

一种基于状态特征的航天发射故障诊断技术

张 甜, 罗 眉, 孟晓红, 赵宗涛

(第二炮兵工程学院 计算机系, 陕西 西安 710025)

摘 要:文中采用模糊聚类分析的方法,利用数据库所积累的历史故障数据,有效地实现了实时发生的故障与历史故障的聚类,在此基础上找出发生故障的仪器等部器件。主要做法是:首先建立了模糊聚类分析模型 \tilde{G} ,及其 $\mu_{\tilde{G}}(u_i), u_i \in U$;其次给出了计算相似系数 s_{ij} 的欧几里得公式,并由此建立了模糊相似矩阵 R ,利用改进的模糊聚类方法进行关系演算,则可得到不同的“类”,对此,设计了一种基于状态特征的算法FJLA;最后可从与要诊断的故障相似的类中找出可能发生故障部器件。经实验分析,应用上述理论可将故障定位在较小的范围,往往是一两件部器件,可有效地辅助人们科学决策。对某型火箭测试应用,其有效率可达65%,对缩短航天发射时间及提高作战应急反应能力具有重要的理论和实用价值。

关键词:航天发射;故障诊断;模糊分析;聚类

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)01-0097-03

A Technology in Fault Diagnosis of Spaceflight Launch Based on State Character

ZHANG Tian, LUO Mei, MENG Xiao-hong, ZHAO Zong-tao

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

Abstract: Adopt a method of fuzzy clustering analysis, using historical fault data in database, implement effectively clustering between Real-time fault and historical fault, on a base of this, find out apparatus which is going wrong. The main method is: firstly, set up a model of fuzzy clustering analysis \tilde{G} and $\mu_{\tilde{G}}(u_i), u_i \in U$; secondly, Euclid formula for calculating parallel coefficient s_{ij} , set up R , a fuzzy parallel matrix by this. Process relation figure by using improved method of fuzzy clustering, gained different “genus”. Scheme out an algorithm FJLA based on state character; finally, find out possible apparatus which is going wrong from parallel genus with pending diagnostic fault. By experiment, applying this theory can pitch fault in a small area, sometimes one or two parts, it can assist people's scientific decision available. To a certain rocket test application, its efficient can reach to 65%, it has important theoretic and applied value for shortening time of spaceflight launch, enhancing response ability when meeting an emergency in campaign.

Key words: spaceflight launch; fault diagnosis; fuzzy analysis; clustering

0 引言

航天发射,包括导弹发射,是一个复杂的系统工程,故障诊断是其实施过程中一项极为重要的工作,它要求人们要在有限的时间内将故障准确定位并进行彻底排除,以保障顺利发射。在导弹武器发射过程中,它是提高部队应急反应能力及保障其作战性能的关键环节。在国内外的许多航天发射中,往往因系统隐藏故障而造成生命和财产巨大损失的例子有很多^[1]。人们迫切需要总结经验,并将故障检测以排除实现自动化

或半自动化,以保障航天发射工程的万无一失^[2]。由此,关于总结经验并从中找出排除故障理论方法的论文著作已有很多^[3~7],但绝大多数侧重于经验的多,理论方法研究的少,特别是利用计算机技术将其实现自动化或半自动化方面的成果就更少。

作者在见习部队作战训练和调研兄弟单位的相关工作的基础上,就故障诊断作了大量的工作。在此基础上研究了模糊聚类的理论技术,将其应用在故障诊断定位上,初步作了些工作。

1 故障模糊分析与算法设计

以下对故障进行模糊分析,也就是将一个故障看成一个模糊集 \tilde{G} ,定义其隶属函数 $\mu_{\tilde{G}}(u_i), u_i \in U, U$ —论域,以及两个故障的相似系数 s_{ij} ;而后在此基础上讨论聚类分析及相关算法。

收稿日期:2009-05-03;修回日期:2009-08-29

基金项目:中国博士后基金(080431401)

作者简介:张 甜(1979-),女,硕士研究生,研究方向为数据库与数据挖掘、通信与系统工程;赵宗涛,教授,博导,研究方向为数据库与知识库。

1.1 Fuzzy 故障 \tilde{G} , 隶属函数 $\mu_{\tilde{G}}(u_i)$, 相似系数 s_{ij}

定义1: 称由 n 个特征 (u_1, u_2, \dots, u_n) 所描述的状态为一个故障, 且记为:

$$\tilde{G}(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad u_i \text{ 为故障特征, } i = 1, 2, \dots, n$$

故障特征表征系统在发生故障时的物理现象或测试数值, 如电流、电压等。

定义2: 称故障 G 为模糊故障, 若 \tilde{G} 为一个 Fuzzy 集, 由以下隶属函数所刻画,

$$\mu_{\tilde{G}}(u_i) = r_i, r_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n$$

其中, r_i 是隶属函数在 u_i 点的隶属度, (u_1, u_1, \dots, u_n) 为论域, 记为 U 。

定义3: 二个 Fuzzy 故障 \tilde{G}_1, \tilde{G}_2 相似, 记为 $\tilde{G}_1 \sim \tilde{G}_2$, 其距离为 $\bar{\mu}_{ij}$, 相似系数为 s_{ij} ,

$$\begin{cases} \bar{\mu}_{ij} = \left(\sum_{i=1}^n |\mu_{\tilde{G}_1}(u_i) - \mu_{\tilde{G}_2}(u_i)|^2 \right)^{1/2} & u_i \in U \\ s_{ij} = 1 - \bar{\mu}_{ij} & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

定义4: m 个 Fuzzy 故障 $\tilde{G}_i, i = 1, 2, \dots, m$ 的相似矩阵为:

$$(s_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mm} \end{pmatrix}$$

1.2 定理、推论

定理1: 若 $\tilde{G}_0, \tilde{G}_1, \tilde{G}_2, \dots, \tilde{G}_{n+1}$ 为模糊故障集; 令 $\tilde{F} = \{\tilde{G}_1, \tilde{G}_2, \dots, \tilde{G}_n\}$ 为模糊故障集的集合, 则存在 $\tilde{G}_i \subset \tilde{F}$, 满足下式:

$$\bar{\mu}_{0i} = \min_{j=1}^n \{\bar{\mu}_{0j}\} \quad (2)$$

即

$$\bar{s}_{0i} = \max_{j=1}^n \{1 - \bar{\mu}_{0j}\} \quad (3)$$

证明: (2) 式和 (3) 式说明存在 $\tilde{G}_i \subset \tilde{F}$, 使其与 \tilde{G}_0 之距离较之 \tilde{F} 集中其他 F 集为最小。此时, 也就是相似系数最大。

由定义3很容易得到定理1的结论。公式(1)所表达的是欧几里得有限维空间之距离。

推论 由上述定义, 若 \tilde{G}_1, \tilde{G}_2 为模糊故障集, s_{ij} 为其相似系数, 则

$$s_{12} = s_{21}, s_{11} = s_{22} = 1$$

例1 在航天发射中, 某控制系统故障 \tilde{G}_0 特征为 (电流 i_1 , 电流 i_2 , 电流 i_3 , 电位 u_1 , 电位 u_2 , 频率 f , 时间 t), 为抽取隶属函数 $\mu_{\tilde{G}_i}$ 模型, 以及计算 s_{ij} , 需将其不同的物理特征数值化为无量纲数, 这只需要其各个物理值在系统工作时所取得的最大值和最小值即可计算^[1]。显然, 这些数值 $s_{ij} \in [0, 1]$, 所有不同的物理量在故障模糊后统称为隶属函数的论域 $U, u_i \in U$, 具

体如表1所示。

表1 F 故障 \tilde{G}_0 状态及特征值

特征 u_i	电流 i_1 (mA)	电流 i_2 (mA)	电流 i_3 (mA)	电位 u_1 (V)	电位 u_2 (V)	频率 f (Hz)	时间 t (ms)
max/min	100/0	50/0	50/10	5/0	6/1	1000/200	30/10
实测值	65	30	22	2.4	3	485	17
$\mu_{\tilde{G}}(u_i)$	0.65	0.60	0.30	0.48	0.40	0.36	0.35

对应表1的隶属函数 $\mu_{\tilde{G}}(u_i)$ 如图1所示。

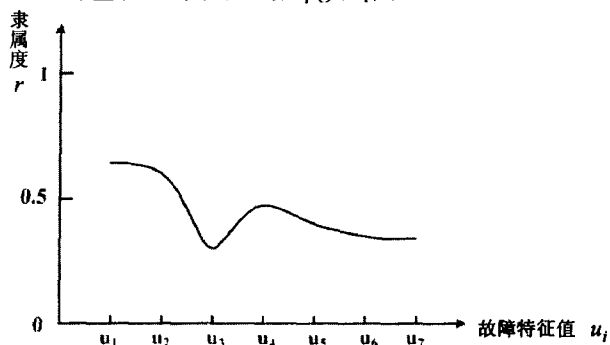


图1 对应表1的隶属函数 $\mu_{\tilde{G}}(u_i)$

1.3 聚类分析与算法设计

根据故障的模糊分析可采用 Fuzzy 理论来进行聚类分析。其基本思想是: 将所需要的诊断的故障 \tilde{G}_0 与故障库中所收集的历史故障数据进行相似分析, 经关系演算后, 即可得到包含 \tilde{G}_0 的若干聚类。在包含 \tilde{G}_0 的类中选择与其最相似的 (s_{0j} 最大, $j \in [0, m]$), 最后根据故障词典即可确定该故障涉及到的部件。

以下应用关系演算来进行聚类分析。设 \tilde{G}_i 的相似矩阵为 $R = (s_{ij})_{m \times m}$, 其关系演算为:

$$\begin{cases} (C_{ij})_{m \times m} = (s_{ij})^2 = (s_{ij}) \circ (s_{ij}) \\ c_{ij} = \bigvee_{k=1}^m (s_{ik} \wedge s_{kj}) \end{cases} \quad (4)$$

$i, j = 1, 2, \dots, m$

其中 \wedge 为最小运算, \vee 为最大运算。类似地, 可以计算 R^4, R^8 , 直至算出最小闭包 \bar{R} 。由此, 可根据 \bar{R} 对不同的 λ 值进行聚类分析^[8]。

基于状态特征的聚类算法 FJLA 归纳如下:

FJLA

Step1: 由故障状态确定其特征 $u_i, i = 1, 2, \dots, n$;

Step2: 根据测量值计算, 抽取故障 \tilde{G} 在特征点 u_i 的隶属度 $\mu_{\tilde{G}}(u_i) = r_i, r_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n$;

Step3: 由公式(1)计算相似系数, 求得 n 个 F 故障的模糊矩阵 (注意检查其中上下三角对称、对角线上元素值为1);

Step4: 按(4)式对模糊矩阵进行关系演算, 最后求得其最小闭包 \bar{R} ;

Step5: 按不同的值进行聚类: C_1, C_2, \dots, C_j ;

Step6:据定理 1 的式(2) 计算,求取在 \tilde{F} 中与 \tilde{G}_i 最相似的故障 $\tilde{G}_j, \tilde{G}_j \subset \tilde{F}$;

Step7:根据历史故障库中的资料,确定发生故障 \tilde{G}_j 的部器件;

Step8:结束。

2 实例:某火箭控制系统故障诊断

(1) 待诊断 \tilde{G} 故障及状态特征。

在文中 1.2 节例 1 中,假定待诊断故障 $\mu_g(u_i)$ 及主要特征如表 2 所示。

表 2 F 故障 \tilde{G}_0 状态及特征值

特征 u_i	电流 i_1 (mA)	电流 i_2 (mA)	电流 i_3 (mA)	电位 u_1 (V)	电位 u_2 (V)	频率 f (Hz)	时间 t (ms)
$\mu_g(u_i)$	0.65	0.60	0.30	0.48	0.40	0.36	0.35

(2) 历史故障库 CGBS 控制系统资料 $\tilde{G}_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 。

从控制系统的历史故障库 CGBS 中抽取了故障 $\tilde{G}_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 与待诊故障 \tilde{G}_0 进行聚类,希望从已有的故障数据中找出与待诊故障相似的故障,从而确定发生故障的部器件。历史故障 $\tilde{G}_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 的状态及主要特征如表 3 所示:

表 3 历史故障库 CGBS $\tilde{G}_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 的状态及特征值

u_i	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7
$\mu_{g_1}(u_i)$	0.7	0.3	0.4	0.26	0.5	0.4	0.4
$\mu_{g_2}(u_i)$	0.52	0.53	0.62	0.24	0.53	0.38	0.37
$\mu_{g_3}(u_i)$	0.63	0.60	0.3	0.49	0.4	0.35	0.35
$\mu_{g_4}(u_i)$	0.7	0.24	0.38	0.37	0.35	0.42	0.33
$\mu_{g_5}(u_i)$	0.65	0.6	0.28	0.48	0.4	0.36	0.35
$\mu_{g_6}(u_i)$	0.4	0.36	0.35	0.22	0.34	0.38	0.4

注:第 i 行代表 $\tilde{G}_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 。

(3) 计算相似矩阵 R 。

用待诊故障 \tilde{G}_0 与历史故障 $\tilde{G}_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 构造相似矩阵 R ,根据公式(1),可得相似矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.59 & 0.55 & 0.98 & 0.60 & 0.98 & 0.56 \\ 0.59 & 1 & 0.63 & 0.59 & 0.79 & 0.59 & 0.65 \\ 0.55 & 0.63 & 1 & 0.55 & 0.53 & 0.55 & 0.61 \\ 0.98 & 0.59 & 0.55 & 1 & 0.60 & 0.98 & 0.56 \\ 0.60 & 0.79 & 0.53 & 0.60 & 1 & 0.60 & 0.63 \\ 0.98 & 0.59 & 0.55 & 0.98 & 0.60 & 1 & 0.56 \\ 0.56 & 0.65 & 0.61 & 0.56 & 0.63 & 0.56 & 1 \end{bmatrix}$$

(4) 定位待诊故障对应的部器件。

根据公式(4) 对 R 进行聚类后发现:

① 与待诊故障 \tilde{G}_0 相似的为故障 \tilde{G}_3, \tilde{G}_5 ,其相似系数为 0.98;

② 发生故障 \tilde{G}_3 的部件是箭上三相电源或单相电源高频部分输出异常。

发生故障 \tilde{G}_5 的部件有三个:一是地面配电柜中的继电器的瞬时抖动;二是箭上配电器中的继电器瞬时抖动;三是箭地连接的脱落插头松动。

因此,根据历史故障库中的资料,就可以了解引发故障 \tilde{G}_0 的部器件,从而对故障进行排除,保证发射的顺利进行。

3 结束语

利用模糊聚类分析可将故障进行诊断,其先决条件是建立基于状态特征的故障数据库,将历史故障的特征进行归一化整理,即求取在每个特征点 u_i 的值 $r_i, u_i \in U$ 。也就是求得模糊故障的隶属函数。利用欧几里得距离空间的概念,定义了两个模糊故障的相似系数 s_{ij} ,从而得到相似矩阵 R 。在此基础上进行聚类分析,可得到要诊断故障的所在类;在此类中寻求与要诊断故障较相似的故障,由此得到发生该故障的部器件,实践证明,算法 FLJA 是有效和可行的。

经过大量的实践分析,对某型号火箭供配电控制系统故障进行诊断,其有效率达 65%,如图 2 曲线所示。为教学训练中的故障分析提供了具有一定参考价值的科学依据。

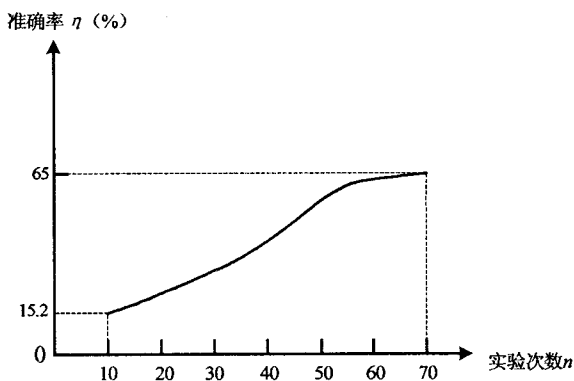


图 2 算法有效率

系统故障诊断与定位是一个比较困难的课题。有待研究的问题是:若利用这种基于状态特征的模糊故障诊断,需对历史故障进行大量规范化整理并建库。

参考文献:

[1] 徐克俊. 航天发射故障诊断技术[M]. 北京:国防工业出版社

(下转第 103 页)

析,然后指出了当前网格模拟器的局限性。

通过前面的分析可以看出,为满足当前发展的实际需要,网格模拟器必须不断的改进,以打破上面提及的各种局限性。

网格模拟技术未来的发展趋势^[10,11]有以下5个方面:

(1)智能化。除了要实现网格资源的分布性、多样性、动态性等特征的模拟,网格系统中还包括表现出智能的实体,网格模拟器也必须能够进行模拟。智能化是模拟器技术发展的长远目标。

(2)通用化。开发一个规模大而功能全的模拟器是不现实的,但现在的模拟器都是针对某一特定领域的问题提出来的,有非常强的领域倾向性,不能满足需要。随着网格模拟技术的不断成熟和需求的不断增长,模拟器应往通用化方向发展。

(3)集成和整合化。网格系统具有部署灵活、资源可以即插即用、随时扩充等特点,这就要求模拟器在功能上也要有很强可扩展性。目前集成和整合是实现扩展的最好方式,通过集成一些成熟的模拟技术,有助于迅速扩展系统功能。

(4)可视化。模拟器具有可视化的开发界面可以减少用户编写代码量,提高开发效率。

(5)开源化。开源是现在非常流行的开发模式,源码开放,有助于模拟器系统设计的改进,完善系统功能。

参考文献:

- [1] 徐志伟,冯百明,李伟. 网格计算技术[M]. 北京:电子工业出版社,2004:1-4.
- [2] 夏靖波,刘颖,汪胜荣. 网格原理与开发[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006:236-240.

- [3] Aida K, Takefusa A, Nakada H, et al. Performance Evaluation Model for Scheduling in a Global Computing System[J]. The International Journal of High Performance Computing Applications, 2000, 14(3): 268-279.
- [4] Song H J, Xin L, Jakobsen D, et al. The MicroGrid: A Scientific Tool for Modeling Computational Grids[C]//Proceedings of the 2000 Conference on Supercomputing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000: 4-10.
- [5] Xia E, Jurisca I, Waterhouse J. CasSim: a Top-level-simulator for Grid Scheduling and Applications[C]//Proceedings of the 2006 Conference of the center for Advanced Studies on Collaborative Research. New York: ACM Press, 2006: 353-356.
- [6] Buyya R, Murshed M. GridSim: A Toolkit for the Modeling and Simulation of Distributed Resource Management and Scheduling for Grid Computing[J]. The Journal of Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2002, 14(13-15): 1175-1220.
- [7] Henri C. SimGrid: A Toolkit for the Simulation of Application Scheduling, 2001[C]//Proceedings of Cluster Computer and the Grid. Brisbane: IEEE Computer Society Press, 2001: 430-437.
- [8] Dumitrescu C L, Foster I, GangSim: A simulator for grid scheduling studies[C]//Proceedings of Cluster Computing and the Grid. Brisbane: IEEE Computer Society Press, 2005: 1151-1158.
- [9] 田翠华,常桂然,游新冬. 网格模拟技术分析[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(2): 101-105.
- [10] 李波,石冰心,沈斌,等. 网格资源管理和调度仿真工具研究进展[J]. 微机与应用, 2005, 24(3): 4-7.
- [11] 马海波,郑婷婷,徐志英. 通用网格模拟器(GGS)的研究及其基础运行平台的设计[J]. 大连交通大学学报, 2007, 29(6): 77-78.

(上接第99页)

- [1] 社, 2007.
- [2] Hou Zhijian, Lian Zhiwei, Yao Ye, et al. Data mining based sensor fault diagnosis and validation for building air conditioning system[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 2479-2490.
- [3] 程树林,姚合生,叶家鸣. 基于模糊产生式规则推理的电脑故障诊断系统[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(12): 37-39.
- [4] Li J R, Khoo L P, Tor S B. RMINE: A rough set based data mining prototype for the reasoning of incomplete data in condition-based fault diagnosis[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2006(17): 163-176.

- [5] 杨苹. 基于聚焦式模糊聚类的故障诊断数据挖掘方法[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 511-515.
- [6] Jeong S, Lee S, Kim J. Fault Management System Using Penalty Method and Data Buffer for Communication Satellite[C]//24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC). 2006. San Diego, California: [s. n.], 2006.
- [7] Sun Weixiang, Chen Jin, Li Jiaqing. Decision tree and PCA-based fault diagnosis of rotating machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21: 1300-1317.
- [8] 陈水利,李敬功,王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.