

審査の結果の要旨

氏名 高橋直彦

学位請求論文は、「高速ターボ圧縮機用磁気軸受システムの制御系設計・振動抑制技術に関する研究」と題し、全7章から構成されている。

制御型の磁気軸受は、電磁石による吸引力によって、ロータを非接触で支持することから、低損失であり、高速回転に適し、メンテナンスも容易である。一方、遠心圧縮機などのターボ圧縮機分野では、モータ軸とインペラ軸を直結する構造を持つ高速ドライブ技術の利用が盛んに行われている。今後、ユーザーが高速ターボ圧縮機に磁気軸受システムを安心して受け入れるようになるためには、高速ターボ圧縮機用磁気軸受システムの信頼性確立が求められている。

このような背景の元に、本論文は、磁気軸受システムの信頼性を実証する具体的研究対象として、永久磁石モータ駆動の高速小形ターボ圧縮機のプロトタイプ機を取り上げ、高速回転に対応した新しい制御系設計法の提案とその評価を行うとともに、磁気軸受搭載機の高速化によって生じる熱曲がり振動の問題に取り組み、振動発生メカニズムと安定度評価、対処法について検討したものである。

第1章は、「緒論」と題し、関連する研究についての概観と本論文中で展開されている研究の位置付けについて述べている。

第2章は、「高速ターボ圧縮機への磁気軸受の適用」と題し、検討対象となる、磁気軸受で支持されたモータ直接駆動型のプロトタイプ空気圧縮機について、その概要と磁気軸受の仕様を示している。続いて、磁気軸受制御系の構成および制御対象の振動モードと制御手法についても述べている。本研究の目的は、磁気軸受による振動抑制によって曲げ1次危険速度を越える定格回転速度での運転を実現するものである。

第3章は、「高速ターボ圧縮機の磁気軸受制御系設計」と題し、本論文で用いられている制御手法について述べている。

磁気軸受の制御には、主に浮上を担う浮上制御器と不釣合い振動の抑制を担う不釣合い振動制御器が必要である。本研究では、浮上制御器については、移相回路や2次ローパスフィルタを使用した急峻な位相推移と高周波域の低ゲイン特性を有する帯域制限型制御器を提案している。ロータの共振・反共振の特性に合わせて、この移相回路や2次ローパスフィルタを設計することで、従来にはない高減衰で安定余裕度の高い制御系を実現することができる点に特徴が

ある。

一方、不釣合い振動は、回転速度に同期した単一周波数の強制振動であるので、その周波数のみに着目した制御法が有効である。本研究では不釣合い振動制御器として、位相シフトトラッキングフィルタを用いた回転速度同期 1 次成分フィードバックを提案している。位相シフトを 90 度進みにすることで、不釣合い振動に対しては理想的な微分制御と同様の効果をもたらすことができる。

第 4 章は、「磁気軸受支持高速ターボ圧縮機の安定性評価と回転試験」と題し、帯域制限型制御器によって構成された磁気軸受制御系に対し、ゲイン変化と位相遅れをパラメータ変動として与えた試験を行い、感度関数に基づく ISO 規格に準拠した安定余裕を確認している。

回転中の安定性評価においては、測定した伝達関数に後ろ向きと前向きの共振ピークが混在して現れるが、混在した共振ピークを分離する手法を提案し、後ろ向きモードと前向きモードを区別した安定性評価が可能であることを示した。また、曲げ 1 次モードの危険速度通過時の不釣合い振動値を測定し、不釣合い振動制御機能の効果を実証することにも成功している。

第 5 章は、「磁気軸受弾性ロータに生じる熱曲がり振動の解明」と題し、磁気軸受によって支持された弾性ロータに生じる熱曲がり振動を実測するとともに振動の発生機構を明らかにしている。本章では、制御則の違いによる熱曲がり振動の挙動の違いを予測し、実験で確認している。また、実験結果を説明できるようなモデルを提案し、安定不安定の条件を導くことに成功している。

第 6 章は、「高速ターボ圧縮機に生じる熱曲がり振動の抑制と安定度評価」と題し、高速ターボ圧縮機で発生する曲げ 1 次モードでの熱曲がり振動を回避するために急加減速によって曲げ 1 次危険速度通過を実現できたことを述べている。

また、フィードフォワード加振による熱曲がり振動の同定法を提案し、熱曲がり振動の安定度について実験結果とシミュレーション結果を比較するとともに、熱曲がり振動を回避する対処法を提案し、その効果を確認している。

第 7 章は、結論と題し、本研究で得られた知見について纏めて述べている。

以上を要約すると、本論文は、研究対象として、高速小形ターボ圧縮機のプロトタイプ機を取り上げ、新しい磁気軸受制御系設計法の提案、制御系安定性と軸振動の評価、熱曲がり振動の解明およびその抑制と安定度評価を行ったものであり、これらの研究成果により、高速ターボ圧縮機に適用される磁気軸受の制御系設計、振動低減技術の確立に貢献した。本研究は、機械工学、特に振動学の発展に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。