電空弁ポジションナの動特性の改善*

(第3報, 発振現象の防止)

朝倉 俊行^{*1}, 大嶽 宏之^{*2}, 段野 勝^{*1}

Improvement of Dynamical Characteristics of the Electropneumatic Valve Positioner (3rd Report, Prevention of Hunting)

Toshiyuki ASAKURA, Hiroyuki OHTAKE and Masaru DANNO

This research is concerned with the analysis of dynamic behavior and the stabilization of an electropneumatic valve positioner. When the valve positioner is surrounded by combustible gas, the electrical control circuit must be positioned far from the actuator by using the long pneumatic tube as a safety measure. However, if the length of the pneumatic tube exceeds a certain length, hunting will occur to the drive shaft of the actuator due to the time lag of the pneumatic pressure signals and the nonlinear characteristics existing in the system. First, the behavior of hunting and its generating conditions are clarified. Next, in order to prevent hunting, the compensator based on the Smith method is applied to this system and the effectiveness is certified. Finally, by experiment, it is ascertained that the introduction of the compensator makes it possible to stabilize the positioner.

Key Words: Response, Control Device, Hunting, Valve Positioner, Dead Time, the Smith Method

1. 緒 言

電空弁ポジションナを可燃性ガス発生の可能性のある場所で使用する場合、電空変換器と調節弁との間を空気圧管路(以下、管路と略す)により接続する必要がある。この時、管路が長くなると空気圧信号の伝送に遅れが生じて、駆動軸が発振現象(ハンチング)を起こす。そこで、電空変換器と調節弁との間の距離にかかわらず、安定な制御動作を維持することが必要となる。

本研究では、このような発振現象の防止策を考案することを目的とし、発振現象の発生メカニズムを理論的・実験的に明らかにする。第1報⁽¹⁾では、発振現象に影響を与える空気圧信号の伝送遅れについて理論解析を行った。第2報⁽²⁾では、電気弁ポジションナのシステムを線形近似することにより安定に動作するパラメータを同定してきたが、実際の駆動軸の応答とはかなり異なるものであった。これは、システムになんらかの非線形要素が存在することが原因と考えられる。そこで、本報では、システムに非線形要素を考慮すること

により駆動軸の応答の解析を行い、実験結果との良い一致を得た。また、管路の長い場合に起こる発振現象について理論解析を行い、その発生条件を明らかにした。次に、発振現象の防止策として、Smithにより提案されたむだ時間を含むシステムの安定化法(以後、スミス法と呼ぶ)⁽³⁾による補償回路を構成し、理論解析を行う。スミス法を適用する場合の問題点は、制御対象のシステムモデルを正確に同定することが困難な点にあるので、補償回路に用いられるシステムが制御対象と異なる場合のパラメータ調整範囲を理論解析により明らかにした。

さらに、発振現象の防止を実際に確かめるため、スミス法による補償回路を実システムで構成・試作し、安定化実験を行った。その結果、管路長さが40 m程度と想定した場合について、騒動軸の応答は、定常偏差やヒステリシスはあるものの、その動的挙動を安定に動作させ得ることが明らかとなり、補償回路の構成のための基礎資料が得られた。

2. 構造とブロック線図

2・1 構造 本研究に用いる電空弁ポジションナはトップマウント形E-Pポジションナでその概略図を図1に示す。電空弁ポジションナは、入力する電気操作信

* 原稿受付 平成2年3月26日。

^{*1} 福井大学工学部 (〒910 福井市文京3-9-1)。

^{*2} 三菱重工業(株) (〒729-03 広島市奈岐町5007)。

号および駆動部からのフィードバック信号を処理する電気制御部と、その電気信号を空気圧信号に変換し、その空気圧信号によって、駆動軸に変位を与える空気圧駆動部とから成り立っている。電気操作信号をPID調節器からなる制御回路に入力することにより、電空変換器において圧電素子で構成されるフラップがノズルを閉じる方向に変位する。これによって生ずる背圧変化をパイロット弁により増幅し、この圧力をダイアフラム駆動部に送り駆動軸に変位を与える。この変位を、リニアポテンシオメータによって電気信号に変換し、制御回路にフィードバックすることにより電気操作信号に見合った駆動軸変位になるまで訂正動作が働き、常に電気操作信号に比例した駆動軸変位が得られる。可燃性ガスの存在する場所では、図1の破線部の電気制御部を本体(調節弁)と切り離し、その間を長い管路により接続する必要がある。

2・2 ブロック線図 電空弁ポジションナのシステムをモデル化するために、図1の各構成要素について過渡応答実験を行い、これから、ノズルフラップ機構を持つ電空変換器を二次遅れ要素、ダイアフラム駆動軸を一次遅れ要素と仮定した。また、管路の伝送遅れ

をむだ時間と仮定し、非線形要素を考慮することにより電空弁ポジションナのブロック線図は図2のようになる。なお、本解析に用いる記号を以下に示す。

K_p : 制御回路の比例ゲイン v/mA

K_v : ダイアフラム駆動軸のゲイン mm/Pa

L : 制御対象のむだ時間 s

m : 非線形要素の線形係数

R_o : 入力電気操作信号 mA

s : ラプラス演算子

T_i : 制御回路の積分時間 s

T_d : 制御回路の微分時間 s

T_v : ダイアフラム駆動軸の時定数 s

Y : 駆動軸変位 mm

ω_n : 電空変換器の固有振動数 rad/s

z : 非線形要素への入力振幅 v

α : リニアポテンシオメータのゲイン v/mm

ζ_n : 電空変換器の減衰率

δ : 非線形要素の入力の飽和値 v

ここで、制御器(コントローラ)の伝達関数 $G_c(s)$ は、

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \cdots \cdots (1)$$

として与える。また、電空変換器の伝達関数 $G_n(s)$ およびダイアフラム駆動軸の伝達関数 $G_v(s)$ からなるむだ時間を除く制御対象の伝達関数 $G_p(s)$ は⁽²⁾、

$$G_p(s) = G_n(s)G_v(s) \cdots \cdots (2)$$

$$= \frac{\omega_n^2 K_v}{(s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2)(T_v s + 1)}$$

となる。また、電空弁ポジションナは発振現象(リミットサイクル)を生じることからシステムには非線形要素が含まれていると考えられる。そこで、制御回路への印加電圧と圧電素子への印加電圧との相関関係を実験的に調べた結果、図3に示すような飽和特性⁽⁴⁾が確認され、これが発振現象の発生の一要因になっていると思われる。この結果から、電空変換器の圧電素子には

図1 電空弁ポジションナの概略図

図2 電空弁ポジションナのブロック線図

図3 飽和特性(入力電圧と印加電圧)

図2に示す飽和形非線形要素が存在するものと仮定し、動特性の解析を行う。

ここで、図2に示す飽和形非線形要素の記述関数 $N(z)$ は、次式で表される⁽⁵⁾。

$$N(z) = \frac{2m}{\pi} (\sin^{-1} \phi + \phi \sqrt{1 - \phi^2}) \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $\phi = \delta/z$ ($z \geq \delta$) とする。

3. スミス法による動特性の改善

ここでは、スミス法に基づく補償回路をシステムに適用し、補償回路のパラメータの同定誤差による過渡応答への影響について考察する。

3・1 スミス法の適用 スミス法は、制御器に制御対象のモデルを組み込むことによりむだ時間を閉ループから追い出し、通常の有限次元の制御問題に帰着させることによって、むだ時間系のシステムを安定化するものである。すなわち、図4のブロック線図で示すようにこの方法はむだ時間をもつ制御対象の伝達関数 $G_p(s)e^{-sL}$ を同定することにより制御器 $G_c(s)$ について $\alpha G_p(s)(1 - e^{-sL})$ なる局所フィードバック回路を構成する方法である。したがって、この場合の応答は、むだ時間を含まない系の応答を求め、これにむだ時間 L 分だけ考慮すれば良いことになる⁽⁶⁾。ここでは、電空弁ポジションのシステムに上述の補償回路を構成し、システムの安定化を図る。

図より、システムの特性格方程式は次式ようになる。

$$1 + \alpha N(z) G_c(s) G_p(s) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $s = j\omega$ として式(4)を整理すると、

$$-\frac{1}{N(z)} = G_s(j\omega) \dots \dots \dots (5)$$

となる。ただし、 $G_s(s) = \alpha G_c(s) G_p(s)$ とする。

$$G_s(j\omega) = \frac{\omega_n^2 K_v K_p \alpha}{(-\omega^2 + 2\zeta_n \omega_n j\omega + \omega_n^2)(T_v j\omega + 1)} \dots \dots \dots (6)$$

図4 補償回路を考慮した場合のブロック線図

システムにステップ状電気操作信号を入力したときの駆動軸の変位を数値計算により求める。図4より、入力 $R(s) = R_0/s$ とすると、出力応答 $y(t)$ に関する微分方程式が次のように得られる。

$$b_1 \frac{d^4 y(t)}{dt^4} + b_2 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + b_3 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + (b_4 + b_5) \frac{dy(t)}{dt} = b_6 u(t - L) \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 $u(\cdot)$ を単位ステップ関数とし、各係数 $b_1 \sim b_6$ は次式のようなのである。

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= T_v, b_2 = 1 + 2\zeta_n \omega_n T_v \\ b_3 &= 2\zeta_n \omega_n + \omega_n^2 T_v, b_4 = \omega_n^2 \\ b_5 &= K, b_6 = KR_0/\alpha \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

3・2 シミュレーション実験 ステップ状入力に対する過渡特性の応答評価として ITAE(Integral of time-multiplied absolute value of error)法⁽⁷⁾を使用し、この評価値を拡張し無次元化することにより、その評価値 J^* を以下のように定義する。

$$J^* = \int_0^{t_1} \frac{t}{t_1} \left| 1 - \frac{y(t)}{y(t_1)} \right| dt \dots \dots \dots (9)$$

ここでは、解析の便宜上、有限時間 $t_1 = 60$ s とし、

(a) ベクトル軌跡

(b) 駆動軸の過渡特性

図5 シミュレーション実験結果

この評価値 J^* を過渡特性の応答評価に用いる。また、解析に必要な各パラメータは、システムの各構成要素の応答実験から得られた次の値を用いた。

$$\left. \begin{aligned} K_p &= 1.70 \text{ v/mA}, T_d = 0, \alpha = 1.33 \text{ v/mm} \\ K_v &= 0.87 \text{ mm/Pa}, R_o = 20 \text{ mA}, T_i = \infty \\ T_v &= 0.1 \text{ s}, \zeta_n = 0.67, \omega_n = 2.0 \text{ rad/s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

これらのパラメータを用いてシステムのベクトル軌跡および駆動軸の過渡応答についてシミュレーション実験を行った。ここでは、むだ時間が $L=0.40 \text{ s}$ (管路長さ $l=40 \text{ m}$) の場合について、図 5 (a) に式 (5) によるベクトル軌跡を、図 5 (b) に式 (7) による駆動軸変位の過渡特性を示す。なお、図中、実線 a は補償回路がない場合、一点鎖線 b は補償回路を適用した場合を表す。図 5 (a) からむだ時間が $L=0.4 \text{ s}$ で、補償回路がない場合 (実線 a) には、周波数軌跡 $G_o(j\omega)$ と振幅軌跡 $-1/N(z)$ は安定な交点 P をもち、この P 点でリミットサイクルを生じていることがわかる。この場合のリミットサイクルの振幅は 2.80 mm 、周期は 2.1 s となる。また、補償回路を適用した場合 (一点鎖線 b) には、周波数軌跡 $G_s(j\omega)$ が振幅軌跡 $-1/N(z)$ を常に左にみるためシステムは漸近安定となり、リミットサイクルを生じない。また、過渡特性における J^* の値は、補償回路を適用した場合 0.956 と良好な応答を示す。

3.3 補償回路の同定 スミス法は制御対象のモデルを正確に同定することによりむだ時間システムの動的挙動を補償する方法である。しかし、制御対象とモデルの間のパラメータ同定誤差を避けることができ

ず、これらのパラメータ同定誤差の影響の度合を検討しておく必要がある。そこで、補償回路に用いられるパラメータが制御対象と異なる場合 (パラメータ同定誤差が生じた場合) のパラメータ調整範囲を理論解析により明らかにする。ここでは、制御対象と異なるパラメータをもつ補償回路の伝達関数を $G_m(s)$ とする。なお、本解析で用いる記号を以下に示す。また、その他の記号は 2・2 節と同様である。

L_m : 補償回路のむだ時間 s

ω_m : 補償回路の固有振動数 rad/s

ζ_m : 補償回路の減衰率

伝達関数 $G_m(s)$ を次式のように定義する。

$$G_m(s) = \frac{\omega_m^2 K_v}{(s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2)(T_v s + 1)} \dots\dots (11)$$

補償回路の局所フィードバックの伝達関数に式 (11) を用いて、駆動軸の変位を数値計算によって求める。基準となるパラメータは式 (10) とする。各パラメータ L_m, ζ_m および ω_m について基準値から $\pm 50\%$ の同定誤差が生じた場合の駆動軸変位のシミュレーション実験結果の一例を図 6 に示す。図中、実線は補償回路に制御対象と同じシステムを適用した場合、破線はむだ時間パラメータ L_m に -50% の同定誤差が生じた場合、一点鎖線はパラメータ L_m に $+50\%$ の同定誤差が生じた場合のそれぞれの駆動軸の過渡特性を表している。図より、誤差が大きくなると実線で示す波形からの離反が大きくなることがわかる。これらのシミュレーション実験により、補償回路の各パラメータの影響の度合が明らかとなる。他のパラメータの同定誤差を含めた駆動軸の応答評価値 J^* の変動率を表 1 に示す。表より、各パラメータ値が設定より小さい (同定誤差が負) 場合よりは、設定より大きい (同定誤差が正) 場合のほうが、応答評価値 J^* は小さくなり、影響の度合は少ない。また、補償回路の固有振動数 ω_m の同

表 1 同定誤差と応答評価値 J^* の変動率

Error	$\frac{L_m}{L}$	$\frac{\zeta_m}{\zeta_n}$	$\frac{\omega_m}{\omega_n}$
+50%	-4.5%	46.2%	25.5%
-50%	68.0%	54.2%	493.3%

図 6 同定誤差を考慮した駆動軸の過渡特性

図 7 パラメータの同定誤差比と J^* の等高線図

4.2 システム構成 補償回路に用いるモデルは、その伝達関数を制御対象と同じものとするために実際のシステム(電空弁ポジションナ)を用いる。そこで、この場合の補償回路を含むシステム構成を図9に示す。補償回路は、異なる管路長さの二つの電空弁ポジションナで構成し、それぞれのリニアポテンシオメータからの電気信号をアナログ減算回路⁽⁸⁾で演算させ、その信号を制御回路にフィードバックさせる。また、補償回路の演算部を含んだ制御回路の回路図を図10に示す。なお、図中、破線はアナログ減算回路を示す。

4.3 補償回路による安定化実験 較正された3台の電空弁ポジションナを用いて、図9に示す補償回路を含んだシステム構成を行い、管路長さによるハンチングが除去される状態を確認するため、次のような実験を行った。管路長さ $l=40$ m において補償回路を作動させない状態で駆動軸を動作させ、任意の時間 $t=t_c$ で補償回路を作動させたときのハンチング状態の動的挙動の変化を測定した。ここで、制御回路への入力電気操作信号を 20 mA とし、任意の時刻 $t=t_c$ で補償回路を作動させた場合の駆動軸の動的挙動を図11に示す。図より、補償回路を作動させる前 ($t \leq t_c$) では駆動軸変位は上下非対称となり、周期 2.04 S、振幅 2.89 mm となりその中心位置が $y_0=8.87$ mm の発振現象を起こしている。そこで、スミス法による補償回路を $t=t_c$ で作動させると、駆動軸変位は補償回路作動後、約 4.2 s で安定(定常値の $\pm 1.0\%$ 以内)になりハンチングが除去されていることがわかる。また、制御回路への入力電気操作信号を 20 mA から 4 mA まで減少させると、補償回路作動後安定になるまでの時間が多少長くなり定常偏差は残るものの駆動軸変位は安定化され、動特性の改善がされていることが確認された。

5. 結 言

本研究は、電空弁ポジションナにおける発振現象の防止策を考察することを目的とし、発振現象の発生メカニズムを理論的・実験的に明らかにした。また、スミス法による補償回路をシステムに適用することにより駆動軸の動的挙動を安定化させ得ることを明らかにし、次のような結果が得られた。

(1) 電空弁ポジションナの各種特性実験を行い、特に発振現象の態様を明らかにすることができた。

図11 駆動軸変位の安定化実験結果

(2) システムモデルに非線形要素を考慮することにより駆動軸の応答解析を行い、実験結果との良い一致を得た。また、ベクトル軌跡および駆動軸のシミュレーション実験から発振現象の発生条件を明らかにした。

(3) 駆動軸の発振現象を防止するため、スミス法による補償回路を実システムで構成・試作することにより、安定化実験を行った。その結果、管路長さが 40 m 程度の場合について、補償回路の挿入により駆動軸の応答は、定常偏差やヒステリシスはあるものの発振状態から安定な挙動に移行させ得ることが明らかとなった。

(4) スミス法の適用範囲を調べるため、補償回路のパラメータが制御対象と異なる場合の調整範囲を理論解析により明らかにした。

以上の解析および実験結果から補償回路を構成するための基礎資料が得られた。著者らは、現在、補償回路を一次遅れの電子回路で構成し、より簡単化することにより、安定化を行う研究を進めているが、これについては次の機会に発表の予定である。

文 献

- (1) 段野・ほか3名, 機論, 54-450, B(1989), 1224.
- (2) 朝倉・ほか2名, 機論, 56-524, C(1990), 900.
- (3) Smith, O. J. M., ISA Journal, 6-2(1959), 28.
- (4) 朝倉・ほか3名, 電子情報通信学会技研報告, 89-460(1990), 1.
- (5) 榎木・ほか2名, 自動制御工学, (1977), 11, 養賢堂.
- (6) 砂原・榎木, 自動制御工学I, (1965), 224, 養賢堂.
- (7) 稲葉, 自動制御入門, (1979), 160, 丸善.
- (8) 宮崎, アナログ IC 活用ハンドブック, (1987), 64, CQ出版.