

模糊数学 在船舶工程中的应用

章昌文 编著

国防工业出版社

新
兵
船

解
學

PDG

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，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. 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，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作，职责是：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，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工业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
第一届评审委员会组成人员**

主任委员：邓佑生

副主任委员：金朱德 太史瑞

委 员：尤子平 朵英贤 刘琯德

(按姓氏笔划排列) 何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长：刘琯德

前 言

模糊数学诞生于 1965 年，它是研究事物模糊性的一门边缘学科，现已成为数学领域的一个重要分支。

工程模糊分析设计是 70 年代以来出现的一种新颖的现代设计方法，它是以模糊数学理论为基础，借助于电子计算机进行工程领域的各项分析设计。迄今虽仅有 20 年的历史（在我国约 10 年左右），但它的发展非常迅速，已在许多领域得到广泛的应用。

模糊数学在船舶工程中的应用方兴未艾。自 1985 年以来，我国造船科技工作者在模糊优化设计、模糊综合评判和模糊模式识别等方面进行了研究工作，取得可喜的成果。

1987 年，作者根据国内外发表的文献资料，结合多年来自己的研究成果和工作体会，曾编写《工程模糊分析设计》讲义，在有关学会、工厂技术人员讲习班和本科生选修课中试用过，受到欢迎和好评。在此基础上，作者又不断进行修改和补充，终于写成这本书，以飨读者。全书共分九章，介绍模糊数学的基本知识简明扼要，叙述工程模糊分析设计的原理和方法力求深入浅出，避免深奥而冗长的数学推导，并尽量结合工程应用实例，以便于读者学习和使用。

书中引用了一些前辈和同行的研究成果和论述，特此一并致谢。

由于作者水平有限，书中谬误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 事物的不确定性	1
§ 1-2 模糊性的数学描述	2
§ 1-3 工程模糊分析设计的兴起	3
第二章 集合简介	7
§ 2-1 集合及其表示法	7
§ 2-2 集合的运算	8
§ 2-3 映射和特征函数	11
§ 2-4 直积和关系	14
第三章 模糊集合基本知识	17
§ 3-1 模糊集合及其表示法	17
§ 3-2 模糊集合的运算	20
§ 3-3 截集和阈值	25
§ 3-4 分解定理和扩张原理	28
§ 3-5 模糊关系	30
第四章 隶属函数的确定	37
§ 4-1 确定隶属函数的原则	37
§ 4-2 模糊统计	38
§ 4-3 二元对比排序	40
§ 4-4 模糊分布及其常用图式	43
§ 4-5 船体振动频率禁区的建立	50
§ 4-6 流体过渡状态流动的描述	52
第五章 模糊模式识别	55
§ 5-1 模糊模式识别概述	55
§ 5-2 模糊模式识别方法	56
§ 5-3 几何图形的识别	60
§ 5-4 手写文字的识别	63

§ 5-5 舰艇噪声的识别	68
第六章 模糊聚类分析	71
§ 6-1 聚类分析概述	71
§ 6-2 模糊聚类分析方法	77
§ 6-3 模糊聚类分析的应用	83
§ 6-4 最大树法	93
第七章 模糊控制	96
§ 7-1 模糊控制概述	96
§ 7-2 模糊控制设计原理	98
§ 7-3 模糊控制的应用	107
第八章 模糊综合评判	120
§ 8-1 综合评判概述	120
§ 8-2 模糊综合评判方法	122
§ 8-3 模糊综合评判模型的讨论	128
§ 8-4 船舶主要要素方案的优选	131
§ 8-5 潜艇储备浮力的论证	136
§ 8-6 多级模糊综合评判	144
§ 8-7 权数的确定	148
§ 8-8 船舶结构设计的跟踪评估	153
§ 8-9 船舶操纵性能的综合评判	165
第九章 模糊优化设计	176
§ 9-1 模糊优化设计概述	176
§ 9-2 水平截集法	177
§ 9-3 限界搜索法	189
§ 9-4 槽形舱壁模糊优化设计	196
§ 9-5 油船中剖面模糊优化设计	200
§ 9-6 最大水平法	206
§ 9-7 多目标模糊优化设计	213
参考文献	229

第一章 绪 论

§ 1-1 事物的不确定性

在现实生活和工程领域中，存在着大量具有不确定性（uncertainty）的现象。这些不确定性可以归纳为两类：随机性和模糊性。

一、随机性（randomness）

随机性是由于客观事物的因果关系不充分所致，表现为因果律的缺陷，造成结果的不可预知性。例如，掷骰子每次掷出几点无法确定，也就是“随机”的；但如果掷上千百次，那末不难发现，掷出1~6点中任一特定点的次数在总掷次数中所占的比例渐趋稳定，接近于六分之一。

对事物随机性的描述是建立在概率论（probability theory）基础上的统计数学，它反映了“一因多果”的随机性，力求从随机性中去把握广义的因果律即概率统计规律。在船舶工程中，概率方法现已广泛应用于诸如波浪随机荷重等船体强度问题的研究中。

二、模糊性（fuzziness）

与随机性不同，模糊性是指客观事物的差异在中介过渡中所呈现的“亦此亦彼”性，表现为排中律的缺陷，造成事物的边界不清晰（尽管结果已知）。例如，在日常生活中，人们谈论年龄老中青、身材高矮、体形胖瘦、气候冷热等概念，都具有含义不明确、边界不清晰的模糊性。此外，事物之间的关系也可能有模糊性，例如“两个人长得像”就表示一种模糊关系，因为某人只能与自己长得完全相同，至于子女像父母，确切程度就很难说清楚了。

在船舶工程中, 类似的模糊性是不不少的。例如, 按照设计要求某构件的剖面模数 $W \geq 900 \text{ cm}^3$, 这意味着选取该构件实际剖面模数 $W = 900 \text{ cm}^3$ 是容许的, 而 $W = 899 \text{ cm}^3$ 就不容许, 但两者在本质上并无区别。从完全容许到完全不容许的过程中, 实际上有一中介过渡阶段。若要考虑这一中介过渡情况, 构件容许剖面模数的边界就变得不清晰, 这就是工程设计具有模糊性的一种表现。类似地, 容许应力、容许位移、尺寸界限和频率禁区等工程量, 也都具有模糊性。

对事物模糊性的描述是建立在模糊集合论 (fuzzy set theory) 基础上的模糊数学, 它反映了“亦此亦彼”的模糊性, 力求从模糊性中寻找广义的排中律即隶属规律。模糊数学将在精确的经典数学与充满模糊性的现实世界之间架起一座相联的桥梁。

§ 1-2 模糊性的数学描述

1965年, 美国加利福尼亚大学控制论教授扎德 (Zadeh) 发表著名论文 “Fuzzy sets” (模糊集), 首次提出了处理模糊现象的数学新概念——“模糊子集”, 并引入了“隶属函数”的定量描述方法, 标志着模糊数学这一崭新数学分支的诞生。

19世纪末康托尔 (Cantor) 提出的集合论 (Set theory) 是近世数学的基础。随着对客观事物具有模糊性的认识不断深化, 人们发现集合论实质上是扬弃了这种模糊性而抽象出来, 把人类思维过程加以绝对化。为了达到精确性的目的, 对一个元素是否属于某一子集简单地给予肯定或否定。然而, 根据模糊数学的观点来看却并非如此, 也就是说, 对一个元素是否属于某一子集不是绝对地肯定或否定, 而是把对该子集的属于程度用“隶属度”的概念加以描述。

举一个简单的例子来说, 按照目前我国男性的身材状况可作如下规定: 身高 1.8 m 以上的人属于“高个子”这一子集的隶属

度为1, 身高1.6 m以下的人属于“高个子”这一子集的隶属度为0, 而身高1.6~1.8 m之间的人按比例给予 $[0, 1]$ 中的一个数来作为对“高个子”子集的隶属度。例如, 身高1.75m属于“高个子”子集的隶属度为0.75, 身高1.7 m属于“高个子”子集的隶属度为0.5, 余类推。这种子集称为模糊子集, 而每个元素对模糊子集都有一个 $[0, 1]$ 中的隶属度来描述其属于的程度。显然, 上述对身材高矮这一模糊概念的描述方式要比简单地把某人说成是高个子或不是高个子更加符合客观实际, 并易于为人们的认识规律所接受。

由此可见, 把经典数学中的集合论推广到模糊集合论是模糊数学的基础。实际上, 模糊数学的兴起绝不是让数学变成模模糊糊的东西, 而是要让数学进入模糊现象这一禁区。敢于向传统数学观念提出挑战, 这正是模糊数学具有强大生命力的表现。

§1-3 工程模糊分析设计的兴起

进入70年代, 随着模糊数学理论的完善和传播, 工程领域中模糊分析设计(fuzzy analysis and design)迅速兴起。

一、工程模糊分析设计的发展背景

探究工程模糊分析设计的发展背景, 可以从如下几方面进行考察。

1. 工程分析设计中的模糊性

工程分析设计长期来受到经典数学的传统影响, 其本身由于建立数学模型的近似、设计过程的简化和设计因素的复杂性等所致, 包含有各种不确定性。迄今, 人们越来越认识到, 并非所有的不确定性都具有随机特性的, 因此也就不能相应地运用概率论来模化这种不确定性; 也就是说, 某些非随机的模糊不确定性在制订合理分析设计的方法中起着重要作用。显然, 这类不确定性必须运用模糊集合论加以研究才能奏效。

2. 系统复杂性与精确化的互克性

随着科学技术的迅猛发展，各种工程领域都迫切要求数学化、定量化。但是，科学技术的深化意味着研究对象的复杂化，而复杂的事物又难于精确化。电子计算机的出现，在一定程度上解决了复杂化与精确化两者之间的矛盾，然而，正是由于计算机的出现，又使得这一矛盾更加激化。这是因为：一方面，严格的程序要求高度的精确；另一方面，机器所执行的任务又日益复杂。

模糊集合论的创始人扎德从实践中总结出一条所谓“互克性原理”，即“当一个系统的复杂性增大时，人们使它精确化的能力将减小。在达到一定阈值之上时，复杂性与精确性将互相排斥。”这就是说，复杂程度越高，有意义的精确化能力便越低，从而表明系统所具有的模糊性越大。在许多场合下，过分的精确反而模糊，适当的模糊反而精确。因此，对于复杂的工程系统而言，模糊分析设计势在必行。

3. 人脑与电子计算机的智能比较

若将人脑与电子计算机进行智能比较，不难发现，计算机在运算速度、记忆功能等方面是超人的，它可以在每秒钟内进行几百万次甚至上亿次计算，并存储若干个图书馆的资料，但计算机在对模糊信息的识别和判决方面却远远不如人脑。例如，一个三岁的小孩能在人群中毫不费力地认出自己的母亲，因为他具备对母亲外貌特征的各种模糊信息进行识别和判决的能力，然而，迄今任何先进的电子计算机都无法胜任。从这个角度来说，计算机的“智力”还不如一个小孩。

扎德曾经指出，“如果深入研究人类的认识过程，我们将会发现，人类能够运用模糊概念，决不是一种负担，而是一种巨大的社会财富，这正是理解人类智能与机器智能之间深奥差别的关键所在。”目前，世界上不少国家都致力于研究开发人工智能（artificial intelligence）和专家系统（expert system），探索未来计算机和智能机器人的雏形，无疑将会涉及模糊数学理论及

应用,以便使智能机器人和计算机模拟人脑思维识别和判定模糊信息的特点,变得更加“聪明”。

二、工程模糊分析设计的基本特点

与普通分析设计相比,工程模糊分析设计的基本特点可归纳如下:

(1) 工程模糊分析设计能够定量地处理影响分析设计问题的各种模糊因素,因而所建立的数学模型要比普通分析设计的数学模型更接近于客观实际,从而使分析结果更为合理,使设计方案更为优化。例如,工程设计参数的模糊评定、具有模糊约束条件的优化设计等,都比普通分析设计合理而有效。

(2) 工程模糊分析设计充分考虑分析设计问题所含有的中介过渡性质,浮动地选取阈值,从而能给出一系列不同水平或要求下的分析结果和设计方案,为工程技术人员的决策和优选提供了有利条件。正如人们曾有这样的评价:“在建立计算机辅助设计(computer-aided design, 简称 CAD)系统中按用户要求的设计环境时,模糊集合论的应用是很有发展前途的。”

(3) 工程模糊分析设计具有哲理的方法论特点,初步形成了借助于精确化、定量化的途径解决工程领域模糊性问题的一整套理论和方法,如模糊模式识别、模糊聚类分析、模糊控制、模糊综合评判和模糊优化设计等许多方面都得到了广泛应用。

三、工程模糊分析设计的发展动态

模糊集合论及其在工程模糊分析设计方面应用的发展,迄今虽仅有 20 多年的历史(在我国约 10 年左右),但已显示极强的生命力和渗透力。据不完全统计,1977 年关于这方面的文献有 700 多篇,到 1984 年却增加为 3000 多篇。从 1982 年至 1984 年的短短两年中,全世界共举行 20 多次关于模糊集理论及其应用的国际性会议。1985 年 7 月,在比利时卢万由北大西洋公约组织高级研究所主持召开模糊集理论及其应用会议,并出版文集作为

北大西洋公约组织高级研究所丛书系列之三《数学与物理科学》的第 177 卷。日本对所谓模糊工程理论的研究始于 80 年代初期,到 1987 年为止,应用模糊集理论进行实际技术开发的事例仅有 10 项左右。但近两年来,以大学和企业为中心,对模糊工程的研究迅速发展。1988 年夏季,以企业的研究人员为主的 300 多名模糊工程研究者参加了在福岡县飯塚市举行的国际研究会。包括正在研制开发的项目在内,模糊工程的实用项目已接近百项。

应该强调指出,我国在模糊集合论及其在工程模糊分析设计方面都进行了不少开创性的工作。从应用角度来看,由于广大模糊数学工作者和工程技术人员共同努力,在我国许多国民经济领域中取得了重要的成果,除气象预报、医疗诊断外,在林业、农业、采矿、冶金、地质、地震、机械、交通运输等各方面都分别进行了一些有实用价值的研究工作。正如扎德评价的那样,“从数量、质量和前景来看,中国学者对模糊集的研究是第一流的,应用是最广泛的。”

模糊集合论在船舶工程领域中的应用方兴未艾。自 1985 年以来,我国造船科技工作者在船舶结构模糊优化设计、船舶设计方案的优选和排序、船舶操纵性能的综合评判、舰艇噪声模糊识别等方面进行研究工作,取得了有益的成果,其中有些开创性的工作曾获得国外同行的好评。

1988 年,中国模糊分析设计学会成立。根据学科发展需要,学会设置“模糊设计与决策”、“模糊分析与控制”和“人工智能与专家系统”三个专业委员会。无疑地,该学会的成立对进一步开展我国工程模糊分析设计的研究和应用工作将起到推动作用。

最后应该指出,作为一门新兴学科来说,模糊数学资历浅薄,只能说是处于初始发展阶段,严谨完整的理论体系还不如研究事物随机性的概率统计数学,工程模糊分析设计方面的文献发表不算太多,研制开发的有用成果还不很大。但是我们深信,在科学技术的广阔天地里,模糊集理论和应用一定会有美好的发展前景,正如日本科技界有识人士惊呼:“模糊工程时代正在到来!”

第二章 集合简介

集合论是近世数学的基础，也是学习模糊集合论所必备的基本知识，本章将作一简要介绍。

§ 2-1 集合及其表示法

一、集合的概念

客观事物，浩如烟海。但是，我们在讨论一个具体事物时，总把议题局限于一定的范围内。这一讨论范围，即被讨论的全体事物，就称为论域 (universe of discourse)，常用大写字母 U 、 V 等表示。

给定一个论域，其中，具有某种属性的事物的全体，称为论域上的一个集合 (set)，常用大写字母 A 、 B 、 X 、 Y 等表示。

集合中的每一个事物，称为这个集合的元素 (element)，常用小写字母 a 、 b 、 x 、 y 等表示。

元素和集合是不同层次的概念，它们之间只有属于或不属于的关系，如

a 属于 A ，记作 $a \in A$ 或 a 不属于 A ，记作 $a \notin A$

非此即彼，两者必居其一，且必居其一。这是普通集合论的基本要求。

二、集合的表示法

通常，表示集合的方法有两种：列举法和描述法。

1. 列举法

当一个集合所包含的元素数为有限个时，该集合可表示为

$$A = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

例 1 设 A 为 $1 \sim 5$ 的自然数集合

$$A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

例 2 设 B 为一个学习小组成员的集合

$$B = \{\text{赵忠、钱平、孙立、李明}\}$$

C 为成绩评定集合

$$C = \{\text{优、良、中、差}\}$$

2. 描述法

当具有属性 $p(x)$ 的若干元素 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 组成一个集合时, 该集合可表示为

$$X = \{x | p(x)\}$$

例如 $A = \{x | x^2 - 1 = 0\}$

$$B = \{x | 0 \leq x \leq 4\}$$

$$C = \{x | x \text{ 是奇数}\}$$

$$D = \{x | x \text{ 是 1989 年所造的船舶}\}$$

$$E = \{x | x \text{ 是实数, } x^2 + 1 = 0\}$$

其中 A 和 B 两个集合的属性 $p(x)$ 用数学形式表达; C 和 D 两个集合的属性 $p(x)$ 用语言描述; E 集合中不含有任何元素, 称为空集 (empty set)。

此外, 集合还可用特征函数表示, 将在 § 2-3 中讨论。

§ 2-2 集合的运算

一、集合运算的概念

1. 包含 (contain)

设 A, B 是论域 U 上的两个集合, 如果对任一 $x \in U$, 由 $x \in A$ 可推得 $x \in B$, 则称 A 被 B 包含, 或 B 包含 A , 记作

$$A \subseteq B \quad \text{或} \quad B \supseteq A$$

此时, A 称为 B 的子集 (subset)。

如果 $B \supseteq A$ 与 $A \supseteq B$ 同时成立, 则称 A, B 两个集合相等,

记作

$$A = B$$

不含有任何元素的集合称为空集，记作 ϕ 。显然，对任意集合 A 有

$$U \supseteq A \supseteq \phi$$

2. 并 (union)

设 A 、 B 是论域 U 上的两个集合， A 、 B 的并集定义为

$$A \cup B = \{x | x \in A \text{ 或 } x \in B\}$$

3. 交 (intersection)

设 A 、 B 是论域 U 上的两个集合， A 、 B 的交集定义为

$$A \cap B = \{x | x \in A \text{ 且 } x \in B\}$$

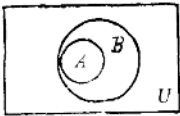
4. 补 (complement)

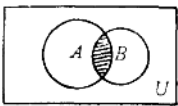
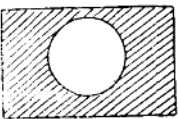
设 A 是论域 U 上的集合， A 的补集定义为

$$\bar{A} = \{x | x \in U \text{ 但 } x \notin A\}$$

此外，集合运算的概念可用文氏图 (Venn diagram) 图解表示。为了清楚起见，将上述运算的定义、图示和举例一并列于表 2-1。

表 2-1 集合运算的概念

运算	符 号	文 氏 图	例
包含	$A \subseteq B$ $(x \in A \Rightarrow x \in B)$		$\{1, 2\} \subseteq \{1, 2, 3\}$
并 (或)	$A \cup B = \{x x \in A \text{ 或 } x \in B\}$		$\{1, 2\} \cup \{2, 3\} = \{1, 2, 3\}$

运算	符 号	文 氏 图	例
交 (且)	$A \cap B = \{x x \in A \text{ 且 } x \in B\}$		$\{1, 2\} \cap \{2, 3\} = \{2\}$
补 (非)	$\bar{A} = \{x x \in U \text{ 但 } x \notin A\}$		$\overline{\{1, 2\}} = \{x x \neq 1, 2\}$

二、集合的运算法则

表 2-2 列出集合的几条运算法则，它们都是成对出现，可用文氏图加以证明。

表 2-2 集合的运算法则

序号	名 称	运 算 法 则
1	幂等律	$A \cup A = A \quad A \cap A = A$
2	交换律	$A \cup B = B \cup A \quad A \cap B = B \cap A$
3	结合律	$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$ $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$
4	吸收律	$A \cup (A \cap B) = A \quad A \cap (A \cup B) = A$
5	分配律	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
6	复原律	$\overline{\bar{A}} = A$
7	对偶律	$\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B} \quad \overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}$
8	两级律	$A \cup U = U \quad A \cap U = A$ $A \cup \phi = A \quad A \cap \phi = \phi$
9	互补律	$A \cup \bar{A} = U \quad A \cap \bar{A} = \phi$