高速デジタル電気油圧変換器に関する研究* (積層 PZT 素子を用いたポペット形オン・オフ弁)

横 田 真 一^{*1}, 堆 浩 太 郎^{*2}

Fast-Acting Electrohydraulic Digital Transducer (Poppet-Type On-Off Valve by Making Use of a Multilayered Piezoelectric Device)

Shinichi YOKOTA and Kotarou AKUTU

Intelligent control of an electrohydraulic servo system can be realized comparatively easily by introducing microcomputer. To realize intelligent control systems, it is important to obtain a digital control valve with high transducer-actuator switching speed performance. In the case of a small valve opening, a poppet-type valve has some advantages compared to a spool-type one. The aims of this study are to propose a high-speed displacement control method for the valve poppet and to develop a high-speed digital valve whose switching time is within 100 μ s. By introducing feed-forward control and providing some improvements, a poppet-type on-off valve with a high-speed switching response within 70 μ s is developed. In application, a two-stage digital servo valve, whose second stage of the spool valve is driven by the high-speed poppet-type on-off valves, is devised.

Key Words: Fluid Power Systems, Digital Valve, PZT, Poppet, Electrohydraulic Servo, Control Device, On-off Valve

1. ま え が き

大パワー高速サーボ系には、電気油圧方式が適している。最近、この分野においてマイクロコンピュータによる制御が用いられるようになりつつある。これに対応してコンピュータによるインテリジェント制御の利点を最大限に引き出すためにはコンピュータのデジタル出力をそのまま入力として高速に応答しうる電気油圧変換器の開発が不可欠である。高速オン・オフ弁を用いて流体パルスが発生させてそれにより油圧アクチュエータへの流量や圧力を制御することができる。この方法は、高速性、コンピュータとの結合性にすぐれており、作動油中のごみに対しても強いなどの利点がある。

このような弁制御を円滑に行うには、弁の切換えをより高速に行う必要がある。これに関する従来の研究として、オン・オフ弁については田中らによる電磁弁などの報告⁽²⁾⁽³⁾および Lühmann らによる圧電素子によるもの⁽⁴⁾があるが、速いものでも切換え時間 0.5 ms 程度であり高速デジタルサーボ系を構成するには十

分な速さであるとは言えない。

前報⁽¹⁾においては、従来の高速弁の壁を破ることを試みて、スプール形オン・オフ弁の駆動部に積層形 PZT 素子を用いて、その素子の能力を最大限に引き出すため、フィードフォワードの制御などにより弁変位が 1 kHz 方形波入力に追従しうる高速デジタル弁の試作に成功している。しかし実際に負荷を動作させるにあたり、変位が微小である PZT 素子を用いてスプール形オン・オフ弁を構成した場合には漏れなどによる構造上の問題が避けられない。

本研究では、ポペット形オン・オフ弁に PZT 素子を用いて弁変位が 2 kHz を超える方形波入力に追従できる超高速デジタル電気油圧変換器を開発すること、およびこの弁を応用して、この高速デジタル電気油圧変換器を初段とする、大流量を高速に制御できる 2 段形デジタル入力サーボ弁の試作を目的としている。

2. 試作したポペット形電気油圧変換器の構成

デジタル弁の構成において、スプール形は、四方弁などを構成しやすい、静圧の影響を受けにくいという利点がある。しかし弁変位が小さい場合にはスリーブ、スプール間にある数 μ m の半径方向すきまによる

* 原稿受付 平成元年 8 月 28 日。

^{*1} 正員、東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町 4259)。

^{*2} 正員、(株)キャノン (〒146 東京都太田区下丸子 3-20-2)。

漏れが問題となる。これに対してポペット形は、ポペットをパルプシートに密着させることにより、制御オリフィス面積を確実に零に制御できるなどの点から弁変位が小さい場合にはポペット形⁽⁵⁾のほうが有利と考えられる。

図1(a)に本研究で試作したポペット形オン・オフ弁の概略を示す。この弁の特徴は1組のオン・オフ弁を2個直列に対向させてつないだ点にあり、構成上2位置三方弁となっている。この構造にすることにより、この形の2組のオン・オフ弁で(すなわち4個の積層

(a) ポペット形オン・オフ弁概略

(b) ポペット形状

図 1

図 2 積層 PZT 素子形状

PZT 素子で)図12に示すように四方弁に対応する構成を簡単に実現できる。また供給圧に基づく静圧による力が直接弁にかかることを避けることができる。ポペットの直接駆動に用いた積層 PZT 素子の形状は図2に概略を示すように、圧電素子の一つである PZT を層状にはりあわせたもので 100 V の印加電圧をかけると無負荷時に 15 μm 伸び、また出しうる力は最大で 850 N である。

この弁は2個の積層形 PZT 素子により両側から差動で直接駆動される。片方の PZT 素子が弁開時に制御オリフィスの開度が 15 μm となるように位置を調整して固定している。

弁の機械的固有振動数は高いことが望ましく、少なくとも 2 kHz を十分に超える必要がある。前報⁽¹⁾において、PZT 素子とスライダの固定において接着部の剛性の低さが系の共振周波数を著しく下げることが明らかとなっており、本研究でもエポキシ樹脂系接着剤にアルミナを混合したものを用いて、剛性を十分に高めて PZT 素子とスライダを接着している。

またポペットはできるだけ軽量化する必要があるがこれがパルプシート(ケース)に、高速で衝突することによって変形することも考えられるので、ポペット、パルプシートには硬い材質のものが望ましい。試作上の理由から本研究ではパルプシートには S 45 C, ポペットには軽量でかつ鋼鉄なみに硬い超々ジュラルミンを用いた。これによりポペットと駆動素子による系の機械的固有振動数は図6に示すように S 45 C の場合より 1.4 倍程度(8.7 kHz)に高めることができた。

ポペットの変位の計測には非接触形磁気抵抗素子変位計を用いている。図1(b)にポペットのオリフィス部形状の概略を示す。ポペット弁はポペット径 20.2 mm, 弁半頂角 $\phi 45^\circ$, 受圧面積 $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, ポペット質量 0.012 kg であり、また弁シート部の角はシャープエッジ状とした。

図 3 積層 PZT 素子駆動回路

図 4 積層 PZT 素子印加電圧記録波形例

3. ポペット変位の制御

3.1 ポペット変位駆動系 高速に弁開度をオン・オフさせるためその駆動アンプもオン・オフ状にキャパシタンス負荷としての PZT 素子両端の高印加電圧を制御する必要がある。本研究では、スイッチング特性にすぐれたエンハンスメント形の NMOSFET (2 SK 312) を用いて、図 3 に示す駆動回路を試作している。0～5 V の方形波状入力が入加されると、これはまず 0～8 V の方形波状信号に変換され、FET B 2 のゲートソース間に加えられる。またこの信号はフォトカプラ (6 N 136) を通り反転した (位相が半周期ずれた) 信号となり、FETB 2 制御信号とは絶縁されて FETB 1 のゲートソース間にも同時に加えられる。高速に大電流を供給するため、直流電源のほかに数十 μ F の高応答大容量コンデンサを入れ、FETB 1 と FETB 2 を交互に高抵抗状態と導通状態にすることにより、PZT 素子 B を 0～100 V に高速でアクティブに充放電する。2 個の PZT 素子を差動動作させるため、0～8 V の信号を反転させて、同じように PZT 素子 A も高速に充放電している。これより以後、入力信号に同期する PZT 素子側を A とし、反転して

図 7 フィードフォワード的制御原理

図 8 ポペット変位駆動システム

図 5 ポペット形オン・オフ弁駆動システム

図 6 ポペット変位記録波形例

図 9 ポペット変位記録波形例

いる PZT 素子側を B とする。図 4 にこの駆動回路に方形波を入力したときの A 側の PZT 素子の印加電圧波形を示す。これらの工夫により、A 側方向への動きを正として、立上り時間、立下り時間はいずれも約 $24 \mu\text{s}$ ときわめて速い応答を得ることができた。

図 5 に示すようにポペット形オン・オフ弁を構成し、その動特性を検討した。図 6 (a), (b) にステップ波形を入力したときのポペット変位の過渡応答結果を示す。ポペットの過渡的な動きをよく観察できるように図 6, 9, 10 においてはポペットとバルブシートの間隔は $15 \mu\text{m}$ より大きくとってある。図 6 (a) は駆動回路にステップ波形(立上り)を入力したときの A 側の変位計で測定したポペットの変位と B 側の変位計で測定したポペットの変位である。また図 6 (b) はステップ波形(立下り)を入力したときの応答である。A と B において若干の違いはみられるものの固有振動数、過渡振動ともによく一致している。

ステップ状入力に対するポペット変位は立上り時間、立下り時間ともに $60 \mu\text{s}$ ときわめて速い応答を示すが、過渡応答(固有振動数 8.7 kHz)の振動減衰性はきわめて悪い。

3.2 ポペット変位のフィードフォワード制御
本研究のように、システムがオン・オフの二つの状態

(a)

(b)

図 10 方形波入力ポペット変位記録波形例

しかとらず、目標値があらかじめわかっている場合には、フィードフォワード的に入力波形を工夫してやることにより速やかに整定できる可能性がある。前報⁽¹⁾において、入力波形を工夫するフィードフォワード的制御が振動的な応答の改善に有効であることが明らかになっている。その原理を図 7 に示す。制御するパラメータは、 t_d, t_{pu} および h_p であるが、この制御をマイクロコンピュータで行うことを考慮しパラメータは t_d, t_{pu} の二つを用いる。図 8 に示すように駆動回路の前段にフィードフォワード入力波形生成回路を設け希望の入力波形が得られるようにしている。

図 11 スプール弁形状

図 12 スプール形デジタルサーボ弁

図 13 変換器状態の組合せ

図9(a), (b)にフィードフォワード入力波形工夫による制御結果を示す。行過ぎ、過渡振動が十分おさえられている。このときの $t_d=11\mu\text{s}$, $t_{pu}=35\mu\text{s}$ および $h_p=2.8\text{V}$ とした。

図10(a), (b)に1 kHz および 2 kHz 方形波を入力したときのポペットの応答とそれぞれに制御をかけたときのポペットの応答を示す。フィードフォワード的に入力波形を工夫することにより、ポペット変位は2 kHz 方形波入力に追従していることがわかる。

スプール弁を負荷として駆動させるには2組の変換器が必要であるため、もう1組の変換器を作り、ここには示さないがその特性がお互いに同様の特性を示すことを確認している。

4. 試作変換器を用いたデジタル入力サーボ弁

図14 スプール応答記録波形例

図15 圧力応答記録波形例

4.1 デジタル入力サーボ弁のシステム構成

ここで試作した高速デジタル電気油圧変換器を用いた負荷動作の確認を兼ねて、この変換器を後段のスプール駆動に用いたサーボ弁を試作した。図11に本研究で試作したスプール弁の概略を示す。ここで、スプールの質量 0.009 kg , 受圧面積 $5\times 10^{-5}\text{ m}^2$ である。

図12にデジタル入力サーボ弁のシステム構成図を示す。CPUとして6809を用いており、その出力はI/Oポートを通して電気油圧変換器に入力される。供給圧側の電気油圧変換器を添字 u で表し、ドレイン側を添字 d で表す。またスプールの変位は磁気抵抗素子変位計で測定しA-D変換器を通してシステムにとりこまれる。

2組の変換器の状態を、I/Oポートの出力の弁U, Dそれぞれに対応したビットの状態で表現する。組合せは図13に示すように4とおりある。例えば、図13の(b)は次のように表される。

$$(U, D)=(1, 0)$$

この状態は、弁UのA側が開、弁DのA側が閉で、このときスプールは y の正の方向に動く。また(0,

(a)

(b)

図16 スプール変位応答記録波形例

1)はスプールが負の方向に動いている状態である。スピールの停止は(1, 1)あるいは(0, 0)の2とおりの方法で実現できる。

4.2 スプールの応答 図14(a)に弁Uにパルスを入力したときの弁Uのポペットの応答 x_U およびスピールの応答 y を示す。この場合、変換器の状態を初期状態(0, 0)から(1, 0)へ、さらに(0, 0)とすることにより、スプールは y の正の方向に動く。

図14(b)は、弁Dにパルスを入力したときの弁Dのポペットの応答 x_D 、スピールの応答 y である。この場合は、変換器の状態を初期状態(0, 0)から(0, 1)、(0, 0)とすると、スプールは y の負の方向に動く。ここで供給圧は1.7 MPa、パルス幅は2.8 msとした。ポペットはきわめて高速にオン・オフして、それによりスプールが駆動されている。図14の中段の変位 X_U, X_D が15 μm を超えているのは負荷圧力の差がポペットに働いてしまったこととバルブシートの弾性変形のためと考えられる。

また図14(a)のスピールの応答において立上り時に意図する方向と逆方向にわずかに振れる逆応答現象が観測される。図14(b)においては、スピールの応答に逆応答はみられない。

図15(a)は図14(a)と同じ条件のもとで得られたスピールのA側とB側の油室内圧力応答波形 p_A, p_B である。また図15(b)は図14(b)に対応している。どちらの応答もかなり振動的でその周波数は約5.3 kHzである。また図15においてパルス入力時に p_A は一瞬降下し p_B は一瞬上昇している。これがスピールの立上り時、応答が逆に振れる原因となっていると思われる。この圧力波の振動はポペットの制御オリフィスからスプールまでを管路($L=68\text{ mm}$)とした、油の波動現象によると考えられ、そのとき音速を1300 m/sとして周期 $T=0.21\text{ ms}$ 、周波数は4.8 kHzとなり、実験結果に近い値を示す。

図16(a)に変換器を初期状態(0, 0)から(1, 0)、(0, 1)でパルス周波数350 Hz、図16(b)にパルス周波数890 Hzで動作させたときのスピールの応答を示す。供給圧は装置の都合で1.7 MPaと低いため十分

な応答が得られていないがこれについては次報においてさらに検討する予定である。

5. あとがき

本研究では、ポペット形オン・オフ弁を二つ対向させ、その直接駆動に積層形PZT素子を用いた高速デジタル電気油圧変換器を開発した。その素子の能力を最大限に引き出すためにフィードフォワード的制御など高速化のための工夫をおこない、駆動システムを含めた弁の固有振動数8.7 kHzとすることができた。またこれらにより弁の切替時間を70 μs 以内にする事ができ、弁変位が2 kHz 方形波に十分追従するシステムを実現した。

さらに一つの応用としてこの高速デジタル電気油圧変換器2組(ポペット弁として4個)により、2段目のスプール弁を駆動するデジタル入力サーボ弁を試作した。

PZT素子2個直列につなぎ弁開度30 μm とするなどの工夫をおこなえば、十分な流量を高速に制御できる高速デジタル電気油圧変換器となる可能性がある。

最後に、日頃ご教示を賜っている東京工業大学 中野和夫教授に厚く謝意を表す。また実験装置の試作についてご助力いただいた東京工業大学精密工学研究所 附属工場 横塚浩一、和田選の各氏および大学院生 平本健一郎君にお礼申し上げる。またこの研究には一部油空圧機器技術振興財団からの補助を受けたことを記して関係者の方々に謝意を表す。

文 献

- (1) 横田・平本・上西、積層PZT素子を用いたデジタル電気・油圧変換器、油圧と空気圧、20-7(1989)。
- (2) 田中、油空圧のデジタル制御、油圧と空気圧、16-1(1985)、3-11。
- (3) 本間、電気油圧オン・オフ制御系の特性と設計のポイント、油圧と空気圧、13-4(1983)、238-244。
- (4) Lühmann, B., ほか1名、Electrohydraulischer Stelltrieb mit Abtastregelung Einsatz eines Mikrorechners, Aachener Fluidtechnisches Kolloquium, (1982)。
- (5) 大島・市川、ポペット形油圧弁の特性に対する弁形状の影響、機論、52-474, B(1986)、801-806。