管内遠隔瞬時流量計測手法の機能拡張に関する研究*
(第2報, 外挿手法の検討)横 田 真 一^{*1}, 鈴 木 賢 二^{*2}An Approach to Extend the Potential of the Remote Measurement Method
for Unsteady Flow Rate using Hydraulic Pipeline Dynamics
(2nd Report, On an Extrapolation Method)

Sinichi YOKOTA and Kenji SUZUKI

The paper describes an approach for extending the potential to estimate unsteady flow rate through oil hydraulic pipelines and components in real time. In this method unsteady flow rate at an arbitrary point along the pipeline is estimated by using the hydraulic pipeline dynamics and the only measured pressure values at two distant points along the pipeline in high responsiveness. This method has some advantages, that is, more easy and convenient to install without flow disturbance and with high responsiveness to unsteady flow rate changes. There are two minor methods, an interpolation method and an extrapolation method. This paper mainly describes the extrapolation method. In the extrapolation method, unsteady flow rate at the arbitrary external portions between two pressure measuring points is obtained by an inverse Fourier fast transform between the weighting functions and the measured pressure values. And this method is considered to be most useful for practical purpose. Under unsteady laminar oil flow conditions, the good agreement between the estimated and directly measured flow rate waveforms illustrates the validity of the method proposed here. In addition, a real time flow monitor applying this method is proposed and the validity is ascertained.

Key Words: Unsteady Flow Rate Measurement, Fluid Power Systems, Hydraulic Pipeline Dynamics

1. ま え が き

油圧制御システムにおいて、管内あるいは機器内を通過する非定常流量を精度よく計測することは、システム動特性解明、流量フィードバック制御などの点で重要な課題である。前報^(*)では遠隔瞬時流量計測手法の機能を拡張し、管路上のある距離を隔てた二点での圧力測定のみによって、管路上の任意な位置断面を通過する非定常流量および圧力を推定できる、より有効な手法として、内挿手法および外挿手法からなるはん用高機能遠隔瞬時流量計測手法を提案し、その手法のうち内挿手法の妥当性を実験的に明らかにしている。本報では残る外挿手法について実験的にその妥当性および有効性を明らかにすることを目的としている。

2. 外 挿 手 法

ここでは、はん用高機能遠隔瞬時流量計測手法のうち、図1(a)に示すような管路系において管路上のある距離を隔てた二点の圧力を測定して、その二点の外

側の任意の位置断面の通過流量および圧力を推定できる外挿方法について、その計測原理を示し、ついで実験的に本手法の妥当性の検討をする。

この手法は実時間化には困難を伴うが、流量を計測したい位置が、計測可能な位置の上流あるいは下流になってしまう場合がよくあり、そのような状況に対処

(a) 管路系1概略

(b) 管路系2概略

図1 管路系

* 平成3年11月15日 秋季油空圧講演会において講演，原稿受付 平成4年3月11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} セイコー電子(株)。

できること、また管路上の位置的に余裕のある点の圧力を測定するのみでよいスペース上の制約に強く、さらに圧力センサの応答性を考慮すると本手法を非定常流量計として用いた場合、その応答性は非常に優れていること、また流量計を挿入しないため流れを乱すこともなくシステムの特性に影響を及ぼさないことなどの多くの特徴を有しており、計測に対する自由度が非常に高く、実用上大いに有効な手法であると考えられる。

次に、管路上のある距離を隔てた二点の圧力を測定して、その二点の外側の任意の位置断面の通過流量を推定する外挿手法の計測原理を、図1(b)に示す管路系2において、二点の圧力 $p_1(t)$, $p_2(t)$ を測定して、流量 $q_3(t)$ を推定する場合を代表的な例として示す。

外挿手法において、圧力 p_1 , p_2 および流量 q_3 関係は内挿手法と同様にして次式で与えられる⁽⁷⁾。ここで変数の大文字はラプラス変換形を表す。

$$Q_3(s) = G_{ue}(s) \cdot P_1(s) - G_{de}(s) \cdot P_2(s) \cdots \cdots (1)$$

ここで、二つの伝達関数 $G_{ue}(s)$, $G_{de}(s)$ は次のようになる。

$$G_{ue}(s) = \frac{\cosh\{\lambda(s) \cdot L_2\}}{Z_0(s) \cdot \sinh\{\lambda(s) \cdot L_1\}} \cdots \cdots (2)$$

$$G_{de}(s) = \frac{\cosh\{\lambda(s) L_2\}}{Z_0(s) \cdot \tanh\{\lambda(s) \cdot L_1\}} + \sinh\{\lambda(s) \cdot L_2\} / Z_0(s) \cdots \cdots (3)$$

ここで、記号は、 s : ラプラス演算子、 L : 管路上流下流二点間の距離、 Z_0 : 非定常粘性を考慮した管路の特性インピーダンス、 λ : 管路の伝ば定数、また下付き添字 u は上流、 d は下流を表す。

図2(a), (b)に管路長 $L_1 = L_2 = 40$ cm と等しく短くした場合の、二つの伝達関数 $G_{ue}(j\omega)$, $G_{de}(j\omega)$ の周波数特性を示す。ここで、時間領域における瞬時流量値 $q_3(t)$ を実時間で得るためには、二つの伝達関数の時間領域における重み関数 $g_{ue}(t)$, $g_{de}(t)$ が必要となる。しかしながら、それらの重み関数は、管路長 L_1 , L_2 には関係なく、ただちには得ることができない。実時間推定は困難であるが、次に示す方法により時間領域における瞬時流量 $q_3(t)$ を求めることができる。

まず、圧力測定値 $p_1(k\Delta T)$, $p_2(k\Delta T)$ を式(4), (5)のように高速フーリエ変換 (FFT) する。

$$P_1(j\omega) = \Delta T \sum_{k=0}^{N_s-1} p_1(k\Delta T) \exp(-2\pi jnk/N_s) \cdots \cdots (4)$$

$$P_2(j\omega) = \Delta T \sum_{k=0}^{N_s-1} p_2(k\Delta T) \exp(-2\pi jnk/N_s) \cdots \cdots (5)$$

ここで、 ΔT : サンプル間隔、 Δf : 周波数領域

におけるサンプリング間隔、 ω : 角周波数、 N_s : サンプル数 (ここでは 4096) である。

次に伝達関数 $G_{ue}(j\omega)$, $G_{de}(j\omega)$ を用いて、式(6)のような乗算を行い、周波数領域における流量 $\hat{Q}_3(j\omega)$ を得る。

$$\hat{Q}_3(j\omega) = P_1(j\omega)G_{ue}(j\omega) - P_2(j\omega)G_{de}(j\omega) \cdots \cdots (6)$$

ここで得られた周波数領域における流量 $\hat{Q}_3(j\omega)$ を式(7)のように高速フーリエ逆変換 (IFFT) することにより、時間領域における流量 $\hat{q}_3(k\Delta T)$ を求める。

$$\hat{q}_3(k\Delta T) = \Delta f \sum_{n=1}^{N_s-1} \hat{Q}_3(2\pi n\Delta f) \exp(2\pi jnk/N_s) (k=0, 1, 2, 3, \dots, N-1) \cdots \cdots (7)$$

ここで Δf は周波数領域におけるサンプリング間隔を示す。また、ここでは圧力 $p_1(t)$, $p_2(t)$ を測定して流量 $\hat{q}_3(t)$ を推定する場合を例として述べたが、同様な方法で圧力 $p_2(t)$, $p_2(t)$ を測定して流量 $\hat{q}_1(t)$ の推定、さらに流量と同様に、圧力の推定 (例えば、圧力 $p_1(t)$, $p_2(t)$ を測定して圧力 $\hat{p}_3(t)$ の推定) も可能である。

3. 実験装置および実験方法

図3に、外挿手法の妥当性を確認するために用いた、

(a) 伝達関数 $G_{ue}(s)$ の周波数特性

(b) 伝達関数 $G_{de}(s)$ の周波数特性

図2 伝達関数

前報⁽⁷⁾ とほぼ同様の実験装置の概略を示す。内径 14 mm の真直円管には、距離 L_1, L_2 を隔て上流位置、中流位置および下流位置での圧力 $p_1(t), p_2(t)$ および $p_3(t)$ を測定するための半導体形圧力変換器が取り付けられており、また、下流位置には本手法により推定され流量値の比較検討に用いる流量 $q_3(t)$ を直接測定するために、本研究室で開発された 400 Hz を超える高い応答性をもつ円筒形絞り瞬時流量計 (以下 CCFM と記す) が設置されている。ただし円筒形絞りには内径 2.5 mm、長さ 15 mm のものを用いている。ここで、管路長 L_1, L_2 は実験条件により変えられるようにしてある。また、下流端には油温を計測するためのサーミスタ温度計、任意な流量変動を与えるためのサーボ弁が設置されている。各データは 12 bit A/D コンバータを介してサンプリング周波数 4.5 kHz で同時にサンプリングされ、マイクロコンピュータに取込まれる。これらの測定した圧力 $p_1(t), p_2(t)$ から流量 $\hat{q}_3(t)$ を推定し、その推定流量値と CCFM により直接測定した流量値 $q_3(t)$ と比較し検討する。

4. 実験結果および考察

作動油にダフニ#32 を用いて、油温 $31 \pm 1^\circ\text{C}$ 、油の動粘度 $\nu = 0.49 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、管路上流端圧力 3.1 MPa に保ち、管路の下流に設置されたサーボ弁に、ある平均開口度上に重畳させた方形波を入力して流量変動を作り、圧力 $p_1(t), p_2(t), p_3(t)$ および流量 $q_3(t)$ を測定して、圧力 $p_1(t), p_2(t)$ から外挿手法により流量 $\hat{q}_3(t)$ を推定する。そこで、CCFM によって実際に測定した流量 $q_3(t)$ と比較する。図 4 に、管路長を $L_1 = L_2 = 40 \text{ cm}$ として、サーボ弁に 50 Hz の方形波を入力して得られた記録波形を示す。図の 1 段め、2 段めおよび 3 段めはそれぞれ測定された圧力波形 $p_1(t), p_2(t)$ および CCFM により測定された流量波形 $q_3(t)$ であり、4 段めが圧力 $p_1(t), p_2(t)$ から外挿手法により推定した推定流量波形 $\hat{q}_3(t)$ 、最下段が推定流量波形 $\hat{q}_3(t)$ と実

際に測定した流量波形 $q_3(t)$ を重ねたものである。外挿手法により推定流量波形は、CCFM により測定された流量波形と全体的によく一致している。

また図 5 に、管路長を $L_1 = 84 \text{ cm}, L_2 = 140 \text{ cm}$ に変えて、サーボ弁に 30 Hz の方形波を入力して得られた記録波形を示す。図の構成は図 4 と同様である。管路長 L_1, L_2 を変えても外挿手法による推定流量波形は実際に測定された流量波形と非常によく一致している。これらの管路長 L_1, L_2 を変えて行った実験結果より、外挿手法は圧力を測定する 2 点の外側の任意の位置断面を通過する非定常流量を高い精度で推定できることがわかる。また、外挿手法による圧力推定実験を行った。その計測原理は、流量の推定と同様に圧力 $P_1(s), P_2(s)$ および $P_3(s)$ の関係を求め同様に FFT を用いた。管路長を $L_1 = 84 \text{ cm}, L_2 = 140 \text{ cm}$ にとり、サーボ弁に 30 Hz の方形波を入力し得られた記録波形を図 6 に示す。図の 1 段め、2 段めおよび 3 段めはそ

図 3 実験装置概略

図 4 圧力記録波形および流量推定波形 ($L_1 = L_2 = 40 \text{ cm}$, 50 Hz 方形波入力)

それぞれ測定された圧力波形 $p_1(t)$, $p_2(t)$ および $p_3(t)$ であり, 4 段めが, 測定された圧力 $p_1(t)$, $p_2(t)$ から外挿手法により推定された推定圧力波形 $\hat{p}_3(t)$, 最下段が外挿手法による推定圧力波形 $\hat{p}_3(t)$ と実際に測定された圧力波形 $p_3(t)$ を重ねて示したものである。外挿手法による推定圧力波形は, 測定された圧力波形と非常によく一致している。

5. 低周波に限定した実時間流量モニタ

図2よりわかるように, 外挿手法の伝達関数の周波数特性を管路共振のピークあるいはノッチ部を含んで広く表現できる重み関数は得られないが, ピークあるいはノッチ部を含まない極低周波 (この場合 100 Hz 以下) に周波数領域を限定すれば, 近似的な重み関数を得ることは可能であり, 低周波流量変動に対して実時間モニタ的な流量計を外挿手法で構成できる。この場合, 管路長を短く (例えば 40 cm 程度) したほうが, 伝達関数のいちばん低周波に現れる共振のピークあるいはノッチの周波数を高くすることができ, 結果として比較的高周波 (この場合 100 Hz 程度) まで合う重み関数を得ることができる。それにより, より高い周波

図5 圧力記録波形および流量推定波形
($L_1=84$ cm, $L_2=140$ cm, 30 Hz 方形波入力)

図6 圧力記録波形および圧力推定波形
($L_1=84$ cm, $L_2=140$ cm)

(a) 重み関数 $g_{ue}(t)$

(b) 重み関数 $g_{de}(t)$

図7 重み関数

図8 圧力記録波形および流量推定波形
($L_1=L_2=40$ cm, 高周波カット実時間演算による)

数まで測定可能となる。

以下にその試みを示す。図7(a), (b)は図2と同様に管路長を $L_1=L_2=40$ cm とした場合 150 Hz 以上の成分をカットしてフーリエ逆変換により求めた近似重み関数 $g_{ue}(t)$, $g_{de}(t)$ を示す。図2(a), (b)の白丸は、この近似重み関数を用いて正弦波と畳み込み積和算を行い、計算結果を図2(a), (b)の周波数特性に重ねて示したものである。この計算結果は、もともになる伝達関数の周波数特性とよく一致しており、IFFT によって求めた近似重み関数のこの限られた周波数範囲 (100 Hz 以内) で妥当性が確認できる。この結果をもとに、次のような実験を行った。管路長を $L_1=L_2=40$ cm ととり、サーボ弁に 50 Hz の方形波を入力して、圧力変換器および較正用の CCFM の出力信号をカットオフ周波数 150 Hz の2次のローパスフィルタに通して、低周波成分のみの圧力脈動および流量

脈動を得て、この信号を用いて、さきに求めた近似重み関数との実時間畳み込み演算を行った。この実時間演算は著者らの文献(2)に示したのと同様にしてできる。図8はこの結果得られた流量波形例を示したもので、CCFMにより計測された流量波形 $q_3(t)$ に比較して、推定された流量波形 $\hat{q}_3(t)$ は多少時間の遅れを伴っているが、モニタ程度には十分な応答性を有していると考えられる。

6. あとがき

本研究では、管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測法の基本的な手法の機能を拡張し、管路上のある距離を隔てた二点での圧力測定のみによって、管路上の任意な位置断面を通過する非定常流量および圧力を推定できる、より有効な手法として、外挿手法を提案し、円筒形絞り瞬時流量計と遠隔手法との比較を通じて、その手法の妥当性を実験的に明らかにし、実時間計測についても検討を行った。また、この外挿手法は(1)スペース上の制約に強い、(2)応答性に優れている、(3)システムの影響を及ぼさない(流れに無侵襲)。などの特徴を有しており、計測に対する自由度が非常に高く実際上特に実用的な手法であるといえる。終わりに、日頃ご教示を賜っている東京工業大学中野和夫教授に深く謝意を表する。また実験遂行にあたり一部助力を得た同大学助手金道泰博士に感謝する。

文 献

- (1) 横田・金・中野, 油圧管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法, 油圧と空気圧, 21-2(1990), 187.
- (2) 金・横田・中野, 油圧管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法 (第2報), 油圧と空気圧, 22-2, (1991), 169.
- (3) 横田・金・中野, 管路の圧力流量間の動特性を利用した非定常流量計測法 (2点の圧力を用いる方法), 機論, 57-541, C(1991), 2872.
- (4) 横田・井手・中野, 円筒形絞りを用いた瞬時流量計の高機能化, 機論, 53-489, B(1987), 1548.
- (5) Oldenburger, R., ほか1名, Trans. ASME, D, 86-3 (1964), 589.
- (6) 金・横田・中野, 油圧管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法 (第3報), 油圧と空気圧, 23-2(1992), 掲載予定.
- (7) 横田・鈴木・金, 管内遠隔瞬時流量計測手法の機能拡張に関する研究 (第1報, 機能拡張の提案と内挿手法について), 機論, 58-556, C(1992), 3634.