

KỸ THUẬT HÃM CỦA ĐOÀN TÀU TỐC ĐỘ CAO

BRAKING TECHNOLOGY OF HIGH-SPEED TRAINS

Vũ Thị Hoài Thu

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: thuvth@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Đường sắt tốc độ cao đang là một xu thế phát triển giao thông trên thế giới và tại Việt Nam cũng đang nghiên cứu xây dựng hệ thống đường sắt cao tốc với tốc độ lên đến 350 km/h. Hệ thống hãm đoàn tàu có những đặc điểm cần tương đồng với các đặc điểm kết cấu của đoàn tàu EMU hiện đại. Bài viết này giới thiệu đặc điểm cũng như các yêu cầu của hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao. Việc ứng dụng phương thức hãm phối hợp điện – khí nén có khả năng tận dụng được tối đa năng lực hãm của hệ thống.

Từ khóa: Hệ thống hãm đoàn tàu EMU; Phân phối lực hãm.

ABSTRACT

High-speed rail has become a global trend in transportation development, and Vietnam is also conducting research on building a high-speed railway system with operating speeds of up to 350 km/h. The braking system of a train must exhibit characteristics consistent with the structural features of modern EMU trains. This article presents the characteristics and requirements of the braking system for high-speed trains. The application of a combined electro – pneumatic braking method enables the system to maximize its braking capacity.

Keywords: EMU train braking system; Braking force distribution.

1. MỞ ĐẦU

Hiệp hội Đường sắt quốc tế (UIC) định nghĩa đường sắt tốc độ cao là một hệ thống có tốc độ khai thác $\geq 250\text{km/h}$ trên tuyến đường xây dựng mới hoặc từ 200km/h trên tuyến đường sắt nâng cấp [2], [3].

Theo luật đường sắt năm 2017 quy định: Đường sắt tốc độ cao là một loại hình đường sắt quốc gia có tốc độ thiết kế từ 200km/h trở lên, có khổ đường 1435mm, đường đôi, điện khí hoá.

Dựa vào các đặc điểm của đoàn tàu tốc độ cao mà hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao cũng cần có các đặc điểm tương ứng:

- Đối với đoàn tàu tốc độ cao động lực phân tán, thiết bị hãm đoàn tàu là sự kết hợp giữa thiết bị hãm toa xe động và thiết bị hãm toa xe kéo theo để tạo thành một hệ thống hãm hoàn chỉnh. Điều khiển hãm chọn dùng phối hợp hãm điện không và hãm khí nén. Đoàn tàu tốc độ cao thường chọn phương thức hãm tái sinh kết hợp với phương thức động lực phân

tán của đoàn tàu nên có thể phát huy hết hiệu quả của hãm tái sinh nhằm nâng cao tính kinh tế.

- Để nâng cao sự thoải mái, độ giảm tốc mỗi toa xe trong đoàn tàu tốc độ cao là phải thống nhất.

- Các đoàn tàu tốc độ cao đều được trang bị bộ chống trượt điện tử hiệu suất cao để tiến hành điều khiển chống trượt, tận dụng đầy đủ lực bám dính.

2. HỆ THỐNG Hãm ĐOÀN TÀU TỐC ĐỘ CAO

Hệ thống hãm là một trong những hệ thống chính và quan trọng nhất trong quá trình vận hành đoàn tàu. Hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao bao gồm: hệ thống chỉ lệnh và truyền tải chỉ lệnh; hệ thống điều khiển hãm; hệ thống thực hiện hãm và hệ thống cung cấp khí nén. Các hệ thống có quan hệ mật thiết với nhau. Hiệu quả và tính năng của hệ thống hãm ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn của đoàn tàu. Vì vậy, hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao phải đáp ứng được các yêu cầu cơ bản sau [3]:

- Yêu cầu về tính an toàn: Có đủ năng lực hãm, đáp ứng yêu cầu về khoảng cách hãm quy định và đảm bảo đoàn tàu dừng trong khoảng cách hãm quy định. Đoàn tàu phải đáp ứng yêu cầu về khoảng cách hãm khẩn cấp trong mọi điều kiện.

Động năng của đoàn tàu tỷ lệ bình phương với tốc độ nhưng yêu cầu về năng lực của hệ thống hãm còn phải lớn hơn nhiều. Đây là một trong những thách thức của hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao khi nâng cao tốc độ. Hệ thống hãm phải có năng lực đủ lớn để đảm bảo triệt tiêu được lượng động năng khổng lồ

của đoàn tàu trong một khoảng cách nhất định là rất quan trọng. Ví dụ, khi tốc độ tăng từ 200 km/h đến 300km/h thì khoảng cách hãm khẩn đã bị kéo dài lên tương đối lớn từ 2000m đến 3700m, nhưng khi tốc độ tăng đến 350 km/h thì khoảng cách hãm khẩn đã tăng lên nhanh hơn, kéo dài từ 4500m đến 6000m tùy vào năng lực của thiết bị hãm [5]. Điều khiển linh hoạt, độ giảm tốc hãm nhanh, tác dụng hãm nhạy và đáng tin cậy, tác dụng hãm và nhả hãm của các toa xe trước và sau đoàn tàu phải thống nhất.

- Có khả năng hãm động lực, trong quá trình hãm thường, phải được tận dụng tối đa năng lực của hãm động lực để giảm chi phí vận hành. Có khả năng hãm kết hợp giữa hãm động lực và hãm ma sát.

- Hệ thống hãm phải đảm bảo lực hãm không suy giảm khi lên và xuống dốc dài.

- Lực hãm của mỗi toa xe động càng ổn định càng tốt và hệ thống hãm phải có khả năng điều chỉnh theo sự thay đổi số lượng hành khách.

- Phải có tính năng hãm khẩn cấp: Trong quá trình vận hành, khi các toa xe động gặp sự cố gây nguy hiểm cho an toàn vận hành đoàn tàu như đoàn tàu bị phân tách, hỏng hệ thống hãm, v.v., các toa xe động phải có khả năng tự động áp dụng hãm khẩn cấp.

Hãm khẩn cấp có thể được kích hoạt từ nhiều nguồn khác nhau: thứ nhất là do tài xế tác động vào vị trí hãm khẩn cấp trong buồng lái, thứ hai là do hành khách đi tàu tác động vào nút khẩn cấp được lắp trên toa xe để thông báo với tài xế hoặc bởi hệ thống bảo vệ đoàn tàu tự động ATP (Automatic Train Protection) trong trường hợp phát hiện nguy hiểm. Khi hãm khẩn cấp được kích hoạt, tất cả các thiết bị hãm trên



tất cả các toa tàu sẽ được áp dụng với lực tối đa để đảm bảo thời gian hãm ngắn nhất và khoảng cách hãm ngắn nhất có thể.

- Đáp ứng yêu cầu nhẹ hóa trọng lượng của đoàn tàu: Thiết bị cung cấp khí nén và thiết bị điều khiển hãm của hệ thống hãm được phân bố trên tất cả các toa xe trong đoàn tàu cũng

phải đáp ứng yêu cầu về nhẹ hóa trọng lượng.

- Trạng thái làm việc của hệ thống hãm liên quan trực tiếp đến an toàn vận hành đoàn tàu, ngoài việc đáp ứng yêu cầu về độ tin cậy còn phải đáp ứng yêu cầu dễ bảo trì, bảo dưỡng và sửa chữa.

Bảng 1. Hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao trên thế giới và hệ thống điều khiển [3, 5]

Đoàn tàu		Đức		Pháp		Nhật Bản	
		ICE3	ICE350	TGV-2N	AGV	Seri 700	Seri E2
Tốc độ vận doanh cao nhất, km/h		330	350	300	350	300	300
Móc nối		4M4T	4M4T	2M8T	12M8T	12M4T	6M2T
Thiết bị hãm toa xe	Toa động	Tái sinh + 2 bộ hãm đĩa bánh xe	Tái sinh + điện trở + 2 bộ hãm đĩa bánh xe	1,54	Tái sinh + 2 bộ hãm đĩa bánh xe	Tái sinh + 2 bộ hãm đĩa bánh xe	Tái sinh + 2 bộ hãm đĩa bánh xe
	Toa kéo theo	2 bộ hãm đĩa trục + 2 bộ đĩa dòng xoáy	3 bộ hãm đĩa trục		4 bộ hãm đĩa bánh xe	2 bộ hãm đĩa bánh xe + 1 bộ đĩa dòng xoáy	2 bộ hãm đĩa bánh xe + 2 bộ đĩa trục
Phương thức điều khiển hãm		Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu mô phỏng	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu mô phỏng	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu mô phỏng	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu mô phỏng	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu số học hãm	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu số học

Bảng 2. Tham số kỹ thuật cơ bản của đoàn tàu tốc độ cao của Trung Quốc [3, 5]

Đoàn tàu	CRH2C	CRH3C	CRH5A	CRH380	
				CRH380AL	CRH380D
Năm khai thác	2008	2008	2007	2011	2014
Tốc độ vận doanh cao nhất, km/h	350	350	250	380	380
Móc nối	6M2T	4M4T	5M3T	14M2T	4M4T
Gia tốc khởi động, km/h/s	1,46	1,54	1,8	1,74	1,44
Thiết bị hãm	Tái sinh + hãm đĩa	Tái sinh + hãm đĩa	Tái sinh + hãm đĩa	Tái sinh + hãm đĩa	Tái sinh + hãm đĩa

Từ Bảng 1 và 2 cho thấy, các đoàn tàu của tốc độ cao trên thế giới đều sử dụng kết hợp hãm tái sinh và hãm đĩa làm thiết bị hãm chính và sử dụng hãm dòng xoáy – chủ yếu dùng khi hãm khẩn cấp (đoàn tàu của Đức và Nhật Bản) ở các toa xe kéo theo nhằm nâng cao khả năng hãm của đoàn tàu. Việc sử dụng thiết bị hãm dòng xoáy sẽ ảnh hưởng đến tính năng động lực cũng như giá thành đầu tư thiết kế của đoàn tàu.

3. PHÂN TÍCH PHƯƠNG THỨC TỔNG HỢP CỦA LỰC HÃM TRÊN ĐOÀN TÀU EMU TỐC ĐỘ CAO

Phân bố lực hãm ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn vận hành đoàn tàu. Để đạt được sự cân bằng giữa tốc độ phản ứng và hiệu quả hãm, lực hãm điện – khí nén thường được phân bổ cho các toa xe trong nhóm theo mô-đun. Độ lớn của lực hãm bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như hệ số ma sát, diện tích tiếp xúc, tốc độ tương đối và nhiệt độ. Ở mỗi giai đoạn vận hành của đoàn tàu, mối quan hệ giữa tốc độ vận hành và lực hãm là phi tuyến tính. Do cơ chế kết hợp của hãm phối hợp tương đối phức tạp nên nếu hãm phối hợp được thực hiện hoàn toàn theo điều kiện thực tế của từng đoàn tàu thì khối lượng tính toán của hệ thống điều khiển hãm sẽ rất lớn, điều này sẽ ảnh hưởng nghiêm trọng đến tốc độ phản ứng của hệ thống hãm đoàn tàu.

Hiện nay, các đoàn tàu EMU đều áp dụng phương pháp hãm phối hợp giữa hãm khí nén và hãm điện với tiêu chí ưu tiên hãm điện đầu tiên. Việc sử dụng phối hợp hãm điện và hãm khí nén có thể nâng cao hiệu quả sử dụng hãm điện, giảm hao mòn cơ học của thiết bị hãm cơ bản và giảm chi phí vận hành.

Việc thực hiện kết hợp hãm điện và hãm khí nén trên một toa xe gọi là tổ hợp lực hãm

phương tiện đơn; việc thực hiện kết hợp hãm điện và hãm khí nén trong một mô-đun gồm nhiều xe trong toàn đoàn tàu gọi là đơn nguyên hãm phối hợp điện – không (khí nén) [3], [4], [6].

3.1. Nguyên lý phân bổ lực hãm phối hợp điện – khí nén

Chúng ta đã biết, toa xe động có thể có khả năng cung cấp cả hãm điện và hãm khí nén, còn toa xe kéo theo thường chỉ có khả năng cung cấp hãm khí nén. Do đó, tổng lực hãm trong quá trình hãm tàu thỏa mãn mối quan hệ sau:

$$F_U = F_t + F_m = F_E + F_{tA} + F_{mA}$$

Trong đó:

- F_U - Tổng lực hãm đạt được khi hãm đoàn tàu;
- F_E - Lực hãm điện do tất cả toa động cung cấp;
- F_t và F_m - Lực hãm yêu cầu của toa xe kéo theo và toa xe động lực;
- $F_{tA}(N)$, $F_{mA}(N)$ - Lực hãm khí nén được cung cấp bởi tất cả các toa xe kéo theo và toa xe động lực tương ứng.

(1) Khi $F_E \geq F_U$, tức là lực hãm điện có thể thỏa mãn lực hãm yêu cầu của đoàn tàu, thì cả toa xe kéo theo và toa xe động lực đều không cần dùng hãm khí nén ($F_{tA} = 0$ và $F_{mA} = 0$), toàn bộ lực hãm mà đoàn tàu yêu cầu đều do hãm điện đảm nhiệm.

(2) Khi $F_U > F_E$, khi hãm điện không đủ đáp ứng toàn bộ lực hãm yêu cầu của đoàn tàu thì sẽ xảy ra các trường hợp sau:

*Trường hợp 1:

$$\text{Khi } F_E \geq F_m, F_{mA} = 0, F_{tA} = F_U - F_E.$$



Khi lực hãm điện không đáp ứng được lực hãm mà đoàn tàu yêu cầu thì lực hãm còn lại sẽ được bổ sung bằng hãm khí nén. Để ngăn bánh xe bị trượt, nếu lực hãm không đủ đầu tiên sẽ bổ sung tác dụng của hãm khí nén toa xe kéo theo trước tiên.

*Trường hợp 2:

$$\text{Khi } F_E < F_m, F_{mA} = F_m - F_E, F_{tA} = F_U - F_m.$$

Nếu lực hãm vẫn không đủ thì sẽ bổ sung tác dụng của hãm khí nén toa xe động lực.

Tuy nhiên, khi hãm ở tốc độ thấp, đoàn tàu không thể cung cấp lực hãm điện ổn định, hãm khí nén bị ảnh hưởng bởi thời gian phản ứng và không thể tạo lượng giảm tốc nhanh lực hãm điện. Nếu không tránh được tình trạng này, bộ chuyển đổi hãm điện – khí nén được đặt ở phần hãm tốc độ thấp và BCU sẽ điều khiển hãm điện rút từ từ để có thể bổ sung lực hãm khí nén kịp thời nhằm giảm dao động gây ra bởi độ trễ của lực hãm khí nén.

3.2. Giới thiệu giải pháp tổng hợp lực hãm

Việc lựa chọn phương pháp tổ hợp hãm chủ yếu liên quan đến chế độ điều khiển và yêu cầu vận hành của đoàn tàu. Đối với đoàn tàu tốc độ cao sử dụng phương pháp tổ hợp lực hãm theo mô-đun, lấy đoàn tàu EMU gồm 8 toa với 4 toa động và 4 toa kéo theo làm ví dụ. Đoàn tàu sẽ được tách thành 2 mô-đun, mỗi mô-đun gồm 2 toa động và 2 toa kéo theo để tạo tổ hợp lực hãm (xem hình 1).



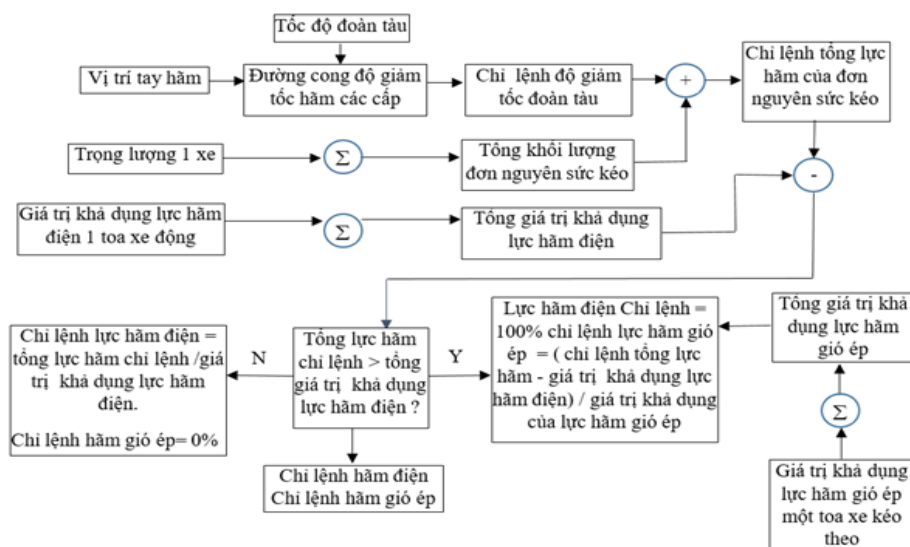
Hình 1. Sơ đồ hãm hỗn hợp điện – khí nén của mô-đun 2 xe động + 2 xe kéo theo Mc – Xe động có buồng tải xé; Tp – Xe kéo theo có cần lấy điện; M – Xe động không có cần lấy điện; T – Xe kéo theo.

* Phương pháp tổng hợp lực hãm được thực hiện như sau:

(1) Logic điều khiển tổng hợp lực hãm.

Hãm hỗn hợp điện – khí nén cũng được áp dụng theo mô-đun. Khi hãm hỗn hợp được thực hiện theo cách này, hai đơn vị lực kéo độc lập với nhau có thể được truyền bằng MVB (Multifunction Vehicle Bus – Mạng truyền thông tin trên toa xe) hoặc dây cứng. Mỗi BCU (Brake Control Unit – Bộ điều khiển hãm) có thể đọc vị trí tay hãm thông qua dây cứng của đoàn tàu và có thể đọc các tín hiệu phân bổ lực hãm liên quan thông qua MVB. Dựa trên chỉ lệnh hãm và thông tin hãm tổng hợp từ các toa xe khác nhau, mỗi BCU tính toán và áp dụng hãm điện – khí nén cho toa xe của mình.

Tức là việc phân bổ lực hãm chỉ được thực hiện trong đơn nguyên 2 toa động và 2 toa kéo theo. Khi đoàn tàu hãm bình thường, lực hãm điện của đoàn tàu được ưu tiên trong mô-đun, phần không đủ sẽ được bổ sung bằng hãm khí nén theo nguyên lý “độ bám bằng nhau” hoặc “độ mòn bằng nhau” của hãm khí nén. Hãm khí nén của toa xe kéo theo có thể được bổ sung trước hoặc hãm khí nén của toa động và toa kéo theo có thể được áp dụng đồng thời. Khi một toa xe trong mô-đun không thể thực hiện hãm thì thông qua tính toán hãm có thể xác định xem có nên bổ sung lực hãm từ 3 toa xe còn lại. Do đó cải thiện tính khả dụng của hệ thống hãm khi hãm thông thường so với việc hãm cả đoàn tàu, nó làm giảm độ phức tạp của giao thức mạng và giảm số lượng kết nối có dây cứng. Logic tính toán cụ thể của nó được thể hiện trong hình 2:



Hình 2. Logic điều khiển tổng hợp lực hãm mô-đun 2 toa đông + 2 toa kéo theo

(2) Phân tích sơ đồ tổng hợp lực hãm.

Để giải thích chi tiết sự phân bố lực hãm khi hãm phối hợp, các sơ đồ phân bố khác nhau trong cùng điều kiện làm việc hỗn hợp được chọn để phân tích. Lấy sơ đồ hãm phối hợp 2 toa động và 2 toa kéo theo làm ví dụ và xét trong các điều kiện làm việc khác nhau:

a) Trường hợp 1: Tổ hợp lực hãm trong điều kiện làm việc bình thường.

Trong điều kiện bình thường (có tính đến trọng lượng xe) và không vượt quá giới hạn bám dính, lực hãm điện được phát huy tối đa tác dụng hãm. Nếu lực hãm điện không đáp ứng được yêu cầu hãm thì ưu tiên bổ sung thêm hãm khí nén từ toa xe kéo theo tùy theo trọng lượng xe và hạn chế về độ bám dính. Nếu lực hãm vẫn không đủ, trong trường hợp không vượt quá giới hạn bám dính, đoàn tàu sẽ bổ sung hãm khí nén từ các toa xe động.

b) Trường hợp 2: Lực hãm tổng hợp khi hãm điện bị hỏng.

Hãm hỗn hợp điện – khí nén được phối hợp theo thời gian thực theo lực hãm điện thực tế. Khi hãm điện của một đoàn tàu nào đó bị hỏng, lực hãm điện thực tế bằng 0 và hệ thống hãm khí nén vẫn có thể hoạt động bình thường và không bị ảnh hưởng về tổng lực hãm tàu. Khi tất cả các hệ thống hãm điện trong bộ phận hỗn hợp bị hỏng, mỗi toa xe sẽ được coi như một toa kéo theo và việc kết hợp chéo trong bộ phận sẽ được thực hiện tùy theo trọng lượng xe và các hạn chế về độ bám dính.

Khi hãm điện của toa xe điện trong mô-đun hỗn hợp không thành công, logic tổng hợp giống như trường hợp bình thường. Lực hãm điện tối đa được áp dụng lần đầu tiên và lực hãm còn lại được bổ sung cho mỗi xe tùy theo trọng lượng xe và giới hạn bám dính.

c) Trường hợp 3: Phôi hợp lực hãm khi hãm khí nén bị hỏng.

Bình thường, nếu hệ thống hãm khí nén của một toa động lực bị hỏng, lực hãm điện vẫn có thể hoạt động bình thường, do đó không ảnh hưởng

hưởng đến tổng lực hãm của đoàn tàu. Khi hệ thống hãm khí nén của toa kéo theo bị hỏng, trong mô-đun vẫn có thể thực hiện hãm phối hợp giữa điện và khí nén. Nếu lực hãm điện có thể đáp ứng nhu cầu lực hãm của mô-đun, thì sự cố hệ thống hãm khí nén của toa kéo theo sẽ không gây ảnh hưởng đến tổng lực hãm của đoàn tàu. Tuy nhiên, lực hãm của đoàn tàu có thể bị giảm nhỏ.

Hệ thống hãm cơ bản vẫn cần được kiểm chứng thông qua tính toán lực hãm, nhằm xác định có cần bổ sung lực hãm trong đơn vị hay phải cân nhắc chế độ vận hành giảm cấp. Trong phương án này, mặc định toa bị sự cố đã tạo ra lực hãm tương ứng, và ba toa còn lại trong cùng đơn vị sẽ thực hiện phối hợp hãm chéo để bù đắp. Mức lực hãm suy giảm này, sau khi được thẩm định và kiểm chứng, vẫn đáp ứng yêu cầu an toàn.

4. KẾT LUẬN

Bài viết này chủ yếu giới thiệu những đặc điểm cũng như các yêu cầu của hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao. Đặc điểm của hệ thống hãm đoàn tàu cần tương đồng với các đặc điểm kết cấu của đoàn tàu EMU hiện đại nhưng lợi dụng động lực phân tán, phân phối lực hãm khi thực hiện phối hợp hãm điện – khí nén, nghiên cứu nguyên lý phân phối hãm phối hợp điện – khí nén của trong các điều kiện làm việc khác nhau.... Với các đoàn tàu khác nhau, việc lựa chọn hợp lý các mô-đun phân bổ lực

hãm có ý nghĩa cực kỳ quan trọng trong việc tận dụng tốt hiệu quả của hệ thống hãm cũng như giảm giá thành kinh tế. Ngoài ra, phương pháp phân bổ lực hãm cũng liên quan đến điều kiện đường, trọng lượng xe và các điều kiện khác nên khi thiết kế và lựa chọn hệ thống hãm phải căn cứ vào tình hình thực tế để lựa chọn.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong quá trình thực hiện đề tài mã số T2025-CK-008.❖

Ngày nhận bài: **23/9/2025**

Ngày phản biện: **06/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Vũ Thị Hoài Thu, Vũ Duy Lộc, Tào Văn Chiến, “*Hãm đoàn tàu*”. NXB. Giao thông vận tải, 2024.
- [2]. Nguyễn Chí Đạt, “*Đường sắt tốc độ cao và một số công nghệ đặc trưng*”. Sở Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, 2022.
- [3]. Li He Ping, “*Hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao*”. NXB. Đại học Giao thông Tây Nam (Trung Quốc), 2019.
- [4]. Zhang Zhong Yang, “*Tính toán lực kéo tàu*”. NXB. Đường sắt Trung Quốc, 2009.
- [5]. Chang Zhong Bing, “*Thảo luận về đường sắt cao tốc*”. NXB. Đường sắt Trung Quốc, 2013.
- [6]. MJ Leigh, “*Đặc điểm và ứng dụng của hãm tổng hợp*”, 2009.