大形ホブ盤用動的割出誤差測定装置の開発*

柳 下 福 蔵**

A New Method for Measuring the Dynamic Dividing Error
in Large Gear Hobbing Machines

Hukuzo YAGISHITA

A new apparatus for measuring the dynamic dividing error between hob and worktable in large gear hobbing machines is described in which a pair of small and high sensitive servo-accelerometers are mounted tangentially on a periphery of the large worktable, 180° apart, in order to detect the non-uniformity of rotation of the worktable. Two acceleration signals from the servo-accelerometers are added on the worktable, so as to be additive for the circumferential acceleration and null each other for the rectilinear acceleration of the worktable. After the circumferential acceleration signal transmitted with a telemeter is processed by a pulse signal from the rotary encoder attached to hob shaft in this apparatus, the dynamic dividing error can be obtained. In an experimental use with a large size (3.3 m worktable diameter) gear hobbing machine, the dynamic dividing error has been measured and recorded. By transforming the recorded analogue signal with an FFT (Fast Fourier Transform) analyzer and by consulting to the schematic drawing of the rotational transmission mechanism, specific parts in the mechanism have been identified that cause the dividing error. Also, by transforming the circumferential acceleration of the worktable during quick starting test with an FFT analyzer, rotational natural frequency of the worktable can be obtained easily.

Key words: large gear hobbing machine, dynamic dividing error, servo-accelerometer, rotational vibration, rotational natural frequency

1. 結 論

筆者は、過去にホブ盤のホブ軸およびワークテーブルに適当なパルス数のロータリーエンコーダを取り付け、その信号を電気的に処理して回転中の割出誤差をアナログ信号として比較的容易に測定できる安価な装置を開発している。その装置を用いて、中形ホブ盤において実測を行い、空転中だけでなく歯切り中にも割出誤差を測定・記録することに成功している¹⁾。その割出誤差測定法を組み込んで、歯切精度に最も強く影響するホブ盤駆動系の静的ならびに動的ねじり剛性に関する一連の試験法を新たに考案し、生産現場において広く使用されている中形ホブ盤において実施した。その結果、供試ホブ盤に適する高能率・高精度歯切条件の決定、さらにホブ盤の保守・管理に有益な結果を得る技術が確立されている²⁾。

本技術を大形ホブ盤に適用しようとすると、大きな

ワークテーブルの中心に精確に心合わせしてロータリーエンコーダを取り付けるという困難さが伴う。また、過去に大形ホブ盤用の動的割出誤差測定法としてねじり受振器を用いた地震計法³⁾、2台の変位形振動計を用いる方法⁴⁾、2個の小形振動加速度計を用いる方法⁵⁾、超大形回転磁気スケールを用いる方法⁶⁾等が考案されているが、どの方法にも一長一短があり、特に歯切り中の割出誤差はいずれの方法によっても測定不可能である。

そこで、大形ホブ盤の動的割出誤差を歯切り中にも容易に測定できるように開発した本装置は、ワークテーブルの180°対称位置に同特性のサーボ加速度計を円周方向反対向きに取り付けて検出した円周加速度信号をテレメータにより無線で飛ばし、受信した円周加速度信号を積分したのちホブ軸に取り付けたロータリーエンコーダのパルス信号で処理してホブ・ワークテーブル間の割出誤差を測定・記録しようというものである。

本装置を用いて、ワークテーブル直径3.3 mの大形ホブ盤において実測を試みたところ、動的割出誤差が

* 原稿受付 昭和59年12月21日。昭和59年度精機学会春季大会学術講演会(昭和59年3月27日)にて発表

** 正 会 員 沼津工業高等専門学校(沼津市大岡3600)

Fig. 1 Constitution of the apparatus to measure dynamic dividing error in large gear hobbing machines

精度よく測定・記録でき、それらをFFT (Fast Fourier Transform) 処理したのち駆動系図と対照することにより、割出誤差の原因となっている駆動系箇所が推定できることが判明した。さらに、本測定装置の応用として急発進した時のワークテーブルの円周加速度をFFT処理することによりワークテーブルの回転固有振動数を求めることができる。

2. 大形ホブ盤用動的割出誤差測定装置

2.1 測定装置の構成

開発した大形ホブ盤用動的割出誤差測定装置の構成を図1に示す。本装置はワークテーブル外周の180°対称位置に同特性のサーボ加速度計を円周方向反対向きに取り付け、カットオフ周波数70 Hzのローパスフィルタで低域濾波したそれぞれの加速度信号をワークテーブル上の加算器で加算する。そのようにして求まった円周加速度信号をテレメータの送信機により無線で飛ばす。テレメータの受信機で受信した円周加速度信号を割出誤差演算部において1回積分して速度とし、コンデンサにより超低周波成分を除去*したのちV/F変換する。そのデジタル信号に、ホブ軸に取り付けたロータリーエンコーダのパルス信号でゲートをかけて各1パルス期間中の計数値の累積値を可逆カウンタにより求め、その結果をD/A変換してアナログ信号を記録計に出力する。したがって、記録結果の横軸はワークテーブルの回転位置となり、縦軸はその回転位置におけるホブ・ワークテーブル間の割出誤差となる。

また、本測定装置におけるテレメータ受信機の受信

* 100 μ Fのコンデンサを直列に使用することにより、0.01 Hz以下の超低周波成分を除去するようにした。

Fig. 2 Frequency response of the employed one servo-accelerometer

信号はワークテーブルの円周加速度であり、V/F変換後のゲートを開放にするとワークテーブル単独の回転振動(円周方向変位)が記録できる。

2.2 本装置の特性

2.2.1 サーボ加速度計の特性

ワークテーブル外周の180°対称位置に円周方向反対向きに取り付けた両サーボ加速度計の検出信号の加算により、ワークテーブルの円周加速度が精度良く検出できるためには次の条件が満たされていなければならない。

- (1) 両サーボ加速度計の周波数応答が測定周波数範囲において一定かつ同一であること。
- (2) ワークテーブルの円周方向以外の方向の振動の影響が無視できるほど微小であること。
- (3) サーボ加速度計がワークテーブルの微小な円周加速度信号を検出するのに十分な分解能を有していること。

条件(1)については、図2に使用した一方のサーボ

Table 1 Specifications of the employed servo-accelerometer (Made by Japan Aviation Electronics Industry, Ltd.)

Type	JA-512
Measurable range (F.S.)	$\pm 12 \text{ G}^*$ On electric power source of $\pm 15 \text{ V}$
Sensitivity	
Electric current	$1.3 \text{ mA/G} \pm 10\%$
Electric pressure	$2 \text{ V/G} \pm 5\%$
Natural frequency	Above 800 Hz
Frequency response ($\pm 0.5 \text{ dB}$)	$\text{DC} \sim 100 \text{ Hz}$
Damping coefficient	0.3
Linear character	$\pm 0.05\% \text{ F.S.}$
Resolution (DC)	Under $1 \times 10^{-6} \text{ G}$
Noise	
Component of 100 kHz	Under $100 \text{ mV}_{\text{rms}}$
Component of 1 kHz	Under $50 \text{ mV}_{\text{rms}}$
Sensitivity of transversal direction	Under 0.1%
Unbalance of zero point	Under 0.02 G
Case alignment	Under 0.5°
Temperature coefficient of zero point	Under $\pm 30 \times 10^{-6} \text{ G/}^\circ\text{C}$
Temperature coefficient of sensitivity	Under $0.02\%/^\circ\text{C}$

* G is the acceleration of gravity

加速度計の周波数応答の実測結果を示す。本装置の測定周波数範囲は $0.01 \sim 70 \text{ Hz}$ と設定した(2.1 節参照)ので、同図よりゲインおよび位相特性ともその周波数範囲において一定であることがわかる。他方のサーボ加速度計のゲインおよび位相特性は 100 Hz 以下の周波数範囲においては図 2 と全く同一であり、 200 Hz 以上においてゲイン特性のみがわずかに異なるだけであることが確認されている。

条件 (2) については、円周加速度測定状態において大形ホブ盤のワークテーブル外周を中心方向および上下方向にハンマリングしたが、円周加速度信号はほとんど影響されないことが実験により確認されている。

条件 (3) については、表 1 に示す本サーボ加速度計の仕様における分解能の値 $1 \times 10^{-6} \text{ G (DC)}$ を用いて測定可能な割出誤差の分解能を略算すると、ワークテーブル径 5 m の大形ホブ盤の場合、 1 Hz において約 $0.01''$ と求まる*。この値は大形ホブ盤の割出誤差の測定を十分可能とするものであり、表 1 に示されているその他の特性値も本測定法を十分可能とするものである。

図 3 は大形ホブ盤のワークテーブル外周に取り付けられた本サーボ加速度計の外観である。

* 円周加速度信号が片振幅 $\Delta\alpha = 1 \times 10^{-6} \text{ G} = 9800 \times 10^{-6} \text{ mm/s}^2$ 、周波数 $f = 1 \text{ Hz}$ の正弦波と仮定すると、その時の振動変位の片振幅は $a = \Delta\alpha / (2\pi f)^2 = 9800 \times 10^{-6} / (2\pi)^2 \text{ mm} = 248 \times 10^{-6} \text{ mm}$ となり、両サーボ加速度計間の距離 $L = 5 \text{ m}$ を用いて角度 $\Delta\theta$ に換算すると $\Delta\theta = a/L = 248 \times 10^{-6} / 5000 = 49.6 \times 10^{-9} \text{ rad} = 0.01023''$ と求まる。

2.2.2 テレメータの特性

ワークテーブルの円周加速度信号を無線で飛ばすために使用したテレメータ(送信機および受信機)の入出力関係はよい直線性を示し、その応答周波数は $\text{DC} \sim 1 \text{ kHz}$ 、伝送距離は 15 m 以上であることが確認されている。

2.2.3 割出誤差測定装置の動特性

図 4 に割出誤差演算部の入出力の関係を示す。割出誤差演算部においては 2 回の積分演算(1 回のアナログ積分と 1 回のデジタル累積演算)を実施しているので、入力電圧 $\Delta\alpha$ と出力電圧 Δd の関係は理論的には同図ようになる。すなわち、出力電圧 Δd は入力電圧 $\Delta\alpha$ より位相が π 遅れ、振幅は入力周波数 f の 2 乗に反比例して減少する。

加算器(図 1 参照)の入力端子に超低周波発振器から一定振幅の正弦波 $\Delta\alpha = 0.02 \cdot \sin(2\pi ft) \text{ V}$ を印加し、ゲート(図 1 参照)を開放にした状態で周波数 f を変化した時の入力 $\Delta\alpha$ と出力 $\Delta\theta$ (割出誤差測定装置の出力電圧)の関係調べた。図 5 は以上のようにして得られた割出誤差測定装置の動特性である。同図が示すように、周波数 f が 30 Hz 付近まで入出力の振幅比 $\Delta\theta/\Delta\alpha$ の実験値は計算

Fig. 3 Appearance of the servo-accelerometer mounted on a periphery of the large worktable

Fig. 4 Input-output relationship of the dividing error computing unit

Fig. 5 Dynamic characteristics of the apparatus to measure dynamic dividing error

値(40 dB/dec の直線)と良く一致しており、図には示していないが位相関係も一定に保たれていることが確認できた。30 Hz 以上については出力電圧が微小のため測定不可能であったが、加算前の加速度信号をカットオフ周波数 70 Hz のローパスフィルタで低域濾波し

ていることおよび 1 回積分後の速度信号の超低周波成分をコンデンサにより除去していることを考慮すると本割出誤差測定装置全体の動特性は 0.1~70 Hz と理解できる。

3. 大形ホブ盤の動的割出誤差の測定

3.1 供試ホブ盤

割出誤差を測定したホブ盤はワークテーブル直径 3.3 m の大形ホブ盤であり、その運動伝達系を図 6 に示す。図中、○印で囲んだ数字は歯車番号であり、他の数字は歯数である。ワークテーブルは二つのウォームで駆動され、ワーク重量によるワークテーブルの変形を補正する油圧装置を備えており、さらにホブ軸は 3 口のウォームとウォームホイールで駆動されるという特殊な設計となっている。本ホブ盤は恒温室 (20±1°C) に設置されており、大形工作機械用リングギヤ等を歯切りするために使用されている。

3.2 ロータリーエンコーダ

ホブ軸端に 1000 P/R のロータリーエンコーダを心合わせして取り付け付けた。

Fig. 6 Rotational transmission mechanism of a large size gear hobbing machine tested
The numbers in circle designate the gear ones. Uncircled numbers specify the number of teeth.
Worktable diameter of 3.3 m

Fig. 7 Time records of circumferential acceleration during hammering test of worktable
Rotational speed of hob shaft; 9.54 rpm, Indexed number of gear teeth; 200

3.3 円周加速度の測定結果

ワークテーブル外周の180°対称位置に円周方向反対向きに取り付けた両サーボ加速度計の加速度信号を加算することにより、ワークテーブルの円周加速度が純粋に検出できることを実験的に確認した。図7(a)、(b)および(c)がその結果である。ホブ軸回転数9.54 rpm、割出歯数200枚で駆動中（ワークテーブル1回転に21 minを要する）のワークテーブル外周を円周回転方向にハンマリングした(a)の場合および円周反回転方向にハンマリングした(b)の場合にはそれぞれの方向に円周加速度が感度よく検出できている。しかし、中心方向にハンマリングした(c)の場合にはハンマリングの影響が全く検出されていないことがわかる。

3.4 急発進によるワークテーブル固有振動数の測定

停止しているワークテーブルを急に回転する、すなわちステップ状の回転速度指令を与えた時の応答円周加速度をFFT処理することによりワークテーブルの回転固有振動数を求めることができる⁷⁾。図8(a)および(b)は供試ホブ

盤において急発進試験を実施した結果である。

(a)は応答円周加速度の時間波形であり、(b)は周波数領域において15回平均して得られたFFT処理結果である。図8(b)において、ワークテーブルの回転固有振動数は5.92 Hzおよび11.1 Hzと求まっており、2.84 Hzはホブ盤構造全体の固有振動数と推定できる。

3.5 動的割出誤差の記録結果

ホブ軸回転数9.54 rpm、割出歯数200枚で駆動中（ワークテーブル1回転に21 minを要する）のワークテーブルの回転振動（円周方向変位）をサーボ加速度計取付位置（直径3250 mmの円周位置）に換算した記録結果の一例を図9(a)および(b)に示す。(a)は4 s間、(b)は20 s間の記録結果である。

図10(a)および(b)は図9と同一駆動状態において、ホブ軸に取り付けたロータリーエンコーダのパルス信号でゲートをかけてホブ・ワークテーブル間の動的割出誤差を記録した同様の結果の一例である。いずれの記録結果にも規則的な変動成分が認められるが、ワークテーブル駆動用ウォームの回転およびホブの回転に同期する成分はほとんど認められない。さらに、他の記録結果と比較すると、ワークテーブルの回転位置により回転振動（円周方向変位）および動的

Fig. 8 Results in quick starting test of worktable
Rotational speed of hob shaft; 9.54 rpm, Indexed number of gear teeth; 200

Fig. 9 An example of time records of worktable's rotational vibration (Rotational vibration means circumferential displacement at the position of 3 250 mm diameter on which two servo-accelerometers are mounted)
Rotational speed of hob shaft; 9.54 rpm, Indexed number of gear teeth; 200

Fig. 10 An example of time records of dynamic dividing error
Rotational speed of hob shaft; 9.54 rpm, Indexed number of gear teeth; 200

割出誤差が異なった波形を示すことが確認されている。

3.6 動的割出誤差の周波数分析結果

データレコーダを用いて空転状態の動的割出誤差を磁気テープに収録したのちFFTアナライザを使用して周波数分析を実施した。図11(a)および(b)は周波数領域において20回の平均化処理をしたワークテーブルの異なる回転位置における分析結果の一例であ

Fig. 11 An example of Fourier transforms of dynamic dividing error (Average of 20 samples in the frequency domain)
Rotational speed of hob shaft; 9.54 rpm, Indexed number of gear teeth; 200

る。図6に示した供試大形ホブ盤の運動伝達系図に基づいて駆動状態における各歯車の回転周波数(rps)およびかみ合い周波数(Hz)をすべて算出し、動的割出誤差の各成分周波数と対照することにより各割出誤差成分を引き起こしている駆動系箇所が推定できる。

図11(a)および(b)中に○印で囲んだ歯車番号(図6参照)が各割出誤差成分の原因箇所と推定できる。(a)の場合、最も顕著な割出誤差成分(2.83 Hz)は割出換え歯車⑭からワークテーブル駆動用に伸びている長い軸、あるいはその軸に取り付けられている他の歯車の回転に起因している。次に顕著な割出誤差成分(6.23 Hz)はホブ軸駆動系の歯車③、⑤、⑦とその軸の回転、およびワークテーブル駆動系の歯車⑪とその軸の回転に起因するものである。

(b)の場合には、ワークテーブル駆動用の二つのウォームに回転を分離している系列の歯車⑮とその軸の回転(1.27 rps)が顕著な割出誤差成分の主要原因である。すなわち、その回転周波数(1.27 rps)の高次成分が割出換え歯車⑫の高次回転周波数と主モータ⑨の回転周波数、ホブ軸駆動系のかさ歯車②とウォーム②および割出換え歯車⑬の高次回転周波数と合致して11.2 Hz, 12.7 Hzおよび15.0 Hzの各割出誤差成分が顕著に現れたものと理解できる。

ワークテーブル1回転に21 minを要するような大

形ホブ盤の場合、動的割出誤差の記録結果およびその周波数分析結果は図 11 (a) および (b) のようにワークテーブルの回転位置により異なる場合がある。したがって、動的割出誤差の原因箇所を推定するにあたってはこのことを十分考慮しておく必要がある。

4. 結 論

ワークテーブルの 180° 対称位置に同特性のサーボ加速度計を円周方向反対向きに取り付け、両加速度信号の加算結果をテレメータを用いて無線で飛ばし演算処理する新方式の大形ホブ盤用動的割出誤差測定装置を試作し、ワークテーブル直径 3.3 m の大形ホブ盤において実測を試みたところ以下のことが明らかとなった。

- (1) 試作した新方式の大形ホブ盤用動的割出誤差測定装置により、大形ホブ盤の動的割出誤差が比較的容易に測定できる。
- (2) 歯切り中の測定を実施する場合には、(i) 両サーボ加速度計に切削油および切りくずが直接当たらないように適当な覆いをする、(ii) 両加速度信号の加算結果に対して増幅器のゲインを適当に選ぶ、対策が必要となる。
- (3) 本測定装置においては、動的割出誤差だけでなくワークテーブルの回転振動すなわち円周方向変位および円周加速度も容易に測定できる。

急発進試験を実施してワークテーブルの応答円周加速度を FFT 処理することにより、従来測定が困難であったワークテーブルの回転固有振動数

を容易に求めることができる。

- (4) 加速度ピックアップと加算器および送信器がワークテーブル上に取り付け可能ならば、本測定法は大形ホブ盤に限らず中形ホブ盤および小形ホブ盤にも十分適用できる。

最後に、本研究を遂行するにあたり、ご教示賜りました豊橋技術科学大学・星鉄太郎教授、本測定装置の試作に協力いただきました小野測器(株)・岩本康男課長ならびに実験に協力いただきました東芝機械(株)・酒井保男技師長に感謝の意を表します。なお、本研究は昭和 57 年度文部省科学研究費補助金・試験研究 (2) (研究課題番号 57850049) の援助をうけて実施されたものであり、記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 柳下福蔵：動的割出誤差の一測定法，精密機械，48，8 (1982) 1022.
- 2) 柳下福蔵ほか：ホブ盤の動的割出誤差試験法，精密機械，49，10 (1983) 1385.
- 3) 中田 孝ほか：ホブ盤のテーブル回転精度の測定と回転誤差補正装置，日本機械学会誌，66，533 (1963) 25.
- 4) 緒方省三ほか：大形歯切盤の伝達誤差の測定，精密機械，38，9 (1972) 715.
- 5) 丸山一男ほか：ホブ盤ワークテーブルの回転むらの動的測定法に関する研究，日本機械学会論文集 (第 3 部)，34，265 (1968) 1596.
- 6) 桜井信男ほか：超大形回転形磁気スケールによるホブ盤の精度測定，昭和 52 年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1977) 95.
- 7) 星 鉄太郎：切削加工における振動解析，機械の研究，34，12 (1982) 1323.

事務局コンピュータの活躍

学会の事務局に小型のコンピュータが入って活躍を始めたのは昭和 58 年 12 月です。ちょうど竹山先生が会長の時でした。他の学会からも注目を浴び、資料提供、説明会などを行いました。学会特有の複雑で大量な事務処理をコンピュータ化できたのは事務局の努力によるものです。担当した職員にきいてみると、まず仕事の流れをファイル化し、その手順を明確に整理してソフトウェアのメーカーに示したのが成功の原因で、さらに、従来慣れ親しんでいた手作業をできるだけそのままコンピュータに移したことが、事務局全体で活用できる理由のようです。

コンピュータの導入により、有名な精機学会の残業を著しく減少させましたし、多くの事務処理を容易化して、ある女性事務局員によると、コンピュータを使うのが楽しくてしょうがないという状態になっているそうです。

入会処理、住所変更、退会処理、会費未納者への請求、

領収書発行など、すべてコンピュータで処理されています。従来、住所不明などで返送の多かった会誌についても、このような誤りが著しく減少しました。役員の入会年、生年月日、就任年度別、役員種別なども検索できますから、名誉会員、永年会員、功労者などの資料も、容易に整えることが出来ます。

おそらく、出版関係のコンピュータ化はこうなっているかと、関心をお持ちの方も少なくないと思います。現在は投稿論文のワープロによる整理くらいしか行われていませんが、これも事務局の努力によりコンピュータ化が進んでいますので、いずれ御報告できると思います。コンピュータとそのソフトには、それ相当の費用はかかるのですが、現在、それを上まわる効果が上がっているのが、精機学会における事務のコンピュータ化です。

(庶務理事・吉井康一)