

## Aerodynamika a mechanika letu - 3. díl

V tomto díle zařadíme podrobný rozbor aerodynamických vlastností padáku nezvislých na vlivu dynamického tlaku viz "Aerodynamika a Mechanika letu - 1. díl" a velikosti působících síl viz "Aerodynamika a Mechanika letu - 2. díl".

Aerodynamické vlastnosti jednotlivých částí padáku ovlivňují následující parametry:

- tvar jednotlivých částí, tedy např. profil vrcholu, průměry, tvar dorysní tvar vrcholu apod.

- materiálové provedení (převážně u vrcholu)

- kvalita povrchu

### 3. Součinitel aerodynamických sil

Aerodynamické vlastnosti se ve většině aerodynamických sil zohledňují bezrozměrnými součiniteli působících síl, které se vztahují buď k ploše působících částí (pilot, část padáku) nebo k dorysní ploše (vrcholu).

Vztlakovou sílu  $L$  ovlivňuje součinitel vztlaku  $c_l$ , sílu odporovou  $D$  součinitel odporu  $c_d$ .

Hodnoty aerodynamických sil, tedy vztlakové síly  $L$  a odporové síly  $D$  (viz "Aerodynamika a Mechanika letu - 1. díl"), získáme vzájemně působících sil nebo odporu  $c_d$  dynamického tlaku

a p<sup>TM</sup>-slučnou plochou S:

$$L = c_l \cdot q \cdot S$$

[N]  
(4)

$$D = c_d \cdot q \cdot S$$

[N]  
(5)

Hodnoty p<sup>TM</sup>-slučných součinitelů se získávají - měřením v aerodynamických tunelech, ve virtuálních aerodynamických tunelech (tyto jsou sice stále poněkud nepřesnějšími dostupnými - pro simulaci 2D proudění kolem jednoduchých profilů křídla - delostřelných, balistických, potrubních) nebo p<sup>TM</sup>-možností z letových zkoušek konkrétních letadel a letových zařízení.

### 3.1 Součinitel odporu

#### 3.1.1 SOUČINITEL TVAROVÉHO ODPORU

Abychom si proudění vzduchu kolem p<sup>TM</sup> představili, budeme v tomto textu konkrétně tělesa ve vlnkladu i obrázců nahrazovat pouze jejich podélným profilem a proudění zobrazovat pouze dvourozměrně.

a) Tělesa s p<sup>TM</sup>evládajícími tlakovými odpory

Polokoule s vlnkladem nastavenou proudě vzduchu je klasickým geometrickým tvarem s patrně nejvyšším součinitelem odporu ze všech těles. Tento tvar se v paraútlumu používá od jeho počátku dodnes (kruhové vrchle, vlnkladem padáček a koneckonců i

slider).

Odpor polokoule vzniká tak, že vzduch proudí do vlnění duti polokoule, kde vytváří tlak, má vlnění a rychlost, na okrajích polokoule je silně vytlačován do opačném směrem do vlních stran a vytváří tlak - tak na odtokové straně polokoule rozsáhlé vlnění s podtlakem a zpětným vlněním.

Jelikož odpor vzniká tímto tlakem vlnění hradně díky rozdílu tlaků před a za polokoulí - hovoříme o odporu tlakovém. Hodnota součinitele odporu  $C_d$  cca 1,3.

Obdobně jako dutá polokoule i deska postavená kolmo na proud vzduchu bude generovat odpor rozdílem tlaků před a za deskou. Rozdíl tlaků bude o něco nižší, vzduch jí tolik nemění směrem a rychlost a vlnění bude tak o něco menší. Deskovým tělesem zhruba nahrazujeme tělo pilota u aerodynamických vlnění letových vlastností padáku. Hodnota součinitele odporu  $C_d$  cca 1,2.

Vlnění různé níže - koeficient odporu bude generovat polokoule otočenou vypouklou stranou směrem k nabíhajícímu proudu vzduchu. Na nabíhající straně bude tlak velmi malý a odpor bude tvořen tlakem před a za deskou podtlaku tvořenému se vlněním. Navíc relativně ostrý ohraj polokoule způsobí usměrnění vlnění, takže vlnění sledně součinitel odporu  $C_d$  bude relativně nízký 0,35.

Prakticky používané, těžší tvar má širší ramena, rychlost volného pádu a malých rozdílů v úrovni hladin průřezů v pase při formování v skydivingu (erovkách).

V základní poloze tělo skydivera mezi rameny a kolena přiblíží tvar rovné nebo ještě více prohnuté desky (na obrázku uprostřed), pro zrychlení a zpomalení se používají prohnuté v pase šluky směrem nahoru napodobuje tvar polokoule orientované jedním nebo druhým směrem.

Je třeba poznamenat, že plavba nad skydiverem se v různých tvarech se zdá být v podobě formace, viz "Velké sestavy - big ways".

Vážná je uvedení tělesa a další tělesa, která generují plavbu s se zpět v tvarem (tělesa s nerovným povrchem a stupky, což jsou ve skydivingu podstatná tělesa, se považují za tělesa tzv. aerodynamicky neaktivní. Většinou tvoří vrcholky, které mají širší průřez k tělesu aerodynamicky aktivní i když s určitou rezervou - opravdu aerodynamicky aktivní tělesa jsou v praxi např. křídla moderního vrtulníku vyrobené z kompozitů, která se kromě profilovaného tvaru vyznačují velmi hladkým povrchem.

b) Tělesa s přídavky - tělesa s přídavky

Hodnota součinitele odporu je u tělesa značně ovlivněna viskozitou vzduchu. Jde především o aerodynamicky čistější tělesa (profilovaná a s hladkým povrchem), kterými proudí vzduch těsně u tělesa nebo jde o tělesa velmi malá (například padákoví děti), v jejich proudě vzduchu pomalu se pohybují.

Obecně platí, že čím je těleso a rychlost obtékání menší, tím větší vliv viskozita vzduchu a součinitel odporu je se zdá (1).

Můžeme si pomoci představou hustoty tekutiny například medu nebo barvy, kterou máme tenkou tyčinkou - kolem tyčinky se má vytvořit síť a proudí a přesto tyčinka klade významný odpor, obdobně situace nastává u malých, pomalu se pohybujících těles ve vzduchu proudě - modelů letadel, prutových antén, lankových vztuh u historických letadel (většinou AN-2) a v našem případě především u padákových dětí.

Jakmile med nebo barvu nahradíme nebo budeme chatřít dílo, odpor značně poklesne, a to přestože se kolem tyčinky budou tvořit vlny. Tato situace je obdobně jako u velkých těles ve vzduchu proudě - u větších moderních letounů (L-410 atd.).

## Mezní vrstva

Díky viskozitě se při obtékání každého tělesa vzduchem vytvoří takzvaná mezní vrstva, na její okraji proudí vzduch stejně rychle jako v nenaruženém proudě, směrem k tělesu se rychlost proudění snižuje a na povrchu tělesa je rychlost nulová, vzduch jakoby na tělese ulpává.

U malých pomalu se pohybujících těles se viskozita vzduchu projevuje různými, proto bude tloušťka mezní

vrstvy relativně velké, pohyb částic vzduchu bude plynulý a nechaotický (pravě jako kdyby měly med nebo hustou barvu). Mluvíme proto o tzv. laminárním proudě - v mezní vrstvě. Mezi součiniteli odporu jednotlivých těles nebudou podstatné rozdíly a součinitel odporu  $c_d$  budou dosahovat poměrně vysokých hodnot - cca 0,3 u kapkovitého tělesa a cca 0,5 až 0,8 u ostatních. Mezní vrstva je v následujících obrázcích vyznačena modře, měrná rychlost proudu vzduchu červeně.

obrázek 6

U velkých aerodynamicky čistých těles s vyššími rychlostmi proudě - okolního vzduchu bude situace poněkud odlišná: díky menšímu vlivu viskozity bude mezní vrstva relativně tenká, avšak laminárním proudě - v určitém bodě (samovolně) přejde do proudě - turbulentního - jednotlivé vzduchové částice mezní vrstvy se začnou mezi sebou mísit, ovšem bez zřetelných vln charakteristických pro proud u aerodynamicky čistých těles. V následně součinitel odporu  $c_d$  již bude relativně malý 0,02 až 0,01.

Změna velikosti součinitele odporu (i vztlaku) souvisí - s viskozitou vzduchu se však v aerodynamicky čistých vlnách nepoměrně - ve aerodynamicky čistých. Proto jsou v literatuře uváděny přibližné koeficienty (vztlaku, odporu) vždy s ohledem na podmínek proudě - 1).

Laminární profily

Polohu bodu přechodu mezi laminárním a turbulentním proudě - m v mezní vrstvě lze v letecké praxi do jisté míry ovlivnit. Protože turbulentní proudě - je zdrojem škodlivého tlakového odporu, je zpravidla

snaha konstruktivně

letadel tento bod pátého co nejvíce oddělit. Toho lze dosáhnout vhodným tvarováním těles, například posunutím nejvíce tloušťky profilu co nejvíce od nabídnutí hrany (velmi zjednodušeně řečeno), vznikne tak tzv. laminární profil o velmi nízkém součiniteli odporu  $c_d$ , v praxi je například u tenkých profilů ocasních ploch vyrobených z kompozitů dosahováno hodnot  $c_d$  ) až 0,0035.

Oddělení pátého bodu mezi

laminární a turbulentní proudění snižuje součinitel odporu. To platí především u větších těles a při vyšších rychlostech proudění, avšak nejdelší itálie je, že pro laminární proudění je naprosto bezpodmínečně hladký povrch obtákaného tělesa. Jakákoliv malá nerovnost či hrana laminární proudění ihned mění na turbulentní.

Profily měkkých kádel

Laminární proudění je u měkkých

kádel vrchlákové bohužel zcela utlumeno díky principiálně nezbytným nábořovým otvorům v nábořové hraně. Měkká káď tedy nemohou vykazovat vlastnosti těles s hladkým povrchem a proto se páté znívání vlastnosti laminárních profilů pro snážená odporu u těchto kádel v praxi neuplatní (4).

Navíc mnohá laminární profily vykazují oproti profilům klasickým zpravidla nižší maximální součinitele vztlaku a proto se u měkkých kádel nepoužívají. Používají se spíše profily tzv. klasické, známé již od dvacátých let minulého století s maximální tloušťkou zhruba v 1. třetině hloubky profilu avšak modifikované pro potřeby měkkých kádel.

Jak bylo již naznačeno, při

obtáknutí měkkých kádel dochází k ovlivnění mezních vrstvy naprosto opačným způsobem než u laminárních profilů - na horní a spodní hraně nábořových otvorů dochází k vynucení změny proudění z laminárního na turbulentní daleko dříve, než by páté samovolně, což samozřejmě součinitel odporu  $c_d$  oproti profilům laminárního vlnění zvykne (5). Reálné hodnoty  $c_d$  ) u vrchlákové z nepropustných tkanin se mohou pohybovat mezi cca 0,03 až 0,015, u vrchlákové z propustných tkanin však mohou být až 0,035.

## Válcové tělesa

Zajímavými tělesy jsou koule a válcové tělesa, u kterých se uplatí jak tlaková tak  $\tau$ -odpor. Při malých rychlostech a velikostech převládá odpor  $\tau$ - a válcové těleso vykazuje vysoký součinitel odporu  $c_d$ , cca 0,5 (viz prostědně těleso na obr. 6). Tato hodnota je relativně vysoká (vytvořená u vypouklé polokoule) a to z toho důvodu, že vzduchové částice kopírují i v zadní části tělesa a část je vytvářen značný podtlak a zároveň působí odtrhávání proudů dochází ke zkrácení ale poměrně dlouhému oplavu s pulsujiícími vlnami.

Při zvýšení rychlosti a/nebo velikosti tělesa, cca při  $Re \approx 300\,000$ , začne proudění postupovat směrem k největšímu tloušťce. Při proudění odpovídajícímu zhruba  $Re \approx 600\,000$  je součinitel odporu  $c_d$  nejmenší (cca 0,15) a proudění odpovídající dle obrázku 10:

Při zvýšení  $Re$  se začne součinitel odporu  $c_d$  opět měrně zvyšovat vlivem postupného posunování bodu přechodu proudění směrem k největšímu tloušťce tělesa, a se  $c_d$  ustálí na hodnotě cca 0,2.

Do válcových těles patří i padákové  $\hat{r}$ . S ohledem na  $\hat{r}$  je uveden zřetelnosti se  $\hat{r}$  vzhledem ke svému rozměru budou vždy pohybovat v oblasti nízkých hodnot  $Re$  s vysokým součinitelem odporu s nezanedbatelným podílem na celkovém odporu padáku. Proto je u vrcholové části snížovat počet  $\hat{r}$  (např. použitím diagonálních vztuh) a to i v případě, že pro zachování pevnosti je nezbytně použit  $\hat{r}$  o větší průměru). V sledném efektem je vždy snížení odporu  $\hat{r}$ .



Pokračování předchozího článku

1) Podmínky obtékání -  
určuje tzv. Reynoldsovo číslo  $Re$ , které v sobě zahrnuje vliv viskozity proudícího plynu nebo kapaliny, rychlosti proudění a velikosti tělesa. Číselně je  $Re$  číslo vyjádřeno, tím je menší vliv viskozity vzduchu.  $Re$  se zvyšuje přímo úměrně se zvyšující se rychlostí obtékání a zvažující se vztažením rozměrem tělesa.

2) Přechodová zóna mezi laminárním a turbulentním prouděním nastává při  $Re$  500 000, což odpovídá vzdálenosti 73cm od náboje hrany profilu při rychlosti 10m/s ve standardní atmosféře a hladině moře. Při rychlosti 20m/s to bude 37cm, při rychlosti 5m/s nastane přechod ve 146cm od náboje hrany.

3) Souřadnice u profilů jsou vždy vztaženy k hloubce profilu, tedy k vzdálenosti od náboje hrany k odtokové hraně, pokud by byly vztaženy k tloušťce profilu, byly by cca o 10% vyšší.

4) Laminární profily  
v jakémkoliv leteckém zřetelě význam. Objevily se ve třicátých letech minulého století a používají se na dřevěných letadlech

vÁjech souĀasnĀ½ch letadel. Jejich vlastnosti se stĀjle vylepĀjĀ- a nĀkterĀĉ pĀvodnĀ- profily se pouĀĀ-vajĀ- i na dnes konstruovanĀ½ch letadlech.

#### 5) VynucenĀĉ

turbulentnĀ- proudnĀ- v meznĀ- vrstvĀĉ mĀj vĀjak vedlejĀĀ- velmi pĀTMĀ-znivĀ½ efekt - zvyĀjuje pĀTMĀilnavost meznĀ- vrstvy k povrchu vrchlĀ-ku, coĀ¾ je dĀleĀ¾itĀĉ pro dosaĀĀenĀ- vysokĀ½ch souĀinitelĀ- vztlaku a nezĀludnĀĉ vlastnosti pĀTMĀi pĀTMĀetaĀenĀ-.

VrchlĀ-ky klouzavĀ½ch padĀjkĀ- totiĀ¾

obdobnĀĉ jako kluzĀjky (vĀtronĀĉ) a malĀj sportovnĀ- letadla patĀTMĀ- spĀĀje do kategorie malĀ½ch lĀĉtajĀ-cĀ-ch zaĀTMĀ-zenĀ-, kde je stĀjle velkĀ½, pomĀrnĀĉ nepĀTMĀ-znivĀ½ vliv vysokĀĉ viskozity vzduchu. NapĀTM. na nĀkterĀ½ch hladkĀ½ch profilech malĀ½ch letadel se dĀky vysokĀĉ viskozitĀĉ mohou vytvĀjĀTMet tzv. laminĀrnĀ- bubliny, kterĀĉ velmi zhorĀjĀ- aerodynamickĀĉ vlastnosti. Z toho dĀvodu je v souĀasnĀĉm vĀvoji profilĀ- pro malĀj letadla vĀnovĀjino velkĀĉ ĀsilĀ- vytvoĀTMit takovĀĉ profily, u kterĀ½ch je vznik laminĀrnĀ- ch bublin minimĀlnĀ-. PĀTMes tuto snahu vĀjak najdeme u nĀkterĀ½ch letadel na kĀTMĀ-dlech malĀĉ ploĀjky (tzv. turbulĀtory) instalovanĀĉ kolmo na povrch (zpravidla na hornĀ-, tzv. sacĀ- stranĀĉ kĀTMĀ-del), kterĀĉ majĀ- za Āokol mĀnit laminĀrnĀ- proudĀnĀ- v meznĀ- vrstvĀĉ na turbulentnĀ-. U vrchlĀ-kĀ- pro skydiving a paragliding takovĀito pĀTMĀ-davnĀj ĀĀzaĀTMĀ-zenĀ-" nepotĀTMebujeme, protoĀ¾e hrany nĀjbĀrovĀ½ch otvorĀ- jĀ¾ tvoĀTMĀ- jakĀsi konstrukĀnĀĉ pĀTMĀirozenĀĉ turbulĀtory.

#### 6)

VychĀzĀ- z ĀistĀĉ geometrickĀĉ

zĀvislosti: NapĀTM. nahradĀ-me-li pro potĀTMĀeby pevnosti 20 tenkĀ½ch ĀĀĀ-ry

10ti silnĀĉjĀĀ-mi ĀĀĀ-rami ze stejnĀĉho materiĀjlu

(v obou pĀTMĀ-padech tedy bude celkovĀj prĀĀTMĀezovĀj plocha stejnĀj), budou mĀt

silnĀĉjĀĀ- ĀĀĀ-ry o 30% menĀjĀ- ĀelnĀ- plochu neĀ¾

ĀĀĀ-ry tenkĀĉ.

Ivan Kraus krausivan@yahoo.com

DalĀjĀ- ĀĀĀjinky autora:

Aerodynamika a Mechanika letu - MANTA nebo BOX?

Aerodynamika a Mechanika letu - Trekování-

Aerodynamika a Mechanika letu - 7. díl

Aerodynamika a Mechanika letu - 6. díl

Aerodynamika a Mechanika letu - 5. díl

Aerodynamika a Mechanika letu - 4. díl

Aerodynamika a Mechanika letu - 2. díl

Aerodynamika a Mechanika letu - 1. díl

Paráštář na sportovní padáčku - 2. díl

Paráštář na sportovní padáčku - 1. díl