

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 05. 016

# 基于 CAFSC 算法的航空发动机多管路智能布局

张 禹<sup>1</sup>,白晓兰<sup>2</sup>

( 1. 东北大学 机械工程与自动化学院,辽宁 沈阳 110819 ;2. 沈阳化工大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110142 )

**摘 要 :** 针对航空发动机多管路布局问题 ,运用协同进化的思想 ,结合混沌人工鱼群算法 ,提出了基于混沌人工鱼群协同进化算法的航空发动机多管路智能布局方法 .该方法将每个管路对应一个种群 ,一方面采用混沌人工鱼群算法使各物种在自己的种群中进行独立进化 ,另一方面采用合作型协同进化方法对由选取的代表构成的系统模型进行进化以使多管路布局达到全局最优 .该算法不仅避免了在管路增多情况下的组合爆炸现象 ,而且不用考虑布局顺序从整体上优化管路布局 .

**关 键 词 :** 航空发动机 ;多管路智能布局 ;混沌人工鱼群算法 ;协同进化算法 ;工程规则

**中图分类号 :** V 23      **文献标志码 :** A      **文章编号 :** 1005 - 3026( 2016 )05 - 0683 - 05

## Intelligent Multi-pipes Layout for Aero-Engine Based on CAFSC Algorithm

ZHANG Yu<sup>1</sup> ,BAI Xiao-lan<sup>2</sup>

( 1. School of Mechanical Engineering & Automation , Northeastern University , Shenyang 110819 , China ;  
2. School of Mechanical Engineering , Shenyang Univesity of Chemical Technology , Shenyang 110142 , China.  
Corresponding author : ZHANG Yu ,E-mail : zy4097534@ 126. com )

**Abstract :** For the issue of multi-pipes layout for aero-engine , the chaos artificial fish swarm algorithm-based co-evolutionary ( CAFSC ) algorithm was applied to the intelligent multi-pipes layout , utilizing the idea of co-evolution and combining with the chaos artificial fish algorithm. In the algorithm , every pipe was considered as a population. On the one hand , every population was evolved independently by the chaos artificial fish swarm algorithm. On the other hand , choosing the representation to create the system model , the optimal pipe-routing was achieved by means of mutual collaboration. Facing the increasing pipes , the algorithm avoided the combination explosion , and optimized the pipe-routing on the whole regardless of the layout sequence.

**Key words :** aero-engine ; intelligent multi-pipes layout ; chaotic artificial fish swarm algorithm ; co-evolutionary algorithm ; engineering rules

管路布局设计的智能化能够提高布局设计效率和质量 ,减轻设计人员负担 ,缩短航空发动机设计周期和减少制造成本 .因此 ,管路智能化布局设计已经成为国内外学者研究热点之一 .樊江等<sup>[1]</sup>应用遗传算法对航空发动机的管路布局的优化设计进行了研究 .该方法在种群迭代计算过程中 ,需要应用已有的管路路径规划算法评价每一个个体 ,这个过程比较耗时 .Liu 等<sup>[2]</sup>采用自适应曲面可视图布管算法对航空发动机管路布局进行了优化设计 .该算法适用于分层场合非正交走向的管

路路径规划 .白晓兰等<sup>[3]</sup>提出了基于工程规则和空间离散的航空发动机管路布局方法 .这种方法可以求得符合工程规则的可行解、局部最优解 .刘检华等<sup>[4]</sup>在虚拟样机上进行了人机交互与自动推理相结合的管路布局设计 .该方法在一定程度上提高了管路布局的效率 ,但设计结果依赖于设计人员的经验 .通过上述的研究发现 ,虽然国内外学者做了很多有意义的研究工作 ,但是大多数研究集中在单管路布局 ,即仅考虑管路自身和静态的管路布局环境 .而在实际工程应用中 ,管路布局

不只存在单管路布局,还存在多管路布局,即不仅要考虑布局环境和自身的约束条件,还要考虑其他管路布局情况.而协同进化算法<sup>[5-7]</sup>可以对复杂系统内的各控制变量进行合理的种群划分,并通过由各种群组成的生态系统的协同进化而取得系统的整体优化解.因此,本文基于混沌人工鱼群协同进化(chaos artificial fish swarm algorithm-based co-evolutionary, CAFSC)算法对航空发动机多管路智能布局进行了研究,并取得了较好的效果.

1 管路布局问题建模

1.1 布管空间建模

位于内机匣与短舱之间的回转空间为航空发动机管路布管空间,存在着如燃油系统等障碍.图 1 为航空发动机管路系统布管空间的简化模型.

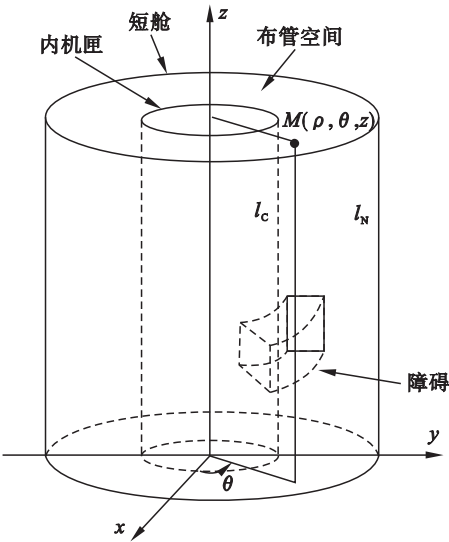


图 1 航空发动机管路布局空间简化模型  
Fig. 1 Simplified model of the pipe layout space for aero-engine

由于内机匣外表面和短舱内表面可以认为某曲线绕某直线旋转所生成的回转面或近似回转面,所以布管空间可表示如下.

设短舱内表面与内机匣外表面的母线  $l_N$ 、 $l_C$  分别表示为

$$l_N: \begin{cases} f_N(\rho, z) = 0 & (0 \leq z \leq h_0) \\ \theta = 0 \end{cases}, \tag{1}$$

$$l_C: \begin{cases} f_C(\rho, z) = 0 & (0 \leq z \leq h_0) \\ \theta = 0 \end{cases}, \tag{2}$$

式中  $h_0$  表示机匣轴向长度.

为了表达方便,将  $l_N$  与  $l_C$  分别表示为  $\rho_N = f_N(z)$  与  $\rho_C = f_C(z)$ . 因而,布管空间可表示为

$$\left. \begin{aligned} f_C(z) < \rho < f_N(z) \\ 0 \leq \theta < 2\pi \\ 0 < z < h_0 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

此外,依据最小扇环体包容盒原则,布管空间中的障碍可表示为

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \\ \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \\ z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中  $[\rho_{\min}, \rho_{\max}] \times [\theta_{\min}, \theta_{\max}] \times [z_{\min}, z_{\max}]$  为障碍包容盒在柱面坐标系下的取值范围.

1.2 管路布局数学模型

1.2.1 目标函数

对管形设计进行规整化,即管路在三维空间布局时,敷设路径可看成由多段折线组成,折线交点为节点.因此,路径采用变长度节点位置编码的方式:

$$\text{path} = \{(x_S, y_S, z_S), \dots, (x_i, y_i, z_i), \dots, (x_T, y_T, z_T)\}. \tag{5}$$

式中  $(x_i, y_i, z_i)$  表示第  $i$  个节点的空间坐标值.

那么,管路布局的目标函数如下:

$$f(l_1, \dots, l_i, \dots, l_n) = \sum_{i=1}^n l_i. \tag{6}$$

式中  $l_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}$  为第  $i$  段管路的长度  $\rho < i < n + 1$   $n$  为 1 条管路的管段数.

1.2.2 约束条件

根据管路布局的工程规则<sup>[8]</sup>,管路约束条件为

1) 弯曲数约束:

$$n_{\text{bend}} \leq M. \tag{7}$$

式中  $M$  为常数,其值由技术人员指定.

2) 弯曲半径约束:

$$r_{\text{bend}} \geq R. \tag{8}$$

式中:当  $D \geq 22 \text{ mm}$ ,  $R = 3D$ ; 当  $D < 22 \text{ mm}$ ,  $R = 2D$   $D$  为管路外径.

3) 夹角约束:

$$i_{\text{angle}} \geq \pi/2. \tag{9}$$

4) 长度约束:

$$d_{1\text{-length}} \geq 2.5r_{\text{bend}}. \tag{10}$$

5) 距离约束:

$$d_{2\text{-length}} \geq \lambda_1 L_1 + \lambda_2 L_2 + \lambda_3 L_3. \tag{11}$$

式中  $L_1$  为管路之间、管路与相邻一般附件间最小间隙;  $L_2$  为管路与热源等特殊附件间最小间隙;  $L_3$  为管路和刚性固定处的最小间隙.  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  值由技术人员指定.当管路与管路或管路与一

般附件间相邻时  $\lambda_1 = 1$   $\lambda_2 = 0$   $\lambda_3 = 0$  ;当管路与特殊附件(如热源)相邻时  $\lambda_1 = 0$   $\lambda_2 = 1$   $\lambda_3 = 0$  ;当管路与刚性固定相邻时  $\lambda_1 = 0$   $\lambda_2 = 0$   $\lambda_3 = 1$  .

6) 跨度约束 :

$$a\_angle < \pi . \tag{12}$$

1. 2. 3 数学模型

基于以上的讨论 ,将管路节点坐标作为变量 ,把管路布局中的工程要求作为约束条件 ,以最短管路路径为优化目标建立的管路布局的数学模型为

$$\min(l_1 \dots l_i \dots l_n) = \min \sum_{i=1}^n l_i. \tag{13}$$

s. t.

$$\begin{aligned} n\_bend &\leq M , \\ r\_bend &\geq R , \\ i\_angle &\geq \pi/2 , \\ d_1\_length &\geq 2.5r\_bend , \\ d_2\_length &\geq \lambda_1 L_1 + \lambda_2 L_2 + \lambda_3 L_3 , \\ a\_angle &< \pi . \end{aligned}$$

2 应用于航空发动机多管路智能布局的 CAFSC 算法

2. 1 算法原理

航空发动机多管路智能布局 CAFSC 算法的原理是 :它将每个人工鱼群种群作为独立进化的种群(每个种群中包含一个混沌映射机构) ,利用人工鱼群算法<sup>[9]</sup>的全局并行搜索和混沌优化算法<sup>[10-11]</sup>的随机性、遍历性和对初值敏感性等特点对整个解空间进行搜索 ,同时通过选取代表共同构成系统模型的方法来相互协作 ,实现互相跟踪对方的全局最优解 ,达到同步进化进而取得系统的整体优化解. 如图 2 所示 ,以 3 根管路为例来说明 CAFSC 算法. 对于物种 1(管路 1) ,在计算个体适应度时 ,需要评估其对整个系统的贡献. 因此 ,采用混沌人工鱼群算法从物种 2(管路 2)和物种 3(管路 3)各选取 1 个物种个体的代表 ,与物种 1(管路 1)的个体共同构成整个系统模型的解 ,并以该解的优劣来评估物种 1(管路 1)的个体的适应度. 同样 ,对物种 2(管路 2)和物种 3(管路 3)分别进行上述类似的进化过程. 于是 ,3 个物种(3 根管路)通过各自的进化和相互协作不断改善整个系统的适应度 ,进而获得整个系统的最优解.

2. 2 算法模型

1) 映射布局问题 :将每根管路对应一个种群 ,则管路系统变为由多种群构成的生态系统.

2) 进化种群 :通过混沌人工鱼群算法<sup>[12]</sup>实现各物种在自己的种群中进化 ,并且每一代中种群的进化顺序是随机生成的.

3) 计算个体适应度 :种群个体适应度取决于该个体所处的进化环境 ,由适应度函数来计算. 个体所处的进化环境通过最优个体配合协同方式构造 ,即由当前其他种群中的最优个体所形成的小环境和原始环境组合而成. 根据建立适应度函数的一般原则 ,适应度函数可表示为

$$fit(x) = \begin{cases} C_{\max} - P(x) , & C_{\max} - P(x) > 0 ; \\ 0 , & C_{\max} - P(x) \leq 0 . \end{cases} \tag{14}$$

式中  $C_{\max}$  为一个相对较大的数. 在建立适应度函数的时候 ,要考虑对约束的处理 ,本文采用混和惩罚函数法将有约束最优化问题转化为求解无约束最优化问题. 作为惩罚函数方法之一 ,混和惩罚函数法可同时处理具有等式和不等式的约束优化问题 ,对初始点的选择也没有特殊要求. 混和惩罚函数为

$$\begin{aligned} P(x, W) &= F(x) + W \sum_{i=1}^k [h_i(x)]^2 + \\ &W \sum_{j=1}^l [\min\{0, g_j(x)\}]^2 . \end{aligned} \tag{15}$$

式中  $F(x)$  为原目标函数 ; $h_i(x)$  是等式约束条件 ; $g_j(x)$  是不等式约束条件 ; $W$  为惩罚因子 , $W = (w_0, w_1, \dots)$  且  $w_0 < w_1 < w_2 < \dots$

因此 ,将式(13)代入式(14)和式(15) 就可以得到航空发动机管路布局的适应度函数.

4) 终止条件 :当某个整体最优解经过  $Q$  次迭代未改变 ,此时迭代终止 ;或当迭代次数达到设定的进化代数  $G$  ,此时迭代终止.

2. 3 算法流程

根据以上的讨论 ,图 3 给出了基于 CAFSC 算法的航空发动机多管路布局优化流程图.

3 仿真实验

航空发动机的简化模型包含 12 个不同附件 ,管路布局空间范围为  $\theta \in [0, 2\pi]$  ,  $\rho \in [1\,000, 1\,560]$  ,  $z \in [0, 2\,310]$  . 欲敷设 6 根管路 ,每根管路的 外径均为 12 mm ,管路与障碍(附件和管路)间的最小间隙为 3 mm ,管路弯曲半径是 24 mm ,管路的直线段长度大于等于 60 mm. 令混沌人工鱼条数  $N = 30$  ,视野  $v = \{2, 4, 6, 8\}$  ,移动步长  $L = \{1, 2, 3, 4\}$  ,拥挤度  $\delta = 0.36$  ,控制迭代次数

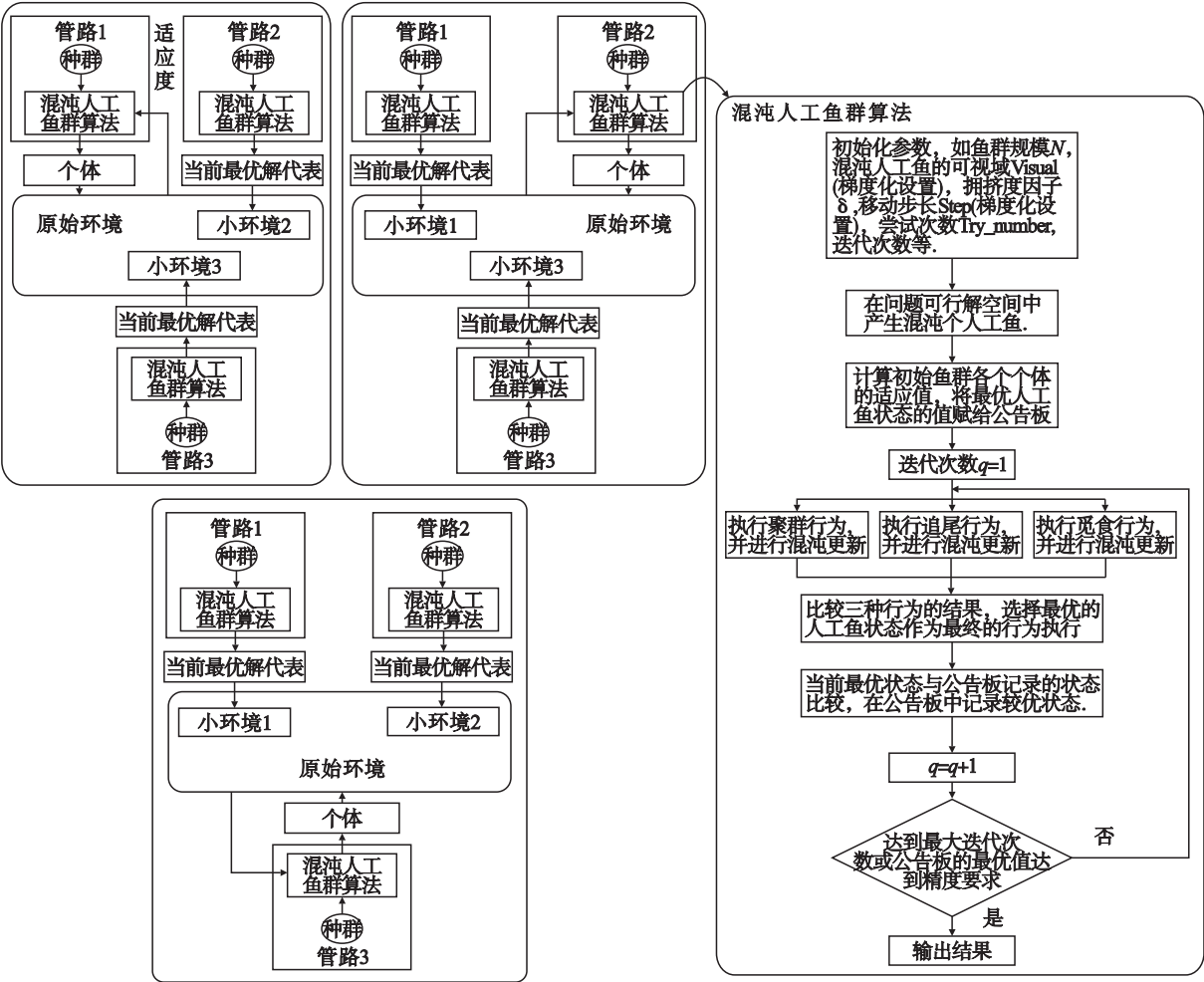


图 2 CAFSC 算法

Fig. 2 CAFSC algorithm

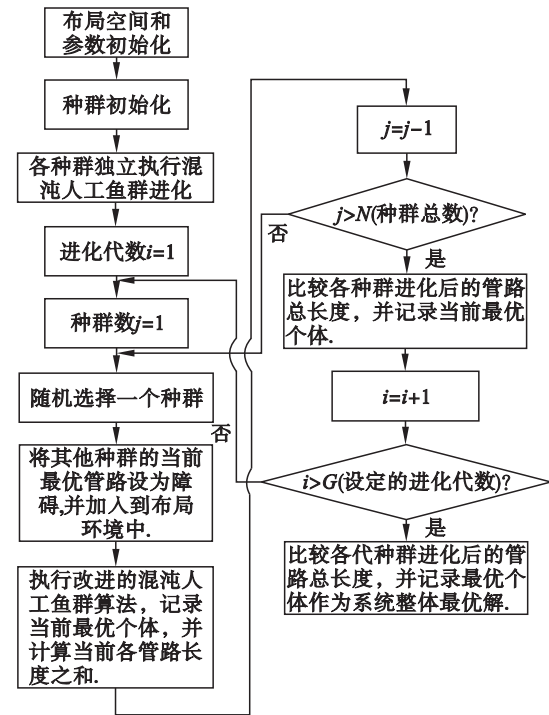


图 3 基于 CAFSC 算法的航空发动机多管路布局优化流程图

Fig. 3 The flow chart of CAFSC-based multi-pipes layout for aero-engine

$q_{\max} = 200$  ,觅食尝试次数  $\text{Try\_number} = 5$  ,进化迭代次数  $G_{\max} = 300$  .在 Matlab 和 UG 平台上 ,分别应用混沌人工鱼群算法和混沌人工鱼群协同进化算法进行了管路规划.图 4 显示了采用混沌人工鱼群算法顺次布局多根管路的布局结果 ,图 5 显示了应用混沌人工鱼群协同进化算法的并行布局多根管路的布局结果.通过图 4 与图 5 的对比可以看到 ,采用混沌人工鱼群协同进化算法进行管路布局不仅管路路径较优 ,而且管路的路径基本成束 ,避免了图 4 中局部管路编织成网、弯头较多等现象 ,利于附件及管路的安装 ,实现了管路整体布局优化.而且 ,在具有 CPU 2.93 GHz ,内存 1 GB 的个人计算机上 ,两种算法管路布局所用的时间分别为 53 s 和 47 s (其中模型文本读取消耗 41 s) ,因此 ,应用本文所提出的算法进行管路布局的计算效率较高.

另外 ,应用混沌人工鱼群协同进化算法实现了 34 根管路的整体布局优化 (如图 6 所示) ,管路布局所用的时间为 76 s (模型文本读取消耗 41 s) .对比上面应用混沌人工鱼群协同进化算法

敷设 6 根管路的时间可以发现：管路增多，并没有引起组合爆炸现象。

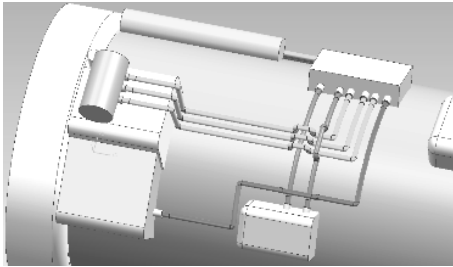


图 4 基于混沌人工鱼群算法的 6 根管路布局

Fig. 4 The layout of six pipes based on the chaotic artificial fish swarm algorithm

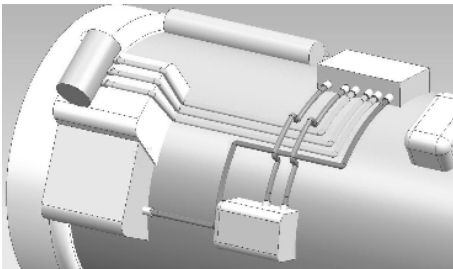


图 5 基于混沌人工鱼群协同进化算法的 6 根管路布局

Fig. 5 The layout of six pipes based on the CAFSC algorithm

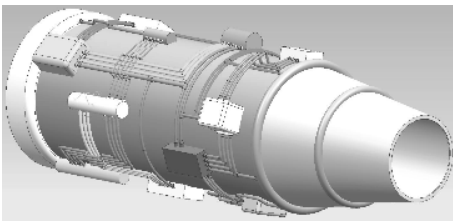


图 6 基于混沌人工鱼群协同进化算法的 34 根管路布局

Fig. 6 The layout of thirty-four pipes based on the CAFSC algorithm

## 4 结 论

1) 以协同进化算法为基础，结合混沌人工鱼群算法，本文提出了基于 CAFSC 算法的航空发动机多管路智能布局方法。

2) 该方法不用考虑布局顺序的同时从整体上优化管路布局，进而得到管路系统整体最优的布局方案。而且，由于个体所处的进化环境通过最优个体配合协同方式构造，避免了由管路增多引起的组合爆炸现象。

3) 在个人计算机上（CPU 2.93 GHz，内存 1 GB），通过对航空发动机简化模型的仿真实验验证了该多管路布局方法的可行性和有效性。

## 参考文献：

[ 1 ] 樊江，陈志英，王荣桥. 航空发动机外部管路多 Agent 协同

设计系统框架 [ J ]. 航空动力学报，2006，21( 1 )：186 - 189.

( Fan Jiang ,Chen Zhi-ying ,Wang Rong-qiao. A framework of cooperated aero-engine pipe routing multi-agent system [ J ]. *Journal of Aerospace Power* 2006，21( 1 )：186 - 189. )

[ 2 ] Liu Q ,Wang C E. A graph-based pipe routing algorithm in aero-engine rotational space [ J ]. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2015，26( 6 )：1077 - 1083.

[ 3 ] 白晓兰，张禹. 航空发动机管路智能布局 [ J ]. 机械设计与制造，2013( 2 )：56 - 59.

( Bai Xiao-lan ,Zhang Yu. Pipe routing algorithm for aero-engines[ J ]. *Machinery Design & Manufacture* ,2013( 2 )：56 - 59. )

[ 4 ] 刘检华，刘少丽，宁汝新，等. 管路数字化布局设计与制造及检测集成技术 [ J ]. 计算机集成制造系统，2015，21( 4 )：941 - 954.

( Liu Jian-hua ,Liu Shao-li ,Ning Ru-xin ,et al. Integrated technology digital pipeline routing , manufacturing and inspection[ J ]. *Computer Integrated Manufacturing Systems* , 2015，21( 4 ) 941 - 954. )

[ 5 ] Lee S M , Kim H , Myung H , et al. Cooperative coevolutionary algorithm-based model predictive control guaranteeing stability of multirobot formation [ J ]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* , 2015，23( 1 )：37 - 51.

[ 6 ] Chaaraoui A A ,Flórez-revuelta F. Optimizing human action recognition based on a cooperative coevolutionary algorithm [ J ]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* , 2014，31：116 - 125.

[ 7 ] Omidvar M N ,Li X D ,Mei Y , et al. Cooperative co-evolution with differential grouping for large scale optimization [ J ]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 2014，18( 3 )：378 - 393.

[ 8 ] 陈志英. 面向并行工程的航空发动机外部系统设计研究 [ D ]. 北京：北京航空航天大学，2003.

( Chen Zhi-ying. The study of aeroengine accessory system design oriented to concurrent engineering [ D ]. Beijing：Beihang University 2003. )

[ 9 ] 李晓磊，邵之江，钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式：鱼群算法 [ J ]. 系统工程理论与实践，2002，22( 11 )：32 - 38.

( Li Xiao-lei ,Shao Zhi-jiang ,Qian Ji-xin. An optimizing method based on autonomous animats :fish-swarm algorithm [ J ]. *System Engineering Theory and Practice* ,2002，22( 11 ) 32 - 38. )

[ 10 ] Okamoto T ,Hirata H. Global optimization using a multipoint type quasi-chaotic optimization method [ J ]. *Applied Software Computing Journal* 2013，13( 2 )：1247 - 1264.

[ 11 ] Mendel E ,Krohling R A ,Campos M. Swarm algorithms with chaotic jumps applied to noisy optimization problems [ J ]. *Information Sciences* 2011，181( 20 )：4494 - 4514.

[ 12 ] Zhang Y ,Bai X L. The intelligent pipe-routing layout for the aero-engine based on improved artificial fish swarm algorithm [ J ]. *Sensors and Transducers* 2013，25( 12 )：147 - 154.