永久磁石を用いた反発浮上形磁気軸受の回転振動特性

Characteristics of Rotating Vibration of Repulsive Type Magnetic Bearing Using Permanent Magnet

大路貴久・鹿野 充・Subhas C. Mukhopadhyay・山田外史・岩原正吉

金沢大学工学部附属電磁場制御実験施設, 石川県金沢市小立野2-40-20 (☎920-8667)

T. Ohji, M. Kano, S. C. Mukhopadhyay, S. Yamada, and M. Iwahara

Laboratory of Magnetic Field Control and Applications, Faculty of Engineering, Kanazawa University,

2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa 920-8667

(1999年10月26日受理, 2000年1月25日採録)

A permanent magnet bearing system has been fabricated in our laboratory that utilizes the repulsive forces operating between the stator and rotor permanent magnets for the levitation without any radial control. Usually a magnetic bearing system characteristically has constant stiffness in the radial direction and is soft at steady position. Therefore, it is required to determine the rotor vibration conditions at high rotational speed. This paper discusses the attenuation of vibration for axial and radial disturbances in this system. The rotor runs through the critical speed effectively owing to the soft stiffness.

Key words: magnetic bearing, permanent magnet, rotor vibration, natural frequency

1. はじめに

一般に磁気軸受は, 利点として機械的摩擦や摩耗の問題, 振動, 騒音の問題が極めて少ないことが挙げられる¹⁾. 著者らの提案する永久磁石を用いた反発浮上形磁気軸受(永久磁石反発形磁気軸受)は, これらの利点を有しつつ, さらに制御電磁石や制御回路の数を削減し, コスト削減や周辺装置の縮小を可能にした簡易な磁気軸受構成を持つ. この構成はフライホイール電力貯蔵装置など回転体に対し機械的に非接触を確立した状態でエネルギーを得る装置等に適用できる. 永久磁石によって確立された半径方向の受動安定軸は剛性が小さく, さらに定常位置においてその剛性は一定という, 一般の能動形磁気軸受とは異なる特徴を持つため, 柔らかい支持において高速回転での振動状態を把握し, 生じた振動への対処法を考慮する必要がある.

本稿では, 回転体の外乱に対する振動特性と, 固有振動数付近での振動に対する減衰を確認するとともに, 本試験装置における半径方向の剛性と回転体の固有振動数との関係について検討した. また, 高速回転時や固有振動数近辺での振動を回避する方法についても検討した.

2. 磁気軸受構成と制御システム

永久磁石反発形磁気軸受として縦軸形・横軸形の2種類

の構成²⁾が考えられるが, 本稿では試験装置として横軸形磁気軸受を使用し実験を行った. 試験装置の概略をFig. 1に示す.

回転体の軸両端に2組の軸受部永久磁石を配置し, フライホイールを軸中央に設ける. ギャップセンサには渦電流式センサを使用しており, 円筒形の制御電磁石に対向して2個配置し, その平均を変位信号として検出する. 他のギャップセンサは振動測定のために使用し制御系とは無関係である. 回転体の駆動には誘導機を用い非接触浮上・安定回転を確立する. 回転体質量 7.9kg, 軸長 510mm, フライホイール直径 220mmに設計されている.

Fig. 1 Configuration of the repulsive type magnetic bearing.

Fig. 2 Permanent magnet configuration.

軸受部永久磁石の構成をFig.2に示す。軸方向に着磁されたネオジ磁石 (Neomax35, 保磁力 $1.01 \times 10^6 \text{ A/m}$, 比透磁率1.07) を使用しロータ部磁石, ステータ部磁石, 上部ステータ磁石で構成する。上部ステータ磁石により浮上方向の剛性は約1.7倍程度に増加する。また, ロータ部磁石には10mm厚のものを3枚一組として使用し, 円周方向の着磁不均一を軽減している³⁾。

Fig.3に制御システムと計測システムの構成を示す。検出された軸方向の変位信号および制御電磁石の電流信号をA/Dコンバータを介してDSPに取り込み, ホストコンピュータから与えられた制御パラメータをもとに, 制御電磁石に与える電圧をコントローラで計算し, D/Aコンバータを介してパワーアンプに出力する。半径方向のギャップセンサはFFTアナライザに接続し, 振動測定を行う。コントローラとして積分形最適レギュレータを使用しており, 定常位置は制御電磁石のギャップ1mm, 定常電流は0.7Aである。

Fig. 3 Controller block diagram.

3. 実験結果

まず安定回転 (2000rpm) 時に生じた外乱に対する回転体の振動特性を検討する。ここで安定回転の指標として半径方向の振動振幅が約0.1mm以下 (回転数に同期した機械的誤差のみ) とする。また, 試験装置の半径方向の最小メカニカルクリアランスは誘導機の回転子-固定子間で1.5mmである。

コントローラの制御性を調べるために, 軸方向 (Z軸方向) にステップ状外乱を安定浮上および安定回転時にて印加した場合の振動状態をFig.4に示した。この結果, 安定浮上時, 安定回転時ともに約0.7秒で静定しており, いずれの場合も軸方向外乱に対して安定であるとともに回転による影響は無いと言える。Fig.5は浮上方向 (Y軸方向) のインパルス状外乱に対する浮上方向振動特性である。外乱は回転軸をはさんで半径方向ギャップセンサの反対側から機械的振動を加えた。半径方向は永久磁石の反発力だけで持たせるため, 基本的にはバネ要素のみであるが, 実際には半径方向の振動減衰が僅かに存在し, 安定回転時の印加外乱は緩やかに収束する。これは回転体振動時に生じる傾き運動に対し, 制御電磁石部に僅かな減衰要素が存在するためであると考えられる。

(a) 0 rpm

(b) 2000 rpm

Fig. 4 Z-axis vibration characteristics due to Z-axis disturbance.

(a) 0 rpm

(b) 2000 rpm

Fig. 5 Y-axis vibration characteristics due to Y-axis disturbance.

Fig.6に安定浮上時での半径方向へのインパルス外乱に対する半径方向振動のパワースペクトルを示す。ここで水平方向 (X軸方向) および浮上方向に印加した機械的振動の大きさは異なるため, 特に振動周波数成分のみに注目すると, 水平方向は2.8Hz, 6.0Hz, 浮上方向は4.0Hz, 8.0Hzで存在し, 半径方向の剛性が小さいため固有振動数も非常に低い周波数で存在すると言える。Fig.7は実際に回転体を駆動した時の半径方向の振動幅を測定したものである。Fig.6で検出した振動数にほぼ等しく, 600rpm付近でふれ回りが非常に大きくなる。この時, 半径方向の振動幅は最大で約1.2mmであり固有振動数付近での回転運動は不安定ながらも切り抜けることができた。また3360rpm付近での振動についてFig.8に示す。この際, 半

(a) X-direction

(b) Y-direction

Fig. 6 Power spectrum due to impulse disturbance along radial direction.

Fig. 7 Peak-to-peak displacement versus rotational speed.

Fig. 8 Vibration characteristics at 3360 rpm.

径方向のギャップセンサは軸の両端に浮上方向から設置し実験を行った。図のように回転体は振動周波数が約4Hzで並進運動をしている。Fig.7より不安定状態となる回転数は4000rpm以下において3箇所存在するが、どの回転数においても振動周波数はやはり約4Hz程度となった。このような振動を生じた場合でもさらに回転数を上昇し、振動を

切り抜けることは可能であったが、さらに厳密に不安定要素である危険速度に対する検討を行うために、次節では本装置の回転体を3質点ロータとしてモデル化し、安定回転可能な周波数領域を解析的に調べた。

4. 解析結果

回転体をフライホイール部および2組のロータ部磁石で構成された3質点ロータとして構造解析手法の一つである有限要素法による解析⁹⁾を行った。解析モデルをFig.9に示す。仮定として半径方向の剛性は永久磁石のみで存在するものとし、制御電磁石によって半径方向に与える剛性は無視する。Table 1には解析に使用した定数を示した。ここで J_i ($i = 1, 2, 3$) はX軸およびY軸回りの慣性モーメント、 J_{pi} は極慣性モーメント、 EI は軸の曲げ剛性である。また半径方向の剛性は反発力測定により水平方向、浮上方向で

Fig. 9 Three-wheel rotor model.

Table 1 Parameters for analysis of three-wheel rotor.

$m_1 = m_3 = 0.434 \text{ kg}$
$J_1 = J_3 = 2.313 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$J_{p1} = J_{p3} = 1.358 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$m_2 = 4.24 \text{ kg}$
$J_2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$J_{p2} = 2.12 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$E I_1 = E I_2 = 4.016 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^2$
$l_1 = l_2 = 0.214 \text{ m}$

それぞれ $K_x = 1030 \text{ N/m}$, $K_y = 2320 \text{ N/m}$ となっている。そこで、浮上方向の剛性を導入して回転数増加に対する固有振動数の変化をFig.10として示す。解析結果は三次までとする。回転数と固有振動数が等しい直線と各モードとの交点が危険速度である。本装置の場合、半径方向の剛性は安定浮上状態で一定であり、ここでは $K_y = 2320 \text{ N/m}$ として解析した。二次モードでの危険速度から三次モードでの危険速度までの領域（ハッチング部）を安定回転域と考えれば、安定回転域は約130rad/sから1680rad/sまで広範囲にわたる。比較として同一の回転体に対し、一般に実用的な支持剛性 $K_y = 100,000 \text{ N/m}$ を持つ磁気軸受で浮上させ

Fig. 10 Natural frequency of oscillation versus rotational speed.
(Stiffness $K_y = 2320$ N/m)

Fig. 11 Natural frequency of oscillation versus rotational speed.
(Stiffness $K_y = 100,000$ N/m)

た場合をFig.11に示した。回転体は中央のフライホイール部の極モーメントが大きいため、二次モードの変化が最も大きく、安定回転域が極端に狭まる。よって永久磁石によ

る柔らかい剛性での受動磁気軸受は、安定回転域の増加という点ではフライホイールによる電力貯蔵等の応用に適している。

5. まとめ

永久磁石反発形磁気軸受は、半径方向剛性が比較的小さく、かつ定常位置で一定であるという特徴を有する。本稿では、回転体に外部から与えられた外乱に対する安定性と、回転体の固有振動数に対する検討を行った。結果とそれに対する課題を以下に挙げる。

- ・回転体に与えられた外乱は安定回転時であれば、安定浮上時と同様に減衰し安定状態となる。
- ・回転体の固有振動数は低速回転時に存在し、回転体のふれ回りは最大で1.2mm程度となったが、回転を上昇させることで安定回転に復帰できた。また回転体振動時の振動周波数は剛性が柔らかいため約4Hzという非常にゆっくりとした振動となり、この点は制御電磁石と受け側の形状の関係から振動軽減を目指す必要がある。
- ・回転体の二次モードでの危険速度は非常に小さいため三次モードでの危険速度までの安定回転域が大きく取れる。

文 献

- 1) 電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会編：磁気浮上と磁気軸受，第5章，(コロナ社，1993)。
- 2) S. C. Mukhopadhyay, T. Ohji, T. Kuwahara, M. Iwahara, S. Yamada and F. Matsumura : NASA periodicals, **NASA/CP-1998-207654**, 393-405 (1998).
- 3) 大路貴久，鹿野 充，S.C.Mukhopadhyay，山田外史，岩原正吉：電気学会マグネティクス研究会資料，MAG99-44，(1999)。
- 4) 日本機械学会編：磁気軸受の基礎と応用，p110 (養賢堂発行，東京，1995)