

基于遗传算法的复杂环境混流生产线物料配送技术

孙希婕¹ 鲁祥¹ 杨开彬² 袁辰希³

1. 中国空空导弹研究院 河南洛阳 471009;

2. 山东金雷新能源重装有限公司 山东东营 257000; 3. 中国航空工业集团北京航空精密机械研究所 北京丰台 100076

DOI:10.12238/ems.v7i7.14271

[摘要] 针对光机部件混流生产线生产环境复杂, 装调过程不确定因素多、工时浮动大等导致物料配送复杂度增加的问题, 提出基于遗传算法的物料配送技术。首先分析了光机部件产线的特点, 并根据特点选定了配送策略, 提高了应对复杂环境的能力; 基于配送成本和时间设计了配送策略优化模型, 并通过遗传算法对模型进行求解。仿真实验结果表明, 对于光机部件产线等复杂环境相对传统方法在成本和效率方面均有明显优势。

[关键词] 光机部件装配; 物料配送; 遗传算法; 复杂环境; 混流装配生产线

1 引言

光机部件作为多数机载制导武器的重要组成部分, 是一种涉及了光、电和机械的复杂装置^[3]。生产制造企业为满足多种型号产品订单, 需同时生产多种型号光机部件, 即采用装配生产线混流生产的方式。混流生产线是在一条生产线上混合连续地生产不同型号产品的柔性生产系统, 提高生产效率、扩大产能的同时又能满足多规格生产需求, 具有一定的灵活性和适应性, 但需要强大的配送能力。

生产线物流配送具有较高的时效性要求, 如果因配送方式不当造成缺货和不同型号的零部件过多交叉, 将严重影响

生产效率^[5]。本文针对光机部件的产品工艺特点和生产特性, 研究基于遗传算法的混流生产线物料配送技术, 深入分析了光机部件混流生产线特点, 建立配送优化模型并设计求解算法。在满足物料配送时间、数量、位置需求的前提下, 有效地降低配送工作量和成本、增强配送工作的柔性以应对复杂的生产环境, 提高产线生产效率。

2 产线特征分析

光机部件生产线生产过程主要包括机装和电装两部分, 在装配过程中会穿插多次测试和固化工序, 其装配流程示意图如图 1。

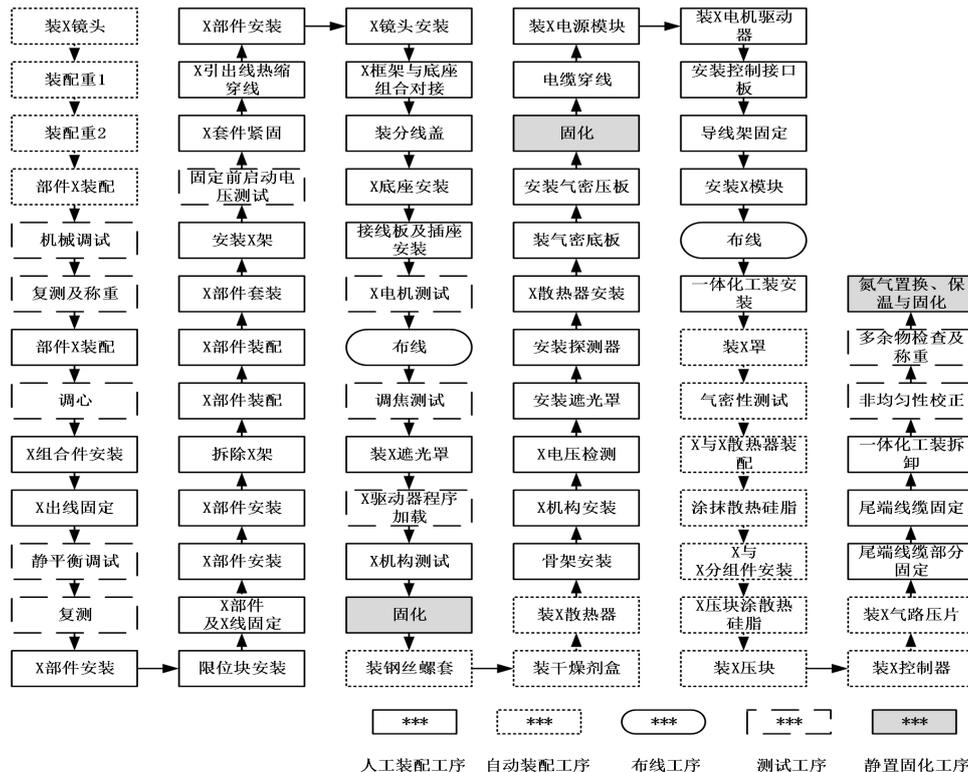


图 1 光机部件产线典型生产流程示意图

在上述生产条件下, 混流生产线物料配送将面临分拣工作量大、难以确认配送量和配送形式等状况, 最终导致配送效率下降, 产线产量减少等问题。因此需要针对产线特征优化配送策略。

3 配送策略设计

根据光机部件的产线特征, 可以以齐套性、固定式/移动式、转运方式三个维度为分类依据。其中, 齐套性表示严格按生产一件或一套产品配送物料; 固定式和移动式的区别在于单次配送物料针对的是固定工位还是在不同工位之间流转; 转运方式分为不同类型的物料同步转运和分开转运。

由于光机部件产品所需的零部件数量多、体积大, 且装配过程具有多阶段特征, 因此适宜将其物料按照装配阶段划分为不同的料箱, 即移动式配送; 对于在制品, 通过载具设计, 可以将其同物料齐套料箱同步转运, 相对分开转运减少了转运的工作量; 移动式配送方式也可以避免因作业计划等动态调整而带来的物料调整成本, 只需在工位作业完成后, 将物料与在制品按照新的路径转回仓储中心即可。

综上所述, 通过每种要素的利弊分析, 对于光机部件类产品的混流装配生产线, 采用多阶段分料箱移动式、同步转运的部分齐套配送方式。

4 配送优化模型建立

对于一个配送作业周期内的全部作业, 实质是车辆路径规划问题, 且车辆运输过程中存在运载能力约束和时间窗约束。其优化目标 Z 为双目标优化, 分别为降低配送成本和降低配送延迟时间 D , 如式 (1):

$$Z = \min\{C, D\} \quad (1)$$

其中, 配送成本 C 可以分为分拣成本 C_1 和配送成本 C_2 , 包含因生产变动导致需要重新分拣和配送的成本, 如式 (2):

$$C = C_1 + C_2 \quad (2)$$

C_1 由仓库的运行成本和人员的拣货成本构成, 如式 (3):

$$C_1 = \sum_{p=1}^n (T_p q_p) \times a + \sum_{p=1}^n \left\lceil \frac{Q_p}{q_p} \right\rceil \times b, \quad p = 1, \dots, n \quad (3)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整, q_p 表示一个配送作业周期, 物料 p 所属料箱出库一次的分拣量, Q_p 表示物料 p 的原装料箱的存储量, T_p 表示分拣一件物料 p 所用的时间, a 表示分拣工人单位作业时间的成本, b 表示料箱在分拣中心出入库一次产生的成本。

C_2 为车辆的行驶距离和单位距离成本 e 的乘积, 单位距离的成本可由统计得到, 如式 (4):

$$C_2 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^N X_{i,j}^{k,p} d_{ij} \times e \quad (4)$$

其中, $X_{i,j}^{k,p}$ 为布尔变量, 当取值为 1, 表示车辆 k 运输料箱 p 从点位 i 到点位 j , d_{ij} 表示 i 点和 j 点间的运输距离。

配送延迟时间 D 可以表示为式 (5):

$$D = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{p=1}^m (tc_{ij}^p - ta_{ij}^p + td_{ij}^p - tb_{ij}^p)$$

$$tc_{ij}^p \geq ta_{ij}^p, \quad td_{ij}^p \geq tb_{ij}^p, \quad ta_{ij}^p - tb_{ij}^p \geq \frac{d_{ij}}{v}, \quad tc_{ij}^p - ta_{ij}^p \geq \frac{d_{ij}}{v} \quad (5)$$

其中, ta_{ij}^p 和 tb_{ij}^p 分别表示料箱 p 按照排产计划需要从点位 i 运输至点位 j 的离开时间和到达时间, tc_{ij}^p 和 td_{ij}^p 分别表示料箱 p 实际从点位 i 运输至点位 j 的离开时间和到达时间, v 表示运输车辆的速度。式中约束了所有点位的物料配送不允许提前到达、车辆速度允许在两个时差之内完成。

配送过程中所有车辆的路径应当闭环, 可表示为式 (6):

$$\sum_{i=0}^n X_{i,U}^{k,p} = \sum_{j=0}^n X_{U,j}^{k,p}, \quad k = 1, \dots, m$$

$$U = 0, \dots, n \quad p = 1, \dots, N \quad (6)$$

执行配送任务时需要有且仅有一个车辆响应, 表示为式 (7):

$$\sum_{k=1}^m X_{i,j}^{k,p} = y_{ij}^p, \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n$$

$$p = 1, \dots, N, \quad y_{ij}^p \in \{0,1\} \quad X_{i,j}^{k,p} \in \{0,1\} \quad (7)$$

其中, k 为车辆序号, y_{ij}^p 为 0, 1 变量, 当取值为 1, 表示料箱 p 需要从点位 i 运输至 j 。

5 求解算法设计

综合上述, 本文所研究的问题属于带有时间窗约束的车辆路径问题。许多学者对该问题的复杂性进行了分析, 得出车辆路径问题是一个 NP 完全问题^[6], 解决这类问题一个快速有效的途径为启发式算法, 可以在有限的时间内找到满意的次优解/可行解, 适用于实际应用中^[7]。本文采用典型的启发式算法——遗传算法^[8]对该问题进行求解。

染色体编码和解码:

算法编码采用双层编码方式, 第一层为调用配送车量和任务的对应关系, 第二层为配送优先级。

以 2 台转运车, 2 个料箱, 6 个工位为例。料箱 1 需要按照工位 1→2→3 的顺序流转, 标准工时均为 40 分钟, 料箱 2 需要按照工位 4→5→6 的顺序流转, 标准工时均为 45 分钟,

则这两个料箱的搬运任务序列为: 料箱 1 工位 1 至工位 2/料箱 2 工位 4 至工位 5, 料箱 1 工位 2 至工位 3, 料箱 2 工位 5 至工位 6, “/” 表示并行任务, 无先后顺序。对于该任务序列, 只需确认每个任务的执行车辆, 以及在同一时刻同一车辆面临多个任务时, 优先执行哪个任务, 也就实际上确认了该配送任务的执行方案。

则一个可能的染色体编码为 1 1 2 1 2 2 1 2 2 1 2 1 2 1 1 2 1 2。该个体分段之后可以表示为 1 1 2 1 2 2 | (1 2) (1 2) (2 1) (2 1) (1 2) (1 2), 表示这 6 个任务分别由车辆 1、车辆 1、车辆 2、车辆 1、车辆 2、车辆 2 完成, 在车辆 1 执行第一个任务时如果同时面对 2 个任务, 则优先执

行料箱 1 的任务, 以此类推。

在进行染色体解码时, 依次按照该逻辑进行推算即可计算出全部任务完成的时间、车辆的行驶路线等。

6 仿真实验与验证

为了验证本文配送策略的有效性, 以现有装配生产线为原型, 在保留原有生产特征的前提下, 做简化处理, 在 Plant Simulation 仿真平台搭建物料配送仿真模型, 并进行仿真对比分析, 整体效果如图 2 所示。产线共有 2 个接驳台、4 个自动工作站、2 个缓存区、2 个调焦台、8 个手工作业工位, 并通过物流通道连接仓储分拣中心。共有 3 辆运输车负责物料配送, 每个运输车一次可以转运 1 个料箱。

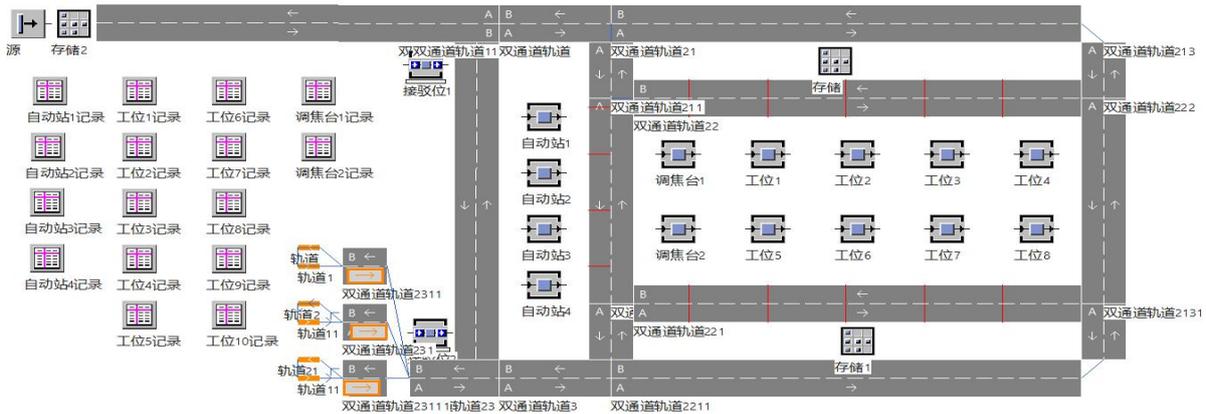


图 2 仿真模型整体效果图

生产线共装配 3 种产品, 每种产品的主要工序顺序和对应的工位需求一致, 所需工装和工具不同, 相关信息如表 1 所示。其中工位栏表示可执行该工序的工位, 工时栏表示 3 种产品分别对应的工时, 用 “/” 隔开。

各产品不同工序对应的物料信息如表 2 所示。不同产品在不同工序所需的物料种类相同, 但其型号规格、对应的包装、使用的配送料箱规格均不同。其中物料栏注明数量的表示该物料的需求数量, 不注明的默认为 1。容量代表仓储中心每个料箱对应各物料可放置的数量。

表 1 不同产品装配信息表

工序	工位	工时 (min)
1 装配	自动站 1, 2	20/25/20
2 装调	工位 1, 5	40/45/50
3 布线	工位 2, 6	40/45/50
4 调焦	调焦台 1, 2	40/45/50
5 装调	工位 3, 7	40/45/50
6 布线	工位 4, 8	40/45/50
7 装配	自动站 3, 4	30/35/40

表 2 不同产品物料信息表

工序	物料	容量
1 装配	A B C D	10/5/5/10
2 装调	2E 2F 6G	20/80/60
3 布线	10H 10I	50/50
4 调焦	J K	20/20
5 装调	L 4M N	20/30/20
6 布线	10H 10I	50/50
7 装配	O P Q R S	2/5/4/2/10

基于上述信息, 设定相关验证试验的参数, 其中成本数据为统计处理后的数据, 无具体单位。车辆匀速 0.5m/s, 行驶 1m 的成本是 5; 每个料箱出入库一次的成本为 100; 每分拣一个物料需要时间为 3s; 分拣作业工人的成本为 5/s。

仿真过程采用的配送策略为: 车辆按照预先的分工, 根据生产计划排产进行物料配送, 在需要的时刻到相应位置进行物料搬运, 如果在料箱的目的工位暂时无法接收物料, 则

就近放置在缓存区,待下一个工位空闲后再继续完成配送任务;当同一时刻要处理多个料箱时,按照设定的优先级进行操作。

分别按照传统车间的配送策略和本文所述的策略进行仿真实验并对比。在1个班次内,产线需要同时生产第1种和第2种产品各15件,传统策略每次将5件产品所需的物料直接送至对应的工位上,共配送3次,然后将制品在工位间流转;本文采取的策略为每次分拣3套物料,每个产品需要分2个阶段,即2箱物料完成全流程装配,并将制品和料箱一同进行流转。

按照 μ 为标准工时, σ 为2的正态分布随机生成各工序的实际工时,进行10次试验,每次为1个完整班次的运转,对相关结果进行统计,数据如表3。

表3 试验一统计结果

	分拣成本	配送成本	生产配送延迟
传统策略	16410	18210	37min
本文策略	24010	11200	39min

试验一生产过程中未出现意外情况,可以看出,在这种条件下,本文的策略在分拣过程产生了更多的成本,在配送阶段节省了部分成本。主要原因是在第一次配送时,相较传统的策略,避免了各个工位的物料初始化工作,二者配送延迟相当,由此可知,在生产稳定无意外状况时,本文策略并无优势,且总体成本略高于传统策略。在同一种路径优化算法下,两者的生产配送延迟基本在同一水平。

然后按照 μ 为标准工时, σ 为1的正态分布随机生成各工序的实际工时,并进行10次试验,进行均值统计,每次为1个完整班次的运转,但在运转过程中,随机选取时间点,使生产计划发生变化,将其中一个产品替换为第3种产品的生产任务。对于这种情况,传统策略需要将所有未使用的物料搬离并重新分拣配送,本文策略重新分拣料箱即可使产线内的料箱继续完成流转。对相关结果进行统计,数据如表4。

表4 试验二统计结果

	分拣成本	配送成本	生产配送延迟
传统策略	24055	31520	55min
本文策略	28710	13200	41min

由表可以看出,发生意外情况后,两种策略均在成本上

产生了增幅,但本文策略的增幅较小,尤其是配送成本,即生产的波动对其影响较小。在配送延迟方面,由于本文采取的策略无需进行过多的调整,也节省了大量的时间,说明该策略能够有效应对复杂环境中生产的变动。

7结论

本文详细分析了光机部件的重要性,并将光机部件类产品装配归结为多阶段、多工序、长流程的复杂装配。针对其装配过程特殊性导致的零部件配送工作难度增加等问题,通过工艺特征分析、不同策略间的特征对比,设计了多阶段分料箱移动式、同步转运的部分齐套配送方式;提出以配送成本、配送延迟为主要优化目标的调度模型,设计双层编码的遗传算法,并利用Plant Simulation软件对物料配送环节进行仿真,结果表明本文策略不仅能够满足生产中的物料供应需求,而且有效减少了不确定环境下出现生产变动带来的成本大幅增加问题,相比传统物料配送方式具备明显的优势,验证了本文设计策略的优越性。

[参考文献]

- [1]陈玉峰,洪长青,胡成龙等.空天飞行器用热防护陶瓷材料[J].现代技术陶瓷,2017,38(05):311-390.
- [2]晋严尊,王中一,汤辉等.智能制造技术在机载武器制造中的应用[J].航空兵器,2021,28(06):1-6.
- [3]张蓬蓬,张俊宝.规模化对抗下的空空导弹发展[J].电光与控制,2023,30(12):1-5.
- [4]刘明周,王小巧,张铭鑫等.不确定环境下混流装配线动态准时制物料配送系统[J].计算机集成制造系统,2014,20(12):3020-3031.
- [5]吴瑶.基于JIT的总装物料配送路径优化研究[J].现代商业,2014,(01):104-105.
- [6]姜大立,杨西龙,杜文等.车辆路径问题的遗传算法研究[J].系统工程理论与实践,1999,(06):41-46.
- [7]刘云忠,宣慧玉.车辆路径问题的模型及算法研究综述[J].管理工程学报,2005,(01):124-130.
- [8]Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. MI: University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

通讯作者:孙希婕,女,1987年生,工程师,研究方向为智能产线技术,自动化装配技术。