

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.01.018

炮射导弹系统故障的模糊-免疫混合诊断策略

张万君, 王新, 刘新亮

(装甲兵工程学院兵器工程系, 北京 100072)

摘要: 针对炮射导弹系统故障特点和故障诊断方法中存在的不足, 提出基于模糊-免疫混合故障诊断方法。从理论上分析模糊-免疫诊断方法的可行性和创新性, 给出故障诊断策略的总体方案, 建立故障诊断的数学模型; 以制导装置为例对故障产生的原因进行定量计算。诊断结果表明: 该电路发生故障的主要原因是由保护电路引起; 所提方法可解决在故障先验知识缺乏的情况下对炮射导弹系统故障的定量诊断。

关键词: 炮射导弹; 故障诊断; 模糊-免疫; 数学模型; 先验知识

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A

Mixed Diagnosis Tactic on Fuzzy-Immunity of Gun-Launched Missile System

Zhang Wanjun, Wang Xin, Liu Xinliang

(Dept. of Arms Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Aimed at the features of gun-launched missile system fault and scarcities of fault diagnosis methods, the fuzzy-immunity mixed fault diagnosis method is proposed. The feasibility and innovation is theoretically analyzed, the overall project of fuzzy-immunity fault diagnosis is given, the math model of fault diagnosis is established; Taking guidance device as an example, the fault reason is quantitatively calculated. The diagnosis result indicates that the main reason of this circuit fault is protecting circuit; this method can resolve quantitatively diagnosis for gun-launched missile fault in the lack of prior knowledge.

Key words: gun-launched missile; fault diagnosis; fuzzy-immunity; math model; prior knowledge

0 引言

武器装备的故障诊断一直是各国军方重点关注的课题。炮射导弹系统故障具有复杂性、随机性和模糊性, 目前的一些智能故障诊断方法已不能满足炮射导弹系统故障诊断的要求, 如较单一的神经网络、故障树诊断方法等, 虽然在故障知识训练、定性诊断分析方面具有一定优势, 但在故障知识获取以及故障征兆和原因之间的模糊关系方面存在诸多问题, 尤其是动态、在线故障知识获取一直是故障诊断技术的瓶颈。为此, 笔者针对炮射导弹系统故障特征和故障诊断方法中的不足, 提出基于模糊-免疫混合方法故障诊断策略, 在一定程度上既可以解决故障诊断技术的瓶颈, 又能理清故障征兆和故障原因之间的模糊关系。

1 总体方案设计

1.1 炮射导弹系统故障特征分析

进行诊断问题的研究, 首要问题是对诊断对象的认识。炮射导弹系统结构分析是故障诊断中研究故障机理和故障特征的基础, 是找寻适合其故障诊

断方法的依据, 也是总体方案设计的基础。图 1 给出了炮射导弹系统的层次结构。

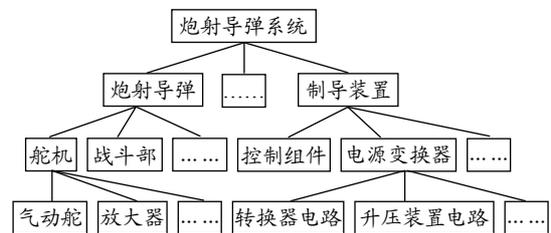


图 1 炮射导弹系统层级结构图

炮射导弹系统故障的特点为:

- 1) 由于系统的复杂性, 导致故障的随机性增大, 分系统也包含若干组件, 因此, 系统故障种类繁多, 并且仍然会有随机故障产生, 这就需要建立一个庞大的故障数据库, 来满足故障诊断的需要。
- 2) 系统故障原因和故障征兆之间表现出极其错综复杂的关系, 即同一种故障征兆对应着集中故障原因, 同一种故障原因又会引起多种故障征兆。
- 3) 系统故障具有相关性和不确定性。系统某一部件发生故障时势必会导致与它相关的部件状态发生变化, 可能同时引起多个故障发生, 同时由于主

收稿日期: 2011-08-09; 修回日期: 2011-08-31

基金项目: 军队计划科研项目

作者简介: 张万君(1965—), 男, 吉林人, 博士, 副教授, 从事武器系统试验与诊断研究。

观和客观因素，故障也存在不确定性的问题。

1.2 总体方案设计

通过分析炮射导弹系统故障特征和故障诊断所面临的诸多问题，笔者发现人工免疫系统中的免疫原理可以对复杂的系统进行故障诊断，同时还具有免疫学习的能力，对解决故障样本缺乏，先验知识获取的问题大有帮助。模糊诊断在解决了故障征兆和故障原因之间的模糊关系后，还可以对故障原因进行定量计算，实现对故障原因的定量分析。因此，笔者提出了这种混合方式的故障诊断策略，可大大提高故障诊断的时效性。根据以上分析和研究，设计出了炮射导弹系统故障诊断的总体方案，其总体方案如图 2。

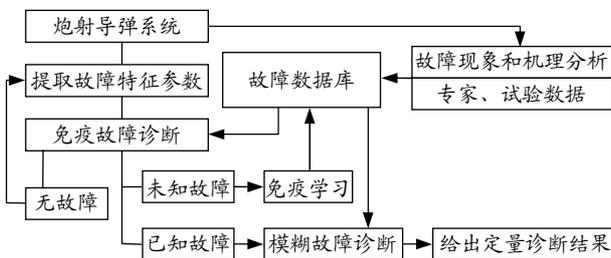


图 2 模糊-免疫诊断方法总体方案图

在该炮射导弹系统故障诊断策略中，主要具有以下特点：

1) 该策略较适用于复杂的武器系统。无论是模糊算法还是免疫算法，都是依据复杂武器系统故障特征所进行的故障诊断。

2) 该策略实现了由定量计算代替传统的定性推理的故障诊断。传统的故障诊断方法大多是基于专家经验和大量案例来定性分析、推理故障原因，存在诸多不确定性，也不能解决故障征兆和故障原因之间的模糊关系，采用模糊数学理论可以理清两者间的隶属关系，实现较确切的定量诊断。

3) 该策略在一定程度上解决了故障知识获取难的问题。故障知识获取是故障诊断中的首要问题，而许多学者采用的人工免疫系统在解决故障先验知识少的问题上凸显成效。本策略就是借鉴自然免疫系统原理，获取炮射导弹系统的动态、随机故障知识样本，增加故障先验知识，再结合故障模糊诊断技术，能够较快速、准确地实现炮射导弹系统的故障诊断。

2 模糊-免疫故障诊断策略的方法与模型

在深入研究免疫诊断方法和模糊诊断方法的基本原理和算法后，按照图 2 所示的故障诊断策略

方案，具体诊断方法如下：通过炮射导弹系统故障信号检测设备，将采集到的信号进行故障特征参数提取，并对数据归一化处理，依据数据信息，通过免疫诊断方法把可以将故障信息划分为已知故障和未知故障。对于已知故障可直接采用模糊诊断方法，通过模糊数学模型确定故障原因，给出一个定量的诊断结果；对于未知故障则是通过免疫学习获取故障信号的数据信息，并更新至故障数据库，在一定程度上解决故障数据库先验知识缺乏等问题。

2.1 免疫诊断原理

许多研究者从生物学的隐喻机制中研究出人工免疫系统，其主要应用于智能控制、模式识别、计算机安全等诸多领域，因而，一些研究人员将人工免疫系统中的免疫原理应用于故障诊断中，发现具有很强的鲁棒性。尤其是人工免疫系统中的反面选择原理是解决故障诊断的重要方法。通过随机生成大量的用于检测故障信号的检测器（即抗体）来识别故障信号（即抗原），该检测器是经过反面选择后的有效检测器集合，即如果在检测中遇到与检测器中匹配度高的抗原，则认为该系统存在已知故障，否则为未知故障。而免疫学习也是免疫识别的一个过程，它将未被识别的抗原通过克隆抗体数据信息，在经过高频变异后得到匹配度高的抗体作为记忆抗体更新至故障数据库中。其原理如图 3 所示。

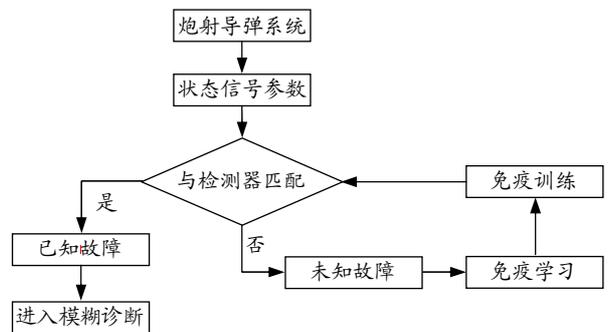


图 3 人工免疫系统中反面选择原理流程图

笔者采用一维向量的形式对抗原和抗体进行数据处理，该向量中的参数是经过故障特征提取后得到的，体现了故障信号的特征。

即：假设抗原向量为：

$$Ag = (g_1, g_2, \dots, g_n),$$

抗体向量为：

$$Ab = (b_1, b_2, \dots, b_n),$$

其中 $g_i, b_i (i=1,2,\dots,n)$ 分别代表故障信号特征参数。

则抗原与抗体的欧几里德距离如式 (1):

$$D_{EC}(Ag, Ab) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (g_i - b_i)^2} \quad (1)$$

由于欧几里德距离不能直接表示抗体对抗原的匹配程度, 因此, 提出了亲和度 (*Aff*) 作为衡量抗原和抗体之间的匹配程度。亲和度与欧几里德距离之间的关系可以用式 (2) 表示:

$$Aff = (1 - D_{EC})^3 \quad (2)$$

下面给出抗体识别抗原的条件:

当 $Aff \geq DY$ 时, 该抗原为已知故障;

当 $Aff < DY$ 时, 该抗原为未知故障。

对于未知故障, 抗体将克隆扩增 q 个抗体, 如式 (3):

$$q = \text{ceil}\left(\left(\frac{Aff + DO}{Aff - DO}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \quad (3)$$

这个抗体经过一些数据处理后, 将有一个或多个抗体完成与抗原的匹配, 将亲和度高的作为记忆抗体更新至数据库。

这里, DY, DO 为阈值, 两者根据需要适当选择和调整, 一般无法用确定的公式获取, 主要是根据经验和实际故障诊断过程来确定。笔者在研究过程中, 一般取 DY 为 0.80, DO 为 0.6。

2.2 模糊诊断方法原理与模型

模糊诊断方法是利用模糊数学理论对已知故障进行诊断的过程, 当通过免疫诊断后, 诊断结果将会告知故障的类型和产生的故障现象, 这样模糊诊断便可通过故障现象来计算出故障原因。

1) 依据对炮射导弹系统的故障现象和故障机理分析, 建立故障征兆集和故障原因集。根据模糊数学理论, 可能发生各种故障征兆的试验、专家数据, 设定为故障征兆集 X , 若某种故障原因可能引起 m 种故障征兆, 则用向量表示为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, 记为 m 维故障征兆空间; 同样, 设定所有可能产生故障的原因集为 Y , 若故障原因的总数可能有 n 种, 则故障原因集用向量表示为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, 记为 n 维故障原因空间。

2) 确定每个故障征兆与故障原因之间的隶属关系, 用隶属度来表示, 这些隶属度构成了模糊关系矩阵 R 。

3) 根据模糊诊断数学模型给出相对定量的诊断结果。

其中, 模糊数学模型如下:

$$Y = X \circ R$$

可用矩阵表示为:

$$Y = X \circ R = (x_1, x_2, \dots, x_m) \circ \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$$

式中: 用故障征兆 X , 求得故障原因 Y ; R 为模糊诊断关系矩阵。可见模糊关系矩阵是得到诊断结果的关键。在故障征兆已知的情况下, 便可通过该式求出故障原因 Y 。

3 制导装置中的某实际故障诊断实例

制导装置中电源变换电路是将低压直流转换为各级所需的高电平直流电压, 以保证激光发射器等组件正常供电。当用信号检测设备对其在线检测时, 提取信号频率 f 、平均功率 pw 值作为特征参数, 经过数据归一化和加权处理后, 得到输出抗原:

$$Ag = (0.241, 0.203, 0.283, 0.350)$$

其中前 3 个参数量是 $0 \sim f$ 之间不同阶段取得的峰值, 后一个参数量是平均功率值。

在检测过程中, 求得某一检测器对抗原的识别程度最高, 即

$$Ab = (0.240, 0.211, 0.279, 0.355)$$

其欧几里德距离为:

$$D_{EC}(Ag, Ab) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (g_i - b_i)^2} = 0.055$$

其亲和度为:

$$Aff(Ag, Ab) = (1 - D_{EC})^3 = (1 - 0.055)^3 = 0.844$$

可见, $Aff = 0.844 > DY = 0.80$, 符合匹配条件。因此, 该故障为已知故障, 通过在记忆抗体表中查询, 可知, 该电源变换电路中出现了稳压不良和输出波纹大的现象。

在模糊诊断中, 模糊关系矩阵的建立至关重要, 通过专家诊断的先验知识和电路工作的机理分析可以确定每一个故障征兆 x_i 分别对应每个故障原因 y_j 的隶属度为:

$$\mu_{y_j}(x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n)$$

这样就得到模糊关系矩阵。电源变换电路故障的模糊关系矩阵如表 1 所示。

表 1 电源变换电路故障的模糊关系矩阵

原因	征兆					
	无电压输出 x_1	没有稳压 x_2	稳压不良 x_3	没有变压 x_4	纹波系数大 x_5	杂波振荡 x_6
保护电路 y_1	0.25	0.35	0.65	0.20	0.85	0.80
隔离电路 y_2	0.40	0.10	0.10	0.35	0.20	0.20
控制电路 y_3	0.60	0.95	0.85	0.75	0.15	0.30
稳压电路 y_4	0.85	0.00	0.10	0.65	0.40	0.25

当表中的故障现象出现时记为“1”，未出现的故障记为“0”，于是得到故障征兆向量：

$$X = (0,0,1,0,1,0)$$

再由表 1 给出的模糊关系矩阵，以及故障模糊诊断数学模型，经过计算得到故障原因向量：

$$Y = X \circ R = (0,0,1,0,1,0) \circ \begin{pmatrix} 0.25 & 0.40 & 0.60 & 0.85 \\ 0.35 & 0.10 & 0.95 & 0.00 \\ 0.65 & 0.10 & 0.85 & 0.10 \\ 0.20 & 0.35 & 0.75 & 0.65 \\ 0.85 & 0.20 & 0.15 & 0.40 \\ 0.80 & 0.25 & 0.30 & 0.25 \end{pmatrix} = (1.5, 0.3, 1.0, 0.5)$$

然后，结合最大隶属度评判原则，可以看出 $\mu_{y_1} = 1.50$ 最大，说明该电路发生故障的主要原因为

(上接第 52 页)

依据电流突变电压跌落等变化电气量设置保护整定值，在 Matlab 上实现仿真，仿真数据显示保护原理能对汇流条进行有效保护，进而缩小故障范围，对提高飞机配电系统的可靠性有着重要意义。在环网发生重构后，配电网的拓扑结构相应会发生改变，对保护影响的大小有待进一步研究。

参考文献：

[1] 严东超. 飞机电气系统总体设计[M]. 北京：航空工业

保护电路引起的。

4 结束语

在对制导装置的诊断实例中，笔者利用模糊-免疫诊断方法对炮射导弹系统故障进行诊断，不但解决了故障数据库的不断更新完善问题，而且实现了诊断结果的定量分析，大大提高了武器装备的故障诊断效率和准确性，为其他领域的故障诊断研究提供了一个新的诊断策略。

参考文献：

[1] Dasgupta D, Forrest S. Artificial Immune System in Industrial Applications[C]. New York: In Proc. of the IPMM'99, 1999: 257-267.

[2] Jayabharata R M, Mohanta D K. A wavelet-fuzzy combined approach for classification and location of transmission line faults[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2007, 29(9): 134-139.

[3] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748-758.

[4] 项荣杰. 基于人工免疫模型的故障诊断及系统研究[D]. 浙江：浙江大学, 2006.

[5] 庞茂, 周晓军, 孟庆华. 基于免疫学的在线故障检测算法的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 149-153.

[6] 何伟, 任涛. 基于模糊推理的电网故障诊断专家系统的研究[J]. 电力系统通信, 2008, 29(9): 47-50.

[2] 刘晔, 杨新伟, 张璐, 等. 基于 VC++ 的飞机电源控制器试验台软件设计[J]. 四川兵工学报, 2011, 31(2): 111.

[3] 刘麦玲, 胡兴荣. 民用飞机配电网保护装置的选取分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2008(4): 21-23.

[4] 姜忠山, 刘艳平, 陈军青. 基于 Matlab 某型飞机航空直流供电保护研究[J]. 航空计算技术, 2011(4): 23-25.

[5] 姜忠山, 刘艳平. 飞机环形配电系统环网重构设计[J]. 计算机测量与控制, 2011(10): 32-36.

[6] 张梅. 实用化的配电网无通道保护[D]. 北京：清华大学, 2005: 15-17.