

机械系统设计初期的 可靠性模糊预计与分配

Fuzzy Prediction and Allocation Technique
for Mechanical System Reliability
in Early Design Stage

赵德孜 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

机械系统设计初期的 可靠性模糊预计与分配

**Fuzzy Prediction and Allocation
Techniques for Mechanical System
Reliability in ~~Early~~ Design Stage**

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

机械系统设计初期的可靠性模糊预计与分配 / 赵德
孜著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 5

ISBN 978-7-118-07015-6

I. ①机... II. ①赵... III. ①机械设计: 可靠性设计
—研究 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 155898 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$ 字数 166 千字

2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(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

系统可靠性预计与分配是系统可靠性设计的重要任务之一,而且前者是后者的基础。基于可靠性设计的基本原则,国军标 GJB 450—88 要求系统的可靠性预计与分配应从系统的设计初期开始实施,而且应随着设计进程的发展而多次进行。换句话说,系统可靠性预计与分配应贯穿于整个设计过程,而且系统设计初期的可靠性预计与分配对系统可靠性有着十分重要的影响。现代机械系统有许多是机电一体化的复杂系统,它们具有失效模式种类多、零部件标准化程度差和寿命分布不同等特点,设计初期的可靠性数据往往缺乏,且可靠性的影响因素比较模糊,从而导致了可靠性信息的模糊性,尤其是新型产品和特种设备。这时,基于传统数学的可靠性预计与分配方法难以得出较合理的决策结果,进而对系统的固有可靠性产生不良影响。因此,这个问题是机械系统可靠性设计理论中的一个重要课题。由于机械系统设计初期的可靠性信息模糊因素较多,尤其是新型的复杂机械系统,这也正是常规机械系统可靠性设计最为薄弱之处。

产生上述问题的关键是设计初期机械系统的可靠性预计与分配有许多模糊的不确定性。这一方面是源于机械系统中的磨损、腐蚀及蠕变等失效形式所导致的故障,其中间过渡过程大多呈现的是“亦此亦彼”的模糊状态;另一方面是缺乏必要的或可信的可靠性数据来确定随机变量的分布概率。这时,经验就成为数据收集的一个重要来源,而经验是人类认知客观世界的产物,本身也具有模糊性。因此,传统可靠性设计理论从本质上讲无法解决或不可能较好地解决这类问题。模糊数学能提供确切描述模糊对象的

方法,从而与精确数学、随机数学形成互补。这也是模糊数学理论及其应用能够在短短不到 40 多年的时间内得以迅速发展的主要原因。因此,模糊数学理论应用于机械系统的可靠性预计与分配,既是客观实践的需要,也是模糊数学可应用性的必然,它的发展必将使可靠性设计理论得到进一步的发展。

目前国外有关机械系统设计初期的可靠性模糊预计与分配的学术论文很少,国内的相对多些,但专门系统论述这一领域的著作还没有。本书是在作者 10 多年来研究工作的基础上撰写而成的一本学术专著,主要从实际工程背景出发,以作为复杂机械系统的航空发动机为具体研究对象,针对机械系统设计初期可靠性的特点,对其模糊预计与分配的技术进行了较为深入的研究。本书的研究思路是将模糊综合评判、模糊推理和模糊故障树分析等理论应用于机械系统设计初期的可靠性模糊预计与分配,主要研究内容包括两个方面:一是相关基本理论的研究;二是这些理论研究成果在机械系统可靠性预计与分配中的应用研究。

全书共分为 7 章,其主要内容要点如下(图 1):

第 1 章是机械系统可靠性设计的概述,着重介绍机械系统可靠性的特点、常规的机械系统可靠性预计与分配技术的发展概述,以及机械系统可靠性模糊预计与分配技术的发展概述。

第 2 章简要介绍模糊数学中与本书研究内容有关的基本概念与理论。主要的有模糊数学的基本理论、常规的模糊综合评判模型、Vague 集合论和模糊推理系统等。这些内容是阅读本书必备的基础知识。

第 3 章简要介绍与本书研究内容有关的系统可靠性设计的基本概念与理论。主要有可靠性概念、基本可靠性参数及其分类,基本可靠性模型,系统可靠性预计与分配的目的、基本原则和常用的方法等。这些内容也是阅读本书必备的基础知识。

第 4 章是相关基本理论的研究,主要是对评价集设置、因素赋权和单因素评判等模糊综合评判理论的关键问题,以及模糊综合评判模型进行了系统、深入的研究。在此基础上,给出了三种新的

主观型模糊综合评判模型:

(1) 基于模糊数的模糊综合评判模型(FSAFN 模型),它在一定程度上改进了现有模型。

(2) 基于模糊语言变量的模糊综合评判模型(FSALV 模型),它是前一种模型的进一步发展,在缺乏决策信息的情况下能更好地利用专家经验来进行模糊综合评判,从而可以得到更为合理的评判结果。

(3) 基于 Vague 集的模糊综合评判模型(VSA 模型),它不仅具有上述两种模型的优点,而且符合人的直觉。

第 5 章论述机械系统可靠性模糊预计。本章应用第 4 章所建立的模糊综合评判模型以及模糊推理、模糊故障树分析等理论,给出了三种机械系统设计初期的可靠性模糊预计方法:

(1) 分别基于 FSAFN 模型、FSALV 模型和 VSA 模型的可靠性模糊预计方法,它们的主要特点是用上述模糊综合评判模型来评价系统单元的可靠性,然后根据系统可靠性模型来预计系统可靠性。

(2) 基于上述模糊综合评判模型和模糊推理系统的可靠性模糊预计方法,其思路是应用上述模糊综合评判模型评价各单元的可靠性设计水平和制造水平,然后由模糊推理系统根据评判结果推出单元可靠性的预计值。

(3) 基于上述模糊综合评判模型和改进的模糊故障树分析技术的可靠性模糊预计方法,其中上述模糊综合评判模型用于确定基本事件的模糊数,该方法不仅可以预计机械系统的基本可靠性及使用可靠性,而且可以预计人机系统的可靠性。

第 6 章论述机械系统可靠性模糊分配。该章运用第 4 章所建立的模糊综合评判模型以及第 5 章提出的可靠性模糊预计方法,给出了三种机械系统设计初期的可靠性模糊分配方法:

(1) 串联机械系统的可靠性模糊分配方法,即先用上述模糊综合评判模型评定系统各单元之间的相对失效系数,然后

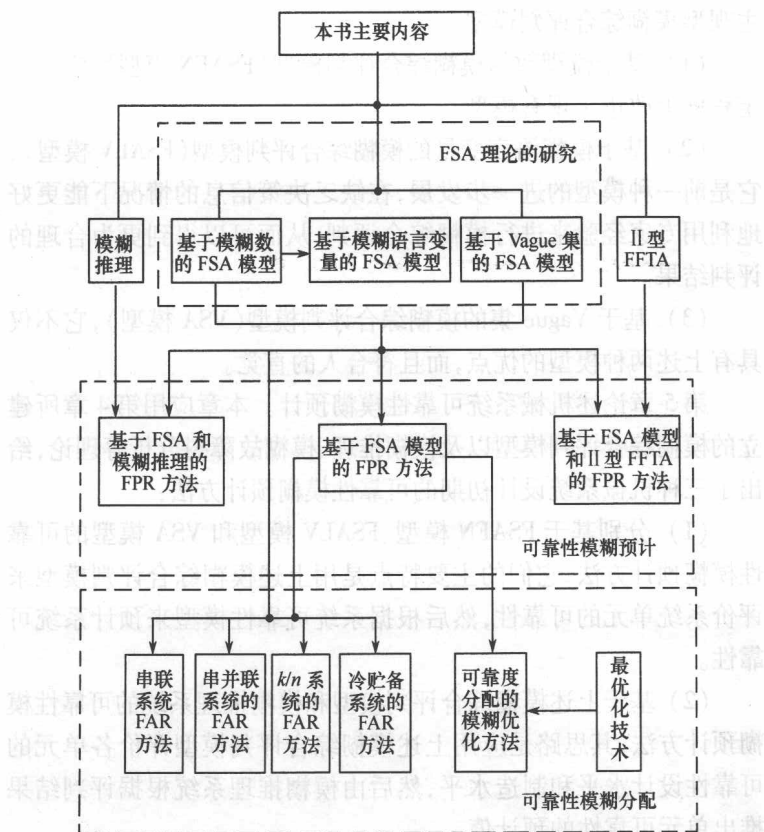


图1 本书主要内容的基本概况

根据相对失效系数,运用线性分配的原则来分配系统的可靠性指标。

(2) 冗余机械系统的可靠性模糊分配方法,适用于混联、 k/n 和冷储备等冗余系统的可靠性模糊分配方法,其特点是根据单元可靠度的模糊预计值、比例组合分配法的思想和重要度的概念,用数值方法近似地分配系统的可靠度指标。

(3) 基于可靠性模糊预计的机械系统可靠性模糊优化分配方法,该方法综合运用可靠性模糊预计与优化技术进行可靠度模

糊优化分配。

第7章是全书的总结以及对机械系统设计初期的可靠性模糊预计与分配技术研究的展望。

本书在撰写过程中得到了南京航空航天大学温卫东教授、高德平教授以及海军航空工程学院青岛分院段成美教授的悉心指导和大力帮助,在此一并表示衷心的感谢。

总的来讲,机械系统设计初期的可靠性模糊预计与分配技术的研究仍处于起步、发展阶段,本书如能起到抛砖引玉的作用,作者将会感到十分的欣慰。鉴于作者学识、水平所限,加之书中绝大多数内容属于个人学术见解,难免会存在许多有待完善及改进之处,恳请广大学者、读者斧正。

海军航空工程学院青岛分院教授、博士

赵德孜

2010年3月

主要符号说明

$A, B, C, \dots$	普通集合
$\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \dots$	模糊集合, 模糊数
$\tilde{A}(\cdot), \tilde{B}(\cdot), \dots$	隶属函数, 隶属度
$\tilde{A}_\lambda$ 或 $\tilde{A}^{(\lambda)}$	模糊集 $\tilde{A}$ 的 λ 截集
$\tilde{A}^c$	模糊集 $\tilde{A}$ 的补(余)
$\hat{A}$	Vague 集合
$D(\cdot)$	满意度函数
$EMV(\cdot)$	平均期望评价
$EV(\cdot)$	期望评价
$f(t)$	故障密度函数
$F(t)$	累积故障概率
$F(X)$	X 的模糊幂集
$f: U \rightarrow V$	映射
$u \mapsto f(u)$	
$\text{hgt}(\tilde{A})$	模糊集 $\tilde{A}$ 的高度
$\text{Ker}(\tilde{A})$	模糊集 $\tilde{A}$ 的核
R	实数域, 可靠度
R^+	非负实数域
$\tilde{R}$	模糊关系, 模糊矩阵

$\hat{R}$	Vague 关系, Vague 矩阵
$\text{Supp}(\tilde{A})$	模糊集 $\tilde{A}$ 的支集
$t_A(x), f_A(x)$	Vague 集 $\hat{A}$ 的真隶属函数、假隶属函数
T_{BF}	平均故障间隔时间
$U, V, X, \dots$	论域
$*$	非模糊化得到的值, 可靠性指标或分配值
α	可信度, 倾向性因子
δ_L, δ_R	模糊数的左、右分布参数
ε	群决策相对偏差的允许值
λ	阈值, 置信度(水平), 失效率
Π	可能性测度
$\pi(x)$	X 上的可能性分布函数 t
$\circ$	合成运算
$\vee^*, \wedge^*$	广义合成算子
$\oplus$	有界和

缩 略 语 表

AGREE—Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, AGREE 分配法

BADD—Basic Defuzzification Distribution, 基本非模糊分布法

FAR—Fuzzy Allocation of Reliability, 可靠性模糊分配

FFTA—Fuzzy Fault Tree Analysis, 模糊故障树分析

FLV—Fuzzy Linguistic Variable, 模糊语言变量

FPAR—Fuzzy Prediction and Allocation of Reliability, 可靠性模糊预计与分配

FPFTA—Fuzzy Probist Fault Tree Analysis, 基于 Probist 可靠性理论的模糊故障树分析

FPR—Fuzzy Prediction of Reliability, 可靠性模糊预计

FSA—Fuzzy Synthetic Assessment, 模糊综合评判

FSAFLV—FSA Based on FLV, 基于模糊语言变量的模糊综合评判

FSAFN—FSA Based on Fuzzy Number, 基于模糊数的模糊综合评判

FTA—Fault Tree Analysis, 故障树分析

GLSD—Generalized Level Set Defuzzification, 广义水平集非模糊法

MR—Mission Reliability, 任务可靠度

PFTA—Profust Fault Tree Analysis, 基于 Profust 可靠性理论的

模糊故障树分析

RPA—Reliability Prediction and Allocation, 可靠性预计与分配

SLIDE—Semi-linear Defuzzification, 半线性的非模糊法

VSA—Vague Synthetic Assessment, 基于 Vague 集的综合评判

AGREE—Advisory Group on Reliability of Electronic Equip-

ment, A.R.E.R. 分配法

BADD—Basic Defuzzification Distribution, 基本非模糊分

布法

FAR—Fuzzy Allocation of Reliability, 可靠性模糊分配

FTA—Fault Tree Analysis, 故障故障树分析

FLV—Fuzzy Linguistic Variable, 模糊语言变量

FPAR—Fuzzy Prediction and Allocation of Reliability, 可靠性模糊预计与分配

模糊预计与分配

FFTA—Fuzzy Probist Fault Tree Analysis, 基于 Probist 可靠性理论的模糊故障树分析

理论上的模糊故障树分析

FRP—Fuzzy Prediction of Reliability, 可靠性模糊预计

FSA—Fuzzy Synthetic Assessment, 模糊综合评判

ESAFV—ESA Based on FLV, 基于模糊语言变量的模糊综合评判

评判

ESAFN—ESA Based on Fuzzy Number, 基于模糊数的模糊综合评判

评判

FTA—Fault Tree Analysis, 故障树分析

GLSD—Generalized Linear Defuzzification, 广义水平非模糊法

模糊法

MR—Mission Reliability, 任务可靠度

FFTA—Fuzzy Probist Fault Tree Analysis, 基于 Probist 可靠性理论的

目 录

第1章 绪论	1
1.1 机械系统可靠性概述	1
1.1.1 机械系统可靠性的主要内容	1
1.1.2 机械系统可靠性的特点	2
1.1.3 模糊可靠性基本理论的研究概况	3
1.2 机械系统可靠性预计与分配技术的发展概况	5
1.2.1 常规的机械系统可靠性预计与分配技术 发展概述	6
1.2.2 机械系统可靠性模糊预计与分配技术的 发展概述	8
第2章 模糊数学理论基础	14
2.1 引言	14
2.2 模糊数学的基本概念与理论	16
2.2.1 模糊集及其性质	16
2.2.2 模糊数及其运算	20
2.2.3 模糊关系和模糊矩阵	23
2.2.4 模糊语言和模糊语言变量	24
2.2.5 可能性分布	25
2.2.6 去模糊化的方法	26
2.3 常规的模糊综合评判理论	30
2.3.1 基本原理	30

2.3.2	一级模糊综合评判的方法	31
2.3.3	一级模糊综合评判模型	32
2.3.4	多级模糊综合评判	35
2.3.5	对模糊综合评判模型的简要讨论	35
2.4	Vague 集合论简介	36
2.5	模糊推理系统	39
2.5.1	模糊 If-then 规则	39
2.5.2	模糊推理	40
2.5.3	Mamdani 型模糊推理系统的设计	41
2.6	本章小结	43
第3章	可靠性设计与分析的基本理论	44
3.1	引言	44
3.2	可靠性参数及其分类	46
3.2.1	几种常用的可靠性参数	46
3.2.2	可靠性的分类	48
3.3	系统可靠性模型	49
3.3.1	系统可靠性模型的组成和建模目的	49
3.3.2	几种典型系统的可靠性模型	50
3.4	系统可靠性预计	54
3.4.1	系统可靠性预计的目的	54
3.4.2	常用的可靠性预计方法	56
3.4.3	可靠性预计的注意事项	59
3.5	系统可靠性分配	60
3.5.1	系统可靠性分配的目的	60
3.5.2	系统可靠性分配的准则	61
3.5.3	常用的可靠性分配方法	62
3.5.4	可靠性分配的注意事项	64
3.6	故障树分析	65

3.6.1	故障树分析的常用术语和符号	67
3.6.2	建立故障树的一般方法	69
3.6.3	故障树的结构函数	71
3.7	本章小结	72
第4章	模糊综合评判模型	73
4.1	引言	73
4.2	基于模糊数的模糊综合评判(FSAFN)模型	74
4.2.1	λ 置信水平的工程意义	74
4.2.2	模糊数的进一步研究	75
4.2.3	带置信度的质心法	78
4.2.4	FSAFN 模型及其算法	79
4.3	基于模糊语言变量的模糊综合评判(FSAFLV) 模型	83
4.3.1	模糊语言变量在综合评判中的应用	83
4.3.2	梯形模糊数特点的分析	84
4.3.3	量化模糊语言变量的方法	85
4.3.4	群体模糊决策的一致性判据	86
4.3.5	FSAFLV 模型及其算法	87
4.4	基于 Vague 集的综合评判(VSA)模型	90
4.4.1	Vague 集理论的研究	90
4.4.2	VSA 模型及其算法	94
4.5	对模糊综合评判方法的进一步讨论	97
4.6	本章小结	98
第5章	机械系统可靠性的模糊预计技术	100
5.1	引言	100
5.2	基于 FSAFN 模型的可靠性模糊预计方法	101
5.2.1	可靠度模糊预计的基本方法	101

5.2.2	算例1(基于 FSAFN 模型的航空发动机可靠度模糊预计)	105
5.3	基于 FSAFLV 模型的可靠性模糊预计方法	109
5.3.1	可靠度模糊预计的基本方法	109
5.3.2	算例2(基于 FSAFLV 模型的航空辅助动力装置首翻期可靠度的模糊预计)	111
5.4	基于 VSA 模型的可靠性模糊预计方法	115
5.4.1	可靠度模糊预计的基本方法	115
5.4.2	算例3(基于 VSA 模型的航空发动机首翻期可靠度模糊预计)	117
5.5	基于模糊综合评判和模糊推理的可靠性模糊预计方法	120
5.5.1	可靠度模糊预计的基本方法	120
5.5.2	算例4(基于模糊综合评判和模糊推理的航空发动机可靠度模糊预计)	122
5.6	基于模糊故障树分析技术的可靠性模糊预计方法	127
5.6.1	模糊故障树分析技术	128
5.6.2	模糊故障树分析技术在可靠性模糊预计中的应用	138
5.7	本章小结	143
第6章	机械系统可靠性的模糊分配技术	145
6.1	引言	145
6.2	串联系统的可靠性模糊分配方法	146
6.2.1	可靠性模糊分配的基本方法	146
6.2.2	算例5(基于常规模糊综合评判模型的可靠性模糊分配方法)	148
6.2.3	算例6(基于 FSAFLV 模型的可靠性模糊分配	

方法)	153
6.3 冗余系统的可靠性模糊分配方法	158
6.3.1 可靠性模糊分配的基本方法	159
6.3.2 算例7(作为混联系统的发动机控制系统 可靠性模糊分配)	161
6.3.3 算例8(三发直升机的动力装置任务可靠度 模糊分配)	164
6.3.4 算例9(具有冷贮备的航空发动机数控系统 可靠性模糊分配)	169
6.4 引入重要度概念的可靠性模糊分配方法	173
6.5 基于 FPR 的系统可靠性模糊优化分配方法	174
6.5.1 可靠性模糊优化分配的基本方法	174
6.5.2 算例10(基于 FSAFLV 模型的燃气轮机首翻期 可靠度的模糊优化分配)	175
6.6 本章小结	180
第7章 总结与展望	183
7.1 总结	183
7.2 展望	186
参考文献	188