

ガウス混合回帰モデルを用いたPI（比例積分制御）パラメータの最適化 ～圧力式マスフローコントローラ（MFC）D700への適用～

PI Parameter Optimization for Pressure-Based MFC (D700) Using Gaussian Mixture Model

上田 喬之

UEDA Takayuki

樋口 世治

HIGUCHI Seiji

瀧尻 興太郎

TAKIJIRI Kotaro

林 大介

HAYASHI Daisuke

半導体産業では膨大な数のマスフローコントローラ(MFC)が使用されており、MFCの効率的な生産方法が求められている。効率的な量産には、設定流量を実現するための比例積分(PI)制御のゲイン調整が本質的である。ゲイン調整は、設定毎の応答波形における応答時間とオーバーシュート量が評価指標を満たすように行われる。本論文で我々は圧力式MFC(D700)の製造に適用可能な、ガウス混合モデル(以下GMM)とその逆解析を用いたPIゲイン調整の簡易な方法を提案する。MFCの標準ユニットにおけるゲインと評価指標の関係はGMMとしてモデル化される。その逆解析では、基準機と試験機の差分が算出される。その差分は単純なシフトで補正できるという前提のもと、試験機の仕様を満たす可能性の高いゲインが探索される。我々はこの手法を7つの試験機に適用した結果、すべての試験機のゲインをわずか数回の反復で調整することができた。

キーワード

半導体, ガウス混合モデル, PI制御, マスフローコントローラ, 製造

A vast number of mass flow controllers (MFCs) are used in semiconductor industry. An efficient production method of MFC is required. The gain tuning of the proportional-integral (PI) control to realize a setting flow rate is essential for efficient mass production. The gains are tuned to meet the specifications required for evaluation indices of response time and overshoot amount in a step response waveform. In this paper, we propose a simple method for the PI gain tuning using the Gaussian Mixture Model (GMM) and the direct inverse analysis applicable to the pressure-based MFCs' production. The relationship between the gains and evaluation indices for a standard unit of the MFC is modeled as the GMM. The direct inverse analysis calculates the difference between the standard and a test unit. Under the assumption that the difference can be compensated by a simple shift, gains likely to meet the specifications for the test unit are searched. We applied the method to seven test units. The result showed that the gains of all the test units were tuned within only a few iterations.

Keywords

Semiconductor, Gaussian mixture mode, PI control, Mass flow controller, Manufacturing

はじめに

半導体製造においては、流体の質量流量を精密に制御するマスフローコントローラ(MFC)が広く用いられている^[1]。半導体製造の全工程は多くの反応過程から構成されるため、各プラントには膨大な数のMFCが必要となる。そのため、MFCの効率的な生産方法の確立が重要となっている。

MFCはバルブの開度を調整することで流体の流量を制御し、設定流量を実現する。圧力センサを基に流量を測定する圧力式MFCは、応答性が高く高精度であるという利点がある。MFCの生産には、その調整のためのアルゴリズムを含む制御設計が非常に重要である。制御アルゴリズムを含む制御設計が非常に重要である。制御アルゴリ

ズムには比例積分(PI)制御や比例積分微分(PID)制御が広く用いられており、設定流量と測定流量の差異を収束させるように、PIゲインやPIDゲインがバルブに印加する電圧を決定する。それらのゲインは設定毎の応答波形から得られる応答時間やオーバーシュート量といった評価指標が要求仕様を満たすように調整される。MFCの生産では、ゲインは個々の個体毎に試行錯誤的に調整されており、効率的な生産方式の確立を阻むボトルネックとなっている。GMMは、複数の変数間の関係をガウス確率密度の重ね合わせで表現するシンプルなモデルである^{[2],[3]}。この適用により、ゲインとその結果として得られる評価指標の関係は単純なモデルで表現できる。さらに、ベイズの定理に基づく逆解析により、得られた指標に対して最も可能性の高いゲインを逆に推定することもできる。しかし、制御対象に実装されている部品は個体毎に特性が異なるため、MFCの単一個体でモデル化された関係をすべての個体に単純に適用することはできない。

本稿で我々は、圧力式MFC (D700)の生産に適用可能なGMMとその逆解析を用いたPIゲイン調整の簡易な方法を提案する。先ず標準機についてPIゲインと評価指標の関係を調べる。次にGMMとその逆解析を用いて、各々の試験機と標準機との差分を算出する。そしてその差分を補正することで、全ての試験機の仕様を満たすようにゲインを調整する。我々はこの方法を定式化した後、量産適用性を確認するために、圧力式MFC数台の調整に適用した。

圧力式MFCの特性

MFCの構造

Figure 1に圧力式ガスMFCの概略図を示す。MFCはピエゾバルブ、2個の圧力センサ、温度センサ、層流素子抵抗体(リストリクタ)、および制御回路から構成される。ガスの入口側および出口側は、それぞれ上流および下流の配管に接続される。入口側から流入したガスは、ピエゾバルブとリストリクタを通過し、出口側から流出される。出力ガスの流量(Q_{out})は次式で算出される。

$$Q_{out} = k(p_1^2 - p_2^2). \tag{1}$$

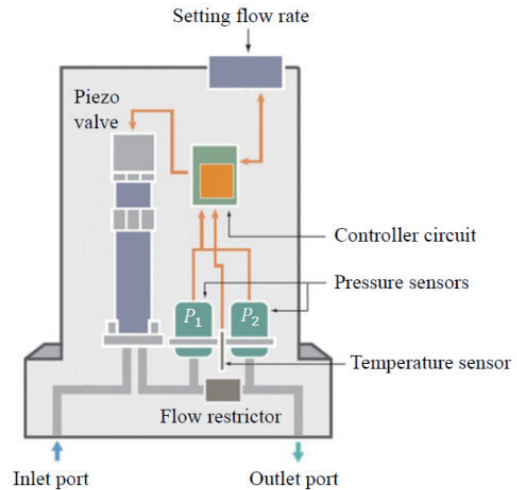


Figure 1 Internal structure of a pressure-based gas MFC.

ここで k は温度影響を加味したリストリクタ定数、 p_1 , p_2 はそれぞれ圧力センサ P_1 , P_2 の出力である。

制御回路は、印加電圧によりバルブ開度を調整し、設定流量(Q_{set})を実現する。制御回路に搭載されたPI制御のブロック図をFigure 2に示す。ここで K_p , K_I はそれぞれPゲイン, Iゲインを意味する。これらのゲインは、制御対象の特性(ピエゾバルブやリストリクタの特性, センサの遅れなど)に合わせて調整される。さらに、個体差が存在するため、MFC1台毎にゲイン調整が必要となる。

PIゲイン調整の評価指標

本稿では、0→100%FS入力に対するステップ応答において、以下の2つの評価指標に基づいてPIゲインを調整する場合を考える。 (“%FS”は制御フルスケールに対して規格化された流量を意味する)：(i) T_r (ms)： Q_{set} 入力から Q_{out} が Q_{set} の98%に達するまでの時間として定義された応答時間。(ii) Q_{os} (%)： 次のように定義されたオーバーシュート量。

$$Q_{os} = \frac{Q_{peak} - Q_{set}}{Q_{set}} \times 100, \tag{2}$$

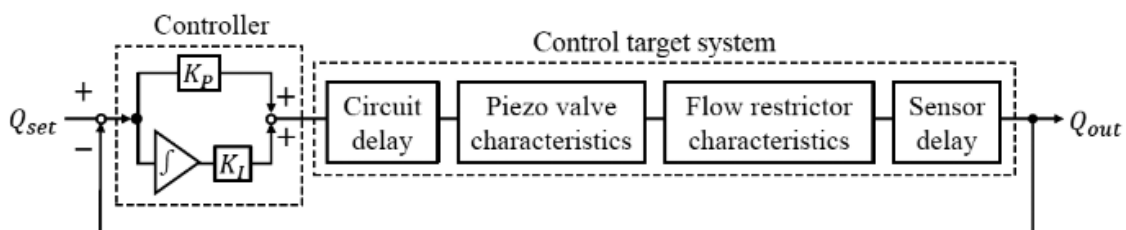


Figure 2 Block diagram of PI control system for the pressure-based MFC.

ここで Q_{peak} は Q_{out} が Q_{set} を超えた後、 Q_{set} との差が最大となる時の流量である(Q_{out} が Q_{set} を超えない場合は $Q_{os}=0$ となる)。ステップ応答の試験時間は200 msに固定されている。仕様では T_r は 85 ± 5 ms, Q_{os} は $0 \pm 0.55\%$ の範囲内にあることが要求されている。ここで、指標の最適値を $(T_{r0}, Q_{os0}) = (85, 0)$, その許容範囲を $(\Delta T_r, \Delta Q_{os}) = (10, 1.05)$ と表示することとする。

我々は量産されたMFCの中から任意に選んだ標準器について、 (K_p, K_I) と (T_r, Q_{os}) の関係性を調べた。 (K_p, K_I) を $[0.5, 1.5]$ の範囲で0.02刻みに変化させ、合計2,500通りのステップ応答波形とその (T_r, Q_{os}) を取得した。本稿における標準機では、 (T_{r0}, Q_{os0}) に最も近い指標を与えた最適ゲインは $(K_{p0}, K_{I0}) = (0.94, 0.94)$ であった。Figure 3は $(K_p, K_I) = (K_{p0}, K_{I0})$, $(1.50, 0.50)$, および $(0.50, 1.50)$ におけるステップ応答波形を示している。 $(K_p, K_I) = (K_{p0}, K_{I0})$ の場合、 $(T_r, Q_{os}) = (85, -0.046)$ の好ましい波形が得られた。 $(K_p, K_I) = (1.50, 0.50)$ の場合、波形は大きなオーバーシュートを示した。 $(K_p, K_I) = (0.50, 1.50)$ の場合、波形は非常に遅い応答を示した。

このステップ応答を簡単に評価するために、次のような偏差指数 z を定義した。

$$z = \frac{|T_r - T_{r0}|}{\Delta T_r} + \frac{|Q_{os}|}{\Delta Q_{os}}. \quad (3)$$

いずれかの指数が確実に仕様を満たすための必要条件は $z \leq 1.02$ であり、両方の指数が確実に仕様を満たすための十分条件は $z \leq 0.50$ である。 $0.50 < z \leq 1.02$ の場合、式(3)の各項のバランスによって仕様が満たされるかどうかが決まる。標準機の $K_p - K_I$ 平面における z の分布は、Figure 4に

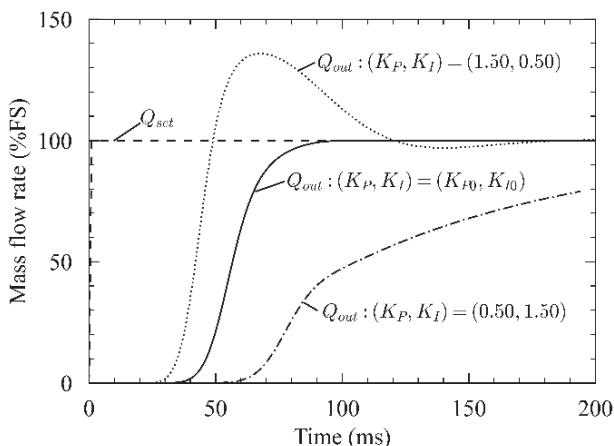


Figure 3 Step response waveforms of standard unit at $(K_p, K_I) = (K_{p0}, K_{I0})$, $(1.50, 0.50)$ and $(0.50, 1.50)$.

必要条件(白破線)および十分条件(白実線)の領域が、 (T_{r0}, Q_{os0}) の位置(赤点)とともに示されている。仕様を満たす可能性の高いPIゲインは、 $K_p \approx K_I$ の周辺にある狭い領域に位置している。この分布は、圧力式のMFC構造の特性を反映している。

PIゲイン調整方法

PIゲイン調整の手順は、標準機の学習と試験機の調整という2つのフェーズに分かれる。定式化にあたって、説明変数と目的変数 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) を次のように定義する。

$$\mathbf{x} = (K_p, K_I), \quad (4)$$

$$\mathbf{y} = (T_r, Q_{os}). \quad (5)$$

また、 $\mathbf{x}_0 = (K_{p0}, K_{I0})$, $\mathbf{y}_0 = (T_{r0}, Q_{os0})$ とする。

標準機の学習

標準ユニットの2,500個の (\mathbf{x}, \mathbf{y}) データから、確率密度分布はGMMの形式でモデル化される。

$$p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n_G} \pi_i N\left([\mathbf{x}, \mathbf{y}] \mid [\boldsymbol{\mu}_{x,i}, \boldsymbol{\mu}_{y,i}], \begin{bmatrix} \Sigma_{xx,i} & \Sigma_{yx,i} \\ \Sigma_{xy,i} & \Sigma_{yy,i} \end{bmatrix}\right). \quad (6)$$

ここで、 π_i は i 番目のガウス分布の重み、 $\boldsymbol{\mu}_{x,i}$, $\boldsymbol{\mu}_{y,i}$ はそれぞれ \mathbf{x}, \mathbf{y} の平均ベクトル、 $\Sigma_{xx,i}$, $\Sigma_{xy,i}$, $\Sigma_{yx,i}$, $\Sigma_{yy,i}$ はそれぞれ \mathbf{x}, \mathbf{y} の分散共分散行列であり、これらは期待値最大化法によって決定される。ガウス分布の個数 n_G は、過学習を起こすことなく二乗誤差を最小化するように決定する。この場合、 $n_G = 10$ とした。

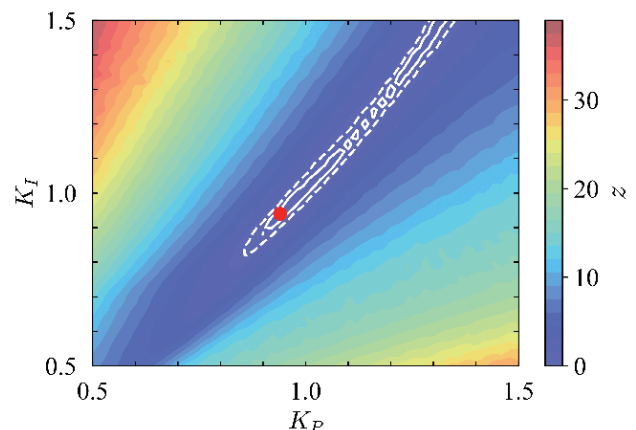


Figure 4 Distribution of the deviation index z for the standard unit (See Eq. (3)).

試験器のPIゲイン調整

初期ゲインを $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ として、各試験機のステップ応答波形を取得する。もし、試験機の $p(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ が標準機のものとはほぼ同じであれば、結果の \mathbf{y} は即座に仕様を満たすことになる。結果の \mathbf{y} が仕様を満たさない場合、 \mathbf{y} に関するGMMの逆解析が適用され、標準機と同じ \mathbf{y} が得られる予測ゲイン $\hat{\mathbf{x}}(\hat{K}_p, \hat{K}_I)$ が求められる。与えられた \mathbf{y} における \mathbf{x} の確率密度は、次式で計算できる。

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n_G} \omega_{y,i} p(\mathbf{x}|\mathbf{y}, \boldsymbol{\mu}_{y,i}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i}), \quad (7)$$

ここで、 $p(\mathbf{x}|\mathbf{y}, \boldsymbol{\mu}_{y,i}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i})$ は $\boldsymbol{\mu}_{y,i}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i}$ および与えられた \mathbf{y} の下での、式(6)における i 番目のガウス分布における \mathbf{x} の確率密度分布であり、 $\omega_{y,i}$ は次式で計算される重みである。

$$\omega_{y,i} = \frac{\pi_i p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\mu}_{y,i}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i})}{\sum_{j=1}^{n_G} \pi_j p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\mu}_{y,j}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,j})}. \quad (8)$$

与えられた \mathbf{y} における i 番目のガウス分布の \mathbf{x} の平均ベクトルは次のように計算される。

$$\mathbf{m}_i(\mathbf{y}) = \boldsymbol{\mu}_{x,i} + (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}_{y,i}) \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i}^{-1} \boldsymbol{\Sigma}_{yx,i}^{-1}. \quad (9)$$

試験機の z 分布は標準機の分布を \mathbf{x} 方向にシフトさせるだけで近似的に重なるものと仮定すると、新たに定義された \mathbf{x} ,

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}, \quad (10)$$

は試験機に対し、 \mathbf{y}_0 に近い \mathbf{y} を与えることが期待される。ここで、シフトベクトルは

$$\Delta\mathbf{x} = (K_{p0} - \hat{K}_p, K_{I0} - \hat{K}_I), \quad (11)$$

である。新しい \mathbf{x} で再び仕様を満たす \mathbf{y} が得られない場合、反復回数 n が特定の最大値 n_{max} に達しない限り、同じサイクルが繰り返される。この手順のフローチャートを Figure 5 にまとめる。

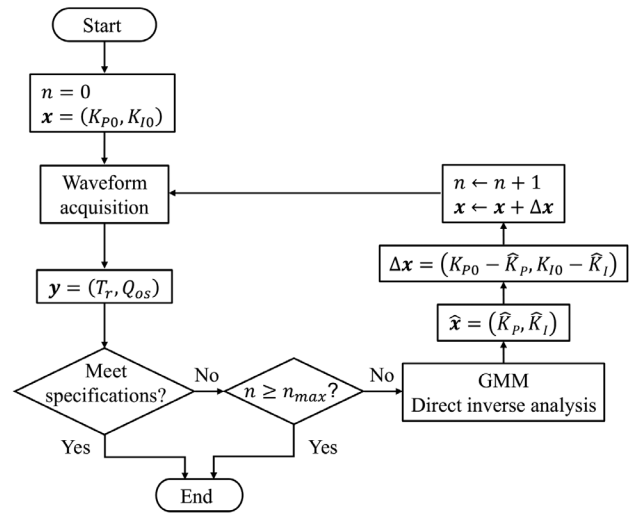


Figure 5 Flow chart of PI tuning for test units.

結果

本PIゲイン調整方法を7つの試験機に適用した。結果を Table 1 に示す。本試験では $n_{max} = 10$ と設定していたが、すべての試験機で仕様を満たす評価指標が $n \leq 4$ で得られた。

Table 1 Results of PI tuning for test units

Unit no.	(K_p, K_I)	T_r (ms)	Q_{os} (%)	n
1	(0.91, 0.88)	82	0.214	2
2	(0.94, 0.94)	86	-0.061	0
3	(0.97, 0.91)	86	-0.165	1
4	(0.90, 0.86)	84	-0.161	4
5	(0.90, 0.85)	88	-0.228	4
6	(0.93, 0.89)	84	-0.118	1
7	(0.99, 0.98)	84	-0.174	1

必要な反復回数は $n = 0-4$ とユニット毎に異なっていた。この違いを考察するために、反復回数が最小(No. 2)と最大(No. 4)の試験機の z 分布を調べた(Figure 6)。両ユニットとも、 $K_p \approx K_I$ の周辺に必要十分な領域を持つ標準機の分布と類似した分布を示した。したがって、試験機の z 分布は標準機の分布を \mathbf{x} 方向にシフトさせるだけで近似できるという仮定は適切であったことが分かる。(No. 4)の必要十分領域の位置と面積は、(No. 2)の標準の分布と比較して、より異なっていたため、(No. 4)の試験機は(No. 2)よりも多くの反復を必要とした。しかし、その差は逆解析と \mathbf{x} 方向シフトのサイクルを繰り返すことで十分補えるほど小さかった。目標波形を実現する可能性が高いPIゲインが繰り返して設定されるため、少ない反復で目標を達成することができた。

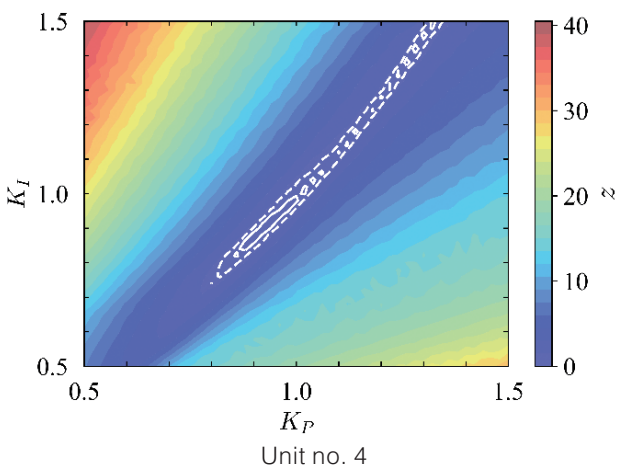
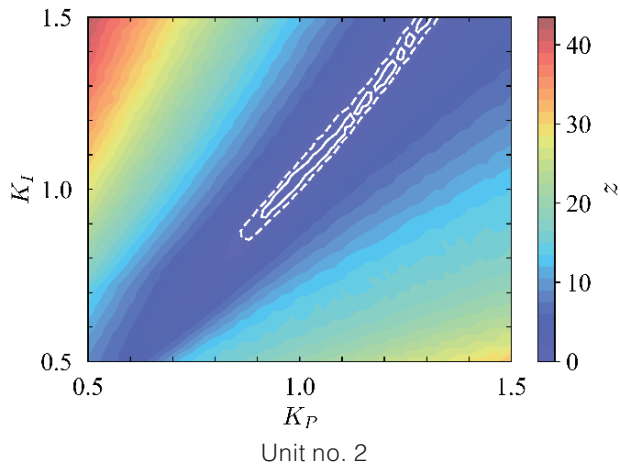


Figure 6 Comparison of distributions of the deviation index z (See Eq. (3))

おわりに

本稿では圧力式MFCの量産に適用可能なGMMとその逆解析を用いたPIゲイン調整方法を提案した。我々はこの方法を7つの試験機に適用した結果、すべての試験機のゲインをわずかに数回の反復で調整することが出来た。この方法は $K_p - K_i$ 平面上の狭い領域に位置する最適ゲインを効率的に見つけることができるため、制御対象が非常に複雑な圧力式MFCの量産に対して有望な方法である。我々はこの方法により、圧力式MFCの製造プロセスを簡素化し、安定供給に貢献できると確信している。

* 編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] Böer KW, Pohl UW “Semiconductor physics”, Springer, Berlin, 2023.
- [2] N. Shimizu, H. Kaneko “Direct inverse analysis based on Gaussian mixture regression for multiple objective variables in material design”, *Materials and Design*, Vol. 196, 109168, 2020.
- [3] H. Kaneko “True Gaussian mixture regression and genetic algorithm-based optimization with constrains for direct inverse analysis”, *Science and Technology of Advanced Materials: Methods*. Vol. 2, No. 1, pp. 14-22, 2022.



上田 喬之

UEDA Takayuki

株式会社堀場エステック
開発本部 Gas Product開発部
チームリーダー
Section Leader
Gas Product Development Dept.
Research & Development Division
HORIBA STEC, Co., Ltd.



樋口 世治

HIGUCHI Seiji

株式会社堀場エステック
開発本部 要素技術開発部
Elemental Technology Development Dept.
Research & Development Division
HORIBA STEC, Co., Ltd.



瀧尻 興太郎

TAKIJIRI Kotaro

株式会社堀場エステック
開発本部 Vapor Product開発部 部長
博士(工学)
Manager
Vapor Product Development Dept.
Research & Development Division
HORIBA STEC, Co., Ltd.
Ph.D.



林 大介

HAYASHI Daisuke

株式会社堀場エステック
開発本部 要素技術開発部
博士(理学, 工学)
Elemental Technology Development Dept.
Research & Development Division
HORIBA STEC, Co., Ltd.
Ph.D.

