電力監視を基にした工作機械の診断技術*

Diagnosis Technology of the Machine Tool Based on Electric Power Monitoring

伊藤一夫**
Kazuo ITO

Key words electric power diagnosis, tendency management, loss detection of the tool, accident diagnosis

1. 緒 言

筆者らの工場では、エンジンおよびトランスミッションの部品を量産加工している。工具はできる限り長く使用し、工具を含めた工作機械の故障は、できる限り早期発見するというのが長年の課題であった。工具の寿命は、経験的な加工数の設定による交換、工具の欠損はタッチセンサによる工具先端の有無検知、工作機械の故障は音、振動、温度等による診断方法がある。筆者らは、30年ほど前から工作機械のスピンモータの消費電力による工具を含む工作機械の劣化診断に取り組んできた。

工具が摩耗すると、切れにくくなり回転数が低下し、回

転数を戻そうと電力が上昇する。工具が欠損するときは大きな抵抗が発生するために、回転数を保とうと電力が急激に上昇する。工作機械のボールベアリング、リニアガイド等が劣化すると、動きにくくなるために電力が上昇する。このように、駆動源であるモータの電力を観察すると諸処の異常を検知することが可能である。

図1は3.7kWのモータの特性図である。加工負荷を知るために簡便なクランプメータによる電流計測があるが、図1のように負荷が1kWから2kWに上昇しても電流は数%しか上昇していない。昨今は、サーボアンプやインバータによりモータの回転制御、負荷制御をしている。中には、電流は低く抑え、電圧を大きく変化させて負荷制御しているものもある。このように、電流では加工負荷を計測できない場合がある。対して電力は式(1)のように、低負荷領域で大きく変化する力率を掛けているため、負荷と電力は比例している。また、工場の一次電圧は、駆動している機器の数量により変動する。モータは、一次電圧が下がったときには電流を上昇させて負荷を一定にしようとする特性があるため、負荷とは無関係に電流は上下する。

なお、工作機械では、電流による過負荷検知装置が装備されている。これは、工作機械を壊す前に停止させるための安全装置のため、100%負荷時の電流値以上が判定値になっているので、電流でも目的を達成できる。ただし、工具の摩耗、欠損、ベアリング、リニアガイド等の工作機械の構成部品の劣化時の電流変化がわずかのときには検知できない。

なお、本稿では電力診断の意義、実用化のための技術と事例の紹介およびネットワークによるモニタリングシステムの利便性を中心に述べる。

$$P(\text{ワット}) = \sqrt{3} \times V(\text{ボルト}) \times A(\text{アンペア}) \times \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 P ：電力、 V ：電圧、 A ：電流、 $\cos \theta$ ：力率

図1 モータの特性図

2. 電力診断の意義

直接目で見えない加工点を見るためには、各種の設備診断機器や計測機器を用いなければならない。しかし、それでも直接加工点が見えることはまれで、間接的にしか見え

*原稿受付 平成28年12月12日

**愛知機械工業(株) (名古屋市熱田区南一番町1-10)

図2 気温による電力変化

ないことが大半である。直接、加工点を見ることができないため、被削材の温度や軸受の振動を測って代用値として用い、それを介して加工点の状況を判断しているのである。生産現場では、たくさんの計測機器を用いて設備の状態を観察している。物理量を定量的に計測したデータを解析して、目的とする箇所を的確に判断するには、豊富な診断経験が必要である。現場の設備診断技術は、こうした経験値の上に発展してきており、故障の原因調査や設備停止時期の判断などに活用されてきた。

加工点が正常に動いているかを知るために、工具保持部の振動の計測、作動油の温度や汚れ具合の調査、軸の回転数の変動等にて判断している。そこで、工具を回転させている駆動源であるモータの負荷変動を追っていくと、加工が正常か異常かだけでなく、工作機械の異常の予兆や原因までを知ることができるということが分かってきた。

3. 診断装置の開発

1995年に筆者らは、電力診断の有効性が確認できたため、工作機械に常設する小型で安価な診断装置の開発を開始した。当初はパソコンを使用してデータ取り・データ解析を実施した。この期間に取得した特徴的な波形が図2であり、これが診断装置の主要技術の開発の原点となった。当時より存在した各種センサのアナログ信号を取り込んで診断する市販の波形判定装置は、正常時の実測波形に倣って作成した上限判定波形、下限判定波形を超えたときに異常とする装置であった。実際に使用したが、結果的には実用には至らなかった。この理由が図2の波形であり、工作機械の気温に左右されて、電力が大きく変化しているのが分かる。工作機械では、潤滑油や作動油を使用している。気温が低いときには粘度が高くなるため、回転抵抗が大きくなり、電力は高くなる。気温が高いときには、逆に粘度が低くなるため、回転抵抗は低くなり、電力は低下する。これは、季節の気温変化だけでなく、土日に設備を停

図3 トレンド曲線

止させた後の月曜日は、しばらくは電力が高く、暖気運転後は低くなるということもある。ここでの着目点は、電力波形は平行移動しているだけで加工電力（無負荷時の電力を引いた電力）は安定していることである。なお、当時の工作機械は、送りが油圧フィードユニットであったため、加工時間も変動している。図2のグラフのように、縦方向も横方向も工具の状態は変わらないのに変動しているため、工具診断には波形診断は実用的でないとの結論を出した。

開発した装置では、診断する範囲を指定して、その範囲内の最低値（無負荷時電力）と最大値（加工中の最大電力）の差（相対値）を求めた。これが最大加工電力であり、1サイクルで1個のデータのみとなり、記憶するデータ数を極端に少なくできた（測定時間40秒の波形データは、サンプリング周期10ミリ秒のとき4000個）。

最大加工電力の変化を常時観察するトレンド診断（傾向管理、現在サイクルの波形のみの診断でなく、過去から現在に至るまでのデータのバラツキを診断する。後述7章参照）を採用した。正常と異常の2状態だけの識別ではなく、正常状態から異常状態に至るまでの遷移が識別できる。図3は本装置の代表的な画面であり、工程ごとに特徴のあるトレンド曲線（下半分のグラフ）が描かれる。これにより、寿命診断と微欠損診断が異なった判定値により可能となった。無負荷時基準の固定判定値による寿命診断、毎サイクル更新する次サイクルの判定値（正常時のバラツキから決定）による微欠損診断が可能である。

本装置は、基本的にはパソコンは必要ない。スタンドアローンな装置であり、パソコンを必要とせず本装置のみで設定から診断までこなす。リアルタイムに診断を下し、即座に工作機械を停止する。本体のSDカードに、異常時の波形を異常発生時の情報（時刻、種類）とともに最大1000波形、それとは別にすべての波形をCSV形式にて10

図4 異常一覧表

図5 工具の加工電力による交換

万波形以上保存できる。過去にさかのぼっての異常解析が簡単にできるように工夫してある。

4. 電力による工具寿命診断

工具交換は、定数交換が主流である。例えば、500 個加工したら交換する方法である。しかし、工具の切れ味は常に一定ではなく再研（一度使用した工具の先端を研磨して切れ味を復元する）の良し悪しによってもばらつく。新品でも切れ味のバラツキがある。メーカーは、寸法保証はしているが、切れ味の保証はしていない。切れ味の代用値である電力による工具交換は欠損のリスクも少なく最大限に工具寿命を延ばすことができ理想的である（図5）。

5. 電力と振動による最適加工条件探索

本稿にて紹介する最適加工条件探索方法は、加工条件

		切削速度				
		90%	100%	110%	120%	130%
送り速度	90%	113	109	153	75	165
	100%	104	100	188	78	188
	110%	98	94	240	75	170

図6 最適加工条件探索

（スピンドル回転数と送り速度）を変更して、加工中の振動と電力を同時測定して最も振動が小さく、電力が安定している加工条件を最適と見なす方法である。加工状態が悪いときには、音や振動が大きくなる現象の逆を狙った方法である。良い条件のときには、加工中の振動、音が小さくなると仮定した探索方法であり、この方法により、工具寿命が10 倍になった事例もある。最適加工条件探索では、振動の方がより明瞭に変化した。電力が不明瞭なのは、モータの回転数を上げれば電力は上昇し、回転数を下げれば電力が低下するのは当然であり、条件の最適化による電力の低下との区別が付きにくいからである（図6）。

6. 実用化のための技術

量産加工の工作機械に実用的に使用するためには、診断技術のみでは不十分であり、6.1~6.5 節に示す技術が必要である。

6.1 測定開始の位置をそろえて誤判定をなくす

測定開始は工作機械から開始信号をもらう。開始信号は、例えば被削材のクランプ限の近接センサがON した後のスピンドル回転指令と同時に工作機械側が出力する。このタイミングにはバラツキがないと思われるが、実際には本装置と工作機械の処理のバラツキによりタイミングもばらつく。さらに、スピンドル回転から工具が被削材に接触するまでの時間のバラツキもある。

そこで、測定開始後に指定位置にて無負荷時状態から指定値以上に電力が上昇（加工開始）するまで待機する機能（第2 内部トリガ機能）を設けた。これにより、常に波形グラフの同じタイミングで電力が上昇（加工開始）する。

6.2 診断に必要な波形は無視する

起動電力および停止（ブレーキ）電力は、加工はしていないが大きな電力を示す。ここを診断してしまうと異常となる。診断は加工中のみとしたいので、この区間を自動的に無視する機能を設けた（キャンセルタイム機能）。

6.3 低負荷時の計測は拡大して診断を容易にする

マシニングでは、大きな出力のモータで小径の穴を加工する場合がある。このとき加工負荷は数%程度であり、無負荷時との差が小さく判定が困難である。そこで、スケールリングとオフセットにて、モニターに大きく拡大表示して判定しやすくした。なお、本装置の拡大機能は数値の拡大だけではなく、測定分解能も上げている。50 倍に拡大すると測定分解能も 50 倍にしている。倍率は最大 100 倍まで可能である（スケールリング&オフセット機能）。

6.4 モータの回転数に依存しない電力測定方法

モータが 50 Hz で回転しているときは、1 周期が 20 ミリ秒である。瞬時の変化も見逃さないためには、最低でもサンプリング周期は 10 ミリ秒であり、加工時間が 40 秒のときは、4000 点の測定が必要である。モータが 400 Hz で回転しているときには、1 周期が 2.5 ミリ秒であり、同じく 40 秒間の測定では、32000 点必要となる。このように、モータ回転数からサンプリング周期と測定数を決定する必要がある。本装置は、どんな回転数でもサンプリング周期は 10 ミリ秒、測定数は 4000 点でよい。これは本装置の実際のサンプリング周期は、常に 0.125 ミリ秒であり、1 サンプリング間（50 Hz のときは 10 ミリ秒分、400 Hz のときは 2.5 ミリ秒分を 4 回）測定後に、1 サンプリング間の最大電力を代表値として記憶しているからである。本機能により、モータの回転数を意識せず、サンプリング周期と測定数を決定できる。前項の拡大機能と同様に、瞬時の変化を見逃さない仕組みが組み込んである（図 7）。

6.5 データ数削減のため加工時電力のみを抽出

マシニングで複数穴を加工する場合、1 個加工した後に次の場所へ移動する。移動中のデータは必要ないことと、移動時間にバラツキがあると誤検知の原因となるため、本装置にはデータ 0 のときは待機する機能があり、データ数を削減できる。データ 0 がないときは無負荷時電力をオフセットして、強制的に 0 を作り加工中のみを抽出することができる（0 データ待機機能）。

7. 統計手法による判定

7.1 標準偏差による判定

判定には比較的簡単に判定値を決定するために、統計による方法も採用している。本稿で紹介している主要判定方法であるトレンド診断とは、簡単に述べるとバラツキ診断である。例えば、過去 20 サイクル分の最大加工電力の平均値を計算し、正常時のバラツキが平均値に対して $\pm 5\%$ 以内であれば、次の判定値を平均値 $\pm 15\%$ （任意）とする方法である。ここで、変化率（%）でなく、標準偏差で決定することもできる。同様に平均値を求め、20 サイ

図 7 高速電力計算機能

クルの標準偏差を計算する。これを 1σ （式(2)）として次の判定値は平均値 $\pm 3\sigma$ （任意）とする方法である。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

ここで、 σ : 標準偏差、 n : データの数、 x_i : 各データの値、 $\bar{x}$: データの平均

7.2 正規性検定

ダゴステイノ・パーソン検定による正規性検定を採用している。トレンドデータの正規分布からの乖離度を計算して異常診断をする。

7.3 管理図判定

JIS Z 9021 (1998)「シューハート管理図」および JIS Z 9020 (1999)「管理図——一般指針」による管理図判定も採用している。

正規性検定と管理図判定は常時実施し、将来活用するためのデータベースとして記憶している。異常とするか記憶のみとするかは設定できる。

8. 事例の紹介

8.1 小径ドリルの微欠損検知（図 8）

径 5 mm、深さ 100 mm の 3 カ所の穴開けを順番に実行する工程である。移動時にはモータは停止していない。負荷が急激に変化しているところは加工ではなく、大きく回転数変動しているためである。ここを無視するために、オフセット（無負荷時電力を 0 にする）とキャンセルタイム機能（矩形部分を無視）を使用している。2 穴目のドリル欠損時に電力が上昇しているが、折れる前に工具交換することで再研により、再使用できる。

8.2 チップの微欠損検知（図 9）

負荷が少ないので、拡大機能（10 倍）により波形を拡大して判定しやすくしている。欠損時は大きく電力が上昇する（矩形部分）。欠損した状態で加工を継続すると、不良品を大量に製造することとなる。1 個目で検知できれば最小のロスとなる。

8.3 ベアリングの劣化検知（図 10）

半年前に比べ無負荷時電力が交換レベルまで上昇したため、ベアリングを交換した。交換により無負荷時電力が半年前よりも低下した。着目点は交換間際には電力はまだ高

図8 ドリルの微欠損時の波形

図11 6カ所の焼き入れ時の電力波形（無通電時は排除）

図9 チップの正常波形と欠損時の波形（10倍に拡大）

図12 フィレットロールのローラ傷検知装置

図10 ベアリング交換による無負荷時電力の低下

いレベルであり、その後、加工が進むと徐々に低下している点である。ならし運転による回転抵抗の減少が、電力にて一目瞭然である。

8.4 高周波焼き入れの品質管理（図11）

400 A の焼き入れ電流を変流器により本装置に取り込める大きさまで縮小し、コイル移動時の無負荷時電力をカットして判定しやすくした（0 データ待機機能）。コイルの劣化診断と焼き入れ不具合を検知できる。

8.5 フィレットロールのローラ傷検知（図12）

本装置には電力測定機能をなくして、外部センサ信号入力を4個にした4CH仕様がある。4個のロードセルによる応力を同時測定して、フィレットロールのローラ傷を検

知する装置を構築した。4気筒のクランクシャフトでは9個のロードセルを装備しているので、4CH仕様2台と電力仕様（2CHの外部センサ信号入力あり）1台にて、9個のロードセルによる応力とワークを回転するモータの電力を測定する。

9. ネットワークによるモニタリング

本装置にはイーサネットが装備してある。

工場のネットワークに接続すると9.1～9.3節の機能により遠隔にてモニタリングができる。

9.1 指定サーバーへの波形とトレンドデータの保存

本装置は、波形診断は基本的にはしていない。1波形から10種類程度の特徴量（トレンド：絶対値、相対値、最小値、変化量、面積、変化面積、標準偏差等）を抽出して、その変化から異常を検知する。ただし、記憶できるデータ量には限界があり、最大64000トレンドである。設備診断には、例えば半年前、1年前の過去データと現時点との比較が必要となる。そのためにネットワークロガー（図13）にてサーバーにトレンドを保存し、長期間の大量のデータ解析を要する設備診断に有効である。現在は人手による解析であるが、近い将来はAI技術を活用しての自動診断を視野に入れている。

なお、ネットワークロガーは1台のパソコンにて64台の本装置の管理（波形監視、データ収集）が可能である。

図 13 ネットワークロガー

図 14 ワイヤレスネットワークによる遠隔操作システム

9.2 異常時に E メール発信

本装置が異常と診断したときには、Eメールを2カ所へ送信できる。実際に異常なときや設定が不完全なときに、メールが担当者に飛んでくる。その際に現地に赴き調査をする。あるいは、下記の遠隔操作によりデータ収集と判定値の変更が可能である。

9.3 パソコンによる遠隔操作 (図 14)

社内ネットワーク上のパソコンからの遠隔操作が可能である。また、外販先ユーザーの本装置を、汎用のパソコン遠隔ソフトにより遠隔操作することも可能であり、遠方(海外含む)ユーザーの遠隔支援が可能である。

10. ま と め

電力による工具診断および設備診断は広くは浸透していない。電力波形は加工中の動作をイメージ通りに表現して

いる。昨今のマシニングはカバーに覆われ、加工中の動作を観察することが困難であるが、電力波形を見ると一目瞭然である。工具の摩耗の進行を電力と振動の実効値で比較したが、電力では明瞭であるものの、振動では不明瞭であった。また、電力は非常に安定しており、振動のように回りのノイズに影響されることもない。

設備診断といえば振動の周波数解析が主流である。周波数解析は専門的な知識が必要であるが、電力診断は低コストであり、簡便に測定できる。電力では故障場所の特定はできないが、重大故障に至る前の予兆を発見することが可能である。故障場所の多くは経験により特定できるが、困難な場合は、さらに振動解析による精密診断にて、場所の特定をするのが理想的である。

どんな種類の信号も試験的に測定し、時間を要してデータを解析し、異常値を見つけるのは可能である。難しいのは、常時測定し、誤検知も少なく、リアルタイムに自動診断することである。筆者らの装置は、実機設置による検証を20年以上継続している。その間に診断技術の開発以上に時間を割いたのは実用化技術の開発であった。

昨今のIoTによるデータのクラウド上での故障診断は、まだリアルタイム性が劣っており、異常時に瞬時に設備を停止することは困難である。前章に述べたような大量の過去データとの比較による故障診断にはAIを含め有効であるため、これからの工作機械の診断は、「リアルタイム性を求める診断は工作機械の近傍にて実施し、リアルタイム性を求めない、例えば1日に1回のバッチ処理による診断はクラウド上にて実施する」方法が良いと考える。また、診断装置自体の故障のことを考えると、診断装置1台にて設備1台のモニタリングが安全だと考える。昨今のIoTやAIではデータを集めることと、ビッグデータの活用に重点が置かれているが、一番初めに重要なのは、目的に合うデータを見極めて集めることである。無用なデータを大量に集めても、役には立たない。今後は、過去から現在に至るまでのデータの変化から異常を見つける方法の確立に尽力したい。

参 考 文 献

- 1) JIPM ソリューション加工点の見える化研究会 編：最適生産を実現する加工点の見える化技術, JIPM ソリューション, (2008) 20.

伊藤一夫

1979年三重大学工学部卒業。現在、愛知機械工業技術部在職。専門は生産設備のマイコン組み込みシステム開発。主な業務は溶接・搬送ロボット制御、低圧鋳造機の昇圧装置、設備の故障診断装置。著書(共著)は、『最適生産を実現する加工点の見える化技術』(JIPM ソリューション)。