模糊分析设计在石油工业中的应用

肖芳淳　张效羽　张　鹏　姚安林　编著

石油工业出版社

前　言

模糊集合理论的诞生，使人们在处理事物的不确定性方面增加了一个强有力的工具。尽管只有短短20多年的历史，由于独特的思想体系和灵活的应用方法，这门学科发展迅速，已在许多领域得到了广泛应用。尤其是高速计算机与模糊集合理论方法的结合，给人工智能的研究带来了新的曙光，尤为令人瞩目。

石油工业是技术高度密集的行业，现代科学技术的绝大多数新思想、新成果都能在这里找到用武之地。由于石油工业的各个领域均存在着大量模糊现象和模糊因素，有时这样的因素甚至占居主导地位，所以模糊集合理论这门新兴学科在该领域也有着很强的实用性。近些年来，模糊集合理论的思想和方法已渗透到诸如石油地质分析，信息处理，油水层的识别、划分，含油圈闭的分类，石油机械和油气管道工程的优化设计，设备选型，系统的效益评估和故障诊断，油田开发方案的制定，经济效益和社会效益的综合评价等许多方面，初步显示了这门学科在石油工业领域里的实用性和广阔前景。但是必须看到，模糊集合理论在石油工业中的应用起步较晚，同它在另一些领域里的应用相比是比较落后的。即使就这门学科能够在石油工业中发挥的作用而言，这项工作也仅是刚刚开始。本书的目的就是希望通过编者的这些工作，能使更多的人、尤其是石油工业领域里更多的科技工作者了解模糊集合理论以及在石油工业中应用的巨大潜力，推动这项工作更加迅速的展开。

由于本书主要是针对有关工科院校的本科生、研究生以及一般工程技术人员而编写的，因而编写时力求深入浅出，结合例子说明问题，对其中的定理均未作严格的证明。全书大致可分成两个部分，第2～8章为第一部分，第9～13章为第二部分。前者简要介绍了模糊集合理论的基本概念和常用方法，后者为近些年来国内在石油工业领域里应用模糊分析设计方法的部分实例，由于我们知识面和占有资料的有限，肯定有不少更好的例子未被收入，有待再版时增补。此外，第14章结合编者在这方面的部分工作，简要阐述了模糊分析设计的前景展望以及模糊集合理论与不同学科结合而深入发展的可能性。

全书共计14章，其中第1、2、3、5章和前言由张效羽编写；第4、6、11章由张鹏编写；第7、8、9、14章由肖芳淳编写；第10、12、13章由姚安林编写。全书由肖芳淳统编定稿。

王光远教授在百忙之中抽出时间，对全部书稿进行了认真仔细地审阅，编者在此表示衷心的感谢！

编写这样一本涉及数学、模糊数学等许多学科以及石油工业各个领域等众多方面内容的书，难度很大。尽管编者作了最大努力，但鉴于我们水平和能力的有限，书中缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

编　者

1991年12月

序

在工程问题中存在着大量不确定性的因素和信息。目前已被人们认识和积极研究的不确定性有三种：某些未来事物的随机性；无法精确定义和测定的事物的模糊性；决策者主观认识不清的事物的未确知性。只有正确地处理这些不确定性才能进行正确的规划、决策和设计。

过去由于人们不会对这些工程中的不确定性信息进行合理的数学处理，不得不采用二种极端的手段。一种办法是把所有信息都当作不可知的，或无法应用的；例如一些重大的决策（如工程项目的可行性论证；设防水平的选择，最优可靠度的给定等）常常由决策者"拍脑袋"决定，有时就会造成重大的失误。另一种办法是把所有信息都当作绝对精确的，完全确定的。例如在结构分析中，把结构、荷载、边界条件和初始条件都当作确定性的，要求什么"答案的唯一性"；在结构设计中把目标函数、约束条件都当作确定性的，要求什么唯一的"最优解"。实际上，拍脑袋和绝对化都是一种不得已的无能为力的表现，随着科学的发展都会逐步找到合理的处理方法。本书就是适应这个需要而编写的，反映这个领域最新成就的佳作。

本书分为三大部分。

第一部分（第1～8章）介绍了模糊分析和设计的工程背景、模糊集合理论的基础知识、模糊优化、模糊决策、模糊控制、模糊可靠性和模糊价值分析。它包括了模糊数学在工程应用中的主要数学工具和具体的方法，这部分深入浅出，概念清楚，容易为读者所接受和掌握。其中在模糊可靠性分析和模糊价值分析方面还包含作者们的创造性的研究成果。

第二部分（第9～13章）是上述基本理论和方法在石油地质勘探、石油开发、石油机械、油气储运和石油管理工程中的应用。它几乎包括了石油工业的各个主要领域。在这些应用中都包含有作者们的创造性劳动。这些成果具有很高的应用价值。

在第三部分（第14章）中，作者还对模糊分析与设计在断裂力学、复合材料中的应用，与灰色系统理论、物元分析的结合，以及工程大系统全局优化技术的延拓的可能性进行了探讨。这部分有很多独到的见解。

本书所提出的各种方法，不仅可以应用于石油工业，而且可以为解决其他工程问题所借鉴。预祝本书在我国社会主义建设事业中发挥重要作用。

王光远

1992年5月于哈尔滨

目　录

1. 绪　论

1.1　对精确性的追求导致了模糊集合理论的产生

纵观现代科学技术及其发展，数学的精确性无所不在，“无所不能”。微积分学的建立，使人们能够准确描述变量和运动；精确的数学及力学方法，可预测到人们尚未知晓的行星及远在宇宙深处天体的运行规律；现代的计算方法，能够将极其复杂的大型结构分割成极小单元而算清楚每一处的具体情况，能够使人们坐在室内控制火箭发射和航天飞机的运行并将其准确回收，……所有这些，都给科学技术打上了“绝对精确”这个鲜明的烙印。

数学及其精确性最令人鼓舞的成就之一是电子计算机的出现、发展和广泛应用。可以说，计算机的严格和精确到了无以复加的地步，冰冷刻板的二值逻辑在高速电子的运动下显示出了“超人”的能力。它不仅能以每秒上亿次的速度进行运算，还能解决许多人们无法解决的复杂问题，甚至能战胜高超的棋手，证明象“四色问题”这样长期困扰世界科学家的难题，创造出了一个又一个的奇迹。以至人们惊呼：这简直是计算机对人类智慧的嘲弄和挑战！

一切的一切，似乎都在说明这样一个问题：通过精确的描述和计算，可以解决科学技术上的所有问题。而事实上，人们也的确追求过这种完美的目标。

不幸的是，现实世界并没有如此理想。精确性在不断发展、成功的同时也为自己设下了一道道难以逾越的鸿沟。

首先，客观世界中的许多事物无法精确描述。在数学里，满足排中律的康托集合是表达概念的基本方法，1就是1，2就是2，泾渭分明，毫不含糊。但是，象“美丽的小姑娘”，“矮胖的大胡子”，“强烈地震”，“轻微破坏”等概念，均无法用这类集合描述。经典数学碰到这类问题时，一般采用两种态度，一是人为地设定一些阈值，将模糊不清的界限强行分开。二是干脆回避，诸如“美丽”，“大胡子”，“强烈”，“轻微”等概念，数学不承认是自己讨论的范畴。然而，随着科学的发展，过去那些同数学关系不大或毫不相干的学科，例如生物学，生理学，语言学，人文科学，医疗诊断等领域，都迫切要求定量化和数学化。这些学科都包含大量的模糊现象，难以用精确的数学方法描述，人们无法再一味回避，更不能为了迁就现有的数学方法而舍弃学科的固有特点和内在规律。数学该如何办？

其次，精确意味着搞清事物的每一个细节，这促使人们将问题分得越来越细，可分得越细就会使问题变得越复杂，以至于形成了“越想使问题精确，问题就变得越无法精确”的恶性循环。精确方法在这儿进入了“死胡同”，如何走出来？

再者，看一看被称之为当代科学奇迹的电子计算机。尽管能以惊人的高速度进行运算，能解决许多“难而又难”的难题，可在那些人们看来再简单不过的事情面前，计算机却是一筹莫展。例如，“具有和蔼可亲性格的人”大家都喜欢，连孩子们也分得清，但让计算机辨认这样的人却毫无办法。原因在于“和蔼可亲的性格”这个概念高度概括，无法用精确的数

据或是非分明的集合表述，因而计算根本无法接受和理解。这里精确性不灵了。

所有这些矛盾，都是与精确性的绝对思维方法同时存在的，无法通过更加“精确的”方法加以解决。出路何在？

幸好，人们总可以想出办法。

1965年，美国加利福尼亚大学L.A.Zadeh（札德）教授首先提出了“模糊集合”的概念，为描述模糊现象提供了数学依据。所谓模糊集合是这样的集合，它不要求一个对象要么绝对属于自己，要么绝对不属于自己。换句话说，模糊集合的边界是不清晰的，是模糊的，事物从不属于该集合到属于该集合是逐渐过渡的，不再是泾渭分明，而是亦此亦彼。为了描述某事物对模糊集合的属于程度，用闭区间〔0，1〕上的一个数值进行度量，这个数称之为隶属度。如果隶属度随事物的不同而变化，便称其为隶属函数。以模糊集合为基础而建立的一整套数学理论和应用方法，常称为模糊集合理论或模糊数学。模糊现象与数学相结合，绝不是让数学变成模模糊糊的东西，而是将数学引入具有模糊现象的领域，使数学这个强有力的工具能够处理模糊现象，使数学方法的适用范围更加广泛。

模糊性是事物之间差异的连续变化而产生的一种不确定性，从而导致了概念外延的不清晰，无法对事物作出精确的定义。随机性是另一种不确定性，这里事件的定义是明确的，但是否发生不确定。模糊性和随机性从两个不同的方面反映了事物的不确定性，有着根本的区别。虽然隶属函数和概率均用区间〔0，1〕上的数值表示，但其意义完全不同，初学者要注意对二者的理解。

1.2 模糊分析设计的背景和方法

分析、设计，历来是精确性驰骋的领域。一般说来，分析是指对给定的事物或对象进行性能评估，这里的性能可以是造价、重量、承载能力、可靠性、寿命等等。设计通常指给定一系列性能要求和有关准则，生成一个满足这些要求及准则的对象，优化设计则进一步要求在某种意义下的寻优。无论是分析评价一个系统或一个工程项目，还是设计一个新的结构，都离不开大量的准确计算。然而，正是人们长期以来不断追求精而又精的计算，一直用绝对精确的思维方式处理问题，忽略了大量的模糊现象，使许多问题在一定程度上未能反映真实情况。

1.2.1 简化模型与客观实际的差异

在分析设计过程中，常常要将研究对象抽象、简化成特定的模型，例如力学中的刚性结构，光滑铰支，质量一弹簧系统，理想流体，大型工程中的结构简化模型，优化问题中的数学模型等等。这种将研究对象进行科学抽象、合理简化后建立模型的方法，可以在一定范围内反映事物的本质内容，突出主要矛盾，以便用经典的数学方法进行严格精确的分析。在许多情况下，这种方法发挥了重大作用。然而必须看到，抽象后的模型毕竟只是实际问题的一种近似，与客观事物并不完全等同，因此只是相对正确。其原因之一是略去了一些在某种意义上的次要因素，当情况改变时，这些所谓次要因素的影响可能变得不应忽略。原因之二是，客观事物本身具有模糊性，由于无法用经典的数学方法予以精确描述，不得不在建立模型时舍去这些模糊因素。例如，力学中的“光滑铰支”是一个常用的计算模型，该模型认为

铰接处不承受任何力矩。但是绝大多数作为光滑铰支处理的实际结构，节点处都存在相当的力矩。之所以这样简化，是因为节点处的反力矩从无到有的过渡是渐进的，界限并不分明，为了得到一个清晰的模型，只好舍弃这些模糊因素。这样推出的结果必然与实际情况有出入。如果能在建立模型时充分考虑到事物的模糊性并进行恰当处理，则会得到与实际情况更为吻合的结果。

1.2.2 数量化标准的不合理

工程分析设计的特点之一是要求数量化，许多设计参数均是以一个数值或一个限定区间给出，作为判断、分级、设计取舍的标准。例如在常温、静载下，16锰钢的许用应力值是$[\sigma]=235\mathrm{MPa}$，这在设计中意味着，实际应力为236MPa时结构不安全，是不允许的；而实际应力是235MPa时结构安全，是允许的。这种规定显然难以令人信服，因为实际应力是236MPa和235MPa在本质上没有什么差异，却被分成不安全和安全这两种截然不同的状态。矛盾出自实际应力由小到大增加时，构件从"安全"到"不安全"是逐渐过渡的，"安全"和"不安全"均属模糊概念，无法用一个明确的界限截然分开，又如《中国地震烈度表(1980)》规定，地震时地面水平加速度峰值在90～177厘米/秒^{2}时，烈度为7度，在178～353厘米/秒^{2}时为8度。而同时，在抗震结构设计中，8度地震的地震载荷为7度的2倍。这样，177厘米/秒^{2}为7度，178厘米/秒^{2}即为8度，从而确定的地震载荷有成倍的差异，这显然极不合理。这种用"一刀切"的方法作出硬性划分，除了上述的不合理性之外，还容易在设计过程中失去较优的方案。人们早就对这种处理方法感到不满，但一直未能找到妥善的解决办法。模糊集合理论的出现，使人们立即想到用模糊边界代替人们设定的所谓"清晰"边界，在分析设计过程中恢复事物的本来面目。

1.2.3 大系统的出现，使复杂性与精确性的矛盾越来越突出

随着科学技术的发展和人类要求的不断提高，许多问题越来越复杂，每个问题都构成一个错综复杂的系统，众多学科相互交叉影响，每一个细节都是整体的有机组成，牵一发而动全身。例如我国的长江三峡工程就是一个巨大的系统工程，由许许多多子工程（或称子系统）构成，而每一个子工程本身也是一个复杂的系统，各个子工程之间相互影响，但都必须满足整体要求或使整体最优。在这样复杂的系统面前，人们对其精确描述的能力显得苍白无力。L.A.Zadeh教授1973年指出："当一个系统复杂性增大时，我们使它精确化的能力将降低，在达到一定阈值时，复杂性和精确性将相互排斥。"这就是著名的"不相容原理"，它尖锐地指出了当代科学中的一个基本矛盾就是复杂性与精确性之间的矛盾。这就是说，要对所有现实的物理状态都进行精确描述是不可能的。为了把整体问题搞清楚，必须在准确性与简明性之间取得平衡，使得既减少复杂性而又不过于简单化。J.A.Goguen说得更明确："描述的不确切性并非坏事，相反，倒是件好事，它能用较少的代价传输足够的信息，并能对复杂事物作出高效率的判断与处理。也就是说，不确切性有助于提高效率。"在这方面，人类的思维方式是无与伦比的，对此，被誉为计算机之父的Von Neumann指出："神经系统是这样一台计算机，它在一个相当低的准确度水平上进行非常复杂的工作。它只可能达到二至三位十进制数字的准确度水平。我们还不知道有哪一种计算机在这样低的准确度水平上仍能可靠地、有意义地进行运算。"这里，人脑的思维以较低的精度换来了相当高的可靠度，相比之下，计算机实在太渺小了。模糊集合理论的诞生，使人们开始放弃对所有问题

追求精确解答，试图以较低的精确性换取对复杂问题的简化。也正是模糊集合理论这方面的优点，使其在许许多多领域得到了广泛应用。

在分析设计过程中充分考虑事物的模糊性，让模糊现象参与分析设计全过程，而不是在一开始就人为地“简化”掉事物固有的模糊性特点，发挥模糊性、概括性处理问题的优势，使分析设计更符合实际，更全面有效，是模糊分析设计思想的宗旨。从以上讨论可知，这不仅仅限于工程科学和具体结构、零件的分析设计，还包含人们的主观参与和系统分析方法，例如决策过程，系统控制等。当前，模糊分析设计在以下诸方面已经得到了较为普遍的应用，或者已开始得到人们的高度重视。

一、模糊识别和模糊聚类分析

识别，也称模式识别，简单地说就是对事物进行辨认，这包含对事物的理解、描述及综合，从这个意义讲，聚类分析也属于模式识别的范畴。这方面简单的工作诸如文字、图象的辨认，机械零件的选材和分类，系统故障诊断等。模式识别的理想方式是通过大量信息对复杂过程进行学习、判断及寻找规律，并能不断地在更高层次上反复这个过程。作为一门新兴学科，模式识别的应用涉及到许多领域，甚至有人断言，象自动控制这样的问题，唯一有希望解决最终问题的途径，是应用模式识别和人工智能的综合成果。在这些方面，人类思维具有明显优势。人们非常善于把感觉信号变为认识符号，也善于用常识解决问题，但是人脑在大量数据面前就感到“力不从心”了。计算机的出现帮助人们解决了这个问题，可计算机又缺乏人类思维的“灵性”，缺乏概括能力和创造能力。使用模糊集合理论这个有力的工具，使这一希望变得更加接近现实。

二、模糊综合评判

对事物作出评价通常要考虑到各方面的因素及其相互影响，故称之为综合评判。大系统和复杂工程的出现，使这一工作变得困难重重。因为大系统中的因素十分繁多，各个因素相互影响、相互制约。此外，各因素对整体的影响和相互间的关系很难用精确的概念表述。要综合所有因素对事物整体作出切合实际的评价，人们往往有顾此失彼的感觉，或“只见树木不见森林”之偏颇。应用模糊集理论之后，这方面状况得到了很大改观。模糊综合评判是目前模糊集理论应用最活跃、最广泛的方面之一。

三、模糊优化设计

自从计算机问世并广泛使用以来，优化设计理论及其应用几乎进入了每一个设计领域，传统的“选型—验算”设计模式得到了彻底改变。模糊优化设计理论认为，应该在模型建立，边界条件，目标函数等各方面充分考虑到实际情况的模糊性，并让这些模糊因素参与整个优化计算过程。这种思想和方法已经在许多实际问题中取得了显著效益。然而，尽管模糊优化设计方法是模糊集合理论应用最活跃的形式之一，但目前在理论上和实用上都还有不少需要进一步深入探讨的问题。

四、模糊决策

从习惯上讲，决策似乎是靠人们“拍脑袋”而形成的。随着决策论的问世和计算机的参与，决策也逐步进入了科学化的行列。不难发现，决策过程中的模糊因素更为常见、更为重要，这不仅因为决策要考虑所有的方面，还因为决策过程需要更多的人为因素参与。模糊决策是模糊集理论应用较晚的方面，要做的工作还很多。

五、模糊控制

我们人类语言涉及到大量的模糊概念，诸如较好，很好，差不多等，这些都是电子计算机所无法理解的。为了让计算机与人一样灵活地处理各种复杂情况，就必须使语言中的模糊概念定量化，这称之为“智能语言”，也叫“模糊语言”，用这种语言来实现自动控制，就是所谓的“模糊控制”。由于模糊控制能够模仿人的思维方式进行控制操作，所以这种思想一经出现，立刻引起了人们的极大关注。国外已经在这方面进行了大量的实用性研究，最近，具有模糊控制能力的洗衣机和能够预测摄影者对构图、聚焦、图像大小和曝光要求的模糊照像机都已问世。事实证明，对于那些工作环境变化大、稳定性很差的系统以及难以建立清晰数学模型的系统的控制问题，模糊控制器均能发挥很好的作用，而常规控制器却难以正常工作或根本无法实现。此外，模糊计算机和高级人工智能的实现，也将依赖于模糊控制。这是一个前景极为广阔、极为诱人的领域。但同时应该看到，虽然已经有了一些成功的事例，模糊控制的理论及应用历史毕竟十分短暂，尚有许多工作等待人们去研究、探索。

六、模糊可靠性分析

可靠性是分析、考察、设计工程系统的重要指标之一。建立在概率论基础上的经典可靠性理论可解决随机可靠性问题。但实际上，工程系统的安全性、可靠性具有很强的模糊性，可靠性分析中不可避免地存在许多模糊因素。因此，应该同时考虑随机性和模糊性对工程系统进行可靠性分析。

七、模糊价值分析

价值分析是一门较新的学科，它从分析产品的功能、造价以及二者的相互关系入手，探讨如何获得功能好、造价低的产品。本书编者将模糊集理论应用于这门学科之中，使二者相互交触，形成了模糊价值分析的雏形，取得了一些成果，在国内有关学术会议上得到了同行专家学者的肯定。特别是在模糊价值分析中所提出的改进田中法等方法，成功地解决了油气管道输送的价值分析问题。

本书将分别对上述几个方面的基本概念、基本方法作些介绍，不准备进行理论上的系统论述。读者若需对某个方面作系统深入的了解，可参阅有关专著。

1.3 模糊分析设计在石油工业中的应用与前景

模糊集理论自诞生以来，只有26年（1965～1991）的历史，可以说是较年轻的学科，其理论远远不如古老学科那样完善，但由于惊人的生命力和渗透力。在这短短的20多年里得到了突飞猛进的发展，并在许多领域得以广泛应用，取得了瞩目的成果。

石油工业是技术高度密集的行业，现代科学技术的绝大部分新成果，都可以在石油工业领域中找到用武之地。例如我国自行设计制造的上亿次巨型计算机——银河计算机，就是首先满足石油勘探方面的需要；1991年底研制成功的KJ8920大型计算机系统，也是最先应用于这个领域。模糊集合理论这门新兴学科也不例外，因为在石油工业的各个方面，同样存在大量的模糊现象。近十多年来，许多有识之士在模糊集理论应用于石油工业领域方面做了大量的理论研究和应用尝试，取得了可喜的成果。

石油地质勘探工作是从地质地面调查，地球物理勘探到钻井这样一个不断提供石油信息的过程，最终结果在全部工作结束前是不确定的。比如钻一口探井，其结局有“出油”，“出气”，“出水”，“干井”这四种可能，事前无法确切知道是哪一种结局。但工作中对于不

同的结局需要预先准备不同的工作方式，怎样安排这种不同结局的工作方案呢？模糊决策分析是一种行之有效的方法。

面对一个新探区，如何布置地震测线，如何选择井位，首先钻哪个圈闭，钻探出油后如何调整钻探井位等勘探过程中的一系列问题，都需要决策者考虑各种因素及时作出决策。这方面的许多因素都具有很强的模糊性，难以靠准确的计算作出决策分析，因而模糊决策分析方法有着很好的适用性。例如某油田采用模糊决策分析的手段，对某区块开发方案进行评价与优选，作出了正确的决策，结果发现这一区块属凝析气藏，储量可观。

石油地质学中定性描述的方法目前仍居主导地位，因而模糊数学在该领域有着广泛的运用前景。事实上，近年来模糊数学方法在用于寻找含油气有利地带方面，表现得非常出色。例如，通过一系列手段，可获得有关含油性的地质资料，即有关含油性的信息，然后通过对这些信息的分析、研究，形成是否含油的结论。这些信息本身以及它们与含油性之间的关系包含着大量的模糊性和随机性。这样，就把计算含油信息量的问题变成了如何确定含油或不含油的模糊概率问题。这涉及到我们对油藏形成的客观过程的认识是否符合实际。模糊数学的方法可以帮助我们建立更加符合实际的油藏形成模糊概率模型。所谓油藏形成模糊概率模型，就是各种地质因素（变量）与含油性模糊概率之间的关系，这可以利用老油区统计资料建立对比模型或理论模型。由于这种方法既能运用数学和计算机进行快速准确的分析，又保留了石油地质分析中定性描述的特点，因而引起了石油地质工作者的极大兴趣与关注。随着进一步的探索与开拓，这种方法肯定会发挥更好的作用。

在石油地质圈闭含油性分类，石油机械零件分类等问题中，要将许多事物按照一些带有模糊性的标准划分成若干类别，这属于模糊聚类分析的范畴。应用这种方法，可以根据要求将所分类数的多少进行调整，因此，这是一种灵活的“动态分类”。又如对油水层的识别，涉及到大量的模糊特征，模糊识别方法现已在这方面得到了应用。

对一台石油钻机的效益评估，一座油气管桥设计方案的确定，一项管理项目的评价，都要事先考虑各项指标的重要程度，随后才能作出综合的评价。模糊综合评判问题的关键之一是确定各项指标在评价中的权重，这需要对具体问题进行大量深入细致的研究，寻找各自符合实际情况的权重体系。目前，模糊综合评判方法已在石油机械零件的故障分析与诊断，石油地质圈闭的综合评价，水力压裂缝高的模糊估计，孔隙性碳酸盐岩储集层的分类等许多方面广泛应用，取得了良好效果。

油井抽油参数的选择和新油井的设计，采用模糊优化设计的方法，增产效果显著，经济效益远远超过了常规设计。斜拉索管桥的模糊优化设计方案与普通优化设计方案相比，不仅节省了材料费用，而且更能发挥斜拉索管桥结构的承载潜力。至于油田开发方案的制定，矿区设计，生产能力的合理调配，运输工具的统筹规划等等，由于存在大量模糊因素，均与模糊优化设计有密切关系。

随着模糊可靠性设计思想的不断发展，最近我们提出了模糊广义因子设计法，解决了由经典设计向模糊可靠性设计的过渡问题。这种方法能使人们从设计一开始，既考虑到强度设计，又考虑到可靠性设计，很容易满足设计的总体要求。这不仅适用于象长输管道这样整体结构的设计，而且也适用于象套管柱这样单个零件的设计。此外，我们把模糊可靠性设计与模糊价值分析相结合，得到了模糊价值可靠性分析设计方法，这对于造价昂贵，可靠性要求高的石油机械，石油储运设备，石油化工设备等提供了更为全面可靠的模糊分析设计方法。

当然，这尚是一片待开垦的处女地，具有很强的实用价值，有待勇于探索的石油科技工作者去研究、开发。

以上所述，充分展示了模糊分析设计理论与方法在石油工业各个领域的应用与广阔前景，说明了它能在石油工业中大显身手，坚信在不久的将来会产生更大的经济效益和社会效益。

2. 模糊集合基础知识[1,2]

本章简要介绍有关模糊集合的最基本概念和思想，这对熟悉模糊数学的读者来说，无疑是过于简单。希望初次涉足该领域的读者能由此对模糊集合知识有个概要的了解。

2.1 模糊集合及其基本性质[3,4]

2.1.1 集合的概念[5,6]

具有特定属性的确定对象的全体，称为集合，简称集。这些对象称作集合的元素。

集合是现代数学最基础的概念之一，可用来表示概念。我们知道，概念由内涵和外延构成，一个概念所包含的区别于其它概念的全体内在性质构成它的内涵，而符合此概念的对象的全体称为此概念的外延。例如“人”这个概念，其内涵是人与其它动物区别的本质属性的全体，诸如“有语言表达能力”，“会直立行走”等等，而它的外延就是世界上所有的人。我们要表达一个概念，可以用内涵法，即给出概念的定义；也可以用外延法，用一个集合列出属于此概念的所有对象。

集合通常用大写字母表示，如A，C，E等。集合的元素简称为元，常用小写字母表示，如a，c，x等。不包含任何元素的集合称为空集，记为Φ。

为了讨论的方便，我们常常将问题限制在某一特定的范围之内考虑，用集合论的观点说，就是将考虑的因素限制在某一集合中，这个集合称之为论域，有时也被称为全集，常用大写字母表示，例如U，V，Ω等。初等代数是在实数范围内考虑问题的，故实数集E就是初等代数的论域（或全集）。类似地，实数集对于整数集和有理数集是全集，而整数集对于偶数集和奇数集是全集。

如果集合A的每个元素都是集合B的元素，则称A是B的子集，记为

$$A\subseteq B \tag{2.1}$$

显然，一个非空集合至少有两个子集：集合本身和空集。

进一步，设A和B是两个集合，如果$A\subseteq B$且$A\neq B$，则称A是B的真子集，记为

$$A\subset B \tag{2.2}$$

此时A中所有元素均属于B，而B中至少有一元素不属于A。

如果$A\subseteq B$且$B\subseteq A$，则两集合相等，记为

$$A=B \tag{2.3}$$

这时A与B的元素完全相同。

集合之间可以进行运算，构成新的集合。最常用的有

（1）并：集合A和B的并集记为$A\cup B$，是由A和B中所有元素构成的集合，即

$$A\cup B=\{u|u\in A,\ 或u\in B\} \tag{2.4}$$

例如，若$A=\{3,\ 5,\ 7\}$，$B=\{7,\ 9,\ 11\}$则

$$A\cup B=\{3,\ 5,\ 7,\ 9,\ 11\}$$

（2）交：集合A和B的交集记为$A\cap B$，它是由A和B的共同元素构成的集合，即

$$A\cap B=\{u|u\in A且u\in B\} \tag{2.5}$$

（3）差：集合A与B的差集记为$A-B$，它是由属于A但不属于B的元素构成的集合，即

$$A-B=\{u|u\in A但u\notin B\} \tag{2.6}$$

（4）补：设U为一全集，A为U上的子集，则集合$U-A$称为A的补集，用A^c表示，即

$$A^c=U-A=\{u|u\in U但u\notin A\} \tag{2.7}$$

集合与集合间的关系，可用一种称作文氏图的图形直观地表示，以帮助理解，如图2-1所示。

2.1.2 模糊集合的概念及表示

尽管集合可以由各种不同的元素构成，但它的边界必须是清晰的、确定的，即论域上的某个元素要么属于该集合，要么不属于该集合，二者必居其一、仅居其一。

然而，客观世界中大量存在边界不清晰的集合。例如“很漂亮的人”，“略阴的天气”等。再如，“高高的个子，棕色头发，面色苍白，胖胖的脸上有不太浓的络腮胡子”这类描述给我们的是一个很模糊的概念，某个人是否属于该描述所定义的人，是不肯定的，似是而非的，或者说是在某种程度上属于的。我们将这种集合称之为模糊集合，并用一个〔0，1〕上的数值来表示元素属于这种集合的程度。L.A.Zadeh给出的定义是：

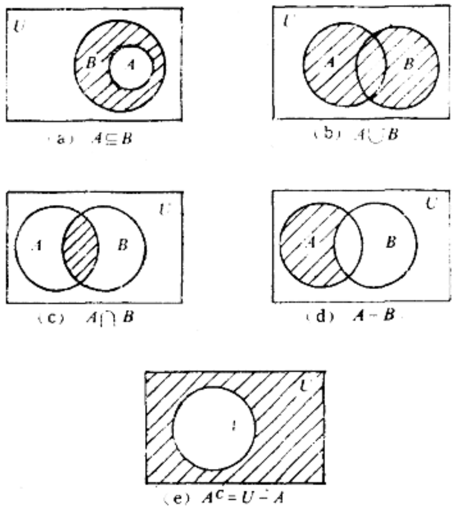

图2-1 集合的关系及运算

所谓论域U上的一个模糊集合（也称模糊子集）$\underset{\sim}{A}$，是指给定一个从U到〔0，1〕区间的映射：

$$\begin{aligned}&\mu_{\underset{\sim}{A}}:\ U\rightarrow[0,\ 1]\\&u\rightarrow\mu_{\underset{\sim}{A}}(u\in[0,\ 1])\end{aligned} \tag{2.8}$$

式中$\mu_{\underset{\sim}{A}}$叫做$\underset{\sim}{A}$的隶属函数；$\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)$叫做元素$u$对于$\underset{\sim}{A}$的隶属度，其值愈大，$u$对$\underset{\sim}{A}$的隶属程度愈高。当$\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)=1$时，$u$肯定属于$\underset{\sim}{A}$；当$\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)=0$时，$u$肯定不属于$\underset{\sim}{A}$。当$\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)$仅取1，0两值时 隶属函数$\mu_{\underset{\sim}{A}}$便蜕化为普通集合的特征函数，$\underset{\sim}{A}$蜕化为一个普通集合。所以，普通集合是模糊集合的特殊形态。

有时为了方便，将一个元素u对一个模糊集合$\underset{\sim}{A}$的隶属度直接写成$\underset{\sim}{A}(u)$，即

$$\underset{\sim}{A}(u)=\mu_{\underset{\sim}{A}}(u) \tag{2.9}$$

这也意味着一个模糊集合$\underset{\sim}{A}$与其隶属函数$\mu_{\underset{\sim}{A}}$可以不加区别，即

$$\underset{\sim}{A}=\mu_{\underset{\sim}{A}} \tag{2.10}$$

这些记法不仅简单，而且也在情理之中，我们将不时使用。

如果以论域的元素为横坐标，隶属度值为纵坐标，则可用图形直观表达一个模糊集合。如图2-2，$\underset{\sim}{A}$，$\underset{\sim}{B}$，$\underset{\sim}{C}$的论域均为实数域E，$\mu(u)$是E上的连续函数，这种实数域E上的模糊集合很常见，称作模糊分布。而$\underset{\sim}{D}$的论域是有限论域$\{a，b，c，d，e，f\}$。

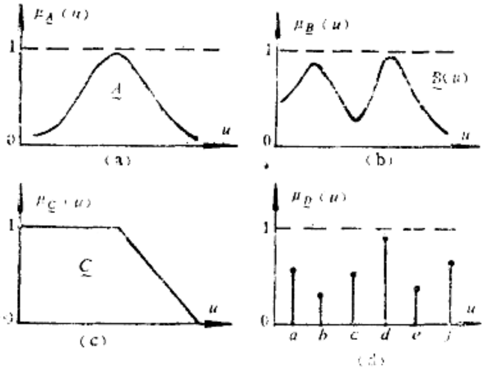

图2-2　模糊集合的图形表示

当论域为有限时，模糊集合可以用以下几种方法来表示。

一、向量表示法

将论域U上每个元素的隶属度按顺序列出，构成一个向量，即可表示U上的一个模糊集合。这种向量称作模糊向量。例如，设论域

$$U=\{a，b，c，d，e，f\}，$$

$\underset{\sim}{A}$为U上的模糊集合，各元素对$\underset{\sim}{A}$的隶属度分别为$\underset{\sim}{A}(a)=0.8$，$\underset{\sim}{A}(b)=0.9$，$\underset{\sim}{A}(c)=0.3$，$\underset{\sim}{A}(d)=0.5$，$\underset{\sim}{A}(e)=0$，$\underset{\sim}{A}(f)=0.6$。那么按向量表示法，$\underset{\sim}{A}$可表示为

$$\underset{\sim}{A}=(0.8，0.9，0.3，0.5，0，0.6)$$

二、札德表示法

用这种方法，上例中的$\underset{\sim}{A}$则表示为

$$\underset{\sim}{A}=\frac{0.8}{a}+\frac{0.9}{b}+\frac{0.3}{c}+\frac{0.5}{d}+\frac{0.6}{f}$$

此处的“—”和“+”不是通常的分数线和加号，而是一种特定的记号。“—”的下面记元素，上面记该元素对此模糊集合的隶属度；“+”是“联”的意思。当元素的隶属度为0时，通常可不写出。

三、序列表示法

将元素及其隶属度构成有序对，一一列出。上例中的$\underset{\sim}{A}$则可表示为

$$\underset{\sim}{A}=\{(0.8，a)，(0.9，b)，(0.3，c)，(0.5，d)，(0，e)，(0.6，f)\}$$

对一般论域，札德记法为

$$\underset{\sim}{A}=\int_U \frac{\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)}{u} \tag{2.11}$$

式中符号“∫”不是普通的积分号含义，而是“联”的意思。

2.1.3　模糊集合的运算

如何将普通集合的运算法则推广到模糊集合中才算合理？或者说，模糊集合应该具有什么样的运算规则？这仍是一个值得继续研究的问题。目前，我们一般仍用札德给出的定义。

模糊空集合：所谓模糊集合$\underset{\sim}{A}$为空集，系指对所有的$u\in U$，均有$\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)=0$，记作$\Phi$，

即

$$\underset{\sim}{A}=\Phi \Longleftrightarrow \mu_{\underset{\sim}{A}} \equiv 0 \tag{2.12}$$

包含：设$\underset{\sim}{A}$，$\underset{\sim}{B}$是U上的模糊集合，如果对所有的$u\in U$均有$\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)\leqslant\mu_{\underset{\sim}{B}}(u)$，则说$\underset{\sim}{A}$是$\underset{\sim}{B}$的模糊子集，在不发生混淆时，也简称$\underset{\sim}{A}$是$\underset{\sim}{B}$的子集，记作

$$\underset{\sim}{A}\subseteq\underset{\sim}{B} \tag{2.13}$$

也就是说

$$\underset{\sim}{A}\subseteq\underset{\sim}{B}\Longleftrightarrow\mu_{\underset{\sim}{A}}\leqslant\mu_{\underset{\sim}{B}} \tag{2.14}$$

相等：如果$\underset{\sim}{A}\subseteq\underset{\sim}{B}$且$\underset{\sim}{B}\subseteq\underset{\sim}{A}$，则称$\underset{\sim}{A}$与$\underset{\sim}{B}$相等，记作

$$\underset{\sim}{A}=\underset{\sim}{B} \tag{2.15}$$

设$\underset{\sim}{A}$，$\underset{\sim}{B}$为U上的模糊集合，隶属函数分别为$\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)$，$\mu_{\underset{\sim}{B}}(u)$，定义$\underset{\sim}{A}$，$\underset{\sim}{B}$的运算如下：

（1）$\underset{\sim}{A}$与$\underset{\sim}{B}$的并集记为$\underset{\sim}{A}\cup\underset{\sim}{B}$，即

$$\begin{aligned}\mu_{\underset{\sim}{A}\cup\underset{\sim}{B}}(u)&=\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)\vee\mu_{\underset{\sim}{B}}(u)\\&=\max\{\mu_{\underset{\sim}{A}}(u),\ \mu_{\underset{\sim}{B}}(u)\}\end{aligned} \tag{2.16}$$

（2）$\underset{\sim}{A}$与$\underset{\sim}{B}$的交集记为$\underset{\sim}{A}\cap\underset{\sim}{B}$，有

$$\begin{aligned}\mu_{\underset{\sim}{A}\cap\underset{\sim}{B}}(u)&=\mu_{\underset{\sim}{A}}(u)\wedge\mu_{\underset{\sim}{B}}(u)\\&=\min\{\mu_{\underset{\sim}{A}}(u),\ \mu_{\underset{\sim}{B}}(u)\}\end{aligned} \tag{2.17}$$

（3）$\underset{\sim}{A}$的补集记为$\underset{\sim}{A}^c$，且有

$$\mu_{\underset{\sim}{A}^c}(u)=1-\mu_{\underset{\sim}{A}}(u) \tag{2.18}$$

下面通过简单的两个例子来帮助我们理解这些运算。

例2-1 设论域U为〔0，100〕，U上的三个模糊集合为

$$\underset{\sim}{A}(u)=\begin{cases}1, & 0\leqslant u\leqslant 20\\ \dfrac{50-u}{30}, & 20<u\leqslant 50\\ 0, & 50<u\leqslant 100\end{cases}$$

$$\underset{\sim}{B}(u)=\begin{cases}0, & 0\leqslant u\leqslant 30\\ \dfrac{u-30}{10}, & 30<u\leqslant 40\\ 1, & 40<u\leqslant 50\\ \dfrac{65-u}{15}, & 50<u\leqslant 65\\ 0, & 65<u\leqslant 100\end{cases}$$

$$\underset{\sim}{C}(u)=\begin{cases}0, & 0\leqslant u\leqslant 55\\ \dfrac{u-55}{20}, & 55<u\leqslant 75\\ 1, & 75<u\leqslant 100\end{cases}$$

这三个模糊集合的隶属函数图示如图2-3。试分别求$\underset{\sim}{A}$与$\underset{\sim}{B}$的并，$\underset{\sim}{A}$与$\underset{\sim}{B}$的交，以及$\underset{\sim}{A}^c$与$\underset{\sim}{C}^c$的交。