

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-191597

(P2017-191597A)

(43) 公開日 平成29年10月19日(2017. 10. 19)

(51) Int.Cl. F 1 テーマコード (参考)
G 0 5 D 7/06 (2006.01) G 0 5 D 7/06 Z 5 H 3 0 7

審査請求 未請求 請求項の数 14 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2017-35030 (P2017-35030)	(71) 出願人	000005083
(22) 出願日	平成29年2月27日 (2017. 2. 27)		日立金属株式会社
(31) 優先権主張番号	特願2016-79460 (P2016-79460)		東京都港区港南一丁目2番70号
(32) 優先日	平成28年4月12日 (2016. 4. 12)	(74) 代理人	110000213
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		特許業務法人プロスペック特許事務所
		(72) 発明者	岸根 裕次
			三重県三重郡朝日町小向210番地 日立
			金属ファインテック株式会社内
		Fターム(参考)	5H307 BB01 DD02 DD17 EE02 EE07
			FF03 FF12 FF15 HH12

(54) 【発明の名称】 質量流量制御装置及び質量流量制御方法

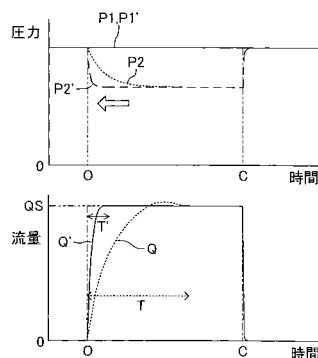
(57) 【要約】

【課題】 圧力式流量計を備えた質量流量制御装置において、流量計によって測定された流量が実際に流れている流量と時間的に乖離している場合であっても、安定でかつ迅速な制御動作を実現すること。

【解決手段】 圧力差発生手段の上流側における流体の圧力及び圧力差発生手段の下流側における流体の圧力から導かれる1又は2以上の圧力値を圧力値測定手段によって測定し、得られた圧力値の時間変化を加速手段によって加速し、時間変化が加速された圧力値を用いて流量を計算し、計算された流量を用いて流体の流量を制御する。

。

【選択図】 図4



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

流量計と、流量制御弁と、を備え、

前記流量計は、圧力差発生手段と、前記圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 及び前記圧力差発生手段の下流側における前記流体の圧力 P_2 から導かれる 1 又は 2 以上の圧力値を測定する圧力値測定手段と、を備える質量流量制御装置において、

前記流量計は、前記圧力値測定手段によって測定された 1 又は 2 以上の圧力値の時間変化を加速する加速手段をさらに備え、前記加速手段によって時間変化が加速された圧力値に基づいて前記流体の流量を計算し、

前記流量制御弁は、前記流量計によって計算された前記流量に基づいて前記流体の流量を制御する

10

ことを特徴とする質量流量制御装置。

【請求項 2】

前記加速手段は、前記圧力値測定手段によって測定された圧力値をアナログデジタル変換する変換手段と、前記変換手段によってアナログデジタル変換された圧力値の時間変化をデジタルフィルタによるフィルタリング処理によって加速するフィルタリング手段とを含む

ことを特徴とする請求項 1 に記載の質量流量制御装置。

【請求項 3】

前記圧力値が、前記圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 と、前記圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 とを含む

20

ことを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 のいずれかに記載の質量流量制御装置。

【請求項 4】

前記圧力値が、前記圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 と、前記圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 との差圧 ΔP を含む

ことを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 のいずれかに記載の質量流量制御装置。

【請求項 5】

前記圧力値が、前記圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 又は前記圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 のいずれかをさらに含む

ことを特徴とする請求項 4 に記載の質量流量制御装置。

30

【請求項 6】

前記加速手段は、前記圧力値測定手段によって測定された 2 以上の圧力値のそれぞれについて時間変化を個別に加速する

ことを特徴とする請求項 3 又は請求項 5 のいずれかに記載の質量流量制御装置。

【請求項 7】

前記流量計の上流側に配置される機械式調圧弁をさらに備える

ことを特徴とする請求項 1 から請求項 6 までのいずれかに記載の質量流量制御装置。

【請求項 8】

前記機械式調圧弁は、前記流量計に隣接して配置され、

前記流量制御弁は、前記流量計の下流側に配置される

40

ことを特徴とする請求項 7 に記載の質量流量制御装置。

【請求項 9】

圧力差発生手段及び圧力値測定手段を備える流量計と、流量制御弁と、を備える質量流量制御装置において、

前記圧力値測定手段により、前記圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 及び前記圧力差発生手段の下流側における前記流体の圧力 P_2 から導かれる 1 又は 2 以上の圧力値を測定すること、及び

前記流量制御弁により、前記圧力値測定手段によって測定された前記圧力値から導かれる前記流体の流量に基づいて、前記質量流量制御装置のユーザーによって設定された流量である設定流量に前記流体の流量を近付けること、

50

を含む質量流量制御方法であって、

前記流量計は、加速手段をさらに備え、

前記加速手段により、前記圧力値測定手段によって測定された前記圧力値の時間変化を加速すること、

前記流量計により、前記加速手段によって時間変化が加速された圧力値に基づいて前記流体の流量を計算すること、及び

前記流量制御弁により、前記流量計によって計算された前記流量に基づいて前記流体の流量を制御すること、

を含む質量流量制御方法。

【請求項 10】

10

前記加速手段は、アナログデジタル変換を実行する変換手段と、デジタルフィルタによるフィルタリング処理を実行するフィルタリング手段と、を含み、

前記変換手段により、前記圧力値測定手段によって測定された前記圧力値をアナログデジタル変換すること、及び

前記フィルタリング手段により、前記変換手段によってアナログデジタル変換された前記圧力値の時間変化を前記フィルタリング処理によって加速すること、

を含む請求項 9 に記載の質量流量制御方法。

【請求項 11】

前記圧力値が、前記圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 と、前記圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 とを含む

20

ことを特徴とする請求項 9 又は請求項 10 のいずれかに記載の質量流量制御方法。

【請求項 12】

前記圧力値が、前記圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 と、前記圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 との差圧 ΔP を含む

ことを特徴とする請求項 9 又は請求項 10 のいずれかに記載の質量流量制御方法。

【請求項 13】

前記圧力値が、前記圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 又は前記圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 のいずれかをさらに含む

ことを特徴とする請求項 12 に記載の質量流量制御方法。

【請求項 14】

30

前記加速手段により、前記圧力値測定手段によって測定された 2 以上の圧力値のそれぞれについて時間変化を個別に加速すること、

を含む請求項 11 又は請求項 13 のいずれかに記載の質量流量制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、質量流量制御装置及び質量流量制御方法に関する発明であり、特に、流体の圧力に基づいて質量流量を制御する質量流量制御装置及び質量流量制御方法に関する。

【背景技術】

【0002】

40

質量流量制御装置（マスフローコントローラ）は、少なくとも、流体の流量を測定する流量計、流体の流量を制御する流量制御弁、これらを制御する制御回路を含む部品によって構成された制御機器である。質量流量制御装置は、例えば、半導体の製造プロセスにおいてチャンバー内に供給されるガスの質量流量を制御する用途などに広く使用されている。

【0003】

質量流量制御装置に用いられる流量計にはさまざまな形式のものがある。半導体の製造プロセスにおいてガスの質量流量を制御する用途に使用される質量流量制御装置においては、主に熱式流量計又は圧力式流量計が用いられている。いずれの形式の流量計においても、ガスの流量の測定値は、流量計を通過するガスの圧力の影響を受けやすい。例えば、

50

流量計を通過するガスの圧力が急激に変化した場合などには、流量を正確に測定することが困難となる。このため、流量を正確に測定して制御することを目的として、流量計を通過するガスの圧力を一定に保持するための機構を備えた質量流量制御装置が提案されている。

【 0 0 0 4 】

例えば、特許文献 1 には、流量計と、流量計の上流側に隣接して配置される機械式調圧弁と、流量計の下流側に配置される流量制御弁と、を備える質量流量制御装置の発明が記載されている。機械式調圧弁は、電気的な手段を用いることなく機械的な動作のみによって圧力の調整を行うことができる調圧弁又は圧力レギュレータである。

【 0 0 0 5 】

機械式調圧弁は、上流側における流体の圧力が想定された範囲内において変動しても、下流側における流体の圧力を常に予め設定された一定の値に維持する作用を有する。このため、特許文献 1 に記載された質量流量制御装置においては、機械式調圧弁の有する調圧作用により、流量計に到達するガスの圧力が変動した場合であっても、これを元の圧力に瞬時に回復させることができる。これにより、流量計を通過するガスの圧力が一定に保持されるので、流量計によって測定される流量の測定精度を高めることができる。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 6 】

【 特許文献 1 】 国際公開第 2 0 1 6 / 0 3 5 5 5 8 号

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 7 】

流量計は、どのような形式のものであっても、測定される流量（以下「測定流量」という場合がある。）と、実際に流れている流量（以下「実流量」という場合がある。）との間に時間的な乖離があることが知られている。一般に、実流量が変動した場合に、測定流量の変動は実流量の変動に比べて遅れて現れる。

【 0 0 0 8 】

質量流量制御装置のユーザーによって設定された流量（以下「設定流量」という場合がある。）と、流量計によって測定される流量との偏差に基づいていわゆるフィードバック制御により流体の流量を制御しようとする場合、測定流量の実流量からの時間的な乖離は、制御動作の不安定化をもたらす要因となる。具体的には、流量が設定流量を超えて増加するオーバーシュート及び / 又は測定流量が安定せずに振動するハンチングなどの現象が起こりやすくなる。

【 0 0 0 9 】

圧力式流量計においては、圧力差発生手段としての層流素子等の周辺に主流路や圧力計への導管などの一定の体積を有する空間が存在する。この空間に存在する流体は、流体の流量や圧力などが変動したときに、その変動を時間的に遅らせる作用をもたらす、測定流量の実流量からの時間的な乖離の原因となる。このため、圧力式流量計を備えた質量流量制御装置において測定流量をそのまま用いて流量の制御を行うと、熱式流量計を備えた質量流量制御装置に比べて制御動作が不安定になったり、流量が設定流量に到達するまでの応答時間が長くなったりする場合があるという課題があった。

【 0 0 1 0 】

また、機械式調圧弁は、さまざまな原因によって、調圧作用が働かずに流体が機械式調圧弁の上流側から下流側に向かって漏れ出ることが知られている。特許文献 1 に記載された機械式調圧弁を備えた質量流量制御装置においてこのような現象が起こると、機械式調圧弁と流量制御弁との間の空間に、機械式調圧弁が正常に動作した場合よりも高い圧力の流体が滞留する。そうすると、質量流量制御装置が次に制御動作を開始したときに、流体の圧力が正常な値に戻るまで滞留した流体を下流側に排出しなければならない。このため、機械式調圧弁を備えた質量流量制御装置において機械式調圧弁の漏れが発生

10

20

30

40

50

すると、測定流量の実流量からの時間的な乖離がより顕著になるという課題があった。

【0011】

本発明は、従来技術に係る質量流量制御装置が有する上記の諸課題に鑑みてなされたものであり、圧力式流量計を備えた質量流量制御装置において、流量計によって測定された流量が実際に流れている流量と時間的に乖離している場合であっても、安定かつ迅速な制御動作を実現することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明に係る質量流量制御装置は、流量計と、流量制御弁と、を備え、流量計は、圧力差発生手段と、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 及び下流側における流体の圧力 P_2 から導かれる1又は2以上の圧力値を測定する圧力値測定手段と、を備え、流量計は、圧力値測定手段によって測定された圧力値の時間変化を加速する加速手段をさらに備え、加速手段によって時間変化が加速された圧力値に基づいて流量を計算し、流量制御弁は、流量計によって計算された流量に基づいて流体の流量を制御することを特徴としている。なお、本明細書において、「時間変化」とは、「時間の経過に伴う変化」を意味するものとする。

10

【0013】

この発明の構成において、流量計によって計算される流量は、加速手段によって時間変化が加速された圧力値に基づいて計算された流量であり、質量流量制御装置を実際に流れている流量の時間変化に近い速度にて時間的に変化する。このため、加速手段を用いない場合に比べて短い応答時間で流体の流量を設定値に安定に到達させることができる。

20

【0014】

本発明の好ましい実施の形態において、圧力値は、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 と、圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 とを含んでもよい。また、圧力値は、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 と下流側における流体の圧力 P_2 との差圧 ΔP を含んでもよく、この場合に、圧力値は、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 又は圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 のいずれかをさらに含んでもよい。

【0015】

本発明の好ましい実施の形態において、加速手段は、圧力値測定手段によって測定された2以上の圧力値のそれぞれについて時間変化を個別に加速する。この発明の構成において、質量流量制御装置は、より安定で迅速な制御を行うことができる。なお、本発明は、本発明に係る質量流量制御装置において実行される上述した方法によって実現される質量流量制御方法にも関する。

30

【発明の効果】

【0016】

本発明に係る質量流量制御装置及び質量流量制御方法によれば、圧力差発生手段と圧力値測定手段とを備えた圧力式流量計を用いた場合であっても、従来技術に係る質量流量制御装置に比べて測定流量と実流量との時間的な乖離を少なくすることができ、安定かつ迅速な流量制御を実現することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】本発明に係る質量流量制御装置の構成の例を示す模式図である。

【図2】質量流量制御装置における圧力 P_1 及び圧力 P_2 並びに流量 Q の時間変化の一般的な例を示すグラフである。

【図3】測定流量の実流量からの時間的な乖離が大きい場合の質量流量制御装置における圧力 P_1 及び圧力 P_2 並びに流量 Q の時間変化の典型的な例を示すグラフである。

【図4】本発明に係る質量流量制御装置において、加速手段によって時間変化が加速された圧力 P_1' 及び圧力 P_2' 並びに流量 Q' の時間変化の例を示すグラフである。

【図5】機械式調圧弁の構造の例を示す断面図である。

50

【図 6】機械式調圧弁に漏れが発生した場合の従来技術に係る質量流量制御装置において、直前に行われた運転を停止してからの時間と、運転再開後の圧力 P_1 及び圧力 P_2 の時間変化との関係を示すグラフである。

【図 7】機械式調圧弁に漏れが発生している状態において測定流量の実流量からの時間的な乖離が大きい場合の従来技術に係る質量流量制御装置における圧力 P_1 及び圧力 P_2 並びに流量 Q の時間変化と、機械式調圧弁に漏れが発生している状態において測定流量の実流量からの時間的な乖離が大きい場合の本発明に係る質量流量制御装置において加速手段によって時間変化が加速された圧力 P_1' 及び圧力 P_2' 並びに流量 Q' の時間変化と、を比較するグラフである。

【図 8】従来技術に係る質量流量制御方法における処理手順を示すフローチャートである。

【図 9】本発明に係る質量流量制御方法における処理手順を示すフローチャートである。

【図 10】本発明の好ましい実施の形態に係る質量流量制御方法における処理手順を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0018】

本発明を実施するための形態を、図を用いて詳細に説明する。なお、ここで説明する実施の形態は本発明の実施の形態を例示するものにすぎず、本発明の実施の形態はここに例示する形態に限られない。

【0019】

図 1 は、本発明に係る質量流量装置の構成の例を示す模式図である。流体（液体又はガス）は、図の左側から質量流量制御装置 1 に流入し、右側から流出する。本発明に係る質量流量制御装置 1 は、流量計 2 と、流量制御弁 4 と、を備える。流量制御弁 4 は、弁 4 b 及び弁 4 b を開閉するためのアクチュエータ 4 a を備える。アクチュエータ 4 a は、圧電素子又はソレノイドコイルによって構成することができる。

【0020】

流量計 2 は、圧力差発生手段 2 a と、圧力差発生手段 2 a の上流側における流体の圧力 P_1 （以下「圧力 P_1 」という。）及び下流側における流体の圧力 P_2 （以下「圧力 P_2 」という。）から導かれる 1 又は 2 以上の圧力値を測定する圧力値測定手段と、を備える。圧力差発生手段 2 a は、ノズル、オリフィス、及び層流素子などの流体抵抗を有する部材によって構成することができる。圧力測定手段は、公知の圧力センサ又は差圧センサによって構成することができる。

【0021】

流量計 2 は、圧力値測定手段によって測定された圧力値を用いて流体の流量を計測するものである。圧力値は、圧力 P_1 及び圧力 P_2 から導かれる 1 又は 2 以上の値である。例えば、圧力値測定手段は、圧力 P_1 及び圧力 P_2 のそれぞれについて測定することができる別個の圧力センサによって構成してもよいし、圧力 P_1 と圧力 P_2 の差圧を測定することができる 1 個の差圧センサによって構成してもよい。前者の場合の圧力値は圧力 P_1 及び圧力 P_2 の 2 つの値そのものを含むことができ、後者の場合の圧力値は圧力 P_1 と圧力 P_2 から導かれる両者の差圧 ΔP という 1 つの値を含むことができる。

【0022】

図 1 に例示された流量計 2 は、圧力差発生手段 2 a として層流素子を備え、層流素子の上流側の圧力 P_1 及び下流側の圧力 P_2 をそれぞれ別個の圧力値測定手段としての圧力センサ 2 b 及び 2 c で測定するように構成されている。流量計 2 によって計測される流量は体積流量であるので、例えば、圧力 P_1 と圧力 P_2 の平均値などを用いてこれを質量流量に換算することができる。圧力センサ 2 b 及び 2 c の代わりに 1 個の差圧センサを用いて差圧 ΔP を測定する場合には、差圧センサとは別に圧力センサを設けて圧力式流量計の位置での流体の圧力を測定することにより、体積流量を質量流量に換算することができる。

【0023】

図 2 は、質量流量制御装置における圧力 P_1 及び圧力 P_2 並びに流量 Q の時間変化の一

10

20

30

40

50

般的な例を示すグラフである。なお、当該質量流量制御装置は、図 1 に示した質量流量制御装置 1 と同様の構成を有するものとする。したがって、このグラフに関する以下の説明においては、図 1 に示した質量流量制御装置 1 の各構成要素に付した符号を使用する。このグラフにおいて、圧力 P_1 は常に一定の値に保たれる。流量制御弁 4 が閉じていて流体が流れていないときは、圧力 P_2 は圧力 P_1 と等しい。

【0024】

時刻 O (Open) において質量流量制御装置 1 に流体を流す命令信号が伝えられると、流量制御弁 4 が開き、流体の流量 Q が増加する。また、圧力差発生手段 2a に流体が流れ始めるので、圧力 P_2 は圧力 P_1 よりも低くなる。質量流量制御装置 1 は、流量計 2 によって測定される流量 Q が予め設定された設定流量 Q_S と等しくなるように、公知の制御方法を用いて流量制御弁 4 の開きを制御する。この結果、流量 Q は時刻 O の後、短い応答時間を経て設定流量 Q_S に到達する。また、圧力 P_2 も同じ応答時間を経て圧力 P_1 よりも低い一定の値に到達する（破線によって描かれたグラフを参照。）。

【0025】

次に、時刻 C (Close) において質量流量制御装置 1 に流体の供給を停止する命令信号が伝えられると、流量制御弁 4 が閉じる。流量制御弁 4 は、流量制御弁 4 が閉じられると、流量計 2 が計測する流体の流量 Q は直ちにゼロとなる。また、これに伴い、圧力 P_2 も直ちに増加し、圧力 P_1 と等しくなる。

【0026】

ところが、前述したように、流量計は、どのような形式のものであっても、測定される流量（測定流量）と実際に流れている流量（実流量）との間に時間的な乖離（一般的には遅れ）があることが知られている。ユーザーによって設定された流量（設定流量）と測定流量との偏差に基づくフィードバック制御により流体の流量を制御しようとする場合、測定流量の実流量からの時間的な乖離は、制御動作の不安定化をもたらす要因となり得る。具体的には、測定流量の実流量からの時間的な乖離が大きいほど、流量が設定流量を超えて増加するオーバーシュート及び／又は測定流量が安定せずに振動するハンチングなどの現象が起こりやすくなる。

【0027】

図 3 は、測定流量の実流量からの時間的な乖離が大きい場合の質量流量制御装置 1 における圧力 P_1 及び圧力 P_2 並びに流量 Q の時間変化の典型的な例を示すグラフである。比較のため、図 2 に示した圧力 P_1 及び圧力 P_2 並びに流量 Q の時間変化も図 3 に併記されている（点線）。ここに例示されたグラフにおいて、質量流量制御装置 1 に流体を流す命令信号が伝えられた時刻 O 以降の圧力 P_2 の値（破線）は、図 2 のグラフに示された圧力 P_2 の値（点線）の変化に比べて緩やかに減少している。これは、圧力差発生手段 2a の内部及び周辺の空間に存在する流体の影響により、圧力 P_2 が減少するのに一定の時間が必要であるためである。

【0028】

このように、時刻 O 以降において流量制御弁 4 が開いて実際には流体が流れているにもかかわらず、圧力 P_2 の減少は緩慢であるため、流量計 2 によって測定される流量 Q は、実際に流れている流量よりも遅れて増加する。したがって、流量計 2 によって測定される流量 Q と設定流量 Q_S との偏差に基づいて流量制御弁 4 の開きを制御すると、流量制御弁 4 の操作量が過剰となるので、測定される流量 Q は図 3 の実線のグラフに示すように設定流量 Q_S を超えてオーバーシュートしたり、あるいはハンチングしたりする。その結果、測定される流量 Q が設定流量 Q_S に安定するまでの応答時間 T は、図 2 の場合（点線）に比べて長くなる。

【0029】

そこで、本発明に係る質量流量制御装置 1 においては、圧力値測定手段によって測定された圧力値の時間変化を加速する加速手段をさらに備えることにより、圧力値の時間変化を速めて、短い時間で安定値に到達させる。図 4 は、本発明に係る質量流量制御装置 1 において加速手段によって時間変化が加速された圧力 P_1' 及び圧力 P_2' 並びに流量 Q'

10

20

30

40

50

の時間変化の例を示すグラフである。比較のため、図 3 に示した圧力 P_1 及び圧力 P_2 並びに流量 Q の時間変化も図 4 に併記されている（点線）。本発明において「圧力値の時間変化を加速する」とは、例えば図 4 の記号 P_2' が付されたグラフの時刻 0 以降の部分に示されるように、圧力値の時間変化を速めて、時間軸の方向に圧縮する変換を行うことをいう（白抜きの矢印）。なお、本発明において、記号「 $'$ 」は、加速手段によって加速された値及びその値に基づいて計算された値を表す記号である。

【0030】

本発明に係る質量流量制御装置 1 において、流量計 2 は、加速手段によって時間変化が加速された圧力値に基づいて流量を計算する。図 4 の記号 Q' が付されたグラフは、加速手段によって時間変化が加速された圧力 P_1' 及び圧力 P_2' に基づいて計算された流量 Q' の時間変化を示す。流量 Q' は、時間変化が加速された圧力 P_2' に基づいて計算されているため、実際に流れている流量の時間変化に近い時間変化を示す。なお、図 4 に示した例において圧力 P_1 は一定の値であるため、加速手段によって時間変化を加速しても、その値は変わらない。

10

【0031】

本発明に係る質量流量制御装置 1 において、流量制御弁 4 は、流量計 2 によって計算された流量に基づいて流体の流量を制御する。図 4 に示された流量 Q' はこのような流量であり、流量 Q に比べて急速に増加し、オーバーシュートすることなく、応答時間 T よりも短い応答時間 T' にて設定値 Q_S に到達する。これは、流量 Q' が実際に流れている流量の時間変化に近い時間変化を示しているため、流量制御弁 4 の操作量が過剰にならず、適切な値に制御されるためである。

20

【0032】

本発明において、流量 Q' の時間変化が、実際に流れている流量の時間変化に近い挙動を示しているかどうかは、例えば、質量流量制御装置 1 の下流側に応答速度の極めて速い他の流量計を設置する方法や、質量流量制御装置 1 に設定流量 Q_S を与えたときの応答の安定性を調べる方法などの方法により、確認することができる。

【0033】

本発明における加速手段は、圧力値の時間変化を加速することができるものであれば、公知のどのような手段を用いてもよい。具体的には、加速手段は、アナログ値としての圧力値の時間変化を加速することができる電氣的なアナログフィルタ回路等によって構成することができる。この場合、アナログフィルタ回路の時定数を好ましい値に設定することにより、本発明における加速手段を構成することができる。

30

【0034】

本発明の好ましい実施の形態において、加速手段は、圧力値測定手段によって測定された圧力値をアナログデジタル変換する変換手段と、変換手段によってアナログデジタル変換された圧力値の時間変化をデジタルフィルタによるフィルタリング処理によって加速するフィルタリング手段とを含む。この発明の構成において、質量流量制御装置 1 は、加速手段としてアナログフィルタ回路等を用いた場合に比べてより安定な制御を行うことができる。

【0035】

変換手段によって圧力値をアナログデジタル変換する際のサンプリング周期は、CPU のクロック周期等に応じて適宜定めることができる。具体的には、サンプリング周期は例えば 2 ms（ミリ秒）とすることができる。また、圧力値をサンプリングした値をそのまま使ってアナログデジタル変換すると、ノイズの影響により圧力値の変動が大きくなる場合がある。そのようなときは、例えば、過去の複数回（例えば、50 回）分のサンプルの移動平均値を用いることにより、ノイズの影響を軽減することができる。

40

【0036】

【数 1】

$$P'(z) = \frac{b_1 z + b_0}{a_1 z + a_0} P(z) \quad (\text{数式 1})$$

【0037】

数式 1 は、デジタルフィルタによるフィルタリング処理を行う場合の離散周波数領域において表された変換式の例である。ここで、 $P(z)$ は、連続時間 t の関数である圧力 $P(t)$ を z 変換したときの関数を表し、 $P(z)$ は加速手段によって時間変化が加速される前の圧力値を表し、 $P'(z)$ は加速手段によって時間変化が加速された後の圧力値を表す。また、 a_1 、 a_0 、 b_1 及び b_0 は、それぞれ適宜定めることができる定数である。

10

【0038】

【数 2】

$$P'[k] = b_1 P[k] + b_0 P[k-1] - a_0 P'[k-1] \quad (\text{数式 2})$$

【0039】

数式 2 は、デジタルフィルタによるフィルタリング処理を行う場合の離散時間領域において表された変換式であり、漸化式の形式にて表されている。ここで、 k は離散的な時刻を表し、 $k-1$ は、それよりもひとつ前の離散的な時刻を表す。また、 a_0 、 b_1 及び b_0 は、それぞれ適宜定めることができる定数である。数式 1 と数式 2 とは表現に用いられた領域が異なるものの、同一の内容を表している。

20

【0040】

【表 1】

表 1

n	$P[n]$	$P'[n]$
0	$P[0]$	$P'[0]$
.	.	.
$k-1$	$P[k-1]$	$P'[k-1]$
k	$P[k]$	$P'[k]$
.	.	.

30

【0041】

表 1 は、数式 2 の漸化式によって表された変換式による計算の手順を説明するものである。加速された圧力 $P'[k]$ は、表 1 の太枠によって囲まれた加速前の圧力値 $P[k-1]$ 及び $P[k]$ と、加速後の圧力値 $P'[k-1]$ とを用いて算出される。それぞれの圧力値には、数式 2 において示された定数を乗じる。

【0042】

40

本発明において、加速手段を変換手段とフィルタリング手段とによって構成する場合、変換手段はアナログデジタルコンバータによって構成することができ、フィルタリング手段は、質量流量制御装置 1 の内部に実装されるコンピュータ、又は質量流量制御装置 1 の外部に接続されたコンピュータなどのハードウェア資源によって実現されるソフトウェアによって構成することができる。

【0043】

本発明において、加速手段を変換手段とフィルタリング手段とによって構成する場合、数式 1 及び数式 2 に含まれる各定数は、実際の質量流量制御装置 1 を用いて流体の流量制御を行いながら試行錯誤により決定することができる。あるいは、実際の質量流量制御装置 1 の動作をシミュレーションすることができるソフトウェアを用いて決定することもで

50

きる。この場合において、各定数は、流量 Q' の時間変化が実際に流れている流量の時間変化にできるだけ一致するように定めることが好ましい。

【0044】

本発明の好ましい実施の形態において、加速手段は、圧力値測定手段によって測定された2以上の圧力値のそれぞれについて時間変化を個別に加速する。2以上の圧力値の具体例としては、圧力 P_1 と圧力 P_2 とを含むことができ、あるいは圧力 P_1 と圧力 P_2 との差圧 ΔP と、圧力 P_1 又は圧力 P_2 のいずれかとを含むことができる。

【0045】

この実施の形態において、「2以上の圧力値のそれぞれについて時間変化を個別に加速する」とは、2以上の圧力値に基づいて計算された流量について時間変化を加速したり、2以上の圧力値について数式1又は数式2における各定数を共通にして時間変化を加速したりするのではなく、2以上の圧力値のそれぞれについて個別の定数を用いて時間変化を加速することをいう。このように圧力値を個別に加速することにより、流量 Q' を実際に流れている流量により近づけることができるので、流量の制御動作をさらに安定かつ迅速にすることができる。

10

【0046】

本発明の好ましい実施の形態において、質量流量制御装置1は、流量計2の上流側に配置される機械式調圧弁3をさらに備える。機械式調圧弁は、上流側における流体の圧力が想定された範囲内で変動しても、下流側における流体の圧力を常に一定の値に維持する作用を有する。このため、流量計2の上流側に機械式調圧弁3を配置すると、流量計を通過するガスの圧力が一定に保持されるので、流量計によって測定される流量の測定精度を高めることができる。

20

【0047】

図5は、機械式調圧弁3の構造の例を示す断面図である。機械式調圧弁3において、弁スプリング3bが弁体3cを弁座3dの側へ押し下げる弾性力と、調圧スプリング3iがダイヤフラム押え3h及びダイヤフラム3gを調圧室3fの側へ突き上げる弾性力とが、ステム3eを介して拮抗している。

【0048】

調圧室3fの圧力 P_1 が設定圧力 P_S よりも低いときは、流体がダイヤフラム3gを押し下げる力が弱いので、弁体3cが突き上げられて、弁体3cと弁座3dの間に隙間ができる。このため、流体は流体入口3aから入って調圧室3fを経て流体出口3kから流出する。

30

【0049】

一方、調圧室3fの圧力 P_1 が設定圧力 P_S よりも高いときは、流体がダイヤフラム3gを押し下げる力が働き、弁体3cが弁座3dの側へ変位して弁体3cと弁座3dとの間の隙間が閉じる。このため、流体の流動が遮断される。

【0050】

このように、弁体3cと弁座3dとの間の隙間の開閉動作が正常に行われている間は、圧力 P_1 は設定圧力 P_S に等しくなるまで調整される。なお、設定圧力 P_S は、調整ねじ3jの位置によって変更することができる。

40

【0051】

ところが、例えば、弁座3dと弁体3cとの間の隙間がわずかに開いた状態において何らかの原因によりステム3eの上下の動きが妨げられた場合及び弁座3dと弁体3cとの間の隙間に異物が挟まったような場合などにおいては、機械式調圧弁3の下流側の圧力が上昇しても弁座3dと弁体3cとの間の隙間を閉じることが困難になり、機械式調圧弁3において流体の漏れが発生する。そうすると、この隙間を通して機械式調圧弁3と閉じている流量制御弁4との間の空間に流体が漏れ出して、この空間における流体の圧力が徐々に上昇する。

【0052】

図6は、機械式調圧弁3に漏れが発生した場合の質量流量制御装置において、直前に行

50

われた運転を停止してからの時間と、運転再開後の圧力 P_1 及び圧力 P_2 の時間変化との関係を示すグラフである。なお、当該質量流量制御装置も、図 1 に示した質量流量制御装置 1 と同様の構成を有するものとする。したがって、このグラフに関する以下の説明においても、図 1 に示した質量流量制御装置 1 の各構成要素に付した符号を使用する。時刻ゼロから時刻 0 までの間は、流量制御弁 4 が閉じており流体が流れない状態である。また、この間は機械式調圧弁 3 も完全に閉じており、漏れは発生していないものとする。したがって、この間は、圧力 P_1 及び圧力 P_2 には変化が見られない。次に、時刻 0 において流量制御弁 4 が開き、流量の制御が開始されると、応答時間 T_0 が経過した後に流量 Q は安定し、圧力 P_2 も一定の値に保持される。このときの時刻 0 における圧力 P_2 と時刻 C における圧力 P_2 との差は ΔP_0 である。

10

【0053】

次に、時刻 C において流量制御弁 4 が閉じられると、流量 Q は直ちにゼロとなるが、機械式調圧弁 3 に漏れが発生しているため、圧力 P_1 は増加し、圧力 P_2 もこれに追従して増加する。この漏れに伴って、圧力 P_1 及び圧力 P_2 は、時刻 0 からの時間の経過と共に最初は急激に、その後は緩やかに増加する。圧力 P_1 及び圧力 P_2 の増加は、最終的に圧力 P_1 及び圧力 P_2 が機械式調圧弁 3 よりも上流側の供給ラインの流体の圧力 P_0 に到達するまで続く。

【0054】

その後、時刻 O_1 において再び流量制御弁 4 が開かれると、応答時間 T_1 が経過した後に圧力 P_1 及び圧力 P_2 は安定し、流量 Q も安定する。このときの時刻 O_1 における圧力 P_2 と安定した後の圧力 P_2 との差 ΔP_1 は ΔP_0 よりも大きい。これに対応して、応答時間 T_1 は応答時間 T_0 よりも長くなる。このように、機械式調圧弁 3 に漏れが発生すると、漏れが発生していない場合と比べて質量流量制御装置 1 の応答時間が長くなる。これは、圧力差発生手段 2 a の内部及び周辺の空間に漏れ出た流体の影響により、圧力差発生手段 2 a の上流側の圧力 P_1 及び下流側の圧力 P_2 が減少するのに一定の時間が必要であるためである。

20

【0055】

図 6 において、流量制御弁 4 が開かれる時刻が O_1 よりも後の O_2 である場合は、応答時間 T_2 が経過した後に圧力 P_1 及び圧力 P_2 が安定し、流量 Q も安定する。このときの時刻 O_2 における圧力 P_2 と安定した後の圧力 P_2 との差 ΔP_2 は ΔP_1 よりも大きい。これに対応して、応答時間 T_2 は応答時間 T_1 よりも長くなる。このように、機械式調圧弁 3 に漏れが発生すると、直前に行われた運転を停止してから運転を再開するまでの時間の長さに応じて、質量流量制御装置 1 の応答時間が長くなったり短くなったりする。

30

【0056】

上記のように機械式調圧弁 3 に漏れが発生している状態において閉じられていた流量制御弁 4 が再び開かれた場合においても、測定流量と実流量との間の時間的な乖離は、設定流量と測定流量との偏差に基づく流量 Q のフィードバック制御における制御動作の不安定化をもたらす要因となり得る。

【0057】

図 7 は、機械式調圧弁に漏れが発生している状態において測定流量の実流量からの時間的な乖離が大きい場合の質量流量制御装置 1 において、流体を流す命令信号が伝えられた時刻 0 以降の圧力 P_1 及び圧力 P_2 の値並びに流量 Q の時間変化の例を示すグラフである。従来技術に係る質量流量制御装置 1 においては圧力値の時間変化が加速されないため、時刻 0 以降において流量制御弁 4 が開いて実際には流体が流れているにもかかわらず、圧力 P_1 及び圧力 P_2 の減少は緩慢である。その結果、流量計 2 によって測定される流量 Q は、実際に流れている流量よりも遅れて増加する。したがって、流量計 2 によって測定される流量 Q と設定流量 Q_S との偏差に基づいて流量制御弁 4 の開きを制御すると、流量制御弁 4 の操作量が過剰となるので、測定される流量 Q は図 7 に示すように設定流量 Q_S を超えてオーバーシュートしたり、あるいはハンチングしたりする。その結果、測定される流量 Q が設定流量 Q_S に安定するまでの応答時間が長くなる。

40

50

【 0 0 5 8 】

そこで、本発明に係る質量流量制御装置 1 においては、流量計 2 が、圧力値測定手段によって測定された圧力値の時間変化を加速する加速手段をさらに備え、加速手段によって時間変化が加速された圧力値に基づいて流量を計算する。そして、流量制御弁 4 が、流量計によって計算された流量に基づいて流体の流量を制御する。これにより、圧力値の時間変化を速めて、短い時間で安定値に到達させる。図 7 の記号 Q' が付されたグラフは、上記のように加速手段によって時間変化が加速された圧力 P_1' 及び圧力 P_2' に基づいて計算された流量 Q' の時間変化を示す。流量 Q' は、時間変化が加速された圧力 P_1' 及び圧力 P_2' に基づいて計算されているため、実際に流れている流量の時間変化に近い時間変化を示す。

10

【 0 0 5 9 】

本発明に係る質量流量制御装置 1 において、流量制御弁 4 は、流量計 2 によって計算された流量に基づいて流体の流量を制御する。図 7 に示された流量 Q' はこのような流量であり、流量 Q に比べて急速に増加し、オーバーシュートすることなく、応答時間 T_1 及び T_2 よりも短い応答時間で設定値 Q_S に到達する。これは、流量 Q' が実際に流れている流量の時間変化に近い時間変化を示しているため、流量制御弁 4 の操作量が過剰にならず、適切な値に制御されるためである。

【 0 0 6 0 】

このように、本発明に係る質量流量制御装置 1 においては、流量計 2 によって測定される流量（測定流量）と実際に流れている流量（実流量）との乖離がほとんど無視することができる程度となるように圧力値の時間変化の加速の程度を調整することができる。この結果、機械式調圧弁 3 に漏れが発生したあと、図 6 に示したように圧力 P_1 及び圧力 P_2 の値が時間の経過とともに増加しているような場合であっても、流量制御を再開する時刻にかかわらず一定の応答時間にて安定な流量制御を実現することができる。

20

【 0 0 6 1 】

本発明の好ましい実施の形態において、機械式調圧弁 3 は、流量計 2 の上流側に隣接して配置され、流量制御弁 4 は、流量計 2 の下流側に配置される。ここで、「隣接して配置される」とは、機械式調整弁 3 と流量計 2 との間に他の構成部品が存在せず、両者が互いに配管部材によって直接接合されていることをいう。機械式調整弁 3 と流量計 2 とを接合する配管部材はできるだけ短くすることが好ましい。

30

【 0 0 6 2 】

機械式調圧弁 3 を流量計 2 の上流側に隣接して配置することにより、両者の間の流体抵抗及び流体の体積が小さくなるので、機械式調圧弁 3 の調圧室 3f の圧力を設定圧力 P_S と等しくなるように調整した結果が流量計 2 の内部の圧力により迅速に反映される。それにより、流量計 2 の内部の圧力が常に設定圧力 P_S と等しくなるように維持されるので、流量計 2 による流量測定の精度が高まる。

【 0 0 6 3 】

また、流量制御弁 4 を流量計 2 の下流側に配置することにより、質量流量制御装置 1 に流体の供給を停止する命令信号が伝えられて流量制御弁 4 が閉じると、流量を直ちにゼロにすることができる。本発明に係る質量流量制御装置 1 においては、流量制御弁 4 によって流路が遮断された後に機械式調圧弁 3 に漏れが発生しても、応答時間を一定に保つことができる。このため、例えば、流体を短い周期で断続的に流したいような場合であっても、精度のよい流体の供給が可能となる。

40

【 0 0 6 4 】

ところで、前述したように、本発明は、本発明に係る質量流量制御装置において実行される上述した方法によって実現される質量流量制御方法にも関する。本発明に係る質量流量制御方法は、圧力式流量計において、ユーザーによって設定された流量である設定流量に流体の流量を近付ける方法である。この点においては、本発明に係る質量流量制御方法は、従来技術に係る質量流量制御方法と同様である。

【 0 0 6 5 】

50

従来技術に係る質量流量制御方法においては、例えば図 8 のフローチャートに示すような処理手順に従って、流体の流量が制御される。まず、ステップ S 8 1 0 において、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P 1 及び圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P 2 から導かれる 1 又は 2 以上の圧力値が圧力値測定手段によって測定される。次に、ステップ S 8 2 0 において、圧力値測定手段によって測定された上記圧力値に基づき、その時点における測定流量が流量計によって計算される。続いて、ステップ S 8 3 0 において、流量計によって計算された上記測定流量とユーザーによって設定された設定流量との偏差に基づくフィードバック制御により流量制御弁の開きが制御され、測定流量が設定流量に近付けられる。

【 0 0 6 6 】

ところが、前述したように、流量計は、どのような形式のものであっても、測定（計算）される流量（測定流量）と実際に流れている流量（実流量）との間には時間的な乖離（一般的には遅れ）がある。したがって、上記のように設定流量と測定流量との偏差に基づくフィードバック制御により流体の流量を制御しようとする、測定流量の実流量からの時間的な乖離は、制御動作の不安定化をもたらす要因となり、流量のオーバーシュート及び / 又は測定流量のハンチングなどの問題に繋がるおそれがある。

【 0 0 6 7 】

一方、本発明に係る質量流量制御方法は、圧力差発生手段及び圧力値測定手段を備える流量計と流量制御弁とに加えて加速手段をさらに備える本発明に係る質量流量制御装置において、例えば図 9 のフローチャートに示すような処理手順に従って、以下に列挙する各ステップを実行することを含む。

【 0 0 6 8 】

ステップ S 9 1 0 : 圧力値測定手段により、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P 1 及び圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P 2 から導かれる 1 又は 2 以上の圧力値を測定する。

ステップ S 9 2 0 : 加速手段により、圧力値測定手段によって測定された圧力値の時間変化を加速する。

ステップ S 9 3 0 : 流量計により、加速手段によって時間変化が加速された圧力値に基づいて流体の流量を計算する。

ステップ S 9 4 0 : 流量制御弁により、流量計によって計算された上記流量に基づいて流体の流量を制御して、質量流量制御装置のユーザーによって設定された流量である設定流量に流体の流量を近付ける。

【 0 0 6 9 】

上記のような各ステップを実行する本発明に係る質量流量制御方法によれば、圧力差発生手段と圧力値測定手段とを備えた圧力式流量計を用いた場合であっても、従来技術に係る質量流量制御装置に比べて測定流量と実流量との時間的な乖離を少なくすることができ、安定かつ迅速な流量制御を実現することができる。

【 0 0 7 0 】

なお、上述したように、本発明における加速手段は、圧力値の時間変化を加速することができるものであれば、公知のどのような手段を用いてもよい。具体的には、加速手段は、アナログ値としての圧力値の時間変化を加速することができる電氣的なアナログフィルタ回路等によって構成することができる。この場合、アナログフィルタ回路の時定数を好ましい値に設定することにより、本発明における加速手段を構成することができる。

【 0 0 7 1 】

本発明の好ましい実施の形態において、加速手段は、圧力値測定手段によって測定された圧力値をアナログデジタル変換する変換手段と、変換手段によってアナログデジタル変換された圧力値の時間変化をデジタルフィルタによるフィルタリング処理によって加速するフィルタリング手段とを含む。この発明の構成において、質量流量制御装置は、加速手段としてアナログフィルタ回路等を用いた場合に比べてより安定な制御を行うことができ、本発明に係る質量流量制御方法においても、このような加速手段を用いて、圧力値の時

10

20

30

40

50

間変化を加速することができる。

【0072】

この場合、本発明に係る質量流量制御方法が適用される質量流量制御装置が備える加速手段は、アナログデジタル変換を実行する変換手段と、デジタルフィルタによるフィルタリング処理を実行するフィルタリング手段と、を含む。そして、本発明に係る質量流量制御方法に含まれるステップS920は、例えば図10のフローチャートに示すように、以下に列挙する各ステップを実行することを含む。

【0073】

ステップS921：変換手段により、圧力値測定手段によって測定された圧力値をアナログデジタル変換する。

ステップS922：フィルタリング手段により、変換手段によってアナログデジタル変換された圧力値の時間変化をフィルタリング処理によって加速する。

【0074】

なお、圧力値は、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 と、圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 とを含むことができる。あるいは、圧力値は、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 と、圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 との差圧 ΔP を含むことができる。後者の場合、圧力値は、圧力差発生手段の上流側における流体の圧力 P_1 又は圧力差発生手段の下流側における流体の圧力 P_2 のいずれかをさらに含むことができる。

【0075】

さらに、加速手段により、圧力値測定手段によって測定された2以上の圧力値のそれぞれについて時間変化を個別に加速するようにしてもよい。

【0076】

加えて、本発明に係る質量流量制御方法は、上述したように流量計の上流側に配置される機械式調圧弁をさらに備える質量流量制御装置にも適用され得る。この場合、機械式調圧弁は流量計に隣接して配置されることが好ましく、流量制御弁は流量計の下流側に配置されることが好ましい。

【0077】

なお、本発明に係る質量流量制御方法が適用される質量流量制御装置の構成及び圧力値測定手段によって測定された圧力値の時間変化を加速手段によって加速する処理等の詳細については、上述した各種実施の形態を始めとする本発明に係る質量流量制御装置に関する説明において既に説明した。従って、これらの事項についての詳細な説明は、ここでは繰り返さない。

【符号の説明】

【0078】

- 1 質量流量制御装置
- 2 流量計
 - 2 a 圧力差発生手段（層流素子）
 - 2 b 圧力値測定手段（圧力センサ）
 - 2 c 圧力値測定手段（圧力センサ）
- 3 機械式調圧弁
 - 3 a 流体入口
 - 3 b 弁スプリング
 - 3 c 弁体
 - 3 d 弁座
 - 3 e ステム
 - 3 f 調圧室
 - 3 g ダイアフラム
 - 3 h ダイアフラム押さえ
 - 3 i 調圧スプリング

10

20

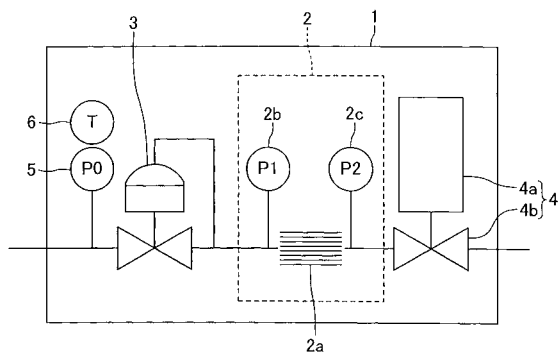
30

40

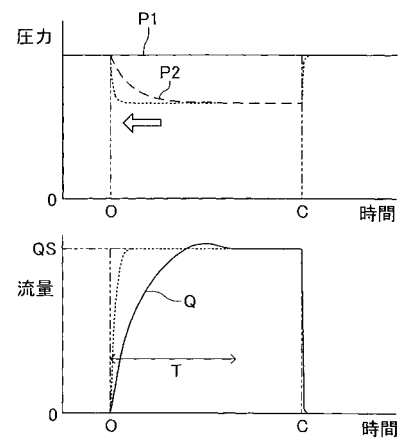
50

- 3 j 調整ねじ
- 3 k 流体出口
- 4 流量制御弁
- 4 a アクチュエータ
- 4 b 弁
- 5 圧力センサ
- 6 温度センサ

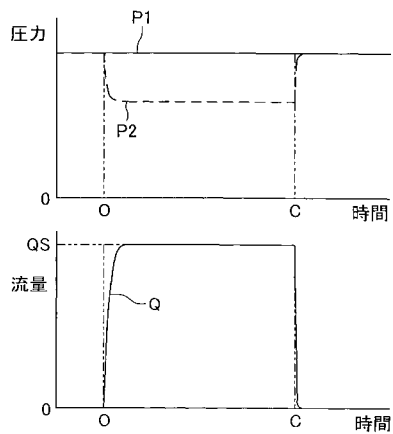
【図 1】



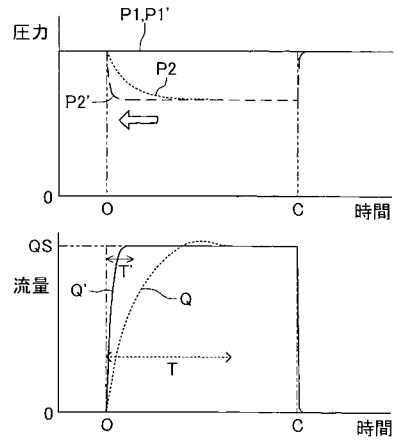
【図 3】



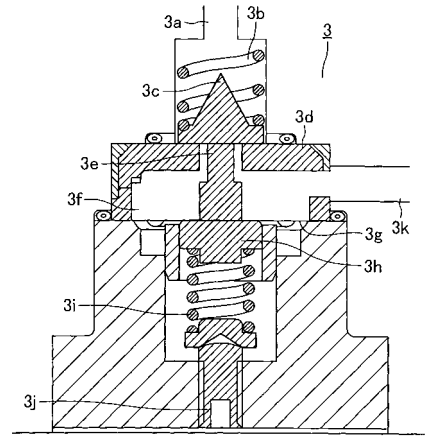
【図 2】



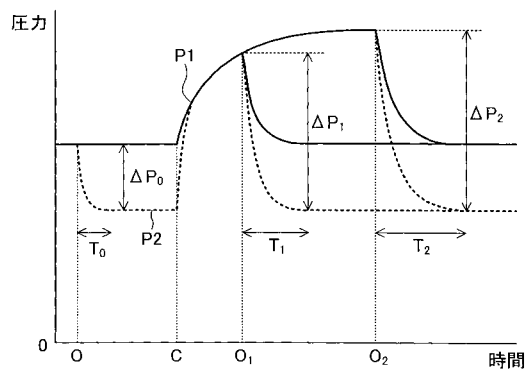
【図 4】



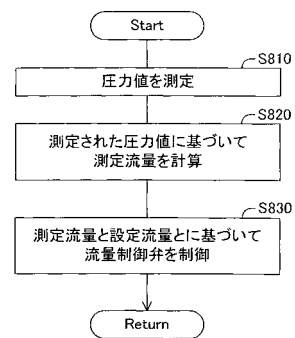
【図 5】



【図 6】

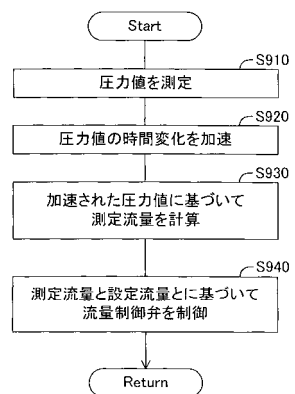
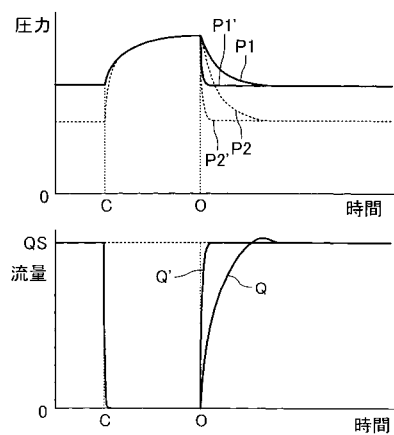


【図 8】



【図 9】

【図 7】



【図 10】

