

PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN DÂY NEO VẬT NỔI
BẰNG THUẬT GIẢI TỐI ƯU PSO
AN OPTIMIZATION-BASED APPROACH FOR CALCULATION
OF FLOATING STRUCTURES' MOORING LINES

PHẠM QUỐC HOÀN

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: hoanpq.ctt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Nội dung bài báo này đề xuất một phương pháp mới cho việc tính toán dây neo vật nổi bằng cách vận dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn PSO để giải các phương trình giải tích mô tả quỹ đạo dây neo. Các phương trình về độ sâu khu nước và chiều dài dây neo được vận dụng để thiết lập hàm mục tiêu của thuật toán PSO. Các ẩn số là góc nghiêng dây neo tại đáy và độ dạt ngang của vật nổi được giải tự động bằng thuật toán này. Qua đó, các tham số để xác định quỹ đạo và lực căng dây neo cũng được xác định. Phương pháp tính toán này mở ra hướng mới cho việc tính toán dạng kết cấu này bên cạnh các phương pháp phổ biến hiện nay như phương pháp giải tích, phương pháp phần tử hữu hạn,...

Từ khóa: Dây neo, phao nổi, phương pháp tính, thuật toán tối ưu hóa bầy đàn, phương pháp thử dần.

Abstract

This paper proposes a new method of calculating mooring lines by using the particle swarm optimization algorithm (PSO) to solve the analytical equations describing the mooring line trajectory. The equations of water depth and mooring line length are applied to establish the objective function of the PSO algorithm. The unknowns are the mooring line tilt angle at the bottom and the drift of the floating object are solved automatically by this algorithm. Thereby, the parameters to determine the trajectory and tension of the mooring line are also determined. This calculation method opens up a new approach for calculating this type of structure besides the popular methods today such as the analytical method, the finite element method, etc..

Keywords: Mooring line, floating bouy, calculation method, particle swarm optimization, trial and error method.

1. Đặt vấn đề

Dây neo của công trình nổi là một bộ phận quan trọng, có vai trò giúp cho vật nổi nổi riêng và cả hệ thống nổi chung ổn định dưới tác động của sóng gió, dòng chảy hay tác động của tàu,... Tùy vào mỗi loại công trình mà vật nổi có thể được neo bởi một dây neo hay nhiều dây neo. Dây neo có thể là dây chùng hoặc dây căng ở dạng xích hoặc dây cáp, thường làm bằng các loại thép đặc biệt hoặc vật liệu phi kim cường độ cao [1, 2].

Trong tính toán dây neo, hiện nay có hai phương pháp được sử dụng rộng rãi là phương pháp giải tích và phương pháp phần tử hữu hạn [1, 3]. Đối với phương pháp phần tử hữu hạn, các tính toán được thực hiện trên các phần mềm thương mại có giá thành rất cao hoặc ít phổ biến và khó sử dụng. Trong khi đó, với phương pháp giải tích, khi tính toán phải chấp nhận các giả thiết gần đúng, tính thử dần nên việc tính toán mất nhiều thời gian và phức tạp. Mặt khác việc lựa chọn thông số của dây neo cũng chủ yếu dựa vào kinh nghiệm, đôi khi quá thiên về an toàn, gây lãng phí. Từ đó dẫn tới sự cần thiết về việc cải tiến phương pháp tính toán.

2. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo này sẽ trình bày tóm tắt về lý thuyết tính toán dây neo đơn. Sau đó, nhóm tác giả sẽ đề xuất một phương pháp tính toán mới cho dây neo đơn của một phao báo hiệu nổi bằng cách vận dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO) trên code Python để tìm nghiệm gần đúng của các phương trình mô tả dây neo. Các phương trình không chế về độ sâu khu nước và chiều dài dây neo được vận dụng để thiết lập hàm mục tiêu của thuật toán PSO. Các ẩn số là góc nghiêng dây neo tại đáy và độ dạt ngang của vật nổi được giải tự động bằng thuật toán này.

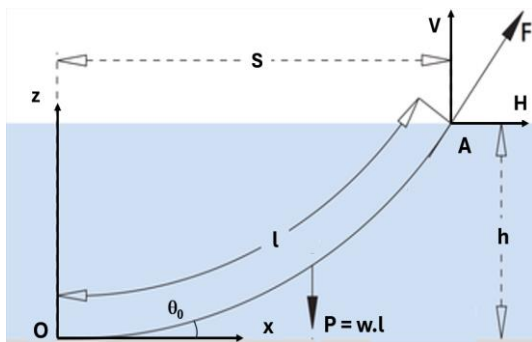
3. Lý thuyết tính toán dây neo đơn

Trong tính toán dây neo của phao neo đơn, phương trình mô quỹ đạo dây neo như sau [3-5]:

$$z(x) = a \cdot \cosh \left[\frac{x}{a} + \operatorname{arcsinh}(\tan(\theta_0)) \right] - a \cdot \cosh [\operatorname{arcsinh}(\tan(\theta_0))] \quad (1)$$

$$x(l) = a \cdot \operatorname{arcsin} h \left[\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right] - a \cdot \operatorname{arcsin} h [\tan(\theta_0)] \quad (2)$$

$$a = \frac{H}{w} \quad (3)$$



Hình 1. Sơ tính toán dây neo đơn

Trong đó x, z là tọa độ theo phương ngang và phương đứng. θ_0 là góc nghiêng của dây neo ở đáy (Hình 1). H là tổng lực ngang tác động lên vật nổi, w là trọng lượng của 1m dây neo dưới nước. Từ phương trình quỹ đạo dây neo các giá trị bao gồm độ sâu nước h , chuyển vị ngang của vật nổi S , chiều dài dây neo l được biểu diễn ở các phương trình dưới đây:

$$h = a \cdot \left[1 + \left(\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{a}{\cos(\theta_0)} \quad (4)$$

$$S = a \cdot \operatorname{arcsin} h \left[\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right] - a \cdot \operatorname{arcsin} h [\tan(\theta_0)] \quad (5)$$

$$l(x) = a \cdot \left[\sinh \left(\frac{x}{a} + \operatorname{arcsinh}(\tan(\theta_0)) \right) - \tan(\theta_0) \right] \quad (6)$$

Lực căng dây tại tọa độ l dọc dây được xác định theo công thức sau đây:

$$T(l) = H \sqrt{1 + \left(\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right)^2} \quad (7)$$

Các phương trình (1) và (2) hoặc (1) và (6) cho phép xác định chính xác quỹ đạo của dây neo. Hai phương trình này tạo thành hệ phương trình rất khó có

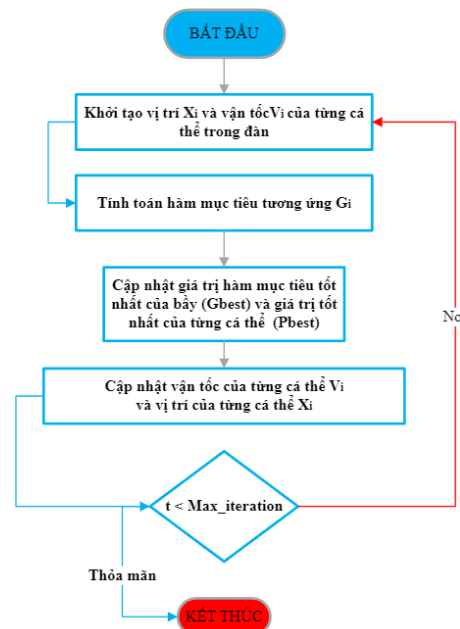
thể giải được bằng các phương pháp thông thường.

Trong tính toán thiết kế dây neo, chiều dài dây neo và trọng lượng bản thân đơn vị dây neo được giả định trước theo kinh nghiệm, góc nghiêng của dây neo ở đáy cũng được giả định bằng 0. Từ đó xác định lực căng dây neo và kiểm tra lại các điều kiện ổn định của dây neo. Phương pháp trên có nhược điểm là đã đơn giản hóa nhiều giá trị, việc kiểm tra phải thực hiện nhiều lần, mặt khác không thu được giá trị chính xác của góc nghiêng dây trong trường hợp tính toán dây ngắn [6].

Phương pháp thử dần cũng được sử dụng để xác định giá trị góc nghiêng dây neo nhưng có hạn chế là khá phức tạp và cần phải có được giá trị gợi ý ban đầu hợp lý để giảm bớt khối lượng tính toán [1, 2]. Ngoài ra phương pháp phần tử hữu hạn cũng được sử dụng [4, 7, 8]. Nhưng phương pháp này có hạn chế là các phần mềm thương mại có giá thành rất cao hoặc tương đối phức tạp nếu tự viết chương trình tính.

4. Đề xuất phương pháp tính toán mới cho dây neo đơn bằng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn PSO

4.1. Giới thiệu về thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO)



Hình 2. Sơ đồ thuật toán PSO [13]

Thuật toán tối ưu đã được áp dụng nhiều trong lĩnh vực tính toán tối ưu của các bài toán kỹ thuật nói chung và vật nổi nói riêng [9-11]. Trong đó, thuật toán PSO được đánh giá là khá đơn giản, yêu cầu ít tham số đầu vào và đã được đánh giá là có độ tin cậy cao

do đã được sử dụng rất nhiều trong các bài toán kỹ thuật trước đó. Thuật toán PSO ra đời vào năm 1995, được lấy cảm hứng từ cách mà đàn chim di chuyển trong khi tìm kiếm thức ăn [12]. Thuật toán này đã được sử dụng nhiều và khá phù hợp với các bài toán kỹ thuật. Sơ đồ thuật toán được thể hiện ở Hình 2. Một quần thể (swarm) được khởi tạo với số lượng cá thể (particle) nhất định. Mỗi cá thể đại diện cho một giải pháp trong tìm kiếm. Các cá thể di chuyển trong không gian tìm kiếm và cập nhật vị trí của chúng sau mỗi một vòng tìm kiếm dựa trên định hướng là vị trí tốt nhất mà mỗi cá thể đã tìm thấy (Pbest) và vị trí tốt nhất mà quần thể đã tìm thấy (Gbest). Vị trí tốt nhất ở đây là vị trí thỏa mãn tốt nhất điều kiện được đưa ra để tối ưu.

Thuật toán tối PSO cho phép tìm giá trị tối ưu của hàm mục tiêu. Nói cách khác là tìm giá trị cực trị của một hàm bất kỳ có các biến thỏa mãn các điều kiện ràng buộc nhất định. Vì vậy thuật toán này có thể vận dụng để tìm nghiệm cho hệ phương trình mô tả quỹ đạo dây trong các bài toán về dây neo.

4.2. Đề xuất phương pháp tính toán dây neo đơn bằng thuật toán PSO

Trong phần này, nhóm tác giả sẽ đề xuất một phương pháp mới để tính toán dây neo đơn. Phương pháp tính sẽ được minh họa và kết quả tính toán sẽ được so sánh với kết quả của phương pháp giải tích và phương pháp phần tử hữu hạn trong tài liệu tham khảo [4] để chứng minh tính hiệu quả và tính chính xác. Các bước chính của phương pháp mới như sau:

- Bước 1: Ấn định giá trị các tham số đầu vào bao gồm: Tải trọng ngang H , chiều sâu nước h , chiều dài dây neo l , trọng lượng dây neo trên $1m$ dài w .

- Bước 2: Thiết lập hệ phương trình mô tả quỹ đạo dây neo bao gồm phương trình (1) và (6). Khi đó các ẩn số là giá trị góc nghiêng của dây neo ở đáy θ_0 và độ dịch chuyển của phao so với neo S .

- Bước 3: Thiết lập phương trình mục tiêu (objective function) của thuật toán PSO ở dưới dạng sau đây:

$$f(\theta_0, S) = |l(S) - l| + |z(S) - h| \quad (7)$$

Tại vị trí đặt phao (điểm A trong Hình 1) chiều dài dây $l(S)$ xác định từ phương trình (6) và độ sâu nước $z(S)$ được xác định từ phương trình (1). Khi giá trị $f(\theta_0, S) \rightarrow 0$ có nghĩa là các giá trị θ_0, S tìm được từ thuật toán chính là các giá trị đặc trưng của dây neo cần tìm.

- Bước 4: xác định các điều kiện biên và ràng buộc của thuật toán PSO như thể hiện ở các phương trình sau:

$$0 \leq \theta_0 < \frac{\pi}{4} \quad (8)$$

$$S > 0 \quad (9)$$

$$S^2 + h^2 < l^2 \quad (10)$$

$$\left| S - a \cdot \arcsin h \left[\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right] - a \cdot \arcsin h [\tan(\theta_0)] \right| < 10^{-3} \quad (11)$$

Các phương trình (8), (9) là các biên giá trị của biến θ_0, S . Phương trình (10) là ràng buộc về hình học của dây neo còn phương trình (11) là điều kiện ràng buộc để kiểm tra giá trị biến S tìm được thỏa mãn phương trình (5) về độ dạt của vật nổi.

- Bước 5: Ấn định các tham số cho thuật toán PSO bao gồm: số lượng biến, số lần chạy và số vòng lặp tối đa trong một lần chạy.

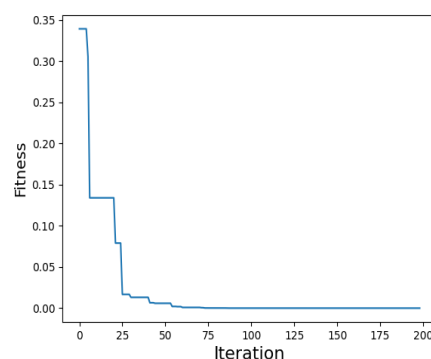
- Bước 6: chạy thuật toán PSO để thu được kết quả là giá trị góc nghiêng của dây neo ở đáy θ_0 và độ dịch chuyển của phao so với neo S .

4.3. Áp dụng tính toán

Trong phần này, phương pháp tính đề xuất ở trên sẽ được áp dụng tính toán cho một công trình đã được tính toán ở tài liệu tham khảo [4]. Tài liệu này tính toán cho một phao báo hiệu. Chiều sâu nước là $d=9,5m$, chiều dài dây xích $\Phi 42$ là $l=20m$. Tải trọng ngang tổng hợp do gió và dòng chảy lớn nhất tác dụng lên vật nổi là $H=0,343T$.

Nội dung tính toán áp dụng thuật toán PSO với các thông số cơ bản của mô hình tính như sau:

- Số lượng cá thể tìm kiếm (particle): 200;
- Số lần chạy (run): 200;
- Số vòng lặp tối đa (max iteration): 200.



Hình 3. Đường cong hội tụ kết quả

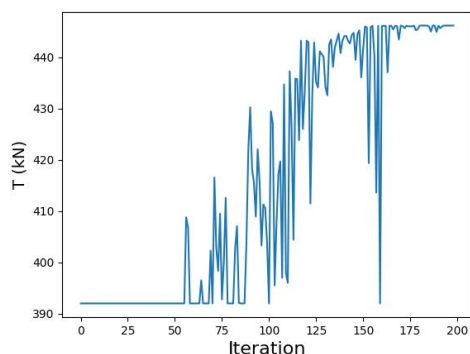
Hình 3 thể hiện đường cong hội tụ lời giải tối ưu, sau khoảng 50 vòng lặp kết quả đã tiệm cận và tiệm tới

hội tụ tại vòng lặp số 75. Thời gian tính toán là khoảng 31s. Kết quả tính toán được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả tính toán

STT	Biến	Kết quả tính toán
1	$\theta_0(\text{rad})$	0,272
2	$S(\text{m})$	17,430
	$f(\theta_0, S)$	$3,55\text{e-}15$

Giá trị của hàm mục tiêu là $3,35.10^{-15}$ có thể coi xấp xỉ bằng 0 cho thấy các giá trị của góc dây neo tại đáy và độ dạt của vật nổi là phù hợp với lý thuyết và thỏa mãn các điều kiện về độ sâu nước và chiều dài dây được ấn định trước. Sự biến thiên của lực căng dây theo vòng lặp trong lần chạy cho kết quả tính toán được thể hiện ở Hình 4.



Hình 4. Sự biến thiên của lực căng dây

Để kiểm chuẩn cho kết quả của mô hình tính toán của phương pháp được đề xuất, kết quả được so sánh với kết quả đã được công bố trong tài liệu tham khảo [4] ở Bảng 2. Sai số kết quả của phương pháp mới được so sánh với kết quả thu được từ phương pháp giải tích và phương pháp phần tử hữu hạn được thể hiện ở Bảng 3. Sai số lớn nhất là 0,89% cho thấy kết

Bảng 2. So sánh kết quả tính toán với phương pháp phần tử hữu hạn và giải tích

STT	Đại lượng	Kết quả tính toán		
		Áp dụng PSO	Phương pháp PTHH [4]	Phương pháp giải tích [4]
1	$S(\text{m})$	17,430	17,430	17,430
2	$T(\text{T})$	0,446	0,450	0,450
3	$\theta_0(\text{rad})$	0,272	0,272	0,272

quả tính toán là đúng đắn, phương pháp được đề xuất là đáng tin cậy.

Bảng 3. Sai số của kết quả tính toán so với phương pháp phần tử hữu hạn và giải tích

STT	Đại lượng	Sai số (%) so với	
		Phương pháp PTHH [4]	Phương pháp giải tích [4]
1	$S(\text{m})$	0,00	0,00
2	$T(\text{T})$	0,89	0,89
3	$\theta_0(\text{rad})$	0,00	0,00

5. Kết luận và kiến nghị

Bài báo đã trình bày tổng quan về lý thuyết tính toán dây neo đơn của vật nổi và đề xuất một phương pháp tính toán dây neo mới bằng cách vận dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn PSO để tìm nghiệm của các phương trình giải tích. Kết quả tính toán thu được từ phương pháp mới đã được kiểm chuẩn bằng cách so sánh với kết quả tính toán đã được công bố trước đó theo phương pháp phần tử hữu hạn. Sai khác với phương pháp phần tử hữu hạn là 0,89% chứng tỏ kết quả tính toán là đáng tin cậy. Đặc biệt với ưu điểm là thời gian tính toán khá nhanh, chỉ mất 31s. Hơn nữa, mô hình tính toán được viết trên code miễn phí Python, dễ tùy biến cho thấy mô hình tính toán từ phương pháp mới rất có triển vọng để áp dụng cho các tính toán tương tự. Trong thời gian tới, việc áp dụng thuật toán tối ưu đa mục tiêu sẽ được nhóm tác giả phát triển thêm để có thể tìm được các thông số của dây neo thỏa mãn không những tối ưu về mặt khối lượng mà còn tối ưu độ dạt ngang của vật nổi.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.85**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Shengjie Rui et al. (2024), *A review on mooring lines and anchors of floating marine structures*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.199,114547.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114547>.
- [2] H. O. Berteaux (1976), *Buoy Engineering (Ocean Engineering; a Wiley Series)*. John Wiley and Sons.

- [3] Kai-Tung Ma, Yong Luo, Thomas Kwan, and Yongyan Wu (2019), *Chapter 5 - Mooring analysis, in Mooring System Engineering for Offshore Structures*, K.-T. Ma, Y. Luo, T. Kwan, and Y. Wu Eds.: Gulf Professional Publishing, pp.85-114.
- [4] Đào Văn Tuấn (2024), *Nghiên cứu tính toán dây neo phao bảo hiệu có vật treo bằng phương pháp phần tử hữu hạn*, Đề tài Nghiên cứu khoa học cấp Trường, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.
- [5] Nguyễn Thanh Sơn (2016), *Tính toán dây neo ụ nổi có khối treo đơn lẻ*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 47.
- [6] Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (2020), *The overseas coastal area development institute of Japan*, Japan, 2020.
- [7] Zhenqing Liu, Yuangang Tu, Wei Wang, and Guowei Qian (2019), *Numerical Analysis of a Catenary Mooring System Attached by Clump Masses for Improving the Wave-Resistance Ability of a Spar Buoy-Type Floating Offshore Wind Turbine*, Applied Sciences, Vol.9, No.6.
doi: 10.3390/app9061075.
- [8] Chiemela Victor Amaechi, Agbomerie Charles Odijie, Facheng Wang, and Jianqiao Ye (2022), *Numerical investigation on mooring line configurations of a Paired Column Semisubmersible for its global performance in deep water condition*, Ocean Engineering, Vol.250, 110572.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110572>.
- [9] Guido Benassai, Antonio Campanile, Vincenzo Piscopo, and Antonio Scamardella (2015), *Optimization of Mooring Systems for Floating Offshore Wind Turbines*, Coastal Engineering Journal, Vol.57(04), 1550021.
<https://doi.org/10.1142/S0578563415500217>.
- [10] Idris Ahmed Ja'e, Montasir Osman Ahmed Ali, Anurag Yenduri, Chiemela Victor Amaechi, Zafarullah Nizamani, and Akihiko Nakayama (2022), *Optimization of mooring line design parameters using Mooring Optimization Tool for FPSO (MooOpt4FPSO) with the consideration of integrated design methodology*, Ocean Engineering, Vol.264, 112499.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112499>.
- [11] Ying Wang, Haiyan Xie, and Enxi Zheng (2019), *Design and research on optimization of single point mooring system*, Journal of Physics: Conference Series, Vol.303(1), 012031,
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1303/1/012031>.
- [12] J. Kennedy and R. Eberhart (1995), *Particle swarm optimization*, Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, 4, pp.1942-1948.
<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [13] Phạm Quốc Hoàn, Phạm Văn Sỹ (2024), *Tính toán tối ưu hóa tường chắn đất dạng cứng bằng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 78, tr.86-91.

Ngày nhận bài:	18/02/2025
Ngày nhận bản sửa:	28/02/2025
Ngày duyệt đăng:	01/03/2025