

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760103
 研究課題名 (和文) 外部振動を受ける小型流体軸受スピンドルの特性解析と最適設計に関する研究
 研究課題名 (英文) Characteristic Analysis and Optimum Design of Small Size Fluid Film Bearing Spindle Subjected to External Vibrations
 研究代表者
 落合 成行 (OCHIAI MASAYUKI)
 東海大学・工学部・准教授
 研究者番号：40407995

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、情報機器などに用いられる小型流体軸受スピンドルの特性改善を、最適設計手法の適用により実施することを目的としている。課題の遂行に際しては、流体軸受スピンドルの振動解析モデルを構築し、本モデルを最適設計手法に適用して多数の設計諸元の最適な組合せを見出す。最適化計算の結果、軸受溝深さの公差が軸受の振動特性のばらつきに及ぼす影響は極めて大きく、寸法公差を無視した最適軸受では接触を引起こす危険性があることなどが明らかになった。また理論モデルの実験検証を行なった結果、実験と理論は良い一致を示した。

研究成果の概要 (英文)：

The objective of this research work is to improve the characteristics of small size fluid film bearing spindle by using the optimal design method. In this study, firstly a vibration analysis model of fluid film bearing spindle are made and then the optimum combination of design variables are calculated using the optimal design method. From the results of optimum design, it is found that the influence of tolerance of the bearing groove depth on vibration characteristics and there is danger of contact using the optimal design method without tolerance. Moreover, the experimental verification is conducted and good agreements are seen between the theoretical results and experimental ones.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 2,100,000 | 0 | 2,100,000 |
| 2008年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2009年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 360,000 | 3,660,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：情報機器，流体軸受，最適設計，高速回転，振動特性，スピンドル

1. 研究開始当初の背景

近年HDDは、モバイルPCやポータブル

レコーダーなどの携帯型情報端末やカーナビゲーションシステムなどの車載用機器の

記憶装置として用途が広がっており、これにともない耐外部振動性の向上や消費電力の低減が益々重要となってきた。中でもディスクを支えるスピンドル用軸受の性能向上は重要な課題の一つといえる。一方で、このような流体軸受スピンドルは高い精度が要求されるにも関わらず大量に生産される製品である。したがって、寸法公差による製品性能のばらつきを抑えることも重要な課題と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、寸法公差の影響を考慮して特性のばらつきを抑えるロバスト最適化手法を適用し、スピンドル用流体軸受の振動特性の向上とトルク低減の両方を目的とした最適設計を実施した。また軸受加振試験装置を用いた実験についても検討した。

3. 研究の方法

(1) 流体軸受で支持されたスピンドルの特性解析

流体軸受で支持されたHDD用スピンドルは、シャフト、ハブ、ディスクで構成される回転体のラジアル方向は上下一對のジャーナル油膜軸受により支持されており、軸の振れまわりを抑える構造となっている。ここで、回転体の重心は構造上の制約から上側の軸受の近傍に位置することが多く、このため図中のラジアル方向に外乱が作用した場合には、パラレルモードの振動と共にコンカルモードの振動を生じる。そこで図1に示すように各軸受の油膜を、連成項を含む4つのパネとダッシュポッドに置き換えている。

(2) 確率手法を用いたばらつきの評価法と最適設計

流体軸受を設計する際には、軸受性能を最大限に高めることが要求される。これまでに、流体軸受の最適設計により特性を改善する試みがなされているが、これらはいずれも設計緒元が確定論で扱われ、そのばらつきに対する影響は不明である。しかしながら、特に情報機器に使用される流体軸受は、極めて大量に生産されるため、実際の製品設計では寸

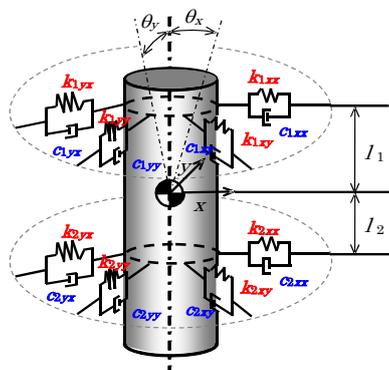


Fig.1 Vibration analysis model

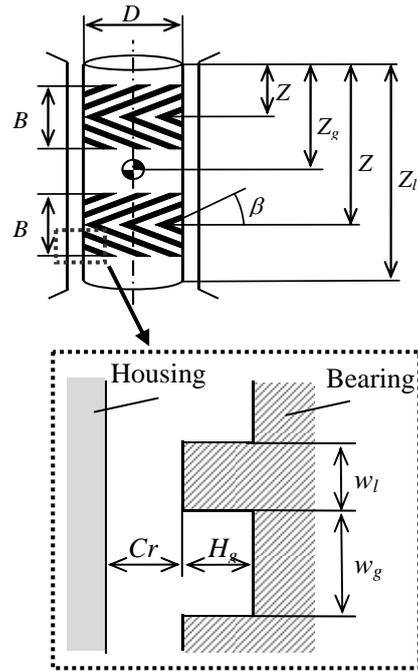


Fig.2 Schematic diagram of fluid bearing spindle

法のばらつきが及ぼす影響について考慮することは極めて重要といえる。そこで本研究では、寸法公差に対する軸受性能のばらつきを抑えるロバスト最適化法の適用を試みた。軸受寸法のばらつきを確率密度関数 $f(x)$ で与え、そのばらつきが軸受性能に及ぼす影響を期待値と標準偏差にて評価した。外乱を受けた際の回転軸の振幅と軸受面の摩擦トルクの両者を最小化する多目的最適設計問題を定義した。なお、回転軸の振幅としては、上下端における振幅の大きい方を最小化する回転軸の振幅としている。また、上下の軸受が重ならないなどの制約条件を設けている。

(3) 理論モデルの実験的検証

理論解析の妥当性を検証するために、本研

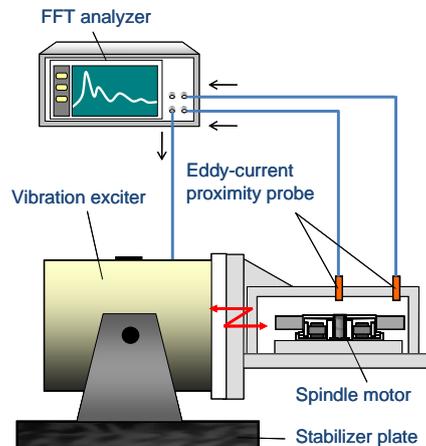


Fig.3 Schematic diagram of test rig

究では加振装置を新たに製作し、流体軸受スピンドルの振動特性実験を行った。図3は、実験装置の概略である。流体軸受スピンドルモータを図のように加振器に取り付けている。ラジアル方向加速度一定の条件下でスピンドルモータを加振器で加振し、モータの上部に取り付けた渦電流式非接触変位計によりディスクのアキシャル方向の変位を取得している。

4. 研究成果

(1) 最適設計の結果

図4に最適設計計算の結果を示す。縦軸は軸端の振動振幅を軸受クリアランスで除した偏心率 ε を示しており、 $\varepsilon=1.0$ は軸と軸受面の接触を意味する。同図より、寸法公差を無視した場合の最適化軸受では、軸受寸法のばらつきによって振幅が大幅に増加し、接触の危険性があることがわかる。これに対し、寸法公差を考慮した最適化軸受では、いずれの場合においても偏心率が小さく抑えられ、接触しないことが確認される。また軸受クリアランスを $\pm 1 \mu\text{m}$ とした場合にその傾向が顕著に現れていることがわかる。

表1は寸法公差を考慮した場合と無視した場合の最適設計結果を比較したものである。ほとんどの設計変数に対して両者はほぼ一致しているが、溝深さ H_g において大きく異なっている。このことから、振幅のばらつきを抑える効果は溝深さに大きく起因するものと考えられる。

図5は、偏心率 ε と溝深さ H_g の関係を表した計算結果で、同図(a)は寸法公差を無視した場合を同図(b)はこれを考慮した場合を示している。また図中には、寸法公差による最適溝深さにおけるばらつきと偏心率 ε のばらつきの確率分布を示している。同図より、偏心率の最小値は溝深さ $H_g=3.5\mu\text{m}$ となっているが、 H_g のばらつきにより偏心率が大幅に増大してしまうことがわかる。これに対し、寸法公差を考慮した場合には、 H_g のばらつきに対する偏心率 ε の感度が低い領域で最適解が

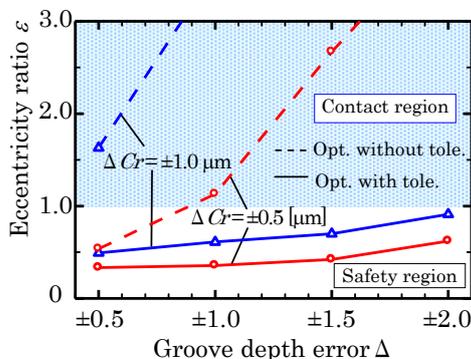
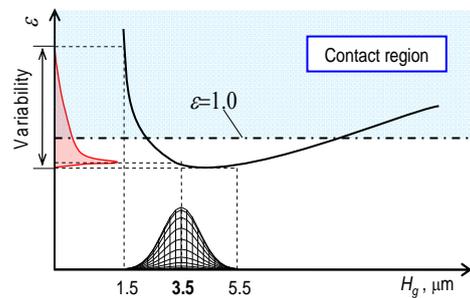


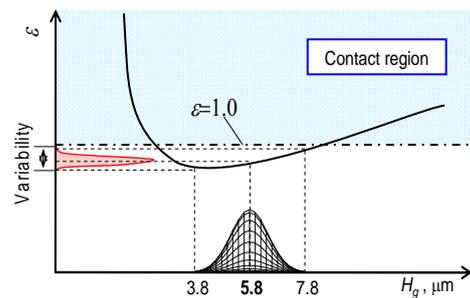
Fig.4 Maximized eccentricity ratio each groove depth and clearance tolerances

Table 1 Bearing specifications for each optimum design

| Parameters | Optimized | Optimized with tolerance |
|---------------------|-------------|--------------------------|
| $C_r, \mu\text{m}$ | 2.00 | 2.00 |
| B_1, mm | 1.93 | 2.00 |
| B_2, mm | 1.07 | 1.00 |
| Z_1, mm | 1.85 | 1.70 |
| Z_2, mm | 3.60 | 3.30 |
| $H_g, \mu\text{m}$ | <u>3.50</u> | <u>5.80</u> |
| β, deg | 26.0 | 22.0 |
| α | 0.74 | 0.80 |



(a) Without tolerance



(b) With tolerance

Fig.5 Comparison of eccentricity ratio both optimized bearings with and without tolerance

得られており、偏心率 ε のばらつきが大幅に抑えられていることがわかる。

(2) 実験結果と理論解析結果の比較

図6は、 x 方向（加振方向）および y 方向（加振に対して 90° 位相のずれた方向）の振動振幅の実験結果と計算結果を比較したものである。周波数の増加と共に振幅は減少している。 x 方向および y 方向共に実験結果と計算結果は概ね一致していることがわかる。

図7はリサージュ波形の結果を示している。実験結果と計算結果はよく一致しており、理論の妥当性が検証された。

さらに本研究では、上記実験装置を用いたスピンドルの油膜係数（弾性係数と減衰係

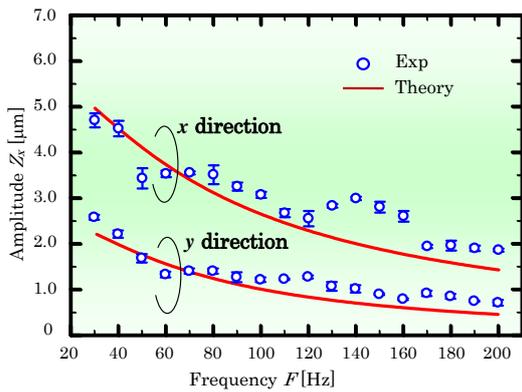


Fig.6 Experimental results of amplitude

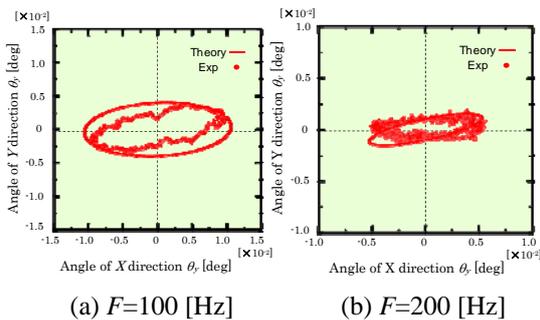


Fig.7 Experimental results of Lissajous

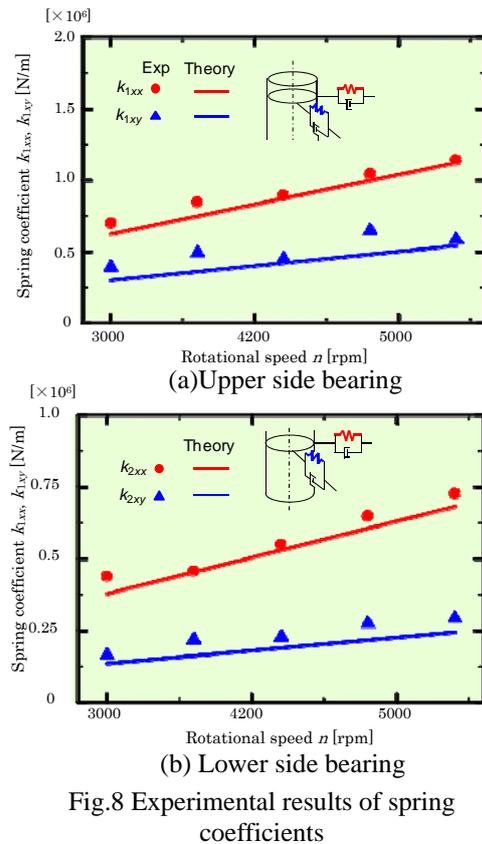


Fig.8 Experimental results of spring coefficients

数)の実験的同定法についても検討した。情報機器用小型スピンドルは複数の軸受の組合せにより支持されるため、これまでは軸受の油膜係数は理論計算のみの扱いに留まっ

ていたが、ここでは新たに実験的な油膜係数の同定法について提案し、その有効性を検証した。図8はその結果である。実験値は理論値と概ね一致しており、本手法の妥当性が確かめられた。

(3) まとめ

①寸法公差を考慮した流体軸受スピンドルの最適設計法を提案し、最適設計計算を実施した結果、軸受の振動振幅と摩擦トルクの低減が図られた。

②寸法公差を考慮した最適化設計では、寸法公差の影響による性能のばらつきを大幅に低減させ得ることが明らかになった。

③加振試験装置を製作し、実験を行なったところ理論との良い一致が見られた。また油膜係数の実験的な同定法についても提案し、良好な結果を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① M. D. Ibrahim, T.Namba, M.Ochiai, H.Hashimoto, Optimum Design of Thrust Air Bearing for Hard Disk Drive Spindle Motor, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.4 No. 1, 2009, pp.70.
- ② M. D. Ibrahim, T.Namba, M.Ochiai, H.Hashimoto, Application of SQP Method in Designing Thrust Air Bearing for Hard Disk Drive Spindle Motor, Proceedings of the 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment, No.09-204, 2009, pp.117.
- ③ M. D. Ibrahim, T.Namba, M.Ochiai, H.Hashimoto, Optimization of Small Size Thrust Air Bearing with the Consideration of Groove Dimensions and Geometry Variables, Proceedings of the World Tribology Congress 2009, Vol.4, 2009, pp.706.

[学会発表] (計5件)

- ① 伊藤 径, 砂見雄太, IBRAHIM M. Daniel, 難波唯志, 落合成行, 橋本巨, 小型スピンドルモータ用流体軸受の最適設計, 日本機械学会年次大会, 2009年9月15日
- ② 伊藤 径, 砂見雄太, 落合成行, 橋本巨, 製造誤差の影響を考慮したHDDスピンドル用流体軸受の最適設計, 日本機械学 I I P 部門講演会, 2010年3月17日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

落合成行 (OCHIAI MASAYUKI)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号: 40407995