

報告番号	甲 第 12780 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **電磁トランスデューサを用いたセンサレス
振動制御に関する研究
(Study on sensorless vibration control
using electromagnetic transducer)**

氏 名 **池 亀 透**

論 文 内 容 の 要 旨

鉄道車両や自動車などの機械構造物や橋梁、タワーなどの大型構造物に対して、大振幅または長期的な振動が発生すると、破損や疲労破壊、快適性・操作性の劣化などの様々な問題が引き起こされる。このような振動問題は現代社会の多くの場面で発生しており、構造物への有害な振動の抑制が求められている。振動の抑制に用いられる手法の一つとして、古くから動吸振器が用いられてきた。動吸振器は、振動する構造物に対して補助質量をばねとダンパを介して付加することで、構造物の振動を補助質量が吸収し振動を抑制する装置である。この動吸振器は受動制振装置でありながら、構造物の機械共振周波数において大きな制振性能が期待できるといった利点を持つ。しかしながら動吸振器は、可動部が存在するため装置の設置には空間的な制約があり、また動吸振器として設置するばねやダンパの調整が難しいといった欠点がある。そこで近年、純粋な機械式ダンパである動吸振器ではなく、電気機械式のダンパによる振動制御が注目されている。電気機械式ダンパは可動部が存在しない、電氣的に制御を行うため調整が容易などの利点がある。

本論文では、電気機械式ダンパの一つとして、電磁トランスデューサを用いた振動制御に着目する。電磁トランスデューサを用いた振動制御方法として、アクティブ振動制御が広く用いられているが、この方法にはセンサとアクチュエータの 2 つのデバイスが必要であり、コントローラ次第では容易に振動が不安定化したり、取り付け位置によって抑えられる振動モードが変化したりするなどの問題がある。そこで近年、単一の電磁トランスデューサを用いた振動制御手法として、電磁トランスデューサの持つアクチュエーション、センシング特性の双方を同時に活用した、電磁シャント制振という手法が研究されている。

電磁シャント制振は、振動する構造物に電磁トランスデューサを取り付け、その端子間に外部電気回路（シャント回路）を取り付けるだけで振動制御を達成するため、位置や速度、加速度センサ等が不要な手法である。電磁シャント制振ではシャント回路の構成で振動制御性能が決まるため、設計においてシャント回路は最も重要な要素である。これまでにシャント回路として、RC パッシブ回路型や負性 LR 回路型、セルフチューニング型、適応制御型等が考案されている。

本論文では、抵抗とキャパシタを一つずつ直列接続しただけの回路である、RC パッシブ回路型のシャント回路を用いた電磁シャント制振に着目する。このシャント回路は非常に簡単な回路構成であるが、機械共振周波数で高い制振性能を発揮できる利点を持つ。高い制振性能が発揮できる理由は、シャント回路のキャパシタンスと電磁トランスデューサの自己インダクタンスによる電気共振周波数を機械共振周波数に一致させることで振動制御を達成しているためである。このように、あえて共振現象を発生させることで制御対象の振動を抑える方法は、動吸振器で振動を抑制することと同様のメカニズムである。他にも電気共振現象を引き起こして振動制御を行う方法として、圧電素子と LR パッシブ回路を用いた圧電シャント制振がある。この圧電シャント制振や電磁シャント制振における最適なシャント回路のパラメータは以前から議論されてきている。しかし H_{∞} ノルムや H_2 ノルム等の評価関数を厳密に最適化するシャント回路のパラメータに関する議論は未だ不十分であり、実際に共振型シャント回路を用いてシャント制振を行う際に、既存の設計方法では所望の制振特性が満たされない恐れがある。

電磁シャント制振には、空間的な制約が動吸振器と比べて小さく、制振性能の調整が容易であることといったメリットが挙げられる。一方で共振現象を利用しているため、振動系の固有振動数や電磁トランスデューサの自己インダクタンス等といった系のパラメータ値の推定精度によって容易に制振性能が劣化するという欠点もある。そのため、電磁トランスデューサが取り付けられた振動系の物理パラメータ値の高精度な推定が必須である。しかし系のパラメータ値を推定するためには、一般に加振用のアクチュエータやセンサが必要となる。例えば、固有振動数や減衰比を推定するためには、アクチュエータを制御対象に取り付けて加振を行い、その応答を位置や速度センサを用いて計測する必要がある。また、自己インダクタンスや電気抵抗を推定するためには、制御対象が振動しないように固定して、LCR メータやインピーダンスアナライザを用いて計測する必要がある。さらに電磁トランスデューサの電気機械変換の結合係数を推定するためには、制御対象の速度をセンサで計測しつつ、電圧センサで電磁トランスデューサの端子間電圧を計測する必要があるなど、非常にコストがかかる。そのため必要な計測機器の少ない、コストが低いパラメータ推定手法の提案が求められている。

制御対象のパラメータ値を推定するためには、制御対象のモデルが必須である。振動系の機械系モデルは制御対象に依存するが、電磁トランスデューサの電気系モデルではこれ

まで、コイルに発生する速度起電力、コイルの内部抵抗と自己インダクタンスの直列接続で表される簡単なモデルが広く用いられてきた。しかし、この従来の電気系モデルでは、とりわけ中高周波帯域で、実測データと十分に一致しないという問題がある。共振型シャント回路を用いた電磁シャント制振では、パラメータ値だけでなくモデル化の精度次第で制振性能が容易に変化する。そのため、従来モデルを用いて推定したパラメータ値では、電磁シャント制振性能が最適化できないため、モデル化精度の高い電磁トランスデューサの電気系モデルの提案が求められている。

本論文の主な目的は次の3つである。1) シャント制振の最適設計パラメータの提案、2) 電磁シャント制振設計に必要なパラメータ値のセンサレス推定手法の提案、3) 電磁シャント制振性能向上のための新しいモデリングの提案である。各章の概要は以下の通りである。

第2章では、共振型シャント回路を用いた電磁/圧電シャント制振の厳密に評価規範を最適化する設計パラメータの解析解を導出する。最適化する評価規範には、 H_{∞} ノルムの最小化、 H_2 ノルムの最小化、安定度の最大化の3つとする。従来研究では、電磁/圧電シャント制振のどちらか一方に着目して議論されてきていたが、本論文では両シャント制振を包括的に扱うことで両シャント制振が双対の関係にあることを示し、機械アナロジーを行うことで両シャント制振と、これまで振動制御に広く用いられてきた動吸振器との違いを明らかにする。導出した厳密に評価規範を最適化する解析解を表にまとめ、以前からシャント制振の設計に用いられてきた定点理論による設計結果との違い、それぞれの規範ごとによる違いなどについて議論する。数値事例によって、それぞれの設計規範による制振性能の特徴を議論することで、今後の電磁シャント制振や圧電シャント制振の共振型シャント回路の設計に関する指針を示す。

第3章では、電磁シャント制振の設計に必要な機械系、電気系、電気機械結合系の物理パラメータ値をセンサレスに同時に推定する手法を提案する。初めに電磁トランスデューサが取り付けられた振動系のモデル化を行い、その支配方程式から電磁トランスデューサの端子間電圧と電流の比である電気アドミタンス伝達関数を導出する。そして振動系に取り付けられた電磁トランスデューサの端子間電気アドミタンスを計測し、その計測結果と導出した電気アドミタンス伝達関数を用いることで、コイルの自己インダクタンス、内部抵抗や機械系の固有角振動数や減衰比、そして電気機械結合係数といった電磁シャント制振に必要なパラメータ値を推定可能であることを示す。この際、非線形最小二乗問題を数値最適化によって解くことでパラメータを推定するが、この数値最適化に必要な初期値の選定方法についても議論する。ここで推定するパラメータ値は、LCRメータや変位センサ、加振用アクチュエータ等を使用すれば、個別の推定が可能である。しかし本論文で提案する手法には、個別でパラメータ値を推定するよりも、短時間かつ低コストとなる利点がある。また本手法は位置や速度センサを必要としない電磁シャント制振と相性が良く、外部センサや加振用アクチュエータを用いずにパラメータ推定から電磁シャント制振を行うこ

とができるという利点も持つ。

第4章では、渦電流を考慮した電磁トランスデューサの新しい電気系モデルを提案する。これまでは自己インダクタンスが電流の微分に理想的に比例すると仮定し、自己インダクタンスと内部抵抗のみで、電磁トランスデューサの電気系のモデリングを行っていた。しかし、電磁トランスデューサの電気アドミタンス周波数特性を観測すると、中高周波数帯域では自己インダクタンスのみでモデリングするには不十分であることを示す。そこでマクスウェル方程式とオームの法則を用いることで、鉄心内部に渦電流が発生することを考慮した電気系モデルを2つ提案する。1つ目は透磁率等のパラメータが空間的に一様で、渦電流が分布的に存在するといった仮定したモデル、2つ目はパラメータが空間的に非一様であり、渦電流が集中的に存在するといった仮定したモデルである。両モデルの物理的意味として、前者は鉄心の材質が一様で、漏れ磁束がないことを考慮しており、後者は材質が非一様で、漏れ磁束も考慮しているが集中定数近似を行っていることに相当する。第3章で提案したパラメータ推定手法を提案モデルに対して拡張することでパラメータ推定実験を行い、モデル化精度検証のために電磁シャント制振実験も行う。そして提案モデルによる結果と従来モデルによる結果を比較することで、提案モデルの有効性を検証する。

本論文で導出した電磁シャント制振や圧電シャント制振の最適設計結果は、様々な応用先におけるシャント回路の設計指針となりうる。また、本論文で提案した電磁トランスデューサのパラメータ推定手法やモデル化は、アクチュエーションやセンシングだけでなくエネルギー回生といった様々な応用先のコスト低減・性能向上が期待される。