

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	空気静圧スピンドルの熱解析と空気圧制御法の研究
Title(English)	Study on Thermal Analysis and Pneumatic Control Method of Aerostatic Spindle
著者(和文)	武石桐生
Author(English)	Hisami Takeisi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第256号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:肖鋒,青木 尊之,末包 哲也,大西 領,因幡 和晃,門永 雅史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第256号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	武石 桐生		審査員主査： Chief Examiner	肖 鋒 教授

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「空気静圧スピンドルの熱解析と空気圧制御法の研究」と題し、空気静圧スピンドルの動作特性を数値解析によって解明したものである。まず、空気静圧軸受の熱解析モデルの選定基準を明確化し、設計効率を向上させる。数値計算による熱流体解析を行い、提案する選定基準の妥当性を検証した。次に、位置制御のための空気圧制御回路を提案し、空気静圧スピンドルの主軸位置精度を向上させる。先行研究にない新たな空気静圧スピンドルの制御手法を提案し、その有効性を数値計算モデルにより検証した。本研究により、空気静圧スピンドルの設計最適化および高精度制御技術の確立を目指す。本論文は5章で構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景、目的、および必要性について述べている。現在、精密加工技術は飛躍的に進化しており、微細加工分野では高精度・高速回転スピンドルが不可欠な要素となっている。従来のスピンドルにおいては、転がり軸受が広く使用されているが、高速回転時には摩擦による摩耗が大きな問題となることが分かっている。これらの問題は、加工品質の維持やスピンドルの寿命に直接的な影響を与えるため、早急に解決する必要がある。そのため、摩擦がほとんど発生せず、長期間にわたって性能が維持できる空気静圧軸受が注目されている。空気静圧軸受は固体の転動体の代わりに圧縮空気を利用する軸受である。非接触構造であるため摩擦劣化が極めて少なく、長時間の連続加工や高精度加工において非常に有効である。本研究では、空気静圧軸受内のせん断発熱および主軸位置精度に着目し、数値計算モデルを用いてこれらの問題解決を図る。

第2章「解析手法」では、本研究で用いた解析手法述べている。熱流体解析にオープンソースソフトウェア「OpenFOAM」を用いて、空気静圧軸受内のせん断発熱量および温度分布を解析する。OpenFOAMのソースコードを改良し、圧縮性流体における発熱を考慮したシミュレーションを実施する。軸受内の圧力分布を求めめるために圧縮性レイノルズ方程式を導出し、さらにそれを摂動法により線形化し、軸受の剛性係数および減衰係数を求める。

第3章「空気静圧軸受のせん断発熱解析」では高速回転するスピンドルの熱流体解析に関する研究を述べている。空気静圧軸受の設計において、熱解析は非常に重要であるが、解析モデルの選定によって計算コストが大きく変化する。従来、せん断発熱解析において、1次元解析モデルと3次元解析モデルの選択基準が明確ではなかった。本研究では、軸受内流れの3次元性を評価する無次元数 H (軸方向流速と主軸周速の比) を提案し、1次元解析モデルと3次元熱流体解析モデルの切り替え基準を明確化した。1次元解析モデルと3次元解析モデルの結果を H に沿って比較し、せん断発熱解析に対して1次元解析モデルが適用できる範囲を調べた。研究の結果、 H の値が一定閾値以下 ($H \leq 0.6$) であれば1次元解析でも十分な精度が得られるが、閾値を超える場合は3次元解析が必要であることが判明した。この結果は、高速回転時の空気静圧軸受の設計効率向上に大きく寄与した。

第4章「空気静圧スピンドルの位置制御」では空気静圧スピンドルの位置制御についての研究成果を述べている。空気静圧スピンドルは、微細加工に対応するため高速化が進んでいる。高速化に伴い、ジャイロ効果、くさび効果を考慮した位置制御が必要であり、これらの補償にノズルフラップと空気圧パイロット弁を用いた新たな空気圧制御回路を提案した。まず、空気圧制御回路を考慮した空気静圧スピンドルの初期研究を行い、提案手法がジャイロ効果の補償に有効で、より高精度な主軸の位置制御を達成できることを確認した。次に、上記のモデルを改良し、くさび効果や空気圧制御回路の応答遅れを考慮した数値計算モデルを作成した。数値計算モデルは実験との比較を行うことで計算精度を保証した。改良したモデルを用いてより精度の高い解析を行った。その結果、提案手法を用いることでジャイロ効果およびくさび効果を補償可能であり、主軸の位置精度を向上させる効果があることを確認した。

第5章「結論」では、本論文の成果および今後の課題をまとめている。空気静圧軸受におけるせん断発熱解析モデルの選定基準を提案し、計算効率の向上を実現した。空気静圧スピンドルの主軸位置制御を目的とした空気圧制御回路を提案し、その有効性を数値解析により確認した。今後の課題として、シミュレーション結果の実験的検証およびモデルの精度向上が挙げられる。

本論文では、空気静圧スピンドルの熱解析および位置制御に関する数値シミュレーションを行い、その設計と制御に対する有用な知見を得た。これらの成果は、今後の高精度・高速スピンドル設計に寄与するものであり、工学上貢献するところが大きい。よって本論文は博士 (工学) 論文として十分な価値を有すると認められる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	武石 桐生		審査員主査： Chief Examiner	肖 鋒 教授	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This paper reports the results of a numerical analysis of an aerostatic spindle. A study on the selection method of thermal analysis model for aerostatic bearings used in aerostatic spindles was conducted. Also, a new numerical model for the design of aerostatic spindles was proposed to improve the machining accuracy of aerostatic spindles.

A new dimensionless number was proposed to describe the characteristics of aerostatic bearings. A dimensionless number that evaluates the complexity of the flow in an aerostatic bearing was derived, and a range was defined within which the shear heating value can be calculated from one-dimensional equations with low computational cost. We formulated a one-dimensional energy equation for compressed air in an aerostatic bearing and derived an analytical solution for calculating the amount of shear heating in an aerostatic bearing. A three-dimensional CFD solver was developed using an open-source fluid analysis software called OpenFOAM for comparison with the analytical solution for the shear heating value. The developed three-dimensional CFD solver was used to calculate the shear heating value considering complex flows. As a result of the study, a range of dimensionless numbers was identified in which the shear heating values calculated from the one-dimensional equation were in close agreement with the results from the three-dimensional CFD solver.

We are currently developing an aerostatic spindle that incorporates a new control mechanism to improve machining accuracy. A numerical model of the aerostatic spindle with the proposed control mechanism has been developed. The stiffness and damping coefficients of the aerostatic bearing were calculated using the compressible Reynolds equation and the perturbation method. The calculated stiffness and damping coefficients were validated by comparison with experimental data. The aerostatic spindle was analyzed as a spring-mass-damper system, and the spindle motion under machining load was calculated. The calculation results show that the proposed control mechanism can adequately suppress disturbances applied to the spindle. The changes in the response of the aerostatic spindle to operating conditions, such as rotation speed, were also investigated, and it was found that the optimum gain of the control mechanism changed depending on the operating conditions.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).