押出機温度制御パラメータの 簡単なチューニング方法

佐藤 聡*・河野 寿明*

A Simple Method for Tuning the Temperature Control Parameters for an Extruder

Akira SATO*, Toshiaki KONO*

A simple method for tuning the temperature control parameters for the die and cylinder of a plastics extruder is investigated. This method is based on a fuzzy control system. Recently, an increasing demand for small lot size manufacturing has led to frequent and rapid changes in the manufacturing process. This requires temperature controllers to find the appropriate control parameters quickly with an auto-tuning method. Unfortunately, most commercially based PID controllers apply the so called "Limit cycle method" to tune the appropriate control parameters. This method takes a relatively long time to find the parameters, because it requires several on/off cycles of heater output to form a temperature wave in order to identify the process characteristics. Furthermore, this method discards the first peak of the temperature wave, thus wasting time. The first peak is usually higher in magnitude than succeeding waves, but this characteristic can not be explained as long as we assume that the process is a first-order system plus a transportation lag. In this paper, assuming that the process is a second order system, we can explain the characteristics of the wave form theoretically. We find that the magnitude of the peak at an appropriate set temperature can be estimated using the magnitude of the peak of the tuning temperature, regardless of the value of the time constant and gain of the process. We also generate a simple fuzzy rule that can utilize the magnitude of the first peak as a control parameter. Experimental results show that this method is practical enough for its accuracy and robustness, and can decrease the tuning time by one third compared to that of conventional PID controllers.

Key words : Temperature control/Extruder/Tuning/Fuzzy control/Second order system

1. 緒 言

押出製造ラインにおいて、金型やシリンダーの温度制御は、成形品の品質に直接影響する重要な制御項目の一つである。従来より、この目的のためには、PID（比例、積分、微分）調節計が広く使われており、温度を一定に保つ定値制御の面では、実用上十分な性能が得られている^{1,2)}。しかし、近年、多品種少量生産の

* 積水化学工業(株) 京都技術センター
FA 技術推進センター
京都市南区上鳥羽上調子町 2-2 (〒601)
Kyoto Technical Center, Sekisui Chemical Co., Ltd.
2-2 Kamichoshi-cho, Kamitoba, Minami-ku, Kyoto
601 Japan
1993. 12. 30 受理

要求がますます高まり、小ロットサイズの生産が増えるにつれて、各品種に応じた製造温度を頻繁に設定変更するケースが増えてきた。この場合、原料劣化を防ぐために過昇温（オーバーシュート）に注意しながら、短時間で設定温度に到達する必要がある。したがって、温度コントローラーとしては、定値制御性能だけでなく、過渡応答特性の向上および短時間で適切な制御パラメーターを決定できるオートチューニング機能が要求されるようになってきた。

この要求を満たすため、本稿では、ファジィ制御を適用することにより、従来より短時間でオートチューニングを完了し、理論上のほぼ最短時間で、オーバーシュートなしに設定温度に到達する制御方法について検討を行った。

2. 従来の制御方法と問題点

本稿では、制御対象として、通常の製造ラインで使用する押出機の加熱制御を想定する。Fig. 1 に制御系のブロック図を示す。製造ラインでは、ヒーター電流を制御するスイッチング素子として、既存ラインと取扱いを統一するためやコスト的観点から、半導体リレーの代わりに電磁接触器が用いられる場合が依然として多い。そのため、調節計の制御出力は、リレーを用いた 2 値（オン/オフ）出力が一般的である。

さて、PID 制御パラメーターの調整方法としては、限界感度法やステップ応答法でシステム特性を把握し、Ziegler-Nichols の調整則を始めとする種々の調整則に従って、パラメーターを調整する方法が提案されている^{3)~5)}。しかし、市販の PID 調節計の多くは、これらの方法とは異なり、いわゆる「リミットサイクル法」と呼ばれる手法でオートチューニングを実行している。

Fig. 2 に、リミットサイクル法によるチューニング時の、制御出力と温度波形の一例を示す。実測温度が

Fig. 2 An actual tuning wave form by the “Limit cycle method”

Fig. 1 Block diagram of a temperature control system

設定値を上回ったらリレーをオフし、設定値を下回ったらリレーをオンするという繰り返しで Fig. 2 のような周期的な波形を作る。なお、実際には波形の振幅を大きくしてデータを取りやすくするために、設定値±0.2~1°C 程度のヒステリシスを設けてオン/オフする場合が多い。図中の実線が温度変化、下部の破線がリレーのオン/オフの状態を示す。この波形の振幅 T_w と周期 t_w などから、制御対象の伝達関数を推定し、適切な PID 制御パラメーターが決定できる^{6)~8)}。

ここで、伝達関数を求める前提となっているのは、制御対象が、「1 次遅れ＋無駄時間」で表されるという点である。ところが、この前提をもとにリミットサイクル波形をシミュレーションすると、Fig. 3 のように、それぞれのオーバーシュートが同一になり、実際に観測される Fig. 2 の波形とは異なる場合が多い。このため、市販の PID 調節計では、2 番目以降の数サイクルの波形を基にパラメーターを調整しているので、チューニングに時間がかかる。いっぽう、シミュレーションで Fig. 2 のような波形を生成するためには、制御対象を 2 次系以上でモデル化する必要があるが、この場合に、伝達関数を簡単に同定する方法は見当たらない。そこで、以下に、制御モデルをより現実に近い 2 次系で近似したうえで、2 次系のステップ応答にお

Fig. 3 A simulated tuning wave form by the “Limit cycle method” for a first-order system plus a transportation lag

Fig. 4 The relationship between set temperature T_p and overshoot T_o . The process gain $K=600$, the second order coefficient $k=0.1$, and the time constant τ is varied from 2000 to 3000

けるオーバーシュートの挙動から、複雑な同定作業をせずに制御パラメーターを調整する方法を検討する。

3. 2 次系のオーバーシュートの挙動

ここでは、制御対象を2次系にした場合のオーバーシュートの挙動について、理論的考察を行う。最初の波高値 T_p のみが高い波形を生成するためには、制御対象を2次系以上の高次系にする必要がある。ただし、押出機の金型やシリンダーの場合、あまり複雑な特性はもっていないと思われるので、制御対象の伝達関数 $G(s)$ を(1)式のような2次系で仮定する。

$$G(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1)} \quad (1)$$

ここで、 K はプロセスゲイン、 τ は主時定数、 k は2次係数(副時定数と主時定数の比)である。

この系の時間領域におけるステップ応答は(2)式で表される。

$$T(t) = \frac{K}{1-k} \{ (1 - e^{-(t/\tau)}) - k(1 - e^{-(t/k\tau)}) \} \quad (2)$$

ここで、 $T(t)$ は時刻 t における温度、 e は自然対数の底である。さて、時刻 t_c で入力を0にした場合、その後の温度は(3)式で表される。なお、以降、見やすくするため時刻 t の起点を $(t=0 \text{ at } t=t_c)$ に書き直してある。

$$T(t) = \frac{K}{1-k} \{ (1 - e^{-(t_c/\tau)})e^{-(t/\tau)} - k(1 - e^{-(t_c/k\tau)})e^{-(t/k\tau)} \} \quad (3)$$

オーバーシュートのピークを求めるために、(3)式を時間で微分すると、

$$T'(t) = \frac{K}{(1-k)\tau} \{ -(1 - e^{-(t_c/\tau)})e^{-(t/\tau)} + (1 - e^{-(t_c/k\tau)})e^{-(t/k\tau)} \} \quad (4)$$

Fig. 5 The relationship between set temperature T_p and overshoot T_o . The second order coefficient $k=0.1$, the time constant $\tau=2000$, and the process gain K is varied from 100 to 1000

(4) 式で $T'(t_p)=0$ となる t_p を求めると、

$$t_p = \frac{k\tau}{1-k} \ln \frac{1 - e^{-(t_c/k\tau)}}{1 - e^{-(t_c/\tau)}} \quad (5)$$

この t_p を(3)式に代入するとオーバーシュートのピーク $T(t_p)$ が(6)式のように求められる。

$$T(t_p) = \frac{K}{1-k} \{ (1 - e^{-(t_c/\tau)})e^{-(t_p/\tau)} - k(1 - e^{-(t_c/k\tau)})e^{-(t_p/k\tau)} \} \quad (6)$$

以上の式のうち、実際に観測できるのは、 t_p , $T(t_p)$, $T(t_c)$ および $T'(t_c)$ だが、これらの実測値から、制御対象の K , τ および k を解析的に求めるのはかなり困難である。しかし、1回のチューニングデータを基に、任意の設定値 T_p に到達するためのリレーをオフする温度 T_c を推定することができれば、温度 T_c になった時点で入力を0にすることで、オーバーシュートなく設定値 T_p に到達する制御を実現することができる。

そこで、 τ , K および k をそれぞれ独立したパラメーターとして変化させた場合に、設定値 T_p に到達するための T_c を、時刻 t_c を共通変数として(3), (5), (6)式から求め、 T_p と T_p に到達する際に生じるオーバーシュート $T_o (=T_p - T_c)$ にどのような関係があるかを、シミュレーションによって調べる。Figs. 4~6に結果を示す。Fig. 4は $K=600$, $k=0.1$ のときに、 τ を 2000 および 3000 にした場合の様子を示す。ピークに達するまでの時間 t_p は異なるが、任意の設定温度に対応するオーバーシュート T_o は、 τ の値によらず一意に定まっていることがわかる。

Fig. 5は $\tau=2000$, $k=0.1$ として、 K を 100~1000

Fig. 6 The relationship between set temperature T_p and overshoot T_o . The process gain $K=600$, the time constant $\tau=2000$, and the second order coefficient k is varied from 0.001 to 0.2

の間で変化させた場合を示す。この場合、 K の値によって T_p と T_o の関係を表すカーブは平行移動する。すなわち、あるチューニング温度で測定したオーバーシュートが、他の設定温度でどの程度のオーバーシュートになるかは、 K によらず一定となるので、1回チューニングをすれば、任意の温度のオーバーシュートが予測できることがわかる。

Fig. 6 は $\tau=2000$, $K=600$ として、 k を 0.001~0.2 の範囲で変化させた結果である。この場合は、 k の値によって傾きが変化するため、 k の値を同定できないと1回のチューニングで他の設定温度におけるオーバーシュートを求めることはできない。しかし、いずれの場合も、設定温度が高くなるにつれてオーバーシュート値は単調減少するので、低めの温度でチューニングを実施して、実用上の設定温度範囲におけるオーバーシュートの最大値を推定すると共に、曖昧な入力条件からでも出力値を計算できる特徴を持つファジィ制御を用いることにより、 k の値が不明でも実用上十分な制御を実現する方法を次項で検討する。

Fig. 7 Definition of control zone

4. ファジィ制御

Fig. 7 に金型を初期値 (0°C) から設定値 (150°C) まで昇温する様子を示す。ここで、実測値と設定値 SV までの差が大きい Zone I では出力は 100% となり、Zone II で実測値が設定値に近づく (時刻 t_c)、適当な制御則によって出力を調整して設定値に到達する。設定値に到達すると (時刻 t_p)、その温度を一定に保つための定値制御を行う (Zone III)。実際の制御では樹脂の摩擦発熱などによる外乱の影響を考慮する必要があるが、ここでは特に過渡特性の向上に注目し、過渡領域 (Zone II) についてファジィ制御を適用することを検討する。なお、Zone III の定置制御については通常の積分制御を適用した。

Fig. 8 に Zone II を拡大したものを示す。温度がオーバーシュートを生せず、かつ最短の時間で設定値に到達するためには、ぎりぎりまで出力を 100% 出し続け、時刻 t_c で出力を 0% にしたあと、オーバーシュートのピーク値 T_p (時刻 t_p) が設定温度に一致するような T_c もしくは t_c を求めて出力を制御すればよい。ここで、曖昧な入力を許容するファジィ制御の特性を活かし、なるべく簡単に得られる測定値に基づいて制御出力を求めるために、偏差 E (=設定値-実測値)、温度変化率 ΔE およびこの制御則を適用する制御領域の範囲 (Fig. 8 の斜線部) を入力変数としたファジィ制御を考える⁹⁾。

一般にファジィ制御則を設計する場合には、大まかな入力条件を想定し、それぞれの入力条件でどのような制御を行えばよいかを定性的に記述した制御則のマトリックスを作成するが¹⁰⁾、ここでは Fig. 9 に示すマトリックスを作成した。縦軸が偏差 E 、縦軸が温度変化率 ΔE 、マトリックスに書かれた値が出力値を表している。偏差 E が大きく (PB)、変化 ΔE が負 (NB) の場合、すなわち、設定値にはまだ達していないのに温度が下がっている場合には出力を大きく

Fig. 8 Fuzzy control area

		Derivative of error ΔE				
		PB	PS	ZERO	NS	NB
Error E	NB					ZERO
	NS				ZERO	
	ZERO			ZERO		PS
	PS		ZERO		PS	
	PB	ZERO		PS		PB

Fig. 9 Fuzzy rule table (PB : Positive Big, PS: Positive Small, NS : Negative Small, NB : Negative Big. The shaded part is eliminated from the investigation because the controller is assumed to have no negative output)

(PB) し、偏差 E が小さく (PS), 変化 ΔE も小さい (PS) とき、すなわち、ほぼ設定値に近づいた場合には、出力を 0 (ZERO) にする、といった制御則が記述されている。具体的な出力値はメンバーシップ関数を用いたファジィ演算を施すことで得られ¹⁰⁾、マトリックスの空白部分には、ファジィ演算を行うことで補間される出力値が与えられる。また、今回は強制冷却機能を省略しているため、マイナスの出力は存在しない。

この制御則に基づいて実際の出力率を計算した結果を Fig. 10 に示す。 x 軸は変化率 ΔE , y 軸は偏差 E , z 軸は出力率である。また、この制御則を適用する偏差 E および変化率 ΔE の範囲を、それぞれ $\bar{E}$, $\Delta\bar{E}$ で示しているが、 $\bar{E}$ には Fig. 8 の $(T_p - T_c)$, $\Delta\bar{E}$ には時刻 t_c の時の温度変化率 ΔE を設定する。ここで、メッシュで示した部分 ABC が、ファジィ演算に基づく出力率の曲面 ($E\Delta E$ テーブル) である。比例制御の場合は、この出力曲面は図中一点鎖線で示した直線

Fig. 11 An experimental result of the tuning (The arrows indicate the end of the tuning)

Fig. 10 Output surface of the fuzzy control (meshed part)

Dashed lines indicate the control surface of a proportional control. T_1 and T_2 are trajectories of temperature.

AC, CB および BA で規定される平面となるが、この平面に比べると、ファジィの出力曲面には、設定値に近づくにつれて出力値を急に小さくするような、ある程度の非線形性が付加されていることがわかる。また、偏差の大きい Zone I に相当する $y = \bar{E}$, $y = \Delta\bar{E}$ の外側の領域では、 $y < \bar{E}/\Delta\bar{E} \cdot x$ で出力 100%, $y > \bar{E}/\Delta\bar{E} \cdot x$ で出力 0% とした。

このように制御パラメーターを設定した場合、温度は Fig. 10 の軌跡 T_1 のように座標点 $(\bar{E}, \Delta\bar{E})$ から $E\Delta E$ テーブルに進出し、スムーズに設定値 (原点) に到達する。制御対象の特性が多少変動して、例えば温度変化率が予想より小さかった場合も、軌跡 T_2 のように、 $E\Delta E$ テーブルに入ってしばらくの間出力が出るため、やはり設定値近傍に到達できると考えられる。

5. 実験

以上の検討を基に、実際の押出機金型に対して実験を行った。種々の口径のパイプ、インフレーションフィルム、シート押出用 T ダイ金型など 19 種類の金型

Fig. 12 An experimental result of heat up control

Fig. 13 The control range that the new tuning method and the fuzzy control can be applied

The white circles represent the controllable points certified by experiments, and the white squares by simulations. The black squares represent where the method is not applicable.

に対し、120°C でチューニングをかけたデータから制御パラメーターを算出し、室温から150°Cまで昇温した。Fig. 11 にチューニング、Fig. 12 にこのチューニングに基づいて昇温した結果の一例を示す。Fig. 11では、従来のリミットサイクル法に比べてチューニング時間が22分から7分へと約1/3になっていることがわかる。また、Fig. 12では、オーバーシュートを発生せずにスムーズに設定値に到達していることがわかる。

6. 考 察

上記の実験結果から、本方式が短時間でチューニングを完了し、オーバーシュートが少なく立ち上がりの速い制御結果を得られることが確認できたが、この方式が制御変数のどの範囲で有効かを調べるためにシミュレーションを行った。

Fig. 13に、実験とシミュレーションで、この方法の適応範囲を調べた結果を示す。プロセスゲイン K 、主時定数 τ 、2次係数 k を変化させて、チューニング時のステップ応答を求め、オーバーシュート T_o を横軸、入力を0にしてからオーバーシュートのピークに達するまでの時間 $t_p - t_c$ を縦軸にとり、実験およびシミュレーション結果をプロットした。昇温時にオーバーシュートが $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内で、かつスムーズに設定温度に到達できたものを○(シミュレーションの場合は□)で示している。Fig. 13からわかるように、1次系に近いオーバーシュートの小さいものから、大きなオーバーシュートを示す2次系に至るまで、かなり広い範囲にわたって本方式が有効であると思われる。また、温度軌跡が制御テーブル内に入れば、その中では設定値に到達するような制御がかかるので、 $\bar{E}$ の値はある程度ラフでもかまわない。

なお、ノイズの影響を減少させる観点からは、むしろ

$\bar{E}$ の値をある程度大きくしておくほうが、望ましい結果が得られると思われる。したがって、 $\bar{E}$ の値を最低10°C程度以上に設定し、チューニング時のオーバーシュート値がこれより大きい場合にはその値を採用することにより、 $\bar{E}$ の値を決定する。なお、 $\Delta\bar{E}$ については、 t_c における温度変化率をそのまま用いるものとする。これらの関係を式で表すと次のようになる。

$$\bar{E}(T_p) = \max(T_o, 10) \quad (7)$$

$$\Delta\bar{E}(T_p) = T(T_c) \quad (8)$$

また、今回の制御はマイクロコンピュータを用いて実装されているが、ファジィ制御の出力値をあらかじめ計算して数値テーブル化しており、チューニングで決定された $\bar{E}$ 、 $\Delta\bar{E}$ の値に応じてテーブルのスパンを変換するだけで制御演算ができるため、PID制御に比べて演算が単純で、メモリー容量、演算時間共、従来より少なくできるという特徴もあり、現実に即した方式だと思われる。

8. 結 言

押出機金型、シリンダーの温度制御について、特にオーバーシュートが少なく、理論上の最短時間に近い時間で設定温度に到達するファジィ制御方法を提案した。制御対象を2次系として近似することにより、チューニング時の波高値から、任意の設定温度のオーバーシュートの値を推定する方法を示し、チューニング時の波高値と温度変化率を制御パラメーターとするファジィ制御を実現した。リミットサイクル法と異なり、オーバーシュートの最初の波高値だけでチューニングが完了するので、チューニング時間を短縮することができた。今後、定常状態における定値制御への移行方法や外乱に対する制御ロジックについてさらに検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 佐伯健児：プラスチック, 40(5), 33 (1989)
- 2) 早房信行, 長倉靖彦：プラスチック, 40(5), 43 (1989)
- 3) Franklin, F.G., Powell, J.D., and Emami-Neaini, A.: *Feedback Control of Dynamic Systems* (1991), Addison-Wesley
- 4) Astrom, K.J. and Wittenmark, B.: *Computer Controlled Systems* (1990), Prentice Hall
- 5) 宮崎誠一, 宮崎 仁：パソコンで学ぶ自動制御の実用学 (1991), CQ 出版社
- 6) 須田信英：PID 制御 (システム制御情報学会編) (1992), 朝倉書店
- 7) 上滝致孝, 明石友行：制御理論の基礎と応用 (1986), オーム社
- 8) オムロン(株)：電子温度調節器総合カタログ, (1990)
- 9) 河野寿明：成形加工 90, 61 (1990)
- 10) 菅野道夫：ファジィ制御 (1988), 日刊工業新聞社