

学 位 論 文 題 名

Optimal Design of Electromagnetic Devices and Machines Based on Multipole Expansion of Magnetic Fields

(磁場の多重極展開に基づいた電磁機器の最適設計に関する研究)

学位論文内容の要旨

電磁機器に対する高性能化、開発期間の短縮、低コスト化などのニーズを実現する上で、最適化技術を活用した限界設計が重要である。本論文は、MRI（核磁気共鳴イメージング）用と加速器用の超電導磁石、交流同期モータ、永久磁石応用装置を例に、機器内における磁場を多重極展開することが、最適化問題を解く上で有効であることを示すものである。また、多重極展開の立場から対象機器の特性を見直すことにより、新たな視点での設計が可能となることを提案する。以下、第2章から第5章において、それぞれの機器の具体的な最適化問題の設定方法、解の探索方法、設計例を示す。

第2章は、MRI用超電導磁石の最適設計に関する。鉄シールド型とアクティブシールド型の2種類を対象とし、超電導コイルの最適な配置を決定する。最適化の目標は、磁石の内側空間における磁場の均一性と均一磁場領域の大きさを最大化することである。後者の磁石では、同時に外部への漏れ磁場も可能な限り低減する。

最適化の手順は、①電流密度分布の最適化、②コイル配置の最適化からなる。①の最適化の結果から、②の初期コイル配置を求める。①の最適化では、要素分割したコイル領域に対して各要素の電流密度を変数とする線形計画問題を解くことにより、電流密度分布の最適解を求める。このとき、複数の評価点における磁場の空間分布を制約する代わりに、2次から適当な次数までの低次誤差磁場の多重極展開係数を制約する。②のコイル配置の最適化では、上記誤差磁場の二乗和を準ニュートン法により最小化する。鉄シールド型に関しては、②の最適化を行う際に、鉄シールドによる内向き高次磁場を考慮する必要があるが、これには、多重極展開係数の算出精度の観点で有利な等価磁化電流法による磁場解析を利用する。

以上の方法により、両方の磁石に関して14次までの高次誤差磁場を消去したコイル配置（最適解）を求めることができた。アクティブシールド型については、同時に低次の外部漏れ磁場も消去し、良好なシールド性能と内側空間における磁場の均一度を両立させた。これらにより、磁場の多重極展開に注目した最適化の考え方の有効性を確認することができた。

第3章では、加速器用のアクティブシールド型2極、4極超電導磁石の最適設計について述べる。MRI用磁石では磁場は軸対称であるが、上記加速器用磁石では2次元である。ここ

では、2次元磁場の多重極展開係数を求めるために、2次元自由空間における磁場の正則関数による表現方法を利用する。この方法は、流体力学における非圧縮性の2次元渦なし流の表現方法と類似である。この結果、2次元磁場の多重極展開は、磁石の内側および外側領域に関して、それぞれ複素座標 z ないし $\bar{z}$ の逆数のテイラー展開として表される。

最適化の手順はアクティブシールド型MRI磁石と同様である。最初に最適な電流密度分布を求め、次にコイル配置を最適化する。最適設計の結果は、期待通りの良好なものであった。両方の磁石ともに、内側空間による誤差磁場が非常に小さく、また、漏れ磁場も十分にシールドされたコイル配置（最適解）を求めることができた。この結果、2次元的な磁場を有する機器においても、上記の最適化の考え方が有効であることが確認できた。

第4章では、上記の考え方を回転型交流同期モータの最適設計に適用する。回転型モータでは、機内の磁場は十分な精度で2次元である。そこで、固定子と回転子の間に存在するエアギャップ（自由空間）に注目して、第3章と同様の方法論を適用する。第3章との相違点は、エアギャップの形状が円環状であることから、ギャップ磁場を表す正則関数がローラン級数に展開されることである。このローラン展開が、エアギャップにおける磁場の多重極展開を表す。あわせて、エアギャップにおけるマックスウェル応力をローラン展開の立場から再点検する。

以上で述べたことを踏まえて、永久磁石同期モータにおけるコギングトルクの最小化と時間平均トルクの最大化問題を例に、具体的な目的関数の設定方法と最適設計例を示す。これらに共通する特長は、目的関数を計算する際にトルク波形を一切計算する必要がない点である。有限要素法による磁場解析と直接探索法の組み合わせを用いて最適解を探索した結果、上記いずれの問題においても良好な最適解が得られた。また、従来の波形ベースの方法と比較して、最適解の探索時間が大幅に減少することが実証できた。

第5章では、複素形式による等価磁化電流法について述べる。これは、正則関数による2次元磁場の表現方法に基づいて、第2章で述べた等価磁化電流法を改良したものである。この方法による磁場解析の特長は、解析の全過程において数値積分を一切使うことなく、多重極磁場の展開係数を算出できる点にある。適用先が2次元計算にだけ限定されるが、この方法によれば、高次の展開係数の計算精度が大幅に向上することが期待できる。

そこで、上記の期待効果を検証するために、ハルバックシリンダを例に、この磁石構成と磁化の向きに関する最適化問題を設定し、改良型等価磁化電流法と3種類の最適化アルゴリズム（準ニュートン法、共役勾配法、直接探索法）の組み合わせによる最適解を比較検討した。最適化の目標は、磁場の均一性と均一磁場領域の大きさの最大化である。この最適化問題は電気学会調査専門委員会のベンチマークモデルとしても選ばれ、有限要素法による磁場解析と遺伝的アルゴリズムの組み合わせによる最適解が求められた。いずれの最適化計算においても、目的関数の収束性は良好であったが、ハルバックシリンダの理論解と一致したのは、改良型等価磁化電流法と準ニュートン法の組み合わせのみであった。これにより、複素形式による改良型の等価磁化電流法が展開係数を精度良く計算する上で有効であることが検証できた。

以上で述べたように、磁場を多重極展開する考え方が各種電磁機器の最適設計に有効であり、これにより設計の質、スピードが大幅に向上することを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 五十嵐 一
副 査 教 授 本 間 利 久
副 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 北 裕 幸

学 位 論 文 題 名

Optimal Design of Electromagnetic Devices and Machines Based on Multipole Expansion of Magnetic Fields

(磁場の多重極展開に基づいた電磁機器の最適設計に関する研究)

本論文は、MRI（核磁気共鳴イメージング）用と加速器用の超電導磁石、交流同期モータ、永久磁石応用装置を例に、機器内における磁場を多重極展開することが、最適化問題を解く上で有効であることを示すものである。また、多重極展開の立場から対象機器の特性を見直すことにより、新たな視点での設計が可能となることを提案している。

第2章では、MRI用超電導コイルおよび鉄シールド型とアクティブシールド型の2種類を対象とし、超電導コイルとシールド系の最適配置問題について論じている。最適化の目標は、コイルの内側空間における磁場の均一性と均一磁場領域の大きさを最大化することである。また同時に外部への漏れ磁場も可能な限り低減する。

最適化の手順は、①電流密度分布の最適化、②コイル配置の最適化からなる。①の最適化の結果から、②の初期コイル配置を求める。①の最適化では、要素分割したコイル領域に対して各要素の電流密度を変数とする線形計画問題を解くことにより、電流密度分布の最適解を求める。鉄シールド型に関しては、②の最適化を行う際に、鉄シールドによる内向き高次磁場を考慮する必要があるが、これには、多重極展開係数の算出精度の観点で有利な等価磁化電流法による磁場解析を利用する。

以上の方法により、両方の磁石に関して14次までの高次誤差磁場を消去したコイル配置（最適解）を求めることができた。アクティブシールド型については、同時に低次の外部漏れ磁場も消去し、良好なシールド性能と内側空間における磁場の均一度を両立させた。これらにより、磁場の多重極展開に注目した最適化の考え方の有効性を確認することができた。

第3章では、加速器用のアクティブシールド型2極、4極超電導磁石の最適設計について述べている。MRI用磁石では磁場は軸対称であるが、上記加速器用磁石では2次元である。ここでは、2次元磁場の多重極展開係数を求めるために、2次元自由空間における磁場の正則関数に

よる表現方法を利用する。この結果、2次元磁場の多重極展開は、磁石の内側および外側領域に関して、それぞれ複素座標 z ないし z の逆数のテイラー展開として表される。最適化の手順はアクティブシールド型MR I磁石と同様である。すなわち最初に最適な電流密度分布を求め、次にコイル配置を最適化する。最適設計の結果、両方の磁石ともに、内側空間による誤差磁場が非常に小さく、また漏れ磁場も十分にシールドされたコイル配置（最適解）を求めることができた。この結果、2次元的な磁場を有する機器においても、上記の最適化の考え方が有効であることが確認できた。

第4章では、上記の考え方を回転型交流同期モータの最適設計に適用している。回転型モータでは、機内の磁場は十分な精度で2次元である。そこで、固定子と回転子の間に存在するエアギャップ（自由空間）に注目して、第3章と同様の方法論を用いる。適用対象は、永久磁石同期モータにおけるコギングトルクの最小化と時間平均トルクの最大化問題である。本方法においては、目的関数を計算する際にトルク波形を一切計算する必要がない。有限要素法による磁場解析と直接探索法の組み合わせを用いて最適解を探索した結果、上記いずれの問題においても良好な最適解が得られた。また、従来の波形ベースの方法と比較して、最適解の探索時間が大幅に減少することが実証できた。

第5章では、複素形式による等価磁化電流法について述べている。これは、正則関数による2次元磁場の表現方法に基づいて、第2章で述べた等価磁化電流法を改良したものである。この方法による磁場解析の特長は、解析の全過程において数値積分を一切使うことなく、多重極磁場の展開係数を算出できる点にある。適用先が2次元計算にだけ限定されるが、この方法によれば、高次の展開係数の計算精度が大幅に向上することが期待できる。

そこで、上記の期待効果を検証するために、ハルバックシリンダを例に、この磁石構成と磁化の向きに関する最適化問題を設定し、改良型等価磁化電流法と3種類の最適化アルゴリズム（準ニュートン法、共役勾配法、直接探索法）の組み合わせによる最適解を比較検討した。最適化の目標は、磁場の均一性と均一磁場領域の大きさの最大化である。解析の結果、目的関数の収束性は良好であり、解析解に収束することがわかった。これにより、複素形式による改良型の等価磁化電流法が展開係数を精度良く計算する上で有効であることが検証できた。

これを要するに、著者は磁場を多重極展開する考え方が各種電磁機器の最適設計に有効であり、これにより設計の質、スピードが大幅に向上することを明らかにしており、電磁機器の高品位化と設計の効率化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。