ハイブリッド動吸振器による振動制御*

背戸一登^{*1}, 光田慎治^{*2}, 山下繁生^{*1}

Vibration Control by a Hybrid Dynamic Absorber

Kazuto SETO, Shinji MITSUTA and Shigeo YAMASHITA

This paper proposes a new hybrid dynamic absorber that combines an electro-magnetic actuator with a magnetic-damping-type dynamic absorber and shows its vibration controlling performances. Although the passive dynamic absorber with optimum adjustment conditions is able to control vibration well, the controlling effectiveness deteriorates markedly when these adjustment conditions fail. On the contrary, the active dynamic absorber expends a lot of energy for controlling vibration, instead of obtaining good control performance and robustness of control. In this paper, it is demonstrated theoretically and experimentally that the hybrid dynamic absorber has the advantages of both passive and active dynamic absorbers.

Key Words: Vibration, Vibration Control, Hybrid Dynamic Absorber, Active Control Device, Actuator, Magnetic Damper

1. 緒 言

最近、機械装置に限らず、乗物、土木建築構造物、宇宙構造物など、各方面で機能、性能の維持向上のために振動制御装置の研究が盛んになってきた⁽¹⁾。振動制御装置は、受動的、準能動的、能動的装置に分類される。その受動的制振装置を代表するのが動吸振器である。最適調整法が確立しており、エネルギーの注入も不要であり、保守管理が容易であるので各方面で使われてきた。最近では、動吸振器による多自由度系の制振理論も明らかにされて、さらに応用面が拡大される傾向にある⁽²⁾⁽³⁾。

しかし、動吸振器の最大の短所はロバスト性が低いことである。動吸振器は質量とばね、およびダンパの3要素に巧妙な動力学的バランスを持たせることによって、優れた制振効果を作り出している。裏返せば、そのバランスが崩れると大いに制振効果が損なわれるのである。特に、質量比が小さいときその問題が顕著に現れる。そこで、二重動吸振器⁽⁴⁾や、磁気減衰⁽⁵⁾を用いた動吸振器等の提案があり、その問題がある程度緩和

できることが示されたが、制振対象の特性が変化する場合には、根本的解決に至っていない。

一方、振動をセンサで検出し、外部からエネルギー供給して制振する能動的制振装置においても、能動的動吸振器が代表的存在⁽⁶⁾である。これは、アクティブマスダンパ⁽⁷⁾等とも呼ばれており、動吸振器固有のロバスト性の不足を補い、さらに大きな制振効果をもたらすために盛んに研究されるようになってきた。しかし、この制振装置においても別な問題点がある。すなわち、制御にエネルギーが消費されることと、制御系の設計を誤ったり制御回路の一部が欠損するなどがあれば、制振装置が逆に発振装置に成りかねないといった不安要因があることである。

以上に述べたそれぞれの欠点を補完するものとして登場したのが準能動的制振装置である。これは、基本的には受動的制振装置に属するが、外部から制振装置のパラメータが変えられるような適応性を持たせたものである。したがって、消費するエネルギーはわずかですむが、最適調整された動吸振器以上の制振効果は得られない。また、制御はフィードフォワード方式が採られるので、調整を誤れば期待した効果が得られない。

そこで、本論文では動吸振器と能動的動吸振器の特

* 原稿受付 平成2年6月25日。

^{*1} 正員、防衛大学校 (〒239 横須賀市走水1-10-20)。^{*2} (株)小松製作所 (〒254 平塚市万田1200)。

長を合わせ持ちながら、準能動的制振装置が持ち合わせていない特性を持ったハイブリッド動吸振器を提案する。これは、著者の一人が提案した磁気減衰を有する並列ばね構造の動吸振器⁽⁸⁾に電磁アクチュエータの機能を付加したものである。構造が簡単で、不要な摩擦もなく、またセンサも内蔵されているので、優れた機能を持っていると思われる。理論解析と実験によって、この制振装置がエネルギー消費が少なく、しかも優れた制振効果を持ち、高い信頼性を持つことが検証されたので報告する。

2. 磁気減衰力と電磁力を併合した ハイブリッド動吸振器の提案

著者らは、減衰要素に磁気ダンパを用いた動吸振器を提案し、これを多分野に応用して有用性を実証してきた。磁気ダンパの特徴として次のものが挙げられる。

- (1) 極めて線形性のよい減衰力が得られる。
- (2) 温度変化などに対して減衰特性が安定している。
- (3) 機械的な接触部がないので不要な摩擦がない。

これらの特徴は、動吸振器に要求される減衰特性にとって望ましいものばかりである。

そこで、この特徴を生かして受動的に減衰力を発生させながら、その上に電磁力の発生機構を付加して、この力を能動的に制御するようにしたのが、ここに提案するハイブリッド動吸振器である。

図1に、制振対象の1自由度系に取り付けられたハイブリッド動吸振器の基本構成を示す。これは、永久磁石で作られた磁気回路と、その磁場内を動く吸振器質量兼用の導体、その導体を機械的接触することなく支持するばね、制振対象と吸振器質量間の相対変位検出用センサ、およびコントローラより成っている。導体には駆動コイルが巻いてあるので、コイルと磁場で

電磁アクチュエータが構成され電流を通すと上下方向に電磁力が発生する。また、上下方向に運動させるとその方向と逆向きに磁気減衰力が発生する。つまり、この吸振器質量兼用導体には、受動的、能動的力が発生するので、以後これをハイブリッド質量と呼ぶことにする。

このような構造にすると、動吸振器の設計と能動的動吸振器の制御系設計を個別に進めることができる。以下に、このハイブリッド動吸振器を状態方程式で表し、最適レギュレータ理論を用いてこの制御系を設計する。

3. 理論解析と制御系設計

3.1 力学モデルと運動方程式 このハイブリッド動吸振器は、動吸振器のばねとダンパに並列にしてアクチュエータが配置された構造であるから、図2のような力学モデルで表される。ここで、 M, K, C は、各々制振対象の質量、ばね定数、減衰定数であり、 m, k, c は、ハイブリッド動吸振器の質量、ばね定数、減衰定数を表す。また、 X と x は、制振対象と動吸振器の各変位、 f と f_c は、制振対象に作用する外力とアクチュエータで発生する制御力と定義する。この動吸振器は状態フィードバックによって制御されるので、コントローラの制御則はフィードバック・ゲインベクトル K で表す。

以後の制御系設計のためには、新たに相対変位 x_d

$$x_d = x - X \dots\dots\dots (1)$$

を定義して、これと絶対変位 X によってシステムを記述するのが都合がよい。そこで、図2に基づき、 X と x_d によって運動方程式を立てると次のようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{X} = \frac{1}{M} (-KX + kx_d - C\dot{X} + c\dot{x}_d + f + f_c) \\ \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

図1 ハイブリッド動吸振器の概要

図2 ハイブリッド動吸振器の力学モデル

$$\ddot{x}_d = \frac{K}{M}X - \left(1 + \frac{m}{M}\right)\frac{k}{m}x_d + \frac{C}{M}\dot{X} - \left(1 + \frac{m}{M}\right)\frac{c}{m}\dot{x}_d - \frac{1}{M}f - \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{m}\right)f_c \quad (3)$$

3・2 状態方程式表示 以上に示した運動方程式の変数を次のような状態ベクトルで表すと、

$$\mathbf{X} = \{\dot{X} \quad \dot{x}_d \quad X \quad x_d\}^T = \{x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4\}^T \quad (4)$$

状態方程式は次のように表される。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{b}u + \mathbf{d}v \quad (5)$$

$$y = \mathbf{c}\mathbf{X} \quad (6)$$

ここに、 $\mathbf{A}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{d}$, $\mathbf{c}$ および $\mathbf{X}$ は次のように定義した行列とベクトルであり、 u と v は制御量と外乱である。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2\zeta_1\Omega_n & 2\zeta_2\mu\omega_n & -\Omega_n^2 & \\ 2\zeta_1\Omega_n & -2(1+\mu)\zeta_2\omega_n & \Omega_n^2 & \\ 1 & 0 & 0 & \\ 0 & 1 & 0 & \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = [K_c/M \quad -K_c/M(1+1/\mu) \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{d} = [K_v/M \quad -K_v/M \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{c} = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

ただし、

$$\mu: \text{質量比} = m/M$$

$$\omega_n: \text{動吸振器系の固有振動数} = \sqrt{k/m}$$

$$\zeta_2: \text{動吸振器系の減衰率} = c/2\sqrt{mk}$$

$$\Omega_n: \text{制振対象系の固有振動数} = \sqrt{K/M}$$

$$\zeta_1: \text{制振対象系の減衰率} = C/2\sqrt{MK}$$

また、 K_c , および K_v は次のように定義した変換係数

$$f_c = K_c u \quad (7)$$

$$f = K_v v \quad (8)$$

である。

そこで、このハイブリッド動吸振器に次のような状態フィードバックを施すようにする。

$$u = -\mathbf{K}\mathbf{X} \quad (9)$$

ここに、ゲインベクトル $\mathbf{K}$ は、次のように定義する。

$$\mathbf{K} = \{k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4\} \quad (10)$$

式(4)~(8)の関係を信号伝達線図で表すと図3のようになる。ここで、 s は微分演算子を表す。

3・3 無次元化状態方程式表示 動吸振器の最適設計式は無次元化されているので、共通性を持たせるために状態方程式も無次元化表示しておく。まず、図3を用いて無次元化を図るために、次のようなスケール変換係数を導入する。

$$s = \Omega_n p, \quad \dot{X} = \Omega_n^2 \bar{X}, \quad \dot{x}_d = \Omega_n \bar{x}_d, \quad X = \bar{X}$$

$$u = \bar{u}, \quad \ddot{x}_d = \Omega_n^2 \bar{\ddot{x}}_d, \quad \dot{x}_d = \Omega_n \bar{\dot{x}}_d, \quad x_d = \bar{x}_d$$

$$f_c = M\Omega_n \bar{f}_c, \quad f = \frac{M}{K}\Omega_n \bar{f}$$

$$\bar{k}_i = \frac{K_c}{M\Omega_n} k_i \quad (i=1, 2) \quad \bar{k}_k = \frac{K_c}{M\Omega_n^2} k_k \quad (k=3, 4)$$

これらの係数を用いれば、図3は図4のような無次元化された信号伝達線図に書き換えられる。そして、この図から次のような無次元化状態方程式が導かれる。

$$\dot{\bar{\mathbf{X}}} = \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{b}}\bar{u} + \bar{\mathbf{d}}\bar{v} \quad (11)$$

ここに、

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -2\zeta_1 & 2\zeta_2\gamma\mu & -1 & \mu\gamma^2 \\ 2\zeta_1 & -2(1+\mu)\zeta_2\gamma & 1 & -(1+\mu)\gamma^2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{b}} = [1 \quad -(1+1/\mu) \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\bar{\mathbf{d}} = [1 \quad -1 \quad 0 \quad 0]^T$$

ただし、

$$\gamma: \text{固有振動数比} = \omega_n/\Omega_n$$

図3 状態方程式の信号伝達線図表示

図4 無次元信号伝達線図表示

である。また、状態ベクトルは次のように変換される。

$$\bar{X} = \{\bar{x}_1 \quad \bar{x}_2 \quad \bar{x}_3 \quad \bar{x}_4\}^T \quad \dots\dots\dots (12)$$

この時、状態フィードバック・ゲインベクトル K も式(10)から次式に変換される。

$$\bar{K} = \{\bar{k}_1 \quad \bar{k}_2 \quad \bar{k}_3 \quad \bar{k}_4\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

3・4 制御系設計 以上のようにハイブリッド動吸振器が状態方程式によって記述されたならば、制御系設計が可能になる。この設計手順は、まず受動系の最適設計を行って m, k, c 、あるいは γ と ζ の値を決めた後、能動系の最適設計を行う。

(a) 受動系の最適設計 いま、制振対象の減衰が無視できるとすれば、動吸振器の最適設計法を用いて、受動系の係数行列 A 内の γ と ζ_2 が質量比 μ を設計パラメータとして次式から決定される。

$$\gamma = 1/(1+\mu) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\zeta_2 = \sqrt{3\mu/[8(1+\mu)]} \quad \dots\dots\dots (15)$$

なお、 ζ_1 無視できない場合の γ, ζ_2 の決定式もすでに明らかにされている。

(b) 能動系の最適設計 係数行列 A, b, d の内部構造が決定されたならば、最適レギュレータ理論を用いて状態フィードバック・ゲインベクトル K をシステムチェックに決定することができる。最適レギュレ

ータ理論は、次のような評価関数 J を最小にする K を決定する問題である。

$$J = \int_0^\infty \{X^T Q X + u^T r u\} dt \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 Q は状態量に関する重み行列、 r は制御量に関する重み係数である。 Q を次のように与える。

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (17)$$

この Q と r を設計変数として与えて、次のリカッチ方程式の解 P を求めれば、

$$PA + A^T P - P b r^{-1} b^T P + Q = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

この P を用いて K を次のように定めれば、評価関数が最小になることが知られている。

$$K = r^{-1} b^T P \quad \dots\dots\dots (19)$$

この K の値は、式(10)と一致する。もしも、無次元化状態方程式のゲインベクトル $\bar{K}$ を求めたい時は、 $\bar{A}, \bar{b}$ を用いてリカッチ方程式の解 P を求めればよい。

4. シミュレーション

4・1 ハイブリッド動吸振器の制振効果 まず、シミュレーションによって、ハイブリッド動吸振器の制振効果を調べてみよう。図5は、質量比を $\mu=0.1$ に定めた後、まず動吸振器を最適設計して、次に行列 Q の係数を $q_1=q_2=q_4=0, q_3=1$ に定めて、重み係数 r を変えて制御量を増加していった時の周波数応答と X と u の時間応答を示す。 r が大きく、つまり制御量が小さいときは、最適設計された動吸振器の制振効果が支配的であり、制御エネルギーはほとんど消費されないにもかかわらず、ほどほどの制振効果がもたらされている。また、 r を小さくして制御量を増すに伴い、動吸振器では得られない制振効果の向上が見られる。

次に、ハイブリッド動吸振器のロバスト性について

図5 ハイブリッド動吸振器の制振効果

図6 制振対象の質量が変化した時の周波数応答

調べる。行列 Q は前と同じで、 $r=10$ に定めて最適フィードバックゲインベクトルを決めた後、制振対象の質量を 50% 増減した時の周波数応答を図 6 に実線で示す。比較のために最適制御された時の応答を一点鎖線で、また $\pm 50\%$ 変化させた時の動吸振器単体 ($r=\infty$ の場合) の周波数応答を点線で示す。動吸振器単体では、質量変化によって極めて大きな制振効果の減退が見られるが、ハイブリッド動吸振器においては優れたロバスト性を示しており、ほとんど制振効果の減退がないことがわかる。

4.2 能動的動吸振器との消費エネルギーの比較
能動的動吸振器と比較して、ハイブリッド動吸振器には消費エネルギーが少ないこと、信頼性が高いことが期待できる。以下に、そのことについて調べる。

図 7 は、無次元化した状態方程式を用いて、各々 $r=10$ に定めて最適制御されたハイブリッド動吸振器と、能動的動吸振器について、消費エネルギーと制振効果を比較したものである。実線はハイブリッド動吸

図 7 ハイブリッド動吸振器と能動的動吸振器の消費エネルギーの比較

図 8 制振効果と消費エネルギーを評価する 2 乗面積 (ISE) と重み係数の関係

振器、一点鎖線は能動的動吸振器の応答を示す。制振対象の変位応答 X はいずれも同じような応答を示しているが、制御量においてかなりの差が生じており、第一のピーク値に差はないが、第二のピーク値で 2 倍以上にもなっていることがわかる。

そこで、この差を定量的に調べるための評価式として制御量と変位応答の二乗面積 (ISE) を次のように定義する。

$$J_v = \int_0^\infty u^2 dt \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$J_x = \int_0^\infty X^2 dt \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここに、制御量の二乗面積 J_v は消費エネルギーを、また変位応答の二乗面積 J_x は制振効果を表している。

重み係数 r は制御量を支配する重みであるから、これを変化することにより J_v と J_x を能動的動吸振器と比較した結果を図 8 に示す。縦軸、横軸ともに対数目盛を用いている。見られるように、重み係数が 10 を境にして、10 以上では明らかにハイブリッド動吸振器のほうがエネルギー消費が少ないことがわかる。しかし、10 を下回ると消費エネルギーの差は認められない。つまり、過剰な制御量を与えれば両者の間に有意差はないが、図 7 に示すような実用的な制御量を与える領域ではハイブリッド動吸振器のほうが優れていることが

図 9 制御系に異常が発生した時のインパルス応答の比較

図 10 本提案のハイブリッド動吸振器の構造

わかる。

4・3 信頼性の検討 次に、信頼性について調べる。図9は、なんらかの故障原因で相対速度センサが破損した場合の変位応答 X の比較を示す。能動的動吸振器では応答が不安定になっているのに対して、本動吸振器では、ある程度制振効果を維持している。これは、受動的動吸振器の作用により制振対象自身が構造的に減衰を保有しており、信頼性が向上したものである。

5. 実験

5・1 ハイブリッド動吸振器の構造 図10に試作したハイブリッド動吸振器の構造を示す。これは、著者らが今までに用いてきた二重動吸振器の磁気ダンパの部分に駆動コイルを装備して、さらに平行板ばねにひずみゲージを張り付けて相対変位を検出するようにしたものである。このような構造にすれば、受動的要素と能動的要素を独自に最適設計することができるだけでなく多くの利点がある。すなわち、永久磁石により作られた磁気回路は、磁気ダンパと電磁アクチュエータが兼用できるので、構造の簡素化と軽量化を図ることができる。また、センサが一体化されているので、小形化に加えて機能性が増している。さらに、平行

板ばねによってハイブリッド質量が支えられているので、機械的な接触部分がなく不要な摩擦の発生がなく安定した動作が得られる。

以下に、理論解析で得られた制振効果の検証のために構成された実験装置の諸元を示す。

$$M=1.3 \text{ kg}, \quad m=0.23 \text{ kg}$$

$$K=6495 \text{ N/m}, \quad k=863 \text{ N/m}$$

$$K_c=0.712 \text{ N/v}, \quad c=6.69 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$

5・2 実験結果 実験は、最適設計された受動的動吸振器に加えて能動的に最適制御方法を取り、実験結果は理論値と比較するようにした。図11(a)は受動的動吸振器単体の応答である。制御量がないにもかかわらず、比較的良く制振されている。同図(b)はその上に能動的制御を加えた応答である。各図の右側には対応する理論解析結果を示す。実験結果は理論値と良く一致しており、今までに示した解析結果の妥当性が実証されている。

図12は、制振対象の質量に0.9 kgを付加した場合の応答である。動吸振器単体では、やはり制振効果が悪化しているが、能動的制振の付加によってロバスト性が保持されている。また、その結果も理論解析結果ともよく一致している。

(a) ハッシュ制御

(b) ハイブリッド制御

図11 最適制御の結果の比較

(a) ハッシュ制御

(b) ハイブリッド制御

図12 制振対象に0.9 kgの質量が付加された後の制御結果の比較

6. 結 言

省エネルギーと信頼性向上の観点からハイブリッド動吸振器を提案し、理論解析と実験結果から次の結論を得た。

(1) 磁気減衰を有する動吸振器に電磁アクチュエータを付加して、受動的、能動的減衰力を同時に発生できるハイブリッド動吸振器を提案した。

(2) この動吸振器を無次元状態方程式で記述することによって、解析結果に汎用性を持たすことができた。

(3) 解析の結果、受動的動吸振器固有の低いロバスト性が大いに改善されることがわかった。

(4) 能動的動吸振器に比較して、重み係数 $r > 10$

の領域で消費エネルギーが少なくなることがわかった。それ以下ではほとんど差異はない。なお、 $r=10$ では十分に制振効果を満たしている。

(5) 実験値と理論値は極めて良く一致し、解析結果の妥当性が確認された。また、ここで提案したハイブリッド動吸振器の有用性も確認された。

文 献

- (1) 背戸, 計測と制御, 28-8 (1989), 719.
- (2) 背戸・ほか2名, 機論, 50-458, C (1984), 1962.
- (3) 大熊・ほか3名, 機論, 52-484, C (1986), 3184.
- (4) 岩浪・背戸, 機論, 50-449, C (1984), 44.
- (5) 背戸・山之内, 機論, 44-378 (1978), 542.
- (6) 吉田・ほか2名, 機論, 54-508, C (1988), 2948.
- (7) 古石・武藤, 機論, 52-474, C (1986), 683.
- (8) 背戸・山下, 機論, 52-481, C (1986), 2318.