

УДК 621.452.3 : 681.518.54

А.Ю. СОКОЛОВ, И.А. ТРОФИМОВА, М.Л. УГРЮМОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Рассмотрен метод решения задачи технической диагностики сложных распределенных систем. Для организации распределенного контроля и диагностики множественных дефектов состояния системы применена мультиагентная технология. В качестве примера представлена методика диагностирования технического состояния вертолетного газотурбинного двигателя (ГТД). Применение такой методики позволило выявлять дефекты логически, что снижает материальные затраты на диагностирование ГТД.

мультиагентный подход, техническая диагностика, модель «дефект-симптом», диагностическая гипотеза, коалиционная логика, процедура выявления дефектов.

Введение

Своевременная диагностика технического состояния авиационных ГТД позволяет существенно улучшить их эксплуатационные показатели. Среди множества задач технической диагностики ГТД важное место занимает анализ термодинамических параметров, который должен давать объективную информацию о техническом состоянии проточной части двигателя и своевременно выявлять возникающие в проточной части неисправности.

Анализ существующих подходов и методов решения задач технической диагностики ГТД [1 – 4] показывает, что число их ограничено. Ранее для диагностики дефектов применялись модели, ориентированные на выявление одиночного дефекта. Предполагалось, что дефекты возникают последовательно во времени. Особенностью сложных технических систем, таких как авиационные ГТД, является то, что время между возникающими дефектами столь мало, что их можно считать возникающими одновременно. Таким образом, актуальной является проблема разработки математических моделей, позволяющих построить диагностическую модель, учитывающую возможность появления нескольких дефектов одновременно. Применение такой модели позволит выявлять дефекты логически, что снижает

материальные затраты на диагностирование сложных технических систем.

В настоящей работе предложен метод решения задачи технической диагностики авиационных ГТД, учитывающий возможность появления нескольких дефектов одновременно. Исследуются диагностические модели в виде набора правил «симптом-дефект». Для организации распределенного контроля и диагностики множественных дефектов системы применяется мультиагентная технология.

1. Модели «Симптом-дефект» и «агент-дефект»

Пусть $F = \{f_l\}_{l=1}^{N_F}$ и $S = \{s_m\}_{m=1}^{N_S}$ определяют множества возможных дефектов и симптомов соответственно. Тогда существует многозначное отображение

$$\psi : S \rightarrow F, \quad (1)$$

которое можно представить в виде бинарной *диагностической матрицы* (табл. 1), отражающей влияние симптомов и дефектов в виде логических значений $I = \{0,1\}$ [5].

Табл. 1 может быть представлена в виде набора продукций, отражающих причинно-следственные отношения связи наблюдаемых симптомов и поро-

ждающих их дефектов, например,

IF s1 is True AND s4 is True THEN f3 is True.

На практике такие продукции определяют одинаковые дефекты.

Отображение «симптом-дефект» является двунаправленным ориентированным графом, в котором каждый дефект непосредственно связан с проявляющимися в этом случае симптомами и наоборот. Обычно методы диагностики решают задачу определения дефектов, используя отображение «симптом-дефект». В задаче моделирования системы, напротив, задается отображение «дефект-симптом».

В настоящей работе предлагается дополнить данную модель множеством агентов, ответственных за наблюдаемые симптомы. Распределение системы на агентное представление, как правило, осуществляется по физическому принципу разделения системы на подсистемы [6, 7].

Агентное представление в задачах диагностики позволяет осуществлять диагностику распределенных систем, учитывая активность агентов в выдвижении гипотез о возможных дефектах и возможность их общения с целью минимизации множества возможных дефектов в ответственных подсистемах.

Для решения задачи введем в рассмотрение множество диагностических распределенных агентов.

Пусть задано множество агентов $A = \{a_i\}_{i=1}^{N_A}$, $N_A \leq N_F$ и существует отображение

$$\xi: A \rightarrow F, \quad (2)$$

удовлетворяющее следующим условиям:

$$\xi(A) = F;$$

$$\exists i, j \neq i \in N_F : \xi^{-1}(f_i) = \xi^{-1}(f_j);$$

$$\forall i, j \neq i \in N_A : \xi(a_i) \neq \xi(a_j).$$

Это означает, что каждый агент ответственен за несколько дефектов, а один дефект распознается только одним агентом. Способ, по которому множество F распределяется по агентам A , возлагается на эксперта предметной области.

Отображение (2) также можно представить в виде бинарной *матрицы ответственности агентов* (табл. 2).

Таблица 1

Структура бинарной диагностической матрицы

S / F	f_1	...	f_{N_F}
s_1	1	...	0
...	0	...	1
s_{N_S}	1	...	1

Таблица 2

Бинарная матрица ответственности

A / F	f_1	...	f_{N_F}
a_1	1	...	0
...	0	...	
a_{N_A}	0	...	1

2. Мультиагентная диагностическая модель

Предположим, что все агенты получают информацию о дефектах из диагностической матрицы.

Пусть $S_O \subseteq S$ есть подмножество симптомов, наблюдаемых системой агентов. Тогда из диагностической матрицы (1) можно сформировать *диагностическую гипотезу* – множество возможных дефектов, порождающих наблюдаемые симптомы, определив

$$\sigma = \bigvee_{i=1}^{D(S_O)} \left(\bigwedge_{j \in C_i(S_O)} f_j \right), \quad (3)$$

где $D(S_O)$ – количество дизъюнкций;

$C_i(S_O)$ – множество индексов i -й конъюнкции [8].

Задача диагностики может быть сформулирована следующим образом: найти подмножество дефектов $F_0 \subset F$, для которых диагностическая гипотеза (3) при наблюдаемых симптомах S_O сохраняется истинной:

$$\text{card}(F_0 \in F | \sigma(F_0) = \text{true}) \rightarrow \min. \quad (4)$$

В условиях одновременного возникновения нескольких дефектов можно сформулировать задачу уточнения дефектов в терминах коалиционной логики. Согласно [9, 10] коалиционная логика – это логика, позволяющая проводить рассуждения коалиции агентов.

Системы коалиционной логики базируются на понятии кооперативной модальности – унарного модального оператора, индексированного множеством агентов, которые используются для представления факта, что данное множество агентов может кооперироваться таким образом, что делает истинным логическое выражение, являющееся аргументом оператора.

В коалиционной логике, например, формула $[1,2](p \wedge q)$ выражает факт, что коалиция агентов $\{1,2\}$ может кооперироваться так, что формула $(p \wedge q)$ будет истинной.

Ключевая идея применения коалиционной логики в мультиагентной диагностике дефектов заключается в том, что каждый агент должен проверить множество дефектов, определяемых отображением (2) для обеспечения истинности выражения (3).

Рассмотрим множество дефектов как множество пропозициональных логических переменных, имеющих значения *true* или *false*.

Тогда можно ввести в рассмотрение коалиционную логику вида

$$M = \langle A, F, Af_1, \dots, \theta \rangle, \quad (5)$$

где $A = \{a_i\}_{i=1}^{N_A}$ – конечное не пустое множество агентов;

$F = \{f_l\}_{l=1}^{N_F}$ – конечное не пустое множество дефектов (пропозициональных переменных);

Af_1, \dots, Af_{N_A} – распределение F по элементам из A , подразумевая, что Af_i есть подмножество F , находящееся под управлением $a_i \in A$;

$\theta : F \rightarrow \{true, false\}$ – пропозициональная логическая функция, определяющая начальное логическое значение каждой пропозициональной переменной (как правило, заранее не известно о наличии дефектов, поэтому начальное значение равно *false*).

Пусть C – коалиция агентов из множества A , то есть $C \subseteq A$. Тогда можно определить F_C для

$$\bigcup_{a_i \in C} Af_i.$$

Имея модель (5) и коалицию C в M , определим оценку C как функцию:

$$\theta_C : F_C \rightarrow \{true, false\}.$$

Пусть $M \oplus \theta_C$ представляет собой модель, идентичную модели M за исключением значений, назначенных функцией оценки θ_C участников коалиции C .

Тогда имея модель $M = \langle A, F, Af_1, \dots, Af_{N_A}, \theta \rangle$ и

формулу $\sigma = \bigvee_{i=1}^{D(S_O)} \left(\bigwedge_{j \in C_i(S_O)} f_j \right)$ можно записать

общую **диагностическую задачу** (d-задачу)

$M \models^d \sigma$ как выражение того, что σ имеет значение *true* в M . В соответствии с общей модальной логикой выражение $M \models^d \diamond_C \phi$ истинно, если существует оценка θ_C для коалиции C такая, что $M \oplus \theta_C \models^d \phi$.

Рассмотрим следующую эвристическую рекуррентную процедуру выбора дефектов, подлежащих проверке, из $F_C = \{Af_{1_C}, \dots, Af_{N_C}\}$.

Пусть σ_0 – исходная формула (3), а $F_0 = \{F_{1_C}^0, \dots, F_{N_C}^0\} = F_C$, $F_{i_C}^0 \subset Af_{i_C}$ – множество возможных дефектов, явившихся причиной наблюдаемых симптомов, распределенных по агентам из C . Далее предлагается процедура проверки дефектов, применяемая ко всем агентам Ag для $C = \{a_{1_C}, \dots, a_{N_C}\}$ на k -м шаге одновременно.

1). Уточнить $\sigma = \bigvee_{i=1}^{D_k} \left(\bigwedge_{j \in C_i^k} f_j \right)$ в соответствии с

результатами проверки дефектов на предыдущей итерации и сократить выражение за счет удаления избыточных и ложных конъюнкций.

2). Если $F_{Ag}^k \neq \emptyset$, то выбрать один дефект f_{Ag} из F_{Ag}^k , принадлежащий конъюнкции из (3) с минимальным количеством элементов $\text{mincard}(C_i^k, C_i^k \equiv F_{iC}^0)$.

Если таких конъюнкций несколько, воспользоваться случайным выбором либо дополнительными критериями. Если $F_{Ag}^{k+1} = F_{Ag}^k \setminus f_{Ag} \neq \emptyset$, продолжить проверку, иначе остановка для процесса проверки текущим агентом.

3). Проверить f_{Ag} и установить надлежащее значение $f_{Ag} = \{true, false\}$.

4). Установить глобальное состояние $k = k + 1$ и перейти к пункту 1.

Предлагаемый алгоритм является сходящимся ввиду априорной достоверности множества симптомов, диагностической матрицы и итерационной процедуры редуцирования множества возможных дефектов.

Проиллюстрируем результаты теоретических исследований примером. Рассмотрим техническое диагностирование термодинамического состояния вертолетного ГТД.

Возможные дефекты представлены в табл. 3. При этом могут наблюдаться изменения функциональных параметров s_i , указанных в табл. 4. Представим отображение «дефект-симптом» в форме табл. 5. Определим агентов, ответственных за дефекты (табл. 6).

Таблица 3

Возможные дефекты

f_k	Описание дефекта
f_1	Завышение или занижение оборотов турбины компрессора на режиме малого газа
f_2	Засорение или обгорание топливных форсунок
f_3	Помпаж двигателя
f_4	Повышенный износ лопаток компрессора
f_5	Вытяжка лопаток ротора компрессора
f_6	Выдувание уплотнительной мастики и износ внутренней поверхности корпуса компрессора
f_7	Забоины рабочих лопаток ротора компрессора
f_8	Обледенение входного устройства двигателя
f_9	Дефект в работе клапанов или лент перепуска воздуха
f_{10}	Дефект или нарушение нормальной работы системы поворота лопаток компрессора
f_{11}	Прогар жаровой трубы и корпуса камеры сгорания
f_{12}	Деформация жаровой трубы и корпуса камеры сгорания
f_{13}	Срыв пламени в жаровой трубе камеры сгорания
f_{14}	Вытяжка рабочих лопаток турбины компрессора
f_{15}	Обрыв или разрушение рабочих лопаток турбины компрессора
f_{16}	Обгорание деталей проточной части турбин
f_{17}	Вытяжка рабочих лопаток свободной турбины
f_{18}	Обрыв или разрушение рабочих лопаток свободной турбины
f_{19}	Разрушение выходного устройства
f_{20}	Наличие воды в топливе

Таблица 4

Наблюдаемые симптомы

s_1	Частота вращения турбокомпрессора
s_2	Частота вращения свободной турбины
s_3	Давление воздуха за компрессором
s_4	Температура газа перед (за) турбиной
s_5	Разность температур газов перед турбинами
s_6	Давление топлива перед форсунками
s_7	Уровень вибрации двигателя
s_8	Инерционность вращения роторов двигателя (выбег)
s_9	Величина механического износа лопаток компрессора

Таблица 5

Отображение «дефект-симптом»

f/s	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_8	s_9	s_{10}
f_1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
f_2	1	0	1	1	0	1	0	0	0
f_3	1	1	1	1	1	0	1	0	0
f_4	1	0	1	1	1	0	1	0	1
f_5	1	0	1	1	1	0	1	1	1
f_6	1	0	1	1	1	0	1	1	1
f_7	1	0	1	1	1	0	1	0	0
f_8	1	1	1	1	1	0	1	0	0
f_9	1	1	1	1	1	0	0	0	0
f_{10}	1	0	1	1	1	0	1	0	0
f_{11}	1	1	1	1	0	0	0	0	0
f_{12}	0	0	0	1	1	0	0	0	0
f_{13}	1	1	1	1	1	1	0	0	0
f_{14}	1	0	1	1	1	0	1	1	0
f_{15}	1	1	1	1	1	0	1	1	0
f_{16}	0	1	0	1	1	0	1	0	0
f_{17}	0	1	0	1	1	0	1	1	0
f_{18}	1	1	1	1	1	0	1	1	0
f_{19}	0	1	0	1	1	0	1	0	0
f_{20}	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Таблица 6

Распределение агентов по дефектам

Элемент системы	Агент	Список дефектов агента
Компрессор	a_1	$f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_9, f_{10}$
Камера сгорания	a_2	$f_2, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{20}$
Турбина компрессора и свободная турбина	a_3	$f_1, f_{14}, f_{15}, f_{16}, f_{17}, f_{18}$
Входное и выходное устройство	a_4	f_8, f_{19}

Процедура выявления дефектов

Шаг	Действие		
1	$\sigma = f_1 \vee (f_2 \wedge f_9) \vee (f_2 \wedge f_{11} \wedge f_{12}) \vee f_{13} \vee (f_{11} \wedge f_{20}) \vee (f_9 \wedge f_{20})$ $C_1^1(S_O) = \{1\}, C_2^1(S_O) = \{2,9\}, C_3^1(S_O) = \{2,11,12\}, C_4^1(S_O) = \{13\}, C_5^1(S_O) = \{1,1,20\}, C_6^1(S_O) = \{9,20\}$		
1	$Ag = a_1; \text{mincard}(C_i^1) = 2;$ $f_{Ag} = f_9$	$Ag = a_2; \text{mincard}(C_i^1) = 1;$ $f_{Ag} = f_{13}$	$Ag = a_3; \text{mincard}(C_i^1) = 1;$ $f_{Ag} = f_1$
1	Проверка: $f_9 = false$	Проверка: $f_{13} = false$	Проверка: $f_1 = false$
2	$\sigma = (f_2 \wedge f_{11} \wedge f_{12}) \vee (f_{11} \wedge f_{20})$ $C_1^2 = \{2,11,12\}, C_2^2 = \{11,20\}$		
2		$Ag = a_2; \text{mincard}(C_i^2) = 2;$ $f_{Ag} = f_{11}$	
2		Проверка: $f_{11} = true$	
3	$\sigma = f_{20} \vee (f_2 \wedge f_{12})$ $C_1^3 = \{20\}, C_2^3 = \{2,12\}$		
3		$Ag = a_2; \text{mincard}(C_i^3) = 1;$ $f_{Ag} = f_{20}$	
3		Проверка: $f_{20} = false$	
4		Установить: $f_2 = true, f_{12} = true$	

Тогда модель $M = \langle A, F, Af_1, \dots, Af_{N_A}, \theta \rangle$ имеет следующую структуру:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}; N_A = 4; F = \{f_1, \dots, f_{20}\};$$

$$Af_1 = \{f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_9, f_{10}\};$$

$$Af_2 = \{f_2, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{20}\};$$

$$Af_3 = \{f_1, f_{14}, f_{15}, f_{16}, f_{17}, f_{18}\};$$

$$Af_4 = \{f_8, f_{19}\};$$

$$\theta(f_i) = false, i = 1 \dots 20$$

(т.е. мы не имеем априорной информации о дефектах).

Пусть имеет место $S_O = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$, т.е.

$$S = \{s_i\}_{i=1}^{N_S=6}.$$

Тогда, согласно представлению (3), имеем:

$$\sigma = f_1 \vee (f_2 \wedge f_9) \vee (f_2 \wedge f_{11} \wedge f_{12}) \vee f_{13} \vee (f_{11} \wedge f_{20}) \vee (f_9 \wedge f_{20});$$

$$D(S_O) = 6;$$

$$C_1(S_O) = \{1\}; C_2(S_O) = \{2,9\};$$

$$C_3(S_O) = \{2,11,12\}; C_4(S_O) = \{13\};$$

$$C_5(S_O) = \{1,1,20\}; C_6(S_O) = \{9,20\}.$$

Применим описанную выше процедуру выявления дефектов.

В данном случае мы имеем дело с тремя агентами – $C = \{a_1, a_2, a_3\}$.

Кроме того,

$$F^0 = \{F_1^0, F_2^0, F_3^0\} = \left\{ \begin{array}{l} \{f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_9, f_{10}\}, \\ \{f_2, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{20}\}, \\ \{f_1, f_{14}, f_{15}, f_{16}, f_{17}, f_{18}\} \end{array} \right\}.$$

Последовательность выполненных операций по выявлению дефектов, согласно предложенной процедуре, в рассматриваемом случае представлена в табл. 7.

Легко видеть, что применение предлагаемой процедуры позволило уменьшить количество проверок возможных дефектов, так как дважды дефекты были установлены логическим путем (f_2, f_{12}). За счет агентного подхода первые три дефекта – f_1, f_9, f_{13} – были проверены одновременно, что также позволило сократить общее время на проведение диагностики.

Заключение

Благодаря распределенному характеру дефектов в процессе диагностирования сложных распределенных систем мультиагентный подход представляется достаточно эффективным средством решения задачи диагностики. Локальная база знаний агентов и правила коммуникации позволяют уточнить возможные диагнозы в бинарном представлении диагностической матрицы. Рассмотрен метод решения задачи технической диагностики сложных распределенных систем. Исследуются диагностические модели в виде набора правил «симптом-дефект». В качестве примера представлена инженерная методика диагностирования технического состояния вертолетного газотурбинного двигателя (ГТД). Применение этой методики позволило выявить часть дефектов логически, что снижает материальные затраты на диагностирование ГТД.

Литература

1. Сиротин Н.Н., Коровкин Ю.М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 272 с.
2. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Транспорт, 1980. – 248 с.
3. Епифанов С.В., Кузнецов Б.И., Богаенко И.Н. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
4. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х.: ХАИ; Бизнес-Информ, 2000. – 260 с.
5. Isermann R.. Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Springer, 2006.
6. Wooldridge M.. An introduction to multi-agent systems. John Wiley&Sons, 2001.
7. Pomeroy B.D., Spang H.A, Dausch M.E. Event-based architecture for diagnosis in control advisory systems. Artificial Intelligence in Engineering 5. – 1990. – P. 174-181.
8. Sokolov O. The multi-agent method and its application to particle sinking analysis and fault diagnosis problems. Scientific report. ZITTAU. – 2006.
9. Hoek W., Wooldridge M. On the logic of cooperation and propositional control. Artificial intelligence 164. – 2005. – P. 81-119.
10. Soo Young Eo, Tae Suk Chang, Dongil Shin, En Sup Yoon. Cooperative problem solving in diagnostic agents for chemical processes. Computer & Chemical Engineering 24. – 2000. – P. 729-734.

Поступила в редакцию 28.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.