

---

## *Sensori di spostamento, pressioni e forze*

### 13.1. Introduzione

La posizione, il moto, lo spostamento sono strettamente correlati tra loro e correntemente si parla di sensori di posizione e di sensori di moto, mentre sarebbe più corretto parlare di *sensori di spostamento*. Infatti dalla misura dello *spostamento*, che si definisce come il vettore rappresentativo della variazione nella posizione di un corpo o di un punto rispetto a un riferimento fisso, in un determinato lasso di tempo si hanno informazioni sia sulla posizione sia sul moto. I sensori possono essere di spostamento sia lineare sia angolare.

Nell'undicesimo capitolo si è già esaminato un sensore digitale di spostamento che può essere sia lineare sia angolare, con sistema di rilevazione sia a contatto, sia magnetico, sia fotoelettrico. Nel seguito si prenderanno in esame altri sensori di spostamento.

I sensori di spostamento, forza e pressione sono molto simili tra loro; infatti la maggior parte dei sensori di forza impiega un elemento sensibile che converte la forza applicata in uno spostamento meccanico, in genere una deformazione di un elemento elastico. Da tale deformazione, nota che sia l'area della superficie su cui agisce la forza, si può risalire alla forza per unità di area ( $\text{N/m}^2$ ), ovvero alla pressione che si misura in pascal (Pa).

I *sensori di spostamento* si suddividono in due categorie: *a contatto* (quando vi è un contatto meccanico tra sensore e oggetto di cui si vuol misurare lo spostamento); *privi di contatto* (quando l'accoppiamento tra elemento sensibile e oggetto è di tipo elettromagnetico).

I *sensori di spostamento a contatto* utilizzano un albero sensibile che deve essere accoppiato all'oggetto in movimento con la maggior cura possibile, in dipendenza naturalmente dell'accuratezza di misura richiesta. Esiste una gran varietà di questi alberini legata alle molteplici possibili applicazioni. Per talune di queste si richiede che una molla avvolga l'alberino, in modo da limitare lo spostamento a valori prefissati.

Nel caso di *sensori di forza* gli elementi sensibili possono essere costituiti da piccole travi, mensole, corone circolari, colonnine e diaframmi. Le travi possono essere incastrate o appoggiate. La forza agente sulla trave dà luogo a sforzi e quindi ad allungamenti in dipendenza dell'entità della forza e del punto della trave in cui essa è applicata. Le corone cir-

colari sono vincolate e la forza è applicata da parte opposta al vincolo sulla stessa retta. Le colonne sono costituite da un cilindro di altezza  $L$  e diametro  $h$ , appoggiate su una base e con la forza agente sull'altra. La loro caratteristica è legata al rapporto  $L/h$ . I diaframmi sono elementi circolari costituiti da materiale con ottime caratteristiche elastiche e buona stabilità. I valori massimi di deflessione e sforzo si hanno per forze agenti al centro della sezione circolare. La deflessione in realtà non dipende semplicemente dal carico applicato e dalla geometria del sensore, ma anche dalle caratteristiche elastiche del materiale impiegato e inoltre bisogna portare in conto gli effetti della temperatura.

Anche gli *elementi sensibili alla pressione* sono costituiti da diaframmi piatti. È possibile misurare la pressione assoluta, riferita a quella del vuoto, o differenziale, riferita a quella dell'ambiente o a un'altra presa come riferimento. Le due pressioni, quella da misurare e quella di riferimento agiscono da parti opposte rispetto al diaframma. In realtà il diaframma oltre che piatto può anche essere di tipo corrugato, per aumentare la sezione utile e quindi la sensibilità di misura. La deflessione del centro della membrana,  $\Delta x$ , è dipendente linearmente dalla pressione,  $p$ , applicata, per deflessioni che non superino all'incirca la metà del suo spessore; in tali ipotesi risulta valida la seguente relazione:

$$[13.1] \quad p = \frac{256 E t^3 \Delta x}{3(1 - m^2) d^4}$$

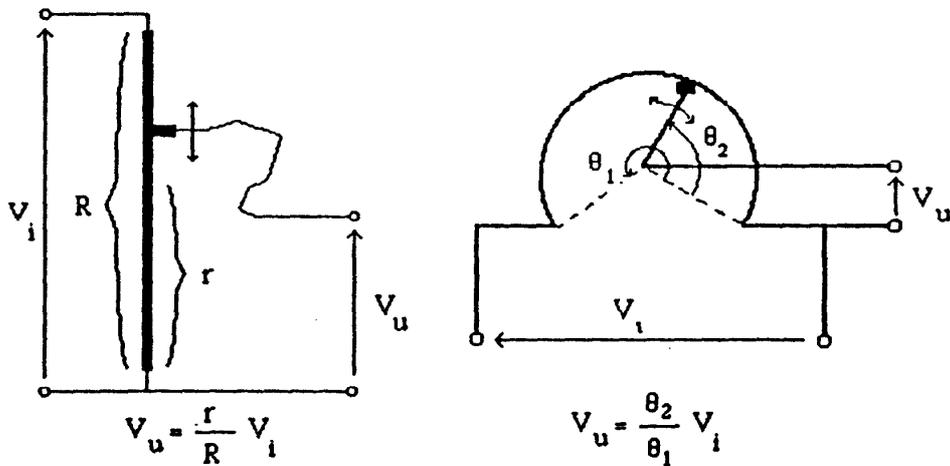
dove  $m$  è il rapporto di Poisson,  $d$  il diametro e  $t$  lo spessore del diaframma,  $E$  il modulo di Young. Dall'eq. [13.1] risulta che a parità di pressione applicata la deflessione aumenta, entro i limiti di linearità, con la quarta potenza del diametro del diaframma, mentre si riduce all'aumentare dello spessore. Questo dovrebbe quindi essere il più piccolo possibile, ma non si può andare al di sotto di determinati limiti per problemi di linearità di risposta. Altri tipi di elementi sensibili sono quelli a molle; molto noto è il trasduttore di pressione tubolare di *Bourdon*, a *tubo avvolto* e a *soffietto*. Essi sono forgiati in vario modo e sono molto utilizzati nei sistemi pneumatici.

### 13.2. Sensori potenziometrici

Sono costituiti da un elemento resistivo su cui è abilitato a scorrere un contatto mobile o cursore azionato dalla grandezza meccanica da misurare.

In fig. 13.1 sono riportati gli schemi di due *potenziometri* a geometria *lineare* e *circolare*. Nell'ipotesi che l'impedenza di carico del sensore tenda all'infinito, esiste una diretta proporzionalità tra tensione in uscita e spostamento del cursore, quando la tensione  $v_i$  in ingresso al sensore sia costante. La resistenza del potenziometro deve risultare invariante con la temperatura, per cui nei potenziometri a spira avvolta si utilizzano materiali quali manganina e costantana.

FIGURA 13.1  
Sensori potenziometrici a geometria lineare e circolare



La dimensione della bobina è determinata dalla risoluzione e dalla potenza richiesta a valle del sensore. Uno dei limiti maggiori dei sensori potenziometrici è la *linearità*. Lo scostamento da un andamento lineare della caratteristica di taratura del sensore è addebitabile al contatto spazzola-resistore.

Alcune *applicazioni tipiche* dei sensori potenziometrici sono la misura di livelli e quella di pressioni come mostrato in fig. 13.2. Altre applicazioni si hanno nell'industria tessile, in quella del legno, nel controllo delle valvole, nei registratori, negli strumenti medici, nel controllo dei processi, nelle applicazioni audio, nel settore militare, in quello manifatturiero, nei robot.

Le resistenze elettriche sono di vario tipo e utilizzano materiale a basso costo e metalli pregiati per la spazzola, che è particolarmente cu-

FIGURA 13.2  
Misura di livello e pressione con sensori potenziometrici

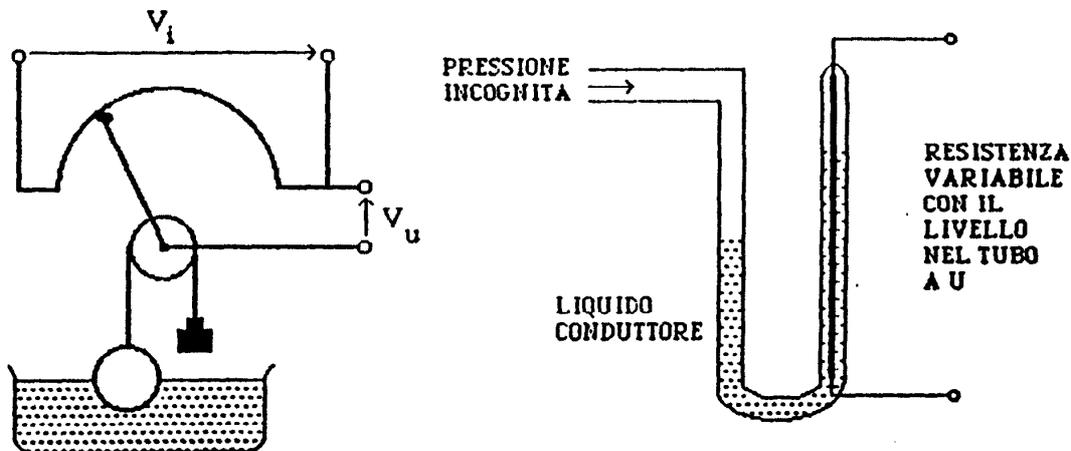
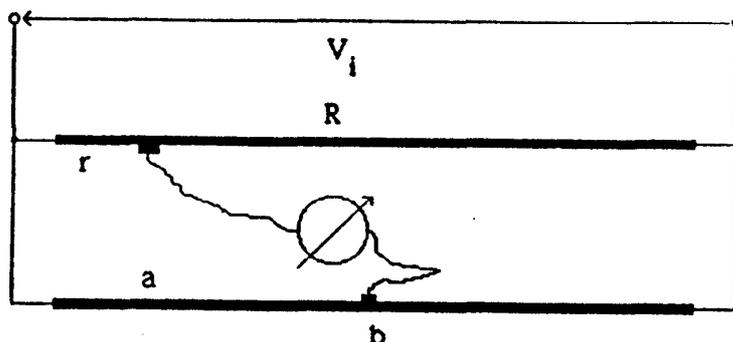


FIGURA 13.3  
Potenziometro inserito in un ponte a filo



rata nella realizzazione e nella geometria. Il resistore potenziometrico può essere costituito da un *filo avvolto* o da un *film di carbone* o da un *film metallico* o da un elemento compatto in plastica conduttrice, detto anche *cermet* (impasto *metallo-ceramico*). La *risoluzione* nei potenziometri a filo è limitata dal diametro del filo e dalla dimensione finita della spazzola. Essa è decisamente superiore nei potenziometri a film e in quelli cermet, in tal caso dipende essenzialmente dalla risoluzione del sistema a valle del sensore.

I sensori sono abbastanza robusti e hanno campi di applicazione abbastanza estesi dai millimetri alle decine di centimetri con linearità intorno allo 0,1%. Il *misuratore di tensione* deve avere una impedenza di ingresso di molto superiore alla resistenza totale del potenziometro per evitare errori di consumo nella misura della tensione a vuoto in uscita al potenziometro.

Particolarmente indicati sono i voltmetri elettronici analogici o digitali con valori di impedenza di ingresso superiori a 1 M $\Omega$ . La tensione di uscita è in genere amplificata mediante un amplificatore differenziale, per aumentare la sensibilità. Dei resistori variabili sono posti in serie al potenziometro per regolazioni nel corso della taratura. Nei potenziometri di maggiore precisione si controlla la linearità del sensore evitando errori di eccentricità della spazzola, si predispongono sistemi di smorzamento elastico della corsa della spazzola, e si esegue una compensazione dell'errore di temperatura.

L'*alimentazione* è in genere in corrente continua con valori di tensione variabili intorno alle decine di volt. Per rendere il segnale di uscita indipendente dalla tensione di alimentazione il resistore potenziometrico è inserito in un ponte a filo, come indicato in fig. 13.3. All'equilibrio del ponte:

$$[13.2] \quad r(b - a) = a(R - r)$$

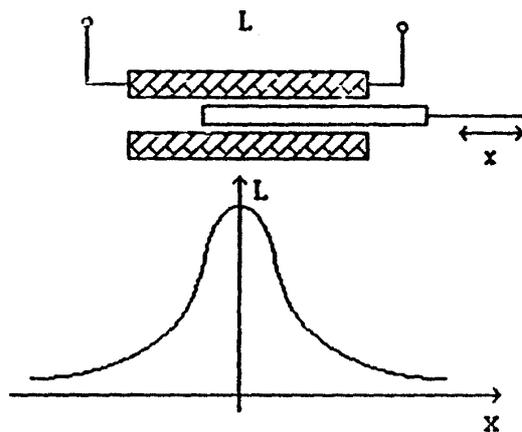
da cui si ricava il valore di  $r$ , proporzionale allo spostamento del cursore, pari ad  $aR/b$ , indipendente dalla tensione di alimentazione. Vi sono sistemi automatici di azzeramento e di presentazione del risultato.

### 13.3. Sensori induttivi di spostamento

I sensori induttivi sono molto utilizzati nel campo industriale per la loro compattezza e robustezza. Essi sono raggruppati in tre classi fondamentali: ad *accoppiamento variabile* con sensori a induttanza semplice (fig. 13.4) e a rapporto di induttanza (fig. 13.5); a *trasformatore differenziale* LVDT (Linear Variable Differential Transformer) (figg. 13.6 e 13.7) e RVDT (Rotary Variable Differential Transformer); a *riluttanza variabile* (fig. 13.8).

In fig. 13.4 è indicato un *senso*re a induttanza semplice costituito da una bobina di materiale conduttore, al cui interno può scorrere un nucleo di materiale ferroso, vincolato a un supporto di materiale isolante. In figura è anche mostrato l'andamento dell'autoinduttanza della bobina al variare della posizione del nucleo di materiale ferroso al suo interno. È immediato quindi dalla misura della variazione di autoinduttanza risalire al valore dello spostamento subito dal nucleo.

FIGURA 13.4  
Senso

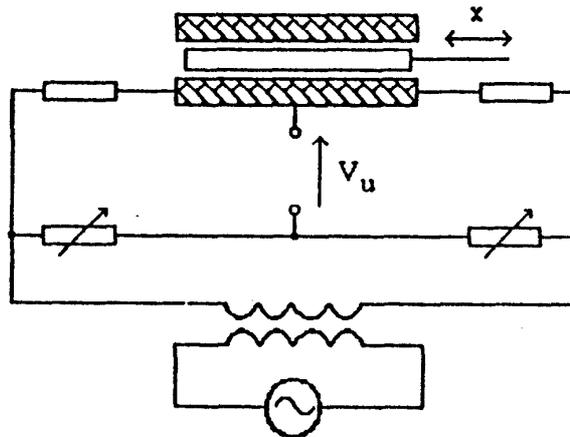
re a induttanza semplice


In fig. 13.5 è mostrato un dispositivo analogo al precedente, salvo che in questo caso l'induttore ha anche una presa in posizione centrale. Lo spostamento del nucleo modifica l'*autoinduttanza* delle due bobine in senso inverso. Il dispositivo prende il nome di sensore a rapporto d'induttanze in quanto in genere le due bobine sono inserite in un circuito a ponte, nel quale il segnale in uscita è proporzionale al rapporto fra i valori delle due induttanze.

L'avvolgimento che subisce la variazione di induttanza può essere inserito in un circuito oscillante LC in modo che la suddetta variazione sia convertita in un segnale a frequenza variabile, misurabile con elevata accuratezza mediante un frequenzimetro digitale.

Altri trasduttori induttivi non prevedono il contatto tra oggetto in

FIGURA 13.5  
 Sensore a rapporto d'induttanze



movimento ed elemento sensibile e si basano sulle variazioni delle *correnti parassite* indotte nell'elemento mobile, di materiale conduttore, da un avvolgimento fisso percorso da corrente alternata inserito nel trasduttore. Il sensore è costituito da una bobina, solidale con il trasduttore, mutuamente accoppiata con l'avvolgimento fisso percorso da corrente. A causa delle variazioni nelle correnti parassite si modificano le linee di campo magnetico e quindi la mutua induttanza fra le bobine accoppiate. Il sensore è inserito in un ponte alimentato a radio frequenze, con un sistema di bilanciamento automatico, di amplificazione dei segnali, di conversione c.a./c.c. e di presentazione dei risultati, direttamente in valori di spostamento, forza o pressione.

Il *trasformatore differenziale* si basa sulle variazioni di mutuainduttanza fra bobine. Esso è detto a E, in quanto per aumentare la sensibilità di misura le bobine si avvolgono su di un unico nucleo di materiale ferromagnetico, come schematizzato in fig. 13.6. L'avvolgimento centrale di alimentazione è alimentato da tensione alternata (di solito a 1 kHz), per aumentare la sensibilità. Le altre due bobine, connesse in opposizione, rappresentano l'avvolgimento di rivelazione. Quando l'ancora magnetica mobile è in posizione centrale rispetto al nucleo a E, il segnale d'uscita è nullo, a meno di una tensione di disturbo. Con lo spostamento dell'ancora si ha una variazione della mutuainduttanza fra avvolgimento di rivelazione e le due bobine costituenti l'avvolgimento di rivelazione. L'ampiezza e la fase del segnale in uscita dipendono dall'entità dello spostamento e dal senso in cui esso avviene (con l'invertirsi dello spostamento la fase della tensione in uscita subisce una variazione di  $\pi$ ).

La f.e.m. residua presente anche con ancora centrata è dovuta alla *dissimmetria del circuito magnetico* e agli accoppiamenti capacitivi, tanto più temibili quanto maggiore è la frequenza di alimentazione. In molte realizzazioni pratiche il trasformatore differenziale presenta i tre avvolgimenti coassiali, montati su un supporto isolante. Un nucleo di mate-

FIGURA 13.6  
 Schema di principio di un trasformatore a E

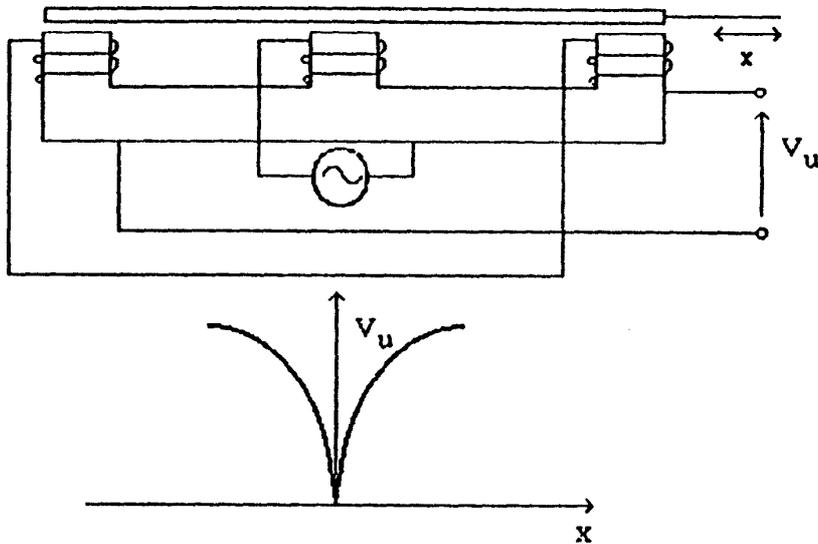
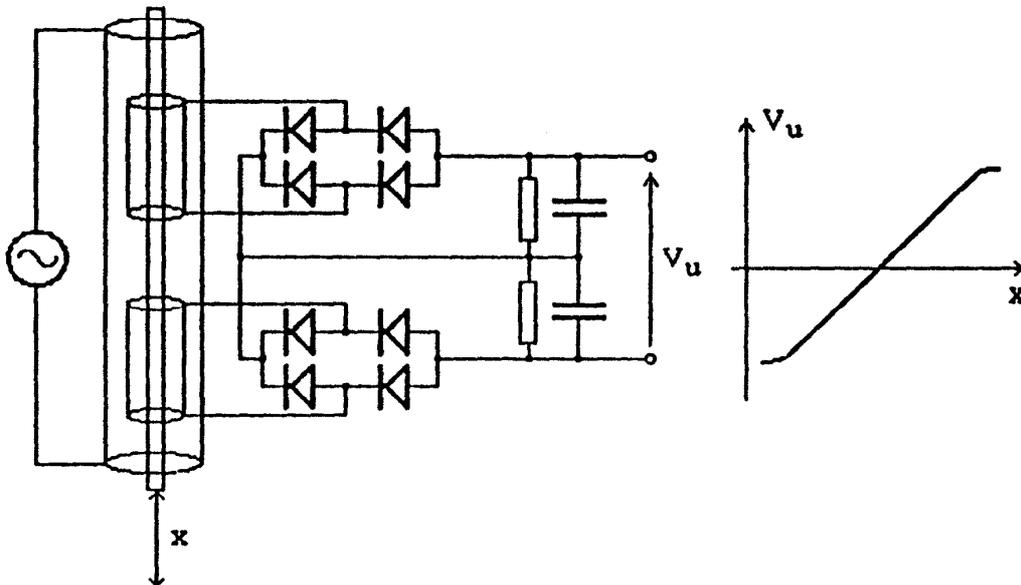
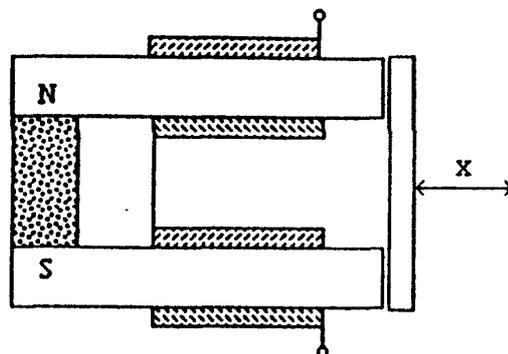


FIGURA 13.7  
 Schema semplificato di realizzazione di un LVDT



riale magnetico, in grado di scorrere all'interno, determina le variazioni di mutuainduttanza negli avvolgimenti. Per evitare la f.e.m. residua si raddrizza la tensione in uscita, come mostrato in fig. 13.7, per cui la caratteristica segnale di uscita-spostamento attraverserà lo zero. Amplificando il segnale di uscita si rende il dispositivo sensibile ai millesimi di millimetro e utilizzabile per esempio come micrometro elettrico o come rivelatore di nullo di spostamento.

FIGURA 13.8  
**Sensore a variazione di riluttanza**



Le caratteristiche salienti degli LVDT e degli RVDT sono quelle di un'eccellente risoluzione ed errore di isteresi trascurabile per assenza di attrito tra nucleo mobile e bobine, di un'ottima risposta dinamica, insensibilità alle variazioni di temperatura, elevata risoluzione nel campo delle piccole vibrazioni, linearità, capacità di sovraccarico meccanico, elevata affidabilità, lunga vita operativa.

Valori tipici della *frequenza di alimentazione* sono da 50 Hz a 25 kHz. Nel campo delle misure di vibrazione si richiede una frequenza di alimentazione almeno dieci volte maggiore della massima frequenza delle componenti in cui si può scomporre il segnale di moto meccanico. Questo esempio sta a mostrare che la frequenza di alimentazione del trasformatore differenziale va scelta opportunamente secondo l'applicazione; nella maggior parte dei casi il campo ottimo di frequenze risulta compreso fra 1 e 5 kHz. Un altro campo tipico di valori è quello relativo alle tensioni di alimentazione compreso in genere tra 1 e 10 V. La potenza richiesta all'alimentatore è di frazioni di watt. La tensione di alimentazione è mantenuta a valori bassi per evitare saturazione del nucleo, per ridurre l'isolamento delle spire, per non causare la circolazione di correnti intense e quindi il riscaldamento della bobina, anche se la sensibilità del sensore cresce all'aumentare della tensione.

I sensori a *variazione di riluttanza* hanno una alimentazione costituita da una forza magneto motrice costante. In fig. 13.8 è indicato un prototipo costituito da un circuito magnetico in cui è presente un magnete permanente e sul quale è avvolta una bobina. Con lo spostamento dell'ancorina mobile si ha una variazione del traferro e quindi del flusso concatenato con la bobina.

Se il fenomeno è dinamico, ovvero si hanno variazioni continue del traferro, legate a vibrazioni dell'elemento sensibile allo spostamento dell'oggetto mobile, nella bobina si indurrà una f.e.m. funzione dello spostamento dell'ancorina. Viceversa se il fenomeno è discontinuo sarà necessario prevedere la misura delle variazioni di induttanza della bobina. Notevole importanza assume l'entità del traferro. Con piccoli traferri si ha maggiore sensibilità, ma minore linearità, a causa dei fenomeni di sa-

turazione del materiale magnetico da cui è costituito il sensore. È necessario quindi far ricorso a trasferi tali che la riluttanza dipenda praticamente solo dal percorso in aria del flusso, anche se esistono limiti superiori dovuti all'insorgere di non linearità a causa dei flussi dispersi.

#### 13.4. Sincro

Diversi sono i modi per trasferire uno spostamento a distanza. Nel seguito si farà riferimento semplicemente ai metodi analogici. Nel caso si tratti di uno *spostamento angolare* il metodo più banale è quello di utilizzare dei potenziometri a geometria circolare. Lo spostamento angolare determina la rotazione di un cursore collegato al potenziometro. Il segnale elettrico in uscita al potenziometro è trasmesso mediante cavetti nel luogo dove deve trasferirsi lo spostamento e comanda la bobina di un equipaggio mobile di un sensore magnetoelettrico (basato sull'effetto elettrodinamico). Con tali sistemi non si possono superare distanze di qualche chilometro ed eventuali dispersioni, oltre che variazioni di temperatura, possono alterare sensibilmente gli spostamenti trasmessi.

Più adeguati allo scopo sono i trasduttori che si basano sulle variazioni di f.e.m. o di fase (detti anche *sincro*). I *sincro di f.e.m.* sono costituiti da una bobina mobile, in grado di ruotare nel campo magnetico radiale generato da un elettromagnete. In essa si indurrà una f.e.m. proporzionale sia all'angolo  $\delta_t$  di rotazione dal piano neutro, sia al numero di spire  $n_t$  della bobina, dove con l'indice  $t$  si è contraddistinto il trasmettitore.

Se a tale f.e.m. se ne oppone una di natura analoga su un dispositivo simile, con una bobina di  $n_r$  spire, detto *ricevitore*, come mostrato in fig. 13.9, nel circuito interno alle due bobine circolerà una corrente  $I$  pari a:

FIGURA 13.9  
Sincro di f.e.m.

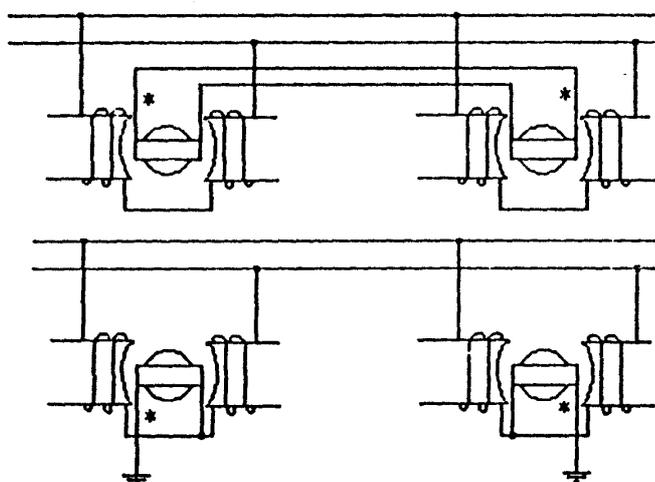
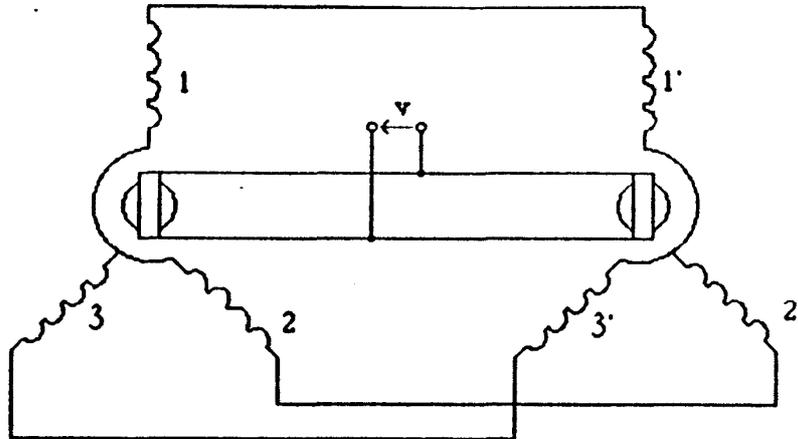


FIGURA 13.10  
Sincro di coppia



$$[13.3] \quad I = \frac{E_t - E_r}{R} = \frac{k(n_t \delta_t - n_r \delta_r)}{R}$$

dove  $R$  è la resistenza elettrica del circuito interno alle due bobine e dove si sono trascurati gli effetti induttivi. La corrente  $I$  tende ad annullarsi per la legge di Lenz, per cui la bobina mobile tenderà a ruotare di un angolo  $\delta_r$  rispetto al proprio piano neutro, tale che:

$$[13.4] \quad \delta_r = \delta_t \frac{n_t}{n_r}$$

In tal modo è possibile trasmettere ampliato o ridotto a distanza lo spostamento angolare di un oggetto in rotazione. Se si utilizza come conduttore di collegamento la terra, i cavetti per la trasmissione a distanza si riducono da 4 a 2, come indicato sempre in fig. 13.9.

Quando si voglia trasferire a distanza uno spostamento angolare con forte coppia, si utilizzano *sincro di coppia*. In fig. 13.10 è indicato lo schema di massima di tale sincro. Esso è dotato di uno statore, con tre bobine collegate a stella e disposte con gli assi a  $120^\circ$  l'uno dall'altro, e di un rotore costituito da un'unica bobina. Quando si alimenta il rotore con tensione alternata insorge un flusso nella direzione dell'asse dell'avvolgimento rotorico. Sugli avvolgimenti statorici si indurranno delle f.e.m. di ampiezza dipendente dalla reciproca posizione tra rotore e statore. Se queste tensioni statoriche sono applicate a un dispositivo simile, che presenta lo stesso coefficiente di accoppiamento tra rotore e statore, lo statore del dispositivo ricevente genererà un flusso che ha la stessa direzione dell'asse rotorico del dispositivo trasmittente. Alimentando il rotore del ricevitore con la stessa tensione alimentante il rotore del trasmettitore, si genererà una coppia che tenderà a far ruotare il rotore del ricevitore finché non si disponga lungo l'asse del flusso statorico. Quindi

gli assi dei due rotori tendono ad assumere la stessa posizione, ovvero, ruotando il rotore del trasmettitore, anche il rotore del ricevitore ruota dello stesso angolo. Quando si volesse muovere a distanza un asse con forti coppie, i sincro dovrebbero avere dimensioni tali da dar luogo a intensi flussi con conduttori in grado di sopportare forti intensità di corrente.

### 13.5. Sensori piezoelettrici di forza

Sono usati soprattutto nel campo delle forze rapidamente variabili o fluttuanti, quindi come si vedrà nel prossimo capitolo per misure di vibrazioni e accelerazioni. Poiché la carica elettrica si manifesta su facce piane e parallele del *materiale piezoelettrico* quando questo è soggetto a compressione, perché si possano misurare sollecitazioni bidirezionali, si carica preventivamente il cristallo piezoelettrico con una forza nota di riferimento, che costituisce un livello statico di precompressione. In tal modo i sensori piezoelettrici sono in grado di percepire e misurare forze che varino bidirezionalmente. Campi tipici di applicazione sono 7-180 kN per forze di compressione e 4-120 kN per forze di trazione.

Il cristallo piezoelettrico è schiacciato in dispositivi di varia forma in modo da aumentare la sensibilità. A questo stesso fine in alcuni trasduttori si sovrappongono due o tre anelli di materiale piezoelettrico e in uscita si hanno due o tre boccole sulle quali è disponibile un segnale proveniente da ogni anello. In uscita al sensore piezoelettrico in genere si predispongono opportuni convertitori costituiti da amplificatori di carica in c.c. con elevata impedenza di ingresso (amplificatori operazionali) e retroazione capacitiva negativa, in modo che la variazione di carica è convertita in una variazione di tensione.

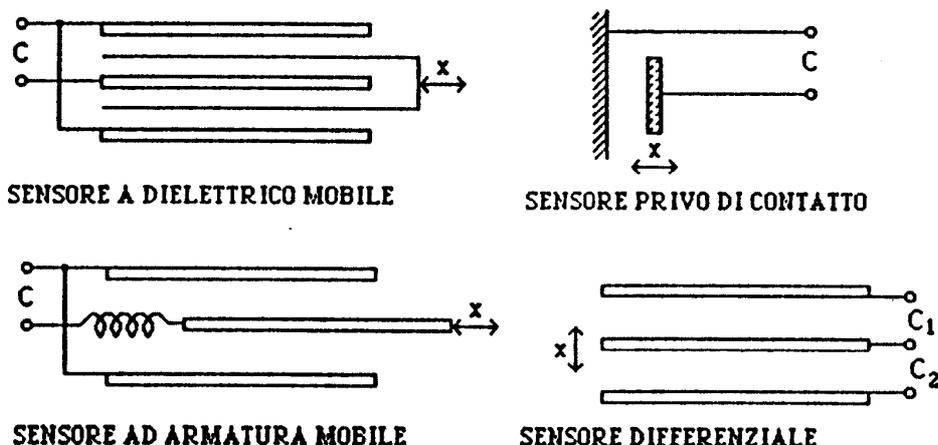
### 13.6. Sensori capacitivi di spostamento

Si è detto che sensori capacitivi si possono ottenere variando sia la distanza fra le armature, sia l'area interessata alla presenza del campo elettrico, sia le caratteristiche dielettriche del materiale interposto tra le armature. In fig. 13.11 sono mostrate alcune tipiche realizzazioni di sensori capacitivi di spostamento.

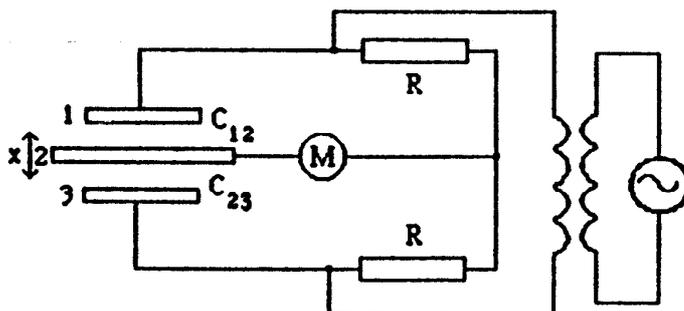
Il *senso* *a dielettrico mobile* presenta due armature fisse e il dielettrico in grado di spostarsi rispetto a queste; risultati analoghi si ottengono lasciando fisso il dielettrico e spostando le armature. La configurazione differenziale mostrata in figura consente sia di evidenziare la natura differente del dielettrico fra le armature dei due condensatori simmetrici, sia di misurare lo spessore di film sottili di un liquido sulla sommità di un altro liquido, quando le proprietà dielettriche dei due liquidi siano differenti, come per esempio il caso di olio su acqua.

Il *senso* *privo di contatti* presuppone che l'elemento di cui si voglia misurare lo spostamento sia di natura metallica in modo che costituisca

**FIGURA 13.11**  
**Sensori capacitivi di spostamento**



**FIGURA 13.12**  
**Sensore capacitivo differenziale inserito in un ponte**



una delle armature di un condensatore. L'altra armatura è fissa e inizialmente dovrebbe essere posta quanto più vicino possibile all'elemento mobile per aumentare la sensibilità di misura.

Il *senso* a scorrimento di armatura, o a variazione di area, è senza dubbio il tipo più diffuso e può essere a geometria lineare o angolare. Nel tipo lineare lo scorrimento di un'armatura rispetto all'altra può essere sia trasversale sia longitudinale, in dipendenza dell'entità dello spostamento che si vuole misurare.

Per aumentare la sensibilità di misura si ricorre molto spesso a una configurazione differenziale, come mostrato in fig. 13.12. Le armature 1 e 3 sono fisse mentre la 2 è mobile. L'alimentazione del ponte in cui sono inseriti i due condensatori è in alta frequenza, in modo da migliorare la sensibilità della misura.

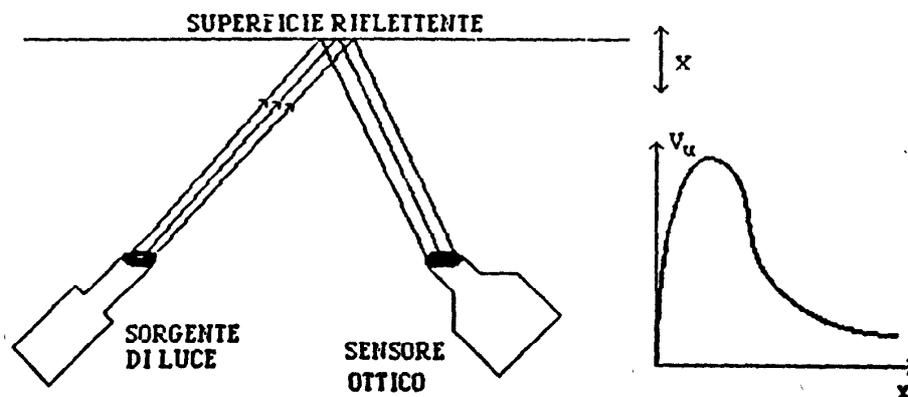
I *sensori capacitivi* sono abbastanza robusti, compatti e presentano

una buona linearità compresa in genere tra lo 0,1% e lo 0,001%. Il campo di misura va dalle frazioni di millimetro ad alcuni decimetri. Il valore aggiunto aumenta in quanto sono commercializzati con l'elettronica di alimentazione, ad alta frequenza, e di rivelazione. Le grandezze di influenza che possono alterare il buon funzionamento del sensore sono: l'umidità dell'aria, che può alterare le caratteristiche del dielettrico; le capacità parassite, specie quelle dei cavetti di collegamento che devono quindi essere quanto più è possibile corti; le vibrazioni meccaniche, che possono determinare indebite variazioni di capacità; variazioni di temperatura, anch'esse influenti sulle caratteristiche del dielettrico; campi elettrici parassiti presenti nell'ambiente in cui è posto il sensore.

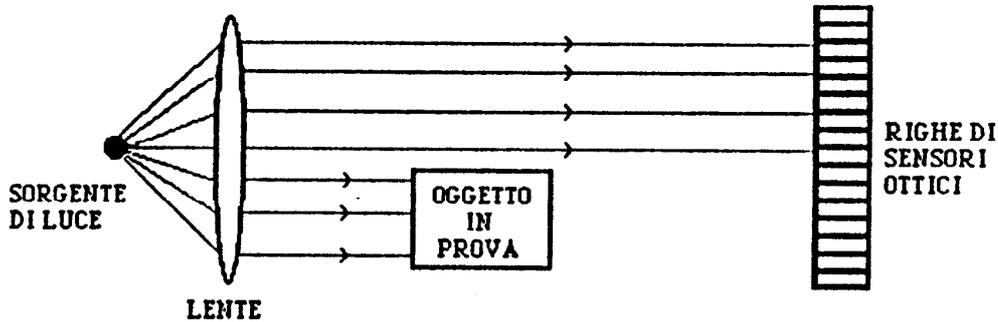
### 13.7. Sensori elettroottici di spostamento

Se si esclude l'encoder digitale con codifica per via ottica, i *sensori elettroottici* sono del tipo *privo di contatto*. Il tipo più semplice di sensore elettroottico è costituito da una sorgente di radiazioni, per esempio nel campo del visibile, e da un fotorivelatore. Il fascio di radiazioni è inviato sulla superficie mobile di cui si vuol misurare lo spostamento; se questa non presenta elevate proprietà riflettenti, bisognerà predisporre su di essa una lastrina o un film di materiale riflettente. L'intensità della radiazione riflessa è funzione della distanza del sensore dalla superficie riflettente, come mostrato qualitativamente nel grafico in fig. 13.13. Quindi dalla misura della tensione in uscita al fotorivelatore, in genere una tensione elettrica, si può risalire allo spostamento della superficie riflettente. Questi sensori presentano ottima risoluzione ed elevata sensibilità. Il fascio di radiazioni può essere a intensità costante o pulsante o modulata con modulazione a bassa o alta frequenza in dipendenza del tempo di risposta richiesto al sensore e dal tipo di applicazione. Abbastanza utilizzati come *sorgenti di radiazioni* sono i LED (Light Emitting Diode) a infrarossi e come fotorivelatori le celle fotoconduttrici, che, si

FIGURA 13.13  
Schema semplificato di un sensore elettroottico



**FIGURA 13.14**  
**Sensore ottico a occultamento di luce**



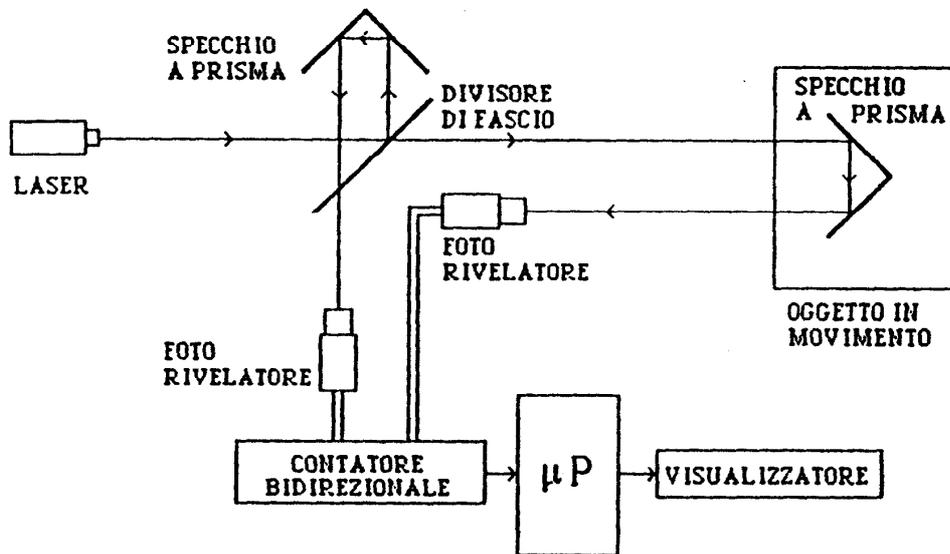
ricorda, presentano una ottima sensibilità nell'infrarosso e un breve tempo di risposta.

Un altro sensore elettroottico di spostamento o di dimensioni utilizza il metodo di *occultamento della luce*. Come mostrato in fig. 13.14, da una sorgente di luce, tramite una opportuna lente, le radiazioni vengono focalizzate su una superficie piana dove sono predisposti i fotorivelatori. Quando fra la sorgente di luce e il sensore viene interposto un oggetto è possibile rilevarne sia gli spostamenti sia le dimensioni, in base all'occultamento della luce. Gli attuali sistemi di riconoscimento di immagine, dove i segnali di uscita al sistema di visione possono essere confrontati con un'immagine standard, hanno dato particolare impulso a questo sensore, attualmente realizzato con fasci di luce monocromatica, coerente, ben collimata proveniente da laser.

Altri sensori sono detti *a righe ottiche* e presentano su un vetro, solidale con l'elemento mobile, delle righe graduate. Con un sistema ottico è possibile misurare lo spostamento dell'elemento mobile rispetto a un riferimento fisso. Le risoluzioni raggiungibili sono dell'ordine di  $1 \mu\text{m}$  anche con distanze fra sensore ed elemento mobile di 1 m. Grandezze di influenza sono la temperatura e la polvere. Per quanto riguarda gli effetti di dilatazione termica, è possibile eseguire facilmente la correzione, mentre è sconsigliabile l'uso di sensori ottici in presenza di ambienti molto polverosi.

Fra tutti i sensori di spostamento più sensibili sono quelli che sfruttano *metodi interferometrici*. Essi si basano sul fenomeno dell'interferenza fra due radiazioni luminose monocromatiche emesse da laser. Per esempio il laser He-Ne emette luce a una lunghezza d'onda pari a  $632,8 \text{ nm}$ . In fig. 13.15 è mostrato uno dei possibili sensori interferometrici, in cui il laser genera un fascio luminoso che mediante un opportuno divisore di fascio è inviato a due specchi a prisma, uno fisso e l'altro solidale con l'elemento mobile. I fasci riflessi dai due specchi sono inviati a due fotorivelatori. L'interferenza fra il fascio di riferimento, proveniente dalla parte fissa, con quello riflesso dalla parte mobile dà luogo a delle frange che vengono rilevate da un opportuno contatore. Se al posto del fotori-

FIGURA 13.15  
 Sensore ottico a interferenza



velatore del fascio riflesso dalla parte mobile si pone un altro specchio a prisma, questo rifletterà il fascio, che quando incontrerà il divisore si sovrapporrà a quello emesso dal laser e verrà inviato all'unico fotorivelatore presente in questa configurazione, dovuta al Michelson. Con i sensori interferometrici si raggiungono risoluzioni eccellenti dell'ordine dei *nanometri*, utilizzando radiazioni di piccola lunghezza d'onda. Il contatore bidirezionale fornisce il conteggio delle frange di interferenza al microprocessore in grado, sulla base di tale conteggio, di fornire al sistema di presentazione dei dati il valore assoluto dello spostamento dell'elemento mobile. Le applicazioni di questi sensori sono le più disparate e oggi trovano impiego nelle macchine a controllo numerico e nel posizionamento di precisione di pezzi meccanici. L'elevata sensibilità e l'ottima risoluzione consentono ad esempio di misurare i modi di vibrazione di una diga causati dal vento, ponendo il laser anche a un centinaio di metri dalla diga.

Un altro metodo basato sulle frange interferenziali è quello che sfrutta l'effetto Moirè, ottenuto giustapponendo due reticoli regolari. I due reticoli regolari costituiti da linee chiare e opache, quando vengono sovrapposti e scorrono l'uno rispetto all'altro danno luogo a righe di interferenza. Il moto relativo traslatorio o rotatorio dei due reticoli generati da due sorgenti una mobile e una fissa dà luogo a frange di interferenza su un unico rivelatore. Dal conteggio delle righe di interferenza mediante semplici sistemi optoelettronici si risale allo spostamento lineare o angolare di una sorgente rispetto all'altra. Si raggiungono risoluzioni dell'ordine dei micrometri.

### 13.8. Estensimetri

Nel 1988 si sono celebrati i cinquant'anni di questo piccolo e diffusissimo sensore, che permette, attraverso la misura di piccole deformazioni di risalire a tante altre grandezze meccaniche. Gli estensimetri si basano sull'effetto piezoresistivo o più estensivamente sulle variazioni di resistenza di un resistore che subisca variazioni delle sue caratteristiche meccaniche ed elettriche. I resistori sono costituiti da diversi materiali che possono essere metalli, semiconduttori o impasti metallo-ceramici.

Si consideri una barretta di sezione circolare sottoposta a trazione, si avrà una elongazione longitudinale e una contrazione trasversale. Il rapporto tra le due è il coefficiente di Poisson, fisso per un determinato materiale. Due punti, a distanza  $l$  fra loro in assenza di deformazione, quando la barretta è sottoposta a trazione, si troveranno a distanza  $l + \Delta l$ . La *deformazione* o allungamento unitario è esprimibile nel modo seguente:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Indicata con  $F$  la forza esercitata all'estremità della barra di superficie trasversale  $S$ , lo sforzo  $\sigma$  o forza per unità di area risulta:

$$[13.5] \quad \sigma = \frac{F}{S} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$$

La relazione tra *sforzo* e *deformazione* è lineare finché non si raggiunge il limite di elasticità o punto di cedimento. Nella zona lineare la costante di proporzionalità tra sforzo e deformazione è il *modulo di elasticità*  $E$  che varia secondo il metallo tra 1 e  $2 \cdot 10^4$  kg/mm. La relazione tra sforzo e allungamento unitario è la *legge di Hooke*:

$$[13.6] \quad \sigma = E \varepsilon$$

Quando un materiale a forma di filo a sezione circolare è soggetto a sforzo subisce una variazione di resistenza elettrica addebitabile sia alla variazione delle sue dimensioni sia alla variazione di resistività, trascurabile nei metalli, sensibile nei semiconduttori. Una spira di materiale conduttore o semiconduttore o metallico-ceramico, fissata su un supporto isolante, è applicata a un oggetto, sul quale agisce la sollecitazione meccanica. Dalla misura della variazione di resistenza della spira si può risalire all'allungamento unitario e quindi allo sforzo sull'oggetto.

Indicate con  $R$  la resistenza di un filamento e con  $\Delta R$  la sua variazione quando è soggetto a sforzo, esiste una costante di proporzionalità  $k$  (indicata spesso anche con  $GF$ , acronimo delle parole inglesi "gauge factor") tra allungamento unitario e variazione relativa di resistenza:

$$[13.7] \quad k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

Il valore di  $k$  per un conduttore di sezione circolare può essere facilmente calcolato. Infatti la resistenza  $R$  è data da:

$$[13.8] \quad R = \frac{\rho l}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

dall'eq. [13.8], passando ai logaritmi ( $\ln \pi/4 + 2 \ln D + \ln R = \ln \rho + \ln l$ ) e differenziando si ha:

$$[13.9] \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - 2 \frac{dD}{D}$$

Indicato con  $m$  il rapporto di Poisson, si ha  $dD/D = -m dl/l$ , per cui la [13.9] diventa:

$$[13.10] \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} (1 + 2m)$$

La variazione di resistività si può ritenere proporzionale alla variazione di volume del conduttore, attraverso la *costante di Bridgman*,  $c$ :

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{d\left(\frac{\pi}{4} D^2 l\right)}{\frac{\pi}{4} D^2 l} = c \left[ 2 \frac{dD}{D} + \frac{dl}{l} \right] = c (1 - 2m) \frac{dl}{l}$$

per cui l'eq. [13.10] si può scrivere:

$$[13.11] \quad \frac{dR}{R} = (1 + c + 2m - 2mc) \frac{dl}{l}$$

Dal confronto fra la [13.7] e la [13.11] si ricava:  $k = 1 + c + 2m - 2mc$ . Per esempio per la costantana, materiale metallico molto utilizzato per realizzare estensimetri, si ha  $c = 1,13$ ,  $m = 0,3$ , da cui  $k = 2,05$ . Il fattore  $k$  prende anche il nome di coefficiente di sensibilità dello "strain gauge"; infatti, a parità di deformazione, la variazione di resistenza dell'estensimetro è tanto più sensibile quanto maggiore è  $k$ . A rigore si dovrebbe parlare di coefficiente di sensibilità longitudinale, per il caso in

esame, che va distinto dal coefficiente di sensibilità trasversale, che lega la deformazione trasversale del filamento (contrazione nel caso di trazione) alla variazione di resistenza.

Il *filamento* di costantana o di altro materiale deve essere molto *sottile* (diametro 20-30  $\mu\text{m}$ ), in modo da renderne elevata la resistenza. A questo scopo il filamento si fa molto lungo, piegato più volte e cementato plasticamente su un supporto di carta delle dimensioni di un francobollo.

Il *fattore k*, che per i metalli assume valori intorno a 2, risulta molto più elevato, intorno ai 150, per i semiconduttori e ha valori intermedi, intorno a 10-15, per gli impasti ceramico-metallici, detti anche cermet. Questi materiali sono costituiti da granuli metallici mescolati a polvere di vetro e solventi organici con tracce di legante. La pasta, dopo macinazione, è applicata, con processi serigrafici, a una superficie di allumina (AlSi Mg al 96%) e successivamente essiccata a temperature di 150-200 °C. Una successiva cottura a 800-950 °C produce la fusione del vetro che resta aderente all'allumina. Si ottiene un film spesso con spessore intorno ai 20-30  $\mu\text{m}$  (si ricorda che i film sottili hanno spessori inferiori ai micrometri) costituiti da particelle metalliche, separate da sottilissimi strati di vetro. Questi materiali, che come si è visto hanno un fattore k intermedio tra quello dei metalli e quello dei semiconduttori, hanno un costo più contenuto rispetto ai semiconduttori e il grande vantaggio di avere un più basso coefficiente di temperatura, relativo alle variazioni di resistenza, prossimo a quello dei metalli. Oltre all'elevato valore del fattore k una prerogativa importante degli estensimetri a semiconduttore è quella delle dimensioni ridottissime, che ne consente l'utilizzazione in campi specifici come quello biomedico. Si ricordano inoltre l'elevata affidabilità e la piccola isteresi.

Poiché i valori di  $\epsilon$  sono molto piccoli nel campo elastico, intorno a 0,001, in base ai valori di k relativi ai diversi materiali utilizzabili, in corrispondenza delle massime deformazioni prevedibili, si ha:

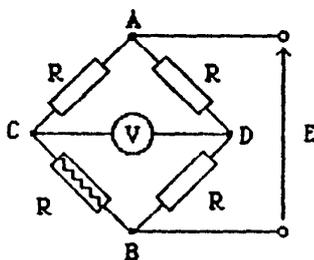
- materiali metallici  $dR/R = 0,002 = 0,2\%$ ;
- materiali semiconduttori  $dR/R = 0,15 = 15\%$ ;
- materiali cermet  $dR/R = 0,015 = 1,5\%$ .

Quanto maggiore è la resistenza dell'estensimetro tanto più elevata è la sua variazione, a parità di k e di  $\epsilon$ , e quindi meno problematica la sua misura. In ogni caso è evidente la necessità di ricorrere a strumenti e metodi di misura molto sensibili.

### 13.8.1. Dispositivi a ponte per la misura della variazione di resistenza

Per la misura si utilizza il *ponte di Wheatstone*. La configurazione più semplice, detta a 1/4 di ponte, consiste di 4 resistenze uguali, delle quali una è rappresentata dal filamento dell'estensimetro. Si ipotizzi che una sorgente in corrente continua alimenti il ponte con una tensione E ai terminali come mostrato in fig. 13.16. Con l'estensimetro non caricato, ai vertici D e C del ponte si ha una differenza di potenziale nulla. Quan-

FIGURA 13.16  
Ponte di Wheatstone per misure estensimetriche



do l'estensimetro è sollecitato meccanicamente, la resistenza del filamento passa dal valore iniziale  $R$  al valore  $R + \Delta R$ . Nell'ipotesi che il voltmetro, collegato ai morsetti di rivelazione del ponte, non assorba corrente, si ha:

$$V_{AC} = \frac{ER}{2R + \Delta R} \quad V_{AD} = \frac{E}{2}$$

$$V_{CD} = V_{AD} - V_{AC} = E \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R}$$

poiché  $\Delta R$  è piccolo rispetto a  $R$  si può scrivere:

$$[13.12] \quad V_{CD} = E \frac{\Delta R}{4R}$$

La misura della tensione ai capi del voltmetro è direttamente proporzionale alla variazione relativa della resistenza estensimetrica che è proporzionale all'allungamento unitario, per cui la scala del voltmetro può essere graduata direttamente in valori di deformazione. Il voltmetro deve avere elevata resistenza d'ingresso ed essere in grado di misurare basse tensioni, pertanto risultano particolarmente indicati i voltmetri elettronici digitali. Per aumentare la tensione ai capi del voltmetro e quindi l'SNR, a parità di deformazione, si potrebbe incrementare la tensione di alimentazione. Ciò è in contrasto con l'esigenza di evitare il riscaldamento dell'estensimetro e dell'oggetto in prova. Un eccessivo riscaldamento dell'estensimetro causa la variazione delle sue caratteristiche, in particolare della resistenza, e al limite può causarne lo scollamento dal supporto isolante. La capacità poi di smaltire calore è strettamente legata alle condizioni dell'ambiente in cui l'estensimetro opererà. Elevate tensioni di alimentazione possono inoltre comportare sensibili derive dallo zero. Tutte queste considerazioni spingono a preferire basse tensioni di alimentazione in corrente alternata, con amplificazione del segnale ai capi di rivelazione del ponte.

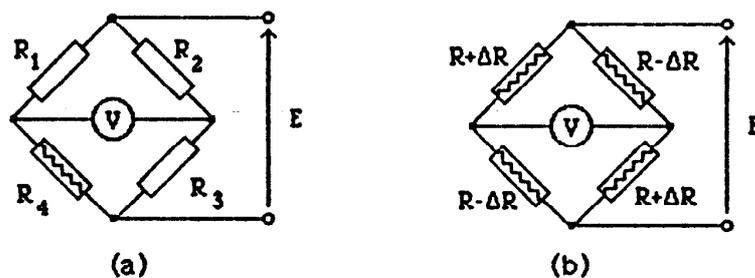
Una soluzione alternativa è quella di ricorrere al metodo di zero. Per non perdere il vantaggio della lettura diretta, si utilizza un compensatore che automaticamente, agendo sulla resistenza variabile del ponte di

Wheatstone, mediante servomotore, bilancia il ponte. In tal modo è ancora possibile leggere direttamente la variazione di resistenza o la microdeformazione.

### 13.8.2. Compensazione dell'effetto di variazione della temperatura

*Variazioni di temperatura* fanno modificare la resistenza dell'estensimetro e l'effetto è particolarmente sentito negli estensimetri a semiconduttore. Le variazioni di resistenza addebitabili all'effetto termico possono essere dello stesso ordine di grandezza e a volte anche superiori a quelle dovute alla deformazione subita dall'estensimetro. Si rende quindi indispensabile compensare la variazione di resistenza dovuta all'effetto termico. A questo scopo si utilizzano due estensimetri posti su due *lati adiacenti* del ponte di Wheatstone.

FIGURA 13.17  
Ponte di Wheatstone a configurazione a ponte intero



Con riferimento alla fig. 13.17, la tensione di sbilanciamento del ponte risulta:

$$[13.13] \quad V_{CD} = E \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}$$

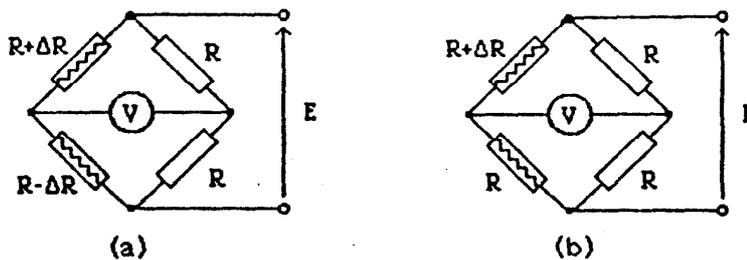
se allora si pongono sui lati del ponte 4 estensimetri attivi, di cui per esempio quelli sui lati 1 e 3 soggetti a trazione e quelli sui lati 2 e 4 a contrazione di eguale entità, si ottiene, in base all'eq. [13.13]:

$$[13.14] \quad V_{CD} = E \frac{(R + \Delta R)^2 - (R - \Delta R)^2}{4R^2} = E \frac{\Delta R}{R}$$

vale a dire, in base al confronto tra la [13.12] e la [13.14], un segnale 4 volte superiore a quello che si otterrebbe con un solo estensimetro attivo. La configurazione con un solo estensimetro attivo prende il nome di circuito a un quarto di ponte, quella con quattro estensimetri attivi, circuito a ponte intero. La configurazione a ponte intero, rispetto a quella a

un quarto di ponte, ha l'ulteriore vantaggio che le variazioni di resistenza dovute all'effetto termico non influenzano l'equilibrio del ponte, nell'ipotesi che i 4 estensimetri siano soggetti alle stesse sollecitazioni termiche. Infatti, come risulta evidente dalle equazioni precedenti, poiché le variazioni di resistenza dovute all'effetto termico sono dello stesso segno, la tensione di squilibrio del ponte non è sensibile a queste, nel caso siano anche della stessa entità.

FIGURA 13.18  
Configurazioni a mezzo ponte e a quarto di ponte



La configurazione a ponte intero non sempre è realizzabile ed è spesso sostituita, anche per maggiore semplicità da quella detta a mezzo ponte, indicata in fig. 13.18a, in cui si utilizzano solo due estensimetri attivi su due lati adiacenti del ponte, soggetti a sforzi di segno opposto e a variazioni uguali di temperatura. Anche con questa configurazione si ottiene la compensazione degli effetti termici, ma il segnale in uscita risulta ridotto rispetto alla configurazione a ponte intero, infatti:

$$[13.15] \quad V_{CD} = E \frac{(R + \Delta R)R - (R - \Delta R)R}{4R^2} = \frac{E}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

Poiché non sempre è possibile disporre i due estensimetri attivi su parti della struttura soggette rispettivamente ad allungamenti e contrazioni uguali, per compensare l'effetto termico si utilizza ancora una configurazione a mezzo ponte, salvo che uno solo degli estensimetri risulta attivo. Il secondo, soggetto alle stesse sollecitazioni termiche del primo, è posto in un punto della struttura dove la deformazione è nulla. In tal caso, sempre con riferimento alla fig. 13.18b, si può verificare facilmente che la sensibilità del ponte è dimezzata:

$$V_{CD} = E \frac{(R + \Delta R)R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} = E \frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}} \cong \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R}$$