

Antriebs- und Steuerungstechnik

Hydrostatik

Bei Schlittenantrieben punktet der hydrostatische Gewindetrieb

26.08.2008 | Autor: Robert Schönfeld und Jochen Schönfeld

Zum verschleißenden, wenig dämpfenden Kugelgewindetrieb gibt es eine Alternative: den Linearmotor und den hydrostatischen Gewindetrieb, der hochbelastbar und verschleißfrei ist. In Kombination mit einem Servomotor und Ölstromreglern, die zwischen Mutter und Spindel die Ölfilmdicke nahezu konstant halten, kann er bei Schlittenantrieben für spanende Werkzeugmaschinen punkten, insbesondere im Bereich der Präzisionsbearbeitung.



Die bekannten Schwächen von Kugelgewindetrieben haben einerseits zur Entwicklung von Synchron-Linearmotoren geführt. Andererseits wurden von der Hyprostatik Schönfeld GmbH, Göppingen, hochbelastbare und verschleißfreie hydrostatische Gewindetriebe am Markt eingeführt.

Beim hydrostatischen Gewindetrieb gleitet die Mutter (rechts) auf einem Ölfilm, der sich auf den Gewindeflanken befindet. Dadurch ist die Bewegung verschleißfrei, unabhängig von der Belastung und Geschwindigkeit. Bild: Hyprostatik

Während sich bei so manchem Anwender von Linearmotoren nach der ersten Euphorie bereits Ernüchterung, wenn nicht gar Enttäuschung breit machte, arbeiten hydrostatische Gewindetriebe teilweise seit mehr als zehn Jahren mit höchster Präzision und Zuverlässigkeit – auch im 3-Schicht-Betrieb.

Ölfilm im hydrostatischen Gewindetrieb vermeidet Verschleiß

Wie ein Kugelgewindetrieb verwandelt der hydrostatische Gewindetrieb die Drehbewegung eines Servomotors in eine Linearbewegung. Die Mutter des hydrostatischen Gewindetriebs schwebt auf einem hydrostatischen Ölfilm, der sich auf den Flanken des modifizierten Trapezgewindes der Gewindespindel befindet. Die Relativbewegung zwischen Mutter und Spindel ist absolut verschleißfrei.

Patentierete PM-Regler (Progressiv-Mengen-Regler) steuern die Ölzuführung in die Hydrostatiktaschen der Mutter. Dadurch bleibt die Ölfilmdicke weitgehend unabhängig von der Belastung und Geschwindigkeit nahezu konstant. Das Ergebnis ist eine hohe, im Vergleich zu Kugelgewindetrieben durchaus doppelte bis dreifache Steifigkeit der Mutter zur Spindel. Es wird eine absolute Spielfreiheit erreicht.

Die acht PM-Regler sind an der Mutter befestigt. Sie steuern die Ölzuführung ohne Hilfsenergie – aufgrund des Differenzdrucks zwischen Pumpen- und Taschendruck. Der Anwender führt also nur gereinigtes Öl mit dem vorgesehenen Druck zum Gewindetrieb.

Hydrostatischer Gewindetrieb vermeidet Sprung des Antriebsmoments

Die Reibung des hydrostatischen Gewindetriebs ist sehr gering und proportional der Drehzahl, so dass bei Umkehr der Bewegungsrichtung kein Sprung des Antriebsmoments auftritt. Dies sind Voraussetzungen, um höchste Positioniergenauigkeit und Bahntreue zu erreichen sowie kleinste Verfahwege und präzise, langsame Bewegungen zu ermöglichen.

Im Vergleich zu dynamischen Belastungen wirkt der hydrostatische Gewindetrieb wie ein Stoßdämpfer mit exzellenter Dämpfung. Er läuft geräuschlos, die von Kugelgewindetrieben her bekannten Vibrationen treten nicht auf.

Der hydrostatische Gewindetrieb wird mit Nenndurchmesser 40, 50, 63, 80, 100, 125 und 160 mm und aktuell bis 2 m Länge angeboten. In absehbarer Zeit werden Längen bis 5 m geliefert. Die zulässigen Belastungen reichen von 10 bis 300 kN, die Geschwindigkeit bis etwa 90 m/min.

Wie bei Kugelgewindetrieben werden die Spindelenden der hydrostatischen Gewindetriebe nach Kundenwunsch ausgeführt. Hydrostatische Gewindetriebe werden durch hydrostatische Fest- und Loslager und hydrostatische Führungen ergänzt.

Linearmotor verlässt das Funktionsprinzip des Gewindetriebs

Elektrische Energie lässt sich sehr effektiv mit relativ wenig Kraft und hoher Geschwindigkeit in mechanische Energie umwandeln. Üblicherweise werden deshalb für elektrische Vorschubantriebe relativ schnelllaufende Motoren mit Gewindetrieben zur Erzeugung langsamer Schlittengeschwindigkeiten und hoher Vorschubkräfte verwendet.

Somit wird die elektromotorische Kraft über einen sehr großen Hebel auf den Schlitten übertragen. Bei entsprechender Qualität der Übertragungsglieder lässt sich der Schlitten somit durch geringe Kräfte sehr feinfühlig bewegen.

Der Linearmotor verlässt dieses Prinzip. Zur direkten Erzeugung großer Kräfte müssen extrem starke Magnetfelder erzeugt werden. Das lässt sich nur durch hohe elektrische Ströme und/oder Spulen mit hoher Induktivität erreichen. Weil jede stromdurchflossene Spule eine „elektrische Masse“ darstellt, ist bei dynamischen Lastwechseln auch dann eine große elektrische Masse wechselweise zu beschleunigen, wenn der Schlitten nur in Position gehalten werden soll. Auch wenn zur Änderung des magnetischen Flusses außergewöhnlich hohe Spannungen eingesetzt werden, ist die Änderung der Motorkraft zeitbehaftet.

Dieses Problem besteht mit Gewindetrieb und Servomotor nur in vielfach geringerem Maße. Grund dafür ist, dass die zu steuernden elektrischen Ströme um Zehnerpotenzen kleiner sind als beim Linearmotor.

Steifheit ist deutlich höher als bei Linearmotoren

Die Steifheit des Linearmotors resultiert ausschließlich aus der Lageregelung des Antriebs im Zusammenwirken mit dem notwendigen Linearmaßstab. Ohne Lageregelkreis ist die Steifheit des Linearmotors gleich null, im Vergleich zur statischen Belastung dagegen unendlich hoch. Dies gilt jedoch auch für einen mittels Linearmaßstab gesteuertem Antrieb mit hydrostatischen Gewindetrieb.

Die „dynamische“ Steifheit von Linearmotoren ist aufgrund von Zeitverzögerungen durch Verlagerungsmessung, Reaktionszeit der Steuerung und Aufbau des Magnetfelds gering. Nach Angaben eines Linearmotorherstellers liegt sie bei 30 N/µm (Schlittengewicht 100 kg) bis 120 N/µm (Schlittengewicht 600 kg) – ohne Angabe der Frequenzen. Aufgrund der fehlenden Dämpfung in Bewegungsrichtung bei schwingender Schlittenbelastung ist die Gefahr von Resonanzschwingungen gegeben.

Hydrostatischer Gewindetrieb erlaubt deutlich längere Spindel

Die Steifheit eines Antriebs mit hydrostatischem Gewindetrieb der Nenngröße 50 liegt dagegen – inklusive der Federung der Gewindespindel – mit etwa 500 N/µm bei einseitig eingespannter Spindel deutlich höher. Dabei beträgt die wirksame Spindellänge 400 mm.

Zusammen mit der hohen Dämpfung und der höheren, aus dem Schwungmoment der Spindel resultierenden Gesamtmasse des hydrostatischen Gewindetriebs werden mit diesem Antrieb vielfach kleinere Schwingwege oder vielfach kleinere dynamische Positionsabweichungen erreicht als mit einem Linearmotor. Auch klingen Wegschwingungen mit dem hydrostatischen Gewindetrieb aufgrund der ausgezeichneten Dämpfung sehr schnell ab.

Maximale Beschleunigung ist mechanisch unbegrenzt

Beschleunigungsgrenze. Die maximale Beschleunigung wird von den Massen und den Vorschubkräften begrenzt. Die Lebensdauer des hydrostatischen Gewindetriebs ist unabhängig von der Beschleunigung. Der Servomotor muss zusätzlich sein Eigenträgheitsmoment und das des Gewindetriebs mitbeschleunigen.

Trotzdem können moderne Servomotoren 500 bis 1000 kg schwere Schlitten auf einem Weg von 500 bis 1000 mm mit 16 bis 34 m/s² beschleunigen. Bei optimierten Kurzhubschlitten sind noch deutlich höhere Beschleunigungswerte möglich. Begrenzt wird die Schlittengeschwindigkeit beim Linearmotor jedoch durch die sichere Beherrschung der kinetischen Energie bei Stromausfall, die Zerstörungsgefahr im Crash-Fall sowie die Unfallgefahr.

Hydrostatischer Gewindetrieb erlaubt deutlich höhere Vorschubkräfte



Die maximale kontinuierliche Vorschubkraft des größten Linearmotors ist mit etwa 8 kN für einen Großteil der Anwendungen im Werkzeugmaschinenbau nicht ausreichend. Mit dem hydrostatischen Gewindetrieb der Nenngröße 50 können bis zu 20 kN übertragen werden. Bei der Größe 125 sind es bis zu 300 kN.

Der hydrostatische Gewindetrieb ist hinsichtlich der möglichen Vorschubkräfte dem Linearmotor also weit überlegen. Hohe Belastungen bei sehr langsamer, extrem schneller oder oszillierender Bewegung beeinträchtigen die Funktion und Lebensdauer des hydrostatischen Gewindetriebs in keiner Weise (Bild 1).

Die maximale Schlittengeschwindigkeit des hydrostatischen Gewindetriebs mit 10 mm Gewindesteigung beträgt etwa 30 m/min. Bei 20 mm Steigung sind es bis zu 60 m/min, bei 30 mm bis zu 90 m/min. Bei rotierender Spindel ist die maximale Drehzahl aufgrund der kritischen Drehzahl begrenzt. Die maximale Schlittengeschwindigkeit mit dem Linearmotor wird bei Nennbelastung mit 60 bis 200 m/min angegeben.

Geschwindigkeit von 60 m/min ist meistens ausreichend

Bei den meisten Werkzeugmaschinen sind hohe Schlittengeschwindigkeiten und Beschleunigungen nicht während des Bearbeitungsprozesses erforderlich, sondern zur Reduktion der Nebenzeiten. Reduzierte Nebenzeiten aufgrund einer Beschleunigung über 10 m/s² sind bei durchschnittlichen Bearbeitungszeiten wenig sinnvoll. Höhere Beschleunigungen sollten nur dann vorgesehen werden, wenn sie für den Bearbeitungsprozess oder aufgrund extrem kurzer Bearbeitungszeiten notwendig sind.

Sinnvoll ist jedoch die Anhebung der Schlittengeschwindigkeit von 20 auf 40 m/min. Bei einer weiteren Anhebung der Schlittengeschwindigkeit von 40 auf 60 m/min sollte ein regelmäßiger Eilweg von etwa 400 mm „durchfahren“ werden, eine Erhöhung auf 80 m/min scheint dagegen nur bei regelmäßigen Eilwegen länger als 800 mm zweckmäßig zu sein.

Mit dem hydrostatischen Gewindetrieb sind 20 m/s² Beschleunigung und 90 m/min Geschwindigkeit erreichbar. Bei den meisten Werkzeugmaschinen ist es jedoch sinnvoll, mit etwas geringeren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bessere Bearbeitungsergebnisse, eine höhere Lebensdauer, einen geringeren Wärmeübergang und reduzierte Wartungs- und Stromkosten anzustreben.

Hydrostatische Gewindetriebe arbeiten energieeffizient



Bei den meisten Bearbeitungsprozessen auf Werkzeugmaschinen wird während der Hauptzeit eine niedrige Schlittengeschwindigkeit von etwa 0,1 bis 0,4 m/min und eine hohe Vorschubkraft benötigt. Die Kühlleistung des

Vergleichs-Linearmotors beträgt auch bei dieser niedrigen Vorschubgeschwindigkeit – Nennkraft 6600 N – laut dem Linearhersteller rund 5,4 kW. Zur Rückkühlung dieser Leistung ist zusätzlich für das Kälteaggregat eine Leistung von mindestens etwa 2,6 kW erforderlich. Insgesamt werden also rund 8 kW Leistung verbraucht, wobei nur eine Vorschubkraft von 6600 N erreicht wird (Bild 2a).

Ein typischer hydrostatischer Gewindetrieb für höhere Geschwindigkeiten benötigt einen

Druckpumpe und die Ölrückkühlung mit Luft/Öl-Wärmetauscher sind rund 0,45 kW Leistung, für den Servomotor bei 400 mm/min Vorschubgeschwindigkeit, 10 000 N Vorschubkraft und 50% Wirkungsgrad etwa 0,14 kW notwendig.

Es ergibt sich also ein Leistungsbedarf von zirka 0,6 kW oder trotz der wesentlich höheren Vorschubkraft eine im Vergleich zum Linearmotor eine auf 1/13 oder um 7,4 kW reduzierte Verlustleistung (Bild 2b). Bei drei Vorschubantrieben beläuft sich der Unterschied auf 22 kW

Wärmeentwicklung beim Linearmotor kann zu Ungenauigkeiten führen

Der Linearmotor muss unter dem Schlitten angeordnet werden. Die enorme Heizleistung des Linearmotors ist mit einer wassergekühlten Isolierung vom Schlitten zu isolieren, weil sonst der Wärmeeintrag zu inakzeptablen Ungenauigkeiten führt. Der Servomotor des Antriebes mit hydrostatischem Gewindetrieb wird dagegen außerhalb der Achse montiert. So ist der Wärmeübergang auf die Achse minimal. Damit genügt für die Motorkühlung in der Regel ein Fremdlüfter, nur in Sonderfällen ist eine Wasserkühlung erforderlich.

Der Energieeintrag in das Öl durch Pumpe und Reibung der Hydrostatikmutter beträgt selbst bei schnellen Schlittenbewegungen typischerweise nur etwa 60 bis 120 W. Er wird überwiegend mit dem Öl ausgetragen. Das Öl temperiert und säubert die Gewindespindel kontinuierlich.

Kugelgewindetrieb mit vielen Nachteilen

Mit Kugelgewindetrieben sind speziell aufgrund der Kugelumlenkung bei akzeptabler Lebensdauer keine hohen Beschleunigungen, extremen Drehzahlen und oszillierenden Bewegungen möglich. Der Kugelgewindetrieb hat nur minimale Dämpfung und verschleißt, wodurch positionsabhängige Unterschiede bei Reibung, Steifheit und Umkehrsprung des Reibmoments entstehen. Im Crash-Fall können auf den Laufbahnen Kugeleindrücke entstehen, die den vorzeitigen Austausch der Kugelgewindespindel erzwingen.

Außerdem tritt aufgrund der Vorspannung der Mutter bei Umkehr der Bewegungsrichtung ein deutlicher Momentensprung auf. Das Reibmoment von Kugelgewindetrieben variiert durch den Kugelein- und -auslauf. Aufgrund dieses Momentensprungs und dessen unterschiedlicher Höhe sind eine präzise Lageregelung, das definierte Verfahren kleiner Wege und das Verfahren mit sehr geringer Geschwindigkeit mit einem Kugelgewindetrieb nur bedingt möglich.

Beschleunigung beim hydrostatischen Gewindetrieb nicht eingeschränkt

Alle diese Nachteile gibt es beim hydrostatischen Gewindetrieb nicht. Die Beschleunigung ist in der Hydrostatik nicht eingeschränkt und die Hydrostatikmutter kann für jede Anwendung durch Anpassung der Ölviskosität, des Druckes und des Durchflusses optimal ausgelegt werden. Der hydrostatische Gewindetrieb ist verschleißfrei, langsame Bewegungen auch unter hoher Last und oszillierende Bewegungen sind bei höchsten Frequenzen kein Problem.

Die Dämpfung von Wegschwingungen durch die Hydrostatikmutter ist hervorragend. Die Crash-Sicherheit ist weit höher als beim Kugelgewindetriebe, jedoch kann auch der hydrostatische Gewindetrieb durch Crash beschädigt werden.

Wie Messungen des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (WBK) an der Universität Karlsruhe gezeigt haben, ist die Steifheit des hydrostatischen Gewindetriebs deutlich höher als bei vergleichbaren Kugelgewindetrieben. Sie verändert sich nicht durch Verschleiß. Trotzdem ist die Reibung des hydrostatischen Gewindetriebs sehr klein und vor allem proportional zur Drehgeschwindigkeit, wodurch bei Umkehr der Drehrichtung keinerlei Momentensprung auftritt.

Servomotor muss bei geringer Geschwindigkeit keine Reibung mehr überwinden

Werden an den Enden des hydrostatischen Gewindetriebs hydrostatische Lager eingesetzt und wird der Schlitten hydrostatisch geführt, so hat der Servomotor bei geringer Schlittengeschwindigkeit sowie bei Umkehr der Bewegungsrichtung keine Reibung zu überwinden. Das hydrostatische Antriebs- und Führungssystem ermöglicht damit auch das schrittweise und oszillierende Verfahren des Schlittens um Bruchteile von Mikrometern und das präzise extrem langsame Verfahren unabhängig von der Belastung.

Die Abbremsung des Linearmotors – auch mit Bremswagen – ist bei Ausfall der

dagegen können über den Gewindetrieb vielfach höhere Bremskräfte aufgebracht werden. Ein hydrostatischer Gewindetrieb mit konventioneller Steigung hat im Vergleich zu einem Kugelgewindetrieb zudem bei abgeschalteter hydrostatischer Ölversorgung den Vorteil der Selbsthemmung.

Magnetfeld der Linearmotoren erfordert zusätzlichen Schutz

Die Führungen von Linearmotorachsen sind aufgrund der hohen Magnetkräfte stark belastet. Die Magnetkräfte wirken auch bei abgeschalteter Maschine. Diese Belastung variiert und beträgt ein Mehrfaches der maximalen Motorkraft. Beim Vergleichsmotor waren es etwa 40 kN.

In Verbindung mit den hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ist die Lebensdauer von Wälzführungen dabei reduziert. Deshalb werden für Linearmotorschlitzen anstelle von Wälzführungen vielfach hydrostatische Führungen eingesetzt.

Hydrostatische Führungen arbeiten verschleißfrei

Wie der Gewindetrieb arbeiten hydrostatische Führungen verschleißfrei und haben eine 20- bis 1000-fach geringere, geschwindigkeitsproportionale und belastungsunabhängige Reibkraft. Bei Umkehr der Bewegungsrichtung gibt es keinerlei Kraftsprung aufgrund der Führung.

So lassen sich bei entsprechender Qualität der Antriebe und Steuerung mit „vollhydrostatisch“ ausgerüsteten Kreuzschlitten Kreisbewegungen mit Bahnabweichungen im Bereich von 0,1 µm erzielen, wodurch vollkommen neue Maschinenkonzepte möglich sind, zum Beispiel bei Lehrenbohrwerken und Koordinatenschleifmaschinen.

Magnetisierbare Späne werden von starken Magnetfeldern der Linearmotorteile angezogen. Folglich können sie Störungen verursachen. Deshalb sind für Linearmotoren bessere Abdeckungen notwendig. Die Montage, Wartung und der Austausch des in die Maschine integrierten Linearmotors sind wesentlich aufwändiger als beim außen angebauten Servomotor, der ohne Demontage der Achse getauscht werden kann.

Aufgrund der starken Magnetfelder des Linearmotors sind zusätzliche Maßnahmen zum Schutz von bestimmten Personengruppen (mit Herzschrittmachern, Metallimplantaten, Schwangere) sowie von Gegenständen, die durch starke Magnetfelder beeinflusst werden können (Datenträger, Uhren, Scheckkarten), erforderlich. Der Maschinenhersteller ist an den Hersteller des Linearmotors gebunden, woraus vielfach auch die Bindung an nur einen Steuerungshersteller resultiert.

Magnetkräfte bei Linearmotoren problematisch

Auch bei der Montage an der Maschine bereiten die hohen, permanent wirkenden Magnetkräfte Probleme: Lieferanten der Linearmotoren empfehlen, bei der Montage stets einige nichtmagnetische Keile bereitzuhalten, mit deren Hilfe im Falle eines Unfalls die Motorteile auseinander getrieben werden können.

Das für den Betrieb des hydrostatischen Gewindetriebs nötige Öl muss in das Aggregat zurückgeführt werden. Entweder wird es von einer mit Abstreifern versehenen Mutter in einer Leitung zurückgeführt oder es fließt zusammen mit dem Öl der hydrostatischen Führung in den Tank zurück. Für die hydrostatische Führung, den Gewindetrieb und die Gewindetrieblager kann das gleiche Öl mit gleichem Druck von einem Aggregat verwendet werden, das noch andere Hydraulik- oder Schmieraufgaben erfüllt.

Hydrostatischer Gewindetrieb ersetzt Kugelgewindetrieb mit wenig Aufwand



Maschinen müssen für den Einsatz von Linearmotoren komplett neu entwickelt werden. Dagegen kann ein hydrostatischer Gewindetrieb mit relativ wenig Aufwand einen Kugelgewindetrieb ersetzen. Berücksichtigt man die etwas größere Mutter des hydrostatischen Gewindetriebs bei der Neukonstruktion, so kann der Kunde einen Kugelgewindetrieb oder optional den hydrostatischen Gewindetrieb wählen

(Bild 3).

Rund zehn Jahre nach der ersten Auslieferung gehören hydrostatische Gewindetriebe heute zum Standard vieler europäischer Werkzeugmaschinen zur Präzisionsbearbeitung, zum Beispiel von Schleifmaschinen für Nocken- und Kurbelwellen, für Zahnräder zum Universalschleifen.

Gewindetriebe mit 300 kN Axialkraft und rund 3,5 m Länge bearbeiten in Räummaschinen
Innenverzahnungen für Automatikgetriebe.

Im Machine Tool Resarch Center in Florida steht eine Fräsmaschine mit hydrostatischen
Gewindetrieben und Führungen. Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT),
Aachen, setzt hydrostatische Gewindetriebe, Fest- und Loslager sowie hydrostatische
Führungen unter anderem in einer Ultrapräzisions-Maschine ein.

Robert Schönfeld und Jochen Schönfeld sind Geschäftsführer der Hyprostatik Schönfeld GmbH
in 73035 Göppingen.

Redakteur: Josef-Martin Kraus

Die Beiträge auf dieser Website sind urheberrechtlich geschützt. Bei Fragen zu den Nutzungsrechten wenden Sie sich
bitte an manuela_maurer@vogel-medien.de oder Tel.: 0931-418-2888.

Dieses PDF wurde Ihnen bereitgestellt von <http://www.maschinenmarkt.vogel.de>