

XÂY DỰNG TIÊU CHUẨN TỐI ƯU LQR CHO HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TÀU THỦY

Đỗ Công Thắng^{1*}, Cao Tiến Huỳnh²

Tóm tắt: Tiêu chuẩn tối ưu có vai trò hết sức quan trọng trong việc thiết kế và tổng hợp hệ thống điều khiển tối ưu cho tàu thủy hiện đại. Bài báo đề xuất phương pháp xây dựng tiêu chuẩn tối ưu LQR đảm bảo hệ thống điều khiển tàu thủy theo hướng có tổn thất tốc độ là bé nhất, từ đó phân tích được các yếu tố ảnh hưởng tới hàm tiêu chuẩn tối ưu (đặc trưng cho tổn thất tốc độ). Bài báo cũng chỉ ra được các khó khăn và sự phức tạp trong việc lựa chọn trọng số của hàm mục tiêu, đồng thời chỉ ra được các hạn chế của một số tác giả trong việc xác định các trọng số hàm mục tiêu. Từ đó, đề xuất một phương pháp để xác định trọng số trong hàm mục tiêu của bài toán điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính (LQR).

Từ khóa: Tiêu chuẩn tối ưu; Hàm mục tiêu; Điều khiển tối ưu; LQR; Tàu thủy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tàu thủy có vai trò rất quan trọng trong vận tải hàng hóa, an ninh và quốc phòng. Để khai thác và vận hành tàu thủy có hiệu quả cao cần hệ thống điều khiển và tự động hóa, đặc biệt là hệ thống điều khiển lái tự động tàu theo hướng là không thể thiếu. Để hệ điều khiển có chất lượng cao thì tiêu chuẩn tối ưu cần phải chính xác. Đối với hệ lái tàu theo hướng, tiêu chuẩn tối ưu phải đảm bảo khi vận hành lực cản lên tàu là bé nhất ứng với tổn hao tốc độ là bé nhất.

Để xây dựng được hệ thống tối ưu, vấn đề quan trọng bậc nhất là phải xây dựng được tiêu chuẩn tối ưu, bởi chất lượng của hệ thống hoàn toàn phụ thuộc vào tiêu chuẩn tối ưu được lựa chọn trước lúc bước vào thiết kế hệ thống. Đối với hệ thống tự động lái tàu theo hướng tiêu chuẩn đó phải được xây dựng trên cơ sở các yêu cầu đặt ra cho nó. Cụ thể là:

a. Hệ thống phải đảm bảo độ chính xác, theo đó sai số càng nhỏ càng tốt, bởi sai số hướng mũi tàu là nguyên nhân tăng sức cản lên con tàu làm giảm tốc độ chuyển động của tàu, kéo dài thời gian hành trình dẫn đến làm giảm hiệu quả kinh tế - kỹ thuật của tàu.

b. Bên cạnh đó, hệ thống nhất thiết phải đảm bảo sao cho biên độ và tần số bẻ bánh lái nhỏ nhất, bởi biên độ bẻ bánh lái càng lớn thì sức cản càng lớn dẫn đến tổn thất tốc độ càng lớn và đi kèm với đó là kéo dài thời gian hành trình, tần số bẻ bánh lái càng lớn thì sự mài mòn máy lái càng nhiều dẫn đến giảm tuổi thọ của máy lái.

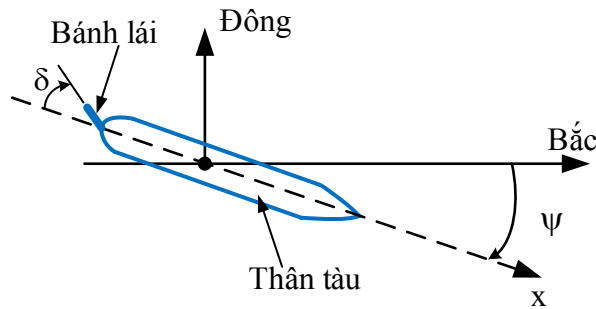
Cả hai yêu cầu nêu trên hướng tới việc giảm thiểu sức cản và do đó giảm thiểu sự mất mát tốc độ do góc sai lệch hướng mũi tàu và góc bẻ bánh lái gây ra.

2. GIẢI QUYẾT VẤN ĐỀ

Mô hình toán học mô tả động học của tàu thủy đã được tác giả thể hiện trong công trình [2] có dạng:

$$\psi^{(3)} + \sum_{i=1}^2 a_i \psi^{(i)} = k_1 \delta + k_2 \dot{\delta} \quad (1)$$

Với ψ là góc hướng của mũi tàu so với phương bắc; δ là góc bẻ bánh lái. Các tham số a_1, a_2, k_1, k_2 là các tham số phụ thuộc vào tham số động học đặc trưng của tàu, động học của tàu phụ thuộc rất nhiều vào tải trọng của con tàu, mà tải trọng của tàu là một tham số bất định không biết trước. Trong công trình [2] đã đề xuất phương pháp nhận dạng các tham số a_1, a_2, k_1, k_2 này của tàu thủy.



Hình 1. Định nghĩa các góc bề bánh lái δ và góc hướng ψ .

Viết (1) ở dạng hàm truyền $G(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{k_1 + k_2s}{s^3 + a_2s^2 + a_1s}$ (2)

Đặt $A(s) = s^3 + a_2s^2 + a_1s$; $U(s) = \delta(s)$ và $Y(s) = \psi(s)$

$X_1(s) = \frac{1}{A(s)}U(s); X_2(s) = \frac{s}{A(s)}U(s); X_1(s) = \frac{s^2}{A(s)}U(s)$

Suy ra $\frac{dx_1}{dt} = x_2; \frac{dx_2}{dt} = x_3$

Từ đó ta có:

$\psi(s) = (k_1 + k_2s) \frac{U(s)}{A(s)} = k_1 \frac{U(s)}{A(s)} + k_2 \frac{sU(s)}{A(s)} = k_1X_1(s) + k_2X_2(s)$ (3)

Suy ra đầu ra: $y(t) = \psi(t) = k_1x_1 + k_2x_2$

và $U(s) = A(s).X_1(s) = (s^3 + a_2s^2 + a_1s).X_1(s)$

hay $u(t) = \frac{dx_3}{dt} + a_2x_3 + a_1x_2 \Rightarrow \frac{dx_3}{dt} = -a_1x_2 - a_2x_3 + u$

Từ đó ta có hệ phương trình trạng thái mô tả tàu thủy:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = -a_1x_2 - a_2x_3 + u \\ y = k_1x_1 + k_2x_2 \end{cases} \quad (4)$$

Hay viết dưới dạng ma trận ta được phương trình trạng thái của tàu thủy:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (5)$$

Với $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$ là véc tơ trạng thái; \mathbf{u} là tín hiệu điều khiển;

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ là ma trận trạng thái với $a_{32} = -a_1$; $a_{33} = -a_2$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ là ma trận đầu vào; $\mathbf{C} = [k_1 \quad k_2 \quad 0]$ là ma trận đầu ra.

Với phương trình trạng thái (5), để tổng hợp được bài toán điều khiển tối ưu ta cần xác định được tiêu chuẩn tối ưu. Tiêu chuẩn tối ưu này có dạng[1]:

$$\mathbf{J}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{u}}) = \int_0^T (\underline{\mathbf{x}}^T \mathbf{Q} \underline{\mathbf{x}} + \underline{\mathbf{u}}^T \mathbf{R} \underline{\mathbf{u}}) dt \rightarrow \min \quad (6)$$

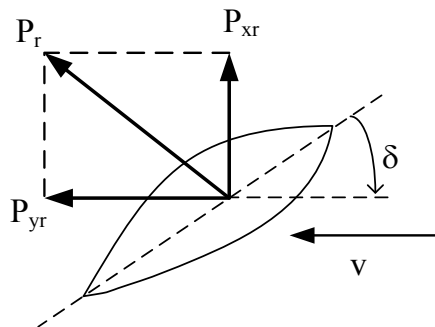
Trong đó \mathbf{Q} , \mathbf{R} là các ma trận trọng số cần xác định. Việc lựa chọn \mathbf{Q} và \mathbf{R} liên quan tới tính ổn định của hệ thống và chất lượng bài toán điều khiển nhưng từ trước tới nay \mathbf{Q} , \mathbf{R} vẫn được lựa chọn theo kinh nghiệm. Đòi hỏi cần có phương pháp để xác định các trọng số này một cách khoa học. Dưới đây sẽ tiến hành xác định các trọng số cho hàm mục tiêu (6).

Để có cơ sở xây dựng tiêu chuẩn tối ưu cho hệ thống tự động lái tàu theo hướng, chúng ta khảo sát lực tác động lên bánh lái và lên con tàu khi có sai lệch hướng mũi tàu.

Biểu thức giải tích xác định lực tác động lên bánh lái lần đầu được Euler đưa ra năm 1978 [6]. Tuy nhiên, đối với các bánh lái phẳng người ta sử dụng công thức do Jossel đề xuất[6] để xác định lực tác động:

$$P_r = \frac{k_r F_r v^2}{C_{p,r}} \sin \delta \quad (7)$$

- Trong đó: F_r – diện tích của bánh lái, m^2 ;
 v – Tốc độ chuyển động của tàu, m/s ;
 δ – góc bẻ bánh lái, độ;
 $C_{p,r}$ – hệ số biến thiên theo góc δ ;
 k_r – hệ số tỷ lệ.



Hình 2. Lực tác động lên bánh lái.

Từ Hình 2 và biểu thức (7) ta tính được lực cản tác động lên bánh lái P_{yr}

$$P_{yr} = \frac{k_r F_r v^2}{C_{p,r}} \sin^2 \delta \quad (8)$$

Tương tự như vậy, ta xác định được biểu thức tính lực cản tác động lên con tàu với góc lệch hướng mũi là ψ :

$$P_{ys} = \frac{k_s F_s v^2}{C_{p,s}} \sin^2 \psi \quad (9)$$

Trong đó: F_s – diện tích mặt sườn của tàu, m^2 ;

ψ – góc lệch hướng mũi, độ;

$C_{p,s}$ – hệ số biến thiên theo góc δ ;

k_s – hệ số tỷ lệ, có tính đến tuyến hình và tính đến dạng thủy động học của tàu.

Từ các biểu thức (8) và (9) với góc ψ và δ nhỏ ta có $\sin \delta \approx \delta$, $\sin \psi \approx \psi$. Vì vậy, các biểu thức cho phép xác định gần đúng lực cản tác động lên bánh lái và lên con tàu sẽ là:

$$P_{yr} \approx \frac{k_r F_r v^2}{C_{p,r}} \delta^2 \quad (10)$$

$$P_{ys} \approx \frac{k_s F_s v^2}{C_{p,s}} \psi^2 \quad (11)$$

Quá trình điều khiển tàu theo hướng chính là quá trình tạo ra góc bẻ bánh lái δ theo luật điều khiển tối ưu, đảm bảo cho tổng lực cản lên tàu là nhỏ nhất trong suốt thời gian điều khiển. Điều đó có thể được thực thi khi luật điều khiển cho phép cực tiểu hoá tích phân của tổng lực cản lên con tàu.

$$\begin{aligned} J_1 &= \int_0^T (P_{yr} + P_{ys}) dt = \frac{k_s F_s v^2}{C_{p,s}} \int_0^T (\psi^2 + \frac{k_r F_r C_{p,s}}{k_s F_s C_{p,r}} \delta^2) dt \\ &= \frac{k_s F_s v^2}{C_{p,s}} \int_0^T (\psi^2 + \lambda \delta^2) dt \rightarrow \min \end{aligned} \quad (12)$$

Trong đó T là thời gian điều khiển, λ là trọng số:

$$\lambda = \frac{k_r F_r C_{p,s}}{k_s F_s C_{p,r}} \quad (13)$$

Điều kiện cực trị (12) theo δ hoàn toàn trùng khớp với điều kiện cực trị riêng thành phần tích phân:

$$J_2 = \int_0^T (\psi^2 + \lambda \delta^2) dt \rightarrow \min \quad (14)$$

Bằng cách so sánh (6) với (14) ta dễ dàng suy ra được các ma trận trọng số của tiêu chuẩn tối ưu cho đối tượng (5) như sau:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{R} = \lambda$$

Như vậy, bằng việc phân tích sự hình thành sức cản lên bánh lái và lên con tàu trong quá trình điều khiển và sự cần thiết phải giảm thiểu tổng các lực cản, chúng ta đã thu được tiêu chuẩn tối ưu cho hệ thống tự động lái tàu theo hướng. Trong tiêu chuẩn tối ưu vừa được thiết lập, trọng số λ có vai trò vô cùng quan trọng. Trọng số này được xác định theo biểu thức (13). Tuy nhiên có rất nhiều khó khăn trong việc xác định λ do không có đủ

thông tin về các hệ số $k_r, k_s, C_{p,r}, C_{p,s}$. Đây là những hệ số phụ thuộc phức tạp vào dạng thủy động học của bánh lái và của con tàu.

Vì vậy, khả năng để có thể xác định gần đúng giá trị của trọng số λ theo biểu thức (13) cũng gần như không thể. Trong phần tiếp theo dưới đây vấn đề xác định giá trị tối ưu cho trọng số λ sẽ được luận giải.

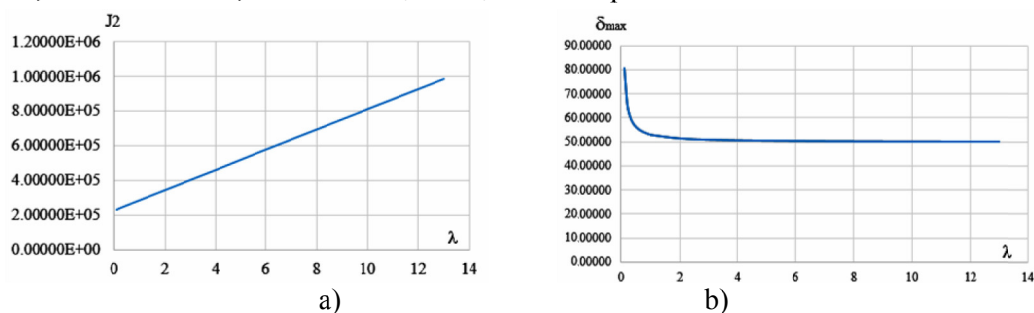
Tiêu chuẩn tối ưu cho hệ thống lái tàu theo hướng đã được nhiều tác giả đề xuất [3], [4], [5], [7]. Trong các công trình này, tiêu chuẩn tối ưu được đề xuất có dạng giống với (14). Tuy nhiên ở đó điều đáng lưu tâm nhất là chưa đưa ra cơ sở để lựa chọn biểu thức dưới dấu tích phân, cũng chưa đưa ra được phương pháp xác định trọng số λ . Koyama [4] đề xuất lựa chọn λ trong khoảng $8 \div 10$, trong khi Norrbinn[5] đề nghị chọn λ tùy thuộc vào điều kiện thời tiết:

$$\text{(Biển lặng)} \quad 0,1 \leq \lambda \leq 10 \quad \text{(Biển động)} \quad (15)$$

Amerongen và Van Nauta [3] lại đề xuất lựa chọn λ theo loại tàu, thí dụ: đối với tàu chở dầu chọn $\lambda = 8,0$, với tàu vận tải hàng chọn $\lambda = 6,0$. Những đề xuất của các tác giả nêu trên chủ yếu dựa vào kinh nghiệm, mang tính gần đúng thiếu lập luận chặt chẽ về mặt lý thuyết và gặp nhiều khó khăn thực tế trong việc lựa chọn trọng số λ , bởi dải thay đổi rất rộng (từ 0,1 đến 10), hoặc lựa chọn λ theo loại tàu, trong khi trên thực tế chúng ta đã thấy thông qua biểu thức (11) để có được giá trị tối ưu cho trọng số λ đòi hỏi phải biết rất cụ thể và chi tiết kích thước, dạng thủy động học và các dữ liệu khác của bánh lái và của con tàu.

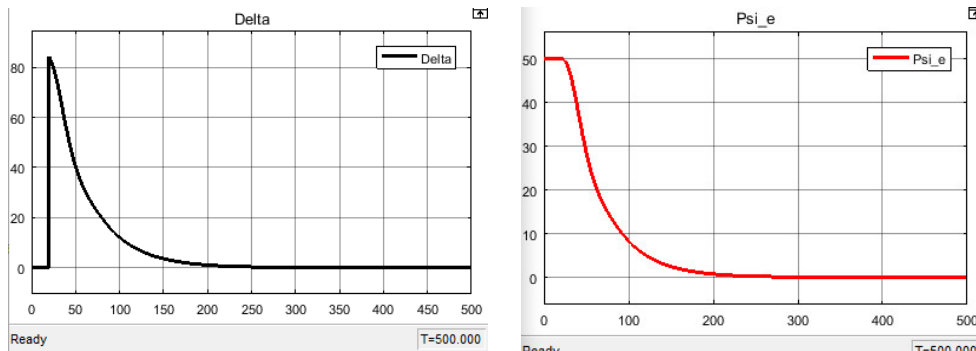
Ta trở lại biểu thức (14), nó đặc trưng cho sức cản của nước lên tàu thủy. Hiển nhiên thấy rằng sức cản tác động lên tàu càng nhỏ thì tốc độ tàu sẽ càng lớn và ngược lại. Từ đây đề xuất phương pháp để xác định trọng số λ như sau: Giả thiết công suất của động cơ đẩy tàu không đổi (công suất của chân vịt không đổi), ta coi λ là một tham số đầu vào của hệ thống điều khiển góc hướng của tàu thủy, thực hiện thay đổi λ sau thời gian quá độ ta đo được tốc độ của tàu. Ứng với mỗi giá trị của trọng số λ_i ta sẽ có một bộ điều khiển tối ưu cho tàu thủy và sẽ có một giá trị hàm tối ưu J_2 và góc bẻ bánh lái δ .

Thông qua thực nghiệm mô phỏng áp dụng cho tàu có tham số $a_1 = 8,33 \cdot 10^{-4}$; $a_2 = 0,0792$; $k_1 = 4,167 \cdot 10^{-4}$ và $k_2 = 0,0167$ ta xác định được các kết quả sau:

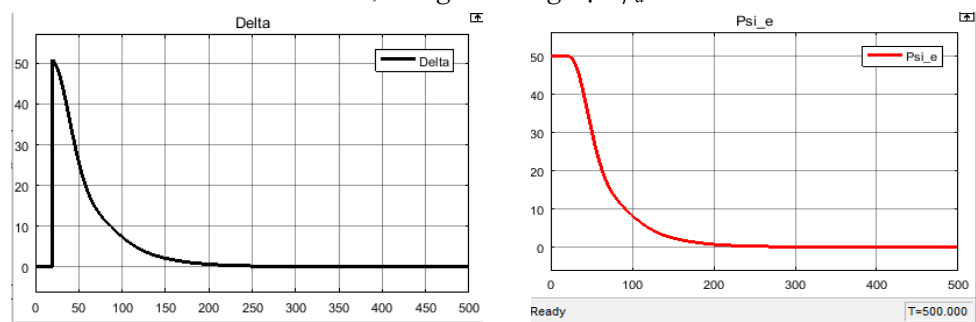


Hình 3. Quan hệ giữa tổn hao J_2 (a) và biên độ góc bẻ bánh lái δ_{max} (b) theo λ khi góc hướng đặt $\psi_d = 50^\circ$.

Qua hai đường đặc tính trên ta thấy rằng khi λ càng lớn thì J_2 cũng càng lớn, δ_{max} ban đầu giảm sau đó hầu như không đổi. Như vậy, ta phải lựa chọn λ đồng thời thỏa mãn hai điều kiện là J_2 phải đủ bé và biên độ góc bẻ bánh lái của tàu thủy cũng phải đủ bé. Từ đó, ta có thể lựa chọn được giá trị phù hợp của trọng số là $\lambda = 4$.



Hình 4. Góc bẻ bánh lái và sai lệch góc hướng khi $\lambda = 0,1$ và góc hướng đặt $\psi_d = 50^\circ$.



Hình 5. Góc bẻ bánh lái Delta và sai lệch góc hướng Psi_e khi $\lambda = 4$ và góc hướng đặt $\psi_d = 50^\circ$.

Qua **Hình 4** và **Hình 5** trên ta thấy với trọng số $\lambda=4$ sẽ cho đáp ứng góc bẻ bánh lái nhỏ hơn so với giá trị khác mà một số tác giả đề xuất.

3. KẾT LUẬN

Trên đây đã đề xuất, phương pháp xây dựng tiêu chuẩn tối ưu cho hệ thống điều khiển góc hướng của tàu thủy một cách logic, có cơ sở khoa học và có tính thuyết phục hơn so với các công trình được công bố trước đây (chỉ dùng kinh nghiệm), đã đề xuất phương pháp để xác định trọng số của tiêu chuẩn tối ưu. Việc lựa chọn tiêu chuẩn tối ưu hoàn toàn dễ dàng thực hiện nhờ vào các trang thiết bị kỹ thuật và công nghệ thông tin ngày nay.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Doãn Phước (2002), *Lý thuyết điều khiển tuyến tính*, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội, 408.
- [2]. Do Cong Thang (2017), "A method to identify the dynamic parameters of ships", *Journal of Military Science and Technology*. Vol. 51A(Special Issue: Rapid Communications in Advanced Science and Technology), pp. 10-17.
- [3]. J.Van Amerongen and H.R. Van Nauta Lemke (1978), Optimum steering of ships with an adaptive Autopilot, *Proceeding of 5th Ship Steering Automatic Control*, Genoa, Italy.
- [4]. Koyama, T (1970), "On the optimum automatic steering system of ships at sea.", *J.S.N.A.* Vol. 122.
- [5]. Norrbin, N.H (1972), "On the added resistance due to steering on a straight course", *Proceedings of the 13th ITTC*, Berlin, Hamburg, Germany.

- [6]. Phrayzon I.R (1974), "Автоматизация и системы передачи на кораблях.", - Ленинград-Федерация России.
- [7]. Thor I.Fossen (1994), "Guidance and Control of Ocean vehicles", John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 494.

ABSTRACT

**ESTABLISHING LQR OPTIMAL CRITERIA
FOR SHIPS CONTROL SYSTEM**

Optimal criteria have an extremely important role in designing and building an optimal control system for modern ships. The paper proposed a method to build optimal LQR criteria ensured that control system moving direction of the ship is always having minimum speed loss, then analyze factors that effect to optimal criteria function(characterizes speed loss). The paper also shows the difficulty and complexity in selecting the weights of the objective function, while pointing out the limitations of some authors in determining the objective function weights. Since then, a method is proposed to determine the weight in the objective function of the optimal control problem linear quadratic (LQR).

Keywords: Optimal critia; Objctive function; Optimal control; LQR; Ships.

Nhận bài ngày 10 tháng 7 năm 2018

Hoàn thiện ngày 20 tháng 8 năm 2018

Chấp nhận đăng ngày 20 tháng 9 năm 2018

Địa chỉ: ¹ Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên;
² Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.
* Email: doconghang77@gmail.com.