磁歪式トルクセンサにおけるシェイキング磁界重畳の効果

Effect of Superposition of a Shaking Field in a Magnetostrictive Type Torque Sensor

上野新太郎・小松大祐・児塔典沙・脇若弘之

信州大学, 長野市若里 4 - 17 - 1 (〒380-8553)

S. Ueno, D. Komatsu, T. Koto, and H. Wakiwaka

Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi, 380-8553, Nagano, Japan

There are many requirements for measuring torque, such as non-contact with the shaft, small size of the measurement device, and simple installation. Other requirements include no special processing in the shaft and cost-effectiveness. Therefore, we have proposed a magnetostrictive-type torque sensor for a steering shaft using an inverse magnetostrictive effect.

Generally, a magnetostrictive-type torque sensor for a low-carbon steel shaft has a large hysteresis to the torque and output fluctuation due to axis rotation. With this sensor, we have shown that the hysteresis on the output voltage can be drastically decreased, if the magnetic shaking method is applied.

Key words: magnetostrictive-type torque sensor, hysteresis, torque-sensitive, magnetic shaking

1. はじめに

トルクの情報は、種々の機械あるいは電気機械系の高度な制御に必要とされ、構造が簡単で非接触式のトルクセンサは強く望まれている¹⁾。特に、産業機器の分野において、トルクを検出し、制御することは、省エネ化や高機能化を可能にする。また、軸の劣化や過負荷をセンサの出力電圧から知ることができるため、保守の面でも大きな効果が期待できる。

トルクセンサの中でも本論文で述べる磁歪式トルクセンサ (Magnetostrictive type Torque Sensor: 以下、MTS と略記) は、軸に接触しないで簡単にセンサを装着し、トルクを検出することができるので、多くの機器に安価でセンサを導入することが可能である。また、軸には特別な加工が必要でないため、軸の強度を高くすることができ、MTS における許容印加トルクは、ひずみゲージ式、位相差式のトルクセンサよりも大きい。

しかし、MTS には、トルクに対するヒステリシスが大きい、軸の回転に伴う出力電圧の変動が大きい、温度依存性が大きい、外部磁界や時間経過により軸の磁化状態が変化するなど問題点も多い^{2), 3)}。

このトルク (応力) に対するヒステリシスを低減するため、シャフトに流す励振磁界を大きくする方法が一般に取られているが、この方法では高励振周波数の場合、電力損失が大きく、発熱の恐れがあり適用に関して制限を受ける^{2)~4)}。他にも、直交シェイキング法と呼ばれる、振幅の比較的大きな交流磁界 (シェイキング磁界) を励振磁界と直交方向に加えることによって磁壁を連続的に振動させ、磁壁のピンニング力を実効的に低減させる方法^{4)~6)}や、トルク (応力) 値を測定する直前にシャフトを脱磁する事によって、磁壁のピンニング力や出力電圧の変動を低減させる方法などがある^{6)~8)}。

そこで本論文は、トルクに対するヒステリシスを低減するため

に、励振磁界に異なる周波数の交流磁界を重畳する、磁気シェイキング法の適用を提案し検討を行った。同手法はヒステリシスの低減に大きな効果があり、同時にトルク感度が増加する効果もあることを示し、シェイキング磁界の周波数への依存性についても検討したため報告する。以下に本論文の内容について示した。

- (1) 磁歪式トルクセンサの基本構成と動作原理
- (2) シェイキング条件によるトルク感度の増加とヒステリシス低減効果

2. 磁歪式トルクセンサの基本構成と動作原理

2.1 MTS の動作原理

Fig. 1 に MTS の概観図を示した。MTS はリング状の 2 極構造であり、円周方向の磁気異方性の検出を行う。シャフト円周方向に A ~ D の 4 つの検出コアがあり、それぞれの検出コアに検出コイルを巻きつけてある。励振コイルは、シャフトを囲むよう巻きつけることで、励振コイルの個体差を考慮する必要がなく、常に、軸の円周方向に均一な磁界を生じさせることが可能である。無トルク時は、全ての検出コアに流れる磁束の量は等しい。トルクが加わると、シャフト表面 ±45° 方向に応力差が生じ、逆磁歪効果の影響より、磁化容易軸と磁化困難軸が現れる。これにより、検出コア A と B、および C と D に流れる磁束の量に差が生じて、これらの差をとることでトルクに比例した誘起電圧が検出コイルから検出される。MTS とシャフト間のギャップ g は 0.5 mm である。式(1)に検出電圧 V_D とトルク T の関係式を示した。

$$V_D = a_\mu(\mu_1 - \mu_2) = a(\sigma_1 - \sigma_2) = a_T T \quad [\text{V}] \quad (1)$$

ここに、 a_μ : 比透磁率差に対する感度 [V / Pa], μ_1, μ_2 : シャフト長手 ±45° 方向の比透磁率, a : 主応力差に対する感度 [V / Pa], σ_1, σ_2 : シャフト長手 ±45° 方向の応力 [Pa], a_T : トルク感度 [V / (N · m)]

Fig. 1 Appearance of the MTS (unit : mm).

Fig. 2 Block diagram of the torque measurement system.

Table 1 Specifications of coils in the MTS.

Items	Number of turns	Diameter of wire
Exciting coil	250 turns × 2 coils	0.2 mm
Detecting coil	400 turns × 4 coils	0.1 mm

Table 2 Composition of S25C (unit : %).

Items	C	Si	Mn	P	S
S25C	0.22 ~ 0.28	0.15 ~ 0.35	0.30 ~ 0.60	~ 0.03	~ 0.035

Fig. 3 Concept chart of the output voltage to the torque.

2.2 信号処理回路のブロック図

MTS の検出コイルは、トルクに比例した誘起電圧が検出できるように接続され、その誘起電圧は信号処理回路へ入力される。Fig. 2 にトルク測定システムのブロック図を示した。検出電圧 V_h は増幅器を通り、位相検波回路で同期整流される。その後、ローパスフィルタを通過し、出力電圧 V_o となる。正トルクは + の直流電圧、負トルクは - の直流電圧に変換される。

2.3 測定環境

Table 1 に、MTS におけるコイルの仕様を示した。また、Table 2 に、シャフトの組成を示した。測定対象となるシャフトは、機械構造用炭素鋼鋼材 S25C である。S25C に 5 kA/m の磁界を加えたときの保磁力は 0.3 kA/m であり、残留磁束密度は 0.87 T、また飽和磁束密度は 1.61 T である。

2.4 トルク感度とヒステリシスの定義

Fig. 3 に、トルクに対する出力電圧の概念図を示した。トルクと

Fig. 4 Output voltage characteristics vs. the torque in MTS.

($f_e = 1$ kHz, $g = 0.5$ mm, S25C shaft)

Fig. 5 Torque sensitive and hysteresis characteristics vs. the exciting current. ($f_e = 1$ kHz, $g = 0.5$ mm, S25C shaft)

シャフト表面 $\pm 45^\circ$ 方向の比透磁率の間にヒステリシスが存在するため、MTS の出力電圧にも大きなヒステリシスを持つ。

ここで、最大トルク ± 49 N · m を加えた時のトルク感度 a_T とヒステリシス h を、以下の式(2), (3)のように定義した。

$$a_T = \frac{V_m}{T_m} \quad [\text{V} / (\text{N} \cdot \text{m})] \quad (2)$$

$$\varepsilon_h = \frac{V_h}{V_m} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

ここに、 V_m : 最大トルクを加えた時の出力電圧差 [V]、 V_h : 同一トルクで最大出力電圧差 [V]、 T_m : 最大トルク (= 98 N · m) [N · m]

3. MTS のトルク出力特性

Fig. 4 に、MTS によるトルクに対する出力電圧特性を示した。正トルクと負トルクの出力電圧に対称性があり、シャフトの逆磁歪効果を直接利用できていることが確認できた。

Fig. 5 に、励振電流に対するトルク感度特性、ヒステリシス特性を示した。励振電流 I_e の増加に伴いトルク感度は上昇、ヒステリシスは低減した。ここで、励振電流 $I_e = 30$ mA の時トルク感度 a_T は 0.3 mV / N · m となった。一方、ヒステリシス h は 18 % となった。そこで、ヒステリシスが 18 % と比較的大きい $I_e = 30$ mA を励振条件と設定して、これに励振磁界とは異なる周波数の交流磁界を重ねる、磁気シェイキング法の効果を以下で述べる。

Fig. 6 Block diagram of the torque measurement system in the magnetic shaking method.

Fig. 7 Superposition waveform of the exciting power source and shaking (\$f_e = 1\$ kHz, \$f_s = 5\$ kHz).

4. シェイキング磁界を重畳した時のトルク出力特性

4.1 磁気シェイキング法概念

センサにおいて、ヒステリシスの低減は重要である。強磁性体に応力が作用した場合、磁化は応力方向に対して、磁壁の移動と磁化の回転が起きる。しかし、測定対象内の空孔、夾雑物などにより、磁壁がピン止めされ、全ての磁壁の移動と磁化の回転が起きるわけではない。つまり、磁壁のピンニング力が大きいと、磁壁の不可逆的移動によりヒステリシスを生じる。

磁気シェイキング法は、励振磁界とは異なる周波数の交流磁界を重畳させ、磁壁を連続的に振動させることで、磁壁のピンニング力を低減させる方法である。

Fig. 6 に、磁気シェイキング法におけるトルク測定システムのブロック図を示し、Fig. 7 に、励振用波形とシェイキング用波形の重畳波形の一例を示した。直接的に、励振コイルに励振磁界とは異なる周波数のシェイキング磁界を重畳させ、位相検波回路で励振磁界に起因した出力電圧成分のみ同期整流させ検出する。ここで、本論文の磁気シェイキング法は、直交シェイキング法^{9)~7)}と異なり、励振磁界の方向にシェイキング磁界を重畳させるだけでなく、特別な構造を必要としない。

励振用波形とシェイキング用波形の入力電圧の関係式を、以下の式(4), (5)に示した。

$$v_e = V_e \sin(2 f_e t) \quad [\text{V}] \quad (4)$$

$$v_s = V_s \sin(2 f_s t) \quad [\text{V}] \quad (5)$$

Fig. 8 Torque-sensitive characteristics vs. shaking current on superposition of shaking frequency \$f_s\$ \$n f_e\$

(\$f_e = 1\$ kHz, \$I_e = 30\$ mA, \$g = 0.5\$ mm, S25C shaft).

Fig. 9 Hysteresis characteristics vs. shaking current on superposition of shaking frequency \$f_s\$ \$n f_e\$

(\$f_e = 1\$ kHz, \$I_e = 30\$ mA, \$g = 0.5\$ mm, S25C shaft).

ここに、\$v_e\$：励振用波形の瞬時電圧 [V]、\$V_e\$：励振用波形の実効電圧値 [V]、\$f_e\$：励振周波数 [Hz]、\$v_s\$：シェイキング用波形の瞬時電圧 [V]、\$V_s\$：シェイキング用波形の実効電圧値 [V]、\$f_s\$：シェイキング周波数 [Hz]

4.2 シェイキング周波数を励振周波数の半整数倍とした時

励振条件は、ヒステリシスが 18 % である励振周波数 \$f_e = 1\$ kHz、励振電流 \$I_e = 30\$ mA に設定して、重畳させるシェイキング周波数 \$f_s = 2.5, 5.5, 7.5\$ kHz と励振周波数の半整数倍として加算した。これは、励振用波形とシェイキング用波形の重畳波形を常に変化させるためである。

Fig. 8 に、シェイキング周波数 \$f_s\$ \$n f_e\$ 重畳時におけるトルク感度特性を示した。いずれのシェイキング周波数 \$f_s\$ においても、シェイキング電流 \$I_s\$ を増加するとトルク感度は飽和傾向を示しながら上昇することが分かった。シェイキング磁界を重畳させることで、シャフトの磁化特性における透磁率を高め、かつ保磁力を減少させる⁹⁾。従って、シェイキング電流が低い範囲ではトルク感度は増加したが、シェイキング電流を 100 mA まで増加させることで、シャフトの飽和領域まで磁界が印加され透磁率が減少したためトルク感度が減少したと考えられる。

Fig. 9 に、シェイキング周波数 \$f_s\$ \$n f_e\$ 重畳時におけるヒステリシス特性を示した。いずれのシェイキング周波数 \$f_s\$ においても、シェイキング電流 \$I_s\$ を印加する前 (\$I_s = 0\$ mA) から 100 mA まで増加すると、ヒステリシスは 18 % から 1 % 以下に低減した。

Fig. 10 Torque-sensitive and hysteresis characteristics vs. shaking current on superposition of the shaking frequency $f_s = 4 \text{ kHz}$ ($f_e = 1 \text{ kHz}$, $I_e = 30 \text{ mA}$, $f_s = 4 \text{ kHz}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, S25C shaft).

Fig. 11 Torque-sensitive and hysteresis characteristics vs. shaking current on superposition of the shaking frequency $f_s = 5 \text{ kHz}$ ($f_e = 1 \text{ kHz}$, $I_e = 30 \text{ mA}$, $f_s = 5 \text{ kHz}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, S25C shaft).

4.3 シェイキング周波数を励振周波数の整数倍とした時

励振条件は、励振周波数 $f_e = 1 \text{ kHz}$ 、励振電流 $I_e = 30 \text{ mA}$ に設定して、重畳させるシェイキング周波数 $f_s = 4, 5 \text{ kHz}$ と励振周波数の整数倍（偶・奇数倍）に設定して加算した。

Fig. 10 に、シェイキング周波数 $f_s = 4 \text{ kHz}$ 重畳時におけるトルク感度特性、ヒステリシス特性を示した。ヒステリシス特性において、シェイキング電流 I_s を印加する前($I_s = 0 \text{ mA}$)から 100 mA まで増加すると、ヒステリシスは 18% から 1% 以下に低減した。トルク感度特性において、シェイキング電流を増加すると、飽和傾向を示しながら上昇することが分かった。

Fig. 11 に、シェイキング周波数 $f_s = 5 \text{ kHz}$ 重畳時におけるトルク感度特性、ヒステリシス特性を示した。ヒステリシス特性において、シェイキング電流 I_s を 100 mA まで増加すると、ヒステリシスは 18% から 1% 以下に低減した。トルク感度特性において、シェイキング電流を増加すると、トルク感度はシェイキング電流にほぼ比例して上昇した。

PSD を通過することで、Fig. 7 より、シェイキング周波数が励振周波数の偶数倍であるとき、シェイキング用波形の振幅は、励振用波形との初期位相角とは無関係に加算されLPF で平均化されるため、直流成分はゼロになる。一方、奇数倍であるとき、励振用波形との初期位相角が 0° であれば、シェイキング用波形の半波周期分の振幅がLPF で平均化されるため、出力電圧を強調する結果となり、トルク感度が上昇した。

これに対して、シェイキング用波形が奇数倍で初期位相角 90° の場合、シェイキング用波形の半波周期分の振幅の重みは存在せず、トルク感度は数%しか上昇しなかった。

また、消費電力における磁気シェイキング法の効果として、励振電流 $I_e = 30 \text{ mA}$ 、シェイキング電流 $I_s = 80 \text{ mA}$ を加え、約 1 W までの低消費電力領域において、ヒステリシス特性は単一励振とほぼ変わらなかった。トルク感度特性においては、シェイキング周波数が奇数倍で初期位相角が 0° の時、単一励振よりトルク感度が 10% 程度増加した。発熱においては、コイル系および軸に影響を及ぼす程の問題はなかった。

5. おわりに

本論文では、トルクに対するヒステリシスを低減するために、励振磁界とは異なる周波数の交流磁界を重畳する、磁気シェイキング法を適用し検討を行った。以下に、本論文で明らかになったことを示す。

- (1) シェイキング周波数を励振周波数の半整数倍とした時、シェイキング磁界の振幅を大きくすることで、ヒステリシスを 1% 以下に低減でき、トルク感度は飽和傾向を示すことが分かった。
- (2) シェイキング周波数を励振周波数の偶数倍とした時、シェイキング磁界の振幅を大きくすることで、ヒステリシスを 1% 以下に低減でき、トルク感度は飽和傾向を示した。
- (3) シェイキング周波数を励振周波数の奇数倍とした時、シェイキング磁界の振幅を大きくすることで、ヒステリシスを 1% 以下に低減でき、トルク感度はシェイキング磁界にほぼ比例して上昇することが分かった。PSD を通過することで、励振用波形との初期位相角が 0° であれば、シェイキング用波形の半波周期分の振幅がLPF で平均化されるため、出力電圧を強調する結果となり、トルク感度が上昇した。

References

- 1) I. Sasada, S. Uramoto, and K. Harada: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **10**, 379 (1986).
- 2) H. Wakiwaka, M. Mitamura, S. Yamada, Y. Ito, T. Kamada, and M. Horiuchi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **25**, 963-966 (2001).
- 3) H. Wakiwaka, M. Mitamura: *Sensors and Actuators*, **A91**, 103-106 (2001).
- 4) E. Nagano, I. Sasada, and K. Harada: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **15**, 485-488 (1991).
- 5) I. Sasada, E. Nagano, and K. Harada: *J. Appl. Phys.*, **69**, 4919-4921 (1991).
- 6) H. Wakiwaka, M. Mitamura, K. Banno: *Technical Meeting on Magn. IEEJ, MAG-99-68*, 37-39 (1999).
- 7) H. Wakiwaka, M. Kobayashi, and H. Yamada: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **14**, 387 (1990).
- 8) H. Wakiwaka, M. Mitamura, Y. Ito, M. Horiuchi, T. Kamada: *Electromagnetics and Dynamics*, **224**, 319-322 (2001).
- 9) V. Kelha, R. Peltonen, and Borje Rantala: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-16**, 575-578 (1980).

2004 年 10 月 6 日受理，2005 年 2 月 8 日採録