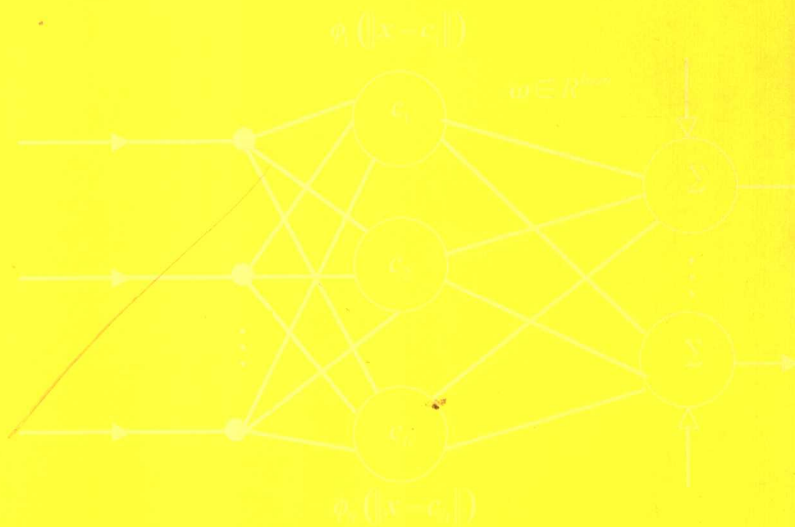


计算智能与计算电磁学

田雨波 钱 鉴 编著



TP183/69



科学出版社
www.sciencepress.com

TP183/69

2008

计算智能与计算电磁学

田雨波 钱 鉴 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在论述计算智能及计算电磁学基本概念和研究领域的基础上,系统地介绍了计算智能中的遗传算法、神经网络、模糊系统在电磁建模和优化问题中的应用。全书共分6章,内容主要包括计算智能、遗传算法基本原理及电磁应用、模糊理论基本原理、神经网络基本原理及电磁应用等。同时,书后附有相关程序。

本书可供计算电磁学、电磁场理论、电磁场工程、宽带微带天线、计算智能等领域从事研究和开发工作的科技人员和高校教师参考阅读,也可作为高等院校相关专业的高年级本科生和研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

计算智能与计算电磁学/田雨波,钱鉴编著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-021201-6

I. 计… II. ①田…②钱… III. ①人工智能-神经网络-计算-研究②电磁计算-研究 IV. TP183 TM15

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第035236号

责任编辑:孙 芳 王志欣/责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年4月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—3 000 字数:294 000

定 价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

前 言

计算智能是以计算模型和数学模型为基础、以分布并行计算为特征的模拟人的智能求解问题的理论与方法。计算智能系统是在神经网络、模糊系统、进化计算三个分支的基础上,通过相互之间的有机融合而形成的新的科学方法,也是智能理论和技术发展的崭新阶段。这些不同的成员方法从表面上看各不相同,但实际上是紧密相关、互为补充和促进的。神经网络反映大脑思维的高层次结构,模糊系统模仿低层次的大脑结构,进化系统则与一个生物体种群的进化过程有着许多相似的特征。这些研究方法各自可以在某些特定方面起到特殊的作用,但是也存在一些固有的局限。因此,将这些智能方法有机地融合起来进行研究已经成为一种发展趋势。1994年起,IEEE的神经网络、模糊系统、进化计算三大会议合在一起召开,计算智能作为人工智能新发展的主流地位从此确定。

计算电磁学是在20世纪60年代随着电子计算机技术的发展而诞生的,它是在电磁学、计算数学和计算机科学的基础上产生的边缘交叉学科。计算电磁学实质上是以电磁场理论为基础,以高性能计算技术为手段,运用计算数学提供的各种方法,解决复杂电磁场理论和工程问题的应用科学。经过几十年的发展,计算电磁学内容非常丰富,影响非常深广,以致所有与电磁场相关的领域都因其发展而受益,不少领域由于运用了计算电磁学的方法而使其面貌完全改观。然而,对于复杂的电磁系统,对其进行严格的电磁仿真耗时费力,在保证计算精度的情况下对其进行快速而精确地建模和优化必将成为计算电磁学的发展趋势,而这又是建立在计算智能的基础之上,进而提高电磁场工程问题的计算机辅助设计水平。

本书是作者从事计算智能和计算电磁学建模及优化的教学和科研工作的系统总结,并从国内外相关文献资料中提取最主要的理论及成果,力图反映最新的研究动态,清楚阐述电磁问题的高效建模和优化设计。全书共分6章。第1章论述计算智能及计算电磁学的基本概念和研究领域,及其相互之间的关系。第2章介绍了遗传算法的基本原理,其中包括基本遗传算法、微量遗传算法、免疫遗传算法等。第3章主要介绍遗传算法的电磁应用,涉及电磁吸波材料设计、天线阵列优化设计、电磁问题复超越方程求解等内容。第4章介绍了模糊理论基本原理。第5章介绍了神经网络的基本原理,涉及的神经网络模型包括BP神经网络、RBF神经网络、遗传神经网络、模糊神经网络等。第6章主要介绍神经网络的电磁应用,包括矩形波导匹配负载设计、微带天线优化设计、谐振频率计算、智能天线波束形成等内容。另外,本书的第2章、第4章和第5章主要参考了陈国良、王立新、魏海坤、

王秉中、田景文等人的著作,在此深表感谢。

本书是在江苏省高校自然科学基金基础研究计划项目(项目编号:07KJB510032)、江苏科技大学出版基金的资助下完成的,在此对上述资助单位表示诚挚谢意。同时,对在本书创作过程中给予作者大力支持的江苏科技大学电子信息学院的领导及各位同仁表示由衷的感谢。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

前言

| | |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 计算智能 | 1 |
| 1.1.1 人工智能的概念 | 1 |
| 1.1.2 计算智能的概念 | 2 |
| 1.1.3 计算智能研究领域 | 3 |
| 1.2 计算电磁学 | 4 |
| 1.3 计算智能的电磁应用 | 5 |
| 参考文献 | 7 |
| 第 2 章 遗传算法基本原理 | 9 |
| 2.1 遗传算法概述 | 9 |
| 2.1.1 遗传算法简史 | 10 |
| 2.1.2 遗传算法特点 | 11 |
| 2.1.3 遗传算法研究课题 | 13 |
| 2.2 遗传算法的数学基础 | 14 |
| 2.2.1 模式的概念 | 14 |
| 2.2.2 模式定理 | 16 |
| 2.2.3 隐并行性 | 19 |
| 2.2.4 积木块假说 | 20 |
| 2.3 基本遗传算法 | 21 |
| 2.3.1 编码技术 | 22 |
| 2.3.2 群体设定 | 23 |
| 2.3.3 适应度函数 | 24 |
| 2.3.4 遗传操作 | 28 |
| 2.3.5 遗传算法的收敛性 | 33 |
| 2.3.6 几种流行遗传算法策略 | 34 |
| 2.4 微量遗传算法 | 34 |
| 2.5 免疫遗传算法 | 36 |
| 参考文献 | 38 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 第3章 遗传算法电磁应用 | 40 |
| 3.1 遗传算法电磁应用概述 | 40 |
| 3.2 吸波材料优化设计应用 | 42 |
| 3.2.1 电磁吸波材料简介 | 42 |
| 3.2.2 吸波材料设计中的分层优化 | 43 |
| 3.2.3 吸波材料设计中的分块优化 | 48 |
| 3.2.4 分层设计和分块设计相结合 | 52 |
| 3.3 天线阵列优化设计应用 | 53 |
| 3.3.1 天线阵列综合的发展现状 | 53 |
| 3.3.2 天线阵列综合用遗传算法 | 54 |
| 3.3.3 模拟退火算法 | 59 |
| 3.3.4 遗传模拟退火算法的实现 | 61 |
| 3.3.5 直线天线阵列的综合 | 62 |
| 3.3.6 平面天线阵列的综合 | 71 |
| 3.4 电磁复超越方程求解应用 | 75 |
| 3.4.1 算法描述 | 76 |
| 3.4.2 算法实例 | 78 |
| 3.4.3 算法特点 | 83 |
| 参考文献 | 83 |
| 第4章 模糊理论基本原理 | 88 |
| 4.1 模糊理论概述 | 88 |
| 4.1.1 模糊理论简史 | 88 |
| 4.1.2 模糊理论特点 | 91 |
| 4.1.3 模糊理论研究课题 | 92 |
| 4.2 模糊理论基础知识 | 93 |
| 4.2.1 模糊概念与模糊集合 | 93 |
| 4.2.2 常用的隶属函数 | 95 |
| 4.2.3 模糊集合的运算 | 96 |
| 4.3 模糊关系和模糊推理 | 97 |
| 4.3.1 模糊关系 | 97 |
| 4.3.2 模糊关系的运算 | 98 |
| 4.3.3 模糊蕴含和模糊推理 | 99 |
| 4.4 模糊逻辑系统 | 104 |
| 4.4.1 模糊系统 | 104 |
| 4.4.2 模糊逻辑系统框架 | 104 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 4.4.3 Takagi-Sugeno 模糊逻辑系统 | 106 |
| 4.4.4 模糊逻辑系统的逼近问题 | 107 |
| 4.5 模糊理论电磁应用概述 | 108 |
| 参考文献 | 110 |
| 第 5 章 神经网络基本原理 | 112 |
| 5.1 神经网络概述 | 112 |
| 5.1.1 神经网络简史 | 114 |
| 5.1.2 神经网络特点 | 115 |
| 5.1.3 神经网络研究课题 | 118 |
| 5.2 神经网络基础知识 | 120 |
| 5.2.1 神经网络模型 | 120 |
| 5.2.2 神经网络的训练和学习 | 125 |
| 5.2.3 神经网络训练用样本 | 129 |
| 5.3 BP 神经网络 | 134 |
| 5.3.1 BP 神经网络结构 | 134 |
| 5.3.2 BP 学习算法 | 136 |
| 5.3.3 BP 神经网络应用要点 | 139 |
| 5.3.4 BP 算法的不足及改进 | 142 |
| 5.4 RBF 神经网络 | 146 |
| 5.4.1 RBF 神经网络结构和工作原理 | 146 |
| 5.4.2 RBF 神经网络常用的学习算法 | 149 |
| 5.4.3 RBF 神经网络的特点及注意事项 | 153 |
| 5.4.4 RBF 神经网络与 BP 神经网络的比较 | 154 |
| 5.5 遗传神经网络 | 154 |
| 5.5.1 遗传算法和神经网络的融合 | 155 |
| 5.5.2 遗传神经网络的实现 | 160 |
| 5.6 模糊神经网络 | 163 |
| 5.6.1 模糊系统与神经网络比较 | 163 |
| 5.6.2 模糊神经网络实现 | 166 |
| 参考文献 | 174 |
| 第 6 章 神经网络电磁应用 | 178 |
| 6.1 神经网络电磁应用概述 | 178 |
| 6.2 波导匹配负载设计 | 179 |
| 6.2.1 H 面 T 型波导匹配负载设计 | 180 |
| 6.2.2 E 面 T 型波导匹配负载设计 | 182 |

| | | |
|-------------|-----------------------------|------------|
| 6.2.3 | 波导终端短小匹配负载设计 | 184 |
| 6.3 | 微带天线设计 | 190 |
| 6.3.1 | 微带天线概述 | 190 |
| 6.3.2 | 微带天线设计 | 191 |
| 6.4 | 谐振频率计算 | 199 |
| 6.4.1 | 微带天线谐振频率 | 200 |
| 6.4.2 | 谐振频率计算用神经网络 | 202 |
| 6.4.3 | 自适应网络基模糊推理系统 | 202 |
| 6.4.4 | 混合法用于计算谐振频率 | 204 |
| 6.5 | 智能天线的波束形成 | 213 |
| 6.5.1 | 智能天线的基本原理 | 213 |
| 6.5.2 | 基于RBF神经网络的自适应波束形成 | 216 |
| | 参考文献 | 219 |
| 附录 1 | 计算智能和计算电磁学相关网站 | 225 |
| 附录 2 | 相关程序 | 226 |
| 附录 2.1 | 遗传算法 MATLAB 程序 | 226 |
| 附录 2.2 | BP 神经网络 MATLAB 程序 | 230 |
| 附录 2.3 | RBF 神经网络 MATLAB 程序 | 232 |

第 1 章 绪 论

近年来,一些新的研究领域,如神经网络(neural network, NN)、模糊逻辑和遗传算法等,由于它们都是模拟人的智能行为或进化过程而发展起来的,并且具有高度并行化与智能化等特征,因而引起了人们的极大兴趣。这些模仿人的智能行为的交叉学科被称为计算智能,它可以用来解决不确定、非线性、复杂的各类问题,具有非常广阔的应用前景。本章主要论述计算智能和计算电磁学的基本概念,简单阐述计算智能中的神经网络、模糊逻辑与遗传算法在计算电磁学中的应用。

1.1 计算智能

1.1.1 人工智能的概念

人工智能(artificial intelligence, AI)也称机器智能,它是计算机科学、控制论、信息论、神经生理学、心理学、语言学等多种学科互相渗透而发展起来的一门综合性科学^[1~5]。从计算机应用系统的角度出发,人工智能是研究如何制造出人造的智能机器或智能系统来模拟人类智能活动的能以延伸人类智能的科学。人工智能涉及计算机、通信、自动化、数学、物理、心理学和认知科学等众多领域,是一门覆盖面很广,甚至可以说是包罗万象的学科,它包括推理、学习和联想三大智能要素。目前,人工智能的推理功能已获突破,学习功能正在研究之中,联想功能尚处于探索阶段。人工智能将在逻辑推理计算机、模糊计算机和神经网络计算机三者的基础上实现。届时,人工智能将把人类从繁琐而又一般性的脑力劳动中解放出来,去从事诸如科学、艺术等具有高创造性的脑力劳动,同时生产效率也将会大幅度提高。

人工智能的传说可以追溯到古埃及,但 1941 年以来,随着电子计算机的发展,其技术最终已可以创造出机器智能。“人工智能”一词最初是在 1956 年 Dartmouth 学会上提出的,经历了博弈时期、自然语言理解、知识工程和目前的机器学习等阶段。从出现到现在,已经开发出许多人工智能程序,并且也影响到了其他技术的发展。例如,美国首创的模糊逻辑,可以从不确定的条件做出决策;还有神经网络,被视为实现人工智能的可能途径。总之,20 世纪 80 年代,人工智能引入了市场,并显示出其实用价值。在“沙漠风暴”行动中,军方的人工智能设备经受了战争的检验,人工智能技术被用于导弹系统和预警显示以及其

他先进武器；同时，人工智能技术也进入了家庭，智能电脑的增加吸引了公众兴趣，一些面向苹果机和 IBM 兼容机的应用软件（例如语音和文字识别）已可买到，使用模糊逻辑技术简化了摄像设备；智能控制将人工智能应用于传统的控制技术方面也取得了明显的进展，收到了很好的经济效益和社会效益。人工智能作为联系生命科学与信息处理的学科，其应用刚刚拉开序幕。在未来，它将深入到信息技术、教育、卫生、娱乐、金融、交通和通信领域，进而影响和改变人类的生活。人工智能技术将使计算机具有灵活而友好的多种媒介用户界面，包括语音、图像和其他多媒体方式，使计算机和人类的交流更为容易和自然，实现真正的人机合一。它将延伸人类的智能，为人们提供知识处理和决策分析的工具。这些信息处理系统将深入到家庭成为人类的保健医生，深入到政府和企业承担辅助决策的任务，在浩如烟海的信息中找到有用的资讯，成为默默无闻的好秘书和助手。利用人工智能技术研制出来的各种工业和家用机器人将在家庭和制造业中从事各种繁重和机械重复的劳动，或是在对人类有害和危险的环境下取代人的工作。总而言之，人工智能技术将深刻地改变人类生产和生活的方式。

人工智能可以认为是计算机学科的一个分支，20 世纪 70 年代以来同空间技术、能源技术一起被称为世界三大尖端技术，也与基因工程、纳米科学一起被认为是 21 世纪三大尖端技术。

1.1.2 计算智能的概念

1992 年，美国学者 Bezdek 在《国际近似推理杂志》上首次给出计算智能 (computational intelligence, CI) 的定义，他指出计算智能依靠生产者提供的数字、数据材料，而不是依赖于知识，而人工智能使用的是知识精华。Bezdek 还认为人工神经网络应称为计算神经网络，即“人工”两字应改为“计算”。在人工智能和计算智能的关系上，Bezdek 认为 CI 是 AI 的子集，即 $CI \in AI$ 。1994 年，Bezdek 再次阐述了他的观点^[6]，即智能有三个层次。第一层次是生物智能 (biological intelligence, BI)，它是由人脑的物理化学过程反映出来的，人脑是有机物，它是智能的物质基础；第二层是人工智能，它是非生物的，是人造的，常用符号表示，来源是人的知识精华和传感器数据；第三层是计算智能，它是由数学方法和计算机实现的，来源是数值计算和传感器。以上三者第一个英文字符取出来称之为 ABCs。显然，从复杂性看有三个层次，即 B (有机)、A (符号)、C (数值)，而且 BI 包含了 AI，AI 又包含了 CI。从所属关系来看，CI 是 AI 的一个子集，而 AI 虽不是 BI 的子集，但 BI 通常用来指导 AI 模型，同样也指导了 CI。AI 是 CI 到 BI 的过渡，因为 AI 中除计算方法之外，还包括符号表示及数值信息处理。模糊集和模糊逻辑特别适合从 CI 到 AI 的平滑过渡，因为它包含了数值信息和语义信息。

1993年, Marks写了一篇关于计算智能和人工智能区别的文章,并在文中给出了对计算智能的理解,他把神经网络、遗传算法、模糊系统、进化规划和人工生命统称为计算智能。他的这一定义得到许多学者的认同,包括IEEE的专家和领导。1994年的国际计算智能会议的命名就部分地源于Marks的文章,这次会议将国际神经网络学会发起的神经网络、模糊系统和进化计算三个年度性会议合为一体,会议日程分为三个阶段,第一阶段内容主要是模糊系统,第二阶段主要是进化算法,第三阶段主要是神经网络,会后出版了名为 *Computational Intelligence: Imitating Life* 的论文集^[6]。此后,计算智能这个术语就开始被频繁地使用。

Zadeh则认为传统的硬件计算是强调人工智能的计算模式,而计算智能的基础是软件计算,即模糊逻辑、神经网络和进化计算。他认为计算智能和人工智能的本质区别在于使用的推理类型不同,人工智能使用的是易脆逻辑,而计算智能使用的是模糊逻辑和规则。

Ebethart、Dobbins和Simoson关于计算智能的理解是将智能系统置于一个环境中,智能行为的标准是改变或作用于环境的能力,而计算智能只是智能系统的一个内部节点,适应性只是计算智能的衡量指标。计算智能是一种方法论,是通过计算实现适应和处理新形势的能力,具有推理的属性,能得到预测或决定的结果。

另外,也有人认为计算智能和人工智能仅有部分重合。他们认为,人工智能是符号主义,基于知识、规则和推理,相当于人的左脑;而计算智能属于连接主义,基于数据、学习和记忆,相当于人的右脑。

1.1.3 计算智能研究领域

计算智能所涉及的研究领域主要包括人工神经网络、模糊系统和遗传算法三个方面。

(1) 人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 是根据人脑的生理结构和信息处理过程来创造的,从而模仿人的智能。

(2) 模糊系统 (fuzzy system, FS) 试图描述和处理人的语言和思维中存在的模糊性概念,其目的也是模仿人的智能。

(3) 遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一种模仿生物进化过程的优化方法,也属于模仿人的智能的范畴。

可见,模仿人的智能是它们共同的奋斗目标和合作的基础,将三者统称为计算智能,因为三者实际上都是计算方法^[7~10]。

需要说明的是,计算智能所研究的问题涉及信息获取、传输、处理和利用的各个方面,本书主要从学习、搜索和推理三个方面来讨论其相关理论和方法。另

外, 讨论的计算智能的研究方法是以模型、算法和实验为基础, 具有计算理论与技术的特征和智能行为的依据。

1.2 计算电磁学

现代科学研究的基本模式是“科学研究、理论分析、高性能计算”三位一体。在国际高技术竞争日益激烈的今天, 高性能计算技术已经成为体现一个国家经济、科学和国防实力的重要标志, 成为解决挑战性课题的一个根本途径。目前, 在全球范围展开的高性能计算技术的竞争已成白热化态势。

在高性能计算技术发展的同时, 在电磁场和微波技术学科中, 以电磁场理论为基础, 以高性能计算技术为手段, 运用计算数学提供的各种方法, 诞生了一门解决复杂电磁场理论和工程问题的应用科学——计算电磁学 (computational electromagnetics), 它是一门新兴的边缘交叉科学^[11~14]。

电磁场理论的早期发展和无线电通信、雷达的发展是分不开的, 它首先被应用在军事领域。现在, 电磁场理论的应用已经遍及生命科学、医学、材料科学和信息科学等几乎所有的技术科学学科。计算电磁学的研究内容涉及面很广, 它渗透到电磁学的各个领域, 与电磁场工程、电磁场理论互相联系、互相依赖。对电磁场工程而言, 计算电磁学是要解决实际电磁场工程中越来越复杂的电磁场问题的建模与仿真、优化设计等问题; 而电磁场工程也为之提供实验结果, 以验证其计算结果的正确性。对电磁场理论而言, 计算电磁学可以为其研究提供进行复杂数值或解析运算的方法、手段和计算结果。计算电磁学对电磁场理论发展的影响决不仅仅是提供一个计算工具, 而是使整个电磁场理论的发展发生了革命性的变化。目前, 计算电磁学已成为对复杂体系的电磁规律、电磁性质进行研究的重要手段, 为电磁场理论研究开辟了新的途径, 极大地推动了电磁场工程的发展。

计算电磁学研究是对电磁问题进行分析, 抓住主要因素, 忽略各种次要因素, 建立起相应的电磁、数学模型, 选择适当的算法在计算机上实现。首先考虑算法。对确定的数学模型, 可以采用数值或非数值计算来求解, 这是计算电磁学的基础。算法可以简单地认为是在解决具体问题时计算机所能执行的步骤, 它将一个复杂的问题逐步简化为简单的、基本的、计算机能够执行的运算。算法的好坏是影响到能否计算出结果、精度的高低或计算量大小的关键。其次是算法的误差。一般来说, 所有数值计算方法都存在误差, 其来源主要有模型误差、观测误差、方法误差和舍入误差等, 在进行任何一项计算时都必须考虑误差, 然后根据实际精度要求选择和设计出好的计算方法。同时, 必须要考虑计算的收敛性和稳定性问题。

计算电磁学在吸收计算数学研究成果的基础上, 采用具有自身学科特色的研

究方法,其在研究上的主要特点表现在以下几方面。

(1) 计算电磁学工作者在选用计算方法时更多的考虑是算法和计算结果的物理意义,因为计算电磁学是以要解决的电磁问题为出发点和归宿点,有时采用简单可靠、物理意义清楚的算法,对复杂物理问题作各种近似。

(2) 计算电磁学的任务是寻求电磁规律,解决电磁问题,因而它有时利用某些直观的电磁现象,加上逻辑推理、判断和实验,采用自身特有的方法,建立起输入和输出之间的桥梁,而不拘泥于数学上的严格证明。

(3) 计算电磁学工作者在使用计算机分析整理大量计算数据的基础上,还需得出物理结论,这些结论最好是以某种解析形式的近似解来表达,这样有利于电磁规律和理论的进一步推广使用。

1.3 计算智能的电磁应用

人工智能在电磁学领域中有较为广泛的应用,尤其表现在计算智能在计算电磁学中的应用,如神经网络^[15~18]、遗传算法^[19~22]、模糊系统^[23~28]等。

1) 遗传算法

电磁场理论研究与实践中存在着大量与优化、自适应相关的问题,但除了一些简单的情况外,人们对于大型复杂电磁场系统的优化和自适应问题仍然无能为力。然而,自然界中的生物却在这方面表现出了其优异的能力,他们能以优胜劣汰、适者生存的自然进化规则生存和繁衍,并逐步产生出对其生存环境适应性很强的优秀物种。遗传算法正是借鉴生物的自然选择和遗传进化机制开发的一种全局优化的、自适应的、概率性的搜索算法。

遗传算法是一门新兴的科学,它是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的自适应全局搜索算法,是当代应用数学中的一个重要分支,应用面极广。它模拟了达尔文进化论中优胜劣汰、适者生存、自然选择、遗传变异的机理,本质上是求解最优化问题的高效并行全局搜索方法。虽然它的各种理论、方法尚未完全成熟,有待于进一步发展和完善,但它却已经为解决许多复杂问题提供了希望。尽管在遗传算法的研究和应用过程中会出现许多难题,同时也会产生许多不同的算法设计观点,然而,目前遗传算法在电磁场领域的应用实践已经展现出了有益的性能和巨大的发展潜力,而且其前景更加被看好。

2) 神经网络

在微波集成电路设计中,现代计算机辅助设计(computer aided design, CAD)方法的效果取决于有源及无源电路元件模型的准确性。随着电路密度及工作频率的增高,传统建模技术的准确性变得不可靠。例如,典型的电路模拟软件所提供的无源元件模型不能准确地考虑寄生和耦合效应。为补救这一缺陷,人

们采用建立无源元件库的办法,制作、测量、存储成百上千组元件数据在一个表中,但建表成本高,占用内存资源大。另外,在任何一个高速 VLSI 系统中,为保证系统正常工作,必须进行互连结构的仿真与优化设计。信号时延、串扰、接地板反弹噪声等重要的信号整体特性的优劣取决于系统中的互连网络及互连电路。目前,高速互连系统的分析是一项高强度的计算工作,耗费很长计算时间,占用大量的内存资源。

从数学上看,一个电磁场问题的 CAD 模型就是一种映射关系 F ,即

$$Y = F(X) \quad (1.1)$$

式中, Y 为目标函数矢量; X 为输入矢量。通常, X 和 Y 之间的函数关系是多参量的、高度非线性的,难以用简单函数直接给出。而神经网络模型却能有效、准确地描述这种映射关系,并且计算方便、快速,非常适合于面向 CAD 优化过程的复杂系统电磁场建模。

3) 模糊逻辑

模糊逻辑理论的概念是由美国加利福尼亚大学伯克利分校电子工程系的控制论专家 Zadeh 在 1965 年提出来的。模糊集合着眼于现实世界的精确和不完整的信息传感,以隶属度作为建立基石,通过定义的隶属度特征函数表达模糊性,利用模糊推理规则,从数据中挖掘知识表达的逻辑关系,它能实现信息的并行处理,从输入信息中找到一种非线性映射的数学关系。最近,模糊逻辑算法被频繁地应用在一些工学学科中。模糊逻辑算法用例如小一中一大等等的语言变量来表示随机的、不确定的每个相互联系的物理事件。在计算中应用模糊算法,随机性、不确定性就可以消除。

通常,在电磁学当中处理具体问题时总是从 Maxwell 方程出发,经过严格推导,然后进行优化,最后做数值计算。如果采用解析方法,则推导过程长而且比较困难;若采用矩量法等数值方法,推导过程虽短,但计算量比较大。如果改变处理问题的顺序,即在问题的一开始就进行简化,然后经过严格推导,同样可以得到简单又较为精确的 CAD 公式。由于这些公式是推导出来的,它们的适用范围比较宽,而误差也不比通常的解析法或数值法大很多,称之为模糊电磁学,这里模糊的概念不完全等同于模糊逻辑中模糊的概念。可见,模糊电磁学是从建立在物理概念基础上的模糊起始式开始,通过严格的推导,得到实际电路元件精确的 CAD 公式。模糊电磁学所得到的 CAD 公式覆盖范围宽,而且简单,这对于设计来说,可以提供非常好的物理基础。可以将 CAD 公式看作是“非常粗糙但还算准确的模型”,用于初始设计与优化,然后用通用数值软件给出“精细模型”以提高设计精度,完成最后一步优化。

模糊逻辑理论直接应用到电磁设计中的研究并不是很多,但模糊逻辑能够充分利用来自专家的信息,将神经网络与模糊逻辑相结合形成的模糊神经网络必将

在复杂电磁系统建模和设计过程中发挥重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 王万森. 人工智能原理及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [2] 蔡自兴, 姚莉. 人工智能及其在决策系统中的应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.
- [3] 高济, 朱森良, 何钦铭. 人工智能基础. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [4] 敖志刚. 人工智能与专家系统导论. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002.
- [5] 廉师友. 人工智能导论 (第二版). 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [6] Bezdek J C. What is computational intelligence? //Zurada J M, Marks R J, Robinson C J. Computational Intelligence; Imitating Life. New York: IEEE Press, 1994; 1—12.
- [7] 周春光, 梁艳春. 计算智能: 人工神经网络·模糊系统·进化计算. 长春: 吉林大学出版社, 2001.
- [8] 褚蕾蕾, 陈绥阳, 周梦. 计算智能的数学基础. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 徐宗本, 张讲社, 郑亚林. 计算智能中的仿生学: 理论与算法. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] 丁永生. 计算智能——理论、技术与应用. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] Miller E K, Medgyesi-Mitschang L, Newman E H. Computational Electromagnetics. New York: IEEE Press, 1992.
- [12] Chew W C, Jin J M, Michielssen E, et al. Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics. Norwood: Artech House, 2001.
- [13] 王秉中. 计算电磁学. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] 王长清. 现代计算电磁学基础. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [15] Zhang Q J, Gupta K C. Neural Networks for RF and Microwave Design. Norwood: Artech House, 2000.
- [16] Christodoulou C, Georgiopoulos M. Applications of Neural Networks in Electromagnetics. Norwood: Artech House, 2001.
- [17] Zhang Q J, Gupta K C, Devabhaktuni V K. Artificial neural networks for RF and microwave design—from theory to practice. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2003, 51 (4): 1339—1349.
- [18] Gupta K C. Emerging trends in millimeter-wave CAD. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 1998, 46 (6): 747—755.
- [19] Haupt R L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 37 (2): 7—15.
- [20] Johnson J M, Rahmat-Samii Y. Genetic algorithms in engineering electromagnetics. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1997, 39 (4): 7—25.
- [21] Weile D S, Michielssen E. Genetic algorithm optimization applied to electromagnetic; A review. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45 (3): 343—353.
- [22] Rahmat-Samii Y, Michielssen E. Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms. New York: Wiley, 1999.
- [23] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems Man Cybernet, 1985, 15 (1): 116—132.
- [24] Chow Y L, Tang W C. Development of CAD formulas of integrated circuit components; Fuzzy EM for-

- mulation followed by rigorous derivation. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2001, 15 (8): 1097—1119.
- [25] Guney K, Sarikaya N. A hybrid method based on combining artificial neural network and fuzzy inference system for simultaneous computation of resonant frequencies of rectangular, circular, and triangular microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55 (3): 659—668.
- [26] Rashid K, Ramirez J A, Freeman E M. Optimization of electromagnetic devices using sensitivity information from clustered neuro-fuzzy models. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37 (5): 3575—3578.
- [27] Damousis I G, Satsios K J, Labridis D P, et al. Combined fuzzy logic and genetic algorithm techniques—application to an electromagnetic field problem. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 129 (3): 371—386.
- [28] Arkadan A A, Mneimneh M A, Aawar N A. Electromagnetic fuzzy logic scheme for the characterization of ac actuators. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41 (10): 3985—3987.