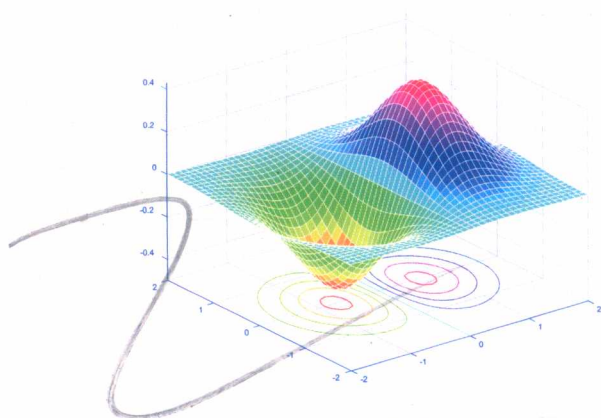


DESIGN AND APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK
METHOD ON ENVIRONMENT SCIENCE AND ENGINEERING

—— 人工神经网络 在环境科学与工程中的设计应用

赵琦琳 施 择 铁 程 / 著



人工神经网络在环境科学与工程 中的设计应用

赵琦琳 施择 铁程 著

中国环境出版集团·北京

内 容 简 介

随着大数据和和电子技术的发展,人工智能、深度学习成为时下关注的技术热点和解决科研、工程领域建模和数据应用的重要手段。本书结合环境科学与工程领域实际工作中使用神经网络建模求解环境问题的需要,从实用角度出发,对人工神经网络入门、统计学相关原理、数据预处理方法、神经网络基本架构、原理及应用展开介绍,基于 Matlab 和 SPSS 软件,详尽讲述感知器、线性网络、径向基网络、竞争型网络、BP 网络、反馈型网络等内容。最后详细讲解了环境科学与工程领域中的 6 个实际大型案例与应用。

本书可作为在校环境相关专业研究生学习用书,也可作为广大科研人员、学者、工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

人工神经网络在环境科学与工程中的设计应用/赵琦琳,施择,铁程著.

—北京:中国环境出版集团,2019.3

ISBN 978-7-5111-3943-6

I. ①人… II. ①赵… ②施… ③铁… III. ①人工神经网络—应用—环境科学—研究 ②人工神经网络—应用—环境工程—研究 IV. ①TP183 ②X

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 057912 号

出 版 人 武德凯

责任编辑 田 怡

责任校对 任 丽

封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版集团

(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.com.cn>

电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn

联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)

发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京建宏印刷有限公司

经 销 各地新华书店

版 次 2019 年 3 月第 1 版

印 次 2019 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787×1092 1/16

印 张 28.25

字 数 670 千字

定 价 140.00 元

【版权所有。未经许可,请勿翻印、转载,违者必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本社更换

序

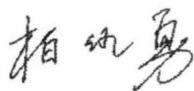
目前，我国高度重视生态环境保护事业，环境监测是环境监管执法的基础，是推进生态文明建设的重要支撑。环境监测已全面融入生态文明建设和生态环境保护的主战场。为打好污染防治攻坚战，必须构建现代生态环境监测体系，并着力提高环境监测公共服务能力。

我国已建成覆盖全域、多要素的环境监测网络，将来要逐步实现从微观项目、指标与要素监测，到中观区域与流域监测，再到宏观生态结构、功能与系统监测的转变。注重研究污染物排放与生态环境状况间的关联影响，健全空气质量精细化监测预报体系，加强水质监测预警和土壤污染风险评估等技术研究，开展生态环境质量系统性变化、趋势判断，推动环境监测从现状告知向预报预警的深化和拓展。

随着我国信息技术的长足发展，各行业正积极推动实施国家大数据战略，推进数据挖掘、资源整合与开放共享，可以更好服务我国经济社会发展和人民生活改善。国家大数据战略中的一项重要内容就是生态环境大数据。利用大数据技术深入挖掘监测数据的价值是摆在每一位生态环境工作者面前的又一重大课题。

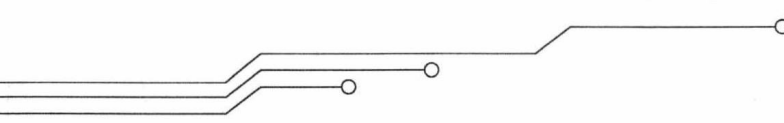
本书基于人工智能应用领域的最新技术成果，聚焦于生态环境数据深度挖掘和应用，讲解了数据挖掘的常用方法和技术，人工神经网络的基本原理、架构、技术路线和应用方法，并展示了涵盖城市区域环境空气质量预测模型、神经网络模型在臭氧成因分析中的应用、河流地表水水质响应模型、湖泊富营养化模型、生态系统观测研究、冶金废气处理系统模型等几个大型应用的详细建模方法、过程、程序代码、成果及应用总结。此书的出版，将对生态环境大数据挖掘、生态环境质量变化趋势研判、预报预警业务技术提供一些方法范例，对于相关领域技术人员应用神经网络建立统计模型求解环境问题、提出污染防治对策建议具有一定的参考价值，值得推荐。

生态环境部生态环境监测司司长



2018年11月

Preface



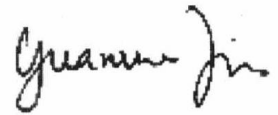
Artificial intelligence (AI) and machine learning have seen a remarkably fast evolution in the past two decades. Deep learning represents the next evolution of machine learning. Google DeepMind's AlphaGo program and Microsoft's automatic language translation software demonstrate convincingly that AI technologies powered by deep learning and artificial neural networks are able to perform certain tasks as well as, or better than, we humans can. The success of deep learning we have witnessed is made possible by the extraordinary amount of data we collect and consume, continued improvements in mathematical formulas of learning models, and increasingly powerful computers. Deep learning has enabled many practical applications of machine Learning and enriched the overall field of AI, for example, from driverless cars, preventive healthcare, to climate change forecasting. In the field of environmental protection and pollution monitoring, the formation of the new Ministry of Ecology and Environment of China underscores the importance of combating challenges the society is facing for environmental and ecological protection with natural resources exploration. The development artificial neural networks provides new technologies and methods for researchers, engineers, and practitioners in this field to achieve their missions.

This timely book is written by a team of seasoned senior engineers with decades of experiences in environmental monitoring and assessment. The book is intended as a tool for those interested in using artificial neural networks to study complex problems in human-nature interactions within a wide range of scales, such as urban outdoor air pollution, water resources management, hazardous waste, waste gas treatment, and ecological system modeling.

The book's focus is on applications of artificial neural networks theory and the use of computing software for environmental studies. It addresses a range of topics such as statistics, Matlab programming, signal processing and machine learning algorithms, and dynamic neural networks that are critical to undertake practical projects in the field of environmental science and engineering. One of the unique features of the book is that it provides six real-world case studies

using artificial neural networks and other data processing and analytic tools to solve various practical problems that environmental engineers and researchers may encounter in workplace. Although the book's theme is utility, it strives to respect mathematical integrity of the underlying theory, algorithms, and implementation of artificial neural networks. This book primarily targets readers in the general field of environmental science and engineering where readers have a basic background in college mathematics, statistics, and programming.

Yuanwei Jin, Ph.D.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yuanwei Jin', written in a cursive style.

Professor of Electrical Engineering, and
Chair of Department of Engineering and Aviation Sciences
University of Maryland Eastern Shore
30925 College Backbone Road
Princess Anne, MD 21853
USA
September 21, 2018

序（译文）

近 20 年来，人工智能（AI）和机器学习的快速发展非常引人注目。深度学习代表了下一代的机器学习。谷歌 DeepMind's AlphaGo 和微软自动语言翻译程序显示出由深度学习驱动的 AI 技术能够执行人类才能够做到的特定的任务，甚至更好。我们产生和收集到的庞大的数据量、学习模型的数学算法的持续改进、不断增强的计算能力，造就了深度学习的成功。深度学习使得很多机器学习的实际应用成为可能，并极大地丰富了 AI 的领域，例如：从无人驾驶、安防、医疗，到气候变化预测。在环境保护与污染监测领域，中国生态环境部的组建，说明面对来自自然资源开发的挑战，中国政府十分重视生态环境的保护。人工神经网络的优势为生态环境领域的研究人员、工程技术人员带来了实现任务的全新技术和方法。

这本书由在环境监测和评价领域工作了几十年的、经验丰富的高级工程师写作完成，成书非常及时。作为一本工具书，本书主要针对在广阔的范围内使用人工神经网络去研究人与自然交互过程中的复杂问题，例如：城市空气污染、水资源管理、危险废物、工业废气处理工程与生态系统的建模。

该书聚焦于人工神经网络理论的应用与环境研究计算机软件的使用，它涉及的专题包括：统计学、Matlab 编程、信号处理、机器学习算法和对于在环境科学与工程领域中解决实际问题具有至关重要作用的动态神经网络。该书的一大特点就是提供了 6 个真实大型案例研究，在这些案例中，作者使用神经网络、其他数据处理与分析工具解决多种复杂的实际环境问题，这些都是环境研究人员、工程技术人员在实际工作中可能会碰到的问题。虽然本书的主题是应用，但它力求神经网络基础理论、算法和实现的数学体系的完整性。其主要目标读者为具有数学、统计学、计算机编程本科基础背景的、在环境科学与工程领域中工作的科研和工程技术人员。

美国马里兰大学工程与航空科学系

金元威 博士

教授、系主任

2018 年 9 月 21 日

前言

在生态环境领域中的广大科研和工程技术人员在实际工作中对于手头的大量数据，长期的工作习惯就是按照相关标准和技术规范进行使用，如以最大或平均值代表一个样本的多次测量结果，以相关标准对照进行评价，以“达标超标”评判一个环境对象的性质；看似相近的两次测量值如 101 与 103，我们也会得出“仅有轻微变化、无显著变化”等结论。但结合统计学原理深入分析，我们会发现这样的数据应用和评价方式却过于“简单粗暴”。从这个角度来看，我们日常工作中环境数据使用仅处于简单的、粗线条的应用，数据的价值仍然远远没有充分发挥出来，大量的数据仍然在“沉睡”中。

随着国家对生态环境事业的重视和投入的不断加大，生态环境监测网络的不断完善和壮大，环境大数据应用的重要性日益凸显，如何深度挖掘环境数据的价值，让数据为国家生态环境事业发挥作用，是摆在我们每一个生态环境技术人员面前的新课题，可以说，生态环境大数据的深度挖掘刻不容缓、迫在眉睫。

2011 年诺贝尔经济学获奖获得者 Thomas J. Sargent 说：“人工智能（Artificial Intelligence）其实就是统计学，20 世纪 40 年代就有了 AI 的概念，很多科学家写下了今天广泛使用的算法公式，得益于今天 IT 技术的飞速发展，使得很多复杂的算法在计算机上得以实现”。机器学习（Machine Learning）可以简单地理解为实现人工智能的核心方法。神经网络就是机器学习众多算法中的一类，而深度学习（Deep Learning）是神经网络的延伸，是一类新的神经网络，这一切的基础都是统计学。对于环境系统各要素之间的迁移转化等相互关系，具有环境专业背景的广大工程技术人员在很大程度上是熟悉和了解的，但是如何使用现代信息技术、数学语言来建立模型以描述环境系统内各要素之间相互作用的动态定量动力学机制，在一定程度上超出了我们的专业范畴，是环境技术人员进一步挖掘数据价值的“瓶颈”。本书从这一问题入手，以目前科学研究、工程设计领域通用的 Matlab、SPSS 等软件为平台，深入浅出、循序渐进地讲解统计模型相关的统计学、线性代数、编程、神经网络基础，到数据预处理技术、常用神经网络的结构、原理和使用，最后通过 6 个大型实际案例来示例如何通过静态和动态神经网络来建立环境系统的统计模型，求解环境问题。对于生态环境大数据深度挖掘与应用，具有一定的教学、参考价值。

本书共分为 9 章，每章的主要内容提示如下：

第 1 章：神经网络概述。主要介绍了神经网络的概念、特点、开发技术、发展历史与展望、神经元结构与功能、人工神经网络的分类等内容。

第2章：环境统计学基础理论。主要介绍了神经网络相关的统计学基础，包括数据资料整理、特征数、概率与分布、常见理论分布、三大抽样分布及其在假设检验中的应用等内容。

第3章：Matlab 相关基础与编程技术。主要介绍了 Matlab 概览、软件所需软硬件条件及安装、基本使用及设置、变量、常用命令、帮助及学习资源、数据类型、数据精度、数组与矩阵的运算、程序代码设计、编程思维、绘图、统计学分析函数、常用函数等内容。

第4章：人工神经网络的 Matlab 实现。主要介绍了神经网络工具箱、神经网络基础函数、神经网络求解环境问题的基本步骤等内容。

第5章：数据预处理技术。主要介绍了统一数据、无效数据识别及处理、小波降噪、环境系统观测的随机误差、数据降噪理论、小波降噪的实现、归一化、主成分分析及降维等内容。

第6章：静态网络。主要介绍了感知器、线性神经网络、径向基网络、竞争型网络、BP 网络等常用静态网络的结构、原理及使用、提高泛化能力、静态网络的可靠性评价等内容。

第7章：动态网络。主要介绍了动态网络分类、典型动态网络的结构、动态网络的 Matlab 实现、Hopfield 网络、Elman 网络、Timedelay 网络、Distdelay 网络、NARX 网络、NAR 网络及其一步/多步预测方法的实现、动态网络性能评价、几种动态网络的比较等内容。

第8章：环境系统的复杂性。主要介绍了污染物在环境中迁移、转化的一般规律、迁移转化的不确定性、灰箱模拟环境系统的可行性、环境数学模型及其相关理论；

第9章：大型案例。展示了环境科学与工程领域中6个实际大型案例：城市封闭河段水质响应仿真模型、浙江普陀山枫香林生态系统微气候要素仿真模型、云铝碳素煅烧脱硫系统仿真模型、城市环境空气常规六项质量仿真预测模型、O₃浓度-气象常规-空气质量常规-VOCs 耦合仿真预测模型、O₃浓度-气象及空气质量常规-VOCs-紫外线能量耦合仿真预测模型；利用双变量相关性、主成分分析探讨 O₃ 成因。通过上述6个实际大型案例来详细讲解神经网络建模的过程。每个案例的主要内容包括：案例背景、数据内容及结构、问题提出及建模需求、数据预处理及模型结构规划、网络选型及参数选取、主要技术路线和编程代码、运行结果、应用总结等内容。

现以案例中的城市环境空气常规六项质量仿真预测模型为例，简要介绍一个大型案例的主要内容结构及其对于生态环境监测的支撑作用和应用价值。本书在9.4节介绍了城市环境空气常规六项质量仿真预测模型的详细建模过程，该案例从建模需求及意义开始，到数据收集及预处理、神经网络选型及网络参数、超参数的优化选取、建模训练，以及预测结果与现行的城市环境空气预报预警业务平台的 NAQPMS 数值模型、CMAQ 数值模型、Google LSTM 统计模型的预测结果进行比较及应用总结，深入细致地阐明了利用神经网络技术和空气自动监测站数据开展城市环境空气质量系统性变化、趋势判断和预报预警的基本技术路线和详细步骤。案例结果表明：NARX 神经网络建立的统计模型能够比较准确地模拟预测城市空气质量未来1天的浓度水平，空气质量常规六项（NO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、O₃）的预测结果与实际监测值的相对误差显著优于

Google LSTM、NAQPMS 两个模型，前 5 项污染物显著优于 CMAQ 数值模型，仅有 O₃ 一项与 CMAQ 数值模型基本持平。预测性能较理想，尤其是前 5 项污染物浓度能取得 16% 以内的相对误差，说明通过神经网络建立和训练得到的模型具有较强的非线性复杂动力学机制的描述能力，模型对于城市环境空气预报预警具有参考和应用价值。6 个实际案例表明：神经网络建立统计模型的方法是生态环境质量预报预警的一种新的技术方法和实现方式，对于生态环境监测大数据的深度挖掘具有一定的示范作用，对于从事环境监测、环境质量评价及预报预警的广大科研、工程技术人员具有一定参考价值。

本书可作为在校环境相关专业研究生学习用书，也可作为广大科研人员、学者、工程技术人员的参考用书。

本书主要由赵琦琳著，此外参加合著的还有施择、铁程。

华东师范大学生态与环境科学学院阎恩荣教授在著写过程中给予了指导并提供了生态站观测数据；云南省气象科学研究所的杨家康高工、云南省环境监测中心站的邱飞工程师、昆明市环境监测中心的杨健高工、云铝安环部的李嵘高工提供了部分自动监测、工艺控制数据，一并致谢。

由于时间仓促，作者水平有限，错误和疏漏之处在所难免。诚恳希望得到各领域专家和广大读者的批评指正。

作者
2018 年 9 月

目 录

1 神经网络概述	1
1.1 人工神经网络概念	1
1.2 神经网络的特点	3
1.3 人工神经网络开发的技术路线	4
1.4 人工神经网络的发展史	5
1.5 神经网络的展望	6
1.5.1 Google AlphaGo开启的全新视觉	6
1.5.2 人工神经网络的前景	6
1.5.3 人工神经网络在环境预测中的应用前景	7
1.6 神经元	8
1.6.1 生物神经元	8
1.6.2 人工神经元模型	10
1.6.2.1 结构	10
1.6.2.2 激活函数	11
1.7 人工神经网络的类型及特点	13
1.7.1 以网络结构和学习算法分类	14
1.7.2 以是否有延迟、反馈及时间直接相关进行分类	16
2 环境统计学基础理论	17
2.1 资料的整理	17
2.2 数据资料特征数的计算	19
2.2.1 平均数	19
2.2.2 算数平均数的重要性质	20
2.2.3 变异数	20
2.2.3.1 方差	20
2.2.3.2 标准偏差	20
2.2.3.3 相对标准偏差	21
2.3 概率与概率分布	21
2.3.1 概率	21
2.3.2 概率分布	22
2.3.3 大数定理	24
2.4 几种常见的理论分布	25

2.4.1	二项式分布	25
2.4.2	正态分布	28
2.4.3	二项分布与正态分布的关系	29
2.5	三大抽样分布	31
2.5.1	χ^2 分布	31
2.5.2	F 分布	33
2.5.2.1	方差的分布	33
2.5.2.2	F 分布的推导	34
2.5.3	t 分布	36
2.5.3.1	标准差的分布	36
2.5.3.2	t 分布的推导	36
2.6	三大抽样分布在假设检验中的应用	39
2.6.1	χ^2 检验	39
2.6.2	F 检验在方差分析中的应用	41
2.6.3	t 检验	44
3	Matlab相关基础与编程技术	46
3.1	本书约定	46
3.2	Matlab简介	47
3.3	Matlab概览	48
3.3.1	软件安装所需软硬件条件及安装方法	48
3.3.2	基本界面	49
3.3.3	软件设置	50
3.3.4	Matlab可操作的文件类型	51
3.4	变量	52
3.4.1	变量的类型	52
3.4.2	变量的命名规则	53
3.5	常用命令	53
3.6	帮助及学习资源	54
3.6.1	联机帮助	54
3.6.2	帮助命令	54
3.6.3	lookfor命令	55
3.6.4	学习资源	56
3.7	数据类型	56
3.7.1	数值型	56
3.7.2	字符型	58
3.7.3	日期和时间	62
3.8	数据精度	63
3.9	数组与矩阵	65
3.9.1	矩阵/数组的建立	66

3.9.2	数组和矩阵的基本运算	68
3.9.2.1	算术运算	68
3.9.2.2	逻辑运算	77
3.9.2.3	关系运算	78
3.9.2.4	数组的集合运算	79
3.9.3	矩阵的操作	80
3.9.3.1	特殊矩阵的创建	80
3.9.3.2	矩阵的常见操作	82
3.10	元胞数组	84
3.11	程序代码设计	89
3.11.1	顺序结构	89
3.11.2	循环结构	90
3.11.2.1	for循环结构	90
3.11.2.2	while循环结构	92
3.11.3	分支结构	93
3.11.3.1	if分支结构	93
3.11.3.2	switch分支结构	94
3.11.4	编程思维训练	95
3.12	基础绘图	103
3.12.1	二维绘图	103
3.12.2	三维绘图	110
3.12.3	应用实例	112
3.13	统计学分析函数	116
3.14	多项式拟合	116
3.15	几个实用的函数	120
3.15.1	随机数产生函数	120
3.15.2	eval函数	120
4	人工神经网络的Matlab实现	124
4.1	神经网络工具箱	124
4.2	神经网络基础函数	129
4.3	神经网络求解环境问题的基本步骤	137
5	数据预处理技术	138
5.1	统一数据文件格式、数据类型、单位、精度	138
5.2	无效数据识别及处理	139
5.3	小波降噪	145
5.3.1	环境系统观测的随机误差	145
5.3.2	数据降噪技术概况	146
5.3.3	小波降噪的Matlab实现	147
5.3.3.1	阈值函数	147

5.3.3.2	阈值获取	147
5.3.3.3	降噪和压缩	148
5.3.3.4	小波降噪应用实例	150
5.4	归一化	156
5.4.1	Matlab的归一化函数	156
5.4.2	归一化应用实例	157
5.5	主成分分析及降维	160
5.5.1	主成分及主成分分析的概念	161
5.5.2	主成分分析的基本原理和技术步骤	161
5.5.3	主成分分析的SPSS实现	163
5.5.4	主成分分析的Matlab实现	169
6	静态网络	173
6.1	感知器	173
6.2	线性神经网络	182
6.2.1	线性网络的基本语法	182
6.2.2	线性网络的实例	183
6.3	径向基网络	193
6.3.1	传递函数和网络结构	194
6.3.2	径向基网络	195
6.3.3	精确径向基网络	195
6.3.4	newpnn概率神经网络	202
6.3.5	newgrnn泛化回归神经网络	204
6.4	竞争型网络	207
6.4.1	概述	207
6.4.2	通用型竞争网络	208
6.4.2.1	相似性测量	208
6.4.2.2	竞争型网络的Matlab实现	208
6.5	BP神经网络	211
6.5.1	传递函数	212
6.5.2	训练函数与学习函数	213
6.5.3	BP网络类型及语法格式	213
6.5.4	BP网络结构与内部计算传递的基本规则	217
6.5.4.1	网络结构	217
6.5.4.2	网络内部信号数据计算传递的基本规则	218
6.5.4.3	网络内部数据处理过程	218
6.5.5	BP神经网络的工作原理	219
6.5.6	BP网络隐藏层设计的一般性原则	227
6.5.7	提高BP泛化能力	228
6.5.7.1	BP网络的优势和缺陷	228

6.5.7.2	BP网络的泛化能力	228
6.5.7.3	控制网络规模提高泛化能力	229
6.5.7.4	使用归一化提高泛化能力	231
6.5.7.5	提前终止训练提高泛化能力	231
6.5.7.6	贝叶斯正则化训练提高泛化能力	232
6.5.8	BP网络应用实例	235
6.6	静态网络可靠性评价	240
6.7	网络训练前数据处理技术路线	245
7	动态网络	247
7.1	动态网络分类	247
7.1.1	根据网络结构的分类	247
7.1.2	按照连接方式的拓扑结构分类	248
7.2	典型动态网络的结构	248
7.3	动态网络的Matlab实现	251
7.4	带外部输入的非线性自动回归网络	256
7.4.1	NARXNET的创建	256
7.4.2	闭环与开环	257
7.4.3	一步预测	259
7.4.4	多步预测	266
7.4.4.1	相关基础函数知识的准备	266
7.4.4.2	多步预测方法	269
7.4.4.3	多步预测方法总结及实例	271
7.5	非线性自动回归网络	278
7.5.1	NARNET的语法格式	279
7.5.2	一步预测	279
7.5.3	多步预测	281
7.6	动态网络性能评价	289
7.7	几种动态网络的比较	291
8	环境系统的复杂性	293
8.1	污染物在环境中迁移的一般规律	293
8.2	污染物在环境中转化的一般规律	295
8.3	污染物迁移转化的不确定性	298
8.4	环境数学模型	299
9	大型案例	302
9.1	城市封闭河段水质响应仿真模型	302
9.1.1	案例背景	302
9.1.1.1	模型意义	302
9.1.1.2	研究对象基本概况	303
9.1.1.3	对象数据条件	303

9.1.2	数据内容及结构	303
9.1.3	问题提出及建模需求	303
9.1.4	数据预处理及模型结构规划	304
9.1.4.1	污染物指标及分类	304
9.1.4.2	数据取舍	304
9.1.4.3	预测方案及建模用数据划分	305
9.1.5	网络选型及参数选取	306
9.1.5.1	网络选型	306
9.1.5.2	参数选取	306
9.1.6	主要技术路线及编程代码	309
9.1.7	运行结果	313
9.1.8	应用总结	315
9.2	浙江普陀山枫香林生态系统微气候要素仿真模型	316
9.2.1	案例背景	316
9.2.1.1	模型意义	316
9.2.1.2	研究对象基本概况	316
9.2.1.3	研究对象数据条件	317
9.2.2	数据内容及结构	317
9.2.3	问题提出及建模需求	317
9.2.4	数据预处理及模型结构规划	318
9.2.4.1	数据取舍和预处理	318
9.2.4.2	模型方案及建模用数据划分	318
9.2.5	网络选型及参数选取	320
9.2.6	主要技术路线和编程代码	320
9.2.7	运行结果	323
9.2.8	应用总结	325
9.3	云铝碳素煅烧脱硫系统仿真模型	325
9.3.1	案例背景	325
9.3.1.1	模型意义	325
9.3.1.2	对象基本概况	326
9.3.1.3	对象数据条件	327
9.3.2	数据内容及结构	327
9.3.3	问题提出及建模需求	329
9.3.4	数据预处理及模型结构规划	329
9.3.4.1	数据取舍和预处理	329
9.3.4.2	模型方案及建模用数据划分	331
9.3.5	网络选型及参数选取	331
9.3.6	主要技术路线和编程代码	332
9.3.7	运行结果	341
9.3.8	应用总结	343

9.4 城市环境空气常规六项质量仿真预测模型	343
9.4.1 案例背景	343
9.4.1.1 模型意义	343
9.4.1.2 空气质量模型简介	344
9.4.1.3 模拟对象的数据条件	346
9.4.1.4 问题提出及建模需求	347
9.4.2 数据预处理及模型结构规划	348
9.4.2.1 数据取舍和预处理	348
9.4.2.2 模型方案及建模用数据划分	349
9.4.3 网络选型及参数选取	350
9.4.4 主要技术路线和编程代码	350
9.4.5 运行结果	363
9.4.6 应用总结	366
9.5 O ₃ 浓度-气象常规-空气质量常规-VOCs耦合仿真预测模型	367
9.5.1 案例背景	367
9.5.1.1 模型意义	367
9.5.1.2 模拟对象的数据条件	368
9.5.1.3 问题提出及建模需求	369
9.5.2 数据预处理及模型结构规划	371
9.5.2.1 数据取舍和预处理	371
9.5.2.2 模型方案及建模用数据划分	372
9.5.3 网络选型及参数选取	373
9.5.4 主要技术路线和代码	374
9.5.5 运行结果	384
9.5.6 应用总结	386
9.6 O ₃ 浓度-气象及空气质量常规-VOCs-紫外线能量耦合仿真预测模型： 利用双变量相关性、主成分分析探讨O ₃ 成因	386
9.6.1 案例背景	386
9.6.1.1 模型意义	386
9.6.1.2 模拟对象的数据条件	387
9.6.1.3 问题提出及建模需求	391
9.6.2 数据预处理及模型结构规划	392
9.6.2.1 数据取舍和预处理	392
9.6.2.2 模型方案及建模用数据划分	393
9.6.3 网络选型及参数选取	394
9.6.4 主要技术路线和编程代码	395
9.6.5 运行结果	430
9.6.6 应用总结	434
参考文献	435