

基于蜂群算法的变循环发动机最小耗油率优化

骆广琦, 李游, 吴涛, 胡神鑫, 曾剑臣
(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要:性能寻优控制是使变循环发动机满足长寿命、低油耗和大推力需求的主要途径,也是实现飞机推进系统综合控制的关键技术。基于双外涵变循环发动机非线性数学模型,在满足发动机各部件物理约束条件和推力条件下,采用人工蜂群算法对变循环发动机典型亚声速巡航点($H=11\text{ km}$, $Ma=0.8$)耗油率进行了寻优分析,找到了耗油率最小条件下发动机 6 个几何可调参数、5 个发动机循环参数最优值。结果表明:亚声速巡航点的耗油率在优化后比优化前降低了 4.5%,从而证实人工蜂群算法能够完成变循环发动机多维优化问题。

关键词:变循环发动机;性能寻优;人工蜂群算法;耗油率

中图分类号:V231.3

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.01.001

The Minimum Fuel Consumption Optimization of Variable Cycle Engine Based on Artificial Bee Colony Algorithm

LUO Guang-qi, LI You, WU Tao, HU Shen-dao, ZENG Jian-chen

(Academy of Aeronautics and Astronautics Engineering, Airforce Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Performance seeking control is the main way to meet the needs of keeping Variable Cycle Engine (VCE) long-life, low fuel consumption and large thrust, it is also the key technology to realize the Integrated Flight of Propulsion Control (IFPC). Based on Double Bypass Variable Cycle Engine (DBVCE) nonlinear mathematical model, by satisfying the physical constrains and thrust condition of engine, the Artificial Bee Colony(ABC) has been adopted to the fuel consumption optimization analysis of VCE typical subsonic cruise point ($H=11\text{ km}$, $Ma=0.8$). Six engine geometric variable parameters and five engine cycle parameters are found under the lowest specific fuel consumption condition. The results showed that the optimized fuel consumption is 4.5% lower than before, thus confirming that the problem of VCE multidimensional optimization can be solved by the ABC.

Key words: variable cycle engine(VCE); performance optimization; Artificial Bee Colony algorithm; fuel consumption

0 引言

变循环发动机 (Variable Cycle Engine, VCE) 可通过变几何部件的调节,改变发动机的热力循环参数,以在飞行包线的不同区域获得最优性能,这是变循环发动机的设计思想^[1-2]。

航空发动机性能寻优控制是飞行/推进系统综合控制的关键技术^[3]。国外已经开展了多个研究计划^[4-9],但由于变循环发动机可调参数多,其性能寻优难度较大,国内外公开的研究资料较少,而传统方法如线性规划法等局限性较大。

人工蜂群算法(Artificial Bee Colony Algorithm, ABC)是 1 种建立在群体智能上的仿生优化算法。D. Karaboga 于 2005 年提出了基于蜂群采蜜过程的人工蜂群算法,并应用到函数的数值优化问题上^[10]。Omkar 等^[11]提出了基于向量评价的多目标人工蜂群算法。在近年来的一些相关研究中^[12-13],相比于遗传算法、微粒群算法、模拟退火算法等其他优化算法,人工蜂群算法在收敛速度、计算精度等方面性能更好,适合求解航空发动机等复杂机械的优化问题。

本文采用人工蜂群算法对双外涵变循环发动机亚声速巡航状态进行寻优,在满足发动机各部件安全

收稿日期:2015-06-03

作者简介:骆广琦(1971),男,教授,研究方向为航空发动机总体设计、性能评定与数值仿真;E-mail:78758909@qq.com。

引用格式:骆广琦,李游,吴涛,等.基于蜂群算法的变循环发动机最小耗油率优化[J].航空发动机,2016,42(1):1-5. LUO Guangqi, LI You, WU Tao, et al. The minimum fuel consumption optimization of variable cycle engine based on artificial bee colony algorithm[J]. Aeroengine, 2016, 42(1): 1-5.

工作的约束条件下,通过发动机模型与蜂群算法程序结合进行寻优,充分挖掘发动机的性能潜力,满足任务需要。

1 寻优问题描述

1.1 变量选取

本文所研究对象为如图 1 所示的双外涵变循环发动机^[2],其控制变量包括

$$X=[I_{Fan}, I_{CDFS}, I_{HPC}, I_{LPT}, A_{BVABI}, A_8]^T$$

式中: I_{Fan} 为风扇进口导流叶片角度; I_{CDFS} 为核心机驱动风扇级进口导流叶片角度; I_{HPC} 为高压压气机进口导流叶片角度; I_{LPT} 为低压涡轮导流叶片角度; A_8 为尾喷管出口截面面积; A_{BVABI} 为后混合器面积。

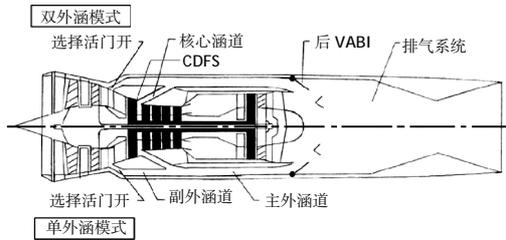


图 1 双外涵变循环发动机

1.2 约束条件

寻优过程的前提是确保发动机在特定的安全工作限制下,即发动机不超温、超转、有足够的喘振裕度。构成优化的约束条件描述为

$$\text{s.t.} \begin{cases} F \geq F_{\text{const}} \\ n_L \leq n_1 \\ n_L \leq n_2 \\ IGV_{\text{min}} \leq IGV \leq IGV_{\text{max}} \\ SM > SM_{\text{min}} \\ T_4^* \leq T_{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为推力; T_4^* 为涡轮前进口温度; n_L 、 n_H 为低、高压转子相对转速; S 为喘振裕度。

1.3 目标函数

按不同的控制需求,性能寻优控制可分为最大推力、最低油耗和最低排气温度等^[14-15]。亚声速巡航状态下的控制模式是在保持推力满足要求的前提下降低耗油率,从而增加飞行航程以及提高战斗机的作战半径。本文假设发动机采用低压转子转速不变的调节规律研究优化问题,最终描述为

min sfc

$$\text{s.t.} \begin{cases} n_H \leq n_{\text{const}} \\ F \leq F_{\text{const}} \\ T_4^* \leq T_{\text{max}} \\ S > S_{\text{min}} \\ a \leq X \leq b \end{cases} \quad (2)$$

式中: X 为 6 个控制变量, n_H 、 T_4^* 、 S_{Fan} 、 S_{HPC} 、 S_{CDFS} 为发动机的 5 个循环参数。

2 人工蜂群算法

2.1 算法原理

在 ABC 算法中,蜂群大体可以分为以下 3 类:引领蜂、跟随蜂、侦查蜂^[3]。首先,由引领蜂去寻找蜜源并进行记忆,进行比较并对符合要求的蜜源作标记;然后,引领蜂释放信号“招来”跟随蜂,跟随蜂在所设定的机制下选取合适的蜜源并在其附近搜索新蜜源,反复循环寻找最佳蜜源;最后,若某个食物源或某个蜜源不符合要求则被舍弃,生成侦查蜂随机地寻找新的蜜源。

在 ABC 算法中,每个蜜源的位置代表了优化问题每个可能的解,蜜源的花蜜数量代表解的质量(适应度— fit_i)

$$fit_i \begin{cases} \frac{1}{1+fit_i} & (fit_i \geq 0) \\ 1+abs(fit_i) & (fit_i < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_i 为目标函数。

ABC 算法含有 N 个初始解(N 为蜜源数量)。每个解 $x_i(i=1, 2, \dots, N)$ 是 D 维的向量(D 为需要进行的优化参数个数,即本文中的控制变量)。引领蜂先对蜜源进行 1 次搜索,并选择花蜜量(适应度)多的蜜源。所有的引领蜂都完成搜索后,在舞蹈区把蜜源的信息传达给跟随蜂,跟随蜂根据所得到的信息按照一定概率(即蜜源质量)选择蜜源。随后,跟随蜂也进行 1 次邻域搜索,并选择较好的蜜源。跟随蜂按照概率值 p_i 选择蜜源

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^N fit_i} \quad (4)$$

式中: fit_i 是第 i 个蜜源的适应度值。

引领蜂和跟随蜂按式(5)进行邻域搜索

$$V_{ij} = X_{ij} + R_{ij} \cdot (X_{ij} - X_{kj}) \quad (5)$$

式中: V_{ij} 为第 i 个蜜蜂、第 j 维对应搜索后的位置, x_{kj} 随机选择, 不等于 i 的蜜源 k 的第 j 维位置; R_{ij} 是 1 个在 $[-1, +1]$ 的随机数, 随着搜索进行, 各蜜源逐渐靠近, 邻域范围逐渐减小。

在 ABC 算法中, 有 1 个重要的控制参数“limit”, 是为防止陷入局部最优而用来记录某个蜜源被更新的次数。假定某个蜜源在 limit 次循环后仍没有提高, 就将被抛弃, 与这个蜜源相对应的引领蜂转变为侦查蜂查找新的蜜源。

综上, 人工蜂群算法有较强的全局搜索能力, 不容易陷入局部最优, 并在收敛速度和稳定性上较其它算法有所提高。

2.2 算法流程

ABC 算法流程如下:

- (1) 初始化, 产生初始种群;
- (2) 通过目标函数计算出每个解的对应值并进行比较, 记录满足要求的蜜源;
- (3) 引领蜂根据式(5)开采新蜜源;
- (4) 比较前后蜜源优劣, 若搜索后的蜜源优于搜索前的蜜源, 则由搜索后蜜源取代搜索前蜜源, 反之, 继续开采搜索前蜜源;
- (5) 计算每个蜜源对应的概率值, 跟随蜂根据蜜源处的引领蜂释放的花蜜信息, 按照概率的大小选择蜜源, 并在其附近按式(5)搜索新蜜源;
- (6) 假如某些蜜源经 limit 次循环后没有变化(即陷入局部最优), 则放弃该蜜源, 相应引领蜂变成侦查蜂, 查找新蜜源;
- (7) 若不满足终止条件(即已达到最大循环代数或找到最优解), 则跳回(5)重新搜索, 直至满足终止条件。否则, 输出最优解。

3 仿真结果

亚声速巡航状态寻优过程使用双外涵变循环发动机的稳态模型和人工蜂群算法结合, 通过人工蜂群算法程序调用发动机程序从而实现寻优。参数设置如下: 种群数设为 50(即, 引领蜂和跟随蜂的个数均为 25), $D=5$, $limit=50$, 相应的最大迭代次数为 500, 寻优过程的总流程如图 2 所示。

本文选取 $H=11$ km, $Ma=0.8$ 这一典型的亚声速巡航工作点进行寻优, 采用低压转子为常数的调节规律($n_L=85\%$)。VCE 在双外涵模式下时, A_{sel} 选择活门

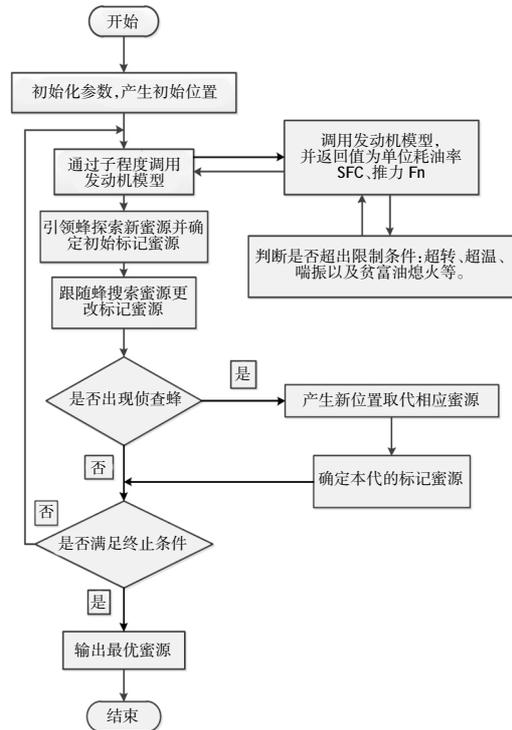


图 2 基于人工蜂群算法的亚声速巡航状态性能优化流程

完全打开。设定为

$$\begin{cases} F_{const}=20000 \text{ N} \\ T_{max}=1500 \text{ K} \\ S=20\% \end{cases} \quad (6)$$

优化结果见表 1。

$$X=[I_{Fan}, I_{CDFS}, I_{HPC}, I_{LPT}, A_{BVABI}, A_8]^T = [2.89, 8.04, 0.67, 3.02, 0.84, 1.28]$$

表 1 亚声速巡航状态寻优结果

几何部件变量	基准	优化	发动机性能参数	基准	优化
$A_{sel} / \%$	100	100	F / N	24425	20025.9
$I_{GVfan} / (^\circ)$	0	2.89	SFC / $\text{kg} \cdot (\text{N} \cdot \text{h})^{-1}$	0.0930	0.0887
$I_{GVCDFS} / (^\circ)$	0	8.04	$S_{Fan} / \%$	25.42	27.67
$I_{GVHPC} / (^\circ)$	0	0.67	$S_{CDFS} / \%$	22.37	23.58
$I_{GVLPT} / (^\circ)$	0	3.02	$S_{HPC} / \%$	26.88	33.17
$A_{BVABI} / \%$	100	84	T_4^* / K	1502.709	1353.049
$A_8 / \%$	100	128	$n_H / \%$	89.4	85.3
—	—	—	B	0.4258	0.5597
—	—	—	$W_a / \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	43.468	44.877

从表 1 中可见, 寻优后发动机的耗油率较之前未寻优时有明显降低, 在推力满足条件的前提下, 优化后耗油率 SFC 减少 $0.0042 \text{ kg} \cdot (\text{N} \cdot \text{h})^{-1}$, 为原耗油率的 4.5%, 整体燃油流量也随之降低。

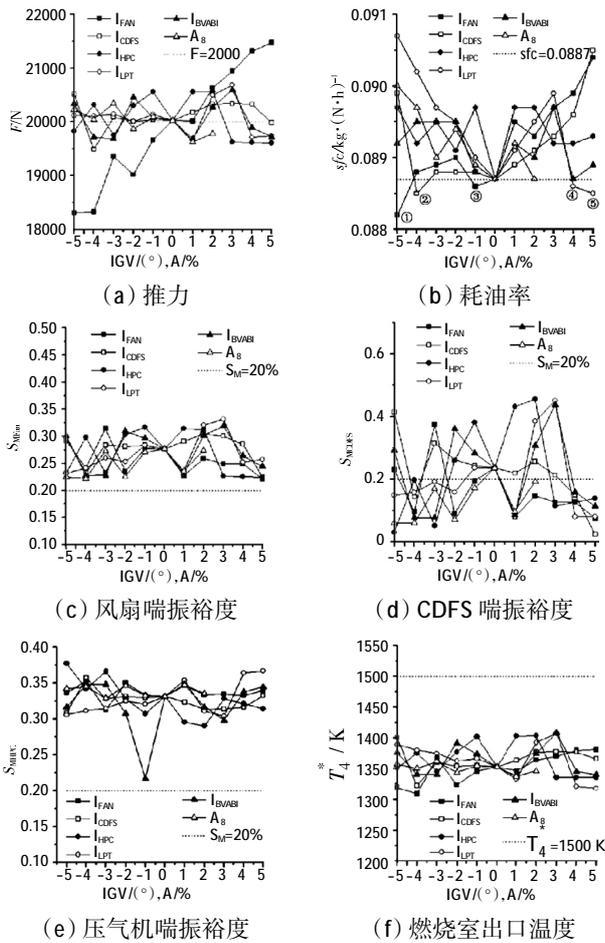


图 3 单变量调节对双外涵模式 VCE 性能的影响

4 结果分析

取飞行状况为 $H=11\text{ km}$, $Ma=0.8$, 该点为飞机比较典型的亚声速巡航工作点。采用 $n_L=85\%$ 的调节规律, 取发动机寻优后为标准见表 1, 分别对 I_{FAN} 、 I_{CDFS} 、 I_{HPC} 、 I_{LPT} 、 A_{BVABI} 、 A_8 单独进行调节, 其中 I_{FAN} 、 I_{CDFS} 、 I_{HPC} 、 I_{LPT} 变化范围为 $[-5^\circ, +5^\circ]$, A_8 的变化范围为 $[-5\%, +2\%]$, A_{BVABI} 的变化范围为 $[-5\%, 5\%]$, 以研究在双外涵模式下单变量调节以上 6 个变量对发动机性能的影响, 计算结果如图 3 所示。

结合表 1 和图 3 可见, 单变量调节时, 周围仍有点的耗油量小于优化值, 但通过约束调节中的 F 、 S_{CDFS} 的对比不难看出, 周围点不符合约束条件, 所以优化结果正确。

5 结论

本文利用人工蜂群算法研究了变循环发动机的最小耗油率优化问题, 得到如下结论:

(1) 人工蜂群算法由于收敛快、精度高, 可以解决

变循环发动机的多变量优化问题, 优化后变循环发动机的最小耗油率有明显改善, 降幅达到 4.5%;

(2) VCE 在典型亚声速巡航点工作时, 风扇导叶角度的调节对发动机性能影响非常显著, 合理调节风扇导叶角度可以更大程度发挥 VCE 性能;

(3) CDfs 喘振裕度对变几何部件调节较为敏感, 在优化过程中要尤其注意 CDfs 的可用稳定裕度。

以上结论均为仿真计算所得, 还有待进一步试验验证。下一步将通过人工蜂群算法对发动机推力和稳定性进行优化。

参考文献:

- [1] Johnson J. E. Variable cycle engine developments at General Electric 1955-1995[R]. AIAA-97-15033.
- [2] 方昌德. 变循环发动机[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(3):1-5. FANG Changde. Variable cycle engines [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(3):1-5. (in Chinese)
- [3] Johnson J. E. Progress in astronautics and aeronautics [M]. America: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996:105-107.
- [4] 袁春飞, 孙健国, 熊智, 等. 推进系统优化控制模式研究[J]. 航空动力学报, 2003, 19(1):159-163. YUAN Chunfei, SUN Jianguo, XIONG Zhi, et al. A study of propulsion optimization control modes [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 19(1):159-163. (in Chinese)
- [5] 刘旭东, 邓小宝, 高扬. 某涡扇发动机最小油耗模式性能优化算法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(12):74-77. LIU Xudong, DENG Xiaobao, GAO Yang. Performance optimization of turbofan engine minimizing fuel consumption mode[J]. Computer Simulation, 2009, 26(12):74-77. (in Chinese)
- [6] 孙丰诚, 孙健国. 基于序列二次规划算法的发动机性能寻优控制[J]. 航空动力学报, 2003, 20(5):862-867. SUN Fengcheng, SUN Jianguo. Aeroengine performance seeking control based on sequential quadratic programming algorithm [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 20(5):862-867. (in Chinese)
- [7] 朱之丽, 王晓波. 高推重比涡扇发动机性能寻优分析研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3):260-264. ZHU Zhili, WANG Xiaobo. Performance optimization of high thrust-weight ratio turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(3):260-264. (in Chinese)
- [8] 王芳, 樊思齐, 吴丹, 等. MAPS 方法在航空发动机性能寻优控制中的应用[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3):503-507. WANG Fang, FAN Siqi, WU Dan, et al. Study of MAPS methods for turbofan engine performance seeking control [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3):503-507. (in Chinese)
- [9] 黄红超, 王占雪, 刘增文, 等. 基于 iSIGHT 的变循环发动机性能优化[J]. 机械设计与制造, 2012(2):217-219.

- HUANG Hongchao, WANG Zhanxue, LIU Zengwen, et al. A numerical simulation system of the variable cycle engine[J]. Machinery Design and Manufacture, 2012(2): 217-219. (in Chinese)
- [10] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Technical report TR06.
- [11] Omkar S N, Sentihlnath J, Khandelwal R, et al. Artificial Bee Colony (ABC) for multi-objective design optimization of composite structures [J]. Applied Soft Computing, 2011, 8(1): 489-499.
- [12] Karaboga D, Basturk B. On the performance of Artificial Bee Colony (ABC) algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 687-697.
- [13] Karaboga D, Akay B. A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 214(1): 108-132.
- [14] 任新宇, 杨育武, 樊思齐. 推进系统综合性能寻优控制研究[J]. 推进技术, 2010, 31(1): 62-64.
- REN Xinyu, YANG Yuwu, FAN Siqi. Study on propulsion system overall performance seeking control algorithm[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(1): 62-64. (in Chinese)
- [15] 骆广琦, 李游, 刘琨, 等. 变循环发动机组合变几何调节方案[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10): 2273-2278.
- LUO Guangqi, LI You, LIU Kun, et al. Combined variable geometry regulation schemes for variable cycle engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10): 2273-2278. (in Chinese)

(编辑: 赵明菁)