空気式カップリング・コンデンサ回路を用いた 空気式バンドリジェクト・フィルタ[†]

小 山 紀*

Study on Pneumatic Band Reject Filter Using Pneumatic Coupling Condenser Circuits

Osamu OYAMA*

In this paper, a new design of pneumatic band reject filter based on the characteristics of pneumatic coupling condenser circuits¹⁾ is described. The coupling condenser circuit has the character of a high pass filter essentially.

A pneumatic band reject filter is constructed by combining two coupling condenser circuits and the two restrictor-capacitor circuits. Features of this device are as follows.

1) The central frequency of the band reject filter can be chosen by changing resistances in the coupling condenser circuits and the restrictor-capacitor circuits.

2) Low central frequency filters having, for instance a corner frequency lower than 1 Hz, can be realized.

The gain characteristics of pneumatic band reject filters were tested in the range of stop frequencies 0.7~5 Hz. As a result, it was shown that the band reject filters reduce the signal levels of stop frequencies by more than 15 dB in comparison with the signal levels of distant frequencies.

Theoretical values of the gain characteristics of band reject filters were derived from the time constants and amplitudes of the coupling condenser circuits, and the time constants of the restrictor-capacitor circuits. These calculated values and the experimental data show good agreement.

The effects of these time constants and amplitudes on the characteristics of a pneumatic band reject filter are discussed theoretically.

1. 緒 言

著者は前報¹⁾において膜を用いた空気式カップリング・コンデンサ回路を提案し、その動作原理を示し、膜の特性や寸法などが伝達特性に及ぼす効果について論じた。そして、この要素は空気圧伝送系におけるハイパス・フィルタあるいはバンドパス・フィルタを構成するのに有用であることを実験により明らかにし、さらに各パラメータより導いた理論値と実験結果とを比較した。

本報ではさらに、この要素を用いて空気式バンドリジェクト・フィルタを構成しその原理と特性を示す。

バンドリジェクト・フィルタは入・出力間のゲイン特性において、ある任意の周波数近傍での伝達ゲインが非常に小さくなるもので、特に電気回路系では信号に含まれる特定の周波数成分の除去、たとえば搬送波の除去などに多用されているものである。電気回路系ではこのバンドリジェクト・フィルタとして、一般にハイパス形とローパス形の2種のT形フィルタを並列に結合した、いわゆるツインT形バンドリジェクト・フィルタがよく知られている。これは、それぞれのT形フィルタの時定数 T を同じにすると周波数 $f=1/2\pi T$ の近傍において、それぞれフィルタを通過した信号の位相差により伝達ゲインが急激に小さくなる原理を利用したものである。

しかし従来この回路を空気圧回路系で対応させるには、ハイパス・フィルタ部を制作するのが困難であった。高森ら²⁾は異径管を用いてハイパス・フィルタを構成することが可能であることを示した。これは径の異なる伝送管内の信号の反射を利用したもので、信号の周波数がかかなり高い場合には、非常に有効な手段であると思われる。しかし、信号の周波数が低い（たとえば数 Hz 程度）場合には、実用上困難であろう。

[†] 第13回フレイディクスシンポジウムで発表（昭53・10）

* 明治大学工学部 川崎市多摩区東三田 1-1-1

* Faculty of Engineering, Meiji University, Kawasaki (Received May 20, 1980)

(Revised October 6, 1980)

本報では空気式カップリング・コンデンサ回路を用いたハイパス・フィルタを使用することにより、先のツインT形フィルタと類似の回路を構成し、空気式バンドリジェクト・フィルタを試作した。

この空気式バンドリジェクト・フィルタは膜を用いているために、原理的に膜の共振周波数を十分高く設計すれば、どのような周波数帯でも利用可能である。特に数 Hz 以下の超低周波帯にも容易に使用できるし、バンドリジェクト・フィルタの中心周波数を自由に変更することもできる。

本報では、中心周波数 0.7~5 Hz 程度の空気式バンドリジェクト・フィルタを試作し、理論解析による計算値と、実験結果とを比較、検討する。

2. 設計原理および理論

本報で用いる記号は、つぎのとおりである。

- C : 空気室容量 (m^3/Pa)
- f : 周波数 (Hz)
- g : 圧力ゲイン
- M : 空気式カップリング・コンデンサの倍率
- n : ポリトロプ指数
- p : ゲージ圧 (Pa)
- P : 絶対圧 (Pa)
- $\Delta p_i, \Delta p_o$: それぞれ入・出力信号全振幅 (Pa)
- $\bar{p}_i, \bar{p}_o$: それぞれ入・出力信号バイアス圧力 (Pa)
- R_a, R_b : 遅れ回路の抵抗 ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$)
- R_1, R_2 : 圧力加算部の入力抵抗 ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$)
- R_3 : 圧力加算部のベント抵抗 ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$)
- T : 時定数 (s)
- T_1, T_2 : それぞれ遅れ・進み回路の時定数 (s)
- V : 空気室容積 (m^3)
- φ : 位相角のずれ (rad)
- ω : 角周波数 (rad/s)

空気式バンドリジェクト・フィルタの原理は2次遅れ、2次進み、加算を組み合わせたものであり Fig. 1 にそのブロック線図を示す。

入力信号 p_i は2方に分けられ、一方は No. 1 に示す2次遅れ回路、他方は No. 2 に示す2次進み回路

Fig. 1 Block diagram

Fig. 2 Lag circuit

を別々に通過する。この際、それぞれの回路の信号に位相のずれを生じる。そして次段の圧力加算部で加えられたとき、位相が互いにちょうど 180 deg. ずれるような特定の信号成分は振幅が小さくなる。特にこの成分の二つの信号の振幅が等しくなるように調節されていれば、原理的に入力信号のうちこの特定の周波数成分の信号は完全に除去される。つぎに個々の要素について述べる。

2.1 2次遅れ回路

Fig. 2 に示す2段の絞リ容量回路において、抵抗 R_a, R_b を線形抵抗とすると p_{in}, p_{out} 間の伝達関数は

$$G_1(s) = \{(1 + R_a C_a s)(1 + R_b C_b s) + R_a C_b s\}^{-1} \quad (1)$$

ただし

$$C_a = V_a / n P_a, \quad C_b = V_b / n P_b$$

で表わされる。ここで P_a, P_b は空気室内の平均絶対圧力である。いま $R_a C_a = R_b C_b = T_1$ とし、 $R_a C_b$ を T_1 に比べて十分小さくすると(1)式は次式で表わされる。

$$G_1(s) = (1 + T_1 s)^{-2} \quad (2)$$

2.2 2次進み回路

空気式カップリング・コンデンサ回路の原理図を Fig. 3 に示す。これは2枚の膜と入力室、変調室そして空気マイクロメータを用いた出力発信器により構成される。入力信号は2枚の膜の変動により出力側に伝達される。この要素の伝達関数は、前報の(3)式より次式で示される。

$$G(s) = e_1 e_2' R K s / [1 + R(e_1 + e_2 + V_0 / n P) s] \quad (3)$$

ここで e_1, e_2 は入・出力膜の容積変化と圧力変化の比

Fig. 3 Pneumatic coupling condenser circuit

Fig. 4 Pressure adder

であり、 e_2' は出力膜の中心部変位と圧力変化の比である。また K は空気マイクロメータを用いた出力発信器の近似直線部の変換ゲインで、 V_0 は変調室容積、さらに R はベント抵抗である。これらの値はカップリング・コンデンサ回路の設計により定まる定数であるので (3) 式はつぎのようになる。

$$G(s) = MT_{2s}(1+T_{2s})^{-1} \quad (4)$$

ただし

$$M = e_1 e_2' K (e_1 + e_2 + V_0 / nP)^{-1}$$

$$T_2 = (e_1 + e_2 + V_0 / nP) R$$

同じ特性のカップリング・コンデンサ回路を 2 段重ね合せると、その伝達関数は

$$G_2(s) = M^2 T_2^2 s^2 (1+T_{2s})^{-2} \quad (5)$$

となる。

2.3 圧力加算部

Fig. 4 のように三つの抵抗と、小さな出力室で圧力加算部を構成する。出力室はここでの応答遅れによる影響を少なくするために、容積を小さくして時定数を小さく保つ。二つの入力、抵抗 R_1 と R_2 を通って別々に出力室に導かれ、抵抗 R_3 を経て大気中に放出される。ここで入力抵抗 R_1, R_2 を通過して上流側の遅れ要素、進み要素内の空気が出入するので、このためこれらの要素内の圧力が相互に干渉されることが考えられる。そこで R_1, R_2 を十分大きくして、上流の要素への影響を非常に小さく設計するものとする。抵抗がすべて線形抵抗であると、入・出力圧力の関係は、出力室を出入する空気の連続の条件より次式で表わされる。

$$p_1 R_1^{-1} + p_2 R_2^{-1} = (R_1^{-1} + R_2^{-1} + R_3^{-1}) p_0 \quad (6)$$

2.4 空気式バンドリジェクト・フィルタ

バンドリジェクト・フィルタは圧力加算部の R_1, R_2 にそれぞれ遅れ回路、進み回路の出力部を接続して構成される。したがって圧力加算部の入力圧力 p_1, p_2 は

$$p_1 = p_i (1+T_1 s)^{-2} \quad (7)$$

$$p_2 = p_i M^2 T_2^2 s^2 (1+T_{2s})^{-2} \quad (8)$$

となる。これらを (6) 式に代入することにより、バンドリジェクト・フィルタの伝達特性は次式により表わされる。

Fig. 5 Effects of magnification of pneumatic coupling condenser

Fig. 6 Effects of $T_1 \equiv T_2$ condition

$$G(s) = \frac{R_2(1+T_1 s)^{-2} + R_1 M^2 T_2^2 s^2 (1+T_{2s})^{-2}}{R_1 + R_2 + (R_1 R_2 / R_3)} \quad (9)$$

ここで $T_1 = T_2 = T$ および $R_1 M^2 = R_2$ となるように調節すると (9) 式は

$$G(s) = (1+T^2 s^2) / \{1 + (1+R_2/R_3)/M^2\} (1+T s)^2 \quad (10)$$

となる。したがって、このフィルタのゲイン特性は

$$g(\omega) = \left| \frac{1-T^2 \omega^2}{1+T^2 \omega^2} \right| / \{1 + (1+R_2/R_3)/M^2\} \quad (11)$$

となる。

Fig. 5 にカップリング・コンデンサ回路の倍率 M を変えたときのバンドリジェクト・フィルタのゲイン特性の例を (9) 式による計算例で示す。このとき、圧力加算部の入力抵抗は等しく $R_1 = R_2 = R$ であるとする。 M が変化すると、中心周波数、ゲイン共変化するのがわかる。 $M=1$ のとき、フィルタの中心周波数 f は、遅れ、進み回路の時定数 T により $f=1/2\pi T$ と表わされる。またこのとき、ゲイン特性も中心周波数に対し左右対称の理想的な形状を示す。

Fig. 6 に遅れ回路と進み回路のそれぞれの時定数 T_1, T_2 が異なった時の影響を (9) 式により計算して

示す。この時、 $R_1=R_2=R$ 、 $M=1$ であるとする。 T_1 と T_2 とが完全に一致した時、最も大きなフィルタ効果を有することがわかる。

以上の例より空気バンドリジェクト・フィルタは、カップリング・コンデンサ回路の倍率 $M=1$ とし、遅れ、進み回路の時定数を等しくするように設定するのが好ましいといえる。しかしもし $M \neq 1$ の場合でも圧力加算部の入力抵抗 R_1 、 R_2 とで $M^2 R_1/R_2=1$ とすることにより補正できることが(9)式の分子第2項によりわかる。

3. 実験および実験結果

遅れ回路や圧力加算部の抵抗およびカップリング・コンデンサ回路のベント抵抗には、細管による線形抵抗を用いた。この細管は内径 1.47 mm で、実測により 10 cm あたり $0.275 \text{ Pa} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^{-3}$ の抵抗値を有する。

圧力の測定には半導体圧力変換器を用い、ペン書オシログラフで記録した。入力信号は空気圧発振器より 0.1~10 Hz 程度の正弦波信号を供給した。その圧力は、いずれも 0.8 kPa を定常的に加え、これを中心に振幅 0.25 kPa である。

以下各要素についての実験結果を個々に論じる。

3.1 2 次遅れ回路

遅れ回路は 2 段の抵抗容量回路と膜形空気リレーにより構成する。1 段目の絞り抵抗 R_a 、容積 V_a および 2 段目の抵抗 R_b 、容積 V_b の組合せを Table 1 に示す。当初は遅れ要素として、この抵抗容量回路のみを使用していたが、抵抗容量回路から次段の圧力加算

Table 1 Dimension of lag circuit

No.	1	2	3	4
$R_a (\text{Pa} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.69	0.34	0.34	0.17
$R_b (\text{Pa} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^{-3})$	4.14	2.04	2.04	1.02
$V_a (\text{cm}^3)$	660	660	330	330
$V_b (\text{cm}^3)$	110	110	55	55

Fig. 7 Pneumatic relay

Fig. 8 Gain of lag circuit

Fig. 9 Phase shift of lag circuit

部への空气の流出、あるいは加算部から抵抗容量回路への流入により、抵抗容量回路の圧力が影響を受けた。このため抵抗容量回路の出力部と圧力加算部のインピーダンス整合のために、アナログ式の膜形空気リレーを導入させた。この空気リレーは Janu³⁾ および萩原⁴⁾ らがその動作原理や伝達特性を報じているものである。膜形空気リレーの原理図を Fig. 7 に示す。入力信号は下側の部屋に導かれ膜を撓ませる。入力圧力が変化すると膜とベントとの距離が変わり、出力側の部屋の圧力が変化し、このため膜はまた位置を変える。以上の動作の結果、出力圧力は入力圧力と平衡し、信号が伝達される。この要素は通常、入・出力圧力は等しくなり、出力インピーダンスは小さくできるので、ある要素の出力バッファとして利用できる。試作した空気リレーは膜に直径 53.5 mm、厚さ 0.3 mm のゴム膜を使用した。ベント内径は 3 mm で、供給圧力は 4 kPa である。このリレーの入・出力間の伝達関数はほぼ 1 である。以上の要素を組合せて構成した遅れ回路の周波数応答の実験例を示す。

Fig. 8 はそれぞれの抵抗・容量の組合せにおける遅れ回路のゲイン特性で、Fig. 9 は同じ組合せにお

Fig. 10 Gain of lead circuit

Fig. 11 Phase shift of lead circuit

ける位相特性である。これらの結果よりそれぞれの時定数 T_1 は 0.215, 0.118, 0.059, 0.030 (s) となる。図中の実線は、これらの値を(2)式に代入して計算した値で、この遅れ回路は 2 次遅れの特性を有しているのがわかる。

3.2 2 次進み回路

進み回路は空気式カップリング・コンデンサ回路を 2 段重ねて構成した。カップリング・コンデンサ回路の寸法は前報と同様に変調室の容積 33.1 cm³、膜は直径 53.5 mm、厚さ 0.04 mm の磷青銅波形膜である。供給圧力は 4 kPa で、入・出力信号の中心圧力は 0.8 kPa である。

進み回路の時定数 T_2 は、カップリング・コンデンサ回路のバント抵抗を変えることにより任意に選択できる。 T_2 を遅れ回路の T_1 と同じにするために、バント抵抗を調節した結果得られた実験結果のゲイン特性を Fig. 10 に、位相特性を Fig. 11 に示す。この時の T_2 はそれぞれ 0.215, 0.118, 0.059, 0.030 (s)、 M は 0.9 となる。図中の実線はこれらの値を用いて(5)式により計算したもので、この回路が 2 次進みの特性を有しているのがわかる。

Fig. 12 Static characteristics of pressure adder

Fig. 13 Characteristics of pneumatic band stop filter

3.3 圧力加算部

圧力加算部は 3 本の抵抗とアクリル樹脂製の出力室より構成される。出力室の容積は約 3 cm³ である。圧力加算部の静的特性を調べるため、種々の抵抗を組み合わせた実験結果を Fig. 12 に示す。異なった 2 種の圧力 P_1, P_2 の加算が正しく行われているのがわかる。

遅れ回路、進み回路のゲインが多少異なるので、(10)式の条件を満足するように入力抵抗 R_1, R_2 を調節した。この結果、圧力加算部の入力抵抗には $R_1 = 1.54 \text{ Pa} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^{-3}$, $R_2 = 1.38 \text{ Pa} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、バント抵抗には $R_3 = 2.75 \text{ Pa} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^{-3}$ を使用した。この要素は受動素子であるので、出力圧力は入力圧力よりも小さくなる。上記の条件では、出力圧力と入力圧力の合計との比は 0.417 となる。

3.4 空気式バンドリジェクト・フィルタ

以上の 2 次遅れ回路、2 次進み回路そして圧力加算器とを組み合わせで構成したバンドリジェクト・フィルタの実験結果を示す。

Fig. 13 は試作したフィルタのゲイン特性である。

入・出力の伝達ゲインは中心周波数付近で急激に落ち

Upper : output, 0.5Hz+10Hz
Lower : input, 0.5Hz+2.7Hz+10Hz

Fig. 14 Wave forms

込み、バンドリジェクト・フィルタとしての機能を有しているのがわかる。試作したフィルタは全体的に約 10 dB のゲインの損失がある。しかし中心周波数の信号は、ゲインの平坦部よりさらに 15 dB 以上減衰しており、この周波数をもつ信号成分が除去される。中心周波数は遅れ回路の時定数 T_1 、進み回路の T_2 を $T_1 = T_2$ を保ちながら同時に変えることにより選択できる。実線は(11)式より求めた計算値である。計算値と実験結果とは比較的良く一致するが、設計した中心周波数 ($f = 1/2\pi T$) と実際の中心周波数とは若干異なっている。これは 2 章で述べた進み回路の倍率 M が 1 でないための効果が、圧力加算部のこの入力抵抗の組合せでは正しく補正されなかったためと思われる。

Fig. 14 に入・出力圧力波形の例を示す。公称中心周波数が 2.7 Hz の試作バンドリジェクト・フィルタに入力信号（下側）として、0.5 Hz, 2.7 Hz, 10 Hz の正弦波を混ぜ合せたものを加えた。出力信号（上側）では、2.7 Hz の信号成分が除去されている。

4. 結 言

空気式カップリング・コンデンサ回路を使用した空

気式バンドリジェクト・フィルタを試作した。このフィルタは使用している抵抗値を変えることにより、中心周波数を任意に選択できる。また、特に 1 Hz 以下の超低周波域でも容易に使用できるなどの特長がある。

本報では 33.1 cm³ の変調室容積を有するカップリング・コンデンサ回路と、最大 660 cm³ の容積の抵抗容量回路を組み合わせることにより、0.7~5 Hz 程度の中心周波数を有するバンドリジェクト・フィルタを試作した。

これらのフィルタは、中心周波数付近で 15 dB 以上の信号除去能力があることが実験により示された。

また、遅れ・進み回路の時定数、倍率を用いてバンドリジェクト・フィルタの伝達特性の理論式を導き、これらの計算値が実験結果と良く一致することを示した。さらにこの理論式を用いて、時定数、倍率などのパラメータがバンドリジェクト・フィルタの特性に及ぼす効果について論じた。

終りに、本研究に関して終始ご指導くださった明治大学 萩原辰弥教授ならびに原田正一教授に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小山 紀：空気式カップリング・コンデンサの設計原理と伝達特性，計測自動制御学会論文集，13-6，636/641 (1977)
- 2) 高森 年，米持政忠：高域通過形分布定数流体フィルタの設計，第 11 回フルイディクスシンポジウム講演論文集，91/96 (1976)
- 3) G. J. Janu: Utilization of Miniature Diaphragm-Leakport Devices in Fluidic Applications, ASME 72-WA/FLCS-10, 1/12 (1972)
- 4) 萩原辰弥，野口幸広：膜形空気リレーの動特性，第 12 回フルイディクスシンポジウム講演論文集，63/68 (1977)