

黄冈师范学院学术文库

神经网络在结构识别中的 应用研究

尚 钢 著



武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

黄冈师范学院学术文库

神经网络在结构识别中的 应用研究

尚 钢 著

武汉理工大学出版社

内容简介

全书系统介绍了作者将神经网络方法应用于结构识别方面的研究成果。重点以结构工程中的基本结构——梁、桁架、板、壳等为基本对象,在结构反问题及其力学系统下的结构识别模型的建立基础上,把力学反问题与 BP 神经网络算法相结合,系统研究了如何构造有效的神经网络解决具体结构的荷载大小、作用点、缺陷位置等识别问题。在构造具体结构神经网络的过程中,对传递函数——Sigmoid 型函数的 A 、 B 、 C 等参数进行了研究,得出了对某些具体反问题识别时的最佳参数组合。同时,提供了各种识别问题的神经网络训练程序及生成系统。本书还收入了作者近几年来在该领域的最新研究成果。

图书在版编目(CIP)数据

神经网络在结构识别中的应用研究/尚钢著. —武汉:武汉理工大学出版社,2005.1

ISBN 7-5629-2191-1

I. 神…

II. 尚…

III. 神经网络—应用—结构力学—研究

IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 005403 号

武汉理工大学出版社出版发行

(武昌路狮子岭 122 号 邮政编码:430070)

湖北省农科院印刷厂印刷

*

开本:880×1230 1/32 印张:8.5 字数:253 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

印数:2000 册 定价:26.80 元

序

神经网络的研究已有五十多年的历史,近十年来神经网络的理论及其工程应用引起美国、欧洲、日本等世界各国科学家和企业家的巨大热情。目前,神经网络理论的应用已渗透到各行工程领域,并在智能控制、模式识别、计算机视觉、自适应滤波和信号处理、非线性优化、自动目标识别、连续语言识别、声纳信号的处理、知识处理、传感技术与机器人、生物医学工程等方面取得了令人鼓舞的进展。

尚钢教授的专著《神经网络在结构识别中的应用研究》,系统地介绍了作者将神经网络方法应用于结构识别方面的研究成果。重点以结构工程中的典型基本结构——梁、桁架、板、壳等为基本对象,在结构反问题及其力学系统下的结构识别模型的建立基础上,把力学反问题与 BP 神经网络算法相结合,系统研究了如何构造有效的神经网络解决具体结构的荷载大小、作用点、缺陷位置等识别问题。同时,提供了各种识别问题的神经网络训练程序及生成系统。

本书首先阐述了神经网络的理论与方法研究,从神经网络的发展、基本理论、训练方法以及 BP 神经网络及其实现等方面,重点对 BP 网络的实现过程进行了数学上的推导与论证,提出了 BP 网络加快收敛的一些方法和措施。重点介绍了神经网络的结构工

程,典型的基本结构——梁、桁架、板、壳等结构识别问题的研究。内容包括:荷载位置与大小、缺陷位置及程度(包括动荷载)、神经网络结构设计、学习方法的改进、训练样本及其选取、权值分析、BP 算法应用的详细步骤、误差分析…等等。其中很多内容均为作者近年来的研究成果。同时,介绍了作者运用 C 语言编制了三种特殊结构神经网络程序设计及生成系统。最后介绍了作者近年来发表于各种学术刊物上的最新研究成果。

该书研究内容丰富、理论系统、条理清晰、文字流畅、紧密结合工程实际。

神经网络在结构识别方面有着十分广泛的应用前景,该书的出版,对推动神经网络在各个工程领域的运用,有着十分重要的理论价值和实际工程意义。

吴代华

2004 年 11 月

目 录

1	绪论	(1)
1.1	问题的产生与提出	(1)
1.2	研究问题的基本思路	(2)
1.3	主要研究内容与关系	(2)
1.4	研究的重点与难点	(3)
2	结构中的反问题及力学系统识别研究	(5)
2.1	工程中的反问题研究	(5)
2.2	反问题的基本理论及其研究	(12)
2.3	力学反问题及识别系统	(16)
2.4	本章小结	(17)
3	神经网络的理论与方法研究	(18)
3.1	神经网络的发展	(18)
3.2	神经网络的基本理论	(22)
3.3	神经网络的训练方法	(32)
3.4	BP神经网络及其实现	(36)
3.5	本章小结	(44)
4	神经网络在梁体结构识别问题中的研究	(45)
4.1	简支梁载荷位置与大小的识别	(45)
4.2	缺陷梁缺陷位置及程度的识别	(57)
4.3	振动缺陷梁缺陷位置及程度的识别	(60)
4.4	本章小结	(63)
5	神经网络在桁架结构识别问题中的研究	(64)
5.1	框架结构的识别问题	(64)
5.2	神经网络结构设计	(65)
5.3	学习方法的改进	(67)

5.4	训练样本的处理	(68)
5.5	训练结果分析	(69)
5.6	权值分析	(71)
5.7	BP 算法应用的详细步骤	(76)
5.8	本章小结	(80)
6	神经网络在板结构识别问题中的研究	(81)
6.1	板结构的识别问题	(81)
6.2	样本选取	(81)
6.3	网络设计的三种训练方式	(82)
6.4	识别结果与误差分析	(85)
6.5	本章小结	(88)
7	神经网络在壳体结构识别问题中的研究	(89)
7.1	扁壳结构的识别问题	(89)
7.2	圆柱壳结构的识别问题	(93)
7.3	本章小结	(95)
8	神经网络程序设计及生成系统	(96)
8.1	BP 神经网络通用程序流程图	(96)
8.2	简支梁识别程序	(96)
8.3	振动缺陷梁识别程序	(104)
8.4	板壳识别程序	(112)
8.5	神经网络生成系统研究	(120)
8.6	本章小结	(123)
9	该课题的拓展研究成果与展望	(124)
9.1	研究成果	(124)
9.2	总结	(254)
9.3	展望	(255)
	参考文献	(256)

1 绪 论

1.1 问题的产生与提出

在研究结构工程中的力学问题时,通常是在已知结构的材料参数、边界条件、初始条件及承受载荷状况的情况下,利用数学物理方法或数值解法(如有限元法、加权残值法、边界元法等),计算出结构的应力、应变(或位移)场等物理量。但是,在实际工程问题中,常常遇到这样的问题:结构所承受的载荷不好确定,甚至还有不可预知的载荷,如意外碰撞、地震等;结构中含有某些未知的损伤因素,如某处可能产生了裂缝,结构中某处的弹性模量发生了变化;结构的边界条件不好确定,如水坝、建筑物、桥梁的地基条件等。对这些问题的正常求解,如按传统数值方法求解(即正向求解方法)有关物理量就显得十分困难,甚至无法求解。

然而,对于实际工程可能出现的问题,如果我们根据某些实验方法或实测手段,可以很方便地获取结构中某些区域或点域的物理量,那么,我们是否可以判别或识别出产生这些物理量的某些干扰源呢?换句话说,在绝大部分工程实际问题中,结构的反问题如何解决?结构的逆向力学系统如何识别?如何通过可获取的结构的应力、应变或位移量,识别载荷可能作用的位置?对结构工程中这类问题的产生与提出,其实质是提出了一类值得研究的问题,这类问题本书归结为力学系统下的结构识别问题。

在工程实际中除了产生并提出结构的识别问题以外,对结构工程研究者还提出了更进一步的问题,这就是用什么方法去完成或实现对结构的识别呢?随着科学技术的迅猛发展,生命科学、信息科学、计算机应用技术得到了很大的发展,因此,人们自然而然地就会考虑能否运用现代的计算机智能技术,模拟人脑神经系统,借助于神经网络方法,

“智能”地对工程问题进行预测与计算,研究与探讨出结构工程中便于应用的识别方法。也就是在这样的工程实际背景和指导思想下,作者提出了本书的研究课题。

本书的研究工作对解决结构工程中力学系统下的结构识别问题、对确保结构的安全使用和维护具有很好的研究价值和积极的实际工程意义。

1.2 研究问题的基本思路

本书研究问题的基本思路是:以实际工程中典型的基本结构——梁、桁架、板及壳作为研究对象,考虑结构在外载荷作用下正问题的解存在、可求或可测,运用理论求解、数值求解(如有限元法、能量法等)和实测等方法,获取结构中所需要的物理量,以这些物理量作为输入参数,以已知外部作用的载荷或缺陷作为输出参数,运用神经网络方法,建立适合某类工程问题的神经网络,利用给定的输入与输出参数对设定的神经网络进行训练,并将训练的神经网络运用到结构反问题的求解,即实现结构的识别。在此基础上,总结和探讨神经网络在结构识别问题中的一般方法。

1.3 主要研究内容与关系

本书主要研究的结构与内容为:

- (1)结构反问题及其力学系统下的结构识别模型的建立;
- (2)工程反问题及其基本理论的研究;
- (3)神经网络与结构识别相结合的方法研究;
- (4)神经网络在梁体结构识别中的研究;
- (5)神经网络在桁架结构识别中的研究;
- (6)神经网络在板体结构识别中的研究;
- (7)神经网络在壳体结构识别中的研究;
- (8)神经网络生成系统的研究;
- (9)神经网络在结构识别中的方法总结。

1.4 研究的重点与难点

识别问题与一般的正问题有本质的区别:正问题是由因求果,在数学上是积分问题,其解具有稳定性和唯一性;识别问题是由果求因,在数学上是微分问题,其解有不适应性。一般来说,求解识别问题比求解正问题更为复杂,难度也更大,主要体现在:

(1)实际工程中获取的物理信息是有限的、离散的,这些信息显然少于经典的正问题中用连续关系式所决定的信息,由有限的、离散的信息求解函数显然比由函数求值更难。

(2)实际工程获取的物理量或用数值方法计算出的结果总是有误差的,这些有误差的测量值和计算值不可能绝对精确地满足经典意义下求解的方程,这样就给识别的精确性带来了难度。

(3)在若干理想化的假设下,部分正问题可以是线性问题,而求解反问题,由于已知信息只在结构的部分子集中取得,并且,求解的值域受限制,故本质上结构的识别问题都是求解非线性问题,它比求解线性正问题要难得多。

(4)在运用神经网络时,样本采集与分类没有固定的方法,带有一定的经验性。

(5)由于如何选取网络的隐层数和节点数还没有确切的方法和理论,因而通常是凭对学习样本和测试样本的误差交叉评价的试错法选取。

(6)传递函数中某些参数的设定需要对具体问题具体分析,这些参数将会影响收敛的速度和效果。

因此,求解识别问题时需考虑的重点是:

- (1)如何对力学系统下的结构识别问题建立相应的模型;
- (2)如何运用神经网络方法解决实际工程中具体结构中特殊的识别问题;
- (3)如何构造具体问题的神经网络;
- (4)如何提高网络的收敛速度及识别精度;
- (5)归纳和总结运用神经网络解决结构识别问题的一般方法。

本书结构:第1章阐述了问题产生的背景与解决问题的基本方法;第2章研究了反问题研究的发展过程及反问题的基本理论;第3章研究了神经网络的基本理论、运用方法及发展现状;第4章研究了基于神经网络梁的载荷识别、缺陷识别等问题,研究了BP神经网络具体运用的有关技术问题与训练情况;第5章在梁体结构识别研究的基础上,进一步对桁架结构运用神经网络识别的有关问题进行了研究,并在此基础上总结了神经网络一般意义上的详细的计算过程与使用步骤;第6章运用有限元方法计算出板上挠度作为样本,进一步研究神经网络在结构识别方面的运用问题;第7章研究壳体受集中载荷位置的识别;第8章在对基本结构识别的基础上,汇总了对各类具体结构识别问题的网络训练及相应程序,研制了可用于结构识别的神经网络生成系统;第9章收入作者与有关研究者合作研究的最新成果,主要是从理论上对神经网络识别方法的进一步研究,对某些特殊结构的识别问题的研究,对结构识别技术方面的研究等等,并对全书进行了总结,提出了今后还需深入研究的课题及方向。

2 结构中的反问题及力学系统识别研究

2.1 工程中的反问题研究

对反问题的研究已有较长的历史,涉及的范围也相当广泛,如地球物理、生物医学、材料科学、系统工程、振动、热传导弹塑性等等。由于早期的研究在应用上没有重大突破,所以在数学界和工程界一直没有引起重视。随着科学技术的飞速发展,特别是计算机技术、仿真技术及计算方法的发展和测量技术的进步,为反问题的研究提供了有效的手段。同时,高新技术,尤其是智能系统的研究和应用,为反问题的研究提供了迫切的实际需求,这时反问题的研究才引起学术界和工程界的高度重视。在许多工程领域中都会遇到反问题,对反问题的深入研究主要集中在以下几个领域。

1. 振动问题

对反问题的研究最早是在振动领域中开展的,而此时的研究主要局限于数学和应用数学领域。古典的振动理论主要考虑各种离散或连续体的无穷小(线性)无阻尼自由振动,基本问题是确定振动物体的固有频率和减振模态。振动中研究的反问题主要是构造问题,也就是构造某种存在并唯一的振动系统,使之具有给定的特征值、特征向量或特征函数等。换句话说,在古典理论范围内,振动反问题研究构造某种给定的模型,如弹簧质点系统、弦、杆等,使之具有给定的谱数据,这一般也属于应用数学领域。

总体来说,在给定这些谱数据后,可能不存在、也可能存在一个或多个系统具备这些性质,在比较严格的振动反问题中,给定的谱数据使之有且仅有一个指定类型的振动系统具备这些谱性质,这类问题基本

包括以下三方面的研究内容:

(1)如果系统存在,为保证此系统唯一,关于谱数据的充要条件是什么?

(2)为保证对应一个真实的系统,即一个具有正质量、正长度、正的截面面积等等的系统,谱数据须满足什么充要条件?

(3)这个唯一的真实的系统如何构造?

由于这三方面的内容涉及到大量较高深的数学知识,难度比较大,因而研究进展较缓慢,从20世纪30年代开始研究至今,还只能构造离散的二阶系统的反问题,由二阶或四阶微分方程描述的一维连续系统(例如杆、Euler-Bernoulli梁等)的反问题,还没有得到二维或三维振动反问题的结果,即使对于似乎很简单的高维系统,仍然没有全面深入地回答前面提出的三个方面的问题。

2. 瞬态热传导问题

在20世纪60年代,由于航空航天事业发展的需要,促进了热传导中反问题的研究,并使热传导反问题的研究取得突破性进展,也给力学中反问题的研究提供了有益的借鉴。

热传导正问题是解在给定的初始条件和边界条件下的热传导方程,也就是在已知物体初始温度分布和物体分界上的温度或热流的情况下确定物体内部的温度分布。

热传导反问题通过物体初始温度分布,以及在物体内部某些点测得的温度分布,确定物体边界上的温度或热流的变化情况。因为在实际工程中由于空间和环境条件的限制,很难或不可能测量物体边界上的温度,只能在物体内部某些点测量其温度,而有时我们需要知道物体边界上的温度或热流,这种情况在许多物体(特别是在航空航天领域,如固体火箭点火器、火箭发动机、火箭喷嘴、热涡轮的叶片、新型阻热材料等)的热传导研究中都会遇到。

另一类热传导反问题是具有相变的热传导反问题,界面上的温度、热流及界面速度都是给定的,须确定液体和固体占有的整个区域的静止边界上的温度和热流。这类反问题的典型例子是金属和合金的熔化和铸造过程,对铸造过程的设计有重要的指导意义,因为凝固前的热流

和速度决定了铸造结构的质量,可通过确定外部边界的热流来控制铸造结构的质量,使凝固前获得所需的热流和速度,从而可优化铸造时间,防止液体流动的堵塞。

反问题比正问题难解决得多,在热传导正问题中,边界上的热流中的高频成分或干扰在介质中传播时被抑制或丢失了,而在热传导反问题中,测量中的高频成分或干扰在被外推到边界表面的过程中将被放大,因而所得的边界条件将由于内点测量的干扰而被埋没,这是热传导反问题不适定性的表现。

从1960年至今,对热传导反问题的研究取得了一系列的成果,这类文献报道很多。G. Stolz 首先给出了球体热传导反问题的数值解,是研究热传导反问题的开创性工作。他先从正问题出发,即已知边界上热流随时间的变化关系,把时间分成 n 等份,将边界热流曲线用分段折线代替,对每个时间步长,热流增量将引起温度变化,把每个时间步长的温度变化叠加起来就得到内点的最终温度,然后反推回去,在已知测得的内点温度的前提下,将其分成 n 个分量,每个分量是相应的边界热流增量的响应,最终可得物体边界热流曲线。Stolz 实际上应用了有限差分法的思想,但如果时间步长取得太小,他的计算结果是不稳定的,这是由于他没考虑热传导反问题的不适定性造成的,为得到边界条件的更多信息采用小时间步长是必要的。

针对热传导反问题的不适定性,I. Frank 首先提出用最小二乘法解热传导反问题,他将物体表面热流用时间的 k 次代数多项式表示,利用在物体内部一点测得的几个时刻的温度($n > k + 1$)用最小二乘法定出热流的多项式中的系数,尽管用多项式表示热流计算过程较简单,但不能模拟那种先弯曲后平坦类型的热流曲线(如等离子体弧热源),而且当多项式阶数较高时计算结果也会不稳定。

J. V. Beck 是研究热传导反问题卓有成效的一位学者,发表了许多这方面的论文,其中 Beck 在文献中研究了一维非线性热传导反问题,这是一篇很著名的论文,他在论文中提出的数值方法被广泛应用。Beck 的方法是基于非线性估计(nonlinear estimation)的有限差分法,可采用在线方式(on-line method),即一次确定表面热流的一个分量(将连续的热流曲线用有限个离散数值代替),顺序地求出全部分量;也可采

用不在线方式,即同时求出热流的全部分量。在线方式比不在线方式优越,因为不在线方式花费的计算时间多,并会遇到严重的计算结果不稳定。Beck 将热传导方程用 Crank-Nicoson 有限差分格式离散,用非线性最小二乘法,使测点在有限个时刻测得的温度与在相应时刻计算所得温度的差的平方和函数对于有限个热流分量取极小值;计算热流的时间步长可比计算温度的时间步长小,若已求得 M 个热流分量,求第 $M+1$ 个热流分量时须用此热流分量对应时刻以后的测点的温度分量(这是热传导反问题的特性决定的),求解过程是非线性的,可用线性迭代来近似(若问题是线性的则毋需迭代),他把每步迭代的温度分量对热流分量的偏导数定义为敏感性系数(sensitivity coefficient),并给出其近似计算公式,敏感性系数表示了未来的温度分量,测量的温度的误差对边界热流的计算结果的稳定性影响较小。Beck 的方法可采用很小的时间步长,处理不精确的测量数据的稳定性好,由于对热传导方程采用有限差分或有限元离散,可用于一般的非线性热传导反问题(如有内热源或肋片)。

H. R. Busby 等首先给出了二维热传导反问题的数值解,他们先将二维热传导方程对空间坐标进行有限元离散,得到了关于温度向量和边界热流向量的矩阵微分方程,接着将此方程用指数矩阵组合成等效的时间离散方程,他们给出的最小二乘误差表达式与 Beck 的不同:

$$E_N(T_0, g_1) = \sum_{j=1}^N [(Z_j - d_j, A)(Z_j - d_j) + (g_j, Bg_j)]$$

其中, T_0 为物体初始温度分布, g_1 为待求的边界热流向量, Z_j 为计算的测点温度向量, d_j 为测得的温度向量, (x, y) 表示两个向量的内积, A 和 B 为对称正定的权矩阵, 内积 (g_j, Bg_j) 是用来控制未知热流向量的光滑性, 有了矩阵 B 就可将温度测量中的干扰抑制掉, 然后用动态规划(dynamic programming)方法使最小二乘误差函数对未知的边界热流向量取极小值, 从而求出边界热流向量。这种动态规划方法相对求热传导反问题的其他方法来说是比较直观的, 给计算模型(如集合形状、有限差分或有限元离散、测点的位置和数目、问题的线性或非线性等)提供了较大的灵活性, 计算方法易于实现, 但需要一些程序设计和数据存贮方面的技巧, 计算结果是稳定的。

N. Zabarás 等首先研究了具有相变的一维热传导反问题,给定液体的初始温度及液固交界面上温度、热流和界面的速度随时间的变化关系,待求的是整个区域的外部静止边界上的热流,这个问题等于解两个分离的具有运动边界的热传导反问题,一个在固相,一个在液相。在固相中,他们将热传导方程写成对时间的积分方程形式,然后在两个边界(一个边界的热流已知,另一个边界的热流未知)上对时间进行离散,并且用了 Beck 提出的敏感性系数,使最小二乘法误差函数对未知的热流分量取极小值来求出静止边界的热流分量,在液相中的计算与在固相中的类似。他们的这种边界积分法与求此问题的有限差分法或有限元法相比可看出:计算都在边界上进行,对敏感性系数的计算更直观,且得到的矩阵方程形式与第一类热传导反问题的类似,可引用第一类热传导反问题的研究成果。接着, N. Zabarás 等用边界元法和 Beck 提出的敏感度系数研究了二维热传导反问题。

总体来说,目前热传导中的反问题主要考虑的是构造问题,即由物体初始温度分布以及由物体内部某些点测得的温度分布来确定边界上的温度或热流的变化情况。

3. 弹塑性力学问题

固体力学中弹塑性反问题的研究起步较晚(20 世纪 80 年代后期),但由于它借鉴了热传导领域反问题的研究经验,同时,热传导反问题的研究成果也为研究弹塑性力学反问题创造了条件,因而,对弹塑性反问题的研究一开始就站在较高起点上。

1989 年, A. Maniatty 等借鉴热传导中反问题的研究思想对二维线弹性反问题进行研究,主要讨论利用物体内点的位移反算边界上承受的载荷的有限元法。在分析中引入了灵敏度的概念和正则化技巧,给出了有限元计算公式。他们首先定义了固体力学中的弹塑性反问题是:用在物体内部测得的带有一定误差的实验数据(通常是位移或应变)来求整个物体的位移、应变和应力场(包括边界)。在工程实际中经常会遇到这种问题,因为有时物体的边界条件特别是物体所受的载荷不好确定,给用数值方法计算弹塑性正问题带来困难,须借助实验来确定物体的边界条件,由于在物体与其他物体接触的边界上布置传感器

很困难,实验中通常也只能在物体内部点测量某些量,即使用全息摄影(holography)或斑点干涉(speckle interferometry)这些先进的实验方法测得物体边界上的位移,由于测量数据中不可避免地会有误差,在计算应力或应变(需用到测量的位移数据的微分)时可能会产生显著的精度损失。而且,由于边界条件的计算结果的稳定性有时与内测点有关,因而反问题的计算对实验有指导作用,如预测传感器的最佳数目和位置;通过弹塑性反问题的计算还可进行物体内部残余应变的无损检测。

在此之后,A. Maniatty 和 N. Zabaras 研究了粘弹塑性反问题,给定经历粘弹塑性变形的物体的某些内点的位移历程数据,计算边界上的位移和力的时间历程。他们应用了有限元法以及正则化最小二乘法和将来时间法(future-time technique),敏感度系数以及迭代过程中解正问题的计算比较费时。1989年,N. Zabaras 等用空间正则化技巧和边界元方法研究上述弹性反问题。1990年,Schur D. S 和 Zabaras N 更广泛更详细地讨论了空间正则化技巧在二维弹性反问题中的应用,并提出了一种关键节点法以简化计算。1994年,Michael L 和 Zhiqing Zhou 根据振动测试的数据,采用类似的方法反演层合板的材料参数和层合板的分层位置及分层大小。1995年,沈新普、岑章金和徐秉业利用正则化技巧反演材料的残余强度和弹性模量,获得了与实际十分吻合的结果。1995年,高效伟、马选荣采用有限元反分析方法和边界单元反分析方法反演土壤和岩体的弹性模量、泊松比和原始应力,并取得了与实际测量值相吻合的结果。

4. 识别问题

由于识别问题的复杂性和特殊性,另有一些学者从不同思路研究力学中某些具体的反问题的特殊解法。

1989年,Gao Zhanjun 等利用微观力学中等效力学中等效力学应变场的思想,根据测量获得的表面位移反演由一系列未知载荷引起的损伤区域的残余应变场。结果表明:由等效塑性应变场可以导出等效损伤区的真实应力,同时给出了解的唯一性和稳定性的一些说明。1993年,Yeih Weichung 等研究了有部分超静定边界条件的线弹性反问题,应用正则化方法求解了第一类范德霍姆方程,并证明了解的存在性和唯一性。