

XÂY DỰNG CÁC MÔ-ĐUN TÍNH TOÁN TỰ ĐỘNG ĐỂ PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CƠ CẤU PHẪNG MỘT BẬC TỰ DO

AUTOMATIC CALCULATION MODULES DEVELOPMENT FOR DYNAMIC ANALYSIS OF SINGLE-DEGREE-OF-FREEDOM PLANAR MECHANISMS

Đặng Hoàng Minh

Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về việc xây dựng mô-đun tự động tính toán động lực học các cơ cấu phẳng nhiều khâu một bậc tự do. Động học của cơ cấu được phân ra các nhóm Dyad và giải bằng phương pháp giải tích dựa trên phương trình véc tơ khép kín. Động lực học cơ cấu được giải bằng phương pháp D'Alembert. Các chương trình tính toán ở dạng mô-đun được lập trình trên ngôn ngữ MATLAB. Điểm đặc biệt trong các mô-đun này là chúng được xét các điểm dị biệt trong một vòng quay của khâu dẫn để tránh các lỗi như chia cho 0, số phức khi tính toán. Trên cơ sở các mô-đun được xây dựng, chương trình tính toán động học, động lực học của các cơ cấu phẳng (5 khâu) đã được thực hiện một cách tự động. Kết quả tính toán thu được nhờ những mô-đun này được so sánh với mô phỏng nhờ phần mềm Recurdyn để kiểm chứng. Các mô-đun tính toán được xây dựng có thể sử dụng trực tiếp cho việc xây dựng mô hình toán nhằm tối ưu hóa thiết kế các cơ cấu phẳng nhiều khâu khác nhau trong lĩnh vực chế tạo máy.

Từ khóa: Mô-đun tính toán; Cơ cấu phẳng; Động học; Động lực.

ABSTRACT

The development of modules that automatically calculate the dynamics of single-degree-of-freedom planar multi-link mechanisms is described in this paper. The mechanism's kinematics are classified into Dyad groups and solved analytically using closed vector equations. The D'Alembert's principle is used for dynamic analysis of mechanisms. Modular computational programs are written in MATLAB. The unique feature of these modules is that they are considered for differences in one revolution of the conduction to avoid calculating errors such as division by zero or complex numbers. The program for calculating the kinematics and kinematics of planar five-link mechanisms has been performed automatically based on the built-in modules. The built-in calculation modules can be used directly to develop mathematical models for design optimization of various planar multi-link mechanisms in the field of machine building.

Keywords: Calculation module; Planar mechanism; Kinematics; Dynamics.



1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, việc thiết kế máy móc và các hệ thống cơ khí vẫn đang là một chủ đề quan trọng trong đời sống và kỹ thuật. Khi khoa học máy tính càng phát triển thì người ta càng mở rộng nghiên cứu về độ phức tạp của các hiện tượng vật lý xảy ra trong các hệ thống, mở rộng sự xem xét nhiều yếu tố và lĩnh vực ảnh hưởng đến chất lượng và độ cạnh tranh của sản phẩm cơ khí. Một trong những hướng phát triển đó là xây dựng các mô hình toán thiết kế toàn diện hơn, xét đến nhiều yếu tố hơn. Một lĩnh vực liên quan mật thiết đến mô hình toán thiết kế các hệ thống cơ khí đó là động lực học. Tuy nhiên, việc xây dựng mô hình toán động lực học lại thường rất phức tạp chứ không đơn giản. Vấn đề nằm ở chỗ với những cơ cấu phức tạp (lớn hơn 3 khâu) thì việc xây dựng các hệ thức, công thức tính toán tường minh là vô cùng khó khăn và nhiều khi là bất khả thi. Một số cách tiếp cận như sử dụng phần mềm, kết nối các phần mềm đa vật lý và phần mềm tính toán như MATLAB không phải là giải pháp toàn diện vì phải đối diện với nhiều vấn đề liên quan đến việc trao đổi và xử lý dữ liệu giữa các phần mềm, các lỗi phát sinh trong quá trình tính toán. Một trong số những hướng giải quyết triệt để và có triển vọng đó là xây dựng các bộ công cụ mô-đun tính toán mà ở đó có thể dễ dàng tính toán các bài toán động lực học cho các nhóm cơ cấu cơ bản. Việc xây dựng này phải sử dụng các kiến thức cơ học cổ điển trong các môn động lực học máy hoặc nguyên lý máy [1-6]. Sau đó, sử dụng các kiến thức về lập trình toán học [7] để viết nên các chương trình con (mô-đun) để từ đó có thể ứng dụng vào việc giải quyết các bài toán động lực học.

Trên thực tế, ý tưởng mô-đun hóa các cụm cơ cấu cơ bản đã có từ trước đây [8-9]. Tuy nhiên, khi đó cách tiếp cận của các tác giả vẫn chỉ dừng ở việc xây dựng mô-đun để tính toán các giá trị động lực học tại một điểm cụ thể cần khảo sát. Các mô-đun chưa tính đến các điểm dị biệt

mà một cơ cấu phức tạp có thể gặp phải. Về mặt vật lý thì đó là những vị trí mà cơ cấu thay đổi giá trị vận tốc, gia tốc, phản lực, lực quán tính, v.v... một cách đột xuất, và tiệm cận giá trị vô cùng lớn. Về mặt toán học thì trong các hệ thức xuất hiện phép tính chia cho 0 hoặc số phức. Vì vậy mà ứng dụng mô-đun ở các công trình trước cho việc xây dựng mô hình toán là chưa hoàn toàn khả thi.

Vì vậy trong bài báo này, các tác giả đi sâu vào vấn đề lập trình ứng dụng cho các mô-đun dạng này. Ý tưởng nằm ở chỗ chia nhỏ cụm cơ cấu cơ bản ra đơn giản nhất có thể; xây dựng các mô-đun phụ trợ để hỗ trợ xem xét các trường hợp riêng của các hệ thức để xử lý các điểm dị biệt. Đồng thời, chương trình không chỉ tính toán một điểm cụ thể mà vô số điểm trong một vòng quay của khâu dẫn động cơ, từ đó đảm bảo việc sử dụng chúng để xây dựng mô hình toán thiết kế tối ưu được hoạt động trơn tru không có lỗi. Trong khuôn khổ bài báo này, các tác giả tập trung vào việc xây dựng các mô-đun và chứng minh tính chính xác, khả thi của nó trong việc phân tích động lực học của các cơ cấu phẳng nhiều khâu.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Như đã trình bày, bài báo đề xuất xây dựng các mô-đun tính toán động học và động lực học dựa trên các đối tượng cơ bản là các khâu đơn để xử lý các điểm dị biệt, sau đó tăng dần lên một vài đối tượng ở dạng Dyads [1]. Chúng sẽ đóng vai trò như những khuôn mẫu dành cho tất cả các cơ cấu phẳng một bậc tự do với độ phức tạp tùy ý. Các mô-đun này sau đó sẽ được viết dưới dạng Code của các phần mềm toán học như MATLAB, MAPLE, v.v... để có thể gọi chúng trong các công việc tính toán.

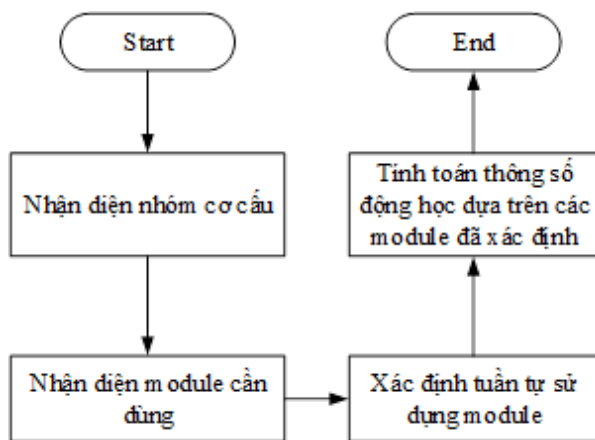
2.1. Mô-đun động học cơ cấu phẳng

Để giải quyết được bài toán động học, tác giả đề xuất 11 mô-đun cơ bản, được trình bày trong bảng sau:

Với các ký hiệu x, y là các tọa độ của các điểm; l là ký hiệu về khoảng cách; v là ký hiệu của vận tốc; a là ký hiệu của gia tốc; v_x, v_y là ký hiệu của vận tốc các điểm theo phương x, y ; a_x, a_y là ký hiệu của gia tốc các điểm theo phương x, y ; φ là ký hiệu của tọa độ góc, ω là ký hiệu của vận tốc góc; ε là ký hiệu của gia tốc góc.

2.2. Quy trình sử dụng Mô-đun động học

Trên cơ sở thư viện mô-đun động học kể trên, tác giả xây dựng quy trình ứng dụng chúng nhằm để tính toán các thông số động học trong một cơ cấu phẳng một bậc tự do, thể hiện trong hình 1:

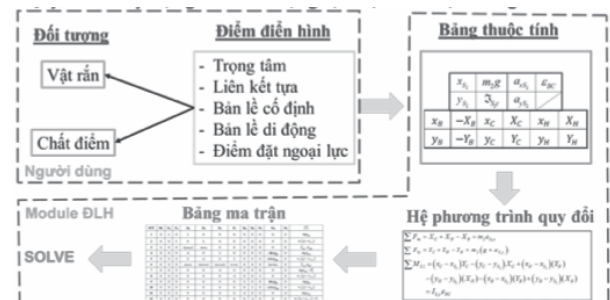


Hình 1. Quy trình sử dụng module động học trong việc xác định, tính toán các thông số động học cơ cấu phẳng

Mấu chốt của Quy trình này nằm ở chỗ nhận diện được cấu trúc của cơ cấu đề bài. Các cơ cấu có thể được phân tách ra các nhóm cơ bản theo từng mô-đun ở bảng 1. Sau đó cần xác định trình tự sử dụng các mô-đun đó theo quy tắc: đầu ra của mô-đun trước sẽ là đầu vào của mô-đun sau, từ đó tính toán được các thông số động học cần thiết cho cả cơ cấu và bất kỳ khâu khớp nào trong cơ cấu.

2.3. Mô-đun động lực học

Trong thiết kế máy móc cơ khí, bài toán động lực học ngược khá phổ biến so với bài toán động lực học xuôi. Ở bài toán động lực học xuôi là cho toàn bộ tải trọng có ý đồ và các tải trọng ngẫu nhiên tác dụng vào cơ hệ, cần đi tìm quy luật chuyển động động học của các khâu. Tuy nhiên thực tế thì các máy móc cần thực hiện các chuyển động một cách tuần hoàn có quy luật, nhằm để đáp ứng yêu cầu về hành trình của cơ cấu chấp hành và năng suất mà máy đó cần thực hiện. Khi đó thì quy luật động học của một khâu (với cơ cấu một bậc tự do) hoặc nhiều khâu (cơ cấu nhiều bậc tự do) được cho trước. Sau đó, chúng ta phải tìm được quy luật của nguồn năng lượng cung cấp cho các khâu dẫn (quy luật mô men quay của động cơ). Trong phạm vi của bài báo, tác giả tập trung vào bài toán động lực học ngược này để đáp ứng các bài toán thiết kế máy trên thực tế. Quy trình xây dựng mô-đun động lực học thể hiện trong hình 2:



Hình 2. Quy trình sử dụng module động lực học trong việc xác định, tính toán các thông số động lực học cơ cấu phẳng

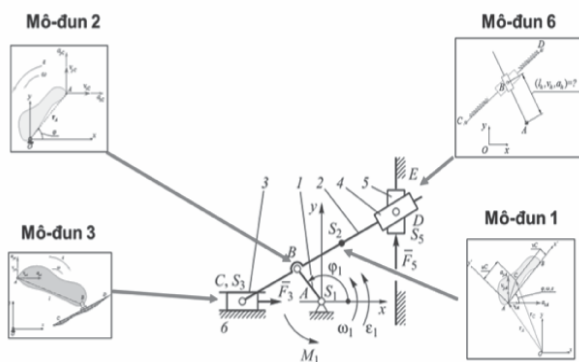
Ý tưởng chính của mô-đun động lực học đó là phân loại các cơ cấu phẳng ra hai loại đối tượng chính: chất điểm và vật rắn, đồng thời xây dựng khái niệm điểm điển hình. Đó là các điểm như trọng tâm, liên kết tựa, bản lề cố định, bản lề di động, điểm đặt ngoại lực. Với

mỗi loại điểm điển hình sẽ có một bảng thuộc tính tương ứng. Điểm điển hình được đặt trên các đối tượng sẽ tương ứng với một bảng thuộc tính xác định, và mỗi một bảng thuộc tính sẽ được chuyển đổi thành 1 hệ phương trình động lực học tương đương. Nhiệm vụ của mô-đun là sẽ gom các hệ số của những phương trình này để sắp vào một bảng ma trận để giải quyết bài toán hệ phương trình tuyến tính hoặc hệ phương trình phi tuyến bằng phương pháp số.

3. THỰC NGHIỆM SỐ VÀ KẾT QUẢ

3.1. Ví dụ tính toán động học – Cơ cấu 5 khâu nhờ các mô-đun

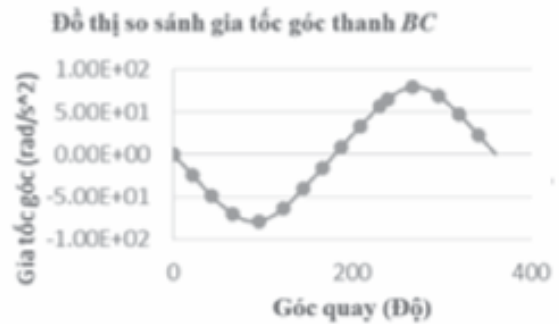
Cho một cơ cấu phẳng 05 khâu như hình bên dưới (Hình 3). Với các thông số như sau: $\omega_1 = 15 \text{ rad/s}$, $\varepsilon_1 = 0 \text{ rad/s}^2$, $l_{AB} = 0,1 \text{ m}$, $l_{BC} = 0,3 \text{ m}$, $l_{BS2} = 0,15 \text{ m}$, $x_E = 0,3 \text{ m}$, $y_C = 0 \text{ m}$. Tìm các thông số động học của các khâu và khớp trong cơ cấu. Áp dụng quy trình sử dụng mô-đun động học để giải quyết bài toán, ta có sơ đồ sau (hình 3):



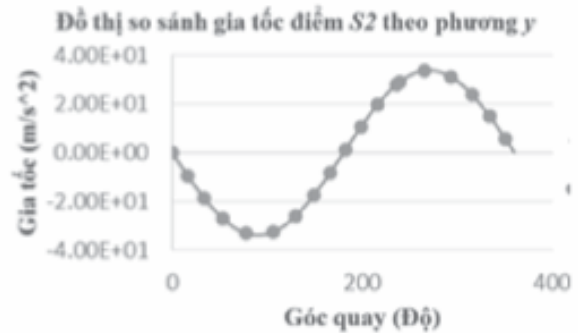
Hình 3. Bài toán động học – cơ cấu và quy trình giải

Cơ cấu đề cho có thể được tách ra làm 04 mô-đun cơ bản, đó là các mô-đun 1, 2, 3 và 6. Chương trình toán động học của cơ cấu sẽ được xây dựng nhờ ngôn ngữ MATLAB, với 7 dòng code ngắn gọn.

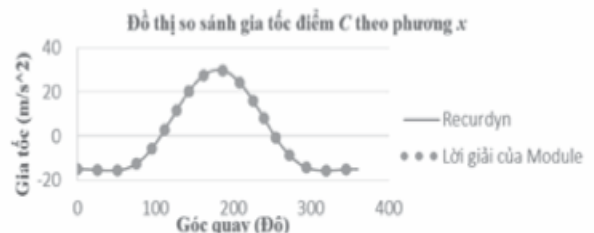
Một vài kết quả tính toán của các mô-đun được so sánh với phần mềm mô phỏng Recurdyn và thể hiện trong hình 4:



(a)



(b)



(c)

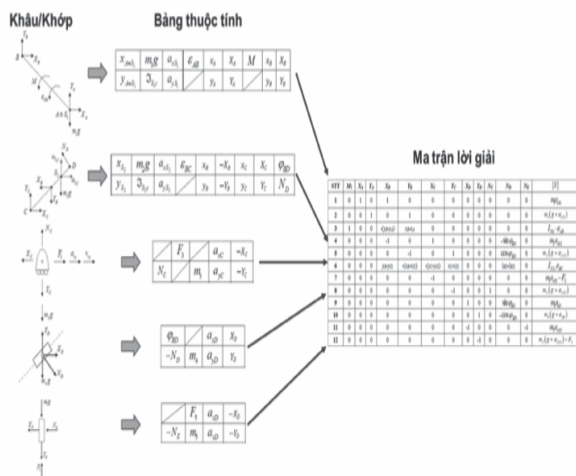
Hình 4. So sánh kết quả lời giải thông số động học của Mô-đun và của phần mềm Recurdyn.

- (a) – Biểu đồ gia tốc góc khâu BC; (b) – Biểu đồ gia tốc theo phương thẳng đứng của điểm S_2 ; (c) – Biểu đồ gia tốc theo phương ngang của điểm C.

Theo hình 6, ta thấy sai số giữa lời giải của mô-đun động học và phần mềm là dưới 5%, cho thấy các mô-đun có độ chính xác cao.

3.2. Ví dụ bài toán động lực học – Cơ cấu 5 khâu nhờ các mô-đun

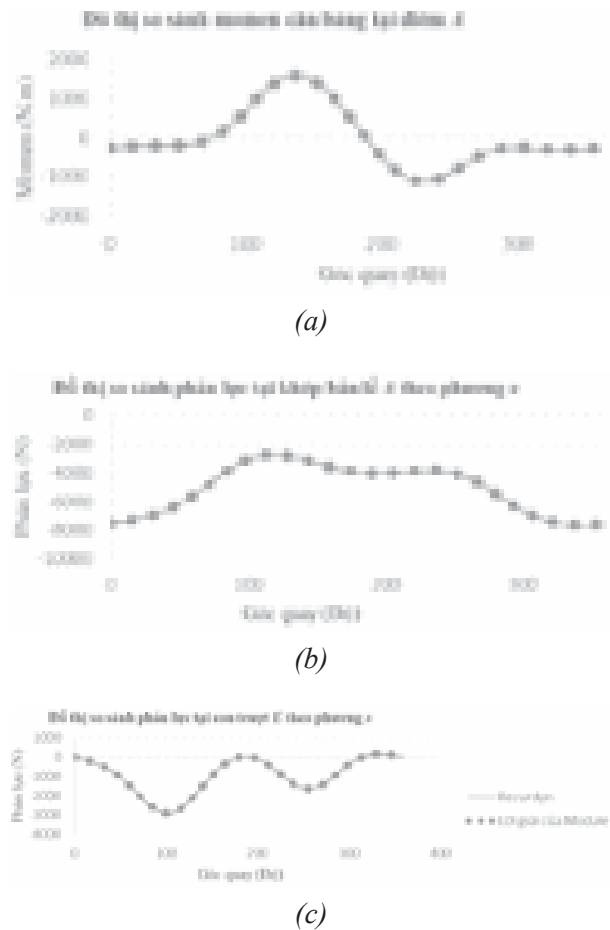
Giải quyết bài toán động lực học cho cơ cấu số 2 (Hình 3), với dữ kiện $m_1 = 15 \text{ kg}$, $m_2 = 30 \text{ kg}$, $m_3 = 50 \text{ kg}$, $m_4 = 60 \text{ kg}$, $m_5 = 60 \text{ kg}$, $J_{1s} = 15 \text{ kg.m}^2$, $J_{2s} = 2,2 \text{ kg.m}^2$, $F_3 = 6 \text{ kN}$, $F_5 = 3 \text{ kN}$. Cần tính mô men cân bằng và phản lực khớp động trong cơ cấu. Quy trình xử lý của mô-đun động lực học có thể được biểu diễn như hình 5:



Hình 5. Bài toán động lực học – cơ cấu 2 và quy trình giải

Như đã trình bày ý tưởng, cơ cấu này có thể tách ra các khâu vật rắn AB, CD và các chất điểm con trượt như C, D, E. Với mỗi đối tượng này có những điểm điển hình và được quy đổi sang các phương trình động lực học (có quy chuẩn nhưng không thể hiện trên hình 5 mà ẩn bên trong code của mô-đun). Sau đó, mô-đun động lực học sẽ tự động gom các hệ số của phương trình đó về một bảng ma trận đại số tuyến tính để tìm ra các ẩn số tương ứng là mô men khâu dẫn và các áp lực khớp động.

Một vài kết quả tính toán của các mô-đun được so sánh với phần mềm mô phỏng Recurdyn và thể hiện trong hình 6:



Hình 6. So sánh kết quả lời giải thông số động lực học của Mô-đun và của phần mềm Recurdyn.

- (a) – Biểu đồ mô men cân bằng ở khâu dẫn;
- (b) – Biểu đồ phản lực theo phương ngang của khớp A;
- (c) – Biểu đồ phản lực theo phương ngang của con trượt E.

Kết quả tính toán của mô-đun động lực học được so sánh với kết quả mô phỏng bằng phần mềm Recurdyn cho thấy sai số dưới 5%. Như vậy, độ tin cậy của mô-đun động lực học là khá cao.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, tác giả đã xây dựng các mô-đun tính toán động học và động lực học cơ cấu phẳng một bậc tự do với độ chính xác khá cao (sai số tính toán so với phần mềm

Recurdyn nhỏ hơn 5%). Điểm khác biệt của các mô-đun được xây dựng so với các công cụ khác ở chỗ nó được xem xét các điểm dị biệt bên trong code chương trình, là các trường hợp riêng của cơ cấu khi mà các đại lượng vận tốc và gia tốc tiến đến vô cùng, tương ứng với mặt toán học là chia 0 hoặc gặp phải số phức. Đồng thời, chương trình được viết để tính toán, để khảo sát không chỉ một điểm bất kỳ mà có thể tính cho vô số điểm trong vòng quay của khâu dẫn. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để xây dựng mô hình toán và giải quyết các bài toán tối ưu thiết kế cơ cấu máy đa dạng trong thực tế. ❖

Ngày nhận bài: **08/10/2022**

Ngày phản biện: **18/10/2022**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Pandrea, N., & Popa, D., & Stanescu, N.D.; *Classical and Modern Approaches in the Theory of Mechanisms*. New York: John Wiley and Sons, 2017.
- [2]. O. Vinogradov; *Fundamentals of kinematics and dynamic of machines and mechanisms*. London: CRC Press, 2000.
- [3]. R.L. Norton; *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines, 5th Edition*. New York: McGraw Hill, 2011.
- [4]. M.J. Rider; *Design and Analysis of Mechanisms: A Planar Approach*. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [5]. M.J. Rider; *Design and Analysis of Mechanisms: A Planar Approach*. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [6]. M.M. Stanisic; *Mechanisms and Machines: Kinematics, Dynamics, and Synthesis*. Boston: Cengage Learning, 2015.
- [7]. D.B. Marghitu; *Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB*. Springer-Verlag, 2009.
- [8]. Kinzel, G.L., & Chang, C.H.; “The analysis of planar linkages using a modular approach”, *Journal of Mechanism and Machine Theory*, Vol. 19, No 1, pp. 165-172, 1984.
- [9]. Durango, S., & Giraldo, C., & Calle, G, & Mesa, L.; “Dynamics of planar mechanisms by a modular approach”. *Journal of Ingeniería y Competitividad*, Vol. 16, No 1, pp. 147-156, 2014.