



国防科技图书出版基金

*Process Neural Network Models
and its Engineering Applications*

过程神经元网络模型 及其工程应用

■ 钟诗胜 丁刚 付旭云 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

过程神经元网络模型 及其工程应用

Process Neural Network Models and
its Engineering Applications

钟诗胜 丁刚 付旭云 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

过程神经网络模型及其工程应用/钟诗胜,丁刚,付旭
云著. —北京:国防工业出版社,2014.4

ISBN 978-7-118-09273-8

I. ①过... II. ①钟... ②丁... ③付... III. ①小波理
论—应用—人工神经网络—网络模型—研究 IV. ①
TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 066009 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 20 字数 373 千字

2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆 军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

过程神经网络(Process Neural Networks, PNN)是由中国工程院何新贵院士于2000年首先提出来的。过程神经网络是传统神经网络在时域上的拓展,它放宽了传统神经网络对输入的同步瞬时限制,是更一般化的人工神经网络模型。所以,过程神经网络对于求解与过程有关的众多实际问题有着很大的应用价值。

本书著者于1999年开始进行复杂装备状态监控和故障诊断的研究,2001年又开始进行卫星环境预示技术以及航空发动机状态预测与维修决策支持系统的研究。卫星地面环境试验是卫星研制过程中的必须环节,而且有的地面环境试验持续时间长(如热平衡试验、环境污染模拟试验)。为了缩短地面试验时间,降低卫星研发成本,国外航天发达国家非常注重卫星环境预示技术的研究。如果采用传统方法建立预示模型,一般需要建立和求解较为复杂的数学模型或建立经验统计公式,由于卫星地面环境试验是影响因素较多的复杂非线性系统,传统方法建模困难大、精度低、适应性差且求解困难。为此,国外航天发达国家都转向从以往卫星型号试验数据中挖掘试验模型,建立相应的模型库和环境预示系统。航空发动机状态预测是视情维修模式得以实施的前提。与卫星地面环境试验类似,航空发动机状态参数变化也受许多因素的影响,建立航空发动机状态预测解析模型也非常困难,从历史数据中寻找发动机的状态参数变化规律并预测未来变化趋势就成了一种有效方法。为此,当时我们试图将人工神经网络应用到上述两个领域的研究中,希望利用历史数据预测未来变化趋势。上述两个领域都有一个共同特点,就是影响因素与预测结果大多是时间序列型数据,测量结果是多个影响因素在空间上的聚合和时间上的累积形成的。为此,当时的做法是时将变输入和输出在时域上进行离散,得到多个输入和输出的时间序列值,再对神经网络进行训练,然后利用训练好的网络预测未来某一时刻的系统信息。这种用非时变的模型处理时变信息的方法必然会带来误差,实际应用效果不太理想。

过程神经元的输入和权值等都可以是时变的,其聚合运算既有对空间的多输入聚合,也有对时间过程的积累,可处理时变信息,是对传统神经元在时间域上的扩展,满足了卫星环境预示、航空发动机状态预测等连续复杂非线性系统的建模需求。为此,在何新贵院士的指导下,我们于2002年开始进行过程神经元

网络的研究,研究工作陆续得到国家自然科学基金、国家“863 计划”、高等学校博士点基金和总装备部预先研究基金的资助。先后提出了 Elman 型反馈过程神经网络、双并联过程神经网络、对向传播过程神经网络、小波过程神经网络和离散输入过程神经网络等模型,研究了它们的一般理论、学习算法、泛化能力和应用技术,取得较好的实际应用效果。本书内容是前期工作的总结。由于过程神经网络放宽了传统神经网络对输入的同步瞬时限制,不仅适合上述实际问题建模,还适合系统实时控制、连续系统仿真、过程模拟、复杂装备和系统的状态预测及故障诊断等复杂连续问题的求解。希望本书对从事相关领域的研究人员和高等学校师生有所参考。

在本书成稿之际,首先要感谢导师周济院士和何新贵院士,感谢他们多年来的悉心培养和指导。同时要感谢东北石油大学的许少华教授,我们多年并肩合作进行过程神经网络的研究,本书成稿后他又在百忙之中审阅了全书,并提了许多宝贵意见。还要感谢中国国际航空股份有限公司和北京卫星环境工程研究所的工程技术人员,他们在应用需求方面给予我们大力的支持。

全书由钟诗胜(第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 9 章、第 10 章、第 11 章、第 12 章)、丁刚(第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 7 章、第 8 章)、付旭云(第 13 章)执笔完成,并由钟诗胜统稿。除本书作者外,本课题组博士生李洋、栾圣罡、金向阳、雷达和崔智全,硕士生朴树学、孙艳、孙智源、彭云飞和边旭等多位研究生也参加了部分研究工作,在此向他们表示感谢,并祝他们新的工作岗位上一切顺利。

我们的研究工作得到国家自然科学基金、国家“863”计划、高等学校博士点基金和总装备部预先研究基金的资助,图书的出版得到“国防科技图书出版基金”的资助,在此一并表示衷心感谢。

过程神经网络是对传统神经网络的一种变革,是更一般化的人工神经网络,对于求解与过程有关的众多实际问题有着很大的应用价值。由于过程神经网络提出时间较短,还有许多不成熟之处,书中难免有不足的地方,衷心希望读者批评指正。

作者

2013. 12

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 过程神经网络的研究与进展	1
1.2 人工神经网络在预测预报中的应用研究现状	7
1.3 航空发动机健康管理技术的研究与进展	13
1.4 本书总体框架设计	31
参考文献	33
第 2 章 双并联过程神经网络模型	39
2.1 双并联前馈过程神经网络拓扑结构	39
2.2 双并联前馈过程神经网络学习算法	42
2.3 双并联前馈过程神经网络收敛性分析	49
2.4 双并联前馈过程神经网络仿真试验	52
2.5 本章小结	57
参考文献	57
第 3 章 Elman 型反馈过程神经网络模型	59
3.1 Elman 型反馈过程神经网络模型	59
3.2 Elman 型反馈过程神经网络学习算法	63
3.3 Elman 型反馈过程神经网络稳定性分析	68
3.4 Elman 型反馈过程神经网络仿真试验	70
3.5 本章小结	74
参考文献	74
第 4 章 对向传播过程神经网络模型	76
4.1 对向传播过程神经网络模型	76
4.2 对向传播过程神经网络学习算法	78
4.3 对向传播过程神经网络性能分析	82
4.4 对向传播过程神经网络仿真试验	85
4.5 本章小结	86
参考文献	87
第 5 章 小波过程神经网络模型	88
5.1 小波过程神经元模型	88

5.2	连续小波过程神经网络模型	93
5.3	小波基函数过程神经网络模型	109
5.4	小波过程神经网络解的存在性定理	113
5.5	本章小结	117
	参考文献	117
第 6 章	离散输入过程神经网络模型	119
6.1	离散输入过程神经网络模型	119
6.2	离散输入过程神经网络学习算法	122
6.3	基于离散输入过程神经网络的仿真试验	124
6.4	本章小结	125
	参考文献	125
第 7 章	过程神经网络泛化能力分析	127
7.1	基于 LM 算法的过程神经网络学习算法	128
7.2	过程神经网络学习样本集的构造	134
7.3	过程神经网络集成	147
7.4	本章小结	156
	参考文献	157
第 8 章	基于过程神经网络的状态预报与时间序列预测	159
8.1	过程神经网络在动态模式识别中的应用	159
8.2	过程神经网络在时间序列预测中的应用	168
8.3	本章小结	184
	参考文献	184
第 9 章	基于过程神经网络的航空发动机健康状态预测	186
9.1	航空发动机健康状态参数降噪处理	186
9.2	基于对向传播过程神经网络发动机转子故障诊断	197
9.3	航空发动机排气温度预测	199
9.4	航空发动机滑油状态预测	207
9.5	本章小结	217
	参考文献	217
第 10 章	基于静态权值组合集成模型的航空发动机健康状态预测	219
10.1	集成学习与局域建模	220
10.2	面向回归问题的 AdaBoost. RT 集成学习算法	222
10.3	改进的 AdaBoost. RT 算法	223
10.4	基于改进 AdaBoost. RT 的静态权值组合集成局域预测模型	225
10.5	发动机核心机转速偏差值预测试例	225
10.6	本章小结	230

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Research and Development of Process Neural Network	1
1.2	State-of-the-art of Condition Prediction Using Neural Network and Its Application	7
1.3	Research and Development of Aeroengine Health Management Technique	13
1.4	The outline of this book	31
	References	33
Chapter 2	Double Parallel Feedforward Process Neural Network	39
2.1	Topological Structure of Double Parallel Feedforward Process Neural Network	39
2.2	Learning Algorithm of Double Parallel Feedforward Process Neural Network	42
2.3	Convergence Analysis of Double Parallel Feedforward Process Neural Network	49
2.4	Simulation Test of Double Parallel Feedforward Process Neural Network	52
2.5	Summary	57
	References	57
Chapter 3	Elman-style Feedback Process Neural Network	59
3.1	Topological Structure of Elman-style Feedback Process Neural Network	59
3.2	Learning Algorithm of Elman-style Feedback Process Neural Network	63
3.3	Stability Analysis of Elman-style Feedback Process Neural Network	68
3.4	Simulation Test of Elman-style Feedback Process Neural Network	70
3.5	Summary	74

References	74
Chapter 4 Counterpropagation Process Neural Network	76
4.1 Topological Structure of Counterpropagation Process Neural Network	76
4.2 Learning Algorithm of Counterpropagation Process Neural Network	78
4.3 Performance Analysis of Counterpropagation Process Neural Network	82
4.4 Simulation Test of Counterpropagation Process Neural Network	85
4.5 Summary	86
References	87
Chapter 5 Wavelet Process Neural Network	88
5.1 Wavelet Process Neuron	88
5.2 Continuous Wavelet Process Neural Network	93
5.3 Wavelet Basis Function Process Neural Network	109
5.4 Solution Existence Property of Wavelet Process Neural Network	113
5.5 Summary	117
References	117
Chapter 6 Discrete Input Process Neural Network	119
6.1 Topological Structure of Discrete Input Process Neural Network	119
6.2 Learning Algorithm of Discrete Input Process Neural Network ...	122
6.3 Simulation Test of Discrete Input Process Neural Network	124
6.4 Summary	125
References	125
Chapter 7 Generalization Capability Analysis of Process Neural Network	127
7.1 Process Neural Network Learning Algorithm Based on LM Algorithm	128
7.2 Training Samples Construction Method of Process Neural Network	134
7.3 Process Neural Network Ensemble	147
7.4 Summary	156
References	157

Chapter 8	Applications of Process Neural Network in Two Fields	159
8.1	Dynamic Pattern Recognition Based on Process Neural Network	159
8.2	Time Series Prediction Based on Process Neural Network	168
8.3	Summary	184
	References	184
Chapter 9	Aeroengine Health Condition Prediction Based on Process Neural Network	186
9.1	Aeroengine Health Condition Parameter Denoising Method	186
9.2	Diagnosis of Aeroengine Rotor Fault Using Counterpropagation Process Neural Network	197
9.3	Aircraft Engine Exhaust Gas Temperature Prediction	199
9.4	Aircraft Engine Lubricating Oil Condition Prediction	207
9.5	Summary	217
	References	217
Chapter 10	Aeroengine Health Condition Prediction Based on Static Weights Combining Ensemble Models	219
10.1	Ensemble Learning and Local Modeling	220
10.2	The AdaBoost. RT Algorithm for Regression	222
10.3	The Improved AdaBoost. RT Algorithm	223
10.4	Static Weights Combining Ensemble Local Prediction Model Based on the Improved AdaBoost. RT Algorithm	225
10.5	Prediction of Aeroengine Core Rotor Speed Bias Series	225
10.6	Summary	230
	References	230
Chapter 11	Aeroengine Health Condition Prediction Based on Dynamic Weights Combining Ensemble Models	232
11.1	Dynamic Combining Methods for Ensemble Learning Models	232
11.2	Extreme Learning Machine	234
11.3	Dynamic Combining Boosting Learning Model	235
11.4	Model Validation	238
11.5	Aeroengine Health Condition Prediction	239
11.6	Summary	244
	References	244
Chapter 12	Prediction Interval Estimating Based on Bootstrap	246
12.1	Prediction Interval Estimating Methods Based on Bootstrap	246

12.2	The Resilient Backpropagation Learning Algorithm for Neural Network	249
12.3	Applications of Prediction Interval Estimating	251
12.4	Summary	255
	References	256
Chapter 13	The Development of Aeroengine Health Management System Oriented to Users	257
13.1	Summary of Aeroengine Health Management System	257
13.2	Aeroengine Health Management System Requirement Analysis	263
13.3	Data Organization of Aeroengine Health Management System	264
13.4	Data Management of Aeroengine Health Management System	268
13.5	Design of Aeroengine Health Management System	271
13.6	Design of Aeroengine Performance Monitoring Module	279
13.7	Application Instance of Aeroengine Health Management System	287
13.8	Application Situation of Aeroengine Health Management System	299
13.9	Summary	299
	References	300
Acronyms		302

第1章 绪 论

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)作为一种数据驱动方法,由于无需事先特殊建模以及具有较强的非线性映射能力,不断被引入到对大型复杂装备性能监控数据的实时或离线处理中,以达到状态预测和故障诊断的目的。由于受输入的同步瞬时限制,传统人工神经网络模型的输入往往是一系列与时间累积无关的离散值,难以直接反映系统中实际存在的时间累积效应。为解决这一问题,中国工程院何新贵院士于2000年首次提出了一种新型人工神经网络模型——过程神经网络(Process Neural Networks, PNN)^[1,2]。从结构上讲,过程神经网络模型与传统人工神经网络模型类似,其不同之处在于过程神经网络的输入、相应的连接权以及输出都可以是连续函数。过程神经网络模型与传统人工神经网络模型相比,其聚合运算算子除具有一个空间加权聚合运算算子外,还有一个时间累积聚合运算算子,所以过程神经网络模型非常适合用于解决如卫星热平衡温度预测、航空发动机状态预测和故障诊断等与时间累积效应密切相关的工程问题。

本书将首先介绍几种常用的过程神经网络模型的拓扑结构、学习算法、基本性质等理论内容。在此基础上进一步介绍过程神经网络的技术应用情况,特别是过程神经网络在航空发动机健康状态预测中的应用情况。最后对航空发动机健康管理技术以及面向使用方的航空发动机健康管理与维修决策支持系统进行介绍。

1.1 过程神经网络的研究与进展

1.1.1 从生物神经元到过程神经元

人类具有高度发达的大脑,大脑是进行思维活动的物质基础,而思维则是人类智能的集中体现。大脑在微观上看十分简单,是由一些简单的神经元组成的。但是在宏观上却能解决非常复杂的问题,更不可思议的是具有惊人的创造性。长期以来,人们一直试图解密人脑的工作机理和思维的本质,向往能构造出具有类似人类智能的人工智能系统,以模仿人脑功能,完成类似于人脑的工作。

生物科学研究表明,布满在人类大脑皮层上的每一个神经细胞(也称为神经元)都有数以千计的通道同其他神经元广泛互连,人脑是由大量基本单元(生

物神经元)经过复杂的相互连接而成的一种高度复杂、非线性、并行处理的信息处理系统,每一个神经细胞都是一个简单的信息处理单元,自身机制与外部环境决定了神经细胞的状态,形成一定的输入输出规则。人的神经系统具有记忆、计算、逻辑推理、对环境的感知和学习、进化以及思维等能力。因此,从模仿人脑的组织结构和运行机制的角度出发,来探寻新的信息表示、存储和处理方式,构造一种更接近于人类智能的信息处理系统来解决实际工程和科学研究中由传统冯·诺伊曼计算机难以解决的问题,必将大大扩展计算机的应用领域和促进科学技术的进步。而从模拟人脑生物神经网络的信息存储和加工处理机制入手,设计具有人类思维特点的人工智能系统,无疑是最有希望的途径之一。总体来看,生物神经网络的信息处理方式与基于冯·诺伊曼计算机体系结构的信息处理方式相比有以下几点不同^[3]:

(1) 信息的存储方式不同。生物神经网络没有单独而集中的存储器和运算器,神经元集存储与运算功能于一体,各种信息被分布存储在各个神经元的突触中,各种信号处理十分细粒度地被分布在众多的神经元中完成。

(2) 生物神经网络在求解问题时无需编程。即实际问题求解时不需要预先建立模型,而是通过学习直接改变神经元突触中的记忆参数来获得求解特定问题的知识。

(3) 生物神经网络所处理的信息往往是不确定的,具有明显的模糊性和随机性,其处理对象既可能是离散量,也可能是连续量。

(4) 生物神经网络对信息的处理方式既有数字方式,又有模拟方式,或者数/模(D/A)有机混合方式,而且包含随机的处理方式。因此可以认为,大脑与现代计算机在信息处理方式上具有极大区别。随机处理方式的加入,数/模混合进行处理,使得整个处理过程变得十分复杂,处理过程往往具有不可重复性。

(5) 大脑神经元的开关时间约为几毫秒(10^{-3} s 数量级),比现在的计算机处理要慢数千万倍(10^{-10} s 数量级)乃至数万亿倍。然而人脑却能在几分之一秒内对一个很复杂的激励产生正确的响应。这说明虽然对单个神经元来说其处理和传输速度是比较慢的,但由于大脑的巨量并行性而得到了补偿,从而使大脑在整体上响应速度更快。

为此,人们对生物神经元进行了模拟,并在此基础上提出了人工神经元的概念。人工神经元的建模离不开对生物神经元的研究,生物神经元是其基础也是其约束。一个典型的生物神经元一般可分为树突、细胞体、轴突和突触四部分,其简要结构如图 1-1 所示。树突是树状的神经纤维,它接受来自其他神经元的信号,简单地讲,树突相当于信号输入装置,它将来自神经元的电信号输送到细胞体。细胞体相当于执行非线性处理功能的中央处理器,对来自树突的输入信号进行整合,并进行阈值处理。轴突是单根长纤维,它把细胞体的输出信号传导到相邻的其他神经元。一个神经元的轴突与另一个神经元的树突的结合点称为

突触,突触是构成信息处理的关键部位,它不但把输入的频率信号转换为电位信号,而且具有经验记忆功能,能根据记忆对输入信号进行加权综合处理^[4,5]。

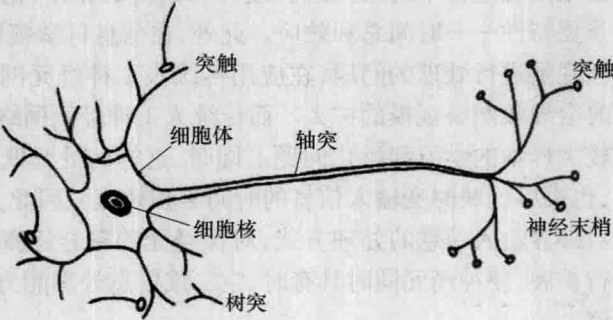


图 1-1 生物神经元示意图

生物神经元的组织结构和特点启发人们从模仿生物神经系统的组织结构和运行机制的角度出发,来探寻新的信息表示、存储和处理方式,构造一种具有类似人类智能的信息处理系统,来解决实际工程和科学研究领域中利用传统方法难以解决的问题。对人工神经网络的研究可以追溯到 20 世纪 40 年代 McCulloch 和 Pitts 的工作,他们从原理上证明了人工神经网络可以计算任何算术和逻辑函数^[6]。通常认为他们的工作标志着人工神经网络领域研究工作的开始。仿照生物神经元建立的经典传统人工神经元模型如图 1-2 所示。

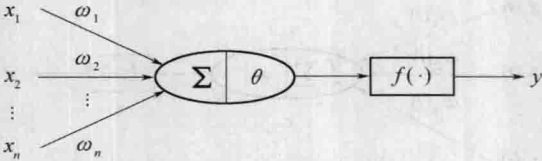


图 1-2 传统人工神经元模型

图 1-2 所示的传统人工神经元的系统输出可表达为

$$y = f(\sum_{i=1}^n \omega_i x_i - \theta) \tag{1-1}$$

由式(1-1)可以看出,传统人工神经元较好地模拟了生物神经元的空间加权聚合、自适应、传导和输出等大部分特性,但缺乏对于时间总和效应和延时特性的描述。在其信息处理过程中没有涉及时间,输入与输出之间没有时间延迟,是一种瞬时的输入/输出(I/O)关系,也没有考虑输入对输出的时间累积效应,某瞬时的输出只依赖于当时的输入,与之前的输入没有关系。然而现代神经生理实验和生物学研究表明,在生物神经元中突触的输出变化与输入脉冲的相对定时有关,即依赖于持续一定时间的输入过程;输出信号既依赖于输入信号的空