УДК 629.7.03.004.64

А.Дж Мирзоев, к.т.н., О.С Якушенко к.т.н.
(Национальная Академия Авиации, Азербайджан, Баку)
(Национальный Авиационный Университет, Украина, Киев)

Синтез информации о техническом состоянии ГТД на базе применение теории Демпстера-Шефера

В статье рассматриваются особенности применения теории Демпстера-Шефера при синтезе информации в составе комплексной системы диагностирования авиационных газотурбинных двигателей. Приведен численный пример синтеза информации, полученной на выходе различных моделей оценки состояния газотурбинных двигателей.

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.

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.

Пусть рассматривается множество $\theta = \{A_1, A_2, ..., A_N\}$ 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(∅)=0, где ∅-пустое множество и

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

Функции доверия и привлекательности определяются следующим образом

$$Bel(A) = \sum_{\varnothing \neq B \subseteq A} m(B) \quad \forall A \subseteq \theta$$

$$Pl(A) = 1 - Bel(\overline{A}) = 1 - \sum_{B \subseteq \overline{A}} m(\overline{A}) = \sum_{B \cap A \neq \varnothing} m(B) \quad \forall A \subseteq \theta$$

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

$$EI(A) = \left[Bel(A), 1 - Bel(\overline{A})\right],$$

т.е. $Bel(A) \leq P(A) \leq Pl(A)$

Оценки сомнения и игнорирования или неосведомленности рассчитываются по формулам

$$Dbt(A) = Bel(\overline{A}) = 1 - Pl(A), \; Igr(A) = Pl(A) - Bel(A)$$

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

$$m_1 \otimes m_2(A) = k \sum_{X \cap Y = A \neq \varnothing} m_1(X) m_2(Y)$$

$$k = \frac{1}{1 - \sum_{X \cap Y = \varnothing} m_1(X) m_2(Y)}$$

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

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

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

и после комбинации функция масс будет

$$m(A) = (m_1 \otimes m_2 \otimes \ldots \otimes m_n)(A) =$$

$$= \frac{1}{1-K} \sum_{\bigcap_{i=1}^{n} E_i = A} m_1(E_1) m_2(E_2) \ldots m_n(E_n) > 0$$

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 показывают, 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

$$m_P = A_{P.cp} \big/ A_{P.\max} ,$$

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

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) (Таблица 1-3). Из-за некоторых ошибок в системе измерений и методах оценки вибрационного состояния моделями №1 и №2 формирована следующая таблица функций масс по идентификации причин. Здесь a-причина вибрации в маслосистеме, b-причина вибрации в повреждениях лопаток компрессора, c-причина повреждения в подшипниках, d-неисправность измерительной аппаратуры. Требуется определить наиболее вероятной причины вибрации.

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

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

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

Таблица 1 Исходные данные функций масс

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

Таблица 2

Результаты расчетов по определению правдоподобности и привлекательности по X

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

Таблица 3

Результаты расчетов по определению правдоподобности и привлекательности по Y

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

Таблица 4 Результаты комбинаций классов

	$m_2(a) = 0.2$		$m_2(b) = 0.6$		$m_2(c) = 0.2$		$m_2(\varnothing) = 0.0$	
$m_1(b) = 0.2$	∅	0.04	{b}	0.12	∅	0.04	{b}	0

$m_1(c) = 0.5$	∅	0.1	∅	0.30	{c}	0.10	{c}	0
$m_1(d) = 0.3$	∅	0.06	∅	0.18	∅	0.06	{d}	0
$m_1(\varnothing) = 0.0$	{a}	0	{b}	0	{c}	0	∅	0

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

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

Далее находим значения

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

и значения фактора нормализации

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

Определяем

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

$$m_1 \otimes m_2(\{d\}) = 0$$

$$m_1 \otimes m_2(\{\varnothing\}) = 0$$

Вышеприведенные значения позволяют вычислять новые значения доверия m_3 на основе комбинации m_1 и m_2, которые показаны ниже (таблица 5).

Таблица 5 Результаты по определению новых значений доверий

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

{a,b,c}	0	$\overline{X}=\{d\}$	0.0	[1.0,1.0]
{a,b,d}	0	$\overline{X}=\{c\}$	0.10/0.22	[0.12/0.22, 0.12/0.22]
{a,c,d}	0	$\overline{X}=\{b\}$	0.12/0.22	[0.10/0.22, 0.10/0.22]
{b,c,d}	0	$\overline{X}=\{a\}$	0.0	[1.0,1.0]
Θ={a,b,c,d}	0	$\overline{X}=\{\varnothing\}$	0.0	[1.0,1.0]
∅	0	$\overline{X}=\{\Theta\}$	1.0	[0,0]

В результате формируются интервалы $EI[Bel(X), Pl(X)]$, 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 a и b вибрации являются наиболее вероятными.

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.

Список литературы

1. Romessis C, Kyriazis A, Mathioudakis K. Fusion of gas turbines diagnostic inference - The dempster-schafer approach. Proceedings of IGTI/ASME Turbo Expo 2007, 9p., Canada, May 14-17, 2007, Montreal, ASME Paper GT2007-27043.
2. Vachtsevanos G., Lewis F.L., Roemer M., Hess A., Wu B., Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems, Wiley, 2006, 456 pp.
3. Basir O. Yuan X.H. Engine fault diagnosis based on multi sensor information fusion using Dempster–Shafer evidence theory, Information Fusion, 2005, pp.1–8.
4. Lou R.C., Kay M.G. Multisensor integration and fusion in intelligent systems, IEEE Transactions of System, Man and Cybernetics 19 (1989), pp.901-931.