模糊数学
在电力系统中的应用

王平洋 胡兆光 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

模糊数学自诞生以来，经许多学者及工程技术人员的努力，在理论研究与应用中取得了丰硕的成果。特别是自80年代初模糊数学在国内电力系统中得到应用以来，至今已有许多成果需加以总结推广。本书重点介绍了模糊数学的基本概念、模糊逻辑控制、模糊规划、模糊决策等及其在电力系统中的应用，希望起到抛砖引玉的作用。

书中对模糊数学的理论进行了深入浅出的描述，并尽量将应用实例写得通俗易懂，旨在为电力工业的工程技术人员提供一本参考书。

图书在版编目（CIP）数据

模糊数学在电力系统中的应用/王平洋，胡兆光编著．北京：中国电力出版社，1999

（电力新技术丛书）

ISBN 7-5083-0067-X

Ⅰ．模… Ⅱ．① 王… ② 胡… Ⅲ．模糊数学-应用-电力系统 Ⅳ．TM7

中国版本图书馆CIP数据核字（1999）第24452号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn）

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999年7月第一版 1999年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 6.625印张 145千字

印数 0001—3000册 定价 **12.00** 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

《电力新技术丛书》出版说明

我国电力工业的发展取得了举世瞩目的成就，从1978年到1997年的19年中装机容量及发电容量连续上两个台阶（1987年装机容量达1亿kW及1995年装机容量达2亿kW），到1996年底已居于世界第2位。电力工业的领导者向我们提出了建“一流电网”的号召，针对当前两个根本性转变的关键时刻，提出要进行由计划经济体制向具有中国特色的社会主义市场经济体制转变的第二次创业。其目标就是要保持电力工业持续、快速、健康地发展和电力供给与需求的平衡，从而保证国民经济的发展和社会的进步以及人民生活水平的日益提高。为达到建成“一流电网”的目的，必须有一流的人才，用一流的技术，并且得到各行业的关心、支持和理解。本套《电力新技术丛书》即是用深入浅出的叙述方法介绍有关一流电网的新技术。希望关心这些问题的有关人员可以用较短的时间理解这些问题的概要，加深对这些问题的关注和支持。

本丛书的作者们都是从事所写专题多年的工作者，并在该专题领域有开拓性的贡献。他们出于“甘为人梯”的想法，把自己的体会及资料尽可能深入浅出地写出，希望读者能用最少的投入，掌握作者的所知所得。

本丛书包括一些具有现实意义和广阔应用前景，并在国际上或国内处于前沿地位的高新技术。例如微机继电保护、电力网中的谐波、电网调度员培训模拟（DTS）、人工神经网络及其应用、配电系统自动化及其发展、面向对象设计的开放

式能量管理系统、模糊数学在电力系统中的应用、电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统、直接法稳定分析、无功补偿的矢量控制等，读者可以根据需要与可能选用。

本丛书的宗旨是用读者容易理解的体系和叙述方法，深入浅出、循序渐进地就各专题题目的引出，专题的基本原理和理论及对电力系统的影响进行简要论述，并对专题的应用领域和前景及可能产生的效益作出评述。

本丛书的读者对象为：科研、教学、生产第一线的电力工程技术人员，特别是工作5年左右的年轻工程师及大、中专院校有关专业的学生。由于科学技术的飞速发展以及我们的水平有限，丛书肯定会存在许多不足，丛书的书目和内容也应当不断发展和更新。我们热诚地希望得到社会各界和广大读者的批评指正。

王平洋　周孝信

前　言

本书为《电力新技术丛书》中的一册，用高级科普深入浅出的语言介绍模糊数学在电力系统中应用的概况。模糊数学现在已在实践中证明是现代智能技术中最重要的技术之一，是处理不确定性问题的有效方法，在工农业、医学、军事等方面都显示了其重要的作用，在电力系统中也有广泛的应用前景。尤其在规划和控制方面，应用模糊方法优势的报导已越来越多，模糊家用电器在日本已深入到千家万户，成为优选产品。但模糊数学是处理不确定性的计算方法之一，是一种计算方法与工具，其应用的深度将完全依赖于专业人员的使用水平。因此模糊数学在电力系统中应用的推广，需要专业人员投入一定的时间与力量了解模糊数学，从而解决应用问题。同时，关心模糊数学的电力系统专业人员，迫切希望有一些浅显而实用的介绍。本书目的主要是举一些实际例子，希望引发专业人员的兴趣，并提供一些怎样应用的启发信息，还可以看到智能技术的各方面互相配合应用的好处。具体理论及实践的报导，限于篇幅，请参考有关专著。本书写作过程中参考了国内外著作和诸多专家、师长、同学提供的材料，于此深致谢忱。

本书第 1 章为引言，包括模糊数学在电力系统中应用的优势和向智能技术发展；第 2 章介绍模糊数学的基本概念；第 3、4 章介绍模糊逻辑控制及其应用；第 5 章介绍模糊规划；第 6 章介绍模糊电力负荷预测；第 7 章介绍模糊决策；第 8 章介绍模糊综合评判——火电厂厂址选择；第 9 章介绍模糊电源

规划决策支持系统。

本书第1章由王平洋、胡兆光、王广生合写，第3、4章由王平洋、王广生合写，第5、6章由王平洋编写，第8章由王广生、胡兆光合写，第2、7、9章由胡兆光编写。本书由周孝信院士和韩英铎院士审阅。

限于技术及经验水平，所写内容有不到和不妥之处，希读者指正。

王平洋　胡兆光

1999年1月

目　录

《电力新技术丛书》出版说明
前言
1　引言 …… 1
1.1　模糊数学在电力系统中的应用优势 …… 1
1.2　模糊数学的发展和智能计算 …… 8
2　模糊数学的基本概念 …… 21
2.1　模糊集 …… 21
2.2　模糊集的表达方式和运算 …… 24
2.3　模糊关系 …… 31
2.4　模糊逻辑推理 …… 35
3　模糊逻辑控制 …… 50
3.1　引言 …… 50
3.2　控制量查询表 …… 51
3.3　两级倒摆模糊控制 …… 54
3.4　模糊方法改进常规控制 …… 63
3.5　模糊 PI 控制 …… 65
3.6　神经模糊控制 …… 68
3.7　智能控制 …… 70
4　模糊逻辑控制的应用 …… 74
4.1　PSS …… 74
4.2　模糊节能控制应用于电动机 …… 84
4.3　过热温度控制 …… 98
5　模糊规划 …… 104

5.1 线性规划 …… 104
5.2 模糊线性规划 …… 107
5.3 模糊多目标线性规划 …… 114
5.4 期望目标与软性约束 …… 118
6 模糊电力负荷预测 …… 123
6.1 引言 …… 123
6.2 人工神经网络负荷预测方法 …… 126
6.3 负荷的周期性变化 …… 135
6.4 新开发区的负荷预测 …… 140
7 模糊决策 …… 147
7.1 层次分析法 …… 147
7.2 模糊层次分析法 …… 152
7.3 群组决策 …… 157
8 模糊综合评判——火电厂厂址选择 …… 162
8.1 模糊综合评判方法 …… 162
8.2 模糊综合评判方法的应用 …… 168
9 模糊电源规划决策支持系统 …… 180
9.1 电源规划 …… 180
9.2 多目标电源规划模型 …… 188
9.3 模糊多目标电源规划决策支持系统
(MGD) 的结构 …… 192
9.4 MGD 中的数据库系统 …… 195
9.5 MGD 中的模型库系统 …… 197
9.6 算例分析 …… 199
参考文献 …… 202

1 引 言

1.1 模糊数学在电力系统中的应用优势

模糊数学的出现是数学的一个新发展，也是一个新补充。因为实际生活中许多现象在人们头脑中的反映是模糊的。人们收到的代表现象的信息，大体上是不精确、不完全的，并夹杂着许多干扰信息。因此，用精确的数学来代表这些模糊信息，描述人们所认识的现象，总是难于满足人们的要求。人们处理模糊信息的能力是很强的，而现在的计算机还望尘莫及。古代的神箭手百步穿杨，现在的射击运动员命中靶心得10分，母亲在一群婴儿哭声中能辨认出哪一个是她的孩子的哭声，调度员在垂暮时觉察到气象的变化，可以估计出爬峰（负荷急速上升）时将增多少万千瓦负荷，有经验的选厂专家从地形地貌可以大致估计出要增加土方平整量多少立方米，而这些若用精确计算也许费很大劲仍难满足要求。代表电力系统现象的信息也是如此。规划年负荷的预测，可假定为“争4保3”，即争取增长率为4%，确保3%，这本身已是一个模糊概念。3%和4%也不可能很准确，而这却是一个很重要的规划条件，不论用哪一个精确数字来描述这一约束都是不适当的。若用模糊集的方法来描述，就很接近实际的情况。用了模糊集，也不必去计算什么“灵敏度”，即约束变动时，结果变动多大。如果要考虑的约束条件多时，计算量太大，一般就只能选取几个条件算一下。模糊方法的答案可以是，某

一种结果的可能性多少，另一种结果的可能性多少等，用一个模糊集来给决策者作参考，比单个决策数字好得多。

再用某公司优化投资计算来说明模糊集的优点，假设某公司规划某一年投资5000万元生产若干种产品，这些产品各有不同的单位产品投资额（成本）和单位产品产值。一般的优化投资是以在某些原料限额或电力限额下对若干组产品产量要求的安排方案求投资最低的最佳方案，或是投资限额下求最大总产值的产品产量方案。但实际经营中限额单位投资和单位产值都有一个变动范围（约束条件是软性的），若希望得到最低投资的产品方案比预计的投资5000万元低时，总想在投资限额内再增加一些产量，以求增加一些总产值，且总投资不超过5000万元。这就是期望投资额。用模糊数学方法，可以在考虑软性约束条件下给出有一定裕度的最佳期望投资额，供决策者参考。因此，模糊数学在电力系统规划中的应用是有美好前景的。关于建立期望投资等软性规划目标的方法，将在第5章进一步介绍。

1.1.1 期望目标与满意度

模糊规划中还引入了“满意度”的概念，使规划决策在几个互相制约的目标中，可以选择一个大家满意的比例关系，供决策者参考。例如在电力供应规划时，需引导部分工业用户用电。工业用电中有的工业（如电化冶炼等）耗电量很大，电价很低，但对本市的总产值贡献很大，当全市产值为一个重要指标时，必须大力支持这种工业，但对供电局的电费收入却是不利的。有的工业产值不大，但电价较高，对全市的产值虽贡献不大，对电费收入却很有利。这样，在全市的几十个工业的用电方案中，有全市产值最佳的方案和电费最佳的方案。怎样进行优化计算是一个多目标规划问题。一般的

解法，用规划者对两种目标的偏向意图，算出甲目标对乙目标的相对权重，把多目标问题化为单目标问题，然后进行优化计算。用模糊方法对每一个方案加一个模糊满意度因素，从甲目标最佳到甲目标最差（乙目标最佳时）之间建立一个模糊变化关系。这个关系最简单的方式是线性关系，但也可以根据具体情况建立其他非线性关系，把这个关系称为满意度关系。然后求算最佳满意度，就可以推算出甲乙都满意的折衷满意方案。当然这种方法可以推广到任何多个目标的优化计算，在第5章中将用例题进一步介绍。

1.1.2 综合专家经验作出决策与评价

模糊数学中用模糊集来表达一个模糊评价是比较有效的。例如三峡工程的专家评议中分十几个专题组，每专题组的评价，可以是许多专家的综合意见。如果要把各方案排列优先次序的话，这十几组专题意见对各方案的比较评价，需作出汇总的综合评价意见。每一专题的专家需按准则作出各方案的比较给以评价，然后汇总这些专题组的评价，得出总的方案评价次序。如果用常规的方法，只能请每一专题组的各专家给以评分，要专家对一复杂的专题评分是困难的。如果允许专家用语言变量（V）“很好”、（G）“好”、（M）“一般”、（B）“坏”、（W）“很坏”来评价，则比较易于做到。如果组内11个专家，2人说（M）“一般”，5人说（G）“好”，4人说（V）“很好”，那么这一组评价的模糊集 E 为（0.2，M）、（0.5，G）、（0.4，V），或用 Zadeh 表达式表示为

$$E=\frac{0.2}{M}+\frac{0.5}{G}+\frac{0.4}{V}$$

表达式中 M、G、V 都可以用模糊集代表。这里“+”号不是加法，下文将解释。用模糊方法不难把各专题的评价综

合起来，根据各专题在综合评价中的不同重要性，应有不同的权重，这样就可以较合理地把各专家意见汇总综合。

再以火电厂厂址选择为例，为建设火电厂，厂址选择需满足既利于运进燃料，又便于架线送出电力，冷却水方便，地质良好，地形地貌好，却又少占良田．施工及器材运输方便等至少十几项条件，故要对厂址进行详细的调查研究，气象及地震条件等还需要调查历史资料并进行某些试验，仅以供水条件一项，就有表 8.3 所示的因素需加以考虑。怎样把这些因素的调查结果化为可比的数字，专家们根据积累的经验，把调查结果逐条给以评分，附以评分的可信度，如表 8.4 所示。这些原始数据，需综合为可比的总分，成为总的厂址比较方案中的分数。显然这些数据很难给得十分精确，只能给以一定的模糊度，也就是说，用模糊集来表示，比较适当。此外，每一项选厂条件项目（例如供水条件）在火电厂厂址的十几条可比项目中占据的分量（重要性）也视待选厂址方案的地区而不同。例如在江浙一带水源比较方便的，供水条件项目就不大严重，可以给以较轻的权重；在北方缺水地带，甚至各工业争水紧张的地区，供水能否满足要求是十分重要的条件，这项目就需给以较大的权重。但这些权重，又不可能有绝对准确的分量，有较大的模糊性。因此可比项目之间，需给以不同的权重，且用模糊集来表示。在电力规划设计总院选厂专家指导下，这个厂址选择的模糊方法，由王广生在胡兆光工作的基础上完善化、实用化向全国设计单位推广应用，将在第 8 章较详细地进行介绍。

由于电力系统中许多现象是不精确的、模糊的，所以模糊数学中“隶属函数”的概念很有用途。例如一台电力设备的额定容量为 50kVA，可以过负荷达到 60kVA，用连续推理

法硬说 70kVA 也可以。硬说负荷到 60kVA 既然可以，加 0.1kVA 达到 60.1kVA，应该也不是不可以。这样每次加 0.1kVA 连续推理到达 69.9kVA，仍将硬说可以。那么再加 0.1kVA 达到 70kVA，仍不能说不可以吧！这就得到了过负荷到 70kVA 也可以的结论。这当然是悖论。因为 50kVA 额定容量和 60kVA 过负荷容量都是经过试验和设计计算最后人为地确定的数字，是模糊的概念。如果用模糊方法，可以对从 50kVA 到 60kVA 这个过负荷的中间过负荷区段，作出一个“过负荷允许度”的隶属函数。这可以是一个线性关系，也可是一个代表设计者或研制人员经验的任何其他关系。50kVA 时允许度为隶属度 1.00，然后向 60kVA 允许度递减时［负荷（kVA）递增，允许度递减］，很明确地表示了不能增加到 60kVA 以上，那时允许度到达 0。这就比较明确地描述了设计或研制专家的意图了。

又如负荷预测的专家系统中也可以应用模糊集得到更好的效果。负荷变化的特性，一般有总的发展趋势和随机的临时变化两个部分。总的发展趋势可以从历史数据用回归法或时间序列法等取其规律，已经有可靠的把握。只是气象的影响和临时发生的重大事件，如影响面广的电视节目或天灾人祸等，现在还没有足够准确的预报方法作为负荷变化的根据。这些因素对负荷变动的数学关系，也没有足够地掌握。因此，经验丰富的调度员（专家）觉察这些因素时作出应付的手段，往往比计算预测准确。所以这个随机部分可以就各地不同的具体条件，把各调度所不同专家的经验与判断方法，和观察的不同因素，构造成不同的专家系统（也就是所谓的“锦囊妙计”，“如果这样…那么就这样…”）。这类预测系统现在已经证明有强大的生命力，尤其用人工神经网络来构造回归或

时间序列部分，则反应更为迅速。

人工神经网络在实际应用中有许多方案各有特长（下文将谈到），在电力系统中应用较多的为 BP 神经网络及 Hopfield 网络，尤其以 BP 网络最为普遍。BP 网络有强大的处理非线性关系的能力，使用简单而方便，一旦凭历史数据把网络参数调整好（又称训练好）后，应用中运算极快，所以吸引了研究者的兴趣。但主要缺点是十分费时费力，条件变化后又必须重新训练，所以应用者往往为此而丧气。我们在负荷预测中应用了 BP 网络。为了满足负荷预测快速性的要求应用了模糊逻辑控制训练调整，以改进其训练的性能（实际上是计算向最优点收敛的性能）得到了十分令人鼓舞的结果，能把训练速度提高一个数量级以上。这不但适用于负荷预测，也适用于其他模糊逻辑控制的实际应用，下文还将多次谈到。至于中长期负荷曲线形状的预测，即负荷的周期性变化部分的预测，由于其变化虽有规律，但不确定性很大，所以不得不用模糊方法来处理，这些都将在负荷预测的一章中介绍。

1.1.3 模糊逻辑控制有巨大的经济效益

模糊逻辑控制，简称模糊控制，为目前模糊方法实际应用中效益较大的新技术。在家用电器中（如空调、洗衣机、电冰箱、电风扇等）模糊控制的产品已成为优选的产品，进入千家万户。日本的地铁机车模糊控制，显示了惊人的水平，甚至技术难度很高的模糊声控直升飞机，也已有模型试演。其关键在于模糊控制方法和 PID 控制（比例、积分、微分控制）相比不但反应正确而且自适应性强。比例、积分、微分控制的基础是以实际被控制量（如温度）与目标之间的误差（如温差）作为调整控制的依据，加以积分环节以增加其稳定

性，再加以微分环节以增加其动态灵敏度，在设定点上是最佳的。但由于其误差量是设定的一些精确数据，很难反映许多动态细节。当影响其动态的因素较多、偏离设定点较大时，控制作用很难通过 PID 方法来适应。而模糊控制则不问其影响因素有多少（有大、有小、有快、有慢），所有影响到误差的实际情况都反映为表示误差的模糊集内的真值，不论其隶属于语言变量（如正大，即正方向大幅度，或负小，负方向小幅度等）的程度有多大，一概收取而给以适当的考虑，因此模糊控制的输入量能较好地反映误差的动态变化。这些变化的处理又凭专家经验（包括规程、导则等有效的总结）来决策，所以能进一步实现专家能手的处理水平。模糊控制和最优控制相比则理论及结构简单、直观而自适应性好，所以已在家用电器等领域内显示了其有利的竞争能力。其在电动机应用中能得到的节能效果，将是十分巨大的。其他如在电力系统稳定控制和电容器、电抗器、移相器等的快速与灵活控制方面都将有良好的应用前景。

模糊逻辑控制的有效性可以用一个简单的有关 BP 网络的例题来说明。在人工神经网络中 BP 网络应用得最普遍已如上所述，所以不少研究单位及高等院校的研究人员、博士生、硕士生应用此有效工具的很多。但他们都遇到同样的困难：应用虽好而训练很费时费力。研究人员各想方设法，试图改进其训练的收敛速度和其精确度。验算的例题，有一个称为异或门（XOR）例题，简单而便于比较，应用的人较多。这例题的内容如表 1.1 所示。一般的改进算法如优化学习速度（η）、优化冲量（α）、改进初始值等，可以改进收敛速度一个数量级。应用模糊逻辑控制方法，在提高准确度（减少最终误差值）的情况下，可以加快速度达两个数量级（见第 6 章

模糊电力负荷预测，常规方法迭代 11233 次，用时 488s，得全局误差 0.001；应用模糊逻辑控制，迭代 137 次，只用 5.49s，全局误差为 0.000837)。

表 1.1　　异 或 门 例 题

输　入			输　出
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

模糊逻辑控制的关键在于凭专家经验来处理复杂的控制关系，而描述专家经验的较好方法为模糊数学，专家系统在电力系统中的发展为模糊数学开辟了广阔的应用前景。人工神经网络显示了其巨大的优势，而人工神经网络和模糊数学的结合，为解决电力系统中复杂的难题提供了有力的工具。模糊数学与神经网络在电力系统中应用的国际会议，自 1992 年以来连年不断地进行。下面将介绍人工神经网络与模糊方法的应用。

1.2　模糊数学的发展和智能计算

模糊数学是处理不确定性问题的有效方法。电力系统中的应用，大致可分为规划设计（包括负荷预测）及运行控制两个方面。最近几年来在模糊逻辑控制方面取得了较大的实

用进展，尤其在日本，大大小小的模糊逻辑控制器，从洗衣机、空调机、电饭煲、照相机到制造生产车间内的质量控制小机器人，以至地下铁道机车启停和声控直升飞机等方面的应用，取得了丰硕的成果，已席卷全国，美国和欧洲正在急起直追。在我国，主要是高等院校，对理论方面有颇多贡献，模糊逻辑控制在电力工业中的应用正在探索中。

电力系统规划也是应用模糊数学较为活跃的领域，德国的 H. J. Zimmermann 教授 1978 年提出了多目标模糊规划的论文，1985 年还出版了一本专论模糊理论应用于决策和专家系统的专著。在此基础上我国电力系统规划工作者结合我国国情进行了应用的研究，提出了一种 Fuzzy 多目标算法。用相似方法，重庆大学 1991 年提出了有 5 个目标函数的模糊多目标规划法。胡兆光还发展了 Saaty 的层次分析法，提出模糊层次分析法在国际学术会议上得到了好评。在水电梯级开停机问题上，段虞荣提出了应用模糊集方法，在 1998 年的国际会议上得到了与会外籍专家的赞赏。

电力系统中，人们对实际数据的认识往往是不精确的、模糊的。用精确数字进行的电力系统计算，只能给出特定数据下的代表性情况。例如，电力系统控制所依据的功率、电压、电流等，不但有测量的误差，还有时间上各母线各发电机间并非绝对同时测量，匹配上也有误差，因此人们对这些数据认识的模糊性是不可避免的。但人们头脑对模糊信息的处理能力却是很强的，在模糊环境中锻炼和积累的经验及作出的判断，往往能超出公式化了的定型的计算模型智慧。应用模糊逻辑控制，模仿人脑处理模糊信息的方法，可以得到较为满意的结果。但模糊逻辑控制是一项新兴的技术，凡是新兴技术总有一段逐步完善和徐徐被用户接受的、“首先吃螃蟹”