

应用回声状态网络的 EGR 阀电路在线诊断*

胡明江, 杨师斌

(河南城建学院建筑环境与能源工程系 平顶山, 467036)

摘要 为了实现废气再循环(EGR)阀电路控制性能能够满足车载诊断系统(OBD)的排放要求,应用主元分析(PCA)和回声状态网络(ESN)的融合理论,提出了柴油机 EGR 阀控制电路故障在线诊断策略。利用 PSpice 软件对 EGR 阀电路故障仿真的采样值作为 PCA 输入值,电路各元器件故障代码作为 ESN 输出值,进行了柴油机 EGR 阀电路故障的在线训练与诊断。基于 PCA-ESN 融合诊断策略,进行了 EGR 阀电路故障在线诊断试验。结果表明:故障诊断的正确率为 94.3%;误判率为 0.58%;拒绝率为 0.15%。该诊断策略能够快速实现故障诊断及定位,确保了柴油机 EGR 阀在各种工况下快速、准确和可靠开启。

关键词 柴油机;故障诊断;EGR 阀;主元分析;回声状态网络

中图分类号 TK421+.5

引言

废气再循环(EGR)技术的利用是目前降低柴油机 NO_x 排放的最有效的措施之一。在国外,客车和轻型卡车用柴油机已普遍采用了 EGR 技术,重型卡车柴油机也在逐渐采用 EGR。EGR 阀是车用柴油机 EGR 技术的关键部件,EGR 阀电路用来控制 EGR 阀的开启角度,其性能将直接影响到柴油机的排放指标。2009 年,全国实施机动车污染排放的国 IV 标准,强制要求安装车载诊断系统(OBD)。OBD 是基于排放控制、满足国 III 以上排放标准的车载诊断系统,EGR 技术是其检测与诊断的重点内容。柴油机工作状况恶劣,EGR 阀控制电路元器件自身性能改变会产生故障,故 EGR 阀电路在线故障诊断技术显得尤为重要。

由于电路故障现象的多样性、元件参数的离散、非线性等原因,电路故障诊断技术还未广泛应用。随着智能技术的不断深入和发展,提出了模糊理论、神经网络及小波分析的电路故障诊断方法^[1-3],虽然融合技术已广泛应用于电气与机械设备的故障诊断,但车用 EGR 阀的控制电路故障诊断的应用研究却还刚刚起步,研究成果很少。

在主元分析(PCA)、回声状态网络(ESN)的基础上^[4-6],提出了一套针对车用 EGR 阀控制电路故

障的在线诊断策略。通过 Pspice 软件对控制电路故障的仿真采样值作为 PCA 输入值,控制电路各元器件故障代码作为 ESN 输出值,进行了 EGR 阀控制电路故障的在线诊断与学习。利用 PCA-ESN 诊断策略,进行了 EGR 阀控制电路故障在线诊断试验。结果表明:诊断策略的故障诊断的正确率为 94.3%;误判率为 0.58%;拒绝率为 0.15%。因此,能够实现快速故障诊断及定位,具有高准确率。

1 故障诊断策略

图 1 为车用 EGR 阀控制电路的故障诊断策略。由图可知,采用 PSpice 软件对 EGR 电路故障的仿真采样值,通过主元分析(PCA)和回声状态网络(ESN)的融合诊断策略,计算出故障误差值,并与误差限值比较,判断检测点是否故障。

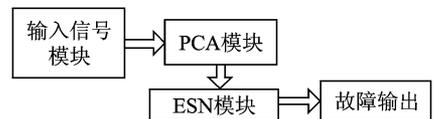


图 1 EGR 阀电路在线故障诊断策略

1.1 PCA 处理模块

主元分析(PCA)是多变量统计方法,可对电路故障和不稳定的测量数据进行分析^[7]。图 2 为 PCA

* 河南省高等学校青年骨干教师资助项目(编号:2010GGJS-150);河南省科技厅重点攻关计划资助项目(编号:112102210363)

收稿日期:2010-01-14;修改稿收到日期:2010-04-13

模块的 EGR 电路数据处理策略,处理步骤如下:

1) 原始数据标准化

设 EGR 电路故障特征值构成原始数据样本集 $(x_{ij})_{m \times n}$ 。其中: m 为样本数目, n 为故障特征数目。为消除原变量差异太大带来的影响,需对原变量做标准化处理,即

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{S_{ij}^*}}, \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中: $\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}$; $S_{ij}^* = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ 。

2) 建立 EGR 电路信号数据处理矩阵,计算矩阵特征值与特征向量

$$R = \frac{1}{m-1} X^{*'} X^* \quad (2)$$

其中: X^* 为标准后的 EGR 电路信号数据矩阵。

由 R 可获得特征值 λ_i 和特征向量 $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

3) 选取主元

计算 EGR 电路方差贡献率: $|\lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i| \times 100\%$ 。当累计方差贡献率大于 80% 所需的主元个数时,计算各主元值,否则转向步骤 2,重新建立 EGR 电路信号数据处理矩阵,再选取主元。

4) 计算主元值

各主元值计算公式为 $\Gamma_i = \sum_{j=1}^n a_j x_j$, 计算各主元值。以形成新的训练样本集和测试样本集,消除 EGR 电路故障特征值相关性,以提高 ESN 学习速率。

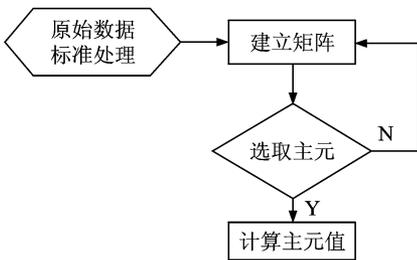


图 2 主元分析模块的数据处理策略

1.2 ESN 诊断模块

ESN 是新型递归神经网络,其网络诊断结构如图 3 所示^[8]。

储备池神经元活性值为

$$X(n+1) = f[W_{in}u(n+1) + Wx(n) + W_{back}y(n)] \quad (3)$$

其中: f 为储备池激活函数,选双极 S 型函数。

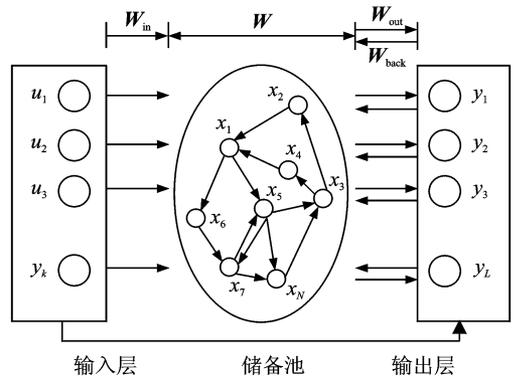


图 3 回声状态神经网络诊断结构图

回声状态神经网络输出值为

$$y(n+1) = f_{out}[W_{out}x(n+1)] \quad (4)$$

其中: $y(n+1)$ 为 $x(n+1)$ 的预测值; f_{out} 为输出层神经元激活函数。

图 4 为 EGR 电路的回声状态网络诊断策略模块,其学习训练与诊断的步骤如下:

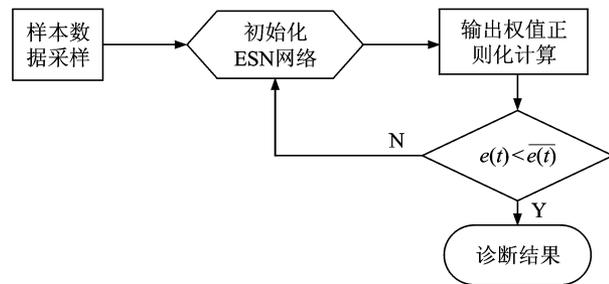


图 4 回声状态网络模块的诊断策略

1) 样本数据采样。将经 PCA 处理后的样本数据输入到 ESN 网络,由式(3)更新神经元状态,得到状态矩阵 M 。

2) 初始化 ESN 网络。随机产生连接权矩阵 W_0 ,其谱半径为 $|\lambda_{max}|$,并将 W_0 标准化为 W 。最终产生输入权 W_{in} 、输出权 W_{out} 和输出反馈权 W_{back} 。

3) 输出权值正则化计算方法。EGR 阀电路的输出权值最小化目标函数为

$$E_S(F) = \sum_{i=1}^N (y_i - F(X))^2 + \lambda \|PF\| \quad (5)$$

其中: λ 为正则化系数; $\|PF\|$ 为正则化泛函数; F 为训练样本 $S = \{(X_{b_i}, y_i) \in R^n \times R | i = 1, 2, \dots, N\}$ 的有效逼近函数; P 为线性微分算子。

采用正则化方法,式(5)的优化解为

$$F_\lambda(X) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^N [y_i - F(X_i)] G(X, X_i) \quad (6)$$

其中: $G(\cdot)$ 为算子 $\tilde{P}P$ 的 Green 函数; \tilde{P} 为 P 的伴随算子; $G(X, X_i)$ 的形式依赖于 X 和 X_i 的距离,即

$G(X, X_i) = G(\|X, X_i\|)$ 。

通过输出权值正则化计算,得到柴油机 EGR 阀电路故障的诊断误差为 $e(t)$ 。

4) 诊断结果。 $e(t)$ 与设定的 EGR 阀电路故障误差评估值 $\overline{e(t)}$ 进行比较,如果 $e(t) < \overline{e(t)}$ 时,则输出诊断结果。否则转向步骤 2,重新优化权值,再进行诊断。

2 诊断应用

2.1 控制电路和参数设置

为满足国 IV 排放标准,必须对柴油机轻型车的 EGR 阀电路运行状况进行判断,从而判断 EGR 阀故障。柴油机轻型车的 EGR 阀控制电路如图 5 所示,由图 5 可知,4 个大功率开关管分为两组(VT1 和 VT4,VT2 和 VT3)。两组大功率开关管轮流导通和截止,产生控制电压,用于控制 EGR 阀。该电路由对称的四部分构成。把 EGR 阀控制电路对称地分割为 4 个子电路模块,如图 6 所示。以单个子电路模块电路为对象,进行故障诊断与测试。

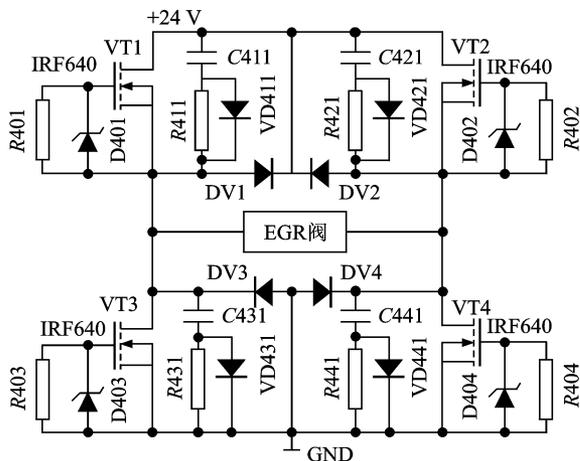


图 5 EGR 阀的控制电路原理图

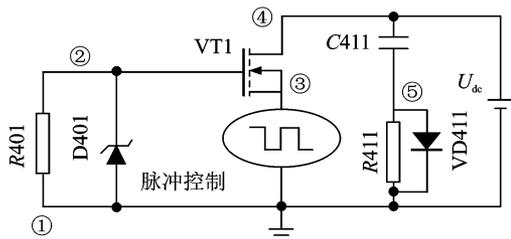


图 6 子电路模块模型

子电路模型元件基本参数设置:电容 $C411 = 470 \text{ MF}$,电阻 $R401 = 20 \text{ k}\Omega$, $R411 = 40 \text{ k}\Omega$, $D401$ 为

续流二极管;电路故障的仿真测试信号:输入直流电源电压 U_{dc} 为 24 V,开关管 VT1 频率为 30 kHz。

2.2 构造故障模式

根据汽车频繁起动的特点,经统计分析表明,EGR 阀电路最常见的硬故障为开关管故障、元件短路或开路;软故障为开关管放大倍数减小并超出了容差限($\pm 50\%$)。电阻、电容软故障电阻值增大或减小并超出了容差限($\pm 5\%$)。依照 ITC 标准构造故障模型,对 EGR 阀控制电路的子电路模块构造故障模式。其中,大功率开关管的硬故障主要有 6 种模型,分别为栅极开路(grid open)、漏极开路(drain open)、源极开路(source open)、漏源短路(DS short)、栅源短路(GS short)和栅漏短路(GD short);大功率开关管软故障为放大倍数 β 减小($\beta \downarrow$)。电阻、二极管和电容的硬故障主要有短路和开路 2 种模型;电阻和电容的软故障为电阻、电容的值增大或减小。假定该电路存在单一故障,除电路无故障情况,另还设有 18 种硬故障模式和 7 种软故障模式,如表 1 所示。

表 1 子电路故障设定和描述

描述	故障代码	描述	故障代码
VT1DS 端短路	VT1-ds-s	VT1D 端开路	VT1-d-o
VT1GS 端短路	VT1-gs-s	VT1S 端开路	VT1-s-o
VT1GD 端短路	VT1-gd-s	VT1G 端开路	VT1-g-o
R401 短路	R401-s	R401 开路	R401-o
R411 短路	R411-s	R411 开路	R411-o
C411 短路	C1-s	C411 开路	C1-o
VD411 短路	V1-s	VD411 开路	V2-o
VD001 短路	V2-s	VD001 开路	V1-o
D401 短路	D1-s	D401 开路	D1-o
R401 减小	R401- \downarrow	R401 增大	R401- \uparrow
R411 减小	R411- \downarrow	R401 增大	R411- \uparrow
C411 减小	R411- \downarrow	C411 增大	R411- \uparrow
放大倍数减小	VT1- $\beta \downarrow$		

2.3 仿真分析

为满足 OBD 排放要求,必须对柴油机 EGR 阀电路进行故障诊断。用 PSpice/Orcad9.1 软件对 EGR 阀电路子模块电路建模并仿真,每种故障模式迭代仿真 50 次,并对每种故障的仿真样本进行采样,采样点数为 1 920 点。经采样样本处理后,得到 650 个故障样本。取故障样本的一半作为训练样本集,剩余样本作为测试样本集。采用训练样本集对 ESN 进行训练,用来确定 ESN 的结构,结果表明,ESN 的最佳网络结构为 9-25-9。用测试样本集分别

用 ESN 算法和 PCA-ESN 融合算法对 ESN 进行测试,经过样本训练和测试,诊断结果如表 2 所示。由表可知,对于相同的训练和测试样本集,PCA-ESN 融合算法的训练时间为 29 s,ESN 算法的训练时间为 78 s;PCA-ESN 融合算法的故障诊断正确率、误识率和拒绝率分别为 99.2%,0.6%和 0.2%,ESN 算法的故障诊断正确率、误识率和拒绝率分别为 91.8%,5.6%和 2.6%。ESN 的最佳输入权值 W_{in} 为 0.45,平均绝对误差为 0.18%。故 PCA-ESN 融合算法具有快速寻优和故障诊断率高的特点,适合于 EGR 阀电路的在线故障诊断。

表 2 诊断结果对比

对比项	PCA-ESN	ESN
训练时间/s	29	78
训练样本(325个)	325	313
测试样本(325个)	321	292
正确率/%	99.2	91.8
误识率/%	0.6	5.6
拒绝率/%	0.2	2.6

3 试验验证

按照车用柴油机排放性能试验要求,为验证 PCA-ESN 融合故障诊断策略的正确性,并满足 OBD 标准对 EGR 系统的检测要求。在转毂试验室内,进行了 EGR 阀电路故障诊断试验。试验方案如图 7 所示。环境温度调控为 23℃,由 SKE-32AD 检测与保护。PCA-ESN 诊断系统对控制电路进行测试与诊断,诊断结果分别传递给 PC 和电控单元,并对柴油机采取相应控制策略。

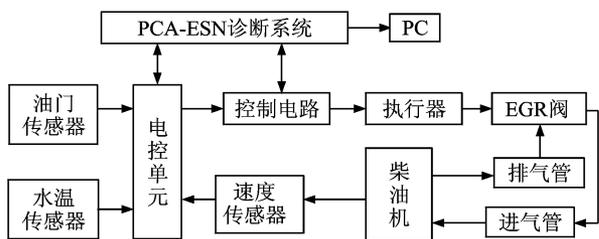


图 7 EGR 阀电路在线故障诊断系统图

试验时,对大功率开关管 VT1 设定了如下故障:a. 栅极、漏极和源极分别开路,故障代码分别记为:VT1_g_o,VT1_d_o 和 VT1_s_o;b. 漏源短路、栅源短路和栅漏短路,故障代码分别记为:VT1_ds_s,VT1_gs_s 和 VT1_gd_s。对这两种故障模式分别用 PCA-ESN 诊断策略进行诊断,得到 EGR 阀两端电压分别为 0 和 24 V,EGR 阀不能正

常工作。车用柴油机在不同工况下运行时,对 EGR 阀电路进行诊断试验,得到 VT1_g_o,VT1_d_o 和 VT1_s_o 诊断的正确率分别为 94.8%,96.2%和 95.7%;VT1_ds_s,VT1_gs_s 和 VT1_gd_s 诊断的正确率分别为 94.3%,94.4%和 95.2%。

用同样的试验方法,分别对电阻(R401 和 R411)、电容(C411)和二极管(D411 和 VD401)人为设定了故障模式,故障代码如表 3 所示。用 PCA-ESN 诊断策略对 EGR 阀的控制电路诊断的正确率见表 3。

表 3 子电路模块的硬故障诊断结果

故障代码	正确率/%	故障代码	正确率/%
VT1_ds_s	94.3	R401_o	98.5
VT1_gs_s	94.4	R411_s	98.2
VT1_gd_s	95.2	R411_o	98.3
VT1_d_o	96.2	V1_s	96.5
VT1_s_o	95.7	V2_o	96.1
VT1_g_o	94.8	V2_s	97.2
Cl_s	98.3	V1_o	97.4
Cl_o	98.4	D1_s	96.3
R401_s	98.6	D1_o	95.9

对于 EGR 阀电路软故障诊断。以 R401 为例,列出了部分诊断结果,如表 4 所示。

表 4 R401 软故障诊断结果

R401/kΩ	最大输出	次大输出	诊断定位
R401_s	②(0.98)	①(0.08)	②
1.0	②(0.96)	④(0.13)	②
3.3	②(0.86)	②(0.41)	②
5.1	②(0.92)	⑤(0.18)	②
7.2	0(0.74)	③(0.25)	无故障
10	②(0.86)	⑤(0.22)	②
220	②(0.91)	④(0.15)	②
510	②(0.94)	④(0.12)	②
R401_o	②(0.98)	①(0.04)	②

由表 4 可知,R401 标称值为 7.5 kΩ。当 R401 故障值为 7.2 kΩ 时,由于故障太小,故障特性被其他元件的容差影响所掩盖,无法检测出故障。随着故障值增大,与 R401 故障对应的输出值逐渐增大,当 R401 阻值变为 7.2 kΩ 时,输出值已大于 0.7,则表明 PCA-ESN 故障诊断策略已能检测并正确地定位故障。对于部分小故障情况,当 R401 为 3.3 kΩ 时,PCA-ESN 网络诊断为无故障状态,但节点②输出值为 0.41,为次最大值。从这些数据也能判断出电路中 R401 有故障。因此,对于 EGR 阀电路软故障诊断,PCA-ESN 融合故障诊断策略同样适用。

经过上述 EGR 阀电路各元器件的硬、软故障诊断试验,最终得到 PCA 的最佳累计方差贡献率为 0.95,平均绝对误差为 0.2%。PCA-ESN 故障诊断策略对 EGR 阀控制电路各元器件故障诊断的正确率在 94.3%~98.6%之间,误识率为 0.58%,拒绝率为 0.15%,与仿真结果基本吻合。

4 结 论

1) 利用 PCA-ESN 融合理论,提出了 EGR 阀电路的在线故障诊断策略。通过训练和测试,表明 PCA-ESN 诊断策略能够对 EGR 阀电路故障在线诊断。

2) 试验表明,PCA-ESN 融合故障诊断策略能够实现柴油 EGR 阀电路快速故障诊断及定位,具有准确率高特点。

参 考 文 献

- [1] 崔宝珍,王泽兵,潘宏侠.小波分析-模糊聚类法滚动轴承故障诊断[J].振动、测试与诊断,2008,28(2):151-154.
Cui Baozhen, Wang Zebing, Pan Hongxia. Application of wavelet analysis-cluster fuzzy to fault diagnosis of roller bearings[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008,28(2):151-154. (in Chinese)
- [2] Loves S, Lu Meiliu, Zhang Du. Enhancing search engine performance using expert systems [C] // 2006 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI-2006). Piscataway: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2006(4):567-572.
- [3] 余德平,王宝强,史延枫,等.运用小波变换检测汽车后桥总成故障[J].振动、测试与诊断,2009,29(3):356-361.
Yu Deping, Wang Baoqiang, Shi Yanfen, et al. Fault detection of automobile rear drive assembly by using wavelet decomposition [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009,29(3):356-361. (in Chinese)
- [4] 魏秀业,潘宏侠,王福杰.基于粒子群优化核主元分析特征提取技术[J].振动、测试与诊断,2009,29(2):162-166.
Wei Xiuye, Pan Hongxia, Wang Fujie. Feature ex-
- traction based on kernel principal component analysis optimized by particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009,29(2):162-166. (in Chinese)
- [5] 付琳娟,翟正军,郭阳明.基于回声状态网络的多变量预测模型的研究[J].计算机测量与控制,2009,17(7):1356-1358.
Fu Linjuan, Zhai Zhengjun, Guo Yangming. Research on multivariate prediction model based on echo state networks [J]. Computer Measurement & Control, 2009,17(7):1356-1358. (in Chinese)
- [6] 胡金海,谢寿生,侯胜利,等.核函数主元分析及其故障特征提取的应用[J].振动、测试与诊断,2007,27(1):48-52.
Hu Jinhai, Xie Shousheng, Hou Shengli, et al. Kernel principal component analysis and its application to fault feature extraction [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007,27(1):48-52. (in Chinese)
- [7] 王新峰,邱静,刘冠军.核主元分析中核函数参数优选方法研究[J].振动、测试与诊断,2007,27(1):62-64.
Wang Xinfeng, Qiu Jing, Liu Guanjun. Kernel function optimization in kernel principle component analysis and its application to feature extraction of gear faults [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007,27(1):62-64. (in Chinese)
- [8] 刘颖,王伟,吴毅平,等.基于数据的改进回声状态网络在高炉煤气发生量预测中的应用[J].自动化学报,2009,35(6):731-737.
Liu Ying, Wang Wei, Wu Yiping, et al. Improved echo state network based on data-driven and its application to prediction of blast furnace gas output [J]. Acta Automatica Sinica, 2009,35(6):731-737. (in Chinese)

第一作者简介:胡明江,男,1974年3月生,博士、副教授。主要研究方向为内燃机电子控制技术、故障诊断与排放检测。曾发表《基于RBF-ANFIS的汽油机排放及氧传感器劣化预测》(《内燃机工程》2009年第30卷第5期)等论文。

E-mail:hmj@hncj.edu.cn.