

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04445

研究課題名（和文）数理最適化に基づくノイズフィルタのレイアウト創成設計

研究課題名（英文）Layout design of noise filters based on optimization

研究代表者

山崎 慎太郎（Yamasaki, Shintaro）

早稲田大学・理工学術院（情報生産システム研究科・センター）・教授

研究者番号：70581601

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、コンパクトかつ十分なノイズ減衰性能を持つノイズフィルタの実現を目的としてレイアウト設計に数理最適化の考え方を導入し、数理的・電磁気学的根拠に基づき最適なレイアウトを創成する、新たな設計方法の確立を目指した。

その成果として、素子の配置位置と、それらを結ぶ銅配線レイアウトパターンの両者を総合的に最適設計する方法を構築し、従来の銅配線レイアウトパターンのみでの最適設計法と比較して、より高性能なノイズフィルタの最適設計を可能にした。この研究成果を論文としてまとめ査読付き学術雑誌に発表した。さらに、より実用的な最適設計法の実現を目指し、今後の研究課題の明確化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ノイズフィルタは様々な工業製品の電気系において利用される基本的な電磁デバイスである。その主目的である高周波数におけるノイズ低減に関する性能は銅配線レイアウトパターンに依存して大きく変動する。一方で、高周波数における電磁波の振る舞いが複雑であり、直感的な理解が困難であることから、その適切なレイアウト設計は熟練技術者にとっても難しい。本研究の成果は、このように困難かつ社会的需要の大きい工学上の設計問題に対して、その解決の可能性を示すものであり、社会的意義は高い。また、従来は出来なかった素子の配置位置と銅配線レイアウトパターンの両者を総合的に最適設計する方法を確立したという点で、学術的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：In this study, I introduced the concept of sensitivity-based optimization to layout design for realizing noise filters that are compact and have sufficient noise reduction performance, and aimed to establish a new design method that generates an optimal layout based on mathematics and electromagnetics.

As a result, I established a method to optimize both the positions of the elements and the copper layout pattern connecting them, which enables the optimal design of noise filters with higher performance compared to the conventional optimal design method for the copper layout pattern alone. The research results were published as a paper in a peer-reviewed academic journal. In addition, I clarified future research issues to realize a more practical optimal design method.

研究分野：最適設計

キーワード：最適設計 トポロジー最適化 ノイズフィルタ レイアウト設計

1. 研究開始当初の背景

従来、高周波数におけるノイズ低減性能を対象としたノイズフィルタのレイアウト設計法の確立は大きな工学上の課題であった。その理由は、ノイズフィルタを構成する素子の配置位置やそれら素子を結ぶ銅配線レイアウトパターンの形状・形態が、高周波数におけるノイズ低減性能に大きな影響を与える一方で、高周波数における電磁波の振る舞いは直感的には理解しづらいためである。このため、適切なノイズフィルタのレイアウト設計は熟練技術者の勘や経験に基づく試行錯誤により為されるのが専らであった。

このような状況に対し、筆者は本研究開始前に、素子の配置位置は固定した上で、銅配線レイアウトパターンを最適化する構造最適化法を提案した。これは最適な銅配線レイアウトパターンを設計する上で、設計者の勘や経験に依らず、数学的・物理学的な根拠に基づくという点で画期的であったものの、素子の配置位置は最適設計の対象外であった。実際のノイズフィルタのレイアウト設計においては、銅配線レイアウトパターンのみならず、素子の配置位置もノイズ低減性能に大きな影響を与えることから、素子の配置位置をも設計対象とするノイズフィルタの構造最適設計法の確立が重要な課題となった。

2. 研究の目的

「研究開始当初の背景」を踏まえ、本研究では、銅配線レイアウトパターンと素子の配置位置を設計対象として、コンパクトかつ十分なノイズ減衰性能を持つノイズフィルタの実現を目的としてレイアウト設計に数理最適化の考え方を導入し、数理的・電磁気学的根拠に基づき最適なレイアウトを創成する、新たな設計方法の確立を目指した。

3. 研究の方法

コンパクトかつ十分なノイズ低減性能を持つノイズフィルタを設計するために、具体的には、与えられた外寸固定の設計領域に対して、ノイズ低減性能の最大化を目的として、銅配線レイアウトパターンの最適設計問題と素子の配置位置の最適設計問題を、統合的に解く最適設計法の構築を目指した。一般に、固定設計領域の外寸とノイズ低減性能には相関があり、固定設計領域の外寸を小さくするほど、ノイズ低減性能は悪化する傾向がある。このため、大きさ固定の設計領域に対してノイズ低減性能を最大化する最適設計法が確立できれば、ノイズ低減性能を制約条件としてこれを満たす範囲内で固定設計領域の外寸を縮小していくという、ある種の解探索が成立し、コンパクトかつ十分なノイズ低減性能を持つノイズフィルタを設計するという目的が達成されるからである。

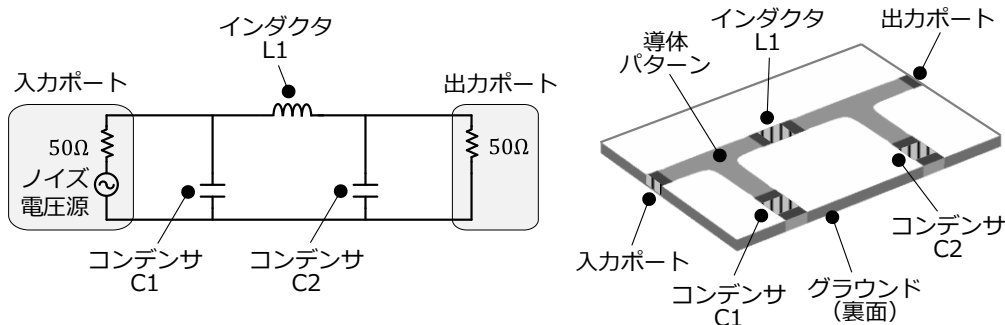


図1 ノイズフィルタの回路図(左)と対応する実装(右)

上記の構想のもと、図1に概略を示すCLC型ノイズフィルタを具体的な対象として、与えられた外寸固定の設計領域に対して、銅配線レイアウトパターン(導体パターン)の最適なレイアウトと素子(1個のインダクタと2個のコンデンサ)の最適な配置を同時に求める最適設計法を構築を目指した。銅配線レイアウトパターンは、基板内において各素子と入出力ポートを電気回路として適切に接続する限り、自由なレイアウトが許容される。また、素子の配置位置についても自由度を持たせ、基板内において様々な配置位置を取ることが許容される。

このような問題設定において、最適設計問題を「素子配置が固定された条件下で最適な銅配線レイアウトパターンを求める最適設計問題」と「素子の配置位置を設計変数とし、前述の最適設計問題における最適化結果を戻り値とする目的関数に対して最適解探索を行う最適設計問題」という2種類の最適設計問題が階層化された最適設計問題として定義し、これを階層的に解く方法の構築を試みた。ここで問題となるのは、2種類の異なる最適設計問題がループ構造になることに起因して、上位層側の目的関数の感度解析が極めて難しくなることと、上位層側の目的関数の計算コスト自体が極めて高くなることである。この2つの点から、感度解析に基づく一般的な非線形計画法の枠組みで最適解を求めることは極めて難しく、一般的な手法とは異なるアプローチが必要となる。

この問題を解決するため、本研究では最適設計問題にメタモデルを導入した。すなわち、素子の配置位置を様々に変えてサンプリングを行い、各サンプル点において「素子配置が固定された

条件下で最適な銅配線レイアウトパターンを求める最適設計問題」を解き、得られた最適な銅配線レイアウトパターンに対応するノイズ低減性能を求める。そして、各サンプル点における素子の配置位置とノイズ低減性能の対応関係を精度よく近似する近似関数（入力：素子の配置位置、戻り値：ノイズ低減性能）をメタモデルとして作成し、この近似関数を目的関数として上位層の最適設計を行う。メタモデルによる近似を導入することで上述の難点を解決し、高性能なノイズフィルタのレイアウト設計を実現する事が本研究の方法のポイントとなる。

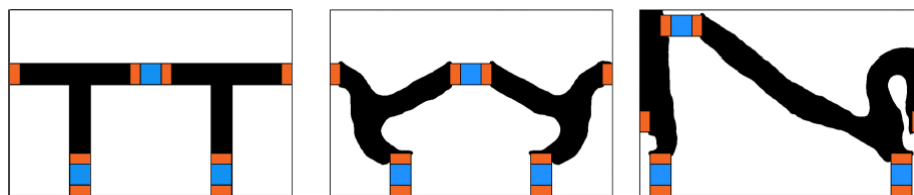


図2 誘導ノイズが支配的な場合における参照レイアウト（左）と銅配線レイアウトパターンのみ最適化したレイアウト（中）と素子の配置位置も最適化したレイアウト（右）

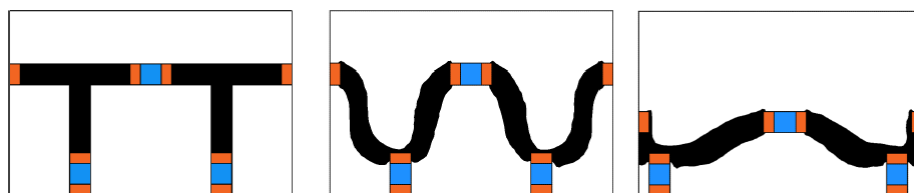


図3 伝導ノイズが支配的な場合における参照レイアウト（左）と銅配線レイアウトパターンのみ最適化したレイアウト（中）と素子の配置位置も最適化したレイアウト（右）

4. 研究成果

「研究の方法」で述べたノイズフィルタの最適設計法をプログラムとして実装し、ノイズフィルタのレイアウト設計問題を解いたところ、図2、図3に示す結果が得られた。図2では、誘導ノイズが支配的となる場合における参照レイアウト、銅配線レイアウトパターンのみを最適化したレイアウト、素子の配置位置をも最適化したレイアウトを順に示している。それぞれのレイアウトにおいて、ノイズ低減性能を表す指標である S_{21} パラメータ（小さいほど良好な性能を示す）は-83.93dB、-85.12dB、-102.5dB となった。これらの数字の比較から分かるように、参照レイアウトに対して、銅配線レイアウトパターンのみを最適化するだけでも約 1.2dB の性能向上が見込めるが、素子の配置位置をも最適化することで、さらに約 17.4dB の性能向上が見込める。同様に図3では、伝導ノイズが支配的となる場合における参照レイアウト、銅配線レイアウトパターンのみを最適化したレイアウト、素子の配置位置をも最適化したレイアウトを順に示している。それぞれのレイアウトにおいて、ノイズ低減性能を表す指標である S_{21} パラメータは-79.19dB、-84.70dB、-93.96dB となった。これらの結果から、参照レイアウトに対して、銅配線レイアウトパターンのみを最適化することで約 5.5dB の性能向上が見込め、さらに素子の配置位置をも最適化することで約 9.3dB の性能向上が見込める。以上の数値例における検討から、誘導ノイズが支配的となる場合でも、伝導ノイズが支配的となる場合のいずれにおいても、本研究で開発した最適設計法の効果が大きいことが確認できた。

「研究開始当初の背景」で述べたように、適切なノイズフィルタのレイアウト設計は熟練技術者の勘や経験に基づく試行錯誤により為されるのが専らであった。国内外における関連研究もノイズフィルタのレイアウトが与えられた場合に、そのノイズ低減性能を予測する精度を向上させることに主眼が置かれており、数理的根拠に基づく最適設計法の確立を志向したものは極めて少ない。特に、メタモデルに基づく階層的最適化により、銅配線レイアウトパターンのみならず素子の配置位置をも最適化する最適化手法は、筆者が知る限り他になく、その独創性は高い。そして、銅配線レイアウトパターンのみならず素子の配置位置をも最適化することの意義は、先に数値を用いて示した通りである。

以上より、本研究を通して世界的に見て高い独創性を持ち、インパクトの大きい成果が得られたものとする。今後は、ノイズ低減性能をより精度よく評価するための数値解析技術を導入し、実測値と数値計算との乖離を最小化していくことが課題となる。数値計算の精度をさらに向上させるには各種非線形効果の考慮が必須であり、それは必然的に最適設計問題の非線形性が高くなることを意味する。これを踏まえ、今後は非線形性が高い最適設計問題に対しても高性能な設計解が導出できるノイズフィルタのレイアウト最適設計法の確立を目指していきたい。

※図2，図3は日本計算工学会の許諾を得て、「構造形態と外部変数の統合的最適化によるノイズフィルタの素子・導体レイアウト設計」(丸山、山崎ら著、DOI: 10.11421/jsces.2021.20210007)より転載したものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 丸山 峻, 山崎 慎太郎, 野村 勝也, 矢地 謙太郎, 藤田 喜久雄	4. 巻 2021
2. 論文標題 構造形態と外部変数の統合的最適化によるノイズフィルタの素子・導体レイアウト設計	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20210007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11421/jscses.2021.20210007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------