

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.031

基于改进黏菌算法的多分支线束布局优化

郭权, 张丹, 宋健, 蔡超利

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对自动布线设计中的多分支线束布局优化问题,受黏菌智能行为启发,提出一种基于改进黏菌算法的三维空间多分支线束布局优化方法。基于最小斯坦纳树定义多分支线束的布局优化问题,利用基于多头绒泡菌的空间预处理方法,获得降维的离散布线空间,结合 Lazy Theta* 路径搜索算法,设计与线束结构相对应的黏菌编码方式,引入佳点集、自适应柯西扰动策略和自适应参数调整策略改进黏菌算法性能。实例验证结果表明:所提算法在布线质量和效率上具备优势。

关键词:多分支线束;布局优化;黏菌算法;路径搜索;自动布线

中图分类号:TP202⁺.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)02-0159-05

Optimization of Multi-branch Cable Harness Layout Based on Improved Slime Mould Algorithm

GUO Quan, ZHANG Dan, SONG Jian, CAI Chaoli

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aimed at the multi-branch cable harness layout optimization problem in automatic routing design, and inspired by the intelligent behavior of slime mould, a three-dimensional space multi-branch cable harness layout optimization method based on an improved Slime Mould Algorithm is proposed. Based on the minimum Steiner tree, the layout optimization of multi-branch cable harness is defined. The space preprocessing method based on Phsarum-inspired Algorithm is used to obtain the reduced-dimensional discrete routing space. Combined with the Lazy Theta* path algorithm, the slime mould encoding method corresponding to the cable harness structure is designed. Good Point Set, adaptive Cauchy perturbation strategy and adaptive parameter adjustment strategy are introduced to improve the performance of the Slime Mould Algorithm. The example verification results show that the proposed algorithm has advantages in cabling quality and efficiency.

Keywords: multi-branch cable harness; layout optimization; slime mould algorithm; path search; automatic routing

0 引言

线缆是机电一体化设备中的重要组成部分,在航空航天等领域的复杂机电产品中被广泛运用。由于机电产品内部结构的日益复杂,其数量和种类也逐渐增多,线缆布局设计的复杂性逐渐上升,传统布线设计技术效率低、精准度差、可靠性差的劣势日渐凸显。相较于传统布线设计,自动布线技术不仅能够生成符合要求的线缆敷设路径,而且还能优化线缆布局,这已成为线缆布局研究的热点^[1-3]。

智能优化算法有着优秀的搜索效率和鲁棒性,在复杂的多分支线缆布线设计中被广泛运用^[4]。ZHAO 等^[5]将概率路线图法与遗传算法相

结合来解决多分支线缆布局问题,为此设计了专门用于分支结构与分支点的编码方式,将交叉操作与变异操作的顺序互换,采用概率公式进行自适应搜索,有效提高了布线效率。WANG 等^[6]在蚁群算法中引入工程规则,约束蚁群在空间中的运动方向,根据蚁群在空间节点留下的信息素浓度选择最短路径,并在二次开发的系统中实现多分支线束的构建。PARK 和 CONRU 等^[7-8]针对布线问题利用遗传算法在开敞空间内进行线缆空间布局拓扑优化。然而,上述方法面对较复杂的多分支线束布线问题仍存在计算效率不高、针对布线空间的预处理较为粗糙等不足。

黏菌优化算法(slime mould algorithm, SMA)是一种源于黏菌捕食行为的群智能优化算法。在

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705246)

第一作者简介:郭权(1999—),男,安徽宣城人,硕士研究生,研究方向为智能化制造技术, sxgq132@nuaa.edu.cn。

通信作者简介:张丹(1983—),男,河南洛阳人,讲师,博士,研究方向为虚拟装配技术制造业信息化技术, zhd@nuaa.edu.cn。

类似线缆布局等组合优化问题上应用最多的是多头绒泡菌正反馈算法 (phsarium - inspired algorithm, PIA), 该算法模型由 NAKAGAKI 等^[9]最先展开研究。LI 等^[10]最先开展黏菌启发的随机算法相关研究, 他将黏菌的多个原生质团作为种群个体, 建立多种个体位置更新公式模拟黏菌觅食时的行为过程。该算法利用自适应权重模拟黏菌细胞液传播产生的正负反馈过程, 具有良好的全局寻优能力与收敛性。因此, 本文针对多分支线束布线问题, 探索一种基于改进黏菌算法的布线优化方法, 为解决复杂机电产品中自动布线设计问题提供新的途径。

1 多分支线缆布局优化建模及布线空间预处理

1.1 基于 SMT 的多分支线缆优化问题及建模

多分支线缆的布局优化可以看作欧氏距离下的避障最小斯坦纳树问题^[11]。将线缆组件抽象成特殊的斯坦纳树, 斯坦纳点对应线缆的分支点, 斯坦纳点之间的路径对应线缆的捆扎段, 斯坦纳点与定点之间的路径对应线缆的非捆扎段, 如图 1 所示。结合线束布局问题的特点, 对符合布线要求的特殊斯坦纳最小树做以下规定:

- 1) 关联顶点的边仅有 1 条;
- 2) 与斯坦纳点关联的边至少为 3 条;
- 3) 当顶点总数为 N 时, 斯坦纳点的总数不超过 $N-2$ 个;
- 4) 边权值由通过该边的芯线质量决定。

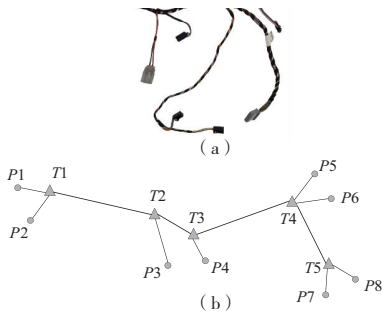


图 1 线缆组件模型及其斯坦纳树模型

结合上述分析, 建立如下数学模型:

$$\begin{cases} \min f(x) = (f_1(x), f_2(x)) \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} G(x) = 0 \\ D(x) = 0 \\ B(x) = r_c \\ E(x) = l \\ s \in [2, N-2] \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_1(x)$ 为线缆总质量目标函数; $f_2(x)$ 为捆扎

段占比目标函数; $G(x) = 0$ 为线束贴壁; $D(x) = 0$ 为线束不经过高温、电磁干扰区域; $B(x) \geq r_c$ 为线缆弯曲半径大于最小弯折半径 r_c ; $E(x) = l$ 为接线端口延伸长度; l 为要求的长度; s 为分支点数量; N 为端口数量; x 为多分支线缆的布局方案。

1.2 基于多头绒泡菌算法的布线空间预处理

利用栅格法预处理获得离散的布线搜索空间后, 采用基于 PIA 的布线空间预处理方法进行降维处理, 获得简化的布线空间, 以方便点信息的储存和算法搜索效率的提高^[12-13]。改进传统 PIA^[14]并运用到有约束的线缆布局设计问题上, 将该算法运用到布线空间预处理中, 能有效降低空间维度和复杂度, 缩小后续优化算法的搜索空间。

2 基于改进黏菌算法的线缆布局优化

2.1 基于改进 Lazy Theta* 算法的线束路径寻优

本文采用 Lazy Theta*^[15-16]算法进行路径搜索, 并针对线缆敷设的需求, 对 Lazy Theta* 算法的估价函数做出改进, 在原有的最小估价函数 $g(p)$ 和估算函数 $h(p)$ 的基础上, 将实际布线时的干扰源约束、线缆最小弯折约束、接线端延长约束作为惩罚函数引入式子:

$$f(p) = g(p) + h(p) + d(p) + b(p) + s(p) \quad (2)$$

式中: $d(p)$ 为工艺干扰惩罚函数; $b(p)$ 为线缆过度弯折惩罚函数; $s(p)$ 为接线端夹角惩罚函数。

2.2 面向多分支线束布局优化的黏菌算法

标准黏菌优化算法的数学模型如下:

$$\begin{aligned} X(t+1) = & \begin{cases} \text{rand} \cdot (B_U - B_L) + B_L, & r_1 \leq z \\ X_b(t) + v_b \cdot (W \cdot X_A(t) - X_B(t)), & r_1 > z \text{ 且 } r_2 < p \\ v_c \cdot X(t), & r_1 > z \text{ 且 } r_2 \geq p \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: B_U 与 B_L 为搜索空间上下边界; N 为黏菌个体数目; $X(t)$ 为黏菌种群在 t 次迭代时的位置; $X_b(t)$ 为全局最优位置; rand 、 r_1 、 r_2 均为取值区间 $[0, 1]$ 的随机数; z 为自设参数, 通常取值 0.03; 参数 v_b 为取值区间 $[-a, a]$ 内的随机值; v_c 取值根据迭代次数从 1 线性递减至 0; 搜索空间的维度为 dim ; $X_A(t)$ 与 $X_B(t)$ 为随机选择的黏菌个体位置; 参数 p 为当前黏菌个体与最优黏菌个体的适应度差值; W 为各位置权重系数。

将多分支线缆布局优化问题转为求解最小斯

坦纳树的组合优化问题,改进黏菌优化算法并进行线束布局寻优。具体步骤如下:1)黏菌个体的数据结构编码;2)建立适应度函数;3)初始化种群;4)黏菌个体的更新迭代计算。

依据斯坦纳点数量及位置信息进行黏菌个体的编码。黏菌个体的位置更新时,其对应的斯坦纳点集构成的最小树逐渐逼近最小斯坦纳树。黏菌个体的编码方式如图2所示。

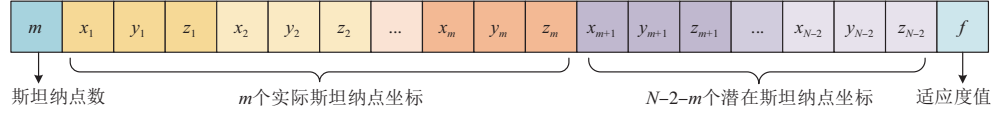


图2 黏菌个体编码形式

黏菌个体编码完成后,通过 Prim 算法构建斯坦纳点间的最小生成树,最后计算各顶点到斯坦纳点的最优路径,直致最小斯坦纳树形成。构建过程如图3所示,圆形表示端口点,三角形表示斯坦纳点,实线表示非捆扎段,点划线表示捆扎段。

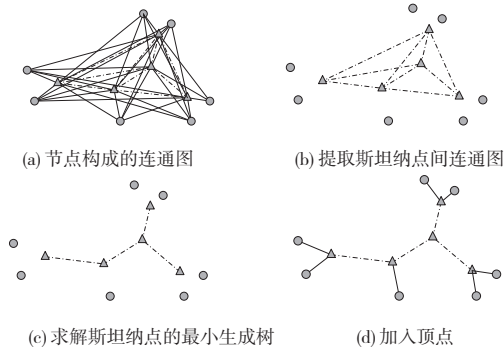


图3 特殊斯坦纳树的构建过程

在确定线缆的分支结构后,得到每段线束的长度信息,计算出捆扎段占比。再根据斯坦纳树中顶点间的连通信息,将树形结构转化为无向图,利用 Dijkstra 图搜索算法找到接线端口间的最短路径,由此确定单个线缆经过的分支点信息。

本文按 1.1 节中提出的优化模型来设计适应度函数,优化目标为:线束总重、捆扎段占比。

1) 线束总重目标函数 $f_1(x)$

线束布局方案 x 对应的总质量可视为非捆扎段线束质量 G_N 与捆扎段线束质量 G_B 的总和:

$$f_1(x) = G_N + G_B \quad (4)$$

非捆扎段线缆的质量为各段线缆长度 L_i 与对应线缆密度 ρ_i 的乘积:

$$G_N = \sum_{i=1}^N (L_i \cdot \rho_i) \quad (5)$$

捆扎段线束质量需要确定捆扎段内部线缆的种类与数量,再根据捆扎段长度进行计算。

$$G_B = \sum_{i=1}^n (L_{bi} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \rho_j) \quad (6)$$

式中: n 为捆扎段数量; L_{bi} 为第 i 段捆扎段长度; N_i 为第 i 段捆扎段内部线缆数量; ρ_j 为对应的线缆的线密度。

2) 捆扎段占比目标函数 $f_2(x)$

$$f_2(x) = k \frac{\sum_{i=1}^n L_{bi} + \sum_{j=1}^m L_j}{\sum_{i=1}^n L_{bi}} \quad (7)$$

式中: m 为非捆扎段数量; k 为放大参数。最终的适应度函数如下所示,其中 λ_1 与 λ_2 为权重参数。

$$f_{\text{fitness}} = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) \quad (8)$$

本文采用分圆域方法生成佳点集 (good point set, GDP)^[17-18]。取 $\{r_k = \{2\cos(2\pi/p)\}, 1 \leq k \leq s\}$, p 为满足条件 $(p-3)/2 \geq s$ 的最小素数, s 为单个黏菌个体维度。将其映射到三维布线空间可表示为

$$x_i(j) = (B_{U,j} - B_{L,j}) \cdot \text{mod}(r_j^{(i)}, 1) + B_{L,j} \quad (9)$$

式中: $x_i(j)$ 为第 i 个种群个体中 j 维的位置坐标; $B_{U,j}$ 与 $B_{L,j}$ 为第 j 维的上下界, 其中 $r_j^{(i)} = 2\cos(2\pi j / (2s+3))$; $\text{mod}(r_j^{(i)}, 1)$ 为取 $r_j^{(i)}$ 的小数部分。

针对原始黏菌算法本身存在的一些设计缺陷,如缺乏极值扰动机制、缺乏自适应调整能力等,引入两个改进策略以优化算法性能。自设参数 n , 经过 n 次迭代后,若种群的最优适应度值不再发生变化,则判定种群处于停滞状态,采用自适应柯西扰动策略。在算法初期选择大步长摆脱局部极值,并随着迭代次数的增加,变步长不断减小^[19-20]。此外,黏菌个体的局部搜索由式(3)中的第3项公式决定,其中参数 v_c 从1线性递减至0,在实际应用中会使得黏菌个体的各项坐标值向零点逼近,因此不适用于线束布局设计。对 v_c 做出如下修改:

$$v_c = \left\{ 1 + \sin \left[\pi \left(1 + \frac{I_{\text{ter,cur}}}{2 \cdot I_{\text{ter,max}}} \right) \right] \right\}^m \quad (10)$$

式中: $I_{\text{ter},\text{cur}}$ 为当前迭代次数; $I_{\text{ter},\text{max}}$ 为最大迭代次数; z 为步距调节参数。在迭代前期, v_c 的值处在较高区间,这有利于提高算法前期的探索性能。而在迭代后期, v_c 的值会迅速下降到较低区间,以便进行更精确的局部搜索,保证算法在不同迭代时期具有自适应的探索能力。

改进后的算法流程如图 4 所示。

3 实例验证与算法性能分析

以图 5 所示的某飞机机舱模型为例测试改进黏菌算法的性能,采用基于 PIA 的预处理方法,并选取 PSO 算法^[21]和原始黏菌算法作为对比算法。算法的参数设置如表 1 所示。

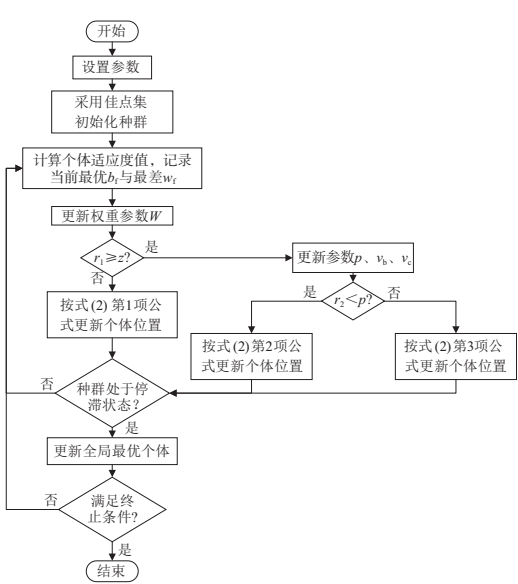


图 4 改进黏菌算法流程图

表 1 3 种算法参数设置

算法名称	迭代次数	种群数量	捆扎段占比	非捆扎段占比	变异概率参数	停滞参数	步距参数	社会学习因子	个体学习因子	最大惯性因子	最小惯性因子
ISMA	100	40	2.0	1.0	0.3	5.0	3.0	—	—	—	—
SMA	100	40	0.5	0.5	0.3	—	—	—	—	—	—
PSO	100	40	0.5	0.5	—	—	—	1.5	1.0	0.8	0.4

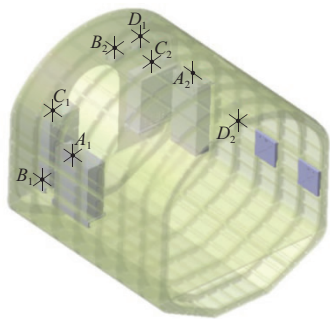


图 5 某飞机机舱段模型

由图 5—图 6、表 1 可知,与另外两种算法相比较,ISMA 算法在迭代前期收敛性较好,在迭代后期能有效地跳出局部最优值,对比可知 ISMA 算法的寻优效果最佳。3 种布线算法所得的线束布局如图 7 所示。由图 7 可知,相较于另外两种算法,ISMA 算法最终得到的结果不仅线束布局结构主干分明、走线路径开敞,有利于布线工人的敷设安装,更贴合实际敷设需求,同时线束总质量更轻,捆扎段占比更小。

3 种算法的收敛情况如图 6 所示。

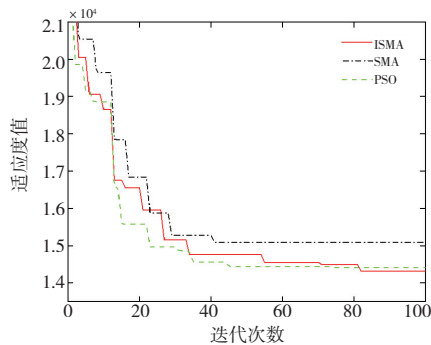


图 6 3 种算法的收敛情况对比

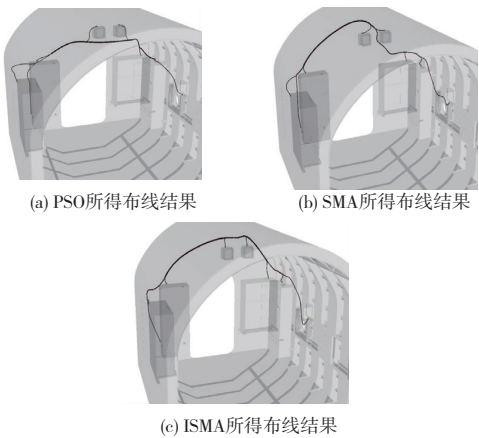


图 7 3 种算法所得布线结果

4 结语

本文针对复杂机电产品的线缆布局优化问题,建立了基于斯坦纳理论的多分支线束布局问题模型。该模型是一种斯坦纳最小树的特殊变种问题,属于 NP-hard 问题,它考虑了布线的结构和装配性要求,因此具有实际工程意义。采用基于 PIA 的空间预处理方法,获得了更为合理有效的布线空间预处理模型。基于 Lazy Theta* 算法进行了线缆分支的路径搜索,同时在估价函数中加入了工艺干扰惩罚函数、过度弯折惩罚函数、接线端夹角惩罚函数等,能够获得线缆敷设的平滑路径,减少了路径的后处理。提出了面向线缆布局优化的改进黏菌算法,通过实验验证和对比,证明了该算法能够得到更加符合工程要求的线缆结构,对线缆的布局设计具有实际参考意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 牛蕊. 航空产品电缆的数字化布局分析[J]. 山东工业技术,2016(1):133.
- [3] 党艳银,陈永生. 舰载电子设备整机布线技术的工艺性研究[J]. 新技术新工艺,2012(9):79-81.
- [4] 郭伟,刘艳芳,赵辉,等. 基于骨架模型的快速布线方法[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(11):2391-2397.
- [5] ZHAO Y F, LIU J H, MA J T, 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):33.
- [6] WANG W, ZHANG Q, QIU B, et al. Research on cable route planning based on secondary development of CATIA [C]. DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences, 2018:195-200.
- [7] PARK H, LEE S H, CUTKOSKY M R. Computational support for concurrent engineering of cable harnesses[C]//ASME 1992 International Computers in Engineering Conference and Exposition, San Francisco, California, USA: 2021: 261-268.
- [8] CONRU A B. A genetic approach to the cable harness routing problem [C]//Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Orlando, FL, USA:IEEE, 1994:200-205.
- [9] NAKAGAKI T, YAMADA H, TÓTH A. Maze-solving by an amoeboid organism[J]. Nature, 2000, 407(6803):470.
- [10] LI S M, CHEN H L, WANG M J, et al. Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 111: 300-323.
- [11] GAREY M R, JOHNSON D S. The rectilinear steiner tree problem is $\mathcal{NP}$ -complete[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1977, 32(4):826-834.
- [12] 王朝,黄慧涛,张晶,等. 基于解空间降维的大规模约束多目标进化算法[J]. 电子学报,2023,51(11):3120-3127.
- [13] 梁静,刘睿,于坤杰,等. 求解大规模问题协同进化动态粒子群优化算法[J]. 软件学报,2018,29(9):2595-2605.
- [14] TERO A, TAKAGI S, SAIGUSA T, et al. Rules for biologically inspired adaptive network design [J]. Science, 2010, 327(5964):439-442.
- [15] NASH A, KOENIG S. Any-angle path planning[J]. AI Magazine, 2013, 34(4):85-107.
- [16] 吴宏超,刘检华,唐承统,等. 基于改进 A* 算法的管路自动布局设计与优化方法[J]. 计算机集成制造系统,2016,22(4):945-954.
- [17] 程梦飞,丁蕊. 基于佳点集遗传算法的多路径覆盖测试用例生成[J]. 计算机与数字工程,2022,50(9):1940-1944.
- [18] 李书群,陈钰,杨雨婷,等. 基于佳点集人工鱼群的点云配准算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(9):1203-1209.
- [19] 胡滨,朱亚辉,周延年. 柯西变异的模拟退火鲸鱼雷达资源调度算法[J]. 西北工业大学学报,2022,40(4):796-803.
- [20] 褚鼎立,陈红,王旭光. 基于自适应权重和模拟退火的鲸鱼优化算法[J]. 电子学报,2019,47(5):992-999.
- [21] 周琛. 基于 CATIA 的复杂线束布局自动设计系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.

收稿日期:2023-11-27