時間・確率付有向グラフ逆方向探索による故障源推定法[†]

古河 雅澄*・宮崎 聡*・新谷 定則*

Fault Location Method Using Inverse Direction Search in Digraph with Time and Probability

Masasumi KOKAWA*, Satoshi MIYAZAKI* and Sadanori SHINGAI*

The purpose of this paper is to present a fault location method for a large scale plant.

Operators in a control room should take measures to meet the situation for maintenance of the plant function when a detector informs them of something wrong. On the other hand, the matter of plant is often detected at failure propagated devices rather than at the failed device (failure origin). In addition, the number of detectors which inform them of something wrong increases exponentially. Therefore, because they can not locate the failure origin in a short time, they can not take corrective counter operations.

Fault location we propose is executed in the following procedure. First, a digraph which shows the failure propagation network of the plant is constructed from devices of the plant or failure modes of devices (nodes) and failure propagation relations between nodes (branches). Second, some candidates for the failure origin are selected in the digraph by back-tracing on branches starting from the failure propagated nodes. Third, the candidates are screened by back-tracing starting from normal state nodes, failure propagation probabilities and failure propagation time between adjacent nodes. Fourth, the failure propagation probabilities and the failure rates of the devices are used to evaluate the priority ranking among the screened candidates.

The method makes it easy to find out the failure origin and to take proper counter operations when the detector informs opera-

tors of something wrong.

Keyword: fault location, digraph, large scale plants, maintenance, network systems

1. 緒 言

プラントの運転室で異常が報知されると、運転員は、異常の拡大を防止する一手段として故障原因の除去(対策)を要求される。しかし、プラントの異常は、異常(故障)源そのものよりも、故障の影響が波及した先で検知されることが多い。しかも、異常を示す検出器は短時間で多数に及び、情報過多を引き起す。この結果、運転員は短時間で故障源を同定することが難しくなり、適切な対策を行えないということになる。このような懸念に対処するため、近年、公共機関、民間企業などで国内外にわたり、大規模プラント用の運転員支援システムの開発が積極的に進められている¹⁾。

一方、われわれは、大規模プラント用の運転員支援システムの開発を目的に、故障波及範囲予測・評価法²⁾や機能生存経路探索法³⁾の研究、それらの実プラントへの適用^{4)~6)}を進めてきた。本論文では、運転員支援システム開発のいま一つの課題である故障源推定法について述べる。

故障源推定法に関する従来の主な研究には、

(1) 故障(事故)事象を原因と結果の関係でとらえ、原因・結果関連樹木(CCT)で表わし、故障を示す事象を起点として樹木上の枝を追跡する方法⁷⁾、

(2) プラントの測定点での状態量(圧力、流量など)をノード、測定点間のつながりをブランチ、異常の状態が正常値の+側か-側か、測定点間の異常の因果関係が助長(+)か抑制(-)かの符号で表わす符号付有向グラフを用いて、符号間の論理関係から故障源を推定する方法⁷⁾、

がある。

CCTによる方法は、複数個の機器に異常が波及し

[†] 電気学会全国大会で発表(昭57・4)

* (株)日立製作所システム開発研究所 川崎市多摩区王禅寺1099

* Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd., Kawasaki

(Received March 9, 1982)

(Revised August 26, 1982)

ている状態を一言で事象として表すには適しているが、樹木状表現をとるためプラントの構造をとらえにくい。符号付有向グラフを用いる方法はグラフ作成に多大の労力を要する。また、符号間の論理関係のみから故障源を推定するものであり、故障率や故障波及確率を扱えない。このため、本論文では、プラントの構造をとらえやすいグラフ表現を保ちながら、故障波及時間や故障率、故障波及確率を扱い、かつグラフ作成時間を短縮できるように符号を使用しない方法を提案する。

本方法は、プラントの構成機器をノード(注1)、機器間の故障波及関係をブランチとして、プラントの故障波及網を有向グラフで表現し、故障源を推定するものである。故障源推定には、構成機器の一部に設置されている検出器からの正常・異常情報、2機器間の故障波及確率・波及時間、各機器の故障率を利用して、故障源候補の選出と候補間の優先順位づけを行う。以下、2章で故障源推定法、3章で簡単な適用例を示す。

2. 故障源推定法

一般に、プラントの異常は、故障源そのもので検知されるよりも、故障の影響の波及先で検出器により検知されることが多い。このため、対策を行うには検出器情報を利用して故障源を推定することが必要となる。

以下では、設置検出器から得られる異常情報を用いて故障源候補を求め、その故障源候補を正常情報、2機器間の故障波及確率・波及時間を用いてしぼり、さらに2機器間の故障波及確率と各機器の故障率を用いて故障源である可能性の順序づけをつぎの前提条件のもとで行う方法を示す。

2.1 前提条件

(1) 検出器はプラント構成機器の一部に設置されており、その機器における状態量が正常か異常かは設置した検出器によって測定可能。

(2) 故障源は一つ。

(3) 故障波及網に AND ノードは含まない。すなわち、複数の有向枝が合流するノードから先への故障波及は、そのノードへいづれか一つの有向枝からの故障波及があれば先へ波及するものとする。

前提条件(1)は、検出器からの情報を利用して故障源推定を行うには不可欠な条件であり、(2)、(3)は発生頻度の低い多重故障(二つ以上の故障が独立して

ほぼ同時に発生する故障)や複合故障(二つ以上の故障が複雑にからみあって発生する故障)は扱わないという条件である。

2.2 故障源推定手順

(1) プラントの構成機器をノード、隣接2機器間の故障波及関係をブランチとし、波及方向を与えることによって、プラントの故障波及網を有向グラフで構成する^{2),8)}。

(2) 故障源は異常な状態を示す検出器 i に対応するノード x_i よりも有向グラフのソース側にあると考えられる。このため x_i から、故障の波及方向(有向枝)を逆方向に有向グラフのソースまでたどり、その経路上にあるノードの集合 $\{x_i\}$ を求める。異常状態を示す検出器が複数個の場合は、各 x_i について求めた集合 $\{x_i\}$ の共通集合 $\bigcap_i \{x_i\}$ をとり、故障源候補とする。

(3) 正常状態を示す検出器 j に対応するノード x_j 、隣接2機器 x_k と x_l 間の故障波及確率 $p(x_k, x_l)$ 、故障の影響の波及時間 $t(x_k, x_l)$ により、以下の手順で故障源候補をしぼる。

(a) x_j から有向枝を逆方向に有向グラフのソースまでたどり、その経路上にある機器の集合 $\{x_j\}$ を求める。 x_j が複数個の場合は、各 x_j について求めたノードの集合の和集合 $\bigcup_j \{x_j\}$ を求める。

(b) $S \triangleq (\bigcap_i \{x_i\}) \cap (\bigcup_j \{x_j\})$ を求める(注2)。 $S = \phi$ 、すなわち、共通する要素 x_m がない場合は、手順(2)で求めた故障源候補を、正常値情報を用いてしぼることができないため、手順(4)へとお。 $S \neq \phi$ 、すなわち、 x_m がある場合は、以下の手順(c)に示すように、波及確率、波及時間により、共通要素 x_m を故障源候補から除外できるか否かを検討する。

(c) x_m から x_j までの故障波及確率 $p_{m,j} = \prod p(x_k, x_l)$ を求める。 x_m から x_j までの経路が複数個ある場合は、各経路ごとに $p_{m,j}$ を求める。求めた波及確率のうち、いずれも $p_{m,j} < 1$ となれば、故障の影響が x_m から x_j へ波及しない場合もあると考えられるため、 x_m を故障源候補として残し、手順(4)へ、 $p_{m,j} = 1$ となる経路がある場合は、さらにその経路について、以下のように故障波及時間の面から検討する。

(i) $\max_i \{t_{ji}^{\min} + T_0 - T_i\} < \min_j \{t_{ej}^{\min}\}$ なら x_m を故障源候補として残し、手順(4)へ、

(ii) $\max_i \{t_{ji}^{\min} + T_0 - T_i\} \geq \min_j \{t_{ej}^{\min}\}$ なら x_m を

(注1) 機器にいくつかの故障形態がある場合は、各機器の各故障形態をノードとする。

(注2) S の計算にあたっては、3章で示すように、各機器間の故障の可到達行列を前もって求めておく。

故障源候補からはずす。

ここで、

$t_{fi}^{\min}$: x_m から x_i までの故障波及最短時間(注 3)

$t_{ej}^{\min}$: x_m から x_j までの故障波及最短時間

T_0 : 故障源推定の計算開始時刻

T_i : 検出器 i が異常値を示した時刻

である。

上記不等式の左辺は、故障源で故障が発生した後、少くとも $\max_i \{t_{fi}^{\min} + T_0 - T_i\}$ は経過していると考えられる時間、右辺は故障源で故障が発生した後、遅くとも $\min_j \{t_{ej}^{\min}\}$ 後には異常が検知されると考えられる時間を示している。

結局、(i)は、現在正常状態を示す測定点が、異常になるか否かは、さらに時間の経過を待たねばならず、現時点では共通要素 x_m が故障源ではないと断定できないために、故障源候補に含め、(ii)は、 x_m が故障源であれば、正常状態を示している検出器は異常を示さねばならないということから故障源ではないとみなすことになる。

共通要素が複数個ある場合は、それぞれについて(3)の(c)を行い、故障源候補に含めるか否かを定める。

(4) 故障源候補の数が多い場合には、多岐にわたる対策を考えねばならない。そこで、つぎに、迅速かつ適切な対策を行えるように、複数個の故障源候補について故障源である可能性の順序づけを以下の手順で行う。

(a) 故障源候補の中から、最も下流にある要素 x_u を選ぶ。

(b) 故障源候補に含まれ、かつ x_u 以外の要素 x_n から x_u に至るまでの故障波及確率 $p_{n,u}$ と x_n 自身の故障率 $p(x_n)$ との積を求め、最も下流側にある要素自身の故障率 $p(x_u)$ も含めて、それらの値の大小を比較し、値の大きい順に故障源である可能性が大きいとする。

結局、手順(4)は、各候補で故障が発生し、かつ最初に異常が検知された機器まで故障の影響が波及する確率の大小により順序づけを行うことと同等である。

3. 適用例

ポンプ設備 (Fig. 1) を対象として、2章で示した故障源推定法を適用する。適用に際して必要なデータ

Fig. 1 Pump system in liquefied petroleum gas plant

Table 1 Fallible elements and failure rates

name of fallible element : y_i	number of fallible element : $\{x_i\}$	failure rate/year : $p(y_i)=p(x_i)$
source	1	0.0001
sluice valve	2, 5, 10, 13	0.57
pump	3, 11	9.4
power source	4, 12	1.9
flow transmitter	6, 14	0.54
flow control valve	7, 15	0.34
hand or air motor valve	8, 16	0.30
air motor valve	9, 17	0.30
sink	18, 19	0.0001

である故障率を Table 1 に、2要素間の直接的な故障波及関係、距離、単位長さ当りの故障波及時間、波及確率を Table 2 に示す。故障波及関係を行列表示すると Fig. 2 に示す B となる。たとえば B の 1 行 2 列要素が 1 であることは、入力節点 x_1 からスルース弁 x_2 へ故障の影響が波及することを示す。

以下では、測定点は、Fig. 1 の空気作動弁 x_9 、流量指示調節計 x_{15} 、空気作動弁 x_{17} 、出力節点 x_{19} とし、 x_{15} と x_{17} が正常、 x_9 と x_{19} が異常と仮定し、故障源を推定する。

(1) 行列 B を用いて、ポンプ設備の故障波及網を有向グラフで構成する^{2), 8)}と Fig. 3 に示すようになる。

(2) 故障源候補を具体的に求めるには、まず Fig.

(注 3) 最短時間計算法としては、たとえばダイクストラ法⁹⁾がある。

Table 2 Relationship between fallible elements

Note: Failure propagates from left-hand element to right-hand element in the second and seventh columns

No.	relationship: (x_i, x_j)	length: L (m)	propagating time: f (s/m)	transition probability: $p(x_i, x_j)$	No.	relationship: (x_i, x_j)	length: L (m)	propagating time: f (s/m)	transition probability: $p(x_i, x_j)$
1	1, 2	1.0	100	1.0	12	9, 18	1.0	100	1.0
2	1, 10	1.0	100	1.0	13	10, 11	1.0	100	1.0
3	2, 3	1.0	100	1.0	14	11, 13	1.0	100	1.0
4	3, 5	1.0	100	0.3	15	11, 16	1.0	100	1.0
5	3, 8	1.0	100	0.1	16	11, 17	1.0	100	1.0
6	3, 9	1.0	100	1.0	17	12, 11	1.0	1	1.0
7	4, 3	1.0	1	1.0	18	13, 14	1.0	100	1.0
8	5, 6	1.0	100	1.0	19	14, 15	1.0	10	1.0
9	6, 7	1.0	10	1.0	20	15, 17	1.0	10	1.0
10	7, 9	1.0	10	1.0	21	16, 19	1.0	100	1.0
11	8, 19	1.0	100	1.0	22	17, 18	1.0	100	1.0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1									1									
2		1																	
3			1					1	1										
4			1																
5				1															
6					1														
7						1													
8							1											1	
9																		1	
10										1									
11											1				1	1			
12											1								
13												1							
14													1						
15														1					
16																1			
17																	1		
18																		1	
19																			1

Fig. 2 Relation matrix of failure propagation

2に示した行列 $\mathcal{B}$ から可到達行列 B を求める。これには、 $(\mathcal{B}+I)^k = (\mathcal{B}+I)^{k+1}$ 、 I は単位行列、となるまでべき乗すればよい。例では、**Fig. 4** に示すように $h=6$ となる。つぎに、異常を示す x_9 と x_{19} に対応した行列 B の 9 列と 19 列を調べ、共に 1 の値をもつ行をみると、1, 2, 3, 4 の各行である。これらの行に対応した要素から、故障源候補は x_1, x_2, x_3, x_4 となる。

(3-a) 行列 B で正常情報に対応する 15 列と 17 列を調べ、いずれかに 1 の値をもつ行をみると、1, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17 の各行である。これらの行に対応した要素を求めると、 $x_1, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{17}$ となる。

(3-b) 上記(2)で求めた要素と(3-a)で求めた要

Fig. 3 Failure propagation network of pump system

素の共通集合 S を求めると、 $S = \{x_1\}$ となる。

(3-c) $p_{1,15}=1, p_{1,17}=1$ なる。このため、故障波及時間の面から検討する。 $T_0=T_{19}=100, T_9=0$ とすれば、

$$\begin{aligned} \max_i \{t_{fi}^{\min} + T_0 - T_i\} &= \max(t_{1,9}^{\min} + 100, t_{1,19}^{\min}) \\ &= \max(400, 400) \\ &= 400 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min_j \{t_{ej}^{\min}\} &= \min(t_{1,15}^{\min}, t_{1,17}^{\min}) \\ &= 300 \end{aligned}$$

$\max_i \{t_{fi}^{\min} + T_0 - T_i\} > \min_j \{t_{ej}^{\min}\}$ となるため、 x_1 を故障源候補からはずす。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
2			1	1	1	1	1	1	1									1	1
3				1	1	1	1	1	1									1	1
4				1	1	1	1	1	1									1	1
5					1	1	1		1									1	
6						1	1		1									1	
7							1		1									1	
8								1											1
9									1									1	
10										1	1		1	1	1	1	1	1	1
11											1		1	1	1	1	1	1	1
12												1	1	1	1	1	1	1	1
13													1	1	1		1	1	
14														1	1		1	1	
15															1		1	1	
16																1			1
17																	1	1	
18																		1	
19																			1

Fig. 4 Reachability matrix of failure propagation

(4-a) 手順(3-c)までの結果, 故障源候補は x_2, x_3, x_4 となる. 最下流の要素は x_3 であることが Fig. 3 からわかる.

(4-b) x_2 については $p_2 \cdot p_{2,3} = 0.57$, x_3 については $p_3 = 9.4$, x_4 については $p_4 \cdot p_{4,3} = 1.9$ となるため, 故障源候補の順序は, x_3, x_4, x_2 となる.

4. 結 言

大規模プラントを対象として,

(1) 状態測定点からの異常情報を利用して故障源候補を推定し,

(2) 測定点からの正常情報, 隣接 2 機器間の故障波及確率, 隣接 2 機器間の故障波及時間を利用して故障源候補をしぼり,

(3) 各機器の故障率, 隣接 2 機器間の故障波及確率を用いて故障源である可能性の順序づけを行う, 故障源推定法を提案した. この方法により, プラントの異常が報知された場合, 故障源の発見が容易となり, 迅速な対策が可能となる. 今後は, 複合原因故障も扱えるように本方法を拡張する.

最後に, 本研究の機会を与えていただいた日立製作

所システム開発研究所長 三浦武雄博士, 井原廣一郎長, 御討論いただいた研究室諸氏に深謝する.

参 考 文 献

- 1) 井爪: 外乱解析と監視, 計測と制御, **20**-11, 36/41 (1981)
- 2) 古河, 他: 故障波及過程モデル化の一研究, 信学論, **63-A-3**, 197/203 (1980)
- 3) 古河: 多入力多出力網における機能生存経路探索法, 信学論, **63-A-9**, 619/622 (1980)
- 4) M. Kokawa, et al.: Failure Propagating Simulation and Nonfailure Paths Search in Network Systems, Automatica, **18**-3, 335/341 (1982)
- 5) 古河, 他: 故障波及シミュレータによる Boil Off Gas 処理設備の安全性解析, 第 20 回 SICE 学術講演会予稿集, 361/362 (1981)
- 6) 宮崎, 他: 故障波及シミュレータによる LPG ポンプ・気化設備の安全性解析, 電気学会東京支部大会講演集, 430/431 (1981)
- 7) 松山: 化学プロセスの安全解析, 異常診断における組合せ論的モデリング, システムと制御, **23**-1, 21/28 (1979)
- 8) 河村: 複雑な社会問題を取り扱う一手法, Interpretive Structural Modeling, 計測と制御, **16**-1, 157/161 (1977)
- 9) E. W. Dijkstra: A Note on Two Problems in Connection with Graphs, Numerische Mathematik, **1**, 269/271 (1959)