

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560921

研究課題名(和文) フィールドバス計装システムにおける自動調節弁の早期故障検出法の開発

研究課題名(英文) Detection Method for Stiction of Pneumatic Control Valve with Fieldbus Communication

研究代表者

柘植 義文(Tsuge, Yoshifumi)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00179988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：化学プラントにおいて重要な操作端である自動調節弁の故障により、プラントの運転は不安定になり、事故に繋がる可能性もある。自動調節弁で頻繁に起きる故障として固着があるが、従来の計装機器で得られる情報から固着を検出することは難しい。一方、近年普及しつつあるフィールドバスにより、制御系の内部情報を得ることができる。本研究では、それら内部情報を利用した固着検出法を提案し、流量制御を実現する装置により手法の有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：Control valve (CV) is one of the important final control elements. If CV unintentionally takes control action because of its internal failure, the process becomes unstable, at worst, industrial accidents occur. Stiction is the most commonly occurred as the internal failure of CV. However, it has been difficult to detect the stiction, because operators have not been able to get the internal information of CV from traditional instrumentation. In these latter days, Fieldbus has been widely implemented. It is possible to get the internal information by using Fieldbus instrumentation. In this study, we developed a method for stiction detection of pneumatic control valve via Fieldbus communication. The effectiveness of the detection method was demonstrated by the laboratory equipment with the flow control system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学、 反応工学・プロセスシステム

キーワード：化学工学 自動調節弁 故障診断 固着 フィールドバス

1. 研究開始当初の背景

(1) 化学プラントの高効率運転を求めて、プラントのモデルを利用した高度制御が導入されている。しかし、化学プラントの分散型制御システム(Distributed Control System : DCS)に直結している末端の制御系の不調が高効率運転を阻害する要因になっている。このような制御系の不調の原因には、制御系を構成する調節計(Controller)の調整不良と調節弁(Control Valve : CV)の不具合がある。前者の調節計に着目した制御性能の評価と監視に関する研究は積極的に行われ、実用的な成果も得られている。一方、後者の調節弁について実プラントでよく観測される不具合として固着現象がある。調節弁は必要に応じてスムーズに開閉して必要量の流体を流す機能を有するが、その開閉動作が鈍くなるのが「固着」であり、固着が進行すると制御不能に陥ってしまうこともある。図1に示すように、化学プラントで用いられている空気圧式調節弁は複雑な構造を有している。調節計からの開度指示信号はポジションナーに入力された後、アクチュエータ内の空気圧とスプリングの弾性力のバランスに応じて、ステム(弁軸)を介してプラグが上下に動くことにより流量を調節する。ステムにはグランドパッキンと呼ばれる流体漏洩防止用のシール材が巻かれているために、ステムの上下運動には常に摩擦力を伴う。この摩擦力が規定値以上になるとステムのスムーズな動作が阻害される。このように固着現象のメカニズムは明らかであるので、固着現象のモデルを利用して固着している調節弁を検出する手法も開発されている。しかし、従来のDCSの計装器機から得られる情報は調節計の出力である開度信号(ポジションナーへの入力)と実際に流れている流体の流量測定値(調節弁の出力に相当)だけであるので、調節弁内の固着現象をどのようにモデル化しても、固着がある程度進行して開度信号と流量測定値との間にその影響が現われない限り検出が難しい。

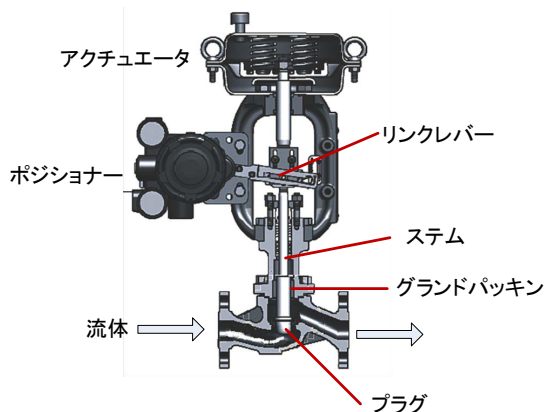


図1 調節弁の構造

(2) 一方、DCSでの通信方式にフィールドバスを利用したデジタル計装器機も普及し

始めている。平成21年度の段階で、フィールドバス対応のDCSを導入した国内のプラントは数カ所にとどまっているが、そのメリットにより、今後確実に増えることが期待される。フィールドバスの最大のメリットは、従来に比べて大量の情報を双方向で通信できることである。調節弁に限定すると、調節弁の実開度(%), アクチュエータ空気圧(Kpa), ポジショナー温度(°C) サーボ出力値(%)などの調節弁内の詳細な状態に関する情報が入手可能である。

2. 研究の目的

従来の計装システムに比べて、フィールドバス対応計装システムでは大量の情報を双方向で通信できる。その結果、化学プラントの末端の制御系の重要器機である調節弁の内部状態に関する情報も入手可能である。そのことに着目して、化学プラントの高効率運転あるいは安定運転の阻害要因である調節弁の不具合である固着現象の詳細な現象モデルを作成し、その不具合を予兆段階で検出する手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) まず準備として、実プラントで使用されているフィールドバス対応計装機器を用いて、水循環実験装置を作製した。循環流量の流量制御およびバッファータンクの液面制御を行うために、オリフィスと差圧伝送器、および自動調節弁を組み込んだ。また、固着現象を繰り返し再現できるように、調節弁内のステムをグランドパッキンとは別のシール材で覆い、そのシール材の締め付け状態を変更することによって所定の摩擦力を加えられるような工夫を凝らした。DCSに相当する部分はフィールドバス対応計装機器に付属のソフトをパソコンにインストールして、計装機器との間で双方向のデータ送信を行えるようにした。

(2) 前述の実験装置を用いて固着現象の再現実験を行った。実験条件としては、流量もしくは液面の設定値を正弦波状、矩形状、ランプ状、階段状に与える場合と、設定値は一定で外乱を与える場合について、固着なし、固着弱、固着強の3段階について、実験を行った。なお、流量制御系のパラメータ(比例ゲイン、積分時間、微分時間)については、制御応答が敏感になる組合せと応答が緩やかになる組合せの2通りについて行った。液面制御系のパラメータ(比例ゲイン、積分時間、微分時間)については、制御応答が敏感になる組合せについて行った。

(3) (検出手法①) 調節弁の挙動を良く表す変数として、調節弁開度(MV), 開度指示値(OP), ダイアフラム室内空気圧(P)の3変数に着目して、共通因子が1つの因子モデルを作成した。

$$\begin{aligned} OP(t) &= \lambda_1 F(t) + e_1(t) \\ MV(t) &= \lambda_2 F(t) + e_2(t) \\ P(t) &= \lambda_3 F(t) + e_3(t) \end{aligned} \quad (1)$$

残差にあたる独自因子 e_1, e_2, e_3 を無視すれば、因子負荷量 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ を係数とする単純な線形モデルであり、3変数間に存在する強い正の相関を F が説明する。ある一定期間のデータ(1単位と呼ぶ)から式(1)のモデルを構築することを考える。固着が無いときに得た1単位全てのデータから構築したモデルは3変数の挙動を十分に説明できるが、固着が発生したときに得た1単位全てのデータから構築したモデルの場合、 P の独自因子 e_3 が単純な残差から“行き過ぎによる変動”という因子へ変化することにより F のみで P を説明することが困難になる。したがってモデルの説明力低下を固着の進行ととらえ、説明力にあたる λ_3 を指標とする。しかし、 P の挙動が2本の直線で表現されることから、1単位全てのデータに対して式(3)の単純な線形モデルを構築することは望ましくない。state別(Open, Close)で式(1)のモデルを構築し得る2つの因子負荷量 $\lambda_{3\text{Open}}, \lambda_{3\text{Close}}$ を固着の程度を示す指標とする

(4) (検出手法②) 固着がなくても、調節弁はグランドパッキンに接しているために必ず摩擦力が働くために、MVとPとの間にはヒステリシスがある。固着が進行すると、このヒステリシスの程度が大きくなっていく。この程度を定量化するのに判別分析法を適用して、固着の程度に対応する指標を定義した。

$$\begin{aligned} z &= a_1 MV(t) + a_2 P(t) + b \\ \rightarrow P(t) &= -\frac{a_1}{a_2} MV(t) - \frac{b}{a_2} + \frac{z}{a_2} \end{aligned} \quad (2)$$

判別得点 z は符号により群を、大小により距離を定める。したがって式(2)において $z=0$ とし得られる方程式は2群の境界線であり、これが中心線であると期待できる。さらに z/a_2 が中心線からの距離を表すので $P_z = |z/a_2|$ とすれば、固着の進行を表現できる。なお、 P_z は経時的に得られるが、 P の変動の増加も考慮し、瞬間値ではなく一定期間の平均値を用いるべきである。また、弁の状態を無視して扱うべきではない。Keepに分類されるデータにおいては、OpenやCloseに比べ P_z が小さくなると期待できるためである。したがって、手法①同様にstate別で、かつ1単位の平均値 $\overline{P_z\text{Keep}}, \overline{P_z\text{Open}}, \overline{P_z\text{Close}}$ を固着の程度を示す指標とする。

(5) (検出手法③) 前の2つの手法は、運転中にある程度のデータを蓄積しないと判定することはできない。これに対して、逐次確率比検定と組み合わせることによって、オンラインで固着の程度を評価する手法を定義した。まず、現在の空気圧と固着が無い時の空気圧の差が固着の程度を表しており、これを次式で定義した(P_c^* : 固着が無い時の動摩擦力に相当する圧力)

$$D(t) = \begin{cases} P(t) - P_{nof}(t) - P_c^* & \text{(Open)} \\ -P(t) + P_{nof}(t) + P_c^* & \text{(Close)} \end{cases} \quad (3)$$

$D(t)$ は固着が無い時0近傍を平均として分布し、固着が進行していくと平均がずれる。そこで $D(t)$ の測定値に対して逐次確率比検定(SPRT法)を適用して固着の発生を判定する。

4. 研究成果

(1) 外乱実験の一部を図2に示す。固着の程度が異なる5単位の試験から任意の300秒ずつを抽出しているため、図中では300秒毎に不連続である。最上段に単位毎に同定された F_c を載せた。図2における169Nの実験は固着を模擬しておらず(固着が無いとされる)、372~985Nは固着を模擬している。PVの時系列においては764N以上、MVの時系列においては527N以上の場合を注視すると固着の進行に伴う行き過ぎが確認できるが、それ以上は言及できない。つまり、時系列を確認しただけでは F_c の異なる527, 764, 985Nの3単位において各単位の固着の程度の強弱までは分からない。挙動①に着目しても P の時系列を確認するだけでは難しい。ましてや372N程度の弱い固着では、行き過ぎすら確認できず、 P の時系列を見ても169Nと殆ど変化がない。

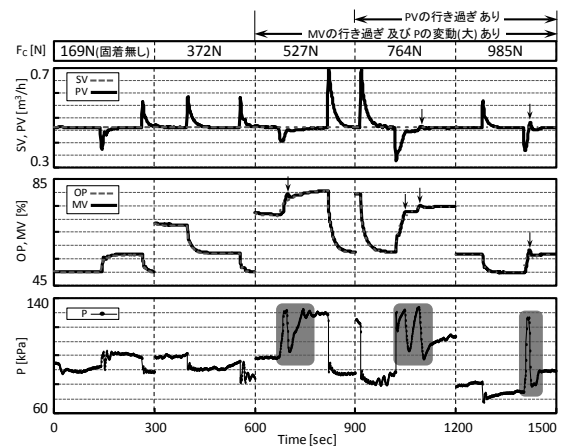


図2 外乱実験での時系列データ

(2) 図2に載せた5単位に対する手法の適用結果を表1に載せる。手法①は固着の進行に伴い指標が低下し、手法②は固着の進行に伴い指標が増加している。これらの推移は2手法の期待するところであり、大まかに言って妥当な結果である。また、実際の運転中に得られるデータに対して最も多く存在することが期待されるKeepのデータからであっても、手法②により固着の進行を捉える事ができた。さらに、時系列の観察では固着か否かの判断が困難であった372Nの実験データでも5指標中、 $\lambda_{3\text{Close}}$ を除く4つにおいて固着の進行を捉えることができた。

表1 図2の外乱実験5単位に対する適用結果

手法	指標	169N	372N	527N	764N	985N
①	$\lambda_{3\text{Open}}$	0.98	0.93	0.87	0.78	0.78
	$\lambda_{3\text{Close}}$	0.92	0.94	0.85	0.83	0.86
	$P_z\text{Keep}$	3.0	6.5	8.8	11.6	14.3
②	$P_z\text{Open}$	5.1	9.3	13.0	19.4	21.8
	$P_z\text{Close}$	4.6	9.1	13.6	18.3	21.5

(3) 72 単位全てに対する適用結果を図3に載せる。単位毎の F_c を横軸にとり、2手法の指標 λ_3, P_z を縦軸に載せた。先ほどと同様に、指標の推移は妥当な結果である。しかしながら、手法①において、OpenとCloseで指標の低下量に差があった。具体的には、 $\lambda_{3\text{Open}}$ は $\lambda_{3\text{Close}}$ に比べ固着の進行に伴い低下し易い傾向にあった。これは調節弁の給排気の構造上の問題であると考えられ、手法②にも影響した。対象とした調節弁において、Openは給気に、Closeは排気に対応する。排気は、外気にダイヤフラム室内空気を排出するだけであり、調整が易しい。一方の給気は、コンプレッサから減圧弁を介しダイヤフラム室へ供給されるため、調整に時間がかかる。このため、Openと分類されたデータの P の変動が大きく、Closeと分類されたデータの P の変動が小さい結果となった。

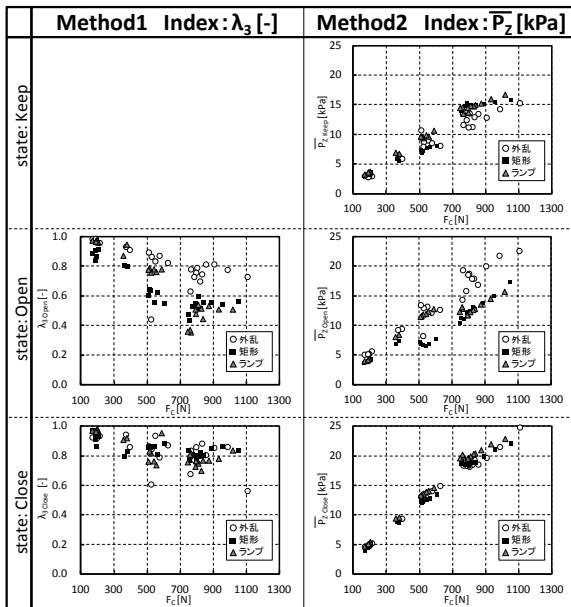


図3 手法の適用結果
(縦軸:指標, 横軸:動摩擦力)

(4) 固着がない時の3種類の制御実験で $D(t)$ を計算し、その平均 μ_0 と標準偏差 σ を決定した。 $\alpha = \beta = 0.001$ とし、またLを小さくすることで固着の弱い段階で固着を検出できるかを検証するため、 $L = \{6, 4, 3, 2, 1\}$ の5通りで検定を行った。まず、実験で設定した固着の程度に対応する動摩擦力 F_c を $D(t)$ に換算した結果を図4に示す。固着・強の時 F_c を $D(t)$ に換算すると $L=6$ をはるかに超える値となる。固着・中の時 $D(t)$ は $L=2 \sim 4$ の範囲にある。固着・弱の時 $D(t)$ は $L=1$ 以下であり、固着・無の時との差はほとんど見られない。

次に適用結果を表2に示す。固着・強の時は全てのLで「異常」と判定できており固着を検出できた。次に固着中程度の場合は $L=4$ 以下で「異常」と判定したが $L=6$ の時は矩形・ランプで判定できなかった。これは $D(t)$ が丁度 μ_0 と μ_1 の間に存在したためである。固着が弱い時はほぼ全ての実験で「正常」と判定した。これは固着・弱が極めて程度の小さい固着であるため $D(t)$ が小さく μ_0 付近に存在したためである。固着が無い時は $L=1$ の外乱時のみ「異常」と判定された。 $D(t)$ が μ_0 より明らかに大きく μ_1 付近に存在したためである。

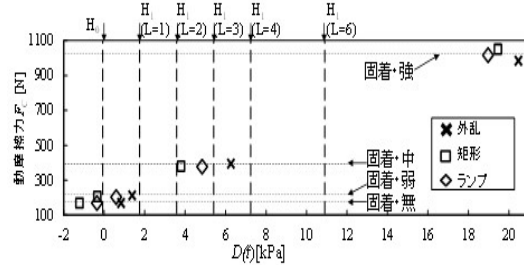


図4 動摩擦力と $D(t)$ の関係

表2 SPRT 結果(○正常 ●異常 △判定不可)

固着	L=6			L=4			L=3			L=2			L=1		
	外乱	矩形	ランプ	外乱	矩形	ランプ	外乱	矩形	ランプ	外乱	矩形	ランプ	外乱	矩形	ランプ
無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
弱	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中	●	△	△	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
強	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- Chihiro IDE, Takehiko BABA, Akemi FUJIHARA, Naoki KIMURA, Yoshifumi TSUGE, "Simulation of Pneumatic Control Valve Behavior in Consideration of Stiction", Proceeding of the 26th International Symposium on Chemical Engineering (ISChE 2013), 査読なし, Busan, Korea, PE-10, December, 2013
- Kyohei KUBO, Takehiko BABA, Akemi FUJIHARA, Naoki KIMURA and Yoshifumi TSUGE, "Behavior Simulation of Pneumatic Control Valve with Fieldbus Communication", Proceeding of the 25th International Symposium on Chemical Engineering (25th ISChE), 査読なし, Okinawa, Japan, PG-02, 15 December, 2012
- Yuta OKAMOTO, Takehiko BABA, Akemi FUJIHARA, Naoki KIMURA, and Yoshifumi TSUGE, "The method of modeling pneumatic control valve behavior with communicating via Fieldbus", Proceeding of the 24th International

Symposium on Chemical Engineering
(24th ISChE), 査読なし, Gyeongju,
Korea, OD-1-1, 3 December, 2011

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 久保恭兵, 藤原朱実, 木村直樹, 柘植義文, 馬場岳彦, ”探索的因子分析を利用した調節弁の早期固着検出法”, 日本設備管理学会秋季研究発表大会, 2013 年 11 月 21 日, 北九州市
- ② 岡本侑大, 馬場岳彦, 藤原朱実, 木村直樹, 柘植義文, ”フィールドバス通信対応型自動調節弁における固着現象のモデル化”, 日本設備管理学会秋季研究発表大会, 2011 年 12 月 16 日, 青山学院大学(東京)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柘植 義文 (TSUGE YISHIFUMI)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号 : 00179988