

ISSN1000-4750
《工程力学》增刊 CODEN
CN11 - 2595/ O3

第十一届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅱ卷

PROCEEDINGS OF THE ELEVENTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

Vol. II

主编：崔京浩

中国 长沙
CHANGSHA, CHINA
10.20~10.23, 2002

第十一届 全国结构工程学术会议

(长沙 10.20~10.23, 2002)

主办单位

中国力学学会结构工程专业委员会
湖南大学土木工程学院
中国力学学会《工程力学》编委会
清华大学土木工程系

协办单位

中国建筑总公司第二工程局
湖南大学结构工程研究所
湖南省土木工程学会

第十一届全国结构工程学术会议论文目录

本次会议论文集收录论文 354 篇, 共计 1576 页, 分装成二卷, 每卷独立编页。第 I 卷载入全套论文集的总目录, 第 II 卷则只载本卷目录。

第 I 卷载论文 169 篇 (共 807 页), 包括:

特邀报告; 一. 力学分析与计算; 二. 钢与钢筋混凝土材料、构件与结构; 三. 路桥、水工、港工

第 II 卷载论文 185 篇 (共 769 页), 包括: 四. 岩土、地基与地下工程; 五. 特种结构、飞行器与船舶结构; 六. 抗震、动力与稳定; 七. 设计、施工、事故分析与加固, 优化与可靠度。

第 II 卷目录

四、岩土、地基与地下工程

疏松砂岩油层出砂问题研究综述.....	曾流芳 赵国景 (001)
进化神经网络在支护结构变形预测中的应用.....	葛培明 陈 虬 (005)
边坡稳定性评价 T-S 型模糊神经网络模型.....	陈昌富 袁玲红 龚晓南 (010)
北美非开挖技术.....	段兵廷 金康宁 (014)
上部结构与地基基础共同作用分析的一种新方法.....	邓安福 干腾君 曾祥勇 (019)
地基变形对高层建筑结构的影响.....	龚耀清 杨小林 (025)
深基坑开挖引起周围土体位移的监测.....	汤永静 Edward Kujawski (028)
边界元特解样条函数在上部结构-桩-土共同作用下的应用.....	熊仲明 赵鸿铁 (035)
高层建筑地基中大跨度浅埋洞室力学性态研究.....	张永兴 王桂林 文海家 孙运轮 (039)
T1 层状场地中的双桩横向动力阻抗函数.....	陈 镭 万春风 薛松涛 王远功 (043)
高层建筑主裙楼基础相互影响的研究.....	杨秋学 郭全全 李 珠 张善元 (048)

万州长江二桥锚固系统中隧道式复合锚碇分析.....	万仁辉 李 良 阳金惠 (051)
宝钢工程长桩的侧弯缺陷及试验研究.....	王怀忠 (055)
复合土钉支护技术.....	孙铁成 张明聚 徐从平 杨 茜 (059)
基于 Mindlin 应力解和位移解的地基沉降量的数值分析.....	麻玉鹏 丁继辉 王维玉 宇云飞 (063)
巷道围岩变形 FBEM 模拟与定量加固设计方法.....	谭云亮 (070)
确定性波动输入条件下的地震动场数值模拟.....	吕 斌 李 杰 (074)
钢桁架-混凝土组合设备基础的应用及发展.....	叶清华 (080)
土钉墙工作性能监测.....	刘 艳 许金余 陈 端 姜锡滨 司建波 (085)
圆隧道衬砌接头试验及理论研究.....	车法星 黎立云 傅德明 (089)
矿物成份对粘土力学性状影响的试验研究.....	强成仓 江菊英 丁荣富 刘应保 (094)
群桩在弯扭联合作用下的计算分析.....	巫惠斌 李 红 (097)
大直径扩底桩工作机理的探讨.....	付友冬 (100)
软土地区深基坑支挡结构变形分析和处理措施.....	王天运 刘水江 刘国强 (103)
沉管夯扩灌注桩在软土地基中的应用.....	孙金坤 胡功笠 李赞成 (108)
处理不均匀地基的实践.....	王利文 包海蓉 (112)
巨厚冲积层中竖井破坏机理与防治措施.....	刘宏伟 谢永亮 刘道永 庄惠平 张海波 (115)
爆破密实法及其在机场工程中的应用.....	齐爱东 杨 斌 胡功笠 顾红军 (118)
已建防护结构的可靠性评判方法研究.....	李志成 史海兵 乔蓓蓓 李忠中 (122)
饱和粉质粘土在不同固结条件下受载后孔压变化试验研究.....	王景龙 王 哲 (127)
柱下独立基础基底尺寸的实用优化设计方法.....	吴方伯 张毛心 朱志辉 (130)
非确定性反分析在基坑工程中的应用.....	朱振华 吴时敏 (135)
土层剖面概率模型适用性探讨.....	张 梅 王士杰 (139)
非饱和土坡稳定性模糊概率模型的因素分析.....	孙宇坤 吴为义 徐伟良 张士乔 蒋 菡 (143)
寒区滑坡冻融破坏机制研究.....	王晓春 聂德新 (147)
关于基坑边坡与支护的稳定性分析.....	李 飞 郝子进 (151)
盾构隧道衬砌施工阶段的纵向受力性能分析.....	耿耀明 刘文燕 黄鼎业 (155)
深厚软土地基加固方法对比研究.....	谭一鸣 邵 宁 顾红军 陈太林 (159)
减少软土路基工后沉降的地基处理措施.....	翟 鹏 郭有宏 (163)
基于应力空间变换的重塑土本构模型.....	刘元雪 施建勇 (167)
软土深基坑排桩支护的优化设计和监测.....	林雪梅 (171)
静压桩贯入地基的模拟计算.....	张明义 周 伟 (176)
地基沉降和基底配筋方案的三维有限元分析.....	杨小平 张文巧 (181)
21 世纪我国越江的主要方式—水下隧道.....	蒋美蓉 金丰年 王 斌 (185)
岩石的一种损伤本构模型及本构参数的实验拟合.....	周 钟 王肖钧 刘文韬 (189)
广义波兹曼原理在群桩施工的初应变法叠代计算中的应用.....	刘海升 (194)
硬岩类地下洞库围岩的张裂判断和裂缝补救中混凝土喷层研究.....	孙 博 陆春奇 朱 磊 胡功笠 顾红军 (198)
岩溶地区嵌岩灌注桩施工技术.....	满洪高 (201)

大直径扩底端承桩直接计算法	韩建平 苏长吉 王伯成 曹仕雄 (205)
挤扩支盘桩的研究进展	卢成原 施 颖 (209)
一种实用的加筋土有限元分析方法	安英浩 彭一江 (213)
在冻胀力作用下的挡土墙可靠性分析	申向东 姬宝霖 王丽萍 李晓丽 (217)
基于模糊理论的深基坑支护方案的综合评判	赵德辉 许金余 邵 宁 张国喜 (222)
易风化软弱围岩隧道洞口段施工技术	姚 辉 刘青林 (227)
两级基坑工程变形监测与分析	冯玉芹 董忠厚 张 飞 (230)
静力触探预估沉桩阻力的方法及应用	朱振华 朱小林 (234)
民用地下工程对化学爆炸的防护能力	胡金华 周早生 孙 杰 (237)

五、特种结构、飞行器与船舶结构

膜结构裁剪标准的确定	那向谦 郑 竹 (241)
组合网架结构的自动设计软件的编制	王秀丽 李晓东 王朝光 江小燕 (245)
梁板结构大变形分析	章向明 王安稳 (249)
体育场遮阳篷结构形式研究	那向谦 甄 伟 (253)
兰州某家具城 50 米球面网壳结构优化设计	王秀丽 丁彩莲 朱彦鹏 马泽宝 徐 菁 (258)
古木建筑风洞模型试验研究	魏剑伟 李铁英 (262)
一对拱组合的空腹桁架研究	叶晨立 (266)
大跨预应力混凝土体育馆结构的设计要点	张 巍 孟少平 (271)
通过疲劳试验确定飞机结构检修周期的方法	薛景川 杨玉恭 焦坤芳 (275)
变截面单跨门式刚架计算长度系数分析	李 天 刘朝宏 李 光 (280)
带吸能装置的组合式抗爆结构的试验分析	陈 斌 曾首义 晏麓晖 蒋志刚 (284)
菱形索网体系几何非线性问题的摄动法	王秀丽 江小燕 李晓东 马泽宝 (288)
地下指挥工程易损性分析	李 霖 于伯毅 厉阿明 余承华 (292)
海洋平台舒适度的模糊控制分析	韦 林 (296)
含裂纹金属飞机结构的复合材料微波修复	许陆文 许湘琦 (300)
船舶上层建筑端部应力状态试验研究	孙焕香 裴智勇 吴卫国 (304)
船舶在斜浪中的扭矩外力计算	陈超核 (308)
飞机结构腐蚀疲劳寿命预估工程方法研究	薛景川 焦坤芳 肖迎春 弓云昭 董登科 (311)
应用 BP 网络预测电磁脉冲对防护工程的透射深度	赵 靖 许金余 邵 宁 李 敏 刘 硕 (317)
高耸钢塔风荷载计算方法	薛 刚 李云飞 冯玉芹 (320)
关于膜结构中的正应力分布与剪力滞后的一个新概念	陈 翔 石远松 孟苗超 蔡松柏 程翔云 (323)
军事防护工程设计与理念更新	史 强 邵 宁 顾红军 (327)
应急性大吨位龙门吊机的研制及应用	李云峰 (329)

六、抗震、动力与稳定

结构振动控制的鲁棒 H_{∞} 控制方法.....	何玉敖 史月珍 (333)
化爆作用下无梁板结构动力响应数值模拟.....	王安宝 董 军 杨秀敏 邓国强 杨科之 (337)
车辆荷载作用下斜拉桥的动力反应.....	王解军 李全林 刘光栋 (341)
粘滞阻尼器在结构中的位置与参数优化.....	聂云靖 张旭红 张善元 (344)
弹性地基上贮仓结构模型的动力计算.....	黄 义 尹冠生 (348)
基于非比例阻尼特性的基础隔震结构分析与设计.....	韩建平 杜永峰 李 慧 党 育 兰 倩 (353)
结构变刚度隔震、耗能控制研究.....	王焕定 赵桂峰 王 伟 马玉宏 张永山 孙 锋 (357)
支承裙开孔并补强的快堆堆本体的抗屈曲分析.....	沈成康 刘 锋 (366)
斜拉桥结构振动控制的界限控制算法.....	刘筱玲 陈 虬 (371)
高层建筑悬挂结构体系的非线性动力分析.....	周 坚 伍孝波 刘 娜 (376)
LANCZOS 方法在网架结构动力分析中的应用.....	曾裕林 何放龙 贺光明 (381)
随机激励载荷谱识别的计算机模拟与实验.....	李东升 郭杏林 许士斌 李宏男 (384)
振动对建筑物的影响及其控制标准.....	曹艳梅 夏 禾 (388)
建筑结构振动变阻尼滑模控制.....	张旭红 吴植安 张善元 (393)
渡槽结构的弯矩风振系数和剪力风振系数.....	吴红华 李正农 楼梦麟 (397)
混凝土加劲桁架悬索桥的动力特性分析.....	汪新惠 彭大文 (401)
排架支承式渡槽自振特性的简化计算方法.....	李正农 吴红华 楼梦麟 (406)
设外挂板高层钢结构弹塑性地震反应分析.....	王立忠 罗 健 (410)
与地下结构抗震相关的若干问题探讨.....	刘志贵 万仁辉 (414)
高拱坝的非平稳随机地震响应分析.....	陈健云 李 静 周 晶 (418)
动力特性测试在建筑物检测中的应用.....	王 莉 赵考重 张建阳 (423)
高架独腿公路桥的短悬吊免震方案.....	武建勋 王晓刚 樊延霞 高树栋 颜治国 (426)
古木塔风作用动力分析.....	魏剑伟 李铁英 (430)
超薄钢管动力屈曲实验研究.....	顾红军 范伏生 吴云泉 (434)
连续斜弯桥模型的动力试验与分析.....	孙全胜 孙丽萍 (438)
复合材料缝合结构稳定性试验研究.....	汪 海 朱菊芬 郭杏林 (442)
能力谱方法在混凝土结构抗震加固中的应用.....	吴晓莉 张 巍 孟少平 (446)
桥梁抖振反应谱理论研究.....	季文刚 闫贵平 (450)
应用准最优控制理论设计 MTMD 系统参数.....	张 丹 张洵安 崔艳丽 (454)
秦岭隧道 TBM 拆卸洞室的稳定性分析.....	李德武 (458)
平面拉索预应力钢结构的自振特性及敏度分析.....	王新堂 郑荣跃 (462)
地震灾害对坑道式洞库的影响研究.....	吴云泉 陈海天 顾红军 陈太林 (466)
释迦塔场地抗震性能评价.....	魏剑伟 李铁英 (470)
圆拱结构侧向稳定的耶硕克近似法.....	周松鹤 顾惠琳 (474)
斜拉桥地震响应特性及其被动控制研究.....	董嘉林 贺 辉 江 辉 郑 云 (478)
快速增量弧长法求解结构后屈曲问题.....	刘承宗 周志勇 (483)

土工格栅加筋土挡墙的动力分析探讨	钟国强 周亦唐 赵 川 (490)
建筑结构振动控制装置研究现状与展望	张顺宝 (494)
波形钢腹板剪切屈曲分析及其几何参数设计	李宏江 叶见曙 万 水 (499)
地震作用下简支梁桥碰撞反应分析	帅纲毅 (504)
磁致伸缩 Terfenol-D 杆的非线性振动分析	金明昱 尚新春 (508)
有初始缺陷高桥墩的稳定性分析	何学德 吴国松 王 成 (512)
阻尼减振仪表板实验模态分析	梁天锡 黄协清 杜 强 肖世富 (516)
结构振动半主动预测控制研究	徐建功 (522)
热状态下复合材料层合板非线性参激系统的振动方程分析	吕 敬 叶 敏 (526)
非线性系统地震反应估计问题	田 琪 陈兴冲 朱东生 (530)
粘弹性阻尼器对铁塔风振响应的影响	李剑清 梁 波 (534)
喜来登环球旅馆强地震反应的谱特征	李鸿晶 Mehmet Celebi (539)
碰撞对桥梁结构地震反应影响的初步研究	王东升 冯启民 翟 桐 (544)
从结构抗震设计理论看地震动输入	李英民 赖 明 白绍良 (549)
变截面筒状高耸结构抗震传递矩阵法	李青宁 梁兴文 (555)
MTMD 控制结构风振反应的安装位置研究	崔艳丽 张洵安 张 丹 (559)
脉冲电子束辐射带芯杆壳体结构引起的动力学响应研究	彭常贤 唐玉志 谭红梅 林 鹏 (563)
滑移技术在建筑子结构抗震中的应用分析	毕 征 许金余 姚焕忠 单程道 沈常友 (567)

七、设计、施工、事故分析与加固, 优化与可靠度

金属拱形波纹屋盖两种常用截面形式的比较	高福聚 刘锡良 (571)
哈尔滨框架轻板建筑结构的可靠性分析	杨伟军 李桂青 (574)
现代工程建设项目管理的计算机应用	施 炜 黄金枝 (578)
ActiveX Automation 技术在结构 CAD 软件开发中的应用	贺光明 何放龙 曾裕林 (585)
考虑抗力衰减的钢筋混凝土结构可靠度分析	房贞政 陈建兴 (588)
某银行综合楼事故分析及加固	吴真洁 赵振佳 付占明 王明恕 (593)
方钢管混凝土柱与焊接工字型钢梁刚接的节点设计	王洪涛 韩庆华 刘兴业 徐 昊 (597)
多层商住楼震害预测及其结构型式优化的研究	常业军 刘学应 程文灏 (601)
结构优化设计的遗传算法研究	牟在根 张举兵 陈云周 (605)
青洲高架桥施工支架结构选型优化与应用	郑则群 房贞政 卓卫东 (609)
异形柱框架结构设计中有问题的探讨	谢 霏 谢 威 蒋沧如 (613)
建筑物防止突发爆炸袭击的对策	顾渭建 冯 丽 (617)
幼儿园设计实例	韩 颖 王平福 曹明星 (620)
VBA 开发 AutoCAD 应用程序的研究	蒲怀仁 李三珍 宁晓骏 (624)
对门式轻钢结构设计中存在问题的探讨	唐柏鉴 王洪涛 刘兴业 (628)
滑移隔震结构振动优化混合控制	郭惠勇 张 陵 蒋 健 (631)

纽约世贸大厦坍塌的原因分析及设计高层建筑应吸取的经验教训

.....	张其顶 许金余 张国喜 邵 宁 (636)
二次受力混凝土 T 形受弯构件用碳纤维片材加固时正截面承载力分析	丁寿安 徐吉恩 杨 勇 (640)
小生境遗传算法及在离散变量优化设计中的应用	韩英仕 郭鹏飞 朱朝艳 (644)
钢筋混凝土拱板屋架预应力施工工艺探索	胡群言 段兵廷 (648)
基于激振反射法的建筑结构缺陷梁损伤诊断技术的研究	马卓军 高 江 兰付所 (652)
冶金热镀锌生产线主厂房结构设计	尹子峰 杨 冶 金祥武 (657)
真空吸水施工对水泥混凝土路面早期裂缝的影响	李赞成 石 坚 胡功笠 (661)
复合载体灌注桩的施工与检验	王利文 陈国庆 (664)
变宽度变厚度钢板弹簧的优化设计模型	石 萍 (668)
离散变量结构优化的 Fibonacci 遗传算法	郭鹏飞 韩英仕 朱朝艳 (672)
P-S-N 曲线的处理与比较	马 群 佟晓君 武春亭 (676)
建筑工程施工荷载对结构安全性影响的探讨	申继红 何明胜 汤 骅 (680)
包钢二炼钢工程筏板基础大体积砼施工方案	施永国 张文巧 (682)
某公寓楼主体结构的缺陷分析与加固	张 超 李砚波 陈志新 李学锋 (686)
大跨度桥梁悬臂浇筑综合控制研究	王钧利 于克萍 (690)
基于遗传算法的输电铁塔结构优化	王 坤 梁 波 (694)
大跨度商铺夹层预埋件、钢结构的技术处理	邹 胜 李长实 (698)
砖混结构条形基础设计方法的研究	桑国辉 李向国 孟丽军 (702)
浅谈水泥稳定碎石基层的开裂原因及预防处理措施	姜 斌 徐从平 刘云涛 (706)
一种改进的遗传算法在离散变量结构优化设计中的应用	朱朝艳 郭鹏飞 韩英仕 史建成 (709)
不同破损特征对屋面板承载力的影响	刘海生 于无私 雷 军 顾 敏 (713)
钢筋混凝土多层住宅结构的经济性能比较研究	吴本华 徐 勤 叶献国 种 迅 (717)
商品住宅舒适度模糊综合评价	许金余 赵 靖 沈常友 徐矫翔 (721)
现浇预应力砼连续梁施工技术探讨	刘青林 姚 辉 (725)
山区挖孔灌注桩施工技术	郝中海 徐生美 叶 松 (728)
地表无扰动隧道出洞施工技术	姚 辉 刘青林 (731)
祁临高速常家山隧道治滑进洞施工控制	孙斌科 (735)
基于 VB 的连续梁结构分析的可视化编程	李三珍 蒲怀仁 宁晓骏 (741)
预应力混凝土折线形屋架端头铁件的设计	王银花 (744)
AutoCAD 与 Microsoft Word、Photoshop 在建筑工程中的综合应用	
.....	张其顶 许金余 姜锡滨 陈 端 司建波 (747)
多层工业建筑的计算机设计应用	韩 颖 王平福 张会斌 (752)
某六层住宅楼墙体拆除更换设计与施工	李安起 孙剑锋 孙剑平 (755)
多级模糊优选方法在导管架结构优化中的应用	翟钢军 康海贵 刘 未 (758)
预制箱梁整体浇注施工技术	刘 炯 王久权 (762)
承台冲切破坏机理的有限元后处理研究	郭宏磊 黄 丽 郑晓冰 (766)

疏松砂岩油层出砂问题研究综述

曾流芳¹ 赵国景²

(1.胜利石油管理局孤东采油厂, 山东 东营 257237; 2.中国矿业大学北京校区, 北京 100083)

摘 要: 本文结合孤东油田疏松砂岩油藏出砂和防砂情况, 概述了油层出砂的机理、预测和防砂方法。并提出了出砂研究进一步发展的趋势。

关键词: 出砂; 疏松砂岩油藏; 机理; 预测

1 引言

在石油开采过程中, 由于水动力的冲刷等作用引起的疏松砂岩储层出砂是导致储层损害和产能降低的主要原因。出砂不仅会导致油井减产或停产以及地面和井下设备的腐蚀, 而且会使套管损坏、油井报废。胜利石油管理局孤东油田就是如此^{[1],[2]}。孤东油田是 1984 年发现, 1986 年投入开发的大型稠油疏松砂岩油藏。馆陶组油层由于埋藏浅, 压实程度差, 生产过程出砂十分严重。据统计生产馆陶组的 1163 口油井作业过程冲砂量资料, 出砂井 957 口, 占 82.3%。由于油井出砂造成卡管、砂埋、砂卡、杆断、泵漏等原因停产的油井 217 口, 占同期关井数的 65%(表 1)。

由于油层地质条件差, 以及采液强度大, 油层结构遭到破坏, 油层出砂日趋严重。孤东油田 1986-1995 年集输站大罐清砂表明, 采万吨液出砂量由 2.45m³ 增加到 4.21m³, 采万吨油出砂量由 2.86m³ 增加到 59.6m³, 出砂量成倍增长。事故井数也随之增多, 由 1986 年的 27 口上升到 1995 年的 85 口, 到目前累积 1156 口, 其中套变井数也由 3 口增至 34 口, 累计套变井数达 317 口, 影响了油田开发效果。本文在大量调研工作的基础上, 结合孤东采油厂的现场实践经验, 对油井出砂机理及预测、防砂方法进行综述。

表 1 孤东油田出砂量统计表

类别	统计井数	出砂井数	百分比	平均单井出砂量/m ³	每万吨液出砂量/m ³	每万吨油出砂量/m ³
全部井	1163	957	82.3	5.00	1.0	2.89
单采井	426	322	75.5	5.56	1.41	3.59

表 2 孤东油田分年度出砂情况统计表

项 目	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
采液强度(m ³ /m.d)	2.35	2.07	3.25	4.40	4.77	6.41	9.30	9.90	10.3	10.8
每万吨油出砂量(m ³)	2.86	1.09	4.60	6.24	14.7	23.5	34.6	35.6	49.0	59.5
每万吨油出砂量(m ³)	2.45	0.82	2.81	2.57	4.43	4.84	5.25	4.10	4.35	4.21
累积事故井数(口)	27	96	198	348	499	126	779	966	1071	1156
累积套变井数(口)	3	14	31	64	91	116	168	246	283	317

2 油层出砂机理及影响因素

2.1 油层出砂机理

出砂机理作为出砂预测和防砂的理论基础, 越来越受到人们的重视。油气井出砂可归结为两种岩石破坏机理, 即剪切破坏机理和拉伸破坏机理。剪切破坏机理是井壁附近或炮眼周围岩石受过高的应力所致, 其原因是井筒压力过低或生产压差过大。过高的开采速度或过快的流速也可能导致地层的拉伸破坏, 过高的井眼应力导致地层出砂。流体的高速流动、地层压力的衰减和含水量的增加, 加重了油气井的出砂程度, 因此, 出砂问题时岩石力学和渗流力学的耦合问题。

因此,出砂问题时岩石力学和渗流力学的耦合问题。

一般来说,地层剪切破坏表现的出砂为突发性大量出砂,而拉伸破坏则是“细砂长流”。出砂使孔穴通道增大,而孔穴增大又导致流速梯度降低,从而使出砂有趋停倾向,因此拉伸破坏有“自稳性”效应。

(1) 剪切破坏机理

射孔使岩石产生不同程度的损坏,孔周水泥环也受到松动,从炮眼向外可依次分为颗粒压碎、岩石重塑、塑性受损及变化较少的较小受损区(弹性区)。如果岩石抗剪强度低,射孔后岩石强度更减弱,若抵抗不住孔周的应力,就会产生剪切破坏或屈服,逐层剥离孔壁,产出固相。

(2) 拉伸破坏机理

以射孔为例,在油田开采时,在一个存在差应力的应力场中,流体流动产生的压力脉冲会降低其剪切强度,微粒运移造成的部分孔隙的堵塞所造成的表皮效应也会使压力降升高,从而使压应力变为拉伸,导致低拉伸强度的岩石产生拉伸剥离。

射孔周边的切向应力几乎永远是压应力,它与径向压差应力组成孔周的差应力,这是产生剪切破坏的根源。由于流体阻力和井筒应力联合作用,在近射孔区引起岩石剥落和地层出砂。单个砂粒从骨架脱离,然后发生砂堵,在射孔端部形成稳定的砂拱。砂拱是一个膨胀区,其渗透率、孔隙度都很大,但损害强度。在低流速下,流体阻力并不影响砂拱的稳定性,但随着流速的增加,阻力高到足以从砂拱带出砂粒,砂拱的稳定状态即被打破。若流体阻力太大,不再形成砂拱,油气井就会出砂。

2.2 影响出砂的因素

油层出砂机理十分复杂,影响因素很多,包括地质力学因素(原地应力状态、孔隙压力、原地层温度、地质构造)、砂岩储层的综合性质(井深、岩石的强度和变形特征、孔隙度、渗透率、泄流半径、流体的组成即油气水的含量和分布等、粘土含量、砂粒尺寸和形状以及压实情况等)、工程因素(包括完井类型、井身结构参数、完井液的性能、增产措施、生产工艺参数等)^{[3],[4]}。

油层出砂主要有以下几种影响因素^[5]:

(1) 油层内流体的流动。流体流动时对砂粒产生拖曳力,拖曳力的大小取决于流体的流速和粘度。

(2) 地质因素。地质年代较短的地层,其胶结强度较弱,容易出砂;反之,不易出砂。

(3) 生产速度。当生产速度增加到一定值时,充填于孔道中的未胶结的砂粒先发生移动;当生产速度进一步增加时,组成岩石骨架的砂粒会被剪切脱离岩石骨架而成为自由砂。

(4) 胶结方式。一般来讲,接触式胶结并且是以粘土为胶结物的储层易出砂。

(5) 多相流动。随着油田的开发,会出现油气水三相流,水可以溶解掉部分胶结物;含水饱和度的变化引起毛管力下降,使颗粒间的内聚力减小,水湿砂粒随着水的参与流动而移动;脱气导致油的粘度增加,使油流对砂粒的拖曳力增加。

3 油层出砂预测方法

3.1 经验公式法

(1) 出砂指数法

出砂指数又称产砂指数或单向杨氏模量,该方法又称组合模量法,定义为

$$B = K + 4G/3 \quad (1)$$

式中, B 为出砂指数; K 为体积模量; G 为剪切模量。

根据德莱塞公司介绍,当采用英制单位时,

$B > 3$, 不出砂;

$B < 2$, 出砂;

$2 < B < 3$, 少量出砂。

(2) 斯伦贝谢法

$$R = \frac{C^2(1-2\mu)(1+\mu)\rho^2}{6(1-\mu)^2(\Delta t_c)^4} \quad (2)$$

式中, R 为斯伦贝谢比; μ 为泊松比; ρ 为岩石密度; C 为常数; Δt_c 为岩石纵波时差。

斯伦贝谢公司对墨西哥湾进行了大量的实验研究后提出 $R > 3.8 \times 10^7 \text{Mpa}$ 时油井不出砂, 而 $R < 3.3 \times 10^7 \text{Mpa}$ 时则有可能出砂。目前这一判别值在美国加利福尼亚、阿拉斯加以及加拿大、特立尼达和印度等井深 1000~4000 米的油井中使用, 预测结果比较准确。

3.2 实验模拟法

90 年代初, 壳牌公司、斯伦贝谢公司和泰雷泰壳公司等分别进行了实验室模拟研究, 得到大量的有价值的成果。斯伦贝谢公司采用一个简单的、易监测的出砂试验系统, 可分别改变单个变量, 考察其对出砂的影响。在实验中分别考虑应力、流量、流体粘度和岩石强度等因素。该实验得出的结论为, 在同类型岩芯条件下, 流速是出砂最主要的影响因素。对油或水, 当射孔炮眼中流速超过 0.2m/s 时就有可能出砂。而流动又分为轴向和径向两部分。轴向流动(沿炮眼方向)对出砂影响较大, 这是因为轴向流动更易于清楚岩石表面已被破坏的岩石颗粒。因此, 该公司建议使用大孔径、高孔密射孔以提高不出砂的临界生产压差。

1992 年壳牌公司发表了大型出砂实验室试验结果。它们采用代表某油田某地层的露头岩石作为试验岩样, 同时考虑套管、水泥环、射孔的影响。该实验的目的是研究应力和流速对出砂的影响, 实验装置可模拟三维地应力、孔隙压力等。壳牌公司的实验结果有许多新的内容, 当增加压差时, 都短时间地大量出砂; 当压差维持不变时, 出砂速度降低到较低水平, 这说明压力波动对出砂影响较大。另外, 当将孔隙流体油换成盐水后出砂速度增加, 随之不久出砂速度又降低到原有水平。这说明纯盐水对出砂影响并不大, 而两相流动对出砂速度影响较大。

3.3 理论分析法

现行的大部分出砂预测分析模型, 都是以炮眼和孔洞的稳定性理论模拟为基础的。理论上的出砂预测方法需要涉及砂粒破坏机理的数学公式。目前破坏机理主要有压缩破坏、拉伸破坏和滑移次生破坏^{[6],[7]}。

1. 压缩破坏引起的出砂

压缩破坏是由孔壁附近过大的压缩应力引起地层剪切破坏, 过大的压力衰竭和生产压差均可造成此种情况。如常见到的最大安全生产压差公式就是压缩剪切破坏模型中的一种:

$$\Delta P_{\max} = P - [0.5P_o / (1-\mu) + (1-1.5\mu)\alpha P_p / (1-\mu) - 0.86 - t_0] \quad (3)$$

式中: $\Delta P_{\max}$ 为最大安全生产压差; P 为地层压力; μ 为泊松比; P_o 为上覆岩石压力, Mpa; P_p 为地层压力, Mpa; α 为 Biot 常数; t_0 为岩石固有抗剪切强度。

该公式是根据 Mohr 圆应力分析方法推出的。它未考虑射孔及液流对岩石颗粒拖曳力的影响, 计算出的井底流压偏小。

2. 拉伸破坏

拉伸破坏是径向拉应力超过拉伸强度而产生的, 作用机理时生产压差引起的。目前, 模拟砂岩拉伸破坏是一个棘手的问题。一般情况下可由孔壁的生产压差梯度来描述破坏准则, 并于油井工作状况有关, 即正常生产时关井生产压差。

4 防砂方法研究

做好出砂油层的防砂、治砂工作, 对于疏松砂岩油层来讲, 是一个长期和重要的工作, 防砂的好坏直接影响油田的油水井利用率和储量动用程度, 因此, 防砂、治砂, 确保油田正常生产是十分重要的。下面就孤东油田防砂工艺实际结合地层开采状况总结如下:

(1) 对于出砂严重的油层, 投产初期必须采取先期防砂, 以提高投产成功率。从四区、八区分层系 1991 年以前油井投产时防砂情况看(见表 3), 馆 3~4 层系比馆 5~6 层系出砂要严重, 但采取先期防砂成功率要高。例如八区二套层系情况: 馆 3~4 层系油井投产采用先期防砂投产成功率为 81.8%, 未防砂投产成功率

仅 40.0%；馆 5~6 层系采用先期防砂投产成功率为 100%，而未防砂投产成功率也达到 95.0%。在相同的条件下(防砂和未防砂)，馆 3~4 层系比馆 5~6 层系低 18.2%~55.0%^[1]。

(2) 选择合理的防砂方法，并做到机、杆(管)、泵合理配套。不同开发层系和不同沉积亚相所要求的防砂方法是有差异的。目前采用的五类防砂方法中，绕丝管的成功率和有效期优于其它四种，是目前常用的一种。对于馆 3~4 砂层来说，选择防砂方法时，除了考虑抑制出砂，还注意到油层泥质含量高，蒙脱石遇水膨胀作用，选用化学方法防砂比较合适。馆 5~6 砂层组，油层条件好，单井液量高，采液强度大，采用绕丝管，复合防砂等比较理想。另外，对于油稠，岩性为粉细砂岩，出砂严重的开发单元，为了减少流体在井筒中的停留时间，降低躺井率，则在部分井中采用小泵、小油管(2#)、大冲程、小冲次深油生产。

(3) 继续加强对油井的管理。从钻井、井下作业、采油各个环节，严格执行各种合理的工作制度和措施。同时，对于出砂严重的井，作业开抽时选择合理的工作制度，尽可能延长生产时间，生产过程中由于出砂严重造成油井液量下降时(降至正常生产时液量的 1/3)，尽快洗井排砂，减少作业次数。

(4) 把防大生产压差和防砂治砂有机结合，建立合理的生产压差，既能提液增油，又能延长油井检泵周期。

表 3 孤东油田防砂效果统计

防砂方法	施工井次	对比井次	成功井次	成功率(%)	有效期(天)
绕丝	757	621	567	91.3	689
地合	1073	464	355	76.5	231
涂合	401	160	113	70.6	118
干灰	1308	515	404	78.4	190
滤砂管	2277	879	558	63.5	149

参考文献

- [1] 刘仁君, 戴启德, 刘良叔等. 孤东油田储层研究与开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [2] 朱德武. 出砂预测技术进展[J]. 钻采技术, 1996, 19(6): 23-26.
- [3] 程绍志, 胡常忠, 刘新福. 稠油出砂冷采技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [4] 王凤清, 秦积舜. 疏松砂岩油层出砂机理室内研究[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(4): 66-72.
- [5] 李宾元. 油层出砂机理研究[J]. 西南石油学院学报, 1994, 16(1): 23-27.

进化神经网络在支护结构变形预测中的应用

葛培明 陈虬

(西南交通大学应用力学与工程系, 成都, 610031)

摘要: 本文提出用进化神经网络的方法对岩土工程中的支护结构的变形进行预测。文中的方法是综合遗传算法和人工神经网络两种非经典的数值优化算法的优点, 克服了传统算法的一些不足点。它特别适合于解决复杂的、非线性的、不确定性的问题。本文将进化神经网络法用以解决支护结构的变形的预测。数值试验表明, 进化神经网络较人工神经网络在速度和精度上都有较大程度的提高。

关键词: 进化神经网络, 支护结构, 变形预测

1. 引言

近些年来, 人工神经网络在解决岩土工程中的复杂的、非线性问题方面得到了很大的发展, 并有了一些成功的实例[1—7]。然而人工神经网络只是一个反传算法, 从中很难以更深入地开发思想和信息, 而且存在训练速度慢, 易陷入局部极小值和全局搜索能力弱等缺点。本文提出进化神经网络法, 它是将人工神经网络的非线性映射功能和遗传算法的优化功能有机地结合在一起, 用遗传算法优化神经网络参数, 克服传统人工神经网络所固有的缺点, 然后再用人工神经网络的反向调节功能进一步调整已经用遗传算法优化过的网络参数, 期望可以提高映射的精度和收敛的速度。某些工程问题[8, 9], 例如本文的算例—支护结构的水平变形预测, 由于受到工程地质条件、施工方法、周围环境等多种因素的综合影响, 而其中每一种因素又极其复杂, 且作用机理不是很清楚, 采用常规方法建立数学模型进行计算将会十分困难, 甚至是不可能的。采用上述思路实现的进化神经网络的计算结果显示无论是计算速度还是精度均优于传统的遗传算法和人工神经网络方法, 且具有更强的稳定性和推广能力。

2. 进化神经网络算法描述

进化神经网络即用遗传算法优化过的人工神经网络。人工神经网络能够实现正确的映射必须依赖于一组较好的参数组合, 如果参数组合不好, 迭代可能不收敛, 或者收敛到一个局部解, 显然这不是我们所希望的结果; 而如何寻找这样一组较好的参数组合目前还缺少十分有效的方法。本文用遗传算法优化网络权值和阈值的方法, 即进化神经网络的方法。

2.1 BP 神经网络拓扑结构

BP 神经网络由输入层、隐含层和输出层组成, 每层又由若干神经元组成。相邻两层的各个神经元由权值系数相联系。神经网络所储存的映射信息就记录在这些权值系数上。根据 Kolmogorov 多层神经网络映射存在定理^[3], 对于一个 n 个设计变量, m 个响应量的结构, 其极限状态函数可以用一个输入层有 n 个神经元, 隐含层有 $2n+1$ 个神经元, 输出层有 m 个神经元的三层神经网络来描述, 该神经网络可以精确地表达从输入到输出的映射关系。

2.2 遗传算法概述

遗传算法是将个体编成具有一定长度的染色体, 这个过程称为编码。让每个染色体对应一个适应度函

基金项目: 国家自然科学基金委和中国工程物理研究院联合基金 (10076014)

作者简介: 葛培明: (1978.1), 男, 西南交通大学在读研究生

陈虬: (1940), 男, 江苏苏州人, 西南交通大学教授, 博士生导师

数值, 用这个值代表对环境(即所要解决的问题)的适应程度, 简称为适应度。遗传算法的一般过程是: 首先随机产生一定数目的初始染色体, 将这些染色体组成一个种群, 种群中染色体的数目称为种群的规模; 计算各染色体的适应度, 将其作为评价染色体好坏的依据。其次, 进行一系列遗传操作, 包括选择操作、交叉操作和变异操作。选择操作, 是为了从当前种群中筛选出相对优良的染色体, 使它们成为新一代染色体, 在这个过程中, 染色体的适应度越高, 其被选择的概率越大。交叉操作则模仿了自然界生物进化过程中的基因重组过程; 通过交叉操作, 遗传算法的搜索能力得到了极大的提高, 可以使一代染色体的各个个体逐步趋向一致。但这一效果有可能使该算法在某一局部最优解附近徘徊不前, 即所谓的早熟现象, 不过随之进行的变异操作可以消除这一不利影响。变异操作模拟了生物在自然界中由于各种偶然因素而引起的基因突变, 可以有效地防止遗传算法的搜索陷入局部极值点而不能自拔。

2.2.1 编码

编码是联系问题空间和遗传算法表达空间的桥梁。遗传算法并不了解所要解决的实际问题的任何信息, 我们只是对所要解决的问题进行编码, 再通过译码计算适应值作用于原问题。传统遗传算法是采用二进制编码, 即各个染色体是用一定长度的 0, 1 二进制码所组成的串, 它表示寻优问题的一个解。但绝大多数工程问题大都用浮点数来表述的, 浮点数在概念上更靠近问题空间。从计算时间上考虑, 计算时把二进制数转换成浮点数, 要进行很多步指数运算, 人为地增加了问题的计算量; 从存储空间上考虑, 二进制数占有更多的空间, 使得编码更长; 从精度上考虑, 二进制码是一步步跳进的, 不连续的, 精度要求越高, 编码将会越长。所以, 本文的遗传算法采用更具优势的浮点数编码。

2.2.2 选择

适应度比例方法, 即赌盘选择法是目前遗传算法中最基础也是最常用的选择方法。在该方法中, 每个个体的选择概率和其适应度值成比例。设群体规模为 n , 其中个体 i 的适应度值为 f_i , 则被选择的概率 P_{s_i} 为

$$P_{s_i} = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j},$$

由上式可以看出, 个体的适应度值越大, 它被选择的机会也越多, 从而基因结构被遗传到下一代的可能性就越大, 即优秀的染色体有更多的生存概率。本文对上述选择策略稍加改进: 保留前一代中最优秀的个体, 如果当前代中最优个体好于前一代中的最优个体, 则放弃前一代中的最优个体, 保留当前代中的最优个体; 否则, 保留前一代中的最优个体, 并将其作为当前代中的最优个体, 然后用前一代中的最优个体替换当前代中最差的个体。采取上述办法不仅可以加速提升每一代的平均适应值, 加速淘汰最差的个体, 而且可以保存所有搜索过的个体中的最优个体。

2.2.3 交叉

在遗传算法中, 交叉算子的作用非常重要。一方面, 它使得在原来的群体中的优良个体的特性能够在一定程度上保持, 另一方面, 它使得算法能够探索新的染色体空间, 从而新的群体中的个体具有多样性。交叉算子是以一定的概率实现的, 这一概率称为交叉概率。针对不同的实际问题, 可以根据所求解问题的特殊性, 设计不同的交叉算子。一般而言, 交叉算子有单点交叉, 两点交叉, 多点交叉和均匀交叉等。交叉点越多, 可以创造更新的差别性更大的个体, 但也使得优良基因被破坏的概率大大增加。

2.2.4 变异

变异算子是对群体中的个体串的某些基因位置上的基因值作变动。就基于字符集{0, 1}的二进制编码而言, 变异操作就是把某些基因位置上的基因值取反, 即 1 变成 0, 或 0 变成 1; 对浮点数而言, 变异操作是把某些基因位置上的基因值赋以指定边界的随机值。一般来说, 变异算子的基本操作步骤是:

- ① 在群体中所有个体的码串范围内随机地确定基因位置;
- ② 以事先设定的变异概率 P_m 来对这些基因位置的基因进行变异。

遗传算法中, 交叉算子因其全局搜索能力而作为主要算子, 变异算子因局部搜索能力而作为辅助算子。正如交叉算子以一定的概率进行一样, 变异算子也是以一定的概率来执行的。这个概率称为变异概率。遗

传算法通过交叉和变异这一对相互配合又相互竞争的操作而使其具备兼顾全局和局部的均衡搜索能力。所谓相互配合,是指当群体在进化中陷入搜索空间中某个超平面而仅靠交叉不能摆脱时,通过变异操作可有助于这种摆脱;所谓相互竞争,是指当通过交叉已形成所期望的基因块时,变异操作有时可能破坏这些基因块。正如自然界的任何事物都存在辩证的两方面一样,交叉和变异作为既相互合作又相互竞争的两个方面一个都不能少。我们可以通过选择不同的遗传算法参数,如调节交叉概率和变异概率的大小来发挥一方面的优势而抑制另一方面。

2.3 进化神经网络

神经网络所表达的信息是分布在各个权值上的,因此,我们要设法使人工神经网络通过样本学习找到一组使网络的实际计算输出与样本的期望输出之间误差最小的权值。在 BP 算法的样本学习中是采用一种梯度下降算法。它存在局部优化、收敛缓慢、初始权值难以确定等缺点。而近几年发展迅速的遗传算法则具有全局优化,简单通用,适应性好等特点。鉴于此,本文将遗传算法引入神经网络权值和阈值的优化,期望可以克服神经网络本身所固有的缺点。但是,神经网络的权值和阈值较多,通常多达几十个甚至上百个,要使学习误差达到非常小,简单遗传算法可能无法胜任。为此,本文对传统遗传算法进行了若干改进,并用 BP 网络的反传算法对已经优化过的权值进行局部细调,通过这些措施,神经网络表达的信息的精度和速度上均有了较大提高。

3. 支护结构的变形预测

3.1 问题的提出

水泥土重力式支护结构^[8]在工程中应用得非常广泛。但是,该结构在应用时侧壁变形受施工方法、地质条件及周围环境等多种因素的综合影响,易产生较大的变形,因而必须对变形大小进行监控和预测。由于影响变形因素很多,且每种因素又极其复杂,因而用传统方法很难对其作出正确的预测。本文基于进化神经网络在解决复杂的、非线性的、不确定性问题的能力提出用进化神经网络对支护结构的变形进行预测。

3.2 变形预测的进化神经网络

首先要解决的是网络的拓扑结构问题。将影响变形的因素归纳为时间、基坑开挖深度、支护结构埋入基坑底以下的深度、支护结构宽度和计算点深度共 5 个,所以输入层有 5 个神经元,根据上述的映射存在定理,隐含层应有 $2 \times 5 + 1 = 11$ 个神经元,该结构只有一个输出,即结构的变形,所以输出层只有 1 个神经

元。神经元的映射函数取为 Sigmoid 函数,即 $f(x) = \frac{1}{1 + e^x}$ 。

其次是对本问题的编码。本文采用浮点数编码并按以下方式进行:每一个权值和阈值用一个浮点数表达,分别组成权值串和阈值串,然后连起来组成一个串,即问题的一个解或称为一个染色体。虽然权值串和阈值串连起来组成一个串,但在执行交叉操作时仍单独进行,这样做可以防止对染色体的数据结构进行的不合理的破坏。

本文选择算子采用最常用的赌盘选择法。交叉算子采用两点交叉,具体操作为:以交叉概率 $P_c = 0.6$ 在群体中随机选择要交叉操作的染色体,然后把它们两两组合,在每对染色体基因串随机确定两个交叉点,实行交叉时,这两点前或后的两个个体的部分结构进行互换,并生成两个新个体。但考虑到本文优化的对象是神经网络的权值和阈值,它们是一条染色体中性质不同的两类参数,所以随机点的位置是有讲究的。两个随机点一个限定在权值串内,另一个限定在阈值串内,其效果相当于权值串和阈值串分别独立进行单点交叉。自然界总是充满矛盾与和谐,希望通过这种交叉方式能在扩宽搜索空间和破坏优良基因的矛盾中找到一个和谐的平衡点。变异算子采用均匀变异,具体作法为:随机选择群体中的一个染色体,再在这个染色体中随机选取一个基因,然后随机产生一个指定范围内的小的随机数加到这个基因值上,使该基因值有一个小的改变,然后组成一个新的染色体。

虽然遗传算法的变异算子有局部搜索能力,但这种能力比起神经网络所用的 BP 算法要弱,所以本文采用神经网络的 BP 算法对经过遗传算法优化的网络权值进行局部细调。具体做法是,先用遗传算法优化网络权值到某一指定误差,该误差通常来说作为神经网络的最终预测权值还太粗糙,将这组粗糙的权值作

为神经网络的初始权值用 BP 算法使误差进一步减小,直到达到所最终要求的精度。计算表明,这是一种有效的方法。

下面结合支护结构变形问题总结一下整个过程的基本步骤:

(1) 对问题进行编码,该问题神经网络的拓扑结构为输入层 5 个神经元,只有一个隐含层 11 个神经元,输出层只有一个神经元。编码时用 66 个浮点数组成一列表示上述拓扑结构神经网络的 $11 \times 5 + 11 \times 1 = 66$ 个权值,用 $11 + 1 = 12$ 个浮点数组成一列表示隐含层 11 个神经元和输出层 1 个神经元的阈值(第一层只是输入层,神经元没有阈值)。然后把 66 个权值基因和 12 个阈值基因组成一串数列构成一个染色体;

(2) 随机产生指定规模的初始群体,即随机产生 N 条染色体,组成第 0 代群体。其中 N 为设定的群体规模,每一条染色体代表一组权值和阈值;

(3) 把每一条染色体数据译码成所对应的一组网络权值和阈值,用它们计算样本的网络输出,设

网络输出为 O_i ,期望输出为 P_i ,适应度函数为 $E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}$,依据适应度函数公式计算该染色

体的适应度;

(4) 根据赌盘选择原则选择若干适应度值较大的个体直接进入下一代;

(5) 对当前一代群体以交叉概率 P_c 进行交叉操作;

(6) 对当前一代群体以变异概率 P_m 进行变异操作;

(7) 重复第三步到第六步,直到迭代完指定的代数或达到指定的精度。

3.3 遗传算法参数的选择

(1) 群体的规模大小 N 。群体规模应该越大越好, N 越大,个体的多样性越高,染色体进化为最优解的机会也就越高,算法陷入局部解的危险就越小。但 N 太大,算法的计算量也会大大增加,根据大量研究的资料和文献报道,实际应用中群体规模的大小一般为几十到几百,这可能是综合了精度和速度得出的结果。在本文的算例中,取 $N = 200$ 。

(2) 交叉概率 P_c 。每一代中都有 $N \times P_c$ 个染色体进行交叉操作。本文算例中 $P_c = 0.6$ 。

(3) 变异概率 P_m 。变异概率是算法中的一个重要参数。它直接影响到算法的收敛性和最终解的性能。变异概率大,会使得算法能不断地探索新的解空间,增加模式的多样性。但较大的变异概率会影响算法的收敛性。在实际应用中, P_m 通常是一个较小的值。根据经验,该参数一般在 0.001 到 0.01 之间。本文算例取 $P_m = 0.001$;

3.4. 计算结果

样本数据见文献 [8]。对人工神经网络,取多组初始参数进行测试,并将其中测试结果最好的一组 and 进化神经网络结果进行比较。下表显示了它们的比较情况:

表 1: ENN 预测值和 ANN 预测值与实测值的比较

编号	网络输入值					ENN 预测 值	ENN 误 差	ANN 预 测值	ANN 误 差	实测值
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5					
1	0.05	0.536	0.464	0.32	0.3	0.071	2.9%	0.072	4.4%	0.069
2	0.09	0.536	0.464	0.32	0.1	0.174	3.5%	0.178	5.9%	0.168
3	0.09	0.536	0.464	0.32	0.6	0.073	2.6%	0.071	5.3%	0.075
4	0.15	0.536	0.464	0.32	0.4	0.184	1.7%	0.186	2.8%	0.181
5	0.47	0.536	0.464	0.32	0.16	0.432	3.6%	0.429	3.8%	0.448

从上表可以看出,进化神经网络在计算精度上较人工神经网络有了一定程度的提高。另外,一般情况下进化神经网络在计算速度上较人工神经网络会提高数倍甚至达十几倍。

4. 小结

计算结果表明,本文提出的进化神经网络方法,可以应用于支护结构的变形预测。与人工神经网络相比,人为干涉更少,可靠性更高,达到相同精度计算时间更短,因而其应用前景也更广泛。

参考文献:

- [1] 阎平凡,张长水.人工神经网络与模拟进化计算.北京:清华大学出版社, 2000
- [2] 刘 勇,康立山,拜毓屏.非数值并行算法—遗传算法.北京:科学出版社, 1995
- [3] 陆多桂等.机遇人工神经网络的结构近似分析方法的研究.中国科学(A 辑), 1994(6)
- [4] Zbigniew Michalewicz. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996
- [5] Angeline, P.J. and Kinnear, K.E.(Editors), Advances in Genetic Programming II, MIT Press, Cambridge MA,1996
- [6] 靳 蕃. 神经计算智能基础—原理·方法. 新世纪学术专著丛书. 成都:西南交通大学出版社, 2000
- [7] S. T. Magri, et.al., Application of Neural Network for Detection of Changes in Nonlinear System, J, Engng. Mech. ASCE.126(7),2000
- [8] 龚晓南主编. 深基坑工程设计施工手册. 中国建筑工业出版社,1998.7
- [9] 张吉萍,陈 虬. BP 网络在边坡稳定性分析中的应用. 西南交通大学学报,Vol36,No.6.2001