

Използване на класификацията на образи при диагностика на дизелови двигатели

Георги Кръстев, Орлин Стоянов

The use of image classification in the diagnostics of diesel engines: In the development of algorithms for diesel engine faults diagnostics is appropriate to use the multidimensional analysis and statistical decision theory in pattern recognition.

This paper presents an approach to the process of algorithmizing diagnostic systems to detect malfunctions in the diesel engine fuel system. As the object carrying information about the malfunction in the fuel system, the pulse pressure formed after the high pressure fuel pump is selected.

Key words: Diesel fuel system, diagnostics, reliability.

ВЪВЕДЕНИЕ

Статистическата теория за разпознаване на образи (СТРО) е научно направление на техническата кибернетика, занимаващо се с разработването на формални (математически) методи за разпознаване на обекти със статистическа природа. При това в качеството на разпознаван обект могат да бъдат обекти с най-различна физическа същност. При решаването на задачи за диагностика такива обекти се явяват класовете на техническо състояние [1, 2].

ИЗЛОЖЕНИЕ

В основата на множество методи на СТРО лежи теоремата на Бейс, определяща апостериорната вероятност за принадлежност на класифицирания обект (или вектора на наблюдение) към този или друг клас ω_i (класовете са определени във вид на статистически разпределени в пространството на наблюденията) [3, 4].

Формулата на Бейс за определяне на апостериорната вероятност има вида:

$$P(\omega_i / x) = \frac{P(\omega_i) f(x / \omega_i)}{f(x)} \quad (1)$$

където $P(\omega_i)$ е априорната вероятност за принадлежността на вектора на наблюдение x към класа ω_i ; $f(x / \omega_i)$ – условната плътност на разпределение на вероятността на вектора x , съответстваща на класа ω_i ; $f(x)$ – тегловната плътност на разпределение на вероятността на вектора x по всички класове, $f(x) = \sum P(\omega_i) f(x / \omega_i)$, k е равно на броя на разпознаваемите класове.

В общия случай статистическите закони, на които се подчинява разпределението на вектора x могат да имат сложно описание, но при изследване на статистическите свойства на класовете на техническото състояние в много случаи тяхното описание е възможно с нормален закон на разпределение. Тогава условната плътност на разпределение на вектора се записва във вида:

$$f(x / \omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}k} |\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{1}{2} (x - \mu)^t \Sigma^{-1} (x - \mu) \right] \quad (2)$$

където k е размерността на вектора на наблюдение x ; μ – вектора на математическото очакване на разпределението на признаците на класа ω_i ;

Σ – ковариационна матрица на признаците (компонентите на вектора x) на класа ω_i ; $|\Sigma|$ – детерминанта на ковариационната матрица на признаците на класа ω_i ;

t – символ на транспониране на матрицата (вектора); $^{-1}$ – символ за обръщане на матрица.

При този случай за класификация на обекта е достатъчно да се разполага с:

- априорната вероятност за появяването на този или друг клас техническо състояние;
- статистическото описание на плътността на разпределение на всеки клас в пространството на диагностичните признаци; μ - вектор на математическото очакване на разпределението на признаците на класа ω_i , $i=1,2,\dots,N$; Σ - матрица на ковариацията на признаците (компонентите на вектора x) на класа ω_i , $i=1,2,\dots,N$.

Замесвайки в (2) реализацията на вектора x , може да се изчислят стойностите на плътностите $f(x/\omega_i)$. По формула (1) се определя апостериорната вероятност за принадлежност на вектора на наблюдение. Следва да се отбележи, че процедурата за определяне на апостериорната вероятност на принадлежност се явява ключова, на основата на която се строят правилата за класификация СТРО: съгласно оценката на максималната апостериорна вероятност на принадлежност на основата на минималните стойности на грешните решение; по праговото ниво на грешки от първия (първия или първия плюс втория) вид; на основата на правилата за максимално правдоподобие; последователните методи на Валда и други.

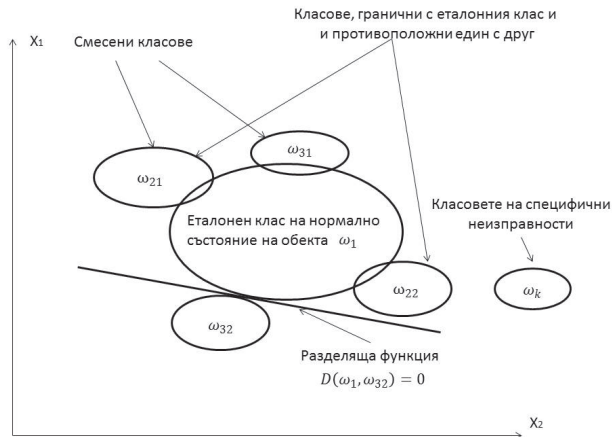
В основата на алгоритмизацията на процедурите за диагностиране са положени: правилото за максималното правдоподобие [1, 2]; праговото условие, за равни апостериорни вероятности на принадлежност (т.е. $P(\omega_i/x)=P(\omega_j/x)$, $i \neq j$). На основата на правилата за максималното правдоподобие може да се построи дискриминантната функция и решаващото правило.

$$x^T \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_2) - \frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2)^T \times \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_2) > (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_1 (x \in \omega_2) \quad (3)$$

Дискриминантната функция (лявата част на неравенството) представлява линейна комбинация от компонентите на вектора на наблюдение (вектора на диагностичните признаци). Следва да се отбележи, че за да се опрости математическият апарат е прието допускането за близост (равенство) на ковариационната матрица на разпознаваните класове ω_1 и ω_2 и равенство на априорните вероятности (т.е. $\sum_1 = \sum_2 = \sum$ и $P(\omega_1)=P(\omega_2)=0.5$).

В пространството на диагностични признаци има само един еталонен клас на нормалното техническо състояние на обекта и множество класове с някои нарушения. Класовете с нарушения на техническото състояние могат непосредствено да граничат с еталонните класове на нормалното състояние на обекта. Те могат да се нарекат гранични класове. Граничните класове на състоянието, в зависимост от тяхната позиция по отношение на класа с нормално състояние на обекта, се подразделят на противоположни и смесени. Първите включват класове, които лежат от двете страни на еталонния клас на нормалното състояние на обекта; към вторите се отнасят класове на неизправностите, които граничат един с друг. Към особения тип класове техническо състояние се отнасят класовете на специфичните неизправности, т.е. тези, които не граничат с класа на нормалното състояние. Понятието за еталонен клас на нормалното състояние на обекта, граничните класове, противоположните класове и класовете по специфичните неизправности са дадени на фиг. 1.

Разгледаната методологията е приложена за разпознаване нарушенията на работата на горивната система (ГС) за дизелов двигател. В качеството на обект, носещ информация за нарушенията в горивната система, е избран импулсът на налягането, образуващ се след горивната помпа за високо налягане и имащ параметри, разгледани в литература [5].

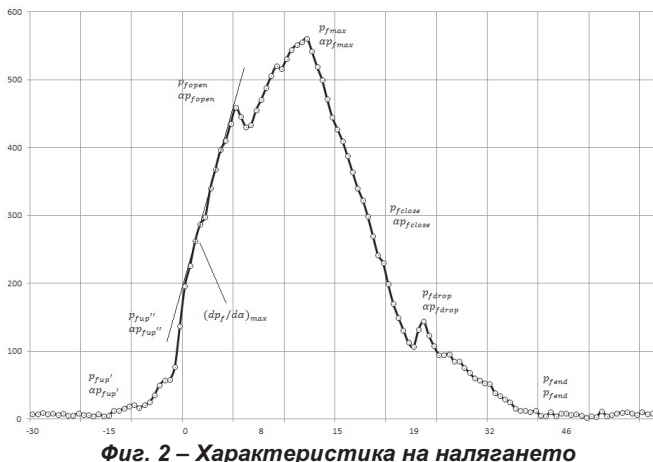


Фиг. 1 – Разпознаваеми класове в пространството на признаците

Исходният (пълният) вектор на диагностичните признаци, описващи процеса на горивоподаването има вида:

$$x = \{p_{fup}, \alpha p_{fup}, p_{fup}^n, \alpha p_{fup}^n, p_{fopen}, \alpha p_{fopen}, p_{fmax}, \alpha p_{fmax}, p_{fclose}, \alpha p_{fclose}, p_{fdrop}, \alpha p_{fdrop}, p_{fend}, \alpha p_{fend}, (dp_f / d\alpha)_{max}\}$$

Той включва описание на седем характерни точки на импулса на горивоподаването и параметъра динамичност на нарастване на налягането (фиг. 2).



Фиг. 2 – Характеристика на налягането

Задачата е да се разпознаят класовете на най-характерните отклонения в регулировката на горивната система на дизелов двигател (десет класа, граничещи с еталонния клас и явяващи се противоположни един на друг ($\omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{62}$)). За разпознаване на класове от изходния вектор на диагностичните признаци x се избира информационното подмножество на неговите компоненти (по възможност минималното), което осигурява разпознаване на малки отклонения.

Така новообразувания вектор се означава с x' .

Разпознаваеми класове на отклонение на регулировката на горивната система	Диагностични признаци	Режимен фактор
1. Еталонен клас на нормалното състояние на горивната система ω_1	-	-
2. Твърде рано впръскване на горивото ω_{21} Твърде късно впръскване на горивото ω_{22}	p_{fup} αp_{fopen}	Index
3. Твърде ниско налягане на отваряне дюзата ω_{31} Твърде високо налягане на отваряне дюзата ω_{32}	p_{fopen}	Index
4. Твърде ниско налягане на впръскване ω_{41} Твърде високо налягане на впръскване ω_{42}	p_{fopen} p_{fmax}	Index
5. Твърде голяма продължителност на впръскване ω_{51} (или αp_{fdur}) Твърде кратка продължителност на впръскване ω_{52}	αp_{fopen} αp_{fclose}	Index
6. Твърде бавно увеличение на налягането ω_{61} Твърде бързо увеличение на налягането ω_{62}	$(dp/d\alpha)_{max}$	Index

където αp_{fup} – ъгъл на началото на рязко повишаване на налягането; αp_{fopen} – ъгъл на началото на горивоподаването; p_{fopen} – налягане, съответстващо на момента на отваряне на дюзата; p_{fmax} – максималното налягане на импулса; *Index* – индекс на рейката на горивонагнетателната помпа за високо налягане (режимен фактор).

За разпознаване на класовете ω_{51} и ω_{52} във вектора x' допълнително е въведен признакът αp_{fdur} , явяващ се комплекс, образуван от „първичните“ диагностични признаци; $\alpha p_{fdur} = \alpha p_{fstop} - \alpha p_{fstart}$; $(dp/d\alpha)_{max}$ – скорост на нарастване на налягането в момента, предшестващ отварянето на дюзата (равна на тангенса на наклона на апроксимиращата права).

Посочените по-горе нарушения в работата на горивната система на дизеловия двигател могат да предполагат понататъшно задълбочаване на диагностиката, т.е. разкриване на първопричините за тези нарушения. Например, такава неизправност като твърде бавното нарастване на налягането (клас ω_{61} , разпознаван на базата на диагностичния параметър $(dp/d\alpha)_{max}$) може да бъде причинена от повишеното износване на плунжерната двойца или нарушение в херметичността на всмукателния клапан на горивонагнетателната помпа, или от твърде ниския вискозитет на горивото.

Както вече бе отбелязано, за решаване на задачите на диагностиката в такава обстановка е необходимо да се получи статистическо описание на класовете въз основа на статистическа обработка. Такава извадка от данни е получена в процеса на провеждане на стендови изпитания на дизелов двигател. Статистиката на разпознаваемите класове неизправност е получена при няколко режима на работа на дизеловия двигател.

Избраният вектор на диагностичните признаци x' , който се явява подмножество на x и служещ за разпознаване на обозначените групи класове на отклонения на регулировката на горивната система има вида:

- матрица на коефициентите на корелация на диагностичните признаци $R(x')$ (Табл. 1);

- ковариационна матрица на диагностичните признаци в $\sum(x')$ (Табл. 2).

При изпитването на дизеловия двигател на всеки режим, обемът на извадката е съставен от 80 последователни цикъла на подаване на горивото. Праговите стойности на значимостта за коефициента на корелация r за извадка от такава размерност е 0,22 (хипотеза $r=0$ се отхвърля, ако $|r|>22$; мярката за надеждност $1-\alpha=0.95$). Търси се праговата стойност за коефициента на корелация, изхождайки от

предпоставката, че за достатъчно голям обем на извадката стойността r е разпределена асимптотично нормално по закона $N(x, r, \sigma_r)$. Стандартното отклонение за r се дава по формула [6]: $\sigma_r \approx S_r = (1 - r^2) / \sqrt{n}$.

Таблица 1. Коефициенти на корелация на диагностичните признаци $R(x')$

	$\rho_{fup''}$	ρ_{fopen}	$\alpha\rho_{fopen}$	ρ_{fmax}	$\alpha\rho_{fmax}$	$\alpha\rho_{fclose}$	$\alpha\rho_{fdur}$	$(d\rho/d\alpha)_{max}$
$\rho_{fup''}$	1	-0,029	0,323	-0,047	-0,521	-0,811	-0,813	0,917
ρ_{fopen}	-	1	0,841	-0,207	-0,421	-0,088	-0,274	-0,131
$\alpha\rho_{fopen}$	-	-	1	-0,178	0,1604	-0,211	-0,483	0,083
ρ_{fmax}	-	-	-	1	0,125	-0,069	-0,021	0,005
$\alpha\rho_{fmax}$	-	-	-	-	1	0,515	0,432	-0,553
$\alpha\rho_{fclose}$	-	-	-	-	-	1	0,975	-0,889
$\alpha\rho_{fdur}$	-	-	-	-	-	-	1	-0,829
$(d\rho/d\alpha)_{max}$	-	-	-	-	-	-	-	1

Таблица 2. Ковариационна матрица на диагностичните признаци $\sum(x')$

	$\rho_{fup''}$	ρ_{fopen}	$\alpha\rho_{fopen}$	ρ_{fmax}	$\alpha\rho_{fmax}$	$\alpha\rho_{fclose}$	$\alpha\rho_{fdur}$	$(d\rho/d\alpha)_{max}$
$\rho_{fup''}$	0,1164	-	0,027	-	-0,286	-0,2674	-0,2944	1,559
ρ_{fopen}	-	167,0	2,661	-17,75	8,759	-1,106	-3,766	-8,450
$\alpha\rho_{fopen}$	-	-	0,0598	-	0,0630	-0,065	-0,1257	0,1021
ρ_{fmax}	-	-	-	43,77	1,336	-0,4416	-0,1534	0,1828
$\alpha\rho_{fmax}$	-	-	-	-	2,580	0,7993	0,7362	-4,426
$\alpha\rho_{fclose}$	-	-	-	-	-	0,9333	0,9989	-4,278
$\alpha\rho_{fdur}$	-	-	-	-	-	-	1,124	-4,380
$(d\rho/d\alpha)_{max}$	-	-	-	-	-	-	-	25,11

Стандартното отклонение за величината r е функция на два аргумента – обемът на извадката и величината на коефициента на корелация. Необходимият праг също зависи от размера на извадката и от степента на достоверност $(1 - \alpha)$, избрана за проверка на хипотезата, $r = 0$.

Анализът на матрицата $R(x')$ показва, че между компонентите x' главно се наблюдава „незначима“ корелация. Въпреки това, отделните компоненти са достатъчно силно корелирани и отделената взаимовръзка се обяснява от физическа гледна точка. От теорията на СТРО е известно, че наличието на корелационни връзки между признаците не следва да се пренебрегва, тъй като тяхното отчитане позволява да се построят по-ефективни алгоритми за разпознаване.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На практика техническата диагностика най-често използва теорията на статистическите решения, съгласно която разпознаването се осъществява с минимален риск или минимална вероятност на грешката.

Синтезът на класификатора на Бейс, основан на решаващите функции, изисква познаване на априорните вероятности и плътностите на разпределение за всеки

клас образи, а също и цената на вземаните решения. Оптималността в статистически смисъл на решенията все още може да бъде достигната и при отсъствието на тези сведения. Ако априорните вероятности не са известни или не се поддават на непосредствена оценка, то съществува и друга възможност за решаване на тази задача - използването на минимаксия критерий.

Идеята, служеща за основа на минимаксия критерий, се състои в избора на такова решаващо правило, което минимизира средните загуби при най-лоши възможни условия. В този случай можем да сме сигурни, че се неутрализират възможните неблагоприятни случайности, свързани с недостатъчната информация за априорните вероятности. Ако не са известни нито априорните вероятности, нито стойността на загубите, то тогава може да се използва критерият на Нойман-Пирсън.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Левин М. И., Обозов А.А. Применение методов статистической теории распознавания образов при синтезе алгоритмов диагностирования малооборотных дизелей // Двигателестроение. — 1986. — № 5. — С. 15-18, 24.

[2]. Левин М. И., Обозов А.А. Автоматическая безразборная диагностика дизелей. Информационные аспекты. Применение метода «обучения» при решении задач диагностирования судового малооборотного дизеля // Двигателестроение. — 1986. — № 9. — С. 41—46.

[3]. Андерон Т. Введение в многомерный статистический анализ. — М. : Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1963. — 500 с.

[4]. Биргер И. А. Техническая диагностика. — Машиностроение. 1978. — 240 с.

[5] Gunther H., Dieseldiagnose, Vogel Buchverlag. 2001

[6] Korbicza G., Diagnostyka procesow. WNT Warszawa. 2002

За контакти:

доц. д-р Георги Кръстев, Катедра “Компютърни системи и технологии”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 672, e-mail: gkrastev@ecs.uni-ruse.bg

маг. инж. Орлин Стоянов, Катедра “Компютърни системи и технологии”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 212, e-mail: ostoyanov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.