

学位論文題名

タービン翼の最適設計と振動解析に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、発電用タービンの急激な大容量化が進み、タービン動翼についても高速化、長大化、高温化などが図られてきている。このため、高遠心力場あるいは高負荷条件での運転など翼を取り巻く環境はますます過酷化しており、信頼性の高い翼を設計するためには設計段階で翼の振動特性を正確に予測し、かつ性能や工作上的の種々の制約条件下で最適設計ができる解析手法を開発することが必要となってきている。このため本研究では、タービン翼の最適設計や振動解析という観点から従来の設計法の問題点を指摘し、これらの課題を解決することを目的とした具体的な解析法を提案した。また、数値解析結果や実験値との比較を通じて、提案した解析法が実際の翼設計に適用できることを検証した。

以下に本論文の概要を述べる。

第1章は緒論であり、振動強度設計という観点から従来の翼設計法の問題点を指摘し、本研究でとり上げるテーマの設定を行った。

第2章では翼型の最適設計技術として、有限要素法に基づく感度解析と非線形計画法を応用し、種々の制約条件下で翼の固有振動数を自動調整する方法を提案した。次に、提案した方法に従って実際に固有振動数の自動調整を行い、本手法が多数の設計クライテリアを満足させながら形状を微調整していくような最適設計問題に対して特に有効であることを確認した。また、従来設計者の経験と勘にたよることが多かった振動数調整作業の効率を大幅に高めることができ、実設計へも十分適用可能であることを確認した。

第3章では翼根・翼溝形状の最適設計技術として、数値差分法と有限要素法の感度解析から設計変数の変化に対する局部応力の感度を求め、これに逐次線形計画法を応用して最適形状を求める手法を提案した。次に、提案した最適設計手法に従って工作や強度上の制約条件を満足させながら翼根・翼溝形状の最適設計を行い、翼根・翼溝の局部応力に及ぼす個々の設計変数の影響を明らかにするとともに、本手法の有効性を検証した。

第4章では、翼・ディスク系のミスチューン効果について検討した。ミスチューン効果とはディスク上の個々の翼の特性が工作誤差や材料定数のばらつきによりわずかに異なっているため、翼・ディスク系の応答特性が極端に変化する現象であり、ミスチューンが原因と思われる事故例も報告されている。また最近ガスタービン翼では、翼の負荷方向と材料の結晶方向を一致させることにより大幅な強度アップを図る結晶制御合金翼が注目されており、航空機用ジェットエンジンでは既に実用化されている。このような翼は結晶方向に依存した材料特性(異方性)を強く示し、従来の等方性材料翼よりも個々の翼の特性のばらつきが大きくなるため、ミスチューン効果を考慮した強度評価法や品質管理法を導入していくことが不可欠になってきている。このようなミスチューニング現象を解明するため、本章ではまず

翼・ディスク系を等価ばね・質量系でモデル化し、これにモンテカルロ法を適用してミスチューン系の応答解析を行い、各翼構造（単独翼構造、インテグラルシュラウド翼構造、綴り翼構造）のミスチューニング現象を調査した。次に、感度解析法を適用してミスチューン系の応答を予測する方法を提案し、モンテカルロ法と比較することにより本手法の適用限界を確認した。さらに、実験値と解析値を比較することにより、等価ばね・質量モデルがミスチューン系の解析に有効であることも確認した。

第5章と第6章では、タービン翼のダンピング予測法について検討した。タービン翼の信頼性を向上させるためには、材料強度を向上させる、加振力を低減させる、ダンピングを付加するなどの方法が有効であるが、このうち設計時に確実にコントロールできる項目はダンピングだけである。このため最近の蒸気タービン動翼やガスタービン動翼には、摩擦減衰を利用したシュラウド翼などの各種ダンパ翼構造が採用され始めている。しかしながら、このようなダンパ翼の減衰特性については実験データをベースに評価しているだけであり、ダンパ翼の減衰特性を解析的に評価する手法が確立されていなかった。このためまず第5章では、翼・ディスク系を等価ばね質量系でモデル化し、これにハーモニックバランス法を適用して摩擦型ダンパ翼の減衰特性を解析する方法を提案した。また解析値と実験値との比較を行い、本手法によりダンパ翼の減衰特性を予測できることを確認した。

第6章では、第5章の解析法を拡張した方法として、ダンパ部（非線形部分）とダンパ以外の部分（線形部分）を別々に解析し、両者の結果を合成して非線形周波数応答解析を行う方法を提案した。さらに提案した解析法の有効性を検証するため、摩擦型ダンパ翼のモデル試験を実施し、解析値と実験値を比較した。その結果、ダンパ翼の減衰特性を実験的に把握するとともに、ここで提案した手法によりダンパ翼を連続体として取り扱った解析が可能であることを確認した。

第7章では、翼・ディスク・軸連成ねじり振動の解析法を検討した。従来、高圧タービンから発電機まで結合した実機ロータの翼・ディスク・軸連成ねじり振動を解析する場合には、有限要素でモデル化しなければならない段数が10段以上になり、解析モデルの節点数が膨大となるため有限要素法を直接適用して解析することが事実上不可能であった。このため本章では、個々の翼・ディスク系の解析を有限要素法で行い、得られた結果を軸のねじり振動に連成させて翼・ディスク・軸系のねじり振動解析を効率良く行う手法を提案した。また本手法による解析結果を、翼・ディスク・軸系を一度に有限要素法で解析した結果や実験値と比較し、本手法が翼・ディスク・軸連成ねじり振動の解析にきわめて有効であることを確認した。

第8章は総括であり、本研究で得られた成果の要点をまとめ、結論を述べた。

以上、本研究では、タービン翼の振動強度設計という観点から従来の翼設計法の問題点を指摘し、これらの問題点を解決するための解析法を提案した。また、数値解析結果や実験値との比較を通じて提案した解析法の妥当性を検証するとともに、ミスチューン効果やダンパ翼の振動特性などを明らかにした。ここで提案した解析法は既に実設計に応用されており、タービン翼の信頼性向上にきわめて有効であることも確認した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 田 元
副 査 教 授 鶴 飼 隆 好
副 査 教 授 岸 田 路 也
副 査 教 授 新 保 勝

学位論文題名

タービン翼の最適設計と振動解析に関する研究

発電用タービンの大容量化にともない、タービン動翼は高速化、長大化、高温化の一途をたどり、この結果、高遠心力場あるいは高負荷条件下での運転など翼を取り巻く環境はますます苛酷になり、高い信頼性を有する翼を実現するためには、設計段階での翼の振動特性の正確な予測と、性能や工作上的の種々の制約条件下での翼の最適設計を可能とする手法の開発が重要となる。

本論文は、タービン技術の進展に欠くことの出来ない、タービン翼の最適設計と振動解析に関する方法の提案と、数値解析や実験による結果との比較を通じてその解析法の妥当性を検証したものであって、その主要な成果は次の点に要約される。

[1]有限要素法に基づく感度解析と非線形計画法を適用して、種々の制約条件下で翼の固有振動数を自動調整する方法を提案し、多数の設計要件を満足させながら形状を微調整するような最適設計問題に対して特に有用であることを示した。

[2]設計変数の変化に対する翼の局部応力を、数値差分法と有限要素法の感度解析から求め、これに逐次線形計画法を応用して、翼根・翼溝形状の最適設計法を考案し、局部応力に及ぼす個々の設計変数の影響を明らかにすると共に、本設計法の有効性を検証した。

[3]翼・ディスク系を等価ばね・質量系でモデル化し、モンテカルロ法を適用してミスチューン系の応答解析を行い、翼構造のミスチューン現象を明らかにすると共に、提案したモデルがミスチューン系の振動解析に有効であることを確認した。

[4]翼・ディスク系の等価ばね・質量モデルに対し、ハーモニックバランス法を適用し、摩擦型ダンパ翼の減衰特性を明らかにするとともに、ダンパ翼の減衰特性の予測を可能にした。一方、ダンパ翼を連続体として取り扱うために、ダンパ部とそれ以外の部分に分けて部分構造合成法を適用し、周波数応答解析から翼の減衰特性を求めた。また、数値解析や実験の結果との比較よりこれらの解析方法の有用性を確認した。

[5]翼・ディスク系の有限要素法による解析結果を、軸のねじり振動に連成させることにより、翼・ディスク・軸系のねじり振動の効率的な解析法を提案した。この結果を、系全体に有限要素法を適用して求めた結果や実験結果と比較し、本解析法が翼・ディスク・軸連成ねじり振動解析に有効であることを明らかにした。

これを要するに、著者は、タービン翼の最適設計と振動解析に関する方法の提案とその解析法の妥当性を検証したもので、タービン動翼の設計に有用な多くの知見を与えており、機械振動学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。