

冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法

陈江攀, 刘艳, 王增凯, 刘艺, 孙立敏

(北京电子工程总体研究所, 北京 100854)

摘要: **目的** 通过自动寻优制定冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件, 避免冲击“过试验”。**方法** 根据冲击响应谱的基本原理和谱型特征, 提出利用对数距离量化评价 2 条谱型的吻合度。对冲击环境和后峰锯齿脉冲分别进行冲击响应谱分析, 将 2 条冲击响应谱之间的对数距离最小作为优化目标, 将后峰锯齿脉冲的波形参数作为优化参数, 基于自适应差分进化算法, 提出冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法。**结果** 将所提方法分别应用于模拟冲击环境和实测冲击环境, 均获得了合理的后峰锯齿脉冲试验条件, 验证了所提方法的正确性。**结论** 提出的基于自适应差分进化算法的冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法正确可行。

关键词: 冲击环境; 后峰锯齿脉冲; 冲击响应谱; 自适应差分进化算法; 自动寻优

中图分类号: TJ760; V416.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)12-0135-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.017

Automatic Optimization Method for Terminal Peak Sawtooth Shock Pulse Test Conditions of Shock Environment

CHEN Jiang-pan, LIU Yan, WANG Zeng-kai, LIU Yi, SUN Li-min

(Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an automatic optimization method for terminal peak sawtooth shock pulse test conditions of shock environment to avoid "over-test". Firstly, the logarithmic distance was proposed to quantitatively evaluate the goodness of fit between two shock response spectra according to both the basic principle and spectrum characteristics of shock response spectra. Secondly, shock response spectrum analysis was carried out on both the shock environment and the terminal peak sawtooth shock pulse. According to the analysis results obtained, via setting the logarithmic distance between the two spectra as the optimization goal and the wave parameters of terminal peak sawtooth shock pulse as the optimization parameters, the automatic optimization method for terminal peak sawtooth shock pulse test conditions of shock environment was established based on adaptive differential evolution algorithm. The proposed method was applied in a simulated shock environment and a measured shock environment respectively. The reasonable terminal peak sawtooth shock pulse test conditions obtained verified the correctness of the method proposed. As a consequence, the proposed automatic optimization method for terminal peak sawtooth pulse test conditions in shock environments based on adaptive differential evolution algorithm is correct and feasible.

KEY WORDS: shock environment; terminal peak sawtooth shock pulse; shock response spectrum; adaptive differ-

收稿日期: 2023-08-02; 修订日期: 2023-09-17

Received: 2023-08-02; Revised: 2023-09-17

基金项目: 中国航天科工集团第二研究院质量与技术基础自筹资金项目 (E23A013)

Fund: Quality and Technology Foundation Self-financing Project of the Second Academy of CASIC (E23A013)

引文格式: 陈江攀, 刘艳, 王增凯, 等. 冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 135-141.

CHEN Jiang-pan, LIU Yan, WANG Zeng-kai, et al. Automatic Optimization Method for Terminal Peak Sawtooth Shock Pulse Test Conditions of Shock Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 135-141.

ential evolution algorithm; automatic optimization

导弹装备在研制、生产、运输、发射、飞行等过程中,将会经受多种复杂冲击环境作用,包括运输跌落、弹射冲击、点火冲击、分离冲击、着陆冲击等。复杂恶劣的冲击环境是导弹装备在其寿命期内所必须经受的最严酷的力学环境,极易造成弹上冲击敏感元件发生失效(例如脆性元件出现裂纹或断裂、微电子芯片结构完整性遭到破坏、继电器抖动等),甚至导致飞行失败^[1-3]。NASA 曾经统计分析过 1963~1985 年间的所有飞行故障,其中超过 63 次与冲击环境有关,且大多数是灾难性故障^[3-4]。因此,为了确保飞行任务成功,必须对导弹装备的冲击环境适应性进行充分的地面验证。

经典冲击脉冲由于具有重复性好和易于控制等优点,在装备的冲击环境适应性验证领域应用广泛^[5-11]。工程中比较常用的经典冲击脉冲波形包括后峰锯齿脉冲和半正弦脉冲,二者的理想波形详见 GJB 150.18^[12]。其中,由于后峰锯齿脉冲比半正弦脉冲具有更均匀的频谱,更易激起各频率的冲击响应,故随着试验能力的不断发展,后峰锯齿脉冲已逐步替代半正弦脉冲成为推荐使用的脉冲波形,2009 年发布的 GJB 150.18A 中已经取消了半正弦脉冲^[13-14]。因此,针对冲击环境,合理制定后峰锯齿脉冲试验条件,充分暴露设计薄弱环节,对于保证导弹装备的冲击环境适应性至关重要。

目前,工程中针对冲击环境制定后峰锯齿脉冲试验条件的常用工作模式:首先对冲击环境进行冲击响应谱(Shock Response Spectrum, SRS)分析,然后通过人为调整后峰锯齿脉冲的波形参数,使后峰锯齿脉冲的 SRS 在全频段完全覆盖冲击环境的 SRS。这种工作模式存在以下问题:一方面,缺乏合理的量化评价指标,仅能保证试验条件的覆盖性,无法量化评价试验条件的合理性,存在较大的“过试验”风险;另一方面,受主观因素的影响较大,人为调整波形参数较难实现多次迭代寻优,且由于不同设计师的工作经验和习惯不同,对于同一冲击环境,可能制定出差异较大的试验条件。自适应差分进化算法是一种模拟生物进化过程的随机启发式搜索算法,该算法通过利用个体局部信息和群体全局信息进行协同搜索,以实现全局自动寻优,且由于其具有较强的鲁棒性、实用性和强大的全局寻优能力,在 BP 神经网络时间序列预测、LED 光谱匹配和冲击响应谱分析等诸多工程领域均得到了广泛应用^[15-19]。其中,在冲击响应谱分析方面,文献[18]利用自适应差分进化算法,通过将冲击响应谱条件与实测冲击环境的 SRS 进行匹配,获得了最优的导弹冲击试验条件,为导弹装备确定冲击试验条件提供了理论依据。文献[19]将自适应差分

进化算法应用于爆炸冲击环境的时域波形重构优化问题,获得了比传统方法更好的计算结果。因此,考虑到自适应差分进化算法在冲击响应谱分析方面的成功应用,利用该方法自动寻优制定冲击环境的后峰锯齿脉冲试验条件具有切实的可行性。

文中基于 SRS 的基本原理和谱型特征,提出利用对数距离量化评价 2 条 SRS 的吻合度,并将后峰锯齿脉冲的波形参数作为优化参数。通过将后峰锯齿脉冲试验能力作为约束条件,提出了基于自适应差分进化算法的冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法。最后对该方法进行了应用验证,为导弹装备合理制定冲击环境试验条件提供了一种新思路。

1 基本概念

1.1 冲击响应谱

SRS 是一种基于损伤等效原则的冲击环境模拟方法,由 Blot 在 1932 年研究地震对建筑物的危害时首次提出,其基本原理如图 1 所示^[20-21]。首先,建立一个虚拟振动系统,该系统由一系列在分析频带内具有不同固有频率和相同阻尼比的独立单自由度系统组成;然后,利用解析方法或数值方法计算各单自由度系统在给定冲击环境基础激励作用下的加速度响应;最后,将各单自由度系统的固有频率和最大加速度响应分别作为一个坐标点的 X 值和 Y 值,在双对数坐标下依次连接这些坐标点即可获得给定冲击环境的 SRS。

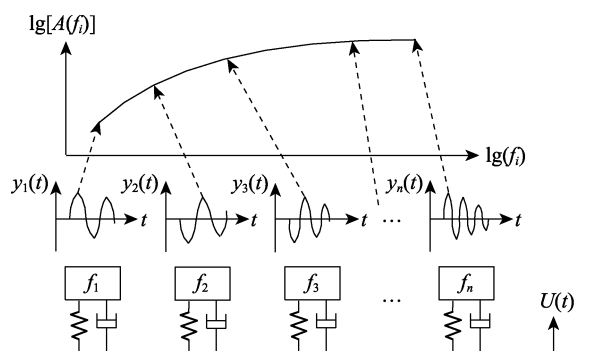


图 1 SRS 基本原理
Fig.1 Basic principle of SRS

图 1 中, $U(t)$ 代表给定冲击环境; $f_i (i=1, 2, \dots, n)$ 代表第 i 个单自由度系统的固有频率; $y_i(t)$ 和 $A(f_i)$ 分别代表第 i 个单自由度系统在给定冲击环境基础激励作用下的加速度响应及其最大值。SRS 的数值方法详见参考文献[22-23]。对于 SRS 的解析方法, $y_i(t)$ 和 $A(f_i)$ 的计算公式分别如式(1)和式(2)所示。

$$y_i(t) = \int_0^t U(t-\tau) h_i(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$A(f_i) = \max |y_i(t)| \quad (2)$$

式中: $h_i(\tau)$ 为第 i 个单自由度系统的单位脉冲载荷加速度响应, 其表达式见式 (3)。

$$h_i(\tau) = \omega_{di} e^{-\xi \omega_{di} \tau} \left[\frac{1-2\xi^2}{1-\xi^2} \sin(\omega_{di} \tau) + \frac{2\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cos(\omega_{di} \tau) \right] \quad (3)$$

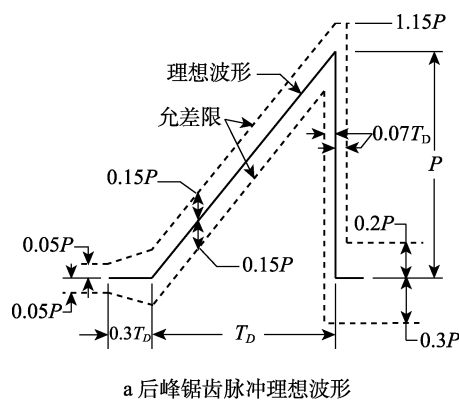
式中: ξ 为阻尼比; ω_{di} 为第 i 个单自由度系统的

固有角频率, $\omega_{di} = 2\pi f_i$; ω_{di} 的表达式见式 (4)。

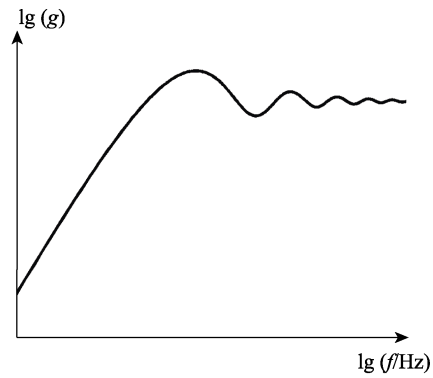
$$\omega_{di} = \omega_{0i} \sqrt{1-\xi^2} \quad (4)$$

1.2 后峰锯齿脉冲

GJB 150.18 和 GJB 150.18A 给出了后峰锯齿脉冲的理想波形, 如图 2a 所示。可以看出, 后峰锯齿脉冲仅有 2 个波形参数, 即峰值加速度 P 和脉冲持续时间 T_D , 故当 P 和 T_D 确定后, 即可获得唯一的后峰锯齿脉冲。典型后峰锯齿脉冲的 SRS 分析结果如图 2b 所示。



a 后峰锯齿脉冲理想波形



b 典型后峰锯齿脉冲的 SRS

图 2 后峰锯齿脉冲理想波形及其冲击响应谱

Fig.2 Ideal wave form of terminal peak sawtooth shock pulse and its SRS: a) ideal waveform of terminal peak sawtooth shock pulse; b) SRS of typical terminal peak sawtooth shock pulse

1.3 谱型吻合度量化评价指标

上述提到, 对于 SRS 的谱型吻合度, 目前工程中大多采用 2 条 SRS 之间的线性距离进行量化评价^[18-19,24-25], 如式 (5) 所示。

$$D_x = \sum_{i=1}^n |A_1(f_i) - A_2(f_i)| \quad \text{或} \quad D_x = \sum_{i=1}^n [A_1(f_i) - A_2(f_i)]^2 \quad (5)$$

式中: $A_1(f_i)$ 和 $A_2(f_i)$ 分别代表 2 条给定的 SRS; D_x 代表二者之间的线性距离。然而, 由于线性距离不具备多尺度归一化的评价能力, 可能导致评价结果不合理。从图 2b 可见, 典型的 SRS 在高频区与低频区的加速度量值通常存在数量级上的差异, 对于相同数值的线性距离 D_x , 各频段的占比不同意味着 2 条 SRS 的吻合度可能大相径庭。因此, 线性距离并非量化评价 2 条 SRS 吻合度的最优指标。为此, 文中提出利用对数距离量化评价 2 条 SRS 之间的吻合度, 见式 (6)。

$$D_d = \sum_{i=1}^n \lg \left[\frac{A_1(f_i)}{A_2(f_i)} \right] \quad (6)$$

式中: D_d 为 $A_1(f_i)$ 和 $A_2(f_i)$ 之间的对数距离。由于 D_d 对 2 条 SRS 中不同数量级的加速度量值的差异进

行了归一化处理, 故相较于线性距离, 对数距离更适用于量化评价 SRS 的吻合度。此外, 为了确保装备的冲击环境适应性验证充分, 工程中在制定冲击环境试验条件时, 通常采用最大包络方法, 即在不考虑余量的情况下, 要求后峰锯齿脉冲试验条件的 SRS 在全频段完全覆盖冲击环境的 SRS。此时, 式 (6) 可进一步改写为:

$$D_d = \sum_{i=1}^n \lg \left[\frac{A_{hf}(f_i)}{A_{cj}(f_i)} \right] \quad (7)$$

式中: $A_{hf}(f_i)$ 和 $A_{cj}(f_i)$ 分别为后峰锯齿脉冲试验条件和冲击环境的 SRS。由于要求 $A_{hf}(f_i)$ 在全频段完全覆盖 $A_{cj}(f_i)$, 故对于任意 f_i , 都有 $A_{hf}(f_i) \geq A_{cj}(f_i)$, 进一步可得 $D_d \geq 0$ 。

2 自动寻优方法

基于自适应差分进化算法, 将后峰锯齿脉冲与冲击环境的 SRS 之间的对数距离最小作为优化目标, 将后峰锯齿脉冲的 2 个波形参数作为优化参数。通过在规定约束条件下对 2 个参数进行全局自动寻优, 提出了基于自适应差分进化算法的冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法, 并梳理形成了该方法的实施流程。对于文中寻优问题, 自适应差分进化算法

可分为6个步骤,包括参数设置、初始化种群、变异操作、交叉操作、选择操作和输出寻优结果。

2.1 参数设置

在此步骤中,需对如下参数进行设置,包括优化目标、约束条件、基因维度 N 和各基因所对应的搜索区间、个体种群大小 N_p 、迭代次数 N_i 、变异系数 F 和交叉因子 C_R 。其中,优化目标和约束条件分别如式(8)和式(9)所示。

$$\min(D_d) = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \lg \left[\frac{A_{hf}(f_i)}{A_{cj}(f_i)} \right] \right\} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_{hf}(f_i) \geq A_{cj}(f_i), \text{ 对于所有 } f_i \text{ 均成立} \\ P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \\ T_{\min} \leq T_D \leq T_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 分别代表后峰锯齿脉冲试验能力所能达到的峰值加速度 P 和脉冲持续时间 T_D 的最小值和最大值。此外,待优化参数为后峰锯齿脉冲的2个波形参数,故基因维度为 $N=2$,记基因1和基因2分别为峰值加速度 P 和脉冲持续时间 T_D ,则2个基因的搜索区间见式(9)。动态自适应的变异系数 F 和交叉因子 C_R 的表达式分别如下^[16]:

$$F^G = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \cdot e^{\left(1 - \frac{N_i - 1}{N_i - 1 - G}\right)} \quad (10)$$

$$C_R^G = C_{R,\max} - \frac{G \cdot (C_{R,\max} - C_{R,\min})}{N_i - 1} \quad (11)$$

式中: $G=0,1,2,\dots$; N_i 为当前进化代数; F^G 和 C_R^G 分别代表第 G 代种群的变异系数和交叉因子; $F_{\min}$ 、 $F_{\max}$ 和 $C_{R,\min}$ 、 $C_{R,\max}$ 分别代表变异系数 F 和交叉因子 C_R 的最小值和最大值。由于 F^G 和 C_R^G 随着进化代数的增加而减小,故动态自适应的变异系数和交叉因子既可保证算法进化早期的全局搜索能力,又能提高算法进化后期的局部搜索能力和收敛速度。

2.2 初始化种群

初始种群可利用式(12)随机生成 N_p 组二维个体 $X_{u,v}^0$ 来获得,其中: $u=1,2,\dots,N_p$; $v=1,2$ 。

$$\begin{cases} X_{u,1}^0 = P_{\min} + \text{rand}(0,1) \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \\ X_{u,2}^0 = T_{\min} + \text{rand}(0,1) \cdot (T_{\max} - T_{\min}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\text{rand}(0,1)$ 代表服从 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数。

2.3 变异操作

对于第 G 代种群中的目标个体 X_u^G , 通过从当代种群中随机选择3组其他不同个体 X_a^G 、 X_b^G 和 X_c^G ($u \neq a \neq b \neq c$), 则可利用式(13)生成对应的变异个体 V_u^{G+1} 。

$$V_u^{G+1} = X_a^G + F^G \cdot (X_b^G - X_c^G) \quad (13)$$

2.4 交叉操作

对于第 G 代种群中的目标个体 X_u^G , 可利用式(14)生成对应的实验个体 U_u^{G+1} 。

$$U_{u,v}^{G+1} = \begin{cases} V_{u,v}^{G+1}, \text{ rand}(v) \leq C_R^G \text{ 或 } v = \text{randn}(u) \\ X_{u,v}^G, \text{ 其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\text{rand}(v)$ 为服从 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数; $\text{randn}(u)$ 代表服从 $[1,N]$ 区间均匀分布的随机整数,且由于 $N=2$, 故文中 $\text{randn}(u)$ 代表随机取1或2。此外,条件 $v=\text{randn}(u)$ 是为了确保实验个体中至少有1个基因是来自于变异个体,以保证算法的全局搜索能力。

2.5 选择操作

对于第 G 代种群中的目标个体 X_u^G 及对应的实验个体 U_u^{G+1} , 记适应度为 S , 并将其表达式设置如式(15)所示。

$$S = \begin{cases} \frac{1}{D_d + 1}, \text{ 满足式(9)} \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \quad (15)$$

此时,通过个体竞争可得目标个体 X_u^G 的下一代个体 X_u^{G+1} , 如式(16)所示。

$$X_u^{G+1} = \begin{cases} U_u^{G+1}, S(U_u^{G+1}) > S(X_u^G) \\ X_u^G, \text{ 其他} \end{cases} \quad (16)$$

2.6 输出寻优结果

重复开展交叉操作、变异操作和选择操作,直到完成规定的迭代次数 N_i , 并最后生成 N_p 组二维个体 $X_{u,v}^{N_i}$ 。考虑到在实际工程中,后峰锯齿脉冲试验条件的峰值加速度通常为整数,单位为 g ; 脉冲持续时间通常为整数或保留有限位小数,单位为 ms 。因此,为了确保后峰锯齿脉冲试验条件对冲击环境的包容性,首先对二维个体 $X_{u,v}^{N_i}$ 进行预处理,过程如式(17)所示。

$$\begin{aligned} \bar{X}_{u,1}^{N_i} &= \text{ceil}(X_{u,1}^{N_i}) \\ \bar{X}_{u,v}^{N_i} &= \begin{cases} \bar{X}_{u,1}^{N_i} = \text{ceil}(X_{u,1}^{N_i}) \\ \bar{X}_{u,2}^{N_i} = \frac{\text{floor}(10^m \cdot X_{u,2}^{N_i})}{10^m} \end{cases} \\ \tilde{X}_{u,1}^{N_i} &= \text{ceil}(X_{u,1}^{N_i}) \\ \tilde{X}_{u,v}^{N_i} &= \begin{cases} \tilde{X}_{u,1}^{N_i} = \text{ceil}(X_{u,1}^{N_i}) \\ \tilde{X}_{u,2}^{N_i} = \frac{\text{ceil}(10^m \cdot X_{u,2}^{N_i})}{10^m} \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: m 为脉冲持续时间 T_D 的保留小数位数; $\text{ceil}(\cdot)$ 和 $\text{floor}(\cdot)$ 分别代表向上取整数和向下取整数。由式(17)可知,二维个体 $X_{u,v}^{N_i}$ 经过预处理后变成2组二维个体 $\bar{X}_{u,v}^{N_i}$ 和 $\tilde{X}_{u,v}^{N_i}$ 。此时,根据式(15)从 $2N_p$

组二维个体中通过竞争选出适应度最优的个体, 则其二维基因即为自动寻优获得的冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件的 2 个波形参数。

2.7 方法实施流程

根据上述讨论, 文中所提出的基于自适应差分进化算法的冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法的实施流程如图 3 所示。

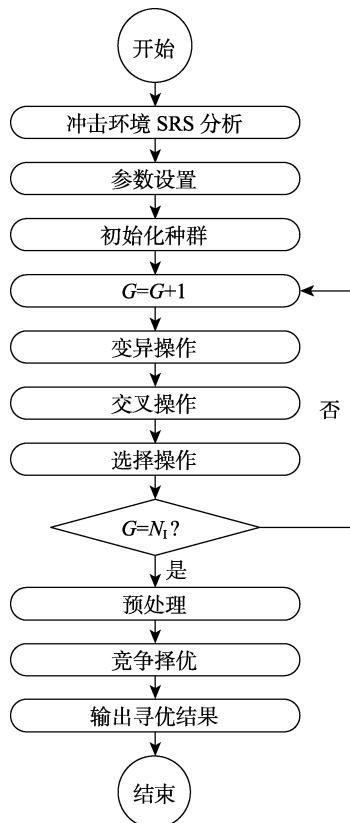


图 3 所提方法实施流程
Fig.3 Implementation flow chart of the proposed method

3 应用验证

为了验证文中所提方法的正确性, 利用该方法分别对 1 组模拟冲击环境和 2 组实测冲击环境的后峰锯齿脉冲试验条件进行了自动寻优。其中, 模拟冲击环境为理想的后峰锯齿脉冲, 峰值加速度为 40g, 脉冲持续时间为 11 ms; 实测冲击环境 1 为某装备实验室系统级冲击试验中所布置的外测传感器的实测冲击环境; 实测冲击环境 2 为某装备飞行试验中其上遥测传感器所敏感到的弹射冲击环境。

根据图 3 所示流程, 首先对 3 组冲击环境进行 SRS 分析, 分析频带为 10~1 000 Hz, 频率分辨率为 1/6 倍频程对数频率分辨率, 阻尼比取 $\zeta=0.05^{[23]}$ 。自适应差分进化算法的参数设置情况见表 1, 脉冲持续时间的保留小数位数取 $m=1$ 。

利用文中所提方法自动寻优得到的模拟冲击环境的后峰锯齿脉冲试验条件的峰值加速度和脉冲持续时间分别为 40g 和 11.0 ms, 与给定的后峰锯齿脉冲模拟冲击环境的 2 个波形参数完全一致。自动寻优得到的 2 组实测冲击环境的后峰锯齿脉冲试验条件的峰值加速度和脉冲持续时间分别为 65g、8.0 ms 和 39 g、7.1 ms。此外, 为了验证文中所提出的利用对数距离量化评价 SRS 吻合度的正确性, 文中同时还将式 (5) 所示的线性距离最小作为优化目标, 利用自适应差分进化算法对 2 组实测冲击环境的后峰锯齿脉冲试验条件进行了自动寻优, 对应的峰值加速度和脉冲持续时间寻优结果分别为 65g、8.1 ms 和 39 g、7.4 ms。2 种优化目标自动寻优所得的后峰锯齿脉冲试验条件与对应实测冲击环境的 SRS 对比结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 利用 2 种优化目标自动寻优得到的 2 组实测冲击环境的后峰锯齿脉冲试验条件, 其峰值

表 1 自适应差分进化算法参数设置情况
Tab.1 Parameters definition for the adaptive differential evolution algorithm

参数	N_P	N_I	F_{min}	F_{max}	$C_{R,min}$	$C_{R,max}$	P_{min}/g	P_{max}/g	T_{min}/ms	T_{max}/ms
数值	100	500	0.2	0.9	0.1	0.6	1	100	0.1	30

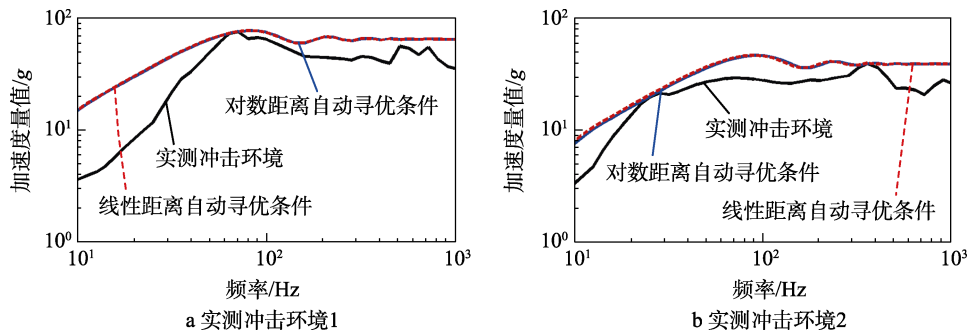


图 4 自动寻优条件与实测冲击环境的 SRS 对比结果
Fig.4 SRS comparison results between automatic optimization conditions and measured shock environments:
a) measured shock environment 1; b) measured shock environment 2

加速度相同,在高频段,2种方法的自动寻优条件谱型吻合一致;对于脉冲持续时间,文中所提方法的自动寻优结果相对更小,故利用对数距离最小作为优化目标的自动寻优条件在低频区的加速度量值相对更低,“过试验”情况更为缓和。因此,利用文中所提方法自动寻优得到的2组实测冲击环境的后峰锯齿脉冲试验条件的SRS均实现了对实测冲击环境SRS更为合理的包络,但由于文中所用2组实测冲击环境的加速度量值变化相对比较平缓,2种方法自动寻优结果的差异性并不明显。此外,对于图4中自动寻优条件SRS与实测冲击环境SRS之间存在差异,其原因为,实测冲击环境时域波形并非理想的经典冲击脉冲,这就意味着无论自动寻优条件能够多么精确地包络实测冲击环境,二者的SRS仍会存在差异。文中的研究目的就是通过自动寻优找到实测冲击环境的最优包络,尽量降低冲击试验条件与实测冲击环境之间的差异,最大程度避免“过试验”发生。

综上所述,模拟和实测冲击环境的应用验证结果表明,文中所提出的基于自适应差分进化算法的冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法正确可行。

4 结语

文中提出了一种基于自适应差分进化算法的冲击环境后峰锯齿脉冲试验条件自动寻优方法,可有效解决传统方法由于缺乏合理的量化评价指标且受主观因素影响较大可能导致的“过试验”问题,应用验证结果证明了该方法的正确性。文中所提方法一方面可指导导弹装备更为精细化的制定后峰锯齿脉冲试验条件,另一方面可进一步推广应用至其他类型经典冲击脉冲试验条件的自动寻优。

参考文献:

- [1] 徐子健, 南宫自军, 李炳蔚, 等. 航天器插装型元器件冲击损伤边界研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 71-78.
XU Z J, NANGONG Z J, LI B W, et al. Impact Damage Boundary of Spacecraft Plug-in Components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 71-78.
- [2] 李会娜, 高庆, 卢鑫, 等. 基于传递特性的航天器在轨冲击环境预示方法研究[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(4): 340-343.
LI H N, GAO Q, LU X, et al. Prediction of Spacecraft In-Orbit Shock Environment Based on Transfer Functions[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(4): 340-343.
- [3] 邵旭东, 南宫自军, 李炳蔚, 等. 航天产品冲击响应分析及损伤/失效评估方法研究综述[J]. 强度与环境, 2021, 48(3): 36-45.
SHAO X D, NANGONG Z J, LI B W, et al. A Review of Shock Response Analysis and Damage/Failure Evaluation of Aerospace Products[J]. Structure & Environment Engineering, 2021, 48(3): 36-45.
- [4] 郭迅, 郭强岭. 空空导弹爆炸分离冲击试验分析[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 78-82.
GUO X, GUO Q L. Pyroshock Test for Air-to-Air Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(4): 78-82.
- [5] 邓婷, 严侠, 牛宝良. 多维经典波形冲击控制技术[J]. 信息与控制, 2017, 46(6): 746-751.
DENG T, YAN X, NIU B L. Multi-Dimensional Classical Shock Waveform Control Technology[J]. Information and Control, 2017, 46(6): 746-751.
- [6] 姚建军, 闫红松, 杨研蒙. 惯导系统两类冲击环境条件之间的等效转换[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(1): 116-122.
YAO J J, YAN H S, YANG Y M. Equivalent Conversion between Two Kinds of Shock Test Condition for INS[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(1): 116-122.
- [7] 洪翔, 卢立新. 后峰锯齿脉冲激励下双曲正切包装系统的非线性动力学特性研究[J]. 包装工程, 2012, 33(11): 60-62.
HONG X, LU L X. Nonlinear Dynamic Characteristics Research of Hyperbolic Tangent Packaging System under the Action of Final Peak Saw Tooth Shock Pulse[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 60-62.
- [8] 史明丽, 黄国强. 冲击基本设计试验条件对机载外挂的适用性分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 17-20.
SHI M L, HUANG G Q. Applicability Analysis of Basic Shock Test Condition on Aircraft External Carry[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 17-20.
- [9] 杨光, 刘波, 李正举, 等. 航天器火工冲击源力函数模拟分析[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(4): 348-354.
YANG G, LIU B, LI Z J, et al. Simulation of Pyroshock Load Force Function on Spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(4): 348-354.
- [10] 张玉杰, 黄超广, 李斌. 飞机冲击载荷等效静载的确定方法研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 157-163.
ZHANG Y J, HUANG C G, LI B. A Method to Determine the Equivalent Static Load of Aircraft Impact Load[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 157-163.
- [11] 刘继伟, 王金华, 孙俊伟, 等. 非制冷红外探测器陶瓷封装结构优化及可靠性分析[J]. 红外技术, 2023, 45(1): 77-83.
LIU J W, WANG J H, SUN J W, et al. Ceramic Package Structure Optimization and Reliability Analysis for Uncooled Infrared Detectors[J]. Infrared Technology, 2023, 45(1): 77-83.
- [12] GJB 150.18—1986, 军用设备环境试验方法 冲击试验[S].
GJB 150.18—1986, Environmental Test Methods for Military Equipments—Shock Test[S].
- [13] 朱升贺, 方东, 牛金皓, 等. 跌落式冲击试验台后峰锯齿脉冲试验条件的自动寻优方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 1-6.

- 齿冲击数值分析与试验研究[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(1): 40-46.
- ZHU S H, FANG D, NIU J H, et al. Numerical Analysis and Experimental Study of the Terminal-Peak Sawtooth Pulses Produced by Drop-Test Shock Machine[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(1): 40-46.
- [14] GJB 150.18A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第18部分: 冲击试验[S].
- GJB 150.18A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 18: Shock Test[S].
- [15] STORN R, PRICE K. Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [16] 王林, 彭璐, 夏德, 等. 自适应差分进化算法优化 BP神经网络的时间序列预测[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(12): 2270-2275.
- WANG L, PENG L, XIA D, et al. BP Neural Network Incorporating Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm for Time Series Forecasting[J]. Computer Engineering & Science, 2015, 37(12): 2270-2275.
- [17] 程真, 司赶上, 李振钢, 等. 基于自适应差分进化算法的LED光谱匹配[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0930004.
- CHENG Z, SI G S, LI Z G, et al. LED Spectral Matching Based on Adaptive Differential Evolution Algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0930004.
- [18] 方诗麟, 卢梅, 李铁. 基于冲击响应谱的导弹冲击试验条件制定与优化方法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 203-207.
- FANG S L, LU M, LI T. Institution and Optimization of the Percussion Experiment Condition of Missiles Based on the Shock Response Spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(1): 203-207.
- [19] 孙文娟, 陈海波, 黄颖青. 基于自适应遗传算法的爆炸冲击响应谱时域重构优化方法[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5): 67-76.
- SUN W J, CHEN H B, HUANG Y Q. Time Domain Reconstruction Optimization of Pyrotechnic Shock Response Spectrum via Adaptive Genetic Algorithm[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(5): 67-76.
- [20] 李树勇. 冲击谱中过试验和欠试验的控制[J]. 装备环境工程, 2007, 4(1): 41-43.
- LI S Y. Control of Over-Test and Short-Test in Shock Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 41-43.
- [21] 龚学兵, 任全彬, 李翥. 导弹发射冲击试验条件制定研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(5): 86-90.
- GONG X B, REN Q B, LI Z. Research on the Establishment of Shock Response Spectrum under the Missile Launch Conditions[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(5): 86-90.
- [22] 金有刚, 袁宏杰. 用实测冲击环境数据确定冲击试验条件[J]. 装备环境工程, 2007, 4(1): 25-27.
- JIN Y G, YUAN H J. Determination of Shock Environmental Condition with Measured Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 25-27.
- [23] GJB/Z 222—2005, 动力学环境数据采集和分析指南[S].
- GJB/Z 222—2005, Guidelines for Dynamic Environmental Data Acquisition and Analysis[S].
- [24] 曹源, 汪凤泉, 童丽萍. 冲击响应谱匹配的改进多目标遗传算法研究[J]. 应用科学学报, 2007, 25(3): 311-316.
- CAO Y, WANG F Q, TONG L P. Improved Multi-Object Genetic Algorithm for Shock Response Spectrum Match[J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(3): 311-316.
- [25] 何志勇, 宋少伟, 邓长华, 等. 瞬态时域数据合成冲击响应谱算法研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(5): 55-59.
- HE Z Y, SONG S W, DENG C H, et al. Research on Transient Time-Domain Data Synthesis of Shock Response Spectrum[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(5): 55-59.

责任编辑: 刘世忠