

CARATTERISTICHE METROLOGICHE DEGLI STRUMENTI DI MISURA

Bibliografia:

Doebelin, *Strumenti e metodi di misura* - MCGRAW-HILL - Ed2008

pagg. 11-18; 99-133

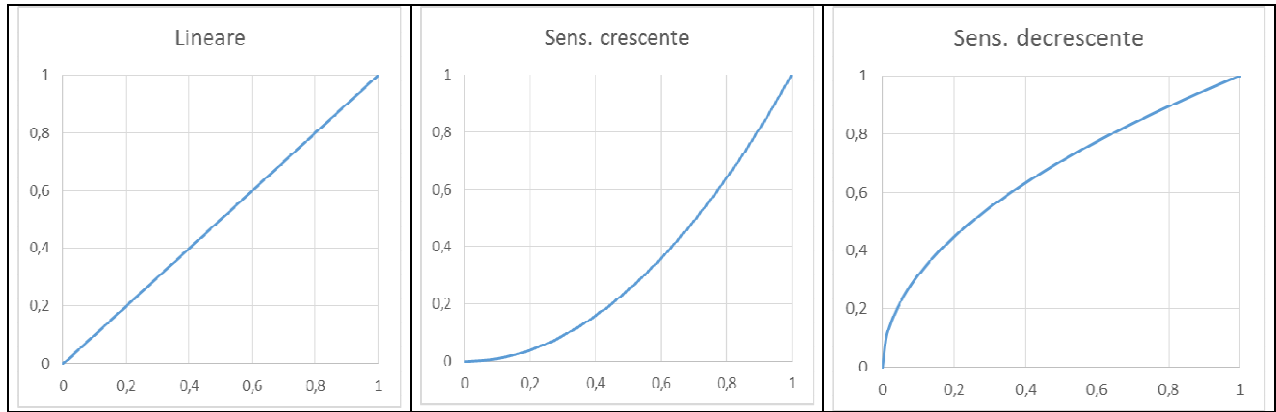
1 - Modalità di funzionamento

- ad **azzeramento**: si esercita una azione sullo strumento tendente ad azzerare l'indicazione.
La misura viene ricavata dalla conoscenza della azione esercitata
Es. Misura di una forza: si esercita una forza nota che equilibri la forza incognita. La misura è determinata dalla conoscenza della forza di contrasto applicata.
- a **deflessione**: la misura viene ricavata dalla variazione della indicazione provocata dalla applicazione della grandezza
Es. Misura di una forza: si fa agire la forza su di una molla. La misura è ricavata misurando la deformazione della molla ed utilizzando la legge forza-deformazione.

Vantaggi AZZERAMENTO	Vantaggi DEFLESSIONE
- ridotte o annullate: - non linearità del sistema - giochi - isteresi - influenza grandezze estranee attive	- immediatezza della indicazione
- minore effetto di carico	- facilità di realizzazione di strumenti per grandezze tempovarianti
- migliore accuratezza	- migliore risoluzione

Svantaggi AZZERAMENTO	Svantaggi DEFLESSIONE
- costo	- minore accuratezza
- laboriosità nella esecuzione delle misurazioni	

- 2 - Sensibilità:** rapporto fra il cambiamento dell'indicazione di un sistema di misura e il corrispondente cambiamento del valore di una grandezza sottoposta a misurazione (= derivata, ricavata per un determinato valore della grandezza, della indicazione rispetto alla grandezza). L'unità di misura [um] della sensibilità, è pari al rapporto fra l'unità di misura della indicazione fratto l'unità di misura della grandezza.
- Può essere **costante** al variare del valore della indicazione (strumento lineare): situazione preferita per la immediatezza della lettura, per la facilità con cui possono essere eseguite successive elaborazioni, per la sovrapponibilità degli effetti
- Può **augmentare** all'aumentare della indicazione (es. tubo di Pitot, tubo di Venturi)
- Può **diminuire** all'aumentare della indicazione (es. anemometro di Gill): situazione preferibile qualora si desideri che la incertezza relativa di misura non cresca, o cresca poco, per valori piccoli della grandezza misurata



3 - Risoluzione: il più piccolo cambiamento di una grandezza sottoposta a misurazione che provoca un cambiamento rilevabile nell'indicazione corrispondente ([μm] = unità di misura della grandezza).

Limitazioni alla risoluzione sono dovute:

- potere separatore dell'occhio = $1/1000$ della distanza di osservazione $\approx 0,2$ mm
- errore di parallasse¹ => riducibile curando la costruzione, realizzando un quadrante speculare, ...
- incertezza di interpolazione $\approx \pm 1/10$ della distanza fra due tratti successivi
- risoluzione dei sistemi di conversione A/D (LSB)

4 - errore di misura: risultato di una misurazione meno il valore convenzionale del misurando

errore di misura sistematico: componente dell'errore di misura che, durante più misurazioni dello stesso misurando, rimane costante o varia in modo prevedibile.

Cause di errori di misura sistematici possono essere:

- graduazione della scala non corretta (per quadranti indicatori)
- generazione di tensioni nei cavi conduttori (per indicatori elettrici analogici o digitali)
- influenza di grandezze estranee attive (temperatura, pressione, accelerazione, magnetismo, giochi, isteresi, ...)

Si eliminano (si riducono) gli errori sistematici mediante:

- cura nella costruzione dello strumento (macchinari tarati e controllati, scelta dei materiali, dispositivi di recupero dei giochi, schermatura e messa a terra di cavi ed apparati elettrici, ...)
- controllo delle grandezze estranee attive
- misura e successiva correzione dell'errore
- taratura
- esecuzione delle misurazioni con procedure standardizzate

errore di misura casuale (random): componente dell'errore di misura che, durante più misurazioni dello stesso misurando, varia in modo non prevedibile.

Cause di errori di misura casuali possono essere:

- variazioni aleatorie o non controllate delle grandezze estranee attive
- turbolenza, rumore di fondo
- modalità non standardizzate di esecuzione delle misurazioni

¹ Fenomeno per il quale un osservatore, a seconda della sua posizione rispetto al quadrante dello strumento, legge valori diversi della indicazione.

Si riducono gli errori casuali mediante:

- controllo delle grandezze estranee attive
- esecuzione delle misurazioni con procedure standardizzate
- ripetizione delle misurazioni in modo da poter ridurre l'incertezza (tipo A)
- nel caso di segnali di tipo elettromagnetico di bassa intensità, schermando e raffreddando le apparecchiature²

5- Relazione tra risoluzione e incertezza:

Concettualmente sono due concetti non correlati, ma:

- migliorare la risoluzione è facile e poco costoso, migliorare l'incertezza è difficile, costoso, non sempre fattibile;
- se la risoluzione è pari ad un valore molto più piccolo dell'intervallo di incertezza si induce erroneamente nell'utilizzatore una percezione sbagliata della incertezza
- se l'incertezza è molto più piccola della risoluzione non siamo in grado di ottenere le misure con l'incertezza teorica (subentra il calcolo di tipo B)
- le norme stabiliscono un rapporto tipico tra risoluzione ed incertezza compreso tra 1 e 4 in modo da avere indicazioni di misura univoche ma che non penalizzino l'incertezza

6 - Tipiche cause di errore di misura in strumenti di misura meccanici

In strumenti di misura ad indicazione meccanica, o nei quali la grandezza da misurare provoca spostamenti o deformazioni, le cause tipiche di errore sono:

- **graduazione:** la graduazione è realizzata con macchine utensili, utilizzando funzioni di taratura ottenute su prototipi e controllate solo in maniera episodica
 - si riduce l'errore effettuando la taratura del singolo strumento (molto costoso, si esegue solo se richiesto dalle norme o dal cliente)
- **giochi e discontinuità:** l'indicazione relativa ad una medesima grandezza è differente se raggiunta partendo da una indicazione minore o maggiore di quella finale
 - si riduce l'errore prevedendo sistemi di ripresa dei giochi oppure disponendo nello strumento molle o altri sistemi che assicurino, negli accoppiamenti, che il contatto delle parti in movimento avvenga sempre sulle medesime facce
 - si riduce l'errore operando in modo che, sia durante la taratura sia nel normale utilizzo, il valore dell'indicazione sia raggiunto sempre partendo da indicazione nulla
- **attriti:** le forze di attrito, opponendosi al movimento, non consentono all'indicatore dello strumento di misura di raggiungere la corretta posizione

si riduce l'errore

² I laboratori del Gran Sasso sono un esempio di struttura pensata e realizzata per ridurre il più possibile gli errori di misura casuali: sono realizzati in zona a quasi nulla radioattività naturale, in caverna sotto 1400 metri di granito in modo che non arrivino disturbi elettromagnetici e raggi cosmici, gli strumenti di misura sono raffreddati con azoto liquido (temperatura di ebollizione pari a -209,9 °C).

- scegliendo opportunamente i materiali con cui realizzare gli accoppiamenti,
 - diminuendo le forze scambiate (però si aumentano i giochi),
 - sottoponendo a vibrazioni lo strumento di misura³
- **isteresi**: l'isteresi fa sì che, quando si misura una grandezza, si ottenga una indicazione differente a seconda che si parta da una indicazione minore o da una maggiore di quella finale; l'indicazione corretta si ottiene con una doppia misura, la prima partendo da indicazione zero, la seconda partendo da indicazione massima, e facendo la media fra i due valori così ottenuti
- si riduce l'errore con una opportuna scelta del materiale delle parti sottoposte a deformazioni,
 - si riduce l'errore adottando procedure che obbligano a raggiungere l'indicazione sempre partendo dal valore minimo (es. dispositivi automatici di azzeramento fra una misurazione e l'altra) e tarando lo strumento seguendo rigorosamente le medesime modalità
- **variazioni delle grandezze estranee attive**: provocano variazioni delle indicazioni.

Grandezze estranee attive sono:

- **temperatura** dello strumento di misura, dell'ambiente, dell'oggetto misurato
 - **accelerazioni costanti** (es. accelerazione di gravità: l'indicazione dipende dalla posizione dei baricentri delle parti mobili dello strumento di misura)
 - **accelerazioni variabili** (es. vibrazioni: l'indicazione varia per effetto delle forze d'inerzia)
 - **campo elettrico**: induce sui conduttori delle tensioni non dovute alla variazione della grandezza da misurare
 - **campo magnetico**: induce su parti ferromagnetiche dello strumento di misura forze che possono alterare l'indicazione; se variabile, ovvero anche se costante ma con conduttori che si muovono, induce sui conduttori stessi tensioni, non dovute alla variazione della grandezza da misurare, che modificano l'indicazione di misura
- **effetto di carico**: descrive il fenomeno per il quale il valore della grandezza, e conseguentemente la misura, variano per effetto dell'utilizzo dello strumento di misura

L'entità dell'effetto di carico dipende sia dalle caratteristiche dello strumento di misura sia dal fenomeno fisico che varia la grandezza da misurare.

es1: nelle misure di temperatura, la temperatura di regime dopo l'inserimento di un termometro, e quindi l'indicazione, è intermedia fra quella iniziale del sistema e la

³ Come è noto quando due corpi rigidi a contatto strisciano l'uno sull'altro si scambiano una forza la cui componente tangenziale non può assumere un valore qualsiasi ma è determinata. Tale forza, infatti, è direttamente proporzionale, secondo un coefficiente di attrito radente f , alla componente normale ed ha la direzione della velocità relativa dei punti di contatto; il verso, sui due corpi, è tale da opporsi al movimento. Questa legge viene sfruttata nella pratica di tutti i giorni quando, ad esempio, per stappare una bottiglia di spumante si ruota il turacciolo attorno al proprio asse in quanto, così facendo, si obbligano le forze d'attrito a disporsi nella direzione del movimento, per opporsi allo stesso, e quindi vengono corrispondentemente fortemente ridotte le forze che si opponevano alla estrazione del tappo.

Lo stesso principio viene sfruttato per eliminare l'errore di attrito sulle misure, infatti se si provocano movimenti interni allo strumento di misura, per esempio picchiando sullo strumento, le forze di attrito si disporranno tutte in modo da opporsi ai movimenti provocati e quindi saranno automaticamente fortemente ridotte quelle componenti che si opponevano all'adeguamento della indicazione.

iniziale del termometro. Se la temperatura varia nel tempo, l'entità della variazione sarà differente in presenza di un termometro in quanto aumenta la capacità termica globale; l'errore è grande se il termometro è di capacità termica non trascurabile rispetto alla capacità termica dell'oggetto, dell'ambiente, sottoposto a misura

es2: nelle misure di pressione l'indicazione può variare se, al variare della pressione, lo strumento varia il volume occupato dal fluido; l'errore è grande nel caso di misure di pressioni di fluidi racchiusi in recipienti, enorme se il fluido è "incomprimibile"; l'errore è del tutto trascurabile in misure in ambienti nei quali la pressione è creata da forze esterne costanti esercitate, ad esempio, da uno stantuffo oppure dalla forza di gravità agente sulle particelle di fluido sovrastanti

es3: nelle misure di lunghezza effettuate con strumenti che toccano l'oggetto da misurare, la forza esercitata dallo strumento di misura varia la dimensione dell'oggetto sottoposto a misurazione; l'errore è grande per misure dimensionali di corpi altamente deformabili (ad esempio la misura del diametro di una sfera di gomma)

es4: nelle misure di vibrazione uno strumento applicato all'oggetto vibrante ne varia la massa ed esercita una forza esterna variandone il comportamento; l'errore è grande se il tasto sonda dello strumento di misura è premuto e se l'oggetto vibrante è piccolo; l'errore è grande se anche solo una parte dello strumento di misura è solidale con l'oggetto vibrante ed ha massa confrontabile con lo stesso.

7 - Combinazione di più cause di errore:

Qualora esistano cause di errore sistematico è sempre possibile, e quindi si deve, correggere l'indicazione sottraendo il valore dell'errore.

Qualora esistano più cause di errore casuale fra di loro non correlate, l'incertezza composta è pari alla radice quadrata della somma dei quadrati degli errori dovuti alle singole cause:

$$u = \sqrt{\sum(u_i)^2}$$

Da questa definizione si ricavano alcune regole pratiche:

- se ci sono alcune cause di errore aventi valore elevato ed altre aventi valore più piccolo, queste ultime hanno influenza trascurabile e quindi possono non essere considerate
- considerando solamente la cause di errore aventi valore elevato, se esse sono in numerosità di
 - 4, e sono di valore uguale, o quasi,
l'incertezza composta è circa doppia rispetto alla singola $u = 2 * u_i$
 - 9, e sono di valore uguale, o quasi,
l'incertezza composta è circa tripla rispetto alla singola $u = 3 * u_i$

Le norme, che stabiliscono le caratteristiche costruttive degli strumenti di misura, normalmente prevedono che ogni singola causa di incertezza debba avere valore minore od uguale ad un terzo della incertezza totale dello strumento, supponendo quindi che possano essere presenti, di norma, una decina di cause indipendenti, e non trascurabili, di errore.

Regola generale:

Il valore della incertezza di misura ottenuto durante una misurazione sarà normalmente superiore (mai inferiore) a quello ottenuto durante la taratura dello strumento di misura; lo eguaglierà solo qualora si esegua la misurazione con la stessa procedura utilizzata per eseguire la taratura.

Nessuno strumento di misura potrà mai avere un valore di incertezza di misura più piccolo rispetto al valore di incertezza degli strumenti e dei campioni utilizzati per tararlo.