

I. MISURE DI MOTO

Il moto di un corpo nella fisica classica è descritto dalle equazioni di Newton. In particolare esso può essere definito in termini di **spostamento**, **velocità** ed **accelerazione**, sia per quanto concerne il moto lungo una **direzione** (moto lineare) sia **attorno ad un asse** (moto angolare). Una ulteriore distinzione riguarda il sistema di riferimento adottato, che può essere **assoluto** o **relativo**.

Dal punto di vista tecnico le misure di moto rivestono una **capitale importanza**, basti pensare, ad esempio, all'analisi dei **fenomeni vibratorii** o di shock, oppure ai più comuni problemi di **controllo di un motore**. In tutti questi casi si devono impiegare dispositivi in grado di rilevare la grandezza di interesse, che caratterizza il moto di un sistema.

APPARECCHI DI TEST MATERIALI

In questa sede verranno presentati gli strumenti di misura adatti allo studio sia dei moti relativi che assoluti, ponendo particolare enfasi nella descrizione dei principi di funzionamento.

MISURA DI MOTO RELATIVO

La determinazione dello spostamento lineare e/o angolare è una misura che riveste un carattere molto importante nella meccanica. Sono stati sviluppati sistemi per valutare sia gli spostamenti relativi che assoluti, adottando metodologie sia analogiche che digitali; in questo capitolo la nostra attenzione sarà rivolta ad alcuni trasduttori sensibili al moto relativo e cioè:

- **potenziometro**
- trasformatore differenziale (LVDT)
- trasduttori a variazione di induttanza o di riluttanza
- **trasduttori capacitivi**
- trasduttori elettro-ottici
- **encoders ottici**

In seguito sono illustrate le modalità di funzionamento e le caratteristiche principali dei trasduttori elencati in precedenza. I trasduttori tipo resolver e syncro non verranno affrontati.

Il potenziometro

Essenzialmente un potenziometro è costituito da un resistore fornito di un contatto mobile detto « **cursore**». Il moto del cursore può essere di traslazione, di rotazione, o una combinazione dei due (moto elicoidale in potenziometri a molti giri). Pertanto i potenziometri possono misurare sia spostamenti rotatori che traslatori. I rotatori hanno corse da 10° a 60 giri completi; i traslatori da 2 mm a 50 cm. L'alimentazione del potenziometro può essere sia con tensione continua che alternata, e la tensione di uscita può essere una funzione lineare dello spostamento o anche, in modelli speciali, una funzione sinusoidale o logaritmica o altro. I potenziometri possono essere a **filo**, a **film di carbone** o a **plastica (o ceramica) conduttiva**. Se la distribuzione della resistenza rispetto allo spostamento del cursore è lineare, la **tensione di uscita e_u riproduce fedelmente il moto in ingresso S_i o ϑ_i** se i terminali di e_u sono a circuito aperto (cioè in assenza di corrente erogata all'uscita). Normalmente, però la tensione di uscita di un potenziometro è applicata ad un misuratore o ad un registratore che assorbono una certa corrente, perciò un circuito più realistico è quello che prevede una resistenza R_m tra i terminali di uscita del potenziometro (vedi fig. 1.1).

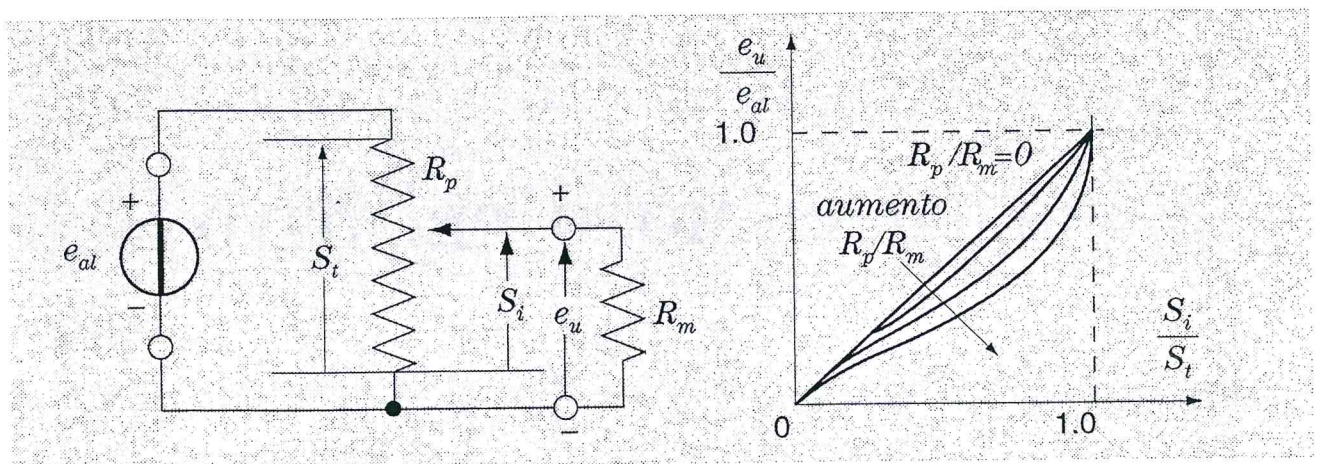


FIG. 1.1. *Effetto del carico*

L'analisi di questo circuito ci dà:

$$\frac{e_u}{e_{al}} = \frac{1}{\frac{1}{S_i/S_t} + \frac{R_p}{R_m} \left(1 - \frac{S_i}{S_t}\right)} \quad (1)$$

dove R_p è tutta la resistenza del potenziometro.

Nel caso ideale in cui $R_p/R_m = 0$ (cioè a circuito aperto), la (1) fornisce la:

$$\frac{e_u}{e_{al}} = \frac{S_i}{S_t} \quad (2)$$

Perciò in assenza di carico la curva ingresso-uscita è una linea retta. Nei casi pratici $R_m \neq \infty$ e l'equazione (1) mostra una relazione non lineare tra e_u ed S_i . Tale relazione di non linearità è mostrata in figura 1.1.

Il massimo errore è circa il 12% del fondo scala se $\frac{R_p}{R_m} = 1.0$ e scende a circa 1,5% quando $\frac{R_p}{R_m} = 0.1$.

Per valori di $\frac{R_p}{R_m} < 0.1$ la posizione del massimo errore capita in prossimità di $\frac{x_i}{x_t} = 0.67$ e il massimo errore è approssimativamente $15 \left(\frac{R_p}{R_m} \right) \%$ del fondo scala.

Vediamo che al fine di ottenere una buona linearità, per un misuratore di data resistenza R_m si dovrebbe scegliere un potenziometro con resistenza R_p sufficientemente piccola rispetto a R_m .

Questo requisito è in contraddizione con il desiderio di avere un'alta sensibilità. Dato che e_u è direttamente proporzionale a e_{al} , sembrerebbe possibile raggiungere la sensibilità desiderata semplicemente aumentando e_{al} .

Ciò non è possibile in quanto il potenziometro ha una ben definita potenza in relazione alla capacità di dissipare il calore. Di solito il costruttore può progettare una serie di potenziometri, ad esempio ad un giro e 5 cm di diametro, con un ampio campo di resistenza (da 100 a 100000 Ω), ma tutti con la stessa dimensione e configurazione meccanica, e quindi tutti con la stessa capacità di dissipare calore e quindi con la stessa potenza (ad esempio 5 W a 20°C).

Se la dissipazione è limitata a P Watt, la massima tensione di alimentazione è data da:

$$e_{al_{max}} = \sqrt{R_p P} \quad (3)$$

Perciò un basso valore di R_p permette solo un piccolo valore di e_{al} e quindi una piccola sensibilità. La massima sensibilità dei potenziometri varia considerevolmente in relazione alla tipologia e comunque dipende dalle dimensioni.

La sensibilità si può calcolare dai dati forniti dai costruttori, quali tensione, corrente o potenza, e corsa massima. I potenziometri con corsa più piccola hanno generalmente una più alta sensibilità. Valori limite sono dell'ordine di 15 V/grado per i rotazionali a corsa piccola e 100 V/cm per quelli di traslazione. Questi sono valori massimi, normalmente si hanno sensibilità da 10 a 100 volte più piccole.

La risoluzione dei potenziometri è fortemente influenzata dalla costruzione del resistore.

L'idea più semplice è quella di usare un singolo filo steso come un resistore, in modo che allo scorrere del cursore si abbia una variazione continua della resistenza. Tali potenziometri esistono ma sono limitati da valori di resistenza piuttosto piccoli.

Per ottenere valori di resistenza più alti in un piccolo spazio si usano elementi a filo avvolto. Il filo si avvolge su un cilindro o su un rettangolo di carta o di mica e quindi può essere conformato secondo un circolo o un elica nel caso di un potenziometro a rotazione. Con tale costruzione il cursore salta da un filo del giro al successivo, e quindi la variazione di resistenza non è una funzione continua lineare, ma presenta un andamento seghettato. Questa caratteristica dà luogo ad una limitazione

LINEARITÀ
↓

SENSIBILITÀ

RISOLUZIONE

di base alla risoluzione del dispositivo in relazione alle dimensioni del filo. Per esempio, se un potenziometro di traslazione ha un resistore con 500 giri su un supporto di 25 mm non possono essere rilevati spostamenti minori di 0,05 mm.

Attualmente si hanno limiti pratici di spaziatura tra i 20 e 50 giri per millimetro.

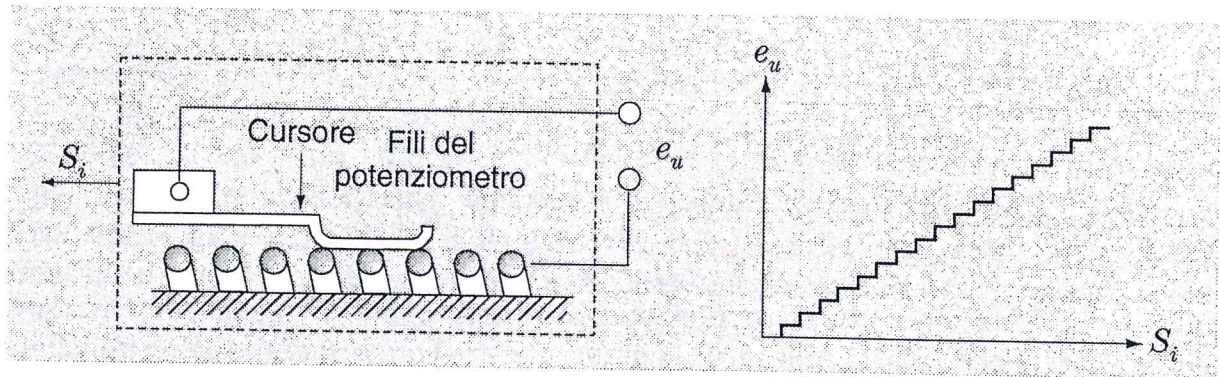


FIG. 1.2 e 1.3. Risoluzione di potenziometri a filo avvolto

Per i potenziometri a rotazione ad un giro la risoluzione dipende dal diametro D secondo la relazione:

$$\text{limite di risoluzione angolare} = \frac{3 \div 6}{D} \text{ gradi} \quad (4)$$

dove D è espresso in mm.

È da notare inoltre che la risoluzione dipende strettamente dalla resistenza totale in quanto se si usa filo molto sottile la resistenza totale sarà grande. Quindi risoluzione e resistenza totale sono parametri che non si possono scegliere indipendentemente l'uno dall'altro. Se si richiede una risoluzione molto spinta ed al tempo stesso una bassa resistenza si può fare ricorso a potenziometri a strato di carbone o a plastica conduttiva. Un elemento a strato di carbone può avere una risoluzione di $0,12 \cdot 10^{-3}$ mm. Tale valore dipende dalla granulosità del composto; inoltre bisogna tener presente che la risoluzione complessiva peggiora sempre a causa dei difetti meccanici dei cuscinetti e della molla del cursore. Usando potenziometri a carbone bisogna tener presente che il contatto cursore carbone è un contatto a resistenza relativamente alta e perciò la caduta di tensione sulla resistenza di contatto iR causa errori di linearità sulla tensione di uscita.

Un'altra possibilità per aumentare la risoluzione è fornita dall'uso di potenziometri a molti giri, comandati meccanicamente mediante un sistema di ruote dentate in modo che, ad esempio, una rotazione di un giro dell'albero misurato si trasformi in una rotazione di 10 giri dell'albero del potenziometro. Con questo sistema si aumenta la risoluzione di un fattore 10; bisogna aver cura, però, di non introdurre «giochi» tra le ruote dentate.

La linearità di un potenziometro dipende dalla uniformità con cui è avvolto il filo, ma entro certi limiti è possibile correggere la disuniformità mediante l'aggiunta di resistenze fisse in serie o in parallelo in opportuni punti dell'avvolgimento; questo procedimento può essere adottato anche per correggere la non linearità derivante dal valore troppo basso della resistenza R_m .

Le migliori non linearità disponibili in commercio vanno da 1% del fondo scala per potenziometri da 1/2" di diametro, allo 0,02% per potenziometri da 2" a molti giri,

fino allo 0,002% per diametri da 10" sempre a più giri. Per potenziometri di traslazione si va dallo 0,05 allo 0,1% del fondo scala.

È importante notare che l'incertezza globale non può essere migliore della metà della risoluzione.

Il «rumore» o tensione di disturbo nei potenziometri si riferisce alle fluttuazioni di segnale durante il moto del cursore ed include gli effetti della risoluzione. Inoltre ci sono vari altri difetti meccanici ed elettrici che producono «rumore».

In potenziometri a filo, il moto del cursore può causare una intermittenza di contatto per certe velocità del cursore che, in relazione alla spaziatura dei fili può produrre delle forze di frequenza prossima a quella di risonanza del sistema elastico costituito dal cursore. A questo inconveniente si può porre rimedio con un dispositivo come quello rappresentato (fig. 1.4), che prevede l'uso di due cursori, uno con frequenza naturale più alta e l'altro con frequenza naturale più bassa, di modo che se va in risonanza uno rimane il contatto formato dell'altro.

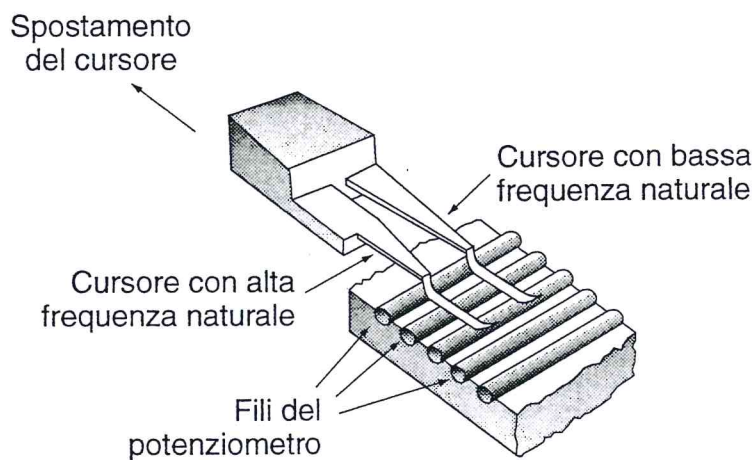


FIG. 1.4. *Cursori antivibrazione*

Un'altra possibilità è quella di accrescere lo smorzamento in modo da ridurre l'ampiezza delle oscillazioni riempiendo il potenziometro con fluido opportuno.

Un'altra causa di «rumore» è la presenza di sporcizia sia sui fili che sul contatto strisciante tra cursore e terminale fisso.

La caratteristica dinamica di un potenziometro è essenzialmente quella di uno strumento di ordine zero, perché normalmente si possono trascurare la resistenza d'attrito e l'inerzia delle parti mobili rispetto alle forze in gioco nel sistema oggetto di misura.

Se ciò non è possibile, essendo forniti dal costruttore il momento di inerzia e la forza di attrito del cursore, si può sempre tenerne conto.

Potenziometri rotazionali speciali a basso attrito hanno coppie di attrito di primo distacco dell'ordine di $2 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$. Per i tipi più convenzionali si hanno valori da $1 \cdot 10^{-3}$ a $5 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ o più.

Per i potenziometri di traslazione le forze di attrito hanno valori tra 0,3 e 5 N. L'inerzia varia molto a seconda delle dimensioni; ad esempio per un tipico potenziometro di 7/8" di diametro si ha un momento di inerzia di $0,12 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$; per un potenziometro di 2" a 10 giri si arriva a $18 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$.

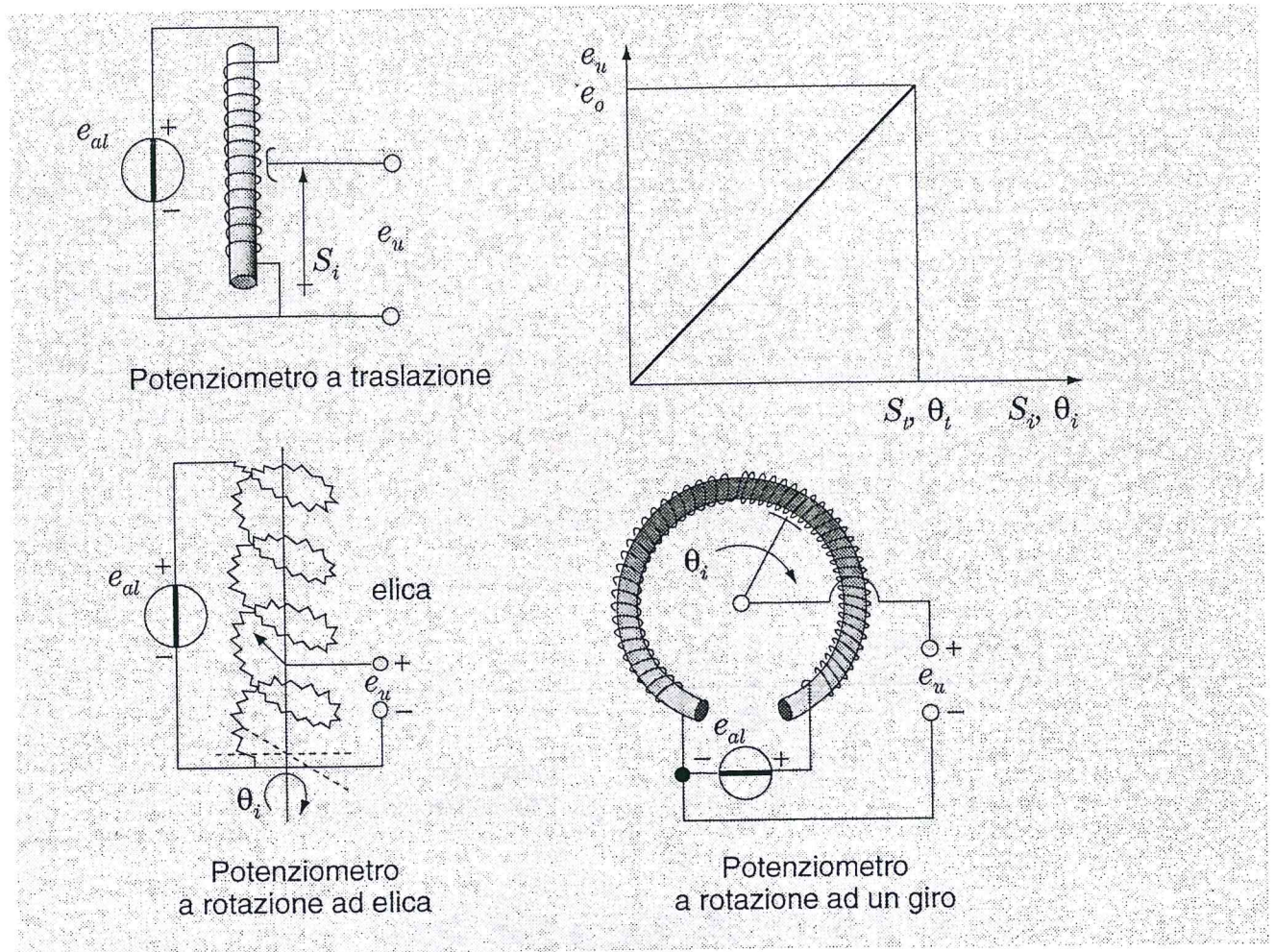


FIG. 1.5. Varii tipi di potenziometro

Trasformatore differenziale (LVDT)

Schematicamente il trasformatore differenziale è costituito come in fig. 1.6. L'alimentazione è normalmente una tensione sinusoidale da 3 a 15 V di ampiezza e con frequenza da 50 a 20000 Hz.

I due secondari sono identici e in loro si induce una tensione sinusoidale della stessa frequenza dell'alimentazione; l'ampiezza invece dipende dalla posizione del nucleo di ferro molto puro. Quando i secondari sono connessi (in serie) in opposizione esiste una posizione del nucleo in cui l'uscita è zero.

Da tale posizione uno spostamento del nucleo da una parte causa un maggiore accoppiamento di quel secondario col primario e un minor accoppiamento dell'altro secondario, e l'ampiezza di e_u diventa una funzione quasi lineare della posizione del nucleo per un certo campo al di là e al di qua della posizione di zero. La tensione e_u subisce uno sfasamento di 180° nell'attraversare la posizione di zero. Di solito c'è un certo sfasamento tra tensione primaria e secondaria, ma esiste una particolare