



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401892

引用格式:王发麟,龚建华,蒋英吉,等.基于多重规则粒子群算法的复杂机电产品线缆自动布线[J].科学技术与工程,2025,25(5):1996-2008.

Wang Falin, Gong Jianhua, Jiang Yingji, et al. Automatic wiring of cables for complex mechatronic products based on multi rules particle swarm optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 1996-2008.

# 基于多重规则粒子群算法的复杂机电 产品线缆自动布线

王发麟,龚建华,蒋英吉,谢孙轩  
(南昌航空大学航空制造工程学院,南昌 330063)

**摘要** 针对复杂机电产品线缆布局中布线路径设计耗时、耗力的问题,提出了基于多重规则粒子群算法的复杂机电产品线缆自动布线方法。首先分析了线缆布线环境,将布线路径抽象为点序列,完成线缆布线空间的定义。通过位姿变换,解决布线路径和零件之间干涉检测难的问题;为充分利用布线空间,将粒子的多重规则引入粒子群算法中;利用粒子个数、多尺度碰撞检测、相邻路径点置换方法和四阶准均匀B样条曲线法4种粒子规则,解决布线环境复杂而无法获得最优解的问题,提高了算法的搜索能力、求解速度以及线缆的布线质量。通过仿真分析,与其他算法进行对比证明了算法的优越性。实例证明,该方法可以在进行布线路径布局时高效地对可行路径进行搜索,生成的布线路径与三维空间内零部件不发生干涉,路径光滑无突变点,为复杂机电产品线缆自动布局提供了一种新思路。

**关键词** 线缆自动布线;碰撞检测;布线路径优化;粒子群算法;复杂机电产品

**中图分类号** TP391; **文献标志码** A

## Automatic Wiring of Cables for Complex Mechatronic Products Based on Multi Rules Particle Swarm Optimization

WANG Fa-lin, GONG Jian-hua, JIANG Ying-ji, XIE Sun-xuan

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**[Abstract]** Aiming at the problem of time-consuming and labor-intensive routing path design in the cable layout design of complex electromechanical products, an automatic routing technology for complex electromechanical product cables based on multi rules particle swarm algorithm was proposed. Firstly, the cable routing environment of electromechanical products was analyzed, and the routing path was abstracted into a sequence of points to complete the definition of cable routing space. Through pose transformation, the problem of difficult interference detection between wiring paths and parts in electromechanical products was solved. In order to make full use of the wiring space, the particle multiple rules were introduced into the particle swarm optimization algorithm. By using particle number, multi-scale collision detection, adjacent waypoint replacement method and fourth-order quasi-uniform B-spline curve method, the problem that the routing environment is complicated and the optimal solution cannot be obtained was solved, and the searching ability, solving speed and routing quality of the algorithm were improved. Through simulation analysis and comparison with other algorithms, the superiority of the algorithm is proved. The example proves that the proposed method can search feasible paths efficiently during routing. The generated routing paths do not interfere with parts in three-dimensional space, and there are no mutation points in the path fairing, which provides a new idea for the automatic routing of complex electromechanical products.

**[Keywords]** cables automatic wiring; collision detection; wiring path optimization; particle swarm optimization; complex mechatronic products

线缆作为复杂机电产品传输能量和信号的载体,其布局设计耗时耗力。三维计算机辅助设计软件的广泛应用,为线缆布线路径设计提供了一种有

效的解决办法<sup>[1]</sup>。目前复杂机电产品趋于控制智能化、多功能化以及高精度化,使得产品内部线缆的数量越来越多,种类也越来越复杂,采用人机交

收稿日期:2024-03-17 修订日期:2024-11-20

基金项目:江西省自然科学基金重点项目(20212ACB202005);国家重点实验室(工程中心、基地)开放基金(GT202108060)

第一作者:王发麟(1986—),男,汉族,江西吉安人,博士,讲师。研究方向:数字化设计与制造,线缆虚拟装配。E-mail:wjme@nchu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

互的布线方式已经越来越不适用于复杂机电产品的线缆布局设计。因此,使用智能优化算法进行线缆自动布局设计成为现在国内外的一个研究热点<sup>[2]</sup>。基于智能优化算法的布线路径设计可以更加高效地完成复杂机电产品的线缆布局作业,但路径的质量不稳定,易出现线缆不满足最小弯曲半径、布线空间利用率低等问题。当线缆的性能受到严重影响导致的例如线缆的绝缘层破裂、电磁兼容过大等问题而造成线缆无法正常传输信号、能量时,会给设备造成安全隐患<sup>[3]</sup>。

针对线缆布线路径自动布局,国内外很多学者通过各种算法对布线路径的自动求解进行了研究,取得了一定的成果。Pemarathne 等<sup>[4]</sup>将蚁群优化算法应用在建筑施工布线上,网格化施工墙体等障碍物,实验证明算法很好地避开障碍物并生成有效的路径,但在障碍物增多的情况下计算量较大,且未考虑线缆弯曲半径的问题。Conru 等<sup>[5-6]</sup>将线缆布线路径问题定义为线缆拓扑结构图中的一个搜索问题,利用遗传算法对线束配置进行优化,通过以图中每条边的线束数目为目标函数,最小化目标函数,对线缆路径进行了求解,作为研究线缆布线路径较早的学者,对布线问题进行了详细的阐述,但线缆干涉问题和路径质量问题考虑较少。Masoudi 等<sup>[7]</sup>提出多目标遗传算法并将算法应用到了分支线缆路径的布局上,但只考虑了二维平面的线缆自动布局,算法应用到三维空间中的布线路径设计是否可行未进行验证。吴银锋等<sup>[8]</sup>通过对布线空间网格划分,运用迷宫算法进行布线路径的搜索,并用 Rubin 算法减少迭代次数,生成了布线路径,通过变网格法保证线缆的弯曲半径符合要求。刘冲等<sup>[9]</sup>提出了一种基于快速扩展随机树算法(rapidly-exploring random trees, RRT\*)的母线布线路径规划算法,在传统的 RRT\* 算法的基础上,通过引入中间点的方式改变已生成路径到随机点的扩展方式,使生成路径符合母线的走向限制,实现了初始路径的生成。杨旭等<sup>[10]</sup>提出考虑各类工程规则的改进 A\* 算法,求解的布线路径既满足约束条件,也降低了布线总成本,但当布线环境复杂时,A\* 算法在效率上表现不佳。

上述研究都是在对布线空间进行网格化的前提下完成布线路径设计。网格化便于表征障碍物和算法迭代,但在求解速度上较慢,尤其是在复杂机电产品中,求解时间往往耗费在了网格的步数迭代中。

因此,为避免网格划分所产生的问题,通过随机采样的算法较适用于复杂机电产品的线缆布线路径设计。基于此,刘佳顺等<sup>[11]</sup>通过双树吸引 RRT

算法增加解算速度,通过磁吸算法对解算路径质量进行贴壁改进。Zhao 等<sup>[12]</sup>提出了基于障碍物的概率路线图方法(probabilistic roadmap method, PRM)对路径点进行采样,建立了新的编码规则,进而改进遗传算法来确定线缆的路径点与分支结构,对三维空间线缆进行了布局,但较少考虑路径的弯曲半径、干涉等问题。王发麟等<sup>[13]</sup>提出了多尺度混沌变异粒子群算法,证明了粒子群算法在布线路径布局的可行性。

由于复杂机电产品内部空间有限,线缆的敷设应尽可能利用有限的空间来进行,同时布线路径的弯曲半径要在规定要求内,避免过多的弯折和交叉<sup>[14]</sup>。为此,现提出基于多重规则粒子群算法(multiple rules particle swarm optimization, MRPSO)的复杂机电产品线缆自动布线方法,以解决复杂机电产品线缆布线路径设计时布局空间利用率低、弯曲半径过小等问题。首先分析复杂机电产品线缆的敷设方法,将布线路径抽象为路径点集,进行路径点位姿变换,以完成算法求解空间的初始化;其次,将路径点作为粒子,路径点集合作为算法的解,通过对粒子施加多个规则以保证算法求解路径的效率和质量,包括根据实际布线情况动态修改粒子个数以减少算法运算次数,通过多尺度碰撞检测策略充分利用布线空间,在求解过程中进行路径优化和弯曲检测提高解的质量。用 4 种标准测试函数对所提 MRPSO 算法进行仿真试验,最后将算法应用到雷达机柜的线缆路径自动布局中,通过实例分析完成对算法的测试和验证。

## 1 问题描述

### 1.1 布线空间定义

线缆自动布局的核心是利用复杂机电产品有限的布线空间对线缆进行合理布局。线缆可以看成是三维数字化模型空间中的一条曲线,该曲线连接零件起始端和终止端,呈均匀变化,具有一定直径且与零件不发生干涉。如图 1 所示,布线空间中的线缆  $C$  可以用线缆离散化后的  $Q \in R^3$  密集点序列表示,其中  $R^3$  表示三维空间,使用  $q_i [i \in (1, 2, \dots, n)]$  来表示点序列  $Q$  中的点,  $n$  为点序列中路径点的数量。所谓布线空间,即在工作空间  $W$  中对线缆布线路径进行布局时,可容纳线缆布线路径的不与其他零件发生干涉的空间集合,工作空间  $W$  为复杂机电产品所在的笛卡尔空间。使用  $O_j$  来表示空间中障碍物,  $j$  为障碍物的数量,  $O = \cup O_j$  表示所有障碍物的集合。线缆上的某一部分用  $C(q_i)$  表示,工作空间中障碍物会与线缆发生碰撞的空间集合为

$$Q_o = \{q_i \in W \mid C(q_i) \cap O \neq \emptyset\} \quad (1)$$

布线空间为工作空间  $W$  与  $Q_o$  的差集为

$$Q_{free} = W \setminus Q_o \quad (2)$$

式(2)中:符号“ $\setminus$ ”表示集合的相对差集。

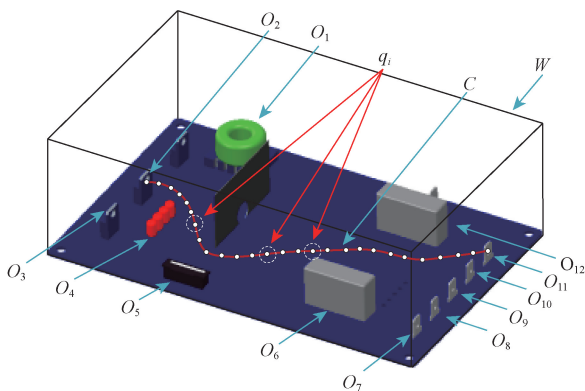


图1 线缆布线空间

Fig. 1 Cable routing space

### 1.2 布线约束与流程

在求解线缆布线路径的过程中,为了保证线缆的布局质量,所考虑的布线约束包括基本约束、工艺约束和经济约束。

(1)基本约束。确保布线路径与数字化模型不发生干涉,一定程度上通过线缆与零件的间距来保证线缆的电磁兼容性,拟通过多尺度碰撞检测策略来实现基本约束的达成。

(2)工艺约束。路径无交叉扭结现象,弯曲半径大于规定值。保证线缆长期工作的稳定性,是线缆布线路径合格的核心要求,拟通过相邻路径点置换方法与弯曲半径检测来实现。

(3)经济约束。航空线缆通常都比较昂贵。在保证基本约束和工艺约束的情况下,线缆路径合理且长度尽可能短,是降低复杂机电产品线缆敷设成本需要考虑的一项重要因素。拟通过将线缆长度作为算法求解的主要适应度函数,以期来实现线缆敷设路径最优情况下路径最短。

利用 MRPSO 算法解决复杂机电产品线缆自动布线的总体流程如图 2 所示。流程主要分 3 个步骤,首先读取复杂机电产品数字化模型内的零件信息和布线信息,确定布线空间;其次通过 MRPSO 算法对线缆布线路径进行求解,算法通过多尺度碰撞检测策略保证布线路径不与零部件产生干涉,满足基本约束条件;最后求解路径,通过相邻路径点置换算法对

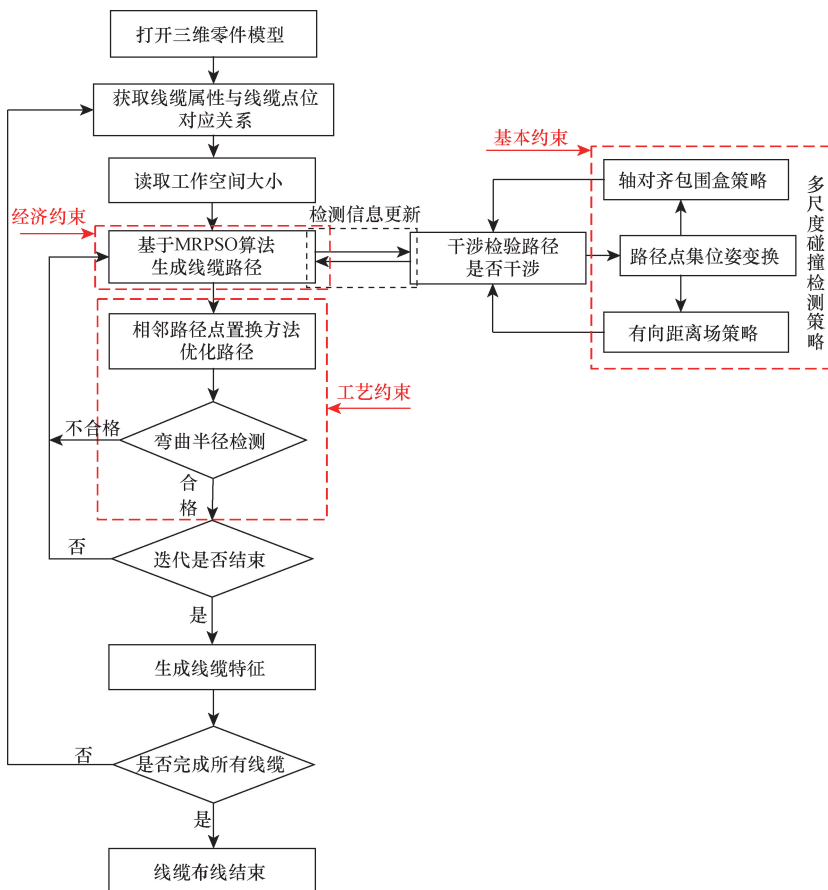


图2 线缆自动布线总体流程图

Fig. 2 Overall flowchart for automated cable routing

可能出现交叉现象的路径进行优化,完成线缆弯曲半径检测,在布线路径上生成布线线缆特征。

## 2 基于 MRPSO 算法的线缆自动布局方法

### 2.1 线缆位姿变换

线缆可以看成是由点集组成的序列,线缆的敷设作业也可以看成一个点到点的过程,即工人通过手持方式将线缆固定在产品上一个个固定点上,再用工具进行固定。线缆的路径可看成一个点到点的运动,线缆布线路径是指线缆的一端在整个布线过程中所经过的轨迹,可以定义关键路径点为线缆一端在布线某时刻所处的空间位置,按固定的时间间隔将关键路径点进行记录,将得到的密集点序列表征线缆的整体路径<sup>[15]</sup>。

通过将线缆布线路径看成点序列(点集),将线缆与零部件的干涉检测问题转换为三维空间中的离散路径点与零部件的干涉问题。基于该思想,线缆布线路径求解问题首先要解决离散路径点与零部件之间的位姿关系问题。具体原因:在三维数字化模型中,装配一定数量的零部件,这些零部件有各自的建模坐标系,各零件的几何特征根据建模坐标系构成,各零件之间的位置关系通过装配坐标系进行表达<sup>[16]</sup>;所有几何要素如零部件、线缆、坐标点、坐标系都是基于同一个装配坐标系建立,从而方便对每一个几何要素的位置和姿态进行描述。据此也说明了获

取到的三维数模几何信息中,只可得出路径、零部件等几何要素相对于装配坐标系的位姿关系,而无法给定路径和零部件之间的位姿关系。

如图3所示,在装配坐标系ASM下构建了一系列线缆布线路径点和零部件,由装配坐标系ASM可以得出零部件A、B在空间下的位姿,使用变换矩阵 $T_A$ 、 $T_B$ 表示,也可以得出线缆布线路径点的空间位置,因路径点没有大小,可以看成无姿态变化,用位置向量 $P$ 表示。通过上述方式,零部件A、B与线缆布线路径点 $p$ 之间的位姿关系是未知的。若通过零部件装配坐标系下的变换矩阵,以及路径点位置向量进行布线路径的自动布局,既要考虑零部件姿态的变化,又要考虑线缆上所有路径点碰撞干涉检测的复杂度,会使问题解决变得复杂。若将路径点全部转变到零部件本身的建模坐标系上,确定路径点与零部件之间的位置关系,就无须考虑零部件复杂的姿态变换问题。因此需要对复杂机电产品内几何要素进行位姿变换以方便检测线缆与零部件的干涉。

通过齐次变换矩阵来描述对象与对象之间的相对位置关系(平移和旋转关系)。变换矩阵 $T_{a \leftarrow b}$ 如式(3)所示,表示对象“b”相对于零部件“a”的位姿关系, $T_{a \leftarrow b}$ 由旋转矩阵 $R_{3 \times 3}$ 和平移向量 $P_{3 \times 1}$ 组成,即

$$T_{a \leftarrow b} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中: $R_{3 \times 3}$ 为“b”的坐标系相对于“a”的坐标系的

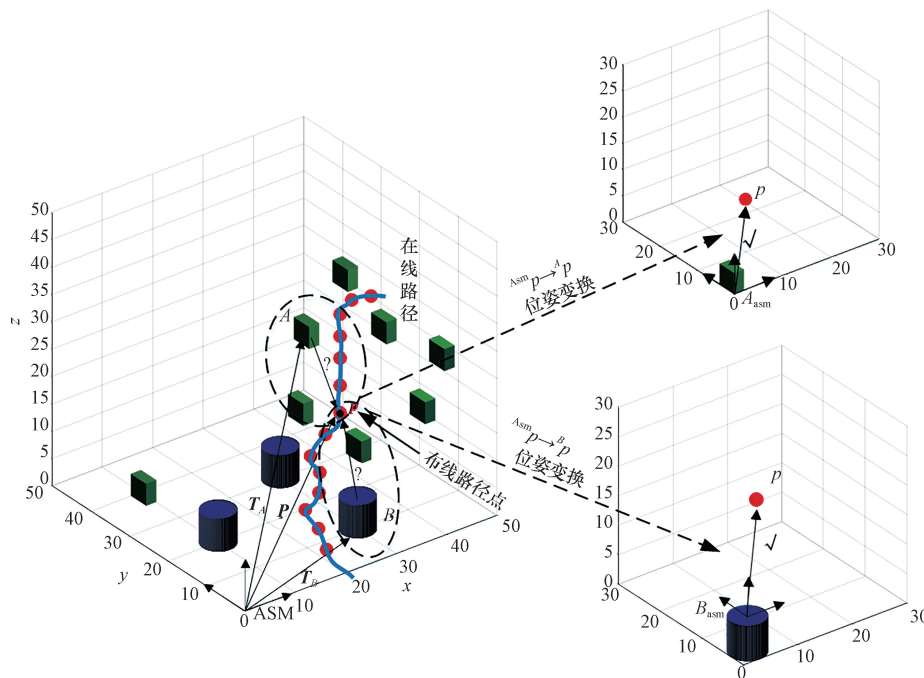


图3 布线路径点位姿变换

Fig. 3 Wiring path point attitude transformation

旋转矩阵,具体含义为一个3行3列的矩阵,其值如式(4)所示,表示“b”坐标系的X、Y、Z方向轴分别投影到“a”坐标系X、Y、Z方向轴上的值(内积)。 $P_{3 \times 1}$  ( $P_{a \leftarrow b \text{ org}}$ )为“b”的坐标系原点相对于“a”的坐标系的变化矢量(位置向量)。

$$\begin{aligned} R_{3 \times 3} = R_{a \leftarrow b} &= \begin{bmatrix} \hat{X}_b \hat{X}_a & \hat{Y}_b \hat{X}_a & \hat{Z}_b \hat{X}_a \\ \hat{X}_b \hat{Y}_a & \hat{Y}_b \hat{Y}_a & \hat{Z}_b \hat{Y}_a \\ \hat{X}_b \hat{Z}_a & \hat{Y}_b \hat{Z}_a & \hat{Z}_b \hat{Z}_a \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} | & | & | \\ {}^a \hat{X}_b & {}^a \hat{Y}_b & {}^a \hat{Z}_b \\ | & | & | \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

以图3中零件A和装配坐标系ASM之间的位姿关系为例,变换矩阵 $T_{ASM \leftarrow A}$  ( $T_A$ )、旋转矩阵 $R_{ASM \leftarrow A}$ 和变化矢量 $P_A$ 如式(5)所示。

$$\begin{cases} T_{ASM \leftarrow A} = \begin{bmatrix} R_{ASM \leftarrow A} & P_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_{ASM \leftarrow A} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.3 \\ 0.5 & 0.9 & 0.4 \\ 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} \\ P_A = \begin{bmatrix} 40 \\ 40 \\ 25 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

通过捆绑“坐标系”的方式,各零件的空间位置关系可以得到确定的描述。为方便在算法搜索过程中对布线路径进行干涉检测,基于变换矩阵对布线路径点进行位姿变换,将以装配坐标系为创建基准的路径点转换为相对于建模坐标系为创建基准的路径点。

图3中装配坐标系ASM下有一路径点 $p$ 和零件B,路径点 $p$ 的坐标为 ${}^{Asm}p = (a, b, c)^T$ ,零件B相对于装配坐标系ASM的齐次变换矩阵为 $T_{Asm \leftarrow B}$  ( $T_B$ ),要求出路径点 $p$ 相对于零件B建模坐标系 $B_{asm}$ 的坐标 ${}^B p = (a', b', c')^T$ ,位姿变换公式如式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} {}^B p \\ 1 \end{bmatrix} = T_{B \leftarrow Asm} \begin{bmatrix} {}^{Asm} p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由齐次变换矩阵的特点可知

$$\begin{aligned} T_{Asm \leftarrow B} T_{B \leftarrow Asm} &= I_{4 \times 4} \\ &= \begin{bmatrix} R_{Asm \leftarrow B} & P_{Asm \leftarrow B \text{ org}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R_{B \leftarrow Asm} & P_{B \leftarrow Asm \text{ org}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} & & & 0 \\ I_{3 \times 3} & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)得

$$\begin{cases} R_{Asm \leftarrow B} R_{B \leftarrow Asm} = I_{3 \times 3} \\ P_{Asm \leftarrow B \text{ org}} + R_{Asm \leftarrow B} P_{B \leftarrow Asm \text{ org}} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)以及旋转矩阵的正交性可求得齐次变换矩阵的逆 $T_{B \leftarrow Asm}$ 为

$$\begin{aligned} T_{B \leftarrow Asm} &= T_{Asm \leftarrow B}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} R^T_{Asm \leftarrow B} & -R^T_{Asm \leftarrow B} P_{Asm \leftarrow B \text{ org}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)推算可得

$${}^B p = R^T_{Asm \leftarrow B} ({}^A p - P_{Asm \leftarrow B \text{ org}}) \quad (10)$$

通过式(10)将装配坐标系下的路径点转换到零件建模坐标系下的路径点,进而对路径点集合进行位姿变换,整条线缆布线路径便映射到了零件B的建模坐标系 $B_{asm}$ 下。

## 2.2 粒子的多重规则

### 2.2.1 粒子个数的选择

MRPSO算法粒子个数 $k$ 的大小决定了布线路径的路径点个数。一条布线路径的路径点个数是由布线空间线缆的起始端、终止端之间零部件复杂程度决定的,零部件布局越复杂,布线路径需要更多的路径点来控制路径的走向。粒子个数对于算法有效运算次数的影响很大,若布线环境简单,较多的粒子个数会增加算法的运算次数,增加不必要的运算时间;若布线环境复杂,较少的粒子个数,则会增加运算次数而导致运算时间过长或求解效果不理想。为了确定路径复杂程度与粒子个数数量之间的关系,通过大量的调试实验,得到粒子个数、零件个数(0~40、40~80、80~120)、路径长度之间的近似关系,如表1所示。在设计算法时,粒子个数通过实际的布线情况进行动态调整,以达到良好的布线效果。

表1 粒子个数-零件个数-路径长度之间的近似关系

Table 1 Approximate relationship between number of particles-number of parts-path length

路径长度/cm	粒子个数		
	0~40	40~80	80~120
100	3	7	10
200	2	5	8
300	1	4	7

### 2.2.2 多尺度碰撞检测策略

为保证布线路径与数字化模型不产生干涉碰撞,在算法求解过程中,需采用碰撞检测技术对路径进行检测。单一的碰撞检测技术无法充分利用布线空间,依据零件本身不同的复杂程度,用轴对齐包围盒和有向距离场相结合的多尺度碰撞检测策略对布线路径与零件间的是否碰撞进行检测。

1) 轴对齐包围盒碰撞检测

以轴对齐包围盒 (axis aligned bounding box, AABB) 方法来检测线缆布线路径与零件是否发生碰撞检测。

轴对齐包围盒是用平行于零件建模坐标系轴、且包含零件各边的最小六面体来近似描述几何零件对象, 并通过与布线路径进行相交测试以达到碰撞检测的目的<sup>[17]</sup>。轴对齐包围盒如式(11)所示。

$$\begin{cases} x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \\ z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

如图 4 所示, 要判断线缆布线路径是否与零件干涉, 设线缆半径为  $r_c$ , 路径点集  $(x_i, y_i, z_i) [i \in (1, 2, \dots, n)]$ ,  $n$  为路径点个数, 将算法求出的线缆布线路径点集  $(x_i, y_i, z_i)$  代入式(12)可得

$$\begin{cases} x_i \leq x_{\min} - r_c \vee x_i \geq x_{\max} + r_c \\ y_i \leq y_{\min} - r_c \vee y_i \geq y_{\max} + r_c \\ z_i \leq z_{\min} - r_c \vee z_i \geq z_{\max} + r_c \end{cases} \quad (12)$$

若  $(x_i, y_i, z_i)$  满足式(12)三项中的任意一项, 说明路径点集在包围盒外部, 布线路径与零件不发生干涉。

2) 有向距离场碰撞检测

采用轴对齐包围盒策略进行路径搜索, 虽能保证布线路径与零件不干涉, 但有一些零部件结构狭窄, 或有孔洞特征可以让路径穿过, 轴对齐包围盒策略生成的零部件包围盒较大, 导致有很多可用布线空间被浪费, 且布线路径无法穿过零部件的孔洞。为尽可能的利用布线空间, 首先对这类零部件进行三角面片处理, 如图 5 所示, 将零部件的表面划

分为多个三角面片组成的集合, 构建基于三维几何图元的有向距离场 (signed distance field, SDF), 采用有向距离场避障策略, 保证线缆布线路径与零部件的不干涉。

利用三角面片集合近似表示三维模型, 如图 6 所示, 三维模型内的零件被三角面片化, 三角面片由 3 个顶点坐标组成的三角形平面。

通过读取模型的 STL 文件数据来获取三角面片几何数据, 包括三角面片三顶点坐标、外法矢量。三角形面片的外法矢量为指向零件实体外部的法矢量坐标, 可根据右手螺旋法则, 用三顶点坐标值计算, 假设三顶点坐标值为  $(v_{1x}, v_{1y}, v_{1z})$ 、 $(v_{2x}, v_{2y}, v_{2z})$ 、 $(v_{3x}, v_{3y}, v_{3z})$ , 外法矢量  $N(n_x, n_y, n_z)$  计算如式(13)所示。

$$\begin{cases} n_x = (v_{1y} - v_{3y})(v_{2z} - v_{3z}) - \\ \quad (v_{1z} - v_{3z})(v_{2y} - v_{3y}) \\ n_y = (v_{1z} - v_{3z})(v_{2x} - v_{3x}) - \\ \quad (v_{2z} - v_{3z})(v_{1x} - v_{3x}) \\ n_z = (v_{1x} - v_{3x})(v_{2y} - v_{3y}) - \\ \quad (v_{2x} - v_{3x})(v_{1y} - v_{3y}) \end{cases} \quad (13)$$

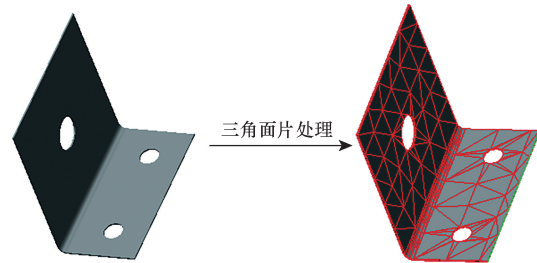


图 5 零件三角面片处理  
Fig. 5 Triangulation of parts

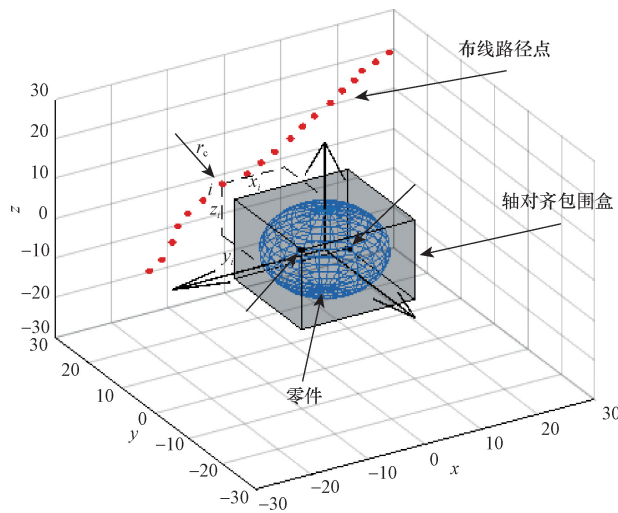


图 4 线缆路径点与轴对齐包围盒的干涉检测  
Fig. 4 Interference detection of cable path points and axis-aligned wraparound boxes

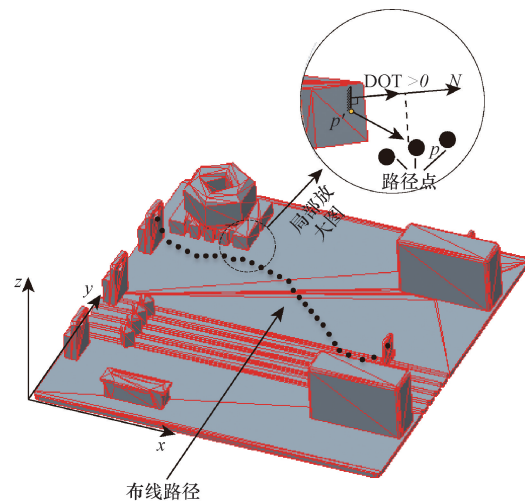


图 6 线缆路径点与数模距离场的干涉检测  
Fig. 6 Interference detection between cable path points and digital-modeled distance fields

线缆路径点为  $p$ , 三角面片  $\Gamma$  的三顶点分别为  $V_0, V_1$  和  $V_2$ , 三角面片上任意一点可以用参数方程  $\Gamma(s, t)$  表示,  $\Gamma(s, t) = V_0 + se_0 + te_1, (s, t) \in D, D = \{(s, t) : s \in [0, 1], s + t \leq 1\}, e_0 = V_1 - V_0$ . 假设三角面片上最接近路径点  $p$  的点为  $p'$ , 则点  $p$  与点  $p'$  的距离为  $\|\Gamma(s, t) - p\|$ , 为了保证非负, 取平方值  $Q = \|\Gamma(s, t) - p\|^2$  作为最短距离, 展开得到关于自变量  $s$  和  $t$  的函数  $Q = (e_0e_0) + 2\{[e_0(V_0 - p)]e_1\}t^2s - 2e_1(V_0 - p)t + (V_0 - p)^2$ . 只要求出函数  $Q$  的最小值, 就可以求出  $p'$ , 计算函数  $Q$  的梯度如式(14)所示。

$$\nabla Q = \left\{ \frac{\partial Q}{\partial s}, \frac{\partial Q}{\partial t} \right\} = 2 \left[ (e_0e_0)s + (e_0e_1)t + e_0(V_0 - p), (e_0e_1)s + (e_1e_1)t - e_1(V_0 - p) \right] \quad (14)$$

令梯度  $\nabla Q = (0, 0)$ , 解得

$$\begin{cases} s = \frac{-(e_0e_1)e_1(V_0 - p) - (e_1e_1)e_0(V_0 - p)}{(e_0e_0)(e_1e_1) - (e_0e_1)^2} \\ t = \frac{(e_0e_1)e_0(V_0 - p) - (e_0e_0)e_1(V_0 - p)}{(e_0e_0)(e_1e_1) - (e_0e_1)^2} \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)内的参数代入  $\Gamma(s, t)$ , 求出三角面片上距离路径点  $p$  的最近点  $p'$ 。

在得出了三角面片上的  $p'$ 、路径点  $p$  以及三角面上的外法矢量  $N(n_x, n_y, n_z)$ , 求出  $p'p$  与外法矢量  $N$  的数量积  $\text{DOT} = p'p \cdot N$ , 路径点  $p$  的场值如式(16)所示。

$$\text{sign}(p) = \begin{cases} -1, & \text{DOT} < 0 \\ 0, & \text{DOT} = 0 \\ 1, & \text{DOT} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$\text{sign}(p)$  取值  $-1, 0, 1$  分别代表路径点在零件内部、零件外表面上和零件外。通过零件三角面片化, 建立有向距离场, 便可以在较大利用布线空间的情况下得出路径点与零件的位置关系。通过构建基于三维几何图元的有向距离场, 在计算的布线路径经过特殊零件时, 能有效地利用零件的布线空间。

### 2.2.3 路径优化与弯曲半径检测

粒子在搜寻到可能的最优值时, 需对求解的路径点集合进行优化以提高路径的质量, 通过相邻路径点置换方法减少线缆弯曲度小甚至扭结的可能性。相邻路径点置换方法分为交叉检验和交叉消除两步骤<sup>[18]</sup>。在完成路径优化后还需对最终路径进行弯曲半径检测, 以保证路径符合实际布线要求。

#### 1) 交叉检验

布线路径的交叉如图7所示, 设  $i < j, (i,$

$i + 1)$  表示线缆路径点  $i \sim i + 1$  的子路径,  $(j, j + 1)$  表示线缆路径点  $j \sim j + 1$  的子路径, 路径的交叉点发生在  $(i, i + 1)$  与  $(j, j + 1)$  的连线上, 也有可能出现交叉点发生在多条子路径的情况。针对发生交叉点的子路径的不唯一性, 需对所有子路径进行交叉检验, 具体方法是判断全部子路径的线段之间是否相交。

设求解的子路径点  $i, i + 1, j, j + 1$  的路径三维坐标为  $C_1(X_i, Y_i, Z_i), C_2(X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}), C_3(X_j, Y_j, Z_j), C_4(X_{j+1}, Y_{j+1}, Z_{j+1})$ , 如图8所示。路径  $(i, i + 1)$  与路径  $(j, j + 1)$  所在直线  $L_1, L_2$  的方程分别为

$$\begin{cases} L_1: P = P_1 + t_1L_1, t_1 \in (-\infty, +\infty), \\ P_1 = C_1, L_1 = \frac{C_2 - C_1}{|C_2 - C_1|} \\ L_2: P = P_2 + t_2L_2, t_2 \in (-\infty, +\infty), \\ P_2 = C_3, L_2 = \frac{C_4 - C_3}{|C_4 - C_3|} \end{cases} \quad (17)$$

先计算点  $C_3$  到  $L_1$  的距离  $C_3E$  为

$$|C_3E| = |C_3C_1L_1| \quad (18)$$

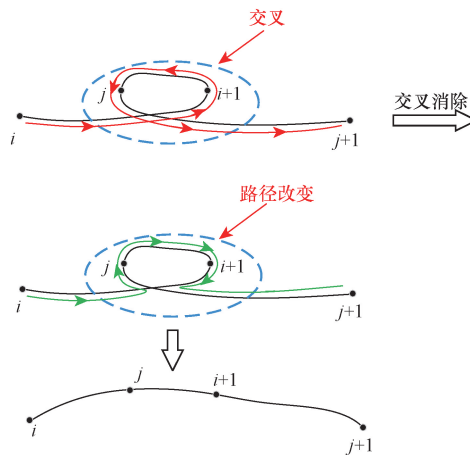


图7 线缆交叉消除示意图

Fig.7 Cable crossing elimination schematic

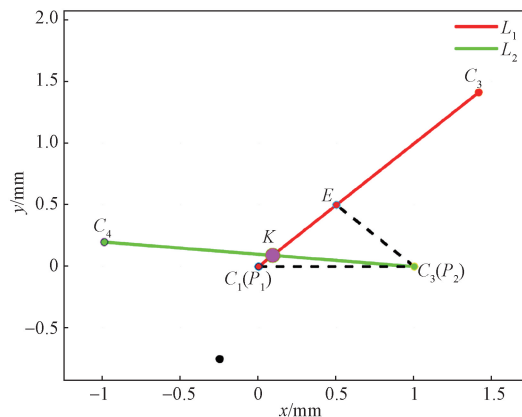


图8 线缆子路径交叉检验图

Fig.8 Cable sub-path cross-check diagram

假设  $L_1$ 、 $L_2$  的交点为  $K$ , 两直线的夹角  $\theta$  余弦值为  $\cos\theta = \frac{|L_1 L_2|}{|C_3 E|}$ , 则点  $K$  到点  $E$  的距离为

$$|KE| = \frac{|C_3 E|}{\tan\theta} = \frac{|C_3 E|}{\sqrt{\cos^2\theta - 1}} \quad (19)$$

点  $E$  由投影关系得

$$OE = OC_1 + |P_1 P_2 L_1| L_1 \quad (20)$$

交点  $K$  可以存在于  $E$  的两侧, 记两侧的点为  $K_1$  和  $K_2$ , 计算如下。

$$OK_1 = OE + |KE| L_1 \quad (21)$$

$$OK_2 = OE - |KE| L_1 \quad (22)$$

计算  $K_1$  和  $K_2$  到  $L_2$  的距离  $|C_3 K_1 L_2|$ 、 $|C_3 K_2 L_2|$ , 距离  $L_2$  小的点必为所求交点  $K$ 。还要判断  $K$  点是否在线段  $(i, i+1)$  和  $(j, j+1)$  上, 只需判断  $K$  点的坐标  $K(x, y, z)$  是否在线段的定义域上即可, 当

$$\begin{cases} \min(X_i, X_{i+1}) \leq x \leq \max(X_i, X_{i+1}) \\ \min(Y_i, Y_{i+1}) \leq y \leq \max(Y_i, Y_{i+1}) \\ \min(Z_i, Z_{i+1}) \leq z \leq \max(Z_i, Z_{i+1}) \end{cases} \quad (23)$$

则子路径  $(i, i+1)$  与子路径  $(j, j+1)$  交叉。由于子路径不需要与相邻子路径进行交叉检验, 设路径点个数为  $n$ , 经过  $(n-3)(n-2)/2$  次总交叉检验后即可检验出是否出现交叉。

## 2) 交叉消除

如图 7 所示, 经交叉检验, 子路径  $(i, i+1)$  与子路径  $(j, j+1)$  交叉, 只需将路径  $(i, i+1)$  的终点  $i+1$  与  $(j, j+1)$  的起点掉换顺序, 既将线缆路径点顺序由  $i \rightarrow i+1 \rightarrow \dots \rightarrow j \rightarrow j+1$  变为  $i \rightarrow j \rightarrow \dots \rightarrow i+1 \rightarrow j+1$ , 将发生路径交叉的两路径之间的所有路径点进行逆序, 线缆路径便可完成交叉消除。

## 3) 弯曲半径检测

弯曲半径检测的对象是 MRPSO 算法经过求解输出的  $n+1$  个路径点组成的集合  $Q = (q_0, q_1, \dots, q_n)$ , 通过四阶准均匀 B 样条曲线法, 将路径点集合拟合为 B 样条  $Q(u)$ , 实际计算获得的是密集的 B 样条点集  $Q$ , 通过数值分析计算点集的最大弯曲半径  $R_{\max}$  与最小弯曲半径  $R_{\min}$ , 区间  $[R_{\min}, R_{\max}]$  作为布线路径的弯曲半径变化范围, 与布线线缆弯曲半径要求做对比以完成布线路径的弯曲半径检测。

四阶准均匀 B 样条曲线计算公式为

$$Q(u) = \sum_{i=0}^n q_i B_{i,4}(u) = [q_0 \quad q_1 \quad \dots \quad q_i] \begin{bmatrix} B_{0,4}(u) \\ B_{1,4}(u) \\ B_{2,4}(u) \\ \vdots \\ B_{i,4}(u) \end{bmatrix} \quad (24)$$

式 (24) 中:  $u$  为自变量, 定义域为  $[u_3, u_{n+1}]$ ;  $B_{i,4}(u)$  为基函数。通过式 (25) 的递推式, 可求出  $B_{i,k}(u)$  为

$$\begin{cases} B_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ B_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k-1} - u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u) \\ \text{定义 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

$u_i$  被称为节点矢量, 是一组非递减的连续变化值, 该序列如式 (26) 所示。

$$[u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n+4}] = \left[ 0, 0, 0, 0, \frac{1}{n-3}, \frac{2}{n-3}, \dots, \frac{n-4}{n-3}, 1, 1, 1, 1 \right] \quad (26)$$

由于所采用四阶准均匀 B 样条曲线法所得出的 B 样条点集  $Q$  足够大, 路径的弯曲半径的计算式近似为

$$R = \left| \frac{\Delta s}{\Delta \varphi} \right| \quad (27)$$

式 (27) 中:  $\Delta s$  为  $Q$  内相邻点相连的直线距离;  $\Delta \varphi$  为  $Q$  内相邻点分别与下一点相连所得两直线的夹角。

## 2.3 MRPSO 算法设计与实现步骤

### 2.3.1 算法介绍

根据所阐述粒子的多重规则, 结合标准粒子群算法, 将粒子群算法改进为适配复杂机电产品布线的多重规则粒子群算法 (MRPSO), 通过约束粒子, 在算法求解前对粒子个数进行控制, 求解过程中采用两种碰撞检测策略、求解后对路径进行相邻路径点置换和弯曲半径检测, 并通过自适应权重保证粒子的搜索能力, 以提高解的质量。MRPSO 算法将布线路径求解问题看成一个寻优问题, 而将解看成一个空间中的鸟, 称为“粒子”。布线路径可以看成是由包含起始端、终止端以及起始端和终止端之间若干个散点 (路径点) 依据先后顺序拟合得到的光滑曲线。通过 MRPSO 算法进行线缆布线路径求解的核心思想如下。

(1) 将路径点看成粒子, 粒子集合构成线缆布线路径。

(2) 将布线空间看成每个粒子的可行域, 即解空间。

(3) 将零件等看成障碍物, 即约束条件。

(4) 路径长度作为适应度函数主要参数。

基本参数如下。

全局搜索空间中有  $n$  个粒子组成的  $k$  个种群集

合  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ , 每个种群独立存在, 但同时受到全局最优值的约束。

第  $i$  个粒子表示一个三维向量  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})^T$ 。

第  $i$  个粒子的速度为三维向量  $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, V_{i3})^T$ 。个体种群极值为  $P_{im} = (P_{i1}, P_{i2}, P_{i3})$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ , 每个种群都有个体种群极值, 且极值随着迭代过程实时更新, 个体种群能够记住种群迭代时的最优值。全局最优值为  $P_g = \text{MIN}\{F(P_{ij})\}$ 。

速度更新公式引入自适应权重的速度更新思想, 即  $V_{id}^{H+1} = \omega V_{id}^H + c_1 r_1 (P_{id}^H - X_{id}^H) + c_2 r_2 (P_{gd}^H - X_{id}^H)$ , 位置更新公式为  $X_{id}^{H+1} = X_{id}^H + V_{id}^{H+1}$ 。在迭代过程中的每一代中, 都要对粒子种群中所有粒子进行速度更新和位置更新。通过评价粒子种群的适应度函数, 确定在  $t$  代的各粒子的最佳位置  $p_{best}$ , 以及全局所发现的最优位置  $g_{best}$ , 通过  $p_{best}$  和  $g_{best}$  按照式(28)和式(29)来更新粒子的速度和位置。

$$v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{ij} - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [p_{gj} - x_{ij}(t)] \quad (28)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{i,j}(t+1), j = 1, 2, \dots, 3 \quad (29)$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子, 控制粒子搜索时的全局方向和局部方向步长;  $r_1$  和  $r_2$  为随机因子, 为  $0 \sim 1$  的均匀分布的随机数, 随机值保证搜索方向的多样化, 有利于粒子搜索到最佳位置;  $c_1 r_1 [p_{ij} - x_{ij}(t)]$  为个体认知部分;  $c_2 r_2 [p_{gj} - x_{ij}(t)]$  为社会认知部分。搜索期间将粒子速度和位置控制在  $[v_{min}, v_{max}]$  和  $[x_{min}, x_{max}]$ , 速度和位置进行适当合理的约束, 保证粒子在空间搜索步长不至于过大而忽略了目标位置, 也保证了粒子飞行不越界,  $\omega$  为自适应权重, 控制粒子的全局和局部搜索能力,  $\omega v_{i,j}(t)$  为权重速度分量, 是上一代粒子的速度与权重的乘积, 个体认知、社会认知、权重分量三者的矢量之和, 构成了粒子的速度分量, 如图 9 所示。

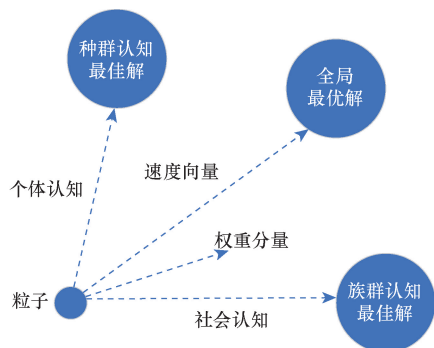


图 9 种群粒子搜索速度合成图

Fig. 9 Synthesized plot of population particle search speed

### 2.3.2 自适应权重

粒子的飞行速度为粒子每一次迭代过程中的步长, 飞行速度大, 有助于粒子更快到达全局最优解的区域。但逼近最优解时, 大的飞行速度使得粒子很容易飞过最优解, 容易造成局部最优, 飞行速度的有效控制可以使粒子拥有良好的全局和局部搜索能力, 更容易收敛到全局最优。

为了合理控制算法的全局和局部搜索能力, 对权重采用非线性动态惯性权重公式, 表达式为

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) [F(P_{ij}) - F_{\min}]}{F_{\text{avg}} - F_{\min}}, & F(P_{ij}) \leq F_{\text{avg}} \\ \omega_{\max}, & F(P_{ij}) > F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (30)$$

权重在每次迭代时, 可以选取不同的值来改变粒子的飞行速度, 称为自适应权重。权重选取标准为: 以平均目标函数值  $F_{\text{avg}}$  为评判点, 在当前代的适应度函数(目标函数值)远远差于平均值时, 采用尽可能大的权重, 使得粒子更注重全局搜索; 在当前代的适应度函数(目标函数值)优于或接近平均值时, 降低权重, 使得飞行速度降低, 粒子的局部搜索能力更强, 而且在每一次迭代中, 目标函数  $F_{\text{avg}}$  都会更新, 使得所有粒子都可以较好的向搜索区域靠拢。

### 2.3.3 算法流程

首先确定适应度函数, 假设路径点集为  $q_i = (d_{ix}, d_{iy}, d_{iz})$ , 适应度函数  $f(q_i)$  的数学模型如式(31)所示。

$$\begin{cases} \min[f(q_i)] = \text{sum}\{\text{sqrt}[\text{diff}(d_{ix})^2 + \text{diff}(d_{iy})^2 + \text{diff}(d_{iz})^2]\} + K\text{ConSt} \\ \text{s. t.} \begin{cases} \text{AABB}(q_i, a) = 0 \\ \text{Sign}(q_i) = 0 \\ h(q_i) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

$$\text{ConSt} = \sum_{i=0}^n [h(q_i) + \text{AABB}(q_i, a) + \text{Sign}(q_i)] \quad (32)$$

式中:  $f(q_i)$  为 MRPSO 算法适应度计算函数;  $\text{sum}\{\text{sqrt}[\text{diff}(d_{ix})^2 + \text{diff}(d_{iy})^2 + \text{diff}(d_{iz})^2]\}$  为路径点的差分距离求和, 代表线缆的路径长度;  $K\text{ConSt}$  为约束权重, 由路径点集合内所有点的  $\text{AABB}(q_i, a)$ 、 $\text{Sign}(q_i)$ 、 $h(q_i)$  数量和计算得出,  $\text{AABB}(q_i, a)$  为包围盒计算干涉函数,  $a$  为电磁系数, 通过增加包围盒体积来防止路径受强电磁区域的影响。当布线路径与零件不干涉时,  $\text{AABB}(q_i, a) = 0$ , 否则,  $\text{AABB}(q_i, a) \neq 0$ ;  $\text{Sign}(q_i)$  为距离

场计算干涉函数,当  $\text{Sign}(q_i) = 0$  时,布线路径与零件不干涉,否则  $\text{Sign}(q_i) \neq 0$ ;  $h(q_i)$  为贴壁约束,  $h(q_i) = 0$  表示路径达到了贴壁要求,否则,  $h(q_i) \neq 0$ 。约束权重的大小会影响适应度函数的值,进而促进粒子搜寻出符合要求的路径。

MRPSO 算法流程如下。

**步骤 1** 确定种群数量,将各种群初始化,确定种群内的粒子个数,以随机的方式对每个粒子的初始位置与速度进行设置,确定迭代次数、粒子速度界限、粒子位置界限。

**步骤 2** 获取各种群粒子内  $n$  个粒子的  $X_i$ , 获取  $n$  个  $X_i$  的数据,进行分段样条插值,得出  $100n$  个散点集。

**步骤 3** 将散点集进行位姿变换,对每个散点针对不同的零件进行包围盒碰撞检测和有向距离场碰撞检测,求出贴壁约束值,计算 ConSt,得出适应度函数值。

**步骤 4** 更新各种群的种群极值  $P_{im}$ , 以及全局最优值  $P_g$ 。

**步骤 5** 根据式(28)和式(29)调整粒子的速度和位置,判断粒子速度和位置是否在界限内,越界则对速度和位置进行重置。

**步骤 6** 粒子和速度更新后,重复步骤 2 ~ 步骤 3。

**步骤 7** 将每一个种群当代的适应度函数值与种群极值  $P_{im}$  比较。若当代适应度值更优,则更新  $P_{im}$  的值,将  $P_{im}$  的值与全局最优值  $P_g$  比较,若  $P_{im}$  的值更优,则同时更新  $P_g$  的值。

**步骤 8** 检查迭代次数是否达到最大或者最优解不再发生变化,若未达到,则返回步骤 5;若达到条件,则停止迭代。

### 3 仿真分析

为了比较 MRPSO 算法的性能,利用标准粒子群算法(standard particle swarm optimization, SPSO)、带加速度常数的粒子群算法(modified time-varying

accelerator coefficients particle swarm optimization, MRPSO-TVAC)进行算法的性能比较。比较过程中,采用 Sphere、Ackley、Griewank、Rastrigin 标准测试函数(表 2)进行测试。

表 2 中,  $f_1$  是单峰函数,有唯一全局最小值,检测算法的全局搜索能力和效率。 $f_2$ 、 $f_3$  和  $f_4$  属于典型的非线性多模态函数,存在许多局部极小值点,可以检测算法跳出局部的能力,其中  $f_4$  的峰形高低起伏不定更为明显,很难搜索到最优值,  $f_2$  的外部峰形几乎平坦,但中心存在凹陷,使得算法很难辨别搜索方向。布线路径求解属于三维空间下的寻优问题,故本次仿真分析的测试函数的维数  $D$  取 3。

实验环境如下:对每个测试函数,设置迭代次数为 200,维数为 3,种群个数为 100,学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  均取 2。初始种群在问题域内用随机数产生。对每个函数进行测试,独立执行 50 次,取平均最优适应度,迭代次数、仿真结果如图 10 所示。

表 2 中,  $f_1$  是单峰函数,有唯一全局最小值,检测算法的全局搜索能力和效率。 $f_2$ 、 $f_3$  和  $f_4$  属于典型的非线性多模态函数,存在许多局部极小值点,可以检测算法跳出局部的能力,其中  $f_4$  的峰形高低起伏不定更为明显,很难搜索到最优值,  $f_2$  的外部峰形几乎平坦,但中心存在凹陷,使得算法很难辨别搜索方向。布线路径求解属于三维空间下的寻优问题,故仿真分析的测试函数的维数  $D$  取 3。

实验环境如下:对每个测试函数,设置迭代次数为 200,维数为 3,种群个数为 100,学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  均取 2。初始种群在问题域内用随机数产生。对每个函数进行测试,独立执行 50 次,取平均最优适应度,迭代次数、仿真结果如图 10 所示。

由图 10 的结果可知,对于  $f_1$  函数,MRPSO 算法在针对唯一极值的函数搜索上,刚开始的适应度虽然大于 SPSO 和 MRPSO-TVAC 两种算法,但收敛速度较快,在更早的迭代次数上得到了最优解。对于  $f_2$ 、 $f_3$  和  $f_4$  这类局部极小值较多、图像起伏不定的函数,MRPSO 算法的效果都较好。在  $f_3$  函数的测试中,

表 2 标准测试函数

Table 2 Standard test functions

函数	函数名	表达式	规模	最优
$f_1$	Sphere	$\sum_{j=1}^D x_j^2$	$\pm 100$	0
$f_2$	Ackley	$-20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{j=1}^D x_j^2}\right) - \exp\left[\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i) + 20 + e\right]$	$\pm 32$	0
$f_3$	Griewank	$\frac{1}{4000} \sum_{j=1}^D x_j^2 - \prod_{j=1}^D \left[\cos\left(\frac{x_j}{\sqrt{j}}\right)\right] + 1$	$\pm 600$	0
$f_4$	Rastrigin	$\sum_{j=1}^D [x_j^2 - 10 \cos(2\pi x_j) + 10]$	$\pm 5.12$	0

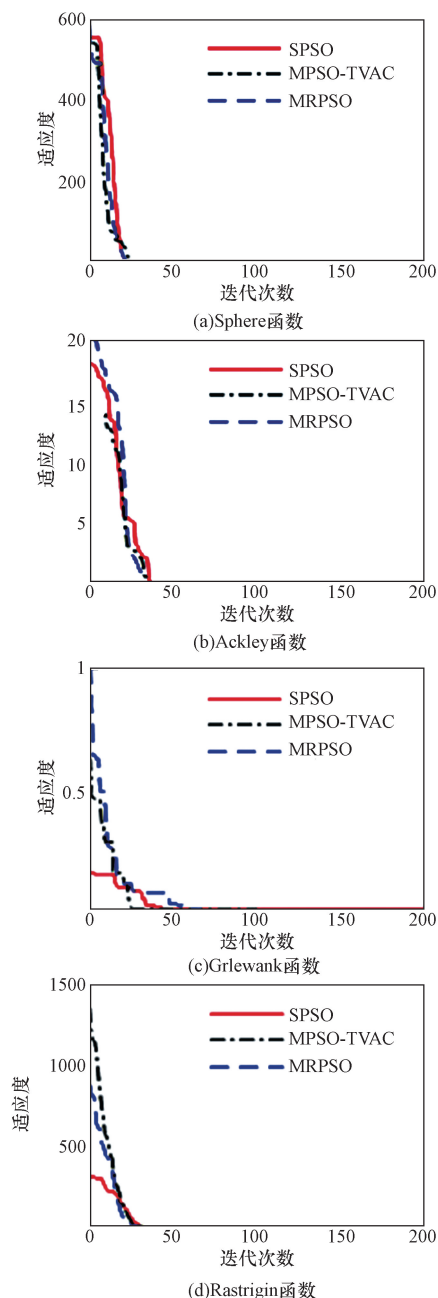


图 10 MRPSO 算法与其他算法性能比较  
Fig. 10 Performance comparison of MRPSO algorithm with other algorithms

可以看出,虽然 MRPSO 算法的速度和迭代数较多,但相比于 SPSO 和 MPSO-TVAC 算法,MRPSO 算法求得的解更精确,算法执行时间的适当增加也在允许范围内。

## 4 实例

为了验证 MRPSO 算法的布线效率和优势,将算法应用在三维模型上进行线缆路径生成比较。三维模型内的零件数量为 50,设每个种群粒子数为 3,种群数设为 10,最大迭代次数为 50。测试计算机

硬件环境如下:CPU 为 3.6GHz AMD R5 3600,内存为 16 GB,显卡为 AMD RX580。

采用标准 PSO 算法与 MRPSO 算法所生成的布线路径如图 11 所示。可以发现 MRPSO 算法通过多尺度避障策略可以有效地识别带孔零件并让布线路径穿过孔,避障能力更强,生成的布线路径无突变点且光滑,有利于线缆的敷设。算法具体运算时间和迭代终止次数如表 3 所示。

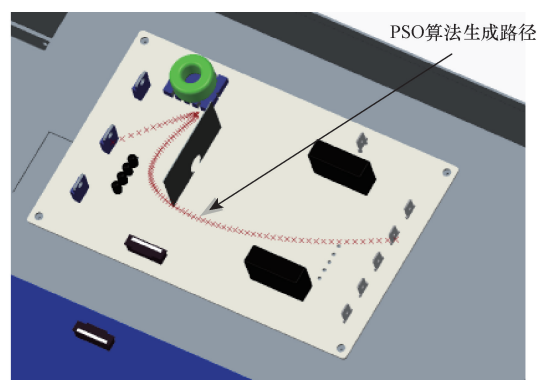
由表 3 可知,相比于 PSO 算法,MRPSO 算法在线缆路径的计算时间和迭代次数上虽然都比 PSO 算法要稍多,但在优化的路径质量上,采用 MRPSO 算法生成的线缆路径效果远优于采用 PSO 算法生成的线缆路径。而对于时间上的部分损失相对而言是可以接受的。

线缆的实际布线效果如图 12(a)所示,其中 I、

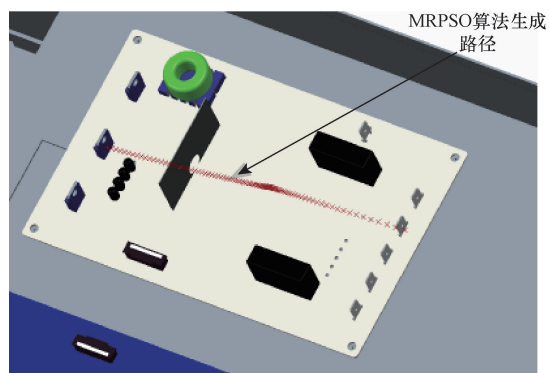
表 3 布线路径生成速度对比

Table 3 Wiring path generation speed comparison

算例	算法	计算时间/s	迭代次数
图 11(a)	PSO	30	13
图 11(b)	MRPSO	50	20



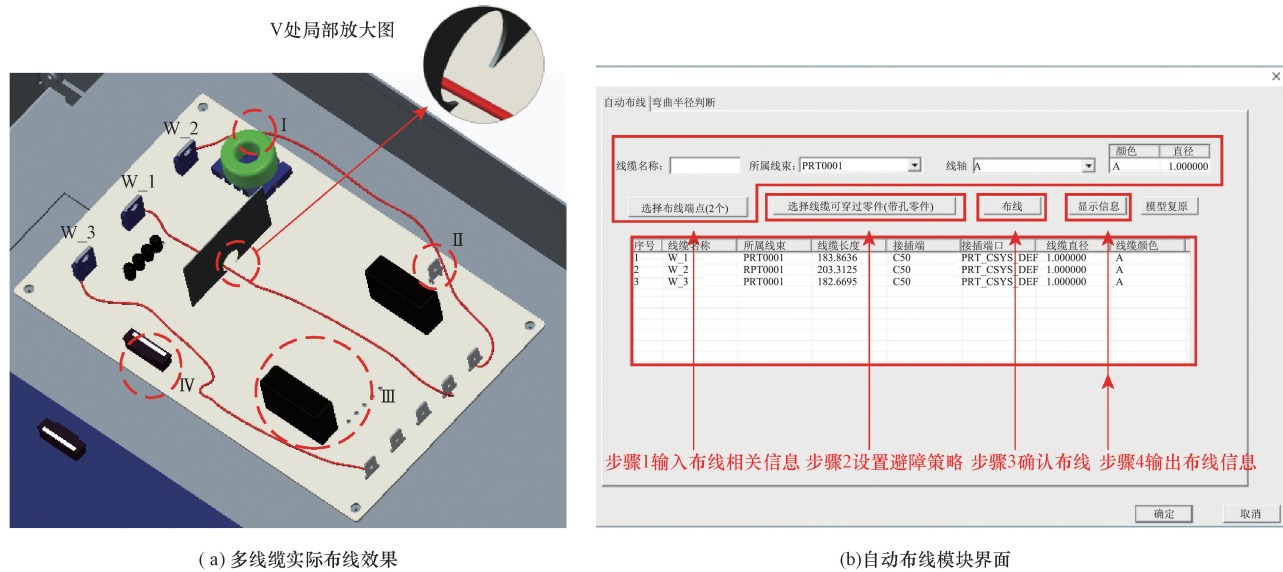
(a) PSO 算法线缆路径生成效果



(b) MRPSO 算法线缆路径生成效果

图 11 PSO 与 MRPSO 算法布线路径生成效果对比图

Fig. 11 Comparison of PSO and MRPSO algorithm wiring path generation effects



(a) 多线缆实际布线效果

(b) 自动布线模块界面

图 12 线缆实际布线效果

Fig. 12 The actual wiring effect of the cable

II、III、IV 这 4 个部分采用轴对齐包围盒避障策略, V 采用有向距离场避障策略。可以看出 MRPSO 算法在面对不同结构的零件时, 都可以求解出有效的布线路径。用户可以按图 12(b) 中的步骤, 依次点击所开发的功能界面上的按钮, 向系统输入布线相关参数信息, 系统软件会对所有线缆进行布线路径设计, 并创建相应的线缆形态。线缆创建完成之后, 软件会将线缆特征保存为障碍物信息, 并添加到系统内以保证线缆之间不发生干涉。

## 5 结论

(1) 提出了基于多重规则粒子群算法的复杂机电产品线缆自动布线方法, 对粒子进行限制以达到充分利用布线空间和提高布线质量的目的。

(2) 解决路径点与产品位姿关系问题, 提高了检测布线路径是否干涉的效率。通过控制粒子数、多尺度碰撞策略、路径优化与弯曲度检测 3 种粒子规则提高了线缆布线质量。

(3) 用标准测试函数对算法进行了仿真实验, 通过实例分析表明, 所开发的线缆自动布线模块, 可以生成用于复杂机电产品布线的有效路径。

### 参 考 文 献

- [1] 刘佳顺, 刘检华, 金望韬, 等. 稳定平台中活动线缆的虚拟布局设计方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 111-119.  
Liu Jiashun, Liu Jianhua, Jin Wangtao, et al. A virtual layout design method of motional cable in stabilized platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 111-119.
- [2] Holt P, Ritchie J, Day P, et al. Immersive virtual reality in cable and pipe routing: design metaphors and cognitive ergonomics[J].

Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2004, 4(3): 161-170.

- [3] 王发麟, 俞威. 基于 TCN-LSTM 神经网络的线缆性能衰退预测方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(35): 15109-15116.  
Wang Falin, Yu Wei. Prediction method research of cable performance degradation state for complex mechatronic products based on TCN-LSTM[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(35): 15109-15116.
- [4] Pamarathne W, Fernando T. Ant colony optimization algorithm to solve electrical cable routing[M]. Singapore: Springer, 2020.
- [5] Conru A B. A genetic approach to the cable harness routing problem[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation. Orlando: IEEE, 1994, 1: 200-205.
- [6] Conru A B, Cutkosky M R. Computational support for interactive cable harness routing and design[C]// Proceedings of the 19th Annual ASME Design Automation Conference. Albuquerque: IEEE, 1993, 65: 551-558.
- [7] Masoudi N, Fadel G. An optimization framework for the design of cable harness layouts in planar interconnected systems[J]. Journal of Mechanical Design, 2021, 144: 1-29.
- [8] 吴银锋, 吴兆华, 李春泉. 电子整机三维自动布线技术研究[J]. 电讯技术, 2005(2): 76-81.  
Wu Yinfeng, Wu Zhaohua, Li Chunquan. 3D auto-routing technology of electronic equipment[J]. Telecommunication Engineering, 2005(2): 76-81.
- [9] 刘冲, 周驰. 基于 RRT\* 的母线布线路径规划算法[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(5): 233-236, 257.  
Liu Chong, Zhou Chi. Busbar path planning based on RRT\* algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(5): 233-236, 257.
- [10] 杨旭, 周德俭, 宋微, 等. 一种考虑复杂约束的线缆束路径规划方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(3): 197-204.  
Yang Xu, Zhou Dejian, Song Wei, et al. Path planning method for cable harness considering complex constraints[J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(3): 197-204.

- [11] 刘佳顺, 刘检华, 张之敬, 等. 基于任意时间 RRT 算法的三维自动布线技术[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 156-165.  
Liu Jiashun, Liu Jianhua, Zhang Zhijing, et al. Anytime RRT based cable automatic routing under three-dimensional environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 156-165.
- [12] 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(2): 78-88.
- [13] 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.
- [14] 郑轶, 宁汝新, 刘检华, 等. 虚拟装配关键技术及其发展[J]. 系统仿真学报, 2006(3): 649-654.  
Zheng Yi, Ning Ruxin, Liu Jianhua, et al. Survey on key techniques of virtual assembly[J]. Journal of System Simulation, 2006(3): 649-654.
- [15] 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.  
Guo Wei, Liu Yanfang, Zhao Hui, et al. Fast wiring method based on skeleton model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(11): 2391-2397.
- [16] 王发麟, 郭学鹏, 李志农, 等. 坐标系引导下的线缆布线点位对应关系自动提取方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(14): 1708-1716.  
Wang Falin, Guo Xuepeng, Li Zhinong, et al. Automatic extraction method for corresponding relationship among endpoint-to-location of cable wiring under coordinate system guidance[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(14): 1708-1716.
- [17] 王伟. 轴对齐包围盒算法的研究[J]. 网络安全技术与应用, 2013(10): 127-128.  
Wang Wei. Study of axis aligned bounding box algorithm[J]. Network Security Technology & Application, 2013(10): 127-128.
- [18] 伍国华, 马满好. 路径交叉检测与消除方法和邻节点置换方法改进 TSP 的解[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 485-487.  
Wu Guohua, Ma Manhao. Improve solution of TSP based on route-intersection inspection and elimination method and neighbor nodes interchanging method[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2): 485-487.