

《数据挖掘》课程综合实践（考试）论文（报告）评分表

姓名：林明圣	班级：信科 12103 班
学号：2126010408	E-mail: 2488433241@qq.com
项目代码地址：https://github.com/MingShengLin/1-.git	
考核项目	考核分数
论文的选题合理性（10 分）	
论文的基本工作量（25 分）	
论文的表达流畅度（15 分）	
论文的结构合理性（10 分）	
论文的内容准确性（20 分）	
论文的观点创新性（5 分）	
附录代码的规范性（15 分）	
总成绩（总分 100 分）	

评语：

教师签名：

日 期：

基于回归模型的插层熔喷非织造材料的性能研究

姓名：林明圣

学号： 2126010408 E-mail: 2488433241@qq.com

摘要：

插层熔喷非织造材料相较于传统类型，在压缩回弹性和过滤效率方面展现出更优越的性能，预示着其将成为医用口罩制造领域的一大发展趋势。为了深入探索插层工艺对各项性能指标影响的内在规律，并揭示工艺参数与结构特性之间的关联，本研究采取了严谨的数据处理步骤，包括清除异常值和填补缺失数据，以确保分析的准确性。在此基础上，我们通过正态性检验，将六项关键指标依据其分布特点分为两组：符合正态分布的四项指标采用了 T 检验，而偏离正态分布的两项则运用了 Wilcoxon 符号秩检验。结果显示，除了透气性之外，插层处理对其他所有指标均产生了显著的正面效应。为进一步剖析工艺参数与结构变量间的复杂联系，本文选取接收距离和热空气速度作为解释变量（自变量），并将结构变量设定为响应变量（因变量），实施了多项式回归分析。利用 MATLAB 编程技术，本文发现厚度、孔隙率及压缩回弹性与上述自变量之间存在二次关系，表明它们之间的关系并非线性，而是更为复杂的曲线关系。回归模型的拟合优度 R^2 值皆超过 0.89，彰显了模型的高度适用性和良好的预测能力。

关键词：插层熔喷；正态分布检验；多项式回归分析

Study on properties of intercalation melt-blown nonwovens based on regression model

MingshengLin

1. 2126010408 2. 2488433241@qq.com

Abstract:

Compared with traditional types, intercalation meltblown nonwovens show better performance in compression resilience and filtration efficiency, indicating that it will become a major development trend in the field of medical mask manufacturing. In order to deeply explore the internal law of the influence of intercalation process on various performance indicators and reveal the correlation between process parameters and structural characteristics, rigorous data processing steps were taken in this study, including clearing outliers and filling in missing data to ensure the accuracy of analysis. On this basis, through normality test, we divided the six key indicators into two groups according to their distribution characteristics: the four indicators that met the normal distribution adopted T test, while the two items that deviated from the normal distribution adopted Wilcoxon signed rank test. The results show that intercalation has a significant positive effect on all indexes except gas permeability. In order to further analyze the complex relationship between process parameters and structural variables, this paper selects the receiving distance and hot air velocity as explanatory variables (independent variables), and sets the structural variables as response variables (dependent variables), and carries out polynomial regression analysis. Using MATLAB programming technology, this paper finds that there is a quadratic relationship between thickness, porosity and compressive resilience and the above independent variables, indicating that the relationship between them is not linear, but a more complex curve relationship. The goodness of fit R^2 values of the regression models all exceeded 0.89, which demonstrated the high applicability and good prediction ability of the models.

Key words: Intercalation melt-blow; Normal distribution test; Polynomial regression analysis

0 引言

口罩制造不可或缺的原材料——熔喷非织造材料，凭借其卓越的过滤效能、简化的生产工艺、经济的成本及轻巧的质地，在全球企业界备受瞩目。然而，这种材料因纤维极度细小，在应用中遭遇了压缩回弹性不足的问题，从而影响了材料性能的稳定性。针对这一挑战，科研人员创新性地开发了“插层熔喷”技术，通过在聚丙烯（PP）熔融喷丝过程中巧妙融入涤纶（PET）短纤维等增强材料，成功研制出具有独特“Z 型”构造的新型插层熔喷非织造材料。

熔喷非织造技术是一种能够生成超微纤维的先进纺织工艺，所产出的纤维因其极细微特性，在医疗领域被广泛应用于防护装备如隔离服和口罩的制造，为医护人员提供有效屏障。鉴于标准熔喷工艺的产物在回弹性能上的局限性，科研团队对工艺进行了革新，引入了插层熔喷技术。该技术通过增设特殊设备来梳理并适时导入短纤维至熔喷纤维流中进行复合，不仅保留了原有材料的优点，还显著提升了成品的结构稳定性和弹性，造就了性能更佳的插层熔喷复合非织造材料。



图 1 熔喷非织造布车间

制备插层熔喷非织造材料的工艺涉及众多参数，这些参数之间相互作用，复杂性进一步加剧，特别是在引入插层气流后。因此，确定关键工艺参数（接收距离和热空气速度）对结构特性（厚度、孔隙率及压缩回弹性）的影响，进而这些结构特性如何决定最终产品的性能（过滤阻力、过滤效率及透气性），成为了一个颇为复杂的课题。

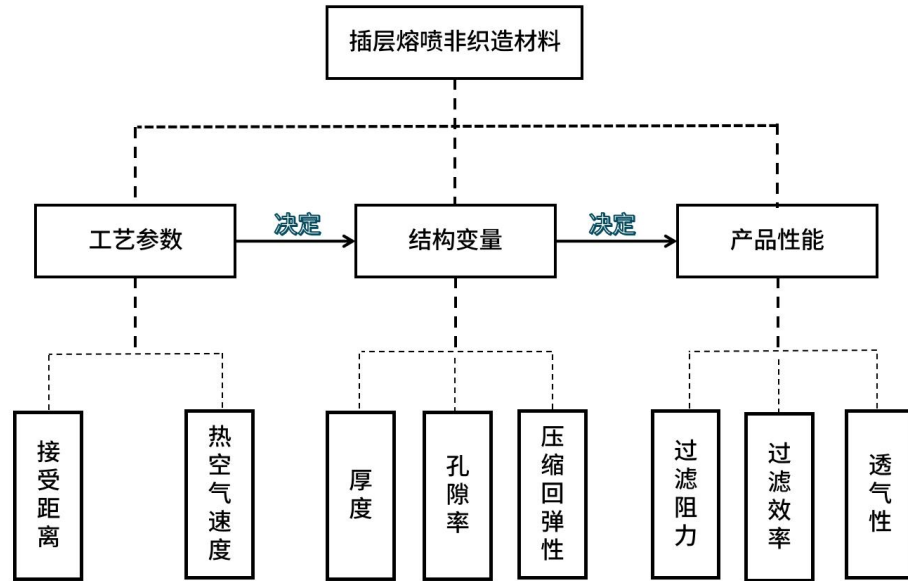


图 2 主要参数介绍

1 插层后结构变量、产品性能的变化规律

1.1 数据可视化与异常值处理

为了直观感受插层对结构变量和产品性能变化带来影响，本文利用 SPSSPRO 将 data1 中的数据进行了初步的可视化，得到以下图 3。

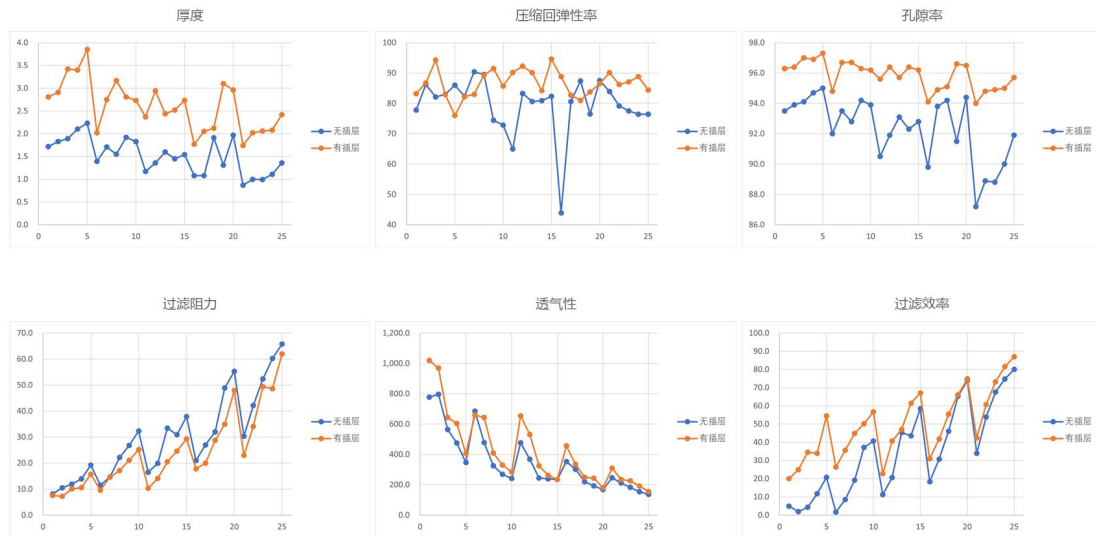


图 3 数据初步可视化

从图 3 可以看出插层对结构变量和产品性能各指标的值大小有提升或下降，但同时发现对于压缩回弹率这一结构变量而言，不进行插层的数据当中，第 16 组的数据过低，在相同热空气速度的条件下，改变接收距离和插层率带来的影响应当是连续的，对比第 1、6、16、21 组数据，可以发现，第 16 组数据比其他的数据小了将近一半，本文认为该数据可能是由于记录错误导致的异常值。为了更加明显地看出该数据地极端情况，本文在此给出压缩回弹性的盒须图，如下图 4 所示。

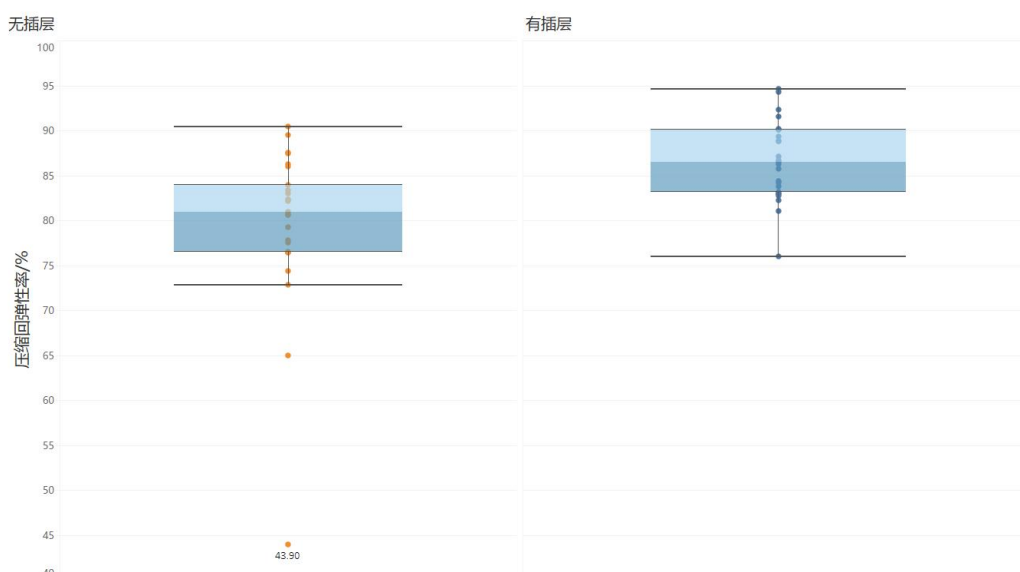


图 4 压缩回弹性率的盒须图

通过上述盒须图可以发现，第 6 组和第 16 组数据在下须范围以外，第 6 组数据其偏离总体的程度不大，本文认为第 6 组数据是偶然误差，不做处理；而第 16 组数据偏离较大，认定为过失误差，本文用线性插值的方法，即相邻两组实验数据（第 11 组和第 21 组）的平均值来代替原有的异常值。

1.2 定性研究

本文通过对同一组实验样本插层前后的实验数据差值按照插层率的大小排序进行正态分布检验，来判断插层前后各类参数差值是否服从正态分布。本文将“ H_0 插层前后各类参数差值不服从正态分布”作为原假设，相应的“ H_1 插层前后各类参数差值服从正态分布”作为备择假设。

检验结果如下表所示：

表 1 正态分布检验结果

因素	厚度	孔隙率	压缩回弹性率	过滤阻力	过滤效率	透气性
P 值	0.203	0.467	0.007	0.146	0.33	0.038
正态分布	是	是	否	是	是	否

根据上表可以发现除了压缩回弹性率和透气性的 p 值小于 0.05 之外，其余指标的 p 值都大于 0.05，即对于大部分的指标，可以拒绝原假设，对于压缩回弹性率和透气性，未能拒绝原假设。

满足正态性检验的厚度、孔隙率、过滤阻力和过滤效率 4 项指标正态分布检验可视化图形如下图所示：

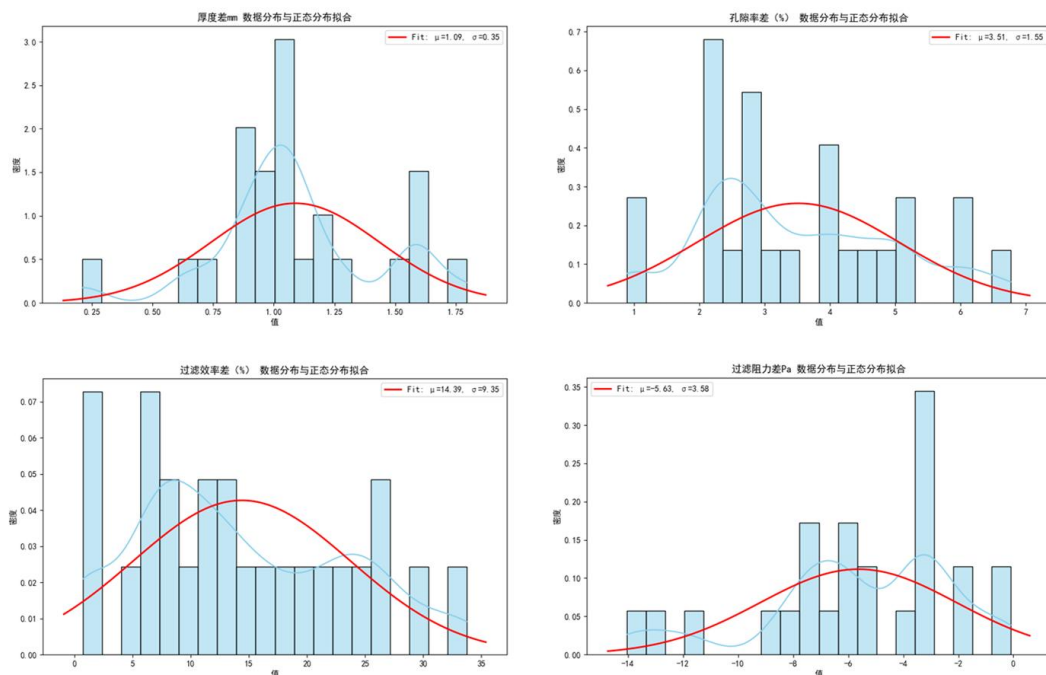


图 5 参数插层前后差值服从正态分布检验

从上图可知数据视觉上遵循正态分布，本文针对服从正态分布的 4 项指标进行 T 检验，检验结果如下表所示：

表 2 检验检验结果

匹配变量	t 值	自由度	P 值	Cohen's d
厚度	-15.607	24	0.001	3.121
孔隙率	-11.306	24	0.001	2.261
过滤阻力	7.866	24	0.001	1.573
过滤效率	-7.696	24	0.001	1.539

不满足正态性检验的压缩回弹性率和透气性两项指标正态分布检验可视化图形如下图所示：

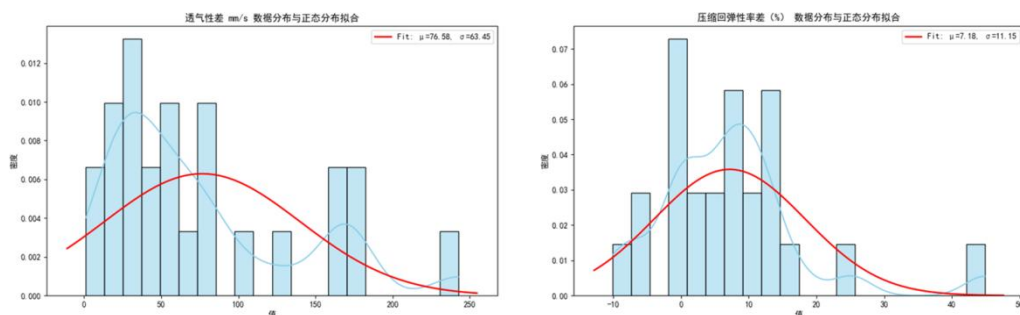


图 6 参数插层前后差值不服从正态分布检验

从上图可知数据视觉上不遵循正态分布，本文针对服从正态分布的 4 项指标进行 Wilcoxon 符号秩检验，检验结果如下表所示：

表 3 Wilcoxon 符号秩检验结果

匹配变量	Z 值	自由度	P 值	Cohen's d
压缩回弹率	2.973	24	0.003	0.983
透气性	4.211	24	0.001	0.347

通过上述结果,可得到结构变量中厚度、孔隙率、压缩回弹性变化幅度于插层前后显著增大,产品性能中过滤阻力、过滤效率变化幅度于插层前后显著增大,产品性能中透气性插层前后变化幅度则属于中等程度。

2. 工艺参数与结构变量之间的关系

2.1 数据处理

将原始数据 data1 中未插层的结构变量数据和 data2 中各个组别的工艺参数数据进行汇总,部分数据如下表所示,详细数据见附录,

表 4 汇总数据部分示例

组别	厚度	孔隙率	压缩回弹性率	接收距离	热风速度
1	1.715	93.52	77.84	40	800
2	1.83	93.93	86.23	40	900
3	1.89	94.12	82.12	40	1000
4	2.095	94.7	83.01	40	1100
5	2.235	95.03	86.04	40	1200

2.2 非线性回归模型建立与求解

根据上方数据对厚度、孔隙率、压缩回弹性率三个结构变量,以接收距离、热空气速度为自变量建立多元非线性回归方程模型:

$$y_i = \rho_0 x_1^2 + \rho_1 x_2^2 + \rho_3 x_1 x_2 + \rho_4 x_1 + \rho_5 x_2 + \rho_6 (i=1,2,3) \quad (1)$$

其中 y_i 表示结构变量, x_1 表示接收距离, x_2 表示热空气速度。

利用 SPSS 进行计算得到结构变量多项式方程系数如下表所示:

表 5 非线性回归方程系数

结构变量	ρ_0	ρ_1	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6
厚度	0.0011	0	0	-0.0194	0.0083	-2.977
孔隙率	-0.0015	0	-0.0002	0.352	0.026	75.0648
压缩回弹性率	-0.0207	0	0	1.1539	0.0588	43.9529

同时本文对回归方程的拟合优度 R^2 进行计算,得到以下结果

由上表可以看出,拟合优度 R^2 都大于 0.89,可以认为得到的回归方程有较好拟合效果,利用 Matlba 绘制非线性回归预测值与真实值对比图和回归方程二次曲面图如下所示:

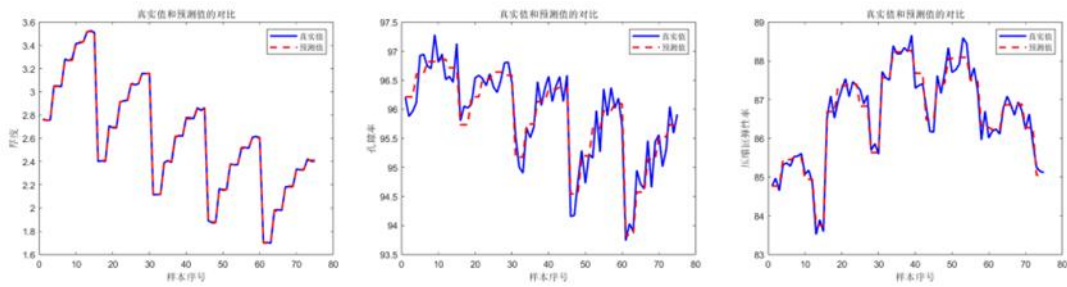


图 7 非线性拟合结果对比图

同时，本文对求解得到的多项式方程所对应的二次曲面图形进行可视化如下图所示：

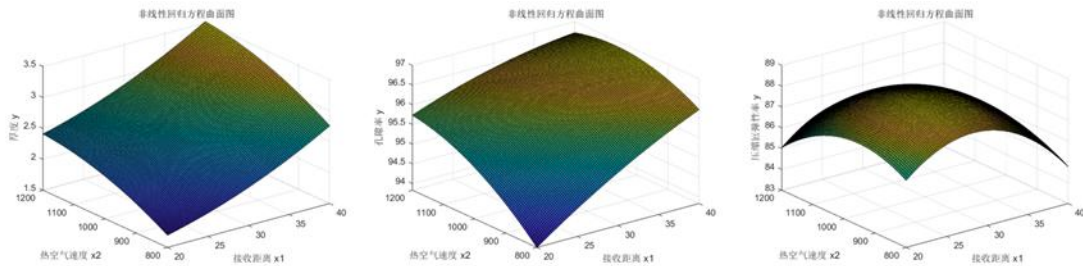


图 8 非线性回归方程二次曲面图

综上可得产品工艺和结构变量的关系符合非线性回归方程，具体关系式如下：

$$y_1 = 0.0011x_1^2 - 0.0194x_1 + 0.0083x_2 - 2.9770$$

$$y_2 = -0.0015x_1^2 - 0.0000x_2^2 - 0.0002x_1x_2 + 0.3520x_1 + 0.0260x_2 + 75.0648$$

$$y_3 = -0.0207x_1^2 + 1.1539x_1 + 0.0588x_2 + 43.9529$$

其中其中 y_1 表示厚度， y_2 表示孔隙率， y_2 表示压缩回弹效率， x_1 表示接收距离， x_2 表示热空气速度。

从图像中可知接收距离增大时，通过插层熔喷技术得到的纤维粘合性较差，会导致纤网的蓬松性提升，纤维直径增大，孔隙率随之增大。这与武辉的研究结论^[2]是一致的。

3. 结论

通过上述分析和计算，本文得出以下结论：是否插层对除透气性之外的指标变化都有显著影响。结构变量与工艺参数之间存在十分明显的非线性关系，拟合因子 R^2 均达到 0.89 以上，也从中得到接收距离增大时，通过插层熔喷技术得到的纤维粘合性较差，会导致纤网的蓬松性提升，纤维直径增大，孔隙率随之增大。

4. 参考文献

- [1]王滢靓,龚小容,江永,等.基于 NSGA-II 的插层熔喷非织造材料工艺参数优化方法[J].武汉纺织大学学报,2023,36(06):60-66.
- [2]武辉.插层熔喷气流场模拟及其过滤材料性能的研究[D].天津工业大学,2018.
- [3]魏泽辉.基于多元非线性回归分析的光伏发电系统经济模型预测研究[J].电站系统工程,2024,40(03):1-5.
- [4]刘人文,周伟,周亚萍,等.基于非线性回归的暴雨泥石流堵河预测[J/OL].人民长江,1-10[2024-05-24]
- [5]李果,李军,吴高华,等.基于 SPSS 的微耕机质量调查结果正态检验分析[J].农机质量与监督,2023,(07):26-27.
- [6]郭轶斌,李佳迅,吴聘,等.极小样本两独立定量资料假设检验方法比较[J].数理医药学杂志,2023,36(07):481-485.

5. 附录

数据：

Data1:

组号	编号	厚度 mm	孔隙率(%)	压缩回弹性率(%)	过滤阻力 Pa	过滤效率(%)	透气性 mm/s	插层率(%)
1	1#	1.715	93.52	77.84	8.13	4.967	777.1	
	2#	2.81	96.28	83.2	7.533	19.967	1019.67	36.44
2	1#	1.83	93.93	86.23	10.47	1.933	795.57	
	2#	2.91	96.41	86.65	7.2	24.967	968.63	24.74
3	1#	1.89	94.12	82.12	11.87	4.3	564.93	
	2#	3.425	96.95	94.33	10.133	34.6	643.4	31.45
4	1#	2.095	94.7	83.01	13.9	11.767	474.5	
	2#	3.4	96.93	82.88	10.6	33.9	603.17	19.37
5	1#	2.235	95.03	86.04	19.23	20.767	347.23	
	2#	3.845	97.3	75.97	15.7	54.5	405.83	31.19
6	1#	1.39	92.01	82.33	11.47	1.733	685.97	
	2#	2.015	94.82	82.19	9.533	26.4	660.3	16.53
7	1#	1.705	93.48	90.36	14.67	8.5	477.57	
	2#	2.75	96.7	83.05	14.567	35.567	642.9	19.73
8	1#	1.55	92.83	89.47	22.17	19.2	326.33	
	2#	3.165	96.7	89.29	17.1	44.867	408.6	21.72
9	1#	1.915	94.2	74.37	26.77	37.2	268.83	
	2#	2.81	96.28	91.49	21.1	50.167	329.73	18.62
10	1#	1.83	93.93	72.79	32.3	40.667	242.4	
	2#	2.725	96.17	85.73	25.167	56.733	284.77	13.87
11	1#	1.17	90.5	65.03	16.53	11.3	477.37	
	2#	2.365	95.58	90.2	10.3	22.833	653.47	7.63
12	1#	1.365	91.86	83.33	19.9	20.567	367.5	
	2#	2.935	96.44	92.31	14.067	40.667	530.5	19.84
13	1#	1.6	93.06	80.56	33.4	45.433	244.47	
	2#	2.445	95.73	90.11	20.467	47	325.03	4.84
14	1#	1.45	92.34	80.91	30.9	43.467	239.1	

	2#	2.525	96.43	84.24	24.633	61.433	262.07	22.12
15	1#	1.54	92.78	82.31	37.87	58.367	233.53	
	2#	2.725	96.17	94.59	29.333	67.133	234.67	2.5
16	1#	1.085	89.76	43.91	21.03	18.3	352.67	
	2#	1.775	94.12	88.76	17.8	30.967	455.7	15.69
17	1#	1.08	93.83	80.63	27.03	30.7	303.07	
	2#	2.05	94.91	82.65	19.967	41.733	335.37	29.79
18	1#	1.905	94.17	87.4	32.03	46.1	219.73	
	2#	2.115	95.06	80.98	28.733	55.367	249.43	50.87
19	1#	1.31	91.52	76.54	48.93	65.333	192.5	
	2#	3.105	96.64	83.82	34.9	66.067	242.6	43.72
20	1#	1.97	94.36	87.5	55.27	73.933	168.63	
	2#	2.96	96.47	86.47	48	74.933	180	21.71
21	1#	0.87	87.23	83.89	30.27	34	245.7	
	2#	1.74	94	90.12	23.033	42.333	309.93	11.32
22	1#	1	88.89	79.17	42.17	53.9	211.4	
	2#	2.02	94.83	86.21	34.1	60.733	234.13	19.35
23	1#	0.995	88.83	77.52	52.33	67.567	182.63	
	2#	2.06	94.93	87.12	49.367	73.2	226.03	24.02
24	1#	1.11	89.99	76.39	60.2	74.767	154.2	
	2#	2.085	94.99	88.83	48.567	81.633	191.1	35.88
25	1#	1.365	91.86	76.39	65.77	80.033	137.17	
	2#	2.425	95.69	84.38	62.033	86.967	156.33	32.95
	1#是熔喷样品即未插层，2#为插层样品							

Data2:

热风速度 接收距离	800	900	1000	1100	1200
20	21	22	23	24	25
25	16	17	18	19	20

30	11	12	13	14	15
35	6	7	8	9	10
40	1	2	3	4	5
表格里的编号为组号，与 data1 第一列对应					

数据来源：第三届“华数杯”数学建模竞赛 C 题

汇总数据：

组别	厚度	孔隙率	压缩回弹性率	接收距离	热风速度
1	1.715	93.52	77.84	40	800
2	1.83	93.93	86.23	40	900
3	1.89	94.12	82.12	40	1000
4	2.095	94.7	83.01	40	1100
5	2.235	95.03	86.04	40	1200
6	1.39	92.01	82.33	35	800
7	1.705	93.48	90.36	35	900
8	1.55	92.83	89.47	35	1000
9	1.915	94.2	74.37	35	1100
10	1.83	93.93	72.79	35	1200
11	1.17	90.5	65.03	30	800
12	1.365	91.86	83.33	30	900
13	1.6	93.06	80.56	30	1000
14	1.45	92.34	80.91	30	1100
15	1.54	92.78	82.31	30	1200
16	1.085	89.76	43.91	25	800
17	1.08	93.83	80.63	25	900
18	1.905	94.17	87.4	25	1000
19	1.31	91.52	76.54	25	1100
20	1.97	94.36	87.5	25	1200
21	0.87	87.23	83.89	20	800
22	1	88.89	79.17	20	900
23	0.995	88.83	77.52	20	1000
24	1.11	89.99	76.39	20	1100
25	1.365	91.86	76.39	20	1200

插层前后差值：

厚度差 mm	孔隙率差 (%)	压缩回弹性率差 (%)	过滤阻力差 Pa	过滤效率差 (%)	透气性差 mm/s	插层率 (%)
1.185	3.39	12.28	8.537	8.766	1.14	2.5
0.845	2.67	9.55	12.933	1.567	80.56	4.84
1.195	5.08	25.17	6.23	11.533	176.1	7.63
0.87	6.77	6.23	7.237	8.333	64.23	11.32
0.895	2.24	12.94	7.133	16.066	42.37	13.87
0.69	4.36	44.85	3.23	12.667	103.03	15.69
0.625	2.81	0.14	1.937	24.667	25.67	16.53

0.895	2.08	17.12	5.67	12.967	60.9	18.62
1.02	5.94	7.04	8.07	6.833	22.73	19.35
1.305	2.23	0.13	3.3	22.133	128.67	19.37
1.045	3.22	7.31	0.103	27.067	165.33	19.73
1.57	4.58	8.98	5.833	20.1	163	19.84
0.99	2.11	1.03	7.27	1	11.37	21.71
1.615	3.87	0.18	5.07	25.667	82.27	21.72
1.075	4.09	3.33	6.267	17.966	22.97	22.12
1.065	6.1	9.6	2.963	5.633	43.4	24.02
1.08	2.48	0.42	3.27	23.034	173.06	24.74
0.97	1.08	2.02	7.063	11.033	32.3	29.79
1.61	2.27	10.07	3.53	33.733	58.6	31.19
1.535	2.83	12.21	1.737	30.3	78.47	31.45
1.06	3.83	7.99	3.737	6.934	19.16	32.95
0.975	5	12.44	11.633	6.866	36.9	35.88
1.095	2.76	5.36	0.597	15	242.57	36.44
1.795	5.12	7.28	14.03	0.734	50.1	43.72
0.21	0.89	6.42	3.297	9.267	29.7	50.87

程序代码：

检验（正态检验、T 检验、Wilcoxon 符号秩检验）

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from scipy import stats
from scipy.stats import wilcoxon, ttest_1samp
import pandas as pd

# 读取 excel 文件
file_path = '插层前后差值.xlsx'
df = pd.read_excel(file_path)

# 设置 matplotlib 中文字体支持中文显示
plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']
plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False

# 定义函数用于执行检验并打印结果
def perform_test_and_print(column_data, test_name, test_func):
    _, p_val = test_func(column_data)
    result = "拒绝原假设：数据不符合正态分布条件。" if p_val < 0.05 else "未能拒绝原假设：数据符合正态分布条件。"
    print(f"{test_name}: p-value = {p_val}, {result}")

# 遍历除最后一列外的所有列
for col in df.columns[:-1]:
```

```

sample_data = df[col]
statistic, p_value = stats.shapiro(sample_data)

print(f"Column: {col}")
print(f"Statistic: {statistic}, p-value: {p_value}")

# 数据可视化
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.histplot(sample_data, bins=20, color="skyblue", kde=True, stat='density',
kde_kws={'bw_adjust': 0.5})

mu = sample_data.mean()
sigma = sample_data.std()
xmin, xmax = plt.xlim()
x = np.linspace(xmin, xmax, 100)
p = stats.norm.pdf(x, mu, sigma)
plt.plot(x, p, 'r', linewidth=2, label=f'Fit:  $\mu={mu:.2f}$ ,  $\sigma={sigma:.2f}$ ')

plt.title(f'{col} 数据分布与正态分布拟合')
plt.xlabel('值')
plt.ylabel('密度')
plt.legend()

alpha = 0.05
if p_value < alpha:
    print("拒绝原假设：数据不遵循正态分布。")
    # 对非正态分布数据进行 Wilcoxon 符号秩检验
    perform_test_and_print(sample_data, "Wilcoxon 符号秩检验", wilcoxon)
else:
    print("未能拒绝原假设：数据视觉上遵循正态分布。")
    # 对正态分布数据进行 T 检验
    perform_test_and_print(sample_data, "T 检验", lambda
x: ttest_1samp(x, popmean=0))

plt.show()
plt.close()

print("所有列的正态性检验、Wilcoxon 符号秩检验及 T 检验已完成。")

```

非线性回归（python）：

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit
from sklearn.model_selection import train_test_split

```

```

# 读取数据
data = pd.read_excel('normalized_data.xlsx')

# 设置matplotlib 支持中文显示
plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']
plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False

# 定义非线性回归函数, 优化以处理数组输入
def safe_non_linear_func_vectorized(x_array, a0, a1, a2, a3, a4, a5, a6):
    x1 = x_array[:, 0]
    x2 = x_array[:, 1]
    return a0*(x1**2) + a1*(x2**2) + a3*(x1*x2) + a4*x1 + a5*x2 + a6

# 提取特征和目标变量
X = data[['接收距离', '热风速度']].values
Y_thickness = data['厚度'].values
Y_porosity = data['孔隙率'].values
Y_compr_rate = data['压缩回弹性率'].values

# 分割数据集, 增加随机状态以增加随机性, 尝试获得不同数据分布
random_states = [42, 13, 27, 8] # 示例随机状态列表, 可根据需要调整

X_train, X_test, Y_train_thickness, Y_test_thickness = train_test_split(X, Y_thickness,
                                test_size=0.2, random_state=random_states[0])
X_train, X_test, Y_train_porosity, Y_test_porosity = train_test_split(X, Y_porosity,
                                test_size=0.2, random_state=random_states[1])
X_train, X_test, Y_train_compr, Y_test_compr = train_test_split(X, Y_compr_rate,
                                test_size=0.2, random_state=random_states[2])

# 初始参数猜测, 可尝试更宽泛范围以增加初值搜索范围
params_guess = [-1, 1, -1, -1, -1, -1, -1]

# 拟合模型
try:
    params_thickness, _ = curve_fit(safe_non_linear_func_vectorized, X_train,
                                    Y_train_thickness, p0=params_guess, maxfev=500000)
    params_porosity, _ = curve_fit(safe_non_linear_func_vectorized, X_train,
                                    Y_train_porosity, p0=params_guess, maxfev=50000)
    params_compr, _ = curve_fit(safe_non_linear_func_vectorized, X_train, Y_train_compr,
                                p0=params_guess, maxfev=5000)
except RuntimeError as e:
    print("Optimization failed with error:", e)

# 绘图函数及预测保持不变...

```

```
# 预测并绘制结果...
```

```
# 绘图函数
```

```
def plot_results(Y_true, Y_pred, variable_name):  
    plt.figure(figsize=(10, 6))  
    plt.scatter(X_test[:, 0], Y_true, color='blue', label='真实值')  
    plt.plot(X_test[:, 0], Y_pred, color='red', label='预测值')  
    plt.title(f'{variable_name} 的非线性回归预测')  
    plt.xlabel('接收距离')  
    plt.ylabel(variable_name)  
    plt.legend()  
    plt.show()
```

```
# 预测并绘制结果
```

```
Y_pred_thickness = safe_non_linear_func_vectorized(X_test, *params_thickness)  
plot_results(Y_test_thickness, Y_pred_thickness, '厚度')
```

```
Y_pred_porosity = safe_non_linear_func_vectorized(X_test, *params_porosity)  
plot_results(Y_test_porosity, Y_pred_porosity, '孔隙率')
```

```
Y_pred_compr = safe_non_linear_func_vectorized(X_test, *params_compr)  
plot_results(Y_test_compr, Y_pred_compr, '压缩回弹性率')
```

非线性回归 (Matlab)

厚度 (F21) :

```
% 在此处设置数据文件路径
```

```
dataFilePath = '21.csv';
```

```
% 读取数据文件
```

```
data = csvread(dataFilePath);
```

```
% 提取自变量和因变量
```

```
x1 = data(:, 1);
```

```
x2 = data(:, 2);
```

```
y = data(:, 3);
```

```
% 构建非线性方程的矩阵形式
```

```
X = [x1.^2, x2.^2, x1.*x2, x1, x2, ones(size(x1))];
```

```
% 使用线性回归方法求解非线性模型的系数
```

```
coeffs = X\y;
```

```
% 提取系数
```

```
a = coeffs(1);
```

```
b = coeffs(2);
```

```
c = coeffs(3);
```

```
d = coeffs(4);
```

```
e = coeffs(5);
```

```
f = coeffs(6);
```



```

% 预测因变量
y_pred = a*x1.^2 + b*x2.^2 + c*x1.*x2 + d*x1 + e*x2 + f;
% 计算回归分析指标参数
SSE = sum((y - y_pred).^2);
MSE = SSE / length(y);
RMSE = sqrt(MSE);
MAE = mean(abs(y - y_pred));
R2 = 1 - SSE / sum((y - mean(y)).^2);
% 输出非线性回归方程和回归分析指标参数
fprintf('非线性回归方程: y = %.4f*x1^2 + %.4f*x2^2 + %.4f*x1*x2 + %.4f*x1 + %.4f*x2\n', a, b, c, d, e, f);
fprintf('回归分析指标参数: \n');
fprintf('SSE: %.4f\n', SSE);
fprintf('MSE : %.4f\n', MSE);
fprintf('RMSE: %.4f\n', RMSE);
fprintf('MAE : %.4f\n', MAE);
fprintf('R^2 : %.4f\n', R2);
% 绘制真实值和预测值的对比折线图
figure;
plot(y, 'b-', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(y_pred, 'r--', 'LineWidth', 2);
hold off;
legend('真实值', '预测值');
xlabel('样本序号');
ylabel('厚度');
title('真实值和预测值的对比');
孔隙率（F22）：
% 在此处设置数据文件路径
dataFilePath = '22.csv';
% 读取数据文件
data = csvread(dataFilePath);
% 提取自变量和因变量
x1 = data(:, 1);
x2 = data(:, 2);
y = data(:, 3);
% 构建非线性方程的矩阵形式
X = [x1.^2, x2.^2, x1.*x2, x1, x2, ones(size(x1))];
% 使用线性回归方法求解非线性模型的系数
coeffs = X\y;
% 提取系数
a = coeffs(1);
b = coeffs(2);
c = coeffs(3);

```

```

d = coeffs(4);
e = coeffs(5);
f = coeffs(6);
% 预测因变量
y_pred = a*x1.^2 + b*x2.^2 + c*x1.*x2 + d*x1 + e*x2 + f;
% 计算回归分析指标参数
SSE = sum((y - y_pred).^2);
MSE = SSE / length(y);
RMSE = sqrt(MSE);
MAE = mean(abs(y - y_pred));
R2 = 1 - SSE / sum((y - mean(y)).^2);
% 输出非线性回归方程和回归分析指标参数
fprintf('非线性回归方程: y = %.4f*x1^2 + %.4f*x2^2 + %.4f*x1*x2 + %.4f*x1 + %.4f*x2\n', a, b, c, d, e, f);
fprintf('回归分析指标参数: \n');
fprintf('SSE: %.4f\n', SSE);
fprintf('MSE : %.4f\n', MSE);
fprintf('RMSE: %.4f\n', RMSE);
fprintf('MAE : %.4f\n', MAE);
fprintf('R^2 : %.4f\n', R2);
% 绘制真实值和预测值的对比折线图
figure;
plot(y, 'b-', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(y_pred, 'r--', 'LineWidth', 2);
hold off;
legend('真实值', '预测值');
xlabel('样本序号');
ylabel('孔隙率');
title('真实值和预测值的对比');
压缩回弹效率（F23）：
% 在此处设置数据文件路径
dataFilePath = '23.csv';
% 读取数据文件
data = csvread(dataFilePath);
% 提取自变量和因变量
x1 = data(:, 1);
x2 = data(:, 2);
y = data(:, 3);
% 构建非线性方程的矩阵形式
X = [x1.^2, x2.^2, x1.*x2, x1, x2, ones(size(x1))];
% 使用线性回归方法求解非线性模型的系数
coeffs = X\y;
% 提取系数

```

```

a = coeffs(1);
b = coeffs(2);
c = coeffs(3);
d = coeffs(4);
e = coeffs(5);
f = coeffs(6);
% 预测因变量
y_pred = a*x1.^2 + b*x2.^2 + c*x1.*x2 + d*x1 + e*x2 + f;
% 计算回归分析指标参数
SSE = sum((y - y_pred).^2);
MSE = SSE / length(y);
RMSE = sqrt(MSE);
MAE = mean(abs(y - y_pred));
R2 = 1 - SSE / sum((y - mean(y)).^2);
% 输出非线性回归方程和回归分析指标参数
fprintf('非线性回归方程: y = %.4f*x1^2 + %.4f*x2^2 + %.4f*x1*x2 + %.4f*x1 + %.4f*x2\n', a, b, c, d, e, f);
fprintf('回归分析指标参数: \n');
fprintf('SSE: %.4f\n', SSE);
fprintf('MSE : %.4f\n', MSE);
fprintf('RMSE: %.4f\n', RMSE);
fprintf('MAE : %.4f\n', MAE);
fprintf('R^2 : %.4f\n', R2);
% 绘制真实值和预测值的对比折线图
figure;
plot(y, 'b-', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(y_pred, 'r--', 'LineWidth', 2);
hold off;
legend('真实值', '预测值');
xlabel('样本序号');
ylabel('压缩回弹性率');
title('真实值和预测值的对比');
绘制二次曲面:
clc;clear
dataFilePath = '21.csv';
% 读取数据文件
data = csvread(dataFilePath);
% 提取自变量和因变量
x1 = data(:, 1);
x2 = data(:, 2);
y = data(:, 3);
% 构建非线性方程的矩阵形式
X = [x1.^2, x2.^2, x1.*x2, x1, x2, ones(size(x1))];

```

```

% 使用线性回归方法求解非线性模型的系数
coeffs = X\y;
% 提取系数
a = coeffs(1);
b = coeffs(2);
c = coeffs(3);
d = coeffs(4);
e = coeffs(5);
f = coeffs(6);
% 生成网格点
x1_range = linspace(min(x1), max(x1), 100);
x2_range = linspace(min(x2), max(x2), 100);
[x1_grid, x2_grid] = meshgrid(x1_range, x2_range);
% 计算预测值
y_pred = a*x1_grid.^2 + b*x2_grid.^2 + c*x1_grid.*x2_grid + d*x1_grid + e*x2_grid + f;
% 绘制三维曲面图
figure;
surf(x1_grid, x2_grid, y_pred);
xlabel('接收距离 x1');
ylabel('热空气速度 x2');
zlabel('厚度 y');
title('非线性回归方程曲面图');

```