

АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

До Дык Лыу, к.т.н., Государственная Морская Академия им. адм. С.О. Макарова
Ле Ван Диет, Нгуен Ху Хао, аспиранты
Санкт-Петербургский Государственный Университет Водных Коммуникаций

Представлены алгоритмы для построения классификаторов текущего наблюдаемого состояния и прогноза на основе нейронных сетей для автоматического контроля и диагностирования судовых дизелей. Алгоритм классификатора текущего состояния предложен на основе вероятностной нейронной сети (PNN — Probabilistic Neural Networks), а алгоритм классификатора прогноза — на основе адаптивной аппроксимации наблюдаемых данных или фильтрации с помощью нейронных сетей с прямой связью.

Основными задачами систем контроля и диагностирования (САКД) судовых дизелей является проверка их работоспособности, распределения нагрузки по цилиндрам, своевременное обнаружение и локализация возникших неисправностей.

В работе [1] предложена САКД, состоящая из блока датчиков виброакустических сигналов, многоканального аналогоцифрового преобразователя (АЦП), пакета программного обеспечения для диагностирования и прогнозирования состояния судовых дизелей. Пакет программного обеспечения САКД представлен отдельными модулями с применением методов теории распознавания образов (ТРО) для решения следующих задач:

- построение вектора диагностических признаков (ДП);
- построение эталонных характеристик классов состояний;
- идентификация текущего наблюдаемого состояния путем отнесения его к одному из эталонных классов;
- построение прогноза состояния и формирование закона адаптивного управления техническим состоянием объекта диагностирования.

В целях автоматического мониторинга и комплексного диагностирования решена задача классификации состояний судовых дизелей. Множество состояний судового дизеля с z цилиндрами группируются в обобщенные классы:

$D = \{ D_1, \dots, D_{z+2} \}$, где D_1 — при нормальной работе дизеля; D_2, \dots, D_{z+1} — при исключении из работы одного из цилиндров и D_{z+2} — при одновременном исключении из работы двух и более цилиндров.

Отключение цилиндров происходит либо в результате выключения подачи топлива, либо из-за большой негерметичности камеры сгорания, а также при появлении некачественного воздухообеспечения. Определение причин и локализация конкретного дефекта в зарегистрированном аварийном состоянии цилиндра — это основная задача поэлементного диагностирования состояний судового дизеля.

Блоки классификаторов текущего наблюдаемого состояния и прогноза состояния объекта диагностики в САКД построены по алгоритмам с применением принципов распознавания образов в многомерном пространстве ДП виброакустических сигналов. В настоящей статье представлены алгоритмы для комплексного диагностирования судовых дизелей при использовании нейронных сетей на основании методов ТРО.

Построение классификатора и определение класса текущего состояния приведенного к одному из эталонных классов осуществляется на основании оптимальности функций расстояний между текущим и эталонным классами (образами). В то же время прогноз представляет собой предвидимые оценки состояния судовых дизелей в будущем на основании непрерывных наблюдений состояний в настоящем и прошлом времени. Он построен с помощью модели прогноза, которая получена методом обработки сигналов наблюдений — методом регрессионного анализа.

В комплексном диагностировании каждый класс состояния D_k ($k = 1 \div R$, $R = z + 2$) описывается в многомерном пространстве ДП: $V^{(k)} = [V^{(k)}_1, V^{(k)}_2, \dots, V^{(k)}_p]$ или $D_k \equiv (\mu_k, K_k)$, где μ_k — усредненное значение вектора признаков k -го класса; K_k — ковариационная матрица, характеризующая рассеивание наблюдений около центра (μ_k) класса; p — размер вектора ДП, $k = 1, 2, \dots, R$.

Для описания текущего состояния используются и получены четыре линейных классификатора, построенных на основании евклидового расстояния, расстояния Махаланобиса, оценки вероятности Бейеса (Bayes) и классификатора Фишера (Fisher), а также несколько квадратичных классификаторов.

Линейные классификаторы диагностики имеют вид [1]:

$$d_{xj} = \beta_{1j} \dot{x} + \beta_{0j}, \quad j = 1, 2, \dots, R, \quad (1)$$

где β_{1j}, β_{0j} — постоянные, независимые от текущего вектора наблюдения состояния μ_x .

Решающее правило классификации текущего наблюдаемого состояния с вектором ДП $V(x)$ принимается следующим образом:

$$D_x \subset D_k \Leftrightarrow d_{xk} = \min_{j=1-R} d_{xj}. \quad (2)$$

Линейные классификаторы прогноза имеют вид:

$$d_{0j} = m_{1j} \dot{\delta} + m_{0j}, \quad j = 1, 2, \dots, R, \quad (3)$$

а квадратичные нелинейные классификаторы:

$$d_{0j}^H = m_{2j} \dot{\delta}^2 + m_{1j} \dot{\delta} + m_{0j}, \quad j = 1, 2, \dots, R, \quad (4)$$

где m_{2j}, m_{1j}, m_{0j} — коэффициенты регрессионных уравнений j -го класса, полученные регрессионным анализом наблюдаемых данных в процессе диагностирования (непрерывного контроля и мониторинга) по линейному классификатору диагноза (1) или по нелинейному классификатору.

Для решения задачи классификации наблюдаемого состояния судовых дизелей на основании нейронных сетей применены вероятностные нейронные сети (PNN), в которых используются методы Бейеса [2, 4]. Структура PNN состоит из двух слоев. В первом слое вычислены расстояния между векторами текущего наблюдаемого состояния V_x и каждого эталонного (обучаемого) состояния V_k (в k -м классе состояния наблюдаются n_k раз $V_{ij}^k = 1 \div p$), по евклидовому расстоянию $\rho_x = ||V_x - V_k||$ и образуется вектор расстояний наблюдаемого состояния $\rho_x = [\rho_{x1}, \rho_{x2}, \dots, \rho_{xR}]$. Второй слой определяет класс состояния (элемент вектора ρ_x) с минимальным значением $\rho_{xm} = \min(\rho_x)$.

Способы построения классификаторов по уравнениям (1), (2) и интеллектуального классификатора с использованием PNN аналогичны. Особенности статистических классификаторов (1), (2) являются определения эталонных характеристик (или коэффициентов дискриминантов) (1) и оптимального критерия (2) на базе данных исследования судовых дизелей в R основных классах состояний [1]. Отличием алгоритмов при решении задачи классификации на

основе нейронных сетей является использование специальных методов (для нейронных сетей) определения весовых коэффициентов в процессе обучения (исследования) объекта диагностирования.

Использование сети MAXNET [2] позволяет определить элемент с максимальным (или минимальным) значением наблюдаемого вектора. Для решения задачи классификации элементы (нейроны) сети синтезируются следующим образом:

> каждый элемент соединен с самим собой, а также со всеми другими элементами двунаправленными взвешенными связями;

> весовые коэффициенты устанавливаются равными между собой, $w_{ik} = -\omega$, $i \neq k$, кроме веса автосвязи, который равен 1, $w_{kk} = 1$, где $0 < \omega < 1/R$.

На базе данных по характеристикам виброакустических сигналов в частотной или временной области исследуемого дизеля и определенных R классах строится PNN. При наблюдении текущего состояния X с вектором диагностических сигналов $V_x = [V_{x1}, V_{x2}, \dots, V_{xp}]$ результат классификации представляет собой класс, выход соответствующего нейронного элемента которого равен 1, а выходы остальных элементов — 0.

Структура классификатора на базе PNN показана на рис. При этом используются две функции активности: $\text{radbas}(\cdot)$ и $\text{complekt}(\cdot)$. Первая функция $\text{radbas}(n) = \exp(-n^2)$ принимает значение 1, когда ее вход равен 0. Это означает, что если снизится расстояние между вектором текущего наблюдения V_x и некоторым вектором образца W_j (см. рис.), то ее выходное значение повысится. Для управления чувствительностью функции использован вектор B_1 .

Вторая функция $\text{complekt}(\cdot)$ описывает алгоритм MAXNET.

Сущность построения классификаторов прогноза технического состояния (3) или (4) заключается в аппроксимации наблюдаемых текущих состояний по линейной функции (1) или некоторым нелинейным функциям. Коэффициенты классификатора в полученных алгоритмах определены методом наименьших квадратов и регрессионным анализом. В процессе диагностирования регистрируются векторы ДП в разные моменты времени наблюдения $\tau(1), \tau(2), \dots, \tau(m)$: V_1, V_2, \dots, V_m и фиксируются результаты $d_{xk}(1), \dots, d_{xk}(m)$, $k = 1, 2, \dots, R$ классификаторов. На основании полученных моделей прогноза осуществляется экстраполяция в будущее. Структура модели (3) или (4) предварительно выбрана перед определением коэффициентов этого уравнения.

При использовании метода нейронных сетей для аппроксимации наблюдаемых данных нельзя

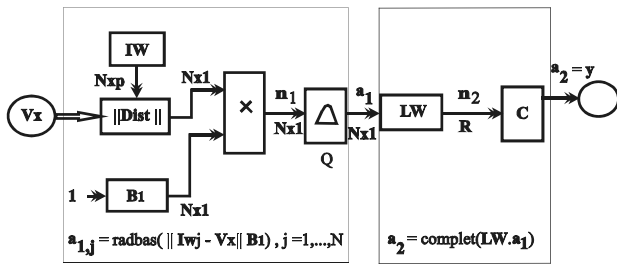


Рис. Структура классификатора текущего состояния судовых дизеля на основе искусственной вероятностной нейронной сети:

V_x — вектор ДП (характеристики виброакустических сигналов); IW , $B1$ — эталонные характеристики (веса), полученные при обучении на обобщенных классах состояний D_k , $k = 1:R$ объекта диагностирования; $\|Dist\|$ — евклидово расстояние; « \times » — символ блока умножения; $radbas()$, $complet()$ — функции вероятностной нейронной сети; N , p , R — числа наблюдений образов, ДП и классов соответственно; Q — число нейронов первого слоя; n_1 и n_2 — сигналы активности (входы функции $radbas()$, $complet()$)

выбрать предварительно вид регрессионных уравнений. Методы прогнозирования на основе нейронных сетей являются адаптивными. Они основаны либо на адаптивной аппроксимации наблюдаемых данных, либо на теории адаптивной фильтрации.

Алгоритм использования нейронной сети при адаптивной фильтрации вектора $d_{xk}(1), d_{xk}(2), \dots, d_{xk}(m)$, $k = 1, \dots, R$ состояния записывается следующим образом [3]:

$$y(n) = \sum_{i=1}^{u-1} w_i x(n-i), \quad (5)$$

где $x(1), \dots, x(m)$ — элементы вектора состояния d_{xk} ; u — окно задержки фильтра; w_i — необходимые коэффициенты фильтра; $y(n)$ — выходные отклики адаптивного фильтра.

Идея применения нейронной сети для прогнозирования заключается в том, что если мы можем обучить сеть для того, чтобы она предсказала известные значения, то она также может предсказать значения на будущее.

Если прогнозирование по уравнению (5) выполнено на базе данных в интервале наблюдения τ , $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_m]$, то апостериорное прогнозирование начинается с момента $\tau_{a1} = \tau_u$ и оканчивается в момент $\tau_{a,m} = \tau_m$. Затем прогнозирование начинается с момента τ_{m+1} и продолжается до необходимого момента в будущем.

Таким образом, прогнозирование адаптивным методом фильтрации (5) не использует регрессионное уравнение (аппроксимацию), а выполняется алгоритмом «скользящего», «запаздывания» данных по времени.

В настоящее время существуют разные прикладные пакеты программ, реализующие алгоритмы нейронных сетей, например, инстру-

ментальная панель «Neural Network Toolbox» в MATLAB.

Комплексное диагностирование и прогнозирование состояния судовых дизелей при использовании Neural Networks в MATLAB может быть выполнено по следующей методике, предложенной авторами. Комплекс действий состоит из основных модулей:

➤ ввод (INPUT_Data). Входные данные для обучения нейронных сетей представляются матрицей V с размером Nxp , где p — число диагностических признаков и N — общее число наблюдений, $N = n_1 + \dots + n_k + \dots + n_R$, n_k — число повторных наблюдений на k -м классе. Элементы вектора j -го наблюдения $V_j = [V_{j1}, V_{j2}, \dots, V_{jp}]$ представлены в нормализованной форме $X_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp}]$, $x_{js} \in [0, 1]$ или $x_{js} \in [-1, 1]$. ДП могут быть физическими или объективно трансформируемыми, ортогональными.

➤ классификация текущего состояния на основе PNN (Diagnos_net). Построен PNN с помощью функции $newpnn$ следующим образом: $net = newpnn(X, T)$, где T — вектор эталонных состояний (target vector). При использовании построенной сети, классификация текущего наблюдения $X_x = [x_{x1}, x_{x2}, \dots, x_{xp}]$ выполняется командой: $T_x = sim(net, X_x)$;

➤ прогнозирование состояния (Prognos_net) на базе данных непрерывного контроля состояния и на основе нейронной сети построено либо аппроксимацией, либо фильтрацией данных.

Реализация предложенных алгоритмов для диагностирования и прогнозирования состояния судовых дизелей на основе искусственных нейронных сетей произведена следующим образом: классификатор диагностики построен с помощью вероятностной нейронной сети, а классификатор прогноза — на основе нейросетевой аппроксимации (или адаптивного скользящего фильтра) наблюдаемых данных. Предложенные алгоритмы могут быть применены для построения классификаторов состояния и прогноза в системах автоматического контроля и диагностирования судовых дизелей по виброакустическим сигналам.

Литература

1. До Дык Лыу. Построение системы автоматического контроля и диагностики судовых дизелей по общему двигательному моменту и закону движения коленчатого вала // Сборник трудов ГМА им. адм. С.О. Макарова. — СПб., 2006. — С. 183–191.
2. Роберт Каллан. Основные концепции нейронных сетей Пер. с англ. — М: Издательский дом «Вильямс», 2003. — 287 с.
3. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов; Пер. с англ. — М: Радио и связь, 1989. — 440 с.