高速電磁弁の高速サンプリング PWM 制御方式*

朴 聖 煥^{*1}, 北 川 能^{*2}, 李 珍 杰^{*3}PWM Control Method for High Speed Solenoid Valve Using
High Speed SamplingSung-Hwan PARK, Ato KITAGAWA^{*4} and Jin-Kul LEE^{*4} Department of Mechanical and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

In this study, a new PWM method using high speed sampling strategy based on the presupposition of using a quick driving circuit which can rapidly switching the high speed solenoid valve as quickly as possible is proposed to improve the response precision and to reduce undesirable on-off characteristic in steady state of electro hydraulic servo system controlled by high speed solenoid valve. In addition, the decision method for PWM parameters such as gain, basic period of PWM and sampling time is cleared up. The experimental result shows that it is possible to achieve precise and quiet control without occurrence of limit cycle and without necessary of designing wide range dead band.

Key Words: PWM Control, High Speed Solenoid Valve, High Speed Sampling, Quick Driving Circuit

1. 緒 言

油圧で使われる弁には、大きく分けてアナログ制御方式とデジタル制御方式がある。アナログ制御方式の弁には比例弁、サーボ弁等があり、これらの弁は、応答性や円滑性に優れている反面、価格が高く作動油中の汚れに弱いという特徴を有する。

一方、デジタル制御方式の弁には、ソレノイド弁や高速電磁弁(HSSV)等のオンオフ弁がある。これらは、弁自体の構造が単純であるため低価格であり、作動油の汚れに強い。また、制御回路が簡単であることや経済性と信頼性の面で優れているという特徴を備えているが、アナログ制御方式による油圧サーボシステムの制御と比べて、デジタル制御方式による油圧サーボシステムの制御特性は次に述べるように、弁のむだ時間のため制御ができない制御量の領域の存在や応答性、制御精度の点で劣っている⁽¹⁾。

高速電磁弁を用いた油圧サーボシステムの PWM

制御方式に関しては、高速電磁弁のオンむだ時間を補償し、通常の四方向弁では困難な弁の中立点付近の流量の不連続性を改善した田中ら⁽²⁾の研究や微小なデューティーに対しても良好な線形的関係で制御ができる末松ら⁽³⁾の方法など種々の方法が提案されてきた。また、高速電磁弁のオフむだ時間による行き過ぎを防止するため、システムに大きな不感帯を設定する方法も広く用いられた。しかし、高速電磁弁を用いた制御システムは弁のむだ時間が根本的に長いため、システムの不感帯を小さくするとリミットサイクルが発生しやすいという問題点があり、これを改善するためには高速電磁弁をより高速で駆動する必要があった。これに対し佐藤ら⁽⁴⁾はソレノイドや駆動電気回路の高速化に関する研究を行い、高速電磁弁のむだ時間特性を改善しているが、サーボシステムとした場合の制御性能はまだ明らかになっていない。

そこで、本研究ではまず高速電磁弁をできるだけ高速で駆動することにより油圧サーボシステムの制御特性を向上させることを試みた。その結果、単なる高速化では弁の無効微細振動すなわち弁が振動音だけを発生して有効な流量を流さない状態が起こることがわかった。

本研究では高速電磁弁をできるだけ高速で開閉させ

* 原稿受付 2001 年 4 月 3 日。

^{*1} 東京工業大学大学院理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。^{*2} 正員、東京工業大学大学院理工学研究科。^{*3} 韓国釜山大学校工科大学機械工学部。

E-mail: kitagawa@ctrl.titech.ac.jp

る高速駆動電気回路を用いることを前提として、高速サンプリングを行うことによりデューティ生成の誤差を少なくするとともに、高速サンプリングによって生成される離散的なデューティ値を利用する高速サンプリング PWM 制御方法を提案する。この方法によれば、定常状態での弁の不必要なオン、オフの繰返しすなわち前述の無効微細振動をなくして騒音の発生を抑えることができ、同時に制御システムに不感帯を設定する必要のない精度のよい制御結果が得られる。また、提案する方法の PWM 基本周期、サンプリングタイム、ゲインの設定方法について実験で検討する。

主 な 記 号

- d : 制御ができない制御量の領域
- K : システムのゲイン
- p_s : 供給圧力
- T_c : PWM 基本周期
- T_s : サンプリングタイム
- T_1 : 高速電磁弁のオンむだ時間
- T_2 : 高速電磁弁の立上り時間
- T_3 : 高速電磁弁のオフむだ時間
- T_4 : 高速電磁弁の立下り時間
- $T_1 + T_2$: 高速電磁弁のオン作動遅れ時間

Fig. 1 Principle of quick driving circuit

Fig. 2 On-off characteristics of HSSV

- $T_3 + T_4$: 高速電磁弁のオフ作動遅れ時間
- u : 制御入力信号
- U_{max} : 三角波の高さ

2. 高速駆動電気回路と高速電磁弁のオンオフ特性

従来、高速電磁弁を駆動するため、電圧増幅回路と逆電流を防止するためのフォトカプラーを結合したダーリントン回路がよく用いられたが、本研究では高速電磁弁をできるだけ高速で開閉させるため図1のような形の過励磁電圧および消磁電圧をソレノイドに加える高速駆動電気回路を用い、高速電磁弁の作動遅れ時間を短縮することとした⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

図2は高速駆動電気回路で高速電磁弁を駆動した場合の作動遅れ特性の測定結果である。ダーリントン回路を用いる場合は、電流波形の変曲点から弁の開閉作動遅れ時間が測定できるが、高速駆動電気回路を用いる場合は強制的に短時間の過励磁電圧と消磁電圧が印加されるため、この方法で測定することができない。そこで弁のポペットが弁座または固定子に当たる瞬間に大きい衝撃が発生することに着目し、衝撃センサを用いた。図2においてオンオフ入力信号から衝撃信号が発生するまでの約1 msの時間が弁の開閉作動遅れ時間である。従来のダーリントン回路では約7~8 msであり大幅に改善されている。

図2の測定結果からは高速電磁弁のポペットが完全に開閉された瞬間しか観測できないが、高速電磁弁のポペットは実際には入力信号に対して一定時間遅れてから動き始める。すなわち図3のように表すことができる。

入力信号の変化からポペットが動き始めるまでの時間 T_1 (または T_3) を高速電磁弁のむだ時間、またポペットが動き始めてから完全に開閉するまでの時間 T_2 (または T_4) を立上り時間または立下り時間と言い、高速電磁弁の完全開閉にかかる時間 $T_1 + T_2$ あるいは、 $T_3 + T_4$ を作動遅れ時間と定義する。

高速電磁弁に入力信号を入れてから動き出すまでの

Fig. 3 Switching behavior of poppet

極めて短いむだ時間を計測することを考えた。その方法として高速電磁弁の出力流量の変化を用いるのは困難であるため、高速電磁弁の出力流量変動による圧力の変動を圧力変換器で計測し、その遅れ時間からむだ時間を求めることとした。本研究では高速電磁弁の開閉による圧力変動をより正確に計測するため、高速電磁弁両側に圧力変換器を設置した図4のような油圧回路を構成して実験した。圧力変換器1による圧力測定結果を図5に、また圧力変換器2による測定結果を図6に示す。

図5および図6からわかるように入力信号に対して約0.7 ms遅れてから圧力波形に変化が現れる。したがって、高速電磁弁のむだ時間(T_1 , T_3)は0.7 msであり、立上り時間または立下り時間(T_2 , T_4)は0.3 msであることがわかる。ただし、このむだ時間は高速電磁弁の作動条件によりある幅をもって変動する。すなわちむだ時間の計測値にはある幅の誤差が存在する。

3. 高速サンプリング PWM 制御方式

図7はPWM基本周期 T_c ごとに1回のサンプリン

Fig. 4 Hydraulic circuit for measuring the dead-time

Fig. 5 Experimental result of dead time (on-time)

グを行いデューティ比を決める三角波を利用した方式であり、従来の研究でよく使われてきた代表的方式であるが、高速電磁弁のむだ時間によって、不安定な弁作動すなわちリミットサイクルが発生しやすく、それを防止するため一般的にシステムに大きな不感帯を設定するため制御精度が著しく低下するという問題点があった。また、この方式は図7の下部に示すようにサンプリングタイムが長い場合デューティ生成の誤差が大きくなるという問題点もあった。

一方、本研究で提案する高速サンプリング PWM 制御方式はサンプリングを従来より高速で行い、サンプリングタイムの整数倍に対応する離散的なデューティ値を用いるが、サンプリングが短いのでより適確なデューティ値が生成される。

図8は本研究で提案する高速サンプリング PWM 制御方式を説明するための図である。図8(a)に示すようにサンプリングタイム T_s を細かく取ってそのサンプリングタイムごとに制御入力信号が三角波より上にあるとき PWM 信号がオンの状態、制御入力信号が三角波より下にあるときは PWM 信号がオフの状態にする。この方式は細かい高速のサンプリングタイム

Fig. 6 Experimental result of dead time (off-time)

Fig. 7 Conventional PWM method

T_s ごとに制御入力信号と三角波の比較を行うため、デューティ値はサンプリングタイムの整数倍に対応した値になり離散的なデューティ値が生成される。なお、本研究では PWM 変調の際は図 8(b)のようにシステムの応答特性に大きい影響を及ぼす三角波の高さを正規化して 1 に設定するとともに三角波の高さ $U_{\max}$ の逆数をシステムのゲイン K として表すことにする。

図 9 は離散的に生成されるデューティ値を利用して定常状態における不必要なオン、オフを避ける方法を説明するための図である。

本研究で提案する高速サンプリング PWM 制御方式は図 8 のように高速でサンプリングを行い、かつサンプリングタイム T_s をむだ時間 T_1 および T_3 よりも短い値に取り、その整数倍がむだ時間 T_1 (または T_3) と立ち上がり時間 T_2 (または T_4) の境目の時点に一致しないようにすることにより、定常状態での不必要なオン

Fig. 8 PWM method used in this study

Fig. 9 Method for determination of sampling time

オフの繰返しを回避する。ただし、図 9 に示すようにこのむだ時間 T_1 および T_3 の計測値は高速電磁弁の作動条件により変動するため、サンプリングタイムの整数倍がこの変動誤差範囲に入らないように設定する必要がある。サンプリングタイムの整数倍をこの変動誤差範囲に設定してしまった場合、弁の無効微細振動すなわち弁は微小な振動的動作をするものの流量は流れないようなことが発生し、結果として定常状態での不必要なオン、オフが繰返されることとなり、これが大きな騒音の原因となるためである。

4. PWM パラメータの設定方法と実験

本研究で提案する高速サンプリング PWM 制御方式の特性と PWM 制御のパラメータである PWM の基本周期、サンプリングタイム、ゲインの設定方法を実験的に検討するために図 10 に示す高速電磁弁を用いた電気・油圧サーボシステムを構成する。

この実験装置の主要部は 2 個の三方向形高速電磁弁、油圧シリンダ、PWM 変調を行うパーソナルコンピュータから構成されている。ピストン変位はポテンショメータによって検出され、A/D 変換器を介してコンピュータに取り込まれる。また、高速電磁弁の駆動回路には高速駆動電気回路を用いる。

この電気・油圧サーボシステムは図 11(a) のブロック線図で表すことができ、本研究で提案する高速サンプリング PWM 制御方式を使う際の高速電磁弁のむだ時間 T_1 による、制御ができない制御量(この場合、変位)の領域 d は図 11(b) に示すように式(1)で表される。

$$d = \frac{1}{K} \cdot \frac{T_1}{T_c} \dots \dots \dots (1)$$

本研究で提案する方法は高速駆動電気回路を用いることを前提としているため、開閉時のむだ時間 T_1 および T_3 は従来より大幅に小さく、これに応じて

Fig. 10 Electro-hydraulic system using HSSV

PWM の基本周期 T_c も小さくすることが可能である。

一方、制御ができない制御量の領域 d を減少させるためには図 11(b) および式(1)からわかるように PWM の基本周期 T_c を高速電磁弁のむだ時間 T_s より十分大きくし、またシステムのゲイン K をなるべく大きく設定することが望ましいが、これらのパラメータ値の増加はシステム帯域幅の減少、リミットサイクルの発生によるシステムの不安定などにつながる可能性がある。そこで本研究では PWM の基本周期 T_c とシステムのゲイン K の設定指針を実験的に検討した。

まず PWM の基本周期 T_c がシステムの応答に及ぼす影響を調べるため、供給圧力 p_s を 12 MPa、システムのゲイン K を 1、サンプリングタイム T_s を 0.3 ms とし、PWM の基本周期 T_c の 3 種類の値についてシリンダの変位を測定した結果を図 12 に示す。図 12 より PWM 基本周期 T_c が長いほど定常誤差すなわち制

Fig. 11 Block diagram for hydraulic servo system controlled by HSSV

Fig. 12 Effect of PWM period T_c on position control

御ができない制御量の領域 d は減少するが、応答が遅くなることがわかる。この結果は、高速電磁弁を用いるシステムの帯域幅は PWM 基本周期の影響を受け、基本変調周波数の約 1/4 程度になるという従来の研究⁽⁶⁾に相通じる。

次に PWM 基本周期 T_c を 24 ms、サンプリングタイム T_s を 0.3 ms に設定し、図 8(b) に表した PWM 変調のゲイン ($1/U_{\max} = K$) がシステムの応答に及ぼす影響を実験した結果を図 13 に示す。この実験ではゲインを大きくすると応答の立上りが早くなり、定常偏差が零に近づいている。

図 14 は①ダーリントン回路で高速電磁弁を駆動し、PWM 基本周期ごとにサンプリングを行う従来の PWM 制御方式、②高速駆動電気回路で高速電磁弁を駆動するが、PWM 基本周期ごとにサンプリングを行う従来の PWM 制御方式、それから本研究で提案した③高速サンプリング PWM 制御方式の応答特性を比較した実験結果である。各実験は制御特性を比較検討するため不感帯をいっさい設定していない。図 15 はこの実験の際の高速電磁弁のオンオフに伴うポペットと弁座の衝突の衝撃を衝撃センサで計測した結果であ

Fig. 13 Effect of system gain on position control

Fig. 14 Experimental result for comparison

Fig. 15 Record of shock wave

る。供給圧力 p_s は 12 MPa であり、PWM 基本周期 T_c は 24 ms、ゲイン K は 1 に設定した。サンプリングタイムの設定に関しては従来の PWM 方式を使う ①と②の実験では 24 ms を用い、高速サンプリング PWM 制御方式の場合はサンプリングタイムを整数倍したデューティーがむだ時間 T_1 と立上り時間 T_2 の境目の変動誤差範囲内に入らないように 0.3 ms と設定した。

①の実験ではシリンダ変位にリミットサイクルが認められず、定常状態で不必要なオンオフも発生しないが、大きい定常偏差を伴っている。定常偏差を減らすためゲインを大きくすると高速電磁弁のむだ時間による行き過ぎが発生するためリミットサイクルによる振動がシリンダ変位に発生する。すなわちこの場合はシステムの安定性を確保するため、高速電磁弁のむだ時間を考慮した不感帯を設計する必要がある。

②の実験では高速電磁弁のむだ時間が極めて短く、弁の作動も速いため、定常偏差が極めて小さく、シリンダ変位にも明確なリミットサイクルは認められないが、図 15 の衝撃記録②からわかるように高速電磁弁の作動による衝撃は定常的に続いており、大きな騒音が定常的に発生した。この②の衝撃の発生原因は定常状態近傍でデューティーがむだ時間 T_1 (または T_3) と立上り時間 T_2 (または T_4) の境目の変動誤差範囲内に入ってしまう、高速電磁弁は微小に作動して振動するのみで有効な量の流量が流れない状態、すなわち無効微細振動が持続的に発生しているためと考えられる。したがって、単に高速電磁弁の開閉速度だけを速くすると高速電磁弁のむだ時間による行き過ぎによるリミ

ットサイクルを防止するための不感帯の設定は必要ないが、無効微細振動が発生するため、これを防止するための不感帯の設定が必要となる。

本研究で提案した③の実験ではシリンダ変位に定常的なリミットサイクルは全くなく、高速電磁弁作動による衝撃は過渡状態においてのみ発生し、定常的には発生していない。すなわちシステムに不感帯をいっさい設定していないが、定常偏差のない精度のよい結果が得られている。一方、この高速サンプリング PWM 制御方式は単純に制御器からの制御入力信号をオンオフ信号に変換する変換器であり、PWM 変調自体は負荷およびシステムパラメータなどの変動に影響を受けない。したがって、PWM 変調する際のゲイン K の調整に他のロバスト制御器を併用すればよりよい制御結果が予想される。

5. 結 論

本研究は、市販されている高速電磁弁を強制的に励磁消磁し、高速電磁弁をできるだけ高速で開閉させる高速駆動電気回路を用いることを前提とした高速電磁弁の PWM 制御において、離散的なデューティーを生成することを特徴とする高速電磁弁の高速サンプリング PWM 制御方法を提案した。この方法では不感帯を設定することなく安定性が確保できる精密な制御が可能であり、さらに実用上問題になる定常状態での不必要なオン、オフの繰返しがないので騒音の発生を抑えることができる。

文 献

- (1) 田中裕久, “油空圧のデジタル制御と応用”, (1995), 11-17, 近代図書, 東京.
- (2) 田中裕久, “三方向高速電磁弁の電子油圧デジタル制御”, 機論, **50**-458, B(1984), 2663-2666.
- (3) 末松良一・山田宏尚・武藤高義, “差動 PWM 方式による油圧アクチュエータ系のデジタル制御”, 機論, **55**-516, C (1989), 2053-2061.
- (4) 佐藤恭一・佐藤正次郎・田中裕久・矢内基之, “高速電磁弁の切換え特性におよぼす過電流の影響”, 油圧と空気圧, **24**-4 (1993), 504-510.
- (5) 荒木一雄・荻浦洋市・浜本智, “電子油圧デジタル制御機器 “HYDIS” について”, NACHI 技報, **42**-1, (1986), 51-66.
- (6) Shuxing, Y., Shulan, W. and Fan, X. C., “On the Frequency response characteristic of PWM high speed on off valves”, 2nd JHPS Symp. On Fluid Power, (1993), 459-463.