歯車ホブのリード誤差の自動測定*

吉本 勇**, 丸山一男**, 出口信吉***
Isamu YOSHIMOTO, Kazuo MARUYAMA, Nobuyoshi DEGUCHI

Key Words: Automatic Measurement, Lead Error, Gear-Hob, Optical Feeler, Optical Reflective Sensor

1. 緒 言

歯車ホブ等のねじ状切削工具の切れ刃のリード誤差の測定は難しい精密測定の一つであり、最近その自動測定の試みが進んでいるが⁽¹⁾⁽²⁾、いずれも接触形のフィーラを用いている。接触形のフィーラではフィーラの摩耗とか、小さいモジュールのホブの測定が困難とかの問題が残されており、測定精度もさらに向上させる必要に迫られている。著者らは、これまでレーザ干渉を利用した接触形フィーラによるねじリードの自動測定機を開発し⁽³⁾、さらに非接触形の光学的フィーラによるねじリード自動測定機も開発してきた⁽⁴⁾。

本研究では、さらにこの研究を押し進め、非接触形の光学的フィーラによるねじリード自動測定機を利用して、歯車ホブのリード誤差を測定する装置を考案、試作したので、その測定原理および測定精度について報告する。

2. 切れ刃位置の検出方法

歯車ホブのリード誤差測定に際して一番問題となるのは、ホブには切れ刃溝があることである。そのため切れ刃のリード誤差(切れ刃の基礎ねじ面からのずれ)を測定しなければならない。すなわち切れ刃の角位置を検出し、その時のリード誤差を測定しなければならない。そこで切れ刃位置の検出方法として、反射形のオプティカルセンサとロータリエンコーダを用いる方法を考案した。まずSIP万能測定機を用いて静的な実験を行い、その特性を調べ、つぎにレーザ干渉ねじリード自動測定機に取付けて、その動的特性を検討した。

2.1 静的実験 表1に示す仕様のホブをアーバに取付け、SIP万能測定器の両センタ間に支持し、図

1に示すように反射形オプティカルセンサのスポットが切れ刃の先端に当たるように固定し、ホブを回転させて、その時の回転角と出力電圧の関係を調べた。その結果を図2に示す。A点はオプティカルセンサのスポットが切れ刃に半分かかっている点である。図2からわかるように切れ刃付近(A点付近)で出力電圧の変化が大きく、各刃で同様の変化が見られるので、切れ刃位置の検出に利用できると思われる。この時の出力電圧の立下がり部分を正弦波と見なすと、A点はその変曲点と考えられ、このA点で切れ刃位置信号を取出すようにすれば、検出誤差が小さくなる可能性がある。

2.2 動の実験 A点で切れ刃位置信号を取出すための回路の原理を図3に示す。図2のA点(変曲点)

表1 実験に用いたホブの仕様

Module	2
Pressure angle	14.5°
Type	Right single thread, Straight gash
Number of gashes	12
Axial pitch	6.2874mm
Lead angle	2°06'

図1 切れ刃位置の検出方法

* 昭和56年9月2日歯車および伝動機構に関する国際シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和56年10月22日。

** 正員、東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町4259)。

*** 学生員、東京工業大学大学院。

で位置信号を発生させるために、オプティカルセンサからの出力電圧を図3に示すように2回微分し、その出力電圧が0ボルトを切る点でパルスを発生させる。このようにして取出した位置信号の再現性を調べるために、従来のレーザ干渉ねじリード自動測定機の主軸にロータリエンコーダ(43 200 パルス/回転)を、移動台上に反射形オプティカルセンサを固定して(図4)、表1に示したホブの切れ刃位置割出し誤差の測定を行

図2 反射形オプティカルセンサの出力電圧とホブの回転角の関係

図3 位置信号を発生させるための回路の原理

図4 反射形オプティカルセンサによる切れ刃位置検出装置の写真

った。その際の測定系の構成を図5に示す。累積誤差演算装置には、ホブの切れ刃位置を示す位置信号パルスとロータリエンコーダからのパルスが入って来る。切れ刃位置信号は、表1のホブの場合ホブ1回転につき12個のパルスが来る。本実験に用いたロータリエンコーダは1回転当たり43 200パルスであるからホブの切れ刃の割出し角が正しいとすれば、切れ刃位置パルスの間にロータリエンコーダから来るパルスの数は $43\,200/12=3\,600$ である。累積誤差演算装置のプリセットカウンタには、この3 600という数値をプリセットし、ロータリエンコーダからのパルスで減算を行い、切れ刃位置信号が来るたびに残値を別のカウンタに累積すると同時に、プリセットカウンタには3 600をプリセットするという動作を繰返す。累積値はデジタルプリンタ及びペンレコーダに記録する。

図6に本装置でホブの切れ刃の割出し誤差を測定した結果及びSIP万能測定器による測定結果の比較を示す。二つの方法による測定値は良く一致している。また本装置による連続した3回の測定結果のばらつきを標準偏差 σ で表すと、 $\sigma=20''$ であり、ロータリ

図5 切れ刃位置検出精度を調べるための測定系

図6 切れ刃の割出し誤差の測定例

ンコードの仕様分解能 $30''$ 、最大累積誤差 $12''$ に比べ、検出誤差の繰返し精度は十分である（検出誤差に関する詳しい検討は付録参照）。

3. 光学的フィーラ

光学的フィーラの原理及び性能についてはすでに文献(4)に詳しく述べたので本章ではその概要について述べる。図7は光学的フィーラの原理を示したもので、理解を容易にするため、ねじリードの測定を例として取上げている。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二つに分けられ、一方は被測定ねじに、他方はPINフォトダイオードPH2に向かう。被測定ねじに向かった光は対物レンズによって被測定ねじのねじ山の実像を円形の穴（ピンホール）を持つ像面（マスク）上に結ぶ。この時、ピンホールを通った光を受光部のPINフォトダイオードPH1で検出する（この装置を光学的フィーラと

呼ぶ）。移動台が軸方向に移動すると、被測定ねじの像が移動してピンホールを通過する光量が変わり、ピンフォトダイオードPH1の出力が変化する。ねじ山のフランクの像がピンホールの中心を通る付近では、ピンホールを通過する光量の変化が、ねじ山のフランクの像のピンホールに対する移動量に比例する。光電信号増幅器では、PINフォトダイオードPH1、PH2で検出された信号を差動増幅し、ローパスフィルタで高周波分を除き、ピンホールを通過する光量の変化に比例した電圧を発生させる。

図8に、ねじ山のフランクの軸方向変位 x_R （顕微鏡の中心で $x_R=0$ とする）と光学的フィーラの出力電圧 e_L の関係を示す。 x_R はレーザ測長器により、電圧はデジタルマルチメータにより測定した結果である。変位 x_R と出力電圧 e_L は、 x_R が $\pm 70 \mu\text{m}$ の範囲で良い比例関係にあることがわかる。またPINフォトダイオード及び光電信号増幅器の安定性を調べるために、変位 x_R を一定にし、出力電圧 e_L を変位 $0.1 \mu\text{m}$ 当たり 5 mV となるように調整したときの出力電圧の変動は、 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以内であった。これらのことから、光学的フィーラの検出誤差は $0.2 \mu\text{m}$ 以内であるといえることができる。

4. リード誤差の自動測定

4.1 測定機の構成 2章に述べた切れ刃位置検出装置、3章に述べた光学的フィーラ及びロータリエンコーダをレーザ干渉ねじリード測定機に取付けて、ホブのリード誤差の測定機を構成した。図9に測定

図7 光学的フィーラの原理

図8 変位 x_R と出力電圧 e_L の関係（ピンホールの直径 1 mm の場合）

図9 測定機の構成

機全体の構成を示す。コンピュータIIIでは次のような演算を行う。まずロータリエンコーダからのパルス列を回転角に対応するホブの称呼リードに従った $0.1\mu\text{m}$ のパルス列に変換する。すなわち、ロータリエンコーダの1回転当たりのパルス数を n_R 、ホブの称呼リードを L (mm)、補正回路の倍率を k として、次の関係を満足するように k の値を求める。

$$L \times 10^4 = k \cdot n_R$$

上式を満たすような倍率をもった補正回路により、回転角を移動台の移動量に変換した $0.1\mu\text{m}$ ごとのパルス列を得る。

主軸の回転に伴う移動台の長手方向の移動量は周波数を安定化したレーザ光線を用いて測定する。レーザ発生器を出た光線はベットに固定された半透鏡Iによって二つの光線に分かれる。半透鏡Iを通過した光線は移動台の上に固定された三つの平面鏡に逐次入反射し、ベットに固定された半透鏡IIで、半透鏡Iで反射された光線と出合って干渉じまを作る。干渉じまは拡大鏡によって拡大される。移動台の長手方向の移動に伴って移動する干渉じまの明暗はPINフォトダイオードで検出される。PINフォトダイオードで検出された電気信号はコンピュータIの補正回路で、移動台の移動距離 $0.1\mu\text{m}$ ごとのパルス列に変換されコンピュータIIIに入力される。切れ刃位置信号が切れ刃位置検出装置から来ると、それまでにコンピュータIIIに入力されたロータリエンコーダからのパルスとPINフォトダイオードからのパルス数を比較演算して、その値(主軸の回転を基準とした移動台の送り誤差に相当する値: ΔE)をコンピュータIIに送る。

また移動台の上に固定された光学的フィーラではリード誤差(ϵ)と移動台の送り誤差(ΔE)との和あるいは差(この値は歯車ホブの切れ刃の進み側フランクを測定するか、追い側フランクを測定するかによって異なる)をアナログ出力として検出し、切れ刃位置信号によりA-D変換器でA-D変換を行い、その値(ϵ

$-\Delta E$)または($\epsilon + \Delta E$)をコンピュータIIに送る。コンピュータIIではこれらの二つの値を加算または減算し、リード誤差 ϵ を計算し、それをデジタルプリンタ及びペンレコーダで記録する。測定機の写真を図10に示す。

4.2 リード誤差の測定結果 4.1節に述べた装置を用いて表1に示したホブのリード誤差を測定した結果及びSIP万能測定器による測定結果の比較を図11に示す。プロットされている点は、それぞれ3回の測定の平均値である。割出し誤差の測定と同様に、連続した3回の測定の結果のばらつきを標準偏差 σ で表すと、本装置による測定結果については、 $\sigma = 0.6\mu\text{m}$ 、SIP万能測定器による測定結果では $\sigma = 0.5\mu\text{m}$ となり、繰返し精度も十分と思われる。なお測定に要した時間は約2分であった。

5. 結 言

本研究の主な結論は次のとおりである。

- (1) 歯車ホブのリード誤差の自動測定を行うため、反射形光学センサを利用した切れ刃位置検出装置を開発した。
- (2) 歯車ホブに対する切れ刃位置検出精度を繰返し精度で表すと、標準偏差で約 $20''$ である。
- (3) この方法と従来開発してきた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法を組合せて上述の目的を達した。
- (4) この方法によるリード誤差の測定の繰返し精度は標準偏差で $0.6\mu\text{m}$ であった。

最後に本研究の端緒を与えられた東京工業大学精密工学研究所 豊山 晃教授に感謝の意を表します。またこの研究にご協力下さいました同研究所付属工場の各位に感謝の意を表します。

図10 測定機の写真

図11 リード誤差の測定結果

表 2 切れ刃の検出角度誤差 θ による見かけのリード誤差

Module	Outer diameter	Virtual lead error e (μm)		
m	(mm)	$\theta = 1^\circ$	$30'$	$10''$
1	50	0.94	0.23	7.04×10^{-2}
○ 2	60	1.08	0.27	8.15×10^{-2}
3	70	1.23	0.31	9.26×10^{-2}
4	85	1.48	0.37	1.11×10^{-2}

Pressure angle = 14.5°

○: Hob used in this study

表 3 回転角検出誤差による見かけのリード誤差 ($m=2$ の場合)

Detective error for rotational angle $\Delta\phi$	1°	$30'$	$10''$	$1'$	$30''$	$10''$
Virtual lead error Δl (μm)	17.47	8.73	2.91	0.29	0.15	0.05

図 12 切れ刃角位置検出誤差がリード誤差に及ぼす影響

〔付 録〕

切れ刃位置検出誤差及び回転角検出誤差の検討

歯車ホブに割出し誤差がなければ、光学的フィーラによるねじリード測定機でも一度切れ刃面で光学的フィーラを調節すれば、一定の回転角(分割角度分)ごとにリード誤差を測定することができる。しかし一般的には若干の割出し誤差があるため測定できない。そこ

で本研究では割出し誤差の影響を受けないでリード誤差を測定できるように、切れ刃位置検出装置を製作した。ここではまず切れ刃の角位置検出誤差について検討する。

歯車ホブには、外周逃げ角、横逃げ角があり、それぞれ $7^\circ \sim 12^\circ$ 、 $3^\circ \sim 5^\circ$ と大きく、また光学的フィーラは切れ刃の進み角に合わせて傾けてあるので、光学的フィーラの像面における切れ刃位置は図 12 のように半径方向にずれるだけで、像はほとんどぼけない。図 12 において、切れ刃角位置検出誤差 (θ) は見かけのリード誤差 (e) = $\overline{EF}$ だけ影響を及ぼす。図 12 より、

$$e = \overline{EE'} \tan \alpha' \dots\dots\dots (1)$$

$$\overline{EE'} = \left(\frac{\alpha}{2} - 1.25m \right) (1 - \cos \theta) \dots\dots\dots (2)$$

$$\tan \alpha' = \frac{\tan \alpha}{\cos \theta} \dots\dots\dots (3)$$

式(1), (2), (3)より

$$e = \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} \left(\frac{\alpha}{2} - 1.25m \right) \tan \alpha \dots\dots\dots (4)$$

若干の例について θ と e の関係を求めると表 2 のようになり切れ刃の角位置検出誤差は $10''$ 以内であればあまりリード誤差の測定に影響を及ぼさない。

次に回転角検出誤差 $\Delta\phi$ (単位: 度) による見かけのリード誤差 Δl を次式により求めると表 3 のようになる。

$$\Delta l = \pi m \frac{\Delta\phi}{360} \dots\dots\dots (5)$$

本研究で使用する光学的フィーラの分解能が $\pm 0.2 \mu\text{m}$ ということを考慮して、許容誤差を $\pm 0.2 \mu\text{m}$ とすれば、表 3 より使用すべき回転角検出器の精度は $\pm 40''$ 以内となる。このことから、回転角検出器として N 社のロータリエンコーダ RH シリーズ (43 200 パルス/回転, 分解能 $30''$, 保証精度 $12''$) を選出した。

文 献

- (1) Klingenberg, PWF 300 カタログ.
- (2) 大阪精密機械(株), ホブ測定機仕様書 PCD-50 HB (昭 54).
- (3) 山本・ほか 4 名, 精密機械, 41-9 (昭 50), 919.
- (4) 吉本・ほか 2 名, 精密機械, 47-4 (昭 56), 448.

討 論

〔質問〕 久保愛三〔京都大学工学部〕

リード誤差以外のホブの誤差や、測定装置へのホブ取付誤差のため、ホブ切れ刃と光学的フィーラの間の距離が、ホブの回転に対し確実に一定でない場合には、結果にかなりの測定誤差が入ってくるのか。あるいはこの光学的フィーラを用いた場合には、この測定誤差は無視できるものか。

〔回答〕 リード誤差以外のホブの誤差として何を指すか。又測定装置へのホブの取付誤差として何を指すか具体的に述べておられないので回答しにくいですが、ホブの切れ刃と光学的フィーラの間の距離（付図1の l_H ）がホブの回転に対し一定になるように、ホブの切れ刃の角位置を反射形光学センサーを用いて検出している。しかしホブの取付けに偏心誤差があったり、ホブに歯形誤差や圧力角誤差があると測定値に影響する。

付図 1