inc., Latham, N.Y., 518-785-2464. (www.mechtech.com)

di risonanza di 500 Hz. La modellazione del comportamento dinamico di questi sistemi viene discussa nei cataloghi/manuali dei produttori⁷⁶ e nel mio libro "Dinamica dei Sistemi"⁷⁷. L'attuazione piezoelettrica è anche una componente fondamentale di vari microscopi a scansione, discussi più avanti in questo testo. La misura e il controllo di movimenti molto piccoli è una parte fondamentale della tecnologia dei MEMS (sistemi microelettromeccanici).

Piccoli movimenti di precisione possono anche essere ottenuti con motori elettrici "ordinari" o micrometri, usando gli *attuatori elastici*⁷⁸. Questi sono oggetti metallici flessibili che accettano un movimento grande come ingresso e producono un movimento molto più piccolo in uscita. Per esempio, il movimento in ingresso può venire da un micrometro ordinario a nonio con campo di 25 mm e risoluzione di 0.0025 mm mentre il movimento in uscita ha un campo di 1 μm con una risoluzione di 1 nm. Questi attuatori sono anche stati combinati con motori elettrici⁷⁹.

Strumenti elettro-ottici

Descriveremo ora alcuni strumenti di misura di spostamento che combinano principi ottici ed elettronici. Ciascuno è progettato per uno specifico tipo di applicazione, ma tutti condividono i vantaggi generali delle misure ottiche⁸⁰, delle operazioni a non contatto, con una forza trascurabile esercitata sull'oggetto in movimento, dal momento che la pressione di radiazione della luce è trascurabile.

Il nostro primo esempio, il sensore Fotonic⁸¹, utilizza le fibre ottiche per misurare spostamenti nel campo dai centesimi di millimetro fino anche a 250 mm, con un apparato optoelettronico relativamente semplice. La sonda (Figura 4.44), con diametro di 0.5-7.5 mm e lunghezza di 75 mm, consiste in un fascio di parecchie centinaia di fibre ottiche, ciascuna con diametro di pochi centesimi di millimetro. Il fascio di fibre può avere lunghezza da 30 cm fino a 1 m tra il punto di misura e l'elettronica di condizionamento, dove il fascio stesso viene di-

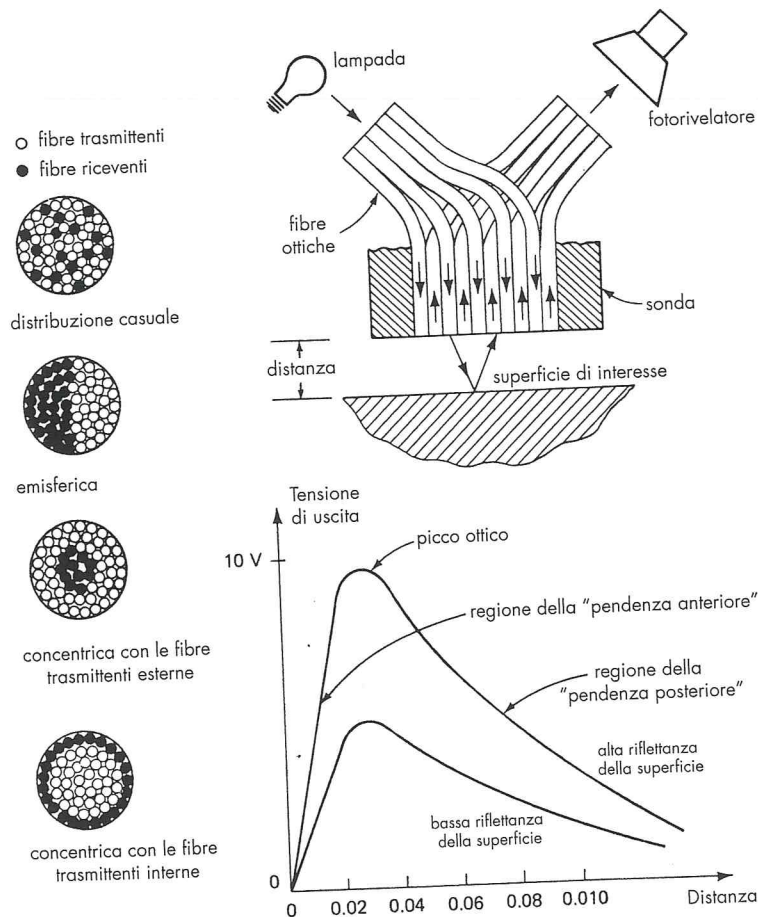


FIGURA 4.44
Trasduttore di spostamento a fibra ottica.