PID調節計

村上 良明

(株)エム・システム技研 マーケティング部 (〒108-0014 東京都港区芝4-2-3 NOF芝ビル1F)

PID Controller

Yoshiaki MURAKAMI

Marketing Department, M-System Co., Ltd., 4-2-3 Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014

(Received June 10, 2011)

PID control has been developed as a critical automation technology for more than 70 years. Today it is classified as classical control method, but still widely used, mainly for process automation in steel, petrochemical, chemical, food and other industries. This article introduces basic functions and applications of PID controller, a control device typically used for process automation with examples of actual products in the market.

Key Words: Feedback control, PID, Single loop controller, Function block, Combustion control

1. はじめに

PID制御方式の歴史は古く、1920年代には着想が始まり30年代にはPID制御方式を実現する調節計の原型が登場したとされている。今日においては、古典的な制御方式として分類されているが、それでもなお、産業、医療機器、自動車、航空機などさまざまな分野における制御に広く活用されている。とりわけ鉄鋼、石油、化学、食品などの装置産業におけるプロセスオートメーション(PA: Process Automation)では必要不可欠な自動化技術要素として主要な位置を占めている。本稿では、主としてPAにおいて使用されるPID制御機能を搭載した調節計(以下、PID調節計とする)について、製品例を挙げながら基本的な機能や応用方法などを中心に解説する。なお、PID制御方式に関する理論的な解説に関しては、昨今では著書やインターネット上から多くの情報を容易に得ることが可能と考えられるため、ここでの詳述は割愛する。

2. PID制御と調節計

2.1 PID制御について

PID制御とはフィードバック制御の一種であり、一巡するフィードバック制御ループにおいて、目標値(=設定値, SP: Set Point)に対して測定値(PV: Process Variable)が一致するように操作量(MV: Manipulated Variable)を加減する制御方式である(Fig. 1参照)。実際のPAにおいては、制御対象からPVを発信するセンサ、制御を行

うPID調節計、MVを制御対象に伝えるアクチュエータ、そして制御対象といった一巡する制御ループが構成されている。

PID制御では、比例要素(P: Proportional)、積分要素(I: Integral)、および微分要素(D: Derivative)の組み合わせ(総和)で操作量が定まる。PID制御の基本的なアルゴリズムを(1)式に示す。

$$MV = K_p \cdot e + K_p \cdot 1/T_i \cdot \int e \, dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (1)$$

P: 比例要素 I: 積分要素 D: 微分要素

e : 偏差 [= 目標値(SP) - 測定値(PV)]

K_p : 比例ゲイン

T_i : 積分時間

T_d : 微分時間

上記(1)式からも明らかなように、比例要素(P)は偏差(e)に比例して操作量を変える動作を行う。もし、比例要素のみで操作量が決まるとすれば、偏差が0の時の操作量で目標値と測定値が一致しない限り、何らかの偏差が存在することになる。この偏差をオフセット(定常偏差)と呼ぶ。

積分要素(I)は、偏差の時間積分に比例する値で操作量を変える動作を行う。偏差が0になるまで操作量が変化するため、比例要素と組み合わせることによりオフセットを0にすることができる。比例+積分要素による制御方式(PI制御)は、流量制御や圧力制御など広い範囲で採用されている。

Fig. 1 Basic block-diagram of PID control loop.

微分要素(D)は、偏差の時間微分に比例する値で操作量を変える動作を行う。偏差が変化しない限りその値は0であり、比例要素や積分要素の動的な効果を補完する役割をする。微分要素は、熱容量の大きなプロセスや応答速度の遅いプロセスの制御などにおいて効果を発揮し、比例+積分+微分要素による制御方式(PID制御)は、温度制御や成分制御(例：pH値制御)など広い範囲で採用されている。

これらP、I、D各要素の効果は、パラメータ(K_p 、 T_i 、 T_d)の値によって変化し、それぞれの影響は概ね次のようなものである。

- ・ K_p ：この値を大きくすれば、オフセットの幅が小さくなるが、制御ループは振動的になる。大きくし過ぎると発散する。
- ・ T_i ：この値を小さくすれば、オフセットの収束時間が短くなる。小さくし過ぎると制御ループは振動的になり、ついには発散する。
- ・ T_d ：この値を大きくすれば、制御ループの応答が早くなる(振動の周期が短くなる)。大きすぎると、小さな外乱の影響で操作量が過度に変化する。

実際のPAの制御ループでは、SPを変更した場合や何らかの外乱によりPVが変動した場合においても、偏差が速やかに収束して制御ループが安定した状態に至るように、制御対象の特性に応じた最適なパラメータの値(最適値)を与えることが望ましい。ここで、最適状態を判断する評価方法にはいくつかの種類があるが、例えば振幅減衰比が25%ダンピング^{†1}となる状態を最適とする評価方法などが良く知られている。また、最適値の求め方としてもいくつかの方法があり、代表的なものとして「Ziegler Nicholsの方法」、「高橋の方法」、「Chien Hrones Reswickの方法」などがよく知られている。なお、最近のPID調節計は、最適パラメータの自動計算(オートチューニング)機能を有する製品が多い。

2.2 PID調節計

PID調節計として、これまでに多くの種類の製品が実

用化されてきた。古くは、空気圧力を情報伝達媒体とした「空気式計器」から始まり、次にアナログの電気信号を真空管やトランジスタで増幅・演算処理する「電子式計器」が登場した。やがては、その電子部品がIC、LSIへと進化し、ついにマイクロプロセッサを搭載する製品も現れた。そして、現代は単体製品としての調節計から総合的な制御システムに至るまで、PID制御機能を有する様々な種類の製品が存在し、それらは下例に挙げるようなカテゴリに大別できる。

- ①シングルループ・コントローラ^{†2}：主としてPA市場で用いられる、代表的なPID調節計
 - ②温度調節計：温度の制御用に特化した調節計
 - ③PLC(Programmable Logic Controller)：論理制御を主体とした制御機器でPID制御機能も搭載可能な製品が多い
 - ④DCS(Distributed Control System)：主としてPA市場で用いられる、中～大規模なプラントの総合制御システム
- 以下、本稿では、現代のPID調節計の代表として①に属する製品について解説する。

3. PID調節計の製品例

3.1 概要

Fig. 2に示すのは、最新のシングルループ・コントローラ(以下、コントローラとする)の一例であるエム・システム技研製「SCシリーズ」である。以下に、その概要を示す。

(1) 外形、寸法

一般に、コントローラをはじめとするPA用の計器類は、パネル(計装盤)の表面に実装して使用され、その取り付け穴(パネルカット)の寸法は、国際規格(IEC61354/DIN43700)として規定されている。従って、メーカーや種類の異なるコントローラやその他の計器でもパネル上に整然と並べて実装が可能である。

(2) 前面部

前面部には、表示・操作のタッチパネル付きカラー

^{†1} 制御ループのSPをステップ状に変化させたとき、振動するPVの波高値が周期ごとに減衰する比率。例えば、波高値が毎周期1/4に減衰した場合に25%ダンピングと呼ぶ。

^{†2} DCSが数十ループ分のPID制御を1個のマイクロプロセッサで処理するのに対して、1ループ分のPID調節計が1個のマイクロプロセッサを搭載しているためにこのように呼ばれるようになった。マイクロプロセッサが高級パーツである時代であった。

Fig. 2 Product example of Single Loop Controller SC series (Model : SC210), Manufactured by M-System Co., Ltd..

液晶 (4.3型TFT, 256色, 480 × 272ドット) が搭載されている。また、液晶の下部には、制御モードの自動/手動の切り換えボタン、および手動時のMVの操作ボタン類が配置されている。

液晶には、運転用、およびパラメータ類の設定用に各種の画面が表示される。主な画面表示例を下記に示す。

- ① バーグラフ表示画面：PID調節計の典型的な表示パターンである。制御ループの変数 (PV, SP, MV) がバーグラフとデジタル値で表示され、ループの状態が一目で判別できる (Fig. 3)。タッチパネルからSPの設定や制御モードの変更などができる。
- ② ショートトレンド表示画面：PV, SP, MVやその他の内部変数のヒストリカルデータ (履歴データ) を時系列のトレンドグラフとして表示する。PID調節計と記録計の機能を併せた利便性の高い表示画面である。最新の調節計でのみ実現可能となった (Fig. 4)。
- ③ チューニング画面：P, I, Dのパラメータを設定 (チューニング) するための画面である。小さなトレンドグラフ表示部も付属するので、ループの制御変

数の動きを観察しながらパラメータの調節が可能である。なお、本製品にはオートチューニング機能が搭載されているので、パラメータの最適値を自動的に算出、設定することも可能である (Fig. 5)。

Fig. 4 Short trend view.

Fig. 3 Bargraph display view.

Fig. 5 Tuning view.

(3) 端子台部

計器背面部は、配線用の端子台が取り付けられており、ここに制御ループのPVやMVをはじめとする各種の電気信号(PID制御以外の各種付帯機能に使用する信号)を接続する(信号の種類と点数はFig. 2参照)。

(4) バックアップユニット

コントローラには、MVのバックアップユニットを搭載したモデルも用意されている。バックアップユニットは、万一、調節計の本体が故障した場合においてもMVの維持・操作を可能とするためのものであり、本体とは独立したハードウェアとして端子台部の内側に実装されている。Fig. 2に見える前面部の5連LEDはバックアップユニットが出力するMVの表示用である。バックアップユニット付きの調節計は、PAや発電所などで高い信頼性が要求される制御対象向けに適用される。

3.2 制御・演算機能

コントローラは、基本となるPID制御機能以外にも様々な制御・演算機能を有する。これらの制御・演算機能は、小分割された機能単位でファームウェア化され(これをファンクション・ブロックと呼ぶ)、本体のメモリ上に実装されている。ユーザは、適切な演算ブロックを選択して組み合わせることによって、目的に応じた制御内容を実現することができる。主なファンクション・ブロックの種類を以下に示す。

①調節器ブロック：基本的なPID制御機能に加え、PVに対する警報設定機能やMVの上下限值制限や変化率制限など付帯的な機能を持つ。調節器ブロックは2個実装され、2ループ分までのPID制御ループを構成できる。

②演算器ブロック：下記に大別される各種演算ブロックが実装されている。

- ・一般演算器ブロック：四則演算、関数演算、時間関数演算(一次遅れフィルタ等)、警報設定、信号制限、信号選択、パルス入力処理、タイマ/カウンタ、その他—合計40個使用可能
- ・大型演算器ブロック：折れ線リニアライザ、プログラム設定、その他—合計8個使用可能
- ・シーケンスブロック：論理演算・制御(シーケンス)用ブロック—合計12個使用可能(命令文 最大1,068個記述可能)

3.3 通信機能

コントローラには、通信機能を備えたモデルも用意されている。通信機能には、以下の2種類がある。

①機器間通信：コントローラ間、あるいはコントローラと拡張用の入出力ユニット(別製品)間で通信を行い、ワードデータやビットデータの授受が可能である。

通信の物理層はRS485でトークン方式によるPeer-to-Peer通信^{†3}を行う

②上位通信：例えば、パソコン(PC)でコントローラの持つ情報を収集する場合や、逆にPCからコントローラへ各種のパラメータを設定するために通信を行う。通信の物理層は、Ethernet^{†4}、もしくはRS485で通信プロトコルとしてModbus^{†4}を使用する。

これらの通信機能を使って複数のコントローラやPCでネットワークを構成し、小～中規模な制御システムを構築することも可能となり、DCSに準ずる機能を有するシステムを実現することができる。

4. PID調節計の応用例

4.1 簡単な応用例—熱交換機の温度制御

PID調節計の簡単な応用例として熱交換機における温度制御を挙げる(Fig. 6参照)。本例における熱交換機は、水を蒸気で加温して温水を作る装置である。制御の目的は熱交換機の出口における温水温度(T)を一定に保つことである。温水温度は、熱媒である蒸気の流量(W)を変えることによって制御可能である。ここで、主な外乱となるのは水(=温水)の流量(Q)の変動であり、外乱に対しても温水温度の変動を最小に抑えられるように、PID制御のパラメータを調整する。

4.2 少し複雑な応用例—ボイラの燃焼制御

PID調節計の少し複雑な応用例として、コントローラを2台使用したボイラの燃焼制御の例を挙げる(Fig. 7参照)。本例におけるボイラは、発電所やプロセス産業などに設置される、重油を燃料とした一般的な蒸気発生装置

Fig. 6 Temperature control system for heat exchanger.

^{†3} ネットワーク上の任意の端末間で通信ができるアーキテクチャ。サーバ/クライアント、あるいはマスター/スレーブの位置付けが不要。

^{†4} Modicon社がPLC用に開発した通信プロトコル。仕様が公開されており、工業計器やPCの通信に広く普及している。基本的にはマスター/スレーブ方式の通信アーキテクチャ。

Fig. 7 Combustion control system for boiler.

置である。

ボイラには、燃料とその燃焼用の空気が投入され燃料の燃焼エネルギーにより蒸気が発生する。ボイラに於ける燃焼制御の主目的は、発生する蒸気の圧力を一定に保つことである。ここで、主な外乱となるのは蒸気流量(W)の変動、すなわち負荷変動である。この時、投入する燃料の流量(F)を負荷に追従させ、発生させる蒸気量を変更する必要がある。一方、燃料が燃焼する際には、燃料の流量に対する適切な空気の流量(Q)を与える必要がある。空気の量が過剰であれば加熱された空気により持ち去られるエネルギーが増えて発生蒸気に対するエネルギー効率が低下し、逆に少なすぎれば不完全燃焼を起こして燃焼効率が低下するだけでなく、黒煙などを発生して大気汚染の原因ともなるからである。ここで、空気と燃料の流量比($Q:F$)を空燃比(μ)といい、ボイラの運転においては常に適切な空燃比を保つことが重要である (Fig. 8 参照)。

負荷変動時も空燃比が適切に保たれることが望ましいが、実際のプロセスではどちらかの流量の追従が遅れる。そのため、一時的に空燃比は適正值より過大になったり、過小になり好ましくない。そこで、このような過渡的な状態においても適正な空燃比を保つために本例のような制御手法が採られる (クロスリミット制御とも呼ばれる)。クロスリミット制御を実現するために、コントローラでは Fig. 7 に示すように PID 制御ループ以外にも信号選択 (ハイ/ローセクタ)、加減算、乗除算などの演算ブロックが適用され複雑な制御ループが構成されている。制御ループの詳細な動作については説明を割愛するが、主な動作を下記する。

①主蒸気圧力制御ループ：PID 制御により主蒸気圧力 (P) を一定に制御する。MV は「ボイラマスタ」信号と呼ばれる。

②燃料流量制御ループ：基本的にはボイラマスタを PID 制御の SP として¹⁵燃料流量を制御する。クロス

① Fuel / Air ratio	⑤ Extreme low excess air
② Increase CO and smoke density	⑥ Low excess air
③ Increase NO _x , SO _x	⑦ Over excess air
④ Short air	

Fig. 8 Relationship between Fuel/Air ratio and combustion status.

¹⁵ 本例のように、上位のPID制御ループ (図中のPIC) のMVを下位のPID制御ループ (図中のFIC) のSPとして与える制御方式を「カスケード制御」と呼ぶ。

リミット制御によって、SPが減少する方向の動きに対しては制限がかからないが、逆に増加する方向の動きは一定の範囲内に制限される。

- ③空気流量制御ループ：基本的にはボイラマスタに空燃比を乗じた値をPID制御のSPとして空気流量を制御する。SPの可動範囲はクロスリミット制御により制限され、過渡時においても常に不完全燃焼にならないような値が設定される（負荷が増加する時は燃料流量に対して空気流量が先行して増加し、逆に負荷が減少する時は、空気流量が遅れて減少する）。

5. おわりに

PID調節計について、最新の製品例を挙げて解説してきた。冒頭にも述べたように、PID調節計は長い歴史を持つ製品であるが、最近はこのようなPID調節計の国産製品が市場から次第に姿を消している。我が国においてプロセス産業の工場が新設されることが少なく、マーケットサイズが縮小してきたからである。従って、現在、調節計の国内需要の多くは古い調節計のリプレースが目的であると考えられる。しかし、一方ではこのようなプロセス産業の工場が稼働を続けるためにはPID調節計はなくてはならない製品であり、その需要が消えることは当分の間はないであろう。

なお、本稿では、応用例などPAに偏向した内容であるために、読者にはわかりにくい点が多々あったかも知

れない。筆者としては、はなはだ恐縮であるがPID制御方式はあらゆる分野において応用が可能であり、レーザー研究に携わる読者諸賢にとって少しでも参考になれば幸甚である。

参考文献

- 1) 千本 資，花瀬 太：計装システムの基礎と応用（オーム社 1987年刊）。
- 2) 上記1)の英訳版
Tasuku Senbon, Futoshi Hanabuchi (Eds.): *Instrumentation Systems - Fundamentals and Applications* (1987 Ohmsha).
- 3) F. G. Shinskey (岩永 正雄・小川 積幸・栗原 宏文・長山 千五郎訳)：プロセス制御システム (好学社 1971年刊)。
- 4) 広井 和男：PID制御のお話 (株式会社エム・システム技研広報誌「エムエスツデー」2-12, 2004)。
http://www.m-system.co.jp/mstoday1/MSTback/data/2004/02/PID_T.htm
- 5) (株)エム・システム技研 システム技術部：データロガー今昔 (「エムエスツデー」1-8, 2006)。
<http://www.m-system.co.jp/mstoday/plan/serial/2006datalogger/01/index.html>
- 6) (株)エム・システム技研：計装豆知識 クロスリミット制御 (「エムエスツデー」10, 1995)。
http://www.m-system.co.jp/mstoday/plan/mame/b_control/9510/index.html
- 7) (株)エム・システム技研：計装豆知識 Modbus (「エムエスツデー」10, 1999)。
http://www.m-system.co.jp/mstoday/plan/mame/b_network/9911/index.html
- 8) (株)エム・システム技研：プロダクツレビュー シングルループコントローラSC100/200 (「エムエスツデー」10, 2010)。
<http://www.m-system.co.jp/mstoday/backnum/2010/10/sc/index.html>