

Posudek disertační práce

Modelování turbulentního proudění pomocí RANS a implicitního přístupu LES s využitím nespojité Galerkinovy metody

Ing. Heleny Prausové

Předložená práce se zabývá implementací dvourovnicového modelu turbulence do softwarového balíku vyvíjeného na ZČU, aplikací tohoto rozšířeného balíku na simulace proudění v úzkých kanálech a základními testy implicitního LES v kombinaci s nespojitou Galerkinovou metodou vysokého řádu přesnosti. Práce je členěna na do tří hlavních kapitol. Po úvodní části obsahující přehled současného stavu řešené problematiky, vymezení cílů práce a popis struktury následuje první kapitola věnovaná implementaci dvourovnicového modelu turbulence. V kapitole je podrobně vysvětlen přístup založený na časovém středování Navierových-Stokesových rovnic včetně popisu dvourovnicového modelu turbulence dle Wilcoxe z roku 2006. Dále je zde diskutována modifikace tohoto modelu spočívající v nahrazení specifické rychlosti disipace ω veličinou $\ln(\omega)$, což dle autorky i dle citované literatury vede k částečnému odstranění problémů s nestabilitou výpočtu především v počátečních stádiích simulací. Dále je zde stručně popsána nespojitá Galerkinova metoda pro 2D úlohu. Rovnice modelu turbulence jsou přitom zahrnuty společně se středovanými Navierovými-Stokesovými rovnicemi do jedné monolitické formulace (tzv. *strong coupling*). Poslední část první kapitoly je věnována verifikaci pro případ obtékání hladké desky.

Druhá kapitola je zaměřena aplikačně a autorka v ní provádí simulace dvourozměrného proudění v úzkých kanálech. Kapitola opět začíná rozбором řešeného problému z hlediska současného stavu poznání. Dále následuje stručný popis experimentů prováděných na ÚT AVČR, v.v.i. Autorka formuluje úlohu pro dva typy kanálů (širší a užší mezera) a uvádí výsledky numerických simulací. Ty srovnává s experimentálními daty ÚT AVČR, v.v.i. Kapitola je zakončena diskusí ve které autorka zdůrazňuje vliv turbulence resp. přechodu z laminárního do turbulentního režimu na proudové pole v úzkých kanálech. Z publikovaných výsledků totiž vyplývá, že v případě úzkého kanálu pravděpodobně nedochází k přechodu a proudění tak zachovává laminární charakter po celé délce testovaného kanálu.

Třetí kapitola je věnována aplikaci nespojité Galerkinovy metody pro implicitní LES (ILES). Autorka cituje řadu výsledků, kdy ILES poskytuje výsledky srovnatelné s klasickým LES řešeným na jemnější síti, či lepší výsledky na srovnatelné síti. V kapitole je provedena simulace proudění mezi dvěma deskami s $Re_\tau=13\ 764$ a srovnání s teoretickými výsledky a s výsledky DGM a DNS simulací z literatury.

V závěrečném shrnutí autorka rekapituluje dosažené výsledky, explicitně uvádí vlastní přínos práce a uvádí náměty na další směry výzkumu.

Hodnocení práce

Předložená práce se zabývá velmi aktuální problematikou simulací turbulentního proudění pomocí numerických metod vysokého řádu přesnosti. Aktuálnost tématu dokládá mimo jiné i seznam citovaných zdrojů a data jejich vydání. Obzvláště přínosnou shledávám třetí kapitulu ve které se autorka věnuje implicitní LES. V této problematice totiž doposud panuje jistá určitá nedůvěra vzhledem k problémům s teoretickým rozбором. Proto je každý, ať už pozitivní či negativní příspěvek, velmi vítaný. Nicméně i implementace „klasického“ RANS přístupu pomocí

dvourovnicového modelu je velkým přínosem. Jedná se totiž o metodu široce akceptovanou v průmyslových aplikacích.

Autorka při řešení volila standardní postupy a metody. V práci jsou popsány a podrobně diskutovány použité modely a jejich implementace, jsou uvedeny formulace úloh, jejich numerické řešení spolu s porovnáním s experimentem či údaji získanými jinými autory a následný rozbor výsledků. V práci mi bohužel chybí studie závislosti řešení na zvolené síti (viz např. tzv. *Grid convergence index* dle Roache). To by přitom v zásadě neměl být problém, protože výpočty obtékání desky byly provedeny na sérii sítí s různým krokem.

Práce je napsaná přehledně, srozumitelně a s minimem chyb. Po stránce jazykové lze autorce vytknout snad jen skloňování (resp. nesklonování) prvního jména ve dvojicích jako „Laxovo-Friedrichsovo“ či „Orrovy-Sommerfeldovy“ a některé, možná poněkud nevhodně volené, termíny jako „stlačitelný řešič“ nebo „zahnížděná síť“. Jak však už bylo řečeno, jedná se o naprosté minimum chyb a nijak to nenarušuje vysoký standard předložené práce.

Autorka v práci uvádí tři publikace ve WOSu. Jedná se vesměs o příspěvky ve sborníku konference EFM. Je škoda, že se nepodařilo publikovat výsledky v impaktovaném časopise. To by vzhledem ke kvalitě předložené práce určitě neměl být problém.

Práci Ing. Heleny Prausové považuji za velmi kvalitní a rozhodně ji **doporučuji k obhajobě**.

Uvítal bych, kdyby autorka během obhajoby zodpověděla následující dotazy:

1. Na vstupu do oblasti je zadáván celkový tlak, celková hustota, nulový teplotní gradient ve směru normály, nulové složky tenzoru napětí a dvě Dirichletovy podmínky pro model turbulence. To dává dohromady 7 podmínek pro 6 rovnic. Není některá z podmínek nadbytečná? Jakým způsobem je u těchto podmínek určen směr nabíhajícího proudu?
2. Jaký vliv má volba koeficientu β_0 (str. 30) na řešení? Souvisí nějak s použitou metodou či s jejím řádem?

V Praze dne 20.9.2019

Doc. Ing. Jiří Fürst, PhD.

Západočeská univerzita v Plzni

Doručeno: 24.09.2019

ZCU 023357/2019

listy:

přílohy:

druh: Svazek



zcupes 1227202



Prof. Ing. Jaromír Příhoda, CSc.
Ústav termomechaniky AV ČR

Posudek disertační práce

Modelování turbulentního proudění pomocí RANS a implicitního přístupu LES s využitím nespojitě Galerkinovy metody

autorka Ing. Helena Prausová

Fakulta aplikovaných věd ZČU v Plzni
Studijní obor Aplikovaná mechanika

Disertační práce v rozsahu celkem 112 stran obsahuje seznam symbolů a označení, úvod, tři kapitoly, závěr, seznam literatury a publikovaných prací. Práce se zabývá využitím nespojitě Galerkinovy metody konečných prvků pro numerické modelování turbulentního proudění stlačitelných tekutin pomocí RANS a LES modelů. Těžiště práce je ve třech kapitolách, kde je popsáno modelování turbulentního proudění pomocí dvourovnicového $k-\omega$ modelu turbulence a jeho použití pro simulaci proudění v minikanálech. Dále je popsána implicitní simulace velkých vírů pomocí ILES přístupu a její ověření pro proudění v 2D kanále. Závěrem jsou shrnuty dosažené výsledky získané pomocí RANS a ILES přístupu, přínos práce a možnosti dalšího využití obou přístupů k simulaci turbulentního proudění v různých aplikacích.

V úvodní části jsou popsány přístupy k modelování turbulentního proudění od jednoduchých RANS modelů až po různé varianty modelování velkých vírů. Dále jsou uvedeny cíle disertační práce a její struktura. V první kapitole je popsáno modelování turbulentního proudění pomocí klasických dvourovnicových modelů turbulence. Jsou uvedeny základní rovnice pro proudění stlačitelné tekutiny, tj. zákony zachování a konstituční vztahy, podmíněné středování a způsoby uzavření středovaných rovnic. Hlavní pozornost je věnována $k-\omega$ modelu a jeho úpravě pro zlepšení numerické stability výpočtu. Dvourovnicový $k-\omega$ model Wilcoxe (2006) byl upraven pro diskretizaci modelu pomocí nespojitě Galerkinovy metody konečných prvků. Rovněž bylo použito omezení produkce turbulentní energie. Implementace modelu byla ověřena pomocí obtékání rovinné desky bez tlakového gradientu při Machově čísle $M = 0.2$ a jednotkovém Reynoldsově čísle $Re = 5 \times 10^6$ podle databáze NASA.

Druhá kapitola se zabývá simulací proudění stlačitelné tekutiny v minikanálech. V úvodní části jsou stručně shrnuty vztahy pro kritické Reynoldsovo číslo, kdy dochází k přechodu do turbulence. Výpočty byly porovnány s experimentálními výsledky měření v kanálech s výtokem do volného prostoru, provedenými v Ústavu termomechaniky AVČR. Upravený dvourovnicový model byl nejprve testován porovnáním průběhů tlaku v ose kanálu a smykového napětí na stěně kanálu s měřením v kanálu o výšce 10 mm a pak použit pro výpočet proudění v minikanálech s výškou $h = 0,5; 2; 3$ a 4 mm při různých tlakových poměrech včetně nadkritických. Výpočet pomocí laminárního a turbulentního modelu byl porovnán s průběhem statického tlaku. Pro výšku $h = 2$ mm byl výpočet též porovnán s interferogramy proudění v kanálu. Ze získaných výsledků bylo odhadnuto kritické Reynoldsovo číslo, které je pro minikanály vyšší než obvykle.

Třetí kapitola se zabývá simulací velkých vírů pomocí tzv. ILES přístupu, kdy je numerická vazkost implicitního schématu využita pro modelování turbulentního proudění místo subgrid modelu. V práci je uveden matematický model využívající disipativní vlastnosti nespojitě Galerkinovy metody při dostatečně vysokého řádu přesnosti. Matematický model, tvořený 3D

systemem Navierových-Stokesových rovnic bez filtrování a bez explicitního subgridního modelu, je použit pro výpočet turbulentního proudění mezi dvěma nekonečnými rovnoběžnými deskami na velmi hrubé výpočetní síti. Implementovaný model byl testován pomocí vyvinutého 2D turbulentního proudění v kanále a porovnán jednak s publikovanými výsledky získanými přímou numerickou simulací a ILES metodou. Výsledky získané pomocí ILES metody se středně vysokým řádem nespojitě Galerkinovy metody a velmi hrubou sítí dávají celkem dobrou shodu s porovnávanými daty.

Poznámky a připomínky

K práci nemám zásadní připomínky, týkající se přístupu k řešení dané problematiky, výběru modelů turbulentního proudění a jejich použití pro simulaci vybraných případů. Práce je velmi pečlivě a přehledně napsána prakticky bez prohrěšků proti češtině. Shrnutí matematických modelů turbulence svědčí o tom, že autorka má dobrý přehled o současných přístupech k numerickým simulacím i modelování turbulentního proudění. Dále uvádím drobné připomínky k práci:

- V kap. 1.2 chybí uvedení okrajové podmínky na stěně pro turbulentní veličiny k a zejména ω a $\hat{\omega}$. Konkrétní hodnoty jsou popsány pro výpočet obtékání desky.
- Pro posouzení hladiny turbulence vnějšího resp. nabíhajícího proudu se zpravidla používá stupeň či hladina turbulence Tu . Při ověření implementace RANS modelu je použita jako vstupní hodnota velmi nízká turbulentní energie, takže se dostane $Tu = 0,0078 \%$, což je hodnota velmi malá, nedosažitelná v žádném experimentálním zařízení. Pro testování implementace $k-\omega$ modelu by bylo vhodnější použít např. výsledky DNS simulace obtékání desky podobně jako při simulaci velkých vírů.
- Výsledky výpočtů v kanále s výškou $h = 10$ mm (obr. 2.6 až 2.10) by bylo výhodnější vynést v bezrozměrném tvaru podobně, jako jsou vyneseny pro minikanály. Platí to zejména o tření na stěně, kde by bylo možné porovnat součinitel tření C_f s empirickými vztahy.
- V popisu matematického modelu v odst. 3.1.2 na str. 71 je celková měrná energie označena e a měrná vnitřní energie ε . Je celkem zavedený způsob označení E pro celkovou vnitřní energii a e pro vnitřní energii, podobně jako H pro celkovou entalpii a h pro entalpii.
- V závěru 3. kapitoly se uvádí, že „...velmi slibná je tato metoda v oblasti přechodového proudění, jak bylo již prokázáno při simulacích odtržení proudu a přechodu do turbulence na leteckém profilu...“. Je třeba podotknout, že se jedná pouze o přechod v odtrženém proudění,

Dotazy

- Proč je zvolena na vstupu do rozšířené části kanálu s výškou $h = 10$ mm intenzita turbulence $Tu = 1,3\%$ a poměr vazkostí $\mu_t/\mu = 10$ (str. 52) a pro kanály s výškou $h = 0,5$ až 4 mm byly použity hodnoty $Tu = 0,5\%$ a $\mu_t/\mu = 0,1$ (str. 61)? Rychlost na vstupu do rozšířené části kanálu byla v obou případech cca 30 m/s.
- V čem se liší implementovaný ILES model od práce Cartona de Wiart (2014), se kterou jsou porovnány výsledky simulace vyvinutého turbulentního proudění v kanálu?
- Jaký je rozdíl mezi zadáním počátečních podmínek pro výpočet pomocí LES a ILES přístupu?
- Bylo by možné zadat pro výpočet proudění v kanálu skutečný tlakový spád bez použití přídatných zdrojových členů?

Závěr

Hlavním přínosem disertační práce je implementace dvou různých matematických modelů do numerického řešiče, založeného na nespojitě Galerkinově metodě konečných prvků – jednak RANS $k-\omega$ modelu turbulence, který byl použit výpočet stlačitelného proudění minikanálech a jednak ILES modelu implicitní simulace velkých vírů, založeného na disipativních vlastnostech nespojitě Galerkinovy metody konečných prvků při použití vyšších řádů přesnosti v prostoru, který byl ověřen pomocí vyvinutého turbulentního proudění v kanále.

Řešení obou úloh představuje velmi aktuální problematiku v oblasti matematického modelování turbulentního proudění. Získané výsledky jsou přínosem v oboru matematického modelování. Zvolené postupy řešení odpovídají současnému stavu dané problematiky. Implementace obou modelů a jejich ověření představuje dobrý základ pro další výzkum, např. modelování proudění v minikanálech s uvažováním přechodu a použití ILES metody pro simulaci proudění s odtržení včetně přechodu na profilech a lopatkách. Výsledky byly přiměřeně publikovány ve sbornících mezinárodních konferencí uvedených v databázi WoS. Uvedené připomínky se týkají formálního zpracování práce a nijak nesnižují kvalitu dosažených výsledků.

Ing. Helena Prausová zcela splnila stanovené cíle disertace a prokázala, že má odpovídající znalosti z numerické matematiky i mechaniky tekutin a že je schopna samostatně vědecky pracovat. Disertace splňuje všechny podmínky podle §47 zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. ve znění pozdějších předpisů a proto ji doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 6. září 2019