

中图分类号: U 666 12 文献标识码: A

基于置信规则库专家系统的发动机故障诊断

张 伟, 石菖蒲, 胡昌华, 周志杰

(第二炮兵工程学院, 陕西西安 710025)

摘 要: 针对发动机故障原因和征兆之间存在的复杂非线性关系, 利用 RMER(基于证据推理算法的置信规则库推理方法)对发动机进行故障诊断, 克服了传统专家系统或神经网络技术只能单一利用专家知识或训练数据的缺点, 将定性知识与定量数据有效结合, 对发动机故障原因进行了研究, 给维修人员提供了重要参考依据, 仿真实验结果表明该方法可行有效。

关键词: 专家系统; 置信规则库; 故障诊断; 发动机

Fault Diagnosis of Engine Based on RMER Expert System

ZHANG Wei SHI Changpu HU Changhua ZHOU Zhijie

(The Second Artillery Engineering College Xi'an 710025 China)

Abstract: The belief rule base inference methodology using the evidential reasoning approach(RMER) expert system is applied to the fault diagnosis of engine to deal with the complex nonlinear relation between cause and symptom of fault and it overcomes the disadvantage that the traditional expert system or neural network only uses expert knowledge or training data. investigates the fault cause and its possibility of engine supplies the mainainer with important reference basis. The method is proved to be feasible and effective by the experiment results.

Key words: expert system; belief rule bases (BRB); fault diagnosis; engine

1 引 言

发动机故障原因和征兆之间存在复杂的非线性关系, 1种故障原因会引起多种征兆或 1种故障征兆可能是由多种原因造成的, 甚至有些故障是潜在缓变的, 不能片面地断定发动机是否发生故障。目前, 应用于发动机故障诊断的方法主要分为两类, 定性方法, 如故障树^[1]、传统专家系统^[2]; 定量方法, 如神经网络^[3]、信息融合^[4]。定性方法能够

构造故障树或利用专家的经验或知识, 知识库越丰富, 诊断正确率越高, 但无法利用数据进行学习更新; 定量方法则主要建立在数据驱动的基础上, 利用大量数据来训练系统, 诊断精确, 但无法加入专家知识。为了处理人类决策中遇到的不确定性信息, 在 D-S理论、决策理论和规则库的基础上, Yang等人提出了基于证据推理方法的置信规则库推理方法(RMER)^[5]。基于证据推理的置信规则库推理方法 RMER专家系统在传统规则表示的基础上加入规则参数, 将定性和定量方法结合对系统进行建模, 并建立了 RMER专家系统的学习模型, 该学

习模型是 1 个带有线性或非线性的复杂非线性优化问题。其学习过程既能采用专家的经验知识, 又能利用测试数据对系统模型进行训练。利用该方法建立发动机规则库, 并建立相应的学习模型, 对怠速状态下的正常怠速、进气系统漏气、怠速电机不工作和某缸喷油器堵塞 4 种状态进行诊断。实验结果表明该方法切实可行。

2 置信规则库理论

2.1 置信规则库的结构及参数表示

规则库是专家系统的 1 个重要组成部分。一般的, 传统规则库中的第 k 条规则形式如下:

$$R_k: \text{If } A_1^k \text{ and } A_2^k \text{ and } \dots A_M^k, \\ \text{Then } D_k \quad (k=1, \dots, L) \quad (1)$$

在传统规则的基础上, Yang 等提出了 1 种更接近实际的表达机制即置信规则, 在置信规则库 BRB 中共有 M 个前提属性, $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$ 为系统的输入, 其中 X_i ($i=1, \dots, M$) 表示第 i 个前提属性的输入, 则第 k 条规则形式如下:

$$R_k: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^k \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^k \text{ and } \dots x_M \text{ is } A_M^k, \\ \text{Then } \{ (D_k, \beta_{1k}), \dots (D_k, \beta_{Nk}) \} \quad (2)$$

并且有规则权值 θ_k 和前提属性权值 $\delta_{1k}, \delta_{2k}, \dots, \delta_{Mk}$ 。在公式 (2) 中, A_i^k ($i=1, \dots, M, k=1, \dots, L$) 表示在第 k 条规则中第 i 个前提属性的参考值; M_k 表示在第 k 条规则中前提属性的数目; L 表示规则的数目; θ_k ($k=1, \dots, L$) 表示第 k 条规则的规则权值, 它反映了第 k 条规则相对于规则库中其他规则的重要度; δ_i^k ($i=1, \dots, M, k=1, \dots, L$) 表示在第 k 条规则中第 i 个前提属性的权值, 它反映了第 i 个前提属性相对于其他前提属性的重要度; β_j^k ($j=1, \dots, N, k=1, \dots, L$) 表示在第 k 条规则中输出部分的第 j 个评价结果 D 的置信度。

2.2 学习模型

在对规则库的推理过程中, 由专家直接根据

经验确定的参数如前提属性权值、规则权值、置信度等往往带有一定的主观性, 因此 Yang 等提出了 RMER 专家系统的训练模型, 如图 1。

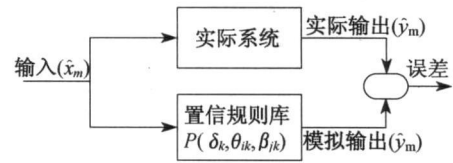


图 1 置信规则库训练过程图解

Fig 1 Training of BRB

训练的目的在于最小化实际输出和模拟输出间的误差。在本实验中, 由于实际输出和模拟输出是以分布式出现, 因此减小 y_m 和 \hat{y}_m 间的误差就等价于减小置信度 β_m 和 $\hat{\beta}_m$ 间的误差^[9], 即采用文献中提出的第二种训练模型。

因此, 训练模型的目标函数定义如下:

$$\min_p \xi_j(p), \quad j=1, \dots, N \quad (3)$$

其中:

$$\xi_j(p) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\beta_j(m) - \hat{\beta}_j(m))^2, \\ j=1, \dots, N \quad (4)$$

$p = \{ \beta_{jk}, \theta_k, \delta_{ik} \}$ 是训练参数向量; $m=1, \dots, M$ 是输入输出训练数据的组数。

该模型的约束条件如下:

$$(1) 0 \leq \beta_{jk} \leq 1, \quad j=1, \dots, N \quad (4a)$$

$$(2) 0 \leq \theta_k \leq 1, \quad k=1, \dots, L \quad (4b)$$

$$(3) 0 \leq \delta_{ik} \leq 1, \quad i=1, \dots, T \quad (4c)$$

(4) 如果第 k 条规则是完整的, 那么其置信度和为 1:

$$\sum_{j=1}^N \beta_{jk} = 1 \quad (4d)$$

因此, 该问题可归结为线性约束多目标优化问题。

3 发动机故障诊断实例

3.1 问题描述

发动机怠速不稳是汽车发动机维修中遇到最多的故障, 按其故障系统分类可分为进气系

统、燃油系统、点火系统和机械系统故障。因此,结合本实验实际,选取进气压力、转速和喷油器喷油时间 3 个参数作为输入前提属性,正常怠速工况状态和进气系统漏气、怠速电机不工作及某缸喷油器堵塞这 3 种故障、4 种情况作为输出。

3.2 确定参考值及输出代码

由于本文是初次尝试,所以将 3 个前提属性均分为 3 个参考值等级即进气压力分为 {高,正常,低},转速 {高,正常,低},喷油时间 {长,正常,短}。上述 4 种情况对应的输出代码可定义为 {1 0 0 0}, {0 1 0 0}, {0 0 1 0} 和 {0 0 0 1}。

3.3 建立规则库

根据以上设定的参考值等级及输出代码,就可以建立关于怠速状态的故障诊断规则库,并根

据发动机的怠速工作原理 初始设定前提属性权值 δ_j^k 、规则权值 θ_k 和结论置信度 β_j^k 。因篇幅原因,初始置信规则库在此不罗列。

3.4 模型学习

在建立了上述初始置信规则库后,利用表 1 中 4 种工况的前 5 组数据,并结合图 1 所示模型对参数进行训练,最后一组检验数据对优化结果进行检验。

在进行模型训练前,需要设定前提属性的参考值点,可设 3 个前提属性的参考值分布如下:进气压力 = { (低, 23.9), (正常, 34.4), (高, 39.1)}; 转速 = { (低, 850.9), (正常, 894.3), (高, 1 978.2)}; 喷油器喷油时间 = { (短, 2.0), (正常, 3.4), (长, 5.0)}。

表 1 发动机怠速工况
Tab 1 Status of running of engine

样本	正常怠速工况			进气系统漏气			怠速电机不工作			某缸喷油器堵塞		
	进压 / kPa	转速 / (r/min)	喷时 / ms	进压 / kPa	转速 / (r/min)	喷时 / ms	进压 / kPa	转速 / (r/min)	喷时 / ms	进压 / kPa	转速 / (r/min)	喷时 / ms
1	32.2	875.0	3.3	37.5	896.6	5.0	24.8	1 766.2	2	33.6	860.1	3.2
2	36.2	906.2	3.1	36.5	956.2	3.9	23.9	1 657.2	2	32.7	870.5	3.6
3	37.3	904.2	3.6	39.1	983.2	4.1	25.7	1 749.2	2	35.8	850.9	3.1
4	32.6	878.0	3.8	36.9	926.5	3.7	25.5	1 978.2	2	34.9	865.8	3.0
5	33.9	898.3	3.2	33.9	898.3	3.6	24.2	1 846.2	2	33.6	875.9	3.4
6	34.1	904.1	3.4	38.3	938.1	4.3	24.1	1 894.6	2	34.6	887.1	3.5

然后将输入值转化为对应前提属性的参考值的隶属度,例如以表 1 第 1 组数据为例,3 个前提属性输入分别为 (32.2 875.0 3.3),则进气压力 32.2 隶属于 (低, 23.9), (正常, 34.4), (高, 39.1) 的程度分别为 (0.208 3 0.791 7 0),即 $(32.2 - 23.9) / (34.4 - 23.9) = 0.791 7$ 。同理,转速 875.0 隶属于 (低, 850.9), (正常, 894.3), (高, 1 978.2) 的程度分别为 (0.444 7 0.555 3 0),喷油时间 3.3 隶属于 (短, 2.0), (正常, 3.4), (长, 5.0) 的程度分别为 (0.071 4 0.928 6 0)。

3.5 仿真结果

根据第 2 节 RMER 的理论及训练模型,采用 MATLAB 工具箱中的 optimization 多目标优化函

数 $f_{\min \max}$,经过 20 组数据训练后的置信规则库如表 2 所示。

目标函数 $\{ \xi \}^T, i=1, 2, 3, 4$ 的误差为 {0.033 2 0.018 6 0.002 3 0.033 2},基本达到实验要求。最后利用表 1 中每种工况的最后 1 组数据对学习模型进行检验,检验结果如下:

$$\beta_1 = \{0.882 0 \quad 0.000 1 \quad 0.000 1 \quad 0.000 1\}$$

$$\beta_2 = \{0.006 9 \quad 0.859 4 \quad 0.054 2 \quad 0.000 0\}$$

$$\beta_3 = \{0.002 9 \quad 0.049 2 \quad 0.945 3 \quad 0.000 0\}$$

$$\beta_4 = \{0.012 1 \quad 0.000 5 \quad 0.000 5 \quad 0.877 7\}$$

该实验结果表明了每组数据导致每种故障的可能性,从数据上反映了与实际结果的吻合度,可为维修人员查找故障原因提供有效依据。

表 2 训练后置信规则库
Tab 2 Trained BRB

规则数	规则权值	进气压力	转速	喷油器喷油时间	结论
1	0.000 0	低	低	短	{0.240 0, 0.235 5, 0.234 6, 0.290 0}
2	0.000 0	低	低	正常	{0.047 6, 0.144 1, 0.045 6, 0.762 8}
3	0.000 0	低	低	长	{0.349 8, 0.213 9, 0.217 6, 0.218 7}
4	0.000 0	低	正常	短	{0.340 9, 0.228 1, 0.230 4, 0.200 6}
5	1.000 0	低	正常	正常	{1.000 0, 0.000 0, 0.000 0, 0.000 0}
6	0.000 0	低	正常	长	{0.802 4, 0.075 1, 0.093 7, 0.028 8}
7	0.998 3	低	高	短	{0.002 9, 0.049 3, 0.947 8, 0.000 0}
8	0.600 0	低	高	正常	{0.250 0, 0.250 0, 0.250 0, 0.250 0}
9	0.600 0	低	高	长	{0.250 0, 0.250 0, 0.250 0, 0.250 0}
10	0.000 0	正常	低	短	{0.241 4, 0.216 8, 0.218 0, 0.323 9}
11	0.195 9	正常	低	正常	{0.000 0, 0.000 0, 0.000 0, 1.000 0}
12	0.000 0	正常	低	长	{0.491 6, 0.048 4, 0.060 9, 0.399 1}
13	0.133 3	正常	正常	短	{1.000 0, 0.000 0, 0.000 0, 0.000 0}
14	0.004 2	正常	正常	正常	{1.000 0, 0.000 0, 0.000 0, 0.000 0}
15	0.000 0	正常	正常	长	{0.332 3, 0.524 1, 0.088 4, 0.055 2}
16	0.258 4	正常	高	短	{0.019 1, 0.511 9, 0.024 8, 0.444 3}
17	0.000 0	正常	高	正常	{0.042 8, 0.703 1, 0.179 0, 0.075 1}
18	0.892 1	正常	高	长	{0.000 0, 0.940 7, 0.059 3, 0.000 0}
19	0.007 3	高	低	短	{0.176 2, 0.217 8, 0.2152, 0.390 8}
20	0.015 5	高	低	正常	{0.085 3, 0.182 9, 0.174 3, 0.557 4}
21	0.800 0	高	低	长	{0.332 5, 0.332 5, 0.332 5, 0.002 5}
22	0.000 0	高	正常	短	{0.163 6, 0.415 8, 0.006 2, 0.414 4}
23	0.000 0	高	正常	正常	{0.655 0, 0.000 8, 0.323 2, 0.021 1}
24	0.000 0	高	正常	长	{0.079 8, 0.320 5, 0.483 8, 0.116 0}
25	0.444 8	高	高	短	{0.273 2, 0.242 0, 0.242 6, 0.242 2}
26	0.000 0	高	高	正常	{0.043 4, 0.653 8, 0.002 3, 0.300 4}
27	0.000 0	高	高	长	{0.000 3, 0.974 2, 0.023 5, 0.002 0}

4 结 论

置信规则库专家系统不仅能采用专家的经验知识,还能利用训练数据对系统进行学习,迎合了定性和定量方法结合的故障诊断发展趋势,还能对潜在故障可能性进行估计。实验结果表明该方法切实可行。本文建立的初始规则库简单,专家知识有限,系统参数设定还不能完全反映系统的特性,如果能充分利用专家的准确经验和更多的不同种类的输入,实验结果会更接近实际。

参考文献:

[1] 施云. 模糊故障树在汽车发动机故障诊断中的应用[J]. 桂林电子科技大学学报, 2008, 28(3): 222—224.
SHI Yun. Application of fuzzy fault tree in automobile engine failure diagnosis[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2008, 28(3): 222—224.

[2] 吕克洪, 李岳. 基于铁谱信息的发动机故障诊断专家系统研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(6): 453—457.
LV Kehong, LI Yue. Study of fault diagnosis expert system for engine based on ferrography information[J]. Journal of CSICE, 2003, 21(6): 453—457.

[3] 王娟, 曹建云, 钟永彦. 基于 RBF神经网络的电机故障诊断的研究[J]. 系统仿真技术, 2009, 5(1): 36—39.

- WANG Juan, CAO Jianyun, ZHONG Yongyan. Research in the fault diagnosis of induction motors based on RBF Neural Networks [J]. System Simulation Technology, 2009, 5(1): 36—39.
- [4] 王冀松, 褚福磊, 何永勇, 等. 基于信息融合技术的发动机故障诊断的研究 [J]. 内燃机学报, 2003, 21(5): 374—378.
- WANG Binson, CHU Fulei, HE Yongyong, et al. Study on fault diagnosis for automobile electronically controlled engine based on data fusion technique [J]. Journal of CSCE, 2003, 21(5): 374—378.
- [5] Yang JB, Liu J, Wang J, et al. Belief rule base inference methodology using the evidential reasoning Approach. RMER [J]. IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2006, 36(2): 266—285.
- [6] Yang JB, Liu J, Xu D L, et al. Optimization models for training belief rule-based systems [J]. IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2005, 21(4): 1—28.



张伟 女 (1966—), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 智能计算, 故障诊断等。



石菖蒲 男 (1984—), 湖北武汉人, 硕士生, 主要研究方向为控制理论与控制工程。

(上接第 5 页)

方法, 将演习计划转化为仿真推演系统可识别的脚本文件, 提高了演习计划仿真资源的可重用性与仿真推演系统参数配置的灵活性。

参考文献:

- [1] 胡晓峰, 杨镜宇, 司光亚. 战争复杂系统仿真分析与实验 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2005.
- HU Xiaofeng, YANG Jingyu, SI Guangya. The complex system simulation analysis and experiment of the war [M]. Beijing: National Defense University Press, 2005.
- [2] 胡晓峰. 战争模拟引论 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2004.
- HU Xiaofeng. The introduction of simulation for the war [M]. Beijing: National Defense University Press, 2004.
- [3] 军事科学院. 中国人民解放军军语 [M]. 北京: 军事科学出版社, 1997.
- Academy of Military Sciences. The military language of People's Liberation Army [M]. Beijing: Military Science Press, 1997.
- [4] 张最良. 军事运筹学 [M]. 北京: 军事科学出版社, 1993.
- ZHANG Zuiling. Military operations research [M]. Beijing: Military Science Press, 1993.
- [5] DMSQ 美国国防建模标准 [EB/OL]. 2004-07-10. <http://www.dmsq.mil>
- DMSQ Evaluation final report [EB/OL]. 2004-07-10. <http://www.dmsq.mil>



赵邵蕾 女 (1984—), 上海人, 助教, 硕士, 主要研究方向为作战建模仿真。



魏石川 男 (1984—), 山东青岛人, 硕士, 主要研究方向为军事运筹作战建模仿真。