

Nghiên cứu van servo khí nén cao tốc kiểu không đối xứng

- Phạm Xuân Hồng Sơn
- Trần Thiên Phúc

Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 04 tháng 03 năm 2013, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 29 tháng 10 năm 2013)

TÓM TẮT:

Bài báo này mô tả một loại van servo điện-khí nén kiểu không đối xứng và phương pháp điều khiển van tốc độ cao nhằm tăng (hoặc giảm) thời gian quá trình nạp khí (hoặc thoát khí) trong hệ thống. Với van servo khí nén kiểu không đối xứng, khả năng dòng chảy qua các cửa điều khiển khí thoát ra của

van servo (337NL/min) là gấp khoảng hai lần của van kiểu đối xứng (171NL/min) với điều kiện có cùng độ dịch chuyển trục van. Kết quả thử nghiệm cho thấy dải đáp ứng tần số đạt được 200Hz và thời gian tăng nhỏ hơn 1 ms.

Từ khóa: điều khiển khí nén, van servo khí nén, van ao tốc, van cao tốc, van kiểu không đối xứng.

1. Tổng quan

Kỹ thuật điều khiển khí nén rất phức tạp và yêu cầu về độ tin cậy cao. Sử dụng khí nén để điều khiển tự động được sử dụng từ đại chiến thế giới thứ hai, khi đó người ta có thể dùng công nghệ khí nén để điều khiển đường bay của hỏa tiễn hay đạn đạo nhờ hệ thống gồm thiết bị tạo khí nén, van tự động và motor khí nén [1;2]. Bốn mươi năm sau đại chiến thế giới thứ hai Mỹ và các nước châu Âu đã phát triển nhanh ngành hàng không vũ trụ, hỏa tiễn, tàu vũ trụ bay vào không gian được điều khiển bằng lực đẩy của khí nén. Năm 1965 hiệp hội kỹ thuật hàn Nhật đã ứng dụng kỹ thuật khí nén vào máy hàn điện trở, van điện từ khí nén, van tỷ lệ khí nén, từ đó kỹ thuật khí nén được mở rộng sang ngành chế tạo ô tô, máy bay, tàu hỏa, máy công cụ, robot.

Trong công nghiệp, ứng dụng điều khiển khí nén có tốc độ còn chậm, do vậy mà dần dần hình

thành nên điều khiển servo khí nén và đã đạt được một tốc độ đáp ứng nhất định đồng thời đạt được độ chính xác cao hơn. Tuy nhiên, van servo khí nén lại có vấn đề của thời gian quá trình thoát khí ra ngoài van lớn hơn rất nhiều so với thời gian quá trình khí nạp vào, dẫn đến sai lệch tính năng điều khiển khoang khí trong van, đặc biệt là khó thực hiện điều khiển tốc độ cao, dẫn đến xuất hiện tình trạng không điều khiển được cả hệ thống [3;4]. Ví dụ chất lượng hàn của máy hàn điểm điện trở loại công nghiệp được quyết định bởi ba yếu tố: dòng điện hàn, thời gian tăng áp, lực tác dụng lên điện cực, trong đó điều khiển lực tác dụng lên điện cực phần lớn là dùng điều khiển khí nén, thời gian đáp ứng không có cách nào thỏa mãn. Với xylanh có dung tích 900 cm³ dùng điều khiển lực tác dụng lên điện cực, thì thời gian quá trình nạp khí là 200 ms, thời gian quá trình thoát khí khoảng 400 ms, do vậy rất khó thực

hiện điều khiển cao tốc và không tiết kiệm năng lượng.

Những năm gần đây, nhiều nhà nghiên cứu đã đi sâu nghiên cứu các đặc tính motor điều khiển van servo khí nén, đặc tính xylanh tác động kép điều khiển van servo khí nén kiểu đối xứng, cho biết nhược điểm của loại van này là với cùng hệ thống khí nén kín và cùng trạng thái áp suất, thời gian quá trình khí bị đẩy ra ngoài van lớn hơn rất nhiều so với thời gian quá trình khí nạp vào van servo [5;7].

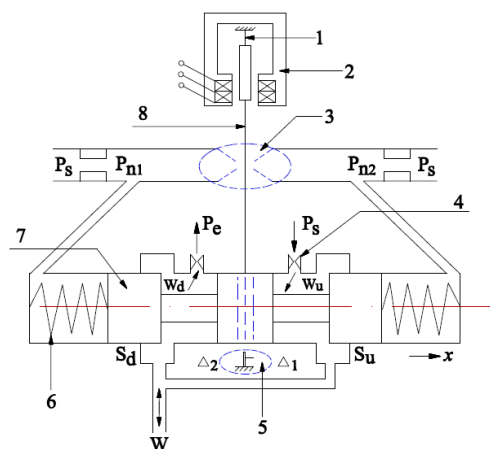
Để khắc phục những nhược điểm nói trên và tiến hành nghiên cứu, chế tạo các hệ thống điều khiển khí nén có tốc độ cao, như máy hàn điểm điện trở dùng khí nén, bài báo này thực hiện nghiên cứu một loại van servo khí nén cao tốc không đối xứng, đó là loại van có diện tích cửa tiết lưu khí bị đẩy ra ngoài van lớn gấp đôi diện tích cửa tiết lưu khí được nạp vào van servo.

2. Kết cấu van servo kiểu không đối xứng

Van servo lưu lượng điều khiển bằng khí nén kiểu không đối xứng được mô tả như hình vẽ 1. Van có kết cấu 2 cấp, điểm khác biệt của loại van này là cửa tiết lưu bên phải và trái khác nhau về diện tích mở cửa, do vậy mà van servo loại này có kết cấu không đối xứng và đặc tính lưu lượng của van cũng không đối xứng.

2.1 Kết cấu

Xét van servo điển hình điều khiển bằng khí nén kiểu không đối xứng có 2 cấp. Cấp 1 là cấp dẫn hướng bao gồm motor lực có từ trường vĩnh cửu và cơ cấu bản chắn-vòi phun kiểu đẩy kéo. Cấp 2 bao gồm van trượt có ba cửa thông, hai lò xo, một lò xo phản hồi lực, một cảm biến vị trí trượt van trượt. Trục van trượt chịu tác dụng của lực phản hồi lò xo và momen lực motor. Mức độ mở cửa thông của van là không cân bằng, độ rộng cửa ra lớn gấp đôi độ rộng cửa vào.



Hình 1. Kết cấu van servo khí nén kiểu không đối xứng

- 1- lò xo đỡ, 2- cụm điều khiển, 3- tấm bản-vòi phun, 4- cửa tiết lưu cố định, 5- cảm biến vị trí, 6- lò xo cân bằng đối trọng, 7- trục van trượt, 8- cọc lò xo phản hồi

Bảng thông số kỹ thuật của các loại van servo khí nén (PVM 067 và PVM 025) như sau:

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Áp suất định mức, p_{dm}	31.5	MPa
Áp suất lớn nhất, p_{max}	45	MPa
Lưu lượng định mức, q_{dm}	80	NL/min
Thời gian đáp ứng, t	10	ms
Dòng điện định mức, i_{dm}	$\pm 300/650$	mA
Độ từ trễ	$< 2\%$	
Độ tuyến tính	6.25%	
Điện trở cách điện	> 15	$M\Omega$
Điện trở cuộn dây	1000	Ω
Điện cảm cuộn dây	11~15	H
Trọng lượng tịnh	< 0.4	kg
Tuổi thọ	$> 10^7$	lần

Tính toán kết cấu đặc thù của loại van này là dựa vào trở lực khoang khí ở đường hồi mà cần khí thoát ra phải có tốc độ cao [6]. Van servo khí nén được dùng nghiên cứu có đường kính trục

van 8 mm, hành trình lớn nhất của trục van là $\pm 350 \mu\text{m}$, cửa khí thoát có thể điều khiển lưu lượng đạt 337 (NL/min). Đặc điểm của nó là dùng lưu lượng không đối xứng, để cân bằng sự sai lệch giữa thời gian khí vào và thời gian khí thoát ra ngoài qua khoang khí có trở lực.

2.2 Nguyên lý làm việc

Lúc chưa nhập tín hiệu điện áp vào, thanh nổi, tấm băng và trục van trượt đều nằm ở vị trí giữa. Khi nhập một tín hiệu điện áp dương, trục van trượt dịch chuyển sang phải như hình vẽ cho đến khi lực lò xo ở 2 đầu trục van trượt tác dụng lên nó cân bằng nhau. Nhập một tín hiệu điện áp âm, trục van trượt dịch chuyển sang trái. Độ lớn tín hiệu nhập vào và độ dịch chuyển của trục van trượt là tỷ lệ thuận.

Khi nhập tín hiệu dương chỉ có cửa tiết lưu khí vào mở, nhập tín hiệu âm, hai cửa tiết lưu khí thoát cùng mở đồng thời. Trong hệ thống điều khiển áp suất chu trình kín, thông qua cảm biến phản hồi lắp ở đầu xylanh, áp suất được phản hồi về [8]. Theo hình vẽ 1 ta thấy van kiểu không đối xứng có ba cửa:

Cửa khí vào có áp suất p_s , cửa phụ tải có áp suất P_L và cửa khí thoát ra có áp suất p_e .

Cửa tiết lưu bên phải có diện tích mở cửa điều khiển là:

$$x > 0, S_u = b_p x \quad (1)$$

với b_p là độ rộng cửa tiết lưu (mm),

S_u diện tích cửa tiết lưu bên phải (mm^2),

x là dịch chuyển của trục van trượt (mm).

Cửa tiết lưu bên trái có diện tích mở cửa điều khiển là:

$$x \leq 0, S_d = -2b_p x \quad (2)$$

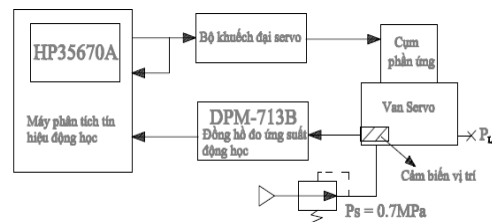
với S_d là diện tích cửa tiết lưu bên trái (mm^2).

3. Phân tích lý thuyết và kết quả thực nghiệm

3.1 Đặc tính trạng thái động

Trong thực nghiệm dùng máy phân tích trạng thái động của trục van bên trong phát sinh tín hiệu vào nhờ màng phim và tự động đo đáp ứng tần số của van servo không đối xứng ($x/\Delta i$), và đặc tính đáp ứng thời gian. Dịch chuyển của trục van trượt đo được nhờ phim biến dạng dán bên trong.

Máy đo độ chuyển dịch của biến dạng là loại DPM-713B do công ty Kyowa (Nhật) chế tạo, tần số có thể đo được là 10 kHz (hình 2). Trong quá trình phân tích, áp suất khí nguồn cấp vào là $p_s = 0.7 \text{ MPa}$.



Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm van servo không đối xứng

Khi cho áp suất khí vào là $p_s = 0.7 \text{ MPa}$, kết quả đáp ứng tần số đo được của van servo khí nén kiểu không đối xứng cho trên hình 3, lúc biên độ dao động là -3dB tần số là 200 Hz. Ở vị trí -90° tần số vượt quá 200 Hz.

Thời gian đáp ứng trục van trượt rất ngắn, khi trục van dịch chuyển 0.2 mm thời gian tăng lên không quá 1 ms.

So sánh tín hiệu vào u_i và độ dịch chuyển của trục van trượt x_i với thời gian trễ bằng hằng số $t = 0.9 \text{ ms}$, thời gian trễ này là do tương tác giữa các bộ phận chuyển động gây nên.

Ta có hàm truyền như sau:

$$\frac{x(s)}{u_i(x)} = \frac{k_v k_a e^{-\tau s}}{\left(\frac{s}{\omega_r} + 1\right) \left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\xi_v}{\omega_v} s + 1\right)} \quad (3)$$

trong đó,

ω_r là tần số cố định của motor lực,

ω_v là tần số van servo khí nén,

$\omega_r = 40 \text{ Hz}$; $\omega_v = 200 \text{ Hz}$.

ξ_v là hệ số cản trở $= 0.03$;

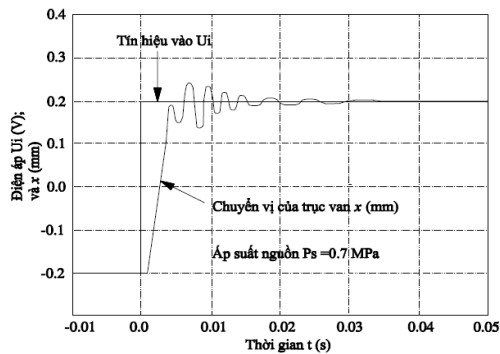
τ là thời gian trễ = hằng số $= 0.9 \text{ ms}$;

u_i là tín hiệu điện nhập vào (V);

k_a là hệ số khuếch đại bộ khuếch đại servo,

k_v là hệ số gia tăng của van servo (m/V),

$k_a \times k_v = 2 \times 10^{-4} \text{ (m/V)}$.



Hình 3. Đáp ứng thời gian van servo kiểu không đối xứng

3.2 Mô hình toán học

Để tính toán đặc tính cơ hữu van servo kiểu không đối xứng, ta dùng mô hình phương trình lưu lượng khối lượng qua họng tiết lưu cố định, với những giả thiết như sau:

1/ Áp suất nguồn khí cấp vào là $p_s =$ hằng số, áp suất này là áp suất tuyệt đối.

2/ Khác biệt giữa cửa tiết lưu vào và cửa tiết lưu ra: cửa vào là loại cửa tiết lưu cố định diện tích, còn ở cửa tiết lưu ra là loại cửa đều có thể điều chỉnh được diện tích, nên thiết kế đặc thù của van servo này là van có trạng thái làm việc bão hòa và trạng thái làm việc không bão hòa.

3/ Khí lưu động qua cửa tiết lưu là một quá trình quá nhiệt, chỉ số quá nhiệt của khí và hệ số lưu lượng cửa tiết lưu là hằng số.

4/ Trong mô hình toán, tại các cửa tiết lưu vào/ra, nhiệt độ sử dụng là nhiệt độ trung bình.

3.2.1 Phương trình lưu lượng qua cửa tiết lưu

Phân tích lưu lượng khối lượng khí có tốc độ dưới âm thanh đi qua một cửa tiết lưu có diện tích S_o , bị giới hạn bởi điều kiện:

$0.5283 \leq p_0/p_i \leq 1.0$, ta có phương trình là

$$q = f_s(s_o, p_i, p_o, T) = CS_o \frac{p_i}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_o}{p_i} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_o}{p_i} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (4)$$

Khi khí có giới hạn là tốc độ âm thanh và $0 \leq p_0/p_i \leq 0.5283$, phương trình là

$$q_o = f_c(s_o, p_i, p_o, T) = CS_o \frac{p_i}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} \quad (5)$$

trong đó,

C là hệ số lưu lượng qua cửa tiết lưu, $C = 0.68$;

S_o là diện tích tiết lưu;

k là hệ số quá nhiệt của không khí, $k = 1.4$;

R là hằng số khí, $R = 287.06 \text{ Nm/kg}^0\text{K}$;

T là nhiệt độ tuyệt đối của không khí;

p_i là áp suất khí vào cửa tiết lưu.

p_o là áp suất khí ra cửa tiết lưu.

3.2.2. Phương trình lưu lượng tại cửa tiết lưu vào của van servo không đối xứng

Trong quá trình khí đi vào cửa tiết lưu, lúc trục van trượt dịch chuyển theo chiều dương, có một cửa tiết lưu với diện tích cố định S_o và một cửa với diện tích điều khiển được S_u . Phương trình lưu lượng khối lượng của khí có tốc độ dưới âm thanh đi qua cửa tiết lưu cố định S_o , bị giới hạn bởi: $0.5283 \leq p'_s/p_s \leq 1.0$

$$q_{01} = f_s(s_o, p_s, p'_s, T) \quad (6)$$

Khi khí bị giới hạn bởi:

$0 \leq p'_s/p_s \leq 0.5283$, phương trình là

$$q_{01} = f_c(s_o, p_s, p'_s, T) \quad (7)$$

Phương trình lưu lượng khối lượng của khí có tốc

độ dưới âm thanh đi qua cửa tiết lưu điều chỉnh S_u với $0.5283 \leq p_L/p'_s \leq 1.0$ là:

$$q_u = f_s(s_u, p'_s, p_L, T) \quad (8)$$

Khi khí bị giới hạn bởi:

$0 \leq p_L/p'_s \leq 0.5283$, phương trình là

$$q_u = f_c(s_u, p'_s, p_L, T) \quad (9)$$

trong đó,

p_c là áp suất khí quyển, $p_c = 0.1013$ MPa,

p_s và p_L là áp suất khí nguồn và áp suất phụ tải, $p_s = 0.7$ MPa.

Cửa tiết lưu điều khiển được quyết định độ dịch chuyển của trục van trượt, do vậy phương trình liên tục lưu lượng khối lượng tại cửa tiết lưu đầu vào van servo kiểu không đối xứng là

$$q_{01} = q_u \quad (10)$$

3.2.3. Phương trình lưu lượng tại cửa tiết lưu ra của van servo kiểu không đối xứng

Cửa tiết lưu có diện tích cố định $2S_o$, cửa tiết lưu có diện tích điều chỉnh được S_d , trục van trượt di chuyển theo chiều âm, $x \leq 0$, lưu lượng khối lượng của khí đi qua cửa tiết lưu điều chỉnh S_d (với áp suất cửa ra p'_e) với vận tốc dưới âm thanh: $0.5283 \leq p'_e/p_L \leq 1.0$

ta có phương trình là

$$q_d = f_s(s_d, p_L, p'_e, T) \quad (11)$$

Khi khí bị giới hạn bởi điều kiện:

$0 \leq p'_e/p_L \leq 0.5283$, thì phương trình là

$$q_d = f_c(s_d, p_L, p'_e, T) \quad (12)$$

trong đó cửa tiết lưu điều chỉnh là:

$$S_d = -2b_p x$$

Lưu lượng khối lượng của khí đi qua cửa cố định $2S_o$ với tốc độ dưới âm thanh và bị giới hạn bởi: $0.5283 \leq p_c/p'_e \leq 1.0$, ta có phương trình là

$$q_{02} = f_s(s_o, p'_e, p_e, T) \quad (13)$$

Khi khí bị giới hạn bởi:

$0 \leq p_c/p'_e < 0.5283$, ta có

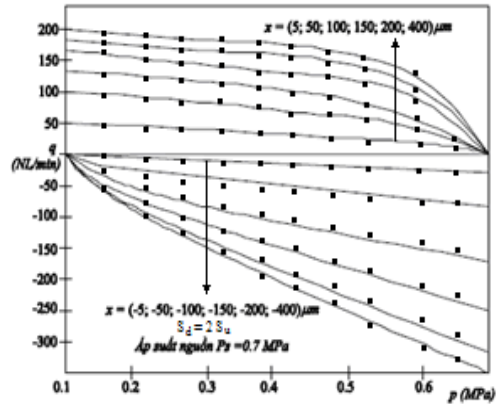
$$q_{02} = f_c(s_o, p'_e, p_e, T) \quad (14)$$

Phương trình liên tục lưu lượng khối lượng qua cửa ra của van servo kiểu không đối xứng

$$q_{02} = q_d \quad (15)$$

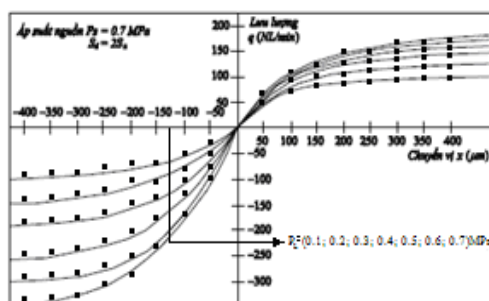
3.3 So sánh lý thuyết và kết quả thực nghiệm

Hình 4 mô tả kết quả thực nghiệm và hình 5 mô tả tính toán lý thuyết của van servo kiểu không đối xứng với trục van servo có đường kính 8 mm, di chuyển của trục van trong phạm vi $-400 \mu m$ đến $+400 \mu m$. Kết quả lý thuyết và kết quả theo thực nghiệm hầu như trùng nhau. Theo hình 4 cửa van ra có lượng khí thoát ra khí trời lớn nhất ở vị trí $x = -400 \mu m$ với lưu lượng là $q_u = +337$ NL/min, lưu lượng khí lớn gấp đôi khi cấp vào khoang làm việc ở cửa tiết lưu vào khí $x = +400 \mu m$ là $q_u = +191$ NL/min. Ta thấy với cùng dung tích làm việc lưu lượng khí vào và lưu lượng khí ra là khác nhau. Ngoài ra theo hình 5 khi van ở vị trí $\pm 350 \mu m$ đến $\pm 400 \mu m$, lưu lượng khí thay đổi không đáng kể, nguyên nhân là ở vị trí này ảnh hưởng của cửa tiết lưu cố định lên van đã đạt trạng thái bão hòa về lưu lượng.



° là kết quả thực nghiệm; — là kết quả lý thuyết

Hình 4. Đặc tính lưu lượng-áp suất van không đối xứng



• là kết quả thực nghiệm; — là kết quả lý thuyết

Hình 5. Đặc tính lưu lượng–chuyển vị van không đối xứng

4. Kết luận

1/ Bài báo này giới thiệu một loại van servo khí nén có tốc độ cao kiểu không đối xứng do cửa tiết lưu ra có diện tích lớn gấp đôi cửa tiết lưu vào. Kết quả đạt được có thể lấy làm phương án xử lý phần cứng đường đặc tính cấp khí cho van servo, dùng đường đặc tính này để cân bằng thời gian tăng và giảm trong sai lệch đáp ứng trạng thái động.

2/ Đánh giá được đường đặc tính lưu lượng – chuyển vị và đặc tính lưu lượng – áp suất của van servo khí nén cao tốc kiểu không đối xứng.

3/ Đáp ứng tần số của van đạt được 200Hz, phạm vi điều chỉnh lưu lượng là +191 (NL/min) đến – 337 (NL/min).

Research on an Asymmetric High-speed Pneumatic Servo Valve

- Pham Xuan Hong Son
- Tran Thien Phuc

University of Technology, VNU-HCM

ABSTRACT:

This paper describes an asymmetric electro-pneumatic servo valve and hardware compensation approaches for high speed control of rise time and step-down time. The flow capacity of the downstream control orifice of asymmetric valve is about twice of that of the symmetric valve at the same spool

displacement. Experimental results show that the bandwidth is 200Hz and rise time is less than 1 ms. The flow capacity of the downstream control orifice of asymmetric valve (337NL/min) is about twice of that of the symmetric valve (171NL/min).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Wang J., Wang D. J. D., Moore P. R., and Pu J. S. Modelling study, analysis, and robust servo control of pneumatic cylinder actuator systems. *IEEE Process Control Theory and Applications*, Vol. 148, No. 1, 35-42. January (2001).
- [2]. Moore P. R. and Pu J. S. Pneumatic servo actuator technology. *IEEE Colloquium:*

- Actuator Technology: Current Practice and New Developments*, 3/1-3/6. May (1996).
- [3]. Oneyama, N., Takahashi, T. Terashima, Y., Kuroshita, K. and Kagawa, T. *Study and suggestion on Flow-rate Characteristics of Pneumatic Components, Proceeding of the Seventh Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, Sorrento, Italy, Aug. (2003).
- [4]. 田中裕久。基于电子气动伺服阀的伺服气缸位置控制[J]。油压与空气压, 日本油空压, 日本油空压学会, 12(4), 57, 61. (1981).
- [5]. Yao Bao Yin, Kenji ARAKI, Yuji ISHINO. *Development of an asymmetric flow control pneumatic valve*. Proceedings of the International sessions of the 75th JSME Meeting (No.98-1), The Japan society of mechanical engineers [J], 3 Tokyo, 86-89. (1998).
- [6]. Henri, P.D. Hollerbach, J.M. and Nahvi, A. *An analytical and experimental investigation of a jet pipe controlled electro pneumatic actuator*. IEEE Trans. Robotics automation, 14(6), 601-610(1998).
- [7]. Yao Bao Yin, Kenji ARAKI. *High speed force control of a pneumatic system with an asymmetric servo valve and single acting cylinder for a spot welding machine [J] (the 2nd report*. Experimental analyses of an asymmetric servo valve and hardware compensation of a closed loop pneumatic pressure control system), Transactions of the Japan hydraulics and pneumatics society, Vol.30, No 2, 35/41, March, (1999).
- [8]. 王春行.液压控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 50-54.