

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH KRIGING KẾT HỢP THUẬT TOÁN CÁ VOI TRONG TỐI ƯU HÓA PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA KẾT CẤU VI MÔ ĐỐI VỚI HIỆU SUẤT MA SÁT CẶP MA SÁT LÓT XILANH-XEC MĂNG ĐỘNG CƠ Ô TÔ

*NCS. Lê Văn Lợi, GS.TS. Xu Ping, GS.TS. Yu Ying Hua, NCS. Zhu Hua Jie
Đại học Kỹ thuật Công nghệ Liêu Ninh, Trung Quốc*

Tóm tắt: Để nghiên cứu ảnh hưởng của kết cấu vi mô, nâng cao hiệu suất cặp ma sát động cơ ô tô, lựa chọn cặp ma sát lót xilanh-xec măng làm đối tượng nghiên cứu. Bài báo phân tích và đánh giá ảnh hưởng của các thông số hình học kết cấu vi mô đến hiệu suất làm việc của cặp ma sát. Thông qua mô hình Kriging mô hình hóa các tham số của kết cấu vi mô dạng parabol không đối xứng của mở hình elip, kết hợp thuật toán tối ưu hóa cá voi, tiến hành tối ưu hóa đa mục tiêu các tham số kết cấu vi mô và thu được tham số kết cấu vi mô tối ưu của cặp ma sát lót xilanh-xec măng lần lượt là: Bán kính dài 15,3 μm ; bán kính ngắn 14,9 μm ; độ lệch 6,5 μm ; độ sâu 7,7 μm ; khoảng cách trục ngang 45,5 μm ; và khoảng cách trục dọc 261,2 μm . So với cặp ma sát lót xilanh-xec măng nguyên mẫu, hệ số ma sát trung bình của cặp ma sát lót xilanh-xec măng có kết cấu vi mô không tối ưu hóa và kết cấu vi mô được tối ưu lần lượt giảm 10,88% và 13,99%; tải trọng trung bình lần lượt tăng 23,75% và 24,12%; công suất ma sát trung bình lần lượt giảm 9,24% và 12,89%; độ dày màng dầu trung bình lần lượt tăng 0,56% và 7,49%; độ dày màng dầu tối thiểu lần lượt tăng 29,80% và 34,51%.

Từ khóa: Hệ số ma sát, kết cấu vi mô, kriging, lót xilanh-xec măng, thuật toán tối ưu hóa cá voi, tải trọng.

1 Đặt vấn đề

Khi động cơ đốt trong làm việc, các cặp ma sát phát sinh nhiệt ma sát dẫn đến tổn hao năng lượng. Trong đó, phát nhiệt của cặp ma sát lót xilanh-xec măng chiếm tỷ trọng tương đối lớn [7, 8]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng, giảm 10% tổn thất năng lượng do ma sát thì có thể tiết kiệm được khoảng 1,5% tiêu hao nhiên liệu [12]. Vì vậy, giảm ma sát lót xilanh-xec măng luôn được quan tâm.

Kết cấu bề mặt hay kỹ thuật vi mô bề mặt được coi là một phương tiện hữu hiệu để cải thiện hiệu suất ma sát và giảm mài mòn của các cặp ma sát [4, 12, 13], ứng dụng đối với cặp ma sát lót xilanh-xec măng có thể nâng cao hiệu quả sử dụng. Cụ thể như: Nghiên cứu quy luật ảnh hưởng rãnh lõm vi mô đến hệ số ma sát [9]; nghiên cứu thử nghiệm quy luật ảnh hưởng của độ sâu và mật độ diện tích của kết cấu vi mô đến hệ số ma sát [15]; nghiên cứu so sánh lực ma sát

không gia công kết cấu vi mô với cặp có gia công [10]; nghiên cứu ảnh hưởng tỷ lệ diện tích của các vùng phân bố kết cấu vi mô khác nhau của bề mặt xilanh động cơ đến khả năng làm việc của cặp ma sát lót xilanh-xec măng [19]; nghiên cứu quy luật ảnh hưởng của tỷ lệ chiếm diện tích của kết cấu vi mô có cửa mở dạng hình tròn đối với tính năng mài mòn của cặp ma sát [20].

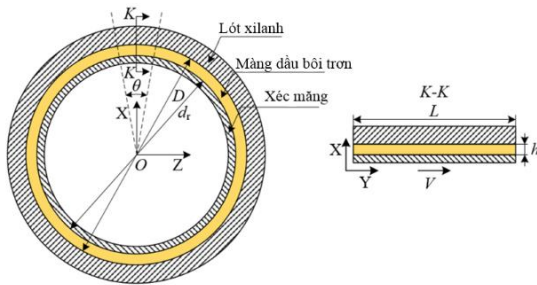
Cho đến nay, các nghiên cứu được thực hiện trên thế giới về ứng dụng kết cấu vi mô bề mặt trong cặp ma sát lót xilanh-xec măng đã thu được những thành quả to lớn, nhưng hình dạng kết cấu vi mô vẫn còn đơn giản, không thuận tiện để tối ưu hóa và việc chọn lựa lý thuyết thiết kế tối ưu hóa đối với các tham số đặc trưng của kết cấu vi mô để tiến hành thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu vẫn ít được đề cập đến. Trong bài báo này, kết cấu vi mô dạng parabol không đối xứng có cửa mở hình elip được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số đặc trưng

kết cấu vi mô mới đến hiệu suất ma sát, khả năng chịu tải, công suất ma sát, độ dày màng dầu của cặp ma sát lót xilanh-xéc măng. Mô hình toán học tương ứng được thiết lập và lý thuyết thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu được lựa chọn để khai thác triệt để tiềm năng của kết cấu vi mô bề mặt nhằm nâng cao hiệu suất toàn diện của cặp ma sát này.

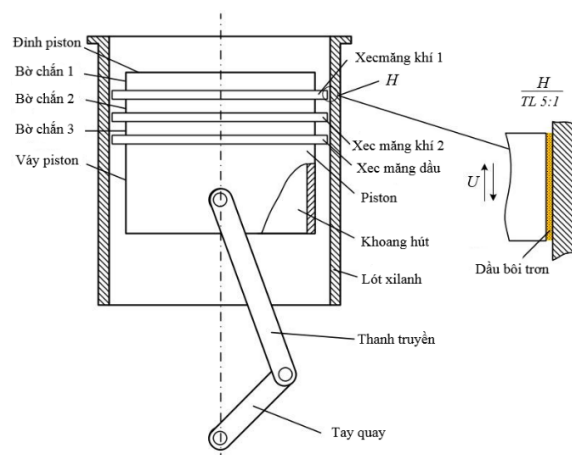
2 Lựa chọn, phân tích tính năng cặp ma sát lót xilanh- xéc măng nguyên mẫu

2.1 Lựa chọn cặp ma sát lót xilanh-xéc măng nguyên mẫu

Trong bài báo này, tác giả lựa chọn cặp ma sát lót xilanh/xéc măng của động cơ ô tô loại CY4102 làm nguyên mẫu nghiên cứu (hình 1). Các thông số chính được thể hiện trong bảng 1, sơ đồ cấu trúc đơn giản được thể hiện trong hình 2.



Hình 1. Cặp ma sát lót xilanh-xéc măng



Hình 2. Sơ đồ làm việc của cặp ma sát

Bảng 1. Các thông số chính cặp ma sát lót xilanh-xéc măng

TT	Tên gọi	Đơn vị	Giá trị
1	Đường kính trong lót xilanh (D)	mm	102
2	Đường kính ngoài xéc măng (d _r)	mm	101,98
3	Hành trình piston (S _r)	mm	118
4	Chiều dài thanh truyền (L)	mm	192
5	Độ dày màng dầu (h)	μm	10
6	Mật độ dầu bôi trơn	kg/m ³	890
7	Độ nhớt dầu bôi trơn	kg/(m.s)	0,009
8	Chiều dày xéc măng (L _r)	mm	1,8

2.2 Tính toán trạng thái bôi trơn cặp ma sát nguyên mẫu

Phương trình N-S đối với chất lỏng không ép nén, theo [1-3, 14] ta có:

$$\nabla(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\left(\frac{4}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \right] \quad (1)$$

$$\nabla(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{4}{3} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) \right] \quad (2)$$

$$\nabla(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{4}{3} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial y} \right) \right] \quad (3)$$

Trong đó: u, v, w – lần lượt là vector vận tốc theo ba hướng x, y, z; ρ – mật độ dầu bôi trơn, kg/m³; μ – độ nhớt dầu bôi trơn, kg/(m.s); p – áp suất tại mọi điểm trường chất lỏng, Pa.

Thông qua giải các phương trình (1)-(3) ở trên, có thể thu được tải trọng, lực cắt, lực ma sát của màng dầu bôi trơn. Theo [1-3, 14] ta có:

- Khả năng chịu lực của màng dầu bôi trơn bề mặt xéc măng:

$$F_N = \iint p(x, y) dx dy \quad (4)$$

- Ứng suất cắt giữa màng dầu bôi trơn và bề mặt rắn tiếp xúc

$$F_f = \iint \eta \frac{\partial u}{\partial z} dx dy \quad (5)$$

- Hệ số ma sát:

$$\mu_t = \frac{F_N}{F_f} \quad (6)$$

- Cường độ tải trọng của màng dầu:

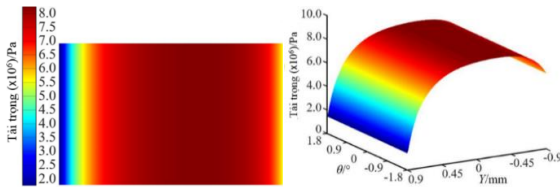
$$F_p = \frac{F_N}{A_0} \quad (7)$$

- Hiệu suất ma sát của màng dầu:

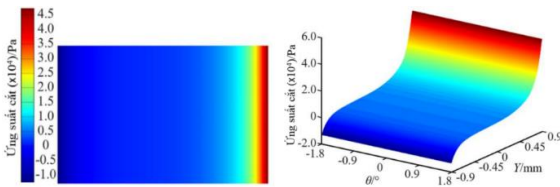
$$W = \frac{F_f U_w}{\theta_0} \times 360 \quad (8)$$

Trong đó: p – áp suất màng dầu bôi trơn khu vực tính toán, Pa; η – độ nhớt động học của chất lỏng, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; A_0 – diện tích mô hình tương ứng đối với lực ma sát F_N , m^2 ; θ_0 – góc kẹp tương ứng giữa mô hình với lực ma sát, độ; U_w – tốc độ xéc măng, m/s .

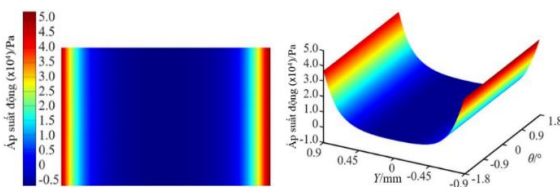
Theo nguyên lý làm việc của cặp ma sát lót xilanh-xec măng, khi độ dày của màng dầu bôi trơn mỏng nhất, tức là điều kiện bôi trơn kém nhất. Do đó, để so sánh với cặp ma sát lót xilanh-xec măng với kết cấu vi mô bề mặt, tiến hành xem xét góc quay trục khuỷu tại vị trí độ dày màng dầu bôi trơn của cặp ma sát lót xilanh-xec măng nguyên mẫu là nhỏ nhất và được lấy làm góc đặc trưng, thu được biểu đồ đám mây mô phỏng khả năng chịu tải (tải trọng), ứng suất cắt và áp suất động của bề mặt xéc măng trong màng dầu bôi trơn cặp ma sát nguyên mẫu (hình 3-5).



Hình 3. Biểu đồ tải trọng



Hình 4. Biểu đồ ứng suất cắt



Hình 5. Biểu đồ áp suất động ở vị trí màng dầu mỏng nhất

Để đánh giá hiệu suất ma sát của cặp ma sát lót xilanh-xec măng, ngoài hệ số ma sát trung bình, tải trọng trung bình và công suất ma sát trung bình, trạng thái bôi trơn của cặp ma sát cũng phải được xem xét. Độ dày màng dầu trung bình và độ dày màng dầu mỏng nhất được sử dụng để đánh giá trạng thái bôi trơn kém nhất của cặp ma sát, được tính như sau:

- Hệ số ma sát trung bình:

$$F_\mu = \frac{\int_{x_0}^{x_1} \mu dx}{x_1 - x_0} \quad (9)$$

- Tải trọng trung bình:

$$F_{pa} = \frac{\int_{x_0}^{x_1} F_p dx}{x_1 - x_0} \quad (10)$$

- Công suất ma sát trung bình:

$$F_w = \frac{\int_{x_0}^{x_1} W dx}{x_1 - x_0} \quad (11)$$

- Độ dày màng dầu trung bình:

$$F_{ha} = \frac{\int_{x_0}^{x_1} h dx}{x_1 - x_0} \quad (12)$$

Kết quả mô phỏng trên Ansys Fluent (hình 3-5) thay vào các công thức (9)-(12) thu được: Hệ số ma sát trung bình 0,0193; tải trọng trung bình 414205 Pa; công suất ma sát trung bình 35,7 W; độ dày màng dầu trung bình 5,34 μm ; và các độ dày màng dầu mỏng nhất 2,55 μm .

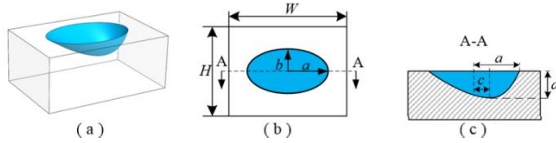
3 Nghiên cứu quy luật ảnh hưởng của các thông số kết cấu vi mô đối với hiệu suất tương quan cặp ma sát lót xilanh-xec măng

3.1 Xây dựng sơ đồ phân bố kết cấu vi mô

3.1.1 Lựa chọn đơn nguyên kết cấu vi mô

Căn cứ vào một số nghiên cứu và quá trình nghiên cứu kiểm tra khảo sát một số đơn nguyên vi mô biên dạng tròn, trụ, tam giác, tam giác góc lệch... [6, 11, 15, 16], nhận thấy đơn nguyên kết cấu vi mô dạng parabol với cửa mở hình elip có tính năng tốt hơn. Do đó, trong nghiên cứu này tác giả đi sâu vào giải quyết bài toán tối ưu với

đơn nguyên vi mô này. Đơn nguyên kết cấu vi mô được xây dựng có dạng parabol không đối xứng có cửa mở hình elip (Elliptic Opening Offset Parabola Micro Texture – EOOPT) như hình 6 và có các thông số hình học chủ yếu bao gồm: a , b – lần lượt là bán kính dài, bán kính ngắn của hình elip; c – độ dịch chuyển (khoảng lệch hay khoảng cách từ đường thẳng nối điểm thấp nhất của parabol tương ứng với độ sâu mặt cắt đường thẳng nối điểm tâm của hình elip), d – chiều sâu cắt lớn nhất.

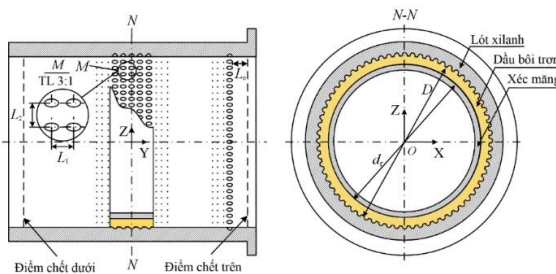


Hình 6. Hình dạng đơn nguyên kết cấu vi mô EOOPT

a) Hình 3D; b) Hình chiếu bằng; c) Mặt cắt

3.1.2 Sơ đồ phân bố kết cấu vi mô trên bề mặt cặp ma sát lót xilanh-xéc măng

Trong bài báo này, lựa chọn kết cấu vi mô EOOPT bố trí phân tán trên bề mặt của lót xilanh có khoảng cách giữa các trục dọc và trục ngang của EOOPT song song với trục của lót xi lanh, như hình 7, trong đó, L_1 là khoảng cách trục dọc, L_2 là khoảng cách trục ngang, $L_c = 15$ mm là khoảng cách bắt đầu của nhóm kết cấu vi mô so với điểm chết trên.



Hình 7. Kết cấu vi mô bề mặt cặp ma sát lót xilanh-xéc măng

3.2 Mô hình Kriging

3.2.1 Giới thiệu khái quát mô hình Kriging

Mô hình Kriging còn được gọi là phương pháp nội suy tốt nhất của hiệp phương sai tự động không gian, về cơ bản là sự kết hợp có

trọng số của các điểm mẫu đã biết trong vùng lân cận của điểm dự đoán, xem xét toàn diện ảnh hưởng của khoảng cách và phân bố không gian của điểm mẫu trên điểm dự đoán, dưới dạng thông tin ước tính cho điểm dự báo.

a. Thiết lập mô hình

Phương trình mô hình Kriging cơ bản được xác định theo [13]:

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n \omega_k^{(i)} y^{(i)} \quad (13)$$

Trong đó: $\hat{y}$ – giá trị hàm số ước tính; ω_k – hệ số trọng số, $\omega = [\omega^{(1)}, \dots, \omega^{(n)}]^T$; y – giá trị hàm số tương ứng.

Từ công thức (13) có thể thấy rằng để có được giá trị ước tính của không gian thiết kế, cần phải xác định hệ số trọng số của nó. Để tính toán các hệ số trọng số, mô hình Kriging coi hàm chưa biết là một quá trình ngẫu nhiên tĩnh Gaussian [13]. Quá trình ngẫu nhiên tĩnh được định nghĩa:

$$Y(x) = \omega^T(x) \beta_k + Z(x) \quad (14)$$

Trong đó: $\omega^T(x)$ – vector hàm hồi quy, $\omega^T(x) \beta_k = \beta_1 \omega_1(x) + \dots + \beta_i \omega_i(x)$; $\omega_i(x)$ – hàm hồi quy; β_k – hàm vector hồi quy; $Z(x)$ – quá trình ngẫu nhiên được giả định có trung bình 0 và hàm hiệp phương sai σ^2 .

Giả sử một số tương quan giữa biến ngẫu nhiên và các biến khác trong không gian thiết kế:

$$\text{Cov}[Z(x), Z(x')] = \sigma^2 R(x, x') \quad (15)$$

Trong đó: $R(x, x')$ – hàm số tương quan.

Căn cứ các giả định trên, mô hình Kriging tìm kiếm hệ số trọng số tối ưu ω_k làm cho các lỗi bình phương trung bình MSE nhỏ nhất:

$$\text{MSE}[\hat{y}(x)] = E[(\omega^T(x) Y_s - Y(x))^2] \quad (16)$$

Và thỏa mãn điều kiện nội suy:

$$E\left[\sum_{i=1}^n \omega^{(i)} Y(x^{(i)})\right] = E[Y(x)] \quad (17)$$

Thông qua đạo hàm thu được hệ số trọng số tối ưu nhất ω_k :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \omega_k^{(j)} R(x^{(i)}, x^{(j)}) + \frac{\lambda_k}{2\sigma^2} = R(x^{(i)}, x) \\ \sum_{i=1}^n \omega_k^{(i)} = 1 \end{cases} \quad (18)$$

Trong đó: λ_k – hệ số nhân Lagrange.

Từ biểu thức (18) có thể viết thành ma trận sau:

$$\begin{bmatrix} R_k & F \\ F^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_k \\ \bar{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Trong đó:

$$F = [1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^n, \quad \bar{\mu} = \frac{\mu}{2\sigma^2} \quad (20)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} R(x^{(1)}, x^{(1)}) & \dots & R(x^{(1)}, x^{(n)}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R(x^{(n)}, x^{(1)}) & \dots & R(x^{(n)}, x^{(n)}) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (21)$$

$$r_k = \begin{bmatrix} R(x^{(1)}, x) \\ \vdots \\ R(x^{(n)}, x) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n$$

Với: R_k – ma trận tương quan, gồm các giá trị hàm tương quan giữa tất cả các điểm mẫu đã biết; r_k – vector tương quan, gồm các giá trị hàm tương quan giữa tất cả các điểm mẫu đã biết.

Thay các biểu thức (14)-(19) vào biểu thức (13) ta thu được giá trị dự đoán mô hình Kriging:

$$\hat{y}(x) = \begin{bmatrix} r_k(x) \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_k & F \\ F^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Thông qua nghịch đảo ma trận khối, thu được biểu thức cuối cùng của mô hình như sau:

$$\hat{y}(x) = \beta_k + r_k^T(x) \underbrace{R^{-1}(y_s - \beta_0 F)}_{V_{Kriging}} \quad (23)$$

Trong đó: $\beta_k = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} y_s$;

$V_{Kriging}$ – vector cột chỉ liên quan đến các điểm mẫu đã biết.

b. Mô hình hồi quy

Theo công thức mô hình Kriging đã thiết lập, sử dụng mô hình Kriging yêu cầu cần xác định mô hình hồi quy khi tiến hành xây dựng mô hình. Nói chung, các mô hình hồi quy đa thức bậc 0, 1 và 2 được sử dụng, và có dạng như sau:

$$\begin{aligned} \omega_1(x) &= 1 \\ \omega_2(x) &= x_1, \dots, \omega_{l+1}(x) = x_1 x_n \\ \omega_{n+2}(x) &= x_1^2, \dots, \omega_{2l+1}(x) = x_2 x_n \\ &\dots \\ \omega_l(x) &= x_1^2 \end{aligned} \quad (24)$$

c. Mô hình tương quan

Biểu thức xác định hàm số tương quan:

$$R(\theta_k, \omega_k, x) = \prod_{j=1}^n R_j(\theta_k, \omega_{kj} - x_j) \quad (25)$$

Ở đây, hàm R có thể được xác định từ một trong các hàm sau hàm mũ, Gaussian, đa tuyến... [13], trong đó, hàm Gaussian được sử dụng rộng rãi nhất, với m, n lần lượt là số lượng mẫu và số biến thiết kế thì hàm số xác định tương quan giữa hai điểm mẫu theo Gaussian được biểu diễn như sau:

$$R(\theta, x_i - x_j) = \exp\left(\sum_{k=1}^n -\theta_k (x_k^i - x_k^j)^2\right) \quad (26)$$

Trong đó: $\theta_k \geq 0$ – vector trọng số tương quan tại vị trí thứ k .

d. Thực nghiệm độ chính xác của mô hình Kriging

Để kiểm tra độ chính xác của mô hình Kriging, trước tiên chọn ngẫu nhiên khoảng 90% nhóm thử nghiệm từ bảng thiết kế thử nghiệm để xây dựng mô hình Kriging, sau đó sử dụng các nhóm thử nghiệm còn lại để xác minh độ chính xác mô hình Kriging, được đánh giá bằng hệ số xác định và sai số bình phương trung bình [21].
- Hệ số tương quan (Correlation Coefficient- R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (27)$$

- Sai số bình phương trung bình (Root Mean Square Error – RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (28)$$

Trong đó: y_i – giá trị quan sát; $\hat{y}_i$ – giá trị dự đoán; $\bar{y}_i$ – giá trị trung bình mô hình.

3.2.2 Mô hình thiết kế thực nghiệm

Mục đích của thiết kế thử nghiệm (Design of Experiment – DOE) là sử dụng các phương pháp hợp lý để sắp xếp các tổ hợp thử nghiệm nhằm thu được đủ dữ liệu hiệu quả, để có thể tiến hành thí nghiệm và phân tích kết quả tốt nhất, nhằm thu được nhiều kết luận đáng tin cậy. Latin Hypercube Sampling (LHS) là một phương pháp lấy mẫu ngẫu nhiên phân tầng, có thể lấy mẫu hiệu quả từ khoảng phân phối của các biến và các mẫu được phân phối trong toàn bộ không gian thử nghiệm.

Thuật toán SLE-CLHS là một phương pháp lấy mẫu không gian hạn chế được cải tiến dựa trên phương pháp LHS. Đầu tiên, nó sử dụng phương pháp LHS để tạo các điểm mẫu trong không gian không bị hạn chế, sau đó loại bỏ các điểm mẫu không có trong không gian bị hạn chế theo các ràng buộc. Tiếp theo, lần lượt tính khoảng cách của từng giá trị lấy mẫu tham số và chèn một điểm lấy mẫu mới ở khoảng cách tối đa cho đến khi điểm đó đáp ứng các đặc tính lấp đầy không gian và hình chiếu của lấy mẫu tổng thể, cuối cùng, nó thỏa mãn các ràng buộc.

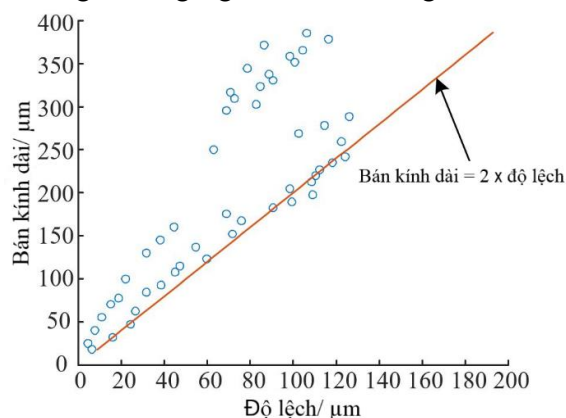
Để xác định mối quan hệ ràng buộc giữa các tham số hình dạng kết cấu vi mô, phương pháp LHS đã được sử dụng để tạo 75 bộ bảng tham số hình dạng vi cấu trúc trong không gian không bị giới hạn và SolidWorks đã được sử dụng để có được 50 bộ tham số hình dạng có thể tạo kết cấu vi mô hình parabol không đối xứng cửa mở hình elip, như thể hiện trong bảng 2. Từ đó có thể thu được mối quan hệ phân phối dữ liệu giữa bán kính dài của EOOPT và độ lệch và độ sâu, như trong các hình 8-9.

Bảng 2. Bảng tham số hình dạng kết cấu vi mô EOOPT

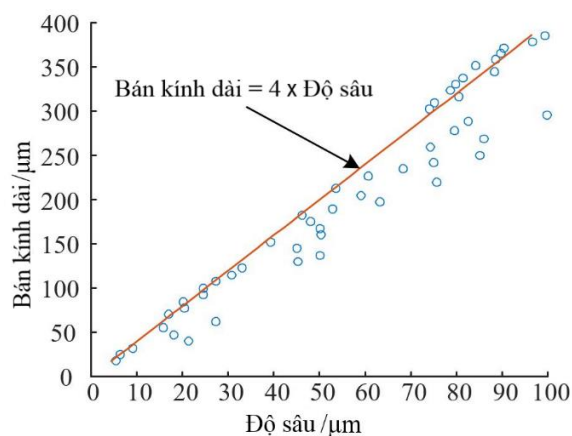
TT	Bán kính dài, μm	Bán kính ngắn, μm	Độ lệch, μm	Độ sâu, μm	TT	Bán kính dài, μm	Bán kính ngắn, μm	Độ lệch, μm	Độ sâu, μm
1	17,5	17,4	6,0	27,2	26	204,9	188,1	98,5	59,2
2	25,0	24,4	4,3	17,0	27	212,4	213,9	108,4	53,5
3	32,5	29,1	15,8	20,4	28	219,9	205,3	110,4	75,6
4	40,0	33,9	7,6	20,1	29	227,4	231,2	112,4	60,8
5	47,5	48,0	24,1	24,5	30	234,9	222,6	118,3	68,4
6	55,0	43,3	10,9	24,5	31	242,4	245,1	124,3	75,1
7	62,5	57,4	26,7	27,2	32	249,9	170,9	62,7	85,2
8	70,0	52,7	15,2	30,7	33	259,5	67,2	122,3	74,2
9	77,5	19,7	18,5	33,1	34	269,1	261,1	102,4	86,1
10	85,0	86,0	31,7	45,2	35	278,6	250,4	114,3	79,5
11	92,5	90,7	38,3	50,2	36	288,2	239,8	126,2	82,7
12	100,0	76,6	21,8	45,1	37	295,2	271,7	68,7	99,8
13	107,5	100,2	44,9	39,4	38	302,2	303,6	82,6	74,1
14	115,0	104,9	47,2	50,3	39	309,1	314,3	72,7	75,3
15	122,5	43,6	59,7	50,2	40	316,1	282,3	70,7	80,6
16	130,0	95,4	31,4	48,1	41	323,1	277,0	84,6	78,6
17	137,5	123,7	54,4	46,2	42	330,1	293,0	90,5	79,8
18	145,0	114,3	38,0	52,9	43	337,1	335,5	88,5	81,5
19	152,5	142,6	71,6	63,2	44	344,1	324,9	78,6	88,3
20	160,0	152,0	44,6	27,2	45	351,1	356,8	100,5	84,3
21	167,5	166,2	75,6	17,0	46	358,1	346,2	98,5	88,5
22	175,0	161,5	68,9	20,4	47	365,1	287,7	104,4	89,8
23	182,5	179,5	90,6	20,1	48	372,0	367,4	86,6	90,5
24	190,0	133,2	99,2	24,5	49	379,0	378,1	116,3	96,7
25	197,5	196,7	109,2	24,5	50	386,0	388,7	106,4	99,5

Từ hình 8, có thể thấy rằng bán kính dài của kết cấu vi mô và độ lệch phải thỏa mãn: bán kính dài $\geq 2 \times$ độ lệch. Từ hình 9 có thể thấy rằng bán kính dài của kết cấu vi mô và độ sâu phải thỏa mãn: bán kính dài $\leq 4 \times$ độ sâu. Ngoài ra, để đảm bảo tính chính xác của việc xác định bán kính dài và bán kính ngắn của kết cấu vi mô EOOPT, một mối quan hệ ràng buộc được thêm vào: bán kính dài $\geq$ bán kính ngắn. Trong nghiên cứu này chọn sử dụng đơn nguyên EOOPT phân tán, để

ngăn chặn phát sinh chồng chéo của các đơn nguyên EOOPT theo hướng trục dọc và trục ngang của lát xilanh, các ràng buộc được thêm vào: khoảng cách dọc trục $> 2 \times$ bán kính dài; khoảng cách ngang $> 2 \times$ bán kính ngắn.



Hình 8. Mối quan hệ giữa bán kính và độ lệch



Hình 9. Mối quan hệ giữa bán kính và độ sâu

Tham số tối ưu bán kính dài, bán kính ngắn, độ lệch và độ sâu của kết vi mô dạng parabol không đối xứng có cửa mở hình elip được chọn là: $A = 10 \div 100 \mu\text{m}$; $B = 10 \div 100 \mu\text{m}$; $C = 0 \div 100 \mu\text{m}$; $D = 5 \div 30 \mu\text{m}$. Khoảng giá trị giữa các đơn nguyên vi mô theo chiều dọc-ngang là: $L_1 = 30 \div 250 \mu\text{m}$; $L_2 = 20 \div 280 \mu\text{m}$.

Sử dụng phương pháp giải kiểm tra SLE-CLHS trong Matlab thiết lập 80 tổ hợp các giá trị tham số kết cấu vi mô EOOPT tiến hành kiểm tra ngẫu nhiên (bảng 3).

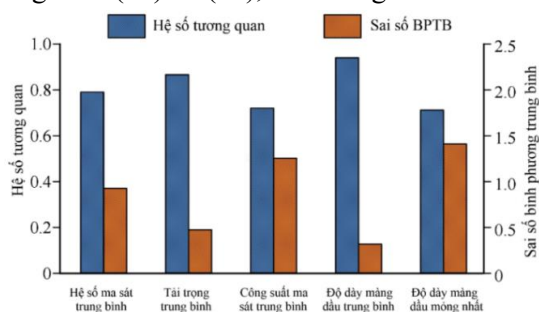
So với phân tích mô phỏng của cặp ma sát lát xilanh-xec măng nguyên mẫu, có thể thấy

Bảng 3. Thiết kế thực nghiệm

TT	Bán kính dài, μm	Bán kính ngắn, μm	Độ lệch, μm	Độ sâu, μm	K/C L_1 , μm	K/C L_2 , μm	TT	Bán kính dài, μm	Bán kính ngắn, μm	Độ lệch, μm	Độ sâu, μm	K/C L_1 , μm	K/C L_2 , μm
1	38,3	27,6	2,9	29,8	156,4	199,4	41	80,8	79,6	8,3	21,7	171,0	266,1
2	44,0	11,9	15,6	19,5	134,4	76,7	42	84,3	78,5	8,6	22,4	176,9	157,0
3	72,1	63,7	9,3	24,6	203,2	127,6	43	87,8	86,4	9,9	23,0	182,7	262,0
4	24,1	19,7	6,1	12,2	79,7	262,0	44	91,3	83,2	10,3	23,7	188,6	168,4
5	86,0	45,7	12,4	22,0	179,8	260,5	45	94,8	88,7	10,7	25,6	200,3	266,6
6	58,0	54,7	7,7	15,8	226,6	260,9	46	98,3	95,5	11,0	26,3	206,1	191,0
7	17,1	15,8	4,5	8,6	52,4	31,7	47	56,3	37,7	12,2	15,4	117,3	262,4
8	31,2	23,6	10,9	27,2	107,1	47,3	48	59,8	49,1	12,6	26,9	124,1	1258,4
9	79,0	36,5	14,0	20,7	191,5	73,2	49	39,7	33,2	13,8	10,9	83,1	262,4
10	93,0	81,9	1,4	28,5	214,9	262,0	50	42,6	42,3	9,7	11,8	103,6	262,7
11	51,0	50,2	10,1	14,0	120,7	260,7	51	18,0	12,9	3,1	8,2	48,9	266,1
12	65,0	32,1	6,9	17,6	168,1	64,2	52	21,5	20,7	4,3	6,4	62,6	264,0
13	13,5	10,9	3,7	6,8	38,7	262,4	53	25,0	22,7	5,5	9,1	76,3	45,4
14	20,6	17,7	8,5	10,4	66,0	35,6	54	32,1	26,6	7,9	13,6	69,4	266,8
15	27,7	25,6	5,3	23,3	93,4	264,8	55	33,9	24,6	6,7	12,7	90,0	262,9
16	34,7	34,3	11,6	25,9	238,3	68,7	56	37,4	29,3	4,7	29,5	96,8	58,5
17	47,5	41,1	13,2	14,9	145,4	82,3	57	10,9	10,2	3,5	5,5	35,3	260,9
18	68,5	59,3	14,8	18,5	197,3	260,9	58	12,7	12,4	5,9	7,3	55,8	265,3
19	75,5	72,8	0,7	20,1	209,0	261,6	59	14,4	14,3	6,3	25,0	42,1	28,7
20	82,5	77,3	2,2	21,4	173,9	154,7	60	19,7	18,3	7,5	24,3	223,7	36,6
21	89,5	68,3	10,5	22,7	185,6	261,4	61	23,3	23,2	9,5	27,6	241,2	46,3
22	96,5	90,9	7,3	26,6	220,7	182,0	62	26,8	22,2	11,5	28,2	217,8	267,0
23	54,5	38,9	8,1	16,7	113,9	77,8	63	30,3	28,1	13,0	28,9	229,5	56,2
24	61,5	47,9	3,3	27,9	127,6	95,9	64	35,6	30,4	13,4	16,1	247,1	60,8
25	41,2	29,8	4,1	11,3	86,5	59,6	65	28,6	27,1	14,2	18,3	235,4	54,1
26	36,5	13,9	4,9	9,5	100,2	27,8	66	16,2	13,4	3,9	14,3	137,2	258,2
27	11,8	10,2	5,7	5,9	31,8	21,0	67	67,6	46,8	14,6	17,0	142,6	262,9
28	18,8	16,8	8,9	13,1	59,2	265,0	68	71,1	54,9	15,0	17,9	153,6	111,7
29	22,4	21,2	9,7	29,2	72,9	43,4	69	76,4	60,4	15,4	19,2	178,3	120,8
30	25,9	18,8	11,3	24,0	162,2	37,6	70	79,9	67,2	5,1	20,3	160,8	134,4
31	29,4	28,7	12,0	25,3	232,5	262,2	71	88,6	71,7	11,8	22,5	184,2	143,5
32	33,0	31,0	12,8	10,0	244,2	266,8	72	97,4	93,2	1,6	24,8	198,8	186,5
33	45,8	43,4	13,6	14,5	139,9	264,8	73	44,9	44,5	2,0	12,0	148,1	1258,2
34	49,3	35,5	14,4	17,2	150,9	266,8	74	46,7	39,9	1,3	13,4	101,9	80,0
35	52,8	52,3	15,2	19,0	110,5	104,9	75	53,7	53,6	2,4	15,6	112,2	107,2
36	63,3	61,5	2,5	16,3	131,0	265,5	76	57,2	51,3	0,2	14,7	115,6	262,9
37	66,8	66,0	0,4	18,1	194,4	265,7	77	58,9	58,1	0,5	15,2	122,4	116,3
38	70,3	57,0	1,1	19,8	212,0	265,5	78	62,4	32,6	0,9	16,5	125,9	65,3
39	73,8	70,6	1,8	20,4	159,3	265,9	79	50,2	34,9	2,7	12,9	105,3	265,7
40	77,3	75,1	7,1	21,1	165,2	150,2	80	65,9	64,9	11,0	17,4	132,7	129,8

rằng sự tồn tại của kết cấu vi mô trên bề mặt của cặp ma sát lót xilanh-xéc măng sẽ làm tăng khả năng sinh nhiệt ma sát nhớt của dầu bôi trơn ở một mức độ nhất định. Tuy nhiên, theo các nghiên cứu trước đây của tác giả, sự gia tăng nhiệt độ của màng dầu do kết cấu vi mô gây ra là rất nhỏ, trong khi nhiệt độ làm việc thực tế của cặp ma sát lót xilanh xec măng tương đối cao. Do vậy, phân tích mô phỏng của cặp ma sát có kết cấu vi mô trong bài báo này không còn xem xét quá trình sinh nhiệt nhớt của dầu bôi trơn và các điều kiện biên mô phỏng phù hợp với các điều kiện của cặp ma sát nguyên mẫu.

Hệ số ma sát trung bình, tải trọng trung bình, công suất ma sát trung bình, độ dày màng dầu trung bình và độ dày màng dầu mỏng nhất của cặp ma sát có kết cấu vi mô EOOPT, thu được bằng phân tích mô phỏng từng nhóm thử nghiệm theo bảng 3, được cho trong bảng 4. Chọn ngẫu nhiên 75 nhóm dữ liệu trong bảng 3 và 4 để thiết lập mô hình Kriging, 05 nhóm còn lại dùng để kiểm định sai số của mô hình Kriging, tính hệ số xác định R^2 và sai số bình phương trung bình của nhóm kiểm định theo công thức (17) và (18), như trong hình 10.



Hình 10. Phân tích sai số của mô hình Kriging

Từ định nghĩa về hệ số tương quan và sai số bình phương trung bình, có thể thấy khi hệ số tương quan càng gần 1 và bình phương trung bình càng gần 0 thì sai số của mô hình càng nhỏ; và mô hình có độ tương quan càng cao khi hệ số tương quan lớn hơn 0,7 và bình phương trung bình không lớn hơn 1,5. Theo hình 10, có thể thấy mô hình Kriging thiết lập trong bài báo này

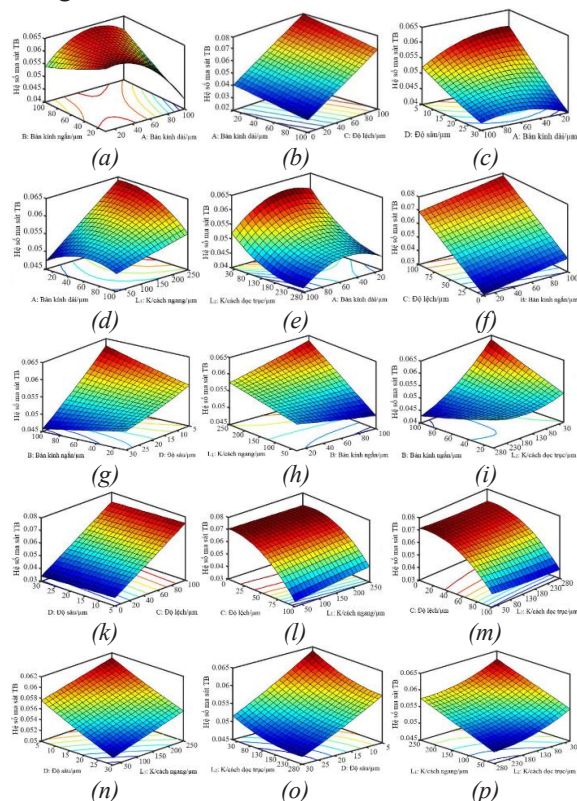
có mối tương quan cao.

Bảng 4. Kết quả tính toán thực nghiệm

TT	Hệ số ma sát trung bình	Tải trọng trung bình	Công suất ma sát trung bình	Độ dày màng dầu trung bình	Màng dầu mỏng nhất	TT	Hệ số ma sát trung bình	Tải trọng trung bình	Công suất ma sát trung bình	Độ dày màng dầu trung bình	Màng dầu mỏng nhất
1	0,0433	338450	46,9	2,81	1,81	41	0,0161	486600	29,5	5,66	2,48
2	0,0348	384700	40,1	3,61	2,37	42	0,0509	494825	43,2	1,31	0,80
3	0,0671	273225	57,7	1,56	0,85	43	0,0160	450550	29,3	5,66	2,59
4	0,0167	511175	31,0	5,74	3,36	44	0,0151	463125	28,0	5,62	1,95
5	0,0168	497300	30,1	5,66	2,47	45	0,0410	124610	42,1	1,27	0,77
6	0,0168	509775	30,7	5,72	3,16	46	0,0151	452425	28,0	5,63	2,26
7	0,0169	477750	30,4	5,57	1,77	47	0,0165	504350	30,4	5,70	2,93
8	0,0523	308175	50,7	1,36	0,76	48	0,0163	498200	30,0	5,68	2,73
9	0,0707	259275	30,0	1,29	0,31	49	0,0772	219178	54,3	1,85	0,89
10	0,0165	499475	29,3	5,66	2,55	50	0,0631	151165	47,0	1,38	0,76
11	0,0169	492005	30,4	5,70	2,83	51	0,0398	353450	44,5	2,38	0,99
12	0,0159	493800	29,5	5,67	2,71	52	0,0166	511650	31,0	5,74	3,36
13	0,0403	373475	43,3	3,11	1,16	53	0,0582	399700	50,4	1,99	0,84
14	0,0664	260775	54,4	1,86	0,85	54	0,0537	354900	49,1	2,63	1,20
15	0,0584	296838	44,7	1,34	0,95	55	0,0459	234173	43,6	2,78	0,77
16	0,0167	480725	30,6	5,60	1,55	56	0,0784	125175	59,0	1,33	0,83
17	0,0515	310925	51,0	1,61	0,84	57	0,0172	512575	32,4	5,37	3,31
18	0,0165	505600	30,4	5,71	2,97	58	0,0423	379250	44,4	2,79	1,07
19	0,0163	502725	30,1	5,70	2,98	59	0,0161	502475	29,9	5,66	2,25
20	0,0574	288725	46,2	1,52	0,81	60	0,0252	2428700	36,6	4,15	2,71
21	0,0560	262630	49,2	1,31	0,64	61	0,0315	424450	39,0	3,77	2,44
22	0,0633	241110	38,3	1,26	0,76	62	0,0408	301350	45,5	3,15	2,48
23	0,0580	255000	50,4	1,39	0,79	63	0,0597	171648	49,4	1,50	0,75
24	0,0401	131448	36,5	1,30	0,80	64	0,0470	202718	45,4	2,34	0,79
25	0,0522	176065	49,1	1,31	0,81	65	0,0430	275675	44,8	1,77	0,94
26	0,0397	156370	39,5	1,21	0,24	66	0,0317	449000	39,0	3,73	1,33
27	0,0514	220278	51,1	1,73	0,83	67	0,0164	500500	30,3	5,69	2,87
28	0,0369	311050	41,9	3,49	2,50	68	0,0155	466775	28,7	5,64	2,32
29	0,0169	503325	31,0	5,26	1,87	69	0,0439	186453	40,0	1,26	0,76
30	0,0164	509775	30,6	5,72	3,21	70	0,0265	115733	29,8	1,21	0,41
31	0,0516	199838	48,1	2,21	0,97	71	0,0502	84095	41,2	1,31	0,81
32	0,0607	196013	45,4	1,67	1,04	72	0,0402	125828	37,5	1,26	0,76
33	0,0166	509350	30,7	5,72	3,14	73	0,0166	510500	30,8	5,72	3,21
34	0,0543	193533	49,0	1,68	0,87	74	0,0436	245673	44,0	1,30	0,79
35	0,0452	144088	41,9	1,29	0,79	75	0,0570	174913	52,6	1,31	0,81
36	0,0163	493675	30,0	5,68	2,74	76	0,0164	498475	30,2	5,69	2,77
37	0,0164	505975	30,3	5,71	2,99	77	0,0368	293550	43,5	2,22	1,29
38	0,0164	506500	30,3	5,71	3,09	78	0,0431	167958	39,1	1,23	0,70
39	0,0178	497100	31,4	5,10	2,43	79	0,0654	234265	55,7	1,66	0,85
40	0,0559	272775	51,9	1,59	0,83	80	0,0162	490675	29,7	5,67	2,56

3.2.3 Phân tích kết quả và thảo luận

Theo mô hình Kriging đã thiết lập, sơ đồ tương tác hai yếu tố được sử dụng để phân tích ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau đến hệ số ma sát của cặp ma sát lót xanh/xec măng, như trong hình 11.



Hình 11. Phân tích ảnh hưởng của tham số vi mô đối với hệ số ma sát

Từ hình 11, có thể thấy rằng khi hệ số ma sát trung bình được chọn làm hàm mục tiêu, thứ tự ảnh hưởng: Độ lệch > khoảng cách dọc trục > bán kính dài > bán kính ngắn > khoảng cách ngang > độ sâu; theo cách tương tự, khi lấy khả năng chịu tải hay tải trọng trung bình làm mục tiêu, thứ tự ảnh hưởng: Độ lệch > khoảng cách dọc trục > bán kính ngắn > bán kính dài > độ sâu > khoảng cách ngang; khi công suất ma sát trung bình được lấy làm mục tiêu, thứ tự ảnh hưởng: Độ lệch > bán kính dài > bán kính ngắn > khoảng cách dọc trục > khoảng cách ngang > độ sâu; khi lấy độ dày màng dầu trung bình làm mục tiêu, thứ tự ảnh hưởng: Độ lệch > khoảng cách dọc

trục > bán kính ngắn > bán kính dài > độ sâu > khoảng cách ngang; khi độ dày màng dầu mỏng nhất được lấy làm mục tiêu, thứ tự ảnh hưởng: Độ lệch > khoảng cách dọc trục > bán kính ngắn > độ sâu > bán kính dài > khoảng cách ngang.

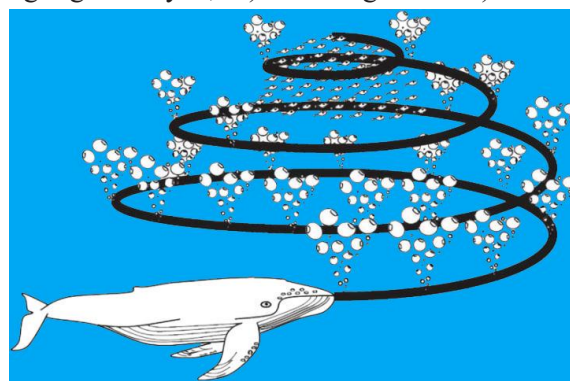
4 Thiết kế tối ưu hóa tham số kết cấu vi mô cặp ma sát lót xanh-xec măng

Thuật toán tối ưu WOA là phương pháp tìm kiếm thông minh do Seyedali Mirjalili và Andrew Lewis phát triển năm 2016, dựa trên hành vi xã hội và tập tính săn mồi của loài cá voi lưng gù.

4.1 Nguyên lý thuật toán tối ưu hóa cá voi

Năm 2016, Seyedali Mirjalili căn cứ vào quá trình săn mồi của cá voi lưng gù, đã đề xuất một thuật toán tối ưu hóa toàn cục cá voi (WOA) [22], và thể hiện hành vi săn mồi này bằng một phương pháp mô hình toán học bao vây con mồi, kiếm ăn bằng lưới bong bóng xoắn ốc và tìm kiếm con mồi (hình 9).

Các hành vi săn mồi của cá voi cũng là yếu tố chính trong giải thuật này, bao gồm: i) Theo dõi và tiếp cận con mồi; ii) Truy đuổi, bao vây và quấy nhiễu con mồi cho đến khi con mồi ngừng di chuyển; iii) Tấn công con mồi).



Hình 12. Sơ đồ săn mồi bằng lưới bong bóng xoắn ốc của cá voi lưng gù

a. Giai đoạn bao vây con mồi

Sau khi xác định được cá thể tìm kiếm tốt nhất, các cá thể khác sẽ cập nhật vị trí của mình theo cá thể tìm kiếm tốt nhất đó. Hành vi này được thể hiện bởi các biểu thức sau:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (29)$$

$$\vec{X}^*(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (30)$$

Trong đó: t – vòng lặp hiện tại; $\vec{A}$, $\vec{C}$ – các vector hệ số; $\vec{X}^*(t)$ – vector vị trí tốt nhất đạt được; $\vec{X}(t)$ là vector vị trí. Quan trọng ở đây là $\vec{X}^*$ cần được cập nhật trong mỗi $(t+1)$ lần lặp nếu có kết quả tối ưu hơn.

Vector $\vec{A}$ và $\vec{C}$ được tính như sau:

$$\vec{A} = 2\vec{a}r - \vec{a} \quad (31)$$

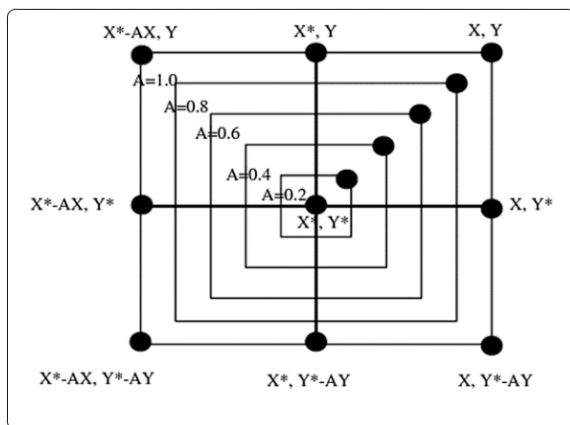
$$\vec{C} = 2\vec{r} \quad (32)$$

Trong đó: $\vec{r}$ – vector ngẫu nhiên trong khoảng $[0,1]$; $\vec{a}$ – hệ số chỉ định có độ dài modul giảm tuyến tính từ 2 về 0 trong quá trình tính toán.

b. Giai đoạn săn mồi

Quá trình săn mồi của cá voi lưng gù được thể hiện bằng hai cơ chế chính:

- *Cơ chế thu hẹp vòng vây*: Hành vi này có thể đạt được bằng cách giảm giá trị của a trong phương trình (31). Giá trị của a giảm từ 2 xuống 0 trong quá trình lặp. Do đó, A sẽ nhận giá trị trong khoảng $[-a; a]$. Chính vì vậy, vị trí mới có thể được định nghĩa bất cứ nơi nào giữa vị trí ban đầu và các vị trí tốt nhất hiện tại.



Hình 13. Vị trí tối ưu trong không gian 2D [18]

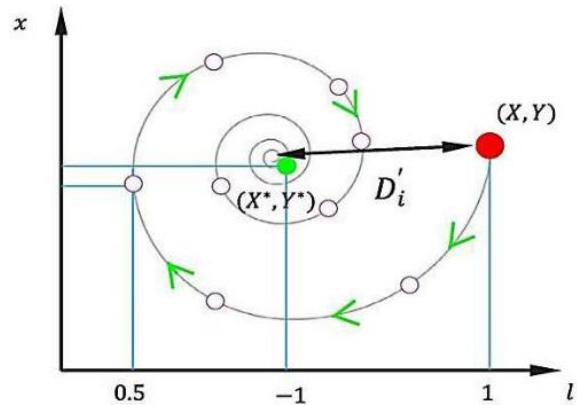
Cơ chế cập nhật vị trí theo hình xoắn ốc: Ngoài việc cập nhật vị trí so với con mồi theo

quỹ đạo hình tròn, cá voi lưng gù còn tiếp cận con mồi theo quỹ đạo hình xoắn ốc. Phương trình hình xoắn ốc như sau:

$$\vec{X}(t+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (33)$$

$$D' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (34)$$

Trong đó: D' – chỉ ra khoảng cách của con cá voi thứ i tới con mồi; b – hằng số xác định hình dạng của đường xoắn ốc lô-ga-rít; l – số ngẫu nhiên nằm trong đoạn $[-1, 1]$.



Hình 14. Cập nhật vị trí theo hình xoắn ốc [15]

Giả định rằng có xác suất 50% cá voi lưng gù sẽ lựa chọn một trong hai cơ chế chuyển động trình bày ở các biểu thức (29), (30), (33), (34), ta có được:

Phương trình cập nhật vị trí của cá voi lưng gù:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & p \leq 0,5 \\ D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & p > 0,5 \end{cases} \quad (35)$$

Với: p – số ngẫu nhiên nằm trong khoảng $[0; 1]$

c. Giai đoạn tấn công con mồi:

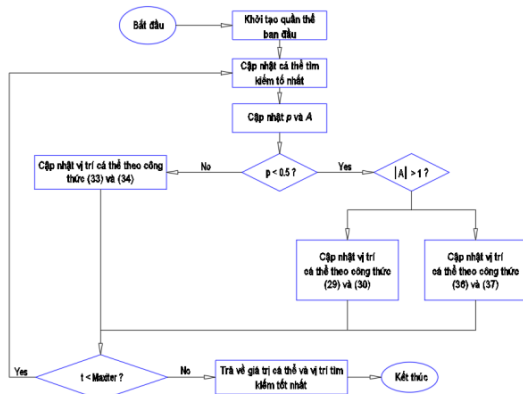
Khi tấn công con mồi, mô hình toán học được thể hiện như sau:

$$\vec{E} = |\vec{C} \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{X}| \quad (36)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (37)$$

Trong đó: $\vec{X}_{\text{rand}}$ – vector ngẫu nhiên (cá voi ngẫu nhiên) trong quần thể.

4.2 Thiết lập mô hình tối ưu



Hình 15. Lưu đồ giải thuật của thuật toán tối ưu WOA

$$\max F(E) = \lambda'_1 \frac{F_h(E)}{F_{h0}} + \lambda'_2 \frac{F_N(E)}{F_{N0}} + \lambda'_3 \frac{F_{W0}}{F_W(E)} + \lambda'_4 \frac{F_{ha}(E)}{F_{ha0}} + \lambda'_5 \frac{F_{f0}}{F_f(E)}$$

$$S.T \begin{cases} E = [E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6]^T \\ 10 \leq E_1 \leq 100 \\ 10 \leq E_2 \leq 100 \\ 0 \leq E_3 \leq 100 \\ 5 \leq E_4 \leq 30 \\ 30 \leq E_5 \leq 250 \\ 20 \leq E_6 \leq 280 \\ E_1 \geq E_2 \\ E_1 \geq 2E_3 \\ E_1 \leq 4E_4 \\ E_5 > 2E_1 \\ E_6 > 2E_2 \end{cases} \quad (38)$$

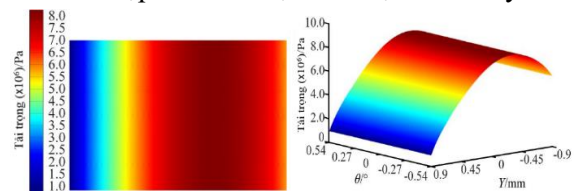
Trong đó: $F_h(E)$ – độ dày màng dầu nhỏ nhất của cặp ma sát kết cấu vi mô, μm ; $F_N(E)$ – khả năng chịu tải trung bình của cặp ma sát kết cấu vi mô, Pa ; $F_W(E)$ – công suất ma sát trung bình của cặp ma sát kết cấu vi mô, W ; $F_{ha}(E)$ – độ dày màng dầu trung bình của cặp ma sát kết cấu vi mô, μm ; $F_f(E)$ – hệ số ma sát trung bình của cặp ma sát kết cấu vi mô, μm ; F_{h0} – độ dày màng dầu nhỏ nhất của cặp ma sát nguyên mẫu, μm ; F_{N0} – khả năng chịu tải trung bình của cặp ma sát nguyên mẫu, Pa ; F_{W0} – công suất ma sát trung bình của cặp ma sát nguyên mẫu, W ; F_{ha0} – độ dày màng dầu trung bình của cặp ma sát nguyên mẫu, μm ;

F_{f0} – hệ số ma sát trung bình của cặp ma sát nguyên mẫu, μm ; $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6$ – lần lượt là tham số kết cấu vi mô $a, b, c, d, L1, L2$; $\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \lambda'_4, \lambda'_5$ – các hệ số trọng số, lần lượt chọn bằng 0,4; 0,2; 0,2; 0,1; 0,1.

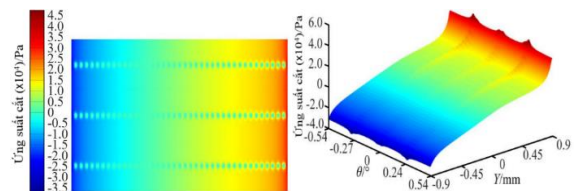
4.3 Kết quả và thảo luận

Mô hình toán học tối ưu hóa đã được thiết lập thông qua thuật toán tối ưu hóa cá voi, cuối cùng thu được tham số kết cấu vi mô EOOPT tối ưu: Bán kính dài 15,3 μm ; bán kính ngắn 14,9 μm ; độ lệch 6,5 μm ; độ sâu 7,7 μm ; khoảng cách L_1 45,5 μm ; và khoảng cách L_2 261,2 μm .

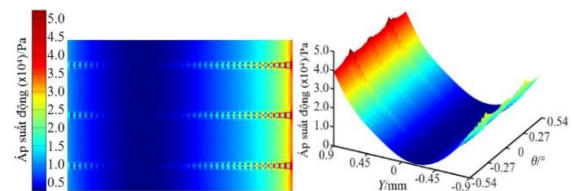
Căn cứ tham số tối ưu của kết cấu vi mô EOOPT, xây dựng lại mô hình trên SolidWorks và tiến hành phân tích mô phỏng trên Ansys Fluent, đưa kết quả phân tích để tính toán lực ma sát, hệ số ma sát, tải trọng và công suất ma sát. Khi màng dầu của cặp ma sát lót xilanh-xéc măng với kết cấu vi mô EOOPT tối ưu là nhỏ nhất, biểu đồ đám mây về khả năng chịu tải, ứng suất cắt và áp suất động bề mặt màng dầu bôi trơn của cặp ma sát được thể hiện dưới đây.



Hình 16. Biểu đồ tải trọng



Hình 17. Biểu đồ khả năng chịu tải



Hình 18. Biểu đồ áp suất động

màng dầu mỏng nhất

của cặp ma sát có kết cấu vi mô tối ưu

Từ các hình 16-18, có thể thấy rằng sự tồn tại của kết cấu vi mô có ảnh hưởng nổi bật hơn đối với ứng suất cắt và áp suất thủy động, nhưng không quá rõ rệt trong biểu đồ đám mây về khả năng chịu tải. Điều này chủ yếu do khả năng chịu tải là tổng hợp của áp suất thủy động và áp suất thủy tĩnh, mà giá trị áp suất tĩnh tương đối lớn, khiến cho hiệu ứng áp suất động của kết cấu vi mô không quá rõ ràng trong biểu đồ đám mây của khả năng chịu tải, nhưng khả năng chịu tải chính đã xuất hiện sự gia tăng.

Từ hình 17 cho thấy, so với cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng nguyên mẫu, mặc dù ứng suất cắt tăng nhanh ở một bộ phận kết cấu vi mô, nhưng ứng suất cắt giảm trong toàn bộ cặp ma sát. Từ hình 18, so với cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng nguyên mẫu, dầu bôi trơn chảy qua kết cấu vi mô để tạo ra hiệu ứng áp suất động mạnh hơn, điều này phù hợp với lý thuyết kết cấu vi mô làm tăng khả năng chịu lực cho màng dầu.

Thay dữ liệu từ các hình 16-18 vào các công thức (9)-(12) thu được: Hệ số ma sát trung bình 0,0166; tải trọng trung bình 514128 Pa; công suất ma sát trung bình 31,1 W; độ dày màng dầu trung bình 5,74 μm ; và độ dày màng dầu mỏng nhất 3,43 μm của cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng với kết cấu vi mô tối ưu ở góc quay 720°.

So sánh phân tích hệ số ma sát trung bình, tải trọng trung bình, công suất ma sát trung bình, độ dày màng dầu trung bình và độ dày màng dầu mỏng nhất thu được khi tiến hành mô phỏng nguyên mẫu, kết cấu vi mô không được tối ưu, kết cấu vi mô dự đoán và cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng với kết cấu vi mô tối ưu được thể hiện trong bảng 5. Để việc so sánh kết quả ở bảng 5 được trực quan hơn, xây dựng biểu đồ so sánh kết quả hoạt động của cặp ma sát như hình 19.

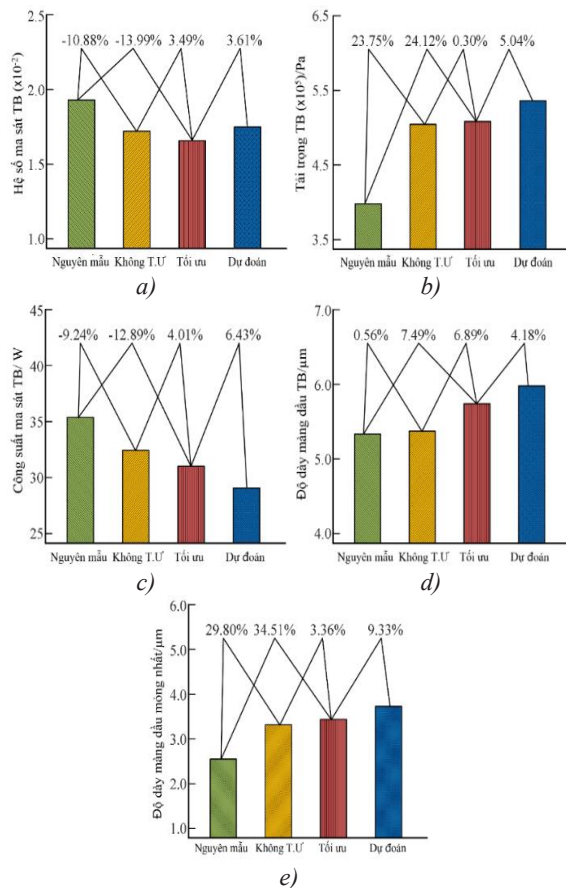
Có thể thấy từ bảng 5 và hình 19, so với cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng nguyên mẫu, hệ số ma sát trung bình của cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng với tham số kết cấu vi mô dạng parabol không đối xứng của mở hình elip không được tối

ưu và tham số kết cấu vi mô được tối ưu tương ứng giảm 10,88% và 13,99%, khả năng chịu tải trung bình tương ứng tăng 23,75% và 24,12%, công suất ma sát trung bình tương ứng giảm 9,24% và 12,89%, độ dày màng dầu trung bình tương ứng tăng 0,56% và 7,49%, độ dày màng dầu mỏng nhất tương ứng tăng 29,80% và 34,51%. So sánh với kết quả phân tích mô phỏng hiệu suất của cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng với tham số kết cấu vi mô tối ưu, sai số của mô hình tối ưu về hệ số ma sát trung bình, khả năng chịu tải trung bình, công suất ma sát trung bình, độ dày màng dầu trung bình và độ dày màng dầu mỏng nhất lần lượt là 3,61%, 5,04%, 6,43%, 4,18% và 9,33%.

So với tham số kết cấu vi mô chưa tối ưu, hệ số ma sát trung bình và công suất ma sát của cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng với kết cấu vi mô tối ưu lần lượt giảm 3,49% và 4,01%, đồng thời khả năng chịu tải trung bình, độ dày màng dầu trung bình và độ dày màng dầu mỏng nhất lần lượt tăng 0,30%, 6,89% và 3,63%. Nó không chỉ chứng minh hiệu quả của kết cấu vi mô trong việc cải thiện hiệu suất ma sát của cặp ma sát lót xi lanh-xéc măng, mà còn chứng minh tầm quan trọng của thiết kế tối ưu hóa để khai thác triệt để hiệu quả của kết cấu vi mô nhằm cải thiện hơn nữa các đặc tính bôi trơn của các cặp ma sát.

Bảng 5. Bảng so sánh hiệu suất

Các thông số	Cặp ma sát nguyên mẫu	Cặp ma sát kết cấu vi mô				
		Không tối ưu	Giá trị tối ưu nhất	Tỷ lệ tối ưu	Giá trị dự đoán	Sai số mô hình
Hệ số ma sát trung bình (% thay đổi)	0,0193	0,0172 (-10,88%)	0,0166 (-13,99%)	3,49%	0,0172	3,61%
Tải trọng trung bình (% thay đổi)	414205	512575 (+23,75%)	514128 (+24,12%)	0,30%	540033	5,04%
Công suất ma sát trung bình (% thay đổi)	35,7	32,4 (-9,24%)	31,1 (-12,89%)	4,01%	29,1	6,43%
Độ dày màng dầu trung bình (% thay đổi)	5,34	5,37 (+0,56%)	5,74 (7,49%)	6,89%	5,98	4,18%
Độ dày màng dầu mỏng nhất (% thay đổi)	2,55	3,31 (+29,80%)	3,43 (+34,51%)	3,63%	3,75	9,33%



Hình 19. Đồ thị so sánh tính năng cặp ma sát:
a) Hệ số ma sát trung bình; b) Tải trọng trung bình; c) Công suất ma sát trung bình; d) Độ dày màng dầu trung bình; e) Độ dày màng dầu mỏng nhất

5 Kết luận

Thông qua mô hình tối ưu hóa đa mục tiêu dựa trên mô hình Kriging kết hợp với thuật toán tối ưu hóa cá voi WOA, thu được tham số kết cấu vi mô EOOPT bề mặt cặp ma sát lót xilanh-xéc măng tối ưu lần lượt: Bán kính dài 15,3 μm ; bán kính ngắn 14,9 μm ; độ lệch 6,5 μm ; độ sâu 7,7 μm ; khoảng cách trục ngang 45,5 μm ; và khoảng cách trục dọc 261,2 μm ;

So với cặp ma sát lót xilanh-xéc măng nguyên mẫu, hệ số ma sát trung bình của cặp ma sát lót xilanh-xéc măng không có kết cấu vi mô được tối ưu hóa và kết cấu vi mô tối ưu lần lượt giảm 10,88% và 13,99%; tải trọng trung bình lần lượt tăng 23,75% và 24,12%; công suất ma sát trung bình lần lượt giảm 9,24% và 12,89%; độ dày màng dầu trung bình lần lượt tăng 0,56% và 7,49%, độ dày màng dầu tối thiểu lần lượt tăng 29,80% và 34,51%.

Nghiên cứu không chỉ chứng minh hiệu quả của kết cấu vi mô nói chung và kết cấu vi mô dạng parabol không đối xứng của mô hình elip trong việc cải thiện hiệu suất ma sát của cặp ma sát lót xilanh-xéc măng, mà còn chứng minh tầm quan trọng của thiết kế tối ưu hóa để khai thác triệt để khả năng của kết cấu vi mô nhằm cải thiện hơn nữa đặc tính bôi trơn các cặp ma sát.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Đăng Bình, Phan Quang Thế. Ma sát, mòn và bôi trơn trong kỹ thuật. Tập 1, 2. NXB Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2006, 210 tr.
2. Nguyễn Anh Tuấn, Bùi Văn Gôn. Lý thuyết bôi trơn ướt. Tập 1, 2. NXB Xây dựng Hà Nội, 2006, 86 tr.
3. Ezhilmaran V., et al. Investigation on Generation of Laser Assisted Dimples on Piston Ring Surface and Influence of Dimple Parameters on Friction [J]. *Surface and Coatings Technology*, 335, 2018, PP. 314-326.
4. Fiaschi G et al. Tribological Response of Laser-Textured Steel Pins with Low-Dimensional Micrometric Patterns [J]. *Tribology International*, 149(5):105548, 2019.
5. Mirjalili S, Lewis A. The Whale Optimization Algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 95(5), 2016, PP. 51-67.
6. Le Van Loi, Xu Ping, Yu Ying Hua. Research Status on Surface Texture in Lubrication and Friction Reduction of Tribological Systems. *Mining Industry Journal*, (5), 2022, PP. 40-48.

7. **Murat K. et al.** Friction And Wear Studies Between Cylinder Liner And Piston Ring Air Using Taguchi Design Method [J]. *Advances in Engineering Software*, 42(3): 59503, 2011.
8. **Tang Ling, He Pengfei, Ma Guozheng, et al.** Research Progress on Surface Performance Enhancement of Cylinder Liner-Piston Ring Friction Pair [J]. *Surface Technology*, 48(08), 2019, PP. 185-198.
9. **Tianchi Qin, Chiharu Tadokoro, Shinya Sasaki.** The Effects of Surface Texturing on Friction Performance under Reciprocating Sliding Condition [J]. *Key Engineering Materials*, 739, 2017, PP. 36-41.
10. **Venkateswara Babu P, Ismail Syed, Satish Ben Beera.** Influence of Positive Texturing on Friction and Wear Properties of Piston Ring-Cylinder Liner Tribo Pair Under Lubricated Conditions [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 71(04), 2019, PP. 515-524.
11. **Jonathon K. Schuh, Randy H. Ewoldt.** Asymmetric Surface Textures Decrease Friction with Newtonian Fluids in Full Film Lubricated Sliding Contact [J]. *Tribology International*, 19, 2016, PP. 490 - 498.
12. **Ye Nianye, Mu Jianhua, Huang Zhongwen.** Comparative Experimental Study on Friction Power of Naturally Aspirated Gasoline Engine [J]. *Vehicle Engine*, (2), 2013, PP. 10-13.
13. **Lophaven S.N., Nielsen. H.B, Sondergraard J.** DACE-A Matlab Kriging Toolbox. *Technical University of Denmark*, 2002.
14. **温诗铸,黄平.**摩擦学原理[D].北京,清华大学出版社, 2008.
15. **于英华,杨帅彬,曹茂林,沈佳兴,阮文新.**滑动轴承表面椭圆偏置类抛物线微织构研究[J/OL]. *表面技术*, 051(009), 2022, 131-167.
16. **赵亚丽,张斯琪,鲁文茜,陈冲,魏莉.**基于多指标权重分析和正交设计法优选如意金黄散复方提取工艺[J]. *中国新药杂志*, 30(15), 2021, 1428-1434.
17. **童文俊,王明环,邱国志等.**摩擦副表面气膜屏蔽微细电解加工微织构及摩擦性能分析[J]. *中国机械工程*, 31(11), 2020, 1331-1336.
18. **佟德辉,尹必峰,徐波等.**缸套表面分区差异织构的润滑摩擦性能研究[J]. *内燃机学报*, 39(05), 2021, 451-458.
19. **徐阳阳,韩晓光,徐久军等.**激光表面织构微坑形貌及面积占有率对氮化气缸套摩擦学性能的影响[J]. *中国表面工程*, 34(04), 2021, 149-157.
20. **李岩霖,吉华,王天豪,李倩,冯东林.**基于 CFD 的均布圆形微孔活塞环数值分析[J]. *机械*, 46(06), 2019, 18-22.
21. **马旋.**表面织构参数对活塞/缸套摩擦副润滑行为的影响及优化方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2018.
22. **Mirjalili. S, lewis. A.** The Whale Optimization Algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 95(5), 2016, PP. 51-67.
23. **王洪涛,朱华.**圆柱形微凹坑排布形式对织构表面摩擦性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 34(04), 2014, 414-419.