加速度フィードバック制御を用いた磁気軸受の弾性ロータに対する浮上・制振実験

Levitation and Vibration Suppression Experiment of Magnetic Bearings Using Acceleration Feedback Control for an Elastic Rotor

○池田龍哉¹,木村祐平¹,伴野泰一²,渡辺亨³,背戸一登⁴

Tatsuya Ikeda¹, Yuhei Kimura¹, Hirokazu Tomono², Toru Watanabe³, Kazuto Seto⁴

This paper presents an integrated control system performing levitation and vibration suppression for a magnetic bearing (AMB) supporting elastic rotor. Stable levitation of the elastic rotor is achieved by using PD controller. However, there is a problem with the 2nd mode of the elastic rotor appeared notably. In previous studies, jerk feedback controller is applied that posses difficulty in tuning. In this study, location of AMBs and the shape of the rotor are modified to solve problem as controllability and observability. Moreover, we introduce acceleration feedback controller coupling to PD controller and phase lead compensator in series. The effect of presented controller is verified by experiment.

1. 序論

磁気浮上軸受は本来,剛性の大きいロータを用いる のが常である¹⁾.しかしながら高速で回転するときは 弾性振動およびジャイロ効果²⁾の影響は無視できない. そこで本研究では細長比 0.012 とこれらの影響が大き く現れる軸を用いての,曲げ二次危険速度の通過を目 指している.このため,磁気軸受に浮上制御に加え制 振制御も行わせる必要があり,両者を統合した制御シ ステムの研究を行っている.具体的には加々速度フィ ードバック(FB)制御項の導入によって実現を目指して いる³⁾.しかし先行研究では,制御効果が弱くまた制 御器のチューニングが困難であり,十分な制御効果は 得られていなかった.

そこで、チューニングが困難な加々速度 FB 制御器 に代わり、比例微分(PD)制御器と位相進み補償器を直 列結合した加速度 FB 制御器を提案する.これを用い て浮上・制振実験を行い、その効果を確認した.

2. 実験装置

2.1 弾性ロータ

実験ロータの概略図を Figure 1 に示し、そのパラメ ータを Table 1 に示す.軸は弾性を強調し固有振動数 を小さくするため、全長 1002[mm]、シャフト径は 12[mm]と細く長い形状となっている.これにより低い 回転数で危険速度に達することができる.



Fig 1. Schematic diagram of designed flexible rotor

 Table 1. Parameters of flexible rotor

mass[kg]	4.5	1st. Mode[Hz]	24.8
dimeter[mm]	12	2nd. mode[Hz]	73.2

2.2 磁気軸受装置

製作した磁気軸受装置の概略図を Figure.2 に示す. 装置は横置き型になっており,電磁石およびセンサを 長軸方向から見て X 字状斜め対向に配置してある.



Fig.2 Schematic diagram of designed magnetic bearings

3. 制御器設計

磁気軸受装置を用いた浮上には成功しているが,浮 上時にロータの弾性二次モードが顕著に表れる問題を 抱えていた.本研究では,加々速度 FB 制御器を導入 し,浮上・制振性能があると確認されていたが,その 効果を十分に発揮できていなかった.これは一般的に 変位項に比べ加々速度項のゲインが極小となるからで ある.今年度は PD 制御器と位相進み補償器を直列結 合した加速度 FB 制御器を用い磁気軸受の相補感度関 数低減と二次モードへの減衰付加を主眼に置き制御器 設計を行った.

3.1 ノイズ対策

本研究では DSP を用いたデジタル制御を行っており,相補感度関数が高周波域になるほど大きくノイズを増幅してしまう.このことから一次ローパスフィルタ(一次 LPF)を用いたノイズ対策 4をとる.

一方,本研究では弾性二次モードより高い周波数域 を自作一次 LPF (fc=79.6Hz)でカットしている.こ れはセンサーコントローラ間に,弾性三次モード以上の スピルオーバ対策で挿入している.

ここでは微分器による周波数伝達関数の上昇に注意 しながら PD 制御器の設計を行った.したがって一次 LPF と負バネ特性をモデルに含め、スピルオーバ対策 と相補感度関数上昇抑制の二つの役割を持たせた.

1:日大理工・学部・機械 2:日大理工・院(前)・機械 3:日大理工・教員・機械 4:背戸技術士事務所

3.2 制御器設計

3.2.1 制御対象伝達関数

磁気軸受の構成要素の慨図を,ブロック線図を用い て示す.本研究ではラジアル4自由度方向へローカル フィードバック制御を行っている.



Fig.3 Block diagram of AMB component

上図にて、パワーアンプは電流制御型のサーボアンプ を用いているので、電磁石のインダクタンスや抵抗に よる影響は無視する.また、自作の LPF は制御帯域に 影響を及ぼすのでモデルに含める.これらを考慮して 磁気軸受の制御対象モデルの伝達関数を次式のように おく.

$$G_0(s) = \frac{K_s IH}{(Ms^2 - K_w)(Ts + 1)}$$
(1)

ここで, M は電磁石が一軸で支持するロータの等価質 量[kg], Km は電磁石の負ばね剛性[N/m], Ks は制御 力に対する電流係数[N/A], I はアンプの増幅率[A/V], H はセンサの増幅率[V/m], T は自作一次 LPF の時定 数[s]である.

3.2.2 加速度 FB 制御器設計

PD 制御と位相進み補償を直列結合し、加速度まで フィードバックし制御する.加速度 FB 制御器の伝達 関数を示す.

$$G_c = K \frac{\alpha_d T_d s + 1}{T_d s + 1} (K_p + K_d s) \quad (\alpha_d > 1) \quad (2)$$

今回,位相進み補償器は弾性二次モードへ減衰を付加するために,二次モードの共振周波数近傍に最大位相進みを発生するように設計しておく.PD 制御器のゲインは周波数伝達関数の増加を一次LPFの一次遅れによってどの程度に抑えるかは実験的に決定した.

3.2.3 シミュレーション

上記のパラメータは弾性二次モードへ減衰を十分に 付加するように設定されている.次の式(3)で表される 磁気軸受一巡伝達関数のボード線図を用いシミュレー ションを行った.



Fig.4 Bode plot of a loop transfer function

Figure.4 において、微分器による周波数伝達関数の増加が十分に抑えられ、相補感度関数も低く抑えられている.またロールオフ特性は、一次 LPF と負バネ特性によって-40dB/dec が得られている.弾性モードに対

して減衰を付加するためには、弾性モードの浮上時の 共振周波数近傍において位相を-180°より進めておく 必要がある.上図から一次モード(約 40Hz)と二次モー ド(70Hz)において 45°以上の位相進みが得られている. 安定性についても位相余裕が 60°得られている.

4. 実験結果

上記の制御器を用いて,浮上及び弾性二次モードの制振効果を実験で確認した.その結果を次に示す.



(a) (b)
(a) Previous control (Jerk FB control)
(b) Acceleration FB control (PD + Phase lead)





Fig.6 Frequency response in levitation

Figure.5 はロータ変位信号の時刻歴応答, Figure.6 は ハンマリング加振力に対する軸変位の周波数応答であ る. Figure.5 より時刻歴応答に現れていた弾性二次モ ードによる振動が抑えられていることがわかる. Figure.6においても弾性一次と二次モードが抑えられ ている.またノイズによる影響も抑えられていること がわかる.さらに弾性三次モード以上のピークも低く 抑えられ,スピルオーバも発生していないことがわか る.

5. 結論

PD 制御器と位相進み補償器を直列結合した加速度 FB 制御器を導入し、一巡伝達関数の位相特性および相 補感度関数低減を考慮し設計を行った.これにより浮 上時のロータの弾性モードを抑えることに成功した. また一次LPFと磁気軸受の負バネ特性によるロールオ フを用いて、相補感度関数低減およびスピルオーバ対 策を行い、効果があることを確認した.

現在,軸の浮上位置に偏りがあり,これが軸の回転 浮上を行うなかで問題となる恐れがある.今後,制御 や装置を再度見直し,解決に努めたい.

6. 参考文献

- [1] 社団法人電気学会:「磁気浮上と磁気軸受」,コロナ社, 1993
- [2] 松下修己 他:「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,2004
- [3] 岡田幸人:「弾性ロータに対する磁気軸受の加々速度フィ ーバック制御器を用いた浮上・制振制御」,日本大学修士 論文,2014
- [4] 杉江俊治,藤田政之:「フィードバック制御入門」, コロ ナ社, 1999