電動機音のアクティブ消音制御*

直 江 伸 至** 大 坂 昇 平***
山 田 弘 文***

Active Noise Control of Motor Noise

By Nobuyuki Naoe, Syohei Osaka, Hirofumi Yamada

It is desirable to make low noise motors from the viewpoints of environment. This paper describes an effective way of reducing noise for a induction motor in the duct. The motor noise in the duct is using by the active noise control. The proposed system can be reduced 13dB for a induction motor noise.

1. ま え が き

騒音に関する研究は古くから行われてきているが、特に最近環境上の観点から低騒音化が要求されている。図1は吸音材料の一種である多孔質材料を示す。吸音原理は多孔質材料に音が当たると、材料の隙間で空気振動が生じ、エネルギーの一部が熱に変換されるものである。このような吸音や共鳴現象などを利用した受動的な騒音制御技術の進歩により周波数の高い部分の騒音は、かなり低減可能となった。しかし、低周波領域での騒音低減が難しいのが現状である。そこで、アクティブ消音制御を用いた騒音制御技術で低周波領域の騒音低減が期待されている。現在、一部の製品にアクティブ制御が導入され、実用化されている^{1) 2)}。

電動機の騒音は、電磁騒音、通風騒音及び機械的騒音がある。電動機は一般にエアギャップが狭いため、エアギャップ磁束に影響をうける電磁騒音が相当な割合を占める。そのため電磁騒音の研究が中心であり、多くの研究成果が報告されている^{3) ~ 5)}。通風騒音、機械的騒音などについては、冷却ファンや軸受などに工夫が施されている。これらの対策に

図1 多孔質材料

よって電動機の騒音は年々小さくなってきている。しかし、設計の工夫により電動機音を小さくするには限界があり、回転機分野にも新技術を導入しなくてはならない。

本研究では、電動機の冷却用ダクトを騒音低減のために効率的に利用して、ノイズレスの電動機を造ることが目的である。本稿では研究の第一段階として、ダクト内に電動機を設置した場合について、簡易なアクティブ消音制御装置により誘導電動機の消音実験を実施し、電動機から発生する電源周波数の整数倍の電磁騒音をアクティブ消音制御によって低減できることを報告する⁶⁾。

2. アクティブ消音制御の原理

アクティブ消音制御 (Active Noise Control : ANCと略記) の原理は、一次音 (騒音) に対して

*原稿受付 平成9年2月17日

第57回秋季学術講演 (平成8年10月16日)

**正会員 金沢工業高等専門学校 (石川県金沢市)

***金沢工業高等専門学校 (石川県金沢市)

それと同振幅・逆位相の二次音を生成し、一次音と二次音を重ね合わせて、音の干渉によって打ち消し合い消音するものである⁷⁾。図2では、一次音 P_1 が同振幅・逆位相の二次音 P_2 によって、消音する様子を示したものである。実際の場合は、一次音が時間とともに値が変化するため、二次音はリアルタイムで波形生成を行わなくてはならない。そのため、大量データを処理するためにDSP(Digital Signal Processor)を用いて演算速度を高める必要がある。図3は、アクティブ消音制御の大まかな流れを示し

図2 一次音と二次音の干渉波形

図4 振幅と位相の違いによる減衰量の比較

たものであり、一次音を採取・解析後、二次音を生成し、一次音と合成することで消音することを示している。

図4は一次音と二次音の位相差が、 0° 、 10° 、 20° 、 30° の各場合について、振幅の違いによる減衰量を示した。図からわかるようにわずかの位相のずれにより減衰量が低下する。ANCでは、正確な二次音を生成することが必要であると考えられる。

3. 電動機の騒音

電動機を含めた電気機器の騒音は電磁騒音、通風騒音、機械的騒音の3つに分けられる³⁾。図5は、電動機から発生する騒音を図示したものであり、その詳細は下記に示す。

- (1) 電磁騒音 誘導電動機のギャップ磁束には、基本波のほかにスロット高調波、偏心高調波、各部の不均衡による高調波など多くの空間及び時間高調波磁束が含まれる。これらの高調波磁束によって構造部材を振動させ騒音を発生させる。従って電磁騒音の低減策はギャップ磁束分布を正弦波に近づけることである。
- (2) 通風騒音 大容量電動機では、冷却用のファン騒音や通風ダクト騒音に分けられる。ファン騒音は回転速度と羽根枚数の積の整数倍によって決まる周波数の回転音と、広帯域の乱流音から成っている。通風ダクト騒音は回転子冷却用のダクトによって発生する。
- (3) 機械的騒音 機械的騒音には軸受騒音、ブラシ音とブレーキ音など摩擦音がある。

4. 基本システムと検証実験

図6は一次元ダクトを持つアクティブ消音制御の基本構成図である。ダクトの上流側に電動機を置き、その下流側にはリファレンスセンサ、二次音源、エ

図3 ANC流れ

図5 電動機の騒音

図6 ANC基本構成図

ラーセンサが設置されている。ダクトの下流端は開口部とし、ダクトの上流端には吸音材を挿入した。消音の適応アルゴリズムは、Filtered-X LMSアルゴリズム (FX-LMS) を用いてANCを行った。リファレンスセンサとエラーセンサ及び二次音源の位置は、実験を繰り返し、騒音計のレベルの最も小さい位置に設置した。

FX-LMSでは、一次音を二次音によって打ち消すために、二つの出力間の誤差 $e(k)$ の二乗が最小となるように $x(k)$ と $e(k)$ を用いてフィルタ係数を更新する。

図において、エラーセンサの入力 $e(k)$ は、次式で示される⁸⁾。

$$e(k) = d(k) + w(z) c(z) x(k) \quad (1)$$

但し、 $e(k)$: エラーセンサー (評価点) での騒音

$d(k)$: ダクトを通過した騒音

$x(k)$: 電動機から発生する騒音

$W(z)$: 適応型FIRフィルタ

$C(z)$: 二次音源からエラーセンサまでの伝達関数

$\hat{C}(Z)$: C のモデル

エラーセンサにおける騒音を低減させるには、

$$J = E [e^2(k)] \quad (2)$$

なる評価量 J を最小化することで電動機音を消音す

図7 ANCシステムのフロー

図8 実験装置

る。

図7は基本ANCシステムのフローの概略を示したものである。システムでは適用型FIRフィルタ用いて消音を行う最も基本的な構成をしている。システム同定によりフィルタ係数を算定し、その係数に従って二次音 (消音波形) を二次音源からダクト内に発生させ、一次音 (モータ音) と二次音ダクト内で干渉させる。エラーセンサー一次音と二次音との干渉後のエラー音を検出し、消音されていれば、そのままのフィルタ係数で二次音を発生し続け、消音されていないければ、フィルタ係数を更新することになる。

図8は基本ANCシステムを検証するために試作した実験装置の概略図を示す。ダクトは厚さ15mmの木材を用いて製作した。電動機の設置は、防振ゴムを二重にした上に設置し、電動機の振動がダクトに伝わらないようにしてある。本実験に使用した装置の概略を表1に示す。

図9は実験装置において、ANCの機能を停止した状態で、電動機からの発生音を採取し、周波数別に音圧レベルを示したものである。本電動機は、小

表 1 実験装置の仕様

実験機器	
FIRディジタルフィルタ	サンプリング周波数 3kHz, タップ数 256, 12ビット
リファレンスセンサ エラーセンサ	指向性コンデンサマイク
スピーカ	再生周波数帯域 80～20,000Hz
電動機	コンデンサ始動単相電動機, 0.55kW, 4p, 100V

図 9 単相誘導電動機の騒音

形であるため電磁騒音が通風騒音や機械的騒音に比べて小さく、120Hz（電源周波数の2倍）の電磁騒音がきわめて大きくなっていることがわかる。このような結果をふまえて、以下の図では500Hz以下の周波数帯域のみを図示する。また、小形機では電磁騒音の120Hzを消音すれば音圧レベルの低下に貢献できることがわかる。

図10は上記実験装置でANCを適用した場合とANCを適用しない場合の相対的な音圧レベルを示したものである。ANCを適用することで、ダクト開口部の音圧レベルは約13dB低減でき、120Hz成分もほぼキャンセルできた。その他の周波数では、元々の入力がい小さいためにあまり大きな効果は見だせなかったが、実験機を大形にすればその他の周波数でも低減可能であると考ええる。

図11はリファレンスセンサの入力と二次音源であるスピーカの出力の関係の相対的な音圧レベルを示したものである。リファレンスセンサの入力及びス

図10 ANC適応の効果

図11 リファレンスセンサ入力とスピーカ出力の関係

ピーカの出力とともに120Hzに高い値を示している。スピーカの性能上、79Hz以下の出力はリファレンスセンサの入力とは異なる。その他の周波数では、スピーカ出力はリファレンスセンサの入力を忠実に反映していることがわかる。

5. む す び

以上、本稿では、アクティブ消音制御を用いて電動機音を低減する一方式について述べた。本実験では小形の誘導電動機を用い電磁騒音の120Hzの周波数（電源周波数の2倍）をキャンセルできた。今回は、電動機を無負荷運転によるANCを報告したが、今後負荷運転によるANCについても報告したい。

参考文献

- 1) 新しい騒音・振動の制御技術, (平4), 工業技術会
- 2) 高橋・浜田, アクティブ消音技術の産業分野への適応例, 111-8 (平8-8), 電学誌, 678
- 3) 高木・池谷・青柳, 低騒音誘導電動機, 27-4 (昭47-4) 東芝レビュー, 353
- 4) 森・林, 電気機器における低騒音化技術, 111-8号 (平3-8), 電学誌, 659
- 5) 森, 電気設備の騒音防止, 騒音制御, 17-1 (平5), 34
- 6) 直江・大坂・山田: 電動機音のアクティブ制御の一考察, 船機講57回前刷 (平8-10), 74
- 7) 長松, 音・振動のモード解析と制御, (平8), コロナ社
- 8) 辻井, 適用信号処理, (平7), 昭晃堂

〔質 疑 応 答〕

質問者 神戸商船大学 片木 威

〔質問1〕

図6の実験装置におけるreference sensor, secondary source, error sensorのmotorからの距離(例えばreference sensorはmotorから100mmの距離)の決定方法をお教え下さい。

〔回答〕

reference sensor, secondary source, error sensorはmotorからの距離は, 実験により決定いたしました。

○reference sensor: motorから100mm程度離れた位置にした理由は, motorから発生する通風を直接拾わないためにある程度離れた位置に設置しました。

○error sensor: 開口端に設置しました

○secondary source: reference sensorとerror sensorの間で, アクティブ消音制御適用時に開口端で騒音計が指示する値が最も小さな値を示す位置に設置しました。

〔質問2〕

実験に用いたマイクロホンの指向特性等の特性をお教え下さい。

〔回答〕

マイクロフォンは, 一般に市販されているコンデンサマイクを使用しております。但し, 一方向からの音を拾うように工夫がなされています。

本実験に使用するマイクロフォンの性能としては, 1kHz程度までの周波数特性が良好なものが必要と考えられます。また, 小型であることも必要であります。これらの点から考えると, 本実験で使用しているマイクには改良の余地があると思われます。