多方式进化遗传算法及其优化波纹薄壁管的耐撞性

孙海龙[1],隋允康[1,2],叶红玲[1]

1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院,北京 100024
2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁大连 116023

摘要　通过提出一种多方式进化遗传算法的途径改进了遗传算法,并用于求解汽车新型波纹薄壁管耐撞性优化问题。文中采用响应面法近似建立金字塔形波纹薄壁管的优化模型,在多方式进化遗传算法中采用多种编码方式、选择策略、交叉和变异操作,同时还设计了类似遗传学中染色体结构变异的倒位操作,有效改善了群体多样性。对于函数实例测试的结果显示,该算法克服了遗传算法有时局部收敛的缺陷,提升了收敛速度。在波纹薄壁管耐撞性优化问题上的应用研究表明了本算法在求解此类优化问题上的有效性和方便性。优化后波纹管吸能提高40%以上,显著改进了初始设计,进一步验证了多方式进化遗传算法求解此类优化问题的实用性。

关键词　遗传算法;多方式进化;耐撞性;波纹薄壁管;结构优化

中图分类号　TP31,TB12　　**文献标识码**　A　　**doi**　10.3981/j.issn.1000-7857.2012.18.003

Multi-mode Evolution Genetic Algorithm and Optimizaton of Thin-Walled Tube with Folding Patterns Baesd on Crashworthiness

SUN Hailong[1], SUI Yunkang[1,2], YE Hongling[1]

1. *College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China*
2. *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning Province, China*

Abstract　A multi-mode evolution genetic algorithm is proposed to improve the simple genetic algorithm and to solve the crashworthiness optimization design problems for a new type of thin-walled tube with folding patterns. Structural crashworthiness analysis is a highly non-linear transient dynamic process, involving a very complex relationship between the objective function (energy absorption value) and the design variables (wave height and angle) without an explicit function expression to optimize the design of the thin-walled tube. The optimization model of the thin-walled tube established by the Response Surface Method (RSM) and various encoder modes, the selection strategy, the crossover and the mutation operation are used in the multi-mode evolution improved genetic algorithm, and an inversion operation, similar to the genetic variation in the chromosome structure, effectively improves the population diversity. Examples of function test results show that the algorithm overcomes the local convergence of the GA and increases the convergent speed. The application of the multi-mode evolution genetic algorithm for crashworthiness optimization of the thin-walled tube with folding patterns shows the efficiency and convenience of this algorithm to solve such optimization problems. The energy absorption of the optimized structure is increased by more than 40%, a significant improvement over the initial design.

Keywords　genetic algorithm; multi-mode evolution; crashworthiness; thin-walled tube; structural optimization

---

收稿日期:2012-01-05;修回日期:2012-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(11172013,11072009);北京市自然科学基金项目(3122004);大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室基金项目(GZ0819)

作者简介:孙海龙,研究方向为结构和多学科优化,电子信箱:hpu350@126.com;隋允康(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:S030000050S),教授,研究方向为结构和多学科优化,电子信箱:ysui@bjut.edu.cn

0　引言

在汽车碰撞耗散系统设计中,常用延性金属薄壁管件发生塑性变形来吸收轴向撞击时的动能,因其吸能性好且制造廉价,基于有限元技术对其进行优化设计日渐受到国内外学者关注[1-2]。本文在传统的光滑圆柱壳表面添加金字塔型波纹形成一种新型波纹管,并对其耐撞性进行了优化。碰撞是一个高度非线性的瞬态动力过程,碰撞中构件吸收的能量与波纹高度及角度间的关系非常复杂,没有一个显式的函数表达式,而在优化问题的求解过程中,数学模型的建立是提高优化效率和避免繁重计算的前提和基础,针对这个问题,有学者基于响应面法[3-4]和显式碰撞有限元技术对此类吸能构件的抗撞性优化研究做了大量工作[5-6]。本文则采用文献[7]中响应面法近似出管件的吸能量与设计变量间的显式函数。

由于耐撞性优化同工程结构的最佳方案设计一样,都属于有约束条件的最优化问题,相应的寻优算法则可以分为数学规划法和智能解法。传统的序列二次规划法适用于求解凸规划问题,要求目标函数的海塞矩阵正定,而本文目标函数海塞矩阵存在非正定的情况,因此采用智能算法求解薄壁结构耐撞优化问题,以期能更可靠地获得全局最优解。

智能算法中提出最早的是遗传算法(GA),它是一种随机全局优化算法,具有良好的鲁棒性并得到了广泛应用,但同时也有在搜索接近全局最优解时收敛的速度变慢、早熟、易陷入局部最优的缺陷。遗传算法产生这种缺陷的根源是由于人工遗传算法对现实生物演化过程的模拟过于简化,人为地假设人工遗传过程中的群体具有良好多样性[8]。

由于得到显式目标函数的困难,众多运用智能算法的结构优化问题通常不建立优化模型。而本文为了提高效率,在响应面法建模之后采用遗传算法求解,同时考虑到简单遗传算法的缺陷,提出一种多方式进化的改进遗传算法,改善了种群的多样性。标准的函数实验以及在薄壁管耐撞性优化上的应用结果表明算法快速有效。

1　多方式进化遗传算法

1.1　算法的基本操作

算法中采用多种方式的编码、选择、交叉、变异操作,为进一步提高种群的多样性,还采用了类似遗传学中染色体结构变异行为的倒位操作。具体的做法如下。

(1) 编码方式:同时采用二进制编码和实数编码,由程序根据不同的条件选择或人为设定编码方式,如无设定则默认优先采用实数编码,同时为克服二进制编码的海明悬崖(Hamming Cliff)缺点,采用二进制格雷码(Gray-code)编码[9]。

(2) 选择方式:在进化的前期采用基于轮盘赌法[10]的非线性排名选择,中后期则采用锦标赛选择(含精英选择),摒弃了存在诸多弊端的单纯轮盘赌选择[11-12]。

(3) 交叉方式:针对二进制编码方式,采用多点交叉和均匀交叉,并在进化的过程中逐步地增大均匀交叉的概率;针对实数编码方式,进化的前期采用离散交叉、中期采用算术交叉、在后期采用 AEA 重组。

(4) 变异方式:二进制编码采用随机变异;实数编码则采用自适应变异和随机变异,且尽量的采用前者。

(5) 倒位:模仿遗传学中染色体的倒位变异行为,算法中增加了倒位算子,适当的倒位可以提高种群的多样性。

1.2　算法的程序实现框架

多方式进化遗传算法的具体框架流程如下。

Step1:初始化种群。根据变量数目、求解精度,由一个参数开关 options(1)控制的编码方式,生成初始种群。options(1)=0 为二进制编码,options(1)=1 为实数编码。

Step2:选择操作。由一个以 r 为参数生成的一个随机数为值的开关 options(2),控制选择方式,options(2)=1 或 0,0 为锦标赛选择,1 为非线性排名选择。$r=eranum/MaxEranum$,$eranum$ 为当前进化代数,$MaxEranum$ 为最大进化代数。

Step3:交叉操作。首先由编码方式控制开关 options(1)控制选择相应的交叉类型,再由依据一个以 r ($r=eranum/MaxEranum$)为参数生成的随机数为值的开关 options(3)控制不同进化时期(前期、中期、后期)的交叉方式 options(3)=0,1,2。

Step4:变异操作。首先由编码方式控制参数 options(1)控制相应的变异类型。再由一个以随机生成的元素值小于 5 的 $1\times MaxEranum$ 矩阵各元素为值的开关 options(4)控制选用变异方式。

Step5:倒位操作。依据倒位概率进行倒位操作,最终得到新一代种群。

Step6:适应度评价,满足收敛条件转 Step7,否则转 Step2。

Step7: 生成最优解,结束。

2　多方式进化遗传算法性能测试

选用两个具有相当复杂度的典型测试函数 Shaffer's F6 函数和 Rosenbrock 函数进行实验,函数表达式见表 1,函数图像见图 1、图 2。两个函数均为搜索全局最大值,分别用单种群简单遗传算法(SGA)和本文多方式进化遗传算法求解上述 2 个算例。Rosenbrock 函数很难极大化,是一个经典的约束优化问题,其有一个局部极大点(2.048,-2.048),全局最大值出

表 1　测试函数表达式

Table 1　Expression of test functions

函数名称	表达式
Shaffer's F6	$\max f_1(x,y)=0.5-\frac{\sin^2\sqrt{x^2+y^2}-0.5}{(1+0.001(x^2+y^2))^2}$, $-4\leqslant x,y\leqslant 4$
Rosenbrock	$\max f_2(x,y)=100(x^2-y)^2+(1-x)^2$, $-2.048\leqslant x,y\leqslant 2.048$

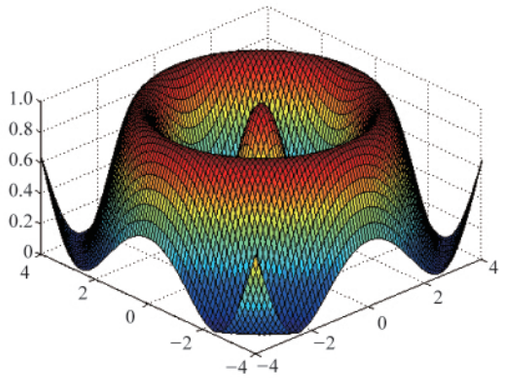

图 1　Shaffer´s F6 函数图像

Fig. 1　Graph of Shaffer´s F6 functions

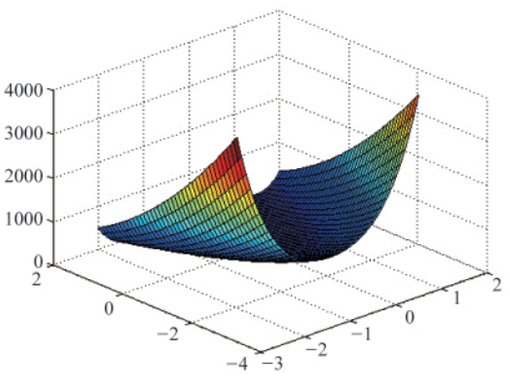

图 2　Rosenbrock 函数图像

Fig. 2　Graph of Rosenbrock functions

现在 $f(-2.048,-2.048)=3905.93$,Shaffer´s F6 函数在唯一的全局最大值 $f(0,0)=1$ 周围有无限个围成一圈取值均为 0.99028 的局部极大点,求解该函数极易陷入局部最优解。

测试过程中交叉概率 0.8,变异概率 0.1,倒位概率 0.2,种群规模 100。结果显示,简单遗传算法求解 Rosenbrock 函数在第 100 代时最优值为 3863.14,未达到全局最优解,进化到 137 代时达到全局最优点 (−2.048,−2.048),函数值为 3905.92,进化过程见图 3;求解 Shaffer's F6 函数在 100 代时最优值为 0.9960,未达到全局最优解,进化到 124 代时达到全局最优点(0,0),函数值为 1,进化过程见图 4(F_{MAX} 为适应度最大值)。

而多方式进化遗传算法求解两个函数,分别只进化 25 代和 14 代就达到了全局最优解,进化过程分别见图 5 和图 6。由达到全局最优解所需的进化代数可知多方式进化遗传算法寻优效率远高于简单遗传算法,收敛速度提高 6 到 8 倍,有测试函数的图像可知 Shaffer's F6 函数的复杂程度远高过 Rosenbrock,但前者收敛速度提高的倍数要大于后者,这表明越是复杂程度高的函数越能显出多方式遗传算法收敛速度快的优势。

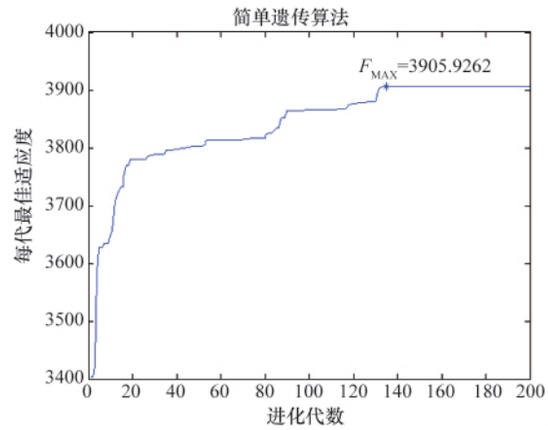

图 3　SGA 优化 Rosenbrock 函数

Fig. 3　Optimization Rosenbrock function with SGA

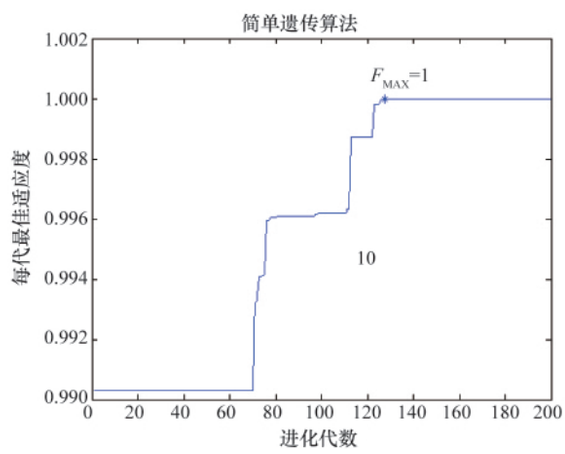

图 4　SGA 优化 Shaffer´s F6 函数

Fig. 4　Optimization Shaffer´s F6 function with SGA

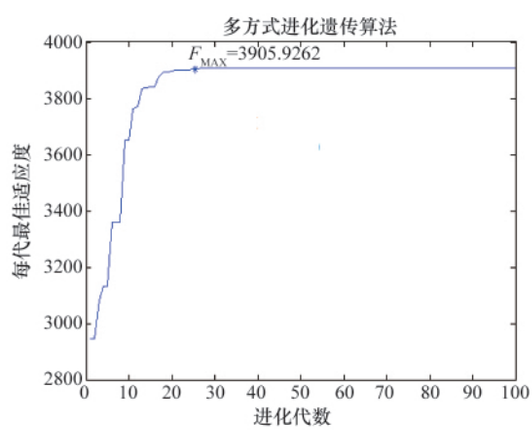

图 5　多方式进化优化 Rosenbrock 函数

Fig. 5　Optimization Rosenbrock function with MEGA

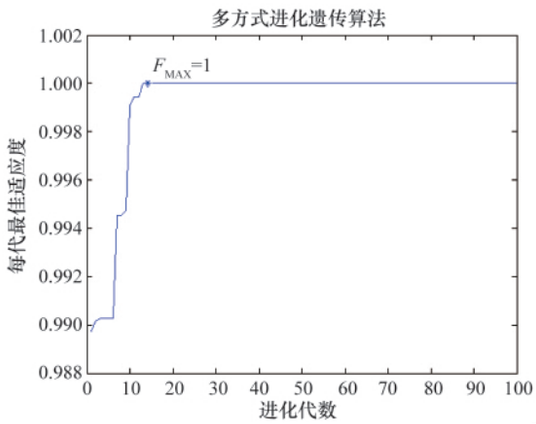

图 6　多方式进化优化 Shaffer´s F6 函数

Fig. 6　Optimization Shaffer´s F6 function with MEGA

3　波纹薄壁管耐撞性优化

3.1　有限元分析模型

本文在光滑圆柱壳表面添加金字塔型波纹,形成正多边形截面波纹管,截面形状及几何参数见图 7。正多边形外接圆半径与原半径相同,波纹管轴长 280mm,管厚 2mm,波纹随尺寸变化在薄壁管外表面成对称分布,管外接圆半径 R_n,波纹高度 $h/2$,四面皆为等腰三角形波纹,轴向高度为 h,正多边形边长 d,中心到边距离 b。APDL 语言采用 SHELL163 单元双线性同性材料在 ANSYS 中创建金字塔波纹管的有限元模型,见图 8。

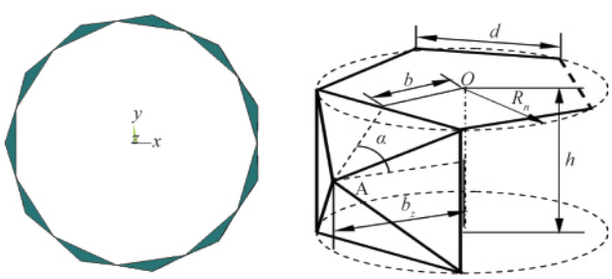

图 7　波纹管截面形状及几何参数

Fig. 7　Section shape and geometry of the pattern model

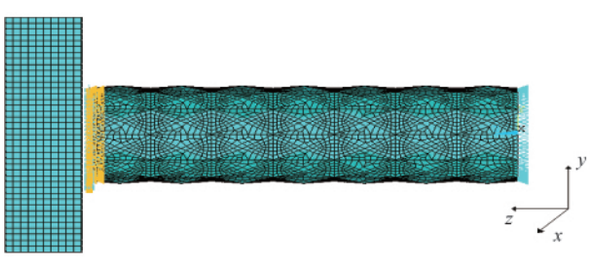

图 8　金字塔波纹薄壁管

Fig. 8　Pyramid corrugated thin-walled tube

设置单元剪切因子为 5/6、管壁厚度 2mm。弹性模量 210GPa,泊松比 0.3,屈服应力 230MPa,线性剪切模量 10GPa,并定义 SURFACE TO SURFACE 接触类型,接触面的动、静摩擦系数均为 0.1。约束构件左端边界节点 z 向平动,右端边界节点 x,y,z 方向转动和 x,y 方向平动自由度,受质量为 500kg、初速为 50km/h 的刚性轴向冲击。

3.2　结构优化模型

以最大吸能为优化目标,波纹高度 h 以及波纹角度 α 为设计变量,建立正多边形截面波纹管在轴向冲击荷载下的优化模型:

$$\begin{cases} \text{求}: h,\alpha \\ \text{使}: f(h,\alpha)\rightarrow \max \\ \text{st}\ \dfrac{\pi}{3}\leqslant\alpha\leqslant\dfrac{\pi}{2} \\ 20\leqslant h\leqslant 100; \end{cases}$$

其中 $f(h,\alpha)$ 为结构冲击过程中所吸收的能量。初始设计尺寸为 h=60mm,α=70°(1.221 弧度)。

3.3　求解及优化结果

多方式进化算法求解优化模型,进化 14 代后算法收敛,相对应的设计变量为 h=62.60mm,α=0.785(弧度),以最大吸能为目标的进化过程见图 9。同样的条件简单遗传算法需要 88 代才收敛,进化过程见图 10。多方式进化算法较简单算法收敛速度提高了 6 倍以上。

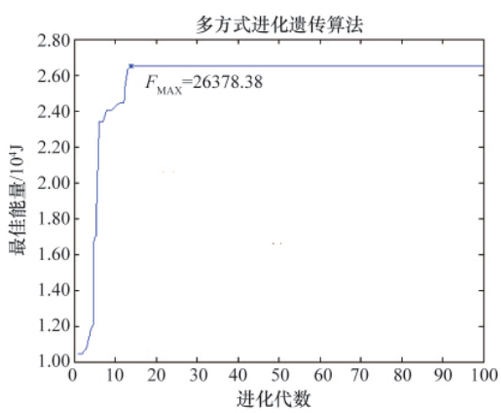

图 9　MEGA 最大吸能进化过程

Fig. 9　Optimization maximum value with MEGA

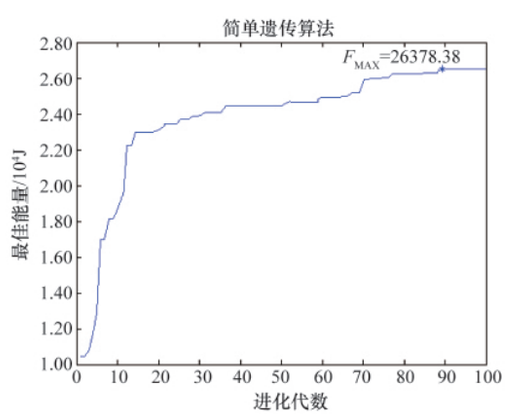

图 10　SGA 最大吸能进化过程

Fig.10　Optimization maximum value with SGA

经过优化设计的多边形截面波纹薄壁管受冲击过程不同时刻时的变形和应力分布,如图 11 所示。优化后的波纹管在碰撞发生的大部分时间内吸能能力明显优于传统结构和未优化的结构。碰撞发生 10ms 时, 优化后的结构吸收能量 26378J,比未优化的 18314J 多吸收 44.3%。

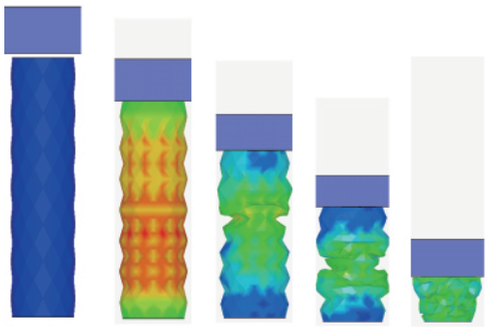

图 11　冲击载荷下优化后多边形截面波纹管的应力分布和变形

Fig. 11　Stress wave and deformation of optimized folding pattern-tube with regular polygon section under impact load

4　结论

由于用响应面法得到了目标函数对于设计变量的显函数关系,进而得以建立优化的数学模型,这种关系虽然是近似的,但却是显式的,这减小了优化计算的成本,提高了求解的效率。

多方式进化克服了单种群普通遗传算法局部收敛的缺陷,提高了算法全局搜索能力,且能以较快的速度收敛到全局最优解,对函数的仿真测试结果表明了算法的有效性和高效性。

在多边形截面金字塔波纹薄壁管耐撞性优化问题上的应用结果显示, 优化后的波纹管抗撞吸能性能提高 40%以上,显著改进了初始设计,进一步验证了多方式进化遗传算法求解此类优化问题的实用性和方便性。

研究表明,建立近似显式优化模型后用智能算法求解确实集二者的优点于一身,既提高了求解的效率,又保证非凸问题能搜索到全局最优解。

参考文献(References)

[1] Forsberg J, Nilsson L. On polynomial response surfaces and kriging for use in structural optimization of crashworthiness [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2005, 29(3): 232-243.

[2] 张雄, 程耿东. 轻质薄壁结构耐撞性分析与设计优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 20-63.
Zhang Xiong, Cheng Gengdong. Crashworthiness analysis and design optimization of light thin-walled structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 20-63.

[3] Kurtaran H, Eskandarian A, Marzougui D, *et al*. Crashworthiness design optimization using successive response surface approximations [J]. *Computational Mechanics*, 2002, 29(4-5): 409-421.

[4] Avalle M, Chiandussi G, Belingardi G. Design optimization by response surface methodology: Application to crashworthiness design of vehicle structures [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2002, 24(4): 325-332.

[5] 张立新, 隋允康, 杜家政. 基于响应面方法的结构碰撞优化[J]. 力学与实践, 2005, 27(3): 35-39.
Zhang Lixin, Sui Yunkang, Du Jiazheng. *Mechanics in Engineering*, 2005, 27(03):35-59.

[6] 侯淑娟, 李青, 龙述尧. 端部方锥形薄壁构件的抗撞性尺寸优化[J]. 机械强度, 2007, 29(4): 683-685.
Hou Shujuan, Li Qing, Long Shuyao. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 29(04): 35-39.

[7] 隋允康, 白海波. 基于中心点精确响应面法的板壳结构优化 [J]. 机械设计, 2005, 22(11): 10-11.
Sui Yunkang, Bai Haibo. *Journal of Machine Design*, 2005, 22 (11): 10-11.

[8] 胡桂武. 远亲杂交遗传算法及其在供应链优化中的应用[J]. 计算机与现代化, 2008(12): 1-4.
HU Guiwu. *Computer and Modernization*, 2008(12): 1-4.

[9] 杨晓华, 杨志峰, 郦建强. 格雷码混合加速遗传算法及其性能分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2004, 40(06): 831-836.
Yang Xiaohua, Yang Zhifeng, Li Jianqiang. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition*, 2004, 40(06): 831-836.

[10] Bradshaw J, Miles J C. Using standard fitnesses with genetic algorithms [J]. *Advances in Engineering Software*, 1997, 28(7): 425-435.

[11] 张琛, 詹志辉. 遗传算法选择策略比较 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(23): 5471-5478.
Zhang Chen, Zhang Zhihui. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(23): 5471-5478.

[12] Goldberg D E, Korb B, Deb K. Messy genetic algorithms: Motivation, analysis and first results[J]. *Complex Systems*, 1989(3): 493-530.

(责任编辑　岳臣)

科技导报 SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》"卷首语"栏目征稿

"卷首语"栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿信箱:kjdbbjb@cast.org.cn。