コンデンサプローブを用いた微小振動振幅測定 のリフト・オフ補償*

伊藤 晴夫**・菊池 清明***・鈴木 昭****

Lift-off Compensation for Vibrating Amplitude Meter Using a Capacitive Transducer*

Haruo Ito**, Kiyooki Kikuchi*** and Akira Suzuki****

Vibrating amplitude measurement using a condenser sensor has a weak point that measuring sensitivity varies by the distance between the probe and the vibrating body (lift-off).

This paper describes an instrumental technique suitable for industrial measurement of the vibrating amplitude in the range 1~100 μm .

In order to achieve constant sensitivity against lift-off changes, the two kinds of power sources are supplied in series with the vibrating body and the probe. One is a DC source and the other is an AC (high frequency) source. The resulting composite signal are separated into two signals by a low and a high pass filter. Low frequency component (e_{OL}) is proportional to the vibrating amplitude and inversely proportional to the lift-off squared. High frequency component (e_{OH}) is inversely proportional to the lift-off. Then lift-off compensation is achieved by performing an operation (e_{OL}/e_{OH}^2) on an electronic circuit.

When the effective area of the probe is 4.11 mm², the lift-off compensation covers from 0.2 mm to 2.0 mm within the error of 5%.

1. ま え が き

非接触での微小振動振幅の測定には、レーザー干渉法を利用する方法が高感度を有することから最近広く用いられている。しかし、この方法は構成が複雑でセッティングおよび測定に熟練を必要とする欠点を有している。一方、容量センサは構造が簡単で取り扱いが容易であり、比較的高感度が得られる利点を有している。この点に着目し、筆者らは容量センサを用い、従来測定が困難とされた超音波加工用ホーン先端の振動分布の測定を行ない、その結果については既に報告¹した。この方法は測定対

象とプローブとを対向させコンデンサを形成し、先ずプローブ—振動体間の距離（リフト・オフ）を規定値に設定し、次に振動振幅を測定するという二度の操作が必要であった。したがって、測定中に温度変化などにより測定対象が伸縮するとリフト・オフが変化するため直接検出感度に影響を与える欠点を有する。

本報告は、容量センサの利点を生かし、リフト・オフ変動に伴う検出感度の変化を回路的に補償した微小振動振幅測定用装置について述べたものである。

2. 測定原理

Fig. 1は振動振幅測定の基本回路を示したもので、コンデンサプローブと容量—電圧変換回路より構成される。ここで R_g は高抵抗、 C_f は帰還容量、 C_i は演算増幅器の入力容量とプローブを含む分布容量である。

プローブ—振動体間の静電容量 C_x は、振動体の振幅 Δd 、振動周波数 f 、プローブの有効面積を S 、静止時のリフト・オフを d_0 とすると

$$C_x = \frac{\epsilon_0 S}{d_0} \cdot \frac{1}{1 + (\Delta d/d_0) \sin \omega t} \quad (1)$$

* 原稿受付 1988. 5. 30
 ** 神奈川大学工学部 (現, カスタムテクノロジー ㈱)
 *** 東京職業訓練短期大学校 Department of electronic, Tokyo Vocational Training College ; 2-32-1 Ogawa-nishimachi, Kodaira 187, JAPAN
 **** 神奈川大学 工学部 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering ; Kanagawa University ; 3-27 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama 221, JAPAN
Key Words : capacitive transducer, vibrating amplitude meter, capacitance-to-voltage converter, lift-off compensation, condenser probe sensor.

Fig. 1 Basic circuit of the vibrating amplitude meter

で与えられる。ただし、 ϵ_0 は真空中の誘電率である。ここで $(\Delta d/d_0) \ll 1$ が成立する範囲内で C_x は、

$$C_x \approx \frac{\epsilon_0 S}{d_0} \cdot \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0} \sin \omega t\right) \quad (2)$$

と置ける。

まずスイッチを1に倒し振幅 E_i 、周波数 f_0 ($f_0 > f$)の交流信号 $e_i = E_i \sin \omega_0 t$ を印加すると出力電圧 e_o は変換利得を η とし、 $(\omega AC_f R_f)^2 \gg 1$ が成立する範囲内で

$$-e_o \approx \eta \cdot e_i = \frac{E_i \epsilon_0 S}{d_0 C_f} \sin \omega_0 t \quad \left(\eta = \frac{C_x}{C_f}\right) \quad (3)$$

となり、出力電圧 e_o はプローブの有効面積 S が一定の範囲内で d_0 に逆比例する。これより d_0 に対する e_o の関係を求めておけば d_0 が設定できる。

つぎにスイッチを2に倒して直流電圧 V を印加すると出力電圧 e'_o は

$$e'_o \approx \eta \cdot \frac{\Delta d}{d_0} V \sin \omega t = \frac{\Delta d V \epsilon_0 S}{d_0^2 C_f} \sin \omega t \quad (4)$$

となり、 d_0 が一定であれば振動振幅 Δd を求めることができる。しかし、長時間の測定に対してリフト・オフ d_0 は振動体の熱膨張、また振動分布を測定する場合には、プローブの移動により d_0 の変化などが考えられ、振幅測定に誤差を生ずることとなる。

3. リフト・オフ補償を施した測定装置

Fig. 2は補償回路のブロック図を示したものである。工業的には振動体が接地されていると考えられるので、容量—電圧変換回路をフローティングとし、出力をビデオトランスを用い補償回路に接続した。また、リフト・オフに比例した信号と振動振幅に比例した信号を同時に取り出すため、二つの電源を直列に接続した。このとき容量—電圧変換回路の出力電圧 e_o は

$$e_o \approx \frac{\Delta d V \epsilon_0 S}{d_0^2 C_f} \sin \omega t - \frac{E_i \epsilon_0 S}{d_0 C_f} \sin \omega_0 t + \frac{\Delta d E_i \epsilon_0 S}{d_0^2 C_f} \sin \omega t \cdot \sin \omega_0 t \quad (5)$$

Fig. 2 Block diagram of the lift-off compensating apparatus

となる。ここで、リフト・オフに比例した信号周波数 f_0 を振動体周波数 f に比べ充分高い周波数とすると、リフト・オフ信号と振動振幅信号とをそれぞれローパスフィルタおよびハイパスフィルタにより分離することができる。いまリフト・オフ信号を e_{oH} 、振動振幅信号 e_{oL} とすると、それぞれは

$$e_{oH} \approx -\frac{E_i \epsilon_0 S}{d_0 C_f} \sin \omega_0 t \quad (6)$$

$$e_{oL} \approx \frac{\Delta d V \epsilon_0 S}{d_0^2 C_f} \sin \omega t$$

となる。つぎにこれらの信号を個々に全波整流すると

$$E_{oH} \approx \frac{2 E_i \epsilon_0 S}{\pi d_0 C_f} \quad (7)$$

$$E_{oL} \approx \frac{2 \Delta d V \epsilon_0 S}{\pi d_0^2 C_f}$$

となる。ここで、 d_0 に無関係な出力信号を得るため E_{oH} を2乗したもので E_{oL} を割ると、その出力 D は利得を Q とすると、

$$D \approx Q \pi V C_f \Delta d / (2 E_i^2 \epsilon_0 S) \quad (8)$$

となり、 D は d_0 に無関係となり Δd に比例する。これより Δd は、

$$\Delta d \approx 2 D E_i^2 \epsilon_0 S / (Q \pi V C_f) \quad (9)$$

より求まる。本測定法において、プローブと振動体とが θ だけ傾いて配置されたときの誤差 α は、プローブの有効面積を $S(\theta)$ とし、 θ が十分小さいとき、

$$\alpha \approx \{S_0 - S(\theta)\} / S_0 = (1 - \cos \theta) \quad (10)$$

で近似できる。ただし、 S_0 は $\theta = 0$ におけるプローブの有効面積である。

4. 測定装置の特性

4.1 容量—電圧変換回路

Fig. 3は容量—電圧変換回路において、 $C_x = 0.78 \text{ pF}$ とし、帰還容量 C_f に対する変換利得 η と出力側の雑音

Fig. 3 Relations of a conversion gain and an input equivalent voltage noise vs. a feedback capacitance C_f of the C-V converter

Fig. 4 Frequency response of the C-V converter

電圧より入力側に換算した雑音電圧 e_n との関係求めたものである。 C_f が 5 pF 以上になると e_n は増加しているが、これは C_f が大きくなると η が減少し雑音電圧に対する信号電圧の割合 (SN 比) が小さくなるためと考えられる。容量-電圧変換回路では、 C_f の値が大きいほど高域特性が優れる¹ が、SN 比を考えると $C_f < 5$ pF に設定する必要がある、今回は $C_f = 4$ pF とした。 Fig. 4 は試作した容量-電圧変換回路の周波数特性を示したもので低域遮断周波数 $f_L = 1.2$ Hz、高域遮断周波数 $f_H = 1.2$ MHz であり、広い周波数範囲にわたり振動測定が可能である。

4.2 プローブ

プローブは直径 2 mm の黄銅棒を用いその廻りにガード電極を配置し、更にガード電極の外側に安全性と誘導雑音を避けるためシールド電極を設け、三重構造とした。 Fig. 5 はプローブの構造、寸法および形状とリフト・オフ d_0 に対する入出力の逆比 (e_i/e_o) を求めたもので、 $d_0 = 0.1 \sim 2.0$ mm の範囲で直線関係を有し、プローブの有効面積 S が一定となっていることを示して

Fig. 5 Assembly and characteristic of the probe made as a trial

Fig. 6 Relation between the lift-off d_0 and diameter of a guard electrode using the probe, within a range a conversion gain is kept unchanged

いる。直線の傾きより有効面積 S を求めると $S = 4.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ であり、有効直径になおすと 2.29 mm である。 Fig. 6 はガード電極の効果を調べたもので、横軸にガード電極の直径を取り、縦軸は有効面積が一定と見なせる時のリフト・オフ d_0 を示したものである。ガード電極の直径が大きいくほど有効面積が一定となる範囲は広がるが、ガード電極の直径が 4 mm でも $d_0 = 1.7$ mm まで有効面積が一定となることから、プローブの小型化が可能である。 Fig. 7 はプローブの傾きによる誤差を求めたもので○は実測値であり、実線は (10) 式により求めたものである。結果よりプローブの傾きが 8° 程度まで誤差 1% 以下で測定でき、実用上問題とならないことがわかる。

4.3 整流回路、2乗算器および除算器

本測定法において、 $\Delta d/d_0$ が大きくなると振動振幅信号波形が歪むため誤差が生ずる。 Fig. 8 は $\Delta d/d_0$ に対する歪による誤差を理論的に求めたもので、実線が全波整流回路を用いたときで、破線が実効値整流回路を用いたときの結果である。結果より $\Delta d/d_0$ が 0.1 以下で

Fig. 7 Measured vibrating amplitude error vs. inclination angle θ against the vibrating body

Fig. 8 Error in approximate equation of the capacitive transducer vs. the ratio of vibrating amplitude Δd to lift-off d_0

は二つの整流方式ともに、誤差1%以内となっているが、実効値整流回路の方が平均値整流回路に比較し、 $\Delta d/d_0$ が大きくなるほど誤差が大きくなるため、全波整流回路を用いた。Fig. 9 (a) は全波整流回路と周波数特性を示したもので、10 Hz~150 kHz まで平坦な特性を有している。(b) は入出力特性であり利得は約2倍で、良好な直線性を示している。整流回路の周波数特性より、距離測定用交流電源の周波数を150 kHzに設定した。試作した装置は、距離測定信号 e_{OH} と、振動振幅信号 e_{OL} とを分離するために用いたフィルタ特性（3次バターワース・フィルタを従属接続）を考慮して、被測定振動周波数の上限を20 kHzとした。2乗算回路および除算回路には市販のモノリシック IC (AD-534 JH) を用いた。

5. 測定結果

Fig. 10 は交流電圧 $e_i = 5.3$ V, 直流電圧 $V = 340$ V に設定したときの結果で、 $\Delta d = 10 \mu\text{m}$ のとき除算器の出力電圧 D を10 V に調節し、 Δd をパラメータとして測定したときの結果である。横軸はリフトオフ d_0 で縦

(a) Full wave rectifier circuit and its frequency characteristic

(b) Linearity and gain of the rectifier

Fig. 9

軸は除算器出力 D である。振動周波数 f はそれぞれ (a) が100 Hz, (b) が16 kHz である。 $d_0 = 0.2$ mm から斜線で囲まれた部分が相対誤差5%以内で測定可能な範囲であり、リフト・オフの変化に対し検出感度が一定に補償されていることがわかる。 Δd が小さくなると補償範囲は狭まるが、これは振動振幅信号 e_{OL} が小さくなるためである。 $d_0 = 0.2$ mm 以下で D が急増するのは乗算器の飽和によるものである。また、 f が16 kHz のときの測定結果の方が、100 Hz のときの補償範囲より広がっているがこれは振動周波数が高くなったために試作したフィルタでは距離信号 e_{OH} と振動振幅信号 e_{OL} が完全に分離できず、 e_{OL} に e_{OH} が僅かに乗ったまま除算されたため、見掛け上補償範囲が広がったものと考えられる。Fig. 11 は装置のドリフト特性を示したもので、長時間ドリフトは充分安定しておりほとんど無視できる。短時間ドリフトについては約 7.5 mV_{p-p} 程度生じているが、振動振幅信号 Δd に換算すると 7.5 nm であり、 $1 \mu\text{m}$ 程度の測定には充分利用できる。

6. むすび

コンデンサプローブを用いた微小振動振幅測定におけるリフト・オフ補償について述べた。距離信号 e_i の周

(a) Vibrating frequency : 100 Hz

(b) Vibrating frequency : 16 kHz

Fig. 10 Relation between the output and the lift-off, with a parameter of the vibrating amplitude. The range of error 5 % is shown with two hatching lines

Fig. 11 Drift characteristic of the vibrating amplitude meter

波数を 150 kHz としたことにより振動周波数 20 kHz までの振動振幅が測定できた。フィルタ、および整流回路の改良によりより高い振動周波数の測定が可能である。

本方法は簡単な電子回路で構成できる利点を有している。

参 考 文 献

- 1) 菊池, 鈴木: 簡易微小静電容量測定法と変位および振動振幅測定への応用; 計測自動制御学会論文集, 20 巻, 11 号, pp. 53~59 (1984)