

明 細 書

発明の名称：真空ポンプ

技術分野

[0001] 本発明は真空ポンプに係わり、特に回転体を交流磁界を用いて加熱することで、回転体の停止時も含めて生成物の付着を防止でき、また、回転体を高効率に加熱することのできる真空ポンプに関する。

背景技術

[0002] 近年のエレクトロニクス的发展に伴い、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、きわ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氣的性質を与えたり、エッチングにより半導体基板上に微細な回路を形成したりなどして製造される。

[0003] 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。

[0004] 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。

[0005] ところで、プロセスガスは、反応性を高めるため高温の状態でチャンバに導入される場合がある。そして、これらのプロセスガスは、排気される際に冷却されてある温度になると固体となり排気系に生成物を析出する場合がある。そして、この種のプロセスガスがターボ分子ポンプ内で低温となって固体状となり、ターボ分子ポンプ内部に付着して堆積する場合がある。

[0006] ターボ分子ポンプ内部にプロセスガスの析出物が堆積すると、この堆積物がポンプ流路を狭め、ターボ分子ポンプの性能を低下させる原因となる。

この問題を解決するために、ターボ分子ポンプについてはベース部周りにヒータを配設し、このヒータの加熱制御が行われている。

[0007] ところで、生成物の付着をより一層効率よく防止するためには、ベース部周りやステータに対する加熱だけに限らず、回転体側についても加熱することが望まれる。

回転体への加熱の方法としては、例えば特許文献1には、永久磁石、電磁石により生成された直流磁界を回転体に交差させる方法が開示されている。また、特許文献2には、モータの効率を下げることで回転体を加熱させる方法が開示されている。更に、ステータ側を加熱し、その輻射熱で回転体側を加熱させる方法も考えられる。

先行技術文献

特許文献

[0008] 特許文献1：特開昭59-32697号公報

特許文献2：特開2019-031969号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0009] ところで、かかる生成物の付着防止については、ポンプの運転中だけではなくポンプの停止時においても継続して行われることが望ましい。特許文献1の構成では、回転体に交差する磁界が直流であるため、交流電流を供給可能な加熱用電源を設ける必要がない一方で、回転体を加熱できるのは回転体の回転時のみであり、回転体の停止時には回転体を加熱することができない。

また、生成物の付着防止時の加熱制御については、加熱に必要な消費電力の効率化が求められる。

[0010] 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、回転体を交流磁界を用いて加熱することで、回転体の停止時も含めて生成物の付着を防止でき、また、回転体を高効率に加熱することのできる真空ポンプを提供するこ

とを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0011] このため本発明（請求項1）は、回転体と、該回転体を回転駆動させるモータと、該モータに回転駆動用の電力を供給するモータ用電源と、前記回転体を加熱するために所定の磁界周波数の交流磁界を発生させる加熱用電磁石と、該加熱用電磁石に交流電流によって電力を供給する加熱用電源とを備え、前記加熱用電磁石で発生された前記交流磁界を前記回転体と交差させることで前記回転体において、該交差した前記交流磁界の周囲に渦電流を発生させることを特徴とする。
- [0012] 加熱用電磁石は、加熱用電源より供給された交流電流により、所定の磁界周波数の交流磁界を発生させる。交流磁界は、回転体と交差することで、回転体において、この交差した交流磁界の周囲に渦電流を発生させる。この渦電流により渦電流損が発生するため、回転体を加熱することができる。加熱用電磁石が発生させる磁界は交流磁界であるため回転体の回転が停止しているときでも渦電流損を生じさせることができ、回転体を加熱することができる。堆積物は回転体の停止中であっても生じることが想定されるので、堆積物の生成を効果的に防止できる。また、本発明では、回転体に渦電流損を直接発生させることができるため、ステータ側を加熱し、その輻射熱で回転体側を加熱させる場合と比べて、回転体を高効率に加熱することができる。
- [0013] また、本発明（請求項2）は、前記回転体には前記交流磁界の交差の対象となる所定の導電性を有する加熱対象物が備えられたことを特徴とする。
- [0014] この手法では、回転体に加熱対象物を備えたことにより、効率よく渦電流を発生させることができる。このため、回転体を高効率に加熱することができる。
- [0015] 更に、本発明（請求項3）は、前記回転体の剛体モード固有振動数を ω_{res} と定義したときに前記磁界周波数が $\omega_{res}/\sqrt{2}$ より大きいことを特徴とする。
- [0016] 交流磁界は、回転体を加熱させる一方で、回転体への吸引力も同時に生ずる。この吸引力は、回転体の振動を大きくする原因になる。しかし、磁界周

波数を $\omega_{res}/\sqrt{2}$ より大きくすることで、同一の大きさの磁束密度の直流磁界を回転体に交差させる場合と比べて、回転体の振動を小さくすることができる。

[0017] 更に、本発明（請求項4）は、前記磁界周波数が前記回転体の機械角に基づき定義された定格回転周波数より大きいことを特徴とする。

[0018] 一般に、回転体の回転によって発生するポンプの振動のスペクトルには、回転体の回転周波数成分の大きなピークが表れる。このピーク周波数は運転状態によって変化し、最大値は、回転体の機械角に基づき定義された定格回転周波数である。従って、回転体の機械角に基づき定義された定格回転周波数よりも加熱用電磁石で発生させる交流磁界の周波数が大きい場合には、交流磁界によって発生するポンプの振動スペクトルのピークが、回転体の回転によって発生する振動スペクトルのピークとは一致しない。そのため、ポンプの振動を小さくすることができる。

[0019] 更に、本発明（請求項5）は、前記磁界周波数が前記モータに流れる電流の定格回転時の周波数より大きいことを特徴とする。

[0020] 一般に、モータに流れる電流によって発生するポンプの振動のスペクトルには、モータに流れる電流の周波数成分の大きなピークが表れる。このピーク周波数は運転状態によって変化し、最大値は、モータに流れる電流の定格回転時の周波数である。従って、モータに流れる電流の定格回転時の周波数よりも加熱用電磁石で発生させる交流磁界の周波数が大きい場合には、交流磁界によって発生するポンプの振動スペクトルのピークが、モータに流れる電流によって発生する振動スペクトルのピークとは一致しない。そのため、ポンプの振動を小さくすることができる。

[0021] 更に、本発明（請求項6）は、前記モータ用電源の出力電圧を変換し、前記モータに電圧を印加するモータ用インバータと、該モータ用インバータを制御するモータ用インバータ制御器とを備え、前記磁界周波数が前記モータ用インバータ制御器の制御周波数の半分より大きいことを特徴とする。

[0022] 磁界周波数がモータ用インバータ制御器の制御周波数の半分より大きけれ

ば、モータ用インバータが、モータに流れる電流に重畳して交流電流を流し、モータの磁界に重畳して加熱用の交流磁界を発生させることで回転体を加熱する場合と比べて、大きい周波数の交流磁界で加熱できる。そのため、同一の回転体の渦電流損を得るのに必要な交流磁界の磁束密度を小さくでき、交流磁界によって回転体に発生する外力を小さくすることができ、回転体の振動を小さくすることができる。

[0023] 更に、本発明（請求項7）は、前記回転体を空中に浮上支持する磁気軸受と、該磁気軸受に対して電力を供給する磁気軸受用電源と、前記磁気軸受用電源の出力電圧を変換し、前記磁気軸受に電圧を印加する磁気軸受用インバータと、該磁気軸受用インバータを制御する磁気軸受用インバータ制御器とを備え、前記磁界周波数が前記磁気軸受用インバータ制御器の制御周波数の半分より大きいことを特徴とする。

[0024] 磁界周波数が磁気軸受用インバータ制御器の制御周波数の半分より大きければ、磁気軸受用インバータが、磁気軸受に流れる電流に重畳して交流電流を流し、磁気軸受の磁界に重畳して加熱用の交流磁界を発生させることで回転体を加熱する場合と比べて、大きい周波数の交流磁界で加熱できる。そのため、同一の回転体の渦電流損を得るのに必要な交流磁界の磁束密度を小さくでき、交流磁界によって回転体に発生する外力を小さくすることができ、回転体の振動を小さくすることができる。

[0025] 更に、本発明（請求項8）は、前記回転体を空中に浮上支持する磁気軸受と、該磁気軸受に対して電力を供給する磁気軸受用電源と、前記回転体の位置を所定のセンサ周波数で変調された位置信号に基づき非接触に計測する変位センサと、前記位置信号を復調させるローパスフィルタを含む復調回路とを備え、前記磁界周波数が前記ローパスフィルタのカットオフ周波数より大きいことを特徴とする。

[0026] 磁界周波数が変位センサの位置信号を復調させるローパスフィルタのカットオフ周波数よりも大きければ、復調された変位センサの位置信号に含まれる、交流磁界によって発生するポンプの振動成分が小さくなる。そのため、

交流磁界によって発生するポンプの振動は回転体の位置制御に影響を及ぼさず、より安定な磁気軸受制御を実現することができる。

[0027] 更に、本発明（請求項 9）は、前記回転体を空中に浮上支持する磁気軸受と、該磁気軸受に対して電力を供給する磁気軸受用電源と、前記回転体の位置を所定のセンサ周波数で変調された位置信号に基づき非接触に計測する変位センサとを備え、前記磁界周波数が前記センサ周波数より大きいことを特徴とする。

[0028] 磁界周波数がセンサ周波数より大きければ、変位センサの位置信号に含まれる、交流磁界によって発生するポンプの振動成分が小さくなる。そのため、交流磁界によって発生するポンプの振動は回転体の位置制御に影響を及ぼさず、より安定な磁気軸受制御を実現することができる。

[0029] 更に、本発明（請求項 10）は、前記加熱用電源が前記モータ用電源と兼用されたことを特徴とする。

[0030] 加熱用電磁石に対してはモータ用電源から交流電流が供給される。このため、省スペースかつ安価に構成できる。

[0031] 更に、本発明（請求項 11）は、前記回転体を空中に浮上支持する磁気軸受と、該磁気軸受に対して電力を供給する磁気軸受用電源を備え、前記加熱用電源が前記磁気軸受用電源と兼用されたことを特徴とする。

[0032] 加熱用電磁石に対しては磁気軸受用電源から交流電流が供給される。このため、省スペースかつ安価に構成できる。

[0033] 更に、本発明（請求項 12）は、前記加熱用電源が前記磁気軸受用電源と兼用されたことを特徴とする。

[0034] 加熱用電磁石に対しては磁気軸受用電源から交流電流が供給される。このため、省スペースかつ安価に構成できる。

発明の効果

[0035] 以上説明したように本発明によれば、回転体を加熱するために所定の磁界周波数の交流磁界を発生させる加熱用電磁石を備え、加熱用電磁石で発生された交流磁界を回転体と交差させるように構成したので、交流磁界は、回転

体において、この交差した交流磁界の周囲に渦電流を発生させる。この渦電流により渦電流損が発生するため、回転体を加熱することができる。加熱用電磁石が発生させる磁界は交流磁界であるため、渦電流損は回転体の回転が停止しているときでも生じさせることができる。堆積物はポンプの停止中であって生じることが想定されるので堆積物の生成を効果的に防止できる。また、回転体に直接渦電流損を発生させることができるため、回転体を高効率に加熱することができる。

図面の簡単な説明

- [0036] [図1]本発明の実施形態で使用するターボ分子ポンプの構成図
- [図2]制御装置の電源周りの構成図
- [図3]交流磁界により外力の生じる様子を示す図
- [図4]強制振動モデルの構成図
- [図5]振幅と周波数の関係を示す図
- [図6]PWM制御のタイミングチャート
- [図7]位置信号を抽出する際のローパスフィルタのカットオフ周波数を説明する図
- [図8]4極での加熱装置の構成例
- [図9]4極での加熱装置の別構成例
- [図10]2極での加熱装置の別構成例
- [図11]ターボ分子ポンプに対する加熱装置の設置方法を説明する図
- [図12]矢印Aで示す箇所に設置される加熱装置の構成図
- [図13]矢印Bで示す箇所に設置される加熱装置の構成図
- [図14]矢印C、Dで示す箇所に設置される加熱装置の構成図
- [図15]加熱装置を遠心式ポンプに適用した例
- [図16]加熱装置をポンプの複数箇所に配設したときの例
- [図17]加熱装置同士を直列に接続して交流電流の供給をする例
- [図18]加熱装置同士を並列に接続して交流電流の供給をする例
- [図19]加熱装置のそれぞれに対して独立して加熱用電源を配設した例

[図20]モータ用電源が加熱用電源を兼ねた例

発明を実施するための形態

- [0037] 以下、本発明の実施形態について説明する。図1に本発明の実施形態で使用するターボ分子ポンプの構成図を示す。図1において、ターボ分子ポンプ100は、円筒状の外筒127の上端に吸気口101が形成されている。そして、外筒127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である複数の回転翼102（102a、102b、102c・・・）を周部に放射状かつ多段に形成した回転体103が備えられている。この回転体103の中心にはロータ軸113が取り付けられており、このロータ軸113は、例えば5軸制御の磁気軸受により空中に浮上支持かつ位置制御されている。回転体103は、一般的に、アルミニウム又はアルミニウム合金などの金属によって構成されている。
- [0038] 上側径方向電磁石104は、4個の電磁石がX軸とY軸とに対をなして配置されている。この上側径方向電磁石104に近接して、かつ上側径方向電磁石104のそれぞれに対応して4個の上側径方向センサ107が備えられている。上側径方向センサ107は、例えば伝導巻線を有するインダクタンスセンサや渦電流センサなどが用いられ、ロータ軸113の位置に応じて変化するこの伝導巻線のインダクタンスの変化に基づいてロータ軸113の位置を検出する。この上側径方向センサ107はロータ軸113、すなわちそれに固定された回転体103の径方向変位を検出し、図2に示す制御装置200の内部の図示しない中央演算処理装置（CPU）に送るように構成されている。
- [0039] この中央演算処理装置においては、磁気軸受制御器の機能が搭載されており、例えばPID調節機能を有する補償回路が、上側径方向センサ107によって検出された位置信号に基づいて、上側径方向電磁石104の励磁制御指令信号を生成し、図2に示す磁気軸受用インバータ16が、この励磁制御指令信号に基づいて、上側径方向電磁石104を励磁制御することで、ロータ軸113の上側の径方向位置が調整される。

- [0040] そして、このロータ軸 113 は、高透磁率材（鉄、ステンレスなど）などにより形成され、上側径方向電磁石 104 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。また、下側径方向電磁石 105 及び下側径方向センサ 108 が、上側径方向電磁石 104 及び上側径方向センサ 107 と同様に配置され、ロータ軸 113 の下側の径方向位置を上側の径方向位置と同様に調整している。
- [0041] さらに、軸方向電磁石 106 A、106 B 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。ロータ軸 113 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、その軸方向位置信号が制御装置 200 の中央演算処理装置（CPU）に送られるように構成されている。
- [0042] そして、中央演算処理装置に搭載された磁気軸受制御器において、例えば PID 調節機能を有する補償回路が、軸方向センサ 109 によって検出された軸方向位置信号に基づいて、軸方向電磁石 106 A と軸方向電磁石 106 B のそれぞれの励磁制御指令信号を生成し、磁気軸受用インバータ 16 が、これらの励磁制御指令信号に基づいて、軸方向電磁石 106 A と軸方向電磁石 106 B をそれぞれ励磁制御することで、軸方向電磁石 106 A が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 106 B が金属ディスク 111 を下方に吸引し、ロータ軸 113 の軸方向位置が調整される。
- [0043] このように、制御装置 200 は、この軸方向電磁石 106 A、106 B 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ようになっている。
- [0044] 一方、モータ 121 は、ロータ軸 113 を取り囲むように周状に配置された複数の磁極を備えている。各磁極は、ロータ軸 113 との間に作用する電磁力を介してロータ軸 113 を回転駆動するように、制御装置 200 によって制御されている。また、モータ 121 には図示しない例えばホール素子、レゾルバ、エンコーダなどの回転速度センサが組み込まれており、この回転

速度センサの検出信号によりロータ軸 113 の回転速度が検出されるようになっている。

[0045] さらに、例えば下側径方向センサ 108 近傍に、図示しない位相センサが取り付けられており、ロータ軸 113 の回転の位相を検出できるようになっている。制御装置 200 では、この位相センサと回転速度センサの検出信号を共に用いて磁極の位置を検出できるようになっている。

回転翼 102 (102a、102b、102c・・・) とわずかの空隙を隔てて複数枚の固定翼 123 (123a、123b、123c・・・) が配設されている。回転翼 102 (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。固定翼 123 (123a、123b、123c・・・) は、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。

[0046] 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 の外周端は、複数の段積みされた固定翼スペーサ 125 (125a、125b、125c・・・) の間に嵌挿された状態で支持されている。

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 が配設されている。ベース部 129 には排気口 133 が形成され、外部に連通されている。チャンバ (真空チャンバ) 側から吸気口 101 に入ってベース部 129 に移送されてきた排気ガスは、排気口 133 へと送られる。

[0047] さらに、ターボ分子ポンプ 100 の用途によって、固定翼スペーサ 125

の下部とベース部 129 の間には、ネジ付スペーサ 131 が配設される。ネジ付スペーサ 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。回転体 103 の回転翼 102 (102a、102b、102c・・・) に続く最下部には円筒部 102d が垂下されている。この円筒部 102d の外周面は、円筒状で、かつネジ付スペーサ 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。回転翼 102 および固定翼 123 によってネジ溝 131a に移送されてきた排気ガスは、ネジ溝 131a に案内されつつベース部 129 へと送られる。

[0048] ベース部 129 は、ターボ分子ポンプ 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 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。

[0049] 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 により回転駆動されると、回転翼 102 と固定翼 123 の作用により、吸気口 101 を通じて図示しないチャンバから排気ガスが吸気される。回転翼 102 の回転速度は通常 20,000rpm~90,000rpm であり、回転翼 102 の先端での周速度は 200m/s~400m/s に達する。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。

[0050] なお、上記では、ネジ付スペーサ 131 は回転体 103 の円筒部 102d の外周に配設し、ネジ付スペーサ 131 の内周面にネジ溝 131a が刻設されているとして説明した。

しかしながら、これとは逆に円筒部 102d の外周面にネジ溝が刻設され、

その周囲に円筒状の内周面を有するスペーサが配置される場合もある。

- [0051] また、ターボ分子ポンプ100の用途によっては、吸気口101から吸引されたガスが上側径方向電磁石104、上側径方向センサ107、モータ121、下側径方向電磁石105、下側径方向センサ108、軸方向電磁石106A、106B、軸方向センサ109などで構成される電装部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、このステータコラム122内はパージガスにて所定圧に保たれる場合もある。
- [0052] この場合には、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の内周側円筒部の間の隙間を通じて排気口133へ送出される。
- [0053] ここに、ターボ分子ポンプ100は、機種の特定制と、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、上記ターボ分子ポンプ100は、その本体内に電子回路部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、それらの実装用の基板143等から構成される。この電子回路部141は、ターボ分子ポンプ100の下部を構成するベース部129の例えば中央付近の図示しない回転速度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。
- [0054] ところで、半導体の製造工程では、チャンバに導入されるプロセスガスの中には、その圧力が所定値よりも高くなり、或いは、その温度が所定値よりも低くなると、固体となる性質を有するものがある。ターボ分子ポンプ100内部では、排気ガスの圧力は、吸気口101で最も低く排気口133で最も高い。プロセスガスが吸気口101から排気口133へ移送される途中で、その圧力が所定値よりも高くなったり、その温度が所定値よりも低くなったりすると、プロセスガスは、固体状となり、ターボ分子ポンプ100内部

に付着して堆積する。

[0055] 例えば、A I エッチング装置にプロセスガスとして SiCl_4 が使用された場合、低真空 ($760 [\text{torr}] \sim 10^{-2} [\text{torr}]$) かつ、低温 (約 $20 [^\circ\text{C}]$) のとき、固体生成物 (例えば AlCl_3) が析出し、ターボ分子ポンプ 100 内部に付着堆積することが蒸気圧曲線からわかる。これにより、ターボ分子ポンプ 100 内部にプロセスガスの析出物が堆積すると、この堆積物がポンプ流路を狭め、ターボ分子ポンプ 100 の性能を低下させる原因となる。そして、前述した生成物は、排気口 133 付近やネジ付スペーサ 131 付近の圧力が高い部分で凝固、付着し易い状況にあった。

[0056] そのため、この問題を解決するために、従来はベース部 129 等の外周に図示しないヒータや環状の水冷管 149 を巻着させ、かつ例えばベース部 129 に図示しない温度センサ (例えばサーミスタ) を埋め込み、この温度センサの信号に基づいてベース部 129 の温度を一定の高い温度 (設定温度) に保つようにヒータの加熱や水冷管 149 による冷却の制御 (以下 TMS という。TMS ; Temperature Management System) が行われている。

[0057] 次に、回転体 103 の加熱制御について説明する。

上述したように、ベース部 129 側についての加熱が従来行われているが、生成物の堆積防止によるポンプの運転効率向上のため、近年は更に回転体 103 側も含めた一層の加熱が望まれている。

このように回転体 103 の加熱制御を行う方法を図 1 と図 2 に基づき説明する。図 1 において、保護ベアリング 1 と上側径方向センサ 107 の間には、2 極の加熱用電磁石 3 A と加熱用電磁石 3 B とがロータ軸 113 を隔てて対向して配設されている。この加熱用電磁石 3 A と加熱用電磁石 3 B とは加熱装置 3 に相当し、この加熱装置 3 に対しては図 2 に示すように、加熱用電源 21 より交流電流が供給されるようになっている。この交流電流により加熱用電磁石 3 A と加熱用電磁石 3 B は励磁され、交流磁界が発生するようになっている。

[0058] かかる構成において、発生した交流磁界はロータ軸 113 と交差する。交差した交流磁界の周囲には渦電流が発生する。このとき、ロータ軸 113 には図示しない導電性を有する加熱対象物が固着され、この加熱対象物に対して交流磁界が貫通し、渦電流が発生するようにしてもよい。加熱対象物の材料としては鉄、ステンレス、アルミニウムなどの導電性を有する金属が挙げられるが、鉄、ステンレスなどの強磁性体がより望ましい。そして、この渦電流により回転体 103 は加熱される。

[0059] 交流磁界は、正弦波であってもよいし、方形波、三角波等の他の波形や、これらの足し合わせでもよい。また、この交流磁界に直流磁界がオフセットされてもよい。他の波形の場合には、各波形の基本波成分を磁界の周波数とみなす。

[0060] このとき発生する渦電流損について「回転機械設計者のための磁気軸受ガイドブック」日本工業出版 59 ページ（（2）渦電流損）によれば、板厚 t 、磁界の変動周波数 f 、磁界の変動を受ける磁性体の体積 V 、最大の磁束密度 B_m 、磁性体の固有抵抗 ρ と定義したときに渦電流損 P_e は数 1 で表せる。

[数 1]

$$P_e = \frac{\pi^2 t^2 f^2 V B_m^2}{6\rho}$$

数 1 によれば、渦電流損 P_e は交流磁界の周波数の 2 乗で増加することが分かる。従って、交流磁界を用いることで、渦電流損 P_e に伴う発熱を非接触に効率よく発生させることができる。また、同一の渦電流損 P_e を得るのに必要な磁界の磁束密度 B_m は、磁界の変動周波数 f に反比例して減少することが分かる。

[0061] また、交流磁界を回転体 103 と交差させる場合には、渦電流損 P_e はロータ軸 113 の回転が停止しているときでも生じさせることができる。堆積物はポンプの停止中であっても生じることが想定されるので堆積物の生成を効果的に防止できる。

[0062] 次に、回転体 103 及びポンプの振動について検討する。回転体 103 の

振動は、回転体 103 の故障の原因となる。特に、磁気軸受を用いて回転体 103 を浮上させているポンプでは、回転体 103 の振動の増大によって磁気軸受制御が不能となり、ロータ軸 113 が保護ベアリング 1、120 に接触するタッチダウンが発生するおそれがある。また、回転体 103 の振動は、軸受やモータ 121 などを通してポンプ全体へと伝わる。

[0063] 更に、ポンプのステータ部には、磁気軸受を構成する上側径方向電磁石 104、下側径方向電磁石 105、軸方向電磁石 106A、106B や、モータ 121 の電磁石、加熱装置 3 の加熱用電磁石 3A、3B などが存在する。これらの電磁石においては、コイルに電流が流れて磁界が発生することで、磁界とコアの相互作用によりコアの変形が発生し、振動が発生する。この振動は、ポンプ全体へと伝わる。

[0064] これらの振動の結果、騒音の発生や、吸気口 101 を介して図示しないチャンバ側に振動が伝わることによる半導体製造工程への悪影響などが発生するおそれがある。従って、回転体及びポンプの振動はなるべく抑制されることが望ましい。

[0065] 交流磁界をロータ軸 113 に対し交差させることに伴う回転体 103 の振動について検討する。

渦電流損 P_e を発生させるために交流磁界をロータ軸 113 に対し交差させると、この交流磁界により外力が生ずる。この交流磁界により外力の生じる様子を図 3 に示す。図 3 は図 1、図 2 に示した 2 極の配置での磁界及び外力の様子を示している。等方的な極配置の場合には理想的には左右の外力 F_L と F_R は均衡するはずである。しかしながら、現実には加工精度による形状のばらつきや、アンバランスによるロータ軸 113 の偏心、材料の磁性のばらつき等の要因によりロータ軸 113 への外力が発生する。また、非等方的な極配置の場合でも、ロータ軸 113 への外力が発生するおそれがある。このため、回転体 103 を低振動で安定に回すためには、ロータ軸 113 への外力 F_L 、 F_R を小さくすることが望まれる。

[0066] 交流磁界がロータ軸 113 に対し交差したことに伴い生ずる外力 F_R は、数

2 に示す通り加熱用電磁石 3 B とロータ軸 1 1 3 間のギャップの磁束密度 B_g の 2 乗に比例する。

[数 2]

$$F_R \propto B_g^2$$

ここに数 2 の外力 F_R を比例定数 K_g を用いて数 3 と定義する。

[数 3]

$$F_R = K_g B_g^2$$

[0067] 時刻 t におけるギャップの磁束密度 B_g を数 4 の振幅 B_{g1} 、角振動数 ω_0 の正弦波と仮定すると、

[数 4]

$$B_g = B_{g1} \cos \omega_0 t$$

ロータ軸 1 1 3 にかかる外力 F_R は数 5 となる。

[数 5]

$$F_R = K_g B_{g1}^2 \cos^2 \omega_0 t = K_g B_{g1}^2 \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos 2 \omega_0 t)$$

[0068] ここに、数 6 なので、

[数 6]

$$0 \leq \cos^2 \omega_0 t \leq 1$$

B_{g1} を $1/n$ 倍にできたら、外力 F_R の最大値は $1/n^2$ 倍になる。

この外力 F_R による影響を図 4 の強制振動モデルについて検討する。ここに、回転体・ステータの外力方向のバネ定数 k 、回転体・ステータの外力方向の減衰係数 γ 、回転体の質量 m 、磁界により与えられる外力 F と定義する。

[0069] このとき、外力が加えられる方向の回転体剛体モード固有角振動数 ω_{res} は

[数 7]

$$\omega_k^2 = \frac{k}{m}$$

と定義すると、減衰係数 γ が数 8 のときに数 9 となる。

[数 8]

$$\gamma < \frac{\omega_k}{\sqrt{2}}$$

[数 9]

$$\omega_{res} = \sqrt{\omega_k^2 - 2\gamma^2}$$

[0070] 一方、減衰係数 γ が数 10 のときには、数 11 と定義する。

[数 10]

$$\gamma \geq \frac{\omega_k}{\sqrt{2}}$$

[数 11]

$$\omega_{res} = 0$$

[0071] このとき、数 12 を満たす交流ならば、同一の磁束密度に対するロータ軸 113 の変位（強制振動の応答）が、数 13 の直流の場合と比べて小さくなる。そして、交流磁界の周波数が高くなればなるほどこの変位は小さくなる。この間の様子を図 5 に示す。

[数 12]

$$\omega_0 \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \omega_{res}$$

[数 13]

$$\omega_0 = 0$$

[0072] 次に、この強制振動モデルについての証明を行う。

強制振動モデルの運動方程式を数 14 とし、 F/m を数 15 の強制振動に基づく正弦波と仮定する。ただし、 x はロータ軸の変位であり、 ω_1 は外力 F の角振動数である。

[数 14]

$$\frac{d^2}{dt^2} x + 2\gamma \frac{d}{dt} x + \omega_k^2 x = \frac{F}{m}$$

[数 15]

$$\frac{F}{m} = f_0 \cos \omega_1 t$$

[0073] x の解を数 1 6 とおくと、 a は数 1 7 となる。

[数 1 6]

$$a \cos(\omega_1 t - \delta)$$

[数 1 7]

$$a = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_k^2 - \omega_1^2)^2 + (2\gamma\omega_1)^2}}$$

直流磁界をロータ軸に交差させた場合、即ち、 $\omega_0 = 0$ の場合、外力 F は数 1 8 となるので、 $\omega_1 = 0$ であり、 a は数 1 9 である。

[数 1 8]

$$F = K_g B_{g1}^2$$

[数 1 9]

$$a = \frac{f_0}{\omega_k} = \frac{F}{k} = \frac{k_g}{k} B_{g1}^2$$

[0074] 一方、交流磁界をロータ軸に交差させた場合、外力 F は数 2 0 であり、直流成分と交流成分の和で表される。

[数 2 0]

$$F = k_g B_{g1}^2 \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega_0 t)$$

力の直流成分に対するロータ軸 1 1 3 の振幅 a は数 2 1 である。

[数 2 1]

$$\frac{1}{2} \frac{k_g}{k} B_{g1}^2$$

[0075] よって、外力のうち、角振動数 ω_1 の交流成分の振幅が数 2 2 未満ならば、交流磁界による強制振動のロータ軸 1 1 3 の変位の振幅は、交流磁界の磁束密度最大値と同一の直流磁界をかけた場合と比べて、小さい。

[数 2 2]

$$\frac{1}{2} \frac{k_g}{k} B_{g1}^2$$

数 2 3 となる ω_1 は数 2 4 である。また、 ω_0 と ω_1 には数 2 5 の関係がある。

[数 2 3]

$$\frac{f_0}{\sqrt{(\omega_k^2 - \omega_1^2)^2 + (2\gamma\omega_1)^2}} = \frac{1}{2} \frac{k_g}{k} B_{g1}^2$$

[数 2 4]

$$\omega_1 = \sqrt{2}\omega_{res}$$

[数 2 5]

$$\omega_1 = 2\omega_0$$

[0076] このため、数 2 6 を満たす交流磁界の周波数において、交流磁界による強制振動のロータ軸 1 1 3 の変位の振幅は、交流磁界の磁束密度最大値と同一の直流磁界をかけた場合と比べて、小さい。

[数 2 6]

$$\omega_0 \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \omega_{res}$$

[0077] 次に、加熱装置の加熱用電磁石 3 A、3 B にて交流磁界が発生することにより、ポンプに発生する振動について検討する。図 3 において、加熱用電磁石 3 A、3 B は、主に積層鋼板やフェライトからなるコア 6 と、コア 6 の突極部 7 a、7 b に捲回されたコイル 4 a、4 b などから構成される。コイル 4 a、4 b に加熱用電源より供給された交流電流が流れることによって起磁力が発生し、交流電流と同一の周波数の交流磁界がコア 6 に発生する。発生した交流磁界は、ギャップを介してロータ軸 1 1 3 に交差し、磁力線の閉ループ 5 a、5 b を形成する。

[0078] 交流磁界の発生時には、交流磁界とコア 6 の相互作用によりコア 6 の変形が発生し、交流磁界の周波数成分の振動が加熱用電磁石 3 A、3 B に発生する。この加熱用電磁石 3 A、3 B の振動は、加熱用電磁石 3 A、3 B とポンプの結合部などを介して、ポンプ全体へと伝わっていく。

[0079] 次に、回転体 1 0 3 の回転によって発生する回転体 1 0 3 の振動について検討する。回転体 1 0 3 が回転すると、加工精度による形状のばらつきや、アンバランスによる回転体 1 0 3 の偏心、材料の磁性のばらつき等の要因に

より、回転体 103 への外力が発生し、振動が発生する。この振動のスペクトルには、回転体 103 の回転周波数成分の大きなピークが表れる。このピーク周波数は運転状態によって変化し、最大値は、回転体 103 の機械角に基づき定義された定格回転周波数である。

[0080] 従って、回転体 103 の機械角に基づき定義された定格回転周波数よりも加熱用電磁石 3A、3B で発生させる交流磁界の周波数が大きい場合には、交流磁界によって発生するポンプの振動スペクトルのピークが、回転体 103 の回転によって発生する振動スペクトルのピークとは一致しない。そのため、ポンプの振動スペクトルのピークを小さくすることができる。

[0081] 次に、モータ 121 に流れる電流によって発生するポンプの振動について検討する。モータ 121 は、コアにコイルが捲回された電磁石からなりポンプに固定されたステータと、ステータから発生した磁界との相互作用により発生したトルクを回転体に伝達するロータからなる。なお、モータ 121 が例えば永久磁石同期モータの場合には、定格回転時の電流の周波数は電気角周波数に等しく、また、この電気角周波数は機械角周波数×極対数で算出可能である。

[0082] モータ 121 のステータでは、磁界とコアの相互作用によりコアの変形が発生し、モータに流れる電流の周波数成分の振動が発生する。この振動は、モータとポンプの結合部を介して、ポンプ全体へと伝わっていく。

[0083] モータ 121 の回転駆動についてはモータ用インバータ 18 を用いた PWM (Pulse Width Modulation) 制御が行われている。図 6 に示すように、この PWM 制御では、周期 t_0 にて制御される。このときの制御周波数 $f_0 = 1 / t_0$ はモータ用インバータ制御器の制御周波数に相当する。そして、モータ用インバータ 18 の出力可能な電圧の周波数 f は、制御周波数 f_0 の $1 / 2$ 倍の $f = f_0 / 2$ である。即ち、モータ用インバータ制御器の制御周波数の 2 倍より大きい周波数をもって交流磁界による回転体 103 の加熱を行えば、モータ用インバータ 18 が、モータ 121 に流れる電流に重畳して交流電流を流し、モータ 121 の磁界に重畳して加熱用の交流磁界を発生させることで回転

体 103 を加熱する場合と比べて、大きい周波数の交流磁界で加熱できる。そのため、同一の回転体 103 の渦電流損を得るのに必要な交流磁界の磁束密度を小さくでき、交流磁界によって回転体 103 に発生する外力を小さくすることができ、回転体 103 の振動を小さくすることができる。

[0084] 更に、この点は、磁気軸受を制御する磁気軸受用インバータ 16 を用いた PWM 制御についても同様である。タイミングチャートは図 6 と同様なので省略する。図 6 と同様に、磁気軸受を制御する PWM 制御についても周期 t_0 にて制御される。即ち、磁気軸受用インバータ制御器の制御周波数の 2 倍より大きい周波数をもって交流磁界による回転体 103 の加熱を行えば、磁気軸受用インバータ 16 が、磁気軸受に流れる電流に重畳して交流電流を流し、磁気軸受の磁界に重畳して加熱用の交流磁界を発生させることで回転体 103 を加熱する場合と比べて、大きい周波数の交流磁界で加熱できる。そのため、同一の回転体 103 の渦電流損を得るのに必要な交流磁界の磁束密度を小さくでき、交流磁界によって回転体 103 に発生する外力を小さくすることができ、回転体 103 の振動を小さくすることができる。

[0085] 更に、下側径方向センサ 108 や上側径方向センサ 107 には、インダクタンスセンサ若しくは渦電流センサが用いられている。この下側径方向センサ 108 や上側径方向センサ 107 で検出された変位信号に対しては所定のセンサ周波数の変調波が重畳されているが、この変調波を基に、加熱用電磁石 3A と加熱用電磁石 3B で発生させる交流磁界の好適な周波数を判断してみる。

[0086] 図 7 において、下側径方向センサ 108 や上側径方向センサ 107 から出力された位置信号はローパスフィルタ (LPF) を含む復調回路 11 で復調された後、磁気軸受制御器 13 で信号調整された後、下側径方向電磁石 105 や上側径方向電磁石 104 を励磁駆動する。ローパスフィルタのカットオフ周波数 (通過域平坦部から 3 dB 低下する周波数) よりも加熱用電磁石 3A と加熱用電磁石 3B で発生させる交流磁界の周波数が大きければ、復調された変位センサの位置信号に含まれる、交流磁界によって発生するポンプの

振動成分が小さくなる。そのため、交流磁界によって発生するポンプの振動は回転体 103 の位置制御に影響は及ぼさず、より安定な磁気軸受制御を実現することができる。

[0087] また、加熱用電磁石 3A と加熱用電磁石 3B で発生させる交流磁界の周波数がセンサ周波数よりも大きければ、変位センサの位置信号に含まれる、交流磁界によって発生するポンプの振動成分が小さくなる。そのため、交流磁界によって発生するポンプの振動は回転体 103 の位置制御に影響を及ぼさず、より安定な磁気軸受制御を実現することができる。

[0088] 次に、図 1、図 2 の加熱装置 3 では加熱用電磁石 3A と加熱用電磁石 3B の 2 極で構成した例を示したが、図 8 に 4 極での加熱装置の構成例を示す。この場合、加熱装置 23 としては、加熱用電磁石 23A、加熱用電磁石 23B、加熱用電磁石 23C、加熱用電磁石 23D が互いに 90 度ずつ隔ててロータ軸 113 周りに存在し、コイル 24a、24b、24c、24d がコア 26 の突極部 27a、27b、27c、27d に対し均等に配置される。そして、磁界はロータ軸 113 を通り、ロータ軸 113 周りに突極部 27a、27b、27c、27d を通る 4 つの磁界の閉ループ 25a、25b、25c、25d が形成される。

[0089] また、図 9 には 4 極での加熱装置の別構成例を示す。この場合、加熱装置 31 としては、コの字状のコア 36a の 2 つの突極部 37a、37b に対しそれぞれ配設されたコイル 34a、34b からなる加熱用電磁石 33A、加熱用電磁石 33B とで x 軸正方向に磁界の閉ループ 35a が形成され、一方、コの字状のコア 36b の 2 つの突極部 37c、37d に対しそれぞれ配設されたコイル 34c、34d からなる加熱用電磁石 33C、加熱用電磁石 33D とで x 軸負方向に磁界の閉ループ 35b が形成される。

[0090] 更に、図 10 に 2 極での加熱装置の別構成例を示す。この場合、加熱装置 41 としては、コの字状のコア 36a の 2 つの突極部 37a、37b に対しそれぞれ配設されたコイル 34a、34b からなる加熱用電磁石 33A、加熱用電磁石 33B とで x 軸正方向にのみ磁界の閉ループ 35a が形成される

。このように非対称に構成された場合でも回転体 103 に対し交差した交流磁界の周囲には渦電流損 P_e を生じさせることができる。

[0091] 加熱用電磁石のコイルは、一つの加熱用電源に対して直列に接続されるのが望ましい。しかし、加熱用電磁石のコイルを並列に接続したり、コイルに対して複数の加熱用電源を用意したりしてもよい。

[0092] また、各加熱用電磁石のコアの材料は、積層鋼板やフェライトなどの、導電率が小さく透磁率が大いものが望ましい。しかし、例えば、通常の鉄やステンレスを使用してもよい。この構成は、回転体と同時にステータ側を加熱する場合に有用である。また、アルミニウムなどの非磁性金属や、プラスチックなどの絶縁体を用いたり、コア材料を使用しない空芯コイルを加熱用電磁石として用いたりしてもよい。

[0093] 次に、図 11 にターボ分子ポンプ 100 に対する加熱装置の設置方法について説明する。まず、図 11 中に矢印 A で示す箇所に設置される加熱装置 41 は、図 12 のようにロータ軸 113 の周囲に対しコイル 43 が一方向に捲回されている。また、ロータ軸 113 の外周面には溝が掘られ、この溝に対し導電性を有する加熱対象物 45 が埋設されている。そして、コイル 43 に対しては交流電流が流され、その周囲に交流磁界が生じている。この交流磁界は加熱対象物 45 に対し交差することで加熱対象物 45 では渦電流が発生し、この渦電流により渦電流損 P_e を生じさせることができる。このため、加熱対象物 45 は発熱する。従来のようなベース部 129 を加熱したときの輻射熱による加熱等ではなく、加熱対象物 45 を直接加熱することができるので、回転体 103 に対し効率のよい加熱を行うことができる。

[0094] また、図 11 中に矢印 B で示す箇所に設置される加熱装置 51 は、図 13 のようにロータ軸 113 の周囲に対しコイル 53 が一方向に捲回されることで構成されている。

そして、コイル 53 に対しては交流電流が流され、その周囲に交流磁界が生じている。この交流磁界は回転翼 102 に対し交差することで回転翼 102 では渦電流が発生し、この渦電流により渦電流損 P_e を生じさせることがで

きる。このため、回転翼 102 は発熱する。回転翼 102 を直接加熱することができるので、回転体 103 に対し効率のよい加熱を行うことができる。

[0095] 更に、図 11 中に矢印 C で示す箇所に設置される加熱装置 61 は、図 14 に示すように固定翼スペーサ 125 若しくは外筒 127 の内部にコイル 63 がロータ軸 113 周りに一方向に捲回されることで構成されている。

そして、このコイル 63 に対しては交流電流が流され、その周囲に交流磁界が生じている。この交流磁界は回転翼 102 に対し交差することで回転翼 102 では渦電流が発生し、この渦電流により渦電流損 P_e を生じさせることができる。このため、回転翼 102 は発熱する。回転翼 102 を直接加熱することができるので、回転体 103 に対し効率のよい加熱を行うことができる。

[0096] 更に、図 11 中に矢印 D で示す箇所に設置される加熱装置 71 は、図 14 に示すようにネジ付スペーサ 131 の内部にコイル 71 がロータ軸 113 周りに一方向に捲回されることで構成されている。

そして、このコイル 71 に対しては交流電流が流され、その周囲に交流磁界が生じている。この交流磁界は回転翼 102 の円筒部 102d に対し交差することで回転翼 102 では渦電流が発生し、この渦電流により渦電流損 P_e を生じさせることができる。このため、回転翼 102 は発熱する。回転翼 102 を直接加熱することができるので、回転体 103 に対し効率のよい加熱を行うことができる。

但し、ステータコラム 122 側にコイル 73 を埋設するようにしてもよい。そして、このコイル 73 で発生させた交流磁界を回転翼 102 の円筒部 102d に対し交差させることで、渦電流損 P_e を生じさせるようにしてもよい。

[0097] 次に、本発明の加熱装置を遠心式ポンプに適用した場合について説明する。図 15 に示すように、ロータ軸 113 の頭部には複数枚の羽根 81 が取り付けられている。羽根 81 の先端部に対峙するようにコイル 83 がステータ側に配設されている。そして、このコイル 83 に対しては交流電流が流され

、その周囲に交流磁界が生じている。この交流磁界は羽根 8 1 の先端部分に対し交差することで羽根 8 1 の先端部分では渦電流が発生し、この渦電流により渦電流損 P_e を生じさせることができる。このため、羽根 8 1 は発熱する。

なお、羽根 8 1 の側部を加熱するために、羽根 8 1 の側部に対峙するようにコイル 8 5 が配設されてもよい。この場合には、コイル 8 5 で発生した交流磁界は羽根 8 1 の側部に交差する。このため、羽根 8 1 の側部では渦電流が発生し、この渦電流により渦電流損 P_e を生じさせることができる。

[0098] 次に、本発明の加熱装置をポンプの複数箇所に配設したときの加熱用電源の接続方法について説明する。

図 1 6 には、ロータ軸 1 1 3 の加熱用に加熱装置 9 1 を配設し、一方、回転翼 1 0 2 の加熱用に加熱装置 9 3 と加熱装置 9 5 とを軸方向に隔てた 2 か所に配設した例を示す。加熱用電源 9 7 は、図 1 7 に示すように、加熱装置 9 1、加熱装置 9 3、加熱装置 9 5 同士を直列に接続して交流電流の供給をしてもよいし、図 1 8 に示すように、加熱装置 9 1、加熱装置 9 3、加熱装置 9 5 同士を並列に接続して交流電流の供給をしてもよい。あるいは、図 1 9 に示すように、加熱装置 9 1、加熱装置 9 3、加熱装置 9 5 のそれぞれに対して独立して加熱用電源 9 7 A、9 7 B、9 7 C を配設し、交流電流の供給をしてもよい。

[0099] また、図 2 0 に示すように、加熱装置 9 1 をモータ 1 2 1 の U 相ケーブルの途中に接続、加熱装置 9 3 を V 相ケーブルの途中に接続、加熱装置 9 5 を W 相ケーブルの途中に接続するようにしてもよい。この場合には、モータ用電源 1 9 及びモータ用インバータ 1 8 は、加熱用電源を兼ねている。加熱装置 9 1、加熱装置 9 3、加熱装置 9 5 に対してはモータ用電源 1 9 及びモータ用インバータ 1 8 から交流電流が供給される。この場合、モータの三相に対して、それぞれ、同じ抵抗・インダクタンスの加熱装置を直列に接続するのが望ましい。しかしながら、モータのある相のみに接続したり、モータと加熱装置の接続が並列であったり、抵抗やインダクタンスが加熱装置毎に異

なったりしていてもよい。

[0100] 図示は省略するが、この点は、磁気軸受用電源 17 についても同様であり、磁気軸受用電源 17 は加熱用電源を兼ねるように構成してもよい。

[0101] 加熱用電源は、インバータ、LC共振回路、リニアアンプ等で構成が可能である。また、加熱用電源は、例えば、モータ用インバータと並列にインバータを設置してその出力を加熱装置に接続し、モータ用電源の電力を加熱装置に対して供給する構成となってもよい。また、例えば、モータ用電源が交流の商用電源である場合には、モータ用電源を直接加熱装置に接続することで、これを加熱用電源としてもよい。磁気軸受用電源と加熱用電源を兼用する場合にも、同様の構成が考えられる。

[0102] なお、本発明は、本発明の精神を逸脱しない限り種々の改変をなすことができ、そして、本発明が当該改変されたものにも及ぶことは当然である。また、上述した各実施形態は種々組み合わせても良い。

符号の説明

[0103] 1 保護ベアリング
3、23、31、41、51、61、71、91、93、95 加熱装置
3A、3B 加熱用電磁石
4a、4b、24a、24b、24c、24d、34a、34b、34c、34d コイル
5a、5b、25a、25b、25c、25d、35a、35b 磁界の閉ループ
6、26、36a、36b コア
7a、7b、27a、27b、27c、27d、37a、37b、37c、37d 突極部
11 復調回路
13 磁気軸受制御器
16 磁気軸受用インバータ
17 磁気軸受用電源

18 モータ用インバータ

19 モータ用電源

21、97、97A、97B、97C 加熱用電源

23A、23B、23C、23D、33A、33B、33C、33D 加熱用
電磁石

43、53、63、71、73、83、85 コイル

45 加熱対象物

81 羽根

100 ターボ分子ポンプ

101 吸気口

102、102a、102b、102c 回転翼

102d 円筒部

103 回転体

104 上側径方向電磁石

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

111 金属ディスク

113 ロータ軸

120 保護ベアリング

121 モータ

122 ステータコラム

123、123a、123b、123c 固定翼

125、125a、125b、125c 固定翼スペーサ

127 外筒

129 ベース部

131 ネジ付スペーサ

1 3 1 a ネジ溝

2 0 0 制御装置

請求の範囲

- [請求項1] 回転体と、
該回転体を回転駆動させるモータと、
該モータに回転駆動用の電力を供給するモータ用電源と、
前記回転体を加熱するために所定の磁界周波数の交流磁界を発生させる加熱用電磁石と、
該加熱用電磁石に交流電流によって電力を供給する加熱用電源とを備え、
前記加熱用電磁石で発生された前記交流磁界を前記回転体と交差させることで前記回転体において、該交差した前記交流磁界の周囲に渦電流を発生させることを特徴とする真空ポンプ。
- [請求項2] 前記回転体には前記交流磁界の交差の対象となる所定の導電性を有する加熱対象物が備えられたことを特徴とする請求項1記載の真空ポンプ。
- [請求項3] 前記回転体の剛体モード固有振動数を ω_{res} と定義したときに前記磁界周波数が $\omega_{res}/\sqrt{2}$ より大きいことを特徴とする請求項1又は請求項2記載の真空ポンプ。
- [請求項4] 前記磁界周波数が前記回転体の機械角に基づき定義された定格回転周波数より大きいことを特徴とする請求項1又は請求項2記載の真空ポンプ。
- [請求項5] 前記磁界周波数が前記モータに流れる電流の定格回転時の周波数より大きいことを特徴とする請求項1又は請求項2記載の真空ポンプ。
- [請求項6] 前記モータ用電源の出力電圧を変換し、前記モータに電圧を印加するモータ用インバータと、
該モータ用インバータを制御するモータ用インバータ制御器とを備え、
前記磁界周波数が前記モータ用インバータ制御器の制御周波数の半分より大きいことを特徴とする請求項1又は請求項2記載の真空ポンプ

。

- [請求項7] 前記回転体を空中に浮上支持する磁気軸受と、
該磁気軸受に対して電力を供給する磁気軸受用電源と、
前記磁気軸受用電源の出力電圧を変換し、前記磁気軸受に電圧を印加する磁気軸受用インバータと、
該磁気軸受用インバータを制御する磁気軸受用インバータ制御器とを
備え、
前記磁界周波数が前記磁気軸受用インバータ制御器の制御周波数の半
分より大きいことを特徴とする請求項1又は請求項2記載の真空ポン
プ。
- [請求項8] 前記回転体を空中に浮上支持する磁気軸受と、
該磁気軸受に対して電力を供給する磁気軸受用電源と、
前記回転体の位置を所定のセンサ周波数で変調された位置信号に基づ
き非接触に計測する変位センサと、
前記位置信号を復調させるローパスフィルタを含む復調回路とを備え
、
前記磁界周波数が前記ローパスフィルタのカットオフ周波数より大き
いことを特徴とする請求項1又は請求項2記載の真空ポンプ。
- [請求項9] 前記回転体を空中に浮上支持する磁気軸受と、
該磁気軸受に対して電力を供給する磁気軸受用電源と、
前記回転体の位置を所定のセンサ周波数で変調された位置信号に基づ
き非接触に計測する変位センサとを備え、
前記磁界周波数が前記センサ周波数より大きいことを特徴とする請求
項1又は請求項2記載の真空ポンプ。
- [請求項10] 前記加熱用電源が前記モータ用電源と兼用されたことを特徴とする
請求項1～9のいずれか一項に記載の真空ポンプ。
- [請求項11] 前記回転体を空中に浮上支持する磁気軸受と、該磁気軸受に対して電
力を供給する磁気軸受用電源を備え、前記加熱用電源が前記磁気軸受

用電源と兼用されたことを特徴とする請求項 1 ～ 6 のいずれか一項に記載の真空ポンプ。

[請求項12] 前記加熱用電源が前記磁気軸受用電源と兼用されたことを特徴とする請求項 7 ～ 9 のいずれか一項に記載の真空ポンプ。