Design and Evaluation of a Flexible Pickup Coil for a Magnetostrictive Torque Sensor with a Reduced Offset and Closely Paired Contacts

K. Egashira and I. Sasada*

Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka 816-8580, Japan

*Faculty of Engineering Sciences, Kyushu Univ., 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka 816-8580, Japan

We designed a flexible pickup coil for torque sensors in which the offset is reduced as a result of the asymmetric structure, which was created in order to obtain an easy connection. The mutual inductance was calculated for all the possible coil patterns of an asymmetric configuration, and the coil pattern that exhibited the lowest mutual inductance was selected the best design for the pickup coil. In addition, the performance of a flexible pickup coil incorporating this design was evaluated by observing its offset voltage, response to the uniaxial magnetic anisotropy, and input-output characteristic. The results showed that the offset voltage was lowest in an asymmetric coil pair. The response to the uniaxial magnetic anisotropy showed an output pattern as the axis torque sensor. The input and output characteristics almost accorded with those of a conventional symmetric model coil pair.

Key words: torque sensor, flexible coil, figure-of-eight, offset, mutual inductance

オフセット電圧を低減した結線容易なトルクセンサ用フレキシブル検出コイルの設計および評価

江頭広祐・笹田一郎*

九州大学大学院総合理工学府, 福岡県春日市春日公園 6-1 (〒816-8580)

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

1. はじめに

近年, 機械システムの発達に伴い, 自動車などの回転運動系の制御のためにトルク検出の必要性が高まっている¹⁾. トルクが鋼軸に印加されたとき, 鋼軸表面に軸方向に対して ± 45 度方向に一軸磁気異方性が誘起される. この一軸磁気異方性を測定することでトルクを非接触で検出できる²⁾.

著者らはトルクを検出することを目的として, 小型・薄型かつ量産性を備えたフレキシブルプリント検出コイルを開発してきた³⁾. 図 1(a), (b)にフレキシブル検出コイルの概略図および実際の導体のラインパターンを示す. このコイルは, 時計回り, 半時計回り各 15 ターンからなる 180 度回転対称な平面 8 の字形のコイル 2 個からなり, その一方は, 他方に対して直交するように配置され, それらの間に絶縁フィルムをはさみ, 重ね合わせた構造である. 各コイルには, 上下および左右のコイルの間にスペースが設けてあり, スルーホール加工を施して上下および左右のコイルを繋ぐ. このようなコイル対は, コイル間の正と負のインダクタンスの大きさの平衡が保たれているため原理的に磁気結合がない⁴⁾. コイルを鋼軸の軸方向に直交して非接触で設置した状態でトルクが印加しない場合, 一方を交流励磁し, 他方の誘起電圧 (オフセット電圧) を測定しても出力は原理的にゼロである.

このコイル対は, 図 1(b)に示すように, 励磁端子 a, b および検出端子 c, d が互いに対角線上に位置する対称構造 (対称型コイル対) であるため, コイルに配線する際に, リード線の取り回しが不便であった. 具体的には, リード線がコイル系をまたぐことによってコンパクト性に欠ける, リード線に流れる電流による外乱の影響を受け易いなどといった問題が生じる. この取り回しの問題は, 例えば, 励磁端子 b および検出端子 d に導線を各 1/2 ターン

ずつ付加し, 端子 a と端子 b, 端子 c と端子 d を近接した構造 (非対称型コイル対) にすることで回避できる. しかし, 8 の字形コイル対としての対称性を犠牲にすることとなり, コイル間の正と負の相互インダクタンスの平衡が崩れオフセット電圧が生じる.

本研究では, リード線の取り回しの不便さを解消し, かつ, オフセット電圧を低減したフレキシブル検出コイルの構造を設計した. また, 試作した検出コイルを, オフセット電圧, 一軸磁気異方性への応答, さらにトルクセンサの入出力特性を測定し, 評価した.

(a) Schematic diagram of a flexible coil

(b) Conductor patterns of a flexible coil. Pads a and b and pads c and d are located on different layers.

Fig. 1 Structure of a flexible coil.

2. フレキシブル検出コイルの設計

オフセット電圧は 8 の字形コイル対の正および負の相互インダクタンスの不平衡により生じる。まず、この相互インダクタンスの定量的な計算方法を述べる。さらに、非対称型コイル対の全ての構成パターンについて相互インダクタンスを計算し、その値が最小となる構造を選択する。

2.1 導線断面の影響

Fig. 2 に今回検討するフレキシブル検出コイルの一邊の断面図を示す。コイルの導線のラインアンドスペースは $100\ \mu\text{m}$ 、厚みは $18\ \mu\text{m}$ 、励磁、検出コイル間の距離は $50\ \mu\text{m}$ 、コイル外周の一邊の長さは $15\ \text{mm}$ である。まず、相互インダクタンスの計算において、励磁コイルと検出コイルの各導線断面に流れる電流分布の影響を無視できるか否かについて考える。ここでは、この影響が最大となる各コイルの導線が最も近接した平行線路間について考える。

導線断面を考慮した相互インダクタンスは、有限要素法を用い、導線の長さを無限長とした二次元解析より、空間内の全磁気エネルギーと導線に流れる電流から算出した。また、使用を想定している励磁周波数 $60\ \text{kHz}$ ⁵⁾ において、銅の表皮深さは約 $270\ \mu\text{m}$ と導線の厚み $18\ \mu\text{m}$ および幅 $100\ \mu\text{m}$ に比べても充分に大きいので、有限要素法は直流解析で行なった。励磁、検出コイルに流れる電流 I の向きが共に同じ場合の磁気エネルギーを W_1 、互いに逆の場合の磁気エネルギーを W_2 とすると、相互インダクタンス M は、

$$M = (W_1 - W_2) / 2I^2 \quad (1)$$

から求められる。導線断面を無視した導線間の相互インダクタンスは、電流が導線の断面中心にのみ流れると近似し、鎖交磁束より求めるよく知られた計算式⁶⁾より算出した。これら 2 つの方法による解析は、励磁コイル側から代表として選んだ導線 1 と導線 1'~15' 間において行なった。

Table 1 に導線 1 と導線 1', 8', 15' 間の相互インダクタンスを示す。結果より、平行往復線路間の相互インダクタンスは、断面積を考慮した場合と無視した場合の相互インダクタンスは約 95% 以上で一致した。この一致は他の導線間においても確認できた。このことから、今回検討する検出コイルの相互インダクタンスの計算において、導線断面の影響は無視できるとしてよい。

Fig. 2 Cross-section of a flexible coil.

Table 1 Mutual inductances calculated by an approximation formula and by the FEM.

Conductor number of pickup side	# 1'	# 8'	# 15'
Approximation formula (μH)	1.54	0.47	0.31
FEM (μH)	1.57	0.46	0.29
Error (%)	-1.59	3.03	5.06

2.2 8 の字形コイル対の相互インダクタンス

Fig. 3 に 8 の字形コイル対の相互インダクタンス計算のためのモデル図を示す。8 の字形コイル対は、励磁コイルを A と B、検出コイルを A' と B' の 4 つの直角二等辺三角形に分けて考えることができる。つまり、8 の字形コイル対における励磁側コイルと検出側コイル間の相互インダクタンス M は、

$$M = M_{AA'} + M_{AB'} + M_{BA'} + M_{BB'} \quad (2)$$

と表される。

ここで A, A' 間の相互インダクタンス $M_{AA'}$ の具体的な計算方法について述べる。2.1 より電流は導線の断面中心にのみ流れるとする。A の導線 1~4, A' の導線 1'~4' には、それぞれの導線が $N_1 \sim N_4$, $N_1' \sim N_4'$ 本並ぶとすると、相互インダクタンス $M_{AA'}$ は、A の導線の各線分と A' の導線の各線分のすべての組み合わせに対して存在する相互インダクタンスの総和として求められる。また、直交する線分間の相互インダクタンスは 0 であることに注意すれば、 $M_{AA'}$ は、

$$\begin{aligned} M_{AA'} = & \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_1'} M_{12'(i,j)} - \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_3'} M_{13'(i,j)} - \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_4'} M_{14'(i,j)} \\ & - \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_1'} M_{21'(i,j)} + \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_3'} M_{23'(i,j)} + \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_4'} M_{24'(i,j)} \\ & + \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_1'} M_{31'(i,j)} - \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2'} M_{32'(i,j)} \\ & + \sum_{i=1}^{N_4} \sum_{j=1}^{N_1'} M_{41'(i,j)} - \sum_{i=1}^{N_4} \sum_{j=1}^{N_2'} M_{42'(i,j)} \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。ただし、電流の向きは各コイルにおいて時計回りとする。 $M_{AB'}$, $M_{BA'}$, $M_{BB'}$ についても同様に表わすことができる。

ここで、 M_{12} , M_{21} は平行配線間の相互インダクタンス、それ以外は 2 つの線分の成す角度が 45° の斜め配線間の相互インダクタンスである。導線断面を無視した 2 つの線分間の相互インダクタンスは、Neumann の公式によって容易に計算できる⁷⁾。

Fig. 3 Segmentation for the calculation.

2.3 相互インダクタンスが最小となる検出コイル

励磁コイルと検出コイルを各 1/2 ターンずつ付加し各端子が近接させた非対称型コイル対は全ての場合を考慮すると 36 通りある。これは一方のコイルで考えた場合、コイルを水平方向に反転、垂直方向に反転、反転なしの 3 通りと、コイルを 180 度内面回転するか否かの 2 通りがあるため、 $3 \times 2 = 6$ 通りある。他方のコイルの場合を合わせると $6 \times 6 = 36$ 通りになる。しかし、これらの場合には、コイル対を反転または 180 度内面回転させると構造が重複するものが数多くありそれらを同一視すると 4 通りに絞ることができる。

Fig. 4 に従来の対称型コイル対および 4 通りの非対称型コイル対のパターンのターン数を減らした簡略図を示す。パターン A は対称型コイル対の各コイルに導線を時計回りに 1/2 ターンずつ付加したコイル対、パターン B はパターン A の検出コイルを垂直方向を軸に反転させたコイル対、パターン C はパターン A の検出コイルを 180 度内面回転させたコイル対、パターン D はパターン B の検出コイルを 180 度内面回転させたコイル対である。

Table 2 に各コイルパターンにおける相互インダクタンスを示す。結果より、非対称型の中で、パターン A、C において相互インダクタンスが最も小さいことが確認できた。

Symmetric coil pair.

(a) Pattern A.

(b) Pattern B.

(c) Pattern C.

(d) Pattern D.

Fig. 4 Structural patterns of a flexible coil. The numbers of turns of the coil are reduced for simplicity.

Table 2 Mutual inductance of coil patterns.

Coil patterns	Sym. coil pair	A	B	C	D
Mutual inductance (nH)	0	11.6	62.0	-11.6	85.1

3. フレキシブル検出コイルの性能評価

従来の対称型コイル対に加え、非対称型コイル対のうちパターン A およびパターン B のフレキシブル検出コイルを試作し、これらのオフセット電圧および一軸磁気異方性への応答、さらにトルクセンサの入出力特性を比較し、軸トルクセンサとしての基本性能について評価した。

3.1 オフセット電圧

オフセット電圧は、空心のフレキシブル検出コイルにおいて、励磁コイルに交流電流を流し、検出コイルに誘起される電圧をロックインアンプで同期整流し測定した。測定条件は、励磁電流を 300 mA、励磁周波数を 60 kHz とした。結果を Table 3 を示す。結果より、Table 2 で相互インダクタンスがより小さくなったパターン A のオフセット電圧の方が低いことがわかる。また、相互インダクタンスの計算方法の有効性は、各パターンにおける Table 2 で示した相互インダクタンス および Table 3 で示したオフセット電圧の比（相互インダクタンス/オフセット電圧）より確認できる。これは、オフセット電圧は 8 の字形コイル対の相互インダクタンスと比例関係であるためである。この結果、比は、パターン A で約 0.19、パターン B で約 0.17 と近い値を示し、相互インダクタンスの計算方法の有効性を確認できた。

Table 3 Offset voltage of coil alone.

Coil patterns	Offset voltage (mV)
Sym. coil pair	0.6
Pattern A	4.2
Pattern B	25.2

(Excitation current = 300 mV)

3.2 一軸磁気異方性への応答

一軸磁気異方性への応答は、励磁コイルに交流電流を流し、一軸磁気異方性を持つ磁性体を近接させてコイル系に対して 360 度回転させたときに検出コイルに誘起される電圧をロックインアンプで同期整流し測定した。一軸磁気異方性は、Fig. 5 に示すように、幅 1 mm にスリットした長さ 60 mm のアモルファスリボン(METGLAS2714A)を多数平面のプラスチックシート上に一方方向かつ密に並べることによって作り出すことができる。これは、細長い磁性体は長軸方向に磁化容易軸を持つためである。本論文では、このシートを一軸磁気異方性シートと呼ぶこととする。このシートの大きさは幅が 60 mm、長さが 60 mm である。軸トルクセンサ用検出コイルとして応用する場合、フレキシブル検出コイルの応答は、一軸磁気異方性印加方向が 45, 135, 225, 315 度で最大出力点を同振幅で示し、符号は交番しなければならない²⁾。ただし、Fig. 1(b)の端子 c, d 方向が 0 度方向である。

測定条件は、励磁電流を 50 mA、励磁周波数を 60 kHz、同期位相を出力が最大となる 69.8 度とした。また、検出コイルと一軸磁気異方性シート間の空隙は、0.3 mm、フレキシブル検出コイルの背面には、バックヨークとしてコイル面と同形状のアモルファス薄帯 (METGLAS 2714A) を一枚貼付した。

Fig. 6 および Fig. 7(a), (b)に一軸磁気異方性印加方向に対する出力電圧を示す。結果より、印加方向が 45, 135, 225, 315 度のときの出力は、対称型コイル対および非対称型コイル対パターン A においてほぼ一致し、共に軸トルクセンサ用検出コイルとしての応答を確認できた。しかし、非対称型コイル対パターン B は、45, 225 度方向の出力が 135, 315 度方向の出力に比べ大きく、軸トルクセンサ用検出コイルとしての応答を示さない。これはオフセット電圧が約 30 mV もあり、この電圧が誘起電圧に 45, 225 度方向で同位相、135, 315 度方向で逆位相となって重畳されたためである。

3.3 入出力特性

Fig. 8 に 3.2 で軸トルクセンサとしての一軸磁気異方性への応答が確認できた対称型コイル対および非対称型コイル対パターン A のトルクセンサの入出力特性を示す。測定条件は、励磁電流を 300 mA、励磁周波数を 60 kHz、同期位相を出力が最大となる -137 度とした。また、検出コイルと軸間の空隙が 0.3 mm、検出コイルにはバックヨークとしてアモルファス薄帯 (METGLAS 2714A) を一枚貼付した。また、軸には優れた磁気特性と機械強度を備えた SUS403 のスリーブと SUS304 の軸による冷やしバメ軸⁸⁾を用いた。結果は、対称型コイル対と非対称型コイル対パターン A の入出力特性が約 95 %以上で一致した。つまり、パターン A の空心状態で生じていたオフセット電圧は、フレキシブル検出コイルにバックヨークを貼付し軸に取り付けることで無視できる。これはオフセット電圧が出力振幅

に対して十分に小さくなるためである。また、出力特性の非線形性は、感度が高いとダイナミックレンジが小さくなるのが一般的であることから、本トルクセンサの場合、SUS403 のスリーブ厚が 500 μm と薄く高感度であり、大きな印加トルクによって出力が飽和したことによって現れた。

Fig. 5 Sheet with uniaxial magnetic anisotropy.

Fig. 6 Output of a symmetric coil pair.

(a) Pattern A.

(b) Pattern B.

Fig. 7 Output of an asymmetric coil pair.

Fig. 8 Input-output characteristics.

4. まとめ

本論文では、対称構造を持つフレキシブルコイルへのリード線の結線を容易にするために、非対称な構造へ変形し、可能なコイルパターンの中でオフセット電圧が最小となるコイル設計を実現した。設計は、励磁コイルと検出コイルへ各 1/2 ターンずつ導線パターンを付加し各端子を近接させた非対称型コイル対全てについて相互インダクタンスを計算し、その値が最小となる構造を選択することで行なった。計算の結果、相互インダクタンスは、リード線の取り回しの向きや位置によって大きく変化し、対称型コイル対の各コイルに導線を 1/2 ターンずつ付加したコイル対 (本文パターン A) およびこのコイル対の検出コイルを 180 度内面回転さ

せたコイル対 (本文パターン C) で最小となった。また、本設計によって試作したフレキシブル検出コイルの性能をオフセット電圧、一軸磁気異方性への応答、さらにトルクセンサの入出力特性を測定した。その結果、オフセット電圧は、非対称型コイル対の中で最小となった。一軸磁気異方性への応答は、異方性印加方向が 45, 135, 225, 315 度で最大出力点を同振幅で示し、符号は交番する軸トルクセンサとしての出力パターンを示した。入出力特性は、従来の対称型コイル対とほぼ一致し、空芯状態で生じていたオフセット電圧の影響は、フレキシブル検出コイルにバックヨークを貼付し軸に取り付けることでほぼ無視できる程度まで小さくできた。

以上のことより、結線が容易でオフセット電圧を低減したトルクセンサ用フレキシブル検出コイルを開発することができた。

References

- 1) S. Larsson and I. Andersson: *Control Engineering Practice*, **16**, 505 (2008).
- 2) O. Dahle: *ASEA Journal*, **33**, 3, (1960).
- 3) I. Sasada, Y. Etoh, and K. Kato: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 3309 (2006).
- 4) I. Sasada and M. Akinaga: *J. Appl. Phys.*, **91**, 7792 (2002).
- 5) I. Sasada and F. Koga: *J. Appl. Phys.*, **75**, 5916 (1994).
- 6) K. Goto, and S. Yamasaki: *Shokai Denjigakuenshuu* (in Japanese), p. 278 (Kyoritsu Shuppan, Tokyo, 1970).
- 7) F. W. Grover: *Inductance Calculations*, p. 55 (Dover Publications, New York, 1946).
- 8) Y. Eto, T. Kato, Y. Habata, and I. Sasada: *Tech. on Magnetism, IEE Japan*, MAG-05-35 (2005) (in Japanese)

2008年3月17日受理, 2008年7月14日採録