

基于人工免疫系统的 机组故障诊断技术

张清华 编著

JIYU RENGONG
MIANYI XITONG DE
JIZU GUZHANG ZHENDUAN JISHU

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

基于人工免疫系统的机组故障 诊断技术

前言

第一章 绪论

张清华 编著

1.1 绪论	(1)
1.2 故障诊断技术	(2)
1.2.1 故障诊断技术	(2)
1.2.2 频域分析法	(4)
1.2.3 时频域分析法——小波分析法	(4)
1.3 旋转机械故障诊断技术新进展	(5)
1.3.1 基于人工神经网络故障诊断方法	(5)
1.3.2 基于模糊推理故障诊断方法	(6)
1.3.3 基于遗传算法故障诊断方法	(6)
1.3.4 基于粒子群优化故障诊断方法	(6)
1.3.5 基于免疫算法故障诊断方法	(6)
1.3.6 基于人工免疫系统的故障诊断方法	(7)
1.4 本章小结	(7)
第二章 旋转机械故障诊断技术	(9)
2.1 旋转机械故障诊断技术	(9)
2.1.1 测振传感器	(9)
2.1.2 数据记录	(10)
2.2 振动诊断的基础	(11)
2.3 旋转机械故障诊断技术	(14)
2.4 旋转机械典型故障诊断	(18)

中国石化出版社

内 容 简 介

本书介绍了将人工免疫系统应用于旋转机械故障诊断领域的最新研究成果。全书分七章,前三章分别介绍了旋转机械故障诊断应用研究的现状、旋转机械故障诊断的原理及基于人工免疫系统的故障诊断原理;四、五、六章主要介绍对阴性选择算法的改进及利用无量纲指标生成免疫检测器进行故障诊断;最后一章列举了该研究成果在石化企业汽轮机-压缩机组上的初步应用情况。

本书可作为从事人工智能、旋转机械故障诊断等领域应用研究的专业人员的参考书,亦可供高等院校教师、科研院所研究人员、研究生及工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于人工免疫系统的机组故障诊断技术/张清华编著.
北京:中国石化出版社,2008
ISBN 978-7-80229-625-1

I. 基… II. 张… III. TE28 IV. TE28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 088052 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京密云红光制版公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 148 千字

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前言

人工免疫系统是对生物免疫系统的模拟,具有强大的信息处理能力。生物免疫系统的主要功能就是在线检测和杀伤来自生物体内和体外的抗原,具备“自己-非己”识别能力。由此衍生而来的阴性选择算法能有效地识别被检测对象的正常模式(自己)及异常模式(非己),且不需要有异常模式的先验知识。该算法为故障诊断领域提供了新的思路和方法。

在阴性选择算法中,检测器的训练计算极为复杂,训练时间极为漫长,本书根据人工免疫系统疫苗接种、克隆选择等原理提出了两种变异搜索方法,简化检测器训练的计算复杂度,并结合免疫分布性、多样性等特性,对二进制编码方式进行了改进。

目前阴性选择算法结合时域振动波形数据在旋转机械设备故障诊断中的应用存在诸多不足,甚至是不可实现的。本书以大量的试验与深入的研究为基础,指出了在阴性选择算法中采用无量纲指标进行诊断的合理性、可行性及有效性。本书进一步根据人工免疫系统分布性、多样性的特性,首先按故障特征所处频段的不同,分别定义位移类、速度类、加速度类三大类无量纲指标免疫检测器,在此基础上,再定义了每一类的五种无量纲指标免疫检测器(峰值指标免疫检测器、裕度指标免疫检测器、波形指标免疫检测器、峭度指标免疫检测器、脉冲指标免疫检测器)。试验的结果证明了本检测器定义方法的实用性、有效性。

本书根据免疫进化、免疫学习、免疫记忆及免疫应答等的概念,将检测器按训练过程的不同,分别定义为生成检测器、成熟检测器、优秀检测器,并与故障空间检测器集经约简、聚类运算得到独有故障空间检测器集的过程相对应。在故障检测试验中,按检测器等级高低进行检测应用,达到了在线快速诊断的目的。

无量纲指标具有对并发缺陷不敏感的特性,本书通过试验研究对此特性进行了验证,给出了新的定义,并指出了该特性适用的指标及范围,为利用无量纲指

标进行复合故障的有效诊断提供了新的思路。 (103)

针对本书在独有故障特征提取及优秀检测器训练过程中,即在进行约简、聚类数据分类过程中丢失部分有用信息的不足,采用了利用五种无量纲指标免疫检测器进行简单而实用的集成诊断的弥补方法。试验结果证明,本方法具有较高的诊断准确率。本书同时给出了该集成诊断方法的定义。 (116)

本书利用 C++ Build 语言设计了“基于人工免疫系统的机组故障诊断系统”,并对时域分析法与人工免疫系统原理的有机结合进行深入研究,利用 InTouch 组态软件等结合阴性选择原理,以某石化公司二重整车间 K201 汽轮机-压缩机组为工业应用背景,设计了“K201 机组智能故障诊断系统”,并初步取得成功诊断案例。

由于本人水平有限,加上部分结论是依据试验结果进行探讨、研究、归纳和总结的,还有待进一步完善,敬请各位专家批评指正。

本书是以作者博士学位论文为基础编著的,感谢作者的导师华南理工大学钱宇教授、胥布工教授的培养;感谢广东技术师范学院院长王乐夫教授、华南理工大学朱学峰教授、茂名学院计算机与电子信息学院院长陈政石教授、中国石化股份茂名分公司副经理李永林博士等给予的大力支持!深深地感谢妻子杨小凤给予的理解、关爱、支持和照顾。终生感念为了不耽误我的学业而在我攻读博士学位期间悄然离去的、勤劳、正直、苦难的父亲。

张清华

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
1.1 旋转机械故障诊断技术的研究意义	(1)
1.2 旋转机械故障诊断主要方法及特点	(2)
1.2.1 时域分析法	(2)
1.2.2 频域分析法	(4)
1.2.3 时频域分析法——小波分析法及分形分析法	(4)
1.3 旋转机械故障诊断技术新进展	(5)
1.3.1 基于人工神经网络的故障诊断方法	(5)
1.3.2 基于模糊逻辑推理的故障诊断方法	(6)
1.3.3 基于模糊神经网络的故障诊断方法	(6)
1.3.4 基于专家系统的故障诊断方法	(6)
1.3.5 智能融合故障诊断方法	(6)
1.3.6 基于人工免疫系统的故障诊断方法	(7)
1.4 本章小结	(7)
第二章 旋转机械故障诊断原理	(9)
2.1 旋转机械故障诊断概述	(9)
2.1.1 测振传感器	(9)
2.1.2 数据采集与处理	(10)
2.2 振动诊断的基础工作	(11)
2.3 旋转机械典型故障	(14)
2.4 旋转机组典型故障特征提取	(18)

2.5 本章小结	(20)
第三章 基于人工免疫系统的故障诊断原理	(21)
3.1 人工免疫系统原理及模型	(21)
3.1.1 人工免疫系统的生物原型	(21)
3.1.2 人工免疫系统的仿生机理	(22)
3.1.3 人工免疫系统模型与算法	(27)
3.1.4 人工免疫系统的典型应用	(30)
3.2 阴性选择算法介绍	(32)
3.2.1 阴性选择算法	(32)
3.2.2 检测信号处理及检测器训练	(33)
3.3 阴性选择算法新的改进	(35)
3.3.1 现有阴性选择算法存在的不足	(35)
3.3.2 新改进的阴性选择算法	(36)
3.4 新改进的阴性选择算法流程及仿真分析	(37)
3.4.1 新改进的阴性选择算法流程	(37)
3.4.2 变异搜索方法1 算法流程及仿真	(39)
3.4.3 变异搜索方法2 算法流程及仿真	(40)
3.5 本章小结	(41)
第四章 基于免疫系统的机组 ISO—2372 诊断标准	(42)
4.1 ISO—2372 国际诊断标准诊断原理	(42)
4.2 利用阴性选择算法实现机组 ISO—2372 诊断标准	(42)
4.3 旋转机组运行状态监测的实际实现	(45)
4.4 本章小结	(45)
第五章 无量纲指标特征及免疫检测器	(46)
5.1 时域分析法提取故障特征	(46)
5.2 无量纲指标特性及优点分析	(47)
5.2.1 概率密度分布函数	(47)
5.2.2 无量纲幅域诊断参数与典型信号的关系	(47)

10.5.2.3 无量纲指标应用于故障诊断技术中的优点	(50)
5.3 旋转机组故障免疫检测器的生成与定义	(52)
5.4 电动机-压缩机机组试验提取故障特征的原理与方法	(54)
10.5.4.1 试验机组组成及工作原理	(55)
10.5.4.2 振动数据采集系统	(55)
10.5.4.3 无量纲指标计算与故障特征提取方法	(56)
5.5 试验旋转机组免疫检测器生成原理	(58)
5.6 本章小结	(62)
第六章 基于免疫系统的机组故障诊断试验及仿真	(63)
6.1 利用试验方案 1 进行无量纲指标免疫检测器的离线训练	(63)
6.1.1 利用试验方案 1 建立与独有故障特征的免疫检测器集 R'	(63)
6.1.2 试验方案 1 的小结与讨论	(69)
6.2 利用试验方案 2 进行机组故障特征提取	(70)
6.2.1 五种故障的特征提取试验	(71)
6.2.2 复合故障的特征提取试验	(76)
6.2.3 高频故障的特征提取试验	(83)
6.3 基于人工免疫系统的机组故障诊断实验及仿真	(85)
6.3.1 集成诊断	(85)
6.3.2 基于人工免疫系统的机组故障诊断系统软件	(86)
6.3.3 基于人工免疫系统的机组故障诊断仿真实验	(88)
6.4 本章小结	(89)
第七章 汽轮机-压缩机组智能故障诊断系统设计	(91)
7.1 重整 K201 汽轮机-压缩机组	(91)
7.1.1 重整生产工艺流程及其装置	(91)
7.1.2 重整 K201 汽轮机-压缩机机组	(91)
7.2 重整车间 K201 汽轮机-压缩机组智能故障诊断系统	(94)
7.2.1 设计方案	(94)
7.2.2 系统结构与特性	(96)

7.2.3	数据图表简介	(101)
7.3	重整 K201 机组智能故障诊断系统运行应用研究	(103)
7.4	本章小结	(104)
总结与展望		(105)
参考文献		(108)
项目支撑		(116)
3.1	阴性选择算法介绍	(30)
3.2	阴性选择算法介绍	(32)
3.2.1	阴性选择算法	(33)
3.2.2	检测信号处理及检测器训练	(33)
3.3	阴性选择算法新的改进	(35)
3.3.1	现有阴性选择算法存在的不足	(35)
3.3.2	新改进的阴性选择算法	(36)
3.4	新改进的阴性选择算法流程及仿真分析	(37)
3.4.1	新改进的阴性选择算法流程	(37)
3.4.2	变异搜索方法 1 算法流程及仿真	(39)
3.4.3	变异搜索方法 2 算法流程及仿真	(40)
3.5	本章小结	(41)
第四章 基于集成模型的 K201 机组故障诊断		
4.1	ISO-2372 标准	(42)
4.2	利用阴性选择算法实现机组 ISO-2372 诊断标准	(43)
4.3	旋转机组运行状态监测模型	(45)
4.4	本章小结	(45)
第五章 无量纲指标特征及免疫检测		
5.1	时域分析法提取故障特征	(46)
5.2	无量纲指标特性及优点分析	(47)
5.2.1	概率密度分布函数	(47)
5.2.2	无量纲幅值诊断参数与典型信号的关系	(47)

第一章 绪 论

1.1 旋转机械故障诊断技术的研究意义

机械设备中很大部分是旋转机械,旋转机械指汽轮机、鼓风机、发电机、压缩机、水轮机、电动机等,主要构成部件有转子、支撑转子的轴承、定子或机器壳体、联轴器等,它涉及到动力、电力、化工、冶金、机械制造等重要的工程领域,往往是工厂的关键设备,而且转速一般都比较高的,其工况状态不仅影响旋转机械设备本身的运行,而且还会对后续的生产造成损失,严重时将会对国民经济造成重大的损失,甚至导致机毁人亡事故。特别对于石化企业而言,随着现代工业的大规模化,石化行业的机械设备日益趋向大型化、高速化、连续化和自动化,组成和结构越来越复杂,对于设备运行的安全性、维修性和可靠性提出的要求也越来越高。特别是石化行业的生产装置常处于高温、高压或低温、真空状态,一旦机组发生故障,往往出现停产甚至导致灾难性事故,不仅给生产厂家带来巨大经济损失,而且严重威胁着人身安全。为此,故障诊断已经成为保证大型关键设备安全可靠、高效运行及视情维修的必要手段。为保证机组安全运行,降低机组维修费用和提高机组利用率,大型机组的状态监视与故障诊断的研究就显得尤为重要。

我国在工业部门中开展状态监测技术研究的工作起步于1986年,80年代中后期以来,我国有关科研院所、高等院校和企业开始自行或合作研究旋转机械设备状态监测技术,无论在理论研究、测试技术和仪器研制方面,都取得了成果,并开发出相应的旋转机械状态监测系统。这些系统主要应用于国家重点企业中关键设备的监测或特定设备的监测,如大型汽轮机组、大型水轮机组等。中国石化总公司从20世纪70年代组织研究无损伤检测到80年代开展设备状态监测,已投巨资加强了对机组的振动监测及故障原因分析。

当前我国对设备的维护往往仍采用传统的计划、定期维修。而这种方式带有很大盲目性,设备有无故障、故障类型、故障部位、故障程度难以准确把握。另外,由于良好部位的反复拆卸,机械性能往往不理想,甚至低于检修前。而且,没有必要的超前维修,将带来人力、物力的巨大浪费。

故障诊断技术的广泛应用,使对机械设备的维护由计划、定期检修走向状态、预知检修变为现实,使机械设备的维护方式发生了根本性革命。状态监测避



免了机械设备的突发故障,从而避免了被迫停机而影响生产;机械状态分析为预知机械设备的维修期提供了可靠依据,即可做到当测量表明有必要时才进行维修。使我们能够及时准备维修部件,安排维修计划,克服了定期维修带来的不必要的经济损失和设备性能的下降;完善的诊断能力可为我们准确指出故障类型和故障部位,避免了维修的盲目性,使检修简捷易行,大大缩短了维修工期。如实行状态维修后,某化工厂年维护修理工作由 247 台减至 14 台;某电机厂维护费用下降了 75%;某造纸厂年节约 25 万美元,而振动监测设备一次性投资仅是此数的 10%。据日本统计,采用诊断技术后事故率减少 75%,维修费用降低 25%~50%。由此可见,状态检测及故障诊断技术给企业带来的经济效益是十分显著的。

1.2 旋转机械故障诊断主要方法及特点

统计资料表明,由于机械振动而引起的旋转设备故障,在各类故障中占 60% 以上,故利用振动信号对旋转机械设备即机组进行诊断是最有效、最常用的方法。机组在运行过程中的振动及特征信息是反映系统状态及其变化规律的主要信号。通过各种测试仪器在线拾取、记录和分析动态信号是进行状态监测及故障诊断的主要途径。

目前基于振动信号分析的机组状态监测及故障诊断的方法手段很多,但归结起来不外乎有三种典型的方法:时域分析法、频域分析法以及时频域综合分析法。

1.2.1 时域分析法

振动信号以位移、速度、加速度三个参量表示,其最简单、最直接的表示形式

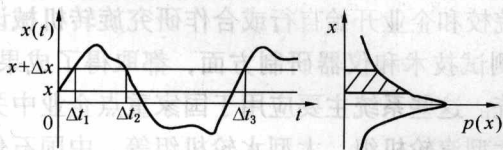


图 1-1 概率密度函数

就是时域波形。若对检测仪器所测得的时间历程信号直接实行各种运算且结果仍属于时域范畴,这样的分析运算即为时域分析法。它包括统计特征参量分析、相关分析、时域同步平均法等。

(1) 统计特征参量分析

统计特征参量分析又称为幅值域分析,对振动信号随机过程的分析实质上取决于随机信号的概率密度函数 $p(x)$ 及概率分布函数 $F(x)$, 如图 1-1 所示。其中

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{p[x < x(t) \leq x + \Delta x]}{\Delta x}$$

$$\begin{aligned}
 &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T} \right) \\
 &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^k \Delta t_i}{T} \right) \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

式中 T ——样本长度；

T_x ——信号幅值落在 x 与 $x + \Delta x$ 之间的时间和。

从概率密度函数可得到：

$$\text{均值} \quad \bar{X} = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x) dx \quad (1-2)$$

$$\text{平均幅值} \quad |\bar{X}| = \int_{-\infty}^{+\infty} |x| p(x) dx \quad (1-3)$$

$$\text{均方根值} \quad X_{\text{rms}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx} \quad (1-4)$$

$$\text{方根幅值} \quad X_r = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{|x|} p(x) dx \right]^2 \quad (1-5)$$

$$\text{斜度(歪度)} \quad \alpha = \int_{-\infty}^{+\infty} x^3 p(x) dx \quad (1-6)$$

$$\text{峭度} \quad \beta = \int_{-\infty}^{+\infty} x^4 p(x) dx \quad (1-7)$$

以上各统计量指标值一般均随着故障的发生和发展而逐渐增大，其中峭度 β 对大幅值非常敏感，有利于检测含有脉冲的故障，尤其对诊断滚动轴承故障极为有用。以上参数属于有量纲参数，它们常因负荷、转速等条件的变化而改变，在实际中很难于区分。改善的方法是引入无量纲参数，即归一化处理，归一化处理后的参数对信号的幅值和频率不敏感，即与机器工作条件关系不大，而对故障足够敏感。常用的无量纲参数有

$$\text{波形指标} \quad S_f = \frac{X_{\text{rms}}}{|\bar{X}|} \quad (1-8)$$

$$\text{峰值指标} \quad C_f = \frac{X_{\text{max}}}{X_{\text{rms}}} \quad (1-9)$$

$$\text{脉冲指标} \quad I_f = \frac{X_{\text{max}}}{|\bar{X}|} \quad (1-10)$$

$$\text{裕度指标} \quad CL_f = \frac{X_{\text{max}}}{X_r} \quad (1-11)$$

$$\text{峭度指标} \quad K_v = \frac{\beta}{X_{\text{rms}}^4} \quad (1-12)$$

峭度指标、裕度指标和脉冲指标对于脉冲类故障比较敏感,特别是在故障早期发生时,它们有明显增加;但上升到一定程度后,随故障的逐渐发展,反而会下降,表明它们对早期故障有较高敏感性。将后期故障与均方根值结合起来进行判断则较为合适。

(2) 相关分析

相关分析又称为时延域分析,用于描述信号在不同时刻的互相依赖关系,是提取信号中周期成分的常用手段,在系统的振源识别和故障诊断中有着广泛的应用。相关分析包括自相关分析和互相关分析。

(3) 时域同步平均法

时域同步平均法是从混有噪声干扰的信号中提取周期性分量的有效方法,也称为相干检波法。

此外,还有时间序列分析法等等,因这些内容与本书关系不大,故不再展开阐述。

1.2.2 频域分析法

对于旋转机械故障诊断而言,时域分析所能提供的信息量十分有限。现有的时域分析法只能粗略地回答设备有无故障,有时也能得到故障严重程度的信息,但不能指出故障的部位,故一般只能用作设备的简易诊断。故障诊断更重要的任务是要判断设备哪一部分发生了故障,以便有针对性地采取措施。对故障进行定位一种常用的方法就是进行频域分析。

频域分析法就是把以时间为横坐标的时域信号通过傅立叶(Flourier)变换分解为以频率为横坐标的频域信号,从而求得关于原时域信号频域信号频率成分的幅值与相位信息的一种变换方法。通过对各频率成分的分析,对照设备各部件运行时的特征频率,以便查找出故障源。

频域分析法具体包括幅值谱分析法、相位谱分析法、平均谱分析法、功率谱分析法、对数谱分析法、倒频谱分析法等,它们已经成为旋转机械故障诊断的主要内容,这里不再详细叙述。

1.2.3 时频域分析法——小波分析法及分形分析法

小波(Wavelets)分析是傅立叶分析思想的继承和发展。傅立叶分析的本质在于将一个相当任意的函数 $f(x)$ 分解为一系列不同频率的谐波函数的线性叠加,是一种全频域分析。它最明显的不足是缺乏空间的局部性,而在旋转机械设备诊断中,我们关心的却是因故障引起的信号突变。尽管加窗可以突出信号的局部特征,但一旦窗函数取定,则其大小和形状随之确定,我们只能得到信号在窗区内的信息。如果在信号中有短时、高频成分,傅立叶变换就显得难于奏效。小波分

析发展了加窗傅立叶变换的局部化思想,它的窗宽随频率的增加而缩小,从而保证了对高频信号有较高的频率分辨率,而对低频信号有更长的时间分析长度,较好地实现了对信号的全貌及局部特征的双重分析。

目前,在旋转机械设备诊断中,小波分析得到了高度重视,并取得了不少实际应用成果,是时频域分析法的重要工具。

分形(Fractal)分析将面对的复杂对象看成是分数维数,它突破了维数只能是整数的概念,这样,维数便成为一个连续函数。利用分形维数计算方法可实现对振动信号的滤波和为状态识别提取特征。分形滤波直接在时域进行,由于是从分形的角度间接地控制频率范围,故可成为时域模糊数学滤波。滤波整体思想是:旋转机械状态监测和故障诊断是通过对所监测设备的信号离散采样和分析来实现的。通常设备特征多数在低频段,故实际上较多的滤波是低通滤波。由于频率反映了所测信号的变化快慢,从分形函数角度看,信号变化快,信息维数就高;信号变化慢,信息维数就低。这样,计算分形维数就实现了滤波。进一步看,旋转机械的振动信号具有分形特征,在有限时间内和某一有限频率下采得的信号都具有不同的分形特征,这些特征可以用于故障诊断。

目前,分形理论在设备故障诊断工程中的应用正处在起步阶段。

1.3 旋转机械故障诊断技术新进展

随着模糊理论、专家系统、神经网络技术以及检测技术、通信技术、计算机技术、电子技术等相关领域学科的进一步深入研究,旋转机械设备诊断正朝智能化方向发展,已形成了一门数学、物理、化学、电子技术、计算机技术、通信技术、信息技术、模式识别和人工智能等多学科交叉的综合性技术,相应的设备维修技术也步入了智能化维修阶段,智能故障诊断技术的实现,为提高现代复杂工程技术系统的可靠性开辟了一条新的途径。

基于知识的故障诊断技术是设备诊断领域中最引人注目的发展方向之一,也是研究最多、应用最广的一类技术。它不需要精确的数学模型,故具有良好的应用前景。

1.3.1 基于人工神经网络的故障诊断方法

由于人工神经网络具有处理非线性和自学习以及并行计算能力,使其在非线性的故障诊断方面有很大的优势^[1]。人工神经网络在故障诊断中的应用包括:(1)从预测角度应用神经网络作为动态预测模型进行故障预测;(2)从模式识别角度应用神经网络作为分类器进行故障诊断;(3)从知识处理角度建立基于神经网络的专家系统。



1.3.2 基于模糊逻辑推理的故障诊断方法

模糊逻辑系统最大特点是其模糊规则库可以直接利用专家知识构造,因而能充分利用和有效处理专家的语言知识和经验。而且一个设计好的模糊推理系统可以在任意精度上逼近某个非线性函数,具有良好的性能。

对于不确定的系统状态,可以用模糊集来描述。首先建立起故障与故障原因的模糊关系矩阵 R , 如果当前故障原因向量的模糊隶属度为 C , 则故障可通过模糊合成后进行确定, 故障可表示为 $F = R \circ C^{[2]}$ 。

1.3.3 基于模糊神经网络的故障诊断方法

模糊神经网络技术是将模糊逻辑系统与神经网络相结合, 它充分吸取两者的优点, 既能处理专家知识和经验, 又能通过自学习增强系统的判断能力。利用模糊神经网络来解决故障诊断问题正得到越来越多的关注, 在理论上和实际应用中都体现出了重要意义和价值, 代表了一个新的发展方向^[3]。

1.3.4 基于专家系统的故障诊断方法

如果系统在运行过程中发生故障, 则领域专家很快就可以根据经验确定故障的原因和部位。这种方法对于复杂系统的故障诊断非常有效。随着计算机和人工智能技术的发展, 专家系统诊断方法的智能化水平不断提高, 使其克服了基于模型的故障诊断方法对模型的过分依赖性, 从而成为故障诊断的有效方法, 并在很多系统中得到广泛的应用。

目前, 智能故障诊断技术有两种发展趋势: 一是把人工神经网络与专家系统相结合, 将神经网络的学习机制引入专家系统; 二是将基于经验的方法与基于模型的方法相结合, 取长补短, 充分发挥各自的优势。

如何表述系统的特征向量和确定合适的判别函数是模式识别方法的难点。模糊推理法的困难表现在如何建立模糊关系矩阵和如何确定某一故障属于哪一故障原因的隶属度, 即如何确定故障的模糊隶属度向量, 而这些都取决于相关系统的先验知识和人们对系统的认知程度。故未来研究方向是如何直接从系统的运行数据中提取有用信息的方法。

人工神经网络的故障诊断方法为解决复杂系统的故障诊断提供了一条崭新的技术路线, 但如何选择合适的网络结构和规模, 以保证算法的收敛性、快速性、实时性以及学习样本的完整性和代表性, 仍是需进一步研究的问题。

1.3.5 智能融合故障诊断方法

从上述可知, 以上几种诊断方法各有其优势及不足, 如果能将几种诊断方法

集成,充分发挥各种诊断方法的优势,克服各自存在的不足,最大限度地找到问题的解,则可大大地提高故障诊断的智能性及效率,达到优势互补、全过程模拟、全局融合诊断思维的目的。

1.3.6 基于人工免疫系统的故障诊断方法

从20世纪70年代开始,Jerne^[4]开创了免疫系统(Immune System)网络假说,建立了独特型网络(Idiotypic network)理论。Perelson^[5]对此进行了进一步阐述。1986年,Farmer^[6]构造了一个免疫系统的动态模型。利用免疫系统机制解决工程问题最早出现在90年代,在1998年之前,人们对于免疫系统的研究并没有引起足够的重视。近几年来,各类研究人员对免疫系统的研究兴趣不断增加,并利用其机理解决许多不同的工程问题。日本学者Ishida在1990年利用免疫系统解决传感器网络故障诊断问题^[7],Forrest在1994年首次将免疫系统手段用于计算机安全和病毒检测^[8]。此后,越来越多的学者尝试建立免疫系统的模型,人工免疫系统(Artificial Immune System)应用领域由此不断得到扩大,现已覆盖信息安全、模式识别、机器学习、数据挖掘、故障诊断、自动控制等领域。

在故障诊断领域,Dasgupta利用免疫系统反面(或称阴性)选择(Negative Selection)机理提出一个高效检测算法用于铣削刀具断裂的检测^[9],试验结果表明它可以有效地用于自动安全临界操作监测;Ishiguro将免疫网络模型用于在线设备故障诊断^[10];Tang将人工免疫网络模型用于交流驱动和UPS的控制和诊断^[11]。总之,从文献检索及调研情况来看,目前,国内外专家学者在设备故障诊断、计算机病毒预防等方面做了一些初步的工作,但总体说来,国内外对人工免疫系统在故障诊断领域中的应用研究刚刚起步,实际应用更少,而故障诊断是继信息安全之后另一个从免疫系统直接映射而来的人工免疫系统应用领域,深入挖掘人工免疫系统仿生机理有助于进一步开展基于人工免疫系统模型的故障诊断研究。

1.4 本章小结

人工免疫系统是对生物免疫系统的模拟,具有强大的信息处理能力。众所周知,生物免疫系统主要的功能就是在线检测和杀伤来自生物体内和体外的抗原,具备“自己-非己”识别能力。再者,免疫系统与神经网络系统一样是一个高度的并行处理系统,具有学习能力、记忆能力等,这些能力协同激励、多样性、适应性等将对故障诊断领域的研究提供新思想和新方法。而人工免疫理论在故障诊断技术方面的研究更是如此。

本书将对人工免疫系统的机理进行充分研究,特别是对于与故障诊断技术密切相关的诸如免疫系统的模式识别能力、特征提取、多样性、学习能力、记忆能



力、分布式检测及协同激励等方面进行深入研究,构建基于人工免疫系统的化工过程机组智能故障诊断技术,具体所做的工作有如下几方面:

(1) 改进阴性选择算法,针对其不足进行进一步的改进和完善,使得在故障诊断过程中,既能检测正常模式的变化,又能检测模式发生了何种变化,以及变化了的模式和哪一种故障匹配,形成本书的基本核心算法;

(2) 指出了现有检测器训练方法存在检测器选择难于覆盖整个自己空间的不足,利用遗传算法变异的思想,提出一种变异搜索方法,使得检测器的选择能尽可能覆盖整个自己空间的区域;

(3) 指出现有二进制编码检测器存在训练过程时间长、计算机难于处理等不足,充分研究人工免疫系统的多样性、分布性机理,提出按不同故障性质构建不同检测器的方法,使检测器的训练方式和结果更能体现人工免疫系统的多样性、分布性;

(4) 指出现有基于人工免疫系统的旋转机械故障诊断技术中,所采用的位移、速度、加速度等时域信号均不适宜用基于阴性选择算法,首次提出了利用无量纲指标构建基于人工免疫系统的旋转机械故障诊断技术的正确性、合理性;

(5) 定义了峰值因子免疫检测器、波形因子免疫检测器、裕度因子免疫检测器、脉冲因子免疫检测器、峭度因子免疫检测器;

(6) 利用人工免疫系统的抗体生成原理,应用于在线提呈成熟检测器、优秀检测器,解决其他化工过程机组智能故障诊断方法中存在的在线性差、难于满足快速诊断的突出问题;

(7) 针对无量纲指标具有对并发缺陷不敏感的特性,本书通过试验研究对此特性进行了验证,给出了新的定义,并指出了该特性的适用的指标及范围,为利用无量纲指标进行复合故障的有效诊断提供了新的思路;

(8) 针对在独有故障特征提取及优秀检测器训练过程中,即在进行约简、聚类等数据分类过程中丢失部分有用信息的不足,采用了利用五种无量纲指标免疫检测器进行简单而实用的集成诊断的弥补方法,并给出了该集成诊断方法的定义;

(9) 设计制造了压缩机-电动机机组故障诊断模拟试验装置,能完成不对中、偏心、基础松动、轴承故障、齿轮故障、轴位移故障试验以及基础松动加弯轴、裂轴加偏心等复合故障试验;

(10) 采用 C++ Build 语言、利用阴性选择算法开发了按 ISO—2372 标准构建的旋转机组通用的故障诊断系统,以及设计了一套“基于人工免疫系统的机组故障诊断系统”,可对时域分析法与人工免疫系统原理的有机结合进行深入研究;

(11) 针对某石化公司第二铂重整装置中的压缩机机组,开发了融合常规时域故障诊断方法、频域故障诊断方法、模糊逻辑诊断方法、人工免疫系统的阴性选择算法为一体的故障诊断系统,并初步应用于实际生产。