

基于随机Petri网的民机审定试飞实施流程建模与分析

邓汉年, 周杰, 杨波, 易力力, 傅广, 周鹏

引用本文

邓汉年, 周杰, 杨波, 易力力, 傅广, 周鹏. 基于随机Petri网的民机审定试飞实施流程建模与分析[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230700050-6.

DENG Hannian, ZHOU Jie, YANG Bo, YI Lili, FU Guang, ZHOU Peng. [Modeling and Analysis of Implementation Process for Civil Aircraft Certification Test Flight Based on Stochastic Petri Net](#) [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230700050-6.

相似文献推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[一种安全高效的去中心化移动群智感知激励模型](#)

Safe Efficient and Decentralized Model for Mobile Crowdsensing Incentive

计算机科学, 2023, 50(11A): 221000184-10. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221000184>

[批量厄米矩阵特征值分解的GPU算法](#)

Batched Eigenvalue Decomposition Algorithms for Hermitian Matrices on GPU

计算机科学, 2023, 50(4): 397-403. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220100232>

[密码学智能化研究进展与分析](#)

Research Progress and Analysis on Intelligent Cryptology

计算机科学, 2022, 49(9): 288-296. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300053>

[降雨环境下毫米波MIMO信道特性研究](#)

Study on Characteristics of Millimeter-wave MIMO Channel in Rainfall Environment

计算机科学, 2022, 49(7): 297-303. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210600075>

[数据科学与大数据技术课程体系的复杂网络分析](#)

Complex Network Analysis on Curriculum System of Data Science and Big Data Technology

计算机科学, 2022, 49(6A): 680-685. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800123>

基于随机 Petri 网的民机审定试飞实施流程建模与分析

邓汉年¹ 周杰¹ 杨波¹ 易力力¹ 傅广² 周鹏²

1 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044

2 贵州大学机械工程学院 贵阳 550025

(denghannian@163.com)

摘要 审定试飞是民用飞机获取型号合格证书的重要活动,具有高成本、高风险的特点。研究审定试飞的实施流程有利于推动试飞工作有序进行,进而缩短试飞周期及降低试飞成本。目前对试飞流程的研究局限于流程描述与定性分析,缺乏对试飞流程的形式化建模与性能分析,无法检验流程中的关键环节。为解决上述问题,文中研究了审定试飞3个阶段的实施流程,并利用随机 Petri 网构建了该流程的仿真模型;通过建立与该模型同构的马尔可夫链,对实施流程进行了性能分析,识别出了流程中耗时较多的关键环节,进而分析了关键环节的实施速率对流程平均运行时间的影响。最后通过一个案例验证了模型与方法的可行性。结果表明,制造符合性检查环节与试飞数据处理环节是流程中耗时较多的关键环节,应将其作为流程优化的重点,同时提升上述两个关键环节的实施速率相比提高单环节速率,成本更低且流程运行效率提升幅度更大。

关键词: 审定试飞实施流程;随机 Petri 网;马尔可夫链;性能分析;关键环节

中图分类号 TP391.9

Modeling and Analysis of Implementation Process for Civil Aircraft Certification Test Flight Based on Stochastic Petri Net

DENG Hannian¹, ZHOU Jie¹, YANG Bo¹, YI Lili¹, FU Guang² and ZHOU Peng²

1 State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2 School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract Certification test flight is an important activity for civil aircraft to obtain a type certificate, characterized by high cost and high risk. Studying the implementation process of certification test flight is conducive to promoting the orderly conduct of test flight, thereby reducing the test flight cycle and cost. Currently, research on the test flight process is limited to process description and qualitative analysis, lacking formal modeling and performance analysis of it, which hinders the examination of key links in the process. In order to solve the above problems, the implementation process in the three stages of certification test flight is studied, and the simulation model of it is constructed by using stochastic Petri net (SPN). By establishing a Markov chain isomorphic to the model, the performance analysis of the implementation process is conducted to identify the time-consuming key links in the process. Furthermore, the impact of the implementation rates of key links on the average running time of the process is analyzed. Finally, the feasibility of the model and method is validated through a case study. The results show that the manufacturing compliance check and test flight data processing are the time-consuming key links in the process and should be the focus of process optimization. Compared to improving the speed of individual link, enhancing the implementation rates of these two key links at the same time has lower cost and greater improvement in process efficiency.

Keywords Implementation process of certification test flight, Stochastic Petri net, Markov chain, Performance analysis, Key links

1 引言

飞行试验是航空技术发展与航空装备研制的关键环节,它不仅是探索航空新理论和技术的重要手段,也是航空新装备投入实际应用前必不可少的验证环节。飞行试验的主要任务为发现飞行器潜在的设计缺陷,并验证其能否满足适航规章和用户要求。根据试飞工作的性质和目的,民用飞机的试飞任务可以分为申请人试飞、审定试飞以及功能与可靠性

试飞3类。其中审定试飞是在确定设计构型并确保飞机试飞安全性的基础上,验证民用飞机是否符合适航条款,能否获取型号合格证书的关键性活动。审定试飞作为一项高投入、高风险的系统工程,其实施流程异常复杂。该流程要求民用航空局、飞机制造公司以及飞行试验研究院三方紧密合作,同时涉及制造符合性检查代表、试飞人员和适航审查工程代表等相关人员。试飞周期和成本受到试飞实施过程中人员调配、设备维护及飞机改装等多种因素的影响。因此,如何确保试

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB1713300);国家自然科学基金(51975074);重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0732)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China(2020YFB1713300), National Natural Science Foundation of China(51975074) and Natural Science Foundation of Chongqing(cstc2021jcyj-msxmX0732).

通信作者:杨波(yangbo61@cqu.edu.cn)

飞流程的安全性和高效性,提高关键环节的实施效率,是缩短试飞的周期、降低试飞成本的关键。

为了揭示试飞流程中存在的问题和优化空间,专家学者们对试飞流程进行了广泛的研究。Yu等^[1]在分析试飞管理体系中存在问题的基础上,提出了优化试飞流程的途径与措施。为了保证某系列无人机的飞行试验高效、安全的进行,Chen^[2]详细阐述了无人机试飞操作流程。Gao^[3]指出试飞流程管理的重点和难点集中在故障处理、飞机改装、制造符合性检查等方面。Zhao等^[4]详细阐述了民用飞机的申请人试飞、审定试飞、功能可靠性试飞等3个试飞阶段,并研究了民机审定试飞的工作流程及试飞过程中飞行人员的职责分配情况。在搭建试飞信息化管理平台的基础上,Cai等^[5]为了保障试飞工作的顺利展开,构建了标准化的试飞组织实施流程。针对飞机的强度试验,Wei^[6]研究分析了试验过程中的故障处理流程及其主要工作。

可以看出,目前对试飞流程的研究集中在流程描述及定性分析方面,缺乏试飞流程的形式化建模和性能分析方法,因此难以识别流程中的关键环节,进而难以分析关键环节对流程运行效率的影响。

目前常见的流程建模工具包括:事件驱动流程链(EPC)^[7-8]、统一建模语言(UML)^[9]、业务流程建模符号(BPMN)^[10-11]、Petri网^[12-13]等。其中,Petri网是一种用于描述系统结构及行为的图形化工具,在对具有并发性、同步性以及随机性的过程建模和性能分析方面具有显著的优势,因此其在航空领域的流程建模分析方面得到了广泛应用。为了研究飞机备件供应流程的可靠性,Wang等^[14]采用随机Petri网建立了该过程的工作流模型,并运用T_不变量对模型的合理性进行了验证。针对IDEF₀模型无法表达航空产品研制流程动态特性的问题,Xie等^[15]定义了一套映射规则,将IDEF₀模型的元素和关系映射到Petri网的库所和变迁上,从而实现了

两种模型之间的转换。Xing等^[16]通过应用着色时间Petri网以及蒙特卡罗法,为航班保障服务流程的性能分析提供了一种有效的方法。针对航空装备维修流程建模难的问题,Zhang等^[17]利用层次Petri网分层构建了该流程的仿真模型,并以更换航空发动机为例验证了模型的合理性,为流程的定量分析奠定了基础。Wang^[18]利用面向对象Petri网构建了航空发动机设计流程的多层次集成模型。针对航空领域中的“主机厂-制造厂”协同研制模式,Fu^[19]采用Petri网建立了一种可靠的厂所协同研制工作流模型,并进行了仿真验证。为了解决飞机故障处理流程中存在的问题,Pei^[20]提出了一种基于Petri网模型的解决方案,旨在对该流程进行优化和改进。该研究还对所建立的Petri网模型进行了有效性验证,并应用关联矩阵重组算法对工作流模型进行了优化。鉴于Petri网在流程建模中的优势与在航空领域中的广泛应用,本文使用随机Petri网对审定试飞实施流程进行建模分析。

本文首先分析民机审定试飞实施流程3个阶段的相关工作,进而引入随机Petri网(Stochastic Petri Net, SPN)构建该流程的仿真模型。为了评估审定试飞实施流程的系统性能,在求解所有可达标识的基础上,建立了与SPN模型等价的马尔可夫链。通过计算相关的性能指标,探讨流程中的关键环节及其实施速率的变化对总流程平均运行时间的影响。最后通过一个案例验证了本文提出的仿真模型与分析方法能为审定试飞实施流程的设计规划提供理论支持及实践指导。

2 民机审定试飞实施流程分析

在型号检查核准书的指导下,审定试飞按照特定的顺序完成一系列试飞科目,包括空速校准、操作性和稳定性校验、静压源修正等。在审定试飞实施过程中,每个科目的飞行试验基本都包括飞行准备、飞行实施、飞行讲评3个重要阶段,具体的实施流程如图1所示。

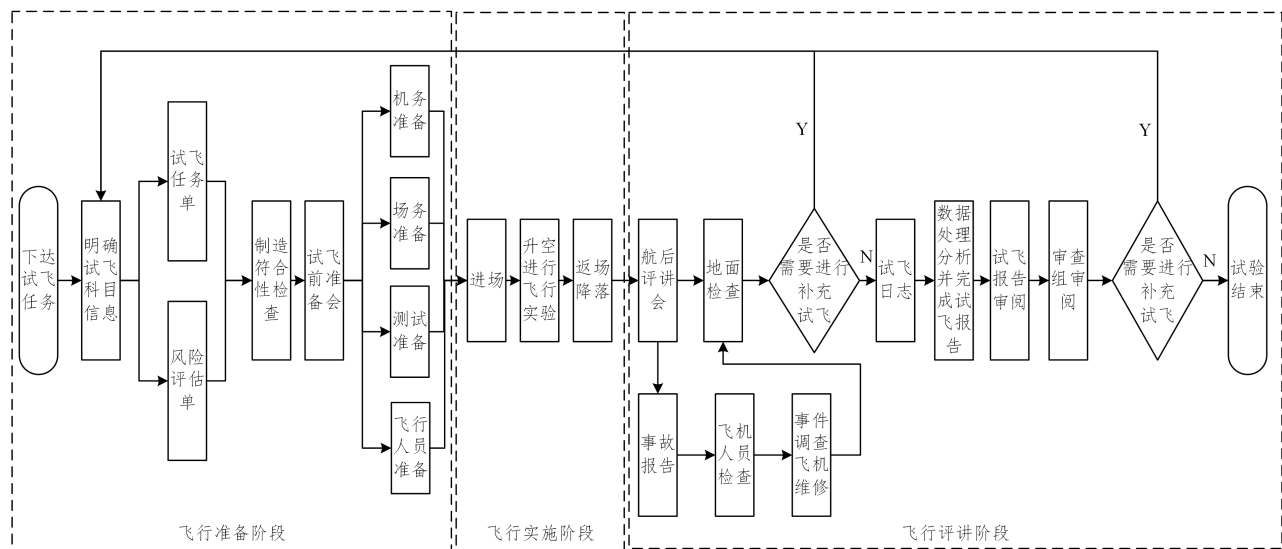


图1 民机审定试飞实施流程

Fig. 1 Implementation process for civil aircraft certification test flight

在飞行准备阶段,试飞团队将进行全面的准备工作,确保试飞任务的顺利进行。在试飞任务下达后,试飞工程师首先根据试飞科目的要求,制订试飞任务单以及风险评估单。其中试飞任务单作为飞行人员及相关保障单位的操作指南,明确规定了试验方法步骤、飞行限制、试验允差、操作动作以及

试飞点的各项参数等重要内容。风险评估单用于对飞行试验中可能存在的危险进行定性定量的评估,同时提供相应的应急处理措施。在完成前面的任务后,需要进行制造符合性检查。该检查作为试飞过程中极其重要的环节,旨在确保飞机的制造与设计始终保持一致。检查工作需要工程部门、试飞

部门以及制造部门等多个部门的协同参与,共同核查飞机的各个方面,包括结构、系统、性能等。最终,由制造部门提交符合性声明,民用航空局审核是否通过,以确保飞机的合规性。紧接着在试飞准备会议上,试飞科目的负责人需要向总指挥以及试飞人员汇报试飞计划的具体实施情况。在试飞当天,飞机进入跑道之前,需要进行机务、场务、测试、人员等多方面的准备,以确保试飞工作的安全进行。

在完成所有准备工作后,飞机进入跑道,升空进行飞行试验。在试验过程中,试飞人员按照试飞任务单中的试验次序分工进行试验,并实时监控各项飞行参数和试验允差。

飞行试验完成后,召开航后讲评会,对飞行试验的实施情况进行回顾总结并对试验结果进行初步评估。在讲评会上,将讨论试飞过程中的问题,并进行相应的分析和讨论。根据初步评估的结果,将判断是否需要补充试飞。如需补充试飞试验应尽早通知试飞组组长和相关审查代表,并在审批通过后制定补充试飞计划。若不需要补充试验,则由试飞工程师撰写试飞日志,记录本次试飞活动的概况。随后,申请人完成试飞数据处理及撰写试飞报告,提交给审查代表和试飞人员进行审批,对飞机的试飞大纲符合性与条款符合性进行评估。最终由审查组决定是否补充试验,若不需补充则完成存档,试验结束。

3 基于随机 Petri 网的民航审定试飞实施流程建模

3.1 随机 Petri 网

Petri 网是由德国学者 APetri 提出的一种强大建模工具,

不仅具有直观的图形化表达,而且有严谨的数学表达式。在民航审定试飞的实施流程中,由于其复杂性,各环节的处理时间会因实际飞行试验情况产生一定的波动。随机 Petri 网 (SPN) 在每个变迁的可实施与实施之间联系一个随机的延迟时间,能较好地反映试飞流程的不确定性和动态性,其数学表达式为:

$$SPN = \{P, T; F, W, M, \lambda\} \quad (1)$$

其中, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 为库所集, n 为库所的数量; $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ 是变迁集, m 是变迁的数量; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是连接库所和变迁的有向弧集合; W 为 $F \rightarrow N$ 的权重函数; N 为正整数集合; $M = \{M_0, M_1, \dots, M_s\}$ 为模型的状态标识集合, M_0 表示初始标识, s 是状态标识的数量,标识由库所中的令牌数量表示; $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ 为变迁平均实施速率集合,其倒数为变迁的平均实施时间。

3.2 审定试飞实施流程的 SPN 模型

基于第 2 章审定试飞实施流程,通过将流程中的活动进行概化,利用变迁代表流程中的各个环节,建立了该实施流程的 SPN 模型,如图 2 所示。模型中有向弧的权重都为 1,初始状态为 M_0 (库所 P_1 中有 1 个 token,其余库所为空),20 个变迁的具体含义如表 1 所列。其中,变迁 T_{17}, T_{18}, T_{21} 和 T_{22} 为选择变迁,需要为变迁附加发生概率,这里设这 4 个变迁的发生概率分别为 $1-\alpha, \alpha, 1-\beta, \beta$ 。模型开始运行时,变迁 T_1 开始触发,表明试飞任务正在下达。之后剩余变迁按照规则依次触发,直到变迁 T_{22} 实施完成,整个飞行试验结束并完成存档。

表 1 SPN 模型中变迁的含义

Table 1 Meaning of transitions in SPN model

符号	变迁含义	符号	变迁含义
T1	下达试飞任务	T12	完成所有准备,飞机进场
T2	确定试飞科目的相关信息	T13	进行飞行试验
T3	制定试飞任务单	T14	召开航后讲评会
T4	制定风险评估单	T15	提交事故报告,并进行维修
T5	审阅任务单及风险评估单	T16	地面检查
T6	进行制造符合性检查	T17	讲评会后,提交补充试飞的申请
T7	召开试飞前准备会议	T18	撰写并提交试飞日志
T8	机务准备	T19	完成数据处理及试飞报告
T9	场务准备	T20	审阅试飞报告,检查其与试飞大纲、适航规章条款的符合性
T10	测试准备	T21	试飞报告审阅后,提出补充试飞申请
T11	飞行人员准备	T22	完成存档,试验结束

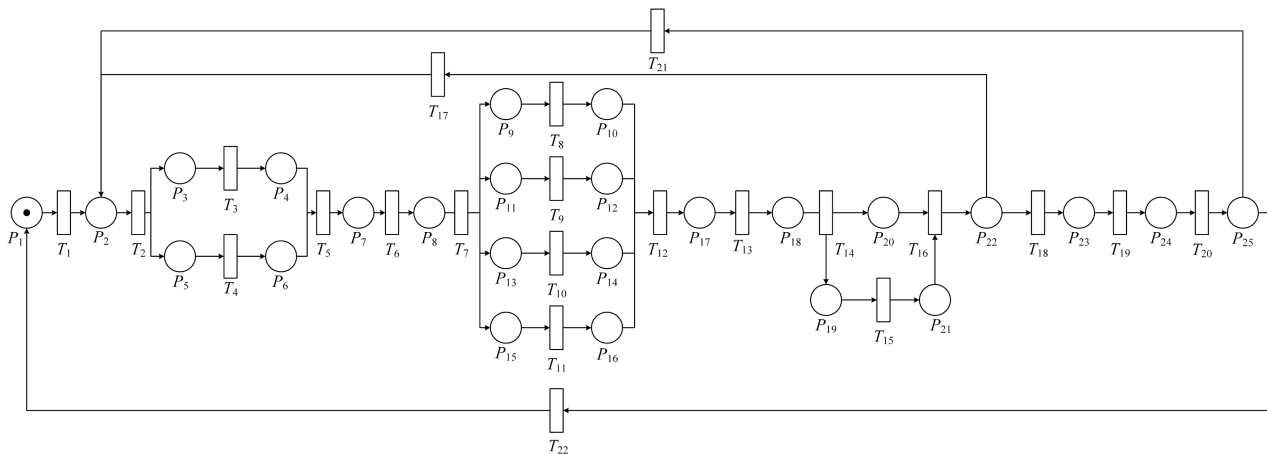


图 2 民航审定试飞实施流程的 SPN 模型

Fig. 2 SPN model of civil aircraft certification test flight implementation process

3.3 基于同构马尔可夫链的审定试飞实施流程性能分析方法

在构建 SPN 模型的基础上,需要利用马尔可夫链的计算方法实现流程的定量分析。如果通过触发变迁序列 T_1, T_2, \dots, T_m , 随机 Petri 网模型能够从初始状态 M_0 转变到状态 M_i , 则称 M_i 是从 M_0 可达的。根据构建好的审定试飞实施流程的 SPN 模型, 得到模型的可达标识集 M_0, M_1, \dots, M_{31} 。紧接着构建审定试飞实施流程 SPN 模型的同构马尔可夫链, 如图 3 所示。马尔可夫链中的节点表示可达标识, 节点之间通过有向弧进行连接, 弧上数值表示状态转换所触发变迁 T_i 的平均速率 λ_i 。比较特殊的是, T_{17}, T_{18}, T_{21} 和 T_{22} 是选择性发生的, 与之相对应的平均速率需乘上变迁的发生概率, 在图 3 中表现为 $(1-\alpha)\lambda_{17}, \alpha\lambda_{18}, (1-\beta)\lambda_{21}, \beta\lambda_{22}$ 。

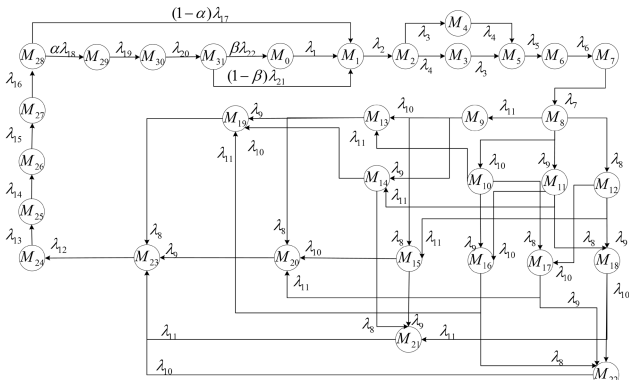


图 3 同构的马尔可夫链

Fig. 3 Isomorphic Markov chain

在构造马尔可夫链后, 求解每个状态的稳定概率, 在此基础上分析库所的概率密度、变迁的利用率以及平均运行时间等关键指标。

1) 可达标识的稳定状态概率

基于构建好的马尔可夫链建立线性方程组:

$$\begin{cases} YD=0 \\ \sum_{i=0}^{31} y_i=1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Y=(y_0, y_1, \dots, y_{31})$; 转移矩阵 D 为 32×32 的方阵; 矩阵 D 非对角线的元素 $d_{i,j} (i \neq j)$ 表示状态 M_i 到状态 M_j 有向弧上的速率, 若状态之间不存在有向弧, 则值为 0; 对角线上的元素 $d_{i,i} (i=j)$ 则等于从节点 M_i 输出的有向弧上平均速率之和的负值。通过计算得到方程组 (2) 的解向量 Y , 其中, 解向量 Y 即为每个可达标识的稳定概率 $G[M_i]=y_i (0 \leq i \leq 31)$ 。

$$C_f = \frac{|Time(\lambda_i + \Delta\lambda, \lambda_k + \Delta\lambda) - Time(\lambda_i, \lambda_k) - (Time(\lambda_i, \lambda_k) - Time(\lambda_i - \Delta\lambda, \lambda_k - \Delta\lambda))|}{|Time(\lambda_i, \lambda_k) - Time(\lambda_i - \Delta\lambda, \lambda_k - \Delta\lambda)|} \quad (8)$$

其中, $Time(\lambda_i + \Delta\lambda, \lambda_k + \Delta\lambda)$ 表示点 $(\lambda_i + \Delta\lambda, \lambda_k + \Delta\lambda)$ 的流程平均运行时间。 C_f 越小, 说明当变迁的实施速率提升相同幅度时, 流程的平均运行时间缩减得越少, 收益越低。

4 算例分析

为了验证所构建的民机审定试飞实施流程 SPN 模型与分析方法的正确性, 结合相关资料及实际情况, 给出各行动的平均实施速率 λ_i , 如表 2 所列。选择发生变迁 T_{18} 和 T_{22} 的发生概率分别为 $\alpha=85\%, \beta=90\%$ 。

2) 库所的概率密度函数

$$G[M(P_i)=1] = \sum_j G[M_j] \quad (3)$$

其中, M_j 表示库所 P_i 中含有 token 的状态标识。

3) 变迁的利用率函数

变迁的利用率 $U(T)$ 等于能触发变迁 T 的所有标识的稳定概率之和:

$$U(T) = \sum_{M \in E} G[M] \quad (4)$$

其中, E 是使变迁 T 可实施的所有可达标识集合。

4) 平均运行时间

根据最小化原则以及平衡原理, 可计算流程的平均运行时间, 计算式如下:

$$Time = \frac{\bar{N}}{R(T, R)} \quad (5)$$

其中, \bar{N} 为子系统所有库所标记数的平均值, 即平均标记数, 计算式如下:

$$\bar{N} = \sum_{i=2}^{25} G[M(P_i)=1] \quad (6)$$

$R(T, P)$ 为变迁 T 的标记流速, 计算式为:

$$R(T, R) = W(T, P) \times U(T) \times \lambda \quad (7)$$

其中, $W(T, P)$ 表示变迁 T 指向库所 P 的有向弧权值, $U(T)$ 为变迁 T , λ 是变迁 T 的平均实施速率。

3.4 关键环节实施速率对流程时间影响程度的分析方法

各环节实施速率的加快直接影响了流程的执行效率。然而, 需要注意的是, 各环节实施速率对平均运行时间的影响程度是有差异的。总的来说, 关键环节对平均运行时间的影响程度相对较大, 其他环节的影响相对较小。通过计算得到所有变迁的利用率, 变迁利用率高的环节是流程中的关键环节。为了观察关键环节实施速率对整个流程运行时间的影响程度, 取利用率较高的变迁, 提高单个变迁的实施速率, 增长的步长为 $\Delta\lambda$, 通过式 (5) 计算流程的运行时间 $Time(\lambda_i + \Delta\lambda)$ 。

在以往的研究中, 仅考虑单个关键环节实施速率对平均运行时间的影响。但流程中关键环节往往不止一个, 且关键环节的实施速率共同影响平均运行时间。为此, 本文在研究单个关键环节实施速率对流程时间影响的基础上, 分析了多个关键环节对其的影响。取利用率最高与次高的变迁, 同时增加两个变迁的实施速率, 观察时间 $Time(\lambda_i + \Delta\lambda, \lambda_k + \Delta\lambda)$ 的变化情况。

考虑到边际效益, 为了获得实施速率得到提升从而得到较高收益的区间, 需要计算时间的变化率, 计算式如下:

表 2 SPN 模型中各变迁的实施速率

Table 2 Implementation rate of each transition in SPN model (次每小时)

变迁	实施速率	变迁	实施速率
T1	2.000	T12	0.500
T2	2.000	T13	0.200
T3	2.000	T14	1.000
T4	0.333	T15	0.167
T5	0.250	T16	0.500
T6	0.667	T17	2.000
T7	0.083	T18	1.000
T8	0.500	T19	0.100
T9	1.000	T20	0.500
T10	0.500	T21	2.000
T11	0.667	T22	1.000

4.1 结果分析

根据各行动的实施速率构建转移矩阵 D ,使用式(2)计算出每个状态的稳定状态概率。在求取每个标识的稳定状态概率后,使用式(3)获得各个库所繁忙率,如表 3 所列。繁忙率越高,表示该环节所需时间占整个审定试飞实施流程总时间的比重越大,同时也表明该环节容易产生信息堆积。通过分析发现,库所 P7,P20,P23,P19(繁忙概率分别为:0.23534,0.01705,0.01318,0.03922)的繁忙率较高,表明制造符合性检查、完成试飞报告、飞机维修的环节在整个流程中的时间占比大,容易产生信息堆积。

表 3 库所繁忙率
Table 3 Busy rate of places

库所	繁忙概率	库所	繁忙概率
P1	0.00593	P14	0.07828
P2	0.00981	P15	0.09806
P3	0.05883	P16	0.01961
P4	0.07424	P17	0.11767
P5	0.07845	P18	0.15689
P6	0.05463	P19	0.03922
P7	0.23534	P20	0.01705
P8	0.03922	P21	0.14495
P9	0.01961	P22	0.02899
P10	0.07828	P23	0.01318
P11	0.03922	P24	0.07828
P12	0.05867	P25	0.09806
P13	0.02942		

表 4 变迁利用率
Table 4 Utilization rate of transitions

变迁	利用率	变迁	利用率
T1	0.00593	T12	0.03922
T2	0.00981	T13	0.09806
T3	0.05883	T14	0.01961
T4	0.07845	T15	0.11767
T5	0.02942	T16	0.03922
T6	0.23534	T17	0.01705
T7	0.03922	T18	0.01705
T8	0.01961	T19	0.14495
T9	0.03922	T20	0.02899
T10	0.02942	T21	0.01318
T11	0.01961	T22	0.01318

表 4 列出了 22 个变迁的利用率,分析发现 T6,T19,T15(利用率分别为:0.23534,0.14495,0.11767)变迁的利用率较高。变迁利用率反应环节的重要程度和利用率高,说明该环节是试飞流程的关键环节或瓶颈环节,决策人员应当给予高度重视。其中 T6 为制造符合性检查环节,T19 是数据处理及提交试飞报告环节,T15 是提交事故报告及维修环节。制造符合性检查环节利用率高主要是因为检查工作需要工程部门、试飞部门、制造部门等多个部门的协调合作。然而,当前的职能管理模式导致工作交叉、责任主体不明等问题,同时部门之间沟通协调存在困难,这极大地影响了检查工作的推进。变迁 T19 利用率较高,说明完成试飞报告的环节用时相对较长。在撰写试飞报告之前,需要对试验数据进行有效性评估以及后续的处理分析。试飞过程中的测试参数多且测试采样频率高,导致试飞数据量巨大,一个飞行架次的数据就有几十上百 GB 的数据。海量的数据处理需要消耗大量时间,再加上目前数据传输效率不高,进一步降低了数据处理的工作效率。变迁 T15 利用率高反映出提交事故报告及维修环

节占时较长。这主要是因为试飞工作的复杂性导致现场故障的多样性和变化性,需要对故障进行分类和分析,并根据故障的不同类别采取相应的处理流程,这也导致故障处理相对缓慢。

为了评估整个流程的执行效率,需要求解流程平均运行时间,首先应使用式(6)计算平均标记数:

$$\bar{N} = \sum_{i=2}^{25} G[M(P_i) = 1] = 1.578$$

利用式(7)计算变迁 T1 的标记流速:

$$R(T_1, P_2) = W(T_1, P_2) \times U(T_1) \times \lambda_1 = 0.01186$$

根据最小化原则结合平衡原理,采用式(5)计算流程的平均运行时间:

$$Time = \frac{\bar{N}}{R(T_1, P_2)} = 133.03(\text{单位为 } h)$$

4.2 关键环节实施速率对流程运行时间的影响

通过前面的分析发现,变迁 T6,T19 是关键环节。使用第 3.4 节提出的分析方法研究关键环节实施速率对流程运行时间的影响,分别改变 T6,T19 的实施速率 λ_6, λ_{19} ,观察平均运行时间的变化情况。这里设置 λ_6 为 0.083~20, λ_{19} 在 0.100~20 之间变化,步长量 $\Delta\lambda$ 取 0.01。运算结果如图 4 所示,通过对比发现 λ_6 相比 λ_{19} 对平均运行时间的影响程度较大,说明了提升制造符合性检查的效率比提升数据处理及提交试飞报告环节的效率收益更大。随着速率的提升,平均运行时间逐渐减少,速率 λ_6 从 0.083 增加到 2 以及速率 λ_{19} 从 0.1 增加到 2 时平均运行时间下降趋势最为显著,但速率达到 2 以后,平均运行时间的下降趋势已经不明显,下降趋于平缓。

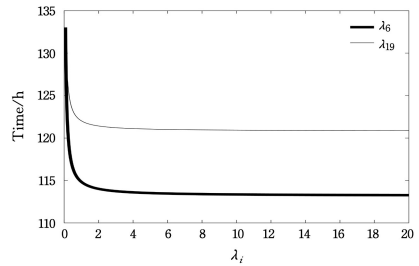


图 4 λ_6 和 λ_{19} 单独变化的平均运行时间

Fig. 4 Average running time when λ_6 and λ_{19} varies separately

为了研究两个关键环节实施速率对平均运行时间的影响,通过同时改变实施速率 λ_6 和 λ_{19} 来观察运行时间的变化情况。 λ_6 取值范围为 0.083~3, λ_{19} 取值范围为 0.100~3,步长量 $\Delta\lambda$ 取 0.01。运算结果如图 5 所示,在深蓝色区域,速率增加,运行时间缩短已经不明显。

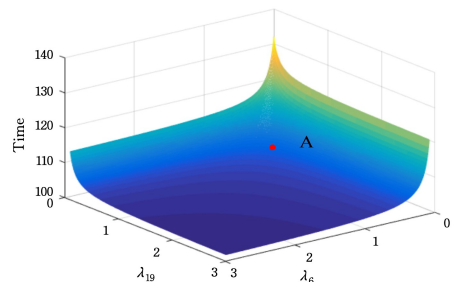


图 5 λ_6 和 λ_{19} 同时变化的平均运行时间

Fig. 5 Average running time when λ_6 and λ_{19} vary simultaneously

由图 4 发现,单独提升 λ_6 ($\lambda_6 \geq 2.03$),运行时间能缩短到

114 h 左右,单独提升 λ_{19} ($\lambda_{19} \geq 6.40$),运行时间能缩短到 121 h。当同时考虑提升 λ_6 和 λ_{19} ,运行时间能降低到 106 h,且两者仅需要提高相对较小的幅度。如图 5 中的点 A, $\lambda_6 = 0.52, \lambda_{19} = 0.64, Time = 106.03$ 。由此给予决策人员启发,不能仅仅考虑单个环节效率的提升,而要综合考虑优化职能管理模式、加强部门间沟通协作及提高数据传输效率等多方面的措施,共同提高制造符合性检查及数据处理两个重要环节的处理效率,从而整体提升流程实施效率。

为了更直观地观察平均运行时间的变化情况,计算时间变化率,计算结果如图 6 所示,在 $(0.083 \leq \lambda_6 \leq 0.73) \cup (0.1 \leq \lambda_{19} \leq 0.69)$ 区间内时间变化率较为明显。而在图 6 中的深蓝色区域,速率再进行提升,时间变化率已经很小 ($C_f < 0.025$)。此时再提升环节的实施效率,收益较小。

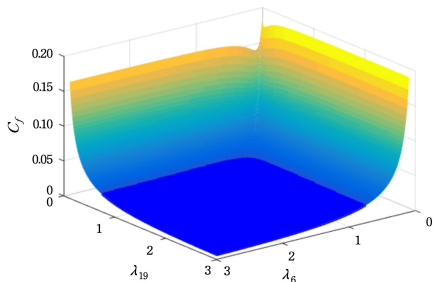


图 6 时间变化率

Fig. 6 Rate of time change

结束语 本文在分析审定试飞实施流程的基础上,构建了该流程的随机 Petri 网模型。在获得模型的可达标识集后,构建了与模型等价的马尔可夫链,进而计算了流程的性能分析指标。并通过实验研究了多个关键环节实施速率变化给流程效率带来的影响。最后通过一个算例,验证了模型与方法的合理性,结果表明:制造符合性检查、试飞数据处理、提交事故报告及飞机维修等环节是审定试飞实施流程中耗时较多的主要活动,应是流程优化的重点。提高关键环节的实施效率,能缩短流程的运行时间,但相比单环节,同时考虑提高两个关键环节的实施速率,能更好地缩短整个流程的运行时间。

参考文献

- [1] YU J Q, HAN J. Research on Optimization of flight Test organization management Process [J]. Equipment Management and Maintenance, 2021(9):3-4.
- [2] CHEN D. Flight-Test Safety Control of CH Series UAVs [J]. Aircraft Design, 2018, 38(2):20-22.
- [3] GAO B. X Company Flight Test Program Management System Research [D]. South China University of Technology, 2014.
- [4] ZHAO Z Q, XU J C, ZHANG H Z, et al. Flight Test Technology [M]. Civil Aviation Press of China, 2019, 10:3-5.
- [5] CAI B, PAN L P. Organization and Security Management of Flying Test Based on Information Platform [J]. Aircraft Design, 2018, 38(3):77-80.
- [6] WEI C L. Research on Fault Handling Process of Civil Aircraft Strength Test [J]. Science and Technology Vision, 2016(20):84-85.
- [7] LV B W, YANG H Z. Workflow technology overview [J]. Intelligent Computer and Applications, 2018, 8(1):159-161.
- [8] CHEN F. Overview and Research Trend of Workflow Modeling Technology [J]. Computer Optical Disc Software and Applications, 2014, 17(21):146-147.
- [9] NIU B, HUANG Z L, WU J J, et al. Modeling and Verification of Intelligent Recommendation for early Warning Intelligence Based on UML and Colored Petri Net [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(12):291-298.
- [10] ZHAO Y, ZHAO C, HUANG B, et al. Semantics and analysis of BPMN2.0 process model [J]. Computer Science, 2018, 45(S2):558-563.
- [11] YE J H, YE S. Bidirectional mapping between YAWL and BPMN [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(1):1-5, 11.
- [12] LAI X W, ZHENG W B, WU Y Q, et al. Task Collaborative process Network Model and Time Analysis of Mine Accident Emergency Rescue Digital Plan [J]. Computer Science, 2021, 48(S1):596-602.
- [13] YANG H R, FANG X W. Business Process Consistency Analysis of Petri Net Based on Probability and Time Factor [J]. Computer Science, 2020, 47(5):59-63.
- [14] WANG D, FENG J C, WANG X, et al. Modeling for Aircraft Based on 3D Printing Technology and SPN [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(2):149-154.
- [15] XIE Q, MAO Z. Aircraft product design process model based on Petri net [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006(1):131-136.
- [16] XING Z W, WEI Z Q, LUO Q, et al. Flight support service modeling method based on colored time Petri Net [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(5):1064-1069.
- [17] ZHANG G Y, ZHANG F G, CHENG J H. Aircraft equipment maintenance process modeling based on hierarchical Petri net workflow [J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(5):138-141, 151.
- [18] WANG W. Research on Dynamic Modeling Method of aero-engine Collaborative Design Process based on object-oriented Petri Net [C]//The 2nd China Aeronautical Science and Technology Conference 2015. 2015:377-384.
- [19] FU G L. Research on Collaborative Development Process of Aircraft OIC [D]. Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [20] PEI Y. Research on Optimization of Fault Handling Process of E Airlines based on Petri Net [D]. Shanghai: Donghua University, 2019.



DENG Hannian, born in 1998, postgraduate. His main research interests include process modeling and intelligent optimization technology.



YANG Bo, born in 1986, Ph.D, associate professor. His main research interests include cloud manufacturing service composition, production scheduling, networked manufacturing and industrial big data analytics.