

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7238461号  
(P7238461)

(45)発行日 令和5年3月14日(2023.3.14)

(24)登録日 令和5年3月6日(2023.3.6)

(51)国際特許分類 F I  
 G 0 5 D 16/20 (2006.01) G 0 5 D 16/20 Z  
 F 1 6 K 51/02 (2006.01) F 1 6 K 51/02 Z

請求項の数 7 (全19頁)

(21)出願番号	特願2019-31724(P2019-31724)	(73)特許権者	000001993 株式会社島津製作所 京都府京都市中京区西ノ京桑原町1番地
(22)出願日	平成31年2月25日(2019.2.25)	(74)代理人	100121382 弁理士 山下 託嗣
(65)公開番号	特開2020-135731(P2020-135731 A)	(72)発明者	小崎 純一郎 京都府京都市中京区西ノ京桑原町1番地 株式会社島津製作所内
(43)公開日	令和2年8月31日(2020.8.31)	審査官	今井 貞雄
審査請求日	令和3年5月21日(2021.5.21)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 バルブ制御装置および真空バルブ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

真空チャンバと真空ポンプとの間に設けられた真空バルブに対し第1の開度制御と第2の開度制御とを順に行って、前記真空チャンバのチャンバ圧力を目標圧力へ制御するバルブ制御装置であって、

第1の設定圧信号を生成する生成部と、

前記目標圧力に基づいて第1の開度制御を行い、前記第1の開度制御の後に、前記第1の設定圧信号と前記チャンバ圧力との差に基づいてフィードバック制御する第2の開度制御を行う開度制御部と、を備え、

前記生成部は、前記第1の開度制御から前記第2の開度制御への切り替え時のチャンバ圧力から目標圧力へと所定の時定数で収束する第1の設定圧軌道に基づいて、前記第1の設定圧信号を生成し、

前記時定数は、前記切り替え時におけるチャンバ圧力および該チャンバ圧力の時間微分値と、前記目標圧力とに基づいて算出される、  
バルブ制御装置。

【請求項2】

真空チャンバと真空ポンプとの間に設けられた真空バルブに対し第1の開度制御と第2の開度制御とを順に行って、前記真空チャンバのチャンバ圧力を目標圧力へ制御するバルブ制御装置であって、

第1の設定圧信号を生成する生成部と、

10

20

前記目標圧力に基づいて第 1 の開度制御を行い、前記第 1 の開度制御の後に、前記第 1 の設定圧信号と前記チャンバ圧力との差に基づいてフィードバック制御する第 2 の開度制御を行う開度制御部と、を備え、

前記生成部は、前記第 1 の開度制御から前記第 2 の開度制御への切り替え時のチャンバ圧力から目標圧力へと所定の時定数で収束する第 1 の設定圧軌道に基づいて、前記第 1 の設定圧信号を生成し、

前記生成部は、

前記第 1 の設定圧軌道の時定数を、前記第 1 の設定圧信号の時間変化および前記チャンバ圧力の時間変化に基づいて制御周期ごとに補正し、

補正後時定数で前記目標圧力へ収束する第 2 の設定圧軌道に基づいて第 2 の設定圧信号を生成し、

10

前記開度制御部は、

前記第 2 の開度制御に代えて、前記第 2 の設定圧信号とチャンバ圧力との差に基づいてフィードバック制御する第 3 の開度制御を行う、バルブ制御装置。

#### 【請求項 3】

請求項 2 に記載のバルブ制御装置において、

前記補正後時定数は、

前記第 1 の設定圧信号の時間変化の大きさが前記チャンバ圧力の時間変化の大きさよりも小さい場合には補正前の時定数より小さく設定され、

前記第 1 の設定圧信号の時間変化の大きさが前記チャンバ圧力の時間変化の大きさよりも大きい場合には補正前の時定数より大きく設定され、

20

前記第 1 の設定圧信号の時間変化の大きさが前記チャンバ圧力の時間変化の大きさと等しい場合には補正前の時定数と等しく設定される、バルブ制御装置。

#### 【請求項 4】

真空チャンバと真空ポンプとの間に設けられた真空バルブに対し第 1 の開度制御と第 2 の開度制御とを順に行って、前記真空チャンバのチャンバ圧力を目標圧力へ制御するバルブ制御装置であって、

第 1 の設定圧信号を生成する生成部と、

前記目標圧力に基づいて第 1 の開度制御を行い、前記第 1 の開度制御の後に、前記第 1 の設定圧信号と前記チャンバ圧力との差に基づいてフィードバック制御する第 2 の開度制御を行う開度制御部と、を備え、

30

前記生成部は、前記第 1 の開度制御から前記第 2 の開度制御への切り替え時のチャンバ圧力から目標圧力へと所定の時定数で収束する第 1 の設定圧軌道に基づいて、前記第 1 の設定圧信号を生成し、

前記目標圧力を  $P_s$ 、前記チャンバ圧力を  $P_r$ 、前記切り替え時のチャンバ圧力を  $P_{r0}$  と表した場合に、

前記時定数は式「 $| (P_s - P_{r0}) | / | (d P_r / d t | 0) |$ 」により算出される、バルブ制御装置。

#### 【請求項 5】

真空チャンバと真空ポンプとの間に設けられた真空バルブに対し第 1 の開度制御と第 2 の開度制御とを順に行って、前記真空チャンバのチャンバ圧力を目標圧力へ制御するバルブ制御装置であって、

40

第 1 の設定圧信号を生成する生成部と、

前記目標圧力に基づいて第 1 の開度制御を行い、前記第 1 の開度制御の後に、前記第 1 の設定圧信号と前記チャンバ圧力との差に基づいてフィードバック制御する第 2 の開度制御を行う開度制御部と、を備え、

前記生成部は、前記第 1 の開度制御から前記第 2 の開度制御への切り替え時のチャンバ圧力から目標圧力へと所定の時定数で収束する第 1 の設定圧軌道に基づいて、前記第 1 の設定圧信号を生成し、

前記生成部は、

50

前記時定数を前記第 1 の開度制御の制御誤差に基づいて補正した時定数を、前記時定数に代えて使用し、

前記補正した時定数で前記目標圧力へ収束する設定圧軌道に基づいて前記第 1 の設定圧信号を生成する、バルブ制御装置。

【請求項 6】

請求項 4 または 5 に記載のバルブ制御装置において、

前記生成部は、

前記第 1 の設定圧軌道の時定数を、前記第 1 の設定圧信号の時間変化および前記チャンバ圧力の時間変化に基づいて制御周期ごとに補正し、

補正後時定数で前記目標圧力へ収束する第 2 の設定圧軌道に基づいて第 2 の設定圧信号を生成し、

10

前記開度制御部は、

前記第 2 の開度制御に代えて、前記第 2 の設定圧信号とチャンバ圧力との差に基づいてフィードバック制御する第 3 の開度制御を行う、バルブ制御装置。

【請求項 7】

弁体と、

前記弁体を開閉駆動する弁体駆動部と、

前記弁体駆動部による開閉駆動を制御する請求項 1 から請求項 6 までのいずれか一項に記載のバルブ制御装置と、を備える真空バルブ。

【発明の詳細な説明】

20

【技術分野】

【0001】

本発明は、バルブ制御装置および真空バルブに関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 に記載されているバルブ装置では、バルブ弁体開度を自動制御してチャンバ圧力を目標圧力へ速やかに収束させるために、目標圧力近傍までオープン制御による粗調整で圧力を近づけ、さらにクローズ制御に切り替えて目標圧力まで微調整にて追い込むようにしている。また、バルブ装置におけるクローズ制御としては、特許文献 2 に記載のような、目標圧力  $P_s$  と検出されたチャンバ圧力  $P_r$  との圧力偏差信号をゼロに収束させるようにフィードバック制御する開度制御が知られている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開 2018 - 106718 号公報

特開 2018 - 112933 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

ところで、特許文献 1 における切り替え後のクローズ制御において、特許文献 2 に記載のクローズ制御を適用した場合、目標圧力近傍までオープン制御で制御してクローズ制御に切り替える際に、計測される圧力  $P_r$  と目標圧力  $P_s$  と差  $= |P_r - P_s|$  はゼロではないので、切り替え前後でクローズ制御の圧力偏差信号が不連続にステップ状に変化することになる。その結果、クローズ制御において大きなオーバーシュートが発生して、調圧時間が長くなるおそれがあった。

40

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明の好ましい態様によるバルブ制御装置は、真空チャンバと真空ポンプとの間に設けられた真空バルブに対し第 1 の開度制御と第 2 の開度制御とを順に行って、前記真空チャンバのチャンバ圧力を目標圧力へ制御するバルブ制御装置であって、第 1 の設定圧信号

50

を生成する生成部と、前記目標圧力に基づいて第 1 の開度制御を行い、前記第 1 の開度制御の後に、前記第 1 の設定圧信号と前記チャンバ圧力との差に基づいてフィードバック制御する第 2 の開度制御を行う開度制御部と、を備え、前記生成部は、前記第 1 の開度制御から前記第 2 の開度制御への切り替え時のチャンバ圧力から目標圧力へと所定の時定数で収束する第 1 の設定圧軌道に基づいて、前記第 1 の設定圧信号を生成する。

さらに好ましい態様では、前記時定数は、前記切り替え時におけるチャンバ圧力および該チャンバ圧力の時間微分値と、前記目標圧力とに基づいて算出される。

さらに好ましい態様では、前記生成部は、前記第 1 の設定圧軌道の時定数を、前記第 1 の設定圧信号の時間変化および前記チャンバ圧力の時間変化に基づいて制御周期ごとに補正し、補正後時定数で前記目標圧力へ収束する第 2 の設定圧軌道に基づいて第 2 の設定圧信号を生成し、前記開度制御部は、前記第 2 の開度制御に代えて、前記第 2 の設定圧信号とチャンバ圧力との差に基づいてフィードバック制御する第 3 の開度制御を行う。

10

さらに好ましい態様では、前記補正後時定数は、前記第 1 の設定圧信号の時間変化の大きさが前記チャンバ圧力の時間変化の大きさよりも小さい場合には補正前の時定数より小さく設定され、前記第 1 の設定圧信号の時間変化の大きさが前記チャンバ圧力の時間変化の大きさよりも大きい場合には補正前の時定数より大きく設定され、前記第 1 の設定圧信号の時間変化の大きさが前記チャンバ圧力の時間変化の大きさと等しい場合には補正前の時定数と等しく設定される。

さらに好ましい態様では、前記目標圧力を  $P_s$ 、前記チャンバ圧力を  $P_r$ 、前記切り替え時のチャンバ圧力を  $P_{r0}$  と表した場合に、前記時定数は式「 $| (P_s - P_{r0}) | / | (d P_r / d t | 0) |$ 」により算出される。

20

さらに好ましい態様では、前記生成部は、前記時定数を前記第 1 の開度制御の制御誤差に基づいて補正した時定数を、前記時定数に代えて使用し、前記補正した時定数で前記目標圧力へ収束する設定圧軌道に基づいて前記第 1 の設定圧信号を生成する。

本発明の好ましい態様による真空バルブは、弁体と、前記弁体を開閉駆動する弁体駆動部と、前記弁体駆動部による開閉駆動を制御する上記態様のいずれか一に記載のバルブ制御装置と、を備える。

【発明の効果】

【0006】

本発明によれば、フィードバック制御へ切り替えた後に、チャンバ圧力を目標圧力へ速やかに収束させることができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図 1】図 1 は、バルブ制御装置が設けられた真空装置の模式図である。

【図 2】図 2 は、真空バルブの吸気口側を示す図である。

【図 3】図 3 は、真空バルブおよびバルブ制御装置の構成を示すブロック図である。

【図 4】図 4 は、本実施の形態における開度調整動作を説明するフローチャートである。

【図 5】図 5 は、比較例における圧力応答および開度出力の一例を示す図である。

【図 6】図 6 は、第 1 の実施の形態の設定圧を適用した場合の圧力応答と開度出力を示す図である。

40

【図 7】図 7 は、目標開度推定値に誤差がある場合に、開度を目標開度推定値に維持したときの圧力応答を示す図である。

【図 8】図 8 は、目標開度推定値に誤差がある場合に、第 1 の実施の形態の設定圧を適用したときの圧力応答を示す図である。

【図 9】図 9 は、第 2 の実施の形態における真空バルブおよびバルブ制御装置の構成を示すブロック図である。

【図 10】図 10 は、第 2 の実施の形態における圧力応答の一例を示す図である。

【図 11】図 11 は、第 2 の実施の形態における圧力応答の他の例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0008】

50

以下、図を参照して本発明を実施するための形態について説明する。

- 第 1 の実施の形態 -

図 1 は本発明のバルブ制御装置を説明する図であり、バルブ制御装置 2 で制御される真空バルブ 1 を備える真空装置 100 の模式図である。真空装置 100 は、例えば、CVD 装置等の半導体製造装置であり、半導体処理の処理プロセスが行われる真空チャンバ 3 を備えている。真空チャンバ 3 は、真空バルブ 1 を介して装着された真空ポンプ 4 によって真空排気される。真空チャンバ 3 には、チャンバ内圧力を計測する真空計 31、および真空チャンバ 3 に導入されるガスの流量  $Q_{in}$  を制御する流量制御器 32 が設けられている。真空バルブ 1 はバルブ制御装置 2 によってコントロールされる。真空ポンプ 4 には、例えば、ターボ分子ポンプ等が用いられる。

10

【0009】

真空バルブ 1 は、バルブプレート 11 と、バルブプレート 11 を開閉駆動するバルブモータ 12 とを備えている。真空バルブ 1 は、バルブ制御装置 2 に入力される目標圧力  $P_s$  と真空計 31 により計測された真空チャンバ 3 の圧力  $P_r$  とに基づいて、真空チャンバ 3 の圧力  $P_r$  を目標圧力  $P_s$  へと調整する自動圧力調整バルブである。目標圧力  $P_s$  は、例えば、真空装置 100 のコントローラ（不図示）からバルブ制御装置 2 に入力される。

【0010】

図 2 は、真空バルブ 1 の吸気口側を示す図である。バルブプレート 11 は真空バルブ 1 のバルブボディ 13 内に納められており、バルブボディ 13 の吸気側には開口 131 を有する吸気口フランジ 132 が設けられている。なお、バルブボディ 13 の排気側（吸気側とは反対側）には、真空ポンプ 4 が取り付けられる排気口フランジ（不図示）が吸気口フランジ 132 と同軸で設けられている。バルブモータ 12 を正方向および逆方向に回転駆動してバルブプレート 11 を揺動駆動させると、バルブプレート 11 が水平方向にスライドしてバルブ開閉動作が行われる。バルブプレート 11 は、開口 131 の全体に対向する開度 0% の位置と開口 131 から退避した開度 100% の位置との間で、開閉駆動される。

20

【0011】

（バルブ制御装置 2）

図 3 は、真空バルブ 1 およびバルブ制御装置 2 の構成を示すブロック図である。真空バルブ 1 のバルブモータ 12 には、バルブプレート 11 の開度を検出するためのエンコーダ 14 が設けられている。エンコーダ 14 の検出信号（以下では、単に開度  $r$  と称す）および真空計 31 で計測された真空チャンバ 3 の圧力  $P_r$  は、バルブ制御装置 2 に入力される。

30

【0012】

バルブ制御装置 2 は、設定圧生成部 20、開度制御部 21 およびモータ制御器 25 を備えている。開度制御部 21 は、目標開度推定器 22、フィードフォワード制御器 23 およびフィードバック制御器 24 を備えている。バルブ制御装置 2 は、開度制御前期においてバルブプレート 11 の開度を素早く粗調整する第 1 の開度制御と、第 1 の開度制御の後の開度制御後期において開度を高精度に微調整する第 2 の開度制御を実行する。

【0013】

本実施の形態では、第 1 の開度制御として、目標圧力  $P_s$  に基づくオープン制御がフィードフォワード制御器 23 によって行われ、第 2 の開度制御として、圧力  $P_r$  と設定圧生成部 20 で生成された設定圧  $P_{set1}$  との差分である圧力偏差  $\Delta P$  に基づくクローズ制御がフィードバック制御器 24 によって行われる。フィードフォワード制御器 23 からの開度設定出力  $r_{set1}$  とフィードバック制御器 24 からの開度設定出力  $r_{set2}$  とは加算され、開度設定出力  $r_{set}$  としてモータ制御器 25 に入力される。モータ制御器 25 は、開度設定出力  $r_{set}$  に基づいてバルブモータ 12 を駆動制御する。

40

【0014】

目標開度推定器 22 の記憶部 221 には開度  $r$  と圧力  $P$  との相関関係が記憶され、目標開度推定器 22 の演算部 220 は、目標圧力  $P_s$  と相関関係とに基づいて目標開度推定値  $r_{se}$  を推定演算する。目標開度推定値  $r_{se}$  の推定演算方法については後述する。フィードフォワード制御器 23 は、目標開度推定器 22 で推定演算された目標開度推定値  $r_{se}$  に基づ

50

いて開度設定出力 1 を出力する。このように、オープン制御では、目標圧力  $P_s$  になるような目標開度推定値  $se$  を別途求め、最終的に目標開度推定値  $se$  になるように適切に決めた経路でもって開度設定を出力する。オープン制御によって最終的に開度  $r$  が目標開度推定値  $se$  になると、フィードフォワード制御器 23 から出力される開度設定出力 1 は目標開度推定値  $se$  に固定されたまま、開度制御はオープン制御からクローズ制御へと切り替わる。

#### 【0015】

設定圧生成部 20 は、目標圧力  $P_s$  と真空計 31 から入力された圧力  $P_r$  とに基づいて、圧力偏差 を算出する際の設定圧を生成する。開度制御前期のオープン制御の際には、設定圧として圧力  $P_r$  が設定圧生成部 20 から出力される。クローズ制御の際には、設定圧生成部 20 は、オープン制御からクローズ制御に切り替えたタイミングにおける圧力  $P_{r0}$  と目標圧力  $P_s$  とに基づいて設定圧軌道を推定演算し、設定圧軌道に基づく設定圧  $P_{set1}$  を出力する。設定圧  $P_{set1}$  の算出方法の詳細は後述する。

10

#### 【0016】

フィードバック制御器 24 は、圧力偏差  $= P_r - (\text{設定圧})$  に基づく開度設定出力 2 を出力する。通常、フィードバック制御器 24 は、比例ゲイン、積分ゲイン（所謂  $PI$  ゲイン）で構成される。上述したように、オープン制御の際には圧力  $P_r$  が設定圧として設定圧生成部 20 から出力されるので、圧力偏差  $= 0$  がフィードバック制御器 24 に入力されることになり、 $2 = 0$  がフィードバック制御器 24 から出力される。一方、フィードフォワード制御器 23 から出力される開度設定出力 1 が目標開度推定値  $se$  に固定されてオープン制御からクローズ制御に切り替わると、設定圧生成部 20 から設定圧  $P_{set1}$  が出力される。その結果、圧力偏差  $= P_r - P_{set1}$  がフィードバック制御器 24 に入力され、フィードバック制御器 24 は圧力偏差 に基づいて開度設定出力 2 を出力する。モータ制御器 25 は、開度設定出力  $set = 1$ （固定）+ 2 に基づいて開度を制御する。

20

#### 【0017】

（相関関係の一例）

上述したように、目標開度推定器 22 の演算部 220 では、記憶部 221 に記憶されている開度と真空チャンバ 3 の圧力との相関関係と、入力された目標圧力  $P_s$  とに基づいて、目標開度推定値  $se$  を推定演算する。ここでは、開度 と圧力  $P$  との相関関係として次式（1）で定義されるプラントゲイン  $G_p$  を使用する場合を例に説明する。式（1）から分かるように、プラントゲイン  $G_p$  は開度 の変化に対する圧力応答特性を表している。なお、 $| ( P / ) |$  は、 $( P / )$  の絶対値を示している。

30

$$G_p = | ( P / ) | / P \dots (1)$$

#### 【0018】

開度を入力とし真空チャンバ 3 の圧力を出力とした場合、開度変化に対する圧力変化つまり  $( P / )$  を圧力  $P$  で規格化した量  $( ( P / ) / P )$  は、プラントである真空チャンバ 3 内の希薄ガスの圧力応答の静的なゲイン特性を表している。ここでは、 $( P / ) / P$  の絶対値  $| ( P / ) | / P$  をプラントゲイン  $G_p$  と呼ぶことにする。なお、式（1）で表されるプラントゲイン  $G_p$  は、圧力  $P$  ( ) の対数値  $( \text{Log}_e P ( ) )$  を開度 で微分した量と考えることもできる。

40

#### 【0019】

プラントゲイン  $G_p$  は真空バルブ 1、真空チャンバ 3 および真空ポンプ 4 から成るシステムのものである。真空バルブ 1 が同じであっても真空チャンバ 3 や真空ポンプ 4 が異なればプラントゲイン  $G_p$  は若干異なる。

#### 【0020】

真空バルブ 1 の開度制御には、真空チャンバ 3 の実効排気速度  $S_e$  が一般的に用いられる。通常、真空バルブ 1 を真空チャンバ 3 に装着して使用する際には、実効排気速度  $S_e$  に關する初期校正操作、すなわちバルブ制御に関する初期校正操作が行われる。一般に、適用するプロセス条件の代表的なガス、あるいは平均的なガス条件（ガス種、ガス流量）にし

50

た状態にて、真空チャンバ3の容積、バルブプレート11の感度等に応じて制御器のゲイン校正が行われる。平均的な条件としては、例えば、混合ガスの平均分子量を求め、取扱が比較的容易なガス種で代用されることが多い。

#### 【0021】

記憶部221にはプラントゲイン $G_p$ の初期値(データテーブル)が記憶されているが、プラントゲイン $G_p$ についても、実効排気速度 $S_e$ を用いて制御を行う従来の場合と同様に初期校正が必要となる。初期校正により、予め決めておいた特定ガス種および流量値条件における各開度 $i$ ごとのプラントゲイン $G_{pi}$ を求め、得られたデータテーブル( $i$ ,  $G_{pi}$ )を校正後のプラントゲイン $G_p$ として記憶部221に記憶させる。

#### 【0022】

(目標開度推定値  $s_e$ の算出)

次に、目標開度推定値  $s_e$ の算出方法の一例について説明する。ここでは、現在の調圧状態( $i$ ,  $P$ )を( $0$ ,  $P_0$ )と表し、移行すべき次の調圧状態を( $1$ ,  $P_1$ )と表すことにする。上述したように、記憶部221には、開度 $i$ とプラントゲイン $G_p$ との関係を表すデータテーブル( $i$ ,  $G_p$ )が記憶されている。すなわち、プラントゲイン $G_p$ は開度 $i$ の関数 $G_p(i)$ のように表すことができる。式(1)の定義式を用いると、開度変化 $\Delta i$ と圧力変化 $\Delta P$ との関係は、式(2)のように表される。開度 $i$ が増加すると圧力 $P$ は減少するので、式(2)の右辺にはマイナス符号が付く。

$$\Delta P = -P \times G_p(i) \times \Delta i \quad \dots (2)$$

#### 【0023】

現在の調圧状態( $0$ ,  $P_0$ )と次の調圧状態( $1$ ,  $P_1$ )との関係は次式(3), (4)で表せる。

$$1 = 0 + \int_0^1 di \quad (\text{積分範囲は } 0 \text{ から } 1 \text{ まで}) \quad \dots (3)$$

$$P_1 = P_0 + \int_{P_0}^{P_1} dP \quad (\text{積分範囲は } P_0 \text{ から } P_1 \text{ まで}) \quad \dots (4)$$

#### 【0024】

式(3), (4)の積分は、実際には調圧状態( $0$ ,  $P_0$ )から調圧状態( $1$ ,  $P_1$ )までの各準静的状態における開度の増分 $\Delta i_n$ と圧力の増分 $\Delta P_n$ をそれぞれ加算したものと表されるので、 $1$ および $P_1$ は次式(5), (6)のように表すことができる。なお、式(5)における $\sum_{n=0}^1 \Delta i_n$ は、開度 $i_n$ における開度増分 $\Delta i_n$ であることを表しており、例えば、 $\Delta i_1$ は開度 $0$ から開度 $i_1$ に変化した場合の開度増分である。同様に、 $\Delta P_n$ は、圧力 $P_n$ における圧力増分を表している。

$$1 = 0 + \sum_{n=0}^1 \Delta i_n \quad \dots (5)$$

$$P_1 = P_0 + \sum_{n=0}^1 \Delta P_n \quad \dots (6)$$

#### 【0025】

式(5)の $\sum_{n=0}^1 \Delta i_n$ に関しては、式(7)のように各開度 $i_n$ に従って増分 $\Delta i_n$ を与えれば良い。式(6)の $\sum_{n=0}^1 \Delta P_n$ に関しては、開度 $i_n$ と圧力 $P_n$ との相関関係を用いて開度 $i_n$ における増分 $\Delta i_n$ に対応する圧力 $P_n$ における増分 $\Delta P_n$ を与えれば良い。相関関係としてプラントゲイン $G_p$ を用いる場合には、圧力 $P_n$ における増分 $\Delta P_n = -P_n \times G_p(i_n) \times \Delta i_n$ は、上述の式(2)を適用して次式(8)のように表される。なお、式(8)において、 $\Delta i_n = i_n - i_{n-1}$ であり、 $G_{p_n} = G_p(i_n)$ である。

$$\Delta i_n = i_n - i_{n-1} \quad \dots (7)$$

$$\Delta P_n = -P_n \times G_{p_n} \times \Delta i_n \quad \dots (8)$$

#### 【0026】

式(7), (8)を式(5), (6)に代入して累積演算すれば、調圧状態( $1$ ,  $P_1$ )における開度値 $1$ 、圧力値 $P_1$ へおおよそ到達できる。また、式(5), (6)を変形して下記のように表せば、逐次演算することができる。

$$i_{n+1} = i_n + \Delta i_n \quad \dots (9)$$

$$P_{n+1} = P_n + \Delta P_n \quad \dots (10)$$

#### 【0027】

10

20

30

40

50

現在の調圧状態 (  $0, P_0$  ) において次の調圧条件として目標圧力  $P_s$  がバルブ制御装置 2 に入力されると、その時点で、少なくとも現在の目標圧力に対して次の目標圧力が高いか低いかが判る。従って、次の目標圧力  $P_s$  が高くなる場合 (  $P_s = P_1 > P_0$  ) は、極端に流量が変化しない限り、弁体駆動方向は現在よりも開度を小さくする方向である。逆に、次の目標圧力  $P_s$  が低くなる場合 (  $P_s = P_1 < P_0$  ) は、弁体駆動方向は開度を現在よりも大きくする方向となる。つまり、次の調圧条件 ( 目標圧力  $P_s$  ) がバルブ制御装置 2 に入力されると、現在の調圧状態 (  $0, P_0$  ) から開度増分を単調に増やす方向か、単調に減らす方向か決定できる。

#### 【 0 0 2 8 】

目標開度推定器 2 2 の演算処理能力が高ければ、式 ( 7 ) における  $P_n$  の値を可能な限り微小量とすることで演算精度が上げられる。例えば、フル開度 100% に対して  $P_n$  を 0.1% 以下に設定する。調圧状態 (  $0, P_0$  ) から単調に +0.1%、あるいは単調に -0.1% として式 ( 7 ) , ( 9 ) から開度  $P_n$  が累積演算され、式 ( 8 ) , ( 10 ) から圧力  $P$  が逐次累積演算される。そして、圧力の累積演算値である式 ( 6 ) の右辺の値「  $P_0 + P_n(P_n)$  」が次ぎの圧力値 ( 目標圧力値 )  $P_1$  に達したならば ( あるいは越えたならば )、演算を終了する。この圧力値  $P_1$  に達したときの累積演算された開度が、目標開度推定値  $P_{se}$  に相当する。以上が目標開度推定値  $P_{se}$  の算出方法の一例であるが、前述した通りプラントゲインが圧力の対数値を開度で微分した量でもあることから、詳述しないが、対数演算あるいは指数演算を適用しても求めることができる。

#### 【 0 0 2 9 】

( 開度調整動作 )

図 4 は、本実施の形態における開度調整動作を説明するフローチャートである。ステップ S 10 では、バルブ制御装置 2 に目標圧力  $P_s$  が入力されたか否かを判定し、目標圧力  $P_s$  が入力されるとステップ S 11 へ進む。ステップ S 11 では、オープン制御による開度調整を行う。すなわち、設定圧生成部 20 からは圧力  $P_r$  が出力されてフィードバック制御器 24 の開度設定出力  $P_2$  は  $P_2 = 0$  となり、フィードフォワード制御器 23 から出力される開度設定出力  $P_1$  による開度制御が行われる。

#### 【 0 0 3 0 】

ステップ S 12 では、開度  $P_r$  が目標開度推定値  $P_{se}$  に到達したか否かを判定し、到達していない場合にはステップ S 13 へ進み、到達している場合にはステップ S 14 へ進む。ステップ S 13 では、制御周期 ( サンプリング周期 ) である所定時間  $t$  が経過したか否かを判定し、経過したと判定されるとステップ S 11 へ戻る。

#### 【 0 0 3 1 】

一方、ステップ S 12 で開度  $P_r$  が目標開度推定値  $P_{se}$  に到達したと判定されてステップ S 14 に進んだ場合には、目標開度推定値  $P_{se}$  へ固定した状態でオープン制御を終了し、続いてステップ S 14 においてクローズ制御による開度調整を行う。すなわち、設定圧生成部 20 から出力された設定圧  $P_{set1}$  と圧力  $P_r$  との圧力偏差  $P = P_r - P_{set1}$  がフィードバック制御器 24 に入力され、フィードバック制御器 24 から出力される開度設定出力  $P_2$  に基づく開度制御が行われる。

#### 【 0 0 3 2 】

ステップ S 15 では、制御周期 ( サンプリング周期 ) である所定時間  $t$  が経過したか否かを判定し、経過したと判定されるとステップ S 16 へ進む。ステップ S 16 では、目標圧力  $P_s$  が変更されたか否かを判定する。目標圧力  $P_s$  が変更された場合にはステップ S 15 からステップ S 11 へ戻り、再びオープン制御による開度調整から始める。一方、目標圧力  $P_s$  が変更されない場合には、ステップ S 14 へ戻りクローズ制御を継続する。

#### 【 0 0 3 3 】

( 比較例 )

本実施の形態におけるクローズ制御では、設定圧生成部 20 により設定圧  $P_{set1}$  を生成し、その設定圧  $P_{set1}$  と圧力  $P_r$  との圧力偏差  $P = P_r - P_{set1}$  に基づいてフィードバック制御する点が従来と異なる。従来のクローズ制御では、例えば、特開 2018 - 1226

10

20

30

40

50

3号公報の図3に記載されているように、目標圧力 $P_s$ と計測された圧力 $P_r$ との差分に基づいて開度制御を行っている。これは、図3の設定圧生成部20からは、本実施形態の設定圧 $P_{set1}$ ではなく目標圧力 $P_s$ が出力されることに相当する。

#### 【0034】

図5は、本発明の比較例を説明する図である。比較例では、オープン制御からクローズ制御へ切り替えた際に、目標圧力 $P_s$ と計測された圧力 $P_r$ との差分に基づいてクローズ制御を開始する。図5(a)は圧力応答の一例を示し、図5(b)はそのときの開度出力( $r$ )を示す。比較例の場合も、オープン制御が終了すると開度 $r$ は1の最終値である目標開度推定値 $se$ で固定される。引き続きクローズ制御が開始される。そのため、設定圧生成部20から出力される設定圧がクローズ制御開始直前の圧力 $P_{r0}$ から目標圧力 $P_s$ へと変更されるので、それまで0であった圧力偏差 $\Delta P$ がクローズ制御開始直後には急激に増加し、開度 $r$ は目標開度推定値 $se$ からずれることになる。

10

#### 【0035】

図5は、目標開度推定値 $se$ の精度が極めて良好な場合を示したものであり、目標開度推定値 $se$ が目標開度 $s$ (目標圧力 $P_s$ となる開度)と等しい場合を示している。このような場合でも、オープン制御からクローズ制御に切り替わった際にラインL11のように設定圧が $P_{r0}$ から $P_{set}$ へステップ状に変化するので、圧力応答(ラインL12)に大きなオーバーシュートが発生し調圧時間が長くなるという欠点があった。クローズ制御開始直後に圧力偏差 $\Delta P$ がゼロから急激に増加するため、図5(b)のラインL13で示す開度 $r$ は、クローズ制御開始直後にいったん低下した後、徐々に目標開度推定値 $se$ ( $=s$ )へと戻る。

20

#### 【0036】

本実施の形態では、設定圧生成部20から出力される設定圧 $P_{set1}$ を、以下に説明するような設定圧とすることで、図5(a)に示すようなオーバーシュート等の発生を防止し、調圧時間の短縮を図るようにした。

#### 【0037】

(設定圧 $P_{set1}$ の算出方法)

真空装置100が、例えば半導体プロセスを行う装置である場合、真空チャンバ3へ導入されるガスのガス種、流量および目標圧力 $P_s$ が異なる種々のプロセス条件が、所定時間ごとに切り替え変更される多数の調圧イベントが実施される。各調圧イベントでは、開始直後に流量制御器32にて流量が所定流量値に収束され、並行して真空バルブ1の開度を調整して排気系の実効排気速度を制御することで真空チャンバ3の圧力 $P_r$ が目標圧力 $P_s$ へと収束される。真空チャンバ3の圧力 $P_r$ に対しては、次式(11)に示す排気の式が成立している。式(11)において、 $V$ は真空チャンバ3の容積、 $Se$ は真空バルブ1のコンダクタンスを含む排気系の実効排気速度、 $Q_{in}$ は真空チャンバ3に導入されるガスの流量である。

30

$$V \times (dP_r/dt) + Se \times P_r = Q_{in} \quad \dots (11)$$

#### 【0038】

一般のプロセスでは、流量制御器32による流量制御収束完了のタイミングは、真空バルブ1による圧力制御収束完了のタイミングより早い。そのため、クローズ制御の開始タイミングにおいては、導入されるガスの流量 $Q_{in}$ は既に所定の流量 $Q_{in0}$ に収束しているものと考えて良い。また、クローズ制御開始前において、開度 $r$ はオープン制御の最終開度値(目標開度推定値 $se$ )に固定されるので、クローズ制御の開始タイミングでは実効排気速度 $Se$ も一定の値 $Se0$ になっていると考えて良い。

40

#### 【0039】

オープン制御では、開度 $r$ は、圧力 $P_r$ が目標圧力 $P_s$ の近傍になるような最終開度値(目標開度推定値 $se$ )に制御される。上記の $Se0$ は、この開度値 $se$ における実効排気速度である。開度 $r$ と実効排気速度 $Se$ との相関関係は、予め記憶部221(図3参照)に記憶されている。圧力 $P_r$ が目標圧力 $P_s$ になっていて、そのときの実効排気速度は上記よりほぼ $Se0$ であるとみなせるので、流量はそれらの積 $P_s \times Se0$ で表される。そのため、

50

クローズ制御開始タイミングにおける流量 $Q_{in0}$ も、ほぼ $Q_{in0} = P_s \times S_{e0}$ と見做すことができる。

【0040】

一方、クローズ制御開始タイミングにおける排気の式(11)は、式(12)のように表される。式(12)において、「 $dPr/dt|_0$ 」は、クローズ制御開始タイミングにおける圧力の時間微分「 $dPr/dt$ 」の値である。

$$V \times (dPr/dt|_0) + S_{e0} \times Pr_0 = Q_{in0} \quad \dots (12)$$

【0041】

式(12)に $Q_{in0} = P_s \times S_{e0}$ を適用すると、次式(13)が求まる。

$$V/S_{e0} = (P_s - Pr_0)/(dPr/dt|_0) \quad \dots (13)$$

式(13)の左辺 $V/S_{e0}$ は、クローズ制御開始タイミングにおける時定数 $\tau_0$ である。すなわち、時定数 $\tau_0$ は、クローズ制御開始タイミングにおける圧力 $Pr (= Pr_0)$ および圧力の時間微分値 $(dPr/dt|_0)$ を用いて、次式(14)により算出することができる。なお、圧力の時間微分値 $(dPr/dt|_0)$ は、制御周期 $\tau$ の間の圧力差分 $(Pr - Pr_0)$ を用いて $Pr/\tau$ で算出できる。

$$\tau_0 = (P_s - Pr_0)/(dPr/dt|_0) \quad \dots (14)$$

【0042】

なお、圧力の時間微分値 $(dPr/dt)$ はノイズの影響を強く受けるので、検出信号に混入するノイズレベルに応じて平滑処理(移動平均などのフィルタリング)を行うと良い。上述のように、式(14)を用いることにより、バルブ制御装置2側では未知であるガス種および流量によらず、時定数 $\tau_0$ を算出することができる。

【0043】

ここで、図5において、開度 $r$ がオープン制御の最終開度値(目標開度推定値 $s_e$ )に制御された後にクローズ制御を開始せずに、図5(b)のラインL14のように開度 $r$ を目標開度推定値 $s_e$ に維持した場合を考える。その場合、真空チャンバ3の圧力 $Pr$ は、 $Pr_0$ から上述した時定数 $\tau_0$ で上昇することになる。目標開度推定値 $s_e$ は目標開度 $s$ に一致すると仮定しているので、圧力 $Pr$ は、図5(a)のラインL15のように目標圧力 $P_s$ に収束することになる。この時の圧力応答 $Pr_{open}$ は次式(15)で表される。なお、次式(15)では、 $Q_{in0} = P_s \times S_{e0}$ を用いた。

$$\begin{aligned} Pr_{open} &= Pr_0 \exp(-t/\tau_0) + (Q_{in0}/S_{e0})[1 - \exp(-t/\tau_0)] \\ &= Pr_0 \exp(-t/\tau_0) + P_s[1 - \exp(-t/\tau_0)] \quad \dots (15) \end{aligned}$$

【0044】

式(15)は、目標開度推定値 $s_e$ が誤差なく算出されて理想的な目標圧力 $P_s$ と一致する場合の、クローズ制御無しでオープン制御のみで目標圧力 $P_s$ へ収束する圧力応答である。つまり、クローズ制御にて不必要な圧力偏差を生じない設定圧 $P_{set1}$ として最適値と解釈できる。本実施の形態では、図5(a)のラインL15を設定圧 $P_{set1}$ を生成する際の設定圧軌道に採用する。実際の信号は離散信号なので、式(16)のような漸化式で表す。 $i = 1$ をクローズ制御の開始タイミングとし、制御周期 $\tau$ が進むに従って $i$ が+1される。なお、 $P_{set\_0} = Pr_0$ とする。

$$\begin{aligned} P_{set1\_i} &= A \times P_{set\_i-1} + P_s \times (1 - A) \quad i = 1, 2, \dots \quad \dots (16) \\ &\text{ただし、} A = \exp(-\tau/\tau_0) \end{aligned}$$

【0045】

図6(a)のラインL20は、上述した式(16)で示した設定圧 $P_{set1\_i}$ 、すなわち図5(a)のラインL15で示す設定圧軌道となるような設定圧 $P_{set1\_i}$ を設定圧生成部20から出力したときの、圧力応答を示す図である。また、図6(b)のラインL21は開度出力を示す。目標開度推定値 $s_e$ は理想的な目標圧力 $P_s$ と一致すると仮定したので $s_e = s$ であり、設定圧 $P_{set1\_i}$ は計測される圧力 $Pr$ と同じになる。そのため、圧力偏差はゼロで、フィードバック制御器24の出力 $u_2$ は常にゼロとなる。

【0046】

クローズ制御時にはフィードフォワード制御器23の開度設定出力 $u_1$ は目標開度推

10

20

30

40

50

定値  $se$  に固定されているので、モータ制御器 25 に入力される開度設定出力  $set(=1+2)$  も  $se$  となり、開度  $r$  は図 6 (b) のライン L 21 のように一定 ( $es$ ) に維持される。また、図 6 (a) に示すライン L 20 は、図 5 (a) に示すライン L 15 と一致する。すなわち、クローズ制御においては、式 (16) を満たす設定圧  $P_{set1}$  を設定圧生成部 20 から出力することにより、図 5 (a) のライン L 12 のようなオーバーシュートが生じない圧力応答 (ライン L 20) で、真空チャンバ 3 の圧力  $P_r$  を目標圧力  $P_s$  へ速やかに収束させることができる。

#### 【0047】

上述したように、本実施の形態では、オープン制御からクローズ制御へ切り替えるタイミングにて、図 5 に示した比較例のように目標圧力  $P_s$  に不連続 (ステップ状) に設定変更するのではなく、切り替えタイミングにおける圧力  $P_{r0}$  から目標圧力  $P_s$  に向けておおよそオープン制御単独による圧力軌道となる連続な設定圧軌道 (図 5 (a) のライン L 15) の設定圧  $P_{set1}$  の信号を生成し、その設定圧  $P_{set1}$  でクローズ制御するようにしている。そのため、クローズ制御における圧力応答のオーバーシュートが抑えられ、調圧時間を低減することができる。

10

#### 【0048】

なお、上述した説明では、目標圧力  $P_s$  が調圧開始の圧力よりも高い場合 (以下、アップケースと呼ぶ) を例に説明したが、当然ながら、目標圧力  $P_s$  が調圧開始の圧力よりも低い場合 (以下、ダウンケースと呼ぶ) についても同様に適用することができ、同様の効果が得られる。

20

#### 【0049】

- 第 2 の実施の形態 -

第 1 の実施の形態の図 5 (a) のライン L 15 および図 6 に示した例では、オープン制御の最終的な目標開度推定値  $se$  が目標開度  $s$  に一致するという理想的な場合について説明した。そのような場合、圧力応答を示すライン L 20 は、設定圧  $P_{set1}$  の設定圧軌道 (図 5 (a) のライン L 15) と一致する。

#### 【0050】

しかしながら、現実には目標開度推定値  $se$  は誤差を有する。その誤差が無視できないほど大きい場合、開度  $r$  を目標開度推定値  $se$  の状態に維持した状態とすると、図 5 (a) のライン L 15 のような目標圧力  $P_s$  に収束する圧力応答とならず、図 7 に示すライン L 30, L 31 のように目標圧力  $P_s$  に収束しない圧力応答となる。ライン L 30 の場合には目標圧力  $P_s$  よりも高い圧力に収束し、ライン L 31 の場合には目標圧力  $P_s$  よりも低い圧力に収束している。

30

#### 【0051】

図 8 は、開度  $r$  をオープン制御の最終的な目標開度推定値  $se$  に維持したときの圧力応答が図 7 のライン L 30, L 31 である場合に、クローズ制御において第 1 の実施の形態の設定圧  $P_{set1}$  を適用したときの圧力応答を示す図である。図 8 (a) はライン L 30 の場合を示し、図 8 (b) はライン L 31 の場合を示す。図 8 (a) のライン L 40 は設定圧  $P_{set1}$  の設定圧軌道を示し、ライン L 42 はその場合の圧力応答を示す。また、図 8 (b) のライン L 41 は設定圧  $P_{set1}$  の設定圧軌道を示し、ライン L 43 はその場合の圧力応答を示す。

40

#### 【0052】

図 8 (a) において、設定圧  $P_{set1}$  に関するライン L 40 はクローズ制御開始圧力  $P_{r0}$  から目標圧力  $P_s$  へと収束しているが、圧力応答を示すライン L 42 にはオーバーシュートが生じている。図 8 (b) においても、設定圧  $P_{set1}$  に関するライン L 41 は、クローズ制御開始圧力  $P_{r0}$  から目標圧力  $P_s$  へと収束している。しかし、圧力応答を示すライン L 43 はライン L 41 よりもゆっくりと目標圧力  $P_s$  に収束しており、図 6 (a) に示す理想的な場合と比べて調圧時間が長くなっている。なお、クローズ制御開始タイミングでは、オープン制御の最終開度値 (目標開度推定値  $se$ ) による圧力応答の最終値が目標圧力  $P_s$  に対して、過大になるか過小になるかは不明である。

50

【 0 0 5 3 】

そこで、第 2 の実施の形態では、オープン制御の最終的な目標開度推定値  $se$  に誤差を含んでいる場合でも、適切に速やかに目標圧力  $P_s$  に収束できる設定圧を与えるようにした。図 9 は、第 2 の実施の形態におけるバルブ制御装置 2 の構成を示すブロック図である。図 3 に示したブロック図と比較した場合、設定圧生成部 20 A の構成が異なり、その他の構成は同様である。以下では異なる部分を中心に説明する。

【 0 0 5 4 】

設定圧生成部 20 A は、入力された目標圧力  $P_s$  と圧力  $P_r$  とに基づいて、上述した設定圧  $P_{set1}$  に加えて、さらに設定圧  $P_{set1}$  に基づく第 2 の設定圧  $P_{set2}$  を生成する。設定圧生成部 20 A は、開度制御前期のオープン制御の際には圧力  $P_r$  を設定圧として出力し、クローズ制御の際には設定圧  $P_{set2}$  を出力する。

10

【 0 0 5 5 】

( 設定圧  $P_{set2}$  の算出方法 )

上述したように、クローズ制御開始タイミングでは、図 7 のライン L 30 , L 31 で示すオープン制御の最終開度値 ( 目標開度推定値  $se$  ) による圧力応答の最終値が、目標圧力  $P_s$  に対して過大になるか過小になるかは不明である。そこで、第 2 の実施の形態では、クローズ制御開始タイミングの条件  $P_{r0} , (d P_r / d t | 0)$  で設定圧  $P_{set1}$  を生成し、その設定圧  $P_{set1}$  を基準にして、クローズ制御開始後の状況により軌道修正した設定圧  $P_{set2}$  をクローズ制御の設定圧として生成する。設定圧  $P_{set2}$  は次式 ( 17 ) のように設定される。時定数  $\tau_0$  は式 ( 14 ) で算出される。

20

$$P_{set2\_i} = A\_i \times P_{set2\_i-1} + P_s \times (1 - A\_i) \quad i = 1 \dots (17)$$

ただし、 $A\_i = \exp(-t \cdot \tau_i / \tau_0)$

【 0 0 5 6 】

式 ( 17 ) において、 $\tau_i = 1$  の場合には  $A\_i$  は式 ( 16 ) の  $A$  と同一となり、設定圧  $P_{set2}$  は設定圧  $P_{set1}$  と一致する。 $\tau_0 / \tau_i$  は設定圧  $P_{set2}$  に関する時定数に相当し、 $\tau_i > 1$  のときは時定数  $\tau_0$  の場合よりも速く変化する設定圧軌道の時定数を表しており、 $\tau_i < 1$  のときは時定数  $\tau_0$  の場合よりもゆっくり変化する設定圧軌道の時定数を表している。なお、式 ( 17 ) に示した設定圧  $P_{set2}$  の漸化式は、次式 ( 18 ) に示す圧力応答の設定圧軌道に基づいて導出される。

$$P_{r\_open} = P_{r0} \exp(-t \cdot \tau_i / \tau_0) + P_s [1 - \exp(-t \cdot \tau_i / \tau_0)] \dots (18)$$

30

【 0 0 5 7 】

$\tau_i$  は制御周期  $t$  毎に決定される係数値であり、基準となる設定圧  $P_{set1}$  の制御タイミング  $i$  における変化率 ( $P_{set1\_i} / t$ ) と、制御タイミング  $i$  における圧力  $P_r$  の変化率 ( $P_{r\_i} / t$ ) とを比較して、次式 ( 19 a ) ~ ( 19 c ) のように設定する。なお、 $i = 0$  の場合の  $\tau_0$  は  $\tau_0 = 1$  とし、 $\tau_0$  は正の定数である。

$$| ( P_{set1\_i} / t ) | < | ( P_{r\_i} / t ) | \text{ の場合、 } \tau_i = \tau_{i-1} - \dots (19 a)$$

$$| ( P_{set1\_i} / t ) | = | ( P_{r\_i} / t ) | \text{ の場合、 } \tau_i = \tau_{i-1} \dots (19 b)$$

$$| ( P_{set1\_i} / t ) | > | ( P_{r\_i} / t ) | \text{ の場合、 } \tau_i = \tau_{i-1} + \dots (19 c)$$

【 0 0 5 8 】

式 ( 19 a ) は、設定圧  $P_{set1}$  の変化率よりも実際の圧力  $P_r$  の変化率の方が大きい場合であって、例えば、図 8 ( a ) のライン L 40 とライン L 30 とが対応している。その場合には、 $\tau_i < 1$  に設定して時定数 ( $\tau_0 / \tau_i$ ) を  $\tau_0$  よりも大きくする。図 10 は、図 8 ( a ) に示したライン L 40 およびライン L 30 と、設定圧  $P_{set2}$  の設定圧軌道 ( ライン L 50 ) および設定圧  $P_{set2}$  を用いた場合の圧力応答 ( ライン L 51 ) とを示す図である。 $\tau_i < 1$  と設定することで、設定圧  $P_{set2}$  の設定圧軌道 ( ライン L 50 ) は、設定圧  $P_{set1}$  の設定圧軌道 ( ライン L 40 ) よりも低圧側へと修正され、ライン L 40 よりもゆっくりと目標圧力  $P_s$  に近づくようになる。その結果、圧力応答 ( ライン L 51 ) は、ほぼオーバーシュートすることなく目標圧力  $P_s$  に収束する。

40

【 0 0 5 9 】

式 ( 19 c ) は、設定圧  $P_{set1}$  の変化率よりも実際の圧力  $P_r$  の変化率の方が小さい場

50

合であって、例えば、図 8 ( b ) のライン L 4 1 とライン L 3 1 とが対応している。その場合には、 $\tau_i > 1$  に設定して時定数 ( $\tau_0 / \tau_i$ ) を  $\tau_0$  よりも小さくする。図 1 1 は、図 8 ( b ) に示したライン L 4 1 およびライン L 3 1 と、設定圧 P set2 の設定圧軌道 (ライン L 6 0) および設定圧 P set2 を用いた場合の圧力応答 (ライン L 6 1) とを示す図である。 $\tau_i > 1$  と設定することで、設定圧 P set2 の設定圧軌道 (ライン L 6 0) は、設定圧 P set1 の設定圧軌道 (ライン L 4 1) よりも高圧側へと修正され、ライン L 4 1 よりも速く目標圧力 P s に近づくようになる。その結果、圧力応答 (ライン L 6 1) は、図 8 ( b ) の圧力応答 (ライン L 4 3) よりも速く目標圧力 P s に収束する。

#### 【 0 0 6 0 】

上述した第 1 および第 2 の実施の形態に対して、以下のような変形例 1 , 2 を適用することができる。

10

#### (変形例 1)

目標開度推定値  $\tau_{se}$  の誤差や外乱等によりクローズ制御開始タイミングの圧力 P r 0 が、アップケースの場合に目標圧力 P s よりも大きくなってしまったり、ダウンケースの場合に目標圧力 P s よりも小さくなってしまったりすると、式 ( 1 4 ) で計算される時定数  $\tau_0$  がマイナスの値になる。その場合、設定圧 P set1 が目標圧力 P s から乖離する方向に設定されてしまい、調圧時間が長くなってしまうことになる。

#### 【 0 0 6 1 】

そこで、変形例 1 では、式 ( 1 4 ) に代えて次式 ( 2 0 ) を時定数  $\tau_0$  の算出に用いる。

$$\tau_0 = | ( P_s - P_{r0} ) | / | ( d P_r / d t | 0 ) | \dots ( 2 0 )$$

20

式 ( 2 0 ) により時定数  $\tau_0$  を算出することで、クローズ制御開始タイミングに乱れが生じた場合でも時定数は必ずプラスの値となり、適切な設定圧 P set1 が出力されて調圧の信頼性が向上する。

#### 【 0 0 6 2 】

#### (変形例 2)

変形例 2 は、目標開度推定器 2 2 において、オープン制御による仮想応答が図 7 のライン L 3 0 (または、ライン L 3 1) となるような目標開度推定値  $\tau_{se}$  が算出される傾向がある場合の対応策である。そのような算出誤差傾向がある場合には、予めそれを考慮して、上述した第 1 および第 2 の実施の形態における設定圧 P set1 を、式 ( 1 6 ) の A を A 2 に置き換えた次式 ( 2 1 ) で算出するようにしても良い。

30

$$P_{set1\_i} = A_2 \times P_{set1\_i-1} + P_s \times ( 1 - A_2 ) \dots ( 2 1 )$$

$$\text{ただし、} A_2 = \exp(- t \cdot / 0) 、 1$$

なお、式 ( 2 1 ) に示す設定圧 P set1 の漸化式も式 ( 1 7 ) に示した設定圧 P set2 の漸化式の場合と同様に、次式 ( 2 2 ) に示す圧力応答の設定圧軌道に基づいて導出される。

$$P_{r\_open} = P_{r0} \exp(- t \cdot / 0) + P_s [ 1 - \exp(- t \cdot / 0) ] \dots ( 2 2 )$$

#### 【 0 0 6 3 】

図 7 のライン L 3 0 のように仮想応答が目標圧力 P s を越える傾向が強いことが予め分かっている場合には、 $\tau_i < 1$  に設定する。その結果、設定圧 P set1 による設定圧軌道の傾きが低めに設定され、オーバーシュートが低減される。逆に、図 7 のライン L 3 1 のように仮想応答が目標圧力 P s を下回る傾向が強いことが予め分かっている場合には、 $\tau_i > 1$  に設定する。その結果、設定圧 P set1 による設定圧軌道の傾きが高めに設定され、収束の即応性を改善される。

40

#### 【 0 0 6 4 】

上述した実施の形態および変形例の作用効果をまとめると、以下ようになる。

( 1 ) 第 1 の実施の形態で説明したように、図 3 のバルブ制御装置 2 は、第 1 の設定圧 P s et1 を生成する設定圧生成部 2 0 と、目標圧力 P s に基づいて第 1 の開度制御であるオープン制御を行い、第 1 の開度制御の後に、設定圧 P set1 と真空チャンバ 3 の圧力 P r との差に基づいてフィードバック制御する第 2 の開度制御を行う開度制御部 2 1 と、を備え、設定圧生成部 2 0 は、第 1 の開度制御から第 2 の開度制御への切り替え時の真空チャンバ 3 の圧力 P r 0 から目標圧力 P s へと所定の時定数  $\tau_0$  で収束する設定圧軌道、例えば、図 5 (

50

a) のライン L 1 5 に示すような設定圧軌道に基づいて、設定圧 P set1 を生成する。

【 0 0 6 5 】

このように、第 2 の開度制御における設定圧 P set1 を、第 2 の開度制御へ切り替え時の真空チャンバ 3 の圧力 P r 0 から目標圧力 P s へと所定の時定数  $\tau_0$  で収束する設定圧軌道に基づいて生成するようにしたので、図 5 ( a ) のライン L 1 2 に示すようなクローズ制御切り替え後における圧力応答のオーバーシュートを抑制することができ、調圧時間を低減することができる。

【 0 0 6 6 】

なお、上述した実施形態では、第 1 の開度制御がオープン制御（フィードフォワード制御）である場合を例に説明したが、オープン制御に限定されない。例えば、第 1 の開度制御で粗調整のフィードバック制御を行い、第 2 の開度制御で微調整のフィードバック制御を行うような場合においても、上述のような設定圧 P set1 を適用することができる。

【 0 0 6 7 】

( 2 ) 上述した所定の時定数  $\tau_0$  としては、例えば、第 1 の開度制御から第 2 の開度制御に切り替えた時の真空チャンバ 3 の圧力 P r ( = P r 0 ) および圧力 P r の時間微分値 (  $d P r / d t |_0$  ) と、目標圧力 P s とに基づいて算出するのが好ましい。それにより、第 2 の開度制御における設定圧軌道（すなわち、式 ( 1 5 ) で示される設定圧軌道）を、オープン制御単独による圧力軌道とほぼ同じにすることができる。

【 0 0 6 8 】

( 3 ) さらに、第 2 の実施の形態のように式 ( 1 9 a ) ~ ( 1 9 c ) を適用して、すなわち、設定圧 P set1 の時間変化および真空チャンバ 3 の圧力 P r の時間変化に基づいて、設定圧 P set1 に関する第 1 の設定圧軌道（すなわち、式 ( 1 5 ) で示される設定圧軌道）の時定数  $\tau_0$  を、制御周期  $T$  ごとに (  $\tau_0 / T$  ) のように補正し、補正後時定数 (  $\tau_0 / T$  ) で目標圧力 P s へ収束する第 2 の設定圧軌道（すなわち、式 ( 1 8 ) で示される設定圧軌道）に基づいて第 2 の設定圧 P set2 を生成する。そして、設定圧 P set1 を用いる第 2 の開度制御に代えて、設定圧 P set2 と真空チャンバ 3 の圧力 P r との差  $( P r - P s )$  に基づいてフィードバック制御する第 3 の開度制御を行うのが好ましい。

【 0 0 6 9 】

オープン制御（第 1 の開度制御）における最終開度値（目標開度推定値  $\theta_{se}$ ）に誤差が発生した場合、図 8 のライン L 4 0 , L 4 1 のように設定圧 P set1 に基づいて開度制御しても、ライン L 4 2 のようにオーバーシュートが発生したり、ライン L 4 3 のように目標圧力 P s への収束速度が低下したりする。しかし、上述の第 3 の開度制御を行うことにより、オーバーシュートの可能性がある場合には、設定圧 P set2 は図 1 0 のライン L 5 0 のように設定圧 P set1 よりも低めに設定される。逆に、収束速度低下の可能性のある場合には、設定圧 P set2 は図 1 1 のライン L 6 0 のように設定圧 P set1 よりも高めに設定される。その結果、圧力 P r がより速やかに目標圧力 P s に収束するようになる。

【 0 0 7 0 】

( 4 ) 上述した補正後時定数 (  $\tau_0 / T$  ) は、式 ( 1 9 a ) のように、設定圧 P set1 の時間変化の大きさが真空チャンバ 3 の圧力 P r の時間変化の大きさよりも小さい場合には時定数  $\tau_0$  より小さく設定され、設定圧 P set1 の時間変化の大きさが真空チャンバ 3 の圧力 P r の時間変化の大きさよりも大きい場合には時定数  $\tau_0$  より大きく設定され、設定圧 P set1 の時間変化の大きさが真空チャンバ 3 の圧力 P r の時間変化の大きさと等しい場合には時定数  $\tau_0$  と等しく設定されるのが好ましい。

【 0 0 7 1 】

( 5 ) さらに、時定数  $\tau_0$  は式「  $\tau_0 = | ( P s - P r 0 ) | / | ( d P r / d t |_0 ) |$  」により算出するのが好ましい。その結果、クローズ制御開始タイミングに乱れが生じた場合でも時定数  $\tau_0$  は必ずプラスの値となり、適切な設定圧 P set1 が出力されて調圧の信頼性が向上する。

【 0 0 7 2 】

( 6 ) また、第 1 の開度制御（オープン制御）の制御誤差が予め分かっている場合には、時定数  $\tau_0$  をその制御誤差に基づいて補正した時定数 (  $\tau_0 / \epsilon$  ) を、時定数  $\tau_0$  に代えて使用

10

20

30

40

50

し、補正した時定数(  $\tau$  )で真空チャンバ3の圧力  $P_r$  に収束する設定圧軌道(式(22)で示される設定圧軌道)に基づいて第1の設定圧  $P_{set1}$  を生成するのが好ましい。その結果、第1の開度制御の制御誤差の影響を抑えることができる。

【0073】

上記では、種々の実施の形態および変形例を説明したが、本発明はこれらの内容に限定されるものではない。本発明の技術的思想の範囲内で考えられるその他の態様も本発明の範囲内に含まれる。例えば、バルブプレート11が揺動駆動されて開度が変化する真空バルブ1を例に説明したが、他の構成の自動調圧式の真空バルブにも同様に適用することができる。

【符号の説明】

10

【0074】

1...真空バルブ、2...バルブ制御装置、3...真空チャンバ、4...真空ポンプ、11...バルブプレート、12...バルブモータ、20, 20A...設定圧生成部、21...開度制御部、22...目標開度推定器、23...フィードフォワード制御器、24...フィードバック制御器、25...モータ制御器、31...真空計、32...流量制御器、100...真空装置、 $P_s$ ...目標圧力、 $P_{set1}$ ,  $P_{set2}$ ...設定圧

20

30

40

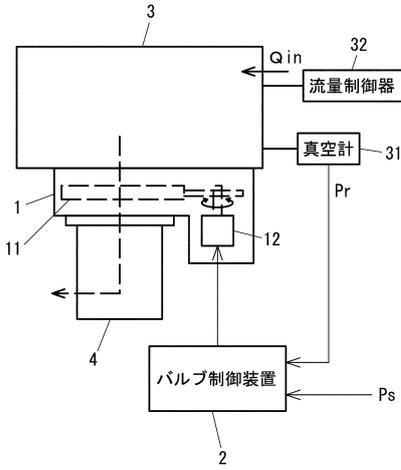
50

【図面】

【図 1】

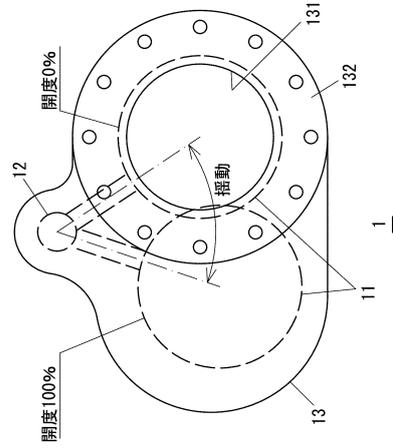
【図 2】

【図 1】



100

【図 2】



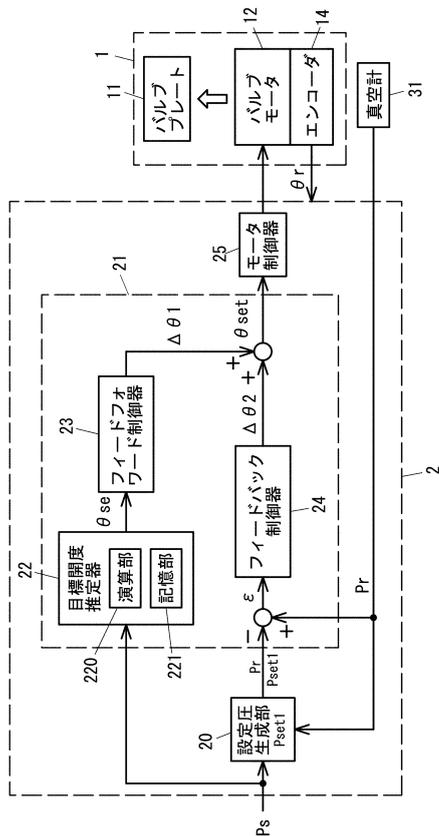
10

20

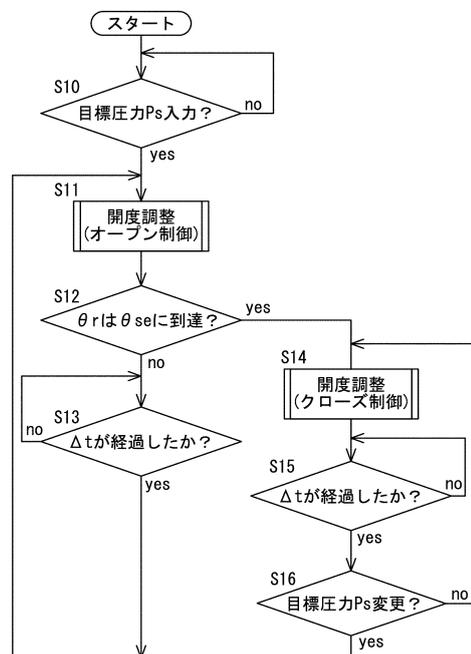
【図 3】

【図 4】

【図 3】



【図 4】



30

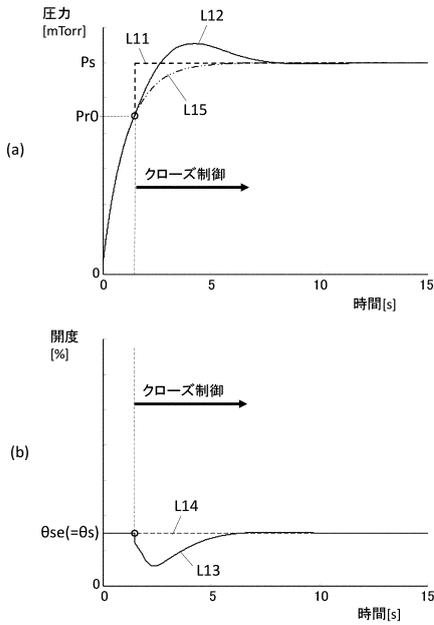
40

50

【 図 5 】

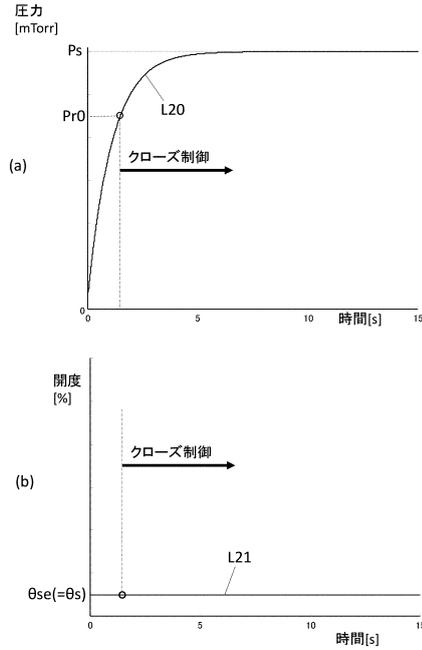
【図5】

(比較例)



【 図 6 】

【図6】

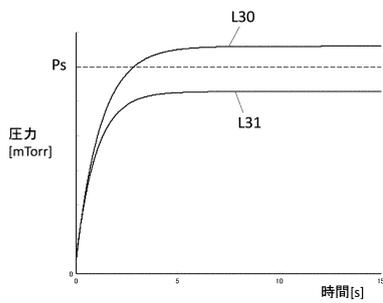


10

20

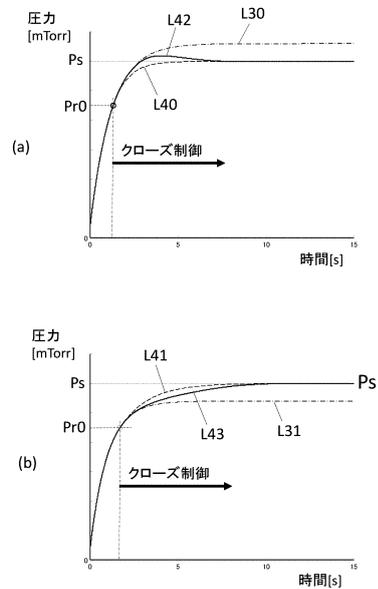
【 図 7 】

【図7】



【 図 8 】

【図8】



30

40

50



---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開 2018 - 106718 (JP, A)  
特開 2005 - 014169 (JP, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
G05D 16/20