電気標準用ボビンのリード精度の非接触自動測定*

丸山一男** 出口信吉*** 本橋茂之† 吉本 勇**

Automatic Non-contact Measurement of Lead Accuracy in the Bobbin
for Electric Standard Use

Kazuo MARUYAMA, Nobuyoshi DEGUCHI, Shigeyuki MOTOHASHI and Isamu YOSHIMOTO

In order to establish the electric standard system, which was renewed in 1977 in Japan, a precision solenoid for electric standard use, manufactured by winding a copper wire on a quartz bobbin having threads, is required. In the first stage, the lead accuracy of the bobbin was measured using two electric comparator's gauge heads as contact feelers. But this method of measurement has some problems. That is, threads on the bobbin are easy to be damaged during the measurement and it takes a lots of time in the measurement. Therefore, in order to solve these problems, the non-contact feelers are introduced, which consist of microscope, pin photodiode and amplifier. The main results in this reports are as follows: (1) The non-contact measurement of the threads having a large diameter and a small pitch is made possible. (2) The precision of measurement for repeatability expressed by the standard deviation is $0.22 \mu\text{m}$ at maximum. (3) The results in the measurement of cumulative pitch accuracy using non-contact feelers and contact feelers show the same trend in the regression analysis using the method of least squares. (4) The measuring time for cumulative pitch accuracy is shortened to 1/10 compared with that in the case of contact feelers.

Key words: non-contact measurement, electric standard, lead error, pitch error, optical feeler, thread, bobbin

1. 緒 言

1977年より日本の電気標準が新しい方式に切り替えられ、これに伴って電子技術総合研究所では、「量子効果による電気標準に関する研究」というテーマで、純水中の陽子の磁気回転比を精密に決定することになった。この磁気回転比の決定には、直径250 mm、長さ800 mmの石英ガラス製ボビンにピッチ1 mmのねじ溝を設け、これに沿って金めっき銅線を巻いた精密ソレノイドが用いられる¹⁾。

銅線を巻く前のボビンのねじ溝のリード精度（累積ピッチ誤差並びに酔歩を含む累積リード誤差）について、著者らはこれまでに電気マイクロメータ、及び従来から送りねじのリード精度測定に用いられてきた、レーザ干渉を利用した親ねじリード自動測定機²⁾に

よって、接触方式で測定を行ってきた³⁾。しかし、被測定物であるガラスボビンは、直径が大きくピッチが小さいために、測定子をねじ溝にセットすることが困難であり、また測定中にねじ溝を傷つけやすい等の問題があった。このため測定にも時間がかかり、長さ800 mmのボビンのピッチ誤差測定に要する時間は90 min以上にも上っていた。

そこで本研究では、ピンフォトダイオードと差動増幅回路等から成る光学的フィーラ⁴⁾を応用して著者が新たに考案試作した装置と前述の親ねじリード自動測定機を用いて、非接触方式によりボビンのリード精度測定を行ったので、電気マイクロメータを用いた接触方式による測定結果との比較を含めて以下に報告する。

2. 光学的フィーラの原理

光学的フィーラの原理については既に詳しく報告している⁴⁾ので、ここではその概略について述べる。原理の概略を図1に示す。照明装置から来る光は、光源の明るさの変動を補償するためにハーフミラーで2方向に分けられ、一方はピンフォトダイオードPH2で検

* 原稿受付 昭和60年1月24日。昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和57年10月20日)および昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和58年10月15日)にて発表

** 正会員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町4259)

*** 正会員 キヤノン(株)(川崎市中区今井上町53)

† 正会員 東京測範(株)(座間市相武台2-215)

Fig. 1 Principle of optical feeler

出される。もう一方の光は被測定ねじ溝に向かい、対物レンズによって被測定ねじ山の実像を円形のピンホールを持つスクリーン上に結ぶ。さらに、ピンホールを通過した光は、ピンフォトダイオード PH1 で検出される。このようにして 2 個のピンフォトダイオードで検出された光電信号は、差動増幅器で増幅され、ピンホールの中心からのねじフランク像の軸方向変位量に比例した電圧を発生する仕組みとなっている。

3. 測定機全体の構成

図 2 に測定機全体の構成を示し、その主要部分の写真を図 3 に示す。測定機は、本体、光学的フィーラ、レーザ測長システム、さらにデータ処理システムから成る。被測定物であるガラスボビンは、本体の両センタ間に支持されている。光学的フィーラは、ボビンの軸線に対称で、かつ大型の特殊直角三面鏡のコーナポイントを挟んで 180° 位相のずれた、往復台上の 2 か所に固定されている。ボビンの累積ピッチ誤差を測定する場合、光学的フィーラをこのような配置にすること

Fig. 3 Main part of the measuring machine

によって、往復台の姿勢変化等から生じる測定誤差を打ち消すことができ、いわゆる Abbe の原理の置換⁵⁾となる。

往復台は駆動モータ及び本体の親ねじによってボビンの軸方向に移動し、その移動量はレーザ測長システムにより測定される。コンピュータにはレーザ測長システム並びに光学的フィーラから自動的にデータが転送され、ボビンのリード精度の演算が行われると共に、結果は CRT に実時間表示され、さらに X-Y プロッタ及びプリンタに出力される。

なお、本測定機にはレーザ測長システムとして H.P. 社製の 5526 A が用いられ、データ処理システムには汎用性の高い 8 ビットパーソナルコンピュータ・PC-8801 (NEC 社製) が用いられている。データ処理プログラムには、リード精度の演算及び CRT への実時間表示等のほかに、測定精度の検討を行うために繰返し測定 (3 回) の平均計算、繰返し精度の標準偏差計算及び最小二乗法による累積ピッチ誤差の計算等も含まれている。ボビンの累積ピッチ誤差測定の場合を例にとり、図 4 に測定プログラムのフローチャートを示す。

Fig. 2 Construction of measuring machine

Fig. 4 Flow chart of program in the measurement of cumulative pitch error

4. 測定の原理及び方法

4.1 累積ピッチ誤差の測定

光学的フィーラは、図2において前節で述べたような配置となっているが、さらにボビンの軸方向及び半径方向に動き得る微調整機構によって、ねじフランク像がピンホールの中央に来るように位置決めを行い、固定する。この状態で、図5(a)に示す光電信号増幅回路のオフセット調整を行い、2個の光学的フィーラから得られる出力電圧の和が0Vとなるようにする。図5(a)の回路では、差動増幅された光電信号はローパスフィルタによって100 Hz以上の高周波成分が除去され、さらに加算増幅された後、シュミットトリガ回路及びクリッピング回路を通過して5Vレベルの負のパルス信号に変換される。

往復台の移動に伴い（この時、主軸は回転させず、ボビンは両センチ間に固定された状態にある）、このパルス信号はボビンのねじフランク像がピンホールの中央をよぎるたびに順次レーザ表示器に入力され、一方ボビンの実際のピッチは、往復台の移動量として $\lambda/4$ ($\lambda \approx 0.6328 \mu\text{m}$) 単位でコンピュータに入力される。コンピュータではボビンのピッチ誤差が

(a) Schematic diagram of the photoelectric signal amplifier (in the measurement of cumulative pitch error)

(b) Schematic diagram of the photoelectric signal amplifier (in the measurement of cumulative lead error)

Fig. 5

累積演算され、その結果はCRTに実時間表示されると共に、各周辺機器に出力される。

4.2 累積リード誤差の測定

ボビンの酔歩を含む累積リード誤差を測定する場合、図2の破線で示されるように、光学的フィーラは片側だけを用いる*。ねじフランク像は、前節で述べたように微調整機構を用いてピンホールの中央に合わせる。さらに、往復台を手動によって微小移動させ、ピンホールの中央からのねじフランク像の軸方向変位量に対応する光学的フィーラの出力電圧のゲインを調整する。この時、往復台の移動量はレーザ表示器にmm単位で出力される。一方、図5(b)に示す回路によって反転または非反転増幅された光学的フィーラの出力電圧は、A/D変換器よりコンピュータに入力され、CRTにデジタル表示される。これら2つのデータから往復台の移動量と光学的フィーラの出力電圧の関係を求める。

ボビンは測定機本体の主軸に取り付けられている回し板によって回転を伝達され、往復台はこれに伴いボビンの呼称リード(1mm)に従って移動する。主軸には円周上に等間隔にけられた20個の穴を持つ面板を取り付けており、フォトトランジスタとの組合せによって主軸の1/20回転ごとに発生する同期信号がレーザ表示器に入力される。レーザ測長システムによって測定される往復台の移動量は、この同期信号ごとにコンピュータに入力され、往復台の送り誤差 $\Delta\epsilon$ が計算される。一方、ボビンの回転に伴って光学的フィーラから得られる出力電圧は、往復台の送り誤差 $\Delta\epsilon$ が含まれた見かけ上のボビンのリード誤差($E - \Delta\epsilon$)として、先に述べた同期信号ごとにA/D変換器からコンピュータに入力される。コンピュータではこれら2つのデータが加算され、ボビンの酔歩を含むリード誤差 E が累積演算されてCRT及び各周辺機器に出力される。

5. 測定結果及び考察

5.1 累積ピッチ誤差

図6に測定に用いたガラスボビンの形状を示す。1対の光学的フィーラを用いて非接触方式で行ったボビンの累積ピッチ誤差の測定結果を図7に示す。測定はテールストック(T)側からヘッドストック(H)側へ向けて繰返し3回行

* 累積リード誤差をフーリエ展開して考えると、位相を180°ずらし、2個のフィーラを用いて測定されたデータでは、奇数項がキャンセルされて酔歩成分のかなりの部分が打ち消されてしまう。

Fig. 6 Schematic figure of quartz glass bobbin

い、その平均値を5山ごとにプロットした。図7から、累積ピッチ誤差の値はほぼ4 μm の範囲内にあることが分かる。最小二乗法を用いた計算では、累積ピッチ誤差 ΔE はボビンの350山間に対して1.7 μm であった。ただし、測定は片側フランク(T側)についてのみ行ったため、ボビンの有効径相互差 ΔPD による見かけ上のピッチ誤差が含まれており、その大きさは、 $\Delta\text{PD}/(2\sqrt{3})$ で表すことができる。 ΔPD の値は、両側のねじフランクについてピッチ誤差を測定することにより、それらの差から推定することが可能である。一方、三針法によるボビンの有効径の測定では、 ΔPD は全長にわたって1 μm 以内であり、これによって生じるボビンの見かけ上のピッチ誤差は0.3 μm 以下であると考えられる。

なお、光学的フィーラを用いた場合の測定速度(往復台の送り速度)は毎分75mmであり、電気マイクロメータを用いた接触方式による測定³⁾と比較して、測定の所要時間は約1/10に短縮された。

5.2 酔歩を含む累積リード誤差

測定前に手動によって往復台を微小移動させ、その時の光学的フィーラの出力の線形範囲を確認した。その結果、図8に示すようにピンホールの中央からのねじフランク像の変位量 $\pm 30\mu\text{m}$ に対して、直線性からの誤差の大きさは $\pm 0.3\mu\text{m}$ 以内であった。

図9に1個の光学的フィーラを用いて行ったボビン

Fig. 7 Results in the measurement of cumulative pitch error (plotted at every 5 pitch)

Fig. 8 Linearity of the output in the optical feeler

Fig. 9 Results in the measurement of cumulative lead error

の酔歩を含む累積リード誤差の測定結果を示す。(a), (b), (c) はそれぞれボビンを測定した際のヘッドストック付近、ボビン中央部、及びテールストック付近について、3 リード間にわたって行った繰返し3回の測定結果の平均値を示している。累積リード誤差はそれぞれ $6\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ の範囲内にあり、測定箇所がヘッドストックに近いほどリード誤差の変動が大きく、またボビンの1 リードごとに周期性がうかがえる。そこで、フーリエ解析を行ってリード誤差データの周期性を調べたところ、図10に示すようにヘッドストック付近の(a)においては、1 リードに1回の周期性が顕著に現れている。また、この傾向はボビン中央部(b)→テールストック側(c)へ移るにつれ、減少していることが分かる。図10に示す結果から、(a), (b), (c)における累積リード誤差の変動差は、主に1次成分が影響しているようである。

Fig. 10 Results of Fourier analysis

一方、ボビンを測定機の両センタ間に支持する直前に電気マイクロメータを用いて主軸センタの振れを測定したところ、スラスト方向で $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 、ラジアル方向で $1.7\text{ }\mu\text{m}$ の振れが確認された。これらの振れの値は、ボビンのリード誤差を測定する際、見かけ上の酔歩誤差として特に主軸に近い箇所でも最も影響を及ぼすと考えられ、またこのことはフーリエ解析の結果からも容易に推定できる。

5.3 測定精度の検討

本研究において、光学的フィーラを用いて非接触方式で行ったガラスボビンのリード精度測定の結果、3回測定の繰返し精度を標準偏差 σ で表すと、累積ピッチ誤差測定の場合で $\sigma = 0.19\text{ }\mu\text{m}$ 、一方酔歩を含む累積リード誤差の測定では、(a), (b), (c) においてそれぞれ $\sigma = 0.17$, 0.22 , $0.16\text{ }\mu\text{m}$ であった。これらの繰返し精度については、従来より親ねじリード自動測定機を用いて行われてきた研究結果^{2)~4)}と比較してほぼ同程度の精度である。

次に、ボビンの350 mm間にわたって光学的フィーラ及び電気マイクロメータを用いて行った累積ピッチ誤差測定の結果(各々3回繰返し測定の平均値)を比較し、図11に示す。光学的フィーラを用いた場合の繰返し精度 $\sigma = 0.19\text{ }\mu\text{m}$ に対し、電気マイクロメータを

Fig. 11 Comparison of the results in the measurement of cumulative pitch error using the contact and non-contact feelers (plotted at every 5 pitch with the length of 350 mm)

用いた接触方式の場合では $\sigma=0.2\text{ }\mu\text{m}$ であり、繰返し精度については両者共ほぼ同様であった。5山ごとにプロットされたこの図では、両者は最大で $2.2\text{ }\mu\text{m}$ の差のもとに比較的よく似た傾向を示している。また最小二乗法による計算では、接触方式における累積ピッチ誤差 ΔE は、350 mm 間で $2.9\text{ }\mu\text{m}$ であり、光学的フィーラによる結果 ($\Delta E=1.7\text{ }\mu\text{m}$) と比較して、 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ の差のもとに同じ方向性を示している。さらに、各測定点における両者の値を比較した場合、個々の点の差の絶対値は平均で $0.7\text{ }\mu\text{m}$ であった。

一方、長さ 800 mm 電気標準用ボビンに要求されるピッチ精度は、中央部の 300 mm 間において累積で $8\text{ }\mu\text{m}$ 以内とされており、本研究における測定精度ではほぼ満足できるが、さらに工作精度を向上させるには、測定精度もこれに伴って向上させる必要がある。また、その具体的な方法等については現在検討中である。

光学的フィーラを用いたねじのリード精度測定では、ねじ溝に付着したわずかな埃が測定誤差の大きな要因となるため、事前にねじ溝をできる限り清浄にする必要がある。そこで、本研究ではシンナーを用いてねじ溝に付着した油類の汚れを拭き取った後、エアガンによって埃を吹き飛ばすことにより、ほぼ完全に汚れを取り除くことができた。なお、ねじフランクに付着した埃を球形と仮定した場合、本研究においてボビンのリード誤差 $1\text{ }\mu\text{m}$ に相当する埃の大きさは、直径でおおよそ $20\text{ }\mu\text{m}$ と推定される。

6. 結 言

光学的フィーラを用いて非接触方式により電気標準用ボビンのリード精度測定を行い、電気マイクロメータを用いた接触方式による測定結果と比較しながら測定精度等について検討を行った。本研究の結果得られ

た主な結論は以下に示すとおりである。

- (1) 新たに考案試作した光学的フィーラを用いて非接触方式により電気標準用ボビンのリード精度を測定した結果、接触方式では種々の問題を含む、直径が大きくピッチの小さいねじの測定が比較的容易に行えるようになった。
- (2) 3回測定の繰返し精度を標準偏差で表すと、累積ピッチ誤差測定では $\sigma=0.19\text{ }\mu\text{m}$ 、酔歩を含む累積リード誤差測定の場合では $\sigma_{\max}=0.22\text{ }\mu\text{m}$ であった。
- (3) 非接触方式及び接触方式によるボビンの累積ピッチ誤差測定の結果を比較すると、最小二乗法による計算では、両者は 350 mm 間で $1.2\text{ }\mu\text{m}$ の差のもとによく似た傾向を示した。
- (4) 累積ピッチ誤差測定に要する時間は、電気マイクロメータを用いた接触方式による場合と比較して約 1/10 に短縮された。

終わりに、本研究を行うに当たり、ガラスボビンの製作に御協力をいただいた東京工業大学精密工学研究所・大塚二郎教授、関根文太郎技官、ボビン用マンドレルの設計製作に御協力をいただいた東京測範(株)・萩原博前部長、高品正夫次長に感謝の意を表する。

文 献

- 1) 大塚二郎ほか：電気標準用精密ソレノイドの製作，精密機械，48，6（1982）778.
- 2) 山本 晃ほか：レーザ干渉ねじリード測定機の実用化，精密機械，41，9（1975）919.
- 3) 丸山一男ほか：電気標準用ボビンのピッチ精度測定，精密機械，49，4（1983）516.
- 4) 吉本 勇ほか：レーザ干渉及び光学的フィーラによるねじリードの自動測定，精密機械，47，4（1981）448.
- 5) 谷村吉久，山本 晃：レーザ干渉ねじリード測定器，精密機械，37，9（1971）659.