Wiegand Wire を用いた回転加速度計の性能[†]

松 木 英 敏*・渡 辺 忠 昭*・村 上 孝 一*

Performance of Angular Accelerometer Using Wiegand Wire

Hidetoshi MATSUKI*, Tadaaki WATANABE* and Koichi MURAKAMI*

Wiegand wire generates a sharp voltage pulse in a coil wrapped around the wire when an applied magnetic field crosses a threshold intensity. Few papers have reported the characteristics of the output pulse from the point of practical applications.

Detailed study have been performed on the frequency characteristics of the amplitude of output pulse and of the threshold intensity of the applied magnetic field.

Although the amplitude of the pulse and the threshold value of the applied field depend to some degree on the exciting frequency, the experiments show that the fluctuations of the amplitude of the output pulse and those of the threshold value of the applied field are reduced when the maximum intensity of the applied field is three times as much as the threshold intensity of the field.

According to the results, the angular accelerometer using Wiegand wire has been made, which can measure angular speed and acceleration within an error of 1% in the wide range of angular speed.

1. はじめに

J.R. Wiegand により開発された Wiegand Wire は、これに適当な大きさの交番磁界を印加すると、Wire 内の磁区の反転に伴ない、Wire に巻きつけたコイル、あるいは Wire 近傍に設定したコイルにパルス状の誘起電圧が発生する。その誘起電圧は、磁界の印加速度に無関係にはば一定波高値を有する電圧となり、この性質を利用すると広範囲の速度計測の可能な速度計を作製できることが報告されている^{1)~4)}。しかし、Wire に印加する磁界強度や周波数が、パルス

状誘起電圧の波高値および発生位相ゆらぎに及ぼす影響や、それに伴う計測限界など、Wiegand Wire の基本特性とこれを用いた速度計の性能の限界について実用の立場から詳細な検討を加えた報告はない。筆者らは、これらの問題を明らかにする目的をもって、いくつかの基礎的な検討を行った。

まず、Wiegand Wire を用いた回転速度・加速度計を試作し、Wiegand Wire の有用性を確かめると共に、パルス状誘起電圧の波高値やその発生位相ゆらぎに対する印加磁界強度および周波数の及ぼす影響などについて、速度・加速度計を実用する立場から詳細な検討を加え、速度計、加速度計用の性能限界など、Wiegand Wire 速度検出素子としての諸条件について明らかにした。

本論文は、これらの成果について報告するものである。

2. 試作計測装置の構成

Fig. 1 は、試作装置に用いた Wiegand Wire で、直径 0.25 mmφ の Wiegand 社製である。Fig. 2 にその直流 B-H 曲線を示す。同図より明らかなごとく、印加磁界強度が 2.4×10^3 A/m 付近において急激な磁束変化が発生することが了解される。

Fig. 3 は、本方式による計測法の基本構成である。同図(a)に示すごとく、被計測体を円筒とし、その外周に 30 mm 程度の長さに切断された Wiegand Wire を等間隔にとりつけている。被計測体側面には永久磁石を配置し、励磁用磁界を Wire の長さ方向に与えるように構成している。今、被計測体が回転し、Wire が永久磁石 B の近傍を通過する際にたとえば一方に磁化されると Wire の磁化の方向が急に反転し、読みだしヘッドに巻かれた検出コイルにパルス状の誘起電圧を発生させる。

Fig. 3(b)の $P_1, P_2, \dots, P_m$ はこの Wiegand Wire の極性反転に伴ない発生するパルス状誘起電圧を示し

[†] 計測自動制御学会東北支部第53回研究集会で一部発表 (昭50・11)

* 東北大学工学部 仙台市荒巻字青葉

* Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai (Received May 12, 1981)

(Revised August 27, 1981)

Fig. 1 Wiegand wire used for the angular accelerometer

Fig. 2 Static B-H curve of Wiegand wire

たものであり、以下においては Wiegand パルスと称する。同図(c)は周期 t_0 [s] の計測用基準パルスを示す。

計測は区間 I, II で行い、Wiegand パルス間隔に対応する基準パルス数を計数したのち、区間 II' において演算により回転速度を求めて表示することとした。これにより、特に低速度領域における計測時間の短縮化が得られる。

今、区間 I および II における基準パルスの計測数をそれぞれ n_1, n_2 とし、回転数の変化が区間 I および II の時間内に生じたとすると、回転加速度 α は次式で示される。

$$\alpha = \frac{60(N_2 - N_1)}{t_0(n_1 + n_2)} [\text{r. p. m./min}] \quad (1)$$

ただし

$$N_1 = 60/mt_0 n_1 [\text{r. p. m.}] \quad (2)$$

$$N_2 = 60/mt_0 n_2 [\text{r. p. m.}] \quad (3)$$

であり、 m は使用される Wiegand Wire の本数である。

Fig. 4 に、上記の考えに基づいて試作した回転加速度計のブロック線図を示す。演算および計測用基準パルスの制御にはマイクロコンピュータを使用した。演算の過程で得られる回転数も加速度と共に表示でき

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the angular accelerometer (b) Wiegand pulse (c) Clock pulse

Fig. 4 Block diagram of the angular accelerometer

Fig. 5 View of the Wiegand pulse detector A: Permanent magnet; B: Wiegand wire; C: Rotator to be measured; D: Detecting coil

るようにした。

Fig. 5 は、試作した回転加速度計の検出部を示す。図中、Aは永久磁石、Bは Wiegand Wire、Cは被計測体、Dは Wiegand パルス読みだし用のヘッドを示す。永久磁石は既製のものを用いたため、磁石位置を適当に調整し、誘起電圧が適当に検出されるように定めた。被計測体の半径は 50 mm であり、実験上の制約から、Wiegand Wire と読みだしヘッドとの間隔を 10 mm 程度としたため、ヘッドは積層珪素鋼板の磁心に、0.1 mmφ の巻線を 1 万回巻いて使用した。

Fig. 6 は、励磁用磁極の磁界分布を、中心よりの角度 θ の関数として実測したものを示す。

Fig. 7 は、表示の一例であり、回転数 12.5 r.p.m.

Fig. 6 Distribution of the applied magnetic field intensity used for the accelerometer

Fig. 7 Display of the angular accelerometer

回転加速度 $-154 \text{ r. p. m. / min}$ を示している。

試作装置の計測範囲は、試作プログラムのために回転数 4 ないし、 $4,000 \text{ r. p. m.}$ 回転加速度 0 ないし $20,000 \text{ r. p. m. / min}$ に制限されるが、プログラムの短縮化がなされた場合には、Wiegand Wire の速度計加速度計用センサとしての性能限界が問題となる。

したがって、試作装置に用いた Wiegand Wire のセンサとしての諸条件について、さらに詳細な検討を行ってみた。

3. 試作装置の性能限界

加速度計の性能は主に、センサとしての Wiegand Wire の性能限界に依存すると考えられるため、Fig. 8 の回路を用い、試作装置に用いた Wiegand Wire の動特性について検討を行った。図において、 N_1, N_1' が励磁巻線で、インピーダンスを介して交流電源より加勢されている。巻線 N_2, N_2' は検出巻線で、互いに差動的に接続され、巻線によるインダクタンスを補償している。巻数はいずれも 1,000 回とした。#1 が Wiegand Wire を示す。

Fig. 9(a) は、Wiegand Wire を $f \text{ Hz}$ の正弦波交番磁界で励磁したときに得られる Wiegand パルス波高値 E_m を励磁周波数 f に対し実測したものであり、印加磁界強度を種々変えて測定した。同図(b) は各励磁周波数における平均的な誘起電圧波形である。図より、誘起電圧波形は、励磁周波数や印加磁界強度最大値により多少変動が認められるが、本試料においては、印加磁界強度最大値が 8×10^3 ないし $1.2 \times 10^4 \text{ A/m}$ 付近で変動の程度が少なくなることが認め

Fig. 8 Basic circuit for measuring the characteristics of Wiegand wire

(a) Frequency characteristic of the peak value E_m of Wiegand wire

(b) Waveforms of Wiegand pulse

Fig. 9

られた。

Wiegand パルスの電圧時間面積は、Fig. 9(b) より明らかなごとく、ほぼ $24 \mu\text{s} \cdot \text{V}$ と一定であり、波形の差の原因は、主に磁化反転速度の多少の不均一性に基つくことが推測できる。したがって、Wiegand パルスの波高値の変動を軽減し波形を安定化させる手段として、誘起電圧波形を積分したのちの電圧波形を使用することも一つの方法と考えられる⁶⁾。試作装置においてはこの方法を採用している。

実験によれば、正弦波交番磁界に対して Wiegand パルスの発生する位相にもゆらぎが観測されるため、

Fig. 10 Frequency characteristic of maximum fluctuation $\delta\theta$ of the phase angle at which Wiegand pulse is generated

Wiegand パルス間隔の計測に基づいた加速度計を構成するには問題となる事項である。

Fig. 10 は、Wiegand パルスの発生する時刻を正弦波交番磁界に対する位相角で表現し、励磁の連続した 100 周期にわたる測定値の最大ゆらぎ幅についての結果を測定したものである。図より明らかなごとく、印加磁界強度最大値が 8×10^3 A/m 以上であれば、位相角のゆらぎ $\delta\theta$ を 2° 以内に抑えることが可能であることがわかった。

Wiegand パルスの発生する位相にこのようなゆらぎが存在するとともに、このゆらぎのもとで計測された回転加速度の誤差 $\delta\alpha$ は、励磁磁界分布を正弦的とすれば、次式で与えられる。

$$\delta\alpha \approx \frac{(m+1)\gamma\delta H}{\pi\sqrt{H_m^2 - H_0^2}} \times 100[\%] \quad (4)$$

ただし、 m は使用する Wiegand Wire の本数、 H_m は印加磁界強度最大値、 H_0 は Wiegand パルスの発生するときの磁界強度、 R は被計測体半径であり、 γ は磁界の存在する領域の長さと、被計測体円周との比である。

Fig. 11 に、(4) 式より求めた計測回転加速度のゆらぎ誤差 $\delta\alpha$ の計算の一例を示した。ただし計算においては $\gamma=1$ とした。回転数についても同様の傾向が認められる。図より、印加磁界強度最大値 H_m の増加に伴ないゆらぎ誤差 $\delta\alpha$ は減少し、1 本の Wire を用いた場合、1% 以内のゆらぎ誤差を実現するためには、少なくともパルスの発生する磁界強度の 3 倍程度の強さの磁場の印加が必要であることが了解される。

つぎに、励磁速度が増大してくると、通常の変圧器起電力が無視できなくなる。これは Wiegand Wire の場合には、Fig. 2 から推測されるように、ほぼ残留インダクタンスに起因する量とみなすことができる。実験に用いた試料について変圧器起電力を評価すれば、50 Hz において単位巻線あたり $3\mu\text{V}$ 程度であり、この値が Wiegand パルス波高値の半分程

Fig. 11 Error of the measurement of angular accelerometer due to the fluctuation of the magnetic field intensity at which Wiegand pulse is generated

度となる励磁周波数は 4 kHz 程度である。一方、Wiegand 効果による磁束変化には約 $100\mu\text{s}$ の時間を要する。これは周波数 4 kHz の周期の 40% に相当し、Wiegand パルスによる計測の上限の存在を示唆している。

他方、励磁速度の下限については、実験により、励磁周波数が 0.008 Hz の場合でも Wiegand パルスは発生しており²⁾、実用上は問題ないと考えられる。

以上の結果から、1 本の Wiegand Wire によって 0.4 ないし 240,000 r. p. m. の回転数範囲において、ゆらぎ誤差 1% 以下での計測が可能であると考えられる。このような Wiegand Wire を実用する場合には、周囲環境の Wire に及ぼす影響についても考慮する必要がある。その中で、周囲温度を種々変えた場合の Wiegand パルス波高値の変化の測定例を Fig. 12 に示す。図より明らかなごとく -40°C から $+180^\circ\text{C}$ の温度範囲において、Wiegand パルスに顕著な変化は認められず、Wire の動作温度範囲はきわめて広いことがわかった。

また、周囲磁場が存在する場合には、Wire を非対称交番磁界で励磁した場合と等価となり、読みだしヘッド付近での Wiegand パルス発生抑制や Wiegand パルス発生時刻の変動の生じることが考えられる。この場合、変動速度が被計測体の回転速度と同程度でない限り、プログラム上の処理でその影響の緩和が期待されるが、地磁気程度は読みだしにまったく影響はなく、特に強磁場の存在する領域内で本装置を使用する場合には、周囲磁場の影響を除去するための磁気シールドを施すなどの構成上の工夫を必要とすると考えられる。

Fig. 12 Temperature dependence of the peak value E_m of Wiegand pulse

4. おわりに

以上, Wiegand Wire を用いた回転加速度計について種々の検討を行い, Wiegand パルス特性の励磁周波数による変動を軽減する条件等について明らかにすると共に, Wiegand Wire の性能限界についても検討を加えた. さらに, マイクロコンピュータの使用によって, 現在入手可能な Wiegand Wire によって

も, 誤差 1% 以下の精度で広範囲にわたる計測が可能であることがわかった.

読みだしヘッドの形状や設定位置の最適化がなされれば, Wiegand Wire を用いた回転加速度計は, 有用な計測器として十分実用化が期待できるものである.

参 考 文 献

- 1) P.E. Wigen: Wiegand Wire; New Material for Magnetic-Based Devices, Electronics, July 100/105 (1975)
- 2) 村上, 渡辺: 複合磁性線を用いた速度計に関する基礎的検討, 計測自動制御学会東北支部第 58 回研究集会資料 (1975)
- 3) R.C. Barker: The Physical Basis of the Wiegand Effect, Interimg Conf. Paper 20-1 (1978)
- 4) 笹田, 原田: Wiegand Wire の特性について, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG 80-40 (1980)
- 5) 松木, 渡辺, 畠山, 村上: Wiegand Wire を用いた試作回転加速度計について, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG 80-104 (1980)