

Oponentský posudek na diplomovou práci Radima Dvořáka s názvem

**Pokročilé numerické metody pro modelování experimentů realizovaných pomocí dělené Hopkinsonovy tyče a jejich implementace a verifikace.**

Diplomová práce má 108 stran, obsahuje 96 obrázků, 8 tabulek a 1 přílohu.

Práce se zabývá popisem, rozбором a implementací moderních numerických metod. Jsou aplikovány na případ jednorozměrného šíření silového pulsu v tenké tyči, modelované lineárním prvkem, a to v oboru lineární elasticity.

Výklad je strukturován do 8 kapitol.

**V druhé kapitole** je popsána teorie šíření vln v 1D prostředí a metoda konečných prvků. Řeší se 1D vlnová rovnice, je probráno d'Alambertovo řešení, definována počáteční a smíšená úloha, a probrán odkaz vln na nespojitém rozhraní tenké tyče. Jsou probrány základy metody konečných prvků, slabá formulace a vysvětlena prostorová a časová diskretizace. Jsou popsány integrační metody Newmarkovy skupiny metod, metoda centrálních diferencí a metoda pushforward-pushback.

**Ve třetí kapitole** se popisuje doménová dekompozice pomocí Lagrangeovských multiplikátorů, a to se záměrem minimalizace časových nároků na numerickou integraci v čase. Autor správně uvádí metodu hrubého násilí (zvýšení výkonu HW) a metodu jemného intelektuálního úsilí, založeného na optimalizaci algoritmů a na jejich efektivní implementaci.

*Comment: Je zřejmé, že pokud máme k dispozici dostatečný výpočetní výkon, dostaneme se k výsledkům dříve – to je cesta v praxi častá. Intelektuální úsilí je namáhavé, ale dostaneme se dále – ne každý to však dokáže.*

Je připomenuto základní pravidlo, stanovující „správný“ integrační krok.

Popisuje se doménová dekompozice, umožňující řešenou oblast rozdělit na části, mající stejné nebo podobné prvky, umožňující provést časovou integraci s řádově „správným“ krokem. Prostorové rozdělení je založeno na metodě Lagrangeovských multiplikátorů, časová postup pak na implementaci pokročilých (advanced) integračních metod.

*Comment: Oba postupy jsou důležité pro budoucnost, danou dostupností paralelních počítačů.*

Další výklad je zaměřen na vysvětlení role Lagrangeovských multiplikátorů při popisu kinematických vazeb mezi jednotlivými doménami. Jsou popsány praktické výhody a nevýhody těchto přístupů.

**Čtvrtá kapitola** popisuje další integrační metody. Podrobně je popsána metoda heterogenní časová integrace, a to včetně podrobného implementačního postupu. Další

popsanou metodou je tzv. asynchronní časový integrátor. Metoda není dále rozebírána a v práci použita. Dále je zmíněna metoda disipativní, a to včetně podrobných implementačních postupů.

**V páté kapitole** jsou některé z probraných metod, a to s ohledem na doménovou dekompozici, naprogramovány v jazyce Matlab. Kód je tvořen preprocesorem, řešičem a postprocesorem. V textu je kód podrobně popsán. Je vlastně vytvořen operační manuál.

**Kapitola 6** je věnována verifikaci. Rozsah provedené práce je obdivuhodný. Výsledky verifikací doménových přístupů, stejně jako porovnání pokročilých metod integrace, jsou nové a podle mého názoru dosud nepublikované.

*Comment: Ty falešné odrazy na rozhraní tvořeném různě velkými prvky jsou známe, ale málo v praxi očekávané. Pochvala za zdůraznění.*

*Comment: Souhlasím s autorem, že „hladké“ výsledky z komerčních softwarů (LS-DYNA, ABACUS) jsou založeny na ad hoc tricích, které jsou fyzikálně nekonzistentní.*

*Comment: Energetická konzistentnost je důležitá. Je důležité ji sledovat. Připomeňme, Newmarkovu metodu s algoritmickým tlumením, Houboltovu metodu.*

**Porovnání numerického řešení s experimentem je probíráno v odstavci 6.4.**

Autor zodpovědně provedl řadu experimentů a jejich výsledky srovnal s výsledky numerickými. Při hodnocení rozdílů správně poukazuje na skutečnost, že se srovnává 3D experiment s 1D numerickým modelem.

*Comment: Stálo by za pozornost více se věnovat analýze experimentu, a to z hlediska prostorové i časové diskretizace, která stejně jako u numerického modelu vede k disperzi. Je zřejmé, že velikost tenzometru a vzorkovací frekvence snímacího zařízení odpovídá jistým způsobem velikosti prvku a velikosti integračnímu kroku.*

**K práci připojuji několik komentářů.**

Str. 8 ... varepsilon ... autor zapomněl na backslash.

Str. 12 ... dynamická rovnováha ... to je protimluv.

Str. 32 ... použití rozumně jemné sítě ... nelze řešit bez ohledu na rozumně jemný časový krok.

Str. 33 .. zdroj numerických oscilací ... text naznačuje, že za to může numerika. Podstatou je však v existenci disperzních jevů ... v důsledku prostorové i časové diskretizace.

Str. 38 ... význam operátoru  $D = \frac{d}{dt}$ , kde je operand? A když je to operátor, tak má být

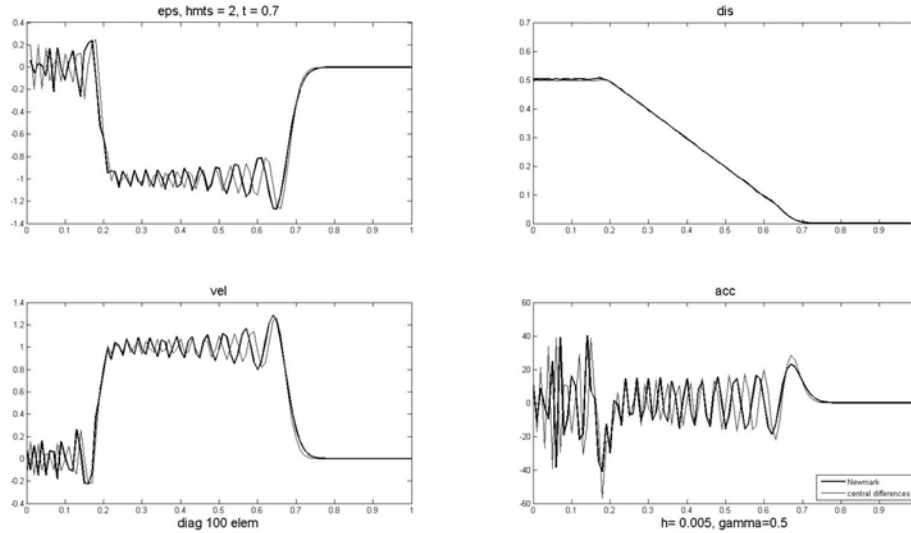
vytištěn svisle, nikoliv kurzivou.

Str. 39 ... má být  $\Delta t_{\min}$  ... zásady matematické sazby nejsou dodrženy.

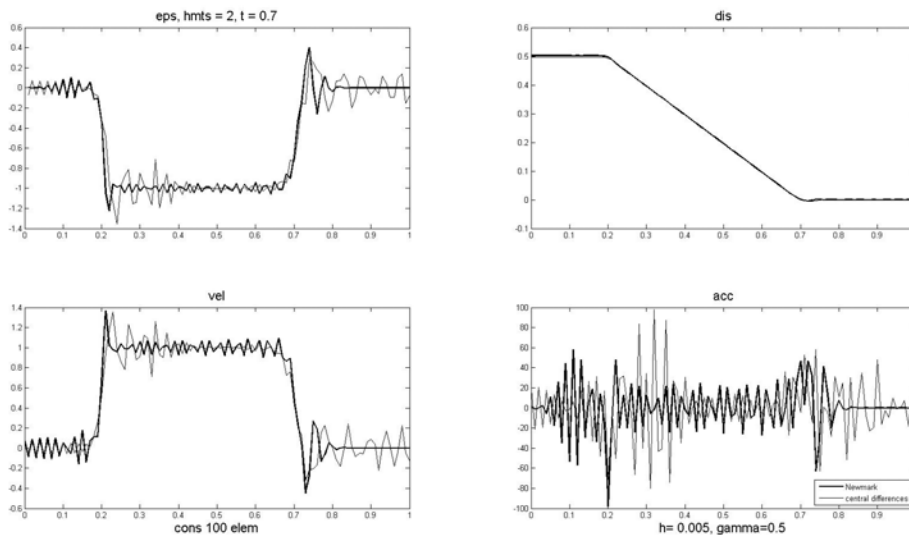
Str. 64 ... znamená to, že konzistentní matice hmotnosti není implementována?

Str. 66 ... k autorovu obrázku 6.3 přidávám dva své obrázky

Str. 64 ... znamená to, že konzistentní matice hmotnosti není diplomantově aplikaci implementována? Škoda, viz ty rozdíly.



**Diagonální matice hmotnosti.** Strain, displacement, velocity, acceleration, stejná velikost prvku, krok odpovídá Courantovi 0,5. Namísto 0,75 máme 0,7. Vysokofrekvenční složky spektra jsou pomalejší než by měly být.



**Konzistentní matice hmotnosti.** Strain, displacement, velocity, acceleration, krok odpovídá Courantovi 0,5. Namísto  $t_{max}$  0,75 mám 0,7. Vysokofrekvenční složky spektra jsou rychlejší než by měly být.

Komentáře na str. 67 jsou příliš neurčité:

... Doba šíření je přiměřeně dlouhá ...

... Dostatečně přesné ...

... Nejlepší shodu s řešením ... takto definovaná shoda je otázkou měřítka.

Souhlas jednotlivých řešení je třeba dokumentovat prostřednictvím norem.

### **Závěr**

Autor diplomové práce pečlivě prostudoval moderní (advanced) časopiseckou i knižní literaturu týkající se šíření vln, metody konečných prvků a integračních metod v čase. Na základě této studie vytvořil Matlabovskou výpočetní aplikaci, umožňující provést kvalitativní a kvantitativní porovnání různých výpočetních metod pro integraci v čase a testovat je na úloze o šíření vln v 1D prostředí, kde jako etalon použil známá analytická řešení.

Škoda, že při vysvětlování rozdílů mezi řešeními se autor nezabýval disperzními jevy plynoucími z prostorové a časové diskretizace, které rozdíly mezi jednotlivými přístupy objasňují. Nejde jen o správné stanovení integračního kroku, ale též o jeho korelaci s velikostí prvku.

Závěry, které se srovnání metod plynou jsou obecně platné a zajímavé jak pro komunitu pracující s dynamickými úlohami metodou konečných prvků, tak i pro akademickou veřejnost. Diplomantova práce přináší cenné podněty pro implementaci úloh tohoto typu na paralelních platformách.

S přehledem a s nasazením autor přistoupil i k realizaci experimentu a následně výsledky experimentálních a numerických přístupů zodpovědně srovnal.

Rozsah odvedené práce je obdivuhodný. Formální i jazykové zpracování je na úrovni.

Práci hodnotím jako výbornou (A) a doporučuji ji k obhajobě.

M. Okrouhlík



Ústav termomechaniky, AV ČR

V Praze, 2021\_06\_10