**1.2.2 BP神经网络模型**

研究基于BP神经网络的运算原理即工作信号正向传递子过程及误差信号反向传递子过程，反复修正权值和阀值，使得误差函数值达到最小的特性建立BP神经网络模型。首先输入数据正向传播，构建参数和输入值的关系，检验预测值与实际值的误差，再反向传播修复权重；读入新数据后再进行正向传播预测，再反向传播修正，多次循环达到最小损失值后进行正交试验结果的优化。设计的网络模型为输入层、隐藏层和输出层三层神经网络，利用平方差作为损失函数，Sigmod函数作为激活函数。输入层对应中和渣掺量、晶须掺量、水泥与矿渣掺量之比、聚羧酸减水剂掺量以及柠檬酸缓凝剂掺量，隐藏层进行数据的归一化处理，输出层对应镍粗精矿产率，图3为BP神经网络模型示意图。

信息正向传播：

误差反向传播：

输入层

输出层

隐藏层

中和渣掺量

晶须掺量

水泥与矿渣掺量之比

聚羧酸减水剂掺量

柠檬酸缓凝剂掺量

7d抗折强度

图3 三层神经网络模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of three-layer neural network model

本研究在正交试验的基础上，利用BP神经网络模型进行网络仿真模拟，检测网络仿真模拟结果与实际试验结果的误差，当模型误差在允许范围内时，利用该神经网络模型优化正交试验结果。首先由正交试验结果分析得到7d抗折强度和7d抗压强度的最优组合，然后将其中4种最优因素设为定值，变换剩余的1种因素，利用神经网络模型得到仿真曲线，该曲线的最高点即为优化后的因素水平的最优值。

1. **结果与讨论**

**2.1正交试验结果分析**

研究以中和渣掺量（A）、晶须掺量（B）、水泥与矿渣掺量之比（C）、聚羧酸减水剂掺量（D）及柠檬酸缓凝剂掺量（E）5个因素为自变量，各个因素分别设置4个水平。设计的L16（45）正交试验如表2所示，正交试验结果如表3所示。

表2正交试验不同因素水平及用量表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 因素  水平 | A中和渣  掺量/% | B晶须掺  量/ % | C水泥：矿渣 | D减水剂  掺量/% | E缓凝剂  掺量/% |
| 1 | 2 | 1 | 20:0 | 0.8 | 0.06 |
| 2 | 5 | 3 | 15:5 | 1.0 | 0.08 |
| 3 | 8 | 5 | 10:10 | 1.2 | 0.10 |
| 4 | 11 | 7 | 5:15 | 1.4 | 0.12 |

表3正交试验安排及试验结果表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验编号 | A水平 | B水平 | C水平 | D水平 | E水平 | 7d抗压强度/MPa |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13.46 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 12.11 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 14.27 |
| 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 14.33 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 12.08 |
| 6 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 11.85 |
| 7 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 13.93 |
| 8 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 13.67 |
| 9 | 3 | 1 | 3 | 4 | 2 | 12.08 |
| 10 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1 | 12.34 |
| 11 | 3 | 3 | 1 | 2 | 4 | 12.03 |
| 12 | 3 | 4 | 2 | 1 | 3 | 13.36 |
| 13 | 4 | 1 | 4 | 2 | 3 | 11.33 |
| 14 | 4 | 2 | 3 | 1 | 4 | 11.33 |
| 15 | 4 | 3 | 2 | 4 | 1 | 12.99 |
| 16 | 4 | 4 | 1 | 3 | 2 | 13.38 |

2.2 BP神经网络预测与优化

2.2.1 BP神经网络预测

本研究在已知正交试验结果的基础上，通过python语言建立BP神经网络模型，对7d抗折强度和7d抗压强度进行神经网络训练仿真，模型训练误差曲线。

2.2.2 BP神经网络优化正交试验结果

本研究在正交试验得到最优因素组合的基础上，固定其他4种影响因素，变换1种影响因素，然后利用BP神经网络模型进行数据模拟优化，结果如图5~图9所示。

图5为固定中和渣掺量为5%、晶须掺量为7%、水泥与矿渣掺量之比为10:10和聚羧酸减水剂掺量为1.0%时，改变柠檬酸缓凝剂掺量；

图6为固定晶须掺量为7%、水泥与矿渣掺量之比为10:10、聚羧酸减水剂掺量为1%和柠檬酸缓凝剂掺量为0.06%时，改变中和渣掺量

图7为固定中和渣掺量为5.0%、晶须掺量为7%、水泥与矿渣掺量之比为10:10和柠檬酸缓凝剂掺量为0.06%时，改变聚羧酸减水剂掺量；

图8为固定中和渣掺量为5.0%、水泥与矿渣掺量之比为10:10、聚羧酸减水剂掺量为1%和柠檬酸缓凝剂掺量为0.06%时，改变晶须掺量；

图9为固定中和渣掺量为5.0%、晶须掺量为7%、聚羧酸减水剂掺量为1%和柠檬酸缓凝剂掺量为0.06%时，改变水泥与矿渣掺量之比。