

# Soluzioni di retroazione



I progettisti di macchine hanno a disposizione un'ampia gamma di dispositivi per regolare con precisione i servomotori e le soluzioni di motion control per le applicazioni più semplici così come per quelle più complesse ed esigenti.

Ciascuno offre vantaggi e svantaggi specifici, sia elettrici sia meccanici, che rendono un dispositivo più adatto per un'applicazione piuttosto che un'altra.

Si presuppone che i sistemi di motion control alimentati con servomotore siano rapidi e precisi e, quando le specifiche sono corrette, lo sono. Tuttavia, vi sono svariati fattori che possono ridurre le prestazioni.

Fondamentalmente, il sistema può mostrare un livello di accuratezza non superiore a quello del dispositivo di retroazione che lo controlla. Inoltre, gli errori di velocità o posizione possono essere introdotti nel sistema dai meccanismi con precisione inferiore che trasferiscono la potenza del motore al carico. Fattori ambientali, come disturbi elettrici o temperatura, possono in-

noltre determinare errori di posizionamento. Talvolta gli errori sono accettabili. Più di frequente non lo sono. Nonostante tutto, i servomotori possono risultare eccessivamente costosi e la speranza è che diventino i più affidabili e precisi di tutti i dispositivi di posizionamento. In caso di servoapplicazioni dalle prestazioni elevate, i dispositivi di retroazione rientrano in diverse categorie.

Ciascuno offre vantaggi e svantaggi specifici, sia elettrici sia meccanici, che rendono un dispositivo più adatto per un'applicazione piuttosto che un'altra.

## La commutazione nei motori brushless

La commutazione è il controllo della corrente per la produzione della coppia. Nei motori a magnete permanente, si produce la coppia quando il campo magnetico emesso dall'avvolgimento interagisce con il campo prodotto dal magnete. Quando la corrente è incanalata verso gli avvolgimenti corretti, si produce la coppia migliore. Quando il motore è in movimento, la posizione degli avvolgimenti relativi al magnete varia. Ciò significa che il percorso ottimale per incanalare la corrente varia in base alla posizione del motore.

Nel motore a spazzole, ciò si verifica automaticamente mediante spazzole e commutatore collegati agli avvolgimenti del rotore. Nel motore brushless, la posizione del rotore invia una retroazione all'azionamento che quindi invia elettricamente la corrente agli avvolgimenti opportuni tramite transistor.

## Collocazione del dispositivo di retroazione

La collocazione ideale di un dispositivo di retroazione è al carico, dove occorre la movimentazione controllata. Questa disposizione elimina errori determinati da trasmissioni poco precise che possono togliere il movimento del motore al carico. Talvolta questo significa collegare un dispositivo di retroazione al sistema, in aggiunta al dispositivo normalmente montato all'interno del motore. I motori brushless richiedono che la retroazione della posizione sia incorporata nel motore per fornire dati immediati sulla posizione del rotore per la commutazione elettrica. Quando si utilizza un dispositivo di retroazione montato su motore è importante determinare l'errore complessivo associato al dispositivo di trasmissione e di retroazione per stabilire se l'errore totale sia accettabile. Un'eccezione alla necessità di collegare un dispositivo di retroazione al carico, quando occorre un'accuratezza elevata, consiste nell'utilizzo di un motore ad azionamento diretto.

Tali dispositivi sono progettati per azionare il carico senza richiedere alcun meccanismo intermedio. Sono disponibili motori lineari e rotativi dotati di retroazione ad alta risoluzione. I motori ad azionamento diretto, inoltre, semplificano le operazioni di manutenzione ed eliminano la cedevolezza, ovvero la perdita di movimento, che può ridurre la sensibilità e la larghezza di banda del sistema.

## Posizione assoluta o incrementale

I sensori di retroazione indicano la posizione assoluta, relativa o incrementale. Il sensore di posizione assoluta è in grado di segnalare la propria posizione all'interno di un ciclo elettrico quando il sistema è in funzione. Invece il sensore di posizione incrementale normalmente segnala gli impulsi di uscita per ogni incremento del movimento, ma senza alcun riferimento alla posizione specifica all'interno dell'intervallo di movimento del dispositivo. Questi dati, unitamente agli impulsi dell'indicatore periodico, a un interruttore interno alla macchina e a un contatore, consentono di conoscere la posizione del carico. Tuttavia, se i circuiti elettronici di retroazione perdono potenza, il sistema perde la traccia della posizione. Per alcune applicazioni critiche, il controller può collegarsi a un gruppo di continuità di riserva per evitare tali problemi. Il secondo elemento da considerare è il tipo di tecnologia utilizzata nel dispositivo. Alcuni sensori sono estremamente robusti e sono destinati al settore industriale e di controllo delle macchine. Altri sono relativamente delicati e sono destinati alle apparecchiature di laboratorio di precisione. Naturalmente, vi sono applicazioni in cui le esigenze si sovrappongono, come, per esempio, nella produzione di semiconduttori, dove le condizioni richiedono un'accuratezza elevata in un ambiente particolarmente pulito, con un flusso ad alta velocità, per soddisfare programmi di produzione elevata. Il terzo elemento riguarda la geometria. I sistemi di automazione sono lineari, rotativi o una combinazione di questi due elementi. I sensori di retroazione sono progettati in modo specifico per ciascuna esigenza. Possono avere caratteristiche di montaggio e di direzione della movimentazione differenti, ma il principio fondamentale del funzionamento dei dispositivi di retroazione è valido normalmente per entrambe le configurazioni. Per i sistemi lineari, come quelli

per il posizionamento sugli assi X-Y-Z, i dati sulla posizione indicano contemporaneamente anche la posizione esatta su tutti gli assi, un fattore che può essere fondamentale in alcune applicazioni. In una situazione di arresto di emergenza, per esempio, la capacità di riavviare i componenti mobili dal punto di arresto può prevenire il blocco della macchina e ridurre gli sprechi.

Nei sistemi rotativi, le informazioni sulla velocità possono essere ricavate dai dati sulla posizione calcolando la derivata rispetto al tempo, rendendo tali dispositivi una soluzione di acquisto 'unificata' per alcuni servosistemi.

Tuttavia, per applicazioni che necessitano di informazioni precise sulla velocità, spesso si preferisce utilizzare un dispositivo di retroazione pro-

## Sensori a effetto Hall

Quando una macchina non richiede un controllo preciso della velocità o una risoluzione elevata da parte del sistema di movimentazione, i sensori di retroazione di basso costo, come i dispositivi a effetto Hall, sono la soluzione più adatta. Tali sensori di attivazione/disattivazione digitali rilevano la presenza di campi magnetici, misurando la forza di un campo elettromagnetico o magnetico permanente. A ogni passaggio su un campo magnetico generano un impulso. I dispositivi a effetto Hall sono disponibili come modelli indipendenti montati all'interno dell'alloggiamento dei servomotori. Nei motori brushless questi sensori talvolta sono inseriti negli avvolgimenti dello statore e attivati dai magneti del rotore. I dispositivi rilevano la po-



gettato per questo scopo specifico, come, per esempio, un tachimetro analogico di precisione.

## Panorama completo

I dispositivi di retroazione giocano spesso un ruolo cruciale nei sistemi di controllo a circuito chiuso. Se non molto tempo fa la scelta del dispositivo più adatto era un'impresa ardua, oggi la selezione è diventata estremamente più semplice. Molti produttori di sistemi di controllo della movimentazione attualmente offrono sistemi di motion control completi, in cui motore, dispositivo di retroazione e azionamento si combinano in un modello ottimizzato. Tali modelli attualmente gestiscono più del 90% delle applicazioni di movimentazione. Il vantaggio per i tecnici consiste nel

sizione dell'albero, che può anche essere convertita tramite algoritmi in dati di velocità o accelerazione. Nelle applicazioni dei servomotori, la funzione utilizzata con maggiore frequenza è la commutazione a sei fasi, un tipo di commutazione elettronica che richiede componenti elettronici di attivazione relativamente semplici. Tale funzione potrebbe non essere adatta ad alcune servoapplicazioni perché può risultare meno efficiente nella produzione della coppia e generare una variazione elevata della coppia. In questo caso, la variazione della coppia deriva dalla transizione di corrente improvvisa che determina fluttuazioni della coppia, che a loro volta producono variazioni di velocità minime ma rilevabili. In alcuni casi la variazione della coppia può compromettere seriamente le prestazioni complessive del sistema di azionamento.

Con azionamenti sinusoidali della corrente, i sensori Hall possono essere utilizzati con retroazione di encoder incrementali per offrire un'indicazione massima della posizione di accensione. Nei servoazionamenti, i sensori Hall funzionano come sensori di corrente per la chiusura del circuito della corrente. In altre applicazioni industriali, rilevano la posizione di alberi motore, camme o altri dispositivi meccanici.



## Resolver

I resolver, unitamente agli encoder, gestiscono più del 80% dei task di controllo del movimento a circuito chiuso. Un resolver è un trasformatore rotativo con un primario e due secondari. Il primario è alimentato con tensione CA. I secondari associano la tensione di ingresso in base alla posizione dell'albero. I segnali sinusoidali risultanti, seno e coseno,

sono convertiti in segnali digitali nel controller di azionamento mediante resolver a convertitore digitale (RDC) o mediante software di interpolazione nell'azionamento. Il resolver a due poli (a velocità singola) offre un segnale della posizione assoluta in un giro del motore.

Poiché i resolver sono fondamentalmente dispositivi analogici, assicurano segnali relativamente puliti. Il loro intervallo a tensione elevata li rende anche meno sensibili ai disturbi. La risoluzione in uscita convertita, di norma, è programmabile nell'azionamento e può raggiungere i 16 bit. Tuttavia, potrebbe essere limitata dalla velocità del motore a causa della riduzione della frequenza massima. I resolver possono essere a velocità singola o a più velocità, facendo riferimento al numero di cicli elettrici per giro meccanico. I conteggi per giro aumentano in base alla velocità del resolver. I resolver presentano molte caratteristiche positive: sono disposi-



tivi robusti altamente resistenti ai disturbi EMI e sopportano calore, vibrazioni e urti. Tuttavia, necessitano di un numero maggiore di componenti elettronici per la conversione dei segnali rispetto ai sistemi con encoder. Inoltre, i resolver in genere sono meno precisi degli encoder ottici, anche se alcune versioni, ossia le cosiddette unità di avvolgimento a denti, sono state migliorate. Le tecniche di produzione di tali unità riducono al minimo la variazione parte-contro parte, che aumenta l'accuratezza in uscita di circa il 50%. I resolver sono normalmente impostati a 155 °C, con modelli particolari in grado di sopportare 230 °C o le radiazioni. I modelli brushless senza carter sono utilizzati normalmente nei servomotori perché richiedono meno operazioni di manutenzione e un foro passante grande che può alloggiare modifiche al motore, come per esempio alberi cavi e prolunghe supplementari dell'albero opzionali.

non dover collegare o montare il dispositivo di retroazione separatamente sul servosistema, in cui i collegamenti possono essere costituiti da 9 a 13 fili o soltanto da 4. Inoltre, alcuni produttori realizzano dispositivi di retroazione 'intelligenti' dotati di azionamento provvisto di una sigla che indica i dettagli di motore e retroazione. Questi dispositivi impostano e regolano automaticamente il dispositivo di retroazione del motore in base al sistema di azionamento selezionato. Che cosa occorre sapere per selezionare il dispo-

sitivo di retroazione migliore per l'applicazione? Innanzi tutto, le esigenze di risoluzione e di accuratezza del posizionamento. Inoltre, fattori ambientali, come, per esempio, la distanza tra motore e azionamento, disturbi elettrici o temperatura, possono essere determinanti per la scelta del dispositivo di retroazione ottimale. È disponibile un'ampia gamma di dispositivi che soddisfano quasi tutte le esigenze di retroazione, compresi sensori a effetto Hall, resolver, encoder per applicazioni generiche (di ampia scelta) ed en-

## Encoder

Gli encoder si distinguono in tre categorie fondamentali: rotativi o lineari, incrementali o assoluti e ottici, magnetici o di contatto in base al metodo di generazione dei segnali. Quando gli encoder ottici sono comparsi sul mercato per la prima volta, sono stati decantati per la capacità di offrire accuratezza elevata in applicazioni a velocità bassa ed elevata.

A un certo punto sono diventati inaffidabili, ma molti problemi sono dipesi unicamente dall'uso improprio che ne è stato fatto. Sono stati installati su apparecchiature destinate all'industria pesante in cui vibrazioni e temperatura compromettevano i componenti elettrici delicati e i dischi di codifica di vetro. Le versioni odierne sono molto più robuste con una migliore protezione dei componenti elettronici e degli elementi ottici. Nonostante ciò, molti produttori consigliano comunque di scegliere gli encoder ottici per applicazioni destinate all'industria leggera in cui siano sottoposti a temperature inferiori a 70 °C e a vibrazioni al di sotto di 20 g. Gli encoder possono essere dispositivi a contatto o senza contatto; tra questi i più comuni sono gli encoder ottici senza contatto. Questi dispositivi utilizzano un'unità di rilevamento della luce che legge il punto di attivazione/disattivazione quando la luce passa all'interno del meccanismo di chiusura/disco di codifica, che invia tali dati al sistema di azionamento.

Gli encoder lineari contengono una pista lineare e una testa di lettura e di solito sono utilizzati con sistemi che tracciano un movimento lineare, come i sistemi con motore



passo-passo, piani di posizionamento e posizioni X-Y. La pista lineare può essere lunga da pochi centimetri a diverse decine di centimetri. Presenta una scala graduata che viene letta dalla testa di lettura quando i componenti mobili si muovono. La testa di lettura rileva diversi canali per fornire i dati su posizione e direzione. Gli encoder con uscite sinusoidali utilizzano circuiti di interpolazione supplementari per migliorare elettronicamente la risoluzione.

Per apparecchiature che richiedono una risoluzione particolarmente elevata, gli encoder lineari rappresentano la scelta migliore tra i dispositivi di questa tipologia. Di norma, la risoluzione è di 0,1 micron, ma alcuni sistemi offrono una risoluzione fino a

20 nanometri. L'accuratezza, normalmente di 20 micron per metro, può diminuire linearmente sulla distanza di spostamento della pista. Tuttavia, può essere compensata con la correzione dell'errore di inclinazione per ridurre l'errore al di sotto di 5 micron per metro. Le macchine che funzionano a velocità elevate utilizzano encoder lineari per la retroazione perché tali sistemi normalmente funzionano a velocità superiori rispetto ad altri dispositivi di retroazione. Il primo fattore che potrebbe determinare la riduzione della velocità riguarda la possibilità che i circuiti elettronici di conteggio siano in grado di sopportare velocità elevate. Gli encoder ottici rotativi sono dotati di una sorgente di luce, di un disco di

coder per applicazioni specifiche. Fortunatamente, molti produttori di servomotori offrono svariate possibilità di retroazione per un determinato motore in grado di soddisfare un'ampia gamma di esigenze ambientali e di prestazioni. Tra i dispositivi di retroazione più semplici ed economici vi sono i sensori a effetto Hall. Si tratta di dispositivi di attivazione/disattivazione digitali che rilevano la presenza di campi magnetici. Realizzati in materiali semiconduttori, sono robusti, possono funzionare a frequenze estremamente elevate (il motore raggiunge decine di migliaia di giri al minuto) e sono normalmente u-

tilizzati per offrire commutazione a sei fasi dei motori brushless. Sono adatti per il controllo della velocità massima e della coppia e semplificano i componenti elettronici dell'azionamento, controllando direttamente i dispositivi per la potenza di fase del motore. I resolver sono trasformatori rotativi particolarmente adatti per condizioni più dure, in cui i fattori dominanti sono temperature estreme, vibrazioni e urti. Inoltre, possono sopportare velocità del motore superiori a 10.000 g/min. Si trovano in una fascia di prezzo medio-bassa e garantiscono valori intermedi di accuratezza e risoluzione adatti per la maggior

parte delle applicazioni industriali. Gli encoder incrementali presentano una molteplicità di configurazioni, dai modelli ottici senza contatto a quelli a contatto, nelle versioni lineare e rotativa e con variazioni di conteggio di più linee. Tali encoder garantiscono un'accuratezza eccellente e possono funzionare a migliaia di giri al minuto. Anche se gli encoder incrementali attualmente sono molto più robusti di quelli prodotti in precedenza, alcuni non sono adatti per condizioni estremamente dure, come le segherie. Gli encoder seno offrono prestazioni di livello estremamente elevato. Sebbene più costosi di resolver o enco-

codifica rotante e di un rivelatore di luce. Il disco presenta un certo numero di fessure o una scala graduata che lo suddividono in aree equidistanti tra loro di buio e di luce. Tali marcature sono spesso rappresentate sotto forma di righe, pertanto l'unità di misura è righe per giro (LPR, Lines per Revolution). Queste misurazioni indicano la risoluzione o la granulosità dell'encoder.

L'accuratezza degli encoder è definita in termini di più (+) o meno (-) righe o conteggi. È importante notare che accuratezza e risoluzione sono attributi diversi, anche se sono spesso in relazione. Con gli encoder, l'accuratezza aumenta normalmente insieme con la risoluzione, perché l'accuratezza è definita come +/- conteggi. All'aumento della risoluzione dei conteggi, aumenta l'accuratezza. Con i resolver, tuttavia, l'aumento della risoluzione mediante una maggiore interpolazione, per esempio, 16 bit e 12 bit, non determina l'aumento dell'accuratezza. È abbastanza comune che i sistemi resolver presentino un'accuratezza 100 volte inferiore della risoluzione. Poiché i componenti collegati ruotano, il rivelatore di luce registra il punto di attivazione/disattivazione della luce che passa nel disco. Il rivelatore converte questo punto di attivazione/disattivazione in un segnale elettronico digitale simile a onde quadre. Normalmente due righe di scanalature o marcature sono controbilanciate da metà della loro ampiezza e da un quarto di un ciclo completo (90 gradi elettrici), che genera due segnali elettrici detti canale A e canale B. Questa compensazione consente al controllo di determinare la direzione di rotazione dell'albero e una parte importante delle informazioni

per l'azionamento durante l'avvio, in modo particolare per i sistemi che utilizzano motori brushless a tre fasi.

Invece di utilizzare soltanto due canali, alcuni encoder usano canali supplementari per tracciare la posizione dell'albero o favorire l'immunità ai disturbi. Tali canali includono i cosiddetti canali di riferimento e ausiliari. Un altro metodo di tracciamento della posizione dell'albero consiste nell'aggiungere un canale di commutazione o un canale Hall equivalente. Rappresentano l'allineamento alla forza contro-elettromotrice (back EMF) della fase A, della fase B e della fase C del motore. A seconda del modo in cui l'encoder rileva i canali A e B, la risoluzione può aumentare di quattro volte. Tale valore aumenta quando il circuito di conteggio traccia i bordi dei fronti crescente e discendente di entrambi i segnali, ossia il rilevamento in quadratura. L'aumento della risoluzione migliora la ripetibilità del sistema. Una risoluzione elevata consente un maggiore incremento dei circuiti di posizione e velocità, assicurando una rigidità superiore del sistema. Le risoluzioni degli encoder da 50 a 5.000 righe per giro sono standard per la maggior parte dei produttori, ma sono disponibili anche conteggi fino a 100.000 righe. In tutte le applicazioni ad accuratezza elevata, l'accuratezza del sistema è influenzata da errori di altre fonti, come errore cumulativo delle viti di comando, espansione termica o gioco dei dadi. Gli encoder lineari possono superare tali variazioni. Gli encoder seno si trovano al vertice della scala dei dispositivi di retroazione in termini di costi, accuratezza e precisione. Sono analoghi agli encoder incrementali, a ec-

cezione del fatto che i canali di dati A e B vengono inviati al controller, normalmente sotto forma di onde seno picco a picco di un volt invece di onde quadre. Il vantaggio è che tali dispositivi possono interpolare ogni onda seno completa, aumentando la risoluzione del sistema e fornendo più informazioni al controller di velocità. Ciò riduce gli errori di troncamento e di quantizzazione, consentendo incrementi di circuito più elevati. Gli encoder seno possono raggiungere i 2 milioni di conteggi per giro o circa 0,62 arcoseno di risoluzione. Tale funzione si adatta ad applicazioni che richiedono inerzia elevata o carichi pesanti.

Come altri encoder, gli encoder seno possono anche essere dotati di track di commutazione, di emulazione Hall o di canali sinusoidali ausiliari definiti C e D, che forniscono la posizione assoluta in un giro. I canali C e D sono simili ai segnali seno e coseno utilizzati nei resolver. Una variante degli encoder seno è costituita dagli encoder seno assoluti a rotazione multipla. Sono dotati di ingranaggi tra albero e ruota di posizionamento in modo che il sistema rilevi la posizione dell'albero all'azionamento. Garantiscono precisione elevata, risoluzione e accuratezza per applicazioni di registrazione a velocità elevata, di rivestimento a pellicola e di controllo del braccio. Gli encoder seno, inoltre, si adattano a operazioni a bassa velocità in cui è fondamentale una rotazione uniforme. Aiutano i sistemi di automazione a ottenere incrementi elevati, una maggiore rigidità e un'accuratezza di posizionamento su piani rotativi, macchine di montaggio per il posizionamento e azionamenti a rulli.

der incrementali, sono la soluzione migliore per applicazioni che richiedono accuratezza e risoluzione elevate. Sono robusti quanto un resolver e possono funzionare a velocità superiori a 10.000 g/min.

## Riduzione dei disturbi

I dispositivi di retroazione possono generare segnali ottici o elettrici. Un vantaggio dell'utilizzo di linee di trasmissione ottica per i segnali di retroazione è che queste sono immuni ai disturbi elevati o alle condizioni EMI/RFI. Livelli elevati di disturbi interferiscono con i segnali puliti e

distorcono i dati inviati all'azionamento, compromettendo la capacità dell'azionamento di offrire un controllo di posizionamento, velocità e coppia di qualità elevata. Inviando elettricamente i segnali, può essere necessario l'utilizzo di amplificatori o di dispositivi di condizionamento dei segnali per modificare i segnali disturbati. I più recenti dispositivi di retroazione utilizzano chip IC per convertire e interpolare i segnali a forme dell'onda più robuste, che non siano influenzate dai disturbi e che non diminuiscano quando si propagano attraverso il cavo verso l'azionamento. Questi dispositivi offrono innanzi tutto dati

sulla posizione dell'albero motore. Tuttavia, possono anche fornire dati su accelerazione e velocità. La velocità si calcola dal sensore della posizione determinando la derivata prima dei dati di posizione. Trovare l'accelerazione significa differenziare i dati della velocità o determinare la derivata seconda dei dati di posizione.

*R. Armstrong, Marketing Tools Development Manager, Danaher Motion.*

[readerservice.it](http://readerservice.it) n. 63