

doi: 10.7690/bgzdh.2018.04.015

基于模糊诊断理论的车辆空调系统故障诊断方法

胡际万, 谢武德, 朱磊, 宁兴兴

(中国人民解放军 63981 部队, 武汉 430311)

摘要: 为有效诊断特种车辆空调系统故障, 及时准确地定位故障原因, 以模糊诊断理论的车辆空调系统为对象研究其故障诊断方法。分析空调系统故障模式, 建立故障模糊数学模型, 确定故障征兆和故障原因的模糊关系, 基于经验维修和专家诊断确定了综合模糊隶属度, 根据最大隶属度原则, 确定故障征兆所对应的故障原因的最大隶属度, 从而判断出导致空调系统发生故障的原因。研究结果表明: 该方法能够准确可靠定位故障, 有效缩短维修时间。

关键词: 模糊诊断; 故障征兆; 模糊关系; 隶属度

中图分类号: TP273⁺.4 **文献标志码:** A

Fault Diagnosis Method of Air Condition System of Vehicle Based on Fuzzy Diagnosis Theory

Hu Jiwan, Xie Wude, Zhu Lei, Ning Xingxing

(No. 63981 Unit of PLA, Wuhan 430000, China)

Abstract: Aiming at effectively diagnosis for air condition system fault of the special vehicle and correctly finding out fault reason in time, research fault diagnosis method of air condition system of vehicle based on fuzzy diagnosis theory. Analyze the air condition system fault mode, establish fault fuzzy math model, ascertain the fuzzy relation of fault symptoms and fault reason, and determine the comprehensive fuzzy membership based on experience maintenance and expert diagnosis. According to max membership principle, determine the max membership of fault symptoms to fault reason, then find out the reason for air condition system. The research results show that the method can correctly and reliably find out the fault location and effectively shorten the maintenance time.

Keywords: fuzzy diagnosis; fault symptoms; fuzzy relations; membership

0 引言

空调系统是某型特种车辆空调系统的关键部件, 空调系统的性能直接影响车载电子设备的性能, 从而影响特种车辆正常运行。而空调系统的故障相对比较复杂, 一种故障可能呈现出多种不同的征兆, 而有时不同故障起因也可能导致同一种故障征兆的发生, 这种情况下很难及时准确定位其真正的故障起因, 影响了维修效率, 使车辆再次投入使用的的时间加长, 严重时会导致战场作战单元的缺失, 从而贻误战机。笔者通过应用模糊诊断理论, 分析故障征兆和故障起因之间的相互联系, 构造模糊诊断数学模型, 确定发生故障的故障起因, 为车辆维修提供了指导依据, 提高了维修效率^[1-2]。

1 模型建立

设某类故障发生时有 m 种征兆, 第 i 种故障征兆表示为 x_i , 用 X 表示故障征兆模糊向量, 则

$$X = (\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_i})。$$

其中 $\mu_{x_i} (i=1, 2, 3, \dots, m)$ 是对象表现故障征兆 x_i 的隶属度。

当某类故障发生时, 可能有 n 种原因同时或者单独发生作用^[3], 第 j 种故障原因表示为 y_j , 用 Y 表示故障原因模糊向量, 则

$$Y = (\mu_{y_1}, \mu_{y_2}, \dots, \mu_{y_j})。$$

其中 $\mu_{y_j} (j=1, 2, 3, \dots, n)$ 是可能引起故障征兆的故障原因 y_j 的隶属度。

用函数隶属度表示某种故障征兆与故障原因之间存在某种隶属关系, 记为 $r_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$, 即第 i 类故障征兆 x_i 对第 j 类故障原因 y_j 的模糊隶属度, r_{ij} 的全集合组成模糊关系矩阵, 记为 R , 则

$$R = (r_{ij})_{m \times n}, 0 \leq r_{ij} \leq 1。$$

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-02-08

作者简介: 胡际万(1989—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事机电工程研究。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}。$$

其中 r_{ij} 为综合模糊隶属度。 r_{ij} 值越大, 表示第 j 类故障原因 y_j 引发第 i 类故障征兆 x_i 的可能性越大; r_{ij} 值越小, 表示第 j 类故障原因 y_j 引起第 i 类故障征兆 x_i 的可能性越小^[4]。

通过查阅资料, 综合考虑各方面影响因素, 综合模糊隶属度 r_{ij} 由经验隶属度、初始隶属度确定, 确定方法^[5-6]如下:

1) 经验隶属度。通过整理统计历史维修数据, 确定基于专家经验维修的经验隶属度 v_{ij} , 则

$$v_{ij} = \frac{\text{第 } i \text{ 类故障征兆 } x_i \text{ 隶属于第 } j \text{ 类故障原因 } y_j \text{ 的次数}}{\text{第 } i \text{ 类故障征兆 } x_i \text{ 出现的总次数}}。$$

2) 初始隶属度。将导致某类故障征兆 x_i 的故障原因 y_j 进行两两比对并按优先序列排列, 形成 $n(n-1)/2$ 种序列, 若 M 位专家比对排列, 则序列数为 $M(n-1)/2$, 记故障原因 y_j 的优先序列为 t_j , 取 t_j 的最大值, 记为 t_k , 则

$$t_k = \max\{t_j (j=1, 2, \dots, n)\}。$$

记故障征兆 x_i 的故障原因 y_j 的初始隶属度为 s_{ij} , 则

$$s_{ij} = \frac{t_j}{t_k} (j=1, 2, \dots, n)。$$

设经验隶属度的占比系数为 w_1 , 初始隶属度的占比系数为 w_2 , 其中 $w_1, w_2 \geq 0$, 且 $w_1 + w_2 = 1$, 则综合模糊隶属度

$$r_{ij} = w_1 v_{ij} + w_2 s_{ij}, (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)。$$

通过模糊合成变换, 建立故障征兆 x_i 和故障原因 y_j 的模糊关系数学模型^[7]:

$$Y = X \cdot R = (x_1, x_2, \dots, x_m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}。$$

则:

$$y_j = \sum_i x_i r_{ij}, j=1, 2, \dots, n;$$

$$Y_j = \max\{y_j | j=1, 2, \dots, n\}。$$

从而推断出故障征兆 x_i 对应的故障原因为 Y_j , 即第 j 类故障原因。

模糊诊断过程如图 1 所示, 通过对现场数据的观测与采集, 确定所有的故障征兆, 确定故障征兆向量 X , 统计分析历史实验数据, 确定故障原因向量 Y , 从而构造综合模糊隶属度, 建立诊断矩阵 R , 通过合成算法选定求解算子, 求解模糊关系方程, 最后确定故障征兆的故障原因。

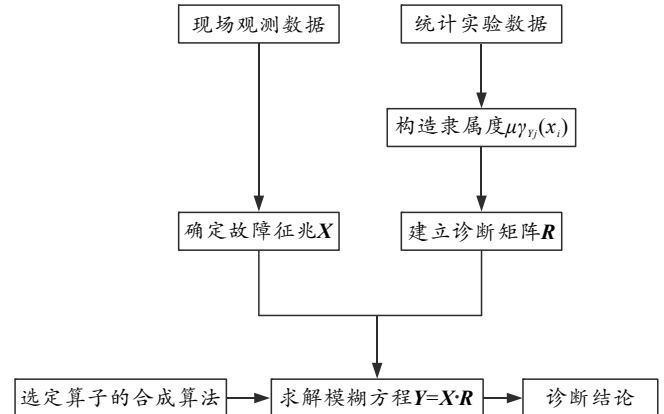


图 1 模糊诊断流程

2 故障现象

某型特种车辆在训练过程中, 空调系统比较容易发生故障, 通过历史维修数据的整理分析, 空调系统表现的主要故障现象有 6 类, 如表 1 所示。

表 1 故障征兆

故障征兆	表示符号
制冷压缩机不启动	x_1
制冷效果差	x_2
系统异常声响	x_3
压力表读数异常	x_4
膨胀阀打不开	x_5
压力控制器开关不闭合	x_6

分析上述故障发生的原因, 统计有 11 类故障原因, 如表 2 所示。

表 2 故障原因

故障原因	表示符号
电机烧坏	y_1
压缩机卡缸	y_2
传动皮带松动	y_3
制冷剂过多	y_4
系统中混有空气	y_5
感温包内工质泄漏	y_6
压力控制器损坏	y_7
制冷剂不足	y_8
压缩机效率太差	y_9
风机卡滞	y_{10}
膨胀阀损坏	y_{11}

3 故障分析

每种故障征兆都有可能是 1 种故障原因或 m 种故障原因引起。结合空调系统的 6 类常见故障征兆 $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$ ，每类故障对应的故障原因可能是单独的 1 种故障原因导致的，也可能是 2 种或 2 种以上的故障原因组合而成。分析引起故障的可能原因，如表 3 所示。

表 3 故障征兆与故障原因关系

故障征兆	表示符号	故障原因
制冷压缩机不起动	x_1	y_1, y_2
制冷效果差	x_2	y_5, y_8, y_9
系统异常声响	x_3	y_3, y_{10}
压力表读数异常	x_4	y_4, y_5
膨胀阀打不开	x_5	y_6, y_{11}
压力控制器开关不闭合	x_6	y_7

分析历史维修数据，空调系统所发生的故障原

$$V = \begin{bmatrix} 0.16 & 0.03 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.06 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0.1 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.03 & 0 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0.16 & 0.1 & 0 & 0 & 0.15 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.14 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0 & 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}。$$

由专家择优法计算确定初始隶属度 s_{ij} ，得到初

$$S = \begin{bmatrix} 0.21 & 0.06 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.13 & 0.07 & 0 & 0 \\ 0 & 0.06 & 0.1 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0 \\ 0.02 & 0 & 0 & 0.31 & 0.2 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0.03 & 0 & 0 & 0 & 0.07 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.07 & 0 & 0 & 0 & 0.03 \end{bmatrix}。$$

设经验隶属度的占比系数 $w_1=0.5$ ，初始隶属度的占比系数 $w_2=0.5$ ，则

$$R = \begin{bmatrix} 0.19 & 0.06 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.09 & 0.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0.1 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.03 & 0 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0.24 & 0.18 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.17 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \end{bmatrix}。$$

4 故障诊断

当故障征兆单独出现或多个故障征兆同时出现时，从模糊诊断矩阵中找到相应故障原因的综合隶属度 r_{ij} ，计算对每个故障原因影响的隶属度，并根据最大隶属度原则最终确定导致该类故障征兆的故障原因。

因与出现频率统计如表 4 所示。

表 4 故障原因频数

故障原因	出现频数	相对频率
y_1	5	0.167
y_2	1	0.033
y_3	3	0.151
y_4	5	0.167
y_5	3	0.151
y_6	1	0.033
y_7	1	0.033
y_8	2	0.066
y_9	1	0.033
y_{10}	1	0.033
y_{11}	4	0.133

通过表 4 数据，结合表 3 中故障征兆和故障原因的模糊关系，由公式

$$v_{ij} = \frac{\text{第 } i \text{ 类故障征兆 } x_i \text{ 隶属于第 } j \text{ 类故障原因 } y_j \text{ 的次数}}{\text{第 } i \text{ 类故障征兆 } x_i \text{ 出现的总次数}}。$$

确定经验隶属度 v_{ij} ，得到经验隶属度矩阵

始隶属度矩阵

$$r_{ij} = 0.5 \times v_{ij} + 0.5 \times s_{ij}。$$

得到模糊诊断矩阵

给定一组故障征兆群 U [8]:

$$U = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}。$$

其中

$$p_i = \begin{cases} 0 & x_i \text{ 征兆出现} \\ 1 & x_i \text{ 征兆未出现} \end{cases}。$$

通过确定故障征兆出现的情形，确定故障征兆

向量 X ，求得征兆群对每个故障原因的隶属度，根据最大隶属度原则，确定最终的故障原因。

特种车辆在某次实际训练过程中，出现了空调制冷效果差 (x_1)、系统异常声响 (x_3)、压力表读数

异常 (x_4) 这 3 个故障征兆，根据上述故障征兆集确定方法，故障征兆集

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \{0, 1, 1, 1, 0, 0\}。$$

因此，故障原因

$$Y = X \cdot R = (0, 1, 1, 1, 0, 0) \begin{bmatrix} 0.19 & 0.06 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.09 & 0.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0.1 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.03 & 0 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0.24 & 0.18 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.17 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \end{bmatrix} =$$

(0.01, 0.05, 0.11, 0, 0.3, 0, 0, 0.11, 0.06, 0.03, 0.02)。

根据最大隶属度原则：

$$Y_j = \max \{y_j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$$

可以得到第 5 项 $y_5 = 0.3$ 值最大，即 y_5 对应的各种故障征兆的综合隶属度值最大；因此，空调系统发生制冷效果差的原因是 y_5 ，即系统中混有空气，需要对空调系统管道进行排气处理。

5 结论

笔者基于历史维修数据，统计了空调系统故障的故障模式，分析了导致故障征兆的故障原因，通过建立模糊诊断数学模型，确定了故障原因的模糊隶属度，最终确定空调系统发生故障所对应的故障原因。实践结果证明：基于模糊诊断理论的故障诊断方法具有较高的可靠性，能够辅助维修人员及时发现故障原因，并准确定位故障点，大幅缩短故障诊断时间。笔者综合模糊诊断隶属度的确定依赖于专家经验，还需要进一步完善，以提高故障诊断的准确性。

参考文献：

[1] 张怀彬. 基于模糊理论的飞机液压油泵车故障诊断专家系统构建[J]. 辽宁大学学报, 2010, 37(4): 359-362.

[2] 张文修, 吴伟志. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 118-122.

[3] 肖余培, 张野. 一种基于模糊控制的推力变向机构控制仿真[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 81-84.

[4] 孙红岩, 姜雪峰. 智能诊断中动态模糊征兆向量方法[J]. 核动力工程, 2010, 31(2): 67-70.

[5] 王伟, 赵卫强, 刘永贤. 基于模糊诊断原理的航空液压油泵车故障诊断系统的研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(4): 42-46.

[6] LIU XF, MA L, MATHEN J. Machinery Fault Diagnosis Based on Fuzzy Measure and Fuzzy Integral Data Fusion Techniques[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3): 690-700.

[7] 韩兆林, 盛兵, 杨永刚. 模糊诊断技术在武器装备维修中的应用[J]. 科技研究, 2011, 27(1): 45-46.

[8] 赵玉刚, 鞠建波, 杨兵兵. 基于小波变换的电子设备故障诊断技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016(5): 49-52.

(上接第 60 页)

参考文献：

[1] 周鑫, 李新洪, 王谦. 基于威胁建模的 PSO 在 UAV 3 维航路规划中的应用[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 73-75.

[2] RISTO L, JOONAS H, PEKKA S. SMAA - Stochastic multi-objective acceptability analysis[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 106(1): 137-143.

[3] RISTO L, PEKKA S. SMAA-2: Stochastic multi-criteria acceptability analysis for group decision making[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 49(3): 444-454.

[4] RISTO L, KAISA M, PEKKA S. Ordinal criteria in stochastic multi-criteria acceptability analysis (SMAA)

[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147(1): 117-127.

[5] 张毅, 王和平, 党荣军. 高空长航时无人机的总体方案评价准则研究[J]. 计算机仿真, 2006(5): 27-29.

[6] 王和平. 飞机总体参数与作战效能的关系研究[J]. 航空学报, 1994(15): 1077-1080.

[7] 高劲松, 余菲, 季晓光. 无人机自主控制等级的研究现状[J]. 电光与控制, 2009(10): 51-54.

[8] 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011(6): 1075-1083.

[9] 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993: 169-178.