

doi: 10.7690/bgzdh.2018.05.018

基于改进型遗传算法的复杂产品生产车间布局优化方法

李翌辉¹, 史亚斌¹, 胡进寿¹, 高智¹, 王小强²

(1. 中国西电集团公司西安西电电气研究院有限责任公司, 西安 710075; 2. 火箭军驻成都地区军事代表室, 成都 610036)

摘要: 针对复杂产品车间设备布局问题, 采用实值编码和进化代沟的方法改进遗传算法, 求解出设备布局的最优方案。根据产品的生产特点及工艺特征, 通过定义优化目标和约束条件建立了设备布局的数学模型。并以某待建的航空发动机零部件智能化生产线为实例, 采用 QUEST 软件对方法进行了验证。试验结果证明, 该方法取得了较好的优化效果。

关键词: 车间布局; 优化方法; 复杂产品; 改进型遗传算法

中图分类号: TP391.7 **文献标志码:** A

Optimization Method on Complex Product Workshop Layout Based on Improved Genetic Algorithm

Li Yihui¹, Shi Yabin¹, Hu Jinshou¹, Gao Zhi¹, Wang Xiaoqiang²

(1. Xi'an XD Electric Research Institute Co., Ltd., China XD Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. Rocket Army Station in Chengdu Representative Office, Chengdu 610036, China)

Abstract: In order to solve the problem of equipment layout in complex products workshop, the real-valued coding and evolutionary generation gap method are used to improve the genetic algorithm to solve the optimal layout of equipment. According to the production characteristics and process characteristics of the product, a mathematic model of the equipment layout is established by defining the optimization objectives and constraints. Taking a certain intelligent production line of aero-engine components to be built as an example, the method is validated by QUEST software. Experimental results show that the method has achieved better optimization results.

Keywords: workshop layout; optimization method; complex product; improved genetic algorithm

0 引言

车间设备布局是指在给定的车间范围内, 合理地确定车间里各种设备的具体位置, 在保证正确的工艺流程条件下, 达到整个车间生产系统的某一或某些优化目标。Sahni 等证明了设备布局问题是 NP 完全问题^[1], 人们开始借助各种启发式手段来求解设备布局问题的近似最优解。Bozer 等^[2]针对不等面积的车间设备布局问题, 设计了基于图形耦和 MIP 模型的启发式算法。S Kulturel Konak^[3]提出一种改进的蚁群算法, 并成功应用于不规则车间设备布局问题的组合优化目标中进行求解。Haktanirlar U.B 等^[4]研究了一种解决不等面积车间设备布局的人工免疫算法, 并验证了其有效性。高贵兵^[5]采用改进的多目标优化算法进行求解, 有效地解决了由混流生产车间生产流程多变性与复杂性带来的车间设备布局难题。朱大林等^[6]针对以物料搬运费用最小为优化目标的多行线性车间设备布局数学模型, 利用混合粒子群算法进行了求解。张屹等^[7]针对传统

优化算法在处理比较复杂的多目标优化问题中出现的收敛性差、解的分布性不达标等问题, 提出了一种差分元胞多目标遗传算法。

复杂产品制造工艺复杂、质量要求严格、加工难度大、涉及因素多^[8], 且一般都采用多品种混流生产的组织模式。笔者基于改进型遗传算法对复杂产品生产车间进行布局优化。

1 数学建模

1.1 假设与简化

为简化复杂产品生产车间的设备布局问题的数学建模和求解计算, 做出如下简化与假设:

- 1) 该生产线制造设备的形状取包络矩形, 忽略其他细节形状;
- 2) 产品加工工艺流程顺序与车间设备编号顺序相同;
- 3) 同行制造设备的矩形中心坐标在同一水平线上, 且所有的设备按照统一方位进行放置;
- 4) 所有制造设备沿 X 轴方向依次布局放置,

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-03-13

作者简介: 李翌辉(1974—), 男, 陕西人, 博士, 高级工程师, 从事智能工厂建设与应用标准研究。

采用自动换行策略，当同一行中所有设备的长度、设备间实际距离与设备距边界的安全距离之和大于生产线横向空间约束时，该行中的最后一个设备自动进入下一行。

1.2 约束条件的确定

根据复杂产品生产车间布局问题的实际情况，复杂产品生产车间设备布局的约束条件如图 1。

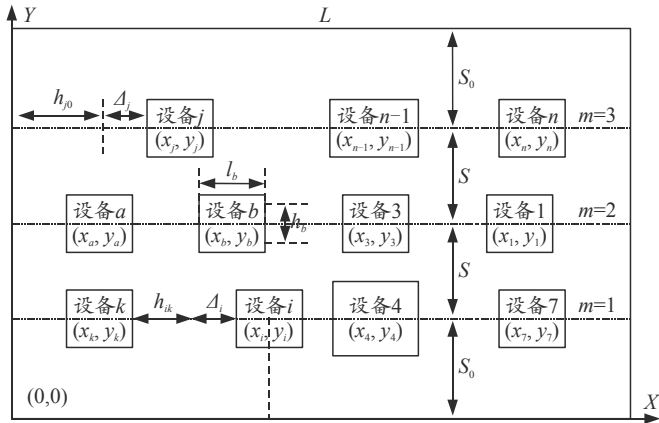


图 1 设备布局模型

1) 设备横坐标求解公式为

$$x_i = x_k + (l_k + l_i)/2 + A_i = h_{k0} + A_k + (l_i + 2l_k)/2 + h_{ik} + A_i \quad (1)$$

2) 设备纵坐标求解公式为

$$y_i = (k-1)s + s_0, \quad \text{若 } z_{ik} = 1, \quad i=1,2,\dots,k; \quad k=1,2,\dots,m. \quad (2)$$

3) 设备横坐标和纵坐标满足同一行设备不重叠

$$|x_i - x_j| \geq [(l_i + l_j)/2 + h_{ij}] z_{ik} z_{jk}; \quad i, j=1,2,\dots,m. \quad (3)$$

其中：

$$z_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{设备 } i \text{ 在第 } k \text{ 行上} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad i=1,2,\dots,n; \quad k=1,2,\dots,m. \quad (4)$$

4) 每台设备只能安排一次

$$\sum_{k=1}^m z_{ik} = 1; \quad i=1,2,\dots,n. \quad (5)$$

5) 每行上设备不能超出车间长度的限制：

$$\max(x_i, k) + l_i/2 + h_{i0} \leq L; \quad k=1,2,\dots,m. \quad (6)$$

6) 所有设备不能超出车间宽度的限制：

$$\max(y_i, m) + s_0 \leq H; \quad i=1,2,\dots,m. \quad (7)$$

其中： L 为该制造单元长度； H 为该制造单元宽度； m 为设备布局行数； l_i 为设备 i 的长度； h_i 为设备 i 的宽度； x_i 为设备 i 中心的 x 坐标； y_i 为设备 i 中心的 y 坐标； s_0 为第一行/最后一行设备纵向距离边界

的距离； s 为设备间行间距； h_{j0} 为设备 j 和边界的横向最小间距要求； h_{ij} 为设备 i 和设备 j 之间的横向最小间距要求； A_j 为设备 j 和设备 $j-1$ 或边界之间的净间距。

1.3 优化目标

对于复杂产品生产车间而言，一般以物流费用最小为优化目标，其目标函数定义为：

$$\min PDE = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} E_{ij} R_{ij}. \quad (8)$$

其中： n 为设备的总数目； D_{ij} 为设备 i 和设备 j 之间的物流距离； E_{ij} 为设备 i 和设备 j 之间的单位物料每单位距离的物流费用； R_{ij} 为设备 i 和设备 j 之间的物料运输频率。

设备之间的物流距离 D_{ij} 需要充分考虑设备间的物流路径，并保证路径最短且物流路径上不存在物流干涉的情况，设备间的物流距离可分为 4 种情况，如图 2 所示。

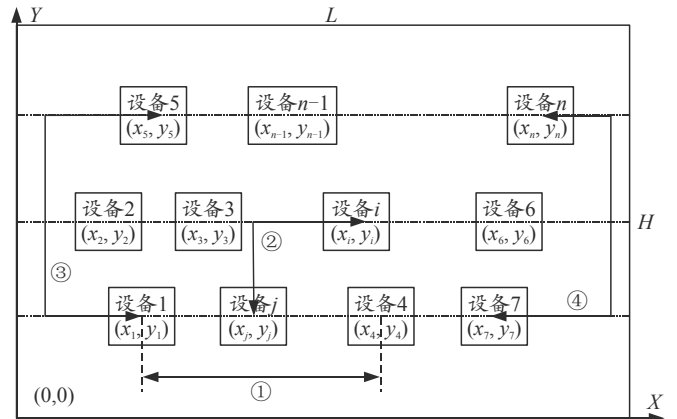


图 2 复杂加工生产线设备间物流距离

1) 当设备位于同一行时，设备间物流距离取两设备间中心坐标点在横向上的距离；

2) 当设备位于相邻行时，设备间物流距离取两设备间中心坐标点的矩形距离；

3) 当设备间跨行时，若设备横向坐标之和大于车间宽度，走左侧物流距离更短；

4) 当设备间跨行时，若设备横向坐标之和小于车间宽度，走右侧物流距离更短。

设备间的物流距离取值情况如式(9)所示。

$$D_{ij} = \begin{cases} |x_i - x_j|, & \text{设备 } i, j \text{ 在同一行} \\ |x_i - x_j| + |y_i - y_j|, & \text{设备 } i, j \text{ 位于相邻行} \\ x_i + x_j + |y_i - y_j|, & \text{设备间跨行, 且 } x_i + x_j \geq L, \text{ 走左侧} \\ |x_i - x_j| + |y_i - y_j|, & \text{设备间跨行, 且 } x_i + x_j < L, \text{ 走右侧} \end{cases}. \quad (9)$$

2 设备布局的优化

2.1 求解流程

根据遗传算法的通用框架,求解复杂产品生产车间设备布局问题的遗传算法设计过程,如图3所示。

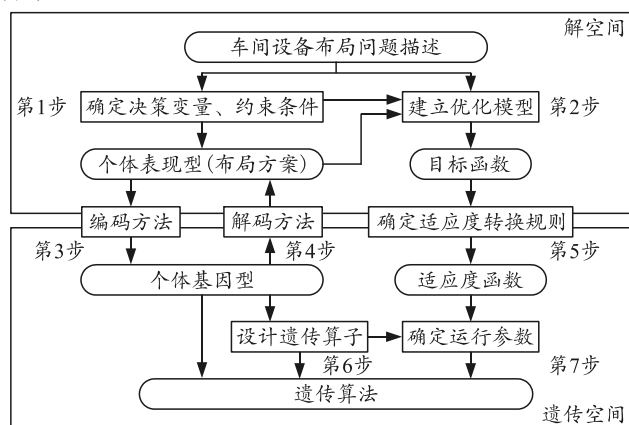


图3 求解流程

1) 分析复杂产品生产车间设备布局问题的优化目标、决策变量及其设备布局约束条件,要求分析尽量详细,充分考虑布局中的各种因素,尽可能符合生产实际。

2) 建立复杂产品生产车间设备布局问题的数学分析模型,构建复杂产品生产车间设备布局问题中的目标函数,确定其变量约束条件等。

3) 根据车间设备布局数学分析模型,确定其编码方式。编码方式应尽可能符合完备性、健全性及非冗余性要求,且不应该过于复杂,以便于解码获得问题的解。

4) 根据遗传算法的特征确定最优解的解码方式。

5) 根据复杂产品生产车间设备布局问题中的目标函数的特点,及数学模型中的约束条件确定适应度转换规则,设计适应度函数。

6) 根据复杂产品生产车间设备布局问题的实际特征,设计遗传算法中的遗传算子。要结合生产实际和相关经验,合理地选取遗传算子。

7) 确定运行参数,包括初始种群大小、交叉概率、变异概率、终止进化代数等,然后编写程序进行求解,得到最优解后进行解码,进而得到实际问题的最优解。

2.2 改进型遗传算法设计

针对生产布局的组合优化与解空间庞大的问题,笔者采用实值编码和进化的方法对遗传算法进行改进^[9]。

1) 编码。

由于设备间的物流频率 R 和设备间的单位距离每单位物料运输费用 E 由加工生产线的生产工艺、产量要求及运输设备等生产实际所决定,可知决策变量为设备间的物流距离。根据设备间物流距离的定义可知,设备的排列序列和设备间的净间距决定了设备间的物流距离,因此其决策变量为设备排列顺序和设备间净间距。实值编码方法对于函数优化和约束优化问题最为有效已被广泛地验证,故编码方法采用设备符号和净间距2个列表的扩展换位表达方式:

$$[\{m_1, m_2, \dots, m_n\}, \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n\}]。$$

其中: m_i 为编号 i 的设备,取值为 $0 \sim n$ 的整数; Δ_i 为编号 $i-1$ 的设备和编号 i 的设备之间的净间距,取值为大于 0 的实数。

2) 适应度函数。

以复杂产品生产车间“最小化物流费用”优化目标,采取目标函数倒数的形式设计适应度函数,结合车间设备布局中采用自动换行策略的惩罚项,适应度函数如下式:

$$\text{Fitness} = \frac{1}{\min PDE + P_k}。 \quad (10)$$

在设备布局优化过程中,只需要判断最后一行设备在纵向上是否超出了车间尺寸的约束,所以 P_k 的取值如下式:

$$P_k = \begin{cases} 0, & s_0 + (m-1)s \leq H \\ T, & \text{其他} \end{cases}。 \quad (11)$$

其中: H 为车间宽度; s_0 为首行设备距边界的最小间距; s 为行间距; T 为正的大数惩罚值 500 。

3) 设计遗传算法参数。

① 种群大小。

在求解车间设备布局问题中,种群大小一般为 $100 \sim 200$,笔者选择种群大小为 150 。

② 选择算子。

笔者采用轮盘赌选择方法和最优保存策略相结合的方式,对每代中的所有个体进行选择。

③ 代沟。

代沟决定了选择操作中父代个体被复制到下一代的比例,代沟取值为 0.8 。

④ 交叉算子。

对于设备排列序列,适合采用部分匹配交叉(partially matched crossover, PMX)方法^[10]来产生新的设备布局序列。对于设备间净间距,适合采用均匀算术交叉方法来调整设备间的距离。二者相结

合产生新的设备布局方案，即新个体。

假设设备排列序列有 2 种方案 A 和 B，采用 PMX 策略产生新设备排列序列的过程如图 4 所示，具体过程如下：

Step1: 随机产生 2 个交叉位置点，逐个交叉两位置之间的所有设备编号。

Step2: 交叉编号为 1、4 的设备：交叉后 A 中有 2 个编号为 4 的设备，B 中有 2 个编号为 1 的设备，需进行修改。将 A 中原来编号为 4 的设备改成编号为 1 的设备，B 中原来编号为 1 的设备改成编号为 4 的设备。

Step3: 按照相同的方式交叉 6、5 和 3、2。

Step4: A、B 2 个父染色体交叉后得到 A 和 B 2 个子染色体。

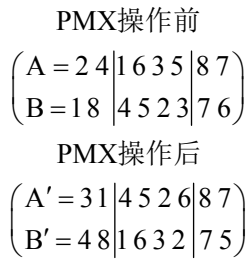


图 4 部分匹配交叉策略处理设备符号示意

假设设备间净间距的取值有 2 种方案 I 和 J，采用均匀算术交叉法产生新设备净间距序列^[11]。具体操作过程按照公式(12)的方式执行， ΔI^t 和 ΔJ^t 为父染色体的设备净间距基因， ΔI^{t+1} 和 ΔJ^{t+1} 为子染色体的设备净间距基因。

$$\begin{aligned} \Delta I^{t+1} &= \alpha \Delta J^t + (1-\alpha) \Delta I^t \\ \Delta J^{t+1} &= \alpha \Delta I^t + (1-\alpha) \Delta J^t, \alpha \text{取常数} 0.5. \end{aligned} \quad (12)$$

均匀算术交叉操作前

$$\begin{pmatrix} I=0.2 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.3 & 0.5 & 0.8 & 0.7 \\ J=0.2 & 0.8 & 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0.7 & 0.6 \end{pmatrix}。$$

若 $\alpha=0.5$

均匀算术交叉操作后

$$\begin{pmatrix} I'=0.2 & 0.6 & 0.45 & 0.55 & 0.25 & 0.4 & 0.75 & 0.65 \\ J'=0.2 & 0.8 & 0.45 & 0.55 & 0.25 & 0.4 & 0.75 & 0.65 \end{pmatrix}。$$

在车间设备布局问题中， P_c 的一般取值范围是 0.4~0.9。

4) 变异算子。

采用均匀变异方法处理设备间净间距序列，假设某个个体的净间距序列为

$$\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}。$$

根据变异概率选定个体净间距序列的变异点

A_i ，充分考虑设备尺寸和工作半径等确定设备间净间距取值范围 $[U_{min}, U_{max}]$ ，然后在该区间内随机产生 r (给定的正整数)个净间距： A'_1, A'_2, \dots, A'_r ，用这些随机产生的净间距分别替换变异点 A_i 的基因值，从而产生 r 个新个体，计算这 r 个新个体的适应度函数值，用最优秀的个体取代原来的个体，完成该个体的变异操作，其中 r 和 $[U_{min}, U_{max}]$ 取值如下：

$$r=10, [U_{min}, U_{max}] = [0, 1.5]。$$

变异操作是遗传算法中增加种群多样性的辅助性操作，变异概率的取值一般比较小，针对车间设备布局问题， P_m 的取值范围一般为 0.005~0.01。

5) 遗传算法的终止条件。

笔者针对复杂产品生产车间设备布局问题，采用设定最大遗传代数的方法作为遗传算法的终止条件。本文中遗传算法的最大遗传代数取 100 代。

3 实例验证

3.1 算例

以某新建航空发动机智能化生产线为例，车间布局中的具体信息和遗传算法参数如表 1—表 3。

表 1 航空发动机智能化生产线信息

车间名称	车间长度 l/m	车间宽度 d/m	设备行间距 s/m	首行/尾行到 边界距离 s_0 /m
制造单元	15	8	2	1.5

表 2 航空发动机智能化生产线制造设备信息 m

设备编号	1	2	3	4	5	6	7
长度	0.9	0.86	1.0	0.86	0.95	0.86	0.90
宽度	0.7	0.50	0.8	0.52	0.80	0.50	0.55
设备编号	8	9	10	11	12	13	14
长度	1.6	0.86	1.2	0.9	0.86	0.90	1.2
宽度	1.3	0.55	0.9	0.5	0.50	0.53	1.0

表 3 遗传算法的各参数值

种群大小	交叉概率	变异概率	最大遗传代数	惩罚项 T 值	净间距算术交叉 α 值	净间距序列变异 r , $[U_{min}, U_{max}]$
150	0.8	0.7	0.05	100	500	0.5 $r=10, [0, 1.5]$

根据复杂产品生产车间设备布局问题的数学分析模型、约束条件、遗传算法的具体设计等，编写遗传算法 Matlab 脚本文件。多次运行脚本程序，可以得到一些较优的解，结合生产实际中产品下线的位置，最好位于边界位置，在最优解中选择执行最后工艺的设备位于边界的解中的一组，如：

$$\begin{aligned} & \left[\{m_1^*, m_2^*, \dots, m_n^*\}, \{A_1^*, A_2^*, \dots, A_n^*\} \right] = \\ & [13, 7, 9, 6, 1, 2, 11, 5, 12, 14, 8, 3, 10, 4, \\ & 0.543\ 7, 0.580\ 0, 0.265\ 5, 0.114\ 3, 0.878\ 2, \\ & 0.264\ 5, 0.965\ 0, 0.651\ 2, 0.183\ 1, 0.611\ 1, \\ & 0.423\ 9, 0.242\ 0, 0.280\ 8, 0.478\ 2]。 \end{aligned}$$

如图 5 所示,对应的目标函数值为 5842。按照自动换行策略,上述得到的最优设备布局方案排列方式为:第 1 行:13 7 9 6 1;第 2 行:2 11 5 12 14;第 3 行:8 3 10 4。

其进化过程如图 5 所示,从图中可以看出采用本方法取得了较好的优化效果。

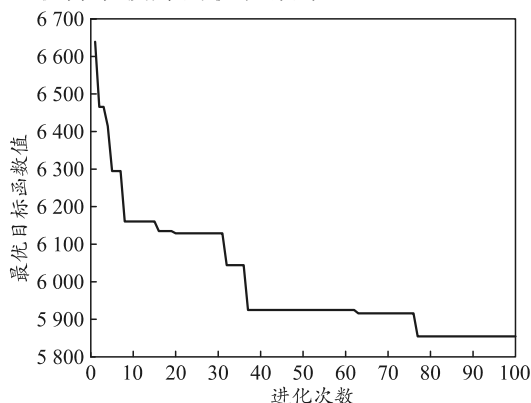


图 5 遗传算法进化过程

3.2 虚拟仿真

采用生产线仿真软件 QUEST 对本文研究结果进行仿真验证。仿真流程如下。

1) 确定仿真目标。

优化目标是最低物流费用,在此基础上,设备布局方案进行物流仿真的目标包括设备利用率、在制品数量、产能等,对遗传算法求解出的初步布局方案进行物流仿真分析,从而对布局方案进一步优化。

2) 数据准备:参数设置、选择仿真建模策略。

数据准备主要包括设备属性、生产纲领和工艺路线等,并以活动扫描法为仿真建模策略。

3) 建立仿真模型。

仿真模型包括 3 维实体建模和逻辑建模,根据遗传算法求解的布局方案 2 维平面图构建车间 3 维实体模型,根据车间设备间物流信息构建逻辑模型。根据设备布局的数学模型和遗传算法的编码方式,将得到的最优解进行解码,绘制该生产线 2 维设备布局平面图,并在 QUEST 中导入设备物理模型。

4) 运行仿真模型。

运行仿真模型,运行前需要校验仿真程序的正确性和仿真模型的正确性。在确保正确的情况下,运行仿真模型。

5) 仿真结果分析。

分析生产线的设备利用率、在制品数量、瓶颈工位、产能等,并输出模型运行仿真结果,保存到

该布局项目文件夹中。

按照上述流程,该生产线的仿真过程如图 6 所示,仿真分析结果如图 7 所示。

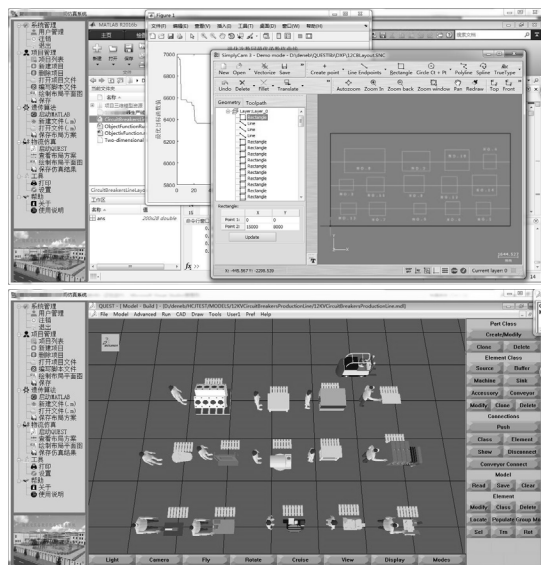


图 6 某新建航空发动机智能化生产线设备布局仿真

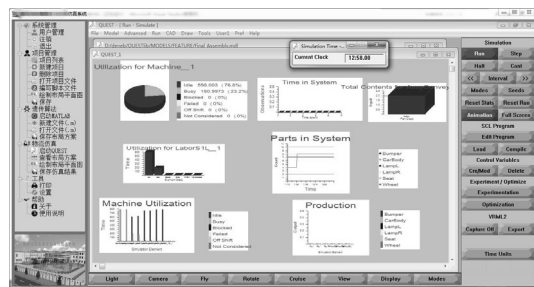


图 7 生产线仿真分析结果

由此,通过在 QUEST 中的运行仿真,从生产能力、设备利用率及生产瓶颈等方面,分析了笔者提出方法求解出的布局方案,验证了车间设备布局的合理性。

4 结论

笔者提出一种设备布局优化方法,解决了复杂生产车间新建和改建中的设备布局优化设计问题。笔者根据问题特征,通过定义优化目标和约束条件建立了设备布局的优化模型,并利用实值编码和进化代沟,提出了一种改进型遗传算法,解决了优化模型解空间较大的问题。笔者以某待建的航空发动机智能化生产线为实例,通过建模和求解,给出了设备布局的最优方案,验证了该建模方法和改进遗传算法的有效性,并利用虚拟仿真技术对研究结果进行了进一步的验证与展示。

参考文献:

[1] SAHNI S, GONZALEZ T. P-Complete Approximation

Problems[J]. Journal of the Acm, 1976, 23(3): 555-565.

[2] BOZER Y A, WANG C T. A graph-pair representation and MIP-model-based heuristic for the unequal-area facility layout problem[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 218(2): 382-391.

[3] SADAN K K, ABDULLAN K. A new relaxed flexible bay structure representation and particle swarm optimization for the unequal area facility layout problem[J]. Engineering Optimization, 2011, 43(12): 1263-1287.

[4] ULUTAS B H, SADAN K K. An artificial immune system based algorithm to solve unequal area facility layout problem[J]. Expert Systems with Applications An International Journal, 2012, 39(5): 5384-5395.

[5] 高贵兵. 混流制造系统生产物流关键问题优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[6] 朱大林, 詹腾, 张屹, 等. 元胞多目标粒子群优化算法

(上接第 63 页)

[7] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 194-199.

[8] 安二峰. 新型战斗部聚能效应及相关问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004: 4-5.

[9] 赵捍东, 陈国光, 董永香. 聚能装药射流的数值仿真研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2001, 22(3): 211-214.

[10] 吴晗玲, 段卓平, 汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 328-332.

[11] 韩世峰. 破甲弹对运动体斜侵彻的仿真研究[D]. 太原:

(上接第 66 页)

3) 同一时刻下, 温度对药筒残余应力的影响很大, 尤其是对筒体;

4) 同一时刻下, 温度使药筒的抽壳力略微增大, 增大约 16%。

综上所述, 热冲击对铜质药筒有一定的影响。温度使得药筒筒体残余应力增大, 对药筒的重复使用有严重影响。该研究对焊接钢质药筒的研究有较为重要的指导意义。

参考文献:

[1] 王志军, 尹建平. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 201-237.

[2] ROBBINS F W, COLBURN J W, ZOLTANI C K. Combustible Cartridge Cases: Current Status and Future Prospects[M]. Combustible Cartridge Cases Current Status & Future Prospects, 1992.

[3] 何清. 焊接钢质药筒设计理论与研究[D]. 太原: 中北

与其应用[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 280-287.

[7] 张屹, 卢超, 张虎, 方子帆. 基于差分元胞多目标遗传算法的车间布局优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4): 727-734.

[8] 李伯虎. 复杂产品制造信息化的重要技术——复杂产品集成制造系统[J]. 机械设计与制造工程, 2006(14): 20-24.

[9] 钱超, 陈维义, 谢芝亮, 等. 基于遗传算法的装备技术准备资源平衡[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 81-85.

[10] LENO I J, SANKAR S S, PONNAMBALAM S G. An elitist strategy genetic algorithm using simulated annealing algorithm as local search for facility layout design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5): 787-799.

[11] 邹世伟. 车间柔性布局算法及三维仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.

中北大学, 2015: 15-18.

[12] 卢芳云, 蒋邦海, 李翔宇, 等. 武器战斗部投射与毁伤[M].北京: 科学出版社, 2013: 176-177.

[13] 樊菲, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 爆炸成型弹丸战斗部不同侵彻着角下的毁伤能力研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 199-204.

[14] 杨绍卿. 灵巧弹药工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 295-298.

[15] 郭希维, 姚志敏, 赵昉. 对抗主动防护系统的 EFP 战斗部设计[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 6-9.

大学, 2005.

[4] 田晓丽, 杨黎明, 何清, 等. 药筒有限元分析前处理软件系统研究与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 636-642.

[5] 卫丰, 张光. 药筒发射应力和抽壳力的有限元分析[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 72-75.

[6] 曹畅. 火炮膛内瞬态多相流场与药筒受力耦合作用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

[7] 何清, 田晓丽, 陈国光. 焊接药筒发射强度应力场分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 82-83.

[8] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 19-46.

[9] 郭振宇. 火炮药筒在发射状态下的工作过程及其基本参量[J]. 兵工学报, 1981, 2(3): 34-39.

[10] 顾克秋, 钱林方, 常秀英, 等. 大口径火炮焊接药筒射击变形机理的启发式反演[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6): 553-557.

[11] 张文革, 李德信, 杨世强. 悬索桥桥梁检查车力学性能分析[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1169-1175.