420 ポペット弁の特性解析

Analysis of Poppet Valve Characteristics

正 鷲尾 誠一 (岡山大)

中村 善也 (岡山大院)

○ 庄司野 公也 (岡山大院)

Seiichi WASHIO, Okayama University, Tsushimanaka3-1-1, Okayama

Yoshinari NAKAMURA, Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

Koya SHOJINO, Graduate School of Engineering, Okayama University

Key Word : Oil Hydraulics, Poppet Valve, Frequency Response

1. 緒言

油圧回路の圧力制御に用いられるポペット弁は、ポペットとそれを支持するバネ、そして弁座から構成される。バネに支持されたポペットが一定圧力を越えるとポペットと弁座間に隙間が生じ、そこから油が流出することにより圧力補償を行っている。構造自体は単純なものであり、多くの評価モデルが今日まで提案されているが、そのほとんどが水力学の知見に基づいたもの⁽¹⁾⁽²⁾であり、また自励振動の発生原因が未だ説明されていないなど多くの問題が残っている。

そこで我々は独自に設計製作したポペット弁実験装置を用いて、ポペット弁の特性評価を行った。そしてそこで得られた静特性要素モデルに基づき、動特性の評価モデルを提案し、その妥当性を周波数応答実験によって検証を行う。

2. 静特性

静特性静実験回路図を Fig.1 示す。実験には頂角 $\phi = 30^\circ$ の円錐ポペットと面取りのない弁座から構成されるポペット弁を用いた。実験方法は上流の差圧式オリフィス流量計により流量を測定し、ポペット弁前後の圧力センサ測定孔に差圧計を接続し差圧を測定する。またポペットは外枠に固定された支持棒で固定し、その支持棒を動かして変位を変える。ポペットには測定用の細いロッドをネジで連結し、そのロッドを支持棒の中を通して末端に円板を取り付けて渦電流式変位計によりポペットの開口変位を測定する。開口変位を $x_p = 1.0\text{mm}$ から 0.05mm の間で変え、各変位ごとに流量を増加させて差圧と流量を測定する。差圧が大きくなると、ポペット支持ロッドが弾性変形を起こしポペット変位が大きくなるため、その分支持ロッドを押し込んで常に変位を一定に保つ。横軸に流量、縦軸に (差圧) $\times$ (開口

面積の2乗) $\div$ (密度) をとって測定結果をプロットすれば Fig.2 の丸印になる。測定値は次式で評価され、これがポペット弁における特性式を与える。⁽⁴⁾

$$\frac{P_{in} - P_{out}}{\rho} = \frac{1}{S_p^2(x_p)} (\alpha q_p^2 + \beta v \omega d_p q_p) \quad (1)$$

$$S_p(x_p) = \pi x_p \sin \phi_p \left(d_p - \frac{1}{2} x_p \sin 2\phi_p \right)$$

Fig. 2 の実線は測定結果を最小二乗近似し流量係数 α 、 β を求めて式 (1) を計算したものである。

Fig.1 Poppet valve used for study

Fig.2 Static characteristics of poppet constriction

記号表

p_{in} : 上流圧	A_p : 上流管断面積
p_{out} : 下流圧	d_p : 上流管路直径
q_u : 実験装置流入流量	ϕ_p : ポペット半頂角
q_p : ポペット通過流量	m_p : ポペット重量
x_p : ポペット開口変位	c_s : スクイズ効果による減衰係数
S_p : ポペット開口面積	k_p : バネ定数
α : 非線形損失係数	x_0 : ポペットバネ初期圧縮量
β : 線形損失係数	
ρ : 油の密度	
ν : 油の動粘度	

2. 動特性

流れが変動する場合も式(1)が成り立つか否かを評価すべく周波数応答を行う。ポペットを支持するロッドを取り外しバネ(外径 $\phi 8.5$, 内径 $\phi 5.3$, 自然長 29.7, バネ定数 20.79N/mm)とそれを支持する支持部に取り換える。実験装置上流から流量脈動を与え、差圧、流量、変位の各変動を測定した。このときのポペットを通過する正味の変動流量 q_p は、装置上流の二点間差圧を測定して変動差圧測定法⁽⁵⁾により得られる q_U とポペット変動 dx/dt によって次のように与えられる。

$$q_p = q_U - A_p \frac{dx_p}{dt} \quad (2)$$

測定波形を DFT 解析し第 3 高調波まで使って再現する。縦軸に $p_{in}-p_{out}$, 横軸に q_p をとって測定結果をプロットしたものを Fig.3 に実線で示す。また, x_p と q_p の測定結果を用いて式(1)より得られる $p_{in}-p_{out}$ を破線で示す。図中の丸印は定常点を示している。

ポペットの運動方程式は次のように与えられる。

$$m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} + c_s \frac{dx_p}{dt} + k_p (x + x_0) = A_p (p_{in} - p_{out}) \quad (3)$$

ここで減衰はポペットと弁座の間のスクィーズアクション⁽³⁾に起因するものと考え、その係数は次式で与えられる。

$$c_s = \frac{\rho v m d_p l^3}{\sin^2 \phi_p x_p^3} \quad (4)$$

このときの l は弁座の面取り部分の長さである。式(1)～(3)を定常状態からの微小変動を考え線形化し⁽⁶⁾, ラプラス変換後連立させて解けば次式となる。

$$\frac{\Delta X_p}{\Delta(P_{in} - P_{out})} = \frac{A_p}{m_p c_1 s^2 + c_s s + k_p} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta(P_{in} - P_{out})}{\Delta Q_p} = \frac{c_1 (m_p s^2 + c_s s + k_p)}{m_p s^2 + (c_s + A_p^2 c_1) s + k_p - A_p c_s} \quad (6)$$

Fig.3 Relations between pressure and flow rate in a pulsating poppet flow

このとき各係数は以下のように与えられる。

$$c_1 = \frac{\rho}{S_p^2(x_p)} (2\alpha \bar{q}_p + \beta v m d_p)$$

$$c_2 = -\frac{2\rho S_p'(x_p)}{S_p^3(x_p)} (\alpha \bar{q}_p^2 + \beta v \pi d_p \bar{q}_p) \quad (7)$$

伝達関数 $\Delta X_p / \Delta(P_{in}-P_{out})$ と $\Delta X_p / \Delta Q_p$ の測定結果を Fig.4 に丸印で示す。実線は $c_s=6.0$ とした場合の計算結果で、破線は $c_s=0$ とした場合のそれである。測定値、計算値ともに定常値で割って無次元化してある。減衰を考えると測定値と計算値はよく合っている。

参考文献

- (1) 林・飯塚・早瀬：リリーフ弁の安定性，平成 7 年春期油空圧講演会論文集，13/16(1995)
- (2) 林・山本・飯村：ポペット弁の安定性に及ぼすドレインオリフィスの影響，油圧と空気圧，24，283/290(1993)
- (3) Theory and Practice of Lubrication for Engineers, DUDLEY D. FULLER, A Wiley-Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS
- (4) 鷲尾・于・中村：平成 8 年春期油空圧講演会論文集，25(1996)
- (5) 鷲尾・高橋・山口：機論(B)，60-574(1994)，2081
- (6) 鷲尾・于・中村：機械学会第 74 期全国大会講演論集，96-15，19(1996)

Fig.4 Frequency responses