研 究

ワウフラッターメータによる工作機械主軸の ねじり振動の測定*

山 本 明** 前 田 良 昭**

Measurement of Torsional Vibration of Machine-tools' Spindles by Wow-flutter Meter

Akira YAMAMOTO, Yoshiaki MAEDA

In recent years, vibrations of the machine-tool systems have been investigated by many researchers and so many available knowledges have been given. But, about torsional vibrations, only a little investigation has been carried out from lack of the appropriate measuring method. So, for the further experimental analysis of this field, a new measuring method has been developed by the utilization of a marketing wow-flutter meter usually used for the audio recording and reproducing apparatuses. In this paper, the principle and the basic characteristics of this method are discussed and an example of the application, the measurement of the arbor speed variation of the typical small horizontal milling machine, is shown. Main results are as follows:

(1) The developed method not only has a better high frequency response (~ 280 Hz: -3 dB) in comparison with hitherto reported ones but also can make the measurement comparatively easy and measure even small variations below $0.1\%_{p-p}$ of mean speeds with a good accuracy.

(2) The application shows that even in the racing condition the arbor speed of the tested machine varies with the maximum amplitude of $0.2-0.3\%_{p-p}$ of the mean speed and the dominant frequency components of this variation mostly result from (a) the fluttering of V-belts between the drive motor and the gearbox, (b) the eccentricity of the arbor, (c) the torsional resonance of the driving system and (d) the gear-noises rising in the gearbox. These aspects may be generally applicable to other machines too.

1. 緒 言

旋盤、フライス盤、中ぐり盤の主軸、研削盤の砥石軸など切削運動に直接かかわる回転軸系では、たわみ振動に加えてねじり振動にも注意を要する。近年、工作機械系の振動問題について多くの検討が進められているが、その対象は主に前者に限られており、後者に対する検討は測定上の問題などから極めて少ないようである。すなわち、ねじり振動の測定は一般に難しいものと考えられており、今までに試みられた種々の方法¹⁾の多くは工作機械主軸のように比較的小径で馬力の小さいものには適用困難なことが多く、応用されたものも応答周波数帯域は狭く、 100 Hz 程度以下に限られる²⁾³⁾ことが多いようである。

そこで、筆者らは新たに音響機器の回転むら測定に用いられる市販のワウフラッターメータを応用して、簡便でかつ高精度なうえ、広帯域応答を期待できるねじり振動の測定装置を試作し、これを用いて工作機械主軸のねじ

り振動を解明することを試みた。本報告では、この新しい測定手法(装置)を紹介し、その特性を検討するとともに応用の一例として、フライス盤主軸(アーバ)の空転時回転むらを測定した結果を示す。

2. 試作装置の測定原理

2.1 音響機器における回転むら測定とその応用

音響機器(テープレコーダ、プレーヤ)の回転速度むら(ワウフラッター)の測定に関して、日本工業規格ではワウフラッターメータ(以下 WFM と略記する)を用いる方法を定めている⁴⁾。この方法では、単一周波数の基準信号(3 kHz 正弦波)を記録した試験用標準テープあるいは標準レコードを被検査機器で再生し、この再生信号を WFM で処理して回転むらを測定する。すなわち、再生速度が変動すれば、基準信号は変動信号で周波数変動されて再生されるから、この再生信号を WFM*** で復調すれば変動信号が検出できるのである。

筆者らは、この方法を工作機械主軸のねじり振動測定に応用するため、図 1 に示すように標準信号テープ、レ

* 原稿受付 昭和 50 年 9 月 11 日。昭和 49 年度関西地方定期学術講演会(昭和 49 年 6 月 6 日)および昭和 50 年度関西地方定期学術講演会(昭和 50 年 6 月 19 日)にて発表。

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部(豊中市待兼山町 1-1)

*** FM 復調回路がその主要部を構成している。その他、一般に振幅制限回路、メータ指示回路、聴感補正回路などが組込まれている。

図1 試作測定系の構成

コードの代わりに磁気信号円板を測定部に取付け、これに基準信号を記録して用いた。この場合、JISにも規定されている⁴⁾ように基準信号記録時の回転速度は厳しく一定に保たねばならない。本研究では、まず主軸空転時に基準信号を記録する方式(空転時記録方式)を試みたが、実測の結果、空転時でもかなり回転速度が変動しており、この方式では微小変動量の測定に対しては精度上問題のあることが分かった。これを解決するには、精度のすぐれた別の記録装置を用意することが望ましいが、測定の準備などをかなり煩雑にする。そこで、本研究では測定の簡便性を特に考慮して、次に示す基準信号の記録と並行して測定を行う方式(同時記録再生方式)によって、この問題の解決を試みた。

2.2 同時記録再生方式による測定

基準信号 $e_i(t) = E_i \sin(2\pi f_s t)$ を半径 R の円板外周部磁性面に記録し、同時に角度 φ だけ隔った再生ヘッドでこの記録信号を再生するとき、軸回転速度(円板周速) $V(t)$ が V_0 を平均速度、 $K_n = \Delta V_n / V_0$ を速度変動率として、

$$V(t) = V_0 \{1 + \sum K_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \alpha_n)\} \quad (1)$$

のように変動すれば、時刻 t に磁性面に記録される信号波長 $\lambda(t)$ は

$$\lambda(t) = V(t) / f_s \\ = (V_0 / f_s) \{1 + \sum K_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \alpha_n)\} \quad (2)$$

となる。いま、再生信号 e_0 の周波数 $f_0(t)$ に注目してみると、記録された信号は記録時刻から再生おくれ時間 Δt を経て再生ヘッドから再生されるから

$$f_0(t) = V(t) / \lambda(t - \Delta t) \\ = \frac{f_s \{1 + \sum K_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \alpha_n)\}}{1 + \sum K_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \alpha_n - \gamma_n)} \quad (3)$$

となる。ただし、

$$\int_{t-\Delta t}^t V(t) dt = R\varphi \quad (4)$$

(a) 予想される出力波形

(b) 振幅補正係数

図2 同時録音再生方式による出力とその補正

$$\gamma_n = 2\pi f_n \Delta t \quad (5)$$

さらに、本研究で取扱う範囲では速度変動率 K_n は 1 より十分小さいので式(3)は次のように近似できる。

$$f_0(t) \doteq f_s \{1 + 2 \sum K_n \cdot \sin(\gamma_n/2) \cdot \cos(2\pi f_n t + \alpha_n - \gamma_n/2)\} \quad (6)$$

すなわち、この方式では基準信号はカッコ内の第2項で表される信号によって周波数変調されて再生される。ここで Δt は式(4)の関係から $R\varphi/V_0$ を中心として $\pm \sum (K_n/f_n)$ の範囲を変動する量であるから、 γ_n は n_0 を平均軸回転数(rps)とすると、 $f_n \varphi/n_0$ を中心として $\pm 2K_n$ の範囲で変動することになる。いま適当な測定条件を選べば、この変動幅を十分に小さくすることができ、式(6)は $\gamma_n \doteq f_n \varphi/n_0$ として取扱っても、その誤差はほとんど無視できる*。そこで、再生信号 e_0 の FM 復調後の出力波形は任意の周波数成分 f_n に対して、一般に図2(a)のようになると予想される。すなわち、この方式では復調信号の振幅は原信号(変動信号)の $2 \sin(\gamma_n/2)$ 倍となり、また位相も変化するので、復調信号即変動信号として扱うことはできないが、補正係数 $K_c = \{2 \sin(\gamma_n/2)\}^{-1}$ を用いて補正すれば容易に速度変動率 K_n を求めることができよう。なお、位相量に対しては $(\pi/2 - \gamma_n/2)$ の進相補償が必要である。図2(b)に周波数分析時のフィルタ幅 Δ を考慮した場合の K_c と γ_n の関係を示す。

* $K_n = 0.01$ の場合、振幅測定時の誤差率は最大の場合でも $2 \sin K_n = 0.019$, すなわち 1.9% にすぎない。

3. 試作した測定装置とその特性

3.1 測定装置の試作

上記の原理に基づいて表1に示す各種の機器を用いて測定系を構成した。測定性能に重要な影響を与える磁気ヘッドは工作機械の実稼動状態を考慮すると、ヘッド-テープ間隔 (d_{RC} , d_{RP}) をかなり大きくする必要があるので空隙長 l の大きなものを選び、これに伴って記録ヘッドでは強磁界を形成できるように信号電流容量の大きなものを自作して用いた。また、信号円板も測定精度上重要で、高い真円精度が要求される。本研究では表1に示す寸法のアクリル樹脂製円板の外周に一般計測用磁気テープ(幅1/4、厚さ40 μ m)を貼付した簡便なものを用いた。軸取付け後の総合的な真円度誤差は半径方向で $\pm 10 \sim 15 \mu$ mであったが、以下の使用条件ではかなり満足できた。また、軽量であるため被測定系へ与える影響も無視できよう。

3.2 測定性能の検討

3.2.1 基準信号の記録再生特性

磁気記録再生時の諸特性はすでによく知られているが、本研究の使用条件は一般に用いられてきたものとかかなり異なるから、測定条件の選定も兼ねて、まず基準信号の記録再生特性を検討した。

図3(a)は記録速度 N_{RC} を変化し、一定の速度 N_{RP} で再生したときの記録波長 λ と再生出力との関係である。一般に短波長信号ほど記録および再生性能は悪化し、再生出力が減少することが知られている*が、本研究では空隙長 $l=1$ mmの自作記録ヘッドを用いたので、 $\lambda < 2$ mmで著しい再生出力の低下がみられ

た。一方、同時記録再生方式では記録周波数 f_s が一定の下で主軸速度 $N_0 (=N_{RC}=N_{RP})$ を変化すれば、同時に $\lambda=2\pi N_0 R/f_s$ の関係から λ も変化するので、図の破線で示すような特性をとると予想される。図(b)は実測した同時記録再生特性である。用いたWFMの許容入力

表1 試作装置に用いた機器

基準信号発振器	明石製作所 自動振動分析装置(AVA-1)内蔵発振器 TAK-1 発振帯域: 0.5 Hz $\sim$ 5 kHz、出力: 0 $\sim$ 10 V _{p-p} 、内部抵抗: 1 k Ω 以下
記録増幅器	同上 AVA-1 内蔵加振器駆動アンプ MSB-52 T 出力: 0 $\sim$ 100 VA(0 $\sim$ 3 A)、入力インピーダンス: 100 k Ω
記録ヘッド	自作、ギャップ: $l_1 \times w_1 = 1 \times 5$ (mm)、ギャップスペーサ: 黄銅、コア: 積層けい素鋼板、コイル巻数: 750
基準信号円板	自作、アクリル樹脂円板(径100および250 mm、厚さ10 mm)の外周部に一般計測用磁気テープ(幅1/4、厚さ40 μ m)を貼付
再生ヘッド	松下電産カセット用消磁ヘッド WY 223 Y-9 H 18 ギャップ: $l_2 \times w_2 = 200 \mu$ m $\times$ 2 mm、ギャップスペーサ: プラスチック、コア: フェライト
再生増幅器	三栄測器 直流アンプ 6 L 5-P、入力範囲: 150 μ V $\sim$ 30 V、0 $\sim$ 20 kHz、ゲイン: 0 $\sim$ 300、出力インピーダンス: 10 M Ω /10 Ω
ワウフラッタメータ	目黒電波測器 MK-66 A、中心周波数: 3 kHz $\pm$ 200 Hz、測定域: 0 $\sim$ 3%、入力レベル: 30 mV $\sim$ 30 V、出力インピーダンス: 300 k Ω /600 Ω
観測記録用機器	データレコーダ、シンクロスコープ、電磁オシログラフなど

図3 磁気記録再生特性(1)

範囲は30 mV $\sim$ 30 Vであるので、再生信号はそのレベルに応じて増幅する必要があるが、再生出力の低下に伴い必然的にSN比が悪化するため、短波長記録時、すなわち低速回転時には測定精度が悪化し測定が困難になる。この点から現装置の適用範囲は標準とした測定条件($d_{RC}=d_{RP}=100 \mu$ m, $I_{RC}=0.3$ A_{rms}, $f_s=3$ kHz)では N_0 が133 rpm以上の時にかぎられるが、信号円板の大形化、および空隙長の小さな記録ヘッドの使用により記

* テープ分離損失 $= 20 \log_{10} e^{2\pi d/\lambda} = 54.6(d/\lambda)$ (dB)、空隙長損失 $= 20 \log_{10}[(\pi l/\lambda)/\sin(\pi l/\lambda)]$ (dB) など λ の減少に伴って増加することが知られている⁵⁾。

再生信号振幅(正規化値) E_a/E_{0max}
 $N_{RC}=33 \text{ rpm}$, $N_{RP}=300 \text{ rpm}$, $f_s=50 \text{ Hz}$
 図4 磁気記録再生特性(2)——記録電流量の影響

(a) 周波数応答特性

(b) 振幅応答特性

$d_{RC}=d_{RP}=100 \mu\text{m}$, $I_{RC}=0.3 \text{ A}_{rms}$, $f_s=3 \text{ kHz}$,
 $N_0=510 \text{ rpm}$

図5 ねじり振動検出特性

録性能を向上すれば、さらに低速の場合にも適用が可能となろう。例えば、 l は一般に d_{RC} と同程度に選ばれることが多いが、現在より1オーダー短い $l=100\sim 200 \mu\text{m}$ の

図6 実験装置概要

記録ヘッドを用いれば、記録特性も1オーダー短い波長域へ十分拡大できよう。

なお、図3(b)にみるように記録ヘッドと記録面の間隔 d_{RC} が大となれば、当然記録面での信号磁界強度が低下する結果、再生出力は減少するので、 d_{RP} と共に d_{RC} は小とする方が有利である。しかし、図4にみるように記録信号電流量 I_{RC} とも関連して記録磁界強度が過大となった場合、ひずみの発生および磁化状態の特異性⁶⁾ から再生出力が逆に減少することにも注意を要する。

3.2.2 ねじり振動の検出特性

試作測定装置系の総合的な検出特性を知るために、加振器を用いて再生ヘッドを定速で回転する信号円板の接線方向に振動させ、相対的に回転速度が平均速度を中心に正弦波状に変動する状態をシミュレートした。

図5がこの結果である。現装置では市販のWFMを使用しており、搬送周波数が3 kHzであることから周波数応答帯域は $\sim 280 \text{ Hz}$ (-3 dB)である。これは従来の測定法²⁾³⁾に比べてかなり広いといえるが、さらに高周波の搬送波を用いれば、より高域までの測定が可能であろう。実験範囲では直線性も非常に良好であった。

4. 横型フライス盤主軸の空転時回転むら

工作機械主軸のねじり振動の解明をすすめるにあたり、試作装置の実用上の問題点を調べる意味も兼ねて、横型フライス盤の空転時回転むらを測定してみた。

4.1 供試フライス盤および実験条件

実験には日立製作所万能フライス盤2 ML型を用い、図6のように装置した。信号円板は主軸のたわみ振動の影響を少なくするようにできるだけ軸受よりに取り付けてある。また、再生ヘッドと記録ヘッドの隔たり角 ϕ は 180° である。供試機は図7にみるように $33\sim 2000 \text{ rpm}$ の範囲で16段階に主軸速度を変換できるが、測定装置の性能を考慮して、実験はこの内 $133\sim 905 \text{ rpm}$ の8速について行った。

図7 主軸速度の変換

図8 主軸系加振応答特性

図8は主軸系の加振応答特性の一例で、テーブルに固定した加振器により実験用工具の刃先位置へ水平方向の

図9 出力波形例

正弦波状加振力を加えた場合で、図では100 Hzを境にしてスケールを変えて表示してある。(a)は加振点での加振方向応答、(b)、(c)はおのおの信号円板外周部の加振方向と加振直角方向の応答である。(a)、(b)、(c)のいずれの場合にも現れる300 Hz付近のピークがこの軸系のねじり共振点を、また(c)の場合のみ消失する80 Hz付近のピークがたわみ共振点であると推定される。その他、図には20 Hz付近にもピーク様のものが、いくつかみられるが、加振器の容量不足から低周波数域の応答は明確ではない。

4.2 実験結果とその考察

図9は主軸回転数を変化した場合の各回転数での出力波形の一例である。先に述べたように本波形をそのまま速度変動波形として取扱うことには問題があるが、この未補正データを用いて変動状態を推定することは可能である。供試機では第5軸(主軸)のギヤ1(図7)が作動する高速回転時(300 rpm以上)とギヤ2が作動する低速回転時(224 rpm以下)で速度変動の様子がかなり異なり、低速回転時には高周波成分が著しく増加することなどを知り得る。図10は、これらのデータを周波数分析した結果で、図2で述べた補正を施してある。100 Hz以下では、各回転数共20 Hz付近を中心とする一、二の優勢なピークがみられるほか、いくつかの周期性の

図10 周波数分析図

あるピークがあらわれている。また、100 Hz 以上では高速回転時のパターンが割合平たんで、かつパワーも低いのにに対し、低速回転時には 300~350 Hz 付近に優勢なピークをもつことがわかる。なお、パターンが 300 Hz 付近から全般に右下がりの傾向を示しているのは、測定系の周波数特性(図5(a))によるものである。同一条件での数回の測定データについて以上の分析を繰返し、変動率 $K_n = 0.05\%_{p-p}$ 以上およびピーク・デプス差 5 dB 以上のピークに注目して、主軸回転数と卓越周波数の関係を整理した。図11にこの結果を示す。この結果から供試機の空転時回転むらには主に次の4つの成分から成っており、最も優勢な成分は $K_n = 0.2 \sim 0.3\%_{p-p}$ 程度であった。

(1) 主軸回転数に比例する成分で、主軸の偏心、ふれまわりなどに起因すると思われる。特に偶数次高調波成分 $2kn_0(\text{Hz})$ ($k=1, 2, \dots$) が顕著に現れるが、本実験では $\varphi=180^\circ$ としたため $2kn_0(\text{Hz})$ 付近で補正量が最大になるので、 φ を変えた場合の検討も必要であろう。

(2) 各回転数に共通で、かつ最も優勢な 20 Hz 付近(16~22 Hz)の成分。機械各部の単打撃テストにより推定するところでは、15~30 Hz に共振点をもつ動力伝達用 V ベルトのばたつきによる成分と思われる。

(3) 224 rpm 以下の低速回転時に顕著な 300~350 Hz の成分。図8の結果から主軸のねじり共振に基づく成分と考えられる。低速時と高速時におけるこの成分の差異には質量の大きなギヤ2(図7)の慣性効果が関係あるう。

図11 主軸回転数-卓越周波数の関係

図12 空転時記録方式と同時記録再生方式の比較

(4) ギヤから発生するギヤノイズに起因する成分。図中矢印で示すのは、種々の伝達ギヤが発すると考えられるギヤノイズ(歯数 $\times n_0$)の周波数で、高周波域のピークにはこれとほぼ一致するものが多くみられる。この内、特にギヤ4とギヤ10のかみあいにより発生する成分は破線で示すように系統的に現れており、この部分に何らかの欠陥が予想される。

なお、図12は同一条件における独立した2回の実験に対するスペクトルの比較(実線と破線)で、同時記録再生方式(A)と共に同一状態に対する空転時記録方式(B)による結果も示している。後者の再現性に問題があるのに対して、前者のそれは良好で、このような微小変動に対する同時記録再生方式の有効性を示している。また、この例でみるように測定方式の違いによる測定値の差異は大きいときで $0.5\%_{p-p}$ 程度であるから、重切削

時などのかなり大きな変動量の測定には空転時記録方式も十分有効といえよう。

5. 結 論

工作機械主軸系のねじり振動の実験的解析に役立てる目的で、音響機器の回転むら測定に用いられる市販のワウフラッタメータを応用した測定手法を考察し、その特性を検討するとともに、その応用性を調べる意味も兼ねて、横型フライス盤主軸の空転時回転むらを測定した。得られた結果をまとめると次のようである。

- (1) 試作した測定システムは簡便で、かつ従来の手法に比較して周波数特性も良好(~ 280 Hz: -3 dB)である。同時記録再生方式によれば、変動率 $0.5\%_{p-p}$ 以下の変動も精度よく測定できるほか、切削時に発生するかなり大きな変動に対しては空転時記録方式でも十分有効と思われる。
- (2) 同時記録再生方式の場合、磁気記録再生特性上、試作装置は軸速度 133 rpm 以上でしか使えないが、磁気ヘッドの性能を向上することにより、この限界を1オーダー下げること十分可能である。
- (3) 供試フライス盤主軸の空転時回転むらは最も優勢な成分の変動率が $0.2 \sim 0.3\%_{p-p}$ で、大別して、

(a) V ベルトのばたつき、(b) 軸ぶれ、(c) 軸のねじり振動、(d) ギヤノイズの4つに基づく成分からなる。全回転数で (a) 成分が最も優勢であるが、低速時には (c) 成分も優勢となった。

終わりにあたり、本研究に協力された東啓二 (松下電工)、白国紀行 (国鉄)、秋山稔 (東大大学院) の諸君、および磁気ヘッドの提供をうけた松下電器産業(株)に深く感謝する。また、本研究は昭和49年度科学研究補助金の援助をうけた。

参 考 文 献

- 1) 例えば, B. I. C. R. A. ed.: A Handbook on Torsional Vibration, Cambridge U.P., (1958) 593-629.
- 2) 大野進一, 荒井紀博: びびり振動中の回転数と振動数の変動の測定, 日本機械学会講演論文集, 700-14 (1970) 69.
- 3) 柳下福蔵, 石田健二郎: 工作機械における主軸の回転速度の変動について (第1報), 昭和49年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1974) 67.
- 4) 例えば, 日本工業規格 JIS-C 5521-1972 (ホノモータ試験法), JIS-C 5551-1971 (テープレコーダ試験法).
- 5) 多田正信: 磁気録音機, オーム社 (1965) 23.
- 6) 岩崎俊一, 中村慶久: 磁気記録の基礎理論, 電子技術, 10, 12 (1968) 6.

情 報

通産省・51年度の無人化工場システム開発

通産省は48年度から3か年計画で検討してきた機械工場無人化モデルの研究開発計画に基づき、51年度から素形材加工部門を含めた無人化工場システムの開発を進めることになった。

工場無人化の研究は機械工業における多品種少量生産部門を対象として、安全、無公害、人間性回復、省資源、省エネルギーなどの観点から取り上げたもので、この成果については米国、英国、西独などの海外諸国からも注目を集めており、同省も今回の研究報告は多品種少量生産のオートメーション化について問題提起をしたものと高く評価している。

そもそも工場無人化モデルの作成は同省が機械技術協会(会長・杉本正雄氏)に開発を委託、同協会が総合委員会(委員長・竹中規雄氏=日本大学教授)と三つの実行委員会を設けて検討を進めてきたものである。

機械工場無人化モデルの基本案件として与えられたのは、①生産形態、②多品種少量生産、③受注方式、④機械工場の4点で、無人化工場の普及時期は1980年代初めに開発、同年代中ごろから普及するとしている。

生産品目は産業機械などの要素となる主要機能部品を生産する工場となっている。

開発するシステムは、①トータルシステム設計、②

在庫管理システム設計、③製造ラインシステム設計、④検査診断システム設計、⑤工場管理システム設計となっているが、このほかにソフトウェアの体系化研究とシステム研究、技術予測も検討対象となっている。

これまでの3か年計画では48年度に無人化機械工場モデルの基本設計、49年度に基本システム設計、50年度に全体のとりまとめを中心としたシステム設計の研究を行った。これに基づき51年度からは従来の研究が素形材については外注を前提としていた点を改め、素形材を含めて工場無人化システムの開発を進める。具体的には自動車、建設機械などに組みこまれているギアボックスを無人化工場で製作するシステムを開発する。

開発委託先はこれまで同様、機械技術協会となる可能性が高く、同省では、システム開発費として1800万円を一般会計に計上している。また同省では工場無人化モデルは多品種少量生産という特性をもった機械工場のために開発されるが、このシステムが開発された場合、多量生産システムへの影響は大きいとみている。

これは多品種少量生産システムにおける技術開発は直接的な形で多量生産にトランスファさせることが可能であるため、機械工場の無人化は技術的にみて波及効果が大きい。(服部 敏夫)