

NT
BS

建筑结构新技术丛书

NEW TECHNOLOGY OF BUILDING STRUCTURES

基于神经网络的 结构优化与损伤检测

● 姜绍飞 著



科学出版社

内 容 简 介

本书主要论述了基于神经网络的结构优化设计和结构损伤检测的基本原理、实现技术策略和工程实际应用。全书共分六章,内容包括神经网络在土木工程中的应用概况、神经网络基本原理与典型网络模型、神经网络求解土木工程问题的方法及数据处理方法、基于神经网络的结构分析与初步设计、结构优化设计、结构损伤检测的理论与方法及其在实际工程中的应用。

本书可供土木建筑、机械工程及自动化控制等专业的广大科技工作者和高等院校相关专业的师生以及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于神经网络的结构优化与损伤检测/姜绍飞著. —北京:科学出版社, 2002

(建筑结构新技术丛书)

ISBN 7-03-010396-3

I. 基… II. 姜… III. ①人工神经网络—应用—建筑结构—结构设计②人工神经网络—应用—建筑结构—损伤—检测 N. TU31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 026449 号

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2002 年 6 月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—2 500 字数:219 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈兰各〉)

前 言

基于计算智能(包括神经网络、遗传算法和模糊理论等)的结构优化设计和结构损伤检测问题是目前国内外科技与工程界广泛关注与研究的课题,尤其是神经网络技术在近 20 年得到了飞速的发展与广泛的应用,其良好的自适应性以及较强的学习、优化、联想和容错功能特别适合于结构工程领域中许多非线性问题,因而近十几年神经网络被广泛地应用于结构工程的优化设计与损伤检测中。作者一直从事该方面的研究和应用工作。本书系统地介绍了运用神经网络进行复杂工程结构优化设计及损伤检测的理论、方法及一些工程实例。

本书共分六章。第一章为绪论,论述了神经网络的基本特点、结构优化设计和结构损伤检测的发展状况以及神经网络在土木工程中的应用;第二章介绍了神经网络的基本原理与典型网络模型,并对 BP 网络存在的问题及网络性能的改进方法进行了阐述;第三章提出了用神经网络求解土木工程问题的方法,并对数据的前后处理方法进行了详细论述;第四章论述了基于神经网络的结构近似分析与初步设计原理、方法及应用;第五章论述了基于神经网络、遗传算法的结构优化设计的原理、方法及工程实例,并对智能结构优化设计的概念及实现策略进行了介绍;第六章首先叙述了结构损伤检测的发展与研究概况,论述了基于神经网络的结构损伤检测的原理、方法及应用,其次论述了基于神经网络的多级损伤检测技术及实现策略,最后分别对悬索桥、斜拉桥、钢框架结构进行了实例损伤检测。

作者诚挚感谢所有为本书作出贡献的师长和朋友:哈尔滨工业大学的钟善桐教授和东北大学的刘之洋、张翅教授一直关注本书的出版,并提出了许多建设性的意见;大连理工大学的赵国藩院士、李宏男教授,福州大学的韩林海教授,原深圳赛格广场的蔡延义高级工程师,浙江大学的王柏生副教授,沈阳建筑工程学院的刘明教授、王连广副教授和王广林老师等给予作者许多鼓励和帮助;作者在香港理工大学作访问学者期间,高赞明讲座教授、倪一清研究员给予作者热情的关怀和悉心指导,并提供了许多宝贵资料和建议。在本书的写作过程中,参考了一些国内外同行发表的研究成果,对被引用研究成果的同行和作者表示诚挚的谢意。最后,特别感谢张春丽女士,她为本书手稿的整理校对付出了辛勤的汗水和默默的劳动。

科学是不断发展的,人们对科学问题的认识也是不断深入完善的。本书的一些观点、方法仅为作者当前对这些问题的认识,其中某些观点与方法会随着研究工作

的不断深入而得到改进。鉴于作者的水平有限及经验所限,因而书中存在的一些缺点和不足之处,敬请各位专家和学者批评指正。

姜绍飞

2002年3月于沈阳

目 录

前 言

第一章 绪论	1
1.1 神经网络在土木工程中应用的可行性	1
1.1.1 神经网络的特点	1
1.1.2 神经网络求解土木工程问题的可行性	3
1.2 结构分析与初步设计	5
1.3 结构优化设计	6
1.4 结构损伤检测	7
1.5 神经网络在土木工程中的应用	8
1.5.1 结构分析与初步设计	8
1.5.2 结构优化设计	9
1.5.3 结构损伤检测	9
1.5.4 结构控制	10
1.5.5 科学决策	11
1.5.6 结构材料及本构关系	11
1.5.7 回归分析	12
参考文献	13
第二章 神经网络理论及模型	16
2.1 神经网络的发展史	16
2.2 神经网络基本原理	18
2.2.1 神经元模型	18
2.2.2 神经元传递函数	22
2.2.3 神经网络的学习算法	23
2.2.4 神经网络模型	25
2.2.5 神经网络的实现机制	26
2.3 典型神经网络模型	28
2.3.1 BP 网络模型	28
2.3.2 Hopfield 网络模型	29
2.3.3 回归 BP 网络	30

2.3.4 Boltzmann 机网络	31
2.3.5 径向基函数(RBF)网络	32
2.3.6 概率神经网络(PNN)	34
2.3.7 对偶传播(CP)神经网络	38
2.3.8 模糊神经网络(FNN)	39
2.4 BP 网络模型及相关问题	41
2.4.1 经典 BP 算法	41
2.4.2 网络模型存在的问题及分析	41
2.4.3 BP 网络模型的改进	42
参考文献	47
第三章 数据的前后处理	48
3.1 引言	48
3.2 数据处理的方法	48
3.2.1 土木工程问题的神经网络求解方法	48
3.2.2 数据处理的方法与步骤	49
3.3 数据变换处理	50
3.3.1 数值(连续值)变量	51
3.3.2 定性变量	52
3.3.3 区间变量	52
3.3.4 无序变量	53
3.4 特征参数的提取	53
3.4.1 向量扩张法	53
3.4.2 小波分析法	54
3.4.3 主成分分析法	57
3.4.4 神经网络方法	58
3.5 样本集的构造	60
3.6 数值算例分析	61
参考文献	63
第四章 结构分析与初步设计	64
4.1 神经网络在结构分析与初步设计中的应用	64
4.1.1 多层前馈神经网络	64
4.1.2 自组织神经网络	66
4.2 基于神经网络的结构分析	66
4.2.1 结构分析的理论基础	66

4.2.2	结构分析方法	71
4.2.3	悬臂梁的结构分析	72
4.3	基于神经网络的结构初步设计	73
4.3.1	初步设计的基本原理与方法	73
4.3.2	外包钢筋混凝土受压构件的设计	74
4.3.3	外包钢筋混凝土受弯构件的设计	76
4.3.4	钢筋混凝土梁的设计	78
4.3.5	钢管混凝土中的应用	79
4.4	小结	82
	参考文献	83
第五章	结构优化设计	85
5.1	结构优化设计的发展与研究	85
5.1.1	结构优化设计理论与方法	85
5.1.2	基于 Matlab 的结构优化设计	93
5.1.3	神经网络在结构优化设计中的应用	93
5.2	基于神经网络的结构优化设计	95
5.2.1	基本原理	95
5.2.2	优化算法	97
5.2.3	桁架结构优化设计	97
5.3	基于遗传算法的结构优化设计	101
5.3.1	遗传算法	101
5.3.2	结构优化设计原理与方法	103
5.3.3	数值算例	104
5.3.4	结构优化设计评述	104
5.4	结构智能优化设计	105
5.4.1	结构智能优化设计概念	105
5.4.2	基本原理	106
	参考文献	108
第六章	结构损伤检测	110
6.1	结构损伤检测的发展与研究	110
6.1.1	基于振动的损伤检测	110
6.1.2	其他无损检测	114
6.1.3	无损与有损伤相结合的检测	116
6.2	基于神经网络的结构损伤检测	117

6.2.1	基本原理与方法	117
6.2.2	神经网络在结构损伤检测中的应用	119
6.2.3	简要评述	127
6.3	基于神经网络的多级结构损伤检测技术	128
6.3.1	面向损伤检测的有限元模型	129
6.3.2	异常检测	130
6.3.3	损伤类型检测	134
6.3.4	损伤定位	134
6.3.5	损伤程度评估	138
6.4	大跨悬索桥结构的损伤检测及定位	138
6.4.1	引言	138
6.4.2	大跨悬索桥损伤定位的 PNN 模型	139
6.4.3	损伤定位结果与讨论	142
6.4.4	相对重要性与特征向量简化	144
6.4.5	不同网络性能比较	148
6.5	大跨斜拉桥的损伤检测	150
6.5.1	斜拉桥的异常检测	150
6.5.2	斜拉桥的损伤定位	154
6.5.3	斜拉桥的损伤程度评估	158
6.6	Benchmark 结构的损伤检测与评估	159
6.6.1	问题的提出	159
6.6.2	Benchmark 结构	160
6.6.3	数值模型	163
6.6.4	模式损伤样本的产生	164
6.6.5	损伤定位	166
6.6.6	损伤程度评估	168
	参考文献	170

第一章 绪 论

人工神经网络(Artificial Neural Network,简称神经网络或 ANN)是在物理机制上模拟人脑信息处理机制的信息系统^[1~7],它不但具有处理数值数据的一般计算能力,而且还具有处理知识的思维、学习、记忆能力。神经网络产生于 20 世纪 40 年代,于 20 世纪 80 年代再度兴起并得到飞速的发展,它采用类似于“黑箱”的方法,通过学习和记忆而不是假设,找出输入、输出变量之间的非线性关系(映射),在执行问题和求解时,将所获取的数据输入给训练好的网络,依据网络学到的知识进行网络推理,得出合理的答案与结果。

1982 年 Hopfield^[2]将“能量函数”引入神经网络,使得网络稳定性能有了明确的判据,再度掀起了人们研究神经网络的热潮。特别是他用神经网络成功地解决了“旅行商”问题后,神经网络越来越被广泛地应用于模式识别、图像信号处理、工业过程控制、管理系统和财政金融预测等领域。土木工程中的许多问题是非线性问题,变量之间的关系十分复杂,很多工程实际问题很难用确切的数学、力学模型来描述。工程现场实测数据的代表性与测点的位置、范围和手段有关,有时很难满足传统统计方法所要求的统计条件和规律,加之工程项目多为单体生产,可统计性差,且影响因素多,所依靠的信息许多是不确定的,因而运用神经网络方法实现土木工程问题的求解是非常合适的。近十几年神经网络开始被应用于土木工程领域,如结构分析与初步设计、结构优化设计、结构损伤检测与评估、结构控制、科学决策、施工工程与管理、岩土及交通工程等诸多方面^[5,6,8,9]。

1.1 神经网络在土木工程中应用的可行性

1.1.1 神经网络的特点

人工神经元是神经网络中的基本处理单元,它是一个近似模拟生物神经元的数学模型,它通过与其相连的其他神经元接收信息。神经网络就是由许多简单单元组成的广泛并行互连的网络,它的组织能够模拟生物神经系统的真实世界物体做出交互反应(Kohonen 定义)^[3],它是在物理机制上模拟人脑信息处理机制的信息系统,是一个具有高度非线性的超大规模连续时间动力系统,具有网络的全局作用、大规模并行分布处理和联想学习能力。

神经网络的模型很多,它们具有共同的基本特性^[1,5~7]:

1. 分布式存储信息

神经网络存储信息的方式与传统计算机的思维方式是不同的,一个信息不是存储在一个地方,而是分布在不同的地方。网络的某一部分也不只存储一个信息,它的信息是分布式存储的。神经网络通过大量神经元之间的连接及对各连接权值的分布来表示特定的信息,因此这种分布式存储方式即使局部网络受损,仍具有恢复原来信息的特点。

2. 自适应性

神经网络的自适应性是指整个神经网络进行自我调节的能力,它包含四个方面的含义,即:学习、自组织、泛化及训练。

学习是指根据与环境的相互作用而发生的行为改变,其结果导致对外界刺激产生反应的新模式的建立。一般地,当神经元之间的连接权值得到调整时,我们就说它正在学习。神经网络中各神经元之间的连接强度用权值的大小来表示,这种权值可以事先给出,也可以根据周围环境而自适应地修改、变化,这种过程称为神经网络的学习过程。神经网络所具有的学习过程模拟了人的形象思维方法,是与传统符号逻辑完全不同的一种非逻辑语言的方法。

自组织是指许多神经元按照一定的规则同时进行改进。神经网络进行迭代修正的过程如同积累经验的过程。

泛化能力也称推广能力,是指网络对以前未曾见过的输入做出反应的能力。泛化本身具有进一步学习和自调节的能力。

训练是指神经网络进行学习的途径。我们经常将“学习”和“训练”这两个概念混合使用。

3. 并行性

传统计算机处理信息的方式为串行处理,计算与存储是完全独立的两部分,这样存储器与运算器之间的通道就成了计算机的瓶颈,大大限制了它的运算能力。神经网络的每个神经元都可根据接收到的信息进行独立的运算与处理,然后将输出结果传输给其他神经元进行同时(并行)处理。

4. 联想记忆功能

神经网络在训练过程中,输入端给出要记忆的模式,通过学习合理地调节网络中的权值,网络就能“记住”所有的输入信息。执行时,若在网络的输入端输入被噪声污染的信息或者是不完整、不准确的信息片段,在输出端仍可得到恢复了的完整而准确的信息。

5. 自动提取特征参数

一般来说,模式特征提取就是首先对模式样本的数据进行预处理,形成数据空间,然后在数据空间基础上经过变换,提取数据中的不变特征,有时根据需要还须对所选择的模式特征矢量进行量化压缩变换,尽可能选择并保留有用的特征信息,形成特征空间。神经网络本身具有自组织、自学习等自适应的特点,在某种意义上说,神经网络的自学习就是实现模式变换和特征提取。在基于知识的专家系统中所必需的领域专家,在神经网络中并不需要,相反只要通过适当的训练与学习,神经网络就能够自动提取外界输入信息的特征,确定原因与结果之间的关系。

6. 鲁棒性(容错性)

由于神经网络信息的存储是分布式地存在整个网络的连接权值上,通过大量神经元之间的连接及对各连接权值的分布来表示特定的信息,因此,这种分布式存储方式即使局部网络受损或外部信息部分丢失也不影响整个系统的性能,具有恢复原来信息的优点,这使得它比传统计算机具有较高的抗毁性。

此外,神经网络还具有过滤噪声和在线应用等特性。总之,神经网络的这些特性是人右半脑直觉形象思维的特征,它是对传统人工智能理论——左半脑逻辑思维的有利补充,随着人们对神经网络的进一步深入研究,人工智能的理论和应用将会不断地完善和改进。

1.1.2 神经网络求解土木工程问题的可行性

人工智能是近几十年来获得飞速发展的学科,它主要研究如何用计算机来模拟人脑的思维活动,包括功能模拟和结构模拟。功能模拟即在功能上模拟人脑,使机器在某种程度上模拟人脑的功能;结构模拟即对人脑物理结构的模拟,使机器在物理机制上模拟人脑。

人工智能在功能模拟领域走向实用化成功的是专家系统技术,它已被广泛地应用于计算机的工程领域,当然也被土木工程人员作为结构设计过程中的工具。这主要是由结构设计过程的特征决定的:结构设计需要工程判断、感应、经验和创造力,而专家系统恰好具有这些功能,同时,结构设计是一个分析和设计的循环过程,在选择某一方法之前需试算不同的方案,因而需要高级的算法才能实现这个任务。进一步讲,由于约束条件和要求的复杂性,找出一个数学优化造价函数并不容易,加之工程项目多为单体生产,可统计性差,所收集的信息部分是不完全的甚至是错误的,特别需要专家的知识 and 经验。因此,专家系统就成为工程结构设计中必不可少的工具。

但是在运用专家系统技术进行结构设计时,常遇到一些难以解决的问题^[10,11]:① 不具备从环境中自学习的能力;② 仅仅局限在逻辑推理领域,对形象

思维、联想、感应等非逻辑思维方式无能为力；③ 规则必须清晰明确。这些问题影响了专家系统的进一步推广和应用，人们开始研究通过对人脑物理结构的模拟来解决这些问题。人脑信息处理系统的功能依赖于其并行分布的结构——由许许多多的神经元彼此通过树突、轴突和突触相连而构成的一个立体网络，它具有高容量、高速度和高容错性，是一种高度并行分布处理信息的系统。神经网络是对人脑生物神经网络的一种简化，它对信息的存贮也是通过并行分布的结构来进行的，也具有生物神经网络的特征，对信息的处理采用直觉联想式而非逻辑推理式。神经网络对知识的掌握是通过对样本的学习来实现的，即通过对大量实例样本的学习，不断调整网络的权值和阈值，从而掌握蕴涵于样本集中的难以用解释形式表达的知识。网络通过权值记下所学过的样本知识并掌握输入、输出之间复杂的非线性关系。专家系统中不确定性推理方法的难点在于先验数据和证据间关系的组合上，采用神经网络方法可以不受这些限制，只要知道了学习样本集，就可以通过网络的自学习能力来解决。

在土木工程中，结构选型、结构分析和结构优化设计的重复性工作，不仅导致分析计算工作量的增加，也需要土木工程师具有对以往工作的经验、判断和创新加以综合决策的能力。旧有建筑物(结构)在经历一段较长时间或受到某种灾害(如火灾、地震)作用后，往往会受到不同程度的破坏或损伤；由于结构的病害而引起结构几何尺寸和材料性能的变化，也会降低结构的安全性、适用性和耐久性。因此对这些建筑物进行鉴定或诊断就变得日益重要起来。影响结构破损状态的因素很多，一般可分为三方面：

- 1) 随机因素：材料性能的不定性、计算模式的不定性和荷载效应的随机性。
- 2) 模糊性因素：结构损伤程度的不确定性和结构失效准则的不确定性。
- 3) 信息不完备性：抗力计算中各种简化和假定对结构实际抗力影响程度的不确定性及荷载处理过程中各种统计假设与实际荷载相关程度的未知性。

这些因素严重地影响了人们对损伤检测与诊断的正确分析与决策。由于神经网络对输入节点没有限制，这样神经网络技术就可用来解决土木工程领域的结构近似分析、结构优化、损伤检测的模式匹配与直觉联想等问题。神经元中的激活函数本身可以选用非线性函数，因而它能处理非常复杂的非线性问题；而网络对大量样本的适用性决定了本领域知识容量大的适用性；神经网络具有自适应的能力，它能够通过训练学习，获得隐含在样本数据内部的输入与输出之间的隐性关系；神经网络还具有联想、记忆及模式匹配的能力，能够存储学习过程中的经验知识，然后将此信息与实测数据进行模式匹配与比较；神经网络具有抽取、归纳的能力，它能够滤出噪声及在有噪声情况下抽取事物本身内在的特征，得出正确的结论，因而它比较适合对具有大量噪声和测量误差的结构进行在线健康检测与状态评估；神经网络的运动轨道总是朝着能量函数减少的方向，最终到达系统的稳定平衡点——能量函数的极小点，该点对应结构优化问题的极小值，因此求神经网络系统稳定平

衡点的过程就是求解结构优化问题的极小值过程;神经网络采用并行分布存储的方法将通过样本学习到的知识来调整网络的权值,决定了知识的处理也是并行分布和存储的,这对于定性、定量或不确定性问题具有很强的鲁棒性(容错性),同时也使快速处理复杂的大型优化设计等问题成为可能。

综上所述,无论从直觉推理还是从不确定性推理的角度上讲,用神经网络方法求解土木工程问题都是可行的。

1.2 结构分析与初步设计

结构设计一般可以分为概念设计、初步设计和施工图设计三个阶段。在初步设计阶段,工程师的思维包括形象思维和逻辑思维两个方面,因而一个人设计项目也会有几种不同的方案可供选择,并且设计项目的思路本身也不是惟一的。可见,形成一个成熟的模式或算法对于知识系统的思维模式来说是相当困难的。由于结构方案和一些重要参数的选择对于结构设计的好坏起着决定性的作用,因此,初步设计对于整个设计过程来说是至关重要的。虽然近年来在实际土木工程设计中开发了一些专家系统,但这些系统往往存在这样一些问题:

1) 系统所拥有的专业知识不够全面。众多从事知识系统研究的人员,往往仅是人工智能技术的专家而并非土木工程领域的专家,他们对土木工程领域的大部分专业知识了解甚少,往往是通过与该领域的专家交谈几次来完成知识的获取,对于一些涉及到更深层次的知识是无法获取的。

2) 系统能够比较容易地处理基于逻辑思维的符号知识,而对于基于形象思维的联想模式处理起来却比较困难,造成系统缺乏深层次的推理能力。

目前很多基于知识的专家系统对于设计目标的变化过于敏感,而相应的知识获取就成为制约系统建立的关键。

在初步设计的过程中,专家的思维模式常常具有这样的特点^[12]:

1) 目标函数是与结构方案和设计参数等诸多因素密切相关的,它们相互之间的关系是一个很复杂的网络,多数情况下,这种关系是不能通过一个分级的关系所替代的。

2) 在整个设计过程中,目标函数、因素条件随时都可能发生变化。

3) 设计者通常希望在众多的可行解中找到一个最优解,但是对于不同的设计者来说,最后方案的确定并不都是一致的。

领域专家思维模式的这三个特点对于一个新知识系统的设计来说是十分重要的。神经网络作为知识展示的一个新范例,显示了其非常适合于解决从很多输入特性参数中映射出一批所需输出参数的优越性,因此可以将神经网络看作是形象思维的知识表示。

计算机的应用和普及,使得数值计算成为结构工程师进行结构分析、初步设计

与结构优化设计常用的方法和手段,而对于大型、复杂结构的非线性响应分析和优化设计等问题,其计算工作量是非常巨大的,即使使用最先进的巨型计算机也要耗费许多机时。目前主要采取简化原问题,即用子结构技术、基于多处理机的并行算法、减少结构分析次数等变通手段来减少计算规模,这样就经常需要进行结构近似分析,而结构近似分析精度不高和不具备全局性的缺陷常是结构工程师必须面对和设法加以解决的。

由于神经网络具有自适应、高度非线性及联想、记忆等特征,它通过对训练样本的学习,归纳、抽取蕴涵在样本内部难以用显性表达式表示的输入、输出之间的复杂非线性关系,比较容易处理形象思维的联想、推理等问题。同时神经网络采用并行计算和分布式数据处理,本身具有全局性,因而对于结构重复分析、初步设计问题来说,它可以极大地减少计算机时,只要神经网络训练完成后,就可以将新的、多组需要进行结构分析、初步设计的输入变量放入训练后的神经网络,神经网络会很快地进行模式匹配与推理,给出合理的结构分析结果和初步设计方案^[9~13]。可见,深入系统地研究运用神经网络进行结构(近似)分析和初步设计很有必要,它不仅可以解决结构设计中的问题,而且对于今后大型、复杂的工程结构进行智能化设计、管理与维护都具有重要的参考价值。

1.3 结构优化设计

结构优化设计是指在满足规范要求和某些特定条件下使结构的某种(些)性能指标为最佳,它大体上可以分为三个阶段:第一个阶段,把一个工程结构的设计问题变成一个数学问题,即建立数学模型;第二个阶段,选择一个合理、有效的计算方法;第三个阶段,编制通用计算机程序。实际工程设计问题往往是很复杂的,在建立数学模型时,通常只能考虑一些主要因素,忽略一些次要因素,以简化计算。

结构优化设计开始于 20 世纪 40 年代,源于 Petersa 的一篇名为“如何应用满应力设计法”的文章。20 世纪 50 年代,用于解决最优化问题的数学方法仅限于经典微分法和变分法,称为经典优化方法。50 年代末,优化方法中的数学规划方法被用于结构最优化,使之成为优化方法的理论基础。1960 年 Schmit 将结构有限元技术与数学规划法结合起来进行结构优化设计^[16],开创了现代结构优化设计的历史。60、70 年代主要有数学规划法和准则法两类进行结构优化设计的优化算法,进入 80 年代,电子计算机的发展与普及,进一步拓展了结构优化设计技术的应用与发展。1982 年 Iman 著文阐述了三维结构形状优化设计问题^[17],掀起了同时求解结构拓扑、形状、尺寸优化算法的研究热潮。1983 年钱令希提出了序列二次规划法^[18]。这期间,数学规划法中的大部分算法,如序列线性规划法、序列二次规划法、对偶规划法、几何规划、动态规划、复合形法、可行方向法等都被用来进行结构优化设计^[19~20]。然而,数学规划法需要多次迭代重复分析,代价昂贵,效率较低;优化准

则法则对不同类型的约束、变量、目标函数等需导出不同的优化准则,通用性较差,且最后解多为近似最优解。

由于结构优化设计中大量的分析计算导致了效率低下,因而人们探讨运用先进的结构近似分析技术进行近似重分析,如利用神经网络的并行计算、强大的近似分析和非线性建模能力进行结构近似重分析。同时,神经网络的稳定平衡点总是对应网络能量函数的极小点,因此人们研究运用神经网络的这一特性进行结构优化设计^[21~24]。用于结构优化设计的多数计算方法要求目标函数和约束条件连续、可微,而遗传算法不需优化问题有连续性和可微性,且能收敛到全局最优解,因而近些年被越来越多地应用于工程结构优化设计中^[25~27]。

1.4 结构损伤检测

随着房屋建筑、公路交通等工程事故的频繁发生,工程质量的好坏引起了人们的日益重视。工程结构中经常存在着表面的某种破损或缺陷,如梁板的裂缝、墙皮开裂、火灾后混凝土的过火等,这些肉眼可见的破损容易引起人们的重视,而旧有建筑物(结构)材料由于初始缺陷的存在及荷载和环境的共同作用,使结构在经历了一段较长时间或受到某种自然灾害后,往往受到不同程度的损伤,或由于结构的病害引起性能变化,导致突发事故或建筑物倒塌现象的发生,这类危险是肉眼看不见的内在缺陷、损伤所造成的。结构的缺陷与损伤严重地降低了结构的安全性、适用性和耐久性,特别是我国建国以来建成的建筑项目多数已接近设计规定的基准使用期,因此迫切需要对它们进行健康诊断,进而更好地对它们进行维修、加固、管理与使用。因而如何通过一定的检测手段与方法来判断结构是否存在缺陷与损伤,并对损伤进行定位及评估成了当前国内外学术界、工程界极为关注且研究活跃的领域。

对工程结构进行健康诊断与损伤探测的研究开始于 20 世纪 40 年代^[6],大致可以分为三个阶段:

1) 探索阶段。该阶段为 20 世纪 40~50 年代,注重分析、研究结构产生缺陷的原因和修补方法,检测工作以外观的目测方法为主。

2) 发展阶段。该阶段为 20 世纪 60~80 年代中期,注重对工程结构检测技术和评估方法的研究,提出了破损检测、无损检测、物理检测等几十种现代检测技术和分项评价、综合评价、模糊评价等多种评价方法。由于历史发展等原因和自然灾害造成的惨痛教训,我国在 20 世纪 70 年代中期开始该项研究,虽然起步比较晚,但引起了国家许多部门和单位的重视,开发研究了许多符合我国国情的诊断方法与技术。

3) 完善阶段。该阶段为 20 世纪 80 年代后期至今,该阶段制定了一系列的规范和标准,强调综合评价,引入知识工程,将有限元分析等数值计算方法与结构损

伤检测方面的专家经验结合起来,使结构损伤检测与可靠性评估工作朝着智能化的方向发展和迈进。

当前结构损伤检测的方法很多,除了外观的目测方法外,还有声发射、超声波法、磁场法、放射法、热力场法等实验方法以及专家系统、神经网络、遗传算法等智能损伤检测技术^[6,28~33]。大部分损伤检测实验技术要求事先已知损伤产生的大致部位,并且要检查的结构部位容易接近,因而这些实验方法只能检测发生在结构表面或接近表面的损伤。实际上,人们往往事先并不知道已经出现的缺陷与损伤,也不知道它们存在的部位,因此需要对工程结构进行整体检测,再加以诊断与分析。为了满足工程结构特别是复杂结构整体探伤的需要,现已产生了许多通过结构振动特性的变化来进行结构整体损伤检测的方法与技术^[30~33],它们都是通过结构动力特性的变化来反映结构物理特性参数的变化,进而对结构进行探伤,故通称为基于振动的损伤检测方法。

一个好的损伤检测方法能够在损伤刚开始出现的时候就将其识别出来,在传感器分辨率的范围内进行损伤定位,对损伤程度进行估计,并对结构的残余使用寿命进行预报。这种好的损伤检测方法以一个无损伤结构初始测量的响应作为基准,以实测的结构响应来同它进行比较,同时还要考虑实际操作时的约束,比如多数损伤检测方法在损伤过程中假设结构的质量不发生改变,这个假定对于海洋石油平台这种结构来说是不正确的。另一个就是对于那些需要先验理论模型的损伤检测方法,应该具有区分理论分析数据与测量数据之间的差异是由模型误差引起的还是由于结构发生损伤而引起的能力。

总之,结构损伤检测方法与技术在不断地发展与丰富,随着研究的深入,还会出现新的损伤检测方法与技术。

1.5 神经网络在土木工程中的应用

自 Adeli 和 Yeh 于 1989 年将没有隐含层的感知机第一次用于简支梁的设计以来,越来越多的土木工程专家、学者将研究方向转移到该领域上来,现在已有许多神经网络模型用于结构分析及优化设计、结构的损伤检测与评估、结构控制、多目标综合决策及预报、施工管理与规划、岩土与交通工程及材料的本构关系等许多方面^[8~11]。

1.5.1 结构分析与初步设计

由于结构分析和优化设计中需要巨大的计算量,为减少结构分析的次数,常进行结构近似分析,这样就出现了分析精度不高和不具备全局性的缺陷。同时,结构的初步设计也需要进行重复的结构分析与设计计算。因此,人们研究运用具有快速、全局性计算的神经网络方法来进行结构分析和初步设计^[8~14],其主要原理是

运用神经网络的抽取、归纳及非线性建模的能力,也就是对离散空间点 $\{x,y\}$ 的基于基函数的最佳拟合过程,建立输入与输出之间的映射函数关系,然后进行模式匹配、分类、识别与计算,得到合理的结构分析结果与设计方案。详细内容见第四章。

1.5.2 结构优化设计

由神经网络理论^[4,7]可知,神经网络能量函数的极小点对应于系统的稳定平衡点,这样,能量函数极小点的求解将转化为求解系统的稳定平衡点。随着时间的推移,神经网络的运动轨道总是朝着能量函数减少的方向,最终到达系统的稳定平衡点——能量函数的极小值。可见,系统的稳定平衡点正好是工程结构最优化问题的极小点。1982年,Hopfield^[2]最早发现了神经网络具有最优化的能力,他用神经网络成功地解决了“旅行商”问题,他和 Tank 于 1986 年设计了第一个求解线性优化问题的神经网络——TH 选型优化网络,由此拉开了运用神经网络进行结构优化设计研究与应用的序幕^[21~24]。

1.5.3 结构损伤检测

对结构进行损伤(或故障)检测、诊断与评估是一个运用数学模型建立描述物理系统的过程,对于遭受不同程度破坏的结构,其本身的某些特性往往发生变化。为了鉴定这些变化对结构的影响程度,常进行一系列的模拟实验,测定相关的荷载、位移、应变及加速度等,从材料性能如强度、刚度和动力特征(如振动频率和阻尼比)方面对结构做出评估。很显然,结构损伤比较严重时,模态参数的改变就比较大。如果损伤程度保持一个常数,则固有频率或模态振型的改变随着损伤位置的不同而发生变化,这显示了模态参数的改变包括了损伤位置和损伤程度两方面的信息。

在某个位置出现的损伤导致了固有频率和模态振型的改变,它们可以作为特定损伤的指标。运用有限单元法可以对不同损伤引起的模态参数的改变进行计算并保存在数据库系统中,通过将实测模态参数的变化与储存在数据库中可能的损伤序列模态参数的变化进行损伤模式的比较与匹配,来识别损伤。运用神经网络进行结构损伤检测就是这样一种模式匹配,它包括训练阶段和检验阶段,训练阶段就是建立损伤模式数据库的过程,检验阶段就是损伤模式匹配的过程。虽然神经网络并非专为损伤检测设计的,但由于神经网络本身就具有模式匹配的能力,使得它成为损伤检测的一种工具。近些年越来越多的学者研究运用神经网络进行复杂结构的损伤检测^[8,9,30~33],主要的网络模型是多层前馈神经网络,如 BP 网络。最近,部分学者探讨运用径向基函数神经网络、概率神经网络、模糊神经网络、对偶传播神经网络、自回归神经网络等模型进行结构的损伤检测与诊断。

由于神经网络具有自适应的能力,它能够通过训练(学习)阶段,获得健康结构和损伤结构所具有的有关知识与信息;神经网络还具有联想、记忆及模式匹配的能