

 国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

工程与材料科学系列
S F C



航空发动机故障 诊断导论

范作民 孙春林 白杰 著



科学出版社

87.8586
330

 国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



航空发动机故障 诊断导论

范作民 ~~孙春林~~ 白杰 著

科学出版社

内 容 简 介

本书是关于基于数学模型(故障方程)的航空燃气涡轮发动机故障诊断理论的一本专著,是国家自然科学基金资助项目“航空发动机故障诊断分析系统”(编号59876046)的主要成果之一。

全书包括15章和4个附录。论述发动机故障方程(包括小偏差故障方程和经验故障方程)的建立方法;介绍故障诊断理论所需的数学基础,包括最优估计和最优化算法以及线性统计模型理论;介绍发动机故障诊断理论,主要是本书作者提出的发动机故障诊断的主因子模型,包括主因子模型的基本原理、故障相关性准则理论以及超定和亚定主因子模型的各种求解算法;讨论多重共线性的影响及其克服方法;介绍发动机故障诊断的有效性评估。

本书可作为高等院校飞行器动力工程和航空维修工程专业专业的研究生和本本科生的教材,也可作为相关专业教师、本科生和研究生以及从事发动机状态监控与故障诊断工作的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机故障诊断导论/范作民,孙春林,白杰著. —北京:科学出版社,2004
ISBN 7-03-013317-X

I. 航… I. ①范… ②孙… ③白… II. 航空发动机-故障诊断 IV. V263.6
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 038830 号

责任编辑:刘剑波 吴伶俐 / 责任校对:钟 洋

责任印制:吕春珉 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2004年7月第一次印刷 印张:26 3/4

印数:1—1500 字数:598 700

定价:66.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

· 工 · 程 · 与 · 材 · 料 · 科 · 学 · 系 · 列 ·



国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助

前 言

本书是关于基于数学模型(故障方程)的航空燃气涡轮发动机故障诊断理论的一本专著,是国家自然科学基金资助项目“航空发动机故障诊断分析系统”(编号:59876046)的主要成果之一。

从 20 世纪 60 年代开始,随着喷气式客机复杂程度和制造成本的提高以及航空运输业的迅速发展,飞行延误和航班取消方面的经济影响以及投入维修的人力和材料开支的增加等问题日趋严重,从而对发动机的研制和使用提出了许多新的研究课题,其中一个重要课题就是发动机状态监控与故障诊断。所谓发动机状态监控与故障诊断,是指借助于一定的有效方式对与发动机各部件工作状态紧密相关的各种参数实施监测,根据所监测的数据对各部件工作状态的发展趋势做出有价值的判断,即对所发生的故障做出诊断结论或预报即将发生的故障,及时提出维修的具体技术内容,达到保证飞行安全、提高维修经济效益的目的。发动机状态监控与故障诊断的重要意义在于:一方面,它可以迅速而准确地确定故障部位及故障严重程度,有利于确保飞行安全以及减少投入维修的人力、物力,缩短飞行器的停飞时间,提高飞行器的利用率;另一方面,它又是实现先进的维修思想(从经验型的“以预防为主”的维修思想转向“以可靠性为中心”的维修思想)和维修方式(从单纯的定时维修方式转向定时维修、视情维修和状态监控三种方式)的必要手段与前提条件。

作者从 20 世纪 80 年代末期开始从事燃气涡轮发动机故障诊断理论的研究(指基于故障方程的故障诊断理论,下同),发现现有故障诊断理论存在三个方面的不足:首先,现有理论在实用上存在较大的局限性(对测量参数数量要求过高,并且多重共线性影响较大);其次,现有文献存在很多不妥甚至错误的观点;再者,现有理论不够系统、完整。本书作者十几年来在上述几个方面做了大量工作,取得了有益的进展,基本上形成了发动机故障诊断的一个比较系统而完善的理论体系(参看参考文献[1~22])。本书就是这些工作的总结。

本书的主要内容如下:

(1) 给出了一种新型的发动机故障诊断理论,即发动机故障诊断的主因子模型。这一理论的特点是:① 它很好地解决了有限信息(测量参数数目 m 少于故障模式数目 n)情况下的故障诊断难题,包括超定故障诊断问题(同时发生的故障模式个数 $FN < m$)和亚定故障诊断问题($FN \geq m$);② 主因子模型本身就是克服多重共线性影响最强有力的手段。

(2) 给出了建立故障相关性准则(这是主因子模型的最重要和最困难的问题)的通用途径,并且找到了几个理想的故障相关性准则。

(3) 全面和细致地探讨了多重共线性影响及其克服方法。

(4) 给出了发动机故障诊断的有效性评估体系,并且对主因子模型的诊断有效性进行评估。

(5) 给出了建立故障方程的完整理论,包括故障方程的故障因子理论和等方差化理论以及经验故障方程理论。

本书包括 15 章和 4 个附录。

第 1 章为概论,简要介绍了发动机故障诊断的有关情况。

第 2 章介绍故障方程的建立理论。这是发动机故障诊断两大组成部分(故障方程的建立和故障方程的求解)的第一部分。这一问题在一般文献中介绍得都不够深入,而且存在不少似是而非的观点。作者对这一问题进行了系统而深入的探讨,给出了故障方程的故障因子理论和等方差化理论。本章还对近代回归分析与发动机故障诊断之间的不同特点给予了独到和详尽的分析,并且论证了一般回归分析中对带截距项模型常常采用的中心化方法不能用于发动机故障诊断所用的过原点模型。这些问题都非常重要,也比较难于理解或比较容易被忽视,但是一般文献中却很少介绍。本章内容基本上是作者自己的工作,是作者的主要研究成果之一。

第 3 章介绍由作者提出的发动机故障诊断的主因子模型的一般原理,包括主因子模型的三个中心环节:主因子原则(组合优化原理)、最优化算法和故障隔离技术,特别是故障相关性准则的识别性、一致性和选优性(以及定阶性)概念以及作为克服多重共线性影响的主要措施之一的基解和通解的概念。本书以后各章的主要内容都是紧密结合本章这些内容展开讨论的。本章最后还对现有各种故障诊断算法做了综合评述。本章内容是本书作者关于发动机故障诊断理论的主要研究成果的概述。

第 4 章介绍线性统计模型理论和最优估计理论,这些知识是发动机故障诊断理论的数学基础。本章内容基本取材于现有文献,但是本书作者进行了全面的整理和加工,并且密切结合发动机故障诊断问题,特别是主因子模型进行讲解。至于本章中给出的变记忆约束滤波算法以及关于最小二乘估计的复相似系数(估计向量与测量向量之间的夹角余弦)为最大的证明都是作者自己的研究成果。应当指出,第 3 章和第 4 章的次序是完全可以互换的,即完全可以首先阅读(或讲授)第 4 章,然后再阅读(或讲授)第 3 章。对于第 3 章和第 4 章的次序安排,作者曾经反复考虑过,现在这样安排的优点是前 3 章实际上包括了本书的全部基本内容,并且在以后讨论各种故障诊断问题时可以紧密地与主因子模型结合在一起。其缺点是对最优估计理论(如最小二乘法)不太熟悉的读者可能有些困难,不过这一缺点是次要的。

第 5 章介绍线性统计模型的统计假设检验与区间估计,这些知识是建立主因子模型故障相关性准则的基础。本章内容基本取材于有关文献,但是将数理统计中的假设检验准则用于发动机故障诊断是作者自己的工作。

第 6 章介绍随机模拟方法在发动机故障诊断理论中的应用(包括故障诊断算法和故障诊断有效性评估两个方面)。故障诊断的有效性评估是一个相当重要而又难以实现的问题。依靠发动机实际故障进行有效性考核的方法具有很大局限性,因为发动机故障实际上很少发生,并且发动机实际故障情况的复杂性未必完全符合故障诊断理论所适用的范围。利用随机模拟方法进行故障诊断算法的有效性评估虽然不能完全代替发动机故障诊断的实际考核,但是“不能完全代替”的部分主要是理论模型的假设是否符合实际情况的问题,而在其他很多问题上完全可以给出具有重要参考意义的评价结果。例如,各种故障诊断算法在理论上的正确性、各种故障诊断算法有效性的比较以及各种故障相关性准则之间的比较等。在这些方面,随机模拟方法的优点是显然的。故障诊断有效性评估的难点是故障诊断有效性指标的确定,作者提出的相似度指标和平均最大相似度指标较好地解决了这个问题,并且在此基础

上对主因子模型的故障诊断有效性进行了评估。所给出的方法不仅可以确定出故障诊断的各种数学模型的最优方案(如最优故障诊断算法和最优故障相关性准则的确定等)以及故障诊断结果的有效性评价,而且还是寻求各种问题最优解答的一种通用的手段。例如,对于最优故障相关性准则问题,对于不同的故障诊断算法或不同的故障方程(如不同的发动机或不同工作状态),最优准则的具体形式可能有所不同。利用本书所给出的有效性评估方法可以根据具体情况确定准则的最优形式。本章内容基本属于作者自己的工作(并且是主要工作成果之一)。

第7章介绍故障方程的多重共线性对故障诊断结果的影响及其克服方法。这部分内容也是本书作者的主要工作之一。对于发动机故障诊断的主因子模型来说,这一问题就其重要性及其难度来说,是仅次于故障相关性准则确定问题的第二个重要问题。但是一般文献特别是发动机故障诊断方面的文献对此问题涉及较少。作者总结出克服多重共线性影响的三大措施,即最优变量子集方法、约束最优化方法和有偏估计与降维算法。作者认为,最优变量子集方法是克服多重共线性影响的最有效的方法,除约束最优化方法的某种功能无法替代外,其他方法的功能基本上都可以利用最优变量子集方法来解决。约束最优化方法在一定条件下是很好的削弱多重共线性影响的一种算法,并且它的某种效能是其他方法包括最优变量子集方法所无法代替的。利用约束最优化方法削弱多重共线性影响是本书作者的重要工作,一般文献很少提到。至于有偏估计与降维算法,其中主成分估计只是在处理形式上具有简便的优点,而岭回归则是约束最优化方法的一个特例,这也是本书作者所发现的。本章的一部分内容虽然引用了近代回归分析的成果,但是作者也结合发动机故障诊断问题进行了分析整理。

第8章讨论超定主因子模型的故障相关性准则。这是主因子模型的最关键和最难以解决的问题。本章提出的关于故障相关性准则的三个层次(识别性、一致性和选优性)的要求、通过 Monte Carlo 方法寻找最优一致性准则的通用途径,在此基础上找到的一致性准则和选优性准则以及对于主因子模型所做的有效性评估是本书作者最重要的成果之一。这些成果使超定主因子模型建立在坚实严谨的理论基础之上,并且确定了超定主因子模型具有足够满意的诊断有效性。在本章中还特别详细和深入地指出了近代回归分析的最优变量子集问题与发动机故障诊断中故障相关性准则问题的区别。本章最后还对近代回归分析中常用的最优变量子集准则的有效性进行了分析比较,这也是一般文献较少涉及的。本章内容除最后介绍的近代回归分析的最优变量子集准则外,都属于作者自己的工作。

第9章全面而系统地介绍了多元统计分析中的主成分分析在发动机故障诊断理论中的应用,主要是在克服多重共线性影响方面的应用。这也是作者的主要工作之一。在主成分估计算法中,作者提出的利用故障相关性准则选取最优主成分个数的概念解决了主成分分析理论中主成分个数选择的难题。本章内容除主成分分析的基本概念取材于多元统计分析文献外,都是作者自己的工作。

第10章和第11章分别讨论故障诊断的超定主因子模型和亚定主因子模型,它们是主因子模型的两个组成部分。第10章给出超定主因子模型的各种算法,包括各类超定方程算法[最优估计算法、约束最小风险算法、Monte Carlo 法、有偏估计算法(主成分估计与岭回归)]和各类等定方程算法(各类 p 阶方阵法和各类 m 阶方阵法)。其中各类超定方程算法实

际上是前面各章内容的一个简要汇总。各类等定方程算法是前面各章所未介绍过的一些特殊算法,但是这一类算法都不是理想的算法。从主因子模型的角度上说,除经典散度法外,上述所有算法都是作者自己的工作。

第 11 章的重点是介绍作者提出的亚定主因子模型的两个重要算法:分布函数模型和随机搜索模型。这两个模型的提出将主因子模型的应用范围扩展到亚定(故障模式个数大于测量参数个数)故障诊断问题领域,并且可以得到相当满意的结果。其中分布函数模型可以概括现有文献中的两类亚定方程算法(准逆法和二次规划法),即后两者可以分别看成是前者的一个特例。

第 12 章介绍发动机故障诊断的多信息综合技术,包括样本群代表性样本的提取,测量数据的平滑(特别是指出了算术平滑和指数平滑与约束滤波算法之间的关系)以及多状态监控等问题。本章内容除算术平滑和指数平滑的基本算法外,都是作者自己的工作。

第 13 章讨论发动机经验故障方程理论,包括故障特征的提取、利用样本群建立经验故障方程以及经验故障方程求解特点等。这一章内容基本上都是作者自己的工作。所给出的经验故障方程理论以及利用相似度准则(两向量之间的夹角余弦)选择最优解的方法特别适用于(当然并不限于)分类故障诊断问题。作者认为,一般说来,相似度法(或与它等价的距离准则法)是最简单和最有效的分类诊断算法。但是在发动机故障诊断文献中(不包括多元统计分析)一般很少提到相似度准则或距离准则,这是很奇怪的。不过,很多人工神经网络模型,如 Kohonen 模型和 ART 模型都是利用距离指标作为被诊断样本彼此接近程度的判据的。这从一个侧面支持了本书作者的看法。

第 14 章介绍人工神经网络在发动机故障诊断上的应用。除 BP 网络和 Kohonen 网络两个模型的基本原理取材于现有文献外,其他都是作者自己的工作。特别是:对于 BP 网络,提出了利用 F 因子改善迭代过程收敛特性的方法;对于 Kohonen 网络,分析了自组织映射模型在提取样本群代表性样本方面的特点。

第 15 章介绍第二类一致性准则的定义及其特性。这是本书作者最近得到的一个重要结果。

附录 I 给出了书中用到的各种重要原始数据和重要计算结果的数据表。附录 II 与附录 III 分别给出了书中所用到的有关矩阵代数和数理统计方面的重要公式和引理。附录 IV 对“发动机故障诊断分析系统”软件(EFDAS)的基本内容做了简单介绍。EFDAS 是本书内容所用到的各种计算机程序的一个汇总,并且利用由 Visual Basic 语言编制的界面加以连接。EFDAS 可以作为发动机故障诊断专家系统的开发工具。事实上,它可以直接作为发动机故障诊断专家系统的一部分,而其中的部分程序可以直接作为发动机故障诊断的实用程序。这一软件还可以作为发动机故障诊断课程的教学软件,利用 EFDAS 可以很方便地复现书中所有计算结果以及验证书中给出的各种有关结论。

本书的特点如下:

(1) 材料的新颖性和先进性。本书的主要内容(包括全书的体系,故障方程的建立,发动机故障诊断的主因子模型及其各种具体求解算法,多重共线性对故障方程求解的影响及其克服方法,发动机故障诊断有效性评估以及绝大部分的计算实例)都是作者自己的工作。这些内容都是故障诊断理论的重要问题而一般文献较少触及或未能很好解决的。书中的部分

内容用到了最优估计理论和多元统计分析等学科的有关内容。对于这些内容,本书作者也针对本书的研究对象做了大量的分析与整理工作,特别是对近代回归分析与发动机故障诊断之间的不同特点给予了独到和详尽的分析。

(2) 理论与实际密切结合。书中介绍的内容具有足够的理论深度和理论上的严谨性,并且所给出的主要结果都具有实用价值。这些主要结果的可信性和有效性都通过典型的故障实例进行了验证。书中对于每一种重要的理论或算法都给出详尽分析和计算实例,以便于应用。

(3) 强调掌握基本概念和对问题的分析观点。作者不赞成不加分析地对待文献中的各种理论、观点和算法。实际上,现有文献中的不少材料是不够成熟的。有些算法实际上只是同一种基本方法的不同表现形式或变形形式,还有不少算法既缺乏理论根据又被实践表明是不可靠的。另外,还有一些理论和算法存在着概念性的错误。简单地罗列文献上各种各样的理论和算法不利于读者很好地掌握发动机故障诊断理论,更不利于培养独立分析与解决问题的能力。众所周知:“方法比知识更重要”,“授人以‘鱼’,一日之餐;授人以‘渔’,一生之需”。本书的写作风格是授人以“渔”而不是“鱼”。一个最能说明问题的例子就是一致性准则的确定。本书不仅仅是简单地给出几个所谓的最优的一致性准则,而且着重指出应当怎样定义以及如何寻找这种最优准则。对于不同的研究对象,未必存在一个通用的最优一致性准则,但是只要掌握了最优一致性准则的基本概念以及确定它的基本方法,就不难根据具体对象找到所需的最优准则。本书紧密围绕发动机故障诊断的主因子模型(它反映了发动机故障诊断理论的最新进展)进行讨论,系统地说明了这一理论的产生背景、理论根据、详细算法、应用和功能以及这一理论与其他算法的比较等问题,从而可以使读者全面而系统地提高解决发动机故障诊断问题以及一般实际工程问题的能力与技巧。当故障诊断问题的具体对象有所不同时(如对不同种类和型号的发动机或不同的运行条件等),书中给出的某些具体数据或结论可能不再适用,但是所给出的方法是可以参考的。

阅读本书的读者最好具有矩阵代数以及数理统计方面的基本知识。

书中对于所引用的文献资料都尽可能给予注明,但未必能够做到详尽无遗。疏漏之处,还请有关学者谅解。

由于作者水平有限,书中错误在所难免,希望读者批评指正。作者对于读者的批评意见将给予足够的重视。

符号说明

拉丁字母

A	故障方程的故障系数矩阵(影响系数矩阵);线性模型的设计矩阵;量测方程的量测矩阵
a	故障系数向量(影响系数向量)
B	等方差化故障系数矩阵
b	等方差化故障系数向量
C	一致性准则;一致度准则
C	主成分向量($=K^T$);对应于等方差化和标准化主成分故障方程的主成分故障系数矩阵
C_p	C_p 准则
CC	第二类一致性准则
CCC	选优性准则
D	散度
d	无量纲散度
e	测量误差向量
F	F -统计量
FCC	故障相关性准则
F_α	F -分布之 α 水平分位数
FN	故障数
H	对应于等方差化和标准化故障方程的故障系数矩阵
H	帽子矩阵[$=A(A^T A)^{-1}A^T$ 或 $B(B^T B)^{-1}B^T$]
I	单位矩阵
K	主成分向量
K	测量次数
L	向量长度(欧氏范数)
$L=\text{diag}(L_1, L_2, \dots, L_p)$	
$M=I-H=I-B(B^T B)^{-1}B^T$	
M	线性模型的方程总数($=mK$);主因子组合的总数
$MSEM$	均方误差阵
MSE	均方误差
m	征兆量向量的维数,即对应于单次测量的故障方程个数

n	故障方程(全模型)中的故障因子总数
P	估计误差的均方误差阵 $[=E(\hat{x}\hat{x}^T)]$
p	主因子方程(选模型)中的主因子个数;线性模型中的参数个数(不包括常数项)
Q	对应于原始测量参数的主成分故障方程的故障系数矩阵 $[=(A^T A)^{-1}$ 或 $(B^T B)^{-1}]$
q	主因子方程中的故障因子总数;分布函数模型中的分布因子
q_m	通过压气机的空气质量流量
q_f	燃油流量
R	测量误差方差阵 $[=E(ee^T)]$;复相似系数
R^n	n 维实空间
R^*	最优加权矩阵的逆矩阵 $(=\lambda^{-2}R)$
RMS	平均残差平方和准则
RSS	残差平方和
r	相似系数(相似度,夹角余弦)
$S=A^T A$ 或 $B^T B$	
S	相似系数(相似度,夹角余弦);修正样本标准差
S^2	修正样本方差;方差的无偏估计量 $[RSS/(m-t)]$
SSC	子集显著性准则
SSR	回归平方和
$SSRJ$	偏回归平方和
TSS	总(偏差)平方和
t	线性模型中的变量总数(对于过原点模型有 $t=p$,对于带截距模型有 $t=p+1$)
VIF	方差扩大因子
VSC	变量显著性准则
W	权矩阵
w	权参数
x	故障因子向量或故障因子偏差向量
y	测量参数向量或测量参数偏差向量
z	等方差化测量参数向量

希腊字母

α	对应于原始测量参数的主成分故障方程的故障因子向量
α	显著性水平(误判风险)
β	对应于等方差化和标准化主成分故障方程的故障因子向量
β	一致性准则中的惩罚因子
δ	相对误差($\delta\bigcirc=\Delta\bigcirc/\bigcirc$);Kronecker 符号
Δ	偏差
ϵ	最优加权(等方差化)测量误差向量

η	发动机部件效率
θ	对应于等方差化和标准化故障方程的故障因子向量
θ	约束最优化方法中的惩罚因子
λ	标准差比, 由 $R = \lambda^2 R^*$ 定义; 主成分贡献率
μ	均值
σ	测量误差的标准差或样本标准差
σ^*	测量误差的基准标准差(基准样本标准差)
σ^2	测量误差的方差或样本方差
ϕ	一致性准则的修正因子
χ^2	χ^2 -分布
ω	相对残差模($\omega^2 = RSS / TSS = 1 - R^2$)

上标或上修饰符

$^\circ$	参考状态; 中心化
$*$	基准值
T	矩阵转置
$\sim$	第一类故障因子(用于第 2 章); 估计误差(用于第 2 章外的各章)
$\cdots$	第二类故障因子
$-$	工作点位移; 平均值; 代表性向量
$-(p)$	单纯性工作点位移
$-(f)$	故障性工作点位移
	估计值

下 标

a	空气
B	燃烧室
C	压气机
E	尾喷口
f	燃料
g	燃气
T	涡轮
LS	最小二乘估计
OLS	普通最小二乘估计
WLS	加权最小二乘估计

算子和函数

cov	协方差(对于随机向量用黑体, 对于随机变量用白体)
-----	---------------------------

D	方差(对于随机向量用黑体,对于随机变量用白体)
d	微分
det	行列式
diag	对角线矩阵
E	数学期望(对于随机向量用黑体,对于随机变量用白体)
N	正态分布
P	概率
p	概率密度
R 或 rank	矩阵的秩
tr	方阵的迹
var	方差(对于随机向量用黑体,对于随机变量用白体)

缩 写

BLEED	放气
EFF	效率
EGT	发动机排气温度
FAN	风扇
FF	燃油流量
FCC	故障相关性准则
FN	故障数
HPC	高压压气机
HPT	高压涡轮
LPC	低压压气机
LPT	低压涡轮
N1	低压转子转速
N2	高压转子转速

其 他 符 号

$\ \circ\ $	范数(模)
$ \circ $	行列式或绝对值
$(\circ,\circ)$	内积

目 录

前 言

符号说明

第 1 章 概论	1
1.1 发动机故障诊断学的发展	1
1.2 发动机故障诊断学的研究对象与主要任务	1
1.3 发动机故障诊断系统	2
1.4 发动机故障诊断的基本原理	4
1.5 发动机性能参数的录取	5
1.6 发动机故障诊断的基本假设、复杂性和有效性.....	6
1.7 发动机故障诊断的基本步骤	8
第 2 章 故障方程	10
2.1 发动机的原始数学模型(正常状态数学模型).....	10
2.1.1 发动机的部件特性	10
2.1.2 单轴纯涡轮喷气发动机的原始数学模型(正常状态数学模型)	12
2.1.3 原始数学模型的封闭性(完整性)	14
2.1.4 原始数学模型的简略写法	14
2.2 发动机的故障模型.....	15
2.2.1 发动机故障状态的特点.....	15
2.2.2 故障因子	15
2.2.3 状态量的工作点位移与特性线平移	17
2.2.4 发动机故障模型的建立.....	18
2.2.5 发动机故障模型的求解条件	24
2.3 故障因子.....	27
2.3.1 故障因子的意义	27
2.3.2 状态量的工作点位移与特性线平移	27
2.3.3 第一类故障因子(特性线平移)	28
2.3.4 第二类故障因子(故障分量)	29
2.3.5 故障因子的特性	30
2.4 有关故障方程的基本概念.....	36
2.4.1 线性模型	36
2.4.2 故障方程	36
2.4.3 故障系数(影响系数,小偏差系数)	37
2.4.4 故障方程的建立与求解条件	39

2.4.5 征兆量的选择	39
2.4.6 故障方程的分类与建立方法	39
2.5 数值线性化方法建立第一类故障方程	40
2.6 数值线性化方法建立第二类故障方程	44
2.7 解析线性化方法建立故障方程	46
2.8 典型的故障系数表	47
2.9 故障方程的线性统计模型(量测方程)	48
2.9.1 线性统计模型的基本概念	48
2.9.2 线性统计模型的矩阵形式	49
2.9.3 线性统计模型的最小二乘估计	49
2.9.4 线性回归模型	50
2.9.5 回归模型的中心化	51
2.9.6 故障方程的线性统计模型	54
2.9.7 故障方程的等方差化	55
2.9.8 故障方程的标准化	57
第3章 主因子模型概论	59
3.1 概述	59
3.1.1 基于数学模型的故障诊断的难点	59
3.1.2 故障诊断算法的分类	59
3.2 基本概念	60
3.3 主因子模型的基本原理	69
3.3.1 主因子模型的三个中心环节	69
3.3.2 主因子模型的特点	69
3.4 主因子模型的主因子原则	70
3.4.1 主因子原则的意义	70
3.4.2 主因子个数的选择原则	71
3.5 主因子模型的最优化方法	71
3.5.1 最优化方法的内容	71
3.5.2 最优化方法的分类	72
3.5.3 几点说明	73
3.6 主因子模型的故障隔离技术	74
3.6.1 基本内容	74
3.6.2 两类故障隔离准则	74
3.7 故障相关性准则	74
3.7.1 基本概念	74
3.7.2 对故障相关性准则的要求	77
3.7.3 故障相关性准则的识别性	79
3.7.4 故障相关性准则的一致性	80

3.7.5	故障相关性准则的选优性与定性	81
3.7.6	两个重要的故障相关性准则	82
3.7.7	故障相关性准则的应用特点	83
3.8	合理性准则	84
3.9	基本解和通解的确定	86
3.9.1	基本解的确定	86
3.9.2	利用主因子模型选择基本解	86
3.9.3	利用特征值分析方法选择基本解	87
3.9.4	通解的确定	87
3.10	故障隔离的基本步骤	89
3.11	主因子模型的计算例题	89
3.12	关于现有故障诊断算法的评述	93
3.12.1	Urban 方法(影响系数矩阵法)	93
3.12.2	诊断矩阵法(Дубравский 方法)	94
3.12.3	最优估计算法	101
3.12.4	其他一次性算法	104
3.12.5	现有的组合搜索算法	105
3.12.6	对发动机故障诊断常规算法的评价	105
第4章	最优估计与最优化方法	107
4.1	概述	107
4.1.1	估计与估计对象	107
4.1.2	估计质量的评价准则	107
4.1.3	估计准则与最优估计	109
4.1.4	估计问题的分类	109
4.2	最小二乘估计	109
4.2.1	普通最小二乘估计	109
4.2.2	最小二乘估计的性质	113
4.2.3	带截距项线性模型的特点	124
4.3	加权最小二乘估计	125
4.3.1	普通加权最小二乘估计	125
4.3.2	最优加权最小二乘估计(Markov 估计)	127
4.4	递推最小二乘估计	130
4.4.1	概述	130
4.4.2	变记忆约束滤波	130
4.4.3	讨论	134
4.5	极大似然估计	136
4.5.1	极大似然估计	136
4.5.2	正态线性模型的极大似然估计	136

4.6	Bayes 估计原理	137
4.7	极大验后估计	139
4.8	最小方差估计	140
4.8.1	最小方差估计的概念和性质	140
4.8.2	线性最小方差估计	141
4.8.3	线性最小方差估计的递推算法	144
4.9	Kalman 滤波	145
4.10	约束最优化方法	150
4.10.1	概述	150
4.10.2	约束最优化问题的罚函数法	150
4.10.3	求解故障方程的约束最小二乘法	153
4.10.4	等式约束条件下的最小二乘估计	155
4.10.5	约束最优化方法的应用	155
4.11	变记忆约束滤波	156
第 5 章	统计假设检验与区间估计	159
5.1	统计假设和假设检验	159
5.2	线性模型线性假设的显著性检验	162
5.2.1	线性假设显著性检验的一般形式	162
5.2.2	方程显著性检验	164
5.2.3	变量显著性检验	167
5.2.4	两种检验之间的关系	168
5.3	参数的区间估计	172
5.3.1	置信区间与置信度	172
5.3.2	正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 均值 μ 的区间估计	172
5.4	线性模型的区间预测	174
5.4.1	问题的提出	174
5.4.2	正态线性模型的区间预测	174
5.4.3	一元线性模型的区间预测	176
第 6 章	Monte Carlo 方法在发动机故障诊断中的应用	178
6.1	Monte Carlo 方法	178
6.1.1	Monte Carlo 方法的基本思想	178
6.1.2	随机数与伪随机数	178
6.1.3	随机数的统计检验	180
6.1.4	从已知分布实现随机抽样	180
6.1.5	Monte Carlo 方法应用举例	181
6.1.6	Monte Carlo 方法在发动机故障诊断中的应用	181
6.2	发动机故障诊断的 Monte Carlo 法	181
6.3	发动机故障诊断的有效性评估	184