PHÂN TÍCH VÀ THIẾT KẾ ROBOT LẶN KHÔNG NGƯỜI LÁI STUDY ON ANALYSIS AND DESIGN OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)

Trần Ngọc Huy¹, Đinh Quang Vinh²

¹Trường ĐH Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh, tnhuy@hcmut.edu.vn ²Phòng TN Trong điểm DCSELAB - ĐH Bách Khoa, tnhuy@hcmut.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo giới thiệu về thiết bị lặn không người lái (AUV) sử dụng cơ cấu lặn nổi tích hợp xylanh và đối trọng, được xây dựng theo từng module riêng từ thiết kế cơ khí, hệ thống điện cho đến xây dựng giải thuật điều khiển cho thiết bị để đảm bảo thiết bị hoạt động liên tục một thời gian dài ở độ sâu 20 mét nước. Nội dung chính sẽ trình bày tính toán biên dạng vỏ tàu; lựa chọn vật liệu vỏ; tính toán và mô phỏng ứng suất, biến dạng trên vỏ tàu và các nắp đậy chống thắm bằng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn với module tích hợp trong phần mềm Solidworks; phân tích và lựa chọn phương án bố trí xy lanh - đối trọng. Ngoài ra, việc thiết kế hệ thống điều khiển cho robot cũng được đề cập và làm rõ thông qua lựa chọn thiết bị cảm biến, cơ cấu cháp hành và thiết kế phần cứng để đảm bảo khả năng hoạt động ổn định cho robot lặn.

Từ khóa: AUV, structure of diving/ floating, waterproof, thruster.

Chỉ số phân loại: 2.5

Abstract: This paper presents the design of the autonomous underwater vehicle (AUV) with a built-in cylinder for floatation and counterbalance. The modular structure including mechanical design, eletronic system and control algorithm ensures countinous operation for the vehicle at a depth of 20 meters underwater. The main content will focus on calculating ship hull profile and material selection; computing and simulating stress and distortion on ship hull and waterproof covering using finite element method with integrated modules in SolidworksTM; analyzing and planning cylinder and clarified by the selection of sensors and actuators as well as hardware layout to guarantee stable operation for AUV.

Keywords: AUV, cơ cấu lặn/nổi, chống thấm, thiết bị đẩy.

Classification number: 2.5

1. Giới thiệu

Ngày nay, cùng với sự phát triển như vũ bão của nhân loại, khoa học công nghệ ngày một hiện đại, con người dần khám phá và chinh phục những bí ẩn của tự nhiên. Tuy nhiên, đại dương vẫn còn là một bí ẩn cách xa tầm tay và sự hiểu biết của con người. Viêc nghiên cứu về biển, giải mã những bí ẩn sâu trong lòng đại dương đòi hỏi những trang thiết bị hiện đại như robot lặn không người lái, có thể đắm mình trong đô sâu mà người nhái không thể nào đạt tới. Để nghiên cứu môi trường nước, khảo sát hê sinh thái, thăm dò biến động của biển, hay dùng cho mục đích quân sự, phòng thủ và do thám,... nhiều mẫu AUV được nghiên cứu và phát triển. AUV Remus 100 Woods của Hole Oceanographic Insitution [1] có thể lặn sâu 100m với thời gian trên 10h ở vận tốc 2,3m/s. Lightweight AUV (LAUV) [2] được phát triển tại đại học Porto hợp tác với OceanScan hoạt động ở độ sâu 20m, trong 8h với vận tốc 1,5-2m/s. Autosub6000 của Autonomous Underees Vehicle Applications Center hoạt động ở độ sâu đến 6000m trong 30h với vận tốc 5km/h. Slocum Glider chế tạo bởi Teledylnemarine không sử dụng động cơ đẩy, có thể hoạt động trong thời gian đến vài tháng. [3]

Việt Nam là một quốc gia ven biển, có đường bờ biển dài hơn 3.200 km, với diện tích chiểm khoảng 1.000.000 km2 biển Đông. Các hoạt động kinh tế, khoa học, du lịch và bảo vệ chủ quyền trên biển đảo đóng vai trò hết sức quan trọng. Hàng loạt công trình như cầu cảng, giàn khoan, đường ống dẫn dầu, nhà giàn đã và đang được xây dựng. Cùng lúc phát sinh những vấn đề về thăm dò, khảo sát và thực hiện các nhiệm vụ dưới nước, cứu hộ cứu nạn, trục vớt... Vì vậy việc nghiên cứu phát triển các thiết bị hoạt động dưới nước là một trong những nhiệm vụ cấp thiết để nắm lợi thế về biển và tài nguyên biển.



b) AUV Remus c) Slocum glider

Hình 1. Các loại AUV hình dạng ngư lôi.

Bài báo sẽ tập trung mô tả về thiết kế biên dạng vỏ AUV; mô phỏng ứng suất để chọn vật liệu và bề dày vỏ phù hợp; nghiên cứu, thiết kế cơ cấu lặn nổi; và thiết kế hệ thống điều khiển cho robot lặn AUV.

2. Thiết kế AUV

2.1. Lựa chọn ý tưởng thiết kế.

Thông số kĩ thuật thiết kế:

- Biên dạng ngư lôi
- Độ sâu tối đa 20m
- Vận tốc tối đa 2m/s
- Hoạt động liên tục trong 2 giờ
- Khối lượng thiết bị 50kg

Để đáp ứng khả năng lặn/nổi của thiết bị, nhóm tiến hành đánh giá các phương án thiết kế 1-5 ứng với hình 2-6, trong đó: [4]

- 1: Phần đầu AUV
- 2: Phần thân AUV
- 3: Phần đuôi AUV
- 4: Xy lanh (hình 4)
- 5: Đối trọng (hình 2, 4)
- 6: Mach điều khiển (hình 3)
- 7: Pin (hình 3)
- 8: Xy lanh (hình 3, hình 6)
- 9: Cánh đuôi (hình 3, hình 6)
- 10: Thiết bị đẩy (hình 3)







Hình 3. Cơ cấu lặn/nổi dùng 2 xy lanh điều khiển bằng 1 động cơ



Hình 4. Cơ cấu lặn/nổi dùng 2 xy lanh điều khiển bằng 1 động cơ kết hợp đối trọng



Hình 5. Cơ cấu lặn/nổi dùng 1 xy lanh kết hợp đối trọng

220



Hình 6. Cơ cấu lặn/nổi dùng 2 xylanh điều khiển độc lập
Bảng 1. Đánh giá các phương án lặn nổi.

Phương án Tiêu chuẩn	1	2	3	4	5
Mức độ chế tạo	Đơn giản	Khá phức tạp	Khá phức tạp	Khá phức tạp	Khá phức tạp
Mức độ điều khiển	Đơn giản	Đơn giản	Khá phức tạp	Phức tạp	Khá phức tạp
Độ linh hoạt	Kém	Kém	Tốt	Tốt	Tốt
Khả năng phân bố	Tốt	Tương đối	Tương đối	Tốt	Tương đối
Khả năng giữ cân bằng		Kém	Tốt	Khá	Khá

Từ phân tích trên bảng 1, nhóm nghiên cứu thống nhất thiết kế AUV theo hình dạng ngư lôi và lựa chọn phương án 3 – cơ cấu lặn/nổi sử dụng 2 xy lanh điều khiển bằng 1 động cơ kết hợp đối trọng (hình 4).

2.2. Tính toán biên dạng và vỏ tàu

Hầu hết các AUV dạng ngư lôi dựa trên biên dạng Myring (Hình 8) với phần thân hình trụ, phần mũi và đuôi tàu sẽ theo công thức (1), (2). [5]



Hình 7. Biên dạng Myring

Biên dạng phần mũi tàu:

$$r_{(x)} = \frac{1}{2} \cdot d \cdot \left[1 - \left(\frac{x - a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}}$$
 (1)

Biên dạng phần đuôi tàu:

$$r_{(x)} = \frac{1}{2} \cdot d - \left[\frac{3d}{2c^2} - \frac{tan\theta}{c}\right] \cdot \left(x - a - b\right)^2 + \left[\frac{d}{c^3} - \frac{tan\theta}{c^2}\right] \cdot \left(x - a - b\right)^3$$
(2)

Trong đó:

 $r_{(x)}$: bán kính mặt cắt ngang tại vị trí x.

d : đường kính lớn nhất trên mặt cắt ngang.

a, b, c: lần lượt là chiều dài phần mũi, thân, đuôi AUV.

: góc tại vị trí đuôi tàu.

n : Tham số mũ làm thay đổi biên dạng mũi tàu.

Các thông số kích thước bao và tham số n, θ được chọn dựa trên việc tham khảo những thiết kế AUV trên thế giới và được thể hiện tại bảng 2. [6]

Thông số	Giá trị
а	330 mm
b	1300 mm
с	360
d	203.2 mm
n	2
θ	25°

Bảng 2. Thông số kích thước bao của AUV

Qua tìm hiểu các mẫu AUV trên thế giới cùng với các phương tiện hoạt động dưới nước, đặc biệt là môi trường nước biển, nhóm quyết định lựa chọn vật liệu nhôm hợp kim T6 – 6061 với cơ tính cho ở bảng 3. [6]

Bảng 3. Cơ tính nhôm hợp kim T6 – 6061

Cơ tính						
Độ bền	Ứng suất		Hệ số dẫn			
kéo	chảy	Tỳ lệ kéo	nhiệt (BTU			
(MPa)	(MPa)		hr.ft.°F)			
≥310	≥270	10%	1160			



Hình 8. Phần đầu cố định và áp suất lên vỏ AUV

Phân tích phần tử hữu hạn bằng module Simulation trong phần mềm Solidworks với vỏ AUV dày 1mm, dài 1300mm, đường kính ngoài 203,2mm, 2 đầu cố định bằng vách ngăn, áp lực nước 0,2MPa ở độ sâu 20m (hình 8).

Kết quả mô phỏng (hình 9, 10) cho thấy ứng suất tối đa lên vỏ là 22,1 MPa $\ll [\sigma_c] =$ 275 MPa, biến dạng tối đa 0,038mm. Như vậy việc chọn bề dày vỏ AUV phụ thuộc vào khả năng gia công và thị trường.



Hình 9. Trường ứng suất Von Mises lên thành vỏ AUV.



Hình 10. Biến dạng dẻo trên thân AUV.

Ngoài ra, phải tránh hư hỏng do quá trình hoạt động có thể va chạm với động vật hoặc chướng ngại vật. Nhóm lựa chọn kích thước thân AUV theo sản phẩm dạng ống của nhà sản xuất. Đường kính ngoài D = 203,2mm; bề dày t = 3,18mm; đường kính trong d = 196,85mm. Tiến hành mô phỏng tương tự với thân dày 1mm, ta thu được kết quả (hình 11, 12): ứng suất tối đa lên thân AUV là 6,8MPa, biến dạng lớn nhất 0,0095mm.



Hình 11. Trường ứng suất Von Mises tác động lên thành vỏ dày 3,18 mm



Hình 12. Biến dạng dẻo trên thân AUV dày 3,18mm

Tiến hành phân tích nắp chống thắm 2 đầu thân AUV với bề dày 2, 3, 4 mm (hình 13) ta thu được kết quả (hình 14, 15, 16, bảng 4).



Hình 13. Nắp chống thắm 2 đầu thân AUV.



Hình 14. Ứng suất và biến dạng trên nắp dày 2mm.



Hình 15. Ứng suất và biến dạng trên nắp dày 3mm.



Hình 16. Ứng suất và biến dạng trên nắp dày 4mm.

Bảng 4. Giá trị ứng suất và biến dạng tối đa trên nắp.

Chiều dày mặt chắn (mm)	Áp lực tối đa tác dụng (MPa).	Kích thước biến dạng tối đa (mm)
2	228,5	3,51
3	101,5	1,06
4	56,8	0,45

Như vậy nắp có bề dày 4mm là phù hợp với yêu cầu thiết kế.

2.3. Thiết kế cơ cấu lặn/nổi

2.3.1. Hệ piston – xy lanh



Hình 17. Mô hình 3D hệ piston – xy lanh

Lực dọc trục tác dụng lên xy lanh tính bởi công thức (3) bao gồm lực ma sát giữa O-ring với thành xy lanh (4), áp lực nước tác dụng lên piston (5), áp lực khí nén trong thân tàu khi piston di chuyển (6).

$$F_a = F_p - F_{ms} - F_n \tag{3}$$

Lực ma sát giữa O-ring và thành xy lanh:

$$F_{ms} = F_c + F_h \tag{4}$$

Trong đó:

- $F_c = f_c L_p$ là lực ma sát gây ra bởi sức nén của O-ring.

- f_c : lực ma sát trên 1cm chiều dài [N/cm]

L_p: tổng chiều dai O-ring

- $F_h = f_h A_p$ là lực ma sát giữa bề mặt tiếp xúc của O-ring và thành xy lanh:

- f_h : lực ma sát trên 1 cm^2 diện tích mặt tiếp xúc

- A_p : diện tích mặt tiếp xúc

Lực dọc trục F_p do áp suất nước (hình 18):



Hinh 18. Trạng thái AUV khi hút, nhả nước.

$$F_p = p.A_{piston} \tag{5}$$

Trong đó:

p: Áp suất nước (áp suất thuỷ tĩnh)

Apiston: diện tích bề mặt piston tiếp xúc nước

- Áp lực khí nén: $F_n = P_2 / A_p$ (6)

Giả sử đây là quá trình đẳng nhiệt, áp lực lớn nhất khi piston lùi sâu nhất:

 $P_1V_1 = P_2V_2 \iff P_2 = P_1V_1 / V_2$

Đường kính sơ bộ vis me bi điều khiển xy lanh được tính theo công thức (7). [6]

$$d_1 \ge \sqrt{\frac{4.1, 3.F_a}{\pi.[\sigma_k]}} \quad (\text{mm}) \tag{7}$$

Trong đó $[\sigma_k]$: giới hạn chảy của vật liệu

Mô-men xoắn trên trục vis me:

$$T = \frac{F_a P_h}{2\pi \eta_1}$$
(Nm) (8)

Góc vis (Lead angle):

$$\gamma = \operatorname{arctg}\left[\frac{p_h}{\pi.d}\right] (^{\mathrm{o}}) \tag{9}$$

Trong đó

 P_h : Bước vis (mm)

 η_1 : hiệu suất. (%)

Tổng hợp các thông số kích thước bộ truyền vis me bi cho trong bảng 5.

Bảng 5. Thông số bộ truyền vis me bi

p_h	d_1	γ	n,	Ν	F.	Т	Р
РП	**1	Y	η_1	IN	Га	1	r

10	10	10,8	95	60	1720	2,79	17,5
----	----	------	----	----	------	------	------

Mô-men trên trục đầu ra hộp giảm tốc: $T_{het} = 2.T = 2.2, 79 = 5,58Nm$ (10)

Chọn động cơ RE – max 24ϕ mm, Graphite Brushes, 11W (Part number 222055) với các thông số: U = 15V, hiệu suất $\eta = 83\%$, Mô men cực đại T_{max}=73Nm, N=6500 vòng/phút.

Chọn hộp số Planetary Gearhead GP 32 A ϕ 32mm, 0,75 – 4,5 Nm, Metal Version.Với các thông số trong bảng 5, ta chọn ổ bi đỡ 1 dãy với các thông số sau: đường kính trong d=10mm, đường kính ngoài D=30mm, chiều rộng b=9mm, khả năng tải động 5400N, khả năng tải tĩnh 2360N.

Chọn bạc trượt cho cụm dẫn hướng piston: bạc trượt tự bôi trơn MPBZ (H7/f7-f8) có kích thước:

	Bê dày t	= 2mm		
10 {	-0,034			
10	(-0,016)			
	Đường	kính	ngoài	D = 12f7 =
8{	0			
(-	L0 015			
	Đường	kính	trong	d = 8H7 =



Hình 19. Mô hình 3D hệ đối trọng

Đối trọng được dẫn động qua bộ truyền vis me bi, được dẫn hướng trên 2 ti trượt với 4 ổ trượt. Tải trọng dọc trục vis me:

$$F_{a_{tt}} = \mu P_{dt} = 0,15.40 = 6N \tag{11}$$

Sử dụng các công thức (7), (8), (9) và chọn theo tiêu chuẩn, thu được các thông số vis me cho đối trọng trong bảng 6.

Bảng 6. Thông số bộ truyền vis me bi hệ đối trọng

p_h	d_1	γ	η_1	Ν	F_a	Т	Р
4	10	7,25	95	150	6	4.10^{-3}	0,063

Sử dụng cùng loại động cơ với hệ piston – xy lanh cho hệ đối trọng. Với các thông số trong bảng 6, ta chọn ổ bi đỡ 1 dãy với các thông số sau: đường kính trong d=10mm, đường kính ngoài D=30mm, chiều rộng b=9mm, khả năng tải động 5400N, khả năng tải tĩnh 2360N.



Hình 20. Mô hình 3D AUV hoàn chỉnh

2.4. Thiết kế thiết bị đẩy

Thiết bị đẩy được thiết kế như hình 21 với các thông số kỹ thuật [7]:

- Công suất: 300W
- Tốc độ quay: 1200 rpm
- Độ sâu hoạt động: 100m
- Lực đẩy: 6 kgf
- Số cánh chân vịt: 6 cánh
- Kích thước:
- Chiều dài: 360 mm
- Đường kính thân: 86 mm
- Nguồn vào thiết bị: 48V
- Chống thấm nước bằng khớp nối từ



Hình 21. Thiết bị đẩy cho AUV3. Hệ thống điều khiển AUV

Robot được kết nối với trung tâm điều khiển đặt trên mặt nước (trên bờ, trên tàu mẹ...) thông qua hệ thống không dây RF và Sonar, có nhiệm vụ truyền lệnh điều khiển tới robot, truyền dữ liệu thu được từ robot về trạm trung tâm để quản lí và ra lệnh điều khiển.

Kết cấu hệ thống điều khiển của AUV được biểu diễn như hình 22. Bộ xử lý trung tâm của AUV sử dụng máy tính PC104 có khả năng xử lý tốc độ cao các thông tin được truyền về, tạo tiền đề cho AUV áp dụng các giải thuật cấp cao về dẫn hướng (Guidance) và điều khiển (Control) để phục vụ từng yêu cầu vân hành cu thể. Hê thống thu thập dữ liệu từ cảm biến và điều khiển các cơ cấu chấp hành được thiết kế sử dụng các vi điều khiển lõi ARM tốc đô cao (STM32Fx) và được kết nối với nhau theo chuẩn truyền thông CAN có tốc độ truyền tin lên đến 1Mbit. Ngoài ra, AUV còn được trang bị hệ thống các cảm biến manh mẽ, giúp robot thu thập chính xác các thông tin về trạng thái đang hoạt động và môi trường xung quanh để từ đó hỗ trơ cho việc robot đưa ra quyết đinh điều khiển. Hệ thống cảm biến bao gồm: cảm biến góc nghiêng (sai số < 2 độ), cảm biến GPS (sai số < 1m theo phương ngang), cảm biến vận tốc DVL (sai số 1% ± 1mm/s), cảm biến độ cao đáy biến (Alimeter) và cảm biến độ sâu mặt nước (Pressure sensor).



Hình 22. Mô hình 3D AUV

4. Kết luận

Bài báo đã phân tích và lựa chọn phương án thiết kế hoàn chỉnh cho robot lặn không người lái AUV, có khả năng lặn/nổi ở độ sâu 20m bằng cơ cấu kết hợp giữa xy lanh và đối trọng. Thông qua mô phỏng ứng suất, sử dụng phương pháp phân tích phân tử hữu hạn, để chọn vật liệu và bề dày vỏ phù hợp, đảm bảo robot có thể hoạt động ổn định ở độ sâu thiết kế. Ngoài ra, việc thiết kế hệ thống điều khiển cho robot cũng được đề cập và làm rõ thông qua lựa chọn thiết bị cảm biến, cơ cấu chấp hành và thiết kế phần cứng để đảm bảo khả năng hoạt động ổn định cho robot lặn.

Lời cảm ơn:

Công trình nghiên cứu này được thực hiện tại Phòng thí nghiệm trọng điểm Quốc gia Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống và được tài trợ bởi ĐHQG TP.HCM trong đề tài mã số B2018-20b-01.□

Tài liệu tham khảo

- [1] Kukuly A., et al.,. "Under-ice operations with a *REMUS-100 AUV in the Arctic*", Proc. AUV 2010 IEEE Conference, Monterey, CA, USA (2010).
- [2] Alexandre S., et al.,. "LAUV: The man-portable Autonomous Underwater Vehicle", IFAC Proceedings, 2012.
- [3] Russell W., et al., "Global Inventory of AUV and Glider Technology available for Routine Marine Surveying", Marine Renewable Energy Knowledge Exchange Program, 2013.
- [4] Vikrant P.Shah, "Design Considerations for Engineering Autonomous Underwater Vehicles", B.S Thesis, The University of Texas at Austin, 2005.
- [5] Prestero T., et al., (2001). Verification of a sixdegree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [6] Trịnh Chất, Lê Văn Uyển, "Tính toán hệ dẫn động cơ khí", NXB Giáo dục Việt Nam, tập 1, 2014
- [7] Ngoc-Huy Tran, et al., "Study on Design, Analysis and Control an Underwater Thruster for UUV", Lecture Notes in Electrical Engineering 465, 2017

Ngày nhận bài: 12/3/2018 Ngày chuyển phản biện: 15/3/2018 Ngày hoàn thành sửa bài: 6/4/2018 Ngày chấp nhận đăng: 13/4/2018