

Self-excited oscillation of elastic tubes induced by fluid-structure interaction.

studijní obor: Matematické a počítačové modelování (MFF UK F-11).

1. Cíle a aktuálnost tematu

Téma samobuzených oscilací pružných trubíc a jeho aplikace v biomechanice je evergreen po několik desetiletí. Pro ilustraci, na klíčové slovo "collapsible tubes" and "self-excited oscillation" je v databázi Elsevier 52 odkazů, s mírně rostoucí frekvencí odkazů od počátku šedesátých let až do současnosti. Klíčové otázky „Pro jaké operační parametry může dojít k samobuzenému kmitání?“, „Jaké jsou frekvence těchto kmitů?“ stále nemají uspokojivé odpovědi. Snad se dá říci alespoň to, že samobuzené kmitání elastické trubice může existovat až po překročení určité kritické hodnoty Reynoldsova čísla, když je zajištěn dostatečně intenzivní přenos energie z proudu tekutiny do elastické stěny trubky (viz. Heil, Waters 2008). Nejsou k dispozici jednoduché korelace, které by umožnily posoudit významnost vlivu různých mechanismů na samobuzené oscilace. Zdá se, že neumíme jednoduše odpovědět na jednoduchou otázku zda a s jakou frekvencí se objeví samobuzené kmity v trubici dané geometrie a daných vlastností (modul pružnosti, hustota), když trubicí teče tekutina s konstantním průtokem na vstupu a při zadaném tlaku na výstupu a vnějším tlaku.

Uvedeným problémům se předkládaná disertace věnuje spíše okrajově, protože je zaměřena především na vývoj nástrojů, které by snad mohly být pro řešení problémů samobuzených oscilací použity. Samobuzenými oscilacemi se zabývá spíše magisterská práce V. Štembery „The flow through viscoelastic tubes“, na niž disertace v mnohých ohledech navazuje (1D model proudění nestlačitelné kapaliny v elastické trubici). Těžiště disertace je (možná v rozporu s jejím názvem) jinde: analýza úplného kolapsu trubice z hyperelastického anizotropního materiálu s uvažováním vnitřního bezfrikčního kontaktu plně zkolabované trubice, založená na 3D hybridních konečných elementech a na teorii velkých deformací.

2. Použité metody a postupy

V práci jsou navrženy 3D hybridní konečné elementy typu kvádr s 8mi, 20ti a 27mi uzly pro posuvy a s konstantní popřípadě lineární aproximací tlaku (tyto stupně volnosti jsou eliminovány statickou kondenzací). Elementy jsou založeny na teorii velkých deformací a na principu virtuální práce. Jsou implementovány konstitutivní modely hyperelastického materiálu: neo Hook, Gent a anizotropní Gentův model pro dva libovolně orientované směry vyztužujících vláken. V kapitole „Small Strain Limit“ je vysvětlena souvislost těchto modelů s klasickým Hookovým modelem. Návrh a implementace elementů je na vynikající úrovni (optimalizovaná Gaussova integrace). Za velice přínosné považují testovací příklady využívající i analytická řešení a srovnání s komerčními systémy (ANSYS). Pro řešení soustavy rovnic je použita Gaussova eliminace, Choleského metoda i GMRES (zajímavé je řešení problému faktorizace matice, která není pozitivně definitní, využitím komplexní aritmetiky). Je řešen problém kontaktu protilehlých ploch, k němuž dochází při úplném kolapsu elastické trubice.

Proudění je popsáno 1D modelem toku vazké nestlačitelné kapaliny v trubce s proměnným průřezem. Hyperbolický systém rovnic pro tlak a průtok je řešen implicitní variantou metody Runge-Kutta. Interakce kapalina – stěna je odvozována z působení tlaku (silná vazba, Steffensenova iterační metoda). Po technické stránce je implementované řešení vynikající. Použitý 1D model

proudění však možná není správný nástroj právě pro situaci, kdy trubice kolabuje (viz otázky a připomínky).

3. Teoretický a praktický přínos

Originalita práce spočívá v nezvyklé kombinaci 3D modelu stěny a 1D modelu kapaliny. Z hlediska modelování samobuzených oscilací je slabým článkem pravděpodobně 1D model proudění, a význam práce spatřuji spíše v možnosti aplikace na případy, kdy zůstává zachován přibližně kruhový profil průřezu, např. při modelování aneuryzmatu, stentu, šíření pulzní vlny, vynucených oscilací apod. (bylo by asi žádoucí implementovat průběžně vyvíjené konstitutivní modely do 2D nebo dokonce 1D konečných elementů typu RING, resp. PIPE). Část systému FELIB s 3D elementy může být využita pro vyhodnocení inflačních, uni- a biaxiálních testů, analýze nehomogenit apod., tj. pro zjišťování materiálových parametrů cévní stěny na základě in vitro laboratorních experimentů.

Součástí předložené práce není seznam publikací autora a při hledání ve WoS jsem žádný záznam u Mgr. Štembery nenašel. Bylo to pro mne překvapením a obávám se, že pan Štembera patří do kategorie velmi inteligentních, nadaných a pracovitých jedinců, kteří z jistých důvodů (skromný introvert?) chovají hlubokou averzi k publikování.

4. Odpovídající znalosti doktoranda v daném oboru

I relativně útlá disertační práce je pro mne dokladem toho, že V. Štembera má zažitě znalosti v oblasti numeriky, tenzorového počtu, že je profesionál, který tyto znalosti a dovednosti dokáže uplatnit a implementovat v podobě počítačových programů.

5. Formální zpracování

Formální úroveň je vynikající. Práce je napsaná ve výborné angličtině a srozumitelně (provedl jsem několik namátkových testů a mohu prakticky vyloučit, že by šlo o duplikát). Naprosto specifické je to, že velký objem práce a výsledků je zredukován na holou dřev, celá práce je relativně krátká, 116 stran včetně obrázků. To je samozřejmě pozitivní a vyžaduje jisté umění. Rubem této mince je fakt, že inženýrům se asi disertační práce nebude číst příliš snadno, a že jim možná bude trochu scházet diskuse, vysvětlení základních principů a fyzikální interpretace výsledků.

6. Drobné připomínky a otázky (tučně jsou uvedeny ty, které by mohly být předmětem diskuse během obhajoby)

str.14 Penalizační faktor γ je s odvoláním na práci Sussman ztotožněn s modulem objemové stlačitelnosti κ bez bližšího komentáře. Jenomže v testovacích příkladech se používá hodnota κ , která neodpovídá skutečným materiálům (je cca 200 až 300 menší než objemová stlačitelnost vody nebo měkkých tkání). Nevnímám tedy κ jako objektivní materiálový parametr, ale spíš jako parametr numerický, jenže pak mi není jasné, proč došlo ke ztotožnění $\kappa=\gamma$. V testovacích příkladech se koneckonců vychází z kinematiky dokonale nestlačitelné kapaliny a to by snad mohlo být příčinou odchylek mezi numerickým a analytickým řešením u provedených testů.

str.20 U izotropního Gentova modelu je deformační energie odpovídající stlačení materiálu vyjádřena jinak než u modelu neoHook a anizotropní Gent. Je pro to nějaký zvláštní důvod? Chybí reference.

str.21 Anizotropní Gentův model není příliš běžný a čtenáři by měly být vysvětleny důvody, proč bylo nutné zařadit neoHookovský člen, proč právě čtvrtý a šestý (a ne pátý) invariant apod.

str.26 Není mi jasné, jak by se implementovalo předpětí v tangenciálním směru (tj. jak by se využila informace o úhlu rozevření po rozstřížení prstence cévy).

str.27 Matice tuhosti zřejmě nebyla pozitivně definitní. V jakých případech k této situaci docházelo (pro jaké konstitutivní modely, pro jaké typy aproximace či redukované numerické integrace a pro jaké hodnoty parametrů (γ))? **Je to projev patologie konstitutivního modelu nebo numeriky?**

str.33 Poissonova konstanta $\nu = \frac{1}{2}(1 - \frac{\mu}{\kappa})$ nesouhlasí se vztahy na str.24

$$\nu = \frac{1}{2}(1 - \frac{\mu}{\kappa + \mu/3}).$$

str.39 Dle odvozeného vztahu bude σ_{zz} záporné.

str.40 **b** je levý (a ne pravý) Cauchy-Greenův tenzor.

str.44 Zvolené korelace pro stanovení součinitele třecích ztrát f nelze použít pro uvažovanou aplikaci samobuzeného kmitání s výraznou deformací stěny. Koncept ekvivalentního průměru, na němž je model založen, v laminárním režimu nefunguje (tvar průřezu, odpovídající zcela zkolabované trubici, je charakterizován hodnotami fRe až několikanásobně menšími než 64, viz např. Rohsenow et al. (1998)) a pro daný případ budou i v režimu turbulentního toku odchylky významné. Je zcela ignorován vývoj mezní vrstvy a odchylky od stabilizovaného rychlostního profilu při vyšších hodnotách Womersleyho čísla. Někteří autoři se snaží tento deficit minimalizovat zavedením součinitelů místních ztrát (integrální modely, např. Katz et al. (1969)) nebo korekcí fRe při zmenšování průřezové plochy, (Pedley (1996)). Je možné vysvětlit poněkud problematické výsledky simulací samobuzeného kmitání právě tímto deficitem?

str.44 Kdyby byla průřezová plocha A zadaná jako funkce $A(x,t)$, nebo kdyby ji bylo možné vyjádřit jako funkci tlaku $A(p)$ („law of tube“), tvořily by rovnice (63) hyperbolický systém pro neznámé rozložení tlaku $p(x,t)$ a průtoku $Q(x,t)$. Okrajová podmínka na vstupu je typicky zadaný průtok $Q_0(t)$ a pokud je na výstupu připojena tuhá trubice s předepsaným atmosférickým tlakem na konci, je okrajová podmínka na výstupu elastické trubice typu $dQ/dt = aQ + b$. Je to korektně formulovaný problém? Zdá se, že numerické řešení funguje jen tehdy, když je zadán tlak přímo na výstupu elastické trubice. V čem je chyba?

str.45 Chybí reference, kde by byl vysvětlen stabilizační efekt čtvrtých derivací.

str.50 Udávanému průtoku $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ odpovídá Re cca 10^4 takže použití korelace $fRe=64$ asi není správně.

str.58 Při interakci kapalina-stěna nejsou uvažovány smykové síly a přenáší se pouze tlak. Při úplném kolapsu a rapidním snížení průtočné plochy to může být problém.

str.60 Vztah pro závislost mezi průřezovou plochou A/A_0 a přetlakem není v grafu 23 uveden. Výsledky pouze dokumentují to, že FELIB je schopen takovou závislost předikovat, ale jeho možnosti nejsou využity například k vyhodnocení závislosti parametru K_p na geometrii a především na materiálových parametrech implementovaných modelů. Právě na závislostech

tohoto typu bylo možné demonstrovat za jakých okolností se uplatní specifika anizotropního Gentova modelu a navrhnout odpovídající korelace $A/A_0(p, J_m, \dots)$.

str.62 Smyslu toho experimentu („damping case“) nerozumím. Jako medium je zvolena voda (viskozita, hustota), ale rychlost zvuku 100 m/s!? Jak si mám představit materiál, který je tuhý jako ocel, ale současně objemově stlačitelný téměř jako plyn?

str.63 Pro modelování samobuzených oscilací je rovněž zvolen materiál s nerealistickými materiálovými parametry stěny elastické trubice: objemový modul stlačitelnosti je ztotožněn se smykovým modulem ($\kappa=\mu=10$ MPa). Výsledky numerického experimentu by si zasloužily obsáhlejší diskusi. Z grafů (Fig.26) odhaduji frekvenci dosti divokých oscilací tlaku a průtoku ($Re \approx 10^5$!?) na 1 kHz. Asi by to mohl být důsledek odrazů pulzní vlny, ale její rychlost šíření by pak musela být cca 100 m/s (a to není příliš realistické). Nevím zda se autor pokouší naznačit, že samobuzené oscilace s uváděnou frekvencí 23 Hz jsou důsledkem superpozice odražených pulzních vln s trochu odlišnými frekvencemi.

str.72 Neplatí uvedený vztah pro derivaci inverzního tenzoru X^{-1} jen pro symetrické tenzory?

str.74 V poznámce pod čarou by snad pravý Cauchy Greenův tenzor měl být vždy v druhé mocnině.

str.84 až 88 To už je na mne příliš složité – nekontroloval jsem. Bázové funkce na str.87 mají indexy a_1 až a_{3N} , ale dál už jen a_1 až a_N (jsou použity stejné bázové funkce pro posuvy x, y, z).

Souhrn:

Předloženou disertační práci doporučuji k obhajobě, protože jednoznačně dokumentuje autorovy předpoklady k samostatné tvořivé práci.

Praha 23.7.2010

.....
Prof.Ing.Rudolf Žitný, CSc.
Ústav procesní a zpracovatelské techniky
ČVUT v Praze Fakulta strojní

Prof. RNDr. Z. Němeček, DrSc.
děkan MFF UK
Ke Karlovu 3
121 16 Praha 2

Vaše č.j. 231/2010

Praha 23.7.2010

Vážený pane děkane,

v příloze zasílám oponentský posudek disertační práce pana Mgr.V.Štembery s kladným hodnocením.

S pozdravem

.....
Prof.Ing.Rudolf Žitný, CSc.

Ústav procesní a zpracovatelské techniky
ČVUT Fakulta strojní
Technická 4
166 07 Praha 6

E-mail: rudolf.zitny@fs.cvut.cz

Příloha:

Posudek disertační práce V.Štembera: Self-excited oscillation of elastic tubes induced by fluid-structure interaction.