

Ontv... in een precisie bewerkingsmodule

Kracht, precisie en doelmatigheid door hydrauliek

H.J.J. Kraakman *Hydrauliek wordt gekenmerkt door kracht, precisie en doelmatigheid. Deze prachtige gelijktijdige combinatie van eigenschappen komt zelden voor in een systeem. Onderweg zie je vaak dat aan de weg gewerkt wordt met grote grondverplaatsingsmachines. Ze worden allemaal hydraulisch aangedreven en ze doen hun werk snel en precies. Dit is mogelijk doordat hun kracht zo makkelijk en precies te sturen is.*

De baan en de positionering van de hier besproken precisiemodule (axiaal bewegende en roterende gereedschapspil) zijn sub-micrometer nauwkeurig bij een operationele frequentie van 50 Hz en een amplitude van 400 micrometer top-top. Deze hydrostatische precisiemodule is de "shovel" in de precisie wereld en de moeite waard om toe te passen.

Op de televisie werd eens een demonstratie gegeven van de mogelijkheden van hydrauliek. De graafbak van een 25-tons shovel werd voorzien van een vinger waarmee een toets van een typemachine werd aangeslagen. In een minuut tijd werd een kleine regeltekst geschreven en de schrijfmachine overleefde dit experiment onbeschadigd. De bewegingen werden met de hand gestuurd met hulp van een tweede man

echter een geringe massa, een hoge stijfheid, een nauwkeurige en intelligente terugkoppeling en een snelle regelaar worden toegepast, dan is een hydraulisch aangedreven gereedschap snel en precies. Evenals een grondverplaatsingsmachine is een dergelijk gereedschap robuust, betrouwbaar en economisch.

Overeenkomstig deze uitgangspunten is een hydrostatische precisiemodule ontwikkeld door CFT Technology, waarmee door CFT Engineering een machine is gebouwd die in de fabriek van Philips Drachten wordt gebruikt.

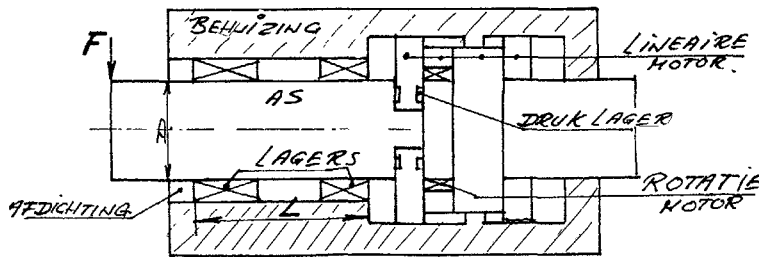


Precisiemodule

Wanneer translatie en rotatie om dezelfde as nodig zijn, dan bestaat de standaard oplossing uit een lineaire slede en een roterende as met zijn eigen behuizing. Beide worden gemonteerd op een grondplaat of freem. Een tweede mogelijke oplossing is dat de behuizing van de roterende as op een slede wordt gemonteerd. Een andere mogelijkheid is het integreren van de behuizing van de as met de slede. Al deze oplossingen hebben gemeen dat elke beweging zijn eigen lagering heeft en dat de stijfheid tussen het werkstuk en de roterende as tot stand gebracht wordt door een keten van stijfheden in serie. Dit betekent dat elke afzonderlijke stijfheid zeer hoog moet zijn om een voldoende totale stijfheid te bereiken. Bovendien zijn de bewegende massa's betrekkelijk hoog door de opeenstapeling van componenten.

die fungeerde als positieterugkoppeling door met gebaren de plaats aan te geven van de toets die ingedrukt moest worden. De typesnelheid was laag als gevolg van de grote massa, de geringe stijfheid, de slechte terugkoppeling en de trage regelaar. Wanneer

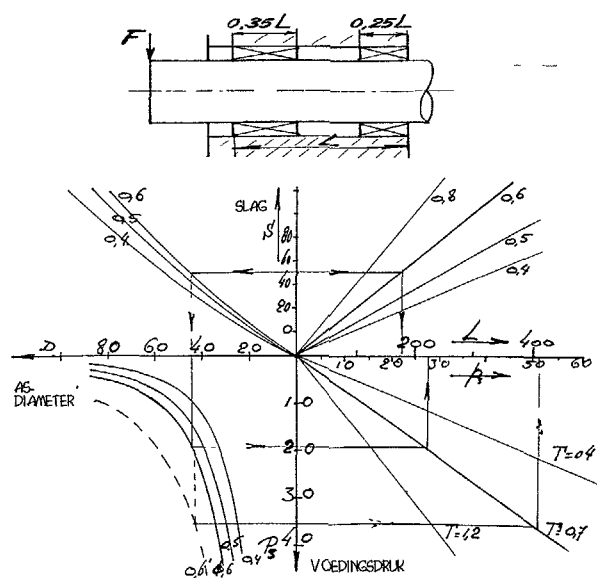
Ontwerp van een precisie bewerkingsmodule



Figuur 1 Dwarsdoorsnede van een precisiemodule voor rotatie en translatie om dezelfde as. Door te kiezen voor hydrauliek is het mogelijk vier functies in één as onder te brengen: translatie, rotatie en de directe aandrijving daarvan met hydromotoren op dezelfde as. Daardoor wordt, in vergelijking met andere constructies, de hoogst mogelijke stijfheid en precisie gerealiseerd.

Hydraulisch is het mogelijk om rotatie en translatie in het zelfde lager te laten plaatsvinden. In een direct aangedreven hydrostatisch ontwerp met deze gecombineerde functies is de stijfheidsketen evenals de bewegende massa minimaal. De kwaliteit en de bandbreedte van de bewegingen is daardoor veelbelovend. Vanbuiten is de hydrostatische precisiemodule een behuizing met een as die zowel kan transleren als roteren, gelijktijdig en onafhankelijk in beide richtingen. De kwaliteit van de bewegingen wordt volledig bepaald door wat in de behuizing zit, en dat zal hierna worden uiteengezet.

In de behuizing zitten een paar hydrostatische lagers, die de as lagere. De translerende en roterende bewegingen van de as worden direct aangedreven door een lineaire en een roterende motor, beide hydrostatisch. Figuur 1 schetst een dwarsdoorsnede van de module.



Figuur 2 Relatie tussen asdiameter D , inbouw lengte L en toevoerdruk p_s als functie van de slaglengte

Dimensionering van radiale lagers en as

Hydrostatische lagers behoren tot de familie van volledige film lagers, waarbij de film in stand gehouden wordt door een externe bron (pomp). Van belang voor een dergelijke lagering zijn de stijfheid en de belasting die het dragen kan. Deze functies worden gerealiseerd door de druk in de oliestroom door het lager. Voor een precisiemodule is stijfheid de belangrijkste eigenschap.

Lagerstijfheid

De lagering met een stijfheid K is afhankelijk van het type lagering weergegeven door een vormfactor Γ , de voedingsdruk p_s , het lager oppervlak $D \lambda L$ en de spleethoogte h_0 overeenkomstig:

$$K = \Gamma p_s D \lambda L / h_0$$

Lagerlengte

Wanneer de inbouw lengte voor de lagers een lengte L heeft, dan rijst de vraag hoe deze lengte opgedeeld wordt over voor- en achterlager en de vrije tussenruimte, als de as belast wordt met een externe kracht. Analyse van deze vraag resulteerde in de volgende dimensionering: voorlager $0,35 L$ en achterlager $0,25 L$. Deze verhouding is nagenoeg onafhankelijk voor de plaats van de externe kracht.

Asdiameter

Een tweede vraag betreft de relatie tussen asdiameter D en beschikbare lengte L .

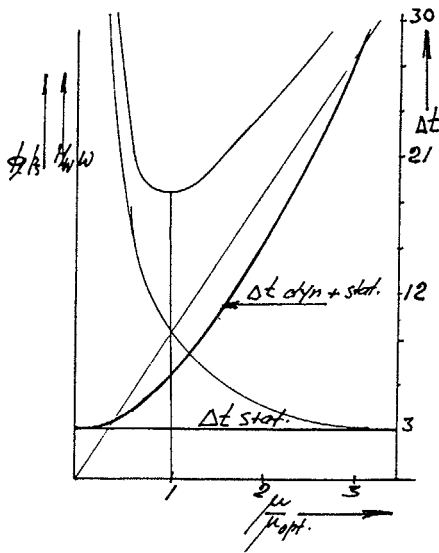
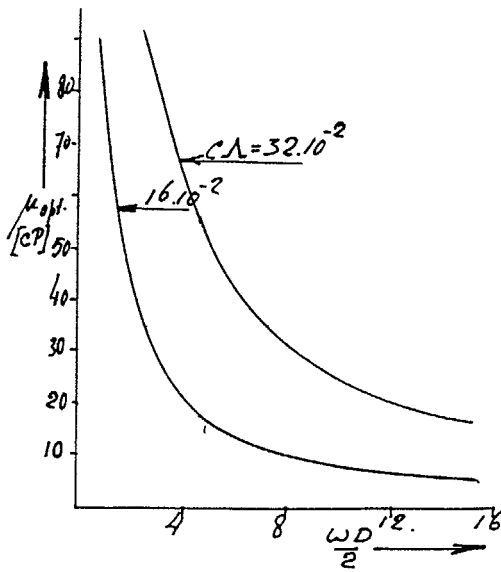
Overeenkomstig het criterium dat de stijfheid van de as moet overeenkomen met de stijfheid van het lagerpaar bij dezelfde belastingsituatie, kan de diameter D en lengte L worden bepaald als functie van de slaglengte s . Met deze waarden en de benodigde lagerstijfheid als uitgangspunt kan tevens de benodigde toevoerdruk p_s van de lagers worden bepaald.

De relatie tussen asdiameter D , inbouw lengte L en toevoerdruk p_s als functie van de slaglengte is uitgezet in 2. Wanneer bijvoorbeeld een slaglengte $s = 50$ mm nodig is en een $0,6$ lagerlengte ontwerp is gekozen, dan is de inbouw lengte $L = 170$ mm en de as diameter $D = 45$ mm en de toevoerdruk $p_s = 29$ bar. De lagerstijfheid kan dan worden verdubbeld doordat de pomp een systeemdruk $p_{sys} = 60$ bar kan leveren.

Figuur 2 toont tevens dat de benodigde lagerdruk p_s gewoonlijk lager is dan de druk van de pomp p_{sys} . In zo'n situatie is het mogelijk dat de lagerstijfheid twee maal zo hoog is dan gevraagd wordt.

Ontwerp van een precisie bewerkingsmodule

Figuur 3 Relatie tussen viscositeit, lagerafmetingen en werkingscondities volgens $\mu_{opt} = C\Lambda p_s / (1/2 \omega D)$ waarbij Λ een vormfactor is voor de geometrie van het lager, die beïnvloed wordt door de wrijving van bijvoorbeeld afdichtingsranden. Voor een geoptimaliseerde uitvoering van bv een staplager in een geïntegreerde lageruitvoering gelden voor $\Gamma = 0,4$ resp maximaal 2 en voor $\Lambda 8 \cdot 10^{-3}$ resp. $32 \cdot 10^{-3}$



Figuur 4 Het effect op de doorstroming in het lager, de viskeuze wrijving en de dynamische temperatuurstijging als van de optimale viscositeit wordt afgeweken. Horizontaal de relatieve viscositeit μ / μ_{opt} , verticaal de temperatuurstoename Δt . De (dynamische) temperatuurstoename van de oliefilm in het lager ten gevolge van rotatie stijgt scherp met de viscositeit. In het optimale geval komt de dynamische temperatuurstoename overeen met de statische temperatuurstoename die het gevolg is van het smoren van de oliedruk (1°C per 20 bar drukval). Of de optimale viscositeit gekozen is, valt eenvoudig te controleren door de dynamische temperatuurstijging te meten.

smoren van de oliedruk (1°C per 20 bar drukval) Of de optimale viscositeit gekozen is, valt eenvoudig te controleren door de dynamische temperatuurstijging te meten

Het onderste uit de kan halen

Veronderstel dat de lagerstijfheid verdubbeld wordt, dan kan de stijfheid van de as gereduceerd worden tot $2/3$, wat een diameterreductie tot 90% van de oorspronkelijke diameter betekent.

De viskeuze wrijving in de lagers bij rotatie is evenredig met de vierde macht van de diameter (D^4). Een reductie van de asdiameter reduceert de viskeuze wrijving tot 65%. Bovendien wordt de massa van de as gereduceerd tot 81%, wat de dynamica van de bewegingen ten goede komt.

Temperatuurstabiliteit

De viskeuze wrijving in de lagers veroorzaakt een allereerst een temperatuurverhoging van de oliefilm en kort daarna van de gehele module. De temperatuurstijging kan beperkt worden tot 3°C als de as roteert met een omtreksnelheid van 16 m/s ($D = 50$ en 6000 omw/min) wanneer de lagering goed ontworpen is en olie van de juiste viscositeit is toegepast.

De relatie tussen viscositeit, lagerafmetingen en werkingscondities is gegeven door

$$\mu_{opt} = \frac{C\Lambda p_s}{1/2 \omega D}$$

waarbij Λ een vormfactor is voor de geometrie van het lager, zoals bijvoorbeeld afdichtingsranden. De formule is weergegeven in figuur 3.

Figuur 4 toont het effect op de doorstroming in het lager, de viskeuze wrijving en de dynamische temperatuurstijging als van de optimale viscositeit wordt afgeweken. In figuur 4 kan worden gezien dat de (dynamische) temperatuurstoename van de oliefilm in het lager ten gevolge van rotatie scherp stijgt met de viscositeit. In het optimale geval komt de dynamische temperatuurstoename overeen met de statische temperatuurstoename die het gevolg is van het smoren van de oliedruk (1°C per 20 bar drukval). Of de optimale viscositeit gekozen is, valt eenvoudig te controleren door de dynamische temperatuurstijging te meten.

Hydrostatische lineaire motor

De translatie van de as wordt veroorzaakt door een hydrostatische lineaire motor. Bij een hydraulische cilinder zouden we dit de zuiger en zouden we de as de zuigerstang noemen. Dit is een perfecte oplossing voor normale kracht-hydrauliek, maar niet voldoende geschikt voor precisietoepassingen. De hoofdreden is dat een dergelijke asymmetrische constructie gevoelig is voor drukvariaties met een slechte regelstijfheid. De oplossing is een symmetrische constructie zoals in figuur 5 is afgebeeld.

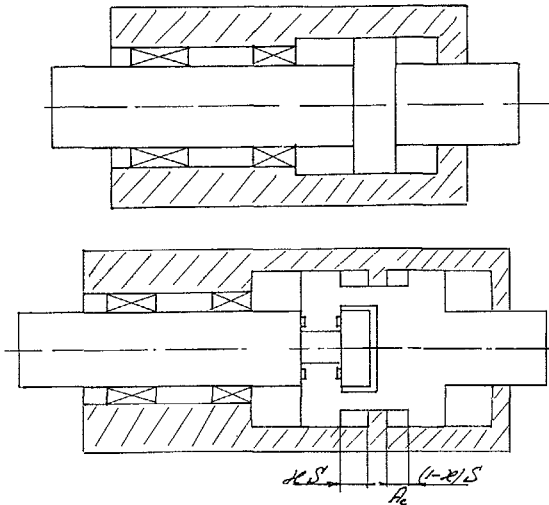
Het enige nadeel van deze constructie is dat de "zuiger" veel dynamische wrijving veroorzaakt aan de omtrek. Dit kan ondervangen worden door het ontkoppelen van de as en de lineaire motor (zuiger), zodat die niet meer meedraait. De oplossing is een dubbel filmdruk-lager zoals in figuur 6 is afgebeeld.

Dynamica

De dynamica van een dergelijk aandrijfsysteem wordt onder andere bepaald door zijn eigenfrequentie. Bij

Ontwerp van een precisie bewerkingsmodule

Figuur 5.
Symmetrisch
geconstrueerde lineaire motor (zuiger) voor het transleren van de roterende as



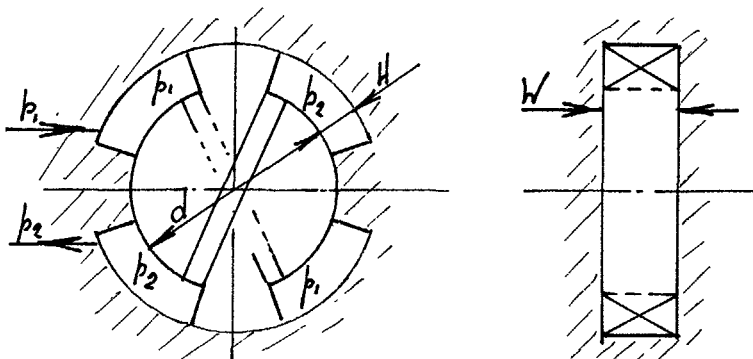
Figuur 6 Het enige nadeel van de constructie van figuur 5 is dat de "zuiger" bij rotatie veel dynamische wrijving veroorzaakt aan de omtrek. Dit kan ondervangen worden door het ontkoppelen van de as en de lineaire motor (zuiger), zodat die niet meer meedraait. De oplossing is een dubbel film-drukager zoals hier is afgebeeld

een hoge stijfheid van de druklagers wordt de ongedempte eigenfrequentie ω_0 bepaald door het actieve oppervlak A_c van de lineaire motor, de slaglengte S , de bewegende massa m en de elasticiteit van de olie E_0 overeenkomstig

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{A_c E_0}{mS} \left(\frac{1}{1-x} + \frac{1}{x} \right)}$$

Deze frequentie hangt af van de actuele positie xS van de lineaire motor met een minimum waarde voor $x = 1/2$. De elasticiteit van de olie E_0 hangt sterk af van de hoeveelheid lucht in de olie. Een realistische waarde voor $E_0 = 10^9 \text{ N/m}^2$ als het oliecirculatiesysteem goed ontworpen is. Dit betekent onder meer: goede ventilatie, geen olie die in het reservoir plonst en filtering op micrometerkleine deeltjes, want vuil is een moordenaar.

Deze eigenfrequentie kan vrij hoog gemaakt worden door het actieve oppervlak A_c van de lineaire motor te vergroten. De massa wordt hierdoor nauwelijks veranderd.



Vergroting van het oppervlak betekent eveneens een toename van de oliestroom ϕ . Voor het regelen van deze oliestroom wordt een servoregelklep toegepast. Een servoklep met een hoge bandbreedte heeft echter een beperkte doorlaat, zodat het oppervlak A_c van de lineaire motor groot genoeg moet zijn om de gewenste stijfheid te halen, maar beslist niet meer. Wanneer desondanks een hoge frequentie en een grote slag vereist is, is het parallel schakelen van enkele servokleppen een mogelijke oplossing.

Hydrostatische roterende motor

De toegepaste roterende motor is een symmetrische vaanmotor. Dit is het enige type hydrostatische motor dat een hoog koppel levert zonder resulterende radiale of axiale krachten. Het principe wordt duidelijk gemaakt aan de hand van een hydromotor met een beperkte rotatiehoek, zie figuur 7. Het drukverschil $(p_1 - p_2)$ drijft de twee rotor vanen met hoogte H en breedte W aan en veroorzaakt een kracht $F_p = (p_1 - p_2)HW$ op elke vaan, exact tegenover elkaar en in tegengestelde richting. De twee krachten werken op een afstand $(d+H) = D$ en leveren een koppel $M = (p_1 - p_2)DHW$. De waarde DHW is het slagvolume per radiaal, zodat het koppel ook als volgt kan worden geschreven $M = (p_1 - p_2)Vr$.

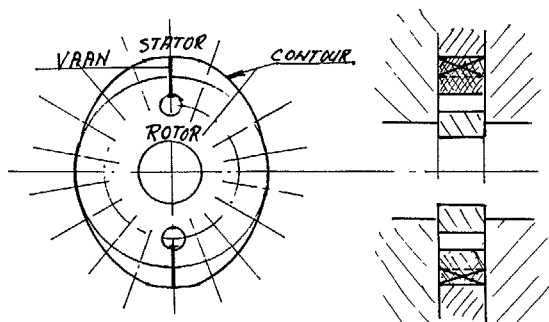
Continu roterende motor

Om de beperking in hoekbeweging van de rotor op te heffen, moeten de vanen van rotor en behuizing elkaar kunnen passeren zonder verstoring. Dit is mogelijk door de statorvaan een continu verloopende vorm te geven, zodat de radiaal inschuifbare rotorvaan deze vorm kan volgen tijdens rotatie van de rotor. Deze continu roteerbare vaanmotor is afgebeeld in figuur 8. Wanneer een vaan langs de contour van de stator beweegt, is er geen drukverschil over de vaan. Dit vergemakkelijkt de radiale beweging van de vaan in de rotorsleuf, zodat hij ongehinderd in contact kan blijven met de statorcontour.

Figuur 7 Roterende hydromotor met beperkte draaihoek, uitgevoerd als een symmetrische vaanmotor. Dit is het enige type hydrostatische motor dat een hoog koppel levert zonder resulterende radiale of axiale krachten. Het drukverschil drijft de twee rotorvanen aan. De kracht op elke vaan staat exact in tegengestelde richting en levert een koppel $M = (p_1 - p_2)DHW$.

Ontwerp van een precisie bewerkingsmodule

Figuur 8 Continu roteerbare vaanmotor. Wanneer een vaan langs de contour van de stator beweegt is er geen drukverschil over de vaan. Dit vergemakkelijkt de radiale beweging van de vaan in de rotor-sleuf, zodat hij ongehinderd in contact kan blijven met de statorcontour.



Wanneer een vaanmotor een koppel van 2 Nm moet leveren en de drukval ter plaatse $(p_1 - p_2) = 40 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ dan is het radiaal slagvolume $V_r = DHW = 0,5 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{rad}$. Met $D = 50$, $H = 0,8$ en $W = 12 \text{ mm}$ kan dat volume gerealiseerd worden. De afmetingen zijn zo gering dat deze motor in de axiale motor gebouwd kan worden, zoals figuur 9 laat zien.

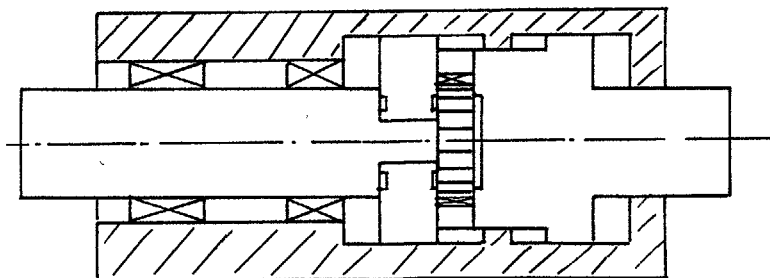
Het toerental van de motor wordt bepaald door de oliestroom door de motor en het radiale slagvolume volgens $\phi_m = V_r \omega$. Het toerental wordt geregeld door het regelen van de oliestroom met een servoklep. De ongedempte eigenfrequentie van een dergelijke motor met als massa de motoras is:

$$\omega_0 = \sqrt{2VR^2 \frac{E_0}{V_0 I_p}}$$

V_0 is het olievolume tussen de rotorvaan en de servoklep. De bijdrage van de rotormotor aan de totale roterende massa is klein genoeg om te verwaarlozen. De geregelde oliestroom van de behuizing naar de motor en terug wordt door pijpen geleid. Deze zijn zodanig gemonteerd dat de lineaire motor er axiaal langs heen en weer kan bewegen, maar tegelijkertijd tegen rotatie wordt geborgd.

Servoklep

De voedingsdruk p_s wordt bepaald door het element



dat de hoogste druk vraagt. In "kracht" systemen, zoals de cilinders in graafmachines etc., wordt gewerkt met hoge druk. In "dynamische" systemen is een hoge stijfheid van de "oliezuilen" (hoogte van de oliekolom in bijvoorbeeld de axiale motor) gewenst en die wordt nauwelijks beïnvloed door de druk. Daarom zijn in dynamische systemen de stuur (servo) kleppen belangrijke en soms zelfs de bepalende elementen.

De ontwikkeling van servokleppen is nauw verbonden met de lucht- en ruimtevaart en daar is een hoge systeemdruk (250-350 bar) voordelig voor een laag gewicht. Het gevolg is dat de momenteel verkrijgbare servokleppen afgestemd zijn op hoge druk. Bepalend voor zo'n servoklep is de interne stroom $(\phi_p = \alpha A \sqrt{\Delta p_s})$. In een lagedruksysteem werkt zo'n servoklep ook goed alleen trager. Om bij een lage druk de servoklep toch snel te krijgen moet de interne stroom vergroot worden en dat kan door de doortocht αA te vergroten. Het wordt steeds belangrijker om zo'n ingreep te doen omdat een veel lagere druk zeer energie besparend is. Andere voordelen zijn dat minder koeling nodig is, die met zijn ventilator navenant veel lawaai veroorzaakt, naast het lawaai dat de pomp bij hoge druk produceert.

Bijzondere eigenschappen

Een lager dient er voor om een beweging te ondersteunen. Een bijzondere eigenschap van een hydrostatische lager is dat het ook gebruikt kan worden als een lineaire motor met de kleine slag (namelijk $3/4$ van de spleethoogte h) maar met hoge stijfheid. Verplaatsingen van minder dan $0,1 \mu\text{m}$ zijn betrouwbaar en snel uit te voeren.

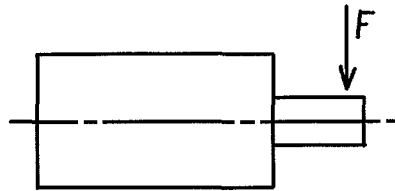
Door een differentiaalmeting van de druk in twee tegenover elkaar liggende lagerkamers kan de belasting op de spil gemeten worden zonder dat het proces beïnvloed wordt qua ruimte en stijfheid. Omdat differentiaal gemeten wordt is het resultaat onafhankelijk van de voedingsdruk p_s en dus betrouwbaar. Op deze manier is procescontrole eenvoudig mogelijk.

Besluit

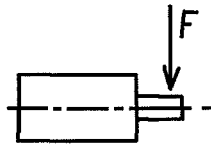
Al de beschreven optimalisaties en integraties resulteren in een as met twee vrijheidsgraden (rotatie en translatie) die uit een behuizing komt, met de volgende eigenschappen:

Ontwerp van een precisie bewerkingsmodule

Figuur 10 Door de hoge olgedruk zijn de afmetingen van een hydrostatisch lager veel kleiner dan die van een luchtlager met een gewoonlijk lagere voedingsdruk. Het gevolg is dat een luchtgelagerde as veel groter en zwaarder is dan een hydrostatisch gelagerde as. Vergelijking van een luchtgelagerde spil met een geoptimaliseerde hydrostatisch gelagerde



luchtgelagerde spil



hydraulische spil

spil met eenzelfde radiale stijfheid op de spilneus geeft het volgende beeld. De wrijving is voor de luchtgelagerde spil 1/3, maar de massa draagheid is 32 maal hoger en dat laatste is dynamisch niet zo interessant

De baan en de positionering zijn sub-micrometer nauwkeurig bij een operationele frequentie van 50 Hz en een amplitude van 400 micrometer top-top. Deze hydrostatische precisie-module is de "shovel" in de precisie wereld en de moeite waard om toe te passen

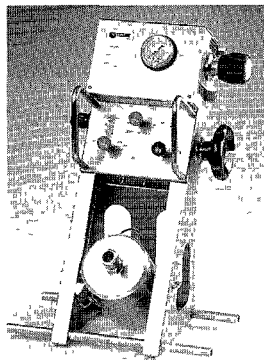
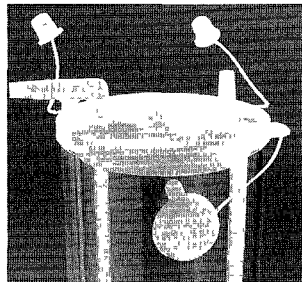
Naast deze dynamische kwaliteiten is er ruimte voor extra bijzonderheden. In de toepassing te Drachten is de as hol uitgevoerd met een luchtgelagerde as er binnen in. Deze extra as centreert het product ten opzichte van het gereedschap in de hydraulisch aangedreven buitenste as. Tevens wordt door de holle as nog vloeistof geleid voor het bewerken van het product

Eenzelfde uitvoering van een hydrostatisch lager en altijd dezelfde (meestal dikke) olie is mogelijk, maar een iets meer toepassing gerichte uitvoering kan veel voordeel opleveren met een soms wel verrassende uitkomst

ProSpec

Produkt- & systeem-realisatie

- CAD/CAM
- 3D CNC frezen
- vacuum gieten
- kunststoftechnologie



- proefmodellen
- prototypes
- integratie technieken
- kleine series

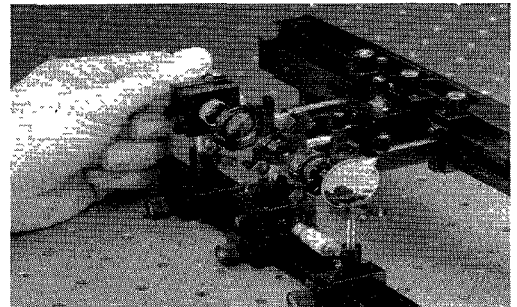
ProSpec bv
Koraalrood 153
2718 SB Zoetermeer
Tel (079) 362 10 66
Fax (079) 362 15 11

Lid Multin Technology Group

IT IS A SMALL WORLD:

TAKE A CLOSER LOOK AT

MICROLAB OPTICS AND HARDWARE



- Melles Griot, your supplier of
- ◆ Optical Research Equipment
 - ◆ Lasers
 - ◆ Components

Call one of our Application Engineers for assistance in specifying Optics for your requirement
call: 0316 - 333041

Melles Griot B.V.
P.O. Box 272
6900 AG ZEVENAAR
The Netherlands