

基于仿真优化的某航天产品装配线规划方法研究

杨长祺, 郭具涛, 何其昌

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

[摘要] 航天产品的装配工艺复杂, 具有典型的小批量、多品种特点, 因此动态设置装配工位成为装配线规划的重要内容。本文以装配线平滑指数最小化为目标, 以装配工艺、空间布局、路径等为约束条件, 建立装配线工位数量优化模型。本文先对装配现场的不确定影响因素进行分析与建模, 并提出基于仿真的优化方法, 利用仿真模型模拟装配线运行状态, 并通过遗传算法确定最优的工位数量, 实现装配线的动态平衡, 从而有效地提高装配线单元工位规划的精确度与效率。

关键词: 航天产品; 装配线; 工位数量配置; 仿真优化; 遗传算法

Research on Aerospace Products Assembly Line Unit Planning Method Based on Simulation Optimization

YANG Changqi, GUO Jutao, HE Qichang

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

[ABSTRACT] Aerospace product assembly process is complex, and has the typical characteristics of discrete events. For a certain type of aerospace product assembly process, considering the impact of uncertain factors, establishing the logistics simulation model, and putting forward to obtain the optimal number of assembly line. Using genetic algorithm determine the optimal balance index to realize the dynamic balance of the assembly line, and effectively improve the accuracy and efficiency of the assembly line unit planning.

Keywords: Aerospace products; Assembly line; Quantity of work position; Simulation optimization; Genetic algorithm

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.14.105

航天产品多属于复杂产品范畴, 其产品装配过程复杂, 通常需要不同部门、不同工种之间相互交叉作业, 保证前后工序间的无缝衔接, 以确保装配过程的流畅进行。目前, 国内航天企业虽然逐渐采用了先进的装配设备与技术, 但由于依然采用传统装配线规划模式, 工程师多凭借经验对装配线规划方案的可行性进行验证, 缺乏定量的评估与分析手段, 很多规划问题在实际运行才被发现^[1]。目前采用离散事件建模工具建模仿真模型, 通过仿真分析进行规划方案的评估的方法已经获得广泛的应用。但由于装配现场不确定影响因素, 包括工人劳动效率、机器设备状态等, 造成仿真模型与实际现场装配过程的严重“失真”, 造成装配线上的“瓶颈漂移”的出现, 严重影响装配线产能和效率。唐娟等对制造单元中瓶颈动态属性进行分析和研究, 对瓶颈漂移规律进行了描述, 并构建“瓶颈漂移”预测模型^[2]。

本文在对某航天产品装配现场不确定影响因素分

析与建模的基础上, 借助仿真优化技术, 分析装配线的动态平衡, 实现事前预测瓶颈的生产过程控制模式, 从而更好的设计装配现场资源分配方案, 保证装配线的产能与质量。

1 装配现场不确定因素分析

1.1 某航天产品装配过程

航天产品的装配过程, 是将不同的零部件装配成符合设计要求的航天产品, 并对其进行测试和试验的过程^[3]。某航天产品的装配工艺流程如图 1 所示。

航天产品的装配过程不同于一般的流水线装配, 主要采用手工装配方式, 装配节拍不明显, 装配工人的熟练程度、装配水平以及作业元素的复杂程度等不确定因素都会影响最终产品的质量。在解决传统的航天产品装配线规划问题上, 大多数规划依据还停留在个人经验上, 将约束条件简化, 忽略了现实中客观存在的不定因素, 如: 订单的随机性、学习曲线效应、装配工序时间的

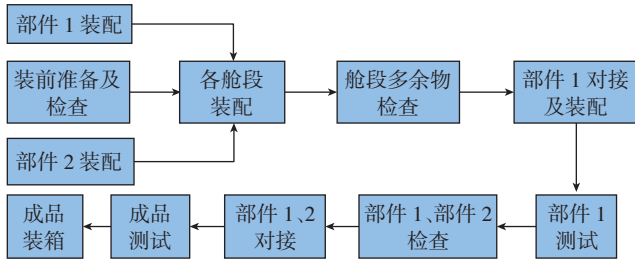


图1 某航天产品装配工艺流程

Fig.1 Assembly process of an aerospace product

不确定性、设备故障率、设备维修时间、资源数量限制等条件。在现场装配过程中不确定因素的影响下,装配过程会出现等待和阻滞现象,这不仅影响了工作站的效率,而且可能会产生“瓶颈漂移”的情况。

1.2 不确定因素建模

(1) 学习曲线建模。

航天产品一般为单件、小批量装配模式,其装配自动化程度低,零部件繁多,且装配工序较多,对技师的水平和经验依赖性强,需要考虑学习曲线对装配工艺工时的影响。学习曲线表示随着装配产品累计产量的增加,装配工时会逐渐减少。但当学习人员逐步熟悉装配产品时,装配工时会趋于稳定。学习曲线数学模型如下^[4]:

$$y = ax^{-b} \quad (1)$$

式中: a 为装配第一件产品的工时数; x 为装配产品的累计数量; b 为学习系数, $0 < b < 1$,该航天产品装配工艺复杂,利用历史数据拟合,得到 b 为0.85; y 为生产 x 件产品时单位产品的平均工时数。

(2) 设备故障率建模。

航天产品装配线工装设备均具有一定的使用寿命,在正常的使用寿命期中,设备会发生故障。有效的评估设备故障对装配线平衡造成的影响,能够主动控制装配线瓶颈,预测“瓶颈漂移”现象。本文采用威布尔分布进行设备故障率建模,故障率是随时间 t 变化的函数,其概率密度函数为^[5]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

式中, β 为形状参数(shape), η 为尺度参数(scale)。

因此设备的故障率定义为:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx \quad (3)$$

记录该航天产品装配线关键设备如某测试设备的运行状态,建立设备维修台账,统计设备故障数据。通过Minitab软件工具拟合威布尔分布概率图,获得 β 为1.30, η 为1.10。利用公式(3)可以计算出测试设备的故障率在运行10天后,概率值大于0.5。

2 基于仿真优化的装配线工位数量配置

2.1 仿真优化基本原理

不同于一般产品的装配,航天产品的装配过程具有工艺复杂、作业量大,作业并行度高,物料相关需求多等特点。由于工艺内容复杂,装配工位相对固定,因此已经发展起来的装配线平衡方面的相关理论不能很好地解决此类装配线规划问题;尤其是在工艺设计初期,需要将各类空间大小、人员数量、现场不确定因素等约束内容考虑进去,利用传统的方法,数学模型是很难建立的^[3]。相关学者在研究过程中提出,是否可以将传统的优化算法和仿真模型相结合,以此来解决调度规则中的序列问题^[6]。基于此方法的提出,研究人员利用优化算法和仿真模型各自的优点,在优化算法中先产生一组解,再将这组解在仿真模型中进行一定时间的仿真,可以得到该组解的特性指标。然后,将该组解作为下一次优化算法的初始解再次进行优化,以得到更优解,以此反复多次,就可以求得最优解^[7]。基于仿真优化方法,本文在Delmia/QUEST软件环境下建立物流仿真模型;然后利用此仿真模型结合遗传算法,优化装配线单元工位数量的配置,从而提高生产线的平衡率。

2.2 参数化物流模型的建立

本文利用Delmia/QUEST软件建立参数化的物流仿真模型。QUEST是面向对象的离散事件仿真工具,提供了强大的交互式仿真建模功能。利用QUEST提供的二次开发语言SCL与BCL,实现仿真模型参数的自动修改。将工艺参数、物流参数、制造资源等相关信息进行合理组织并导入Access数据库中进行存储与管理。表1为工艺信息表内容。

表1 工艺信息表

描述	包含信息
表达进行工艺过程所涉及的相关内容	工位名称,工序ID,工序名称,前道工序,加工零件,加工数量,工序时间,输出零件,机器设备,设备数量,工人数量,备注

装配线的规划是一个不断迭代、进行平衡率优化改善的过程。根据装配工艺流程,将该航天产品整个装配过程划分为4个装配单元:A单元、B单元、C单元、D单元,如图2所示。其中箭头的流向表明物流走向:从装配单元A和单元B进行部件的装配,分别运送至装配单元C进行总装;在单元C进行一系列装配操作后,再运送至单元D进行最后的总装。输入上述相关数据,在Delmia/QUEST软件环境下构建的物流仿真模型如图3所示。

考虑到实际的装配工艺、空间约束,设备尺寸,以及

安全性问题,各装配单元内的关键工位种类及其数量范围如表 2 所示。

在初始方案下的各装配单元工位类型及数量如表 3 所示。在 Delmia/Quest 软件环境中对建立的物流模型进行仿真分析,输出工位利用率如图 4 所示(以工位类型统计)。

采用平滑指数对装配线工位平衡率进行评估。平滑指数计算方法如下:

$$SI = \sqrt{\sum_{i=1}^m (c - t_i)^2} \quad (4)$$

式中, SI 为平滑指数, c 为节拍时间, m 为装配工位类型数, t_i 为第 i 个工位类型的作业时间。

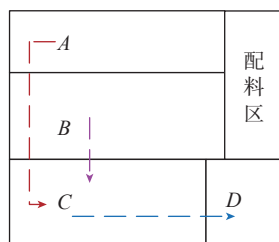


图2 装配单元布置
Fig.2 Assembly unit layout

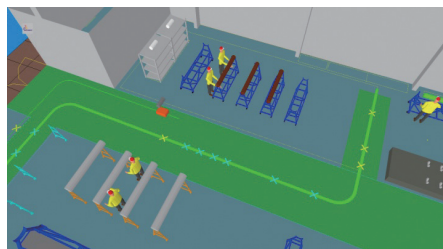


图3 物流仿真模型
Fig.3 Logistics simulation model

表2 装配单元的工位类型及数量范围

装配单元	工位类型	工位名称与取值范围
A	2	A1(1~4) A2(1~6)
B	1	B1(1~13)
C	3	C1(1~4) C2(1~2) C3(1)
D	2	D1(1~2) D2(1~2)

表3 初始方案工位数量

装配单元	工位名称及数量
A	A1(3) A2(4)
B	B1(8)
C	C1(3) C2(2) C3(1)
D	D1(2) D2(2)

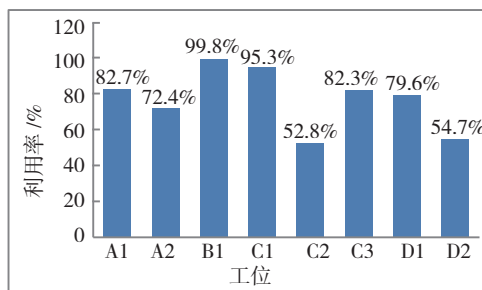


图4 初始方案下的工位类型利用率
Fig.4 Position utilization in initial scheme

利用公式(4)可计算出初始方案下的平滑指数。从图 4 工位类型的利用率分布可以看到,装配单位 C 及 D 的部分工位类型利用率在 60% 以下,而装配单元 B 区的工位处于高负荷运行状态,因此需要对单元工位配置进行平衡改善。下文采用仿真优化的方法,进行单元工位最优数量的配置优化。

2.3 仿真优化模型

假设每个装配单元包含 n 个工位类型,对应的 i 类工位的数量为 N_i 。针对具体某装配单元区,如果工位数量增加,则利用率降低,造成资源、人员空闲;反之如果工位数量减少,可提高利用率,但过高的利用率会增减工人的负荷,甚至造成新的瓶颈装配单元。该问题的数学模型描述为:给定装配工艺内容、车间布局、物流路径等约束条件,确定不同装配单元下的工位最佳数量,使得工位利用率满足一定要求的前提下,装配线平滑指数最小;同时兼顾设备故障率、人员学习曲线对装配时间的影响。数学模型描述如下:

$$\text{Min } SI = f(N_1, N_2, \dots, N_n) \quad (5)$$

s.t.

$$N_{i,\min} \leq N_i \leq N_{i,\max} \quad (5.1)$$

$$\min(\eta_{ij}) \geq \eta_{i,\min} \quad (5.2)$$

$$P(N_1, N_2, \dots, N_n) \leq 0 \quad (5.3)$$

$$L(N_1, N_2, \dots, N_n) \leq 0 \quad (5.4)$$

$$R(N_1, N_2, \dots, N_n) \leq 0 \quad (5.5)$$

$$F(N_1, N_2, \dots, N_n) \leq 0 \quad (5.6)$$

式中, SI 为平滑指数;公式(5)表示以平滑指数值最小为目标函数;式(5.1)表示在考虑空间尺寸、装配工艺后,可供选择的工位数量边界值, $N_{i,\min}$ 和 $N_{i,\max}$ 分别表示第 i 种类型工位的最小数量和最大数量;式(5.2)表示工位利用率满足的要求,其中 η_{ij} 为第 j 种类型工位中的第 i 个工位利用率,此处要保证满足最低要求 $\eta_{i,\min}$;式(5.3)~(5.6)表示工艺约束、车间布局约束、路径约束、设备故障率约束。其中, $P(*)$ 表示关键设备必须满足的工艺约束; $L(*)$ 表示关键设备必须满足的车间布局约束;

R^* 表示关键设备必须满足的路径约束; F^* 表示关键设备必须满足的设备故障率约束。由于这些约束存在的特殊性,传统的数学模型很难准确的表达出来。而仿真建模方法的出现,为实现这些约束提供了一种最新的方法,它不仅描述了这些约束,并且可以准确地反映装配线的逻辑约束。

3 算法试验与结果分析

本文根据仿真优化的原理,采用基于遗传算法的装配单元工位数量配置优化方法,其由三部分组成:主控流程、遗传算法和仿真模型。主控流程控制优化方法的全部流程,包括初始种群如何生成、数据如何传递和种群信息如何显示问题;遗传算法主要用于工位数量配置方案的确定;仿真模型负责种群适应度的计算,在这三个组成部分的相互协调和配合下,完成装配单元工位数量的最优化问题。与传统优化下的遗传算法相比较,仿真优化下的遗传算法具有如下特点:(1)目标函数值是通过仿真实验,然后由仿真结果得到的;(2)仿真优化的效率瓶颈现象,不同于出现在传统优化算法的算法迭代过程中,而是出现在仿真过程中。因此在设计遗传算法时,这些问题都要仔细考虑。

(1) 编码设计与初始解生成。

为了避免遗传算法过早收敛,拟采用随机数的方法生成初始种群。具体步骤:

STEP1: 确定装配单元关键工位数量的范围 $[N_{i,\min}, N_{i,\max}]$;

STEP2: 对装配单元工位个体的每个基因位产生一个 $[N_{i,\min}, N_{i,\max}]$ 随机数 r_i ,并将该随机数赋给对应基因位;

STEP3: 将对应个体导入到仿真模型中,得到该个体的适应值,然后将该值赋给该个体的目标值基因位,同时将标志位值变为 0;

STEP4: 重复以上步骤 N 次,可以产生一个包含 N 个个体的种群。

在装配单元划分好的前提下,第 i 位基因位上的值,代表第 i 种关键工位的数量 N 。依据上述步骤随机生成初始解,将关键工位数量输入到 Delmia/Quest 仿真模型中,进行仿真运行,得到目标函数 $f(i)$ 的数值。一组初始解如图 5 所示。

(2) 选择与交叉操作。

采用经典的轮盘赌机制,利用两点交叉方式进行基

3	7	20	6	3	2	2	1	$f(i)$	0
---	---	----	---	---	---	---	---	--------	---

图5 初始解举例
Fig.5 Initial solution

因交叉处理。对于不同个体,同一关键工位的数量表现为不同基因上的同一位置,并且它们的基因范围相同。由于双亲都是可行解,交叉后产生的必然是可行解。图 6 表示交叉前后的两种可行解。

(3) 变异与迭代。

变异的本质为一种随机算法,目的是维持群体的多样性,而变异算子的出现,是遗传算法的局部搜索能力优良的数学体现。为保证交换基因位后的染色体包含于定义装配单元的属性不变,采用均匀变异。在每一种工位类型的数量 $[N_{i,\min}, N_{i,\max}]$ 之间,产生一个随机数,如图 7 所示。

将工位数量值输入仿真模型,进行遗传算法的迭代过程。观察目标值的大小变化;如果出现目标值连续 25 次没有变化,停止迭代过程。

(4) 仿真优化结果。

通过 Matlab 的遗传算法包求解,该算法包含与遗传算法相关的函数^[8]。经过迭代、计算,遗传算法在第 112 代收敛,目标值为 0.21。优化后关键工位的数量如表 4 所示。在此工位配置方案下建立物流模型,通过仿真分

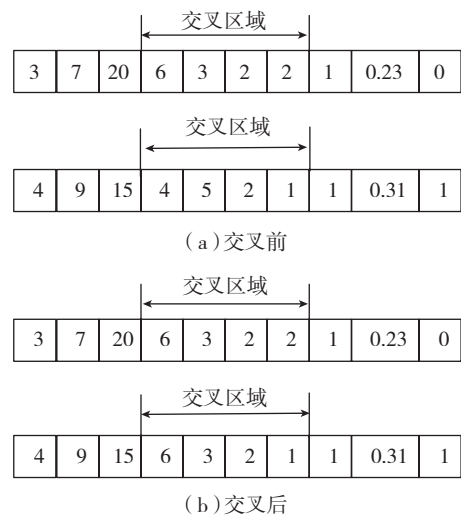


图6 选择与交叉运算

Fig.6 Selection and crossover operator

3	7	25	4	3	2	2	1	0.23	0
---	---	----	---	---	---	---	---	------	---

图7 变异操作

Fig.7 Mutation operation

表4 优化方案的工位数量

装配单元	工位名称及数量
A	A1(3) A2(3)
B	B1(9)
C	C1(4) C2(1) C3(1)
D	D1(1) D2(1)

析获得各工位类型的利用率,见图8。此时各装配单元间的节拍基本平衡,与初始方案相比具有很大的改善。

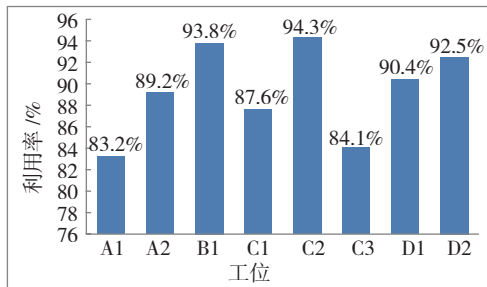


图8 优化方案下的工位利用率

Fig.8 Work position utilization in the optimized scheme

4 结论

航天产品的装配工艺复杂,影响装配节拍的不确定因素较多,容易造成装配线上的“瓶颈漂移”。本文针对某型号的航天产品装配过程,在面向实际生产条件下,将不确定影响因素作为输入条件,完成数据驱动下的物流仿真模型的建立;同时利用仿真优化方法,通过遗传算法寻找初步最优解,作为仿真模型最优解调整依据,借助仿真模型输出结果作为评价指标,实现瓶颈工位的预测与迭代改善。面向瓶颈漂移的航天产品装配线平衡方法,能够使影响装配线平衡的不确定因素提前融入设计,不仅能够提高装配线设计的水平和效率,而且可以更好地指导航天产品装配现场的调度。

参考文献

- [1] 王志东,敖洪峰,沙建军,等. 氢氧发动机装配单元制造模式研究[J]. 航天制造技术, 2012(6):13-15,23.
WANG Zhidong, AO Hongfeng, SHA Jianjun, et al. Research on assembly unit of LOX/LH engine[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(6):13-15,23.
- [2] 唐娟. 不确定环境下制造车间生产物流瓶颈漂移预测方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2009.
TANG Juan. Research on prediction method about production logistics bottleneck shifting of manufacturing shop in uncertain environment[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2009.
- [3] 杨召凯,刘德忠,李志强. 发动机装配生产线平衡问题研究[J]. 机械设计与制造, 2008(1):215-217.
YANG Zhaokai, LIU Dezhong, LI Zhiqiang. Research on balancing problem of engine assembly line[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(1):215-217.
- [4] 陈志祥. 学习曲线及在工业生产运作研究中的应用综述[J]. 中国工程科学, 2007, 9(7):82-88.
CHEN Zhixiang. Learning curve and its application in production operational research[J]. Engineering Science, 2007, 9(7):82-88.
- [5] 潘乐真,张焰,俞国勤,等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算, 电力自动化设备, 2010, 30(2):91-94.
PAN Lezhen, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2):91-94.

[6] 王国新,宁汝新,王爱民. 基于仿真的生产调度优化技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7):1419-1427.

WANG Guoxin, NING Ruxin, WANG Aimin. Production optimal scheduling technology based on simulation[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2007,13(7):1419-1427.

[7] 王国新,宁汝新,王爱民,等. 仿真优化在制造系统中的应用现状及发展趋势[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1):1-6.

WANG Guoxin, NING Ruxin, WANG Aimin, et al. Present application situation and trends of simulation optimization in manufacturing system[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(1):1-6.

[8] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.

WANG Xiaoping, CAO Limin. Genetic algorithm—the theory application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. (责编 冬月)

(上接第104页)

Materials Engineering, 2010(11):74-78.

[4] 房昺,张鹏飞,原玲,等. 钛合金紧固件用铝涂料的性能与应用[J]. 涂料工业, 2013,43(5):17-22.

FANG Bing, ZHANG Pengfei, YUAN Ling, et al. Properties and application of Al-based coatings for titanium alloy fasteners[J]. Paint and Coating Industry, 2013, 43(5):17-22.

[5] 曹文健,汤智慧,原玲,等. 钛合金紧固件用铝涂层抗电偶腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2016,13(2):116-117.

CAO Wenjian, TANG Zhihui, YUAN Ling, et al. Behaviour of galvanic corrosion resistance of aluminum coating on titanium alloy fastener[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016,13(2):116-117.

[6] 刘风雷,殷跃军,刘丹,等. 钛合金紧固件涂铝技术[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012,24(4):352-354.

LIU Fenglei, YIN Yuejun, LIU Dan, et al. Titanium alloy fastener aluminum coating technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2012, 24(4):352-354.

[7] 徐良. 航空钛紧固件铝涂层性能规范研究[J]. 航空标准化与质量, 2012(1):32-36.

XU Liang. Study on the properties of aluminum coating on titanium alloy fasteners[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2012(1):32-36.

[8] 李辉,栗卓新,魏琪. 热喷涂中表面预处理的技术现状与发展[J]. 热喷涂技术, 2009,1(2):15-18.

LI Hui, LI Zhuoxin, WEI Qi. State-of-the-art of the surface preparation for thermal spraying[J]. Thermal Spray Technology, 2009,1(2):15-18.

[9] GB/T 18839.2-2002 涂覆涂料前钢材表面处理 表面处理方法 磨料喷射清理[S].

GB/T 18839.2-2002 Preparation of steel substrates before application of paints and related products—Surface preparation methods—Abrasive blast-cleaning[S].

[10] 肖刚,胡秋,周立. 砂面铝型材不同表面预处理对比研究[J]. 湖南有色金属, 2001,17(6):32-34.

XIAO Gang, Hu Qiu, Zhou Li. Study of different surface pretreatment of grid dose anodizing aluminum profile[J]. Hunan Nonferrous metal. 2001, 17(6):32-34.

[11] EN4473-2010 紧固件铝涂层标准[S].

EN4473 Aluminium pigmented coatings for fasteners technical specification[S]. (责编 冬月)