Come funziona un motore lineare tubolare

Introduzione

Un motore lineare tubolare è un **attuatore a azionamento diretto**: produce movimento lineare senza trasmissione meccanica. Un servo motore convenzionale necessita di un riduttore, una vite a ricircolo di sfere o una cinghia per convertire la rotazione in traslazione. Un motore lineare tubolare invece genera la forza direttamente lungo l'asse di movimento. Il risultato è un sistema con **zero gioco meccanico**, elevata risposta dinamica e praticamente nessuna usura meccanica.

I motori lineari tubolari NILAB sono utilizzati in un'ampia gamma di applicazioni industriali: sistemi pick-and-place, macchine per pressatura e formatura, dosaggio, apparecchiature medicali, movimentazione di semiconduttori e come sostituzione diretta dei cilindri pneumatici.



Componenti principali

Un motore lineare tubolare è composto da due parti principali — uno statore fisso e un'asta magnetica mobile — più un encoder integrato.

Lo statore (gruppo bobine)

Lo statore è l'involucro esterno fisso. Contiene un insieme di avvolgimenti in rame disposti in tre fasi (U, V, W). Questi avvolgimenti sono distribuiti lungo l'asse secondo un pattern spaziale il cui passo polare corrisponde alla disposizione dei magneti dell'asta mobile. Lo statore è di fatto il gruppo di

avvolgimenti di un motore rotativo “srotolato” e avvolto attorno a un cilindro.

L'involucro dello statore è normalmente realizzato in lega di alluminio per un'efficace dissipazione del calore. Un **sensore PTC (Coefficiente di Temperatura Positivo)** è incorporato negli avvolgimenti e monitorato dal servoazionamento per prevenire il surriscaldamento.

Il forcer / traslator (asta magnetica)

La parte mobile è un'asta cilindrica che contiene una serie di magneti permanenti con polarità alternata lungo la sua lunghezza. Vengono tipicamente utilizzati magneti ad alta energia **NdFeB** (Neodimio-Ferro-Boro) per ottenere un'elevata densità di forza in un diametro compatto.

L'asta magnetica scorre assialmente all'interno del foro dello statore con un traferro molto piccolo. È l'**unico** elemento meccanico mobile — niente viti a ricircolo di sfere, niente cinghie, niente ingranaggi. I coperchi terminali e le guarnizioni dell'asta proteggono l'interno dalla contaminazione in ambienti industriali.

L'encoder integrato

Il feedback di posizione proviene da un encoder integrato direttamente nel corpo motore. Nei motori NILAB si tratta di un **encoder incrementale SIN/COS ad alta risoluzione** (segnale 1 Vpp), che offre risoluzione sub-micron quando combinato con un interpolatore del servoazionamento.

La scheda dell'encoder è fissata all'interno dello statore e rileva il campo magnetico dell'asta. Questa disposizione fornisce informazioni di posizione entro una corsa del motore, senza scale lineari esterne. Alcuni modelli (opzione BISS-C) supportano encoder seriali assoluti multi-giro, che consentono una lettura immediata della posizione dopo l'accensione senza ciclo di homing.

Il meccanismo anti-rotazione

Poiché lo statore produce una forza puramente assiale, l'asta magnetica è libera di ruotare a meno che non sia vincolata. Per applicazioni in cui l'asta non deve ruotare — ad esempio quando trasporta un carico guidato — i motori NILAB offrono un **accessorio anti-rotazione**: tipicamente una boccola a chiavetta o una guida lineare esterna che impedisce la rotazione consentendo al contempo la libera traslazione assiale.

Principio di funzionamento

Forza di Lorentz — dalla corrente al movimento lineare

Il principio di funzionamento è la **legge della forza di Lorentz**: un conduttore percorso da corrente in un campo magnetico subisce una forza perpendicolare sia alla direzione della corrente sia al vettore del campo magnetico.

In un motore tubolare, la corrente scorre circonferenzialmente attraverso ciascuna bobina, e i

magneti permanenti sull'asta creano un campo magnetico radiale. L'interazione produce una forza assiale (di spinta). Controllando ampiezza e direzione della corrente in ciascuna fase, il servoazionamento controlla sia l'ampiezza sia la direzione della forza lineare.

La forza di picco teorica F [N] per una singola bobina è:

F = B · I · L · N

dove **B** è la densità di flusso magnetico [T], **I** la corrente di fase [A], **L** la lunghezza effettiva del conduttore [m] e **N** il numero di spire per bobina. In un motore reale, la forza totale è la somma dei contributi di tutte le bobine attive che trasportano corrente simultaneamente.

Commutazione trifase

Come un servomotore rotativo brushless, un motore lineare tubolare utilizza **commutazione AC trifase** (controllo orientato di campo sinusoidale, o FOC). Il servoazionamento genera tre forme d'onda di corrente sinusoidali, sfasate di 120°, applicate alle tre fasi di avvolgimento U, V, W.

Man mano che l'asta magnetica si muove, l'encoder segnala continuamente la posizione all'azionamento. L'azionamento usa questa posizione per calcolare l'**angolo elettrico** istantaneo (angolo di commutazione), che determina quanta corrente fluisce in ciascuna fase in ogni istante. Questo mantiene il vettore di corrente dello statore a 90° rispetto al flusso del rotore — la condizione che massimizza la forza per ampere.

Il **passo polare del motore** (τ) definisce il periodo spaziale del ciclo di commutazione. Per un motore con passo polare τ = 60 mm, un periodo elettrico completo si verifica ogni 60 mm di traslazione lineare.

Caratteristica forza-velocità

La curva forza-velocità del motore lineare tubolare presenta due regioni:

Voce
Forza continua (F_cont): il livello di forza sostenibile indefinitamente, limitato dalla valutazione termica degli avvolgimenti.
Forza di picco (F_peak): tipicamente 2–4× F_cont, disponibile per brevi cicli di lavoro (burst di accelerazione), limitata dalla capacità di corrente dell'azionamento.

A velocità più elevate, la forza controelettromotrice (la tensione generata dai magneti in movimento) riduce la corrente disponibile per la generazione di forza, creando una regione caratteristica di roll-off della forza. La velocità a cui inizia il roll-off dipende dalla tensione di alimentazione e dalla costante di forza controelettromotrice (Ke) del motore.

La relazione tra velocità di picco, tensione di alimentazione e parametri del motore è:

V_max ≈ (V_dc − I·R) / Ke

Ecco perché la selezione della corretta tensione di bus è importante quando è richiesto un funzionamento ad alta velocità.

Feedback di posizione e controllo a loop chiuso

Il servoazionamento implementa una struttura di controllo a cascata:

Voce
Anello di corrente (più interno): regola le correnti trifase per seguire il comando di forza. Larghezza di banda: tipicamente 5–10 kHz.
Anello di velocità: regola la velocità dell'asta basandosi sulla velocità derivata dall'encoder. Larghezza di banda: tipicamente 100–500 Hz.
Anello di posizione (più esterno): regola la posizione assoluta dell'asta rispetto al setpoint target. Larghezza di banda: tipicamente 20–100 Hz.

I segnali dell'encoder SIN/COS sono interpolati dall'azionamento per raggiungere risoluzioni nell'intervallo di **0,1 µm fino a 1 µm**, a seconda del fattore di interpolazione. Questo rende i motori lineari tubolari adatti a compiti di posizionamento di precisione che sarebbero impossibili con attuatori pneumatici o elettrici a loop aperto.

Gestione termica

La principale fonte di calore in un motore lineare tubolare è il **riscaldamento Joule** (perdite $I^2 \cdot R$) negli avvolgimenti in rame. In funzionamento continuo, l'involucro dello statore deve dissipare questo calore verso l'ambiente o verso un circuito di raffreddamento.

I motori NILAB sono dimensionati per il funzionamento continuo fino a una temperatura di avvolgimento di **130°C** (classe di isolamento F). L'involucro in alluminio conduce il calore verso l'esterno, e il raffreddamento convettivo è normalmente sufficiente per cicli di lavoro moderati.

Per applicazioni ad alto ciclo di lavoro o alta forza, sono disponibili **raffreddamento ad aria forzata** (una ventola assiale che soffia sulle alette dello statore) o **raffreddamento a liquido** (una camicia d'acqua attorno allo statore). Il raffreddamento a liquido può aumentare la valutazione di forza continuativa di un fattore **2–3×** rispetto alla convezione naturale.

Il sensore PTC negli avvolgimenti fornisce un segnale diretto di temperatura dell'avvolgimento al servoazionamento, che può attivare un avviso o un guasto prima di raggiungere il limite termico.

Vantaggi rispetto agli attuatori tradizionali

Parametro	Motore lineare tubolare	Cilindro pneumatico	Attuatore a vite a ricircolo di sfere
Ripple di forza	Molto basso (< 1%)	Moderato	Basso
Precisione di posizionamento	±0,1 mm	Nessun controllo di posizione	±10 µm o meno
Velocità	Fino a 5 m/s	Fino a 2–3 m/s	Fino a 1 m/s
Gioco meccanico	Zero	Non applicabile	0,02–0,1 mm
Manutenzione	Nessuna (nessuna parte soggetta a usura)	Guarnizioni, filtri, lubrificazione	Lubrificazione, usura del dado
Efficienza energetica	Elevata	Bassa (15–20%)	Elevata

Profilo di forza programmabile	Sì (completo)	No	Indiretto (via limite di corrente)
Livello di rumore	Molto basso	Alto (scarico)	Moderato

Riepilogo

Un motore lineare tubolare è essenzialmente un **servomotore brushless trifase “srotolato” in linea retta**. I magneti permanenti su un'asta si muovono assialmente in uno statore avvolto, azionati dalle forze di Lorentz generate dal controllo di corrente orientato di campo. Un encoder integrato chiude il loop verso il servoazionamento, consentendo un controllo preciso di posizione, velocità e forza senza perdite di trasmissione meccanica. Il risultato è un'alternativa altamente dinamica, senza manutenzione ed energeticamente efficiente ai cilindri pneumatici e alle viti elettromeccaniche.

From:
https://www.nilab.at/dokuwiki/ - **NiLAB GmbH Knowledgebase**

Permanent link:
https://www.nilab.at/dokuwiki/doku.php?id=it:engineersguide:how_it_works

Last update: **2026/10/22 12:49**