

基于改进蚁群算法航空电缆路径规划

杨禹成, 卢洪义, 章 斌, 桑豆豆, 刘 舜

(南昌航空大学 飞行器工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 针对航空电缆在布局空间安装中存在的可靠性差, 效率低和成本高等问题, 提出了一种基于改进蚁群算法的航空电缆布局路径规划优化方法。对布线安装空间进行栅格化处理, 通过分析航空布线要求与约束条件, 对待布线安装空间进行模拟真实环境建模, 获得的建模空间用于航空电缆的二维布线路径优化。采用了向终点方向引导的转移规则, 并增加转弯拐角惩罚因子, 来改进启发函数, 减少了路径搜索的盲目性, 提高了规划路径平滑度; 采用一种自适应调整方式的信息素挥发因子, 提高算法的搜索效率和后期收敛速度; 引入了遗传变异, 避免算法陷入局部最优。在仿真实验中, 将所提出的方法与其他算法进行了对比分析并表明: 应用该算法优化后总体电缆的路径布局电缆路径明显减少、即电缆长度用量减少; 拐点数明显减少、即电缆电器性能变好, 能够提供航空发动机系统的稳定性。验证了该算法的可行性和有效性。

关 键 词: 航空电缆布局; 蚁群算法; 路径规划; 启发函数; 遗传变异

中图分类号: V263.2; TP391.9

文献标志码: A

Route planning of aviation cable based on improved ant colony algorithm

YANG Yucheng, LU Hongyi, ZHANG Bin, SANG Doudou, LIU Shun

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In view of the problems of poor reliability, low efficiency and high cost in planning space installation of aviation cable, an optimized method of route planning of aviation cable layout based on improved ant colony algorithm was proposed. The wiring installation space was rasterized, and the real environment modeling was carried out for the wiring installation space by analyzing the requirements and constraints of aviation wiring. The modeling space obtained was used to optimize the two-dimensional routing path of aviation cables. The heuristic function was improved by using the transition rule guided to the destination direction and increasing the penalty factor of turning corner, which reduced the blindness of path search and improved the smoothness of the planned path. An adaptive adjustment of pheromone volatile factor was used to improve the search efficiency and convergence speed of the algorithm. Genetic variation was introduced to avoid the algorithm falling into local optimum. In the simulation experiment, compared with other algorithms, the proposed method can significantly reduce overall cable path layout and the number of inflection points, indicating that the cable length was reduced and the cable electrical performance was better, enabling to provide the stability of the aircraft engine system. The feasibility and effectiveness of the proposed algorithm were verified.

Keywords: aviation cable layout; ant colony algorithm; route plan; heuristic function; genetic variation

收稿日期: 2022-09-20

基金项目: 江西重点基金(20201BBE51002); 南昌航空大学研究生创新专项基金(YC2021-060)

作者简介: 杨禹成(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为航空发动机测控系统设计。

引用格式: 杨禹成, 卢洪义, 章斌, 等. 基于改进蚁群算法航空电缆路径规划[J]. 航空动力学报, 2023, 38(7): 1715-1722. YANG Yucheng, LU Hongyi, ZHANG Bin, et al. Route planning of aviation cable based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(7): 1715-1722.

航空设备的设计涉及专业领域广、技术多、零部件数量多^[1-2]。作为航空设备的中枢神经系统,电缆通常位于机身狭窄空间内,在金属框架之间穿梭,因此,包括不同厚度的电源线、信号线和控制线在内的各种电缆缠绕不规则,这种具有复杂空间结构和混乱电缆布局的电气环境可能引发许多潜在故障。因电缆引起的飞行问题的主要原因包括材料技术、布局安排、电气连接、固定捆扎、安全保护、环境载荷(温度、振动、过载等)和施工标准等,美国通用电器公司分析归纳飞机发动机发生故障的原因,其中因为电缆管路损坏或失效而产生故障的比例达到了50%^[3]。电缆布局不合理是电缆失效的主要原因,因此,对航空设备电缆布局的研究变得尤为重要。

传统的电缆布局设计采用是人工式布线,由于成本高、周期长、精度低等缺点已无法满足现代设备研制和生产的需求^[4],而虚拟环境下的电缆布线设计的出现,能够实现电缆自动避障,其高效稳定的特点,特别适用于航空设备复杂的布线条件。电缆的自动布局设计可以抽象为自动路径规划问题^[5],目前学者多采用:A*算法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等作为求解最优路径的算法。唐旭晖等^[6]采用初始信息素差异化分布策略,引入随机状态转移参数,提出了一种应用在机器人移动的改进蚁群算法;袁媛^[7]结合现代化船舶的舱室结构特点,提出一种基于自适应遗传控制算法的线路布局优化模型。文献[8]将概率路线图方法(PRM)和遗传算法相结合,提出了一种新的多分支线束布局设计方法;王发麟等^[9]将混沌变异思想引入到粒子群算法中,提出一种基于多尺度混沌变异粒子群算法的三维空间电缆敷设方法;Sandukar等^[10]开发了基于遗传算法的管道布线(GAPRUS)系统,能够在存在障碍物的环境中得到无碰和高效的布线路径,但是搜索的复杂度较高;文献[11]针对蚁群算法收敛速度较慢的问题,提出了一种结合了信息素扩散和几何局部优化的蚁群算法;文献[12]针对遗传算法容易陷入局部最优解,通过在蚁群算法中引入贪心策略,能有效避免陷入局部最优,较快地得到最优解。徐小强等^[13]针对粒子群算法在搜索路径中的不合理性,引入人工蜂群算法中的跟随蜂和侦察蜂思想,提出了一种融合搜索算法;郝琨等^[14]提出了一种基于区域搜索的自适应粒子群路径规划方法,提高了搜索效率,降低了平均迭代次数。

上述研究使用不同的算法对船舶、机器人等

布线、移动路径进行研究,但是在航空设备领域的电缆布局研究相对较少。

文中首先分析航空设备的布线要求和约束条件,并以电缆最短路径最平滑为优化目标,提出了基于改进蚁群算法的电缆布局方法。

1 航空设备布线要求与约束条件分析

图1为某航空实物发动机电缆布线图,由于上面的电缆布局不规范,导致发动机上的电缆显得十分的复杂混乱,而规范的航空电缆布局,有利于减轻质量,提高系统的稳定性。



图1 航空发动机实物布线图

Fig. 1 Aero-engine physical wiring diagram

在航空设备布线中,电缆必须首先满足电气性能,以保证电流传输和信号传输,电缆接头为刚体,还应满足机械性能。此外,还应考虑环境对电缆的影响以及后期维护和使用过程中的可维护性,本节通过分别分析物理约束(电气性能、机械性能)、环境约束和可维护性约束,总结了航空发动机布线要求和定量约束,如图2所示。

1.1 物理布局分析

电缆作为航空设备中电流传输和信号传输的主要部件,其电气性能影响着以后的使用效果。电缆传输的信号会在其周围空间产生电磁场,从而对其他电缆或设备产生干扰,降低数据传输的可靠性甚至可能会损坏某些装置或设备,磁干扰已成为航空设备电缆布局研究中的一个重要问题。

电缆是噪声的主要载体,因此需要合理布线,以抑制设备内部噪声和电缆之间噪声的相互作用,噪声从电缆侵入设备的方式主要过静电感应或电磁感应。图3和图4是静电感应和电磁感应的等效电路,因此可以计算静电感应电压 U_1 和电磁感应电压 U_2 。

$$U_1 = \frac{\omega C_2 R_0 U}{\sqrt{1 + \omega R_0^2 (C_2 + C_3)^2}} \quad (1)$$

式中 R_0 为电阻值, U_1 为 R_0 两端电压, C_2 为两个

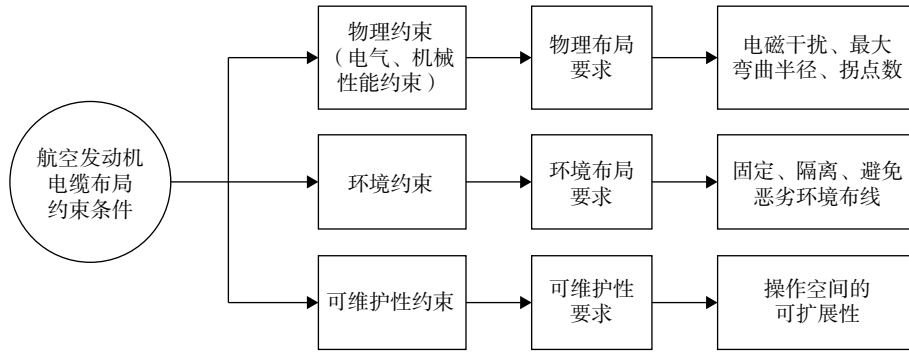


图2 电缆布局约束分析

Fig. 2 Cable layout constraint analysis

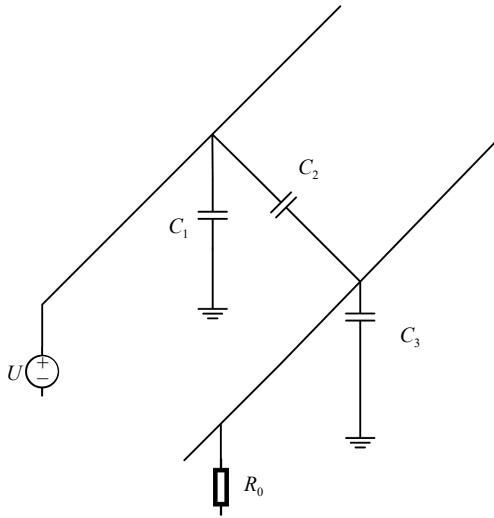


图3 静电感应等效电路

Fig. 3 Electrostatic induction equivalent circuit

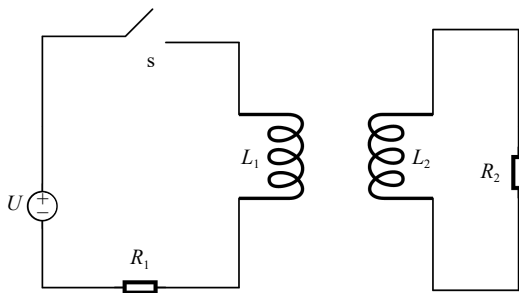


图4 电磁感应等效电路

Fig. 4 Electromagnetic induction equivalent circuit

导体之间的电容, C_1 和 C_3 都为单个导体的接地电容, ω 为电源频率。

$$U_2 = \frac{j\omega M U R_2}{L_1 L_2 (R_1/L_1 \times R_2/L_2 - \omega^2) + j\omega (R_1/L_1 + R_2/L_2)} \quad (2)$$

式中 R_1 和 R_2 为电阻值, L_1 和 L_2 为电感量, U 为供电电压值, U_2 是 R_2 两端的电压, M 是两条线路之间的互感。

根据式(1)、式(2)可以得出结论,当导体之间的距离变近,感应电压的影响也会变大。因此要降低感应电压,必须增加设备电源线与控制线之间的距离,并减少控制线与地面之间的距离^[9],而在实际应用过程中,可以使用双绞线可以有效的降低感应噪声。

此外,在航空设备中,由于设备布局和布线空间的影响,大多数电缆会多次弯曲。考虑到电缆材料性能的限制,在布局设计中必须满足电缆最小弯曲半径(R)的要求,并且尽量减少拐点数量,否则电缆性能会下降,甚至可能损坏电缆。

1.2 环境因素和可维护性分析

电缆穿过设备的各个部分,分布在机身的各个关键部位。为了避免因工作过度或其他原因引起的疲劳,必须考虑环境因素,如湿度、温度、电磁等。电缆的信号衰减受到温度的强烈影响,温度每升高 10°C , 电缆的信号衰减将增加 4%。因此,电缆不应设置在温度变化较大的区域,另一方面,潮湿环境也会影响电缆,例如,铜缆一旦遇水,其电气性能会急剧下降。

电缆良好的电缆布局设计还应满足以最少拆卸量进行检查、测试、维修和更换的要求,在拆除附近结构和系统组件以接近特定电缆的过程中,可能会带来新的污染、摩擦和其他类型的损坏。

因此航空电缆布局的约束条件可以概况为:

- 1) 电源线、控制线和信号线在接线时应分开,即使没有分开,它们之间的距离也应足够大。
- 2) 尽量减少弯曲和拐点,以减少电缆上的应力,为防止电缆移动损坏连接器,接头应牢固固定。
- 3) 接地方式和接地位置应根据信号源的性质和噪声侵入电缆的具体情况确定,以减少屏蔽网和浮动陀螺仪的波动,尽可能消除地线阻抗的影响。
- 4) 电缆应尽可能远离液体管道(燃料、液压、

氧气、水、废水)和高温区域,还应有一个不挂在液体管道和设备上的主机架来固定电缆。

5) 电缆可接近性的设计应便于实施维护、拆卸和更换,并确保维护人员可以根据维护计划大纲在不拆卸其他部件的情况下进行检查和维护(包括清洁)。

2 环境模型建立

为了更好的完成电缆的自动布局分析,这里使用栅格法,以WS10发动机为例,如图5所示:将发动机表面展开成为二维平面,成为一个一个长方形,并且将平面分成一个个等面积大小的具有位置信息的栅格,每个栅格中存储着周围环境信息量,其中黑色栅格表示发动机表面布线区域中的障碍物区、高温区、电磁干扰区、震动区等,设置为静态障碍物,白色栅格为适合布线的区域,如图6所示,每个栅格的所代表的实际长度约为300 mm,宽约为150 mm。

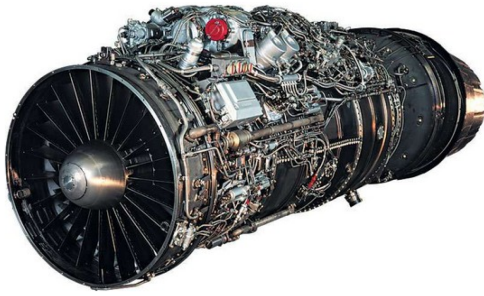


图5 WS10 发动机实物图

Fig. 5 Actual diagram of the WS10 engine

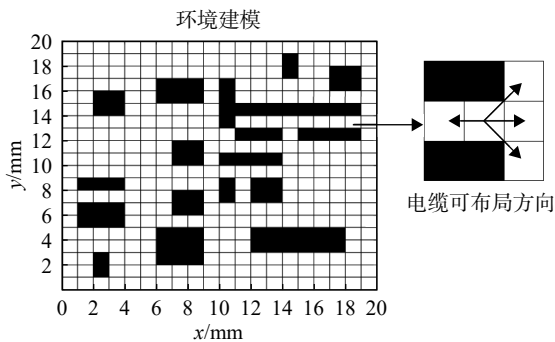


图6 环境模型

Fig. 6 Environment model

图6中每个栅格点有唯一的坐标,假设栅格规模为 x 行 y 列,第 i 个栅格对应的位置由式(3)所示:

$$\begin{cases} x_i = a \times \left[M_{od}(i, y) - \frac{a}{2} \right] d \\ y_i = a \times \left[S + \frac{a}{2} - C_{eil} \left(\frac{i}{S} \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中 a 为每个小方格像素的边长, $C_{eil}(n)$ 取大于等于数值 n 的最小整数, $M_{od}(i, y)$ 为 i 除以 y 的余数, S 为地图的维度。

3 经典蚁群算法

蚁群优化(ACO)算法是一种群体智能算法,吸收了蚁群觅食过程中的行为特性。蚂蚁的移动方向是根据各条路径上信息素的量来决定的,同时根据信息素的量和启发信息来计算状态转移概率^[15-17]。蚂蚁在寻找食物蚂蚁根据轮盘赌选择一个移动点的概率为

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in A_{jh}} [\tau_{is}(t)]^\alpha \times [\eta_{is}(t)]^\beta}, \quad j \in A_{jh} \quad (4)$$

$$0, \quad j \notin A_{jh}$$

式中 α 、 β 分别为信息素因子、启发函数因子; A_{jh} 表示蚂蚁 k 可选择的下一步可行栅格集合; $\eta_{ij}(t) = 1/D_{ij}$ 为启发函数, D_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间的距离。 $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻蚂蚁从节点 i 移动到节点 j 的信息素强度。

蚂蚁在行进过程中会留下信息素,用来为其他蚂蚁提供指向信息。在蚁群的正反馈机制下,路径上的信息素浓度强弱与吸引蚂蚁数量成正比,目前蚁群算法中常用的信息素更新机制为蚁周模型,更新规则如下:

$$\Delta\tau_{ij}^k(N) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{第} k \text{只蚂蚁在循环中经过}(i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$\tau_{ij}(N+1) = (1-\rho) \times \tau_{ij}(N) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(N) \quad (6)$$

式中 ρ 是信息素挥发系数, Q 为信息素常数; L_k 为蚂蚁 k 走过的路径长度, m 为蚂蚁数, N 代表迭代次数。

4 改进蚁群算法

4.1 启发函数改进

传统蚁群算法中启发式函数仅与下一节点的路径长度有关,全局启发性不强。忽略了目标点的导向作用,导致搜索路径过程中具有盲目性,易陷于局部最优值,一定程度上影响算法的搜索效率。由A*算法获得启发,启发函数不再是当前点到下一可行节点的距离的倒数,而是对蚂蚁从栅格 i 行走至目标点的方向进行引导。

在具体线路布局中,拐角的角度会影响电缆的电器特性,为减少路径的拐弯个数,让路径尽量平滑,引入拐点奖惩机制,由蚂蚁在栅格中的运动方向可知,转角只能是 0° 、 45° 、 90° 和 135° ,转角的价值公式为

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \Delta\theta_{ij} = 0^\circ \\ 0.8, & \Delta\theta_{ij} = 45^\circ \\ 0.75, & \Delta\theta_{ij} = 90^\circ \\ 0.7, & \Delta\theta_{ij} = 135^\circ \end{cases} \quad (7)$$

具体启发函数改进如下:

$$\eta_{ij} = L \left(\frac{D_{ij}}{D_{je}} \right)^{\frac{3}{2}} \times Z_{ij} = L \left(\frac{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}{\sqrt{(x_e - x_j)^2 + (y_e - y_j)^2}} \right)^{\frac{3}{2}} \times Z_{ij} \quad (8)$$

式中 L 为方向引导函数因子,一般取值 $L > 0$; D_{ij} 为 i 点到下一个节点 j 的直线距离; D_{je} 为 j 点到目标 e 点的直线距离; Z_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的拐角惩罚函数, $\Delta\theta_{ij}$ 为节点 i 到邻近节点 j 转过的角度,当节点越靠近目标节点 e 且临近节点转过的角度越小时, η_{ij} 越大。

4.2 信息素规则改进

在蚁群搜索的前期,使信息素挥发系数增大,可以增强随机搜索的能力,扩大搜索范围;后期,使信息素挥发系数减小,搜索范围逐步向最优解范围收缩,增强算法的收敛性。而在传统算法中信息素挥发因子不会随着环境变化而改变,改进后的信息素挥发因子如下:

$$\rho = \rho_{\min} + \mu \times \left(1 - \frac{m}{M_{\max}} \right) \quad (9)$$

式中 $\rho_{\min}$ 为最小挥发系数, $M_{\max}$ 为最大蚂蚁数, μ 为权重系数,可以根据布线环境动态调整。

4.3 基于变异改进策略

由于蚁群算法陷入局部最优解,影响寻找最优能力。为解决这一问题,在进入下一次迭代之前,利用遗传算法中的突变,使算法跳出局部最优,增大寻优的能力。改进规则如下:变异算子设定变异概率,如果的随机数小于变异概率,随机选择蚂蚁经过路径的 2 个的空间位置点进行顺序交换,重复交换 3 次,完成变异。否则,跳过。

4.4 改进蚁群算法实现步骤流程

根据文中改进的策略,提出的改进蚁群算法,具体步骤如下:

步骤 1 环境模型建立,初始化各类参数,如蚂蚁个数、信息素蒸发系数最小值、信息矩阵等;

步骤 2 构建启发式信息矩阵,按照公式计算启发式信息。并建立代价值矩阵,将每个栅点至各自相邻无障碍栅格点的代价值存储进去;

步骤 3 蚂蚁从起始点出发,筛选出当前可选的栅格点,如果且可选栅格点个数大于等于 1,则根据改进的启发函数,用轮盘赌计算蚂蚁 k 在当前时刻 t 从栅格点 i 转移到各相邻栅格点的概率,选择下一个删点;

步骤 4 更新蚂蚁爬行的路径、路径长度、代价值矩阵等,重复步骤 3 和步骤 4 直到无可选栅格点数,则代表本次迭代结束;

步骤 5 判断是否进行变异,若随机数 R_{and} 小于变异概率则进行遗传变异,并重新更新蚂蚁爬行的路径和长度等,否则跳过,记录最短路径;

步骤 6 判断是否满足终止条件,满足则结束蚁群算法,并绘制路径图,否则按照自适应挥发因子规则更新信息素,转步骤 3。

算法流程图如图 7 所示。

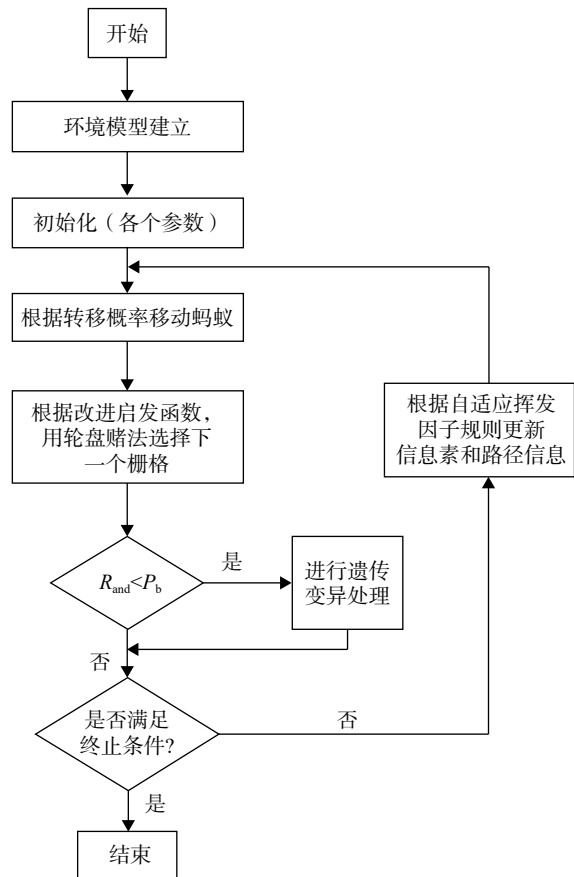


图 7 改进蚁群算法实现步骤流程

Fig. 7 Improved ant colony algorithm implementation step flow

5 算法仿真

为了验证算法的有效性,在仿真软件 matlab 上验证改进蚁群算法的性能,运行环境为:CPU 型号为 intel(R) Core(TM) i7-10700,主频 2.9 GHz,内存 16 GB, Windows10, 64 位操作系统。将改进的蚁群算法与文献 [18] 路径规划算法、经典蚁群算法、经典遗传算法在 20×20 的栅格地图上进行分析比较,仿真初始参数设置如表 1。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

参数	数值
起点	0
终点	399
蚂蚁个数 M	50
最大迭代次数 K	100
信息素因子 α	1
启发函数因子 β	7
信息素挥发因子最小值 ρ	0.3
信息素增加强度系数 Q	1
遗传变异概率 P_b	0.04

图 8~图 11 分别为经典遗传算法、经典蚁群算法、文献 [18] 改进算法、本文改进蚁群算法线路布局轨迹图,在传统蚁群算法中,初始信息素是相等,挥发系数也是不变的,容易导致算法陷入局部最优解,并且启发函数没有加入拐点奖惩机制,因此路径长度较长,拐点较多。本文改进算法与文献改进算法对比经典遗传算法和蚁群算法效果较好。

对算法的收敛性进行实验验证,图 12 为 4 种算法的迭代对比图,由图可以看出文中改进的蚁群算法采用自适应信息素挥发因子,其收敛速度

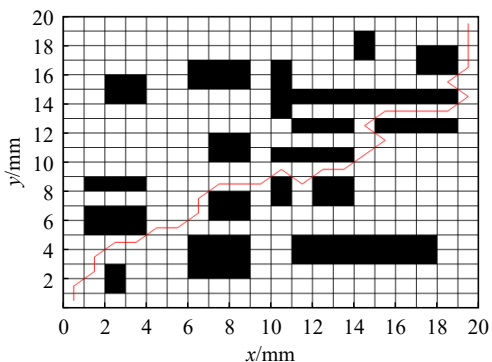


图 8 经典遗传算法路径规划图

Fig. 8 Classic genetic algorithm route planning diagram

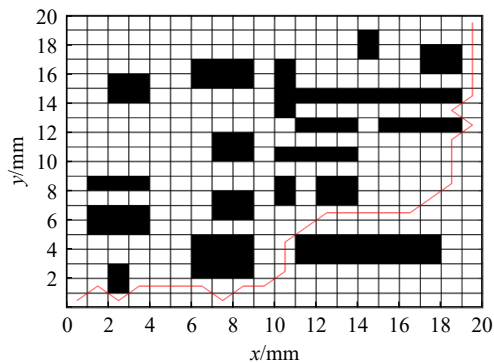


图 9 经典蚁群算法路径规划图

Fig. 9 Classical ant colony algorithm route planning diagram

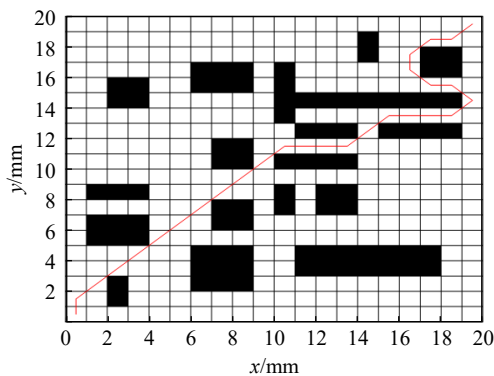


图 10 文献 [18] 算法路径规划图

Fig. 10 Reference [18] algorithm route planning diagram

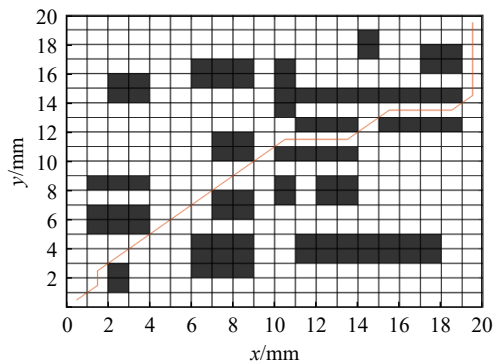


图 11 本文改进蚁群算法路径规划图

Fig. 11 The route planning diagram of the improved ant colony algorithm in this paper

相比于其他 3 种算法最快。

为了防止随机性,表 2 提取 10 次算法运行的结果,分别比较几种算法搜索过程中所走过的最短路径长度,拐点数和算法的迭代次数。

从表 2 可以清楚地看到改进蚁群算法相比较于经典遗传算法、经典蚁群算法、文献 [18] 改进算法,其平均最短路径长度减少了 5.358 8、5.499 5、1.09;拐点数分别减少了 16、11、6;其迭代次数也明显优于其他 3 种算法。

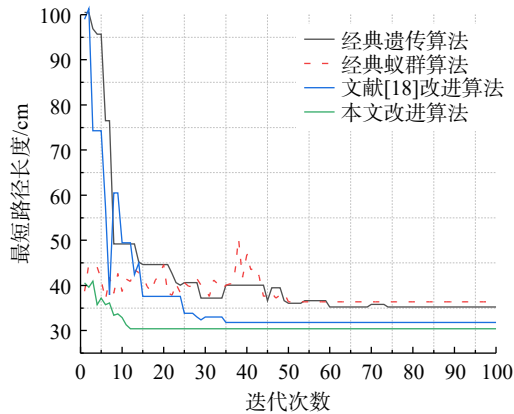


图12 迭代收敛图

Fig. 12 Iterative convergence graph

表2 4种算法10次对比结果

Table 2 10 comparison results of 4 algorithms

算法	平均最短 路径长度	平均 拐点数	平均 迭代次数
经典遗传算法	35.743 6	22	42
文献[18]改进算法	31.474 8	12	17
经典蚁群算法	35.884 3	17	72
改进蚁群算法	30.384 8	6	11

6 结 论

针对航空设备复杂的电缆布线问题,提出了一种基于改进蚁群算法的航空电缆路径规划方法。本文从航空布线的物理约束(电气性能、机械性能)、环境约束和可维护性约束,总结出了航空发动机布线要求和定量约束。对待布线安装空间进行模拟真实环境建模,并进行栅格化处理,获得的建模空间用于航空电缆的二维布线路径优化。采用了向终点方向引导的转移规则,并增加转弯拐角惩罚因子,来改进启发函数,减少了路径搜索的盲目性,提高了规划路径平滑度,采用一种自适应调整方式的信息素挥发因子,提高算法的搜索效率和后期收敛速度,引入了遗传变异,避免算法陷入局部最优。

在仿真实验中通过对比与基本蚁群算法、基本遗传算法、改进蚁群算法之间的路径长度、拐点个数和收敛迭代次数,其结果表明文中改进的算法更加优越。应用改进的路径优化算法对航空发动机其他复杂的路线布局进行优化,优化后总体电缆的路径布局电缆路径明显减少、即电缆长度用量减少;拐点数明显减少、即电缆电器性能变好,能够提高航空发动机系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 宋军强, 潘慕绚, 黄金泉. 航空发动机分布式控制系统技术分析及其系统方案[J]. 航空动力学报, 2013, 28(10): 2391-2400. SONG Junqiang, PAN Muxuan, HUANG Jinquan. Technology analysis and system scheme for aero-enginedistributed control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(10): 2391-2400. (in Chinese)
- [2] 皮骏, 黄江博. 基于IPSO-Elman神经网络的航空发动机故障诊断[J]. 航空动力学报, 2017, 32(12): 3031-3038. PI Jun, HUANG Jiangbo. Aero-engine fault diagnosis based on IPSO-Elman neural network[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 3031-3038. (in Chinese)
- [3] 吴保胜, 郭宇, 王发麟, 等. 基于改进蚁群算法的线缆路径规划技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(10): 236-241. WU Baosheng, GUO Yu, WANG Falin, et al. Research on path planning of cable harness based on improved ant colony optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(10): 236-241. (in Chinese)
- [4] 崔钰萍, 郑国磊. 电缆布局设计技术研究进展综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(2): 268-280. CUI Yuping, ZHENG Guolei. Research progress of cable layout design technology:a review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(2): 268-280. (in Chinese)
- [5] PARK H, CUTKOSKY M R, CONRU A B, et al. An agent-based approach to concurrent cable harness design[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 1994, 8(1): 45-61.
- [6] 唐旭晖, 辛绍杰. 改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(5): 287-295. TANG Xuhui, XIN Shaojie. Improved ant colony algorithm for mobile robot path planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(5): 287-295. (in Chinese)
- [7] 袁媛. 自适应遗传算法在船舶线路布局中的应用研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(10): 85-87. YUAN Yuan. Application research of adaptive genetic algorithm in ship line layout[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(10): 85-87. (in Chinese)
- [8] ZHAO Y, LIU J, MA J, et al. Multi-branch cable harness layout design based on genetic algorithm with probabilistic roadmap method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 1-11.
- [9] 王发麟, 廖文和, 郭宇, 等. 基于多尺度混沌变异粒子群算法的三维空间线缆敷设技术[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 144-156. WANG Falin, LIAO Wenhe, GUO Yu, et al. Three dimensional space-wiring technology for cable harness based on multi-scale chaotic mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(9): 144-156. (in Chinese)
- [10] SANDUKAR S, CHEN W. GAPRUS-genetic algorithms based pipe routing using tessellated object[J]. Computer in Industry, 1999, 38(3): 209-223.
- [11] LAMINI C, BENHLIMA S, ELBEKRI A. Genetic algorithm based approach for autonomous mobile robot path planning[J]. Procedia Computer Science, 2018, 127: 180-189.
- [12] 圣文顺, 徐爱萍, 徐刘晶. 基于蚁群算法与遗传算法的TSP路径规划仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(12): 398-402, 412. SHENG Wenshun, XU Aiping, XU Liujing. Simulation of traveling salesman path planning based on ant colony algorithm and genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,

- 2022, 39(12): 398-402, 412. (in Chinese)
- [13] 徐小强, 刘静雯, 冒燕. 基于改进粒子群算法的无人船全局路径规划研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(3): 131-138.
XU Xiaoqiang, LIU Jingwen, MAO Yan. Global path planning of USV based on improved PSO[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(3): 131-138. (in Chinese)
- [14] 郝琨, 邓晁硕, 赵璐, 等. 基于区域搜索粒子群算法的机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(12): 126-135.
HAO Kun, DENG Chaoshuo, ZHAO Lu, et al. Robot path planning based on region search particle swarm optimization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(12): 126-135. (in Chinese)
- [15] LIU J, YANG J, LIU H, et al. An improved ant colony algorithm for robot path planning[J]. *Soft Computing*, 2017, 21(19): 5829-5839.
- [16] LUO Q, WANG H, ZHENG Y, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32(6): 1555-1566.
- [17] SUN Y, DONG W, CHEN Y. An improved routing algorithm based on ant colony optimization in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(6): 1317-1320.
- [18] 周敬东, 杨磊, 高伟周, 等. 改进蚁群算法在机器人路径规划上的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36(5): 19-22.
ZHOU Jingdong, YANG Lei, GAO Weizhou, et al. Application of improved ant colony algorithm in robot path planning[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2021, 36(5): 19-22. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)