

DOI: 10.7652/xjtuxb201906013

采用改进粒子群算法的机载光电平台多目标优化

刘国强, 陈维义, 陈华东, 程晗
(海军工程大学兵器工程学院, 430033, 武汉)

摘要: 为了提高光电平台的动态特性,减少受激励源的振动响应,通过引入交叉算子、学习因子和混沌变异等,提出了一种改进粒子群算法,并采用改进粒子群算法与动力学联合优化的方法(APSO-ABAQUS)对机载光电平台进行多目标优化研究。首先建立了光电平台的有限元模型,并将该模型的模态计算结果与模态试验测试值进行对比,验证了光电平台有限元模型的有效性;然后将优化前仿真得到的光电平台的振动响应与随机振动试验得到的振动响应相比较,进一步验证模型有效;最后以振动响应、质量和刚度特性为优化目标,对光电平台进行优化。结果表明:优化前振动加速度峰值为 641.30 m/s^2 ,优化后的振动加速度峰值为 375.68 m/s^2 ,较优化前振动加速度峰值降低了 41.42% ;优化后光电平台基频由 74.53 Hz 提高到 107.36 Hz ,提高了 44.04% ,较大程度提升了平台的动刚度,有效提高了光电平台的动态性能;光电平台的质量由优化前的 53.4 kg 减小至 48.6 kg ,质量降低了 8.64% ,优化后光电平台的结构更加合理;建立的 APSO-ABAQUS 多目标优化模型是合理可行的,可为其他结构优化设计提供一定的借鉴。

关键词: 机载光电平台;模态分析;ABAQUS 软件;改进粒子群算法;振动响应

中图分类号: TN206;TH136 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)06-0092-09

Multi-Objective Optimization of Airborne Electro-Optical Platform with Ameliorated Particle Swarm Optimization Algorithm

LIU Guoqiang, CHEN Weiyi, CHEN Huadong, CHENG Han
(College of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To improve the dynamic characteristics of the electro-optical platform and reduce the vibration response of the excited source, an ameliorated particle swarm optimization algorithm is proposed by introducing crossover operator, learning factor and chaotic mutation. The ameliorated particle swarm optimization algorithm and the software ABAQUS are combined to realize multi-objective optimization of the airborne electro-optical platform. A finite element model of the electro-optical platform is established and the modal calculation results are compared with the modal test values to verify the model's effectiveness. And the vibration response of the electro-optical platform obtained by the pre-optimization simulation is compared with that obtained by the random vibration test to further verify the model. Taking vibration response, mass and stiffness as the objectives, this electro-optical platform is completely optimized. The results show that the peak value of the vibration acceleration before optimization is reduced by 41.42% from 641.30 to 375.68 m/s^2 , and the impact vibration response of the optimized

platform is also reduced. Once optimization, the fundamental frequency of the platform is increased by 44.04% from 74.53 Hz to 107.36 Hz, the dynamic stiffness of the platform is greatly strengthened, the dynamic performance is effectively improved, and the weight of this electro-optical platform is reduced from 53.4 kg to 48.6 kg.

Keywords: airborne electro-optical platform; modal analysis; ABAQUS; ameliorated particle swarm optimization; vibration response

机载光电平台是直升机上装载的图像获取、监测设备,任务是获得高质量的图像。对于机载光电平台来说,平台的稳定性对于成像质量有重要的影响^[1-2],而使光电平台稳定,需要对光电平台采用合适的优化方法,减少振动响应,达到设计要求^[3-4]。

针对光电平台一般采用拓扑优化设计^[5-9]、有限元软件优化设计^[10-12],但是拓扑优化设计和有限元仿真软件优化设计只能进行单目标优化,而且大多只能对结构进行优化设计,无法满足日益复杂的多目标优化需求。为此本文以某型机载光电平台为研究对象,建立了机载光电平台 ABAQUS 有限元模型,以平台振动响应和动态刚度为优化目标,采用改进粒子群算法(APSO)和 ABAQUS 有限元仿真软件(APSO-ABAQUS)联合对机载光电平台进行多目标优化设计研究。

1 光电平台有限元模型及模型试验

1.1 机载光电平台有限元模型

采用 CATIA 三维软件,建立机载光电平台三维实体模型,经合理简化后导入 ABAQUS 有限元分析软件。定义下列几何参数,其中材料属性为底座和支架弹性模量,泊松比为 0.3,密度为 7 850 kg/m³,光电球材料属性中弹性模量为 72 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2 730 kg/m³。考虑到底座与支架间接轴承的摩擦特性、装配预紧力等接触面边界条件,在光电底座施加摩擦力,光电平台两侧有支架,支架与光电球之间添加固定约束。为了保证光电平台动力学的计算精度,应用 Hypermesh 方式划分四面体网格,在光电底座和支架部分网格紧密,其中光电底座单元网格数为 133 201,支架单元网格数为 45 630,光电球的网格稀疏,单元网格数为 118 759。

光电平台受到发动机及其他设备工作而引起剧烈振动,为了减小其振动响应,可从光电平台结构入手,对光电平台进行模态分析,研究光电平台的振动规律,来保证其有良好的工作性能。

利用 ABAQUS 有限元软件中的 Lanczos 法,

计算得到光电平台前 6 阶模态及模态的固有频率,如图 1~图 6 所示。

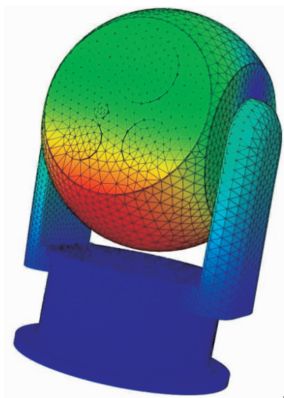


图 1 光电平台 1 阶模态振型

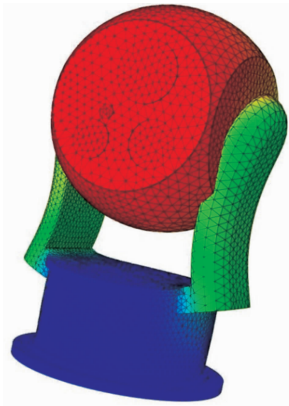


图 2 光电平台 2 阶模态振型

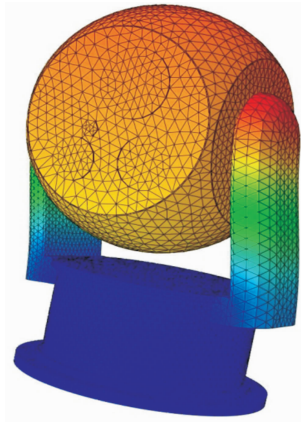


图 3 光电平台 3 阶模态振型

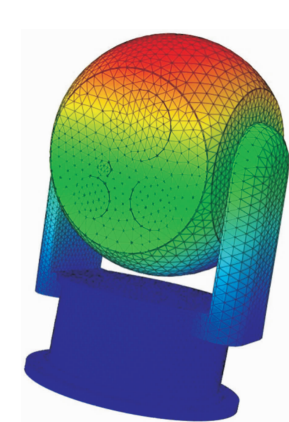


图 4 光电平台 4 阶模态振型

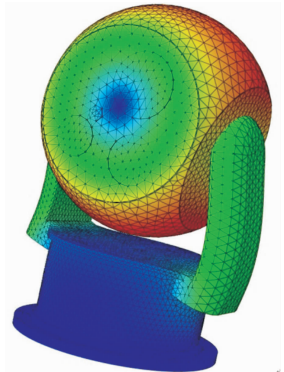


图 5 光电平台 5 阶模态振型

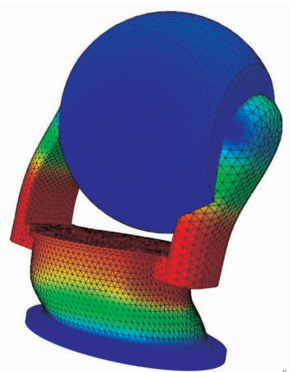


图 6 光电平台 6 阶模态振型

1.2 模态试验

光电平台模态试验流程如图7所示,试验设备如图8所示。测试软件选用B/K公司的PULSE 7753;使用DEWERTON公司的DEWE501数据采集系统;使用B/K公司生产的4326A加速度传感器;使用Baumer公司生产的DLRP L002-1传感器;力锤为INV9312;模态参数识别的后处理软件为东华测试的DHMA模态分析软件。试验采用锤击法,流程主要包括对机载光电平台锤击激励、测得激励和响应信号、采集信号、分析信号及模态识别^[13-14]。

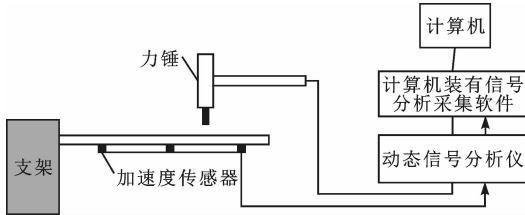


图7 模态试验流程示意图

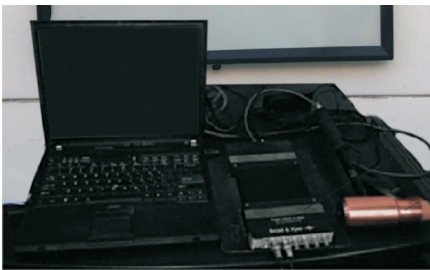


图8 模态试验设备图

具体试验方案为:光电平台放置在试验台架上,室内常温下用力锤移动锤击激励,为了减小试验误差,测试点的锤击激励测试5次取平均值,试验采用单点多次激励输入、多点3方向输出。锤击激励位置为光电平台正上方,采用动态激励的方法,力传感器采集的激励力信号、加速度传感器采集的响应信号,通过数据采集系统传至DHMA软件进行分析,进而得到模态试验值。

1.3 模态识别及模型验证

根据采集的激励响应信号,应用DHMA模态试验分析软件进行模态识别,得到机载光电平台主要固有频率和振型。由于高阶固有频率对光电平台动态特性影响不大,所以本次试验选取前6阶模态试验结果进行对比。前6阶固有频率的计算值和测试值如表1所示。由表1可知,光电平台模态的固有频率计算值与测试值之间的最大相对误差小于9.81%,根据模态试验测试相关要求,试验测试与计算误差在15%以下均为有效。因此,光电平台有限元模态计算值与模态试验测试值相吻合,验证了

ABAQUS建立的光电平台有限元模型的正确性。

表1 有限元计算频率与模态试验测试值的对比

阶次	计算频率 /Hz	测试频率 /Hz	误差 /%	振型
1	74.53	67.22	9.81	弯曲振动
2	133.63	123.09	7.88	弯曲振动
3	147.20	136.40	7.34	扭转振动
4	282.84	263.44	6.86	扭转振动
5	334.94	319.23	4.69	扭转振动
6	563.43	541.63	3.87	扭转振动

2 改进粒子群算法与动力学优化

2.1 改进粒子群算法

为了克服基本粒子群算法局部极值、早熟收敛的问题^[15-18],应用添加交叉算子、动态惯性因子、改进学习因子参数和加入混沌变异操作等方法对基本PSO算法进行改进。

(1)交叉算子。本文将交叉算子引入到PSO算法中,生成粒子 i 对应的测量位置 $\mathbf{X}_{i,t+1}$,然后将测量位置 $\mathbf{X}_{i,t+1}$ 和个体历史最优位置 $\mathbf{P}_{i,t}$ 离散交叉,生成测试位置 $\mathbf{Q}_{i,t} = \{q_{i,t}^1, q_{i,t}^2, \dots, q_{i,t}^D\}$ 。交叉公式为

$$q_{i,t+1}^j = \begin{cases} x_{i,t+1}^j, & r_j(0,1) < v_i \text{ 或 } j = j_r \\ v_{i,t}^j, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $r_j(0,1)$ 为 $[0,1]$ 之间满足均匀分布的随机数; j_r 为 $[1,D]$ 上随机均匀产生的整数; v 为交叉概率。这种交叉方式与差分演化中的二项交叉操作相同。

最后,更新粒子的个体历史最优位置为

$$p_{i,t+1}^j = \begin{cases} q_{i,t+1}^j, & f(q_{i,t+1}^j) < f(p_{i,t+1}^j) \\ p_{i,t+1}^j, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(*)$ 为适应度函数。本文采用自适应方法将参数 s 直接编码到每个粒子中,以实现自适应控制。扩展编码后群体中粒子可描述为

$$\mathbf{X}_{i,t} = \{x_{i,t}^1, x_{i,t}^2, \dots, x_{i,t}^D, p_{i,t}\} \quad (3)$$

对于群体中的每个粒子,采用如下规则更新交叉概率

$$s_{i,t+1} = \begin{cases} r_1(0,1), & r_2(0,1) < \lambda \\ s_{i,t}, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ 为参数 s_c 的更新概率。

(2)添加动态惯性因子和学习因子。有学者提出自适应调整的粒子群算法^[19],但随着算法的迭代过程惯性权重线性减小,该算法不能适应比较复杂的非线性问题。为此,本文采用了动态惯性因子的

粒子群算法。先定义两个变量,粒子进化度为

$$m = \frac{p_{g,i}}{p_{g,i-1}} \tag{5}$$

粒子聚合度为

$$l = \frac{p_s p_{g,i}}{\sum_{j=1}^M p_j} \tag{6}$$

式中: $p_{g,i-1}$ 、 $p_{g,i}$ 分别为前一代迭代过程中全局最优值和当代的全局最优值; M 为种群规模,。

粒子进化度表示粒子的运行状态,初始值 m 较小,进化速度较快。惯性权重 ω 与例子的进化度 m 、粒子的聚合度 l 密切相关,表达式如下^[20]

$$\omega = f(m, l) = \omega_0 - 0.6m + 0.15l \tag{7}$$

式中: ω_0 为初始权重,一般取 0.9。加入了粒子进化度 m 和粒子聚合度 l 的动态惯性因子能够改进粒子群的算法性能。

学习因子(c_1 、 c_2)表示的是粒子的记忆和学习能力, c_1 、 c_2 是局部最优值和全局最优值的权重。在开始迭代时,粒子在一个较大的空间进行搜索,保持了粒子的多样性, c_1 较大、 c_2 较小,加快粒子群搜索速度。在迭代后期,粒子群的重心在全局最优解, c_1 较小、 c_2 较大,保持粒子群能够精细搜索。所以,有表达式

$$\left. \begin{aligned} c_1^m &= c_{10} - (c_{10} - c_{11})(1 - k/k_m) \\ c_2^m &= c_{20} - (c_{20} - c_{21})(1 - k/k_m) \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

式中: c_{10} 、 c_{11} 是 c_1 的初始值和最终值; c_{20} 、 c_{21} 是 c_2 的初始值和最终值; k 、 k_m 分别为粒子群的迭代次数和迭代次数最大值。

(3)加入混沌变异操作。为了扩大粒子群的搜索空间,防止粒子在迭代后期陷入局部最优,故基于混沌系统生成混沌序列的方式对粒子进行变异操作。首先对 PSO 算法进行收敛性分析,可以得到保证算法全局收敛的必要条件,假设粒子 $\mathbf{x}_i, j(t)$ 收敛于 $\mathbf{k}_i(t) = (\mathbf{k}_{i1}(t), \mathbf{k}_{i2}(t), \cdots, \mathbf{k}_{in}(t))^T$, 表达式为

$$\mathbf{k}_{i,j}(t) = \varphi \mathbf{p}_{i,j}(t) + (1 - \varphi) \mathbf{p}_{g,j}(t) \tag{9}$$

式中: $\varphi \in (0, 1)$; $\mathbf{p}_{i,j}(t)$ 为粒子 i 的历史搜索最优位置; $\mathbf{p}_{g,j}(t)$ 为最优粒子位置。首先,假设粒子的维数为 1,通过计算第 i 个粒子的位置 $\mathbf{x}_i(t)$ 与 $\mathbf{k}_i(t)$ 的距离建立混沌映射关系,在迭代过程中动态调整每一代粒子的混沌搜索范围。粒子的 $\mathbf{x}_i(t)$ 的搜索范围如下

$$\mathbf{x}_{i,\min} = \begin{cases} \mathbf{k}_i(t) - |\mathbf{k}_i(t) - \mathbf{x}_i(t)|/u, & \mathbf{k}_i(t) \neq \mathbf{x}_i(t) \\ \mathbf{k}_i(t) - |\mathbf{k}_i(t) - \mathbf{z}|, & \mathbf{k}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) \end{cases} \tag{10}$$

$$\mathbf{x}_{i,\max} =$$

$$\begin{cases} \mathbf{k}_i(t) + |\mathbf{k}_i(t) - \mathbf{x}_i(t)|/u, & \mathbf{k}_i(t) \neq \mathbf{x}_i(t) \\ \mathbf{k}_i(t) + |\mathbf{k}_i(t)(1-u)|, & \mathbf{k}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) \end{cases} \tag{11}$$

式中: $\mathbf{z}, u \in (0, 1)$ 。然后,对粒子 $\mathbf{x}_i(t)$ 进行归一化,得出混沌序列的初始值如下

$$\mathbf{G}_{i,1} = \frac{\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_{i,\min}}{\mathbf{x}_{i,\max} - \mathbf{x}_{i,\min}} \tag{12}$$

通过混沌映射结构产生新的混沌序列 $\mathbf{G}_i = (\mathbf{G}_{i,1}, \mathbf{G}_{i,2}, \cdots, \mathbf{G}_{i,m})$,将这些序列反变换至原始搜索空间

$$L(\mathbf{x}_{i,r}(t)) = \mathbf{x}_{i,\min} + \mathbf{G}_{i,r}(\mathbf{x}_{i,\max} - \mathbf{x}_{i,\min}) \tag{13}$$

最后,选择序列中评价结果最优的粒子作为下一代粒子,APSO 算法的迭代公式如下

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \arg \min_{1 \leq r \leq v} L(\mathbf{x}_{i,r}(t)) \tag{14}$$

式中: v 为混沌序列长度。

2.2 算法测试及结果

本文仿真试验在 2.6 GHz 双 CPU 和 4 GB 内存的电脑上运行。3 种算法随机运行 50 次,粒子数 $N=40$,维数 $d=20$,要求精度为 10^{-5} ,最大迭代次数 $t_{\max}=1\ 500$ 。各算法的参数设置如表 2 所示。交叉混沌算子粒子群算法测试函数如表 3 所示,交叉算子粒子群算法在 4 种测试函数的收敛情况如图 9~图 11 所示,计算结果如表 4 所示。函数 f_1 原点上只有一个最优解,通常用它来检验算法的局部搜索能力。函数 f_2 是一个单模态函数,但它的最优解存在于粒子总是易于逃逸的狭窄区域,因此它总是用来测试算法的局部和全局搜索能力。函数 f_3 是多模态函数,通常用于比较算法的全局搜索能力。由图 9~图 11 可发现,APSO 能够以较高的精度得到最优解,在全局搜索能力和局部搜索能力方面均优于遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO),证明本文算法收敛速度更快、精度更高。在收敛时间比较方面,与 GA 和 PSO 相比,APSO 在多峰函数 f_3 用时最短,计算时间为 3 372 ms,在单峰函数 f_1 和 f_2 因设置约束条件和改进算法导致运行时间最长,分别达到 2 120 ms 和 3 390 ms。

表 2 各算法的参数设置

算法	参数设置
GA ^[21]	$p_0=0.05, p_1=0.95, r$ 随机设置
PSO ^[22]	$\omega=0.4\sim0.9, c_1=c_2=2$
APSO	$\omega_0=0.9, c_1=1.25\sim2.5, c_2=1.5\sim4$
本文算法	$p_0=0.9, r$ 随机设置

表 3 测试函数

函数	公式	低值	高值
f_1	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	(50, 100)	100
f_2	$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10)$	(2.56, 5.12)	10
f_3	$\frac{1}{4\,000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	(300, 600)	600

表 4 不同算法运行 50 次的结果

函数	GA 算法			PSO 算法			APSO 算法		
	均值	方差	时间/ms	均值	方差	时间/ms	均值	方差	时间/ms
f_1	7.15×10^{-7}	6.38×10^{-8}	1 099	6.85×10^{-10}	8.10×10^{-9}	954	8.27×10^{-20}	4.83×10^{-20}	2 120
f_2	584.02	501.00	2 024	213.20	301.59	2 785	152.00	0.582 7	3 390
f_3	0.095	0.084	5 347	0.038 1	0.033	4 924	4.01×10^{-4}	0.083 8	3 372

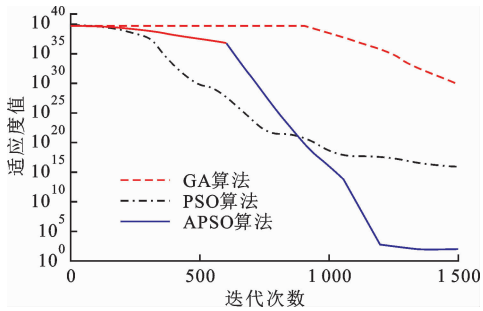


图 9 不同算法下函数 f_1 的收敛情况

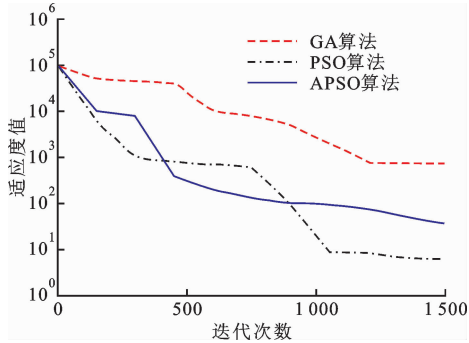


图 11 不同算法下函数 f_3 的收敛情况

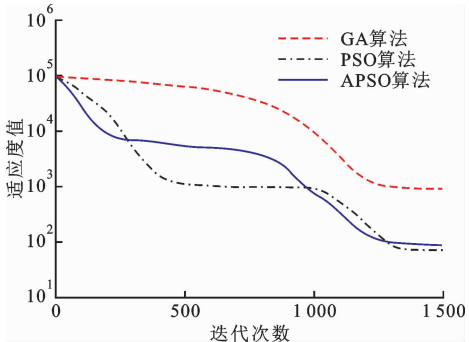


图 10 不同算法下函数 f_2 的收敛情况

2.3 APSO-ABAQUS 联合优化

在优化过程中,由于 ABAQUS Explicit 求解器不能随着优化的调整改变部分设计变量,需要对 ABAQUS 进行二次开发。本文编写了改进粒子群算法 FORTRAN 语言优化模块,嵌入到 ABAQUS Explicit 求解器中,实现了在优化过程中根据优化结果实时调整模型的设计变量,达到理想效果。APSO-ABAQUS 联合优化的流程如图 12 所示。

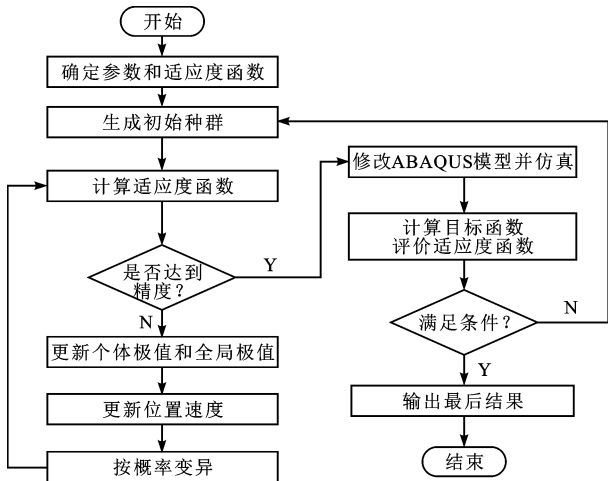


图 12 APSO-ABAQUS 联合优化流程图

2.4 确定光电平台优化参数和目标函数

对光电平台的优化主要是结构参数和材料参数的优化,其中光电平台由底座、支架和光电球组成。本文主要对底座、支架和光电球的外形结构、材料进

行优化设计,在保证光电平台强度的情况下,尽可能降低光电平台的振动响应,提高光电平台的瞄准精度。优化参数有光电平台底座的厚度(L_1)、底座的直径(D_1)、底座的弹性模量(E_1)、支架厚度(L_2)、支架宽度(B)、支架的材料密度(ρ_2)、支架的弹性模量(E_2)、光电球的直径(D_2)、底座的材料密度(ρ_1)、光电球的材料密度(ρ_3)和光电球的弹性模量(E_3),具体优化参数及取值范围如表 5 所示。

优化目标主要有光电平台的刚度特性(k)、振动响应(A)和质量(m)。光电平台的多目标优化问题可以描述为

$$\min f(x) = (f_1(x), f_2(x), 1/f_3(x)) \tag{15}$$

振动响应(A)的目标最小化表示为

$$\min A = f_1(L_1, D_1, L_2, B, D_2, \rho_1, \rho_2, \rho_3, E_1, E_2, E_3) \tag{16}$$

质量(m)的目标最小化表示为

$$\min m = f_2(L_1, D_1, L_2, B, D_2, \rho_1, \rho_2, \rho_3, E_1, E_2, E_3) \tag{17}$$

刚度特性(k)的目标最大化表示为

$$\max k = f_3(L_1, D_1, L_2, B, D_2, \rho_1, \rho_2, \rho_3, E_1, E_2, E_3) \tag{18}$$

表 5 光电平台优化参数的初值及取值范围

参数	初值	低值	高值
L_1/mm	125.0	0.1	250.0
L_2/mm	175.0	0.1	250.0
D_1/mm	120.0	80.0	250.0
D_2/mm	155.0	80.0	250.0
B/mm	20.0	5.0	50.0
$\rho_1/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 850	2 000	10 000
$\rho_2/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 800	2 000	10 000
$\rho_3/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 730	2 000	9 500
E_1/GPa	206	10	500
E_2/GPa	202	10	500
E_3/GPa	70	10	500

3 优化结果与分析

采用 APSO 与 ABAQUS Explicit 求解器联合对光电平台的外部结构和冲击振动响应进行优化,并将优化前的 ABAQUS 的仿真计算结果与试验数据相比较。

由于光电平台的质量较大,不适于在振动台进行压载试验,故采用吊载试验方法。图 13 为机载光电平台振动试验装置,图 14 为机载光电平台试验照

片,试验设备主要有 AC10 振动控制仪、激振器、传感器、计算机、功率放大器和机载光电平台。

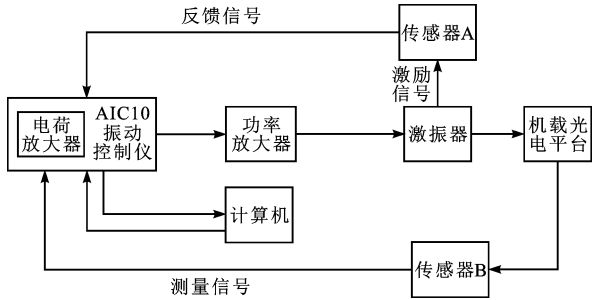


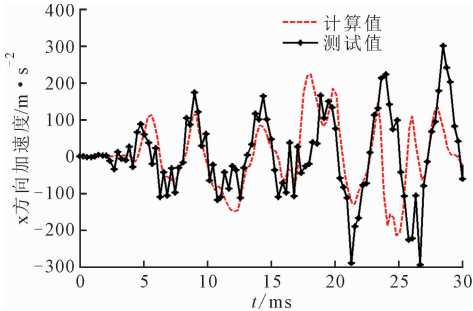
图 13 振动试验装置示意图



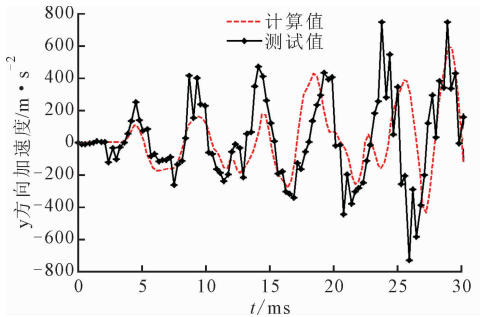
图 14 机载光电平台试验照片

加速度传感器安装在光电平台的内框架上,试验时,振动控制仪发出正弦及随机信号,经功率放大器传至激振器,使得振动台正弦随机振动,光电平台通过工装与振动台固定在一起。加速度传感器测得的振动信号经信号处理后一起输送到计算机内进行分析,最终绘制出光电平台加速度曲线。光电平台的振动响应曲线如图 15~图 18。

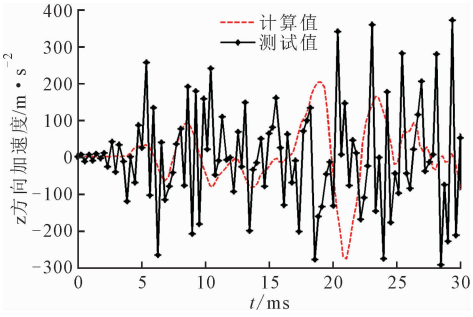
通过图 15 可以发现,优化前的有限元计算模型冲击响应曲线与试验测得冲击响应趋势一致,再次证明建立的 ABAQUS 有限元计算模型是有效的。通过图 16 可以发现,优化前振动加速度峰值 641.30 m/s^2 ,优化后的振动加速度峰值为 375.68 m/s^2 ,优化后的振动加速度峰值降低了 41.42% ,优化后的冲击响应较优化前有明显降低,加速度明显减小。



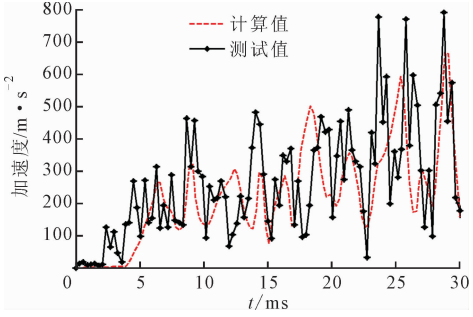
(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

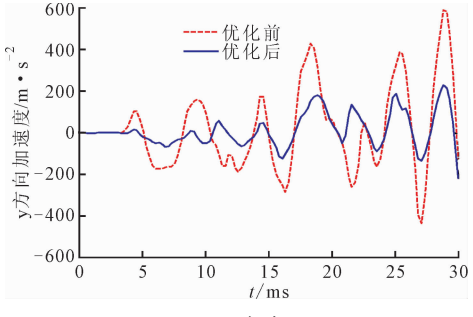


(d) 总的响应

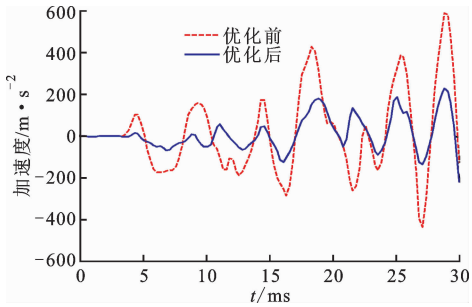
图 15 光电平台优化前模型计算值与试验测试值的对比

这说明建立的 APSO-ABAQUS 冲击振动优化模型是合理可行,优化结果能够有效提升机载光电平台的瞄准精度。

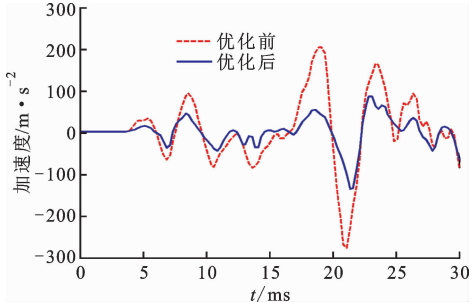
表 6 表示的是光电平台优化前、后的前 4 阶固有频率(Hz),其中基频由 74.53 Hz 提高至 107.36 Hz,提高了 44.04%,提升了平台的动刚度,有效地



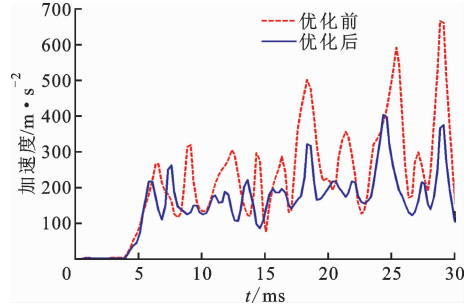
(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向



(d) 总的响应

图 16 光电平台优化前后振动响应的比较

避开了载机激振频率和伺服系统带宽的影响,增加了抗冲击、干扰能力。光电平台的质量由优化前的 53.4 kg 减至 48.6 kg,降低了 8.64%,优化后光电平台的结构更加合理。

表 6 光电平台模态优化结果

阶次	计算频率/Hz	试验频率/Hz	变化比例/%
1	74.53	107.36	44.04
2	133.63	164.50	23.10
3	147.20	189.15	28.50
4	282.84	346.90	22.65

4 结 论

本文以机载光电平台为研究对象,建立了 ABAQUS 机载光电平台有限元模型,提出了改进粒子群算法与动力学联合优化的方法,对机载光电

平台进行了多目标优化设计,得到了以下结论。

(1)将机载光电平台有限元模型的模态计算结果与模态试验比较,证明建立的 ABAQUS 有限元模型是有效的,能较好地反映机载光电平台的动力学特性。

(2)改进粒子群算法与动力学联合优化获得了较好的优化效果,较优化前振动加速度峰值,优化后的振动加速度峰值降低了 41.42%,优化后的冲击响应较优化前有明显降低,加速度明显减小,有效提升了光电平台的瞄准精度。优化后的光电平台的模态计算结果较优化前基频提升了 17.24%,提高了该平台的动态刚度,质量有所降低,优化结构更加合理,说明建立的 APSO-ABAQUS 冲击振动优化模型是合理可行的。

参考文献:

- [1] 王平,田大鹏,徐宁,等. 航空光电侦察平台内藏式扫描系统像旋分析及补偿 [J]. 光学学报, 2017, 37(9): 1-9.
WANG Ping, TIAN Dapeng, XU Ning, et al. Analysis and compensation of image rotation in internally mounted scanning system for aerial electric-optical reconnaissance platform [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 1-9.
- [2] 陈水忠,王凯. 基于鱼群算法的机载光电平台误差分配方法 [J]. 激光与红外, 2017, 47(5): 600-605.
CHEN Shuizhong, WANG Kai. Error distribution method of airborne electro-optical platform based on artificial fish swarm algorithm [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(5): 600-605.
- [3] 郑凤翥,宁飞,王培群,等. 一种机载光电设备减振系统设计及稳定精度试验研究 [J]. 应用光学, 2018, 39(4): 453-459.
ZHENG Fengzhu, NING Fei, WANG Peiqun, et al. Design of vibration damping system for airborne optoelectronic equipment and research on stability accuracy test [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(4): 453-459.
- [4] 姜伟伟,扈宏毅,刘儒贞. 动平台光电设备冲击隔离的工程设计 [J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(1): 74-78.
JIANG Weiwei, HU Hongyi, LIU Ruzhen. Engineering design of shock isolations for mobile-platform optoelectronic equipment [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(1): 74-78.
- [5] 王平,刘家燕,李永刚,等. 机载光电平台外框架结构优化设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1):

84-89.

- WANG Ping, LIU Jiayan, LI Yonggang, et al. Optimization design of outer frame structure for airborne electro-optical platform [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(1): 84-89.
- [6] 张卫红,杨军刚,朱继宏. 压力载荷下的结构拓扑-形状协同优化 [J]. 航空学报, 2009, 30(12): 2335-2341.
ZHANG Weihong, YANG Jungang, ZHU Jihong. Simultaneous topology and shape optimization of pressure loaded structures [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(12): 2335-2341.
- [7] 张卫红,郭文杰,朱继宏. 部件级多组件结构系统的整体式拓扑布局优化 [J]. 航空学报, 2015, 36(8): 2662-2669.
ZHANG Weihong, GUO Wenjie, ZHU Jihong. Integrated layout and topology optimization design of multi-component systems with assembly units [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2662-2669.
- [8] BENDSOE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2): 197-224.
- [9] ESEHNAUER H A, OLHOFF N. Topology optimization of continuum structures: a review [J]. American Society of Mechanical Engineers, 2001, 54(4): 331-390.
- [10] 刘树峰,白鸿柏,李冬伟,等. 动载体光电平台框架结构优化设计 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(2): 153-157.
LIU Shufeng, BAI Hongbai, LI Dongwei, et al. Optimization design about frame structure of moving optoelectric platform [J]. Computer Simulation, 2012, 29(2): 153-157.
- [11] 刘长顺,王兵,陈兆兵. 车载光电稳定平台外框架优化设计 [J]. 中国光学, 2011, 4(6): 606-610.
LIU Changshun, WANG Bing, CHEN Zhaobing. Optimization design of external border for vehicle optoelectronic stabilized platform [J]. Chinese Optics, 2011, 4(6): 606-610.
- [12] 张明,刘文斌,李闯,等. 优化驱动的起落架结构设计方法 [J]. 航空学报, 2015, 36(3): 857-864.
ZHANG Ming, LIU Wenbin, LI Chuang, et al. Optimization-driven design method of landing gear structure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(3): 857-864.

- [13] 王善坡, 李舜酩, 廖庆斌, 等. 专用汽车分动箱模态试验与分析 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 24-27.
WANG Shanpo, LI Shunming, LIAO Qingbin, et al. Modal experiment and analysis of certain special vehicle transfer case [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 24-27.
- [14] HAO Min, RAO M D. Vibration and damping analysis of a sandwich beam containing a viscoelastic constraining layer [J]. Journal of Composite Materials, 2005, 39(18): 1621-1643.
- [15] 张选平, 杜玉平, 秦国强, 等. 一种动态改变惯性权的自适应粒子群算法 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(10): 1039-1042.
ZHANG Xuanping, DU Yuping, QIN Guoqiang, et al. Adaptive particle swarm algorithm with dynamically changing inertia weight [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(10): 1039-1042.
- [16] 许榕, 周东, 蒋士正, 等. 自适应粒子群神经网络交通流预测模型 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 103-108.
XU Rong, ZHOU Dong, JIAN Shizheng, et al. A traffic forecasting model using adaptive particle swarm optimization trained neural network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 103-108.
- [17] 郭森, 秦贵和, 张晋东, 等. 多目标车辆路径问题的粒子群优化算法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(9): 97-104.
GUO Sen, QIN Guihe, ZHANG Jindong, et al. A novel particle swarm optimization for multi-objective vehicle routing problem [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(9): 97-104.
- [18] 刘道华, 原思聪, 张锦华, 等. 粒子群参数自适应调整的优化设计 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 134-138.
LIU Daohua, YUAN Sicong, ZHANG Jinhua, et al. Optimization design of particle swarm with self-adaptive parameter adjusting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 134-138.
- [19] JIANG Y, HU T S, HUANG C C. An improved particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 193(1): 231-239.
- [20] 杨宇, 郑淑涛, 韩俊伟. 基于动力学的 Stewart 平台振动控制策略研究 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 20-24.
YANG Yu, ZHENG Shutao, HAN Junwei. Stewart platform vibration control strategy based on dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 20-24.
- [21] NOMAN S, SHAMSUDDIN S, HASSANIEN A. Hybrid learning enhancement of RBF network with particle swarm optimization [C]// International Symposium on Neural Networks. Berlin, Germany: Springer, 2009: 19-29.
- [22] 张宇, 郭晶, 周激流. 动态变异遗传算法 [J]. 电子科技大学学报, 2002, 31(3): 234-239.
ZHANG Yu, GUO Jing, ZHOU Jiliu. Dynamic mutation genetic algorithm [J]. Journal of UEST of China, 2002, 31(3): 234-239.

[本刊相关文献链接]

- 赵舵, 唐启超, 余志斌. 一种采用改进交叉熵的多目标优化问题求解方法. 2019, 53(3): 66-74. [doi:10.7652/xjtuxb201903010]
- 宋喜玉, 任修坤, 郑娜娥, 等. 多目标跟踪下的分布式 MIMO 雷达资源联合优化算法. 2018, 52(10): 110-115. [doi:10.7652/xjtuxb201810015]
- 李智翔, 李赞, 贺亮, 等. 使用新预测模型的动态多目标优化算法. 2018, 52(10): 8-15. [doi:10.7652/xjtuxb201810002]
- 杜明洋, 毕大平, 王树亮, 等. 一种混合的机动群目标分离检测跟踪算法. 2018, 52(10): 116-123. [doi:10.7652/xjtuxb201810016]
- 柏婷, 郑娜娥, 李海文. 面向邻近目标分辨的 MIMO 雷达波形设计方法. 2018, 52(4): 125-131. [doi:10.7652/xjtuxb201804018]
- 邓亚琦, 王俊, 武勇, 等. 一种机载外辐射源雷达微弱目标检测方法. 2017, 51(2): 72-78. [doi:10.7652/xjtuxb201702012]
- 郭森, 秦贵和, 张晋东, 等. 多目标车辆路径问题的粒子群优化算法研究. 2016, 50(9): 97-104. [doi:10.7652/xjtuxb201609016]
- 赵博选, 高建民, 陈琨. 求解多目标柔性作业车间调度问题的两阶段混合 Pareto 蚁群算法. 2016, 50(7): 145-151. [doi:10.7652/xjtuxb201607022]
- 邓涛, 林椿松, 李亚南, 等. 采用 NSGA-II 算法的混合动力能量管理控制多目标优化方法. 2015, 49(10): 143-150. [doi:10.7652/xjtuxb201510023]

(编辑 杜秀杰)