

Lập trình phân tích độ nhạy trong tối ưu hóa mô phỏng quỹ đạo tàu

■ **TS. TRẦN KHÁNH TOÀN** - Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TÓM TẮT: Trong mô hình toán có nhiều biến đầu vào, phân tích độ nhạy của các biến đầu vào là bước quan trọng đảm bảo độ tin cậy của mô hình toán. Để tối ưu hóa mô phỏng quỹ đạo tàu thì trong mô hình toán cần thiết phải phân tích độ nhạy để lựa chọn nhóm các hệ số thủy động lực học (TĐLH) có độ nhạy lớn nhất. Trong bài báo, tác giả áp dụng kỹ thuật phân tích độ nhạy trong mô hình toán lập trình tối ưu hóa quỹ đạo cho mô hình tàu thực Esso Bernicia 193000 DWT.

TỪ KHÓA: Phân tích độ nhạy, hệ số thủy động lực học, tối ưu hóa, quỹ đạo tàu, điều động tàu, mô phỏng.

ABSTRACT: In the mathematical model with multiple input variables, the sensitivity analysis of the input variables is an important step to ensure the reliability of the mathematical model. In order to optimize the ship trajectory simulation, the sensitivity analysis should be performed in the mathematical model to select the group of the most sensitive hydrodynamic coefficients. In this paper, the author applied the sensitivity analysis method in mathematics model of ship manoeuvring programming in order to optimize the ship trajectory of Esso Bernicia 193000DWT tanker model.

KEYWORDS: Sensitivity Analysis, hydrodynamic coefficients, optimization, ship trajectory, ship manoeuvring, simulation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Từ kết quả nghiên cứu của Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ GTVT về "Nghiên cứu ứng dụng các thuật toán tối ưu hóa để nâng cao độ chính xác dự đoán quỹ đạo tàu của các hệ thống mô phỏng hàng hải", Mã số DT154021 do tác giả làm chủ nhiệm đề tài [1] cho thấy: Vì phải tối ưu hóa số lượng lớn các hệ số TĐLH và mức độ ảnh hưởng của các hệ số tới hàm mục tiêu là không giống nhau, do đó cần thiết phải áp dụng thuật toán để phân tích và lựa chọn số lượng nhất định của một số các hệ số có mức độ ảnh hưởng lớn nhất tới hàm mục tiêu. Ngoài ra, do tính phức tạp của mô hình toán chương trình lập trình, nên việc giảm số lượng hệ số TĐLH sẽ tăng tính hội tụ khi tính toán giá trị tối ưu của các hệ số TĐLH, giảm số lượng các bước lặp (iteration), kết quả

là hàm mục tiêu sẽ nhanh chóng đạt giá trị cực tiểu, giảm thời gian tính toán của chương trình lập trình. Trên cơ sở đó, tác giả đã nghiên cứu và áp dụng kỹ thuật phân tích độ nhạy để lập trình chương trình phân tích, lựa chọn bộ hệ số TĐLH có ảnh hưởng lớn nhất tới hàm mục tiêu, là cơ sở quan trọng cho các bước tiếp theo trong lập trình chương trình mô phỏng và tối ưu hóa quỹ đạo tàu.

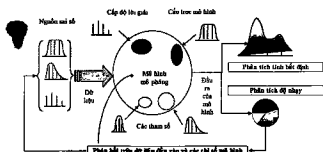
2. TỔNG QUAN VỀ KỸ THUẬT PHÂN TÍCH ĐỘ NHẠY [2,3]

Kỹ thuật phân tích độ nhạy là kỹ thuật phân tích để tính bất định trong đầu ra của một mô hình toán học hay hệ thống (mô hình số hoặc các loại mô hình khác) có thể được phân bố cho các nguồn bất định khác trong đầu vào của mô hình. Sơ đồ mô hình phân tích độ nhạy được khái quát như trong Hình 2.1.

Trong nội dung nghiên cứu, tác giả giới thiệu và áp dụng phương pháp cục bộ (Local Methods): Khảo sát sự biến thiên của hàm hệ thống Y đối với từng biến đầu vào X_i tại lân cận giá trị cố định ban đầu x^0 :

$$\left| \frac{\partial Y}{\partial X_i} \right|_{x^0} \quad (1)$$

Độ nhạy sẽ được lượng hóa thông qua sự thay đổi giá trị hàm hệ thống Y khi giá trị các biến X_i thay đổi quanh lân cận giá trị cố định ban đầu x^0 .



Hình 2.1: Sơ đồ mô hình phân tích độ nhạy

3. MÔ HÌNH TOÁN LẬP TRÌNH MÔ PHỎNG VÀ TỐI ƯU HÓA QUỹ ĐẠO TÀU

(i) Hệ phương trình vị phân chuyển động tàu mặt nước (3 bậc tự do) ở dạng không thứ nguyên (áp dụng cho mô hình tàu Esso Bernicia 193000 DWT [13]) có dạng như sau [4,5,6,7,12]:

$$\begin{aligned} -vr &= gX'' \\ +ur &= gY'' \\ (L)2 &= gLN'' \end{aligned} \quad (2)$$

Vế phải của các phương trình trong hệ phương trình (1) là tổng hợp các thành phần lực và mô-men thủy động, biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned}
 g.X'' &= X_{\alpha}'' + \frac{1}{2} X_{|\alpha|}'' |\alpha| + \frac{1}{2} X_{\omega}'' \omega + \frac{1}{2} X_{\omega|\alpha}'' \omega|\alpha| \\
 &+ \frac{1}{2} X_{c|c|}'' c|c| + \frac{1}{2} X_{c|\alpha}'' c|\alpha| + \frac{1}{2} X_{\alpha c}'' \alpha c + gT(1-id) \\
 g.Y'' &= Y_{\alpha}'' + \frac{1}{2} Y_{|\alpha|}'' |\alpha| + \frac{1}{2} Y_{\omega}'' \omega + \frac{1}{2} Y_{\omega|\alpha}'' \omega|\alpha| + \frac{1}{2} Y_{c|c|}'' c|c| + \frac{1}{2} Y_{c|\alpha}'' c|\alpha| \\
 &+ \frac{1}{2} Y_{\alpha c}'' \alpha c + \frac{1}{2} Y_{\alpha\omega}'' \alpha\omega + \frac{1}{2} Y_{\omega\alpha}'' \omega\alpha + \frac{1}{2} Y_{\alpha c\omega}'' \alpha c\omega + \frac{1}{2} Y_{\omega c\alpha}'' \omega c\alpha \\
 &+ \frac{1}{2} Y_{\alpha\omega c}'' \alpha\omega c + \frac{1}{2} Y_{\omega\alpha c}'' \omega\alpha c + \frac{1}{2} Y_{c\alpha\omega}'' c\alpha\omega + \frac{1}{2} Y_{\omega c\alpha}'' \omega c\alpha \\
 &+ \frac{1}{2} Y_{\alpha c\omega}'' \alpha c\omega + \frac{1}{2} Y_{\omega c\alpha}'' \omega c\alpha + \frac{1}{2} Y_{c\alpha\omega}'' c\alpha\omega + \frac{1}{2} Y_{\omega c\alpha}'' \omega c\alpha \\
 g.L.N'' &= \frac{1}{2} N_{T'} T' + \frac{1}{2} N_{\omega}'' \omega + \frac{1}{2} N_{|\alpha|}'' |\alpha| + \frac{1}{2} N_{c|c|}'' c|c| + \frac{1}{2} N_{\alpha}'' \alpha \\
 &+ \frac{1}{2} N_{c|\alpha}'' c|\alpha| + \frac{1}{2} N_{\alpha c}'' \alpha c + \frac{1}{2} N_{\alpha\omega}'' \alpha\omega + \frac{1}{2} N_{\omega\alpha}'' \omega\alpha + \frac{1}{2} N_{\alpha c\omega}'' \alpha c\omega \\
 &+ \frac{1}{2} N_{\omega c\alpha}'' \omega c\alpha + \frac{1}{2} N_{c\alpha\omega}'' c\alpha\omega + \frac{1}{2} N_{\omega c\alpha}'' \omega c\alpha + \frac{1}{2} N_{c\alpha\omega}'' c\alpha\omega
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Trong đó: $X_{\alpha}, X_{|\alpha|}, \dots, Y_{\alpha}, Y_{|\alpha|}, \dots, N_{T'}, N_{\omega}, \dots, N_{c|c|}, N_{c|\alpha}, \dots$ - Các hệ số TDLH của tàu.

(ii) Xây dựng hàm mục tiêu trong hai phép thử tàu thực nghiệm điển hình [1, 12]:

$$F_{obj} = \left(\sum_{i=1}^N f_i(\alpha_i) \right)^2 = \left(\sum_{i=1}^N \Delta\psi_i^2 \right)^2 \tag{4}$$

- Phép thử Turning Circle:
 Trong đó: $f_i(\alpha) = \Delta\psi_i$ - Hàm sai lệch góc xoay mô phỏng và thực nghiệm tại điểm đo thứ (i); $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N]^T$ - Ma trận của $M (M=35)$ hệ số TDLH của tàu ảnh hưởng đến giá trị độ sai lệch góc xoay mô phỏng và thực nghiệm; N - Số điểm đo thực nghiệm.

$$F_{obj} = \left(\sum_{i=1}^N f_i(\alpha_i) \right)^2 = \left(\sum_{i=1}^N \Delta\psi_i^2 \right)^2 \tag{5}$$

- Phép thử Zigzag:
 Trong đó: $f_i(\alpha) = \Delta\psi_i$ - Hàm sai lệch góc xoay mô phỏng và thực nghiệm tại điểm đo thứ (i); $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N]^T$ - Ma trận của $M (M=35)$ hệ số TDLH của tàu ảnh hưởng đến giá trị độ sai lệch góc xoay mô phỏng và thực nghiệm; N - Số điểm đo thực nghiệm.

4. ÁP DỤNG KỸ THUẬT PHÂN TÍCH ĐỘ NHAY TRONG TỐI ƯU HÓA MÔ PHỎNG QUỸ ĐẠO TÀU

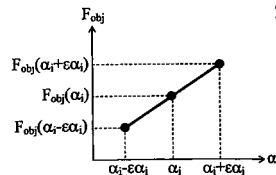
Biểu diễn lại hàm mục tiêu:
 $F_{obj} = F(\alpha, x, t)$ [8,9,10].

Trong đó: α_i - Các hệ số TDLH của tàu (35 hệ số); x - Vector các biến chuyển động của tàu (tọa độ vị trí, góc xoay, vận tốc dọc, vận tốc ngang...); t - Tham số thời gian.

Độ nhạy của các hệ số TDLH thể hiện ở mức độ ảnh hưởng của từng hệ số đối với sự biến thiên giá trị hàm mục tiêu F_{obj} . Mức độ ảnh hưởng này thể hiện qua đạo hàm bậc nhất của hàm mục tiêu đối với từng hệ số TDLH α_i , thể hiện qua công thức:

$$\frac{\partial F_{obj}}{\partial \alpha_i} = \frac{F_{obj}(\alpha_i + \epsilon \alpha_i) - F_{obj}(\alpha_i - \epsilon \alpha_i)}{2\epsilon \alpha_i} \tag{6}$$

Trong đó: ϵ - Hệ số để chọn giá trị khoảng lân cận vô cùng bé khi đánh giá sự biến thiên của hàm mục tiêu F_{obj} đối với từng biến α_i (các hệ số TDLH tàu), được minh họa trong Hình 4.1:



Hình 4.1: Sự biến thiên của hàm mục tiêu F_{obj} quanh lân cận biến α_i .

5. KẾT QUẢ LẬP TRÌNH PHÂN TÍCH ĐỘ NHAY CÁC HỆ SỐ THỦY ĐỘNG LỰC HỌC CHO HAI PHÉP THỬ TURNING CIRCLE VÀ ZIGZAG

Tác giả đã lập trình mô-đun phân tích độ nhạy bằng ngôn ngữ Matlab để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các biến đầu vào (các hệ số TDLH) đối với sự biến thiên của hàm mục tiêu F_{obj} cho từng phép thử Turning Circle và Zigzag.

Kết quả phân tích độ nhạy đạt được như sau:

Bảng 5.1. Hệ số TDLH mô hình tàu thực Esso Bermania

STT	Hệ số TDLH	Giá trị trước tối ưu hóa	STT	Hệ số TDLH	Giá trị trước tối ưu hóa
1	X_{α}''	-0.0500	19	N_{ω}''	-0.1000
2	$X_{ \alpha }''$	1.0200	20	Y_{α}''	0.2000
3	Y_{α}''	-0.0200	21	$Y_{ \alpha }''$	0.0000
4	Y_{ω}''	-2.16	22	N_{α}''	-0.3418
5	$Y_{ \omega }''$	0.0400	23	$X_{c c }''$	0.1529
6	N_{α}''	-0.0200	24	$N_{c \alpha}''$	-0.0200
7	N_{ω}''	-0.0728	25	$N_{\alpha c}''$	0.0125
8	$Y_{\alpha\omega}''$	-2.4099	26	$Y_{\alpha c}''$	-2.1000
9	$N_{\omega\alpha}''$	0.3000	27	$N_{\alpha c\omega}''$	0.0000
10	$N_{\alpha\omega}''$	0.3000	28	$N_{\omega c\alpha}''$	-0.1910
11	$N_{\omega\alpha}''$	-1.2056	29	$N_{c\alpha\omega}''$	0.3460
12	$N_{\alpha\omega}''$	-0.4510	30	Y_{α}''	0.2400
13	X_{α}''	-0.0500	31	N_{ω}''	-0.2077
14	Y_{α}''	-0.3780	32	$X_{ \alpha }''$	-0.0077
15	Y_{ω}''	0.1820	33	X_{ω}''	-0.0045
16	N_{α}''	-0.0470	34	$X_{\alpha\omega}''$	-0.0061
17	X_{ω}''	0.3780	35	$X_{\omega\alpha}''$	-0.0000
18	Y_{ω}''	-1.5000			

(1) Phép thử Turning Circle: Giá trị biến thiên của mục tiêu F_{obj} theo từng biến hệ số TDLH α_i thể hiện trong Hình 3.1. Các biến có độ nhạy lớn theo cận lọc ($Tol = \pm 0.1$) gồm: có 10 biến như sau:

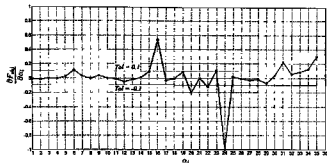
$$N_{T'}, Y_{\alpha}, N_{\omega}, N_{|\alpha|}, Y_{\alpha\omega}, N_{\omega\alpha}, N_{\alpha c}, N_{c|\alpha}, N_{\alpha c\omega}, N_{\omega c\alpha}, N_{c\alpha\omega}, N_{\omega}, X_{|\alpha|}, X_{\alpha\omega}, X_{\omega\alpha}$$

(2) Phép thử Zigzag: Giá trị biến thiên của hàm mục tiêu F_{obj} theo từng biến hệ số TDLH α_i thể hiện trong Hình 4.1. Các biến có độ nhạy lớn theo cận lọc ($Tol = \pm 0.1$) cũng gồm có 10 biến như sau:

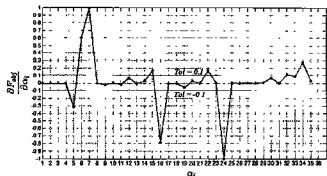
$$Y_{T'}, N_{T'}, N_{\omega}, Y_{\alpha}, Y_{\omega}, N_{\omega}, N_{|\alpha|}, N_{\alpha c}, X_{|\alpha|}, N_{\omega}, N_{\alpha}, X_{\alpha\omega}, X_{\omega\alpha}$$

(3) Tổ hợp kết quả phân tích độ nhạy của cả hai phép thử Turning Circle và Zigzag: Từ kết quả phân tích và lựa chọn các hệ số TDLH có độ nhạy lớn nhất của từng phép thử cho thấy: Có 5 hệ số TDLH trùng nhau, còn lại mỗi phép thử có 5 hệ số khác. Như vậy, tổ hợp lại có tổng cộng 15 hệ số TDLH có độ nhạy lớn nhất chung cho cả hai phép thử, thể hiện trong Bảng 5.2. Sau khi chọn được nhóm các

hệ số có độ nhạy lớn nhất, tiến hành mô phỏng và tối ưu hóa quỹ đạo bằng cách đồng nhất quỹ đạo mô phỏng với quỹ thực nghiệm, qua đó cũng xác định (giải) được giá trị tối ưu nhất của nhóm các hệ số có độ nhạy lớn nhất.



Hình 5.1: Kết quả phân tích độ nhạy các hệ số TĐLH trong phép thử Turning Circle



Hình 5.2: Kết quả phân tích độ nhạy các hệ số TĐLH trong phép thử Zigzag

Bảng 5.2. Tổ hợp kết quả phân tích độ nhạy cả hai phép thử Turning Circle và Zigzag

STT	σ_1	Hệ số TĐLH	STT	Hệ số TĐLH
1	9	N''_T	9	X''_{khq}
2	10	Y''_{khq}	10	X''_{lc66}
3	11	N''_{khq}	11	Y''_T
4	12	Y''_{lc66}	12	N''_T
5	13	N''_{khq}	13	N''_{khq}
6	14	X''_{lc66}	14	X''_{khq}
7	15	N''_{lc66}	15	N''_{khq}
8		N''_{khq}		

6. KẾT LUẬN

Tác giả đã giới thiệu tổng quan về phương pháp luận, thuật toán và ứng dụng của kỹ thuật phân tích độ nhạy. Bài báo cũng đã trình bày tóm tắt kết quả nghiên cứu là kết quả phân tích độ nhạy của 35 hệ số TĐLH, từ đó xác định 15 hệ số TĐLH có độ nhạy lớn nhất của mô hình tàu thực Esso Bernicia 193000 DWT để phục vụ cho các bước tiếp theo trong nghiên cứu lập trình tối ưu hóa quỹ đạo tàu. Việc xác định 15 hệ số này giúp cho các bước nghiên cứu tiếp theo về tối ưu hóa mô phỏng chuyển động tàu sẽ rút gọn được bộ hệ số cần tối ưu hóa. Đồng thời, qua đó cũng xác định và phân tích được những hệ số TĐLH có

ảnh hưởng lớn đến sự sai lệch quỹ đạo mô phỏng của tàu. Nội dung bài báo có giá trị khoa học và giá trị tham khảo hữu ích cho các nhà khoa học, các chuyên gia nghiên cứu về mô phỏng tối ưu hóa quỹ đạo tàu, ước tính các hệ số TĐLH của tàu, mô phỏng các loại tương tác TĐLH của tàu, mô phỏng cảnh báo đảm và tàu và các nghiên cứu liên quan khác □

Tài liệu tham khảo

- [1]. Trần Khánh Toàn (2017), Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ GTVT "Nghiên cứu ứng dụng các thuật toán tối ưu hóa để nâng cao độ chính xác dự đoán quỹ đạo tàu của các hệ thống mô phỏng hàng hải", Mã số DT154021, Bộ GTVT.
- [2]. Andrea Saltelli (2002), *Sensitivity Analysis for Importance Assessment, Risk Analysis*, vol.22, no.3.
- [3]. Andrea Saltelli (2003), Stefano Tarantola, Francesca Campolongo and Macro Ratto, *Sensitivity Analysis in practice - A guide to assessing scientific models*, John Wiley & Sons, Ltd.
- [4]. Trần Khánh Toàn, Hoàng Xuân Danh (8/2014), *Lập trình mô phỏng điều động tàu biển cho phép thử Turning Circle và Zig-Zag theo tiêu chuẩn IMO*, Tạp chí Khoa học công nghệ hàng hải, số 39.
- [5]. Trần Khánh Toàn (11/2015), *Mô phỏng tương tác thủy động lực giữa tàu với bờ và đáy luồng nhằm nâng cao hiệu quả công tác bảo đảm an toàn giao thông đường thủy nội địa*, Tạp chí GTVT, Số đặc biệt (ISN 2354-0818), tr.174-176.
- [6]. Trần Khánh Toàn (2015), *Giáo trình "Kỹ thuật an toàn hàng hải"*, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.
- [7]. Fossen T.I. (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, 448p.
- [8]. Tran Khanh Toan, Ouahsine A., Naceur H., Hissel F. and Pourplanche A. (2009), *A fast simulation and identification of hydrodynamic parameters for a freely manoeuvring ship vessels*, International Conference on Multiphysics - MULTIPHYSICS 2009, Lille, France, pp.71.
- [9]. Tran Khanh Toan, Ouahsine A., Naceur H., Hissel F. and Pourplanche A. (June 2011), *Coefficient Identification for Ship Manoeuvring Simulation Model based on Optimization Techniques*, International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering IV - COUPLED PROBLEMS 2011, 20-22, Kos, Greece, pp.1261-1272.
- [10]. Tran Khanh Toan, Ouahsine A., Naceur H., Hissel F. and Pourplanche A. (September 2011), *Coefficients Identification for Ship Manoeuvring Simulation based on Optimization Techniques*, International Conference on Computational Methods in Marine Engineering IV - MARINE 2011, 28-30, Lisbon, Portugal, pp.369-380.
- [11]. Antoniou A. and Lu W.S. (2007), *Practical Optimization: Algorithms and Engineering Applications*, Springer, 202p.
- [12]. Sutulo S., Moreira L. and Soares C.G. (2002), *Mathematical models for ship path prediction in*

manoeuvring simulation systems, Ocean Engineering 29, pp.1-19.

[13]. Clarke D., Patterson D.R., Vfooderson R.K. (1972), *Manoeuvring trials with the 193000 dwt tanker "Esso Bernicia"*, Paper: Spring Meeting of the Royal Inst of Naval Architects, no.10.

[14]. Skjetne R., Smogeli Ø.N. and Fossen T.J. (2004), *A Nonlinear Ship Manoeuvring Model: Identification and adaptive control with experiments for a model ship*, Modeling, Identification and Control 25(1), pp.3-27.

[15]. Tran Khanh Toan., Ouahsine A., Naceur H. and El Wasifi K. (2013), *Assessment of ship manoeuvrability by using a coupling between a nonlinear transient manoeuvring model and mathematical programming techniques*, ELSEVIER/ScienceDirect/Journal of Hydrodynamics/DOI: 10.1016/S1001-6058(13)60426-6, pp.788-804 (2013). ISSN:1001-6058.

[16]. P.Du, A.Ouahsine, Tran Khanh Toan, P.Sergent (2017), *Simulation of ship manoeuvring in confined waterway using a nonlinear model based on optimization techniques*, ELSEVIER - OCEAN ENGINEERING 142(2017), pp.194-203, ISSN 0029-8018.

[17]. P.Du, A.Ouahsine, Tran Khanh Toan, P. Sergent (Oct 2018), *Simulation of the overtaking maneuver between two ships using the non-linear manoeuvring model*, SPRINGER - JOURNAL OF HYDRODYNAMIC (JHD), pp.791-802, vol.30, Issue 5, ISSN: 1001-6058 (Print) 1878-0342 (Online).

Ngày nhận bài: 01/12/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/12/2018

**Người phản biện: PGS. TS. Nguyễn Kim Phương
ThS. Phạm Hồng Cường**