

支持向量机 故障诊断及控制技术

ZHICHI XIANGLIANGJI
GUZHANG ZHENDUAN
JI KONGZHI JISHU

胡良谋 曹克强 徐浩军 董新民 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

中国博士后科学基金资助项目

支持向量机故障诊断 及控制技术

胡良谋 曹克强 徐浩军 董新民 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

支持向量机目前在模式识别、辨识建模、故障诊断、智能控制等各个领域得到了广泛的应用。本书主要研究基于支持向量机回归算法的控制系统(包括电液伺服系统和飞行控制系统)辨识建模、故障诊断及智能控制(包括逆模型控制和内模控制)理论和方法,进行了大量的仿真试验研究,并给出了部分典型实例的 MATLAB 仿真程序,便于读者自学和进一步开发。希望本书的出版能促进支持向量机在我国的发展与提高。

本书可作为从事人工智能、系统辨识、故障诊断、智能控制等领域工程技术人员的参考书,同时也可作为人工智能、控制理论与应用、计算机应用、飞行器设计等专业高年级本科生、研究生和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

支持向量机故障诊断及控制技术/胡良谋等著. —北京:国防工业出版社,2011. 11
ISBN 978-7-118-07465-9

I. ①支... II. ①胡... III. ①向量计算机—故障诊断 ②向量计算机—计算机控制 IV. ①TP338

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 124763 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 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15¼ 字数 346 千字

2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

支持向量机(SVM)是由 Vapnik 等人于 20 世纪 90 年代在统计学习理论上提出的一种新的机器学习方法,以 VC 维理论和结构风险最小化原则为基础,能够较好地解决小样本、非线性和高维数等问题。经过十几年的研究,无论是理论研究、算法,还是实现方法,都有了突飞猛进的发展,在模式识别、辨识建模、故障诊断、智能控制、容错控制、预测、信号处理、光谱分析、数据挖掘、医学、经济、社会等各个领域得到了广泛的应用,是一项很有发展前途的技术,具有广阔的应用前景。

在基于支持向量机的控制系统辨识建模、故障诊断及智能控制研究方面,国内近些年来取得了许多研究成果,公开发表的学术论文和硕博学位论文逐年增多,但目前还没有一本专门介绍支持向量机在控制系统的辨识建模、故障诊断及智能控制方面的专著和教材。

作者多年来一直从事支持向量机理论及其应用方面的研究工作,为了促进我国支持向量机技术的发展与提高,作者认为有必要将多年的研究工作进行总结,为读者提供一本从控制系统辨识建模、故障诊断及智能控制方面来介绍支持向量机的书,以期能给相关领域的研究人员提供一些思路和帮助,从而推动我国支持向量机应用的发展。

本书主要研究基于支持向量机回归算法(包括回归型支持向量机、最小二乘支持向量机回归算法等)的控制系统(包括电液伺服系统和飞行控制系统)辨识建模、故障诊断及智能控制(逆模型控制和内模控制)理论和方法,作者进行了大量的仿真试验研究,并给出了部分典型应用实例的 MATLAB 仿真程序,便于读者自学和进一步开发。

本书是在总结作者多年研究成果的基础上,进一步理论化、系统化、规范化、实用化而成的,其特点如下:

(1) 支持向量机算法取材新颖,内容先进,重点置于学科交叉部分的前沿研究和介绍一些有潜力的新思想、新方法和新技术;

(2) 着重从应用领域角度出发,突出理论联系实际,面向广大工程技术人员,具有很强的工程性和实用性;

(3) 书中有大量典型的应用实例,对每个应用实例都有详细的实现步骤及其结果分析,为读者提供了有益的借鉴;

(4) 对部分典型的应用实例给出了完整的基于 MATLAB 7.0 开发的仿真程序,这些程序都可以在线运行,并给出了程序的说明和仿真结果,程序设计力求简单明了,具有很强的可读性,便于读者自学和进一步开发。

由于支持向量机辨识建模、故障诊断、智能控制是正在快速发展的领域,目前仍未建立一套较为完整的理论体系,理论和应用中还存在许多有待解决的问题,且涉及的知识面宽,交叉学科多,应用领域广,支持向量机的研究又日新月异,许多新的复杂现象不断地被

人们认识和发现,因此本书的内容难以全面跟踪这一领域的进展情况,仅基于作者近年来的研究成果,根据作者的认识和体会,论述了运用支持向量机回归算法实现控制系统的辨识建模、故障诊断及智能控制的一般理论和方法,并对部分典型的实例进行了仿真实现,以便为广大读者在从事支持向量机应用研究时提供一些有益的思路,期望起到抛砖引玉的作用。

本书的研究内容得到 2009 年第 46 批中国博士后科学基金一等资助(20090460116)和 2010 年第 3 批中国博士后科学基金特别资助(201003788),在此表示衷心感谢。

感谢为本书的出版给予关心、支持和帮助的人们,并特别感谢国防工业出版社的编辑同志给予的支持与帮助。

在本书的编写过程中,参考或引用了参考文献中所列论著的有关内容,在此谨向这些论著的作者表示由衷的谢意。

由于本书内容涉及学科前沿,推陈出新快,加上作者学识、水平有限,时间仓促,书中难免存在一些不足和错误之处,真诚欢迎广大读者批评指正。若读者有指正或需与作者商讨,或对仿真程序有疑问,请通过电子邮件 huliangm@163.com 与作者联系。

作者

2011 年 3 月于西安空军工程大学工程学院

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 控制系统故障诊断技术概述	4
1.2.1 故障及故障诊断的定义	4
1.2.2 控制系统故障诊断的任务及过程	4
1.2.3 故障诊断方法的分类	4
1.2.4 故障诊断技术的国内外研究现状	13
1.2.5 故障诊断技术的发展趋势	14
1.3 自动控制技术发展概述	15
1.3.1 经典控制理论	15
1.3.2 现代控制理论	16
1.3.3 智能控制理论	16
1.4 统计学习理论与支持向量机的研究及发展现状	23
1.4.1 学习机器的定义及性能指标	23
1.4.2 传统机器学习理论的缺陷	23
1.4.3 统计学习理论的提出	24
1.4.4 支持向量机的发展历史	25
1.4.5 支持向量机的优点	26
1.4.6 支持向量机的应用范围	27
1.5 基于 SVM 的控制系统辨识建模的国内外研究现状	27
1.5.1 国外研究现状	27
1.5.2 国内研究现状	27
1.6 基于 SVM 的故障诊断的国内外研究现状	28
1.6.1 国外研究现状	28
1.6.2 国内研究现状	28
1.7 本书的内容及章节安排	29
参考文献	30
第 2 章 统计学习理论与支持向量机	35
2.1 统计学习理论	35
2.1.1 机器学习问题的描述	35
2.1.2 学习过程的一致性理论	37

2.1.3	VC 维	38
2.1.4	推广性的界	40
2.1.5	结构风险最小化原则	41
2.2	支持向量机基本理论	42
2.2.1	线性可分支持向量机	42
2.2.2	广义线性支持向量机	45
2.2.3	核特征空间的非线性映射算法	46
2.2.4	非线性支持向量机	47
2.3	回归型支持向量机	50
2.3.1	回归问题的数学描述	50
2.3.2	ε 不敏感损失函数	50
2.3.3	线性回归型支持向量机	52
2.3.4	非线性回归型支持向量机	55
2.4	本章小结	57
	参考文献	58
第 3 章	基于 SVR 的控制系统辨识建模	60
3.1	系统辨识建模概述	60
3.1.1	系统建模方法	60
3.1.2	系统辨识的定义	60
3.1.3	系统辨识的分类	61
3.1.4	系统辨识的基本原理	63
3.1.5	传统的系统辨识方法的缺陷	63
3.2	基于支持向量机的控制系统辨识建模理论和方法	64
3.2.1	基于支持向量机的控制系统辨识的任务	64
3.2.2	支持向量机正向辨识建模	65
3.2.3	支持向量机模型的选择	66
3.2.4	辨识信号的选择	69
3.2.5	采样周期的选择	69
3.2.6	基于 SVM 的辨识建模算法	70
3.3	基于 SVR 的开环控制系统辨识建模仿真试验	70
3.3.1	线性系统的辨识建模仿真试验	71
3.3.2	非线性系统的辨识建模仿真试验	72
3.4	基于支持向量机的闭环控制系统辨识建模理论和方法	74
3.4.1	闭环控制系统辨识建模的特点	74
3.4.2	闭环控制系统的经典辨识方法	75
3.4.3	基于 SVM 的闭环控制系统辨识建模的方法	75
3.5	本章小结	76
	参考文献	76

第4章 基于SVR的控制系统故障诊断	78
4.1 基于解析余度的故障诊断理论和方法	78
4.1.1 控制系统故障的数学描述	78
4.1.2 基于解析余度的故障诊断思想	80
4.1.3 基于解析余度的故障诊断步骤	81
4.1.4 故障的可检测性	81
4.2 基于支持向量机的控制系统故障诊断理论及方法	83
4.2.1 基于支持向量机的故障诊断方式	83
4.2.2 基于支持向量机故障诊断的思想及特点	87
4.2.3 基于支持向量机的控制系统故障诊断方法	88
4.2.4 基于支持向量机的控制系统故障诊断算法	90
4.3 基于SVR的开环控制系统故障诊断仿真试验	91
4.3.1 线性系统的故障诊断仿真试验	91
4.3.2 非线性系统的故障诊断仿真试验	93
4.4 基于支持向量机的闭环控制系统故障诊断理论和方法	94
4.4.1 闭环控制系统故障诊断的特点	94
4.4.2 基于支持向量机的闭环控制系统故障诊断策略	95
4.4.3 基于支持向量机的闭环控制系统故障诊断的思想	97
4.5 基于SVR的闭环控制系统故障诊断仿真试验	97
4.5.1 闭环控制系统的仿真参数	97
4.5.2 故障诊断策略	97
4.5.3 SVR 辨识建模	98
4.5.4 SVR 辨识模型的校验	99
4.5.5 传感器恒增益故障的诊断	101
4.5.6 传感器恒偏差故障的诊断	102
4.5.7 传感器卡滞型故障的诊断	103
4.5.8 元件2 恒增益故障的诊断	103
4.5.9 元件2 恒偏差故障的诊断	104
4.5.10 元件2 卡滞型故障的诊断	104
4.5.11 仿真结果分析	105
4.6 本章小结	108
参考文献	108
第5章 电液位置伺服系统故障诊断	110
5.1 电液伺服控制系统概述	110
5.1.1 液压伺服控制系统的定义及工作原理	110
5.1.2 液压伺服控制系统的分类	110
5.1.3 电液伺服控制的发展历史	111

5.1.4	电液伺服控制系统的优缺点	112
5.1.5	液压伺服控制的发展方向	113
5.2	最小二乘支持向量机的回归算法	113
5.3	电液位置伺服系统的数学描述	115
5.3.1	伺服放大器的传递函数	115
5.3.2	电液伺服阀的传递函数	116
5.3.3	阀控液压缸的传递函数	116
5.3.4	位移传感器的传递函数	120
5.4	电液位置伺服系统故障诊断策略	120
5.5	基于 SVR 的电液位置伺服系统故障诊断仿真试验	122
5.5.1	电液位置伺服系统的仿真参数	122
5.5.2	SVR 的辨识建模	122
5.5.3	SVR 辨识模型的校验	123
5.5.4	传感器恒增益故障的诊断	125
5.5.5	传感器恒偏差故障的诊断	126
5.5.6	伺服阀恒增益故障的诊断	126
5.5.7	伺服阀恒偏差故障的诊断	126
5.6	基于 LS-SVM 的电液位置伺服系统故障诊断仿真试验	127
5.6.1	电液位置伺服系统的仿真参数	127
5.6.2	LS-SVM 的辨识建模	127
5.6.3	LS-SVM 辨识模型的校验	128
5.6.4	传感器恒增益故障的诊断	130
5.6.5	传感器恒偏差故障的诊断	130
5.6.6	伺服阀恒增益故障的诊断	131
5.6.7	伺服阀恒偏差故障的诊断	131
5.7	SVR 与 LS-SVM 的仿真试验结果对比分析	132
5.8	本章小结	132
	参考文献	132
第 6 章	液压舵机双闭环系统故障诊断	134
6.1	LS-SVM 的改进算法	135
6.1.1	LS-SVM 的特性	135
6.1.2	加权 LS-SVM 的回归算法	135
6.1.3	稀疏 LS-SVM	137
6.2	液压四余度舵机的结构、工作原理及故障分析	138
6.2.1	某型飞机平尾四余度液压舵机的结构及工作原理	138
6.2.2	某型四余度液压舵机伺服控制系统工作原理	140
6.2.3	某型四余度液压舵机单通道伺服控制系统的典型故障分析	141

6.3	液压舵机数学模型的描述	143
6.4	基于 SVM 的液压舵机故障诊断策略	145
6.5	液压舵机故障诊断仿真试验及结果分析	146
6.5.1	仿真参数	146
6.5.2	液压舵机的加权 LS - SVM 辨识建模	146
6.5.3	液压舵机的加权 LS - SVM 辨识模型的校验	147
6.5.4	外传感器恒增益故障的诊断	149
6.5.5	外传感器恒偏差故障的诊断	150
6.5.6	伺服阀喷嘴堵塞型故障的诊断	151
6.5.7	伺服阀泄漏型故障的诊断	151
6.5.8	内传感器恒增益故障的诊断	152
6.5.9	内传感器恒偏差故障的诊断	153
6.6	本章小结	153
	参考文献	154
第7章	基于 SVM 的飞控系统故障诊断	155
7.1	飞行控制系统故障诊断研究概述	155
7.1.1	飞行控制系统故障诊断的意义	155
7.1.2	飞行控制系统故障诊断技术的发展历程	156
7.1.3	飞行控制系统故障诊断技术的发展方向	156
7.1.4	自修复飞行控制系统研究概述	157
7.2	基于支持向量机的飞控系统传感器故障诊断理论和方法	158
7.2.1	飞控系统传感器故障诊断的意义	158
7.2.2	基于 SVM 的飞控系统传感器故障诊断的理论和方法	159
7.2.3	基于 SVM 的飞控系统传感器的故障诊断策略	161
7.3	仿真试验及结果分析	162
7.3.1	飞控系统的仿真模型	162
7.3.2	基于 LS - SVM 的辨识建模	162
7.3.3	LS - SVM 辨识模型的校验	163
7.3.4	纵向速度传感器恒偏差故障的诊断	168
7.3.5	迎角传感器恒增益故障的诊断	168
7.3.6	俯仰角速度传感器恒增益故障的诊断	169
7.3.7	俯仰角传感器恒增益故障的诊断	169
7.4	本章小结	170
	参考文献	170
第8章	基于 SVM 的直接逆模型控制	172
8.1	逆系统方法和理论	173
8.1.1	逆系统的定义	173

8.1.2	伪线性复合系统	174
8.1.3	逆系统的正则性	175
8.1.4	逆系统方法的基本原理	175
8.1.5	系统可逆性判别	176
8.2	基于 SVM 的控制系统直接逆模型控制理论和方法	177
8.2.1	SISO 系统的直接逆模型控制描述	177
8.2.2	支持向量机 α 阶时延逆系统的辨识建模	177
8.2.3	基于支持向量机的直接逆模型控制	178
8.2.4	基于支持向量机的直接逆模型控制算法	179
8.3	基于 SVM 的控制系统逆模型复合控制理论和方法	181
8.3.1	直接逆模型控制的缺陷	181
8.3.2	直接逆模型控制的改进方法	181
8.3.3	支持向量机逆模型控制 + 输出反馈控制的复合控制	181
8.3.4	支持向量机逆模型控制 + 输出反馈 PID 控制的复合控制	182
8.4	线性系统的直接逆模型控制仿真试验	186
8.4.1	线性系统仿真模型	186
8.4.2	基于 SVR 的线性系统直接逆模型控制	186
8.4.3	基于 LS - SVM 的线性系统直接逆模型控制	189
8.4.4	结论	192
8.5	非线性系统的直接逆模型控制仿真试验	192
8.5.1	非线性系统仿真模型	192
8.5.2	基于 SVR 的非线性系统直接逆模型控制	192
8.5.3	基于 LS - SVM 的非线性系统直接逆模型控制	194
8.5.4	结论	197
8.6	本章小结	197
	参考文献	197
第 9 章	基于 SVM 的内模控制	199
9.1	内模控制原理	200
9.1.1	内模控制系统的基本结构	200
9.1.2	内模控制系统的特性	200
9.1.3	内模控制器的设计	202
9.2	基于支持向量机的内模控制理论与方法	203
9.2.1	基于支持向量机的内模控制的系统结构	203
9.2.2	内部模型的建立	204
9.2.3	逆模型控制器的建立	204
9.2.4	基于支持向量机的内模控制算法	205
9.3	线性系统的内模控制仿真试验	207

9.3.1 线性系统仿真模型	207
9.3.2 基于 SVR 的线性系统内模控制	207
9.3.3 基于 LS - SVM 的线性系统内模控制	210
9.3.4 结论	212
9.4 非线性系统的内模控制仿真试验	212
9.4.1 非线性系统仿真模型	212
9.4.2 基于 SVR 的非线性系统内模控制	212
9.4.3 基于加权 LS - SVM 的非线性系统内模控制	217
9.4.4 结论	222
9.5 本章小结	222
参考文献	222
第 10 章 展望	224
 附录 A 支持向量机工具箱的加载方法	 228
附录 B 光盘程序清单及说明	230
附录 C 中英文术语对照表	231

第1章 绪 论

1.1 研究意义

现代控制系统的自动化程度不断提高,规模日益扩大,复杂程度迅速提高,极大地促进了社会生产和科学技术的不断发展。然而这些巨大的复杂的系统在运行过程中,传感器、执行机构以及系统的内部元件都不可避免地会发生故障。一旦发生故障,如果不能及时被检测、排除,首先将使控制系统的稳定性受到破坏,控制性能显著下降,进而可能导致整个控制系统的失效、瘫痪,引起灾难性后果,造成巨大的经济损失,甚至危及人身安全。例如,1986年1月28日,美国航天飞机“挑战者”号的空中爆炸事件,导致7名宇航员全部遇难,总计损失达12亿美元;1996年6月,欧洲“阿丽亚娜”号运载火箭因导航系统出现故障,致使火箭坠毁,造成数亿美元的巨大损失。据统计,在1990年—2001年间成功发射的卫星、空间站等764个航天器中,总共有121个出现故障,占航天器总数的15.8%,其中制导、导航与控制系统故障有35个,占航天器故障数的28.9%^[1]。因此,对于现代控制系统的可靠性和安全性的要求越来越高,特别是在航天、航空等领域,对系统的可靠性和安全性要求更高。

提高控制系统的可靠性和安全性,目前所采取的措施主要有提高元器件的可靠性、系统的高可靠性设计、基于故障诊断技术的容错设计等。而提高元器件的可靠性有一定的范围,不可能无限制地提高,而且选用高可靠性的元件,不一定就能获得最可靠的控制系统。但在系统故障造成灾难性影响之前,如果通过自动故障检测和容错控制技术尽早检测、分离和容错系统故障,则可有效地提高系统的可靠性和安全性,因此故障检测与诊断(Fault Detection and Diagnosis)和容错控制(Fault-Tolerant Control)技术是解决这一问题的一条有效的新途径。

容错控制技术是在20世纪60年代为发展高性能的飞机和保证航天系统的可靠性而发展起来的。容错控制的概念是1986年9月由美国国家科学基金会和美国电气和电子工程师学会(IEEE)控制系统学会共同在美国 Santa Clara 大学举行的控制界专题讨论会的报告中正式提出的。

所谓容错就是容忍故障的能力。容错控制是指系统对故障的容忍技术,也就是指处于工作状态的系统中一个或多个关键部分发生故障或差错时,系统能自动检测与诊断,并能采取相应的措施保证维持其规定功能或维持其功能在可接受的范围内的技术^[2-6]。

对飞机而言,飞控系统的高可靠性是飞行安全的重要保证。因此,未来先进飞机的飞控系统应该具备较强的容错能力,这样可以提高飞控系统的可靠性和可维护性,降低寿命周期费用,提高飞机的生存性,减轻驾驶员的负担。对飞控系统故障部件,要求容错控制系统能够快速、准确地隔离故障,并采用相应的重构手段保证系统持续、稳定、安全地运行。

在飞控系统中,液压舵机作为执行机构,是飞机电传操纵系统的关键部件之一,也是故障率较高的环节。作为飞机操纵系统的最后一级,它的性能好坏及可靠性的高低直接影响着飞控系统乃至整个飞行器的性能及可靠性。因此,研究液压舵机的容错控制也具有非常重要的意义。

容错控制是一门新兴的综合性边缘学科,它的理论基础涉及系统论、信息论、控制论、信号处理、人工智能、模式识别、故障诊断、工业自动化、计算机工程、数理统计、可靠性等多学科知识和技术。到目前为止,容错控制理论尚在蓬勃发展之中,已成为各国的研究热点课题之一。

容错控制系统一般结构如图 1.1 所示,由传感器、执行器、故障监测系统和容错控制器组成,其中故障监测系统能够对控制系统中的执行器、传感器和被控对象进行实时故障监测,并根据故障特征进行动态补偿或切换故障源;容错控制器则根据故障监测系统所得到的故障特征做出相应的处理,保证系统在故障状态下仍能获得良好的控制效果。

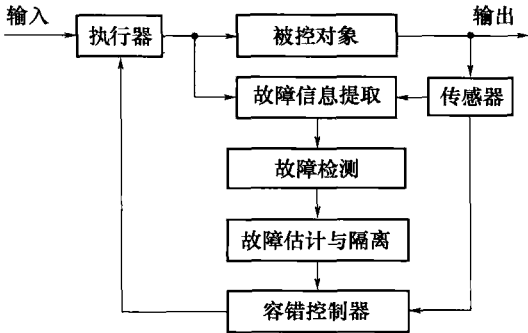


图 1.1 容错控制系统的一般结构图

从容错控制系统的结构图可以看出,控制系统的容错控制与故障诊断有着密切的联系。故障诊断是容错控制的基础和前提,而容错控制的发展为故障诊断研究带来了新的动力。故障诊断的目的是为故障控制提供预警能力,以提高系统可靠性和安全性。因此,故障诊断必须对各种误差和干扰具有很强的鲁棒性,对故障发生时的检测与诊断具有实时性。

解析余度代替硬件余度进行故障诊断与容错控制,为提高控制系统的可靠性提供了新的设计途径。基于解析余度的故障诊断方法的优点是能深入系统本质的动态性质,有利于实现实时诊断,有利于故障的定位和分离,有利于设备的早期故障诊断,如国外针对可重复使用的运载器和国际空间站的最新故障诊断系统大都采用基于解析余度的故障诊断推理技术。

基于解析余度的故障诊断的准确性和精度在很大程度上依赖于所建立的模型,因此建模就成为故障诊断的关键。而对于复杂系统,采用传统的机理建模法难以准确建立系统的数学模型,因此,辨识建模就成为基于解析余度的控制系统故障诊断的核心问题和前提。

随着人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的研究、发展和应用,为基于解析余度的故障诊断问题和系统辨识建模问题拓宽了研究思路,解决了基于常规解析余度的故障

诊断方法难以建立系统模型的困难,弥补了常规故障诊断方法和系统辨识建模方法的不足,显示了非常明显的优越性。

随着科学技术和生产的迅速发展,对大型、复杂和不确定性系统实行自动控制的要求不断提高,使得传统控制理论的局限性日益明显,所面临的难题日益增多,主要表现在以下方面^[7]:

(1) 传统控制系统的设计与分析是建立在精确的系统数学模型基础上的,而实际系统由于存在复杂性、非线性、时变性、不确定性和不完全性等,一般无法获得系统精确的数学模型。

(2) 研究这类系统时,必须提出并遵循一些比较苛刻的假设,而这些假设在应用中往往与实际不相吻合。

(3) 对于某些复杂的和包含不确定性的对象,根本无法以传统的数学模型来表示,即无法解决建模问题。

(4) 为了提高性能,传统控制系统可能变得很复杂,从而增加了设备的初期投资和维修费用,降低了系统的可靠性。

(5) 应用要求进行创新,提出新的控制思想,进行新的集成开发,以解决未知环境中复杂系统的控制问题。

为了解决这些难题,智能控制就是在这一背景下逐步发展起来的,对解决复杂不确定、非线性时变系统的控制提供了有效的方法。智能控制是一种不依赖于被控对象精确数学模型的控制方法,它适合于具有不确定性或高度非线性的控制对象,并具有较强的自适应和自学习能力。目前,智能控制已形成多种方法,其中比较典型的有专家控制、模糊控制和神经网络控制等。

综上所述,以人工智能技术为核心的智能技术大大促进了控制系统辨识建模、故障诊断、容错控制及智能控制理论和技术的发展。如神经网络在这几个领域都已得到了成功的应用,取得了良好的效果。但是,神经网络属于传统机器学习理论。

以神经网络为代表的传统机器学习理论研究的是样本数目趋于无穷大的渐进理论,在假设训练样本数目足够多的前提下进行研究的,这些方法只有当训练样本数目趋于无穷大时其性能才能达到理论上的最优。这就导致传统方法在解决小样本问题中的表现差强人意,因而在实践中推广和应用受到了相当大的挑战。因此传统机器学习理论在样本数目有限时难以取得理想的效果,而且传统机器学习理论具有较多的缺陷,如神经网络理论存在网络结构选择的难题、过学习以及局部极值等问题。

统计学习理论(Statistical Learning Theory)正好为解决以上问题提供了一种新的途径。统计学习理论以结构风险最小化(Structure Risk Minimization, SRM)原则为基础,建立在坚实的理论基础之上,为解决小样本学习问题提供了统一的框架,致力于寻找在小样本情况下学习问题的最优解^[8-14]。

支持向量机(Support Vector Machines, SVM)是由 Vapnik 于 1995 年在统计学习理论基础上提出的一种新的机器学习方法。它以 VC 维理论和结构风险最小化原则为基础,其算法是一个凸二次优化问题,能够保证找到的极值解就是全局最优解,在解决非线性及高维模式识别问题中表现出了许多特有的优势,非常适用于解决小样本问题等。这些特性都使得支持向量机非常适合于控制系统的辨识建模、故障诊断、容错控制及智能控制领

域,是当今辨识建模、故障诊断、容错控制及智能控制的一个非常重要的最新的研究领域。

支持向量机与智能辨识建模、智能故障诊断、智能容错控制及智能控制技术相结合,既是理论对应用的推动,也是应用对理论的需求。它们的有机结合不仅大大拓宽了支持向量机的应用范围,更好地发挥其理论优势,并在应用中发现问题的过程中发展和完善支持向量机理论;而且可以预见其将极大地促进控制系统的智能辨识建模、智能故障诊断、智能容错控制及智能控制技术的发展,从而实现理论与应用的有机结合和相互促进。

1.2 控制系统故障诊断技术概述

1.2.1 故障及故障诊断的定义

对一个控制系统而言,其运行状态可分为正常状态、异常状态和故障状态三种。

故障可以理解为系统中至少有一个重要变量或特性偏离了正常范围,广义地讲,故障可以理解为使系统表现出所不期望的特性的任何异常现象。通常说系统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许范围内。异常是缺陷有了进一步发展,使系统状态发生变化、性能恶化,但仍能维持工作。故障则是缺陷发展到使系统性能和功能都有所丧失的程度。

故障诊断是指利用系统的结构或解析冗余,并综合运用被诊断系统运行中的各种状态信息和已有的各种知识进行信息的综合处理,最终得到关于系统运行状况和故障状况的综合评价,对系统是否正常和是什么原因引起故障、故障的程度有多大等问题进行分析、判断,得出结论的过程^[2-6, 16]。

1.2.2 控制系统故障诊断的任务及过程

控制系统故障诊断的任务,由低级到高级,可分为四个方面的内容^[2]:

(1) 故障建模 按照先验信息和输入/输出关系,建立系统故障的数学模型,作为故障检测与诊断的依据。

(2) 故障检测 从可测或不可测的估计变量中,判断运行的系统是否发生故障,一旦发生意外变化,应发出报警。

(3) 故障的分离与估计 如果系统发生了故障,给出故障源的位置,区别出故障原因是执行器、传感器和被控对象等或者是特大扰动。故障估计是在弄清故障性质的同时,计算故障的程度、大小及故障发生的时间等参数。

(4) 故障的分类、评价与决策 判断故障的严重程度及其对系统的影响和发展趋势,针对不同的工况采取不同的措施。

根据故障诊断的任务,故障诊断的一般过程如图 1.2 所示。

1.2.3 故障诊断方法的分类

故障诊断技术发展至今,其方法多种多样,其分类方法也有多种。根据国际故障诊断权威——德国 Frank 教授的观点^[15],所有的故障诊断方法可划分为基于解析余度的方

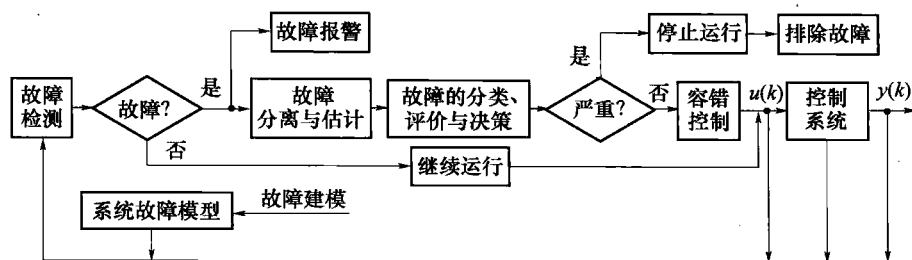


图 1.2 控制系统故障诊断的一般过程

法、基于信号处理的方法及基于知识的方法三种。按照这种分类思路,作者对各种常用的故障诊断方法进行了分类,如图 1.3 所示。

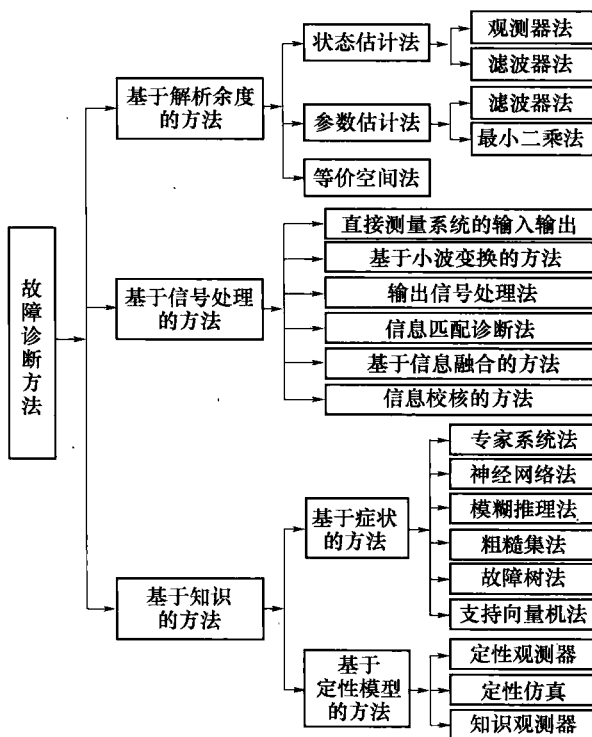


图 1.3 故障诊断方法分类图

1. 基于解析余度的故障诊断方法

对于控制系统而言,最有效、最简单的故障检测方法就是硬件冗余方法。硬件冗余方法就是将几个功能相同的子系统或部件并联在一起完成同一任务,假如并联子系统或部件中有一个子系统或部件发生故障,将不影响系统的正常工作。硬件冗余可使可靠性不太高的子系统或部件组成高可靠性或超高可靠性的系统。但是由于硬件冗余技术完成同一功能需要多个相同的子系统或部件,因此在提高系统可靠性的同时也带来一些不足,如增加了系统的成本、结构、重量、体积和能耗,并且使系统更加复杂。

由于控制系统的复杂性越来越高,随着计算机技术的发展,解析冗余技术逐步取代了