

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.016

基于 MBD 的弹药装配序列规划方法

娄 鹏^{1,2}, 曾鹏飞^{1,2}, 郝永平²

(1. 沈阳理工大学机械工程学院, 沈阳 110159;

2. 沈阳理工大学辽宁省先进制造技术与装备重点实验室, 沈阳 110159)

摘要: 针对弹药装配结构复杂、零件数量多和装配效率低等问题, 提出一种基于模型定义(model based definition, MBD)的弹药装配序列规划生成方法。在定义装配序列可行性的基础上, 构建装配规划的适应度函数, 提出包含精英种群的基于改进遗传算法(genetic algorithm, GA)的装配序列规划算法。基于 UG/NX 二次开发技术, 设计和开发 MBD 的装配序列规划系统。以某引信子装配体为例进行应用验证的结果表明, 所提方法有效且稳定。

关键词: MBD; 装配序列规划; 改进遗传算法; 多目标优化; 弹药装配

中图分类号: TJ4 **文献标志码:** A

Ammunition Assembly Sequence Planning Method Based on MBD

Lou Peng^{1,2}, Zeng Pengfei^{1,2}, Hao Yongping²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology and Equipment,
Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex structure, large number of parts and low assembly efficiency in ammunition assembly, a method of generating ammunition assembly sequence planning based on model based definition (MBD) was proposed. On the basis of defining the feasibility of assembly sequence, the fitness function of assembly planning is constructed, and an assembly sequence planning algorithm based on improved genetic algorithm (GA) including elite population is proposed. Based on the secondary development technology of UG/NX, the assembly sequence planning system of MBD is designed and developed. A fuze sub-assembly is taken as an example to verify the effectiveness and stability of the proposed method.

Keywords: MBD; assembly sequence planning; improved genetic algorithm; multi-objective optimization; ammunition assembly

0 引言

装配作为制造过程中关键的环节, 对企业的装配规划能力提出了更高要求。装配序列优化是一种复杂的组合优化问题, 涉及到装配几何、装配干涉、装配稳定性、装配工具、装配方向等多个因素。模型定义(MBD)通过将必要的装配信息嵌入到3维模型中, 实现数字化装配, 提高了装配效率, 确保了可装配性^[1-3]。曾芬芳等^[4]采用基于 MBD 的装配信息模型和“拆卸定义装配”的模式研发了3维装配工艺规划系统。康颜奎等^[5]针对基于 MBD 的数字化定义技术、3维装配指令生成与管理、3维装配工艺仿真技术、基于 XML 装配工艺语义网络等内容进行了深入研究。Ding 等^[6]提出了一种基于3维 CAD 模型 AFR 和相似度评价的新的基于模型的定

义。Xu 等^[7]研究了用于加工零件的系统化 AFR 方法, 将零件 MBD 模型转换为基于工艺语义的结构化特征模型。Xia 等^[8]提出了面向装配的图注意力序列, 利用启发式信息作为装配图结构的边权重来增量地引导搜索到最优序列。印宇珂等^[9]对模拟退火算法和遗传算法进行算法研究和改进, 提出两者的混合算法融合策略。Xiao 等^[10]提出了一种粒子群优化算法和遗传算法相结合的算法对模型进行求解。

笔者提出了一种基于 MBD 的装配序列规划方法。以装配结构信息、装配约束矩阵和干涉矩阵信息为核心的装配 MBD 信息, 基于改进遗传算法, 采用基于几何可行性矩阵和装配优先矩阵的初始种群生成, 建立适应度函数, 在选择交叉中引入精英种群策略, 提高算法的寻优效率和收敛速度。以某引信子装配体为例, 验证了系统的有效性。

收稿日期: 2024-07-09; 修回日期: 2024-08-15

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目(2022JH2/101300254)

第一作者: 娄 鹏(1998—), 男, 山东人, 硕士。

通信作者: 曾鹏飞(1978—), 男, 河南人, 博士。

1 基于改进遗传算法的装配序列规划

1.1 装配序列可行性

1.1.1 装配几何可行性

对由 n 个零件组成的装配体, 每个零件用 $p_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 表示, 其装配序列为 $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 。装配过程中各零件在坐标系中有 6 个装配方向 $R(i)=\{+x, -x, +y, -y, +z, -z\}$ 。各零件在其装配方向上可能与其他零件发生干涉, 使其不能顺利装配; 因此, 建立装配体零件间的干涉矩阵 $[Fa_{ij}]_{n \times n}$, 其中 Sa_{ij} 为零件 Sa_j 和 Sa_i 的装配干涉关系; i 和 j 为零件序号, 取值如下:

$$Fa_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if 零件 } i \text{ 在装配方向上与零件 } j \text{ 干涉} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

装配序列的装配干涉性指标 V_f 的取值如下:

$$V_f = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Fa_{i,j}, \quad 0 \leq V_f \leq \frac{n(n-1)}{2} \quad (2)$$

当 $V_f > 1$ 装配序列不可行, $V_f < 1$ 装配序列可行。

1.1.2 装配优先约束性

通过算法生成的序列结果会产生不可行的序列, 通过装配优先矩阵可以排除不可行解, 用 $[Pa_{ij}]_{n \times n}$ 表示, 其中 Pa_{ij} 为零件 i 是否优先于零件 j 装配, 取值如下:

$$Pa_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if 零件 } i \text{ 优先于零件 } j \text{ 安装} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

装配序列的装配违规性指标 V_p 的取值如下:

$$V_p = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Pa_{i,j}, \quad 0 \leq V_p \leq \frac{n(n-1)}{2} \quad (4)$$

当 $V_p > 1$ 装配序列不可行, $V_p < 1$ 装配序列可行。

1.2 适应度函数构建

1.2.1 装配稳定性

稳定性指在装配过程中, 确保零件之间的连接牢固、稳定, 并能够承受所需的力和负荷。建立装配体的连接矩阵 $[Sa_{ij}]_{n \times n}$, 其中 Sa_{ij} 为零件 Sa_j 和 Sa_i 之间的连接关系, i, j 为零件序号, 连接矩阵取值如下:

$$Sa_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{if 零件 } Sa_j \text{ 和零件 } Sa_i \text{ 不存在连接关系} \\ 1 & \text{if 零件 } Sa_j \text{ 和零件 } Sa_i \text{ 存在接触连接} \\ 2 & \text{if 零件 } Sa_j \text{ 和零件 } Sa_i \text{ 存在稳定连接} \end{cases} \quad (5)$$

式中稳定连接指零件之间通过紧固件或者孔轴过盈配合等具有强制约束的联接。装配序列稳定性指标 V_s 取值如下:

$$V_s = \sum_{k=1}^{n-1} Sa_{P_k, P_{k+1}}, \quad 0 \leq V_s \leq 2(n-1) \quad (6)$$

式中: n 为零件总数; $Sa_{P_k, P_{k+1}}$ 为零件 P_{k+1} 和 P_k 的装配稳定性; P_{k+1} 、 P_k 为零件序号; V_s 越小, 装配稳定性就越好。

1.2.2 装配重定向性

重定向性指装配方向的改变次数。建立零件的装配方向矩阵 $[Da_i]_{n \times 1}$, 其中 Da_i 为零件 i 的装配方向, n 为组件数量, V_d 为 2 个连续组装操作中装配方向的更改, 取值如下:

$$D_{i,i+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } Da_{i+1} \neq Da_i \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

装配方向改变次数:

$$V_d = \sum_{i=1}^{n-1} D_{i,i+1}, \quad 0 \leq V_d \leq n \quad (8)$$

式中, n 为零件总数, V_d 为零件 D_{i+1} 和 D_i 的装配重定向性, $i+1$ 、 i 为零件序号; V_d 越小, 装配稳定性就越好。

1.2.3 装配聚合性

聚合性指在装配中装配工具的改变次数。建立装配矩阵 $[Ta_i]_{n \times 1}$, 每个零件的装配工具集合 $T(i)=\{Ta_1, Ta_2, Ta_3, Ta_4, Ta_5, Ta_6\}$ 。 $T_{i, i+1}$ 为零件 T_i 和 T_{i+1} 之间的连接关系, $i, i+1$ 为零件序号, 取值如下:

$$T_{i,i+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } Ta_{i+1} \neq Ta_i \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

装配序列的装配工具改变次数 V_t 取值如下:

$$V_t = \sum_{i=1}^{n-1} T_{i,i+1}, \quad 0 \leq V_t \leq n \quad (10)$$

式中: n 为零件总数; V_t 为零件 T_{i+1} 和 T_i 的装配重定向性; V_t 越小, 装配序列装配稳定性就越好。

1.2.4 装配规划适应度函数

综合考虑装配序列稳定性、重定向性和聚合性, 建立装配序列规划的适应度函数:

$$\text{fitness} = 1/(\omega_1 \cdot V_s + \omega_2 \cdot V_d + \omega_3 \cdot V_t) \quad (11)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为各项指标权重, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$; 适应度值越高, 装配序列复杂度越低装配序列越优。

1.3 基于改进遗传算法的序列规划算法

1.3.1 算法基本流程

在构建装配序列可行性和适应度的基础上，提出基于改进遗传算法的装配序列规划算法，如图 1 所示。

1.3.2 精英策略

在遗传迭代中，首先，对种群的个体按照适应度大小排序；然后，按设定的精英种群比例保留最优个体，确保算法中最好的个体可以从第 n 代种群中保留到第 $n+1$ 代在每一代只生成 $n \times (1-a)$ 个子代， n 为种群规模， a 为精英种群比例；最后，将父代中最好的 $a \times n$ 个个体与子代合并得到下一代的 n 个个体。

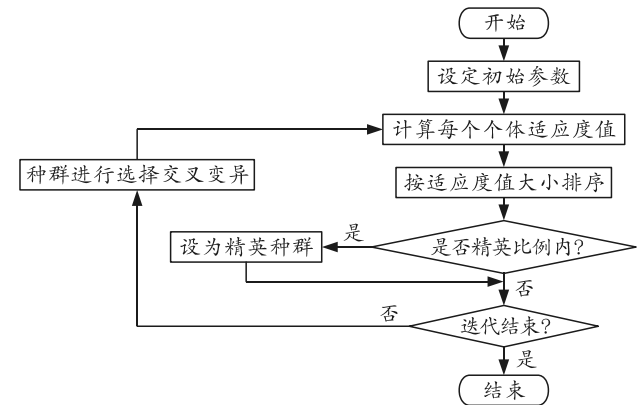


图 1 改进遗传算法序列规划算法

2 基于 UG/NX 的 MBD 装配系统开发

基于 UG/NX 二次开发工具及接口，以 C/C++ 为开发语言，通过调用 NXOpen C/C++ API，完成 MBD 装配系统的开发，实现了装配信息提取和装配序列生成算法的集成。通过调用 UF_ATTR Functions、UF_DRF Functions 等头文件内定义的 API 以及 AttributeManager、Assemblies 等命名空间下的类的成员函数，实现了装配相关性属性提取。通过 OnInitDialog() 函数构建装配关系和装配约束关系矩阵，使用 GetAllComponent、GetConstraints Type 函数以及 UFUN API 来实现装配约束、约束类型与约束对象提取，利用 UF_MODL_check_

interference 构建装配干涉矩阵，如图 2 所示。

3 实验验证与分析

以某引信子装配体为例进行验证，装配体共 20 个零件，零件信息、装配工具和装配方向如表 1 所示。



图 2 装配序列规划系统界面

表 1 某引信子装配体装配信息

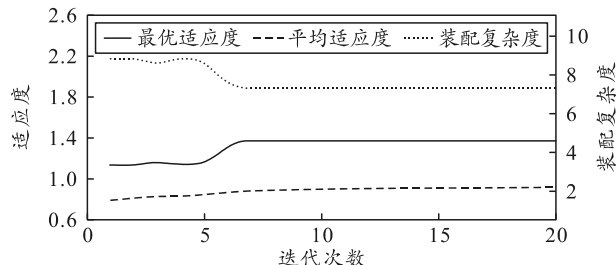
零件序号	零件名称	装配方向	装配工具
0-1	下垫	z	Ta ₁
0-2	小环	-z	Ta ₂
0-3	保险套筒	-z	Ta ₃
0-4	止销	-z	Ta ₄
0-5	止销簧	z	Ta ₅
0-6	套筒	-z	Ta ₆
0-7	下活机体	x	Ta ₄
0-8	定位套	-z	Ta ₄
0-9	强装药	z	Ta ₄
0-10	惯性止销簧	z	Ta ₅
0-11	惯性止销	-z	Ta ₃
0-12	下活机体簧	-x	Ta ₅
0-13	下活机体簧套	-x	Ta ₅
0-14	底	-z	Ta ₆
0-15	下帽	-z	Ta ₄
0-16	压紧座	z	Ta ₄
0-17	套	-z	Ta ₅
0-18	垫片	z	Ta ₅
0-19	压紧环	-z	Ta ₄
0-20	小环	z	Ta ₂

针对装配体，取权重值 $\omega_1=0.2$, $\omega_2=0.4$, $\omega_3=0.4$ 。算法迭代次数分别取 20、50、100、200、300 和 500 时进行了实验，种群 800，精英种群比例 0.05，分别运行 50 次，其序列规划结果如表 2 所示。

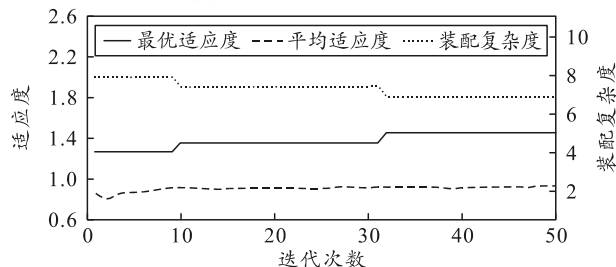
表 2 各迭代次数装配序列规划结果

迭代次数	装配序列规划结果	最优适应度	装配复杂度	装配方向改变次数	装配工具改变次数
20	17, 10, 1, 16, 13, 9, 5, 12, 14, 6, 3, 2, 4, 8, 7, 11, 18, 15, 19, 20	1.369 86	7.30	10	12
50	17, 13, 10, 12, 9, 16, 11, 15, 5, 1, 8, 7, 4, 3, 2, 6, 14, 18, 19, 20	1.449 28	6.90	10	11
100	17, 14, 10, 6, 16, 11, 9, 5, 3, 2, 4, 8, 7, 1, 18, 12, 13, 15, 19, 20	1.515 15	6.60	9	10
200	17, 14, 10, 15, 16, 13, 11, 14, 4, 8, 1, 5, 3, 2, 6, 7, 9, 12, 19, 20	1.538 46	6.50	9	10
300	17, 10, 15, 12, 18, 13, 14, 11, 16, 6, 4, 3, 2, 8, 7, 9, 5, 1, 19, 20	1.785 71	5.60	8	8
500	17, 10, 14, 11, 13, 12, 15, 16, 9, 5, 1, 7, 8, 4, 3, 2, 6, 18, 19, 20	1.785 71	5.60	8	8

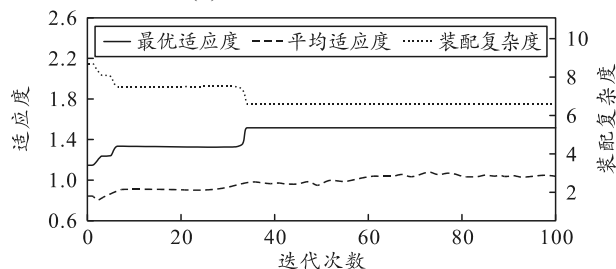
通过表 2 数据可以发现：获取最优装配序列最少的装配工具改变次数为 8 次、最少的装配方向重定向次数为 8 次。通过比较图 3 中各迭代次数适应度收敛，发现算法结果随迭代次数改变而改变。



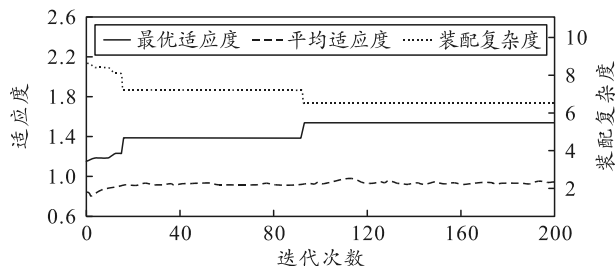
(a) 20 次迭代结果变化



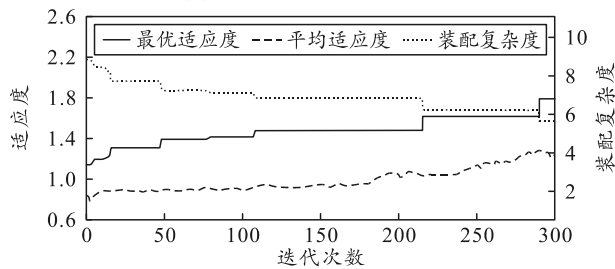
(b) 50 次迭代结果变化



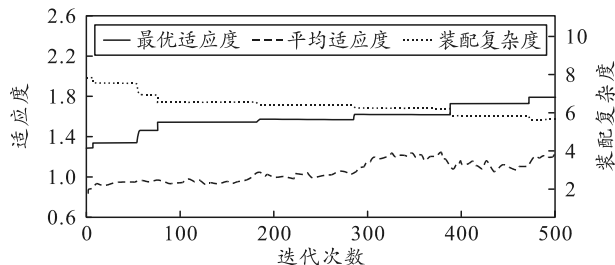
(c) 100 次迭代结果变化



(d) 200 次迭代结果变化



(e) 300 次迭代结果变化



(f) 500 次迭代结果变化

图 3 各迭代次数适应度收敛图

针对选择概率取 0.8、0.9、0.95 和 0.98，变异概率取 0.2、0.1、0.05 和 0.02 时进行了再次试验，其序列规划结果如表 3 所示。

表 3 各概率装配序列规划结果

交叉 概率	变异 概率	装配序列规划结果	最优 适应度	平均 适应度	装配 复杂度	装配方向 改变次数	装配工具 改变次数
0.80	0.20	17, 10, 14, 11, 13, 12, 15, 16, 9, 5, 1, 7, 8, 4, 3, 2, 6, 18, 19, 20	1.785 71	1.229 18	5.6	8	8
0.90	0.10	17, 10, 14, 11, 18, 12, 15, 16, 5, 3, 6, 2, 8, 7, 9, 4, 1, 13, 19, 20	1.724 14	1.485 67	5.8	8	9
0.95	0.05	17, 10, 14, 18, 11, 15, 13, 16, 5, 7, 4, 8, 9, 3, 2, 1, 6, 12, 19, 20	1.785 71	1.667 55	5.6	8	8
0.98	0.02	17, 6, 2, 4, 3, 8, 7, 9, 12, 11, 15, 14, 10, 18, 13, 16, 1, 5, 19, 20	1.449 28	1.331 13	6.9	10	11

在交叉概率和变异概率改变时，随着 P_c 值增大和 P_m 值减小，平均适应度越来越接近最优适应度，但会使最优适应度有所降低，算法陷入局部最优。通过分析可以得出：最优适应度值和种群平均适应度随着迭代次数增加逐渐升高，验证了算法的稳定性。

4 结束语

针对装配工艺智能规划需求，在相关工作基础上，提出了一种基于 MBD 的装配序列规划方法。在分析装配序列可行性的基础上，建立了含装配稳定性、装配聚合、装配重定向性 3 个指标的装配适应度函数，构建了融合精英策略的基于改进遗传算

法的装配序列规划算法。利用装配优先矩阵和装配干涉矩阵避免组合爆炸。基于 UG/NX 二次开发技术，开发了基于 MBD 的装配序列规划系统，实现了对装配约束矩阵信息和装配干涉信息提取。以某引信子装配体为实例，验证方法的有效性和稳定性，为装配序列规划研究提供了新的思路，提高弹药装配工艺设计效率。

参考文献：

- [1] GOHER K, AL-ASHAAB A, SARFRAZ S, et al. An uncertainty management framework to support model-based definition and enterprise[J]. Computers in Industry, 2023, 150: 103944.