

基于遗传算法的炮击振动环境谱编制方法

张 飞, 李凯翔, 白春玉, 刘继军, 李益萱

(中国飞机强度研究所 西安, 710065)

摘要 为了提高炮击振动环境谱编制精度,提出了基于遗传算法(genetic algorithm,简称GA)的炮击振动环境谱特征点确定方法。首先,介绍了现有标准的预估炮击振动谱的编制方法;其次,以炮舱结构模拟件为对象,开展了炮击振动试验并获取了实测谱,基于飞机飞行振动环境测量数据的归纳方法对实测谱进行了归纳处理;然后,以特征点构成的环境谱与实测数据归纳谱的能量最接近为目标建立目标函数,采用遗传算法对目标函数进行优化以确定炮击振动谱特征点坐标,在对数坐标下通过折线将特征点连接以实现炮击振动环境谱的编制;最后,将基于遗传算法得到的环境谱与基于标准得到的预估谱进行对比,分析验证了所提方法的有效性。结果表明,所采用的方法获得的炮击振动环境谱在均方根值(root mean square,简称RMS)和谱形特征上都更接近实测数据归纳谱。

关键词 数据归纳;遗传算法;环境谱编制;炮击振动;炮击振动试验标准

中图分类号 V214.3⁺3;TH113.1

引 言

机载航炮是现代战斗机的一种重要的近距离格斗性机载武器^[1-2],其在发射过程中由于振动引起的结构破坏是军机结构设计与相关机载设备研制的一个难题。炮击振动环境谱描述了机载航炮在发射过程中机身结构或设备的振动环境,对于军机研制来说,既为各成品附件研制单位提供环境技术要求,也为新工艺、新结构以及新设计的构件、部件提供研制性的振动试验技术条件。若编制的炮击振动环境谱过于严格,将大大提高飞机研制成本,增加研制难度和周期,造成人力、物力、经济及时间上的浪费;若编制的炮击振动环境谱强度不够,则在实际使用中会使飞机主机(结构)或辅机产生故障、失灵甚至破坏,严重的会导致机毁人亡,造成重大事故。因此,编制合理的炮击振动环境谱直接关系到军机结构、机载设备强度设计的合理性和可靠性^[3-4]。

现行的炮击振动环境谱编制标准规范^[3]给出的通用参数方程是基于美国第2、第3代军机的统计结果,但按照该标准制定的炮击振动环境谱与我国飞机炮击环境差距较大^[4-5],有时甚至存在数量级上的差别,造成实际使用过程中出现“过试验”或“欠试验”的情况,很难适用于我国现役飞机。

为了解决上述问题,笔者提出一种基于遗传算法的炮击振动环境谱编制方法。GA是模拟生物在

自然界的遗传机制和生物进化而形成的一种并行随机搜索最优化方法^[6-7],而炮击振动环境谱编制本质上是特征点坐标(频率值与功率谱密度幅值)的寻优问题。因此,采用遗传算法能够很好地适用于炮击振动环境谱编制。

1 预估炮击振动谱编制方法

炮击振动试验标准规范中给出了预估炮击振动环境谱的编制方法,具体为炮击振动预估谱由平稳随机振动宽带谱叠加4个正弦离散谱构成。通用炮击诱发振动谱如图1所示。其中,宽带谱的3个试验量级 $T_j(j=1,2,3)$ 和4个离散正弦振动量级 $P_i(i=1,2,3,4)$ 的计算公式分别为

$$10 \lg T_j = 10 \lg NF_1 E + H + M + W + J + B_j - 53 \text{ dB} \quad (1)$$

$$10 \lg P_i = 10 \lg T_3 + K_i + 17 \text{ dB} \quad (2)$$

其中:单位“dB”指相对 $1 \text{g}^2/\text{Hz}$ 的大小,可通过对功率谱密度值取10倍的以10为底的对数后得到; N 为炮的最大数目(相距很近的同时射击的炮); F_1 为炮击频率; H 为炮投影距离的影响大小; W 为被试装备质量的影响大小; J 为装备位置和飞机器蒙皮相对空间的影响大小; B 为从炮口到装备位置矢量距离的影响大小; E 为炮的爆炸能; M 为炮口垂直于炮管轴向的平面与飞机结构的相交性; K_i 为在每个振

动峰值 P_i 上的矢量距离的影响大小。

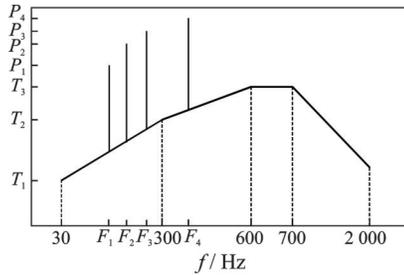


图1 通用炮击诱发振动谱

Fig.1 Universal gunfire-induced vibration spectrum

2 基于遗传算法的炮击振动环境谱编制方法

在实际中往往通过试验获取多次重复的测量数据,为了便于后期环境谱编制,通常需要将同一位置的多次测量数据先进行统一归纳,得到实测数据的归纳谱,再基于实测数据归纳谱和遗传算法进行炮击振动环境谱的编制^[8-10]。

2.1 数据归纳方法

对于炮击振动测试数据,采用文献[11]标准中给出的数据统计归纳方法。针对同一测点不同测试次数的归纳方法为:设某一测点在同一测量方向拥有 K 个测量数据,在相同频率或频段上其量值(幅值或谱密度值)分别为 A_1, A_2, \dots, A_k , 则

$$\bar{A} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k A_i \quad (3)$$

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (A_i - \bar{A})^2} \quad (4)$$

根据规定的置信系数 $1 - \alpha$, 估计该测量点振动量值母体均值的置信上限为

$$A_{1-\alpha}^n = \bar{A} + \bar{S} t_{k-1, \alpha/2} / \sqrt{k} \quad (5)$$

其中: $1 - \alpha$ 为规定的置信系数,这里取 $\alpha = 0.1$; $t_{k-1, \alpha/2}$ 为按自由度 $k - 1$ 及 $\alpha/2$ 值自 t 分布表上查出的值。

将不同频率或频段得出的相应 $A_{1-\alpha}^n$ 值作为该测量点的单一振动数据,但在测量数据较少的情况下一般直接取算术平均值 \bar{A} 作为该测量点的单一振动数据。

2.2 遗传算法模型的建立

由于振动环境谱通常为图1所示的简单折线谱,因此定义折线的拐点为炮击振动环境谱的特征

点。用特征点坐标(频率值与功率谱密度幅值)描述炮击振动环境谱,将炮击振动环境谱编制问题转化为特征点寻优问题,建立遗传算法模型,以实测数据归纳谱与炮击振动环境谱能量差为优化目标构建适应度函数,进行炮击振动环境谱的编制。遗传算法的基本步骤如下:

- 1) 先初始化一个大小为 N 的种群;
- 2) 种群内部个体按照设定的交叉和变异概率进行基因的交叉和变异,生成新的种群;
- 3) 按照构建的适应度函数计算种群中每个个体的适应度函数值;
- 4) 判断是否满足终止条件,若满足终止条件则对最优结果进行输出,并终止算法;
- 5) 对新的种群中每个个体的基因通过适应度函数进行选择,然后跳转至步骤2。

对于特征点的编码方式,考虑到推荐的规范谱折线段一般不超过4段,采用固定炮击振动环境谱为4段式,即使用5个特征点表示炮击振动环境谱,在遗传算法中种群的每个个体代表一个炮击振动环境谱。假设每个个体的基因个数为 $10 \times M$, 则基因序列中的奇数位代表5个特征点的频率,偶数位代表5个特征点的幅值。特征点频率和幅值的编码方式采用实测功率谱的频率或幅值范围与基因表达数量的均匀映射,分别为

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^M (2^{M-j} G_{2i} + 10j - 11)}{2^M - 1} (F_u - F_l) + F_l \quad (6)$$

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^M (2^{M-j} G_{2i} + 10j - 10)}{2^M - 1} (P_u - P_l) + P_l \quad (7)$$

其中: f_i 为第 i 个特征点的频率 ($i = 1, 2, \dots, 5$); p_i 为第 i 个特征点的幅值 ($i = 1, 2, \dots, 5$); M 为1个特征点的频率或幅值的基因数; G 为1个个体的基因序列,其下标表示在基因序列中的位数; F_u 为实测数据功率谱的上限频率值; F_l 为实测数据功率谱的下限频率值; P_u 为实测数据功率谱的最大幅值; P_l 为实测数据功率谱的最小幅值。

适应度函数可以有效评估种群中每个个体表示的炮击振动环境谱的好坏。为了使采用遗传算法得到的炮击振动环境谱尽可能接近实测数据功率谱,基于以下两个优化目标构建适应度函数:①炮击振动环境谱与实测数据功率谱的能量误差尽可能小;②为了避免炮击振动环境谱的谱形与实测数据功率谱差别过大,引入两者重合部分的能量尽可能大,即实测数据功率谱与二者重合部分的能量差尽可能小。

由于在遗传算法中,个体的存活遵循轮盘赌选择因此将目标函数求倒,得到一个最大化的优化目标作为最终的适应度函数,即

$$F_{ob} = \frac{1}{(E_{is} - E_{es})^2 + (E_{is} - E_{cs})^2} \quad (8)$$

其中: F_{ob} 为遗传算法的目标函数; E_{is} 为实测数据归纳谱的能量; E_{es} 为基于遗传算法得到的特征点所构成的炮击振动环境谱的能量; E_{cs} 为归纳谱与环境谱重合部分的能量。

式(8)中,能量定义为功率谱密度曲线沿 x 轴积分。对于离散数据,能量 E 计算公式为

$$E = \sum_{f_1}^{f_u} (P_f \Delta f) \quad (9)$$

其中: E 为炮击振动谱能量; f_1 为炮击振动谱频率下限; f_u 为炮击振动谱频率上限; P_f 为频率等于 f 时对应的功率谱密度值; Δf 为炮击振动谱频率间隔。

3 炮击振动环境谱编制与分析

3.1 炮击振动试验

试验装置与测点布置如图2所示。其中,试验件为某炮舱结构模拟件,见图2(a)。模拟舱段外侧布置航炮,模拟舱段由底部支座支撑,通过地脚螺栓安装在平整的地面上。舱段内部有设备安装架和设备模拟盒,在每个模拟盒与安装架连接处布置一个传感器测点,测量方向垂直于地面方向,见图2(b)。

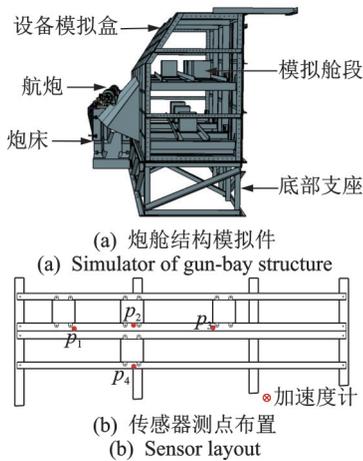


图2 试验装置与测点布置
Fig.2 Test device and test point layout

3.2 采用遗传算法的炮击振动环境谱编制

本研究以设备模拟盒 p_1 测点为例, p_1 测点5次测试数据功率谱密度(power spectrum density,简称PSD)曲线如图3所示。采用数据归纳方法,考虑到测试数据量较少,直接采用各频率对应幅值的算术

平均值作为归纳谱幅值,得到 p_1 的归纳谱。 p_1 测点目标函数收敛曲线如图4所示。

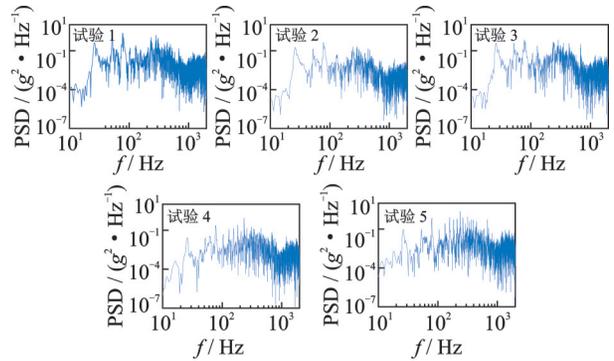


图3 p_1 测点5次测试数据功率谱密度曲线
Fig.3 Five times PSD curves of p_1 test point

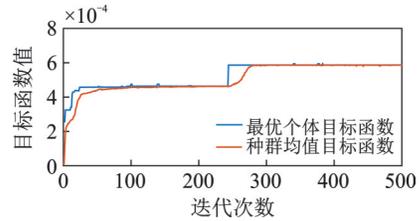


图4 p_1 测点目标函数收敛曲线
Fig.4 Convergence curve of object function for p_1 test point

采用环境谱的特征点编码方式及构建的适应度函数建立遗传算法模型,特征点频率取值范围为10~2 000 Hz,幅值取值范围为 p_1 测点归纳谱的最小值到最大值,这里为0.05~2.078 g^2/Hz 。遗传算法采用单点交叉和单点变异方法。遗传算法参数设置见表1。 p_1 测点归纳谱与基于GA的环境谱对比如图5所示。

表1 遗传算法参数设置
Tab.1 Parameter setting of GA

参数	数值
基因长度	200
种群数量	200
交叉概率	0.8
突变概率	0.005
迭代次数	500

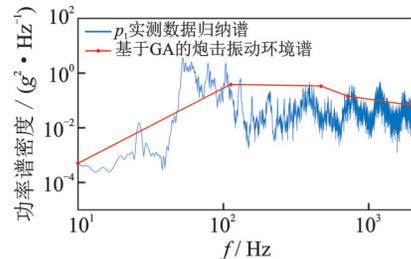


图5 p_1 测点归纳谱与基于GA的环境谱对比
Fig.5 Comparison of induction spectrum and environmental spectrum based on GA for p_1 test point

3.3 采用炮击振动试验标准的预估炮击振动谱编制

基于炮击振动试验标准^[3]的预估炮击振动谱编制方法,不考虑离散正弦振动试验量级,以 p_1 测点为例计算宽带谱的试验量级。式(1)中各参数值是通过测量从炮口到装备支撑点之间的平均距离 D 、炮管与飞机表面的垂直距离 h 、垂直于飞机蒙皮到舱内设备处的距离 R ,以及炮口径 c 等几何参数,查询标准中上述几何参数对试验量级衰减量影响的曲线得到。预估炮击振动谱参数值如表2所示。 p_1 测点归纳谱与基于标准的预估谱对比如图6所示。

表2 预估炮击振动谱参数值

Tal.2 Parameter values of estimated gunfire vibration spectrum

参数	数值	参数	数值
N	1	B_j/dB	$-21(j=1)$
F_1/Hz	26	E/J	307 500
H	0	M	0
W/kg	2		
J/dB	-8		

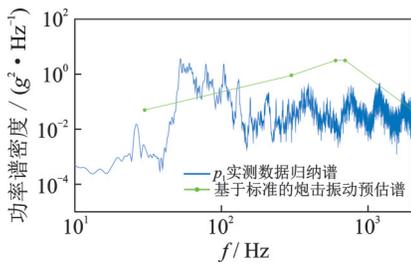


图6 p_1 测点归纳谱与基于标准的预估谱对比
Fig.6 Comparison of induction spectrum and estimated spectrum based on standard for p_1 test point

3.4 结果分析

按照上述2种方法对图2中4个测点数据进行炮击振动环境谱编制。 $p_1 \sim p_4$ 测点归纳谱与基于标准的预估谱及基于GA的环境谱对比分别如图7~10所示。相比于炮击振动试验标准得到的预估炮击振动谱,采用遗传算法得到的炮击振动环境谱能更好地反映实测数据归纳谱频率分布特性。同时,分别计算4个测点3种谱的均方根值,如表3所示。其中,基于遗传算法的炮击振动环境谱和基于炮击振动试验标准的炮击振动预估谱的RMS值,都是通过对数坐标下线性插值后计算得到。结果表明:遗传算法得到的炮击振动环境谱更接近实测数据归纳谱。因此,采用笔者所提方法得到的炮击振动环

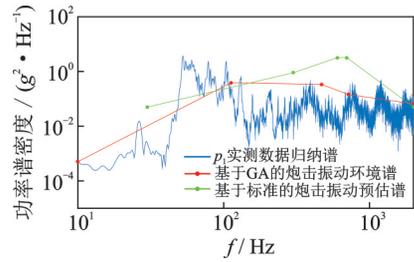


图7 p_1 测点归纳谱与基于标准的预估谱及基于GA的环境谱对比

Fig.7 Comparison of induction spectrum and estimated spectrum based on standard and environmental spectrum based on GA for p_1 test point

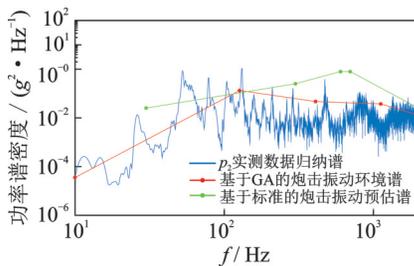


图8 p_2 测点归纳谱与基于标准的预估谱及基于GA的环境谱对比

Fig.8 Comparison of induction spectrum and estimated spectrum based on standard and environmental spectrum based on GA for p_2 test point

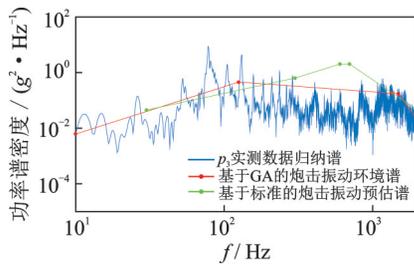


图9 p_3 测点归纳谱与基于标准的预估谱及基于GA的环境谱对比

Fig.9 Comparison of induction spectrum and estimated spectrum based on standard and environmental spectrum based on GA for p_3 test point

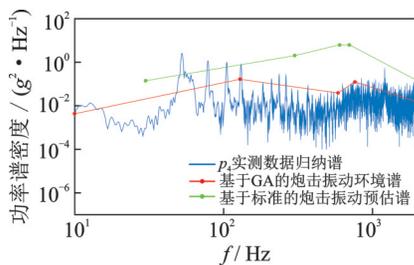


图10 p_4 测点归纳谱与基于标准的预估谱及基于GA的环境谱对比

Fig.10 Comparison of induction spectrum and estimated spectrum based on standard and environmental spectrum based on GA for p_4 test point

表3 4个测点3种谱的均方根值对比
Tab.3 RMS of three spectrums for four test points

测点	实测数据	基于GA的炮击	基于炮击振动试验
	归纳谱 RMS	振动环境谱 RMS	标准的炮击振动 预估谱RMS
p_1	12.11	17.69	41.69
p_2	5.99	8.59	22.15
p_3	13.64	19.64	33.76
p_4	7.15	10.50	60.82

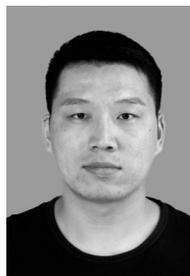
境谱,无论是从谱形还是从均方根值上都更加接近实测归纳谱。

4 结束语

现有炮击振动环境谱编制方法主要基于炮击振动试验标准^[3]中的通用参数方程,但该方程是基于国外机型的测试数据统计而得,编制的炮击振动环境谱量级过大,不符合我国飞机的炮击环境振动特性。本研究通过地面模拟试验获取炮击环境下的振动响应谱,基于遗传算法搜索寻优的特点建立算法模型,编制炮击振动环境谱,并采用相关标准进行了预估炮击振动环境谱计算。通过对两种编谱方法对比分析可知,采用遗传算法得到的炮击振动环境谱精度更高。

参 考 文 献

- [1] 王波. 航炮后坐力模拟测试实验方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [2] 薛松松. 某型航炮后坐力地面模拟测试方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [3] 中国人民解放军总装备部. GJB 150.20A—2009 军用装备实验室环境试验方法第20部分: 炮击振动试验[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
- [4] 王宝禄. 炮击振动试验谱的预计[J]. 航空学报, 1990(11): 650-652.
WANG Baolu. Prediction of test spectrum for gunfire vibration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990(11): 650-652.(in Chinese)
- [5] 王光芦, 徐明, 李大鹏. 飞机飞行振动预计技术[J]. 航空工程进展, 2010, 1(3): 251-255.
WANG Guanglu, XU Ming, LI Dapeng. Aircraft flight vibration prediction methodology[J]. Advances in Aero-
- nautical Science and Engineering, 2010, 1(3): 251-255. (in Chinese)
- [6] 王文杰, 叶世伟. 人工智能原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004: 50-53.
- [7] 毛云霄, 王英杰, 肖军华, 等. 基于过桥车辆响应的遗传算法桥梁损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4): 696-703.
MAO Yunxiao, WANG Yingjie, XIAO Junhua, et al. Bridge damage detection using a moving vehicle response on the bridge with genetic algorithm[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 696-703.(in Chinese)
- [8] 袁宏杰, 罗敏, 姜同敏. 随机振动环境测量数据归纳方法研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 115-117.
YUAN Hongjie, LUO Min, JIANG Tongmin. Study on inductive method for environmental measured data of random vibration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 115-117.(in Chinese)
- [9] 王茜, 雷晓波. 发动机着陆冲击数据归纳方法及冲击特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 601-605.
WANG Qian, LEI Xiaobo. Inductive method of landing shock data of aero-engine and shock characteristics analysis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 601-605.(in Chinese)
- [10] 丰志强, 阎楚良, 张书明. 飞机机载设备振动环境谱的数据处理与编制[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 289-293.
FENG Zhiqiang, YAN Chuliang, ZHANG Shuming. Data processing and compilation of vibration environmental spectrum for aircraft airborne equipment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 289-293.(in Chinese)
- [11] 中华人民共和国航空工业部. HB/Z 87—84 飞机飞行振动环境测量数据的归纳方法[S]. 北京: 航空工业部, 1985.



第一作者简介: 张飞, 男, 1988年10月生, 硕士、工程师。主要研究方向为振动主动控制及振动舒适性。曾发表《某型飞机客舱座椅人体振动舒适性评价研究》(《强度与环境》2019年第46卷第4期)等论文。

E-mail: zhangfeiwy@163.com