

免疫系统的反面选择算法在故障诊断中的应用

谷吉海 姜兴渭 刘树林 宋立辉

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要 生物免疫系统的主要功能就是检测和杀伤来自生物体内和体外称为抗原的非己物质, 受免疫系统自己—非己识别机理的启发提出的反面选择算法能检测任何异常变化。文章结合航天器故障诊断的特点对反面选择算法进行了改进, 提出了对卫星电源分系统实时故障诊断的新方法。通过诊断实例表明该方法是有可行性的, 能对卫星电源系统的故障准确、快速的实时诊断。

关键词 反面选择算法 故障诊断 航天器

1 引言

航天器是一个庞大复杂的系统, 需要测量的参数很多, 通过专家根据大量的测量数据判别飞行器的工作状态是非常费时、繁杂而低效的^[1]。故障诊断技术作为保证航天器高可靠性的重要手段得到了广泛应用。现有的故障诊断方法主要有: 基于规则的专家系统、基于系统解析模型、基于案例和基于故障树的方法等^[2]。这些方法的研究和应用, 从不同方面满足了航天器故障诊断的要求, 对提高航天器的长寿命、高可靠性发挥了重要的作用。但这些方法在诊断的实时性和对缓变故障的诊断方面, 都存在各自的欠缺和局限而难以发挥优势。事实上, 航天器系统中所出现的许多故障都是缓慢发展变化的, 同时, 突发性航天事故要求诊断系统具有快速准确的诊断能力, 以便及时采取相应措施, 减小损失或避免灾难的发生。实时诊断的目的就是为了提高对故障的快速反应能力, 实现自主控制^[3]。因此, 寻找一种新的诊断方法, 使其具有诊断缓变故障的功能, 并且对突发性故障实现在线实时诊断, 这无疑是极具应用价值的, 本文就是针对这一问题进行的研究。

近年来, 随着人们对生物免疫系统认识的不断深入, 在国际上引发了人工免疫系统 (Artificial Immune System, 简称 AIS) 的研究热潮, 并逐渐用其解决工程实际问题。生物免疫系统的主要功能就是在线实时检测和杀伤来自生物体内和体外称为抗原的非己物质 (如病毒、癌细胞等致病因子), 受免疫系统自己—非己识别机理的启发, Forrest 提出的反面选择算法能检测任何微小异常变化^[4]。本文利用反面选择算法的思想, 结合航天器故障诊断的特点, 对这一算法提出了改进, 并将其应用于卫星电源系统的在线实时故障诊断。其

国家 863 基金资助项目 (863-2-4-5-11)

收稿日期: 2001-10-31, 收修改稿日期: 2001-11-27

基本思想是:由电源系统的模拟仿真试验台离线产生各部件正常模式的自己空间串集 S 和各种缓变故障及突发故障模式的检测器集 R' ,使 R' 中的任意检测器串 R'_i 只对某特定故障的信号特征具有敏感性,而与 S 中的任何子串 s_i 不匹配。将训练好的检测器集 R' 对在线遥测信号数据产生的空间串集 S' 进行检测,若任意的 R'_i 被激活,即 R'_i 与 s'_i 相匹配,说明系统发生了故障,检查 R'_i 对应的部件及故障模式,即可诊断出系统的故障。通过实例验证,该方法可行的,能够快速、准确地诊断出卫星电源系统各种缓变故障及突发性故障,为航天器在线实时故障诊断提供了一种新的有效方法。

2 反面选择算法及改进算法

(1) 反面选择算法

免疫系统主要由两类淋巴细胞组成^[5],即B细胞和T细胞。B细胞由骨髓产生,当检测到有抗原存在时,B细胞将在表面产生Y型抗体。T细胞也由骨髓产生,在T细胞产生过程中,通过伪随机基因重组过程在T细胞表面产生检测器。然后T细胞进入胸腺进行检查(称为反面选择),那些和机体自身蛋白质反应的T细胞被毁灭,只有那些不破坏自身组织的T细胞存活,这些成熟的T细胞在体内循环,它能检测出任何非己物质,执行免疫功能,保护机体免受抗原的侵袭。

受免疫系统自己-非己识别机理的启发,Forrest^[6]等提出了用于检测各种变化的反面选择算法。该算法与免疫系统的反面选择过程类似,通过随机的产生检测器,并取消那些能检测出自己的检测器,以便保留的检测器能检测任何非己。算法如下:

- 1) 定义自己为需要被保护或检测的有限串 S ,串可以是程序、数据文件及正常模式等;
- 2) 随机产生检测器集 R , R 中的每个检测器都不能与 S 中的串相匹配;
- 3) 通过将 R 与 S 串相比较来检测 S 串的变化,如果任意检测器与 S 匹配,则认为 S 串已发生变化。

该算法只能检测自己串有无变化,却不能检测自己串发生了何种类型变化。但在故障诊断过程中,不仅要检测正常模式的变化,而且要检测模式发生了何种变化,变化了的模式和哪种故障相对应。为了应用反面选择算法的思想对航天器故障进行诊断,必须对算法进行改进。

(2) 改进算法

为了便于对改进算法进行描述,本文提出以下定义和符号。

定义1:设备各种正常工作模式的测量时域信号称为自己空间,记为 S 。

定义2:设备各种故障模式的测量时域信号称为故障模式空间,记为 M 。 $M=(M_1, M_2, \dots, M_n)$, $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 类故障模式时域信号, n 为已知故障模式数。

定义3:反映设备故障模式独有特征的测量信号称为非己空间,记为 N 。非己空间是指故障模式空间减去其所包含的自己空间的内容。

三个空间的关系为: $N=M-S \cap M$

定义4:将非己空间 N 按各种故障模式独有特征和共有特征进行划分称为非己空间划分,即 $N=N_1 \cup N_2 \cup \dots \cup N_n \cup N_0$ 。其中 N_0 为两个以上故障模式的共有特征空间, $N_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 类故障模式独有特征空间。

改进算法可概括为以下几步:

1) 产生与自己空间 S 不相匹配的所有检测器集 R , 使检测器集 R 不能检测自己空间, 只能捕获非己空间的特征。

2) 与故障模式空间的各故障模式信号 M_i 相匹配, 与两个以上故障模式相匹配的检测器能检测共有特征空间, 为了消除歧义性, 取消这样的检测器; 与各故障模式独有空间相匹配的检测器只能检测一种故障, 只对某种故障具有敏感性, 保留这样的检测器; 另外, 还应取消那些与任何一种或一种以上的故障模式都不匹配的检测器。按匹配情况对检测器集 R 进行约简和聚类, 形成新的检测器集 R' , 即 $R' = (R'_1, R'_2, \dots, R'_n)$ 。其中 R'_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为只与第 i 类故障模式独有空间相匹配, 而与其它任何故障模式独有空间不匹配的检测器子集。

3) 将训练好的检测器集 R' 与 S 相比较来检测 S 的变化, 如果任意检测器与 S 匹配, 该检测器被激活, 则认为 S 已发生变化。

4) 检查被激活检测器对应 R' 中的哪类故障模式, 从而诊断出设备发生了何种故障。改进算法中的 R 能检测出第 i 类故障不同于其它故障的独有特征。

3 信号处理方法

(1) 数据编码

为了产生检测器集 R , 首先应对自己空间和各种故障模式空间的信号数据进行编码, 编码采用二进制编码形式。先求出所采集自己空间和各种故障模式空间的信号数据中的最小值和最大值, 根据所要求的诊断精度选择编码位数 n , 然后把最小值和最大值区间等分成 2^n 个子区间, 根据信号数据所落入的区间不同分别取不同的整数值 (如图 1 所示), 并用 n 位二进制编码表示^[9]。图 1 中关于何时取 0 和 2^n 两个数值, 将在故障诊断方法中介绍。

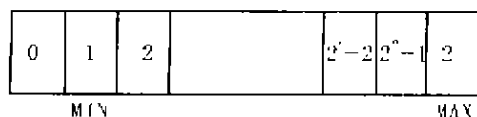


图 1 编码方法

(2) 自己空间串和各种故障模式空间串的定义方法

自己空间串和各种故障模式空间串的定义可采用将各自的所有二进制编码的信号数据按时间顺序连接在一起, 作为正常模式和各种故障模式串, 但这种定义方法使模式串太长, 使产生检测器的操作复杂。本文采用加窗并移动窗口的方法将每个模式分成 m 个相等的子串, 即 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$; $M_i = \{M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{im}\}$, 然后按子串进行编码, 该方法涉及如何选择窗宽 L_w 及移动步长 L_s 两个参数。例如, 当 $L_w=6$ 及 $L_s=2$ 时每个窗口的模式分别为 $\{x_1, x_2, \dots, x_6\}$, $\{x_3, x_4, \dots, x_8\}$ 等, x_i 为信号数据。

4 检测器的产生及训练方法

(1) 匹配准则

在改进算法中, 所有检测器都不能检测自己空间串 s_i , 为了产生与所有自己空间串 s_i 不相匹配的检测器集 R 可选择不同的匹配准则: 完全匹配准则和部分匹配准则。完全匹配准

则是指两串的每一位都相同时才称为匹配,这种匹配方法使得检测所有非己空间模式的检测器数量增大。部分匹配准则是指规定两串至少有连续的 q 位相同时(q 称为匹配阈值)才称为两串匹配,如有两串00101101010和10111101101,若规定两串的匹配阈值 $q \leq 4$,则匹配,若规定 $q > 4$,则两串不匹配。这种匹配方法使得检测所有非己空间模式的检测器数量减少,但涉及到如何优选匹配阈值 q 的问题。本文采用部分匹配准则。

(2) 产生检测器

检测器可由随机方式产生,如果检测器与自己空间任何子串相匹配,取消该串,重复执行这个过程直到所要求的检测器数量为止,检测器数量可根据实际问题的需要确定。该方法计算量大,计算量与自己子串长度的指数成正比。基于以上缺点,本文提出产生检测器的高效方法:产生与自己空间子串不相匹配的所有检测器集 R_0 ,从 R_0 中随机选择所需要的检测器集 R ,算法的计算量只与自己空间子串长度成正比例关系,本文采用该方法产生检测器。

(3) 检测器约简及聚类训练

将 R 中的检测器与各故障模式空间的故障模式子串相匹配,根据匹配结果对 R 进行约简和聚类,形成新的检测器集 R' ,使聚类结果是各独特空间的映射,每类检测器子集反映了某种故障模式最突出的特征,只对特有故障具有敏感性。

5 故障诊断方法

对卫星电源分系统进行在线故障诊断时,对遥测信号的处理方法与以上介绍的方法相同,即采用相同的编码方法及空间串的产生方法,当信号数据的某一数值小于最小值时取0,当信号数据的某一数值大于最大值取 2^n (如图1所示)。用离线训练的检测器集 R' 在线检测遥测信号的位串,根据匹配过程中检测器激活结果进行故障诊断,故障诊断方法原理如图2所示。

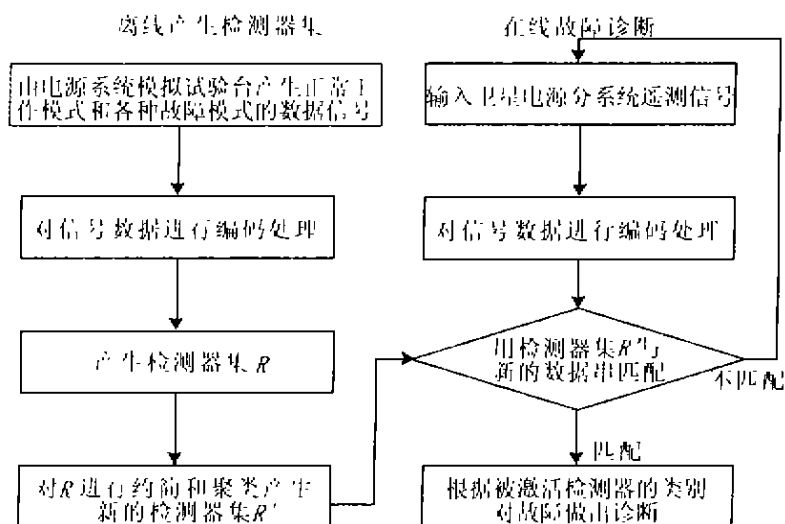


图2 基于免疫系统反面选择算法的故障诊断方法原理图

6 诊断实例分析

为有效的提取卫星电源系统正常工作模式和各种故障模式的信号数据,研制开发了卫星电源系统模拟试验台。模拟试验台由故障模拟装置、数据采集与通讯装置组成,它的主要作用是产生卫星电源分系统正常工作模式和故障模式下的信号数据,用来训练和产生检测器集 R' 。

卫星的电源分系统与其它分系统紧密耦合,如与温控系统的耦合,这种耦合性表现在故障判据的多样性,既有电流、电压判据,也有温度判据,因此,为充分采集各种模式的信号数据,在实验台上设置了10个电流测点、11个电压测点,13个温度遥测数据由软件产生。将采集到的信号数据,根据缓变故障的诊断精度要求,按第3节的方法统一编码,由计算机产生并训练检测器,用训练好的检测器集 R' 对卫星电源分系统的遥测信号进行在线诊断,由于卫星在轨运行期间电源系统始终处于正常状态,故在线诊断时,遥测信号中的故障信号数据由仿真软件给出。表1给出了卫星电源分系统常见的7种故障模式。

表1 卫星电源系统部分故障模式

故障编号	故障类型
FN-1	27V(I)调节器主机失效
FN-2	27V(II)调节器主机失效
FN-3	16V调压器主机失效
FN-4	太阳能电池阵输出功率下降
FN-5	镉镍蓄电池组输出容量下降
FN-6	太阳能电池帆板一侧不伸展
FN-7	电源控制器故障

表2 诊断结果统计表

参数	故障类型	诊断准确率
$L_w=8$ $L_s=8$ $n=6$ $d=350$ $q=25$	27V(I)调节器主机失效	0.95
	27V(II)调节器主机失效	0.95
	16V调压器主机失效	0.95
	太阳能电池阵输出功率下降	0.98
	镉镍蓄电池组输出容量下降	0.96
	太阳能电池帆板一侧不伸展	0.98
	电源控制器故障	0.96

用本文的方法诊断时,匹配域 q 、检测器集 R 所包含的检测器数量 d 、窗宽、移动步长、编码位数 n 等参数对诊断结果都有不同程度的影响,以上参数的选择可根据测量信号的变化情况选择,只要参数选择合理,诊断准确率可达到95%以上。表2是某组给定参数下诊断结果的统计情况。从表2可以看出,该诊断方法达到了较高的故障诊断准确率。通过变化各种参数观察诊断效果,发现匹配域 q 的选取对诊断精度的影响较大:当匹配域较大时,由于训练检测器的故障模式与实际故障模式存在一定差别,很难在大的匹配域下进行匹配,从而造成漏诊现象;当匹配域较小时,由于不能有效捕捉故障模式的本质特征而产生误诊;只有选择适中的匹配域,才能有效捕捉与训练故障模式相似故障的本质特征。所以在选择匹配域时应根据其它参数和信号的变化特征进行合理的选择。

7 结论

1) 本文对依据生物免疫系统自己-非己识别机理提出的反面选择算法进行了改进,并将其应用于卫星电源系统的故障诊断,通过诊断实例验证,该方法是有可行性的,能对电

源系统的各种故障进行快速、准确的在线实时诊断。

2) 通过选择检测器编码位数 n 、匹配域 q 、可任意调节检测器对故障特征的捕获精确度, 从而实现对缓变故障的诊断功能。

3) 信号的故障特征是通过检测器的约简和聚类过程自动从时域信号中提取, 操作简单且无各种变换误差, 没有人为干预因素, 克服了基于规则的方法知识获取的瓶颈问题。

4) 该诊断方法具有广泛的适用范围, 测量信号可以是反映设备运行状态的各种动态参数(慢变或快变参数), 特别适用于传统诊断方法无法提取故障特征的复杂系统, 应用前景广阔。

参 考 文 献

- 1 刘占生, 苏平线, 姜兴渭. 航天器电源模拟系统故障诊断的神经网络方法. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(1): 65~68
- 2 张晓梅, 姜兴渭, 黄文虎. 基于分形的航天器故障检测. 振动与冲击, 2001, 20(1): 76~78
- 3 宋政吉. 航天器分布式融合诊断理论与技术研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2001: 1~12
- 4 Dasgupta D, Artch-Okine N. Immunity-based Systems: A Survey. In: Proc 1997 IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics, Orlando, USA, 1997, 1: 869~874
- 5 Jerne N K. Toward a Network Theory of the Immune System. Annual Immunology, 1974, 125: 373~389
- 6 Forrest S, Perelson A S, Allen L, et al. Self-nonself Discrimination in a Computer. In: Proc IEEE Symposium on Research in Security and Privacy, Oakland, CA, 1994: 202~212
- 7 Dasgupta D, Forrest S. Artificial Immune Systems in Industrial Applications. In Proc. of the IPMM'99, 1999: 257~267

作者简介

谷吉海 1964 年生。1991 年毕业于东北林业大学机电工程系机械设计与制造专业, 获工学硕士学位。现为博士研究生, 研究方向: 航天器故障诊断与仿真技术, 人工智能。

Application of Negative-selection Algorithm of Immune-System for Fault Diagnosis

Gu Jihai Jiang Xingwei Liu Shulin Song Lihui
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The main task of the immune system is to detect and eliminate the non-self materials called antigens such as virus and cancer cells which come from inside and outside

(下转第 43 页)

