

Metody a postupy ve výpočetní mechanice tekutin (CFD)

Petr Šidlof

Česko-anglický slovník termínů v CFD

Česky	Anglicky
proudění	fluid flow
vedení tepla	heat transfer
letectví a kosmonautika	aerospace
automobilový průmysl	automotive
těžba ropy a plynu	oil and gas production
turbostroje	turbomachinery
metoda konečných diferencí	finite difference method
metoda konečných objemů	finite volume method
metoda konečných prvků	finite element method
(ne)konzervativní	(non)-conservative
po částech polynomiální funkce	piecewise polynomial function

Česky	Anglicky
(numerický) tok	numerical flux
hranice oblasti	domain boundary
paměťové nároky	memory requirements
konvergence	convergence
okrajové podmínky	boundary conditions
počáteční podmínky	initial conditions
modelování turbulence	turbulence modelling
bezsíťové metody	meshless methods
metody vnořené hranice	immersed boundary methods
interakce proudění s pevnými tělesy	fluid-structure interaction
modelování geometrie	geometry modelling
generování sítě	mesh (grid) generation

Výpočetní mechanika tekutin (Computational Fluid Dynamics – CFD)

CFD = numerické řešení problémů proudění tekutiny (a vedení tepla) pomocí počítače

- rovnice popisující proudění tekutin známé skoro 200 let
.. analytické řešení v praktických případech nelze
- numerické metody známé 20-100 let
- dostatečně výkonné počítače běžně dostupné cca 30 let

Jedna z prvních CFD simulací: Mitutosi Kawaguti, Uni Tokyo (1953), obtékání válce @ $Re=40$

- mechanická kalkulačka
- 20hod týdně po 18 měsíců
- *“a considerable amount of labour and endurance”*

Účel CFD

- nástroj při návrhu, testování a optimalizaci technických zařízení
- pochopení přírodních a technických procesů
- obvykle levnější, rychlejší a detailnější informace o proudovém poli než měření

Aplikace CFD

- Letectví a kosmonautika
- Automobilový průmysl
- Lodní doprava
- Těžba ropy a plynu
- Turbostroje
- Hydraulické systémy
- Průmyslové procesy
- Tepelná technika a chlazení
- Biomechanika

Přehled numerických metod v CFD (1)

Metoda konečných objemů – Finite Volume Method

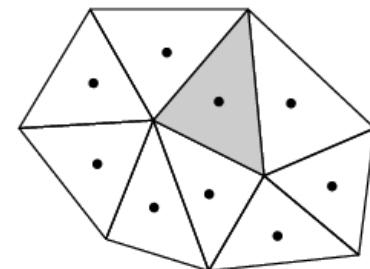
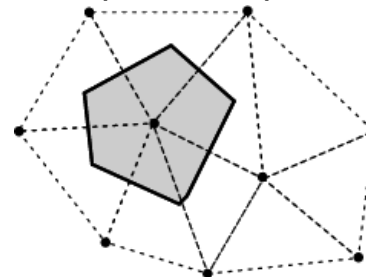
- nejpoužívanější metoda v CFD
- komerční: ANSYS Fluent (cell-centered FVM), ANSYS CFX (cell-vertex FVM), Star-CCM+
Open-source – GNU GPL: OpenFOAM
- rozdělení oblasti na kontrolní objemy, řešení aproximováno po částech konstantní nebo lineární funkcí
- proměnné uloženy ve vrcholech (vertex-centered) nebo v těžištích objemů (cell-centered)
- klíčový prvek MKO – interpolace a vyhodnocení toků přes hranice kontrolních objemů
- metoda prvního nebo druhého řádu

(+) inherentně konzervativní, aplikovatelná na složité 3D geometrie

(+) širší výběr typů elementů sítě než u MKP

(+) nižší paměťové a výpočetní nároky než MKP – vhodné i pro velké problémy

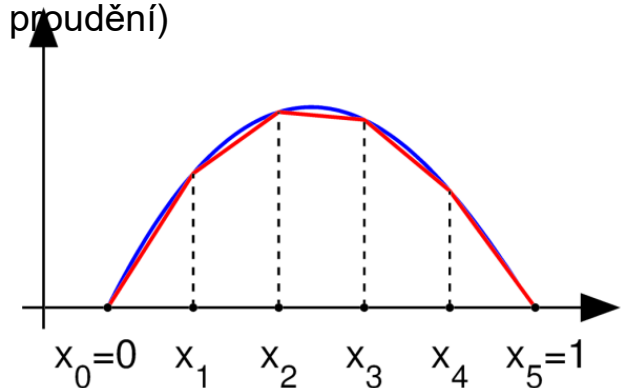
(-) nižší přesnost než MKP –
u schémat nižšího řádu numerická difuze



Přehled numerických metod v CFD (2)

Metoda konečných prvků - Finite element method

- Komerční: COMSOL, Adina, Abaqus
Open-source – GNU GPL: Code Saturne, deal.II, FEniCS
 - strukturální mechanika, akustika, elektromagnetismus, multifyzikální simulační software
 - řešení aproximováno pomocí spojitých, po částech polynomiálních funkcí řádu p
 - přenásobení testovacích funkcí, integrace přes celou výpočetní oblast
- (+) libovolný řád přesnosti (řád polynomu – „typ elementu“)
- (+) aplikovatelné na komplexní 3D geometrie
- (+) CFD: velmi dobrá pro problémy s dominantní difuzí (vazké proudění)
- (-) proudění při vysokých Re - problémy



Přehled numerických metod v CFD (3)

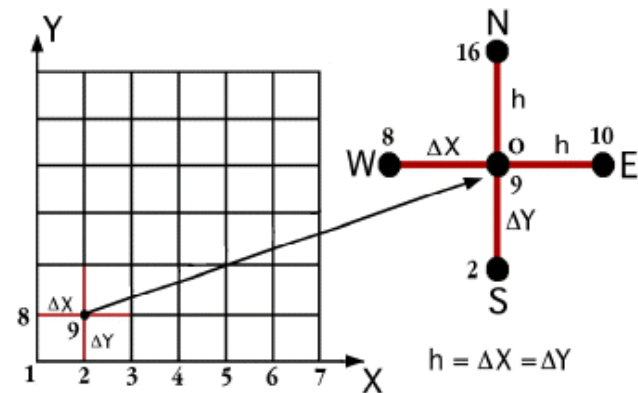
Metoda konečných diferencí - Finite difference method (FDM)

- aproximace parciálních derivací konečnými diferencemi
- existují varianty FDM vysokého řádu – vyžadují speciální implementaci okrajových podmínek pro zachování řádu přesnosti

(+) jednoduchá pro porozumění a implementaci

(-) nekonzervativní (nezajišťuje zachování hmoty, hybnosti a energie)

(--) použitelná pouze pro strukturované sítě – jednoduché geometrie



Méně běžné numerické metody v CFD (1)

Metoda spektrálních elementů - Spectral element method

- varianta MKP
- Legendreovy, Čebyševovy nebo Lagrangeovy polynomy vysokého řádu jako bázové i testovací funkce (pro CFD typicky 10. řádu), Gaussova kvadratura vysokého řádu

Nespojitá Galerkinova metoda - Discontinuous Galerkin method (DGFEM)

- hybridní metoda využívající konceptů MKP i MKO
- řešení aproximováno po částech definovanými polynomiálními funkcemi (ne nutně spojitými na hranicích elementů)
- numerické toky pro řešení konvektivních toků mezi elementy

Spektrální metody

- aproximace řešení globálně hladkou funkcí
- (+) velmi vysoká přesnost – exponenciální konvergence
- (-) použitelné pouze pro jednoduché geometrie a omezený výčet okrajových podmínek

Méně běžné numerické metody v CFD (2)

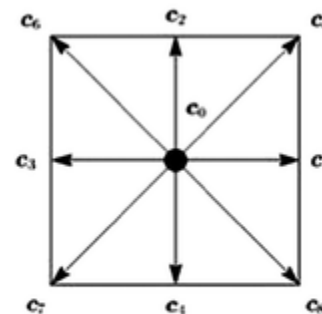
Lattice Boltzmann method (LBM)

- Komerční: PowerFlow
Open-source – GNU GPL: OpenLBM
- nejde o diskretizaci zákonů zachování – tekutina je simulována na základě dynamiky fiktivních částic, které se pohybují a narážejí jedna na druhou
- místo Navier-Stokesových rovnic řeší diskrétní sítovou Boltzmannovu rovnici

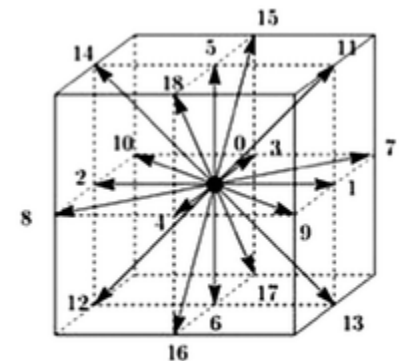
(+) interakce (srážky) mezi částicemi jsou lokální – lineární škálovatelnost při paralelním řešení

(--) problémy s modelováním turbulence

(-) obtížně aplikovatelné pro případ transonického a supersonického proudění



D2Q9



D3Q19

Méně běžné numerické metody v CFD (3)

Panelové metody

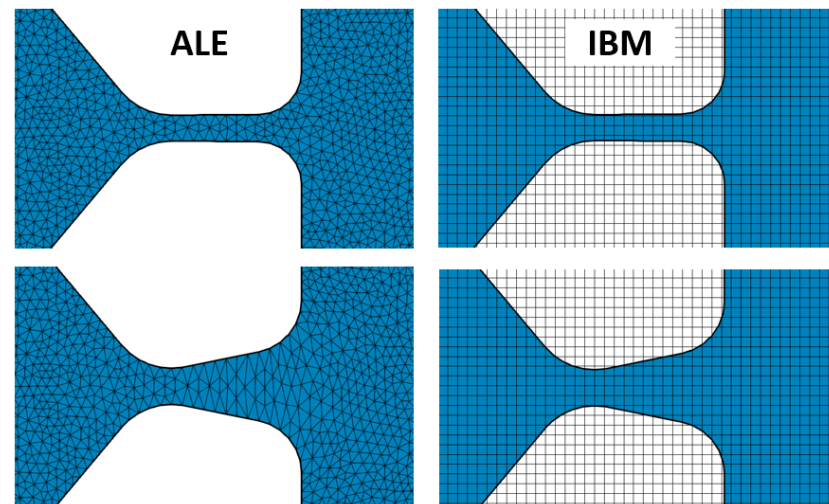
- historicky velmi používané – letecká a kosmická aerodynamika
- numerický výpočet potenciálního proudění: $\nabla \times \mathbf{v} = 0$

Bezsíťové metody

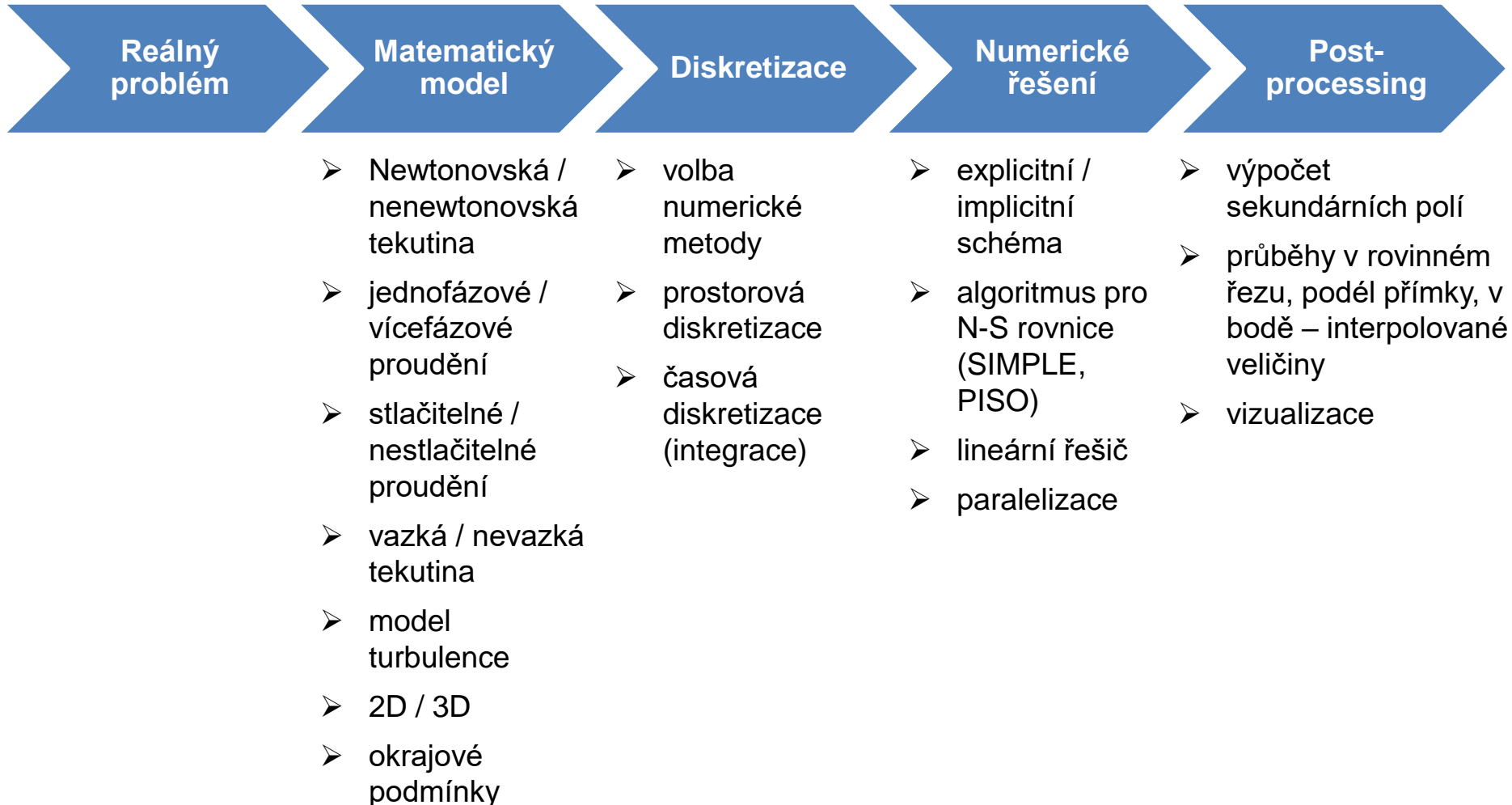
- nepotřebují výpočetní síť (odpadají problémy se síťováním)
- založené na interakci uzlové veličiny se sousedními uzly
- Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Immersed boundary methods (IBM)

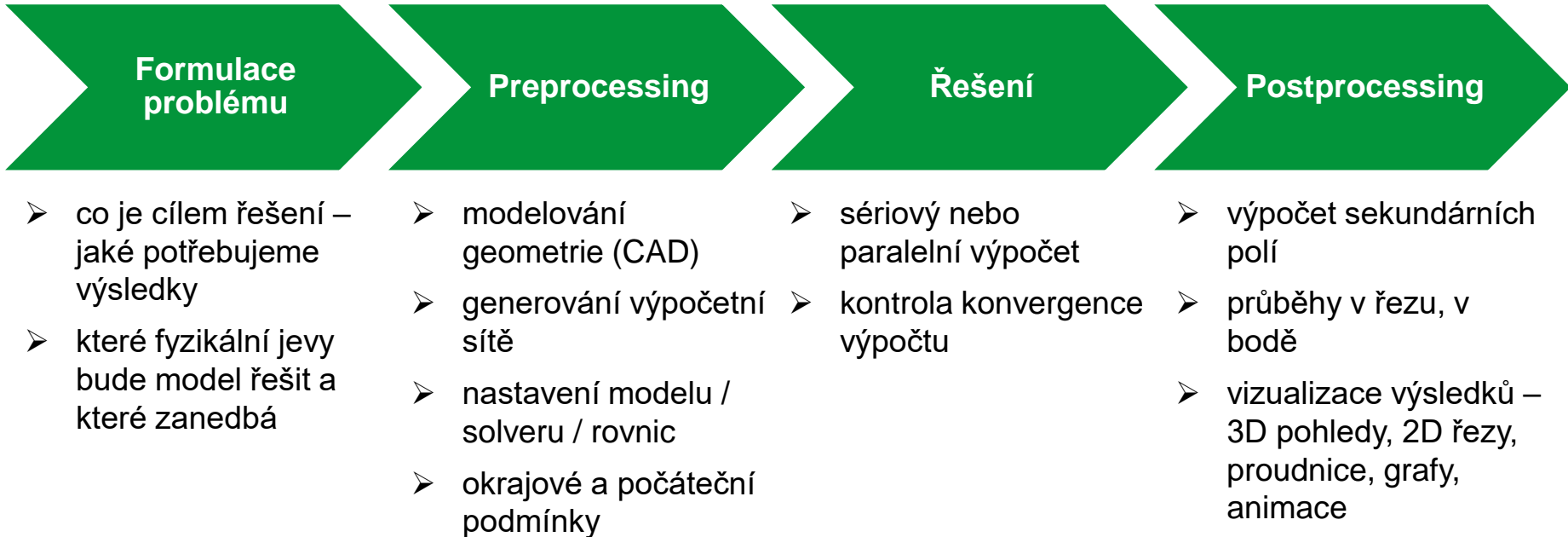
- užitečné pro problémy interakce proudění s pevnými tělesy
- není nutné zvlášť síťovat oblast zabranou tekutinou, rozhraní sledováno pomocí zvláštního matematického popisu
- problém: implementace okrajových podmínek



Základní schéma CFD – principiální hledisko



Základní schéma CFD – uživatelské hledisko (workflow)



Poznámky

- kvalitní CFD simulace: expertní nástroj, vyžaduje kvalifikovaného odborníka
 - mechanika tekutin
 - numerika
 - programování
 - znalost počítačového hardware
- ani komerční CFD nástroje nejsou tak robustní, jako software pro výpočty strukturální mechaniky nebo elektrostatických úloh.. **snadné dostat naprosto špatný výsledek**
- výsledky CFD jsou zřídka používány jako jediný podklad pro závažná konstrukční rozhodnutí
 - validace experimentálními daty
 - inženýrský nadhled