低オフセット基本波型直交フラックスゲート

Low Offset Orthogonal Fluxgate Operating in Fundamental Mode

古賀文隆・笹田一郎*

福岡県工業技術センター機械電子研究所, 北九州市八幡西区則松 3-6-1 (〒807-0831)

*九州大学大学院総合理工学研究院, 春日市春日公園 6-1 (〒816-8580)

F. Koga and I. Sasada*

Fukuoka Industrial Technology Center, 3-6-1 Norimatsu, Yahatanishi-ku, Kitakyushu 807-0831

*Department of Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University, 6-1 Kasugakoen, Kasuga, 816-8580

A method is presented for canceling offset of an orthogonal fluxgate operating in the fundamental mode with dc biased excitation. Offset occurs under the influence of the magnetic anisotropy that is inherent in a wire core. When both the excitation current and dc bias polarities are either positive or negative, the absolute value of the offset is the same but the signs are contrary. The offset can therefore be removed by changing polarities of both excitation current and dc bias periodically to take the mean value. This method can also reduce the input-output hysteresis. Experimental results are shown for a sensor head consisting of a 15-mm-long cobalt-based amorphous wire of 120 μm in diameter and a 300-turn sensing coil formed on the wire.

Key words: orthogonal fluxgate, fundamental mode, low offset, amorphous wire, magnetic sensor

1. はじめに

磁界センサは、磁界を情報媒体とするセンシング技術の基本となる構成要素である。近年、磁界センサはシステムに組み込むための小形、低電力、低価格化が重要となっている。磁界を検出するための原理に関してはこれまで多くの研究がなされており、小形化に適した磁性ワイヤを用いるものとして磁気インピーダンス効果に基づくもの^{1,2)}と、直交フラックスゲートに基づくもの³⁾がある。前者は、磁気インピーダンス効果自体には入力磁界の極性判別能がないため、その極性判別のためにバイアス磁界を必要とする。一方、後者は磁性ワイヤと一つの検出コイルでセンサを構成でき、本質的に入力磁界の極性判別能を備えているという利点がある。

著者らは、直交フラックスゲートの励磁を従来の交流励磁から直流バイアスを重畳させた交流励磁に変更し、検出コイルに誘起される電圧の第2調波ではなく基本波成分を同期検波することで、感度の向上と線形性の改善ができることを既に示している^{4,5)}。また、この動作モードにおいて、直流バイアスの極性を周期的に切替え、出力側でこの周波数に同期して誘起電圧の符号を反転させることで、磁性ワイヤに内在する磁気異方性の影響で生じる出力のオフセット電圧を除去する方法を示している^{5,6)}。

本論文では、上記の考え方を発展させた、直流バイアスの極性だけでなく交流励磁電流の極性も同時に周期的に切替える方法を提案する。これは、交流励磁電流と直流バイアス両方の極性が正と負のときで、生じるオフセット電圧の絶対値は同じであるが符号が逆になることを利用し、励磁電流の極性を周期的に切替えながら出力を得、両者の平均を取ることでオフセット電圧を除去するものであるが、直流バイアスの極性のみを切替える場合^{5,6)}に必要であった出力側での電圧の符号反転回路が不要となり、回路構成が簡単になる。本手法は無調整でオフセット電圧を低減できるものであり、量産時等のオフセット電圧のばらつきの小さいセンサの実現につながる。また、試作した回路で特性を調べた結果、オフセット電圧が小さいだけでなく、入出力間のヒステリシスも減少していることがわかった。

2. 構造と動作原理

Fig. 1に基本波型直交フラックスゲートの基本回路を示す^{4,5)}。交流励磁に直流バイアスを重畳することと、同期整流器 (Phase-Sensitive-Detector: PSD) で第2調波ではなく基本波成分を同期検波するところが従来の直交フラックスゲート³⁾と異なり、これにより、磁性ワイヤとしてアモルファス

Fig. 1 Basic circuit of orthogonal fluxgate with dc-biased excitation.

ワイヤを用いたときの高感度化と、入出力特性の原点近傍での直線性の改善がなされる^{4,5)}。

Fig. 2に示した基本波型直交フラックスゲートの磁性ワイヤの回転磁化モデル^{4,5,7)}と、励磁電流 i (とそれに比例した励磁磁界 $H(t)$)、検出コイルの鎖交磁束 Φ と誘起電圧 v の各波形を用いて、本論文で提案する方法を説明する。磁性ワイヤの軸方向を上下方向としている。磁性ワイヤには励磁電流を直接通電するので、ワイヤ内には図のように横方向(円周方向)に、交流磁界 $H_{ac} \sin(2\pi ft)$ に直流磁界 H_{dc} が重畳された励磁磁界 $H(t) = H_{dc} + H_{ac} \sin(2\pi ft)$ が発生する。ただし $|H_{dc}| > H_{ac}$ であるとする。 K_u は、磁性ワイヤ内に存在する磁気異方性を一軸性と仮定したもので、円周方向に対して角 α をなすものとする。測定対象となる外部磁界 H_{ex} は軸方向にかかり、磁化 J_s は次式の磁気エネルギー E を最小化する方向を向く。

$$E = -H_{ex} J_s \sin(\theta) + H(t) J_s \cos(\theta) + K_u \sin^2(\alpha - \theta) \quad (1)$$

ここで θ は J_s が円周方向となす角である。

Fig. 2 (a)のように励磁磁界が変化すると、 J_s は最初の半サイクルで(1)の方向に回転し、次の半サイクルで(2)の方向に回転する。このサイクルは交流励磁の周波数と同じである。検出コイルは磁性ワイヤを取り囲むソレノイドであるので、検出コイルには J_s の軸方向成分 $J_s \sin(\theta)$ に比例した磁束 Φ が鎖交し、 Φ の時間微分に比例した電圧 v が誘起される。したがってこの v のサイクルも交流励磁と同じ周波数成分となり、基本波を参照信号として同期整流すれば H_{ex} に対応した出力が得られる。

次に Fig. 2 (b)に交流励磁電流と直流バイアス両方の極性を負にした場合について示す。 J_s は最初の半サイクルで(1)の方向に回転し、次の半サイクルで(2)の方向に回転する。ここで注意すべきは、直流バイアスのみの極性を負にした場合^{5,6)}と比較すると J_s の回転の向きが逆であり、検出コイルに鎖交する磁束 Φ と誘起電圧 v が(a)の場合と同位相となる点である。したがって同期整流して得られる出力電圧の極性、すなわち外部磁界 H_{ex} に対する感度の極性は、励磁電流の極性に関わらず同一に保たれる。

外部磁界 H_{ex} がゼロで、交流励磁電流及び直流バイアスの極性が正と負の場合の磁化のモデルと各波形をそれぞれ Fig. 2 (c), (d)に示す。 H_{ex} がゼロでも α がゼロでないために $\theta = 0$ とはならず、励磁磁界 $H(t)$ によって J_s はわずかに回転して磁束 Φ の変化が生じるので、誘起電圧 v が発生する。これがオフセット電圧の原因となる。しかし(c)と(d)では、誘起電圧 v は、振幅は同じであるが逆位相になる。したがって、両者の和、もしくは平均をとればオフセット電圧をキャンセルでき、磁性ワイヤに内在する磁気異方性の影響によるオフセット電圧が生じないセンサが構成できる。

交流励磁電流及び直流バイアスの極性が正と負のときのそれぞれの出力電圧の平均を取る方法として、磁性ワイヤに流す励磁電流の極性を周期的に切替える方法が考えられ、一手法として Fig. 3のように回路を構成する方法が考えられる。交流励磁周波数 f_0 に対して、スイッチ S_a と S_b を逆位相

(a) Positive excitation

(b) Negative excitation

(c) Positive excitation, $H_{ex} = 0$

(d) Negative excitation, $H_{ex} = 0$

Fig. 2 Model for magnetization process of magnetic wires and waveform of dc-biased excitation current, linkage flux to the sensing coil and induced voltage.

で周波数 $f_1 = f_0/n$ でスイッチングさせる。同期整流器(PSD)への参照信号は交流励磁源から取る。破線で示した差動増幅器は、実際の回路作製時に高感度を得る場合に挿入するもので、原理的に必要とされるものではない。この回路では前述のように外部磁界 H_{ex} に対する感度の極性は常に一定に

Fig. 3 Schematic diagram of a low offset fluxgate, in which polarities of both excitation current and dc bias are periodically changed.

保たれるので、直流バイアスの極性のみを周期的に切替える場合^{5,6)}に必要であった感度の極性反転回路が不要となるか、または2個必要としていた同期整流器のうちの1個が不要となり、出力側の回路構成を簡素化することができる。

3. 実験及び結果

3.1 フラックスゲートの構成

センサヘッドとして直径120 μm 、長さ約15 mmのCo基アモルファスワイヤ(ユニチカ製)に300ターンの検出コイルを巻回したものをを用い、電池駆動によるFig. 3の回路を作製した。励磁電流の極性切替用のスイッチ及び同期整流回路にはアナログスイッチを用い、励磁回路はOPアンプで構成した。励磁周波数 f_0 は58.4 kHz、励磁電流の極性切替周波数 f_1 は1.825 kHz ($f_0/32$)、差動増幅器の増幅率は690倍とした。同期整流部にはカットオフ周波数590 Hzの6次のローパスフィルタを用いた。励磁電流は、交流振幅3.5 mA、直流バイアス4 mAとした。その励磁電流の波形をFig. 4に示す。センサヘッドでの消費電力は約0.1 mWであった。

3.2 フラックスゲートの特性

まず、励磁電流の極性切替を行わないFig. 1に示した基本

Fig. 4 Waveform of excitation current.

回路の状態で作動させた場合について示す。Fig. 3のスイッチ S_{a-1} 、 S_{a-2} のみを常にオン、または S_{b-1} 、 S_{b-2} のみを常にオンにした状態として、励磁電流を正または負に固定して、 $\pm 19 \text{ A/m}$ の磁界を印加したときの入出力特性をFig. 5に示す。励磁電流を正に固定したときは28 mV (0.56 A/m相当)、励磁電流を負に固定したときは -25 mV (-0.5 A/m 相当)のオフセット電圧が存在していた。次に、励磁電流の極性を周期的に切替えた場合の入出力特性をFig. 6に示す。オフセット電圧を1 mV以下まで低減することができた。このことから、励磁電流の極性を周期的に切替えることにより、アモルファスワイヤに内在する磁気異方性の影響で生じるオフセット電圧を除去できていると考えられる。また、Fig. 6からわかるように正負の対称性も改善することができた。

Fig. 6には若干の非直線性が見られる。検出コイルに鎖交する磁束の変化は、励磁磁界の変化に伴う J_s の回転、すなわち θ の変化によって生じるが、 θ の変化そのものではなく $\sin(\theta)$ の変化に比例することが非直線性の一因になっていると考えられる。励磁電流、特に直流バイアスを大きくすることによって θ の小さい領域で J_s を回転させれば、消費電力は大きくなるが、非直線性の改善は可能である。

Fig. 5ではまた、入出力間にヒステリシスも存在している。ヒステリシスの大きさを、外部磁界がゼロのときの出力電圧差の、フルスケール(外部磁界 $\pm 19 \text{ A/m}$ 印加時の出力電圧差)に対する割合で定義すると、励磁電流を正に固定したときは1.7%、負に固定したときは2.1%であった。一方励磁電流の極性を周期的に切替えたFig. 6では、ヒステリシスは約1/4の0.5%まで低減されていることがわかった。これは極性切替時にアモルファスワイヤの磁化の残留がリセットされることによると考えられ、励磁電流の極性の切替は、オフセット電圧の低減だけでなくヒステリシスの低減にも有効であった。

径方向のシールド比が約1000の円筒形磁気シールドの中央に、センサヘッドの軸方向が円筒の径方向と一致するようにセンサヘッドを配置し、ローパスフィルタ($f_c = 4.2 \text{ Hz}$)を通して観測した出力波形をFig. 7に示す。分解能は0.1 Hz

(a) Positive excitation

(b) Negative excitation

Fig. 5 Input-output characteristics when polarities of both excitation current and dc bias are fixed.

Fig. 6 Input-output characteristic when polarities of both excitation current and dc bias are periodically changed.

Fig. 7 Waveform of output voltage when sensor head is put in a magnetic shield.

において約 2 nT であった。また、Fig. 7 に示した 20 分間のドリフトは約 3 nT で、ゼロ点の安定性に関しても良好な特性が得られた。

4. まとめ

基本波型直交フラックスゲートにおいて、交流励磁電流及び直流バイアス両方の極性を周期的に切替えることにより、オフセット電圧を低減できることを示した。アモルファスワイヤによって構成したセンサヘッドを用い、電池駆動する低消費電力の試作回路による評価では、アモルファスワイヤに内在する磁気異方性に起因して生じるオフセット電圧を、極性の切替を行わない場合と比較して 1/25 以下に低減できていることが確認できた。更に、正負の対称性が改善され、ヒステリシスに関しても約 1/4 に低減できていることがわかった。また、ゼロ点の安定性についても確認することができた。

文 献

- 1) E. P. Harrison, G. L. Turney, M. Rowe, Electrical properties of wires of high permeability: *Nature*, **135**, 961 (1935).
- 2) K. Mohri, K. Bushida, M. Noda, H. Yoshida, L. V. Panina, and T. Uchiyama: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 2455 (1995)
- 3) T. M. Palmer: *Proc. IEE* (London), **100**, 545 (1953)
- 4) 笹田一郎：電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-117, 25 (2001)
- 5) I. Sasada: *J. Appl. Phys.*, **91**, 7789 (2002)
- 6) 笹田一郎, 臼井崇：電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-10, 7 (2002)
- 7) E. C. Stoner, E. P. Wohlfarth: *Trans. Roy. Soc. (London)*, **A240**, 599 (1948)

2002 年 10 月 7 日受理, 2003 年 1 月 17 日採録