

基于改进粒子群算法的多分支电缆自动布线技术

刘召朝,张丹,周琛,左敦稳

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:以多分支电缆的总质量作为优化目标,考虑电缆敷设相关的工艺约束,基于 Steiner 最小树建立多分支电缆自动布线的优化数学模型。提出了电缆布局优化的改进粒子群优化算法,采用一维定长度数组对多分支电缆布局进行粒子编码,在电缆分支点处引入引力算子,指导粒子的运动方向,并通过飞机舱段布线实例验证了所提方法的有效性。

关键词:自动布线;多分支电缆;Steiner 最小树;粒子群优化算法

中图分类号:V22;TP39 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)01-0177-03

Automatic Routing Technology of Multi-branch Cable Harness Based on Improved Particle Swarm Optimization

LIU Zhaochao, ZHANG Dan, ZHOU Chen, ZUO Dunwen

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

Abstract: An optimization problem model of multi-branch cable harness for automatic routing was established based on Steiner minimum tree. In the model, the total weight of multi-branch cable harness was taken as the optimization objective, with the multiple routing process constraints being taken into account. An improved particle optimization algorithm for cable layout optimization was proposed with the particles coding with one dimensional fixed length array. Afterwards, a gravitational operator of branch point position was introduced to guide the direction of particles motion. The proposed method was verified by its application to an aircraft cabin segment routing task.

Keywords: automatic routing; cable harness; Steiner minimum tree; particle swarm optimization

0 引言

在机电一体化设备中电缆负责电气元件的能量输送与信号控制。在复杂机电产品中电缆被大量使用^[1]。不合理的电缆布局会破坏系统的稳定性,导致产品故障率上升,如发动机空中停车故障事件有 50%是由于管路、电缆和传感器损坏导致的^[2]。在复杂机电产品电气系统中存在许多单根电缆和多分支电缆,单根电缆路径优化使用简单的路径搜索算法即可完成,多分支电缆布局优化往往被视为三维空间下路径和结构的组合优化问题^[3]。属于典型避障 Steiner 最小树(SMT)的 NP 困难问题^[4]。随着人工智能技术的发展,智能优化算法如遗传算法^[5]、蚁群算法^[6]等,可有效地求解 Steiner 最小树问题。本文基于改进粒子群算法针对面向多分支电缆的 Steiner 最小树问题进行优化,自动生成满足实际工程应用的电缆布局方案。

1 多分支电缆布局优化模型

1.1 基于 SMT 的多分支电缆优化问题

如图 1 所示,多分支电缆布局与 SMT 问题相似,可将

其转化为 SMT 问题求解,但二者之间也存在以下差异:

1) 多分支电缆中端子要经多个分支点才到达另一端,而 SMT 中各点之间可直接相连。

2) SMT 中 Steiner 点必须关联三条夹角为 120°的边,而多分支电缆设计中分支点连接的端子数量不止 3 个,故分支路径的夹角存在多种形式。

3) 多分支电缆中只连接一个接线端子的分支点相当于一个路径点,可以将其删除。

基于上述分析,将分支电缆布局设计抽象为特殊的 SMT 进行优化,对其做如下规定:顶点关联的边有且只有一条;Steiner 点关联的边不少于 3 条;顶点数量为 n 时,Steiner 点数量不超过 $n-2$ 个;边权值使用路径优化算法计算。



图 1 SMT 与多分支电缆的对比

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705246)

第一作者简介:刘召朝(1994—),男,河南永城人,硕士研究生,研究方向为数字化制造。

1.2 优化问题数学模型

根据航空器中电缆布局相关的工艺约束要求^[7],以电缆总质量作为目标函数,建立如式(1)所示的数学模型:

$$\begin{aligned} \min f(p) &= f_0(p) \\ \text{s.t. } h(p) &= 0, T(p) = 0, E(p) = 0, N(p) = 0 \quad (1) \\ b(p) &\geq b_{\min}, s \in [2, n-2] \end{aligned}$$

式中: $f_0(p)$ 为电缆总质量函数; $h(p)$ 为贴壁约束,路径贴壁 $h(p)=0$,反之, $h(p) \neq 0$;经过高温区域 $T(p)=0$,反之, $T(p) \neq 0$;经过强电磁区域 $E(p)=0$,反之, $E(p) \neq 0$;满足开敞性要求 $N(p)=0$,反之, $N(p) \neq 0$; $b(p) \geq b_{\min}$ 为满足最小弯曲半径要求; s 为分支点数量; n 为接线端数量; p 为多分支电缆布局方案。

根据多分支电缆的拓扑结构,建立如式(2)所示的电缆总重数学模型

$$f_0(p) = \sum_{i=1}^{n_b} (b_i \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_j) + \sum_{i=1}^{n_s} s_i \cdot \mu_i \quad (2)$$

式中: n_b 为捆扎段数量; b_i 为捆扎段 i 的长度; N_i 为捆扎段 i 中的电缆数量; λ_j 为捆扎段 i 中电缆 j 的线密度; n_s 为非捆扎段数量; s_i 为非捆扎段 i 的长度; μ_i 为非捆扎段 i 电缆线密度。

2 电缆布局搜索离散环境

在构建多分支电缆优化模型时需要路径搜索,路径搜索算法一般基于离散化的搜索空间。对于复杂机械结构的产品模型,均匀离散化建模在效率和空间描述完整性上有局限性,本文选择八叉树空间建模^[8],对飞机舱段敷设环境进行离散化,获得如图2所示的离散敷设空间。

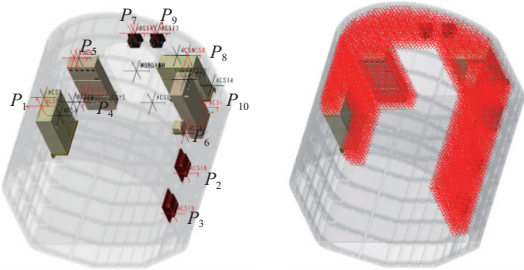


图2 飞机舱段模型及离散敷设空间

3 基于粒子群算法的多分支电缆优化

3.1 改进粒子群优化算法

PSO算法^[9]具有收敛速度快、编码效率高等特点。但传统的PSO只适合处理连续优化问题,本文所提的特殊STM离散问题,需要对粒子的编码和种群个体的搜索方式进行改进,才能有效进行优化求解,保证搜索效率并避免陷入局部最优。改进PSO算法流程如图3所示,其中为每个粒子随机分配空间位置生成规模为 N 的种群,根据式(2)计算适应度函数。

3.2 粒子编码

将指定数量Steiner点的集合作为粒子,更新过程中

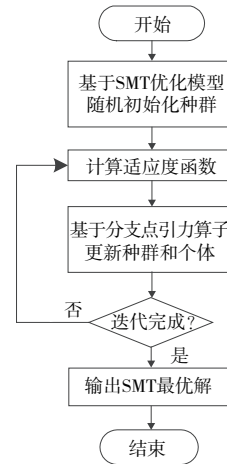


图3 改进粒子群算法流程

每个Steiner点根据运动方程在三维空间中飞行移动。对于接线端子数量为 n 的三维电缆布局设计问题,粒子描述成长度为 $3(n-2)+1$ 的一维数组,编码形式如图4所示,其中潜在Steiner点是指初始阶段不参与构成SMT而迭代中可能构成SMT的点。



图4 粒子编码形式

3.3 基于分支点引力算子的种群更新

PSO算法中粒子根据自身和种群最优位置调整自身的飞行速度,对于多分支电缆布局优化问题,粒子需要调整分支点的飞行方向以实现更新。由于粒子有多个分支点,选择合适的分支点作为飞行的目标地对算法搜索性能有一定影响。向最优粒子中添加引力算子,吸引当前粒子的分支点,使用式(3)计算被吸引分支点处产生的引力 F_{bc} 。

$$F_{bc} = KM_b M_c / [(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2 + (z_b - z_c)^2] \quad (3)$$

式中: K 为常数; M_b 为最优粒子分支点的质量,同一粒子的 M_b 相同; M_c 为当前更新粒子分支点的质量; (x_b, y_b, z_b) 、 (x_c, y_c, z_c) 分别为最优、当前粒子分支点的空间位置。

如图5所示,1号点在当前粒子分支点处产生的引力最大,将其作为当前粒子分支点的飞行目标地,在更新位置时,使用式(4)计算引力分支点产生的飞行偏向 a 。

$$a = r \cdot (B_d - C_d) \quad (4)$$

式中: B_d 、 C_d 分别为最优、当前粒子在维度 d 方向的位置; r 为 $[0, 1]$ 的随机数。

基于分支点引力算子的个体更新将粒子运动方程改进为式(5)。

$$\begin{aligned} v_{id}(t+1) &= \omega \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot a_{pid} + c_2 \cdot a_{gid} \\ x_{id}(t+1) &= x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: t 为迭代数; $v_{id}(t)$ 、 $x_{id}(t)$ 分别为粒子 i 在搜索空间 d 维度的速度和位置; c_1 、 c_2 分别为自身、社会学习因子; ω 为速度惯性; a_{pid} 、 a_{gid} 分别为局部、全局最优粒子对当前粒

子在维度 d 产生的飞行偏向。

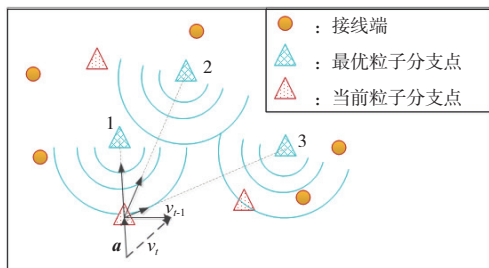


图5 分支点引力算子

4 实例验证

硬件运行环境:CPU Intel Core i5-3230M,内存 4GB。针对图 2 所示机舱模型的多分支电缆布线问题,根据图中接线端点的空间分布,设置 5 条信号线,接线关系如表 1 所示。

表 1 接线关系

电缆编号	类型	直径/mm	线密度/(g/mm)	起点	终点
01	信号线	20	12	P_1	P_{10}
02	信号线	30	15	P_2	P_9
03	信号线	30	15	P_3	P_8
04	信号线	20	12	P_4	P_7
05	信号线	20	12	P_5	P_6

PSO 算法参数:种群规模 $N=40$, $c_1=1.4962$, $c_2=1.4962$, $\omega=0.7298$,算法迭代 100 次,运行两次的优化过程如图 6 所示,两次分别经 36、41 代进化得到对应最优解 854.73、855.09,算法具有较好收敛性。基于线缆自动三维建模技术生成两次优化得到的电缆结构模型如图 7 所示。经分析:算法获得的布线方案能很好地贴合机舱表面,便于固定;电缆整体拓扑形状与实际机舱中的布局类似,满足实际工程要求。

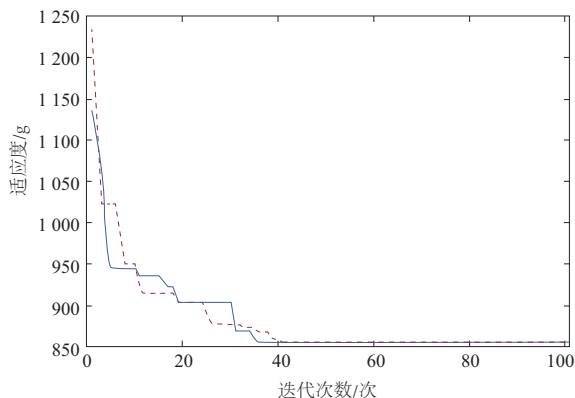


图6 改进 PSO 的收敛特性曲线

5 结语

针对多分支电缆自动布线设计问题,本文将其转化为优化问题并提出了一种基于改进 PSO 的优化求解方法,能够实现多分支电缆布局的自动生成。

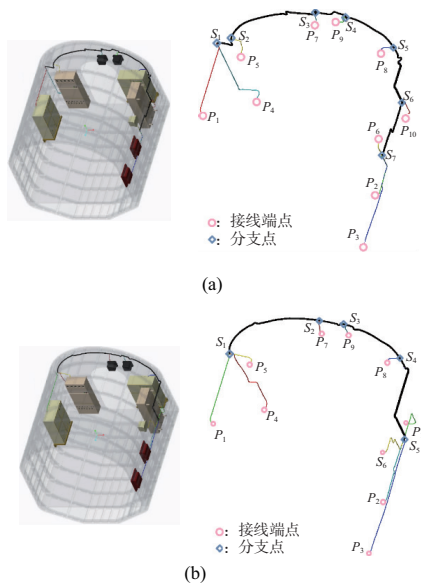


图7 优化获得的电缆布局方案

1)该方法将多分支电缆布局用特殊的 SMT 进行表达,并以电缆总质量作为目标函数,布线工艺作为约束建立优化问题模型。

2)通过改进 PSO 进行优化计算,采用定长一维数组的对多分支电缆布局进行粒子编码,引入分支点引力算子指导粒子的更新方向。通过飞机机舱段布线实例验证,表明该方法具有较好的收敛性,并能获得具有工程价值的电缆布局方案。

参考文献:

- [1] 王发麟,廖文和,郭宇,等. 线缆虚拟装配关键技术研究现状及其发展[J]. 中国机械工程, 2016, 27(6): 839-851.
- [2] CONRU A B, CUTKOSKY M R. Computational support for interactive cable harness routing and design[C]. Albuquerque, NM: ASME DE, 1993.
- [3] 李国闻,张丹,杜海遥,等. 基于遗传算法的机电产品布线结构优化设计方法[J]. 中国科技论文, 2015, 16(10): 1944-1948, 1952.
- [4] GAREY M R, JOHNSON D S. The rectilinear steiner tree problem is $\$ NP \$$ -complete[J]. Siam Journal on Applied Mathematics, 1977, 32(4): 826-834.
- [5] 赵礼峰,王小龙. 图的 Steiner 最小树问题的混合遗传算法[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(10): 110-114.
- [6] 何小锋,马良. Steiner 最小树问题的量子蚁群算法[J]. 系统工程学报, 2012, 27(4): 467-473.
- [7] SAE International in United States. SAE-AS-50881 Wiring, Aerospace Vehicle [S]. USA: SAE International in United States, 2003.
- [8] 耿琪,张丹,刘召朝,等. 面向机电产品布线规划的空间预处理技术[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(3): 25-30.
- [9] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of ICNN '95 - International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.

收稿日期:2019-12-20