

報告番号	※ 甲 第 10742号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 反発型磁気軸受で支持される回転軸系の危険速度通過のための振動解析と制振

氏 名 水貝 智洋

論 文 内 容 の 要 旨

近年、地球温暖化や燃料資源の不足の面から、様々な産業で省エネルギー商品の開発が活発に行われており、小型・軽量化が求められている。また、高速化による高性能化も進んでいる。さらに、自動車や航空機においては、環境問題や制御の高度化により、従来のエンジンや油圧システム等のアクチュエータアプリケーションは、電気モータによる電動アクチュエータ方式へ移行しつつある。このように小型、高速なモータを用いた回転機械は今後様々な産業分野において増加していくと予想される。しかし、回転機械において小型・軽量化によって剛性が低下したま高速化が進むと、固有振動数と実用回転速度領域の周波数が近接し、振動が発生しやすくなる。特に高速域では系の変位が大きくなりばね特性が線形と見なせる領域を超えると、非線形振動が発生しやすい。また、磁気軸受の磁気力やローラーと補助軸受等との接触のように回転機械を構成する要素が非線形ばね特性を持ち、非線形振動が発生する場合もある。

磁気力により軸を非接触に支持することができる磁気軸受は、摩擦・摩耗がない、超高速回転が可能、機械的損失が極めて少ない、メンテナンスが不要、真空中での使用が可能、環境を潤滑油等で汚染しないなど優れた特徴を持つ。そのため、ターボ冷凍機、工作機械用スピンドル、人工心臓、エネルギー貯蔵用フライホイール、人工衛星などさまざまな産業において利用、実用化への検討が進められている。磁気軸受の方式には電磁石の吸引力を利用する能動型と、永久磁石の反発力を利用する反発型がある。能動型磁気軸受は、回転を除く5軸全てを電磁石で支持すると装置が大がかりになり非常にコストがかかる。一方、1軸制御の反発型磁気軸受の構成は、半径方向を反発型磁気軸受で受動的に支持し、軸方向のみを電磁石で制御することで非接触浮上を得る簡易な支持方式である。従来の能動型磁気軸受と比較して、制御設備等の簡素化によりコストの削減が可能、装置全体の小型化が可能という利点がある。

しかし、反発型磁気軸受は永久磁石の反発力を利用しているため非線形性を有する。このため、危険速度近傍で非線形系特有の跳躍現象や履歴現象が現れる恐れがある。これまでの研究では、様々な着磁方向、配置パターンの磁石における剛性や、ギャップや軸方向位

置を変化させた場合の剛性の変化等が調べられているが、これらは線形特性の変化を明らかにするにとどまっており、非線形性の変化についてはほとんど調べてられていない。また、反発型磁気軸受の剛性は能動型と比べて低いため、剛体モードの危険速度が低い。よって、回転機械の高速化のニーズに伴い通常使用回転速度領域を剛体モードの危険速度より上に設定すると良いと考えられる。そのため、運転開始時および停止時に主危険速度を通過する必要がある。回転軸系が正の非線形復元力特性を有する場合には、危険速度通過時の振動は高速側に傾いた共振曲線に引き込まれたまま振動が増大し、危険速度を通過しにくい。したがって、反発型磁気軸受で支持された回転軸系を危険速度以上で高速回転させる場合には、危険速度通過時に何らかの制振手段を講じることが望ましい。

回転機械が危険速度を通過する際の振動を抑えるには、つり合わせを行なうことが重要である。しかし、反発型磁気軸受のようなその減衰が小さい系では、十分な釣り合わせを行なっても振動が避けられない場合がある。ダンパによって減衰を付与するパッシブ制振法は、パラメータ変動の影響を受けやすく、場合によっては大きな制振効果を得ることは難しい。また、外部から振動抑制のためのエネルギーを供給するアクティブ制振法は、パッシブ制振法に比べて大きな制振効果を得られるが、エネルギーを必要とし構造が複雑になる欠点がある。さらに、制御パラメータが適切に設定されていないと系を不安定にする危険がある。セミアクティブ制振法は系のパラメータを変更する制振法であり、本質的には安定でありながらパッシブ制振法に比べて大きな制振効果が期待できる。本論文では、反発型磁気軸受の軸方向変位制御を用いたセミアクティブ制振法を提案する。

磁気軸受系では、回転体が磁石等と接触するのを防止するため補助軸受(タッチダウン軸受)が設置される。磁気軸受の補助軸受としては、接触時の摩擦を低減するため転がり軸受が使用されることが多い。軸と補助軸受との隙間は、回転機械の小型化、性能・効率向上を目的に小さくなる傾向にある。このため、危険速度通過時に補助軸受と接触して接触振動が発生する恐れがある。回転軸と補助軸受との接触振動は、接触することにより系の復元力が区分線形様式の強非線形ばね特性を持ち、かつ衝突と摩擦が作用する複雑な動的挙動である。ロータとステータの接触に起因する振動には、ラビング(接触前向き振れまわり振動、接触後向き振れまわり振動)、衝突振動、分数・超調波振動、カオス振動などがある。前向き振れまわり振動は、不釣合いの応答として発生する強制振動である。また、接触による摩擦によって、後向き振れまわりの自励振動が発生することが知られている。後向き振れまわり振動やカオス振動は大きな振れまわり速度を持つ場合があり、発生すると周りの装置に大きな損害を与える危険がある。従来の研究では、それぞれの接触振動についてその特徴が調べられており、定常的な振れまわりを仮定し系のパラメータの影響を明らかにした研究も多い。

以上のように、反発型磁気軸受について、ギャップの変化や軸方向変位に対する復元力特性の変化が調べられているが、これらは線形特性の変化を明らかにするにとどまっており、非線形性の変化についてはほとんど調べてられていない。また、補助軸受として転がり軸受を使用した場合、補助軸受内輪は回転可能である。この場合、補助軸受内輪とロータとの相対速度によってロータに作用する摩擦力の大きさと方向が変わると予想される。しかし、これまでのロータとケーシングとの接触に関する研究は補助軸受の回転を考慮しておらず、補助軸受内輪の回転自由度を考慮し、滑り接触(スリップ)と転がり接触(ステイック)の状

態による摩擦力の変化を考慮してその接触振動を調べた報告は著者の知る限りない。さらに、系のパラメータと発生する振動様態の関係を明らかにした研究は多いが、接触からの離脱に着目し、離脱と系のパラメータの関係を調べた例は少ない。

本論文では、反発型磁気軸受の高速化のための非線形振動特性の解明、補助軸受との接触振動の解明を目的とし、危険速度通過のための制振法の提案と接触から早期に離脱させるための磁気軸受・補助軸受系の設計パラメータの設定指針を、理論解析、シミュレーションと実験により検討する。その解析において、反発型磁気軸受の非線形性の変化、補助軸受内輪の回転自由度、滑り接触と転がり接触の状態遷移を考慮する。

各章の概要は以下の通りである。

第2章では、反発型磁気軸受のロータ側とステータ側の磁石の軸方向相対変位、磁束密度、磁石の長さ、ギャップが復元力特性に与える影響を非線形性も考慮して調べた。これらのパラメータを選ぶことにより、線形剛性と非線形剛性の特性を設計できる。軸方向変位または磁石長さの比の選び方により、復元力特性をハードスプリング特性にもソフトスプリング特性にも設計でき、また線形特性（非線形剛性=0）にも設計できることを明らかにした。

第3章では、反発型磁気軸受で支持された剛性回転軸の傾き振動モデルを考え、系の運動方程式を導出した。反発型磁気軸受の非線形性、補助軸受内輪の回転自由度、滑り接触と転がり接触の状態遷移を考慮し、モデルを構築した。ロータと補助軸受との滑り接触時及び非接触時の運動方程式をLagrangeの方程式を用いて導出し、さらに転がり拘束を導入し、仮想パワーの原理を用いて転がり接触時の拡大系の運動方程式を導出した。

第4章では、反発型磁気軸受の復元力のべき級数表現を用いて、磁束密度、軸方向変位および内外輪磁石の長さ比が振動特性に与える影響について調べた。軸方向変位と磁石長さの比の選び方により、共振周波数と共振曲線の傾きの方向および強さを調整できることを明らかにした。また、軸方向変位または磁石長さの比を適切に選ぶことにより、跳躍現象などの非線形系特有の現象を抑制できることを示した。

第5章では、軸の回転速度の変化に応じて反発型磁気軸受の軸方向変位を制御することによる危険速度通過時の制振法を提案した。回転速度に応じた軸方向変位制御により、反発型磁気軸受の非線形性の影響による複数の安定解が存在する回転速度領域は現れなくなり、さらに主共振を小さく抑えることができ、危険速度通過時の非定常振動も大幅に低減できた。本実験では、軸方向変位をリニアアクチュエータを用いて制御したが、1軸制御の反発型磁気軸受の構成の場合は、アクチュエータを追加することなくこの制振手段を適用できる。

第6章では、補助軸受内輪の回転自由度と滑り接触と転がり接触の状態遷移を考慮した理論モデルを用いて接触振動を調べた。従来の研究で用いられている補助軸受内輪の回転自由度を考慮していないモデルでは、転がりモードの前向き振れまわり運動や、振れまわり速度がロータの回転速度の数倍程度となる転がりモードの後向き振れまわり運動は観察されなかつたが、本研究ではシミュレーションにおいてこれらの接触振動を観察した。実験においてもこれらの接触振動を観察しており、本論文で構築した理論モデルの妥当性を確認した。摩擦係数が大きいと接触振動は転がりモードに移行しやすく、転がりモードの振れまわりは接触から離脱しにくい。したがって、接触状態から早期に離脱させるには滑

りモードの前向き振れまわりに移行させとどめることが良く、そのためにはある程度の補助軸受内輪の回転の減衰を与えつつ、摩擦係数は小さくすることが望ましい。一方、滑りモードの前向き振れまわりから早期に離脱させるためには、ある程度の摩擦係数が必要である。これらのことから、最適な摩擦係数と補助軸受内輪の回転の減衰の値が存在し、これらの値は系のパラメータによって変わるために、装置毎に検討、設計し設定することが望ましい。また、滑りモードの前向き振れまわりからの離脱回転速度は、軸方向変位を制御することにより低下させることができる。

以上のように、反発型磁気軸受の磁束密度、磁石長さ、軸方向変位等のパラメータが反発型磁気軸受系の非線形振動特性に与える影響を明らかにし、反発型磁気軸受で支持される回転機械の危険速度通過のためのセミアクティブ制振法を提案した。また、危険速度通過時の補助軸受との接触振動を解明し、接触から早期に離脱、危険速度を通過させるための磁気軸受・補助軸受系のパラメータの設計指針を示した。

本研究では、危険速度の通過に関して接触からの離脱回転速度に着目して検討を行なったが、危険速度を安全に通過させるためには、振れまわり速度や振れまわりの変位の大きさについても評価項目に含めて、検討することが今後の課題である。また、剛体モードの主危険速度の通過について検討を行なったが、より高次の曲げモードの危険速度を超えたところで運転する場合には、2次あるいは3次のモードに対応する危険速度の通過についての検討が必要である。補助軸受との接触振動については、能動型磁気軸受系等の補助軸受の他、回転部と静止部との接触を持つ回転機械の開発において、振動現象の解明、設計に応用できると考える。