

OPONENTSKÝ POSUDEK DIZERTAČNÍ PRÁCE

Název: Numerical Simulations of Turbine Blade Flutter
Předkladatel: Ing. Marek Pátý
Vedoucí: doc. Ing. Jan Halama, Ph.D.

SHRNUTÍ OBSAHU PRÁCE

Tématem předložené dizertační práce je numerické řešení modelů popisujících samobuzené kmitání lopatek turbín. Matematický model je založený na kombinaci dvourozměrných Eulerových rovnic pro nevazké stlačitelné proudění kombinované se soustavou obyčejných diferenciálních rovnic popisujících vychýlení a rotaci pevného tělesa lopatky. Rovnice proudění jsou numericky řešeny metodou konečných objemů na trojúhelníkových a čtyřúhelníkových sítích s rekonstrukcí gradientů (metoda nejmenších čtverců a limiting) pro zvýšení řádu přesnosti. Pohyb výpočetní sítě je řešený pomocí Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) metody, kdy je deformace oblasti definována rozinterpolováním pohybu lopatky do okolí s přihlédnutím k periodicitě oblasti. Časová diskretizace je implicitní, splňující tzv. geometrický zákon zachování. Nelineární problémy jsou řešeny explicitním pseudo-časovým krokováním s lokálním časovým krokem. Výsledná metoda je implementována a testována na čtyřech lopatkových geometriích v různých režimech. Výsledky jsou detailně rozebrány a diskutovány, přičemž je demonstrována nutnost použití kvalitních bezodrazových okrajových podmínek.

FORMÁLNÍ A JAZYKOVÁ STRÁNKA PRÁCE

Práce je psána a strukturována velmi dobře a dobře se čte. Nenarazil jsem na žádné překlepy. Úroveň angličtiny je velmi dobrá, našel jsem jen pár chyb v členech. Z hlediska matematiky je vše v pořádku, nenašel jsem žádné chyby a značení je srozumitelné a konzistentně používané. Formální stránku tedy hodnotím jako výbornou.

CELKOVÉ HODNOCENÍ PRÁCE

V první řadě bych rád vyzdvihl přehledové části práci. Zde autor zjevně nastudoval velké množství rozmanité literatury, a to jak současné, tak historické. To se týká úvodních přehledových kapitol dizertace, ale i motivace výběru numerických metod pro řešení jednotlivých podproblémů v rámci úlohy a rozboru získaných výsledků. Volba numerických metod tak není náhodným výběrem, ale je dobře motivovaná stávající literaturou.

Sílu práce vidím v implementaci a testování několika numerických metod a jejich srovnání na řadě případů. Oceňuji implementaci a srovnání různých limiterů a obšírný rozbor jejich výhod a nevýhod. Dále různé varianty časové diskretizace a zejména pak bezodrazových okrajových podmínek. Jejich formulace a hlavně pak implementace je netriviální, vzhledem k jejich nelokální povaze a použití Fourierovy transformace. Numerické experimenty jsou poměrně extenzivní a podrobně diskutované. Jasně je zde doložena nutnost použití sofistikovaných bezodrazových okrajových podmínek pro získání kvalitních výsledků u lopatkových turbín. Praktický přínos je tedy velký. Bylo by zajímavé vidět srovnání s přístupy založenými na přidání ‘absorbční vrstvy’ elementů kolem umělé hranice, ale to již přesahuje požadavky na dizertační práci.

Práci bych vytkl snad jen to, že některé aspekty použitých metod jsou popsány jen v hrubých rysech a není jasná jejich konkrétní realizace. Jde zejména o detaily některých aspektů časové

diskretizace (viz dotazy níže). Dále bych ocenil testování více možností linearizace Eulerových rovnic v okrajových podmínkách, což, předpokládám, autor v nějaké formě provedl, ale rád bych viděl detailnější rozbor (viz dotaz níže). Celkově ale, vzhledem k rozsahu práce, nejsou tyto výtky zásadní.

Celkově jde o kvalitní práci, silnou zejména po stránce implementace a testování různých variant zvolených numerických metod. Práce se zabývá velice důležitou a aktuální problematikou z hlediska praktických aplikací. Vytčené cíle jsou jednoznačně splněny s tím, že zejména výběru limiterů a okrajových podmínek bylo věnováno velké úsilí a testování různých variant. Výsledky obsažené v práci byly již z části publikovány, i když by publikační činnost mohla být silnější jak počtem, tak kvalitou. Doporučil bych připravit přinejmenším ještě jednu shrnující publikaci v kvalitnějším časopise.

Celkově mohu říci, že dizertační práce Ing. Marka Pátého má požadovanou odbornou a formální úroveň a je vědecky přínosná. Doporučuji ji proto k obhajobě.

V Praze dne 2. 9. 2022

doc. RNDr. Václav Kučera, Ph.D.

PŘIPOMÍNKY A OTÁZKY

1. Chybí některé detaily ohledně lokálního krokování v čase:

- Skutečně se berou časové kroky dané lokální CFL podmínkou, tedy se časové vrstvy na jednotlivých elementech nikdy “nesejdou”, anebo se zvolí nějaké globální časové hladiny t_n, t_{n+1} , mezi nimiž se jde pomocí více či méně mezikroků dle lokální CFL podmínky?
- Jak se efektivně určuje pořadí elementů, v jakém se aktualizují lokálním explicitním krokováním?
- Jak se dělá průměrování v (5.91) při lokálním krokování, když není jeden globálně definovaný časový krok?
- Jak se dělá Fourierova transformace v čase, když při lokálním krokování nemám pravidelné dělení v čase?
- Jak se dělá coupling tekutiny a pohybu lopatky při lokálním krokování v čase (obrázek 5.11), když má každý element vlastní časový krok - jaký časový krok se pak bere v diskretizaci pohybových ODR?

2. Základem pro uvažované bezodrazové okrajové podmínky je linearizace Eulerových rovnic. Proč se linearizuje zrovna kolem průměru fyzikálních veličin? Proč se neprůměrují např. zachovávané veličiny či charakteristické proměnné nebo jiný typ průměrování (např. typu Roe)? Vzhledem k tomu, že se linearizuje jedním stavem na celé hranici, přijde mi tato volba velmi důležitá.

3. Je skutečně levnější dělat implicitní schéma, kde se nelineární problémy řeší vnitřím cyklem s explicitním pseudo-časovým krokováním, oproti tomu od začátku řešit původní problém plně explicitním schématem?
4. Pohyb lopatky se do okolí rozinterpoluje pomocí koeficientu q , který je po částech lineární. Nebylo by lepší, aby koeficient závisel hladce na vzdálenosti, zejména v případě, kdy je více lopatek a hranice podoblastí deformace je nutné modifikovat jako v sekci 5.1.2?
5. Jaký byl typicky počet hraničních hran N_y z (5.84) v numerických experimentech?
6. Ve výsledcích pro “desátou standardní konfiguraci” se mi zdá, že metody obsažené v dizertaci v porovnání s výsledky z literatury nezachytily špičku v křivce aerodynamického tlumení v okolí $\sigma \sim -30^\circ$ (obrázek 6.20). Je tomu tak?
7. Jaká je naděje na rozšíření uvažovaných okrajových podmínek do 3D u trbínových lopatek? Bylo by pak nutné počítat 2D (resp. 3D při transformaci i v čase) Fourierovu transformaci na hranici s tvarem výseče mezikruží, kde není kartézská síť?