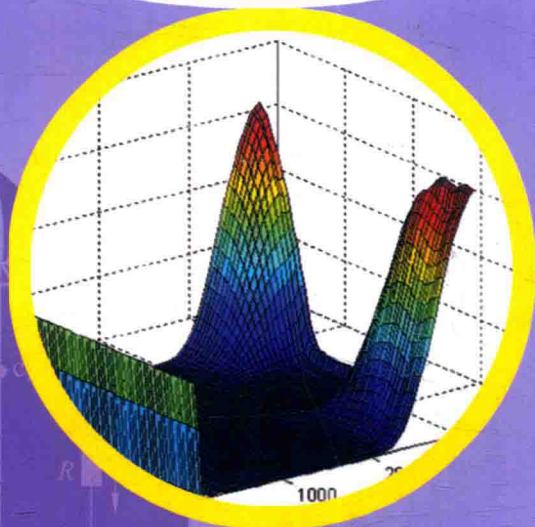
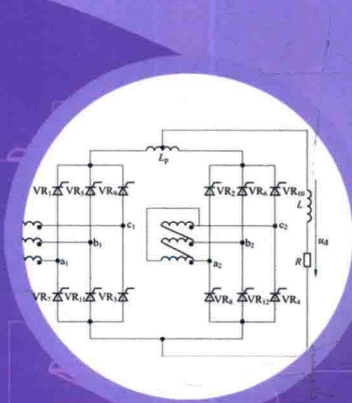


DIANLI DIANZI DIANLU

GUZHANG ZHENDUAN JISHU

电力电子电路 故障诊断技术

王荣杰 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANLI DIANZI DIANLU

GUZHANG ZHENDUAN JISHU

电力电子电路 故障诊断技术

王荣杰 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以发展完善的电力电子电路故障智能诊断方法为目的,针对电力电子电路故障诊断中的故障特征提取和识别两个关键技术问题进行了深入的研究和分析,在讲解基本原理和基本方法的基础上,辅以一定的故障诊断实例,使读者学习起来更能结合实际。

本书的具体内容包括:电力电子电路故障诊断基本概念与特点,波形直接分析和神经网络相结合、统计分析与神经网络相结合、小波分析与神经网络相结合、主元分析与支持向量机相结合、S变换域与支持向量机相结合以及基于相似度的电力电子电路故障诊断方法。这些算法不仅通过了理论上的分析,还通过了仿真实验予以验证。

本书适合大专院校电力电子专业的师生学习使用,也可供从事电力电子电路研发、分析的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子电路故障诊断技术/王荣杰著. —北京:中国电力出版社,2016.6

ISBN 978-7-5123-9209-0

I. ①电… II. ①王… III. ①电力电子电路-故障诊断
IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第077987号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016年6月第一版 2016年6月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 9.25印张 121千字

印数0001—2000册 定价28.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

随着电力电子技术的迅猛发展,实现能量变换的电力电子电路,由于其效率高、控制灵活方便、易实现等优点,使其的应用日益广泛。而电力电子整流装置的故障问题越来越突出,因此在电力电子电路中应用自动故障诊断技术,是有其现实意义和经济效益的,开展相关的理论和方法研究尤为重要。

本书以发展和完善电力电子电路故障的智能诊断技术为目的,针对电力电子电路故障诊断中的故障特征提取和识别两个关键技术问题进行了深入研究和分析。全书共分为7章,包括电力电子电路故障诊断基本概念与特点的简述、基于波形直接分析和神经网络的电力电子电路故障诊断方法、统计分析的故障特征提取方法以及其与神经网络相结合的电力电子电路故障诊断方法、小波分析的故障特征提取方法以及其与神经网络相结合的电力电子电路故障诊断方法、基于主元分析和支持向量机相结合的电力电子电路故障诊断方法、基于S变换和支持向量机相结合的电力电子电路故障诊断方法、基于相似度的电力电子电路故障诊断方法。这些算法不仅通过了理论上的分析,还通过仿真实验予以验证。

人类文明不断进步,科学发展日新月异,本书在科学探索的道路上还有诸多不足之处,但笔者谨怀抛砖引玉之心,希望它能够为后续研究奠定基础、提供参考、启发思路,共同为电力系统故障诊断的发展不懈努力。

本书受国家自然科学基金(51309116)、福建省自然科学基金(2016J01736)、福建省教育厅杰青科研基金(JA14169)、人工智能四川省重点实验室基金(2014RYJ03)和集美大学科研基金(ZQ2013001, ZC2013012)资助。

编者

前言

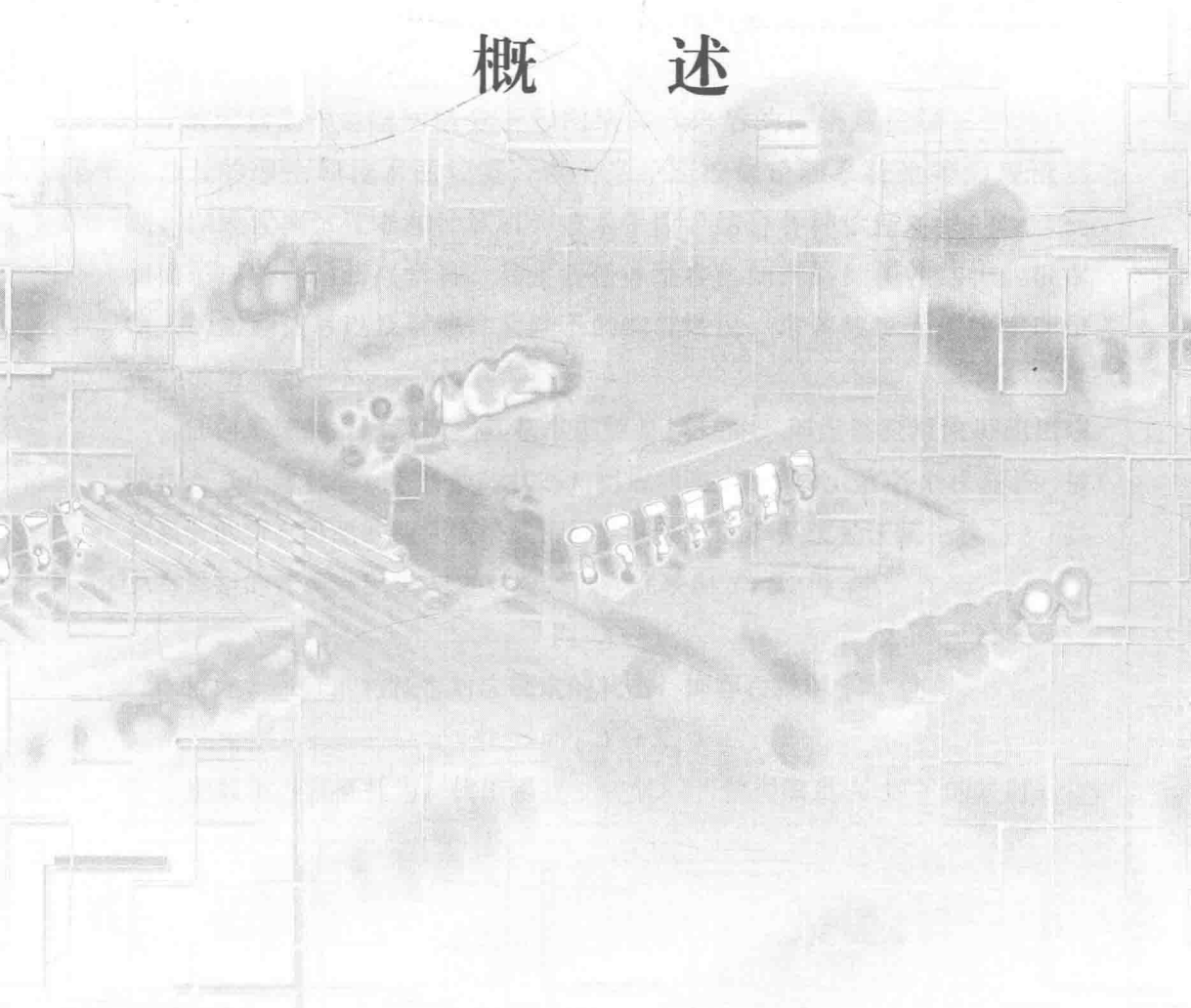
第一章 概述	1
1.1 故障诊断常用的方法	4
1.2 电力电子电路故障的特点	10
参考文献	12
第二章 基于波形直接分析的电力电子电路故障诊断方法	15
2.1 引言	17
2.2 BP 神经网络	17
2.2.1 网络模型	17
2.2.2 BP 算法	18
2.2.3 L-M 学习算法	20
2.2.4 神经网络的设计	21
2.3 基于神经网络的电力电子电路故障诊断方法	23
2.3.1 故障模型	23
2.3.2 故障模型分析	24
2.3.3 基于神经网络的电力电子电路故障诊断方法	26
2.3.4 仿真实验分析	27
2.4 本章小结	32
参考文献	32
第三章 基于主元分析的电力电子电路故障诊断方法	35
3.1 引言	37
3.2 主元分析原理	37
3.2.1 原理概述	38
3.2.2 奇异值分解	41

3.2.3 主元数的确定	42
3.3 基于主元分析的故障特征提取	43
3.4 基于主元分析-神经网络的故障诊断	45
3.5 实验验证	45
3.6 本章小结	50
参考文献	50
第四章 基于小波包分析和神经网络的电力电子电路故障诊断方法	53
4.1 引言	55
4.2 小波包分析理论	55
4.2.1 小波变换定义	55
4.2.2 多分辨率分析	57
4.2.3 小波包分析	58
4.3 电力电子电路故障的特征提取	59
4.3.1 基于能量分布的特征提取原理	59
4.3.2 基于小波包分析的电力电子电路故障特征提取	60
4.4 实验验证	61
4.4.1 十二脉波可控整流电路及故障分析	61
4.4.2 基于小波包分解的能量分布	69
4.4.3 实验结果分析	72
4.5 本章小结	77
参考文献	78
第五章 基于支持向量机的电力电子电路故障诊断方法	79
5.1 引言	81
5.2 支持向量机	81
5.2.1 最优分类面	82
5.2.2 广义最优分类面(线性不可分情况)	84
5.2.3 支持向量机	84
5.3 支持向量机的多故障分类算法的研究	86
5.4 基于小波包分析和 SVM 的电力电子电路故障诊断方法	88
5.4.1 基于小波包分析和 SVM 的电力电子电路故障诊断方法	88

5.4.2 训练性能分析与故障诊断	90
5.5 基于 PCA 和支持向量机的电力电子电路故障诊断方法	93
5.5.1 故障诊断方法	93
5.5.2 仿真实验分析	95
5.6 本章小结	100
参考文献	100
第六章 基于 S 变换的电力电子电路故障诊断方法	103
6.1 引言	105
6.2 S 变换原理	105
6.3 基于 S 变换和支持向量机的电力电子电路故障诊断方法	106
6.3.1 基于 S 变换的故障特征提取	107
6.3.2 支持向量机在故障类型识别中的应用	112
6.4 仿真实验结果分析	114
6.5 本章小结	117
参考文献	118
第七章 基于相似度的电力电子电路故障诊断方法	119
7.1 引言	121
7.2 Wigner - Ville 分布	121
7.2.1 Wigner - Ville 的定义和性质	121
7.2.2 电力电子电路故障信号的 Wigner - Ville 分布	122
7.3 基于相似度的电力电子电路故障诊断方法	123
7.3.1 基于 Wigner - Ville 分布的相似度的定义	124
7.3.2 仿真结果分析	130
7.4 本章小结	135
参考文献	135
后记	137

第一章

概 述



近年来,功率变流技术得到了迅猛的发展,经过变流技术处理的电能在整个国民经济的耗电量中所占比例越来越大。在发达国家,电能的75%左右经过电力电子变换后使用,预计在21世纪中叶会发展到99%以上^[1-2]。电力电子技术已广泛应用于国防军事、工业、交通、农业、商业、医药制造以及家用电器。电力电子设备一旦发生故障,小则造成电器产品损坏、交通阻塞、工矿企业停产;大则会威胁人民生命、财产安全,甚至造成重大的人员伤亡或突发灾难、事故,影响国民经济的正常运行。实现能量变换的电力电子电路,由于其效率高、控制灵活方便、易实现等优点,被广泛应用于电力电子设备中,如电镀、感应加热、直流输电、交流调速、机车牵引、无功补偿及不间断电源等。电力电子电路是整个电力电子设备关键的部分,因此对电力电子电路进行故障检测和诊断是至关重要的。

故障诊断学是继网络分析和网络综合之后的网络理论第三个分支,它涉及的理论和技术面较宽,以信息论、控制论和系统论等为理论基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,结合各种诊断对象的特殊规律而形成的一门新兴学科。其主要任务是在已知网络的拓扑结构,根据输入的激励信号以及系统在激励下的响应情况,求解故障元件的物理位置或故障参数。

任何系统的故障诊断,其基本思想是统一的,即设被测对象可能出现的状态(正常状态和各种故障状态)组成状态空间集 Y ,在各个状态下,被测系统的所有可测的特征值组成特征空间集 X ,当系统处于某一状态 y 时,总有确定的特征向量 x 与之对应,即存在映射 f ,使得

$$f: X \rightarrow Y$$

反之,一定的特征也对应确定的状态,即存在映射 f' ,使得

$$f': Y \rightarrow X$$

用数学语言概括为,找出函数 $y=f(x)$,使得满足 X 到 Y 的映射。

1.1 故障诊断常用的方法

一、国内外研究现状

目前,故障诊断是国内外研究的前沿课题,国内外都对其展开了积极的研究,并且已经产生了巨大的经济效益。从故障诊断技术的各分支技术来看,美国占有领先地位,美国的许多权威机构如美国机械工程师学会、美国宇航局等都参与了这一领域的研究,投入了大量的资金;不少的高校和企业也都设立了诊断技术研究中心,美国的一些公司,如 Bently、HP、Scientific 和 Atalanta 等,他们的检测产品基本上代表了当今诊断技术的最高水平,不仅具有完善的监测功能,而且具有较高的诊断功能,在军事、化工等方面具有广泛的应用。其他一些国家故障诊断技术的发展也是各有特色,如英国在摩擦诊断方面、丹麦在振声诊断方面等,它们在诊断技术应用方面都各具优势。我国的故障诊断技术发展于 20 世纪 70 年代末,一直以来,我国对故障诊断技术展开了积极的研究,在故障诊断技术理论方面已接近世界水平。目前,我国在一些特定设备的诊断研究方面很有特色,形成了一批自己的监测诊断产品。西安交通大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学、南京理工大学等高校的研究成果较为先进。如西安交通大学研制的“大型旋转机械计算机状态监测系统及故障诊断系统 RMMD”、华中科技大学开发出的“汽轮机工况监测和诊断系统 KBTGMD”等。综合我国的故障诊断技术现状,其应用集中在化工、机械、冶金等行业。

二、故障诊断方法

故障诊断方法发展至今,已提出了大量的方法并发展成为一门独立的跨学科综合信息处理技术,是目前研究领域的热点之一。按照国际故障诊断权威——德国的 Frank P. M. 教授的观点^{[1-3]、[1-4]},所有的故障诊断方法

可以划分成基于解析模型的方法、基于信号处理的方法、基于知识的方法三种。

1. 基于解析模型的方法

这种方法是发展最早、研究最系统的一种故障诊断方法。其优点是能深入系统本质的动态性质和实时诊断,缺点是通常难以获得系统模型,且由于建模误差、扰动及噪声的存在,使得鲁棒性问题日益突出。

2. 基于信号处理的方法

这种方法是直接利用信号模型,不需要对象的数学模型,从而回避了抽取对象数学模型的难点,缺点是不便于研究^[1-5]。基于信号处理的方法通常利用信号模型,有相关函数、频谱、自回归滑动平均等^[1-6],直接分析可测信号,提取诸如方差、幅值、频率等特征值,近些年来出现了一些新的基于信号处理的故障诊断方法,直接测量系统的输入输出方法、基于小波变换的方法、输出信号处理法、信息匹配诊断法、基于信息融合的方法、信息校核的方法^[1-7]。

3. 基于知识的故障诊断方法

这种方法与基于信号处理的故障诊断方法类似,也不需要定量的数学模型。不同之处在于它引入了诊断对象的许多信息,特别是可以充分利用专家诊断知识等,所以是很有前景的故障诊断方法,尤其在非线性系统领域。在实际情况中,我们常常无法获得研究对象的精确数学模型,这就大大限制了定量方法的使用范围,基于知识的方法不需要对象的精确数学模型,因此是很有生命力的方法。基于知识的方法主要可以分为基于症状的方法和基于定性模型的方法^[1-8]。基于症状的方法有神经网络方法、专家系统方法、模糊推理方法和模式识别方法,基于定性模型的方法有知识观测器方法等。

(1) 基于神经网络 (artificial neural network, ANN) 的故障诊断方法。神经网络系统是由大量的,同时也是很简单的处理单元广泛地互相连接而形成的复杂系统^[1-9]。它具有大规模并行、分布式存储和处理、自组织、自

适应和自学习能力，特别适用于处理需要考虑许多因素和条件的、非线性、不精确和模糊的信息处理问题。基于神经网络的故障诊断方法，在知识获取方面，只需要用该领域专家解决问题的实例或范例来训练神经网络，与专家系统相比，具有更高的时间效率，又能保证更高的质量；在知识表示方面，采用隐式表示法，获取知识的同时，自动产生的知识由网络的结构及权值来表示，并将某一问题的若干知识表示在同一网络中，通用性强，便于实现知识的自动获取和并行联想推理；在知识推理方面，是通过神经元之间相互作用实现的，网络的同一层推理是并行的，不同层推理是串行的。应用神经网络技术解决故障诊断问题的主要步骤包括：根据诊断问题组织学习样本、根据问题和样本构造神经网络、选择合适的学习算法和参数。常用于故障诊断的神经网络结构有 BP 网、Hopfield 网、SOM 网和 ART 网等。神经网络故障诊断方法的不足之处在于未能充分利用特定领域中专家积累起来的宝贵经验，只利用一些明确故障诊断实例，而且需要足够的学习样本，才能保障诊断的可靠性。在对复杂系统进行诊断时，往往由于网络规模过于庞大和学习训练时间超长等问题，降低了神经网络的实用性。

(2) 基于专家系统的故障诊断方法是根据专家的经验、知识以及大量的故障信息知识，设计出一个计算机程序。它可以像专家一样工作，不受环境、心理等因素的影响，因此是理想的替代人类专家进行故障诊断的工具。专家系统主要由知识库、数据库、推理机、学习系统、上下文、征兆提取器和解释器^[1-10]。基于专家系统故障诊断方法的基本原理为：专家系统诊断根据专家丰富的实践经验、专家分析问题和解决问题的思路，建立故障诊断的知识库、规则库和推理机，设计一个计算机程序，根据知识库提供的知识，规则库通过的规则及推理机提供的推理机制，进行故障诊断。专家系统诊断方法可以解释自己的推理过程，解释结论是如何获得的。专家系统方法主要缺点是由于知识和经验描述的多样性和不确定性，因此知识的获取和有效处理已成为专家系统的“瓶颈”问

题;另外,专家系统在自适应能力、学习能力及实时性方面也都存在不同程度的局限。

(3) 基于模糊数学^[1-11]的故障诊断方法就是依据专家经验在故障征兆空间与故障原因空间之间建立模糊关系矩阵,再将各条模糊推理规则产生的模糊关系矩阵进行组合,根据一定的判定阈值来识别故障。它根据所获取的征兆,列出征兆隶属度模糊向量,再根据以实践为基础所得到的模糊矩阵,利用模糊数学的方法,计算出状态隶属度模糊向量,最后根据此向量中各元素的大小确定有关诊断对象状态的情况。模糊故障诊断技术有两种基本方法:①先建立征兆和故障类型之间的因果关系矩阵,再建立故障与征兆的模糊关系方程,这是基于模糊关系及合成算法的诊断方法;②先建立故障与征兆的模糊规则库,再进行模糊逻辑推理的诊断过程,这是一种基于模糊知识处理技术的诊断方法。模糊故障诊断方法的不足之处,是对复杂的诊断系统,要建立正确的模糊规则和隶属函数是非常困难,而且需要花费很长的时间。

三、技术发展

由于神经网络、专家系统、模糊理论故障诊断方法有着各自的优点,同时也有各自的局限性,近年来众多的学者和文献都提出了多种新的故障诊断方法,体现为利用神经网络、专家系统、模糊理论故障诊断技术的优点互补来克服其局限性,再有就是引入新的数学工具结合知识诊断方法来克服局限性。例如小波变换和粗糙集理论分别与神经网络相结合形成小波网络和粗糙集—神经网络故障诊断方法,遗传算法和专家系统共同形成的遗传专家系统故障诊断方法。

1. 小波神经网络

连续小波变换^[1-12]是由法国理论物理学家 Grossmann 与法国数学家 Morlet 共同提出的。它优于傅里叶分析之处在于:小波分析在时域和频域同时具有良好的局部化性质,可以对高频成分采用逐渐精细的时域或

空间域取代步长，从而可以聚集到对象的任意细节。小波变换已经在信号处理、图像压缩、语音识别、生物医学工程、计算机视觉、故障诊断等许多科学领域得到了广泛应用。小波与神经网络的结合，是一个十分活跃的研究领域。目前，小波与神经网络的结合有以下两个途径：①辅助式结合：比较典型的是利用小波分析对信号进行预处理，然后用神经网络学习与判别；②嵌套式结合：即把小波变换的运算融入到神经网络中去，形成所谓的小波神经网络或小波网络。可以看到，小波神经网络由于把神经网络的自学习特性和小波的局部特性结合起来，具有自适应分辨性和良好的容错性。小波神经网络是在小波分析研究基础上提出的一种前馈网络，它可以被认为是 RBF 网络的推广，其基本思想是用小波元代替了神经元，即激活函数为已定位的小波函数基，通过仿射变换建立起小波变换与神经网络的连接。图 1-1 为小波神经网络故障诊断示意图。

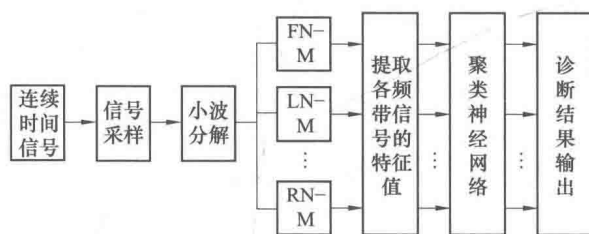


图 1-1 小波神经网络故障诊断示意图

2. 粗糙集—神经网络

粗糙集 (rough sets, RS) 理论是一种刻画不完整性和不确定性的数学工具，能有效地分析和处理不精确、不一致、不完整等各种不完备信息，并从中发现隐含的知识，揭示潜在的规律^[1-13]。RS 理论是由波兰学者 Pawlak Z. 在 1982 年提出的。作为一个独立的理论框架，RS 理论能有效处理下列问题：不确定性或不精确知识的表达，经验学习并从经验中获取知识、知识分析、矛盾分析、不确定性推理、基于信息保留的数据简化、近

似模式分类、识别并评价数据间的依赖性、发现数据中因果关系、发现数据中的相似性和区别、从数据中产生决策算法、基于一致性评价可用信息的质量等。粗糙集—神经网络故障诊断系统模型如图 1-2 所示,其实现步骤为:



图 1-2 粗糙集—神经网络故障诊断系统框图

- 1) 利用条件属性之间的依赖性,去掉所有可省略的条件属性。
- 2) 利用领域知识,把样本中的每一个属性值进行量化,得到一个决策表。
- 3) 样本相容性检查,删除样本不相容性。
- 4) 利用知识的充分性理论对样本进行简化,消去样本集中的重复信息。
- 5) 对条件属性进行简化、求核。
- 6) 利用前面的特征约简算法求出最小条件属性集。
- 7) 根据最小条件属性和相应的原始数据,形成新的故障学习样本集。
- 8) 分别针对全部属性和最小条件属性集采用神经网络对样本集进行训练和测试,得出诊断结果。

基于粗糙集—神经网络故障诊断方法,用粗糙集方法对信息进行预处理,即把粗糙集作为神经网络的前置系统,构成粗糙集—神经网络(rough set-neural network)信息处理系统。粗糙集对输入空间与输出空间的映射关系是通过简单的决策表简化得到的,而且通过去掉冗余属性,可以大大简化知识表达空间维数,其决策表的简化又可以利用并行算法处理,因而将神经网络与粗糙集理论结合是很有意义的。

3. 遗传算法

遗传算法 (GA) 是 Holland 于 20 世纪 70 年代提出的, 并提出了位串编码技术。20 多年, 遗传算法的应用无论用来实际问题还是建模, 其范围不断扩展, 在机器学习、过程控制及工程优化等众多领域得到了成功应用^[1-14]。遗传算法是基于生物进化原理的一种全新的自适应全局优化搜索算法, 是把求解问题的自变量看作原因, 进行编码构成染色体 (个体), 在个体的集合 (群体) 内根据个体适应的大小进行最优评价; 在搜索过程中不断通过选择 (繁殖)、交叉、变异 3 个遗传算子进行新个体的产生与繁殖, 最后得出最优个体。遗传算法在故障诊断专家系统的推理和在自学习中的应用, 克服了专家系统存在的推理速度慢和先验知识很少情况下知识获取困难的障碍。遗传算法用于知识学习的思想, 是根据给定的少量样本, 将与结论有关的一个、两个或 m 个条件集合作为编码单元进行编码, 计算该编码所对应的 m 个 ITV 值 (适应度) 和总的 ITV 值; 利用遗传算子, 对当前一代的个体进行繁衍, 产生出其后代; 淘汰掉父代中值高的个体, 同时计算后代的 ITV 值, 并将 ITV 值低的个体与父代中保留的个体合并成新的一代; 如果达到设定的繁衍代数或算法已收敛, 返回最好的基因串, 将该基因串 ITV 最大的几个个体去掉; 对剩下的个体进行解码, 输出对应的规则到预备库中, 满足要求的存入知识库, 否则继续进行繁衍。利用遗传算法可对规则集进行修正, 即在运行时对规则应用的情况进行评价, 并将评价结果作为适应度, 重复遗传算法的过程, 得到满意的修正规则集。

1.2 电力电子电路故障的特点

(1) 功率开关器件损坏。电力电子电路的实际运行表明, 大多数故障表现为功率开关器件的损坏, 如晶闸管或可关断晶闸管 (GTO) 故障, 其中以功率开关器件的断路和短路最为常见。