能動形磁気軸受を用いた粘性液体を部分的に内蔵する ロータ系の振動と制御*

(第2報, ゲインスケジュールシステムに基づく実験)

張 和 炳^{*1}, 谷 順 二^{*2}
高 木 敏 行^{*2}, 岡 田 養 二^{*3}

Vibration and Control of Viscous Liquid-Filled Rotor System Supported by Active Magnetic Bearings

(2nd Report, Experimental Results Based on the Gain-Scheduled System)

Hebing ZHANG, Junji TANI,
Toshiyuki TAKAGI and Yohji OKADA

This paper presents an experimental study on the vibration control of a viscous liquid-filled rotor using two active magnetic bearings. The magnetic bearings are placed at both ends of a rigid shaft connected to the rotor. In order to support the rotor system and to suppress the unstable whirling motion, the gain-scheduled system based on conventional PD control law is proposed. In addition, a first-order delay filter is also introduced to improve noise sensitivity. The gain schedule system was formed in the experiment by scheduling control parameters of the PD controller with the related rotating speed at which the rotor system is stable. The validity of the control system has been verified by the experiment.

Key Words: Vibration Control, Rotor, Whirl, Viscous Liquid, Active Magnetic Bearings, PD Controller, Gain-Scheduled System

1. 緒 言

液体を部分的に内蔵するロータ系においては, ある回転数領域内で激しい不安定振動が起こることがよく知られている. この不安定振動に関して, いままでに数多くの研究がなされてきた^{(1),(2)}. これらの研究結果より, 液体を部分的に内蔵するロータ系の不安定振動はおもに内部液体の自由表面の後進波動によって起きていることが分かった. この不安定振動が回転機械の早期破壊や性能低下などを導く危険性があるので, それに対する抑制の方法がいくつか報告されている. たとえば, Hendricks⁽³⁾は非粘性非圧縮液体を含むロー

タ系に対して, 液体の運動を含むロータ系の運動を表す状態方程式に基づいて, 最適制御理論によって制御系を設計した. しかし, この方法の有効性は未だに実験的に裏付けされていない. また, 松下⁽⁴⁾は電磁気ダンパによりロータ系のふれまわりを振動制御する方法を提案した. そして, 吉田⁽⁵⁾は液体を内蔵したロータ系の振動を係数励振としてアクティブ動吸振機によって安定化制御を行った. 本研究では, 非接触で回転体を支えることができ, 潤滑剤を必要としない, さらに支持剛性や粘性などを動的に変化させることができる能動型磁気軸受を粘性液体を部分的に内蔵するロータ系に応用することを試み, ロータ系を支持しながら, 液体による不安定振動も抑えるために, 古典制御のPD制御則に基づいたゲインスケジュールシステ

* 原稿受付 平成4年3月27日.

^{*1} 正員, 東北大学大学院 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉).

^{*2} 正員, 東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1).

^{*3} 正員, 茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢4-12-1).

ムによる手法を提案し、実験的に検証した。

2. 実験

2・1 実験装置 実験装置の概略図をそれぞれ図1に示す。

実験装置は液体を内蔵したロータ、磁気軸受、ロータの変位を検出するためのギャップセンサ、回転の動力源であるDCモータ、回転モーメントをDCモータから剛体軸へ伝達するためのソフトカップリング、回転数の測定用のエンコーダ、パワーアンプ、アナログI/Oボード(A/D, D/Aコンバータを含む)、そしてパーソナルコンピュータより構成されている。

ロータ系は面内方向に上下に配置されている二つの能動型磁気軸受によって拘束されており、軸方向にソフトカップリングによって支持されているものとする。制御ゲインをより簡単に変更できるように、デジタル制御系を設計する。さらに、ロータ系が高速回転するとき、アンバランスなどの原因で、変位信号に回転同期成分が含まれている。それを正しく検出するために、より早くサンプリングすることが必要である。そのため、本研究では高速演算処理のできるパーソナルコンピュータ上でデジタル制御系を実現する。

2・2 制御系 粘性液体を部分的に内蔵するロータ系には液体による不安定振動が起りやすいため、制御系を設計する際に浮上系だけではなく、その不安定振動を抑えるアルゴリズムも考えなければならない。また、粘性液体が入ることによって、システムが非常に複雑になるため、本研究では、基本的に古典

制御のPD制御則を用い、制御ゲインを実験段階で試行錯誤によって探すことにする。さらに、PD制御則の中で理論上の微分項が高い周波数の成分を大きく増大してしまい、ノイズに弱いという欠点を持っているので、ここで一次遅れフィルタを導入して不完全微分にする。不完全微分を含めたPD制御則は次のような伝達関数の形で表される。

$$G(s) = \frac{I_c(s)}{E(s)} = (K_p + \frac{K_d s}{1 + T_d s}) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 K_p, K_d, T_d はそれぞれ比例ゲイン、微分ゲインおよび一次遅れフィルタの時定数で、 $I_c(s), E(s)$ はそれぞれ制御電流 i_c と制御偏差 e のラプラス変換を表す。双線形変換の方法で式を離散化すると

$$G(z) = K_p + \frac{2K_d/T(1 - z^{-1})}{(1 + 2T_d/T) + (1 - 2T_d/T)z^{-1}} \dots\dots (2)$$

ここで、 T はサンプリング周期を表す。

液体による不安定振動は一種のふれまわり振動であり、ロータ系の回転速度によって起きたり、消えたりする。この特徴を利用して、その不安定振動の抑制にはゲインスケジュールシステム⁽⁶⁾を使うことにする。具体的に、液体を部分的に内蔵したロータがどんな制御パラメータのもとで、どの回転領域内で不安定振動が起きるのかを前もって把握する。そして不安定振動が起らないように回転速度に対応する制御ゲインをスケジュールしておく(図2に参照する)。実際に回転数を測定し、それに応じた制御パラメータを使えば、不安定振動を抑えることができると考えられる。さらに、前報⁽⁷⁾の計算結果によると、PDコントローラの比例ゲインが不安定振動の下限臨界速度を増大する効果があり、それに対して、微分ゲインが不安定領域に大きく影響を及ぼす。微分ゲインが大きければ大きいほど、不安定領域が広い。さらに、一次遅れフィルタの時定

図1 実験装置の概略図

図2 ゲインスケジュールシステム

図3 実験装置の写真

図4 磁気軸受の静剛性
($K_p=15$, $K_d=45$)

数が比例ゲインを増やし、微分ゲインを減らす効果に相当する。このことから、本研究では時定数を一定値にし、比例ゲインと微分ゲインだけをスケジューリングにするとする。

3. 実験結果および考察

前節で設計した制御系に基づき、実験を行った。実験装置の写真を図3に示す。

実験装置はブロックの上に垂直に固定されている。回転動力としてDCモータ(最大回転速度:10000 rpm)が用いられており、回転モーメントは柔らかいカップリングを介して5 mmのスチール製のシャフトへ伝えられる。また、回転速度およびロータ系の振動変位の測定には、下部にあるDCモータの回転軸に取り付けられているエンコーダ(分解能:2000 P/R)と渦電流型ギャップセンサ(測定範囲:1 mm, 感度:0.2 mm/V)が使用される。真ん中のロータに含まれる液体として

はシリコンオイルが使われ、液深率はおおよそ0.7である。さらに、パワーアンプのゲインは0.5 A/V、自作した磁気軸受のステータとロータの平均エアギャップは約0.5 mm、磁気軸受のバイアス電流は1 A、上下の二つの磁気軸受の距離は160 mmである。本研究ではDCモータの能力を考えてロータ系の最大回転速度を10000 rpmとする。また、前節で述べたようにPDコントローラの時定数 T_d を一定値1 msにし、ロータに含まれる液体の影響に応じて比例ゲイン K_p と微分ゲイン K_d を変化させる。また、ゲインの調整が容易に行えるために、デジタル制御方式を採用し、サンプリング周期 T を0.3 msにした。

$K_p=15$ V/mm, $K_d=45$ V·ms/mmとし、磁気軸受の静剛性を測定して図4に示す。この場合、最小自乗法より磁気軸受の静剛性は9.79 N/mmになると求められる。一方、ゲインスケジューリングシステムを用いて液体による不安定振動を制御するために、あらかじめ制御ゲインが不安定振動にどのように影響するか知る必要がある。微分ゲインと比例ゲインの比率はロータ系の減衰特性に影響し、比率が大きいくほど、減衰特性が良くなる。しかし、大きな比率を用いると同じ比例ゲインに対して微分ゲインも大きくなるので、不安定領域を増大してしよう。したがって、ロータ系を希望する回転速度(ここでは約10000 rpmである)まで回転させることができるゲインの中で、できるだけ小さい比率を選ぶ。 $K_p=8$ V/mm, $K_d=24$ V·ms/mmと置き、ロータ系をおおよそ9900 rpm(165 Hz)まで回転させた。回転数の300 rpm(5 Hz)ごとにパワースペクトラムを測定して図5に示す。この図より回転数 Ω が0から9900 rpmまでの間に回転数同期の振動成分が分布していることが分かる。これは実際のロータ系に不釣り合い力が存在しているためである。また、回転数4800 rpm(80 Hz)に等しいとき、回転数より小さい周波数52 Hzの成分がある。これは液体の影響でロータ系に不安定なふれまわり振動が起きていることを表す。 $\Omega \approx 4800$ rpmのときのパワースペクトラムを図6に示す。この図からふれまわり振動数(52 Hz)と回転数(79.5 Hz)の比率は約0.654で、理論値の0.664とほぼ一致していることが分かる。 $\Omega \approx 4800$ rpmの近くで細かく調べると安定から不安定への下限臨界速度と不安定振動から安定振動への上限臨界速度はおおよそ4770, 4920 rpm となることが分かり、したがって不安定領域の長さが約150 rpm になることが計算できる。 $K_p=10$ V/mm, $K_d=30$ V·ms/mmの場合、上と同じようにパワースペクトラムを測定して図7に示す。図5に比べると、図7より液体による不安定振動を表すふれまわり振動成分がかなり

(a). $\Omega = 0 \sim 4500$ rpm (b). $\Omega = 4800 \sim 9900$ rpm図5 パワースペクトルの三次元表示
($K_p=8$, $K_d=24$)

広範囲にわたって存在することが分かる。その不安定領域は5700から7680 rpmまでである。

以上より, K_p を8から10 V/mmへ, K_d を24から30 V·ms/mmへ増大すると, 下限臨界速度が上がるだけでなく, 不安定領域も広くなることが分かる。これは前報で示した傾向と一致している。また, $K_p=8$ V/mm, $K_d=24$ V·ms/mmと $K_p=10$ V/mm, $K_d=30$ V·ms/mmの場合, 不安定領域が重なっていないため, より簡単な形のゲインスケジュールシステムが構成できる。具体的に, まず $K_p=10$ V/mm, $K_d=30$ V·ms/mmを用いてロータ系を5040 rpm(84 Hz)まで回転させ, 84 Hzになったら, 制御パラメータを $K_p=8$ V/mm, $K_d=24$ V·ms/mmへ切り替えて, 希望の回転数までロータ系を回転させる。このアルゴリズムをプログラム化して実験を行った。測定したパワースペクトラムを図8に示す。この図より, ゲインスケジュールシステムを用いると, 回転数 $\Omega=0 \sim 9900$ rpmまでの間に液体による不安定なふれまわり振動成分が存在していないことが分かる。さらに, 比較のため, ゲインスケジュールシ

図6 $\Omega \approx 4800$ rpmのときのパワースペクトラム
($K_p=8$, $K_d=24$) (a). $\Omega=0 \sim 4500$ rpm (b). $\Omega=4800 \sim 9900$ rpm図7 パワースペクトラムの三次元表示
($K_p=10$, $K_d=30$)

(a). $\Omega=0\sim 4500$ rpm (b). $\Omega=4800\sim 9900$ rpm図8 パワースペクトラムの三次元表示
(スケジュールゲイン)

システムを使う場合と使わない場合のアンバランス応答を図9に示す。明らかにゲインスケジュールシステムを用いることによって、アンバランス応答が大きく減少していることが分かる。

4. 結論

本研究では、縦におかれた粘性液体を部分的に内蔵したロータ系を磁気軸受で支持しながら、液体による不安定振動も抑えることを試みた。制御系の設計は基本的にPD制御則に基づいているが、ノイズなどの影響を減らすために一時遅れフィルタを用いて不完全微分にした。また、液体による不安定振動を制御するには、ゲインスケジュールシステムを用いることを提案し、実験によってその有効性を検証した。また、本研究では制御ゲインの調整に便宜をはかるために、デジタル制御系を使ったが、アナログコントローラを用いることによって、コストを大きく減少することができ、実用性が増すであろう。

図9 アンバランス応答

本研究における実験の遂行にあたり、東北大学流体科学研究所大友規矩雄助手、越河和男技官および神戸製鋼株式会社から多くのご協力をいただきまして、ここで感謝の意を表します。

文献

- (1) Wolf, J. A., Jr., Whirl Dynamics of a Rotor Partially Filled with Liquid, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 35-4(1968), 676.
- (2) 斉藤 忍・染谷常雄, 液体を内蔵した中空回転軸の振動に関する研究(第3報), *機論*, 45-400(1979), 1325.
- (3) Herdricks, S. L., and Klauber, R. D., Optimal Control of a Rotor Partially Filled with an Inviscid Incompressible Fluid, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 51(1984), 863.
- (4) 松下修己・高木亨之・米山光穂・斉藤郁浩・永田明朗, 液体を内蔵したロータの不安定振動に対する電磁ダンパによる安定化, *機論*, 54-496(1987), 2453.
- (5) 吉田和夫・水野孝之, アクティブ動吸振器による液体を内蔵するロータの安定化制御, *機講論*, No. 900-42(1990-7), 294.
- (6) 寺尾 満・金井喜美雄, ロバスト適応制御入門, (1989), 19, オーム社.
- (7) 張 和炳・谷 順二・岡田養二・高木敏行, 能動型磁気軸受を用いた粘性液体を部分的に内蔵するロータ系の振動と制御機論(第1報), *機論*, 58-548, C(1992), 予定.