

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6426475号
(P6426475)

(45) 発行日 平成30年11月21日(2018.11.21)

(24) 登録日 平成30年11月2日(2018.11.2)

(51) Int. Cl. F I
G05D 7/06 (2006.01) G05D 7/06 Z

請求項の数 16 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2014-561002 (P2014-561002)	(73) 特許権者	591203428
(86) (22) 出願日	平成25年3月4日 (2013.3.4)		イリノイ ツール ワークス インコーポレイティド
(65) 公表番号	特表2015-509642 (P2015-509642A)		アメリカ合衆国, イリノイ 60025, グレンビュー, ハーレム アベニュー 155
(43) 公表日	平成27年3月30日 (2015.3.30)		
(86) 国際出願番号	PCT/US2013/028914	(74) 代理人	100099759
(87) 国際公開番号	W02013/134150		弁理士 青木 篤
(87) 国際公開日	平成25年9月12日 (2013.9.12)	(74) 代理人	100102819
審査請求日	平成28年3月4日 (2016.3.4)		弁理士 島田 哲郎
(31) 優先権主張番号	61/607, 974	(74) 代理人	100123582
(32) 優先日	平成24年3月7日 (2012.3.7)		弁理士 三橋 真二
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100147555
			弁理士 伊藤 公一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 熱モデルを用いてROD測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって質量流量制御器または質量流量計における実時間補正のための減衰速度測定の精度を改善するためのシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

質量流量制御器であって、
流体を受け取るための流入口と、
前記流体が該質量流量制御器を通過する流路と、
前記流路を通る前記流体の質量流量に対応する信号を提供するための質量流量センサーと、

前記流路内の地点における圧力を測定する、前記流路に結合された圧力トランスデューサーと、

該質量流量制御器の流出口から出る前記流体の流量を調整するための調整可能バルブと

10

前記調整可能バルブを所望のバルブ位置に調整するバルブ制御信号を印加して、該質量流量制御器の流出口から出る前記流体の前記流量を制御するコントローラーと、

熱モデルを用いて減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって前記減衰速度測定の精度を改善する命令を実行する少なくとも1つの処理構成要素と、を具備し、

前記少なくとも1つの処理構成要素は、前記減衰速度測定の結果をログ記録する命令と、前記ログ記録された結果に基づいて傾向解析を実行する命令とを実行するように構成されており、

前記少なくとも1つの処理構成要素は、前記精度が所定の閾値を超えて変化したことを

20

示す前記傾向解析に基づいてアラームを生成する命令を実行するように構成されている、質量流量制御器。

【請求項 2】

前記流路に沿って温度を求めるための温度センサーを更に備える請求項 1 に記載の質量流量制御器。

【請求項 3】

前記流路の地点に沿って前記流体の流体圧力に対応する信号を提供するための圧力トランスデューサーを更に備える請求項 1 に記載の質量流量制御器。

【請求項 4】

前記質量流量センサーは、流量センサーを備える熱式質量流量センサーである請求項 1 に記載の質量流量制御器。

10

【請求項 5】

請求項 1 に記載の質量流量制御器であって、前記熱モデルを用いて前記減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にして前記減衰速度測定の精度を改善する前記命令は、前記熱モデルを用いてフィット項 (K 1) を求めるための命令を含み、前記フィット項 (K 1) は、前記減衰速度測定中に該質量流量制御器を去る質量流量に比例する請求項 1 に記載の質量流量制御器。

【請求項 6】

前記熱モデルを用いて前記減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にして前記減衰速度測定の精度を改善する前記命令は、前記フィット項のベースライン値 (K 1_{baseline}) を記憶するための命令を更に含む請求項 5 に記載の質量流量制御器。

20

【請求項 7】

前記熱モデルを用いて前記減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にして前記減衰速度測定の精度を改善する前記命令は、前記熱モデルを用いた前記減衰速度測定を繰り返して、前記フィット項の新たな値 (K 1_{remeasured}) を計算するための命令を更に含む請求項 6 に記載の質量流量制御器。

【請求項 8】

前記熱モデルを用いて前記減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にして前記減衰速度測定の精度を改善する前記命令は、 (K 1_{remeasured} - K 1_{baseline}) / K 1_{baseline} × 100 に等しい精度変化のパーセンテージを計算する命令を更に含む請求項 7 に記載の質量流量制御器。

30

【請求項 9】

前記少なくとも 1 つの処理構成要素は、前記減衰速度測定の結果に基づいてその較正およびオフセットを自己補正する命令を実行するように構成されている請求項 1 に記載の質量流量制御器。

【請求項 10】

前記熱モデルは、

【数 1】

$$Mg(t) = K0 - K1 \int_0^t Q_{ref} dt + K2 e^{-t/\tau} + K3 \int_0^t e^{-t/\tau} Q_{ref} dt.$$

40

によって表され、ここで

K 0 : 減衰の開始時の正規化圧力から指数関数的正規化圧力減衰項を減算したものの、すなわち、K 0 = Mg (0) - K 2 に等しいフィット項であり、

K 1 : 圧力減衰中に M F C を去る質量流量に比例するフィット項であり、

K 2 : 指数関数的温度減衰によって引き起こされる正規化圧力減衰の振幅に等しいフィット項であり、

K 3 : 指数関数的圧力減衰中に M F C を去る質量に起因するフィット項であり、

50

システム気体熱時間定数であって、これは、気体固有値であり、特定のMFC気体の計算を通じて測定または取得され得るものであり、

Q_{ref}：標準密度、即ち標準温度および標準圧力における等価な理想気体の密度における気体体積流量であり、

M_g：温度および圧縮率に関する正規化圧力である、請求項1に記載の質量流量制御器

【請求項11】

質量流量制御器および質量流量計のうちの少なくとも一方を改良するための方法であって、熱モデルを利用して、前記質量流量制御器および前記質量流量計のうちの少なくとも一方によって実行される減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にする命令を、プロセッサを用いて実行すること、

前記減衰速度測定の結果をログ記録する命令と、前記ログ記録された結果に基づいて傾向解析を実行する命令とを実行すること、及び

前記減衰速度測定の精度が所定の閾値を超えて変化したことを示す前記傾向解析に基づいてアラームを生成する命令を実行すること、を含む質量流量制御器および質量流量計のうちの少なくとも一方を改良するための方法。

【請求項12】

前記熱モデルを利用して減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にする命令を、プロセッサを用いて実行することは、前記熱モデルを用いてフィット項(K1)を求めるための命令を含み、前記フィット項(K1)は、前記減衰速度測定中に前記質量流量制御器および前記質量流量計のうちの前記少なくとも一方を去る質量流量に比例する請求項11に記載の方法。

【請求項13】

前記熱モデルを用いて前記減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にして前記減衰速度測定の精度を改善する前記命令は、前記フィット項のベースライン値(K1_{baseline})を記憶するための命令を更に含む請求項12に記載の方法。

【請求項14】

前記熱モデルを用いて前記減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にして前記減衰速度測定の精度を改善する前記命令は、前記熱モデルを用いた前記減衰速度測定を繰り返して、前記フィット項の新たな値(K1_{remeasured})を計算するための命令を更に含む請求項13に記載の方法。

【請求項15】

前記熱モデルを用いて前記減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にして前記減衰速度測定の精度を改善する前記命令は、(K1_{remeasured} - K1_{baseline}) / K1_{baseline} × 100に等しい精度変化のパーセンテージを計算する命令を更に含む請求項14に記載の方法。

【請求項16】

前記熱モデルは、

【数2】

$$Mg(t) = K0 - K1 \int_0^t Q_{ref} dt + K2 e^{-t/\tau} + K3 \int_0^t e^{-t/\tau} Q_{ref} dt.$$

によって表され、ここで

K0：減衰の開始時の正規化圧力から指数関数的正規化圧力減衰項を減算したもの、すなわち、K0 = M_g(0) - K2に等しいフィット項であり、

K1：圧力減衰中にMFCを去る質量流量に比例するフィット項であり、

K2：指数関数的温度減衰によって引き起こされる正規化圧力減衰の振幅に等しいフィット項であり、

10

20

30

40

50

K 3 : 指数関数的圧力減衰中に M F C を去る質量に起因するフィット項であり、
: システム気体熱時間定数であって、これは、気体固有値であり、特定の M F C 気体
の計算を通じて測定または取得され得るものであり、
Q ref : 標準密度、即ち標準温度および標準圧力における等価な理想気体の密度における
気体体積流量であり、

M g : 温度および圧縮率に関する正規化圧力である、請求項 1 1 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、包括的には流体の質量流量を求めるための方法およびシステムに関し、より 10
 詳細には質量流量制御器の動作に関する。

【背景技術】

【0002】

多くの産業プロセスは、様々なプロセス流体の精密な制御を必要とする。例えば、半導体産業では、処理チャンパーに導入されるプロセス流体の量を精密に測定するのに質量流量計 (M F M) が用いられる。質量流量を測定することに加えて、質量流量制御器 (M F C) は、処理チャンパーに導入されるプロセス流体の量を正確に測定、制御するのに用いられる。流体という用語は、本明細書において用いられるとき、流量制御対象となり得る任意のタイプの気体または蒸気に適用されることが理解されるべきである。

【0003】

減衰速度 (R O D) 測定は、質量流量制御器および質量流量計を含む様々な流量測定装置を較正するのに用いることができる。然しながら、現在の減衰速度測定は、熱に起因する誤差を含むおそれがある。

【発明の概要】

【0004】

開示される実施形態は、熱モデルを用いて減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって質量流量制御器または質量流量計における実時間補正のための減衰速度測定の精度を改善するためのシステムおよび方法を含む。

【0005】

開示される実施形態は、熱モデルを用いて減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって質量流量制御器 (M F C) および / または質量流量計 (M F M) における実時間補正のための減衰速度測定の精度を改善するための方法、装置、およびコンピュータプログラム製品を含む。 30

【0006】

例えば、1つの実施形態では質量流量制御器が開示され、この質量流量制御器は、流体を受け取るための流入口と、流体が質量流量制御器を通過する流路とを備える。また、この質量流量制御器は、流路を通る流体の質量流量に対応する信号を提供するための質量流量センサーと、この質量流量制御器の流出口から出る流体の流量を調整するための調整可能バルブと、調整可能バルブを所望のバルブ位置に調整するバルブ制御信号を印加して、この質量流量制御器の流出口から出る流体の流量を制御するコントローラーとを備える。 40
 さらに、開示される実施形態によれば、この質量流量制御器は、熱モデルを用いて減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって減衰速度測定の精度を改善する命令を実行する少なくとも1つの処理構成要素を備える。

【0007】

別の実施形態では、質量流量制御器を改良するための方法が開示される。この方法は、熱モデルを利用して、質量流量制御器によって実行される減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にする命令を、プロセッサを用いて実行することを含む。これらの命令は、熱モデルを用いてフィット項 (K 1) を求めるための指示と、このフィット項のベースライン値 (K 1 _{baseline}) を記憶するための指示とを含み、このフィット項 (K 1) は、減衰速度測定中に質量流量制御器を去る質量流量に比例する。また、上記命令は、熱モデ 50

ルを用いた減衰速度測定を繰り返して、フィット項の新たな値 ($K_{1 \text{ remeasured}}$) 計算するための指示と、式 $(K_{1 \text{ remeasured}} - K_{1 \text{ baseline}}) / K_{1 \text{ baseline}} \times 100$ を用いて精度変化のパーセンテージを計算するための指示とを含む。

【0008】

上記に説明した質量流量制御器の実施形態のそれぞれは、質量流量計（すなわち、質量流量を測定するが、流量を制御するコントローラーを備えていないデバイス）においても同様に構成することができる。追加の実施形態、利点、および新規な特徴は、詳細な説明に述べられている。

【0009】

本発明の例示の実施形態は、添付図面の図を参照して以下で詳細に説明される。これらの図は、引用することによって本明細書の一部をなす。

10

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】開示される実施形態による質量流量制御器の構成要素を示す図である。

【図2】1slpmN2ユニットの流量に対する K_1 のプロットである。

【図3】1slpmN2ユニットの流量に対する τ のプロットである。

【図4】1slpmN2ユニットの流量に対する K_2 のプロットである。

【図5】流量の関数としての気体温度降下のプロットである。

【図6】1slpmN2MFCの0.3秒間の圧力減衰のプロットである。

【図7】92sccmN2ユニットのRODの精度とDryCalの精度の経時変化を同時に示すプロットである。

20

【図8】10sccmN2ユニットのRODおよびDryCal精度の経時的なプロットである。

【図9】基本減衰モデル（すなわち、理想的な場合）を示す流れ図である。

【図10】開示される実施形態による圧力減衰中の温度変化を考慮した熱減衰モデルの一例を示す流れ図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

開示される実施形態は、熱モデルを用いて減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって質量流量制御器または質量流量計における実時間補正のための減衰速度測定の精度を改善するためのシステムおよび方法を含む。

30

【0012】

開示される実施形態およびそれらの利点は、図面の図1～図10を参照することによって最もよく理解される。同様の参照符号は、様々な図面の同様の対応する部分に用いられている。開示される実施形態の他の特徴および利点は、以下の図および詳細な説明を検討すると、当業者には明らかであろう。全てのそのような追加の特徴および利点は、開示される実施形態の範囲内に含まれることが意図されている。さらに、示した図は、例示にすぎず、種々の実施形態を実施することができる環境、アーキテクチャ、設計、またはプロセスに関するいかなる限定を主張することも意味することも何ら意図していない。

【0013】

図1は、質量流量制御器の構成要素が取り付けられたプラットフォームであるステップ110を備える一般的な質量流量制御器100を概略的に示している。熱式質量流量計140と、バルブ170を収容したバルブ組立体150とが、流体流入口120と流体流出口130との間においてステップ110上に取り付けられている。熱式質量流量計140は、通常は流体の大部分が通流するバイパス142と、流体のそれよりも少ない一部分が通流する熱式流量センサー146とを備える。

40

【0014】

熱式流量センサー146は、取り付け板、すなわち基部108上に取り付けられたセンサーハウジング102（センサー146を示すために取り外されて示された部分）内に收容されている。センサー146は、通常は毛細管と呼ばれる小径の管であり、センサー流入口部分146Aと、センサー流出口部分146Bと、2つの抵抗コイル、すなわち抵抗

50

巻き線 147、148 が周囲に配置されているセンサー測定部分 146C とを有する。動作中、電流が 2 つの抵抗巻き線 147、148 に提供され、これらの巻き線は、センサー測定部分 146C と熱接触している。これらの抵抗巻き線 147、148 内の電流は、測定部分 146 内を流れる流体を、バイパス 142 を通流する流体の温度よりも高い温度に加熱する。巻き線 147、148 の抵抗は、温度とともに変化する。流体がセンサー導管を通流する際、熱が、上流の抵抗器 147 から下流の抵抗器 148 に向けて運ばれ、この温度差は、センサーを通る質量流量に比例する。

【0015】

センサーを通る流体流量に関係した電気信号は、2 つの抵抗巻き線 147、148 から導出される。この電気信号は、抵抗巻き線の抵抗の差からまたは各巻き線を特定の温度に維持するために各抵抗巻き線に提供されるエネルギーの量の差から等の複数の異なる方法で導出することができる。熱式質量流量計内の流体の流量と相関する電気信号を求めることができる様々な方法の例は、例えば、同一出願人の米国特許第 6,845,659 号に記載されている。この米国特許は、引用することによって本明細書の一部をなす。信号処理後における抵抗巻き線 147、148 から導出された電気信号は、センサー出力信号を含む。

10

【0016】

このセンサー出力信号は、電気信号が測定されたときに流体流量を求めることができるように質量流量計内の質量流量と相関している。センサー出力信号は、通常は、第 1 にセンサー 146 内の流量と相関し、次いで、この流量は、バイパス 142 内の質量流量と相関し、そのため、流量計を通る総流量を求めることができ、制御バルブ 170 をそれに依りて制御することができる。センサー出力信号と流体流量との間の相関は、複雑であり、流体種、流量、流入口圧力および/または流出口圧力、温度等を含む複数の動作条件に依存する。

20

【0017】

未処理のセンサー出力を流体流量と相関させるプロセスは、質量流量制御器のチューニングおよび/または較正を伴い、多くの場合に 1 人または複数人の熟練オペレーターおよび特殊機器を必要とする、費用を要する労働集約的な手順である。例えば、質量流量センサーは、既知の流体の既知の量をセンサー部分に通し、或る特定の信号処理パラメーターを調整することによって、流体流量を正確に表す応答を提供するようにチューニングすることができる。例えば、この出力は、センサー出力の 0V ~ 5V 等の指定電圧範囲が、ゼロからセンサーの範囲の最高値までの流量範囲に対応するように正規化することができる。この出力は、センサー出力の変化が流量の変化に線形に対応するように線形化することもできる。出力が線形化された場合、例えば、流体出力を 2 倍にすると、電気出力が 2 倍になる。センサーの動的な応答、すなわち、流量または圧力の変化が求められるときに生じる圧力または流量の変化の不正確な影響が求められ、そのような影響を補償することができるようにされる。

30

【0018】

バイパスをセンサーに更に取り付けることができ、このバイパスは、流量計を通る総流量をセンサー出力信号から求めることができるように、質量流量センサー内を流れる流体と当該バイパス内を様々な既知の流量で流れる流体との間の適切な関係を定める既知の流体を用いてチューニングされる。幾つかの質量流量制御器では、バイパスは用いられず、全流量がセンサーを通過する。質量流量センサー部分およびバイパスは、制御バルブおよび制御電子機器部分に更に結合することができ、更に既知の条件下で再度チューニングすることができる。制御電子機器および制御バルブの応答は、この場合、設定点または入力圧力の変化に対するシステムの全体応答が既知であるように特徴付けられ、この応答は、所望の応答を提供するようにシステムを制御するのに用いることができる。

40

【0019】

エンドユーザーによって用いられる流体のタイプが、チューニングおよび/または較正において用いられるものと異なるとき、またはエンドユーザーによって用いられる流入口

50

圧力および流出口圧力、温度、流量の範囲等の動作条件が、チューニングおよび/または較正において用いられるものと異なるとき、質量流量制御器の動作は一般に劣化する。この理由によって、流量計は、追加の流体（「代用流体」と呼ばれる）および/または満足な応答を提供するのに必要なあらゆる変化がルックアップテーブルに記憶されている動作条件を用いてチューニングまたは較正することができる。「Flow Sensor Signal Conversion」についてのWang他に対する米国特許第7,272,512号は、用いられる異なるプロセス流体ごとにデバイスを較正するのに代用流体を必要とするのではなく、異なる気体の特性が応答を調整するのに用いられるシステムを記載している。この米国特許は、本発明の譲受人によって所有され、引用することによって本明細書の一部をなす。

【0020】

加えて、質量流量制御器100は、流路内の圧力を測定するために、これに限定されるものではないが通常はバイパス142の上流の或る箇所で流路に結合された圧力トランスデューサー112を備えることができる。圧力トランスデューサー112は、圧力を示す圧力信号を提供する。開示される実施形態によれば、圧力トランスデューサー112は、減衰速度測定中に圧力を測定するのに用いられる。

【0021】

制御電子機器160は、所望の質量流量を示す設定点と、センサー導管内を流れる流体の実際の質量流量を示す質量流量センサーからの電気流量信号とに従って制御バルブ170の位置を制御する。比例制御、積分制御、比例積分（PI）制御、微分制御、比例微分（PD）制御、積分微分（ID）制御、および比例積分微分（PID）制御等の従来のフィードバック制御方法が、この場合、質量流量制御器において流体の流量を制御するのに用いられる。制御信号（例えば、制御バルブ駆動信号）は、流体の所望の質量流量を示す設定点信号と、質量流量センサーによって感知された実際の質量流量に関係したフィードバック信号との間の差である誤差信号に基づいて生成される。制御バルブは、主要流体流路（通常、バイパスおよび質量流量センサーの下流）に位置決めされ、主要流体流路を通流する流体の質量流量を変化させるように制御（例えば、開放または閉鎖）を受けることができ、この制御は、質量流量制御器によって提供される。

【0022】

図示した例では、流量は、電気導体158によって閉ループシステムコントローラー160に電圧信号として供給される。この信号は、電気導体159によって、増幅され、処理され、制御バルブ組立体150に供給されて、流量が変更される。この目的のために、コントローラー160は、質量流量センサー140からの信号を所定の値と比較し、それに応じて比例バルブ170を調整して所望の流量を達成する。

【0023】

図1は、質量流量制御器100が熱式質量流量センサーを備えることを示しているが、質量流量制御器100は、開示される実施形態によれば、コリオリ型センサーを含む他のタイプの質量流量センサーを利用することができる。コリオリベースのセンサーを用いることの利点は、このセンサーが、温度、流量プロファイル、密度、粘性、および同質性から独立して質量流量を求めることが可能であるということである。

【0024】

前述したように、減衰速度測定は、図1に示す質量流量制御器100を含む様々な流量測定装置を較正するのに用いることができる。開示される実施形態は、現在の減衰速度測定が熱に起因する誤差を含むおそれがあることを認識している。この文書のセクションII～IVは、減衰速度測定における熱に起因する誤差を除去または最小にするように開発された方法の基本原則を説明している。

【0025】

セクションIIは、瞬時タンク放出量が圧力減衰速度および瞬時温度変化率の双方に依存することを示す。セクションIIIは、内部タンク温度が時間とともに指数関数的に減衰すること、および定流体物性気体の最終の定常状態温度が主としてタンク放出流量に依存することを示す。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 6 】

セクション I V では、タンク気体温度解が、理想気体の法則（圧縮率が追加されている）に代入されて、記録された圧力減衰トレースにフィットさせることができる4つの項の経験的モデルが得られる。この経験的モデルにおける第2のフィット項（fitted term）は、圧力減衰中の平均タンク放出量を示す。同じデバイス設定点でのその後の圧力減衰トレースにおけるこの第2項のいずれの変化も、タンク放出流量の変化を示す。

【 0 0 2 7 】

II . 温度および圧力を用いたタンク放出質量流量の計算

理想気体の法則は、以下に示すように、両辺の時間微分を取ることによって圧力チャンバーを出て行く質量流量を計算するのに用いることができる。

$$P V = M R T_{\text{tank}} \quad (\text{式 1})$$

$$d(P V) / d t = d(M R T_{\text{tank}}) / d t \quad (\text{式 2})$$

$$V d P / d t = R T_{\text{tank}} (d M / d t) + M R (d T_{\text{tank}} / d t) \quad (\text{式 3})$$

$$d M / d t = [V / R T_{\text{tank}}] (d P / d t) - [M / T_{\text{tank}}] (d T_{\text{tank}} / d t) \quad (\text{式 4})$$

【 0 0 2 8 】

式中、

$M = M F C$ の内部放出体積に含まれる気体の質量であり、

T_{tank} = 絶対温度単位による、 $M F C$ （またはタンク）内に含まれる気体の平均気体温度であり、

$d M / d t$ = 質量流量であり、

V = 内部流量であり、

P = 瞬時圧力であり、

$d P / d t$ = 時間に関する圧力の導関数であり、

$d T_{\text{tank}} / d t$ = 時間に関するタンク平均化気体温度の導関数であり、

R = 理想気体定数である。

【 0 0 2 9 】

上記の式 4 に示すように、温度時間導関数が存在することによって、質量流量と減衰する圧力との間の単純な直接的関係が妨げられる。

【 0 0 3 0 】

III . 定質量流量におけるタンク放出の解析的熱モデル

放出タンクの熱力学によって、タンク内の気体の温度は、その気体がタンクを去るにつれて減少する。この温度減少は、単純なエネルギー収支から生じる。エネルギーは、気体をタンク外に押し出すのに必要とされ、このエネルギーは、気体自体の内部エネルギーから得なければならない。気体の内部エネルギーは、定積比熱を介してその温度に直接関係しているので（ $U = T \times C v$ ）、内部エネルギーの減少は、気体温度の減少と一致する。

【 0 0 3 1 】

気体温度の減少は、或る時点で、周囲の環境（通例、より高い周囲温度にある）から気体内への熱流量が、気体を環境に放出するのに必要なエネルギーと等しくなるまで継続する。

【 0 0 3 2 】

入ってくる質量流量ストリームおよび出て行く質量流量ストリームを有する制御体積の内部エネルギーを統制する微分方程式は、以下のとおりである。

【 数 1 】

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} + \dot{W}_{cv} + \left(u + \frac{V^2}{2} + gz + Pv \right)_{in} \dot{M}_m - \left(u + \frac{V^2}{2} + gz + Pv \right)_{out} \dot{M}_m \quad (\text{式 5})$$

10

20

30

40

50

【 0 0 3 3 】

ここで

【 数 2 】

$\frac{dE_{cv}}{dt}$ = タンク内の内部エネルギーの変化率であり、

【 数 3 】

10

\dot{Q} = 環境からタンク内への熱伝達であり、

【 数 4 】

\dot{W}_{net} = タンク内への正味の仕事量 (net work) であり、

20

u = タンクに入ってくる / タンクを出て行くストリームの内部エネルギーであり、
 gz = タンクに入ってくる / タンクを出て行くストリームの重力エネルギーであり、
 P = タンクに入ってくる / タンクを出て行くストリーム内の流体の圧力であり、
 v = タンクに入ってくる / タンクを出て行くストリーム内の流体の比体積であり、
 M_{in} / M_{out} = タンクに入ってくる / タンクを去る質量流量である。

【 0 0 3 4 】

式 5 を放出タンクに適用するとき、幾つかの単純化を行うことができる。

- 1 . 流入量項は無視することができる。
- 2 . これは剛性タンクであるので、

【 数 5 】

30

\dot{W}_{net} 項は無視することができる。

【 0 0 3 5 】

3 . 流出口ストリームの速度が低い場合、およびタンクの中心線が出て行くストリームの中心線に接近している場合、出て行くストリームの速度項および重力項は無視することができる。

4 . 残りの内部エネルギー項 (u) および P 項は、エンタルピー項すなわち、 $h = u + P$ に組み合わせることができる。

40

【 0 0 3 6 】

上記単純化を適用した結果、以下の式となる。

【 数 6 】

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} + h_{out} M_{out} \quad (\text{式 6})$$

50

【 0 0 3 7 】

以下の追加の単純化が式 6 に適用される。

1 . 理想気体の法則を介して、

【 数 7 】

$\frac{dE_{cv}}{dt}$ 項は、 $T_{tank} C_v M(t)$ と置き換えることができる。ここで、 T_{tank} は、タンク（または MFC）内の瞬時平均気体温度であり、 C_v は、気体の定積比熱であり、 $M(t)$ は、タンク内の瞬時質量を指す。

10

【 0 0 3 8 】

2 . 理想気体の法則を介して、式 6 の R H S におけるエンタルピー項は、 $T_{tank} C_p$ と置き換えることができる。ここで、 C_p は、気体の定圧比熱である。

【 0 0 3 9 】

その結果、以下の微分方程式が得られる。

【 数 8 】

$$C_v T_{tank} \frac{dM}{dt} + C_v M \frac{dT_{tank}}{dt} = \dot{Q} + M_{out} C_p T_{tank} \quad (\text{式 7})$$

20

【 0 0 4 0 】

式 7 は、以下の追加の単純化を用いて更に縮小することができる。

1 .

【 数 9 】

$$\frac{dM}{dt} = -M_{out}$$

30

2 . $R = C_p - C_v$

3 . $M = M_i - t M_{out}$ 、式中、 M_i は、タンク内の初期質量であり、 t は、タンク放出の開始以後に満了した時間である。

4 .

【 数 1 0 】

$$\dot{Q} = h A_s (T_{env} - T_{tank}) = \frac{Nu k}{Dia} A_s (T_{env} - T_{tank})$$

40

式中、 A_s は、放出気体と接触している MFC の内部表面積であり、 h は、対流熱伝達係数であり、 Nu は、十分に発達したパイプ流量における定温熱伝達のヌッセルト数であり、 k は、気体熱伝導率であり、 Dia は、MFC の内部貯蔵体積のパイプ等価水力直径であり、 T_{env} は、気体を取り囲む環境の温度（金属温度）である。

【 0 0 4 1 】

その結果、以下の微分方程式が得られる。

【数 1 1】

$$\frac{dT_{\text{tank}}}{dt} = \left(\frac{1}{C_v(M_i - tM_{\text{out}})} \right) \left[\frac{Nu k}{Dia} A_s T_{\text{env}} - T_{\text{tank}} \left(\frac{NukA_s + RM_{\text{out}}}{Dia} \right) \right] \quad (\text{式 8})$$

【0042】

放出中にタンクを去る質量 (tM_{out}) が、放出の開始時に存在する質量 (M_i) に対して小さい場合、式 8 の R H S における第 1 項の分母内の放出項は無視することができる。この小さな放出近似の結果、式 8 の以下の解が得られる。

10

【数 1 2】

$$T_{\text{tank}} = \frac{\frac{NukA_s}{Dia} T_{\text{env}}}{\frac{NukA_s}{Dia} + RM_{\text{out}}} + \left[\frac{RM_{\text{out}}}{\left(\frac{NukA_s + RM_{\text{out}}}{Dia} \right)} \right] \exp \left[- \left(\frac{\frac{NukA_s + RM_{\text{out}}}{Dia}}{MiC_v} \right) t \right] \quad (\text{式 9})$$

20

【0043】

式 9 を検討することによって、定流体物性および固定された幾何学的形状の場合、最終の気体温度は、厳密に、質量が気体チャンバーを出て行く速度の関数であることが示される。

【0044】

減衰速度の適用において頻繁に行われる仮定は、減衰チャンバーの内部の温度が減衰中に一定であると仮定することである。これは、式 4 の第 2 項が無視されること、および圧力導関数に定数を単に乗算することによって、チャンバーを出て行く質量流量を計算することができることを意味する。

30

【0045】

式 4 を再整理すると、以下の式となる。

【数 1 3】

$$\frac{dP}{dt} = \frac{R}{V} \left(T_{\text{tank}} \frac{dM}{dt} + M \frac{dT_{\text{tank}}}{dt} \right) \quad (\text{式 4 a})$$

【0046】

式 4、式 4 a、および式 9 を検討することによって、以下のことが示される。

40

1. 所与の流量について、タンク気体温度は、最終の定常状態温度に達するまで、指数関数的温度減衰を受けることになる (式 9)。

【0047】

2. 測定された圧力減衰トレースは、質量放出および指数関数的温度減衰に起因する構成要素を含むことになる (式 4 a)。

【0048】

3. 式 4 a の双方の過渡項は同じ正負符号を有するので、測定された圧力減衰をタンク放出質量流量と直接同等にする (すなわち、式 4 の温度減衰項を無視する) と、その結果、タンク放出質量流量を過大評価することになる。

50

【 0 0 4 9 】

開示される実施形態は、瞬時バルク流体平均温度を正確に測定することができる場合、温度誘起誤差をゼロに低減することができることを認識している。然しながら、数多くの温度センサーなしでバルク流体平均温度を測定することは困難である。加えて、これらのセンサーは、対象となる時間遷移よりも2桁とまではいかないまでも少なくとも1桁高速でなければならず、また、熱慣性は非常に僅かなものでなければならない。ほぼ0.5秒の減衰時間定数が測定されると、これは、0.05秒未満の時間定数を有するセンサーを用いなければならないことを意味する。周囲の環境から気体内への熱流量がほぼ0.02ワット~2.0ワットであると推定されると、熱センサーは、非常に僅かな熱しか吸収してはならない。

10

【 0 0 5 0 】

IV. 経験的モデルを介した圧力減衰トレースからのタンク放出質量流量の抽出

上記問題を克服するために、開示される実施形態は、適切な経験的モデルに基づく代替の手法を提供する。

【 0 0 5 1 】

式9に示すように、低圧カストリームへの一定の流量放出を受けているタンクの温度解は、以下の形を有する。

$$T_{\text{tank}}(t) = T_f + A \times \exp(-t/\tau) \quad (\text{式10})$$

式中、

$T_{\text{tank}}(t)$ = 瞬時時間依存温度であり、

A = 温度の指数関数的減衰の振幅であり、

T_f = タンク内の気体の最終の定常状態温度であり、

τ = 気体依存熱時間定数である。

20

【 0 0 5 2 】

式10を式1に代入すると、以下の式が得られる。

【 数 1 4 】

$$P = \frac{RM(t)}{V} (Ae^{-t/\tau} + T_f) \quad (\text{式11})$$

30

式中、 $M(t)$ は、MFCの内部体積内に含まれる気体の、時間に関する質量である。

【 0 0 5 3 】

デバイス精度のオンライン実時間減衰速度検証を有するには、MFCは、減衰中に同じ流量を維持しなければならない。したがって、 $M(t)$ は、以下の式によって推定することができる。

【 数 1 5 】

$$M(t) = M_i - tQ_{\text{ref}}\rho_{\text{ref}} = M_i - \rho_{\text{ref}} \int_0^t Q_{\text{ref}} dt \quad (\text{式12})$$

40

ここで、

ρ_{ref} = SEMI仕様E12-96による気体標準密度（標準温度および標準圧力における等価な理想気体の密度）であり、

Q_{ref} = SEMI仕様E12-96による標準密度（標準温度および標準圧力における等価な理想気体の密度）における気体体積流量であり、他の全ての変数は前に定義されている。

50

【 0 0 5 4 】

理想的な状況では、MFCコントローラーは、減衰中に正確に同じ流量を維持する。然しながら、実際には、減衰中に幾つかの軽微な流量の乱れが存在する。したがって、式12の最も右側の式が好ましい。

【 0 0 5 5 】

式12からの最も右側の式を式11に挿入することによって、以下の式が得られる。

【 数 1 6 】

$$P(t) = \frac{RM_i T_f}{V} - \frac{RT_f}{V} \rho_{ref} \int_0^t Q_{ref} dt + \frac{RM_i}{V} A e^{-t/\tau} - \frac{RA}{V} \rho_{ref} \int_0^t e^{-t/\tau} Q_{ref} dt \quad (式13) \quad 10$$

【 0 0 5 6 】

式13の導出において用いられた理想気体の法則は、全てのMFC気体に適切であるとは限らないということはよく知られている。より適切な定式化は、圧縮係数が適用される非理想気体の法則、すなわち、以下の式を用いることである。

$$P V = Z M R T_{tank} \quad (式14)$$

ここで、

Z = 気体圧縮係数であり、他の全ての変数は前に定義されている。

20

【 0 0 5 7 】

式13を導出するのに用いられた(正: used)方法と同様の方法で、式10および式12を式14に代入して、以下の式を取得することができる。

【 数 1 7 】

$$P(t) = Z \frac{RM_i T_f}{V} - Z \frac{RT_f}{V} \rho_{ref} \int_0^t Q_{ref} dt + Z \frac{RM_i}{V} A e^{-t/\tau} - Z \frac{RA}{V} \rho_{ref} \int_0^t e^{-t/\tau} Q_{ref} dt \quad (式15)$$

【 0 0 5 8 】

30

式15の両辺が、圧縮係数および温度によって除算される場合、新たな変数(Mg = P / [Z T] = 「Mass Flow Controller With Improved Dynamic」という発明の名称の同一出願人による米国特許第7,905,139号に教示されているような温度および圧縮率に関する正規化圧力である。この米国特許は、引用することによって本明細書の一部をなす)が導入される。その結果の式は、以下となる。

【 数 1 8 】

$$Mg(t) = \frac{RM_i T_f}{V T_{tank}} - \frac{RT_f}{V T_{tank}} \rho_{ref} \int_0^t Q_{ref} dt + \frac{RM_i}{V T_{tank}} A e^{-t/\tau} - \frac{RA}{V T_{tank}} \rho_{ref} \int_0^t e^{-t/\tau} Q_{ref} dt \quad (式16) \quad 40$$

式16によって定義される変数Mgは、タンクの気体温度およびタンクを去っている質量流量の双方による影響を受けることに留意すべきである。

【 0 0 5 9 】

気体圧縮率を含めた場合であっても、式16は、依然として、問題の真の物理的現象に対して幾つかの大幅な近似を含んでいる。最も顕著な近似は次のものである。

【 0 0 6 0 】

1. 式16のRHSの分母内のT_{tank}項は、バルク平均気体温度を指す。然しながら、ほとんどのMFC温度センサーは、流れ場の外部の地点(複数の場合もある)において温度を測定する。温度センサーは比較的低速であるので、測定または感知された温度(T_{tank}

50

) は、減衰中、基本的には一定のままである。したがって、式 16 によって記述される定式化は、指数項を通じた直接的な温度影響しか考慮していない。

【 0 0 6 1 】

2 . 上述したように、式 16 は、バルク平均温度を用いる。すなわち、解析は、気体が 1 つの連続した体積内に含まれ、この単一の体積内の温度変動が最小であると仮定する。実際には、ほとんどの M F C の内部放出体積は連続しておらず、おそらく、複数の内部体積内には、或る程度の温度変動がある。

【 0 0 6 2 】

3 . 式 16 において、温度および圧力の双方の関数である圧縮係数は、減衰中に圧力 (M g 項) に関して連続的に更新されることに留意すべきである。然しながら、上述した比較的 10 低速の温度感知のために、圧縮係数は、温度に関して更新されない。

【 0 0 6 3 】

式 16 は、大幅な近似を含むが、減衰速度測定中に M F C 流量を抽出するのに用いることができる関数曲線フィット (functional curve fit : 関数曲線当てはめ) を提案している。

【 数 1 9 】

$$Mg(t) = K0 - K1 \int_0^t Q_{ref} dt + K2 e^{-t/\tau} + K3 \int_0^t e^{-t/\tau} Q_{ref} dt \quad (\text{式 1 7})$$

20

式中、

K 0 = 減衰の開始時の正規化圧力から指数関数的正規化圧力減衰項を減算したもの、すなわち、 $K 0 = M g (0) - K 2$ に等しいフィット項であり、

K 1 = 圧力減衰中に M F C を去る質量流量に比例するフィット項であり、

K 2 = 正規化圧力減衰 (指数関数的温度減衰によって引き起こされる) の振幅に等しいフィット項であり、

K 3 = 指数関数的圧力減衰中に M F C を去る質量に起因するフィット項であり、

= システム気体熱時間定数である。これは、気体固有値であり、特定の M F C 気体の計算を通じて測定または取得することができる。 30

【 0 0 6 4 】

式 17 における 2 つの重要な項は、K 1 項および K 2 項である。K 1 項は、最終の定常状態温度に依存する単位変換項である。減衰体積が適切に設計されている場合 (例えば、大きな表面積対体積比を有する小径の体積)、K 1 は、全ての流量においてほぼ一定であるはずである。そのような状況では、K 1 は、基本的に定数 (または校正係数) であり、元の測定値からのいずれのずれも、測定された流量の変化 (または偏差シフト) を示す。K 1 が定数でない場合であっても、K 1 は、所与の気体について流量の関数として測定することができる。流量の関数としての K 1 のその後の測定におけるいずれの大きなずれも、流量の大きな変化を示す。 40

【 0 0 6 5 】

K 2 項は、温度に関係しており、以下の式から温度降下を推定するのに用いることができる。

【 数 2 0 】

$$A = \frac{K2 T_{\text{tank, initial}}^2}{P_{\text{start}}} * C \quad (\text{式 1 8})$$

50

式中、

A = 放出気体と環境との間の、ケルビン (°K) による定常状態温度差 (または指数関数的減衰の振幅) であり、

$T_{\text{tank, initial}}$ = ケルビンによる減衰の開始時の気体温度であり、

$P_{\text{start}} = p_{\text{sia}}$ による減衰の開始時の流入口圧力であり、

K_2 = 各流量および各流入口圧力における測定された曲線フィット係数であり、

C = 適切な単位変換定数である。

【0066】

実際の実用では、 K_3 項を含めることによって、特に K_1 項に関して、結果の曲線フィットは大幅に改善されないことが分かっている。したがって、この項は、めったに用いられない。

10

【0067】

式 17 によって定義される関数フィットは、基本的には「タウモデル」である。すなわち、タウが所与の気体および一組の動作条件について判明すると (タウは実験または簡単な計算を通じて取得される)、測定された正規化圧力減衰トレースに対するフィッティング式 17 の問題は、質量流量制御器のファームウェアが非常に容易に取り扱うことができる線形最小二乗問題になる。

【0068】

タウモデルを利用してデバイスの性能の経時的な変化を求める幾つかの方法がある。最も直接的な方法は、デバイスが顧客サイトに最初に設置されたとき、様々な設定点にベースライン K_1 を設定することである。これらの初期 K_1 値を取得するプロセスは、コミッショニング (commissioning) と呼ばれる。これらのベースライン K_1 値は、その後、デバイスに記憶され、後の様々な時点において、式 17 の「タウモデル」はより新しい減衰データに再フィット (refit) され、現在の K_1 値が取得される。

20

【0069】

これらの後の K 値のいずれの変化も、「ベースライン」値と比較すると、デバイス精度の変化と直接相関している。すなわち、 K_1 の 1% の増加は、流量の 1% の増加に対応する。

【0070】

V. 結果

30

図 2 ~ 図 5 は、1 slpmN2 質量流量制御器からの圧力減衰データにタウモデルを適用した結果を示している。図 2、図 3、および図 4 は、対応する K_1 値、タウ値、および K_2 値をそれぞれ示している。図 5 は、式 18 を介して K_2 データから取得された推定温度降下を示している。

【0071】

図 2 に示すように、 K_1 と圧力との小さな依存関係が存在する。この圧力依存関係は、非常に低い流量において 30 psia を超える流入口圧力の変化では約 0.25% である (K_1 は 6.305 から 6.326 まで変動する)。1 slpm において、 K_1 は、30 psia を超える流入口圧力の変化では約 1% 変動する (K_1 は 6.18 から 6.25 に向かう)。この圧力依存関係は、十分に発達した層流の仮定が式 8 の導出において熱伝達係数に用いられたことと、小さな質量放出近似が式 9 を導出するのに用いられたこととの結果である。

40

【0072】

K_1 および最終の気体温度の双方は、流量の増加とともに減少する (流量とともに Δt が増加すること (図 5) は、気体温度が低下したことを意味する)。式 16 を検討すると、 T_f / T_{tank} 係数が第 2 項 (K_1 である) に存在することが示される。前述したように、MFC 温度センサーは、通常、非常に低速であり、圧力減衰中の気体温度の減少を測定する可能性は非常に小さい。このように、 T_f が質量流量の増加とともに減少し続け (式 9)、測定された気体温度 T_{tank} が基本的に一定のままであるので、 K_1 項は、流量の増加とともに減少する。

50

【 0 0 7 3 】

図 6 は、1 slpmN 2 デバイスの 1 0 0 % の S P の場合の実際の圧力減衰トレースおよび減衰の定常状態部分への線形フィットを示している。圧力減衰の早期の（指数関数的な）部分（ $t < 1 0 0$ ミリ秒）から圧力減衰の定常状態部分（ $t > 3 0 0$ ミリ秒）へと約 1 5 % の圧力の勾配の変化が存在する。したがって、減衰速度測定において圧力減衰の指数関数的な部分を考慮しないことは、かなりの量の測定誤差を誘起する可能性がある。

【 0 0 7 4 】

図 7 は、この文書で説明した R O D 方法論を用いて 1 % の S P において動作する 9 2 sc cmN 2 M F C のデバイス精度を示している。また、図 7 には、R O D 精度測定値が取得されていた間、同時に記録されていた DryCal 精度測定値も示されている。この同時測定は、M F C の気体出力を DryCal に送り、M F C に 1 % の S P を与え、次いで、R O D 測定プロセスをオンにすることによって行われる。

10

【 0 0 7 5 】

上記で言及したように、DryCal は、流れが気体シリンダーの底部に入力されたとき、ガラスシリンダーの内部のピストンがどの程度の速さで上昇するのかを求めることによって流量を測定する方法である。流れがシリンダーに入ると、ピストンは、その基部から離昇し始める。ピストンは、上昇すると光スイッチを通過し、タイマーを始動する。ピストンが、ガラスシリンダーのより上部にある第 2 の光スイッチを通過したとき、タイマーは停止される。これらの 2 つの光スイッチ間の体積が判明する（DryCal 製造者によって求められる）と、流量は、その体積をタイマーから取得された時間によって除算することによって計算される。したがって、ピストンが $1 0 \text{ cm}^3$ の体積を横切るのに 1 分を要する場合、実際の流量は $1 0 \text{ cm}^3 / \text{分}$ となる。

20

【 0 0 7 6 】

示した例では、図 7 のデータを生成するのに用いられたデバイスは、経時的にドリフトしていた不良センサーを有することが分かっている。図 7 のデータを検討することによって、減衰速度測定値が、同時の DryCal 測定値と非常に良く一致していることが示される。この一致は、通常、1 2 時間を超える時間期間にわたる読み取りの 1 % の数十分の 1 以内であった。

【 0 0 7 7 】

図 8 は、1 % の S P において動作する 10 sc cmN 2 M F C の減衰速度測定値および DryCal 精度測定値を示している。図 7 において用いられたデバイスと同様に、このデバイスは、経時的にドリフトしていた不良センサーを有することが分かっている。図 7 に示す結果と同様に、図 8 における減衰速度測定値および DryCal 測定値は、1 2 時間を超える時間期間にわたり 1 % の数十分の 1 以内で互いに一致している。

30

【 0 0 7 8 】

図 9 および図 1 0 は、基本減衰モデル（すなわち、理想的な場合）（プロセス 9 0 0 ）と、開示される実施形態による圧力減衰中の温度変化を考慮する熱減衰モデル（プロセス 1 0 0 0 ）との相違を示している。

【 0 0 7 9 】

図 9 に示すように、プロセス 9 0 0 は、理想気体の法則による基本減衰速度測定を示し、圧力減衰中の温度変化を考慮していない。例えば、減衰速度測定を開始するために、プロセスは、ステップ 9 0 2 において、隔離バルブを遮断して、質量流量制御器への気体の流れを停止する。ステップ 9 0 4 において、プロセスは、圧力測定および流量測定を実行する。プロセスは、減衰速度測定に続いて、ステップ 9 0 5 において、隔離バルブを再び開放する。プロセスは、ステップ 9 0 6 において、圧力減衰の直線勾配に基づいて流量を計算し、ステップ 9 0 8 において、計算された流量と測定された流量との間の誤差を求める。プロセスは、ステップ 9 1 0 において、データをログ記録し、ステップ 9 1 2 において、必要に応じてアラームを生成する。プロセス 9 0 0 は、その後、終了する。

40

【 0 0 8 0 】

プロセス 9 0 0 とは異なり、開示される実施形態によるプロセス 1 0 0 0 は、圧力減衰

50

中の温度変化を考慮した減衰速度測定を実行する。したがって、プロセス1000は、減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって減衰速度測定の精度を改善する。プロセス1000は、ステップ1002において、隔離バルブを閉鎖して減衰速度測定を開始することによって開始する。ステップ1004において、プロセスは、圧力測定、流量測定、および温度測定を実行する。プロセスは、減衰速度測定に続いて、ステップ1006において、隔離バルブを再び開放する。ステップ1008において、プロセスは、関数曲線フィット（例えば、式17）を用いて、圧力減衰中にMFCを去る質量流量に比例するフィット項（ K_1 ）の値を求める。プロセスは、 K_1 の値をベースライン値として記憶する。オペレーターによって決定された様々な後の時点（ステップ1010）において、プロセスは、減衰速度測定プロセス（ステップ1012～1016）を繰り返す。関数曲線近似式から新たな K_1 値を計算する。幾つかの実施形態では、プロセスは、流量および気体のタイプに応じて、測定間の最小待ち時間を必要とする場合がある。例えば、1つの実施形態では、一般的な最小待ち時間は約15秒である。したがって、 K_1 のベースライン値が測定されると、プロセスは、オペレーターによって決定された15秒ごとの頻度で K_1 を再測定することができる。ステップ1020において、プロセスは、 $(K_{1_{\text{remeasured}}} - K_{1_{\text{baseline}}}) / K_{1_{\text{baseline}}} \times 100$ に等しい精度変化のパーセンテージを計算する。プロセスは、ステップ1022において、データをログ記録し、傾向解析を実行する。プロセスは、精度が所定の閾値を超えて変化したことを傾向情報が示していると判断した場合、アラーム信号を生成する。例えば、所与の設定点における精度が2週間の期間にわたって2%よりも多く変化した場合、アラームを生成することができる。プロセスは、ステップ1010に戻り、様々な後の時点において、減衰速度測定サイクルを繰り返す。

10

20

【0081】

さらに、或る特定の実施形態では、質量流量制御器は、上記で説明した減衰速度測定の結果に基づいてその較正およびオフセットを自己補正するように構成することができる。

【0082】

したがって、上記に説明したように、開示される実施形態の利点には、熱モデルを用いて減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって質量流量制御器における実時間補正のための減衰速度測定の精度を改善するためのシステムおよび方法を提供することが含まれるが、これに限定されるものではない。

30

【0083】

上記で説明した図は、質量流量制御器の様々な実施形態を開示しているが、当業者であれば、熱モデルを用いて減衰速度測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって質量流量計における実時間補正のための減衰速度測定の精度を改善するための質量流量計に対して、上記で開示される変更を同様に行うことができることを認識するであろう。開示される質量流量制御器と質量流量計との間の主な相違は、質量流量計が、質量流量制御器であれば備えているような、バルブを調整して所望の流量を達成するように動作するコントローラーを備えていないということである。添付の特許請求の範囲の範囲は、質量流量制御器だけでなく質量流量計および他の任意の同様の流量測定/制御デバイスも包含するように意図されている。

40

【0084】

上記実施形態についての具体的な詳細を説明してきたが、上記ハードウェアおよびソフトウェアの説明は、単なる例示の実施形態として意図されているにすぎず、開示される実施形態の構造も実施態様も限定するように意図されていない。

【0085】

加えて、開示される実施形態の或る特定の態様は、上記で概説したように、1つまたは複数の処理ユニット/構成要素を用いて実行されるソフトウェアに具現化することができる。この技術のプログラムの態様は、通常は或るタイプの機械可読媒体上に担持されるかまたはその機械可読媒体に具現化される実行可能コードおよび/または関連データの形態の「製品」または「製造物品」と考えることができる。有形の非一時的な「記憶装置」型

50

媒体には、ソフトウェアプログラミング用にいつでも記憶装置を提供することができる、様々な半導体メモリ、テープドライブ、ディスクドライブ、光ディスクまたは磁気ディスク等の、コンピューター、プロセッサ等、またはそれらの関連モジュールのためのメモリまたは他の記憶装置のうちの任意のものまたはそれらの全てが含まれる。

【 0 0 8 6 】

当業者であれば、本教示が、様々な変更形態および/または強化形態に適用可能であることを認識するであろう。上記内容は最良の形態とみなされるものおよび/または他の例を説明しているが、様々な変更をそれらに行うことができること、本明細書に開示される主題は様々な形態および例で実施することができること、並びにそれらの教示は多数の用途において適用することができ、それらの用途の一部しか本明細書に説明されていないことが理解される。そのような変更は、本教示の真の範囲内に包含されるように意図されている。

10

【 0 0 8 7 】

加えて、図におけるフローチャート、シーケンス図およびブロック図は、本発明の様々な実施形態によるシステム、方法、およびコンピュータープログラム製品の可能な実施態様のアーキテクチャ、機能、および動作を示している。幾つかの代替の実施態様では、ブロックに示された機能は、図に示された順序以外で行うことができることに留意すべきである。例えば、連続して示された2つのブロックは、含まれる機能に応じて、実際には、実質的に同時に実行される場合もあるし、それらのブロックは、時に、逆の順序で実行される場合もある。ブロック図および/またはフローチャート説明図の各ブロック、並びにブロック図および/またはフローチャート説明図におけるブロックの組み合わせは、指定された機能若しくは動作を実行する専用ハードウェアベースのシステム、または専用ハードウェアおよびコンピューター命令の組み合わせによって実施することができることに留意されるであろう。

20

【 0 0 8 8 】

本明細書に用いられる術語は、特定の実施形態を説明するためだけのものであり、本発明の限定であるように意図されていない。数量が特定されていないもの (the singular forms "a", "an" and "the") は、本明細書において用いられるとき、文脈が複数形を含まないことを明確に示していない限り、複数形も同様に含むように意図されている。「備える」 ("comprise" and/or "comprising") という用語は、この明細書および/または特許請求の範囲において用いられるとき、明記した特徴、完全体、ステップ、動作、要素、および/または構成要素が存在することを明示しているが、1つまたは複数の他の特徴、完全体、ステップ、動作、要素、構成要素、および/またはそれらの群が存在することまたは追加されることを排除していないことが更に理解されるであろう。添付の特許請求の範囲における全ての手段またはステップに機能を加えた要素の対応する構造、材料、動作、および均等物は、その機能を、具体的に請求項に記載されている他の請求項に記載の要素と組み合わせるための任意の構造、材料、または動作を含むように意図されている。本発明の説明は、例示および説明の目的で提示されており、網羅的であることも、開示される形態の発明に限定されることも意図するものではない。本発明の範囲および趣旨から逸脱することなく、多くの変更形態および変形形態が当業者に明らかであろう。実施形態は、本発明の原理および実用的な用途を説明するとともに、他の当業者が、考慮されている特定の使用に適するように様々な変更を有する様々な実施形態について本発明を理解することを可能にするために選ばれて記載されている。請求項の範囲は、開示される実施形態および任意のそのような変更を広く包含するように意図されている。

30

40

【 符号の説明 】

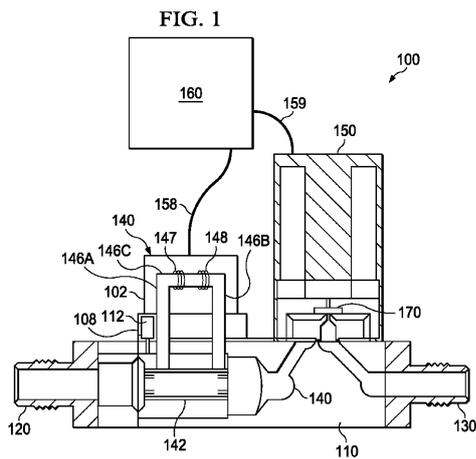
【 0 0 8 9 】

- 1 0 0 質量流量制御器
- 1 0 2 センサーハウジング
- 1 0 8 基部
- 1 1 0 ステップ

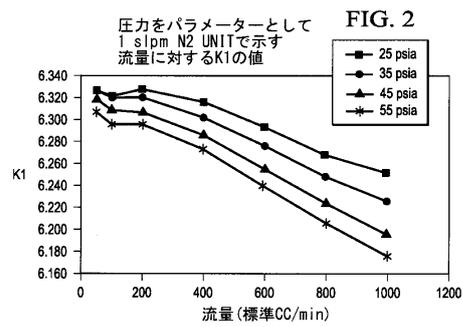
50

- 1 1 2 圧カトランスデューサー
- 1 2 0 流体流入口
- 1 3 0 流体流出口
- 1 4 0 熱式質量流量計
- 1 4 2 バイパス
- 1 4 6 熱式流量センサー
- 1 4 6 A センサー流入口部分
- 1 4 6 B センサー流出口部分
- 1 4 6 C センサー測定部分
- 1 4 7 抵抗器
- 1 4 8 抵抗器
- 1 5 0 制御バルブ組立体
- 1 5 8 電気導体
- 1 5 9 電気導体
- 1 6 0 制御電子機器
- 1 7 0 制御バルブ

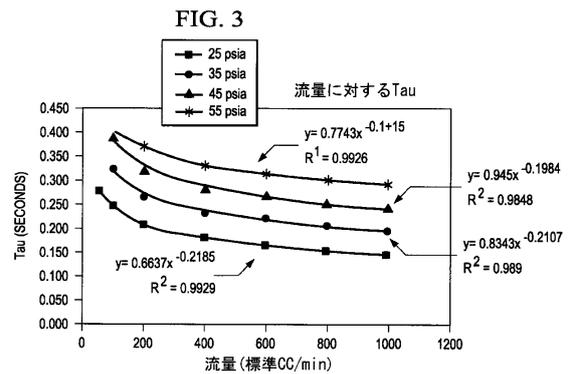
【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 3 】



【 図 4 】

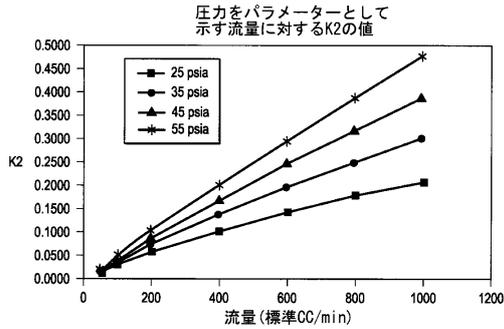


FIG. 4

【 図 6 】

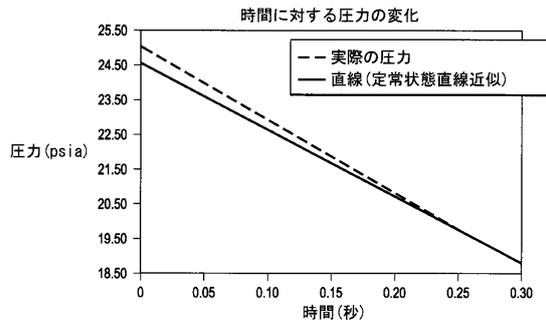


FIG. 6

【 図 5 】

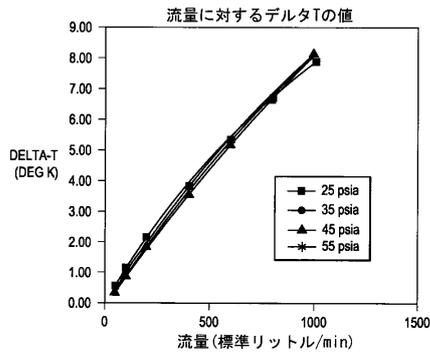


FIG. 5

【 図 7 】

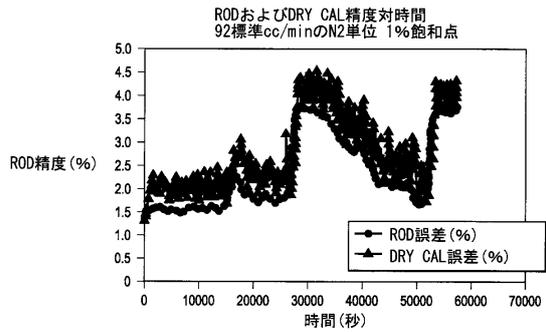


FIG. 7

【 図 8 】

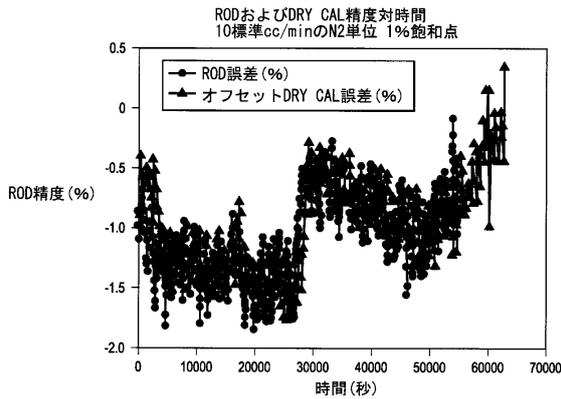


FIG. 8

【 図 9 】

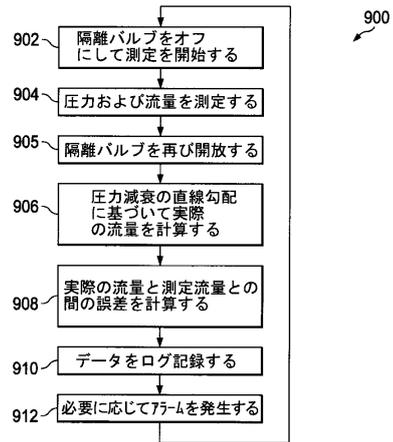


FIG. 9

【図10】

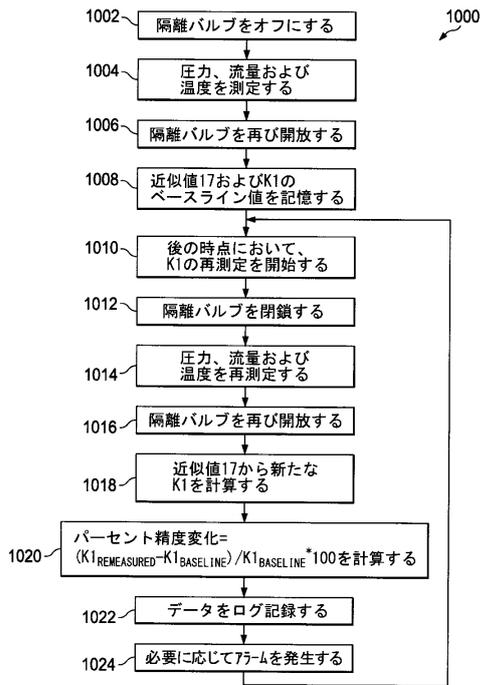


FIG. 10

フロントページの続き

- (74)代理人 100130133
弁理士 曾根 太樹
- (74)代理人 100171251
弁理士 篠田 拓也
- (72)発明者 アンソニー ケホー
アメリカ合衆国, イリノイ 60026, グレンビュー, ウエスト レイク アベニュー 3600
, シーノオー イリノイ トゥール ワークス インコーポレイティド
- (72)発明者 バーウィン バナレス
アメリカ合衆国, イリノイ 60026, グレンビュー, ウエスト レイク アベニュー 3600
, シーノオー イリノイ トゥール ワークス インコーポレイティド
- (72)発明者 クリス エレック
アメリカ合衆国, イリノイ 60026, グレンビュー, ウエスト レイク アベニュー 3600
, シーノオー イリノイ トゥール ワークス インコーポレイティド
- (72)発明者 ジョン ルル
アメリカ合衆国, イリノイ 60026, グレンビュー, ウエスト レイク アベニュー 3600
, シーノオー イリノイ トゥール ワークス インコーポレイティド
- (72)発明者 ウィリアム バレンタイン
アメリカ合衆国, イリノイ 60026, グレンビュー, ウエスト レイク アベニュー 3600
, シーノオー イリノイ トゥール ワークス インコーポレイティド

審査官 影山 直洋

- (56)参考文献 特表2009-524821(JP, A)
特開2008-170410(JP, A)
特表2013-500468(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G05D 7/00 - 7/06

- (54)【発明の名称】熱モデルを用いてROD測定における熱に起因する誤差を最小にすることによって質量流量制御器または質量流量計における実時間補正のための減衰速度測定の精度を改善するためのシステムおよび方法