モータ電流の平均化手法による回転円筒型粘度測定法の精度向上†

柴田 浩*・丸岡 玄門*・古本 奈奈代**・小野 幹夫***

Accuracy Improvement of Co-Axial Cylinder Type Viscometer
by Averaging Technique of Motor Current

Hiroshi SHIBATA*, Genmon MARUOKA*, Nanayo FURUMOTO** and Mikio ONO***

This paper proposes to use a feedback type of digital averaging circuit for removing the noise in motor current and applies the technique to co-axial cylinder type viscometer to contribute accurate and speedy measurement.

Key Words: motor torque, motor current, periodic noise, co-axial cylinder type, viscometer

1. ま え が き

化学プラント工程においては、化学反応の進行程度が液体の粘度の変化として現れる場合がしばしばあり、そのような場合には反応槽内の粘度を測定することによって反応の度合を知り、つぎの工程へ液体の移動が可能となる。このための簡便な粘度測定器の開発が要望されており、さらに粘度の測定値が電気信号で得られれば、コンピュータによる工程管理にも好都合である。

粘度の測定法については現在まで種々のものが提案され、その特徴についても述べられている^{1)~3), 6)~8)}。落球式、気泡式、毛管式などは測定値を電気信号に変換しがたい。回転円筒式は被測定液体中で内円筒あるいは外円筒を一定速度で回転させ、そのトルクを差動変圧器で検出したり⁸⁾、バネとの釣り合いとして目盛りで表示したりしている。また最近開発された回転振動式は、圧電セラミック素子による回転振動子を利用したもので、測定値は電気信号として得られるが粘度と出力電圧の関係は原理的に非線形特性であるため高粘度での感度が低い⁴⁾。

本研究はモータ電流を検出する際のノイズ対策を開

発したものであり、回転円筒式の粘度計を一例としてその効果を示す。被測定液体中の内円筒を直流モータで回転させ、粘度に比例したトルクをモータ電流から読み取れば粘度測定ができるはずであるが、この電流を直接測定したのでは、その電流はいろいろな雑音のため変動が大きすぎて一定値を示さない。変動を抑えるに十分な時定数の低域フィルタを用いると測定速度が低下する。

しかしながら、モータ電流の雑音は1回転ごとの周期性をもっていることがわかったので、モータ1回転ごとに電流を平均化するフィードバック形デジタル平均化回路をここで提案する。これを回転粘度計のモータ電流の測定に応用したところ、雑音が大幅に抑えられ、粘度測定における速応性と精度を向上させることができた。

2. 測定方法

2.1 測定原理

説明の都合上、はじめに本研究の動機づけとなった粘度の測定原理について簡単に述べる。

ここで用いた粘度計は **Fig. 1** に示すように、回転円筒型粘度計であり、被測定液体中で固定された外円

Fig. 1 Scheme of viscometer

† 第28回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1989・7)

* 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町 4-804

** 徳島文理大学 徳島市山城町西浜傍 180

*** (株)花王 和歌山市湊 1334

* Faculty of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai

** Tokushima Bunri University, Tokushima

*** Kao Co., Wakayama

(Received March 14, 1991)

(Revised August 5, 1991)

筒（半径 $R_2=42.5$ mm）の内、同心内円筒（半径 $R_1=38.5$ mm, 高さ $h=32$ mm）を減速ギアを介して直流モータにより一定の角速度 ω で回転すると粘度 η は、

$$\eta = \frac{T}{4\pi h \omega} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \quad (1)$$

で与えられる^{1),2)}。ここで T は内円筒に働くトルクであり、内円筒を液体中で回転したときのモータ電流から摩擦トルク分の電流を差し引いたものに比例する。摩擦トルク分の電流は内円筒を液体外で空転させたときのモータ電流として得られる。

2.2 平均電流検出法

Fig. 2 に示されたモータ電流波形を見ると、大きな雑音が含まれており、このままではその電流値を正確に読み取ることはできない。雑音の原因としては、整流による脈流分とロータの位置に依存した摩擦力の違いに起因するものなどがあげられる。そのことを念頭において **Fig. 2** のモータ電流波形をみなおすと、モータ 1 回転（モータ付属のタコジェネレータ出力の 12 周期分）ごとにそれは周期性を有していることがわかる。そこでモータ 1 回転ごとの電流の平均値を一つの時系列信号とみなすと、これはモータの回転に同期

した雑音成分を完全に除去した変動の非常に小さいものとなる。この時系列信号をフィルタリングすることにより、**Fig. 2** のモータ電流に直接低減フィルタを通す方法と比べて迅速な測定が可能となる。

このために **Fig. 3** に示す回路を考案した。 $u(t)$ は雑音を含んだ電流信号、 $w(t)$ は平均化回路のデジタル出力 w_k の DA 変換値であり、 $v(t)$ は

$$v(t) = -r_2 \{u(t)/r_1 + w(t)/r_3\} \quad (2)$$

で表わされる。 $v(t)$ を $33 \mu\text{s}$ の間隔で AD 変換したデジタル量を v_i とし、下添え字 i はこの系列のサンプリング時点を示す。図中の比較器と 1/12 分周器によって、モータ 1 回転ごとに一つのパルスが発生させ、このタイミングを k としてこれごとに w_k を DA 変換すると、その値は

$$w_{k+1} = w_k + \frac{a}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (3)$$

で表わされる。 N はモータ 1 回転の間に $v(t)$ がサンプリングされる回数であり、**Fig. 2** より $N \approx 191/0.033 \approx 5788$ となる。 a は定数で実際には $a/N = 2^{-13}$ とすることにより、乗除算 a/N を 2 進数の桁移動で行えるようにしている。ここでは省略するが、この動作解析の結果 (2) 式の平均値が零となり $w(t)$ は $u(t)$ の平

Fig. 2 Oscillograms of various signals

Fig. 3 Schematic diagram of measurement circuit

均値の $-r_3/r_1$ 倍となる。また、 w_k の収束の速さは $z=1-ar_2/r_3$ の極に支配される。

3. 測定結果

Fig. 4 は平均化回路の入出力すなわちモータ電流と平均化処理された電圧のオシログラムを示したもので、後者が雑音成分をほとんど完全に除去した一定値を示し、空転時と液体中でのモータ電流のわずかな相違もめいりょうに検出していることがわかる。

Fig. 5 は粘度対出力電圧またはモータ電流の関係を図示したもので、左の縦軸は出力電圧 $w(t)$ 、右の縦軸はモータ電流値である。モータにかかる電圧 V_m をパラメータとしており、永久磁石型直流モータを用いているので V_m が一定ならモータの回転数 ω も一定と考えてよい。図より粘度と出力電圧の直線性がよく保たれていることがわかり、このことは本測定法が

Fig. 4 Oscillograms of original and averaged signal

Fig. 5 Relation between viscosity and processed signal

(1)式の理論式によく合致していることを示している。なお試料液体は水飴とし、その粘度測定は室温下で市販の回転円筒型および回転振動子型粘度計を用いて行った。粘度の精密測定には温度管理⁹⁾も重要となるが、ここではプロセス工程管理用の簡易測定法を目的としているので、測定精度は特に問題としなかった。

4. む す び

提案したモータ電流の平均化回路はつぎの原理による。

モータ電流に回転と同期した周期性ノイズが含まれている場合、モータ 1 回転ごとの電流の平均値を求めることにより、その直流分を精度よく検出しようとするものである。この方法は低域フィルタを用いるよりも測定精度および速度を大幅に向上でき、ほかにも広範囲の応用が期待できる。なお交流モータを用いた場合のトルクの変化分の検出については文献⁵⁾の方法が利用できる。

本研究を始めるに当たり、参考文献やそのときまでの研究概要などについて、大阪府立大学化学工学科宮南啓教授および佐藤宗武助教授から懇切なご教示を受けた。ここに記して深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 小野木, ほか編: 化学計測ハンドブック, 195/219, 朝倉書店 (1985)
- 2) T. C. Patton 著 (植木憲二監訳): 塗料の流動と顔料分散, 1/58, 共立出版 (1986)
- 3) N. Heywood: Selecting a Viscometer, The Chemical Engineer, 16/23, June (1985)
- 4) 三浦漆介: 回転振動型粘度計, センサ技術, 8-6, 149/151 (1988)
- 5) 柴田, 池田, 丸岡, 青木, 小川: 交流電気機器の故障検出のための一電圧・電流測定回路とデータ処理技法, 電気学会論文誌, 108-D-4, 409/415 (1988)
- 6) 芝, 一瀬, 北村: 細管粘度計の補正の理論, 計測自動制御学会論文集, 21-12, 1295/1301 (1985)
- 7) 川島純彦: 高精度細管式粘度計の開発, 計測と制御, 28-3, 261/266 (1989)
- 8) 高橋, 横山, 藤平, 広瀬: マイクロコンピュータ制御によるオートレンジ機能を有するレオメータ, 応用物理, 52-7, 607/613 (1983)
- 9) 倉野, 小林, 吉田: 粘度計校正用標準液の ASTM 動粘度-温度表示式への適用, 計測自動制御学会論文集, 23-8, 859/861 (1987)