

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4228413号
(P4228413)

(45) 発行日 平成21年2月25日 (2009. 2. 25)

(24) 登録日 平成20年12月12日 (2008. 12. 12)

(51) Int. Cl.

F 1

F 1 6 C 32/04 (2006. 01)

F 1 6 C 32/04 Z

B 2 3 B 19/02 (2006. 01)

B 2 3 B 19/02 B

H 0 2 K 7/09 (2006. 01)

H 0 2 K 7/09

請求項の数 2 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願平10-187274
 (22) 出願日 平成10年7月2日 (1998. 7. 2)
 (65) 公開番号 特開2000-18246 (P2000-18246A)
 (43) 公開日 平成12年1月18日 (2000. 1. 18)
 審査請求日 平成17年7月4日 (2005. 7. 4)

(73) 特許権者 000005821
 パナソニック株式会社
 大阪府門真市大字門真1006番地
 (74) 代理人 100097445
 弁理士 岩橋 文雄
 (74) 代理人 100109667
 弁理士 内藤 浩樹
 (74) 代理人 100109151
 弁理士 永野 大介
 (72) 発明者 丸山 照雄
 大阪府門真市大字門真1006番地 松下
 電器産業株式会社内

審査官 岡▲さき▼ 潤

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 回転装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数個の電極部材から構成され、かつ、円周方向でN極とS極が交互に配置されたラジアル磁気軸受の固定子と、前記固定子を収納するハウジングと、厚み T_r 、導伝率 r の珪素鋼板を複数個で構成する回転子と、前記固定子と前記回転子により支持される主軸と、前記主軸を回転駆動するモータとで構成される回転装置において、

前記固定子は前記回転子に面する部分の軸方向の幅 T_d 、導伝率 d の珪素鋼板を複数個有し、 $d > r$ かつ $T_d > T_r$ であること

を特徴とする回転装置。

【請求項 2】

$d \times (T_d)^2 > r \times (T_r)^2$ であることを特徴とする請求項 1 記載の回転装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、生産加工機械あるいは半導体装置のターボ分子ポンプなどで用いられる回転スピンドルに関するものである。

【0002】

【従来の技術】

以下、機械加工における高速スピンドルを例にとり、近年注目されている磁気軸受スピンドルを中心にその課題について説明する。

【0003】

近年機械加工の分野において、高速切削加工に対する要請が強くなっている。高速切削は生産効率を向上させ、切削抵抗の減少により加工精度の向上と工具の寿命を延ばす、また一体の原料から形状を一気に削り出すことで鑄型などの費用を削減できかつ工程の短縮化がはかれる、などの効果が期待されている。

【0004】

また最近の製品品質に対する要求は、加工面の品質すなわち形状精度や面粗度だけでなく、加工表面下の欠陥や変質層の有無まで問われるようになってきており、金属除去に伴う発生熱の影響が低く、切削抵抗が小さくできる高速切削の期待が大きい。

【0005】

さて近年金型加工の分野において、工程の集約化と生産タクトアップを目的として、従来の放電加工を高速のエンドミル加工に置き換えるとりくみが急ピッチで進められている。複雑な曲面形状を有する高硬度材の金型部品加工が切削加工で可能になった理由は、高速切削に耐えるツール、NCソフト、高速送り機構を有するM/C等の実用レベルでの著しい進歩によるものである。

【0006】

M/C(加工機)の性能を決定的に支配するスピンドルには、従来から主に玉軸受による支持構造が用いられてきた。前述した高速切削の要請に対して、潤滑方式の改良、セラミックス軸受の採用などにより、高速化に応えるための開発がなされている。

【0007】

加工用スピンドルの基本性能は、通常DN値(主軸径×回転数)の大きさを評価される。

【0008】

玉軸受スピンドルの場合、近年様々な改良がなされているが、機械的な摺動潤滑をともなうために、寿命という点を考慮すれば、実用的にはDN値は250万程度が限界とされている。

【0009】

一方、磁気浮上により非接触で回転体を支持する能動制御型の磁気軸受スピンドルが、玉軸受方式の限界を超える可能性を持つものとして、近年注目されている。

【0010】

図14はその磁気軸受スピンドルの一例であり、500はスピンドルの主軸、501はモータロータ、502はモータステータである。503と504はフロント側ラジアル軸受、505と506はリア側ラジアル軸受、507と508はスラスト軸受であり、それぞれ回転側のロータと固定側のステータから構成される。509, 510はフロント側とリア側のラジアル変位センサー、511はスラスト変位センサー、512, 513は保護ベアリング、514はケーシングである。

【0011】

図15(イ)(ロ)はラジアル軸受部の原理図を示すもので、600は電磁鋼板から構成される回転子鉄芯(図14のロータ503に相当)、601は固定子鉄芯(図14のステータ504に相当)、602は巻線である。図中に磁束の流れを矢印603で示す。ラジアル磁気軸受は、上下左右の方向から磁気力で回転子600を吸引して回転子を非接触で中心に保持する。

【0012】

磁気軸受の場合、半永久的に使用可能である非接触回転の特徴を活かすことにより、玉軸受のDN値を大きく上回るスピンドルが実現できる可能性がある。前述した加工側の高速・高剛性の要請に応えるために、スピンドルの主軸径をより大きく、またより高速で回転させる試みがなされている。大きな主軸径が要望される理由は、主軸径が大きい程、高速時の慣性剛性(主軸の軸中心が一方向を保とうとする力学的効果)が大きく、またより大きな外径の刃具を把持できるからである。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

エンドミル加工は機械部品の加工において基本的な加工法であり、金型や自動車部品あるいはエアコンのスクロール羽根のような複雑な形状の加工には不可欠である。しかし、工具の支持方法と工具形状に起因する低剛性、低減衰性のために、また切削力が工具の刃数で決まる変動成分を持つために、びびり振動が発生しやすいのも事実である。

【0014】

さて高DN値化を図った磁気軸受スピンドルをもちいて、たとえば高硬度材の金型鋼のエンドミル切削加工を試みた場合、高い周波数のビビリ振動の発生が大きな課題となった。その要因を究明した結果、磁気軸受が磁気浮上により非接触で支持されているがゆえにもっている基本的な素性が大きく関わっていることが分かった。

【0015】

図13は、磁気軸受スピンドルの剛性（変位に対する外力）の周波数特性を示すものである。ゆるやかに変化する外力が主軸に加わったときは、主軸の変位は外力の影響を受けず一定である。しかし外力の周波数が遮断周波数 f_c （たとえば、 $f_c=100\text{Hz}$ ）近傍になると、剛性は低下し主軸変位は外力の影響を最も受けやすくなる。周波数が遮断周波数 f_c を超えた右上がりの部分は、フィードバック制御が及ばない周波数領域であり、浮上物体（主軸）の質量のみから決まる慣性剛性とよばれる特性をもつ領域である。

【0016】

変動する外乱荷重に対して回転主軸を安定に支持するためには、適切な大きさの軸受剛性と減衰特性を持つことが必要条件である。外力の周波数が低く、 $f < f_c$ の領域では、PID制御の微分ゲイン相当するフィードバック係数を変えることにより、磁気軸受のダンピング特性を自在に設定できる。

【0017】

しかし外力の振動数が高くなり、慣性剛性だけで軸受特性が決まる $f > f_c$ の周波数領域になると、制御によるダンピング効果はもはや得られない。したがって、従来の磁気軸受では、高い周波数のビビリ振動に対しては、主軸材料の構造減衰に期待するか、あるいは緩衝材を主軸内部に装着するなどの方策しかなかった。

【0018】

しかし加工負荷が大きく、プロセスダンパー（材料でできる加工粘性抵抗）の小さな高硬度材の切削では、上述した方法ではビビリ振動を完全に抑制することは困難であった。

【0019】

本発明は、たとえば磁気軸受で支持されるスピンドルの上述した課題に対して、抜本的な解決策を与えるものである。本発明を磁気軸受に適用すれば、磁気軸受の高速・高剛性の特徴を失うことなく、軸受特性の基本的な「素性」の改良を図ることにより、ビビリ振動を抑制して高品位加工を実現することができる。

【0020】

【課題を解決するための手段】

本発明の回転装置は、複数個の電極部材から構成され、かつ、円周方向でN極とS極が交互に配置されたラジアル磁気軸受の固定子と、前記固定子を収納するハウジングと、厚み T_r 、導伝率 σ_r の珪素鋼板を複数個で構成する回転子と、前記固定子と前記回転子により支持される主軸と、前記主軸を回転駆動するモータとで構成される回転装置において、前記固定子は前記回転子に面する部分の軸方向の幅 T_d 、導伝率 σ_d の珪素鋼板を複数個有し、 $\sigma_d > \sigma_r$ かつ $T_d > T_r$ であるように構成したものである。

【0021】

【発明の実施の形態】

本発明は磁気軸受スピンドルを高速回転させることによってクローズアップされた現象：渦電流損に注目し、その発生原理を効果的に活用することにより、加工時のビビリ振動を抑制する方策を見出したものである。

【0022】

以下まず最初に本発明の原形モデルとしての第一の実施例の概要を述べ、その原理と効果を渦電流損の理論解析を用いて説明する。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 3 】

(実施の形態 1)

図 1 は、本発明によるラジアル磁気軸受電磁石の第一の実施例（原形モデル）を示すものである。1 は主軸 2 に装着されたラジアル軸受のロータ部（回転子）、3 はスピンドルの固定側に締結されるステータ部（固定子）であり、いずれも複数の電磁鋼板を重ねあわせて構成される。ステータ部 3 は 8 極の独立した磁極から構成された NSNS 型を採用している。すなわち、4 つの N 極 4 a ~ 4 d と 4 つの S 極 5 a ~ 5 d で構成され、異極同士が円周方向で交互に配置された構成となっている。1 つの磁極 4 a に着目すると、6, 7 は巻き線の収納部、8, 9 は異極同士（N と S）の磁極間の間隙部であるスロット部である。6 ~ 9 は他の磁極にも同様に形成されている。

10

【 0 0 2 4 】

本実施例では、上記ラジアル軸受の回転子と固定子に用いる電磁鋼板は板厚が大きく異なる。実施例ではいずれも珪素鋼板を用いているが、回転子 1 の厚み $T_r=0.35\text{mm}$ に対して、固定子 3 は通常用いられる珪素鋼板としては常識外の厚み $T_d=1.5\text{mm}$ を用いている。効果を要約すれば、

1 上記構成により、フィードバック制御が及ばない高周波領域での軸受のダンピング特性の大幅な改善がはかれる。

【 0 0 2 5 】

2 その結果、たとえば高硬度材を対象とした高速・高負荷のエンドミル切削加工に適用しても、ビビリ振動を大幅に抑制できる。

20

【 0 0 2 6 】

上記効果が得られる本発明の原理について、以下ラジアル磁気軸受を渦電流ダンパーと見なした場合の理論解析により詳しく説明する。

【 0 0 2 7 】

I. 渦電流ダンパー解析

磁気軸受の渦電流損失の絶対値を求める従来の研究例、あるいは渦電流ダンパーとしての効果を求める研究例は現段階では見当たらない。そこで本発明の原理と効果を証明するために、渦電流ダンパーのシンプルな解析モデルをもとに、電磁誘導論から直接解析解を導く。

【 0 0 2 8 】

主軸ロータが径方向に微小振動している場合、たとえば $f = 1\text{KHz}$ 以上の高い周波数では制御側は追従できず、起磁力（コイルの巻き数 N と電流値 I との積）は一定のため、ロータとステータ間の磁界はギャップに比例して変動する。

30

【 0 0 2 9 】

この磁束の変化を妨げるように、電磁誘導の法則により、回転側、固定側の電磁鋼板に渦電流が流れる。この渦電流がロータの振動を抑制するダンパー効果となる。このダンパー効果がビビリ振動を抑制するために、はたして実用レベルの大きさで得られるのか、という点について以下考察する。

【 0 0 3 0 】

主軸ロータの振動を、図 2 (ロ) に示すように、狭いギャップを保持して対向している電磁鋼板から構成された二枚の平板間の振動にモデル化する。図 (ロ) において、15 は振動側（回転子 1 に相当）、16 は固定側（固定子 3 に相当）であり、平板 15 は

40

【 0 0 3 1 】

【数 1】

$$x = x_0 + x_1 \sin \omega t$$

【 0 0 3 2 】

で振動するものとする。

起磁力

【 0 0 3 3 】

50

【数 2】

$$E_m = NI$$

【0 0 3 4】

として

【0 0 3 5】

【数 3】

$$B = \frac{NI\mu_0}{x_0 + x_1 \sin \omega t} \cong \frac{NI\mu_0}{x_0} \left(1 - \frac{x_1}{x_0} \sin \omega t\right) \quad \dots \quad (1)$$

10

【0 0 3 6】

したがって磁束密度の変化分：

【0 0 3 7】

【数 4】

$$\Delta B$$

【0 0 3 8】

は、

【0 0 3 9】

20

【数 5】

$$B_0 = NI\mu_0/x_0, \Delta B_0 = B_0 x_1/x_0$$

【0 0 4 0】

とおくと、

【0 0 4 1】

【数 6】

$$\Delta B = -B_0 \frac{x_1}{x_0} \sin \omega t = -\Delta B_0 \sin \omega t \quad \dots \quad (2)$$

30

【0 0 4 2】

電磁誘導論より

【0 0 4 3】

【数 7】

$$\nabla \times J = -\sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots \quad (3)$$

40

【0 0 4 4】

ここで J は電流密度

【0 0 4 5】

【数 8】

$$(\equiv J_x i + J_y j + J_z k)$$

【0 0 4 6】

、 は導伝率（抵抗率 の逆数）である。電磁鋼板の一枚分に着目すると、板厚が十分に小さいために、y 方向の電流密度：

50

【 0 0 4 7 】

【 数 9 】

$$J_y = 0$$

【 0 0 4 8 】

、また z 方向は均一とすると、

【 0 0 4 9 】

【 数 1 0 】

$$J_z = \partial / \partial z = 0$$

10

【 0 0 5 0 】

となる。

【 0 0 5 1 】

【 数 1 1 】

$$\frac{\partial J_x}{\partial y} k = -\sigma \frac{\partial}{\partial t} [-\Delta B_0 \sin \omega t] k$$

$$\frac{\partial J_x}{\partial y} = \Delta B_0 \sigma \omega \cos \omega t$$

20

$$J_x = \Delta B_0 \sigma \omega \cos \omega t \cdot y$$

..... (4)

【 0 0 5 2 】

渦電流損：

【 0 0 5 3 】

【 数 1 2 】

$$W_v$$

【 0 0 5 4 】

30

が、厚みTの電磁鋼板（積層された全長では幅b）、円周方向の長さd、磁束が入る深さSの導体内で消費されるとして、時間平均とx方向及びy方向の平均をとると、

【 0 0 5 5 】

【 数 1 3 】

$$\Delta W_v = J_x^2 \cdot \Delta V / \sigma$$

【 0 0 5 6 】

であるため

【 0 0 5 7 】

40

【 数 1 4 】

$$W_v = \frac{1}{2\pi T} \int_0^{2\pi} \int_0^S \int_{-T/2}^{T/2} \int_0^d \frac{1}{\sigma} J_x^2 dx dy dz d(\omega t) \quad \dots\dots (5)$$

【 0 0 5 8 】

(5)式に(4)式を代入すると、二つの平板間の磁束密度が変化する場合の渦電流損失：

【 0 0 5 9 】

【 数 1 5 】

$$W_v$$

【 0 0 6 0 】

が求まる。

【 0 0 6 1 】

【 数 1 6 】

$$W_v = \frac{bdS}{24} T^2 \Delta B_0^2 \sigma \omega^2 \quad \dots \quad (6)$$

【 0 0 6 2 】

10

但し磁束が入る深さ：Sは表皮効果を考慮して、 $\omega = \omega_0$ のとき $S=S_0$ とすれば、

【 0 0 6 3 】

【 数 1 7 】

$$S = S_0 \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega}} \quad \dots \quad (7)$$

【 0 0 6 4 】

またこの渦電流ダンパーによる単位時間あたりの振動散逸エネルギー：

【 0 0 6 5 】

【 数 1 8 】

20

$$W_c$$

【 0 0 6 6 】

は

【 0 0 6 7 】

【 数 1 9 】

$$W_c = \frac{1}{2} C \omega^2 x_1^2 \quad \dots \quad (8)$$

30

【 0 0 6 8 】

【 数 2 0 】

$$W_c = W_v$$

【 0 0 6 9 】

であるから、減衰定数Cが次のように求まる。

【 0 0 7 0 】

【 数 2 1 】

$$C = \frac{bds}{12x_0^2} \sigma T^2 B_0^2 \quad \dots \quad (9)$$

40

【 0 0 7 1 】

ダンピング効果に影響を与える因子を電磁鋼板の板厚：Tで代表させる。この板厚：Tに対する減衰定数、渦電流損失、減衰と剛性比を求めた結果を、 $f=1\text{kHz}$ 、と $f=4\text{kHz}$ の場合について図3～図5に示す。

【 0 0 7 2 】

計算には主軸回転数：4万rpm、主軸径：90mm、DN値360万の切削加工用高速スピンドルの設計値を参考にして、上記平行平板の振動にモデル化した下記の値を用いた。

【 0 0 7 3 】

【 数 2 2 】

50

B_0 :磁束密度 (=1.5T) , ΔB_0 :磁束密度変化分の最大値、 σ :電磁鋼板の導伝率[$\sigma_r = \sigma_d$
 $= 1.79 \times 10^6 (1/\Omega m)$]、 b :平板の縦幅 (=0.05m) 、 d :平板の横幅($0.09 \times \pi / 2$)、 s :平板に磁束が
 入る深さ(=0.007m, at 40000rpm)、 x_0 :磁気軸受のギャップ(=0.0005m)、 T :電磁鋼板の板厚

【 0 0 7 4 】

結果を要約すれば、次のようである。

1 電磁鋼板の板厚： T を大きくすれば、減衰定数、減衰と剛性比とも大幅に増加し、ダンピング特性が飛躍的に改善されることが分かる。

【 0 0 7 5 】

10

2 一方、半径方向の振動によって発生する渦電流損失は極めて小さい。
 たとえば、電磁鋼板の厚み： $T=5 \text{ mm}$ 、 $f=4\text{kHz}$ 、振幅： $x_1=10 \mu\text{m}$ の場合でも損失は僅か
 $W_v=21.4\text{W}$ であり、ロータの回転によって発生する損失 W_r と比べて1桁から2桁程小さい。
 しかし振動速度 V が小さいために、損失エネルギーが僅かであるにもかかわらず、大きな減衰力
 (たとえば $10 \mu\text{m}$ の振幅で $F_v=170\text{N}$) が得られる。

II . ビビリ振動抑制効果の評価

上記計算から得られた減衰定数 C をもちいて、ラジアル軸受を渦電流ダンパーとみなした場合の振動抑制効果を、再生ビブリの安定限界に関するMerrittの理論[たとえば、稲田重雄ほか：切削工学、朝倉書店、(1975) .]より評価する。

【 0 0 7 6 】

20

解析の途中の過程は省略するが、系を1自由度として、

【 0 0 7 7 】

【数 2 3】

$$K_c$$

【 0 0 7 8 】

を加工材料、加工条件、工具、で決まるカッティングスティフネス、

【 0 0 7 9 】

【数 2 4】

$$K_m$$

30

【 0 0 8 0 】

を機械構造物の剛性 (=スピンドルの剛性とする)、スピンドルの回転部の質量 m 、減衰定数 C とする。

【 0 0 8 1 】

【数 2 5】

$$\delta = C / 2 \sqrt{K_m m}$$

【 0 0 8 2 】

40

としたとき、次の条件が成り立てば、工作機械はビビリ振動に対して安定である。

【 0 0 8 3 】

【数 2 6】

$$K_c \leq \frac{K_m \delta}{2} \sqrt{1 - \delta^2} \quad \dots\dots (10)$$

【 0 0 8 4 】

ダンピング効果に影響を与える因子を電磁鋼板の板厚： T で代表させることにより、安定性の評価をおこなった。また実測値から、ビビリ振動の周波数：

50

【 0 0 8 5 】

【 数 2 7 】

$$f = 1 \text{ KHz}$$

【 0 0 8 6 】

のときのスピンドル動剛性：

【 0 0 8 7 】

【 数 2 8 】

$$K_m = 300 \text{ N} / \mu\text{m}, f = 4 \text{ KHz}$$

10

【 0 0 8 8 】

のとき

【 0 0 8 9 】

【 数 2 9 】

$$K_m = 3000 \text{ N} / \mu\text{m}$$

【 0 0 9 0 】

、カッティングスティフネス：

【 0 0 9 1 】

【 数 3 0 】

20

$$K_c = 4.0 \times 10^5 \text{ N} / \text{m}$$

【 0 0 9 2 】

とした。

図 6 の結果を要約すれば次の通りである。

【 0 0 9 3 】

1 電磁石のステータ側の電磁鋼板の板厚が $T=0.35\text{mm}$ の場合、(10) 式の右边を

【 0 0 9 4 】

【 数 3 1 】

30

$$K_\delta$$

【 0 0 9 5 】

とすれば、

【 0 0 9 6 】

【 数 3 2 】

$$K_\delta = 2.6 \times 10^{-4} \text{ N} / \text{m}$$

【 0 0 9 7 】

であり、

【 0 0 9 8 】

【 数 3 3 】

40

$$K_c \gg K_\delta$$

【 0 0 9 9 】

のため不安定である。

ちなみに、磁気軸受に通常用いられる電磁鋼板の厚みは、 $T=0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ 程度である。

またモータ、変圧器、リアクトル等に用いられる電磁鋼板も、通常やはり同程度の厚みのものが用いられる。

【 0 1 0 0 】

50

2 電磁鋼板の板厚を $T > 1.5\text{mm}$ にすると、

【0101】

【数34】

$$K_c < K_\delta$$

【0102】

となるため系は安定となり、ビビリ振動は発生しない。

以上の結果から、狭いギャップを保って対向している電磁鋼板が相対的に振動している場合、いずれか一方の電磁鋼板の板厚を十分に大きくすれば、渦電流損失のダンパー効果により、ビビリ振動を抑制できることが分かる。

10

【0103】

なを(9)式から、減衰定数 C は導伝率に比例しかつ電磁鋼板の板厚の2乗に比例する。したがって、ビビリ振動を抑制するダンパー効果は、電磁鋼板の導伝率を変えても調節できる。

【0104】

本発明は渦電流損失をラジアル軸受のダンパー効果として利用しているが、通常磁気軸受に発生する渦電流損失は極力回避すべきものとして扱われている。

【0105】

従来は主軸の回転によって回転側の電磁鋼板に発生する渦電流損失が、磁気軸受スピンドルの高速化を図る上で大きな課題とされていた。回転子鉄芯中の一点は回転によって、図1(イ)に示すように、N S N Sと固定子3の磁極に面して磁束10の方向と大きさが変化するために、回転子鉄芯1には変動する誘起起電力が生じて渦電流が流れる。この場合の渦電流損失 W_r は、次式で示すように磁束密度の最大値 B_0 、角速度、電磁鋼板の板厚 T のそれぞれの2乗に比例し、導伝率に正比例する。

20

【0106】

【数35】

$$W_r \propto T^2 B_0^2 \sigma \omega^2 \quad \dots (11)$$

30

【0107】

この渦電流損失 W_r の大きさは、磁気軸受スピンドルの高DN値化を図った場合、無視できないオーダーとなる。この損失： W_r による主軸の温度上昇は、主軸の軸方向の伸びをもたらす、振れ精度を低下させ、また複合部品により構成される回転主軸の信頼性に多大な悪影響を与える。この損失 W_r を小さくするために、通常回転子鉄芯1は、極力板厚 T が薄く導伝率が低い電磁鋼板(珪素鋼板)を重ねあわせた積層構造が採用される。

【0108】

本発明は、ロータの回転によって発生する上述した渦電流損失 W_r と異なり、ロータの径方向の振動による渦電流損失 W_v は、回転側と固定側の両方に発生するという点に着目したものである。したがって、

40

(1) 回転側は損失 W_r を極力低減するために、従来同様に薄く、導伝率の低い(すなわち抵抗率の高い)珪素鋼板を用いる。

【0109】

(2) 固定側には損失 W_v を積極的に発生させるために、たとえば板厚が厚く、あるいは導伝率の高い珪素鋼板を用いる。

【0110】

上記(1)(2)を同時に施すことにより、元来「諸刃の剣」である渦電流損のマイナス面(主軸の発熱)を押えて、プラス面(ダンパー効果)のみを効果的に引き出すことが可能となるのである。

【0111】

50

このとき、たとえ固定側であったとしても、発熱に起因するマイナス面の悪影響が懸念される。しかし

(1) 主軸ロータが回転することに発生する渦電流損失 W_r は、原理上、主軸ロータ側に発生するものがほとんどで、固定側では少ない。

【0112】

(2) 固定側に渦電流損失が発生しても、回転側に発生する場合と比べて次の点で有利である。

【0113】

1 主軸(回転側)が発熱する場合と比べて、とスピンドルの基本性能(振れ精度)に与える影響は小さい。

【0114】

2 固定側の冷却設計の自由度は、回転側(主軸)の場合と比べて、はるかに高い。

【0115】

3 ダンパー効果を得る上で、不必要な損失を減らす方策(後述するダンパー部材等)を適用できる。

【0116】

(3) ダンパー効果を期待するラジアル振動による渦電流損失は、主軸が振動しているときのみ発生する。またこの振動による損失は、回転によるものと比べて、1~2桁小さい。

【0117】

上記理由により、本発明ではマイナス面の悪影響は極力小さくできる。

(実施の形態2)

図7は、本発明によるラジアル磁気軸受電磁石の第2の実施例を示すものである。20は主軸21に装着されたラジアル軸受のロータ部である回転子鉄芯、22はスピンドルの固定側に締結されるステータ部である固定子鉄芯である。回転子鉄芯20は、複数枚の薄く導伝率の低い電磁鋼板($T=0.1\sim0.5\text{mm}$ 程度)を重ねあわせて構成される。一方、固定子鉄芯22は、通常用いられる回転子同様の薄い電磁鋼板23と、ダンパー部材としてもちいる厚い電磁鋼板24の組み合わせから構成される。

【0118】

(実施の形態3)

図8は本発明の第3の実施例を示すものである。高い周波数になると渦電流が表皮効果により部材の表面近傍にしか流れないことを利用したもので、固定側電磁石のダンパーとして機能する部分の径方向の厚みを極力薄くして、それ以外の部分には従来同様の薄く、導伝率の低い電磁鋼板で構成したものである。

【0119】

30は主軸31に装着されたラジアル軸受のロータ部である回転子鉄芯、32はスピンドルの固定側に締結されるステータ部である固定子鉄芯である。この固定子鉄芯32は断面T字形のダンパー用電極部材33と、従来通りの板厚の薄い電磁鋼板である軸受用電極部材34から構成される。

【0120】

固定子鉄芯32は8極の独立した磁極から構成されたNSNS型を採用している。すなわち、4つのN極35a~35dと4つのS極36a~36dで構成され、異極同士が円周方向で交互に配置された構成となっている。1つの磁極35aに着目すると、37, 38は巻き線の収納部、39, 40は異極同士(NとS)の磁極間の間隙部であるスロット部である。37~40は他の磁極にも同様に形成されている。

上記構成により、

1 固定子鉄芯32に渦電流による発熱があったとしても、発熱箇所はダンパー用電極部材33のみに限定される。

【0121】

2 第1、第2の実施例と比べて、固定側電磁石の磁気特性の劣化を極力小さく押さえ

10

20

30

40

50

られる。電磁石とロータの間で形成される閉ループ磁気回路（N極 回転子 30 S極 N極）の特性に与える影響を充分小さくできる。

【0122】

3 ダンピング効果の大きさは、ダンパー部材33の軸方向の幅：Tdを変えることによって任意に設定できる。

【0123】

4 抑制するビブリ振動の周波数：fの最小値によって、ダンパー部材33の径方向の厚み：Tfを決める。高い周波数では、表皮効果により磁束は部材の内面に深く入らないため、実施例ではTf=5mmに設定した。

【0124】

図9は前記ダンパー部材の回転子に面する内面に、抵抗率の小さな導体の皮膜をたとえば溶射などの工法を用いて形成した場合を示す。100は主軸101に装着されたラジアル軸受のロータ部である回転子鉄芯、102はスピンドルの固定側に締結されるステータ部である固定子鉄芯である。この固定子鉄芯102は、回転子100に面する内面に銅またはアルミなどの導体皮膜103が形成されたダンパー用電極部材104と、軸受用電極部材105から構成される。ちなみに銅の抵抗率は、 $=1.55 \times 10^{-8}$ m、アルミは $=2.50 \times 10^{-8}$ mであり、 10^{-7} 台の珪素鋼板と比べて充分に大きい。そのため渦電流が流れ易く、一層のダンパー効果を得ることができる。この導体皮膜を電極の内面に形成する方法は上記第3以外の実施例にも適用できる。

【0125】

（実施の形態4）

図10は本発明の第4の実施例を示すもので、ダンパー部材を冷却する放熱シートを磁気軸受の固定子側に設けたものである。この実施例は、たとえば電磁石に供給する電流の高周波の変動成分が大きく、ダンパー部材の発熱が無視できない場合の冷却方法の一例を示すものである。

【0126】

40は主軸41に装着されたラジアル軸受のロータ部である回転子鉄芯、42はスピンドルの固定側に締結されるステータ部である固定子鉄芯である。このステータ部42は従来通りの板厚の薄い電磁鋼板43と固定子鉄芯の側面に装着されたダンパー部材44とこのダンパー部材43の発熱を放熱する放熱シート45から構成される。46、47はスピンドルのハウジングである。ダンパー部材44は断面形状がL字形をしており、このダンパー部材44と薄い電磁鋼板43の間に放熱シート45を密着させた状態で挟み、ハウジング46、47側へ放熱する。そのため本実施例では、

1 放熱シート45の厚みが薄いために、ラジアル軸受の軸方向長さはほとんど変えなくてよい。

【0127】

2 ハウジング側46、47の冷却（水冷も可）は容易であり、また放熱シートによる伝熱面積は充分大きくとれる。

【0128】

放熱シートとしては、単結晶ライフのグラファイトである公知の「パナソニックグラファイト」を採用した。同材料は、固相 固相法のプロセスで製造されたもので、シート形状の製作が容易であり、熱伝導性が銅の数倍もすぐれているものである。

【0129】

さて、以上の実施例はすべて本発明を磁気軸受に適用したものであった。しかし磁気回路の構成が磁気軸受と類似しているモータにも本発明を適用できる。

【0130】

（実施の形態5）

図11は本発明の第5の実施例を示すもので、振動抑制効果を得るためのダンパー部材をラジアル磁気軸受同様にモータに装着した例を示す。

【0131】

5 1 はスピンドルの主軸、5 2 はモータロータ、5 3 はモータステータである。5 4 と 5 5 はフロント側ラジアル軸受（第一のラジアル軸受）のロータとステータ、5 6 と 5 7 はリア側ラジアル軸受（第二のラジアル軸受）のロータとステータである。5 8 と 5 9 はスラスト軸受のロータとステータである。6 0 , 6 1 はフロント側とリア側のラジアル変位センサー、6 2 はスラスト変位センサー、6 3 , 6 4 は保護ベアリング、6 5 はフロントプレート、6 6 はフロントケース、6 7 はリアケース、6 8 はリアプレートである。

【0 1 3 2】

主軸 5 1 は、フロント側ラジアル軸受のロータ 5 4 が装着されたフロント部 6 9、モータロータ 5 2 が装着されたモータ部 7 0、リア側ラジアル軸受のロータ 6 が装着されたリア部 7 1 から構成される。

10

【0 1 3 3】

7 2 はフロント側ラジアル軸受のステータ 5 5 に装着されたフロント側ダンパー部材、7 3 はモータステータ 5 3 に装着された中央部ダンパー部材、7 4 はリア側ラジアル軸受のステータ 5 7 に装着されたリア側ダンパー部材である。モータも磁気軸受同様に回転側、固定側とも薄く導伝率の低い電磁鋼板から構成される場合が多いが、磁気回路の構成が磁気軸受と良く似ているために、第 1 ~ 第 4 の実施例で説明した構成を同様に施せば、振動抑制効果を得ることができる。本実施例では、薄い珪素鋼板とダンパー部材の組み合わせたステータの構成を採用している。

【0 1 3 4】

また図 11 の例のごとく、フロント側とリア側に加えて中央部のモータにもダンパー効果を施せば、両サイドの軸受を節とする振動も抑制することができる。

20

【0 1 3 5】

（実施の形態 6）

図 1 2 は本発明の第 6 の実施例を示すもので、振動を抑制するダンピング作用の大きさを外部から任意に調節できるようにした例を示す。この実施例では、磁気軸受の固定子側を軸受用固定子とダンパー用固定子の 2 つで構成し、このダンパー用固定子に軸受用主巻線とは別の副巻線を施すことにより、ダンパー用固定子に与えられる磁束密度を任意に調節できるようにしたものである。

【0 1 3 6】

8 0 は主軸 8 1 に装着されたラジアル軸受のロータ部である回転子鉄芯、8 2 はスピンドルの固定側に締結されるステータ部である固定子鉄芯である。このステータ部 8 2 は従来通りの板厚の薄く導伝率の小さい電磁鋼板から構成される軸受用固定子 8 3 と、この軸受用固定子よりも外径が大きく、かつ板厚の厚いあるいは導伝率の高い電磁鋼板から構成されるダンパー用固定子 8 4 から構成される。8 5 は前記 2 つの固定子 8 3、8 4 の両方にまたがって巻かれた主巻線、8 6 はダンパー用固定子 8 4 だけに巻かれた副巻線である。

30

【0 1 3 7】

1 主巻線 8 5 に流す電流を I_B 、副巻線 8 6 に流す電流を $I_D = \pm I_B$ とする。

2 したがって、軸受用固定子 8 3 によって発生する磁束密度を B とすれば、ダンパー用固定子 8 4 によって発生する磁束密度 B_D は、2 つの巻線 8 5 , 8 6 に流す電流で決まるため、 $B_D = B \pm B$ なる。この場合、2 つの巻線 8 5 , 8 6 の電流供給源（ドライバー）は共通でよい。

40

【0 1 3 8】

3 をダンピングパラメータとすれば、を 0 から 1 の範囲で変えることにより、磁束密度 B_D （すなわち振動減衰効果）を 0 から 2 倍の範囲で調節できる。

【0 1 3 9】

したがって、本発明により加工対象（金型材、アルミ etc.）と加工条件（回転数、切り込み量、送り速度 etc.）に合わせて、ビビリ振動を抑制する最も適切なダンピング特性を選ぶことができる。このビビリ振動を磁気軸受が内蔵する変位センサーあるいは力センサー（電磁石の電流値から演算）からの情報をもとに上記 を制御すれば、スピンドルのどのような使用条件下でも、ビビリ振動を最適なダンピング特性で自動的に制御できる「

50

オートダンピング・コントロール」が実現可能となる。

【0140】

また能動制御型の磁気軸受の場合は、磁気軸受のバイアス電流を変えることにより軸受の剛性も変えることができるために、図5の例に示す減衰と剛性比(C/Km)も任意に変えることができる。

【0141】

高速スピンドルの場合、主軸の固有振動数を上げるために、限界に近いところまで主軸の軸長を短縮化する必要があるが、実施例の構成にすればラジアル軸受の軸方向の長さ[図(イ)の寸法L]が変らないために、主軸の全長を変えないで、ダンピング特性のコントロールが可能である。またラジアル軸受の基本性能(剛性、負荷能力)も、 $B_D = 0$ の場合 $B_D = B$ であるため従来と変らない。固定側の外径は大きくなるが、ハウジング外径が大きくなっても、スピンドルの性能・信頼性にはなんら影響を与えない。

【0142】

上記発明は磁気軸受に適用した例であるが、第5の実施例で示したように、モータに適用してもよい。この場合、主巻線部はモータの回転のために、また副巻線部はダンパー効果の大きさの調節のために用いられよう。

【0143】

また電磁鋼板は通常絶縁皮膜が形成されており、本発明の実施例の説明の中で電磁鋼板の厚みとは、積層された場合は皮膜間の間隔を示す。したがってダンパー用電極部材は、絶縁皮膜の無い薄い電磁鋼板を重ねあわせ厚くして用いてもよい。

【0144】

以上、高速切削用のスピンドルを例にあげて説明したが、加工用スピンドルに限らず回転体を安定に支持するためには、軸受の剛性に対してバランスのとれた適切な減衰性能が要求される場合が多い。元来、ダンパーを別途設けることでしかカバーできなかったダンピング効果が、回転数の上限値に影響を与えるスピンドルの軸方向寸法を大きく変えることなく、高周波領域で得られる本発明の効果は極めて大きい。

【0145】

【発明の効果】

本発明は、磁気軸受スピンドルを高速回転させることによってクローズアップされた現象：渦電流損を利用したものである。すなわち、渦電流損失が次のような「諸刃の剣」であることに着目し、

1 マイナス面 ... 主軸に発熱をもたらし、基本性能(振れ精度)と信頼性に多大な悪影響を与える。

【0146】

2 プラス面 ... ダンピング特性向上と振動抑制の効果(ただし磁気軸受ではまだ活用されていない)

上記マイナス面を押さえ、まだ活用されていないプラス面を効果的に引き出すことにより、磁気軸受の弱点であった高速時のダンピング特性の不足を根本的に改善することができる。また本発明を適用した磁気軸受は、従来の磁気軸受電磁石とスピンドルの構成(主軸の軸長)と基本性能(DN値)を大きく変えることなく、加工時のビビリ振動を抑制することができる。

【0147】

すなわち本発明により、従来磁気軸受スピンドルの加工時の課題が解消されるため、磁気軸受スピンドルが本来持っている基本的能力(高速・高剛性)を一層活かした形で、高速切削・高品位加工の要請に応えることができる。また本発明は磁気回路がよく似ているモータにも適用でき、その実用的価値は極めて大きい。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明にかかる第一の実施の形態であるラジアル磁気軸受の電磁石の原理図

【図2】渦電流ダンパーの解析モデルを示す図

【図3】減衰定数と電磁鋼板の板厚の関係を示す図

10

20

30

40

50

【図 4】渦電流損失と電磁鋼板の板厚の関係を示す図

【図 5】減衰と剛性比と電磁鋼板の板厚の関係を示す図

【図 6】安定・不安定領域と電磁鋼板の板厚の関係を示す図

【図 7】本発明にかかる第 2 の実施の形態であるラジアル磁気軸受の電磁石の原理図

【図 8】本発明にかかる第 3 の実施の形態であるラジアル磁気軸受の電磁石の原理図

【図 9】上記第 3 の実施例のダンパーに導体皮膜を形成した図

【図 10】本発明にかかる第 4 の実施の形態であるラジアル磁気軸受の電磁石の原理図

【図 11】本発明にかかる第 5 の実施の形態であるダンパー付モータを搭載したスピンドルの正面断面図

【図 12】本発明にかかる第 4 の実施の形態であるラジアル磁気軸受の電磁石の原理図

10

【図 13】磁気軸受の剛性と周波数の関係を示す図

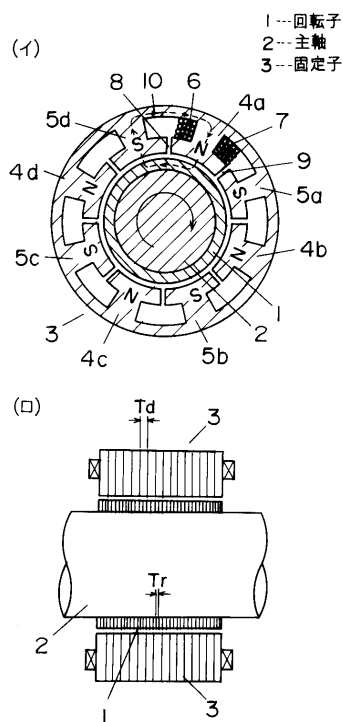
【図 14】従来の磁気軸受スピンドル正面断面図

【図 15】従来のラジアル磁気軸受電磁石の原理図

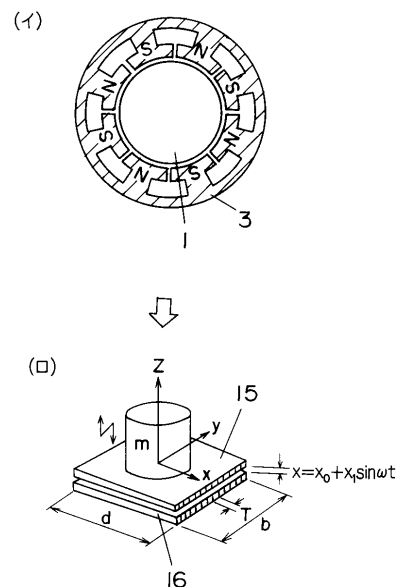
【符号の説明】

- 1 回転子
- 2 主軸
- 3 固定子

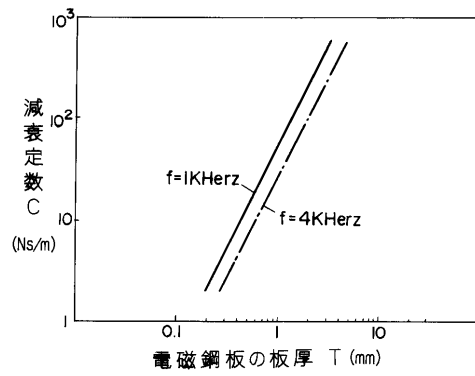
【図 1】



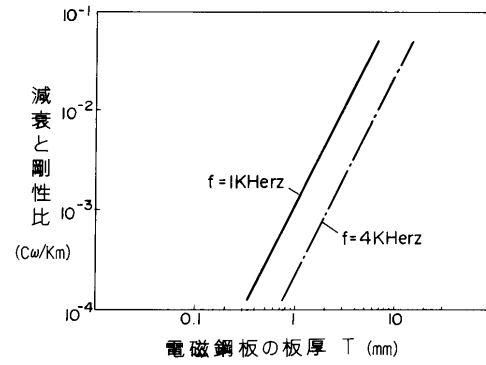
【図 2】



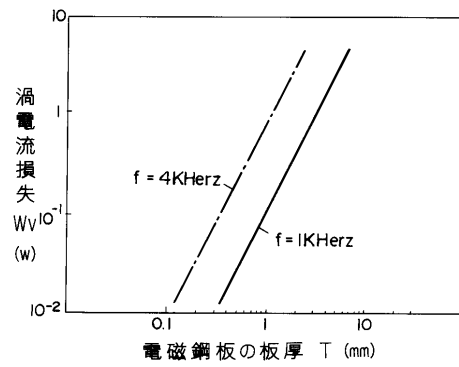
【図 3】



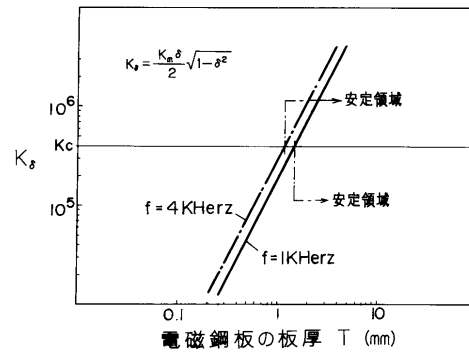
【図 5】



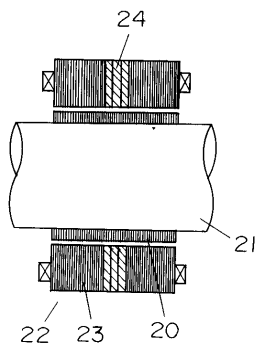
【図 4】



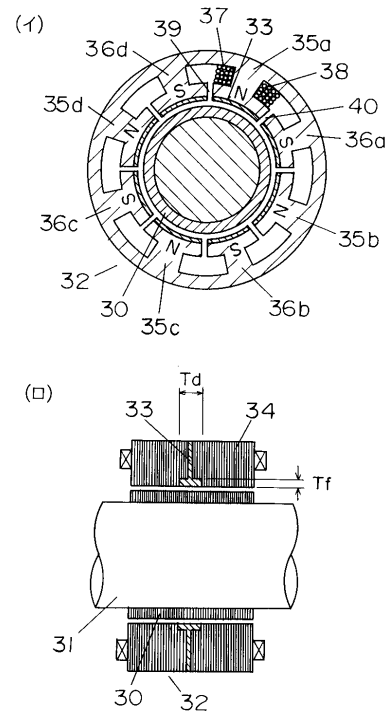
【図 6】



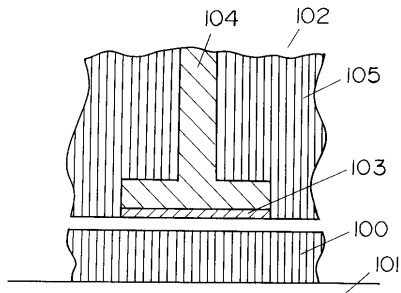
【図 7】



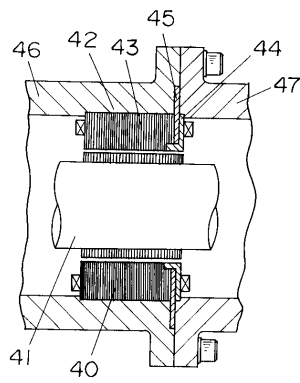
【図 8】



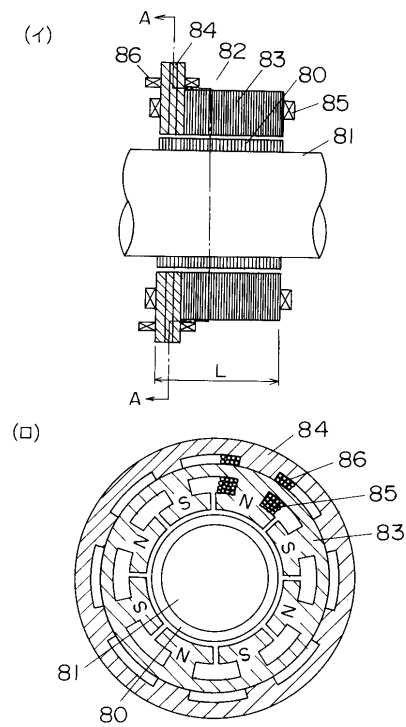
【図 9】



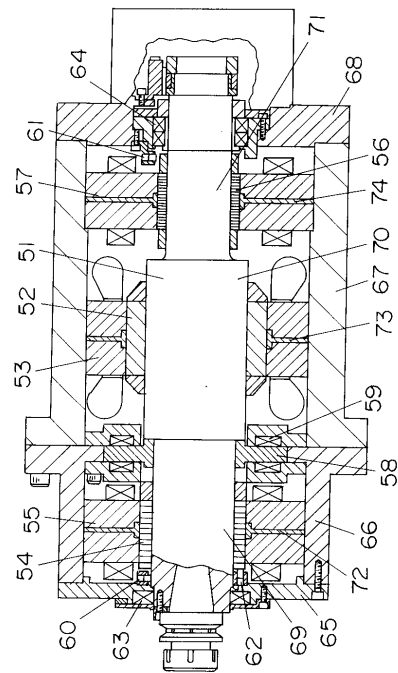
【図 10】



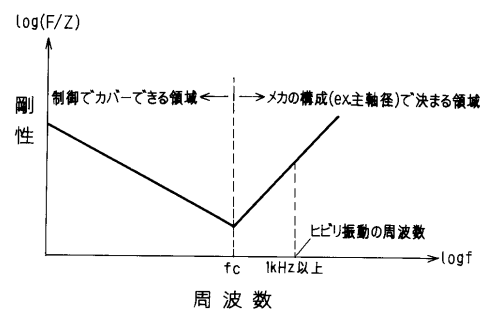
【図 12】



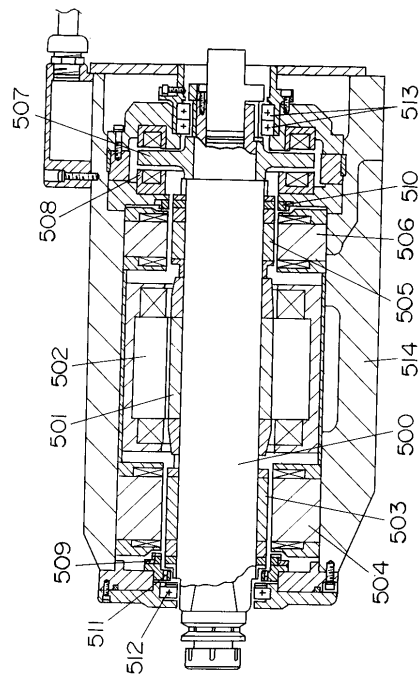
【図 11】



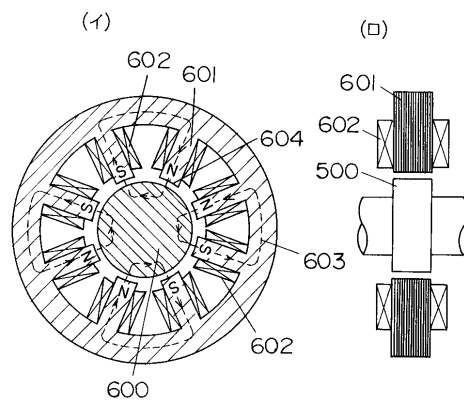
【図 13】



【図 14】



【図 15】



フロントページの続き

(56)参考文献 実開平05-069397(JP,U)
特開平09-236123(JP,A)
特開平05-196041(JP,A)
特開平07-305723(JP,A)
実開平05-091171(JP,U)
実開昭60-101222(JP,U)
特開平06-213231(JP,A)
特開平09-100835(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F16C 32/00-32/06
B23B 19/02
H02K 7/09
H02K 1/00- 1/16
H02K 1/18- 1/26
H02K 1/28- 1/34