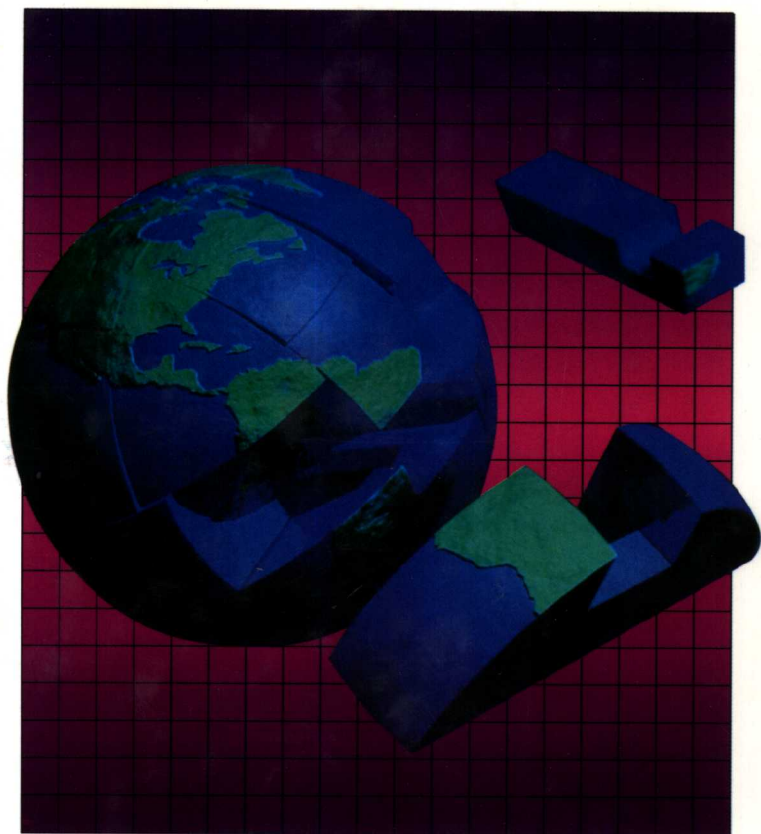


Diagnosis Principle and Application for the Fault Information 故障信息诊断原理及应用

徐章遂 房立清 王希武 左宪章 著



國防工業出版社

故障信息诊断原理及应用

Diagnosis Principle and Application for
the Fault Information

徐章遂 房立清 著
王希武 左宪章

国防工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

故障信息诊断原理及应用/徐章遂等著. —北京:国防工业出版社, 2000.7

ISBN 7-118-02228-4

I. 故… II. 徐… III. 故障诊断: 计算机辅助诊断 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 10408 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9¼ 234 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 20.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

序 言

“接天莲叶无穷碧，映日荷花别样红。”在我国有关设备诊断著作不断出版，我国设备诊断与工况监测技术蓬勃发展的无限生机中，别具一格的《故障信息诊断原理及应用》一书即将出版，我为之祝贺！

《故障信息诊断原理及应用》是论述当今设备故障诊断新理论、新方法、新经验的专著之一。设备诊断作为一个技术领域，从60年代初正式问世以来，一直受到人们的关注。经过了近40年的发展，取得了可喜的进展，提供了巨大的效益。但是，以往所采用的诊断理论与方法往往是针对单一故障模式的，考虑问题较为简单。时至今日，随着科学技术的发展，设备结构日趋复杂，系统的非线性更强，系统故障导致的外部特征更为复杂，基于线性分析的诊断技术一般难于解决大型、复杂设备的诊断问题。因此，在强干扰、多特征、多故障的条件下，诊断中许多不确定性的问题已成为诊断难点。值此之际，徐章遂教授等同志为解决这科技难题，从事了多年的理论研究与现场实践的工作，取得了一系列可喜的成就，并著成此书，作为新中国建国五十周年的献礼，这是令人十分欣慰的。

这一专著特点鲜明，风格别具。第一是创新性。书中力求将信息论、非线性动力学用于设备诊断，探索了采用信息神经网络来解决非线性引起的特征与特征的重叠等诊断难题，有其独到之处。第二是实践性。书中既有理论，又有一定的实例，许多理论与方法都是从实际的诊断中总结出来的。因此，我深深感到，这一专著是从事设备诊断研究工作与应用工作的科技人员与有关专业的大学生值得一读的参考书，开卷是会有益的。

当然,“金无足赤,人无完人”,书无完书。这一专著也定难免于有错误、不妥与不足之处,作者也期望得到读者的指教,以能受益于读者,从而也能为完善此书而作好准备工作。

谨为之序。

中国科学院院士 杨叔子
华中理工大学教授

一九九九年七月五日

前 言

故障诊断是根据设备运行状态信息查找故障源,并确定相应决策的一门综合性的新兴科学。这门科学从 60 年代一出现就受到人们的青睐,经过 30 多年的发展,已取得了长足的进步。从以信号分析为基础的一般诊断方法发展到以知识处理为基础的智能诊断系统,在能源、石化、交通、冶金、电子、军事等许多重要领域都得到比较广泛的应用。但这些诊断方法都是以诊断对象在工作过程中出现的外部特征为基础的,还未涉及到诊断对象的动力学本质。由于系统自身的结构复杂性,机、光、电、液、气间的耦合非线性,运动非线性等,使得系统故障引起的外部特征可能减弱、消失、重叠,因而现有诊断方法不能有效地解决复杂系统的故障诊断问题,对强干扰、并发故障的诊断和预测还有待研究。目前正是我国许多大型技术设备广泛应用的关键时刻,从系统动力学特性出发,对大型设备进行监测、诊断、控制是提高产品质量与性能,保证正常运行,充分发挥最大效益的关键技术。本书就是从这点出发,以信息理论为基础,采用神经网络技术进行这方面探讨,以期解决复杂非线性系统在干扰大、突发条件下及证据、知识、结论等不确定时的多故障诊断问题,能在新设备研制中将研究、设计、监测、诊断、控制、决策融为一体,使故障诊断科学成为新设备研制中不可缺少的一部分。

全书共六章。第一章介绍了设备故障诊断发展现状、研究内容及当前重点需要解决的问题。第二章在介绍信息理论的基础上,阐述了应用神经网络进行故障特征的选择、评价及提取方法,并提出了在信息不足的条件下进行模糊信息优化处理的特征提取方法。第三章较系统地叙述了最大故障信息量诊断法及故障信息

模糊图诊断法的诊断原理和方法,并结合某测控系统的故障诊断实际讨论了在故障特征信息量相近情况下的故障识别、故障信息压缩等问题。第四章主要论述了基于统计概率的径向基神经网络、信息神经网络及组合网络的特性、诊断原理和方法,重点研究了故障特征相近以致重叠条件下,利用组合网络进行故障识别及对复合故障进行诊断,并针对柴油发动机、变速箱等设备的诊断实际,详细论述了从故障机理分析,特征信息提取、信息融合到利用组合网络识别故障的诊断过程。第五章在介绍非线性动力学的基本理论的基础上,重点阐述了奇异谱特性及利用奇异谱谱型、分数维、李雅普诺夫指数识别故障的原理和方法,并结合内燃机故障诊断的问题论述了采用非线性动力学的这些参数诊断故障的方法。第六章介绍了诊断专家系统的基本原理,着重讨论了诊断专家系统中的自学习问题,提出了基于案例(CBR)和基于基因遗传算法的学习方法,并结合内燃机实际叙述了诊断专家系统的自学习功能的实现。

本书是作者长期从事设备故障诊断的教学和科研的结晶,书中引用的实例大都是作者进行设备监测与诊断的研究成果。本书由徐章遂统稿并撰写第一、第二、第三、第四章,左宪章和王希武撰写第五章,房立清撰写第六章。书中图稿由王希武、房立清制作,在本书撰写中得到中国科学院院士杨叔子教授悉心指导,军械工程学院训练部部长米东教授给予了大力支持,张中民博士、张英堂教授提供了有关柴油机实验资料,马春庭、韩小刚、徐英等同志为本书的资料加工做了大量工作,在此表示衷心感谢。

为使篇幅过大,书中涉及数学、物理(如故障机理分析,公式推导等)等方面的知识只能作简述,请读者谅解。

由于作者水平有限,本书有许多缺点和错误,衷心希望读者提出宝贵意见,我们不胜感谢。

本书谨献给中华人民共和国成立五十周年!

作者

1999年5月

目 录

第一章 概论	1
1.1 工程监测与故障诊断技术的发展现状	1
1.2 故障诊断研究的内容	3
1.3 故障诊断系统功能及发展趋势	7
第二章 故障信息与故障特征信息量	11
2.1 故障信息特征.....	11
2.2 故障特征的选择.....	17
2.3 故障特征的提取.....	32
第三章 最大故障信息量诊断	58
3.1 最大故障信息量.....	58
3.2 最大故障信息量二元树诊断法.....	66
3.3 某指挥仪测控随动系统故障信息量诊断.....	72
3.4 故障特征信息量相近的故障识别.....	83
3.5 故障信息压缩.....	91
3.6 模糊图诊断故障方法.....	95
第四章 基于神经网络的设备故障信息模式诊断	104
4.1 设备故障模式诊断的一般方法	104
4.2 基于统计概率的信息分类网络	133
4.3 信息神经网络(INN)诊断故障方法	144
4.4 组合神经网络及其诊断故障的方法	155
第五章 基于非线性动力学分析的诊断原理	185
5.1 非线性动力学分析的基本方法	185
5.2 吸引子的统计特性	192
5.3 奇异谱分析	196

5.4 故障诊断实例	218
第六章 具有自学习功能的智能诊断专家系统	225
6.1 诊断专家系统概述	225
6.2 机器自学习机制	237
6.3 基于遗传算法的机器自学习	244
6.4 具有自学习功能的智能诊断系统	262

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	The Present State of Observation and Fault Diagnosis	1
1.2	The Study Content of Fault Diagnosis	3
1.3	The Function and the Trend of the Fault Diagnosis System	7
Chapter 2	Fault Information and Information Quantity of Fault Feature	11
2.1	The Fault Information Feature	11
2.2	The Selection of the Fault Feature	17
2.3	The Extract of the Fault Feature	32
Chapter 3	Diagnosis of the Maximum Fault Information Quantity for Equipment	58
3.1	The Maximum Fault Information Quantity	58
3.2	The Binary Tree Diagnosis of the Maximum Fault Information Quantity	66
3.3	The Fault Information Quantity Diagnosis of the Measuring-Controlling Follow-Up System of a Director	72
3.4	The Recognition of the Fault with Approximation Fault Feature Information Quantity	83
3.5	The Fault Information Condense	91
3.6	The Fuzzy Graph Diagnosis Method	95
Chapter 4	The Equipment Fault Information Module	

	Diagnosis Based-on the Neural Network	104
4.1	The Usual Method of the Equipment Fault Module Diagnosis	104
4.2	The Information Classification Network Based-on Statistical Probability	133
4.3	The Fault Diagnosis by Information Neural Network(INN)	144
4.4	The Combination Neural Network and the Fault Diagnosis by It	155
Chapter 5	The Diagnosis Principle Based-on the Non-Linear Dynamics Analysis	185
5.1	The Basic Method of the Non-Linear Dynamics Analysis	185
5.2	The Statistical Feature of Attractor	192
5.3	Strange Spectrum Analysis	196
5.4	The Examples of Fault Diagnosis	218
Chapter 6	The Intelligent Diagnosis Expert System with the Self-Learning Function	225
6.1	The Introduction of Diagnosis Expert System	225
6.2	The Machine Self-Learning Mechanism	237
6.3	The Machine Self-Learning Based-on the Genetic Algorithm	244
6.4	The Intelligent Diagnosis System with Self- Learning Function	262

第一章 概 论

1.1 工程监测与故障诊断 技术的发展现状

本书所研究的工程设备(或装备)包括大型机电系统、兵器装备系统、检测仪器等。设备的可靠性,尤其是军用设备的可靠性是头等重要的问题。第二次世界大战中,美国运往远东的装备几乎半数未经使用就失效了;由于飞机故障而损失的飞机达 21 000 架,是被击落的飞机的 2.5 倍。为此战后美国投入了相当大的力量进行可靠性研究。1952 年美国国防部成立了专门研究电子设备可靠性的研究机构“AGREE”(即电子设备可靠性常设顾问团)。可靠性是指产品在规定时间内、规定条件下完成规定功能的能力。它与故障率是一对矛盾,故障率高,可靠性就差。减少故障(或提高可靠性)的途径一方面是提高产品质量,另一方面就要不断监测产品运行状态,预测发展趋势,尽可能把故障消灭在萌芽状态。因此在那些出现故障则意味重大事故的部门(如飞机、舰船)60~70 年代就开始了预报故障的监测系统的研究。如 1962 年英国在飞机上开始应用轨迹照相记录系统;1967 年美国研制飞机数据系统“AIDS”;1977 年美国使用“TRENOS”飞机发动机状态监测系统。随着工程设备自动化程度提高,其结构日趋复杂,一旦出现故障,就会产生链式反应,以致整个设备损坏,不仅造成巨大经济损失,而且会危及人身安全。美国三里岛核电站 1979 年由于系统误判,开关误操作,堆芯严重损失,放射物外流,损失几十亿美元,公害引起居民示威。1986 年 1 月美国“挑战者”号航天飞机,

由于密封装置不善造成爆炸。1985年10月我国某电厂20万千瓦汽轮机发电机组突然发生强烈振动,声音异常,在不到一分钟内,转速由3000r/min升至4500r/min,机组转子的联轴器螺栓有4处全部脱出或断裂,发生毁机的严重事故。据石油化工业统计,1976~1985年期间,化肥行业五大机组由于事故停车造成的直接经济损失达47500万元。

工程实践使人们认识到,要使设备可靠、有效地运行,充分发挥其效益,必须发展工程监测和故障诊断技术。如我国某大型透平压缩机组,1983年12月检修运行不久,发生异常振动。经过监测和诊断分析,认为机组联接高压缸和低压缸的联轴器发生了故障,危及生产,因此紧急停机检修。解体检查后发现,联轴器中8只联接螺栓已断3只,其余5只也将断裂。这样依靠监测诊断技术避免了事故发生。可见监测与诊断技术对国民经济发展起着重要作用。而且随着自动测试技术和计算机科学的发展,使工程设备工作状态的动态识别成为可能,并将研究设计、测试分析、监测诊断作为产品研制的三个组成部分。如美国德克萨斯州在三家大发电厂七台汽轮机组上实现了属于人工智能的监测与故障诊断。美军装备到部队的AN/TPQ-36、37全向炮位侦察雷达就有机内测试设备和故障诊断系统。目前国外大型机电系统大都安装有监测诊断系统。另外,还出现了一些专门从事这方面工作的公司,比较著名的有美国B&K、WESTING HOUSE公司、SDK公司、日本三菱公司、荷兰PHILIPS公司等。

我国在监测与诊断技术方面起步较晚,但由于国家政府部门重视,发展较快。1983年的《国营工业交通设备管理试行条例》中指出,“要根据生产需要逐步采用现代故障诊断和状态监测技术,发展以状态监测为基础的预防维修体制”,从而把故障诊断技术正式列入企业管理法规,并向为维修体制改革^[1]服务的方向发展。“八五”期间,国家组织了若干个故障诊断技术方面的攻关课题,分别在石化、电力等部门进行了应用和推广。因此我国在监测与诊断技术方面,理论研究上已接近世界水平,但在应用技术方面差距

较大。仅石化、电力行业与有关研究所、高等院校合作,对现有的少数大型设备安装监测诊断系统,其水平较之国外的同类产品仍有一定差距。随着国民经济发展,我国正面临大型技术设备广泛应用的关键时期,因此为适应国民经济发展形势的要求,必须使监测与诊断技术研究上升到一个新的水平。

1.2 故障诊断研究的内容

一、设备的系统构成

要研究诊断问题,就要认识诊断对象。虽然诊断对象千差万别,但从系统论的角度出发却又是统一的。一个系统总是由若干个元素通过一定的联系组合而成的。

元素:指构成设备的最基本的具有相对独立功能的构体。一个设备系统总是由有限的完成特定功能的零、部件按一定的方式和要素聚合而完成的。因此零部件就成为设备系统的元素。

联系:指设备的零部件之间相互作用的关系。联系可分为功能联系和非功能联系。功能联系是指反映元素间功能关系的联系,非功能联系是指元素间没有功能关系的联系。从元素到系统之间的纵向可分解性反映了系统的层次性。

系统的输出:指系统的所有行为,即系统的所有表现形式。系统的输出取决于系统的固有特性和系统输入,它反映了系统的状态,是系统的外观表现。

系统功能:指设计时要求系统实现的一些行为。功能失调与否是系统运行的根本标志,也是系统运行的工况监测与诊断的信息。

系统的约束条件:指系统在运行时某些行为所应满足的技术要求。约束条件也是系统行为的一部分,但不是设计的根本目的。系统运行中实现功能时该行为必须合适,因此约束条件也是监测内容的诊断信息。

一个系统可以是简单系统、复合系统和复杂系统^[2]。简单系

统在结构上直接由一个或多个元素组成。各元素间的联系是确定的、可描述的,在功能上其输入和输出之间的关系是确定的,可描述的。

复合系统是由一些在功能上与结构上各异的简单系统组成的多层次系统,输入和输出间的关系是确定的、可描述的,可完成特定功能。一个复合系统可分为系统级、部件级、元件级三个层次。同一层次的多子系统之间在结构、功能上都存在一定差异。

二、故障

通常我们说设备工作正常是指它具备应有的功能,没有任何缺陷,或虽有缺陷但仍在容限范围内。异常是缺陷有了进一步发展,使设备状态发生变化,性能恶化,但仍能维持工作。故障则是缺陷发展到使设备性能和功能都有所丧失的程度。这种功能的偏离可以通过参数调节得到恢复。不同设备之间所谓正常、异常、故障的标准是不一样的,为了对设备运行作出判断,必须建立正常、异常、故障的相应标准。

对一个复杂的装备系统,它具有层次性,因而故障也有层次性。

系统故障是指系统在正常技术环境中,其预定功能失调(包括元素功能失调,元素间联系也被破坏)或约束条件不满足状态。故障是系统一种常见状态,即非预期状态。如果一个系统在规定的的环境条件下,其功能与约束条件不能满足设计要求,则可判定系统发生了故障。

子系统级故障是指该子系统功能失调或约束条件不满足状态。

故障诊断包括诊和断两方面的任务。诊就是查找故障发生征兆的过程,断就是根据诊的结果作出相应的决策。现代故障诊断系统应有诊和断两个功能。

故障诊断的重要任务是查找故障成因,包括系统层次间的纵向成因、子系统间的横向成因、间接成因及外部成因。产生系统

故障的原因有:零部件劣化,包括设计不合理、质量不合格;固有特性劣化;元素之间的联系失调;系统工作条件不满足等。

诊断出系统故障本源是装备维修的基础,也是故障诊断的终极目标。但由于受到特征信号观测手段、征兆提取方法、状态识别技术、诊断知识完备程度以及诊断经济性的制约,诊断层次要深入的程度会受到限制。

三、工程监测与故障诊断研究的主要内容

工程监测与故障诊断就是研究设备运行状态信息的变化,进而识别设备运行状态的科学。

其主要研究内容为:

1. 故障机理研究

这是监测与故障诊断的客观依据。设备的异常或故障是在设备运行中通过其状态信号(即二次效应)变化反映出的。由于监测与诊断是在设备不停机的情况下进行的,因此必然以状态信号为依据。二次效应就是设备在运行中出现的各种物理的、化学的现象,如振动、噪声、温升、油耗、变形、功耗、磨损、气味等,这些都是一种设备运行所固有的。监测与故障诊断就是要快速、准确地提取设备运行时二次效应所反映的特征。

2. 状态监测

主要是测取与设备运行有关的状态信号。状态信号是故障信息的唯一载体,也是诊断的唯一依据。因此在状态监测中及时、准确地获取状态信号是十分重要的。

状态信号的获取主要是依靠传感器或其它检测手段进行故障信号的检测。检测中主要有以下几个过程:

(1) 信号测取:主要是通过电量的或传感器组成的探测头直接感知被测对象参数的变化;

(2) 中间变换:主要完成由探测头取得的信号的变换和传输;

(3) 数据采集:就是把中间变换的连续信号进行离散化过程。数据是诊断的基础,能否采集到足够长的客观反映设备运行状态

的信息,是诊断成败的关键。

这一阶段主要是监测系统获取状态信号反映的主要功能指标的变化。当出现异常,可按其程度分别给出早期警报、紧急警报、强迫系统停机等处置。

3. 特征提取

就是从状态信号中提取与设备故障有关的特征信息^[3]。当特征信号为静态信号时,特征信号即是征兆。对征兆的取值进行检验,看其是否在允许范围,然后作出决策。当特征信号为动态信号时,首先要根据情况选择既能反映系统功能指标,又便于测取的特征信号组;其次是通过特征信号分析提取便于决策的征兆;最后根据征兆、标准模式和某种判别准则,识别系统状态。

设备总是运行在噪声、电磁干扰等环境中,因此决定状态向量的因素并不止故障向量一个,故障信息将混杂在大量干扰信号中。为了消除或抑制外界和内部干扰,必须采取信号处理技术,突出有用信号。在这一过程中为了提高反应速度,必须使用信息模式变换、信号压缩等技术。

4. 诊断故障

又叫故障分离或状态分析。就是根据所提取的特征判别状态有无异常,并根据此信息和其它补充测试的辅助信息寻找故障源。对于不同的要求,故障源可以是零件、部件或子系统。根据这些信息和故障对系统的性能指标影响程度作出估计,综合给出故障等级。诊断故障可以用正常信息来分析故障源,如功能分析法,这要求被诊对象具有较明确的结构和功能关系。也可以用异常信息来分析故障源,这要求被诊断对象的各种特征信号中包含有足够的故障源信息。

在诊断故障中,判别是根据故障向量模型的识别来估计故障状态的。由于故障类型的多样性,故障向量模式也很多。建立各种模式的过程也是建立故障档案。尽管各种模式各异,但都是根据设备运行资料,按照简单、实用、可靠原则来进行的。根据模式可进一步分析故障征兆和状态,弄清设备故障性质、程度、类别、