

Misurazione dello spostamento e della dimensione

Nelle precedenti note tecniche, l' LVDT è stato trattato essenzialmente come un *elemento di trasduzione* che risponde ad uno spostamento assiale. Naturalmente, ogni LVDT può essere costruito come un completo trasduttore di spostamento con un appropriato montaggio della bobina, del sistema di fissaggio, della guida del nucleo congiungendo il nucleo al pezzo in movimento. Tuttavia, per molte misurazioni, è preferibile avere a disposizione un trasduttore di spostamento LVDT pronto all'uso, completamente assemblato. Questa nota tecnica prende in considerazione le caratteristiche più importanti e le applicazioni dei trasduttori usati esclusivamente per le misurazioni di spostamenti lineari ed angolari.

Teste di misura ad LVDT

La più comune struttura di un trasduttore di spostamento assemblato con un LVDT è mostrato in Fig. 9.1. Questo è conosciuto come *LVDT gage head* ovvero testa di misura ad LVDT ed è largamente utilizzato negli equipaggiamenti di ispezione e misura dimensionale e sulle macchine utensili. La tipica testa di misura consiste nell'assemblaggio di un LVDT Fig. 9.1

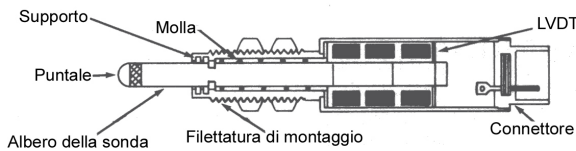


Fig. 9.1 Sezione di una tipica testa di misura ad LVDT

il cui nucleo è collegato ad una sonda caricata con una molla ed un puntale sostituibile. La sonda è guidata da un supporto a manicotto trattenuto nel corpo del trasduttore che include anche gli avvolgimenti della bobina. Il corpo talvolta ha una filettatura esterna per facilitarne il montaggio. Molte variazioni di questo tipo di testa di misura sono state sviluppate per particolari applicazioni, come presentate in Fig. 9.2. In aggiunta, ci sono teste di misura progettate utilizzando supporti flessibili, modelli caricati pneumaticamente e teste di misura che utilizzano sonde a leva oppure che simulano un dito. Queste saranno prese in considerazione, in queste note tecniche, ma più avanti. Ci sono molti modi di classificare le teste di misura LVDT, ma il principale è la prestazione richiesta al trasduttore. Questo ci conduce a suddividere i trasduttori in tre categorie: economici, di precisione ed ultra precisi. Le variabili principali da considerare per appartenere ad una classe

piuttosto che ad un'altra sono i supporti di precisione e la linearità dell'elemento LVDT.

Teste di misura economiche

La classifica di *economico* è attribuita a quelle teste di misura che sono progettate per dare un ragionevole buon livello fig.9.2

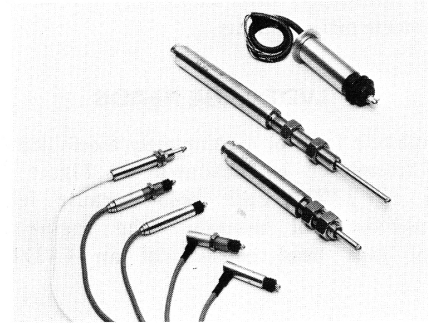


Fig. 9.2 Alcuni modelli di teste di misura ad LVDT

di prestazione ad un costo equilibrato. Le teste di misura economiche utilizzano un LVDT a più basso costo avente una linearità dello 0,5% del fondo scala. L'albero scorre in un supporto in nylon ed è libero di ruotare. Una molla esterna carica l'albero ed il corpo non è solitamente filettato ma richiede un blocchetto di fissaggio od altro adeguato montaggio. L'accoppiamento lasco del supporto e la possibilità dell'albero di ruotare possono causare un movimento obliquo e la rotazione del nucleo. Questi contribuiscono ad avere un errore di ripetibilità più elevato, tipicamente 0,00254 mm rispetto alle teste di misura più precise. D'altra parte, la maggior tolleranza nel supporto di guida può contribuire ad un aumento della vita della testa di misura nelle tipiche condizioni industriali. Ciò riduce anche il grado di protezione necessario per tenere lontano eventuali contaminazioni che potrebbero bloccare la guida - supporto ed aumentare la frizione all'albero. La durata tipica di una testa di misura economica è valutata in 5 milioni di cicli senza un degrado significativo nelle prestazioni. Peraltro non sono raccomandate per funzionare in condizioni ambientali gravose dove sono richieste tecniche di protezione e di sigillatura speciali.

Teste di misura di precisione

La maggior parte delle teste di misura ad LVDT cade nella categoria di *precisione*. Esse sono caratterizzate da una buona linearità, tipicamente lo 0,25% del fondo scala e da un'eccellente ripetibilità, tipica di 0,0127 umm. Inoltre incorporano una guida - supporto più precisa ed un sistema per evitare la rotazione dell'albero. La molla di carico è posta all'interno. La maggior parte delle teste di misura di precisione ha il corpo filettato esternamente e possono essere sia in AC

che in DC con condizionatore di segnale incorporato. La vita operativa è paragonabile a quella dei modelli economici, ma dipende dalle applicazioni di funzionamento normalmente più estese. Una varietà di protezioni ambientali sono disponibili per sopportare le diverse richieste applicative, includendo unità protette con soffiato metallico piuttosto che in gomma, o corpo del trasduttore irrobustito, ed unità contenente il corpo saldato ed ermeticamente sigillato, resistente alle radiazioni nucleari.

Teste di misura ultra precise

Le teste di misura *ultra precise* sono la combinazione di uno speciale LVDT AC con installata una guida supporto smerigliata e lappata oppure un cuscinetto a rulli radiali per ottenere una linearità fino a 0,05% del fondo scala ed una ripetibilità di 0,0101 umm. L'albero non rotante è caricato con una molla per ottenere sul puntale un carico da 10 gr. fino a parecchie libbre. Il montaggio più preciso dell'albero con la guida può causare una certa frizione, che può causare una riduzione della vita operativa della testa di misura. Per questa ragione, le condizioni ambientali di funzionamento devono essere attentamente controllate per prevenire polvere, sporco, umidità, olio e simili contaminanti che possono influire sulla guida di una testa di misura ultra precisa.

Sonda con montaggio ad angolo

È un tipo speciale di testa di misura ultra precisa che usa un montaggio dell'albero a bascula. Questo elimina la frizione dovuta al supporto - guida, senza la rotazione dell'albero e provvede ad una stabilità laterale dell'albero della sonda. Dei fermi sono incorporati per evitare danneggiamenti dovuti ad una corsa eccessiva. Questo tipo di testa di misura ha quasi una ripetibilità infinitesimale, tipicamente meglio di un umm, e praticamente un'aspettativa di vita infinita.

Teste di misura con attuazione pneumatica

Non c'è alcuna molla utilizzata per caricare l'albero della testa di misura. In alcune applicazioni, le teste di misura con attivazione pneumatica offrono dei vantaggi più completi. Una tipica testa di misura di questo tipo è mostrata in Fig. 9.3. Una bassa pressione d'aria è introdotta alla fine del nucleo ovvero dalla parte opposta dell'albero. La forza di carico dell'albero della sonda è proporzionale alla pressione d'aria applicata. La forza di contatto può essere modificata per poter soddisfare le richieste di misura. Una volta che è impostata la pressione di attuazione, fig.9.3

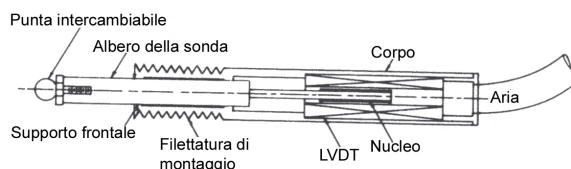


Fig. 9.3
Sezione di una testa di misura con attuazione pneumatica

generalmente per mezzo di un regolatore esterno, la forza di contatto rimane costante; essa non varia con la posizione dell'albero. Questo carico simula quello della molla quando non c'è carico sull'albero della sonda. Applicando una depressione di basso valore (da 5 a 10 pollici di Hg) invece che una pressione l'albero della sonda può essere represso tra i cicli di misura. In alternativa, l'albero della sonda può essere caricato con una molla per ottenere la posizione repressa ed utilizzare la pressione per il bilanciamento della forza della molla. Tuttavia, questo metodo alternativo fa perdere l'effetto costante della forza della molla a carico zero. L'attuazione pneumatica è in genere usata con alcuni tipi di teste di misura ultra precise. Per questa ragione, l'aria applicata deve essere secca e priva della presenza di olio. Dovrebbe anche essere filtrata con un filtro da 10 micron per prevenire l'ingresso di contaminanti nel supporto - guida. Alcune teste di misura hanno un foro di spurgo sul connettore per facilitare la regolazione della bassa pressione. Tipicamente, la forza all'albero della sonda è di 0,4 once/psi della pressione applicata.

Teste di misura a leva o "a dito"

Questo tipo di testa di misura è utile qualora l'oggetto da misurare non è direttamente accessibile da una testa di misura ordinaria. Ci sono due tipi di teste di misura di questo genere. Una ha una sonda con un perno disposto su un fulcro, nell'altro caso vengono utilizzati dei bracci di flessione paralleli. La Fig.9.4a mostra l'errore di rotazione (coseno) che è inerente alle teste di misura che utilizzano una sonda con perno flessibile. Inoltre, il nucleo dell'LVDT si mette di traverso producendo un altro possibile errore. Fig.9.4

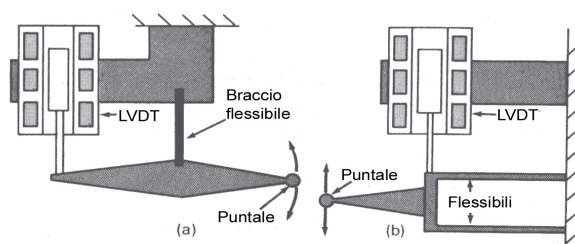


Fig. 9.4 Schema semplificato di teste di misura a "dito": in (a) con braccio flessibile; in (b) a bracci paralleli.

Per queste ragioni, il sistema con sonda a braccio di flessione parallelo di Fig. 9.4b è preferito per le applicazioni di maggior precisione. Una

soddisfacente testa di misura, qualche volta, può essere costruita assemblando un sistema come quello usato negli indicatori meccanici a quadrante. Gli effetti di frizione sul supporto - guida limitano l'utilità di questa tecnica di misurazione a quei casi dove un'estrema precisione non è necessaria.

Effetti delle condizioni ambientali sulle teste di misura

Le stesse considerazioni fatte per l' LVDT possono essere applicate anche alle teste di misura, ma con qualche restrizione. Le teste di misura sia economiche che di precisione possono funzionare in un campo di temperatura da -20°F a $+200^{\circ}\text{F}$. Per le teste di misura ultra precise il campo di temperatura di funzionamento è ristretto da 40°F a 140°F . Le condizioni ambientali locali dovrebbero essere di pulizia e esenti da fluidi o particelle che potrebbero contaminare od influenzare il supporto - guida della testa di misura. Anche l'umidità relativa è preferibile che sia bassa. Se è difficile mantenere queste condizioni ambientali, dovrebbe essere utilizzato un qualche metodo di protezione per la testa di misura. Nessun tentativo deve essere fatto per lubrificare il supporto - guida della testa di misura. In genere le vibrazioni meccaniche non danno problemi nelle condizioni di funzionamento ordinario, ed anzi possono provvedere anche un utile tremolio della sonda che riduce gli effetti della frizione statica. Come ogni comune LVDT anche le teste di misura sono magneticamente schermate e non sono particolarmente influenzate dalla vicinanza di materiali o campi magnetici esterni. Le considerazioni discusse nel Capitolo 5 circa gli effetti magnetici sono applicabili anche in questo caso.

Applicazioni delle teste di misura.

Gli usi tradizionali delle teste di misura sono sugli equipaggi di ispezione delle macchine utensili e nei laboratori per il controllo della qualità e in metrologia. In queste applicazioni, la testa di misura con il suo lettore è molto più precisa degli indicatori meccanici. Sistemi completi per ispezione di "buono - scarto" di complesse parti meccaniche per essere assemblate, usando parecchie teste di misura montate in convenienti attrezzature di guida o fissaggio. I sistemi con le teste di misura possono anche essere utilizzati per registrare i dati elettronicamente, per acquisire informazioni statistiche per il controllo della qualità sulle parti prodotte, o per interfacciarsi con un computer a una macchina utensile controllata con un sistema ad anello chiuso. Alcune applicazioni sono esaminate nel capitolo 15. Un altro vantaggio del sistema di misura con le teste a LVDT è che può essere utilizzato un lettore digitale permettendo

di eseguire il lavoro di ispezione sulla produzione di linea anche a personale non specializzato o semi specializzato. Le teste di misura ultra precise possono fare misurazioni altrimenti difficili da eseguire con i classici indicatori meccanici o a altri dispositivi meccanici di misurazione. Le applicazioni delle teste di misura variano in maniera ampia, così le sonde possono accettare vari tipi di puntali intercambiabili. Queste punte sono mostrate nelle Fig. 9.5.

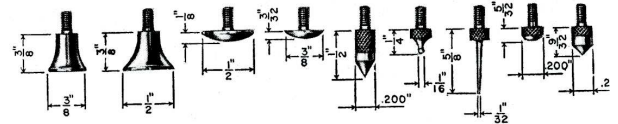


Fig. 9.5 Tipici puntali per le teste di misura

Misurazione della posizione senza contatto

In qualche applicazione, può essere non fattibile o non desiderabile avere un contatto fisico con l'oggetto la cui posizione deve essere misurata. L'utilizzo delle normali teste di misura è precluso ma, fortunatamente ci sono trasduttori alternativi che possono essere usati con soddisfazione per molte misurazioni di spostamento senza contatto. Testa di misura servo assistita pneumaticamente. È un servo meccanismo che funziona pneumaticamente a circuito chiuso, può mantenere una distanza fissa tra l'oggetto mobile del servo meccanismo e la superficie che deve essere misurata, senza tenere conto delle variazioni nelle dimensioni o posizione di quella superficie e senza contatto diretto. L'elemento mobile segue il contorno o la posizione della superficie di lavoro. Se la bobina dell' LVDT è attaccata agli elementi fissi del servo sistema pneumatico, il nucleo dell' LVDT è collegato alla parte mobile, lo spostamento relativo del componente mobile può essere misurato. Poiché la parte mobile si mantiene ad una distanza fissa dalla superficie di lavoro che deve essere misurata, l'uscita dell' LVDT effettivamente rileva la dimensione o la posizione di quella superficie senza contatto. Un servo inseguitore pneumatico combinato con l' LVDT è mostrato in Fig. 9.6.

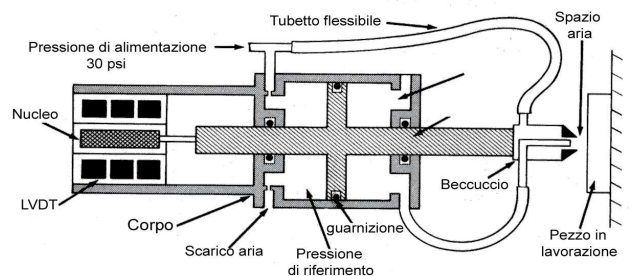


Fig. 9.6 Sezione semplificata di una testa di misura ad asservimento pneumatico accoppiata ad un LVDT.

Il servo inseguitore pneumatico consiste in un cilindro ad aria a doppio effetto, un pistone, una prolunga del pistone, guarnizioni ermetiche ed un speciale ugello sulla estremità della prolunga del pistone. Una bassa pressione d'aria (30 psi) è applicata alla camera di pressione di riferimento attraverso l'orifizio d'ingresso poi scaricata nell'atmosfera tramite l'orifizio di scarico. Poiché gli orifizi hanno la stessa dimensione, la pressione di riferimento sviluppata è uguale a metà della pressione fornita. La pressione di 30 psi è inviata anche all'ugello frontale, terminando ancora nell'atmosfera. Comunque, all'ugello è progettata in modo tale che il ritorno di pressione che si svilupperà varia con lo spazio tra la bocchetta e la superficie che deve essere misurata. Questo spazio dipendente dalla pressione è riportato indietro alla camera di controllo della pressione. Ad un particolare spazio, tipicamente 0,003 pollici, la pressione di controllo è uguale a metà della pressione di alimentazione ed il pistone non si muove. Se lo spazio cambia perché c'è un cambiamento nella superficie dell'oggetto da misurare, la pressione di controllo cambia in accordo, posizionando il pistone e la bocchetta ristabilendo lo spazio tra la bocchetta e pezzo. È possibile retrarre l'ugello dalla superficie di lavoro introducendo una pressione d'aria nella camera di controllo della pressione attraverso una valvola normalmente chiusa. La pressione di riferimento e quella di controllo, sono entrambe sviluppate come cadute di pressione di alimentazione attraverso un orifizio, le variazioni nella pressione di alimentazione hanno un basso effetto sul funzionamento del servo sistema pneumatico. La sorgente di aria deve essere pulita e secca e la lubrificazione non è necessaria. La portata d'aria varia a secondo dei modelli di queste teste di misura ma, normalmente, non eccede i 0,5 cfm. L'LVDT accoppiato al servo sistema pneumatico è un dispositivo con risoluzione infinita. Ma la risoluzione e la risposta sono influenzate dall'effettivo guadagno dell'anello di controllo e dalla frizione dovuta alle guarnizioni. Per piccole variazioni dello spazio tra l'ugello frontale e la superficie da misurare, tipicamente fino a pochi millesimi di pollice, le guarnizioni sono resistenti abbastanza da permettere al pistone di muoversi senza movimento senza attrito. Non c'è un effetto di frizione statica in queste condizioni, e la risoluzione è molto buona. Per variazioni più ampie dello spazio tra l'ugello frontale e la superficie da misurare, gli effetti della frizione statica influenzano il movimento, e perciò esiste una soglia minima di rilevamento dello spazio. Questa soglia è quella variazione dello spazio che produce una pressione differenziale sufficientemente grande per superare la forza della frizione statica delle guarnizioni e muovere il pistone. Questa soglia

cambia tra i differenti modelli, in funzione della sezione del pistone e delle condizioni delle guarnizioni.

Per ampie variazioni dello spazio, la pressione differenziale sul pistone è abbastanza grande da rendere meno significativa la frizione dovuta alle guarnizioni. La frizione dinamica dovuta alle guarnizioni ha qualche effetto sulla risposta dinamica e ai transienti del servo sistema pneumatico, ma anche a 60 Hz, l'ampiezza del segnale d'uscita non scende sotto lo 0,5% dell'uscita di fondo scala. I servo sistemi pneumatici combinati con un LVDT sono correntemente disponibili per corse fino a 50 mm con configurazioni esterne differenti. L'ugello normale produce una forza del flusso d'aria di circa ½ oncia con un diametro minimo di 1/16 di pollice con uno spazio di 0,003 pollici. Altri tipi di bocchette sono disponibili per speciali richieste, come è disponibile anche un amplificatore pneumatico che permette di mantenere uno spazio più ampio tra la bocchetta e la superficie da misurare. Tipiche applicazioni di questo tipo di trasduttore includono sistemi di tracciatura per macchine utensili, misurazioni in linea di battute ed eccentricità, sistemi di misura per lamiere e rulli e come trasduttori di contro reazione in sistemi di controllo automatico.

Misurazioni di spostamento angolare

Il trasduttore a trasformatore differenziale per la misura della posizione angolare è conosciuto come RVDT. Questo dispositivo è analogo alle teste di misura in quanto si presenta come un trasformatore già incapsulato e pronto all'uso.

RVDT

Un tipico RVDT è presentato in Fig. 9.9.

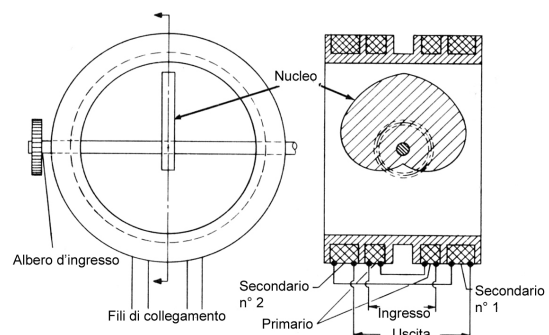


Fig. 9.9 Sezione semplificata di un RVDT

Questo disegno mostra gli avvolgimenti primario e secondari avvolti simmetricamente sullo statore. Come nucleo è usata una camma a forma di cardiode di materiale magnetico (rotore). L'albero d'ingresso attraversa a metà il supporto della

bobina nel piano simmetrico degli avvolgimenti ed è fissato al nucleo a forma di cardiode. La forma del rotore è accuratamente scelta per produrre un'uscita altamente lineare nel campo specificato di rotazione. La curva di uscita di un tipico RVDT è mostrata in Fig. 9.10. Ci sono due campi lineari di funzionamento distanti tra loro di 180° , ma solo uno di questi fig.9.10

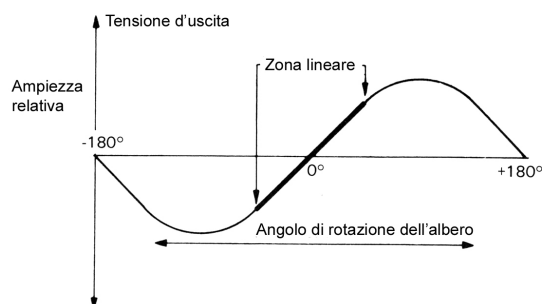


Fig. 9.10 Uscita in funzione della rotazione dell'albero per un tipico RVDT.

è calibrato dal costruttore. La regione lineare calibrata in fabbrica è identificata contrassegnando l'albero ed il corpo dell' RVDT per la posizione di zero gradi dell'albero. L'albero è supportato generalmente con cuscinetti a sfere di precisione per minimizzare la frizione e l'isteresi meccanica. Poiché i carichi dei supporti sono bassi, la vita di un RVDT è comparabile a quella di un LVDT. Una importante caratteristica dell' RVDT è l'assenza di spazzole di contatto nella sua costruzione.

Caratteristiche di un RVDT

La Fig.9.9 mostra che sebbene l' RVDT sia un dispositivo con rotazione continua (360°), il campo lineare di funzionamento è tipicamente di soli $\pm 40^\circ$. La linearità in questo campo è migliore dello 0,5% del fondo scala. Tuttavia, la linearità in un campo di funzionamento più limitato è decisamente migliore. Allora, se un RVDT è usato per effettuare misure di angoli più piccoli, diciamo $\pm 5^\circ$, possiamo trovare una linearità migliore dello 0,1% del fondo scala. In pratica il limite superiore di misurazione di uno spostamento angolare dell' RVDT è di $\pm 60^\circ$. La risoluzione è essenzialmente infinita, può raggiungere frazioni molto piccole del grado.

Applicazioni dell' RVDT

Gli RVDT sono disponibili sia in versione AC che DC, quest' ultimo contenente un condizionatore di segnale a microcircuiti. Entrambi sono usati ampiamente per le misurazioni di una posizione angolare ed offrono significativi vantaggi rispetto ad altri trasduttori per misurazioni analoghe. Il primo vantaggio è l'assenza di contatto tra rotore e statore. Un altro vantaggio importante è l'assenza di

anelli striscianti e spazzole. L'unica limitazione alla vita meccanica del trasduttore è il cuscinetto dell'albero, ma i carichi del cuscinetto sono così insignificanti, nelle normali condizioni di funzionamento, che l' aspettativa di vita è comparabile a quella di un LVDT. Un altro vantaggio è che l' RVDT ha una vera risoluzione infinita. Il gioco del supporto è generalmente così insignificante da non avere praticamente un'isteresi meccanica. È possibile avere un RVDT con il rotore e lo statore separabili per applicazioni dove l'albero del rotore deve essere collocato in un assemblaggio separato dal supporto. L'albero d'ingresso dell' RVDT, se richiesto, può essere sigillato contro la pressione da un semplice O-ring; ma la sigillatura dell'albero può aggiungere una significativa frizione al trasduttore. È inoltre possibile provvedere anche ad una chiusura ermetica della bobina. Un' ulteriore caratteristica vantaggiosa dell' RVDT è che, come per la sua controparte l' LVDT, non è influenzato dall'eventuale superamento della posizione meccanica. Quindi, può essere utilizzato con sicurezza in servo sistemi dove il superamento del campo di misura può giungere inaspettatamente.

Posizione di zero dell' RVDT

La caratteristica altamente lineare dell'uscita di un LVDT o RVDT spesso pone in secondo piano il fatto che entrambi i dispositivi sono anche eccellenti trasduttori nella posizione di zero. Questo fatto può essere particolarmente utile nei sistemi servo assistiti. Questo tipo di sistema mantiene una prefissata relazione di posizione tra due o più parti in movimento. Se la parte di comando cambia posizione, il servo sistema muove le parti asservite in maniera da ripristinare le loro posizioni relative alla parte di comando e raggiungere il così detto bilanciamento " nullo ". Allora, le parti asservite seguono la posizione della parte principale. In questo tipo di applicazione, la linearità di un trasduttore è essenzialmente poco importante. Le principali considerazioni sono la ripetibilità e l'uscita bipolare del trasduttore di posizione. Le caratteristiche di ripetibilità dei trasformatori differenziali ed il fatto di non essere influenzati dal superamento meccanico del campo di misura fanno degli LVDT e RVDT una scelta eccellente come trasduttori per la misurazione dello stesso punto di misurazione (null point).

Tecniche di calibrazione per trasduttori di posizione

Esistono molti metodi per effettuare la calibrazione degli LVDT e delle testa di misura. Fig.9.11

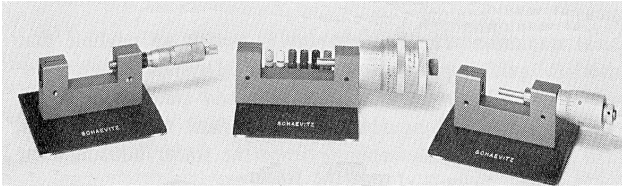


Fig.9.11 Tipici calibratori micrometrici per teste di misura

Calibratori micrometrici

Un metodo abbastanza comune per calibrare i trasduttori di posizione è quello di usare un banco di calibrazione micrometrico, come quello mostrato in Fig. 9.11. Questi tipi di calibratori hanno un campo da 25 mm con un errore cumulativo di 0,0001 pollice ed una leggibilità di 0,0001 pollice. E' fornibile, per calibrare un LVDT con corsa lunga, un calibratore con un campo di funzionamento di 500 mm ed una risoluzione di 0,001 pollice con una precisione totale migliore dello 0,05% del fondo scala. Per calibrazioni più accurate di laboratorio e metrologiche, viene utilizzato un micrometro digitale (encoder ottico), Fig. 9.12. È un sistema molto costoso per le applicazioni ordinarie, ma ha una risoluzione di circa 0,000010 pollici ed una precisione certificata di 0,000015 pollici.

Blocchetti di misura

L'uso di un calibratore micrometrico è ristretto alle applicazioni dove la testa di misura o il trasduttore di spostamento è accessibile e non installato nell'apparecchiatura di prova. Dove il trasduttore LVDT deve essere calibrato sul posto, sono necessari i blocchetti di misura ed una parte terminale del pezzo in movimento deve essere accessibile per poter interporre i blocchetti. Se la precisione di calibrazione richiesta non è rigorosa, possono essere usati degli spessimetri per testare piccole corse, oppure controllati con un calibro, per spostamenti più grandi. Quando è necessaria una precisione più elevata, sono raccomandati i blocchetti di misura tipo Johansson. Questi sono disponibili con tolleranze dimensionali da $\pm 0,000008$ a $\pm 0,000002$ pollici. La massima precisione di calibrazione è ottenuta se i blocchetti Johansson sono propriamente serrati insieme. La speciale tecnica per la pulizia dei blocchetti di misura è adeguatamente descritta nella letteratura su questi dispositivi. Fig.9.12

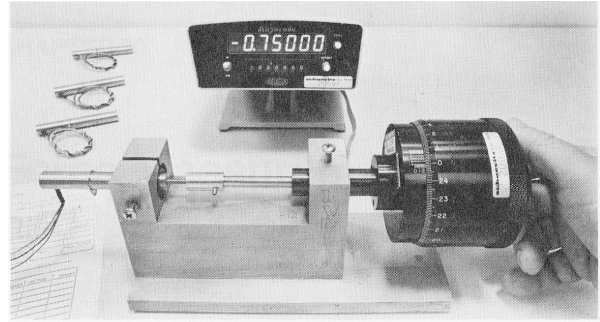


Fig. 9.12 Micrometro digitale per la calibrazione di estrema precisione della testa di misura.

Calibrazione degli RVDT

Parecchi metodi per la determinazione dell'angolo possono essere usati per calibrare un RVDT. Uno dei metodi usati più comunemente è quello di accoppiare l'albero dell' RVDT all'albero di uscita di un preciso sistema con pignone e cremagliera che porta un disco indicante il numero di giri sul suo albero d'ingresso. Lo spostamento angolare dell'albero d'uscita può essere calcolato dal rapporto tra il comando e il numero di giri dell'albero d'uscita. Allora ogni giro di un albero d'ingresso con un rapporto di 100:1, per esempio, muove l'albero di uscita di $3,60^\circ$. Un metodo più diretto di misurazione dello spostamento angolare dell'albero dell' RVDT è connettere un disco divisore all'albero d'ingresso. Il disco divisore potrebbe essere uno del tipo a piastra forata che tipicamente equipaggiano le attrezzature d'officina, ma un disco divisore ottico (come una tavola rotante illustrata in Fig. 12-11) è molto più conveniente da usare. Il disco divisore con fori ha una risoluzione limitata in virtù della sua costruzione, mentre il tipo ottico non lo è. Un altro metodo, è l'uso di un inclinometro ad alte prestazioni (servo inclinometro), accoppiato all'albero di un RVDT montato orizzontalmente, con il suo asse perpendicolare all'albero dell' RVDT. Il rapporto di uscita dell' inclinometro ad un dato angolo dell'albero rispetto alla sua uscita, la vera verticale eguaglia il coseno dell'angolo dell'albero. L'angolo può allora essere determinato consultando le comuni tabelle trigonometriche.

Dott. Edward E. Herceg
Handbook of Measurement and Control