歯車のかみあい伝達誤差スペクトルの位相測定*

林 巖** 林 輝**

On a Measurement of Phase of Transmission Error of Gears

Iwao HAYASHI, Teru HAYASHI

It was reported a method for measurement of error spectra of transmission error of gears. It is considered to be necessary to know both of the error spectra and its phases in order to express quantitatively a profile of a transmission error and examine a vibration and a noise of gears. This report describes a new method for measuring the error spectra and its phases at a time. On a pair of gears which have a pressure angle error, a transmission error curve which was composed from the experimental results is compared with a theoretical curve. It was shown that phases of each component were measured with approximately sufficient accuracy, and it is possible to express quantitatively a magnitude and a profile of a transmission error of gears.

1. 緒 言

歯車伝達機構の性能を評価するには、そのかみあい伝達誤差が重要な一項目であり、その振幅だけでなく、誤差曲線の形状も考慮しなければならないことが従来から指摘されている。ここでかみあい伝達誤差曲線は周期関数であることに着目し、これをフーリエ級数に展開して各成分の大きさと位相を用いて表示すれば、かみあい伝達誤差はその振幅だけでなく、形状も含めて定量的に数値で表現することができる。今回、このかみあい伝達誤差成分のうち、特に歯車の振動と騒音に関係が深いと考えられる歯形誤差による成分について、その位相を、前に報告した誤差スペクトルの測定と同時に測定する方法を試みた。以下この結果について述べる。

2. 一般のフーリエ級数における位相と

本測定法における位相との関係

一般に変数 θ についての周期関数 $f(\theta)$ を、フーリエ級数に展開すれば、

$$f(\theta) = a_1 \sin(\theta + \varphi_1) + a_2 \sin(2\theta + \varphi_2) + \dots + a_n \sin(n\theta + \varphi_n) + \dots \quad (1)$$

となる。これを1次成分と2次成分について図示すると図1(a)のようになり、1周期ごとのパルスからの位相角はそれぞれ $\varphi_1, \varphi_2/2$ 、一般に φ_n/n となる。ところが本測定法では、1次成分が n_1 (rpm) で現れるとすれば、2次成分はその1/2の回転数 $n_1/2$ rpm で現れる。これを

図示すると図1(b), (c)のようになる。図から明らかなように2次成分の1周期ごとのパルス間隔は1次成分の2倍である。したがって1周期ごとのパルスからの位相角を時間軸上で測定すれば、図示してあるように、それぞれ φ_1, φ_2 、一般に式(1)における位相角 φ_n に相当する量が得られる。このことは図1(a)におけるように、測定される一般の位相角 φ_n/n を n 倍する必要がなく、ただちに φ_n が求められることを示しており、測定上非常に好都合である。

さて位相を測定するに当たっては次に記すようにデジタルの手法を用いた。

図2のように正確な一定周波数のパルスを発生させて

図1 成分の現れ方と位置

* 原稿受付 昭和49年2月12日。福井地方講演会(昭和48年11月16日)にて発表。

** 正会員 東京工業大学精密工学研究所(東京都目黒区大岡山2-12-1)

図2 デジタル手法による位相測定

図4 基準パルス発生回路

図3 位相測定の信号系統図

図5 電磁検出器

おき、1周期ごとのパルスでONになり、狭帯域フィルタからの正弦波出力信号が0Vを横切り上昇する点でOFFになるゲートを通す。このとき通過したパルス数を数える。この数を m_i とし、1次成分の1周期内に入るパルス数を m_0 とすれば、 m_0 が360度に相当するから、所要の位相角 φ_i は次式から求めることができる。

$$\varphi_i = \frac{m_i}{m_0} \times 360^\circ \quad (2)$$

実際の測定ではパルスの計数値をD-A変換器に入れ、直流電位に変換して記録した。なお使用したD-A変換器はバイナリ10ビットで、その最高分解能は1パルス当たり約0.35度である。

3. 位相測定の系統図と試作回路

位相測定の系統図を図3に示す。図の上半分の回路は前に報告した誤差スペクトルを測定する部分で、下半分が今回試みた位相を検出する部分である。

各部の動作は次のとおりである。

基準パルス発生器は図2の基準パルスを発生する部分で、周波数の不安定による誤差がそのまま位相出力に現れるので、特に安定度の高い水晶発振回路を用いた。なお使用した水晶発振子の発振周波数が2MHzと高かったので、フリップフロップで周波数を低減し、実験では図4の70.5kHz端子を使用し基準パルス信号とした。

ゲートは通常のNANDで構成した。ONパルスは、歯車自体を1歯ごとの割出しに用い、図5に示す電磁検出器から信号を取り出し、歯がちょうどその中心を通過する時に回転基準パルスが発生するように、微分整形して用いた。この方法は試験歯車を交換するたびに、1歯ごとの割出し装置を作る必要がないこと、一般に歯車のピッチ誤差は数十 μm 以内であるから、きわめて正確な周期パルスが得られるなどの長所を有する。OFFパルスは、比較器およびその付随回路からなるゼロクロス検出器に狭帯域フィルタからの正弦波出力信号を入れ、

図6
試作した位相測定回路

表1 歯車の諸元

モジュール	4.0
圧力角	20°
歯数	21
歯幅	14 mm
転位係数	0
材質	SKS3
熱処理	高周波焼入れ
仕上方法	マージ研削

ビニオン、ギヤ共に同じ

図7 歯形測定例

0 Vを横切って立上がる点で取り出し、ゲートをOFFにする。この間に通過したパルスを次の2進10けたカウンタで数え、いったんラッチ回路に保持したのち、D-A変換器を通して、直接X-Yレコーダに記録できるように直流電位に変換した。

最後の追跡保持器、20 mV 検出器およびピーク検出器は位相出力がX-Yレコーダに読みやすい形で記録されるようにするための回路で、次のように作動する。図3で、スペクトル波高値出力が現れはじめて、20 mVを越えると、20 mV 検出器がパルス（追跡命令信号）を発生し、追跡保持器がD-A変換器の位相出力を追跡しはじめる。スペクトルがピークに達するとピーク検出器がパルス（保持命令信号）を発生し、ピーク時の位相出力を保持する。次のスペクトルが現れ20 mV 検出器が再び作動し、リセットされるまで追跡保持器はピーク時の値を保っている。したがって位相はX-Yレコーダ上でスペクトルのピーク値に相当する点から一定の値を保っている部分の値を読取ればよい。

以上の主要回路に、遅れ回路、記憶回路など若干の付属回路を加え、デジタルIC、リニアICなどを用いて試作した回路を図6に示す。

○内の数字は測定順序を示し、同番号どうしが対応する

図8 位相とスペクトルの測定結果

4. 測定結果および検討

4.1 測定値の再現性について

今回の実験は、歯車の静的かみあい伝達誤差を測定するため、歯面が分離しない回転数範囲で測定を行えるよう、新しく試作した120 Hz、80 dB/oct 狭帯域フィルタを用いて行った。

研削により図7に示すような圧力角誤差をつけた歯車をかみあわせて、連続3回測定した結果を、スペクトルは横軸を1 μm ずつ下げ、位相は横軸を180° ずつ上げて、図8に重ねて示す。表1に試験歯車の諸元を示す。データの記録には2現象X-Yレコーダを用い、誤差スペクトルの波高値と位相を同時に記録した。図8で各スペクトルのピーク点に対応する位相の点(図中白丸の点)が、ピーク点よりも左側にずれているのは、X-Yレコーダのペンが互いに2 mm くらい離れているためである。

図 11 測定値から合成した波形と静的誤差波形の比較

理論値との差が低次成分になるにつれて大きくなる。すなわち位相遅れの測定値が段々と理論値よりも小さくなる傾向が見られる。このことを図 10 において考えると各成分の位相遅れ ϕ_n が低次になるにつれて図から求められる値より少しずつ小さくなる。すなわち回転数が上昇するにつれて回転基準パルスの発生する位置が、理論上の発生する点である D 点より図の P 点より少しずつ移動するためであることがわかる。これは回転基準パルスを作るために試作した微分整形回路が原因であり、微分回路は高い周波数に対して高いゲインを有するため、雑音の点から、入力信号に対して微分された出力信号の位相が完全に 90° 進むように十分に時定数を小さく選べず、角度にして数度の位相遅れがあり、回転数と共に回転基準パルスの周波数が高くなり、位相遅れが少しずつ大きくなることによるものと考えられる。

次にほぼ十分な精度であることを確かめるために、表 2 の 2 回目の測定で得られたスペクトル波高値と位相遅れの値、および理論値欄のそれらの値を用いて逆にかみあい伝達誤差曲線を合成し比較した。その結果を図 11 に示す。

実線で示した測定値から合成した波形の振幅は、破線（理論値の 6 次以上の高調波成分を除いて合成したもの）および二点鎖線で示した理論波形の振幅とはほぼ一致している。次に形状を調べると測定値による曲線が理論曲線

よりも $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 大きくなっている部分があるが、この誤差は振幅に対して 10% 前後の値であること、またここで試みた例は約 $14 \mu\text{m}$ の振幅を有する歯車にとっては厳しい形の伝達誤差で、このような場合でもほぼ 10% 前後の誤差で測定できていることから、本測定法によってほぼ満足できる精度で位相が測定できるものと思われる。

5. 結 論

以上の研究の結果得られた結論をまとめると次のとおりである。

- (1) 今回試みた方法により、かみあい伝達誤差の各スペクトル成分の位相を、そのスペクトルと同時に測定することができた。
- (2) かみあい伝達誤差の各スペクトル成分とその位相を同時に測定する本方法は、回転数が高いところでは歯車の動的な影響を考慮しなければならないが、本論文に示したように回転数が低い範囲で行えば、静的なかみあい伝達誤差の測定、および表現のため、非常に有効な方法になりうるということがわかった。

なお、こうして本測定法により得られるかみあい伝達誤差の一つの表現法であるスペクトルと位相の 1 組の数値と、歯車の振動および騒音などの動的性能との関係については、次報以下にて報告する。

本研究を進めるに当たり、親切にご指導いただいた本精密工学研究所・今井聖助教授に厚くお礼申し上げます。また本研究の一部は昭和 48 年度文部省科学研究費補助金（奨励研究 [A]）を受けて進めることができたものであることを記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 林 巖, 林 輝: 軸系の振動を応用した歯車のかみあい精度測定法, 精密機械, 39, 10 (1973) 1009.
- 2) I. Hayashi and T. Hayashi: A New Measuring Method of Transmission Error of Gears, Bull. TIT, 119 (1973) 85.