

基于遗传算法的涡扇发动机稳态调节规律优化设计

韩文俊,唐 兰,王 晨,郭海红
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为了获得最大推力,对典型的混合排气涡扇发动机的调节规律进行分析,得到发动机控制参数的最优匹配,介绍了 1 种基于排挤机制的小生境遗传算法,并采用多峰值多变量函数对小生境遗传算法进行测试,结果表明:小生境遗传算法能够得到目标函数的局部最优解和全局最优解。将发动机稳态模型作为目标函数代入小生境遗传算法中,并制定相应的约束条件和惩罚机制,结果表明:采用优化后的调节规律使发动机推力表现更优。

关键词: 小生境遗传算法;调节规律;优化设计;推力增大;涡扇发动机

中图分类号: V235.13

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.01.004

Optimization Design of Steady-state Regulation Law of the Turbofan Engine Based on the Genetic Algorithm

HAN Wen-jun, TANG Lan, WANG Chen, GUO Hai-hong
(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to obtain maximum thrust, the regulation law of a typical mixed exhaust turbofan engine was analyzed, and the optimal matching of the control parameters of the engine was obtained. A niche genetic algorithm based on crowding mechanism was introduced, and the multi-peak multivariable function was used to test the niche genetic algorithm. The results show that the local optimal solution and the global optimal solution of the objective function can be obtained by niche genetic algorithm. The steady-state model of the engine was used as the objective function in the niche genetic algorithm, and the corresponding constraint and punishment mechanism were established. The results show that the engine thrust performance is better by the optimized regulation law.

Key words: niche genetic algorithm; regulation law; optimization design; thrust augmentation; turbofan engine

0 引言

航空发动机尤其是军用发动机装配飞机后,在飞机起飞、爬升和水平加速时一般工作在中间状态或最大状态(全加力状态),在此过程中发动机发挥其最大推力。为了保证在任何飞行条件下最大限度地发挥发动机潜力^[1],发动机中间或最大状态的调节规律设计尤为重要。在该设计过程中应综合考虑发动机的强度负荷、热负荷和工作稳定性,还需考虑飞机进气道的流量限制等因素,该设计过程是 1 个需要人工反复迭代的过程,因此研究出合适的优化设计方法提高效率很有必要。近年来,各种新的优化算法迅速发展,

不少基于随机搜索的现代优化算法取得了巨大成功。这些算法与传统优化方法(如 N-R 算法)相比,在求解一些复杂的多维优化问题时具有一定的优势。如粒子群算法和遗传算法是基于随机搜索的优化算法中比较成功的 2 种算法^[2]。粒子群优化算法是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的 1 种基于群体协作的随机搜索算法,搜索速度快、效率高,但在搜索全局最优解方面还有所欠缺;遗传算法是 1 种借鉴生物界自然选择和进化机制发展起来的高度并行、随机、自适应搜索算法,已成功应用于组合优化、机器学习、工程优化等诸多领域^[3-7]。

收稿日期:2018-11-02 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:韩文俊(1982),男,硕士,高级工程师,从事航空发动机总体性能设计工作;E-mail:hwjggh@163.com。

引用格式:韩文俊,唐兰,王晨,等.基于遗传算法的涡扇发动机稳态调节规律优化设计[J].航空发动机,2020,46(1):17-21. HAN Wenjun, TANG Lan, WANG Chen, et al. Optimization design of steady-state regulation law of the turbofan engine based on the genetic algorithm[J]. Aeroengine, 2020, 46(1): 17-21.

本文将遗传算法应用于发动机稳态调节规律(或控制规律)的优化设计问题中,提出了 1 种发动机调节规律的设计方法,在考虑多种约束条件的情况下得到最优的发动机调节规律。

1 发动机调节规律

以混合排气涡轮发动机调节规律为例,发动机的控制参数为主燃油流量 W_f 和喷管喉道面积 A_8 ^[8]。发动机控制系统通过调整 W_f 使发动机的低压转子相对转速 n_1 、高压转子相对转速 n_2 和低压涡轮后总温 T_6 (因高压涡轮前总温 T_4 测量难以实现)的其中之一达到最大限制值,另外 2 个参数随动,但不高于各自的限制值^[9]。通过调整 A_8 使发动机的低压涡轮出口总压 P_6 与风扇进口总压 P_1 的比值 E_{PR} ^[10]符合要求的值。

发动机 n_1 、 n_2 、 T_6 和 E_{PR} 的调节规律分别如图 1、2 所示。从图 1 中可见,发动机调节规律根据不同的 T_1 大致可分为 4 个区域。第 1 区域,当 T_1 较低时低压转子相对换算转速 n_{1r} 达到限制值 n_{1max} , 发动机进气流量接近飞机进气道的最大流量限制值;随着 T_1 的升高, n_{1max} 对应的 n_1 逐渐升高,最终达到第 2 区域,即 n_1 达到限制值 n_{1max} ;随着 T_1 进一步升高,为保持 $n_1=n_{1max}$,必须提高涡轮前总温 T_4 , T_6 随 T_4 的升高也逐渐升高,最终达到第 3 区域,即 $T_6=T_{6max}$;当 T_1 升高到某一温度时,由于风扇和压气机存在“前重后轻”的现象,达到了第 4 区域,即 n_2 达到了最大限制值 n_{2max} 。

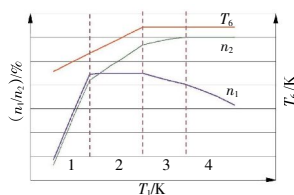


图 1 发动机转速和排气温度调节规律

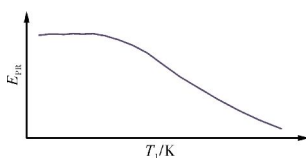


图 2 发动机 E_{PR} 调节规律

在发动机工作的进气温度范围内,控制器通过调节喷管喉道面积来实现要求的 E_{PR} 控制。但是不同的 E_{PR} 调节规律会影响发动机的 n_1 、 n_2 和 T_6 ,从而影响发动机在整个工作温度范围内的推力表现。如果考虑发动机加力工作状态,则更为复杂,需要综合考虑加力燃油流量 W_{fa} 与 A_8 的匹配,以及余气系数和加力燃烧室出口温度的限制。因此在 T_1 条件一定时,发动机的控制参数 W_f 、 W_{fa} 、 A_8 存在最优组合。

2 遗传算法介绍

简单遗传算法的优化机理为:首先随机生成初始种群,然后按照一定规则选择优良的父代个体,再通过交叉和变异等操作生成子代。如此反复迭代,种群经过不断进化,其平均适应度逐渐提高,最终得到最大适应度的个体^[11]。然而随着简单遗传算法的广泛应用出现了局部收敛问题^[12]。为了避免种群中个体出现局部收敛,衍生出了小生境遗传算法。

在用遗传算法求解多峰值函数的优化问题时,经常只能找到几个最优解,甚至往往得到的是局部最优解^[13],小生境遗传算法的基本目标就是形成和维持稳定的多样性种群,在搜索空间的不同区域中并行搜索,最终实现多峰值问题的优化。De Jong^[14]在 1975 年提出排挤机制的小生境实现方法。排挤机制的实现思想是:在种群中选取 N 个较优的个体组成排挤成员,然后依据新产生的成员与排挤成员的相似性来排挤掉一些与排挤成员相类似的个体。其中个体之间的相似性可用个体之间的距离来度量。随着排挤过程的进行,群体中的个体逐渐被分类,形成各个小的生存环境,并维持群体的多样性^[14],小生境遗传算法的流程如图 3 所示。

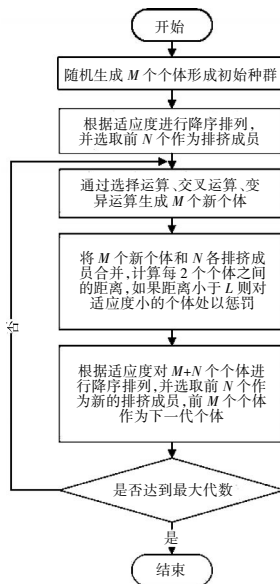


图 3 小生境遗传算法流程

3 遗传算法测试

在使用小生境遗传算法进行发动机调节规律优化设计之前,先对该算法进行测试,并将测试结果与采用粒子群算法和简单遗传算法的计算结果进行对比。测试用目标函数见式(1),该函数在约束条件内共有 16 个局部最优点,其中有 4 个全局最优点。测试函数为

$$y=20+x_1^2+x_2^2-10 \times (\cos(2\pi x_1)+\cos(2\pi x_2)) \quad (1)$$

约束条件: $x_i \in [-2, 2] (i=1, 2)$ 。

惩罚函数: $\text{Penalty}=0$, 即如果某个体被惩罚,则其适应度直接设为 0。

遗传算法运行参数如下:

种群规模: 种群规模的给定参考范围为 20 ~ 100^[13], 为保持种群多样性将种群规模设为 100;

进化代数: 一般进化代数选取范围为 100 ~ 1000^[13], 为减少计算量暂设为 100;

交叉概率: $P_c=0.6$;

变异概率: $P_m=0.01$ 。

遗传算法编码和遗传算子如下:

个体编码: 浮点数编码;

选择算子: 比例选择算子;

交叉算子: 鉴于编码方式采用的是浮点数编码, 所以交叉采用算术交叉方式, 对第 t 代的 1 对个体 P_{1t} 、 P_{2t} 进行算术交叉^[11], 在 $[0, 1]$ 区间随机生成 1 个数 r , 如果 $r \leq P_c$, 则个体 P_{1t} 、 P_{2t} 按式(2)进行算术交叉,

$$\begin{cases} p_1^{t+1} = \alpha p_1^t + (1-\alpha)p_2^t \\ p_2^{t+1} = \alpha p_2^t + (1-\alpha)p_1^t \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为 $[0, 1]$ 区间的数, 本文将 α 设为 0.5;

变异算子: 采用均匀变异, 假设 1 个个体 $X=(x_1, x_2)$, 若 x_1 满足变异条件, 且 $x_1 \in [x_{1\min}, x_{1\max}]$, 则在 $[0, 1]$ 区间随机生成 1 个数 r , x_1 变异后的新值 $x_1' = x_{1\min} + r \cdot (x_{1\max} - x_{1\min})$ 。

粒子群算法、简单遗传算法和小生境遗传算法的测试结果如图 4 所示。从图中可见, 蓝点的 y 值为个体的目标函数值, 采用粒子群算法和简单遗传算法仅得到全局最优解和部分局部最优解。采用小生境遗传算法能够得到该函数的全局最优解和所有局部最优解, 适用于优化发动机稳态控制规律这类复杂问题。种群在进化过程中平均适应度随进化代数的变化如

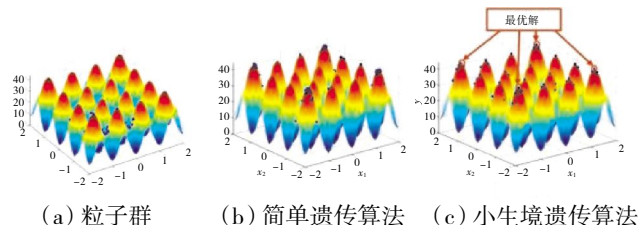


图 4 测试结果

图 5 所示。从图中可见, 随着进化代数的增加种群平均适应度逐渐提高, 当进化到某一阶段时种群平均适应度保持在一定范围内波动, 表明遗传算法收敛。

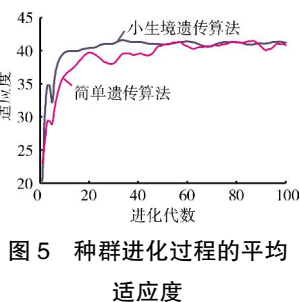


图 5 种群进化过程的平均适应度

进化到 50 代左右收敛, 采用小生境遗传算法时种群进化到 30 代左右收敛, 并且 30 代以后的平均适应度变化较为平稳。

4 遗传算法参数选取

采用小生境遗传算法能够获得优化目标的全局最优解和局部最优解, 但是遗传算法种群规模、变异概率和交叉概率的选取会影响遗传算法的收敛速度, 对于优化发动机稳态调节规律这类计算量庞大的问题, 需要对种群规模、变异概率和交叉概率参数的选取进行分析和优化, 以提高计算效率。

4.1 种群规模

种群规模表示 1 代中个体的数目, 决定了每代优化的计算次数。一般总群规模选取范围为 20 ~ 100。为了找出计算量最小的种群, 选取种群规模分别为 20、30、40、50、……、100 的情况, 每个种群规模计算 10 次, 10 次计算的进化代数取平均值表示该种群规模下的平均进化代数。每个种群规模条件下的平均进化代数如图 6 所示。每个种群规模条件下的总计算次数(总计算次数 = 种群规模 × 进化代数)如图 7 所示。从图 6、7 中可见, 种群规模为 100 时进化平均代数最小, 为 27 代, 但实际计算次数为 2700 次; 种群规模为 20 时平均进化代数为 30.5, 但实际计算次数仅为 612。因此种群规模为 20 时计算量最小。

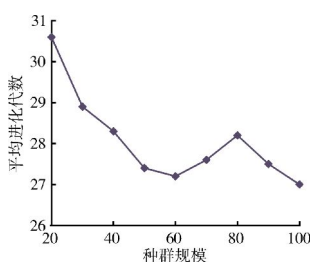


图 6 不同种群规模对进化代数的影响

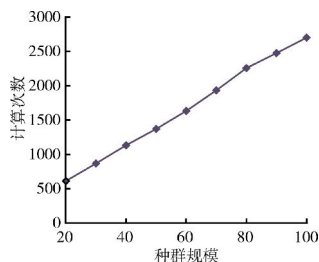


图 7 不同种群规模对计算次数的影响

4.2 交叉概率和变异概率选取

在遗传算法中, 交叉概率一般建议取值范围为 0.40 ~ 0.99, 变异概率取值范围为 0.001 ~ 0.010^[13]。为了找出合适的交叉概率和变异概率进行多次评估, 结果见表 1。从表中可见, 交叉概率对进化代数影响不大, 变异概率对进化代数有影响, 变异用 0.002 和 0.004, 进化代数少。为了减少计算量, 交叉概率设为 0.80, 变异概率设为 0.004。

表1 不同交叉概率和变异概率测试结果

交叉概率	进化代数	变异概率	进化代数
0.40	28	0.002	28
0.60	30	0.004	28
0.80	29	0.006	33
1.00	31	0.008	36

5 发动机调节规律的优化设计

将发动机稳态模型带入小生境遗传算法中,将其看作复杂的目标函数,并以获得最大推力 F 为目标。该问题的模型为:

目标函数为 $\max F=f_{\text{engin}}(X)$,约束条件为:

高压涡轮前温度: $T_4 \leq T_{4\max}$;

风扇裕度: $\Delta SM_f \geq \Delta SM_{f\min}$;

压气机裕度: $\Delta SM_c \geq \Delta SM_{c\min}$;

低压相对转速: $n_1 \leq n_{1\max}$;

高压相对转速: $n_2 \leq n_{2\max}$;

喷管喉道面积: $A_{8\min} \leq A_8 \leq A_{8\max}$;

发动机进口换算流量: $W_{1r} \leq W_{1r\max}$;

惩罚函数: $\text{Penalty}=0$ 。

在不加力的混合排气涡轮发动机模型中共同工作方程共有 29 个方程组^[15],实际变量为 31 个,为了保证方程组具有惟一解,必须附加 2 个量,这 2 个量组成的向量便成为遗传算法中的个体。对于发动机实际的工作情况是通过给定 W_f 来调节 n_1 、 n_2 和 T_6 ,通过给定 A_8 调节 E_{PR} 。根据本文采用的发动机模型,其计算输入为 n_2 和 A_8 (n_2 可近似表征 W_f),即遗传算法中的个体可表达为 $X_i=[n_2, A_8]$ 。

发动机调节规律的优化设计结果如图 8、9 所示,从图中可见,发动机调节规律优化前后的主要区别在于发动机 T_6 和 n_2 受限制区域,在该区域 n_1 优化后低于优化前的,而 E_{PR} 优化后高于优化前的,对于混合排气涡轮发动机来说, n_{1r} 决定发动机进口空气流量, E_{PR} 决定发动机排气速度。当 T_1 较低时,发动机 n_{1r} 或 n_1 达到限制值,表明发动机进口空气流量达到最大空

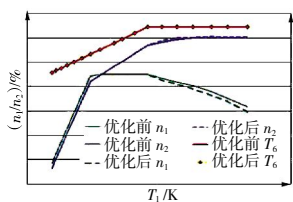


图8 优化的转速、温度调节规律

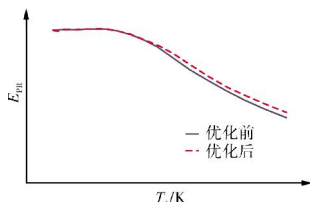


图9 优化的 E_{PR} 调节规律

气流量,且发动机 E_{PR} 达到了较优的状态,因此该区优化前后的结果相近。

当 T_1 升高到 T_6 和 n_2 受限制区域时,发动机 n_{1r} 和 E_{PR} 是相互制约的 2 个量,比如提高 n_{1r} 则需要放大 A_8 ,这样会使发动机进口空气流量提高,发动机推力有增大的趋势;但是因 A_8 增大导致 E_{PR} 降低,影响了发动机排气速度,发动机推力有减小的趋势。所以 n_{1r} 和 E_{PR} 存在最优的匹配,同时反映出发动机控制参数 W_f 和 A_8 存在最优匹配。因为发动机调节规律在进行优化设计前未充分考虑 W_f 和 A_8 最优匹配的问题,因此在该区域的调节规律有一定的优化余地。

以 $H=11\text{ km}$ 为例,发动机调节规律优化前后的速度特性对比如图 10 所示。从图中可见,在 n_{1r} 和 n_1 受限制区域,发动机采用优化前后的调节规律,推力表现相当;在 T_6 和 n_2 受限制区域,采用优化后的调节规律,发动机推力大。

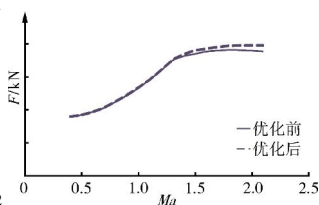


图10 在 $H=11\text{ km}$ 时发动机的推力特性

在最大(全加力)状态下的推力优化更为复杂。发动机模型中需设定的变量增加(加力燃油流量 W_{fa} 或加力出口总温 T_7),对于最大状态推力优化问题,个体表达为: $X_i=[n_2, A_8, T_7]$ 。

目标函数为 $\max F=f_{\text{engin}}(X)$,约束条件在原基础上增加:

加力燃烧室出口总温: $T_7 \leq T_{7\max}$;

加力燃烧室出口余气系数: $\alpha \geq \alpha_{\min}$;

加力状态喷口面积: $A_{8a} \leq A_{8\max}$ 。

在最大状态优化过程中,发动机的 n_1 、 n_2 、 T_6 调节规律与中间状态的一致。

最大状态 E_{PR} 调节规律如图 11 所示。从图中可见,优化结果比优化的中间状态 E_{PR} 调节规律低,与原 E_{PR} 调节规律接近,表明在发动机加力工作条件下,为了能够获得更大的推力,需要将喷口放大,提高进气流量。这样在保证加力燃烧室余气系数不低于要求值条件下,加入更多的燃油。由此可见,原 E_{PR} 控制规律是为了获得大的加力推力而设计的。优化的加力供油规律和加力推力比原状态略高,如图 12、13 所示。

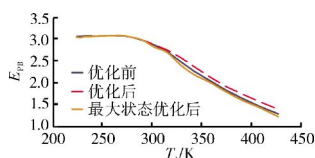


图11 最大状态 E_{PR} 调节规律

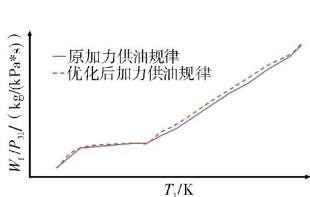


图12 加力供油规律

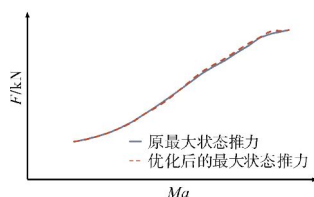


图13 最大状态推力

6 结论

(1)本文针对混合排气涡扇发动机调节规律进行了分析, W_f 主要用来调节发动机的 n_1 、 n_2 和 T_6 , A_8 用来调节 E_{PR} ,当发动机工作在中间状态时, W_f 和 A_8 存在最优的组合,当发动机工作在加力状态时, W_f 、 W_{fa} 和 A_8 存在最优的组合。根据优化结果发现,在发动机中间状态下通过收小喷口能够获得较大的推力,在最大(或加力)状态下可通过增大喷口同时提高加力供油的方式获得较大的加力推力;

(2)介绍了1种基于排挤机制的小生境遗传算法,并采用1种多峰值2变量的函数进行测试,测试结果表明,该遗传算法能够得到该测试函数的局部最优解和全局最优解;

(3)将发动机模型作为目标函数带入小生境遗传算法中,并给定一定的约束条件和惩罚机制,对遗传算法参数进行优化,在种群规模为20、交叉概率为0.8、变异概率为0.004时,能够使进化代数缩减到30以内,减少了优化过程的计算量,提高了效率;

(4)采用遗传算法进行发动机调节规律的优化设计,摆脱了传统的人工反复迭代的设计过程,提高了发动机调节规律的设计效率。

参考文献:

- [1] 廉筱纯,吴虎. 航空发动机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2005:195-231.
LIAN Xiaochun, WU Hu. Aeroengine principle [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005: 195-231. (in Chinese)
- [2] 尹大伟. 航空发动机模型求解算法及性能寻优控制中的参数估计研究[D].长沙:国防科技大学,2011.
YIN Dawei. Algorithms for solving aeroengine nonlinear mathematical model and parameter estimation in performance-seeking control [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] 王银年. 遗传算法的研究与应用——基于3PM交叉算子的退火遗传算法及应用研究[D].江苏无锡:江南大学,2009.
WANG Yinnian. The research and application of genetic algorithm and the research of its application [D]. Jiangsu Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)
- [4] 周伟. 基于聚类方法的小生境遗传算法研究 [D].长沙:湖南大学,2008.
ZHOU Wei. The research on niche genetic algorithm based on clustering [D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)
- [5] 曹道友. 基于改进遗传算法的应用研究[D].合肥:安徽大学,2010.
CAO Daoyou. Research and applications base on improved genetic algorithm [D]. Hefei: Anhui University, 2010. (in Chinese)
- [6] Srinivas M, Patnaik L. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-666.
- [7] 邹朝兰.某型涡扇发动机控制计划研究[C]//探索 创新 交流——第三届中国航空学会青年科技论坛文集(第三集).北京:航空工业出版社,2008:266-275.
ZOU Chaolan. Research on control plan of certain turbine fan engine [C] // Exploration, Innovation, Communication The third China Aviation Society Youth Science and Technology Forum (third sets). Beijing: Aviation Industry Press, 2008: 266-275. (in Chinese)
- [8] 梁宇宁. 航空涡扇发动机建模与控制规律研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
LING Ningning. Reserch on turbo-shaft engine modeling and control law [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [9] 袁小川. 涡扇发动机控制规律及主系统仿真研究[D].西安:西北工业大学,2007.
YUAN Xiaochuan. Simulation study of control law and main system of turbofan engine [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [10] 朱之丽,李东. 高推重比航空发动机调节规律分析[J]. 航空动力学报,1998,13(2):153-156.
ZHU Zhili, LI Dong. Analysis of control schedules for high thrust-weight ratio turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 1998,13(2):153-156. (in Chinese)
- [11] 陈江宁,王和平,张毅. 客机机翼重量估算的自适应遗传算法研究 [J]. 计算机仿真,2011,28(5):97-102.
CHEN Jiangning, WANG Heping, ZHANG Yi. Studies on adaptive genetic algorithm applied to wing weight calculation for civil airplanes [J]. Computer Simulation, 2011, 28(5):97-102. (in Chinese)
- [12] 吕卉. 基于空间交配遗传算法的收敛性分析[D].湖南湘潭:湘潭大学,2010.
LYU Hui. The convergence analysis of genetic algorithm based on space mating [D]. Hunan Xiangtan: Xiang Tan University, 2010. (in Chinese)
- [13] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999:32-76.
ZHOU Ming, SUN Shudong. Genetic algorithms theory and applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 32-76. (in Chinese)
- [14] De Jong K A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. University of Michigan, 1975.
- [15] 童凯生. 航空涡轮发动机性能变比热计算方法[M].北京:航空工业出版社,1991:13-19.
TONG Kaisheng. Calculation method of performance of aviation turbine engine with variable specific heat [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1991: 13-19. (in Chinese)

(编辑:刘静)