

6-28-2024

Completion Time Simulation Prediction Method for Aircraft Assembly Process with Batch and Sortie

Changjian Jiang

*School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China,
jiangcj@mail.nwpu.edu.cn*

Hu Fan

AVIC Xi'an Air-craft Industry Group Company Ltd. , Xi'an 710089, China

Tao Luo

School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Wen Yuan

AVIC Xi'an Air-craft Industry Group Company Ltd. , Xi'an 710089, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Completion Time Simulation Prediction Method for Aircraft Assembly Process with Batch and Sortie

Abstract

Abstract: Aiming at the product differentiation analysis limitation of traditional discrete event simulation method, a simulation prediction method for aircraft assembly process with batch and sortie is proposed. Around the aircraft sortie number, the formal definition of various basic elements and interactions in the assembly process with batch and sortie is studied, and the construction of station and whole line simulation model is carried out. The simulation promotion framework and execution mechanism supporting the product differentiation analysis are studied. Based on the simulation results, a method for predicting the completion time of sorties based on interval estimation method is proposed. The test results of the historical sorties data show that the proposed simulation prediction method can accurately output the confidence interval of the estimated completion time of each sortie, and can provide the reliable evaluation for the site.

Keywords

aircraft assembly, batch and sortie, discrete event simulation, simulation process control, estimated completion time

Authors

Changjian Jiang, Hu Fan, Tao Luo, Wen Yuan, and Zehao He

Recommended Citation

Jiang Changjian, Fan Hu, Luo Tao, et al. Completion Time Simulation Prediction Method for Aircraft Assembly Process with Batch and Sortie[J]. *Journal of System Simulation*, 2024, 36(6): 1404-1413.

面向飞机装配批架次完工时间的仿真预测方法

蒋昌健¹, 樊虎², 罗陶¹, 袁文², 何泽豪¹

(1. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072; 2. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 针对传统离散事件仿真方法缺乏对产品间差异化分析的局限性, 提出一种面向飞机装配批架次作业过程的仿真预测方法。围绕飞机架次标签, 研究对批架次装配作业过程中各类基本要素与交互关系的形式化定义, 由此完成站位、整线仿真模型的构建; 研究支持产品差异化分析的仿真推进框架与执行机制; 以仿真结果数据为基础, 提出基于区间估计法的架次完工时间预测方法。实验结果表明: 该方法能准确地输出各架次预计完工时间的置信区间, 为现场提供可靠的评估依据。

关键词: 飞机装配; 批架次; 离散事件仿真; 仿真过程控制; 预计完工时间

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)06-1404-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0337

引用格式: 蒋昌健, 樊虎, 罗陶, 等. 面向飞机装配批架次完工时间的仿真预测方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1404-1413.

Reference format: Jiang Changjian, Fan Hu, Luo Tao, et al. Completion Time Simulation Prediction Method for Aircraft Assembly Process with Batch and Sortie[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1404-1413.

Completion Time Simulation Prediction Method for Aircraft Assembly Process with Batch and Sortie

Jiang Changjian¹, Fan Hu², Luo Tao¹, Yuan Wen², He Zehao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Xi'an Air-craft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: Aiming at the product differentiation analysis limitation of traditional discrete event simulation method, a simulation prediction method for aircraft assembly process with batch and sortie is proposed. Around the aircraft sortie number, the formal definition of various basic elements and interactions in the assembly process with batch and sortie is studied, and the construction of station and whole line simulation model is carried out. The simulation promotion framework and execution mechanism supporting the product differentiation analysis are studied. Based on the simulation results, a method for predicting the completion time of sorties based on interval estimation method is proposed. The test results of the historical sorties data show that the proposed simulation prediction method can accurately output the confidence interval of the estimated completion time of each sortie, and can provide the reliable evaluation for the site.

Keywords: aircraft assembly; batch and sortie; discrete event simulation; simulation process control; estimated completion time

收稿日期: 2023-03-24 修回日期: 2023-05-19

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1707501)

第一作者: 蒋昌健(1995-), 男, 博士生, 研究方向为复杂制造系统建模与仿真。E-mail: jiangcj@mail.nwpu.edu.cn

0 引言

随着飞机综合性能的不断提高, 其制造复杂度也不断增大, 产品需求数量的快速增长给飞机制造企业的生产能力带来了巨大挑战, 飞机装配制造的生产模式发生重大变革: 以更先进的脉动装配模式代替原有固定站位装配模式^[1-3]。飞机部总装脉动生产模式下, 将各架次的装配任务划分到多个站位进行装配, 实现多站位多架次的同步生产, 并结合批架次管理技术^[4-6], 以架次为中心从计划、工艺、物料、质量等方面对飞机装配过程进行管理, 极大地提高了装配效率^[7]。

飞机装配作为一种严格面向订单的复杂制造过程, 确保在订单交付节点前完成各批架次的所有装配任务是飞机制造企业的根本目标。飞机制造的小批量、高客制化的特点, 使各架次产品普遍存在不同程度上的定制要求, 因此, 现场管控人员对于订单内各架次产品的预计完工时间有着极高的关注度。

由于飞机产品自身的复杂性及其装配过程中存在多种随机因素的影响, 解析法较难以得到可靠性较高的产能指标分析结果^[8]。离散事件仿真技术能够基于已知的作业逻辑行为、约束和规则, 融合由历史数据和生产经验中提取的随机分布规律, 有效刻画具有随机特性和复杂变化关系的作业过程^[9]。因此, 学术和业界普遍将仿真作为分析制造系统性能的首选方法^[10-13]。然而, 目前通用的离散事件仿真框架在处理制造系统作业过程仿真时, 只能采用模糊的、平均的、普适的方法得到系统的整体生产状态指标, 无法以差异化的方式得到具体各产品的生产状态指标, 无法支持对飞机装配作业过程中各架次预计完工时间的预测分析。

离散制造系统仿真分析的首要任务是对系统作业过程的仿真建模。随着制造系统复杂度的不断提高, 国内外学者在经典方法的基础上提出了面向对象、概率图、多层次等的建模方法, 例如,

文献[14]针对装配生产线投入使用后难以重新配置的问题, 提出了一种基于层次结构和随机 Petri 网的面向对象建模新方法。文献[15]结合复杂网络理论, 基于贝叶斯网络提出了一种云制造环境下的机床装备资源优化选择方法。文献[3]结合传统离散制造系统建模理论, 建立了飞机脉动生产线的多层次数学模型。以上方法能够全面描述复杂制造系统中各类要素, 但是对于飞机装配作业过程中围绕产品架次而存在的一些特殊逻辑约束进行表达时会显得不够灵活, 如各站位上作业逻辑关系、资源配置、物料配送等应围绕架次而差异化设置。

本文提出一种面向飞机装配批架次作业过程的仿真预测方法, 在仿真建模、仿真推理、指标解算过程中充分考虑飞机产品的架次标签, 通过对仿真结果的统计分析, 为现场管控人员直观地提供各批架次预计完工时间的置信区间。

1 批架次装配作业过程仿真模型构建

1.1 装配作业过程基本要素仿真定义

一条典型的飞机装配脉动生产线通常包含多个串行排列的装配站位, 在各站位内相对独立地进行一系列装配作业^[16], 以总装为例, 如图1所示。其中, 现场以装配站位为基础管理单元, 在各站位内根据架次标签来跟踪与管理在装产品的作业状态, 同时在整条生产线中的资源和物料也是以站位为基础单元来分配、存储和管理的^[17]。由此可见, 作业、资源、物料是各装配站位中关键生产要素, 各站位按特定逻辑顺序连接形成飞机装配整线, 不同站位作业的具体执行情况及其相互作用共同决定了生产线的整体性能。因此, 为了使仿真模型能够精准描述装配现场的实际情况, 在结构上按照“整线-站位”两个层级来构建批架次装配作业过程仿真模型; 在要素上关注“作业-资源-物料”三类核心要素自身属性与交互关系的定义。

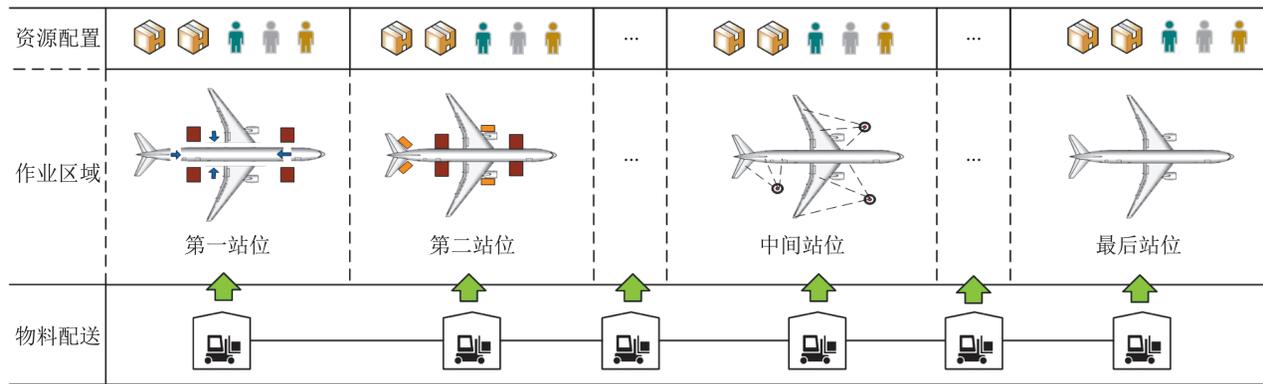


图1 飞机装配作业过程
Fig. 1 Aircraft assembly process

根据现场实际作业情况，资源泛指可重复使用的生产要素，而物料是消耗型要素，按照一定的频率进行供应。装配现场每个站位都有用于存放资源和物料的区域，作业的执行需要从这些区域获取所需的资源和物料。

(1) 资源可以表示为一个三元组： $r = \{id, nam, num\}$ ，其中， id 为资源的唯一编号； nam 为资源的名称； num 为资源的数量。

(2) 资源库可以表示为一个二元组： $R_{c_i} = \{r_{c_i}, r_{cl_i}\}$ ，其中， $r_{c_i} = (r_{c_{i,1}}, r_{c_{i,2}}, \dots, r_{c_{i,j}}, \dots, r_{c_{i,m}})$ 为第*i*个站位上的资源配置信息集合， $r_{c_{i,j}}$ 为第*i*个站位上第*j*种资源的配置数量； $r_{cl_i} = (r_{cl_{i,1}}, r_{cl_{i,2}}, \dots, r_{cl_{i,k}}, \dots, r_{cl_{i,m}})$ 为该资源库与站位内所有作业的信息交互集合， $r_{cl_{i,k}}$ 为第*i*个站位上第*k*项作业与资源库的信息交互。

(3) 物料可以表示为一个三元组： $m = \{id, nam, IAT\}$ ，其中， id 为物料的唯一编号； nam 为物料的名称； IAT 为物料的供应频率。

(4) 物料库可以表示为一个二元组： $M_{c_i} = \{m_{c_i}, m_{cl_i}\}$ ，其中， $m_{c_i} = (m_{c_{i,1}}, m_{c_{i,2}}, \dots, m_{c_{i,j}}, \dots, m_{c_{i,m}})$ 为第*i*个站位上的物料配置信息集合， $m_{c_{i,j}}$ 为第*i*个站位上第*j*种物料所配置的初始存量； $m_{cl_i} = (m_{cl_{i,1}}, m_{cl_{i,2}}, \dots, m_{cl_{i,k}}, \dots, m_{cl_{i,m}})$ 为该物料库与站位内所有作业的信息交互集合， $m_{cl_{i,k}}$ 为第*i*个站位上第*k*项作业与物料库的信息交互。

(5) 作业可以表示为一个七元组 $p_{ij}^x = \{I_{id_i}, n_i, R_i, M_i, t_i, s_{t_i}, l_i\}$ ，其中， x 为架次标签； i 为该作业在第*i*个站位内； j 为该项作业在站位内的索引； I_{id_i} 为第*x*架次在第*i*个站位上该项作业的唯一编号，对应实际生产系统中的AO(装配大纲)号； n_i 为第*x*架次该项作业的名称； $R_i = (H_i, \lambda_i)$ 为第*x*架次该项作业开工的资源需求集合，列向量 $H_i = (id1, id2, \dots, idm)^T$ 和 $\lambda_i = (num1, num2, \dots, numm)^T$ 表示所需资源的编号和数量； $M_i = (K_i, \varphi_i)$ 为第*x*架次该项作业执行的物料需求集合，列向量 $K_i = (id1, id2, \dots, idm)^T$ 和 $\varphi_i = (num1, num2, \dots, numm)^T$ 表示所需物料的编号和数量； $t_i = (t_{r_i}, t_{t_i})$ 为该项作业的时间集合， t_{r_i} 表示第*x*架次该项作业的额定工时， t_{t_i} 表示仿真中的模拟工时； s_{t_i} 为第*x*架次该项作业当前的状态，初始状态时 $s_{t_i} = 0$ ，若该项作业完成，令 $s_{t_i} = 1$ ，标记该项作业已完成； $l_i = (l_{pi_i}, l_{po_i})$ 为第*x*架次该项作业的交互信息集合， l_{pi_i} 表示输入信息集合，主要包括紧前作业的完工信息、物料和资源是否满足需求等信息， l_{po_i} 表示输出信息集合，主要包括该项作业完工信息、资源释放等信息。

第*x*架次在第*i*个站位内的作业间逻辑顺序关系为 $A_i^x = (a_{j,k})_{m \times m}$ ，其中， $a_{j,k} = \begin{cases} 1, & p_{i,j}^x \text{ 是 } p_{i,k}^x \text{ 的紧前作业} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ ， $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ ， $k \in \{1, 2, \dots, m\}$ ，且 $j \neq k$ 。

1.2 作业过程仿真模型构建

在以上基本要素定义的基础上, 通过对站位内包含的作业、资源、物料等生产要素的组织, 以及对关联信息定义, 构建站位作业过程仿真模型。

站位模型主要包含: 站位上包含的作业集合以及作业之间的逻辑约束关系; 站位上的物料供应与各种资源配置信息; 作业开展需求与物料库和资源库的交互信息; 站位的整体状态信息。将站位的网络模型定义为一个六元组: $S_i^x = \{I_{id_i}, \sum_i, R_{c_i}^x, M_{c_i}^x, S_{t_i}^x, L_i^x\}$, 其中, I_{id_i} 为生产线上站位的唯一标识; $\sum_i = (P_i, A_i^x)$ 为该站位内的作业关系网络, $P_i = (p_{i,1}^x, p_{i,2}^x, \dots, p_{i,m}^x)$ 表示该站位内所有作业的集合, 逻辑关系矩阵 $A_i^x = (a_{j,k})_{m \times m}$ 表示站位内所有作业的前后置关系; $R_{c_i}^x$ 为第 x 架次在第 i 个站位上进行装配时, 该站位上的资源库; $M_{c_i}^x$ 为物料库; $S_{t_i}^x$ 为描述站位的状态, t 时刻站位的状态由该时刻站位内的所有作业状态共同决定; $L_i^x = (I_{si_i}, I_{so_i})$ 为该站位的交互信息集合, I_{si_i} 表示输入信息集合, 包括上一个站位的完工信息和本站位上一架次的完工信息, I_{so_i} 表示输出信息集合, 即该站位的完工信息。

将各站位模型按站位间逻辑顺序连接起来, 并关联各站位与上下游之间输入输出的信息交互关系, 从而形成飞机装配整线仿真模型。整线模型的构建可以概括为三部分内容: 站位之间的逻辑顺序关系, 以及站位间的信息交互; 整线上的物料供应与各种资源配置信息; 整线的作业状态, 从而整线的仿真模型可以表示为一个四元组 $A_{al}^x = \{S^x, R^x, M^x, S_{al}^x\}$, 其中, $S^x = (S_1^x, S_2^x, \dots, S_n^x)$ 为整线上站位的集合; $R^x = (R_{c_1}^x, R_{c_2}^x, \dots, R_{c_m}^x)$ 为整线上所有资源的配置信息集合; $M^x = (M_{c_1}^x, M_{c_2}^x, \dots, M_{c_m}^x)$ 为整线上所有物料的供应信息集合; $S_{al}^x = (S_{t_1}^x, S_{t_2}^x, \dots, S_{t_n}^x)$ 为整线的状态, 由各站位的状态共同决定。

2 仿真推进框架与执行机制

批架次装配作业过程的静态仿真模型用以简化表达真实生产线中关键要素与作业逻辑, 还需要相应的仿真推进与执行机制来促使仿真模型的动态运行。由于考虑了飞机产品架次标签, 无法直接使用传统离散事件无差异化的推理规则。为此, 结合飞机装配作业特点, 制定面向批架次作业过程仿真模型的推进框架。

2.1 仿真模型推进整体框架

以事件调度法为核心来推进仿真进程的执行。将包括飞机批次号、架次信息和总数量的批次数据作为仿真输入, 推进过程中采用状态循环扫描的方式扫描生产线上与输入架次相应的物料、资源、作业状态, 并更新将来事件表。基于作业执行机制从将来事件表中选择将要执行的下一项作业, 作业执行完成后消耗相应物料、释放相应资源, 同时基于预定义的仿真决策规则来处理事件。事件处理后触发统计计数器记录资源、物料、作业数据并更新仿真系统内整线模型的状态。以此类推进行仿真循环过程, 整体框架如图2所示。

2.2 仿真进程的执行机制

结合飞机部总装批架次作业过程的特点, 主要针对仿真产品(即飞机或零部件)批处理执行、作业执行、随机事件处理机制进行设计。

(1) 仿真批处理机制

批处理过程如图3所示, 整个飞机装配生产线可以抽象看作一个单服务器系统, 一个批次产品的多次仿真循环可以看作一个等待服务器处理的队列。仿真循环过程中, 采用嵌套的方式, 外部循环用于判断该批次进入服务器系统(即生产线)的次数, 内部循环通过记录架次信息来判断该批次产品每次进入服务器系统的执行进度。

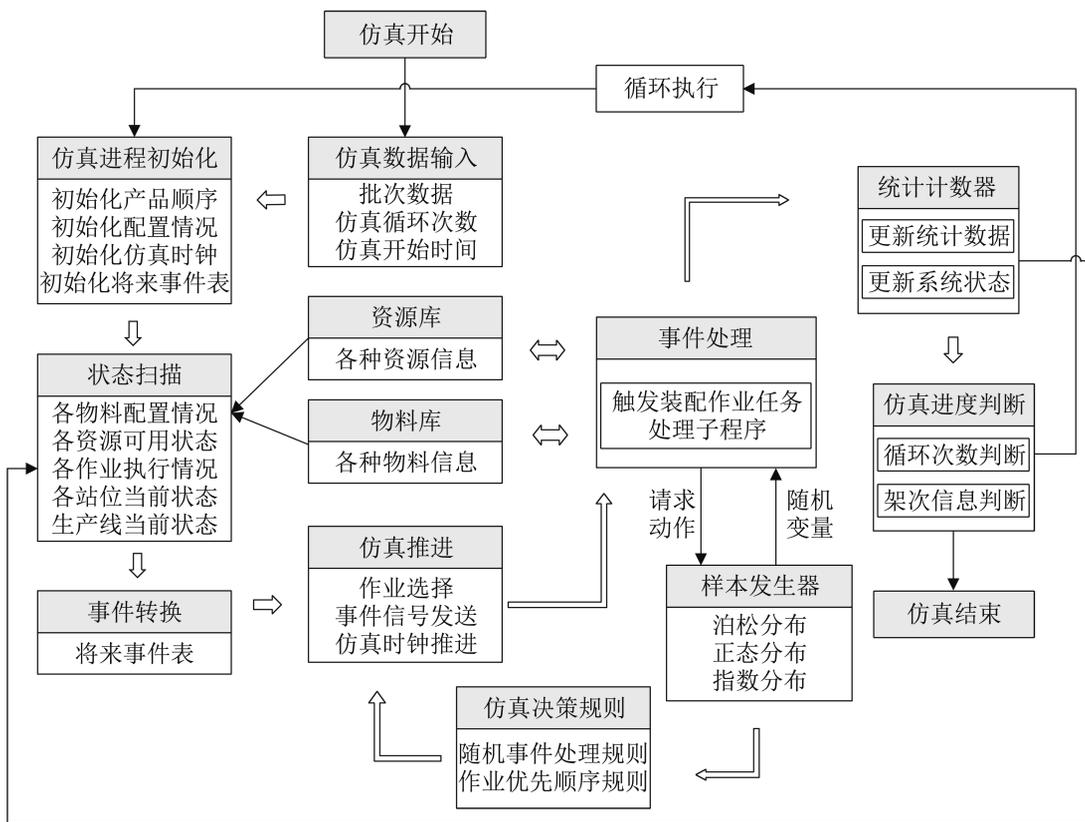


图2 作业过程模型仿真推进整体框架

Fig. 2 Overall framework for advancement of simulation model

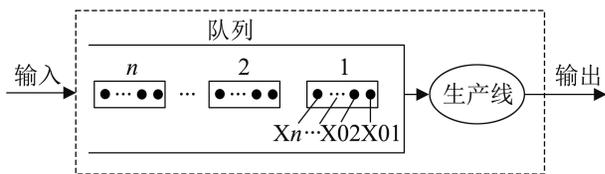


图3 仿真批处理过程

Fig. 3 Simulation batch process

(2) 作业执行机制

作业执行机制如图4所示，按照“条件1：物料齐套与否”“条件2：工具设备资源到位与否”“条件3：人力资源到位与否”的顺序进行判断，并在每个阶段根据是否满足执行条件来更新作业状态。

(3) 随机事件处理机制

根据飞机装配现场实际情况，对影响作业进程的随机事件进行分析和模拟，考虑因素包括工时波动、设备故障、工人请假和物料供应不及时，这些随机事件和所采用的模拟分布如表1所示。在离散事件仿真过程中，会先生成一组伪随机数，

再利用一定的变换方法，在随机数的基础上，生成满足特定分布的随机数字序列。本文方法使用Box-Muller法来生成正态分布随机变量，使用反变换法生成指数分布和泊松分布随机变量^[18]。

3 预计完工时间的指标解算

整个解算流程包括：仿真结果预处理(将仿真推理得到的基础结果处理为可统计分析的变量)、完工天数区间估计、区间精度的迭代计算。

(1) 仿真结果预处理

每一次仿真循环中可以得到各架次在各站位上的装配工期，根据式(1)计算各架次在一次循环中总装配工期：

$$t^x = \sum_{j=1}^n t_j^x \tag{1}$$

式中： t_j^x 为第 τ 次仿真循环时第 x 架次在第 j 个站位上的装配工期； n 为生产线中站位总数。

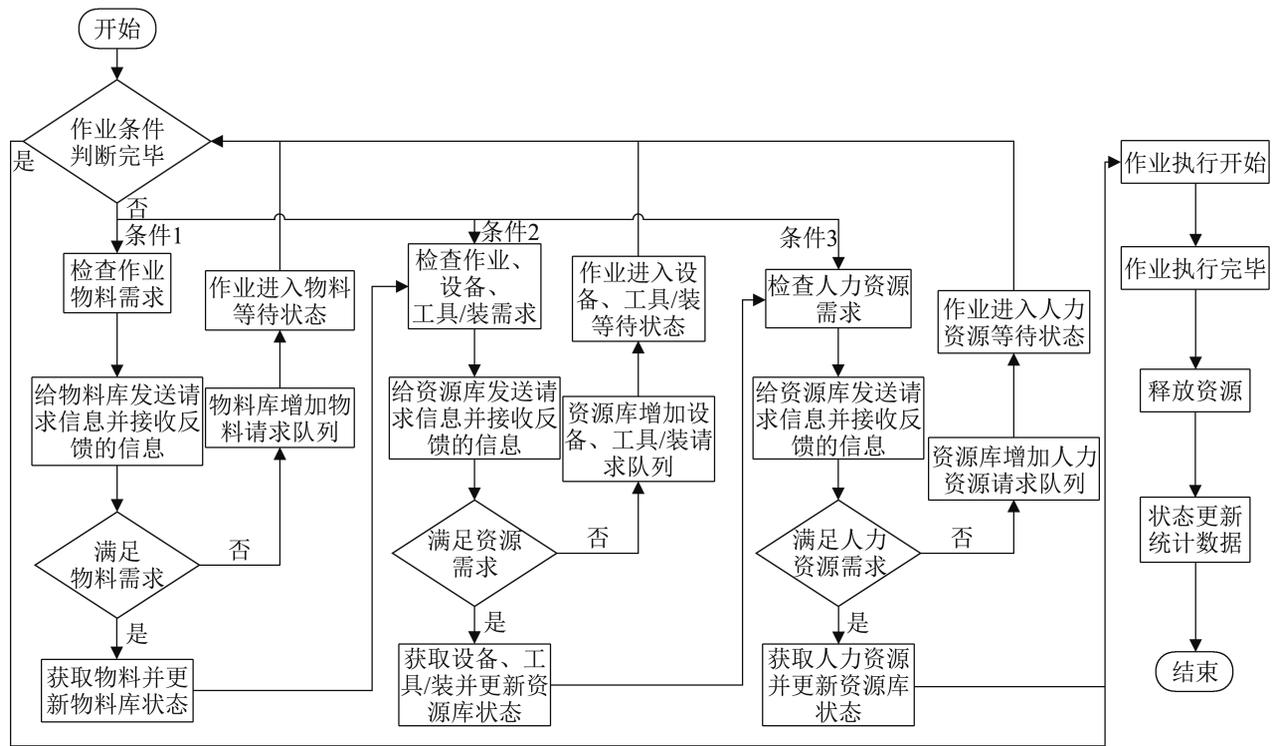


图4 作业执行机制流程

Fig. 4 Dynamic execution of process

表1 作业过程随机事件
Table 1 Process random events

序号	随机事件	事件发生分布	持续时间分布
1	工时波动	必然发生	正态分布
2	设备故障	泊松分布	指数分布
3	工人请假	泊松分布	指数分布
4	物料供应频率波动	必然发生	正态分布

以仿真开始时间为基准将各架次的总装配工期转化为以天为单位的变量。其中第 τ 次仿真循环中各架次总装配工期的仿真结果可以表示为 $D_\tau=(d_\tau^1, d_\tau^2, \dots, d_\tau^x, \dots)$, 其中, d_τ^x 表示该次循环中第 x 架次在距仿真开始时间的第 d_τ^x 天完工。

为了围绕各架次构建具备统计意义的解算结果, 重新按照架次编号将所有 m 次仿真循环的结果组织起来, 构造统计量 $d_x=(d_{1x}, d_{2x}, \dots, d_{mx})$, 其中, d_x 表示第 x 架次装配工期天数的集合; d_{mx} 表示第 x 架次在第 m 次仿真循环中相对于仿真开始时间的装配工期天数。因为每次循环运行可以看作是独立的, 所以 $d_{1x}, d_{2x}, \dots, d_{mx}$ 可以视为是独立且共同服从正态分布的随机变量^[19]。

(2) 完工天数区间估计

采用区间估计法计算 d_x 的置信度为 $1-\alpha$ 的置信区间: $\left(\bar{d}_x - t_{\alpha/2}(m-1) \frac{S_m^*}{\sqrt{m}}, \bar{d}_x + t_{\alpha/2}(m-1) \frac{S_m^*}{\sqrt{m}}\right)$, 其中, S_m^* 为装配工期天数集合的标准差; $t_{\alpha/2}(m-1)$ 为自由度为 $m-1$ 的t分布关于 $\alpha/2$ 的上侧分位数。

(3) 区间精度迭代计算

采用区间估计法, 通过确定次数的循环运行可以得到每架次的最有可能完工天数在置信度为 $1-\alpha$ 的置信区间。置信区间的长度与仿真循环运行次数 m 的平方根成反比, 想要缩小置信区间的长度、提高估计精度就必须增加仿真循环运行次数。但是, 仿真循环运行次数的增加会导致仿真运行时间不断增加, 同时也会给仿真数据的处理增加难度。因此, 在满足精度要求的前提下, 应采取尽可能小的仿真循环次数。

计算能够满足指定精度要求的最小循环次数, 设仿真结果要求精度的临界值为 ϵ , 则置信区间为

$(\bar{d}_x - \varepsilon, \bar{d}_x + \varepsilon)$ 。令 $\beta = t_{\alpha/2}(m-1) \cdot (S_m^* / \sqrt{m})$ ，假设仿真循环次数初始为 m_0 ，而 $\beta_0 = t_{\alpha/2}(m_0-1) \times (S_{m_0}^* / \sqrt{m_0}) > \varepsilon$ 不能满足精度要求。此时，将仿真循环次数为 m_0 时的样本方差代替总体的方差，为了满足精度要求必然有 $m > m_0$ ，且 $\beta = t_{\alpha/2}(m-1) \times (S_m^* / \sqrt{m}) \leq \varepsilon$ ，由此可以推出

$$m \geq \left(\frac{t_{\alpha/2}(m-1) S_{m_0}^*}{\varepsilon} \right)^2 \quad (2)$$

将仿真循环次数为 m_0 时的样本方差代替总体的方差，普遍会出现 m 值偏差的现象，导致当前循环次数下实际无法满足精度要求。为了消除这种影响，将 m 迭代增加1，不断更新样本的方差，使之更接近总体的方差，直至获得的完工天数置信区间满足预定的精度要求。

4 实例分析

4.1 仿真模型构建

本实例选取某型飞机机翼翼盒总装为对象，该生产线包含5个站位，每个站位完成部分装配作业，站位间是串行逻辑关系。统计该生产线中各站位资源、物料、作业，以及批架次信息，构建批架次装配作业过程仿真模型。由于各站位围绕各架次作业过程的建模方法一致，在此仅以第一站位某 x 架次为例来描述建模过程。在第一站位内共统计得到22项作业信息；5种对装配进度影响较大的关键设备；8种专业类别的人力资源；10种在生产过程中有可能会出现的供应不及时的关键物料。由此，将第一站位S1对于架次 x 的作业过程仿真模型构建为六元组： $S_1^x = \{I_{id_1}, \sum_1, R_{c_1}^x, M_{c_1}^x, S_{r_1}^x, L_1^x\}$ ，其中， $I_{id_1} = 1$ 为生产线上第一站位； $\sum_1 = (P_1, A_1^x)$ ， $P_1 = (p_{1,1}^x, p_{1,2}^x, \dots, p_{1,22}^x)$ 表示第一个站位内22项作业集合， A_1^x 表示第一站位内22项作业逻辑顺序矩阵。

为了直观地以图形化展现第一站位内第 x 架次的作业过程，以小方块表示物料库、资源库与

作业的信息交互，并以带箭头的虚线连接表示信息传递方向；以长方形表示作业间信息交互，并以带箭头的实线连接表示信息传递方向，绘制得到第一站位作业过程仿真模型的网络图，如图5所示。将5个站位串联起来得到整线作业过程仿真模型，简化掉各站位内部交互信息表达，绘制整线作业过程仿真模型的网络图，如图6所示。

4.2 指标解算验证

使用现场统计得到6个架次(编号为X01~X06)的历史作业数据进行验证，其中，X01~X03和X06架次在各站位的作业逻辑结构、物料和资源的配置完全相同，而X04和X05架次存在一定的客制化要求，在第1、3、5站位都存在局部工艺调整，例如，第5站位进行翼盒总装时，由于局部结构的变动，需要用到该架次专用的工装和设备资源，导致局部作业逻辑顺序以及资源配置需要调整。基于本文方法，在所构建的作业过程仿真模型中将不同架次的作业、资源、和物料配置信息绑定在各个站位上。

采用Python语言在程序中使用相应数据结构表达所构建的作业过程仿真模型，并在主程序中实现整体仿真模型动态推进框架。经过30次独立的仿真循环推理，采用区间估计法求取各架次完成时间的置信区间。首先，对仿真数据进行处理，得到每次循环6个架次的装配工期，然后，求取各架次装配工期的均值和方差，取 $\alpha = 0.05$ ，查t分布置信区间的参考表得到 $t_{\alpha/2}(29) = 2.042$ ，并计算各架次完成时间的置信区间，结果如表2所示。

由表2可知，各架次的方差较大且存在较大差异，导致置信区间范围较大，为了得到更高精度的结果，限定X01架次精度的临界值为 $\varepsilon = 0.5$ ，迭代求解得到 $m = 187$ ，查表得到 $t_{\alpha/2}(186) = 1.96$ ，从而求得各架次的置信区间 $(\bar{d}_i - \varepsilon, \bar{d}_i + \varepsilon)$ 。同时，以“2022-02-07”为仿真开始时间，将天数置信区间，根据实际排班情况转化为日期的置信区间，最终结果如表3所示。

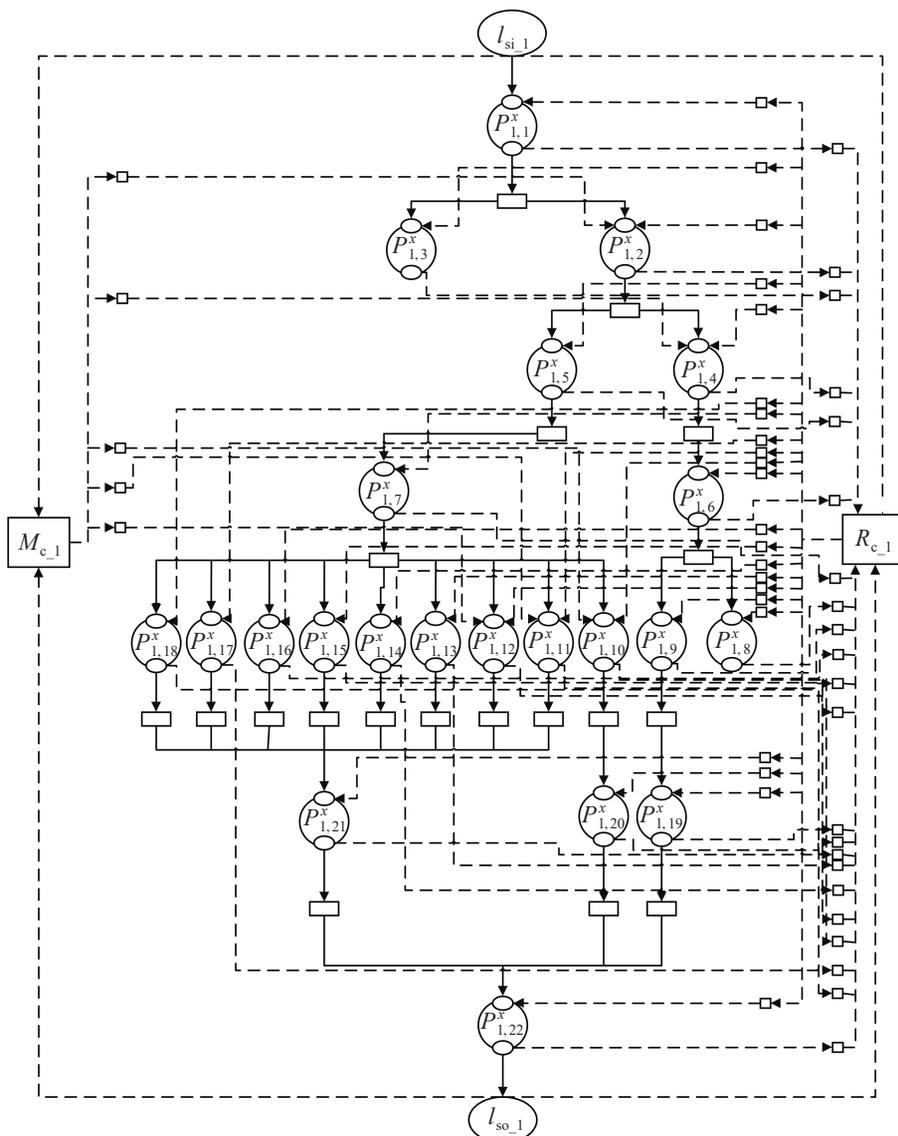


图 5 第一站作业过程仿真模型网络图

Fig. 5 Network diagram of simulation model of the first station process

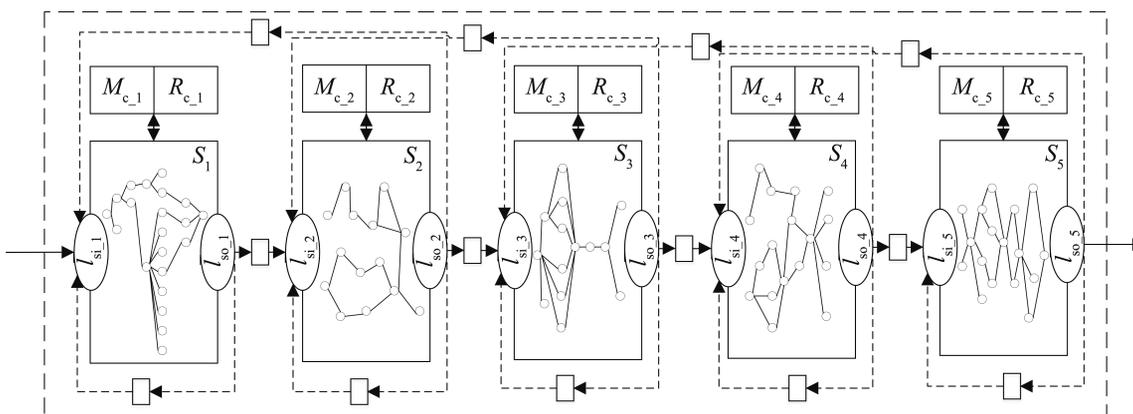


图 6 整线作业过程仿真模型网络图

Fig. 6 Network diagram of simulation model for final assembly line

<http://www.china-simulation.com>

表 2 各架次完工时间解算结果

Table 2 Calculation results of estimated completion time of each sortie

架次	均值	方差	天数置信区间	架次	均值	方差	天数置信区间
X01	131.43	23.25	(129.63, 133.23)	X04	209.76	15.78	(208.28, 211.24)
X02	160.84	24.99	(158.98, 162.70)	X05	237.25	16.33	(235.74, 238.76)
X03	184.10	12.57	(182.78, 185.42)	X06	261.93	13.26	(260.57, 263.29)

表 3 精度要求范围内各架次解算结果

Table 3 Calculation results within range of precision requirements

架次	均值	方差	天数置信区间	转化为日期的置信区间	历史架次的实际完工日期
X01	130.63	12.07	(130.13, 131.13)	(2022-09-03, 2022-09-04)	2022-09-03
X02	157.51	11.44	(157.03, 158.02)	(2022-10-15, 2022-10-16)	2022-10-16
X03	183.87	11.75	(183.38, 184.36)	(2022-11-28, 2022-11-29)	2022-12-01
X04	208.98	11.83	(208.49, 209.47)	(2023-01-10, 2023-01-11)	2023-01-09
X05	236.62	11.37	(236.14, 237.10)	(2023-02-24, 2023-02-25)	2023-02-25
X06	260.80	11.89	(260.31, 261.29)	(2023-03-29, 2023-03-30)	2023-03-27

与实际完工日期数据进行对比发现，X01、X02、X05 架次的实际完工时间在置信度为 95% 的置信区间内，X03 架次装配完工时间比置信区间的右侧值多 2 天，X04 架次则比置信区间的左侧值少 1 天，X06 架次则比左侧值少 2 天。经调研得知，由于飞机产品的装配周期较长，企业能够接受的误差为 ± 3 天，因此，本文提出飞机装配批次完工时间的置信区间是有效的，具备可靠的预测精度。对于预测结果的展示，可以以装配周期天数为横轴，以分布概率为纵轴，绘制各架次预计完工时间的概率分布图，为现场人员提供图形化直观的展示形式，如图 7 所示。

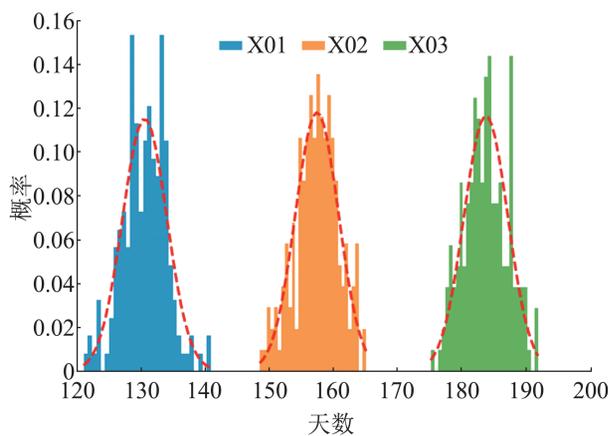


图 7 各架次装配完成时间分布

Fig. 7 Distribution of assembly completion time of each sortie

5 结论

装配现场各批次飞机的预计完工时间，是现场管理者极为关注的作业状态指标。针对传统离散事件仿真技术缺乏对产品差异化分析的局限性，本文首先提出一种考虑飞机架次标签的仿真建模方法；其次，围绕架次标签，研究了仿真推进框架和执行机制，并以仿真推理结果数据为基础，研究了基于区间估计法的预计完工时间指标解算方法；最后，以实际架次的历史数据为验证对象，验证了本文方法的准确性。本文方法同样适用于需要对产品或服务个体进行差异性分析的其他复杂离散系统。在今后研究中，除“事件调度法”之外，需要进一步研究如“进程交互法”等其他离散事件仿真建模与推理框架在飞机装配系统的应用，进而探究不同的仿真机制，为飞机装配系统仿真带来更多的灵活性和可扩展性。

参考文献:

- [1] Ren Yifei, Lu Zhiqiang. A Flexible Resource Investment Problem Based on Project Splitting for Aircraft Moving Assembly Line[J]. Assembly Automation, 2019, 39(4): 532-547.
- [2] 方水良, 刘猛男, 鲜果, 等. 飞机移动装配线-脉动与续动[J]. 航空制造技术, 2021, 64(16): 40-50.
Fang Shuiliang, Liu Mengnan, Xian Guo, et al. Aircraft

- Moving Assembly Line-pulsation and Continuation[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(16): 40-50.
- [3] 魏方剑. 飞机脉动生产线的建模仿真与优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Wei Fangjian. Research on Modeling Simulation and Optimization for Aircraft Pulse Production Line[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [4] 王伟, 王旭东, 孟飘. 飞机生产中的批架次管理技术[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(6): 87-92.
Wang Wei, Wang Xudong, Meng Biao. Shipset Management Technology in Aircraft Production[J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2015, 32(6): 87-92.
- [5] 黄文亮. 试析面向飞机装配的生产管理技术要点[J]. 中国设备工程, 2020(15): 11-12.
- [6] 陈尚宇. 飞机制造企业生产管控中心设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Chen Shangyu. The Design and Implementation of Production Control Center in Aircraft Manufacturing Enterprises[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [7] He Jianxin, Jiang Dongxiao. Theoretical Research on Pull-production of Final Assembly Pulsating Line Based on General Aircraft[C]//2019 6th Asia-Pacific Conference on Social Sciences, Humanities (APSSH 2019). London: Web of Proceedings, 2018: 571-574.
- [8] 贾玉辉. 生产线可用性的指标体系及其建模[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Jia Yuhui. Indicator System and Modeling of Availability Evaluation for Production Line[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [9] 闫飞, 甘斌, 陈招迪, 等. 离散事件仿真中实体被动式空间感知交互机制设计[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(9): 2234-2242.
Yan Fei, Gan Bin, Chen Zhaodi, et al. Mechanism Design for Entities' Passive Dimensional Sensing Interaction in Discrete Event Simulations[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(9): 2234-2242.
- [10] 付建林, 丁国富, 张剑, 等. 基于响应面和NSGA-II的AGV系统多目标优化配置[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(5): 994-1002.
Fu Jianlin, Ding Guofu, Zhang Jian, et al. Multi-objective Optimization Configuration of AGV System Based on Response Surface and NSGA-II[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(5): 994-1002.
- [11] 屈琦, 贾晓亮, 郑植元, 等. 飞机部件装配生产线仿真研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 54-59.
Qu Qi, Jia Xiaoliang, Zheng Zhiyuan, et al. Simulation of Aircraft Components Assembly Line[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(4): 54-59.
- [12] 刘闽东, 吴龙军, 汤明超, 等. 项目型制造过程信息流集成建模仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(3): 555-563.
Liu Mindong, Wu Longjun, Tang Mingchao, et al. Research on Information Flow Integrated M&S Method for Project Type Manufacturing Process[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(3): 555-563.
- [13] Carlos Henrique dos Santos, José Arnaldo Barra Montevechi, José Antônio de Queiroz. Decision Support in Productive Processes Through DES and ABS in the Digital Twin Era: A Systematic Literature Review[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(8): 2662-2681.
- [14] Liu Xia, Ye Wenhua, Wei Bisheng, et al. Research on Multi-level Modeling Method for Aircraft Assembly Line[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 490-495: 538-542.
- [15] 龚小容, 李孝斌, 尹超. 云制造环境下基于贝叶斯网络的机床装备资源优化决策方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(20): 2438-2445.
Gong Xiaorong, Li Xiaobin, Yin Chao. Optimization Decision Method of Machine Tool Resources Based on Bayesian Network Under Cloud Manufacturing Environments[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(20): 2438-2445.
- [16] Xin Bo, Li Yuan, Yu Jianfeng, et al. An Adaptive BPSO Algorithm for Multi-skilled Workers Assignment Problem in Aircraft Assembly Lines[J]. *Assembly Automation*, 2015, 35(4): 317-328.
- [17] Jiang Changjian, Zhang Jie, Long Tengfei, et al. An Optimization Framework for Worker Allocation in Aircraft Final Assembly Lines Based on Simulation Alternative Modelling and Historical Data[J]. *Engineering Optimization*, 2023, 55(8): 1387-1402.
- [18] 秘慧杰. 可视化离散事件仿真系统设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
Mi Huijie. The Design of a Visual Discrete Event Simulation System[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [19] 王津剑, 杜吉旺, 范秀敏, 等. 基于仿真的船舶分段建造动态空间调度[J]. 中国机械工程, 2015, 26(14): 1900-1907.
Wang Jinjian, Du Jiawang, Fan Xiumin, et al. Simulation-based Ship Block Building Dynamic Spatial Scheduling[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(14): 1900-1907.