



Title	高速回転機システムにおける磁気軸受の高付加価値化に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	孫, 浩
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第14628号
Issue Date	2021-06-30
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/82447
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	SUN_HAO_abstract.pdf (論文内容の要旨)



[Instructions for use](#)

学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 孫浩

学位論文題名

高速回転機システムにおける磁気軸受の高付加価値化に関する研究

(Study of Enhancing Added Value of Magnetic Bearings in High-Speed Rotation Machine System)

近年、技術の進歩に伴い、高速回転システム全体の小型化、高出力化、低コスト化への要求が高まっています。高速回転システムでは、回転速度の増加に伴って出力が増加するため、システム全体の小型化と高出力化を実現するため回転速度を上げる方法は有効な対策だと考えられている。しかし、従来の機械式ベアリングは摩擦や摩耗が存在するため定期的に潤滑油などで保守する必要があり、高速回転に連続運転能力が低い、高速運転能力が弱いため、高速回転システムに応用するのは困難である。この課題を解決するために、電磁力で回転軸を静止浮上できる磁気軸受は注目を集めている。磁気軸受は、固定子と非接触する状態で回転軸を静止浮上できるため、従来の機械式ベアリングより摩擦や摩耗がない、低損失、メンテナンスフリーなど利点がある。しかし、軸支持力の発生原理により、静止浮上する時ギャップに磁束密度差が発生している。この磁束密度差は高速運転時に大きな損失の原因である。そして、回転軸は熱伝導率が低い空気に包まれているため、高速運転時システム全体の冷却が課題になっている。また、磁気軸受を採用するシステムには、一般的に軸方向を制御するようスラスト磁気軸受1ユニット、径方向を制御するようラジアル磁気軸受2ユニットと回転ユニットの組み合わせになっているため、システム全体のユニット数が多い、特に軸長が長くなる。その結果、定格速度までに回転軸の危険速度を通過する必要があり、システム全体の安定性が低くなるほか、制御系も複雑になる。そこで、従来の機械式ベアリングより、磁気軸受の方は低損失やメンテナンスフリーなどのメリットがありますが、磁気軸受の高付加価値が近年注目を集めている。

一般的な磁気軸受はヘテロポーラ型とホモポーラ型2種類がある。従来型のヘテロポーラ型磁気軸受は構造が簡単で磁石がないのため安価である。しかし、ギャップに交番磁束が生じるため回転子での鉄損が多い、冷却が難しいことが欠点である。一方、従来型のホモポーラ型磁気軸受は回転子での鉄損が少ないため冷却が容易ですが、欠点は磁石を大量に使用し、構造が複雑である。また、一定のスロット面積を保つ必要があるため極間の幅が広い、ギャップの磁束密度分布は不均一であり、高速回転時回転子での鉄損が大きいと考えている。したがって、磁気軸受の低損失と低コストが両立できる構造が課題になっている。

一方、5自由度を能動的に制御する一般的な軸支持システムでは、軸支持部分にスラスト磁気軸受(TMB)に円板状の回転子を用い、半径方向の軸支持のために2個のラジアル磁気軸受(RMB)を組み合わせた構造が用いられている。しかし、電動機ユニットを含めシステム全体のユニット数が多いためにコストが高くだけでなく、サイズが大きくなることに従い軸長が長くなることで回転軸の共振周波数を低下させ、定格回転数まで危険速度を通過しなければならない恐れがある。また、TMBに円盤所回転子が採用するため、システム全体のアセンブリ性が低下になり、回転軸のバランス取りも難しくなっている。そこで、ユニット数を減らすしながらシステム全体の組み立て性を向上させるために、軸方向の変位と回転軸の傾きの3自由度を能動的に制御できるT+RMB型磁

磁気軸受が提案されている。T+RMB を用いたシステムでは RMB と電動機を融合したベアリングレスモータ (BelM) と組み合わせることで、5 自由度を能動的に制御できながら小型化という優れた利点を持つ。また、ユニット数の減少により軸長の短縮が期待でき、定格回転まで危険速度の通過や回転子のバランス取りなどの課題の対策になっている。しかし、産業用のターボ分子ポンプなどの用途においては、定期的に分解して洗浄する必要があるため、T+RMB ではバイアス磁束を提供している永久磁石による吸引力が回転子の抜差しの作業性を悪化させている。そこで、現実問題として磁気軸受の磁石レス化も注目されている。

そこで、本論文では以上の課題を解決するために磁気軸受の高付加価値化に関する研究を行う。まず、低損失と言われる従来型のホモポーラ型磁気軸受構造に着目し、4 つの C 形コアを用いて新たなホモポーラ型磁気軸受の構造を提案する。その後、産業用ターボ分子ポンプなど現実問題において、円筒型回転子を用いて 3 軸能動制御型磁気軸受の磁石レス化の構造を検討する。そして、バイアス機能を付属する場所により 2 種類の構造を提案し、軸支持力特性や損失の面から考察を行い、最適構造を提案する。

まず、第 2 章では、一般的な磁気軸受の構造とそれぞれの構造における軸支持力の発生原理や利点・欠点を紹介する。そして、磁気軸受を用いて 5 軸能動制御型システム全体の構成において、高速回転システムはどのような構造でより小型化、低コスト化が実現できるかなどの課題を議論する。

第 3 章では、低鉄損と言われる従来型のホモポーラ型磁気軸受は永久磁石が大量に使用するため、コストが高い、構造が複雑などの課題に注目し、我々の研究チームで提案された 4 つの C 形コアを用いた新型ホモポーラ型磁気軸受より更なる損失が低い新たなホモポーラ型磁気軸受を開発する。そして、3D-FEM 解析より新たに提案している「全閉スロット形状」の固定子における、極間の形状と幅を検討し、提案構造の優れた性能を明らかにする上、試作機を製作し新たに提案しているホモポーラ型磁気軸受の有効性を検証する。

第 4 章では、ターボ分子ポンプなどの産業用途では 5 軸能動制御型高速回転システムは定期的に分解や解体など必要があるため、システムに存在する磁石がその作業性を悪化させている課題に注目し、システム全体のアセンブリ性を向上する目的を図る、円筒型回転子を用いて 3 軸能動制御型磁気軸受の磁石レス化構造を検討する。そして、バイアス機能を付属する場所より 2 種類の構造を提案し、それぞれの構造における制御系を設計し、3D-FEM 解析により性能が優れている構造を提案する。

第 5 章では、本論文で提案している 4 つの C 形コアを用いた新型ホモポーラ型磁気軸受と円筒型回転子を用いて 3 軸能動制御型磁気軸受の磁石レス化構造の特性をまとめ、磁気軸受の高付加価値化の面から議論する。最後、それぞれの構造において今後の課題や展望をまとめる。

本論文では磁気軸受の高付加価値化課題に着目し、新たに 4 つの C 形コアを用いた新型ホモポーラ型磁気軸受の構造と円筒型回転子を用いて 3 軸能動制御型磁気軸受の磁石レス化構造を提案する。そして、提案構造の優れた性能を 3D-FEM 解析や実験により明らかにする。