

复杂构型金属橡胶毛坯铺设路径规划

黄 凯, 白鸿柏, 路纯红, 曹凤利
(中国人民解放军 陆军工程大学石家庄校区 车辆与电气工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 基于金属橡胶毛坯自动化铺设工艺,对遗传算法进行合理改进,进行了复杂构型金属橡胶毛坯铺设的定位销优化设计和路径规划。针对定位销优化设计和路径规划问题,建立了改进的编码、交叉、变异算子,并提出评价因子对遗传算法的迭代过程进行评价。优化的定位销排布和铺设路径可以较好地实现复杂构型金属橡胶毛坯铺设,铺设 10 层时,优化路径对应的目标函数 b 的值比经验路径小 54%,路径规划作用显著。单层路径规模对铺设效果影响较小;单层路径规模不同时,毛坯内部接触状态随着铺设螺旋卷长度的增加趋于一致。为复杂构型金属橡胶毛坯铺设提供了理论依据。

关 键 词: 金属橡胶; 复杂构型; 遗传算法; 定位销优化; 路径规划

中图分类号: V259; TB31; TB34 **文献标志码:** A

Paths planning of complicate shape metal rubber roughcast weaving

HUANG Kai, BAI Hongbai, LU Chunhong, CAO Fengli
(Vehicle and Electric Engineering Department,
Army Engineering University Shijiazhuang Campus,
the Chinese People's Liberation Army, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Based on metal rubber roughcast weaving process, the dowels and paths of complicate shape metal rubber roughcast weaving were designed with developed genetic algorithm. Code, crossover and mutation were improved for dowels and paths planning problem. An evaluation factor was presented to appraise iterative procedure of genetic algorithm. Complicate shape metal rubber roughcast can be knitted well with optimized dowels distribution and laying paths. Roughcast can be woven better evidently with optimized paths than traditional experiential paths. When roughcast was knitted to ten layers, the objective function b of optimized weaving was 54% smaller than experience weaving. Knitting quality was little influenced by path's scale in each layer. With the growing laying length, contact states of roughcasts woven with different path's scale in each layer reached accordance, providing a theoretical references, for complicate shape metal rubber roughcast weaving.

Key words: metal rubber; complicate shape; genetic algorithm; dowels optimization; paths planning

金属橡胶是一种具备耐高/低温、耐辐射、耐腐蚀、疲劳寿命长等优点的大阻尼弹性多孔材料,其在军事、航空航天等领域具有广阔的应用前景和重要的应用价值^[1-11]。金属橡胶一般由螺旋卷制备成毛坯,然后通过冲压成形制成所需元件。金属橡胶的毛坯制备

工艺水平对元件的尺寸、性能、组织结构稳定性都有很大影响^[12]。国内外学者针对材料的不同特性,提出了多种毛坯制备方案。其中,俄罗斯 Samara 航空航天大学的学者为了提升材料的弹性阻尼性能,在旋转芯轴上将螺旋卷按波浪形路径进行铺设;为了提升元件的拉伸强度,先将螺旋卷编制成带状网,再用带状网卷制毛坯^[12]。李明森等采用压线和细针固定两种方式固定螺旋卷,制成缠绕型毛坯^[13]。刘红将螺旋卷铺成圆环形、井字形、交叉形等形状的平面网,再按一定角度将平面网铺成毛坯^[14]。赵程等先将螺旋卷按相互垂直方向编制成螺旋卷网片,再把网片叠放,制成毛坯^[15]。无论采用何种毛坯制备方式,保证毛坯中螺旋卷线匝的均匀分布是使成形后金属橡胶元件具有均匀组织结构及稳定性能的前提。

自动化铺设工艺中,定位销的数量、位置及铺设路径的优化设计是制备毛坯的基础。本文针对复杂构型金属橡胶毛坯铺设问题,对遗传算法进行合理改进,对定位销和铺设路径进行优化设计,为复杂构型金属橡胶毛坯制备提供了理论支撑。

1 金属橡胶构型

金属橡胶毛坯自动化铺设工艺^[16]可以制备多种构型的金属橡胶制品,根据路径规划的复杂程度,将金属橡胶分为简单构型和复杂构型两大类。其中,简单构型是指铺设区域的外边界是外凸的(如圆形、椭圆形、凸多边形等),并且内部没有孔洞,如图 1 所示。否则,即为复杂构型金属橡胶(complicate shape metal rubber, CSMR)。

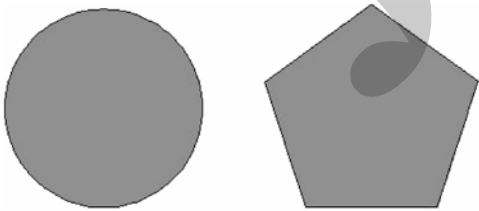


图 1 简单构型
Fig. 1 Simple shape

根据外边界是否外凸、内部有无孔洞,又将复杂构型分为三类:外边界外凸、有孔洞;外边界内凹、无孔洞;外边界内凹、有孔洞,如图 2(a)~图 2(c)所示。

路径规划时,复杂构型相对于简单构型的区别在于:外边界内的任意两个定位销连接而成的路径并不都是可行的,如图 2 中虚线所示。

铺设工艺中,毛坯内、外边界的角点位置,必须设置定位销,称为固定定位销,其他位置的定位销称为非固定定位销,如图 3 所示。

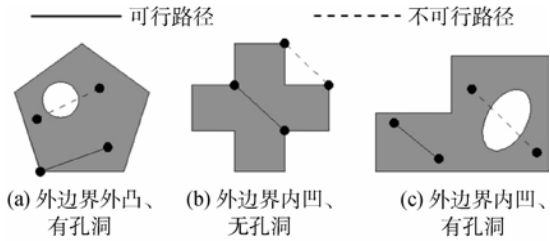


图 2 复杂构型与不可行路径
Fig. 2 Complicate shape and unfeasible path

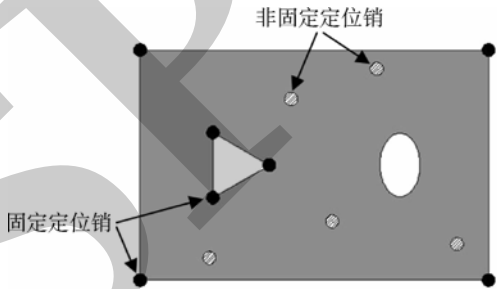


图 3 定位销分类
Fig. 3 Classification of dowels

铺设路径为两定位销间的连线,若定位销之间的连线位于铺设区域内,则称为可行路径,否则称为不可行路径(图 2)。本文主要针对 CSMR 毛坯铺设进行定位销优化设计和路径规划。

2 遗传算法的应用

CSMR 毛坯铺设路径规划所用的优化设计模型与简单构型相同,所采用的背景网格优化模型详见文献[16]。螺旋卷铺设必须以一定数量及排布的定位销为基础,因此在路径规划之前,需对定位销的数量和位置进行优化设计。CSMR 毛坯铺设的定位销优化设计和路径规划问题较为复杂,且随着问题规模的扩大,解空间范围也会急剧增大,使用枚举法难以得到最优解。因此,本文对遗传算法进行合理改进,对 CSMR 毛坯铺设的定位销优化设计和路径规划问题进行求解。

2.1 目标函数

对于 CSMR 毛坯铺设的定位销优化设计和路径规划问题,其目标函数与简单构型的优化设计问题相同,这里不再赘述,详见文献[16]。

2.2 评价因子

由于 CSMR 铺设区域存在孔洞或者内凹的外边界,使得在路径规划中,存在不可行路径(图 2)。因此,针对 CSMR 毛坯铺设路径规划问题,本文引入评价因子 ξ ,对遗传算法迭代过程进行评价,评价因子 ξ 为

$$\xi = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} \tag{1}$$

式中 N_1 为总编码次数, n_1 为失败编码次数, N_2 为总交叉次数, n_2 为失败交叉次数, N_3 为总变异次数, n_3 为失败变异次数。种群迭代一次,式(1)中各参数随之更新一次,评价因子亦更新一次。设定阈值 ξ_0 ,若评价因子的值大于阈值 ξ_0 ,则表明编码、交叉、变异过程中的失败次数较多,需减小路径长度,详见本文编码、交叉、变异算子部分。

2.3 编 码

2.3.1 定位销优化设计编码

对于 CSMR 定位销优化问题,本文采用二进制编码。非固定定位销可以在铺设范围内连续移动,形成无穷多的可行解。为了对问题进行求解,需将铺设区域离散化,如图 4 所示。

分别以外边界内凹、无孔洞;外边界外凸、有孔洞;外边界内凹、有孔洞 3 种构型为例(图 4),对铺设区域进行离散化。首先在 y 方向用 m 条等间距平行线分割铺设区域,每条平行线和铺设区域的外(内)边界相交,形成若干分割线段。

然后对每一条平行线按照如下方法进一步离散:若平行线只与外边界相交且只有两个交点(图 4(a)),则该处平行线变为一条分割线段,再将分割线段用 n 个点等间距分割;若平行线与内、外边界只有一个交点(如只经过多边形的顶点,图 4(b)),则此处的 n 个分割点重合;若平行线与铺设区域内、外边界的交点数大于 2 个,则该处平行线变为铺设区域内的多条线段(图 4(c)),用若干分

割点分别将这些处于同一 y 轴坐标位置的线段进行等间距分割,使得每条线段的分割点线密度相近,且这些分割点的总数为 n 。通过上述方法,铺设区域内的定位销位置就可以用 $m \times n$ 个离散点进行表示。为了满足编码需求,令 $m = 2^k, n = 2^l$,其中 k, l 为正整数。

铺设区域离散化后,每个定位销的表现型为坐标 (x, y) ,对应的基因型为二进制码 $p|q$ 。纵坐标 y 的范围为 $[y_1, y_2]$,若 q' 为沿 y 向正方向的第 q' 条平行线,则 y 可以写成

$$y = \frac{y_2 - y_1}{m - 1}(q' - 1) + y_1$$
$$q' = 1, 2, \dots, m \tag{2}$$

假设第 q' 条平行线被分割成 $s(s \geq 1)$ 条线段,沿 x 正方向分别是第 $1, 2, \dots, s$ 条, s 条线段上的分割点数依次是 $n_1, n_2, \dots, n_s$,且

$$\sum_{i=1}^s n_i = n \tag{3}$$

在第 q' 条平行线上的所有 n 个分割点中, p' 为沿 x 正方向第 p' 个分割点,假设第 p' 个分割点同时也是第 i 条线段上 n_i 个点中的第 j 个点($1 \leq i \leq s, 1 \leq j \leq n_i$)。

如果 $s > 1$, p' 可以表示为

$$p' = \sum_{i=1}^{i-1} n_i + j \tag{4}$$

若第 i 条线段起点、终点横坐标分别为 $x_{i1}, x_{i2}(x_{i1} < x_{i2})$,则第 p' 个点的横坐标可以表示为

$$x = \frac{x_{i2} - x_{i1}}{n_i - 1}(p' - \sum_{i=1}^{i-1} n_i - 1) + x_{i1}$$
$$p' = 1, 2, \dots, n \tag{5}$$

如果 $s = 1$,则第 p' 个点的横坐标可以表示为

$$x = \frac{x_2 - x_1}{n - 1}(p' - 1) + x_1$$
$$p' = 1, 2, \dots, n \tag{6}$$

式中 x_1, x_2 为线段起点、终点的横坐标($x_1 < x_2$)。

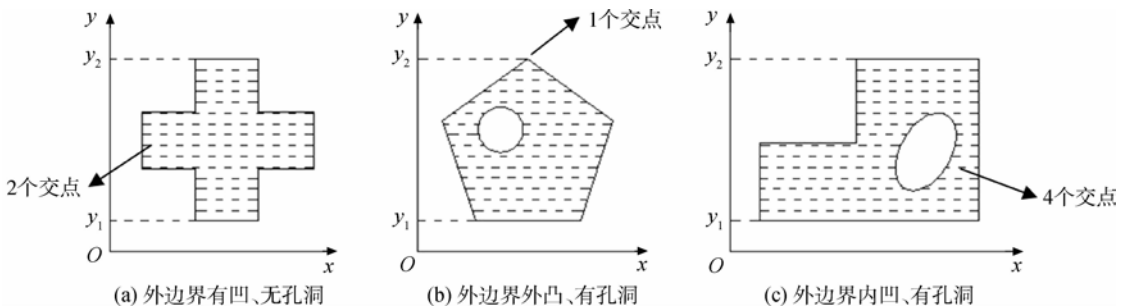


图 4 铺设区域离散化
Fig. 4 Dispersal of laying region

如果平行线与内、外边界只有一个交点(如图 4(b)), n 个分割点重合, 则每个点的横坐标都是 x 。

通过铺设区域的离散化, 可以得到坐标 (x, y) 与编码 $p'|q'$ 的一一对应关系, 再将 $p'|q'$ 转成二进制形式, 即可得到基因型 $p|q$ 。对于多个定位销 $(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_w, y_w)$, 二进制编码为 $p_1|q_1|\dots|p_i|q_i|\dots|p_w|q_w$ 。

2.3.2 路径规划编码

将定位销从 1 开始取正整数进行编号, 基因型采用路径表示。铺设工艺中, 螺旋卷按层进行铺设, 为防止材料在个别定位销位置密度过大, 造成组织不均匀, 规定同一层路径不包含重复的定位销。铺设工艺中, 螺旋卷始终连续不截断, 因此除第 1 层外, 各层路径的起点是上一层铺设路径的终点, 第 1 层路径的起点由人为指定。

对于任意一个定位销, 称其它所有能和它相连构成可行路径的定位销集合为这个定位销的附属集合。在一条路径的基因型中, 第 1 位定位销编号是上一层路径的末位编号(第 1 层由人为指定); 在第 1 位定位销的附属集合内随机选择一个作为第 2 位; 在第 2 位定位销的附属集合内随机选择一个作为第 3 位; 以此类推, 直至编码完成, 但不允许出现重复的定位销编号。如果找不到下一位满足条件的定位销且路径没有达到设定长度, 则重新编码, 且式(1)中的 n_1 增长一次。无论当前编码是否成功, 式(1)中的 N_1 都增长 1 次。

2.4 适应度函数与遗传算子

CSMR 路径规划问题中, 适应度函数、选择算子的选取与简单构型问题相同, 详见文献[16], 这里不再赘述。交叉、变异算子需针对 CSMR 路径规划问题进行改进。

2.4.1 交叉算子

针对 CSMR 定位销优化问题, 本文采用均匀交叉算子。针对 CSMR 路径规划问题, 需要对传统的部分匹配交叉算子^[17]进行改进。假设两父代分别为

父代 1 $a \quad b \quad c \quad d \quad \dots \quad e \quad f \quad g$
父代 2 $h \quad i \quad j \quad k \quad \dots \quad l \quad m \quad n$

称基因中编号之间的位置为间隔点, 如 a 与 b 、 b 与 i 之间各是一个间隔点。

对每一个间隔点进行判断:

1) 对于第 1 个间隔点。如果 a 与 i 、 b 与 h 都可以构成可行路径, 则第 1 个间隔点是可行间

隔点。

2) 对于第 2 个间隔点。如果 b 与 j 、 i 与 c 都可以构成可行路径, 则第 2 个间隔点是可行间隔点。

3) 以此类推。

若一个基因型有 u 个编码, 则有 $u-1$ 个间隔点。若其中有 v 个间隔点是可行间隔点, 则部分匹配交叉中有 C_v^2 种可以交叉的情况, 随机选择一种进行交叉。交叉后, 进行匹配替换操作, 改进的匹配替换方法举例如下:

假设两个父代交叉前为

父代 1 $a \quad b \quad c \quad d \quad \dots \quad w \quad \dots \quad e \quad f \quad g$
父代 2 $h \quad i \quad j \quad k \quad \dots \quad b \quad \dots \quad l \quad m \quad n$
交叉后, 变为
父代 1 $a \quad b \quad c \quad k \quad \dots \quad b \quad \dots \quad l \quad f \quad g$
父代 2 $h \quad i \quad j \quad d \quad \dots \quad w \quad \dots \quad e \quad m \quad n$

交叉后父代 1 中存在重复编码 b , b 在匹配区域的映射编码为 w , 在非匹配区域中, 编码 b 的相邻编码为 a 和 c 。如果编码 a 、 c 的附属集合都包含 w , 则在父代 1 的非匹配区域中, 编码 b 可以被替换为 w 。根据匹配区域内的映射关系, 对非匹配区域逐一进行替换, 直至同一基因型中没有重复编码, 则匹配替换操作成功。

交叉后, 根据上述方法判断能否完成匹配替换操作, 若不能, 则随机选择其他交叉情况, 直至匹配替换操作成功; 若不存在成功的匹配替换操作, 则交叉操作失败, 进入变异阶段, 同时式(1)中的 n_2 增长一次。无论当前交叉操作是否成功, 式(1)中的 N_2 都增长 1 次。

2.4.2 变异算子

针对 CSMR 定位销优化问题, 本文采用二进制变异算子。针对 CSMR 路径规划问题, 需要对点位变异算子进行合理改进。

假设某一要变异的基因型为

$a \quad b \quad c \quad d \quad \dots \quad e \quad f \quad g$

首先判断基因型中每一个编码能否成为变异位置:

1) 对于首位编码 a 。路径的第 1 位定位销编号为上层路径末位定位销编号(第 1 层由人为指定), 不能作为变异位置。

2) 对于除首、末两个编码外的中间位置编码, 以 b 为例: b 的相邻编码为 a 和 c , 假设 a 的附属集合与 c 的附属集合的交集为 B_1 , 若 B_1 包含了该基因型中的定位销编号, 则将这些编号从 B_1

中去除,所剩集合为 B_2 。若 B_2 不是空集,则 b 可以成为变异位置, B_2 称为 b 位置的变异选择集合。

3) 对于末位编码 g 。 g 的相邻编码为 f ,假设 f 的附属集合为 G_1 ,若 G_1 包含了该基因型中的定位销编号,则将这些编号从 G_1 中去除,所剩集合为 G_2 。若 G_2 不是空集,则 g 可以成为变异位置, G_2 称为 g 位置的变异选择集合。

判断后,在可以变异的位置中随机选择一个做值的改变,变异值在相应位置的变异选择集合中随机选取。按照上述方法,如果不能完成变异操作,那么直接将该基因型复制到下一代种群,该次变异失败,式(1)中的 n_3 增长 1 次。无论当前变异操作是否成功,式(1)中的 N_3 都增长 1 次。

为了防止种群的最优个体因为选择、交叉、变异带来的偶然因素而丢失,本文的遗传算法采用精英保留策略^[18]。

3 定位销优化设计算例

以图 5 所示的正方形外边界、中心带圆孔金属橡胶构型为例,按照上述方法对定位销进行优化设计。

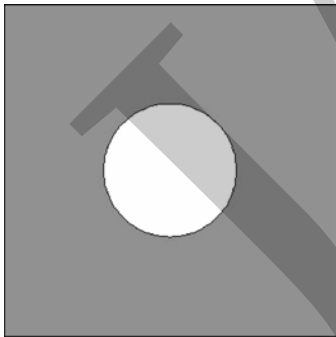


图 5 金属橡胶构型
Fig. 5 Metal rubber shape

优化后,底面背景网格非零网格数量与定位销数量的关系如图 6 所示。定位销占用的铺设区域面积比和定位销数量的关系如图 7 所示。

由图 6 可见,底面背景网格非零网格数量先呈线性趋势增大,当定位销数量达到一定数目时,非零网格数量变为恒值,此时,铺设区域铺满。由图 7 可知,定位销占用的铺设区域面积随定位销数量的增多呈线性趋势增大。

因此定位销数量的选取应当遵循以下原则:定位销的数量一方面可以使铺设区域铺满,另一方面又应占用尽量少的铺设区域面积。根据该原

则,并结合铺设区域形状,算例中选取非固定定位销 15 个,固定定位销 4 个。优化计算的定位销排布如图 8 所示,其中 1 号至 4 号定位销为固定定位销,其余为非固定定位销。

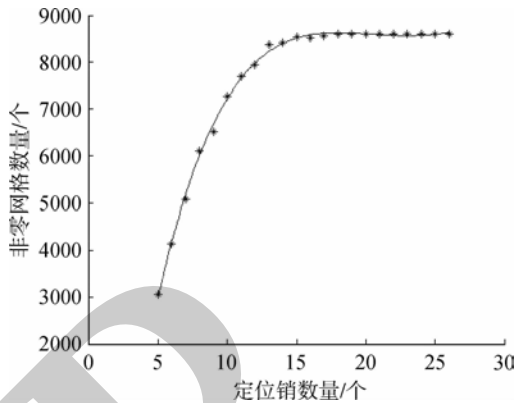


图 6 非零网格数量变化趋势
Fig. 6 Trend of non-zero squares' quantity

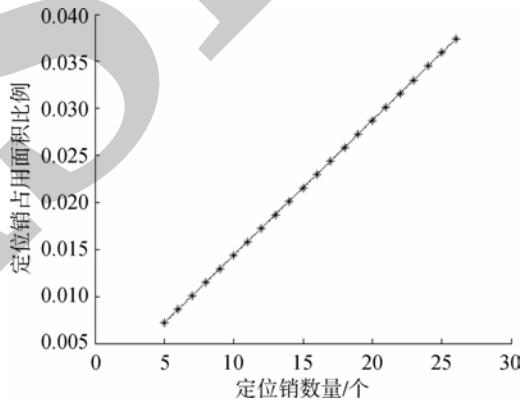


图 7 定位销占用面积比例变化趋势
Fig. 7 Trend of covered area ratio

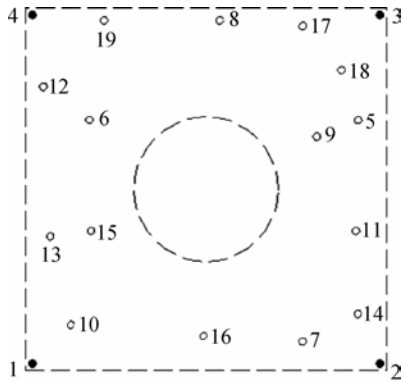


图 8 定位销排布
Fig. 8 Configuration of dowels

4 CSMR 毛坯铺设路径规划算例

4.1 路径规划结果

CSMR 毛坯铺设路径规划算例中,交叉概率

取 0.8,变异概率取 0.1,评价因子阈值取 0.1。根据本文路径规划方法,在 MATLAB 中编制算法程序,对问题进行求解。路径规模取 14 条时,优化后的前 10 层路径如表 1 所示。

表 1 路径规划结果
Table 1 Results of paths planning

层数	路径	目标 函数 <i>a</i>	目标 函数 <i>b</i>	目标 函数 <i>c</i>	目标 函数 <i>d</i>	适应度 函数	平面网 格均值	空间网 格均值	评价 因子
1	15-1-6-19-8-2-10-13-12-17-18-14-16-5-3	0.453	0.188	0.188	5.871	0.888	0.302	0.302	0
2	3-18-6-19-12-16-13-8-9-4-15-2-5-11-1	0.196	0.375	0.208	4.171	0.822	0.643	0.322	0
3	1-16-11-9-5-18-7-14-13-4-8-3-17-6-10	0.115	0.543	0.198	4.332	0.899	0.906	0.302	0.020
4	10-11-7-16-1-13-15-12-4-8-17-9-19-18-3	0.086	0.772	0.185	3.514	1.078	1.138	0.285	0.002
5	3-18-12-19-4-6-15-10-16-2-11-5-17-9-7	0.078	1.056	0.177	3.162	1.342	1.349	0.270	0
6	7-2-5-9-14-10-13-15-12-6-3-18-17-8-11	0.074	1.415	0.172	2.684	1.687	1.572	0.262	0
7	11-8-12-19-6-13-10-1-7-14-3-9-17-18-5	0.054	1.809	0.168	2.627	2.058	1.788	0.255	0
8	5-3-17-18-8-14-7-1-10-12-13-2-15-16-11	0.053	2.299	0.175	2.411	2.550	2.073	0.259	0.020
9	11-9-2-7-16-10-13-8-17-18-6-4-5-12-19	0.050	2.873	0.177	2.269	3.123	2.335	0.259	0
10	19-8-17-3-18-11-9-5-16-12-4-13-1-10-14	0.050	3.411	0.176	1.873	3.656	2.561	0.256	0.020

由表 1 可知,随着铺设层数的增加,目标函数 *a* 逐渐减小,直至螺旋卷将整个铺设区域铺满,目标函数 *a* 趋近于 0。铺设毛坯的平面组织均匀性用目标函数 *b* 进行评价,随着螺旋卷铺设长度的增加,定位销附近的材料密度会逐渐增大,使底面背景网格权值的均匀度变差,因此目标函数 *b* 逐渐增大。目标函数 *c* 用于评价毛坯的空间组织均匀性,在单层背景网格中,所选定的路径长度使铺设路径所覆盖的背景网格数量少于没有被覆盖的背景网格数量,被覆盖的网格权值大于零,没有被覆盖的网格权值为零,因此随着铺设层数的增加,权值为零的网格在所有单层背景网格中所占比例变大,使目标函数 *c* 和空间网格权值均值总体存在微小的下降趋势。铺设层数增加时,螺旋卷总投影面积的增速慢于螺旋卷交叉重叠面积的增速,使目标函数 *d* 逐渐减小。

适应度函数由 4 个目标函数加权求和得到,由于主要考虑材料的均匀性,兼顾螺旋卷的接触状态,且目标函数 *a* 和目标函数 *c* 的值变化较小,因此适应度函数的值与目标函数 *b* 的变化趋势一致。在各层铺设中,评价因子都小于所设定的阈值,表明设定的编码长度是合理的。

4.2 与传统经验铺设对比

图 9 为经验铺设和优化铺设的对比图。为了方便比较,使用背景网格对两种毛坯进行评价。图 10 为两种铺设方式的均匀性对比,可见,目标函数 *a*、*c* 差别较小,目标函数 *b* 和适应度函数的差距较大。这表明,两种铺设方式都可以将铺设区域铺满,但是优化铺设的平面均匀程度明显优于经验铺设,且铺设层数越多,差别越大。铺设 10 层时,优化铺设的目标函数 *b* 比经验铺设小 54%。可见,路径规划的作用十分明显。

图 11 为两毛坯目标函数 *d* 的比较,在刚开始

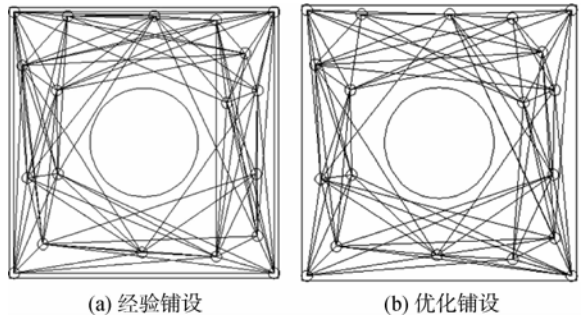


图 9 铺设毛坯
Fig. 9 Weaving roughcast

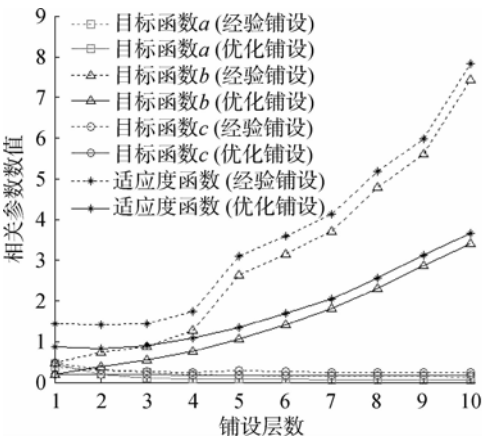


图 10 均匀性对比
Fig. 10 Homogeneity compare

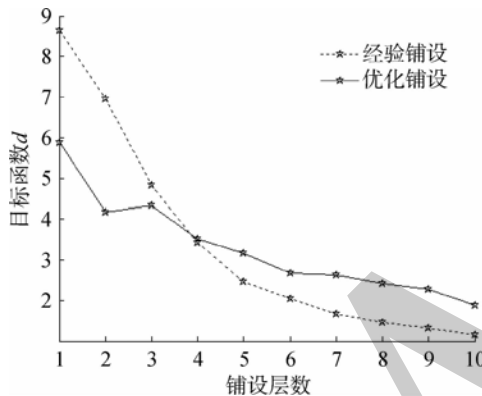


图 11 毛坯接触状态对比
Fig. 11 Contact state's compare between roughcasts

铺设时,优化铺设目标函数 d 的值较小,但是随着铺设层数的增加,优化铺设目标函数 d 的值一直比经验铺设大。这是因为在路径规划中,毛坯组织均匀性和螺旋卷重叠面积之间无法同时达到最优,本文以毛坯的均匀性为主要优化目标。随着铺设层数的增加,毛坯逐渐变得均匀厚实,无论采用哪种铺设方式,目标函数 d 的值都呈减小的趋势,且曲线斜率逐渐趋近于零,表明随着铺设层数的增加,路径的选择对目标函数 d 的影响逐渐减小。而实际制备毛坯时,铺设层数较多,因此将材料的均匀性作为主要优化目标是合理的。

4.3 单层路径规模的影响

由于底面背景网格始终不变,因此选用底面背景网格对单层路径规模的影响进行分析。图 12 为单层路径规模不同、铺设螺旋卷长度相同时,目标函数 b 的对比。由图 12 可知,单层路径规模对毛坯的组织均匀性影响不大。这是由于每层路径相连会形成一条总路径,而每层路径都是

最优的,组合成的总路径也是使毛坯趋于最均匀的。因此,优化过程中,改变单层路径规模对铺设质量影响较小。

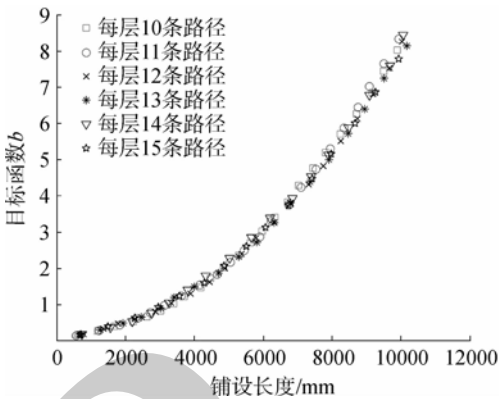


图 12 单层路径规模对均匀性的影响
Fig. 12 Effect of path's scale in each layer on homogeneity

4.4 单层路径规模对接触状态的影响

图 13 为单层路径规模不同、铺设螺旋卷长度相同时,目标函数 d 的对比。由图 13 可知,铺设长度增加时,不同单层路径规模的毛坯接触状态趋于一致。这是由于螺旋卷铺设长度较短时,螺旋卷交叉重叠面积较小,路径的选择对目标函数 d 的影响较大;随着螺旋卷铺设长度的增加,毛坯厚度和螺旋卷交叉重叠面积增大,路径的选择对目标函数 d 的影响越来越小。

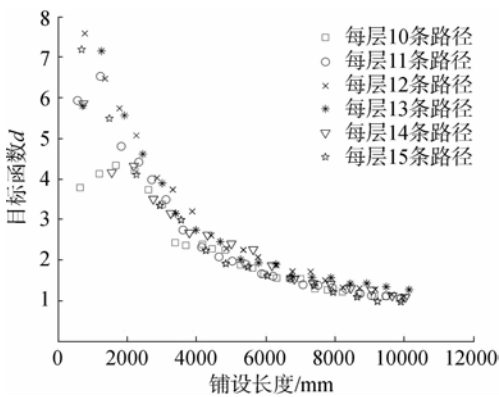


图 13 单层路径规模对螺旋卷接触状态的影响
Fig. 13 Effect of path's scale in each layer on contact state of helix

4.5 单层路径规模对评价因子的影响

本文的 CSMR 毛坯铺设算例中,定位销共 19 个,单层路径规模最大可为 18 条。表 2 为铺设第 1 层时,不同单层路径规模对评价因子的影响。由表 2 可见,评价因子在单层路径规模较小时基

本为零,单层路径规模达到 16 时开始增大,单层路径规模为 18 时,超过了设定阈值。表 3 为单层路径规模为 18 时,式(1)中各参数的数值。由表 3 可见,当单层路径规模达到最大值 18 时,失败编码次数明显变大,编码失败率达 31.5%;对于本文的算例,交叉操作没有受到太大影响,始终能够成功进行交叉操作;由于单层路径规模取最大值时,所有定位销都在单层路径中,没有多余的定位销供变异取值,导致无法进行变异操作。

表 2 单层路数对评价因子的影响

Table 2 Effect of path's scale in each layer on the evaluation factor

路径数	评价因子	路径数	评价因子
10	0.001	15	0
11	0	16	0.02
12	0	17	0.074
13	0	18	1.315 1
14	0	16	0.02

表 3 评价因子各参数数值

Table 3 Values of evaluation factor's parameters

n_1	N_1	n_2	N_2	n_3	N_3
23	73	0	1037	245	245

5 结 论

本文以一种金属橡胶毛坯自动化铺设工艺为基础,对遗传算法进行合理改进,对 CSMR 毛坯铺设进行定位销优化设计和路径规划,主要有以下结论:

- 1) 定位销优化设计结果可以较好地作为路径规划的基础。分析了各参数随铺设层数的变化规律。优化铺设的毛坯质量明显优于经验铺设,优化铺设的毛坯不仅密度均匀,而且兼顾了毛坯内部螺旋卷的接触状态。铺设层数越多,优化铺设的优势越大。
- 2) 提出的铺设工艺中,单层路径规模对毛坯均匀性影响不大;铺设到一定厚度时,不同单层路径规模铺设的毛坯接触状态趋于一致。
- 3) 针对 CSMR 毛坯铺设路径规划,提出评价因子对遗传算法的迭代过程进行评价,单层路径规模越大,遗传操作的失败几率越大,当单层路径包含所有定位销时,无法进行变异操作。

- 4) 采用改进的遗传算法,解决了 CSMR 毛坯制备的定位销优化设计和路径规划问题,避免了经验铺设的盲目性。

参考文献:

[1] 马艳红,王虹,洪杰.带气膜阻尼环的转子系统动力特性试验[J].航空动力学报,2013,28(6):1215-1222.
MA Yanhong,WANG Hong,HONG Jie. Experiment on rotor dynamics of rotor system with air film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1215-1222. (in Chinese)

[2] IZZHEUROV E A. Calculation of resonant sound absorption parameters for performance evaluation of metal rubber material[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(12): 3587-3591.

[3] HUANG Mingji,DONG Xiuping,LIU Guoquan. 3D modeling of the preparation of metal rubber material[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2010, 17(1): 75-79.

[4] 唐果,陈安华,郭源君.金属橡胶隔振器产生混沌的解析预测[J].航空动力学报,2012,27(8):1752-1757.
TANG Guo,CHEN Anhua,GUO Yuanjun. Chaotic prediction of metal rubber damper for occurred chaos[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(8): 1752-1757. (in Chinese)

[5] 王虹,洪杰,马艳红.用于转子系统的气膜密封阻尼结构稳态特性[J].航空动力学报,2012,27(1):190-197.
WANG Hong,HONG Jie,MA Yanhong. Steady-state properties of gas film seal damper used in a rotor system [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 190-197. (in Chinese)

[6] ZHANG D Y,FABRIZIO S,MA Y H,et al. Compression mechanics of nickel-based superalloy metal rubber[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 580(9): 305-312.

[7] MA Yanhong,ZHU Haixiong,ZHANG Dayi,et al. Experimental investigation on shape memory alloy metal rubber [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1949-1955.

[8] HONG Jie,CHEN Lulu,MA Yanhong,et al. Hysteretic properties of metal rubber particles[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 227(4): 693-702.

[9] 李宇燕,黄协清,李福林.基于 BP 神经网络的金属橡胶本构关系的预估方法[J].航空动力学报,2011,26(5):1128-1134.
LI Yuyan,HUANG Xieqing,LI Fulin. Prediction for constitutive relationship of metallic rubber based on BP neural net[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1128-1134. (in Chinese)

[10] LI Yuyan,LI Xiaoling,HUANG Xieqing. Research on factors influencing the mechanical properties of metallic rubber[J]. Mechanics of Composite Materials, 2011, 47(5): 571-580.

[11] ZHANG B, LANG Z Q, BILLINGS S A, et al. System identification methods for metal rubber devices[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 39(1): 207-226.

[12] ЧЕГОДАЕВ Д. Е., МУЛЮКИН О. П., КОЛТЫГИН Е. В. 金属橡胶构件的设计[M]. 李中鄂, 译. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[13] 李明森, 张文群, 吴新跃, 等. 金属橡胶自动成型工艺研究[J]. 机械制造, 2009, 47(537): 55-57.
LI Mingsen, ZHANG Wenqun, WU Xinyue, et al. Automatic forming process of metal rubber[J]. Machinery, 2009, 47(537): 55-57. (in Chinese)

[14] 刘红. 非圆截面丝制造金属橡胶技术研究[D]. 石家庄: 机械工程学院, 2008.
LIU Hong. The technical research on making non-circular wire metal rubber[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2008. (in Chinese)

[15] 赵程, 刘长红, 罗昆. 大丝径金属橡胶制备与共渗工艺研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(14): 73-75.
ZHAO Cheng, LIU Changhong, LUO Kun. Preparation and penetration process for large diameter wired metal rubber[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(14): 73-75. (in Chinese)

[16] 黄凯, 白鸿柏, 路纯红, 等. 金属橡胶毛坯铺设路径规划[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 40-47.
HUANG Kai, BAI Hongbai, LU Chunhong, et al. Paths planning of metal rubber blank laying[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 40-47. (in Chinese)

[17] FREISLEBEN B, MERZ P. New genetic local search operators for the traveling salesman problem[C] // Parallel Problem Solving from Nature-PPSN IV. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 890-900.

[18] RUDOLPH G. Convergence analysis of canonical genetic algorithm[J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1994, 5(1): 96-101.

(编辑: 陈 越)