

Accuratezza degli encoder angolari

Non esiste quasi macchina senza un encoder...

Gran parte dei sistemi di automazione si affidano a movimenti rotativi di precisione: macchine di stampa dal computer alla lastra (CTP, computer-to-plate), assi A, B & C di macchine utensili, macchine per montaggio di componenti SMD, attrezzature per la misura di forma, manipolazione e ispezione di wafer di silicio, goniometri, sono tutti strumenti che utilizzano una qualche forma di encoder angolare*.



Applicazione con motore rotativo a presa diretta

Applicazioni diverse richiedono combinazioni diverse di prestazioni e caratteristiche per ottimizzare le funzioni specifiche: in alcuni casi si richiede accuratezza, in altri ripetibilità, elevata risoluzione o basso errore ciclico per il controllo ad anello chiuso della velocità. In linea generale, si opta per l'encoder che garantisce l'equilibrio ottimale tra specifiche e funzioni, e la scelta va compiuta su un numero sorprendente di opzioni. In linea altrettanto generale, sono poche, le soluzioni in grado di soddisfare tutti i requisiti.

*Gli encoder angolari hanno generalmente un conteggio lineare pari ad almeno 10.000, con una accuratezza superiore a ± 5 secondi d'arco. In termini rigorosi, gli encoder che rientrano in questi criteri vengono designati con l'espressione "encoder rotativo", ma questa denominazione viene spesso estesa genericamente a tutti gli encoder "rotondi".

Il controllo del movimento di precisione non può dipendere unicamente dall'accuratezza, in quanto la risposta dinamica del sistema va tenuta ugualmente in conto. La misura accurata della posizione è importante, ma senza la capacità di effettuare un posizionamento accurato, il sistema è inutile. I motori rotativi a trazione diretta (o motori 'torque') sviluppano una coppia elevata e rendono possibile un servocontrollo di precisione anche su angoli estremamente ridotti. La loro risposta dinamica è eccellente, in quanto il carico viene accoppiato direttamente al motore, evitando alla necessità di elementi di trasmissione, causa di giochi, isteresi, errori nei denti degli ingranaggi e allentamento delle cinghie. La forma dei motori di coppia 'frameless', con l'ampio diametro interno, non presenta una possibilità semplice di accoppiamento per l'inserimento di un encoder ad albero; in questo caso un'encoder ad anello rappresenta una soluzione pratica. Inoltre, proprio come il carico, anche l'encoder ad anello è accoppiato rigidamente alla fonte di moto, eliminando ogni gioco indesiderato dal sistema. In qualsiasi sistema di controllo o di misurazione, è auspicabile che l'encoder sia il più vicino possibile alla fonte del moto, poiché ciò contribuisce a minimizzare il rischio di risonanze a carico delle prestazioni del servo, specie con l'aumento delle larghezze di banda di quest'ultimo.



Motore diretto, Shinko electric

Qualunque sia l'applicazione, il segreto risiede nell'affidabilità del feedback di posizione diretta...

La soluzione più naturale per fornire feedback di precisione è data da un encoder rotativo.

Come per la selezione del motore, la scelta del corretto encoder rotativo dipende da una valutazione realistica dei requisiti, dalla conoscenza dei fattori che condizionano l'accuratezza dell'encoder e da una buona comprensione degli accorgimenti atti ad avviare alle perdite di prestazioni. In questo articolo vengono descritti i fattori di base che influenzano le prestazioni degli encoder rotativi, per aiutare i progettisti a scegliere il "giusto" sistema di encoder.

Quando si sceglie un encoder rotativo o angolare, è poco consigliabile optare per la massima accuratezza e risoluzione senza tenere conto di frequenza, dimensioni del sistema, complessità e costo. Esistono encoder lineari con specifiche di accuratezza e risoluzione nell'ordine delle decine di nanometri. Analogamente, gli encoder angolari possono garantire prestazioni di frazioni di secondo d'arco* (* un secondo d'arco rappresenta 1 micron al raggio di 206,25 mm)

Nel determinare l'accuratezza effettivamente necessaria, è bene considerare separatamente precisione, risoluzione e ripetibilità:

- 1. Per applicazioni che esigono ripetibilità (ad esempio, una macchina pick and place), la tracciabilità dell'angolo di ogni postazione a un campione primario è secondaria rispetto alla capacità del sistema di arrestarsi di volta in volta nello stesso punto.
- 1. Per la continuità e la regolarità del movimento, la risoluzione e la precisione selezionate devono essere tali da non permettere nessuna oscillazione (jitter) all'interno della larghezza di banda del servocontrollo.
- 1. Per un dispositivo con movimento a velocità ridotta, come potrebbe essere un telescopio astronomico, la precisione della misura angolare è più importante della massima frequenza dati del sistema.
- 1. Per una videocamera installata su un elicottero, che richiede un accurato posizionamento manuale, la risoluzione è più importante della ripetibilità o della precisione assoluta, sebbene quest'ultima diventi più importante se lo stesso sensore fornisce dati sull'obiettivo per un sistema d'arma.
- 1. Nei sistemi ad alta velocità, potrebbero rendersi necessari compromessi tra velocità e accuratezza di posizionamento; i sistemi con passi più ampi (numero di linee inferiore) sono adatti a frequenze elevate, ma i sistemi con un passo più fine (numero di linee superiore) generano solitamente minori errori di interpolazione.

Una volta chiarito il quadro dei requisiti di accuratezza, la scelta dell'encoder appropriato diventa molto più semplice. Nonostante le dichiarazioni di alcuni costruttori, l'accuratezza nella misura rotativa è raramente ottenibile in maniera "plug & play": il fattore decisivo per ottimizzare le prestazioni sta nella comprensione del budget di errore.

La costruzione del budget di errore

Nella figura 1, il componente di interesse di cui occorre misurare/controllare il movimento angolare ruota attorno a un asse montato su due cuscinetti. Un encoder angolare con cuscinetto integrato è accoppiato a quest'albero mediante un lettore montato sulla struttura non rotante. Affinché l'uscita del sistema encoder possa riflettere l'effettivo movimento rotativo del componente, devono verificarsi le seguenti condizioni:

1. Ciascuna parte del sistema deve ruotare nei propri cuscinetti senza eccentricità radiale (ossia movimento laterale) del proprio asse di rotazione.
2. L'albero che collega il componente di interesse all'encoder deve essere avere sufficiente rigidezza torsionale.
3. L'accoppiamento deve essere progettato in modo tale che il movimento angolare dell'encoder che ruota nel proprio cuscinetto sia identico a quello del componente di interesse che ruota nel proprio sistema di cuscinetti; in altri termini, occorre un giunto omocinetico preciso.
4. La spaziatura delle linee lungo la traccia dell'encoder deve essere uniforme e il lettore deve interpolare tra una linea e la successiva in modo lineare.
5. La traccia dell'encoder deve essere uniformemente circolare rispetto agli assi di rotazione che attraversano perpendicolarmente il suo centro.
6. Il lettore deve rilevare i valori della riga senza parallasse o altri errori geometrici ed essere montato in modo rigido sul telaio di riferimento non rotante.

Se solo una delle suddette condizioni non viene soddisfatta, si verificano discrepanze tra la posizione angolare del componente di interesse e quella segnalata dal sistema encoder. Esaminando ciascuna di queste potenziali fonti di errore, è possibile stabilirne il contributo individuale e, di conseguenza, il margine di errore totale per l'intero sistema.

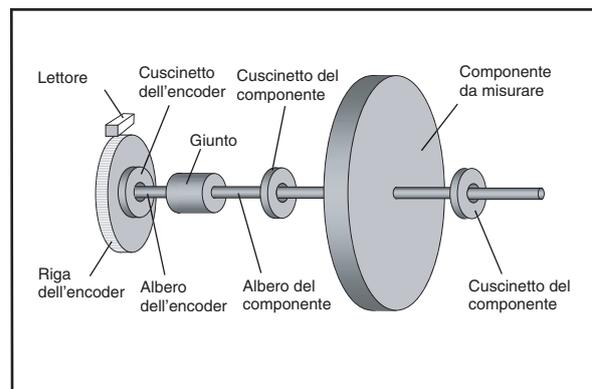


Figura 1. Sistema generico.

Non essendo prevista una discussione dettagliata di queste fonti di errore nel presente articolo, ci limiteremo a indicarne un breve riassunto.

Incertezza di posizionamento dei cuscinetti

Con questa espressione si indica una serie di proprietà del sistema che determinano uno spostamento radiale (o traslazione laterale) dell'asse di rotazione del componente e/o dell'encoder, la maggior parte delle quali sono ascrivibili a deficienze nel sistema di cuscinetti, quali il gioco e le armoniche più elevate (es., imperfezioni a livello di sfere, rulli o piste), ma, come ipotizzabile, non l'eccentricità.

Errori di accoppiamento

La figura 1 mostra un sistema dotato di encoder angolare autonomo con i propri cuscinetti collegati al componente di interesse tramite un giunto. Questo può essere un vantaggio, poiché soltanto lo scostamento nel cuscinetto dell'encoder andrà a condizionare l'accuratezza della misura angolare. Tuttavia, questo "vantaggio" deve essere attentamente valutato, in quanto lo scostamento nei cuscinetti principali andrà ad influire sull'accuratezza del posizionamento se il sistema è stato progettato per restituire le coordinate polari di un punto sul componente di interesse anziché sulle coordinate angolari di un oggetto distante.

La struttura dell'accoppiamento stesso avrà un impatto significativo sull'accuratezza del sistema, con alcune deficienze originate da fattori quali il gioco dei componenti, la rigidità torsionale e l'errore angolare.

Effetto della torsione dell'albero

Come con l'accoppiamento, la mancanza di rigidità torsionale nel o negli alberi fra il componente di interesse e la riga dell'encoder angolare è causa di errori dinamici tali da ridurre le prestazioni del sistema. Per ridurre al minimo questo effetto, si consiglia l'utilizzo di un encoder senza contatto montato il più vicino possibile o direttamente sul componente da misurare (vedere figura 2).

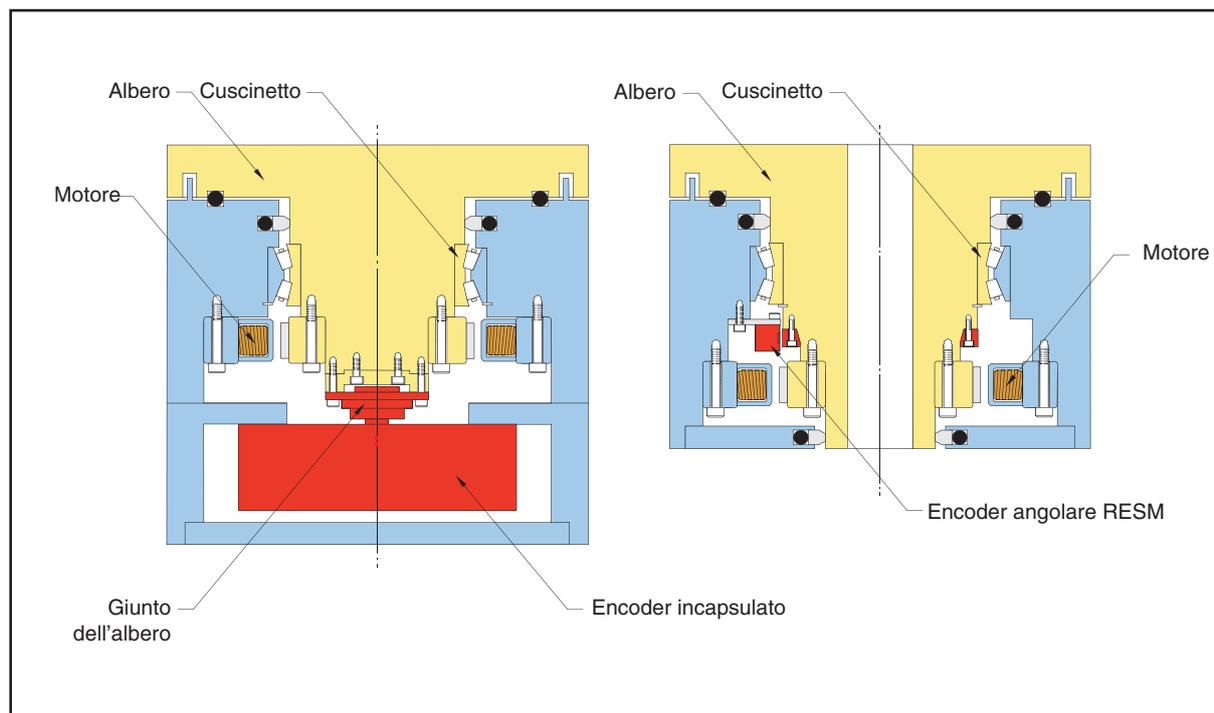


Figura 2. Encoder incapsulato ed encoder ad anello aperto.

Eccentricità e distorsione della riga

Pur essendo possibile realizzare una traccia accurata utilizzando una combinazione di raggi variabili e graduazione non uniforme, se è necessario ottenere una misura angolare accurata, è necessario posizionare la traccia con graduazione lineare uniforme ad una distanza costante dall'asse di rotazione. Le variazioni nel raggio, causate dall'eccentricità di una traccia rotativa perfettamente circolare, possono generare errori che variano una volta a giro. Questi vanno ad aggiungersi ad altri errori, che variano 2 o più volte a giro e che dipendono dalla distorsione della traccia.

Oscillazione assiale della traccia

Con oscillazione assiale si indica la condizione per cui la riga dell'encoder angolare viene montata concentricamente rispetto al componente di interesse, ma presenta l'asse geometrico inclinato rispetto all'asse di rotazione (vedere figura 3). In una visione laterale, ossia radiale, questo avrebbe l'effetto di trasmettere un movimento assiale sinusoidale una volta a giro alla periferia della riga dell'encoder angolare.

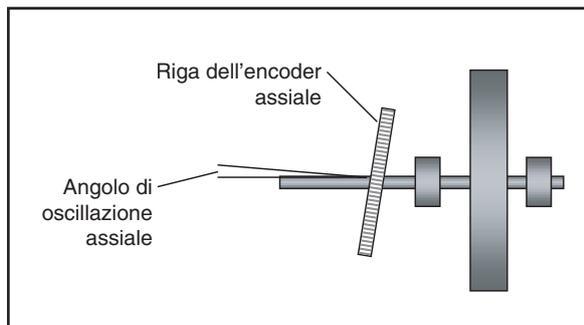


Figura 3. 'Oscillazione'

Errori derivanti dal lettore

Finora si è discusso della traccia dell'encoder e suoi meccanismi di errore, ma la riga è solo una parte del sistema; anche il lettore, infatti, contribuisce al margine di errore globale. Gli errori più significativi derivanti dal lettore sono i seguenti:

Errore di sottodivisione – Un encoder rotativo con 3600 graduazioni avrà una sola graduazione ogni $0,1^\circ$ o 360 secondi d'arco. Se la risoluzione prevista è più fine, il lettore dovrà effettuare interpolazioni. Qualsiasi non linearità nell'interpolazione darà luogo a un errore ciclico, anche noto come errore di sottodivisione (SDE).

Parallasse – Nel caso in cui la distanza tra la riga e il lettore dovesse variare (per effetto, ad esempio, dell'eccentricità dell'anello, del cambiamento di temperatura, ecc.), se il lettore non è correttamente allineato rispetto all'asse centrale rotativo della riga, darà luogo ad errori. Se il lettore è inclinato, ogni variazione di altezza determinerà errori proporzionali al seno dell'angolo di inclinazione.

Stabilità del supporto - Potrebbe apparire ovvio, ma il montaggio rigido e fisso del lettore e dell'attuatore di zero è di fondamentale importanza per una misura angolare accurata e ripetibile. Il sistema dovrà essere progettato in modo tale che il lettore non possa spostarsi rispetto all'asse di rotazione della riga al variare dell'assetto, del carico, della temperatura, della vibrazione, ecc.

Accuratezza della graduazione della riga

Quando un encoder angolare viene fabbricato segnando le graduazioni direttamente sul substrato, il costruttore deve fissare la riga appena formata ad un mandrino, che provvederà quindi a ruotare per posizionare ciascuna graduazione. Al termine del processo di graduazione, ma prima della sua rimozione dal mandrino, l'accuratezza misurata della riga (discrepanza tra la posizione effettiva e la posizione prevista delle graduazioni) prende il nome di "**errore di graduazione**". Qualora tale misurazione debba essere ripetuta, utilizzando questa volta un lettore allineato correttamente, l'errore includerebbe, oltre all'errore di graduazione, anche le componenti dovute al lettore (significativamente SDE); si tratta in questo caso di un "**errore di sistema**".

Se a questo punto l'encoder angolare venisse rimosso e rimontato sullo stesso o su un altro mandrino e la sua accuratezza venisse verificata con un lettore, l'errore registrato risulterebbe per l'ennesima volta diverso. La differenza corrisponderebbe all'errore causato dalla variazione di eccentricità e dalla mancata rotondità di ordine superiore della riga dell'encoder tra la sua installazione iniziale per la graduazione e la nuova installazione. L'errore globale misurato in questo caso viene denominato "**errore installato**" ed è la definizione di errore che rispecchia più da vicino le prestazioni ottenute dall'utente sul campo.

Quindi, per riassumere:

Errore di graduazione = Errore di spaziatura delle graduazioni durante la fabbricazione

Errore del sistema = Errore di graduazione + errore di sottodivisione

Errore installato = Errore di sistema + Effetti delle differenze di installazione

Tecniche di compensazione degli errori

Una volta stabiliti gli effetti di tutte le fonti di errore nello studio preliminare, è possibile effettuare un confronto tra l'accuratezza richiesta per ottenere le specifiche del dispositivo e le prestazioni che è possibile attendersi dal sistema encoder rotativo non compensato. Nel caso in cui il primo valore superi il secondo, occorre operare una scelta tra un diverso sistema di encoder, con specifiche più elevate (sempre che sia possibile trovarne uno che rispetti i limiti di spazio, i termini di consegna e il budget) oppure l'applicazione delle tecniche di compensazione dell'errore per ovviare alle deficienze. Le due più potenti tecniche di compensazione sono l'utilizzo di lettori multipli e la mappatura degli errori.

Lettori multipli: Installando due lettori diametralmente opposti si annullano gli effetti dell'eccentricità e delle armoniche dispari dell'errore sistematico. Vengono inoltre rimossi gli effetti dell'incertezza di posizionamento dei cuscinetti dalla misura angolare; tuttavia, per ottenere un posizionamento polare accurato, privo degli effetti dell'incertezza di posizionamento dei cuscinetti, è necessario utilizzare un cuscinetto di alta specifica o quattro lettori. Aumentando il numero di lettori impiegati si riduce ulteriormente l'errore sistematico, ma si considera generalmente che i vantaggi dell'impiego di più di 4 lettori non valgano la complessità e il costo della procedura. L'aspetto positivo di questa tecnica è che non richiede l'esecuzione di sofisticate calibrazioni; un grande vantaggio, in termini di tempo e di progettazione di sistemi di prova.

Mappatura degli errori: La mappatura degli errori può essere utilizzata in alternativa o in combinazione con i lettori multipli per ridurre gli errori sistematici, sempre che il sistema di controllo prescelto ne offra la possibilità. Perché questa tecnica risulti efficace, il sistema di encoder deve essere calibrato mediante un interferometro o un altro strumento tracciabile al termine dell'assemblaggio finale del dispositivo. Il costruttore del sistema non potrà affidarsi ad alcun certificato di calibrazione fornito dal produttore dell'encoder, poiché gli eventuali errori introdotti in fase di installazione verrebbero ignorati, rendendo inutilizzabile la mappa degli errori. È opportuno ottimizzare il numero di punti nella mappa degli errori. Per un errore ciclico a variazione sinusoidale, con sette punti per ciclo si elimina approssimativamente il 90% dell'errore a quella frequenza. Una mappa degli errori a cento punti riuscirà pertanto a compensare la maggior parte degli errori nelle prime 14 armoniche; va detto tuttavia, che si rischia così di incrementare gli errori causati dalle armoniche più alte residue. È inutile precisare che questa tecnica non ha alcun impatto sugli effetti dello scostamento dei cuscinetti, della torsione dell'albero e di altre fonti di errore che dipendono da variabili temporali.

Riepilogo

Nel presente articolo sono stati brevemente esaminati alcuni compromessi necessari per determinare una specifica realistica di un encoder angolare. Sono stati inoltre descritti alcuni dei principali fattori in grado di limitare l'accuratezza prevista, ed esposte in dettaglio diverse tecniche disponibili per migliorare le prestazioni metrologiche. Per ulteriori informazioni su questo argomento, consultare la norma ISO 230-7 DIS Assi di rotazione.

Per ulteriori informazioni sul prodotto, visitare il sito Web www.renishaw.it

Note sull'autore

Il Dott. Alex Ellin, ha conseguito una laurea in Ingegneria navale e un master in Aerodinamica interazionale degli elicotteri. In qualità di Principal Mechanical Engineer, Alex è responsabile dello sviluppo dei processi di fabbricazione delle righe, inclusi gli encoder angolari RESM e RESR.