

ỨNG DỤNG MÔ PHỎNG ĐỘNG HỌC TRONG THIẾT KẾ MÁY

Nguyễn Hữu Lộc, Lê Văn Sỹ, Lê Anh Vũ

Khoa Cơ Khí, Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Quốc gia Tp. HCM

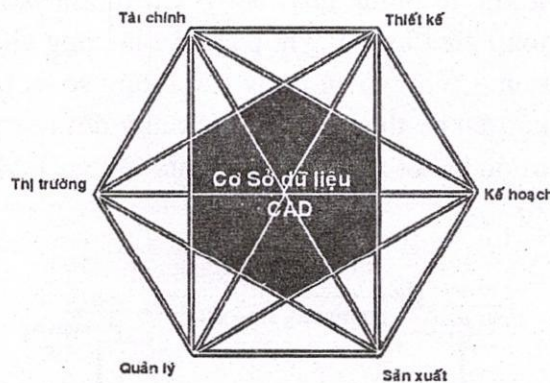
(Bài nhận ngày 09 tháng 06 năm 2005, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 11 tháng 08 năm 2005)

TÓM TẮT: Mô hình hoá hình học và mô phỏng động học đóng vai trò quan trọng trong quá trình thiết kế máy. Bài báo trình bày tổng quan về cơ sở và phương pháp mô phỏng động học, trình tự mô phỏng động học và xây dựng thư viện mô phỏng động học các cơ cấu, bộ truyền phục vụ cho phòng thí nghiệm ảo, tạo ý tưởng thiết kế và tính toán thiết kế máy.

1. Giới Thiệu

Khái niệm mô hình hoá và mô phỏng máy tính được nghiên cứu và ứng dụng trong hầu hết các lĩnh vực khoa học kỹ thuật: cơ khí, xây dựng, điện - điện tử, y học, sinh học, khoa học quân sự... Chúng đã trở thành công cụ không thể thiếu khi thiết kế để đạt mục đích: “năng suất cao nhất và giá thành thấp nhất”. Mô phỏng máy tính cũng được sử dụng để thẩm định tính chính xác của quá trình thiết kế. Mô phỏng quá trình thiết kế rất quan trọng, bởi vì giá thành để khắc phục lỗi sẽ gia tăng đột ngột nếu như lỗi phát hiện ra khi chế tạo hoặc vận hành.

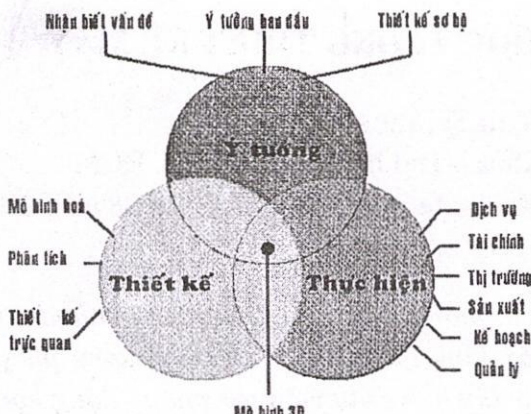
Trong kỹ thuật đồng thời, mục tiêu hàng đầu là sự tích hợp của nhóm thiết kế, công cụ thiết kế, công nghệ và thông tin về sản phẩm và quy trình sử dụng để phát triển và chế tạo ra nó. Điểm then chốt trong phương pháp kỹ thuật đồng thời là mối liên quan thông tin (hình 1) [5].



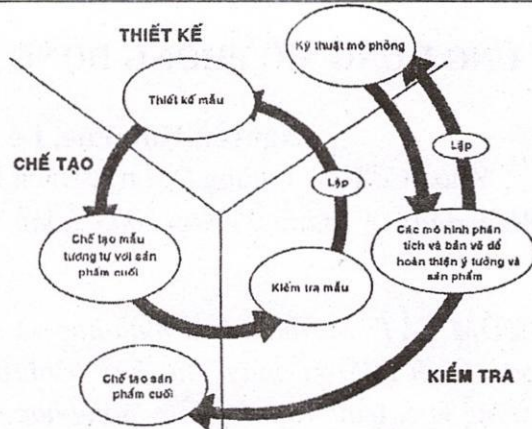
Hình 1

Cơ sở dữ liệu của quá trình thiết kế đồng thời là mô hình máy tính ba chiều (hình 1, 2). Từ khả năng đồ hoạ tĩnh 2D, đến đồ hoạ 3D và phát triển lên kỹ thuật đồ hoạ động [1, 15, 16, 24, 27, 29]. Hiện nay ta đã có thể mô tả những tình huống xảy ra trên thực tế bằng mô hình máy tính thông qua kỹ thuật mô hình hoá và mô phỏng.

Một chu trình khép kín Thiết kế – Chế tạo – Kiểm tra có sử dụng kỹ thuật mô phỏng như hình 3 [26]. Việc sử dụng mô hình vật lý được loại bỏ bằng cách sử dụng kỹ thuật mô hình hoá và mô phỏng máy tính. Ý tưởng được minh hoạ hoàn toàn bằng mô hình máy tính. Hình dáng và chức năng của sản phẩm được xây dựng và kiểm tra trên máy tính mà không cần phải chế tạo thử. Điều này làm giảm đáng kể thời gian và chi phí trong quá trình thiết kế chế tạo.



Hình 2



Hình 3

Trải qua nhiều giai đoạn và thời điểm, kỹ thuật mô phỏng và ngôn ngữ mô phỏng tiếp tục được phát triển và cải tiến nhằm phát huy vai trò của nó trong quá trình thiết kế. Sự phát triển tập trung chủ yếu vào ba yếu tố sau:

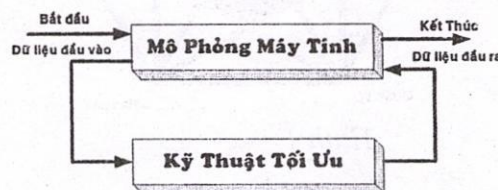
- Giảm bớt thời gian phát triển mô hình.
- Cải tiến độ chính xác.
- Cải tiến sự giao tiếp với người sử dụng.

Trong khuôn khổ của bài báo này chúng tôi thực hiện một số công việc sau:

1. Tổng hợp cơ sở lý thuyết mô phỏng động học cơ cấu và chi tiết máy.
2. Quy trình ứng dụng phần mềm mô phỏng động học trong quá trình thiết kế máy.
3. Xây dựng thư viện mô hình và mô phỏng động học cơ cấu và chi tiết máy.

2. Cơ Sở Lý Thuyết Mô Phỏng Động Học Cơ Cấu

Trong cơ học máy ta giải quyết các bài toán phân tích và tổng hợp cơ cấu: phân tích cơ cấu là công việc xác định vị trí, sự chuyển động, lực tác động lên cơ cấu và sự đáp ứng của các cơ cấu thành phần khi hệ thống hoạt động. Cụ thể là bài toán phân tích vị trí cơ cấu, bài toán vận tốc, bài toán gia tốc. Tổng hợp cơ cấu là công việc tiếp theo sau khi công việc phân tích đã hoàn thành. Chúng ta sử dụng các thông số vị trí, vận tốc và gia tốc để tiến hành công việc thiết kế nên hệ thống. Công việc này đòi hỏi việc lặp lại nhiều lần để được một hệ thống tối ưu trước khi đi vào sản xuất thực tế [5, 7]. Mô phỏng là cơ sở của kỹ thuật thiết kế tối ưu (hình 4).



Hình 4

Phân tích động học cơ cấu đã được trình bày đầy đủ trong các tài liệu [2, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 18, 20, 21, 22, 28]. Khi phân tích động học ta có thể sử dụng ba phương pháp: đồ thị, họa đồ véc tơ và giải tích. Trong phương pháp giải tích ta có các biểu thức biểu diễn mối quan hệ giữa thông số động học với kích thước động các khâu, vị trí khâu dẫn, chuyển động khâu dẫn và thuận tiện cho việc lập trình trên máy tính.

Thông thường, phân tích động học theo phương pháp giải tích phải giải các phương trình đại số không tuyến tính. Với bài toán nhỏ chỉ một vài biến và phương trình thì chúng

ta hoàn toàn có thể giải quyết bằng phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, đối với những bài toán phức tạp, số biến và phương trình lớn hoặc các bài toán nhỏ, nhưng đòi hỏi tính chính xác cao thì việc giải nó rất phức tạp và tốn nhiều thời gian. Đôi khi không tìm được kết quả yêu cầu. Do đó, phương pháp số và các chương trình máy tính là lựa chọn tất nhiên để giải quyết nhanh và chính xác các bài toán động học. Phương pháp này một mặt cho phép ứng dụng tin học trong việc giải quyết bài toán động học, mặt khác cho phép nêu rõ được ý nghĩa vật lý – kỹ thuật của các vấn đề được nghiên cứu. Số tọa độ tối thiểu yêu cầu để mô tả đầy đủ vị trí của hệ thống cơ cấu được gọi là bậc tự do của cơ cấu. Trong một hệ thống cơ cấu nếu k là số bậc tự do của hệ thống thì k tọa độ độc lập yêu cầu để mô tả đầy đủ hệ thống.

Đối với việc phân tích vị trí tại một thời điểm, giá trị các tọa độ k phải được biết. Nếu gọi m là số phương trình ràng buộc độc lập, n là các tọa độ. Thì số phương trình ràng buộc có thể được xác định theo công thức:

$$m = n - k \quad (1)$$

Trong mô phỏng động học theo phương pháp giải tích ta sử dụng hai phương pháp: phương pháp chia tọa độ và phương pháp gán các ràng buộc khâu dẫn [20]. Phương pháp gán các ràng buộc khâu dẫn là thêm các phương trình ràng buộc vào các ràng buộc động học ban đầu bằng với số bậc tự do của hệ thống được gọi là ràng buộc khâu dẫn. Các ràng buộc khâu dẫn là các phương trình mô tả mỗi tọa độ độc lập theo hàm thời gian. Nếu có m ràng buộc động thì k ràng buộc khâu dẫn phải được gán vào ràng buộc động để tạo $n = m + k$ phương trình:

$$\begin{aligned} \Phi &\equiv \Phi(q) = 0 \\ \Phi^{(d)} &\equiv \Phi(q, t) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

trong đó chỉ số (d) cho biết các ràng buộc khâu dẫn. Phương trình (2) mô tả n phương trình n ẩn q , mà có thể được giải tại bất kỳ thời điểm đã xác định t .

Phương trình vận tốc thu được bằng việc đạo hàm theo thời gian phương trình (2):

$$\begin{aligned} \Phi_q \dot{q} &= 0 \\ \Phi_q^{(d)} \dot{q} + \Phi_t^{(d)} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

hoặc là:

$$\begin{bmatrix} \Phi_q \\ \Phi_q^{(d)} \end{bmatrix} \dot{q} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_t^{(d)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Tương tự đạo hàm theo thời gian phương trình (3) sẽ thu được phương trình gia tốc:

$$\begin{aligned} \Phi_q \ddot{q} + (\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} &= 0 \\ \Phi_q^{(d)} \ddot{q} + (\Phi_q^{(d)} \dot{q})_q \dot{q} + 2\Phi_{qt}^{(d)} \dot{q} + \Phi_{tt}^{(d)} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

hoặc:

$$\begin{bmatrix} \Phi_q \\ \Phi_q^{(d)} \end{bmatrix} \ddot{q} = \begin{bmatrix} -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} \\ -(\Phi_q^{(d)} \dot{q})_q \dot{q} - 2\Phi_{qt}^{(d)} \dot{q} - \Phi_{tt}^{(d)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Giải thuật phương pháp ràng buộc khâu dẫn:

1. Thiết lập bước thời gian i đến $i = 0$ và cho giá trị ban đầu $t^i = t^0$.
2. Thêm k phương trình khâu dẫn vào các phương trình ràng buộc.
3. Giải phương trình (2) tìm q^i .
4. Giải phương trình (4) tìm \dot{q}^i .
5. Giải phương trình (6) tìm \ddot{q}^i .

6. Nếu thời gian kết thúc được hoàn thành thì kết thúc, ngược lại ta gia tăng t^i đến giá trị thời gian mới t^{i+1} , cho i bằng $i + 1$ và lặp lại bước 3.

Dựa trên giải thuật này người ta viết các chương trình phân tích động học cơ cấu phẳng [9, 20] bằng các ngôn ngữ lập trình: Pascal, C++, Visual Basic, Fortran, Matlab

Các bài toán kỹ thuật nói riêng và phân tích động học nói chung là giải các hệ phương trình đại số phi tuyến có dạng:

$$\Phi(\mathbf{x}) = 0 \quad (7)$$

trong đó \mathbf{x} là vectơ nghiệm của phương trình.

Các hàm $\Phi(\mathbf{x})$ có thể là hàm hiện hoặc hàm siêu việt. Có nhiều phương pháp số được sử dụng để giải phương trình này, để phân tích động học thuận tiện nhất nên sử dụng phương pháp Newton – Raphson. Tính lặp Newton – Raphson được trình bày như sau (n ẩn):

$$\mathbf{x}^{j+1} = \mathbf{x}^j - \Phi_{\mathbf{x}}^{-1}(\mathbf{x}^j)\Phi(\mathbf{x}^j) \quad (8)$$

trong đó $\Phi_{\mathbf{x}}^{-1}(\mathbf{x}^j)$ là hàm ngược của ma trận Jacôbi ước lượng tại $\mathbf{x} = \mathbf{x}^j$. Phương trình (8) là phương trình n chiều của (7).

Phương trình (8) được trình bày lại như sau:

$$\Phi_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^j)\Delta\mathbf{x}^j = -\Phi(\mathbf{x}^j) \quad (9)$$

$$\mathbf{x}^{j+1} = \mathbf{x}^j + \Delta\mathbf{x}^j \quad (10)$$

trong đó phương trình (9) là tập hợp n phương trình tuyến tính được giải theo $\Delta\mathbf{x}^j$. Sau đó \mathbf{x}^{j+1} xác định theo công thức (10). Bước lặp được thực hiện đến giá trị nghiệm số cần tìm.

Trình tự thực hiện như sau phương pháp Newton – Raphson cho n phương trình n ẩn số:

1. Gán $j = 0$.
2. Ước lượng giá trị ban đầu \mathbf{x}^0 cho nghiệm mong muốn.
3. Hàm được ước lượng. Nếu cường độ vectơ với $i = 1, \dots, n$ nhỏ hơn giá trị dung sai chỉ định ϵ , có nghĩa là nếu $< \epsilon$ với $i = 1, \dots, n$ thì \mathbf{x}^j là nghiệm mong muốn và dừng lại, bằng không ta chuyển sang bước sau.
4. Ước lượng ma trận Jacôbi và giải các phương trình (9), (10) cho \mathbf{x}^{j+1} .
5. Tăng j , nghĩa là gán j bằng $j+1$. Nếu j lớn hơn số bước lặp chỉ định ta dừng lại, nếu không ta thực hiện từ bước 3.

3. Mô Phỏng Động Học Trên Máy Tính

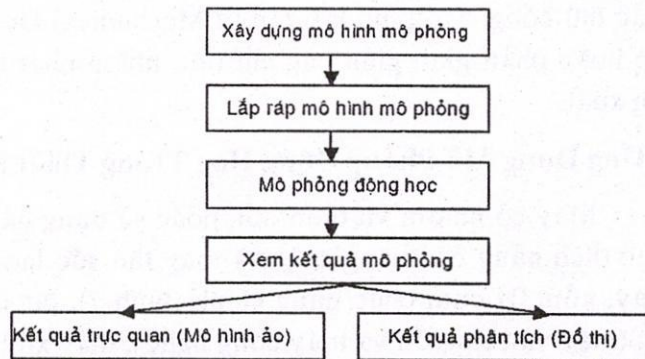
Diễn hoạt máy tính là một quá trình mô hình hoá và phân tích không chính xác một tình huống thực theo yếu tố thời gian trong một môi trường ảo là môi trường máy tính ba chiều. Mô hình ảo ba chiều là gần đúng hoặc tỷ lệ với các đặc điểm của sản phẩm trong thực tế. Sử dụng diễn hoạt máy tính trong: huấn luyện, quảng cáo - tiếp thị, lựa chọn và đánh giá ý tưởng, trợ giúp thiết kế sơ bộ. Tuy độ chính xác của diễn hoạt máy tính không cao nhưng chúng vẫn tuân theo các đặc điểm động học và đặc điểm ứng xử tương tác động học [22, 23, 30]. Các phần mềm sử dụng: 3D Studio Max, VIZ....

Mô phỏng máy tính là một quá trình mô hình hoá và phân tích chính xác một tình huống thực theo yếu tố thời gian trong một môi trường ảo là môi trường máy tính ba chiều. Mô hình ảo ba chiều tương ứng với các đặc điểm của sản phẩm trong thực tế và thực hiện quá trình tính toán phân tích và mô phỏng chúng trong môi trường máy tính. Các phần mềm mô phỏng như: Dynamic Designer, DADS, MSC Nastran, Algor, Adams, Working Model...

Các phần mềm mô phỏng động học được viết một cách có hệ thống, đáp ứng được hầu hết các yêu cầu của công việc thiết kế – mô phỏng. Nhiều phần mềm đáp ứng gần như trọn vẹn các công việc của quá trình thiết kế sản phẩm. Các phần mềm đó mang tính chuyên nghiệp rất cao, từ giai đoạn mô hình hóa, phân tích, mô phỏng và kết nối dữ liệu với quá trình chế tạo sản phẩm. Cho nên việc lựa chọn phần mềm để sử dụng là một trong những yếu tố quan trọng. Câu hỏi thường đặt ra “nên sử dụng phần mềm nào cho công việc thiết kế của mình”. Các yếu tố sau đây có thể tham khảo để chọn lựa phần mềm sử dụng: mục đích sử dụng, phạm vi sử dụng, ngoài ra còn vấn đề giá cả. Mục đích sử dụng muốn đề cập đến mục đích chính mà chúng ta cần sử dụng. Ví dụ, nếu chúng ta chỉ đơn thuần muốn phân tích động học của cơ cấu thì chỉ cần chọn phần mềm chỉ có tính năng phân tích động học. Nhưng nếu chúng ta cần một phần mềm vừa có khả năng mô hình hóa, phân tích động học – động lực học và mô phỏng phần tử hữu hạn thì lúc này mục đích sẽ cao hơn. Phạm vi sử dụng: giáo dục, huấn luyện, dự án, nghiên cứu, thiết kế máy.... Các phần mềm hiện tại cũng có những phiên bản riêng dành cho từng phạm vi sử dụng.

Trong lãnh vực mô phỏng phân tích động cơ cấu thì chúng ta cần phân biệt hai dạng chương trình: chương trình mục đích xác định và chương trình mục đích tổng quát. Chương trình máy tính với mục đích xác định, tạm gọi là chương trình cứng, phục vụ cho việc phân tích một loại cơ cấu xác định. Chương trình được lập ra theo đặc điểm của cơ cấu, các giá trị yêu cầu người sử dụng nhập vào chỉ áp dụng riêng cho cơ cấu đó, không thể áp dụng cho các cơ cấu khác. Chúng được xây dựng dựa trên lý thuyết phân tích động học theo các mô hình toán học như trình bày trên mục 2.

Chương trình mục đích chung, tạm gọi là chương trình mềm, phục vụ cho việc phân tích các hệ thống cơ cấu khác nhau. Giá trị nhập vào phải mô tả đầy đủ hệ thống cơ cấu dưới các ràng buộc, bao gồm số khâu động, đặc điểm liên kết các khâu, loại khớp, thành phần lực và mômen tác động, các đặc trưng về vật lý và hình học... Nếu so sánh hiệu quả thì chương trình cứng hiệu quả hơn, ít tốn bộ nhớ nhưng chương trình mềm rất linh động trong việc sử dụng. Chương trình mục đích tổng quát thường được thương mại hóa và được viết bởi các công ty sản xuất phần mềm, do độ phức tạp của nó. Mô phỏng động học theo chương trình mục đích chung thực hiện theo trình tự (hình 5) theo mô hình hình học.

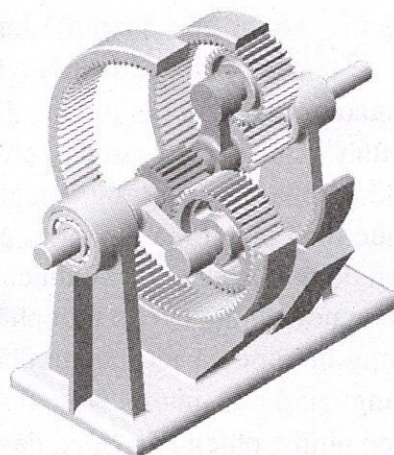
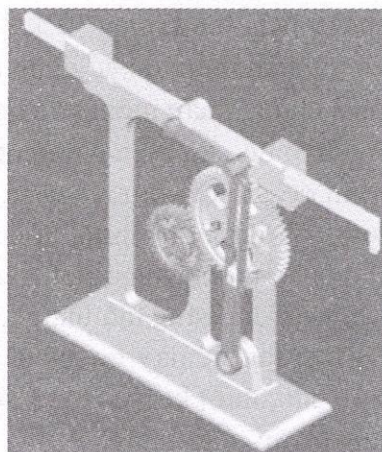


Hình 5

Mô hình mô phỏng (hình 6a, b) là tập hợp các chi tiết solid tham số được tạo bằng nhiều phương pháp, các chi tiết này có thể hiệu chỉnh hình dạng và kích thước dễ dàng.

Các chi tiết này muốn tạo thành một cơ cấu có các mối quan hệ động học thì phải được lắp ráp lại với nhau. Sự kết hợp các chi tiết theo mối quan hệ động học gọi là quá trình lắp ráp. Chúng ta sử dụng các khớp động để gán các ràng buộc động học vào mỗi chi tiết. Mỗi khớp động được gán vào các chi tiết sẽ làm giảm số bậc tự do tương ứng của các chi tiết đó. Các khớp bao gồm: khớp xoay, khớp cầu, khớp trụ, khớp lăng trụ, khớp xoắn, liên kết phẳng có 3 và 6 bậc tự do... Sau khi lắp ráp mô hình có dạng như hình 6.

Kết quả mô phỏng hiển thị bằng hình ảnh, đồ thị (hình 9, 10, 11) và dữ liệu số dưới dạng. CSV file (Excel file), sử dụng dữ liệu số này để phân tích động lực học và tính toán cơ cấu bằng phương pháp phần tử hữu hạn.



a) Bộ phận công tác

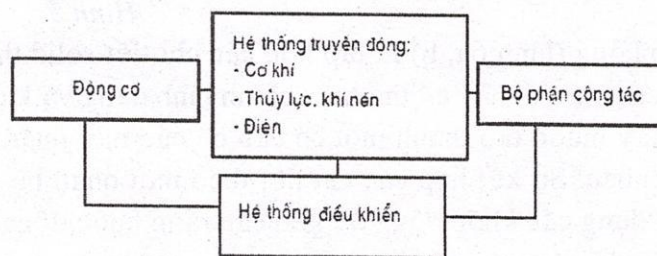
b) Hệ thống truyền động

Hình 6

Dynamic Designer là một phần mềm mô phỏng động học và động lực học hệ thống cơ khí được tích hợp trong môi trường Mechanical Desktop, nó mở rộng khả năng mô phỏng và lắp ráp của Mechanical Desktop [4]. Môi trường tích hợp này cho phép chúng ta vừa có thể xây dựng nhanh chóng mô hình và vừa có thể lắp ráp và mô phỏng mô hình đã tạo. Ngoài ra Dynamic Designer có thể chạy trên các môi trường như: AutoCAD [18], Mechanical Desktop [25], Inventor, SolidWorks, Solid Edge, Catia... Các mô hình lắp ráp từ Mechanical Desktop theo các ràng buộc lắp ráp được biến đổi thành các khớp động trong mô hình mô phỏng. Mô hình được gán vật liệu, đặc tính vật liệu một cách tự động hoặc thủ công. Mô hình lắp ráp từ Mechanical Desktop sẽ được kiểm tra các thông số lắp ráp hoặc phần giao giữa các chi tiết, nhằm phát hiện các khiếm khuyết trước khi đi vào sản xuất.

4. Ứng Dụng Mô Phỏng Động Học Trong Thiết Kế Máy

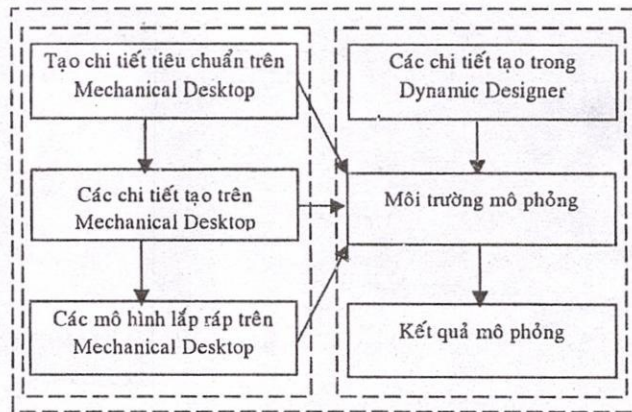
Máy có nhiệm vụ biến đổi, hoặc sử dụng năng lượng, để thực hiện công hữu ích với mục đích nâng cao năng suất và thay thế sức lao động chân tay và trí óc của con người. Máy, gồm 04 cụm chức năng chính (hình 7), được phân loại: máy năng lượng, máy công tác (máy vận chuyển và máy công nghệ), máy xử lý thông tin và máy điều khiển [17].



Hình 7

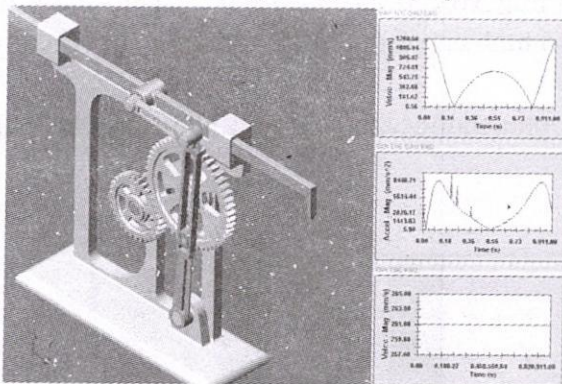
Để biến đổi vị trí, hình dạng, kích thước và trạng thái vật liệu thì ta cần phải cung cấp cho bộ phận công tác của máy công suất và chuyển động cần thiết. Để thực hiện điều này thì các bộ phận máy cần phải có kết cấu đảm bảo các chỉ tiêu về khả năng làm việc

và chuyển động theo qui luật nhất định. Mô phỏng chuyển động (động học) máy bao gồm mô phỏng bộ phận công tác (các cơ cấu) và hệ thống truyền động. Mô phỏng động học máy thực hiện theo sơ đồ hình 8:

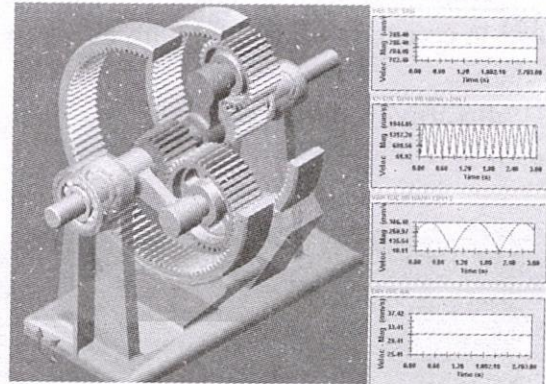


Hình 8

Để mô phỏng động học máy ta tiến hành mô phỏng bộ phận công tác (hình 9).



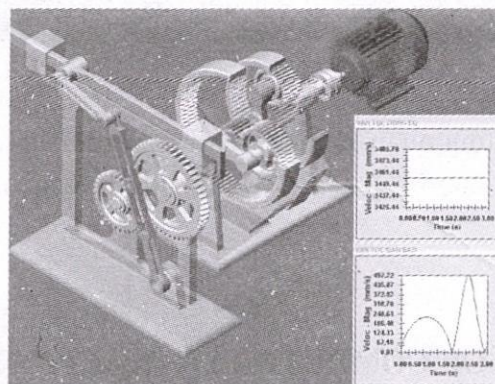
Hình 9



Hình 10

Sau đó mô phỏng hệ thống truyền động để truyền chuyển động và công suất từ động cơ đến khâu dẫn bộ phận công tác, ví dụ là hộp giảm tốc bánh răng hành tinh như hình 10.

Kết hợp bộ phận công tác, hệ thống truyền động và động cơ ta mô phỏng động học cho toàn máy như hình 11.



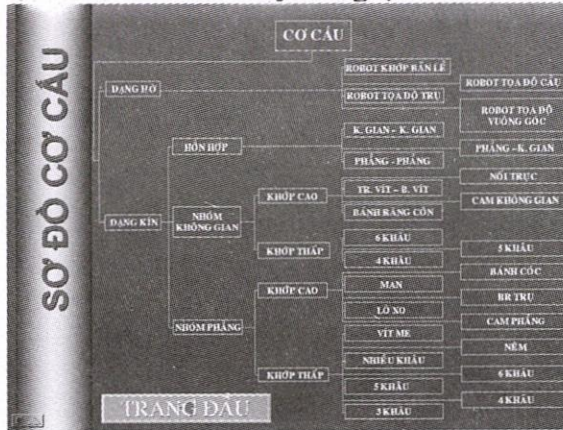
Hình 11

5. Kết Quả Nghiên Cứu

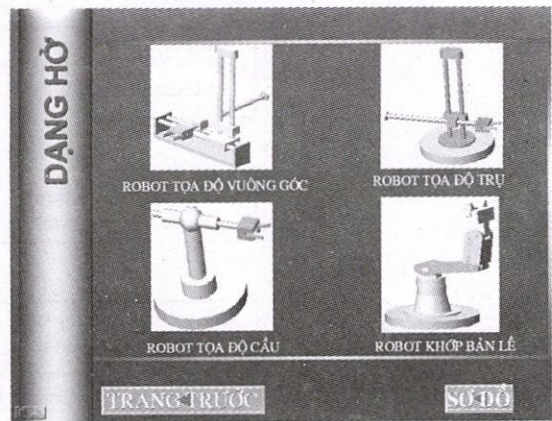
Qua quá trình nghiên cứu theo nội dung bài báo đã có những kết quả cụ thể sau:

- Xây dựng trình tự mô hình hoá hình học và mô phỏng động học các cơ cấu và bộ truyền là cơ sở mô phỏng động học cho máy, góp phần giảm bớt thời gian phát triển mô hình, nâng cao độ chính xác và cải tiến sự giao tiếp với người sử dụng.

- Xây dựng thư viện mô hình và mô phỏng động học các cơ cấu (hình 12) và bộ truyền (hình 14) phục vụ cho công tác giảng dạy như phòng thí nghiệm ảo và phục vụ việc lựa chọn ý tưởng chọn sơ đồ nguyên lý cho bộ phận công tác, sơ đồ động và kết cấu máy trong quá trình thiết kế.



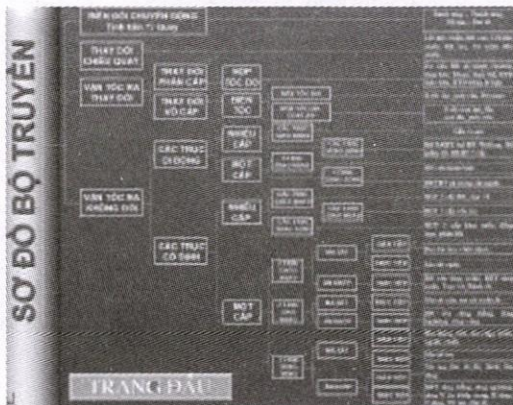
Hình 12



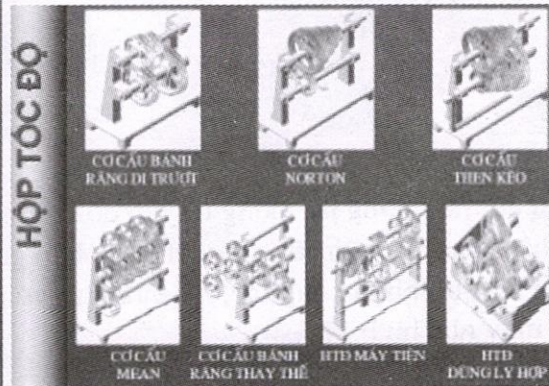
Hình 13

Trong thư viện ta nhấp vào nút tương ứng với cơ cấu cần thiết, ví dụ chọn nút **DẠNG HỒ** ta có các mô hình như hình 13, chọn vào hình cơ cấu ta quan sát được chuyển động của chúng.

Bộ truyền được phân loại như hình 14 phụ thuộc vào yêu cầu khâu dẫn bộ phận công tác.



Hình 14



Hình 15

Nhấp vào nút tương ứng quan sát bộ truyền cần thiết, ví dụ chọn nút **HỘP TỐC ĐỘ** ta có các mô hình như hình 15, chọn vào cơ cấu cần thiết ta quan sát được chuyển động của chúng.

APPLICATIONS OF COMPUTER SIMULATION IN MACHINE DESIGN PROCESS

Nguyen Huu Loc, Le Van Sy, Le Anh Vu

University of Technology – Vietnam National University – HoChiMinh City

ABSTRACT: *In order to automate the design of mechanical models, CAD tools are optimal. Today, CAD systems have been more improved and more completed. They have important applications in machine design process, not only capacities of modeling but also capacities of simulation and mechanism analysis. The problems presented herein were to demonstrate our works that we are performing in recent times. Simulate mechanisms and power transmission systems serving in the design and manufacturing as virtual laboratory. These results are used for education process and practical machine design process.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Anand V. B., *Computer graphics and Geometric modelling for Engineers*. John Wiley and Sons. 1992.
- [2] Artobolevsky I.I *Mechanisms in Modern Engineering Design*. Mir, Moscow, 1979.
- [3] Artobolevsky I.I *Theory of Mechanisms and Machines*. Mir, Moscow, 1989.
- [4] Autodesk. *Dynamic Designer for Mechanical Desktop*, Users Guide. 2002.
- [5] Bertoline G. R., *Technical Graphics Communication*. Irwin McGraw Hill. 1997.
- [6] Chiang C. H., *Kinematics of spherical mechanisms*. Cambridge University Press, 1988.
- [7] Dimarogonas A, D., *Machine design, A CAD approach*, Wiley Interscience, 2001.
- [8] Doughty S. *Mechanics of machines*. John Wiley and Sons. 1988.
- [9] Đinh Gia Tường, Tạ Khánh Lâm. *Nguyên lý máy*, T.1, NXB Giáo Dục 2000.
- [10] Florov K. B. *Theory of Mechanisms and Machines*. University, Moscow. 1989.
- [11] Florov K. B. *Mechanics of industrial robots*. University, Moscow. 1989.
- [12] Koshevnicov C. N. *Mechanisms*. Machinebuilding, Moscow. 1976.
- [13] Krainhev A. F. *Dictionary – Handbook of mechanisms*. Machinebuilding, Moscow. 1987.
- [14] Lại Khắc Liễm, *Giáo trình Cơ học máy*. NXB Đại học Quốc Gia TP Hồ Chí Minh, 2002.
- [15] Lee K., *Principles of CAD/CAM/CAE systems*. Addison-Wesley. 1999.
- [16] Marsh D. *Applied Geometry for Computer Graphics and CAD*. Springer. 1999
- [17] Nguyễn Hữu Lộc, *Cơ sở thiết kế máy*. NXB ĐHQG TP Hồ Chí Minh, 2004.
- [18] Nguyễn Hữu Lộc, *Thiết kế mô hình ba chiều với AutoCAD*. NXB TP HỒ Chí Minh, 2004.
- [19] Nguyễn Hữu Lộc (chủ nhiệm đề tài). *Nghiệp cứu mô phỏng động học và các ứng dụng trong thiết kế máy*. Báo cáo đề tài NCKH cấp trường. 02/2005.
- [20] Nikravesh P. E. *Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems*. Prentice Hall. 1992.
- [21] Norton R. L. *Design of machinery*. McGraw-Hill, 1999.
- [22] Peter Bonus, Vadim Engelson, Peter Fritzson, “*Mechanical models Translation, Simulation and Visualization in Modelica*”, PELAD, Linkoping Univesity, Sweden.
- [23] Polevoi R. *3D Studio Max R3 in depth*. Coriolis. 1999.
- [24] Rao P. N. *CAD/CAM Principles and applications*. Mc Graw-Hill. 2002.
- [25] Tickoo S. *Mechanical Desktop Instructor*. McGraw-Hill. 2002.
- [26] Ullman D. G., *The mechanical Design Process*, McGraw-Hill, 2003.
- [27] Watt A. *3D Computer Graphics*, Addison Wesley. 2000.
- [28] Wilson C. E., Sadler J. P. *Kinematics and Dynamics of Machinery*. Addison Wesley. 1993.
- [29] Zeid I., *CAD/CAM Theory and Practice*. McGraw-Hill. 1999.
- [30] Zirbel J. H., Combs S. B. *The illustrated 3D Studio*. Autodesk Press. 2002.