

# 基于扩展 Petri 网的飞机装配系统设备调度方法<sup>\*</sup>

柴 猛, 严金凤

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**[摘要]** 针对飞机装配过程中设备调度的复杂性, 提出了基于扩展 Petri 网构建设备调度模型的新方法。结合飞机装配的实际特点, 论述了模型定义过程和建立方法。该模型以面向对象 Petri 网表达飞机装配过程, 以赋时 Petri 网将装配过程与辅助设备相关联, 利用混合算法以时间和设备利用率为目标对模型进行优化求解。以某模型飞机中机身装配过程为例, 应用该方法进行建模并求解, 实例应用与分析表明该方法对实际装配设备调度具有较大的指导意义。

**关键词:** 飞机装配; 设备调度; 扩展 Petri 网; 混合算法

## Equipment Scheduling of Aircraft Assembly System Based on Extended Petri Net

CHAI Meng, YAN Jinfeng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the complexity of the facilities scheduling in the aircraft assembly process, a new method to build equipment scheduling model based on extended Petri net is proposed. The definition process and modeling methods of this model are discussed by considering the characteristics of aircraft assembly process. The model is based on the object-oriented Petri net to express the aircraft assembly process, which is related to the auxiliary equipment by timed Petri net, and it is optimized by the hybrid algorithm with the time and equipment utilization. The fuselage assembly process of a certain airliner is taken as an example to build the model and dispatch, and the experimental results show that the method has great guiding significance to the actual assembly equipment scheduling.

**Keywords:** Aircraft assembly; Facility scheduling; Extended Petri net; Hybrid algorithm

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.10.104

飞机零部件数量较多且装配过程复杂, 涉及设备资源较多, 有效的建模方法和设备调度优化策略能够很好地缩短生产周期并降低成本。目前对于飞机装配建模方法的研究主要包括 Petri 网、面向对象、排队网络、事件驱动链<sup>[1-4]</sup>等。文献[5]提出了基于面向对象的复杂产品装配建模方法, 描述了装配过程中的主要对象类及其关系; 张杰等<sup>[6]</sup>以 Petri 网为基础, 探讨了飞机装配系统层次化建模方法, 并进行锁死分析, 但 Petri 网存在组合爆炸问题需要改进; 徐开元等<sup>[7]</sup>探讨了飞机分层装配线、装配资源模型的构建。但是, 上述研究更多注重装配线流程及布局的改善, 涉及飞机装配设备调度优化方面较少。

基于此, 本文根据飞机装配工艺利用面向对象 Petri 网(Object-Oriented Petri Nets, OOPN)建立飞机装配模型并构建装配元逻辑关系, 将模型高度抽象化模块化<sup>[8]</sup>。在 OOPN 装配模型基础上以赋时 Petri 网(Timed

Petri Nets, TPN)构建并扩展装配元-装配设备-体化模型, 形成扩展 Petri 网(Object-Oriented Timed Petri Nets, OTPN), 并以装配元变迁为基础, 嵌入混合算法用以解决装配元设备调度优化问题。

## 1 OTPN 定义

### 1.1 OOPN模型定义

OOPN 建模的基本构造是对象, 对象将数据结构与行为集成为一个相对独立的实体, 可表示为  $S=\{Ob, R\}$ , 此方法能够抽象化、模块化装配单元, 且易于理解。其中  $Ob$  为系统的对象集合;  $R$  为系统中对象的关系集合。 $Ob_i$  和  $R_{ij}$  分别定义为:

$$Ob_i = \{SP_i, AT_i, IM_i, OM_i, I_i, O_i, C_i\} \quad (1)$$

$$R_{ij} = \{OM_i, IM_j, g_{ij}, C(OM_i), C(IM_j), C(g_{ij}), I_{ij}, O_{ij}\} \quad (2)$$

式中,  $SP_i$  表示  $Ob_i$  状态库所的集合;  $AT_i$  表示  $Ob_i$  活动

<sup>\*</sup> 基金项目: 国防基础科研项目(A2620132010)。



排列,形成一条染色体。

### 2.2 适应度函数

本文以装配元装配完成时间和辅助设备利用率为优化目标。装配时间指的是以选定的设备配置方案配置装配元进行装配操作,完成 A-OOPN 模型中所有装配的时间。设备利用率 UT 是指设备实际工作时间与全部工作时间的比值,是一个随时间变化的离散统计量,定义为:

$$B(t) = \begin{cases} 1, & \text{设备在 } t \text{ 时刻处于工作} \\ 0, & \text{设备在 } t \text{ 时刻处于空闲} \end{cases} \quad (3)$$

$$UT = \frac{\int_0^T B(t)dt}{T} \quad (4)$$

式中,  $B(t)$  代表工作时间,  $t$  代表时刻。

### 2.3 选择算子

选择操作用于优胜劣汰,这里选用轮盘赌的方法,即每个个体被选中的概率与适应度函数值的大小成比例关系。设种群大小为  $N$ , 个体  $x_i$  适应度为  $f(x_i)$ , 则个体  $x_i$  被选中的概率为:

$$p(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)} \quad (5)$$

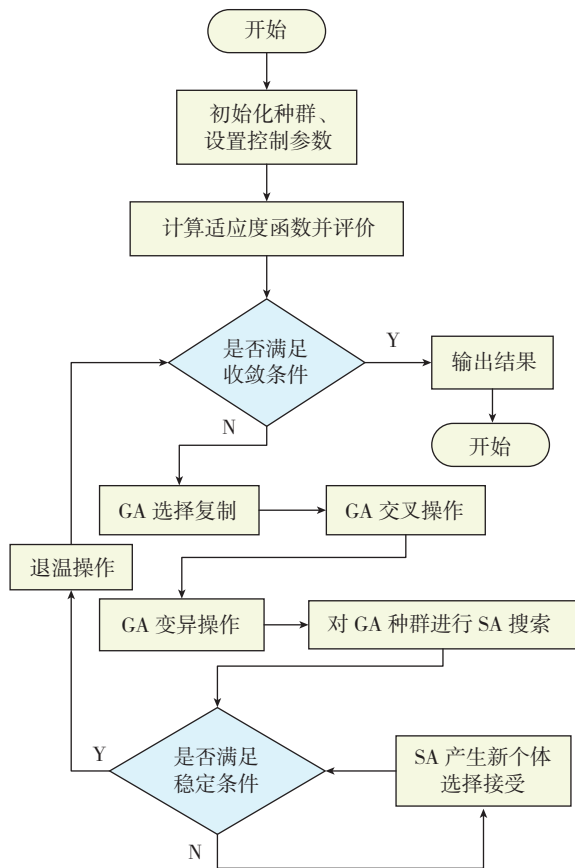


图3 混合算法流程

Fig.3 Flow of hybrid algorithm

### 2.4 模拟退火算法规划

为避免过早收敛,在 GA 中引入 SA,运用 Metropolis 准则判断是否产生并选择新的个体。Metropolis 准则依照公式(6)对经过 GA 算法的新个体进行筛选,具体公式如下:

$$p = \begin{cases} 1 & \Delta f > 0 \\ e^{-\Delta f/Q} & \Delta f < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $Q$  表示 SA 温度;  $\Delta f$  表示当前新个体与原个体适应度值之差,若  $\Delta f > 0$ ,则以概率 1 接受更好的个体。将当前最优解与下一代比较并进行退温操作  $Q_k = \alpha Q_{k-1}$ ,再返回遗传算法直至满足终止迭代条件。SA 中的初始温度值越大,获得优秀解的概率越大,但所需运算时间也越长,所以初温设置从运算效率与优化效果两方面进行考虑。

## 3 实例应用与分析

机身装配涵盖了飞机装配的众多特性,如串行装配和并行装配等,是脉动生产线的重要环节。论文以某型号飞机中机身装配过程为对象,建立 OTPN 模型并对装配设备进行调度优化,由于其并行装配为主,故存在众多设备资源的竞争使用。中机身装配元信息见表 2。

装配元涉及的公共资源有 4 个,1 个输送平台  $m_1$ , 2 套工业夹具  $m_2$  和  $m_3$ , 1 辆小车  $m_4$ 。装配顺序及其设备

表2 中机身装配元信息

装配元	含义	装配元	含义
Ob <sub>1</sub>	支柱装配	Ob <sub>5</sub>	翼梁装配
Ob <sub>2</sub>	隔框装配	Ob <sub>6</sub>	桁条装配
Ob <sub>3</sub>	上下壁板装配	Ob <sub>7</sub>	翼筋装配
Ob <sub>4</sub>	前后地板装配	Ob <sub>8</sub>	蒙皮装配

表3 装配设备关系表

装配方式	可选设备	工时
1	$m_1$	12
2.1	$m_2$	16
2.2	$m_3$	8
3.1	$m_1, m_3$	24, 10
3.2	$m_1, m_2$	24, 12
4.1	$m_1, m_3$	16, 12
4.2	$m_1, m_2$	18, 10
5.1	$m_2, m_4$	10, 6
5.2	$m_1, m_3$	12, 8
6.1	$m_1, m_2$	12, 8
6.2	$m_3, m_4$	6, 8
7.1	$m_2, m_4$	8, 8
7.2	$m_1, m_3$	24, 10
8.1	$m_2, m_3$	6, 8
8.2	$m_1, m_3$	18, 4

关系如表 3 所示,装配元变迁  $T=\{T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{17}, T_{18}\}$  对应表 3 中装配  $\{1,2,3,4,5,6,7,8\}$ 。

表 3 中每个装配可能有多个选择,例如装配 2 有两种配置方案,分别是方案 2.1 和 2.2。中机身 OTPN 模型如图 4 所示。

为保证群体多样性及进化能力,在计算量许可情况下,混合算法参数设计如下:种群个体数目  $N$  为 80 个,代沟  $G$  为 0.9,交叉概率  $P_c$  为 0.9,变异概率  $P_m$  为 0.05,

进化代数 100,模拟退火冷却系数  $q$  为 0.9,终止温度  $T_{end}$  为  $0.001^\circ\text{C}$ ,退温次数为 50。以上面参数为依据,以 MATLAB 为工具计算分析,算法求解收敛曲线如图 5 所示。

从图 5 中可发现,算法经过 50 代完成运算求解过程。与单一算法相比较,混合算法收敛较为平缓,相对 GA 算法避免了早熟,相对 SA 算法能控制求解方向并进行全局搜索,且具有较强的搜索效率。

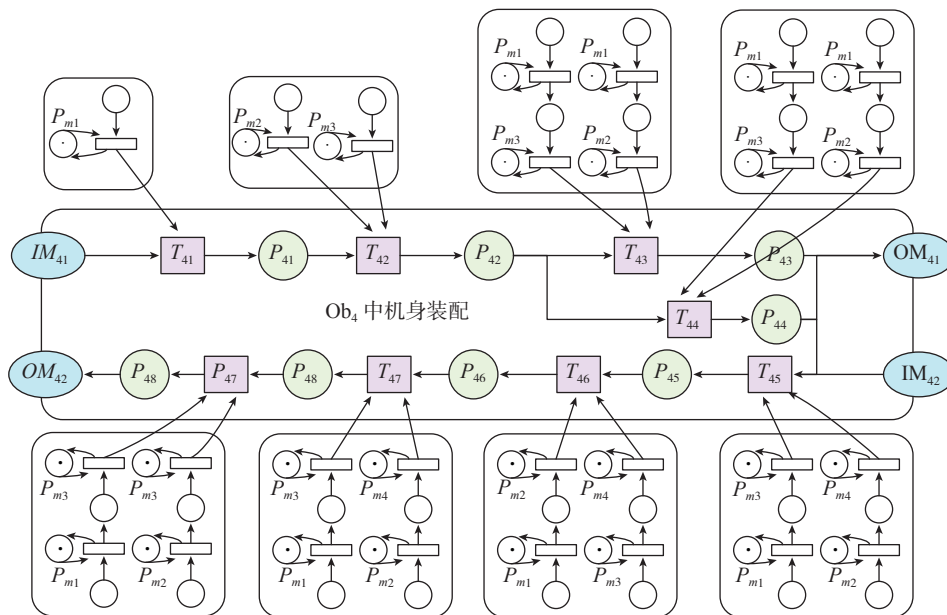


图4 中机身OTPN模型  
Fig.4 Fuselage OTPN model

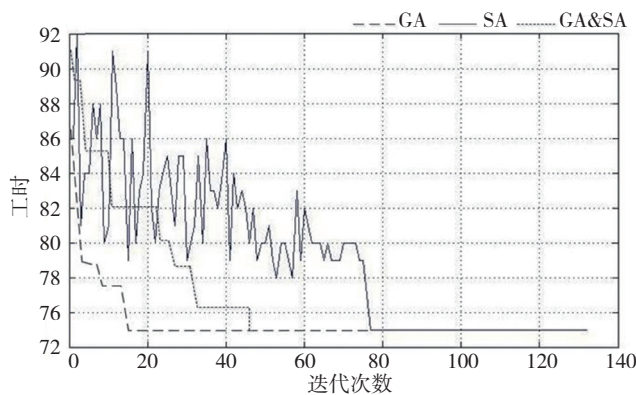


图5 混合算法求解收敛曲线  
Fig.5 Convergence curve of hybrid algorithm solving

表 4 试验运算结果

结果(工时)	平均设备利用率/%	运算次数
74	50.68	38
76	46.74	1
77	40.52	1

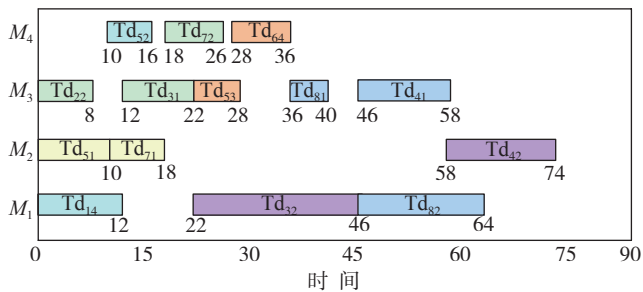


图6 设备调度顺序图  
Fig.6 Diagram of equipment scheduling sequence

为避免随机等因素干扰,本次试验运算 40 次,结果如表 4 所示。从表 4 可得,其中 1 次获得工时 76, 1 次获得工时 77,38 次获得工时 74,平均利用率为 50.68%,工作时间设备 1、设备 2、设备 3、设备 4 分别为 54、34、40、22。最佳染色体为  $P=\{P_1, P_{2.2}, P_{3.1}, P_{4.1}, P_{5.1}, P_{6.2}, P_{7.1}, P_{8.1}\}$ ,  $P_{i,k}$  表示第  $i$  个装配的第  $k$  种方案。调度结果如图 6 所示, Td 表示工序,对甘特图分析可得,夹具设备是生产作业瓶颈。

## 4 结束语

针对飞机装配过程设备调度的复杂性,提出了将面向对象 Petri 网与赋时 Petri 网相结合构建设备调度模型的新方法,该方法能够有效地将装配元变迁与辅助设备关联,且有效解决了模型的“空间爆炸问题”。同时在 TPN 模型中嵌入混合算法,利用装配元变迁和装配元设备库所集为染色体编码,以多目优化为基础对设备调度进行求解。实例应用与分析表明算法可行,能够缩短装配时间。本文下一步将继续研究 OTPN 模型中装配发生意外变更时设备调度的相关问题。

### 参考文献

[1] 孙星. 基于 Petri 网和 eM-Plant 的飞机装配线建模与仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.  
SUN Xing. Modeling and simulation of aircraft assembly line based on Petri net and eM-Plant[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011.

[2] XU K, WANG C, ZHANG W, et al. Object-oriented aircraft assembly model[C]//International Conference on Computer, Networks and Communication Engineering, Beijing, 2013.

[3] 谢志强, 辛宇, 杨静. 基于设备空闲事件驱动的综合调度算法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11):139-147.  
XIE Zhiqiang, XIN Yu, YANG Jing. Integrated scheduling algorithm based on event-driven by machines' idle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11):139-147.

[4] 孔令革, 鲁建厦, 詹燕. 基于排队网络的生产物流瓶颈转移研究[J]. 浙江工业大学学报, 2011, 39(6): 644-647.  
KONG Lingge, LU Jiansha, ZHAN Yan. Study on bottleneck shifting of production logistics based on queueing networks[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2011, 39(6):644-647.

[5] 王成恩, 于宏, 张闻雷, 等. 面向对象的航空发动机装配模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(5):942-948.  
WANG Cheng'en, YU Hong, ZHANG Wenlei, et al. Object-oriented aero-engine assembly models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(5): 942-948.

[6] 张杰, 李原, 张开富, 等. 基于关系对象 Petri 网的飞机装配系统模型快速构建方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(6): 1195-1201.  
ZHANG Jie, LI Yuan, ZHANG Kaifu, et al. Rapid modeling method for aircraft assembly system based on relation-based object Petri nets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(6):1195-1201.

[7] 徐开元, 曲蓉霞, 王健熙. 基于多域集成 Petri 网的飞机装配系统模型[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 2022-2032.  
XU Kaiyuan, QU Rongxia, WANG Jianxi. An aircraft assembly system model based on multi domain integrated Petri net[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 21(8): 2022-2032.

[8] 顾妍午, 王遵彤, 吴启迪. 面向对象 Petri 网技术在系统建模中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 437-441.  
GU Yanwu, WANG Zuntong, WU Qidi. Application of object oriented Petri net technology in system modeling[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2010, 38(3): 437-441.

[9] 刘维来, 孔凡让, 刘志刚, 等. 基于遗传算法和延时 Petri 网

的柔性装配系统的设备调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(8): 1246-1251.

LIU Weilai, KONG Fanrang, LIU Zhigang, et al. Facilities assignments of flexible assembly system based on GA and TPN[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(8): 1246-1251.

[10] 彭勇刚, 罗小平, 韦巍. 一种新的模糊自适应模拟退火遗传算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(6): 843-848.

PENG Yonggang, LUO Xiaoping, WEI Wei. A new fuzzy adaptive simulated annealing genetic algorithm[J]. Control & Decision, 2009, 24(6): 843-848.

[11] 杨萌, ALMAINI A E A. 基于整体退火遗传算法的最佳混合极性搜索[J]. 复旦学报(自然科学版), 2013, 52(3):303-308.

YANG Meng, ALMAINI A E A. Optimization of mixed polarity reed-muller functions based on whole annealing genetic algorithm[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2013, 52(3): 303-308.

通讯作者: 柴猛, 硕士, 研究方向为数字化设计和飞机装配, Email: 1025317432@qq.com. (责编 逸飞)

(上接第103页)

Steel[J]. Material & Heat Treatment, 2012, 41(4):148-149.

[3] 朱晨, 姜传海. 17Cr2Ni2Mo 钢的表面复合喷丸强化[J]. 机械工程材料, 2011, 35(9):98-99.

ZHU Chen, JIANG Chuanhai. Composite shot peening of 17Cr2Ni2Mo steel surface[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(9):98-99.

[4] ZHAN K, JIANG C H, WU X Y, et al. Surface layer characteristics of S30432 austenite stainless steel after shot peening[J]. The Japan Institute of Metals, 2012, 53(5):1002-1006.

[5] KLEMENZ M, SCHULZE V, VOHRINGER O, et al. Finite element simulation of the residual stress states after shot peening[J]. Materials Science Forum, 2016, 524: 349-354.

[6] MIAO H, LAROSE S, PERRON C, et al. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(10): 1023-1038.

[7] 李源, 雷丽萍, 曾攀. 弹丸束喷丸有限元模型数值模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 43-48.

LI Yuan, LEI Liping, ZENG Pan. Shot stream finite element model for shot peening numerical simulation and its experiment study[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 43-48.

[8] GARIÉPY A, LAROSE S, PERRON C, et al. Shot peening and peen forming finite element modelling-towards a quantitative method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(20):2859-2877.

[9] FU P, ZHAN K, JIANG C. Micro-structure and surface layer properties of 18CrNiMo7-6 steel after multistep shot peening[J]. Materials and Design, 2013, 51(5):309-314.

[10] MIAO H Y, LAROSE S, PERRON C, et al. An analytical approach to relate shot peening parameters to almen intensity[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(7):2055-2066.

通讯作者: 解丽静, 副教授, 研究方向为分子动力学、难加工材料的加工和喷丸等, E-mail: rita\_xie2004@163.com. (责编 逸飞)