



国防科技图书出版基金

Time Series Analysis
Methods and Application
for Flight Data

飞行数据的 时间序列分析方法及其应用

张建业 张鹏 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

飞行数据的时间序列 分析方法及其应用

**Time Series Analysis Methods
and Application for Flight Data**

张建业 张鹏 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

飞行数据的时间序列分析方法及其应用 / 张建业,
张鹏著. —北京: 国防工业出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-118-08926-4

I. ①飞… II. ①张… ②张… III. ①飞行数据-时
间序列分析 IV. ①V323

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 146769 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 250 千字

2013 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 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 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镛 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

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 陆 军 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

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

前 言

现代飞机在日常飞行、维护保障过程中产生的飞行数据是一种典型的时间序列,通过飞行参数记录系统自动记录保存。这些数据蕴涵着飞机设备的各种工作状态以及性能变化趋势,日积月累形成的海量数据是重要的客观机载证据源。海量飞行数据不但能够为维护决策提供依据,而且更为重要的是,利用这些信息还可以对系统工作状态进行预测,做到防患于未然。因此,如何充分有效地发挥飞行数据作用,以便为视情维修、质量控制、飞行安全评估与事故取证等提供基本依据,吸引着广大科研工作者持续不断进行广泛而深入的研究。

随着现代科技的飞速发展,我们已跨入信息时代,数据过剩和知识匮乏的矛盾日渐突出。如何从这些海量数据中挖掘有用信息,再将信息转化为知识、应用于实践,是一项极富挑战性的时代课题,因此数据挖掘等众多新兴学科专业应运而生。本书针对海量飞行数据具有典型时间序列的特点,采用理论与实践相结合的方法,严谨通俗地阐述了进行飞行数据分析的基本目标、方法步骤与实现技术,涉及控制理论、检测技术、信息处理等学科的前沿理论,特别是在飞行数据挖掘领域进行了探索性尝试。本书成果是作者及所在课题组十余年来从事飞行数据科学研究和应用实践的凝炼与总结。

全书共分为6章。第1章,介绍了本书的研究背景,对飞行参数记录系统的基本概念、发展演化及其军事应用进行了较为详实的概括和总结;第2章,介绍了飞行数据相关预处理方法,为后续章节实现飞行数据的智能化挖掘处理提供必要的可靠信源和理论支撑;第3章,介绍典型时间序列分析 ARMA 模型在飞行数据中的应用和实现技术;第4章,给出飞行数据相似性搜索的具体实现方法,并进行了较为前沿的理论探索;第5章,重点论述基于飞行数据的二次开发与高级利用,借助多种挖掘技术和方法实现飞机、发动机及设备的状态监控、故障诊断和趋势预测;第6章,介绍了基于飞行数据的智能挖掘系统的设计方案和实践应用。

在本书编写过程中,空军工程大学航空航天工程学院李学仁院长、倪世宏教授,西北工业大学自动化学院潘泉院长给予悉心的指导与帮助,在此深表谢意!

西北工业大学博士后梁建海在搜索、预测算法研究中有重要贡献,空军工程大学航空航天工程学院宋吉学、刘博宁、王占磊等研究生参与了部分文字的撰写与校稿工作。同时向所列参考文献的作者们表示感谢!

由于作者水平有限,难免存在疏漏之处,敬请广大读者和专家批评指正。

作者

2013年8月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 飞行参数记录系统	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 发展演化	2
1.1.3 军事领域应用	9
1.2 面向飞行数据的应用研究	9
1.2.1 基本概念	9
1.2.2 研究现状	9
1.3 本书研究范畴与主要内容	13
第 2 章 飞行数据预处理	15
2.1 基于支持度的飞行数据遗忘记忆融合滤波方法	15
2.1.1 飞行数据统一误差模型	15
2.1.2 基于支持度的遗忘记忆融合滤波算法	16
2.1.3 应用实例与结论	20
2.2 基于综合加权优化的飞行数据空缺值填充方法	24
2.2.1 基于混合算法的改进神经网络模型	24
2.2.2 基于最小二乘法的多项式拟合模型	24
2.2.3 空缺值综合加权填充方法	26
2.2.4 仿真分析与结论	27
2.3 基于虚拟传感器技术的飞行数据扩展方法	28
2.3.1 虚拟传感器技术概述	28
2.3.2 基于发动机模型的虚拟飞行数据扩展	28
2.3.3 基于 BP 网络的虚拟飞行数据扩展	30
2.4 基于自扩充遗传算法的可监控特征参数选择方法	33
2.4.1 特征选择与遗传算法	33
2.4.2 自扩充遗传算法	35
2.4.3 实例验证与评估	37
2.5 飞行数据的混沌特性分析	39
2.5.1 混沌序列相空间重构的数学描述	39

2.5.2	混沌特性分析验证	43
第3章	飞行数据的典型时序分析	51
3.1	ARMA 模型分析基础	51
3.1.1	数学模型	51
3.1.2	建模过程	52
3.1.3	模型参数估计	55
3.1.4	模型适用性检验	57
3.1.5	最佳预测	57
3.2	基于 AR 模型的参数监控方法	58
3.2.1	飞机稳定工作状态的描述	59
3.2.2	基于规则推理机的监控参数提取	60
3.2.3	基于 AR 模型的均值—极差监控方法	62
3.2.4	实例分析与效果评估	63
第4章	飞行数据相似性搜索	68
4.1	时间序列相似性分析方法	68
4.1.1	概述	68
4.1.2	时间序列降维方法	69
4.1.3	时间序列相似性度量方法	78
4.2	基于斜率距离的时间序列相似性搜索方法	85
4.2.1	时间序列的斜率集表示	85
4.2.2	时间序列的斜率距离	86
4.2.3	基于斜率距离的飞行数据聚类验证	87
4.3	基于角度距离的时间序列相似性搜索方法	88
4.3.1	时间序列的角度描述方法	89
4.3.2	时间序列的角度距离及相似性搜索算法	90
4.3.3	基于角度距离的飞行数据聚类验证	92
4.4	基于曲率距离的时间序列相似性搜索方法	94
4.4.1	数据预处理	94
4.4.2	曲率集表示	95
4.4.3	曲率距离及相似性搜索算法	96
4.4.4	基于曲率距离的飞行数据聚类验证	98
4.5	变步长曲线分箱多元序列相似性搜索方法	103
4.5.1	分段线性化表示	103
4.5.2	变步长索引标识	103
4.5.3	变步长分箱相似性搜索算法	104
4.5.4	基于变步长曲线分箱多元飞行数据聚类验证	106

4.6	基于关联矩阵 QR 分解的多元序列相似性搜索方法	110
4.6.1	多元时间序列的矩阵及图形表示	110
4.6.2	多元时间序列的关联表示	111
4.6.3	多元时间序列的 QR 距离	112
4.6.4	基于关联矩阵 QR 分解的飞行数据聚类验证	114
第 5 章	面向飞行数据的状态监控与趋势预测	117
5.1	基于变栅格技术的飞机设备状态监控方法	117
5.1.1	高维数据聚类方法	117
5.1.2	基于密度的聚类算法	119
5.1.3	变栅格收缩聚类算法	120
5.1.4	飞行设备状态收缩聚类监控实例	126
5.2	基于专家系统的突变性故障诊断方法	130
5.2.1	专家系统理论	130
5.2.2	飞机设备故障诊断专家系统功能	133
5.2.3	系统具体实现及效果评价	135
5.3	基于动态主元分析的渐变性故障诊断方法	137
5.3.1	主元分析法	137
5.3.2	动态主元分析法	138
5.3.3	基于动态主元分析的故障诊断算法	139
5.3.4	故障诊断仿真验证	140
5.4	基于加权最小二乘支持向量机的发动机状态参数预测	143
5.4.1	支持向量机的基本理论	143
5.4.2	加权最小二乘支持向量机算法	147
5.4.3	加权最小二乘支持向量机参数预测模型	150
5.4.4	应用实例	152
5.5	基于混沌序列的发动机状态参数预测	160
5.5.1	混沌及混沌序列	160
5.5.2	预测模型	161
5.5.3	模型应用	162
第 6 章	飞行数据挖掘原型系统的设计与实现	166
6.1	数据挖掘系统	166
6.2	飞行数据仓库建模	168
6.2.1	飞行数据的特殊性质	168
6.2.2	飞行数据挖掘的目标	168
6.2.3	飞行数据仓库建模	169
6.3	原型系统的设计与开发	170

6.3.1	总体设计	170
6.3.2	系统数据流程.....	171
6.3.3	系统工作流程.....	172
6.3.4	系统主要功能.....	172
6.4	小结	178
参考文献	179

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Flight Data Recorder System	1
1.1.1 Overview	1
1.1.2 Development History	2
1.1.3 Military Applications	9
1.2 Application Research for Flight Data	9
1.2.1 Basic Concept	9
1.2.2 Research Status	9
1.3 Research Domain and Main Content	13
Chapter 2 Preprocessing for Flight Data	15
2.1 Amnesic Multi-sensor Fusion Algorithm for Flight Data Series Based on Support Degree	15
2.1.1 Unified Error Model for Flight Data	15
2.1.2 Amnesic Multi-sensor Fusion Algorithm Based on Support Degree	16
2.1.3 Case Study and Conclusion	20
2.2 Synthetical Filter Arithmetic of Filling Null Values for Flight Data	24
2.2.1 Modified Artificial Neural Networks Model	24
2.2.2 Polynomial Fitting Model Based on Least Square Algorithm	24
2.2.3 Synthetical Filling Method for Null Values	26
2.2.4 Experimental Evaluation and Conclusion	27
2.3 Flight Data Extension Method Based on Virtual Sensors	28
2.3.1 Overview of Virtual Sensors Technology	28
2.3.2 Virtual Flight Data Extension Method Based on Aeroengine Mathematical Model	28
2.3.3 Virtual Flight Data Extension Method Based on BP Neuralnetworks	30
2.4 Self-expanded Genetic Arithmetic for Feature Selection in Flight Data Capacity Monitor	33
2.4.1 Relations Between Feature Selection and Genetic Arithmetic	33

2.4.2	Self-expanded Genetic Arithmetic	35
2.4.3	Case Study and Assessment	37
2.5	Chaotic Characteristic Analysis for Flight Data	39
2.5.1	Mathematic Description for Chaotic Time Series of Reconstructing Phase Space	39
2.5.2	Chaotic Characteristic Analysis and Validation	43
Chapter 3	Typical Time Series Analysis for Flight Data	51
3.1	Theory of ARMA Model	51
3.1.1	Mathematical Model	51
3.1.2	Modeling Process	52
3.1.3	Estimation of Model Parameters	55
3.1.4	Testing Criterion of Model Fitting	57
3.1.5	Optimum Prediction	57
3.2	Trend of Parameters Monitoring Method Based on AR Model	58
3.2.1	Descriptions for Steady-state Situation of Airplane	59
3.2.2	Extraction of Monitoring Parameters Based on Rule Reasoning Machine	60
3.2.3	Monitoring Method of Mean-value and Range Based on AR Model	62
3.2.4	Case Study and Effect Assessment	63
Chapter 4	Similarity Search for Flight Data	68
4.1	Similarity Search Analysis Method	68
4.1.1	Overview	68
4.1.2	Dimensionality Reduction Methods	69
4.1.3	Similarity Measurement Methods	78
4.2	Similarity Search Method in Time Series Based on Slope Distance	85
4.2.1	Representation of Slope Set for Time Series	85
4.2.2	Slope Distance Measurement for Time Series	86
4.2.3	Verification on Clustering of Flight Data Based on Slope Distance	87
4.3	Similarity Search Method in Time Series Based on Included Angle Distance	88
4.3.1	Representation of Included Angle Set for Time Series	89
4.3.2	Included Angle Distance Measurement for Time Series	90
4.3.3	Verification on Clustering of Flight Data Based on Included Angle Distance	92
4.4	Similarity Search Method in Time Series Based on Curvature Distance	94

4.4.1	Data Preprocessing	94
4.4.2	Representation of Curvature Set for Time Series	95
4.4.3	Curvature Distance Measurement for Time Series	96
4.4.4	Verification on Clustering of Flight Data Based on Curvature Distance	98
4.5	Multivariate Flight Data Similarity Search Method Including Changing Step to Set Data in Different Bin	103
4.5.1	Piecewise Linear Representation for Time Series	103
4.5.2	Indexing Tag Based on Changing Step to Set	103
4.5.3	Similarity Search Method Including Changing Step to Set Data in Different Bin	104
4.5.4	Verification on Clustering of Multivariate Flight Data Based on Similarity Search Method Including Changing Step to Set Data in Different Bin	106
4.6	Multivariate Flight Data Similarity Search Method Based on QR-Decomposition of Correlation Coefficient Matrix	110
4.6.1	Representation of Matrix and Plot for Multivariate Time Series	110
4.6.2	Representation of Correlative Matrix for Multivariate Time Series	111
4.6.3	QR-Distance Measurement for Multivariate Time Series	112
4.6.4	Verification on Clustering of Multivariate Flight Data Based on QR-Distance	114
Chapter 5	Condition Monitoring and Trend Prediction Based on Flight Data	117
5.1	Clustering Method Based on Flexible Size Grid for Airplane Equipment	117
5.1.1	Clustering Methods of Multivariate Series	117
5.1.2	Clustering Method Based on Density Function	119
5.1.3	Shrinking-clustering Method Based on Flexible Size Grid	120
5.1.4	Monitoring Examples	126
5.2	Mutability Fault Diagnosis Arithmetic Based on Expert System	130
5.2.1	Theory of Expert System	130
5.2.2	Main Functions About Fault Diagnosis System Based on Expert System	133
5.2.3	Implementation and Evaluation	135
5.3	Gradual Fault Diagnosis Arithmetic Based on Dynamic Principle Component Analysis	137
5.3.1	Overview of Principle Component Analysis	137

5.3.2	Dynamic Principle Component Analysis Method	138
5.3.3	Fault Diagnosis Arithmeticbased on Dynamic Principle Component Analysis	139
5.3.4	Experimental Evaluation	140
5.4	Aeroengine Parameters Prediction Based on the Weighted least Square Support Vector Machine	143
5.4.1	Basic Theory of Support Vector Machine	143
5.4.2	The Weighted Least Square Support Vector Machine Arithmetic	147
5.4.3	Prediction Model	150
5.4.4	Case Study and Conclusion	152
5.5	Aeroengine Parameters Prediction Based on the View of Chaotic Time Series	160
5.5.1	Chaotic Time Series	160
5.5.2	Prediction Model	161
5.5.3	Case Study and Conclusion	162
Chapter 6	Design and Implementation of Flight Data Mining System	166
6.1	Data Mining System	166
6.2	Data Warehouse Modeling	168
6.2.1	Special Characteristics of Flight Data	168
6.2.2	Mining Goal of Flight Data	168
6.2.3	Data Warehouse Modeling for Flight Data	169
6.3	Design and Implementation Process	170
6.3.1	General Design	170
6.3.2	Data Flow	171
6.3.3	Working Process	172
6.3.4	Main Functions	172
6.4	Conclusion	178
References		179

第 1 章 绪 论

本章概要介绍了飞行参数记录系统的基本概念和发展进程,是全书内容的主要背景。同时,着重介绍了国内外在飞行品质和飞机性能评估、离线和在线设备状态监控、事故处理等方面开展飞行数据应用研究的现状与发展。在此基础上,针对飞行数据这一类典型的时间序列,给出了全书的研究范畴和主要内容。

1.1 飞行参数记录系统

1.1.1 概述

飞行参数记录系统(Flight Data Recorder System, FDRS, 以下简称“飞参系统”)用于采集、记录飞机及其子系统的工作状态参数,通过信息处理系统可为飞机故障诊断及预测、辅助飞行训练、飞行事故处理等提供客观、科学的依据。本书中,将飞参系统采集记录的飞机及其子系统的工作状态参数亦称作飞行数据。

现在,一般意义上的飞参系统包括输入数据源、飞行数据获取组件(Flight Data Acquisition Unit, FDAU)、飞行数据记录器(Fight Data Recorder, FDR)以及快速存取记录器(Quick Access Recorder, QAR),其原理结构如图 1.1 所示。

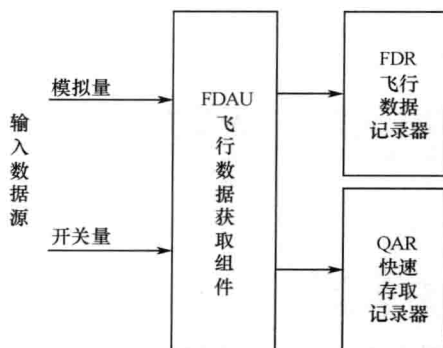


图 1.1 飞参系统原理框图

GJB 2692—1996 中对飞行数据记录器的定义为:飞行数据记录器是“记录飞行状态、操纵状态和飞机/直升机、发动机有关信息的机载自动记录装置”。