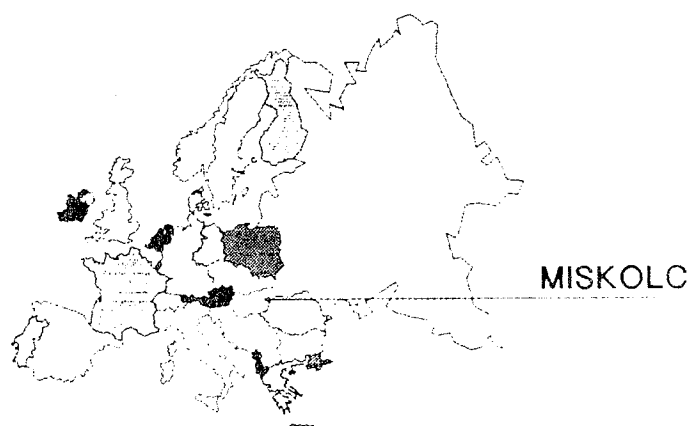


a

microCAD '91

konferenciák előadásai

I. kötet



1. A Számítástechnika Műszaki Alkalmazásai Konferencia

Miskolc-Egyetemváros,
1991. február 26.-március 2.

Hidrosztatikus fűrső-csapágyak optimális méretezése a rugalmas toleranciák módszerével

Dr. Jármái Károly műsz.tud.kand., egy.docens
Miskolci Egyetem, Szállítóberendezések Tanszéke

Dr. Tompa Sándor egyetemi adjunktus
Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

1. Nagypontosságú szerszámgépek fűrső-csapágyai

A nagypontosságú szerszámgépek fűrsőinél a hidrosztatikus és az aerosztatikus csapágyazás alkalmazása terjedt el. A kétfajta kenési mód közötti eltérést, a kenőanyag fizikai tulajdonságából adódó különbségeken keresztül vizsgáljuk. Ugyanaz a csapágy másként viselkedne olajkenéssel, mint légkenéssel, mivel a levegő összenyomható és viszkozitása az olajhoz képest elenyészően kicsi. A tervezés során figyelembe kell venni mindkét eljárás előnyeit és hátrányait. Erre vonatkozóan az [2,3,4,5]-ben található részletesebb, elemző összehasonlítást.

A légkenés előnyei a következők:

- a./ A kenőanyag mindenütt hozzáférhető, természetesen megfelelő előkészítésről /tisztítás, komprimálás, stb./ gondoskodni kell.
- b./ Nem szennyezi a környezetét.
- c./ csuszósurlódás esetén a csúsztatóerő rendkívül kicsi.
- d./ Melegedésre kevésbé érzékeny.

Az olajkenéshez viszonyítva a légkenés hátrányai:

- a./ Kis siklási sebességu légcsapágyazásban nagynyomású kényszerkenést kell alkalmazni. Azonos tápnyomás esetén a fajlagos teherbírás ugyanolyan nagyágrendű, mint a megfelelő olajkenésű csapágyé.
- b./ Kivitelezés szempontjából figyelemre méltó, hogy a sikló felületek makro- és mikrogeometriájával szemben különösen szigorú a követelményrendszer. Ennek magyarázata, hogy a levegő kis viszkozitása miatt a csapágyrés nagyon kicsi, s így az alakhiba és a felületi érdesség mélysége ennek nagyságrenddel kisebb része lehet.
- c./ A kis viszkozitás csökkenti a rezgéscsillapító képességet, ami gyakorta vezet öngerjesztett rezgéshez. Ennek kiküszöbölése gondos konstrukciós munkával lehetséges.
- d./ Soha nincs szilárdtest érintkezés a csapágy és az orsó között, ezért a sikló felületek nem kopnak, igénybevételek csökken.
- e./ A tápnyomás növelésével történő merevségnövelésnek műszaki akadályai vannak.

A továbbiakban hidrosztatikus (HS) csapágyak jellemzőinek vizsgálatával foglalkozunk.

2. Hidrosztatikus radiális csapágyak

A teherbíráshoz szükséges olajnyomást kétféleképpen lehet létrehozni. Ha a nyomás létrehozása a kenőhártyában magára a csapágyra van bízva, akkor hidrodinamikusan csapágyról beszélünk. Ha viszont az olajat megfelelő nyomás alatt vezetjük be, akkor hidrosztatikus csapágyról (HD) van szó.

A HS és HD csapágyak közötti leglényegesebb eltérések:

- a./ HS csapágnál a résznyomást külső szivattyú biztosítja.
- b./ HS csapágy esetén a teherbírás nem a siklási sebességtől függ.
- c./ HS kenés esetén soha nincs szilárdtest érintkezés, állási időben a súrlódási tényezője nulla.

2. A HS radiális csapágy felépítése

Szerkezeti kialakítás szempontjából két fajtája ismeretes:

- a./ olajvisszáramlási horonnyal;
- b./ olajvisszáramlási horony nélküli.

3.1. HS radiális csapágy olajvisszáramlási-horonnyal

A nyomóolaj az előkapcsolt fojtásokon - itt csatornákon - keresztül hosszúsággal és δ átmérővel kerül bevezetésre a kamrákhoz. Ezután feszültségmentesen, vagyis környezeti nyomásra csökkenve folyik ki oldal-, és kerületi irányban a hornyokon.

3.2. HS radiális csapágy horony nélkül

Az egyik nyomókamrából kilépő olaj nem kifelé folyik, hanem a szomszédos nyomókamrába. Ez a megoldás teherbíróbb a hornyos kivitelűnél.

3.3. összefoglalás

A kétféle csapágy összehasonlítása a teherbíróképesség, a súrlódási teljesítmény és az olajátfolyás szempontjából világosan mutatja a visszaáramlási hornyok nélküli csapágy előnyeit, melyek a következők:

- nagyobb üzembiztonság a kisebb excentricitás miatt, azonos terhelés mellett,
- kisebb teljesítményszükséglet,
- nagyobb merevség, mert a tartóerő progresszíven növekszik az excentricitással.

A befolyásoló tényezők ismeretében a HS csapágyak méretezésénél minimálisra csökken a korlátozó feltételek száma, ezért a számítások jobban megközelítik az optimumot.

4. Hidrosztatikus csapágy (HS) egycélfüggvényes optimalizálása

4.1. Célfüggvények HS csapágy optimalizálásához

A tervezendő főorsó-csapágy rendszerrel szembeni műszaki követelmények ismeretében több célfüggvény is megfogalmazható:

- a., minimális súrlódási ellenállás;
- b., minimális olajszükséglet (szivattyú teljesítménye);
- c., minimális teljesítményvesztés;
- d., maximális csapágy terhelhetősége;
- e., maximális csapágy merevsége.

Jelen dolgozatban egycélfüggvényes optimalizálással foglalkozunk, példaként a minimális súrlódási ellenállásra való optimalizálást mutatjuk be.

4.2. Mechanikai modell

A visszaáramlási horony nélküli HS csapágy modellje és a szükséges számítások a [3]-ban találhatóak.

4.3. Analízis

A HS csapágy optimalálása során változónak tekintjük:

- d - tengely (foorsó) átmérőjét [mm];
- v - nyomásviszonyszámot ($v = p_z/p_o$)
- (p_z - kamranomás; p_o - környezeti nyomás).

Ezenkívül természetesen a tervezendő csapágy funkciójából adódóan más paraméterei is felvehetőek változónak, azonban mi a nagy pontosságú szerszámgépek foorsó szempontjából ezt a két paramétert emeljük ki.

Bememo adatok továbbá:

- x - relatív excentricitás;
- Θ - terhelés irányszöge [fok]
- n - fordulatszám [1/min];
- u - fojtástényező;
- k - hosszcsökkenés-tényező;
- i - szélességcsökkenés-tényező;
- η - olajviszkozitás [MPa sec]
- ψ - relatív csapágyjáték;
- F - terhelő erő [N].

4.4. Tervezési feltételek

A célfüggvények illetve a csapágyparaméterek közül több, mint tervezési korlátozás is megfogalmazható:

- geometriai: b/d (szélesség arányszám)
 $(b/d)_{\min} \leq b/d \leq (b/d)_{\max}$
- olajszükséglet [cm³/sec]:
 $Q_{t\min} \leq Q_t \leq Q_{t\max}$
- teljesítményvesztés [kW]:
 $P_{v\min} \leq P_v \leq P_{v\max}$

4.5. Optimalálási módszer : a rugalmas toleranciák módszere [6,7,8].

A Himmelblau (1971) által kidolgozott "flexible tolerance" módszer Nelder és Mead (1965) szimplex módszerére épül.

Meghatározza a célfüggvény $f(x_i)$ minimumát ($i = 1, 2, \dots, N$)
egyenlőtlenségi feltételek $g_j(x_i) \geq 1$ ($j = M, \dots, P$)
egyenlőségi feltételek $h_j(x_i) = 0$ ($j = 1, 2, \dots, M$)
esetén, ahol M és P a két feltételcsoport száma.

Az algoritmus jellemzője, hogy a minimum keresése folyamán olyan pontokat is felhasznál, amelyek nem elégítik ki egyetlen a fenti feltételeket. Ezeket a pontokat közel-megfelelőeknek nevezzük.

Ezáltal lehetőség van a folyamat meggyorsítására, mert nem kell minden lépésben megfelelő pontokat keresnünk. A megoldáshoz közeledve a közel-megfelelő pontok egyre közelebb kerülnek a megfelelő pontok tartományához, s így végül is eljutunk a feladat megoldásához.

Az eljárás az előbb felírt optimalálási feladatot az egyszerűbb

$$\text{PHI}(k) - T(x_i) \geq 0$$

problémával helyettesíti, ahol $\text{PHI}(k)$ a tolerancia-kritérium, $T(x_i)$ pedig a feltételi függvények funkcionálja, amellyel a feltételek megsértését tudjuk ellenőrizni. Megjegyezzük, hogy bár a rugalmas toleranciák módszere jelen tárgyalásmódjában szorosan kötődik Nelder és Mead szimplex módszeréhez, helyette bármely más feltétel nélküli minimáló algoritmus is használható.

A tolerancia kritérium, a $T(x_i)$ függvény és a közel-megfelelő fogalom definíciója a következő. A tolerancia kritérium a minimálás

folyamán használt poliéder csúcsponti koordinátáinak pozitív, monoton csökkenő függvénye. Egy lehetséges alakja,

$$\text{PHI}(k) = \min \left\{ \text{PHI}(k-1) ; M+1 \sum_{i=1}^{r+1} \|x_i(k) - x_{r+2}(k)\| \right\}$$

$$\text{PHI}(0) = 2 * (M+1) * t_p$$

ahol t_p a kezdeti poliédERMÉRET oldalhossza, M az egyenlőséggel megadott feltételek száma, $x(k)$ a poliéder i -edik csúcspontjának helyvektora a minimumkeresés k -adik lépésében, $r = N-M$ szabadságfok, végül $x_{r+2}(k)$ a poliéder súlypontja. $\text{PHI}(k)$ definíciójában a második tag a csúcspontok súlyponttól mért átlagos távolságát jelenti a k -adik lépésben.

Ezen távolság az optimumkeresés során nöhet, csökkenhet vagy változatlan maradhat, attól függően, hogy a Nelder-Mead algoritmus melyik lépésére kerül sor (nyújtás, felezés, tuk-rozás). A megoldás közelében azonban a poliéder mérete egyre kisebb lesz és a nullához tart. Ezért megállapíthatjuk, hogy $\text{PHI}(k)$ monoton csökkenő függvény szintén a nullához tart.

A $T(x_i)$ függvény definíciója a következő,

$$T(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^M h_j^2(x_i) + \sum_{j=M+1}^P U_j * g_j^2(x_i)}$$

ahol az U_j a Heaviside-operátor, $U_j = 0$, ha $g_j(x_i) \geq 0$ és $U_j = 1$, ha $g_j(x_i) < 0$.

Ha egy pont kielégíti a feltételeket, azaz megfelelő, $T(x_i) = 0$, ellenkező esetben pedig $T(x_i) > 0$. Mivel a $T(x_i)$ függvény minden x -re pozitív, ha értéke kicsi, ez azt jelenti, hogy a kérdéses pont a megfelelő pontok tartományához közel helyezkedik el. A közel megfelelő pontok tartományát a

$$\text{PHI}(k) - T(x_i) > 0 \text{ egyenlőtlenség határozza meg.}$$

Az algoritmus két fő fázisból áll. Az első az $f(x_i)$ függvény minimálása. Ennek során a $\text{PHI}(k)$ értéke is csökken, így a közel megfelelő pontok tartománya egyre szűkebb lesz. A második fázis az egyenlőségi és egyenlőtlenségi feltételekből alkotott $T(x_i)$ függvény értékének csökkentése. Ennek célja, hogy megfelelő vagy közel megfelelő pontok sorozatán keresztül jussunk el a megoldáshoz.

A fentieket a $T(x_i)$ és $\text{PHI}(k)$ mennyiségek segítségével fogalmazhatjuk meg pontosan.

- a. $T(x_i(k+1)) \leq \text{PHI}(k)$
- b. $T(x_i(k+1)) > \text{PHI}(k)$

Az a. eset megfelelő, vagy közel megfelelő pont, így sor kerülhet a következő $k+2$ -dik lépésre. A b. esetben x nem megfelelő, ezért $T(x_i)$ függvény értékét csökkenteni kell a Nelder-Mead módszerrel vonatkozó alkalmazásával.

Abból a tényből, hogy a toleranciakritérium zérus, midőn a célfüggvény értékét tovább javítani már nem lehet, következik, hogy az eredeti feladat megoldását kapjuk meg. A megoldás helyén ugyanis $T(x_i) = 0$ teljesül, ami a feltételek egyenkénti teljesülését jelenti.

A $\text{PHI}(k)$ mennyiséget konvergencia kritériumként is fel lehet használni, ugyanis az optimálás befejező fázisában $\text{PHI}(k)$ jelentése megegyezik a poliéder csúcspontjainak a súlyponttól mért átlagos távolsággal. Ezért a $\text{PHI}(k) \leq \text{EPSZ}$ egyenlőtlenség teljesülése esetén, EPSZ tetszőlegesen választott pozitív szám, a legkedvezőbb függvényértékhez tartozó csúcspontra teljesül.

Teljesülnie kell továbbá a $T(x_i(k)) \leq \text{EPSZ}$ összefüggésnek is. Ez utóbbiból következik, hogy minden egyes egyenlőségi feltétel is legalább EPSZ -nyi pontossággal teljesülni fog.

4.5.1. Az FT módszer továbbfejlesztése, paraméterek megválasztása

Abban az esetben, ha a független változók alsó és felső határai ismertek, célszerű a kezdeti poliéder méretét a következő

összefüggés alapján felvenni

$$t_p = \min \left\{ 0.2/N \sum_{i=1}^N (x_{iU} - x_{iL}) \right\}$$

Ha a független változók értéktartományai nagyságrendben különböznek, akkor a legkisebb értéktartomány nagyságát célszerű kezdeti poliéderméretként alkalmazni.

Az FT módszer konvergenciáját négy paraméter befolyásolja alapvetően a kontrakciós együttható, a nyújtási együttható, a kezdeti poliéder t_p mérete, valamint az EPSZ konvergencia-kritérium. Ezek közül a kontrakciós együttható értékét az ajánlott 0.5 -re vettük. A számítógépi futtatások eredménye-képpen az nyújtási együttható értékét az ajánlott 2.8 -as értékről jelentősen csökkentettük (Jármai, 1988).

Ennek oka az, hogy megfelelő pontból kiindulás esetén a poliéder mérete az eredeti értékkel számolva az első néhány lépésben túlzottan megnőtt. Így az első nem-megfelelő pont távol került a megengedett tartománytól, ami a $T(x_i)$ függvény bonyolult alakja miatt lehetetlenne tette annak megfelelő mérték csökkentését. Ezért a nyújtási együtthatót 1.3 -ra csökkentettük, a kezdeti poliéder méretét 5 -20 között állapítottuk meg, a konvergenciakritérium pedig 0.01 - 0.001 volt.

5. HS csapágy optimalizálásához készült program felépítése

Mind a HS csapágy számításait, mind az optimalizáló algoritmust Microsoft Quick BASIC 4.5 programnyelven készítettük [3]. A célfüggvény rögzítése, a bemenő adatok és tervezési feltételek megadása után a program elvégzi az optimális méretek meghatározását és a csapágy ehhez tartozó jellemzőinek meghatározását és az eredményeket egy file-ban tárolja.

A program IBM AT kompatibilis személyi számítógépen fut. A célfüggvény és a tervezési feltételek bonyolultsága függvényében 1-10 perc futási időre van szükség.

7. Példa HS csapágy optimalizására

Konkrét csapágy tervezése helyett bemutatjuk, hogy két változó függvényében hogyan változik valamely célfüggvény értéke.

Változók értékei:

$$d = 30 - 60 \text{ mm}$$

$$v = 40 - 120$$

Tervezési feltételek:

$$0.9 \leq b/d \leq 1.4$$

$$1.5 \leq P_v \leq 18 \quad [\text{kW}]$$

$$4 \leq Q_t \leq 450 \quad [\text{cm}^3/\text{sec}].$$

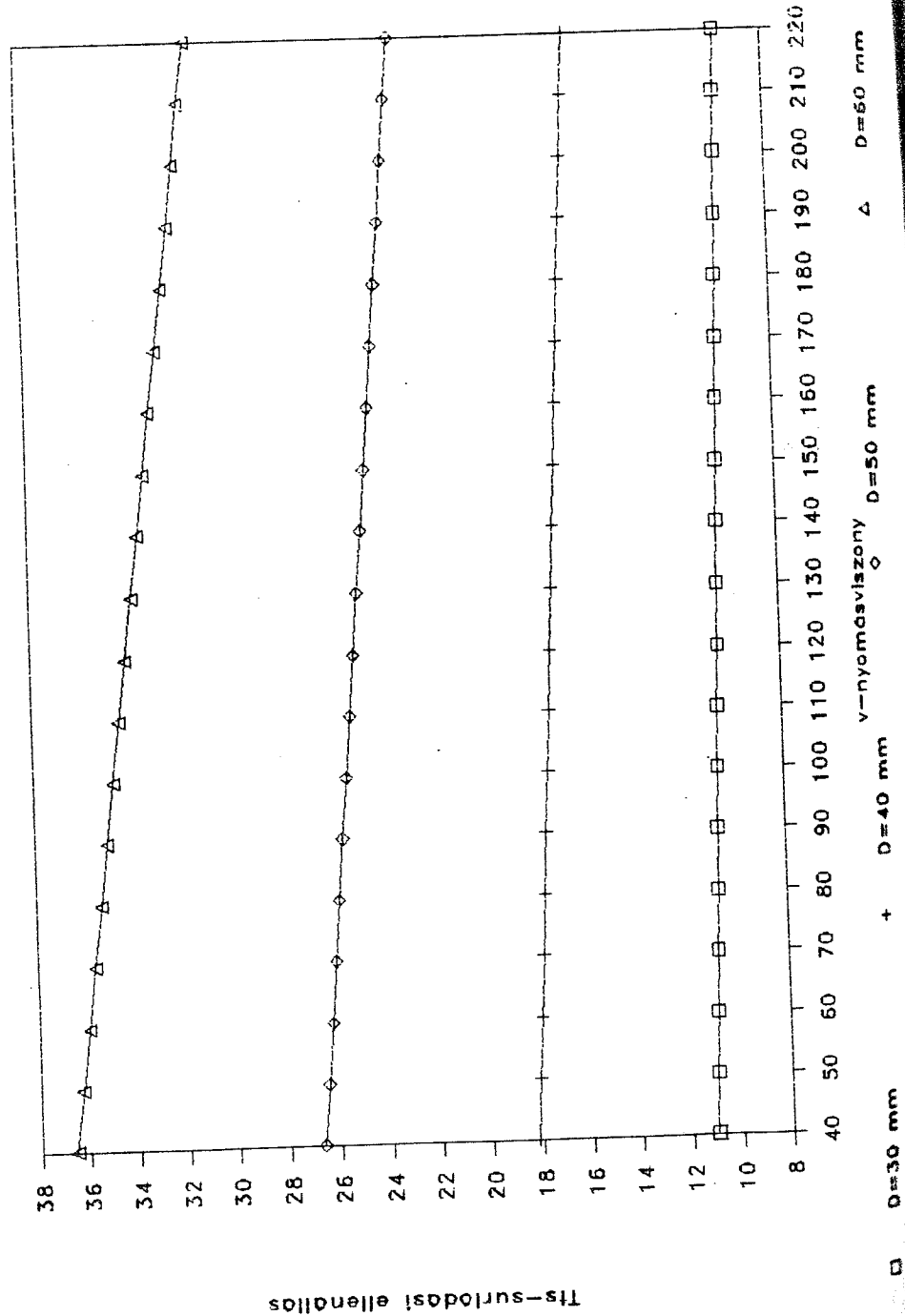
Célfüggvény: T_{ts} - surlódási ellenállás.

Az eredményeket az 1. ábrán szemléltetjük.

7. értékelés

A hidrosztatikus csapágy tervezése az egyik legbonyolultabb technikai feladat a nagyszámú befolyásoló paraméter és sokszor

Hidrostatikus csapágy optimálása



Tis-surloadasi ellenállás

1. ábra

gyomásnak is ellentmondó követelmény megvalósíthatósága miatt. Ez is magyarázza, hogy az irodalomban igen nagy terjedelemben találunk HS csapágyak optimalásával foglalkozó munkát. A személyi számítógépek megjelenése pedig lehetővé teszi e számítógépes feladat gyors végzését is.

Az általunk készített program is e célt szolgálja, természetesen magába foglalva a célfüggvények, tervezési feltételek bővítésének lehetőségét, valamint a többcélű függvényes optimalizációs módszerekhez való illesztés lehetőségét is.

Segítségével könnyen elemezhetők a különféle befolyásoló tényezők hatásai és gyorsan meghatározhatók az adott muszaki követelményeket jobban kielégítő csapágy méretei, jellemzői.

Irodalomjegyzék

- [1] Jármái, K. - Péhl, T. - Tompa, S.: Szerkezetek gazdaságos méretezésre szolgáló AMT programcsomag kifejlesztésére OMFB, 1989. AMTP-6.1.10. részjelentés
- [2] Szota, Gy.: Siklócsapágyak tervezése Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
- [3] Pecken, H.: Hidrostatistische Querlager Konstruktion 16/1964/H.7.226/.
- [4] M. El - Sherbiny, F. Salem, N. El - Hefnawy: Optimum design of hidrostatic journal bearings Part I. : Maximum Load capacity Part II.: Minimum power Tribology international, june 1984 Vol 17. no3.
- [5] Kovács, Zs.: Nagypontosságú szerszámgépek konstrukciós felépítésének sajátosságai NME diplomaterv, 1988, Miskolc /Konzulens: Tompa Sándor/
- [6] Himmelblau, D.M.: Applied nonlinear programming. McGraw Hill Book Co. New York. 1971.
- [7] Jármái, K.: Gazdaságos szerkezetek méretezése. Kandidátusi értekezés. 1988. 187 old.
- [8] Nelder, I.A, Mead, R.: A simplex method for function minimization. Computer Journal, 1965. Vol. 7. pp. 308-313.
- [9] MS Quick BASIC 4.5, MS Corporation, 1988.

A téma kidolgozása kapcsolódik az NME Gépészmérnöki Kar OMFB AMTP 6.1.10. számú kutatási fejlesztési munkájához.