

北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

建筑结构人工智能实验 分析环境

潘 登 郭 明 著

科学出版社

北京

科学出版社
职教技术出版中心
www.abook.cn

内 容 简 介

本书在基于实验数据和人工智能方法的建筑结构人工智能实验分析环境的概念基础上，创建了相应的集成分析系统。当一个新结构模型进入建筑结构人工智能实验分析环境时，该模型的行为或反应能够基于现有的实验数据和现场测量数据绘制出来。

本书利用大量工程实例，阐述了建筑结构人工智能实验分析环境的各个组成部分与关键算法，为建筑结构建模与分析提供了有效的技术支撑，并提供了一些初步的思路。作者希望能抛砖引玉，引起各位专家、学者的深入研究。

本书可作为土木工程、建筑设计等学科领域的研究人员及相关专业教师、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构人工智能实验分析环境/潘登，郭明著. —北京：科学出版社，2018.3

ISBN 978-7-03-055561-8

I. ①建… II. ①潘… ②郭… III. ①人工智能-应用-建筑结构-结构试验 IV. ①TU317-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 289141 号

责任编辑：王彦刚 陈将浪 / 责任校对：马英菊
责任印制：吕春珉 / 封面设计：东方人华平面设计部

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

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本：B5 (720×1000)

2018 年 3 月第一次印刷 印张：8 3/4

字数：180 000

定价：52.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换 (C、D))

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135927-2014

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

前 言

长期以来，在结构工程领域，为了精确分析各种工程结构的工作性能和反应，人们提出和引入了各种分析理论及方法，并与时俱进地不断改进，使以有限元为代表的结构数值模拟分析技术日渐强大。但是，两个显而易见的问题一直在挑战目前的结构分析理论与方法：一是结构分析理论与方法，无论是经验公式还是被广泛应用的有限元分析方法，都是建立在一定的基本假设基础之上的，这使得结构的数值模拟结果、结构的实际工作性能和反应之间具有天然的缺陷，导致在许多复杂工程结构分析中误差过大，甚至使数据失效；二是长期积累的数量巨大的现有实验数据仅用于回归分析或检测数值模拟精度，而这些数据中所包含的大量关于结构工作性能与反应的宝贵信息却没有被充分发掘并加以利用，无形中造成了巨大浪费。因此，若想避免由基本假设引进的误差，提高结构分析的精度和有效性，则需寻找能够直接从结构的实际工作行为/反应出发，预测新结构工作行为/反应的结构分析方法；而实验数据的充分利用，则需要发展行之有效的从现有实验数据中进行知识挖掘的方法。

为了解决上述问题，本书第1章在实验数据和人工智能方法的建筑结构人工智能实验分析环境的概念基础上，创建了相应的集成分析系统。建筑结构人工智能实验分析环境由人工智能技术、数据挖掘技术、实验数据、结构构造的数字建模方法，以及一系列匹配结构类似性质和绘制结构行为/反应的匹配准则共同构成。实验数据经过数据挖掘处理，作为适合于人工智能技术运算的数字模式。在给出建筑结构人工智能实验分析环境的概念后，本书依次探讨了建筑结构人工智能实验分析环境的各个组成部分。

第2章提出了建筑结构人工智能实验分析环境数据库的组织方法。此数据库有3个组成部分：①结构行为，在本书中具体是指横向荷载作用下砌体墙板的破坏模式与破坏荷载；②标准化的结构行为，为了集中反映横向荷载作用下砌体墙板破坏模式的特征，将构造类似的墙板破坏模式的主要特征进行归纳，提炼并剔除次生裂纹，得到标准化的墙板破坏模式，称为标准化的结构行为；③结构反应，本书中的结构反应是指各级荷载作用下砌体墙板相应测点的位移值。这样，就构成了知识发现的原始信息源，而且便于将相应的数据挖掘技术引入建筑结构人工智能实验分析环境。

第3章给出了建筑结构人工智能实验分析环境中的两个数值模式：结构工作行为数值模式和结构构造状态数值模式。在探讨结构破坏模式的数据描述方法过程中，引入了广义墙板的概念，从而丰富了相似度概念的特有内涵，并给出了一种定量比较基础模型和新模型破坏模式的方法。在探讨结构构造状态数值模式的过程中，提出了结构构造状态数值模式的两种模型：适于四边简支墙板的细胞自动机模型和基于 FEA

的无量纲化模型。后者以基于有限元分析所得区域位移的无量纲化结果作为数值模式，丰富了建筑结构人工智能实验分析环境结构行为建模的物理意义。

第4章介绍了建筑结构人工智能实验分析环境的两个匹配准则：类似区域匹配准则和结构工作行为匹配准则。本章重点研究了类似区域匹配准则。在类似区域匹配准则的基础上提出了3种加权的匹配准则，并对这3种匹配准则在建筑结构人工智能实验分析环境中的应用效果进行了比较，找出了结构构造条件不同时相应效果最佳的加权匹配准则。

第5章针对细胞自动机模型中新模型的整体性质变异和局部性质及边界约束变异的建模方法进行了探讨，整体性质的变异可通过细胞自动机模型传递系数取值的变化来反映；建立了支持向量机模型，以此求得最优的传递系数取值范围，该范围一旦确定，则新模型的破坏模式即可通过建筑结构人工智能实验分析环境得到；进一步研究了如何通过细胞自动机模型边界条件初始值的变化来反映由于边界条件和较大区域范围内的结构性质的变异。

第6章建立起了3种基于墙板破坏模式预测其相应破坏荷载的神经网络模型，以及基于反向传播、径向基函数和递归注意力的神经网络模型，使得建筑结构人工智能实验分析环境具备预测破坏荷载的功能。

第7章给出了一系列应用建筑结构人工智能实验分析环境预测结构行为的例子，并与相应实验数据进行对比，验证了建筑结构人工智能实验分析环境的有效性。

感谢哈尔滨工业大学土木工程学院周广春教授十余年的悉心指导，没有周教授的指点就没有本书的出版。本书的研究成果受到北京市优秀人才培养资助青年骨干个人项目（项目编号：2014000020124G052）的资助，本书的出版还得到了北京建筑大学学术著作出版基金、城市地下空间与综合管廊研究中心（北京建筑大学）、北京未来城市设计高精尖创新中心和北京节能减排关键技术协同创新中心的大力支持。科学出版社为本书的出版付出了大量精力，在此一并表示衷心的感谢。

本书提出的结构分析技术实现了直接从结构的实际工作行为/反应出发，预测新结构工作行为/反应，并且能够实现从现有实验数据挖掘出所蕴含的丰富知识，从而克服传统结构分析技术的固有缺陷，初步建立起将挖掘出的知识用于新结构行为/反应的预测的建筑结构人工智能实验分析环境。作者希望能抛砖引玉，引起各位专家学者的深入研究。

由于学识和时间的限制，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正！

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 应用现状	2
1.2.1 智能技术在国内土木工程领域的应用	3
1.2.2 智能技术在国外土木工程领域的应用	6
1.3 建筑结构人工智能实验分析环境的研究意义	11
第 2 章 建筑结构人工智能实验分析环境及其数据库与数据挖掘	13
2.1 建筑结构人工智能实验分析环境	13
2.1.1 建筑结构人工智能实验分析环境的概念	13
2.1.2 建筑结构人工智能实验分析环境的构成	14
2.2 建筑结构人工智能实验分析环境数据库	14
2.2.1 结构行为	15
2.2.2 标准化的结构行为	17
2.2.3 结构反应	18
2.3 知识发现方法	19
第 3 章 结构工作行为数值模式与结构构造状态数值模式	23
3.1 结构工作行为数值模式	23
3.1.1 结构工作行为数值模式概述	23
3.1.2 广义墙板矩阵及相似度	25
3.2 结构构造状态数值模式	30
3.2.1 细胞自动机模型	30
3.2.2 基于 FEA 的无量纲化模型	31
第 4 章 类似区域匹配准则与结构工作行为匹配准则	38
4.1 类似区域匹配准则 1	38
4.1.1 数学表达	38
4.1.2 应用结果	39

4.1.3	结果分析	42
4.2	类似区域匹配准则 2	44
4.2.1	数学表达	44
4.2.2	应用结果	45
4.2.3	结果分析	48
4.3	类似区域匹配准则 3	50
4.3.1	数学表达	50
4.3.2	应用结果	50
4.3.3	结果分析	54
4.4	3 种类似区域匹配准则的比较	55
4.5	结构工作行为匹配准则	56
第 5 章	建筑结构人工智能实验分析环境的变异性预测功能	57
5.1	建筑结构人工智能实验分析环境的变异性预测功能简介	57
5.2	不考虑结构边界变异的结构构造与工作行为变异性描述	58
5.2.1	相似度曲线	58
5.2.2	相似度曲线包络线的回归分析	63
5.2.3	包络线系数的支持向量机模型	68
5.3	考虑结构边界变异的结构工作行为变异性描述	71
5.3.1	结构边界变异现象	71
5.3.2	边界变异参数分析	71
第 6 章	建筑结构人工智能实验分析环境中的神经网络模型	78
6.1	BP 神经网络模型	78
6.1.1	神经网络模型的输入与输出	78
6.1.2	BP 神经网络模型的建立	79
6.1.3	BP 神经网络模型的应用	81
6.1.4	BP 神经网络模型应用的精度分析	84
6.2	RBF 神经网络模型	87
6.2.1	RBF 神经网络模型的建立	87
6.2.2	RBF 神经网络模型的应用	89
6.2.3	RBF 神经网络模型应用的精度分析	91
6.3	RA 神经网络模型	94
6.3.1	RA 神经网络模型的建立	94
6.3.2	RA 神经网络模型的应用	94

6.3.3 RA 神经网络模型应用的精度分析	97
第 7 章 建筑结构人工智能实验分析环境的应用	100
7.1 基于结构的标准化工作模式和细胞自动机构造状态模式的预测实例 1	100
7.2 基于结构的试验工作模式和细胞自动机构造状态模式的预测实例 2	102
7.3 基于结构的试验工作模式和 FEA 无量纲化构造状态模式的预测实例 3	104
7.4 基于结构的试验工作模式和细胞自动机构造状态模式的预测实例 4	106
7.5 建筑结构人工智能实验分析环境预测实例讨论及与 FEA 结果对比	108
附录 A 类似区域匹配准则 1 应用结果	110
附录 B 类似区域匹配准则 2 应用结果	115
附录 C 类似区域匹配准则 3 应用结果	120
参考文献	125

科学出版社
职教技术出版中心
www.abook.cn

第1章 绪 论

1.1 引 言

在结构分析发展过程中,经验公式和有限元分析(finite element analysis, FEA)逐渐成为主要的定量分析手段。以本书的研究对象砌体墙板为例,定量分析手段主要为有限元分析和经验公式。有限元分析建模过程复杂,不适合工程应用;经验公式精度较低,且影响砌体墙板强度的因素很多,离散性强。砌体结构的复杂性使得许多研究都偏于定性,甚至一些学者仅给出了试验现象的描述,而未建立任何分析模型。不仅砌体结构如此,由非均匀各向异性材料建造的结构分析都存在该问题。因此,建立能够直接从结构的实际工作行为/反应出发,预测新结构工作行为/反应的方法十分必要。这种从现有实验数据进行知识挖掘的方法不仅能够克服有限元分析局限于既有规律的缺点,而且适用于分析影响因素多、定量分析表达式常为隐函数的问题。

同时,随着计算机技术的发展,人工智能技术,如神经网络、细胞自动机、支持向量机等,在结构工程中的应用日益广泛。它的迅猛发展主要归结于以下优点:

1) 传统的结构分析方法在进行结构分析的过程中主要依赖对本构关系的假设,而在非线性工作状态下,结构的本构关系很难给出准确的显示表达,这就使得应用传统结构分析技术对结构进行非线性分析的偏差很大,乃至失真。而人工智能技术,如反向传播(back propagation, BP)神经网络,已经被证明能够以任意精度逼近任意函数,因此特别适合用于解决非线性问题,并能够取得较为精确的分析结果。

2) 人工智能技术能够有效地应用于各类结构工作行为/反应的分析求解,通过与传统结构分析技术应用范围进行比较可分为两类:一类是传统结构分析技术也能够实现的功能,包括结构风险评估^[1]、结构健康监测与损伤诊断^[2-5]、结构信号处理^[6]、材料强度预测^[7]、结构变形与开裂预测^[8,9]、结构与构件承载能力预测^[10,11]、结构耐久性分析、结构稳定性分析^[12]、地下工程分析^[13]、岩土工程^[14-22]、预应力结构应力分析^[23]、结构损伤识别^[24]等;另一类是传统结构分析技术不能实现的功能,如高层结构人员疏散^[25]、震后次生灾害分析^[26]等。

3) 人工智能技术是数据挖掘技术的三大支柱之一,具备对大量数据进行挖掘从而得到有价值的潜在信息,并对这些信息进行学习的能力。因而,通过人工智能技术能够根据材料的真实性质或结构的行为/反应预测出相应的材料性质或新结构的工作行为/反应。

但值得注意的是,尽管人工智能技术在结构工程中的应用发展势头迅猛,但始终

停留在科学研究的阶段，而很少用于实际工程应用。造成这一现象的原因可归纳为以下几点：

1) 人工智能技术应用于结构分析时机理性和确定性差，有时不能得到较传统分析技术更加精确和可靠的分析结果，加上人工智能技术固有的复杂性，因此人工智能的应用目前有限。

2) 现有的实验数据和记录都是根据传统的结构分析方法进行设计的，没有考虑应用人工智能技术进行结构分析的需要，因而，将人工智能技术应用于结构分析的研究人员需要先行调整人工智能技术以适应现有的实验数据，以便使现有的数据和记录能够尽可能地被充分利用。这种情况在某种程度上限制了人工智能技术在结构分析中的应用与发展。

3) 在许多例子中，结构和材料的性质变异十分明显，因为结构通常是由不同材料构成的，如砌体结构，这一变异现象更是明显。要在这种结构中有效地应用人工智能技术需要大量的实验数据，导致人工智能技术的应用成本十分高昂。这一昂贵的技术很难被使用者认为是合理的。

4) 目前，基于人工智能技术的结构分析方法的外延性功能不强，其适用范围不能超出构成智能技术模型的基础数据（实验数据或数值模拟数据）所适用的范围。因此，如何突破这种基础数据的限制，是人工智能技术研究的难题之一。

5) 目前所建立的众多人工智能模型，在结构分析中已经展现出其特有的、不同于传统分析方法的功能，但人工智能技术模型中大量参数的相互作用，可能会使很多应用人工智能的模型给出类似的结果，使得使用者很难判断哪个模型更适用某一具体问题。

6) 虽然人工智能技术已经被成功用于解决许多科研和工程问题，已衍生出诸多功能不同的方法种类，且它们的适用情况、算法及优缺点均有不同，但是在结构工程领域中，实际上还未形成能够完整地解决复杂结构工程问题的系统的人工智能技术方法。也就是说，人工智能技术的应用还未发展成根据结构的构造、工况等信息自动选择合适的分析手段，从而计算出结构各种工作行为/反应的结构分析系统。

通过对人工智能技术在结构分析中应用的优势与困难的分析可以看出，为了扬长避短，必须要提出一种能够将人工智能技术有机结合起来并且便于操作的系统，从而简化人工智能技术在结构分析中应用的复杂性，同时降低应用成本，自动实现人工智能技术模型和人工智能方法的选择，将人工智能技术系统地组织起来，使其更好地应用于结构分析领域。

1.2 应用现状

近年来，为了实现基于实验数据直接预测结构的性能，智能技术已在结构工程中

得到大量应用,如人工神经网络(artificial neural network, ANN)、细胞自动机(cellular automata, CA)、支持向量机(support vector machine, SVM)、基因遗传算法(genetic algorithm, GA)和结合智能技术的数据挖掘(data mining, DM)技术。下面就国内外直接与试验或统计数据相关的智能技术研究结果进行简要介绍。

1.2.1 智能技术在国内土木工程领域的应用

1. 细胞自动机在国内土木工程领域的应用

细胞自动机是一种离散的动态数学体系,并被用于许多物理与工程体系的建模。通常,细胞自动机被用来作为基于偏微分方程的复杂模型的备选方法。由于位置均匀、空间规则等属性,细胞自动机模型能够在并行硬件上高效地实现。同时,细胞自动机模型能够密集地利用记忆处理时间。因为它能够在短时间内实现并且不需要特殊的硬件,因此细胞自动机模型的应用范围十分广泛^[27]。国内细胞自动机在下述工程领域的应用情况如下:

(1) 岩土工程

1996年,许强等建立了模拟岩石砂裂过程中所表现出的累进性破坏及无序向有序演化等特征的内在机理的细胞自动机模型^[28]。

2002年,周辉等基于能量守恒定律和岩石的基本力学性质,利用细胞自动机模型模拟了非线性阶段岩体的破坏过程^[29];同年,他们又根据岩体的结构与破坏特征,建立了一种二维物理细胞自动机(physical cellular automata, PCA)的基本模型^[30, 31]。

2003年,李明田等提出了一种物理细胞演化力学模型(evolving cellular automata, ECA),并将该模型与遗传算法结合起来^[32]。

2005年,王士民等利用代表张量和纯量的两类细胞共同形成细胞空间,从而实现了对脆性岩石材料加载及破坏过程的模拟^[33]。

2006年,周辉等建立起用于模拟应变软化岩石类材料单轴压缩破坏过程的平面弹塑性细胞自动机模型,并在细观上对相应压缩破坏过程进行了研究^[34]。

2006年,潘鹏志等建立了模拟岩石试样的应变软化行为的细胞自动机模型,该模型应用了弹脆塑性理论和细胞自动机自组织理论^[35]。同年,王士民等对岩石的非均匀性进行了初步的探讨,并在研究过程中采用了演化细胞自动机方法^[36]。

2006年,周辉等利用细胞自动机模型实现了对岩石破裂过程的弹塑性和应力-渗流耦合的模拟,并将该细胞自动机模型用于对岩石声波发射活动的 Kaiser 效应等现象的分析^[37]。

2007年,潘鹏志等利用自行独立提出的弹塑性细胞自动机模拟系统,进行了开挖损伤区近场模型域的程序校验^[38]。

2011年,潘鹏志等建立起三维弹黏塑性细胞自动机模拟系统,用于岩石蠕变过程分析^[39]。

(2) 混凝土及木结构

2006年,吕海波等建立了模拟复杂的碳化现象的细胞自动机模型^[40]。

2006年,周尚志等根据混凝土的结构与破坏特征建立了二维物理细胞自动机的基本模型,并根据能量传递的原理,模拟混凝土结构中裂纹发展的过程^[41]。

2008年,安彧等采用神经网络技术,并与细胞自动机结合,建立了研究古建筑物理性质变化的模型,并通过神经网络预测出木质结构细胞自动机模型中各细胞的灰度变化,得出古建筑木质构件受损情况随时间的变化规律^[42]。

同时,细胞自动机也应用于结构性能的安全出口设计^[43]、岩土力学性能分析^[44]等。

从上述文献可知,国内细胞自动机在结构工程中的应用主要集中于岩土工程分析,也有个例用于木结构或混凝土结构。在这些分析中,细胞自动机主要用于特指效应的动态扩散/传递过程模拟。但值得注意的是,细胞自动机的分析过程虽然与传统技术不同,但其对结构的分析也是建立在应力-应变分析的基础之上的。也就是说,国内结构分析中所使用的细胞自动机由于本构关系的使用,与传统 FEA 方法相同,都引入了天然误差。

2. 支持向量机在国内土木工程领域的应用

支持向量机在国内结构工程领域的应用尚不广泛,例子较少。

2007年,He等将小波变换分析和支持向量机模型结合起来,实现了对梁和平板结构破坏位置的估计^[45]。

2008年,Zhao首次提出了将支持向量机和一次二阶矩法结合起来的可靠度分析方法。他将大量由一次二阶矩法进行传统分析所得的数据作为支持向量机的输入进行训练,得到功能函数的显式表达式及相应的偏微分量^[46]。

2008年,Dong等提出了模拟和预测结构非线性反应的支持向量机模型。研究表明,Dong等建立的支持向量机模型泛化性和精度良好,为结构非线性反应分析和预测提供了有效的分析模型^[47]。

2010年,Yan等用支持向量机预测普通和高强混凝土的弹性模量,并将支持向量机的预测结果与试验结果进行了比较。在Yan等的研究中,混凝土的抗压强度被用作支持向量机模型的输入。他们通过比较发现,在众多方法建立起的模型中,支持向量机模型具有较高的精度^[48]。

从上述资料中可以看出,在国内的结构分析领域,支持向量机的应用具有以下特点:

- 1) 支持向量机在国内被用于结构分析的例子还较少,处于起步阶段。
- 2) 支持向量机良好的泛化性和精度已经在结构分析领域引起了一定重视。

3) 支持向量机无论是用来回归还是预测,其输入数据都是由传统的结构分析方法得到的,这就决定了这些研究中支持向量机的应用没有突破传统结构分析技术的局限,仅仅促进了传统分析技术的推广和改进。

3. 神经网络在国内土木工程领域的应用

在国内,神经网络被广泛应用于结构工程领域用来解决各种问题。

2002年,许传华等建立了以岩体抗剪强度指标为输入的人工神经网络模型,用于边坡稳定性预测^[49]。

2003年,徐敏等对比了模糊综合评价和人工神经网络,将燃气管道、可燃物品、文化水平、消防管理、消防培训等因素作为输入,建立了结合遗传算法和神经网络的建筑火灾风险评价模型^[50]。

2006年,赵洋等改进了BP神经网络模型,并将其应用于结构损伤检测与识别^[51]。

2009年,陈建功等提出了小波神经网络模型,并使用该模型计算锚杆侧刚度因子,为评估锚杆系统的锚固质量提供了一种有效的智能化手段^[52]。

2010年,冷艳玲等建立了根据锈胀裂缝宽度预测钢筋锈蚀率的BP神经网络模型,并通过与线性拟合法比较,证实了BP网络模型具有更高的精度^[53]。

同时,神经网络被广泛地用来进行结构参数分析、结构风险评估^[1]、结构健康监测与损伤诊断^[2-4]、结构信号处理^[5]、材料强度预测^[6]、结构变形与开裂预测^[7,8]、结构与构件承载能力预测^[9,10]、结构耐久性分析、结构稳定性分析^[11]、地下工程分析^[12]、岩土工程^[13-21]、预应力结构应力分析^[22]、结构损伤识别^[23]等。

研究实例表明,在国内,神经网络在结构分析领域主要被用于非线性函数或多变量函数的拟合,即寻找参数之间的关系,因为神经网络能够以任意精度逼近任何函数,并且不需给出函数的显示表达,因而适用于多因素共同作用的情况。但需要注意的是,虽然神经网络在国内的结构分析领域已有广泛应用,并已经实现与其他智能技术(如遗传算法等)的共同使用,但这些手段只是为了改善和提高现有神经网络模型的精度,而从未试图更进一步发掘人工智能技术在结构分析上的潜力,提高机理分析的功能。

4. 数据挖掘技术在国内土木工程领域的应用

2003年,张治强等对边坡实例数据进行了分析,通过数据挖掘技术挖掘出实例数据中蕴含的潜在信息,在此基础上建立了用于预测岩质边坡稳定性的智能模型系统^[54]。

2005年,杨小兵等应用数据挖掘技术对广州中信广场大厦的实测数据进行了分析,并对该原型实测风致响应的数据进行了相似性挖掘,发现了一些特征和规律,对该领域的进一步研究具有一定的参考价值^[55]。

可见,随着数据挖掘技术的发展,其在结构工程领域也逐渐有了一些应用。研究者利用数据挖掘技术对现场测试和监测资料进行分析,挖掘出有关结构行为/反应的规律。然而,由于相关分析方法的缺失,所挖掘出的结构工作行为/反应的规律并未进一步用于新结构工作行为/反应的预测。

1.2.2 智能技术在国外土木工程领域的应用

1. 细胞自动机在国外土木工程领域的应用

与国内相比,细胞自动机在国外的应用范围十分宽广,被广泛应用于结构工程各种结构类型的各类问题的解决。

2000年,Toyoda等利用细胞自动机提出了新的结构优化方法。该方法的设计范围被划分成正方形细胞,当用有限单元法进行应力分析时,这些细胞被认为是有限单元法的单元。Toyoda等将细胞单元的厚度作为变量,优化目标使结构质量最小。为了建立更新细胞状态的局部规则,他们还引进了特殊的边界条件^[56]。

2004年,Biondini等提出了一种新方法对混凝土结构在侵蚀性环境下的耐久性及使用寿命进行评估分析。该方法主要针对梁与框架,同时也能够推广到其他结构性质中去。他们用细胞自动机对侵蚀剂的扩散过程进行建模,并将该方法用于现存的拱桥的主要构件中,从而证实了该方法的可靠性^[57]。

2005年,Kicinger等提出了一种新方法建立复杂结构体系的模型,并对具有代表性的钢结构体系进行研究。这些有代表性的体系的设计理念是利用各种不同的细胞自动机来产生高层钢结构。研究表明,这种利用细胞自动机产生的具有代表性的体系能够创造出与传统方法所得完全不同的结构形状模式。同时,这种体系也显著改善了进化算法对结构体系的优化性能^[58]。

2005年,Canyurt等提出了基于计算机实现利用细胞自动机进行结构分析与设计的方法。该方法假设一个计算空间能够被离散成一系列的细胞,并且每个细胞都与一定的状态变量相联系。总体来说,这些细胞的状态定义了整个计算领域的状态,并能够通过定义每个细胞周围邻居的局部规则进行演化。同时,Canyurt等利用所提出的方法进行了结构的模拟分析和优化^[59]。

2008年,Leamy提出了基于物理学的细胞自动机计算方法,并将其用于建立理想线性弹性介质的地震动事件。为了保证细胞自动机能合理建模,他们对自由边界进行了简单处理。他们将细胞自动机的计算结果(如压力、剪力和表面波)与交错单元有限差方法进行对比发现,两种方法的结果十分吻合。同时,计算结果还表明,细胞自动机方法的计算结果在左侧和右侧振动波的作用下更加对称。同时Leamy还指出,细胞自动机方法将来还可用于大规模模拟、多分辨率分析和交叉研究领域等的建模^[60]。

2010年,Chen等提出了“半确定性”的桥梁动力分析模型,并利用细胞自动机模拟车辆流产生的动荷载,进而成功建立起考虑了桥梁、风与随机模拟的真实交通情况产生的车辆荷载三者相互作用的系统,克服了传统典型的大跨度桥梁风振研究通常不同时考虑交通荷载的影响而导致的对桥体的动力特性预测所产生的偏差^[61]。

2011年,Biondini等提出了一个新的非线性FEA模型,并将其用于分析混凝土

结构遇火的反应。该模型使用了进化算法——细胞自动机来描述热传递的过程，并在热传递过程和结构分析过程中建立了有效的连接。该模型被用于分析加强混凝土基于温度的特性，取得了良好的精度^[62]。

2014年，Qiao等建立了一个定量的三维细胞自动机模型预测算法，并基于实时电化学噪声分析进行了加固混凝土结构的点蚀监测^[63]。

同时，细胞自动机还被用于解决非线性动力分析^[64]、结构可靠性分析^[65]、高层结构人员疏散^[25]、震后次生灾害分析^[26]、结构设计^[66]、结构优化^[67]、结构在侵蚀性环境下的工作性能分析^[68]、地震动特征建模^[69]、结构设计^[70]等问题。

可见，与细胞自动机在国内结构分析领域的研究相比，其在国外结构分析领域的应用具有如下特点：

1) 应用更加广泛，被用来解决的问题更加多样，不仅包括结构动态过程的模拟，还包括结构与周围环境的相互作用。

2) 建立的细胞自动机模型不仅针对结构个体，还包括如震后次生灾害分析等全局性模拟。

3) 与国内结构分析领域应用细胞自动机情况相同，国外利用细胞自动机对结构进行分析也基于传统基本假设，因此没能解决基本假设所携带的天然误差。

2. 支持向量机在国外土木工程领域的应用

在国外的结构分析研究工作中，支持向量机的应用也比较广泛。

2006年，Tang等用连机顺序权重的最小二乘支持向量机（least squares support vector machine, LS-SVM）技术来识别当振动数据包括破坏事件时结构的参数及其变化。当新的样本输入或移出训练集合时，它能够通过增长更新和消耗修剪算法高效地更新训练好的LS-SVM模型，同时，方法的鲁棒性也能够通过附加的LS-SVM同步得到改进^[71]。

2007年，Rocco等提出了利用支持向量机对核电站瞬态进行分类的方法。该方法将单一和多类支持向量机结合起来测量数据区分核系统分级结构中的瞬态，并给出了一个用于区分供水系统沸水堆反常与故障的例子，从而证实了该方法的可靠性^[72]。

2008年，Pal等提出了一个基于支持向量机的回归方法，利用混凝土旋制管桩动力应力波数据预测静力桩承载力。高斯核与多项式核支持向量机被用来建立所有桩承载力的模型^[73]。

2008年，Basudhar等提出了基于支持向量机计算结构极限状态函数的方法。该方法致力于解决表现出不连续反应和节点破坏的可靠性评估中所遇到的困难。所提出的基于支持向量机的结构极限状态函数能够简便地计算失效概率，并能将特定的系统行为与设计空间联系起来^[74]。

2009年，Basudhar等利用支持向量机预测了高压喷射材料的单周受压强度^[75]。高压喷射是很多土体改进的较好的处理技术。然而，高压喷射缺少设计原理和质量控

制,因此,高压喷射工程都由经验规则进行设计,导致设计十分保守。发展机理模型来模拟高压喷射过程中的不同参数来满足工程项目中安全性和经济性的要求具有十分重大的意义。

2009年, Li 等用支持向量机建立模型,预测建筑逐时冷却荷载。他们利用该模型分析广州移动办公楼,并将结果与传统 BP 神经网络所得结果进行对比,发现支持向量机预测具有更好的精度和泛化性^[76]。

2010年, Cheng 等提出了人工智能混合系统。工程项目本身具有挑战性,工程决策经常要在复杂和不确定的工作条件下作出决定。由于许多决定都需要根据有限信息通过直觉进行判断,因此,正确的决定主要依靠两个因素:专家和之前工程中积累的知识,但这些知识受多种因素的影响,其精度大大降低。研究表明,人工智能技术具有克服这些影响因素的潜力。模糊支持向量机模型是一种包括模糊逻辑、支持向量机和基因遗传算法的人工智能混合系统,其发展为利用经验知识提供了备选方法。两个实际应用的例子证实了人工智能混合系统在建筑工业应用中的有效性^[77]。

2014年, Kordjazi 等提出了支持向量机模型,并根据静力触探数据预测桩基的轴向极限承载力。比较结果证实, Kordjazi 等提出的支持向量机模型的分析结果较传统方法更佳^[78]。

另外,支持向量机也可用来进行对比分析^[79]、工程资料管理^[80]、桩身承载力分析^[81,82]、系统识别^[83]、结构健康监测、地基沉降计算^[84,85]、桥梁结构分析^[86,87]、结构控制^[88]、边坡稳定性分析^[89,90]、结构识别^[91-94]、材料强度计算^[95-97],这里不再一一列举。

上述资料证明,支持向量机在国外结构分析领域的应用具有以下特点:

1) 支持向量机在结构分析领域的应用十分普遍,广泛用于各类结构各种问题的分析当中,并被证明在很多结构分析问题中能够取得比神经网络更优的分析结果。

2) 在这些结构分析过程中,支持向量机都是被用来进行回归和拟合,从而给出解析方法无法给出的相关问题的函数表达,但支持向量机的输入数据很少是实测或实验数据。也就是说,支持向量机作为传统分析方法数据的后处理技术,没能实现直接从实验数据或实测数据出发直接预测结构的工作行为/反应的功能。

3. 神经网络在国外土木工程领域的应用

在国外的人工智能技术中,神经网络的应用范围最为广泛。

2005年, Georgy 等利用神经模糊智能系统来预测结构的工程性能。神经模糊系统由人工神经网络和模糊控制系统组成。Georgy 等重点探讨了神经模糊智能系统的应用,尤其是模糊神经网络在预测结构工程性能方面的应用。该系统的发展建立在通过调查问卷方式得到的实际工程数据之上。预测所得的工程性能通过统计变量的压缩技术进行进一步分析得到线性回归模型^[98]。

2006年, Gupta 等应用神经网络以期得到混凝土强度的预测效果,相应的输入参数为混凝土配合比设计、试件的大小和形状、加工技术和时间、环境情况等。他们用

864 种试件来检验神经网络模型, 为了从现有知识中提取训练样本, 还建立了基于人工智能的分析系统。结果表明, 智能技术在预测混凝土强度方面具有很高的精度^[99]。

2008 年, Joghataie 等人在应用 Prandtl-Ishlinskii 接线器的基础上提出了一个新型的激活函数, 并使用前馈型神经网络来改进它的学习能力, 以便识别与分析非线性结构在动荷载作用下的屈服情况。神经网络的训练过程采用基因遗传算法。训练好的 Prandtl 神经网络可以用于分析单个自由度和三自由度的剪切型框架, 这两个框架均可承受地震荷载。该方法通过神经网络的训练, 实现了直接从已有实验数据学习结构的行为, 并且实现了智能化的结构主动控制, 同时能通过神经网络预测出未来结构的反应, 从而决定结构主动控制所需的控制力^[100]。

许多结构设计问题都需要优化一系列矛盾的工程目标, 如建筑时间与造价的最小化, 安全性、质量和可靠性的最大化。为了优化这些结构问题, 许多研究者进行了一系列多目标优化算法的研究。2010 年, Kandil 等提出了多目标的基因算法, 将其用于结构设计问题的优化并取得了良好的效果^[101]。

2011 年, Ceylan 等利用神经网络对热沥青混合路面的应力强度系数进行了研究。压制路面中反射裂缝是热沥青混合物刚性与柔性路面的主要破坏原因, 虽然很多传统技术都被用来减少反射裂缝, 但反射裂缝的机理与原因始终没有被研究清楚。裂缝的研究机理被用来理解变化应力作用下工程构件裂缝的产生与发展, 应力场强度系数被用来描述裂缝尖端的应力状态。在材料性质已知的情况下, 这些系数可用来计算裂缝在线弹性范围内的发展速率。但应力强度因子的计算或测量十分困难, 尤其是当裂缝处在一个非常复杂的三维几何体中或是复杂的应力状态下。Ceylan 等利用神经网络成功地建立了模型, 并计算了当热沥青混合物中裂缝在温度与荷载作用下发展时, 应力强度因子的数值, 取得了良好的效果^[102]。

2013 年, Abdalla 等提出了采用 7 个神经网络模型根据能量耗散来预测钢筋的疲劳寿命, 经证实提出的神经网络模型能够利用能量作为输入参数, 准确地预测冷轧钢筋的疲劳寿命^[103]。

神经网络还应用于结构优化^[104,105]与结构识别^[106]、材料性质分析^[107,108]、结构行为预测^[109,110]、边坡稳定分析^[111]、地震动预测^[112-114]、构件承载力分析^[115]、结构易损性分析^[116]、构件识别^[117]、结构检测^[118]、项目管理^[119]等方面。

国外结构分析领域对神经网络的应用与国内情况类似, 但值得注意的是, 个别研究者已经提出了利用神经网络实现“直接从已有实验数据学习结构的行为”, 同时能通过神经网络预测出未来结构的反应。也就是说, 基于人工智能技术, 通过实验或实测数据直接预测结构反应的方法已经在个别问题中取得成功, 但相应的研究者并没有充分意识到这一方法在结构分析领域所取得突破的重要意义, 更没能深入下去将这种方法发展成为一个完整的结构分析体系。

4. 数据挖掘在国外土木工程领域的应用

数据挖掘技术现在是国外结构分析研究领域的热点之一。

2006年, Wang等提出了一种混合算法来挖掘结构系统的破坏模式。该算法结合了已有数据挖掘算法进行模式识别的能力及基因遗传算法, 从而实现了新领域的发掘^[120]。

2011年, Miranda等首创了用知识发现(knowledge discovery in database, KDD)程序来分析岩石的工作机理, 基于大量的地质数据, 通过提取有价值的信息, 为新模型的强度参数和变形参数赋值^[121]。

2011年, Kao等提出了一个数据挖掘模型, 并根据基本的设计参数来预测学校建筑的抗震能力^[122]。

2011年, Ahmed等利用数据挖掘技术研究了结构特征和设计 with 结构性能的关系, 并求得结构适用性和节能的最佳关系^[123]。

2011年, Saltan等建立了基于数据挖掘的反算模型, 并利用该模型计算沥青跑道的弹性模量和泊松比, 从而对其进行无损评估^[124]。

2016年, Bilal等就大数据技术在建筑领域的应用进行了详尽的研究。Bilal等查阅了美国土木工程师协会、电气和电子工程师协会、美国计算机协会和爱思唯尔数据库等的数据库中已经发表的研究成果, 得出结论: “大数据技术在建筑行业的应用仍处于初级阶段, 远远落后于其他领域的应用进展”^[125]。

数据挖掘技术也应用于构件强度估算^[126]及复杂情况下的参数分析^[121]。

根据以上资料可知, 数据挖掘在国外结构分析领域中的应用更加深入。挖掘的结构相关信息能够有效地指导进一步的结构分析。

5. 遗传算法在国外土木工程领域的应用

遗传算法常与其他人工智能技术共同使用, 解决各类非线性问题或结构控制问题。

2008年, Joghataie等研究了主动控制的有约束砌体墙板的非线性反应, 并建立了数字模型对其进行模拟。该研究的目的是降低砌体墙板在地震作用下发生屈服时的破坏程度。该研究使用了一个主动控制结构, 包括预应力结构和激励器; 在Wilson同步线性优化控制方法的基础上提出了一个非线性控制算法并加以应用; 为了取得最佳效果, 性能指标(如位移、速度、加速度和控制力)都通过分布式的基因遗传算法进行优化, 通过该算法设计的控制器在所有的试验中都取得了良好的结果, 即使在地震强度很大的情况下仍然适用^[127]。

2014年, Cheng等利用基因加权塔型运算数来建立模型, 以解决预测高性能混凝土抗压强度的问题, 从而丰富了基因运算树的组成^[128]。

遗传算法技术也广泛用于解决土木工程各种结构所遇到的各类问题, 如地震工程

及灾后重建模型^[129]、结构控制与监测^[118,130]、损伤识别^[131]、结构识别^[117,132]、结构评估^[133]、结构优化设计^[134]。

与支持向量机和神经网络相同，遗传算法虽在结构分析中应用很多，但研究者并没有从结构分析原理的高度重新审视其在结构分析中的应用。

国内外的研究人员利用智能技术实现了函数回归、结构的工作行为/反应特征挖掘及动态过程模拟等功能。也有个例使用人工智能技术从结构的实际工作行为/反应出发，直接预测结构可能出现的反应，但人工智能技术使用的基本假设仍与传统结构分析技术一致，或者数据仍然由传统结构分析技术产生，因此人工智能技术仍主要是传统结构分析技术的附属。可见，在过去的研究中，研究者利用人工智能技术在结构分析领域已经进行了大量的尝试，并进行了丰富的理论基础储备，却并未最大限度地挖掘出这些理论的潜能。

通过神经网络、支持向量机或遗传算法等的应用情况也可以看出，虽然个别研究者具有通过人工智能技术，直接根据结构的真实工作行为/反应预测结构可能出现的结构/反应的潜在期望，但没有明确这种期望对结构分析的变革性意义，更没能将人工智能技术与传统的结构分析方法整合成为有机的体系。

1.3 建筑结构人工智能实验分析环境的研究意义

综上所述，本书在实验数据和人工智能方法的建筑结构人工智能实验分析环境的概念基础上，创建了相应的集成分析系统，克服了传统结构分析技术的一些缺陷，更充分地发掘和应用了实验数据所包含的结构行为/性能信息，充分发挥了人工智能技术的优势，有力地推进了人工智能技术在结构分析中的应用。建筑结构人工智能实验分析环境的研究意义主要在于：

1) 建筑结构人工智能实验分析环境具有富于创新意义的理论价值，将促进结构分析的发展和创新，特别是基于结构性能实验数据对结构性能进行建模分析的方法，将为各种复杂工程结构问题的分析开辟新的途径。

2) 在工程应用中，本书所建立和发展的集实验、经验、机理于一体的结构分析方法，将加深对结构性能的认识，在工程上意味着带来可观的经济效益。

3) 构建出的初级建筑结构人工智能实验分析环境，使实验数据蕴含的知识得以充分挖掘，并能用于匹配新结构模型的部分实验结果。同时，建筑结构人工智能实验分析环境对结构变异现象的良好模拟，使得匹配出的新结构模型的行为不仅限于现有实验数据的内插，还能够根据现有实验数据进行外推。这将节省可观的研究经费和获取更多的结构模型工作信息，从而提高实验研究的效益。

4) 本书提出的建筑结构人工智能实验分析环境系统不仅利用了人工智能技术，同时也借鉴了传统分析技术对结构状态的描述。也就是说，建筑结构人工智能实验分

析环境是一个开放系统，在充分利用人工智能技术优点的同时并不排斥利用传统技术，这为传统技术和智能技术的有机结合找到了良好的切入点。

5) 建立起的结构分析系统实现了直接从结构的实际工作行为/反应出发，预测新结构工作行为/反应的功能；并且能够实现从现有实验数据挖掘出所蕴含的丰富知识，从而克服了传统结构分析技术的固有缺陷，初步建立起了将挖掘出的知识用于新结构行为/反应预测的建筑结构人工智能实验分析环境，为科研人员和结构设计人员提供了有力的结构分析工具。

科学出版社
职教技术出版中心
www.abook.cn

第2章 建筑结构人工智能实验分析环境 及其数据库与数据挖掘

在第1章介绍的智能技术应用成果基础上,本章将首次在建筑结构人工智能实验分析环境的概念基础上,创建相应的集成分析系统。建筑结构人工智能实验分析环境是将人工智能技术与结构的实验数据库结合起来的产物,其进行的结构分析既是基于机理的,也是基于经验的。建筑结构人工智能实验分析环境最重要的功能是能够根据几个试验模型图构/预测出新模型的行为/反应,特别是还有其相应的变异情况。在给出概念的同时,本章将介绍建筑结构人工智能实验分析环境的构成元素,并对构成元素中的实验数据库及数据挖掘部分进行详细介绍。

在明确了“建筑结构人工智能实验分析环境”的概念之后,需要考虑的问题就是构建建筑结构人工智能实验分析环境的具体方法。本章将探讨作为建筑结构人工智能实验分析环境信息来源的数据库的构成方式。由于数据库并非实验数据及场地实测数据的简单堆积,而是对数据进行有序管理和组织,能够为新模型提供清晰明了的信息,因此,本章将给出数据库组成的3个部分及相应的数据处理方法。

同时,本章还将介绍在建筑结构人工智能实验分析环境中,从数据库中挖掘关于结构新知识的过程——数据挖掘。数据挖掘的过程赋予了建筑结构人工智能实验分析环境从现有的数据库中挖掘有用信息的能力,也正是由于进行有关数据挖掘,才激发了建筑结构人工智能实验分析环境的概念。

2.1 建筑结构人工智能实验分析环境

2.1.1 建筑结构人工智能实验分析环境的概念




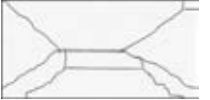



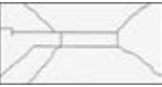

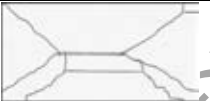


智能技术、数据挖掘技术、实验数据和场地实测数据、结构构造状态数值模式构造方法,以及一系列用来匹配结构性质类似的准则、图构/预测结构行为/反应的准则等,共同构成了建筑结构人工智能实验分析环境。实验数据通过数据挖掘技术进行处理,然后成为适合人工智能利用的数字模型。当一个新的/未知结构模型被置于这个建筑结构人工智能实验分析环境当中时,它的工作行为或反应,也可称为它的试验表达,就可以根据现有的实验数据和场地实测数据被图构或预测出来。

建筑结构人工智能实验分析环境分析系统进一步探索了实验数据和人工智能在结构分析的高非线性和其他难题中的应用,如结构的破坏模式与破坏荷载之间的关系,以及怎样对结构的行为进行建模等。



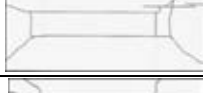






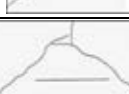


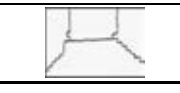
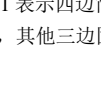
2.2.1 结构行为

表 2-1 给出了一些 Lawrence 取得的实验墙板的破坏模式、墙板尺寸、破坏荷载及标准化破坏荷载。

表 2-1 砌体墙板的实验数据库

边界类型	墙板编号	破坏模式	墙板尺寸 长×高/ (m×m)	破坏荷载 / (kN/m ²)	标准化破坏荷载 / (kN/m ²)
1	Test12		2.5×2.5	8.6	0.76
1	Test16A		2.5×2.5	8	0.71
1	Test22		2.5×5	4.7	0.42
1	Test8		3×6	3	0.27
2	Test13		2.5×2.5	9.1	0.81
2	Test37		2.5×2.5	10.7	0.95
2	Test20		2.5×3.7	5.2	0.46
2	Test23		2.5×5	5.5	0.49
2	Test31A		2.5×6	4.2	0.37
2	Test6		3×6	4.4	0.39
2	Test14		3×6	11.3	1
2	Test38A		2.5×2.5	9	0.80

续表

边界类型	墙板编号	破坏模式	墙板尺寸 长×高/ (m×m)	破坏荷载 / (kN/m ²)	标准化破坏荷载 / (kN/m ²)
3	Test19A		2.5×3.7	4.8	0.42
3	Test24		2.5×5	5	0.44
3	Test30		2.5×6	4.7	0.42
3	Test9		3×6	2.5	0.22
3	Test16B		2.5×2.5	8	0.71
3	Test21		2.5×3.7	3.9	0.35
3	Test25A		2.5×5	2.5	0.22
4	Test29A		2.5×6	2.4	0.21
4	Test15		2.5×2.5	7.8	0.69
4	Test17		2.5×3.75	3.4	0.30
4	Test10		3×6	1.7	0.15
4	Test36		2.5×6	1.9	0.17
5	SB01		2.475×5.615	2.6	0.23
5	SB06		2.45×2.9	7.0	0.62

注：边界类型中数字表示以下含义，1表示四边简支；2表示四边固支；3表示顶端与底部固支；4表示顶端自由，其他三边简支；5表示顶端自由，其他三边固支。

2.2.2 标准化的结构行为


表 2-2 给出了对表 2-1 中的破坏模式进行标准化处理得到的破坏模式数据。处理过程中,滤除了次生裂纹,提取了构造相似、尺寸相同的墙板破坏模式的特征主裂纹。在这一过程中,墙板的约束条件被简化为两种情况:①四边约束;②顶端自由、三边约束。

表 2-2 标准化的实验数据

板号	边界约束	墙板尺寸 长×高/(m×m)	试验墙板破坏模式源	标准化的破坏模式
1	四边约束	2.5×5	 Test22 Test23 Test24	
2	顶端自由、三边约束	2.5×5	 Test26	
3	四边约束	2.5×6	 Test30	
4	顶端自由、三边约束	2.5×6	 Test29A Test36	
5	四边约束	3×6	 Test9 Test7A Test6	
6	顶端自由、三边约束	3×6	 Test10	
7	四边约束	2.5×2.5	 Test12 Test14	

表 2-3 给出了待测墙板的构造条件(因为是新模型,破坏模式待预测,所以“标准化的破坏模式”中的方框为空心)。在后面的研究中,为了记录简单,将“由基础模型×预测所得新模型×的破坏模式”(×表示模型号)进行简写,如“由基础模型 1 预测所得新模型 1 的破坏模式”记为“B1-N1”,其他编号可以此类推。

表 2-3 新模型构造

板号	边界约束	墙板尺寸 长×高/(m×m)	对应的试验墙板	标准化的破坏模式
新模型 1	四边约束	2.5×2.5	Test12、Test13、Test14、 Test37、Test38A、Test38B	

续表

板号	边界约束	墙板尺寸 长×高/ (m×m)	对应的试验墙板	标准化的破坏模式
新模型 2	顶端自由、 三边约束	2.5×2.5	Test15、Test16A、Test16B	
新模型 3	四边约束	3.75×2.5	Test19A、Test19B、Test20	
新模型 4	顶端自由、 三边约束	3.75×2.5	Test17、Test21	
新模型 5	四边约束	6×3	—	

2.2.3 结构反应

建筑结构人工智能实验分析环境数据库中的结构反应为在不同荷载作用下所测得的位移。图 2-2 和图 2-3 分别给出了 SB01 和 SB06 上各个测点的位置。表 2-4 和表 2-5 分别列出了 SB01 和 SB06 上各个测点在逐级荷载作用下的位移。

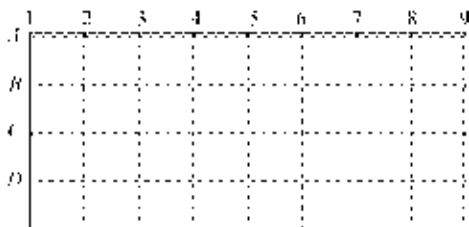


图 2-2 SB01 上的测点

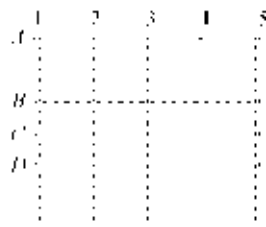


图 2-3 SB06 上的测点

表 2-4 SB01 上测点的位移

荷载/(kN/m ²)	测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.2	A	-0.04	0.04	0.44	0.46	0.48	0.78	0.67	1.40	0.23
	B	-0.25	-0.02	0.54	0.53	0.28	0.84	0.80	1.15	0.19
	C	-0.37	-0.33	0.43	0.20	0.03	0.55	0.37	0.62	0.06
	D	-0.47	-0.55	0.27	0.08	0.29	0.21	0.39	0.11	0.13
0.4	A	0.18	0.41	0.94	0.93	1.23	1.39	1.00	1.75	0.28
	B	0.18	0.38	1.11	0.99	1.17	1.49	0.97	1.39	0.14
	C	0.01	0.03	0.72	0.48	0.60	1.00	0.36	0.76	0.10
	D	-0.08	-0.20	0.58	0.33	0.43	0.67	0.19	0.15	0.15
∴										
1.6	A	0.64	2.00	3.60	4.26	4.72	4.64	3.75	3.75	1.08
	B	0.66	1.94	3.69	3.85	4.31	4.61	3.51	3.31	0.85

续表

荷载/(kN/m ²)	测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.6	C	0.30	0.81	2.18	1.99	2.48	2.70	1.76	2.18	0.42
	D	0.09	0.09	1.41	0.89	1.07	1.36	0.85	1.03	0.12
∴										
2.7	A	0.75	3.85	6.78	8.25	9.14	8.83	7.27	6.05	2.03
	B	0.37	3.64	6.60	7.80	8.73	8.46	6.80	5.20	1.38
	C	-0.05	1.91	4.05	4.51	5.20	5.11	3.88	3.24	0.93
	D	-0.21	0.73	2.51	2.27	3.19	2.64	2.12	1.84	0.91
2.8	A	0.87	4.64	7.93	10.09	11.53	12.04	9.03	6.79	1.85
	B	0.62	5.07	8.56	10.61	11.94	12.74	9.22	6.39	1.23
	C	0.24	3.56	6.16	7.68	8.41	9.01	6.37	4.48	0.95
	D	-0.22	1.91	3.70	4.09	4.52	4.75	3.63	2.93	1.58

注：测点的位移单位为 mm。

表 2-5 SB06 上测点的位移

荷载/(kN/m ²)	测点	1	2	3	4	5
1.0	A	-0.39	0.18	0.22	0.48	0.68
	B	-0.06	0.05	0.38	0.55	0.66
	C	-0.08	0.05	0.30	0.31	0.44
1.5	A	-0.32	0.06	0.47	0.98	1.59
	B	0.06	0.28	0.62	0.95	1.36
	C	0.00	0.24	0.49	0.83	1.17
2.0	A	0.01	0.55	1.08	1.66	2.14
	B	0.46	0.85	1.29	1.69	2.07
	C	0.64	0.96	1.25	1.60	1.87
∴						
6.5	A	1.95	4.16	5.10	5.10	3.64
	B	1.51	3.36	4.07	3.95	2.75
	C	1.50	2.73	3.29	3.10	2.22
7.0	A	2.01	4.42	5.61	5.58	3.94
	B	1.61	3.60	4.44	4.32	2.95
	C	1.46	2.97	3.58	3.62	2.63

注：测点的位移单位为 mm。

2.3 知识发现方法

在建筑结构人工智能实验分析环境中，数据挖掘技术不是直接用来分析实验数据

的，而是用来分析实验数据和有限元数值模拟数据的对比结果，这一方法如图 2-4 所示。

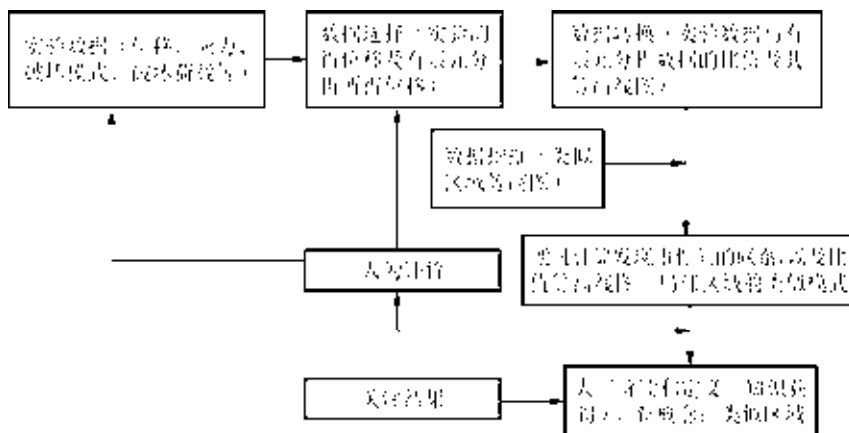


图 2-4 数据挖掘示意图

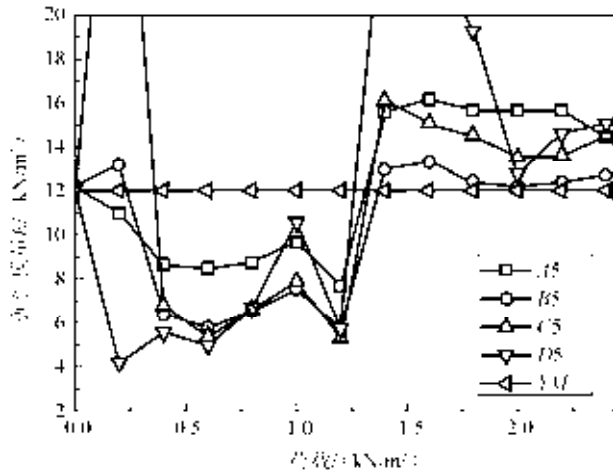
1) 实验数据:数据挖掘所用实验数据为一系列由 Chong 和 Lawrence 进行的横向荷载作用下的墙板实验数据,包括在墙板上均匀分布的测点在逐级加载情况下的位移、荷载值、破坏模式及破坏荷载。

2) 数据选择:以图 2-2 和图 2-3 所示的 SB01 和 SB06 为例,这两块墙板上均匀分布的测点在各级荷载下逐渐增大的位移被用来作为知识发现源。

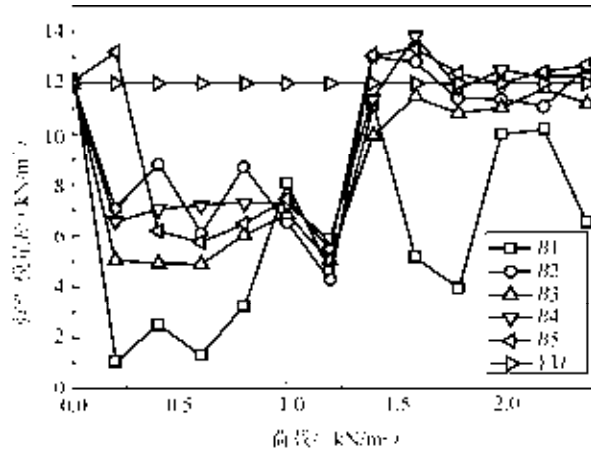
3) 数据转换:对实验数据和数值模拟数据进行无量纲化分析,即计算实验数据和数值模拟结果的比值,从而得到砌体墙板在各级荷载作用下无量纲化的位移模式。

4) 通过计算获得事件间的联系——数据挖掘:观察计算结果所得的位移比值曲线可以发现,数据的无量纲化方法确实能够反映未知的事件之间的联系。曲线的渐进形态(即趋势分析)引出了一个问题:为什么这些曲线的比值最后都趋向于各自的某一定值,如图 2-5 所示。当墙板 SB01 和 SB06 上各点位移比值区域稳定时,将该比值转化为等高线图,如图 2-6 所示(事实上,这已经是第二次转化)。等高线图上的模式又引出了另一个新问题:为什么不同墙板间的某些模式如此相似,如图 2-7 所示。

5) 人工解读和定义(知识获得):刚度/强度修正值。4)的第一个问题引出了刚度/强度修正值的新概念,从而提高了 FEA 法对墙板结构的分析精度;4)的第二个问题引出了类似区域的概念,使其成为建筑结构人工智能实验分析环境的起源之一。

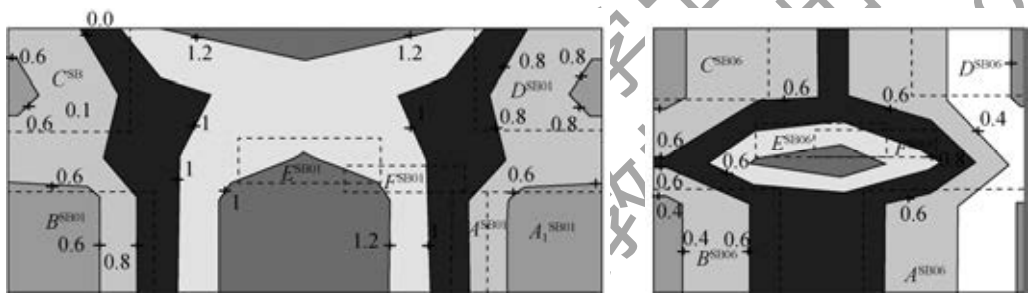


(a) 点 A5~D5 的弹性模量-荷载曲线



(b) 点 B1~B5 的弹性模量-荷载曲线

图 2-5 SB01 实验数据与有限元位移间的比值曲线



(a) 墙板 SB01

(b) 墙板 SB06

图 2-6 墙板 SB01 和 SB06 的位移比值等高线图

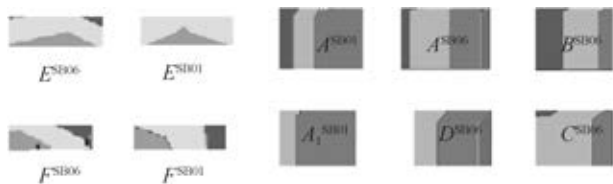


图 2-7 SB01 和 SB06 间类似的修正值分布模式

科学出版社
职教技术出版中心
www.abook.cn

第 3 章 结构工作行为数值模式与结构构造状态数值模式

第 2 章介绍了建筑结构人工智能实验分析环境如何利用数据挖掘技术从已有的实验数据中挖掘出结构的性质,要把这些挖掘出来的知识应用到新模型中需要解决两个问题:一是恰当地描述结构的几何、物理性质和结构工作行为,并将其数值化,即建立结构工作行为数值模式与结构构造状态数值模式模型;二是找到基础模型与新模型之间的联系,使得基础模型的信息能够准确地投射到新模型中来。

本章要解决的即为第一个问题,探讨建筑结构人工智能实验分析环境中结构工作行为数值模式与结构构造状态数值模式。

3.1 结构工作行为数值模式

在建筑结构人工智能实验分析环境数据库中,有关墙板结构工作行为“破坏模式”的数据均为图片格式,不能够直接用于分析和计算。因而必须将其转化成与其一一对应的结构工作行为数值模式。

3.1.1 结构工作行为数值模式概述

本书研究的结构工作行为指横向荷载作用下砌体墙板的破坏模式,这些破坏模式能够通过相应矩阵进行描述。以均布面外荷载作用下 Lawrence^[136]的试验墙板 Test12 的破坏模式为例,它的破坏模式见表 2-1。首先,在砌体墙板上根据其尺寸及细胞自动机模型的分辨率等因素划分一定数量的网格,如图 3-1 所示。然后,假设网格与砌体墙板的破坏模式重合。最后,给所有裂缝通过的网格赋值为 1,其他网格则赋值为 0。

这样,将网格中的数字按照其位置提取出来,就能够得到一个相应的矩阵。显然,当网格中网眼尺寸恒定时,该矩阵与墙板的破坏模式是一一对应的,这个矩阵被称为相应破坏模式的基础矩阵。图 3-2 为 Test12 的基础矩阵。基础矩阵使得对墙板的数值分析成为可能,即可以对单个区域的破坏模式——矩阵中的某个元素进行分析,也可以通过对矩阵的整体变换对墙板的整体破坏模式进行分析。

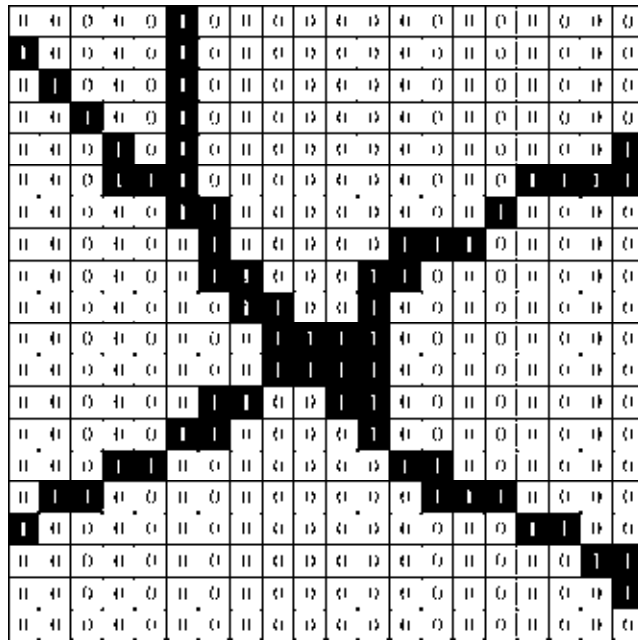


图 3-1 Test12 破坏模式的数值模式

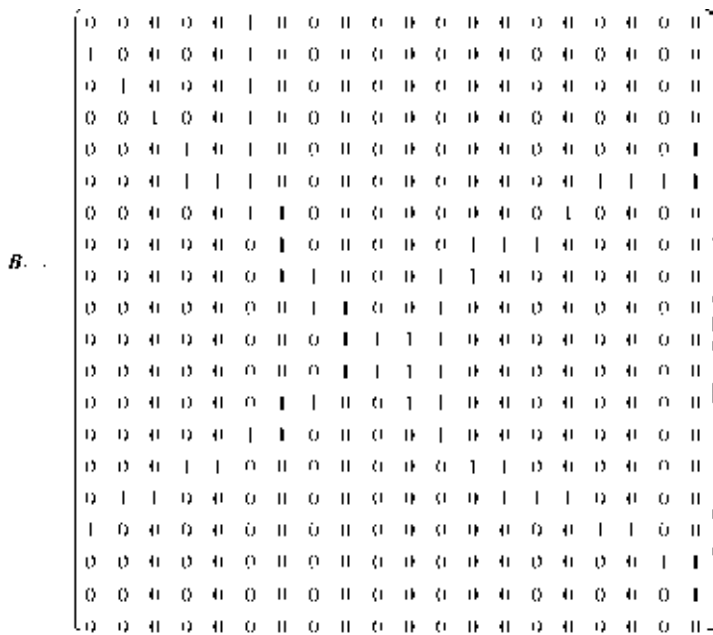


图 3-2 Test12 的基础矩阵

3.1.2 广义墙板矩阵及相似度

墙板的破坏模式转换成数值模式后,需要解决一个新问题:需要确定一个标准来判断两个破坏模式之间的接近程度,从而考查后续算法的精度与分辨率。为了解决这一问题,本书定义了相似度^[138]。

1. 灰度共生矩阵

一幅图片可以被看成某三维空间的表面,并且在该表面上,两相邻的像素间具有相同或不同的灰度。为了进行纹理的研究,需要确定两个像素的交点分布和统计形式。若以一个灰度为 x 的像素点作为起点,并且距该像素点的距离 d 在 (D_x, D_y) 间的其他像素点所具有的灰度为 y , 则两像素点之间,两个灰度 (i 和 j) 沿着某一方向同时发生的概率 P (或频率) 定义如下:

$$P(i, j, d, \theta) = \sum \left\{ \begin{array}{l} \frac{x, y}{f(x, y)} = i \quad f(x + D_x, y + D_y) = j \quad x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{array} \right\} \quad (3-1)$$

式中 x, y —— 像素点的坐标;

N —— 图片中的灰度数量;

i, j —— 取值范围为 $0, 1, 2, \dots, N-1$;

θ —— 两个像素点间的距离。

由于基础矩阵 $\mathbf{B}_{m \times n}$ 中只有 0 和 1 两种元素, $\mathbf{B}_{m \times n}$ 可以被看作只有两个灰度的图片。灰度对 $(b_{i,j}, b_{t,k})$ 之间的关系,也就是某一元素 $b_{i,j}$ ($i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n$) 与它周围元素 $b_{t,k}$ ($t=1, 2, 3, \dots, m; k=1, 2, 3, \dots, n$) 之间的关系可以归类为以下 4 种: (0,0), (0,1), (1,0) 和 (1,1)。

当 d 和 θ 分别取不同值时, $b_{i,j}$ 和 $b_{t,k}$ 的取值分别可能出现 8 种情况, 如图 3-3 所示。这 8 种情况分别对应像素点之间的 8 个角度, 分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ 和 315° 。

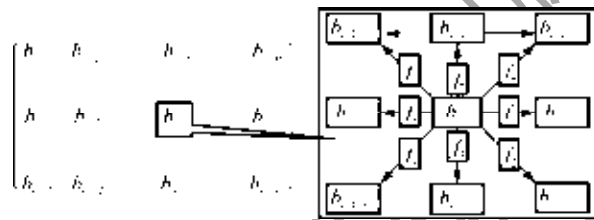


图 3-3 $b_{i,j}$ 和 $b_{t,k}$ 之间的关系

这样, 8 种规则 f_p 被建立起来, 用于处理 $b_{i,j}$, 从而得到一系列子矩阵。在表 3-1 中给出了这 8 种规则, 并且得到了基础矩阵的相应灰度共生矩阵。

表 3-1 转换规则 f_p 及相应的 d 和 θ 值

变量	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
d	1	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$
θ	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°

通过这种方法, 该概率 P 将空间坐标 (x, y) 转换成可用灰度对 (i, j) 描述的量, 由这些灰度对构成的矩阵被称为灰度共生矩阵。作为 d 和 θ 的函数, 灰度共生矩阵将指定区域内所出现的灰度对数量进行累加。显然, 灰度共生矩阵是一个对称阵, 并且它的维数由图片中所出现的灰度数量决定。在本书中, 灰度对具有特定意义的量, 即在一个灰度对中, 像素点的距离与角度都已经给出了规定。下面给出一个具体的例子来说明怎样计算灰度共生矩阵。

3.1.1 节已经说明怎样将砌体墙板的破坏模式转换为相应的数字模式——基础矩阵。以 Test12 为例, 它的基础矩阵在图 3-1 中给出, 当 $\theta=0, d=1$ 时, 它的灰度共生矩阵 S_1 为

$$S_1 = \begin{pmatrix} \sum(0,0) & \sum(0,1) \\ \sum(1,0) & \sum(1,1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 297 & 29 \\ 29 & 27 \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

在式 (3-2) 中, 4 个元素对应的灰度对为 (0,0), (0,1), (1,0) 和 (1,1), 其中灰度对是根据 $\theta=0, d=1$ 确定的。灰度对 (0,0) 意味着这样的灰度关系: 在 B_{Test12} 中, 0 元素的右侧也是 0。在 B_{Test12} 中, 共有 776 个 (0,0) 灰度对存在, 这个灰度对的总数被用作灰度共生矩阵 S_1 的相应元素。类似地, 可以得到 S_1 的其他元素。

需要指出, 尽管基础矩阵 $B_{m \times n}$ 是对砌体墙板破坏模式的描述, 但实际上它包括了砌体墙板的各种信息, 如边界条件、轮廓形状、材料性质及加载情况等各种全方位的信息。因为砌体墙板的破坏模式是与这些条件密不可分的, 所以基础矩阵 $B_{m \times n}$ 的灰度共生矩阵不仅是对砌体墙板破坏模式特征的直接描述, 同时也是对砌体墙板各种性质的间接描述。

2. 广义墙板矩阵

有了以上关于基础矩阵及其子矩阵的介绍作为基础, 下面进一步引入广义矩阵的概念。广义矩阵的引入基于以下考量: 由于不同的砌体墙板的基础矩阵 $B_{m \times n}$ 具有不同的维数, 不便对其进行运算及分析处理。下面提出的概念及方法就是要使描述砌体墙板破坏模式的数字矩阵具有相同的维数, 为进一步研究做好准备。

所提出的函数如下:

$$T = \xi(S_1) \quad (3-3)$$

式中 T ——广义墙板矩阵;

ξ ——转换规则。

将式(3-3)应用于所有的子矩阵时,它能够将 S_i 转换成相应的广义墙板矩阵 T ,所有砌体墙板的广义墙板矩阵具有相同的维数。

这样,就提出了广义墙板的概念,用它来代表具有不同尺寸的砌体墙板的破坏模式。具有固定维数矩阵的 T 就是砌体墙板所对应的广义墙板,也被称为广义墙板矩阵。下式给出了各个 S_i 在 T 中的位置,用转换规则 ξ 来表示。

$$T = \xi([S_i]) = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \\ S_7 & S_8 \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

根据转换规则 ξ ,子矩阵 S_i 的集合构成了广义墙板矩阵 T 。例如,砌体墙板 Test12 的广义墙板矩阵即为

$$T_{\text{Test12}} = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \\ S_7 & S_8 \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

3. T 与 B 之间关系的探讨

通常来说,基础矩阵 $B_{m \times n}$ 的维数要大于广义墙板矩阵 T 的维数。这就引出了一个问题,即基础矩阵 $B_{m \times n}$ 与其相应的通过本节所提出的转换规则所得到的广义墙板矩阵 T 是否为一一对应的关系。换句话说,一个广义墙板矩阵 T 能否逆向追踪到唯一的基础矩阵 B 。下列证明从信息论的角度回答了这一问题^[139]。

基础矩阵 $B_{m \times n}$ 可以被认为是信息源,同时,广义墙板矩阵 T 也可以被认为是另一个信息源。要在基础矩阵 B 及广义墙板矩阵 T (两个信息源)之间建立起一个一对一的关系,则需要一个无损压缩。

基础矩阵 T 传递了下列信息:

- 1) 矩阵的维数为 $m \times n$ 。
- 2) 各个元素的位置及其相应的值。

基础矩阵 $B_{m \times n}$ 中的元素 $b_{i,j}$ 与基础矩阵 $B_{m \times n}$ 中的其他元素之间没有不可变更的联系,也就是说,不能够根据给出的 $b_{i,j}$ 推断出基础矩阵中的其他元素,因为基础矩阵 $B_{m \times n}$ 的所有元素都是相互独立的。在计算子矩阵 S_i 的过程中,要考虑基础矩阵 $B_{m \times n}$ 的所有元素的位置及数值。根据信息论理论,将基础矩阵 $B_{m \times n}$ 无损压缩成一个维数更小的广义墙板矩阵 T 是不可能实现的。在实际应用过程中,可能出现几个基础矩阵对应一个相同的广义墙板矩阵的情况。因此,可采用以下两种方法来尽量避免这种情况的出现。

- 1) 尽可能精细地划分砌体墙板的网格,使对砌体墙板破坏模式的描绘更精确、

更细腻。

2) 扩大子矩阵 S_i 的维数, 即在现有基础上, 考虑基础矩阵 $B_{m \times n}$ 某一元素 $b_{i,j}$ 周围更多的元素与 $b_{i,j}$ 之间的关系。这一方法能够大大减小几个基础矩阵对应同一广义墙板矩阵的概率。

4. 广义墙板矩阵的相似度

两个矩阵具有越多的相同元素, 或位置相对应的元素的差值绝对值越小, 则这两个矩阵越相似。下面首先给出两个元素之间的相似度定义:

定义 1 矩阵中的两个元素分别为 $M_{i,j} \geq 0$ 和 $N_{i,j} \geq 0$, 记它们的差值绝对值为 $\Delta_{i,j} = |M_{i,j} - N_{i,j}|$, 它们的和为 $E_{i,j} = M_{i,j} + N_{i,j}$ 。若 $E_{i,j} \neq 0$ 且 $\frac{\Delta_{i,j}}{E_{i,j}} = 0$, 则这两个元素 $M_{i,j}$ 与 $N_{i,j}$ 的相似度 $\eta_k = 1 (k=1, 2, \dots, n)$, 这意味这两个元素完全相似, 也就是 $M_{i,j} = N_{i,j}$; 若 $E_{i,j} \neq 0$ 且 $\frac{\Delta_{i,j}}{E_{i,j}} = 1$, 则这两个元素 $M_{i,j}$ 与 $N_{i,j}$ 的相似度 $\eta_k = 0$, 即这两个元素完全不相似; 若 $E_{i,j} \neq 0$ 且 $0 < \frac{\Delta_{i,j}}{E_{i,j}} < 1$, 则两元素之间的相似度可看作表达式为

$\eta_k = 1 - \frac{\Delta_{i,j}}{E_{i,j}}$ 的线性插值, 如图 3-4 所示。

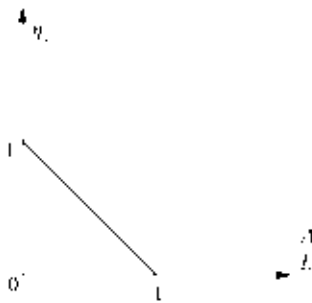


图 3-4 η_k 和 $\Delta_{i,j}/E_{i,j}$ 之间的关系

有了关于不同矩阵的对应元素的相似度定义为基础, 就可以进一步给出两个矩阵之间的相似度定义。如果两个矩阵具有相同的维数, 且包含的元素总数为 n , 则每个元素对矩阵相似度的贡献为 $\frac{1}{n}$ 。首先计算出两个矩阵对应元素的相似度 $\eta_k (k=1, 2, \dots, N)$, 然后将所得结果加权累加, 就得到了两个矩阵之间的相似度。具体定义如下:

定义 2 若矩阵 M 和 N 具有相同的维数, 且满足 $M_{i,j} \geq 0$ 且 $M_{i,j} \in M$, 并且 $N_{i,j} \geq 0$ 且 $N_{i,j} \in N$, 则计算 $\Delta_{i,j}^k = |M_{i,j} - N_{i,j}|$ 和 $E_{i,j}^k = M_{i,j} + N_{i,j}, k=1, 2, \dots, N$; 如果

$E_{i,j}^k \neq 0$ ，那么两矩阵之间对应所有元素 $M_{i,j}$ 和 $N_{i,j}$ 的相似度为 $\eta_k = 1 - \frac{\Delta_{i,j}^k}{E_{i,j}^k}$ ，两个矩

阵 M 和 N 的相似度为

$$\eta_{M,N} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n n_k = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\Delta_{i,j}^k}{E_{i,j}^k} \quad (3-6)$$

显然，矩阵的相似度的值域范围为 $\eta_{M,N} \in (0,1)$ 。例如，示例 M 和 N 如下：

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad N = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

它们的相似度 $\eta_{M,N}$ 计算如下：

$$|\Delta| = |M - N| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad n = 5 \times 5 = 25 \quad |E| = |M + N| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 0 & 2 & 2 \\ 4 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\eta_{M,N} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n n_k = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\Delta_{i,j}^k}{E_{i,j}^k} = 1 - \frac{1}{25} \times \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{2} + 1 \right) \approx 0.907$$

类似地，对于两个广义墙板矩阵 M 和 N ($M_{i,j} \geq 0$ 且 $N_{i,j} \geq 0$)，当 $E_{i,j}^k = M_{i,j}^k + N_{i,j}^k \neq 0$ 且 $\Delta_{i,j}^k = M_{i,j}^k - N_{i,j}^k \neq 0$ 时，如果 Δ 值不为 0 的对应项个数为 q ，则两个广义墙板矩阵 M 和 N 的相似度可以用下式表示：

$$\eta = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^q \frac{\Delta_{i,j}^k}{E_{i,j}^k} \quad (3-7)$$

相似度的概念及其相应计算公式用来研究在什么情况下建筑结构人工智能实验分析环境不再能够正确地区分两个相似的砌体墙板的破坏模式。因此，式 (3-7) 给出了一个准则来建立神经网络模型的由砌体墙板的破坏模式压缩而成的输入数据。

运用式 (3-7) 判断两个砌体墙板破坏模式之间的相似度在以下方面有显著意义：

1) 适当调整用来描绘砌体墙板破坏模式的网格，这样，两个砌体墙板的破坏模式之间的相似度就能够得到进一步的区分，从而达到第 6 章所建立的神经网络模型区分能力的要求。在神经网络的建立过程中，所有砌体墙板破坏模式的相似度计算都是根据相应的用于描绘砌体墙板破坏模式所划分的网格来计算的。通过试算发现，当网格尺寸范围在 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 到 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ 之间变化时，所计算所得的相似度范围在 0.9 左右，正适用于所提出的神经网络模型，并能确保神经网络模型以砌体墙板的

破坏模式为输入，输出精确的相应砌体墙板破坏荷载。

2) 相似度的概念可以用来判断当两砌体墙板的破坏模式相似到何种程度时，第 6 章所提出的神经网络模型失效。在计算过程中发现，当用来描绘砌体墙板破坏模式的网格尺寸超过 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ 时，不同墙板破坏模式之间相似度能够达到 0.95 以上。因为神经网络模型在该范围内不能够良好地区分不同墙板的破坏模式，所以可能预测出不准确的破坏荷载。

有必要指出的是，本书中所提到的砌体墙板都是用无筋砌体构造的，这种材料的属性具有很强的变异性。这就意味着，即使具有相同的尺寸、形状、边界条件及材料属性的两块砌体墙板，在相同的加载条件下也十分可能具有明显不同的破坏荷载。因此，用这些墙板能够很好地测试出在第 6 章中提出的神经网络模型的关于砌体墙板破坏模式相似度的分辨能力。

3.2 结构构造状态数值模式

结构构造状态数值模式是指将结构的工作状态数值化，用特定数值来描述结构某一局部区域范围的工作状态，包括边界条件、区域位置、材料属性等。

可以采取两种模型建立结构构造状态数值模式：细胞自动机模型和本书首次提出的基于 FEA 的无量纲化模型。

3.2.1 细胞自动机模型

要建立结构试验墙板和未知墙板构造模式的细胞自动机模型，第一步要在试验墙板或未知墙板上画出一个数值网格，并使每个网格的每个网眼（区域）都对应墙板上的一区域。由细胞自动机数值模型得到的每个网眼的数值——状态值来表示砌体墙板的工作状态。第二步，在细胞自动机数值模型中给每个边界赋值，作为状态函数的初始值。为了使墙板的细胞自动机模型对墙板的模拟尽可能精确，Zhou 等^[140]专门进行了一系列的参数分析，证明最适合的参数选择为自由边赋值为 0.0，简支边赋值为 0.2，固支边赋值为 0.4。第三步，通过状态函数，计算所有区域的状态值。

1. Zhou 提出的传递函数

Zhou 提出的传递函数如下：

$$\begin{cases} L_{i,j} = L_{i,j-1} + \eta(1 - L_{i,j-1}) & i = 1, 2, \dots, M & j = 1, 2, \dots, N \\ R_{i,j} = R_{i,j+1} + \eta(1 - R_{i,j+1}) & i = 1, 2, \dots, M & j = N, N-1, \dots, 2, 1 \\ B_{i,j} = B_{i-1,j} + \eta(1 - B_{i-1,j}) & i = 1, 2, \dots, M & j = 1, 2, \dots, N \\ T_{i,j} = T_{i+1,j} + \eta(1 - T_{i+1,j}) & i = M, M-1, \dots, 2, 1 & j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3-8)$$

式中 i, j ——区域的位置序号；

M, N ——网格的总行数和总列数；

η ——传递系数;

L 、 R 、 B 、 T ——细胞自动机中各个区域(i, j)由4个边界决定的状态值。

然后, 区域(i, j)的状态值可通过下式计算:

$$S_{i,j} = (L_{i,j} + R_{i,j+1} + B_{i+1,j} + T_{i+1,j+1}) / 4 \quad i=1,2,\dots,M \quad j=1,2,\dots,N \quad (3-9)$$

这样就通过每个区域的状态值 $S_{i,j}$ 构成了墙板的细胞自动机模型。

2. 本书提出的传递函数

本书提出了针对四边约束砌体墙板细胞自动机模型中的结构构造状态的连续传递函数, 可用下式表示:

$$S_{i,j} = 0.2 - \eta \left(1 - \frac{2|x|}{a} \right) \left(1 - \frac{2|y|}{b} \right) \quad (3-10)$$

式中 $S_{i,j}$ ——区域的状态值;

x 、 y ——区域中心的坐标值;

a 、 b ——墙板边长;

η ——传递系数。

该函数具有如下优点:

1) 为连续函数, 可计算出墙板上任意一点的构造状态数值, 避免了对区域网格划分的依赖。

2) 反映了相邻边界间的相互作用。

这里需要强调的是, 研究表明, 这两个细胞自动机模型都能够通过传递系数 η 在一定范围内发生的变化, 实现对结构构造与工作行为变异的描述。细胞自动机模型的这一功能, 增强了建筑结构人工智能实验分析环境对结构工作行为/反应的预测功能, 使得建筑结构人工智能实验分析环境能够成为“环境”。这部分内容将在第5章中进行详细探讨。

3.2.2 基于 FEA 的无量纲化模型

另一种建立试验墙板和未知墙板的构造和工作状态数值模型的方法为使用基于 FEA 的无量纲化模型。该模型的原理是将在一定荷载作用下的 FEA 结果进行无量纲化, 如下式所示:

$$N = D / d_{\max} \quad (3-11)$$

式中 D ——有限元法分析所得节点位移矩阵;

d_{\max} —— D 中绝对值最大的元素;

N ——无量纲化后的节点位移矩阵。

区域状态值可通过下式计算:

$$S_{i,j} = (N_{i,j} + N_{i,j+1} + N_{i+1,j} + N_{i+1,j+1}) / 4 \quad i=1,2,\dots,M+1 \quad j=1,2,\dots,N+1 \quad (3-12)$$

式中 $S_{i,j}$ ——区域状态值。

采取基于 FEA 的无量纲化模型构建结构工作状态数值模式时，数值模式中的网格划分应与细胞自动机模型的网格划分保持一致。在本书的研究中，基于 FEA 的无量纲化模型使用的节点位移为面外横向荷载方向的节点位移。为了保持模型的连续性，边界的状态值分别取为：有约束边为 0.0，自由边取有限元计算所得位移。

下面给出具体实例，验证基于 FEA 的无量纲化模型的效果。

1. 墙板的有限元模型

(1) 基础模型 5 (基础板 5) 的 ANSYS (analysis system, 分析系统) 模型

基础模型 5 的边界条件为四边约束，加载方式为面外横向均布荷载，变形主要发生在 Z 方向，X, Y 方向的变形可以忽略，因而选用 SHELL181 单元进行建模。该单元有 4 个节点，每个节点有 6 个自由度，即 X, Y, Z 这 3 个方向的线位移与绕 X, Y, Z 三轴的角位移。定义材料本构关系为理想弹塑性，取弹性模量 $E=1.7\times 10^9\text{N/m}^2$ ，泊松比 $\nu=0.2$ 。该模型的尺寸为 6000mm (宽) \times 110mm (厚) \times 3000mm (高)，单元尺寸为 125mm \times 125mm。面外均布荷载为 3.2kN/m²。横向荷载作用下基础模型 5 的有限元模型如图 3-5 所示。

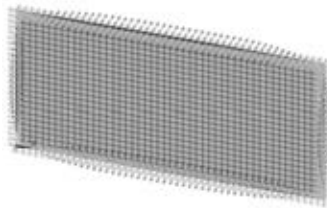


图 3-5 横向荷载作用下基础模型 5 的有限元模型

通过 ANSYS 的 FEA，得到横向荷载作用下基础模型 5 的 Z 向变形等高线图，如图 3-6 所示。

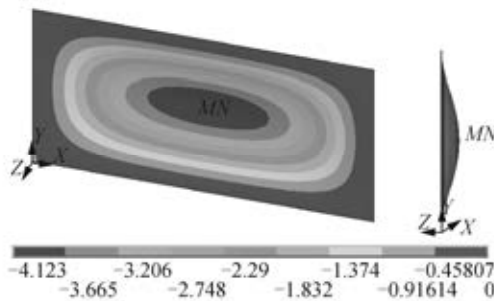


图 3-6 横向荷载作用下基础模型 5 的 Z 向变形等高线图