

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

| | |
|----------------------------|---|
| Název práce: | Machine Learning-Driven Nonlocal Hydrodynamics for Thermonuclear Fusion Modeling |
| Jméno autora: | Aleksandr Bogdanov |
| Typ práce: | bakalářská práce |
| Fakulta: | Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (FJFI) |
| Katedra: | Katedra fyziky |
| Oponent práce: | Ing. Jan Nikl, Ph.D. |
| Pracoviště oponenta práce: | Center for Advanced Systems Understanding, Untermarkt 20, 02826 Görlitz, Německo Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden, Německo |

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

| Zadání | náročnější |
|---|------------|
| <i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i> | |
| <p>Posuzovaná práce se zabývá velice aktuálním a vědecky přínosným tématem aplikace strojového učení na nelokální tepelný transport v rámci simulací procesu inerciálního udržení termojaderné fúze. Toto téma se dostává do popředí zájmu vědecké komunity zejména v souvislosti s dosažením milníku v podobě režimu tzv. hořícího plazmatu. Toto ještě více navyšuje poptávku po prediktivních numerických simulacích pro objasnění senzitivity a optimalizaci procesu. Klíčovým fyzikálním faktorem je pak vliv nelokálního tepelného transportu, který je stále jen velice zjednodušeně zachycen používanými hydrodynamickými kódy. Vzniklo tak úsilí o modelování tohoto jevu s využitím metod strojového učení, které má potenciál vnést přesné, avšak běžně výpočetně náročné, kinetické řešení do makroskopického popisu dynamiky plazmatu. Tento úkol tak vyžadoval od studenta pochopení principu jak ICF a efektu nelokálního transportu, tak seznámení se s hlubokými neuronovými sítěmi a implementaci numerického modelu založeného na nich pro modelování tepelného transportu. Zadání vzhledem k potřebným vícestranným schopnostem tak lze považovat za jedno z náročnějších na bakalářské úrovni.</p> | |

Splnění zadání

splněno

Posudte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.

Na základě předložené práce lze konstatovat, že student se seznámil s procesem ICF a efektem tepelného transportu. Dále pak s modelováním tepelného transportu v hydrodynamických simulacích a využil dat simulovaného holhraumu pro naučení hluboké neuronové sítě predikce tepelného toku. V závěru pak porovnal dosažené výsledky s klasickou metodou omezení tepelného toku. Zadání tak bylo splněno v plném rozsahu.

Zvolený postup řešení

**vhodný s
výhradami**

Posudte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.

Řešení rovnice difuzního vedení tepla s použitím Newtonovy iterativní metody je vcelku standardním přístupem, ale inovativním prvkem je právě nasazení strojově naučeného modelu pro určení omezovače tepelného toku a velmi vhodně pak i koeficientu teplotní závislosti, který umožňuje využít sobě-podobnosti typických profilů deponovaného tepelného toku. Bohužel kapitola 3 žádným způsobem neobjasňuje zvolený návrh neuronové sítě a omezuje se na prosté konstatování použité aktivační a účelové funkce spolu s dalšími parametry. I přes provedenou rešerši literatury pak není uvedena žádná souvztažnost k prezentované metodě. Model lze zřejmě chápat jako základní a výchozí pro budoucí vylepšování, ale diskuze v tomto směru se však objevuje jen částečně v závěru práce (kapitola 5) v souvislosti s pozorovanými nedostatky. Ke konstrukci metody se pak i vztahuje jedna z mých otázek k obhajobě.

Dále lze práci vytknout nereflektování problému s oscilací divergence tepelného toku, který je pozorován. Student sám hodnotí tento problém jako závažný, ale není nijak analyzována příčina tohoto problému ani není diskutováno možné řešení. K tomuto bodu

se tedy vztahuje má další otázka.

Obecně problematické, avšak pochopitelné, lze také spatřovat použití Knudsenova čísla založeného pouze na gradientu teploty a stejně tak tepelný tok závislý také pouze na tomto gradientu. Kinetické kódy totiž budou zahrnovat příspěvky i z gradientu hustoty do nelokálního transportu. Toto je však spíše námětem budoucího rozšíření modelu.

Odborná úroveň

průměrná

Posudte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.

Jak již bylo zmíněno, práce vyžadovala studium literatury z vícero oborů a pochopení vzájemné provázanosti. Student si s tímto úkolem poradil vcelku dobře a aplikuje zavedené metody, jak na straně řešení vedení tepla, tak pro strojové učení. Nápaditým prvkem je pak použití sobě-podobnosti v rámci rovnice tepelné difuze.

Práci však lze vytknout několik nedostatků, jako například, že na straně 5 se pak nachází myšlenkový skok, kdy je uvedeno, že systém Eulerových rovnic (1.7) pochází z rychlostních momentů (1.5), přestože je dříve deklarováno, že jsou uvažovány pouze elektrony. Navíc není uveden uzávěr systému pro elektromagnetické pole, čímž není jasný původ členů radiace a absorpce laseru.

Na straně 6 (po (1.8)) by si zasloužilo rozvedení omezení modelu na jednoteplotní a implikace této volby.

Dále kapitola 2.3 o omezovači tepelného toku by mohla zmiňovat jinou populární podobu omezovače, kdy je omezena tepelná vodivost a tím nepřímo tepelný tok. Zůstává tak totiž původní rovnice difuze v parabolickém tvaru a nestává se hyperbolickou, jako při omezení toku samotného, čímž se předchází vzniku artefaktů. Nicméně to fundamentálně nemění lokalitu tohoto přístupu, který je zde hlavním předmětem.

Na straně 18 není objasněno, co pojmy „commonly“ a „safely“

znamení v tomto kontextu, a bylo by velice vhodné objasnit předpokládané fyzikální podmínky.

Zmiňme též, že konec kapitoly 3.3.1 (strana 23) nevysvětluje, jestli nebo kdy je přesný tvar Jacobiho matice použit.

Formální a jazyková úroveň

podprůměrná

Posudte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posudte typografickou a jazykovou stránku.

Předložená práce obsahuje celou řadu nejasných či zavádějících formulací a tvrzení. Po řadě, na první stránce se objevuje Fourierův zákon tepelné vodivosti s opačným znaménkem než konvenčně, význam koeficientu k však není objasněn a objevuje až na straně 21, též bez zavedení.

Dále je zavádějící na straně 3 tvrdit, že ztráty uvažované v Lawsonově kritériu pocházejí pouze z inverzního brzděného záření. Matoucí je pak zejména věta na konci téže stránky uvádějící, že D-T reakce má největší reaktivitu pro teplotu okolo 4.3 keV. Zde zřejmě není míněno, že by byla maximální, ale že je vyšší než pro jiné nezmíněné reakce. Proč je tato konkrétní teplota relevantní, však také není jasné a po přezkumu zjišťujeme, že zřejmě pochází z reference [3], uvedené v předchozím odstavci, kde je předpokládána jako minimální pro splnění Lawsonova kritéria.

Na straně 4 (druhý odstavec kap. 1.1) je nejasná formulace, že nelokální transport je špatně statisticky popsateľný, když je jeho popis později založen na evoluci distribuční funkce.

V posledním odstavci strany 6 se vyskytuje dopředná reference na vzorec (3.5).

Strana 8 pak neuvádí význam \hat{v} , dále pak je uvedeno f_z namísto f_2 a zřejmě také $\lambda \ll \epsilon$ namísto $\lambda \ll L_n$. Vzorec (2.8) pak používá nedefinovaný symbol \mathbf{n} , který ale by měl být již zmíněným, nezavedeným \hat{v} .

Na začátku kapitoly 3.1 není jasné proč nebylo použito Knudsenovo

číslo, ale později se dozvídáme, že gradient teploty použit byl, takže vlastně efektivně je vstupem modelu.

Na začátku kapitoly 3.2 je uveden vodivostní parametr β bez vysvětlení, kterého dojde až v následující kapitole (3.3).

Vzorec (3.21) používá jakousi nevysvětlenou abstraktní symboliku pro výstupy neuronové sítě a fyzikální závislosti ostatních koeficientů jsou neúplné. To by bylo možné částečně zdůvodnit použitím stavové rovnice ideálního plynu, ale toto není nikde deklarováno.

Obrázku 4.6 lze vytknout značnou nepřehlednost a možná odlišný způsob vizualizace by byl vhodnější. Nabízelo by se také úplné vynechání nebo spojení s obrázkem 4.7, který prezentuje v principu stejný obsah statistickým způsobem. Mohly by zde být jen pro ukázkou vykresleny extrémní případy.

Kromě toho nejsou definovány některé základní fyzikální a matematické konstanty jako je Boltzmannova konstanta, elementární náboj nebo Ludolfovo číslo.

Konečně lze práci vytknout vícečetné použití první osoby a budoucího prostého času či spíše hovorové obraty (např.: „keep in mind“, „sitting at“, atd.), které by se měly v akademickém textu objevovat minimálně. Je však pravdou, že se od tohoto pravidla částečně upouští v anglicky psané literatuře v zájmu čtivosti textu, takže toto lze hodnotit jen spíše jako doporučení.

Výběr zdrojů, korektnost citací

podprůměrné

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posudte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Celkově jsou v práci použité zdroje validní a relevantní, ale v některých částech textu se citace objevují spíše zřídka.

Na straně 1 je to první zmínka konstrukci neuronové sítě Multilayer Perceptron (kde se zřejmě nachází překlep) a pak umělé neuronové

sítě, kde by si oba pojmy zasloužily odkaz do literatury či alespoň odkaz na kapitolu rozebírající základy konstrukce této sítě.

Dále na konci stránky 3 je to neozdrojovaná D-T reakce a již zmiňované tvrzení o její reaktivitě a též Lawsonovo kritérium (1.1).

Druhý odstavec kapitoly 1.1 (strana 4) přirovnává kinetické řešení ke stavovým rovnicím z hlediska výpočetní náročnosti bez citace ani jednoho z modelů nebo uvedeného konkrétního čísla 90 %. Připomeňme, že oba modely se zde objevují poprvé v textu.

Systém Eulerových rovnic (1.7) (na straně 5) by si také zasloužil ocitování, jelikož není plně odvozen, jak již bylo zmíněno. Zejména pak absorpce laseru, která se zde objevuje nově, a mechanismus inverzního brzděného záření.

Menší výtka je pak k volbě referencí či slov v posledním odstavci na straně 6, kde reference [17] a [18] z let 1990 a 2000 těžko lze označit za „recent“.

Citaci by si také zasloužily běžně používané hodnoty omezovače tepelného toku na začátku kapitoly 2.3 (strana 10).

Dále pak na konci strany 18 by bylo vhodné ozdrojovat limitní chování koeficientu β , které není na první pohled zřejmé a pravděpodobně také zcela obecně platné.

Konečně uveďme drobné chyby ve velikosti písmen v citacích [20] a [32]. Dále pak pravidelně vycházející NRL plasma formulary (reference [27]), by mohl být citován v novější verzi než z roku 1983. Citace [38] je nekompletní a pravděpodobně nepublikovaná. Drobnou chybou je i to, že v citaci [45] chybí typ akademické práce a konečně že reference [46] se nezdá být veřejně publikovaná.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

V závěru hodnocení bych vzpomenu, že zřejmým problémem pro vývoj prezentované metody byl nedostatek trénovacích dat modelu,

jak je v práci uvedeno. Tento problém neleží na straně studenta a obecně reflektuje nevelké množství veřejně dostupných detailních simulací nelokálního transportu. Pro strojové učení je však rozsah trénovacích dat zcela klíčový. Nabízí se tedy, že případné budoucí pokračování tohoto tématu by se mohlo a prakticky bude pravděpodobně muset vydat nejenom směrem rekonstrukce dat, ale tvorbou datového souboru s určením vhodné množiny bodů parametrického prostoru pro minimalizaci počtu nutných kinetických simulací v rámci učícího procesu, k čemuž však také existují techniky strojového učení.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

Celkově vyvinutá a prezentovaná metoda je zajímavá a rozhodně vědecky přínosná, vzhledem k velice omezeným možnostem prediktivních simulací nelokálního transportu tepla. Dosažené výsledky jsou vcelku dobré, s přihlédnutím k tomu, že byla pro trénink neuronové sítě dostupná jediná kinetická simulace. V rámci vývoje byly rozpoznány některé nedostatky původního návrhu, které by mohly být rozpracovány v budoucím pokračování tohoto tématu. Tuto praktickou část tak hodnotím pozitivně a těším se na budoucí vývoj této metody studentem.

Bohužel stejně pozitivně nelze hodnotit předkládaný text práce, který by si zasloužil podstatně více věnovaného úsilí a pečlivosti. Objevují se v něm částečně odborné, ale zejména pak celá řada formálních, jazykových a citačních nedostatků. Nelze tak bohužel hodnotit práci lépe než stupněm C (dobře).

K obhajobě mám následující dotazy:

1. V práci je použita aktivační funkce ReLU (tj. $\max(x,0)$), která obsahuje ostrý přechod a používá se tak zejména v klasifikačních problémech a úlohách s diskrétními hodnotami. Pro hladké funkce typicky bývají vhodnější aktivační funkce s pozvolnějším přechodem, jako jsou sigmoidní funkce. Takováto sigmoidní funkce je pak také použita v referenci [8], která je několikrát zmiňována v práci. Co vedlo k výběru této aktivační funkce? Byly vyzkoušeny i jiné varianty? Má aktivační funkce vliv na pozorované oscilace divergence tepelného toku?
2. Jak již bylo zmíněno, bylo v rámci simulací pozorováno, že zatímco predikovaný tepelný tok je monotónní, tak jeho divergence značně osciluje. Jednou z možných příčin by mohlo být „přeučení se“ trénovacích profilů. Z tohoto důvodu se běžně používají techniky regularizace neuronové sítě nebo její rekurence. Byla použita nebo zvažována nějaká taková technika? Případně bylo vyzkoušeno zahrnutí derivace do účelové funkce?
3. Závěr práce uvádí, že by bylo lepší využít pro trénování sítě přímo koeficientů α a β , aby se předešlo použití sobě-podobného řešení. Co je nedostatkem tohoto sobě-podobného řešení? Jak by takovýto celkový proces zpracování kinetických simulací a následné simulace probíhal?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm C - dobře.

Datum: 25.8.2023

v Dražďanech (Německo)

Podpis:

