

Bản thêm về bài toán tối ưu hoá chế độ cắt

More about the problem of cutting parameters optimization

Đào Văn Hiệp

Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: hdaovan@mta.edu.vn; hdaovan@gmail.com

Mobile: 0985 579 552

Tóm tắt

Từ khóa:

Giải thuật di truyền; Hợp kim Titan; Quy hoạch tuyến tính; Tối ưu hoá chế độ cắt.

Trong những năm gần đây chúng ta có thể chứng kiến sự bùng nổ của các mô hình và phương pháp tối ưu hoá (TUH) chế độ cắt. Một số trong chúng được cho là đơn giản, nhanh và hiệu quả. Nhưng theo quan điểm công nghệ truyền thống thì các mô hình quá đơn giản không thể mô tả đúng quá trình gia công, về bản chất là phi tuyến với các ràng buộc về kinh tế và kỹ thuật. Bài báo này giới thiệu các mô hình TUH tuyến tính, phi tuyến, một mục tiêu, đa mục tiêu, tính đến tất cả các yếu tố công nghệ và các ràng buộc cơ bản. Quá trình tiện hợp kim Titan Ti-6Al-4V được giới thiệu làm ví dụ minh họa. Một số phương pháp truyền thống và hiện đại đã được sử dụng và so sánh với nhau. Kết quả cho thấy cách đó có thể là phù hợp nhất.

Abstract

Keywords:

Cutting parameters optimization; Genetic Algorithm; Linear programming; Titanium alloy.

In recent years we can see the booming of models and methods for cutting parameters optimization. Some of them are said to be simple, quick and efficient. But from technological point of view, the overly simple models are unable to describe the right machining process, being non-linear in nature with appropriate technical and economic constraints. This paper introduces the linear, non-linear, single-objective and multi-objective optimization models, that consider every basic technological factors and constraints. The turning process of titanium alloy Ti-6Al-4V is offered as the case study. Some traditional and modern methods are employed and compared. Results show that this method may be the most suitable.

Ngày nhận bài: 16/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 03/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

TUH chế độ cắt vốn là bài toán kinh điển trong gia công cơ. Từ sau thập kỷ 198x với sự phổ cập rộng rãi các máy CNC với các hệ truyền động vô cấp, các nhà công nghệ không còn nghi ngại về tính khả dụng của chế độ cắt tối ưu và quan tâm nhiều hơn đến bài toán này. Theo xu thế, hệ thống gia công sẽ được thông minh hoá nhờ ứng dụng kỹ thuật điều khiển thích nghi và công nghệ CAD/CAM/CAPP, chế độ cắt sẽ được TUH và hiệu chỉnh on-line, ngay trong khi gia công. Nghiên cứu các loại vật liệu mới, dụng cụ cắt mới, phương pháp công nghệ mới,...

không ngừng xuất hiện, cũng đòi hỏi TŨH chế độ cắt. Vì thế TŨH chế độ cắt không chỉ cần thiết mà ngày càng cấp thiết. Mặt khác, chúng ta đang được thừa hưởng sự bùng nổ của các công cụ tin học hỗ trợ mô hình hoá và tính toán, khiến việc giải các bài toán TŨH phức tạp (phi tuyến, nhiều biến, đa mục tiêu, khó biểu diễn tường minh bằng toán học,...) trở nên dễ dàng. Như vậy là cả nhu cầu lẫn khả năng đều đã chín muồi, tạo ra cả lực kéo (*pull*) lẫn lực đẩy (*push*), đưa vấn đề TŨH chế độ cắt từ môi trường nghiên cứu tại các trường, viện ra môi trường sản xuất.

Điểm các công trình đã công bố về TŨH cho thấy sự đa dạng về mô hình và công cụ giải bài toán. Để tiết kiệm thời gian, có thể tham khảo các tài liệu tổng quan, như [2], [3]. Tổng quan 58 công trình từ 1907 đến 2005, trong [2] tác giả đã chia các phương pháp TŨH thành 2 nhóm: các phương pháp truyền thống và các phương pháp "mới". Tổng quan 21 công trình từ năm 2007 đến 2015, tác giả [3] đã chỉ ra các phương pháp mới, gồm Taguchi, mạng nơ ron nhân tạo (ANN), mặt đáp ứng (RSM), giải thuật di truyền (GA),... chiếm số lượng áp đảo; trong đó Taguchi chiếm đến 48%; các phương pháp khác, như GA, RSM, ANN,... chia nhau phần còn lại.

Từ hai tài liệu tổng quan trên có thể nhận ra hai xu hướng trái ngược nhau. Các mô hình TŨH truyền thống dẫn ra trong [2] hoàn chỉnh hơn về toán học, phần lớn là các mô hình nhiều biến (thường là tốc độ cắt v , lượng chạy dao s và chiều sâu cắt t); dùng hàm mục tiêu năng suất và kinh tế; có các điều kiện ràng buộc. Ngược lại, các mô hình "mới" trong [3] đều dùng hàm mục tiêu đơn giản, không có điều kiện ràng buộc.

Nhìn rộng ra khỏi phạm vi các tài liệu vừa dẫn, có thể thấy bức tranh tuy không hoàn toàn giống nhưng có những nét tương đồng. Trong nhiều tài liệu cũng gặp các mô hình không có điều kiện ràng buộc, với hàm mục tiêu tốc độ bóc vật liệu (MRR) [4] hoặc độ nhám bề mặt (R_a) [5], [6], [7], [8], lực cắt F [9]. Mô hình trong [10] có xét đến nhiều mục tiêu (tuổi bền của dụng cụ lớn nhất, lực cắt nhỏ nhất, R_a nhỏ nhất) nhưng lại tách thành các bài toán riêng biệt. Một số ít tác giả lựa chọn mô hình hoàn chỉnh hơn, dùng hàm mục tiêu là tổng chi phí gia công hoặc tổng thời gian gia công với các điều kiện ràng buộc về độ nhám bề mặt, lực cắt, công suất cắt nhưng mô tả về chúng khá mờ nhạt [11], [12]. Mô hình trong [13] có đến 3 mục tiêu: năng suất cao nhất ($T_p \rightarrow min$), chi phí gia công nhỏ nhất ($C_p \rightarrow min$), độ nhám bề mặt nhỏ nhất ($R_a \rightarrow min$) được đặt ra với các điều kiện ràng buộc về công suất động cơ (P_{max}) và lực cắt (F_{max}) nhưng lại được chuyển về bài toán TŨH một mục tiêu, dùng hàm đại diện $y = f(T_p, C_p, R_a)$ và sử dụng ANN để tránh những rắc rối về toán học.

Việc chọn mô hình TŨH phụ thuộc vào mục đích nghiên cứu và điều kiện thực tế của mỗi tác giả, khó phán xét về đúng hay sai, tốt hay xấu. Tuy nhiên, có một vài bình luận như sau:

- Các nhà sản xuất thường phải giải quyết hài hoà 3 yêu cầu mâu thuẫn nhau: năng suất, chất lượng và giá thành. Mục tiêu mà họ cố gắng đạt là năng suất cao nhất, chi phí thấp nhất nhưng chất lượng chỉ vừa đạt yêu cầu. Ý tương tự cũng được diễn tả ngắn gọn bằng một từ JIT (*Just-In-Time*), nghĩa là sản xuất Vừa đủ số lượng (không nhiều hơn, không ít hơn), Đúng chất lượng (không tốt hơn, không tồi hơn), đúng Lúc (không sớm hơn, không muộn hơn). Theo đó thì mục tiêu TŨH nên là chi phí gia công thấp nhất (bài toán chi phí), năng suất gia công cao nhất (bài toán năng suất), nhưng nếu tính đầy đủ các yếu tố trong đó thì bài toán sẽ khá phức tạp. Phải chăng đó là nguyên nhân, khiến rất nhiều tác giả "hiện đại" ưa chọn hàm mục tiêu độ nhám bề mặt, tuổi bền, lực cắt,... như đã dẫn ra ở trên?

- Các điều kiện ràng buộc đảm bảo cho kết quả TŨH phù hợp thực tiễn. Độ nhám bề mặt, biến dạng cho phép của chi tiết, lực cắt, tuổi bền của dụng cụ,... là các yếu tố đảm bảo chất lượng sản phẩm hoặc sự làm việc bình thường của hệ thống. Người ta không cố đạt tốt nhất các chỉ tiêu này, nên sẽ hợp lý hơn nếu đưa chúng vào các điều kiện ràng buộc thay vì hàm mục tiêu trừ một

số trường hợp đặc biệt, ví dụ khi nghiên cứu về tính gia công của vật liệu, khả năng cắt của dao, chọn dung dịch trơn nguội,...

- Việc chọn phương pháp giải bài toán phụ thuộc trước hết vào mô hình. Với các mô hình đơn giản, không có điều kiện ràng buộc có thể dùng các phương pháp đơn giản, như Taguchi, RSM [6], [7], [8], [9]. Các mô hình phức tạp, có điều kiện ràng buộc cần đến các công cụ "chuyên nghiệp" hơn. Các phương pháp truyền thống, trong đó lớp các phương pháp quy hoạch toán học thường cho kết quả ổn định, chính xác nhưng phức tạp về thuật giải đang dần được kết hợp với hoặc thay thế bằng các phương pháp tìm kiếm (*heuristic*), dựa trên tính toán tiến hoá và trí tuệ nhân tạo. Các phương pháp mới thông dụng nhất là GA [6], [9] giải thuật bầy đàn (PSO) [4], [5], [10],... Chúng có thuật toán đơn giản, dễ thực hiện ngay cả với các bài toán phi tuyến, phức tạp.

Nhằm phản ánh một cách đầy đủ nhất các khía cạnh kinh tế, kỹ thuật của bài toán TỰH chế độ cắt, trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu và phân tích mô hình TỰH các thông số chế độ cắt (v, s, a) với hàm mục tiêu tổng chi phí gia công và tổng thời gian gia công, có tính đến đầy đủ các yếu tố; đồng thời có xét đến các điều kiện ràng buộc cơ bản: lực cắt (F), công suất (động cơ) trục chính (P), độ nhám bề mặt (R_a), tuổi bền của dụng cụ (T), và các điều kiện biên. Mô hình sẽ được minh hoạ bằng quá trình tiện hợp kim Titan Ti-6Al-4V, một loại vật liệu bền nhiệt, cơ tính tuyệt hảo nhưng điển hình về tính khó gia công: bền, dai, dính bám mạnh, dẫn nhiệt kém, gây lực cắt lớn, tổn năng lượng, nhiệt độ vùng cắt cao và mòn dao cực nhanh; được kiểm chứng bằng các phương pháp giải khác nhau, cả truyền thống (QHTT) và hiện đại (GA).

2. MÔ HÌNH TỐI ƯU HOÁ CHẾ ĐỘ CẮT

Về toán học, bài toán TỰH tổng quát được phát biểu như sau: cực tiểu hoá hàm mục tiêu (a) với các điều kiện ràng buộc (b)

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= [y_1(\mathbf{x}) \dots y_z(\mathbf{x})]^T \rightarrow \min & (a) \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}) &= \begin{cases} \mathbf{g} = [g_1(\mathbf{x}) \dots g_{m_1}(\mathbf{x})]^T \leq 0 \\ \mathbf{h} = [h_1(\mathbf{x}) \dots h_{m_2}(\mathbf{x})]^T = 0 \\ \mathbf{x}_{min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{max} \end{cases} & (b) \end{aligned} \quad (1)$$

trong đó, $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_i \dots x_n]^T$ - vector các biến đầu vào; $\mathbf{y} = [y_1 \dots y_j \dots y_z]^T$ - vector mục tiêu, biểu diễn các tiêu chí tối ưu; trong (b), lần lượt là các vector biểu diễn các ràng buộc dạng bất đẳng thức, dạng đẳng thức và điều kiện biên.

2.1. Hàm mục tiêu

Mục tiêu của sản xuất là đạt chất lượng yêu cầu với hiệu quả cao nhất nên hàm mục tiêu thường là chi phí gia công (thấp nhất) hoặc năng suất gia công (cao nhất).

2.1.1. Mục tiêu năng suất gia công cao nhất

Năng suất gia công có thể được tính bằng một trong hai tiêu chí:

- Thể tích vật liệu phôi được hót đi trong một đơn vị thời gian, chính là tốc độ bóc vật liệu, gọi theo thuật ngữ quốc tế là *Material Removal Rate (MRR)* lớn nhất

$$Z = v.s.a \rightarrow \max \quad (2)$$

- Thời gian nguyên công nhỏ nhất

$$T_{nc} = T_0 + T_{ph} + T_{md} + \frac{T_{ck}}{n} \rightarrow \min \quad (3)$$

trong đó, T_0 - thời gian chính; T_{ph} - thời gian phụ; T_{md} - thời gian mài dao; T_{ck} - thời gian chuẩn bị, kết thúc loạt gia công; n - số lượng chi tiết trong một loạt hay một ca. Vì T_{ph} và T_{ck} không phụ thuộc chế độ cắt nên có thể bỏ qua trong trường hợp này. Khi đó (3) trở thành

$$T_{nc} = T_0 + \frac{T_0}{T} t_{md} = \frac{V}{Z} \left(1 + \frac{t_{md}}{T}\right) \rightarrow \min \quad (4)$$

trong đó, t_{md} - thời gian cho 1 lần mài dao; T - tuổi bền của dụng cụ; V (cm^3) - thể tích vật liệu phôi được hớt trong loạt hay ca.

Thay cho T_{nc} , người ta thường dùng thời gian gia công một đơn vị thể tích vật liệu phôi

$$\frac{T_{nc}}{V} = \frac{1}{Z} + \frac{t_{md}}{ZT} \rightarrow \min \quad (5)$$

Tuổi bền của dụng cụ được tính theo công thức Taylor

$$T = C_T v^{mt} s^{nt} a^{kt} \quad (6)$$

Thường thì các số mũ đều âm và $|mt| > |nt| > |kt|$ nên có thể bỏ qua ảnh hưởng của s và a . Thay (6) vào (5) và chú ý rằng $Z = v \cdot s \cdot a$ (cm^3/ph), được hàm mục tiêu

$$\frac{T_{nc}}{V} = \frac{1}{vsa} + \frac{t_{md}}{C_T v^{mt+1} s^{nt+1} a^{kt+1}} \rightarrow \min \quad (7)$$

Ta thấy, tổng thời gian gia công có 2 thành phần. Thành phần thứ nhất là thời gian chính T_0 , chỉ liên quan đến Z . Thành phần thứ hai liên quan đến thời gian mài dao và tuổi bền. Nếu chỉ tính đến thành phần thứ nhất như trong [4] thì mô hình đơn giản nhưng không đầy đủ, dẫn đến kết quả sai lệch, nhất là khi cắt các vật liệu khó gia công, dao mòn nhanh.

2.1.2. Mục tiêu chi phí gia công nhỏ nhất

Chi phí gia công là chi phí cần thiết để thực hiện nguyên công, tính bằng đơn vị tiền tệ, ví dụ nghìn đồng (ng.đ).

$$K = K_m + K_d + K_{md} \text{ (ng.đ)} \quad (8)$$

trong đó, K_m là chi phí trực tiếp gia công, gồm chi phí chạy máy và lương thợ đứng máy

$$K_m = AT_0 = \frac{AV}{Z}$$

với A là chi phí cho 1 phút chạy máy (ng.đ/ph);

- K_d là chi phí mua dao, tính cho cả nguyên công

$$K_d = \frac{B_z}{z} \cdot \frac{T_0}{T} = \frac{T_0}{T} B = \frac{BV}{ZT}$$

với z - số lần mài trong toàn bộ thời gian sử dụng dao; B_z - chi phí mua dao (ng.đ); $B = B_z/z$ - chi phí mua dao tính bình quân cho 1 chu kỳ mài;

- K_{md} là chi phí mài dao tính cho cả nguyên công

$$K_{md} = \frac{AT_0}{T} t_{md} = \frac{AV}{ZT} t_{md} = \frac{CV}{ZT}$$

với t_{md} - thời gian 1 lần mài dao; $C=A.t_{md}$ - chi phí cho 1 lần mài dao.

Thay các thành phần vào (8), nhận được hàm mục tiêu

$$K = \frac{AV}{Z} + \frac{BV}{ZT} + \frac{CV}{ZT} \rightarrow \min \quad (9)$$

Vì B và C đều là hằng số và cùng thứ nguyên nên có thể gộp chúng vào hằng số $C_d = B+C = B+A.t_{md}$, gọi chung là chi phí dao để nhận được hàm mục tiêu dưới dạng đơn giản hơn

$$K = \frac{AV}{Z} + \frac{C_d V}{ZT} \rightarrow \min \quad (10)$$

Người ta cũng thường dùng chỉ tiêu chi phí gia công $1cm^3$ vật liệu

$$\frac{K}{V} = \frac{A}{Z} + \frac{C_d}{ZT} \rightarrow \min \quad (11)$$

Thay công thức tuổi bền (6) vào (11) ta nhận được

$$\frac{K}{V} = A \left(\frac{1}{vsa} + \frac{C_d / A}{C_T v^{m+1} s^{n+1} a^{k+1}} \right) \rightarrow \min \quad (12)$$

Tương tự như trong (7), nếu chỉ tính thành phần thứ nhất (chi phí trực tiếp cắt gọt) thì mô hình rất đơn giản, nhưng không thể chấp nhận được khi dùng dao đắt tiền hoặc mòn nhanh. Cũng dễ nhận thấy, thành phần thứ nhất của các hàm mục tiêu (7) và (12) chỉ khác nhau ở hằng số A , nên nếu bỏ qua mòn dao thì bài toán năng suất và bài toán kinh tế giống nhau. Nếu lại bỏ qua các điều kiện ràng buộc nữa (như đã dẫn trong nhiều công trình ở mục 1) thì không cần tính toán cũng thấy ngay là giá trị tối ưu của v , s , a sẽ trùng với cận trên (v_{max} , s_{max} , a_{max}) của chúng. Nói cách khác, nếu không tính đến mòn dao và các điều kiện ràng buộc thì ý nghĩa khoa học và thực tiễn của bài toán TUIH sẽ rất thấp. Nhưng nếu tính đầy đủ các yếu tố trên thì bài toán sẽ khó giải, khiến nhiều tác giả né tránh chúng.

Các hàm mục tiêu (7) và (12) có thể được dùng trực tiếp trong các mô hình phi tuyến, vốn khó giải với các phương pháp truyền thống. Với mô hình tuyến tính thì dạng tổng của chúng là trở ngại đối với phép tuyến tính hoá bằng logarit, vì vậy cần phải biến đổi chúng sang dạng tích.

Thời gian và chi phí gia công tính theo (5) và (11) đều phụ thuộc giá trị tuổi bền T . Nếu T là hằng số thì các chỉ tiêu tối ưu về năng suất cắt $T_{nc}/V \rightarrow \min$ và chi phí gia công $K/V \rightarrow \min$ có dạng giống chỉ tiêu $Z \rightarrow \max$ hay $1/Z \rightarrow \min$. Giá trị T ứng với năng suất cao nhất được gọi là tuổi bền năng suất T_{ns} . Giá trị T ứng với chi phí thấp nhất được gọi là tuổi bền kinh tế T_e . Sau đây chúng ta sẽ thấy là T_{ns} và T_e đều là hằng số, không phụ thuộc chế độ cắt và có thể tính được.

Để tính tuổi bền năng suất, lấy đạo hàm 2 vế của (7) theo v (bỏ qua ảnh hưởng của s và a) và giải phương trình với vế phải bằng 0, nhận được công thức tính tuổi bền năng suất

$$T_{ns} = -t_{md}(mt+1) \quad (13)$$

T_{ns} tỷ lệ thuận với thời gian mài dao và phụ thuộc vào số mũ của v trong công thức Taylor.

Bằng cách tương tự, tính được tuổi bền kinh tế

$$T_e = -\frac{C_d}{A}(mt+1) \quad (14)$$

Chú ý, các công thức tính T_{ns} và T_e chỉ có nghĩa khi $mt < -1$, và thực tế là như vậy.

Thay giá trị T_{ns} từ (13) vào (5) hoặc T_e từ (14) vào (11), ta nhận được các hàm mục tiêu:

- Tổng thời gian gia công nhỏ nhất

$$\frac{T_{nc}}{V} = \frac{1}{Z} \left(1 + \frac{t_{md}}{T_{ns}}\right) = \frac{t_{\Sigma}}{Z} \rightarrow \min \quad (15)$$

- Tổng chi phí gia công nhỏ nhất

$$\frac{K}{V} = \frac{1}{Z} \left(A + \frac{C_d}{T_e}\right) = \frac{A_{\Sigma}}{Z} \rightarrow \min \quad (16)$$

Hàm mục tiêu (15) tương đương với (5), (16) tương đương với (11) nhưng (15) và (16) có dạng tích, có thể lấy logarit để thành hàm tuyến tính, dùng trong các mô hình tuyến tính.

2.2. Các điều kiện ràng buộc và điều kiện biên

Các điều kiện ràng buộc đảm bảo cho quá trình gia công đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, phù hợp điều kiện thực tế hoặc tiến triển bình thường. Trong lý thuyết cắt gọt kim loại, quan hệ giữa các đại lượng ra với chế độ cắt thường (tuy không bắt buộc) có dạng hàm mũ. Sau đây là các điều kiện ràng buộc thường gặp. Theo ý nghĩa, chúng được phân thành 3 nhóm.

2.2.1. Nhóm thể hiện yêu cầu kỹ thuật cần đạt

- Điều kiện ràng buộc về độ nhám bề mặt

$$R_a = R_1 v^{mr} s^{nr} a^{kr} \leq R_{max} \quad (17)$$

Các ràng buộc về sai số kích thước, hình dạng nếu có cũng được biểu diễn tương tự.

2.2.2. Nhóm đảm bảo điều kiện làm việc bình thường của hệ thống

- Điều kiện lực cắt không vượt ngưỡng cho phép

$$F = F_1 v^{mf} s^{nf} a^{kf} \leq F_{max} \quad (18)$$

Điều kiện này đảm bảo không xảy ra biến dạng quá mức của phôi, sự an toàn của hệ thống,... Cùng loại, có các ràng buộc về biến dạng của phôi, rung động, nhiệt độ vùng cắt,...

- Điều kiện tuổi bền của dụng cụ bằng tuổi bền năng suất (T_{ns}) hoặc tuổi bền kinh tế (T_e), nhất thiết phải có khi sử dụng các hàm mục tiêu (15) và (16) trong mô hình tuyến tính:

$$T = C_T v^{mt} s^{nt} a^{kt} = \begin{cases} T_{ns} \\ T_e \end{cases} \quad (19)$$

2.2.3. Nhóm phụ thuộc tính năng của hệ thống công nghệ

- Điều kiện công suất cắt không vượt quá công suất động cơ trục chính (P_m)

$$P = \frac{F_1}{60.1000} v^{(mf+1)} s^{nf} a^{kf} \leq P_m \eta \quad (20)$$

- Miền giới hạn tốc độ cắt, lượng chạy dao, chiều sâu cắt, còn được gọi là điều kiện biên

$$v_{min} \leq v \leq v_{max}; s_{min} \leq s \leq s_{max}; a_{min} \leq a \leq a_{max} \quad (21)$$

3. CÁC PHƯƠNG PHÁP GIẢI BÀI TOÁN

Mô hình TŨH trong mục 2 là mô hình truyền thống. Vì dạng của bài toán năng suất và bài toán chi phí giống nhau, nên ở đây chỉ giải cho bài toán chi phí, dùng hàm mục tiêu (11).

3.1. Mô hình thực nghiệm

Quy hoạch thực nghiệm 3 có yếu tố (v, s, a), 3 mức, được chọn phù hợp với cặp vật liệu phôi (Ti-6Al-4V) - vật liệu dao (BK6) như trong Bảng 1.

Bảng 1. Các yếu tố đầu vào và các mức của chúng

Yếu tố	Mức 1	Mức 2	Mức 3
v (m/ph)	20	35	50
s (mm/v)	0,10	0,20	0,30
a (mm)	0,50	1,0	1,5

Điều kiện thí nghiệm như sau: Máy tiện CNC kiểu EMCO-E25. Trục chính: công suất 5,5kW, tốc độ tối đa 6300v/ph; mô men lớn nhất 35Nm. Phôi từ hợp kim Ti-6Al-4V, kích thước $D \times L = 50 \times 300$ mm. Dao tiện gắn mảnh hợp kim cứng BK6. Các thông số được đo gồm:

Lực cắt F , dùng lực kế 3 thành phần 9257BA của hãng Kistler - Thụy Sĩ; độ nhám bề mặt R_a , dùng thiết bị SJ-201 của Mitutoyo - Nhật; tuổi bền T , là thời gian gia công từ khi dao mới mài đến khi chiều cao trung bình của vùng mòn mặt sau đạt $h=0,3$ mm. Dùng quy hoạch thực nghiệm đa yếu tố toàn phần (L27) với 27 thí nghiệm, nhận được bảng số liệu (đã ẩn một số hàng cho gọn) trong Bảng 2.

Bảng 2. Số liệu thí nghiệm

Thí nghiệm	Chế độ cắt			Số liệu đo		
	v (m/p)	s (mm/v)	a (mm)	F (N)	R_a (μ m)	T (ph)
1	20	0,10	0,50	183,11	0,69	1110,91
2	20	0,10	1,00	246,69	0,75	438,83
3	20	0,10	1,50	293,68	0,79	254,88
...
25	50	0,30	0,50	893,07	5,10	15,42
26	50	0,30	1,00	1203,18	5,58	6,09
27	50	0,30	1,50	1432,35	5,88	3,54

Giá trị giới hạn của các thông số như sau: lực cắt $F_{max} = 800$ N; công suất trục chính $P_{max} = 5,5$ kW; độ nhám bề mặt $R_{max} = 2,5$ μ m; các giới hạn về tốc độ cắt: $v = (20 \div 50)$ m/ph; lượng chạy dao: $s = (0,10 \div 0,30)$ mm/v; chiều sâu cắt: $a = (0,5 \div 1,50)$ mm. Từ thực tế, xác định được các hằng số $C_d = 35$ ng.đ; $A = 2,5$ ng.đ/ph.

Dùng phương pháp hồi quy, xác định được các quan hệ thực nghiệm sau:

$$F = 64.v^{0,95} s^{0,65} a^{0,43} \quad (22)$$

$$R_a = 5,5.v^{0,45} s^{1,45} a^{0,13} \quad (23)$$

$$T = 9546.v^{-2,45} s^{-1,85} a^{-1,34} \quad (24)$$

Từ (20) và (22) nhận được

$$P = 0,0013.v^{1,95} s^{0,65} a^{0,43} \quad (25)$$

Theo (14) tính được $T_e = 20,3\text{ph}$; theo (16) được $A_z = 4,22\text{ng.đ}$.

Thay các quan hệ và các giá trị giới hạn vào (1), nhận được mô hình TỰH tổng quát cho mô hình phi tuyến như sau:

$$y = \frac{2,5}{v \cdot s \cdot a} + \frac{35}{9546 \cdot v^{(-2,45+1)} \cdot s^{(-1,85+1)} \cdot a^{(-1,34+1)}} \rightarrow \min \quad (a)$$

$$f(x) = \begin{cases} 64 \cdot v^{0,95} \cdot s^{0,65} \cdot a^{0,43} & \leq 800 \\ 0,0013 \cdot v^{1,95} \cdot s^{0,65} \cdot a^{0,43} & \leq 5,5 \\ 5,5 \cdot v^{0,45} \cdot s^{1,45} \cdot a^{0,13} & \leq 2,5 \\ 20 \leq v \leq 50 \\ 0,1 \geq s \geq 0,3 \\ 0,5 \leq a \leq 1,5 \end{cases} \quad (b)$$

Nếu dùng mô hình tuyến tính thì thay hàm mục tiêu sau vào (a)

$$y = \frac{4,22}{v \cdot s \cdot a} \rightarrow \min \quad (27)$$

và bổ sung điều kiện ràng buộc về tuổi bền kinh tế sau vào (b)

$$9546 \cdot v^{-2,45} \cdot s^{-1,85} \cdot a^{-1,34} = 20,3 \quad (28)$$

Sau đó, lấy logarit các phương trình, đặt $x_1 = \ln(v)$, $x_2 = \ln(s)$, $x_3 = \ln(t)$, được mô hình sau:

$$y = 1,44 - x_1 - x_2 - x_3 \rightarrow \min \quad (a)$$

$$f(x) = \begin{cases} 4,16 + 0,95x_1 + 0,65x_2 + 0,43x_3 & \leq 6,68 \\ -6,62 + 1,95x_1 + 0,65x_2 + 0,43x_3 & \leq 1,70 \\ 1,70 + 0,45x_1 + 1,45x_2 + 0,13x_3 & \leq 0,92 \\ 9,16 - 2,45x_1 - 1,45x_2 - 1,34x_3 & = 3,01 \\ 3,0 \leq x_1 \leq 3,91 \\ -2,3 \leq x_2 \leq -1,20 \\ -0,69 \leq x_3 \leq 0,41 \end{cases} \quad (b)$$

3.2. Giải bài toán tối ưu hoá một mục tiêu

Phần này trình bày tóm tắt các bước giải bài toán bằng một số phương pháp điển hình và so sánh kết quả để đánh giá tính hợp lý của các mô hình TỰH. Thông tin chi tiết về các phương pháp và thuật toán có thể tìm thấy trong các tài liệu chuyên đề, như [1].

3.2.1. Phương pháp quy hoạch tuyến tính

QHTT là phương pháp kinh điển, có cơ sở toán học là đại số tuyến tính, chặt chẽ và tin cậy. Thuật toán cơ bản của nó là thuật toán đơn hình. Khi chưa có máy tính số, thuật toán này có thể được thực hiện bằng tay. Ngày nay, QHTT được hỗ trợ bởi hầu hết công cụ tính toán, từ phần mềm văn phòng Microsoft Excel đến các phần mềm kỹ thuật chuyên dùng, như Matlab. Để tăng tính trực quan với bạn đọc, phương pháp QHTT sẽ được thực hiện bởi công cụ Solver của Excel.

	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
39	Điều kiện ràng buộc		y_0	x_1	x_2	x_3	y	Giá trị giới hạn		Th. số TU
40	$F \leq F_{max}$	N	4,16	0,95	0,65	0,43	6,62	6,68	800,00	751,48
41	$P \leq P_m$	kW	-6,62	1,95	0,65	0,43	-0,59	1,70	5,50	0,55
42	$R_a \leq R_{max}$	μm	1,70	0,45	1,45	0,13	0,92	0,92	2,50	2,50
43	$v \leq v_{max}$	m/ph		1			3,56	3,91	50,00	35,26
44	$s \leq s_{max}$	mm/vg			1		-1,69	-1,20	0,30	0,19
45	$a \leq a_{max}$	mm				1	0,41	0,41	1,50	1,50
46	$v \geq v_{min}$	m/ph		1			3,56	3,00	20,00	35,26
47	$s \geq s_{min}$	mm/vg			1		-1,69	-2,30	0,10	0,19
48	$a \geq a_{min}$	mm				1	0,41	-0,69	0,50	1,50
49	$T = T_e$	ph	9,16	-2,45	-1,85	-1,34	3,01	3,01	20,30	20,30
50	Hàm mục tiêu		1,44	3,56	-1,69	0,41	-0,84	K/V =	0,4310	
51	Kiểm tra kết quả			v	s	a	Z	A/Z	C_d/ZT	K/V_{min}
52	với chế độ cắt tối ưu			35,26	0,19	1,50	9,800	0,255	0,176	0,431
53	Chi phí trực tiếp A (ng.đ/ph)		2,5					Chi phí dao Cd (ng.đ)	35,0	Te (Tns)
									20,30	

Hình 1. Mẫu nhập dữ liệu và giải bài toán QHTT trong Excel

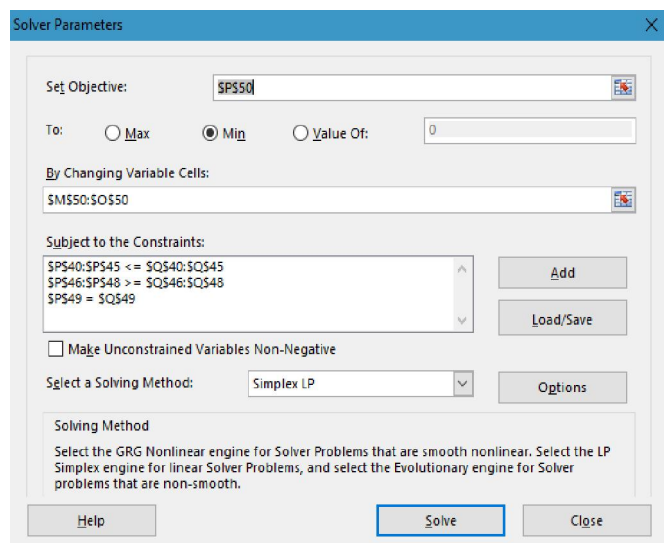
Mô hình tuyến tính (29) được nhập vào bảng tính của Excel như Hình 1: hàm mục tiêu trong mảng L50:O50. Ban đầu x_1, x_2, x_3 (M50:O50) được gán giá trị tùy ý, ví dụ (1, 1, 1), sẽ được cập nhật trong quá trình giải. Các điều kiện ràng buộc và điều kiện biên trong L40:O49; giá trị giới hạn của chúng trong R40:R49.

Giao diện của Solver như trong hình 2. Đối chiếu với hình 1, có thể nhận ra giá trị hàm mục tiêu (Set Objective) ở ô P50; các biến (By Changing Variable Cells) trong các ô M50:O50; các điều kiện ràng buộc bất đẳng thức (\geq, \leq) và đẳng thức (=) được mô tả trong vùng Subject to the Constraints.

Phương pháp giải được chọn (Select the Solving Method) là QHTT, đơn hình (Simplex LP). Sau khi bấm lệnh giải (Solve), mảng M50:O50 của

Hình 1 được cập nhật các giá trị tối ưu: $x_1 = 3,56; x_2 = -1,69; x_3 = 0,41$, tương ứng $v = 35,26\text{m/ph}; s = 0,19\text{ mm/vg}; a = 1,5\text{mm}$. Giá trị hàm mục tiêu là $-0,84$, ứng với chi phí gia công thấp nhất: $K/V = \exp(-0,84) = 0,431\text{ng.đ/cm}^3$. So sánh giá trị giới hạn trong cột (R40:R49) với giá trị tính các đại lượng tương ứng chế độ cắt tối ưu trong cột (S40:S49) có thể thấy R_{max}, a_{max} và T_e được sử dụng hết.

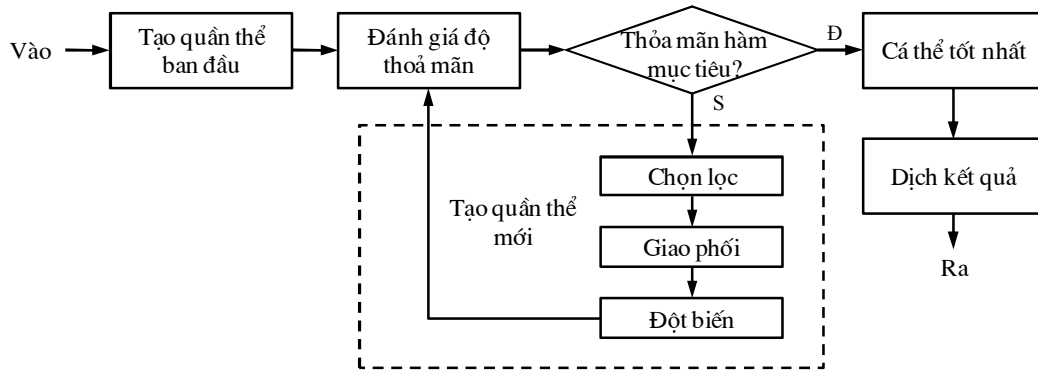
Các điều kiện khác (F, P, v, s) còn dự trữ. Muốn giảm tiếp chi phí thì phải nói rộng R_a và a .



Hình 2. Giao diện giải bài toán QHTT trong Excel

3.2.2. Dùng giải thuật di truyền tuyến tính

GA là một nhánh của tính toán tiến hóa (*Evolution Computing - EC*), là một cách khoa học kỹ thuật học ở tự nhiên. Lý thuyết và kỹ thuật GA được công bố lần đầu tiên vào năm 1975 bởi Holland, lấy ý tưởng từ quy luật tiến hóa, chọn lọc tự nhiên của giới sinh vật, được tổng kết thành nguyên tắc "khôn sống mông chết" trong học thuyết về di truyền của Darwin (1809-1882). Thuật toán TUH bằng GA được mô tả trong Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ thuật toán tối ưu hóa với GA

Quy luật tiến hoá trong tự nhiên được GA kế thừa và mô phỏng như sau:

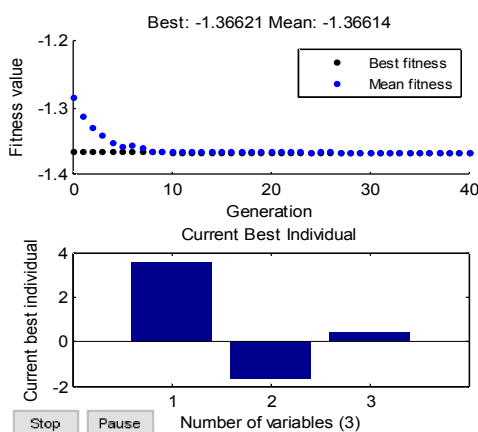
1- Môi trường sống luôn luôn biến động. Để có thể tồn tại và phát triển, sinh vật phải không ngừng tiến hóa và thích ứng;

2- Những cá thể thích ứng tốt sẽ sống sót, giao phối để được nối dõi, cá thể nào thích ứng kém sẽ bị loại hoặc không được chọn nối dõi;

3- Những đặc tính của các cá thể ưu tú nhất sẽ được di truyền cho đời con. Sự chọn lọc và di truyền cho các thế hệ sau nữa được tiếp tục theo các vòng lặp, khiến cho các thế hệ sau luôn có các đặc tính tốt hơn các thế hệ trước;

4. Đôi khi có thể xảy ra hiện tượng đột biến, khiến quá trình tiến hoá nhanh hơn.

Bản chất của quá trình chọn lọc nói trên là TUH. Chương trình được lập trong Matlab với số cá thể (PopulationSize: 40), số thế hệ (Generations: 40).



=== TOI UU HOA CHE DO CAT VOI LINEAR-GA ===

Toc do cat toi uu : v = 35.07 (m/ph)
 Luong an dao toi uu : s = 0.19 (mm/vg)
 Chiều sau cat toi uu : a = 1.50 (mm)
 Nang suat gia cong : Z = 9.802 (cm³/ph)
 Do nham be mat : Ra = 2.50 (μm)
 Luc cat : F = 751.21 (N)
 Cong suat truc chinh : P = 0.55 (kW)
 Tuoi ben tinh toan : T = 20.28 (ph)
 Tuoi ben kinh te : Te = 20.30 (ph)
 Chi phi truc tiep : K1 = 0.255 (ng.d/cm³)
 Chi phi dung cu : K2 = 0.176 (ng.d/cm³)
 Chi phi gia cong : K/V = 0.431 (ng.d/cm³)
 Thoi gian tinh toan : t = 3.107 (s)

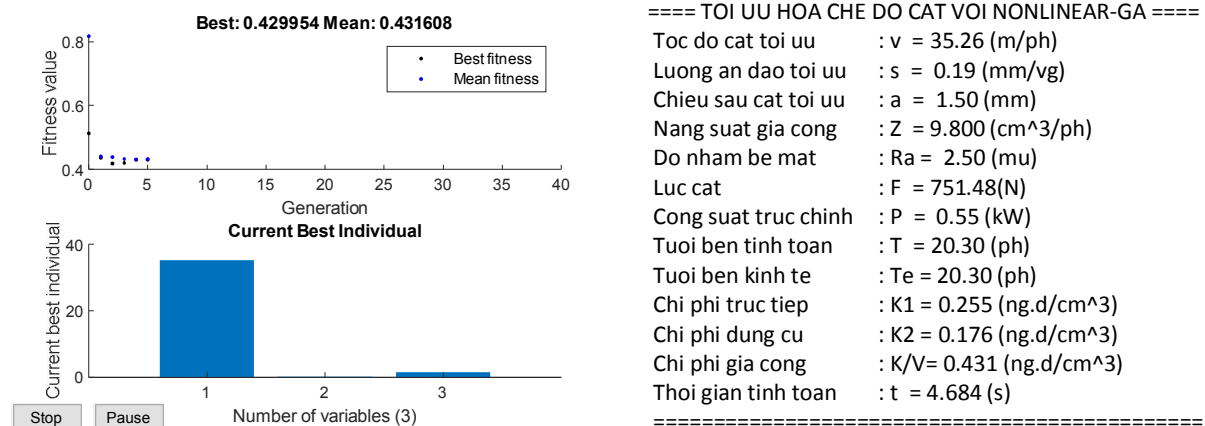
Hình 4. Kết quả TUH nhờ GA tuyến tính

Diễn tiến của quá trình TỰH được thể hiện trong nửa trên của Hình 4, theo đó chỉ sau khoảng 10 thế hệ (*Generation*) hàm mục tiêu (*Fitness Value*) đã đạt đến giá trị tối ưu $Best = -1,36621$. Đối chiếu với

Hình 1, ta thấy nó xấp xỉ giá trị nhỏ nhất (-1,37) của $\ln(A/Z)$. Đồ thị nửa dưới cho nghiệm tối ưu: $x_1 = 3,56$; $x_2 = -1,69$; $x_3 = 0,41$, ứng với $v = 35,07\text{m/ph}$; $s = 0,19\text{mm/v}$; $a = 1,5\text{mm}$. Kết quả này cũng được in ra màn hình như nửa bên phải của Hình 4.

3.2.3. Dùng giải thuật di truyền phi tuyến

Với GA phi tuyến, mô hình (26) sẽ được dùng. Diễn tiến của quá trình TỰH được thể hiện trong nửa trên của Hình 5. Đồ thị nửa dưới và thông tin trên màn hình cho thấy chế độ cắt tối ưu: $v = 35,26\text{m/ph}$; $s = 0,19\text{mm/vg}$; $a = 1,5\text{mm}$ ứng với chi phí nhỏ nhất $K/V = 0,431\text{ng.d/cm}^3$.



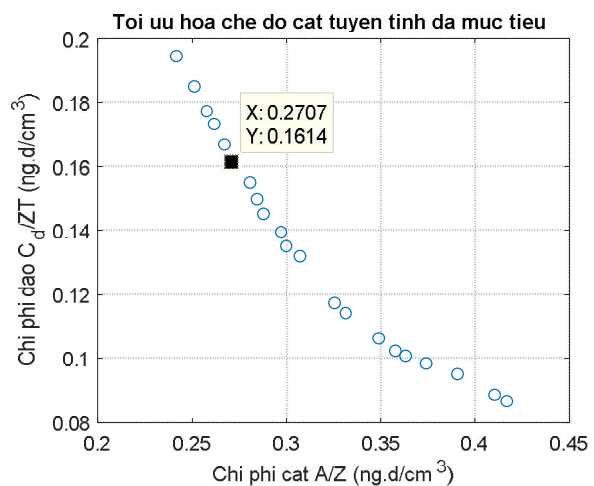
Hình 5. Kết quả TỰH nhờ GA phi tuyến

3.2.4. Giải bài toán tối ưu hoá đa mục tiêu

Mô hình TỰH đa mục tiêu dùng 2 hàm mục tiêu, là 2 thành phần của (26):

- Chi phí cắt $K_1 = A/Z$;
- Chi phí dao $K_2 = C_d/ZT$.

Hai mục tiêu này phụ thuộc trái ngược nhau vào chế độ cắt. Có thể dùng mô hình tuyến tính hoặc phi tuyến và nhận được kết quả tương tự nhau. Tuy nhiên, chỉ trong các phiên bản mới nhất của Matlab (R2018a), mới thấy hỗ trợ giải bài toán phi tuyến đa mục tiêu có ràng buộc. Phần này chỉ minh họa mô hình tuyến tính. Tập nghiệm Pareto được biểu diễn trên Hình 6, giá trị của chúng được xuất ra bằng tính Excel trong Bảng 3 (đã ẩn một số hàng cho gọn).



Hình 6. Tập nghiệm Pareto khi TỰH đa mục tiêu

Bảng 3. Kết quả TỰH đa mục tiêu tuyến tính với GA

TT	v(m/ph)	s(mm/v)	a(mm)	A/Z	C _d /AZ	K/V	Z(mm ³)	T(ph)	R _a (μm)	F(N)	P(kW)	K ₂ /K(%)
1	22,83	0,21	1,48	0,358	0,102	0,460	6,986	48,743	2,396	531,576	0,253	22,25
2	32,84	0,19	1,48	0,271	0,161	0,432	9,235	23,393	2,495	710,656	0,486	37,35
4	24,68	0,21	1,49	0,331	0,114	0,446	7,543	40,458	2,463	571,381	0,294	25,63
5	38,56	0,18	1,50	0,242	0,195	0,436	10,346	17,325	2,465	800,707	0,643	44,60
18	34,20	0,18	1,49	0,267	0,167	0,434	9,357	22,324	2,430	724,937	0,516	38,45
19	21,31	0,19	1,47	0,417	0,087	0,503	5,998	67,076	2,081	472,416	0,210	17,21
23	38,30	0,18	1,48	0,245	0,193	0,437	10,220	17,698	2,472	794,611	0,634	44,07

Điểm cận trên - trái của đồ thị và hàng 5 trong bảng ứng với chi phí cắt nhỏ nhất, chi phí dao lớn nhất, năng suất cao nhất, tuổi bền của dao thấp nhất, lực cắt chạm ngưỡng tối đa cho phép (800N) và công suất tiêu hao lớn nhất. Ngược lại, điểm cận dưới - phải (hàng 19 trong bảng) có chi phí dao nhỏ nhất, chi phí cắt lớn nhất, năng suất thấp nhất, tuổi bền của dao lớn nhất có thể,... Phương án có tổng chi phí nhỏ nhất (tối ưu) nằm ở đoạn giữa của đồ thị (hàng 2 trong bảng) là sự dung hoà giữa 2 loại chi phí. Ngoài 3 phương án đặc biệt nói trên, người dùng có thể chọn phương án bất kỳ, tùy thuộc tiêu chí nào (năng suất cắt hay tuổi bền dao) được ưu tiên.

4. TỔNG HỢP KẾT QUẢ

Bảng 4 tổng hợp kết quả giải bằng 5 phương pháp khác nhau: QHTT (dùng Solver của Excel) và dùng GA với 4 mô hình: 2 mô hình TỰH một mục tiêu (SOOP), và 2 mô hình đa mục tiêu (MOOP), tuyến tính (L) và phi tuyến (NL).

Ta thấy, các mô hình một mục tiêu cho kết quả giống nhau nhất, đảm bảo đúng yêu cầu kỹ thuật ($R_a = R_{amax} = 2,5\mu m$) và tuổi bền xấp xỉ tuổi bền kinh tế ($T \approx T_e = 20,30ph$), chi phí gia công nhỏ nhất ($K/V = 0,431ng.\dot{d}/cm^3$). Kết quả của các mô hình đa mục tiêu khá gần nhau, chỉ hơi khác so với kết quả của các mô hình một mục tiêu. Những sai khác phát sinh từ 2 nguồn chính. Thứ nhất, GA vốn là phương pháp gần đúng, chỉ đảm bảo nghiệm gần tối ưu. Thứ hai, tập nghiệm Pareto là tập rời rạc, nghiệm thực sự tối ưu có thể không trùng với các điểm được xuất ra. Bù lại, người dùng có thể chọn linh hoạt một nghiệm nào đó trong tập Pareto hoặc lân cận nó, tuy không hẳn tối ưu nhưng phù hợp yêu cầu của mình.

Bảng 4. Tổng hợp kết quả TỰH với các phương pháp khác nhau

Ph. pháp giải	v(m/ph)	s(mm/vg)	a(mm)	Z	T	R _a	A/Z	C _d /ZT	K/V
Solver (Excel)	35,26	0,19	1,50	9,80	20,30	2,50	0,255	0,176	0,431
SOOP-LGA	35,07	0,19	1,50	9,80	20,28	2,50	0,255	0,176	0,431
SOOP-NGA	35,26	0,19	1,50	9,80	20,30	2,50	0,255	0,176	0,431
MOOP-LGA	32,84	0,19	1,48	9,23	23,39	2,49	0,271	0,161	0,432
MOOP-NGA	33,01	0,19	1,48	9,24	23,39	2,49	0,271	0,162	0,432
Kiểm chứng	35,00	0,19	1,50	9,92	21,46	2,55	0,252	0,164	0,417

Kết quả tính toán đã được kiểm chứng bằng cách làm 3 thí nghiệm với chế độ cắt như hàng cuối của Bảng 4. Có 2 đại lượng được đo và lấy giá trị trung bình, là T và R_a ; các đại lượng còn lại được tính. Sai số lớn nhất so với giá trị trung bình của các đại lượng xấp xỉ 3,5%, hoàn toàn chấp nhận được.

Từ số liệu TỰH đa mục tiêu trong Bảng 3, ngoài giá trị của tổng chi phí gia công, có thể đánh giá về sự phân bố giữa các thành phần. Cột K_2/K ghi tỷ lệ (%) của chi phí dao (C_d/ZT) trong

tổng chi phí. Tỷ lệ này nhỏ nhất (17,21%) ở phương án cắt nhẹ nhất (tuổi bền lớn nhất); lớn nhất (44,60%) ở phương án cắt nặng nhất (tuổi bền nhỏ nhất), bằng 37,35%, nghĩa là có sự dung hoà ở phương án tối ưu. Rõ ràng, với tỷ lệ này thì chi phí dao không thể bỏ qua được.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đưa ra mô hình TỰH chế độ cắt có tính đến đầy đủ các yếu tố chi phí và các điều kiện ràng buộc thường gặp. Việc đơn giản hoá mô hình bằng cách bỏ qua chi phí dao và/hoặc bỏ qua các điều kiện ràng buộc không những làm sai lệch bản chất toán học của mô hình mà còn làm mất ý nghĩa thực tiễn của bài toán. Tuy nhiên, đưa chi phí dao vào hàm mục tiêu và tính đến các điều kiện ràng buộc thực tế làm cho bài toán phức tạp và khó giải hơn nhiều cần xử lý đặc biệt về toán học. Vì sự bất tiện này mà mô hình đầy đủ thường bị né tránh, không cho lời giải tường minh và tin cậy.

Ngày nay, với sự bùng nổ của các công cụ tin học, chúng ta có nhiều lựa chọn, trong đó các công cụ dựa trên thuật toán kiếm tối ưu cho phép giải trực tiếp mô hình phi tuyến với hệ ràng buộc bất kỳ. Ứng dụng các phương pháp "mới" giảm bớt gánh nặng về xây dựng mô hình và xử lý toán học, nhưng phải trả giá về độ chính xác, tin cậy và ổn định của kết quả. Nếu chọn hợp lý các thông số của thuật toán thì có thể nhận được kết quả tốt nhưng đòi hỏi kinh nghiệm của người dùng. Trong số này có một số thuật toán dễ hiểu, dễ tự động hoá, thực hiện nhanh, phù hợp với nhiệm vụ giám sát trực tuyến và điều khiển thích nghi quá trình gia công.

Có 4 dạng mô hình TỰH đã được thiết lập để so sánh: một mục tiêu, đa mục tiêu, tuyến tính và phi tuyến đã được xây dựng và giải bằng công cụ Solver của Microsoft Excel và GA trong Matlab. Kết quả khá giống nhau giữa chúng và gần với kết quả thực nghiệm kiểm chứng cho thấy các mô hình và thuật giải được thực hiện là tin cậy.

DANH MỤC/ DANH PHÁP/ KÝ HIỆU

Ký hiệu/ chữ tắt	Ý nghĩa	Ký hiệu/ chữ tắt	Ý nghĩa
a (mm)	Chiều sâu cắt	v (m/ph)	Tốc độ cắt
A (ng.đ/ph)	Chi phí chạy máy	V (cm ³)	Thể tích vật liệu được hớt
C_d (ng.đ)	Chi phí mua và mài dao	Z (cm ³ /ph)	Tốc độ bóc vật liệu (MRR)
F (N)	Lực cắt	ANN	Mạng nơ ron nhân tạo
K (ng.đ)	Tổng chi phí gia công	CAPP	Chuẩn bị công nghệ có máy tính trợ giúp
m, n, k	Các số mũ	CNC	Điều khiển số dùng máy tính
P (kW)	Công suất động cơ	GA	Giải thuật di truyền
R_a (μm)	Độ nhám bề mặt	PSO	Tối ưu hoá bầy đàn
s (mm/v)	Lượng chạy dao	QHTT	Quy hoạch tuyến tính
t (ph)	Thời gian	RSM	Phương pháp mặt đáp ứng
T (ph)	Tuổi bền của dao	TỰH	Tối ưu hoá

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Đào Văn Hiệp, 2016. *Giám sát và điều khiển thông minh quá trình gia công cơ*, NXB Quân đội nhân dân, Hà Nội.

- [2]. Aggarwal, A. and Singh, H., 2005. Optimization of Machining Techniques - A Retrospective and Literature Review. *Sadhana*, Vol. 30 (6), pp. 699–711.
- [3]. Sonowal, D., Nath, T. and Sarma, D., 2015. A Review on Optimization of Cutting Parameters on Turning. *Int. J. of Eng. Trends and Technology (IJETT)* - Vol. 28 (2), pp. 54-60.
- [4]. Cus, F., Zuperl, U., Kiker, E., Milfelner, M., 2006. Adaptive Controller Design for Feedrate Maximization of Machining Process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 17 (1-2), 237-240.
- [5]. Johari, N.F. et al., 2017. Machining Parameters Optimization using Hybrid Firefly Algorithm and Particle Swarm Optimization, *J. of Physics: Conf. Series* 892.012005, pp. 1-11.
- [6]. Sahoo, P., 2011. Optimization of Turning Parameters for Surface Roughness Using RSM and GA. *Advances in Production Engineering & Management* 6 (3), pp. 197-208.
- [7]. Aruna, M., Dhanalaksmi, V., 2012. Design Optimization of Cutting Parameters when Turning Inconel 718 with Cermet Inserts. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol 6(1), pp. 278-281.
- [8]. Ribeiro, J., Lopes, H., Queijo, L., Figueiredo, D., 2017. Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 61 (1), pp. 30-35.
- [9]. Bhuiyan, T.H., Ahmed, I., 2013. Optimization of Cutting Parameters in Turning Process. *Journal of Production Engineering*, Vol. 16 (2), pp. 11-19.
- [10]. Marko, H., et al., 2014. Turning Parameters Optimization using Particle Swarm Optimization. *Procedia Engineering* 69, pp. 670 - 677.
- [11]. Matisková, D., Ambriško, L., 2017. Optimization of Cutting Conditions and Improvement of Production in Economic Terms. *TEM Journal*. Vol. 6, (3), pp. 584-590.
- [12]. Esfandiari, A., Mehdizadeh, M., 2016. Cutting Parameters Optimization for Minimizing Production Time in Turning Process using Imperialist Competitive Algorithm. *Int. Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Eng.*, Vol. 6(4), pp. 127-135.
- [13]. Zuperl, U. and Cus, F., 2002. Optimization of Cutting Conditions During Machining by Using Neural Networks. *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Dresden, Germany, pp. 1-11.