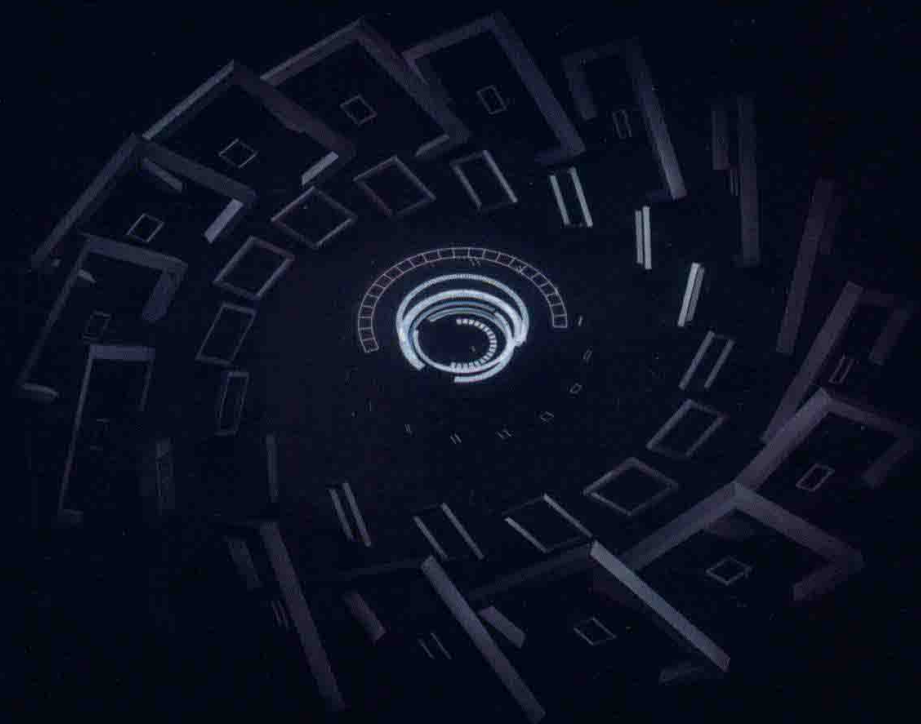




因素空间与智能科学丛书



因素空间与 空间故障树

崔铁军 李莎莎◎著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



因素空间与智能科学丛书

因素空间与空间故障树

崔铁军 李莎莎 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书是空间故障树理论与因素空间理论相结合的研究成果。空间故障树研究多因素影响情况下的系统可靠性,而因素空间则是基于因素的智能科学基础。因此两种方法的结合有利于安全科学的智能化发展,也有利于智能科学理论的实例化。本书总结了空间故障树研究中大部分与因素空间相关的研究内容,主要包括空间故障树理论基础、因素推理与故障数据、因素分析与系统可靠性、因素逻辑与系统功能结构,以及空间故障树理论框架的研究进展。

空间故障树是安全科学的理论发展,与因素空间理论的结合使其具备了智能和数据处理能力。本书适合于学习、应用安全和智能理论方法研究以及解决实际工程问题的科研人员,也可供相关专业研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

因素空间与空间故障树 / 崔铁军, 李莎莎著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2021. 3

ISBN 978-7-5635-6267-1

I. ①因… II. ①崔… ②李… III. ①故障树形图分析 IV. ①TL364

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 253376 号

策划编辑: 刘纳新 姚 顺 责任编辑: 孙宏颖 封面设计: 七星博纳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本: 720 mm×1 000 mm 1/16

印 张: 13.5

字 数: 270 千字

版 次: 2021 年 3 月第 1 版

印 次: 2021 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6267-1

定价: 39.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

《因素空间与智能科学丛书》总序

《因素空间与智能科学丛书》是一套介绍因素空间理论及其在智能科学应用的丛书。

每一次重大的科学革命都会催生一门新的数学,工业革命催生了微积分,信息革命和智能网络新时代催生的新数学是什么?人工智能发展这么多年了,似乎还没有一个真正属于人工智能的智能数学理论。现在,《因素空间与智能科学丛书》所要介绍的因素空间理论就是人们所盼望的智能数学理论。希望它能成为人工智能的数学基础理论。

信息科学与物质科学的根本区别在哪里?信息是物质在认识主体中的反映,是被认识主体加工了的资料,它既是事物本体的客观反映,又是主体加工的产物。所有物质科学的知识都是由人类对物质客体进行智能加工转化出来的成果。信息科学不是去重复研究这些成果,而是要研究以下问题:知识是怎样被转化出来又怎样被运用和发展的?就像摄影师拍摄庐山,物质科学所研究的是摄影师所拍摄出来的照片,而信息科学所研究的则是摄影师的拍摄技巧。拍摄必需有角度,横看成岭侧成峰,角度不同,庐山的面目便不同。庐山自己不会像一个模特儿那样摆出各种姿势,它没有视角选择的需求,也没有视角选择的权能,视角选择的权能只属于摄影师。信息科学要研究的是拍摄的本领和技巧。一切信息都依赖于视角。有没有视角选择的论题是区别信息科学与物质科学的一个分水岭。

认识必有目的,目的决定关切,视角就是关切点。关切点如何选择?关切点是因,靠它结出所寻求之果。宇宙所发生的一切,用两个字来概括就是“因果”,因果贯穿理性,因果生成逻辑,因果构建知识。因素就是视角选择的要素,它是信息科学知识的基元。因素是广义的基因,孟德尔用基因来统领生物属性,打开了生命科学的大门,因素空间是引导人们提取关键因素并以因素来表达知识进行决策的数

学理论和方法,它用广义的基因来打开智能科学的大门。它的出现是数学发展的一个新里程碑。

有很多数学分支都在人工智能中发挥了作用,特别有贡献的是:

① 集合论。它把概念的外延引入了数学,著名的 Stone 表现定理指出:所有布尔逻辑都与集合代数同构,或、且、非三种逻辑运算同构于并、交、余三种集合运算。基于这一定理,数学便进入逻辑而使数理逻辑蓬勃发展起来,而逻辑对人工智能的重要性是不言而喻的。

② 系统理论。系统是事物的普遍结构,它决定视角选择的层次性。

③ 概率论。人生活在不确定性之中,人脑的智能判断与预测都具有不确定性,概率论为人工智能引入了处理随机不确定性现象的工具。智能的操作始于数据,数据的处理必须用数理统计,现在,统计方法已经成为自然语言处理中的主流工具。

④ 经典信息论。尽管 Shannon 的信息论只关注信息编码的传输,不涉及信息的意义和内容,但是,Shannon 以信息量作为优化目标,相对于物质科学以能量为优化目标,他在方法论上就预先为信息革命举起了新的优化大旗,他无愧是智能科学的先驱。他所用到的信息、信道、信源和信宿构架,已为今天的智能理论定下了描述的基调。

⑤ 优化与运筹理论。因素选择就是信息的优化与运筹过程。

⑥ 离散数学。人的思维是离散的,离散数学为人工智能提供了重要的数学描述工具。

⑦ 模糊集合论。如果说上述各个分支都是自发而非自觉地为人工智能服务,那么模糊集合论则是自觉地为人工智能服务的一个数学分支。L. A. Zadeh 是一位控制论专家,他深感机器智能的障碍在于集合的分明性限制了思维的灵活性,他是为研究人脑思维的模糊性而引入模糊数学的。模糊数学的出现,使数学能够描述人类日常生活的概念和语言,Zadeh 在定性与定量描述之间搭起了一座相互转换的桥梁。模糊数学是最接近人工智能的数学分支。可惜的是,Zadeh 没有进一步地刻画概念的内涵以及内涵外延的逆向对合性。他也没有明确地提出过智能数学的框架。

以上这些分支都不能直接构成智能数学的体系。

1982 年,在国际上同时出现了 Wille 的形式概念分析、Pawlak 的粗糙集,加上因素空间理论,一共是 3 个数学分支。它们都明确地把认知和智能作为数学描述

的对象,它们是智能数学的萌芽。1983年蔡文提出了可拓学(研究起始于1976年),1986年Atanassov提出了直觉模糊集,1988年姚一豫提出了粒计算,张钹提出了商空间理论,1999年Molodtsov提出了犹豫模糊集,2009年Torra提出了软集……这些理论是智能数学的幼苗。

智能数学当前面临的任务是要用因素来穿针引线,把这些幼苗统一起来,不仅如此,还要与所有对人工智能有贡献的数学分支建立和谐关系。希望因素空间能担当此任。因素空间的作用不是取代各路“神仙”,而是让各路“神仙”对号入座,因素空间更不能取代传统数学,而是与传统数学“缔结良缘”。

我1957年在北京师范大学数学系毕业留校。1958年参加了在我国高校首轮开设概率论课程的试点任务。在严士健先生的带领下,我参加了讨论班,参与了编写讲义和开设概率论课的全过程。之后我在北师大本科四年级讲授此课。1960年暑假,教育部在银川举办了西北地区高校教师讲习班,由我讲授概率论。这段经历使我深入思考了随机性和概率的本质,发现柯尔莫哥洛夫所提出的基本空间就是以因素为轴所生成的空间。1966年之后,我开始研究模糊数学,当时正面临着模糊集与概率论之间的论战,为了深入探讨两种不确定性之间的区别与联系,我正式提出了因素空间的理论,用因素空间构建了两种不确定性之间的转换定理:给定论域 U (地上)的模糊集,在幂集 $P(U)$ (天上)上存在唯一的概率分布,使其对 U 上一点的覆盖概率等于该点对模糊集的隶属度。这一定理不仅发展了超拓扑和超可测结构的艰深理论,更确定了模糊数学的客观意义,为区间统计和集值统计奠定了牢固的基础。这一定理还可囊括证据理论中4种主观性测度(信任、似然、反信任、反似然)的天地对应问题,在国际智能数学发展竞争中占据了一个制高点。因素空间在模糊数学领域中的成功应用,赢得了重要的实际战果。1987年7月,日本学者山川烈在东京召开的国际模糊系统协会大会上展示出Fuzzy Computer。它实际上只是一台模糊推理机,但却轰动了国际模糊学界。1988年5月,我在北师大指导张洪敏等博士研究生研制出国际上第二台模糊推理机,推理速度从山川烈每秒一千万次提高到一千五百万次,机身体积不到山川烈模糊推理机的十分之一。这是在钱学森教授指导下取得的一场胜战。

这一时期的工作,是用因素空间去串连模糊数学(也包括概率论)。人工智能的视野总是锁定在不确定性上,概率论和模糊数学都做过而且将要做出更大的贡献,经过因素空间的穿针引线,有关的理论都可以更加自然地融入智能数学的体系,而且能对原有理论进行提升。这段时期的工作主要是由李洪兴教授和刘增良

教授发展和开拓的。形式概念分析和粗糙集是和因素空间同年提出的。它们都有明确的智能应用背景,开创了概念自动生成和数据决策的理论和算法,成为关系数据库的数学基础。相对而言,我在前一阶段也研究知识表示,但却是围绕着模糊计算机的研制,关键是中心处理器。我忽视了数据和软件。20世纪人工智能曾一度处于低潮,但当网络时代悄然而至,所有计算机都可以联网以后,中心处理器的作用被边缘化,数据软件成为智能革命的主战场。我1992年在辽宁工程技术大学建立“智能工程与数学研究院”,之后出国。2008年我从国外回来,回头再看一下同年的伙伴,看到粗糙集的信息系统,心里不禁一惊,“我怎么就没想到往关系数据库考虑呢?这不正好就是因素空间吗?”于是我设法用因素空间去串联上面这些成果,在它们的基础上再做些改进,显然因素空间可以使叙述更简单,内容更深刻,算法更快捷。国内学者在粗糙集和粒计算方面的工作都非常优秀,突破了Pawlak的水平,有很多值得因素空间借鉴的思想和方法。尤其是张钹教授的高空间理论,既有准确的智能实践,又有严格的数学理论,可圈可点。

这套丛书是由我的学生和朋友们共同完成的,他们的思想和能力往往超过我所能及的界限。青出于蓝而胜于蓝,这是我最引以为豪的事情。

因素空间理论是否真的能起到一统智能数学理论的作用,要靠广大读者来鉴别,也要靠读者来修正、发展和开拓,企盼大家都成为因素空间的开拓者,因素空间理论属于大家。

汪培庄

前 言

空间故障树理论是作者 2012 年提出的分析多因素影响下系统可靠性的方法体系,经过多年的发展目前已初步形成体系。按照发展过程空间故障树理论可分为 4 部分:空间故障树理论基础、智能化空间故障树、空间故障网络及系统运动空间和系统映射论。空间故障树理论涉及的内容较多,主要包括安全科学、系统论、智能科学和大数据科学等,其中有一部分与汪培庄先生提出的因素空间理论相关。因此在汪培庄、钟义信和何华灿教授的倡导下,为了展示安全科学与智能科学结合的成果,也为了助力相关领域的发展,作者将与因素空间相关的研究成果整理成本专著,成为“因素空间与智能科学丛书”之一。

本书分为 6 章,主要内容如下。

第 1 章,绪论:介绍空间故障树与因素空间融合的现状、空间故障树目前的研究现状、可靠性分析与人机认知体的关系。

第 2 章,空间故障树理论概述:介绍了空间故障树理论基础,包括连续型空间故障树和离散型空间故障树。这也是空间故障树发展的第一阶段,是理论的核心基础,后期的研究均在此之上进行。本章给出了必要的思想、定义、理论和公式。

第 3 章,因素推理与故障数据:主要使用因素空间中因素推理方法研究故障数据反映的系统可靠性;根据故障数据的特点提出并改进了一些定义和方法,包括因素分析与安全状态区分、随机变量分解式与特征函数、故障与因素背景关系分析、故障与因素的因果关系、因素与故障数据压缩、故障影响因素降维等。

第 4 章,因素分析与系统可靠性:借助因素的思想,研究系统状态安全性、安全性分析方法;提出了这些方法需要的定义、步骤和计算过程,包括宏观因素与元件重要性分析、状态迁移与系统适应性改造、系统安全性分类决策规则、系统可靠性决策规则发掘方法、属性圆定义与对象分类、属性圆对象分类改进、属性圆与云模型结合的对象分类、因素与可靠性维持方法等。

第 5 章,因素逻辑与系统功能结构:通过因素的不同状态和系统的不同状态来分析系统的功能结构,这种方法源于空间故障树的系统结构反分析,借助了因素空

间的相关理论,进而得到了发展,包括系统功能结构分析基础和系统功能结构最简式分析。

第6章,空间故障树理论框架的研究进展:包括空间故障树理论框架的研究意义、安全科学中的智能与数据处理研究综述、空间故障树理论框架的4个阶段及更进一步的研究成果概要。

本书的撰写注重空间故障树和因素空间的结合和理论构建,列出了概念和方法的推导过程,并加以详细描述。由于本书是“因素空间与智能科学丛书”之一,因此并未给出因素空间体系化的论述,只是取所需部分列出;同样也未给出空间故障树的详尽内容。如有问题和需要请参见作者和汪培庄教授的论著。因此阅读本书需要读者对因素空间和空间故障树理论有所了解。作者也试图推广因素空间和空间故障树理论的思想,以便在其他领域展开研究和应用。

本书的主要内容为国家自然科学基金(51704141,52004120)、国家重点研发计划项目(2017YFC1503102)的研究成果,本书也为辽宁省教育厅项目(LJ2020QNL018)、辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-31)。本书全部内容由崔铁军副教授和李莎莎博士撰写,在撰写过程中得到了汪培庄教授、钟义信教授的指导,以及大连交通大学马云东教授,辽宁工程技术大学郭嗣琮教授、王来贵教授、邵良杉教授、刘剑教授、陈炜副教授等的支持,在此表示衷心的感谢。特别感谢因素空间理论的研究者辽宁工程技术大学理学院的吕金辉、刘海涛、曲国华、曾繁慧老师及汪华东博士等的研究工作,正是在他们的研究成果中作者受到启发,才完成了本书的研究工作,才能将因素空间理论与空间故障树理论有机融合,在此表示衷心的感谢!

空间故障树理论与因素空间理论在一些方面进行了结合,但两个理论都有自己的符号体系。空间故障树理论使用了因素空间理论的原有符号,但与本书中的符号系统有所区别。例如汪培庄老师书中的 D 和 I 分别与本书中的 U 和 X 同义。本书使用空间故障树中描述因素空间理论的符号体系,请读者注意(主要在第3章)。

本书引用了部分国内外已有专著、文章、规范等成果,在此不能一一提及,向这些作者及相关人士表示感谢。特别对辽宁工程技术大学提供的科研环境及大连交通大学的支持表示感谢。这些为作者进行探索性研究提供了条件。限于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

崔铁军

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 空间故障树与因素空间的融合	1
1.1.1 当前系统可靠性研究存在的问题	2
1.1.2 因素空间概要	4
1.1.3 空间故障树概要	8
1.1.4 空间故障树与因素空间的融合	12
1.1.5 空间故障树与系统演化过程表示	13
1.2 空间故障树与空间故障网络	14
1.2.1 空间故障树	15
1.2.2 空间故障树的改造	18
1.2.3 空间故障网络	20
1.3 可靠性分析与人机认知体	22
1.3.1 人机认知体思想	22
1.3.2 可靠性分析人机认知体的研究意义	24
1.3.3 系统可靠性分析人机认知体	25
1.4 本章小结	29
本章参考文献	29
第 2 章 空间故障树理论概述	38
2.1 连续型空间故障树	38
2.1.1 连续型空间故障树的定义	38
2.1.2 故障概率分布	40
2.1.3 概率重要度空间分布和关键重要度空间分布	42
2.1.4 顶上事件发生概率空间分布趋势	44

2.1.5	更换周期和维持系统可靠性方法	44
2.1.6	径集域与割集域的定义与认识	46
2.1.7	因素重要度分布	47
2.1.8	因素联合重要度分布的定义与认知	48
2.2	离散型空间故障树	51
2.2.1	离散型空间故障树的概念	51
2.2.2	DSFT 下的故障概率空间分布	51
2.2.3	基于 ANN 的故障概率空间分布确定方法	54
2.2.4	基于 ANN 求导的故障概率变化趋势研究	55
2.2.5	DSFT 的因素重要度和因素联合重要度	56
2.2.6	模糊结构元化的意义与特征函数构建	59
2.2.7	模糊结构元化 DSFT 构建	63
2.3	本章小结	68
	本章参考文献	68
第 3 章	因素推理与故障数据	70
3.1	因素分析与安全状态区分	70
3.1.1	因素空间与因素库理论	71
3.1.2	概念分析表提取概念格	72
3.1.3	安全评价中的定性语义问题	74
3.1.4	实例分析	75
3.2	随机变量分解式与特征函数	80
3.2.1	随机变量分解式	80
3.2.2	可靠性数据的随机变量分解式	81
3.2.3	实例分析	83
3.3	故障与因素背景关系分析	88
3.3.1	故障与因素背景关系分析方法	88
3.3.2	实例分析	90
3.4	故障与因素的因果关系	97
3.4.1	因果概念提取方法	97
3.4.2	实例分析	99
3.5	因素与故障数据压缩	104
3.5.1	故障概率分布计算的压缩	104
3.5.2	实例分析	106

3.6 故障影响因素降维	111
3.6.1 故障影响因素降维方法	111
3.6.2 实例分析	112
3.7 本章小结	117
本章参考文献	117
第4章 因素分析与系统可靠性	119
4.1 宏观因素与元件重要性分析	119
4.1.1 元件重要性分析方法	120
4.1.2 实例分析	121
4.2 状态迁移与系统适应性改造	125
4.2.1 系统适应性改造成本确定方法	125
4.2.2 实例分析	126
4.3 系统安全性分类决策规则	129
4.3.1 决策准则挖掘方法	129
4.3.2 实例分析	131
4.4 系统可靠性决策规则发掘方法	133
4.4.1 决策发掘方法	134
4.4.2 实例分析	136
4.5 属性圆定义与对象分类	140
4.5.1 属性圆概念及分类方法	140
4.5.2 实例分析	143
4.6 属性圆对象分类改进	146
4.6.1 对象分类改进方法	146
4.6.2 实例分析	148
4.7 属性圆与云模型结合的对象分类	150
4.7.1 云模型	150
4.7.2 云模型改造的属性圆分类方法	151
4.7.3 实例分析	153
4.8 因素与可靠性维持方法	154
4.8.1 可控因素与不可控因素	155
4.8.2 可靠性维持方法	156
4.8.3 实例分析	156
4.9 本章小结	160
本章参考文献	160

第 5 章 因素逻辑与系统功能结构	162
5.1 系统功能结构分析基础	162
5.1.1 结构分析理论基础	163
5.1.2 功能结构分析的公理体系	165
5.1.3 分析实例	170
5.2 系统功能结构最简式分析	175
5.2.1 最简式分析方法	175
5.2.2 实例分析	176
5.3 本章小结	180
本章参考文献.....	180
第 6 章 空间故障树理论框架的研究进展	182
6.1 空间故障树理论框架的研究意义	183
6.2 安全科学中的智能与数据处理研究综述	184
6.3 空间故障树基础理论(第一阶段)	186
6.4 智能化空间故障树(第二阶段)	187
6.5 空间故障网络(第三阶段)	188
6.6 系统运动空间与系统映射论(第四阶段)	190
6.7 更进一步研究成果概要	191
6.8 本章小结	193
本章参考文献.....	194
后记	202

第1章 绪 论

空间故障树是作者提出的研究系统可靠性的理论,因素空间是汪培庄先生提出的智能科学处理方法。两种理论的结合对安全科学和智能科学都有重要意义。

1.1 空间故障树与因素空间的融合

系统可靠性理论是安全科学的基础理论之一,源于系统工程,在安全科学领域系统可靠性主要关注于系统发生故障和事故的可能性。由于近代科学进步和工业化水平的逐渐提高,为了追求更大的经济和战略目标,各国加紧研究并建立大型或超大型系统以满足要求。但在系统运行过程中人们发现随着系统复杂性的增加,其可靠性下降得非常明显。在这种情况下,原始的问题出发型(即事故发生后吸取教训的方法)不能满足要求。因为问题出发型的研究方法一般适用于低价值、对系统可靠性要求不高、故障发生后果不严重的系统,其对当今大规模和巨复杂系统而言意义不大。因此,在20世纪50年代,英、美等发达国家首先提出了安全系统工程理论,当时将系统工程的一些概念引入安全领域,尤其是可靠性分析方法,并用于军事和航天领域,形成了安全科学的基础理论之一,即安全系统工程。

安全系统工程与系统可靠性分析方法发展到今天,已具备了在相对简单、系统复杂性不高、数据规模有限情况下的系统可靠性分析能力。但随着大数据技术、智能科学、系统科学和相关数学理论的发展,现有系统可靠性分析方法也暴露出一些问题,如故障大数据处理、可靠性因果关系、可靠性的稳定性、可靠性逆向工程及可靠性变化过程描述等问题。同时现有系统可靠性分析方法较多针对特定领域中使用的系统,虽然分析效果良好,但缺乏系统层面的抽象,难以满足通用性、可扩展性和适应性。因此需要一种具备上述能力和满足未来科技要求的系统可靠性分析方法。所以系统可靠性分析方法与智能科学和大数据技术的结合是必然的,也是必须的。

空间故障树理论^[1]是作者于 2012 年提出的一种系统可靠性分析方法。经过 5 年的发展,作者初步完成了空间故障树理论框架的基础。空间故障树理论可满足对简单系统的可靠性分析,包括故障大数据处理、可靠性因果关系、可靠性的稳定性、可靠性逆向工程及可靠性变化过程描述等,并具有良好的通用性、可扩展性和适应性。空间故障树理论在发展过程中融合了智能科学和大数据处理技术,包括因素空间理论^[2]、模糊结构元理论^[3]、云模型理论^[4]等。虽然还存在一些问题,但空间故障树理论还有足够的发展空间来解决它们。

本书将通过综述方式介绍空间故障树理论及系统可靠性分析方法和功能,也将介绍汪培庄先生的因素空间理论,以及两种理论相结合的可行性、功能及成果。因此本书使用描述性语言而非数学模型来说明上述内容。希望本书的介绍能开阔安全科学基础理论研究方向,使读者了解空间故障树理论和因素空间理论及其在系统可靠性分析中的作用,以面向智能科学和大数据技术寻求可靠性的理论发展。

1.1.1 当前系统可靠性研究存在的问题

近年来随着信息科学与智能科学的迅猛发展,系统运行、故障检测和设备维护数据量暴涨成为许多行业共同面对的严峻挑战和发展机遇,尤其是在安全科学领域。美国一家公司对美国各个行业的数据量进行估计后发现,位居首位的是制造业。例如,飞机汽轮压缩器叶片一天会产生 588 GB 的数据,而世界上最大的微博公司 Twitter 每天才产生 80 GB 的数据,可见飞机上一个汽轮压缩器叶片的数据量是一个互联网公司的 7 倍之多。但企业并没有很好地利用这些数据对设备系统进行故障原因、严重程度等分析,数据利用率很低^[5]。又如,法国宇航防务网站披露了 F-35 最致命的缺陷,如果燃油超过一定温度,战机将无法运转。该报道称,最早是美国空军网站公布的照片显示一辆外表重新喷涂过的燃料车,其说明写着“F-35 战机存在燃料温度阈值,如果燃料温度太高将无法工作”^[6]。飞机设计阶段似乎都没有考虑飞机使用过程的环境因素(比如温度、湿度、气压、使用时间等)对可靠性的影响,导致在实际使用中故障频出,严重影响了原设计试图实现的功能。F-35 是信息化作战平台,飞行及维护过程数据是实时记录的,按照最低记录量 1 Mbit/s 计算,那么飞行一天的数量为 84 GB。如果实时传输,F-35 的带宽为 4 Gbit/s,飞行一天的最大数据量为 336 TB。这些系统运行时记录的数据蕴含着系统故障和可靠性特征。然而由于缺乏相应的可靠性分析方法,导致目前交付的 280 架 F-35 只有一半可以正常使用,特别是早期生产的 F-35,可靠性非常低。洛克希德马丁公司对已交付的 F-35 的运行时数据进行了可靠性分析,计划在 2020 年前将飞机可靠性提高到 70%。上述问题表明这些信息中蕴含的故障数据并未

进行可靠性方面的分析;油温升高影响飞机各元件可靠性的变化程度也无法确定,进而无法确定油温因素与飞机可靠性之间的关系。同样的问题也影响着我国高铁在高寒高海拔地区的可靠性。高寒高海拔地区运行高铁的速度、时间和运量与一般情况下不同。不同环境对高铁运行的可靠性影响不同,因此高铁前期研制和运行测试阶段累积的大量数据为保证高铁可靠运行起到了关键作用。在深海中高压低温潜航设备可靠性也同样存在这类问题。

上述飞机、高铁、潜航器等设备系统在设计、制造及运行期间已经存储了大量工况数据,但实际并没有挖掘出这些数据的价值。该问题在系统可靠性研究方面更为突出。可靠性研究是安全科学的重要组成部分,在当今生产生活中起着重要作用,特别是在工矿、交通、医疗、军事等复杂且又关系到生命财产和具有战略意义的领域中更为重要。但目前研究存在一些误区和不足。

① 在研究中过分关注于系统内部结构和元件自身可靠性,竭力从提高元件自身可靠性和优化系统结构来保证系统可靠性。但并未考虑一个事实,各种元件终究是由物理材料组成的,在不同环境下其物理学、力学、电学等相关性质并不是一成不变的,即执行某项功能的系统元件功能性在元件制成之后主要取决于其工作环境。原因在于不同工作环境下,元件材料的基础属性可能是不同的,而在设计元件时相关参数基本固定。这就导致了元件在变化的环境中工作时随着基础属性的改变,其执行特定功能的能力也发生变化,致使元件可靠性发生变化。进一步地,即使是一个简单的、执行单一功能的系统也要由若干元件组成,如果考虑每个元件随工作环境变化的可靠性变化,那么该系统的随工作环境变化的可靠性变化就相当复杂了。上述事实是存在的,且不应该被忽略。

② 可靠性研究的主要议题是系统如何失效,如何发生故障,什么引起了故障。目前研究成果一方面较多反映故障概率与影响因素之间的关系,且这些关系多数以定量形式的函数表示;另一方面则较多反映故障原因与故障本身的因果关系。但主要问题在于故障发生受多种因素影响,显性和隐性因素并存,且难以区分因素间的关联性。另外从实际而来的现场故障数据一般数据量较大,且存在数据的冗余和缺失。现有安全系统工程方法难以解决,特别是针对大数据的计算机推理因果分析在安全系统工程领域尚未出现,更无法分析可靠性与影响因素之间的因果关系。

③ 在日常系统使用和维护过程中会形成大量的监测数据,属于大数据量级,如安全检查记录、故障或事故记录、例行维护记录等。这些数据往往反映了系统在实际情况下的功能运行特征。这些特征一般可表示为在某工作环境下,系统运行参数是多少,或在什么情况下出现了故障或事故。可见这些监测数据不但能反映工作环境因素对系统运行可靠性的影响,而且其数据量较大,可全面分析系统可靠性。所以应研究适应大数据的方法,从而将这些故障数据特征融入系统可靠性分

析过程和结果中。

④ 系统设计阶段的设计行为并不能全面考虑使用阶段可能遇到的不同环境,所以设计后系统在使用期间会遇到一些问题,特别是航天、深海和地下工程等方面所使用的系统会遇到极端工作环境,所以单纯在设计角度从系统内部研究整个系统的可靠性是不稳妥的。该问题可概括为系统可靠性结构反分析问题,即知道系统组成的基本单元可靠性特征和系统所表现出的可靠性特征,如何反推系统内部可靠性结构。当然该内部结构是一个等效结构,可能不是真正的物理结构。

⑤ 在系统中由于物理材料的不同,元件特性对不同环境的响应不同,环境变化导致材料性质变化,进而导致元件功能可靠性改变。系统由这些元件组成,在受到不同环境影响时系统可靠性也是改变的,这是普遍现象。但从另一角度看,环境因素变化是原因,系统或元件可靠性或故障率变化是结果,即故障率随着环境变化而变化。将环境影响作为系统受到的作用,而将故障率变化作为系统的一种响应,组成一种关于可靠性的运动系统,进而讨论故障率变化程度和可靠性的稳定性。稳定的可靠性或故障率是系统投入实际使用的重要条件,如果可靠性或故障率变化较大,则系统功能无法控制。研究使用运动系统稳定性理论对可靠性系统进行描述和稳定性分析是一个关键问题。

⑥ 故障发生过程结构化表示。空间故障树中元件与系统结构表示使用经典的树形拓扑结构,即系统工程中的树形图。虽然可表示一部分实际系统故障发生过程,但更为一般的故障发生过程是因素相互交织、相互作用造成的,显然不能使用树形拓扑结构表示。对于因素之间的相互作用,应使用泛化的网状拓扑结构表示。树形拓扑结构可认为是网状拓扑结构的一种特例,所以研究网状拓扑结构的故障发生过程表示方法才是完全解决元件和系统表示关系,以及因素与可靠性表示关系的关键。

上述现象和问题可归结为目前的系统可靠性分析方法对故障大数据和多因素影响分析的不适应。现有方法难以在大数据量级的故障数据中挖掘出有效信息,也难以有效携带这些数据特征进行系统可靠性分析。这些问题是传统可靠性分析方法与故障大数据涌现、多因素分析和智能科学技术适应性的矛盾。

1.1.2 因素空间概要

1981年,汪培庄教授在一篇名为《随机微分方程》的论文中首先提出了因素空间的原始定义,用以解释随机性的根源及概率规律的数学实质。1982年在与日本学者菅野道夫合作发表的《因素场与 fuzzy 集的背景结构》中给出了因素空间的严格定义,并转向对概念的内涵与外延的解释。因素空间理论为知识的表述提供了一个自然合理的描述框架,并被广泛应用于概念表达、语义分析、数据挖掘、知识获