

# 某星载降水雷达结构动力学优化设计方法

马志毅, 栗华美, 张雪峰, 尹晓琳, 江柏森  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 针对某星载降水雷达结构动力学优化设计要求, 在有限元分析的基础上, 采用Kriging(克里金)代理模型对某星载降水雷达的有限元模型进行近似化处理, 并利用改进遗传算法对其蜂窝板结构参数进行优化设计, 获得较优设计方案。最终通过某星载降水雷达结构动力学优化设计案例以及力学试验证明该方法的有效性。

**关键词:** 星载降水雷达; Kriging代理模型; 改进遗传算法; 蜂窝板

中图分类号: V443+.2; TH123+.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)04-0124-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20231221002

引用格式: 马志毅, 栗华美, 张雪峰, 等. 某星载降水雷达结构动力学优化设计方法[J]. 遥测遥控, 2024, 45(4): 124-131.

## Structural Dynamics Optimization Design Method for A Spaceborne Radar

MA Zhiyi, LI Huamei, ZHANG Xuefeng, YIN Xiaolin, JIANG Bosen  
(Beijing Research Institution of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In response to the structural dynamics optimization design requirements of a certain satellite-borne precipitation radar, based on finite element analysis, the Kriging surrogate model is used to approximate the finite element model of the satellite-borne precipitation radar. The improved genetic algorithm is then employed to optimize the honeycomb panel structure parameters, resulting in a better design solution. Finally, the effectiveness of this method is demonstrated through a case study of the structural dynamics optimization design of a certain satellite-borne precipitation radar and mechanical experiments.

**Keywords:** Spaceborne radar; Kriging model; Improved genetic algorithms; Honeycomb sandwich panel

**Citation:** MA Zhiyi, LI Huamei, ZHANG Xuefeng, et al. Structural Dynamics Optimization Design Method for A Spaceborne Radar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(4): 124-131.

## 0 引言

近年来, 对星载降水雷达轻量化的要求越来越高, 但是在卫星发射过程中, 雷达要承受主动段恶劣的力学环境, 这样轻量化设计和高刚度要求就成为了一对矛盾体。因此, 需要研究如何解决这个矛盾。

蜂窝夹层结构通常由蒙皮和芯子构成。同传统的金属材料相比具有高比强度、高比刚度、低热膨胀率等特点<sup>[1]</sup>。采用蜂窝夹层结构作为星载降水雷达主要承力结构, 可以有效减轻设备重量。此外, 蜂窝夹层结构的设计参数对星载降水雷达的动力学特性也会产生显著的影响。因此, 选取合适的蜂窝夹层结构的设计参数可以解决上述

矛盾。

文献[2]研究了Sandwich(三明治)等效理论在铝蜂窝复合夹层板的应用, 文献[3]研究了蜂窝结构等效弹性模量的测试方法, 文献[4]研究了卫星结构蜂窝夹层板的等效计算, 文献[5]研究了正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效方法。上述文献中, 对蜂窝夹层板的等效参数进行了研究, 然而针对某星载降水雷达结构设计, 不仅需要蜂窝夹层结构力学参数等效计算方法, 还需要结构动力学建模分析方法。文献[6]研究了卫星结构中铝蜂窝夹层板的动力学特性, 并建立了等效板的动力学模型。文献[7]对某型雷达反射板进行了动力学仿真, 并在此基础上进行了轻量化设计, 文献[8]分析了机载电子机箱结构的动力学特性, 并

在此基础上进行了拓扑优化设计。综上所述,针对星载雷达蜂窝结构动力学优化设计的研究较少,工程实用性较弱。

针对上述问题,本文首先在蜂窝结构等效力学参数的基础上,采用有限元方法对某星载降水雷达进行模态分析,然后对蜂窝夹层板模型进行参数化设计,并建立相应的优化模型。在此基础上,采用Kriging代理模型对某星载降水雷达的有限元模型进行近似化处理,最后采用改进遗传算法进行迭代优化计算,最终得到了较优设计方案,使某星载降水雷达的一阶固有频率达到55 Hz,质量减轻了10%,解决了轻量化设计和高刚度要求之间的矛盾。

## 1 某星载降水雷达动力学优化设计问题描述

### 1.1 某星载降水雷达结构力学特性

双频降水测量雷达放置于卫星+X方向,天线阵面对地。当雷达在轨工作时,雷达的天线波束在跨轨方向匹配扫描。雷达在卫星平台上的布局及相对位置关系如图1所示。

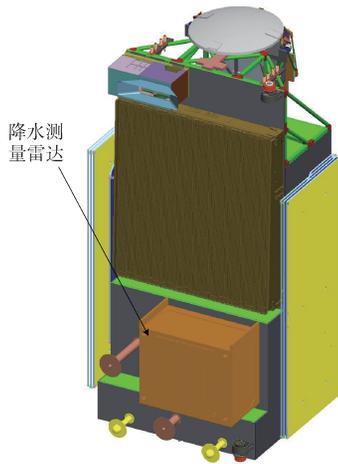


图1 卫星模型

Fig. 1 Satellite model

由图1可知,某星载降水雷达位于卫星安装板上,安装形式为悬臂安装,在发射阶段会承受较恶劣的力学环境。而蜂窝夹层板具有较高的减震特性,能够较好地吸收振动能量。一般卫星结构均采用蜂窝夹层板作为承力结构。

星载降水雷达主要承力结构由外框、天线安装板、仪器安装板等组成,这些承力结构均由蜂

窝夹层板构成,星载降水雷达如图2所示。

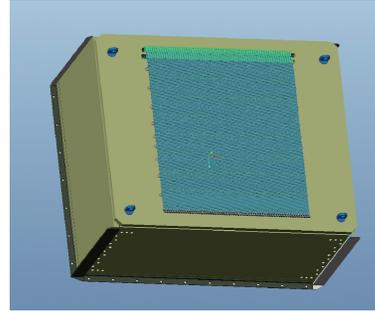


图2 雷达模型

Fig. 2 Radar model

蜂窝板窝芯单元为正六边形,可以把蜂窝板窝芯单元折合成一个等体积实心等效体,那么等效体的总变形能应当与基本单元体的总应变能相等,从而推出窝芯单元的等效力学参数计算方法<sup>[9]</sup>。计算公式如下所示:

$$E_{cx} = E_{cy} = \frac{4}{\sqrt{3}} \left( \frac{t_s}{c} \right)^3 E_s \quad (1)$$

$$E_{cz} = \frac{8\sqrt{3}}{9} \left( \frac{t_s}{c} \right) E_s \quad (2)$$

$$G_{cyz} = \frac{\sqrt{3}}{3} \left( \frac{t_s}{c} \right) G_s \quad (3)$$

$$G_{cxz} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{t_s}{c} \right) G_s \quad (4)$$

$$G_{cxy} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{t_s}{c} \right)^3 E_s \quad (5)$$

式中 $t_s$ 为蜂窝夹层结构芯材厚度, $c$ 为蜂窝夹层结构芯材边长, $E_s$ 为芯材材料拉伸弹性模量, $G_s$ 为芯材材料剪切弹性模量。蜂窝芯子的等效密度计算公式如下所示:

$$\rho_c \approx \frac{8}{3\sqrt{3}} \left( \frac{t_s}{c} \right) \rho_s \quad (6)$$

式中, $\rho_c$ 为芯材等效密度。

### 1.2 某星载降水雷达动力学建模

建立某星载降水雷达的动力学方程如下所示:

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{x}}\} + \mathbf{c}\{\dot{\mathbf{x}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{x}\} = \mathbf{F}(\mathbf{t}) \quad (7)$$

式(7)中, $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, $\mathbf{c}$ 为阻尼矩阵, $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵, $\mathbf{F}(\mathbf{t})$ 为激励力向量。

求解某星载降水雷达的固有频率时,可以忽略阻尼力以及激励力<sup>[10]</sup>,那么可以得到如下方程。

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{x}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{x}\} = 0 \quad (8)$$

设特解

$$\mathbf{x} = \Phi \cdot e^{i\omega t} \quad (9)$$

得到

$$(\mathbf{K} - M\omega^2)\Phi = 0 \quad (10)$$

这样就可以得到一系列圆频率值  $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$

其中  $\omega_i = \left(\frac{K_i}{M_i}\right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $K_i$  为第  $i$  阶模态刚度,  $M_i$  为第  $i$  阶模态质量。由于星载降水雷达结构复杂, 一般都采用有限元法进行固有频率的求解。

### 1.3 某星载降水雷达有限元分析

在 1.1 节及 1.2 节分析的基础上, 对某星载降水雷达进行有限元建模。蜂窝夹层板都采用壳单元模拟, 各向同性的蒙皮和正交各向异性的蜂窝都当成铺层处理。波导等高长细比结构采用梁单元模拟, 那么某星载降水雷达有限元模型如图 3 所示。

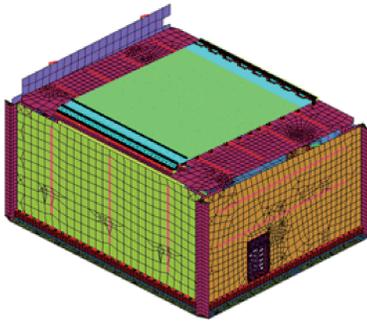


图 3 雷达有限元模型

Fig. 3 Finite element model of radar

为了保证星载降水雷达结构能够抵御发射过程的力学激励, 需要在设计阶段确保星载降水雷达的一阶固有频率大于 50 Hz。通过模态分析得出该星载降水雷达一阶固有频率为 66 Hz, 可知其结构刚度过大, 质量过重, 有一定的优化设计空间。其振型云图如图 4 所示。通过振型图可以知道某星载降水雷达的一阶模态主要是蜂窝板的起伏。可以看出蜂窝板相关参数对一阶固有频率的影响很大。

因此选取蜂窝芯子厚度  $t_s$ 、蜂窝板蒙皮厚度蜂窝板参数  $t_f$ 、蜂窝芯子边长  $c$  为优化设计参数, 设定一阶固有频率高于 55 Hz 为约束条件。

### 1.4 某星载降水雷达动力学优化设计问题

通过上述分析可知, 某星载降水雷达的固有频率是关于刚度和质量的函数, 而蜂窝板的设计参数对某星载降水雷达的刚度和质量有至关重要的影响。

经上文分析, 某星载降水雷达的一阶固有频

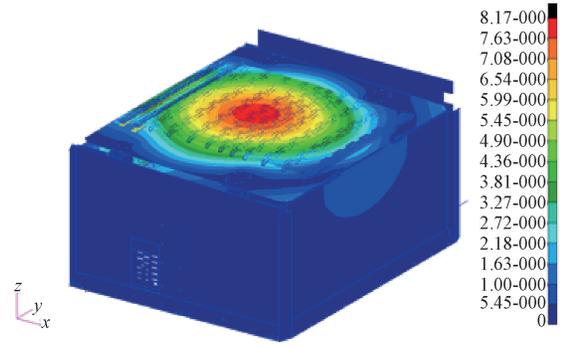


图 4 振型云图

Fig. 4 Vibration mode diagram

率应大于 50 Hz, 根据星载设计结构设计要求, 取安全系数  $\delta = 1.1$ , 那么约束条件就设定为一阶固有频率高于 55 Hz。这样某星载降水雷达结构动力学优化设计模型如下:

$$\begin{aligned} \text{obj} \quad & \min \quad m(t_s, c, t_f) \\ \text{sub} \quad & f(t_s, c, t_f) \geq \alpha \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $t_s$  为蜂窝芯子厚度,  $t_f$  为蜂窝板蒙皮厚度,  $c$  为蜂窝芯子边长,  $f(t_s, c, t_f)$  为一阶固有频率,  $m(t_s, c, t_f)$  为雷达质量,  $\alpha = 55$  Hz 为一阶固有频率。

## 2 基于 Kriging 法的代理模型

由于某星载降水雷达结构复杂, 有限元模型计算规模较大, 单次计算时间较长, 直接进行优化迭代计算, 会导致计算时间过长, 而使用代理模型替代有限元计算就会大大降低优化迭代的时间。

Kriging 代理模型已在工程领域有广泛的应用。在建立代理模型方面, 可以通过已知数据预测估计未知点的结果<sup>[11]</sup>。针对某星载降水雷达的动力学优化问题, 选取一阶固有频率为响应值, 即  $f(t_s, c, t_f)$ , 设计变量  $\mathbf{x} = (t_s, c, t_f)$ 。这样 Kriging 模型的响应值和自变量之间的关系表达如式(12)所示:

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x})\lambda + z(\mathbf{x}) \quad (12)$$

$g(\mathbf{x})$  为全局回归模型,  $\lambda$  为回归系数,  $z(\mathbf{x})$  为误差随机过程。

由于某星载降水雷达的动力学优化问题的设计变量  $\mathbf{x} = (t_s, c, t_f)$ , 因此样本点维度  $m = 3$ 。通过有限元可以计算出  $n$  个样本点, 即  $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]$ , 对应的响应值为  $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]$ , 那么对待预测点  $\mathbf{x}'$  的响应估计值, 通过如式(13)

所示:

$$f(\mathbf{x}') = g(\mathbf{x}')\lambda' + \mathbf{r}^T(\mathbf{x}')\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{I}\lambda') \quad (13)$$

$\lambda'$ 为 $\lambda$ 的估计值,  $f$ 为样本数据,  $\mathbf{I}$ 为单位向量。

$\mathbf{R}$ 为随机误差的相关矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \cdots & R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_n, \mathbf{x}_1) & \cdots & R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_n, \mathbf{x}_n) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$\mathbf{r}(\mathbf{x}')$ 为样本点和预测点的相关向量, 如下式所示:

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}') = [R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}'), R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}'), \dots, R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_n, \mathbf{x}')] \quad (15)$$

式中,  $R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 为相关函数<sup>[12]</sup>, 当采用高斯模型时,  $R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 定义如式(16)所示:

$$R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^m \theta_k (x_{ik} - x_{jk})^2\right) \quad (16)$$

针对某星载降水雷达的动力学优化问题,  $R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 变换如式(17)所示:

$$R(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\theta_1 (t_{s_i} - t_{s_j})^2 - \theta_2 (c_i - c_j)^2 - \theta_3 (t_{f_i} - t_{f_j})^2\right) \quad (17)$$

$\boldsymbol{\theta}$ 为相关参数, 可以通过求解如下的无约束优化问题得到。

$$\max -\frac{n \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|}{2} \quad (18)$$

其中,  $\hat{\sigma}^2 = (\mathbf{f} - \mathbf{I}\lambda')^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{f} - \mathbf{I}\lambda')/n$ 。

### 3 改进遗传算法

为了解决式(11)描述的数学问题, 需要借助优化算法来进行求解。遗传算法是参照自然界物种进化原理, 通过模拟物种遗传、变异、组合的过程, 最终筛选出最优个体<sup>[13]</sup>。遗传算法是一种全局搜索算法, 能够有效探索全局优化解。但遗传算法在局部探索能力较弱, 有可能过早收敛导致不能找出真正的最优解。

序列二次规划算法是将目标函数以二阶泰勒级数展开, 并把约束条件线性化, 原非线性问题就转化为一个二次规划问题<sup>[14]</sup>, 通过解二次规划得到下一个设计点。该算法稳定性较强, 可以快速找出最优解, 但容易落入局部最优解的困局。因此需要一种改进优化算法来解决上述问题。

改进遗传算法是将序列二次规划算法和遗传算法结合起来, 通过遗传算法计算初始种群, 然

后用序列二次规划算法进行寻优计算, 这样既利用遗传算法的全局探索能力, 又利用了序列二次规划算法的局部搜索能力。

根据公式描述的某星载降水雷达的优化设计模型, 建立拉格朗日函数, 如式(19)所示:

$$L(\mathbf{x}, \lambda) = m(\mathbf{x}) + \beta(f(\mathbf{x}) - \alpha) \quad (19)$$

针对序列二次规划法, 上述优化设计模型可以变成二次规划的子问题<sup>[15]</sup>, 如式(20)所示:

$$\begin{aligned} \min & \quad \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{H}_k \mathbf{d} + \nabla m(\mathbf{x})^T \mathbf{d} \\ \text{sub} & \quad \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{d} + f(\mathbf{x}) - \alpha \geq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$\mathbf{d}$ 为全变量搜索方向,  $\mathbf{H}_k$ 为拉格朗日函数的Hessian矩阵近似。

针对遗传算法, 定义适应度函数, 如式(21)所示:

$$h(m(\mathbf{x})) = \exp(-m(\mathbf{x})) \quad (21)$$

选择概率是指个体能被选择进入下一代的概率, 定义如式(22)所示:

$$P_j = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^m h_j} \quad (22)$$

式中 $h_j$ 为第 $j$ 个体的适应度。

这种改进的遗传算法具体步骤如下:

- ①初始化种群计算, 计算每个个体的适应度值;
- ②按选择概率选择将进入下一代的个体;
- ③按概率 $P_c$ 对种群中的个体行交叉操作;
- ④按概率 $P_m$ , 对种群中的个体进行变异操作;
- ⑤进入序列二次规划法进行寻优计算模块
  - a. 确定步长 $\alpha_k$ , 并更新 $\mathbf{H}_k$ ;
  - b. 确定搜索方向 $\mathbf{d}_k = -\mathbf{H}_k^{-1} \nabla m(\mathbf{x})$ ;
  - c. 若满足约束条件 $\|\mathbf{d}_k\| < tol$ ,  $tol$ 为收敛精度, 进入步骤6, 否则更新 $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k$ 返回步骤a;
  - ⑥满足适应度函数 $h_k - h_{k+1} < 10^{-5}$ 或达到终止进化代数, 进入步骤7, 否则返回步骤2;
  - ⑦输出种群中适应度最优的个体作为最优解。

## 4 某星载降水雷达动力学优化

### 4.1 建立Kriging代理模型

根据上文所述, 某星载降水雷达动力学设计参数为蜂窝芯子厚度 $t_s$ 、蜂窝板蒙皮厚度 $t_f$ 、蜂窝芯子边长 $c$ 。由于工艺加工限制, 以上设计参数的

取值范围如表 1 所示。

表 1 设计参数  
Table 1 Design parameter

设计参数	蜂窝芯子厚度 $t_s/\text{mm}$	蜂窝板蒙皮厚度 $t_f/\text{mm}$	蜂窝芯子边长 $c/\text{mm}$
初始值	0.03	0.5	6
取值范围	[0.01,0.06]	[0.1,1]	[1,10]

通过拉丁超立方抽样, 在上述参数取值范围内选取 23 个样本点, 再利用有限元模型分别计算每个样本点对应一阶固有频率值, 这样就得到了初始的样本空间。在此基础上, 利用第 2 节描述的高斯函数所构建的相关向量和回归模型, 构建 Kriging 代理模型。建立 Kriging 代理模型如图 5 所示。

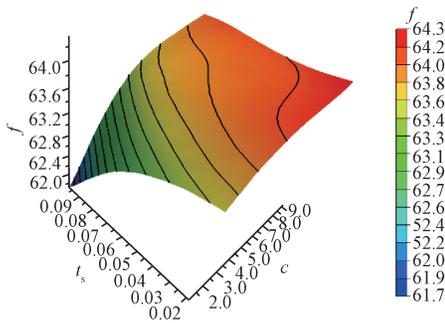


图 5 Kriging 代理模型  
Fig. 5 Kriging surrogate model

为保证 Kriging 模型能够代替有限元计算, 需要对 Kriging 模型进行误差分析, 拟合优度可以作为拟合精度检验的标准, 拟合优度定义如式(23)所示

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \hat{f}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (f_i - \mu)^2} \quad (23)$$

$f_i$  为有限元仿真的真实输出值,  $\hat{f}_i$  为 Kriging 模

型的预测值,  $\mu$  为测试样本点的均值,  $n$  为测试样本点数量。  $R^2$  越接近于 1 说明代理模型的预测精度越高。拟合优度计算检验结果如图 6 所示。

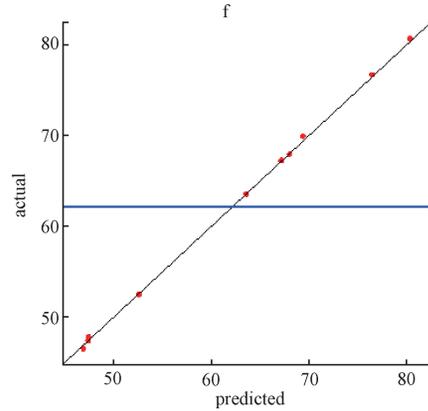


图 6 拟合优度检验结果  
Fig. 6 Goodness of fit test

可以得到一阶固有频率的拟合精度较高, 达到了  $R^2=0.95$ , 说明 Kriging 模型预测精度较高, 可以代替有限元分析。

#### 4.2 基于改进遗传算法优化计算结果

选取交叉概率  $P_c=0.65$ , 变异概率  $P_m=0.005$ , 步长参数  $\alpha_k=0.001$ , 收敛精度  $tol=10^{-6}$ 。某星载降水雷达质量在优化计算的迭代过程如图 7 所示。

改进遗传算法与传统的遗传算法计算结果对比如表 2 所示。

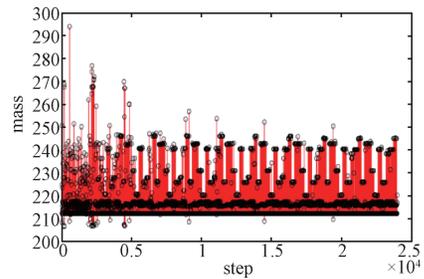


图 7 质量迭代过程  
Fig. 7 Iterative calculation of mass

表 2 计算结果对比  
Table 2 Comparison of calculation results

算法名称	迭代次数	蜂窝芯子厚度 $t_s/\text{mm}$	蜂窝板蒙皮厚度 $t_f/\text{mm}$	蜂窝芯子边长 $c/\text{mm}$	质量 $m/\text{kg}$	一阶固有频率 $f/\text{Hz}$
改进遗传算法	23 976	0.012	0.29	9.93	213.5	55.6
传统遗传算法	28 956	0.023	0.26	7.83	219.6	58.7

通过与传统的遗传算法对比发现, 改进遗传算法由于加入了序列二次规划算法, 相较于传统

遗传算法, 在局部寻优求解更具有优势, 经历更少的迭代次数就能够获取更优的设计方案, 由此

可见，改进的遗传算法在计算速度和精度均优于传统遗传算法。

将表2中的改进遗传算法的计算结果代入有限元模型中，进行模态分析，验证一阶固有频率是否满足要求。有限元分析结果如图8所示。

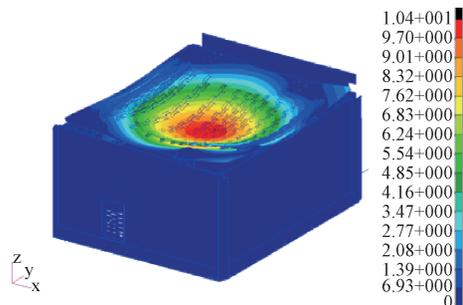


图8 振型云图

Fig. 8 Vibration mode diagram

计算结果为55.3 Hz，说明该设计参数能够满足某星载降水雷达结构动力学设计要求，且重量为213.5 kg，与原设计相比下降了20 kg。

### 4.3 力学试验验证

为了验证降水雷达的固有频率特性，在25吨振动台上进行了振动试验，如图9~图10所示。

通过对图8振型云图的分析可知，在Z向振动时可以激发出一阶模态振型，因此观察Z向振动试验曲线如图11所示。

通过试验数据分析，可知降水雷达一阶固有频率为57 Hz。同基于改进遗传算法优化计算结果55.6 Hz相比，误差为2.5%。证明该方法具有较高

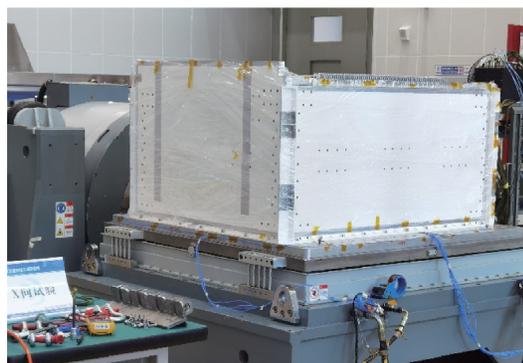


图9 XY轴振动试验现场

Fig. 9 X and Y direction vibration testing site



图10 Z轴振动试验现场

Fig. 10 Z direction vibration testing site

的工程实用性。

## 5 结束语

针对某星载降水雷达结构动力学优化设计要求，在有限元分析的基础上，采用Kriging代理模型对有限元计算结构进行近似化处理，考虑传统

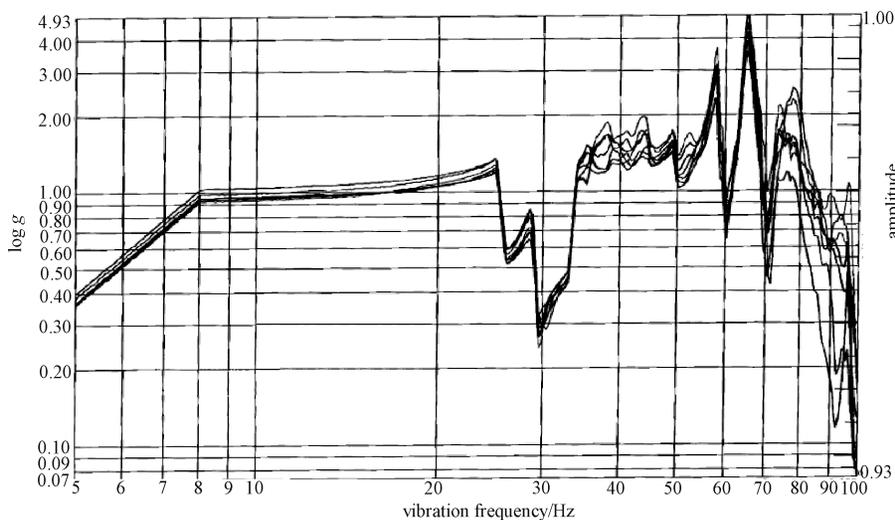


图11 试验结果

Fig. 11 Test result

遗传算法的局部探索能力较差, 采用结合序列二次规划法的改进遗传算法对相关结构设计参数进行优化设计, 得到最优的设计结果。采用某星载降水雷达为工程案例, 采用有限元分析发现降水雷达的一阶固有频率为 66 Hz, 大于一阶固有频率要求 50 Hz, 具有较大的设计优化空间。因此, 选取蜂窝板结构参数为优化设计参数, 降水雷达质量为优化设计目标, 一阶固有频率大于 55 Hz 为约束条件, 采用改进的遗传算法进行迭代计算, 得到最优设计方案, 优化后的设计方案和初始设计方案相比, 可靠度提高到相当于重量减少了 20 kg 的水平, 一阶固有频率 55.6 Hz, 满足一阶固有频率要求。通过振动试验验证了该方法具有较高的计算精度, 具有一定的工程实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] 付立英, 王维扬. 卫星用蜂窝夹层板的等效计算及实验研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(27): 6429-6432.  
FU Liying, WANG Weiyang. Equivalent calculation and experiment research on the honeycomb sandwich plates used in satellite[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(27): 6429-6432.
- [2] 富明慧, 刘祚秋. 蜂窝夹层板的一种等效单层模型[J]. 工程力学, 2001(A01): 700-704.
- [3] 张卫红, 段文东, 许英杰, 等. 六边形蜂窝等效面外剪切模量预测及其尺寸效应[J]. 力学学报, 2013, 45(2): 289-292.  
ZHANG Weihong, DUAN Wendong, XU Yingjie, et al. Predictions of effective out-plane shear modulus and size effect of hexagonal honeycomb[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(2): 289-292.
- [4] 夏利娟, 金咸定, 汪庠宝. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 999-1001.  
XIA Lijuan, JIN Xianding, WANG Xiangbao. Equivalent analysis of honeycomb sandwich plates for satellite structure[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(7): 999-1001.
- [5] 徐胜今, 孔宪仁, 王本利. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法[J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 92-94.  
XU Shengjin, KONG Xianren, WANG Benli. Method of equivalent analysis for statics and dynamics behavior of orthotropic honeycomb and sandwich plates[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2000, 17(3): 92-94.
- [6] 杨雨恒, 张周锁, 史文博, 等. 铝蜂窝夹层板动力学建模仿真与试验验证[J]. 机械设计, 2021, 38(8): 10-12.  
YANG Yuheng, ZHANG Zhousuo, SHI Wenbo, et al. Dynamic modeling simulation and experimental verification of the aluminum honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(8): 10-12.
- [7] 贡毅超, 刘兴艳, 刘鹏, 等. 某型雷达反射板轻量化仿真设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8442-8448.  
GONG Yichao, LIU Xingyan, LIU Peng, et al. Lightweight design and simulation of a radar reflector[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8442-8448.
- [8] 李齐兵, 胡建, 鲁亚辉. 机载电子单元机箱结构动力学特性分析与拓扑优化设计[J]. 现代雷达, 2021, 43(5): 90-93.  
LI Qibing, HU Jian, LU Yahui. Dynamic analysis and topological optimization design of airborne radar electronic chassis structure[J]. Modern Radar, 2021, 43(5): 90-93.
- [9] 马志毅, 张雪峰, 尹晓琳. 遗传算法和RBF神经网络在蜂窝结构等效力学参数计算中的应用[J]. 遥测遥控, 2016, 37(3): 63-72.  
MA Zhiyi, ZHANG Xuefeng, YIN Xiaolin. Application of genetic algorithm and RBF neural network in equivalent mechanics parameter calculation of honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(3): 63-72.
- [10] 马志毅, 张彬, 楚雪梅. 船载雷达随机振动疲劳寿命分析[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 111-119.  
MA Zhiyi, ZHANG bin, CHU Xuemei. Fatigue life prediction of shipborne radar based on random vibration analysis[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 111-119.
- [11] 王文竹, 李杰, 刘刚, 等. 基于Kriging代理模型鼓式制动器稳定性的优化设计[J]. 振动与冲击, 2021, 40(11): 135-138.  
WANG Wenzhu, LI Jie, LIU Gang, et al. Optimization design of drum brake stability based on Kriging surrogate model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(11): 135-138.
- [12] 李小刚, 程锦, 刘振宇, 等. 基于双层更新Kriging模型的机械结构动态特性稳健优化设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 166-173.  
LI Xiaogang, CHENG Jin, LIU Zhenyu, et al. Robust optimization for dynamic characteristics of mechanical structures based on double renewal Kriging model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 166-173.

- [13] 吕帅帅, 王彬文, 杨宇, 等. 基于遗传算法的机翼柔性蒙皮全参数优化设计[J]. 应用力学学报, 2020, 37(2): 618-623.  
LV Shuaishuai, WANG Binwen, YANG Yu, et al. Normal optimization design of flexible skin of airfoil based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(2): 618-623.
- [14] 李佩杰, 黄淑晨, 李滨, 等. 基于梯度采样序列二次规划方法的PSS参数协调优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2734-2743.  
LI Peijie, HUANG Shuchen, LI Bin, et al. Simultaneous coordination and optimization for the parameters of PSS based on sequential quadratic programming with gradient sampling[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2734-2743.
- [15] 马志毅, 张彬, 楚雪梅. 基于遗传算法和序列二次规划法的结构稳健性优化设计方法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 21-28.  
MA Zhiyi, ZHANG bin, CHU Xuemei. The structure robustness optimization design method based on genetic algorithm and sequence secondary planning method[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 21-28.

#### [作者简介]

- 马志毅 1988年生, 硕士, 高级工程师。  
栗华美 1981年生, 硕士, 工程师。  
张雪峰 1974年生, 本科, 研究员。  
尹晓琳 1988年生, 硕士, 工程师。  
江柏森 1982年生, 硕士, 研究员。

(本文编辑: 傅 杰)

(英文编辑: 赵尹默)