

氏 名	藤 沢 二 三 夫
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 61 年 1 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 32 年 3 月 東北大学工学部機械工学科卒業
学位論文題目	大形回転機械軸系の振動防止並びに振動診断に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 谷 順二 東北大学教授 神山 新一 東北大学助教授 長南 征二

論 文 内 容 要 旨

近年，蒸気タービン及び発電機はその性能向上並びに経済性の観点からますます大容量化及び大形化が進められてきており，これに伴ってロータ自身が長大化するのに加えて，回転軸系は単体ロータを多数結合した多軸受多スパンロータを構成するようになってきている。

ロータの長大化によって個々のロータは従来に比較すると一層可撓性を増して振動し易くなり，またそのようなロータを多数結合した多スパンロータ系には定格速度以下に危険速度が多数存在することになるため，回転軸系全体の振動特性もいままでに比べるとより複雑さを増してきている。このような大容量化及び大形化に伴うきびしい作動条件下における回転機械の品質を向上させ，かつ信頼性を確保するために，ロータの生産過程中で不可欠とされる振動低減技術としてのつりあわせ法の重要性はますます大きくなり，新たに大形の実機ロータに迅速に適応しうるより効果的で高精度なつりあわせ法の技術開発が強く要望されるに至っている。

従来のつりあわせ法の多くは，まず影響係数またはそれに類する振動感度を測定し，次にある危険速度における初期振動値と影響係数とを用いて修正量を決定することを基本としている。このような方法は，ロータの危険速度が少ない場合，回転軸系のスパン数が少ない場合，また経済上あるいは工程的に試行運転が再々可能な場合には応用可能である。しかしながら，いくつかのロータが結合され，それらが互いに力学的に影響を及ぼしあうような複雑なつりあい分布を有する多スパンロータ系のつりあわせに対してはこのような従来の方法は不適當であり，より適切なつりあわせ

法の改良または開発が望まれている。

一方、大形の実機回転機械の異常振動や故障の予防保全の見地から、長期間にわたって安全な運転を確保するための回転軸系の振動診断技術開発に関しても各方面で種々検討が進められるようになってきた。しかしながら、現状では軸系振動の周波数分析をよりどころとして、その分析結果から技術者が最終的判断を下すことになっており、異常事態発生時に速応できる技術体制が備わっていない。このような背景のもとに、大形回転機械に適する迅速かつ正確な振動診断法の確立が望まれるに至っている。

以上のような回転機械軸系の振動問題に関する技術、研究の現状を踏まえ、本研究では、大形化及び複雑構造化した回転機械軸系の振動防止並びに振動診断の技術開発を目的として、コンピュータ利用による高精度でしかも迅速に行いうる新しいつりあわせ法並びに振動診断法を提案し、技術の確立を試みた。

第 1 章 緒 論

第 1 章では最近の蒸気タービン及び発電機に関する製品動向としての大容量化、大形化にともなう回転軸系の振動問題を述べ、回転軸系の不つりあい振動防止のためのつりあわせ法並びに予防保全のための振動診断法に関する従来の研究状況を概観したのちに、本研究の動機、目的、本論文の構成並びに内容の概略に言及する。

第 2 章 多軸受多スパンロータ系の 2 方向同時つりあわせ法に関する研究

第 2 章では、最初に、弾性ロータが不つりあい振動を呈する場合、軸受系動剛性の異方性に起因してロータの軸心がだ円軌跡を描くことを示し、多軸受多スパンロータ系の高精度つりあわせを実現するためには軸心軌跡を考慮したつりあわせ法が必要であり、修正量を決定するつりあわせ計算において、従来の 1 方向振動データのみでは不十分であり、水平及び垂直 2 方向のジャーナル振動データが必要であることを指摘した。次に、2 方向の初期振動データ及び影響係数を用いて、2 方向にわたる残留振動の二乗和を最小にする条件のもとにロータ系に分布付加すべき複数の修正量を一挙に決定する 2 方向同時つりあわせの計算式を導いた。さらに、この手法の有効性を単スパンロータ及び多スパンロータ系対象の数値計算によるつりあわせシミュレーションを行って検証した。

第 3 章 モデルロータによる 2 方向同時つりあわせ法の実験的研究

第 3 章では、最初に、定格速度以下に 1 次危険速度をもつ蒸気タービン、定格速度以下に 1 次及び 2 次危険速度をもつ発電機の各モデルロータを用いて、2 方向同時つりあわせ法に関する実験的研究を行い、従来の 1 方向つりあわせ法との比較検討の上で 2 方向同時つりあわせ法の有効性を示す。次に、蒸気タービン 4 基と発電機 1 基を直列に結合した回転軸系をモデル化した 10 軸受 5 スパンロータを対象に、定格速度及び危険速度の不つりあい振動を 11 修正面及び 15 修正面を用いて 2 方向同時つりあわせの実験を行い、実機最大規模の回転軸系のつりあわせに対して本 2 方向同時つりあわせ法が振動低減に効果を発揮し、実用に供しうることを明らかにした。

第4章 分布修正量制約のつりあわせ法に関する研究

第4章では、弾性ロータに分布付加すべき修正量を求めるつりあわせ計算において、ロータによって許容できない過大修正量の算出防止を目的として、残留振動の二乗和と修正量の二乗和で評価関数を定義するとともに、修正量の項に修正量の拘束係数を導入して、評価関数を最小化する条件のもとに修正量を決定する修正量制約法を提案し、さらに、不つりあいをもつモデルロータを用いたつりあわせ実験により、本修正量制約法が修正量緩和の効果を発揮するとともに、良好なつりあわせ状態をもたらすことを明らかにした。

第5章 モード影響係数を用いたつりあわせ法の研究

第5章では、高次振動モード軸のつりあわせにおける影響係数測定のためのロータ運転の回数節減を目的として、ロータに単一不つりあいを付加して求められる従来の影響係数に代わり、弾性ロータの固有モードを考慮したモード不つりあい群による振動応答からモード影響係数を求め、このモード影響係数を用いて残留振動の二乗和が最小となるようにモード修正量群を決定する方法を提案する。続いて、モデルロータを用いたつりあわせ実験を行い、モード影響係数を用いたつりあわせ法が運転回数の節減と振動低減にとって効果のあることを検証する。また、つりあわせの数値シミュレーションを行い、従来の最小二乗つりあわせ法とのつりあわせ精度に関する比較を試みた。

第6章 コンピュータ援用つりあわせに関する研究

第6章では、第2章から第5章にわたって示した2方向同時つりあわせ法、修正量制約法及びモード影響係数を用いたつりあわせ法をもとに、それらを実用的に発展させるべく、コンピュータ利用化と実機への適用を検討する。最初に、つりあわせ計算の大型計算機用プログラムを作成し、実機タービンロータ及び発電機ロータのつりあわせにオフライン処理で応用し、実用上十分な振動低減の効果が得られたことを示す。この結果を踏まえて、ミニコンピュータ及び修正量計算プログラムを中枢部とし、振動データの収集から修正量の決定まで一連のデータ処理及び演算処理を対話形式で実行できるコンピュータ援用つりあわせシステムを開発し、このシステムの構成と機能及び実機ロータへの適用状況を示す。

第7章 大形回転機械軸系の振動診断法に関する研究

第7章では、大形回転機械軸系の振動診断法として、周波数特性に着目する従来法では判別困難な非線形振動（分数調波振動）と自励振動（主としてオイルホイップ）の現象判別及び不つりあい振動の要因判別をとりあげ、振動波形の回転同期性に着目した現象判別法、不つりあい振動ベクトルの対時的变化に着目した要因判別法を提案し、本判別法を流れ図方式によりコンピュータを用いて自動的に実行する方法を検討した。また、軸受スパン間に発生する不つりあいの位置をジャーナルの振動データのみを用いて標定する方法の検討も行った。さらに、モデルロータを用いた実験及び実機データによりこれらの手法の妥当性を検討した結果についても言及する。

第 8 章 結 論

第 8 章では、本研究で得られた結論について述べる。

蒸気タービン及び発電機に代表される大形回転機械の信頼性向上、生産合理化、安全運転確保の観点から、回転軸系の防止並びに振動診断に関する研究を行った。振動防止の研究においては、回転軸系の不つりあい振動低減策としてのつりあわせ法について検討し、従来の手法と比較して一段と高い精度、効率でつりあわせを行いうる手法を提案し、その有効性を実験的に確認した。振動診断の研究においては、ジャーナルの振動のみを用いることを前提として、異常振動の種類及び原因とその位置を精細かつ的確に判定、判別する手法を提案し、その妥当性を実験的に確認した。

本研究によって得られた成果を要約すると次のようになる。

- (1) 多軸受多スパンロータを高精度につりあわせることを目的として、軸受系動剛性の異方性を考慮した 2 方向同時つりあわせ法を提案し、そのための修正量の計算法を導いた。また、蒸気タービンのモデルロータを用いたつりあわせ実験に基づき、従来の 1 方向つりあわせと比較して本方法により、精度の高いつりあわせが達成できることを実証した。さらに、10 軸受 5 スパンロータの多面多速度つりあわせにも 2 方向同時つりあわせ法が有効であることを実証し、実存する最大規模の蒸気タービン及び発電機の結合軸系に対して本 2 方向同時つりあわせ法が適用可能であることを明らかにした。
- (2) 弾性ロータの多面多速度つりあわせに関して、ロータに分布付加すべき修正量の大きさを制限するつりあわせ法を提案し、本手法が修正量軽減及び振動低減の両面にわたって有効であることを蒸気タービン及び発電機のモデルロータで確認した。
- (3) モードつりあわせ法及び影響係数を用いた最小二乗つりあわせ法の両者の長所を組み合わせ、簡便で効率が良くしかも精度上からも満足のいくつりあわせ法を開発するために、弾性ロータのモード影響係数を用いて、残留振動の二乗和を最小化する条件のもとに複数組みのモード修正量を同時に決定するつりあわせ法を導き出した。つりあわせの数値シミュレーション及びモデルロータによるつりあわせ実験の結果も含めて、本方法が実用に供しうることを明らかにした。
- (4) ミニコンピュータ及び修正量計算のソフトウェアを中枢部とし、振動データの収集から残留振動予測及び修正量決定にいたる一連のデータ処理並びに演算処理を対話形式で実行できるコンピュータ援用つりあわせシステムを開発した。このシステムを実際の蒸気タービンロータ及び発電機ロータのつりあわせに適用し、つりあわせの高精度化と合理化を達成した。
- (5) 大形回転機械軸系における異常振動の診断法について、ジャーナルの軸振動のみをよりどころとして、振動現象を判別する方法、不つりあい振動の要因を判別する方法、不つりあいの発生位置を標定する方法を導き、モデルロータによる実験あるいは実機データにより、これらの判別法及び標定法の妥当性を確かめた。

審査結果の要旨

最近の蒸気タービンおよび発電機は大形化し、それらを結合した回転軸系は多数の単体ロータから構成された多軸受多スパン系になっている。そのため定格速度以下に危険速度が多数存在し、振動特性はより複雑化している。防振技術としての従来のつりあわせ法は、個々のロータを逐次対象とするもので効率的でなく、大形回転機械軸系に適した高効率で高精度なつりあわせ法の開発が必要である。一方長期にわたる安全な運転を確保するために、大形回転機械に適したより高精度な振動診断法を確立しなければならない。

本論文は、大形回転機械軸系の生産過程における効率的なつりあわせ法と、運転中のより正確な振動診断法を新たに考案し、それらの研究成果をまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、従来の1方向つりあわせ法では不十分であることを考察し、新たに2方向同時つりあわせ法を提案している。広範囲の回転数に対する防振を複数の修正面によって同時に行うもので、本論文の基本となる提案である。さらに本方法の有効性を数値シミュレーションによって明らかにしている。これは有用な知見である。

第3章はモデル実験である。定格速度以下に7個の危険速度をもつ10軸受5スパンロータを結合した回転軸系を用い、第2章で提案した2方向同時つりあわせ法が振動低減に有効であることを明らかにしている。

第4章では、つりあわせのためにロータに付加すべき修正量がときには過大になる場合があることにかんがみ、修正量に上限を設ける方法を案出し、モデルロータによるつりあわせ実験を行ってその有効性を確認している。

第5章では、新たにモード影響係数を用いる方法を考案して、修正面が多い場合にも適するような2方向同時つりあわせ法の改良を行っている。たとえば発電機の高次振動の防振に適した新手法である。さらに数値シミュレーションおよびモデルロータによる実験を行って、本方法による防振の効果を検証している。

第6章では、第2章から第5章までにのべたつりあわせ法の実用化を目的として、振動データの収集から修正量の決定までの一連の処理を実行するコンピュータ援用つりあわせシステムを開発し、実機試験に適用して、本システムが十分に実用に供しうること確かめている。これは優れた成果である。

第7章は、大形回転機械軸系の運転中の振動の自動診断法に関する研究である。振動の現象判別法、不つりあい要因判別法、および不つりあいの位置標定法から構成されており、これらはいずれも大形回転機械に適した有用な知見である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、長大化と多スパン化を特徴とする大形回転機械軸系に適したつりあわせ法および振動診断法を開発し、生産性と信頼性の向上および安全確保を可能にしたもので、機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。