

Lộ Trình Danh Mục Tổng Thể

Phương Pháp Số, Tính Toán Hiệu Năng Cao (HPC), và Bộ Giải Mức
Nghiêng Cứu

Max Minh Le

Ngày 6 tháng 2 năm 2026

Mục Tiêu và Định Hướng Nghiên Cứu

Danh mục này được thiết kế một cách rõ ràng nhằm thể hiện năng lực phân tích số ở mức nghiên cứu, mức độ trưởng thành trong phát triển bộ giải, và nhận thức về tính toán hiệu năng cao phù hợp cho bậc học sau đại học nâng cao và các hồ sơ ứng tuyển nghiên cứu sinh tiến sĩ. Trọng tâm đặt vào tính chắt chẽ toán học, sự rõ ràng của thuật toán, khả năng mở rộng, tính tái lập, và đánh giá phê bình các phương pháp số vượt ra ngoài phạm vi triển khai kiểu bài tập lớp học.

Mỗi dự án nhấn mạnh khả năng tự thiết kế, kiểm chứng, và mở rộng bộ giải CFD, đồng thời kết nối lý thuyết với triển khai. Danh mục này đóng vai trò như một minh chứng có cấu trúc về mức độ sẵn sàng nghiên cứu, năng lực tự học có định hướng, và tầm nhìn phát triển bộ giải dài hạn trên nhiều lớp PDE khác nhau.

Danh mục này cũng hướng mạnh tới CFD liên quan hàng không vũ trụ, với kiểm chứng dựa trên các bài toán chuẩn kinh điển trong khí động học và động cơ. Trọng tâm đặt vào tư duy vô thứ nguyên và nhận thức chế độ dòng chảy, bao gồm ảnh hưởng của số Reynolds và số Mach, để hành vi bộ giải được diễn giải theo vật lý thay vì chỉ theo hình ảnh. Kết quả được kiểm chứng thông qua tinh chỉnh lưỡi, kiểm tra bảo toàn, và so sánh với nghiệm tham chiếu đã công bố. Mục tiêu cuối cùng là chứng minh kỹ năng phát triển bộ giải có thể áp dụng trực tiếp cho khí động học, động cơ, và các quy trình kỹ thuật khí động nhiệt trong thực tế.

1. Bài Toán Parabolic: Phương Trình Nhiệt và Khuếch Tán

Tóm Tắt

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

Dự án này tập trung giải các phương trình đạo hàm riêng dạng parabolic, cụ thể là dẫn nhiệt và khuếch tán theo thời gian. Mục tiêu không chỉ là thu được trường nhiệt độ đúng, mà còn hiểu sâu hơn về tích phân theo thời gian, giới hạn ổn định, lan truyền sai số, xu hướng hội tụ, và hiệu năng bộ giải khi tăng số chiều.

Công việc bắt đầu từ khuếch tán 1D theo thời gian và kiểm chứng với nghiệm giải tích, sau đó mở rộng sang dẫn nhiệt 2D bằng phương pháp ẩn luân phiên (ADI), và chuẩn bị nền tảng cho mở rộng 3D trong tương lai. Trọng tâm đặt vào cấu trúc bộ giải, áp đặt điều kiện biên, thiết kế mô-đun gọn sạch, và trực quan hóa chất lượng chuyên nghiệp.

Các Phương Pháp Số và Khái Niệm Chính

- Thiết lập phương trình chi phối và vô thứ nguyên hóa
- Lược đồ FTCS tường minh với ràng buộc ổn định theo số Fourier
- FTCS ẩn hoàn toàn và tích phân theo thời gian Crank Nicolson
- Tách ADI để giải ẩn 2D hiệu quả
- Thuật toán Thomas cho hệ tam đường chéo
- Phân tích ổn định và khảo sát độ nhạy theo bước thời gian
- Chuẩn sai số gồm L_2 và L_∞
- Tinh chỉnh lưỡi và kiểm chứng hội tụ
- Bộ giải tương đương triển khai bằng C++, Python, và Fortran
- Phiên bản tham chiếu một tệp và phiên bản mô-đun

Ứng Dụng Thực Tế

Truyền nhiệt trong các cấu kiện rắn và vật liệu nhiều lớp, quản lý nhiệt cho điện tử và làm mát chip, ứng suất nhiệt theo thời gian trong kết cấu hàng không vũ trụ, mô hình hóa runaway nhiệt của pin, khuếch tán nhiệt trong đất, hệ địa nhiệt, khuếch tán vật chất và bài toán chuyển pha, khuếch tán chất ô nhiễm trong môi trường xốp, khuếch tán sinh học như vận chuyển thuốc, và nền tảng số cho các bộ giải đa vật lý có ghép nhiệt.

Trong hàng không vũ trụ, các phương pháp này hỗ trợ phân tích nhiệt theo thời gian cho cánh tuabin, lớp lót buồng đốt, vỏ thiết bị điện tử hàng không, tấm điều khiển nhiệt vệ tinh, khuếch tán nhiệt khi tái nhập trong kết cấu rắn, và các mô phỏng ghép khí động nhiệt nơi bộ giải dòng chảy trao đổi thông lượng nhiệt với miền rắn.

2. Bài Toán Elliptic: Khuếch Tán Trạng Thái Dừng và Phương Trình Poisson

Tóm Tắt

$$\nabla^2 u = f(x, y)$$

PDE dạng elliptic mô tả các hiện tượng cân bằng ở trạng thái dừng và là nền tảng toán học của nhiều thuật toán CFD, đặc biệt là hiệu chỉnh áp suất và cưỡng bức điều kiện không nén được. Dự án này phát triển bộ giải cho phương trình Laplace và Poisson, và nhấn mạnh việc giải hiệu quả các hệ thưa kíc thước lớn.

Các bộ giải này tạo nền tảng cần thiết cho ghép áp suất vận tốc trong các bộ giải Navier Stokes không nén được, và làm rõ vai trò toán học của các toán tử elliptic.

Bộ giải elliptic cưỡng bức các ràng buộc vật lý thay vì trực tiếp tiến hóa trường dòng chảy. Phương trình Poisson xuất hiện tự nhiên trong các phương pháp hiệu chỉnh áp suất dùng cho khí động học không nén được và các dòng chảy bên trong. Vì vậy, bộ giải elliptic chính xác là then chốt cho bảo toàn khối lượng, ổn định số, và khả năng mở rộng trong quy trình CFD hàng không vũ trụ.

Các Phương Pháp Số và Khái Niệm Chính

- Thiết lập phương trình Laplace và Poisson
- Rời rạc hóa sai phân hữu hạn và thể tích hữu hạn
- Jacobi, Gauss Seidel, và SOR (quá thư giãn kế tiếp)
- Bộ giải liên hợp CG cho hệ đối xứng
- Theo dõi phần dư và chẩn đoán hội tụ
- Phụ thuộc theo lưới và so sánh hiệu năng bộ giải
- Vai trò bộ giải elliptic trong hiệu chỉnh áp suất và cưỡng bức không nén được cho dòng chảy khí động
- Bộ giải tương đương triển khai bằng C++, Python, và Fortran

Ứng Dụng Thực Tế

Tính điện và trường thế điện, dẫn nhiệt trạng thái dừng, hiệu chỉnh áp suất và cưỡng bức không nén được trong bộ giải CFD, mô hình dòng nước ngầm và thấm, tính thế hấp dẫn, cân bằng kết cấu và biến dạng màng, xử lý ảnh và làm mượt, khuếch tán ổn định trong môi trường xốp, và các bộ giải hệ tuyến tính cốt lõi trong phương pháp chiếu cho Navier Stokes.

3. Bài Toán Hyperbolic: Hệ Sóng Tuyến Tính và Phi Tuyến

Tóm Tắt

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

PDE dạng hyperbolic mô tả lan truyền sóng, đối lưu, và các hiện tượng chi phối bởi vận chuyển. Dự án này tập trung vào ràng buộc ổn định, tán xạ số, khuếch tán số, và hành vi bất tốc trong các bài toán phụ thuộc thời gian.

Cả phương trình sóng tuyến tính và phi tuyến được giải bằng các lược đồ upwind và lược đồ dựa trên thông lượng, với trọng tâm là điều kiện CFL và các dạng bảo toàn.

Trong hàng không vũ trụ, hệ hyperbolic chi phối lan truyền sóng áp suất, nhiễu âm học, sóng xung kích, và vận chuyển đối lưu của các đại lượng dòng chảy. Xử lý số các phương trình này ảnh hưởng trực tiếp tới ổn định, độ chính xác, và độ trung thực vật lý trong mô phỏng khí động. Phần này nhấn mạnh mối liên hệ giữa lược đồ số và sự lan truyền thông tin, làm rõ cách lựa chọn rời rạc hóa chi phối độ phân giải tốc độ sóng, mức khuếch tán số, và độ sắc nét của sốc.

Các Phương Pháp Số và Khái Niệm Chính

- Phương trình đối lưu và phương trình sóng tuyến tính
- Upwind, Lax Friedrichs, và Lax Wendroff
- Lược đồ TVD với bộ hạn chế thông lượng
- Phân tích ổn định CFL
- Đặc trưng, hướng lan truyền sóng, và vận chuyển thông tin trong hệ hyperbolic
- Độ nhứt nhân tạo và khuếch tán số
- Hành vi bất tốc
- Bộ giải tương đương triển khai bằng C++, Python, và Fortran

Ứng Dụng Thực Tế

Động lực học chất lưu nén được, lan truyền sóng âm, mô hình sóng xung kích, giao thông và động lực đám động, vận chuyển khí quyển và đối lưu chất ô nhiễm, sóng thần và mô hình nước nông, động lực khí và khí âm học hàng không, lan truyền sóng điện từ, hệ truyền tín hiệu, và nền tảng số cho các bộ giải bảo toàn.

Trong kỹ thuật hàng không vũ trụ, các phương pháp này là nền tảng cho khí động học nén được, khí âm học, dự đoán sóng xung kích, phân tích đáp ứng gió giật, mô hình dòng chảy cận âm và siêu âm, và xử lý số của vận chuyển đối lưu trong các bộ giải cả inviscid lẫn viscous.

4. Navier Stokes Không Nén Được: Khoang Dẫn Động Bởi Nắp

Tóm Tắt

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

Dự án chủ lực này giải phương trình Navier Stokes không nén được bằng bài toán chuẩn khoang dẫn động bởi nắp (lid driven cavity). Ghép áp suất vận tốc được xử lý bằng các phương pháp chiết như SIMPLE và các biến thể kiểu PISO.

Bộ giải này tích hợp toàn bộ các thành phần từ các dự án trước và đóng vai trò như một minh chứng tổng hợp về ổn định số, độ trueloing thành của bộ giải, và chất lượng kiến trúc mã.

Bài toán khoang dẫn động bởi nắp được xem như một chuẩn kinh điển để đánh giá ghép áp suất vận tốc, tính nhất quán rời rạc hóa, và ổn định trong các bộ giải không nén được. Trọng tâm đặt vào cấu trúc thuật toán, kiểm soát sai số, và hành vi hội tụ thay vì chỉ trực quan hóa dòng chảy.

Các Phương Pháp Số và Khái Niệm Chính

- Phương trình Navier Stokes không nén được
- Phương pháp bước phân đoạn và phương pháp chiết
- Giải phương trình Poisson áp suất
- Tương tác giữa hiệu chỉnh áp suất elliptic và các toán tử vận chuyển vận tốc
- Kiểm soát độ phân kỳ của vận tốc
- Hội tụ theo lưới và kiểm chứng theo chuẩn tham chiết
- Theo dõi phần dư và độ nhạy theo bước thời gian
- Bộ giải tương đương triển khai bằng C++, Python, và Fortran

Ứng Dụng Thực Tế

Dòng chảy nhớt bên trong và bên ngoài, thông gió và mô hình luồng không khí trong phòng, dòng trộn và tuần hoàn, bôi trơn và dòng Reynolds thấp, dòng sinh học như vận chuyển máu trong mạch, vi lúu, mô hình dòng gió đô thị, dòng chảy công nghệ, kiểm chứng chuẩn cho bộ giải CFD, và phát triển thuật toán không nén được ở mức nghiên cứu.

Trong nghiên cứu hàng không vũ trụ và cơ học chất lưu, bộ giải không nén được là nền tảng cho mô hình dòng Mach thấp, kiểm chứng thuật toán, và phát triển phương pháp số trước khi mở rộng sang chế độ nén được và tốc độ cao.

5. Dòng Chảy Nén Được và Bắt Sốc: Euler và Navier Stokes

Tóm Tắt

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = 0$$

Dự án này nhắm tới động lực khí nén được, nơi sôc và gián đoạn xuất hiện tự nhiên. Mục tiêu là thể hiện các định luật bảo toàn ở cấp hệ, hành vi theo đặc trưng, và thiết kế thông lượng số bền vững. So với dự án sóng, phần này có dạng bảo toàn rõ ràng, phi tuyến, và được thiết kế để xử lý gián đoạn mà không tạo dao động phi vật lý.

Khác với dòng không nén được, hệ nén được tạo ra ghép phi tuyến mạnh giữa bảo toàn khối lượng, động lượng, và năng lượng, dẫn tới sóng xung kích, gián đoạn tiếp xúc, và quạt giãn nở. Phần này xem dòng nén được chủ yếu như một thách thức số, nhấn mạnh dạng bảo toàn, hành vi theo đặc trưng, và ổn định dưới nghiệm gián đoạn thay vì chỉ tối ưu độ chính xác trên nghiệm trơn.

Các Phương Pháp Số và Khái Niệm Chính

- Dạng thể tích hữu hạn bảo toàn cho Euler và Navier Stokes nén được

- Cấu trúc riêng của hệ hyperbolic và lan truyền sóng theo đặc trưng
- Hành vi entropy số và nghiệm yếu chấp nhận được về mặt vật lý
- Trục giác bài toán Riemann, tốc độ sóng, và tư duy theo đặc trưng
- Thông lượng bắt sốc như Rusanov, HLL, HLLC, kiểu Roe
- Tái dựng bậc cao với bộ hạn chế như MUSCL, TVD, WENO
- Ràng buộc CFL cho hệ nén được và độ cứng ở Mach cao
- Bài toán kiểm chứng như ống Sod, bài toán Lax, Shu Osher, tương tác sốc xoáy
- Chẩn đoán như tổng biến thiên, xét entropy, kiểm tra sai số bảo toàn
- Bộ giải tương đương triển khai bằng C++, Python, và Fortran

Ứng Dụng Thực Tế

Khí động học siêu âm, dòng trong vòi phun và tia phản lực, tương tác sốc lớp biên, mô hình sóng nổ, nhiệt tái nhập ghép với dòng nén được, và hàng không vũ trụ tốc độ cao.

Bộ giải dòng nén được là trung tâm trong kỹ thuật hàng không vũ trụ, chi phối mô phỏng khí động tốc độ cao, hệ động cơ, và các môi trường bị chi phối bởi sốc.

6. Song Song Hóa và Tối Ưu: Thực Thi CFD Hiệu Năng Cao

Tóm Tắt

Dự án này tập trung mở rộng các bộ giải CFD vượt khỏi thực thi một lõi, tiến vào môi trường tính toán hiệu năng cao. Mục tiêu là thể hiện hiểu biết về mô hình lập trình song song, hành vi bộ nhớ, và các nút thắt hiệu năng trong tính toán khoa học, thay vì chỉ theo đuổi tăng tốc độ.

Song song hóa được xem như một vấn đề số và thuật toán, không chỉ là một tác vụ phần mềm.

Các Phương Pháp Số và Khái Niệm Chính

- Chiến lược phân rã miền cho lưới cấu trúc
- Hành vi tăng tốc strong scaling và weak scaling
- Song song hóa MPI cho bộ giải sai phân và thể tích hữu hạn
- Halo exchange và mẫu hình truyền thông
- Song song hóa bộ nhớ chia sẻ bằng OpenMP
- Mô hình lai MPI + OpenMP
- Hiệu quả cache và mẫu truy cập bộ nhớ
- Profiling và phân tích hiệu năng
- Bộ giải tương đương triển khai bằng C++, Python, và Fortran

Phạm Vi Triển Khai

Song song hóa được áp dụng từng bước cho các bộ giải đã phát triển ở các phần trước, bao gồm:

- Bộ giải nhiệt parabolic
- Bộ giải Poisson elliptic
- Bộ giải sóng hyperbolic
- Bộ giải Navier Stokes không nén được

- Lược đồ bắt sốc cho dòng nén được

Mỗi bộ giải được phân tích ở chế độ tuần tự và song song để định lượng:

- Speedup và hiệu suất
- Chi phí truyền thông
- Giới hạn khả năng mở rộng

Ứng Dụng Thực Tế

Mô phỏng CFD quy mô lớn trong hàng không vũ trụ và năng lượng, mô hình thời tiết và khí hậu, phân tích luồng gió đô thị, mô phỏng quy trình công nghiệp, và các tải công việc siêu máy tính quốc gia nơi khả năng mở rộng và hiệu năng của bộ giải quyết định tính khả thi.

7. OpenFOAM và ANSYS Fluent: Quy Trình CFD Công Nghiệp và Kiểm Chứng

Tóm Tắt

Phần này tập trung vào việc sử dụng có cấu trúc các phần mềm CFD công nghiệp đã được thiết lập, cụ thể là OpenFOAM và ANSYS Fluent, nhằm bổ sung cho hướng phát triển bộ giải từ nguyên lý cơ bản. Mục tiêu không chỉ là thành thạo công cụ, mà là hiểu sâu cách các bộ giải công nghiệp triển khai phương pháp số, mô hình nhiễu loạn, và ghép áp suất vận tốc, cũng như cách các lựa chọn này liên hệ với các dạng toán học nền tảng.

Trọng tâm đặt vào verification, validation, hành vi bộ giải, độ nhạy theo lưới, và diễn giải kết quả trong giới hạn của các giả thiết mô hình. Các nghiên cứu này nối cầu giữa phát triển bộ giải học thuật và quy trình kỹ thuật trong thực tế.

Kiểm Chứng Theo Hướng Hàng Không Vũ Trụ và Lựa Chọn Bài Toán

Bộ giải CFD công nghiệp được dùng rộng rãi trong hàng không vũ trụ không phải vì luôn chính xác, mà vì chúng cân bằng được độ bền, khả năng mở rộng, và tính thực dụng kỹ thuật. Trong phần này, OpenFOAM và ANSYS Fluent được áp dụng cho các bài toán dòng chảy chuẩn liên quan hàng không vũ trụ, được chọn để bộc lộ hành vi bộ giải thay vì nhằm tạo kết quả đẹp mắt.

Các ca kiểm chứng tiêu biểu gồm:

- Dòng khí động bên ngoài quanh vật thể tù và vật thể khí động
- Dòng chảy trong ống và kênh đại diện cho đường làm mát
- Phát triển lớp biên chuyển tiếp và nhiễu loạn
- Dòng không nén được do chênh áp liên quan khí động tốc độ thấp

Các Phương Pháp Số và Khái Niệm Chính

- Rời rạc hóa thể tích hữu hạn trên lưới phi cấu trúc
- Thuật toán ghép áp suất vận tốc:
 - SIMPLE, SIMPLEC, PISO, và bộ giải ghép
- Giả thiết mô hình nhiễu loạn:
 - Mô hình RANS (ví dụ $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST)
 - Xử lý gần tường và wall functions
- Đánh đổi giữa dạng ổn định và dạng phụ thuộc thời gian

- Lựa chọn bộ giải tuyến tính và tiền điều kiện
- Chỉ số chất lượng lưới và phân tích độ nhạy
- Mô hình điều kiện biên và tính nhất quán vật lý
- Theo dõi phần dư so với hội tụ vật lý
- Kiểm chứng theo nghiệm giải tích và các bài toán chuẩn

So Sánh với Bộ Giải Tự Phát Triển

Kết quả từ OpenFOAM và ANSYS Fluent được so sánh có hệ thống với các bộ giải sai phân và thể tích hữu hạn tự phát triển ở các phần trước. So sánh này làm nổi bật:

- Vai trò của bộ giải Poisson áp suất elliptic trong mã công nghiệp
- Khác biệt giữa chiến lược giải tách và giải ghép
- Khuếch tán số do mô hình nhiễu loạn đưa vào
- Độ nhạy với bước thời gian và tham số relaxation
- Dánh đổi giữa độ bền và độ trung thực vật lý

Các so sánh này cung cấp hiểu biết CFD độc lập công cụ, thay vì phụ thuộc vào một nền tảng phần mềm duy nhất.

Hiểu Các Giới Hạn của Bộ Giải CFD Công Nghiệp

Một kết quả quan trọng của phần này là nhận ra các điểm mà bộ giải CFD công nghiệp tạo ra thỏa hiệp về số hoặc mô hình. Dù OpenFOAM và ANSYS Fluent cung cấp khung làm việc bền vững, độ chính xác của chúng phụ thuộc mạnh vào mô hình nhiễu loạn, chất lượng lưới, và các tham số số do người dùng chọn.

Các giới hạn chính được khảo sát gồm:

- Khuếch tán số do thông lượng thiên về upwind
- Độ nhạy của kết quả theo lựa chọn mô hình nhiễu loạn
- Phụ thuộc vào under-relaxation và tinh chỉnh bộ giải để hội tụ
- Tính dị hướng do lưới và ràng buộc độ phân giải gần tường

Ứng Dụng Thực Tế

Khí động học bên ngoài và bên trong, HVAC và thông gió, mô hình dòng gió đô thị, dòng tuabin và vòi phun, khí động xe, trộn công nghiệp, phân tích dòng môi trường, và các nghiên cứu kiểm chứng phục vụ quy trình thiết kế trong hàng không vũ trụ, năng lượng, và môi trường xây dựng.

Trong hàng không vũ trụ, các nghiên cứu này nhấn mạnh rằng công cụ CFD công nghiệp cần được sử dụng với hiểu biết rõ về phương pháp số và giả thiết mô hình. Kết quả được xem như mô hình kỹ thuật thay vì nghiệm đúng, và được đánh giá bằng kiểm chứng và khảo sát độ nhạy thay vì chỉ nhìn hình ảnh.

8. CFD Tăng Cường Bằng AI: Phương Pháp Lai Vật Lý và Dữ Liệu

Tóm Tắt

Phần này khảo sát việc tích hợp các kỹ thuật học máy với bộ giải CFD cổ điển nhằm tăng năng lực mô hình hóa, giảm chi phí tính toán, và cải thiện khả năng mở rộng. Trọng tâm đặt vào các cách tiếp cận lai, nơi mô hình dựa trên dữ liệu hỗ trợ cho bộ giải dựa trên vật lý thay vì thay thế chúng.

Học máy được xem như một công cụ số tương tác với phương trình chi phổi, lược đồ rời rạc, và cấu trúc bộ giải. Mục tiêu là thể hiện hiểu biết có nguyên tắc về nơi học máy hữu ích, nơi thất bại, và cách đánh giá nghiêm ngặt so với CFD truyền thống.

Các Phương Pháp Số và Khái Niệm Chính

- Học có giám sát cho hồi quy trường nghiệm
- Mạng nơ-ron như bộ xấp xỉ hàm phi tuyến
- Hàm mất mát và tối ưu trong ngữ cảnh nghiệm PDE
- Học có ràng buộc vật lý bằng phần dư PDE
- Mô hình thay thế dựa dữ liệu cho PDE phụ thuộc thời gian
- Mô hình giảm bậc kết hợp học máy
- Tăng tốc bộ giải và dự đoán tham số bằng ML
- Ổn định, khả năng khái quát, và phân tích sai số cho mô hình học được

Phạm Vi Triển Khai

Các mô hình học máy được áp dụng song song với các bộ giải CFD đã phát triển ở các phần trước. Triển khai gồm:

- Huấn luyện mô hình thay thế cho phương trình nhiệt 1D và 2D
- So sánh mô hình ML với nghiệm sai phân hữu hạn
- Mạng PINN để cưỡng bức phương trình chi phổi
- Mô hình giảm bậc bằng POD với tiến hóa thời gian học được
- Hỗ trợ cho bộ giải elliptic và Poisson, gồm dự đoán số vòng lặp và lựa chọn tham số relaxation

Tất cả mô hình học máy được kiểm chứng bằng chuẩn sai số định lượng, hành vi hội tụ, và so sánh chi phí tính toán với bộ giải số nền.

Ứng Dụng Thực Tế

Tăng tốc mô phỏng CFD cho khảo sát tham số và tối ưu, mô hình giảm bậc cho dự đoán và điều khiển thời gian thực, bộ giải hỗ trợ dữ liệu cho mô phỏng kỹ thuật quy mô lớn, mô hình lai vật lý và dữ liệu trong hàng không vũ trụ và năng lượng, và nghiên cứu học máy cho tính toán khoa học và PDE số.

9. Xây Dựng Website và Biên Soạn PDF: Trình Bày Nghiên Cứu Có Tái Lập

Tóm Tắt

Phần này tập trung chuyển hóa công việc kỹ thuật trong danh mục thành một sản phẩm nghiên cứu rõ ràng, có thể tái lập, và trình bày chuyên nghiệp. Mục tiêu không phải thiết kế mỹ thuật, mà là truyền thông khoa học, truy vết, và khả năng bảo trì lâu dài.

Danh mục được cấu trúc để người đọc có thể hiểu phương pháp, tái lập kết quả, và kiểm tra triển khai bộ giải mà không mờ hồ.

Các Khái Niệm và Thực Hành Chính

- Nguyên tắc nghiên cứu tính toán có tái lập
- Tách bạch rõ giữa lý thuyết, triển khai, và kết quả

- Tài liệu hóa nhất quán về giả thiết và giới hạn
- Quy trình phát triển có kiểm soát phiên bản

Phạm Vi Triển Khai

- Kho Git công khai cho từng bộ giải
- Cấu trúc thư mục chuẩn cho mã, dữ liệu, và hình
- Tự động hóa tạo hình khi phù hợp
- PDF danh mục biên dịch từ nguồn L^AT_EX
- Website danh mục triển khai bằng GitHub Pages

Mỗi phần dự án gồm:

- Phương trình chi phối và phương pháp số
- Kết quả verification và validation
- Nghiên cứu hiệu năng và hội tụ
- Thảo luận rõ hành vi số

Ứng Dụng Thực Tế

Danh mục nghiên cứu học thuật, hồ sơ PhD, phỏng vấn kỹ thuật, đề xuất tài trợ nghiên cứu, và các dự án phát triển bộ giải dài hạn nơi sự rõ ràng, tái lập, và chất lượng tài liệu quan trọng không kém độ đúng của nghiệm số.

Tổng Quan Lộ Trình Cấp Cao

Các mốc lộ trình dưới đây mang tính xấp xỉ và có thể thay đổi tùy theo mức độ duy trì nỗ lực và thời gian đầu tư thực tế trong quá trình thực hiện.

Giai đoạn	Dự án	Phương pháp	Số ngày
NỀN TẢNG	Bộ giải Parabolic	Sai phân hữu hạn 1D 2D	15
	Bộ giải Elliptic	Poisson Laplace	15
	Bộ giải Hyperbolic	Upwind TVD	15
TRUNG CẤP	Bộ giải Navier Stokes	Chiếu 2D 3D	15
	Dòng nén được	Bắt sốc	30
	Song song hóa	MPI OpenMP	30
NÂNG CAO	OpenFOAM và ANSYS Fluent	Quy trình CFD công nghiệp	15
	CFD tăng cường bằng AI	PINN ROM Mô hình thay thế	70
	Website và biên soạn PDF	GitHub Pages L ^A T _E X	10
Tổng			215