

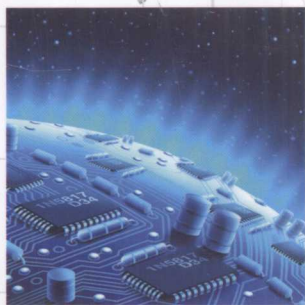
普通高等教育“十三五”规划教材

电力电子电路

及容差电路故障

诊断技术

◎ 蔡金锭 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

电力电子电路及容差电路 故障诊断技术

蔡金锭 刘庆珍 鄢仁武 著



机械工业出版社

《电力电子电路及容差电路故障诊断技术》是一本面向从事航空航天、通信和电力电子工程等专业技术人员的专著。书中总结了作者近几年来在电力电子电路及容差电路故障诊断研究领域取得的成果,以及各种故障诊断的方法和理论。全书共 11 章,分别阐述了电力电子电路故障诊断技术研究现状和故障诊断机理及特点、基于人工神经网络的故障诊断法、BP 神经网络混合算法的故障诊断法、频谱分析和粗糙集理论的故障诊断法、ARMA 双谱与离散隐马尔可夫故障诊断法、ARMA 双谱与 FCM-HMM-SVM 故障诊断法、小波分析与随机森林算法的故障分类、子网络级电路故障可诊断性和交叉撕裂逻辑诊断、容差网络电路故障的区间诊断法、大规模容差网络可测点的优化选择和电力电子电路故障诊断系统的设计等。

本书在内容上注重理论联系实际,书中含有大量的故障诊断分析示例、图形和曲线,供读者系统学习和掌握电力电子电路及容差电路故障诊断的基本方法和步骤。本书可作为高等院校电类专业、研究生和本科生教材,也可供从事航空航天、通信和电力电子工程等的技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子电路及容差电路故障诊断技术/蔡金锭等著. —北京:机械工业出版社, 2016. 6

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-53135-7

I. ①电… II. ①蔡… III. ①电力电子电路—故障诊断—高等学校—教材
IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 041054 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤 路乙达

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 刘秀芝

封面设计: 张 静 责任印制: 李 洋

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13 印张 · 320 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-53135-7

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649 机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

电力电子电路及容差电路故障诊断技术是 20 世纪后半叶新兴的一个研究课题。它在航空航天、军工、电力、通信和自动控制等诸多领域中发挥着重要的作用。目前大量的电力电子设备和装置已广泛应用到通信、航空航天、电力和交通工程等领域中,并担负着供电等重要任务。当电力电子设备或装置中任何组成部分的元器件出现异常时,都会导致设备或装置无法正常工作,直接影响整个系统运行的稳定性和供电可靠性。当系统出现故障时,其输出端波形将发生畸变,输出非正弦波形并向电网注入谐波电流,严重影响其他电气设备的正常工作,如增加系统中旋转电机及其他电气设备的发热并附加谐波损耗、引起谐振过电压、出现错误信号干扰,造成继电保护装置误动作,严重时还将损坏电气设备、缩短设备的使用寿命等。因此,根据电力电子电路工作机理和故障特点,研究电力电子设备故障诊断方法,合理地设计电力电子电路故障在线诊断系统和方案,对故障进行早期预报,快速准确地判断出发生故障的性质和故障所在的位置并及时排除故障,避免因故障造成事故和经济损失具有重要的意义。

电力电子电路故障诊断与容差电路故障诊断在方法上有所不同。电力电子电路故障输出具有较强的非线性特征,容差电路故障时在可测试点的测量值呈现区间模糊性。因此,电力电子电路故障诊断一般先获取输出信号的特征值,然后应用人工智能算法进行故障分类和识别。为此,书中将 BP 神经网络、遗传算法和粒子群等智能算法分别应用到电力电子电路的故障诊断中,并分析了它们的优缺点。容差电路故障诊断通常先建立故障诊断方程,然后借助可测试点测量值求解方程未知量,最后进行故障定位。但随着电路规模的日益扩大,诊断方程未知量必将增大,此外可测试点测量值的可信性直接关系到故障诊断方程的可靠性。本书中提出子网络级电路撕裂诊断法和可测试点的优化选择,不仅可用于容差电路的故障诊断,同样也可以为电力电子电路故障诊断和测试点的优化选择提供有益的帮助。

本书可满足教学、科研和工程技术人员的需求,让更多读者了解和学习电力电子电路及容差电路故障诊断的基本方法和知识。全书共 11 章,除第 1 章绪论外,第 2 章至第 11 章分别阐述了基于人工神经网络的故障诊断法、BP 神经网络混合算法的故障诊断法、频谱分析和粗糙集理论的故障诊断法、ARMA 双谱与离散隐马尔可夫的故障诊断法、ARMA 双谱与 FCM-HMM-SVM 故障诊断法、小波分析与随机森林算法的故障分类、子网络级电路可诊断性和交叉撕裂逻辑

诊断、容差网络电路故障的区间诊断法、大规模容差网络可测点的优化选择和电力电子电路故障诊断系统的设计等。

本书是由作者及课题组成员多年来承担国家自然科学基金项目、福建省自然科学基金项目、福建省教育厅科学基金项目以及校企合作科研项目等在电力电子电路与容差电路故障诊断研究领域取得的成果，大部分章节的内容已在国内外学术刊物公开发表。书中较为系统、详细地介绍了电力电子电路与容差电路故障诊断的基本理论和方法，在内容上注重理论与实际应用相结合。为方便读者学习，书中各章中都列举出电力电子电路和容差电路故障诊断方法的应用示例，并附上大量的故障诊断分析数据、诊断波形图和曲线，力求使读者通过学习能系统地了解 and 掌握电力电子电路与容差电路故障诊断的基本理论和方法。全书在内容安排上具有以下特点：

(1) 主题突出，针对性强 内容直接切入主题，紧紧围绕着电力电子电路故障和容错电路诊断技术这一主题内容进行阐述。除了第1章绪论之外，书中较为详细地介绍了八种电力电子电路和与容差电路故障诊断方法。除此之外，在第10章和第11章中还分别阐述了大规模容差电路可测点的合理设计和优化选择方法以及电力电子电路故障诊断系统的设计和实现。

(2) 内容紧凑，层次分明 整体布局合理，脉络清楚。对书中所涉及的较为繁杂的诊断理论和计算过程都一一进行了简化并运用流程图做了定性描述，每一种类型的诊断方法后面都附有实际应用示例和诊断结果分析，旨在构筑一个理论与应用相结合的平台，使读者在学习过程中对电力电子电路和容错电路故障诊断理论和方法有更为深刻的理解。

(3) 图文并茂，可读性强 各章节内容除了阐述各种故障诊断方法之外，还附有故障诊断方法的流程图、诊断波形图和曲线等。在书中附录列出了大量的故障诊断分析图形和曲线，以及部分诊断方法的运行程序，便于读者学习和参考。

本书由福建省新能源发电与电能变换重点实验室（福州大学）蔡金锭教授、刘庆珍副教授和鄢仁武博士撰写，最后由蔡金锭教授统稿和审核。在本书编写过程中，福州大学刘丽军讲师和研究生曾静岚、严欣、郑敏杨、甘露、邓桂秀、林婷婷、郑闻文、黄妍妍为书中文字的编校付出了辛勤的劳动，在此向他们致以谢意，同时向书中引用的所有参考文献的作者深表谢意。

由于电力电子电路及容差电路故障诊断所涉及的知识面较广，限于作者水平，难免在书中出现遗落、缺点和错误，恳请读者批评指正。

蔡金锭

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 电力电子故障诊断的意义 1
- 1.2 故障诊断法及研究现状 2
 - 1.2.1 解析模型故障诊断法 2
 - 1.2.2 信号处理的故障诊断法 4
 - 1.2.3 知识融合故障诊断法 6
- 1.3 电力电子故障诊断机理及特点 11
 - 1.3.1 故障诊断机理 11
 - 1.3.2 故障诊断的特点 12
- 1.4 可测点优化选择和诊断系统设计 12

第 2 章 基于人工神经网络的故障

诊断法 14

- 2.1 引言 14
- 2.2 BP 神经网络故障诊断法 14
 - 2.2.1 BP 神经网络故障诊断模型 14
 - 2.2.2 BP 神经网络故障样本训练 17
 - 2.2.3 BP 神经网络算法的故障诊断 20
- 2.3 双向联想记忆神经网络故障诊断法 26
 - 2.3.1 双向联想记忆神经网络故障诊断模型 26
 - 2.3.2 多级放大电路的 BAMN 故障诊断 28
 - 2.3.3 BAMN 算法的故障诊断模型 30
 - 2.3.4 子电路级故障的 BAMN 诊断 31
- 2.4 本章小结 33

第 3 章 BP 神经网络混合算法的故障

诊断法 34

- 3.1 引言 34
- 3.2 基于 GA-BP 混合算法的故障诊断 34

- 3.2.1 改进 GA 进化与神经网络混合算法 34
- 3.2.2 基于 GA-BP 混合算法的整流电路故障诊断 37
- 3.3 基于 PSO-BP 混合算法的故障诊断 40
 - 3.3.1 基于粒子群与 BP 神经网络混合算法 40
 - 3.3.2 基于 PSO-BP 混合算法的整流电路故障诊断 42
- 3.4 基于 IM-BP 混合算法的故障诊断 43
 - 3.4.1 免疫神经网络混合算法的实现框架 43
 - 3.4.2 基于 IM-BP 混合算法的整流电路故障诊断 47
- 3.5 本章小结 49

第 4 章 频谱分析和粗糙集理论的故障

诊断法 51

- 4.1 引言 51
- 4.2 整流电路输出电压波形的频谱分析 51
- 4.3 基于粗糙理论的故障诊断法 55
 - 4.3.1 故障诊断决策表的形成 55
 - 4.3.2 故障诊断决策表的约简 57
 - 4.3.3 三相整流电路故障诊断分析 60
- 4.4 粗糙集与神经网络相结合的故障诊断法 61
 - 4.4.1 粗糙集 - 神经网络分步结合故障诊断法 61
 - 4.4.2 粗糙集 - 神经网络整体结合故障诊断法 63
 - 4.4.3 粗糙集 - 神经网络在故障诊断中的应用 65

4.5 本章小结	67	7.3 电力电子整流电路故障识别	105
第5章 ARMA 双谱与离散隐马尔可夫的故障诊断法	68	7.3.1 机车变流器电路故障诊断	105
5.1 引言	68	7.3.2 十二脉波可控整流电路故障诊断	106
5.2 基于 ARMA 双谱与 DHMM 的故障诊断法	68	7.4 本章小结	111
5.2.1 ARMA 双谱故障特征的提取	68	第8章 子网络级电路故障可诊断性和交叉撕裂逻辑诊断	112
5.2.2 HMM 的训练和状态识别	74	8.1 引言	112
5.2.3 基于 ARMA 双谱与 DHMM 故障诊断步骤	76	8.2 子网络级电路故障可诊断条件	112
5.3 电力电子电路故障诊断应用	77	8.3 子网络级电路故障诊断的误区分析	114
5.3.1 SS8 机车变流器电路故障诊断	77	8.4 仿真示例分析	116
5.3.2 十二脉波可控整流电路的故障诊断	80	8.5 大规模电路交叉撕裂逻辑诊断法	117
5.4 本章小结	86	8.5.1 交叉撕裂诊断图和撕裂准则	117
第6章 ARMA 双谱与 FCM-HMM-SVM 故障诊断法	87	8.5.2 逻辑诊断矩阵和诊断函数	119
6.1 引言	87	8.5.3 子电路级故障的逻辑定位	120
6.2 ARMA 双谱与 FCM-HMM-SVM 故障诊断法	87	8.6 逐级撕裂搜索与诊断效率	121
6.2.1 模糊 C 均值聚类的故障信号分析法	87	8.7 不同诊断法的分析比较	123
6.2.2 支持向量机故障分类算法	89	8.8 稳压电源电路故障逻辑诊断	124
6.2.3 ARMA 双谱与 FCM-HMM-SVM 故障诊断步骤	91	8.9 本章小结	126
6.3 电力电子电路故障诊断分析	94	第9章 容差网络电路故障的区间诊断法	127
6.3.1 机车变流器电路故障诊断	94	9.1 引言	127
6.3.2 十二脉波可控整流电路故障诊断	96	9.2 含有容差电路的区间分析方法	127
6.4 本章小结	96	9.2.1 区间节点电压方程的计算方法	128
第7章 小波分析与随机森林算法的故障分类	97	9.2.2 仿真分析实例	129
7.1 引言	97	9.3 容差网络故障的区间判定	130
7.2 基于小波分析与随机森林混合故障诊断法	97	9.4 故障识别仿真示例	132
7.2.1 电力电子电路故障信号奇异性的小波检测法	97	9.5 容差子网络级故障的区间诊断	133
7.2.2 随机森林算法的电力电子电路故障识别	102	9.6 子网络级故障交叉撕裂诊断仿真示例	134
		9.7 容差网络元器件级故障的区间诊断	136
		9.8 容差网络单支路故障诊断仿真示例	137
		9.9 非线性容差子网络级故障的区间诊断法	138
		9.9.1 非线性容差子网络可测端点电压区间值的确定	140
		9.9.2 非线性容差子网络故障诊断	

仿真示例	141	第 11 章 电力电子电路故障诊断	
9.10 本章小结	142	系统的设计	158
第 10 章 大规模容差网络可测点的		11.1 引言	158
优化选择	143	11.2 系统的硬件部分	158
10.1 引言	143	11.2.1 JZB-1A 型实验装置	160
10.2 容差网络可测点电压灵敏度与故障		11.2.2 信号转换电路	161
识别的关系	143	11.2.3 PCI6251 数据采集卡	161
10.3 撕裂端口零电流门限及其灵敏度与故障		11.3 系统的软件设计	161
识别的关系	144	11.3.1 接口实现	162
10.4 容差子网络级可测点的优化		11.3.2 故障诊断软件	163
选择方法	145	11.4 实验结果及说明	164
10.4.1 容差网络可测点优化选择仿真		11.5 本章小结	165
示例一	146	附录	166
10.4.2 容差网络可测点优化选择仿真		附录 A 三相桥式可控整流输出电压	
示例二	148	波形图	166
10.5 优化选择可测点对子网络故障		附录 B ARMA 双谱故障诊断图	177
诊断的影响	153	附录 C SS8 机车主变流器电路故障模式	
10.5.1 合理选择可测点对子网络		小波分解图	182
N_1 零门限 D_0 的影响	153	附录 D 故障诊断程序	188
10.5.2 合理选择可测点对子网络 N_1 故障		参考文献	195
诊断的影响	154		
10.6 本章小结	157		

第 1 章 绪 论

1.1 电力电子故障诊断的意义

电力电子技术是 20 世纪后半叶诞生和发展的一门新兴综合应用技术基础学科，其应用领域正在日益扩大，如国防军事、航天航空技术、电能变换和传输、交通运输和信息通信等领域都有电力电子装置的身影。

电力电子装置通常是由电力电子器件、集成电路、人机互动系统、通信系统、控制系统等部分根据它们的功能和作用按照一定的目的和要求有机地组合成一个装置或整个系统。当系统中的任何一个元器件或子系统局部发生故障时，都有可能导致整个系统和装置的工作状态发生异常，甚至造成整个电路不能正常工作。因此，实时对电力电子电路和装置的工作状态进行监测和诊断是相当必要而且十分重要的。

电力电子电路主要是由主电路和控制电路两部分组成的。在实际工作中，主电路发生故障的概率相对比其他组成部分较高。因此，电力电子电路的故障诊断主要是针对主电路中的电力电子器件进行监测与诊断。故多数的故障诊断研究都是集中在对电力电子电路主电路部分的研究。然而由于电力电子主电路发生故障的类型较为复杂，根据电路发生故障的不同性质，一般可将故障分为两类：其一，是电路中的元器件，如电感、电容和电阻等参数值与正常值出现偏差；其二，是主电路中的电力电子器件，如晶闸管、电力二极管等发生开路、短路，驱动电路输出信号出现异常或无信号，或者因保护电路发生误动作，如断路器跳闸、熔丝断开等。统称这一类故障为电路拓扑结构性故障，其在电力电子电路故障中较为普遍存在，而且在所有故障中占有较大的比例，是故障诊断研究的主要对象。

电力电子电路发生拓扑结构性故障的原因较多且情况复杂，故障发生前呈现出的征兆有时难以捕捉，故障信息转瞬即逝。从电路发生故障到系统无法正常工作时间仅仅为数十毫秒，给故障信号的捕获和诊断带来很大的难度。因此，仅仅依靠维修人员的经验来查找和排除故障已经不能满足工程的要求。

若电路一旦发生故障，应及时、准确地采取方法和措施从电路的不正常运行状态中判断出故障类型，并尽快通知维护人员及时地采取解决措施或者采取故障隔离手段等，以最大限度地确保和维持系统的稳定性，防止故障继续扩大和蔓延，及时根据系统输出信号的特征以及系统保护呈现出的信息，准确地判断出电路发生故障的性质，确定故障区域并诊断出具体发生故障的元器件，以尽快地排除故障使系统恢复到正常工作状态，减轻因故障造成对设备的损坏程度，保障工作人员的人身安全，减少因故障引起的经济损失和对社会造成的不良影响。由此可见，深入研究电力电子电路故障的智能诊断技术和方法在工程中具有重要的应用价值和意义。

1.2 故障诊断法及研究现状

电力电子电路故障诊断的方法主要分为解析模型诊断法、信号识别法和知识融合诊断法三类。

解析模型故障诊断法需要对被诊断系统或电路建立准确的故障诊断方程式,当被诊断系统或电路无法准确地建立诊断方程时,则可利用被诊断系统或电路的输出信号采用基于信号处理的方法对电路或系统进行故障诊断。但近些年来,绝大多数研究者都致力于知识融合故障诊断法的研究,并取得一定的研究成果。该方法是一种将信号处理、建模处理与知识处理等相融合,以知识处理为核心的一种智能故障诊断方法。

1.2.1 解析模型故障诊断法

解析模型故障诊断法通常又可分为状态估计故障诊断和参数估计的故障诊断。解析模型故障诊断法需要精确地建立待诊断电路的故障模型,其特点是通过系统或电路提供的参数值和测量值,并应用故障诊断方程计算出其理论输出值,然后将计算结果与实际测量值进行分析和比较,从而判断出电路发生故障的性质。

1. 状态估计法

应用状态估计故障诊断法对电力电子电路进行故障诊断时,通常采用卡尔曼滤波器或者状态观测器构造被诊断电路的状态变量,从而计算出状态变量的估算值并与实际输出比较构成残差序列,然后应用数理统计法从残差序列中获取故障信息特征从而实现电路故障诊断。状态估计法的故障诊断过程如图 1-1 所示。

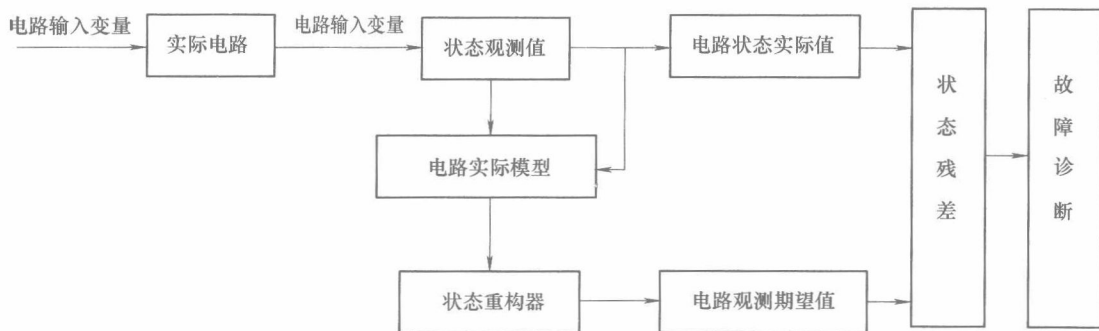


图 1-1 状态估计法的故障诊断过程

在直流调速系统中单相全桥逆变电路的故障诊断和定位方法很多,如参考文献[1]的主要方法是:在两种导通状态下将H变换器的状态空间平均模型中简化为平均状态模型,建立直流调速系统的状态估计方程,应用最小二乘法计算出系统状态变量,并将计算结果与实测值进行比较,从残差序列中获取故障信息,从而达到对电力电子电路中续流二极管开路以及功率晶体管短路和开路等故障的诊断。同时在文献中还提出了实时诊断定子绕组断开和检测绕组温升的方法。该方法首先建立直流无刷电机的控制模型,然后应用有限脉冲响应滤波器和离散状态滤波器对功率变换器的输入电流和电压信号以及转子的角速度测量值进行处

理,最后应用离散平方根滤波器估算出定子反电动势和定子绕组的电阻值,从而实时诊断出定子绕组断开或温升等故障。

在对变换器-电机系统的运行状况进行监控和诊断的过程中可以应用状态空间平均模型法。该方法应用状态空间模型对无故障的斩波器进行建模,并根据电路的实际测量数据分别建立简单残差和正规残差的关系式。应用输出残差波形关系式建立判断电力电子电路中斩波器和二极管等开关器件发生短路或开路故障的逻辑判别方法^[2]。

参考文献[3]从电路理论的基础上对感应式电机三相逆变器中的整流二极管短路、输入电压单相接地、电力晶体管短路和电力晶体管基极开路等故障状态进行了研究,构造了在故障条件下逆变器输出相电压和相电流的时域方程,然后构建状态观测器实现对电力电子电路的故障诊断。

从理论和实际应用的角度对电力电子系统的故障进行分析,以某一类型的故障为例,研究基于模型的故障诊断方法^[4]。文中所提到的三相逆变器中的电力晶体管故障定位方法的主要思路为:首先构建三相逆变器的故障系统状态方程,然后构造标准的卡尔曼观测器,利用输出的观测误差对故障进行检测和分离,准确定位出故障点。

利用扩展卡尔曼滤波(EKF)和直流母线电流信息对永磁同步电动机驱动器进行断相故障诊断^[5]的主要方法为:首先构建永磁同步电动机驱动器的故障系统状态方程,然后采用扩展卡尔曼滤波实时估计监控永磁同步电动机定子电阻,并比较直流母线电流的实际测量值与理论值之差来实现对系统的断相故障诊断。

在直流电机故障诊断领域中,应用模糊观测器可以用于检测直流电机系统故障。当系统状态可测量,且当测量矩阵的秩等于状态维数时,该方法还可以隔离出各种故障状态,并可估计出发生故障范围的大小^[6]。

2. 参数估计法

应用参数估计法对电路进行故障诊断时,电路原理图中元器件的参数必须是已知的,而故障诊断的主要任务是,根据这些元器件参数实际值与正常值存在的偏差是否满足在允许的容差范围之内来判断电路是否发生故障。这种诊断法首先是建立待诊断电路的故障诊断方程,然后将电路的测量值代入诊断方程进行参数辨识,把辨识结果与实际测量值进行比较,最后判断出电路是否发生故障。参数估计法的故障诊断原理图如图1-2所示。

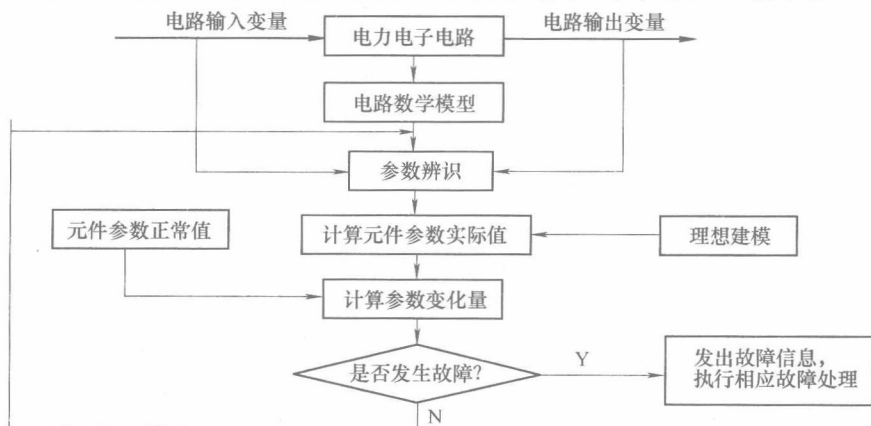


图 1-2 参数估计法的故障诊断原理图

在参考文献[7]中详细阐述了将参数辨识法应用于直流变换电路的故障诊断。这种诊断法首先根据电路的参数,建立直流变换电路故障诊断模型,然后再根据诊断电路的输入和实际输出值对其进行参数辨识,最后计算出随运行状态变化的各个元器件参数值,以此判断出电力电子电路元器件的故障情况及其使用寿命。此外,在参考文献[7]中还提出了采用混杂系统理论建立电力电子电路故障诊断模型,该方法应用最小二乘法实现对电力电子电路的参数辨识,并将该模型应用到电力电子电路的故障诊断中,对系统参数进行在线辨识以及对故障的预知诊断。

作者在参考文献[8]中解决了当解除撕裂端点必须全部可测的限制后是否有误区存在的问题,以及可测点分布必须遵循的规律。同时也解决了自验证(STC)和互验证(MTC)故障诊断法不曾解决的基础性核心问题,论证了撕裂端点全部可及仅是文中所研究无误区的一个特例。

当大规模电路发生故障的子电路数不大于3时,应用交叉撕裂准则和子网络级电路故障的逻辑定位方法是有效的。在子网络级电路故障可诊断性拓扑条件的基础上,作者提出了一种快速诊断子网络级电路故障的新方法^[9-12]。这种诊断法与互验证(MTC)法比较,具有以下独特优点:它不受子网络电路外节点必须可及的限制;一些传统方法无法诊断的电路,用此方法可以诊断,而且诊断次数少、计算量小、可测点可以多次重复使用。这种方法也可以应用于容差子网络电路的故障定位和通信网络中电子电路的故障诊断。

研究实际工程中电路元器件参数含有容差的故障诊断问题,是故障诊断从理论走向实际应用的关键一步。参考文献[13]深入探讨了应用区间分析法对容差子网络级电路故障诊断的方法和步骤,并通过工程实例进行验证,表明这种诊断法在工程中具有实际应用价值。

区间数学分析法作为容差电路故障诊断的一种有效工具^[14-16],作者首先论述区间迭代法的基本算法和迭代步骤,然后把这种算法应用到容差电路的故障诊断之中,并与其他算法进行比较,具有较为精确的诊断结果。

1.2.2 信号处理的故障诊断法

基于信号处理的故障诊断法其最大特点是,它不需要建立被诊断电路准确的诊断模型,因此具有较强的自适应能力。当电路发生故障时,电路的输出量将随之发生变化,这些输出量中包含有大量的故障信息。如果对这些输出量进行信号处理,将可获得故障诊断所需要的重要信息。目前常用于获取电力电子电路故障信号的处理方法主要有傅里叶变换法、沃尔什变换法、Park变换法和小波变换法等。

1. 傅里叶变换法

参考文献[7]介绍了一种诊断三相桥式整流电路的故障诊断法。该方法的实现过程是,在电路故障诊断模型基础上首先进行故障类型分类,然后应用傅里叶分析法对电路的输出电压波形进行特征量的提取,则可获得直流分量、基波幅值、二次谐波幅值和三次谐波幅值4个幅度频谱特征值以及基波相位角、二次谐波相位角两个相位频谱特征值。通过对这4个幅度特征值的分析可以诊断出电路发生故障的类型,然后再利用另外两个相位特征值就可以进一步定位到故障类中的具体元器件。这种诊断法不仅简单直接而且定位较为可靠。在文献中同时还运用离散傅里叶变换(DFT)对三相桥式整流电路进行故障诊断。首先对电力电子可控整流装置的各种电路状态的整流电压波形进行分析和归类,然后定义一种“面积”参

数,利用这个参数建立故障诊断模型,并利用故障模式向量作离散傅里叶变换,将变换后的3个特征值:直流分量、一次谐波幅值和相位等实现对电路故障判断和故障定位。这种方法可以在DSP系统上方便实现。

在三相整流电路中作者提出了一种基于波形分析与神经网络相结合的人工智能诊断法^[17],并将其应用于电力电子整流线路的故障诊断中。以三相整流电路为例,首先对整流电路的输出波形进行实时采样,然后建立BP神经网络输出与故障元器件之间的对应关系,实现了智能故障识别。仿真诊断结果表明,这种诊断法是准确而可信的。

除了应用波形分析与神经网络相结合的故障诊断法之外,作者提出了一种基于AR(Auto-regressive)模型与DHMM(Discrete Hidden Markov Model)的电力电子电路诊断新方法^[18]。首先对电路采样的数据进行零均值处理,然后引入AR模型来表征电路的工作状态,获取电路状态的故障信息特征,最后采用DHMM进行故障模式的训练并设计出故障识别器。通过对三相桥式整流电路进行故障诊断仿真,诊断结果表明,这种具有工程应用价值。

双桥并联可控整流电路在线故障诊断法^[19]与参考文献[7]基本相似,但不同之处是,在故障分类时包含了25类故障,并根据整流电路输出电压波形定义了表征故障的“面积”建立12维故障向量来描述电路的故障状态。然后对故障模式向量进行频谱分析获得三个频谱特征值:直流分量、一次DFT幅值和相位值。而后再利用这三个特征值就可以实现故障的分类和定位。该文献还提出了改进频谱分析的故障诊断法,并给出了算法的实现过程,这种方法比较容易在DSP系统上实现。

2. 沃尔什变换

参考文献[20]的作者利用整流电路输出电压波形,提出了一种基于沃尔什变换的在线故障诊断法。在文献中首先对整流电路的输出电压波形进行沃尔什变换,获取变换后的特征值:直流分量和一、二、三次列率的功率分量等四个幅度频谱特征值以及一、二、三、四次沃尔什变换等四个相位频谱特征值;然后利用四个幅度频谱特征值可以诊断出三相整流桥电路的故障类型;最后再分别应用四个相位频谱特征值则可以具体定位到故障的元器件。由此可见,沃尔什变换法的故障诊断法其基本方法与傅里叶变换诊断法是十分类似的。然而应用沃尔什变换的诊断法只需要采用加减运算,算法简单运行速度比傅里叶变换要快得多。

3. Park 变换

Park变换广泛应用于三相不对称电路的分析和电机控制等领域的应用。Park变换同样也可以推广应用到电力电子整流电路的故障,正如参考文献[21]和参考文献[7]把Park变换应用到电力电子装置的智能故障诊断。由于Park变换可用于三相输出信号的分析,因此,可以将Park变换法应用到三相整流电路的故障诊断。

将Park变换应用于三相半控桥式整流电路直流驱动系统的故障诊断过程如下^[22]:首先获取三相半控桥式整流电路驱动直流电机系统正常工作状态下的三相输入电流,并经Park变换后的标准轨迹图,然后实时监测三相半控桥式整流电路的输入电流并对其进行Park变换得到相应的轨迹图。并将其与标准轨迹图比较,若两者不同,则电路发生故障,且不同的轨迹图代表不同的故障性质和故障部位。同时在参考文献[7]中也深入研究和探讨了应用Park变换实现对电压型三相逆变桥式电路驱动异步电动机系统的故障诊断法。它与参考文献[23]不同之处在于采用逆变器的三相输出电流,也就是采用三相异步电动机定子电流

作为 Park 变换。

4. 小波变换

小波分析也可以应用于 Buck 电路的故障诊断。正如参考文献 [7] 阐述的, 首先应用小波变换消除电力电子电路输出信号中的白噪声, 然后将小波变换应用到残差发生器中, 提高残差发生器的鲁棒性, 最后分析电力电子电路输出信号奇异点的分布规律。根据电路的驱动信号, 得到一种无需数学建模的电路故障诊断法。

应用小波分行检测方法对电力电子装置开路故障进行诊断的具体过程是: 首先模拟三相桥式整流电路可能发生的各种故障的输出电压波形然后进行多尺度分解, 然后应用改进的关联维数算法计算出不同故障状态下的关联维数, 由此表征了不同类型的故障电路对应的不规则程度来判断各种故障类型, 并通过模拟仿真诊断证实了这种方法的可行性。该方法主要应用于三相桥式整流电路晶闸管开路故障诊断^[23]。

在十二脉波可控整流电路故障识别时^[24], 作者提出了一种基于 db6 小波函数和随机森林算法相结合的电力电子故障诊断新方法。文献中详尽地介绍了应用 db6 小波进行波形分解和提取故障特征量的方法与步骤, 阐述了随机森林算法决策树的生长和投票过程和应用随机森林算法设计出故障分类器, 并将其应用于十二脉波可控整流电路的故障识别。诊断结果表明, 这种诊断法具有更高的正确诊断率和较强的抗噪声能力。

无论采用傅里叶变换还是沃尔什变换, 都要求被变换的变量必须是周期性变化的信号^[7]。但是大多数电路的输出信号一般都不是周期性的, 此外还有一些电路的输出信号周期在不断地发生变化, 这都将给信号处理造成一定的麻烦。然而基于小波变换的故障诊断法不像傅里叶变换和沃尔什变换对输入信号要求那么严格, 且计算量也小, 是一种在工程中具有广泛应用前景的故障诊断法。它不但可以进行在线实时故障检测, 而且灵敏度较高, 有较强的抗噪声能力。

1.2.3 知识融合故障诊断法

基于知识融合的故障诊断法, 是近年来在电力电子电路故障诊断领域中发展的另一分支的故障诊断法。基于知识融合的故障诊断法主要包括有: 专家诊断系统、模糊逻辑推理法、故障树法、人工神经网络法、支持向量机法、模式识别法等及其各方法的交叉混合算法。由于这些诊断法不需要对被诊断电路建立精确的诊断模型, 故它在实际工程中得到较为广泛的应用。

1. 专家诊断系统的故障诊断法

专家诊断系统的基本思想正如参考文献 [7] 所介绍的: 通过理论分析与实践经验相结合建立一个可靠的、庞大的知识库。在知识库中包含有电路系统理论知识、环境知识、系统知识和一个规则库。该知识库要能够真实反映出系统的因果关系, 也就是要体现出电路的输出特征与各故障类型、故障点之间的因果关系是一一对应的。应用专家诊断系统进行故障诊断时, 是利用专家知识库中的规则库对从实际运行中获得的特征变量进行逻辑推理, 从而诊断出电路发生各种故障的类型。

应用专家诊断系统对电力电子电路进行故障诊断时, 诊断的准确性和可信度主要取决于专家知识库中的知识水平以及适合范围, 因此庞大和完善的知识库是必需的。尤其是对复杂系统的故障诊断, 要建立所需要的专家知识库有时是十分困难的。目前专家诊断系统有两种发展趋势: 其一是, 将经验性的方法与诊断模型法相互融合, 充分发挥它们的优点; 其二

是,将人工神经网络与专家诊断系统融合起来,把人工神经网络算法应用到专家诊断系统中。

在变频调速系统和电力电子故障诊断领域,参考文献[25]和参考文献[7]的作者分别提出了专家诊断系统。这种专家诊断系统是由微机系统、硬件检测电路以及由调速系统的故障模式知识库、诊断推理机、人机交互接口和数据库等部分组成的智能专家诊断系统。它可以对主电路中的晶闸管故障和控制电路故障进行检测和诊断。如参考文献[7]介绍的在线故障诊断时,逐次采用循环查询的方式、实时进行数据采集,并将采集的数据进行实时刷新和存储。当采样值出现超限现象时,则可判断出电路可能会发生故障,需要及时定向跟踪。如果连续几次的检测结果都相同时,则说明电路或调速系统有故障,最后调用专家诊断知识库进行分析和推理故障产生的原因,并将推理结果显示出来。

应用专家诊断系统对三相全桥逆变驱动电路和单相不可控整流电路的故障诊断,首先需要根据被诊断对象或系统的测量值,然后应用 PSPICE 仿真手段建立一个推理规则的树状知识库。该知识库由两部分组成:系统正常运行时的知识和发生故障时的知识。在实际故障诊断应用时,主要通过对系统的工作状态进行实时监测,获取系统工作时的特征信息,然后应用专家诊断知识库进行逻辑推理,则可以判断出系统所处的工作状态及其发生故障的性质。如果被诊断系统出现的特征信息在专家诊断系统知识库的规则之外,则该专家系统将无法判断出该系统的故障所在^[26]。

2. 模糊逻辑推理的故障诊断法

模糊逻辑推理故障诊断法在工程中已广泛得到应用^[27],其最大特点是,可以直接通过专家知识库构造模糊规则库,能够充分、有效地利用专家积累的丰富经验和渊博知识。应用模糊逻辑推理诊断法能够有效地解决诊断系统输出的信号存在不准确性以及受到噪声干扰等所造成的影响。目前采用的模糊逻辑推理故障诊断法主要有基于模糊聚类算法的故障诊断法、基于模糊知识处理技术的故障诊断法、基于模糊关系及其混合算法的故障诊断法。

将模糊理论与频谱分析相结合并应用于电力电子放大电路的故障诊断^[28],其方法首先通过对电路的输出信号进行数据采集,然后对采集的信号进行频谱分析,从而获得不同故障状态下的频谱特征,再利用各种待诊断元器件的故障模糊隶属度来确定故障类型,最后结合故障实例和仿真结果表明该方法的可行性。

将模糊神经网络(FNN)故障诊断法应用于三相桥式全控整流电路的故障诊断^[29],解决了三相桥式全控整流电路中参数存在的模糊性和不确定性等难题。这种诊断法在神经网络学习的机制上引入了模糊规则,提高了故障诊断准确性。通过仿真实验,结果表明这种诊断法可用于电力电子三相桥式全控整流电路的故障诊断,且具有较高的准确性和可信度。

模糊逻辑推理故障诊断法在理论上和实际应用方面已经取得了很大的进展,但是它仍然存在一些不足,还有待于进一步改进和完善。比如,模糊系统的设计和分析手段主要依赖于专家经验;模糊逻辑推理系统还缺乏自学习的能力;模糊隶属函数和模糊规则无法确保在任何情况下都是最优的。

3. 基于故障树的故障诊断法

故障树分析是将所研究系统中最不希望发生的故障状态或故障事件作为故障分析的目标和出发点,然后在系统中寻找直接导致这一故障的全部因素,将其作为不希望发生的故障的第一层原因事件,再以这个原因事件为出发点,寻找原因事件的下一级发生的下一级全部因

素,以此类推。该分析方法具有直观、应用范围广以及逻辑性强的特点。如参考文献[30]和参考文献[31]的作者分别提出一种逻辑故障树、故障树模型与人工神经网络诊断技术相融合的故障诊断法,并分别将其应用到二十四脉波可控整流电路故障诊断和交流发电机整流器中二极管开路的故障诊断。

基于逻辑故障树诊断法的缺点是,其故障诊断结果的可信性主要依赖于故障树信息的正确性和完整度。倘若故障树信息不够完整、不够详细和不精确时,都将会导致诊断结果也不够准确和完全。

4. 人工神经网络的故障诊断法

人工神经网络故障诊断法为电力电子电路的故障诊断提供了一条崭新的技术路线,它具有非线性映射特性、并行处理能力、良好的容错能力以及自学习、自组织和自适应的特点。由于该方法不要求建立明确的故障模型,克服了电力电子系统难以建模的难题而被广泛应用于电力电子系统故障诊断中。但是通常采用的BP(Back-Propagation)神经网络识别法在训练时容易陷入局部最优解,且在结构设计上存在着盲目性。

在三相全桥整流电路的故障诊断中,作者提出了一种人工神经网络诊断新方法^[32]。该方法首先设计出四层前向神经网络故障诊断系统;神经网络输入神经元的个数是根据实际输入样本数而定,神经网络的输出个数是依据电路的故障代码而设定。神经网络的学习是根据三相全桥整流电路的故障状况分类进行训练。输入学习样本是将三相全桥整流电路可能发生的各种故障状态下的输出电压的波形测量或将经过傅里叶变换后的频谱分量分别作为人工神经网络的输入学习样本。当神经网络经过训练或学习后,在输出满足误差要求的条件下,该神经网络便具有故障识别的功能。

将一种含有20个输入节点、12个隐含层节点以及4个输出节点的三层BP神经网络诊断系统应用于解决高压直流输电(HVDC)系统的故障诊断问题^[33]。该方法首先将高压直流输电系统的故障分为16大类,然后对系统进行模拟故障仿真。将系统无故障时的运行数据与各种故障状态下的运行数据作为BP神经网络的学习训练样本。当BP神经网络训练成熟后,其输出就是系统的故障代码。此外,径向基函数(RBF)神经网络也可以用于高压直流输电系统的故障诊断。它与BP神经网络比较,具有收敛速度很快和实时在线故障监测等优点。

根据生物免疫学的原理,将人工神经网络和免疫算法结合起来,形成免疫神经网络。将免疫系统应用于优化选择人工神经网络的隐含层数、确定隐含层到输出层的权值、设计神经网络结构并应用于电力电子整流电路的故障诊断^[34]。它具有较快的故障诊断速度、良好的容错性和强大的自适应能力。

5. 支持向量机故障诊断法

支持向量机(SVM)与人工神经网络算法十分相似,它也可以看作一种学习的机器。支持向量机是以统计学理论为基础的一种预测方法。应用支持向量机故障诊断具有以下优点:

- 1) 可将分类问题转化为一个二次规划寻求全局最优解的问题来处理。
- 2) 可以在有限的样本数据中最大限度地挖掘出隐含在数据中的分类信息。
- 3) 将非线性问题,巧妙地通过非线性变换转化为高维线性空间问题来解决。

目前,有些学者探索性地研究支持向量机在故障诊断中的应用,并已初步地取得了一定

的研究成果。如采用一对一多分类支持向量机对电力电子电路进行故障诊断时,在小样本的情况下可以实现高正确率的故障诊断,它克服了神经网络等方法对小样本诊断的局限性。因此这种一对一多分类支持向量机诊断法在三相桥式整流电路及在其他形式的电力电子电路故障诊断中已得到有效地应用。

将模糊C均值聚类(FCM)、隐马尔可夫模型(HMM)和支持向量机(SVM)相结合是一种电力电子故障诊断新方法^[35]。文献中应用FCM方法对故障信号进行模糊聚类,提取故障特征;根据HMM进行动态过程建模;应用SVM进行模式分类,基于HMM-SVM混合故障诊断模型实现了对机车变流器电路中晶闸管断路故障诊断。仿真诊断结果表明,该方法能准确地对电力电子电路故障元器件进行定位,且诊断精度高,具有很好的实用价值。

应用支持向量机故障诊断法可以产生较为复杂的分类界面,在特征多、类别和结构复杂时仍具有较高的分类精度。但是当分类的特征很多时,支持向量机诊断法的速度就变得缓慢,尤其是在搜索电路参数过程中需要花费大量的时间、占用较多的资源,所以它不适合在线故障诊断的实现。

6. 模式识别法

模式识别法在电力电子电路故障诊断中应用的基本方法是:从待诊断的对象中逐个与标准模式或类型进行比较,从中辨别出与此相同的或相近的对象。应用模式识别法进行故障诊断首先应模拟系统在正常工作时或系统可能发生的各种类型故障,再通过大量的实验和仿真获取电路在相应的状态下输出的波形或参量作为模式识别的标准模式和特征量。然后实时监测系统运行过程中输出的波形或参量,并将它与标准模式和特征值比较,从而可以实时判断出系统所处的工作状态。基于模式识别的电力电子电路故障诊断系统流程图,如图1-3所示。

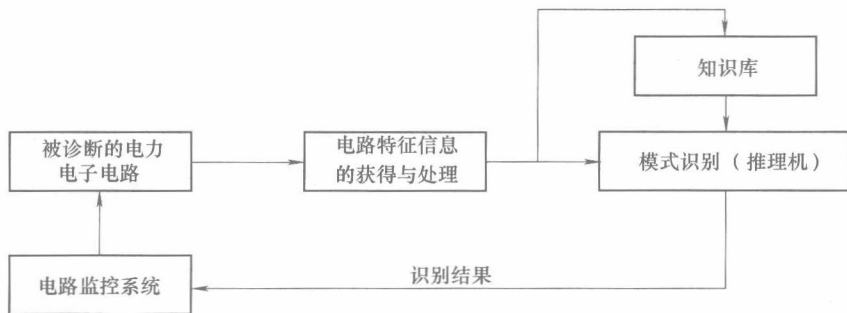


图 1-3 模式识别的电力电子电路故障诊断流程图

将模式识别方法应用到三相晶闸管桥式整流电路的故障诊断在参考文献[36]和参考文献[37]中得到应用。在参考文献[36]中选取触角为 60° 时的三相整流输出电压为特征波形,应用模糊算法分析和提取各种故障状态下的输出特征量,从而形成模式识别规则,实现了三相晶闸管桥式整流电路的故障诊断。而在参考文献[37]中采用软硬件相结合,专门设计一个用于采集和预处理输出电压波形的芯片,它大大减少了系统的软件工作量和诊断系统的结构和体积。

模式识别理论和方法是近些年来在人工智能研究领域中的一个分支,它在故障诊断中的应用略显不足,因此有必要在故障诊断方面加强对模式识别法的应用研究。