

CƠ HỌC CHẤT LỎNG (fluid mechanics)

Cơ học chất lỏng là một ngành học thuộc lĩnh vực toán-lý nghiên cứu sự chuyển động và cân bằng của chất lỏng, chất khí và plasma dưới sự tác động của các lực. Cơ học chất lỏng có nhiều ứng dụng trong các lĩnh vực khác nhau như kỹ thuật dân dụng, cơ khí, kỹ thuật hóa học, địa vật lý, vật lý thiên văn và sinh học. Cơ học chất lỏng là một phần của cơ học môi trường liên tục, một lĩnh vực nghiên cứu trạng thái vật chất trên cơ sở vĩ mô mà không xem xét đến cấu trúc các nguyên tử tạo ra nó. Đặc biệt, động lực học chất lỏng là một lĩnh vực nghiên cứu rất thiết thực hướng đến nhiều vấn đề mà cho đến nay một phần hoặc hoàn toàn chưa được giải quyết. Trong cơ học chất lỏng tồn tại nhiều bài toán rất phức tạp về mặt toán học xây dựng trên hệ các phương trình vi phân đạo hàm riêng phi tuyến với miền tính toán và các điều kiện biên phức tạp, do đó phương pháp tốt nhất cho việc tìm lời giải chính là các phương pháp giải số. Chính vì vậy, một kỹ thuật hiện đại được gọi là cơ học chất lỏng tính toán (CFD) được hình thành nhằm giải quyết các bài toán của cơ học chất lỏng. Ngoài ra, phương pháp xác định chuyển động hạt lỏng bằng hình ảnh, một phương pháp thực nghiệm, cũng đạt được sự tiến bộ nhất định trong việc hiển thị và phân tích dòng chảy.

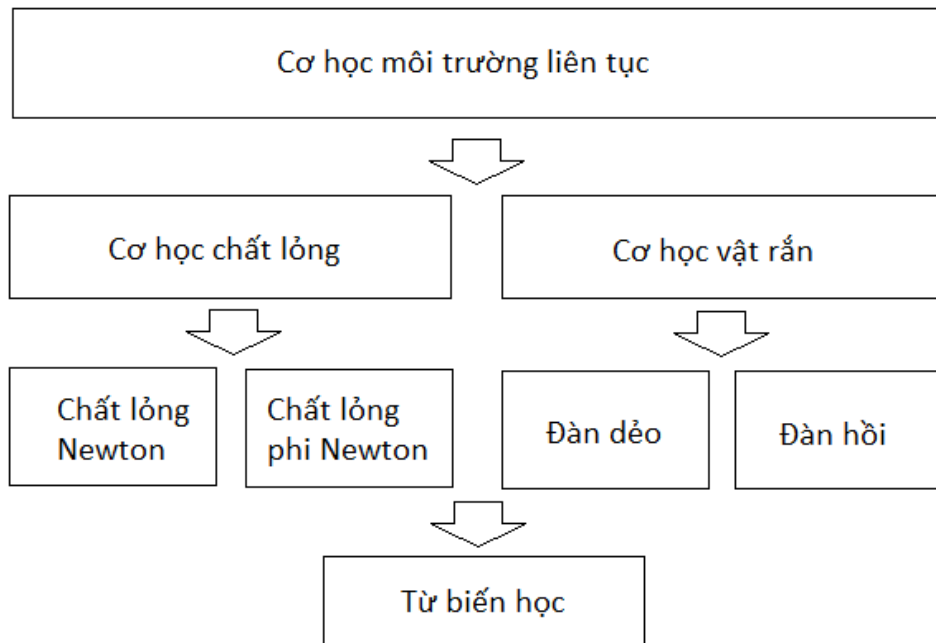
QUÁ TRÌNH PHÁT TRIỂN Từ rất sớm, ít nhất từ thời Hy Lạp cổ đại cơ học chất lỏng được biết đến khi Archimedes đã phát hiện ra lực đẩy lên của chất lỏng và ông đã xây dựng quy luật nổi tiếng mang tên ông, đó là nguyên lý Archimedes được xem là công trình nghiên cứu chủ yếu đầu tiên về cơ học chất lỏng. Tiếp sau đó cơ học chất lỏng được phát triển nhanh chóng với những thành tựu nghiên cứu của Leonardo da Vinci bằng các quan sát và thí nghiệm; Evangelista Torricelli với phát minh ra phong vũ biểu; Isaac Newton nghiên cứu về cứu độ nhớt và Blaise Pascal nghiên cứu thủy tĩnh, thiết lập định luật Pascal và tiếp đến là nghiên cứu của Daniel Bernoulli về nhập môn cơ sở toán học của thủy động lực học được công bố trong *Hydrodynamica* (1738). Xét về mặt thuộc tính, chất lỏng được phân thành 2 loại nhớt và không nhớt. Dòng chảy chất lỏng không nhớt hay còn gọi là chất lỏng lý tưởng đã được các nhà toán học như Leonhard Euler, Jean le Rond d'Alembert, Joseph Louis Lagrange, Pierre-Simon Laplace, Siméon Denis Poisson nghiên cứu và dòng chảy nhớt đã được khám phá bởi nhiều kỹ sư bao gồm Jean Léonard Marie Poiseuille và Gotthilf Hagen. Lý thuyết toán học chặt chẽ hơn được áp dụng bởi Claude-Louis Navier và George

Gabriel Stokes trong việc thiết lập hệ phương trình Navier-Stokes, và các lớp biên được khảo cứu bởi Ludwig Prandtl, Theodore von Kármán, trong khi đó các nhà khoa học khác như Osborne Reynolds, Andrey Kolmogorov, và Geoffrey Ingram Taylor đã mở rộng nghiên cứu về độ nhớt và sự tính rối của chất lỏng.

CÁC LĨNH VỰC CHÍNH CỦA CƠ HỌC CHẤT LỎNG Hai lĩnh vực chính trong cơ học chất lỏng đó là thủy tĩnh học và thủy động lực học. Thủy tĩnh là một lĩnh vực của cơ học chất lỏng nghiên cứu trạng thái của chất lỏng khi đứng yên. Nó bao gồm việc nghiên cứu các điều kiện trong đó chất lỏng được đặt ở trạng thái cân bằng ổn định. Cơ học thủy tĩnh cung cấp các giải thích vật lý cho nhiều hiện tượng của cuộc sống hàng ngày, chẳng hạn như lý do tại sao áp suất khí quyển thay đổi theo độ cao, tại sao gỗ và dầu trôi nổi trên mặt nước, và tại sao mặt nước luôn phẳng và ngang bất kể hình dạng của bình chứa. Các ngành như thủy lực, kỹ thuật thiết bị lưu trữ sử dụng thủy tĩnh học làm lý thuyết cơ bản.

Động lực học chất lỏng hay còn gọi là thủy động lực học là một lĩnh vực khác của cơ học chất lỏng, đó là khoa học chuyên nghiên cứu trạng thái chuyển động của dòng chảy chất lỏng và cả chất khí. Động lực học chất lỏng dựa trên cơ sở lý thuyết cũng như các định luật thực nghiệm và bán thực nghiệm từ kết quả đo lường dòng chảy và được sử dụng để giải quyết các vấn đề thực tiễn. Lời giải cho một bài toán động lực học chất lỏng thường liên quan đến tính toán các yếu tố khác nhau của chất lỏng như vận tốc, áp suất, mật độ và nhiệt độ như là các hàm của không gian và thời gian. Động lực học chất lỏng nói chung được phân thành các chuyên ngành hẹp, bao gồm khí động lực học (nghiên cứu chuyển động của chất khí) và thủy động lực học (nghiên cứu chuyển động của chất lỏng). Động lực học chất lỏng có nhiều ứng dụng trong hàng hải, hàng không, bao gồm tính toán lực và các moment trên profile cánh máy bay, xác định tốc độ dòng chảy của dầu mỏ qua đường ống, dòng chảy đại dương, sông hồ, cửa sông và ven biển, dự báo thời tiết, tìm hiểu tinh vân trong không gian giữa các vì sao và mô phỏng các vụ nổ. Một số nguyên lý chất lỏng động cũng được sử dụng trong kỹ thuật giao thông và động lực đám đông.

PHÂN NGÀNH TRONG CƠ HỌC MÔI TRƯỜNG LIÊN TỤC Cơ học chất lỏng là một phần của cơ học môi trường liên tục được minh họa một cách trực quan như trong hình minh họa dưới đây:



Hình 1: nhóm chuyên ngành trong cơ học môi trường liên tục

CÁC GIẢ THIẾT CƠ BẢN Về cơ bản, mọi hệ phương trình toán học trong cơ học chất lỏng được thiết lập đều tuân theo:

- Định luật bảo toàn khối lượng,
- Định luật bảo toàn động lượng ,
- Giả thiết liên tục của không gian vật lý.

Chẳng hạn tính bảo toàn khối lượng đối với một thể tích bé (còn gọi là thể tích kiểm soát) có nghĩa là sự biến thiên khối lượng trong khoảng thời gian dt phải bằng với tổng khối lượng đi qua mặt kiểm soát từ bên ngoài vào bên trong, trừ đi tổng khối lượng truyền từ bên trong ra bên ngoài. Điều này có thể được biểu diễn dưới dạng tích phân đối với thể tích bé trên toàn miền chất lỏng. Nguyên lý này được áp dụng để thu nhận các phương trình liên tục, truyền tải - khuếch tán nồng độ.

Giả thuyết liên tục là một sự lý tưởng hóa của cơ học môi trường liên tục, trong đó chất lỏng có thể được coi là lấp đầy không gian vật lý một cách liên tục, mặc dù ở quy mô vi mô, chúng bao gồm các phân tử tách

biệt. Theo giả thiết liên tục, các tính chất vĩ mô của các đại lượng vật lý như mật độ, áp suất, nhiệt độ và vận tốc là được xác định ở các yếu tố thể tích bé, nó đủ nhỏ so với quy mô chiều dài đặc trưng của hệ thống, nhưng đủ lớn so với quy mô chiều dài phân tử. Các đặc tính chất lỏng có thể thay đổi liên tục theo các thể tích bé. Giả thiết liên tục có thể dẫn đến những kết quả không chính xác trong các ứng dụng như dòng chảy tốc độ siêu âm hoặc các dòng phân tử theo quy mô nano. Những vấn đề mà giả thuyết liên tục không thỏa mãn, có thể được giải quyết bằng cách sử dụng cơ học thống kê. Để xác định khả năng áp dụng giả thuyết liên tục, số Knudsen, là tỷ số của đường đi tự do trung bình của phân tử và cỡ chiều dài đặc trưng, được sử dụng để đánh giá. Khi số Knudsen có giá trị dưới 0.1 thì vấn đề đang xét có thể sử dụng giả thuyết liên tục, nhưng phương pháp phân tử (cơ học thống kê) có thể được áp dụng cho tất cả các phạm vi số Knudsen.

PHƯƠNG TRÌNH NAVIER–STOKES Phương trình Navier–Stokes được lấy theo tên của nhà vật lý người Pháp Claude-Louis Navier và nhà toán học, cũng là vật lý người Ireland George Gabriel Stokes. Đây là hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng mô tả sự cân bằng lực tại một điểm bên trong chất lỏng. Trường hợp tổng quát với chất lỏng Newton nén được phương trình Navier–Stokes có dạng:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \mu \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{F}. \quad (1)$$

Đối với chất lỏng không nén được phương trình trở thành:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F}. \quad (2)$$

Phương trình Navier-Stokes mô tả các thay đổi về động lượng tại một điểm trong chất lỏng để thích ứng với thay đổi của gradient áp suất và độ nhớt động học, do đó nó cũng được gọi là phương trình động lượng.

Trong các phương trình trên \mathbf{F} chính là lực khối, như lực hấp dẫn trong trường trọng lực hoặc lực Lorentz. Lời giải giải tích của phương trình Navier-Stokes đối với một bài toán nhất định phải được tìm trên cơ sở sử dụng phép tính tích phân. Tuy nhiên, trong thực tế chỉ có những trường hợp rất đơn giản mới có thể tìm được lời giải chính xác theo phương pháp giải

tích. Những trường hợp này thường liên quan đến các giả thiết dòng chảy không rối, dòng chảy dừng, trong đó số Reynolds là nhỏ. Đối với các trường hợp phức tạp hơn, đặc biệt là các trường hợp dòng chảy rối, chẳng hạn như các bài toán về dự báo thời tiết toàn cầu, khí động học, thủy động lực học với các miền tính toán và điều kiện biên phức tạp, các lời giải của phương trình Navier-Stokes hiện tại chỉ có thể được tìm được trên cơ sở giải số với sự trợ giúp của máy tính. Ngành khoa học này được gọi là thủy động lực học tính toán (CFD).

CHẤT LỎNG LÝ TƯỞNG VÀ CHẤT LỎNG NHỚT Chất lỏng không nhớt hay còn gọi là chất lỏng lý tưởng là chất lỏng có hệ số nhớt bằng không và lúc này phương trình Navier-Stokes có dạng đơn giản hơn rất nhiều do bỏ qua lực nhớt (phương trình Euler):

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{F}. \quad (3)$$

Thực ra đây là cách để đơn giản hóa về mặt toán học. Trong thực tế, dòng chất lỏng không nhớt thuần khiết được biết đến như dòng siêu lỏng, còn các trường hợp khác là dòng chất lỏng nhớt hay còn gọi là chất lỏng thực. Tính nhớt của chất lỏng đóng vai trò quan trọng trong lớp biên gần mặt phân cách giữa chất lỏng với mặt rắn. Điều kiện biên trên mặt rắn là vận tốc trượt được áp dụng. Trong một số trường hợp khi giải bài toán dòng chất lỏng nhớt người ta thường áp dụng giả thiết độ nhớt chỉ tồn tại ở lớp biên và xa lớp biên chất lỏng được xem như chất lỏng không nhớt.

Đối với dòng chảy qua lớp biên xốp (có lỗ rỗng), vận tốc của dòng chảy chịu sự gián đoạn tại biên xốp. Mở rộng xa hơn nữa, đối với dòng chất khí chuyển động với vận tốc dưới âm thì có thể xem như chất lỏng là không nén được, có nghĩa là mật độ của chất khí là không đổi cho dù vận tốc và áp suất tĩnh có thay đổi.

CHẤT LỎNG NEWTON VÀ CHẤT LỎNG PHI NEWTON Chất lỏng Newton là một chất lỏng, trong đó các ứng suất nhớt phát sinh từ dòng chảy tại mỗi điểm tỷ lệ tuyến tính với tốc độ biến dạng. Điều này có nghĩa rằng các lực nhớt tỷ lệ thuận với gradient của véc tơ vận tốc của chất lỏng. Như vậy chất lỏng mà quan hệ giữa tensor ứng suất và tensor tốc độ biến dạng không tuân theo qui luật của chất lỏng Newton thì được gọi là chất lỏng phi Newton.

Chất lỏng Newton là những mô hình toán học đơn giản nhất về chất

lỏng có độ nhớt. Trong thực tế nhiều chất lỏng và khí phổ biến, như nước và không khí có thể được coi là Newton trong điều kiện bình thường. Tuy nhiên, chất lỏng phi Newton là tương đối phổ biến, như sơn không nhỏ giọt, các polyme nóng chảy, nhiều chất rắn, máu và các chất lỏng có độ nhớt cao. Bằng quan sát cho thấy rằng việc khuấy một chất lỏng phi Newton có thể để lại "lỗ hồng xoáy" theo sau đó. Nó sẽ dần dần lấp đầy theo thời gian. Ngoài ra, khuấy một chất lỏng phi Newton có thể làm giảm độ nhớt, do đó chất lỏng xuất hiện mỏng hơn trên thành vật chứa. Hầu hết các chất lỏng có chuỗi phân tử dài có thể ứng xử theo cách của chất lỏng phi Newton.

ĐẶNG HỮU CHUNG

Tài liệu tham khảo

1. G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1967.
2. B. Le Méhauté. *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*, Springer Science + Business Media, LLC, 1976.
3. L. D. Landau and E.M. Lifshitz. *Fluid Mechanics*, Vol. 6, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, UK, 2000.
4. R. W. Johnson, *Handbook of Fluid Mechanics*, CRC Press, US, 2016.