

现代设计法丛书

模糊论方法学

中国建筑工程工业出版社

现代设计法丛书

模糊论方法学

王彩华 宋连天 主编

中国建筑工业出版社

总 序

《现代设计法丛书》是一套涉及现代设计科学方法学的系列论著，诸如功能可靠性方法、创造性方法、工程智能论方法、模糊方法、对应方法、离散方法等等。现代设计科学的核心就是要在创造性实现功能目标的基础上，运用人脑与电脑互补的各种现代科学方法，优化地设计各种面临的事物，并获得真善美的综合效果。

因此，随着我国改革开放与经济发展的需要，这套丛书1985年陆续出版以来，获得了各界广泛的关注与响应，其中《现代设计法》一书销售量达到47000册。丛书的出版推动了全国的现代化广泛的研究，高校大量开设有关课程，厂矿企业开始系统运用现代设计方法，并取得了明显的经济与质量效益。机械电子部代表国家行业归口部门，向各部委、军、兵种发出了“推广现代设计方法”的规定性文件并作出了指令性规划与指标性要求。建设部部、局领导亲自参加现代设计法的推动工作。国家科委批示组成有关的组织与社团。许多报刊发表了关于现代设计与广义设计的系列文章。可以说，设计与现代设计的概念逐渐为社会公众所认识，人们不仅对工程与产品谈论设计，而且越来越同自身行为、形象塑造、生活风格与生活方式等联系起来。

社会越是发展，越是需要现代设计科学的运用与普及，越是需要思维现代化、方法科学化。经济竞争、企业竞争、市场竞争的胜利者，只有清醒地认识这一点，抓住这一点，才能持续地立于不败之地。

我相信，现代设计法丛书必将使读者受益匪浅。同时，学科与科学总是在发展中逐步完善的，现有论著不足之处恳希读者见谅。

戚昌滋

1995年10月16日

目 录

第一章	绪论.....	(1)
第二章	模糊论方法学的数学基础.....	(11)
第三章	模糊综合评判.....	(138)
第四章	模糊优化设计.....	(204)
第五章	模糊决策.....	(325)
第六章	模糊模式识别与聚类分析.....	(390)
第七章	模糊控制.....	(437)

第一章 绪 论

第一节 模糊论方法学的实际背景

一、事物的不确定性

现实生活和工程领域中，存在着许多不确定性的现象。这种不确定性主要表现在两个方面：一是随机性、二是模糊性。随机性是由于事物的因果关系不确定所造成的。它由概率统计加以研究，是概率分析、设计等所涉及的范畴。模糊分析、设计，主要涉及事物的模糊性。

所谓模糊，是指边界不清楚，既在质上没有确切的含义，在量上没有明确的界限。这种边界不清的模糊概念，不是由于人的主观认识达不到客观实际所造成的，而是事物的一种客观属性，是事物的差异之间存在着中间过渡过程的结果。

在日常生活中，人们常说的：高、矮、胖、瘦、老、中、青等概念，就是含义不确切、边界不清楚的模糊概念。比如“中年”这个概念，有人说30~50岁是中年，有人说30岁算青年，50岁算老年，可见含义和界限都不清楚。在工程上，类似的模糊概念是很多的。例如，结构设计中常用的许用应力就是个模糊概念。通常我们规定 A_3 钢许用应力的上界为 1800kgf/cm^2 ，按此规定， $\sigma=1801\text{kgf/cm}^2$ 就不许用了。但实际上两者并无区别。从完全许用到完全不许用之间，实际上有一中介过渡过程。当考虑这一过渡过程时，许

用应力的边界就模糊了，许用应力就成了模糊概念。类似地，许用位移，尺寸界限，频率禁区等工程量，也都是模糊的。当分析和设计涉及上述模糊概念时，必然是模糊分析设计问题。

二、广义设计中的模糊性

随着科学技术的发展，过去许多与数学毫无关系、或关系不大的学科，如心理学、语言学以及各种人文科学等，都如同工程技术问题的设计领域一样，迫切要求定量化和数学化。这必然要遇到大量模糊概念。例如，在经济决策问题的研究中，进行非程序化决策时，就要遇到大量的模糊概念。这里，非程序化决策是相对于程序化决策而言的。所谓程序化决策，是指备选方案已知，目标非常明确，可以定量判断的决策；否则，便是非程序化决策。基层和中层管理人员遇到的问题，大多属于程序化的；越往高层，便越属于非程序化的了。这时决策者做出判断，主要是根据他的经验、能力和直观感觉等种种模糊概念。从对这种种模糊概念的分析、推理中作出判定。目前对非程序化决策的机理虽然还远未研究清楚，但是，至少有一点是很清楚的：这类决策问题所具有的不确定性，主要不是随机性而是模糊性。即使是数学分析方法应用得十分成功的工程设计领域，也会遇到不少人文因素，如政治影响，经济政策，环境条件等。这些人文因素大多具有强烈的模糊性。要把对这些因素的考虑，具体化为对某项工程的分析和设计，必将涉及定量的分析计算。

总之，定量的研究从狭义设计到广义设计，必然要遇到大量的模糊概念。显然，这些领域的分析和设计问题，必然涉及模糊论方法学。

三、复杂化意味着模糊化

随着科学技术的不断深化，研究的对象越来越复杂，而复杂的东西是难于精确的。电子计算机的出现，在一定程度上解决了复杂化与精确化之间的矛盾。但是，正是由于电子计算机的出现，使得这对矛盾更加激化。一方面计算机程序要求高度的精确；另一方面机器执行的任务又越来越复杂，模糊数学的创始人查德（Zadeh）从长期的实践中总结出一条互克性原理：“当系统的复杂性增加时，我们使它精确化的能力将减少。直到达到一个阈值，一旦超过它，复杂性和精确性将互相排斥。”这就是说，复杂性越高，有意义的精确化能力便越低；而精确化的能力越低，便意味着系统具有的模糊性越强。因此，对复杂系统的分析和设计，必然涉及模糊因素，必然构成模糊论方法学问题。

另外，由于复杂性还意味着因素众多，而人们往往不可能同时考察所有因素，只能抓住其中主要的进行研究。这样，在一个被压缩了的低维因素空间上考虑问题时，即使本来是明确的概念，也可能变得模糊起来。这时的分析和设计问题，也将涉及模糊论方法学。

四、人工智能与模糊识别

目前，不少国家都在研究智能计算机和智能机器人，这更要涉及模糊论识别分析与设计。要使机器具有人工智能，最关键的是要使其具有识别和处理模糊信息的能力。人脑和机器的一个根本差别，就在于人脑能识别和处理模糊信息，机器则不能。一个三岁的孩子可以在人群中耗不费力地认出自己的母亲，而再先进的电子计算机也很难做到这点。原因就是孩子能识别和处理他母亲外貌特征的种种模糊信息而计

算机则不能。正如查德曾指出的那样：“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。这一点，是理解人类智能和机器智能之间深奥差别的关键所在。”机器要能识别和处理模糊信息，必然是人类首先给出了一套表现识别和处理模糊信息过程的理论和方法。并且把这套理论和方法转化为机器能够“理解”和接受的东西。显然，这中间必然涉及模糊分析和模糊设计。机器的智能都是人给的，都是人通过程序赋予的。人脑究竟是如何识别和处理模糊信息的，虽然至今仍然是个谜，但是，任何把人类的知识转化为机器智能的过程，本身就是一种设计，而且是非常高级和精密的设计。我们通常所说的“程序设计”就是这一过程的一种具体体现。

人类由于能使用工具，所以发展到今天这样完美的程度。如果人类能使自己的工具具有识别和处理模糊信息的能力，人类社会将会发生更大的飞跃。在这样宏伟的事业中，模糊论方法学无疑将具有广阔的发展前景。

以上就是模糊论方法学产生的背景。

第二节 模糊论方法学的发展动态

既然模糊性是事物客观存在的一种属性，因此是可以描述的，是有它自身的规律可循的。1965年，美国控制论专家查德，首先提出了模糊集合的概念，给出了模糊现象的定量描述和分析运算的方法，诞生了模糊数学。1970年，别尔曼（Bellman）和查德又提出了模糊优化的概念。从此，模

糊数学和模糊优化逐渐引起了人们的重视和研究。我国于七十年代中也开始了这方面的研究工作。十多年来,模糊数学及其在各方面的应用,如模糊评判、模糊优化、模糊决策、模糊控制以及模糊识别和聚类分析等许多方面,发展十分迅速。据统计,1977年全世界关于这方面的文献与书籍有750多篇;而到1984年却增加到3000多篇。这些统计还不可能是完全的。

目前,全世界关于模糊集及其应用方面的杂志有:在荷兰出版的《模糊集与系统》杂志(International Journal of Fuzzy Sets and Systems);在中国出版的《模糊数学》杂志;还有供研究和交流的《模糊及其应用通报》(Bulletin for Studies and Exchanges on Fuzziness and its Application)等。国内外出版的有关专著和论文集已有二十余种。

根据汪培庄教授统计,从1982年9月到1984年9月两年内,全世界共开过二十多次关于模糊集及其应用的大、中、小型国际会议。其中,大型会议有两次:1983年7月18~21日在马赛召开的“模糊信息、知识描述和决策分析会议”;1984年7月22~26日在夏威夷召开的“第一届模糊信息处理国际会议”。中、小型会议有九次:在维也纳召开了两次;在布鲁塞尔,捷列兹里,伦敦,剑桥,波兹南,那普勒斯和北京各召开了一次;在北京召开的是“中美电力工程与模糊集双边会议”,1984年7月14~21日。另外,北美模糊信息处理协会(NAFIP),1983、1984年各举行年会一次;欧州工作组(EWG)每年都有三次以上的学术活动会议;日本(东京)模糊系统工作组(JFS),1983、1984年各举行

年会活动一次。在其它一些国际学术会议中，还举行了模糊集与系统分组会议多次。

上述会议的内容，许多都直接涉及模糊分析和模糊设计。例如，从在夏威夷召开的“第一届模糊信息处理国际会议”的大会报告和十八个分组中便可看出。大会的主要报告是：模糊逻辑与日常推理，第五代计算机中的不确定性，Fuzzy系统中的知识工程，Fuzzy专家系统中的不确定性等；十八个分组中，除三个数学分组和两个逻辑分组外，应用方面的是：专家系统，信息检索，Fuzzy数据库，模式识别，计算机视觉，人机系统，决策理论，决策系统，控制与模型I、II，运筹，工业应用I、II等。不难看出，上述内容无不涉及模糊分析；其中人机系统，决策理论，决策系统，运筹等，还直接涉及模糊优化设计。另外，在剑桥召开的“人工智能与运筹中的模糊信息处理会议”的专题是：模糊集与第五代计算机，专家系统和管理决策，专家系统与运筹软包，数学规划中的模糊推理，可能性测度与信任度理论等。显然，管理决策，运筹软包，数学规划中的模糊推理等，本身就是模糊设计，而且是模糊优化设计。

近年来，还有人把模糊集理论推广到有限元分析中去，提出模糊单元的概念。把有限元的定义域，从普通集合推广到模糊集合上，从而可用模糊单元来描述有限元分析中的无限元，为有限元分析指出了一个新的方向。模糊可靠性问题的研究也在深入进行。

这里应特别指出，我国在模糊数学和模糊论分析设计方面，都做了不少开创性的工作，取得了不少重要的研究成果。从70年代末到现在，我国学者在这方面已发表的论文约

700多篇；已出版的有关专著近十本；从1981年起便创办了国内外发行的《模糊数学》杂志。目前，我国在结构模糊优化设计方面，提出了最优水平截集法，为模糊优化设计的具体应用开创了一个切实有效的途径；提出了在优化设计中处理主观信息的方法，为定量处理影响设计方案的模糊因素指出了方向；提出了工程设计参数的多级模糊综合评判法，使人们能从量上比较准确地处理影响设计参数的种种模糊因素，能在较高的精度上对过去主要凭经验才能确定的设计参数，通过定量的分析计算来加以确定；提出了既考虑模糊性，又考虑随机性的模糊可靠性分析与模糊可靠性优化的基本理论和方法；我国在抗震结构的模糊分析与模糊优化方面，在机械结构的模糊分析与模糊优化方面，在船舶结构的模糊分析与模糊优化方面，均做了不少工作。这些都有力地推动了模糊论分析设计的发展和应用。

但是，模糊数学及其在此基础上产生的模糊论方法学，毕竟才诞生不久，还是一门年轻的学科；总的说来还处在初期发展阶段，还缺乏象概率、统计等研究事物的随机性那样严谨的理论体系。模糊论方法学，特别是模糊优化设计方面的文献，相对说来还不太多。考虑到模糊现象的实际背景，对模糊论方法学的研究，潜力是很大的。对具体研究对象中隐含的种种模糊概念的描述；隶属函数的确定；对具体工程问题在考虑种种模糊因素后相应的一套数学处理；模糊性与随机性的综合考虑；机器对模糊信息的识别和处理，等等。这些，都是模糊论方法学今后应特别注意研究的问题。

第三节 模糊论方法学的特点和应用范围

与普通分析设计比较起来，模糊论方法学有以下三大特点：

（一）能定量地处理影响分析和设计的种种模糊因素，使分析的结果和设计的方案更符合客观实际，更为优化合理。

由于模糊论分析设计所涉及的模糊因素，不是人为加进去的，而是研究对象客观存在的，所以模糊论分析设计的数学模型，比普通分析设计的数学模型更接近客观实际；分析结果会更为合理；设计方案会更为优化。由于考虑了有关参数的模糊性，使设计变量和参数的值能达到应有的取值范围。因此，有可能获得更好的结果。例如，一个承受谐振载荷的宽翼缘工字钢梁，在考虑稳态振动的情况下求梁的最轻设计。当考虑应力、挠度、梁截面积和自振频率的模糊性时，得到的最优截面 $A^* = 16.50 \text{ cm}^2$ ；当不考虑上述模糊性时，最优截面 $A^* = 23.75 \text{ cm}^2$ 。考虑模糊性比不考虑要轻百分之四十四。由于现在基本上具备了处理模糊概念的方法和手段，人们对客观事物的认识能力更高了，认识更深入了。只要能考虑客观存在的模糊性，便能取得更加符合实际的合理结果。这是模糊论方法学的一个显著特点。

（二）能充分考虑事物的中介过渡性质、浮动地选取阈值，从而能给出一系列不同水平（或不同的其它指标值）下的分析结果和设计方案，为人们提供广泛的选择余地。

由于事物的模糊性来源于事物差异之间的中介过渡过

程，因此，若在此过渡过程中取定一具体的差异状态，则对于这一取定的差异状态，原来的模糊性便转化为确定的、不模糊的了。若这种中介过渡过程，是结构分析中模糊载荷（如地震载荷）从一个强度等级到相邻强度等级的过渡过程，则从中截取的某一确定状态，便是某一确定的载荷强度。对于这一确定的载荷强度来说，载荷就不再是模糊的了，而是在这一确定的强度下作用于所分析的结构了。显然，相应于每一确定的载荷强度，便是一普通的结构分析问题，可求得一相应的分析结果。而不同的载荷强度，对一定的结构来说，便表示了结构的不同安全水平：载荷强度越大，相应的结构安全水平越低；反之安全水平越高。因此，结构模糊分析，可通过在模糊载荷的中介过渡过程中，截取一系列不同的载荷状态，来获得一系列不同安全水平下的结构响应，供设计者灵活处理。若这种中介过渡过程是结构模糊优化设计中、模糊约束给出的从完全许用到完全不许用的过程，则从中截取的某一确定状态，便表示了某一确定的许用程度。对于这一确定的许用程度来说，约束就不再是模糊的了，而是在这一确定的许用程度上，对设计变量的取值进行限制了。显然，相应于每一确定的许用程度，便是一相应的非模糊优化模型，可求得一相应的非模糊优化方案。而不同的许用程度，又表示了不同的安全水平：许用程度越高，相应的方案越偏安全；反之，越偏危险。因此，模糊优化设计，可通过在中介过渡过程中截取一系列不同的确定状态，来获得一系列不同安全水平的优化方案。由此可知，模糊论分析设计，使我们能充分利用事物的中介过渡信息，获得一系列浮动阈值下的分析结果和优化方案，大大增加了我们的选择余

地和对事物性态的深入了解。这是模糊论方法学的又一显著特点。

由于事物的差异之间几乎都存在不同程度的中介过渡过程，因此，模糊性是事物普遍存在的一种属性。凡是有模糊性存在的地方，都可能提出模糊分析和模糊设计问题。所以模糊论方法学的应用范围是非常广泛的。无论对社会领域还是对自然领域的事物进行分析、设计时，都可能涉及种种不同性质的和不同程度的模糊性，都可能构成模糊分析和模糊设计问题。

当然，並不是作任何分析、设计都要考虑模糊性，更不能为模糊而模糊。事物的性态是由起主要作用的因素决定的。虽然模糊性十分普遍，但並不是任何地方它都起主要作用。在模糊性虽然存在但並不起主要作用的地方，便可不加考虑。

（三）具有哲理的方法论特点。

模糊问题的普遍性，模糊论方法的大量出现，必然具有方法论的哲理，初步形成了用精确的方法解决模糊问题的模糊论方法学，精确与模糊这一对范畴也成了哲学界一项重要的现代课题。在“现代广义设计科学方法学”的十一论方法学中，研究模糊论方法学是这一广义设计科学具有深远意义的发展方向。

鉴于篇幅所限，本书仅讨论工程技术方面的模糊论方法学有关诸方面的问题。但我们相信，模糊论作为现代科学方法论，必然将运用于一切领域。

第二章 模糊论方法学的 数学基础

粗略地讲，数学世界的核心可归结为几类特定的、主要的数学结构（如代数结构、序结构、拓扑结构及其混合结构等），而每一类型的结构又可分为许多分支，并且其间又表现出相互渗透、相互交织、相互作用的多层次的复杂联系，这些受着数学自身发展的逻辑必然性的制约。例如，代数拓扑就是把具有拓扑空间中的某些点集（如单形、闭链等）作为元素，在其上面引入代数运算及代数结构，从而对拓扑空间加以研究。同样，序结构和代数结构的结合，一方面可以得到整除化理论及理想理论，另一方面又导致积分、谱理论及算子理论的产生和发展。

在二十世纪数学发展的过程中，法国布尔巴基学派把人类长期积累起来的数学知识，按数学结构整理成一个井井有条的、博大精深的体系。这个体系成为许多研究工作的出发点和指南，成为当代数学的一个重要组成部分，而且随着数学的发展，又给人类提出一个重要的任务：即在特殊的对象上发现新结构、形成新理论；而这种特殊对象的生长点又往往存在于数学乃至整个科学发展的矛盾点中。

在当今系统科学的发展中遇到了一个十分突出的矛盾，即复杂性与精确性之间的矛盾：当系统日益复杂的时候，人类对于它的精确而有意义的描述能力将相应地降低，以至达到精确性与有意义成为两个几乎互相排斥的特性（这就是所

谓的“互克性原理”）。在这种情况下，为实现有意义的描述，就必须在精确性与简明性之间取得某种平衡，就不可避免地让数学进入到客观上已规范出的“模糊性”的领域，这是一种历史的与逻辑的必然。正是这样，一门以“模糊性现象”为研究对象的崭新学科——模糊数学，在1965年由美国控制论专家 札德 (L · A · Zadeh) 创立了。模糊数学从1965年至今，不过二十年的历史，其发展速度都超过了许多应用数学分支，应用领域已扩展到许多科学技术领域。

正如整个现代数学的理论基础是集合论与数理逻辑一样，模糊数学的理论基础是模糊集合论与模糊逻辑。这两者之间表现了深刻地内在联系：

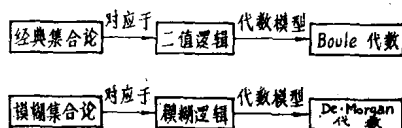


图 2—1

本章做为整个模糊论方法学的数学基础，首先局限在模糊数学的有关内容上，而做为其数学基础的其它分支学科不再涉及。其次，整个理论基础是以模糊集论做为贯穿性主线，以模糊集论做为核心，以模糊集论的概念、方法和理论为工具去研究模糊逻辑与模糊语言（从语义与文法两个不同的角度对自然语言进行描述）。再次，鉴于两类不确定性——模糊性与随机性——之间的联系与区别，我们将模糊

性引入到研究随机性的概率论中去，形成了模糊概率的初步理论，这在分析设计中有着重要的方法论的意义。

上述几个方面理论的逻辑构成与内在联系如下图所示：
(“F”示“模糊”)

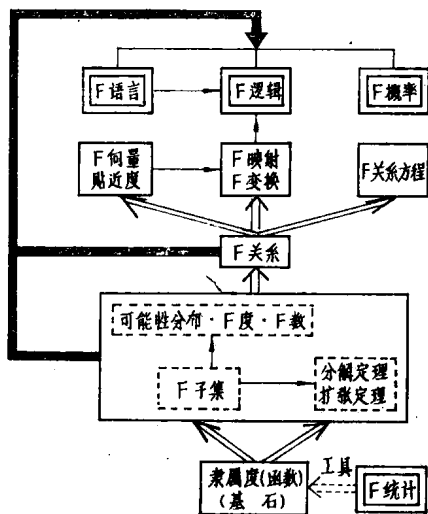


图 2—2

第一节 模糊集合

一、模糊子集

(一) 隶属度

我们观察圈在 U 中的 a 、 b 、 c 、 d 、 e 所标示的图形(见