

垂直冲击试验机结构性能优化设计研究

吴斌, 耿建强, 温晶晶, 成东圣

(1. 西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072; 2. 上海机电工程研究所, 上海 200009)

摘要: 冲击试验机的结构性能对冲击响应有很大的影响, 为弥补传统振动台式、摆锤式等冲击响应谱机冲击能量不足的问题, 设计了气炮式垂直冲击响应谱试验机, 针对冲击试验机设计变量较多, 影响关系复杂, 冲击响应谱曲线求解及调试困难的问题, 基于改进的递归数字滤波法编制了响应谱数据处理软件, 运用 ABAQUS 软件对冲击试验机结构进行动力学建模仿真, 通过编写的数据处理软件将仿真得到的时域信号转换为频域信号, 得到冲击响应谱, 解决了传统采用试验方法调试耗时且成本大等问题。综合考虑冲击台面及锤头的速度、质量等因素, 得到了设计变量对响应谱的影响规律, 归纳总结了可供工程使用的冲击试验机数值仿真分析方法和调试策略, 试验证明仿真方法优化后的垂直冲击试验机能有效进行冲击响应谱试验, 并且满足要求的设计指标。

关键词: 冲击响应谱; 垂直冲击; 气炮式试验机; 非线性动力学仿真

中图分类号: TB122 **文献标识码:** B

Research on the Structural Optimization Design of the Vertical Impact Testing Machine

WU Bin, GENG Jian-qiang, WEN Jing-jing, CHENG Dong-sheng

(1. Department of Aeronautics Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China;

2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

ABSTRACT: The structure performance of the impact testing machine has a great influence on the shock response. To make up for impact energy shortage of the traditional desktop, vibration pendulum impact response spectrum, the gas gun type vertical shock response spectrum test machine is designed. Because of the many design variables of the impact testing machine, the effects of complex relationship and the shock response spectrum curve which is difficulty in debugging, the recursive digital filtering method is used for the data processing software to improve the response spectrum. Based on the ABAQUS software, the dynamic modeling and simulation is carried out for impact test machine structure, the conversion time domain signal is converted to the frequency domain signal through the data processing software, and the shock response spectrum is obtained. The velocity and quality variables of the mesa and the shell are considered, the influence law of the response spectrum of design variables is obtained, and the numerical simulation of impact test machine is summarized. The test proves that the vertical impact machine can do the shock response spectrum test effectively, and meet the requirements of design.

KEYWORDS: Shock response spectrum; Vertical impact; Gas gun-type testing machine; Non-linear dynamics simulation

1 引言

冲击试验机是对试验设备提供机械冲击的一种机构, 其冲击性质可控, 并且在合适的精度要求内可以重复冲击, 对于模拟冲击环境具有重要的应用^[1]。冲击试验机从 20 世纪初期开始研制, 一般根据质量大小选择相应的冲击台, 如轻

型冲击台和浮动冲击台。进入 60 年代, 冲击机可以通过规定指定的冲击波形进行试验, 根据实际情况下的冲击波形, 选择半正弦、矩形波、正矢波或后峰锯齿波作为冲击台模拟冲击的波形^[2-3]。近年来随着冲击环境的复杂性以及计算机的发展, 逐渐依据冲击响应谱进行试验^[4]。冲击响应谱可以更真实的模拟出实际冲击情况, 它既考虑了冲击波性的作用, 同时更为重要的是考虑到了结构在冲击环境下的响应。

目前国内外学者对冲击试验机进行了诸多理论、数值及试验研究。王艳^[5]等设计了一种新型小载荷垂直冲击试验

基金项目: 西北工业大学研究生创新种子基金资助(Z2017074)

收稿日期: 2017-06-28 修回日期: 2017-07-12

机,通过电动式激振器带动激振顶杆及安装在顶杆末端的冲头按照所给的频率上下运动,但其控制系统较为复杂,并且只能进行小载荷冲击条件下的研究。汪学方^[6]等针对微机械电子的可靠性试验设计了一种新型垂直冲击试验机,将电子产品从设定的高度落下,冲击系统可对其进行冲击响应谱分析,该冲击台试验机的试验重复性较好,台体可拆卸,但需对试验件进行多次冲击来达到调试的目的。杨艳峰^[7]等设计了可以实现开门的冲击试验台,结合受力信息与动力学理论,确定不同时刻开闭力,并通过试验进行了验证。但是该冲击机的设计只考虑了开闭力一个影响因素。实际上,冲击台设计影响变量众多且相互关系复杂,这给冲击台的规范化设计与调试带来相当大的困难。因此,目前还主要依靠设计人员的经验和试凑试验进行冲击台设计,对于垂直冲击试验机的规范化设计与调试方法尚需进行深入研究、实践。

针对垂直冲击台影响变量多、设计困难的问题,本文采用有限元仿真方法对气炮式垂直冲击试验机结构性能进行优化设计。针对响应谱波形调试困难的问题,本文采用有限元软件仿真模拟该试验机的冲击过程,并编制有限元软件和冲击响应谱数据处理软件之间的接口,直接利用仿真得到特定工况下的冲击响应谱波形,并得到了设计变量的影响规律。最后通过实验验证了该方法的可行性。

2 垂直冲击响应谱试验机的动力系统模型

气炮式垂直冲击试验机主要用于产品的冲击力学环境试验,通过模拟产品实际环境的冲击脉冲和冲击环境来分析产品对冲击环境的适应能力。当前通用的垂直冲击试验主要采用自由跌落的方式和利用振动台进行冲击响应谱实验,但都存在冲击能量不足、调试困难、脉冲持续时间小等问题^[8]。

采用气炮式垂直冲击台可以实现高加速度和长脉冲持续时间,通过气体炮加速后的弹丸碰撞到一个靶标上,产生近似半正弦的波形,冲击加速度最高可以达到 50000 g,脉冲持续时间可达 1~5 ms。如图 1 所示,气炮式垂直冲击台主要由发射筒、冲击台面、气泵、控制柜等组成。试验件安装在工作台面上,台面通过螺母与支架连接。冲击开始前,气缸充气,控制系统设定开锁气压,当气缸气压达到设定气压时,阀门打开,发射筒释放炮弹,并撞击工作台底面,完成一次冲击过程,安装在台面上的加速度传感器可以实时采集加速度信号。该试验机结构简单,调试方法便利,并且可以实现多次连续冲击(每分钟可达 30 次),这极大地提高了试验效率。

其冲击过程可简化为一阶力学模型,如图 2 所示。

图中 m 、 K 为冲击台面的质量和刚度, M 、 v 为冲击锤头的质量和速度。台面固定在支架上,其刚度与台面尺寸和连接方式有关。锤头质量 M 相对于台面质量很小,作为工程近似计算,可以先不考虑锤头质量的影响(在后面仿真分析中考虑了该变量影响规律)。

该系统的动力学方程为

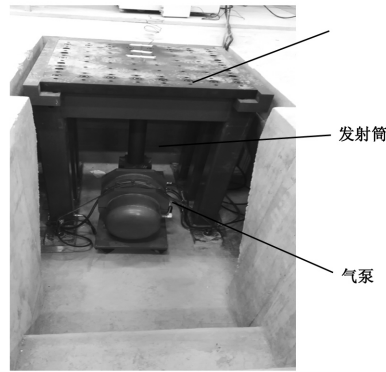


图 1 气炮式垂直冲击响应谱试验机实物图

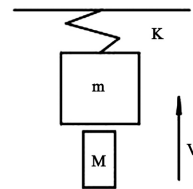


图 2 力学模型

$$m\ddot{x} + Kx = 0 \quad x_0 = 0 \quad \dot{x}_0 = v_0 \quad (1)$$

解上式

$$\tau_n = \pi \sqrt{m/K} \quad (2)$$

$$A = v_0/\omega_n = v_0\tau_n/\pi \quad (3)$$

$$(a_m)_n = A\omega_n^2 = v_0\pi/\tau_n \quad (4)$$

式中 τ_n 为脉冲持续时间(脉宽) A 为冲击台面最大变形, $(a_m)_n$ 为峰值加速度,最大过载为

$$n_m = \frac{(a_m)_n}{g} = \frac{v_0\pi}{g\tau_n} \quad (5)$$

由以上公式知道冲击脉宽和台面的质量及刚度有关,在冲击台面确定下,最大过载和冲击锤头的特性相关。因此台面的模态和锤头的物理特性是影响冲击响应的主要设计变量。

3 垂直冲击试验机的仿真方法

冲击试验机仿真优化指的是利用有限元方法模拟冲击过程,得到谐振板的加速度时域信号,利用编写的冲击响应谱分析软件得到冲击谱。通过分析谐振板固有频率、炮弹的质量和冲击速度等因素对响应谱的影响,得到各因素对响应谱波形的影响规律,可对实际调试工作提供理论基础。其仿真调试流程如图 3 所示。

3.1 基于台面模态分析的仿真优化方法

模态是机械机构的固有振动特性,经大量的试验及仿真分析,在垂直冲击的台面设计过程中,结构固有频率特别是低阶模态将直接影响响应谱的拐点频率,因此研究台面的模态对于以后的优化设计具有指导作用。

冲击台面设计长宽 800 × 800 mm,厚度 50 mm,利用有限

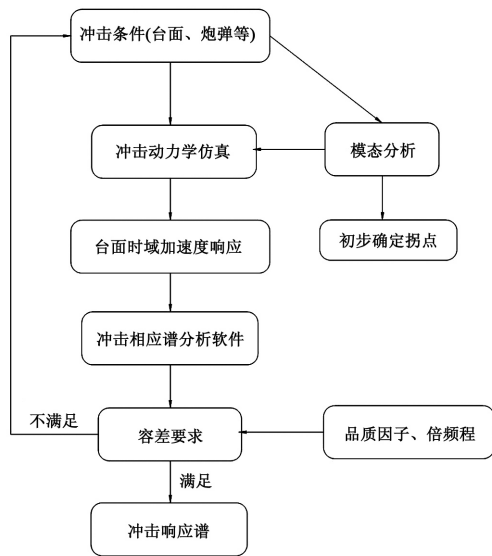


图3 冲击试验机仿真调试流程框图

元软件,如图4,求得冲击台面在自由情况下前四阶垂向固有频率分别为179.29 Hz、262.12 Hz、316.87 Hz、456.22 Hz。可以看出垂向方向固有频率较低,并且前几阶固有频率都集中在低频区域,这会导致冲击响应谱的拐点过低,低频区域波动较大。

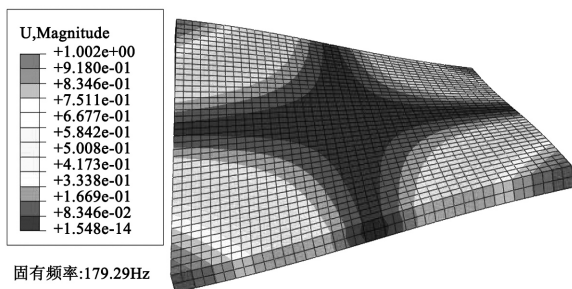


图4 自由台面一阶垂向模式

针对上述问题,本文提出如下改进方法。

将冲击台面四周固结,固有频率分别为:646.80 Hz、1291.7 Hz、1862.0 Hz、2250.3 Hz。可以看出,改变连接方式后其固有频率有明显的提高并且不再集中分布。

在台面四周固结的基础上将台面厚度变为60 mm,求出前四阶固有频率分别为:973.78 Hz、1898.7 Hz、2688.7 Hz、3208.1 Hz,如图5所示。即在适当增加台面厚度的情况下,其纵向固有频率有明显的提高。

通过仿真分析得到以下结论,可以通过改变台面的四周连接方式和台面厚度来改变台面垂直方向的固有频率,以便达到需要的响应谱拐点设计。

3.2 基于非线性动力学计算的仿真方法

为节约设备调试时间和费用,利用有限元软件模拟实际试验过程,通过仿真发现不足,并直接指导实际调试过程。

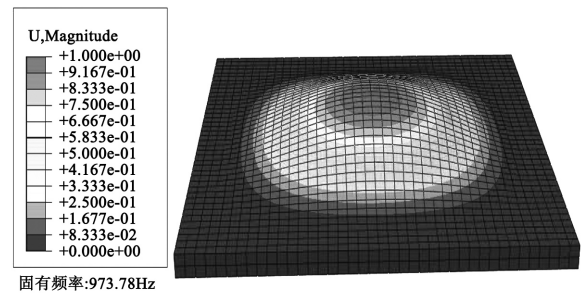


图5 固支、加厚台面一阶垂向模式

定义锤头(炮弹)和冲击台面为钢制材料,弹性模量为207 GPa,泊松比为0.23,密度为7800 kg/m³;在场输出模块定义时间步长为0.03 s,每时间步内输出分析点数为5000,这样可以保证分析具有足够的准确度;在接触模块定义接触方式为表面与表面显示动力学接触,该算法在求解非线性问题时不需要进行迭代,而是显式地从上一个增量步的静力学状态来推导出动力学平衡方程的解;在载荷模块的预定场中定义锤头的冲击速度,并在台面四周边缘施加边界条件。网格采用四边形杂交轴对称单元C3D8R。由于冲击过程是高度非线性行为,需要非常大的计算资源,为了进行有效的计算,需要在场输出模块中将不需要的输出变量(力、能量、厚度等)剔除,只保留加速度、位移和速度的输出。建模仿真如图6所示。

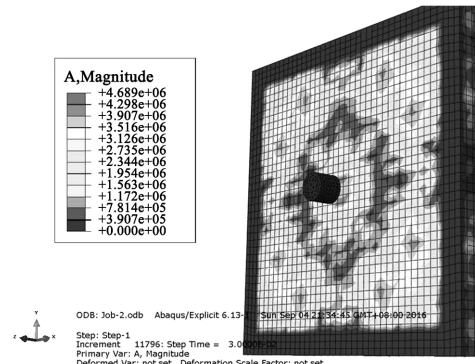


图6 冲击过程建模仿真

仿真分析得到大量时域数据,这些数据反映了台面在整个冲击过程中加速度随时间变化情况。通过接口将时域信号导入到开发的冲击响应谱计算软件中就可以得到冲击响应谱。

3.3 冲击响应谱的原理、数值算法及数据处理软件的编译

研究冲击响应谱在冲击台的设计中具有重要的作用。如图7,冲击响应谱是一系列单自由度振荡器在同一冲击激励下的最大响应与振荡器固有频率的关系曲线。对于不同的冲击激励可能会得到相同的响应谱,它将外载荷加入到一系列固有频率为 ω_n 的单自由度系统,取得一系列最大响应后,以 ω_n 为自变量绘出的最大响应—固有频率的曲线。响

应谱的本质仍代表外激励,但是却以响应结果来刻画,在实际应用中,考虑到研究对象的结构特性,利用冲击响应谱可以直接对响应作出判断或估计。

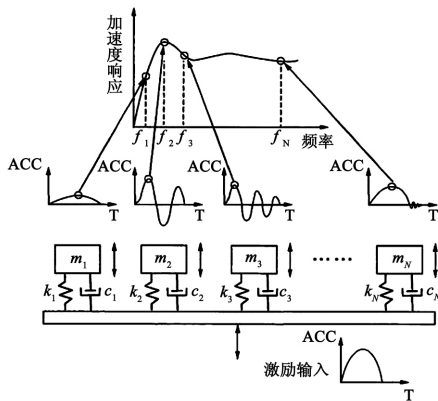


图7 实际系统拆分为多个单自由度系统物理模型图

响应谱的数学方法:得到的激励函数通常是激励(力、位移、加速度)与时间的关系,如果将此时间域的函数变换到响应域,得到最大响应与频率 ω_n 的关系,这就是响应谱,具体过程如下:

设函数 $s(t)$ 在 $-\infty < t < +\infty$

$$s(t) = \begin{cases} 0 & t < a \\ \ddot{x}_s(t) & a \leq t \leq b \\ 0 & t > b \end{cases} \quad (6)$$

式中: $s(t)$ 称为时域冲击函数,函数 $\ddot{x}_s(t)$ 是基础加速度激励函数,在区间 $[a, b]$ 可积。任何冲击激励均可满足上述条件。

将 $s(t)$ 置入单自由度系统得质量点相对运动方程

$$\ddot{x}_r(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}_r(t) + \omega_n^2x_r(t) = -s(t) \quad (7)$$

通常根据冲击台面材料特性选定阻尼比 ξ 参数。因此,在 $s(t)$ 已知的条件下,对于给定的一系列固有频率 ω_n ,分别求解式(7)就可以得到单自由度系统质量点的相对加速度响应。而单自由度系统质量点的绝对加速度响应为

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}_r(t) + s(t) \quad (8)$$

式冲击响应谱的数值解法主要有三种:直接积分法、递归数字滤波法和改进的数字滤波法。

改进的递归数字滤波法又称为 Smallwood 递归法,其基于斜台不变数字滤波模型。对于低频计算不稳定的问题采用了如下递归公式

$$x_i = P_0U_i + P_1U_{i-1} + P_2U_{i-2} + x_{i-1} + (x_{i-1} - x_{i-2}) + (q_1 - 2)x_{i-1} + (q_2 + 1)x_{i-2} \quad (9)$$

改进的递归数字滤波法具有明确的物理意义,并且算法简洁、计算速度快、计算精度高^[9]。本文的冲击响应谱分析软件便根据此种方法得到。

冲击响应谱有一条标准的规范曲线,规定有上下限容差,试验优劣的判定依据是产生的冲击响应谱是否在规范的

容差范围内,容差分析包括分析频率的上下限、拐点频率、斜率以及上下限容差,冲击响应谱中最重要的技术指标是拐点频率。

基于以上响应谱计算基本理论和数值方法,利用 LAB-WINDOW 平台编写冲击响应谱计算软件,该软件具有数据处理与容差分析功能。软件界面如图 8 所示。

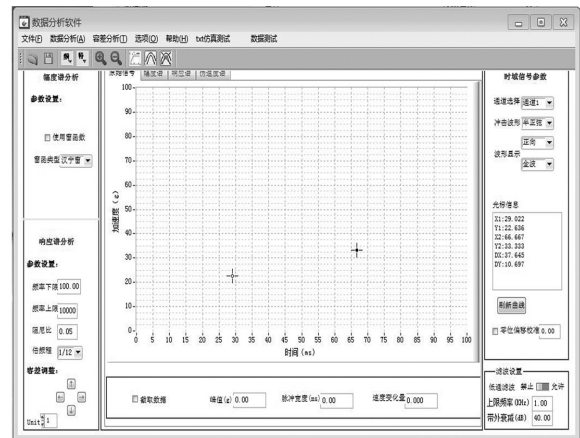


图8 冲击响应谱 CVI 软件

4 仿真与试验结果分析

将台面四周进行固结,台面厚度 50 mm,在给定 6 m/s 的冲击速度下,仿真得到的冲击响应谱如图 9 所示,响应谱拐点频率为 657.1 Hz,与前面模态分析所得到的一阶固有频率 648.8 Hz 相近。试验中给定气压值 3 个大气压,采集冲击过程数据绘制冲击响应谱如图 10 所示,其拐点频率 674.7 Hz。通过与试验比较,两者低频波形及拐点频率相近,高频部分有一定的差距,在实际试验中可以通过在靶标上添加硬缓冲材料调节高频波形。

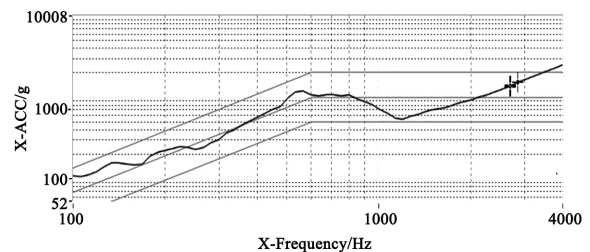


图9 冲击响应谱仿真结果

仿真模型中改变锤头质量与冲击初速度,台面厚度 60 mm,长宽 800×800 mm,分析频率的范围为 100 Hz 到 4000 Hz。结果如表 1 所示:增大锤头质量与冲击初速度对拐点频率影响较小;拐点加速度量值随锤头质量或冲击初速度增加而有明显的增长,其中冲击初速度对其影响最大。

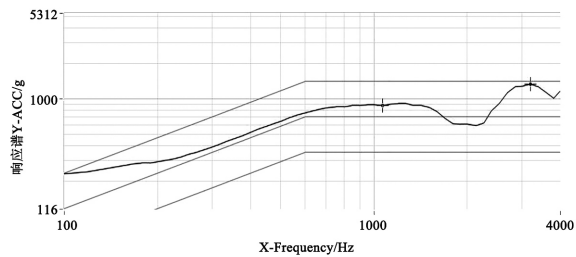


图 10 冲击响应谱试验结果

表 1 仿真结果

锤头质量/kg	冲击速度/ $m \cdot s^{-1}$	拐点频率/Hz	拐点加速度值/g
20	6	917	723
30	6	931	902
40	6	981	1123
50	6	1024	1577
40	5	934	871
40	6	972	1223
40	7	1002	1890
40	8	1012	2622

5 结构优化的实测结果

该试验机工况下响应谱曲线的基本技术要求如表 2。

表 2 气炮式垂直冲击响应谱试验机指标

技术内容	技术指标
额定负载	40 kg
响应频率	100 Hz ~ 4000 Hz
冲击响应加速度	1600 g
响应谱容差的拐点要求	700 Hz
冲击响应控制容差	± 6 dB
冲击响应谱上升斜率	6
冲击波形	半正统
冲击方式	压缩空气驱动
冲击方向	垂直

对于 700 Hz 的容差拐点要求,基于台面的模态分析,依据前面的仿真结果采用台面与支撑架四周固支的方式,台面厚度选为 50 mm;对于容差要求的响应谱加速度 1600 g,依据表 1,炮弹质量选择 50 kg,冲击初速度 6m/s;对于高频部分,通过在弹头与台面之间加入硬橡胶,抑制高频部分的响应谱曲线的凸起,使高频部分更加平滑,以便更容易满足容差要求。试验得到的时域谱、响应谱如图 11 所示,该冲击响应谱曲线的斜率、拐点满足技术指标中的容差要求,并且试验重复性可以达到 90%。

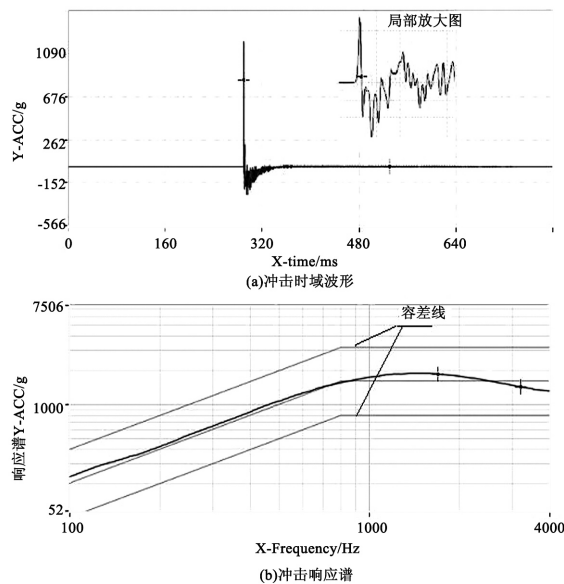


图 11 垂直冲击台试验结果

6 结语

1) 为解决垂直冲击台设计及调试困难的问题,设计了气炮式垂直冲击响应谱试验机,该设备具有响应快、控制方便、加速度量级大等特点;

2) 针对该设备设计变量较多,优化设计困难的问题,提出了基于模态分析和 ABAQUS 非线性显示动力学的仿真优化方法。该方法分析冲击台面的固有特性,并对撞击过程进行有限元仿真分析得到冲击过程的时域信号,利用编写的响应谱分析软件将时域信号转换为频域信号。试验证明,该仿真方法可行;

3) 本文提出的仿真方法也可以应用关于其它类似冲击设备的调试过程中,对于提高冲击响应谱试验的试验效率、降低测试成本具有重要意义;

4) 仿真所得冲击响应谱曲线和实际试验所得冲击响应谱曲线趋势类似,但整体相似度还有待提高,可以进一步改进仿真方法,提高仿真的精确性。

参考文献:

- [1] 宁建国,王成,马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [2] K D Bouzakis, et al. Nano-impact test on a TiAlN PVD coating and correlation between experimental and FEM results[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(7): 1936-1940.
- [3] 刘树林. 冲击与振动手册[M]. 北京:中国石化出版社,2008.
- [4] 都军民,戴宗妙. 冲击响应谱在冲击试验中的应用研究[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(s1): 19-21.
- [5] 王艳,石心余. 新型小载荷冲击磨损试验机的研制及其实验研究[J]. 摩擦学报, 2007, 27(5): 487-491.

(下转第 282 页)

BBO 算法以及 B-BBO 算法,根据图 3(b) 中的运行结果所示, SDBBO 在运行到约第 80 代时达到最终收敛值,而 DEBBO 在约第 140 代时才达到收敛结果,这表明了 SDBBO 的收敛速度和精度优势。对于最优解附近陡峭而极难收敛的单峰函数 $f_3(x)$,从最优值的结果对比来看, SDBBO 算法跳出局部最优解的能力具有优于其它算法的表现。对于单峰函数 $f_4(x)$, SDBBO 算法的精度非常高,在 10^{-21} 的数量级,对比其它算法中最优的 DEBBO 算法平均值提高了 4 个数量级。

根据上述函数对应的运行结果图可以看出,在运行的初期,基本 BBO 算法收敛速度优于其它算法,但随着更新代数的增加, SDBBO 算法的收敛速度明显加剧,同时在收敛精度上超越了其它对比算法。这证明了基本 BBO 算法有一定的利用能力,但在搜索能力方面存在欠缺, SDBBO 算法很好的平衡了利用能力与搜索能力。

5 结语

基本 BBO 算法在迁移和变异的过程中仅针对于栖息地向量中的某一特征,这极大的限制了算法在每次迭代过程中的进化概率和收敛效率,同时也影响了算法的搜索能力与性能。本文提出了一种与更新代数相关的自适应迁移算子与差分变异算子结合的生物地理学优化算法(SDBBO),该算法将基本 BBO 的搜索和利用能力与自适应迁移算子、差分变异算子的开采和探索能力相结合,保持了栖息地的特征并加强了信息交流和分享能力,极大程度提升了 BBO 算法的全局优化水平。通过对基准函数的测试,结果证明 SDBBO 算法具有较好的收敛精度、收敛速度以及较好的搜索能力。

下一步的主要工作内容为:继续完善提高算法的全局寻优能力,并验证改进的算法在实际工程应用中的表现。

参考文献:

- [1] D Simon. Biogeography-based optimization [J]. Evolutionary Computation IEEE Transactions on, 2008, 12(6): 702-713.
- [2] D Simon, et al. Markovmodels for biogeography-based optimization [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B Cybernetics A Publication of the IEEE Systems Man & Cybernetics

Society, 2011, 41(1): 299-306.

- [3] D Simon, et al. Analytical and numerical comparisons of biogeography-based optimization and genetic algorithms [J]. Information Sciences An International Journal, 2011, 181(7): 1224-1248.
- [4] D Simon. A probabilistic analysis of a simplified biogeography-based optimization Algorithm [J]. Evolutionary Computation, 2011, 19(2): 167-188.
- [5] Ma H, Simon D. Blended biogeography-based optimization for constrained optimization [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(3): 517-525.
- [6] 蔡之华,等. 基于进化规划的新型生物地理学优化算法研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(6): 1106-1112.
- [7] 陈基漓. 基于高斯变异的生物地理学优化模型 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(7): 292-295.
- [8] 唐继勇,仲元昌,曾广朴. 基于迁出地动态选择与自适应迁入策略的 BBO 算法 [J]. 计算机科学, 2016, 43(10): 282-286.
- [9] 范会联,曾广朴. 带自适应迁入的生物地理学优化算法 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(12): 3642-3645.
- [10] 马海平,李雪,林升东. 生物地理学优化算法的迁移率模型分析 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, (s1): 16-21.
- [11] Storn R, Price K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997-11: 341-359.
- [12] 关晓蕾. 生物地理优化算法及其在机器人路径规划中的应用 [D]. 哈尔滨工程大学, 2011: 42-46.

【作者简介】



张文辉(1970-),女(汉族),湖南省益阳市人,副教授,硕士研究生导师,主要研究领域为计算机图形学、计算机动画;

刘彤(1992-),男(汉族),河北省承德市人,硕士研究生,主要研究领域为计算机图形学、智能计算;

张延豪(1992-),男(汉族),湖北省鄂州市人,硕士研究生,主要研究领域为虚拟现实技术、真实感图形学;

江泽涛(1961-),男(汉族),江西省九江市人,教授,博士研究生导师,主要研究领域为图像处理与计算机视觉、网络信息安全。

(上接第 219 页)

- [6] 汪学方,等. 微电子产品冲击试验机 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(10): 1052-1055.
- [7] 杨艳峰,郑坚,狄长春,杨玉良,姚家骏. 基于虚拟样机技术的火炮炮门冲击试验台理论设计 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 32-35.
- [8] 蹇永博. 冲击响应谱实验技术研究 [D]. 西北工业大学, 2007.
- [9] David O Smallwood. An Improved Recursive Formula of Calculation of SRS [J]. S&V, Bulletin, 1981, 51(2): 1024-1030.

【作者简介】



吴斌(1967-),男(汉族),四川省简阳市人,副教授,主要研究领域为振动试验技术;

耿建强(1991-),男(汉族),山东省德州市人,硕士研究生,主要研究领域为飞行器结构及力学环境试验;

温晶晶(1991-),男(汉族),江苏省无锡人,博士研究生,主要研究领域为冲击响应谱试验技术;

成东圣(1991-),男(汉族),陕西省咸阳市人,硕士研究生,主要研究领域为飞行器地面颤振。