歯車の新しい精度測定法

石川 二郎*
Jiro ISHIKAWA

1. まえがき

動力伝達機構としての歯車装置は最近ますます高速、高負荷となり、その振動騒音の減少とともに小形軽量化に対しても大きな進歩が要望されている。そこで歯車の精度の向上をはかるために、その工作法の進歩改善に対して大きな努力がはらわれてきた。したがって歯車の精度測定もますますその高精度化がはかられてきたが、歯車の形状がきわめて複雑であり、その適切な測定法に乏しく、またその運転条件も多種多様であるために、歯車の誤差が歯車の性能にどのような影響を与えるかについては、ほとんど明らかにされていない。したがって歯車の設計に際しては従来の経験と工作能力を考慮して、その精度等級の指定を行っているのが現状である。例えば周速度の大きい増速機用歯車ではその精度として JIS B 1702 1~2 級を、自動車用歯車では 2~5 級を、などと指定を行っている。その精度等級はピッチ、歯形、歯すじなどの歯車の数種類の個別の誤差の精度等級によって与えられている。このような歯車精度に対する取扱いは我が国ばかりでなく世界各国でも同様である。

しかしながら歯車の静的な性能はその歯車が誤差のない理想的な歯車、あるいは相手歯車とかみあったときの回転伝達誤差と歯面の歯当たりの良否によって評価さるべきであると考えられるにもかかわらず、従来の方法による個別誤差の測定値からはかみあい誤差、歯当たりなどを推測することは困難である。そこで筆者などは歯車の性能を直接あらわすような歯車の誤差の新しい表現法を提案し、それに対する測定機の開発を試み、所期の成果をあげることができたのでその概要を述べたい。

2. 一歯面かみあい試験

被測定歯車を親歯車とかみあわせ、その回転伝達誤差を測定する方法は一歯面かみあい試験とよばれ、歯車の性能を直接的にあらわす測定方法として、古くから研究用としての価値が認められてきたが、最近世界各国でその実用機の開発が行われた(表1参照)。

図1に示す筆者らの考案による親ウォームギヤ方式の試験機⁽¹⁾は再現性、安定性などがよく、自動車工業の生産現場にも使用されている。この機構では高精度に研削仕上げされた平歯車を親ウォーム歯車として使用し、さらにその誤差および親ウォームの周期誤差を補正することによって2秒程度の回転角誤差の高精度親ウォームギヤを回転の基準とし、被測定歯車の回転角誤差を被動側の親ウォームの軸方向変位として検出するものである。

図1 親ウォームギヤ方式一歯面かみあい試験機 (T_1, T_2 : 試験歯車, W_1, w_1, W_2, w_2 : 親ウォームギヤ)

* 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)。

歯車の騒音とかみあい誤差との相関関係について実験が行われ、この試験機が歯車の騒音対策として用いられている。図2は自動車用ハイポイド

図2 自動車用ハイポイドギヤ ($z_1=8, z_2=37$) の一歯面かみあい試験

ギヤのオフセット量を変化させてかみあい誤差を求めたものであり⁽²⁾、従来の試験機では得られないような結果を容易に求めることができる。

一対の歯車軸に精密な角度目盛板をとりつけて両軸の回転角を検出する方法として3種類の試験機が開発されている。NEL, および Zeiss の方式ではいずれも高精度のガラススケールを使用し、それから得られるパルスを試験歯車の歯数に相当して乗除計算を行った後、駆動軸、被動軸からのパルスの位相差から歯車のかみあい誤差を求めている。筆者らの研究による演算式試験機⁽³⁾は図3に示すように被動軸の回転によるパルス数の測定値を理論値と比較することによって誤差を求めるものであって、計算法が簡単であるなどの大きな特長がある。また角度目盛板として回転形磁気スケールを使用しているが、ガラススケールと異なりその書込みおよび消去がきわめて容易である特長を利用して最近直径2.2mの大形スケールの製作にも成功した⁽⁴⁾。これを利用することによって大形ホブ盤のホブ軸とテーブル軸との回転伝達誤差を測定できるばかりでなく、大形歯車の歯形、歯すじ、およびピッチ誤差の測定などにも応用することができる。

表1 一歯面かみあい試験機の種類と特長

	種 類	開 発 者	特 長
機 械 的 方 法	ピッチ円板の摩擦伝動を基準とするもの	サウラー社, 和栗, 石川など	ピッチ円板を用意する必要がある。
	速比が変化する機構を基準とするもの	サウラー社, マーグ社, オメガ社	機構は複雑で精密な部品を必要とする。
	親ウォームギヤの回転を基準とするもの	東工大(大阪精密機械)	超精密親ウォームギヤが必要。
回 転 計 算 方 法 に 振 動	両軸にとりつけた回転振動計の位相差を検出する方法	アーヘン工大, 古川, 高野など	回転中の回転むらを検出する。取扱いは慎重を要す。
シ ン ク ロ ー ズ ン ル ク 方 法 に レ	低速軸にとりつけた角度発振器の出力とそれに同期して回転するように高速軸にとりつけたシンクロレゾルバ出力との位相差を検出する方法	チェコスロバキア 工作機械研究所	換え歯車が必要。構造は複雑。
角 度 測 定 処 理 の パ ル ス 方 法 を	両軸にとりつけた角度測定器からのパルスの位相差を検出する方法	NEL (ゴールダ・ミクロン社) ツアイス社	ガラススケール使用。厳密には駆動軸の速度変動が影響する。ガラススケール使用。歯車の歯数によってサンプリング点に変化する。
	両軸にとりつけた角度測定器からのパルスを演算して誤差を検出する方法	東工大, 電通大	磁気スケールで大形のものも製作可能。上述の欠点はない。計算が簡単でミニコンも使える。

また一定の比で回転する一对の軸間の回転角の誤差を検査する一歯面かみあい試験機の特性を利用して、すぐばかさ歯車の歯形を検査することができる⁽⁵⁾。

一歯面かみあい試験によれば歯車のかみあい誤差が短時間に求められるので製品検査としては適切なデータが得られるが、かみあう歯面の最高点しかかみあいに参加せず、その他の部分の歯面については何ら情報が得られないばかりでなく、単体としての精度を求めるためには高精度の親歯車

を必要とするなどの大きな欠点がある。このような観点から歯車の精度測定法としてよりすぐれた方法が要望されることは明らかである。

3. 座標測定による歯車精度測定法

3.1 歯車の誤差 まず円筒歯車の軸に直角な一断面について考察する。図4に示すように誤差のない理想的な歯形を考えれば、その歯形との差すなわち図示の黒い部分がこの歯車の誤差である。特に一つの歯だけに大きな誤差があることもすくなく経験されるので、すべての歯についてこのような誤差を測定できれば理想的である。

最近になり計測器も進歩し、その測定値をすぐタイプしたり、記憶したりすることが容易となり、また電子計算機の飛躍的な発達によって膨大な量の得られた結果の計算処理やその表示などがきわめて短時間に可能となってきたので、それらの技術を全面的に利用することによって歯車誤差の適切な表現法と測定法の開発を試みた。

3.2 直角座標法による方法⁽⁶⁾ 図4に示すように測定する歯車の中心を原点とする x, y 座標を考え、歯形上の点を適当な間隔で測定する。1番めの歯の理想的インボリュート曲線の起点 S が x 軸にあると仮定すれば、 N 番めの歯の測定した歯形上の点 $Q(x, y)$ の理論歯形との差、すなわち誤差 f は次式で求められる。

$$f = r_g \tan \eta + (N-1)t_e - r_g(\xi + \eta)$$

ただし

$r_g = zm \cos \alpha_0 / 2$: 基礎円半径, $t_e = \pi m \cos \alpha_0$: 法線ピッチ, z : 歯数, m : モジュール, α_0 : 基準圧力角であり、

$$\tan \xi = y/x, \cos \eta = r_g / \sqrt{x^2 + y^2}$$

また

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} - r_g$$

であるので原点より $s = \rho + (N-1)t_e$ の点の垂直線の上に f の値を図示する。

この方法は腕時計用の小形インボリュート歯車から、直径 1 m 程度の大形歯車にいたるまで適用することが可能であり、解析的に求められた歯形であればインボリュート歯形以外の歯形に対しても適用することが可能である。図5は腕時計用歯

図3 演算式一歯面かみあい試験機

図4 歯車の誤差と直角座標法による精度測定法

図9に示すようにパルスモータでつぎつぎに歯が割り出されて測定が行われ、回転と直線のディジタルの出力がただちに計算機で処理され、歯車の誤差が紙テープにパンチされると同時にD-A変換されてペンオシログラフで記録される。図10

図9 自動歯車精度測定システム

は各種の工作法による $\alpha_0=20^\circ$, $m=4$, $z=24$ の平歯車について測定を行った結果である。工作法による歯車誤差のあらわれ方をめいりように示している。さらに紙テープに記憶された結果はミニコンによって、図11に示すように調和解析が行われ、誤差の特徴を明らかにすることができる。また図10の結果の最高点をつらねれば図12に示す一歯面かみあい誤差 f が得られ、歯車の角度伝達誤差が求められるばかりでなく、その一次微分 K_θ (角速度変動率)、および二次微分 K_a (角加速度係数) などが容易に得られ、歯車の動的な性能を論ずる場合の有益な資料となる。さらに二対かみあいにおける相隣る歯の不一致を示す誤差 (e) すなわち $e=f(N+1, \xi)-f(N,$

図10 各種の工作法による歯車の法線極座標法による測定結果

図11 測定結果の調和解析

図12 測定結果のミニコンによる処理 (図10における No.5 歯車)

5) も求められ、この歯車が二対かみあいが行われるか否かなど歯車の歯当たりの状態を知るために必要な資料が得られる。図示の歯車が駆動歯車の場合には、二対かみあいの始まる点で約 $10\mu\text{m}$ 衝撃的に相手歯車をおし進めることになり、好ましい傾向でないことなどをめいりょうにあらわしている。

このような歯車精度測定法と誤差の表現法⁽¹⁰⁾によりはじめて歯車の誤差と歯車の性能とを直接結びつけることが可能であり、歯車の設計の段階において誤差の影響を考慮に入れることができ、また加工法の違いによる歯車誤差の特長を見出すことが可能である⁽¹¹⁾。

4. あとがき

(1) 歯車の回転伝達誤差を直接あらわす一歯面かみあい試験機の実用機が完成した。

(2) 新しく提案した座標測定による歯車精度測定法により歯車の性能を直接評価し得る歯車の精度測定法と測定機が開発された。

これらの研究成果は、東京工業大学精密工学研究所において多年にわたって筆者とともに仕事を続けてきた数多くの研究者、院生、学生諸氏の尽力によるものであって、ここに厚く感謝したい。

(原稿受付 昭和 51 年 6 月 1 日)

文 献

- (1) 石川・富井, 精機学会昭和 43 年度秋季学術講演会前刷, (昭 43-11), 337.
- (2) 富井・石川, 精機学会昭和 44 年度秋季学術講演会前刷, (昭 44-10), 15.
- (3) 梶谷・ほか 2 名, 精機学会昭和 48 年度秋季学術講演会前刷, (昭 48-10), 193.
- (4) 梶谷・ほか 3 名, 精機学会昭和 49 年度春季学術講演会前刷, (昭 49-4), 185.
- (5) 桜井・ほか 2 名, 精機学会昭和 50 年度秋季学術講演会前刷, (昭 50-11), 433.
- (6) 石川・石川, 精密機械, 42-6 (昭 51-6), 44.
- (7) 石川・ほか 2 名, 機講論, No. 757-2 (昭 50-7), 93.
- (8) 梶谷・ほか 2 名, 精密機械, 36-9 (昭 45-9), 49.
- (9) 石川・ほか 3 名, 機講論, No. 750-9 (昭 50-8), 283.
- (10) 下条・ほか 3 名, 機講論, No. 760-14 (昭 51-10), 140.
- (11) 内山, 機械の研究, 24-12 (昭 47-12), 46.

原子力の工学的安全研究の 5 箇年計画 (その 3)

(1091 ページより)

(5) 放射能の放出低減化に関する研究＝軽水炉の通常運転時における放射能放出量の低減化については 50 年 5 月に原子力委員会が定めた発電用軽水炉施設周辺の線量目標値に関する指針を一つの目標として技術開発が続けられる必要がある。

一方、原子炉事故の被ばく評価を行うために放射能放出過程の解明および放出低減化の過程に関する知見を確保しておく必要がある。

また、再処理施設からの放出低減化や施設内従業者の被ばく低減化に対しても「実用可能な限り低減する」(ALAP) 精神を指向した研究を続ける。

大気を経由する拡散沈着は国の事情により取り上げべき項目もかなり異なるが、特にわが国の人口過密、国土のせまさなどを考慮するといっそうデータの積み上げ、独自の解析法が要求される。

(6) 原子炉施設などの確率論的安全評価に関する研究＝原子炉施設などの安全評価手法としては、(i) 十分に安全余裕のある仮定を用いて事故とその経過を解析し、公衆への放射線影響を解析、推定し、それを基準に公衆との隔離および事故を仮定したときの危険度を評価する方式の安全評価、(ii) 各種の事故を想定し、その予想発生ひん度とそれによって公衆が受けるかも

知れない災害を確率論的手法で評価するものがある。

後者の確率論的评价は定量的危険度解析法を基礎として事故の確率およびその影響を解析し、原子炉施設の安全評価を行うもので原子炉施設の安全の理念に一貫性をもたせ異なる種類、異なる設計の原子炉の安全性を比較検討する場合や原子炉施設の安全性を他の一般施設と比較する場合に必要である。

そのため原子炉施設の事故影響を想定された事故の発生確率と組み合わせて評価する確率論的安全評価手法を開発する。

(7) 原子炉施設などの耐震に関する研究＝耐震設計の目的は原子炉施設などがその供用期間中にかりに大地震にあった場合でも公衆が放射線障害を受けないことを保証することによる。

そのためには原子炉施設などの敷地に起こると考えられる最大の地震を予測、その地震に対しても原子炉が重大事故を起こすことなく、かつ安全停止状態に維持する機能を損わないよう技術的対策をたてる必要がある。

そこで、今後耐震安全研究を積極的に実施し、より正確な安全評価を行うとともに、それを通して原子炉施設の耐震性をより向上させる。

〔服部 敏夫〕