

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.02.013

基于响应面法的地震仪调整平台结构优化

郑乐^{1,2}, 邹光明^{1,2*}, 文陈杨²

(1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;
2. 武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要:为便于实现地震仪调整平台的无人化安装及其水平度的调节,课题组采用响应面法对调整平台进行结构轻量化的设计。在对地震仪调整平台进行静力学分析以及结构参数化基础上,借助参数敏感度分析获得影响其质量、最大等效应力和最大位移形变的关键参数;利用二次多项式响应面法对调整平台进行相关响应面拟合;并采用 MOGA 遗传算法全局寻优;对优化前后的调整平台各指标进行对比分析。结果表明:优化后最大等效应力降低 41%、薄弱方向的最大位移形变下降 5.6%,同时质量降低了 12.8%。该响应面优化设计不仅达到轻量化的效果,又提升了装置刚度和强度。

关键词:地震仪调整平台;敏感度分析;二次多项式响应面法;MOGA 遗传算

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)02-0085-08

Structural Optimization of Seismometer Adjustment Platform Based on Response Surface Method

ZHENG Le^{1,2}, ZOU Guangming^{1,2*}, WEN Chenyang²

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering of Hubei Province,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to easily implement the unmanned installation and levelness adjustment of the seismograph adjustment platform, a response surface optimization method for the lightweight of the adjustment platform structure was adopted. Based on the statics analysis and structural parameterization of the seismograph adjustment platform, the key parameters affecting its mass, maximum equivalent stress and maximum displacement deformation were obtained with the aid of parameter sensitivity analysis. The quadratic polynomial response surface method was used to adjust the platform to the response surface fitting, and MOGA genetic algorithm was used for global optimization. A comparative analysis of the indicators of the adjustment platform before and after optimization was carried out. The results show that the maximum equivalent stress is reduced by 41%, the maximum displacement deformation in the weak direction is reduced by 5.6%, and the mass is reduced by 12.8%. This response surface optimization design not only achieves the effect of weight reduction, but also improves the stiffness and strength of the device.

Keywords: seismograph adjustment platform; sensitivity analysis; quadratic polynomial response surface method; MOGA genetic algorithm

近年来,随着地震探测技术的不断发展,对地震仪的安装水平度要求越来越高,若地震仪安装的水平度不合格,将会对探测数据产生不容忽视的影响。部分

地震仪安放在人迹罕至的地方,需用无人机将其运送至所需的地方,再安装在坡度相对比较平缓的地面上。由于地面坡度和结构压缩或拉伸^[1]等因素,地震仪设

收稿日期:2022-08-30;修回日期:2022-12-20

第一作者简介:郑乐(1997),男,广西玉林人,硕士研究生,主要研究方向为结构与仿真。通信作者:邹光明(1970),男,湖北仙桃人,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为机器视觉、机器人。E-mail:zouguangming@wust.edu.cn

备会产生一定的倾斜;为解决此类问题,地震仪需先安装在具有自动水平调节的安装平台上,而后通过调整平台将地震仪调至水平状态。调整平台采用3自由度并联机构形式,即3支撑腿方案,由3个线性致动器支撑,通过线性致动器的螺旋运动,实现地震仪水平调整。调整平台的质量对无人化安装具有一定的影响,同时其结构变形也会影响地震仪调节的精度。

针对调整平台结构,分析其结构运动学及简单的力学性能已不能满足现有调整平台的研究需要^[2]。Hull^[3]利用全程参数化设计的有限元方法对机械结构进行分析及优化。因此对调整平台进行结构优化是当前需要深入研究的一项工作。在结构优化中,尺寸优化应用广泛,是最易于实现的手段^[4]。响应面分析法是通过确定性的实验来拟合一个响应面,进而模拟真实的极限状态^[5-6]。在结构优化中,响应面法能够很大程度上减少有限元优化计算次数,降低设计成本及缩短计算时间^[7]。

地震仪调整平台的无人化安装需进行轻量化设计,其结构变形也会影响地震仪姿态调节的精确度。课题组首先对调整平台进行了有限元分析,基于该分析结果,通过参数敏感性分析方法筛选出影响其性能的关键参数作为优化尺寸;以调整平台的质量、最大等效应力和最大位移形变作为优化目标,最后应用响应面法对调整平台进行优化。此举旨在降低调整平台无人化安装的误差和姿态调节误差,进一步提高其工作性能。

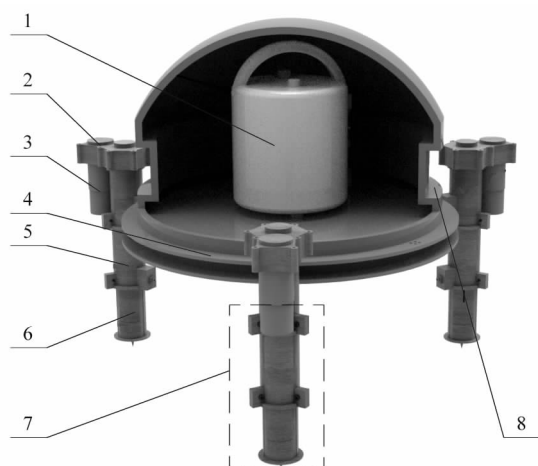
1 调整平台强度和刚度分析及模型参数化

1.1 调试工况的确定

地震仪调整平台整机结构如图1所示。调整平台的伸缩臂截面均为圆柱形,动平台与伸缩臂通过球铰链相连,伸缩臂通过螺旋运动实现动平台水平调整。

在对地震仪调整平台进行力学分析前,首先对调节参数进行分析。已知地面坡度最大不超过 15° ,地震仪调整平台的 15° 倾斜配置适用于极端的部署条件^[8],其主要的调节角度为 $0 \sim 15^\circ$ 。调整平台部署的调节参数如图2所示,调试工况如表1所示。

当调整平台处于工况Ⅲ时,属于平台调整中最为恶劣的情况,对调整平台的性能造成极大的影响。因



1—地震仪;2—滚珠丝杠;3—电机;4—动平台;5—外壳;6—内壳;7—线性制动器;8—球铰链。

图1 调整平台结构

Figure 1 Structure of adjustment platform

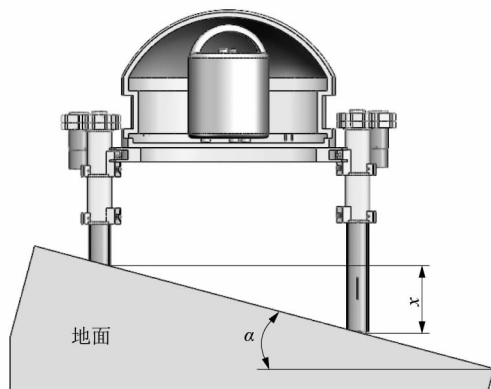


图2 调整平台部署的调节参数

Figure 2 Adjusting parameters for platform deployment adjustment

此课题组对工况Ⅲ下的调整平台进行有限元分析,获得其强度及刚度,为后续的响应面优化设计提供可靠的依据。

表1 调试工况

Table 1 Commissioning conditions

工况	调节角度/ $^\circ$	伸缩臂移动量 x/mm
I	1	5.2
II	5	15.7
III	15	26.1

1.2 调整平台的静力学分析及校核

首先对调整平台进行载荷分析。地震仪及相关设

备质量为 20 kg,计算调整平台所受载荷为 200 N,方向垂直于地面。伸缩臂材料采用 6063-T83,其屈服强度为 240 MPa;铰链材料采用 35Cr,其屈服强度为 835 MPa。经计算获得调整平台的应力、位移云图,以及 X 、 Y 和 Z 方向的位移形变云图,如图 3~4 所示。

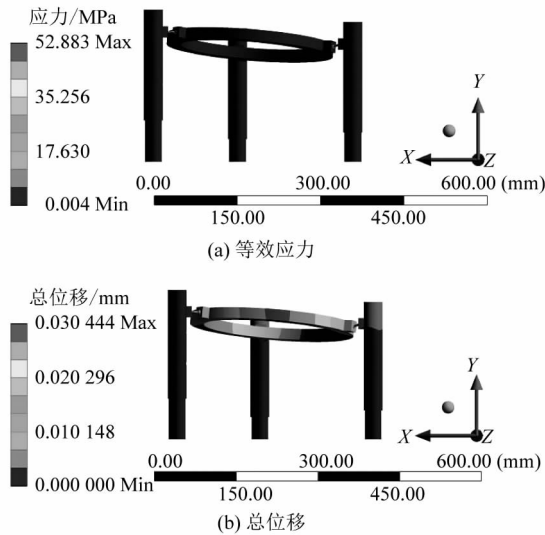


图 3 调整平台的应力和总位移形变云图

Figure 3 Stress and total displacement deformation cloud map of adjustment platform

根据调整平台所选的材料与所施加载荷的情况,取安全系数 $n'=1.5$ 。通过式(1)计算许用应力 $[\sigma]=160\text{ MPa}$ 。

$$[\sigma]=\sigma_s/n'。(1)$$

从图 3(a)可知最大等效应力 52.9 MPa 小于许用应力 160 MPa,调整平台满足强度要求。由图 4 中调整平台在 X 、 Y 和 Z 方向上的位移形变及所施加的载荷大小可计算出调整平台在各个方向的刚度值,结果如表 2 所示。

表 2 调整平台 X 、 Y 和 Z 方向上的最大位移形变量及刚度值

Table 2 Maximum displacement deformation variable and stiffness value in X 、 Y and Z directions of adjustment platform

最大位移形变量/mm			刚度值/($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)		
X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向
0.003 0	0.000 5	0.005 0	67	400	40

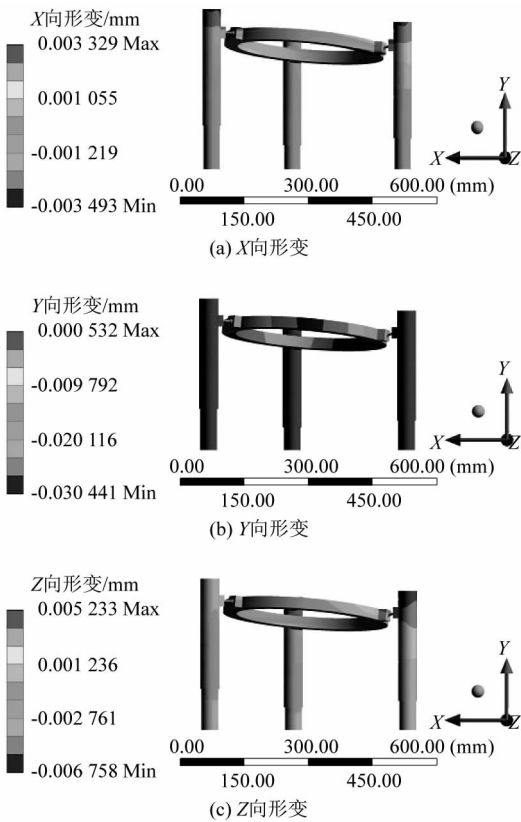


图 4 调整平台 X 、 Y 和 Z 方向的位移形变云图

Figure 4 Displacement and deformation cloud map in X 、 Y and Z directions of adjustment platform

从表 2 可以看出调整平台在 Z 方向上的位移形变量最大,且刚度最差。因此,对调整平台进行结构优化时, Z 方向上的刚度值是优化的目标之一。

由上述的静力学分析及校核结果可知:当前调整平台能满足性能要求,但在设计过程中,可能存在材料浪费的情况,因此可以对调整平台进行结构优化。此举既保证性能需求,又能减轻调整平台的质量。

1.3 调整平台模型参数化及数学优化模型的建立

1.3.1 调整平台模型参数化

进行优化设计前,首先要对模型进行参数化,即在保证不改变动作原理和满足性能要求的前提下,应用三维设计软件对调整平台进行参数化建模,弥补有限元建模功能的不足^[9]。

调整平台结构主要分支撑和连接 2 大部分,其中支撑优化的结构为线性致动器,连接优化的结构为球铰链。线性致动器结构由外壳和内壳组成,进行结构优化时,考虑到外壳和内壳配合关系及调整角度的影

响,外壳底端与内壳底端之间距离保持恒定值。为了减少铰链的损伤,连接端也需要进行尺寸优化,连接端与外壳顶端原距离为 30 mm;球铰链由球头和球头的外伸部组成,球头的初始直径为 8 mm;铰链底座与球头配合的初始直径也为 8 mm。外伸部是圆柱形,其优化尺寸为直径和长度,由于外伸部的长度直径变化会改变调整平台的工况,不符合本文的优化目的,所以其长度和直径这 2 个因素不属于设计变量。

根据设计要求及相关文献可知各个优化参数对应的初始值、优化区间如表 3 所示,调整平台的设计参数结构模型如图 5 所示。

表 3 参数化尺寸

Table 3 Parameterized size

优化变量	初始值/mm	优化区间/(mm,mm)
外壳内直径 D_1	30	[27.0,33.0]
外壳壁厚 T_1	2	[1.8,2.2]
外壳高度 H_1	200	[180.0,220.0]
内壳外直径 D_2	30	[27.0,33.0]
内壳壁厚 T_2	2	[1.8,2.2]
内壳高度 H_2	150	[135.0,165.0]
连接端与外壳顶端距离 L	30	[27.0,33.0]
铰链球头直径 D_3	8	[7.2,8.8]
铰链底座与铰链配合直径 D_4	8	[7.2,8.8]
铰链底座与铰链配合直径 D_5	8	[7.2,8.8]

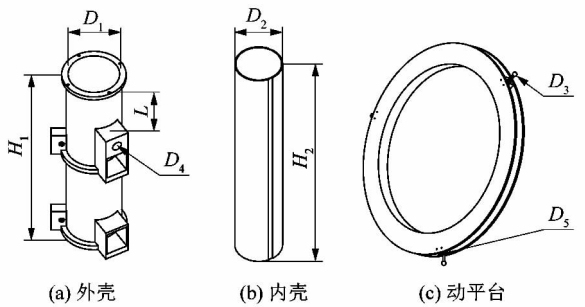


图 5 调整平台的设计参数结构模型

Figure 5 Design parameter structure model of adjustment platform

1.3.2 建立数学优化模型

结构优化的数学模型由设计变量、等式约束条件和确定性目标函数组成^[10]。将调整平台的线性致动器外壳的内直径 D_1 、高度 H_1 和壁厚 T_1 、内壳的外直径 D_2 、高度 H_2 和壁厚 T_2 、球铰链球头直径 D_3 、连接端与外壳顶端距离 L 以及铰链底座与铰链配合直径 D_4 和

D_5 等 10 个设计尺寸作为设计变量 $P_i (i=1,2,3,\dots)$ 。设计变量为:

$$\mathbf{X} = [D_1 \ D_2 \ D_3 \ D_4 \ D_5 \ H_1 \ H_2 \ T_1 \ T_2 \ L]^T = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6 \ P_7 \ P_8 \ P_9 \ P_{10}]^T \quad (2)$$

该数学模型的约束条件如下:

1) 几何约束

控制设计变量,设计空间样点,其几何约束如图 5 所示。

2) 强度约束

$$g_1 = \sigma_i - [\sigma] \leq 0, i=1, \dots, n_o \quad (3)$$

式中: σ_i , $[\sigma]$ 分别为调整平台的应力及许用应力; n 为设计点数目。

3) 刚度约束

$$g_2 = k_j - [k] \leq 0, j=1, \dots, n_o \quad (4)$$

式中: k_j , $[k]$ 分别为调整平台的刚度及许用刚度; n 为设计点数目。

调整平台结构优化的目标是保证减质量的同时,强度、刚度及结构稳定性仍能满足相应要求。状态变量指设计变量的参变量,是设计性能的指标^[11],因此选取调整平台质量 m 、最大位移形变量 δ 和最大等效应力 σ 为状态变量,所以目标函数为:

$$\left. \begin{aligned} \min m(x) &= m(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}); \\ \min \delta(x) &= \delta(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}); \\ \min \sigma(x) &= \sigma(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2 调整平台结构响应面优化设计

2.1 参数敏感性分析

敏感性是指实验中参数模型的输入参数的变化对输出结果的影响^[12]。一般在进行响应面优化之前,需应用参数敏感性分析,由此排除对于相应目标影响较小的设计变量。

依据设计步骤,确定优化的 10 个尺寸参数设计变量,尺寸优化范围为 $\pm 10\%$,在样本空间构造 100 个实验设计点,如图 6 所示。

调整平台各设计参数变化导致优化目标影响程度的变化。调整平台质量、最大位移形变和最大等效应力对 10 个设计参数的全局敏感性如图 7 所示。

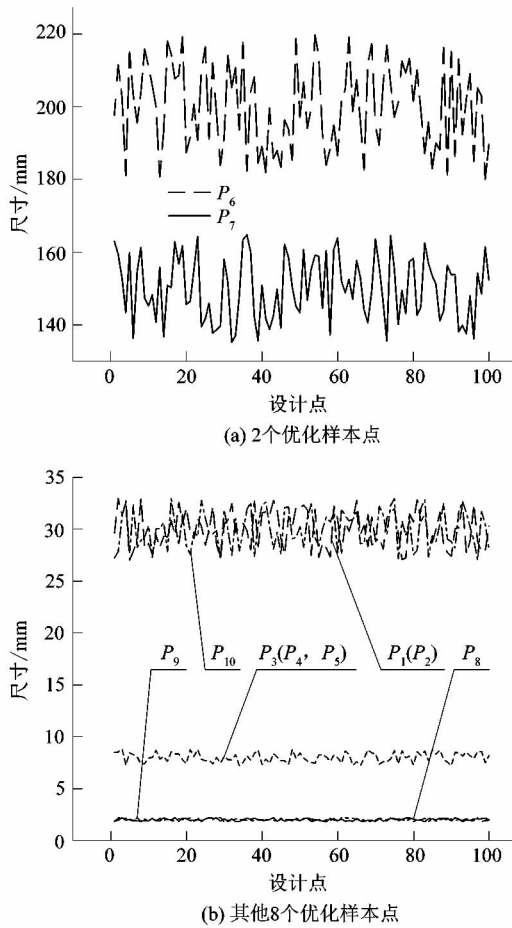


图6 实验样本点

Figure 6 Dot plot of experimental samples

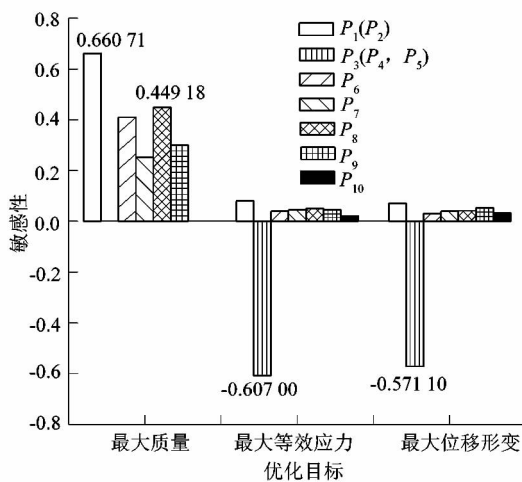


图7 全局敏感性分析

Figure 7 Global sensitivity analysis

从图7中可知调整平台的外内壳、动平台的优化参数与质量、最大等效应力以及最大位移形变均成正

比例关系,而球铰链的优化尺寸反之。具体描述如下:

1) 调整平台质量对各优化参数敏感性的大小排序为:外壳内直径 P_1 (内壳外直径 P_2) > 外壳壁厚 P_8 > 外壳高度 P_6 > 内壳壁厚 P_9 > 内壳高度 P_7 > 球铰链球头直径 P_3 (铰链底座与铰链配合直径 P_4, P_5) > 连接端与外壳顶端距离 P_{10} 。其中 P_3, P_4, P_5 和 P_{10} 的敏感性影响因子均为零。

2) 调整平台最大等效应力对各优化参数敏感性的大小排序为:球铰链球头直径 P_3 > 外壳内直径 P_1 > 外壳壁厚 P_8 > 内壳高度 P_7 > 内壳壁厚 P_9 > 外壳高度 P_6 > 连接端与外壳顶端距离 P_{10} 。

3) 调整平台最大位移形变量对各优化参数敏感性的大小排序与最大等效应力排序一致。

4) 外壳内直径 P_1 对调整平台的质量影响最大,其次为外壳壁厚 P_8 ;球铰链球头直径 P_3 对质量影响最小,但调整平台所受到的最大等效应力和最大形变对 P_3 敏感程度最高。

由上述分析可知 10 个设计变量对优化目标均会产生一定的影响,但 P_1, P_3 和 P_8 对优化目标的影响最大,最终确定外壳内直径 P_1 、球铰链球头直径 P_3 和外壳壁厚 P_8 作为优化设计变量。

2.2 响应面拟合分析

响应面优化法本质上是利用有限实验数据建立响应面并进行拟合函数,通过算法来筛选最优解的科学方法。响应面指利用设计变量中若干样本点的函数响应值或实验值,用回归分析的方法拟合样本点并建立函数响应面关系^[13-14]。响应面拟合函数选择实验点少而精度高的二阶响应面函数,函数表达式为:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^z \beta_i X_i + \sum_{i=1}^z \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{j=2}^z \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (6)$$

式中: $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 为多项式的待定系数; ε 为函数 y 的误差; X_i 为设计变量; z 为设计变量的个数。

其中多项式的待定系数利用最小二乘估计的多项式回归法求得,该表达式如下:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

$$X = \begin{Bmatrix} 1 & x_1^1 & \cdots & x_k^1 \\ 1 & x_1^2 & \cdots & x_k^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_1^n & \cdots & x_k^n \end{Bmatrix}, Y = \begin{Bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^n \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中: n 为模型的实验点数目, x_k^n 为实验点的变量值, y^n 为实验点的函数值。

建立响应面的关键问题是拟合响应面的实验样本点选取。样本点选取位置合适,则能够降低计算成本和提高精度。实验采用 CCD 设计方法 (central composite design),由于该方法具有优秀的填充性及空间对称性,因此能够以较少的实验点数目填充整个样本空间,满足实验要求。通过 CCD 设计法可获得 15 个设计样本点的相关数值,如表 4 所示。

表 4 CCD 法的设计点

Table 4 Design point of CCD method

序号	P_1/mm	P_3/mm	P_8/mm	m/kg	σ/MPa	δ/mm
1	27.00	2.10	8.00	2.73	50.51	0.005 41
2	33.00	2.13	8.00	3.01	48.80	0.004 98
3	30.00	2.05	8.80	2.87	48.91	0.005 03
4	29.10	1.94	7.77	2.78	57.89	0.005 38
5	30.00	1.80	8.00	2.71	49.82	0.005 45
6	29.10	1.94	8.22	2.74	47.36	0.005 27
7	30.80	1.94	7.25	2.82	50.68	0.005 77
8	29.10	1.94	7.89	2.79	53.56	0.005 48
9	30.40	1.94	8.22	2.83	48.63	0.005 35
10	30.00	2.08	8.74	2.91	54.78	0.005 52
11	28.40	2.18	8.00	3.01	48.80	0.004 98
12	28.00	2.00	7.57	2.88	48.67	0.005 24
13	29.60	1.81	7.68	3.02	49.33	0.004 92
14	31.20	2.16	8.21	3.00	51.24	0.005 20
15	28.80	1.89	8.64	2.81	49.62	0.005 22

一般来说,响应面的精度不仅取决于输出变量变化的复杂程度和样本点数量,还与响应面类型相关。为了提高拟合精度和搜索速度,课题组采用有限元 Design Explorer 模块提供的二次多项式^[15]响应面进行数据的拟合,从而获得设计参数与优化目标的响应面。

拟合的响应面需进行拟合度评价,拟合度通过拟合度评价值及拟合度散点图来判断其精度。响应面拟合度评价值如表 5 所示,拟合度符合性分布如图 8 所示。

表 5 拟合度评价值

Table 5 Value of fit evaluation

输出参数	决定系数/%
m	94.081
σ	82.698
δ	93.119

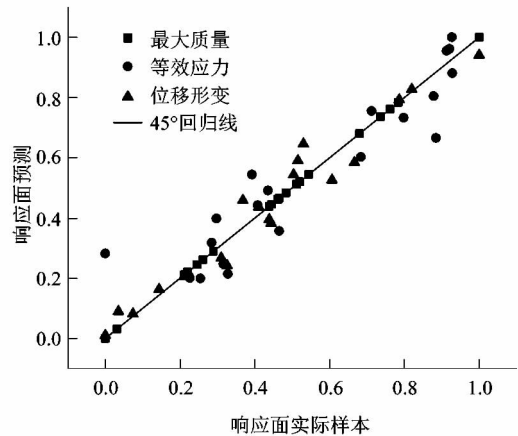


图 8 拟合度散点图

Figure 8 Scatter plot of fit degree

工程上,决定系数需要 75% 以上才满足响应面精度要求。在拟合度散点图中,纵轴为响应面预测的值,横轴为设计点计算值,响应面的质量取决于散点是否位于 45° 线的附近。由表 5 可知 3 个输出值的决定系数均超过 75%,由图 8 可观察出大部分散点位于 45° 线的附近,因此拟合的响应面精度满足工程要求。

重点分析外壳内直径 P_1 与球铰链球头直径 P_3 共同对质量作用的响应面,如图 9(a) 所示;外壳内直径 P_1 与球铰链球头直径 P_3 共同对最大等效应力作用的响应面,如图 9(b) 所示。

从图 9(a) 可以看出, P_1 和 P_3 对质量的影响是线性正相关,适当地减少 P_1 和 P_3 的数值可以有效降低质量。图 9(b) 表明 P_1 和 P_3 对最大等效应力的影响是非线性的, P_1 数值的增加导致其等效应力先升高后降低, P_3 数值增大导致其等效应力降低。由图可知其质量和最大等效应力的最优设计点不一致,存在矛盾,需进行优化设计。

2.3 基于 MOGA 算法的优化及优化结果

优化分析往往会涉及到多目标期望,且目标期望之间可能存在矛盾,比如调整平台的等效应力减低,但质量就会增加,因此针对多目标优化的问题,需要寻找优化目标的平衡点。MOGA (multi-objective genetic algorithm) 方法是一种多优化目标的迭代遗传算法,用于处理连续设计变量的多目标优化问题。MOGA 方法善于搜索全局的最优设计,能适用于响应面优化

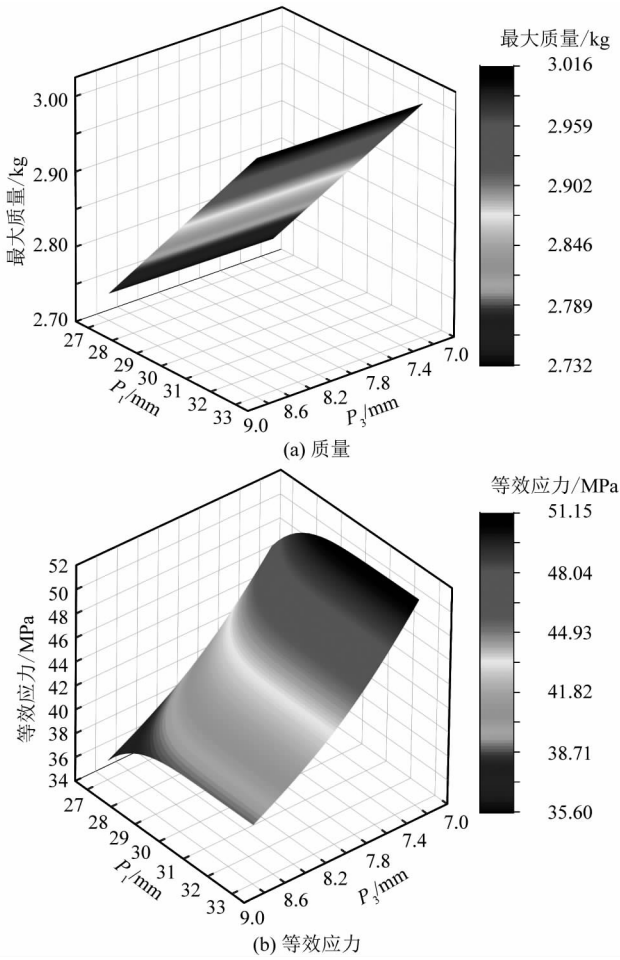


图9 P_1 与 P_3 共同作用的响应面

Figure 9 Response surface of P_1 and P_3 together

对于调整平台而言,需寻找一组最合理的结构设计变量,尽可能满足轻量化以及强度和刚度的要求。根据多目标的要求以及所得到的响应面,本实验采用MOGA 算法进行多目标优化。运用 MOGA 算法求解尺寸优化后的相关响应面模型,设置相关参数,通过以最大等效应力、最大位移形变和质量最小为约束条件进行多目标搜索。求解后得到以调整平台的最大等效应力、最大位移形变和质量为设计指标的三维权衡图,如图 10 所示。从图 10 中得到 3 组最优解作为候选点,如表 6 所示。

减少质量、降低最大等效应力和最大位移形变量是本次实验的指标,从表 6 可知 3 个候选点中候选点 2 是最符合实验指标。考虑到零件制造精度要求,候选点 2 的尺寸需要圆整。圆整后的优化点参数以及优化效果如表 7 所示。

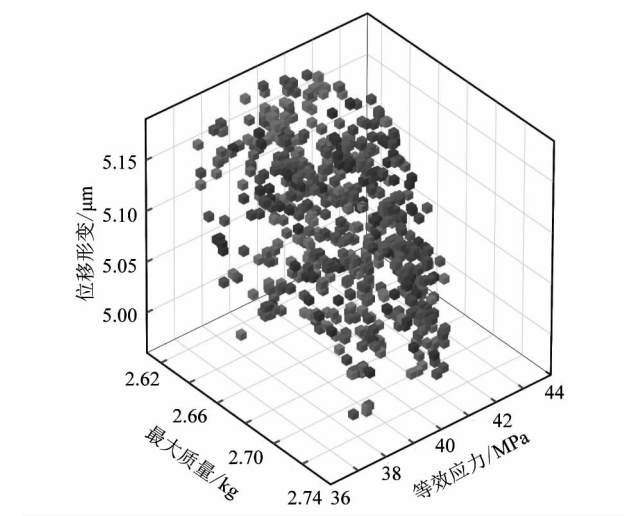


图 10 三维权衡图

Figure 10 Three dimensional trade-off diagram

表 6 优化候选点

Table 6 Candidate point for optimization

候选点	P_1 /mm	P_3 /mm	P_8 /mm	m /kg	σ /MPa	δ /mm
1	27.000	8.590	1.801	2.503	37.81	0.005 1
2	27.050	8.680	1.802	2.499	31.19	0.005 0
3	27.000	8.710	1.802	2.493	28.84	0.005 3

表 7 优化结果对比

Table 7 Comparison of optimization results

类别	P_1 /mm	P_3 /mm	P_8 /mm	m /kg	σ /MPa	δ /mm
优化前	30.0	8.0	2.0	2.87	52.8	0.005 3
优化及圆整后	27.0	8.5	1.8	2.50	31.1	0.005 0
优化效果/%				-12.8	-41.0	-5.6

由表 7 可知调整平台优化后的质量为 2.5 kg,比优化前降低了 12.8%;其最大等效应力为 31.1 MPa,相较于优化前减少了 41.0%;最大位移形变量降低了 5.6%。从优化前后的结果比较而言,降低的趋势比较明显。可见,优化后的调整平台结构稳定性有所提高,说明此次调整平台轻量化设计是合理和可靠的。

3 结论

为了降低地震仪调整平台无人化安装的影响以及提高调整平台的调整精度,课题组采用一种敏感性分析、响应面拟合和基于 MOGA 遗传算法全局寻优求解相结合的轻量化优化设计方法,且通过优化前后结果对比,得到主要的结论如下:

1) 根据调整平台静力学分析可获得其最大等效应力为 52.8 MPa, 最大总位移形变为 0.03 mm, 并通过 X 、 Y 和 Z 方向位移形变比较可知 Z 方向最为薄弱, 其静刚度为 4×10^4 N/mm。通过强度、刚度校核可得出调整平台满足性能要求, 且可以进行响应面优化设计的结论。

2) 通过调整平台尺寸参数化以及敏感性分析的方法获得调整平台尺寸参数对其质量、强度和刚度的影响程度。根据尺寸参数的敏感性, 最终确定外壳内直径 D_1 、外壳壁厚 T_1 和球铰链球头直径 D_3 为优化尺寸参数, 避免调整平台优化时的盲目性, 节省大量建模时间以及提高调整平台尺寸优化的效率。

3) 确定尺寸优化参数, 基于 CCD 方法构造实验样本点, 通过二次项多项式的方法拟合质量、最大等效应力和 Z 方向的位移形变的响应面。通过 MOGA 遗传算法对调整平台的响应面进行全局寻优求解, 求解出的优化点表明: 调整平台的质量降低了 12.8%, 最大等效应力下降 41.0%, 薄弱方向的位移形变降低了 5.6%, 满足了调整平台轻量化以及提升稳定性的要求。这种敏感性分析、响应面模型拟合和 MOGA 遗传算法寻优求解的优化方法对同类结构优化设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 李建, 孙其龙. 钻采综合性能测试系统姿态调整装置研制[J]. 北京大学学报, 2021, 22(4): 534-539.
- [2] 晏远志, 杨金堂, 万欢, 等. 采用响应面法的圆盘造球机可靠性优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(2): 61-65.

(上接第 84 页)

- [10] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE, 2016: 770-778.
- [11] LU Z, JIANG X D, KOTA. Deep coupled ResNet for low-resolution face recognition[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(4): 526-530.
- [12] WANG S H, FERNANDES S L, ZHU Z Q, et al. AVNC: attention-based VGG-style network for COVID-19 diagnosis by CBAM[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 22(18): 17431-17438.
- [13] 赖阳文, 杨振国, 王勇, 等. 嵌入注意力机制模型的人脸表情迁移学习方法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(2): 595-599. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2019.10.0644.
- [14] 李锐, 王旭, 关欣. 一种结合三重注意力机制的双路径网络胸片

- [3] HULL P V, CANFIELD S. Optimal synthesis of compliant mechanisms using subdivision and commercial FEA[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(2): 337-348.
- [4] 吴鹏, 师涛, 赵世刚, 等. 基于 ANSYS 和响应面法的排管机立柱优化设计[J]. 石油机械, 2019, 47(2): 41.
- [5] KANG S C, KOH R M, CHOO R F. An efficient response surface method using moving least squares approximation for structural reliability analysis[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2010, 25(4): 365-371.
- [6] 武照云, 鱼鹏飞, 张毓兰, 等. 基于响应面分析法的粮食搬运 RGV 抓手优化设计[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(1): 50-55.
- [7] 唐林, 许志沛, 贺田龙, 等. 基于响应面法的多节伸缩臂设计优化[J]. 机械设计与制造, 2020(2): 83.
- [8] LOGNONNE P, BANERDT W B, GIARDINI D, et al. SEIS: insight's seismic experiment for internal structure of mars[J]. Space Science Reviews, 2019, 215(1): 32.
- [9] 布申申, 田怀文, 周杰. 基于 ANSYS Workbench 的停车顶检测车底架优化设计[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(4): 823.
- [10] JERINKIC N K, ROZNIK A. Penalty variable sample size method for solving optimization problems with equality constraints in a form of mathematical expectation[J]. Numerical Algorithms, 2020, 83(2): 701-718.
- [11] 赵铁柱, 石端伟. 基于 ANSYS Workbench 的升船机承船厢卧倒门优化设计[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(3): 378-382.
- [12] ZHU J, ZHANG H Q. Numerical study on electrical-submersible-pump two-phase performance and bubble-size modeling[J]. SPE Production & Operations, 2017, 32(3): 267-278.
- [13] 吕辉, 于德介, 谢展, 等. 基于响应面法的汽车盘式制动器稳定性优化设计[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 55-60.
- [14] 李志远, 裴帮, 李学飞, 等. 基于响应面法的减速器行星架多目标优化研究[J]. 机电工程, 2022, 39(1): 26-31.
- [15] HILL W J, HUNTER W G. A review of response surface methodology: a literature survey[J]. Technometrics, 1966, 8(4): 571-590.

- 疾病分类方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44: 1-14.
- [15] CHU Y, YUE X, YU L, et al. Automatic image captioning based on ResNet50 and LSTM with soft attention [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2020: 2020: 1-7.
- [16] 徐祖耀. 低碳钢中的残余奥氏体[J]. 上海金属, 1995, 17(1): 6.
- [17] YANG Z L, DAI Z H, SALAKHUTDINOV R, et al. Breaking the softmax bottleneck: a high-rank RNN language model [EB/OL]. (2018-03-02) [2022-08-30]. <https://arxiv.org/pdf/1711.03953.pdf>.
- [18] HUANG X H, CHEN W H, YANG W D. Improved algorithm based on the deep integration of googlenet and residual neural network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1757(1): 012069.
- [19] DENG X, LIU Q, DENG Y, et al. An improved method to construct basic probability assignment based on the confusion matrix for classification problem[J]. Information Sciences, 2016, 340/341: 250-261.