



国防科技图书出版基金

基于支持向量机的 飞机故障诊断技术

Fault Diagnosis of Aircraft Based
on Support Vector Machine

郎荣玲 潘磊 吕永乐 路辉 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

基于支持向量机的飞机 故障诊断技术

Fault Diagnosis of Aircraft Based on
Support Vector Machine

郎荣玲 潘磊 吕永乐 路辉 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

基于支持向量机的飞机故障诊断技术 / 郎荣玲等编
著. —北京:国防工业出版社, 2016. 5

ISBN 978 - 7 - 118 - 10627 - 5

I. ①基... II. ①郎... III. ①飞机 - 故障诊断 IV.
①V267

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 048717 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6½ 字数 180 千字

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)				
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

一方面,飞机是一个复杂的系统,系统的运行过程中会呈现明显的非线性、时变性和不确定性,因此系统的故障存在模糊性、传播性、放射性和相关性等特征,难以精确建模,给基于模型的故障诊断方法带来了挑战。另一方面,飞机在飞行过程中以及维修时产生了大量数据,这些数据中蕴含了飞机的运行机理和状态的信息。如何对这些数据进行科学的分析,为机载设备性能监控、视情维护维修等提供决策依据,对于提高飞机的安全性、可靠性具有重要的意义。利用飞行数据对飞机故障进行诊断的本质就是对飞机性能参数进行分类和预测,而支持向量机在分类和数据的预测领域已经表现出良好的性能。

目前支持向量机的理论研究和实际应用方面都处于蓬勃发展的阶段,作者几年来就支持向量机原理、支持向量机在故障诊断领域的应用、飞机的故障诊断技术等方面做了一些科研工作。本书便是这些工作的基本总结对本书内容提供支撑的研究项目包括“十一五”和“十二五”期间的条件保障项目、预研项目以及“863”项目和自然科学基金项目。理论研究成果已经发表在《电子学报》《航空学报》《北航学报》等学术期刊上,经进一步凝练构成本书的主要内容。本书对支持向量机的理论基础、模型求解、参数确定等问题进行了系统的论述,同时介绍了其在数据驱动的飞机故障诊断领域的应用,并且详细介绍了如何构建一个飞行数据驱动的故障诊断系统。

希望本书能促进支持向量机理论在飞机故障诊断领域的成功应用,推动我国飞机故障诊断领域的发展。

本书共分9章。第1章介绍了飞机的故障预测与健康管理技术的基本知识,并系统介绍了飞机故障诊断与故障预报以及支持向量机技术的发展现状。第2章介绍了支持向量机的基本理论。第3章、第4

章分别系统地介绍了支持向量分类机和支持向量回归机模型的训练、参数的选取等技术。第5章阐述了利用支持向量机处理飞行数据预测中的不确定性处理问题,将支持向量机模型进行了扩展,考虑了训练数据的摄动问题。第6章介绍了飞机的状态监控系统。第7章系统介绍了飞行参数的预处理技术。第8章以航空电子系统和航空发动机为例,系统介绍了支持向量机在飞机故障诊断领域的应用。第9章系统介绍了如何构建一个数据驱动的飞机故障诊断系统。

本书得以出版,我们要感谢中国国防科技图书出版基金的资助。我们还要感谢北京航空航天大学的邓小乐硕士、张景新硕士、梁家城硕士等对本书的编写给予的支持和帮助。

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,欢迎读者批评指正。

编著者

2015年11月20日

目录

第1章 绪论	1
1.1 基于支持向量机的飞机故障诊断方法的意义	1
1.2 PHM 技术应用现状	2
1.2.1 PHM 的功能及结构	2
1.2.2 国外 PHM 技术的应用现状	5
1.2.3 国内 PHM 技术的应用现状	8
1.2.4 PHM 目前存在的问题	11
1.3 故障诊断与故障预报技术研究现状	12
1.3.1 故障诊断技术	12
1.3.2 故障预报技术	14
1.4 支持向量机理论研究现状	19
1.4.1 支持向量机学习算法	19
1.4.2 支持向量机参数选取方法	22
1.4.3 支持向量机模型算法验证	24
第2章 支持向量机简介	26
2.1 支持向量分类机	26
2.1.1 最优分类面	26
2.1.2 核函数	31
2.1.3 多分类支持向量机	32
2.2 支持向量回归机	35
2.2.1 ε -带超平面	35
2.2.2 SVR 模型推广于构造多分类器	39
2.3 支持向量机训练算法	40

第 3 章	支持向量分类模型研究	42
3.1	概述	42
3.1.1	SVC 算法流程	42
3.1.2	待解决的问题	43
3.2	SVC 的 SMO 算法实现	44
3.3	SVC 的参数选取	46
3.3.1	高斯核参数 σ	47
3.3.2	惩罚因子 C	49
3.4	实验分析	51
第 4 章	支持向量回归模型研究	56
4.1	概述	56
4.1.1	SVR 算法流程	56
4.1.2	待解决的问题	57
4.2	SVR 的 SMO 算法实现	58
4.3	SVR 的参数选取	62
4.3.1	高斯核参数 σ	62
4.3.2	惩罚因子 C	64
4.3.3	不敏感损失参数 ε	64
4.4	实验分析	64
第 5 章	基于支持向量机的不确定性问题处理	68
5.1	概述	68
5.2	建模	69
5.3	模型求解	70
5.3.1	对偶问题	70
5.3.2	KKT 条件	72
5.3.3	SMO 算法求解	73
5.4	实验分析	77
5.4.1	算法分析	77
5.4.2	参数分析	78
第 6 章	飞机状态监控系统及其监测指标分析	82
6.1	飞机状态监控系统 (ACMS)	82

6.1.1	ACMS 的组成与功能	82
6.1.2	飞行数据获取方式	84
6.2	机载设备性能指标	91
6.2.1	机载设备工作性能表示	91
6.2.2	航空发动机性能评价指标	95
6.2.3	机体结构性能评价指标	100
6.3	发动机性能指标监测序列的特点分析	106
6.3.1	综合分析	106
6.3.2	平稳性分析	109
6.3.3	趋势性分析	111
第7章	飞行数据预处理	115
7.1	概述	115
7.1.1	异常值辨识方法	115
7.1.2	噪声去除方法	116
7.2	异常值辨识与剔除	117
7.2.1	不含趋势项监测序列的异常值辨识与 剔除算法	117
7.2.2	含趋势项监测序列的异常值辨识与剔除算法	120
7.3	基于奇异值分解的滤波消噪方法	123
第8章	支持向量机应用分析	132
8.1	概述	132
8.2	航空电子设备故障诊断	133
8.2.1	实验1 标准滤波电路	134
8.2.2	实验2 线性中放电路	137
8.2.3	规则提取验证	140
8.3	航空发动机故障预报	141
8.3.1	性能参数预测	141
8.3.2	寿命监控与异常检测	147
第9章	飞行数据驱动的健康管理系统	154
9.1	系统设计	154
9.1.1	功能设计	154

9.1.2	总体结构	155
9.2	维护系统设计.....	157
9.2.1	功能和结构	157
9.2.2	数据库设计	158
9.3	故障诊断系统设计.....	168
9.3.1	功能和结构	168
9.3.2	推理诊断功能模块的设计	169
9.3.3	自学习功能模块的设计	171
9.4	故障预测系统设计.....	177
9.4.1	功能和结构	177
9.4.2	自回归滑动平均模型	178
参考文献.....		187

Contents

Chapter 1	Intruduction	1
1.1	The significance of the diagnosis method based on SVM	1
1.2	The present situation of PHM application	2
1.2.1	The functions and structure of PHM	2
1.2.2	The overseas present situation of PHM application	5
1.2.3	The present situation of PHM application in China	8
1.2.4	The present engineering roadblock of PHM	11
1.3	The present situation of fault diagnosis and prognosis	12
1.3.1	The thechnique of fault diagnosis	12
1.3.2	The thechnique of fault prognosis	14
1.4	The present situation of support vector machine theory	19
1.4.1	The training algorithms of support vector machine	19
1.4.2	Selecting the parameters of support vector machine	22
1.4.3	Testing support vector machine	24
Chapter 2	Intruduction of support vector machine	26
2.1	Support vector machine for classification	26
2.1.1	Optimal classification hyperplane	26

2.1.2	Kernal function	31
2.1.3	Support vector machine for multi-classification	32
2.2	Support vector machine for regression	35
2.2.1	ε -hyperplane	35
2.2.2	SVR used for multi-classification	39
2.3	The algorithms for training support vector machine	40
Chapter 3	Support vector machine for classification	42
3.1	Overview	42
3.1.1	The flow of training SVC	42
3.1.2	The problem needed to be settled	43
3.2	The SMO algorithm for training SVC	44
3.3	Selecting the parameters of SVC	46
3.3.1	Gaussian kernal parameter σ	47
3.3.2	Penalty factor C	49
3.4	Experimental analysis	51
Chapter 4	Support vector machine for regression	56
4.1	Overview	56
4.1.1	The flow of training SVR	56
4.1.2	The problems needed to be settled	57
4.2	The SMO algorithm for training SVR	58
4.3	Selecting the parameters of SVR	62
4.3.1	Gaussian kernal parameter σ	62
4.3.2	Penalty factor C	64
4.3.3	Insensitive loss factor ε	64
4.4	Experimental analysis	64
Chapter 5	Dealing with the uncertainty based on SVM	68
5.1	Overview	68
5.2	Modeling	69

5.3	Model solution	70
5.3.1	Dual problem	70
5.3.2	KKT conditions	72
5.3.3	Training based on SMO algorithm	73
5.4	Experimental analysis	77
5.4.1	Algorithm analysis	77
5.4.2	Parameters analysis	78
Chapter 6	Aircraft Condition Monitoring System	82
6.1	ACMS	82
6.1.1	The functions and structure of ACMS	82
6.1.2	Access of flight data	84
6.2	Performance index of airborne equipment	91
6.2.1	Expression of airborne equipment working performance	91
6.2.2	Performance evaluation index of aeroengine	95
6.2.3	Performance evaluation index of airfram	100
6.3	Characteristic analysis of performance index of aeroengine	106
6.3.1	Comperhensive analysis	106
6.3.2	Stability analysis	109
6.3.3	Tendency analysis	111
Chapter 7	Pretrement of flight data	115
7.1	Overview	115
7.1.1	The methods for identifing abnormal value	115
7.1.2	The methods for removing noise	116
7.2	Identifing and elimating the abnormal value	117
7.2.1	The algorithm for the series without trend term ..	117
7.2.2	The algorithm for series with trend term	120
7.3	The method for removing noise based on sigalar value	

decomposition	123
Chapter 8 Application analysis of support vector machine	132
8.1 Overview	132
8.2 Fault diagnosis of avionics system	133
8.2.1 Experiment 1 the circuit of basic filter	134
8.2.2 Experiment 2 the circuit of linear IF	137
8.2.3 Testing the rules extracting from SVM	140
8.3 Fault prognosis of aeroengine	141
8.3.1 Forcasting the performance index	141
8.3.2 Service life supervision and abnormality detection	147
Chapter 9 Flight data driven PHM system	154
9.1 System design	154
9.1.1 Function design	154
9.1.2 Architectural structure	155
9.2 Maintenace system	157
9.2.1 Functions and structure	157
9.2.2 Data base design	158
9.3 Fault diagnosis system design	168
9.3.1 Functions and structure	168
9.3.2 Function modul block of fault diagnosis design ..	169
9.3.3 Function modul block of self-learning	171
9.4 Fault prognosis system design	177
9.4.1 Functions and structure	177
9.4.2 Autoregressive moving-average model (ARMA)	178
References	187

1.1 基于支持向量机的飞机故障诊断方法的意义

21 世纪,随着高科技的不断注入,现代飞机的高集成化、高智能化以及分析处理问题的高效化日益增强,随之而来的飞机的安全性、可靠性、经济性和维修保障等问题日益突出,但是传统的定期维修方式不但耗费资源,而且效率低、经济性差,因此迫切需要探索一种以“可靠性”为中心,兼顾“预防为主”和“战备完好性”的科学维修保障体制。20 世纪90 年代,美国针对军用飞机提出了故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)的概念,并迅速引入民用领域。PHM 是综合利用现代信息技术、人工智能技术的最新研究成果而提出的一种全新的健康管理技术,具备故障诊断、故障预测、健康管理和部件寿命追踪等能力,改变了传统的事后状态检查和故障诊断的做法。故障诊断与故障预测作为 PHM 的核心技术,得到了前所未有的关注。

故障诊断和预测以航空装备当前的使用状态为起点,结合已知的结构特性、功能参数、工作条件及运行历史数据(包括各部件状态监测记录,曾发生过的故障及修复记录),利用算法对历史数据进行预测分析,以判断未来一段时间内设备运行是否会出现故障,如果经过判断有可能出现故障,则发出故障警报,以便及时对故障进行诊断,确定可能发生的故障模式,并给出合理的预防和维修策略,避免故障扩大和传播。

飞机的安全性关系着人的生命,因此不可能让其带着故障运行,而且有些故障的发生往往带有突然性,一般不可重复。一方面,由于目前