

Oponentský posudek disertační práce

Vypracoval: Ing. Petr Straka, Ph.D.

Název disertační práce:

“Numerical solution of turbulent flow using DES model with mesh adaptation“

Autor práce: Ing. Lukáš Hájek

Předložená disertační práce se zabývá implementací hybridního RANS/LES modelu turbulence. Zvláštní pozornost je věnována implementaci adaptivního zjemnění výpočetní sítě.

Cíle práce jsou:

1. implementace numerického toku HLLC včetně analytického řešení Jacobiho matic,
2. podílet se na vývoji in-house řešiče „Orion“,
3. popis a implementace různých hybridních RANS/LES modelů turbulence v implicitní formulaci,
4. odvodit novou verzi hybridního modelu X-LES s přepínací funkcí převzatou z modelů SST-DDES a SST-IDDES,
5. rozšířit 2D algoritmus adaptivního zjemnění sítě pro použití na 3D sítích s několika identickými vrstvami,
6. navrhnout několik adaptačních kritérií pro detekci turbulentních jevů,
7. testovat a porovnat implementované metody RANS a RANS/LES,
8. verifikovat algoritmus adaptivního zjemnění sítě a testovat vliv různých adaptačních kritérií,
9. ukázat vliv adaptivního zjemnění sítě na výsledky hybridního modelu RANS/LES.

Autor začíná úvodem, ve kterém stručně popisuje problematiku modelování turbulence. Je uveden popis současného stavu poznání v oboru modelování turbulence pomocí hybridních modelů RANS/LES. Dále jsou zde definovány cíle disertační práce. Následující kapitola popisuje matematický model turbulentního proudění včetně dvourovnicového modelu turbulence. Další rozsáhlá kapitola detailně popisuje použitou numerickou metodu. Autor zde věnuje značný prostor analytickému odvození Jacobiho matic numerických toků a zdrojových členů. Je zde rovněž uvedena podkapitola popisující kritéria a postup adaptivního zjemnění 2D sítí složených z trojúhelníkových a čtyřúhelníkových buněk. V následující kapitole jsou uvedeny čtyři testovací příklady zaměřené na testování adaptivního zjemnění sítě ve 2D, paralelizaci, testování přepínacích funkcí hybridních modelů RANS/LES a porovnání výsledků několika hybridních modelů. Uvedené numerické výsledky jsou částečně porovnány s experimentálními daty. Následuje kapitola pojmenovaná „Výsledky“, která obsahuje další testovací příklad na kterém jsou porovnány výsledky různých modelů turbulence, vliv přepínacích funkcí v hybridních modelech RANS/LES a vliv adaptivního zjemnění sítě. Výsledky jsou opět částečně porovnány s experimentálními daty. Poslední závěrečná kapitola shrnuje dosažené výsledky a definuje směr budoucího vývoje.

- Lze konstatovat, že autor dosáhl všech stanovených cílů disertační práce v plném rozsahu.
- Rozbor současného stavu řešené problematiky, kterou je numerická simulace turbulentního proudění pomocí hybridních modelů RANS/LES je dostatečný.

- Praktický přínos práce lze spatřovat zejména v kapitole 3.5, kde jsou analyticky odvozeny Jacobiho matice numerických toků a zdrojových členů a částečně pak i v podkapitole 3.8.1, kde jsou uvedena různá kritéria pro adaptivní zjemnění sítě
- Teoretický přínos práce lze patrně spatřovat v podkapitole 2.2.2 v části popisující modely DX-LES a IDX-LES.
- V práci uvedené výsledky, stejně jako autorova publikační činnost jasně dokládají jednak vhodnost použitých metod, jednak patřičné znalosti v oboru matematického modelování a numerické simulace stlačitelného turbulentního proudění.
- Postup řešení uvedené problematiky je správný.
- Práce je obsahově plná, přehledně strukturovaná, srozumitelná, jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují. Po formální stránce je práce velice přehledná, konzistentní, vybavená všemi náležitostmi disertační práce.

Práce je napsána velmi přehledně a srozumitelně jen s některými drobnými či formálními nepřesnostmi. Např. počet stran buňky N_i patrně nemá fyzikální rozměr m^2 , jak je uvedeno v seznamu označení. Zdá se, že ve vztazích (3.26a) až (3.26c) místo indexu j mělo být h . Pokud pro konvektivní toky modelu turbulence platí vztah (3.46) i na vstupní hranici, pak se oponent domnívá, že by pro vstupní okrajovou podmínku mělo platit $k_R = k_\infty$, $\omega_R = \omega_\infty$ a nikoliv, jak udávají vztahy (3.64a) a (3.64b), které by platily pro centrální schéma. Vztahy (3.134) a (3.136) neudávají Jacobiho matice zdrojových členů modelu turbulence, jak je v práci uvedeno. Jedná se o Jacobiho matice pouze záporné části zdrojových členů, aniž by to bylo v práci jakkoliv komentováno. Jde nicméně o formality, které nemají na výsledky předložené práce vliv.

Autor v předložené práci implementoval známé modely turbulence, numerická schémata a okrajové podmínky publikované již jinými autory. Jedním z hlavních přínosů předložené disertační práce je úprava modelu X-LES na varianty „delayed X-LES“ a „improved delayed X-LES“ po vzoru modelů SST-DDES a SST-IDDES. Toto lze patrně akceptovat, přestože původní autor modelu X-LES již ve zprávě NLR-TP-2012-333 (J.C.Kok, H. van der Ven, 2012) uvedl několik výsledků získaných pomocí modelu „delayed X-LES“, nicméně bez jakýchkoliv implementačních detailů.

Z popisu 2D algoritmu adaptivního zjemnění sítě není zcela zřejmé, zda dochází ke zjemnění sítě i ve třetím směru. Pokud by tomu tak nebylo, pak je otázka, jak skutečně může adaptivní zjemnění ovlivnit výsledky v oblasti, kde model pracuje v režimu LES, uvažíme-li, že délkové měřítko „subgrid“ modelu SST-DES je $\Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$.

Zásadní podmínkou při použití modelu LES, a to platí i pro hybridní modely RANS/LES, je zachytit alespoň 80% kinetické energie fluktuací přímo v simulovaných vírech. V předložené práci není nikde uveden podíl modelované a celkové energie fluktuací, aby bylo možno posoudit splnění této podmínky.

Další otázkou je, jaký vliv má použitá numerická metoda na rozpad velkých vírů v turbulentní kaskádě. K tomu by bylo třeba posoudit energetické spektrum, v práci však není nikde uvedeno.

Pokud v podkapitole 4.1.1 autor zmiňuje dobrou shodu numerických výsledků s experimentálními daty, bylo by vhodné data v práci skutečně porovnat, ne jen toto slovně zmínit.

V podkapitole 2.2.2 autor uvádí, že je v této práci použita stochastická verze modelu X-LES. Z obrázků 4.20, 4.21 a 5.15, 1.16 není patrný žádný rozdíl mezi tímto modelem a „nestochastickým“ SST-DES (energetická spektra bohužel není možné porovnat), přitom ve zprávě NLT-TP-2009-327 (J.C.Kok, H. van der Ven, 2009) autoři prezentují zásadní vliv stochastického modelu na destabilizaci volné smykové vrstvy a na rozpad 2D vírové řady.

Otázky pro autora:

- Prosím, zda by mohl autor pro příklady z kapitol 4.4 a 5 vyhodnotit poměr $k_{resolved} / (k_{resolved} + k_{sgs})$.
- Prosím, zda by mohl autor pro testovací příklad z kapitoly 4.4 vyhodnotit energetické spektrum a porovnat výsledky modelů SST-DES a X-LES (stochastického) s experimentálními daty (např. Obr. 40 v odkazované literatuře [8]).
- Prosím, zda by mohl autor okomentovat volbu časového kroku simulace v příkladech z kapitol 4.4 a 5.
- Prosím, zda by mohl autor okomentovat velký rozdíl mezi modely SST-DDES/IDDES a DX/IDX-LES z hlediska přepínání režimů RANS/LES (viz. Obr. 5.7 a 5.8)

Z praktického hlediska je přínosná kapitola 3.5, kde jsou analyticky odvozeny Jacobiho matice numerických toků a zdrojových členů jako alternativa k technikám numerického či automatického derivování.

Autor předložené práce bezesporu výrazně přispěl k vývoji in-house řešiče „Orion“.

Předloženou disertační práci doporučuji k obhajobě před komisí.

V Praze 8. dubna 2024

Ing. Petr Straka, Ph.D.