

УДК 629.7.03.004.64

П. Ш. АБДУЛЛАЕВ, А. Дж. МИРЗОЕВ*Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджан***ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ДЕМПСТЕРА-ШЕФЕРА
ПРИ СИНТЕЗЕ ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ГТД**

В статье рассматриваются особенности применения теории Демпстера-Шефера при синтезе информации в составе комплексной системы диагностирования авиационных газотурбинных двигателей. В качестве параметров формирования функций масс предлагается использовать значения коэффициентов асимметрии, а также статистические характеристики распределения значений коэффициента качества распознавания классов ГТД. Приведен численный пример синтеза информации, полученной на выходе различных математических моделей, методов и средств оценки состояния газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель, техническое состояние, диагностирование, синтез информации, теория Демпстера-Шефера.

Введение

Анализ современных методов оценки технического состояния (ТС) авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) показывает, что существующие системы диагностирования базируются на разнотипных и плохо связанных между собой, математических моделях. При этом отсутствует единый подход по построению эффективной архитектуры комплексной оценки состояния двигателей, что приводит к большому разнообразию решений по технической эксплуатации. Основные модули существующих систем комплексного диагностирования ТС ГТД функционируют обособленно из-за разнородности данных и отсутствия стратегий синтеза методов и моделей. Следовательно, применение технологий интеграции и синтеза с учетом ресурсов информационных технологий позволит повысить эффективность и качество процессов диагностирования и управления ТС ГТД.

Цель и постановка задачи

Диагностирование и синтез решений о ТС ГТД, в зависимости от жизненного цикла и различных этапов управления ТС ГТД связан двумя основными вопросами:

– как получить точную и достоверную информацию о потенциальных неисправностях от нескольких источников информации (датчиков или математических моделей оценки ТС ГТД).

– как производить синтез информации и решений, которые получены на основе нескольких источников, в том числе результатов оценки ТС ГТД несколькими диагностическими моделями, которые

могут быть неточными и противоречивыми.

Анализ исследований в области диагностирования сложных систем, каким является ГТД, показывает, что одним из перспективных математических аппаратов при синтезе данных различных источников, признаков и решений является теория Демпстера-Шефера (ТДШ). ТДШ рассматривается как развитие байесовского подхода по уточнению апостериорных вероятностей по мере накопления данных на случаи, когда неизвестны законы распределения вероятностей исследуемой информации.

Однако главной проблемой применения ТДШ является назначение значения функции масс на основе предоставленной информации от различных источников (или датчиков) [1-4]. С учетом выше изложенного кратко рассмотрим основные положения ТДШ и особенности ее применения.

**1. Основы применения теории
Демпстера-Шефера при оценке ТС ГТД**

Пусть рассматривается множество $\theta = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ взаимно исключающих гипотез (высказываний или оценок о состоянии ГТД), которое называется областью анализа (фрейм гипотез). Степенное множество θ обозначается как $2^\theta = \{A \mid A \subseteq \theta\}$. Базовое присвоение вероятностей (БПВ) или функция массы (мера доверия) есть функция, которая определяется как 2^θ в интервале $[0, 1]$, так чтобы $m(\emptyset) = 0$, где \emptyset - пустое множество и

$$\sum_{A \subseteq \theta} m(A) = 1.$$

Функции доверия и привлекательности определяются следующим образом

$$\begin{aligned} \text{Bel}(A) &= \sum_{\emptyset \neq B \subseteq A} m(B) \quad \forall A \subseteq \theta, \\ \text{Pl}(A) &= 1 - \text{Bel}(\bar{A}) = 1 - \sum_{B \subseteq \bar{A}} m(\bar{A}) = \\ &= \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad \forall A \subseteq \theta, \end{aligned}$$

где $\text{Bel}(A)$ -массовая сумма доверия подмножеств A или оценка доверия A , т.е. мера полного количества веры в A и в его подмножества; $\text{Pl}(A)$ - массовая сумма недоверия подмножеств A или оценка привлекательности, т.е. мера правдоподобия. При этом интервал свидетельств определяется как

$$\text{EI}(A) = [\text{Bel}(A), 1 - \text{Bel}(\bar{A})],$$

т.е. $\text{Bel}(A) \leq P(A) \leq \text{Pl}(A)$.

Оценки сомнения и игнорирования или неосведомленности рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} \text{Dbt}(A) &= \text{Bel}(\bar{A}) = 1 - \text{Pl}(A), \\ \text{Igr}(A) &= \text{Pl}(A) - \text{Bel}(A). \end{aligned}$$

Таким образом, свидетельства в виде подмножеств X и Y комбинируются по правилу Демпстера как ортогональная сумма двух мер. Эта величина называется присоединенной массой и определяется как

$$\begin{aligned} m_1 \otimes m_2(A) &= k \sum_{X \cap Y = A \neq \emptyset} m_1(X)m_2(Y), \\ k &= \frac{1}{1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y)}, \end{aligned}$$

где k -константа нормализации (мера конфликта между двумя наборами масс), $\sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y)$ - конфликт между двумя свидетельствами. Для пустого множества $m_1 \otimes m_2(\emptyset) = 0$, $A = \emptyset$.

Если $k^{-1} = 0$, то ортогональная сумма не существует, и меры m_1 и m_2 называют полностью взаимоисключающими. В общем для n -го количества функций масс m в множестве θ конфликт будет как

$$K = \sum_{\bigcap_{i=1}^n E_i = \emptyset} m_1(E_1)m_2(E_2)...m_n(E_n) > 0$$

и после комбинации функция масс будет

$$\begin{aligned} m(A) &= (m_1 \otimes m_2 \otimes \dots \otimes m_n)(A) = \\ &= \frac{1}{1-K} \sum_{\bigcap_{i=1}^n E_i = A} m_1(E_1)m_2(E_2)...m_n(E_n) > 0. \end{aligned}$$

Как видно ТДШ решает проблему измерения достоверности, делая коренное различие между отсутствием уверенности и незнанием. А в теории вероятностей эксперт вынужден выражать степень его знания о гипотезе A единственным числом $P(A)$.

Анализ характера изменения значений основных характеристик законов распределения параметров функционирования ГТД показывает, что значения таких показателей как асимметрия и эксцесс позволяют формировать функции масс. С этой целью в определенном интервале времени $[t_i, t_{i+1}]$ на основе ряда значений асимметрии в упрощенном виде можно формировать функции масс для соответствующего параметра в виде

$$m_P = A_{P,cp} / A_{P,max},$$

где $A_{P,cp}$, $A_{P,max}$ -среднее и максимальное значение коэффициента асимметрии рассматриваемого параметра состояния ГТД за четыре последних измерения. Такой порядок назначения значения функции масс оправдан с физическим смыслом нормального закона распределения соответствующего функционального параметра ГТД.

В случае применения нейронных сетей для оценки состояния двигателя массы могут быть определены на основе статистических характеристик распределения значений коэффициента качества распознавания классов ТС ГТД [5].

2. Численный эксперимент и результаты

Приведем численный пример применения ТДШ при синтезе выходов диагностических моделей ГТД. Пусть вибрационное состояние ГТД анализируется двумя диагностическими моделями №1 (вейвлет модель ГТД) и №2 (регрессионная модель вибрационного состояния ГТД) (табл. 1-3). Из-за некоторых ошибок в системе измерений и методах оценки вибрационного состояния моделями №1 и №2 сформирована следующая таблица функций масс по идентификации причин. Здесь а-причина вибрации в маслосистеме, б-причина вибрации в повреждениях лопаток компрессора, с-причина повреждения в подшипниках, d-неисправность изме-

рительной аппаратуры. Требуется определить наиболее вероятные причины вибрации.

$$m_1 \otimes m_2(Z) = \frac{\sum_{X \cap Y = Z} m_1(X)m_2(Y)}{1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y)}$$

Таблица 1

Исходные данные функций масс

Модель №1	Модель №2
$m_1(d) = 0.3$	$m_2(c) = 0.2$
$m_1(c) = 0.5$	$m_2(b) = 0.6$
$m_1(b) = 0.2$	$m_2(a) = 0.2$

Таким образом, на начальном этапе комбинируются два свидетельства о ТС ГТД в виде подмножеств $X = \{b, c, d\}$ и $Y = \{a, b, c\}$ по правилу Демпстера

При этом функции масс для параметра виброскорости ГТД формировались на основе значений коэффициента асимметрии ее распределения.

В таблице 4 представляются комбинирование m_1 и m_2 , а также промежуточных данных: определяются общие подмножества - $(X \cap Y)$ и произведение их весовых значений.

Как видно в этой таблице не приведены функции масс, для которых массы равны нулю (серые ячейки в таблицах 2 и 3), так как они не позволяют при комбинации формировать новые значения $m_3 = m_1 \otimes m_2$ (т.к. $0 \times \text{любое число} = 0$).

Таблица 2

Результаты расчетов по определению правдоподобности и привлекательности по X

X	Модель №1					
	m_1	Bel(X)	Dbt(Bel(\bar{X}))		Pl(X)	EI[Bel(X), Pl(X)]
{b}	0.2	0.2	$\bar{X} = \{c, d\}$	0.8	0.2	[0.2, 0.2]
{c}	0.5	0.5	$\bar{X} = \{b, d\}$	0.5	0.5	[0.5, 0.5]
{d}	0.3	0.3	$\bar{X} = \{b, c\}$	0.7	0.3	[0.3, 0.3]
{b, c}	0	0.7	$\bar{X} = \{d\}$	0.3	0.7	[0.7, 0.7]
{b, d}	0	0.5	$\bar{X} = \{c\}$	0.5	0.5	[0.5, 0.5]
{c, d}	0	0.8	$\bar{X} = \{b\}$	0.2	0.8	[0.8, 0.8]
$\Theta = \{b, c, d\}$	0	1.0	$\bar{X} = \emptyset$	0	1.0	[1.0, 1.0]
\emptyset	0	0	$\bar{X} = \{b, c, d\}$	1	0	[0, 0]

Таблица 3

Результаты расчетов по определению правдоподобности и привлекательности по Y

Y	Модель №2					
	m_2	Bel(Y)	Dbt(Bel(\bar{Y}))		Pl(Y)	EI[Bel(Y), Pl(Y)]
{a}	0.2	0.2	$\bar{Y} = \{b, c\}$	0.8	0.2	[0.2, 0.2]
{b}	0.6	0.6	$\bar{Y} = \{a, c\}$	0.4	0.6	[0.6, 0.6]
{c}	0.2	0.2	$\bar{Y} = \{a, b\}$	0.8	0.2	[0.2, 0.2]
{a, b}	0	0.8	$\bar{Y} = \{c\}$	0.2	0.8	[0.8, 0.8]
{a, c}	0	0.4	$\bar{Y} = \{b\}$	0.6	0.4	[0.4, 0.4]
{b, c}	0	0.8	$\bar{Y} = \{a\}$	0.2	0.8	[0.8, 0.8]
$\Theta = \{a, b, c\}$	0	1.0	$\bar{Y} = \emptyset$	0	1.0	[1.0, 1.0]
\emptyset	0	0	$\bar{Y} = \{a, b, c\}$	1	0	[0, 0]

Таблица 4

Результаты комбинаций классов

	$m_2(a) = 0.2$		$m_2(b) = 0.6$		$m_2(c) = 0.2$		$m_2(\emptyset) = 0.0$	
$m_1(b) = 0.2$	\emptyset	0.04	{b}	0.12	\emptyset	0.04	{b}	0
$m_1(c) = 0.5$	\emptyset	0.1	\emptyset	0.30	{c}	0.10	{c}	0
$m_1(d) = 0.3$	\emptyset	0.06	\emptyset	0.18	\emptyset	0.06	{d}	0
$m_1(\emptyset) = 0.0$	{a}	0	{b}	0	{c}	0	\emptyset	0

Далее находим значения

$$\sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y) = \\ = 0.04 + 0.04 + 0.1 + 0.30 + 0.06 + 0.18 + 0.06 = 0.78$$

и значения фактора нормализации

$$1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y) = 0.22.$$

Определяем

$$m_1 \otimes m_2(\{a\}) = 0, m_1 \otimes m_2(\{b\}) = 0.12/0.22, \\ m_1 \otimes m_2(\{c\}) = 0.10/0.22, m_1 \otimes m_2(\{d\}) = 0, \\ m_1 \otimes m_2(\{\emptyset\}) = 0.$$

Вышеприведенные значения позволяют вычислять новые значения доверия m_3 на основе комбинации m_1 и m_2 , которые показаны ниже (таблица 5). В результате формируются интервалы, полученные после комбинации

$$EI(\{c, d\}) = [0.10/0.22, 0.10/0.22],$$

$$EI(\{a, b\}) = [0.12/0.22, 0.12/0.22],$$

которые показывают, что причины а и б вибрации являются наиболее вероятными.

Таблица 5

Результаты по определению новых значений доверий

X	Модель №1 и №2			
	m_3	Dbt(Bel(\bar{X}))		EI[Bel(X), Pl(X)]
{a}	0	$\bar{X} = \{b, c, d\}$	1.0	[0,0]
{b}	0.12/0.22	$\bar{X} = \{a, c, d\}$	0.10/0.22	[0.12/0.22, 0.12/0.22]
{c}	0.10/0.22	$\bar{X} = \{a, b, d\}$	0.12/0.22	[0.10/0.22, 0.10/0.22]
{d}	0	$\bar{X} = \{a, b, c\}$	1.0	[0,0]
{a,b}	0	$\bar{X} = \{c, d\}$	0.10/0.22	[0.12/0.22, 0.12/0.22]
{a,c}	0	$\bar{X} = \{b, d\}$	0.12/0.22	[0.10/0.22, 0.10/0.22]
{a,d}	0	$\bar{X} = \{b, c\}$	1.0	[0,0]
{b,c}	0	$\bar{X} = \{a, d\}$	0.0	[1.0,1.0]
{b,d}	0	$\bar{X} = \{a, c\}$	0.10/0.22	[0.12/0.22, 0.12/0.22]
{c,d}	0	$\bar{X} = \{a, b\}$	0.12/0.22	[0.10/0.22, 0.10/0.22]
{a,b,c}	0	$\bar{X} = \{d\}$	0.0	[1.0,1.0]
{a,b,d}	0	$\bar{X} = \{c\}$	0.10/0.22	[0.12/0.22, 0.12/0.22]
{a,c,d}	0	$\bar{X} = \{b\}$	0.12/0.22	[0.10/0.22, 0.10/0.22]
{b,c,d}	0	$\bar{X} = \{a\}$	0.0	[1.0,1.0]
$\Theta = \{a, b, c, d\}$	0	$\bar{X} = \{\emptyset\}$	0.0	[1.0,1.0]
\emptyset	0	$\bar{X} = \{\Theta\}$	1.0	[0,0]

Выводы

Анализ результатов, полученных на основе синтеза различной информации с применением ТДШ в составе комплекса оценки ТС ГТД, позволяет подчеркнуть ее перспективность для будущих систем диагностирования, которые отличаются от существующих высокой адаптивностью к различным диагностическим ситуациям и типам двигателей.

Литература

1. Romessis, C. Fusion of gas turbines diagnostic inference - The dempster-schafer approach [Text] / C. Romessis, A. Kyriazis, K. Mathioudakis // Proceedings of IGTI/ASME Turbo Expo., Canada, May 14-17, 2007, Montreal. – 2007. – 9 p. – ASME Paper GT2007-27043.
2. Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems [Text] / G. Vachtsevanos, F. L. Lewis, M. Roemer, A. Hess, B. Wu. – Wiley, 2006. – 456 p.
3. Basir, O. Engine fault diagnosis based on multi sensor information fusion using Dempster-Shafer evidence theory [Text] / O. Basir, X. H. Yuan // Information Fusion. – 2005. – P. 1–8.
4. Lou, R. C. Multisensor integration and fusion

in intelligent systems [Text] / R. C. Lou, M. G. Kay // IEEE Transactions of System, Man and Cybernetics. – 1989. – P. 901-931.

5. Порядок интеграции методов математической статистики и нейронных сетей в задачах

диагностирования ТС ГТД [Текст] / А. М. Пашаев, П. Ш. Абдуллаев, А. Дж. Мирзоев, Э. Т. Меликов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 10(97). – С. 170-176.

Поступила в редакцию 3.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. авиационных двигателей Ю. М. Терещенко, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ДЕМПСТЕРА-ШЕФЕРА ДЛЯ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ТЕХНІЧНИЙ СТАН ГТД

П. Ш. Абдуллаев, А. Дж. Мирзоев

В статті розглянуто особливості застосування теорії Демпстера-Шефера для синтезу інформації в складі комплексної системи діагностування авіаційних газотурбінних двигунів. У якості параметрів формування функцій мас пропонується використовувати значення коефіцієнтів асиметрії, а також статистичні характеристики розподілу значень коефіцієнту якості розпізнавання класів ГТД. Наведено чисельний приклад синтезу інформації, яка отримана на виході різних математичних моделей, методів і засобів оцінки стану газотурбінних двигунів.

Ключові слова: авіаційний газотурбінний двигун, технічний стан, діагностування, синтез інформації, теорія Демпстера-Шефера

APPLICATION OF THE DEMPSTER-SHAFER THEORY ON FUSION OF THE AVIATION GAS TURBINE ENGINES' HEALTH INFORMATION

P. Sh. Abdullayev, A. J. Mirzoyev

The article discusses the features of the application of Dempster-Shafer theory in the synthesis of information in the complex system of diagnosing aircraft gas turbine engines. The parameters of the formation of mass functions is proposed to use the values of the coefficients of asymmetry, as well as the statistical characteristics of the distribution coefficient values of recognition quality CCD classes. The numerical example of the synthesis of the information obtained at the output of various mathematical models, methods and tools to assess the state of gas turbine engines.

Keywords: aircraft gas turbine engine, the technical condition, diagnosis, information synthesis, Dempster-Shafer theory.

Абдуллаев Парвиз Шахмурад оглы - канд. техн. наук, доцент, зав. каф. «ЛА и АД», Национальная Академия Авиации, г. Баку, Бина 25-й км, Азербайджан, e-mail: a_parviz@azeronline.com.

Мирзоев Азер Джаваншир оглы - канд. техн. наук, преподаватель кафедры «ЛА и АД», Национальная Академия Авиации, г. Баку, Бина 25-й км, Азербайджан, e-mail: azermirzoyev@gmail.com.