

PHÂN TÍCH ỨNG DỤNG HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG KHÍ NÉN TRONG LĨNH VỰC CƠ ĐIỆN TỬ

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF PNEUMATIC DRIVE SYSTEMS IN THE
FIELD OF MECHATRONICS

Nguyễn Tiến Dũng

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: dungnt@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này tổng quan về các phương pháp điều khiển cho hệ thống truyền động khí nén, tập trung vào ứng dụng trong cơ điện tử. Bài báo phân tích ba loại phương pháp điều khiển chính: điều khiển cổ điển (PID), điều khiển hiện đại (LQR, MPC), và điều khiển thông minh (Fuzzy, ANN, và các phương pháp lai). Mỗi phương pháp được đánh giá ưu điểm, nhược điểm và phạm vi ứng dụng. Bài báo cũng đề cập đến các ứng dụng trong robot công nghiệp, robot mềm, truyền động chính xác, và khung xương trợ lực. Bài báo nhấn mạnh sự cần thiết của việc tích hợp cảm biến, học máy và công nghệ song sinh số vào thiết kế điều khiển tương lai cho hệ thống truyền động khí nén để tối ưu hóa hiệu quả và mở rộng khả năng ứng dụng.

Từ khóa: Truyền động khí nén; Robot công nghiệp.

ABSTRACT

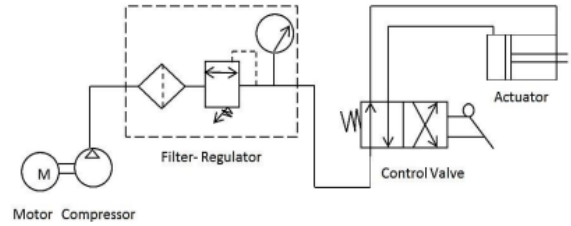
This study presents a review of control methodologies employed in pneumatic actuation systems, with an emphasis on mechatronic applications. Three primary control paradigms are examined: classical control (predominantly PID), modern control (including LQR and MPC), and intelligent control (fuzzy logic, artificial neural networks, and hybrid schemes). The strengths, weaknesses, and suitability of each approach are evaluated. The study further considers applications within industrial robotics, soft robotics, precision motion control, and powered exoskeletons. The necessity of integrating sensor technologies, machine learning capabilities, and digital twin modelling into future pneumatic drive system control designs is underscored to achieve optimal performance and expand the range of practical applications.

Keywords: Pneumatic drive; Industrial robots.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, các hệ thống truyền động sử dụng cơ cấu chấp hành khí nén (pneumatic actuators) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công nghiệp và robot nhờ ưu điểm về cấu trúc đơn giản, trọng lượng nhẹ, chi phí thấp và khả năng hoạt động trong môi trường khắc nghiệt [1, 2]. Tuy nhiên, đặc tính phi tuyến mạnh, độ nén của khí và các hiệu ứng trễ động lực khiến việc thiết kế bộ điều khiển cho các hệ thống truyền động khí nén trở nên đặc biệt phức tạp [3]. Cụ thể, tính phi tuyến này bắt nguồn từ một số yếu tố chính: (1) Lực ma sát cao: Ma sát trong các thành phần cơ khí của hệ thống khí nén có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác và hiệu suất của hệ thống; (2) Khả năng nén của không khí: Tính chất nén của không khí dẫn đến động lực học hệ thống phức tạp và khó dự đoán; và (3) Vùng chết (dead band): Sự tồn tại vùng chết trong van điều khiển làm giảm độ chính xác và độ nhạy của hệ thống. Do những tính chất phi tuyến này, việc sử dụng các bộ điều khiển thông thường như PID đơn giản thường không mang lại hiệu quả cao.

Nhiều phương pháp điều khiển khác nhau đã được nghiên cứu để cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của các cơ cấu chấp hành khí nén, bao gồm điều khiển PID mở rộng [4], điều khiển thích nghi [5], điều khiển mờ và mạng nơ-ron nhân tạo [6], cũng như điều khiển tối ưu như LQR và MPC [7]. Tuy nhiên, không có một giải pháp điều khiển duy nhất nào có thể áp dụng hiệu quả cho tất cả các loại tải và điều kiện vận hành khác nhau. Do đó, việc tổng hợp và đánh giá các phương pháp điều khiển hiện có đóng vai trò quan trọng trong việc xác định xu hướng nghiên cứu và ứng dụng trong tương lai.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống điều khiển khí nén [5]

Mục tiêu của bài báo này là trình bày một cái nhìn tổng quan toàn diện về các phương pháp thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống truyền động bằng cơ cấu chấp hành khí nén, phân tích ưu nhược điểm của từng phương pháp, đồng thời đề xuất các hướng nghiên cứu tiềm năng nhằm nâng cao hiệu quả điều khiển và khả năng ứng dụng thực tế.

2. TỔNG QUAN VÀ ĐÁNH GIÁ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN

2.1. Điều khiển cổ điển

Phương pháp phổ biến nhất là PID nhờ cấu trúc đơn giản, triển khai dễ dàng trong công nghiệp. Tuy nhiên, đối với hệ thống khí nén với tính phi tuyến và trễ thời gian, PID truyền thống không đảm bảo hiệu quả điều khiển [1]. Các biến thể như PID thích nghi hay PID theo mô hình giúp cải thiện khả năng bù phi tuyến [2].

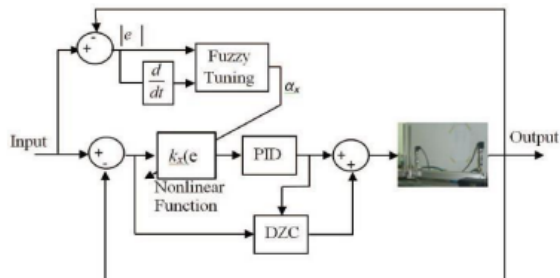
2.2. Điều khiển hiện đại

Các phương pháp như LQR và MPC tối ưu hành vi hệ thống theo hàm chi phí. LQR mang lại đáp ứng nhanh nhưng phụ thuộc mô hình chính xác. MPC linh hoạt hơn nhưng tính toán phức tạp [3], [4]. Các phương pháp thích nghi như MRAC hay Adaptive Backstepping có thể tự bổ sung sự thay đổi tham số, bù phi tuyến [5].



2.3. Điều khiển thông minh

Phương pháp như mờ (Fuzzy) và mạng nơ-ron (ANN) giúp xử lý hệ thống phi tuyến không cần mô hình. Các phương pháp lai như PID-Fuzzy, ANN-PID kết hợp ưu điểm các loại điều khiển [6], [7].



Hình 2. Cấu trúc điều khiển MN-PID [5]

2.4. So sánh các phương pháp với nhau

Phương pháp	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng
PID truyền thống	Dễ triển khai, tính toán đơn giản	Kém ở môi trường phi tuyến	Cao
PID thích nghi	Cải thiện khi tải thay đổi	Khó thiết lập tham số	Trung bình
LQR	Ổn định, nhanh	Cần mô hình chính xác	Trung bình
MPC	Xử lý ràng buộc tốt	Tính toán nặng	Thấp
Thích nghi	Bù phi tuyến tự động	Dễ mất ổn định nếu sai mô hình	Trung bình
Fuzzy/ ANN	Không cần mô hình	Yêu cầu huấn luyện, khó giải thích	Trung bình
Lai	Kết hợp ưu điểm	Thiết kế phức tạp	Trung-Cao

3. ỨNG DỤNG TRONG CƠ KHÍ VÀ CƠ ĐIỆN TỬ

3.1. Robot công nghiệp, cobots

Dùng trong tay gấp, trục truyền động, thiết bị thao tác sản phẩm. Các bộ điều khiển thích nghi giúp tăng độ an toàn khi robot làm việc cùng người [1].

3.2. Robot mềm, thiết bị y sinh

Cơ trúc dễ biến dạng, dùng trong phục hồi chức năng, thao tác vật dễ vỡ. Điều khiển fuzzy, MPC, hay ANN giúp tăng hiệu suất [2], [3].

3.3. Truyền động chính xác

Trong CNC, máy đóng gói, thiết bị gá, các bộ PID nâng cao hoặc LQR giúp cân bằng độ chính xác và tốc độ [4].

3.4. Khung xương trợ lực, tay giả

Dùng của khí nén để hỗ trợ vận động, các bộ điều khiển điều chỉnh theo phản hồi sinh học giúp tạo cảm giác tự nhiên và an toàn hơn [5].

4. KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU

Bài báo này đã tổng quan về các thiết kế bộ điều khiển được sử dụng phổ biến cho hệ thống truyền động khí nén, tập trung vào ba loại chính: PID, SMC và Adaptive Control. Các hệ thống này, mặc dù có chi phí thấp và dễ bảo trì, lại gặp khó khăn do tính phi tuyến vốn có, bao gồm ma sát cao, độ nén của không khí và hiện tượng vùng chết. Bài báo đã tổng hợp các phương pháp điều khiển được áp dụng trong hệ

thống truyền động sử dụng cơ cấu chấp hành khí nén, từ cổ điển đến hiện đại và thông minh. Mỗi phương pháp đều có những thế mạnh và hạn chế riêng, tùy thuộc vào đặc tính tải, độ phi tuyến và mục tiêu điều khiển.

Trong tương lai, các hướng nghiên cứu tiềm năng bao gồm:

+ Phát triển các thuật toán điều khiển thích nghi thông minh lai để xử lý hiệu quả trong môi trường biến động.

+ Tăng cường tích hợp cảm biến và học máy để dự đoán và điều chỉnh hành vi hệ thống theo thời gian thực.

+ Ứng dụng công nghệ song sinh số (digital twin) cho mô phỏng và điều chỉnh điều khiển tối ưu.

+ Tối ưu hóa chi phí tính toán cho các bộ điều khiển MPC và học sâu nhằm ứng dụng trong hệ thống nhúng thực tế.

Các nghiên cứu này sẽ góp phần nâng cao hiệu quả điều khiển, mở rộng khả năng ứng dụng của hệ thống khí nén trong sản xuất thông minh và y tế tương lai.❖

Ngày nhận bài: **28/4/2025**

Ngày phản biện: **07/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyen, Q. H., et al., “A survey on pneumatic actuators for soft robotics”. *Actuators*, vol. 9, no. 1, pp. 1-20, 2020.
- [2]. Wang, X., et al., “Modeling and control of pneumatic actuators”. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 1-15, 2018.
- [3]. Richer, E., and Hurmuzlu, Y., “A high performance pneumatic force actuator system: Part I – Nonlinear mathematical model”. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 122, no. 3, pp. 416-425, 2000.
- [4]. Shearer, J. L., “Study of pneumatic processes in the continuous control of motion with compressed air – Part 2: Controlled velocity and position systems”. *Transactions of the ASME*, vol. 78, pp. 233-249, 1956.
- [5]. Rydén, M., and Wikander, J., “Adaptive control of a pneumatic servo system using backstepping”. *Control Engineering Practice*, vol. 10, no. 5, pp. 567-576, 2002.
- [6]. Smaoui, M. R., et al., “Fuzzy logic control of a pneumatic artificial muscle actuator system”. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 1, pp. 75-82, 2011.
- [7]. Liu, Y., and Goldenberg, A. A., “Modeling and control of a pneumatic actuator with neural network compensation”. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 3, pp. 409-418, 2004.