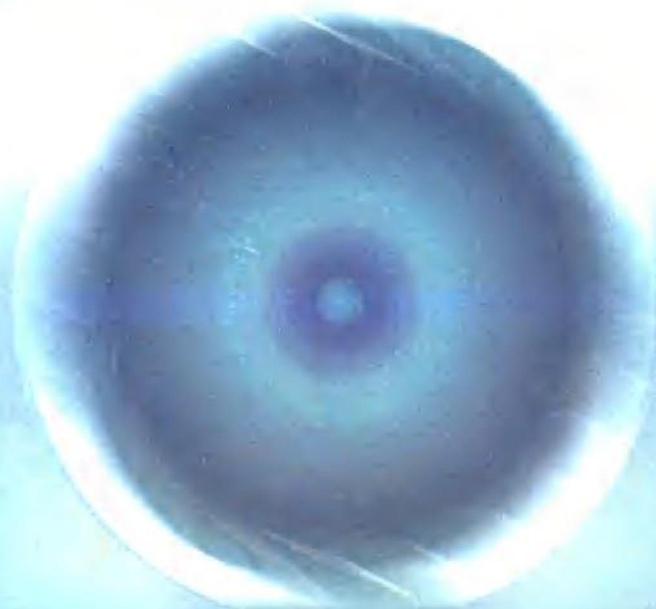


内燃机工程研究新方法

郝强 陈启海 编著
姚春宣 李兵



国防工业出版社

00001295

TK4
20

内燃机工程研究新方法

郝 强 陈启海 编著
姚春宣 李 兵

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

内燃机工程研究新方法/郝强等编著. —北京:国防工业出版社, 1999. 9

ISBN 7-118-02050-8

I. 内… II. 郝… III. 内燃机-研究 IV. TK4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 38691 号

国防·工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

河北三河腾飞印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{5}{8}$ 196 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:12.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

内燃机问世至今已经历了百余年的发展历程,现代内燃机无论是在结构还是性能方面都已今非昔比,但它仍在不断发展、改进和完善。当前内燃机的发展概括起来说,是以节能为中心,充分兼顾到排放和可靠性的要求,全面提高内燃机的性能。为此,人们开展了多方面的研究,并且应用数学、力学及电学等各种方法,其中就有模糊集理论、灰色系统和人工神经网络理论。

本书主要介绍了模糊数学、灰色系统理论和人工神经网络方法在内燃机工程领域应用的研究成果。内容涉及内燃机及其增压系统的评估与优选、内燃机工作状态的模糊分析、内燃机工作过程的模糊控制与优化、内燃机结构分析的软化边界模型及处理方法、内燃机性能的灰色预测、内燃机故障的灰色诊断、内燃机性能曲线的神经网络处理、内燃机故障的神经网络诊断方法以及内燃机气缸活塞组密封状况的神经网络判断方法。其中一些内容是第一作者在刘永长、朱梅林两位教授指导下,完成的博士论文的主要内容,在此向两位先生表示衷心地感谢。

模糊数学、灰色系统理论及人工神经网络方法都处于发展阶段,在内燃机工程中的应用初见成效或开始进行探索,并且需要进一步完善,因此,希望读者在阅读、使用本书的方法和原理时,对书中不妥之处加以指正。

书中有些章节引用其他研究人员的论文,没有这些人的研究工作,要编写完成本书也是不可能的,在此我们谨向各位论文作者表示衷心地感谢。

本书由郝强、陈启海负责纲目的编写,并完成全书的统稿工作。第一章、第二章的 2.5 节、第四章的 4.1、4.3 和 4.4 节、第五章

的 5.6 节、第七章的 7.4 和 7.5 节由郝强编写；第二章的 2.1、2.2 和 2.4 节、第五章的 5.5 节、第六章的 6.1 和 6.2 节、第七章的 7.2 节由陈启海编写；第五章的 5.1 至 5.4 节、第六章的 6.3 和 6.4 节、第七章的 7.3 节由姚春宣编写；第二章的 2.3 节、第三章、第四章的 4.2 节、第七章的 7.1 节由李兵编写。

编写这样一本涉及模糊数学、灰色系统和人工神经网络等多学科、多方面内容的书,存在的困难较多,难度也很大,虽然作者尽了最大的努力,但限于我们的水平和能力,错误和不妥之处难免,望读者指正。

编著者

1998 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 模糊数学、灰色方法与神经网络理论简介.....	1
1.1.1 模糊数学	1
1.1.2 灰色系统理论	2
1.1.3 人工神经网络理论	3
1.2 内燃机工程中的模糊和灰色现象及处理	5
第二章 内燃机工作状况的模糊分析	14
2.1 内燃机故障诊断的模糊集方法.....	14
2.1.1 模糊综合评判方法	15
2.1.2 模糊关系矩阵法	19
2.1.3 模糊逻辑与计算机辅助诊断	23
2.2 内燃机技术状况的模糊聚类判断.....	24
2.2.1 问题的提出	24
2.2.2 数学描述	25
2.2.3 实例与分析	26
2.3 内燃机可靠性的模糊故障树分析方法.....	30
2.3.1 问题的提出	30
2.3.2 模糊故障树分析方法的基本理论	31
2.3.3 内燃机可靠性的模糊故障树分析	34
2.4 基于模糊可靠性的柴油机系统工作状况评估	39
2.4.1 问题的提出	39
2.4.2 系统工作状况评估模型	40
2.4.3 示例与讨论	43
2.5 内燃机故障诊断的模糊逻辑法	47
2.5.1 问题的提出	47
2.5.2 模糊诊断模型	47

2.5.3 实例与分析	50
第三章 内燃机工作过程的模糊控制与优化	54
3.1 内燃机喷油系统的模糊电子控制	56
3.1.1 模糊电子控制喷油系统的设计	56
3.1.2 模糊怠速控制器的设计	58
3.1.3 结论	60
3.2 柴油机最高爆发压力的模糊控制	61
3.2.1 模糊控制模型	61
3.3.2 试验研究	65
3.3 柴油机供油提前角的模糊优化	66
3.3.1 模糊优化模型	66
3.3.2 计算实例及分析	68
3.4 增压柴油机高工况放气的模糊控制	73
3.4.1 模糊控制器设计	74
3.4.2 试验研究及结论	75
第四章 内燃机及其增压系统的评估和优选	78
4.1 内燃机性能的模糊评估方法	79
4.1.1 比较和评估原则	79
4.1.2 比较和评估模型	81
4.1.3 示例	86
4.2 内燃机性能评估的模糊线性回归方法	90
4.2.1 模糊线性回归模型	90
4.2.2 内燃机性能评估模型	91
4.2.3 示例与分析	93
4.3 柴油机涡轮增压系统方案的比较与优选	98
4.3.1 问题的描述	98
4.3.2 比较与优选模型	99
4.3.3 应用示例	101
4.4 系统方案评估与优选的模糊关联度方法	105
4.4.1 问题的提出	105
4.4.2 模糊关联度评估和优选模型	106
4.4.3 应用实例——柴油机涡轮增压方案优选	113

4.4.4 应用实例——内燃机性能的模糊关联度评估	114
第五章 内燃机零部件的模糊优化和分析	119
5.1 基本概念	119
5.1.1 目标函数的模糊化处理	119
5.1.2 约束条件的模糊化处理	120
5.1.3 设计人员经验的描述	121
5.1.4 权重的确定	122
5.2 模糊优化设计问题的数学模型	122
5.2.1 数学模型	122
5.2.2 算例——发动机气门弹簧的模糊优化设计	124
5.3 基于可靠性分析的模糊优化设计模型	128
5.3.1 问题的提出	128
5.3.2 优化设计模型	128
5.3.3 计算示例与分析	131
5.4 多工况多目标模糊优化设计模型	133
5.4.1 问题的提出	133
5.4.2 多工况多目标模糊优化模型	133
5.4.3 计算示例与分析	135
5.5 柴油机曲轴主轴轴承模糊随机优化设计	137
5.5.1 变载滑动轴承的随机性和模糊性	137
5.5.2 模糊随机优化数学模型	139
5.5.3 计算实例与分析	146
5.6 气缸套结构分析的软化边界模型	149
5.6.1 问题的提出	149
5.6.2 软化边界模型及处理方法	150
5.6.3 算例与讨论	153
第六章 内燃机工程中的灰色分析方法	159
6.1 灰色预测方法的应用	159
6.1.1 方法简述	159
6.1.2 实例——增压柴油机的高原功率修正	161
6.1.3 实例——小型径流式压气机特性的高原规律预测	163
6.1.4 实例——增压柴油机高原性能循环模拟灰色预测	168

6.2	内燃机工作过程故障的灰色诊断	171
6.2.1	问题的提出	171
6.2.2	灰色关联度诊断方法	171
6.2.3	实验研究与分析	172
6.3	内燃机工作过程故障的改进灰色诊断方法	177
6.3.1	问题的提出	177
6.3.2	灰色关联度改进模型	177
6.3.3	实验分析与结论	180
6.4	灰色 ABO 型故障诊断与模糊诊断方法的比较	184
6.4.1	问题的提出	184
6.4.2	灰色诊断与模糊诊断方法比较	184
6.4.3	诊断实例与分析	186
第七章	神经网络理论在内燃机工程中的应用	191
7.1	内燃机性能曲线的神经网络处理	191
7.1.1	工程背景	191
7.1.2	用 BP 网络处理性能曲线	192
7.1.3	应用举例及结论	196
7.2	发动机使用工况的神经网络分析	197
7.2.1	问题的提出	197
7.2.2	神经网络分析模型	198
7.2.3	应用实例	200
7.3	神经网络用于内燃机故障诊断的方法	203
7.3.1	故障树分析法	203
7.3.2	内燃机系统故障的基本定义	204
7.3.3	神经网络诊断模型	205
7.3.4	用神经网络定义内燃机系统故障	206
7.3.5	故障分析方法与步骤	207
7.4	柴油机燃油系统故障诊断的神经网络方法	210
7.4.1	问题的提出	210
7.4.2	神经网络模型	211
7.4.3	实例与结论	213
7.5	柴油机气缸活塞组密封状况判断研究	217

7.5.1 问题的提出	217
7.5.2 气缸活塞组密封状况判断问题的描述	217
7.5.3 气缸活塞组密封状况的神经网络判断模型	220
7.5.4 模拟实验研究和结果分析	225
参考文献	231

第一章 绪 论

1.1 模糊数学、灰色方法与神经网络理论简介

1.1.1 模糊数学

在现实生活里,有许多事物一就是一,二就是二,非此即彼。但也有许多事物却亦此亦彼,处于正反之间的中介过渡状态,这种客观事物差异的中间过渡中的“不分明性”很容易造成判断上的一种不确定性,这就是所谓的模糊性。简言之,模糊性就是指事物性态和类属的不清晰性,是指事物在性态和类属方面的亦此亦彼性或中介过渡性。例如,高个子与矮个子、美与丑、战争与和平等,都是具有模糊性的概念,传统的数学方法无法定量描述这类模糊现象。

传统的精确数学是建立在集合论基础上的。根据集合论的要求,一个对象对于一个集合,要么属于、要么不属于,两者必居其一,且居其一,绝不允许模棱两可。这就要求集合的外延必须明确。因而也就限制了经典集合的应用范围,使它无法处理日常生活中大量的不明确模糊现象与概念。

模糊数学诞生于 1965 年,它的创始人是美国 California 大学的 L. A. Zadeh 教授,他在 1965 年的第 8 期《Information and Control》上发表了题为 Fuzzy Sets(模糊集)的论文。这篇论文在世界上首次成功地运用数学方法来描述模糊概念,从而为数学的运用开辟了一个崭新的方向。从此,模糊(fuzziness)的概念便问世了。模糊数学是用“隶属函数”的概念来描述事物差异的中间过渡。模糊集理论在精确的经典数学与模糊的现实世界之间架起了桥梁,现已成为国际上最敏感的学科之一,并集中用于人工智能、新一代

计算机研究和软件开发。

我国于 70 年代后期开展模糊数学理论应用研究。现已在人工智能、图像识别、信息处理、天气预报、地震预报、医疗诊断、体育训练、产品评价以及社会科学、军事领域、管理科学等很多领域内应用模糊数学理论,发表了大量的学术论文,并且在工程应用方面取得了很大的突破。模糊数学将数学引入具有模糊现象和模糊概念的各个知识领域中,从模糊数学的思想上讲,它是精确性对模糊性的逼近,而其本身又是经典数学的推广,并且在研究方法上又延用了经典数学的方法。

当前,模糊数学的研究领域可大体分为三个方面:模糊数学理论及其与经典数学、统计数学的关系;模糊语言和模糊逻辑;模糊数学的应用等。

1.1.2 灰色系统理论

“系统”是人们在研究自然界、社会和思维规律时引用出来的概念,通常是指若干相互联系、相互作用的事物组合而成的整体,其定义非常广泛。一般来讲,系统是指互相关联的各因素的集合体。

在控制论中常常借助于颜色来形容系统内部信息的多少和对系统本身了解的深浅程度,对于内部结构、参数、特性全部确知的系统称为白色系统。对于系统内部特性一无所知,只能从系统的外部表象来研究的系统称为黑色系统。这里的“白”和“黑”分别表示信息充分与信息缺乏。而对于既含有已知信息又含有未知或非确知信息的系统就是灰色系统。区别白色系统与灰色系统的重要标志是系统各因素之间是否具有确定的关系。白色系统的特征是因素之间存在映射关系。

从灰色系统理论的建立来看,本世纪 50 年代的控制论是研究单输入、多输入、多输出的多变量系统,要应用状态空间法来分析全体状态变量的运动规律和控制问题,称为现代控制论。50 年代单输出线性自动调节系统,称为经典控制论,60 年代和 70 年代以

来,则进入大系统控制论的研究阶段,这类大系统规模庞大、结构复杂、功能综合,具有主动性、分散性、信息不完整性和不确定性等特点。不确定性分为随机性和模糊性。解决系统随机不确定性的方法是概率统计,这种统计规律是建立在大样本基础之上的。但实际情况却不是这样。一方面许多系统即使有了大样本,其分布也不一定是典型的,而非典型的随机过程(如非白噪声、非平稳过程等)是难以用统计方法处理的,另一方面,现实中的许多灰色系统,因为没有物理原型,信息难以完全判断,而且数据很少(即小样本),这就难以用统计方法处理,因而,大系统需要另一种理论来处理,灰色系统理论就是在这种需要下发展起来的。

定量研究一类既含已知信息又含未知信息或非确知信息的系统的理论就是灰色系统理论,它研究解决灰色系统分析、建模、预测、决策和控制的理论,该理论是由我国的邓聚龙教授于 1982 年首次提出的。

灰色系统理论的数学基础主要是点集拓扑学,数学分析,泛函分析、区间数学、线性代数,数值计算、格、群、场等。它用灰色数、灰色方程、灰色矩阵等来描述所研究的系统,在此基础上构造出该系统的灰色模型。灰色建模就是找出与系统相关的各因素的时间序列或符合某种规则的指标序列,并对这些序列进行生成处理,建立起该系统的灰色模型。运用灰色模型可对系统进行分析或优化。灰色系统理论研究的内容有系统分析、信息处理、灰色建模、灰色预测与决策、灰色控制、灰色聚类与灰色统计等。

1.1.3 人工神经网络理论

人的大脑神经网络系统在信息处理与运动控制过程中起着十分重要的作用。人类在探索其自身大脑的这种认知规律中经历了艰难的历程,取得了不少的进展,人工神经网络就是这一探索过程中的重要成就。

人工神经网络是一门新兴的交叉学科,它是从人脑的生理结构出发来研究人的智能行为,模拟人脑信息处理的过程。人工神经

网络的研究经历了一条曲折的路程,大致分为兴起、萧条和兴盛三个时期。

早在 1943 年,心理学家 W. McCulloch 和数学家 W. Pitts 在数学生物物理学会刊 *Bulletin of Mathematical Biophysics* 上发表文章,总结了生物神经元的一些基本生理特性,提出了形式神经元的数学描述与结构方法,即 M-P 模型,从此开创了神经科学理论的研究时代。

1949 年心理学家 D. O. Hebb 提出神经元之间突触联系强度可变的假设。他认为学习过程是在突触上发生的,突触的联系强度随其前后神经元的活动而变化。根据这一假设提出的学习率为神经网络的学习算法奠定了基础。

50 年代末,Rosenblatt 提出感知机,第一次把神经网络的研究付诸工程实践。这是一种学习和自组织的心理学模型,它基本上符合神经生物学的知识,模型的学习环境是有噪声的,网络构造中存在随机连接,这符合动物学习的自然环境,当时人们对神经网络研究过于乐观,认为只要将这种神经元互连成一个网络,就可解决人脑思维的模拟问题,以后碰到了理论上和实现技术上的困难,加上其他因素的影响,使得对神经网络的研究进入了低潮。

60 年代,美国著名人工智能学者 Minsky 和 Papert 对 Rosenblatt 进行了深入的研究,写了很有影响的《感知机》一书,指出如果引入隐含神经元,增加神经网络的层次,可提高神经网络的处理能力,但是研究对应的学习方法非常困难。

到了 80 年代中期,神经网络的研究进入了“柳暗花明又一村”的新境界,一个竞相研究神经网络和设计构造神经计算机的热潮在世界范围内掀起。产生这种转折变化的一个重要原因,是美国加州理工学院生物物理学家霍普菲尔德(J. J. Hopfield)采用互连型神经网络模型,利用所定义的计算能量函数,成功地求解了计算复杂度为 NP 完全型的旅行商问题。这项突破性的进展引起了广大学者对神经网络潜在能力的高度重视,从而掀起了研究神经网络信息处理方法和研制神经计算机的热潮。

80 年代后期,在美国、日本等一些工业发达国家里,掀起了一股竞相研究开发神经网络的热潮。1986 年,D. E. Rumelhart 等人出版了《Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition》一书,其中提出的 BP 网络模型再次为神经网络研究领域注入了新的活力。

神经网络的基本特点集中表现在:(1)以分布式方式存储信息;(2)以并行方式处理信息;(3)具有自组织、自学习功能。

神经网络研究涉及四个大的方面:基本模型、基本理论、应用系统与实现技术。这里模型是基础,应用系统是核心,基本理论则是由模型通向应用系统的桥梁,而实现技术是使神经网络真正得到应用的关键。

1.2 内燃机工程中的模糊和灰色现象及处理

高功率、紧凑化、轻量化、低油耗、低成本、良好的可靠性和耐久性,是柴油机设计者、研究者和制造者追求且永不满足的课题,而近 20 年提出的降低有害排放和噪声的问题,又导致增压的出现与发展。在柴油机一百多年的发展历史中,涡轮增压的应用和发展大大推动了柴油机的进步,现已成为提高柴油机升功率和总功率的最主要的手段。从总体上讲,涡轮增压是目前最成熟、最基本,同时也是应用最广泛的柴油机增压系统。对柴油机性能水平做出适当的评估,为柴油机选择合适的涡轮增压系统,是柴油机产品开发研制和柴油机匹配计算中常遇到的问题。

对柴油机性能水平进行评估,是柴油机设计者、生产厂家和用户十分关心的课题,以往的工作多集中对于若干性能指标参数的简单对比和分析,由于涉及的性能指示参数相互影响,很少从整体上评估柴油机的性能水平,也难以解析化、定量化评估过程。应用数理统计的方法,可建立内燃机性能的评估模型,但计算量较大,也没有反映出评估人员的观点、经验等因素对评估结果的影响。涡

轮增压是提高柴油机升功率的有效途径,在单级增压时,是采用定压系统还是脉冲系统,增压装置的复杂性和制造费用,以及必要的技术花费,维护、管理等问题如何在选择增压系统时权衡,是一项很有意义的工作,以往多是在满足柴油机增压程度和经济性的基础上,结合一定工况下的试验结果,从满足要求的涡轮增压系统方案中进行选择,其过程是定性分析为主,缺少定量化的描述。

在柴油机涡轮增压系统方案评选过程中,依据柴油机的工作特点、增压要求等,人们会在诸多的涡轮增压系统方案中进行选择。通过常规的性能模拟、实机实验来检验涡轮增压系统方案的优劣,对各个方案的优劣进行权衡之后,选择出较好的、理想的方案,这是一个评估与优选的过程。

对内燃机性能的预测在经济上和技术上都是十分重要的,多年来,许多研究人员从事这项工作。例如对于内燃机高原性能的预测,人们提出了模拟计算和经验公式法,但是这两种方法并不完善,在模拟循环方法中,压气机和缸内燃烧特性在高原条件下的相互关系没有或没有完全考虑,这样一来,当使用由平原实验数据建立的模型来模拟计算内燃机高原性能时,就会引起较大的误差。而经验公式法不具有普遍性,人们仅能试验少数几个机型而得到一个公式。

造成上述差别的原因是,要获得参数随海拔高度的变化规律公式需做大量的试验,而由于内燃机涡轮增压系统、高原地区及发动机类型的复杂性,使得人们不可能做大量的试验。因而,就需要寻求一种借助于少量实验就能预测内燃机高原性能的方法。实际过程中,涡轮增压柴油机在高原运行时,系统及周围环境存在有“模糊性”,可以将其视为部分信息已知、部分信息未知的灰色系统,应用灰色系统序列方法,进行涡轮增压柴油机系统性能预测,以提高预测数据精度。

随着内燃机工程设计的进展,越来越突出这样一个矛盾:设计研究的深入要求设计过程进一步精确化、量化;但是,产品开发愈深入,对象的复杂性和系统内部参数与规律的不确定性愈明显,

这种复杂性与精确性将相互排斥,与复杂性紧密相伴的,就是模糊性。通常对内燃机的设计与研究,或者将对象作简化的假设,认为系统的内部结构、规律、参数全部已知,因而建立起精确的数学模型,并将求解的结果与实际相对照,求出其误差;或者认为对象的内部全部未知,将其视为“黑箱”,仅从对象外部的因果关系、输入、输出关系来研究这类事物,用经验归纳的方法来总结。这两种处理方法与实际状况均有所差异。实际上,人们对内燃机这个研究对象的认识,并不是全部已知,但也并非全部未知。因而,将数学方法渗透到模糊现象的禁区中去,根据已知和未知的各种条件,在对系统的辨识、建模、仿真过程中,形成一种新的更加灵活而简便的处理手段和方法,这就是模糊和灰色的方法。

70年代以来,随着模糊集理论的完善和传播,在内燃机工程领域中模糊和灰色方法的应用日益受到人们重视,原因之一是在内燃机工程研究领域存在着模糊性与信息不完整性。长期以来,受经典数学的影响,内燃机工程中的分析、设计、研究一直对一些不确定性因素采取近似处理的方法,而实际上,这些不确定性不仅具有随机性,也具有模糊性。其二是内燃机系统的复杂性与精确化的互克性。Zadeh 从实践中总结出一条“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,复杂性与精确化将互相排斥”。对于内燃机这样一个复杂的机器系统,在应用计算机进行定量化研究过程中,计算机要求对内燃机系统的描述越精确越好,但这又会导致问题的复杂性增大。复杂程度越高,有意义的精确化能力越低,从而表明系统所具有的模糊性越大。在许多情况下,过分的精确反而模糊,适当的模糊反而精确。因而,对于内燃机这样一个复杂的机器系统,有必要应用模糊数学和灰色系统理论。目前,在内燃机工程中应用较多的有以下几个方面。

一、模糊灰色综合评判

所谓综合评判,就是对多种因素所影响的事物或现象作出总的评价。其中专家的经验 and 观点、用户的意愿和要求等,起着很重