

金属橡胶毛坯铺设路径规划

黄 凯, 白鸿柏, 路纯红, 曹凤利
(军械工程学院 车辆与电气工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 针对金属橡胶毛坯铺设工艺,提出了以背景网格为基础的优化模型,利用遗传算法建立了定位销设计和路径规划的优化方法,为毛坯铺设提供了理论依据.定位销数量由底面背景网格非零网格数确定,定位销排布由遗传算法计算得到.根据定位销优化设计结果,逐层对铺设路径进行规划,优化路径比经验路径所得毛坯更加均匀、密实,铺设层数越多,路径规划的优势越明显,铺设 10 层时,两毛坯目标函数 b 的值相差 50%;单层路径数对毛坯的铺设质量影响不大;随着螺旋卷铺设长度的增加,不同单层路径数铺设的毛坯接触状态趋于一致.

关 键 词: 金属橡胶; 毛坯铺设; 定位销; 路径规划; 组合优化; 遗传算法

中图分类号: V259; TB31; TB34 **文献标志码:** A

Paths planning of metal rubber blank laying

HUANG Kai, BAI Hong-bai, LU Chun-hong, CAO Feng-li
(Vehicle and Electric Engineering Department,
Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Laying metal rubber blank with a pin board was proposed as a preparation technology. An optimization model based on background grids was built. Optimizing methods of dowels and paths planning were established with genetic algorithm according to characteristics of blank laying. Theoretical basis of metal rubber blank laying was provided. Dowel number was obtained according to non-zero grid number of bottom background grids. Dowel configuration was computed with genetic algorithm. Based on the dowel optimization design results, laying paths are devised in each layer. The blank with optimized paths is more homogeneous and denser than that with experiential paths. The advantage of paths planning is more obvious with more laying layers. There is a difference of fifty percent of object function b at ten layers between two kinds of blanks. Laying quality is little influenced by the number of laying paths in each layer. With increase of helix screw laying length, contact states are coincident in blanks with different numbers of laying paths in each layer.

Key words: metal rubber; blank laying; dowel; path planning; combinatorial optimization; genetic algorithm

金属橡胶(metal rubber/wire mesh)是一种高弹性、大阻尼的多孔材料,具有耐高、低温,耐腐蚀,真空不挥发,疲劳寿命长等优点,可以制成弹性阻尼元件、过滤元件、消声元件,在航空航天领域具有重要的应用价值和广阔的应用前景^[1-11].

制备金属橡胶的一般工艺流程为:选择金属丝牌号和直径、绕制螺旋卷、制备毛坯、冷压成型、后处理.在制备毛坯时,螺旋卷的铺设方式在很大

程度上影响了制品的性能^[12]. 金属橡胶制品的结构及性能不同,具体的毛坯铺设方法亦有不同. 俄罗斯国立萨马拉航空航天大学针对不同的金属橡胶性能,提出了不同的毛坯铺设方法,例如:为了提高金属橡胶衬套元件的拉伸强度,用并排的相互啮合的拉伸线卷编织成带状,再用编织带制成扁平状的线卷毛坯;为了提高金属橡胶制品的弹性阻尼性能,在旋转芯轴上将螺旋卷按波浪形路径铺设^[12]. 王凤鸣、刘红将螺旋卷按一定规则铺设成平面网,再按一定角度将平面网铺设成毛坯^[13-14]. 李明森等分别采用细针定位和压线定位两种布线方式,在心轴上缠绕螺旋卷制备毛坯^[15]. 赵程等将螺旋卷横竖交叉编制出二维网片,再将网片叠放在一起形成块状毛坯^[16]. 无论采用何种铺设方式,保证金属橡胶制品的组织均匀性是基本的要求. 金属橡胶制品中螺旋卷线匝的均匀分布是材料具备优良弹性阻尼性能、均匀孔隙度的前提. 只有毛坯达到一定的均匀性要求,冷压成型后的金属橡胶制品才可能具备足够的组织均匀性.

在目前的毛坯铺设方法中,铺设参数多是根据经验积累,没有经过严谨的理论计算,铺设路径的选择没有明确的理论依据,对于复杂构型的金属橡胶制品,仅凭经验很难给出合理的铺设路径. 本文针对所提出的金属橡胶毛坯铺设工艺,采用遗传算法,分别对铺设钉板和铺设路径进行优化设计.

1 毛坯铺设工艺及优化设计模型

提出一种金属橡胶毛坯铺设工艺,该工艺采用钉板铺设毛坯,如图 1 所示. 钉板由底板和固定在底板上的定位销组成. 制备毛坯时,将定螺距均匀拉伸后的螺旋卷按一定的路径在定位销之间铺设. 按层铺设后压实,使毛坯中螺旋卷线匝之间相

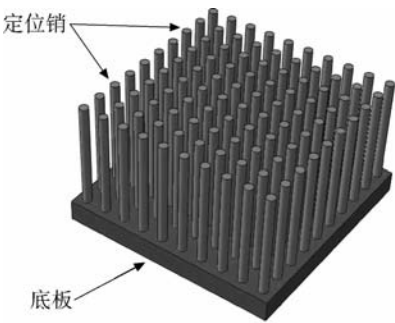


图 1 铺设钉板
Fig. 1 Laying pin board

互咬合勾连,然后从钉板上取下备用. 采用如图 2 所示的背景网格技术对定位销的数量、分布,铺设路径进行评估. 对每一层螺旋卷及铺设底面设置相同的背景网格,背景网格由众多小正方形组成,网格边界与实际铺设区域边界一致. 进行评估时,将定位销简化成点(图 2(a)),将螺旋卷简化成点与点之间的连线,连线宽度为螺旋卷直径. 每一层螺旋卷铺设完成时,在当前层的背景网格上投影,投影会覆盖相应小网格一定面积. 一个小网格被覆盖的面积与小网格的总面积之比为网格权值 q . 这样就生成了每一层被赋予权值的背景网格. 将每一层背景网格的权值叠加到铺设底面背景网格,对铺设底面背景网格赋予权值.

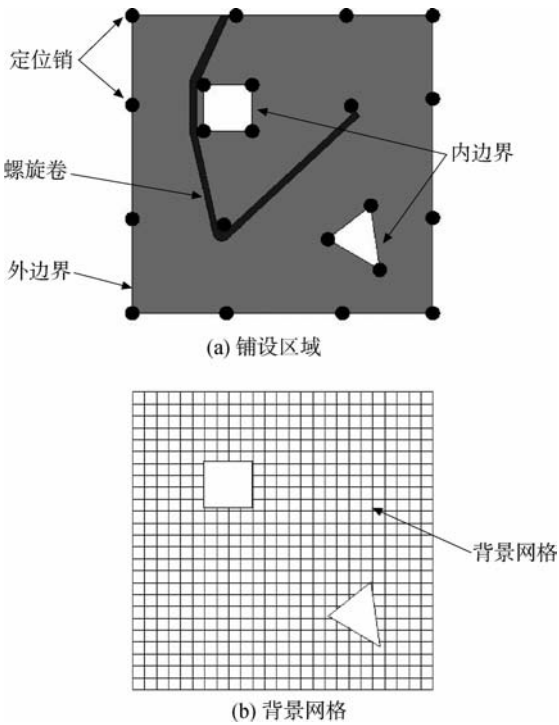


图 2 毛坯铺设
Fig. 2 Blank laying

2 遗传算法的应用

金属橡胶毛坯铺设首先要研究定位销的优化设计,路径规划是以定位销优化设计为基础的. 金属橡胶毛坯铺设的定位销优化设计和路径规划问题属于组合优化问题,随着问题规模的扩大,搜索空间将急剧扩大,采用枚举法很难得到精确解. 对于这类复杂问题,主要寻求其满意解,而遗传算法则是求解这种组合优化问题的最佳工具之一. 本

文采用遗传算法求解金属橡胶毛坯铺设的定位销优化设计与路径规划问题.

在本文的金属橡胶制备工艺中,铺设区域的形状是由所制备的金属橡胶制品外形决定的.例如:对于多边形金属橡胶,顶点处必须设置定位销,本文称这样的定位销为固定定位销.固定定位销数量较少,还需要在铺设区域内以及边线上设置定位销,称这样的定位销为非固定定位销,如图 3 所示.对于圆形、椭圆形铺设区域,则只有非固定定位销,如图 4 所示.非固定定位销的数量、位置需要进行优化设计.

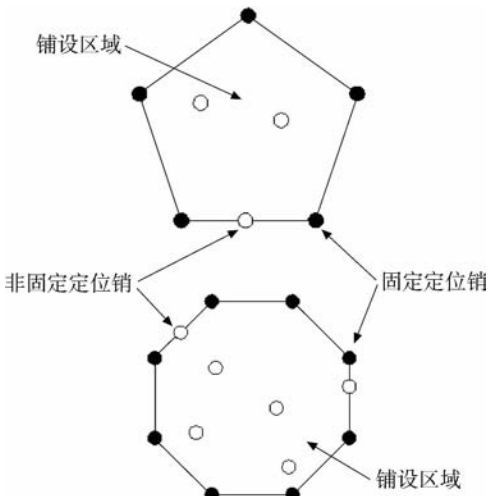


图 3 多边形铺设区域
Fig. 3 Polygon laying regions

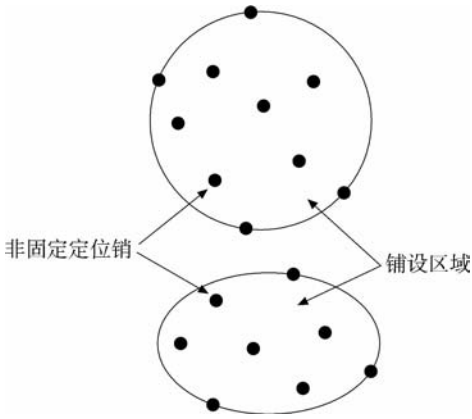


图 4 圆形、椭圆形铺设区域
Fig. 4 Circular, oval laying regions

2.1 目标函数

2.1.1 定位销优化设计

定位销本身具有一定的直径,会侵占一定的铺设区域面积,使螺旋卷的铺设区域减小.制备工

艺中,应当使用尽量少的定位销,使螺旋卷能够铺满铺设区域.根据本文中建立的背景网格优化模型,将所有定位销(包括固定定位销)进行两两连线,找出所有的可能的铺设路径,赋予连线宽度为螺旋卷直径,将所有连线向底面背景网格进行投影,统计背景网格权值,将背景网格中的非零网格数量定为目标函数.此目标函数表示了当前的定位销数量和位置所能够铺满铺设区域的能力.

2.1.2 路径规划

根据本文的优化设计模型,以毛坯组织均匀性及螺旋卷接触状态为目标,定义目标函数为

目标函数 a : 铺设底面背景网格中,网格权值为零的网格数量所占比例;

目标函数 b : 铺设底面背景网格中,所有网格权值的方差;

目标函数 c : 所有单层背景网格的网格权值的方差;

其中,目标函数 a 和目标函数 b 用于评价毛坯的平面组织均匀性;目标函数 c 用于评价毛坯的空间组织均匀性.

螺旋卷铺设时,螺旋卷之间在水平面内会有一定程度的交叉重叠,如图 5 所示.

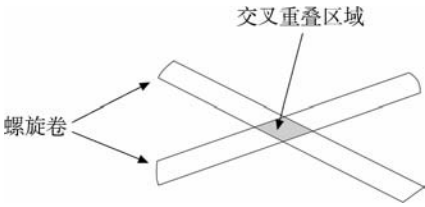


图 5 螺旋卷交叉重叠
Fig. 5 Intersecting and overlapping of spiral coils

在路径规划中,采用螺旋卷总投影面积与螺旋卷投影之间的重叠面积总和的比值作为评估毛坯接触状态的目标函数 d . 目标函数 d 越小,表明螺旋卷之间的交叉重叠区域越大,螺旋卷接触状态越好.

若已经铺设了 k 层螺旋卷($k=0,1,2,3,\dots$),则已知前 k 层对应的所有网格权值,和第 $k+1$ 层的铺设起点.利用遗传算法对第 $k+1$ 层的 n_{k+1} 条路径进行计算,使前 $k+1$ 层对应的 4 个目标函数值最小.第 1 层的起点由人为指定,最终实现铺设轨迹的优化设计.

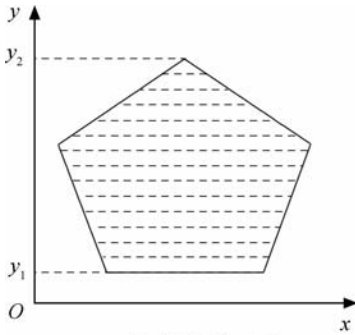
2.2 编 码

遗传算法不能直接处理空间的数据,必须通过编码将它们表示成遗传空间的基因型串结

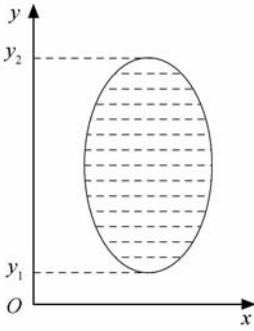
构. 编码应具备完备性、健全性、非冗余性等特点. 常用的编码方式有二进制编码、浮点数编码、符号编码等.

2.2.1 定位销优化设计

针对定位销优化设计问题, 采用二进制编码. 非固定定位销可以在铺设区域范围内任意移动, 可行解的个数为无穷多个. 为了使用遗传算法进行求解, 将铺设区域离散化, 如图 6 所示.



(a) 多边形铺设区域



(b) 椭圆形铺设区域

图 6 铺设区域离散化

Fig. 6 Dispersing of laying regions

图 6 中以五边形和椭圆形为例, 首先对铺设区域在 y 方向用 m 条等间距线段进行分割, 每条分割线段与铺设区域边线相交, 若被分割的位置恰好是多边形的顶点或分割线与边缘相切, 则此位置的分割线段退化成一个点; 然后再将每条线段用 n 个点等间距分割, 若被分割的位置是多边形的顶点或分割线与边缘相切, 则此位置的 n 个点重合, 这样就可以用 $m \times n$ 个点对铺设区域内定位销的位置进行描述. 为了满足二进制编码的需求, 令 $m=2^k, n=2^l$, 式中 k, l 为正整数.

每个定位销的坐标在铺设区域内离散取值, 表现型为坐标 (x, y) , 基因型为二进制编码 $p|q$. 纵坐标 y 在铺设区域内的范围为 $[y_1, y_2]$, q' 为沿 y 正方向第 q' 条分割线段, 则纵坐标 y 可以表示为

$$y = \frac{y_2 - y_1}{m - 1} \cdot (q' - 1) + y_1$$

$$q' = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

第 q' 条线段的起点、终点横坐标分别为 $x_1, x_2 (x_1 \leq x_2)$, p' 为第 q' 条线段上沿 x 正方向第 p' 个分割点, 则横坐标 x 可以表示为

$$x = \frac{x_2 - x_1}{n - 1} \cdot (p' - 1) + x_1$$

$$p' = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式(1)、式(2)表示了定位销坐标 (x, y) 与位置编号 $p'|q'$ 的一一对应关系, 将 $p'|q'$ 转换成二进制编码 $p|q$ 即得到基因型. 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 $p_1|q_1| \dots |p_i|q_i| \dots |p_w|q_w$.

2.2.2 路径规划

针对路径规划问题, 采用符号编码. 将钉板上的定位销从 1 开始取正整数进行编号, 基因型采用路径表示, 基因型的长度小于或等于定位销总数. 例如一条路径

5-6-1-2-8-9-11-12-7

则基因型为

5 6 1 2 8 9 11 12 7

在铺设工艺中, 螺旋卷按层进行铺设. 在同一层中, 如果螺旋卷在同一定位销缠绕多次, 则此处的材料密度必然远大于其余位置. 并且增加了很多无意义的解, 使搜索空间急剧扩大, 因此规定同一层路径不包含重复的定位销. 铺设路径的起点是上一层铺设路径的终点(第 1 层的起点由人为指定), 因此同一层的铺设路径中, 基因型中的首个编号总是相同的.

2.3 适应度函数

定位销优化设计直接选取目标函数作为适应度函数. 在路径规划中, 对目标函数 $a \sim d$ 加权求和, 得到统一的适应度函数, 对求解过程中各路径的优劣进行评判. 适应度函数为

$$F = \alpha F_a + \beta F_b + \gamma F_c + \zeta F_d \quad (3)$$

式中 F_a 为目标函数 a 的值, α 为 F_a 的权重; F_b 为目标函数 b 的值, β 为 F_b 的权重; F_c 为目标函数 c 的值, γ 为 F_c 的权重; F_d 为目标函数 d 的值, ζ 为 F_d 的权重; F 为适应度函数的值, F 越小, 4 个目标函数越优.

2.4 遗传算子

遗传算法一般包括选择、交叉、变异 3 种算子, 它们构成了遗传算法强大的搜索能力, 模拟的

是自然选择过程中的优胜劣汰、繁殖和突变现象.

2.4.1 选择算子

常用的选择操作有轮盘赌选择、排序选择、随机遍历抽样选择、锦标赛选择等. 针对定位销优化设计问题和路径规划问题, 本文采用锦标赛选择, 根据种群中个体的适应度进行选择操作. 随机地从种群中挑选一定数目的个体, 再将其中最好的个体选做父本, 重复这个过程直到完成个体的选择. 表 1 为竞赛规模与选择强度之间的关系.

表 1 竞赛规模与选择强度之间的关系
Table 1 Relationship between competition scale and selection intensity

竞赛规模	选择强度	竞赛规模	选择强度
1	0	5	1.15
2	0.56	10	1.53
3	0.85		

2.4.2 交叉算子

常用的交叉操作有边交换交叉、顺序交叉、循环交叉、部分匹配交叉等. 针对定位销优化设计问题, 本文采用均匀交叉. 均匀交叉随机地产生与个体等长的 0-1 掩码, 掩码中的片段表明了哪个父个体向子个体提供变量值. 针对路径规划问题, 本文采用部分匹配交叉作为交叉算子. 部分匹配交叉^[17] (partially matched crossover, PMC) 首先随机产生两个交叉点, 定义这两个点之间的区域为匹配区域, 通过交换两个父代的匹配区域, 并根据匹配区域内的位置映射关系, 对非匹配区域逐一进行交换, 以产生子代铺设路径.

2.4.3 变异算子

常用的变异操作有插入变异、逆转变异、对换变异、点位变异等. 针对定位销优化设计问题, 本文采用二进制变异, 即随机对基因型中的变量进行翻转. 针对路径规划问题, 本文采用点位变异, 即对随机选择的基因型位置做值的变异. 对于金属橡胶毛坯铺设路径规划问题, 变异值与基因型中其他位置的数字不同, 以保证同一层最多在同一定位销上缠绕一次.

2.5 精英保留策略

普通遗传算法在进化过程中, 种群的最优个体可能因为选择、交叉、变异带来的偶然因素而丢失, 为了防止这种情况, 采用能够使遗传算法依概率收敛于全局最优解的精英保留 (elitist preserva-

tion) 策略^[18]. 该策略的思想是, 把群体在进化过程中迄今出现的最好个体 (精英个体) 不进行交叉、变异而直接复制到下一代中. 为了保持群体的规模不变, 可以将新一代群体中最差的个体淘汰掉.

3 定位销优化设计

某金属橡胶制品的构型如图 7 所示, 根据上述方法对定位销进行优化设计.

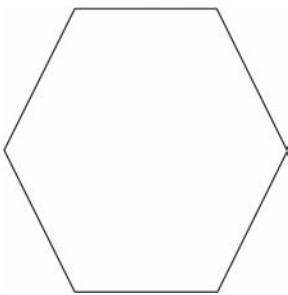


图 7 金属橡胶制品构型
Fig. 7 Configuration of metal rubber specimen

定位销总数等于固定定位销数量与非固定定位销数量的和, 其中固定定位销数量由铺设区域构型决定, 一般为恒值. 优化所得的底面背景网格非零网格数量随非固定定位销数量的变化趋势如图 8 所示. 定位销侵占的铺设区域面积比随非固定定位销数量的变化如图 9 所示. 随着定位销数量的增多, 底面背景网格非零网格数量先呈线性趋势增大, 在定位销数量达到一定数目时趋于稳定, 直至将铺设区域铺满, 非零网格数量变为恒值. 但随着定位销数量的增加, 定位销侵占的铺设区域面积不断增大. 因此, 应选取使得铺设区域铺满的最少定位销数量, 既能铺满铺设区域, 又使铺设区域被侵占面积尽量小. 本文算例中确定非固定定位销数量为 9, 总定位销数量 15, 定位销位置如图 10 所示.

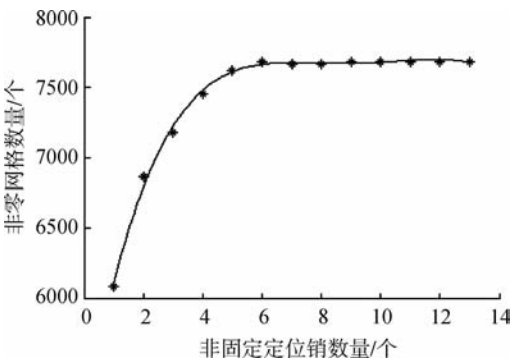


图 8 非零网格数量变化趋势
Fig. 8 Variation trend of non-zero grid number

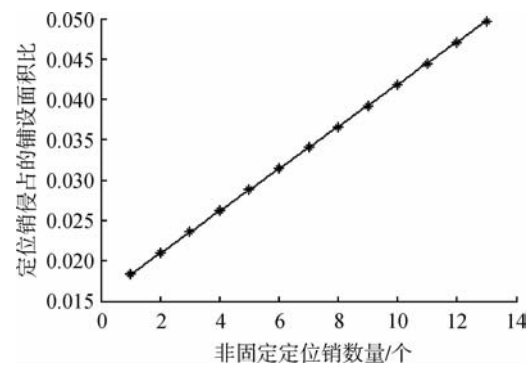


图 9 定位销侵占的铺设面积比例变化趋势

Fig. 9 Variation trend of occupied laying area scale by dowels

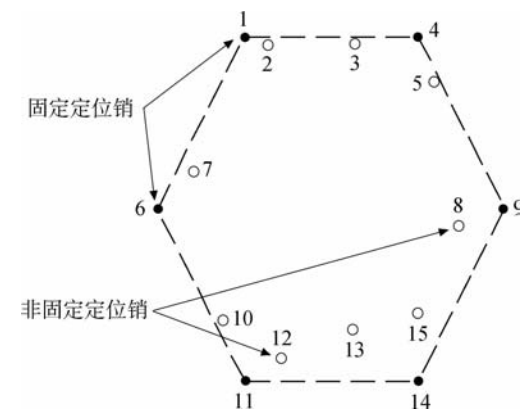


图 10 定位销编号和位置

Fig. 10 Number and location of dowels

4 路径规划

4.1 优化结果

根据定位销优化设计结果,对金属橡胶毛坯

铺设进行路径规划. 优化计算中,交叉概率取 0.8,变异概率取 0.1,竞赛规模取 3,定位销直径为 4 mm,螺旋卷直径为 3.6 mm. 根据金属橡胶毛坯铺设工艺,编制优化算法程序,对每一层的铺设路径进行优化设计.

每一层缠绕 14 个定位销时,前 10 层路径规划如表 2 所示. 第 1 层起点定义为编号 11 的定位销,其余每层的起点为上一层的终点. 随着铺设层数的增加,铺设底面背景网格中网格权值为零的网格数量所占比例(目标函数 a)逐渐减小,铺设到一定层数时,螺旋卷将整个铺设区域填满. 目标函数 c 用于评价毛坯的空间组织均匀性,不同铺设层之间,螺旋卷所占的空间大小相近,因此目标函数 c 和空间网格权值均值在某一值处上下波动. 目标函数 b 用于评价毛坯的平面组织均匀性,由于螺旋卷必须在定位销上缠绕,在被缠绕的定位销附近,材料必然要更多,相应的底面背景网格权重也更大,使得目标函数 b 和适应度函数的值越来越大. 随着铺设层数的增加,螺旋卷之间的交叉重叠面积越来越多,交叉重叠面积比螺旋卷投影总面积的增加速度要快,因此目标函数 d 逐渐减小. 随着铺设层数的增加,材料变多,平面网格均值变大. 虽然目标函数 b 和适应度函数的数值随铺设层数的增加越来越大,但是每一层解的适应度都是本层的最小值(或近似解),每一层的铺设路径都是既使铺设区域尽快铺满,又使平面均匀度和空间均匀度最好(或近似最好)的解,并兼顾了螺旋卷之间的接触状态.

表 2 铺设路径								
Table 2 Laying paths								
铺设层数	路径	目标函数 a	目标函数 b	目标函数 c	目标函数 d	适应度函数	平面网格均值	空间网格均值
1	11-6-7-1-12-14-9-4-2-13-10-8-5-3	0.4289	0.2368	0.2368	6.5951	0.9684	0.3558	0.3558
2	3-1-2-9-6-12-10-7-4-5-13-8-15-11	0.2338	0.4524	0.2459	4.0695	0.9728	0.6928	0.3464
3	11-12-5-3-4-10-2-1-6-13-14-15-9-7	0.1142	0.6933	0.2458	3.602	1.0893	1.0294	0.3431
4	7-3-13-15-2-1-6-5-14-9-8-12-11-10	0.0625	0.9922	0.2494	2.9077	1.3331	1.3786	0.3447
5	10-6-15-14-8-1-2-7-12-13-9-3-11-4	0.0306	1.3402	0.2604	2.4461	1.6863	1.77	0.354
6	4-15-3-10-14-11-1-6-7-13-12-8-5-2	0.0092	1.8481	0.2768	1.9575	2.1998	2.1865	0.3644
7	2-12-11-10-6-8-9-4-13-14-1-3-7-15	0.0025	2.231	0.2794	1.969	2.555	2.5635	0.3662
8	15-8-3-2-1-13-14-9-5-11-12-4-7-6	0.0008	2.8032	0.2784	1.819	3.1108	2.9055	0.3632
9	6-1-2-4-3-12-14-15-9-8-5-7-10-11	0.0006	3.3912	0.2714	1.7135	3.691	3.1779	0.3531
10	11-10-6-7-8-2-14-12-13-15-3-4-5-9	0.0003	3.9905	0.2671	1.5637	4.2801	3.4813	0.3481

4.2 经验铺设与优化铺设对比

图 11(a)、图 11(b)分别为依据经验和优化路径对毛坯进行铺设后的情况,共铺设 10 层. 可以看出,优化路径铺设的毛坯比经验铺设的毛坯更加均匀、密实. 对于复杂的金属橡胶构型及定位销排布,仅凭经验很难给出十分合理的路径,而通过对铺设路径的规划,则可以得到最优路径.

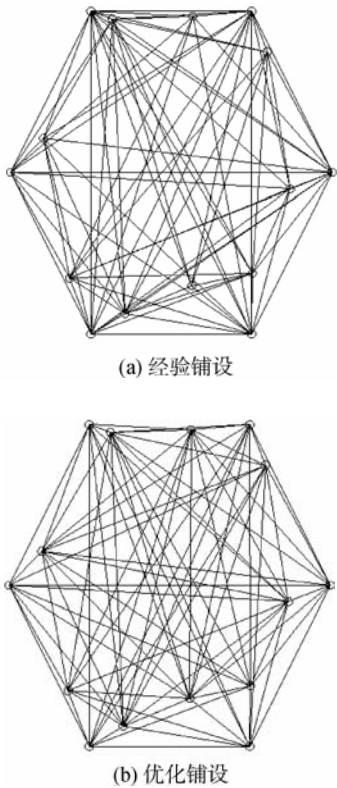


图 11 铺设毛坯
Fig. 11 Laying blank

为了更好地进行比较,使用背景网格对两种铺设方式的毛坯进行评价. 两种毛坯铺设的组织均匀性指标如图 12 所示. 两种铺设方法中目标函数 a , 目标函数 c 差别不大,表明两种毛坯都将铺设区域充满,并且空间均匀度相近. 然而随着铺设层数的增加,目标函数 b 的差距越来越大,经验铺设的毛坯与优化铺设的毛坯平面均匀度差距越来越大. 在第 10 层时,两种毛坯目标函数 b 的值相差 50%,并随着铺设层数的增加会继续增大. 可见,路径规划的作用是明显的. 图 13 为两种毛坯目标函数 d 的比较,由于毛坯组织均匀性与螺旋卷重叠面积之间不可能同时达到最优,本文以组织均匀性为主要优化目标,兼顾螺旋卷的接触状态,因此目标函数 d 的数值在铺设层数较少时略大. 但是,随着铺设层数的增加,毛坯逐渐变得均

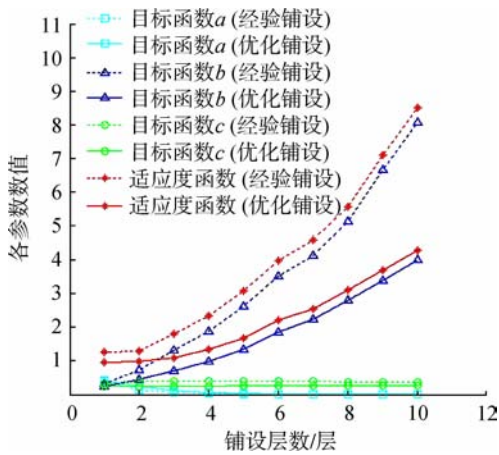


图 12 均匀性对比
Fig. 12 Homogeneity comparison

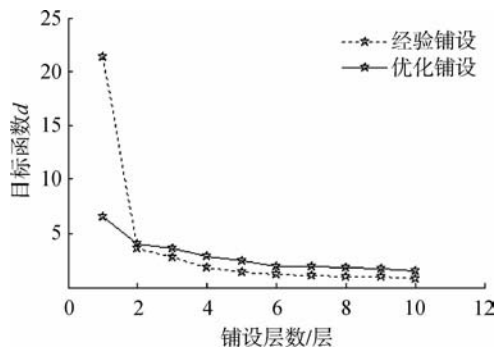


图 13 毛坯接触状态对比
Fig. 13 Comparison of blank contact state

匀厚实,目标函数 d 的数值变得越来越小,表明不同的铺设轨迹对目标函数 d 的影响越来越小. 而实际铺设时,铺设层数较多,因此以均匀性为主要优化目标是合理的.

4.3 单层路径数的影响

螺旋卷总铺设长度相同时,若单层路径数不同,则铺设层数不同,单层背景网格的网格总数也不同,但底面背景网格始终不变,因此选用底面背景网格分析单层路径数对毛坯组织均匀性和螺旋卷接触状态的影响.

图 14 为螺旋卷铺设长度相同、单层路径数不同时,毛坯的平面均匀度对比. 可以看出,不同单层路径数时,底面网格方差基本不变. 在铺设长度相等的前提下,单层路径数对毛坯的组织均匀性影响不大. 这是因为将每层路径相连可以构成一条总路径,不论单层路径数取多少,每层的路径都是当前最优的,组合成总路径也是使毛坯趋近最均匀的. 因此,毛坯铺设中,单层路径数对毛坯的铺设质量影响不大.

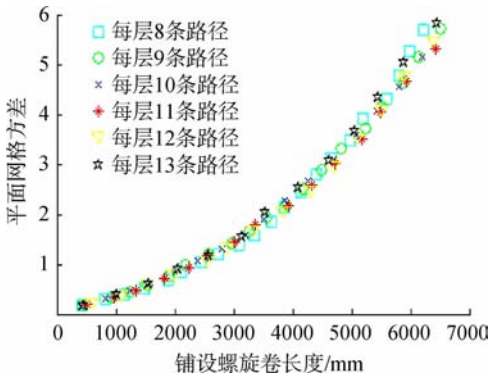


图 14 平面网格方差随铺设长度变化
Fig. 14 Variation of plane grid variance with laying length

图 15 为螺旋卷铺设长度相同、单层路径数不同时,毛坯的接触状态对比.可以看出,随着铺设长度的增加,不同单层路径数的毛坯接触状态趋于一致.这是因为在铺设长度较短时,螺旋卷之间的交叉重叠区域较少,路径的选择对螺旋卷相互重叠面积影响较大;当铺设长度增加到一定长度时,毛坯变的均匀厚实,螺旋卷之间交叉重叠面积急剧增大,并且受路径选择的影响越来越小.此结论与 4.2 节图 13 体现的结论是一致的.

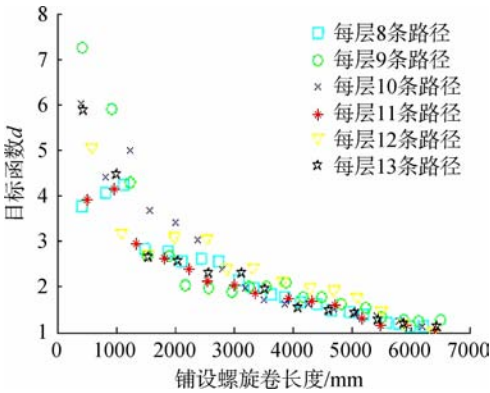


图 15 接触状态随铺设长度变化
Fig. 15 Variation of contact state with laying length

5 结 论

本文提出了一种金属橡胶毛坯铺设工艺,根据工艺特点,建立分析模型、目标函数及优化方法,采用遗传算法对定位销和铺设路径进行优化设计,主要有以下结论:

1) 毛坯铺设新工艺丰富了金属橡胶制备方法.给出了定位销的优化设计方法,为路径规划提供了合理的定位销数量和排布.路径规划为毛坯铺设提供了使毛坯组织最均匀,兼顾螺旋卷接触

状态的优化路径,对于构型复杂的金属橡胶制品依然适用,避免了经验铺设的盲目性.

2) 路径规划中,分析了随着铺设层数的增加,各参数的变化规律.根据优化路径铺设的毛坯比根据经验铺设的毛坯更加均匀、密实,铺设层数越多,路径规划的优势越明显.

3) 采用该铺设工艺及优化路径铺设毛坯时,单层路径数的变化对铺设质量的影响很小;随着铺设长度的增加,不同单层路径数的毛坯接触状态趋于一致.

参考文献:

[1] Ertas B H. Compliant hybrid journal bearings using integral wire mesh dampers[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(2): 022503. 1-022503. 11.
[2] Zarzour M, Vance J. Experimental evaluation of a metal mesh bearing damper[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(2): 326-329.
[3] Ertas B H, Luo H. Nonlinear dynamic characterization of oil-free wire mesh dampers[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(3): 032503. 1-032503. 8.
[4] 国亚东, 闫辉, 夏宇宏, 等. 金属橡胶滤材过滤精度研究[J]. 功能材料, 2010, 41(8): 1387-1389.
GUO Yadong, YAN Hui, XIA Yuhong, et al. Study on the filtration rating of metal rubber filter material[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(8): 1387-1389. (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] 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 damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1215-1222. (in Chinese)
[7] 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)
[8] 张蕊华, 张建辉. 金属橡胶高压精密流量阀流场分析[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 71-74.
ZHANG Ruihua, ZHANG Jianhui. Analysis of flow field in metal-rubber high-pressure precision flow valve [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33 (1): 71-74. (in Chinese)
[9] 马艳红, 洪杰, 李昊宇, 等. 金属橡胶材料吸声特性的理论分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(5): 653-656.

MA Yanhong, HONG Jie, LI Haoyu, et al. Theoretical analysis on sound absorption characteristics of metal rubber [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(5): 653-656. (in Chinese)

[10] 闫辉, 姜洪源, 刘文剑, 等. 金属橡胶冲击隔振系统试验 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1518-1522.

YAN Hui, JIANG Hongyuan, LIU Wenjian, et al. Experimental research on metal rubber shock isolation system [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1518-1522. (in Chinese)

[11] 陈艳秋, 朱梓根. 用于管路的薄金属橡胶减振器的性能研究 [J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 175-178.

CHEN Yanqiu, ZHU Zigen. Damping characteristics of thin metal rubber damper for aeroengine piping system [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 175-178. (in Chinese)

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

[13] 王凤鸣. 金属橡胶构件制备、动力学分析及隔振特性的理论与实验研究 [D]. 石家庄: 机械工程学院, 2010.

WANG Fengming. Theoretical and experimental research on metal rubber manufacture, dynamics analysis and vibration isolation [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2010. (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] 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)

[16] 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)

[17] Freisleben B, Merz P. New genetic local search operators for the traveling salesman problem [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature-PPSN IV. Berlin, Germany: Springer, 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: 秦理曼、王碧珺)