



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

工程优化期末大作业

姓名：刘郅怿

学号：S2302W0389

专业：机械

班级：机械 2311

班主任老师：王琥

2024 年 7 月 21 日

1 优化设计

优化设计是从多种方案中选择最佳方案的设计方法。优化设计的思想是最优设计，以数学中的最优化理论为基础，根据设计所追求的性能目标，建立目标函数；方法是优化方法，在满足给定的各种约束条件下使方案参数沿着方案更好的方向自动调整，以从众多可行设计方案中选出最优方案；手段是计算机，计算机运算速度极快，能够从大量方案中选出最优方案。工程优化设计是指工程设计中选择最合理的设计参数使得设计方案既满足设计要求又能降低成本的过程，在航天航空、特种装备、汽车行业等领域应用广泛。

优化设计方法种类很多，传统优化设计方法按求解方法特点可分为准则优化法、线性规划法和非线性规划法。准则优化法根据力学、物理或其他原则构造评优准则，依据此准则进行寻优。其优点是概念直观、计算简单，少约束时优化效率较高，特别适合工程应用；缺点是只能考虑一个或很少方面，多约束时优化效率大大降低，甚至不收敛。线性规划法是根据数学极值原理求解目标函数和约束条件同为设计变量的线性优化问题，主要方法有单纯形法和序列线性规划法。然而，实际工程的优化设计大都属于非线性规划，非线性程度较高的情况下，完全简化成线性问题是不妥当的，因此采用非线性规划求解此类问题。非线性规划包括无约束直接法、无约束间接法、有约束直接法和有约束间接法。其中，无约束间接法是利用函数性态，通过微分或变分进行求优，主要有梯度法、牛顿法、共扼梯度法、变尺度法等。有约束间接法先将复杂的约束优化转化为一系列容易解决的子优化问题，然后进行优化求解，主要有罚函数法、增广乘子法和序列二次规划法。优化准则法对于不同类型的约束、变量、目标函数等需导出不同的优化准则，通用性较差，且多为近似最优解；规划法需多次迭代、重复分析，代价昂贵，效率较低，往往还要求目标函数和约束条件连续、可微，这都限制了其在实际工程优化设计中的推广应用。现代优化设计理论方法，如遗传算法、神经网络、粒子群算法、进化算法等，不需要目标函数和约束条件的导数信息，且可获得全局最优解，为复杂机械的优化设计提供了新的思路和方法，取得了良好效果，并在实际工程优化设计中有了成功应用。

本文以车辆碰撞为设计系统建立数学模型，借助 MATLAB 软件用遗传算法进行优化设计。

1.1 遗传算法

遗传算法（Genetic Algorithm）是计算数学中用于解决最佳化的搜索算法，是进化算法的一种。进化算法最初是借鉴了进化生物学中的一些现象而发展起来的，这些现象包括遗传、突变、自然选择以及杂交等。遗传算法通常实现方式为一种计算机模拟。对于一个最优化问题，一定数量的候选解（称为个体）的抽象表示（称为染色体）的种群向更好的解进化。传统上，解用二进制表示（即 0 和 1 的串），但也可以用其他表示方法。进化从完全随机个体的种群开始，之后一代一代发生。在每一代中，整个种群的适应度被评价，从当前种群中随机地选择多个个体（基于它们的适应度），通过自然选择和突变产生新的生命种群，该种群在算法的下一迭代中成为当前种群。

1.2 响应面分析法

响应面设计与实验数据处理响应面优化法 响应面优化法（相应曲面法；Response Surface Methodology, RSM），是 20 世纪 90 年代初西方所兴起的一种实验统计方法。响应曲面等值线的分析寻求最优工艺参数，将复杂的未知的函数关系，在小区域内用简单的一次或二次多项式模型来拟合各因素与响应值之间的函数关系的一种统计方法，适用于解决非线性数据处理的相关问题。常用的响应面设计模型有中心组合设计（Central Composite 设计）和 BOX 设计（Box-Behnken 设计）。

2 优化设计—车辆碰撞

车辆的低速碰撞性能，包括正面偏置碰撞和尾部碰撞两种形式。其主要目的是在低速碰撞中，保证乘员人身安全的前提下，使车辆所受到的损伤最小，修复损伤的费用较低。欧盟各国以车辆价格、车辆性能、实验中损坏件的售价和维修工时作为主要依据，制定汽车保险的评价等级。

正面碰撞布置形式如图 1 所示。碰撞车辆为原车整备质量，驾驶员位置处放置一重为 75kg 的假人。碰撞速度为 151km/h，并向驾驶员一侧偏置 40%，碰撞

壁为不可变形的刚性壁障且高于试验车辆。

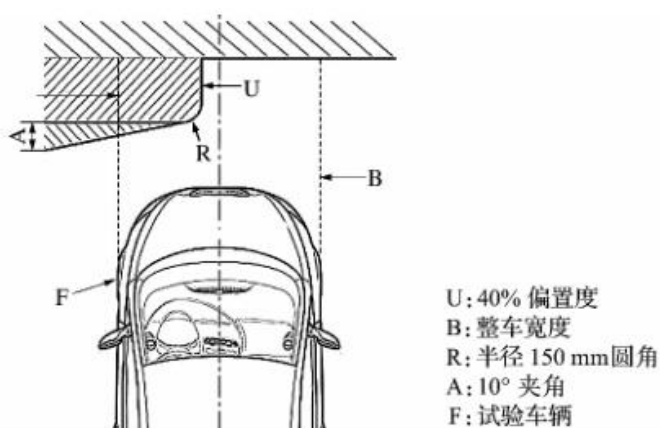


图 1 正面碰撞布置形式

2.1 优化原则

根据低速碰撞的实验特点，确定车辆设计原则。

1) 车辆保险杠、吸能盒充分变形，吸收碰撞能量。

2) 避免前纵梁、车身发生较大变形，以降低维修费用。

3) 合理设计保险杠与发动机盖、翼子板等车身覆盖件的连接和配根据以上原则，车辆的保险杠、吸能盒和前纵梁需要相互匹配，以满足低速碰撞中变形模式的要求。

本文考虑汽车高速碰撞是汽车以 56km/h 的速度正面 100%重叠刚性壁障碰撞。汽车低速碰撞即为车辆正面偏置碰撞。在碰撞变形中，两者主要区别在于车辆的前纵梁是否发生变形。高速碰撞时，以最大程度保护乘员安全为目的，即要求乘员空间不受影响的前提下，前纵梁适当变形，吸收碰撞能量；低速碰撞时，因为乘员安全没有受到威胁，所以要求保护车辆主体，即前纵梁变形尽可能减小，以降低车辆碰撞损伤修复所需要的费用。

2.2 建立多目标优化模型

高速碰撞中，主要考虑乘员的安全，要求最大程度减小甚至避免乘员的伤害。头部伤害指标 HIC (Head Injury Criterion) 作为一个重要衡量指标。

$$HIC = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \right]^{5/2} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中 a 为头部三向合成加速度 (CFC1000 滤波等级滤波)，单位为 g (重力

加速度)， t_1 和 t_2 为测试时间里程内任意时刻，间隔在 36ms 以内。当 $t_2-t_1=36\text{ms}$ 时，计算所得 HIC 记为 HIC_{36} 。结合 HIC 的计算方法，选取加速度积分均值得：

$$\bar{a}=\max\left[\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2} a \, dt\right] \quad (2)$$

作为衡量车身安全性的指标。其中， a 为车辆后方左侧座椅测量点的合成加速度（CFC1000 滤波等级滤波），单位为 g （重力加速度）， t_1 和 t_2 为测试时间里程内任意时刻，且取 $t_2-t_1=36\text{ms}$ ，与 HIC_{36} 保持一致。

车体变形侵入乘员空间造成的接触伤害是乘员伤害的主要成因之一。在汽车碰撞中应尽量避免乘员的接触伤害，保证乘员舱结构的整体刚度避免自身塌陷或其他结构的侵入造成乘员伤害。所以，碰撞变形应限制在一定的区域之内。发动机质量较大，是导致乘员舱前围板变形的主要因素，所以，在发动机上取上、下两标记点，位置如图 2 所示，将两点的侵入量 I_{up} 和 I_{down} 作为衡量车身安全性的指标前纵梁为薄壁梁结构，其失稳载荷分为两种，当材料的失稳载荷小于屈服强度时，发生弹性失稳；反之，当材料的失稳载荷大于屈服强度时发生非弹性失稳。综合两种情况，将前纵梁内、外板吸收的总能量值 E 作为其发生失稳变形的依据。

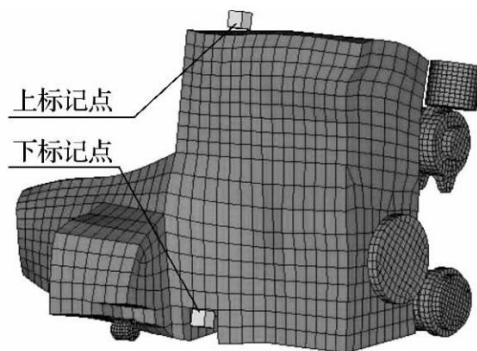


图 2 发动机侵入量测量点

碰撞中，主要考虑乘员的安全，要求最大程度减小甚至避免乘员的伤害。车体变形侵入乘员空间造成的接触伤害是乘员伤害的主要成因之一。在汽车碰撞中应尽量避免乘员的接触伤害，保证乘员舱结构的整体刚度，避免自身塌陷或其他结构的侵入造成乘员伤害。高速碰撞中保险杠、吸能盒以及前纵梁是主要的吸能部件，并且前纵梁为吸收能量最多的单一部件。低速碰撞中主要由保险杠和吸能

盒吸收碰撞能量，并且要避免损伤前纵梁。所以应使保险杠吸能盒和前纵梁相互匹配，从而达到对碰撞中三者变形顺序、变形模式和变形量的控制，以满足车辆高低速耐撞性的要求。

基于以上观点，选取保险杠厚度 x_1 ，吸能盒内、外板厚度 x_2 和 x_3 以及前纵梁内、外板厚度 x_4 和 x_5 五个变量为优化设计变量。如图 3 所示。目标函数为高速碰撞车体后排左侧座椅点加速度积分均值 a 。约束条件为高速碰撞中发动机上、下两标记点侵入量 I_{up} 和 I_{down} ，低速碰撞中前纵梁内、外板吸收总能量 E 。所以，多目标优化问题的数学模型定义如下：

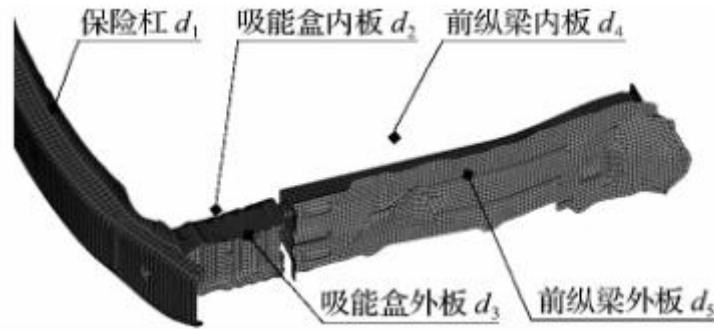


图 3 五个设计变量

在车辆碰撞问题中，碰撞中前纵梁内、外板吸收总能量为 E 不超过车体可吸收的最大能量为 $E_0=300J$ 。上、下两标记点侵入量 I_{up} 和 I_{down} 分别不能超过 350mm 和 200mm。在此优化问题中，目标函数为车辆后方左侧座椅测量点的合成加速度 a 。

所以，该优化问题定义如下：

$$\begin{aligned} & \min. \bar{a}(x) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} E(x) \leq 300J \\ I_{up}(x) \leq 350mm \\ I_{down}(x) \leq 200mm \\ 2.0mm \leq x_1 \leq 3.0mm \\ 1.0mm \leq x_2, x_3 \leq 2.5mm \\ 1.5mm \leq x_4, x_5 \leq 3.0mm \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 优化求解

整车碰撞有限元分析是一个高度非线性的过程，虽然有效减少了实验次数，但每次仿真同样需要消耗大量的计算时间，计算效率较低。本文涉及到五个设计

变量，结合拉丁超立方试验方法(LHS)，通过响应面，构建代理模型；然后，利用遗传算法优化求解，进而提高计算效率。

建立的四个响应面模型如下：

$$\begin{aligned} \bar{a} = & 9.449x_2 - 1.832x_1 + 11.69x_3 + 10.636x_4 + \\ & 6.679x_5 - 1.232x_1x_2 - 1.329x_1x_4 + \\ & 1.106x_2x_3 - 0.914x_1x_5 - 1.313x_2x_5 - \\ & 3.759x_3x_4 - 1.1978x_3x_5 + 1.225x_1^2 - \\ & 2.366x_2^2 - 1.353x_3^2 - 0.906x_4^2 + 16.596 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E = & 1094.281x_1 + 4468.162x_2 + 2921.606x_3 - \\ & 7831.190x_4 - 14550.227x_5 - 789.12x_1x_2 - \\ & 1798.221x_1x_3 + 557.348x_1x_4 + 689.273x_2x_3 + \\ & 975.459x_1x_5 - 990.46x_2x_4 - 884.136x_2x_5 - \\ & 354.607x_3x_4 + 522.592x_3x_5 + 1857.173x_4x_5 + \\ & 148.5x_2^2 + 1349.944x_4^2 + 2753.084x_5^2 + 12579.336 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_{up} = & 37.824x_1^2 + 12.634x_1x_2 - 21.495x_1x_3 - \\ & 20.773x_1x_5 - 135.479x_1 + 25.779x_2^2 - \\ & 15.08x_2x_4 + 8.781x_2x_5 - 123.145x_2 + \\ & 29.194x_3^2 + 7.606x_3x_4 - 65.554x_3 + \\ & 31.565x_4^2 - 15.874x_4x_5 - 93.243x_4 - \\ & 14.968x_5^2 + 106.945x_5 + 643.436 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_{down} = & 51.820x_1 - 9.242x_2 + 8.394x_3 - \\ & 79.998x_4 - 64.932x_5 - 5.156x_1x_2 + \\ & 6.211x_2x_3 + 14.747x_1x_5 - 5.878x_2x_4 - \\ & 9.894x_2x_5 - 8.811x_3x_4 - 2.477x_3x_5 + \\ & 7.152x_4x_5 - 15.196x_1^2 + 6.761x_2^2 + \\ & 20.438x_4^2 + 7.471x_5^2 + 275.327 \end{aligned} \quad (7)$$

汽车耐撞性分析的优化变量为保险杠厚度 x_1 ，吸能盒内、外板厚度 x_2 和 x_3 以及前纵梁内、外板厚度 x_4 和 x_5 。设计变量为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$ 。

2.4 MATLAB 求解

2.4.1 主程序

main.m(主程序)

```
clc;clear;
```

```

LB=[2;1;1;1.5;1.5];UB=[3;2.5;2.5;3;3];           %设计变量的上下界
[x,fval]=ga(@fun,5,[],[],[],LB,UB,@nlinconst);    %GA 工具箱
options=gaoptimset('Generations',300);
rand('state',71);
randn('state',59);
record=[ ];
for n=0:0.05:1
options=gaoptimset(options,'CrossoverFraction',n);
[x fval]=ga(@rastriginsfcn,10,options);
record = [record;fval];
end
plot(0:0.05:1,record);
xlabel('Crossover Fraction');
ylabel('fval')

```

2.42 子程序

a.m(目标函数)

```

function a=a(x)
x1=x(1);
x2=x(2);
x3=x(3);
x4=x(4);
x5=x(5);
a=9.449*x2-1.832*x1+11.69*x3+10.636*x4+...
    6.679*x5-1.232*x1*x2-1.329*x1*x4+...
    1.106*x2*x3-0.914*x1*x5-1.313*x2*x5-...
    3.759*x3*x4-1.1978*x3*x5+1.225*x1^2-...
    2.366*x2^2-1.353*x3^2-0.906*x4^2+16.596

```


2.43 非线性约束

nlinconst.m(约束函数)

```
function [c ceq] = nlinconst(X)
```

```
X1=X(1);
```

```
X2=X(2);
```

```
X3=X(3);
```

```
X4=X(4);
```

```
X5=X(5);
```

```
c=[ 37.824*X1^2+12.634*X1*X2-21.495*X1*X3-...
```

```
20.773*X1*X5-135.429*X1+25.779*X2^2-...
```

```
15.08*X2*X4+8.781*X2*X5-123.145*X2+...
```

```
29.194*X3^2+7.606*X3*X4-65.554*X3+...
```

```
31.565*X4^2-15.874*X4*X5-93.243*X4-...
```

```
14.968*X5^2+106.945*X5+643.436-350;
```

```
51.820*X1-9.242*X2+8.394*X3-...
```

```
79.998*X4-64.932*X5-5.156*X1*X2+...
```

```
6.211*X2*X3+14.747*X1*X5-5.878*X2*X4-...
```

```
9.894*X2*X5-8.811*X3*X4-2.477*X3*X5+...
```

```
7.152*X4*X5-15.196*X1^2+6.761*X2^2+...
```

```
20.438*X4^2+7.471*X5^2+275.327-200]; %非线性不等式约束
```

```
ceq=[]; %非线性等式约束
```

2.5 车辆碰撞优化结果

计算得到最优解为 $\mathbf{X} = [3, 2.3223, 2.518, 2.7, 1.9]^T$, 此时的目标函数值为 28.8198。并且根据图 4 所示的车辆后方左侧座椅点的加速度历程曲线, 可以看出, $a_{\max} = 28.8198g$, 即在各种约束条件下, 车辆的高速碰撞安全性得到了提高。

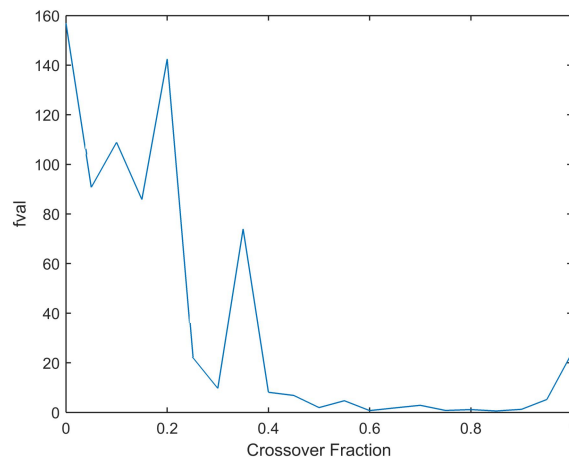


图 4 车辆后方左侧座椅点的加速度优化历程曲线

3 优化设计—简单吊钩结构尺寸优化设计

3.1 吊钩响应面优化（多目标三因素三水平优化）

问题描述：吊钩结构，竖直方向受力 10000N，约束为固定铰支座，初始结构尺寸如图 5 所示。

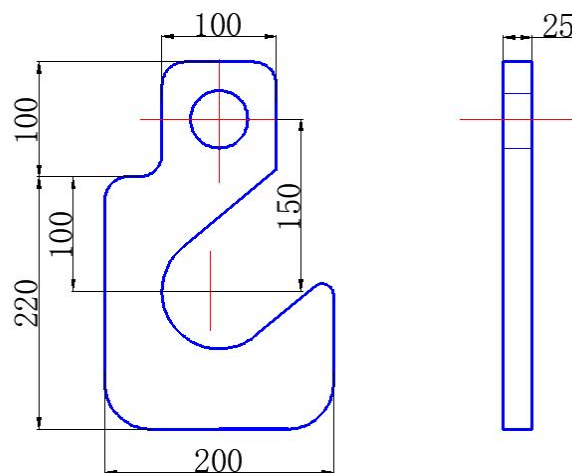


图 5 吊钩初始结构尺寸

原始静力学分析：

(1)材料为结构钢,屈服强度为 250MPa,抗拉强度为 460MPa,弹性模量为 $2e5$ MPa,泊松比为 0.3。

(2)边界条件及网格划,吊钩约束为固定约束,吊钩受力为向下的轴承力 10000N,网格单元数为 12000,节点数为 55632,如图 6a-b 所示。

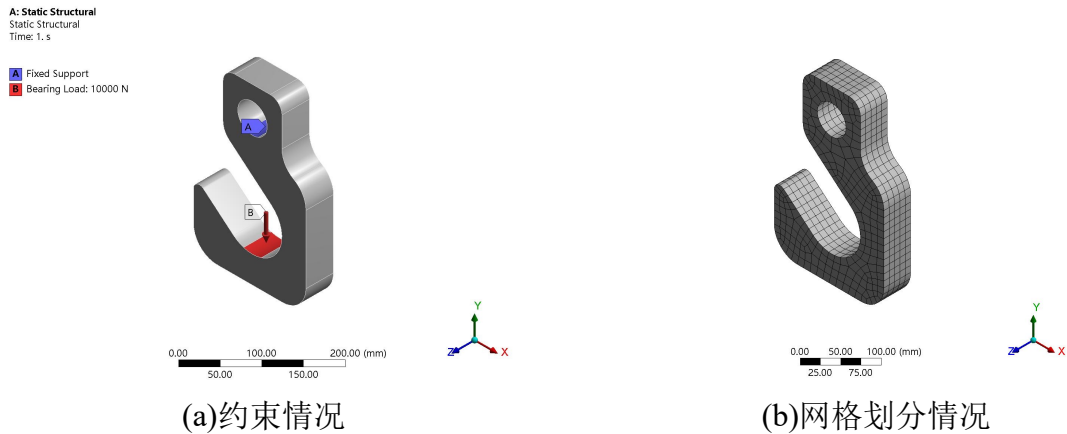
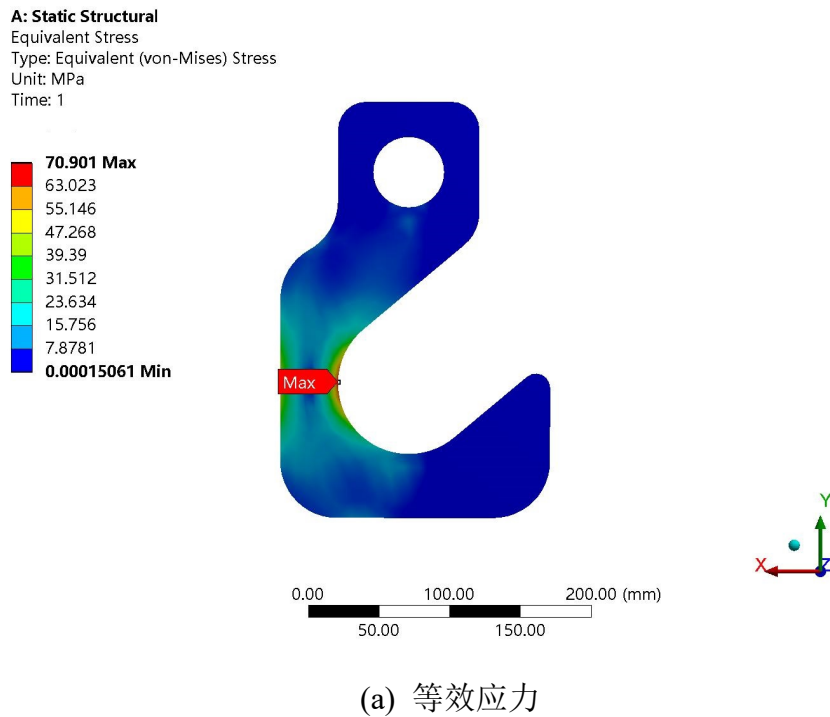


图 6 吊钩边界条件及网格划分

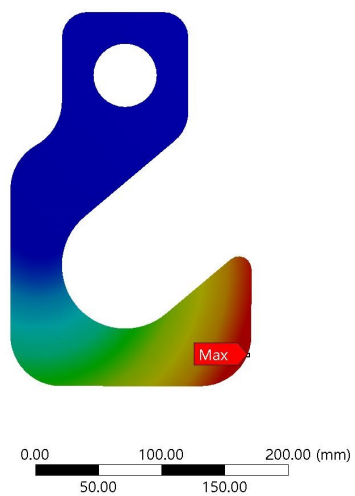
(3)吊钩有限元模拟仿真结果,如图 7a-c 所示



(a) 等效应力

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1

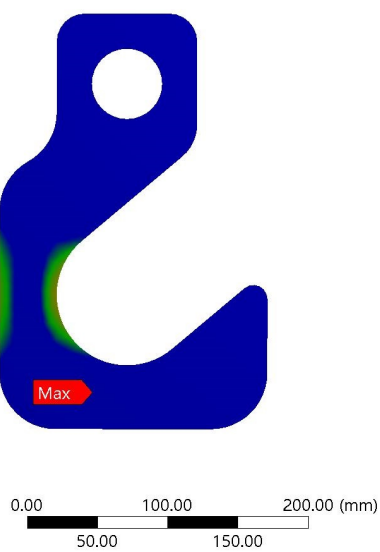
0.21302 Max
0.18936
0.16569
0.14202
0.11835
0.094678
0.071008
0.047339
0.023669
0 Min



(b) 刚度大小

A: Static Structural
Safety Factor
Type: Safety Factor
Time: 1

15 Max
10
3.526 Min
0



(c) 安全因子

图 7 有限元模拟仿真结果

3.2 响应面数学模型

选取的输入参数为 X1、X2、X3，如图 8 所示，选取的输出参数为最小体积 y4_tj,最小安全因子 y1_aq，整体最大变形量 y2_bx，最大应力参数 y3_y1。

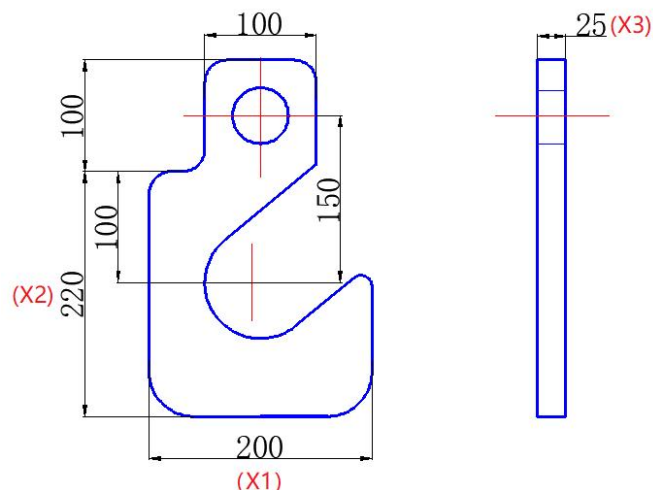


图 8 吊钩结构中所输入参数 X1,X2,X3

通过面心中心复合试验方法选取 15 个样本点（三因子三水平），分别对吊钩结构的有限元模型进行仿真分析得到试验数据如表 1 所示，利用逐步回归方法和 Mintab 软件响应面模拟得到 y1_aq、y2_bx、y3_y1、y4_tj 四个响应面模型（式 8-11）。

表 1 Box-Behnken Design 试验设计表

# Design Points of Design of Experiments							
# Box-Behnken Design : Standard							
Sample number	X3	X1	X2	y1_aq	y2_bx(mm)	y3_y1 (MPa)	y4_tj (mm^3)
1	25	200	220	5.1318	0.1391	48.7156	1.7667E+06
2	22.5	200	220	4.6025	0.1547	54.3182	1.5900E+06
3	27.5	200	220	5.6548	0.1264	44.2103	1.9433E+06
4	25	180	220	2.3843	0.3776	104.8513	1.5427E+06
5	25	220	220	8.0970	0.0817	30.8757	1.9929E+06
6	25	200	195	5.0967	0.1398	49.0517	1.5167E+06
7	25	200	245	5.1127	0.1483	48.8979	2.0167E+06
8	22.5	180	195	2.1371	0.3995	116.9832	1.1859E+06
9	27.5	180	195	2.6315	0.3259	95.0019	1.4495E+06
10	22.5	220	195	7.2031	0.0970	34.7074	1.5461E+06
11	27.5	220	195	8.8001	0.0789	28.4087	1.8896E+06
12	22.5	180	245	2.1448	0.4518	116.5600	1.5909E+06
13	27.5	180	245	2.6415	0.3685	94.6429	1.9445E+06
14	22.5	220	245	7.2258	0.0942	34.5983	2.0411E+06
15	27.5	220	245	8.8477	0.0770	28.2558	2.4946E+06


```

x1=x(1);
x2=x(2);
x3=x(3);
y2wy=-0.0791*x1-0.1004*x2+0.0021*x3+0.0003*x1^2+0.0002*x2^2+0.0003*x1*x
2+11.7434
y1aq=-0.86728*x1-0.10696*x2+0.01754*x3-0.00096*x1^2+0.00026*x2^2....
-0.00005*x3^2+0.00557*x1*x2+0.00005*x1*x3+0.00005*x1*x3....
+0.00001*x2*x3+8.94743
y3yl=-22.6*x1-22.97*x2-0.21*x3+0.09*x1^2+0.05*x2^2+0.08*x1*x2+2790.73

```

3.32 子程序

fun1.m(目标函数)

```
function y4_tj=fun1(x)
```

```

x1=x(1);
x2=x(2);
x3=x(3);
y4_tj=-107330*x1-12120*x2-10000*x3+3*x2^2+450*x1*x2+450*x1*x3....
+50*x2*x3+2201090;

```

3.33 非线性约束

nlinconst1.m(约束函数)

```
function [c, ceq] = nlinconst1(X)
```

```

X1=X(1);
X2=X(2);
X3=X(3);
c=[-0.86728*X1-0.10696*X2+0.01754*X3-0.00096*X1^2+0.00026*X2^2....
-0.00005*X3^2+0.00557*X1*X2+0.00005*X1*X3+0.00005*X1*X3....
+0.00001*X2*X3+1.94743];
ceq=[];

```

3.4 吊钩响应面优化结果

计算得到最优解为 $\mathbf{X} = [23.5, 180, 195]^T$, 此时的目标函数值为 $1.3651 \times 10^6 \text{ mm}^3$, 变形量 $y2_bx$ 数值为 0.1367 mm , 安全因子 $y1_aq$ 数值为 3.0968 , 最大应力 $y3_yl$ 数值为 92.1825 MPa , 即在各约束条件下, 安全因子保持与未优化前相当水平, 吊钩应力稍有所增大, 但整体变形量和体积得到了优化。

4 Ansys workbench 有限元仿真优化

4.1 项目流程框图

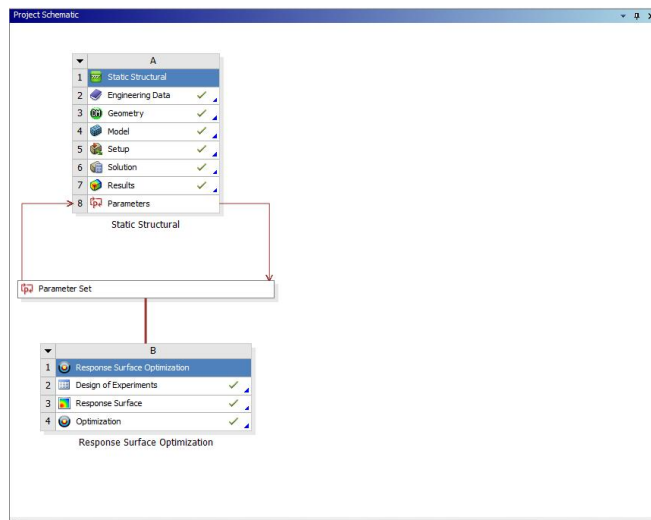


图 9 项目流程框

4.2 DOE 试验设置

为了减少计算量, 试验类型采取面心中心复合设计 (Central Composite Design)。

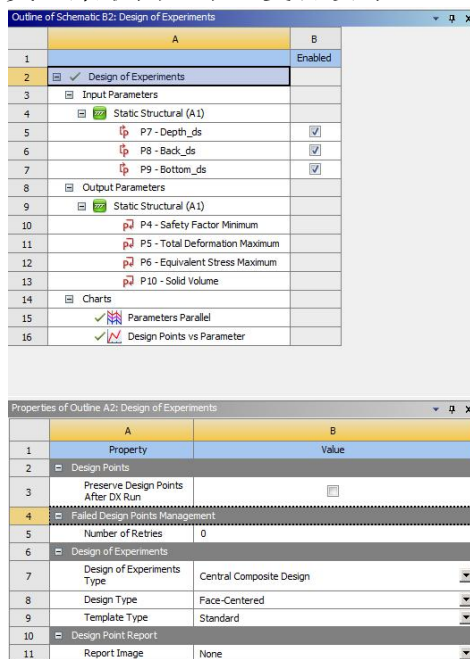


图 10 DOE 试验设置

4.3 响应面响应

(1)Min-Max 结果:

Table of Outline A14: Min-Max Search								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P7 - Depth_ds (mm)	P8 - Bac... (mm)	P9 - Bottom_ds (mm)	P4 - Safety Factor Minimum	P5 - Total Deformation Maximum (mm)	P6 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P10 - Solid Volume (mm ^3)
2	Output Parameter Minimums							
3	P4 - Safety Factor Minimum	22.5	180	195	2.1364	0.401	116.94	1.1855E+06
4	P5 - Total Deformation Maximum	27.5	220	219.91	8.8526	0.073043	28.171	2.1943E+06
5	P6 - Equivalent Stress Maximum	27.5	220	228.24	8.8596	0.0735	28.151	2.2947E+06
6	P10 - Solid Volume	22.5	180	195	2.1364	0.401	116.94	1.1855E+06
7	Output Parameter Maximums							
8	P4 - Safety Factor Minimum	27.5	220	230.67	8.8601	0.073785	28.153	2.3238E+06
9	P5 - Total Deformation Maximum	22.5	180	245	2.1444	0.45045	116.63	1.5908E+06
10	P6 - Equivalent Stress Maximum	22.5	180	195	2.1364	0.401	116.94	1.1855E+06
11	P10 - Solid Volume	27.5	220	245	8.8403	0.076548	28.246	2.4943E+06

图 11 Min-Max 单因子寻优

(2) 响应面结果（由于图片太多，只例举 P7、P8 与 P5、P4、P6、P10 的响应面）:

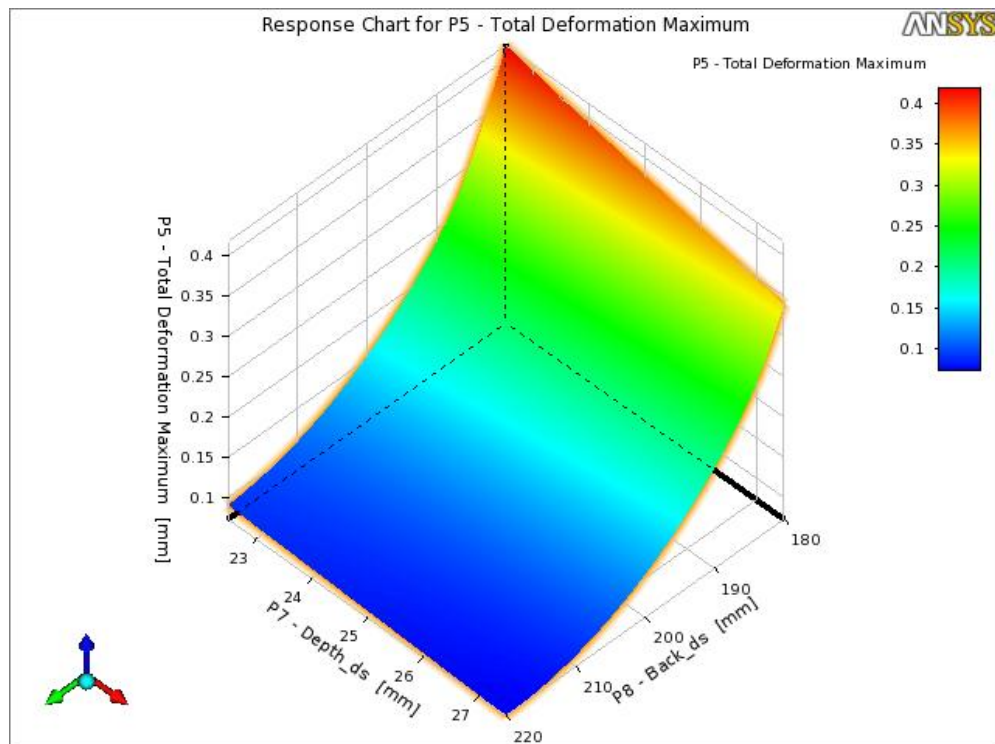


图 12 P7、P8 与 P5 变形量关系

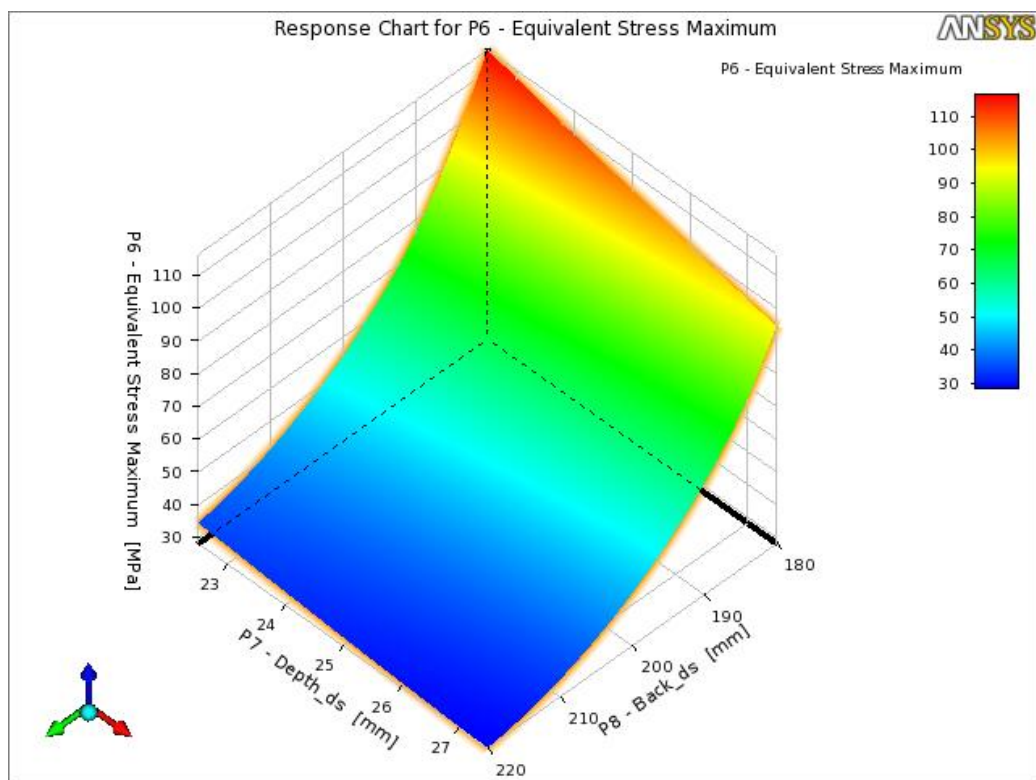


图 13 P7、P8 与 P6 应力关系

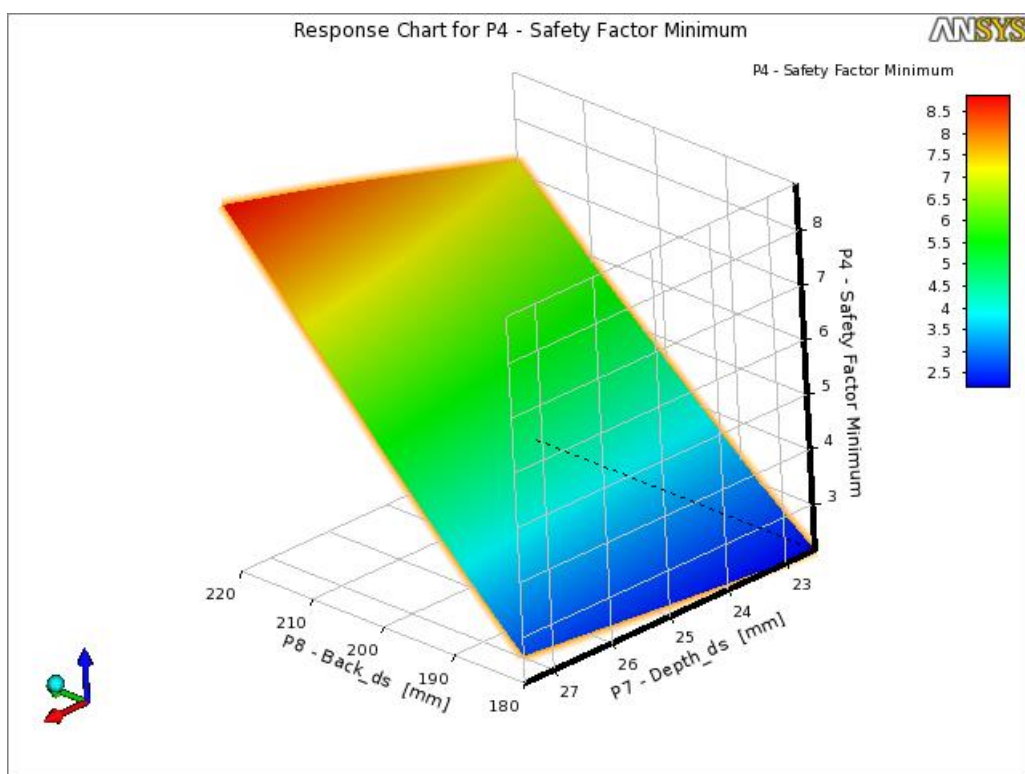


图 14 P7、P8 与 P4 安全因子关系

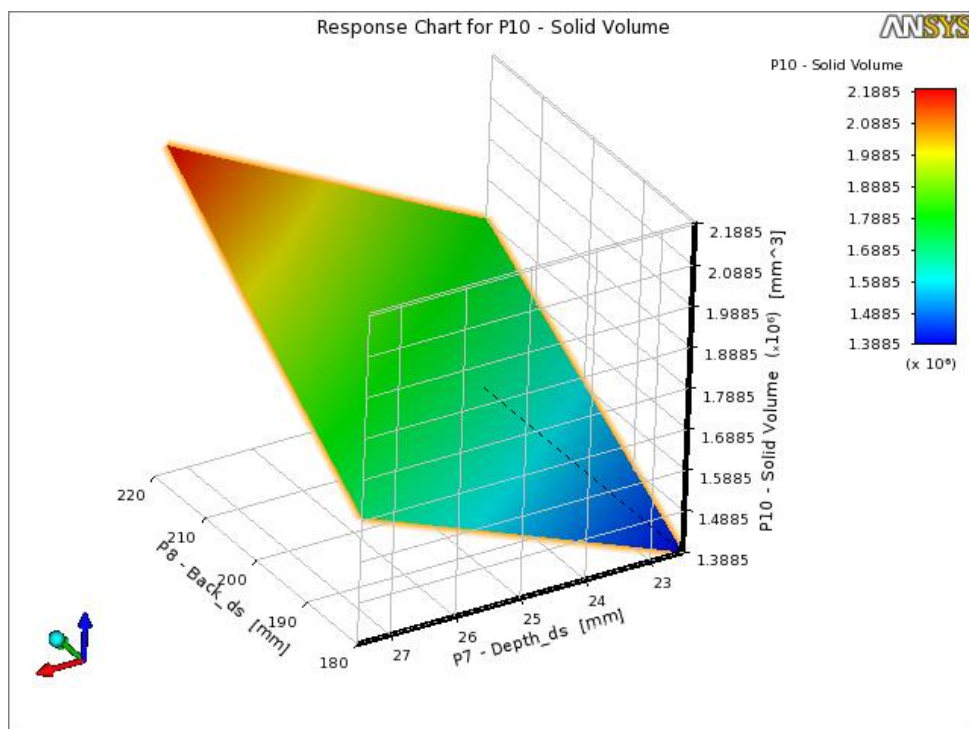


图 15 P7、P8 与 P10 体积关系

(3)参数敏感度分析

由图 16 可看出 P4 安全因子与 P8 有较强正相关性，P5 变形和 P6 等效应力与 P8 有较强负相关性，P5 变形、P4 安全因子和 P6 应力与 P9 几乎没有相关性，P10 与三个因素有相对较小的正相关性，这与四个响应面数学模型参数敏感度结果一致。

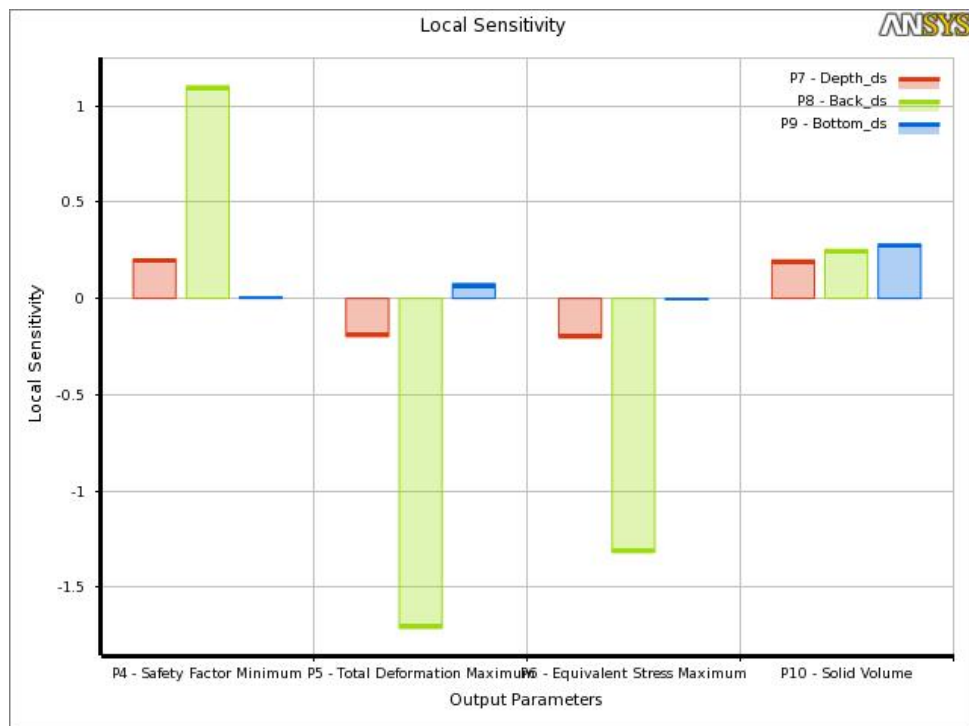


图 16 因数敏感度分析

4.4 Ansys workbench 优化

(1) 目标与约束

如图 17 所示，约束和目标与 Matlab 模型一致，安全因子小于 6，厚度设定为 23.5mm，目标为体积最小。

Table of Schematic B4: Optimization							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	P8	P8 - Back_ds	No Objective		No Constraint		
4	P9	P9 - Bottom_ds	No Objective		No Constraint		
5	P4 <= 6	P4 - Safety Factor Minimum	No Objective		Values <= Upper Bound		6
6	Minimize P10	P10 - Solid Volume	Minimize		No Constraint		
7	Seek P7 = 23.5 mm	P7 - Depth_ds	Seek Target	23.5	No Constraint		
*		Select a Parameter					

图 17 设置约束和目标

(2) 优化结果

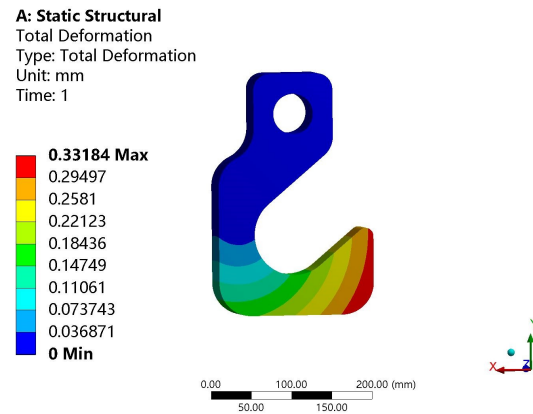
由图 18 可知，所建立的四个响应面数学模型的 matlab 优化结果与 ansys workbenc 结果较为接近，两者相对的误差可能是两者试验类型 BBD 和 CCD 试验不一致导致，也有可能是选择的为完全二次响应面，部分因子不显著没有在模型中舍去而引起的误差，但模型与仿真两者较为接近。

Table of Schematic B4: Optimization				
	A	B	C	D
1	Optimization Study			
2	Seek P7 = 23.5 mm	Goal, Seek P7 = (Default Importance)		
3	Minimize P10	Goal, Minimize P10 (Default importance)		
4	P4 <= 6	Strict Constraint, P4 values less than or equals to 6 (Default importance)		
5	Optimization Method			
6	Screening	The Screening optimization method uses a simple approach based on sampling and sorting. It supports multiple objectives and constraints as well as all types of input parameters. Usually it is used for preliminary design, which may lead you to apply other methods for more refined optimization results.		
7	Configuration	Generate 1000 samples and find 3 candidates.		
8	Status	Converged after 1000 evaluations.		
9	Candidate Points			
10		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
11	P7 - Depth_ds (mm)	★★★ 23.463	★★★ 23.583	★★★ 23.313
12	P8 - Back_ds (mm)	180.49	184.24	190.8
13	P9 - Bottom_ds (mm)	201.61	196.67	195.44
14	P4 - Safety Factor Minimum	★★★ 2.2678	★★★ 2.716	★★★ 3.5123
15	P10 - Solid Volume (mm^3)	★★★ 1.2968E+06	★★★ 1.2972E+06	★★★ 1.3333E+06

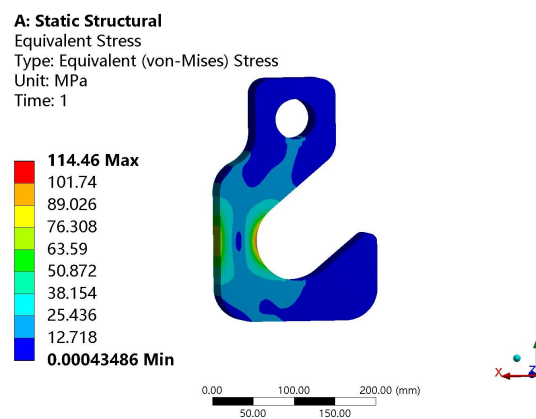
图 18 Workbench 优化星点结果

4.4 Ansys workbench 结果验证

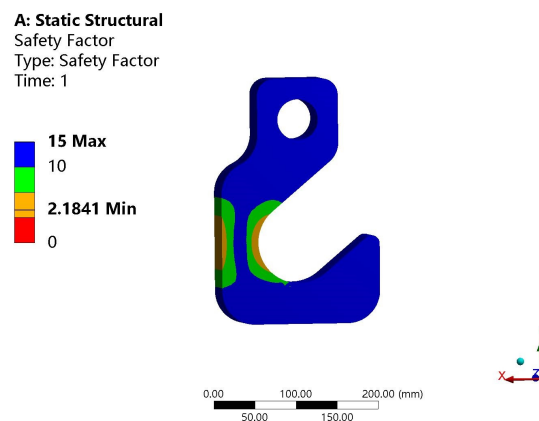
边界条件不变,由 Matlab 计算得到最优解为 $\mathbf{X} = [23.5, 180, 195]^T$ 为有限元模型参数,Ansys workbench 变形量为 0.33184(y2_bx 数值为 0.2367mm),安全因子为 2.184(y1_aq 数值为 3.0968),最大应力 114.46MPa(y3_y1 数值为 92.1825MPa)。



(a) 刚度大小



(b) 应力对比



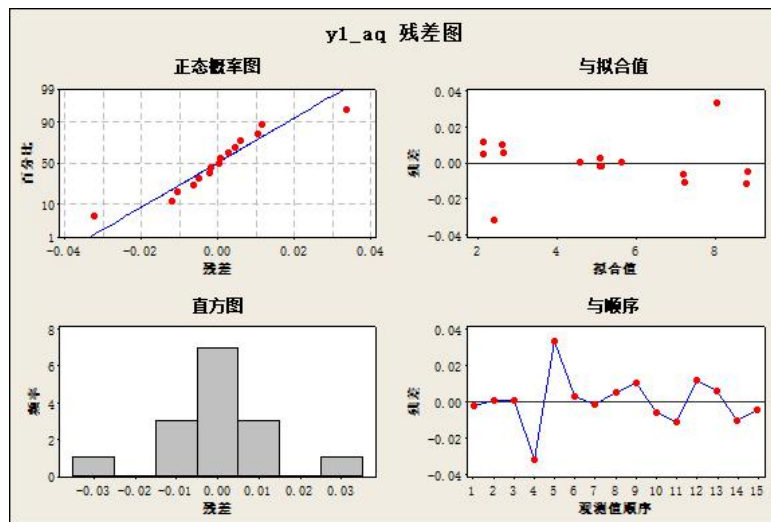
(c) 安全因子

5 Mintab 软件响应面模拟

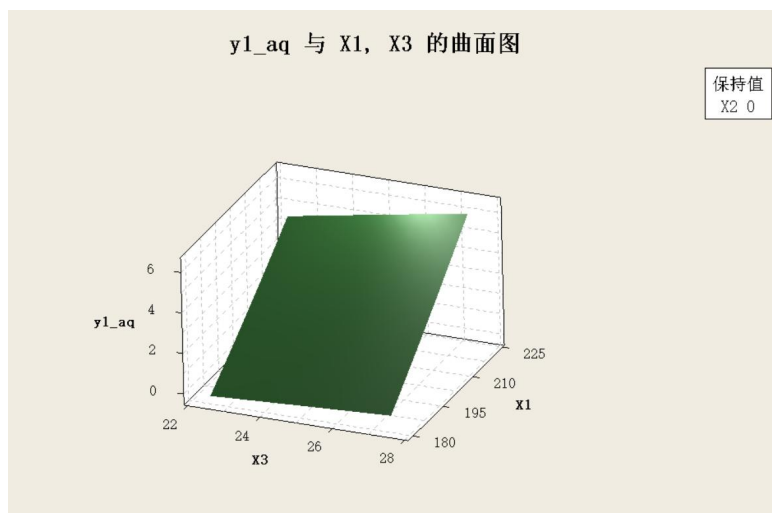
见附图表

附表 1 三因素三水平试验设计表

#	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	运行序	X3	X1	X2	y1_aq	拟合值1	系数1	y2_bx(mm)	拟合值2	系数2	y4_tj(mm^3)	拟合值3	系数4	y3_y1(MPa)	拟合值4	系数3	
1	1	25.0	200	220	5.13182	5.13409	7.94743	0.139121	0.138907	11.7434	1.7667E+06	1766662	2201090	48.716	48.725	2820.73	
2	2	22.5	200	220	4.60251	4.60184	-0.86728	0.154652	0.162626	-0.0791	1.5900E+06	1589906	-107330	54.318	55.927	-22.60	
3	3	27.5	200	220	5.65478	5.65432	-0.10696	0.126388	0.118521	-0.1004	1.9433E+06	1943418	-12120	44.210	42.597	-22.97	
4	4	25.0	180	220	2.38433	2.41664	0.01754	0.377563	0.379126	0.0021	1.5427E+06	1542702	-10000	104.851	104.980	-0.21	
5	5	25.0	220	220	8.09698	8.06353	-0.00096	0.081705	0.080249	0.0003	1.9929E+06	1992862	-0	30.876	30.742	0.09	
6	6	25.0	200	195	5.09666	5.09369	0.00026	0.139840	0.134270	0.0002	1.5167E+06	1516662	3	49.052	49.092	0.05	
7	7	25.0	200	245	5.11269	5.11452	-0.00005	0.148337	0.154014	0.0000	2.0167E+06	2016662	0	48.898	48.853	0.00	
8	8	22.5	180	195	2.13706	2.13244	0.00557	0.399477	0.399844	0.0003	1.1859E+06	1115947	450	116.983	116.524	0.08	
9	9	27.5	180	195	2.63153	2.62119	0.00005	0.325853	0.327517	-0.0000	1.4495E+06	1469458	400	95.002	95.375	0.00	
10	10	22.5	220	195	7.20307	7.20922	0.00001	0.097048	0.095506	-0.0000	1.5461E+06	1566106	50	34.707	34.341	0.00	
11	11	27.5	220	195	8.80011	8.81188		0.078916	0.083997		1.8896E+06	1919617		28.409	28.821		
12	12	22.5	180	245	2.14482	2.13333		0.451831	0.446723		1.5909E+06	1615947		116.560	116.149		
13	13	27.5	180	245	2.64151	2.63564		0.368507	0.370022		1.9445E+06	1969458		94.643	95.011		
14	14	22.5	220	245	7.22580	7.23642		0.094181	0.092490		2.0411E+06	2066106		34.598	34.226		
15	15	27.5	220	245	8.84774	8.85264		0.076999	0.076606		2.4946E+06	2419617		28.256	28.716		
16																	

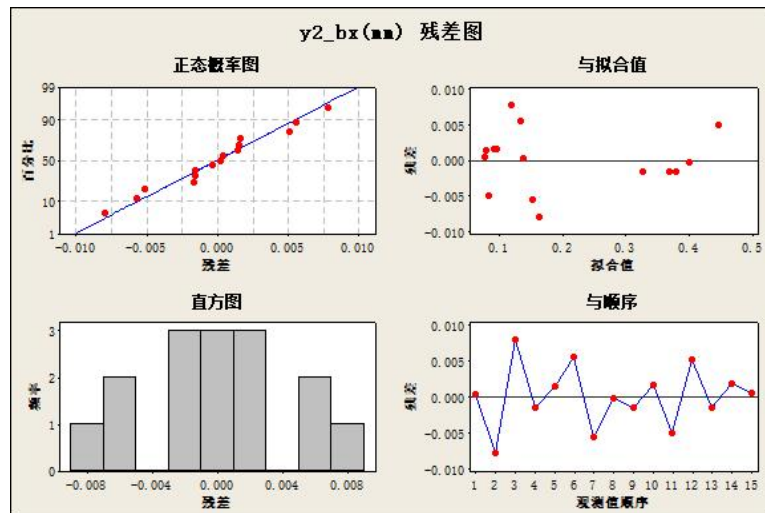


附图 1 y1_aq 响应面拟合残差图

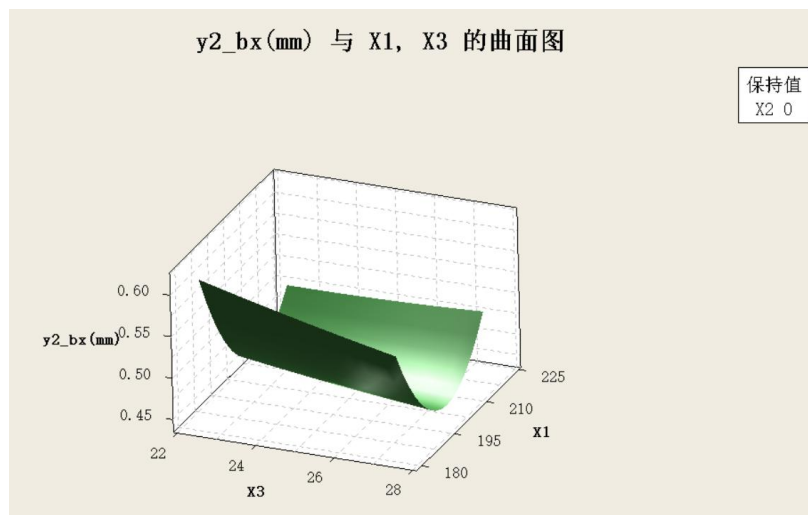


附图 2 y1_aq 响应面拟合图

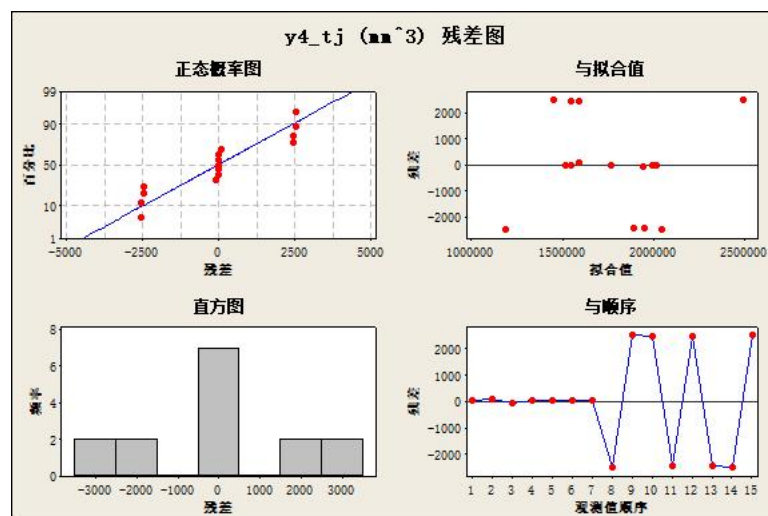
(与 workbench 中响应面图形状一致)



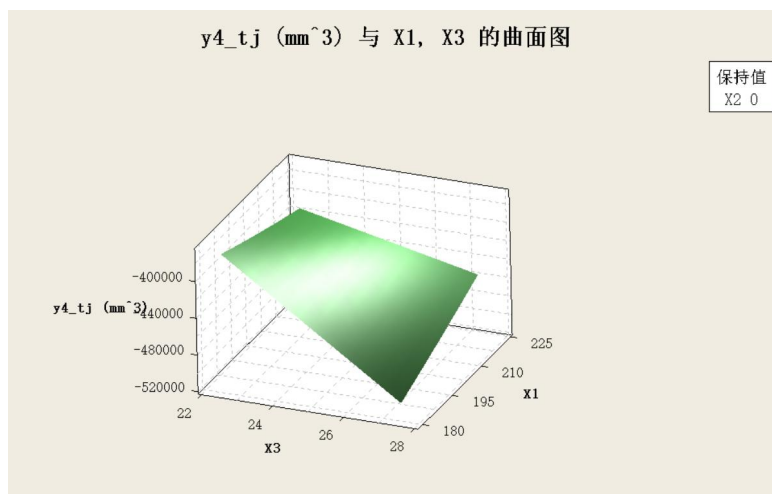
附图 3 y1_bx 响应面拟合残差图



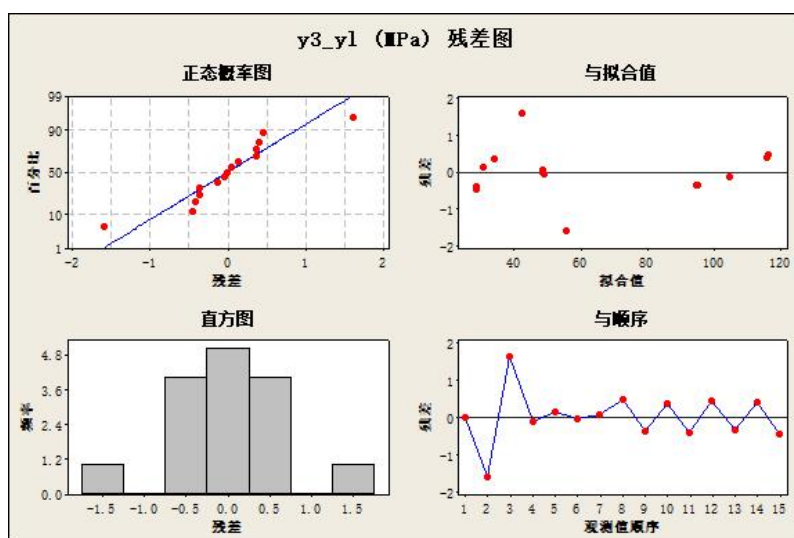
附图 4 y1_bx 响应面拟合图
(与 workbench 中响应面图形状一致)



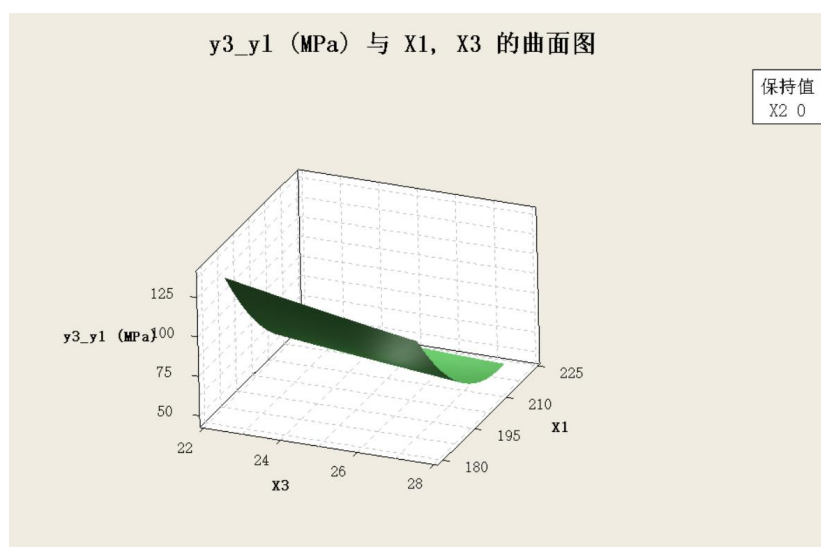
附图 5 y1_tj 响应面拟合残差图



附图 6 y1_tj 响应面拟合图
(与 workbench 中响应面图形状一致)



附图 7 y1_y1 响应面拟合残差图



附图 8 y1_y1 响应面拟合图
(与 workbench 中响应面图形状一致)

Mintab 各响应面模拟报告

(1) 响应曲面回归:y2_bx(mm) 与 X3, X1, X2

分析是使用未编码单位进行的。

y2_bx(mm) 的估计回归系数

项	系数	系数标准误	T	P
常量	11.7434	0.623533	18.834	0.000
X3	-0.0791	0.038157	-2.073	0.093
X1	-0.1004	0.004770	-21.043	0.000
X2	0.0021	0.003452	0.619	0.563
X3*X3	0.0003	0.000714	0.373	0.724
X1*X1	0.0002	0.000011	20.351	0.000
X2*X2	0.0000	0.000007	1.173	0.293
X3*X1	0.0003	0.000051	6.012	0.002
X3*X2	-0.0000	0.000040	-0.432	0.683
X1*X2	-0.0000	0.000005	-4.932	0.004

S = 0.00715321 PRESS = 0.00249858

R-Sq = 99.90% R-Sq (预测) = 99.05% R-Sq (调整) = 99.73%

y2_bx(mm) 的方差分析

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
回归	9	0.261524	0.261524	0.029058	567.89	0.000
线性	3	0.229156	0.025493	0.008498	166.07	0.000
X3	1	0.004863	0.000220	0.000220	4.30	0.093
X1	1	0.223318	0.022658	0.022658	442.80	0.000
X2	1	0.000975	0.000020	0.000020	0.38	0.563
平方	3	0.029264	0.029264	0.009755	190.64	0.000
X3*X3	1	0.005353	0.000007	0.000007	0.14	0.724
X1*X1	1	0.023842	0.021191	0.021191	414.15	0.000
X2*X2	1	0.000070	0.000070	0.000070	1.38	0.293
交互作用	3	0.003104	0.003104	0.001035	20.22	0.003
X3*X1	1	0.001849	0.001849	0.001849	36.14	0.002
X3*X2	1	0.000010	0.000010	0.000010	0.19	0.683
X1*X2	1	0.001245	0.001245	0.001245	24.33	0.004

残差误差	5	0.000256	0.000256	0.000051
合计	14	0.261780		

(2) 响应曲面回归: y_{4_tj} (mm^3) 与 X_3 , X_1 , X_2

分析是使用未编码单位进行的。

y_{4_tj} (mm^3) 的估计回归系数

项	系数	系数标准误	T	P
常量	2311090	275706	8.382	0.000
X_3	-107330	16872	-6.362	0.001
X_1	-12120	2109	-5.747	0.002
X_2	-10000	1526	-6.551	0.001
X_3*X_3	-0	316	-0.000	1.000
X_1*X_1	3	5	0.568	0.595
X_2*X_2	0	3	0.000	1.000
X_3*X_1	450	22	20.128	0.000
X_3*X_2	400	18	22.356	0.000
X_1*X_2	50	2	22.356	0.000

$S = 3162.91$ $PRESS = 1216166852$

$R-Sq = 100.00\%$ $R-Sq(\text{预测}) = 99.92\%$ $R-Sq(\text{调整}) = 99.99\%$

y_{4_tj} (mm^3) 的方差分析

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
回归	9	1.45809E+12	1.45809E+12	1.62010E+11	16194.52	0.000
线性	3	1.44403E+12	1796525300	598841767	59.86	0.000
X_3	1	3.12426E+11	404855273	404855273	40.47	0.001
X_1	1	5.06608E+11	330397288	330397288	33.03	0.002
X_2	1	6.25000E+11	429369647	429369647	42.92	0.001
平方	3	4180275	4180275	1393425	0.14	0.932
X_3*X_3	1	668844	0	0	0.00	1.000
X_1*X_1	1	3511431	3224783	3224783	0.32	0.595
X_2*X_2	1	0	0	0	0.00	1.000
交互作用	3	14052866270	14052866270	4684288757	468.24	0.000
X_3*X_1	1	4052866270	4052866270	4052866270	405.12	0.000

X3*X2	1	5000000000	5000000000	5000000000	499.80	0.000
X1*X2	1	5000000000	5000000000	5000000000	499.80	0.000
残差误差	5	50020065	50020065	10004013		
合计	14	1.45814E+12				

(3) 响应曲面回归:y3_y1 (MPa) 与 X3, X1, X2

分析是使用未编码单位进行的。

y3_y1 (MPa) 的估计回归系数

项	系数	系数标准误	T	P
常量	2870.73	99.6644	28.804	0.000
X3	-22.60	6.0989	-3.705	0.014
X1	-22.97	0.7624	-30.136	0.000
X2	-0.21	0.5518	-0.373	0.724
X3*X3	0.09	0.1141	0.753	0.485
X1*X1	0.05	0.0018	26.838	0.000
X2*X2	0.00	0.0011	0.347	0.743
X3*X1	0.08	0.0081	9.665	0.000
X3*X2	0.00	0.0065	0.006	0.995
X1*X2	0.00	0.0008	0.161	0.879

S = 1.14336 PRESS = 58.2862

R-Sq = 99.96% R-Sq (预测) = 99.63% R-Sq (调整) = 99.88%

y3_y1 (MPa) 的方差分析

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
回归	9	15607.1	15607.1	1734.12	1326.53	0.000
线性	3	14222.8	1380.7	460.23	352.05	0.000
X3	1	444.2	17.9	17.95	13.73	0.014
X1	1	13778.4	1187.2	1187.20	908.15	0.000
X2	1	0.1	0.2	0.18	0.14	0.724
平方	3	1262.2	1262.2	420.72	321.83	0.000
X3*X3	1	229.1	0.7	0.74	0.57	0.485
X1*X1	1	1032.9	941.6	941.63	720.30	0.000
X2*X2	1	0.2	0.2	0.16	0.12	0.743

交互作用	3	122.2	122.2	40.72	31.15	0.001
X3*X1	1	122.1	122.1	122.13	93.42	0.000
X3*X2	1	0.0	0.0	0.00	0.00	0.995
X1*X2	1	0.0	0.0	0.03	0.03	0.879
残差误差	5	6.5	6.5	1.31		
合计	14	15613.6				

y3_y1 (MPa) 的异常观测值

		y3_y1	拟合值		标准化					
观测值	标准序	(MPa)	拟合值	标准误	残差	残差2	3	54.318	55.927	0.852
-1.608	-2.11	R								
2	3	54.318	55.927	0.852	-1.608	-2.11	R			
3	7	44.210	42.597	0.852	1.613	2.12	R			

R 表示此观测值含有大的标准化残差

(4) 响应曲面回归:y1_aq 与 X3, X1, X2

分析是使用未编码单位进行的。

y1_aq 的估计回归系数

项	系数	系数标准误	T	P
常量	7.94743	2.05853	3.861	0.012
X3	-0.86728	0.12597	-6.885	0.001
X1	-0.10696	0.01575	-6.792	0.001
X2	0.01754	0.01140	1.539	0.184
X3*X3	-0.00096	0.00236	-0.408	0.700
X1*X1	0.00026	0.00004	7.197	0.001
X2*X2	-0.00005	0.00002	-2.036	0.097
X3*X1	0.00557	0.00017	33.353	0.000
X3*X2	0.00005	0.00013	0.406	0.701
X1*X2	0.00001	0.00002	0.788	0.467

S = 0.0236156 PRESS = 0.0258059

R-Sq = 100.00% R-Sq (预测) = 99.97% R-Sq (调整) = 99.99%

y1_aq 的方差分析

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
回归	9	83.1405	83.1405	9.23783	16564.19	0.000
线性	3	82.4888	0.0647	0.02158	38.69	0.001
X3	1	2.7693	0.0264	0.02643	47.40	0.001
X1	1	79.7184	0.0257	0.02573	46.14	0.001
X2	1	0.0011	0.0013	0.00132	2.37	0.184
平方	3	0.0309	0.0309	0.01029	18.45	0.004
X3*X3	1	0.0020	0.0001	0.00009	0.17	0.700
X1*X1	1	0.0266	0.0289	0.02889	51.80	0.001
X2*X2	1	0.0023	0.0023	0.00231	4.14	0.097
交互作用	3	0.6208	0.6208	0.20695	371.07	0.000
X3*X1	1	0.6204	0.6204	0.62040	1112.43	0.000
X3*X2	1	0.0001	0.0001	0.00009	0.16	0.701
X1*X2	1	0.0003	0.0003	0.00035	0.62	0.467
残差误差	5	0.0028	0.0028	0.00056		
合计	14	83.1433				

y1_aq 的异常观测值

观测值	标准序	y1_aq	拟合值		标准化	
			拟合值	标准误	残差	残差
4	4	2.384	2.417	0.018	-0.032	-2.05 R
5	12	8.097	8.064	0.018	0.033	2.12 R

R 表示此观测值含有大的标准化残差