診断アルゴリズム*

松山久義**

Diagnosis Algorithm / Hisayoshi MATSUYAMA

Key words: maintenance, fault diagnosis, diagnosis algorithm, probability theory, fuzzy logic

1. 設備診断システムの構成要素

図1に示すように、対象設備に異常の原因となる事象（以後“原因”と呼ぶ）が発生すると、物理・化学的現象が進行して種々の事象（“結果”）が引き起こされ、パラメータの変化を生ずる。

設備診断システムは、パラメータの変化を観測して信号に変換する“計測技術”と、信号から特徴（“症状”）を抽出する“信号処理技術”と、症状から原因を推定する“診断アルゴリズム”とによって構成される。この構造は、プラントの運転支援に用いる“異常診断”と同じであり、設備診断に用いられる診断アルゴリズムは、異常診断に用いられるものと基本的には同じである。

しかし、異常診断においては、大規模な対象に適用できることが重要であるが、設備診断においては、不確定性の処理が重要な課題となる。

2. 計測・信号処理と診断アルゴリズムの相補性

計測技術、信号処理技術が十分に適用されれば、対象設備から十分な情報が得られ、適切に特徴を抽出できるので、症状 F_i が観測されたことが原因が S_j であることの十分条件になり、症状から一意的に原因を推定することができる。このような場合には、「アルゴリズム」というほどのものを必要としない。

計測技術、信号処理技術が不十分であると、症状をはっきりつかむことができず、また、症状と原因との関係が不明確になるため、できるだけ明確な結論を得

るために複雑なアルゴリズムを必要とする。

3. 診断アルゴリズムの分類

3.1 前向き推論と後向き推論

記号論理学は、論理和、論理積、否定、含意、同値の5つの関係を用いて命題の論理的結合を表現し、その真偽を論じる学問である。これらの関係を次のような記号で表現する。

論理和	…	∨
論理積	…	∧
否定	…	～
含意	…	→
同値	…	↔

これらの中で診断アルゴリズムにとって最も大切なものは含意である。すなわち、命題 A, B について、 $A \rightarrow B$ は、 $A \rightarrow B$ が真であり、かつ、 A が真であるとき B も真であることを表している。 A を前提部、 B を結論部と呼ぶことにする。

上のように、 $\rightarrow$ の向きに沿った推論を“前向き推論”と呼ぶ。これとは逆に、 $A \rightarrow B$ が真であり、かつ、 B が真であることが分かったときに、 A に関してなんらかの結論を導き出そうという推論も考えられる。これを“後向き推論”と呼ぶ。

図1 設備診断システムの構成要素

* 原稿受付 平成2年12月27日

** 九州大学工学部（福岡市東区箱崎6-10-1）

症状から原因を推定するとき、症状を前提部に、原因を結論部に置いて前向き推論を用いる診断アルゴリズムと、これとは逆に、原因を前提部に、症状を結論部に置いて、後向き推論を用いる診断アルゴリズムとが存在する。

一方、作成法によって分類すると、熟練者の経験・知識を基にして作成する方法と、対象設備のモデルを基にして作成する方法とがある。前者および後者による診断アルゴリズムを、それぞれ、“ルールベースの診断アルゴリズム”、“モデルベースの診断アルゴリズム”と呼ぶ。

熟練者の経験・知識は、症状→原因の形に整理することが容易であるので、ルールベースの診断アルゴリズムは前向き推論を用いることが多い。一方、対象設備内の事象は、原因→結果→症状の順に進行するので、モデルベースの診断アルゴリズムは必ず後向き推論を用いる。

3.2 前向き推論による診断アルゴリズム

前向き推論による診断アルゴリズムは、原因の候補の集合を種々の症状によってふるい分け（スクリーニング）することに相当する。したがって、“デシジョンテーブル”、または、“フローチャート”によって表現することができる。もちろん、含意の論理式そのままに、if（前提部）then（結論部）の形にルールを表現して、エキスパートシステム構築ツールを用いても実現できる。

3.3 後向き推論を用いる診断アルゴリズム

対象設備のモデルを原因→結果→症状の含意関係で表す方法としては、フォールトツリーがある。また、if（前提部）then（結論部）の形にルールを表現して、エキスパートシステム構築ツールを用いても実現できる。

後向き推論は前向き推論ほど簡単ではないので、エキスパートシステム構築ツールが用意している後向き推論を用いることをお勧めする。

4. 不確定性の処理

4.1 不確定性の処理の必要性

設備診断の対象は比較的小規模であり、また、分秒を争って結論を出す必要がないので、アルゴリズムの効率は問題にならない。むしろ問題は、対象設備がよく理解されていないために、不確定な情報を処理しなければならない点にある。

設備診断を行うとき、2種類の不確定性を処理しなければならない。ひとつは、症状→原因または原因→結果→症状という含意関係の不確定性であり、もうひ

とつは、設備から得られる症状に関する不確定性である。

前向き推論においても、後向き推論においても、含意の前提部は結論部の十分条件になっていなければならない。含意関係の不確定性とは、前提部が必ずしも結論部の十分条件になっていないことである。

落語で有名な「風が吹くと桶屋が儲る」という結論は、「風が吹くと砂が舞い上がる」、「砂が舞い上がると眼病がはやる」、「眼病がはやると盲人が増える」、…という前向き推論を繰り返すことによって導かれる。個々の $A \rightarrow B$ において、 A が B の十分条件になっていないために、前述のような珍妙な結論が得られるのである。

また、症状に関する不確定性は、

型 [1] 症状がはっきりしない

型 [2] 状況が同じでも症状が出現するときと出現しないときとがある

に分類できる。型 [1] は症状は現れるが、特徴がつかめないという不確定性であり、型 [2] は症状が出現するときには特徴をはっきりつかめるが、出現するかしないかがはっきりしないという不確定性である。

これらの不確定性を処理する方法として、確率論とファジ理論がある。

4.2 確率による不確定性の処理

対象設備に異常の原因 F_i が m 個存在し、その結果を観測して得られる症状 S_j が n 個存在する場合を考える。含意関係の不確定性を、症状 $S_j \rightarrow$ 原因 F_i が成立する確率 $P(F_i | S_j)$ で表現し、症状に関する不確定性を症状 S_j が出現する確率 $P_d(S_j)$ で表現できる場合には、異常の原因が F_i である確率 $P_i(F_i)$ を次式で計算することが前向き推論に相当する。

$$P_i(F_i) = \sum_{j=1}^n P(F_i | S_j) P_d(S_j) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

一方、対象設備の確率モデルは、原因 F_i の発生確率 $P(F_i)$ と原因 F_i が発生したとき症状 S_j が観測される確率 $P(S_j | F_i)$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) で表現される。確率 $P(S_j | F_i)$ は原因 F_i の発生が症状 S_j の出現のための十分条件となる確率である。このとき、後向き推論は、症状 S_j が得られたときそれが原因 F_i のために発生した確率 $P(F_i | S_j)$ を次のように計算することに相当する。

$$P(F_i | S_j) = P(F_i) P(S_j | F_i) / \sum_{k=1}^m P(F_k) P(S_j | F_k) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式 (2) はベイズの定理と呼ばれる。

プラントから得られる情報の不確実性が型 [1] である場合には、得られた症状が S_j ($j=1, 2, \dots, n$) のどれに相当するかが不確定であるから、得られた症状が S_j である確率を $P_d(S_j)$ とすれば、発生した異常の原因が F_i である確率 $P_r(F_i)$ は、

$$P_r(F_i) = \sum_{j=1}^n P(F_i | S_j) P_d(S_j) \quad (3)$$

で与えられる。

プラントから得られる症状に関する不確実性が型 [2] である場合には、得られた症状が S_j ($j=1, 2, \dots, n$) のどれかに相当するかがはっきりしているので、得られた症状を S_h とすれば、異常の原因が F_i である確率 $P_r(F_i)$ は、

$$P_r(F_i) = P(F_i | S_h) \quad (4)$$

で与えられる。

4.3 ファジィ論理による不確実性の処理

確率論は不確実性を確率によって評価できるための客観的なデータまたはモデルを必要とするが、設備診断において、そのようなものを用意できる場合は非常にまれである。

不確実性を客観的に評価できない場合に用いられるのがファジィ論理である。通常の記号論理で用いられる真理値は、0 (偽) または 1 (真) しか取り得ないが、ファジィ論理では、これを 0 と 1 の間の任意の値を取り得るように拡張している。

症状 S_j → 原因 F_i が成立することの確からしさを $r(S_j, F_i)$ で表現し、症状が S_j であることの確からしさを $m_d(S_j)$ で表現できる場合には、異常の原因が F_i であることの確からしさを $m_r(F_i)$ を次式で計算することが前向き推論に相当する。

$$m_r(F_i) = \bigvee_{j=1}^n [m_d(S_j) \wedge r(S_j, F_i)] \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

(5)

ただし、ファジィ論理では、 $\vee$ を Max で、 $\wedge$ を Min で置き換えることが多い。

症状に関する不確実性が型 [1] である場合には、 $m_d(S_j)$ が $[0, 1]$ の任意の値として与えられ、型 [2] である場合には 0 または 1 として与えられる。式 (5)

はどちらの場合にも成立するので、前向き推論はどちらの不確実性も取り扱うことができる。

一方、対象設備のモデルは、原因が F_i であることの確からしさを $m_r(F_i)$ と原因 F_i が発生したとき症状 S_j が観測されることの確からしさを $r(F_i, S_j)$ から、症状が S_j であることの確からしさを $m_d(S_j)$ が導かれるという式

$$m_d(S_j) = \bigvee_{i=1}^m [m_r(F_i) \wedge r(F_i, S_j)] \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

によって表現できる。後向き推論は $m_d(S_j)$ と $r(F_i, S_j)$ とが得られたときに $m_r(F_i)$ を求める問題として定式化される。式 (6) はファジィ関係方程式と呼ばれ、その解法が開発されている。

しかし、式 (6) の左辺の $m_d(S_j)$ は右辺の $r(F_i, S_j)$ の中の最大のものを越えることがありえないので、症状に関する不確実性が型 [2] である場合には、ファジィ関係方程式を用いることができない。

5. ま と め

設備診断においては、診断アルゴリズムの効率についての要求は運転支援のための異常診断におけるほど厳しくない。しかし、解明が進んでいない劣化現象を取り扱うために熟練者の知識・経験や対象設備のモデルに不確実性が含まれること、微弱な兆候を利用するために症状に不確実性が含まれることから、不確実性の処理が重要な課題になる。

紙数が限られているので、詳細を述べることはできず、特に症状に関する不確実性が型 [2] である場合に利用できるファジィ論理については全く触れなかったが、推論に関しては参考文献 1)、不確実性の処理に関しては参考文献 2) を参照されたい。

参 考 文 献

- 1) 平尾隆行：エキスパートシステム入門，オーム社，(1989)。
- 2) 田中英夫：ファジィモデリングとその応用，朝倉書店，(1990)。