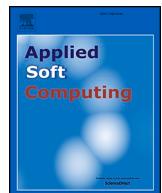
Danh sách nội dung có sẵn tại [Khoa học trực tiếp](#)

## Ứng dụng tính toán mềm

trang chủ tạp chí: [www.elsevier.com/locate/asoc](http://www.elsevier.com/locate/asoc)

Phương pháp tối ưu hóa phân bổ cầu cảng-cần cẩu-xe tải theo thủy triều, môi trường và các yếu tố không chắc chắn dựa trên thuật toán tối ưu hóa Seagull thích ứng lượng tử hỗn loạn



Minh-Vỹ Lý [Một,b](#), Từ Thụy Triết [Một,b](#), Trung Nghĩa Dương [c](#), Wei-Chiang Hong [ngày,và,\\*](#), Tiểu Cương An [Một,néu](#), Dịch Hoành Dã [ngày](#)

Một: Khoa Kỹ thuật đóng tàu, Đại học Kỹ thuật Cáp Nhĩ Tân, Cáp Nhĩ Tân 150001, Trung Quốc

b: Việt Nam Hải, Đại học Kỹ thuật Cáp Nhĩ Tân, Tam Á 572024, Hải Nam, Trung Quốc

c: Khoa Kinh tế và Quản lý, Đại học Kỹ thuật Cáp Nhĩ Tân, Cáp Nhĩ Tân 150001, Trung Quốc

ngày: Khoa Quản lý thông tin, Đại học Khoa học và Công nghệ Đông Á, Tân Bắc 22046, Đài Loan

và Khoa Quản lý thông tin, Đại học Nguyên Trạch, Trung Lịch 320315, Đài Loan

néu: Viện nghiên cứu vận tải đường thủy Trung Quốc, Bắc Kinh 100088, Trung Quốc

### ĐIỂM NỐI BẬT

- Mô hình TEU-BQCT được đề xuất để tối ưu hóa việc phân bổ xe tải-cầu-bến tàu.
- CQASOA được đề xuất để cải thiện khả năng hội tụ và nhiễu loạn toàn cục của thuật toán.
- Bài báo này áp dụng phương pháp TEU-BQCT\_CQASOA để nhận được kế hoạch phân phối phù hợp với quy mô cảng.

### THÔNG TIN BÀI VIẾT

#### Từ khóa:

Lịch trình chung của xe tải-cần cẩu bến tàu Yếu tố thủy triều  
Yếu tố bất định  
Thuật toán tối ưu hóa Seagull  
Phương pháp hàm phạt ngoài  
Máy tính lượng tử  
Bản đồ hỗn loạn

### TÓM TẮT

Ký nguyên hậu dịch bệnh đã dẫn đến tình trạng tích tụ hàng hóa, gây áp lực lớn hơn cho các cảng container. Vì các phương pháp truyền thống không thể đồng thời xem xét tác động của các yếu tố thủy triều, bất định và môi trường lên kế hoạch phân bổ. Để giảm bớt áp lực này, trước tiên, hãy xem xét các yếu tố thủy triều, xây dựng các quy tắc cửa sổ thời gian, suy nghĩ về các yếu tố bất định và xác định các ràng buộc từ góc độ của quy trình neo đậu tàu, cần cầu cầu cảng và hoạt động của xe tải container, một mô hình lập lịch chung cầu cảng-cần cẩu-xe tải mới được xây dựng bằng cách giảm thiểu ba khía cạnh của thời gian quay vòng của tàu, lượng khí thải carbon của cần cầu cầu cảng và xe tải, cụ thể là mô hình TEU-BQCT. Sau đó, nhằm mục đích đạt được một giải pháp chất lượng tương đối cao, kết hợp ánh xạ hỗn loạn và vướng víu lượng tử, một thuật toán tối ưu hóa chim mòng biển thích ứng lượng tử hỗn loạn mới được đề xuất, cụ thể là CQASOA, các quy tắc mã hóa độc quyền phù hợp với mô hình TEU-BQCT được xây dựng, một thuật toán số nguyên khai thi được phát triển, hàm phạt bên ngoài được xây dựng để hạn chế các ràng buộc và một phương pháp giải pháp lập lịch chung mới của cần cầu-xe tải cầu cảng được đề xuất, cụ thể là TEU-BQCT\_CQASOA. Sau đó, hai cảng có quy mô khác nhau ở Nam Trung Quốc được sử dụng để kiểm tra tính khả thi của phương pháp giải pháp được xây dựng. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình TEU-BQCT được xây dựng có thể thu được sơ đồ lập lịch phù hợp hơn. CQASOA được đề xuất có hiệu suất tốt hơn các thuật toán so sánh khác được chọn trong bài báo này, có thể thu được giải pháp tốt hơn khi giải mô hình TEU-BQCT.

### 1. Giới thiệu

Sự tiếp diễn của dịch bệnh vương miện mới đã ảnh hưởng nghiêm trọng đến nền kinh tế và thương mại toàn cầu, gây ra tác động lớn đến cung và cầu toàn cầu. Là một phương thức vận tải quan trọng trong

thương mại quốc tế, vận chuyển đã bị ảnh hưởng nghiêm trọng hơn [1]. Năm 2021, thời gian chờ trung bình của tàu tại Cảng Los Angeles ở Hoa Kỳ, Cảng Felixstowe ở Anh, Cảng Rotterdam ở Hà Lan và Cảng Piraeus ở Hy Lạp sẽ lần lượt đạt 16,5, 13,8, 8,8 và 9,1 ngày. So với năm 2020, thời gian chờ vẫn đang tăng trong cùng kỳ và

\* Tác giả liên hệ tại: Khoa Quản lý thông tin, Đại học Khoa học và Công nghệ Đông Á, Tân Bắc 22046, Đài Loan. Địa chỉ email: [samuelsonhong@gmail.com](mailto:samuelsonhong@gmail.com) (W.-C. Hong).

tình trạng tắc nghẽn vẫn còn rất nghiêm trọng[2]. Ngoài ra, xanh và ít carbon đã trở thành chủ đề của thời đại, và các chính phủ trên toàn thế giới đang ủng hộ việc kiểm soát mức tiêu thụ năng lượng của cảng theo cách xanh và sạch. Do đó, bài báo này tập trung vào việc cung cấp cho các nhà quản lý cảng một giải pháp lập lịch trình để giải quyết vấn đề tắc nghẽn và phát thải carbon trong thời đại hậu dịch bệnh của các cảng.

Lịch trình logistics cảng container có đặc điểm là nhiều liên kết và quy trình. Trong quá trình lập lịch, có nhiều yếu tố ảnh hưởng hơn. Cần phải xem xét ảnh hưởng của các yếu tố không chắc chắn như thủy triều, khí tượng và nhân tạo đối với lịch trình cảng. Cụ thể, những đóng góp chính của bài viết này như sau:

a) Xem xét các yếu tố thủy triều, xây dựng các quy tắc cửa sổ thời gian, suy nghĩ loại bỏ những yếu tố không chắc chắn như yếu tố khí tượng và nhân tạo, và xác định những hạn chế từ ba góc độ của quá trình neo đậu tàu, cần cẩu cầu cảng và xe tải, một mô hình tối ưu mới cho việc phân bổ cầu cảng-cần cẩu-xe tải, cụ thể là TEU-BQCT, được đề xuất, bằng cách giảm thiểu ba khía cạnh của thời gian quay vòng tàu, lượng khí thải carbon của cần cẩu cầu cảng và xe tải làm mục tiêu tối ưu hóa.

b) Do tính đa dạng không đủ và dễ bị kẹt ở trạng thái tối ưu cục bộ trong Giai đoạn sau của quá trình tiến hóa SOA, một thuật toán tối ưu hóa Seagull thích ứng lượng tử hỗn loạn mới, cụ thể là CQASOA, được đề xuất, với phương pháp khởi tạo quần thể dựa trên ánh xạ hỗn loạn (CSOA) được thiết lập để tăng tính ergodic của quần thể ban đầu; Một công quay lượng tử và công NOT lượng tử sử dụng điện toán lượng tử (QSOA) được đề xuất để tăng tốc độ hội tụ của quần thể; Một hệ số trọng số thích ứng (ASOA) được giới thiệu để tăng cường khả năng nhiễu loạn toàn cục trong giai đoạn đầu của SOA và khả năng tìm kiếm cục bộ trong giai đoạn sau.

c) Bài báo này dựa trên mô hình CQASOA và TEU-BQCT, xây dựng các quy tắc mã hóa riêng lẻ, thiết kế thuật toán xử lý số nguyên khai thi (F-IP), xây dựng các hàm phạt bên ngoài để hạn chế các ràng buộc và thiết lập một phương pháp phân bổ xe tải-cần cẩu-bến tàu mới, cụ thể là TEU-BQCT\_CQASOA, có thể cung cấp các kế hoạch phân phối khác nhau theo các yêu cầu vận hành khác nhau bằng cách điều chỉnh trọng số của hàm mục tiêu phụ và có thể có được một kế hoạch phân phối phù hợp hơn khi quy mô cảng tăng lên.

Phần còn lại của bài viết này được tổ chức như sau: Các công trình và đóng góp hiện có được chứa trong [Phần 2](#); [Mục 3](#) mô tả mô hình TEU-BQCT; [Mục 4](#) giới thiệu đề xuất của CQASOA và thiết lập phương pháp giải của TEU-BQCT\_CQASOA; Thực nghiệm dữ liệu và nghiên cứu mô phỏng có mặt, và hiệu suất của mô hình và thuật toán đề xuất được phân tích trong [Mục 5](#); [Mục 6](#) kết thúc bài báo này.

## 2. Tổng quan tài liệu

### 2.1. Tối ưu hóa lịch trình chung logistics cảng container

Hoạt động xếp dỡ tại cảng container có nhiều liên kết và quy trình phức tạp, vẫn còn một số khó khăn trong việc cung cấp một sơ đồ lập lịch trình kiểm soát toàn bộ cảng.[5]. Để tránh kết quả lập lịch quá lý tưởng, ngày càng nhiều học giả đã nghiên cứu lập lịch chung cho các hoạt động xếp dỡ tại cảng container[6–11]. Liu và cộng sự.[12] xây dựng một bến tàu mới và lịch trình kết hợp cần cẩu cầu cảng để ứng phó với sự phân bổ cần cẩu cầu cảng không công bằng. Ma et al.[13] nhằm mục đích cải thiện tỷ lệ sử dụng và chất lượng dịch vụ của cần cẩu cầu cảng và thiết lập một mô hình lập kế hoạch điều động chung có thể giảm thiểu chi phí dịch vụ tàu trong giai đoạn lập kế hoạch. Gao et al.[14] đã thiết lập một mô hình toán học để cải thiện tỷ lệ sử dụng thiết bị cảng container và giảm thời gian làm việc của tàu tại cảng. Yu, et al.[15] xem xét sự khác biệt trong dịch vụ tàu và đề xuất một chế độ hợp tác để tối ưu hóa tốc độ tàu và phân bổ cần cẩu bến-cầu chung. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp này có thể nâng cao sự hài lòng của khách hàng và giảm lượng khí thải carbon. Liu et al.

[16] nghiên cứu vấn đề phân bổ bến chung và phân công cần cẩu cầu cảng khi xem xét thời gian đến không chắc chắn của tàu và hiệu quả hoạt động của cần cẩu cầu cảng. Các tác giả của bài báo này cũng đã thực hiện công trình nghiên cứu trong các lĩnh vực liên quan. Li et al.[17] đã thiết lập một mô hình phân bổ chung đa mục tiêu có thể giảm khoảng cách vận chuyển của xe tải và giảm thời gian quay vòng của tàu. Các ví dụ mô phỏng cho thấy phương pháp này có thể cung cấp giải pháp cho các cảng container. Cao et al.[18] xây dựng một mô hình phân bổ chung

**Bảng 1**

Bảng tóm tắt công việc hiện tại.

Thẩm quyền giải quyết	Khách quan	Người mẫu	Vấn đề đã được giải quyết
Liu và cộng sự[12]	Thời gian cống tối thiểu Chi phí hệ thống tối thiểu Sự bất công tối thiểu	Mô hình lập lịch đa mục tiêu	Giải quyết tình trạng phân bổ bến tàu, cầu cảng không công bằng
Ma và cộng sự[13]	Tối thiểu chi phí dịch vụ tàu đến	Mô hình lập lịch cầu cảng và cần cẩu bến cảng	Phương pháp lấy nguồn tài nguyên cần cẩu bến tàu và cầu cảng và nâng cao chất lượng dịch vụ
Gao và cộng sự[14]	Tổng thời gian tàu ở cảng tối thiểu	Mô hình tối ưu hóa toán học của BACAP	Giảm thời gian tàu ở cảng và cải thiện việc sử dụng thiết bị
Yu và cộng sự[15]	Chi phí nhiên liệu tàu tối thiểu Độ trễ dịch vụ của tàu tối thiểu Độ trễ dịch vụ của tàu tối thiểu Độ trễ tàu	Một đa cấp hai cấp mô hình tối ưu hóa mục tiêu	Giảm chi phí tiêu thụ nhiên liệu của tàu, giảm sự chậm trễ trong dịch vụ và nâng cao sự hài lòng của khách hàng
Liu và cộng sự[16]	tối thiểu thời gian khởi hành Tối thiểu tổng độ lệch bến Tối thiểu tổng chi phí vận hành của cần cẩu bến cảng	Mô hình điều phối chung cho cần cẩu bến cảng	Đối phó với các tình huống phức tạp của hoạt động bến cảng
Azab và cộng sự[19]	Tối thiểu số lần di dời	Mô hình lập lịch di dời xe tải container	Tăng cường hoạt động di dời container tại các bến cảng
Essghaier và cộng sự [20]	Giảm thiểu tổng độ trễ Tối thiểu tổng số khoảng cách di chuyển của các thùng chứa PI	Một mô hình lập trình số nguyên hỗn hợp đa mục tiêu	Tạo ra mặt trận Pareto mạnh mẽ phù hợp với thái độ của người ra quyết định đối với rủi ro
Duan và cộng sự[21]	Tối thiểu thời gian chờ trung bình Tối thiểu thời gian trả khỏi hành của tàu Tối thiểu thời	Mô hình điều phối chung cho cần cẩu bến cảng	Có được giải pháp xanh và hợp lý hơn cho hoạt động của bến tàu và cần cẩu cầu cảng
Wang và cộng sự[22]	lượng khí thải carbon của cảng	Mô hình điều phối chung cho cần cẩu bến cảng	Cải thiện hiệu quả xử lý cảng và giảm phát thải carbon
Kenan và cộng sự [23]	Tối thiểu thời gian neo đậu của tàu Tối thiểu lượng khí thải carbon tại cảng Tối thiểu thời gian tàu ở cảng Tối thiểu lượng khí thải carbon của xe tải Tối thiểu lượng khí thải carbon của cần cẩu cầu cảng phát thải	Mô hình điều phối chung cho cần cẩu bến cảng	Cải thiện hiệu quả xử lý cảng và giảm phát thải carbon
Nghiên cứu này		Một mô hình lập lịch trình chung cầu cảng cần cẩu-xe tải mới	Xem xét thủy triều, môi trường và sự không chắc chắn, cắt giảm lượng khí thải carbon của cảng và đáp ứng nhu cầu của cảng trong thời kỳ dịch bệnh

xem xét các yếu tố kinh tế và giải quyết bằng thuật toán chim sẻ cải tiến. Các ví dụ mô phỏng cho thấy phương pháp lập lịch có thể giảm chi phí của các cảng.

Một số giải pháp tốt cho việc điều phối chung cần cầu bến tàu-cảng được cung cấp bởi công trình nghiên cứu trên, có thể làm giảm chi phí cảng container và nâng cao tỷ lệ sử dụng của cảng container. Tuy nhiên, các thành phần của hoạt động điều phối cảng ảnh hưởng lẫn nhau. Hiệu quả làm việc của cần cầu bến tàu bị giới hạn bởi số lượng xe tải và cũng bị ảnh hưởng bởi lịch trình của xe tải ở phía trước nhà ga. Do đó, trong quá trình lập lịch hoạt động trên bộ, vẫn cần phải xem xét toàn diện tác động của xe tải đến việc phân bổ bến tàu và cần cầu bến tàu. Azab và cộng sự[19] đề xuất hai mô hình IP nhị phân để giải quyết vấn đề tối ưu hóa mới và kết quả cho thấy phương pháp đề xuất có thể cải thiện hoạt động di dời container tại các bến cảng bằng cách phối hợp với lịch hẹn. Essghaier và cộng sự.

[20] đã thiết lập một mô hình Lập trình số nguyên hỗn hợp đa mục tiêu (FMO-MIP) kết hợp lập trình có ràng buộc xác suất mờ và ràng buộc  $\epsilon$  để giảm thiểu cả tổng độ trễ và tổng quãng đường di chuyển của các container PI, đồng thời xem xét sự không chắc chắn về thời gian xe tải đến. Tuy nhiên, vẫn còn một số ít các chuyến tàu chung của bến, cần cầu cầu cảng và xe tải trong các tài liệu hiện có, mà các phương pháp mô hình hóa và giải pháp của chúng vẫn cần được khám phá thêm.

Chủ đề bảo vệ môi trường đã thu hút sự chú ý của nhiều quốc gia về vấn đề biến đổi khí hậu và vấn đề phát thải carbon tại các cảng container cũng đã trở thành điểm nóng nghiên cứu hiện nay. Duan et al.

[21] xây dựng mô hình toán học để sử dụng hợp lý tài nguyên cảng container và giảm phát thải carbon. Lấy Cảng Ninh Ba làm ví dụ, tác giả đã đánh giá tác động của những thay đổi về chi phí phát thải carbon đối với kế hoạch phân phối cần cầu bến và cầu cảng và đề xuất giải pháp. Wang và cộng sự.[22] thiết lập mô hình lập kế hoạch về thiện chí của các cảng container trong việc giảm phát thải carbon theo chính sách thuế carbon mới, đưa ra các giải pháp, đánh giá tác động của thuế phát thải carbon đối với việc giảm phát thải carbon và giảm phát thải carbon của các cảng container. Kenan và cộng sự.[23] thiết lập mô hình toán học, tích hợp phân bổ và lập lịch cho cần cầu bến tàu, và xem xét chính sách quản lý carbon, có thể cắt giảm thời gian neo đậu và lượng khí thải carbon từ tàu thuyền. Tuy nhiên, các mô hình hiện có không thể thích ứng với bối cảnh hậu dịch bệnh hiện tại và công tác hợp tác máy móc cảng cần được nghiên cứu thêm, công tác nghiên cứu trên được tóm tắt như trong Bảng 1. Do đó, trong Mục 3 một mô hình lập lịch trình chung giữa cầu cảng-cần cầu-xe tải mới có tính đến thủy triều, môi trường và các yếu tố không chắc chắn sẽ được đề xuất để tạo ra một kế hoạch điều phối phù hợp hơn với bối cảnh thời đại đổi mới những người ra quyết định về cảng.

## 2.2. Thuật toán cho mô hình lập kế hoạch lịch trình logistics chung của các cảng container

Bài toán giải quyết của mô hình lập kế hoạch lịch trình chung của logistics cảng container có đặc điểm là đa dạng và phi tuyến tính, không thể giải quyết chính xác. Phương pháp thông thường là tiếp cận điểm cực trị thông qua thuật toán giải quyết. Tian et al.[24] xây dựng một mô hình toán học nhằm mục đích cắt giảm tổng chi phí hoạt động hậu cần và giải quyết bằng phương pháp lập trình tuyến tính và phần mềm thương mại ILOG CPLEX. Cheimanoff, et al.[25] đề xuất một phương pháp Công thức tuyến tính số nguyên hỗn hợp (MILP) và Tim kiêm lân cận biến (VNS) mới để giải quyết mô hình phân bổ cần cầu cầu cảng. Sau sự gia tăng về sức mạnh tính toán, thuật toán tối ưu hóa thông minh cũng được sử dụng rộng rãi và hoạt động tốt trong việc giải quyết loại vấn đề tối ưu hóa này[26-28]. Skaf và cộng sự.[29] đã thiết lập một mô hình lập kế hoạch cho vấn đề lập lịch trình của nhiều xe tải và một cần cầu bến cảng, sử dụng thuật toán di truyền để giải quyết mô hình. Chu et al.[30] đề xuất phương pháp lập kế hoạch tuyến đường vận chuyển container và lập lịch tốc độ toàn diện, được giải quyết dựa trên thuật toán di truyền.

Với sự cải thiện sức mạnh tính toán của máy tính, ngày càng nhiều

nhiều thuật toán tối ưu hóa chất lượng cao hơn đã được đề xuất, đã được chứng minh là thành công trong nhiều ứng dụng khác nhau, chẳng hạn như phương pháp dựa trên thử nghiệm để dạy các kỹ thuật tối ưu hóa[31], điều khiển dựa trên mạng nơ-ron sử dụng học tăng cường actor-critic và bộ tối ưu hóa gray wolf với xác thực hệ thống servo thử nghiệm[32], động vật ăn thịt biến lầy cảm hứng từ thuật toán chuỗi chui trại lông để tối ưu hóa toàn cầu[33]. Xem xét hiệu suất tuyệt vời của các thuật toán SOA trong việc lập lịch cảng container, SOA được thử nghiệm để giải quyết các mô hình như vậy [4]. Tuy nhiên, SOA có những vấn đề như dễ bị kẹt ở mức tối ưu cục bộ và tốc độ hội tụ chậm. Ewees et al.[34] sử dụng các toán tử đột biến và bay Lévy cho không gian tìm kiếm tuyến tính SOA, cải thiện sự đánh đổi giữa khai thác và thăm dò để nhanh chóng và chính xác các giải pháp tối ưu. Ma et al. [35] nhằm vào những nhược điểm của SOA với độ chính xác hội tụ thấp, tính đa dạng tổng thể yếu và có xu hướng tối ưu cục bộ, CMSOAs được đề xuất và tính toán thống kê đã chứng minh rằng thuật toán được đề xuất có những ưu điểm. Xiao et al.[36] đã sử dụng phương pháp học dựa trên đối lập (OBL), phân phối Cauchy và hàm sigmoid nghịch đảo để tăng cường SOA dựa trên Máy học cực đại hai lớp ẩn (TELM) với Hàm kích hoạt siêu tham số và kết quả tính toán cho thấy kết quả tốt. Xu et al.[37] kết hợp cơ chế chọn lọc tự nhiên dựa trên SOA và tìm ra giải pháp tối ưu bằng cách sắp xếp quần thể theo giá trị thể lực để thay thế một nửa tệ nhất bằng một nửa tốt nhất.

Nghiên cứu được thực hiện theo phương pháp hiện tại có thể cải thiện hiệu suất tối ưu hóa của SOA, nhưng khi giải quyết các vấn đề phức tạp, nó vẫn bộc lộ những thiếu sót về khả năng nhiễu loạn toàn cục và hiệu suất tính toán. Các tác giả đã cố gắng cải thiện thuật toán tối ưu hóa thông minh bằng nhiễu loạn hỗn loạn và vướng víu lượng tử, và đề xuất thuật toán dơi hỗn loạn mới[38], thuật toán di truyền thích ứng hỗn loạn[39], lập bản đồ mèo, mô hình đám mây và thuật toán lai PSO [40], tối ưu hóa bầy hạt đám mây hỗn loạn[41], thuật toán tối ưu hóa lai đám mây hỗn loạn lượng tử dơi[42], thuật toán tối ưu hóa bướm lượng tử[43], thuật toán tối ưu hóa đám mây di truyền lai cá voi[44] để giải quyết vấn đề tối ưu hóa. Các thí nghiệm đã xác minh rằng các thuật toán được cải tiến ở trên đã đạt được kết quả tốt. Các phương pháp cải tiến ở trên có thể cung cấp một tài liệu tham khảo tốt cho bài viết này. Do đó, hướng đến các khía cạnh khuyết của SOA, một thuật toán tối ưu hóa chim mòng biển thích ứng lượng tử hỗn loạn mới được đề xuất bằng cách kết hợp ánh xạ hỗn loạn và điện toán lượng tử, cụ thể là CQASOA, để nâng cao hiệu suất tối ưu hóa của thuật toán.

## 3. Thiết lập mô hình TEU-BQCT

Xét đến việc các tàu lớn cần sử dụng mực nước thủy triều để vào cảng, các quy tắc cửa sổ thời gian mực nước được xây dựng theo độ sâu mực nước và lịch trình định kỳ của các tàu lớn. Nếu mực nước trong một khoảng thời gian nhất định đáp ứng nhu cầu của các tàu lớn vào cảng, thì mực nước trong khoảng thời gian này là cửa sổ thời gian mực nước cao. Ngược lại, đó là cửa sổ thời gian mực nước thấp. Sự thay đổi định kỳ của thủy triều làm cho các cửa sổ thời gian mực nước cao và mực nước thấp xen kẽ. Bài báo này giả định rằng thời gian đi qua của các cửa sổ thời gian mực nước cao và mực nước thấp gần bằng nhau.

Xem xét tính vững chắc của việc cải thiện mô hình xây dựng, bài báo này giới thiệu các yếu tố không chắc chắn. Khi tàu vào cảng, thời gian dự kiến đến cảng container sẽ được cung cấp. Do khí hậu và các yếu tố con người, thời gian đến thực tế của tàu có thể thay đổi. Thời gian lệch tuân theo luật phân phối Erlang[45], được xác định dựa trên luật thống kê của cảng. Ngoài ra, do yếu tố con người, độ lệch tốc độ hoạt động của xe tải được coi là tuân theo luật phân phối chuẩn được xác định theo luật thống kê của xe tải container.

Trong quá trình tối ưu hóa lịch trình, chúng tôi chia bờ biển liên tục thành nhiều bến riêng biệt. Không được phép neo đậu trùng lắp hoặc neo đậu chéo trong quá trình neo đậu. Ngoài ra, tàu chỉ được phép hoàn thành một hoạt động. Mỗi cần cầu tại bến chỉ có thể phục vụ một tàu tại một thời điểm. Thời gian tối thiểu của tàu tại cảng và

Lượng khí thải carbon từ xe tải và cần cẩu bến tàu phải là hướng dẫn để xác định thứ tự cập cảng và phân bổ bến tàu, cần cẩu bến tàu và xe tải.

### 3.1. Giả định và ký hiệu

Các giả định của mô hình TEU-BQCT được thiết lập từ ba khía cạnh: bến tàu, cần cẩu cầu cảng và xe tải. Chi tiết như sau:

(1) Giả sử rằng tàu cung cấp thời gian ước tính cho đến cảng, nhưng do sự can thiệp của môi trường nên thời gian tàu đến thực tế có độ lệch thời gian theo phân phối Erlang..

(2) Xét đến ảnh hưởng của các yếu tố thủy triều lên tàu thuyền ra vào khi rời cảng, các tàu lớn chỉ được phép vào cảng khi thủy triều lên, thời gian mỗi tàu vào và ra khỏi luồng là bằng nhau và là một hằng số cố định;.

(3) Giả sử rằng độ dài của mỗi cửa sổ thời gian mục nước là bình đẳng.

(4) Một tuyến bến liên tục được chia thành các bến riêng biệt có chiều dài, chiều rộng và độ sâu của nước đáp ứng yêu cầu của tàu;.

(5) Mỗi tàu chỉ được phép cập cảng một lần và không được phép cập cảng di chuyển sau khi cập bến;.

(6) Sau khi tàu bắt đầu hoạt động, cần cẩu cầu cảng được giao sẽ làm việc hiệu quả vẫn không thay đổi;.

(7) Giới hạn trên và dưới của việc phân bổ cần cẩu cầu cảng đáp ứng yêu cầu hạn chế hoạt động của tàu;.

(8) Giả sử cần cẩu cầu cảng có thể được di chuyển đến bên cạnh bến khi không hoạt động, nhưng cần cẩu bến không được phép bước qua các cần cẩu bến khác;.

(9) Xét rằng tốc độ lái xe của xe tải bị nhiễu bởi các yếu tố bất định nhân tạo, nó tuân theo luật phân phối chuẩn;.

(10) Giả sử số lượng cần cẩu trong bãi container là đủ và hiệu quả bốc xếp vẫn không đổi.

Các tham số ứng dụng mô hình TEU-BQCT được phân loại theo Bộ, Biến tối ưu hóa, Tham số đầu vào, Biến phụ thuộc và Biến quyết định 0-1 như sau:

#### Bộ:

$V$  Tàu,  $V = [1, 2, \dots, v]$ ;  $B$  Bến

tàu,  $B = [1, 2, \dots, b]$ ;  $C$  Cần

cẩu,  $C = [1, 2, \dots, c]$ ;  $T$  Thời

gian,  $T = [1, 2, \dots, t]$ ;  $C$  Xe

tải,  $C = [1, 2, \dots, v_a]$ .

$V$  Một nhóm tàu lớn đang cập cảng;. **Tiếng nói** Một tập hợp các thứ tự của tàu thuyền vào cảng;.  $V$  Một bộ số sê-ri của bến tàu sẽ được dổ;.

$V$  Một bộ số sê-ri của các cần cẩu bến cảng được phân bổ cho hoạt động của tàu;.

$C$  Một tập hợp số lượng xe tải thu gom cần cẩu phục vụ tại bến cảng;

$V$  Một tập hợp số lượng xe tải vận hành tàu;. **Biến tối ưu hóa**. **Tiếng nói**  $T$  Tàu thuyền  $T$  trình tự neo đậu;.

$T$  Độ dài của mỗi cửa sổ thời gian mục nước cao/thấp;.  $RS$  Nguyên đơn lớn;.

$T$  Tổng số xe thu gom có sẵn tại các cảng container;

$D$  Thời gian dự kiến đến nơi;.

$D$  Thời gian di chuyển cần thiết để một tàu thuyền đi qua kênh đào.

$I$  Hiệu suất làm việc lý thuyết của một cần cẩu bến cảng đơn;.  $CF$  Hiệu suất làm việc lý thuyết của một cần cẩu đơn trong bãi container;.

$T$  Thời gian chờ tối đa của tàu thuyền;  $VL$  Chiều dài của tàu  $T$ ;  $Vd$  Bản nháp của tàu  $T$  ;.

$V$  Số lượng container được tàu chờ  $T$ ;  $BL$  Chiều dài của bến;  $BD$  Bản nháp của bến tàu;.

$D$  Khoảng cách giữa tàu  $T$  neo đậu tại bến và sân mục tiêu;.

$VC$  Giới hạn dưới của cần cẩu cầu cảng phục vụ tàu  $T$  ;.

$VC$  Giới hạn trên của cần cẩu cầu cảng phục vụ tàu  $T$  ;.

#### Biến phụ thuộc:

$TAI$  SAO Con tàu  $T$  thời gian đến thực tế;.

$B$  Bệnh lao  $T$  Thời gian bắt đầu đi thuyền vào kênh cho tàu thuyền  $T$ ;  $TC$  Thời điểm tàu  $T$  vào cảng;  $TS$  Thời gian bắt đầu hoạt động bốc xếp;  $T$ . $DT$  Thời gian kết thúc hoạt động xếp dỡ;.

$TV$  Thời gian bắt đầu của cần cẩu cầu cảng liền kề thực hiện hoạt động cho tàu  $T$  ;.

$TAI$  Thời gian khởi hành của tàu  $T$  đi ra khỏi kênh khi rời cảng;.

$TAI$  Thời gian cho tàu  $T$  rời khỏi cảng;.

$TH$  Thời gian dành cho tàu thuyền  $T$  tại bến để vận chuyển xe tải rỗng;  $TL$  Thời gian dành cho tàu  $T$  cập bến để vận chuyển hàng hóa nặng bằng xe tải;.

$VN$  Số lượng cần cẩu phục vụ tàu thuyền  $T$  vào thời điểm đó;.

$CK$  Số lượng xe tải phục vụ cầu bến  $N$  vào thời điểm đó;  $T$ .  $TC$  Hiệu suất làm việc thực tế của một cần cẩu cầu cảng đơn lẻ;.

$D$  Tổng số km xe tải chờ hàng nặng đi được;  $D$  Tổng số km xe tải đi được khi không có hàng;  $t$  Tổng thời gian nhàn rỗi của xe tải;.

$v$  Tốc độ của xe container khi không chờ hàng;  $v$  Tốc độ khi xe container quá tải;.

#### 0-1 Biến quyết định:

$$\begin{cases} 1 & \text{nếu tàu } i \text{ phục vụ theo trình tự } k \text{ tại bến } j \\ 0 & \text{khác} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1 & \text{nếu cần cẩu cầu cảng } n \text{ phục vụ cho tàu } i \text{ trong thời gian } t \\ 0 & \text{khác} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1 & \text{nếu tàu } i \text{ đi vào kênh ở vị trí } u \text{ cửa sổ thời gian nước cao} \\ 0 & \text{khác} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1 & \text{nếu tàu } i \text{ đi ra khỏi kênh ở phía } u \text{ cửa sổ thời gian nước cao} \\ 0 & \text{khác} \end{cases}$$

$V$  Bến tàu  $T$  ;.

$V$  Số lượng cần cẩu phục vụ tàu thuyền  $T$  ;.

$V$  Số lượng xe tải phân bổ cho hoạt động của tàu  $T$  ;.

### 3.2. Hàm mục tiêu F

Nhằm đạt được sự cân bằng tốt nhất giữa lợi ích của cảng, lợi ích của chủ tàu và bảo vệ môi trường, lợi ích kinh tế

và các yếu tố môi trường của cảng container được xem xét toàn diện, và mô hình tối ưu hóa được xây dựng với thời gian quay vòng tàu tối thiểu, lượng khí thải carbon tối thiểu của xe tải và lượng khí thải carbon tối thiểu của cần cẩu cầu cảng là các hàm mục tiêu. Hàm mục tiêu của mô hình TEU-BQCT có thể được biểu thị bằng [Phương trình \(1\)](#),

$$F_1 = \text{phút}(\omega_1 \cdot t_{\text{tối}} \cdot F_1 + \omega_2 \cdot t_{\text{tối}} \cdot F_2 + \omega_3 \cdot t_{\text{tối}} \cdot F_3) \quad (1)$$

Ở đây  $F_1$  là hàm mục tiêu;  $F_1, F_2, F_3$  là ba hàm mục tiêu phụ;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  là các yếu tố điều chỉnh trọng lượng;  $t_{\text{tối}}_1, t_{\text{tối}}_2, t_{\text{tối}}_3$  là các hệ số cân bằng độ lớn.

Đây là trạng thái lý tưởng nhất khi thời gian quay vòng của tàu và lượng khí thải carbon của cảng phải được giảm thiểu cùng một lúc, nhưng có những ràng buộc lẫn nhau giữa các chỉ số khác nhau, và thậm chí có sự đánh đổi giữa chúng. Ví dụ, việc giảm thời gian chờ của tàu tại cảng đòi hỏi phải cải thiện hiệu quả hoạt động, điều này chắc chắn sẽ gây ra nhiều ô nhiễm môi trường hơn. Do đó, trong quá trình xây dựng kế hoạch lập lịch trình, cần đặc biệt chú ý đến một chỉ số nhất định theo nhu cầu khác nhau của các giai đoạn khác nhau. Do đó, bài báo này áp dụng phương pháp trọng số tuyến tính có thể giải quyết vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu. Sau đó, các yếu tố điều chỉnh trọng số  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  được giới thiệu để đáp ứng các nhu cầu khác nhau của cảng trong các giai đoạn khác nhau thông qua

sự can thiệp của con người như thể hiện trong [Phương trình \(2\)](#),

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (2)$$

Ngoài ra, các hệ số cân bằng độ lớn  $t_{\text{tối}}_1, t_{\text{tối}}_2, t_{\text{tối}}_3$  được giới thiệu để đảm bảo rằng trọng số ảnh hưởng của mỗi hàm mục tiêu phụ là bằng nhau. Hệ số cân bằng độ lớn có thể được xác định bằng độ lớn của giá trị hàm mục tiêu của một ví dụ tính toán cụ thể. Các giá trị được khuyến nghị là:  $t_{\text{tối}}_1 = 1000, t_{\text{tối}}_2 = 1$  và  $t_{\text{tối}}_3 = 1$ .

### 3.2.1. Hàm mục tiêu phụ $F_1$

Bài báo này xem xét những lợi ích toàn diện của chủ tàu và cảng container và lấy thời gian tối thiểu của tàu trong cảng làm chức năng phụ đầu tiên của mô hình TEU-BQCT để giảm thời gian chờ đợi của chủ tàu trong cảng và nâng cao hiệu quả hoạt động của cảng. Chức năng phụ  $F_1$  của mô hình TEU-BQCT được xác định là [Phương trình \(3\)](#),

$$F_1 = \left[ \frac{1}{V} \sum_{T \in T} (T \cdot D_{T \rightarrow T} - TS_{T \rightarrow T}) \cdot TC_{T \rightarrow T} + (T \cdot D_{T \rightarrow T} - TV_{T \rightarrow T}) \cdot \Delta VDN_{T \rightarrow T} \right] + \lambda_1 \quad (3)$$

Ở đây  $F_1$  là hàm mục tiêu phụ đầu tiên(h);  $T \cdot D_{T \rightarrow T}$  là thời gian khởi hành của tàu  $T$ ;  $TS_{T \rightarrow T}$  là thời gian thực tế tàu đến  $T$ .

### 3.2.2. Hàm mục tiêu phụ $F_2$

Hoạt động của một cảng container không chỉ đảm bảo lợi ích kinh tế mà còn phải đảm bảo thân thiện với môi trường. Lượng khí thải carbon tối thiểu của xe tải được xác định là chức năng phụ thứ hai của mô hình TEU-BQCT nhằm giảm lượng khí thải carbon và mức tiêu thụ nhiên liệu của xe tải tại các cảng container, giàn tiếp kiểm soát chi phí hoạt động vận tải bằng xe tải. Chức năng phụ  $F_2$  của mô hình TEU-BQCT bao gồm ba phần: lượng khí thải carbon của xe tải khi lái không tải, lượng khí thải carbon của xe tải khi lái xe hạng nặng và lượng khí thải carbon của xe tải khi chạy không tải, có thể được xác định bởi [Phương trình \(4\)](#):

$$F_2 = E_1 (\rho_{t \rightarrow T} \cdot D_{T \rightarrow T} + \rho_{t \rightarrow T} \cdot D_{T \rightarrow T} \cdot \eta \cdot \eta) \quad (4)$$

Ở đây  $F_2$  là hàm mục tiêu phụ thứ hai (kg);  $E_1$  là hệ số phát thải carbon của xe tải (kg/L);  $D_{T \rightarrow T}$  là tổng quãng đường xe tải đi được khi không có hàng (km);  $D_{T \rightarrow T}$  là tổng quãng đường xe tải chở hàng nặng đã đi (km);  $\eta$  là tổng thời gian xe tải chạy không tải tiêu thụ nhiên liệu (h);  $\eta$  là mức tiêu thụ nhiên liệu khi chạy không tải (L/h);  $\eta$  là tổng thời gian của xe tải

chạy không tải (h);  $\rho_{t \rightarrow T}$  là mức tiêu thụ nhiên liệu (L/km) của xe tải khi không tải và khi đầy tải, được xác định bởi tốc độ và tải trọng [46], như thể hiện trong [Phương trình \(5\)](#),

$$\rho(t, t_{\text{tối}}) = av_2 + bv_2 + cm_2 + dv_2 + v_2 \quad (5)$$

Ở đây  $M_2 = 0,02, b = -1,67, c = 0,46, n_2 = 0,03, v_2 = 51,17$  [47].

### 3.2.3. Hàm mục tiêu phụ $F_3$

Trong bài báo này, lượng phát thải carbon tối thiểu của cần cẩu cầu cảng được xác định là hàm mục tiêu phụ thứ ba để đo lường mức độ ô nhiễm do hoạt động làm việc của cần cẩu cầu cảng gây ra trong môi trường xung quanh cảng. Vì lượng phát thải carbon do hoạt động của cần cẩu cầu cảng tạo ra có liên quan tích cực đến mức tiêu thụ điện năng, nên có thể tiết kiệm chi phí cảng trong khi giảm lượng phát thải carbon từ cần cẩu cầu cảng. Hàm mục tiêu phụ  $F_3$  có thể được tính toán bằng mức tiêu thụ năng lượng làm việc của cần cẩu cầu cảng trong quá trình làm việc và trong quá trình di chuyển, có thể được xác định bằng [Phương trình \(6\)](#),

$$F_3 = E_2 \left\{ \lambda_1 \sum_{T \in T} [(T \cdot D_{T \rightarrow T} - TS_{T \rightarrow T}) \cdot TC_{T \rightarrow T} + (T \cdot D_{T \rightarrow T} - TV_{T \rightarrow T}) \cdot \Delta VDN_{T \rightarrow T}] + \lambda_2 \sum_{T \in T} \Delta VDN_{T \rightarrow T} \right\} \quad (6)$$

Ở đây  $F_3$  là hàm mục tiêu thứ ba (kg);  $E_2$  là hệ số phát thải tham chiếu lưới điện (kg/kWh);  $\lambda_1$  là mức tiêu thụ năng lượng làm việc của cần cẩu cầu cảng (kWh/h);  $\lambda_2$  là mức tiêu thụ năng lượng của cần cẩu bến cảng trong quá trình di chuyển (kWh/thời gian);  $T \cdot D_{T \rightarrow T}$  là tàu  $T$  kết thúc thời gian hoạt động;  $TS_{T \rightarrow T}$  là tàu  $T$  bắt đầu thời gian hoạt động;  $VDN_{T \rightarrow T}$  là số lượng cần cẩu bến tàu được lên lịch hoạt động;  $\Delta T$  là thời điểm cần cẩu cầu cảng hỗ trợ tàu  $T$  trong hoạt động làm việc;  $\Delta VDN_{T \rightarrow T}$  là số lượng cần cẩu bến tàu di chuyển từ bến gần nhất tại thời điểm để hỗ trợ tàu  $T$  trong hoạt động;  $TV_{T \rightarrow T}$  là thời gian bắt đầu của cần cẩu bến cảng liền kề thực hiện một hoạt động cho tàu  $T$ .

### 3.3. Xác định các ràng buộc

Xét theo tình hình thực tế của cảng container, các hạn chế của mô hình TEU-BQCT được xác định từ ba khía cạnh: quy trình neo đậu tàu, cần cẩu bến cảng và xe tải chở container.

#### 3.3.1. Những hạn chế trong quá trình neo đậu tàu

Sau quá trình cập cảng, các hạn chế về cập cảng của tàu được xác định như sau:

$$TAI SAO_{T \rightarrow T} = \bar{D}_{T \rightarrow T} + \Delta TAI SAO_{T \rightarrow T}, \forall T \in V \quad (7)$$

$$D_{T \rightarrow T} = \text{điểm neo}(T) \text{ là } TAI SAO_{T \rightarrow T}, \forall T \in V \quad (8)$$

$$BENH LAO_{T \rightarrow T} = TAI SAO_{T \rightarrow T}, \forall T \in V \quad (9)$$

$$TC_{T \rightarrow T} = BENH LAO_{T \rightarrow T} + DAI HOC, \forall T \in V \quad (10)$$

$$TS_{T \rightarrow T} \geq TC_{T \rightarrow T}, \forall T \in V \quad (11)$$

$$TS_{T \rightarrow T} = TAI SAO_{T \rightarrow T} + TW_{T \rightarrow T}, \forall T \in V \quad (12)$$

$$\sum_{T \in T} \sum_{T \rightarrow T} (T \cdot D_{T \rightarrow T} - TS_{T \rightarrow T}) \cdot THẾ GIỚI_{T \rightarrow T} \cdot (Tiêu chuẩn_{T \rightarrow T}), \forall T \in V \quad (13)$$

$$TAI SAO_{T \rightarrow T} \geq T \cdot D_{T \rightarrow T}, \forall T \in V \quad (14)$$

$$TAI CHINH_{T \rightarrow T} = TAI SAO_{T \rightarrow T} + DAI HOC, \forall T \in V \quad (15)$$

$$2(ben - 1)T - R(1 - \mu_{ben}) \leq BENH LAO_{T \rightarrow T} (2ben - 1)T - DAI HOC - R(1 - \mu_{ben}), \forall T \in V \quad (16)$$

$$2(ben - 1)T - R(1 - \mu_{ben}) \leq TAI SAO_{T \rightarrow T} (2ben - 1)T - DAI HOC - R(1 - \mu_{ben}), \forall T \in V \quad (17)$$

$$\sum_{\substack{t \in T \\ b \in B}} \mu_{t,b} = 1, \forall T \in V_L \quad (18)$$

$$\sum_{\substack{t \in T \\ b \in B}} v_{t,b} = 1, \forall T \in V_L \quad (19)$$

$$\sum_{\substack{j \in B \\ \text{Mô hình nói}}} (x_{t,j} \times BD) \geq v_{d,t}, \forall T \in V \quad (20)$$

$$\sum_{\substack{j \in B \\ \text{Mô hình nói}}} (x_{t,j} \times BL) \geq VL_{T \in V}, \forall T \in V \quad (21)$$

$$\sum_{\substack{T \in V \\ t \in T \\ j \in B \\ \text{Tiếng nói}}} x_{t,j} \leq 1, \forall j \in B, \forall t \in \text{Tiếng nói} \quad (22)$$

$$\sum_{\substack{j \in B \\ \text{Mô hình nói}}} x_{t,j} = 1, \forall T \in V \quad (23)$$

$$x_{t,j} \times TAI_{SAO,t} \leq x_{t,(j+1)} \times TAI_{SAO,t}, \forall t \in V, \forall j \in B, \forall t \in \text{Tiếng nói} \quad (24)$$

Ràng buộc (7) có nghĩa là phương pháp tính toán thời gian đến thực tế của tàu; Ràng buộc (8) biểu thị rằng thời gian bù đền của tàu phải đáp ứng phân phối Erlang; Ràng buộc (9) biểu thị rằng khi tàu vào cảng, thời gian đi vào luồng phải muộn hơn thời gian tàu đến cảng; Ràng buộc (10) biểu thị phương pháp tính toán tàu ra khỏi luồng; Ràng buộc (11) cho thấy thời gian làm việc của tàu phải muộn hơn thời gian tàu ra khỏi luồng; Ràng buộc (12) cho thấy thời gian chờ của tàu không được muộn hơn ngưỡng thời gian chờ; Ràng buộc (13) biểu thị phương pháp tính toán thời gian hoạt động xếp dỡ thực tế; Ràng buộc (14) biểu thị rằng khi tàu rời cảng container, thời gian đi vào luồng phải muộn hơn thời gian rời bến; Ràng buộc (15) biểu thị phương pháp tính toán thời gian tàu rời cảng container; Các ràng buộc (16)-(19) có nghĩa là tàu thuyền chịu ảnh hưởng của các yếu tố thủy triều và các tàu thuyền lớn chỉ được phép vào cảng container qua tuyến đường thủy ở mức thủy triều; Các ràng buộc (20)-(21) có nghĩa là bến tàu phải đáp ứng các yêu cầu về độ mớn nước và chiều dài của tàu; Các ràng buộc (22) có nghĩa là chỉ một tàu thuyền được phép bốc xếp tại mỗi bến tại một thời điểm; Các ràng buộc (23) cho thấy số bến tàu chỉ có một lần. Các ràng buộc (24) cho thấy rằng nếu tàu thuyền  $T \in V$  và  $T \in V$  là những  $k$ -th và  $(k+1)$ -th được phục vụ, sau đó là thời gian phục vụ của tàu  $T$  phải sớm hơn tàu  $T$ .

### 3.3.2. Hạn chế của cần cầu cẩu cảng

Theo quy trình xếp dỡ của cần cầu cẩu cảng, các hạn chế của hoạt động cần cầu cẩu cảng được xác định như sau:

$$\sum_{\substack{v \\ t \in T \\ n=1}} q_{n,v} = 1, \forall N \in C, \forall t \in T \quad (25)$$

$$\sum_{\substack{v \\ n=1}} q_{n,v}(t - TS_{T \in V})(T \cdot D_{T \in V} - t) \geq 0, \forall T \in V, \forall t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{\substack{v \\ n=1}} q_{n,v} = VON_{N \in C}, \forall T \in V, \forall t \in T \quad (27)$$

$$\sum_{\substack{v \\ t \in T \\ n=1}} q_{n,v} \leq VCM_{T \in V}, \forall T \in V \quad (28)$$

$$\sum_{\substack{v \\ t \in T \\ n=1}} q_{n,v} \leq C, \forall t \in T \quad (29)$$

$$\Delta VON_{N \in C} = VON_{N \in C} - VON_{N \in C-1}, \forall T \in V, \forall t \in T \quad (30)$$

$$q_{N \in C-1} + q_{N \in C} - q_{N \in C} = \begin{cases} -1 & \text{if } T \in V, s \in C, \forall t \in T \\ 0 & \text{if } T \in V, s \in C, \forall t \in T \\ 1 & \text{if } T \in V, s \in C, \forall t \in T \end{cases} \quad (31)$$

Ràng buộc (25) có nghĩa là mỗi cần cầu bờ chỉ có thể phục vụ một tàu cùng một lúc; Ràng buộc (26) chỉ ra rằng thời gian hoạt động của cần cầu bờ trên tàu phải nằm trong thời gian xếp dỡ của tàu đó. Ràng buộc (27) biểu thị rằng số lượng cần cầu bờ phục vụ tàu  $T$  bằng với việc phân bổ cho tàu

$T \in V$ ; Ràng buộc (28) có nghĩa là giới hạn trên và giới hạn dưới của việc phân bổ cần cầu cẩu cảng đáp ứng các yêu cầu về hạn chế hoạt động của tàu; Ràng buộc (29) cho thấy số lượng cần cầu cẩu cảng đang hoạt động tại các cảng container ít hơn tổng số cần cầu cẩu cảng tại các cảng container; Phương trình (30) xác định phương pháp tính toán số lượng cần cầu bến cảng cho các hoạt động phụ trợ di động; Ràng buộc (31) có nghĩa là cần cầu cẩu cảng không được phép bước qua các cần cầu cẩu cảng khác.

### 3.3.3. Hạn chế xe container

Theo tình hình hoạt động thu gom bằng xe tải, các ràng buộc của hoạt động thu gom bằng xe tải được xác định như sau:  $\sum_c$

$$\sum_{n=1}^{CK_{không}} CK_{không} \leq T \in V \quad (32)$$

$$TH_{t \in V} = D_{t \in V} / v_h, \forall T \in V, \forall j \in B \quad (33)$$

$$TL_{t \in V} = D_{t \in V} / v_h, \forall T \in V, \forall j \in B \quad (34)$$

$$v_h \sim N(v_h; \mu_{v_h}, \delta_{v_h}) \quad (1)$$

$$v_{t \in V} \sim N(v_{t \in V}; \mu_{v_{t \in V}}, \delta_{v_{t \in V}}) \quad (2)$$

$$Tiêu chuẩn = CK_{không} / (CK_{không} + 1) / (TH_{t \in V} + TL_{t \in V} + CF_0, CK_{không}) \quad (37)$$

Ràng buộc (32) có nghĩa là số lượng xe tải đang hoạt động tại thời điểm  $t$  không được vượt quá tổng số xe tải có sẵn trong cảng container; Các ràng buộc (33)-(34) biểu thị thời gian vận chuyển container rỗng và hàng nặng khi tàu  $T$  được neo đậu tại bến; Các ràng buộc (35)-(36) có nghĩa là tốc độ không tải và tải nặng của xe tải tuân theo phân phối chuẩn; Phương trình (37) xác định phương pháp tính hiệu suất làm việc thực tế của cần cầu cẩu cảng.

### 3.3.4. Những ràng buộc khác

$$x_{t \in V} \in \{0, 1\}, \forall T \in V \quad (38)$$

$$q_{TRONG} \in \{0, 1\}, \forall T \in V, \forall N \in C \quad (39)$$

$$p_{t \in V} \in \{0, 1\}, \forall T \in V \quad (40)$$

$$v_{t \in V} \in \{0, 1\}, \forall T \in V \quad (40)$$

Phương trình (38)-(41) định nghĩa các biến 0-1.

### 3.4. Xác định các biến phụ thuộc

Dựa trên các ràng buộc trên, mối quan hệ giữa biến phụ thuộc và biến đầu vào được xác định và giá trị hàm mục tiêu có thể được tính toán. Quy trình cụ thể được xác định như sau:

Bước 1 Khởi tạo dữ liệu. Hãy  $T \in V$ , chuyển đến Bước 2;

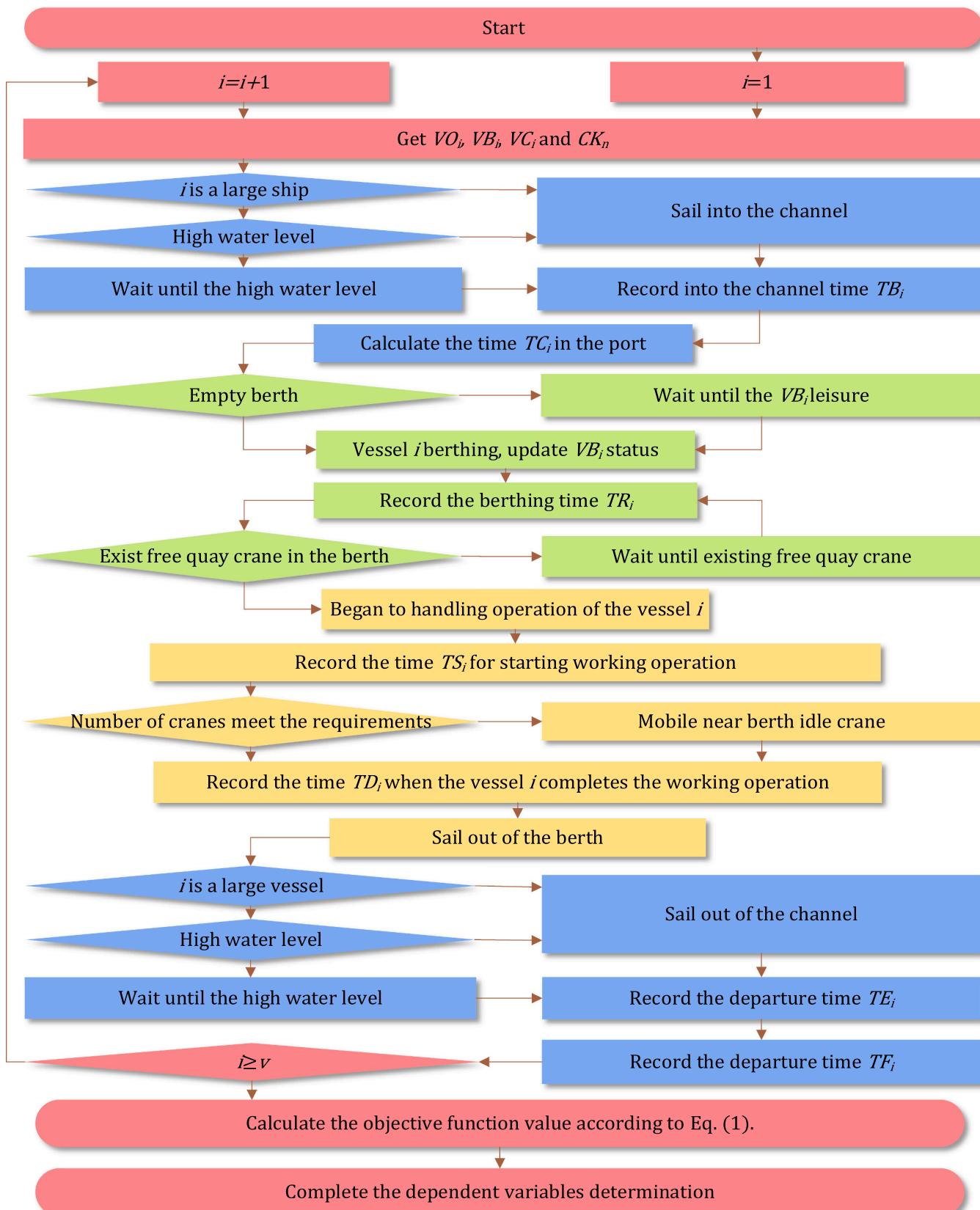
Bước 2: Lấy dữ liệu. Theo trình tự neo đậu  $T$  (tùy ý), có được bến đỡ  $VB_{T \in V}$  của tàu có trình tự neo đậu là  $T$ , các số lượng cần cầu bến cảng được phân bổ  $VON_{T \in V}$  và số lượng xe tải được phân bổ  $CK_{không}$ , sau đó chuyển sang Bước 3;

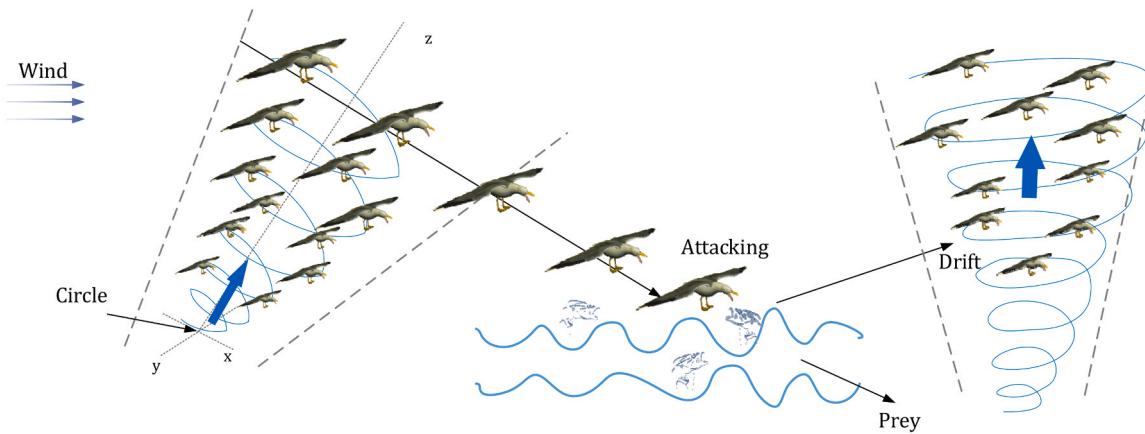
Bước 3 Xác định loại tàu. Nếu tàu  $T$  lớn, hãy chuyển đến Bước 4, nếu không, hãy chuyển đến Bước 6;

Bước 4 Xác định mức nước tại thời điểm này. Nếu mức nước cao, hãy chuyển sang Bước 6, nếu không, hãy chuyển sang Bước 5;

Bước 5: Tính thời gian tàu thuyền đi vào kênh khi mực nước dâng cao. Tàu thuyền  $T$  chỉ có thể neo đậu bên ngoài cảng cho đến khi mực nước cao, sau đó tàu  $T$  bắt đầu vào kênh. Tính toán thời gian bắt đầu  $B_1$  cho tàu  $T$  đi thuyền vào kênh và chuyển đến Bước 7;

Bước 6 Tính thời gian tàu đi vào kênh. Tàu  $T$  bắt đầu vào kênh. Tính toán thời gian bắt đầu  $B_2$  cho tàu  $T$  đi thuyền vào kênh và chuyển đến Bước 7;

**Hình 1.** Biểu đồ xác định biến phụ thuộc.



**Hình 2.**Hành vi di cư và săn mồi của mòng biển.

tàu  $T_{\text{đi}}$  thuyền vào kênh và chuyển đến Bước 7;

Bước 7 Tính thời gian tàu thuyền ra khỏi kênh. Tính toán và ghi lại thời gian  $T_{\text{C}}\text{t}_{\text{đi}}$ của tàu  $T_{\text{đi}}$ vào cảng theo [Phương trình \(10\)](#), và đi đến Bước 8;

Bước 8 Xác định vị trí trống của bến. Nếu bến  $V_{\text{B}}\text{t}_{\text{đi}}$ đang nhàn rỗi, hãy chuyển đến Bước 9; nếu không, hãy chuyển đến Bước 10;

Bước 9 Tính toán thời gian khi tàu bắt đầu hoạt động. Khi tàu  $T_{\text{đi}}$ bến tàu, cập nhật tình trạng sử dụng của bến tàu  $V_{\text{B}}\text{t}_{\text{đi}}$ , ghi lại thời gian cập bến  $T_{\text{S}}\text{t}_{\text{đi}}$ của tàu neo đậu  $T_{\text{đi}}$ và chuyển đến Bước 11;

Bước 10: Tính toán thời gian neo đậu cần thiết để chờ tàu bắt đầu hoạt động bốc xếp. Tàu  $T_{\text{đi}}$ chờ ở nơi neo đậu tại cảng cho đến khi cập bến  $V_{\text{B}}\text{t}_{\text{đi}}$ miễn phí, và sau đó là bến. Cập nhật trạng thái sử dụng của bến  $V_{\text{B}}\text{t}_{\text{đi}}$ , ghi lại thời gian cập bến  $T_{\text{S}}\text{t}_{\text{đi}}$ của tàu neo đậu  $T_{\text{đi}}$ và chuyển sang Bước 11;

Bước 11 Xác định xem cần cầu cầu cảng có đáp ứng các yêu cầu đã định trước hay không. Nếu số lượng cần cầu cầu cảng tự do liên tục tại bến  $V_{\text{B}}\text{t}_{\text{đi}}$ của tàu  $T_{\text{đi}}$ và các bến tàu liền kề của nó đáp ứng các yêu cầu của  $V_{\text{O}}\text{N}_{\text{đi}}$ , chuyển đến Bước 12, nếu không thì chuyển đến Bước 13;

Bước 12 Tính thời gian tàu hoàn thành các hoạt động làm việc khi cần cầu bờ đáp ứng các yêu cầu đã định trước. Tính hiệu suất làm việc thực tế của cần cầu bờ  $T_{\text{đi}}$ theo như [Phương trình \(37\)](#). Tính toán và ghi lại thời gian hoàn thành dịch vụ làm việc của tàu  $T_{\text{đi}}$ .  $\text{Đ}_{\text{đi}}$ theo sau [Phương trình \(13\)](#), cập nhật thời gian nhàn rỗi của cầu cảng và cần cầu cầu cảng, và chuyển đến Bước 14;

Bước 13 Tính thời gian tàu kết thúc hoạt động làm việc khi cần cầu bến cảng không đáp ứng được các yêu cầu đã định trước. Tính hiệu suất làm việc thực tế  $T_{\text{đi}}$ theo như [Phương trình \(37\)](#). Ghi lại số lượng cần cầu bến cảng có thể được tải và dỡ hàng tại thời điểm này như  $V_{\text{O}}\text{N}_{\text{đi}}$ . Sau khi các cần cầu bờ liền kề không hoạt động, trong điều kiện các ràng buộc liên tục của cần cầu bờ được đáp ứng, hãy tính toán và ghi lại thời gian hoàn thành dịch vụ  $T_{\text{đi}}$ của các hoạt động xếp dỡ tàu theo [Phương trình \(13\)](#)và cập nhật thời gian nhàn rỗi của cầu cảng và cần cầu, chuyển đến Bước 14;

Bước 14 Xác định loại tàu. Nếu tàu  $T_{\text{đi}}$ là một tàu lớn, hãy chuyển đến Bước 15, nếu không, hãy chuyển đến Bước 17;

Bước 15 Xác định mức nước tại thời điểm này. Nếu mức nước cao, hãy chuyển sang Bước 17, nếu không, hãy chuyển sang Bước 16;

Bước 16: Tính thời gian chờ tàu vào kênh khi mực nước dâng cao. Tàu  $T_{\text{đi}}$ đang ở nơi neo đậu tại cảng và đợi cho đến khi mực nước ở mức cao, sau đó bắt đầu đi thuyền vào kênh. Ghi lại thời gian bắt đầu  $T_{\text{AI}}\text{t}_{\text{đi}}$ khỏi kênh và chuyển đến Bước 18;

Bước 17: Tính thời gian tàu đi vào kênh. Tàu  $T_{\text{đi}}$ bắt đầu đi thuyền vào kênh. Ghi lại thời gian bắt đầu  $T_{\text{AI}}\text{t}_{\text{đi}}$ cho tàu  $T_{\text{đi}}$ vào kênh và chuyển sang Bước 18;

Bước 18 Tính thời gian khởi hành của tàu. Tàu  $T_{\text{đi}}$ khỏi cảng. Tính toán và ghi lại thời gian khởi hành  $T_{\text{AI}}\text{CHÍNH}_{\text{đi}}$ theo như

[Phương trình \(15\)](#), và đi đến Bước 19;

Bước 19 Đánh giá xem việc tính toán tất cả các tàu đến đã hoàn tất chưa. Nếu  $T_{\text{đi}} \geq v$ , chuyển đến Bước 21, nếu không, chuyển đến Bước 20;

Bước 20 Thực hiện phép tính mạch tiếp theo. Hãy  $T_{\text{đi}}=T_{\text{đi}}+1$ , chuyển hướng đến Bước 2;

Bước 21 Tính giá trị hàm mục tiêu theo [Phương trình \(1\)](#) Bước 22 Hoàn tất việc xác định tất cả các biến phụ thuộc. Sơ đồ dòng xác định các biến phụ thuộc được thể hiện trong [Hình 1](#):

#### 4. Thuật toán tối ưu hóa Seagull thích ứng lượng tử hỗn loạn (CQASOA) và phương pháp giải mô hình TEU-BQCT

Hướng đến giải quyết vấn đề mô hình điều phối cảng container, xét đến hiệu suất tốt của SOA trong các lĩnh vực tương tự khác [48,49], bài báo này cố gắng áp dụng SOA để giải quyết mô hình TEU-BQCT.

##### 4.1. Thuật toán tối ưu hóa Seagull chuẩn (SOA)

SOA được chia thành hành vi di chuyển và hành vi tấn công[3]. Hai hành vi này có thể được mô tả bằng [Hình 2](#). Mô tả tóm tắt về quá trình thuật toán như sau:

###### 4.1.1. Hành vi di cư

**(1) Tránh va chạm:**Công thức cập nhật vị trí mới của

con mòng biển được hiển thị [Phương trình \(42\)](#). Biến s được xác định như thể hiện trong [Phương trình \(43\)](#),

$$C_s = M \cdot T \times P_t \quad (42)$$

Ở đây  $C_s$  có nghĩa là một vị trí mới không va chạm với những con mòng biển bên cạnh;  $t$  có nghĩa là số lần lặp hiện tại;  $P_t$  có nghĩa là vị trí hiện tại của loài mòng biển.

$$M \cdot T = n_{\text{eu}} - [t \cdot (n_{\text{eu}} / T_{\text{đi}})] \quad (43)$$

Giá trị của biến A thay đổi tuyến tính với  $n_{\text{eu}}$ , lấy  $n_{\text{eu}}=2$ .  $T_{\text{đi}}$  là số lần lặp lại tối đa.

**(2) Hướng vị trí tốt nhất:**Để tránh va chạm giữa các con mòng biển, mòng biển sẽ di chuyển về hướng có vị trí tốt nhất cho mòng biển [Phương trình \(44\)](#),

$$T_{\text{AI}}\text{B} \times (P_t - b_s - P_t s) \quad (44)$$

Ở đây  $T_{\text{AI}}\text{B}$  biểu thị hướng vị trí tốt nhất của mòng biển;  $P_t - b_s$  là tốt nhất tư thế của mòng biển;  $b_s$  là một số ngẫu nhiên và biểu thức của nó được xác định như Công thức (45),

$$b_s = 2 \times M \cdot T_2 \times r_{\text{ngày}} \quad (45)$$

**Bảng 2**

Bảng so sánh phân bố điểm ngẫu nhiên và bản đồ hỗn loạn của mèo.

Khoảng cách	Ngẫu nhiên	Bản đồ mèo
[0, 0, 1)	5188	5049
[0,1, 0,2)	4995	4920
[0,2, 0,3)	5039	4975
[0,3, 0,4)	5068	5028
[0,4, 0,5)	4879	4981
[0,5, 0,6)	4867	5048
[0,6, 0,7)	5116	5058
[0,7, 0,8)	4860	4962
[0,8, 0,9)	5023	4999
[0,9, 1)	4965	4980
Phương sai	10.865,4	1808.4

Ở đây  $r_{ngay}$  là một số ngẫu nhiên giữa [0,1].

(3) **Tiếp cận vị trí tối ưu của mòng biển:** Sau khi cá nhân mòng biển đến một vị trí không xung đột với các con mòng biển khác, mòng biển sẽ cập nhật vị trí của mình để đến gần hơn với vị trí mòng biển tối ưu, vì [Phương trình \(46\)](#),

$$D_s = |C_{st} + T_{dis}| \quad (46)$$

Ở đây  $D_s$  là địa điểm di cư mới của loài mòng biển.

#### 4.1.2. Hành vi hung hăng

Khi những con mòng biển tấn công con mồi, chúng cần bay xuống theo hình xoắn ốc và liên tục thay đổi hướng và góc tấn công, điều này có thể được diễn tả như sau [Phương trình \(47\)](#),

$$\begin{cases} X = r \times \cos \phi \\ Y = r \times \sin \phi \\ Z = r \times \phi \\ r = b \cdot \eta \times v_a \end{cases} \quad (47)$$

Ở đây  $r$  là bán kính của đường bay xoắn ốc khi con mòng biển tấn công;  $s$  là giá trị góc ngẫu nhiên trong khoảng [0, 2π];  $b$  là hằng số;  $v_a$  là cơ số của logarit tự nhiên.

Cuộc tấn công của con mòng biển theo hình xoắn ốc có thể được diễn tả như sau [Phương trình \(48\)](#),

$$P_s = D_t \cdot s \cdot X \cdot C_o \cdot Z - P_t \quad (48)$$

Ở đây  $P_s$  có nghĩa là vị trí tấn công của mòng biển trong chuyển động xoắn ốc.

Công thức lập SOA có thể thu được bằng cách tổng hợp [Các phương trình \(42\) đến \(48\)](#),

$$P_{t+1} = P_t - b \cdot s + |B \cdot P_t - b \cdot s + (M \cdot T - B) \cdot P_t| \cdot X \cdot C_o \cdot Z \quad (49)$$

#### 4.1.3. Các vấn đề hiện tại của SOA và phương pháp cải tiến

Mặc dù SOA có ưu điểm là hiệu suất tối ưu hóa tốt hơn và tốc độ tính toán nhanh hơn các thuật toán tối ưu hóa truyền thống, nhưng nó vẫn có vấn đề về khả năng nhiễu loạn toàn cục yếu và dễ rơi vào giải pháp tối ưu cục bộ. Do đó, dựa trên bản đồ hỗn loạn, phương pháp khởi tạo dân số được cải thiện để tăng phân phối toàn cục của dân số ban đầu SOA; Dựa trên cổng xoay lượng tử và cổng NOT lượng tử, quá trình cập nhật lặp lại dân số được thực hiện tốt hơn để tăng tốc độ tính toán; Hệ số hội tụ phi tuyến tính được đưa vào để tăng khả năng nhiễu loạn toàn cục trong giai đoạn đầu và khả năng tìm kiếm cục bộ trong giai đoạn sau. Sau đó, một thuật toán tối ưu hóa chim mòng biển thích ứng lượng tử hỗn loạn mới được đề xuất, có tên là CQASOA.

### 4.2. Thiết kế thuật toán tối ưu hóa Seagull thích ứng lượng tử hỗn loạn (CQASOA)

4.2.1. Thiết kế thuật toán tối ưu hóa Chaos Seagull (CSOA) So với các thuật toán ngẫu nhiên, các bản đồ hỗn loạn có tính ergodic hơn. Trong bài báo này, dựa trên bản đồ hỗn loạn, quá trình khởi tạo của

Dân số SOA được cải thiện, do đó dân số ban đầu được tạo ra có tính đa dạng tốt hơn. Các bản đồ hỗn loạn thường được sử dụng trong các thuật toán tối ưu hóa là Bản đồ logistic[50], Bản đồ lèu[51], Một bản đồ [52], v.v. So với các phép ánh xạ hỗn loạn khác, phép ánh xạ Cat có đặc điểm phân phối tốt hơn[17], do đó, dạng khởi tạo của chuỗi bản đồ hỗn loạn Cat được đề xuất trong bài báo. Biểu thức bản đồ Cat có thể là [Phương trình \(50\)](#),

$$\begin{cases} x_{N+1} = (x_N + v_{N+1}) \text{bản sửa đổi} \\ v_{N+1} = (x_N + 2v_N) \text{bản sửa đổi} \end{cases} \quad (50)$$

Ở đây  $x \mod 1 = x - [x]$  có nghĩa là chỉ có phần phân số của  $x$  được thực hiện;  $x_N, v_N$  là các giá trị của tham số ánh xạ mèo được tính toán cho  $N$ -lần thứ.

Biểu thức dạng ma trận ánh xạ Cat hai chiều là như sau [PT \(51\)](#),

$$\begin{bmatrix} x_{N+1} \\ v_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_N \\ v_N \end{bmatrix} \quad x \mod 1 = C \begin{bmatrix} x_N \\ v_N \end{bmatrix} \quad (51)$$

Ở đây  $C = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$  và  $|C| = 1$ .

Bản đồ Cat và phân phối điểm-điểm ngẫu nhiên đã được thử nghiệm 50.000 lần và phân phối của chúng trong khoảng 0-1 được tính toán như thể hiện trong [Bảng 2](#). Bằng cách tính toán phương sai của trường hợp phân phối khoảng, có thể thấy rằng bản đồ Cat có phân phối tốt hơn trên toàn bộ không gian giải pháp.

Trong quá trình khởi tạo dân số, nếu số lượng mẫu dân số là  $N$ , sau đó toàn bộ dân số được khởi tạo có thể được biểu thị như sau  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ . Dân số cá thể  $x_i$  và tham số phụ trợ  $v_i$  được tạo ra ngẫu nhiên trong phạm vi định nghĩa dân số,  $x_2$  và  $v_2$  được tính toán theo [Các phương trình \(50\) và \(51\)](#) và các quần thể khác được tính toán tuân tự. Các tính toán  $\mathbf{x}$  là dân số.

4.2.2. Thiết kế thuật toán tối ưu hóa lượng tử Seagull (QSOA) Máy tính lượng tử là một mô hình máy tính mới nổi dựa trên cơ học lượng tử. Với nguyên lý chồng chập của cơ học lượng tử, hiệu quả tính toán được cải thiện. Trong máy tính lượng tử, hàm biến đổi logic của qubit thường được thực hiện thông qua một loạt các phép biến đổi đơn vị. Một thiết bị lượng tử thực hiện các phép biến đổi logic trong một khoảng thời gian nhất định được gọi là cổng lượng tử. Các cổng lượng tử một bit thường được sử dụng bao gồm cổng pha,  $s$ ,  $\pi/8$  cổng, cổng Hadamard, cổng xoay lượng tử, v.v. Cổng xoay lượng tử có thể được biểu diễn như [Phương trình \(52\)](#),

$$|\varphi\rangle = R|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} \cos\Delta\varphi & -\sin\Delta\varphi \\ \sin\Delta\varphi & \cos\Delta\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \Delta\varphi) \\ \sin(\varphi + \Delta\varphi) \end{bmatrix} \quad (52)$$

ở đây  $|\varphi\rangle$  là giai đoạn trước khi cửa quay lượng tử chuyển dịch sự hình thành;  $|\varphi\rangle$  là pha sau phép biến đổi cửa quay lượng tử;  $\Delta\varphi$  là radian quay pha của cửa quay lượng tử.

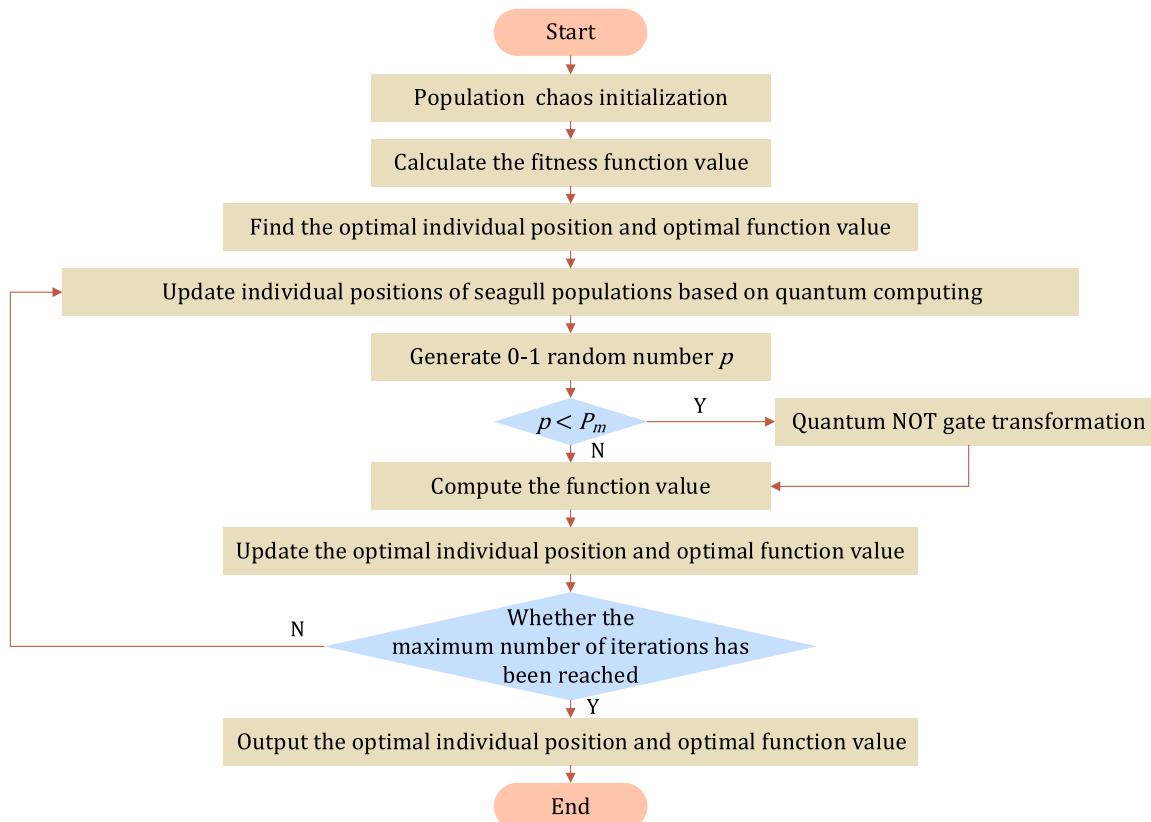
Do hiệu quả cao của điện toán lượng tử, hiệu suất tính toán và tốc độ hội tụ của các thuật toán tối ưu hóa thông minh có thể được cải thiện thông qua các cổng quay lượng tử[53]. Cổng quay lượng tử được thử nghiệm để tăng tốc độ hội tụ và độ chính xác của SOA bằng cách kết hợp [Các phương trình \(52\) và \(49\)](#) và [biểu thức sau \(Các phương trình \(53\) đến \(55\)\)](#) sẽ được thỏa mãn:

$$\varphi = P_{t+1} \quad (53)$$

$$\varphi = P_{t+1} \quad (54)$$

$$\Delta\varphi = |B \cdot P_{t+1} - B \cdot P_t| \cdot X \cdot C_o \cdot Z \quad (55)$$

Hướng của góc  $\Delta\varphi$  có thể được lựa chọn theo các quy tắc sau: Khi  $R \neq 0$ , hướng là  $-\text{sgn}(R)$ ; Khi  $R=0$ , các



**Hình 3.Sơ đồ CQASOA**

hướng có thể là tích cực hoặc tiêu cực.

Trong điện toán lượng tử, các pha chuyển đổi lượng tử có thể đạt được thông qua các cổng NOT lượng tử. Trong thuật toán tối ưu hóa thông minh, phạm vi duyệt toàn cục của thuật toán có thể được tăng lên theo hiệu suất của cổng NOT lượng tử [54]. Đối với vấn đề dễ rơi vào giải pháp tối ưu cục bộ, bài báo này cố gắng làm nhiễu loạn toàn cục vị trí cá nhân của quần thể thông qua cổng NOT lượng tử để thoát khỏi tối ưu cục bộ và tăng cường khả năng tìm kiếm toàn cục của SOA. Biểu thức cổng NOT lượng tử có thể được xác định là [Phương trình \(56\)](#).

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/2 - \varphi) \\ \sin(\pi/2 - \varphi) \end{bmatrix} \quad (56)$$

Ở đâu  $\varphi$  là sự biến đổi có thể được trên pha của cống NOT lượng tử xác định bởi **Phương trình (5 – 3)**.

Trong OSOA, xác suất pha lượng tử đi qua NO lượng tử

Cổng T được thiết lập thành  $P_{t[i]}$ . Sau khi đi qua lƣợng tử cổng quay, một số ngẫu nhiên  $P$  được tạo ra giữa  $[0, 1]$ . Nếu  $p < p_{t[i]}$ , nó đi qua cổng NOT lƣợng tử, nếu không nó sẽ đi vào quá trình lặp lại tiếp theo.

#### 4.2.3. Thiết kế pa thích ứng thuật toán tối ưu hóa rametric seagull (ASOA)

Xem xét rằng SOA có vấn đề về khả năng nhiều yếu trong giai đoạn đầu và khả năng thăm dò cục bộ không đủ trong giai đoạn sau, tham số thích ứng  $\alpha$  được giới thiệu. Trong SOA, các giá trị  $\alpha$  nếu tham số  $M_0$  và  $B$  không thay đổi,  $\alpha$  sẽ không thay đổi. Tuy nhiên, khi  $M_0$  và  $B$  thay đổi,  $\alpha$  cũng thay đổi. Khi  $M_0$  và  $B$  tăng,  $\alpha$  cũng tăng. Khi  $M_0$  và  $B$  giảm,  $\alpha$  cũng giảm. Điều này giúp SOA thích ứng với môi trường thay đổi.

Bảng 3

Mã trận quy tắc mã hóa Ví dụ số của cá nhân  $P$ :

Mã số tàu		1	2	3	4	5	6
Hàng đầu tiên: Trinh tự neo đậu	$MÖ HEO[P, 1;:]$	3	5	4	2	1	6
Trang nội							
Hàng thứ hai: Bến tàu	$MÖ HEO[P, 2;:]$	3	1	2	4	3	4
chức vụ VB							
Hàng thứ ba: Số lượng	$MÖ HEO[P, 3;:]$	2	3	2	1	5	5
được phân bổ VõN							
Hàng thứ tư: Số lượng	$MÖ HEO[P, 4;:]$	11	8	14	9	10	13
được phân bổ VK							

$$M \hat{O} T = n \epsilon u \{v [s \check{o} \pi \cdot (t/t_{\text{hold}} + 1)]\} / 2 \quad (57)$$

nơi biến đổi  $M_0$  thay đổi phi tuyến tính và thích ứng với  $n_{\text{euc}} = 2$ , sau khi thêm số lần lặp lại, biến  $M_0$  de-clines không tuyến tính từ 2 đến 0; thì số lần lặp hiện tại;  $T_{\text{ối}} \rightarrow$  là số lần lặp lại tối đa

4.2.4. Thiết kế thuật toán tối ưu hóa Seagull thích ứng lượng tử hỗn loạn (QASOA)

Bởi vì ba thuật toán CQSOA, QSOA và ASOA có lợi thế, bài báo này cố gắng tích hợp ba cải tiến trên phương pháp để có được CQASOA. sơ đồ dòng chảy của CQASOA được hiển thị trong [Hình 3](#):

#### 4.3. Các thiết kế phương pháp giải để giải mô hình TEU-BQCT dựa trên COASOA

13.1. X2-*h* ( $\mu$ g/g) = 1.5 - 0.56 ( $h$ ) + 0.11 ( $L_{TEH}$ )<sup>0.07</sup>

**4.3.1. Xây dựng quy tắc mã hóa cho mô hình TEU-BQCT**  
Nhằm mục đích tạo điều kiện thuận lợi cho việc thể hiện các biến tối ưu trong quá trình giải mã hình một ma trận mã hóa số tự nhiên của neo đều.

thứ tự, bến được chỉ định, số cần cẩu cầu cảng được chỉ định và số xe container được chỉ định được xây dựng. Số cột ma trận là  $v$ , phụ thuộc vào tổng số tàu thuyền vào cảng; Số hàng trong ma trận là bốn, hàng đầu tiên biểu thị thứ tự các tàu thuyền vào cảng (*Tiếng nói*), hàng thứ hai có nghĩa là số sê-ri của bến tàu sẽ được đỗ (*VB*), hàng thứ ba biểu thị số sê-ri của cần cẩu cầu cảng được phân bổ (*VỐN*), và hàng thứ tư là số lượng bộ xe tải (*VK*). Một ví dụ số đơn giản về phương pháp mã hóa được thể hiện trong *Bảng 3*. Cột đầu tiên của ma trận mã hóa được lấy làm ví dụ: tàu được đánh số 1, thứ tự tàu vào cảng là 3, số sê-ri của bến tàu sẽ đậu là 3, số cần cẩu bến được phân bổ là 2 và số xe tải được phân bổ là 11.

#### 4.3.2. Thiết kế thuật toán tích hợp khả thi (F-IA) cho mô hình TEU-BQCT

Theo quy trình hoạt động của cảng, *Tiếng nói*, *VB*, *VỐN*, *VÀ VK* là số tự nhiên, do đó ma trận mã hóa được định nghĩa là ma trận số tự nhiên. Kết quả tính toán lặp lại của CQASOA là một số thực, do đó, một thuật toán tích hợp khả thi (F-IA) phù hợp với mô hình TEU-BQCT được thiết kế để làm cho các biến tối ưu hóa của mỗi lần lặp cập nhật đáp ứng các yêu cầu của số tự nhiên.

Thuật toán chủ yếu được chia thành bốn phần, tương ứng thực hiện xử lý số nguyên khả thi cho các vectơ bốn hàng của ma trận mã hóa. Trong bài báo này, ma trận mã hóa là  $MÒ HEO[P, :, :]$  cá nhân/Pnhư một ví dụ (nơi  $MÒ HEO[P, 1, q]$  biểu thị giá trị tương ứng với  $q$ -cột thứ của hàng đầu tiên; *kích thước mòng biển* là quy mô dân số) và quy trình thiết kế được giới thiệu như sau:

Bước 1 Đ $\delta$  $P=1$ , chuyển đến Bước 2;

Bước 2 Nếu các biến ở hàng đầu tiên  $MÒ HEO[P, 1, :]$  không bằng nhau thì chuyển sang Bước 3, nếu không thì chuyển sang Bước 4;

Bước 3 Sắp xếp  $MÒ HEO[P, 1, :]$  theo kích thước số và sử dụng thứ tự số tương ứng làm thứ tự neo đậu tàu  $MÒ HEO[P, 1, :]$ , cho phép *SEAGULL\_MỚI[P, 1, :]=MÒ HEO1[P, 1, :]*, đi đến Bước 5;. Bước 4 Sắp xếp

$MÒ HEO[P, 1, :]$  theo kích thước số và sử dụng thứ tự số tương ứng làm thứ tự neo đậu tàu  $MÒ HEO[P, 1, :]$ , trong đó đối với các tàu có giá trị bằng nhau, thứ tự được xác định theo thứ tự cập cảng trước khi tiến hóa, hãy *SEAGULL\_MỚI[P, 1, :]=MÒ HEO1[P, 1, :]*, đi đến Bước 5;. Bước 5 Đ $\delta$  $q=1$ , chuyển đến Bước 6;

Bước 6: Làm tròn bến tàu  $MÒ HEO[P, 2, q]$  của  $q$ -tàu thứ trong cá nhân  $P$  để có được  $MÒ HEO1[P, 2, q]$ , và phán đoán xem  $MÒ HEO1[P, 2, q]$  thỏa mãn các ràng buộc về bến tàu, nếu vậy, hãy *SEAGULL\_MỚI[P, 2, q]=MÒ HEO1[P, 2, q]*, nếu không phải là số tự nhiên  $MÒ HEO2[P, 2, q]$  ] được tạo ngẫu nhiên theo điều kiện thỏa mãn ràng buộc neo đậu và *SEAGULL\_MỚI[P, 2, q]=MÒ HEO2[P, 2, q]*, chuyển đến Bước 7;

Bước 7 Nếu  $q \geq v$ , đi đến Bước 9, nếu không đi đến Bước 8;

Bước 8 Hãy  $q=q+1$ , đi đến Bước 6;. Bước 9 Đ $\delta$  $q=1$ , chuyển đến Bước 10..

Bước 10 Làm tròn số  $MÒ HEO[P, 3, q]$  của số sê-ri của cần cẩu bến cảng được phân bổ cho  $q$ -tàu thứ trong cá nhân  $P$  để có được  $MÒ HEO1[P, 3, q]$ , và phán đoán xem  $MÒ HEO1[P, 3, q]$  đáp ứng các ràng buộc liên quan đến cần cẩu cầu cảng, nếu vậy, hãy *SEAGULL\_MỚI[P, 3, q]=MÒ HEO1[P, 3, q]*, nếu không thì theo điều kiện các ràng buộc được đáp ứng, số tự nhiên  $MÒ HEO2[P, 3, q]$  được tạo ra ngẫu nhiên và *SEAGULL\_MỚI[P, 3, q]=MÒ HEO2[P, 3, q]*, chuyển đến Bước 11;

Bước 11 Nếu  $q \geq v$ , đi đến Bước 13, nếu không đi đến Bước 12;

Bước 12 Hãy  $q=q+1$ , đi đến Bước 10;. Bước 13 Đ $\delta$  $q=1$ , chuyển đến Bước 14..

Bước 14 Làm tròn số  $MÒ HEO[P, 4, q]$  đối với số lượng xe tải được phân bổ cho  $q$ -tàu thứ trong cá nhân  $P$  để có được  $MÒ HEO1[P, 4, q]$ , và phán đoán xem  $MÒ HEO1[P, 4, q]$  thỏa mãn các ràng buộc của xe tải, nếu vậy, hãy *SEAGULL\_MỚI[P, 4, q]=MÒ HEO1[P, 4, q]*, nếu không thì trong điều kiện các ràng buộc được đáp ứng, ngẫu nhiên tạo ra số tự nhiên *mòng biển*[P, 4, q], cho phép *SEAGULL\_MỚI[P, 4, q]=MÒ HEO2[P, 4, q]*, nhập Bước 15;

Bước 15 Nếu  $q \geq v$ , đi đến Bước 17, nếu không đi đến Bước 16..

Bước 16 Hãy  $q=q+1$ , chuyển đến Bước 14..

Bước 17 Nếu  $P \geq$  kích thước *mòng biển*, đi đến Bước 19, nếu không đi đến Bước 18;. Bước 18 Hãy  $P=P+1$ , chuyển đến Bước 2;. Bước 19: Hoàn tất tích hợp khả thi.

Trong F-IA, Bước 2 đến 4 là xử lý số nguyên khả thi cho trình tự cập cảng của tàu; Bước 5 đến 8 là xử lý số nguyên khả thi cho các bến cập cảng; Bước 9 đến 12 là xử lý số nguyên khả thi để phân bổ số lượng cần cẩu bến; Bước 13 đến 16 là xử lý số nguyên khả thi để phân bổ xe tải.

#### 4.3.3. Xây dựng hàm phạt ngoài áp dụng cho mô hình TEU-BQCT

Nhằm vào ràng buộc thời gian cập cảng của tàu (12) và số lượng hoạt động của xe tải (32), phương pháp phạt bên ngoài được thử sử dụng để giải quyết TEU-BQCT[55]. Dựa trên phương pháp xây dựng hàm mục tiêu của mô hình *Phương trình (1)*, hàm phạt bên ngoài hàm phụ trợ *F\_trừng phạt* được xây dựng như Eq. (58),

$$F_{\text{trừng phạt}} = w_1 \cdot t_{\text{đi}} \cdot F_{\text{trừng phạt}} + w_2 \cdot t_{\text{đi}} \cdot F_{\text{trừng phạt}} + w_3 \cdot k_{\text{c}} \cdot F_{\text{trừng phạt}} \quad (58)$$

Ở đây *F\_trừng phạt* là hàm phụ của hàm mục tiêu *F*, *F\_trừng phạt*, *F\_trừng phạt*, *Và F\_trừng phạt* là các hàm phụ của các hàm mục tiêu phụ *F1*, *F2*, *Và F3*;  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  và  $k_{\text{c}}$  là các yếu tố điều chỉnh trọng lượng;  $t_{\text{đi}}$ ,  $t_{\text{đi}}$ , *Và t* là hệ số cân bằng mức số lượng. (Hệ số điều chỉnh trọng số và hệ số cân bằng độ lớn đều thỏa mãn điều kiện của *Phương trình (2)*).

Các chức năng phụ trợ *F\_trừng phạt*, *F\_trừng phạt*, *Và F\_trừng phạt* có thể được xác định là *Các phương trình (59) đến (61)*,

$$F_{\text{trừng phạt}} = F + \mu_1 \sum_{t=1}^{T_{\text{đi}}} \text{tối đa}[(T_{\text{đi}} - TAI SAO_{t,0}) - TAI_{t,0}] \quad (59)$$

$$F_{\text{trừng phạt}} = F + \mu_2 \sum_t \sum_{N=1}^{T_{\text{đi}}} \text{tối đa}(CK_{không} - Tô_{t,0}) \quad (60)$$

$$F_{\text{trừng phạt}} = F_3 \quad (61)$$

Ở đây *F1*, *F2*, *Và F3* là các giá trị hàm mục tiêu phụ 1-3, được xác định bởi *Các phương trình (3)*, *(4)* và *(6)*; *TAI* là thời điểm khi tàu *T* bắt đầu hoạt động; *TAI SAO* là thời gian thực tế tàu đến *T*; *TAI* là thời gian chờ tối đa cho phép của tàu; *CK* không là số lượng xe tải phục vụ cầu bến cảng *N* vào thời điểm đó; *Tô* là tổng số xe tải có thể được phục vụ bởi các cảng container;  $\mu_1$  và  $\mu_2$  là các yếu tố hình phạt, tùy thuộc vào *Các phương trình (62)* và *(63)*,

$$\mu_1 = \text{biểu thức}(T_{\text{đi}}) \quad (62)$$

$$\mu_2 = \text{biểu thức}(T_{\text{đi}}) \quad (63)$$

Trong quá trình lặp lại cập nhật CQASOA, hàm phụ trợ được thay thế bằng hàm mục tiêu để tính giá trị hàm. Nếu các yêu cầu của ràng buộc (12) và (32) không thể được đáp ứng và kết quả tiếp cận  $+\infty$ , kết quả sẽ bị loại bỏ trong quá trình lặp lại. Và sau đó sẽ thu được một giải pháp đáp ứng các ràng buộc.

#### 4.3.4. Thiết kế quy trình giải mô hình TEU-BQCT dựa trên CQASOA

CQASOA được đề xuất để giải mô hình TEU-BQCT, nhằm tối ưu hóa sơ đồ lập lịch để có được sơ đồ lập lịch trình tự cập cảng tàu - số bến - số cần cẩu cầu cảng dịch vụ - số xe tải dịch vụ với thời gian cập cảng ngắn nhất và lượng phát thải carbon của tàu thấp nhất. Quy trình giải mô hình TEU-BQCT được thiết kế như sau:

Bước 1 Đ $\delta$  $t=1$ , chuyển đến Bước 2;

Bước 2 Thiết lập quy mô dân số *kích thước mòng biển* và số lần lặp lại *T* tối đa;

Bước 3 Theo các quy tắc mã hóa TEU-BQCT, dân số hỗn loạn được khởi tạo theo *Các phương trình (50)* và *(51)*.

Bước 4: Tích hợp khả thi của quần thể được khởi tạo dựa trên *F*

**Bảng 4**

Thông tin cơ bản về tàu cập cảng quy mô lớn.

NHÂN DẠNG	$VL_{Tối}$	$Vd_{Tối}$	$V_1 \text{ THẾ GIỚI}_{Tối}$	$VCM_{Tối}$	$VCM_{Trái}$	$D_{Trái}$	$D_{Trái}$	$D_{Trái}$	$D_{Trái}$
1	100	5	100	1	3	1831	2290	2574	3031
2	200	8	250	1	3	2499	1934	2139	2566
3	200	8	250	1	3	2499	1934	2139	2566
4	250	15	500	1	4	3114	2535	2054	2922
5	400	30	1000	1	5	3157	2861	2273	2015
6	400	30	1000	1	5	3157	2861	2273	2015

**Bảng 5**

Thông tin cơ bản về tàu cập cảng quy mô nhỏ.

NHÂN DẠNG	$VL_{Tối}$	$Vd_{Tối}$	$V_1 \text{ THẾ GIỚI}_{Tối}$	$VCM_{Tối}$	$D_{Trái}$	$D_{Trái}$
1	100	5	100	1	3	1831
2	200	8	250	1	3	2499
3	200	8	250	1	3	2499
4	250	15	500	1	4	3114
5	400	30	1000	1	5	3157
6	400	30	1000	1	5	3157

Tôi;.

Bước 5: Tính giá trị của hàm phụ trợ  $F_{trường phat}$  của dân số;.

Bước 6: Tìm kiếm giải pháp tối ưu toàn cục và vị trí giải pháp tối ưu;.

Bước 7: Hoàn thành quá trình tiến hóa lặp lại của quần thể dựa trên Các phương trình (49) và (52);.

Bước 8: Tạo ngẫu nhiên một số ngẫu nhiên 0-1  $P$ , nếu như  $p < p_{tối}$ , chuyển đến Bước 9, nếu không chuyển đến Bước 10;.

Bước 9: Nhập công NOT lượng tử, thực hiện phép biến đổi công NOT lượng tử dựa trên Phương trình (56) và nhập Bước 10;.

Bước 10: Nếu  $t_{tối}$  đã, đi đến Bước 11, nếu không đi đến Bước 12; Bước11:  $t=t+1$ , chuyển đến Bước 4;.

Bước 12: Hoàn tất tất cả các phép tính lặp lại và đưa ra kết quả tối ưu.

#### 4.4. Cơ chế tối ưu hóa lăn

Xem xét các vấn đề về đổi mới tàu và sắp xếp lại thiết bị tại cảng, một cơ chế tối ưu hóa lăn được thiết kế để cung cấp một sơ đồ ứng dụng thực tế của phương pháp giải pháp TEU-BQCT\_CQASOA cho các nhà quản lý cảng theo đặc điểm của các hoạt động làm việc liên tục tại cảng. Dựa trên nguyên tắc "lô và thời gian", cơ chế này sẽ xử lý tàu theo lô theo thời gian đến ước tính của tàu. Khi một lô tàu vào cảng, nếu không có tàu nào trong cảng container đang thực hiện các hoạt động làm việc, nó sẽ trực tiếp vào trình tự tối ưu hóa, áp dụng TEU-BQCT\_CQASOA để giải quyết sơ đồ lập lịch và bắt đầu quá trình tối ưu hóa; Nếu các lô tàu khác đang xếp dỡ, các tàu sẽ chuyển sang lô tiếp theo và đợi quá trình tối ưu hóa của lô tàu trước đó để bắt đầu tối ưu hóa.

### 5. Thí nghiệm số

#### 5.1. Thiết lập thử nghiệm

Trong bài báo này, hai cảng ở Nam Trung Quốc được lấy làm ví dụ để tiến hành các thí nghiệm số. Các cảng quy mô lớn có 4 bến, bến số 1-3 dài 400 m và mớn nước 20 m, chiều dài bến số 4 là 400 m và mớn nước 30 m, tổng số cảng cầu cảng là 12; Các cảng quy mô nhỏ có 2 bến và bến số 1 dài 400 m, mớn nước 20 m, chiều dài bến số 2 là 400 m, mớn nước 30 m, tổng số cảng cầu cảng là 6. Cửa sổ thời gian mục nước ở hai cảng dài 6 giờ. Thời gian lệch cho tàu đến cảng tuân theo phân phối Erlang và các tham số được đặt là  $t_{tối} = 0,03$ .

**Bảng 6**

Ví dụ về giá trị của hệ số điều chỉnh trọng lượng và ứng dụng tương ứng.

	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
Tình huống I: Tập trung vào việc cắt giảm thời gian tàu trong cảng	0,5	0,25	0,25
Tình huống II: Tập trung vào việc cắt giảm carbon của xe tải phát thải	0,25	0,5	0,25
Tình huống III: Tập trung vào việc cắt giảm carbon khí thải của cảng cầu cảng	0,25	0,25	0,5

**Bảng 7**

Kết quả tính toán của ba nhóm điều kiện làm việc tiêu biểu.

	Thời gian tàu thuyền ở cảng $f_1$	Xe tải các-bon phát thải $f_2$	Cần cầu bến cảng carbon phát thải $f_3$
Tình huống I	10.82975589	15385.84584	18185.71205
Tình huống II	11.44170212	14555.17091	18219.32922
Tình huống III	12.46912124	14989.03284	15826.06306

Và  $\mu_{Trợ lý} = 0,03$ .

Hiệu suất tải và dỗ lý thuyết của cần cầu bến là 2TEU/(đơn vị: Giờ) hạn trên đối với tàu nhỏ, vừa và lớn để cho phép cần cầu bờ thực hiện các hoạt động làm việc là 3, 4 và 5. Cảng nằm ở Nam Trung Quốc, hệ số phát thải chuẩn của lưới điện là 0,8959, mức tiêu thụ năng lượng làm việc của lưới điện đối với hoạt động làm việc của cần cầu bờ là 120kWh/h và cần cầu bờ di động tiêu thụ 12kWh/lần điện.

Tốc độ không tải của xe tải  $v_h \sim N(\omega_1; 35, 4)$ , đơn vị là km/h, tốc độ xe tải chở hàng nặng  $v_{tối} \sim N(Vd_{Tối}; 25, 4)$ , đơn vị là km/h. Trọng lượng riêng của xe tải là 4,5 tấn, mức tiêu thụ nhiên liệu không tải là 2,14 L/h, tổng số xe tải trong cảng container là 45 và hệ số phát thải carbon của xe tải là 2,65 kg/L. Quy cách container là container 20 feet, tổng trọng lượng là 17,5 tấn và trọng lượng riêng là 2,3 tấn.

Trong bài báo này, 6 tàu cập cảng được sử dụng làm nhóm để mô phỏng. Giới hạn trên cho thời gian chờ của tàu được đặt là 24 giờ. **Bảng 4** Và **Bảng 5** cho thấy chiều dài của tàu ( $VL_{Tối}$ ), mớn nước của tàu ( $Vd_{Tối}$ ), trọng tải chết ( $V_1 \text{ THẾ GIỚI}_{Tối}$ ), bến tàu được ưa thích ( $Phó chủ tịch_{Tối}$ ), giới hạn trên của cần cầu cảng phục vụ tàu thuyền ( $VCM_{Tối}$ ), và khoảng cách giữa tàu  $T_0$ /neo đậu tại bến/và sân mục tiêu ( $D_{Tối}$ ):

Một cơ sở dữ liệu động được hoàn thành với MySQL và thuật toán được lập trình bằng ngôn ngữ python3.9. Môi trường hoạt động là máy tính xách tay Intel(R) Core(TM) i7-7500 U thế hệ thứ 7, 1,99 GHz, bộ nhớ 8,00 GB, hệ điều hành: Windows11.

#### 5.2. Phân tích hiệu suất mô hình TEU-BQCT

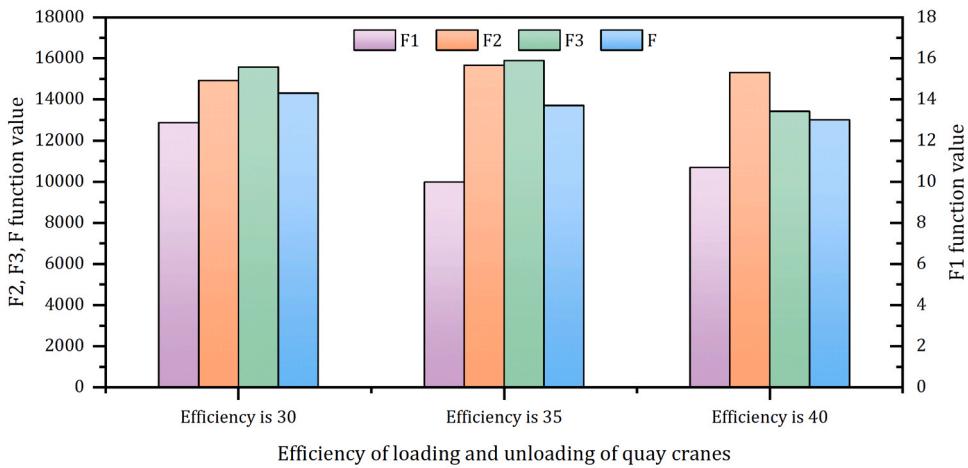
##### 5.2.1. Phân tích hiệu suất mô hình theo các nhu cầu khác nhau

Để đáp ứng các yêu cầu lập lịch trình của các cảng trong các thời kỳ khác nhau, các yếu tố điều chỉnh trọng lượng  $\omega_1, \omega_2$ , và  $\omega_3$  được đưa vào mô hình TEU-BQCT để hiện thực hóa việc phát triển các chương trình lập lịch trình phù hợp cho các cảng có nhu cầu khác nhau. Ba nhóm đại diện

				Loading and unloading operations		Berthing and unberthing process		Vessel waiting at anchorage outside port		Vessel waiting at anchorage in port		Berthing Process(Situation I )																						
Vessels ID	Berth ID	Quay Crane	Trucks Number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		
vessel 1	1	[1, 2, 3]	6																															
vessel 2	2	[5, 6]	11																															
vessel 3	2	[5, 6]	10																															
vessel 4	4	[10, 11, 12]	10																															
vessel 5	4	[8, 9, 10, 11, 12]	25																															
vessel 6	4	[9, 10, 11, 12]	22																															

				Berthing Process(Situation II)		Berthing Process(Situation III)																												
Vessels ID	Berth ID	Quay Crane	Trucks Number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		
vessel 1	4	[10, 11, 12]	10																															
vessel 2	1	[1, 2]	7																															
vessel 3	1	[1, 2]	13																															
vessel 4	2	[4, 5, 6]	9																															
vessel 5	4	[9, 10, 11, 12]	27																															
vessel 6	4	[9, 10, 11, 12]	22																															

**Hình 4.**Lên lịch phân bổ theo hệ số trọng số khác nhau.**Hình 5.**Ảnh hưởng của hiệu suất làm việc của càn cẩu cảng.

giá trị trọng lượng và tinh huống ứng dụng được thiết lập để kiểm tra tác động của hệ số điều chỉnh trọng lượng trên mô hình TEU-BQCT trong bài báo này, như thể hiện trong **Bảng 6**:

**Bảng 6**hiển thị các giá trị hệ số trọng số trong các tinh huống khác nhau:

#### Tinh huống I.

Khi cảng container vào mùa cao điểm, số lượng tàu ra vào cảng lớn, gây ách tắc tàu thuyền. Cần phải rút ngắn thời gian tàu thuyền lưu lại cảng, nâng cao hiệu quả hoạt động của cảng container. Lúc này, giá trị trọng lượng  $\omega_1$ nên được tăng lên.

#### Tinh huống II.

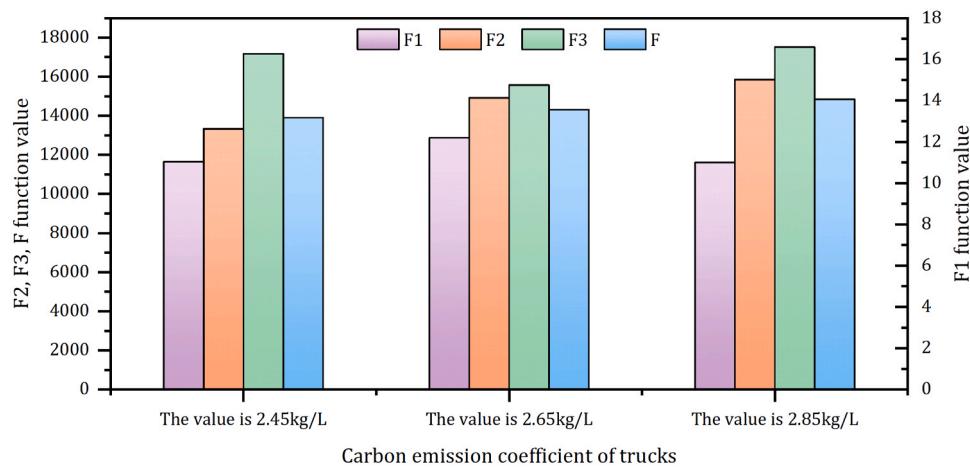
Lượng nhiên liệu thải ra từ xe tải sẽ làm giảm chất lượng môi trường. Để ngăn ngừa việc tạo ra khói mù, xét đến tính nhạy cảm của môi trường, giá trị của trọng lượng  $\omega_2$ nên được tăng lên.

#### Tinh huống III.

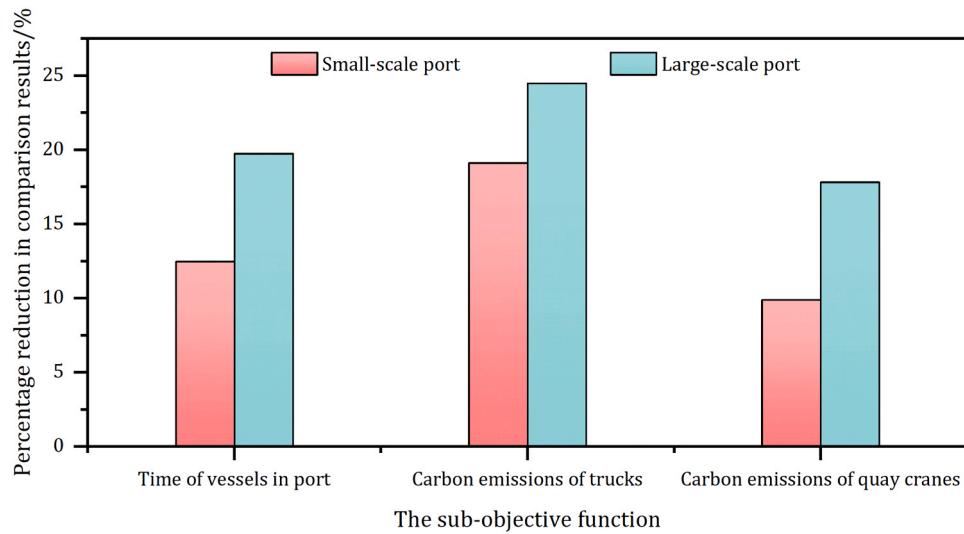
Hoạt động của càn cẩu cảng sẽ tiêu thụ năng lượng điện. Nếu mức tiêu thụ điện của càn cẩu cảng quá cao, nó sẽ dẫn đến tăng lượng khí thải carbon của cảng. Xem xét việc giảm mức tiêu thụ năng lượng lao động do hoạt động của càn cẩu cảng tạo ra, giá trị của trọng lượng  $\omega_3$ nên được tăng lên.

Tính toán mô phỏng được thực hiện theo ba bộ giá trị hệ số trọng số trên. Trong cùng điều kiện, kết quả tính toán được thể hiện trong **Bảng 7**và sơ đồ lập lịch được hiển thị trong **Hình 4**:

Bằng cách so sánh *Tinh huống IN*và *IN*và *Tinh huống I*, người ta thấy rằng nhằm mục đích giảm thời gian quay vòng của tàu, giá trị của hệ số trọng lượng  $\omega_1$ có thể được tăng lên, do đó thời gian quay vòng của tàu *Tinh huống I*có thể giảm lần lượt là 5,35% và 13,15%; So với *Tinh huống N*và *IN*, lượng khí thải carbon của xe tải *Tinh huống II*giảm 5,40% và 2,58%, điều này cho thấy một kế hoạch điều động



Hình 6. Ảnh hưởng của hệ số phát thải carbon của xe tải.



Hình 7. Ảnh hưởng của kích thước cảng.

có thể được tạo ra để giảm lượng khí thải carbon của người thu gom bằng cách tăng giá trị của hệ số trọng lượng  $\omega_2$ ; Sau khi tăng hệ số trọng lượng  $\omega_3$ , lượng khí thải carbon của *Tình huống III* cần cầu cầu cảng giảm lần lượt 12,98% và 13,14%, cho thấy hệ số trọng lượng  $\omega_3$  có thể được sử dụng để tạo ra kế hoạch điều động nhằm giảm lượng khí thải carbon từ cần cầu cầu cảng.

Thử nghiệm trên cho thấy mô hình TEU-BQCT có thể đạt được mục tiêu mong đợi là đáp ứng các nhu cầu khác nhau của cảng trong các giai đoạn khác nhau, cho thấy nỗ lực đưa hệ số trọng số vào là khả thi.

### 5.2.2. Phân tích độ tin cậy của hiệu suất mô hình

1) Ảnh hưởng của hiệu suất làm việc của cần cầu cầu cảng.

Đầu tiên, để kiểm tra tác động của những thay đổi trong hiệu quả xử lý cần cầu cầu cảng đối với mô hình TEU-BQCT, chúng tôi thiết lập ba hiệu quả xử lý cần cầu cầu cảng khác nhau, 30TEU/h, 35TEU/h và 40TEU/h. Kết quả thử nghiệm được hiển thị trong [Hình 5](#). So với trường hợp hiệu suất bốc xếp là 30TEU/h, hàm mục tiêu  $F$  trong hai trường hợp còn lại giảm lần lượt là 4,38% và 9,99%.

TRONG [Hình 5](#), theo sự gia tăng hiệu quả tải và dỡ hàng, mỗi hàm mục tiêu phụ dao động nhẹ nhưng có ít tác động, và hàm mục tiêu  $F$  cho thấy xu hướng giảm. Kết quả phân tích mô phỏng ví dụ cho thấy hiệu quả tối ưu hóa của mô hình TEU-BQCT tốt hơn bằng cách tăng hiệu quả làm việc của cầu cảng.

Bảng 8

Kết quả phân tích so sánh mô hình TEU-BQCT và mô hình hiện tại.

	TEU-BQCT	EB&QC [18]	TEU-BQCT so với EB&QC [18]
Thời gian tàu thuyền ở cảng	12,87	12,07	Tăng 6,66%
Lượng khí thải carbon của xe tải	14.921,95	16.799,84	Giảm 11,18%
Cầu trục bằng carbon phát thải	15.573,20	20.198,67	Giảm giá 22,90%
Thời gian chờ đợi bổ sung cho tàu	19,84	15,52	Tăng 27,80%

cần cầu.

2) Ảnh hưởng của hệ số phát thải carbon của xe tải.

Thứ hai, chúng tôi thiết lập các hệ số phát thải carbon khác nhau để kiểm tra tác động của việc thay đổi hệ số đối với mô hình TEU-BQCT.

[Hình 6](#) thể hiện kết quả thực nghiệm. So với hệ số phát thải carbon là 2,45 kg/L, hàm mục tiêu  $F$  tăng lần lượt 2,82% và 6,31% trong trường hợp hệ số là 2,65 kg/L và 2,85 kg/L.

Kết quả thực nghiệm cho thấy sau khi cải thiện hệ số phát thải carbon, các hàm mục tiêu phụ  $F_1$  và  $F_3$  có ít thay đổi tổng thể và hàm mục tiêu phụ  $F_2$  và hàm mục tiêu  $F$  cho thấy một xu hướng tăng nhẹ. Nhìn chung, mô hình TEU-BQCT vẫn có thể đảm bảo hiệu quả tối ưu hóa của nó khi lượng khí thải carbon

**Bảng 9**

Lựa chọn tham số của thuật toán so sánh.

Thuật toán	Tổng số nhóm con số	Số lần lặp lại tối đa	Các bổ sung khác	siêu tham số
HHO[59]	50	100	—	—
SOA[3]	50	100	$n_{\text{ép}} = 2$	$P_{\text{tối}} = 0,10$
ASOA	50	100	$n_{\text{ép}} = 2$	$P_{\text{tối}} = 0,10$
CSOA	50	100	$n_{\text{ép}} = 2$	$P_{\text{tối}} = 0,10$
QSOA	50	100	$n_{\text{ép}} = 2$	$P_{\text{tối}} = 0,10$
CQASOA	50	100	$n_{\text{ép}} = 2$	$P_{\text{tối}} = 0,10$
<b>Các thuật toán tối ưu hóa khác</b>				
Thuật toán tên	Siêu tham số thuật toán			
SASS[56]	$N=100, H=50$			
BÓNG RÂM [57]	$N_{\text{phút}}=4, q_0=0,5, T_{\text{ôicr}}=0,5, T_{\text{ôicre}}=0,5, T_{\text{ôihoa ky}}=0,5$			
sCMAGES[58]	$P_0=0, P_c=0, C_0=0, T_{\text{ôitối da}}=100$			

thay đổi hệ số.

3) Ánh hưởng của kích thước cồng.

Cuối cùng, chúng tôi kiểm tra tác động của kích thước cồng lên mô hình TEU-BQCT dựa trên dữ liệu từ hai cồng quy mô ở [Mục 5.1. Hình 7](#) thể hiện kết quả phân tích mô phỏng ví dụ. Trong [Hình 7](#), chúng ta có thể thấy rằng hiệu quả đạt được bởi mô hình TEU-BQCT khi áp dụng cho các cồng lớn (giảm thời gian quay vòng của tàu, lượng khí thải carbon của xe tải và lượng khí thải carbon của cần cẩu cồng cảng lần lượt là 19,74%, 24,47% và 17,80%) tốt hơn so với hiệu quả đạt được khi áp dụng cho các cồng nhỏ (giảm số lượng tàu

thời gian quay vòng, lượng khí thải carbon của xe tải và lượng khí thải carbon của cần cẩu bến cảng lần lượt là 12,46%, 19,11% và 9,88%).

Kết quả phân tích so sánh cho thấy mô hình TEU-BQCT có thể thích ứng với các cồng khác nhau và cung cấp các sơ đồ lập lịch tương ứng. Ngoài ra, hiệu quả tối ưu hóa rõ ràng hơn khi quy mô cồng tăng lên.

### 5.2.3. Phân tích so sánh với các mô hình hiện có

Nhằm mục đích kiểm tra hiệu suất của mô hình, chúng tôi đã chọn mô hình so sánh trong tài liệu [\[18\]](#) để phân tích so sánh. Thời gian quay vòng của tàu, chi phí khoảng cách vận chuyển bổ sung của xe tải container và chi phí thời gian chờ bổ sung của tàu được xác định là các hàm mục tiêu của mô hình EB&QC. Do đó, theo kết quả giải pháp, chúng tôi chuyển đổi chi phí vận chuyển xe tải bổ sung thành lượng khí thải carbon của xe tải. Thời gian quay vòng của tàu, lượng khí thải carbon từ xe tải container, lượng khí thải carbon từ cần cẩu cầu cảng và thời gian chờ bổ sung của tàu được xác định là các phân tích so sánh các chỉ số kỹ thuật. [Bảng 8](#) hiển thị kết quả tính toán.

[TRONG Bảng 8](#), kết quả có cùng tác dụng trong việc giảm thời gian quay vòng tàu, với sự khác biệt chỉ 6,66% được giải quyết bằng cách áp dụng mô hình TEU-BQCT và mô hình so sánh. So với mô hình so sánh, sơ đồ điều độ thu được bằng cách áp dụng mô hình TEU-BQCT có thể giảm lần lượt 11,18% và 22,90% về mặt giảm lượng khí thải carbon từ xe tải và cần cẩu bờ, điều này cho thấy việc áp dụng mô hình TEU-BQCT tại cảng có thể đạt được giải pháp giảm lượng khí thải carbon. Thời gian chờ bổ sung của sơ đồ lập lịch tăng 27,80% khi áp dụng mô hình TEU-BQCT. Tuy nhiên, nhiều yếu tố như bến tàu, cần cẩu bờ và xe tải được cân nhắc trong mô hình TEU-BQCT, điều này chắc chắn sẽ làm tăng thời gian. Ngược lại, mô hình so sánh quá lý tưởng và thời gian chờ bổ sung của tàu được sử dụng làm hàm mục tiêu, do đó, sơ đồ lập lịch trình với thời gian chờ bổ sung của tàu thấp hơn sẽ

**Bảng 10**

Kết quả tính toán của 9 thuật toán từ 1-5 lần khi giải mô hình TEU-BQCT.

Trải nghiệm lặp lại 100 lần	1	2	3	4	5
Thời gian quay vòng của tàu $F_1$	SASS[56] 11,83 BÓNG RÂM[57] 12,37 sCMAGES[58] 14,28 HHO[59] 10,73 SOA[3] 11,85 ASOA 12,32 CSOA 13,65 QSOA 10,25 CQASOA 10,56	11.27 13,87 14.03 10,67 13.16 12,56 10,74 11,70 9,88	11,93 14,57 13,93 12,93 13,78 11,71 10,29 11,83 9,62	10,28 10,96 13,73 15,03 12,96 10,85 11,08 9,86 11,02	11,26 10,15 12,83 10,97 12,69 10,61 11,43 10,83 11,05
Lượng khí thải carbon của xe tải $F_2$	SASS[56] 14,601,61 BÓNG RÂM[57] 14,829,28 sCMAGES[58] 14,672,28 HHO[59] 14,829,38 SOA[3] 14,436,56 ASOA 14,784,66 CSOA 15,451,96 QSOA 14,685,43 CQASOA 14,018,24	14,763,29 13,972,27 14,820,12 14,729,28 14,534,22 14,357,11 15,760,95 14,692,03 15,009,87	14,729,28 14,829,29 14,682,38 15,272,27 14,373,51 14,974,99 14,432,79 15,383,85 15,411,47	15,107,35 14,527,29 15,032,28 14,682,28 15,288,95 15,102,34 14,823,97 14,381,43 14,665,62	14,609,79 14,827,29 14,892,37 14,872,27 14,581,79 14,718,44 14,376,70 14,629,20 14,311,81
Lượng khí thải carbon của cần cẩu bến cảng $F_3$	SASS[56] 17,624,27 BÓNG RÂM[57] 17,362,28 sCMAGES[58] 17,292,39 HHO[59] 16,832,35 SOA[3] 16,300,83 ASOA 16,469,93 CSOA 17,968,48 QSOA 16,891,00 CQASOA 16,388,48	17,682,39 18,272,28 17,928,22 18,272,37 17,671,85 16,403,40 19,161,64 16,845,06 16,798,23 17,428,64	16,293,29 16,829,29 18,273,29 18,682,27 17,453,81 18,180,37 17,802,03 18,185,71 17,428,64 16,371,71	17,654,57 16,928,38 17,928,38 20,834,27 17,024,90 18,157,74 17,313,07 16,671,49 16,371,71 15,955,23	16,982,28 16,293,27 18,392,47 21,829,38 16,907,91 16,306,28 17,447,88 16,101,31 15,955,23
Hàm mục tiêu $F$	SASS[56] 13,971,07 BÓNG RÂM[57] 14,234,84 sCMAGES[58] 15,132,27 HHO[59] 13,279,54 SOA[3] 13,608,81 ASOA 13,971,52 CSOA 15,181,84 QSOA 13,021,23 CQASOA 12,880,85	13,747,76 14,997,55 15,201,23 13,586,88 14,631,35 13,969,73 14,099,92 13,733,74 12,891,85	13,719,78 15,201,11 15,203,02 14,952,27 14,846,48 14,146,05 13,204,66 14,307,77 13,021,25	13,331,94 13,345,87 15,104,31 16,393,28 14,559,03 13,740,34 15,131,71 12,691,92 13,267,17	13,528,02 12,852,99 14,735,82 14,661,72 14,216,28 14,485,24 13,671,20 13,100,09 13,091,09

**Bảng 11**

Kết quả tính toán của 9 thuật toán từ 6-10 lần khi giải mô hình TEU-BQCT.

Trải nghiệm lặp lại 100 lần	6	7	8	9	10	
Thời gian quay vòng của tàu $F$	SASS[56] BÓNG RÂM[57] sCMAGES[58] HHO[59] SOA[3] ASOA CSOA QSOA CQASOA	10,98 11,73 14,27 12,54 13,72 11,60 11,44 15,34 10,18	11,98 11,93 11,63 14,27 11,33 <sup>11 giờ 30</sup> 11,98 10,81 9,47	10,38 11,73 13,87 13,73 14,24 12,53 14,12 10,55 11,45	10,95 14,83 13,83 10,73 10,42 10,42 14,64 11,13 10,04	10,46 10,99 13,27 14,73 10,25 10,76 10,97 11,29 9,99
Lượng khí thải carbon của xe tải $F$	SASS[56] BÓNG RÂM[57] sCMAGES[58] HHO[59] SOA[3] ASOA CSOA QSOA CQASOA	14,682,84 14,382,28 14,982,28 14,983,23 14,491,29 15,100,94 14,083,00 14,453,58 14,331,86	14,293,12 14,521,39 14,829,23 14,729,28 15,017,58 15,053,74 14,211,90 14,941,44 14,361,52	14,653,27 14,392,28 14,923,23 15,103,28 15,075,01 15,306,29 14,627,94 14,576,72 14,670,70	14,218,80 13,892,28 14,724,28 15,029,27 13,965,84 14,625,89 14,559,43 14,534,35 14,987,24	14,375,19 14,029,28 15,230,27 16,282,38 14,577,78 15,274,26 14,752,74 14,714,88 14,859,47
Lượng khí thải carbon của càn cẩu bến cảng $F$	SASS[56] BÓNG RÂM[57] sCMAGES[58] HHO[59] SOA[3] ASOA CSOA QSOA CQASOA	17,679,90 16,938,22 17,292,29 20,182,38 21,301,37 17,477,80 16,416,62 21,409,89 16,511,59	17,839,28 18,262,39 19,837,28 19,234,28 15,751,42 17,891,25 17,041,45 17,532,98 16,779,30	18,273,28 17,282,38 18,273,29 19,823,28 22,958,85 18,008,81 16,999,76 16,441,06 15,622,09	19,372,48 18,262,28 19,273,27 20,321,28 17,345,66 16,205,53 21,609,60 19,071,61 16,923,47	19,272,28 17,292,38 19,212,49 20,372,28 16,388,61 16,740,24 17,019,97 16,413,30 16,218,65
Hàm mục tiêu $F$	SASS[56] BÓNG RÂM[57] sCMAGES[58] HHO[59] SOA[3] ASOA CSOA QSOA CQASOA	13,578,52 13,694,27 15,205,10 15,060,09 15,805,80 13,945,32 13,347,38 16,635,36 12,801,89	14,025,50 14,160,31 14,480,77 15,627,31 13,356,30 13,886,34 13,801,00 13,522,36 12,521,59	13,423,10 13,783,32 15,235,59 15,595,79 16,629,36 14,594,45 14,966,89 13,031,43 13,298,58	13,872,82 15,453,28 15,414,03 14,202,24 14,769,01 14,365,14 16,362,88 15,952,06 12,999,28	13,640,48 13,323,62 15,247,11 16,527,78 14,402,04 14,879,05 13,428,76 14,706,99 12,764,59

**Bảng 12**

Kết quả trung bình của hàm mục tiêu khi giải mô hình TEU-BQCT.

100 lần lặp lại	Tàu thuyền	Xe tải các-bon	Cần cẩu bến cảng	Khách quan
Kinh nghiệm	sự quay vòng	phát thải $F$	cacbon	chức năng $F$
SASS[56]	11,13	14,603,45	17,867,40	13,683,90
BÓNG RÂM [57]	12,31	14,420,30	17,372,32	14,104,72
sCMAGES[58]	13,57	14,878,87	18,370,34	15,095,93
HHO[59]	12,63	15,051,29	19,638,42	14,988,69
SOA[3]	12,44	14,634,25	17,910,52	14,682,45
ASOA	11,47	14,929,87	17,184,14	14,198,32
CSOA	12,03	14,708,14	17,878,05	14,319,62
QSOA	11,36	14,699,29	17,556,34	14,070,29
CQASOA	10,33	14,662,78	16,499,74	12,953,81

có thể thu được.

Tóm lại, so với mô hình so sánh, mô hình TEU-BQCT được thiết lập trong bài báo này có thể có được một kế hoạch lập lịch trình tốt hơn để giảm thời gian tàu ở cảng, chi phí cảng và lượng khí thải carbon.

### 5.3. Phân tích hiệu suất cho CQASOA

Xem xét hiệu suất tốt của SASS[56], BÓNG RÂM[57], sCMAGES[58] và HHO[59] trong việc giải quyết các vấn đề tối ưu hóa bị ràng buộc mục tiêu đơn, chúng được chọn để kiểm tra khả năng giải quyết mô hình TEU-BQCT liên quan đến CQASOA được đề xuất. Ngoài ra, SOA[3], ASOA, CSOA và QSOA được chọn để kiểm tra hiệu quả của các cải tiến thuật toán. Ý tưởng về các biến kiểm soát được áp dụng để lựa chọn và so sánh các tham số thuật toán, để tránh các hiệu ứng khác nhau của các tham số thuật toán khác nhau đối với hiệu suất tối ưu hóa.

**Bảng 13**

Bảng phân tích tính ổn định của 9 thuật toán trong việc giải mô hình TEU-BQCT.

100 lần lặp lại	Hàm mục tiêu $F$				
	Kinh nghiệm	Tối đa	Tối thiểu	Trung bình	Tiêu chuẩn độ lệch
SASS[56]	14,025,50	13,331,94	13,683,90	216,66	
BÓNG RÂM[57]	15,453,28	12,852,99	14,104,72	828,40	
sCMAGES[58]	15,414,03	14,480,77	15,095,93	262,20	
HHO[59]	16,527,78	13,279,54	14,988,69	1036,15	
SOA[3]	16,629,36	13,356,30	14,682,45	911,70	
ASOA	14,879,05	13,740,34	14,198,32	347,56	
CSOA	16,362,88	13,204,66	14,319,62	985,72	
QSOA	16,635,36	12,691,92	14,070,29	1265,58	
CQASOA	13,298,58	12,521,59	12,953,81	223,02	

Bảng 9 thể hiện các tham số của thuật toán tối ưu hóa đã chọn.

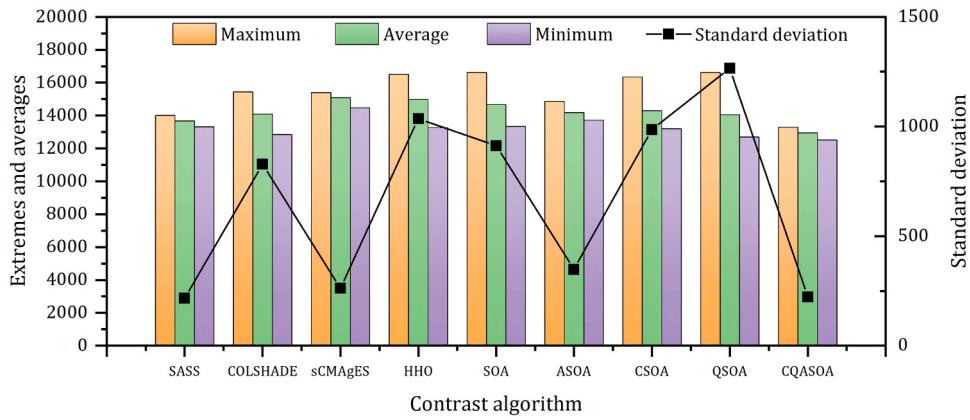
#### 5.3.1. Tối ưu hóa phân tích hiệu suất

Thuật toán trên được áp dụng để giải mô hình TEU-BQCT 10 lần trong trường hợp các cảng có quy mô lớn. **Bảng 10** Và **Bảng 11** Hiển thị kết quả tính toán:

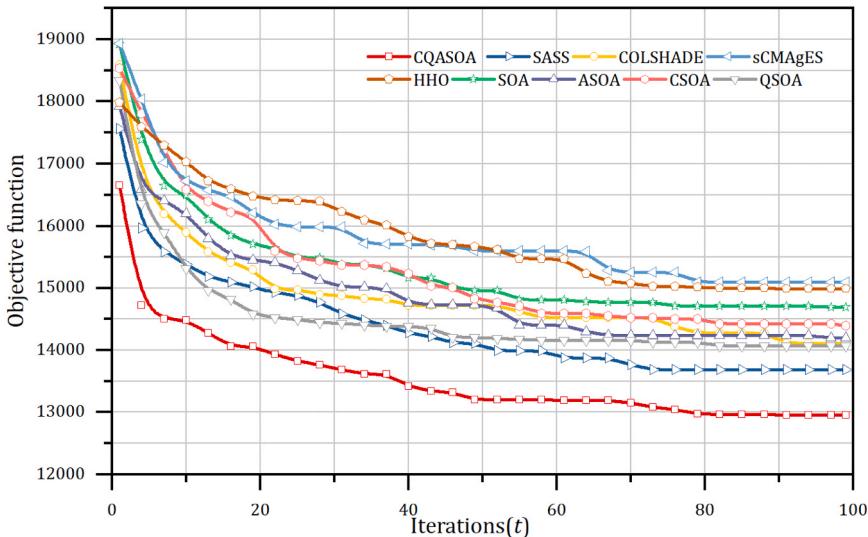
Dữ liệu trong **Bảng 10** Và **Bảng 11** được sắp xếp và giá trị trung bình của kết quả giải pháp được tính như thể hiện trong **Bảng 12**:

TRONG **Bảng 12**, so với SASS, COLSHADE, sCMAGES và HHO, giá trị của hàm mục tiêu $F$  có thể giảm 5,53%, 8,16%, 14,19% và 13,58% thông qua việc áp dụng CQASOA để giải, cho thấy CQASOA có ưu điểm là cập nhật lặp lại tìm kiếm xoắn ốc và khám phá cục bộ lương tử, do đó, hiệu suất của nó tốt hơn thuật toán tối ưu thông minh truyền thống khi giải TEU-BQCT.

So với SOA, giá trị của hàm mục tiêu $F$  có thể giảm 3,30%, 2,47% và 4,17% khi áp dụng ASOA, CSOA và



**Hình 8.** Biểu đồ so sánh phân tích tính ổn định của 9 thuật toán giải mô hình TEU-BQCT.



**Hình 9.** Thuật toán 10 lần để tính đường cong hội tụ trung bình.

QSOA, minh họa rằng hiệu suất tối ưu hóa thuật toán có thể được tăng cường bằng cách thêm trọng số phi tuyến tính, thêm nhiễu loạn hỗn loạn và điện toán lượng tử; Ngược lại với ASOA, CSOA và QSOA, hàm mục tiêu có thể cắt giảm 8,77%, 9,54% và 7,94% thông qua việc áp dụng CQASOA để giải quyết vấn đề, cho thấy CQASOA được xây dựng bằng cách kết hợp ba phương pháp cải tiến có thể đạt được kết quả tốt hơn khi giải mô hình TEU-BQCT.

#### 5.3.2. Phân tích độ ổn định

Theo dữ liệu trên, tiến hành kiểm tra tính ổn định của thuật toán, phản ánh chất lượng giải pháp khi thuật toán giải quyết bài toán tối ưu nhiều lần. Dữ liệu tính toán trong **Bảng 10** và **Bảng 11** được tổ chức, bảng phân tích độ ổn định được hiển thị trong **Bảng 13** và biểu đồ phân tích độ ổn định được hiển thị trong **Hình 8**:

TRONG **Bảng 13** và **Hình 8**, độ lệch chuẩn của CQASOA gần với SASS và sCMagES khi giải mô hình TEU-BQCT, điều này cho thấy CQASOA tương đương với SASS và sCMagES về độ ổn định. Trong khi đó, COLSHADE và HHO có độ lệch chuẩn cao hơn, độ ổn định của chúng yếu hơn CQASOA.

Giá trị giải pháp trung bình của ASOA nhỏ hơn SOA và độ lệch chuẩn giảm 61,88%, cho thấy mục đích mong đợi là cải thiện khả năng nhiễu loạn toàn cục trong giai đoạn đầu và tăng khả năng khám phá cục bộ trong giai đoạn sau có thể đạt được bằng cách đề xuất hệ số hội tụ phi tuyến tính; Có rất ít sự khác biệt giữa việc áp dụng SOA để giải phương sai và áp dụng CSOA

để giải phương sai, nhưng hiệu suất giải của CSOA tốt hơn SOA, minh họa rằng hiệu suất khám phá toàn cầu có thể được tăng cường bằng cách thêm nhiễu loạn hỗn loạn vào giai đoạn đầu của quân thù; Ngược lại với SOA, hiệu suất của QSOA với điện toán lượng tử tốt hơn SOA, mặc dù độ lệch chuẩn lớn hơn một chút so với SOA, nhưng vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được. So với ASOA, CSOA và QSOA, giá trị trung bình tương đối tối ưu và độ lệch chuẩn có thể giảm 35,83%, 77,37% và 82,38% thông qua việc sử dụng CQASOA để giải mô hình TEU-BQCT, cho thấy sự hợp nhất của ba phương pháp cải tiến có thể đạt được mục tiêu mong đợi là nâng cao hiệu suất và tính ổn định của thuật toán.

#### 5.3.3. Phân tích hội tụ

Nhằm mục đích kiểm tra các tính chất hội tụ của thuật toán, bài báo này tính toán dữ liệu dựa trên **Bảng 10** và **Bảng 11** và vẽ đường cong hội tụ trung bình như thể hiện trong **Hình 9**:

TRONG **Hình 9**, SOA có hiệu suất hội tụ tốt hơn SASS, COLSHADE, sCMagES và HHO, và có khả năng hội tụ liên tục mạnh mẽ. So với SOA, hiệu suất hội tụ của CSOA và ASOA tốt hơn một chút so với SOA, và tốc độ hội tụ của QSOA tốt hơn đáng kể so với SOA trong 20 thế hệ đầu tiên, minh họa rằng cải tiến lượng tử có thể tăng tốc độ hội tụ của SOA; Hiệu suất hội tụ của CQASOA tốt hơn ASOA và CSOA, và tốt hơn một chút so với QSOA, điều này cho thấy hiệu suất hội tụ của thuật toán có thể được tăng cường bằng cách hợp nhất

cải thiện hệ số hội tụ tuyến tính, nhiễu loạn hỗn loạn và điện toán lượng tử.

#### 5.4. Ứng dụng thực tế và ý nghĩa quản lý

Mục đích xây dựng phương pháp giải TEU-BQCT\_CQASOA là cung cấp một công cụ hỗ trợ ra quyết định hiệu quả cho việc điều phối thông minh các cảng. Việc áp dụng phương pháp này trong điều phối thực tế có thể cải thiện các lợi ích về kinh tế, xã hội và môi trường. Giá trị ứng dụng và tầm quan trọng của nó chủ yếu bao gồm các khía cạnh sau:

##### 5.4.1. Sự đánh đổi

Phương pháp giải pháp TEU-BQCT\_CQASOA mô tả và giải quyết ba mục tiêu xung đột về thời gian tàu ở cảng, lượng khí thải carbon của xe tải và lượng khí thải carbon của cần cẩu cầu cảng. Người quản lý cảng có thể cân nhắc ưu điểm và nhược điểm của từng mục tiêu theo tình hình thực tế, điều chỉnh hệ số điều chỉnh trọng lượng của từng mục tiêu và có được kế hoạch lập lịch trình phù hợp hơn.

##### 5.4.2. Quyền lợi của chủ tàu và cảng

Phương pháp giải TEU-BQCT\_CQASOA xác định thời gian tàu ở cảng là hàm mục tiêu, có thể nâng cao lợi ích chung của tàu và cảng. Một kế hoạch điều độ tốt phải đảm bảo lợi ích kinh tế của cảng càng nhiều càng tốt, đồng thời phải nâng cao sự hài lòng của chủ tàu. Trong bối cảnh thời kỳ hậu dịch bệnh, việc áp dụng phương pháp giải TEU-BQCT\_CQASOA để giảm bớt tình trạng tắc nghẽn cảng và nâng cao hiệu quả hoạt động của cảng càng cần thiết hơn.

##### 5.4.3. Xanh và ít carbon

Phương pháp giải pháp TEU-BQCT\_CQASOA lấy lượng khí thải carbon của xe tải và lượng khí thải carbon của cần cẩu cầu cảng làm hàm mục tiêu, có thể cung cấp cho các nhà quản lý cảng một sơ đồ lập lịch để giảm lượng khí thải carbon của hoạt động khai thác cảng. Trong bối cảnh kỹ nguyên nhấn mạnh vào việc giảm năng lượng, các cảng thông minh cần một giải pháp không chỉ đảm bảo lợi ích kinh tế mà còn đảm bảo lợi ích về môi trường.

### 6. Kết luận

Để ứng phó với hiện tượng tắc nghẽn chết người và hoạt động chậm chạp tại các cảng trên thế giới trong thời kỳ hậu dịch bệnh, bài báo này xem xét toàn diện các yếu tố về thủy triều, môi trường và sự không chắc chắn và sử dụng các lý thuyết cơ bản như lập bản đồ hỗn loạn, điện toán lượng tử, phương pháp hàm phạt bên ngoài và kết hợp SOA để xây dựng một giải pháp lập lịch trình chung cầu cảng-cần cẩu-xe tải mới (TEU-BQCT\_CQASOA), có thể cung cấp một sơ đồ lập lịch trình tuyệt vời cho các cảng container. Các ví dụ mô phỏng của hai cảng container ở Nam Trung Quốc cho thấy mô hình TEU-BQCT có thể giảm thời gian quay vòng của tàu, lượng khí thải carbon của xe tải và lượng khí thải carbon từ cần cẩu cầu cảng và khí quy mô của cảng tăng lên, có thể có được một kế hoạch điều phối tốt hơn; Ngoài ra, mô hình TEU-BQCT có thể đáp ứng các nhu cầu riêng biệt của cảng trong các giai đoạn khác nhau thông qua hệ số điều chỉnh trọng lượng. Mô hình TEU-BQCT được thiết lập dựa trên giải pháp CQASOA được đề xuất. Khi giải mô hình TEU-BQCT, CQASOA thu được giải pháp tốt hơn so với thuật toán so sánh được chọn trong bài báo này và quá trình giải cũng ổn định hơn, hiệu quả hơn và đáng tin cậy hơn.

Tuy nhiên, giải pháp xây dựng trong bài báo này vẫn còn thiếu sót: nhiều yếu tố ảnh hưởng đến việc lập lịch trình của các cảng container, mô hình xây dựng trong bài báo này chắc chắn sẽ có những vấn đề lý tưởng và cần đưa ra các giải pháp trong các nghiên cứu tiếp theo; Khi quy mô của cảng giải quyết tăng lên, kích thước của ma trận mã hóa tăng lên và quá trình giải quyết trở nên phức tạp, điều này có thể làm tăng thời gian trong quá trình giải mô hình. Trong các nghiên cứu trong tương lai, vẫn cần có các công trình nghiên cứu tiếp theo về vấn đề giải mô hình nhanh.

### Tài trợ

Công trình này được hỗ trợ bởi các khoản tài trợ dự án sau đây, Quý khoa học tự nhiên quốc gia Trung Quốc (số 52371315); Dự án Quý thanh niên xuất sắc Hắc Long Giang (YQ2021E015); Quý đặc biệt về khoa học và công nghệ của tỉnh Hải Nam (ZDYF2023GXJS017); và Hội đồng khoa học và công nghệ quốc gia Đài Loan (MOST 111-2410-H-161-001).

### Tuyên bố đóng góp tác giả CRedit

**Lý Minh Vệ:** Điều tra, Phương pháp, Xác nhận. Thu thập tài trợ, Giám sát, Việt - Chuẩn bị bản thảo gốc.  
**Từ Thụy Triết:** Khái niệm hóa, Điều tra, Phương pháp luận, Phần mềm, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Xác thực.  
**Trung Nghĩa Dương:** Khái niệm hóa, Điều tra, Phần mềm, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức.  
**Wei-Chiang Hong:** Điều tra, Phương pháp luận, Thu hút tài trợ, Giám sát, Việt - Xem xét và Biên tập.  
**Tiểu Cường An:** Điều tra, Phương pháp luận, Phần mềm, Quản lý dữ liệu, Quản lý tài trợ.  
**Yi-Hsuan Yeh:** Phần mềm, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Xác thực.

### Tuyên bố về lợi ích cạnh tranh

Tất cả tác giả đều khẳng định không có lợi ích tài chính/cá nhân hoặc niềm tin nào có thể ảnh hưởng đến tính khách quan của họ.

### Tính khả dụng của dữ liệu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

### Tài liệu tham khảo

- [1] G. Ye, J. Zhou, W. Yin, X. Feng, Các chính sách về năng lượng bờ biển và khu vực kiểm soát khí thải luôn có hiệu quả khi kết hợp với nhau để giảm phát thải chất ô nhiễm? – phân tích tác động chung của chúng trong thời kỳ hậu đại dịch, Ocean Coast. Manag. 224 (2022) 106182, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106182>.
- [2] M.-M. Lu, Các cảng trên thế giới vẫn còn tắc nghẽn không? Vận tải đường thủy Pearl River 4 (2022), 45–47. [Bằng tiếng Trung] <https://doi.org/10.14125/j.cnki.zjsy.2022.04.013>.
- [3] G. Dhiman, V. Kumar, Thuật toán tối ưu hóa Seagull: lý thuyết và ứng dụng của nó cho các vấn đề kỹ thuật công nghiệp quy mô lớn, Knowl. -Based Syst. 165 (2019) 169–196, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.11.024>.
- [4] A. Subramanian, J. Raman, Thuật toán tối ưu hóa mòng biển đã sửa đổi dựa trên MPPT để tăng cường hiệu suất của hệ thống năng lượng mặt trời quang điện, Automatika 63 (2022) (2022) 1–15, <https://doi.org/10.1080/00051144.2021.1997253>.
- [5] J. Rupp, N. Boyesen, D. Briskorn, Tối ưu hóa quy trình hợp nhất tại các trung tâm: vấn đề trung tâm-đến-riê, Eur. J. Oper. Res. 298 (2022) 1051–1066, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.001>.
- [6] C. Liang, X. Hu, L. Shi, H. Fu, D. Xu, Vận chuyển chung thiết bị vận chuyển có cần nhắc đến hậu cần container ngầm, Comput. Ind. Eng. 165 (2022) 107874, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107874>.
- [7] H. Li, J. Peng, X. Wang, J. Wan, Phân bổ tài nguyên tích hợp và tối ưu hóa lịch trình với các hạn chế và thiết bị quan trọng tại một nhà ga container tự động, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 22 (2021) 7607–7618, <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3005854>.
- [8] J. Li, J. Yang, B. Xu, Y. Yang, F. Wen, H. Song, Lập lịch lai cho nhiều thiết bị tại thiết bị đầu cuối tự động có lưu lượng hình chữ U dựa trên tối ưu hóa bầy hạt hỗn loạn, J. Mar. Sci. Eng. 9 (2021) 1080, <https://doi.org/10.3390/jmse9101080>.
- [9] H.-M. Fan, Z.-F. Guo, L.-J. Yue, M.-Z. Ma, Cấu hình chung và tối ưu hóa lịch trình của cần trục cầu cảng hai xe đẩy và AGV cho bến container có tính đến việc tiết kiệm năng lượng, Acta Autom. Sin. 47 (2021) 2412–2426, <https://doi.org/10.16383/j.ass.c190626>.
- [10] C. Bierwirth, F. Meisel, Khảo sát về phân bổ bến và các vấn đề lập lịch trình cần cầu cầu cảng tại các bến container, Eur. J. Oper. Res. 202 (2010) 615–627, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.031>.
- [11] C. Bierwirth, F. Meisel, Khảo sát tiếp theo về phân bổ bến và các vấn đề lập lịch trình cần cầu cầu cảng tại các bến container, Eur. J. Oper. Res. 244 (2015) 675–689, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030>.
- [12] A. Liu, H. Liu, S.-B. Tsai, H. Lu, X. Zhang, J. Wang, Sử dụng mô hình kết hợp trong việc lập lịch trình chung cho các bến tàu và cần cầu cầu cảng - theo quan điểm bền vững, Sustainability 10 (2018) 1959, <https://doi.org/10.3390/su10061959>.
- [13] D. Ma, R. Zhang, X. Shao, 2018. Lập lịch trình tối ưu chung cho các bến cảng và cầu cảng container dựa trên tìm kiếm chim cu gáy được cải thiện, Trong: Biên bản Hội nghị quốc tế năm 2018 về máy tính và kỹ thuật dữ liệu (ICCDE 2018), tháng 5 năm 2018, trang 103–109, <https://doi.org/10.1145/3219788.3219807>.

- [14] Z.-J. Gao, J.-X. Cao, Q.-Y. Zhao, Nghiên cứu tối ưu hóa việc phân bổ bến và phân bổ cảng cầu cảng tại bến container dựa trên thuật toán di truyền, Appl. Máy móc. Mèo ơi. 505-506 (2014) 931-934, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.505-506.931>.
- [15] J. Yu, G. Tang, X. Song, Hợp tác tối ưu hóa tốc độ tàu với phân bổ bến và phân bổ cảng cầu cảng khi xem xét sự khác biệt về dịch vụ tàu, Transp. Res. Phần E: Logist. Transp. Rev. 160 (2022) 102651, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102651>.
- [16] W. Liu, X. Zhu, L. Wang, S. Li, Phương pháp tối ưu hóa mạnh mẽ dựa trên đường châm trời lần của các hoạt động tại bến cảng container hàng hải, Ocean Eng. 256 (2022) 111505, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111505>.
- [17] M.-W. Li, W.-C. Hong, J. Geng, J. Wang, Lập lịch phối hợp cầu cảng và cảng cầu cảng bằng thuật toán tối ưu hóa bầy hạt đám mây hỗn loạn để mục tiêu, Neural Comput. Appl. 28 (2017) 3163-3182, <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2226-7>.
- [18] X. Cao, Z.-Y. Yang, W.-C. Hong, R.-Z. Xu, Y.-T. Wang, Tối ưu hóa phân bổ cảng cầu cảng khi xem xét các yếu tố kinh tế bằng cách sử dụng SSA lượng tử hỗn loạn, Appl. Artif. Intell. 36 (2022) 2073719, <https://doi.org/10.1080/08839514.2022.2073719>.
- [19] A. Azab, H. Morita, Vấn đề di dời khối với lịch hen, Eur. J. Oper. Res. 297 (2022) 680-694, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.06.007>.
- [20] F. Essghaier, T. Chargui, T. Hsu, A. Bekrar, H. Allaoui, D. Trentesaux, G. Goncalves, Lập lịch xe tải để mục tiêu mở trong các trung tâm internet vật lý đường sắt-đường bộ và phương thức, Comput. Ind. Eng. 182 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.110940>.
- [21] J. Duan, Y. Liu, Q. Zhang, J. Qin, Cấu hình kết hợp của bến cảng container và cảng cầu cảng xét đến chi phí carbon, Math. Probl. Eng. 2021 (2021) 6043846, <https://doi.org/10.1155/2021/6043846>.
- [22] T. Wang, X. Wang, Q. Meng, Phân bổ bến tàu chung và phân bổ cảng cầu cảng theo các chính sách đánh thuế carbon khác nhau, Transp. Res. Phần B: Methodol. 117 (2018) 18-36, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.08.012>.
- [23] N. Kenan, A. Jebali, A. Diabat, Các vấn đề về phân công và lập lịch trình cảng cầu cảng tích hợp với các cần nhẫn và phát thải carbon, Comput. Ind. Eng. 165 (2022) 107734, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107734>.
- [24] X. Tian, Q. Meng, Nghiên cứu về lịch trình phối hợp của bến tàu, cảng cầu cảng và xe tải cảng tại các bến container, Logist. Technol. 37 (2018) 32-36, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-152X.2018.03.008>.
- [25] N. Cheimanoff, F. Fontane, MN Kitri, N. Tchernev, . Các phương pháp chính xác và phương pháp tìm kiếm để phân bổ bến tích hợp và các vấn đề phân bổ cảng cầu cảng bắt biến theo thời gian cụ thể, Comput. Oper. Res. 141 (2022) 105695, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105695>.
- [26] T. Jonker, MB Duinkerken, N. Yorke-Smith, A. de Waal, RR Negenborn, Tối ưu hóa phối hợp các hoạt động thiết bị trong một nhà ga container, Flex. Serv. Manuf. J. 33 (2021) 281-311, <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09366-3>.
- [27] X.-G. Jiao, F.-F. Zheng, Y.-F. Xu, M. Liu, Phân bổ bến liên tục tích hợp và phân bổ cảng cầu cảng theo thời gian khai rao vét bến tại cảng container, Oper. Res. Manag. Sci. 29 (2021) 47-57 [bằng tiếng Trung]. <http://www.jorms.net/CN/10.12005/orms.2020.0033>.
- [28] LP Prencipe, M. Marinelli, Một công thức toán học mới để giải quyết vấn đề phân bổ bến đồng và rời rạc bằng cách sử dụng thuật toán tối ưu hóa đòn ống, Appl. Intell. 51 (2021) 4127-4142, <https://doi.org/10.1007/s10489-020-02062-y>.
- [29] A. Skaf, S. Lamrous, Z. Hammoudan, M.-A. Manier, Vấn đề lập lịch trình xe tải sân và cảng cầu cảng tích hợp tại cảng Tripoli-Liban, Comput. Ind. Eng. 159 (2021) 107448, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107448>.
- [30] J.-H. Chu, J.-H. Li, C.-J. Wang, C. Chen, Quyết định tích hợp về quy hoạch tuyến đường và lịch trình dock của tàu container có tính đến các khu vực kiểm soát khí thải, J. Transp. Kỹ thuật Hệ thống Công nghệ Thông tin 21 (2021) 230-238, <https://doi.org/10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.04.028>.
- [31] R.-E. Precup, E.-L. Hedrea, R.-C. La Mã, EM Petriu, A.-I. Szinglak-Stinean, C.-A. Bojan-Dragos, Phương pháp tiếp cận dựa trên thí nghiệm để dạy các kỹ thuật tối ưu hóa, IEEE Trans. Educ. 64 (2021), <https://doi.org/10.1109/TE.2020.3008878>.
- [32] I. Alexandru Zamfirache, R.-E. Precup, R.-C. Roman, EM Petriu, Kiểm soát dựa trên mạng nơ-ron sử dụng học tăng cường Actor-Critic và bộ tối ưu hóa Grey Wolf với xác thực hệ thống servo thử nghiệm, Expert Syst. Appl. 225 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120112>.
- [33] R. Salgotra, S. Singh, U. Singh, S. Mirjalili, AH Gandomi, Thuật toán chuỗi chui trui lồng lẩy cảm hứng từ động vật ăn thịt biến để tối ưu hóa toàn cầu, Expert Syst. Appl. 212 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118822>.
- [34] AA Ewees, RR Mostafa, RM Ghoniem, MA Gaheen, Thuật toán tối ưu hóa mòng biển được cải tiến bằng cách sử dụng toán tử đột biến và bay Lévy để lựa chọn tính năng, Neural Comput. Appl. 34 (2022) 7437-7472, <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06751-8>.
- [35] B. Ma, P.-M. Lu, Y.-G. Liu, Q. Zhou, Y.-T. Hu, Thuật toán tối ưu hóa mòng biển chung với các toán tử đột biến để tối ưu hóa toàn cục, AIP Adv. 11 (2021) 125217, <https://doi.org/10.1063/5.0073335>.
- [36] D. Xiao, L. Wan, Đảo ngược cảm biến từ xa của đất mặn và đất kiềm dựa trên thuật toán tối ưu hóa mòng biển cải tiến và máy học cực đại hai lớp ẩn, Nat. Resour. Res. 30 (2021) 3795-3818, <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09876-8>.
- [37] L. Xu, Y. Mo, Y. Lu, J. Li, Thuật toán tối ưu hóa mòng biển cải tiến kết hợp với phương pháp chia không đều để giải quyết các bài toán tối ưu động, Processes 9 (2021) 1037, <https://doi.org/10.3390/pr9061037>.
- [38] W.-C. Hong, M.-W. Li, J. Geng, Z. Yang, Thuật toán dơi hỗn loạn mới để dự báo chuyển động phức tạp của các nền tảng nổi, Appl. Math. Model. 72 (2019) 425-443, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.03.031>.
- [39] HG Kang, MW Li, PF Zhou, ZH Zhao, Dự đoán lưu lượng hành khách bằng hồi quy vectơ hỗ trợ v được tối ưu hóa bằng thuật toán di truyền thích ứng hỗn loạn, Đại học J. Đại Liên. Technol. 52 (2012) 227-232, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD2012&filename= DLLG201202013&uniplatform=NZKPT&v=E6a7CngjIzGFuzuWcCOnt5GOHGj8bsD1P6YNRJi2NavWXeKogwyqPa7x6z3aVr>.
- [40] M.-W. Li, W.-C. Hong, H.-G. Kang, Dự báo lưu lượng giao thông đô thị bằng Gauss-SVR với lập bản đồ cat, mô hình đám mây và thuật toán lai PSO, Neurocomputing 99 (2013) 230-240, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.08.002>.
- [41] M.-W. Li, J. Geng, W.-C. Hong, L.-D. Zhang, Ước tính chu kỳ dựa trên bù trừ LSSVR-CCPSO để dự báo chuyển động của tàu, Nonlinear Dyn. 97 (2019) 2579-2594, <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05149-5>.
- [42] M.-W. Li, Y.-T. Wang, J. Geng, W.-C. Hong, Thuật toán tối ưu hóa lai dơi lượng tử đám mây hỗn loạn, Nonlinear Dyn. 103 (2021) 1167-1193, <https://doi.org/10.1007/s11071-020-06111-6>.
- [43] M.-W. Li, D.-Y. Xu, J. Geng, W.-C. Hong, Một phương pháp dự báo chuyển động của tàu dựa trên phương pháp phân tích chế độ kinh nghiệm, mạng học sâu lai và thuật toán tối ưu hóa bướm lượng tử, Nonlinear Dyn. 107 (2022) 2447-2467, <https://doi.org/10.1007/s11071-021-07139-y>.
- [44] M.-W. Li, D.-Y. Xu, J. Geng, W.-C. Hong, Một phương pháp tiếp cận kết hợp để dự báo chuyển động của tàu bằng cách sử dụng CNN-GRU-AM và GCWOA, Appl. Soft Comput. 114 (2022) 108084, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108084>.
- [45] Y. Song, N. Wang, Tối ưu hóa kế hoạch neo đậu của bến container dựa trên sự không chắc chắn về thời gian, J. Transp. Syst. Eng. Inf. 20 (2020) 224-230, <https://doi.org/10.16097/j.cnki.1009-6744.2020.04.032>.
- [46] Q. Qin, Z. Zhou, H. Lu, S. Wang, Y. Han, Tối ưu hóa tuyến đường của xe tải vận tải liên phương thức đường thủy-đường sắt có tính đến chi phí phát thải carbon, China Water Transp. 10 (2021) 109-111, <https://doi.org/10.13646/j.cnki.42-1395/u.2021.10.039>.
- [47] G.-L. Tang, M. Qin, X.-Y. Zhao, Y. Qi, X. Li, Tác động của chế độ lập lịch xe tải container đến lượng khí thải carbon tại bến container, Cảng. Kỹ thuật nước. 6 (2019) 46-51, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-4972.2019.06.008>.
- [48] G. Li, C. Zheng, H. Yang, Mô hình dự đoán kết hợp giá carbon dựa trên phân tích chế độ biến thiên được cải thiện, Energy Rep. 8 (2022) 1644-1664, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.270>.
- [49] R. Ghafari, N. Mansouri, Một lịch trình tác vụ hiệu quả dựa trên thuật toán tối ưu hóa seagull cho các nền tảng điện tử đám mây không đồng nhất, Int. J. Eng., Trans. B: Phụ lục 35 (2022) 433-450, <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.02b.20>.
- [50] S. Eldesouky, W. ElShafai, HEDH Ahmed, FEA ElSamie, Hệ thống sinh trắc học điện tâm đồ có thể hủy dựa trên mã hóa hỗn loạn sử dụng bản đồ logistic ba chiều cho các dịch vụ đám mây dựa trên sinh trắc học, Secur. Priv. 5 (2022) e198, <https://doi.org/10.1002/SPY.2.198>.
- [51] PL Leonardo, MJ Ricardo, RC Enrique, PC Michael, JR Omar, VM Rubén, Thành phần hàm từ hàm sin và bản đồ lều xiên và ứng dụng của nó vào các máy phát số giả ngẫu nhiên, Appl. Sci. 11 (2021) 5769, <https://doi.org/10.3390/APP11135769>.
- [52] Y. Dong, H.-M. Guo, Tối ưu hóa bầy hạt hỗn loạn thích ứng dựa trên biến thể thể lực của bầy đàm, Appl. Res. Comput. 28 (2011) 854-856, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2011.03.015>.
- [53] S.-T. Xiang, D. Wang, Phương pháp sửa đổi tương tác mô hình dựa trên thuật toán di truyền lượng tử cải tiến, J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.) 56 (2022) 100-110, <https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-973X.2022.01.011>.
- [54] D. Pizzocri, R. Genoni, F. Antonello, T. Barani, F. Cappia, Tái tạo 3D vật liệu không đồng nhất ngắn nghìnhai bài từ các phân 2D: Một cách tiếp cận thông qua thuật toán di truyền, Nucl. Eng. Technol. 53 (2021) 2968-2976, <https://doi.org/10.1016/J.NET.2021.03.012>.
- [55] N. Ab Aziz, H. Midi, Tối ưu hóa hàm phát trong bề mặt phản hồi kép dựa trên sở thích của người ra quyết định và ứng dụng của nó vào dữ liệu thực, Symmetry 14 (2022) 601, <https://doi.org/10.3390/sym14030601>.
- [56] Kumar A., Das S., Zelinka I. 2020a. Một thuật toán tìm kiếm hình cầu tự thích ứng cho các vấn đề tối ưu hóa bị ràng buộc trong thế giới thực. Trong: GECCO 2020 Companion - Biên bản Hội nghị tính toán di truyền và tiến hóa năm 2020 Companion, 13-14. <https://doi.org/10.1145/3377929.3398186>.
- [57] Gurrola-Ramos J., Hernandez-Aguirre A., Dalmau-Cedeno O., 2020, COLSHADE cho các vấn đề tối ưu hóa ràng buộc một mục tiêu trong thế giới thực. TRONG: Biên bản báo cáo Hội nghị IEEE về tính toán tiến hóa năm 2020, CEC 2020 - Biên bản báo cáo hội nghị. <https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185583>.
- [58] Kumar A., Das S., Zelinka I., 2020b, Một chiến lược tiến hóa thích ứng ma trận hiệp phương sai đã sửa đổi cho các vấn đề tối ưu hóa bị ràng buộc trong thế giới thực. GECCO 2020 Companion - Biên bản Hội nghị tính toán di truyền và tiến hóa năm 2020 Companion, 11 - 12. <https://doi.org/10.1145/3377929.3398185>.
- [59] AA Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, H. Chen, Tối ưu hóa Harris Hawks: thuật toán và ứng dụng, Future Gener. Comput. Syst. 97 (2019) 849-872, <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>.