

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第4287213号
(P4287213)

(45) 発行日 平成21年7月1日(2009.7.1)

(24) 登録日 平成21年4月3日(2009.4.3)

(51) Int.Cl.	F I
F 1 6 C 32/04 (2006.01)	F 1 6 C 32/04 A
F 0 4 D 19/04 (2006.01)	F 0 4 D 19/04 A
F 0 4 D 29/056 (2006.01)	F 0 4 D 29/056 Z
F 0 4 D 29/046 (2006.01)	F 0 4 D 29/046 A
F 0 4 D 29/66 (2006.01)	F 0 4 D 29/66 G

請求項の数 17 (全 31 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2003-207729 (P2003-207729)	(73) 特許権者	508275939 エドワーズ株式会社 千葉県八千代市吉橋 1 〇 7 8 番地 1
(22) 出願日	平成15年8月18日 (2003.8.18)		
(65) 公開番号	特開2004-150628 (P2004-150628A)	(74) 代理人	100105201 弁理士 椎名 正利
(43) 公開日	平成16年5月27日 (2004.5.27)		
審査請求日	平成17年12月8日 (2005.12.8)	(72) 発明者	大立 好伸 千葉県習志野市屋敷 4 - 3 - 1 ビーオー シーエドワーズテクノロジーズ株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願2002-257538 (P2002-257538)	(72) 発明者	深美 英夫 千葉県習志野市屋敷 4 - 3 - 1 ビーオー シーエドワーズテクノロジーズ株式会社内
(32) 優先日	平成14年9月3日 (2002.9.3)	(72) 発明者	並木 啓能 千葉県習志野市屋敷 4 - 3 - 1 ビーオー シーエドワーズテクノロジーズ株式会社内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 振動抑制機能を有する磁気軸受装置、振動推定機能を有する磁気軸受装置及び該磁気軸受装置を搭載したポンプ装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

回転体と、
該回転体に浮上力を作用させる電磁石と、
該電磁石が固設されたステータ部と、
前記回転体の前記ステータ部に対する径方向及び／又は軸方向の相対変位を検出する変位検出手段と、
該変位検出手段が検出した相対変位に基づいて前記浮上力の調整量を算出する磁気軸受制御補償器と、
該磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に応じて前記浮上力を調整する電磁石制御手段と、
前記ステータ部に対する相対位置が固定された装置固定部の所定の物理量を検出する振動検出手段と、
該振動検出手段の出力を、該出力の極性を反転し、少なくとも前記変位検出手段と前記磁気軸受制御補償器と前記電磁石制御手段によって構成される磁気軸受フィードバック制御手段の伝達信号に加算する加算手段とを備え、
前記所定の物理量は、
前記装置固定部及び／又は前記ステータ部の加速度、該加速度を所要回数だけ微分又は積分した変位、速度及び加加速度等のうちの少なくとも一つであり、
前記加速度は、

前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位のラプラス変換と所定の伝達関数とを乗算した第1の乗算結果を時間領域に変換した変換結果であることを特徴とする振動抑制機能を有する磁気軸受装置。

【請求項2】

前記回転体に作用する不釣り合い力を検出又は推定する不釣り合い力検出手段を備え、前記加速度は、
前記第1の乗算結果と、前記不釣り合い力検出手段で検出又は推定された前記回転体に作用する不釣り合い力の変動分のラプラス変換と前記回転体の質量の逆数とを乗算した第2の乗算結果とを加算した加算結果を時間領域に変換した変換結果であることを特徴とする請求項1記載の振動抑制機能を有する磁気軸受装置。

10

【請求項3】

前記所定の伝達関数は、
前記回転体の相対変位と該相対変位により前記電磁石と前記回転体との間に作用する力との関係である磁気軸受フィードバック制御手段固有の伝達関数と、前記回転体の質量により表されたことを特徴とする請求項1又は請求項2記載の振動抑制機能を有する磁気軸受装置。

【請求項4】

回転体と、
該回転体に浮上力を作用させる電磁石と、
該電磁石が固設されたステータ部と、
前記回転体の前記ステータ部に対する径方向及び/又は軸方向の相対変位を検出する変位検出手段と、
該変位検出手段が検出した相対変位に基づいて前記浮上力の調整量を算出する磁気軸受制御補償器と、
該磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に対応して前記浮上力を調整する電磁石制御手段と、
前記ステータ部に対する相対位置が固定された装置固定部の所定の物理量を検出する振動検出手段と、
該振動検出手段の出力を、該出力の極性を反転し、少なくとも前記変位検出手段と前記磁気軸受制御補償器と前記電磁石制御手段によって構成される磁気軸受フィードバック制御手段の伝達信号に加算する加算手段とを備え、
前記所定の物理量は、
前記装置固定部及び/又は前記ステータ部の加速度、該加速度を所要回数だけ微分又は積分した変位、速度及び加加速度等のうちの少なくとも一つであり、
前記加速度は、
前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果又は前記加算手段による加算結果と、前記回転体の質量の逆数とを乗算した第3の乗算結果から、前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位を2階微分した結果を減算した減算結果であることを特徴とする振動抑制機能を有する磁気軸受装置。

20

30

【請求項5】

前記電磁石と前記回転体の間に発生する磁束の変動量を検出する磁束検出手段を備え、前記第3の乗算結果として、
前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果の代わりに、前記磁束検出手段で検出された磁束の変動量に比例する値を用いた乗算結果を用いることを特徴とする請求項4記載の振動抑制機能を有する磁気軸受装置。

40

【請求項6】

前記回転体を回転駆動する誘導モータと、
該誘導モータの通電状態を制御するモータ制御手段とを備え、
前記振動検出手段で前記所定の物理量を検出するとき、前記モータ制御手段は前記誘導モータを無通電とすることを特徴とする請求項4又は請求項5記載の振動抑制機能を有する

50

磁気軸受装置。

【請求項 7】

前記回転体の回転周波数に追従して、該周波数成分を除去する回転周波数追従型ノッチフィルタを備え、
前記加速度等は、
前記減算結果が前記回転周波数追従型ノッチフィルタを通過した結果であることを特徴とする請求項 4、5 又は 6 記載の振動抑制機能を有する磁気軸受装置。

【請求項 8】

前記加速度等が通過するローパスフィルタを備えたことを特徴とする請求項 4～7 のいずれか 1 項に記載の振動抑制機能を有する磁気軸受装置。

10

【請求項 9】

前記振動検出手段の出力にゲイン調整及び / 又は位相補償と、PID 制御と、その他の制御補償のいずれか少なくとも一つの制御補償を施す振動抑制制御補償手段を備えたことを特徴とする請求項 1～8 のいずれか 1 項に記載の振動抑制機能を有する磁気軸受装置。

【請求項 10】

回転体と、
該回転体に浮上力を作用させる電磁石と、
該電磁石が固設されたステータ部と、
前記回転体の前記ステータ部に対する径方向及び / 又は軸方向の相対変位を検出する変位検出手段と、
該変位検出手段が検出した変位に基づいて前記浮上力の調整量を算出する磁気軸受制御補償器と、
該磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に対応して前記浮上力を調整する電磁石制御手段と、
前記ステータ部に対する相対位置が固定された装置固定部の所定の物理量を検出する振動検出手段とを備え、
前記所定の物理量は、
前記装置固定部及び / 又は前記ステータ部の加速度、該加速度を所要回数だけ微分又は積分した変位、速度及び加加速度等のうちの少なくとも一つであり、
前記加速度は、
前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位のラプラス変換と所定の伝達関数とを乗算した第 1 の乗算結果を時間領域に変換した変換結果であることを特徴とする振動推定機能を有する磁気軸受装置。

20

30

【請求項 11】

回転体と、
該回転体に浮上力を作用させる電磁石と、
該電磁石が固設されたステータ部と、
前記回転体の前記ステータ部に対する径方向及び / 又は軸方向の相対変位を検出する変位検出手段と、
該変位検出手段が検出した変位に基づいて前記浮上力の調整量を算出する磁気軸受制御補償器と、
該磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に対応して前記浮上力を調整する電磁石制御手段と、
前記ステータ部に対する相対位置が固定された装置固定部の所定の物理量を検出する振動検出手段とを備え、
前記所定の物理量は、
前記装置固定部及び / 又は前記ステータ部の加速度、該加速度を所要回数だけ微分又は積分した変位、速度及び加加速度等のうちの少なくとも一つであり、
前記加速度は、
前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果と、前記回転体の質量の逆

40

50

数とを乗算した第3の乗算結果から、前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位を2階微分した結果を減算した減算結果であることを特徴とする振動推定機能を有する磁気軸受装置。

【請求項12】

前記電磁石と前記回転体の間に発生する磁束の変動量を検出する磁束検出手段を備え、前記第3の乗算結果として、前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果の代わりに、前記磁束検出手段で検出された磁束の変動量に比例する値を用いた乗算結果を用いることを特徴とする請求項11記載の振動推定機能を有する磁気軸受装置。

【請求項13】

前記回転体を回転駆動する誘導モータと、該誘導モータの通電状態を制御するモータ制御手段とを備え、前記振動検出手段で前記所定の物理量を検出するとき、前記モータ制御手段は前記誘導モータを無通電とすることを特徴とする請求項11又は請求項12記載の振動推定機能を有する磁気軸受装置。

【請求項14】

前記回転体の回転周波数に追従して、該周波数成分を除去する回転周波数追従型ノッチフィルタを備え、前記加速度等は、前記減算結果が前記回転周波数追従型ノッチフィルタを通過した結果であることを特徴とする請求項11、12又は13記載の振動推定機能を有する磁気軸受装置。

【請求項15】

前記加速度等が通過するローパスフィルタを備えたことを特徴とする請求項11～14のいずれか1項に記載の振動推定機能を有する磁気軸受装置。

【請求項16】

請求項1～9のいずれか1項に記載の磁気軸受装置が搭載された真空ポンプであって、該真空ポンプは、被対象設備に設置され、該被対象設備から所定のガスを吸引することを特徴とする振動抑制機能を有するポンプ装置。

【請求項17】

請求項10～15のいずれか1項に記載の磁気軸受装置が搭載された真空ポンプであって、該真空ポンプは、被対象設備に設置され、該被対象設備から所定のガスを吸引することを特徴とする振動推定機能を有するポンプ装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は振動抑制機能を有する磁気軸受装置、振動推定機能を有する磁気軸受装置及び該磁気軸受装置を搭載したポンプ装置に係わり、特に新たな振動センサを配設することなく、真空ポンプの被対象設備を含めた装置システム全体の低振動化を実現することが可能な振動抑制機能を有する磁気軸受装置、振動推定機能を有する磁気軸受装置及び該磁気軸受装置を搭載したポンプ装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

近年のエレクトロニクスの発展に伴い、メモリや集積回路といった半導体の需要が急激に増大している。

これらの半導体は、極めて純度の高い半導体基板に不純物をドーピングして電気的性質を与えたり、半導体基板上に微細な回路パターンを形成し、これを積層するなどして製造される。

10

20

30

40

50

【 0 0 0 3 】

そして、これらの作業は空気中の塵等による影響を避けるため高真空状態のチャンバ内で行われる必要がある。このチャンバの排気には、一般に真空ポンプが用いられているが、特に残留ガスが少なく、保守が容易である等の点から真空ポンプの中の一つであるターボ分子ポンプが多用されている。

【 0 0 0 4 】

また、半導体の製造工程では、さまざまなプロセスガスを半導体の基板に作用させる工程が数多くあり、ターボ分子ポンプはチャンバ内を真空にするのみならず、これらのプロセスガスをチャンバ内から排気するのにも使用される。

【 0 0 0 5 】

さらに、ターボ分子ポンプは、電子顕微鏡等の設備において、粉塵等の存在による電子ビームの屈折等を防止するため、電子顕微鏡等のチャンバ内の環境を高度の真空状態にするのにも用いられている。

【 0 0 0 6 】

このようなターボ分子ポンプは、半導体製造装置や電子顕微鏡等のチャンバからガスを吸引排気するためのターボ分子ポンプ本体と、このターボ分子ポンプ本体を制御する制御装置とから構成されている。

【 0 0 0 7 】

ここで、ターボ分子ポンプ本体の縦断面図を図 1 0 に、このターボ分子ポンプ本体をチャンバ内の真空引き等に用いた場合の装置システム全体の構成図を図 1 1 に示す。

図 1 0 において、ターボ分子ポンプ本体 1 0 0 は、円筒状の外筒 1 2 7 の上端に吸気口 1 0 1 が形成されている。外筒 1 2 7 の内方には、ガスを吸引排気するためのタービンブレードとしての複数の回転翼 1 0 2 a , 1 0 2 b , 1 0 2 c . . . を周部に放射状かつ多段に形成した回転体 1 0 3 を備える。

【 0 0 0 8 】

この回転体 1 0 3 の中心にはロータ軸 1 1 3 が取り付けられており、このロータ軸 1 1 3 は、例えば、いわゆる 5 軸制御の磁気軸受により浮上支持かつ位置制御されている。

【 0 0 0 9 】

上側径方向電磁石 1 0 4 は、4 個の電磁石が互いに直行する X 軸と Y 軸とに対をなしロータ軸 1 1 3 を挟んで対向配置されている。この X 軸と Y 軸は、ロータ軸 1 1 3 が磁気軸受の制御目標位置にあるときのロータ軸 1 1 3 の軸芯に対して直角な平面上に想定されている。また、この上側径方向電磁石 1 0 4 に近接かつ対応されコアに巻かれた 4 個のコイルからなる上側径方向センサ 1 0 7 が備えられている。この上側径方向センサ 1 0 7 は回転体 1 0 3 の径方向変位を検出し、その信号を図 1 1 に示す制御装置 2 0 0 に送るように構成されている。

【 0 0 1 0 】

制御装置 2 0 0 は、補償器 2 0 1 とアンプ 2 0 2 等から構成された磁気軸受フィードバック制御手段を備えており、この制御装置 2 0 0 においては、上側径方向センサ 1 0 7 が検出した変位信号に基づき、P I D 調節機能を有する補償器 2 0 1 を介したアンプ 2 0 2 の出力により、上側径方向電磁石 1 0 4 の励磁を制御し、ロータ軸 1 1 3 の上側の径方向位置を調整する。

ロータ軸 1 1 3 は、高透磁率材（鉄など）などにより形成され、上側径方向電磁石 1 0 4 の磁力により吸引されるようになっている。かかる調整は、X 軸方向と Y 軸方向とにそれぞれ独立して行われる。

【 0 0 1 1 】

また、下側径方向電磁石 1 0 5 及び下側径方向センサ 1 0 8 が、上側径方向電磁石 1 0 4 及び上側径方向センサ 1 0 7 と同様に配置され、ロータ軸 1 1 3 の下側の径方向位置が、上側の径方向位置と同様に、制御装置 2 0 0 において、磁気軸受フィードバック制御手段により調整されている。

【 0 0 1 2 】

10

20

30

40

50

さらに、軸方向電磁石 106A, 106B が、ロータ軸 113 の下部に備えた円板状の金属ディスク 111 を上下に挟んで配置されている。金属ディスク 111 は、鉄などの高透磁率材で構成されている。回転体 103 の軸方向変位を検出するために軸方向センサ 109 が備えられ、その軸方向変位信号が制御装置 200 に送られるように構成されている。

【0013】

そして、軸方向電磁石 106A, 106B は、この軸方向変位信号に基づき制御装置 200 の PID 調節機能を有する補償器 201 を介したアンプ 202 の出力により、励磁制御されるようになっている。軸方向電磁石 106A は、磁力により金属ディスク 111 を上方に吸引し、軸方向電磁石 106B は、金属ディスク 111 を下方に吸引する。

【0014】

このように、制御装置 200 では、磁気軸受フィードバック制御手段により、軸方向電磁石 106A, 106B が金属ディスク 111 に及ぼす磁力を適当に調節し、ロータ軸 113 を軸方向に磁気浮上させ、空間に非接触で保持する。

【0015】

モータ 121 は、その回転子側にロータ軸 113 を取り囲むように周状に配置された複数の永久磁石の磁極を備えている。そして、これらの永久磁石の磁極には、モータ 121 の固定子側である電磁石から、ロータ軸 113 を回転させるトルク成分が加えられるようになり、回転体 103 が回転駆動されるようになっている。

また、モータ 121 には、図示しない回転数センサ及びモータ温度センサが取り付けられており、これらの回転数センサ及びモータ温度センサの検出信号を受けて、制御装置 200 においてロータ軸 113 の回転が制御されている。

【0016】

回転翼 102a, 102b, 102c・・・とわずかの空隙を隔てて複数枚の固定翼 123a, 123b, 123c・・・が配設されている。回転翼 102a, 102b, 102c・・・は、それぞれ排気ガスの分子を衝突により下方向に移送するため、ロータ軸 113 の軸線に垂直な平面から所定の角度だけ傾斜して形成されている。

【0017】

また、固定翼 123 も、同様にロータ軸 113 の軸線に垂直な平面から所定の角度だけ傾斜して形成され、かつ外筒 127 の内方に向けて回転翼 102 の段と互い違いに配設されている。

そして、固定翼 123 の一端は、複数の段積みされた固定翼スペーサ 125a, 125b, 125c・・・の間に嵌挿された状態で支持されている。

【0018】

固定翼スペーサ 125 はリング状の部材であり、例えばアルミニウム、鉄、ステンレス、銅などの金属、又はこれらの金属を成分として含む合金などの金属によって構成されている。

固定翼スペーサ 125 の外周には、わずかの空隙を隔てて外筒 127 が固定されている。外筒 127 の底部にはベース部 129 が配設され、固定翼スペーサ 125 の下部とベース部 129 の間にはネジ付きスペーサ 131 が配設されている。

【0019】

このベース部 129 中のネジ付きスペーサ 131 の下部には排気口 133 が形成されている。そして、排気口 133 には、図示しないドライポンプ通路が接続されており、排気口 133 は、このドライポンプ通路を介して、図示しないドライポンプと接続されている。

【0020】

ネジ付きスペーサ 131 は、アルミニウム、銅、ステンレス、鉄、又はこれらの金属を成分とする合金などの金属によって構成された円筒状の部材であり、その内周面に螺旋状のネジ溝 131a が複数条刻設されている。

ネジ溝 131a の螺旋の方向は、回転体 103 の回転方向に排気ガスの分子が移動したときに、この分子が排気口 133 の方へ移送される方向である。

【0021】

回転体 103 の回転翼 102 a , 102 b , 102 c . . . に続く最下部には円筒部 102 d が垂下されている。この円筒部 102 d の外周面は、ネジ付きスペーサ 131 の内周面に向かって張り出されており、このネジ付きスペーサ 131 の内周面と所定の隙間を隔てて近接されている。

【0022】

ベース部 129 は、ターボ分子ポンプ本体 100 の基底部を構成する円盤状の部材であり、一般には鉄、アルミニウム、ステンレスなどの金属によって構成されている。ベース部 129 はターボ分子ポンプ本体 100 を物理的に保持すると共に、熱の伝導路の機能も兼ね備えているので、鉄、アルミニウムや銅などの剛性があり、熱伝導率も高い金属が使用されるのが望ましい。

10

【0023】

また、ベース部 129 には、コネクタ 160 が配設されており、このコネクタ 160 には、ターボ分子ポンプ本体 100 と制御装置 200 との間の信号線が接続されている。

【0024】

かかる構成において、回転翼 102 がロータ軸 113 と共にモータ 121 により駆動されて回転すると、回転翼 102 と固定翼 123 の作用により、吸気口 101 を通じて、図 1 に示すチャンバ 300 から排気ガスが吸気される。

【0025】

吸気口 101 から吸気された排気ガスは、回転翼 102 と固定翼 123 の間を通り、ベース部 129 へ移送される。そして、ベース部 129 に移送されてきた排気ガスは、ネジ付きスペーサ 131 のネジ溝 131 a に案内されつつ排気口 133 へと送られる。

20

【0026】

また、吸気口 101 から吸気された排気ガスが、モータ 121、上側径方向電磁石 104、上側径方向センサ 107、下側径方向電磁石 105、下側径方向センサ 108 などで構成される電装部側に侵入することのないよう、電装部は周囲をステータコラム 122 で覆われ、この電装部内はパージガスにて所定圧に保たれている。

【0027】

このため、ベース部 129 には図示しない配管が配設され、この配管を通じてパージガスが導入される。導入されたパージガスは、保護ベアリング 120 とロータ軸 113 間、モータ 121 のロータとステータ間、ステータコラム 122 と回転翼 102 間の隙間を通じて排気口 133 へ送出される。

30

【0028】

ここに、ターボ分子ポンプ本体 100 は、機種の特定と、個々に調整された固有のパラメータ（例えば、機種に対応する諸特性）に基づいた制御を要する。この制御パラメータを格納するために、ターボ分子ポンプ本体 100 は、その内部に電子回路部 141 を備えている。電子回路部 141 は、EEPROM 等の半導体メモリ及びそのアクセスのための半導体素子等の電子部品、その実装用の基板 143 等から構成される。

【0029】

この電子回路部 141 は、ターボ分子ポンプ本体 100 の下部を構成するベース部 129 の中央付近の図示しない回転数センサの下部に収容され、気密性の底蓋 145 によって閉じられている。

40

【0030】

ところで、ターボ分子ポンプ本体 100 は、半導体製造装置や電子顕微鏡等のチャンバ 300 に用いられる性質上、その低振動化が望まれている。

すなわち、半導体製造装置のチャンバ 300 において、回路パターンの露光を行っている最中に振動が発生してしまうと、下層の回路パターンとの合わせずれが生じてしまい、正常な回路動作ができなくなるおそれがあった。

また、電子顕微鏡のチャンバ 300 においても、対象物を観察しているときに振動が発生してしまうと、その焦点が合わなくなり、画像が乱れてしまうおそれがあった。

【0031】

50

そのため、図 11 に示すように、ターボ分子ポンプ本体 100 は、チャンバ 300 との間にポンプ用ダンパ 301 を介設されつつ、宙吊りにされている。

図 11 に示すポンプ用ダンパ 301 は、蛇腹状のベローズ 302 を備えており、このベローズ 302 の外周には、ゴム部材 306 が巻かれている。そして、ターボ分子ポンプ本体 100 とチャンバ 300 との間で、回転体 103 の回転に伴う振動を吸収するようになっている。このとき、ベローズ 302 の一端は、図示しないフランジを介してチャンバ 300 に締結固定され、その他端は、フランジ 303 を介してターボ分子ポンプ本体 100 の吸気口 101 と締結固定されている。

【0032】

また、チャンバ 300 は、床 400 に配設されたフレーム 402 によって支持されており、チャンバ 300 とフレーム 402 との間には、装置用ダンパ 401 が介設されている。この装置用ダンパ 401 も、ポンプ用ダンパ 301 と同様に、フレーム 402 とチャンバ 300 との間で振動を吸収するようになっている。

【0033】

かかる構成において、ターボ分子ポンプ本体 100 から振動が発生しても、その振動は、ポンプ用ダンパ 301 に吸収されるため、チャンバ 300 に伝わり難くなる。

また、床 400 から発生される振動に対しても同様で、その振動は、装置用ダンパ 401 に吸収され、チャンバ 300 に伝わり難くなる。

以上により、チャンバ 300 は、その低振動化が図られていた。

【0034】

しかしながら、このようなメカニカルなダンパによる除振の場合、その構造上、特にターボ分子ポンプ本体 100 やフレーム 402 を介して伝わる振動に対して、特に低周波数帯域において良好な除振効果が得られ難いという問題点があった。

【0035】

そのため、チャンバ 300 とターボ分子ポンプ本体 100 やフレーム 402 の間に、ポンプ用ダンパ 301 や装置用ダンパ 401 をそれぞれ複数個直列に介設するなどして、チャンバ 300 への除振効果の向上を図っているが、近年の半導体製造プロセスの微細化や電子顕微鏡の高分解能化等に対応するため、低周波数帯域でのさらなる低振動化が望まれていた。

【0036】

また、近年の半導体製造装置等のチャンバ 300 の容積拡大に伴い、ターボ分子ポンプ本体 100 には大排気速度化の要望が強く、これに対応するため、ターボ分子ポンプ本体 100 は大型化が進み、ポンプ用ダンパ 301 の大型化が進んでいる。

【0037】

このようなポンプ用ダンパ 301 の大型化は、その除振効果を一定以上に保つとすれば、そのコストの上昇に直結するおそれがあった。

【0038】

さらに、ターボ分子ポンプ本体 100 には、図示しないドライポンプが接続されているが、このドライポンプの発生する振動は、わずかではあるが、ドライポンプ通路を介して、ターボ分子ポンプ本体 100 等に伝わり、チャンバ 300 を振動させてしまう。また、床 400 には、このドライポンプや、他の半導体製造装置等が発生する振動、人が歩く際に発生される振動等も伝わってくるため、この振動が、チャンバ 300 を振動させてしまう場合もある。

【0039】

このようなチャンバ 300 の振動は、ターボ分子ポンプ本体 100 自体の低振動化を進めても避けることができず、ターボ分子ポンプ本体 100 だけでなく、チャンバ 300 を含めた装置システム全体としての低振動化が望まれていた。

【0040】

かかる問題点を解決するため、特許文献 1 には、磁気軸受からある程度離れた場所の振動を低減することが可能な磁気軸受装置を備える回転機械が開示されている。すなわち、こ

10

20

30

40

50

の磁気軸受装置を備える回転機械は、ポンプ用ダンパ301のフランジ303や、チャンバ300側の図示しないフランジ等に振動検出センサを配設し、この振動検出センサが検出した検知信号に基づいて、逆位相の振動を回転体103に与え、装置システム全体の振動を打ち消すようにするものである。

【特許文献1】

特開2002-147454号公報

【0041】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、特許文献1の場合、ターボ分子ポンプ本体100として、新たな振動検出センサを用意する必要がある、その分、部品コストが上昇してしまうおそれがあった。

10

【0042】

また、この振動検出センサは、ポンプ用ダンパ301やチャンバ300側に配設されるため、予めポンプ用ダンパ301やチャンバ300等の周辺に配置スペースを確保することが必要であり、かつ、振動検出センサと制御装置200との間を通信するために、ポンプ用ダンパ301やチャンバ300等との間に新たな信号線が必要であった。

【0043】

本発明はこのような従来の課題に鑑みてなされたもので、特に新たな振動センサを配設することなく、真空ポンプの被対象設備を含めた装置システム全体の低振動化を実現することが可能な振動抑制機能を有する磁気軸受装置、振動推定機能を有する磁気軸受装置及び該磁気軸受装置を搭載したポンプ装置を提供することを目的とする。

20

【0044】

【課題を解決するための手段】

このため本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、回転体と、該回転体に浮上力を作用させる電磁石と、該電磁石が固設されたステータ部と、前記回転体の前記ステータ部に対する径方向及び／又は軸方向の相対変位を検出する変位検出手段と、該変位検出手段が検出した相対変位に基づいて前記浮上力の調整量を算出する磁気軸受制御補償器と、該磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に応じて前記浮上力を調整する電磁石制御手段と、前記ステータ部に対する相対位置が固定された装置固定部の所定の物理量を検出する振動検出手段と、該振動検出手段の出力を、該出力の極性を反転し、少なくとも前記変位検出手段と前記磁気軸受制御補償器と前記電磁石制御手段によって構成される磁気軸受フィードバック制御手段の伝達信号に加算する加算手段とを備え、前記所定の物理量は、前記装置固定部及び／又は前記ステータ部の加速度、該加速度を所要回数だけ微分又は積分した変位、速度及び加加速度等のうちの少なくとも一つであり、前記加速度は、前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位のラプラス変換と所定の伝達関数とを乗算した第1の乗算結果を時間領域に変換した変換結果であることを特徴とする。

30

【0045】

振動検出手段は、装置固定部及び／又はステータ部の所定の物理量を検出し、これを加算手段に出力する。また、加算手段は、振動検出手段から出力された信号に対し、その極性を反転して磁気軸受フィードバック制御手段の出力と加算させる。

40

このことにより、磁気軸受装置に振動抑制機能を備えることができる。

なお、回転体の変位のラプラス変換とは、数5中の $Y(s)$ をいう。

【0046】

また、本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、前記回転体に作用する不釣り合い力を検出又は推定する不釣り合い力検出手段を備え、前記加速度は、前記第1の乗算結果と、前記不釣り合い力検出手段で検出又は推定された前記回転体に作用する不釣り合い力の変動分のラプラス変換と前記回転体の質量の逆数とを乗算した第2の乗算結果とを加算した加算結果を時間領域に変換した変換結果であることを特徴とする。

【0047】

このことにより、磁気軸受装置は、さらに回転体に作用する不釣り合い力に起因して装置

50

固定部及び／又はステータ部に生じる振動を抑制する振動抑制機能を備えることができる。

なお、不釣り合い力の変動分のラプラス変換とは、数 4 中の $U_b(s)$ をいう。

【0048】

さらに、本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、前記所定の伝達関数は、前記回転体の相対変位と該相対変位により前記電磁石と前記回転体との間に作用する力との関係である磁気軸受フィードバック制御手段固有の伝達関数と、前記回転体の質量により表されたことを特徴とする。

【0049】

所定の伝達関数は、回転体の質量と、磁気軸受フィードバック制御手段固有の伝達関数とにより定義付けられた関数である。ここで、磁気軸受フィードバック制御手段固有の伝達関数は、磁気軸受の設計段階で決まる関数である。

このことにより、新たな振動センサを配設することなく、磁気軸受装置内のパラメータのみで、所定の伝達関数を算出することができる。

なお、磁気軸受フィードバック制御手段固有の伝達関数とは、数 4、数 5 中の $F(s)$ をいう。

【0050】

さらに、本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、回転体と、該回転体に浮上力を作用させる電磁石と、該電磁石が固設されたステータ部と、前記回転体の前記ステータ部に対する径方向及び／又は軸方向の相対変位を検出する変位検出手段と、該変位検出手段が検出した相対変位に基づいて前記浮上力の調整量を算出する磁気軸受制御補償器と、該磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に対応して前記浮上力を調整する電磁石制御手段と、前記ステータ部に対する相対位置が固定された装置固定部の所定の物理量を検出する振動検出手段と、該振動検出手段の出力を、該出力の極性を反転し、少なくとも前記変位検出手段と前記磁気軸受制御補償器と前記電磁石制御手段によって構成される磁気軸受フィードバック制御手段の伝達信号に加算する加算手段とを備え、前記所定の物理量は、前記装置固定部及び／又は前記ステータ部の加速度、該加速度を所要回数だけ微分又は積分した変位、速度及び加加速度等のうちの少なくとも一つであり、前記加速度は、前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果又は前記加算手段による加算結果と、前記回転体の質量の逆数とを乗算した第 3 の乗算結果から、前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位を 2 階微分した結果を減算した減算結果であることを特徴とする。

【0051】

前記加算手段が、前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に、前記振動検出手段の出力を、その極性を反転して加算する場合には、前記加速度は、前記加算手段による加算結果と、前記回転体の質量の逆数とを乗算した第 3 の乗算結果から、前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位を 2 階微分した結果を減算した減算結果となる。

【0052】

請求項 1 と異なり、装置固定部及び／又はステータ部の加速度等を検出するに際し伝達関数の演算が行われない。この代わりに、電磁石が回転体に作用させる浮上力そのものが用いられる。そして、この浮上力として磁気軸受制御補償器による浮上力の調整量の算出結果又は加算手段で加算された加算結果が用いられる。

このことにより、装置固定部及び／又はステータ部の加速度等の検出にあたり既知である磁気軸受制御補償器による浮上力の調整量の算出結果又は加算手段による加算結果を用いているので、安価な演算装置を用いても高精度に装置固定部及び／又はステータ部の加速度等を算出することが可能である。

【0053】

さらに、本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、前記電磁石と前記回転体の間に発生する磁束の変動量を検出する磁束検出手段を備え、前記第 3 の乗算結果として

10

20

30

40

50

、前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果の代わりに、前記磁束検出手段で検出された磁束の変動量に比例する値を用いた乗算結果を用いることを特徴とする。

【0054】

電磁石が回転体に作用させる浮上力の調整量として、磁束検出手段で検出された磁束の変動量に比例する値が用いられる。

このことにより、伝達関数の演算が行われないので、安価な演算装置を用いても高精度に装置固定部及び／又はステータ部の加速度等を算出することが可能である。

【0055】

さらに、本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、前記回転体を回転駆動する誘導モータと、該誘導モータの通電状態を制御するモータ制御手段とを備え、前記振動検出手段で前記所定の物理量を検出するとき、前記モータ制御手段は前記誘導モータを無通電とすることを特徴とする。

10

【0056】

一般に、モータが界磁手段として永久磁石を使用する場合には、永久磁石の減磁現象などの不確定な特性変化により、回転体に及ぼす力を正確に把握することは困難である。

しかしながら、モータとして永久磁石を有しない誘導モータを使用することで、振動検出手段で所定の物理量を検出するときに、誘導モータを無通電にして誘導モータが回転体に及ぼす力の影響をゼロにすることができる。

このことにより、所定の物理量を精度良く検出することができる。

20

【0057】

さらに、本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、前記回転体の回転周波数に追従して、該周波数成分を除去する回転周波数追従型ノッチフィルタを備え、前記加速度等は、前記減算結果が前記回転周波数追従型ノッチフィルタを通過した結果であることを特徴とする。

【0058】

回転体に作用する不釣り合い力は、周波数を回転体の回転周波数とする正弦波に近似される。そこで、回転体の回転周波数に追従して、この周波数成分を除去する回転周波数追従型ノッチフィルタを設けることにより、回転体の回転周波数付近の結果を考慮せずに、装置固定部及び／又はステータ部の加速度等を検出することができる。

30

このことにより、回転体の回転周波数付近に不感帯が生じるものの、その他の周波数帯域では、不釣り合い力の影響を取り除いて装置固定部及び／又はステータ部の加速度等を精度良く算出することができる。

なお、回転周波数とは、1秒間の回転回数をいう。

【0059】

さらに、本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、前記加速度等が通過するローパスフィルタを備えて構成した。

【0060】

加速度等が通過するローパスフィルタを備えることで、ラプラス領域においては厳密にプロパーな式で演算することが可能となる。

40

このことにより、演算の過程において微分器を必要としないため、装置固定部及び／又はステータ部の加速度等に基づいて振動抑制制御を行うフィードバック制御系の安定性を向上させることができ、かつノイズを低減することができる。

【0061】

さらに、本発明は、振動抑制機能を有する磁気軸受装置に関し、前記振動検出手段の出力にゲイン調整及び／又は位相補償と、PID制御と、その他の制御補償のいずれか少なくとも一つの制御補償を施す振動抑制制御補償手段を備えて構成した。

【0062】

振動抑制制御補償手段は、振動検出手段の出力信号にゲイン調整及び／又は位相補償を施す補償器であっても良いし、PID制御補償器、又は、最適制御補償器、H_∞制御補償器

50

、スライディングモード制御補償器等のその他の方式の制御補償器であっても良い。また、これらの補償器のうちのいずれか少なくとも二つを組み合わせ構成しても良い。

このことにより、装置固定部及び／又はステータ部の振動を発散させることなく、効果的に抑制することができる。

【 0 0 6 3 】

さらに、本発明は、振動推定機能を有する磁気軸受装置に関し、回転体と、該回転体に浮上力を作用させる電磁石と、該電磁石が固設されたステータ部と、前記回転体の前記ステータ部に対する径方向及び／又は軸方向の相対変位を検出する変位検出手段と、該変位検出手段が検出した変位に基づいて前記浮上力の調整量を算出する磁気軸受制御補償器と、該磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に対応して前記浮上力を調整する電磁石制御手段と、前記ステータ部に対する相対位置が固定された装置固定部の所定の物理量を検出する振動検出手段とを備え、前記所定の物理量は、前記装置固定部及び／又は前記ステータ部の加速度、該加速度を所要回数だけ微分又は積分した変位、速度及び加加速度等のうちの少なくとも一つであり、前記加速度は、前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位のラプラス変換と所定の伝達関数とを乗算した第1の乗算結果を時間領域に変換した変換結果であることを特徴とする。

10

【 0 0 6 4 】

さらに、本発明は、振動推定機能を有する磁気軸受装置に関し、回転体と、該回転体に浮上力を作用させる電磁石と、該電磁石が固設されたステータ部と、前記回転体の前記ステータ部に対する径方向及び／又は軸方向の相対変位を検出する変位検出手段と、該変位検出手段が検出した変位に基づいて前記浮上力の調整量を算出する磁気軸受制御補償器と、該磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果に対応して前記浮上力を調整する電磁石制御手段と、前記ステータ部に対する相対位置が固定された装置固定部の所定の物理量を検出する振動検出手段とを備え、前記所定の物理量は、前記装置固定部及び／又は前記ステータ部の加速度、該加速度を所要回数だけ微分又は積分した変位、速度及び加加速度等のうちの少なくとも一つであり、前記加速度は、前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果と、前記回転体の質量の逆数とを乗算した第3の乗算結果から、前記変位検出手段で検出された前記回転体の相対変位を2階微分した結果を減算した減算結果であることを特徴とする。

20

【 0 0 6 5 】

さらに、本発明は、振動推定機能を有する磁気軸受装置に関し、前記電磁石と前記回転体の間に発生する磁束の変動量を検出する磁束検出手段を備え、前記第3の乗算結果として、前記磁気軸受制御補償器による前記浮上力の調整量の算出結果の代わりに、前記磁束検出手段で検出された磁束の変動量に比例する値を用いた乗算結果を用いることを特徴とする。

30

【 0 0 6 6 】

さらに、本発明は、振動抑制機能を有するポンプ装置に関し、磁気軸受装置が搭載された真空ポンプであって、該真空ポンプは、被対象設備に設置され、該被対象設備から所定のガスを吸引することを特徴とする。

【 0 0 6 7 】

真空ポンプは、被対象設備に設置されており、かつ、振動抑制機能を有する磁気軸受装置を搭載している。

40

このことにより、新たな振動センサを配設することなく、ポンプ装置の低振動化を実現することが可能である。

【 0 0 6 8 】

さらに、本発明は、振動推定機能を有するポンプ装置に関し、磁気軸受装置が搭載された真空ポンプであって、該真空ポンプは、被対象設備に設置され、該被対象設備から所定のガスを吸引することを特徴とする。

【 0 0 6 9 】

このことにより、新たな振動センサを配設することなく、ポンプ装置の振動推定を実現す

50

ることが可能である。

【 0 0 7 0 】

【 発明の実施の形態 】

以下、本発明の第 1 実施形態について説明する。図 1 に、本発明の第 1 実施形態である装置システム全体の構成図を示す。なお、図 1 1 と同一要素のものについては同一符号を付して説明は省略する。

図 1 に示す制御装置 5 0 0 は、磁気軸受フィードバック制御手段を備えた従来の制御装置 2 0 0 に加えて、振動検出手段としての振動検出器 5 0 3、振動抑制制御補償手段としての振動抑制制御補償器 5 0 4 及び加算手段としての加算器 5 0 5 を備えている。

【 0 0 7 1 】

振動検出器 5 0 3 は、ターボ分子ポンプ本体 1 0 0 の各回転体位置センサ 1 0 7 , 1 0 8 , 1 0 9 から出力された変位信号を入力としている。

また、振動検出器 5 0 3 では、回転体 1 0 3 の変位のラプラス変換と所定の伝達関数とを乗算した第 1 の乗算結果と、回転体 1 0 3 に作用する不釣り合い力の変動分のラプラス変換と回転体 1 0 3 の質量の逆数とを乗算した第 2 の乗算結果とを加算した結果を時間領域に変換し、この変換結果を、装置固定部 6 0 0 の加速度信号として出力するようになっている。

【 0 0 7 2 】

また、振動検出器 5 0 3 内には、伝達関数の算出のために必要なパラメータが予め決められており（あるいは予め測定されており）、図示しない記憶装置等に保存されている。そして、振動検出器 5 0 3 の出力信号は、装置固定部 6 0 0 の加速度として、振動抑制制御補償器 5 0 4 へ出力されている。

なお、装置固定部 6 0 0 とは、チャンバ 3 0 0 及びターボ分子ポンプ本体 1 0 0 のうち回転体 1 0 3 を除いた部分のことをいう。

【 0 0 7 3 】

振動抑制制御補償器 5 0 4 は、振動検出器 5 0 3 から出力された加速度信号に、所定の周波数特性を持つ増幅率を掛け合わせてゲインを調節し、装置固定部 6 0 0 の発散又は発振を防止するために、位相補償を行うようになっている。

【 0 0 7 4 】

加算器 5 0 5 には、補償器 2 0 1 の出力信号である位置制御力指令信号と、振動抑制制御補償器 5 0 4 の出力信号である加速度調節信号とが入力されている。そして、加算器 5 0 5 は、装置固定部 6 0 0 の振動を抑制できるように、加速度調節信号の正負（+ - ）の極性を反転させ、位置制御力指令信号に加算するようになっている。

【 0 0 7 5 】

そして、加算器 5 0 5 の加算結果である制御力指令値は、電磁石制御手段としてのアンプ 2 0 2 に出力されるようになっている。この結果、アンプ 2 0 2 からは、電磁石 1 0 4 , 1 0 5 , 1 0 6 A , 1 0 6 B を介して、回転体 1 0 3 に浮上支持力が作用されるようになっている。このとき、電磁石 1 0 4 , 1 0 5 , 1 0 6 A , 1 0 6 B（すなわち、装置固定部 6 0 0）は浮上支持力の反力を受けるが、その反力には装置固定部 6 0 0 の振動を抑制する力が含まれているため、この力によって装置固定部 6 0 0 の振動が抑制されるようになっている。

【 0 0 7 6 】

また、図 1 に示す装置システムは、図 1 1 に示す装置システムと異なり、ターボ分子ポンプ本体 1 0 0 とチャンバ 3 0 0 との間には、ポンプ固定部 3 0 4 が介設されている。

【 0 0 7 7 】

このポンプ固定部 3 0 4 は、円筒状の固定柱 3 0 5 を備えており、ターボ分子ポンプ本体 1 0 0 をチャンバ 3 0 0 に固定するものである。

このとき、固定柱 3 0 5 は、その一端が、図示しないフランジを介してチャンバ 3 0 0 に締結固定され、その他端は、フランジ 3 0 3 を介してターボ分子ポンプ本体 1 0 0 の吸気口 1 0 1 と締結固定されている。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 8 】

次に、第 1 実施形態である装置システムの作用について説明する。

まず、装置固定部 6 0 0 の加速度を導出する方法について説明する。この加速度の導出方法を説明するにあたり、装置システム全体のブロック図を図 2 に示す。なお、図 1 と同一要素のものについては同一符号を付して説明は省略する。

【 0 0 7 9 】

図 2 に示す装置用ダンパ 4 0 1 は、その機能を、ばね定数 k_s を有する弾性体 4 0 1 a と、粘性係数 c_s を有する粘性抵抗 4 0 1 b とでモデル化することができる。

また、ターボ分子ポンプ本体 1 0 0 の回転体 1 0 3 は、各電磁石 1 0 4 , 1 0 5 , 1 0 6 A , 1 0 6 B により浮上支持されている。

10

【 0 0 8 0 】

この浮上支持の剛性は、ラプラス領域においては、径方向では、回転体 1 0 3 の装置固定部 6 0 0 に対する径方向変位のラプラス変換を入力とし、電磁石 1 0 4 , 1 0 5 から回転体 1 0 3 に作用する力の変動分のラプラス変換を出力とする伝達関数 $F_r(s)$ で表される。

【 0 0 8 1 】

また、軸方向では、回転体 1 0 3 の装置固定部 6 0 0 に対する軸方向変位のラプラス変換を入力とし、電磁石 1 0 6 A , 1 0 6 B から回転体 1 0 3 に作用する力の和の変動分のラプラス変換を出力とする伝達関数 $F_a(s)$ で表される。

従って、これらの伝達関数 $F_r(s)$, $F_a(s)$ は、制御装置 5 0 0 の補償器 2 0 1 やアンプ 2 0 2 等から構成される磁気軸受フィードバック制御手段固有の伝達関数であるといえる。

20

【 0 0 8 2 】

さらに、ターボ分子ポンプ本体 1 0 0 は、従来と異なり、チャンバ 3 0 0 に固定されているので、装置固定部 6 0 0 すなわちチャンバ 3 0 0 及びターボ分子ポンプ本体 1 0 0 のうち回転体 1 0 3 を除いた部分は一体として考えることができる。

以上により、床 4 0 0 と、装置固定部 6 0 0 と、回転体 1 0 3 との間の運動モデルは、径方向、軸方向ともに図 3 に示すようなモデルで表現することができる。

【 0 0 8 3 】

図 3 において、変位 $x_b(t)$ は、床 4 0 0 の絶対変位を表している。そして、変位 $x_s(t)$ は、装置固定部 6 0 0 の絶対変位を示し、変位 $x_r(t)$ は、回転体 1 0 3 の絶対変位を示している。

30

また、質量 m_s は、装置固定部 6 0 0 の質量を表し、質量 m_r は、回転体 1 0 3 の質量を表している。

【 0 0 8 4 】

さらに、外乱力 $b_p(t)$ は、装置固定部 6 0 0 に作用する外乱力を示している。外乱力 $b_p(t)$ としては、例えば、ターボ分子ポンプ本体 1 0 0 に接続されたドライポンプから伝わる振動等が考えられる。

【 0 0 8 5 】

また、不釣り合い力 $u_b(t)$ は、回転体 1 0 3 の形状中心軸と慣性中心軸の位置ずれに起因して発生する不釣り合い力を示す。

40

【 0 0 8 6 】

ここで、装置固定部 6 0 0 に対する回転体 1 0 3 の相対変位を相対変位 $y(t)$ とおくと、この相対変位 $y(t)$ は、数 1 のように定義される。

【 0 0 8 7 】

【 数 1 】

$$y(t) = x_r(t) - x_s(t)$$

【 0 0 8 8 】

さらに、図 2 において、回転体 1 0 3 が、装置固定部 6 0 0 から浮上支持されていること

50

を、相対変位 $y(t)$ と、電磁石 104, 105 又は電磁石 106A, 106B が回転体 103 に作用する力との関係として、関数 f を定義すると、回転体 103 の運動方程式は数 2 のように表現される。

【0089】

【数 2】

$$-m_r \cdot \ddot{x}_r(t) - f(y(t)) + u_b(t) = 0$$

【0090】

また、数 2 は数 1 を導入することにより数 3 のように表される。

【0091】

【数 3】

$$-m_r \{ \ddot{y}(t) + \ddot{x}_s(t) \} - f(y(t)) + u_b(t) = 0$$

【0092】

ここで、 $f(y(t))$ は $y(t)$ の線形方程式で表されるので、初期値を 0 として数 3 をラプラス変換すると、数 4 が得られる。なお s はラプラス演算子である。

【0093】

【数 4】

$$s^2 X_s(s) = -\frac{m_r \cdot s^2 + F(s)}{m_r} Y(s) + \frac{1}{m_r} U_b(s)$$

【0094】

数 4 の左辺はラプラス領域における装置固定部 600 の加速度を表し、数 4 の両辺を時間領域に変換することで、装置固定部 600 の加速度を求めることができる。

【0095】

ここで、相対変位 $y(t)$ は、各回転体位置センサ 107, 108, 109 によって検出され、不釣り合い力 $u_b(t)$ は、例えば「不釣り合い補償機能を備えた磁気軸受制御系の構成」(水野・樋口 計測自動制御学会論文集, 20, 12, p1095) や「弾性ロータのフィードフォワード形不釣り合い力相殺制御」(日本機械学会論文集(C編), 56, 528(1990) pp. 2056 - 2064) に開示されているように、オブザーバを構成することにより、磁気軸受が回転体 103 を浮上支持する制御力と各回転体位置センサ 107, 108, 109 によって検出された回転体 103 の変位から推定することができる。

【0096】

なお、これらの例は、オブザーバにより回転体 103 に作用する不釣り合い力を推定し、フィードフォワード制御により回転体 103 に作用する不釣り合い力を相殺することで、回転体 103 の振動を抑制しようとするものであるが、本発明は、数 4 又は後述する数 5 を時間領域に変換した結果に基づく計算により、装置固定部 600 の加速度を求め、この加速度を抑制するように制御するものであって、これらの例とは制御対象と制御方法が異なる。また、これらの例は回転体 103 の振動を抑制するのに対し、本発明は、敢えて回転体 103 を振動させ、その振動によって装置固定部 600 に作用する力を利用して、装置固定部 600 の振動を抑制するものである。

【0097】

また、数 4 又は数 5 から明らかなように、装置固定部 600 の加速度は、装置固定部 600 側の状態にはよらず、ターボ分子ポンプ本体 100 側に存在するパラメータと、各回転体位置センサ 107, 108, 109 の検出した変位信号から求められる。

【0098】

次に、算出した装置固定部 600 の加速度に基づいて、装置固定部 600 の振動を抑制するための動作を説明する。

10

20

30

40

50

制御装置 500 の振動検出器 503 は、数 4 の両辺を時間領域に変換した結果の計算を行うことにより、装置固定部 600 の加速度を求め、この加速度の信号を出力する。

【0099】

この信号は、振動抑制制御補償器 504 に入力され、ここで補償器 201 の出力へ加算する際のゲインが調節される。また、振動抑制制御補償器 504 では、制御装置 500 と振動抑制制御補償器 504 とターボ分子ポンプ本体 100 とがフィードバック制御系を構成しているため、装置固定部 600 が発散又は発振しないように、加速度信号に対して、位相補償等の対策を取る。

【0100】

そして、振動抑制制御補償器 504 から出力された加速度調節信号は、加算器 505 に送られ、ここで装置固定部 600 の振動を抑制するように正負 (+ -) の極性を反転して、補償器 201 の出力である位置制御力指令信号へ加算される。

10

【0101】

この加算結果である制御力指令値は、アンプ 202 に出力され、アンプ 202 は、加算器 505 からの制御力指令値に基づいて、電磁石 104, 105, 106A, 106B を励磁し回転体 103 を浮上支持する。このとき、電磁石 104, 105, 106A, 106B (すなわち、装置固定部 600) は、回転体 103 に作用させる浮上支持力の反力を受けるが、この反力には装置固定部 600 の振動を抑制する力が含まれているため、この力によって装置固定部 600 の振動が抑制される。

このように、装置固定部 600 の加速度に対して、この加速度を抑制する力を、電磁石 104, 105, 106A, 106B に作用する浮上支持力の反力に発生させることで、装置固定部 600 の振動を抑制することができる。

20

【0102】

以上により、ターボ分子ポンプ本体 100 及び制御装置 500 は、装置システム全体の振動を抑制することが可能である。

【0103】

そして、この振動抑制は、チャンバ 300 に新たな振動検出センサ等を設置することなく、各回転体位置センサ 107, 108, 109 の変位信号とターボ分子ポンプ本体 100 側のパラメータのみを利用して達成することができる。

よって、新たなセンサを配設することなく、真空ポンプの被対象設備を含めた装置システム全体の低振動化を実現することが可能である。

30

【0104】

なお、本実施形態においては、振動検出器 503 は、数 4 を時間領域に変換した結果の計算を行うことにより装置固定部 600 の加速度を求めるとして説明してきたが、これに限られるものではない。

すなわち、回転体 103 に作用する不釣り合い力 $u_b(t)$ が装置固定部 600 の加速度に及ぼす影響を無視する場合には、回転体 103 の変位のラプラス変換と所定の伝達関数とを乗算した乗算結果を時間領域に変換した変換結果、例えば、以下に示す数 5 の両辺を時間領域に変換した結果の計算を行うことにより装置固定部 600 の加速度を求めても良い。

40

【0105】

【数 5】

$$s^2 X_s(s) = - \frac{m_r \cdot s^2 + F(s)}{m_r} Y(s)$$

【0106】

また、本実施形態においては、振動抑制制御補償器 504 は、振動検出器 503 の出力信号にゲイン調整と位相補償を施すように構成したが、これに限られるものではなく、P I D 制御補償器、又は、最適制御補償器、H 制御補償器、スライディングモード制御補償

50

器等のその他の方式の補償器であっても良いし、これらの補償器のいずれか少なくとも二つを組み合わせ構成しても良い。また、補償器 201 の制御対象である回転体 103 の変位と、振動抑制制御補償器 504 の制御対象である装置固定部 600 の加速度が発散又は発振しなければ、振動抑制制御補償器 504 を備えなくても良い。

【0107】

さらに、本実施形態において、加算器 505 は、補償器 201 の出力信号に振動抑制制御補償器 504 が出力する加速度調節信号を正負(+)の極性を反転して加算し、その加算結果である制御力指令値をアンプ 202 に出力するとして説明してきたが、これに限られるものではない。加算器 505 は、制御装置 500 のフィードバック制御ループ上の伝達信号であれば、どの信号に加算しても良い。

10

【0108】

例えば、加算器 505 は、各回転体位置センサ 107, 108, 109 と補償器 201 との間に接続されて、各回転体位置センサ 107, 108, 109 の変位信号に、振動抑制制御補償器 504 が出力する加速度調整信号を正負(+)の極性を反転して加算し、その加算結果を補償器 201 に出力しても良い。このとき、振動抑制制御補償器 504 は、加算器 505 によって加速度調整信号が正負(+)の極性を反転して加算されるフィードバック制御ループ上の伝達信号に応じた制御補償を行う。

【0109】

また、上述のように、加算器 505 を各回転体位置センサ 107, 108, 109 と補償器 201 との間に接続した場合、通常、補償器 201 は、信号のゲイン調整やその位相補償、PID 制御補償、又は、最適制御補償、H 制御補償、スライディングモード制御補償等のその他の制御補償を行うための機能を備えている。このため、振動抑制制御補償器 504 が行っていた機能を補償器 201 内に容易に組み込むことができる。

20

【0110】

さらに、本実施形態は、いわゆる 5 軸制御の磁気軸受に用いられる場合に限られず、3 軸、1 軸制御の磁気軸受に対して用いても良い。例えば 1 軸制御の場合、制御機能を有する電磁石も 1 軸分しか存在しないので、装置固定部 600 が振動したときに、その振動を抑制する力を作用させることができる方向が、その電磁石で制御できる 1 方向となる。

【0111】

また、本実施形態では、装置固定部 600 の加速度を算出することで、装置固定部 600 の振動を抑制していたが、これを装置固定部 600 の加加速度、速度、位置等のように加速度を所要回数だけ微分又は積分した結果に相当する物理量を算出することで達成しても良い。

30

【0112】

次に、本発明の第 2 実施形態について説明する。

第 1 実施形態である装置システムでは、電磁石 104, 105 又は電磁石 106A, 106B が回転体 103 に作用する力を求めるに際し、伝達関数 $F_r(s)$, $F_a(s)$ を計算していたが、本実施形態である装置システムでは、伝達関数 $F_r(s)$, $F_a(s)$ の計算を行う代わりに、加算器 505 から出力された制御力指令値等を用いるものである。

【0113】

図 4 に、本発明の第 2 実施形態である装置システム全体の構成図を示す。なお、図 1 と同一要素のものについては同一符号を付して説明は省略する。

40

図 4 に示す制御装置 550 は、第 1 実施形態の振動検出器 503 に代えて、振動検出手段及びモータ制御手段としての振動検出/モータ制御器 553 を備えている。

【0114】

この振動検出/モータ制御器 553 には、加算器 505 の出力である制御力指令値が入力されるようになっている。そして、振動検出/モータ制御器 553 では、装置固定部 600 の加速度を求める際に、この制御力指令値を使用するようになっている。

【0115】

また、本実施形態のターボ分子ポンプ本体 150 では、第 1 実施形態で用いられていた永

50

久磁石を有するモータ 1 2 1 の代わりに、誘導モータ 1 7 1 が使用されている。そして、この誘導モータ 1 7 1 には、振動検出 / モータ制御器 5 5 3 から無通電信号が出力されており、誘導モータ 1 7 1 は、振動検出 / モータ制御器 5 5 3 で装置固定部 6 0 0 の加速度の算出が行われる期間中、無通電状態（フリーラン）とされるようになっている。

【 0 1 1 6 】

さらに、振動検出 / モータ制御器 5 5 3 には、回転体 1 0 3 に作用する不釣り合い力 $u_b(t)$ による誤差を低減するための回転周波数追従型ノッチフィルタ 8 0 6 が設けられている（詳細は後述する）。

【 0 1 1 7 】

なお、本実施形態の振動検出 / モータ制御器 5 5 3 には、加算器 5 0 5 から出力される制御力指令値の代わりに、回転体 1 0 3 と、電磁石 1 0 4 , 1 0 5 又は電磁石 1 0 6 A , 1 0 6 B との間に発生する磁束の変動量を示す磁束検出信号が入力されても良い。そして、この磁束の変動量に基づいて、装置固定部 6 0 0 の加速度を求めても良い。

【 0 1 1 8 】

この場合には図 5 に示すように、ターボ分子ポンプ本体 1 5 0 に、回転体 1 0 3 と電磁石 1 0 4 , 1 0 5 又は電磁石 1 0 6 A , 1 0 6 B との間に発生する磁束の変動量を検出する磁束検出器 1 8 1 を設け、この検出結果を振動検出 / モータ制御器 5 5 3 に出力するようにすれば良い。

【 0 1 1 9 】

次に、第 2 実施形態である装置システムの作用について説明する。

まず、装置固定部 6 0 0 の加速度を導出する方法について説明する。

この加速度の導出方法を説明するにあたり、装置システム全体のブロック図は、第 1 実施形態で説明した図 2 と同様である。そして、このブロック図に基づいて運動モデルを構成すると、図 6 のようになる。

【 0 1 2 0 】

このとき、図 6 において、第 1 実施形態である運動モデル（図 3）との対比を行うと以下のようになる。

まず、第 1 実施形態である運動モデルでは、相対変位 $y(t)$ と、電磁石 1 0 4 , 1 0 5 又は電磁石 1 0 6 A , 1 0 6 B が回転体 1 0 3 に作用させる力との関係として関数 f_r , f_a を定義していたが、本実施形態ではこれらの関数 f_r , f_a は定義されていない。その代わりに、本実施形態では電磁石 1 0 4 , 1 0 5 又は電磁石 1 0 6 A , 1 0 6 B が回転体 1 0 3 に及ぼす力として、磁気軸受の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ そのものが定義されている。

【 0 1 2 1 】

また、第 1 実施形態である運動モデルでは考慮されていなかったが、本実施形態の運動モデルでは、誘導モータ 1 7 1 が回転体 1 0 3 に及ぼす力としてモータ力 $f_{mt}(t)$ が考慮されている。

【 0 1 2 2 】

通常、第 1 実施形態のターボ分子ポンプ本体 1 0 0 であっても、モータ 1 2 1 の回転子側である永久磁石の S 極と N 極がロータ軸 1 1 3 の軸心を挟んで対向配置され、かつ固定子側である電磁石がロータ軸 1 1 3 の軸心を挟んで対向配置されていれば、回転体 1 0 3 には回転させるトルク成分のみが生じて、永久磁石の磁極とモータ 1 2 1 の電磁石との間に作用する力は、全て相殺されて 0 になる。従って、この場合にはモータ力 $f_{mt}(t)$ を考慮する必要はない。

【 0 1 2 3 】

しかしながら、実際には永久磁石の磁束の誤差や、固定子側の電磁石に対するロータ軸 1 1 3 の偏心等が起こり得る。そのため、これらの原因によりモータ力 $f_{mt}(t)$ はゼロにならない。従って、装置固定部 6 0 0 の加速度の算出における誤差を小さくするためには、このモータ力 $f_{mt}(t)$ の影響を考慮することが望ましい。

【 0 1 2 4 】

10

20

30

40

50

さらに、本実施形態の運動モデルでは、不釣り合い力 $u_b(t)$ は角速度が回転体 103 の回転角速度 と等しい正弦波に近似される（以下、不釣り合い力 $u_b(t)$ と示す）。この不釣り合い力 $u_b(t)$ は、上述したように回転体 103 の形状中心軸と慣性中心軸の位置ずれに起因して発生する不釣り合い力であるため、このように角速度 の正弦波に近似することが可能となっている。

【0125】

そこで、回転体 103 が装置固定部 600 から浮上支持されていることについて、回転体 103 の運動方程式を求めると数 6 のようになる。

【0126】

【数 6】

$$-m_r \ddot{x}_r(t) + f_{mb}(t) + f_{mt}(t) + u_b(\omega t) = 0$$

【0127】

また、数 6 は、数 1 で定義した相対変位 $y(t)$ を導入することにより数 7 のように表される。

【0128】

【数 7】

$$-m_r \{\ddot{y}(t) + \ddot{x}_s(t)\} + f_{mb}(t) + f_{mt}(t) + u_b(\omega t) = 0$$

【0129】

さらに、数 7 は若干の変形を加えることで数 8 のように表される。

【0130】

【数 8】

$$\ddot{x}_s(t) = (1/m_r) \{f_{mb}(t) + f_{mt}(t) + u_b(\omega t)\} - \ddot{y}(t)$$

【0131】

ここで、数 8 に示された磁気軸受の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ 、モータ力 $f_{mt}(t)$ 、不釣り合い力 $u_b(t)$ について考察する。

まず、磁気軸受の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ について考察する。

上述したように、第 1 実施形態では相対変位 $y(t)$ と、電磁石 104, 105 又は電磁石 106 A, 106 B が回転体 103 に作用させる力との関係として、関数 f_r, f_a を定義していた。そして、この関数 f_r, f_a をラプラス領域に変換し、伝達関数 $F_r(s), F_a(s)$ 等からラプラス領域における装置固定部 600 の加速度を求め、さらにこれを時間領域に変換することで、装置固定部 600 の加速度を求めていた。

【0132】

しかしながら、伝達関数 $F_r(s), F_a(s)$ の算出のために必要なパラメータは予め決められるか、測定される必要があり、かつこれらを振動検出器 503 内に記憶しておく必要があった。また、伝達関数 $F_r(s), F_a(s)$ の演算はそれ自体複雑であるため、高速な演算器が必要であった。

【0133】

これに対し、本実施形態では、伝達関数 $F_r(s), F_a(s)$ の計算を行う代わりに、磁気軸受の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ そのものを定義し、この浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ として加算器 505 から出力された制御力指令値を使用している。そのため、装置固定部 600 の加速度の算出にあたり、既知となる制御力指令値を用いているので、安価な演算器でも十分に使用に耐えられる。

【0134】

ところで、このように制御力指令値を磁気軸受の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ とみなして演算を行う場合、この制御力指令値と実際の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ との間の誤差が問題となり得る。しかしながら、ロータ軸 113 に対して直角な平面上において、電磁石を回転体 103 を挟んで対向配置し、制御装置 550 として、電磁石 104, 105 又は電磁

10

20

30

40

50

石 106A, 106B から発生される磁束の変動量が加算器 505 から出力される制御力指令値に高速に追従するような高ゲイン磁束フィードバック制御器を使用することで、かかる問題は解消される。

【0135】

この高ゲイン磁束フィードバック制御器のブロック線図を図 7 に示す。図 7 において、 $F_r(s)$ は、制御力指令値 $f_r(t)$ の変動分のラプラス変換である。また、 $V_m(s)$ は、磁束指令値 $v_m(t)$ の変動分のラプラス変換であり、 $I_m(s)$ は、電磁石電流値 $I_m(t)$ の変動分のラプラス変換であり、 $m(s)$ は、電磁石の磁束 $m(t)$ の変動分のラプラス変換である。さらに、 $F_{mb}(s)$ は、電磁石の制御力 $f_{mb}(t)$ の変動分のラプラス変換であり、 $X(s)$ は、電磁石と回転体の隙間の変動分のラプラス変換である。また、 R は、電磁石のコイルの抵抗であり、 L は、電磁石のインダクタンスである。

10

【0136】

ここに、ゲイン K_2 を “ $L \cdot s + R$ ” と比較して非常に大きくすることで、磁束指令値 $v_m(t)$ と、電磁石 104, 105 又は電磁石 106A, 106B から発生される制御磁束 $m(t)$ は、一対一に対応するようになる。また、磁束 $m(t)$ の変動分は、浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ と比例関係を保ち、比例ゲイン K_1 をこの比例定数 K_4 の逆数とすれば、制御力指令値 $f_r(t)$ は浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ と一対一に対応するようになる。以上により、制御力指令値と実際の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ との間の誤差を低減することが可能である。

20

【0137】

次に、モータ力 $f_{mt}(t)$ について考察する。

上述したように、本実施形態においては装置固定部 600 の加速度の算出に際し、モータ力 $f_{mt}(t)$ を考慮している。

しかしながら、このモータ力 $f_{mt}(t)$ を正確に把握することは困難である。

【0138】

そこで、本実施形態では、永久磁石からなるモータ 121 の代わりに、誘導モータ 171 を使用している。そして、回転体位置センサ 107, 108, 109 が回転体 103 の位置を検出し、装置固定部 600 の加速度の算出を行う期間中は誘導モータ 171 を無通電状態とすることで、モータ力 $f_{mt}(t)$ の影響をゼロにしている。この点、第 1 実施形態のように永久磁石からなるモータ 121 を用いた場合には、この永久磁石による磁束の影響をゼロにできないので、モータ力 $f_{mt}(t)$ の影響を常に考慮する必要がある。

30

【0139】

なお、誘導モータ 171 を無通電状態とする期間は、以下のように決めることが望ましい。例えば、ターボ分子ポンプ本体 150 が電子顕微鏡等の設備に用いられる場合、電子顕微鏡により撮像が行われる時間、すなわち振動の抑制が最も望まれる期間は、数秒程度である。従って、誘導モータ 171 を無通電状態とする期間としては、数十秒～1分程度の時間があれば十分である。

【0140】

一方、この期間中、回転体 103 に対しては誘導モータ 171 から回転力が与えられないため、回転体 103 の失速が問題となり得る。しかしながら、回転体 103 は慣性モーメントが大きいので、数十秒～1分程度の時間では回転速度が大きく失速することはない。また、撮像を行うまでに十分にチャンバ 300 内のガス吸引が行われていると考えれば、この期間中のガス負荷による回転速度の低下もほとんど起こり得ない。従って、回転体 103 の位置を検出し、装置固定部 600 の加速度の算出を行う期間中に、誘導モータ 171 を無通電状態とすることによる不都合は考えられない。

40

【0141】

そこで、装置システムの振動抑制を行う期間中に誘導モータ 171 を無通電状態とすることで、数 8 中のモータ力 $f_{mt}(t)$ をゼロとした式により、装置固定部 600 の加速度の算出が行われる。

【0142】

50

続いて、不釣り合い力 $u_b(t)$ について考察する。

上述したように、不釣り合い力 $u_b(t)$ は、オブザーバを構成することで、磁気軸受の浮上力の調整量と回転体位置センサが出力する回転体の変位の情報から推定することが可能である。

しかしながら、このようなオブザーバ理論に基づく計算は、複雑になるおそれがある。

【0143】

一方、不釣り合い力 $u_b(t)$ は、回転体 103 の回転角速度 ω を角速度とする正弦波に近似される。そのため、この不釣り合い力 $u_b(t)$ をゼロと仮定して装置固定部 600 の加速度を算出しても、これによる演算誤差は、回転体 103 の回転角速度 ω の周波数に限定され、その他の周波数帯域では装置固定部 600 の加速度を精度良く算出することができる。また、この不釣り合い力 $u_b(t)$ による回転体 103 の振れも、回転角速度 ω の周波数に限定されたものとなる。

10

【0144】

従って、上述したような誘導モータ 171 を無通電状態とした状態での装置固定部 600 の加速度の演算結果を、回転周波数追従型ノッチフィルタ 806 に通すことで、回転体 103 の回転角速度 ω の周波数付近の演算結果を考慮しないようにすることができる。これにより、回転体 103 の回転角速度 ω の周波数付近に不感帯が生じるものの、その他の周波数帯域では装置固定部 600 の加速度を精度良く算出することができる。

【0145】

ここで、回転周波数追従型ノッチフィルタ 806 の原理について詳細に説明する。

20

まず、回転体 103 の装置固定部 600 に対する振れ x_d は、フーリエ級数展開することで、数 9 のように表される。

【0146】

【数 9】

$$x_d = x_r - x_s$$

$$= R_r(\omega t) + E_r - \{R_s(\omega t) + E_s\}$$

$$= A_r \sin(\omega t + \varphi_r) + E_r - \{A_s \sin(\omega t + \varphi_s) + E_s\}$$

30

【0147】

但し、 $R_r(t)$ は回転体 103 の振れの回転体 103 の回転周波数成分（不釣り合い力 u_b により生じる）、 ω は回転体 103 の回転角速度、 t は時間、 E_r は回転体 103 の振れの回転体 103 の回転周波数以外の周波数成分、 $R_s(t)$ は装置固定部 600 の変位の回転体 103 の回転周波数成分、 E_s は装置固定部 600 の変位の回転体 103 の回転周波数以外の周波数成分、 A_r は $R_r(t)$ の振幅、 φ_r は $R_r(t)$ の位相、 A_s は $R_s(t)$ の振幅、 φ_s は $R_s(t)$ の位相を表す。

【0148】

このとき、回転体 103 の装置固定部 600 に対する振れ x_d は、各回転体位置センサ 107, 108, 109 によって検出される。また、回転体 103 の回転角速度 ω は、モータ 121 等に設けられた回転数センサ等によって検出される。

40

【0149】

そして、この回転体位置センサ 107, 108, 109 により検出された回転体 103 の検出信号 x_d に対し、以下のような演算処理を行う。

まず、検出信号 x_d に対し、 $\sin(\omega t)$, $\cos(\omega t)$ を乗算することで、数 10、数 11 を得る。

【0150】

【数 10】

$$x_d \cdot \sin \omega t = A_r \sin(\omega t + \varphi_r) \sin \omega t + E_r \sin \omega t \\ - \{A_s \sin(\omega t + \varphi_s) \sin \omega t + E_s \sin \omega t\}$$

【 0 1 5 1 】

【 数 1 1 】

$$x_d \cdot \cos \omega t = A_r \sin(\omega t + \varphi_r) \cos \omega t + E_r \cos \omega t \\ - \{A_s \sin(\omega t + \varphi_s) \cos \omega t + E_s \cos \omega t\}$$

10

【 0 1 5 2 】

また、数 1 0、数 1 1 に対し三角関数の加法定理を導入することで、数 1 2、数 1 3 を得る。

【 0 1 5 3 】

【 数 1 2 】

$$x_d \cdot \sin \omega t = 1/2 \cdot (A_r \cos \varphi_r - A_s \cos \varphi_s) \\ - 1/2 \cdot \{A_r \cos(2\omega t + \varphi_r) + A_s \cos(2\omega t + \varphi_s)\} \\ + (E_r - E_s) \sin \omega t$$

20

【 0 1 5 4 】

【 数 1 3 】

$$x_d \cdot \cos \omega t = 1/2 \cdot (A_r \sin \varphi_r - A_s \sin \varphi_s) \\ + 1/2 \cdot \{A_r \sin(2\omega t + \varphi_r) - A_s \sin(2\omega t + \varphi_s)\} \\ + (E_r - E_s) \cos \omega t$$

【 0 1 5 5 】

30

そして、数 1 2、数 1 3 をカットオフ周波数の低いローパスフィルタに通すと A C 成分が除去されて、数 1 4、数 1 5 を得る。

【 0 1 5 6 】

【 数 1 4 】

$$a_r = 1/2 \cdot (A_r \cos \varphi_r - A_s \cos \varphi_s)$$

【 0 1 5 7 】

【 数 1 5 】

$$b_r = 1/2 \cdot (A_r \sin \varphi_r - A_s \sin \varphi_s)$$

40

【 0 1 5 8 】

さらに、数 1 4、数 1 5 の a_r 、 b_r のそれぞれに $\sin(\quad t)$ 、 $\cos(\quad t)$ を乗算して加算し、かつ 2 倍に増幅することで、数 1 6 のように回転体 1 0 3 の装置固定部 6 0 0 に対する振れの回転体 1 0 3 の回転周波数成分 $R_r(\quad t) - R_s(\quad t)$ が得られる。

【 0 1 5 9 】

【 数 1 6 】

$$\begin{aligned}
2(a_r \sin \omega t + b_r \cos \omega t) &= A_r (\cos \varphi_r \cdot \sin \omega t + \sin \varphi_r \cdot \cos \omega t) \\
&\quad - A_s (\cos \varphi_s \cdot \sin \omega t + \sin \varphi_s \cdot \cos \omega t) \\
&= A_r \sin(\omega t + \varphi_r) - A_s \sin(\omega t + \varphi_s) \\
&= R_r(\omega t) - R_s(\omega t)
\end{aligned}$$

【 0 1 6 0 】

さらに、回転体位置センサ 1 0 7 , 1 0 8 , 1 0 9 による回転体 1 0 3 の検出信号 x_d から、数 1 6 の回転周波数成分 $R_r(t) - R_s(t)$ を減算することで、数 1 7 のように結果信号 x_o を得る。

10

【 0 1 6 1 】

【 数 1 7 】

$$\begin{aligned}
x_o &= x_d - \{R_r(\omega t) - R_s(\omega t)\} \\
&= R_r(\omega t) + E_r - \{R_s(\omega t) + E_s\} - \{R_r(\omega t) - R_s(\omega t)\} \\
&= E_r - E_s
\end{aligned}$$

20

【 0 1 6 2 】

そして、数 1 7 の結果信号 x_o を制御装置 5 5 0 の補償器 2 0 1 に出力することで、補償器 2 0 1 では、回転体 1 0 3 の装置固定部 6 0 0 に対する振れの回転体 1 0 3 の回転周波数以外の周波数成分 $E_r - E_s$ のみが認識される。

【 0 1 6 3 】

ここで、以上で説明した回転周波数追従型ノッチフィルタ 8 0 6 の原理を表したブロック図を図 8 に示す。

図 8 において、入力 7 0 1 が数 1 0、数 1 1 中の検出信号 x_d に対応する。また、サイン波 7 0 2、コサイン波 7 0 3 が数 1 0、数 1 1 で乗算された $\sin(t)$, $\cos(t)$ に対応する。そして、ローパスフィルタ 7 0 4、7 0 5 が数 1 2、数 1 3 を通すローパスフィルタに対応する。その結果、図 8 の出力 7 0 6 は数 1 6 で計算される回転体 1 0 3 の装置固定部 6 0 0 に対する変位の回転周波数成分 $R_r(t) - R_s(t)$ に対応するようになる。そして、入力 7 0 1 からこの出力 7 0 6 を減算することで(図示略)、数 1 7 の結果信号 x_o が得られる。

30

【 0 1 6 4 】

そこで、以上のような磁気軸受の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ 、モータ力 $f_{mt}(t)$ 、不釣り合い力 $u_b(t)$ についての考察結果に基づき、装置固定部 6 0 0 の加速度の算出を行う数 8 は、数 1 8 のように簡略化される。

【 0 1 6 5 】

【 数 1 8 】

$$\ddot{x}_s(t) = (1/m_r)f_{mb}(t) - \ddot{y}(t)$$

40

【 0 1 6 6 】

一方、数 1 8 は、初期値が 0 であるとすれば、ラプラス領域では数 1 9 のように表される。

【 0 1 6 7 】

【 数 1 9 】

$$s^2 X_s(s) = (1/m_r)F_{mb}(s) - s^2 Y(s)$$

【 0 1 6 8 】

50

ここで、数 19 の右辺第 2 項の $Y(s)$ にはラプラス演算子 s の二乗の係数が掛かっている。そのため、数 19 はプロパーな式ではなく（すなわち、分子のラプラス演算子 s の次数が分母のラプラス演算子 s の次数よりも大きく）、数 18 から明らかなように、この計算には相対変位 $y(t)$ を 2 階微分するための 2 次の微分器が必要となる。

【0169】

そして、演算の過程において微分器を必要とすると、周波数が高くなるに連れて高ゲインとなり、この演算結果を振動抑制制御補償器にフィードバック入力し、装置固定部 600 の振動を抑制しようとするれば、そのフィードバック制御系の安定性が損なわれるおそれがある。また、一般にノイズは高周波数帯域に生じる場合が多く、この微分器によりノイズが増幅される傾向にもある。

10

そのため、数 19 を厳密にプロパーな式（すなわち、分子のラプラス演算子 s の次数が分母のラプラス演算子 s の次数よりも小さい式）にすることが望ましい。そこで、数 19 の演算結果を 2 次のローパスフィルタに通すと、数 20 が得られる。なお、 ω_c は所定の定数である。

【0170】

【数 20】

$$s^2 X_s(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} \left\{ \frac{1}{m_r} F_{mb}(s) - s^2 Y(s) \right\}$$

20

【0171】

さらに、数 20 に変形を加えると数 21 が得られる。

【0172】

【数 21】

$$s^2 X_s(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} \left\{ \frac{1}{m_r} F_{mb}(s) + \omega_c^2 Y(s) \right\} \\ + \frac{2\zeta\omega_c s}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} \omega_c^2 Y(s) - \omega_c^2 Y(s)$$

30

【0173】

数 21 の右辺は全ての項について厳密にプロパーな式であり、この数 21 を、装置固定部 600 の加速度の算出に用いることで、振動抑制のためのフィードバック制御系の安定性を向上させることができ、かつノイズを低減することができる。

【0174】

なお、以上のような装置固定部 600 の加速度の算出方法を表したブロック図を図 9 に示す。

図 9 において、入力 801 が数 21 中の相対変位 $y(t)$ のラプラス変換 $Y(s)$ に対応する。また、入力 802 が数 21 中の磁気軸受の浮上力の調整量 $f_{mb}(t)$ のラプラス変換 $F_{mb}(s)$ に対応する。そして、ローパスフィルタ 803 は数 21 中の右辺第 3、4 項に掛かる係数であり、ローパスフィルタ 804 は右辺第 1、2 項に掛かる係数に対応する。従って、中間出力 805 が数 21 中の装置固定部 600 の加速度のラプラス変換 $s^2 X_s(s)$ に対応する。

40

さらに、この中間出力 805 を、上述で説明した回転周波数追従型ノッチフィルタ 806 に通すことで、図 9 の出力 807 は、数 18 で計算される装置固定部 600 の加速度のラプラス変換に対応するようになる。

【0175】

次に、算出した装置固定部 600 の加速度に基づいて、装置固定部 600 の振動を抑制す

50

るための動作を説明する。

本実施形態における振動抑制動作は、第1実施形態と同様であるが、振動検出/モータ制御器553から、誘導モータ171に対し無通電信号による制御が行われる点が異なっている。

【0176】

例えば、チャンバ300側から自動あるいは手動により、チャンバ300で電子顕微鏡による撮像等が行われる旨の信号が振動検出/モータ制御器553に入力されると(図示略)、この信号に基づき振動検出/モータ制御器553は誘導モータ171を無通電状態とする。

【0177】

そして、この誘導モータ171を無通電状態としている期間中、振動検出/モータ制御器553では装置固定部600の加速度の算出が行われ、加速度信号が振動抑制制御補償器504に出力される(以降は第1実施形態と同様である)。

これにより、装置固定部600の加速度に対して、この加速度を抑制する力を、電磁石104, 105, 106A, 106Bに作用する浮上支持力の反力に発生させることができるので、装置固定部600の振動を抑制することができる。

【0178】

一方、チャンバ300側から、電子顕微鏡による撮像等が終了した旨の信号が振動検出/モータ制御器553に入力されると(図示略)、この信号に基づき振動検出/モータ制御器553は誘導モータ171を通電させる。

これにより、誘導モータ171から回転体103に回転力が与えられ、磁気軸受は、回転体103に対して、例えば従来と同様の位置制御を行う。

【0179】

以上により、伝達関数 $F_r(s)$, $F_a(s)$ の計算を行う代わりに、磁気軸受の制御力指令値等を用いて装置固定部600の加速度の算出を行っているので、安価な演算器を用いても高精度に算出することが可能となる。

【0180】

また、数21のような厳密にプロパーな式に基づいて、装置固定部600の加速度を求めているので、振動抑制のフィードバック制御系の安定性を向上させることができ、かつノイズを低減することができる。

【0181】

なお、本実施形態においては、数21等において、装置固定部600の加速度を求めるとして説明してきたが、これに限られず、第1実施形態と同様に、装置固定部600の加速度、速度、位置等のように加速度を所要回数だけ微分又は積分した結果に相当する物理量を算出するようにしても良い。

【0182】

また、本実施形態においては、ターボ分子ポンプ本体150がチャンバ300に固定されるものとして説明してきたが、これに限られるものではない。もちろん、装置固定部600側が完全な剛体であれば、以上で説明した通りの効果が得られるので最も望ましいが、チャンバ300等は完全な剛体であるとは限らないからである。

【0183】

チャンバ300の剛性が低い場合や、従来のようにターボ分子ポンプ本体150がポンプ用ダンパ301を介してチャンバ300に固定される構成であっても、各実施形態ではターボ分子ポンプ本体100, 150を中心とした系の低振動化が行われるので、十分に装置システム全体の低振動化に寄与することが可能である。

【0184】

さらに、本実施形態においては、回転体位置センサ107, 108, 109の変位信号に基づいて、それぞれに対応する装置固定部600の加速度等を求め、各電磁石104, 105, 106A, 106Bを制御するとして説明してきたが、これに限られない。

【0185】

一般に、回転体 103 の運動は、並進成分の運動と回転成分の運動とが複雑に混在し合っている。そして、従来から行われているように、上側径方向センサ 107 及び下側径方向センサ 108 等の検出結果から、回転体 103 の運動は、並進成分と回転成分とに分離することができる。従って、回転体 103 の並進成分と回転成分のそれぞれに対応して装置固定部 600 の加速度等を求めれば、装置固定部 600 の加速度等の並進成分と回転成分を求めることができる。

【0186】

具体的には、以下のような計算を行う。まず、並進成分に対応した装置固定部 600 の加速度等を求める場合には、回転体 103 の変位の並進成分を、数 8 の相対変位 $y(t)$ に代入して計算を行う。一方、回転成分に対応した装置固定部 600 の加速度等を求める場合には、回転体 103 の変位の回転成分を、数 8 の相対変位 $y(t)$ に代入し、回転体 103 のその回転中心軸まわりの慣性モーメントを、数 8 の質量 m_r に代入して計算を行う。

10

そして、これらの算出結果である並進成分と回転成分に対応した装置固定部 600 の加速度等から、再び上側径方向電磁石 104 及び下側径方向電磁石 105 に対する制御力指令値等を求めることで、電磁石 104, 105 を制御すれば良い。

【0187】

【発明の効果】

以上説明したように本発明によれば、磁気軸受装置は、振動検出手段と加算手段と振動抑制制御手段とを備えて構成したことから、新たな振動センサを配設することなく、真空ポンプの被対象設備を含めた装置システム全体の低振動化を実現することが可能である。また、磁気軸受装置は、振動検出手段を備えて構成したことから、新たな振動センサを配設することなく、真空ポンプの被対象設備を含めた装置システム全体の振動検出を実現することが可能である。

20

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の第 1 実施形態である装置システム全体の構成図

【図 2】 装置システム全体のブロック図

【図 3】 装置システム全体の運動モデルを示した図

【図 4】 本発明の第 2 実施形態である装置システム全体の構成図

【図 5】 同上（別例）

30

【図 6】 装置システム全体の運動モデルを示した図

【図 7】 高ゲイン磁束フィードバック制御器のブロック線図

【図 8】 回転周波数追従型ノッチフィルタの原理を表したブロック図

【図 9】 装置固定部の加速度の算出方法を表したブロック図

【図 10】 従来のターボ分子ポンプの縦断面図

【図 11】 従来の装置システム全体の構成図

【符号の説明】

100, 150 ターボ分子ポンプ本体

103 回転体

104 上側径方向電磁石

40

105 下側径方向電磁石

106A, 106B 軸方向電磁石

107 上側径方向センサ

108 下側径方向センサ

109 軸方向センサ

171 誘導モータ

181 磁束検出器

200, 500, 550 制御装置

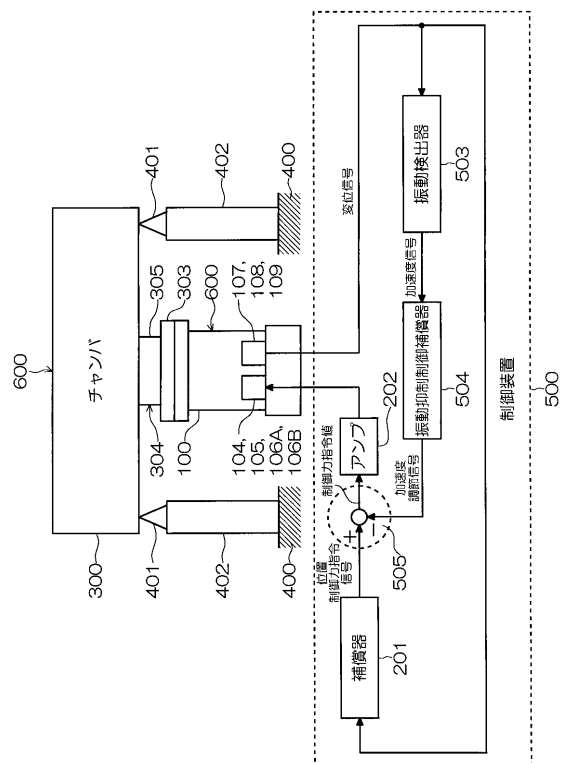
201 補償器

202 アンプ

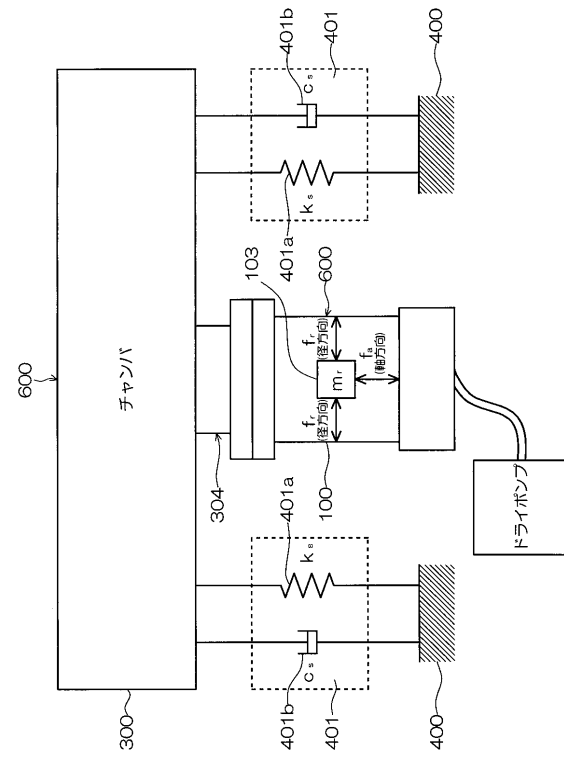
50

- | | |
|-------|-----------------|
| 3 0 0 | チャンバ |
| 3 0 1 | ポンプ用ダンパ |
| 4 0 0 | 床 |
| 4 0 1 | 装置用ダンパ |
| 5 0 3 | 振動検出器 |
| 5 0 4 | 振動抑制制御補償器 |
| 5 0 5 | 加算器 |
| 5 5 3 | 振動検出ノモータ制御器 |
| 6 0 0 | 装置固定部 |
| 8 0 6 | 回転周波数追従型ノッチフィルタ |

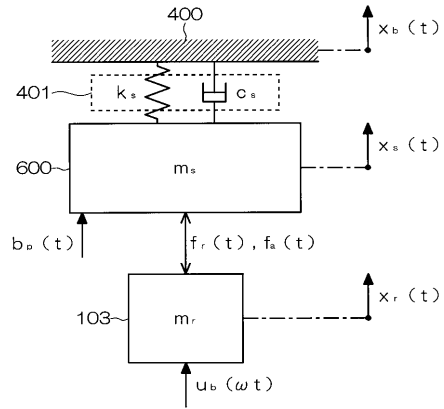
【 図 1 】



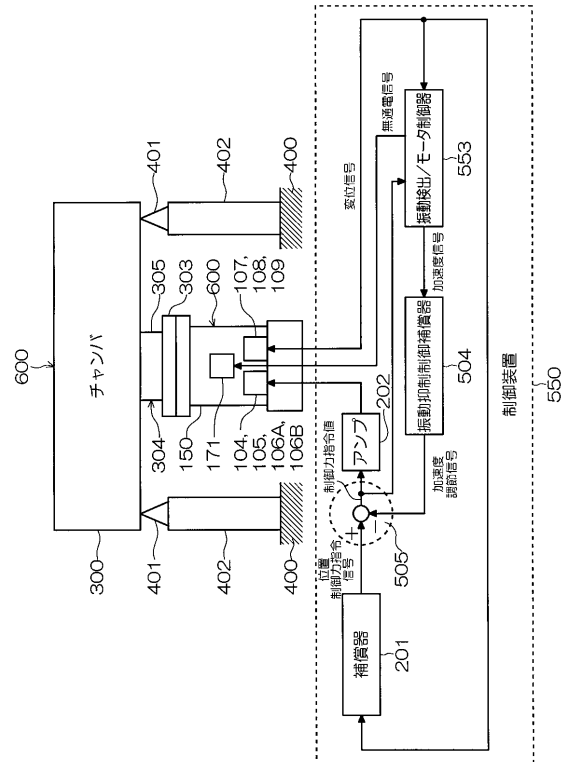
【 図 2 】



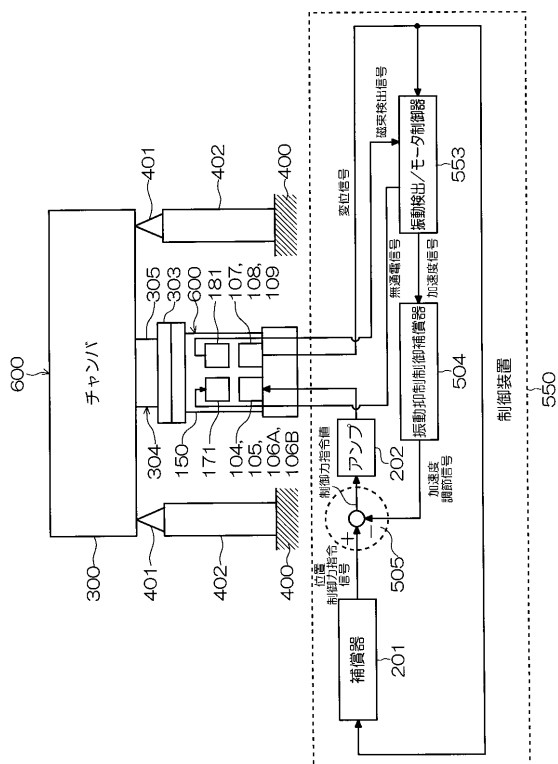
【 図 3 】



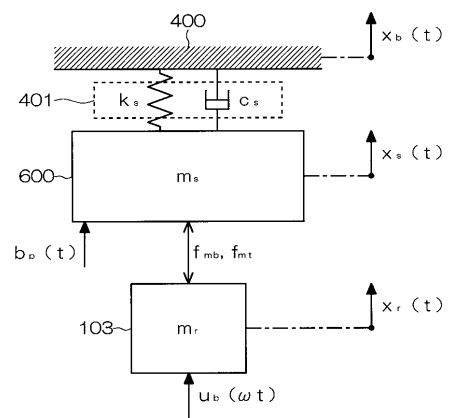
【圖 4】



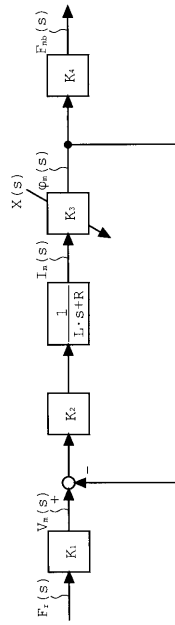
【 図 5 】



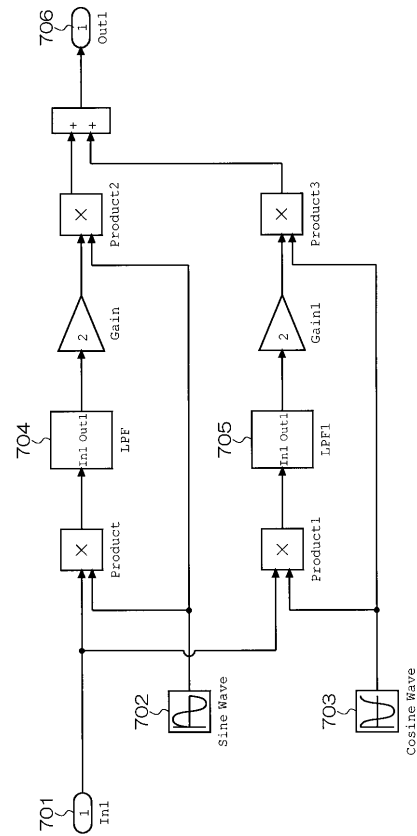
【 図 6 】



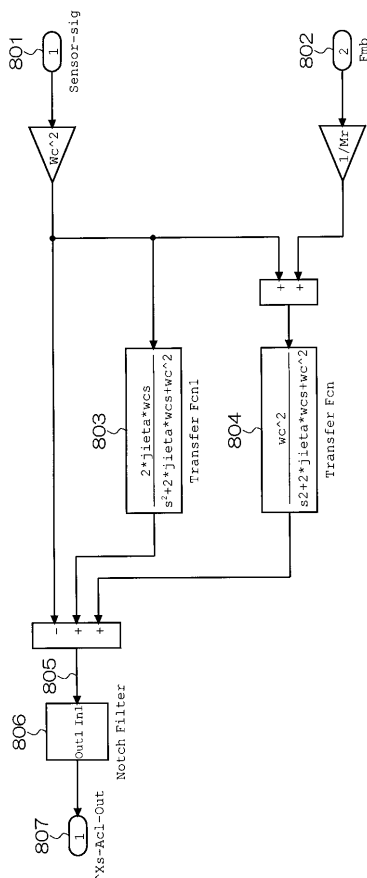
【図 7】



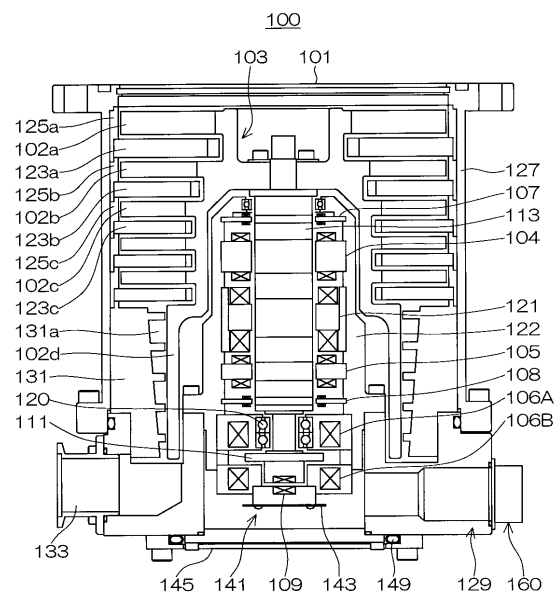
【図 8】



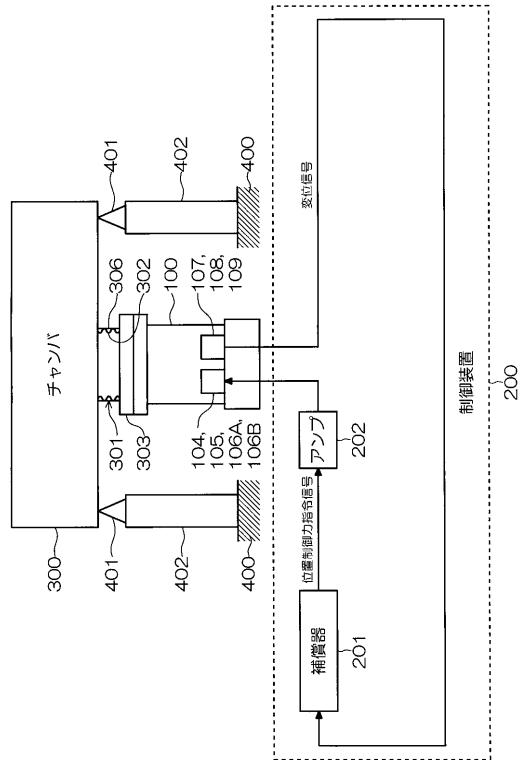
【図 9】



【図 10】



【図 11】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 2 K 7/09 (2006.01) H 0 2 K 7/09

審査官 佐藤 高弘

(56)参考文献 特開 2 0 0 2 - 1 8 8 6 7 9 (J P , A)
実開平 0 6 - 0 3 2 7 8 7 (J P , U)
米国特許第 4 9 9 5 3 4 (U S , A)
米国特許第 5 2 0 2 8 2 4 (U S , A)
特開昭 6 0 - 2 2 0 2 1 9 (J P , A)
特開昭 6 2 - 2 5 8 2 1 9 (J P , A)
特開平 0 7 - 2 5 9 8 5 3 (J P , A)
特開平 0 9 - 1 2 0 3 0 1 (J P , A)
米国特許第 5 3 0 6 9 7 5 (U S , A)
特開 2 0 0 2 - 1 4 7 4 5 4 (J P , A)
特開平 0 7 - 2 5 9 8 5 4 (J P , A)
特開平 0 7 - 0 1 9 2 4 3 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

F16C 32/04
F04D 19/04
F04D 29/046
F04D 29/056
F04D 29/66
H02K 7/09