

基于蚁群算法的飞机定检原位工作流程优化

马登武¹, 张勇亮¹, 姚成柱¹, 陈军青², 王彦¹

(1. 海军航空工程学院, 山东烟台 264001; 2. 92154 部队, 山东烟台 264001)

摘要:首次将蚁群算法(ACO)应用于飞机定检原位工作流程优化中。在建立原位工作流程优化模型的基础上,借鉴最优-最差蚂蚁系统的思想改进信息素更新机制,并采用改进的精英策略和变异特征对基本蚁群算法进行改进。实例仿真表明,改进蚁群算法在全局搜索能力和收敛速度上较基本蚁群算法有明显提高,克服了基本蚁群算法搜索时间长、容易早熟的不足。优化后原位工作完成时间较优化前缩短2.27%,验证了ACO在解决定检工作流程优化问题上的适用性。

关键词:蚁群算法;飞机定检;原位工作;流程优化模型

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)01-0147-05

Optimization of Plane's Primary Periodic Maintenance Workflow Based on Ant Colony Optimization

MA Deng-wu¹, ZHANG Yong-liang¹, YAO Cheng-zhu¹, CHEN Jun-qing², WANG Yan¹

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Regiment 92154, Yantai 264001, China)

Abstract: Ant Colony Optimization (ACO) is used to optimize plane's periodic maintenance primary workflow firstly. After the model of primary work is built, the renew-tactics of the pheromone is improved according to the method of Best-Worst Ant System (BWAS), then improved elite selecting tactics and mutation characteristic are used to improve the simple ACO. The simulation results demonstrate that, the improved ACO is much stronger in global-best solution search ability and much quicker than the simple ACO, and overcomes the deficiency of being long in search and easy to "precocity" of the simple ACO. After optimization the finish time of primary work is shorter 2.27% than before, and proves that ACO is good for the optimization of primary periodic maintenance workflow.

Key words: ACO; plane's periodic maintenance; primary work; workflow optimization model

0 引言

飞机定期检查维护(简称“定检”)是航空兵部队的一项经常性工作,也是部队内场的主要任务,对保障飞机战斗力,尤其是飞行安全具有特殊意义。定检工作分为原位和离位工作两类。原位工作是指在飞机上进行的且不允许其它工作与之并行进行的工作;其是在单位领导的统一协调下,由机械、军械、火控等专业依次组织实施。离位工作是指除原位工作之外的定检工作;其是在各专业车间主任的统一协调下,由各师和员分工负责。原位工作完成时间决定整个飞机定检工作完成时间,离位工作保障原位工作顺利进行。因此,优化原位工作流程,缩短其完成时间,将直接提高飞机定检工作效率,对提高部队内场快速保障能力具有重要意义。

目前,飞机定检原位工作基本上是按照时间段由各专业依次进行,导致专业之间以及专业内部工作的衔接不够紧凑,定检效率低下。文中将在满足工序和人员条件约束的前提下,打乱各专业按照定检时间段进行原位工作的保障模式,将原位工作分为工作准备和工作实施两个阶段,使一项工作的实施和下一项工作的准备并行进行,在此基础上对定检原位工作流程进行组合优化设计。

原位工作流程优化问题属于 NP 问题^[1],蚁群算法是解决此类问题效果较好的一种算法。受到自然界真实蚁群集体行为的启发,意大利学者 Macro Dorigo 于 1991 年,在他的博士论文中首次系统地提出了一种基于蚂蚁种群的新型优化算法——蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO),并用该方法解决了一系列组合优化问题^[2~4],取得了较好的效果。这种算法是继模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索算法、人工神经网络算法等启发式搜索算法以后的又一种新型的启发式搜索算法,具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索的

收稿日期:2011-06-10;修回日期:2011-09-17

作者简介:马登武(1964-),男,山东淄博人,教授,博导,博士,研究方向为航空武器系统运用工程;张勇亮(1986-),男,河北沧州人,硕士生,研究方向为系统工程与应用。

特征,本质上是进化算法中的一种新型启发式优化算法。蚁群算法虽然是从研究求解著名的旅行商问题(Traveling Salesman Problem,简称 TSP)^[5-8]提出的,但它在求解考试安排^[9]、数据挖掘^[10]、网络路由问题^[11]、车辆路径问题^[12,13]、图像处理^[14]、凸整数规划问题、机器人路径规划问题^[15-20]等多种组合优化问题中获得了广泛的应用并显示出了其明显的优势。文中在建立原位工作流程优化模型的基础上,提出了一种改进的蚁群算法,并使用其对应原位工作流程进行优化,计算其最短完成时间,取得了较好的优化效果。

1 原位工作流程模型

1.1 时间和人员数据

假设共有 n 项原位工作,将每项工作分为准备和实施两个阶段。优化前原位工作序号分别为 $1, 2, \dots, n$; 部队内场进行定检工作的专业共有 num 个,各专业的编制为:

$$AP = [ap_1 \quad ap_2 \quad \dots \quad ap_{num}] \quad (1)$$

优化前第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 项原位工作隶属的专业代号为 $m_i(m_i=1, 2, \dots, num)$, 则原位工作隶属的专业代号矩阵为:

$$JB = [m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_{num}] \quad (2)$$

优化前第 i 项工作的准备时间为 mt_{i1} , 实施时间为 mt_{i2} , 则原位工作的准备时间和实施时间为:

$$MT = \begin{bmatrix} mt_{11} & mt_{21} & \dots & mt_{n1} \\ mt_{12} & mt_{22} & \dots & mt_{n2} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

优化后第 i 项工作的准备时间为 mt'_{i1} , 实施时间为 mt'_{i2} , 则优化后原位工作的准备时间和实施时间为:

$$MT' = \begin{bmatrix} mt'_{11} & mt'_{21} & \dots & mt'_{n1} \\ mt'_{12} & mt'_{22} & \dots & mt'_{n2} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

优化前第 i 项原位工作的准备人员数量为 mnp_{i1} , 实施人员数量为 mnp_{i2} , 则原位工作的准备和实施人员数量为:

$$MNP = \begin{bmatrix} mnp_{11} & mnp_{21} & \dots & mnp_{n1} \\ mnp_{12} & mnp_{22} & \dots & mnp_{n2} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

1.2 约束条件

优化后第 i 项和第 $i+1$ 项工作都由第 $j(j=1, 2, \dots, num)$ 个专业负责完成, 由于第 i 项工作的实施与第 $i+1$ 项工作的准备并行, 要求并行阶段所需人员总数不能超过该专业的人员编制数量, 则人员约束条件为:

$$mnp_{i,2} + mnp_{i+1,1} \leq ap_j \quad (6)$$

原位工作中存在 $sm(sm \geq 1)$ 组工序约束关系, 每组有 $sn(sn \geq 2)$ 项工作(不足 sn 项的在非零项后用 0

补齐), 组成一个约束条件矩阵 S ; 第 $si(si=1, 2, \dots, sm)$ 组约束关系中, 优化后原第 $s_{si,j}(s_{si,j}=1, 2, \dots, n; sj=1, 2, \dots, sn-1)$ 项工作的序号变为 i , 原第 $s_{si,j+1}(s_{si,j+1} \neq s_{si,j})$ 项工作的序号变为 $k(k=1, 2, \dots, n, k \neq i)$, 要求优化后第 i 项工作要在第 k 项工作实施阶段开始前完成, 即有 $i < k$ 。则工序约束条件矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1,sn} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \dots & s_{2,sn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{sm,1} & s_{sm,2} & \dots & s_{sm,sn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 目标函数

优化后第 $l(l=1, 2, \dots, n-1)$ 项工作的实施与第 $l+1$ 项工作的准备并行, 求原位工作最短完成时间, 得到第一目标函数为:

$$Z_1 = \min \{ mt'_{11} + \sum_{l=1}^{n-1} \max \{ mt'_{l,2}, mt'_{l+1,1} \} + mt'_{n2} \} \quad (8)$$

原位工作完成时间的计算如图 1 所示。

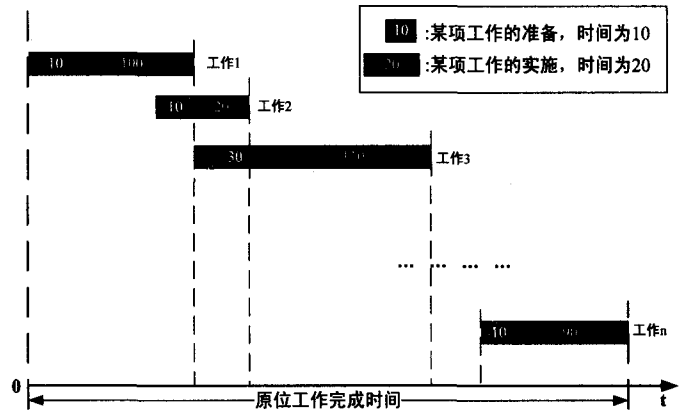


图 1 原位工作完成时间计算图

为使工作衔接尽量紧凑,减小一项工作的实施与下一项工作准备之间时间差的绝对值之和,求最短时间差的绝对值之和,得到第二目标函数为:

$$Z_2 = \min \{ \sum_{l=1}^{n-1} |mt'_{l,2} - mt'_{l+1,1}| \} \quad (9)$$

2 蚁群算法的基本原理及其改进设计

2.1 流程优化模型的蚁群算法实现

飞机定检原位工作流程优化模型可视为有约束条件的 TSP 问题,与 TSP 问题不同的是,它存在工作并行阶段,并以完成时间及相邻工作时间差的绝对值之和作为目标函数。因此,用蚁群算法解决飞机定检原位工作流程优化问题需作如下调整:

1) 由图 1 可知,相邻工作实施阶段与准备阶段的并行程度越大,原位工作完成时间越短。因此,令信息素轨迹强度为:

$$\tau_{ij} = \frac{\min\{\text{time}(i,2), \text{time}(j,1)\}}{\max\{\text{time}(i,2), \text{time}(j,1)\}} \quad (10)$$

2)由式(9)可知,一项工作的实施阶段与下一项工作准备阶段的时间差的绝对值越小,原位工作的时间差的绝对值之和越小。因此,启发信息为:

$$\eta_{ij} = 1/|\text{time}(i,2) - \text{time}(j,1) + 0.000001| \quad (11)$$

3)约束条件的处理。

(1)若不满足人员约束条件,则 $\tau_{ij} = \eta_{ij} = \text{eps}$ (eps 为一极小正值);

(2)对于工序约束条件,在蚂蚁周游完成后,按 S 中的元素逐行确定其在路径中的位置后,将其按照位置编号由小到大的顺序排列,然后将 S 中此行的元素顺序插到这些位置上,保证周游路径最终满足工序约束条件。

2.2 蚁群算法的改进

基本蚁群算法存在搜索时间长、容易早熟等缺点。因此文中通过改进路径信息素的更新机制^[21],并引进精英策略^[22]和变异算子^[23]来弥补蚁群算法的不足。

2.2.1 信息素更新机制的改进

运用文献[21]中最优-最差蚂蚁系统(Best-Worst Ant System, BWAS)的信息素更新方法,在使用基本蚁群算法局部更新基础上,进行全局最优解和迭代最差解全局更新,对最优解进行更大限度地增强,而对最差解进行削弱,使得属于最优路径的边与最差路径的边之间的信息素量差异进一步增大,从而使蚂蚁的搜索行为更集中于最优解的附近。

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^* + \Delta\tau_{ij}^- + \Delta\tau_{ij}^+ \quad (12)$$

$$\Delta\tau_{ij}^* = Q/L_{gb} \quad (13)$$

$$\Delta\tau_{ij}^- = -Q/L_{iw} \quad (14)$$

其中, L_{gb} 为全局最优解, L_{iw} 为迭代最差解。

2.2.2 精英策略

为了保存前代最优解的路径信息,并进一步增强本代中较好个体的信息素强度,文中采用了类似遗传算法的精英策略。其具体步骤为:

1)确定本代最差解,记录其路径信息,以便信息素更新时对最差解进行削弱;

2)当循环次数大于1时,用上代最优解替换本代最差解;

3)将本代所有解按照完成时间从大到小排列,用后 num 个较好解替换前 num 个较差解。

2.2.3 变异特征

为了克服蚁群算法求解时间较长的缺陷,受到遗传算法变异操作的启发,文献[23]提出了一种新的蚁群进化算法——具有变异特征的蚁群算法。通过采用逆转变异方式,设蚂蚁 k 所走的路径为: $k_0, k_1, \dots,$

k_{n-1} , ($k_0, k_1, \dots, k_{n-1} \in \{0, 1, \dots, n-1\}$), 如果满足:

$$d_{[k_{s_1}] [k_{s_2}]} + d_{[k_{s_1+1} \% n] [k_{s_2} \% n]} < d_{[k_{s_1}] [k_{s_1+1} \% n]} + d_{[k_{s_2}] [k_{s_2} \% n]} \quad (15)$$

其中, $s_1, s_2 \in \{0, 1, \dots, n-1\}$, 符号%表示整除符号,则将个体 k 路径中的 $s_1 + 1$ 到 s_2 这一段颠倒过来。改进蚁群算法的基本流程如图2所示。

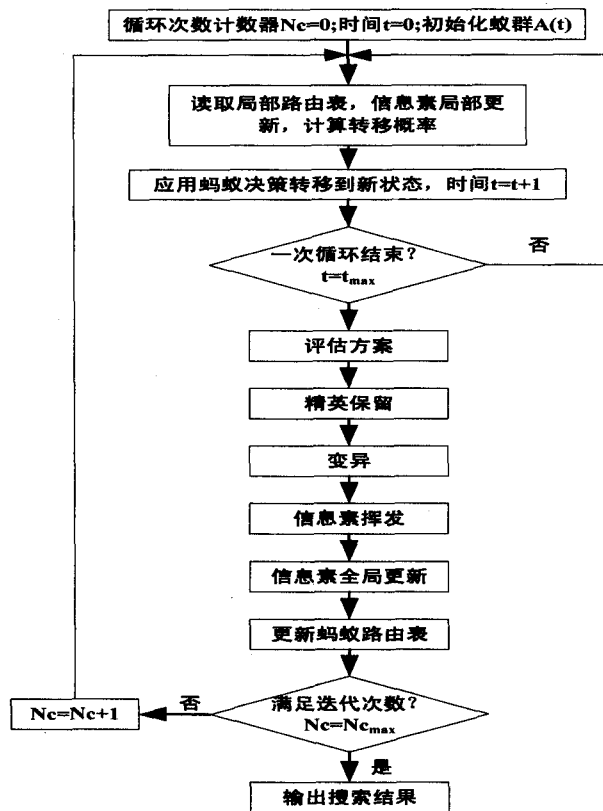


图2 改进遗传算法的基本流程

3 仿真分析

假设优化前有

$$n = 120, num = 7, AP = \{8, 11, 7, 10, 9, 7, 10\},$$

$$JB = \{5, 2, 2, 2, 2, 3, 6, 2, 7, 3, 4, 5, 3, 4, 4, 2, 5, 7, 3, 7, 4, 3, 3, 4, 3, 4, 7, 6, 5, 2, 4, 3, 6, 1, 7, 6, 4, 5, 2, 5, 3, 5, 6, 6, 3, 7, 3, 6, 2, 6, 1, 5, 2, 2, 4, 4, 4, 7, 4, 3, 2, 3, 6, 2, 7, 2, 5, 5, 4, 2, 6, 4, 4, 1, 5, 1, 3, 2, 6, 7, 1, 5, 5, 5, 4, 5, 7, 7, 3, 2, 4, 4, 4, 5, 3, 2, 2, 4, 2, 3, 3, 1, 5, 2, 1, 3, 7, 7, 2, 6, 4, 5, 3, 3, 3, 4, 2, 2, 1, 3\},$$

$$MT = \{22, 5; 18, 39; 28, 26; 27, 15; 21, 52; 13, 104; 10, 97; 6, 55; 4, 20; 22, 81; 30, 49; 13, 65; 15, 46; 27, 71; 22, 65; 28, 117; 9, 17; 4, 55; 22, 81; 4, 63; 8, 67; 7, 82; 10, 76; 14, 95; 7, 113; 18, 86; 9, 93; 3, 89; 20, 18; 9, 110; 9, 3; 17, 89; 12, 89; 27, 1; 28, 35; 20, 22; 9, 110; 3, 8; 2, 98; 28, 10; 27, 43; 17, 12; 16, 87; 3, 12; 19, 48; 14, 43; 1, 50; 19, 118; 16, 26; 20, 24; 13, 47; 24, 82; 5, 52; 20, 95; 9, 6; 21, 78; 14, 23; 18, 5; 12, 78; 15, 88; 2, 64; 9, 60; 1, 117; 17,$$

13,18,48;23,97;16,55;10,27;13,98;15,9;23,40;17,97;7,58;26,65;4,32;16,78;28,101;7,95;15,1;3,78;29,94;23,25;11,71;12,34;23,9;10,46;14,98;8,68;4,38;15,18;16,23;16,4;14,26;15,108;15,103;9,47;20,19;9,24;8,27;1,70;21,11;18,1;24,45;14,6;10,66;12,113;4,21;26,112;6,6;8,116;13,97;13,83;24,15;8,92;14,30;14,14;25,46;6,40;26,2;7,5},

其中,“;”前第一部分为某项工作的准备时间,第二部分为其实施时间;另外,不同的优化方案对应不同的 MT' ,每个 MT' 可由 MT 通过编程变换得到。

$MNP = \{2,5;2,4;3,2;3,5;3,3;1,6;3,4;2,6;3,4;1,3;4,5;3,3;3,5;2,3;3,4;1,6;3,5;2,2;2,2;2,2;4,2;4,2;3,2;1,4;1,2;3,5;2,3;3,3;3,2;4,2;2,5;2,4;4,3;1,4;4,3;1,3;2,2;3,6;1,4;3,5;4,4;4,1;3,2;2,2;2,4;2,5;3,5;2,3;3,4;2,3;1,2;2,4;3,5;3,5;4,4;4,6;3,4;4,5;1,4;4,5;2,4;2,5;3,3;4,4;4,4;3,4;2,1;2,4;3,3;3,3;2,3;2,3;4,4;4,2;3,5;1,1;3,5;3,3;4,2;1,3;2,2;2,4;2,1;4,5;3,5;3,6;2,2;4,2;3,5;1,4;1,3;3,1;2,5;3,4;3,4;3,5;4,4;2,5;3,4;3,4;1,1;1,3;2,4;2,5;3,2;3,4;2,5;2,3;1,2;4,3;2,4;3,3;2,5;1,3;2,5;1,5;3,4;3,5;1,5;3,4\},$

其中,“;”前第一部分为某项工作准备人员数量,第二部分为其实施人员数量。

$S = \{105,11,102,69;18,16,100,55;2,38,4,46;47,99,76,75;111,30,63,82\}.$

其中,使用“;”将每组约束条件区分开。

优化前原位工作中一项工作的实施与下一项工作的准备并行,其完成时间为 6694 分钟,一项工作的实施与下一项工作准备之间时间差的绝对值之和为 5066 分钟。

试验环境:CPU—AMD Athlon (tm) 64 X2 Dual Core Processor 4400 + 2.30 GHz;内存—2GB;操作系统—Windows Xp;开发程序—MATLAB 7.8。

参数设置:蚂蚁个数 $m = 50$;痕迹强度因子 $\alpha = 2$;启发信息因子 $\beta = 5$;信息素挥发系数 $\rho = 0.98$;调整系数 $Q = 1000$;最大迭代次数 $nc_{max} = 100$ 。

改进蚁群算法与基本蚁群算法相比,运行结果如表 1 所示。

表 1 仿真实验结果

| 方法 | 指标 | 运行次数 | 最优解 | 平均值 | 达到最优解的频率 | 达到最优解的平均代数 |
|--------|----|------|------|------|----------|------------|
| 改进蚁群算法 | | 20 | 6542 | 6544 | 50% | 63 |
| 基本蚁群算法 | | 20 | 6644 | 6546 | 20% | 74 |

二者的进化过程分别如图 3 和图 4 所示。

比较可以得出,改进蚁群算法在最优解的全局搜索能力及收敛速度上较基本蚁群算法有明显的提高。

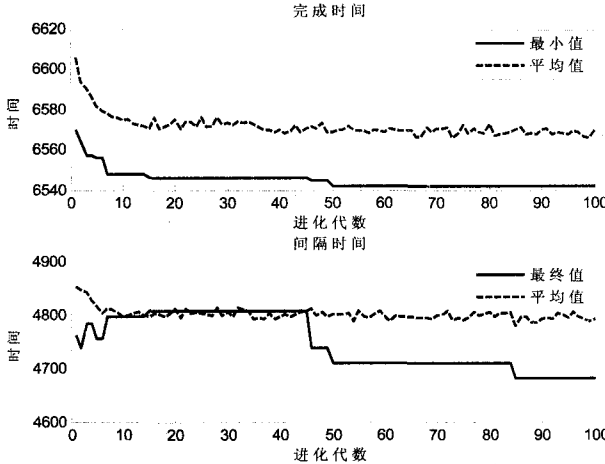


图 3 改进蚁群算法的进化过程

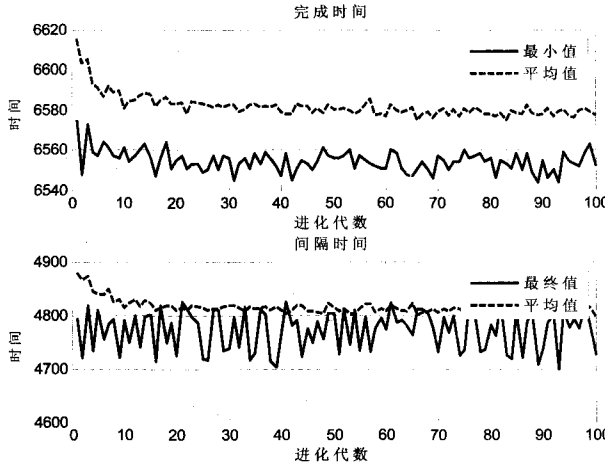


图 4 基本蚁群算法的进化过程

满足同一最优值的流程优化方案可能不止一个,考虑另外一个择优标准:所有相邻两项工作中一项工作的实施与下一项工作准备之间时间差的绝对值之和最小。即在完成时间相同的情况下,时间差的绝对值之和最短的方案优先选择,作为最优流程安排方案,其仿真结果为:

61→41→77→74→52→66→108→117→35→81→85→98→113→90→58→53→71→3→119→39→9→36→15→42→106→27→68→14→67→72→92→89→105→18→8→50→103→19→97→45→64→112→33→120→20→80→70→37→24→62→49→2→94→104→109→118→10→54→116→87→93→1→107→5→57→111→65→56→115→40→86→11→16→29→26→13→12→59→31→44→84→34→47→101→83→95→91→30→38→99→76→102→100→25→7→78→88→73→22→110→96→6→17→32→69→55→75→43→23→21→114→28→4→79→63→51→82→46→60→48

其中,加粗斜体工作为 S 中的工作。

优化后原位工作完成时间为 6542 分钟,较优化前的 6694 分钟缩短了 152 分钟,节约时间 2.27%;一项工作的实施与下一项工作准备之间时间差的绝对值之

和为 4681 分钟,较优化前的 5066 分钟缩短 385 分钟,节约时间 7.60%,优化效果显著。

4 结束语

仿真结果表明:

(1)在改进信息素更新机制并采用精英策略和变异特征后的改进蚁群算法有效弥补了基本蚁群算法搜索时间长、容易早熟的不足;

(2)使用改进蚁群算法优化后的飞机定检原位工作完成时间为 6542 分钟一项工作的实施时间与下一项工作准备时间时间差绝对值之和为 4681 分钟,提高了飞机定检原位工作效率,验证了蚁群算法在原位工作流程优化问题上的适用性;

(3)文中的方法可直接推广到飞机定检离位工作及其他工作流程优化中。

参考文献:

- [1] 朱清新,杨凡,钟黔川. 计算机算法设计与分析导论[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [2] Dorigo M, Caro G D. Ant Algorithms for Discrete Optimization[J]. Artificial Life, 1999, 5(3): 137-172.
- [3] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem[J]. BioSystems, 1997, 43: 73-81.
- [4] Colomni A. Ant System for Job-shop Scheduling[J]. JOR-BEL, 1994, 34(1): 39-53.
- [5] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [6] 王娟,王建. 一种求解 TSP 问题的改进蚁群算法[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(12): 50-52.
- [7] Stutzle T, Hoos H. The MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem[C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation and Evolutionary Programming. Indianapolis, USA: IEEE Press, 1997: 309-314.
- [8] 吴斌,史忠植. 一种基于蚁群算法的 TSP 问题分段求解算法[J]. 计算机学报, 2001, 24(12): 1328-1333.
- [9] 张华,王秀坤,孙焱. 蚁群算法在考试安排中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2003, 24(12): 62-64.
- [10] 杨彦明,陈卓,魏振钢. 基于粗糙集的智能群体文本挖掘聚类算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(2): 269-271.
- [11] 傅鹏,张得运,马兆丰,等. Ad Hoc 网络中基于模拟退火-蚁群算法的 QoS 路由发现方法[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(2): 179-182.
- [12] 黄贵玲,高西全,靳松杰,等. 基于蚁群算法的最短路径问题的研究和应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(13): 233-235.
- [13] 李文勇,王炜,陈学武. 公交出行路径蚂蚁算法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 102-105.
- [14] 王秀宏,赵胜敏. 利用蚂蚁算法求解图的着色问题[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 79-82.
- [15] 梅昊,田彦涛,祖丽楠. 动态环境下机器人路径规划的混合蚁群算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2006, 24(2): 148-152.
- [16] 朱庆保. 复杂环境下的机器人路径规划蚂蚁算法[J]. 自动化学报, 2006, 32(4): 586-593.
- [17] 朱庆保. 动态复杂环境下的机器人路径规划蚂蚁预测算法[J]. 计算机学报, 2005, 28(11): 1898-1906.
- [18] 朱庆保. 全局未知环境下多机器人运动蚂蚁导航算法[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 1890-1898.
- [19] 朱庆保,张玉兰. 基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法[J]. 机器人, 2005, 27(2): 132-136.
- [20] 李果,刘少军. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 控制工程, 2005, 12(5): 473-476.
- [21] 陈永强. 人工蚁群算法及其在组合优化中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2003.
- [22] Dorigo M, Maniezzo V, Colomni A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 29-41.
- [23] 吴庆洪. 具有变异特征的蚁群算法[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(10): 1240-1245.

(上接第 136 页)

- nected dominating sets in wireless networks[J]. WCMC, 2005, 5(8): 927-932.
- [7] 赵学锋,杨海斌,张贵仓. 基于堆的最小连通支配集高效近似算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 54-56.
- [8] Bao L C, Garcia-Luna-Aceves J J. Stable energy-aware topology management in ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 8(3): 313-327.
- [9] Wang Y, Li X. Localized construction of bounded degree and planar spanner for wireless ad hoc networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(2): 161-175.
- [10] Burkhart M, Rickenbach P V, Wattenhofer R. Does topology control reduce interference? [C]//ACM Mobihoc'04. [s. l.]: [s. n.], 2004: 9-19.
- [11] 张信明,刘琼,代仕芳,等. 移动 Ad Hoc 网络通信量相关干扰感知路由协议[J]. 软件学报, 2009, 20(10): 2721-2728.
- [12] 刘永振. 无线自组织网络干扰模型和控制的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2009.