



(12) **BẢN MÔ TẢ GIẢI PHÁP HỮU ÍCH THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN
GIẢI PHÁP HỮU ÍCH**

(19) **Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)
CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ**

(11)



2-0002650

(51) **G06F 17/00**
2020.01

(13) **Y**

(21) 2-2020-00388

(22) 29/12/2017

(67) 1-2017-05384

(45) 25/07/2021 400

(43) 25/10/2018 367A

(73) Tập đoàn Viễn thông Quân Đội (VN)

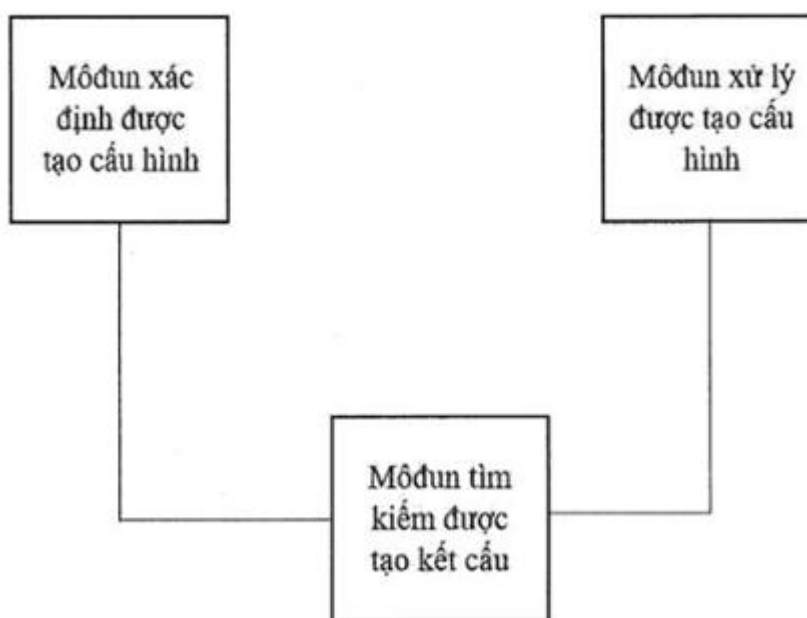
Số 1 đường Trần Hữu Dực, phường Mỹ Đình 2, quận Nam Từ Liêm, thành phố Hà Nội

(72) NGUYỄN VIỆT ANH (VN); DƯƠNG ANH TRÀ (VN).

(74) Công ty TNHH Tư vấn Quốc Dân (NACI CO., LTD)

(54) **THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN VÀ DỰ ĐOÁN KẾT QUẢ MÔ PHỎNG
KHÍ ĐỘNG LỰC HỌC**

(57) Giải pháp hữu ích đề xuất thiết bị và phương pháp tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động lực học. Thiết bị gồm có môđun xác định được tạo cấu hình, môđun tìm kiếm được tạo kết cấu và môđun xử lý được tạo cấu hình. Phương pháp bao gồm các bước: xác định, bởi môđun xác định được tạo cấu hình, các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD; tìm kiếm, môđun tìm kiếm được tạo kết cấu, các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1; xử lý, môđun xử lý được tạo cấu hình, bộ dữ liệu mẫu (bộ dữ liệu mô phỏng) để đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu.



Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Giải pháp hữu ích đề cập đến thiết bị và phương pháp tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động lực học. Cụ thể, thiết bị và phương pháp được đề cập đến sử dụng học máy với kỹ thuật tenxơ đa tuyến tính kết hợp định hướng dữ liệu trên mô hình dòng rối Reynolds trung bình RANS để xây dựng mô hình mô phỏng khí động lực học của dòng chảy nén được.

Tình trạng kỹ thuật của giải pháp hữu ích

Mô hình dòng rối Reynolds trung bình RANS là một mô hình mô phỏng dòng chảy được sử dụng phổ biến trong kỹ thuật mô phỏng động lực học chất lỏng và chất khí (CFD) bao quanh vật thể rắn, được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp hàng không, ô-tô, tàu thủy, hay công nghiệp xây dựng cầu đường, nhà cao tầng... khi phải tính toán tương tác giữa vật thể và dòng chảy bao quanh nhằm mục đích tối ưu hóa thiết kế hình dạng khí động của vật thể.

Mô phỏng động lực học chất lỏng (CFD) có 3 phương pháp chính, đó là mô phỏng số trực tiếp DNS, mô phỏng xoáy lớn LES và mô phỏng rối Reynolds trung bình RANS. Xét về hiệu năng tính toán, với cùng điều kiện bài toán, DNS đưa ra kết quả chính xác nhất nhưng cần tài nguyên tính toán lớn và thời gian tính toán lâu nhất; mô phỏng LES có thời gian tính toán ngắn hơn nhưng tính chính xác kém hơn so với DNS. Trong khi đó mô hình RANS có thời gian tính toán ngắn nhất do hiện tượng xoáy rối không được giải trực tiếp từ phương trình động học chất lỏng Navier-Stokes như phương pháp DNS, hay giải trực tiếp ở những xoáy lớn như LES mà chuyển động của các xoáy rối trong RANS hoàn toàn được mô hình hóa dựa trên giả thiết Boussinesq. Do vậy mô hình rối RANS được sử dụng nhiều nhất trong các ứng dụng mô phỏng khí động trong công nghiệp. Tuy nhiên, RANS vẫn còn rất hạn chế trong việc tính toán và dự đoán các đặc trưng khí động của dòng chảy có độ rối lớn với số Mach lớn hơn 0,3 và số

Reynolds lớn ($Re > 10^6$) như dòng chảy nén được bao quanh các vật thể có hình dạng khí động phức tạp như máy bay quân sự do số Reynolds càng lớn thì càng tiêu tốn tài nguyên tính toán của máy tính.

Các phương pháp mô hình hóa mô phỏng khí động lực học CFD nói trên có một nhược điểm cố hữu là cần thiết lập các điều kiện biên phức tạp cho mỗi trường hợp mô phỏng. Cụ thể, cần chia lưới cho miền tính toán và xác định rõ điều kiện ban đầu của dòng chảy khi mô phỏng. Sau đó chương trình mô phỏng CFD trên cơ sở giải hệ các phương trình vi phân chuyển động của dòng chảy sẽ đưa ra kết quả mô phỏng (các thông số vật lý của dòng) ra sau một khoảng thời gian tính toán dài và cần tài nguyên tính toán lớn (cỡ 100 giờ chạy tính toán song song trên 64 CPUs cho một mô phỏng của dòng chảy có số Reynolds cỡ 10^6). Dữ liệu từ mô phỏng CFD có dung lượng lớn (cỡ 100 Mb cho một tệp tin dữ liệu có chứa các thông số vật lý trạng thái dòng tại một thời điểm của dòng chảy).

Các ứng dụng của học máy đến nay chủ yếu chỉ áp dụng cho xử lý nhận dạng vật thể, hay, xử lý tín hiệu để nhận dạng giọng nói nhưng lại thiếu các ứng dụng của học máy cho việc xử lý dữ liệu mô phỏng khí động lực học của dòng chảy, một lĩnh vực cũng có số lượng dữ liệu mẫu lớn thu được từ kết quả mô phỏng số trên máy tính hay từ kết quả thực nghiệm.

Nhược điểm của mô phỏng CFD truyền thống là các trường hợp tính toán cần xác định cụ thể điều kiện biên và thời gian tính toán rất lâu và tốn nhiều tài nguyên tính toán (ngay cả với phương pháp nhanh nhất là RANS).

Để giải quyết khó khăn trong việc mô phỏng khí động lực học dòng chảy theo phương pháp CFD, giải pháp hữu ích đề xuất thiết bị và phương pháp mới, xây dựng mô hình mô phỏng khí động lực học thông qua ứng dụng của học máy để máy tính có thể dự đoán kết quả mô phỏng khí động của dòng chảy mà không cần phải chạy các chương trình tính toán CFD phức tạp.

Bản chất kỹ thuật của giải pháp hữu ích

Giải pháp hữu ích đề xuất giải pháp ứng dụng học máy cho mô phỏng khí động lực học của dòng chảy như một giải pháp cải tiến cho tính toán và dự đoán các đặc trưng khí động của dòng chảy bao quanh vật thể bay mà không phải tính toán mô phỏng với các chương trình hay phần mềm mô phỏng CFD truyền thống với các bước thiết lập điều kiện biên và các quá trình chia lưới mô phỏng phức tạp.

Mạng nơ-ron sâu DNN (Deep Neural Network) là một phương pháp của học máy được sử dụng trong giải pháp hữu ích này. Trong đó dữ liệu đầu vào được đào tạo với kỹ thuật tenxơ đa tuyến tính kết hợp định hướng dữ liệu thu được từ kết quả mô phỏng CFD với mô hình rối Reynolds trung bình RANS. Bộ dữ liệu mô phỏng bao gồm 6 thông số: phân bố vận tốc, áp suất, nhiệt độ, khối lượng riêng, độ nhớt rối và động năng rối được dùng để dự đoán phân bố các thông số khí động nói trên ở các điều kiện biên khác nhau về vận tốc đầu vào, hình dạng của vật thể hay các góc tấn khác nhau của dòng chảy.

Do đó giải pháp hữu ích đề xuất phương pháp mô phỏng và dự đoán thông số vật lý của dòng chảy dựa trên ứng dụng của học sâu với mô hình mạng nơ-ron sâu DNN xử lý tính toán trên các tệp tin hình ảnh mang kết quả mô phỏng của các trường phân bố của 6 thông số vật lý đặc trưng của dòng chảy (phân bố vận tốc, áp suất, nhiệt độ, khối lượng riêng, độ nhớt rối và động năng rối). Trường phân bố của mỗi thông số vật lý được đánh giá theo mô hình 3D, bằng cách xếp chồng các tệp tin ảnh 2D theo một phương tạo thành một chuỗi hình ảnh xếp chồng, hay một tenxơ ảnh. Theo đó tenxơ hình ảnh này mang thông tin giá trị đại lượng vật lý được tính toán qua giá trị cường độ sáng của điểm ảnh. Vì theo kết quả mô phỏng, các giá trị của đại lượng vật lý được lưu dưới dạng ảnh theo dải màu RGB. Xử lý thông tin trên dạng ảnh kết quả mô phỏng đem lại tốc độ tính toán nhanh hơn và tiết kiệm tài nguyên tính toán hơn so với mô phỏng CFD truyền thống.

Bộ dữ liệu mô phỏng thu được từ dữ liệu mô phỏng CFD với mô hình dòng rối RANS nói trên ứng với các điều kiện dòng chảy khác nhau bao quanh máy bay được sử

dùng làm đầu vào để đào tạo cho mạng nơ-ron sâu DNN. Còn dữ liệu có độ chính xác cao hơn là LES và DNS (thời gian mô phỏng lớn hơn và cần nhiều tài nguyên tính toán) được dùng để làm dữ liệu kiểm chứng mô hình học máy được giới thiệu ở giải pháp hữu ích này. Sau đó mô hình dự đoán kết quả mô phỏng với mô hình mạng nơ-ron sâu được dùng để dự đoán kết quả mô phỏng khi thay đổi điều kiện biên đầu vào của bài toán hay thay đổi hình dạng vật thể mà không cần phải chạy lại các mô phỏng CFD cần nhiều thời gian tính toán.

Theo phương án thứ nhất, giải pháp hữu ích đề xuất thiết bị tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động, bao gồm:

Môđun xác định được tạo cấu hình để: xác định các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD; và tổng hợp các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD.

Môđun tìm kiếm được tạo kết cấu để: tìm kiếm các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1; và xác định các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1;

Môđun xử lý được tạo cấu hình để: phân loại và tính toán, dự đoán kết quả đầu ra; kiểm tra chéo dữ liệu DNS và dữ liệu dự đoán; tối ưu hóa các trọng số của mạng nơ-ron được để giảm thiểu tổn thất; và đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu.

Theo phương án thứ hai, giải pháp hữu ích đề xuất phương pháp tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động bao gồm các bước sau:

Bước 1: xác định, bởi môđun xác định được tạo cấu hình, các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD.

Bước 2: tìm kiếm, bởi môđun tìm kiếm được tạo kết cấu, các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1.

Bước 3: xử lý, bởi môđun xử lý được tạo cấu hình, bộ dữ liệu mẫu (bộ dữ liệu mô phỏng) để đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu.

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó bước 1 còn bao gồm:

Tổng hợp, bởi môđun xác định được tạo cấu hình, các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD.

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó, bước 2 còn bao gồm:

Xác định các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1 và tổng hợp các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD để tạo dữ liệu đặc tính dòng chảy mà chứa các vec tơ đặc tính dòng chảy.

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó bước xử lý còn bao gồm:

Chia, bởi môđun xử lý được tạo cấu hình, bộ dữ liệu mẫu thành 2 phần, trong đó: Phần thứ nhất là dữ liệu mô phỏng DNS và LES được dùng để làm dữ liệu kiểm tra độ chính xác của mô hình mạng nơ-ron sâu; phần thứ 2 là dữ liệu mô phỏng RANS được dùng để đào tạo trong mô hình mạng nơ-ron sâu;

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó bước xử lý còn bao gồm:

Phân loại tính toán, dự đoán kết quả đầu ra bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu; và tính toán bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu; và dự đoán kết quả đầu ra bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu.

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó bước xử lý còn bao gồm: tính hàm tổn thất bằng cách kiểm tra chéo dữ liệu DNS và dữ liệu dự đoán được bằng mô hình mạng nơ-ron sâu; và tối ưu hóa các trọng số của mạng nơ-ron được để giảm thiểu tổn thất; và đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu.

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó, mạng nơ-ron sâu bao gồm: 1 lớp đầu vào và 1 lớp đầu ra cùng các lớp ẩn với N nút trên mỗi lớp (mỗi lớp ẩn tương ứng với một thông số vật lý của dòng).

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó:

Mỗi nút của lớp đầu vào tương ứng với một giá trị đầu vào của một thông số vật lý của dòng.

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó:

Mỗi lớp ẩn tương ứng với việc tính toán trên một thông số vật lý của dòng.

Theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích, trong đó:

Bộ dữ liệu mô phỏng bao gồm 6 thông số: phân bố vận tốc, áp suất, nhiệt độ, khối lượng riêng, độ nhớt rồi và động năng rối; và

Được dùng để dự đoán phân bố các thông số khí động nói trên ở các điều kiện biên khác nhau về vận tốc đầu vào, hình dạng của vật thể hay các góc tấn khác nhau của dòng chảy; và

Động lực học của dòng chảy nén được có tốc độ lớn (số Mach lớn hơn 0,3) bao quanh vật thể bay.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Các hình vẽ được sử dụng để mô tả trong giải pháp hữu ích này gồm có:

Hình 1: Cấu trúc thiết bị tính toán và dự đoán theo phương án thứ nhất của giải pháp hữu ích.

Hình 2: Biểu đồ cấu trúc mạng nơ-ron xoắn

Hình 3: Minh họa hình ảnh quá trình tìm kiếm các đường đặc tính qua các bước tính toán với ma trận xoắn (hình (a)); còn hình (b) biểu diễn đường cong màu đỏ mô tả đường đặc tính dòng được phát hiện.

Hình 4: Minh họa hình ảnh các đặc tính dòng chảy: (a): dòng chảy Couette; (b): dòng chảy Poiseuille; (c): dòng xoáy.

Hình 5: Sơ đồ khối phương pháp tính toán, dự đoán theo phương án thứ hai của giải pháp hữu ích.

Hình 6: Mô tả một mạng nơ-ron học sâu dùng trong phương pháp này với các lớp ẩn tương ứng với các thông số vật lý (vận tốc, áp suất, nhiệt độ, khối lượng riêng), một lớp đầu vào x và một lớp đầu ra y (x và y là các dữ liệu mô phỏng).

Mô tả chi tiết giải pháp hữu ích

Tham chiếu tới hình 1: theo phương án thứ nhất, giải pháp hữu ích đề xuất thiết bị tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động, bao gồm:

Môđun xác định được tạo cấu hình để: xác định các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD; và tổng hợp, các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD.

Môđun tìm kiếm được tạo kết cấu để: tìm kiếm các vectơ đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1; và xác định các vectơ đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1.

Môđun xử lý được tạo cấu hình để: phân loại và tính toán, dự đoán kết quả đầu ra; kiểm tra chéo dữ liệu DNS và dữ liệu dự đoán; tối ưu hóa các trọng số của mạng nơ-ron được để giảm thiểu tổn thất; và đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu.

Tham chiếu tới hình 2: các đặc tính của dòng chảy được đào tạo từ một số lượng lớn các bộ dữ liệu mẫu (50 nghìn tệp tin dạng ảnh 2D). Theo đó, với mỗi điều kiện đầu vào của dòng chảy hay biên dạng của vật thể rắn khác nhau, sự tương tác chất rắn-chất lỏng (hay khí) thu được từ kết quả mô phỏng sẽ được lưu trữ thành các đặc tính dựa trên sự đánh giá trường phân bố vận tốc, áp suất, nhiệt độ, khối lượng riêng, độ nhớt rối và động năng rối trên từng trạng thái của dòng chảy. Tại một thời điểm $t = t_0$, các thông số vật lý của dòng chảy sẽ được lưu dưới dạng phân bố phổ màu được biểu diễn bởi cường độ sáng của các điểm ảnh trên bộ dữ liệu mẫu. Tương ứng với một điểm ảnh ta có thông tin mang giá trị thông số vật lý tại điểm tương ứng thuộc dòng chảy. Từ đó việc xử lý các tenxơ hình ảnh trên bộ dữ liệu mẫu tương ứng với việc xử lý dữ liệu trên trường phân bố các thông số vật lý của dòng chảy với 6 thông số nêu trên. Vì ứng dụng của phương pháp chủ yếu là để tính toán mô phỏng các dòng chảy có tốc độ lớn (dòng chảy bao quanh máy bay) nên phạm vi áp dụng của các thông số vật lý nêu trong giải pháp hữu ích này cụ thể như sau để phương pháp đạt kết quả tính toán chính xác một cách tối ưu: vận tốc của máy bay đạt số Mach lớn hơn 0,3 và nhỏ hơn 2,0 ($0,3 < \text{Mach} < 2,0$);

phân bố áp suất của dòng nằm trong khoảng $[0,5 \text{ atm} < p < 20 \text{ atm}]$; phân bố nhiệt độ trong khoảng $[0 \text{ K} < T < 600 \text{ K}]$.

$\beta(x) \approx \beta(\alpha)$ với $\alpha = [\alpha_1, \alpha_1, \dots, \alpha_N]^T$ là các đặc tính đầu vào tương ứng với các thông số vật lý của dòng. Hàm đặc tính này được mô tả ở các phương trình từ (1) đến (5) trong đó:

Tham chiếu tới hình 3: các xoáy rối tương ứng với các đặc tính nói trên được xác định bằng các vectơ đặc tính, thu được từ việc xử lý các dữ liệu mô phỏng dạng ảnh trên mạng nơ-ron sâu DNN. Mỗi ảnh có độ sâu 24 bit, tương ứng với 3 màu R, G, B. Các ma trận xoắn có kích thước nhỏ $[3 \times 3]$ được sử dụng để tìm kiếm các vectơ đặc tính từ các dữ liệu đầu vào dựa vào thuật toán tìm cạnh, quá trình tìm kiếm này được biểu diễn trên hình 3 (quá trình tìm kiếm đường đặc tính). Để tìm kiếm được nhanh chóng và chính xác, mỗi tệp tin ảnh mang thông tin thông số vật lý của dòng chảy sẽ được chia thành nhiều lưới có cấu trúc và thuật toán tìm kiếm sẽ được thực hiện trên từng ô lưới. Mỗi ô lưới là một ma trận mẫu có kích thước $[16 \times 16]$ điểm ảnh. Dữ liệu mô phỏng mang thông tin thông số vật lý của dòng chảy được lưu dưới dạng 4D (tương ứng với ba chiều trong không gian và một chiều thời gian) tương ứng với kết quả mô phỏng các dòng chảy ở trạng thái không dừng, do vậy bộ dữ liệu mô phỏng được lưu dưới dạng ảnh và được minh họa dưới dạng tenxơ hạng 2 được ma trận hóa dưới dạng ma trận số 3 chiều có kích thước $[m_o \times n_o \times k_o]$ với m_o, n_o, k_o là các số nguyên dương. Bản đồ đặc tính hay tenxơ ảnh được mô tả ở hình 2, khi các ảnh số mang thông tin thông số vật lý của dòng chảy tại mỗi thời điểm được xếp chồng để tạo thành một tenxơ ảnh 3 chiều mang thông tin của dòng chảy 3D. Thuật toán phát hiện cạnh sử dụng ma trận xoắn được sử dụng để xử lý trên các lớp ảnh, phân loại và xác định các đặc tính dòng, hay còn gọi là bước tạo xoắn (tham chiếu đến hình 1). Bước tạo xoắn (hay bước tích chập) được mô tả bằng hàm $C(x, y)$ (phương trình (6)) trong đó I là ma trận ảnh 2D có kích thước $[(2m+1) \times (2n+1)]$ và K là ma trận xoắn (tham chiếu tới hình 3a). Qua bước tạo xoắn, các tệp tin hình ảnh chứa thông tin của dòng chảy được chia nhỏ thành các lớp nhỏ hơn, và quá trình tìm cạnh được thực hiện trên các lớp này với việc sử dụng vectơ đặc tính dòng. Và

cuối cùng, các vector đặc tính trên mỗi ô lưới (kích thước [16x16]) xuất hiện bằng các đường kết nối mô tả đặc tính của dòng dựa trên việc đánh giá trường phân bố các đại lượng vật lý của dòng. Như biểu diễn trên hình 3b, đường các vector đặc tính mô tả tính chất phân bố của một đại lượng vật lý của dòng được biểu diễn bằng đường màu đỏ trên ô lưới.

Tham chiếu tới hình 4: các vector đặc tính được xác định dựa trên các đặc tính dòng chảy phổ biến nhất trong khí động lực học, các đặc tính dòng này được mô tả dưới dạng phương trình toán học (năm phương trình (1) đến (5)), khi đó mối liên hệ giữa các thông số vật lý của dòng được dùng để xác định vector đặc tính của dòng chảy dựa trên việc tính toán mối tương quan giữa các điểm liên kề của dòng chảy. Các vector đặc tính này được dùng để tìm kiếm và phân loại các đặc tính dòng chảy trên các tệp tin dữ liệu đầu vào nhờ sự trợ giúp của thuật toán tìm cạnh như đã trình bày ở phần mô tả của hình 3. Các phương trình xác định đặc tính dòng được trình bày trong giải pháp hữu ích này gồm:

- Dòng chảy Couette (phương trình (1));
- Dòng chảy Poiseuille (phương trình (2));
- Dòng xoáy (phương trình (3));
- Dòng chảy đối lưu (phương trình (4));
- Dòng chảy rối với ứng suất Reynolds trung bình (phương trình (5)).

$$u_i = U_0 \frac{x_j}{h} \quad (1)$$

$$u_i = \frac{G}{2\mu} x_j (h - x_j) \quad (2)$$

$$\vec{\omega} \equiv \nabla \times \vec{u} = \text{const} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \vartheta_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$C(x, y) = (I * K)(x, y) = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n I(x+i, y+j) K(i, j) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{6N_{data}} \sum_{m=1}^{N_{data}} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^i (\hat{y}_{ij,m} - y_{ij,m,DNS})^2} \quad (7)$$

Với h là khoảng cách giữa hai lớp biên của dòng chảy; G là gradient áp suất tham chiếu, được chọn là hằng số: $G = -dp/dx = constant$; $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ là động năng rối; μ hệ số nhớt động lực học; $\vec{\omega}$ là vector dòng xoáy; ϑ_t là hệ số nhớt động học; φ là đại lượng vô hướng (áp suất, nhiệt độ, động năng rối, độ nhớt rối...); δ_{ij} là toán tử kronecker có giá trị 1 khi $i = j$ và bằng 0 khi $i \neq j$; N_{data} là số lượng mẫu.

Tham chiếu hình 5: sơ đồ của phương pháp tính toán được mô tả đầy đủ như sau:

Bước 1: xác định, bởi môđun xác định được tạo cấu hình, các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD.

Bước 2: tìm kiếm, bởi môđun tìm kiếm được tạo kết cấu, các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1.

Bước 3: xử lý, bởi môđun xử lý được tạo cấu hình, bộ dữ liệu mẫu (bộ dữ liệu mô phỏng) để đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu.

Theo phương án của giải pháp hữu ích, trong đó bước 1 còn bao gồm: tổng hợp, bởi môđun xác định được tạo cấu hình, các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD.

Theo phương án của giải pháp hữu ích, trong đó, bước 2 còn bao gồm việc xác định các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1.

Theo phương án của giải pháp hữu ích, trong đó bước xử lý còn bao gồm:

Chia, bởi môđun xử lý được tạo cấu hình, bộ dữ liệu mẫu thành 2 phần, trong đó: phần thứ nhất là dữ liệu mô phỏng DNS và LES được dùng để làm dữ liệu kiểm tra độ chính xác của mô hình mạng nơ-ron sâu; phần thứ hai là dữ liệu mô phỏng RANS được dùng để đào tạo trong mô hình mạng nơ-ron sâu.

Theo phương án của giải pháp hữu ích, trong đó bước xử lý còn bao gồm:

Phân loại tính toán, dự đoán kết quả đầu ra bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu; và tính toán bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu; và dự đoán kết quả đầu ra bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu.

Theo phương án của giải pháp hữu ích, trong đó bước xử lý còn bao gồm: tính hàm tổn thất bằng cách kiểm tra chéo dữ liệu DNS và dữ liệu dự đoán được bằng mô hình mạng nơ-ron sâu; và tối ưu hóa các trọng số của mạng nơ-ron được để giảm thiểu tổn thất; và đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu.

Tham chiếu tới hình 5: minh họa một mạng nơ-ron sâu được dùng trong phương pháp này với 1 lớp đầu vào và 1 lớp đầu ra cùng các lớp ẩn với N nút trên mỗi lớp (mỗi lớp ẩn tương ứng với một thông số vật lý của dòng). Mỗi nút của lớp đầu vào tương ứng với một giá trị đầu vào của một thông số vật lý của dòng. Mỗi lớp ẩn tương ứng với việc tính toán trên một thông số vật lý của dòng. Như mô tả minh họa trên hình 5, có bốn lớp ẩn: lớp vận tốc, lớp áp suất, lớp nhiệt độ, lớp khối lượng riêng được biểu diễn trên mô hình mạng nơ-ron sâu.

Cơ sở tính toán là tenxơ đa tuyến tính vì các thông số vật lý của dòng dưới dạng dữ liệu ảnh 3D được mô tả dưới dạng tenxơ hạng 2 và dữ liệu được tính toán đa tuyến tính trên cơ sở các thông số vật lý khác nhau của dòng chảy. Dữ liệu được định hướng được hiểu là các đặc tính dòng thu được từ dữ liệu mô phỏng được khái quát hóa bằng các vector đặc tính dòng. Trên cơ sở đó, phương pháp đưa ra một cải tiến mới trong kỹ thuật mạng nơ-ron học sâu với cách định nghĩa các bộ vector đặc tính mang tính chất vật lý của các đặc tính dòng chảy tổng quát nhất của chất lỏng và chất khí: dòng chảy Couette, dòng chảy Poiseuille, dòng xoáy, dòng chảy đối lưu và dòng chảy rối với ứng suất Reynolds trung bình. Các gradient áp suất, gradient vận tốc và gradient nhiệt độ được phát hiện nhanh chóng nhờ vào thuật toán tìm kiếm cạnh trên bộ dữ liệu mẫu (hay bộ dữ liệu mô phỏng) các lớp cắt hình ảnh của dòng chảy thu được từ kết quả mô phỏng CFD.

Để thực hiện phương pháp tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động đề xuất trong giải pháp hữu ích này, cần coi dữ liệu mô phỏng dòng chảy là những dữ liệu

dạng ảnh 3D tương ứng với các tenxơ hạng 2. Mỗi thành phần của tenxơ mang một thông tin của một đại lượng vô hướng tại điểm thuộc dòng chảy mà tenxơ mang thông tin (phân bố thành phần vận tốc, áp suất, nhiệt độ, khối lượng riêng, độ nhớt rối và động năng rối). Kết quả mô phỏng CFD với phương pháp RANS và LES dưới dạng bộ dữ liệu 3D được chuyển đổi sang định dạng tệp tin ảnh 2D, mỗi ảnh tương ứng với một cắt lớp của dòng chảy dọc theo phương độ phương Z. Giả sử có 200 nút lưới dọc theo phương Z của miền kết quả mô phỏng, với mỗi thời điểm t_o ta có 200 ảnh 2D mô tả trường phân bố các đặc tính vật lý của dòng chảy dọc theo phương Z. Và dữ liệu này được sử dụng làm đầu vào cho quá trình đào tạo của thuật toán học sâu gồm một lớp dữ liệu đầu vào, một lớp dữ liệu đầu ra và 6 lớp ẩn trong một mạng lưới các đa lớp MLP của thuật toán mạng nơ-ron học sâu.

Các dữ liệu được nhập vào mô hình ở lớp đầu vào được đào tạo qua lưới các lớp ẩn thuộc MLP, nơi dữ liệu được xử lý ở từng lớp và mỗi kết quả đầu ra ở lớp trước được dùng làm đầu vào ở lớp sau với hàm hoạt tính Rectified Linear Unit (ReLU) có dạng $f(x) = \max(0, w \cdot x)$ với w là vectơ trọng số trên mỗi nút của từng lớp thuộc mạng nơ-ron. Quá trình này được gọi là quá trình phát triển thuận để tìm ra kết quả dự đoán ở đầu ra, ký hiệu là $\hat{y}$ mang thông tin của dòng. Sau đó, dữ liệu đào tạo chính xác y , (dữ liệu thu được từ mô phỏng DNS hoặc LES) được dùng để kiểm định kết quả dự đoán bằng cách kiểm tra chéo với hàm tính tổn thất ở khối Tính toán hàm tổn thất. Hàm tổn thất được tính là hàm tính sai số hiệu dụng RMSE (root mean square error) (phương trình (7)). Ở mỗi nút mạng thuộc mỗi lớp trong mạng nơ-ron sâu, các dữ liệu (về đặc tính dòng) được lưu dưới hình thức gắn trọng số trên mỗi nút đó, và các trọng số được xử lý và hiệu chỉnh với phương pháp phản hồi ngược. Với mỗi nút lưới, giá trị của trọng số được tính toán và hiệu chỉnh sao cho sai số là nhỏ nhất, khi đó ta có được các trọng số tối ưu cho mạng nơ-ron học sâu. Đây chính là quá trình đào tạo của mạng nơ-ron. Bộ giá trị các trọng số tối ưu trên các nút của mạng nơ-ron sâu w_{ij} thu được (với $1 \leq i \leq N$ và $1 \leq j \leq 6$ với N là số lượng nút trên mỗi lớp ẩn và số lớp của mạng là 6 tương ứng với 6 thông số vật lý đặc trưng được dùng để tính toán) sẽ được sử dụng để làm phương

pháp tính toán dự đoán cho các mô phỏng khác với các thay đổi về điều kiện đầu vào của bài toán (khi thay đổi điều kiện đầu vào của bài toán về vận tốc, áp suất, nhiệt độ hay hình dạng của vật thể).

Trong các phương án được đề xuất trong đơn giải pháp hữu ích, cần hiểu rằng thiết bị, và phương pháp được bộc lộ có thể được thực hiện theo các cách khác. Ví dụ, phương án về thiết bị được mô tả là chỉ là ví dụ. Ví dụ, cách phân chia bộ phận chỉ là sự phân chia theo chức năng logic và có thể phân chia theo cách khác theo yêu cầu của thực tế. Các bộ phận hoặc thành phần có thể được kết hợp hoặc được tích hợp trong hệ thống khác, hoặc một vài tính năng có thể bị bỏ qua hoặc không được thực hiện. Ngoài ra, các sự ghép nối được hiển thị hoặc được thảo luận hoặc các sự ghép nối trực tiếp hoặc các sự kết nối truyền thông có thể được thực hiện thông qua một vài giao diện. Các sự ghép nối gián tiếp hoặc các sự kết nối truyền thông giữa thiết bị hoặc các bộ phận có thể được thực hiện dưới dạng điện tử, cơ học hoặc các dạng khác.

Các bộ phận được mô tả là các phần tách biệt có thể hoặc có thể không thể tách biệt theo cách vật lý, và các phần được hiển thị như là các bộ phận có thể hoặc không thể là các bộ phận vật lý, có thể được bố trí trong một vị trí, hoặc có thể được phân phối trên các bộ phận mạng. Một phần hoặc tất cả các bộ phận có thể được lựa chọn trong thực tế cần để đạt được các mục đích của giải pháp theo các phương án của giải pháp hữu ích.

Ngoài ra, các bộ phận chức năng theo các phương án của giải pháp hữu ích có thể được tích hợp vào một bộ phận xử lý, hoặc từng bộ phận có thể tồn tại đơn lẻ, hoặc hai hoặc nhiều hơn bộ phận vật lý được tích hợp vào một bộ phận. Bộ phận được tích hợp có thể được thực hiện dưới dạng phần cứng, hoặc có thể được thực hiện dưới dạng bộ phận chức năng phần mềm.

Khi bộ phận tích hợp được thực hiện dưới dạng bộ phận chức năng phần mềm và được bán hoặc được sử dụng như là sản phẩm độc lập, bộ phận được tích hợp có thể được lưu trữ trong máy tính-phương tiện lưu trữ đọc được. Dựa vào sự hiểu biết này, các giải pháp kỹ thuật của bản chất của giải pháp hữu ích, hoặc phần đóng góp đã biết, hoặc

tất cả hoặc một phần của các giải pháp kỹ thuật có thể được thực hiện dưới dạng sản phẩm phần mềm. Phần mềm kết quả được lưu trữ trong phương tiện lưu trữ và bao gồm nhiều lệnh để lệnh cho thiết bị máy tính (mà có thể là máy tính cá nhân, máy chủ, hoặc thiết bị mạng) thực hiện tất cả hoặc một phần của các bước của các phương pháp được mô tả theo các phương án của giải pháp hữu ích. Phương tiện lưu trữ nêu trên bao gồm: phương tiện bất kỳ mà có thể lưu trữ mã chương trình, chẳng hạn như ổ USB, ổ cứng di động, bộ nhớ chỉ đọc (ROM, Read-Only Memory), bộ nhớ truy cập ngẫu nhiên (RAM, Random Access Memory), đĩa từ, hoặc đĩa quang.

Các phần mô tả nêu trên chỉ là các phương án cụ thể của giải pháp hữu ích, mà không không dự định giới hạn phạm vi bảo hộ của giải pháp hữu ích. Bất kỳ sự sửa đổi hoặc sự thay thế dễ dàng được tìm ra bởi người có trình độ trung bình trong lĩnh vực kỹ thuật tương ứng trong phạm vi kỹ thuật được bộc lộ theo giải pháp hữu ích sẽ nằm trong phạm vi bảo hộ của giải pháp hữu ích. Do đó, phạm vi bảo hộ của giải pháp hữu ích sẽ thuộc phạm vi bảo hộ của yêu cầu bảo hộ.

Yêu cầu bảo hộ

1. Thiết bị tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động lực học, bao gồm:

môđun xác định được tạo cấu hình để: xác định các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD; và tổng hợp các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD;

môđun tìm kiếm được tạo kết cấu để: tìm kiếm các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ môđun xác định được tạo cấu hình; và xác định các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ môđun xác định được tạo cấu hình;

môđun xử lý được tạo cấu hình để: phân loại và tính toán, dự đoán kết quả đầu ra; kiểm tra chéo dữ liệu DNS và dữ liệu dự đoán; tối ưu hóa các trọng số của mạng nơ-ron được để giảm thiểu tổn thất; và đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu, trong đó, mạng nơ-ron sâu bao gồm một lớp đầu vào và một lớp đầu ra cùng các lớp ẩn với N nút trên mỗi lớp (mỗi lớp ẩn tương ứng với một thông số vật lý của dòng).

2. Phương pháp tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động lực học bao gồm các bước sau:

bước 1: xác định, bởi môđun xác định được tạo cấu hình, các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD; trong đó còn bao gồm cả việc:

tổng hợp các đặc tính dòng chảy của chất lỏng từ các kết quả mô phỏng CFD để tạo dữ liệu đặc tính dòng chảy mà chứa các vector đặc tính dòng chảy;

bước 2: tìm kiếm, bởi môđun tìm kiếm được tạo kết cấu, các vector đặc tính từ dữ liệu của các đặc tính dòng chảy thu được từ bước 1;

bước 3: xử lý, bởi môđun xử lý được tạo cấu hình, bộ dữ liệu mẫu (bộ dữ liệu mô phỏng) để đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu; cụ thể, tại bước này tiến hành chia bộ dữ liệu mẫu thành 2 phần, trong đó:

phần thứ nhất là dữ liệu mô phỏng DNS và LES được dùng để làm dữ liệu kiểm tra độ chính xác của mô hình mạng nơ-ron sâu;

phần thứ hai là dữ liệu mô phỏng RANS được dùng để đào tạo mô hình mạng nơ-ron sâu.

3. Phương pháp tính toán và dự đoán kết quả mô phỏng khí động lực học theo điểm 2, trong đó bước xử lý còn bao gồm:

phân loại tính toán, dự đoán kết quả đầu ra bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu;

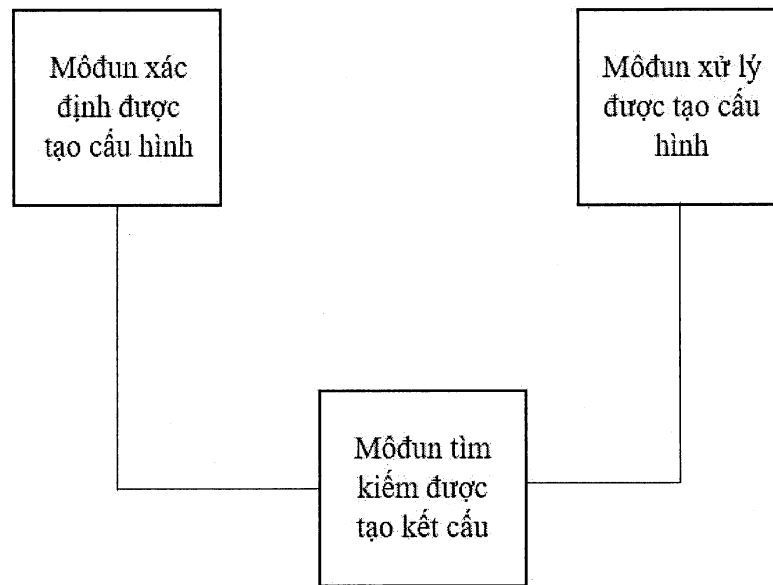
tính toán bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu;

dự đoán kết quả đầu ra bằng cách sử dụng mô hình mạng nơ-ron sâu;

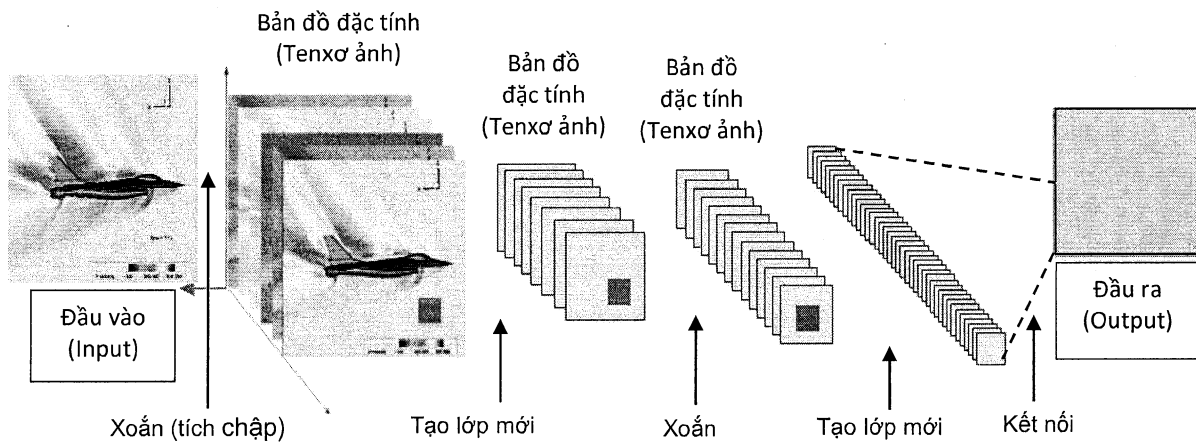
tính hàm tổn thất bằng cách kiểm tra chéo dữ liệu DNS và dữ liệu dự đoán được bằng mô hình mạng nơ-ron sâu;

tối ưu hóa các trọng số của mạng nơ-ron được để giảm thiểu tổn thất; và

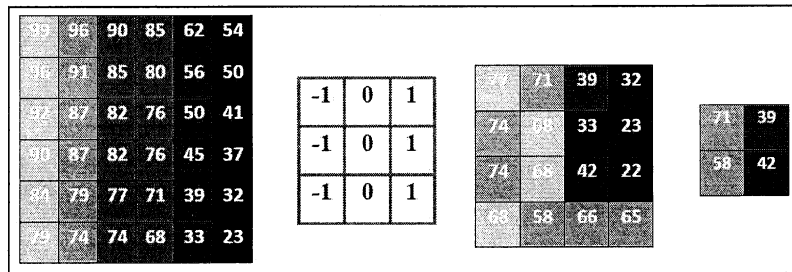
đưa ra mô hình dự đoán kết quả mô phỏng của mạng nơ-ron sâu.



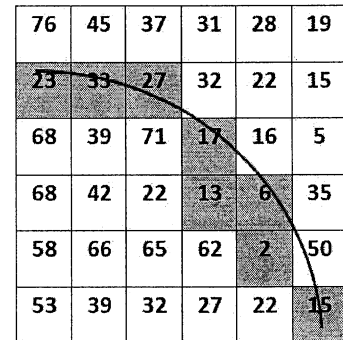
Hình 1



Hình 2

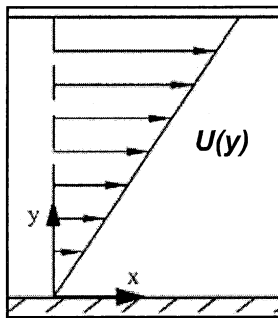


(a)

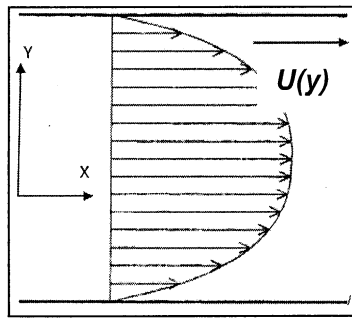


(b)

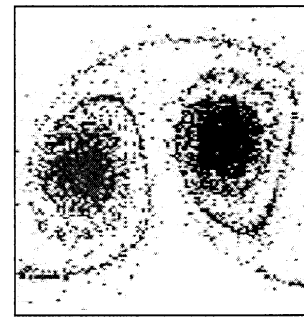
Hình 3



(a)

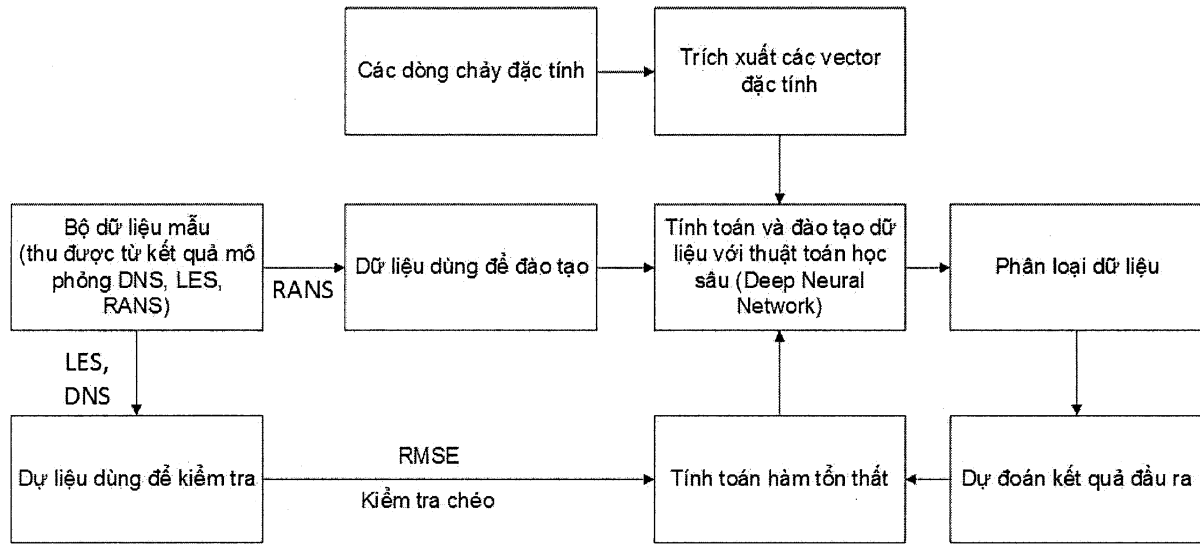


(b)

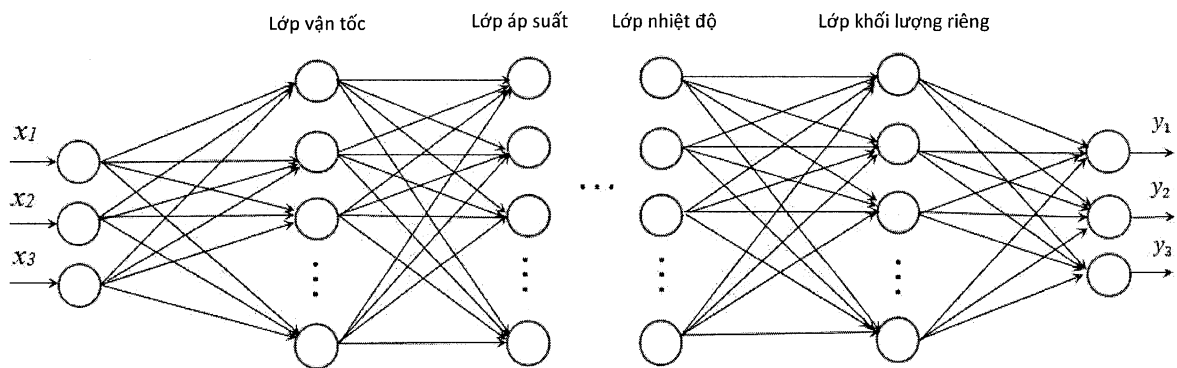


(c)

Hình 4



Hình 5



Hình 6