

Sensori di vibrazioni e accelerazioni

14.1. Introduzione

Le vibrazioni meccaniche sono oscillazioni, ovvero variazioni con il tempo della posizione di una massa rispetto a un riferimento fisso. La vibrazione può essere caratterizzata molto spesso da un moto armonico, quando la sua ampiezza varia nel tempo con legge sinusoidale. Allo scopo di caratterizzare la capacità di un corpo a resistere alla applicazione di una forza vibratoria, si definisce una *impedenza meccanica*, come il rapporto tra la forza applicata e la velocità del corpo in caso di moto armonico.

Le vibrazioni possono essere sia *periodiche* sia *aleatorie*. Nel caso di vibrazioni periodiche, esse sono caratterizzate: dalla *frequenza* f , o dal suo inverso, il *periodo* T ; da una *ampiezza* A , espressa come valore di picco, o come valore picco-picco, o come valore medio, o come valore efficace (in inglese RMS acronimo di Root Mean Square); da una *fase* φ , valutata rispetto a un riferimento arbitrario. Si riportano le espressioni del valor medio e del valore efficace di una vibrazione:

$$[14.1] \quad A = \frac{1}{t} \int_0^t A(t) dt \quad A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t [A(t)]^2 dt}$$

Una *vibrazione aleatoria* o non periodica ha un'ampiezza variabile con legge casuale, che può essere caratterizzata mediante le leggi della statistica. In tal caso particolare rilevanza assume la risposta in frequenza della vibrazione. Molto spesso si considerano vibrazioni che presentano una distribuzione di tipo gaussiano.

Le vibrazioni si estendono in un ampio campo di frequenza, che va dalle frazioni di hertz alle centinaia di kilohertz, e investono parecchi settori: geologico (vulcani, terremoti ecc.); nautico (imbarcazioni di vario tipo, maree ecc.); aeronautico (aeroplani, navicelle spaziali ecc.); idraulico (dighe, tubazioni ecc.); edile (fondazioni, travi ecc.); elettrico (trasformatori, motori ecc.); meccanico (macchine, cuscinetti ecc.); medico (trapani, macchine di rianimazione ecc.) e tanti altri.

I metodi di misura sono i più disparati e vanno, tanto per citarne alcuni, dal semplice righello, al microscopio, allo stroboscopio. Essi possono essere di tipo meccanico, elettrico, ottico o anche una combinazio-

ne di questi. Per esempio nel campo delle vibrazioni acustiche si utilizzano metodi elettrici e in particolare un sensore piezoelettrico di accelerazione per l'ottimo SNR.

Molto spesso il segnale elettrico, proporzionale alla vibrazione, dopo opportuna amplificazione è inviato o a un registratore, che consente la visualizzazione dell'andamento temporale della vibrazione, o a un analizzatore di spettro, che permette la visualizzazione delle ampiezze della vibrazione in funzione della frequenza.

14.2. Misura delle vibrazioni

Le grandezze misurabili per caratterizzare una vibrazione periodica con la sua ampiezza, la sua frequenza e la sua fase sono:

- lo *spostamento*, che è la distanza della massa in movimento dalla sua posizione iniziale;
- la *velocità*, $v(t)$, che è la velocità alla quale si muove la massa;
- l'*accelerazione*, $a(t)$, che è la variazione nel tempo della velocità della massa in movimento.

Si consideri per esempio un moto armonico. È intuitivo che quanto maggiore è la frequenza della vibrazione tanto più veloce sarà il moto della massa e viceversa. Nel caso di moto uniforme, indicato con A lo spostamento, abbastanza piccolo, della massa dal punto di riferimento, che caratterizza la posizione iniziale, si ha:

$$[14.2] \quad A = \frac{v}{2\pi f}$$

dove v è la velocità della massa e f la frequenza del moto armonico. Considerazioni analoghe si possono fare tra accelerazione e velocità o tra accelerazione e spostamento, giungendo alle ben note relazioni del moto armonico:

$$[14.3] \quad v = \frac{a}{2\pi f} \quad A = \frac{a}{(2\pi f)^2}$$

Quindi se è nota la frequenza della vibrazione è sufficiente la misura di uno solo dei tre parametri su indicati per risalire agli altri, o ancora dalla misura congiunta di due dei tre parametri è possibile misurare la frequenza della vibrazione.

La scelta di un parametro invece di un altro dipende dall'accuratezza richiesta alla misura, dalla natura della vibrazione e dalla scopo che ci si prefigge. Per esempio la misura dello spostamento è generalmente preferita per misure di vibrazioni a bassa frequenza, come quelle dovute a non perfetto bilanciamento di una macchina o di un contenitore. La misura di accelerazione è invece preferita per misure di vibrazioni impulsive e a elevata frequenza. La velocità d'altra parte fornisce un'utile indi-

cazione della intensità della vibrazione ed è preferita nel monitoraggio delle condizioni di funzionamento della macchina e nei programmi di manutenzione preventiva. Essa è anche ideale per l'identificazione delle sorgenti di rumore nelle parti in rotazione.

14.3. Verifica delle vibrazioni

Si è accennato all'ampio campo di applicazione dei sensori di vibrazione, ma senza dubbio la loro più diffusa utilizzazione è nel settore delle macchine. In genere i sensori di vibrazione fanno parte di un sistema di controllo e la loro funzione è quella di evidenziare condizioni anomale di funzionamento, consentendo l'adozione di opportune azioni correttive o il blocco della macchina, in modo da evitare gravi danni o il verificarsi di guasti catastrofici.

Quanto più il sistema è complesso e utilizzato in settori strategici e vitali, tanto più ai sensori di vibrazione si richiedono accuratezza, sensibilità, rapidità di risposta. Naturalmente il controllo delle vibrazioni rientra in un sistema più complesso, che prevede la misura di altre grandezze. Sensori di vibrazione sono di fondamentale importanza sugli aeromobili, dove sono ormai installati da più di vent'anni, ma trovano sempre maggiore diffusione nelle industrie per il controllo dei cuscinetti, degli alloggiamenti, degli involucri delle macchine, dei basamenti, dei supporti, delle apparecchiature ausiliarie.

Il sensore di vibrazione, inserito nel sistema di controllo della macchina, può essere collegato a un sistema di allarme e spegnimento o a un sistema di registrazione e analisi continuativa. Nel primo caso la funzione del sensore è del tipo on-off, ovvero serve semplicemente a stabilire se si sia o meno raggiunto un livello massimo prefissato di vibrazione; nel secondo caso si richiedono al sensore prestazioni superiori, in quanto esso deve consentire di operare una diagnosi analitica della macchina, per stabilire un programma di manutenzione, che evidenzi l'insorgere di guasti marginali mentre la macchina è in funzione, e quindi gli interventi da predisporre per evitare che il guasto evolva in senso catastrofico e per riportare il funzionamento all'interno delle specifiche.

I tipi più diffusi di sensori di vibrazione nei sistemi di controllo sono: le sonde di posizione a correnti parassite; i sensori a bobina mobile di velocità di vibrazione; i sensori piezoelettrici di accelerazione. Questi dispositivi forniscono una misura dei livelli massimi della vibrazione. Prima di essere disponibili sul dispositivo di presentazione dei risultati, i segnali sono amplificati, raddrizzati e filtrati, fornendo un segnale in uscita in corrente continua. È quasi sempre possibile regolare un segnale elettrico di riferimento, corrispondente a un valore limite di vibrazione, superato il quale il dispositivo attiva un allarme o lo spegnimento dell'azionamento. I tipi di filtri possono essere passa basso, passa alto o passa banda. La loro utilizzazione serve sia a migliorare l'SNR sia a individuare particolari bande di frequenza.

Nel caso di controlli periodici non si utilizza più ormai la registrazio-

ne manuale e il riporto su grafico, in quanto queste operazioni sono eseguite dal calcolatore numerico, collegato all'analizzatore di spettro cui è applicato il segnale in uscita al sensore. Si va sempre più diffondendo nelle attività di manutenzione preventiva l'uso di analizzatori a tempo reale (RTA). Gli RTA sono analizzatori di spettro molto veloci con uscita su diagrammatore X-Y e con segnale inviato all'elaboratore numerico. Gli attuali processori digitali di segnali, DSP (Digital Signal Processor), in grado di eseguire la trasformata veloce di Fourier, FFT (Fast Fourier Transform), di 1024 punti in meno di 10 ms, hanno permesso di integrare analizzatore ed elaboratore e consentono di ottenere oltre allo spettro valutazioni del valor medio o efficace dell'ampiezza della vibrazione e tante altre informazioni. Questi sistemi si sono rivelati di particolare interesse sia nella manutenzione delle macchine rotanti, sia nella fase di prima installazione di nuovi tipi di macchine, sia nella fase di ricerca di guasti latenti.

14.4. Scelta dei sensori di vibrazione

I sensori di vibrazione più utilizzati sono, come si è accennato, quelli di spostamento, di velocità e di accelerazione. La scelta di uno dei tre tipi di sensore non è facile e dipende dalla particolare applicazione. Se non è nota la frequenza di vibrazione, particolarmente indicata è la misura della velocità, con sensori dotati di un sistema di smorzamento critico a evitare errori nella misura che potrebbero insorgere per la presenza di condizioni di risonanza. Nel caso di vibrazioni ad alta frequenza e ad ampia banda si preferiscono i sensori di accelerazione, che presentano una risposta in frequenza ad ampio spettro, essendo di piccole dimensioni e leggeri. Allo scopo di facilitare la scelta di un sensore, qui di seguito si sintetizzano limiti e vantaggi dei tre tipi di sensori citati precedentemente.

I *sensori di spostamento* presentano diversi vantaggi. Poiché si utilizzano quelli privi di contatto, essi non caricano indebitamente la massa vibrante. Si ricordano a questo proposito i sensori di spostamento elettro-ottici, in grado di misurare vibrazioni di ampiezza inferiore a 1 μm . Essi inoltre forniscono una misura diretta dell'ampiezza, il che è particolarmente utile quando si debba verificare con rapidità il superamento o meno di prefissati limiti di vibrazione. I sensori di spostamento per misure di vibrazione possono essere facilmente miniaturizzati e contenere al loro interno i dispositivi di condizionamento ed elaborazione del segnale, in modo integrato. Presentano una bassa impedenza di uscita, buona sensibilità e sono facili da tarare. Hanno una risposta in frequenza superiore a quella dei sensori di velocità e comparabile con quella dei sensori di accelerazione. Sono molto utilizzati in ambienti industriali purché non si sia in presenza di temperature molto elevate. In genere il limite superiore di temperatura è di 200 °C. Tra gli svantaggi vi è quello che a volte possono risultare di difficile installazione, ma soprattutto quello di avere un basso SNR, infatti la loro elevata sensibilità li porta a

essere influenzati da altre masse in movimento vicine a quella in prova e dalla forma e dal materiale da cui è costituita la massa vibrante. Si ricorda infine che sono sensori passivi.

I *sensori di velocità* presentano il vantaggio di una facilità di installazione. Inoltre nel campo di frequenze da pochi hertz ad alcuni kilohertz presentano una buona sensibilità. Sono sensori attivi con livelli facilmente misurabili del segnale di uscita nel campo di frequenza succitato. Possono essere utilizzati fino a valori limiti di temperatura intorno alle centinaia di gradi Celsius. D'altra parte i sensori di velocità di vibrazione hanno dimensioni e peso abbastanza elevati, il che naturalmente limita la risposta in frequenza. Inoltre hanno parti mobili soggette a usura e non è facile tararli. Infine al di sotto di qualche hertz non hanno un segnale di uscita facilmente rivelabile e quindi non sono indicati nel caso di fenomeni lentamente variabili.

I *sensori di accelerazione* presentano una buona risposta in frequenza che si estende alle alte frequenze, in quanto sono di piccole dimensioni e abbastanza leggeri. Alle alte frequenze presentano una ottima sensibilità e possono essere utilizzati anche in presenza di temperature intorno ad alcune centinaia di gradi Celsius. Sono dei sensori passivi e i maggiori svantaggi sono legati ai costi elevati e alla difficoltà di taratura. Richiedono in genere amplificatori e filtri in uscita essendo sensibili a vibrazioni spurie ad alta frequenza.

Poiché il dato che interessa misurare nel campo delle vibrazioni è soprattutto l'ampiezza, va da sé che i sensori di velocità di vibrazione sono dotati di un sistema di integrazione in modo da fornire in uscita l'andamento dell'ampiezza della vibrazione in funzione del tempo. L'integratore d'altra parte permette di migliorare l'SNR. In particolare se si temono gli effetti di una ben individuata vibrazione spuria, basterà scegliere il periodo di integrazione coincidente o multiplo di quello della suddetta vibrazione. Così nel caso si utilizzi un sensore di accelerazione bisognerà provvedere a una doppia integrazione.

In sintesi, nella *scelta* di un sensore di vibrazione, occorrerà tener presenti i seguenti parametri. La *frequenza* o il campo di frequenza della vibrazione spesso non consentono l'utilizzazione di sensori di velocità, che hanno una risposta in frequenza compresa tra i 10 Hz e i 10 kHz. La *temperatura* di esercizio deve essere ben definita e rientrare nel campo di normale funzionamento del sensore. Il costruttore fornisce i valori limiti di temperatura e al crescere di tali limiti aumenta il costo del sensore. La *distanza* disponibile tra massa vibrante e oggetti circostanti a volte non consente l'installazione di alcuni sensori, specie se la *dimensione* di questi è ragguardevole. I sensori di accelerazione e di velocità in genere sono installati con innesti a vite sulla macchina contenente la massa vibrante e risultano facili da montare. Altrettanto non si può dire per i sensori di spostamento privi di contatto, che vanno posti a una precisa distanza dalla massa vibrante per assicurare una buona *sensibilità*. I *segnali in uscita* ai sensori sono in corrente alternata e in genere richiedono una amplificazione. L'*amplificatore* dovrà avere una risposta in frequenza nello stesso campo di funzionamento del sensore. Partico-

lamente temibili pertanto sono i *rumori* che presentano una banda equivalente nello stesso campo di frequenza del sensore. Attenzione va posta anche al *tipo di vibrazione* da misurare. Se si vuole misurare la vibrazione sui supporti di una macchina in genere è preferibile utilizzare sensori di velocità o di accelerazione in dipendenza del campo di frequenza della vibrazione. Quando invece si voglia misurare la vibrazione di solo una parte della macchina è preferibile utilizzare sensori di spostamento non a contatto. Al solito bisogna portare in conto tutte le possibili *grandezze d'influenza*, oltre alla temperatura occorrerà porre attenzione alla pressione, all'umidità, alla salinità e ad altri agenti chimici aggressivi. Infine non va dimenticata l'*esperienza* acquisita dall'operatore nell'uso di un sensore. A parità quindi di prestazioni e di costi la scelta dovrà cadere sul tipo di sensore sul quale l'utente ha maturato la maggiore esperienza.

14.5. Sensori di vibrazioni

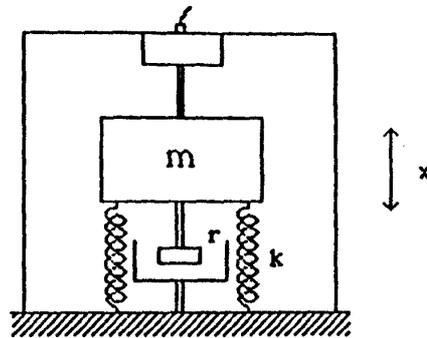
Il rilievo, la misura e la registrazione delle vibrazioni meccaniche assumono notevole importanza in quanto è molto difficile riuscire a prevedere, attraverso una modellizzazione e quindi un calcolo, l'entità delle vibrazioni di una massa. Infatti i parametri in gioco sono diversi e vanno dalla forma, dalla rigidità e più in generale dalle caratteristiche della massa vibrante al tipo, alla ampiezza e alla durata delle sollecitazioni.

Il trasduttore di vibrazione si compone essenzialmente di un *sensore*, detto anche sonda o captatore o pick-up, per rilevare la vibrazione, di un *amplificatore*, inizialmente si utilizzavano quelli di tipo meccanico quasi del tutto sostituiti da quelli elettronici, da un *indicatore*, fino a poco tempo fa di tipo analogico oggi sostituiti da visualizzatori numerici, o da un *registratore*, molto diffusi erano i registratori galvanometrici oggi sostituiti da quelli numerici, in modo da avere disponibili su carta i risultati delle misure.

In base alla natura del sensore si è detto che si hanno diversi trasduttori di vibrazione. I trasduttori basati su sensori di spostamento prendono anche il nome o di *vibrometri*, nel caso misurino spostamenti assoluti, o di *sismografi*, nel caso misurino spostamenti relativi.

I *vibrometri* in realtà oltre che lo spostamento possono misurare anche la velocità della vibrazione. Essi presentano un riferimento fisso, in modo da poter misurare lo spostamento assoluto del corpo. Sono di tipo meccanico, ormai poco utilizzati, elettrico o ottico. Il vibrometro meccanico ha dei limiti funzionali notevoli e può essere usato solo in presenza di vibrazioni abbastanza lente. È costituito da un tasto che viene premuto, mediante una molla fissata all'estremità del contenitore, contro la massa vibrante. Gli spostamenti della molla rispetto al contenitore fisso sono amplificati, mediante un sistema di leve, e registrati su carta, utilizzando una punta scrivente. I vibrometri elettrici e ottici fanno uso dei sensori di spostamento presi in esame nel capitolo precedente, con particolare preferenza per quelli privi di contatto: sensori a correnti parassite, sensori capacitivi, sensori ottici (fatto salvo l'encoder).

FIGURA 14.1
Schema di principio di un accelerometro



Nei *sismografi e accelerometri* il sensore è costituito da una *massa* m e da una *molla* di costante elastica k , come mostrato in fig. 14.1. Inoltre vi è un sistema di *smorzamento* viscoso, il cui coefficiente di proporzionalità con la velocità è indicato con r . Se il corpo vibrante oscilla con legge armonica $A \sin \omega t$, lo spostamento della massa rispetto al riferimento fisso sarà governato dalla legge seguente:

$$[14.4] \quad x = \frac{A}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \frac{r^2}{m^2 \omega_n^2}}} \sin(\omega t - \varphi)$$

dove ω è la pulsazione del moto, $\omega_n = (k/m)^{1/2}$ è la *pulsazione naturale* del sensore e infine la fase φ è data da:

$$[14.5] \quad \varphi = \arctg \left[\frac{\frac{\omega}{\omega_n} \frac{r}{m \omega_n}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \right]$$

Sismografi e accelerometri sono *sistemi del secondo ordine* e per essi valgono quindi tutte le considerazioni fatte nello studio del comportamento dinamico di sistemi di questo tipo nel terzo capitolo. Particolare rilevanza rivestono le caratteristiche di questi sistemi per la registrazione delle vibrazioni in uno spettro ampio di frequenza.

Nel caso di misura di vibrazioni periodiche, la pulsazione naturale della massa del sensore, detta anche *massa sismica*, deve risultare da 2 a 10 volte quella della vibrazione. Agendo sulle caratteristiche della molla e sulla massa è possibile variare la frequenza naturale o propria del sensore. Si deve però tener conto che diminuendo la massa e aumentando la rigidità della molla si aumenta la pulsazione e quindi la frequenza naturale, ma si riduce la sensibilità del sensore.

È possibile misurare anche accelerazioni angolari. In tal caso la massa può essere costituita da un fluido. Il fluido sotto l'azione di una accelerazione angolare si sposta rispetto al contenitore e provoca su due palette simmetriche una pressione dalla cui misura è possibile risalire alla accelerazione. In un altro tipo di trasduttore un disco può ruotare attorno al suo centro. Lo spostamento angolare è contrastato da una molla e dipende dalla costante elastica della molla e dal momento di inerzia del disco. Se le accelerazioni angolari sono rapidamente variabili, per effettuare la misura occorre diminuire il periodo di oscillazione proprio del trasduttore, naturalmente in tal modo diminuisce anche la sensibilità.

14.6. Sensori di vibrazione e spostamento

Nel campo della misura delle vibrazioni si possono utilizzare i sensori di spostamento esaminati nel capitolo precedente: sensori induttivi; trasformatori differenziali; sensori a riluttanza; sensori potenziometrici; sensori capacitivi. Possono inoltre utilizzarsi, anche se il loro impiego è molto scarso, altri sensori di tipo sonoro o pneumatico. Si preferiscono quelli che non richiedono il contatto tra organo in movimento e sensore.

In un certo periodo hanno avuto particolare sviluppo i sensori di spostamento allo stato solido, che includono in un unico dispositivo integrato l'elemento sensibile con i dispositivi elettronici di condizionamento ed elaborazione. Il loro principio di funzionamento è quello di rilevare le interruzioni di un campo magnetico, generato da un oscillatore. Le interruzioni sono dovute all'avvicinarsi al sensore di un oggetto metallico, che è introdotto nella zona in cui opera il campo. Questi sensori si basano sullo stesso principio del cerca metalli portatile, con i quali si è in grado di individuare oggetti metallici a profondità anche superiori al metro.

Molto utilizzati sono i sensori a correnti parassite, che consentono di ottenere misure molto accurate con elevati livelli di sensibilità dell'ordine di $10 \text{ V}/\mu\text{m}$. I tempi di risposta sono molto ridotti e quindi si possono misurare vibrazioni a frequenze elevate fino a 4 kHz. Con questo tipo di sensore è possibile misurare le vibrazioni di un albero rotante. A volte la elevata sensibilità del sensore può creare dei problemi; infatti nella misura delle vibrazioni dell'albero si riveleranno tutte le imperfezioni dell'albero stesso (rugosità, microrotture, differenze nello spessore del rivestimento ecc.), inoltre la presenza di campi elettrici esterni può alterare significativamente la misura.

Nel caso la massa vibrante sia di materiale conduttivo è possibile realizzare dei sensori capacitivi, avvicinando a essa una superficie metallica, che forma con la massa stessa un condensatore con dielettrico in aria. Al vibrare della massa si hanno delle variazioni della capacità. La realizzazione pratica non è semplice in quanto capacità e sue variazioni sono piccole e non sempre facili da misurare. In genere si richiede un'elevata amplificazione e circuiti speciali per ridurre l'influenza dei rumori. Un esempio di dispositivo di rivelazione è dato da un oscillatore con fre-

quenza fissa compresa tra i 50 kHz e 1 MHz, dotato di convertitore frequenza-tensione, che fornisce l'alimentazione del condensatore. Un demodulatore converte in corrente continua il segnale in corrente alternata prelevato ai capi del condensatore. Il segnale in corrente continua viene comparato con quello proveniente da un generatore di riferimento a corrente costante. La differenza delle due correnti viene opportunamente amplificata e quindi, oltre a essere disponibile come segnale in uscita proporzionale alla variazione di capacità, comanda l'amplificatore a frequenza costante variando l'ampiezza della tensione di alimentazione del condensatore. Si raggiungono così ottime risoluzioni dell'ordine di una parte su ventimila e incertezze comprese tra 0,05% e 1%.

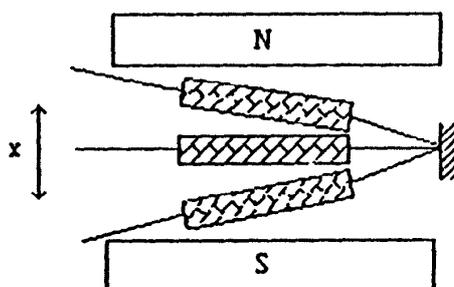
14.7. Sensori di vibrazione e velocità

In fig. 14.2 è mostrato un misuratore di vibrazione basato sulla misura di velocità. Una tensione si genera per *effetto elettrodinamico* in una bobina, solidale con una lamina e soggetta a un campo magnetico generato da un magnete permanente. La lamina, vincolata a un estremo, è soggetta alla vibrazione da studiare. La tensione in uscita prelevabile ai morsetti della bobina, per la legge di Lentz è proporzionale alla velocità cui è soggetta la lamina e quindi la bobina. Se questa vibra con pulsazione $\omega = 2\pi f$, la forza elettromotrice (f.e.m.) indotta nella bobina sarà proporzionale alla pulsazione e quindi alla frequenza della vibrazione. Lo smorzamento del moto della lamina è ottenuto elettricamente, il che permette di ottenere elevata stabilità, anche in presenza di variazioni di temperatura.

Altri sensori di velocità sono *elettro-ottici* e misurano l'ampiezza della variazione di un fascio riflesso dalla superficie vibrante, in un prefissato intervallo di tempo.

Nel campo delle vibrazioni acustiche si possono utilizzare i *microfoni* a bobina mobile o a lamina elastica. In essi la bobina o la lamina è inserita in un campo magnetico, generato da un elettromagnete. Essi si basano sull'effetto elettrodinamico e quindi sono molto simili al sensore precedentemente esaminato. Per effetto della vibrazione nella bobina si in-

FIGURA 14.2
Schema di massima di un sensore di velocità



duce una f.e.m. proporzionale alla velocità della vibrazione. I microfoni permettono nel campo acustico anche la misura di pressioni, ma in tal caso si preferiscono sensori piezoelettrici o capacitivi.

14.8. Sensori di vibrazione e accelerazione

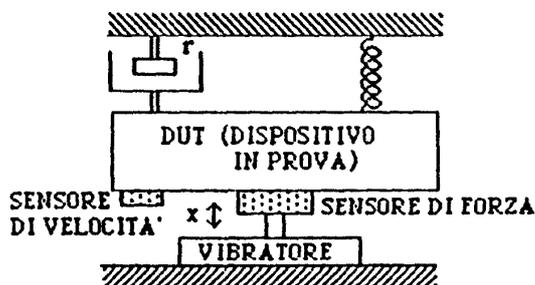
Esistono diversi tipi e nel seguito si esamineranno le caratteristiche salienti dei più diffusi.

Negli *accelerometri capacitivi* la massa sismica vibrando determina la variazione della capacità di un condensatore con uno o due elettrodi fissi. L'accelerometro può anche essere triassiale, usando masse sferiche e tre elementi statorici, predisposti su tre assi ortogonali tra loro.

Gli *accelerometri piezoelettrici* sono quelli più utilizzati. L'accelerazione, agendo sulla massa sismica, esercita una forza su un cristallo piezoelettrico (in genere quarzo), che dà origine a una carica elettrica. Le armature dell'elemento sensibile sono precaricate, in modo da poter rilevare sia accelerazioni sia decelerazioni. In genere si utilizzano due o tre dischetti di quarzo sovrapposti per aumentare la sensibilità. A volte il quarzo è sostituito da cristalli ceramici (titanato di bario, titanato zirconato di piombo ecc.). Il limite superiore della temperatura di funzionamento è dato dal punto o temperatura di Curie del materiale. A questa temperatura i cristalli ceramici perdono la loro polarizzazione. Le temperature di Curie variano da 120 °C per il titanato di bario a 570 °C per il metaniobato di piombo, anche se per alcuni materiali speciali si sono raggiunte temperature di 950 °C. Le variazioni di temperatura possono influenzare il segnale di uscita per l'effetto piezoresistivo. Il campo di frequenza, nel quale la risposta in frequenza presenta un andamento piatto entro il 5%, è compreso tra pochi hertz e la decina di kilohertz. Alcuni accelerometri piezoelettrici speciali sono costituiti da unità triassiali, per rilevare accelerazioni in uno spazio tridimensionale. La peculiarità di questi sensori è quella di essere molto piccoli e leggeri, si riescono a realizzare sensori con massa inferiore al centinaio di milligrammi. I sensori piezoelettrici presentano bassi valori della tensione in uscita, ottenuta mediante un convertitore carica-tensione, ed elevate impedenze di uscita, per cui richiedono amplificazione e adattamento di impedenza. Il segnale in uscita prima di essere inviato tramite un cavo coassiale al dispositivo di presentazione dei risultati o ad altra parte del sistema di controllo deve essere opportunamente condizionato. Uno degli elementi più critici del sistema di trasferimento dell'informazione è proprio il cavo coassiale che deve essere sottile, flessibile, schermato, non attaccabile da ambienti inquinati e avere una capacità molto bassa; a questo scopo si cerca di minimizzare quanto più possibile la sua lunghezza.

Sensori piezoelettrici sono utilizzati anche per misurare l'impedenza meccanica di un dispositivo in vibrazione, definita come il rapporto tra la forza applicata e la velocità assunta. In fig. 14.3 è mostrato uno schema di massima di un sistema atto alla misura dell'impedenza meccanica

FIGURA 14.3
 Schema di principio di un misuratore d'impedenza meccanica



di un dispositivo. I segnali di uscita dei due sensori di forza e velocità sono inviati a un rapportimetro, che fornisce direttamente modulo e fase dell'impedenza $Z_m = F/v$.

Accelerometri allo stato solido impiegano piezotransistori. In essi una massa sismica è sostenuta da un contenitore che trasmette una forza concentrata alla superficie del diodo superiore di un transistor. Sulla superficie del diodo si verificano quindi delle sollecitazioni che danno luogo per effetto piezoresistivo a variazioni della corrente elettrica attraverso l'altra giunzione p-n del transistor. La variazione di corrente è proporzionale alla variazione di resistenza e quindi all'accelerazione che si vuole misurare. Questi sensori hanno dimensioni molto ridotte e pertanto sono competitivi con i sensori piezoelettrici; rispetto a questi presentano più elevata sensibilità (le tensioni in uscita sono sufficientemente elevate da non richiedere ulteriore amplificazione), ma un campo di misura più ristretto con minore risoluzione.

Gli *accelerometri potenziometrici* sono caratterizzati da elevati segnali in uscita e da un campo di frequenza relativamente piccolo che va dai 20 ai 60 Hz. Sono dispositivi a basso costo, ma abbastanza accurati, utilizzati nelle applicazioni in cui le accelerazioni variano lentamente. Lo spostamento del sistema massa-molla è meccanicamente solidale con quello di una spazzola, che si muove lungo l'elemento resistivo. Si può anche prevedere un sistema di leve, che amplifichi lo spostamento della spazzola. In genere si utilizzano come resistori materiali conduttivo-plastici e come dispositivo di smorzamento si utilizza un sistema o gassoso o viscoso o magnetico. Come è noto lo smorzamento è indispensabile per evitare il rumore introdotto dallo scorrimento della spazzola sull'elemento resistivo. Lo smorzamento mediante sistema gassoso è quello più immune dagli effetti termici.

Gli *accelerometri induttivi* sono di vario tipo, ma in genere utilizzano degli LVDT come mostrato in fig. 14.4. Il sistema massa-molla è costituito dal nucleo del trasformatore e da due mensole elastiche. Quando il sistema è soggetto ad accelerazione nella direzione assiale del nucleo si crea uno squilibrio nel trasformatore differenziale con l'insorgere di una tensione in uscita, proporzionale allo spostamento del nucleo e quindi all'accelerazione. Oltre agli LVDT possono utilizzarsi sensori a rapporto

FIGURA 14.4
Accelerometro induttivo utilizzando un LVDT

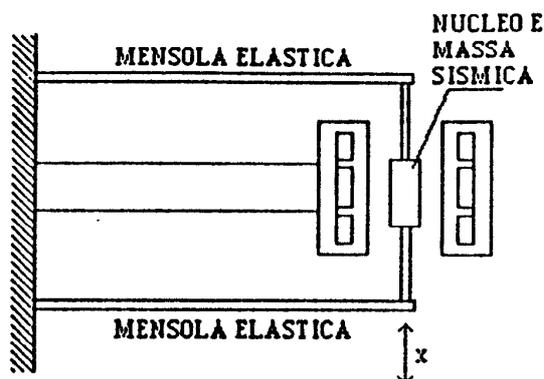
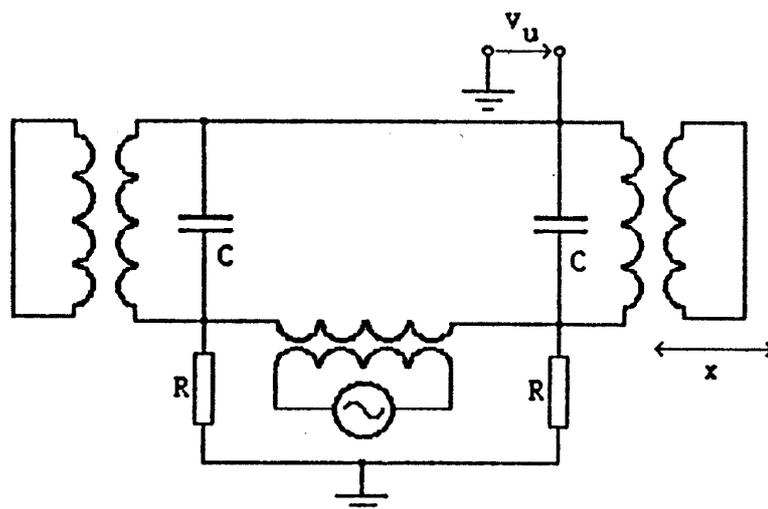


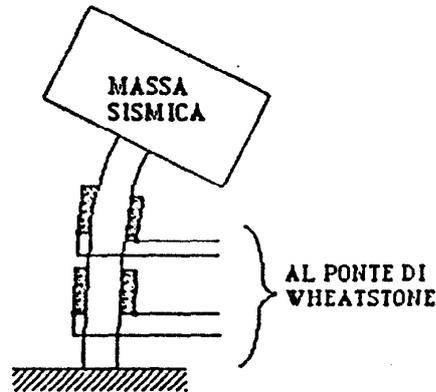
FIGURA 14.5
Accelerometro induttivo con variazione di mutua induttanza



di induttanze. Quando si vogliono utilizzare i sensori accelerometrici in condizioni di temperature elevate (superiori ai 500 °C) si fa ricorso a sensori privi di nucleo ferromagnetico. Una delle possibili soluzioni è quella mostrata in fig. 14.5.

L'accelerometro è costituito da un ponte in c.a., con due induttori gemelli, uno interessato e l'altro no dal moto della massa sismica. La bobina con avvolgimenti fissi consente di avere un valore di induttanza di riferimento. Il materiale da cui è costituita la massa sismica deve essere conduttivo, in modo da avere variazioni di induttanza per effetto delle correnti parassite che circolano nella massa sismica. L'alimentazione del ponte è in alta frequenza. La tensione in uscita è variabile in ampiezza e fase e può essere raddrizzata. La frequenza dell'alimentatore deve risul-

FIGURA 14.6
Accelerometro a estensimetri

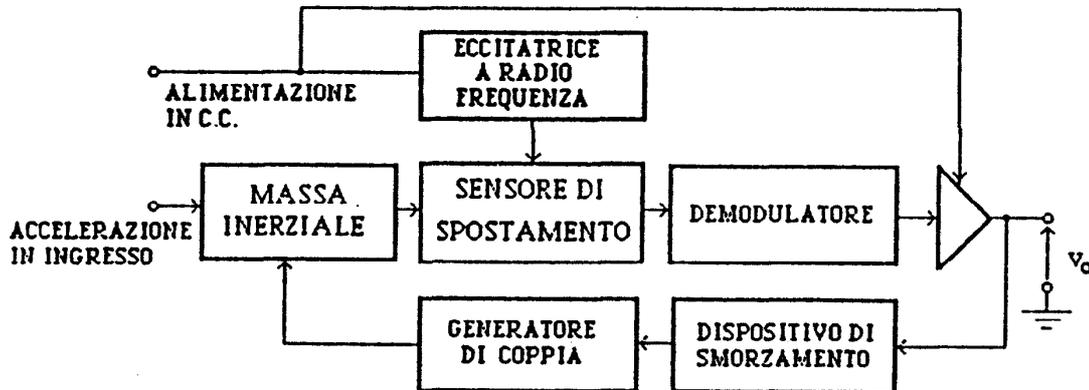


tare superiore alla frequenza più elevata contenuta nello spettro di frequenza della vibrazione.

Gli *accelerometri a estensimetri* utilizzano in genere configurazioni a ponte intero. Gli estensimetri sono montati o sulla molla o su elementi elastici aggiuntivi, soggetti allo sforzo, o tra la massa sismica e un vincolo fisso. In fig. 14.6 è mostrata una delle possibili soluzioni, con una trave incastrata flessibile, cui è vincolata la massa sismica. La risposta del sensore è lineare entro l'1 % del valore di fondo scala. Generalmente la frequenza di vibrazione deve essere inferiore alla frequenza naturale del sistema. In alcuni sensori, specie se si temono condizioni di risonanza, è previsto un sistema di smorzamento. Di solito il segnale in uscita al sensore dovrà essere opportunamente amplificato e si compenseranno gli effetti termici e gli errori dovuti alla forza di gravità.

I *servoaccelerometri* sono sistemi ad anello chiuso che possono essere o a bilanciamento di forza o a bilanciamento di coppia o ad azzeramento. Essi permettono di raggiungere elevati valori di accuratezza, di sensibilità e di stabilità, anche se a un costo decisamente superiore rispetto agli accelerometri ad anello aperto. La fig. 14.7 mostra una tipica configurazione di servoaccelerometro. L'accelerazione causa il moto della massa sismica, di materiale conduttivo. Lo spostamento della massa è rilevato da un opportuno sensore di spostamento, in genere a correnti parassite con alimentazione a radio frequenza. Il segnale in uscita al sensore di spostamento dopo demodulazione e amplificazione in continua è applicato a una bobina mobile che si muove nel campo generato da un magnete permanente; si genera così una coppia contrastante il moto. Poiché la coppia è proporzionale alla corrente che circola nella bobina, questa corrente risulta funzione dell'accelerazione della massa sismica. La corrente è in genere convertita in tensione mediante un semplice convertitore corrente-tensione. Lo smorzamento del sistema avviene per via magnetica, utilizzando una bobina passiva predisposta sull'equipaggio mobile, al ruotare di questo si inducono f.e.m. e circolano correnti che

FIGURA 14.7
Schema di un servoaccelerometro



generano una coppia opposta al moto. Una delle particolarità dei servoaccelerometri è quella di svincolare la frequenza naturale del sistema da quella della massa sismica. Infatti la frequenza naturale è funzione del guadagno dell'anello chiuso moltiplicato per il momento d'inerzia della bobina mobile. È quindi possibile raggiungere elevate frequenze naturali, così come assicurare una buona sensibilità anche alle basse frequenze. In definitiva la portata e la risposta in frequenza dei servoaccelerometri può essere stabilita dalle caratteristiche dei sistemi di amplificazione e smorzamento, entro buoni limiti, piuttosto che da quelle meccaniche del sensore vero e proprio. L'elemento sensibile allo spostamento nei servoaccelerometri può essere, oltre che induttivo, capacitivo, piezoelettrico, estensimetrico. Il segnale di uscita può essere inoltre modulato in frequenza o convertito in numerico e inviato a un sistema automatico di controllo o a sistemi di elaborazione per ulteriori scopi.