研 究

力平衡型ノズルフラップ式電空圧力変換器空気圧回路の特性解析*

(第一報 ノズルフラップ間隙対出力圧特性)

荒 木 獻 次**, 陳 乃 克**
石 野 裕 二**Characteristics of a Force-balance Nozzle-flapper Type
Pneumatic Pressure Control Proportional Valve

——Part 1. Output Pressure versus Nozzle-Flapper Clearance Characteristics——

Kenji ARAKI, Naiké CHEN and Yuji ISHINO

Many kinds of nozzle-flapper type pneumatic pressure control proportional valves are in use. This paper describes the results of experiments and theoretical analyses regarding the characteristics of the valve pneumatic circuit. It was found that the characteristics of the output pressure versus the nozzle flapper clearance has a switching point as a relay. As it has a direct relation with valve linearity, this phenomenon has been studied experimentally and theoretically for various valve parameters. A way for choosing the optimum nozzle-flapper clearance is suggested from the results presented in this paper.

Key Words: Pneumatic pressure control valve, Static characteristics, Nozzle-flapper, Proportional valve, Force balance, Linearity, Switching.

1. ま え が き

近年, FA化の進み中で, 空気圧制御もその一翼を担ってきており, とりわけ電気信号で圧力や流量を比例制御する電空変換器(比例弁)の需要が高まっており, いろいろな種類のものが開発されている。そのうちの一つである電空圧力変換器ではパイロット部分にノズルフラップ機構を用い, 主弁部分に普通の減圧弁の主弁部分を用いたものが多い。そのノズルフラップ機構のノズル背圧を制御する方法として, ノズルフラップ間隙を制御する方式とフラップに作用する電磁力を制御してノズル噴流力(ノズル孔の静圧による力も含む, 以下同様)と平衡させる方式とがある。また, その圧力源を供給圧室とする方式と出力圧室とする方式とがある。ノズルフラップ機構について負荷容器内空気の状態変化に着目した応答特性の解析が行われている¹⁾。減圧弁については, ノンブリード形空気圧パイロット弁の入出力特性及び出力流量の静特性に関する研究が行われている²⁾。また, 力平衡型のノズルフラッ

パ機構を用いた電空減圧弁の動特性解析がなされており³⁾, ノズルフラップ機構の圧力源はの場合供給圧室となっている。

本論文ではノズルフラップ機構の空気圧源が出力圧室となっている力平衡型電空圧力変換器(以下変換器と呼ぶ)を研究対象とする。この変換器は能動的なフィードバック回路を用いていないのでそれだけ信頼性が高く, しかもかなりの精度を有している。そのノズルフラップ間隙に対する出力圧力はリレーのように切換わる特徴ある特性を有しており, この特性は変換器の直線性と深く関係している。ここでは, まず, 変換器空気圧回路の基礎式を線形化して得た伝達関数にRouthの安定法を適用し, 空気圧回路の安定性を調べ, リレー特性の存在することを明らかにし, 次いで, 変換器の諸パラメータがこの切換わり特性に及ぼす影響について理論と実験の両面より解析し, 比較・検討する。

2. 供試変換機の構造及び動作原理

本研究で研究対象としている変換器の構造をFig. 1に示す。上部の電気部分は, 電気的受動回路, マグネット, フラップの取り付けられたコイルからなる。このフラップは極めて弱いばね(ばね定数 K_f)で支持され

*平成6年4月18日 原稿受付

**埼玉大学工学部機械工学科

(所在地 〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

たつて、次の仮定を設ける：(1)供給圧 p_s は一定とする。(2)排気圧 p_e は大気圧に等しい。(3)各絞りの流れは断熱と考える。(4)各室内空気の温度は293Kとする。(5)各絞りの流量係数は一定とする。また、ここでは出力負荷流量を零として解析を行う。

主弁、固定オリフィス、排気弁及びノズルフラップ部の各絞りを通る質量流量 W は式(1)のようになる^{4),5)}。

$$w = \begin{cases} CA \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \frac{\rho_d p_u}{p_d} \sqrt{\left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} & (1 \geq p_d/p_u > 0.5283) \\ CA \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \frac{\rho_d p_u}{p_d} \sqrt{\frac{\kappa-1}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}}} & (0.5283 \geq p_d/p_u > 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 C と A はそれぞれの絞りの流量係数と開孔面積（流路の最小断面積）である。圧力 p_o と空気密度 ρ の添え字 u 及び d は各絞りの上流側及び下流側を表す。

主弁とディスクに加わる力の静的つり合いを考える際、排気弁が閉じている場合（排気弁が閉で、主弁が閉または開の場合）と開いている場合（排気している場合）に分けて考える必要があるが、ここでは前者の場合を考える。また、 x , y , z は主弁の開く方向即ち下向きを正とすると、主弁に作用する力のつり合い式は $f_s = K_n(y_0 - y) - K_s(z_0 + z) + A_{pn}(p_n - p_e)$

$$- A_v(p_o - p_e) - A_s(p_s - p_o) + M_v g - f_f \quad (2)$$

となる。出力負荷流量が無い場合、主弁に及ぼす流体力 f_f は無視できる⁶⁾。また、排気弁が閉じているとき $y = z$ とおける。以上の事柄を考慮すると主弁に働く力の合力 f_s は式(3)のようになる。

$$f_s = A_{pn}p_n - p_o(A_v - A_s) - z(K_s + K_n) + f_{s0} \quad (3)$$

ここで f_{s0} は、式(4)で示すように入力電圧 $e = 0$ V、負荷流量 $w_l = 0$ (NL/min) の場合の定数項である

$$f_{s0} = M_v g - K_s z_0 + K_n y_0 - A_{pn}p_{n0} - A_v p_{o0} - A_s p_{s0} \quad (4)$$

定常状態においては $f_s = 0$ である。よって主弁変位 z は式(5)で与えられる。

$$z = \frac{f_{s0} + A_{pn}p_n - p_o(A_v - A_s)}{K_s + K_n} \quad (5)$$

フラップに作用する力のつり合いを考慮するとき、入力電圧が一定の場合、下向き電磁力 f_e は一定と考えられる。また、 x_{nf}/D_n の値は0.06より小さいのでフラップに及ぼす噴流 f_{nz} はほぼ $A_{noz}(p_n - p_e)$ に比例すると考えられる⁷⁾。そしてフラップ部の力のつり合い式は次式となる。

$$f_e - f_{nz} + M_f g + K_f(x_{n0} - x_{nf}) = 0 \quad (6)$$

式(6)を変形するとノズルフラップ間隙 x_{nf} は式(7)で与えられる。

△ x_{nf} and △ z are the increments when the steps are executed

Fig. 2 Flowchart for numerical calculation

$$x_{nf} = x_{n0} + \frac{f_e + M_f g - A_{noz}(p_n - p_e)}{K_f} \quad (7)$$

各部を通過する質量流量は、主弁、固定オリフィスおよびノズルに対して、それぞれ

$$w_s = w_s(p_s, p_o, A_{sv}) \quad A_{sv} = A_{sv}(z, D_s) \quad (8)$$

ただし、

$$A_{sv} = \pi r_s^2 \frac{(z + z')^2 + r_s^2 - r_o^2}{\sqrt{(z + z')^2 + r_s^2}}$$

ここでは、 r_o を主弁底面の半径0.00152[m]、 r_s を主弁の半径0.00146[m]、 z' を主弁底面の平面から弁座までの距離0.0004[m]とする。

$$w_o = w_o(p_o, p_n, A_{ori}), \quad A_{ori} = D_o^2 \pi / 4 \quad (9)$$

$$w_n = w_n(p_n, p_e, A_{nf}), \quad A_{nf} = D_n \pi x_{nf} \quad (10)$$

で与えられる。式(8)~(10)は式(1)の関数を表す。出力負荷流量 $= 0$ かつ p_s , D_s , D_o および D_n を一定とすると、主弁を通る流量はすべて固定オリフィスを経てノズルから噴出するので、定常状態では次の式が得られる。

$$w_o(p_o, p_n) = w_s(p_o, z) \quad (11)$$

$$w_n(p_n, x_{nf}) = w_o(p_o, p_n) \quad (12)$$

空気圧回路の定常状態のシミュレーションにおいては、基礎式(1)~(12)を用いてFig. 2に示すフローチャートに従って、収束計算により数値解析を行った。

3.3 空気圧回路の安定性（リレー特性）

Fig. 3に示すように、変換器の上部の電気部分を取外し、ノズルに対向させてマイクロメータを固定し、ノズルフラップ間隙 x_{nf} を変化させたときの出力圧 p_o

$$+ \left\{ \begin{aligned} & (B_{pnzd}B_{poS} + B_{pnw}B_{wopos}B_z) \\ & \times [B_{pow}B_{wsz} + B_{pozds}]B_{pn} - B_{pow}B_{wopn}B_z] \\ & - [s - B_{pnw}B_{wopn} + B_{pnw}B_{wnpn}]B_z + B_{pnzd}B_{pnS}] \\ & \times [s - B_{pow}B_{wspo} + B_{pow}B_{wopo}]B_z \\ & + (B_{pow}B_{wsz} + B_{pozds})B_{po}] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$A_6S^6 + A_5S^5 + A_4S^4 + A_3S^3 + A_2S^2 + A_1S + A_0 = 0 \quad (23)$$

標準値 (3.1 主な記号に示した値) を用い, 入力 of x_{nf} を変化させて, Routh の安定判別を行った結果の二例を Table. 1 に示す.

すなわち, 式(23)は $x_{nf} = 24 \mu\text{m}$ では不安定, $x_{nf} = 25 \mu\text{m}$ では安定であり, これらの間に切り換え点 x_{sw} が存在することが分かる. これを詳しく調べると, $x_{nf} < 24 \mu\text{m}$ の場合, $p_o < p_{HI}$ なる初期条件では式(23)は不安定であり, p_o は p_{HI} に跳躍する. これは, 伝達関数 z/x_{nf} も同じ分母すなわち同じ特性方程式(23)を有し, 不安定領域では z が主弁ストローク一杯に急激に開き切り, 出力圧 p_o も p_{HI} に跳躍することになる.

$x_{nf} > x_{sw}$ では, p_o の初期条件に関係なく, 式(23)は安定であり, p_o は p_{Lo} に漸近収束する.

この変換器の信号は, $e \rightarrow f_e \rightarrow f_o$ とバランスする $f_{nj} \rightarrow p_n \rightarrow p_o$ と伝達され, フィードバックを持たないので矢印両側の信号間の直線性が変換器の直線性に直接関係

Table. 1 Coefficients and the stability of eq. (23)

x_{nf}	$24 \mu\text{m} (< x_{sw})$	$25 \mu\text{m} (> x_{sw})$
A_6	0.001728	0.001728
A_5	6.798E+4	6.798E+4
A_4	3.2E+8	3.2E+8
A_3	3.8E+11	3.8E+11
A_2	2.5E+11	2.5E+11
A_1	2.2E+14	2.2E+14
A_0	3.877502E+13	3.877501E+13
Stability	Unstable	Stable

Fig. 6 Switching characteristics

する. ここで, 最も直線性が崩れ易いのは f_{nj} と p_n の関係であり, 座の小さいノズルを用いた場合, x_{nf} が D_n に比べて極めて小さいこととその変化量が小さいことが直線関係を保つために必要である (Fig. 12 参照). リレー特性は x_{sw} が D_n に比べて極めて小さく, しかも, x_{nf} は x_{sw} の $\pm 2 \mu\text{m}$ ぐらいの変化での p_o の p_{Lo} から p_{HI} に対応する. したがって f_{nj} と p_n とは良好な直線関係がえられ, リレー特性は変換器の直線性に関係する重要な特性となっている.

4. 結果及び考察

4.1 ノズルフラップ間隙対出力圧特性

Fig. 3 の装置を用いてマイクロメータのスピンドルを十分緩やかに回転し, ノズルフラップ間隙 x_{nf} と出力圧 p_o の関係を X-Y レコーダにより記録した. Fig. 4 は弁の各パラメータを $r_{dsk} = 0.816$, $D_o = 0.4 \text{ mm}$, $D_n = 1.4 \text{ mm}$, $D_s = 2.92 \text{ mm}$, $p_s = 500 \text{ kPaG}$ とした場合 (標準値) の実験結果である. 固定オリフィスの直径 D_o のリレー特性に及ぼす影響を実験とシミュレーションの両面より求めた結果を Fig. 6 に示す. 実践は実測値, 点線は対応する理論値である. D_o が小さくなると x_{sw} も小さくなるのが分かる. 理論値は実測値とかなりよく一致している.

4.2 諸パラメータの切り換えりに及ぼす影響

四種類のディスク面積比 r_{dsk} を用いた場合の固定オリフィスの断面積 A_{ori} に対する x_{sw} 特性を Fig. 7 に示す. 各記号は実験結果, 実践は理論解析結果を示す. この図から $x_{sw} - A_{ori}$ 特性が直線関係を有していること, また, r_{dsk} が増加すると x_{sw} が減少することが分かる. r_{dsk} をパラメータとした, $x_{sw} - A_{noz}$ 特性の実験と理論解析結果を Fig. 8 に示す. x_{sw} は A_{noz} に反比例していること, また, $x_{sw} - A_{ori}$ 特性と同様に, r_{dsk} が増加すると x_{sw} が減少することを示している. Fig. 8 のデータを横軸にノズル孔径 D_n , 縦軸に切り換えりに関するノズルフラップ間隙 $\pi \cdot D_n \cdot x_{sw}$ の最小環状面積をとって描きかえると Fig. 9 が得られる. ディスク面積比が一定の場合, この最小環状面積はノズル孔径 D_n の大きさとは関係なく, ほとんど一定であることが分かる.

また, $\lambda \equiv \pi \cdot D_n \cdot x_{sw} / A_{ori}$ とディスク面積比 r_{dsk} の関係を求めたのが Fig. 10 である. シミュレーション結果によると λ はノズルの直径とは無関係 (4 本の線は重なる) で, ディスク面積比の変化に対して直線的に変化する. 実験値はシミュレーション結果とほぼ傾向が一致している.

また, 主弁ばね及びディスクばねのばね定数の切り換えりに及ぼす影響は極めて小さいので, ここでは

Fig. 13 p_o and x_{nf} versus v_i characteristics

4.4 入力出力特性に関する最適切り換え点

Fig. 13は入力電気信号 e を定格(0～5V)範囲で変化させた場合の出力圧 p_o ならびにノズルフラップ間隙 x_{nf} の変化の様子の実測値と理論解析結果を示す。図中の△印は入力を増加させた場合、▽印は入力を減少させた場合の実験結果を表している^{8),9)}。この結果から、入力 e の全領域に対して、 p_o は40kPaG(入力0のときの設定値)から200kPaGまで変化しているが、ノズルフラップ間隙は x_{swop} 近傍で僅か3～4μmしか変化していないことが分かる。このように、ノズルフラップ間隙が入力の全範囲に対してほとんど変わらなると、 $f_{nj}/(p_n \cdot A_{noz})$ はほとんどノズル背圧 p_n に比例することになり、変換器の直線性が良くなる。

5. あとがき

本報では力平衡式ノズルフラップ型電空変換器の空気圧回路特性の理論解析と実験を行い、以下のことが明らかとなった。

- (1) 関係する基礎式を線形化して導いたノズルフラップ間隙から出力圧までの伝達関数の安定判別結果より、両信号間にはリレー特性が存在する。
 - (2) 変換器空気圧回路の諸元がリレー特性の切り換えりに点に及ぼす影響を理論的に求め、実験により確めた。
 - (3) 切り換えり点は固定オリフィス断面積に比例し、ノズルノ開孔断面積に反比例する。
 - (4) 切り換えり点については、変換器の入力出力特性の直線性を最も良くする最適切り換えり点が存在する。
- 終わりに、本実験と理論解析にご協力いただいた元本学大学院生石井広宜氏(現在、日本ビクター株式会社勤務)、岡本英司氏(現在、NOK株式会社勤務)に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 香川・清水・森田：ノズルフラップを入力部とするノンブリード形空気圧パイロット弁負荷容量系の動特性に関する研究，計測自動制御学会論文集，21-5，58/64 (1985)
- 2) 香川・花塚・森永：ノンブリード形空気圧パイロット弁の入出力及び出力流量静特性，計測自動制御学会論文集，16-3，427/433 (1980)
- 3) 千歳・上松・峯村：電空減圧弁の特性解析，昭和63年秋季油空圧講演会論文集，89/92 (1988)
- 4) Liepmann, H.M. and Roshoko, A., Elements of Gas Dynamics. Syodenn, Tokyo, 52/64, (1979)
- 5) 日本油空圧学会：油空圧便覧，425/430, (1989)
- 6) 荒木・湯室・陳・石野：電空圧力変換機の空気圧回路の動特性解析，平成3年春油空圧講演会論文集，65/69, (1991)
- 7) 荒木：空気圧ノズルフラップ機構におけるノズル噴流，昭和55年春油空圧講演会論文集，45/48 (1980)
- 8) 荒木・湯室・陳・石野：電空圧力変換器の構成要素の特性解析，平成4年春油空圧講演会論文集，82/92 (1992)
- 9) Araki, K., Yumuro, A., Chen, N., and Ishino, Y: Static Characteristics of a Pneumatic Pressure Control Proportional Valve with Nozzle-flapper Mechanism, Fluid Power of Second JHPS, 719/724, (1993)