

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04754

研究課題名(和文)出力最大化および消費電力最小化を目的とした車載モーターのトポロジー最適化

研究課題名(英文)Topology optimization of in-vehicle motors for achieving torque maximization and power consumption minimization

研究代表者

山崎 慎太郎 (YAMASAKI, SHINTARO)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：70581601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、固定子、回転子、コイルや永久磁石の構造形状や配置位置を同時に最適化する創成設計法を構築することにより、新しい機能、あるいは高機能を持ち低消費電力で高出力を実現する革新的な車載モーターの創成設計を行う事である。この目的を達成するために、構造部材の非線形磁気特性を考慮した回転子の構成部材のトポロジー最適化法を開発した。また、近似モデルを導入することにより、回転子構成部材の構造形態と永久磁石の配置位置の統合的最適化を実現した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to achieve innovative design for in-vehicle motors, which have new functions and high-performances with low power consumption, by constructing a creative design method that concurrently optimizes shape and topology of structural materials and positions of components, such as coils and permanent magnets. For this objective, I constructed a topology optimization method that optimizes shape and topology of a rotor while considering non-linear magnetic properties of the structural material. Furthermore, on the basis of the constructed topology optimization method, I further proposed an integrative optimization method that concurrently optimizes shape and topology of the rotor and positions of the permanent magnets.

研究分野：最適設計

キーワード：構造最適化 トポロジー最適化 車載モーター トルク出力 低消費電力

1. 研究開始当初の背景

(1) 設計者の勘や経験によらず、数学的・物理的根拠に基づき構造物の最適な形状や形態を創出しうる方法論として、構造最適化の研究が行われている。機能構造物への要求性能は年々高度化しつつあり、設計者への負担は増大している。このため、産業界の構造最適化への期待は大きい。

構造最適化の基本的な考え方は、構造物の形状や形態を表現する何らかの設計変数を導入し、最大化あるいは最小化すべき性能評価指標を目的関数とし、満たすべき制約条件を定め、これらを数理計画問題として定式化し、これを数理計画法を用いて解くことで最適構造を得る、というものである。

設計変数の性質により、構造最適化は、寸法最適化[1]、形状最適化[2]、トポロジー最適化[3]に大別できる。これらの中でもトポロジー最適化は、構造の形状変更だけでなく穴の数の増減などの形態の変更も可能とする最も自由度の高い構造最適化の方法である。トポロジー最適化の特徴は、構造最適化問題を材料分布問題へ置き換える点にある。すなわち、材料配置の有無を検討する設計領域を最初に定義し、必要な箇所には材料を与え、不必要な箇所からは材料を削除することにより最適構造を得る。

(2) トポロジー最適化は、剛性最大化[1]や固有振動数最大化[4]といった構造の安定化を目指した設計問題や、伝熱性能最大化問題[5]など、機械工学分野において広く利用されている。また、誘電体共振器アンテナの広帯域化[6]など、電磁気学分野への応用事例も報告されはじめている。一方で、車載モーターを対象としたトポロジー最適化に関して、幾つかの研究事例が散見されるものの、これらの事例においては、設計対象が回転子や固定子の一部構造体の形状・形態に留まっており、コイルや永久磁石の配置については設計対象とすることができない。

(3) 低消費電力で高トルク出力を実現する革新的な車載モーターを創成設計するためには、単に回転子構造体や固定子構造体の形状・形態を考慮するのみならず、永久磁石やコイルの配置位置をも同時に考慮して、拡張された設計空間で最適解を得る必要がある。そのため、回転子構造体や固定子構造体の最適な形状・形態を求めるトポロジー最適化と、永久磁石やコイルの最適な配置位置を求めるパラメトリック最適化を統合する、新しい最適化法が必要であるという結論に達した。

<引用文献>

[1] Prager W. A note on discretized Michell structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 349-355, 1974.

[2] Zienkiewicz O. C., Campbell J. S. Optimum structural design. John Wiley & Sons, pp. 109-126, 1973.

[3] Bendsøe M. P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, No. 2, pp. 197-224, 1988.

[4] Ma Z. D., Kikuchi N., Cheng C. Topological design for vibrating structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 121, Nos. 1-4, pp. 259-280, 1995.

[5] Haslinger J., Hillebrand A., Kärkkäinen T., Miettinen M. Optimization of conducting structures by using the homogenization method. Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 24, No. 2, pp. 125-140, 2002.

[6] Nomura T., Sato K., Taguchi K., Kashiwa T., Nishiwaki S. Structural topology optimization for the design of broadband dielectric resonator antennas using the finite difference time domain technique. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 71, No. 11, pp. 1261-1296, 2007.

2. 研究の目的

本研究では、新しい機能、あるいは高機能を持ち低消費電力で高トルク出力を実現する革新的な車載モーターの構造創成を目的として、車体本体側に固定される固定子や回転軸と一体となって回転する回転子の形状・形態のトポロジー最適化と、コイルや永久磁石の配置位置のパラメトリック最適化を、統合的に行う新しい最適設計法を構築する。

車載モーター設計の現状は、数学的・物理的根拠を備えた最適設計の段階には至っておらず、多分に性能向上の余地が残っている。このため、本研究で提唱する最適設計法が確立されれば、数学的・物理的根拠に基づき最適性が保証された、低消費電力と高トルク出力を両立する車載モーターの創成設計が可能となり、ハイブリッド型自動車や電気自動車の性能向上に大きく寄与するものと期待される。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、以下の事項について開発を行った。

(1) 車載モーターの回転子構造を対象とした非線形磁気特性を考慮したトポロジー最適化法の開発

革新的な車載モーターの構造創成を目的として、車載モーターの回転子構造を設計対象としたトポロジー最適化法を開発した。こ

れを実現するためには、回転子を構成する材料の非線形磁気特性を取扱可能な構造最適化法の構築が必要となるが、研究代表者は密度法に基づくトポロジー最適化法[7]を拡張し、固定設計領域内で線形の磁気特性を示す空気と非線形の磁気特性を示す構造材料の分布を表現可能な方法を構築し、これを解決した。

(2) 車載モーターを対象とした回転子の構造形態と永久磁石の配置位置の統合的最適化法の開発

上記(1)において構築したトポロジー最適化法により回転子構造の最適化は可能となったが、真に高性能な車載モーターの創成設計を実現するには、更に広範に設計対象を最適化する必要がある。具体的には(1)において、回転子に実装される永久磁石の配置位置は固定した上で回転子構造の最適化を行ったが、永久磁石の配置位置をも設計対象とすれば設計空間は更に拡大し、より高性能を発揮する車載モーターの設計が可能となる。ただしこれを実現しようとする、永久磁石の配置位置が変更されることにより設計空間の形状が変化すること、永久磁石の配置位置を表現する設計変数と回転子構造の材料分布を表現する設計変数について目的関数・制約関数の応答が複雑化しいわゆる勾配情報に基づく数値計画法の利用が困難になること、が問題となる。これに対し研究代表者は、最適設計問題を永久磁石の配置位置最適化問題と回転子構造のトポロジー最適化問題に分割し、トポロジー最適化問題における永久磁石の配置位置の影響を応答曲面により近似的に評価することにより、両者を統合的に最適設計する方法を開発した。これにより回転子の構造形態最適化と永久磁石の配置位置最適化の統合的最適化が可能となった。

<引用文献>

[7] Bendsoe M. P. and Sigmund O. Topology optimization: Theory, methods and applications (2nd ed). Springer, 2003.

4. 研究成果

「3. 研究の方法」で述べた項目(1),(2)について、研究成果をそれぞれ以下に示す。

(1) 車載モーターの回転子構造を対象とした非線形磁気特性を考慮したトポロジー最適化法の開発

項目(1)について、非線形磁気特性を持つ構造材料からなる車載モーターの回転子構造を最適化するため、研究代表者は密度法に基づくトポロジー最適化法を拡張し、固定設計領域内で線形の磁気特性を示す空気と非線形の磁気特性を示す構造材料の分布を表現可能な方法を提案した。

本件に関して、非線形磁気特性を考慮した密度法に基づくトポロジー最適化の基礎検討を、日本機械学会 第 25 回設計工学・システム部門講演会にて発表した(5. 主な発表論文〔学会発表〕)。また、上記の成果をさらに発展させ、製造性を考慮し材料分布の平滑化を実現したトポロジー最適化法を、日本機械学会 第 12 回最適化シンポジウムにて発表した(同,〔学会発表〕)。

(2) 車載モーターを対象とした回転子の構造形態と永久磁石の配置位置の統合的最適化法の開発

項目(2)について、より高性能な車載モーターの創成設計を実現するため、回転子の構造形態と永久磁石の配置位置を統合的に最適化する方法を開発した。

本件に関して、トポロジー最適化と要素部品の統合的最適設計に関する基礎検討を、日本設計工学会 2017 年度春季大会研究発表会、および、構造最適化に関する世界最大級の国際会議である 12th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization にて発表した(同,〔学会発表〕 および)。また、上述の統合的最適設計法においては、車載モーターの設計問題を、回転子構造のトポロジー最適化問題と永久磁石の配置位置最適化問題に分割し、トポロジー最適化問題における永久磁石の配置位置の影響を近似モデルにより表現するため、近似モデルの品質が重要な役割を果たす。提案法における近似モデルの重要性に着目し、その数学的な意味付けを明確化した検討結果について、日本機械学会 第 27 回設計工学・システム部門講演会、および、日本機械学会 第 30 回計算力学講演会において発表した(同,〔学会発表〕 および)。さらに、モーターの最適設計に留まらず、構造物の構成部材のトポロジー最適化と要素部品の配置最適化の統合最適設計全般に研究対象を拡張し、個々の統合最適設計問題に対して近似モデルが備えるべき性質について検討を行った。この研究成果を、日本設計工学会 平成 29 年度関西支部研究発表講演会にて発表した(同,〔学会発表〕)。

項目(1),(2)で述べた研究成果に関して、日本設計工学会論文集「設計工学」に学術論文が 1 本掲載された(同,〔雑誌論文〕)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

丸山峻, 山崎慎太郎, 矢地謙太郎, 藤田喜久雄. 永久磁石の配置とヨークの構造形態を考慮した同期モーターの最適設計法. 設計工学, 査読有, Vol. 53, No. 1, pp. 97-110, 2018.

〔学会発表〕(計7件)

山崎慎太郎, 西川泰成, 川本敦史, 齋藤彰, 黒石真且, 藤田喜久雄. ハイブリッド車用高出力モーターを対象としたトポロジー最適化. 第25回設計工学・システム部門講演会, No. 3508, 長野, 2015年9月25日.

丸山峻, 山崎慎太郎, 矢地謙太郎, 藤田喜久雄. 非線形磁気特性を考慮したハイブリッド車用高出力モーターのトポロジー最適化. 第12回最適化シンポジウム, No. 1110, 北海道, 2016年12月6日.

丸山峻, 山崎慎太郎, 矢地謙太郎, 藤田喜久雄. 構造形態と構成要素配置の統合最適化による永久磁石同期モータ設計. 2017年度春季大会研究発表会, No. C06, pp. 49-50, 千葉, 2017年5月20日.

Maruyama S., Yamasaki S., Yaji K., and Fujita K. Integrated design of permanent magnet synchronous motor by incorporating magnet layout and yoke topology optimizations. In proceedings of 12 World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, No. 418, Braunschweig, 6 June 2017.

丸山峻, 山崎慎太郎, 矢地謙太郎, 藤田喜久雄. 応答曲面近似を用いたトポロジー最適化とシステム変数最適化の協調による永久磁石同期モータ回転子設計法. 第27回設計工学・システム部門講演会, No. 2101, 山口, 2017年9月14日.

丸山峻, 山崎慎太郎, 矢地謙太郎, 藤田喜久雄. 構造形態とシステム変数を同時に考慮した永久磁石同期モータのシステムレベル最適設計法. 第30回計算力学講演会, No. 016, 大阪, 2017年9月16日.

丸山峻, 山崎慎太郎, 矢地謙太郎, 内田憲佑, 藤田喜久雄. 軽量高剛性構造物を対象とした要素部品の配置と部材トポロジーの同時最適化. 平成29年度関西支部研究発表講演会, No. C3, pp. 55-56, 大阪, 2017年11月11日.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

特になし.

6. 研究組織

(1)研究代表者

山崎 慎太郎 (YAMASAKI, Shintaro)
大阪大学大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70581601