

ČVUT V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2010

Jana Kuklová

originál zadání bakalářské práce

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám žádný závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 31. května 2010

Jana Kuklová

Abstrakt

Autor: Jana Kuklová
Název: Metody zviditelnění proudění na obtékaném tělese
Škola: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta: Fakulta dopravní
Rok vydání: 2010
Počet stran: 68
Klíčová slova: vizualizace proudění, infračervená termografie, mezní vrstva

Bakalářská práce uvádí přehled pojmů z aerodynamiky nízkých rychlostí a vizualizačních metod využívaných pro experimenty v této oblasti. Dále shrnuje podklady pro využití infračervené termografie k vizualizaci proudění na obtékaném tělese. Praktická část aplikuje teoretické poznatky při experimentálních měřeních v daných laboratorních podmínkách a vyhodnocuje využití termokamery jako vizualizační metody. Výstupy vizualizace pomocí infračervené termografie jsou porovnány s vizualizací olejovým filmem a matematickým modelem.

Abstract

Author: Jana Kuklová

Title: Visualization Methods on a Body Subject to a Fluid Flow

University: Czech Technical University in Prague

Faculty: Faculty of Transportation Sciences

Year of publication: 2010

Number of pages: 68

Key words: flow visualization, infrared thermography, boundary layer

The thesis presents the scope of low-speed aerodynamics terms and visualization methods use for experiments in this field. Moreover, it brings together bases of infrared thermography use for fluid flow circumfluenting the solid body visualization. The experimental part of this bachelor thesis applies the theoretical knowledge to practical laboratory measurements and evaluates the possible utilization of the infrared system as a fluid flow visualization tool. Finally, the results obtained from infrared visualization are confronted with traditional oil film visualization method and mathematical simulation model.

Obsah

Seznam použitých konstant a veličin.....	8
Seznam zkratk.....	10
Slovník pojmů.....	11
Předmluva.....	12
Úvod.....	13
1 Základní pojmy z aerodynamiky.....	14
1.1 Základní fyzikální veličiny.....	14
1.1.1 Stavové veličiny.....	14
1.1.2 Fyzikální vlastnosti tekutin.....	16
1.2 Popis proudění tekutin.....	17
1.3 Typy proudění.....	19
1.4 Obtékání pevného tělesa.....	19
1.5 Mezní vrstva.....	21
1.6 Profil.....	23
2 Metody vizualizace proudění tekutin.....	25
2.1 Vizualizace zaváděním látek do proudící tekutiny.....	26
2.1.1 Látky tvořící souvislá vlákna.....	26
2.1.2 Částice.....	27
2.2 Vizualizace založená na povrchové úpravě obtékaného tělesa.....	28
2.2.1 Chemické metody.....	28
2.2.2 Fyzikální metody.....	28
2.2.3 Mechanické metody.....	28
2.3 Vizualizace termokamerou.....	29
3 Teorie infračervené termografie.....	30
3.1 Teplota.....	30
3.2 Teplo a přenos tepla.....	31
3.2.1 Přenos tepla vedením. Kondukce.....	31
3.2.2 Přenos tepla prouděním. Konvekce.....	32
3.2.3 Přenos tepla zářením. Radiace.....	33
3.3 Elektromagnetické záření.....	34
3.4 Elektromagnetické spektrum.....	34

3.5	Koncepce absolutně černého tělesa	35
3.6	Planckův distribuční zákon	36
3.7	Stefanův-Boltzmannův zákon	38
3.8	Wienův zákon posunu	38
3.9	Reálná tělesa. Kirchhoffův-Bunsenův zákon	39
4	Infračervené měřicí systémy	41
4.1	Pracovní pásmo	41
4.2	Rychlost odezvy	41
4.3	Infračervené detektory	42
4.3.1	Fotonové detektory	42
4.3.2	Tepelné detektory	42
4.4	Způsob detekce infračerveného záření	43
5	Měření termokamerou a princip vizualizace	44
5.1	Faktory ovlivňující měření	44
5.2	Stanovení korekčních koeficientů	46
5.3	Princip vizualizace termokamerou	47
6	Praktické měření – vizualizace termokamerou	50
6.1	Parametry měření	50
6.2	Postup měření	51
6.3	Vyhodnocení termogramů	53
7	Praktické měření – srovnání vizualizačních metod	57
7.1	Vlákna	57
7.2	Olej	59
7.3	Matematický model	61
8	Závěr	63
	Literatura a jiné zdroje informací	64
	Příloha A: Termokamera ThermaCAM™ P65	
	Příloha B: Spektrální propustnost atmosféry [35]	
	Příloha C: Odvození obecné rovnice měření	
	Příloha D: Tunel 750 x 550 mm ČVUT FSI U207.1	
	Příloha E: Profil NACA 63A 418(21)	

Seznam použitých konstant a veličin

Konstanty, jejich označení a hodnoty

Molární plynová konstanta	$R_m = 8,314\ 41\ \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Boltzmannova konstanta	$k = 1,380662\cdot 10^{-23}\ \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Rychlost světla ve vakuu	$c = 2,99792458\cdot 10^8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Stefanova-Boltzmannova konstanta	$\sigma = 5,67032\cdot 10^{-8}\ \text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-4}$
Planckova konstanta	$h = 6,626176\cdot 10^{-34}\ \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
První radiační konstanta	$C_1 = 2\pi hc^2 = 3,741775\cdot 10^8\ \text{kg}\cdot\text{m}^4\cdot\text{s}^{-3}$
Druhá radiační konstanta	$C_2 = \frac{hc}{\lambda} = 1,438769\cdot 10^{-2}\ \text{m}\cdot\text{K}$
Wienova konstanta (třetí radiační konstanta)	$b = C_3 = 2,89779\cdot 10^{-3}\ \text{m}\cdot\text{K}$
Ludolfovo číslo	$\pi = 3,141592654$
Eulerovo číslo	$e = 2,718281828$

Označení použitých veličin a jejich jednotky

Aerodynamický součinitel	$[c_R] = 1$
Délka	$[L] = \text{m}$
Dynamická viskozita	$[\eta] = \text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2} = \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
Energie fotonu ¹	$[E_f] = \text{J} = \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
Frekvence	$[v] = \text{Hz} = \text{s}^{-1}$
Hloubka profilu	$[c] = \text{m}$
Hmotnost	$[m] = \text{kg}$
Hustota	$[\rho] = \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Intenzita turbulence	$[Tu] = 1$
Intenzita vyzařování	$[M_e] = \text{W}\cdot\text{m}^{-2} = \text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$
Kinematická viskozita	$[v] = \text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
Machovo číslo	$[M] = 1$
Měrná plynová konstanta	$[r] = \text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Molární hmotnost	$[M_m] = \text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$
Napětí	$[U] = \text{V} = \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$
Objem	$[V] = \text{m}^3$
Plocha, průřez	$[A] = \text{m}^2$
Poloměr náběžné hrany	$[r] = \text{m}$

¹ Zpravidla se udává v elektronvoltech a platí $1\text{eV} = 1,602\cdot 10^{-19}\ \text{J}$.

Prohnutí profilu	$[m] = m$
Reynoldsovo číslo	$[Re] = 1$
Rychlost proudící tekutiny	$[w] = m \cdot s^{-1}$
Rychlost přenosu tepla (tepelný tok)	$\left[\frac{dQ}{dt} \right] = J \cdot s^{-1} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
Rychlost zvuku	$[a] = m \cdot s^{-1}$
Síla	$[F] = N = kg \cdot m \cdot s^{-2}$
Smykové napětí	$[\tau] = Pa = N \cdot m^{-2} = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
Součinitel povrchového tření	$[c_f] = 1$
Součinitel přenosu tepla prouděním	$[h] = W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} = kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
Součinitel stlačitelnosti	$[\delta] = Pa^{-1} = kg^{-1} \cdot m \cdot s^2$
Součinitel tepelné vodivosti	$[\lambda] = W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} = kg \cdot m \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
Spektrální hustota vyzařování (pro frekvence)	$[H_\nu] = J \cdot m^{-2} = kg \cdot s^{-2}$
Spektrální hustota vyzařování (pro vlnové délky)	$[H_\lambda] = W \cdot m^{-3} = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}$
Spektrální absorptivita	$[\alpha_\lambda] = 1$
Spektrální emisivita	$[\varepsilon_\lambda] = 1$
Spektrální reflektivita	$[\rho_\lambda] = 1$
Spektrální transmisivita	$[\tau_\lambda] = 1$
Teplo	$[Q] = J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
Teplotní spád	$[AT] = K$
Termodynamická teplota	$[T] = K$
Tlak	$[p] = Pa = N \cdot m^{-2} = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
Tloušťka mezní vrstvy	$[\delta] = m$
Tloušťka profilu	$[t] = m$
Úhel náběhu	$[\alpha] = 1$
Vlnová délka	$[\lambda] = m$
Vzdálenost	$[y] = m$

Seznam zkratek

IČ		infračervené
LW	<u>L</u> ong <u>W</u> avelength	dlouhovlnné
NIR	<u>N</u> ear <u>I</u> nfr <u>a</u> red	blízké infračervené
PIV	<u>P</u> article <u>I</u> mage <u>V</u> elocimetry	obraz rychlostí částic
RTG	<u>R</u> oent <u>g</u> en	rentgenové
SW	<u>S</u> hort <u>W</u> avelength	krátkovlnné
UV	<u>U</u> ltrav <u>i</u> olet	ultrafialové

Slovník pojmů

Absorpce – pohlcení, pohlcování

Absorptivita – koeficient pohltivosti; poměr pohlceného a dopadajícího zářivého toku

Emise – vyzáření, vyslání záření

Emisivita – koeficient sálání; poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa (vlastnost materiálu)

Emitivita, emitance – intenzita vyzařování

Kondukce – vedení; přenos tepla vedením

Konvekce – proudění; přenos tepla prouděním

Proudnice – křivka, jejíž tangenta v kterémkoli bodě splývá se směrem rychlosti tekutiny v tomto bodě

Pyrometr – bezkontaktní teploměr (podskupina termometrů)

Pyrometrie – bezdotykové měření teplot

Radiace – záření, vyzařování, sálání; přenos tepla zářením

Reflektivita – koeficient odrazivosti; poměr odraženého a dopadajícího zářivého toku

Reflexe – odraz, odražení

Termografie – bezdotykové měření teplotních polí

Termogram – obrazový výstup termovizního měření

Termometr – teploměr

Termometrie – obor zabývající se měřením teplot

Termovize – původ slova termovize pochází z registrované ochranné značky společnosti FLIR Systems Thermovision® a jeho význam odpovídá slovu termografie

Transmise – propuštění, propouštění, prostoupení

Transmisivita – koeficient propustnosti; poměr propuštěného a dopadajícího zářivého toku

Předmluva

Tato bakalářská práce vznikla ve spolupráci s Ústavem mechaniky tekutin a energetiky na Fakultě strojní ČVUT v Praze, kde se mladí vědci zabývají návrhem profilů pro větroně a řízením proudění v mezní vrstvě obtékaného profilu za účelem zlepšení jeho aerodynamických vlastností. Pro řešení dané problematiky, jež spadá do aerodynamiky nízkých rychlostí, se využívá řada experimentálních metod, mezi něž patří i vizualizace proudění.

Na základě poznatků z odborné literatury se objevila možnost vyzkoušet pro zviditelnění proudění na obtékaném tělese vedle tradičních metod i termokameru. Teoretické úvahy o použitelnosti termokamery pro vizualizaci proudění v laboratorních podmínkách na Fakultě strojní se pak ukázaly jako vhodné téma pro zpracování v bakalářské práci.

Na tomto místě bych chtěla v první řadě poděkovat Bc. Vendule Rensové, díky níž jsem se dostala do kontaktu s týmem, který se zabývá aerodynamikou leteckého profilu. Dále pak děkuji Ing. Lukáši Popelkovi, Ph.D., který s nápadem využití termokamery pro vizualizaci proudění přišel, značnou měrou přispěl k sestavení zadání bakalářské práce a následně mi obětoval svůj drahocenný čas pro konzultace odborných záležitostí z oblasti aerodynamiky.

Dále pak patří velký dík Ing. Natálii Součkové a Ing. Milanu Matějkovi, Ph.D. za skvělou pracovní atmosféru v laboratoři při praktických měřeních a za velmi užitečné poznatky k praktickým měřením, které vycházely z jejich zkušeností.

V neposlední řadě bych také ráda poděkovala vedoucím mého projektu na Fakultě dopravní, Ing. Tomáši Vítů, Ph.D. a RNDr. Zuzaně Malé, Ph.D., kteří mi umožnili se výše zmíněné problematice věnovat. Speciální poděkování pak patří vedoucímu bakalářské práce, Ing. Tomáši Vítů, Ph.D., za poskytnuté konzultace a neocenitelné postřehy z pohledu člověka, který se danou problematikou přímo nezabývá.

Na závěr děkuji celé svojí rodině za podporu a trpělivost, a to zejména během posledních dní před odevzdáním bakalářské práce.

Úvod

Hlavním cílem této práce bylo nalézt způsob, jak v daných laboratorních podmínkách provést vizualizaci proudění na obtékaném tělese termokamerou.

Nezbytnou podmínkou pro dosažení vytyčeného cíle bylo vypracování příslušných teoretických podkladů pro samotné měření. První kapitola se tedy věnuje základním pojmům z aerodynamiky, které jsou nezbytně nutné pro vysvětlení pozorovaných jevů při vizualizaci. Druhá kapitola pak představuje přehled a charakteristiky standardních vizualizačních metod, jež se všeobecně využívají pro experimenty z oblasti aerodynamiky nízkých rychlostí.

Následující tři kapitoly jsou souhrnem teoretických podkladů pro využití termokamery jako vizualizační metody. Nejprve je uveden všeobecný teoretický základ, na němž je infračervená termografie založena. Dále je provedena klasifikace infračervených měřicích systémů podle různých kritérií. Na základě této klasifikace si lze vytvořit představu o možnostech a vlastnostech termokamery, která byla pro praktická měření využita. V poslední teoretické části je pak uveden všeobecný postup měření termokamerou, jenž je doplněn o diskuzi týkající se vizualizace termokamerou v laboratorních podmínkách.

Praktická měření a jejich zpracování jsou rozdělena do dvou částí (kapitol). První uvádí analýzu podmínek měření v laboratoři na Fakultě strojní a samotný postup měření společně s vyhodnocením. Druhá část praktického měření se pak věnuje porovnání výstupů z první části měření s tradičními metodami vizualizace a pro zajímavost i s výstupy matematického modelování.

Na základě dosažených výsledků mohly být vyvozeny závěry o použitelnosti metody vizualizace termokamerou a případné možnosti její aplikace pro další specializovaná měření.