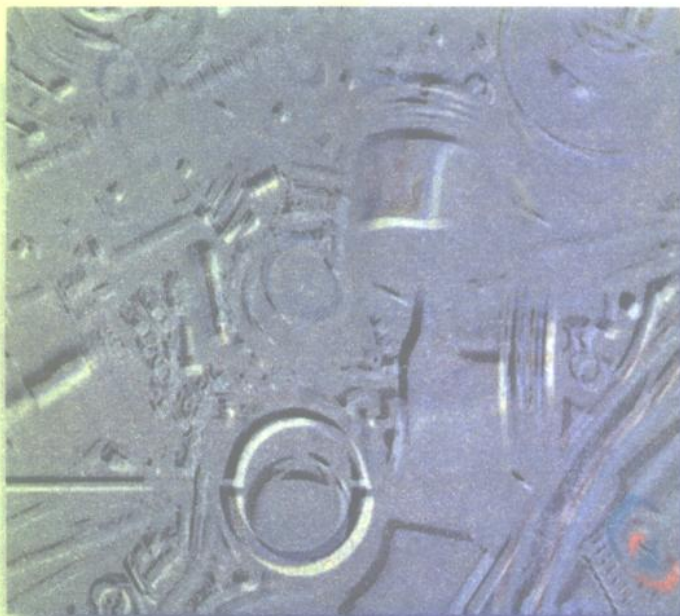


机械设计模糊优化 原理及应用

黄洪钟 编著



科学出版社

11870

机械设计模糊优化原理及应用

黄洪钟 编著

科学出版社

1997

内 容 简 介

本书系统地介绍了模糊优化设计的基础知识、基本方法及其在机械设计中的应用。全书共分七章,包括绪论、模糊集合的基础知识、模糊优化的基本概念、对称型模糊优化设计理论及方法、非对称型模糊优化设计理论及方法、模糊多目标优化设计理论及方法、机械模糊优化设计实例等。

本书可供从事机械工程技术研究、设计和应用的广大科技工作者,高等院校机械设计与制造专业的广大师生参考,也可作为机械设计与制造专业的研究生和高等院校高年级本科生的选修课教材。

机械设计模糊优化原理及应用

黄洪钟 编著

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1997年1月第一版 开本:850×1168 1/32

1997年1月第一次印刷 印张:6 1/4

印数:1—2 000 字数:161 000

ISBN7-03-005944-1/TH·44

定价:15.00元

序

近 30 年来,出现了许多重大的科学概念,且相应形成了学科,例如系统科学、信息科学、决策科学、智能科学、不确定性数学等。这些成就使科学从以“决定论”为哲学基础的“硬科学”起控制作用的时期,逐步地过渡到以“选择论”为哲学基础的“软科学”与硬科学并存的时代。由此可以看出,有些硬科学的命题只是软科学相应命题的特例,后者成为前者的某种拓广。

软科学是研究“人-事-物系统”的运动规律的综合科学。所谓“人-事-物系统”,就是人在其中,又需要人来控制的系统。所以软科学非常重视人的经验、认识和作用。而人的经验和认识常常具有强烈的模糊性。因而,模糊性事物和信息是进行决策时经常遇到和必须正确处理因素。

随着软、硬科学的迅速发展,工程设计理论产生了一系列重大的开创性的课题:全系统优化,全寿命优化,科学决策,智能专家系统,结构的性态控制和不确定性因素的科学处理。在上述各个课题中,模糊性的考虑都具有重要的意义。

优化设计就是从所有可用方案中找出最满意的方案,也就是在满足设计要求的各项约束条件下使目标函数(方案好坏的标准)最佳的方案。

在工程设计的目标函数和约束条件中都存在具有强烈模型性的因素和信息。正确处理这些因素和信息,可以使设计更为合理,并带来良好的经济效益和社会效益。

模糊数学在机械工程中已得到相当广泛的应用,如模糊控制、模糊专家系统、模糊故障诊断、模糊优化设计等在这些应用中都已产生很好的效果。可以预料,随着科学的发展,这些应用必将更为成熟、更为广泛,取得更大的效益。

本书除介绍一些必要的准备知识外,着重讨论了模糊优化设

计方法在机械设计中的应用，其中包括作者本人的一些创造性研究成果。本书内容系统、详尽、具体，概念清晰，逻辑性强。笔者深信，本书必将在提高机械设计的理论水平和具体应用上起重要作用，必将成为有关研究人员、工程师和高等院校的师生的优秀参考书。

中国工程院院士 王光远
哈尔滨建筑大学教授

1996年6月

前 言

优化设计是现代设计方法的重要内容之一。它以数学规划为理论基础,以电子计算机为工具,在充分考虑多种设计约束的前提下,寻求满足预定目标的最佳设计方案。优化方法应用于机械设计中,可以大大缩短设计周期,提高产品质量,降低产品成本,是一种具有重要经济意义和巨大应用潜力的先进设计技术。

模糊数学是一门崭新的数学学科。它的出现不仅拓宽了经典数学的内容,而且还被广泛地应用于机电、轻工、化工、航空航天、土木、地质、水利、气象、企业管理、社会经济等领域。由于机械工程领域中的模糊性、模糊性现象是普遍存在的,因此机械优化设计问题必然涉及种种模糊因素。应用模糊数学中的模糊优化方法能够充分反映优化设计中这些客观存在的模糊因素,从而使优化结果更符合实际、更合理、更科学。

本书系统地介绍了模糊优化设计的基本概念、基本原理和基本方法,重点讨论了模糊优化方法在机械设计中的应用。本书的目的是帮助读者学以致用,学会在机械设计中应用模糊优化新技术,因而特别强调了模糊优化设计的概念,同时,对于建立模糊优化设计数学模型的问题,通过大量实例,进行了比较深入的探讨。

作者希望本书的出版能在模糊优化方法应用于机械设计方面起到一定的推动作用。

本书的部分内容得到国家自然科学基金、四川省应用基础研究专项经费以及铁道科技发展基金的资助,同时本书的出版还得到西南交通大学出版基金的资助。

作者要特别感谢中国工程院院士,哈尔滨建筑大学王光远教授,他在百忙之中仔细审阅了全书,提出了宝贵的指导性意见,并热情为本书作序。

作者由衷地欢迎读者对本书提出批评和建议。

目 录

序

前言

第一章 绪 论	1
1.1 模糊数学的产生与发展	1
1.2 确定性、随机性与模糊性	6
1.3 机械工程中的模糊性、模糊性现象	7
1.4 模糊数学在机械工程中的应用现状及前景展望	9
第二章 模糊集合的基本知识	15
2.1 经典集合及其运算	15
2.2 模糊集合及其运算	21
2.3 模糊集合与经典集合的联系	30
2.4 模糊性的度量	35
2.5 凸模糊集合和模糊数	45
2.6 隶属函数	51
2.7 模糊矩阵与模糊关系	65
2.8 模糊映射与模糊变换	82
2.9 模糊综合评判	86
第三章 模糊优化设计的基本概念	101
3.1 概述	101
3.2 模糊优化设计的数学模型及分类	103
3.3 模糊优化设计的若干概念	105
3.4 模糊优化问题求解的基本思想	106
第四章 对称型模糊优化设计方法	108
4.1 对称模糊优化模型的直接解法	108
4.2 对称模糊优化模型的迭代解法	109
4.3 模糊约束清晰目标函数极值问题的求解方法	114
4.4 对称模糊优化模型迭代解法的改进算法	119
第五章 非对称型模糊优化设计方法	120
5.1 模糊约束下函数的条件极值	120

5.2	非对称模糊优化设计的数学模型	122
5.3	非对称模糊优化模型的水平截集法	128
5.4	非对称模糊优化模型的限界搜索法	137
第六章	多目标模糊优化设计方法	139
6.1	多目标优化设计概述	139
6.2	常规多目标优化设计模型的模糊解法	143
6.3	多目标模糊优化设计	146
6.4	基于模糊综合评判的多目标优化设计方法	154
第七章	机械模糊优化设计实例	157
7.1	减速器的可靠性模糊优化设计	157
7.2	斜齿圆柱齿轮传动的多目标模糊优化设计	165
7.3	弹簧的模糊优化设计	169
7.4	机械系统可靠性的多目标模糊优化设计	172
7.5	伸缩式胶带输送机主参数的模糊优化设计	175
7.6	机械结构动力学模型的模糊优化修正	181
	参考文献	189

第一章 绪 论

1.1 模糊数学的产生与发展

1.1.1 模糊数学产生的背景

随着科学技术的深入发展,系统越来越大,且越来越复杂,需要人们研究的变量越来越多,且变量之间的关系也越来越复杂,对系统的判别和推理的精确性要求也越来越高。而实践告诉我们,复杂的东西是难以精确化的,这就使得人们所需要的精确性和问题的复杂性之间形成了尖锐的矛盾。正如模糊数学的创始人、美国 California 大学的 L. A. Zadeh 教授所说:“当系统的复杂性增加时,我们使它精确化的能力将减小。直到达到一个阈值,一旦超越它,复杂性和精确性将互相排斥。”这就是著名的“互克性原理”^[1]。该原理告诉我们,复杂性越高,有意义的精确化能力就越低;而复杂性意味着因素众多,以致人们往往不可能同时考察所有因素,只能把研究对象适当简化或抽象成模型,即抓住其中的主要部分而忽略掉次要部分,这就使得本来是明确的概念也变得模糊起来。

另一方面,复杂性还意味着深度的延长。对一个大系统,如果用传统的方法,有时可能需要解数千个微分方程,这样由于误差的积累,也可能使模糊性变得不可忽略。

随着科学技术的发展,为了适应新的要求,许多过去与数学毫无关系或关系不大的学科,如心理学、语言学、生物学和社会科学等,现在也迫切要求定量化和数学化,而这些学科中有大量的模糊概念和模糊问题。人们决不可能为迁就现有的数学方法改变由于这些学科的特点所决定的客观规律,而只能改造数学,使它的应用范围更为广泛。这就需要具有处理模糊性的方法。

此外,人脑对客观事物的认识和推理并不只是采用二值逻辑,

除了识别“非此即彼”的确定性现象外,还要识别“亦此亦彼”的模糊性现象。这种模糊性主要是指客观事物差异的中介过渡中的“不分明性”,这在日常生活中俯拾皆是,例如“胖和瘦”、“快和慢”、“美与丑”等都难以明确地划定界线。这就相应地要求特征函数的取值不只是 0 和 1 两个数,而应该是 0 和 1 之间的任何值。因此,要求将特征函数加以拓广,也就是要求将普通集合加以拓广。

电子计算机的“智力”发展,其主要障碍就在于传统数学无法全部、真实地反映人脑的思维规律。我们知道,人类实际的思维活动具有两方面的特征:其一是直觉与严格性的有机结合,可以进行整体性、平行性的思考,因而就必须具有模糊性;其二是推理过程具有逻辑的和顺序的特点,因而又必须是形式化的。对于形式化思维,可以采用数理逻辑方法把它数学化,从而用形式语言把它编成程序让计算机去做。但是人脑的大量思维活动,都是具有模糊性的,而传统数学对此却无能为力。但是科学要发展,电子计算机也要发展,人们决不会为迁就现有的电子计算机而使思维迂腐起来,因此也必须寻找新的途径来解决这个问题,从而更进一步地提高计算机的“智能”。

综上所述,我们可以看出这样一个十分严峻的问题:人们如何处理模糊性?如果说在过去的科学发展中,人们能够回避模糊性而运用传统数学,那么在科学发展日新月异的今天,人们就再也无法回避模糊性了。这就是模糊数学产生的时代背景与客观根源。

1.1.2 模糊数学的诞生与发展

1965 年著名的美国控制论专家、California 大学的 L. A. Zadeh 教授提出了“模糊集合”的概念,给出了模糊性现象定量描述和分析运算的方法,从而诞生了模糊数学。1970 年 R. E. Bellman 和 L. A. Zadeh 教授提出了“模糊优化”的概念,为多目标优化和涉及生产管理、调配等模糊因素较多的领域的线性规划提供了有效工具。1975 年 L. A. Zadeh 教授发表了“语言变量的概念及其在近似推理中的应用”(The concept of a linguistic variable and its

application to approximate reasoning)一文,系统地提出以字或句为值的语言变量和一种不十分精确的近似推理,使得信息的内容和意义的传输与逻辑加工成为一种可能性。1978年L. A. Zadeh教授提出了“可能性理论”,目的是为进一步研究模糊语言与近似推理提供数学工具,这被认为是模糊数学发展的第二个里程碑。可能性理论的出现为模糊数学更广泛地应用于人工智能和其他领域提供了强有力的理论基础和有效的工具。1978年国际性期刊《模糊集与系统》(International Journal of Fuzzy Sets and Systems)诞生。1984年国际模糊系统协会(IFSA)成立。1980年日本“模糊系统研究小组”建立,成为日本模糊数学理论研究的支柱。1984年国际模糊系统协会日本分会正式成立,其会员来自工业界、大学和政府成员三方面。1989年日本模糊协会成立。1983年在Marseilles召开了“模糊信息、知识描述和决策分析会议”。1984年在夏威夷召开了“第一届模糊信息处理国际会议”。1985年国际模糊系统协会在西班牙召开了第一次世界大会,1987年、1989年、1991年、1993年和1995年分别在东京、西雅图、布鲁塞尔、汉城、圣保罗举行了第二次、第三次、第四次、第五次和第六次世界大会。至于各种小型的地区性会议以及国际会议的分组会议,则不胜枚举。北美、欧洲、日本都有一支从事模糊数学研究的庞大队伍。前苏联也在抓紧模糊数学的研究工作,出版的新书、发表的研究论文起点都较高。

模糊数学的研究领域非常广泛,除模糊集、模糊关系、模糊变换、模糊图论、模糊聚类分析、模糊综合评判、模糊模式识别、模糊语言、模糊逻辑以外,还有模糊信息、模糊决策、模糊系统、模糊概率、模糊测度、模糊积分、模糊拓扑等综合理论。

在模糊数学理论迅速发展的同时,模糊技术的开发应用也取得了显著成果。1974年英国工程师Mamdani成功地完成了世界上第一个模糊控制实例:蒸汽机的模糊控制。1976年,英国学者Tong对压力容器内部的压力和液面进行模糊控制,控制的难点在于非线性、强耦合以及时间常数相差太大,而用模糊控制收到了较好的效果。1977年英国的Pappis和Mamdani合作,成功地把模糊

控制理论用于十字路口交通控制系统,使得车辆平均等待时间减少7%。1983年,日本学者 Shuta Murakami 研究成功一种基于语言真值推理的模糊逻辑控制器,成功地用于汽车速度的自动控制。自1985年以来,日本开始开发模糊家电系列产品和微型模糊控制系统,目前已获得了很多专利,仅1989年和1990年就申报了有关模糊技术的专利2000项。据1988年的统计,世界上100个模糊产品中约有80个是日本制造的。诸如 Sanyo 公司开发的模糊控制摄像机, National 公司开发的模糊吸尘器, OTIS 公司开发的模糊空调机、模糊洗衣机和模糊电扇等。仅1990年日本就有40多种模糊产品投产,该年被日本人称之为模糊产品年。1995年,日本仅模糊家电产品就达到7.7亿美元的产值。事实上,由于模糊技术的成功应用,在日本“模糊”一词已成为“非常自动化”和“智能控制”的代名词。1988年美国航空航天局(NASA)举办了一次国际性研讨会,讨论模糊逻辑与神经网络的结合问题,目的在于打开机器思维和推理的僵局。法国也顺应潮流成立了神经模糊研究所,以全面地有计划地开发模糊技术。德国的电子和信息部门,也把模糊技术作为重要研究课题之一。西门子研究和发展中心拟定出一个计划:所属各企业按定额人数的增加为模糊技术进行投入。著名的奔驰汽车公司已开始研制“模糊控制汽车”。美国的 Togai 公司和德国的 Inform 公司也相继开发出不少模糊控制产品。1988年国际模糊系统协会在 Iizuka 举办了国际性模糊产品博览会。1991年国际模糊系统协会在布鲁塞尔自由大学举行的第四次世界大会上,有8个展出,分别展出日本、德国的有关硬、软件。在 L. A. Zadeh 等6人(日本2人,美、意、前苏联、捷各1人)所作的大会专题报告中,除了一篇讨论多值代数在不确定性处理中的应用外,其余全是应用性的,如汇报日本的模糊产品和计划以及模糊控制进展等。

由于模糊技术涉及人对自然、社会或对人本身的判断,而每项被控系统缺乏人的感知是难以想象的,同时模糊技术通常与电子计算机和控制系统相结合,而电子计算机和控制系统作为人类活动最基本的工具,目前已被“信息社会”的种种论断所证明,因此模

糊技术将成为 21 世纪的一项基础技术。正如日本夏普公司电化系统研究所日吉孝藏所说：“一个普遍应用模糊技术的时代我不久就会到来。”(フジ技術がく応用される時代はまもなくやってきましたのです。)

1.1.3 我国的模糊数学和模糊技术研究概况

我国从 70 年代初开始,在关肇直先生等老一辈数学家的扶持下,在蒲保明先生亲自带动下,对模糊数学展开多方面的研究,取得了一批较高水平的研究成果,部分理论研究水平处于国际领先地位。从目前的国际发展概况与阵容来看,北美、欧洲、日本和中国被认为是国际模糊数学的四大主力。1981 年我国创办了《模糊数学》杂志,1982 年正式成立了“中国系统工程学会模糊数学与模糊系统委员会”,1987 年模糊数学与模糊系统委员会会刊《模糊系统与数学》诞生,1988 年“中国现代设计法研究会模糊分析设计学会”成立。迄今为止,模糊数学与模糊系统委员会已召开了 7 次年会,模糊分析设计学会召开了 3 次学术会议,还分别于 1985 年(北京)、1987 年(广州、贵阳)和 1990 年(北京)在我国成功地主办了 3 次国际会议。

但是必须看到,我国的工作偏重于理论研究,与国外特别是日本相比,在模糊技术应用开发上还有很大差距。由于多方面的原因,我国的一些研究成果一时还难以形成应用产品。为了迅速扭转这一局面,国家教委已投资几十万美元在北京师范大学建立了模糊技术研究开发的重点实验室,加强应用开发;国家自然科学基金委员会于 1989 年把“模糊信息处理与机器智能”课题列为重大项目,给予近 100 万元的研究资助。我们相信,在国家的大力支持下,经过有识者的辛勤开拓,模糊技术在我国一定会很快转化为强大的生产力。

1.2 确定性、随机性与模糊性

确定性、随机性和模糊性是事物的三大属性。研究确定性现象的数学体系即为我们熟知的经典数学。所谓确定性现象是指在一定条件下一定会出现的现象,例如在自由落体运动中,路程 s 随时间 t 而变,它们之间的依赖关系由公式

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

严格地表达出来。再如,在标准大气压下,纯水加热到 100°C 会沸腾,在恒力作用下的质点作等加速运动等,都是确定性现象,它们都能用确定的数学模型来表达。

概率论和数理统计、随机过程等所形成的数学体系是研究和处理随机性现象的,该数学体系称之为随机数学。随机事件本身有着明确的含义,只是由于条件不充分,使得在条件与事件之间不能出现决定性的因果关系,从而在事件的出现与否上表现出不确定的性质。

模糊数学研究和处理模糊性现象。在这里,概念本身就没有明确的外延,一个对象是否符合这个概念是难以确定的。由于概念外延的模糊而造成的这种划分上的不确定性称之为模糊性。

随机性是因果律的一种破缺,模糊性是排中律的一种破缺。

随机数学是从随机性中去把握广义的因果律——概率规律。模糊数学则是从模糊性中去确立广义的排中律——隶属规律。

概念,是客观事物本质属性在人脑中的反映。由于它是反映性的东西,人们往往怀疑隶属度的客观意义,甚至怀疑模糊科学的科学性。

模糊性是客观存在的。它的根源在于事物的发展变化,即动态性。事物的变化遵从质量互变规律,即事物的变化总是从量变开始,经过量变的逐渐积累,达到一定程度引起质的变化。事物的质变有两种情况:

(1)量变达到一个临界点而发生的突变。虽然突变迅速,但也有一个过程。在这个过程中旧质与新质并存,旧质向新质过渡。

(2)部分质变,即在量变过程中发生的局部质变。新质逐渐积累最后完成过渡。

上述两种情况都存在中介过渡过程,都存在亦此亦彼的模糊性。由于运动规律和质量互变规律的普遍性,因此模糊性是普遍的、客观存在的。

事物的不同的质在现实中表现为不同的概念。事物在中介过渡过程中对一定质的隶属程度的不断变化正是模糊概念存在的基础。质量互变规律决定了模糊概念外延的不确定性,从而确立了模糊数学和模糊技术成立的哲学基础。正是这一坚实的基础决定了研究事物模糊性现象的体系——模糊数学的科学性。

模糊性与多义性不同,多义性表示对一个明确定义的现象或观察的集合,采用了几个互相矛盾的描述。模糊性不是主观概率意义上的“不确定性”,因为采用的公理不同。模糊性也不是公差分析中的不精密性,因为公差区间并不是不明确的。

1.3 机械工程中的模糊性、模糊性现象

机械工程中普遍存在着模糊性现象。如机械设计的目的是使所设计的机器性能好、效率高、成本低、寿命长、安全可靠、使用维护方便等。这里的“好-坏”、“高-低”、“长-短”、“安全-危险”、“方便-麻烦”等概念就是模糊的。同时,机械设计过程是应用有关学科的知识和技术进行复杂的分析、综合和决策的过程,而且,社会和经济的因素日益渗入设计过程,改变了机械设计是单一技术内容的面貌,使设计过程纳入了人-机-环境的系统工程概念之中,从而导致了形形色色的模糊性问题。又如许用应力、断裂韧度、尺寸界限、频率禁区等设计判据,当考虑从完全许用到完全不许用之间的中介过渡过程时,也成了模糊概念。再如传动轴因微裂纹的扩展而断裂进入失效状态,在进入失效状态之前,传动轴经历了一个从“完

好”到“失效”的过渡过程,即随着工作时间的延长,微裂纹不断扩展,逐渐发展成宏观裂纹,直致最终导致断裂而被判为失效状态。在从“完好”到“失效”的中间过程,传动轴类属是不清晰的,处于“部分完好”与“部分失效”的不分明状态,即传动轴的状态是模糊的。再就是机械产品或系统在长期的使用过程中,由于经受交变载荷、碰撞研磨、介质侵袭等而大量发生的疲劳、腐蚀、老化、剥落、液压系统的油污染等失效现象都具有上述特点,即状态都是模糊的。

随着科学技术的迅猛发展,高速、重载、大型、精密的机械产品越来越多,其结构也日益复杂。许多机械产品或系统常包括有成千上万个乃至数十万个组件(电子元器件、机械零部件)。同时,现代化的机械工业要求把机械企业的全部生产过程作为一个整体来实现总的目标(提高劳动生产率、降低制造成本、提高质量、产品更新换代快等)。这也就是要求设计向全性能设计(动态、摩擦学、强度可靠性等性能设计)、多目标优化设计、并行设计和健壮设计(考虑市场、管理)方向发展^[2]。这也就是说,机械工程领域研究的对象越来越复杂,而复杂的东西是难于精确化的。由“互克性原理”可知,复杂性增加,有意义的精确认识能力将下降,系统的模糊性增强。此外,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,只能把研究对象适当简化或抽象成模型。当在一个被压缩了的低维因素空间考虑问题时,即使本来是明确的概念,也会变得模糊起来。再就是某些抽象简化模型本身就带有概念的不清晰,如“光滑铰链”这个力学模型;什么叫“光滑”,什么叫“粗糙”就没有一个明确的定义,两者之间没有绝对分明的界限。还有就是决策者对非程序化决策做出判断时,主要是根据他的经验、能力和直观感觉等模糊概念进行决策的^[3]。

机电产品的可靠性历来是人们十分关注的问题。由于零件加工的误差、环境及人为因素的影响而造成产品性能的模糊性,直接影响到产品性能的可靠性。随着各种新型复杂系统的建立和工程项目的实施,常规可靠性理论与工程实践的矛盾日益突出,特别是进入 80 年代以来,严重的工程事故时有发生,这就迫使人们不得

不对常规可靠性的理论基础进行反思。目前大中型成套机电设备可靠性数据的缺乏以及现代机械产品或系统普遍反映的模糊特征再一次对以概率论为基础的常规可靠性理论提出挑战^[4,5]。

在本世纪,机械科学发展的最大特征是自动化,特别是本世纪后半叶的计算机与机械科学的碰撞,使机械领域发生了一场革命,自动化加智能化成为机械科学发展的重要特征。系统科学、人工智能科学的权威人士,在认识到当前智能化的局限性的基础上,首先提出了人机智能系统思想,强调了人在系统中的重要性。在CIMS实现过程中,不断有人提出“人”在系统中应扮演更重要的角色。我国著名机械工程专家路甬祥教授等在综合分析机械科学的发展状况之后,结合计算机科学的最新发展成果,提出了人机一体化系统与技术的思想、基本概念及理论体系^[6]。其核心内容就是强调人在系统中的重要性,以人为中心构成新型的机械系统。而人的思维活动无论从总体上说,还是从抽象的判断和推理来看,都具有某种程度的模糊性。

综上所述,我们可以看出,在机械工程领域中,模糊性、模糊性现象是普遍存在的,正确地对其加以处理必将使机械科学与技术取得根本性的突破。这也是模糊数学必然进入机械工程领域的客观根源^[7,8]。

1.4 模糊数学在机械工程中的应用现状及前景展望

近10年来,国内外一些机械科学工作者正在不断努力,使用模糊方法将机械工程中一切能够用经典集合描述的概念、原理和方法加以推广,采用模糊数学理论来拓宽所面临的设计和制造领域,提出新概念、新原理和新方法来刻划人们对复杂的、动态的机械系统的模糊性的认识,取得了一系列有价值的成果。现择其要者加以叙述。