アクティブ振動制御系内のパワー流れの測定

Measurement of power flow in active vibration control system

○正 中原 健志 (九産大), 正 藤本 孝 (九産大)

Takeshi NAKAHARA, Kyushu Sangyo University, 2-3-1, Matsukadai, Higashi-ku, Fukuoka, 813-8503

Takashi FUJIMOTO, Kyushu Sangyo University, 2-3-1, Matsukadai, Higashi-ku, Fukuoka, 813-8503

Key Words: Power Flow, Vibration Control, Piezo-Element, Energy Regeneration, Class D Amplifier

1. 緒論

アクティブ振動制御はセミアクティブやパッシブ振動制御と比較して一般に高い制振性能を得られることが知られているが、アクチュエータ駆動用のエネルギー消費が問題とされている。しかし、振動系のエネルギーに着目して考えるとアクティブ振動制御により振動系の振幅を抑えるということは、振動系に外部からエネルギーを供給するのではなく、アクチュエータを介して振動系のエネルギーを外部に放出することであると考える。これをアクチュエータ側からみると平均的には振動系に対して負の仕事をしていることになるので、アクチュエータは外部から供給される駆動用エネルギーを消費するのではなく、振動系からのエネルギーを回生していると考えられる。

特にスマート構造でよく用いられる圧電アクチュエータでは、電磁アクチュエータの巻線抵抗による損失のようなアクチュエータ内での損失が無い場合、振動系からのエネルギーを効率よく電気エネルギーに回生できると考えられる。この考えに基づいて著者は、従来のアクティブ振動制御系において外部からのエネルギー供給が必要となる原因がアクチュエータ駆動用増幅器の損失であることを示し、スイッチング動作を基本として損失が極めて小さいD級増幅器⁽¹⁾を圧電アクチュエータの駆動に用いることにより、アクティブ振動制御時に振動系の持つエネルギーを電気エネルギーに回生できることをシミュレーションにより示している⁽²⁾⁽³⁾。

本論文では、圧電アクチュエータを用いた片持ち梁の振動制御実験装置を製作し、電力計を用いて系内のパワー（電力）の流れを測定することにより、

- 振動制御時の圧電アクチュエータは電力を消費するのではなく、振動系のエネルギーを電力として回生していること
- 振動制御時のエネルギー消費の原因が従来型のアクチュエータ駆動用増幅器（リニア増幅器）の損失であること
- アクチュエータ駆動用増幅器として高効率なD級増幅器を用いれば、アクチュエータが回生した電力を電源まで回生できること

の3点を確認する。

2. 実験装置

2-1. 圧電素子と片持ち梁 本論文で対象とする片持ち梁を図1に示す。この片持ち梁の両面には圧電素子(MIDE社製QP20n)が貼り付けられており、振動制御用のセンサ、アクチュエータおよび外乱発生用のアクチュエータとして用いる。MIDE社製QP-20nは図2に示すように2枚の圧電素子を重ね合わせてラミネートした構造になっており、梁の両面に貼り付けられたそれぞれの素子の役割は図3に示すとおりである。合計4枚の圧電素子のうち2枚を制御用アクチュエータとして使用し、残りを1枚ずつ外乱発生用アクチュエータおよびセンサとして使用している。また、図中の記号 V_a , V_d , V_s および I_a , I_d , I_s

Fig. 1 Cantilever beam with piezoelectric elements

Fig. 2 QP20n piezoelectric transducer

Fig. 3 Connection of piezoelectric elements

は、それぞれの素子の電圧および電流を表している。

2-2. 制御系の構成 図4と図5は、それぞれ従来型のリニア増幅器と高効率なD級増幅器を用いる場合のアクティブ振動制御系の構成を示す。どちらの場合も、梁が振動するとセンサ用圧電素子には速度に比例する電流 I_s が流れ、この電流が電流-電圧変換回路により電圧信号に変換される。この速度に比例する

Fig.4 Control system using linear amplifier

Fig. 5 Control system using class D amplifier

Fig. 6 Wave forms in class D amplifier

電圧信号は、高次モードとノイズの影響を抑制するためのローパスフィルタを通して、dSPACE 社製 DS1104 制御ボードに実装されたデジタル制御器に入力される。デジタル制御器からは振動を抑制するためのアクチュエータへの制御入力の信号が出力され、この信号がそれぞれの増幅器で増幅されて制御用アクチュエータにフィードバックされる構造になっている。制御器は最適レギュレータと同一次元オブザーバの組み合わせとして設計されており、増幅器の種類によらず同じ制御器を用いることで、増幅器の違いによるパワーの流れの違いを比較できるようにする。

2-3. D 級増幅器 一般的な D 級増幅器は、PWM 変調器、D 級出力段、出力フィルタから構成されており、図 6 に示すように増幅したい信号は PWM 変調器で PWM 信号に変調されてか

ら D 級出力段で増幅される。この増幅された PWM 信号から PWM 変調で付加された高周波成分を出力フィルタにより取り除くことで、元の信号を増幅した信号を得ることができる。このように D 級増幅器では元の信号そのものではなく PWM 信号を増幅しているため、原理的に損失のない D 級出力段のスイッチの ON-OFF のみで増幅が可能であり、効率が極めて高いという特徴を持っている。本論文の実験装置では、DS1104 制御ボード内蔵の PWM 変調器を使用し、ここから出力される PWM 信号を図 7 に示す D 級出力段と出力フィルタを介して制御用アクチュエータに出力している。図 7 の回路の入力である V_{PWM} は DS1104 制御ボードから出力される TTL レベルの PWM 信号であり、 $\bar{V}_{PWM}$ は図 8 に示すように PWM 信号 V_{PWM} を反転した信号である。図 8 では、 V_{PWM} と $\bar{V}_{PWM}$ の双方が 0V となる期間が存在するが、これはデッドタイムと呼ばれるものであり、トランジスタのスイッチング遅れのために上下のトランジスタが同時に ON 状態となり短絡することを防止している。図 9 は図 7 の回路を説明のため簡略化したものであり、TR1 から TR4 は V_{PWM} と $\bar{V}_{PWM}$ により表 1 のようにスイッチとして動作することで PWM 信号を増幅している。

Fig. 7 Class D driver and output filter

Fig. 8 Wave forms of V_{PWM} and $\bar{V}_{PWM}$

Fig. 9 Simplified circuit of class D driver and output filter

Table 1 Switching logic

V_{PWM}	$\bar{V}_{PWM}$	TR1 and TR4	TR2 and TR3
5V	0V	ON	OFF
0V	5V	OFF	ON
0V	0V	OFF	OFF

3. 制御実験とパワーの流れの測定

3-1. 制御効果の確認 まず、製作した装置のアクティブ振動制御系が機能することを確認するため、固定端から 200mm の位置での梁の変位をレーザ変位計で測定し、制御の有無による違いを比較する。外乱としては、梁の 1 次固有振動数に近い 8.12Hz で振幅 120V の正弦波電圧 V_d を外乱用アクチュエータに加える。図 10 と図 11 は、それぞれリニア増幅器を用いた場合と D

級増幅器を用いた場合の結果を示したものである。どちらの場合も制御により振幅が低減されており、同一の制御器を用いているのではほぼ同等の効果が得られていることが分かる。

3-2. パワーの流れの測定 図 12 は、アクティブ振動制御系内のパワーの流れを簡潔に示したものであり、増幅器には直流電源から電力が供給され、制御用アクチュエータには増幅器から電力が供給されている。また、外乱発生用アクチュエータには圧電素子駆動用増幅器から外乱のパワーとして電力が供給されている。実験では、この 3 つの電力を電力計（横河電機製 WT210）により測定することで系内のパワーの流れを明らかにする。なお、図 12 の矢印の向きに流れるパワーを正の電力と定義し、電力が負の値を取るときは矢印と反対向きのパワーの流れを示すものとする。図 13 と図 14 は、それぞれリニア増幅器を用いた場合と D 級増幅器を用いた場合の測定結果であり、外乱として梁の 1 次固有振動数に近い 8.12Hz の正弦波電圧 V_d を外乱用アクチュエータに加え、その振幅を変化させながら電力の変化を測定した。まず、外乱用アクチュエータに入力される電力を見ると、どちらの増幅器を用いた場合も常に正であり外乱振幅の増大とともに増大している。次に制御用アクチュエータに入力される電力を見ると、どちらの増幅器を用いた場合も常に負であり図 12 の矢印とは反対向きにパワーが流れていることが分かる。これは、振動制御時のアクチュエータが振動系からエネルギーを取り除くことで振動を抑制しており、取り除いたエネルギーが電力として回生されアクチュエータから増幅器に流れていることを示している。最後に、増幅器に入力される電力を見ると、増幅器の種類により大きく異なっている。リニア増幅器を用いた場合には常に正であり、外乱振幅の増大とともに増大する傾向を示している。これは、常に図 12 の矢印の向きのように電源からリニア増幅器にパワーが流れていることを示している。リニア増幅器を用いた場合のパワーの流れの向きをまとめると図 15 に示すようになる。つまり、リニア増幅器には電源とアクチュエータの双方からパワーが流れ込み、リニア増幅器内の損失として熱に変換されていることを示している。このようにアクチュエータから増幅器にパワーが流れている状況でもリニア増幅器が電源からの電力を消費してしまい、外乱の増大とともに消費電力も増大する原因は、リニア増幅器の必要とす

Fig. 10 Displacement of cantilever beam driven by linear amplifier

Fig. 13 Power in the system using linear amplifier(with control)

Fig. 11 Displacement of cantilever beam driven by class D amplifier

Fig. 14 Power in the system using class D amplifier(with control)

Fig. 12 Power flow in the system

る電力が理論的にアクチュエータを流れる電流の絶対値に比例して常に正となるため⁽²⁾と考えられる。

一方、D級増幅器を用いた場合には、外乱振幅が小さい領域では増幅器に入力される電力は正であるが、外乱振幅の増大とともに減少し、外乱振幅が大きい領域では増幅器に入力される電力が負になっている。また、D級増幅器に入力される電力とアクチュエータに入力される電力の差である増幅器の損失は、ほぼ一定であり外乱振幅が増大するとやや減少する傾向を示している。これらの傾向は、D級増幅器の内部損失は外乱振幅により大きく変化することが無く、外乱振幅が増大してアクチュエータが回生する電力が大きくなるとD級増幅器の内部損失を上回

Fig. 15 Power flow in the system using linear amplifier

り、電源側へとパワーが流れることを意味している。このときのパワーの流れの向きをまとめると図16に示すようになる。

4. 結論

本論文の結論を以下にまとめる。

- 片持ち梁を対象として圧電アクチュエータを用いたアクティブ振動制御系の実験装置を製作し、系内のパワーの流れを電力計により測定した。
- 振動制御時の圧電アクチュエータに入力される電力は負となり、アクチュエータが振動系から取り除いたエネルギーが電力として回生され、アクチュエータから増幅器に流れることを示した。

Fig. 16 Power flow in the system using class D amplifier

- 圧電アクチュエータの駆動にリニア増幅器を用いた場合には、電源から増幅器に電力が流れ、アクチュエータが回生した電力と合わせて増幅器の損失として散逸することを示した。
- リニア増幅器の代わりに高効率な D 級増幅器を用いることで、アクチュエータが回生した電力の一部を電源に回生できることを示した。
- アクティブ振動制御ではアクチュエータ駆動用のエネルギーが必要であるという従来の認識は、少なくとも圧電アクチュエータを用いる場合には正しくなく、正しくは増幅器の損失がエネルギー消費の原因と考えられる。

参考文献

- (1) 本田潤, D 級/デジタルアンプの設計と製作, CQ 出版社, 2004
- (2) 中原健志, D 級増幅器によるスマート構造のエネルギー回生振動制御 (第 1 報, 等価回路モデルと回路シミュレータを用いた数値解析による検討), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.74, No.738, 2008, pp.259-268
- (3) 中原健志, 藤本孝, 機能モデルによるスマート構造のエネルギー回生振動制御のシミュレーション, D&D2008 CD-ROM 論文集, 講演番号 217, 2008