PHÂN TÍCH THÍ NGHIỆM ĐẶC TÍNH DÒNG KHÍ BÊN TRONG THIẾT BỊ TẠO KHÍ TUẦN HOÀN LIÊN TỤC Cỡ NHỎ ỨNG DỤNG LÀM CẢM BIẾN VẬN TỐC GÓC LƯU CHẤT

EXPERIMENTAL EVALUATION OF FLOW ATTRIBUTE INSIDE THE CIRCULATED FLOW GENERATION APPLIED FOR ANGULAR RATE SENSOR

Phan Thanh Hòa^{1,*}

TÓM TẮT

Trong bài báo này, tác giả trình bày các phân tích thí nghiệm khả năng của vi thiết bị có thể tạo ra được đa dòng chảy dạng tia tuần hoàn trong một hệ kín. Dòng chảy trong vi thiết bị được kích hoạt bởi màng dao động PZT. Hoạt động của dòng chảy trong vi thiết bị được nghiên cứu bằng phần mềm nguồn mở OpenFOAM và được so sánh, đối chiếu với các kết quả thí nghiệm. Mỗi dòng chảy trong vi thiết bị được kiểm chứng bởi hai dây nhiệt điện trở ở các vị trí khác nhau đặt trong bốn buồng cảm biến đối xứng nhau. Kết quả thí nghiệm chứng minh rằng dòng khí được tạo ra thành công thông qua sự phân tích đặc tính thiết lập hay tức thời của dòng khí. Khả năng đo vận tốc quay của thiết bị cũng đã kiểm chứng bằng thí nghiệm cho thấy kết quả hoạt động tốt. Thiết bị ổn định, có kích thước tối thiểu và có thể làm cơ sở phát triển các cảm biến quán tính lưu chất nhiều bậc tự do.

Từ khóa: Dòng chảy dạng tia, đặc tính tức thời, cảm biến quán tính lưu chất nhiều bậc tự do.

ABSTRACT

In this paper, the author presents experimental analysis of a miniature device that can generate multiple circulated jet flows. The device is actuated by a lead zirconate titanate (PZT) diaphragm. The flows in the device were studied using three-dimensional transient numerical simulation with the programmable open source OpenFOAM and was comparable to the experimental result. Each flow is verified by two hotwires mounted at two positions inside each consisting chamber. The experiment confirmed that the flow was successfully created through transient characteristic of flow analysis. Moreover, the capability of the device in measuring angular rate is also experimental test. The device is robust, is minimal in size, and can contribute to the development of multi-axis fluidic inertial sensors.

Keywords: Jet-flow, transient characteristics, multi-axis fluidic inertial sensors.

¹Viên Công nghệ HaUI, Đại học Công nghiệp Hà Nội *Email: phanthanhhoa@haui.edu.vn Ngày nhận bài: 08/01/2018 Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/3/2018 Ngày chấp nhận đăng: 21/8/2018 Phản biện khoa học: TS. Nguyễn Đắc Hải

1. GIỚI THIỆU

Dòng chảy là một yếu tố rất quan trọng đối với thiết vi bị lưu chất vì nó cho biết các đặc tính hoạt động của thiết bị. So với một hệ thống mở, hệ thống dòng chảy kín có ưu điểm về số lượng các mẫu phân tính là tối thiểu [1, 2], trộn lẫn tốt hơn [3,4], ít gây hiệu ứng hoặc không gây ô nhiễm môi trường [5]. Ngoài ra, khi muốn tích hợp hoặc tối thiểu hóa kích thước của hệ thống đo lường làm người ta nghĩ tới việc sử dụng hệ thống vi lưu chất có dòng chảy tuần hoàn. Ví dụ có thể kể ra gồm thiết bị điều khiển dòng chảy nhanh [5] hoặc các thiết bị làm lạnh công suất cao [6].

Rõ ràng, một thiết bị phun dòng khí chạy bên trong có thể tạo ra đối lưu cưỡng bức và ít bị ảnh hưởng bởi trọng lực. Dòng chảy tầng tạo ra từ thiết bị gồm buồng cộng hưởng ở một đầu và đầu kia là khe tạo dòng được dùng trong rất nhiều ứng dụng [7]. Dòng chảy tuần hoàn trong không gian giới hạn được ứng dụng chủ yếu trong cảm biến quán tính đặc biệt là cảm biến vận tốc góc dựa trên hiệu ứng Coriolis với dòng chảy tạo ra từ vi bơm không dùng van đóng mở, thay thế chuyển động của các vật cứng và giảm thiểu ảnh hưởng của gia tốc tuyến tính [8].

Trong nghiên cứu trước [9], tác giả đã phát triển thành công một thiết bị lưu chất và qua mô phỏng và bước đầu đã chứng minh bằng thí nghiệm, thiết bị này có thể tạo ra bốn dòng khí liên tục trong hai cặp kênh vuông góc với nhau từ dao động của màng áp điện PZT. Các dòng khí được tạo ra này gần như giống hệt nhau trong bốn buồng cảm biến. Dòng khí được tạo ra này cho phép ứng dụng để nghiên cứu cảm biến vận tốc góc lưu chất ba bậc tự do. Trong bài báo này, tác giả phân tích kỹ hơn về đặc tính của dòng chảy trong thiết bị như thời gian thiết lập dòng chảy với các ảnh hưởng của tần số dao động của màng PZT. Ngoài ra, tác giả còn kiểm chứng thông qua thí nghiệm khả năng đo vận tốc góc của thiết bị.

2. MÔ PHỎNG SỐ HOẠT ĐỘNG CỦA THIẾT BỊ

Thiết bị được thiết kế bao gồm một mạng lưới kênh dẫn dòng chảy với một màng áp điện PZT gắn phía trên được

KHOA HỌC <mark>CÔNG NGHỆ</mark>

hàn kín với nhau như mô tả trong hình 1. Mạng lưu chất gồm bốn buồng cảm biến đối xứng với nhau qua tâm của thiết bị. Đầu phía ngoài cùng của mỗi buồng cảm biến được nối tới kênh dẫn và đầu kia được nối tới buồng bơm PZT ở phần giữa của thiết bị. Buồng bơm PZT có dạng hình tròn với bán kính là 18mm và sâu 0,3mm. Các kênh dẫn lưu chất có dạng hình cánh quạt mở rộng dần từ tâm của thiết bị với góc mở 6° và độ sâu 0,5mm. Các buồng cảm biến có hình dạng cánh quạt nhỏ dần khi nối tới vòng tròn tâm thiết bị - buồng bơm PZT với góc 12° và độ sâu 1,5mm. Trong buồng cảm biến, dòng lưu chất chảy vào sẽ có dạng tia được tạo bởi khe tạo dạng tia ở đầu vào và do đó, dòng lưu chất sẽ lấp đầy theo đúng hình dạng của buồng cảm biến (hình 2).



Hình 1. Mặt cắt 1/4 của cảm biến

Để kiểm tra và xác nhận các đặt tính của dòng lưu chất này, trong mỗi buồng cảm biến (tổng 4 buồng cảm biến), hai dây nhiệt điện trở được chăng ngang buồng cảm biến vào và song song với nhau ở hai vị trí cách khe đầu vào lần lượt là 1mm và 2,5mm. Các dây nhiệt điện trở được nối với các chân đầu ra rất nhỏ ở phía đáy của thân thiết bị cảm biến để kết nối với mạch điện bên ngoài.



Hình 2. Mô phỏng dòng khí bên trong thân thiết bị cảm biến

Nguyên lý làm việc và việc đo dòng lưu chất được tính toán bởi phương pháp mô phỏng dòng chuyển tiếp trong mô hình ba chiều. Dòng lưu chất tự tạo ra trong một mạng lưới đóng kín, vì thế, lưu chất được coi như là các phần tử bị nén đặc trong các kênh. Dòng lưu chất được mô tả bởi các công thức dưới đây:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho \vec{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u})$$
⁽²⁾

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho c_p T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$
(3)

Trong đó, \vec{u} , p, và T lần lượt là vectơ vận tốc, áp suất và nhiệt độ của dòng chất lưu; $\mu = 1,789 \times 10^{-5}$ Pas, $\rho = 1,2041$ kgm⁻³, $\lambda = 2,42 \times 10^{-3}$ Wm⁻¹K⁻¹ và $c_p = 1006,43$ Jkg⁻¹K⁻¹ lần lượt là độ nhớt động lực, mật độ, độ dẫn nhiệt và nhiệt độ riêng của chất lỏng. Nếu lưu chất được sử dụng là khí thì khi đó mối quan hệ giữa áp suất và mật độ được tính theo phương trình trạng thái của chất khí lý tưởng $p = \rho R_u T/M_w$, trong đó $R_u = 8,314$ Jmol⁻¹K⁻¹ hằng số chất khí chung và $M_w = 28,96$ gmol⁻¹ là khối lượng phân tử.

Đối với màng dao động PZT có lớp áp điện hình tròn gắn phía trên tại trung tâm của đĩa tròn kim loại, tỷ lệ của độ biến dạng cục bộ của màng dao động được chuyển thành vận tốc cục bộ tác động trên bề mặt của màng dao động theo công thức sau:

$$v(\vec{r},t) = 2\pi f Z \cos(2\pi f t) \,\varphi(\vec{r}) \tag{4}$$

Trong đó, độ biến dạng $\varphi(r)$ được tính theo công thức $\varphi(r) = (1 - (r/a)^2)^2$, a = 10 mm là bán kính màng và Z là biến dạng tại trung tâm của màng.

Biên độ biến dạng Z được tính bởi hiệu ứng Doppler laze trong bài báo [9]. Mô phỏng được thực hiên bằng phần mềm OpenFOAM; phương pháp SIMPLE (semi-implicit pressure-linked equation) được sử dụng để giải bài toán quan hệ vận tốc - áp suất. Đối với việc rời rạc hóa không gian động lượng, mật độ và năng lượng, phương pháp ngược gió bậc hai được sử dụng. Việc tính toán theo thời gian được thực hiện bởi phép toán ẩn bậc hai. Đối với phân tích thời gian thiết lập dòng chất lưu, bước thời gian được lấy bằng một phần hai mươi chu kỳ dao động của màng dao động PZT.

Hình 2 mô phỏng nguyên lý tạo dòng lưu chất trong thân thiết bị. Ban đầu, khi màng PZT ép xuống buồng bơm, không khí được đẩy thẳng từ buồng bơm vào kênh dẫn chứ không đi vào phần kênh vòng kết nối bên trong vuông góc với dòng lưu chất (hình 2a). Sau đó, khi màng PZT kéo dãn ra và do cấu trúc hình học của của các họng đầu ra mà các dòng ngược từ các kênh dẫn sẽ chậm lại và hoàn toàn bị ngăn cản bởi dòng lưu chất chảy từ buồng cảm biến vào trở lại kênh dẫn bên trong vuông góc với các kênh dẫn. Do đó, trong thân thiết bị luôn có một dòng lưu chất liên tục được tạo ra thành một mạng kín trong mỗi một chu kỳ bơm (hình 2b).

Để chứng minh và kiểm chứng một số đặc tính của dòng lưu chất bên trong thiết bị cảm biến mẫu chế tạo được, bên cạnh kết quả mô phỏng, tác giả tiến hành một số thí nghiệm để đo lường hoạt động thực của thiết bị nhằm làm rõ kết quả mô phỏng. Các kết quả này được trình bày ở phần tiếp theo của bài báo

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM ĐẠT ĐƯỢC

3.1. Thiết lập thí nghiệm đo tín hiệu đầu ra thiết bị

Thiết bị cảm biến vận tốc góc mẫu được chế tạo bằng phương pháp in 3D bằng vật liệu nhựa cứng PMMA. Các kênh dẫn khí cũng như các buồng cảm biến được ghép chặt với nhau nhờ cấu trúc nắp đực - cái để tránh dò khí ra bên ngoài. Màng áp điện PZT được gắn phía trên buồng bơm nhờ keo epoxy để tạo buồng bơm kín (hình 2c). Kích thước của thiết bị mẫu được chế tạo có kích thước 22mm × 22mm × 2,5mm (dài × rộng × dày) để phù hợp với kích thước màng áp điện PZT đường kính 20mm của công ty Murata có sẵn trên thị trường [10].

Tám dây nhiệt điện trở bằng Tungsten (W) được gắn được gắn trong bốn buồng cảm biến để xác nhận sự tồn tại của dòng lưu chất và cho biết đặc tính thiết lập của dòng lưu chất (hình 2c). Chiều dài dây nhiệt điện trở là 3,0mm, đường kính 10μm và TCR là 4500ppm/°C.



Hình 3. Mach tao dao đông cho màng áp điện PZT



Hình 4. Thiết lập thí nghiệm: các dây nhiệt điện trở được nối với nguồn DC vào các chân cắm của cảm biến thông qua board mạch kết nối tới nguồn DC; màng PZT được nối tới mạch dao động

Màng áp điện PZT được kích hoạt bởi mạch dao động tác giả tự chế tạo dựa trên IC-XR2206CP cho ra các dạng xung khác nhau như xung sin, vuông, tam giác với giải tần số thay đổi từ 100Hz đến 20kHz và biên độ đến 10V đỉnh - đỉnh (hình 3). Dòng điện một chiều dùng để đốt nóng dây nhiệt điện trở được cung cấp bởi nguồn DC của hãng

KENWOOD PW18-1.8AQ. Tín hiệu điện áp tương tự đầu ra trên dây nhiệt điện trở được lấy trên các chân đầu ra gắn trên thân thiết bị và được đưa vào kênh đầu vào thiết bị chuyển đổi tương tự số NI9234. Tín hiệu điện áp này được phân tích trên phần mềm SignalExpress (nền LabView).

Thiết lập thí nghiệm đo tín hiệu trên dây nhiệt điện trở được minh họa trong hình 4.

3.2. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

3.2.1. Thời gian thiết lập của dòng lưu chất

Với thí nghiệm kiểm tra đặc tính dòng lưu chất như mô tả ở phần trước, các kết quả đo thể hiện qua mức thay đổi điện áp của dây nhiệt điện trở khi có dòng lưu chất xuất hiện hay dòng lưu chất thay đổi theo tần số hoạt động của màng PZT.



Hình 5. Quan hệ giữa thời gian thiết lập của dòng lưu chất với tần số hoạt động khác nhau của màng dao động PZT diaphragm tại các mức dòng đốt nóng dây nhiệt điện trở khác nhau khi điện áp trên PZT là 10V

Hình 5 cho thấy mối quan hệ giữa thời gian thiết lập liên quan tới tần số dao đông khác nhau của màng PZT tai các mức dòng điện đốt nóng dây nhiệt điện trở khác nhau. Thời gian thiết lập của điện áp ra trên dây nhiệt điện trở được vẽ trong hình 5 là tính cho dây ở vi trí cách khe khí vào dx = 2,5mm. Nó cho ta thấy thời gian thiết lập dòng lưu chất càng nhỏ khi tần số dao đông của màng áp điện PZT ở khoảng gần tần số công hưởng. Tai mức dòng điện đốt nóng dây nhiệt điện trở là 60mA, thời gian thiết lập đạt tới giá tri nhỏ nhất tại tần số 5,0kHz - là tần số gần nhất với tần số cộng hưởng 5,1kHz của PZT [11]. Hình 5 cũng chỉ ra rằng thời gian thiết lập hầu như không bi ảnh hưởng bởi dòng điện đốt nóng vì điều này có thể giải thích dựa vào tần số rung lớn của dây nhiệt điện trở. Hiệu ứng làm mát của dòng tia lưu chất trên dây nhiệt điện trở phụ thuộc vào tần số hoạt động của dòng tia lưu chất và tần số rung của dây nhiệt điện trở; tuy nhiên tần số của rung dây nhiệt điện trở rất lớn. Thực vậy, tần số rung của dây nhiệt điện trở lên tới $f \sim 1000 f_{a}$, trong đó $2\pi f_a \approx 40 D_f/(2l)^2$ [12]. Đối với dây tungsten dùng trong thí nghiêm này, chiều dài dây / = 3 mm và độ khuếch tán nhiệt là $D_f \sim 6.5 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ thì tần số dao động của dây nhiệt điện trở này lên tới khoảng 46kHz. Tần số dao động này lớn hơn rất nhiều tần số của dòng lưu chất - bằng với tần số làm việc của màng PZT. Do đó, sự phụ thuộc của thời gian thiết lập vào tần số hoạt động của màng PZT như hình 5 chứng minh cho ta thấy rằng dòng lưu chất chuyển động

qua buồng cảm biến bị tác động bởi tần số hoạt động của màng PZT chứ không phải là dòng đốt nóng và dòng lưu chất xuất hiện nhanh nhất khi bơm hoạt động tại tần số cộng hưởng hoặc rất gần tần số cộng hưởng.

3.2.2. Khả năng ứng dụng làm cảm biến vận tốc góc

Với hoat động và đặc tính thời gian thiết lập của dòng khí như chứng minh ở phần a), thiết bị do tác giả chế tạo được có thể dùng như một cảm biến vận tốc góc lưu chất. Phần kiểm tra này được thực hiện bằng cách đặt thiết bi thẳng đứng ở rìa bàn xoay có tốc đô quay thay đổi. Khi quay, do lưc Coriolis, dòng khí sẽ bi lêch trong buồng cảm biến song song với mặt phẳng bàn xoay gây làm cho vận tốc dòng khí chạy qua dây nhiệt điện trở được đặt ở phía giữa của buồng cảm biến bi châm lai. Điều này làm cho nhiệt đô trên dây nhiệt điện trở thay đổi tức là điện trở dây thay đổi dẫn tới điện áp thay đổi trên dây nhiệt điện trở. Còn tại buồng cảm biến vuông góc với mặt bàn xoay, dòng khí chỉ xoay quanh truc của nó mà không bi lệch đi nên không làm thay đổi nhiệt độ trên dây nhiệt điện trở, tức là điện áp ra gần như không thay đổi. Điều này được chứng minh bằng kết quả thí nghiêm trên hình 6.

Hình 6 thể hiện điện áp ra thay đổi trên hai dây nhiệt điện trở đặt tại buồng cảm biến song song mặt bàn xoay (kênh chiều ngang) và đặt tại buồng cảm biến vuông góc với mặt bàn xoay khi cảm biến được quay bởi bàn xoay. Khi đĩa quay với tốc độ tăng dần thì điện áp trên dây nhiệt điện trở của kênh nằm ngang cũng tăng và ngược lại. Tỷ lệ thay đổi của điện áp được tính bằng thay đổi của điện áp trên một độ của góc quay, tức là 0,104µV·deg⁻¹s cho kênh nằm ngang. Ngược lại, điện áp ra của dây nhiệt điện trở trong kênh dọc nhỏ hơn rất nhiều với tỷ lệ thay đổi là 0,006µV·deg⁻¹s. Tỷ lệ điện áp thay đổi nhỏ hơn của dây nhiệt điện trở của kênh dọc so với kênh ngang cho thấy rằng dòng khí trong kênh dọc là giống nhau quanh trục của nó và vì thế dòng khí quay tròn quanh trực fua.



Hình 6 . Mô tả thời gian thực của điện áp ra trên các dây nhiệt điện trở ở kênh ngang và kênh dọc trục đĩa quay khi thiết bị mẫu được đặt ở rìa đĩa quay. Dòng điện qua dây nhiệt điện trở là 60mA và điện áp trên màng PZT là 10V

4. KẾT LUẬN

Bài báo này chứng minh bằng thí nghiệm khả năng tạo dòng khí tuần hoàn liên tục bên trong thiết bị lưu chất đóng kín từ màng dao động PZT được kích hoạt từ mạch dao động do tác giả tự chế tạo - có thể thay đổi biên độ và tần số. Hơn nữa, với dòng khí tuần hoàn bên trong, thiết bị này hoàn toàn có thể ứng dụng làm cảm biến vận tốc góc lưu chất như thí nghiệm đã kiểm chứng. Kết quả nghiên cứu cho chúng ta cơ sở để có thể phát triển cảm biến vận tốc góc lưu chất đơn giản, giá thành rẻ đo được nhiều trục khác nhau.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2015.22

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. M. Krishnan, N. Agrawal, M. A. Burns, and V. M. Ugaz, *"Reactions and fluidics in miniaturized natural convection systems.,"* Anal. Chem., vol. 76, no. 21, pp. 6254–65, Nov. 2004.

[2]. S.-I. Ohira and K. Toda, "Miniature liquid flow sensor and feedback control of electroosmotic and pneumatic flows for a micro gas analysis system.," Anal. Sci., vol. 22, no. 1, pp. 61–65, 2006.

[3]. X. Li, G. van der Steen, G. W. K. van Dedem, L. A. M. van der Wielen, M. van Leeuwen, W. M. van Gulik, J. J. Heijnen, E. E. Krommenhoek, J. G. E. Gardeniers, A. van den Berg, and M. Ottens, *"Improving mixing in microbioreactors,"* Chem. Eng. Sci., vol. 63, no. 11, pp. 3036–3046, Jun. 2008.

[4]. A. P. Sudarsan and V. M. Ugaz, *"Fluid mixing in planar spiral microchannels.,"* Lab Chip, vol. 6, no. 1, pp. 74–82, Jan. 2006.

[5]. V. Studer, A. Pepin, Y. Chen, and A. Ajdari, "An integrated AC electrokinetic pump in a microfluidic loop for fast and tunable flow control.," Analyst, vol. 129, no. 10, pp. 944–949, 2004.

[6]. L. Meyer, S. Dasgupta, D. Shaddock, J. Tucker, R. Fillion, P. Bronecke, L. Yorinks, and P. Kraft, *"A silicon-carbide micro-capillary pumped loop for cooling high power devices,"* in Ninteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2003., pp. 364–368.

[7]. B. L. Smith and a. Glezer, *"Jet vectoring using synthetic jets,"* J. Fluid Mech., vol. 458, pp. 1–34, May 2002.

[8]. V. T. Dau, T. Otake, T. X. Dinh, D. V. Dao, and S. Sugiyama, "A multi axis fluidic inertial sensor," in Proceedings of IEEE Sensors, 2008, vol. 1, pp. 666–669.

[9]. Dau, V.T.; Dinh, T.X. Numerical study and experimental validation of a valveless piezoelectric air blower for fluidic applications. Sens. Actuators B Chem. 2015, 221, 1077–1083

[10]. Manufacturing, L.M. *Piezoelectric Diaphragms*; Murata Manufacturing Co., Ltd.: Kyoto, Japan, 2016. Available online: http://www.murata.com/ensg/products/sound/diaphragm

[11]. B.N.Phong, P.V.Tung, P.T.Hoa, "Use of PZT diaphragm for micro-pump to create continous flows in the fluidic milimeter-scale device", in Journal of Science & Technology - Hanoi University of Industry, No.38, 02/2017

[12]. J. Li, "Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements," Meas. Sci. Technol., vol. 15, no. 9, pp. 1835–1847, 2004

[13]. Hoa, P.T.; Dinh, T.X.; Dau, V.T. *Design Study of Multidirectional Jet Flow for a Triple-Axis Fluidic Gyroscope*. IEEE Sens. J. 2015, *15*, 4103–4113.