

Nghiên cứu đánh giá hiệu quả cực tiểu hóa dị thường từ trường cho vỏ tàu hình cầu dài bằng các thuật toán tối ưu

Trịnh Đình Cường¹, Vũ Lê Hà¹, Phùng Anh Tuấn^{2*}

¹Viện Điện tử, Viện KH-CN quân sự;

²Viện Điện, Đại học Bách khoa Hà Nội.

*Email : tuan.phunganh1@hust.edu.vn

Nhận bài: 19/7/2022; Hoàn thiện: 18/8/2022; Chấp nhận đăng: 10/10/2022; Xuất bản: 28/10/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.82.2022.30-39>

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày các kết quả cực tiểu hóa dị thường từ trường của một vỏ tàu hình cầu dài sử dụng 3 thuật toán tối ưu Active-set, SQP và Interior-Point, để tối ưu hiệu quả bù từ trường bằng các cuộn dây khử từ. Nhóm tác giả tiếp cận bài toán khử từ bằng các mô hình toán học của các vỏ tàu hình cầu dài và từng cuộn dây khử từ bên trong, sau đó, sử dụng 3 thuật toán này để cực tiểu hóa hàm chi phí của bài toán. Các kết quả tối ưu của 3 thuật toán được so sánh và đánh giá định tính dưới dạng quan sát đồ thị và định lượng dưới dạng giá trị RMSE của dị thường từ trường còn lại và giá trị RMS của dị thường từ trường ban đầu. Mục tiêu của nghiên cứu này là đưa ra nhận xét, đánh giá các kết quả cực tiểu hóa bằng 3 thuật toán tối ưu khác nhau, từ đó, đề xuất lựa chọn thuật toán tối ưu phù hợp với mô hình vỏ tàu tương đương.

Từ khóa: Cuộn dây khử từ; Thuật toán tối ưu; Thuật toán Active-set; Thuật toán Sqp; Thuật toán Interior-Point.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi hoạt động trên biển, các tàu quân sự thường bị từ hóa do ảnh hưởng của từ trường trái đất, kết quả là xung quanh con tàu xuất hiện các nhiễu loạn từ trường [1, 2]. Các nhiễu loạn từ trường này có khả năng bị các thiết bị phát hiện dị thường từ của đối phương phát hiện, thậm chí gây kích nổ các loại mìn biển cảm ứng, thủy lôi ở dưới đáy biển [1]. Do đó, yêu cầu đặt ra là phải cực tiểu hóa các dị thường từ này, làm cho con tàu trở nên tàng hình về mặt từ trường trước các thiết bị, vũ khí cảm ứng từ của đối phương [1-4]. Các kỹ thuật bù từ trường bằng các cuộn dây tiêu từ đã được sử dụng để loại bỏ các dị thường từ này, hệ cuộn dây thường bố trí tối thiểu theo 3 phương dọc, phương thẳng đứng và phương ngang vỏ tàu. Khi đó, các cuộn dây khử từ sẽ tạo ra các vector cảm ứng từ có độ lớn bằng với các vector dị thường từ này, nhưng có chiều ngược lại, nên chúng có thể triệt tiêu cho nhau [1-5], [9-12].

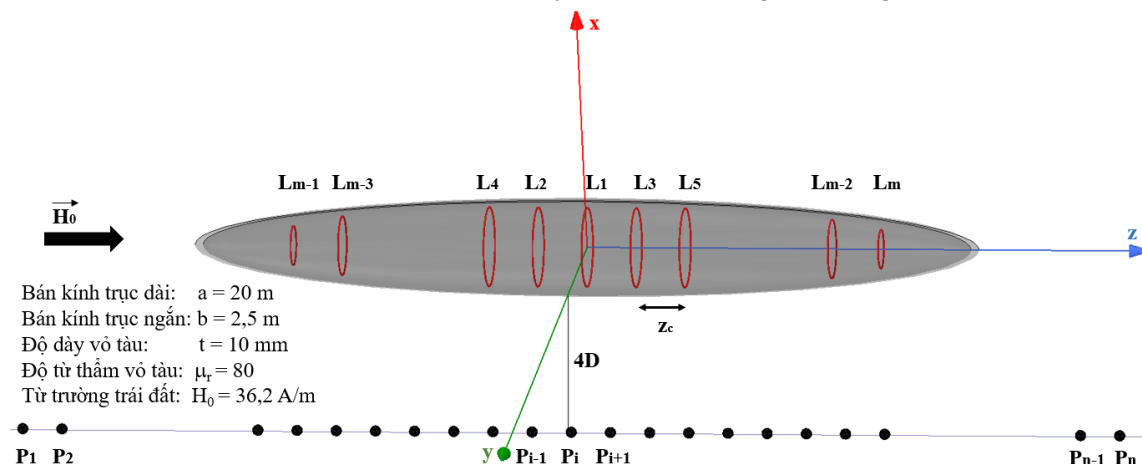
Việc giải bài toán tối ưu khử từ trường cho tàu tương đương với việc giải bài toán ngược phi tuyến đa biến. Các bài toán ngược thường khó tìm được nghiệm xác định, nên thuật toán bình phương trung bình nhỏ nhất thường được áp dụng trong xác định hàm chi phí chung, và kết hợp với các ràng buộc phù hợp để bài toán tồn tại nghiệm duy nhất [2]. Ngoài ra, nhiều thuật toán tối ưu đã được sử dụng kết hợp để cải thiện hiệu quả bù từ trường của các cuộn dây, như thuật toán Tối ưu hóa bầy đàn [5, 9], thuật toán Di truyền [5], thuật toán Hồi quy [11], thuật toán Quasi-Newton [10], thuật toán Cuckoo [12],... Mỗi thuật toán có các hiệu quả tối ưu khác nhau cùng với các đối tượng và mục đích nghiên cứu khác nhau, nên rất khó nhận xét về hiệu quả của mỗi thuật toán. Trong khi đó, mỗi lớp tàu quân sự lại sử dụng một thiết kế hệ thống khử từ khác nhau, các chỉ tiêu, thông số kỹ thuật được tính toán và thiết kế riêng cho từng loại tàu, và đều không được công bố do yêu tố bí mật quân sự. Trong khi đó, nước ta vẫn chưa có một nghiên cứu và quy định nào công bố các kết quả liên quan đến vấn đề tối ưu khử từ và mức khử từ phù hợp cho từng loại tàu quân sự. Vì vậy, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ không bàn luận hay đánh giá về hiệu quả giữa thuật toán này với nhau. Tuy nhiên, để giảm các nghiên cứu trùng lặp khác sau này và đưa ra các lựa chọn phù hợp hơn trong tính toán mô phỏng bài toán khử từ, việc so sánh và đánh giá giữa các thuật toán này là cần thiết. Trên cơ sở đó, nhóm tác giả sẽ sử dụng 3 thuật toán tối ưu là Active-set, SQP và Interior-Point, để so sánh và đánh giá hiệu quả cực tiểu

hóa dị thường từ của một mô hình vỏ tàu hình cầu dài có chứa các cuộn dây khử từ bên trong. Đây là các loại thuật toán tối ưu cổ điển, với giải thuật đơn giản, tốc độ thực hiện nhanh, phù hợp với việc nhanh chóng đánh giá, ước lượng được không gian nghiệm khả thi và mức tăng hình từ trường cho các mô hình tàu tương đương.

2. MÔ HÌNH HÓA BÀI TOÁN TỐI ƯU KHỬ TỪ TRƯỜNG

2.1. Tính toán cảm ứng từ sinh ra bởi vỏ tàu và các cuộn dây

Xét một vỏ tàu hình cầu dài có các cuộn dây khử từ bên trong như trong hình 1.



Hình 1. Hệ thống bù từ trường đơn trục cho vỏ tàu hình cầu dài.

Các vị trí đo từ trường P_1, P_2, \dots, P_n được bố trí trên 1 đường thẳng ở phía dưới vỏ tàu, và mỗi vị trí đo này tương ứng với một cảm biến từ trường ba trục. Đường đo từ trường cách đáy tàu một khoảng bằng $4D$, với D là chiều rộng của vỏ tàu và $D = 2b$ [3]. Các cuộn dây có dạng hình tròn, nằm trong mặt phẳng Oxy, bố trí dọc cách đều nhau một khoảng z_c . Các cuộn dây ngoài cùng có bán kính giảm dần đảm bảo điều kiện nằm hoàn toàn trong vỏ tàu. Độ dày của dây là vô cùng nhỏ và có thể bỏ qua. Nhóm tác giả bỏ qua các tương tác về từ trường giữa vỏ tàu với các cuộn dây và giữa các cuộn dây với nhau, đồng thời coi không gian bên trong và bên ngoài vỏ tàu là chân không, với độ từ thẩm tuyệt đối là $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

Khi chưa khử từ, dưới tác dụng của từ trường ngoài $B_0 = \mu_0 H_0$, cảm ứng từ trường theo phương Oz bên ngoài vỏ tàu được xác định theo các công thức sau [1, 2]:

$$B_{z,votau} = B_0 + \frac{\mu_0 D_1}{c} \left[\left(-\frac{1}{2} \right) \ln \left(\frac{\xi + 1}{\xi - 1} \right) + \frac{c^2 \xi}{r_1 r_2} \right] \quad (1)$$

Trong đó, ξ và r_1, r_2, c lần lượt là tọa độ và các hệ số xác định thuộc hệ tọa độ cầu dài; D_1 là hằng số chưa biết, được xác định từ các điều kiện biên. Công thức của các hệ số và hằng số này đã được xác định trong tài liệu số [1, 2].

Mỗi cuộn dây thứ i mang một dòng điện I_i ($i = 1 \div m$) sẽ tạo ra một vector cảm ứng từ $B_{z,cuonday,i}$. Và theo nguyên lý chồng chất từ trường, xếp chồng hệ m cuộn dây khử từ sẽ tạo ra một vector cảm ứng từ tổng trong không gian $B_{z,cuonday}$, và xác định như sau [2, 6]:

$$B_{z,cuonday} = \sum_{i=1}^m B_{z,cuonday,i}$$

$$= \sum_{i=1}^m \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{1}{\left[(R_i + \rho)^2 + z_i^2 \right]^{1/2}} \left[K_i(k_i) + \frac{R_i^2 - \rho^2 - z_i^2}{(R_i - \rho)^2 + z_i^2} E_i(k_i) \right] \quad (2)$$

Trong đó, I_i và R_i là dòng điện và bán kính của cuộn dây thứ i , ρ và z là các tọa độ trong hệ tọa độ trụ, các tích phân Eliptic $E_i(k_i)$, $K_i(k_i)$ và k_i của cuộn dây thứ i đã được xác định theo tài liệu số [2, 6]. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ không xét đến chiều dòng điện riêng phần của từng cuộn dây, việc lựa chọn chiều dòng điện, tương ứng là chiều của vector cảm ứng từ, sẽ là một bậc tự do được xác định bởi thuật toán tối ưu.

Kết quả ta thu được một vector từ trường tổng là xấp chồng các vector cảm ứng từ của vỏ tàu và các vector cảm ứng từ của các cuộn dây, các vector từ trường ngược chiều nhau sẽ bù trừ cho nhau, mức bù từ trường này được xác định như sau:

$$r_j = B_{zj,votau} + B_{zj,cuonday} - B_0 \quad (3)$$

Trong đó, $j = (0, 1, \dots, n)$ là số điểm đo trong không gian; r_j là phần dư của cảm ứng từ của tàu và cảm ứng từ của các hệ cuộn dây so với từ trường nền. Yêu cầu đặt ra là cực tiểu hóa phần dư này, làm cho hệ từ trường của tàu và cuộn dây tầng hình so với từ trường nền của trái đất.

2.2. Tính toán hàm chi phí của hệ thống và phương pháp đánh giá tối ưu

Từ công thức (2.3), hàm chi phí của bài toán được xác định như sau:

$$f = \min \left(\sum_{j=1}^n (B_{zj,votau} + B_{zj,cuonday} - B_0)^2 \right) \quad (4)$$

Ràng buộc: dòng điện của từng cuộn dây nằm trong dải: $-10.000 \text{ A} \div 10.000 \text{ A}$.

Hàm chi phí f là một hàm phụ thuộc vào rất nhiều biến số như tọa độ đo (x, y, z) , số lượng cuộn dây m , bán kính cuộn dây R_i ($i = 1 \div m$), bán kính trục dài a , bán kính trục ngắn b của vỏ tàu, độ từ thâm vỏ tàu μ_r , cường độ từ trường trái đất H_0 , số lượng điểm đo n và giá trị dòng điện khử từ I_i ($i = 1 \div m$) trong từng cuộn. Các biến số này thay đổi theo các thiết kế khác nhau về vỏ tàu, cuộn dây khử từ và các yêu cầu về mức độ tầng hình từ trường của tàu. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung cực tiểu hóa hàm chi phí f theo biến số là dòng điện khử từ trong 6 kịch bản về số lượng cuộn dây khử từ là 3, 5, 7, 9, 11 và 13 cuộn dây, các cuộn dây cách đều nhau 1 khoảng $z_c = 2,5 \text{ m}$, với số điểm đo là $n = 101$ điểm. Các biến số còn lại đã được xác định từ các giả thiết đầu vào, độ từ thâm μ_r và từ trường trái đất H_0 được sử dụng lại từ nghiên cứu trước đây của nhóm tác giả trong tài liệu số [2]. Số lượng tối đa 13 cuộn dây tiêu từ được giả thiết là đủ nhiều để đảm bảo mục tiêu khử từ trường trong nghiên cứu này. Việc tìm số lượng cuộn dây khử từ tối thiểu phù hợp với mục tiêu bù từ trường là một bài toán cần nghiên cứu thêm bằng các kỹ thuật tối ưu khác và không nằm trong nhiệm vụ mục tiêu của nghiên cứu này.

Để có cơ sở so sánh và đánh giá kết quả, nhóm tác giả sử dụng cách so sánh định tính dưới dạng quan sát đồ thị và định lượng dưới dạng giá trị sai số căn bậc hai bình phương trung bình (RMSE) trên cùng đường lấy mẫu, theo công thức sau:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_{zi,votau} + B_{zi,cuonday} - B_0)^2} \quad (5)$$

Giá trị RMSE sau khi kết thúc mô phỏng tối ưu được dùng để so sánh với giá trị căn bậc hai bình phương trung bình (RMS) của dị thường từ ban đầu do vỏ tàu sinh ra dưới tác dụng của từ trường nền B_0 , và được tính như sau:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_{zi,votau} - B_0)^2} \quad (6)$$

Áp dụng công thức (1) với các thông số đầu vào đã biết, tính được giá trị RMS là $137,748 \text{ nT}$.

2.3. Các thuật toán tối ưu cổ điển

Xét một bài toán tối ưu phi tuyến có ràng buộc dạng tổng quát như sau [13-16]:

$$\min_x f(x), \text{ với } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (7)$$

Ràng buộc:
$$h_i(x) = 0, \quad (i=1, 2, \dots, p) \quad (8)$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad (j=1, 2, \dots, q) \quad (9)$$

Trong đó, $f(x)$, $h(x)$, $g(x)$ là các hàm phi tuyến, \mathbf{x} là vector của nhiều biến thiết kế. Đối với bài toán tối ưu hiệu quả khứ từ cho tàu, hàm chi phí $f(x)$ được tính theo công thức (4) và cần được tính toán để đạt cực tiểu. Vector biến thiết kế \mathbf{x} chính là vector dòng điện \mathbf{I} gồm tối đa 13 dòng điện thành phần, là nghiệm khả thi cần phải xác định để hàm chi phí của bài toán đạt cực tiểu, hay nói cách khác chính là tối ưu hiệu quả tàng hình từ trường cho vỏ tàu.

2.3.1. Thuật toán tối ưu SQP

Theo [13, 16], nguyên lý của thuật toán SQP là tính gần đúng ma trận Hessian của hàm Lagrange sử dụng phương pháp Quasi-Newton. Theo đó, một bài toán con Quy hoạch bậc hai (QP) được giải ở mỗi vòng lặp, nghiệm nhận được dùng để xác định độ dốc của hàm Lagrange và hướng tìm kiếm nghiệm tiếp theo. Điểm cực trị của bài toán tối ưu sẽ thỏa mãn các điều kiện Karush-Kuhn-Tucker (điều kiện KKT) và gradient của hàm Lagrange bằng 0.

Hàm Lagrange dùng để giải bài toán con QP có dạng như sau [13]:

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^p \lambda_i h_i(x) + \sum_{j=1}^q \mu_j g_j(x) = f(x) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{h}(x) + \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{g}(x) \quad (10)$$

Trong đó, $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_p)^T$ và $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \dots, \mu_q)^T$ là vector các hệ số nhân Lagrange có ràng buộc bằng và không bằng.

Theo [13], các điều kiện KKT có dạng như sau:

$$\nabla L(x, \lambda, \mu) = \nabla f(\mathbf{x}_*) + \sum_{i=1}^p \lambda_i \nabla h_i(\mathbf{x}_*) + \sum_{j=1}^q \mu_j \nabla g_j(\mathbf{x}_*) = 0 \quad (11)$$

Và
$$g_j(\mathbf{x}_*) \leq 0, \quad \mu_j g_j(\mathbf{x}_*) = 0, \quad (j=1, 2, \dots, q) \quad (12)$$

Trong đó:
$$\mu_j \geq 0, \quad (j=1, 2, \dots, q) \quad (13)$$

Bài toán tổng quát được tính gần đúng thông qua bài toán con QP như sau:

$$\min_{\mathbf{x}_k, \mathbf{s}} \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \nabla^2 L(\mathbf{x}_k) \mathbf{s} + \nabla f(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{s} + f(\mathbf{x}_k), \quad (14)$$

Ràng buộc:
$$\nabla h_i(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{s} + h_i(\mathbf{x}_k) = 0, \quad (i=1, \dots, p) \quad (15)$$

$$\nabla g_j(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{s} + g_j(\mathbf{x}_k) \leq 0, \quad (j=1, \dots, q) \quad (16)$$

Ma trận đối xứng dương $\mathbf{H}_k \approx \nabla^2 L(\mathbf{x}_k)$ được dùng để tính gần đúng ma trận Hessian, và \mathbf{H}_k có thể được cập nhật bằng thuật toán BFGS theo công thức sau [13]:

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \frac{v_k v_k^T}{v_k^T u_k} - \frac{\mathbf{H}_k u_k u_k^T \mathbf{H}_k^T}{u_k^T \mathbf{H}_k u_k}, \quad (17)$$

Nghiệm của bài toán con QP được dùng để tạo ra vòng lặp mới theo hướng tìm kiếm với giá trị độ dốc $s_k = -\nabla f(\mathbf{x}_k)$, được xác định theo phương trình sau:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{s}_k \quad (18)$$

Trong đó, α_k là độ dài bước điều chỉnh tại vòng lặp thứ k , và được xác định bằng phương pháp tìm kiếm dòng thích hợp để tối thiểu hóa hàm phạt sau:

$$\Phi(x) = f(x) + \rho \left[\sum_{i=1}^p |h_i(x)| + \sum_{j=1}^q \max \{0, g_j(x)\} \right] \quad (19)$$

Thuật toán tối ưu SQP được triển khai như sau:

1. Khởi tạo giá trị xuất phát x_0 và giá trị gần đúng H_0 .

Vòng lặp:

2. Cho $k = 1$ tới N thì thực hiện

3. Giải bài toán con QP theo (14) - (16). Xác định λ_k tại x_k thỏa mãn điều kiện KKT.

4. Sử dụng phương pháp tìm kiếm dòng, xác định s_k , α_k , và x_{k+1} theo công thức (18).

5. Tính và kiểm tra hàm phạt theo công thức (19). Nếu hàm phạt không giảm thì điều chỉnh giảm giá trị của α_k và s_k tại Bước 4 cho đến khi độ lớn của hàm phạt giảm đi.

6. Đánh giá gradient của hàm Lagrange tại x_{k+1} . Cập nhật H_{k+1} theo công thức (17).

7. Tăng k lên 1 đơn vị: $k = k + 1$, tiếp tục vòng lặp cho đến khi α_k và s_k đủ nhỏ.

Kết thúc vòng lặp: Khi α_k và s_k tiến về 0 thì điều kiện KKT của bài toán được thỏa mãn.

2.3.2. Thuật toán tối ưu Active-Set

Thuật toán Active-Set dùng để giải một cách tuần tự các bài toán con QP, tương tự như thuật toán SQP. Thuật toán Active-Set thường được chia thành hai giai đoạn, đầu tiên là tập trung vào tính khả thi, sau đó là tập trung vào tính tối ưu [7, 8]. Tại một tập nghiệm tối ưu x , ràng buộc $g_i(x) \leq 0$ được gọi là hoạt động tại x nếu $g_i(x) = 0$ và không hoạt động tại x nếu $g_i(x) < 0$. Các ràng buộc bằng luôn là hoạt động, tập hoạt động tại x được tạo thành từ các ràng buộc hoạt động $g_i(x)$ [8]. Để thỏa mãn điều kiện KKT, chỉ có các ràng buộc hoạt động tồn tại để gradient của hàm Lagrange bằng 0, các ràng buộc không hoạt động thì các hệ số nhân Lagrange bằng 0. Khi đó, bài toán ràng buộc tổng quát sẽ trở thành bài toán ràng buộc sửa đổi với các ràng buộc bằng đã chọn. Trong bài báo này, các ràng buộc không bằng được biểu thị dưới dạng các ràng buộc biên.

Các bước của thuật toán Active-Set cũng được thực hiện tương tự như thuật toán SQP [7], điểm khác biệt là các bài toán con QP được giải với các ràng buộc tập hoạt động, ngoài ra thuật toán này được thúc đẩy bởi bổ đề Farkas, với tập khả thi x phải thỏa mãn các điều kiện tối ưu bậc nhất hoặc là điểm bắt đầu của một hướng có độ dốc khả thi.

2.3.3. Thuật toán tối ưu Interior-Point

Thuật toán Interior-Point đưa ra một giải pháp thay thế cho thuật toán Active-Set để xử lý các bài toán lớn với nhiều ràng buộc không bằng. Theo đó, bài toán ràng buộc không bằng được giải bằng cách tạo ra một hàm chặn logarit, để hạn chế các nghiệm tiềm năng tăng đến vô cùng khi tiến gần đến biên của vùng khả thi [14, 15]. Lúc này, bài toán tối ưu ban đầu được giải bằng một chuỗi các bài toán cực tiểu gần đúng như sau [13-15]:

$$\min_{x,s} f_\mu(x,s) = \min_{x,s} f(x) - \mu \sum_{i=1}^p \ln s_i \quad (20)$$

$$\text{Ràng buộc:} \quad h(x) = 0 \quad (21)$$

$$g(x) + s = 0 \quad (22)$$

Trong đó, μ là tham số chặn và luôn dương, s là biến lỏng lẻo và giả sử s dương.

Để giải bài toán (20) - (22), thuật toán Interior-Point sử dụng kết hợp với thuật toán SQP và thuật toán Trust Region theo một trong hai bước ở mỗi lần lặp sau [13-15]:

1. Bước trực giao theo (x, s) (Bước Newton): Giải phương trình (11), (12) của điều kiện KKT với bài toán gần đúng (20) nhằm thỏa mãn ràng buộc (22).

2. Bước tiếp tuyến (Bước Gradient liên hợp): Sử dụng phương pháp Gradient liên hợp để giải bài toán gần đúng (20), thuật toán điều chỉnh cả x và s , vẫn giữ s dương. Cách tiếp cận là giảm thiểu một xấp xỉ bậc hai cho bài toán gần đúng (20) trong một Trust Region, tuân theo các ràng buộc tuyến tính (21) và (22).

Trước tiên, thuật toán thực hiện bước trực giao, nếu không thỏa mãn, thuật toán sẽ thử một bước tiếp tuyến. Ở mỗi lần lặp, thuật toán điều chỉnh giảm hàm Lagrange sau:

$$f_{\mu}(x, s) + \nu \| (h(x), g(x) + s) \| \tag{23}$$

Trong đó, ν là tham số phạt và luôn dương. Hệ số nhân Lagrange có thể tăng theo số lần lặp để buộc nghiệm nhận được có tính khả thi. Nếu mỗi bước thử không làm giảm hàm Lagrange, thì thuật toán sẽ từ chối bước đã thử và chuyển sang thử một bước mới.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiệu quả cực tiểu hóa hàm chi phí và số vòng lặp

Với cùng hàm chi phí ban đầu, kích bản 3, 5, 7 và 9 cuộn dây đều thu được hàm chi phí cực tiểu giống nhau theo cả 3 thuật toán, với số vòng lặp không khác nhau nhiều. Số cuộn dây tăng lên thì hàm chi phí cực tiểu giảm càng nhanh, cụ thể kích bản 9 cuộn dây cho hàm chi phí cực tiểu giảm hơn 400 lần so với kích bản 3 cuộn dây, kết quả chi tiết có trong bảng 1.

Bảng 1. Tổng hợp hàm chi phí cực tiểu và số lần lặp của 3 thuật toán.

Số cuộn dây khử từ	Hàm chi phí ban đầu (nT^2)	Thuật toán Active-set		Thuật toán SQP		Thuật toán Interior-Point	
		Hàm chi phí cực tiểu (nT^2)	Số vòng lặp	Hàm chi phí cực tiểu (nT^2)	Số vòng lặp	Hàm chi phí cực tiểu (nT^2)	Số vòng lặp
3 cuộn	$4.17.10^8$	444751	6	444751,4	11	444751,4	16
5 cuộn	$1.38.10^8$	57921,4	18	57921,39	22	57921,39	29
7 cuộn	$2.64.10^8$	15305,8	40	15305,78	34	15305,78	43
9 cuộn	$3.97.10^8$	1016,19	67	1016,193	60	1016,193	67
11 cuộn	$4.63.10^8$	22,2382	71	35,16496	43	20,87759	105
13 cuộn	$4.84.10^8$	0,338415	59	0,33781	59	0,134116	104

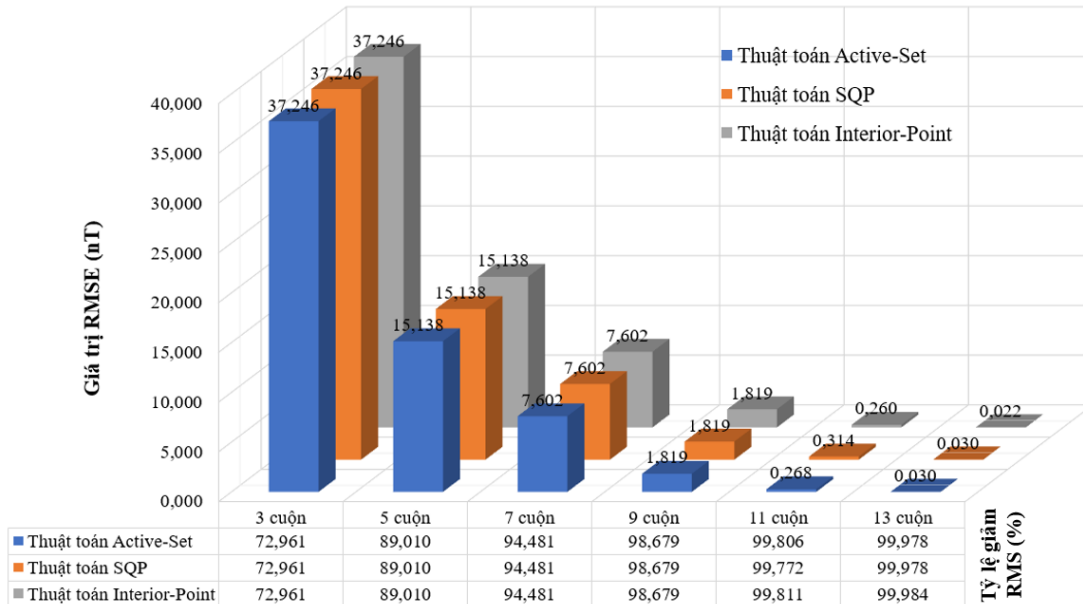
Với kích bản 11 cuộn dây, hàm chi phí cực tiểu đã giảm rất nhiều so với kích bản 9 cuộn, lần lượt là 29 lần (với thuật toán SQP), 46 lần (thuật toán Active-Set) và 50 lần (thuật toán Interior-Point), tương ứng với các hiệu quả bù từ trường khác nhau.

Kích bản 13 cuộn dây đạt được hiệu quả bù từ trường tốt nhất ở cả 3 thuật toán, hàm chi phí cực tiểu đã giảm xuống dưới mức $1 nT^2$. Ở kích bản này, thuật toán Interior-Point thu được hàm chi phí cực tiểu là $0,134116 nT^2$ với 104 vòng lặp, đạt hiệu quả bù từ trường tốt hơn 2 thuật toán còn lại, với hàm chi phí cực tiểu đều là $0,338 nT^2$ sau 59 vòng lặp. Tuy nhiên, thuật toán Interior-Point luôn cần nhiều vòng lặp hơn để đạt được các hàm chi phí cực tiểu tương đương hoặc gần tương đương với 2 thuật toán Active-Set và SQP.

3.2. Hiệu quả giảm giá trị RMSE và giá trị RMS

Hiệu quả giảm giá trị RMSE và giá trị RMS của 4 kích bản 3, 5, 7 và 9 cuộn dây là hoàn toàn giống nhau, với kích bản 11 và 13 cuộn dây thì hiệu quả giảm khác nhau không nhiều, nhưng mức bù dị thường từ trường lại khác nhau lớn, kết quả chi tiết có trong hình 2. Với kích bản 3 và 5 cuộn dây, giá trị RMSE lần lượt là $37,246 nT$ và $15,138 nT$, dù đã giảm nhiều so với giá trị $137,748 nT$ ban đầu, nhưng tỷ lệ giảm RMS chưa cao với 72,961% và 89,010%. Theo tài liệu số [17], thuật toán tối ưu hội tụ và đưa ra quyết định lựa chọn dòng điện khử từ khi dị thường từ

trường sau khi bù nhỏ hơn hoặc 10% hoặc 5% hoặc 1% độ lớn của giá trị RMS của dị thường từ ban đầu. Do đó, kích bản 3 và 5 cuộn dây sẽ không đảm bảo về hiệu quả khử từ.



Hình 2. Tổng hợp hiệu quả giảm giá trị RMSE và giá trị RMS của 3 thuật toán.

Với kích bản 7 cuộn dây, giá trị RMSE đã giảm hơn 1 nửa so với kích bản 5 cuộn dây, còn 7,602 nT so với 137,748 nT ban đầu, hiệu quả giảm RMS đạt 94,481%, nhỏ hơn 10% giá trị RMS. Kết quả của kích bản 9 cuộn dây thu được giá trị RMSE rất nhỏ, với 1,819 nT, và hiệu quả giảm giá trị RMS đạt 98,679%, nhỏ hơn 5% giá trị RMS.

Tại kích bản 11 cuộn dây, giá trị RMSE và RMS giảm rất nhiều ở cả 3 thuật toán, tới hơn 99% giá trị RMS, dị thường từ trường sau khi bù đều nhỏ hơn 1% giá trị RMS, giá trị RMSE đều nhỏ hơn 1 nT, ở mức vài trăm picoTesla. Về hiệu quả, thuật toán Interior-Point cho kết quả bù từ trường tốt hơn thuật toán Active-Set, còn thuật toán SQP cho kết quả thấp nhất ở kích bản này.

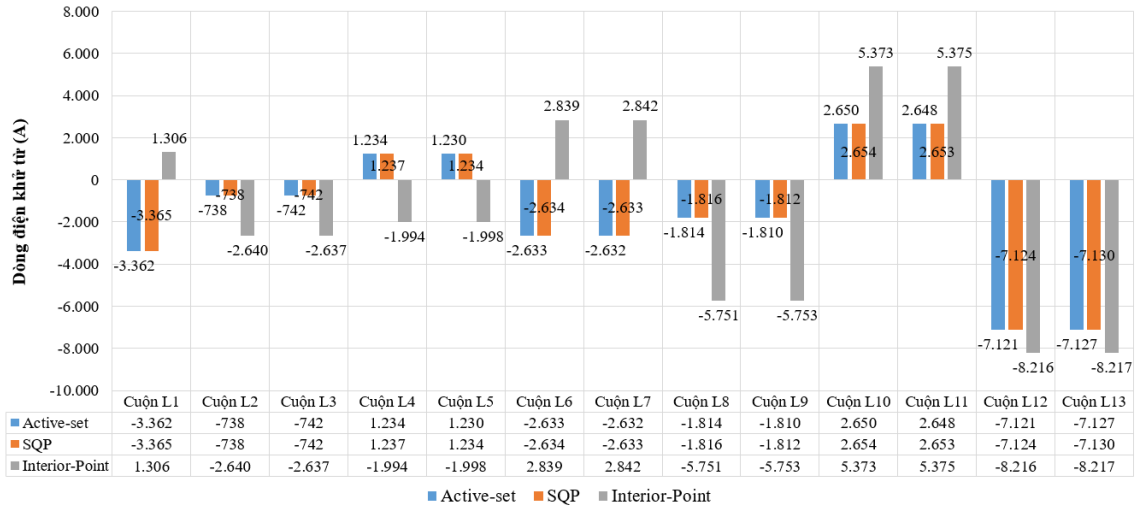
Kích bản 13 cuộn dây cho kết quả bù dị thường từ trường tốt nhất trong 6 kích bản, tỷ lệ giảm RMS gần như giảm tuyệt đối, tới hơn 99,97%. Giá trị RMSE của cả 3 thuật toán đã giảm từ 8 đến 10 lần so với kích bản 11 cuộn dây, đều ở mức vài chục picoTesla, trong đó 2 thuật toán Active-Set và SQP cùng ở mức 30 pT và thuật toán Interior-Point ở mức 22 pT.

Có thể thấy rằng, ở cả hai kích bản 11 và 13 cuộn dây, thuật toán Interior – Point đều thu được hiệu quả bù dị thường từ trường cho vỏ tàu là tốt nhất, các giá trị RMSE sau khi bù đều ở mức picoTesla. Với hiệu quả bù như thế này, các từ kế có độ nhạy ở dải nanoTesla không thể phát hiện được các dị thường từ trường của vỏ tàu, và chỉ với các từ kế có độ nhạy ở dải picoTesla thì mới có thể phát hiện các mức thay đổi từ trường này của vỏ tàu.

3.3. Hiệu quả bù dị thường từ trường

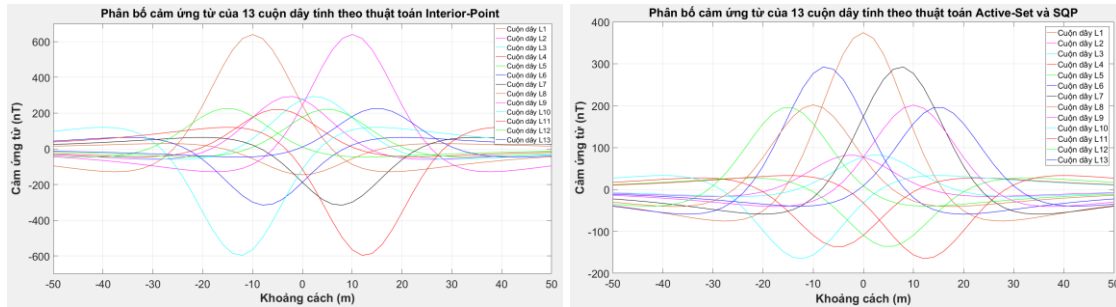
Trong các kích bản 3, 5, 7 và 9 cuộn dây, cả 3 thuật toán đều cho các kết quả giống nhau về hàm chi phí cực tiểu và giá trị RMSE, tỷ lệ giảm RMS, nên hiệu quả bù dị thường từ cũng giống nhau. Kích bản 11 và 13 cuộn dây, các thuật toán cho kết quả khác nhau giữa hàm chi phí cực tiểu và giá trị RMSE, kèm theo đó là các bộ giá trị dòng điện khử từ khác nhau theo từng thuật toán, hay hiệu quả tàng hình từ trường cũng khác nhau. Trong khuôn khổ nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ trình bày và đánh giá kết quả bù dị thường từ trường của kích bản 13 cuộn dây, là kích bản có hiệu quả bù từ trường tốt nhất trong 6 kích bản và có sự khác biệt giữa 3 thuật toán tối ưu sử dụng.

Kết quả phân bố dòng điện khử từ của từng cuộn dây tính bằng 3 thuật toán được trình bày trong hình 3. Theo đó, thuật toán Active-set và SQP đạt mức tối ưu với các giá trị dòng điện giống nhau, do thu được hàm chi phí tối thiểu và giá trị RMSE giống nhau. Trong khi đó, thuật toán Interior-Point lại đạt mức tối ưu với các giá trị dòng điện khác với 2 thuật toán trên. Từ hình 3 thấy rằng, độ lớn của các dòng điện tính bằng thuật toán Interior-Point có sự chênh lệch vài nghìn Ampe tại từng cuộn dây so với 2 thuật toán Active-set và SQP, và sự khác biệt lớn nhất giữa 3 thuật toán là tại cuộn dây L8 và L9, mức chênh lệch lên tới gần 4.000 A.



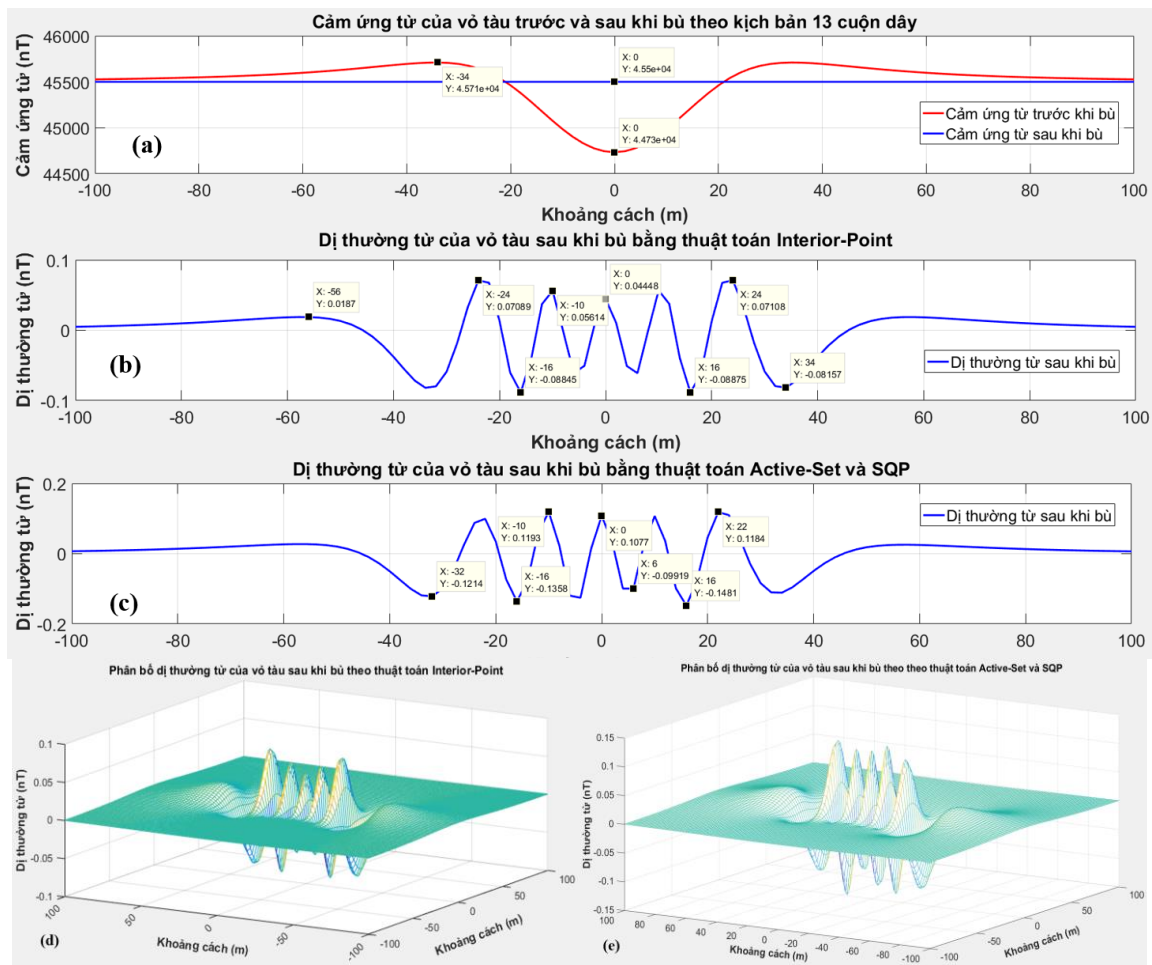
Hình 3. Tổng hợp kết quả tính toán dòng điện khử từ của kịch bản 13 cuộn dây.

Trong khi đó, dấu của các dòng điện thu được theo thuật toán Interior-Point có sự khác biệt với các kết quả tính theo 2 thuật toán còn lại. Cụ thể, dòng điện tại các cuộn dây L1, L4, L5, L6, L7 có dấu ngược chiều nhau, tại các cuộn dây còn lại thì cùng chiều nhau. Phân bố cảm ứng từ trường tạo ra bởi từng dòng điện khử từ tính theo 3 thuật toán được thể hiện trong hình 4.



Hình 4. Phân bố cảm ứng từ của từng cuộn dây khử từ tính theo 3 thuật toán.

Kịch bản 13 cuộn dây, đường cảm ứng từ trường sau khi bù theo cả 3 thuật toán đã hoàn toàn trùng khớp với đường từ trường nền 0 nT, kết quả thể hiện trong hình 5a. Với thuật toán Interior-Point, mức chênh lệch dị thường từ trường lớn nhất chỉ khoảng 89 pT so với nền 0 pT, đạt cực trị tại 71 pT ở nửa dương và -89 pT ở nửa âm, như trong hình 5b. Với thuật toán Active-Set và SQP, mức chênh lệch dị thường từ trường lớn nhất vào khoảng 148 pT so với nền 0 pT, đạt cực trị tại 119 pT ở nửa dương giảm và -148 pT ở nửa âm, như trong hình 5c. Có thể thấy rằng, dị thường từ tính theo thuật toán Interior-Point (như hình 5d) giảm nhiều hơn so với khi tính theo thuật toán Active-Set và Sqp (như hình 5e), và đều giảm xuống dưới mức nanoTesla. Do đó, các từ kế có độ nhạy ở mức nanoTesla không thể phát hiện được các thay đổi của dị thường từ trường nhất này, chỉ với các từ kế có độ nhạy ở mức picoTesla mới có thể phát hiện các biến dị từ này của vỏ tàu.



Hình 5. Hiệu quả bù dị thường từ của kịch bản 13 cuộn dây tính theo 3 thuật toán.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã sử dụng 3 thuật toán tối ưu Active-set, SQP và Interior-Point để cực tiểu hóa dị thường từ trường của vỏ tàu hình cầu dài bằng các cuộn dây khử từ đơn trục. Kết quả cho thấy rằng, khi tăng số cuộn dây khử từ, hiệu quả bù từ trường tăng lên, mức dị thường từ trường sau khi bù tính theo 3 thuật toán cũng tốt hơn. Trong 3 thuật toán trên, thuật toán Interior-Point cho kết quả tốt nhất khi xét đến tiêu chí tối ưu hiệu quả khử từ trường cho vỏ tàu hình cầu dài và hệ cuộn dây khử từ đơn trục theo phương dọc của vỏ tàu. Tuy nhiên, thuật toán này sẽ phải trả giá về tiêu chí thời gian (tương ứng với số vòng lặp lớn) và tiêu chí năng lượng khi quy mô của bài toán lớn hơn. Do đó, với mục tiêu tối ưu hóa hiệu quả khử từ trường, nhóm tác giả đề xuất tiếp tục sử dụng thuật toán này với bài toán khử từ cho mô hình vỏ tàu hình cầu với với nhiều hệ cuộn dây khử từ. Kết quả của nghiên cứu này tạo tiền đề cho nhóm tác giả tiếp tục triển khai các định hướng nghiên cứu, ứng dụng và phát triển các thuật toán tối ưu để tính toán mô phỏng và đánh giá nâng cao hiệu quả của giải pháp khử từ cho các mô hình tàu cho tới tàu thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Trịnh Đình Cường, Đỗ Đình Dương, Vũ Lê Hà, Đỗ Thị Hương Giang, Phùng Anh Tuấn, “Nghiên cứu xác định dấu vết từ trường của một số mô hình vỏ tàu sắt từ”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, số 68, pp. 80-88, (2020).
- [2]. J. J. Holmes, “Modeling a Ship’s Ferromagnetic Signatures”, vol. 2, no. 1. 2007.

- [3]. J. J. Holmes, “Reduction of a Ship’s Magnetic Field Signatures”, Synth. Lect. Comput. Electromagn, vol. 3, no. 1, pp. 1–68, (2008).
- [4]. J. J. Holmes, “Exploitation of a Ship’s Magnetic Field Signatures”, vol. 3, no. 1. (2008).
- [5]. S. M. Makouie and A. Ghorbani, “Comparison between genetic and particle swarm optimization algorithms in optimizing ships’ degaussing coil currents”, Appl. Comput. Electromagn. Soc. J., vol. 31, no. 5, pp. 516–523, (2016).
- [6]. S. Hampton, R. A. Lane, R. M. Hedlof, R. E. Phillips, and C. A. Ordonez, “Closed-form expressions for the magnetic fields of rectangular and circular finite-length solenoids and current loops”, AIP Adv., vol.10, no. 6, (2020).
- [7]. Elizabeth Wong, “Active-Set Methods for Quadratic Programming”, Doctor of Philosophy, University of California, San Diego, pp 01-11, (2011).
- [8]. Schittkowski, K, “An active set strategy for solving optimization problems with up to 200,000,000 nonlinear constraints”, Applied Numerical Mathematics, vol 59, issue 12, pp 2999–3007, (2009).
- [9]. Hongda, L, Zhongli, M. “Optimization of vessel degaussing system based on poly-population particle swarm algorithm”, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp 3133–3137, (2007).
- [10]. Jeung, G., Choi, N. S., Yang, C. S., Chung, H. J., & Kim, D. H, “Indirect fault detection method for an onboard degaussing coil system exploiting underwater magnetic signals”, Journal of Magnetism, vol 19, issue 1, pp. 72–77, (2014).
- [11]. Sharma, N., & Narang, K, “Magnetic Silencing of Naval Vessels Using Ridge Regression”, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), vol 5, issue V, pp. 756–760, (2017).
- [12]. Li, G., Zhang, D., Su, Y., Wang, Z., & Tang, W, “Research on Optimization of Degaussing Current of Submarine Based on Improved Cuckoo Algorithm”, Proceedings - 2020 Chinese Automation Congress, pp. 4595–4599, (2020).
- [13]. Xin-She Yang, “Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications”, John Wiley & Sons Inc, (2018).
- [14]. Gondzio, J, “Interior point methods 25 years later”, European Journal of Operational Research, vol 218, issue 3, pp.587–601, (2012).
- [15]. Richard H. Byrd, Mary E. Hribar, and J. N, “An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming”. SIAM Journal on Scientific Computing, vol 9, issue 4, pp. 877–900, (1999).
- [16]. Boggs, P. T., & Tolle, J. W. “Sequential Quadratic Programming”. Acta Numerica, vol 4, pp. 01–51, (1995).
- [17]. Richard M. Mack, Wingo, R. A, “Ship degaussing system and algorithm”, US Patent, No. US6965505B1, (2005).

ABSTRACT

Researching assessment on magnetic anomaly effectiveness results for prolate spheroidal hulls by optimization algorithms

This research presents the results of minimizing the magnetic anomaly of a prolate spherical hull using 3 optimization algorithms Active-set, SQP and Interior-Point in Matlab, to optimize the effect of magnetic field compensation by degaussing coils. The authors approaches the degaussing problem by mathematical models of prolate spherical hulls and each internal degaussing coil, then uses 3 optimization algorithms to minimize the cost function of the problem. The optimal results of the 3 optimization algorithms are compared and evaluated qualitatively in the form of graph observations and quantitatively in the form of RMSE value of residual magnetic anomaly and RMS value of original magnetic anomaly. head. The objective of this research is to make comments and evaluate the minimization results by 3 different optimization algorithms, thereby proposing the selection of the optimal algorithm suitable for the equivalent hull model.

Keywords: Degaussing Coil; Optimization Algorithm; Active-set Algorithm; Sqp Algorithm; Interior-Point Algorithm.