

Válasz Zombory László Professor Úr opponensi véleményére

Köszönöm Zombory László Professor Úr alapos és gondos opponensi munkáját! Köszönöm, hogy kiemeli, hogy a hiszterézis modellezése, tervezésbe történő felhasználása mindig releváns problémakör. A felmerülő ipari igények ma találkoznak a számítástechnika nagyon erőteljes fejlődésével, miáltal egyre pontosabb számításokat lehet végezni az egyre szigorúbb követelményeknek megfelelő modern tervező rendszerek segítségével.

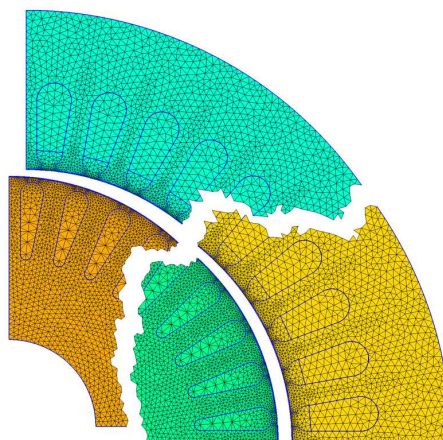
Az alábbiakban a Bíráló kérdéseire és megjegyzéseire kívánok reagálni.

A Bíráló kérdése (1): A dolgozat több helyen említi a fixpontos iteráció rendkívül lassú konvergenciáját. Ennek javítására egyetlen célzást talált a bíráló: „Ezen oknál fogva célszerű foglalkozni a különféle gyorsítás lehetőségekkel” (96. oldal). Kérdésem: vizsgált-e a jelölt egyéb nemlineáris megoldó technikákat, vagy ragaszkodott a fixpont technika használatához. Ha vizsgált egyéb technikákat, miért vetette el azokat?

A jelölt válasza: A hiszterézis modellt tartalmazó numerikus számítások gyorsítására véleményem és tapasztalatom szerint alapvetően két lehetőség van. Az egyik a módszer párhuzamosításán, a másik - jelen esetben - a fixpontos eljárás javításán alapszik.

- A végeelem-módszer párhuzamosítása. A végeelem-módszer egyes részfadatai között található olyan, amely párhuzamosan futtatható, s ezáltal jelentős futási időt lehet megtakarítani.

A párhuzamos architektúrákon az ún. domén-dekompozíción¹ alapuló technikák alkalmasak a végeelem-felbontás párhuzamos módon történő futtatására. Ennek lényege abban áll, hogy a végeelem-hálót valahány részre felbontjuk (például az 1. ábra egy villamos motor végeelem-hálójának felbontását mutatja), s az egyes résztartományokat egymástól függetlenül, egymással párhuzamosan oldjuk meg. Természetesen az egyes domének között lehet kommunikáció. A párhuzamos futtatáshoz megfelelő hardver kell, ami azonban ma már egyre könnyebben elérhető. Hangsúlyozom, hogy párhuzamosan csak olyan feladatrészeket lehet futtatni, amelyek egymástól függetlenek.



1. ábra. A végeelem-háló dekomponálása

¹Átfogó mű például J. Kruis, **Domain Decomposition Methods for Distributed Computing**, Saxe-Coburg Publications, Kippen, Stirling, Scotland, 2006 monográfiája.

Ezzel a tématerülettel magam is foglalkoztam, de eredményeim nem fogalmaztam meg a jelen dolgozatban. Az 1. tézisben utalok arra, hogy a Preisach-modell implementációja során a modellt felkészítettem a párhuzamos futtatásra, az 5.3. és 5.4. fejezetekben bemutatott feladatok megoldása során ez így is történt. A domén-dekompozíción alapuló párhuzamos technikával kutatócsoportomban doktori munkában Marcsa Dániel doktorandusz hallgatóm foglalkozik, egyik legutóbbi munkája az alábbi cikkben található:

D. Marcsa, M. Kuczmann, *Schur-Complement Based Parallel Finite Element Analysis Coupled with Circuit and Mechanical Equations*, Computational Problems of Electrical Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 23-28, 2014.

Az egyenletek megoldását az ún. „elemről elemre”-módszerrel (element-by-element) ki-válóan lehet a véges elemek szintjén kezelni, ahogy azt például az

I. Kiss, Sz. Gyimóthy, Zs. Badics, J. Pávó, *Parallel Realization of the Element-by-Element FEM Technique by CUDA*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 507-510, 2012

cikkben bemutatják a szerzők.

A hiszterézis modellek az integrálási pontokban egymástól függetlenül futtathatók, ami jelentős nyereséget jelent. A fixpontos séma sajnos nem párhuzamosítható: az n -edik iterációs lépés függ az $(n - 1)$ -edik lépés eredményeitől.

- A fixpontos technika módosítása. A fixpontos iterációs séma elektromágneses térszimulációban való alkalmazása Hantila munkásságán alapul [248-252,268], aki az általam ismert és a dolgozatban hivatkozott művekben igazolta a módszer biztos globális konvergenciájának feltételét. A globális itt azt jelenti, hogy a μ és ν értékeket nem kell (nem szükséges) változtatni a számítás során, sem az egyes időpillanatokban, sem az iterációban. Ennek előnye, hogy a felépített egyenletrendszert nem kell iterációról iterációra módosítani, viszont sok esetben lassú - habár biztos - konvergenciát biztosít.

Többen foglalkoztak azzal, hogy ezt a bizonyos globálisan optimális értéket lokálissá tegyék, ezáltal a fixpontos technika jelentősen gyorsítható (Chiampi és szerzőtársai a [263] cikkben, vagy Dlala és szerzőtársai a [264] cikkben). A lokális annyit jelent, hogy minden időpillanatban, s minden geometriai pontban, ahova hiszterézis modellt kell alkalmazni, ott a μ vagy ν értéke más és más, a kontrakció feltételét természetesen betartva. A

G. Koczka, S. Auserhofer, O. Bíró, K. Preis, *Optimal Convergence of the Fixed-Point Method for Nonlinear Eddy Current Problems*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 3, pp. 948-951, 2009

cikk például egy általános formulát javasol az optimális fixpont-reluktancia meghatározására. Hasonlóan jó eredményeket ért el Sári Zoltán PhD értekezésében:

Z. Sári, Investigation of multi-valued, hysteresis-type nonlinearities in numerical field problems, PhD disszertáció, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2012.

Másik lehetőség, ami szintén Hantilától származik ([251]-es számú hivatkozott cikk), az ún. túlrelaxálás módszere, ami minden lépésben iteratíván számítja a relaxálást biztosító, ω -val jelölt paramétert. Például a mágneses indukcióra építő iterációs ciklus n -edik iterációs lépésében $\vec{I}^{(n)}$ helyett az

$$\vec{I}^{(n)} = \vec{I}^{(n-1)} + \omega(\vec{I}^{(n)} - \vec{I}^{(n-1)})$$

értékkel halad tovább, és ω értékét úgy választja meg, hogy az $\|f_{\vec{B}_I}\{\mathcal{M}\{\vec{I}^{(n)}\}\} - \vec{I}^{(n)}\|$ a lehető legkisebb legyen. Az ω paraméter optimális értékét minimalizálással lehet megkeresni. Ezt a technikát kombinálja Chiampi a lokális ν érték meghatározásával a [263] hivatkozott cikkben.

Ezt a módszert magam is realizáltam, azt tapasztaltam, hogy a lépésszám valóban kevesebb, de a relaxációs paraméter számításának időigénye jelentős, így nem foglalkoztam tovább a kérdéssel.

Az

M. Kuczmann, *Using the Newton-Raphson Method in the Polarization Technique to Solve Nonlinear Static Magnetic Field Problems*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 3, pp. 875-878, 2010

cikkben azzal foglalkoztam, hogy a polarizációs alakban megfogalmazott problémát hogy lehet a Newton–Raphson-módszerrel megoldani. A lépésszám jelentősen csökkent ezzel a módszerrel, de sok esetben szükség volt a Newton–Raphson-lépések alulrelaxálására, ami nagyon időigényes lépés volt. Emiatt egyelőre ezt az utat is elvetettem.

A

J. Yuan, M. Clemens, H. De Gersem, T. Weiland, *Solution of Transient Hysteretic Magnetic Field Problems With Hybrid Newton-Polarization Methods*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 5, pp. 1720-1723, 2005

cikk a Newton–Raphson-módszer és a fixpontos iterációs módszer előnyeit egyesíti. Ez a módszer a cikk szerint jelentősen csökkenti az iterációs lépésszámot.

Eddigi munkám során alapvetően akadémiai tesztfeladatokat oldottam meg, ahol a számításra szánt idő nem volt releváns. A jövőben a felhalmozott ismeretanyagot szeretném ipari feladatok megoldásában is kamatoztatni, s az ilyen jellegű feladatok nem nélkülözhetik a lényegesen gyorsabb számításokat. Emiatt ezt a kérdéskört egy nagyon lényeges kutatási irányként képzelem el.

A Bíráló kérdése (2): Mi igazolja, hogy a fixpont iterációs sémában a javító formulákban szereplő optimális érték minden esetben a szóban forgó mennyiség szélső értékeinek számtani közepe (vagy annak reciproka) és nem egy más közbeeső érték?

Pl.

$$(4.64) \quad \nu = \frac{\nu_{\max} + \nu_{\min}}{2}$$

$$(4.65) \quad \mu = \frac{2\mu_{\max}\mu_{\min}}{\mu_{\max} + \mu_{\min}} = \frac{2}{\frac{1}{\mu_{\max}} + \frac{1}{\mu_{\min}}}$$

A jelölt válasza: A közölt optimális értékek ún. globális konvergenciát biztosítanak, aminek

nagy előnye, hogy az egyes iterációs lépésekben nem szükséges a megoldandó egyenletrendszer bal oldalának ismételt előállítás. A Newton-típusú módszerek esetében például minden iterációs lépésben más és más érték kerül az összeállítandó egyenletrendszer bal oldalának megfelelő helyére, emiatt azt iterációról iterációra újra kell felépíteni.

Megjegyzem, hogy a [14] monográfiában a globálisan optimális értékek levezetését a [62-64,72,192,238,247-265,277,281,284-289,292-302] irodalom alapján nagyon részletesen megtettem. Emiatt ezt a levezetést a dolgozatban nem ismételttem meg.

Ahogy az előző kérdésre adott válaszban is megfogalmaztam, az irodalomból ismeretes, hogy több kutató foglalkozik azzal a kérdéssel, hogy az optimális μ és ν értékek nem konstans értékek a számítás minden lépésében.

Azt gondolom, hogy például ipari igényű feladat megoldása kapcsán, vagy optimalizációs feladat futtatása során, esetleg az eljárás kereskedelmi szoftverbe illesztésekor a nagy futási időt feltétlenül csökkenteni szükséges, amelynek egyik lehetséges módja a fixpont-reluktivitás, illetve fixpont-permeabilitás ettől eltérő megválasztása. A múltban főleg akadémiai tesztfeladatok megoldásával foglalkoztam, amelynek eredményeképp meggyőződtem arról, hogy a módszer kiválóan alkalmas hiszterézist is figyelembe vevő számításokra. A jövőben szándékomban áll az általánosabb eredmények felkutatása. Köszönöm, hogy erre a Bíráló felhívta a figyelmem.

Ismételten köszönöm Professzor Úr szakértő, gondos bírálói munkáját.

Győr, 2015. június 16.

Kuczmann Miklós