

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3883371号
(P3883371)

(45) 発行日 平成19年2月21日(2007.2.21)

(24) 登録日 平成18年11月24日(2006.11.24)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 M 19/00 (2006.01)	GO 1 M 19/00 A
GO 1 M 13/04 (2006.01)	GO 1 M 13/04

請求項の数 4 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2000-261381 (P2000-261381)	(73) 特許権者	000000239
(22) 出願日	平成12年8月30日(2000.8.30)		株式会社荏原製作所
(65) 公開番号	特開2002-71532 (P2002-71532A)		東京都大田区羽田旭町1 1 番 1 号
(43) 公開日	平成14年3月8日(2002.3.8)	(74) 代理人	100091498
審査請求日	平成15年12月3日(2003.12.3)		弁理士 渡邊 勇
		(74) 代理人	100092406
			弁理士 堀田 信太郎
		(72) 発明者	江口 真人
			神奈川県藤沢市本藤沢4丁目2番1号 株
			式会社 荏原総合研究所内
		審査官	福田 裕司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 反力測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フィードバック制御する複数の磁気軸受ユニットを搭載して、磁気軸受をそれぞれ独立に加振信号発生器からの加振指令信号を制御系に印加することにより加振機として利用し、且つ、磁気軸受の制御電流を磁気軸受用電力増幅器から検出する検出手段と、変位センサから信号増幅器を通じてロータの変位信号を検出する変位検出手段とにより、それぞれの磁気軸受が発生している電磁力である磁気軸受に作用する動荷重を算出する力検出器を備え、

ラジアル方向を制御する磁気軸受とスラスト方向を制御する磁気軸受とを独立し加振するときに相互の電磁力における干渉を最小限とならしめるため、スラスト方向を制御する磁気軸受ユニットをラジアル方向を制御する2組の磁気軸受ユニットの間に配置し、

磁気軸受の発生する電磁加振力に対して発生する反力について非接触状態で計測することを特徴とする反力測定装置。

【請求項 2】

請求項1記載の測定装置において、計測の対象である非接触環状シールを組み込んだシールケーシングと、該シールケーシングのシール部に循環水を供給する試験装置の配管系を備え、該配管系には回転速度制御が可能なインバータを備えたポンプと、流量調整弁および流量・差圧調整器とを備え、供試体への流量および供給圧力を調整可能としたことを特徴とする反力測定装置。

【請求項 3】

請求項1記載の測定装置において、磁気軸受の制御用補償回路ユニットに、関数発生器を備え、該関数発生器から、直線加振、パラレル加振、コニカル加振、又は縦直線加振の加振形態を含む加振信号を独立して磁気軸受に印加する手段を具備していることを特徴とする反力測定装置。

【請求項4】

請求項1記載の測定装置において、直線加振又はパラレル加振を行う際に、機械要素の動特性の影響で、ラジアル方向制御用上部磁気軸受と下部磁気軸受の制御用変位センサで異なる振動振幅が検出される場合に、これらの制御用変位センサ信号に差が生じないように磁気軸受の各制御軸における加振ゲインを調整する手段を具備していることを特徴とする反力測定装置。

10

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、機械要素の反力測定装置に係り、例えば非接触環状シール等の流体力を計測するのに好適な測定装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

ポンプ等の流体回転機械では、羽根車段間等からの流体の漏れを小さくし、効率を上げるために非接触環状シールを用いる。非接触環状シールは流体回転機械の振動特性に大きな影響を及ぼすので、高速回転で危険速度を越すような弾性ロータである場合、非接触環状シールの液膜により回転軸系に作用する不安定化流体力が原因で、回転軸系に自励振動が発生することがある。重大な事故を防止するためには、このような振動特性を設計時点で予測し回避しなければならない。そのためには、製品に搭載している非接触環状シールの動特性を実験的に調べ、評価する手段を確立しておく必要がある。そこで、非接触環状シールの流体反力を広範な運転条件下で精度良く計測できるシステムを開発することが望まれる。

20

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

本発明は、上記従来技術の問題点に鑑みなされたもので、測定装置の回転体側や静止側に別途加振機や力検出器を取り付ける必要がなく、装置のコンパクト化が実現でき、従来の技術では実現できなかった完全非接触状態での計測が可能となり、計測精度の向上が実現でき、且つ広範な運転条件の設定や、そして、柔軟な機械要素の外周部の支持条件などの境界条件の設定を可能とし、精度良く計測できる機械要素の反力測定装置を提供することを目的とする。

30

【0004】

【課題を解決するための手段】

このようなシステムを実現する一手段として磁気軸受の利用が考えられる。磁気軸受は、軸受としてロータを完全非接触状態で支持することができるばかりでなく、加振指令信号を制御系に印加することで加振機として利用でき、また、制御信号を検出演算することで力検出器として利用することができる。このように磁気軸受に3つの機能を集約することで、計測システムに加振機や力検出器を取り付ける必要がなくなり、装置そのものをコンパクト化することができる。また、計測対象とする供試体の境界条件の設定などが容易になり柔軟な計測を可能とする。

40

【0005】

本発明は、フィードバック制御する磁気軸受ユニットを搭載して、それらの磁気軸受をそれぞれ独立に加振信号発生器からの加振指令信号を磁気軸受の制御系に印加することにより加振機として利用し、且つ、磁気軸受の制御電流等を磁気軸受用電力増幅器から検出する検出手段と、制御用の変位センサから信号増幅器を通じてロータの変位信号を検出する変位検出手段とにより、それらの信号から個々の磁気軸受が発生している電磁力である磁気軸受に作用する動荷重を算出する演算手段を備える力検出器を備え、磁気軸受の発生す

50

る電磁加振力に対して応答する計測の対象である機械要素の発生する反力について非接触状態で計測することを特徴とする機械要素の反力測定装置である。

【0006】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施形態について添付図面を参照しながら説明する。

【0007】

図1は本発明の実施形態の測定装置の概要を示す。試験装置本体は、ベースフレームに立形で据え付けられている。ロータ11の6自由度のうち回転方向を除く5自由度を磁気軸受13, 15, 17によりフィードバック制御し、ロータ11が非接触浮上している。つまり、ラジアル直交2方向とスラスト方向の合計3つの並進運動と、ロータ重心回りのヨーイング運動とピッチング運動の合計2つの傾き運動に対して、制振制御することができる。また、ロータ11は、弾性軸継手で連結しているインバータ制御の誘導電動機により回転数制御を行うことができる。

10

【0008】

構造系は、上部に計測の対象である非接触環状シール21, 23を組み込んだシールケーシング25と、下部にラジアル方向と軸方向を制御する磁気軸受ユニット13と45, 15と46, 17と47, 48を搭載している上下対の2つの軸受ケーシング27, 29とにより構成している。そして、磁気軸受ユニットは、次の3つの機能要素から構成されている。

第1に、磁気軸受の故障等が原因でロータと構造系部品との接触を防止するための保護軸受31, 33, 35。

20

第2に、磁気軸受位置における回転体の振動を監視する誘導型変位センサ45, 46, 47, 48。

第3に、ロータに制御力や加振力を作用する対向に位置する（P極、N極と名づける）一組の電磁石13, 15, 17。

尚、ラジアル磁気軸受については、実際には電磁石と変位センサとは一断面に4個配置されていて、それぞれ回転方向に90°の位置関係にある。

【0009】

シールケーシングの中には、非接触環状シールの下流から磁気軸受ユニットや外部への流体の流れ込みを防止するための2個のオイルシール51, 53と、非接触環状シール位置でのロータの静的な偏心量と振動振幅、位相とを検出する2組の渦電流式変位センサ41, 42と、シール室の入口と出口における圧力を検出する4つの動ひずみ式圧力センサ55, 57とが組み込まれている。その他に、回転パルス波を発生する回転センサを具備している。

30

【0010】

地下側に磁気軸受ケーシング27, 29を地上側にシールケーシングなどの供試体を含むケーシング25を具備し、回転側シールリングなど回転側摺動リングが回転軸の地上側に取り付けられている。これにより、磁気軸受の挿入されている軸受ケーシングはもちろんのこと、供試体を含むケーシングを含む構造系とロータを分解することなく、回転側摺動リングと静止側摺動リングの脱着を共に、容易としている。また、供試体を含むケーシングをラジアル方向にスライドさせる機構が設けられていて、該ケーシングの組み立ての際に、回転側摺動リングと静止側摺動リングとの間の芯出しを容易に行うことができる。

40

【0011】

次に、試験装置の配管系の概要を図2に示す。

加圧用多段遠心ポンプ61で循環水をシール部63へ供給する。このポンプは、設計点が全揚程300mで、流量 $0.6\text{ m}^3/\text{min}$ であり、インバータによりその回転速度制御を行い、吐出圧と流量を負荷に応じて任意に変更可能である。このポンプにより加圧された流体が、2段の流量調整弁65, 66、電磁流量計67を経て、実験装置内に流入する。実験装置内で上下2つのシール21, 23の隙間に流体が押し込まれ、隙間で各種摩擦に

50

より減圧された後、戻り配管 6 2, 6 4 を経て、貯水槽 6 9 に戻る。循環水の流量を制御することで、シールに加える負荷つまり、シール差圧を試験条件に応じて設定することができる。この配管系には、圧力計 6 8, 7 0、冷却装置 7 1、差圧・流量調整装置 7 2 等を備えている。

【0012】

インバータにより回転制御を行える加圧ポンプ 6 1 と、ポンプに掛かる負荷を自在に変化させられる流量調整弁 6 5, 6 6 を具備しており、特にその流量調整器 7 2 は、配管系に供試体に対して並列の位置関係に設けられており、循環系に流れる流体の流量の調整幅を広げることができるので、供試体の上流側と下流側との間の差圧や供試体への供給圧力を広域にかつ細かく調整可能である。加圧ポンプ 6 1 の回転数制御による差圧や供給圧の制御だけでは、低い圧力域での圧力制御が粗くなり、そのような計測ケースに精密な制御が望めない。そのため、供試体と並列な位置関係に流量・差圧調整器 7 2 を配管系に別途設けることで、流量の調整幅を広げて、差圧や供給圧の制御を容易にしている。また、流量・差圧調整器 7 2 は、加圧ポンプ 6 1 がミニフロー状態の運転とならないような役割も果たしている。

10

【0013】

図 3 は、本発明の実施形態の制御系の概要を示す。

そして、磁気軸受の制御系は、以下の構成要素からなる。

ラジアル及びスラストの変位センサ出力を増幅する制御センサ用アンプ 8 1 と、増幅された制御センサ信号を入力し、制御信号を電流アンプに出力する直列型 P I D 制御回路ユニット（補償回路ユニット） 8 2 と、パルス幅変調（P W M）方式の大容量電流アンプ 8 3 と、加振指令信号を発生する関数発生器 8 4 と、その加振指令信号の周波数を制御するオシレータ 8 5 とから主として構成されている。

20

また、ロータの固有値で不安定化しないための対策として、P I D 制御回路中に、ノッチフィルター（図示しない）を直列に挿入している。このフィルターを制御対象に応じて交換することができ、これにより安定した計測環境を実現している。

【0014】

ここで、最終的な計測処理を行う環境は、A / D ボード 8 6 と、オペレーティングシステムとして Windows 95 がインストールされているクロック数 375MHz のパーソナルコンピュータ 8 7 とからなる。制御システム等からの信号は、全て同一仕様のカットオフ周波数 10kHz のローパスフィルターを通過した後、この A / D ボードに取り込まれる。

30

【0015】

磁気軸受により非接触浮上した状態のロータ 1 1 を軸継手により連結している立形の誘導電動機で回転する。所定の運転回転数に到達後、磁気軸受の制御用補償回路ユニット 8 2 に加振指令信号（正弦波等）を関数発生器 8 4 から印加し、ロータ 1 1 を加振する。ここで、各制御軸ごとに加振指令信号を独立して印加しているため、信号それぞれの利得（ゲイン）と位相とを制御することで、図 4（a）（b）（c）（d）に示すように、（a）直線加振、（b）平行加振、（c）コニカル加振、（d）縦直線加振を代表とする多様な加振形態を実現できる。

【0016】

平行加振と直線加振とは基本的にほぼ同一のばね定数や減衰係数を得ることができる。従って、これらの加振により発生する流体反力を導出し比較評価することで、その精度を確認することが可能である。また、平行加振に対し応答する流体反力と直線加振に対し応答する流体反力とは、フーリエ変換の結果得られる力の各成分（実部と虚部）の物理的な意味に違いがある。そのことからこの応答流体反力を和差することでロータに作用する力をロータダイナミクス的に意味のある成分により明確に分離することが可能になる。

40

【0017】

コニカル加振による振動特性を評価するに際して精度を上げるために、スラスト方向を制御する磁気軸受をコニカル加振の際の振動形状で節に相当するラジアル方向を制御する 2

50

組の磁気軸受ユニットの間に置いている。これにより、ラジアル方向とスラスト方向とを独立させた計測が必要となるケースの場合に、ラジアル方向への加振の際にスラスト方向制御用磁気軸受の干渉を最小限とし、また、スラスト方向への加振の際にラジアル方向制御用磁気軸受の干渉を最小限とすることができ、計測精度を向上させることができる。

【0018】

パラレル加振や直線加振の場合に、ロータ上部に機械要素が存在するとその軸受作用等によりオーバーハング構造であるがゆえにラジアル制御上部磁気軸受と下部磁気軸受との制御センサの信号の振幅に差異が生じ、計測精度に影響する場合がある。そのため、上部軸受と下部軸受との加振ゲインを制御センサ信号に差異が生じないように制御することで、計測精度の改善を行うことができる。

10

【0019】

更に、磁気軸受や供試体の組み立て誤差などに起因する振動波形等の位相情報の狂いを検出し評価する手段を具備し、各制御軸の磁気軸受の加振指令信号の位相間で補正する機構を有する。大型の計測装置になると個々の部品の加工精度や組み立て精度が確保しづらくなり、計測の際の出力信号間の位相のずれが生じるようになる。そのため、供試体を装着する前に、磁気軸受を加振し、その信号の位相を基準位相に対して、補正することで解消している。計測した力の情報からその回転軸系への作用の仕方で意味のある情報（例えば、直交座標系から回転座標系へ）に変換する必要がある。そのためには位相情報をより正確にモニターする必要がある。

【0020】

20

次に、加圧用の多段遠心ポンプ61を所定の運転回転数で運転して、循環ループ内の流体にエネルギーを供給する。エネルギーを得た流体は、非接触環状シール21、23の隙間に流入し、液膜が形成される。その液膜が、ロータの振動に応答し流体反力が回転軸系に作用する。この反力と釣り合ってロータが安定して回転するように、磁気軸受に制御力が働き、回転体の定常振れまわり軌道が実現できる。結果として、この定常振れまわり運動状態下で、軸受の動荷重を算出することにより、非接触環状シールの液膜が発生している流体反力を得ることができる。軸受の動荷重Wは、次式により算出することができる。

【0021】

【数1】

30

$$W = K \frac{\mu_0 N^2 A I^2}{4g^2} \quad (1)$$

ここで、K：磁極形状係数、 μ_0 ：空気の透磁率（H/m）、N：コイルターン数、A：磁路断面積（ m^2 ）、I：コイルに流れる電流値（A）、g：エアギャップ（m）である。

【0022】

この式から、磁気軸受で発生する電磁力は、磁気軸受の制御電流の2乗に比例し、エアギャップの2乗に反比例することが分かる。従って、エアギャップに対して、振幅が十分に小さい場合には、磁気軸受で発生する電磁力は、コイルに流れる制御電流の大きさに決まる。

40

そして、磁気軸受に印加する加振指令信号の周波数（以下、加振周波数）を掃引し、それぞれの加振周波数fに対する流体反力と、非接触環状シールの軸方向中心における変位センサ出力とを予め設定したサンプリングシートで記憶媒体に記録する。

【0023】

取り付けられた供試体21、23の長さに応じて、供試体の外側に取り付けている変位センサ41、42の出力信号に対して、供試体部の軸方向任意位置におけるロータの変位と供試体の発生する流体反力を演算する際に、自動的に補正が掛かる機構を具備している。この機能により別途計算する必要がなく、人為的なミスを防ぐばかりでなく、複数の供試体を具備した場合に、それぞれの供試体から発生している反力を同時に定量化することが

50

可能になる。

【0024】

次に、液膜動特性係数の導出方法について説明する。

この流体反力は、シール隙間に対して十分に小さな振幅（この装置では、シール隙間の10%以下としている）で加振した場合には、加振角周波数（ $\omega = 2\pi f$ ）に対して、線形多項式近似することが可能となる。従って、流体反力 F_x 、 F_y （N）は、静的偏心量が0である場合には、次式のように、12個のロータダイナミクス係数により表すことができる。

【0025】

【数2】

10

$$-\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & k \\ -k & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & c \\ -c & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & m \\ -m & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 K ：ばね定数直接項（N/m）、 k ：ばね定数連成項（N/m）、 C ：減衰係数直接項（Ns/m）、 c ：減衰係数連成項（Ns/m）、 M ：慣性係数直接項（Ns²/m）、 m ：慣性係数連成項（Ns²/m）である。

【0026】

ロータが真円の振れまわり軌道を描いている場合（ $x = y = r$ ）に限定すると、式（2）を極座標変換し、回転座標系で表現し直すと、次式の様になる。

20

【0027】

【数3】

$$\begin{aligned} \frac{F_r}{r} &= K + c\omega - M\omega^2 \\ \frac{F_\theta}{r} &= k - C\omega - m\omega^2 \end{aligned} \quad (3)$$

この式において、 r ：振れまわり半径（m）、 ω ：加振角周波数（rad/s）、 F_r ：ロータをシール中心に引き戻そうとする復元力（N）、 F_θ ：ロータを回転方向に振れまわらせる（前振れまわり）接線力（N）である。

30

【0028】

この式から、ロータダイナミクス係数のうち、ばね定数直接項 K と減衰係数連成項 c が正である場合には、ロータに復元力として作用する。慣性係数直接項 M が正である場合には、逆に、ロータを中心に引き離そうとする慣性力として作用する。次に、減衰係数直接項 C と慣性係数連成項 m が正である場合には、ロータの振れまわりを回転方向と逆方向に運動させるような前振れまわりの制御力として作用する。一方、ばね定数連成項 k が正である場合には、逆に、振れまわり運動を助長する接線力として作用する。このように、流体反力と加振周波数との間の線形な関係から機械要素設計に必要なロータダイナミクス係数を得ることができる。

40

【0029】

以上で記述した信号制御、データ処理に関する磁気軸受制御系と計測系の機能を整理すると、図5に示すようなブロック図になる。加振周波数に応じて、予め実測してある電磁力の校正值に基づいて磁気軸受の電磁加振力のキャリブレーションを自動化している。この機能により別途計算する必要がなく人為的なミスなどを防止している。また、供試体部や軸受部での許容振動値を超さないように加振指令信号の利得を制御する。許容振幅の制限は、磁気軸受の電磁力や流体反力の対振幅特性の非線形性が出現する機械要素や磁気軸受のクリアランスに対して最大で15～20%としている。実測に基づいて、この値を設定している。

【0030】

50

計測装置は芯ずれなどがあるため、パラレル加振などを行う際に、スラスト軸受の影響や加振の対象であるロータの慣性の影響等が出て計測データに影響を及ぼす危惧がある。従って、その影響を事前に予測し、実測したデータに対して、補正を掛ける必要がある。

【0031】

更に例えば、計測中にロータから磁気軸受に作用している不釣り合い力に起因する回転同期成分（N成分）を抽出して検討している。この検討図は、浮上回転加振した状態下である一つの供試シールの試験を連続するなかで加振周波数を段階的に変えて採取したデータをプロットしている。もちろん加振周波数以外の他の計測条件は、変化していない。この結果、加振周波数によらずほぼ一定の不釣り合いが磁気軸受に作用しているか否かを検討することができる。このことから、ロータ及びケーシング等構造物の組み立てにおいて、
10
がたなど測定精度に影響する要因がないことや計測時におけるロータ姿勢制御が良好で、精度良く加振できていることも推測できる。

【0032】

尚、反力計測中に他の要因で生じる動荷重成分、例えば、回転体の不釣り合い力に起因する回転同期成分を積極的に制御補償する手法もある。しかしながら、本測定装置では、ある許容値を超さない範囲（計測精度に影響を及ぼさない程度）では逆にこれらの動荷重成分の変動状態に基づいてシステムの健全性（制御系の故障や接触の有無、がたなど組み立て不良など）を診断し、計測精度が確保されているか確認する手段を採用している。

【0033】

【発明の効果】

以上説明したように本発明の測定装置によれば、非接触環状シールの液膜動特性を精度良く計測できる。
20

【0034】

即ち、磁気軸受を適用した結果、加振機や力検出器を必要としないことにより、従来困難であった装置のコンパクト化が達成できる。更に、非接触状態で回転体を支持していることから、回転体とケーシングとが非接触な状態で計測でき、更に回転軸系に対する加振方法に柔軟性があるので、多様な軸振動を想定した計測が可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態の反力測定装置の全体構成を示す図である。

【図2】図1におけるシール流体の配管系の図である。
30

【図3】制御系及び信号系のフロー図である。

【図4】磁気軸受により実現できる加振形態例を示す図であり、（a）は直線加振、（b）はパラレル加振、（c）はコニカル加振、（d）は縦直線加振の例をそれぞれ示す。

【図5】シール流体力（動特性係数）の評価方法を示したブロック図である。

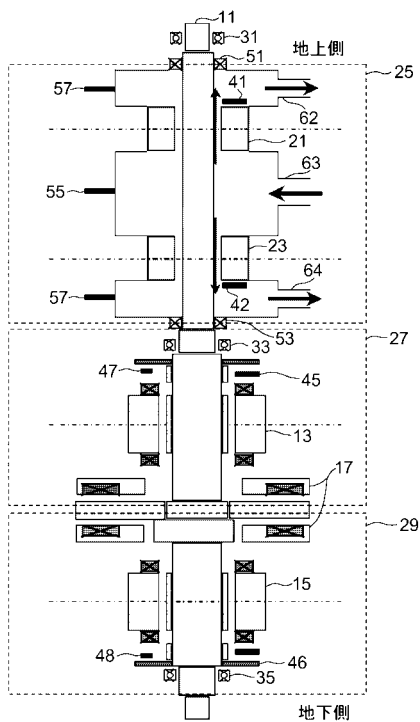
【図6】反力信号処理ダイアグラムの一例を示した図である。

【符号の説明】

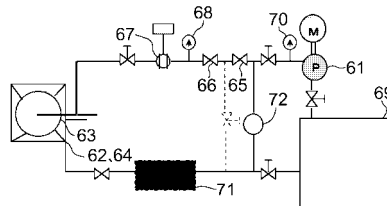
- 1 1 ロータ
- 1 3, 1 5 ラジアル磁気軸受
- 1 7 スラスト時期軸受
- 2 1, 2 3 非接触環状シールリング（共試体）
40
- 2 5 シールケーシング
- 2 7 上部軸受ケーシング
- 2 9 下部軸受ケーシング
- 3 1, 3 3, 3 5 保護軸受
- 4 1, 4 2 シール部の変位センサ
- 4 5, 4 6, 4 7, 4 8 磁気軸受部の変位センサ
- 5 1, 5 3 オイルシール
- 5 5, 5 7 圧力センサ
- 6 1 ポンプ
- 6 2, 6 4 シール部出口
50

- 6 3 高圧室入口
- 6 5, 6 6 流量調整弁
- 6 7 電磁流量計
- 6 8, 7 0 圧力計高圧室入口
- 7 2 差圧・流量調整装置
- 8 6 A / D ポート
- 8 7 コンピュータ

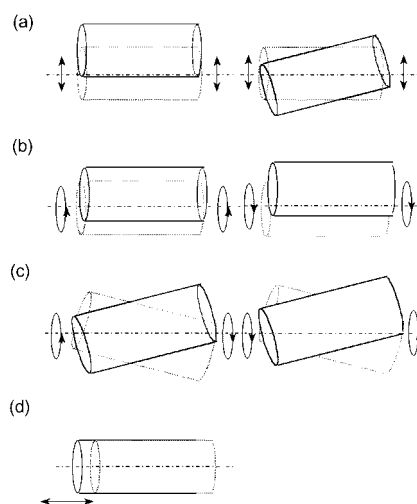
【図 1】



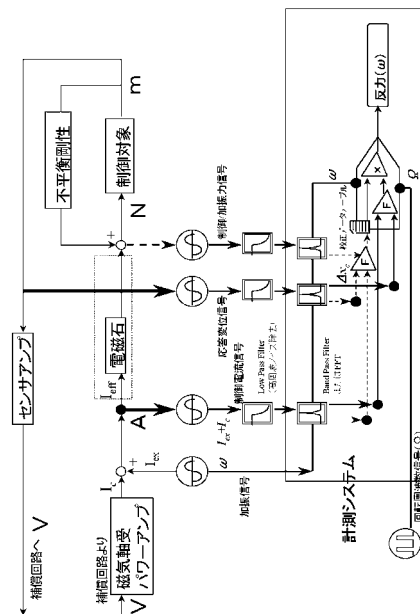
【図 2】



【图 4】



【图 6】



フロントページの続き

(56)参考文献 特公平05-071897 (JP, B2)

特開昭60-010878 (JP, A)

特開平02-074859 (JP, A)

特開2000-074788 (JP, A)

特開平10-029101 (JP, A)

特開平09-053181 (JP, A)

特開平07-071457 (JP, A)

特開平05-288219 (JP, A)

特開昭61-241661 (JP, A)

特開昭60-122327 (JP, A)

K. Kwanka, DYNAMIC COEFFICIENTS OF STEPPED LABYRINTH GAS SEALS, THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 米国, 1999年, 99-GT-20, 1~6頁

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01M 19/00

G01M 13/00~13/04