

Doc. Ing. Zdeněk Pátek, CSc., MS.
Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.
Beranových 130
199 05 Praha - Letňany

Oponentský posudek
disertační práce Ing. Víta Štorcha
Verified Unsteady Model for Analysis of Contra-Rotating Propeller Aerodynamics

Posuzovaná práce z oboru Termomechanika a mechanika tekutin byla předložena na Fakultě strojní ČVUT v Praze v září 2017. Práce je napsána v anglickém jazyce, je rozsáhlá, čítá 154 strany rozdělené do deseti kapitol, seznamu literatury a tří příloh.

Práce z oblasti Computational Fluid Dynamics (CFD) se zabývá novým výpočetním modelem pro protiběžné vrtule (rotory).

V první kapitole Introduction autor práce vysvětluje důvody, které vedly k volbě tématu, a stručně popisuje současný stav výpočetního řešení protiběžných vrtulí.

Druhá kapitola, nazvaná Propeller Aerodynamics, shrnuje základy aerodynamiky vrtulí, seznamuje s hlavními výpočetními metodami a uvádí do problematiky aerodynamiky protiběžných vrtulí.

Třetí kapitola Potential Flow Theory and Related Methods popisuje základní principy potenciálního proudění a jeho řešení.

Čtvrtá kapitola Formulation of Aims nad Objectives uvádí hlavní cíl práce, tj. vytvoření aerodynamického modelu protiběžné vrtule pro nízká Reynoldsova čísla a získání nových poznatků o aerodynamice protiběžných vrtulí a jejich propulzní účinnosti.

V páté kapitole Vortex Wake Model autor shrnuje různé aspekty modelování úplavu za tělesem pomocí vírů.

Šestá kapitola Propeller Blade Representation se zabývá dvěma modely vrtulového listu. Náhradou listu nosnou čárou a náhradou listu pomocí trojrozměrné panelové metody s obdélníkovým vírem na panelech .

V sedmé kapitole Coupled 2D Integral Boundary Layer Model se zabývá modelem mezní vrstvy. Je řešena jako stacionární bez vlivu stlačitelnosti pomocí dvourovnicového modelu (Von Kármánova hybnostní rovnice a rovnice pro tvarový parametr kinetické energie). Uvažuje laminární a turbulentní korelační vztahy, jako kritérium přechodu používá metodu „e⁹“. Pro sdružení s řešičem nevazkého proudění využívá kvazi-simultánní metodu založenou na Veldmanově práci. Základní myšlenkou je nalézt jednoduchý vztah mezi pošinovací tloušťkou mezní vrstvy a rychlostí na hranici mezní vrstvy a uvažovat tak rychlost na hranici mezní vrstvy jako proměnnou.

Osmá kapitola Experimental Investigation of Contra-Rotating Propellers popisuje zařízení pro měření tahu a momentu malých protiběžných vrtulí a použité modelové vrtule (průměr 0,559 m). Zařízení umožňuje měnit podélnou vzdálenost mezi jednotlivými vrtulemi a rovněž nezávisle ovládat otáčky jednotlivých vrtulí. Vrtule jsou poháněny

elektromotory. Zařízení umožňuje měřit tah a krouticí moment vrtulí pomocí tenzometrických měřicích členů. Doplňkově byl měřen hluk vrtule.

V deváté kapitole Results, Analysis and Discussion jsou shrnuty a diskutovány výsledky výpočtů i experimentálních měření. Kapitola je zaměřena na srovnávání různých výpočetních metod, na srovnávání výpočtů s experimenty a na získání aerodynamických poznatků o protiběžných vrtulích.

Desátá kapitola Conclusions and Recommendations shrnuje provedenou práci a navrhuje směry dalšího pokračování.

Oddíl References obsahuje 62 položky, oddíl Cited work of the author 9 položek.

Appendix A se zabývá čtyřúhelníkovým panelem s konstantním zdrojem.

Appendix B předkládá analýzu eliptického křídla komerčně dostupným programem CFD.

Appendix C se zabývá různými možnostmi řešení konce křídla u modelu s nosnou čarou.

Dosažení stanoveného cíle

Vytyčené cíle formulované v kapitole 4 – sestavení výpočetního modelu protiběžných vrtulí pro nízká Reynoldsova čísla a získání nových poznatků o protiběžných vrtulích - byly celkově splněny. Navrženou zjednodušenou vazbu mezi mezní vrstvou a vnějším prouděním lze považovat za nový přístup, který může být za určitých předpokladů vhodný a výhodný.

Úroveň rozboru současného stavu

Rozbor současného stavu je dostatečný. Rozbor současného stavu výpočetních metod odpovídá požadavkům. Pokud se jedná o aerodynamiku samotných protiběžných vrtulí, poněkud překvapivě nejsou v soupisu literatury uvedeny a v rozboru zmíněny aerodynamické práce z období praktického využívání výkonných protiběžných vrtulí, např. zprávy NACA a britské zprávy ARC.

Teoretický přínos práce

Za hlavní teoretický přínos práce lze považovat novou jednoduchou formulaci lineárního vlivového koeficientu (vztah 7.36) v kvazisimultánní metodě interakce mezní vrstvy s nevazkým řešením. Autor by měl podrobněji zmínit odvození tohoto vztahu a měl by alespoň v určité míře pojednat o mezích platnosti tohoto vztahu.

Praktický přínos práce

Výsledky práce přispívají k možnostem návrhu protiběžných vrtulí (rotorů), vzhledem k rychlosti a určitým zjednodušením je předložená výpočetní metoda vhodná zejména pro předběžný návrh. Pro praktické použití je třeba věnovat pozornost výše zmíněným mezím platnosti vztahu (7.36) a vůbec celkově omezením metody.

Významem pro praktické rozvahy se vyznačují rovněž výsledky výpočtů různých provedení protiběžné vrtule, různých režimů jejího chodu a srovnání protiběžné vrtule s jednoduchou vrtulí uvedené v kap. 9.

Vhodnost použitých metod řešení

Kombinace trojrozměrné panelové metody s dvourozměrným řešením mezní vrstvy je pro rychlý výpočet protiběžných vrtulí (rotorů) vhodná. Zejména když autor práce zapracoval do výpočtu tvar profilů listů, vývoj a vzájemné interakce úplavů a neosové nabíhání proudu vzduchu.

Návrh a realizace experimentálního zařízení na měření protiběžných vrtulí a jeho využití v rámci disertační práce si zaslouží kladné hodnocení.

Avšak vrtule ověřovacího experimentu nebyly navrženy vhodně, protože, jak sám autor uvádí, vrtule zřejmě částečně pracovaly ve stavu odtrženého proudění, jehož spolehlivé řešení není v možnostech předložené výpočetní metody. V tomto kontextu se tvrzení v kap. 9.6 str. 129 o souhlasu experimentálních a výpočetních výsledků překonávajícím očekávání nejví jako dokonale podložené, což ukazují i grafy s výsledky v kapitole 9. Možná by místo časově i nákladově náročného návrhu a výroby vlastních vrtulí bylo efektivnější přizpůsobit experimentální zařízení pro upravené komerčně dostupné modelářské vrtule vhodného průměru, aby se mohly lépe experimentálně zkoumat režimy odpovídající výpočtům.

Způsob aplikace použitých metod řešení

Použité metody odpovídají řešenému problému.

Rozdíly mezi vypočtenými výsledky a experimentálními výsledky autor komentuje a naznačuje možné příčiny v různých zjednodušeních výpočetních metod. Chybí podrobnější diskuze nejistot měření, která by přispěla k přesnějšímu posouzení závažnosti rozdílů mezi výpočtem a experimentem.

Průkaz odpovídajících znalostí v oboru

Disertační práci autor prokázal, že disponuje v oboru Termomechanika a mechanika tekutin znalostmi odpovídajícími absolvování doktorského stupně studia a je schopen odborné práce na odpovídající úrovni.

Formální úroveň práce

Práce je dosti rozsáhlá. Je uspořádána přehledně, orientaci usnadňuje podrobné víceúrovňové členění a podrobný seznam symbolů. Vybavení grafy a obrázky je velmi dobré, škoda, že někdy se nachází vysvětlující text k obrázku na jiné straně, než obrázek. Většinu grafů by prospěly popisy os a legend většími typy, které by se velikostí tolik nelišily od textu práce (je to nepříjemné zejména u drobných indexů) a výraznější provedení křivek a bodů.

Předložení práce v anglickém jazyce je třeba hodnotit vysoce kladně; jazyková úroveň nemohla být oponentem posouzena.

Otázky

- 1) Jak bylo odvozeno vyjádření vlivového členu bez použití derivací pouze na základě nevazké rychlosti na stěně (rov. 7.36) ?
- 2) Mohl by autor uvést stručnou rozvahu o aplikaci pro různé profily a úhly náběhu ?

Závěr

Práci doporučuji k obhajobě a s podmínkou, že autor práce uspokojivě odpoví na položené otázky, doporučuji udělení akademického titulu doktor (Ph.D.) podle §47 zákona 111/1998 Sb. v platném znění.

V Praze 04. ledna 2018