

基于着色 Petri 网的维修作业建模与人机工效分析

徐庆宏 孙有朝 李龙彪 王异香

(南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016)

摘要:基于着色 Petri 网和 CPN Tools 平台,研究了维修作业过程的建模方法,提出了维修作业过程建模方法与步骤,采用模特法计算每一步操作所需时间值,采用人体动作代谢能耗预测模型计算每个操作的能耗值,实现了维修作业建模与仿真、作业序列的控制以及维修人员工作负荷和工作时间的定量计算。以 A320 飞机前起落架轮胎拆卸作业为例,采用 CPN Tools 软件进行了维修作业建模和仿真模拟,验证了模型和方法的可行性与有效性。该方法引入了传统维修作业模型中没有涉及的人机工效因素,能够有效评价维修人员的作业舒适性。

关键词:着色 Petri 网;作业建模;维修作业;人机工效分析

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)06-0951-08

Maintenance Task Modeling and Ergonomic Analysis Using Colored Petri Nets

Xu Qinghong, Sun Youchao, Li Longbiao, Wang Yixiang

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The model of maintenance task process is investigated based on colored petri nets(CPN). The method and procedure of maintenance task are developed. The MODAPTS method is used to calculate the work time of each operation step, and the metabolic energy predicting model for human action is used to calculate the energy dissipated of each operation step. The model and simulation of the maintenance, the control of the work sequence and the computation of work load and work time are all presented based on CPN Tools. Taking the nose landing gear tire removal operations of A320 aircraft as an example, the CPN Tools software is used to conduct the modeling and simulation for the maintenance operations to prove the feasibility and effectiveness of the developed model and methods. The ergonomic analysis is introduced into the analysis to evaluate the comfortability of maintenance workers.

Key words: colored Petri net (CPN); task modeling; maintenance task; ergonomic analysis

产品的维修性是设计赋予的使之维修简便、迅速、经济的重要特性,是决定产品维修品质与寿命周期费用的关键因素。维修性模型是指为了分析、预计、评估产品的维修性而建立的各种物理或数学模型,维修性建模是产品的维修性设计与评价的一项重要重要工作^[1],其对确保产品的维修性水平、降低

维修成本等具有决定性作用。

根据分析对象与建模方法的不同,目前维修性模型通常可分为 3 类:第一类是以概率论与数理统计为方法,建立了系统维修时间、维修事件维修时间以及维修作业时间之间的函数关系,最早由美军标 MIL-HDBK-472^[2]提出的概率模拟法、回归预

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合(U1333119,60572171,60979019,60939003)资助项目;国防科工局技术基础科研(Z052013B003)资助项目;国防基础科研计划资助项目;中国民用航空局科技(MHRD0722, MHRD200908)资助项目。

收稿日期:2013-05-21;**修订日期:**2014-06-06

通信作者:孙有朝,男,教授,博士生导师,E-mail:sunyc@nuaa.edu.cn。

计法、时间累计法、功能层次法以及基于 GRASP 维修性模型、基于故障树的维修性模型^[3]等都属于这类模型;第二类是以过程建模技术为方法,分析与维修过程相关的维修对象、维修作业、维修资源之间的相互关系,这类模型包括基于 Petri 网^[4]、Petri-PatNet 网^[5]、计划评审技术^[6]等方法的一系列维修性模型;第三类是以评价与决策理论为方法,构建维修性设计属性与产品维修性水平之间的映射关系,诸如基于模糊综合评判^[7]、多目标决策^[8-9]、恒定矩阵值^[10]等方法的维修性模型都可归入此类模型。第一类模型通常只能评判系统维修时间能否满足规定要求,没有考虑具体的维修作业,也无法分析维修人员、工具、备件等资源需求;第二类模型主要用于支持维修过程虚拟仿真的实现,Petri 网能直观易懂地描述图形,且具有灵活强大的系统分析能力;第三类模型从本质上说是一类定性的维修性设计或评估方法,也无法对产品的维修性做出定量评价。近年来一些学者对 Petri 网技术在维修作业建模中的应用开展了大量研究^[4,11-13],提出了基于 Petri 网的维修作业建模和分析方法^[14],但 these 方法通常仅考虑了作业时间、作业序列以及维修保障资源等要求,对维修过程中人的因素研究较少,随着维修作业复杂程度的提高,对维修人员的要求也越来越高,这就给作业模型提出了人机工效分析的要求。

为了在维修作业分析中引入人机工效分析,本文提出了一种基于着色 Petri 网 (Colored Petri nets, CPN) 的维修作业建模方法,用 CPN Tools

(基于 CPN 的仿真软件)建立维修作业过程模型,并在模型中实现对维修人员工作时间和工作负荷的分析与评价。

1 CPN 的建模原理

Petri 网的基本元素是“库所 (place)”和“变迁 (transition)”,两者用有向弧连接。“库所”描述系统的状态或条件,在 Petri 图中用圆圈表示;“变迁”描述状态的变化或事件,在 Petri 图中用矩形表示;“托肯 (token)”描述系统的资源,在 Petri 图中用小黑点表示。Petri 网就是通过这些元素形成的网系统来描述维修作业过程,并模拟过程的运行。着色 Petri 网使用类似“数据结构”的颜色托肯集代替一般 Petri 网的单值托肯,将网系统中的托肯集进行分类或解析,描述维修作业所需的各类资源;用“库所”描述维修作业的状态和维修活动的前提条件;用“变迁”描述维修活动^[15-16]。

Petri 网的逻辑关系主要包括:与分叉 (AND-split) 结构、与合并 (AND-join) 结构、或分叉 (OR-split) 结构和或合并 (OR-join) 结构 (见图 1)。通过 4 个基本结构图间的结合描述活动间的逻辑关系。例如,与分叉 (AND-split) 连接与合并 (AND-join) 表示作业中的并行活动关系,或分叉 (OR-split) 连接或合并 (OR-join) 表示作业中活动的选择执行关系。其中,或分叉 (OR-split) 连接与合并 (AND-join) 可能产生死锁,而与分叉 (AND-split) 连接或合并 (OR-join) 则会使系统缺乏同步机制,在建模设计中必须考虑这些因素。

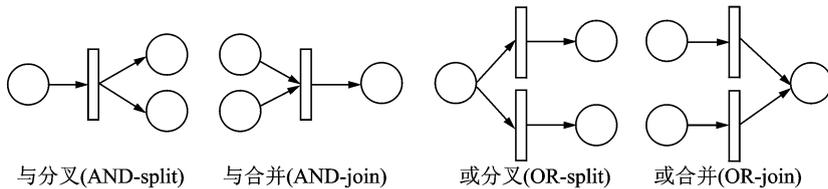


图 1 基本 Petri 网结构图

Fig. 1 Configuration diagram of basic Petri net

2 维修作业 CPN 建模方法

2.1 维修作业系统描述

维修作业系统是设备维修所需的工具、备件、人员、技术资料等保障资源、维修策略和维修过程规划等要素综合构成的总体^[14]。根据系统分析内容的不同,构成系统的要素可能有所不同,需建立不同的系统模型。一般包括如下两种类型:维修流程模型和维修过程模型。维修流程模型描述从设

备使用中发现故障,进行故障分析和制定维修策略,到申请和等待备件、设备维修(更换故障零件),最后到维修完毕重新投入使用的整个设备维修任务流程,模型实际上是一种 workflow 模型,通常用于业务流程管理。维修过程模型描述对故障设备的具体维修操作过程,是维修流程中设备维修任务的细化,主要研究设备拆卸或装配过程中各个部件的拆装状态、维修人员的具体拆装操作活动以及这些活动工序的安排等问题,模型用于维修过程分析,

通常是对维修保障资源、维修作业时间和维修活动工序合理性进行分析。这里主要研究维修作业过程的建模方法。同时,维修作业包括拆卸过程和装配过程,本文以维修拆卸过程为例进行研究,其方法完全适用于维修装配过程。

为了在维修作业过程中分析计算维修人员的工作负荷和工作时间,需要明确设备维修的操作过程、操作的工作量以及操作工序等,将维修人员每一步操作的工作负荷和工作时间相累加,得出维修人员在整个维修过程中的总工作负荷和总工作时间。

2.2 CPN 的基本元素建模

(1) 托肯集

定义 3 类独立的托肯集,描述维修作业信息。

工具托肯(Tools),代表维修活动需要的工具,属性{id, no}。“id”描述工具名称,“no”表示该工具数量,如[“pliers”, 1],[“spanner”, 3]。

人员托肯(Staff),代表执行维修活动的人员,属性为{name, workload, worktime}。其中“name”描述人员的名字或代号,“workload”记录人员当前的工作量,“worktime”记录人员参与拆卸活动的总工作时间,如[“Jack”, 0, 0],[“Tom”, 20, 100]。

状态托肯(E),表示维修过程中设备各个部件是否处于某种状态。状态托肯不含属性,是一般 Petri 网的单值托肯,状态库所中存在状态托肯表示部件处于当前库所代表的状态,不存在状态托肯则表示部件不处于此状态。状态托肯是描述系统状态的重要元素。

(2) 库所

包含资源库所与状态库所两种。

资源库所,分别存放工具托肯、人员托肯,作为触发活动变迁的前提条件之一,表示执行维修活动所需要的保障资源。

状态库所,描述维修作业系统的状态。对于设备拆卸作业,系统状态由设备各个部件的状态组成,拆卸过程实际上就是系统状态的变化过程,即如下两个状态的转变:待拆卸状态 $P_i(P_{ij})$ 和拆卸完毕状态 $D_i(D_{ij})$, P_{ij} 和 D_{ij} 分别表示可并发操作部件的待拆卸状态和拆卸完毕状态。

(3) 变迁

维修活动是维修人员的维修操作过程,通常用变迁表示,引起系统状态的改变。对于设备拆卸作业,变迁表示设备部件的拆卸操作,部件的整个拆卸活动在 Petri 网图中表现为触发变迁,状态托肯

转移,部件状态由待拆卸转变为拆卸完毕。

2.3 维修作业建模过程

2.3.1 建模方式

对于不同的作业信息条件和作业分析要求,有以“维修状态”为中心和以“维修活动”为中心两种建模方式^[17]。针对设备拆装作业过程人机工效分析的要求,将维修人员作为维修活动中的资源考虑,采用以“维修活动”为中心的建模方式,用变迁描述拆卸作业的所有活动,用库所表示使活动可进行的保障资源和紧前工序等前提条件。

2.3.2 建模步骤

(1) 确定设备拆卸的所有活动

以“维修活动”为中心建模,首先根据产品拆卸过程,给出拆卸作业所涉及的所有活动,如“拆卸螺钉”“拆卸开口销”等,用变迁表示这些活动。

(2) 确定活动所需资源和前提条件

针对每个具体的活动分析其所需要的工具类型、数量和人员数量等资源,对于不属于拆卸起点的部件,其拆卸活动需要紧前工序的完工为前提条件,相应地在 Petri 网图上用变迁的前置库所表示。

拆卸作业开始时,所有需要拆卸的部件都处于待拆卸状态,即每个部件的 $P_i(P_{ij})$ 库所都包含状态托肯,此时,无紧前工序的待拆卸部件作为拆卸作业的起点,只要满足工具、人员等保障资源,即可进行拆卸活动。部件拆卸后进入拆卸完毕状态,作为操作下一个待拆卸部件的紧前工序。特别地,当目标部件进入拆卸完毕状态则表示拆卸任务完成。

(3) 分析活动间的关系,建立 Petri 网图

设备拆卸活动间的关系有顺序和并发两种。如部件拆卸活动与其紧前工序的拆卸活动之间属于顺序关系,只有前一活动完成才能进入下一活动,如“拆卸开口销”与“拆卸螺帽”之间的关系。当多个部件均处于待拆卸状态,且保障资源和前提条件均满足的情况下,部件的拆卸活动属于并发关系,如位于同一部件的多个螺钉的拆卸活动。能并发执行的多个活动在作业空间允许的前提下,可由多个人员同时进行。

2.4 建模案例

以 A320 飞机前起落架轮胎拆卸作业为例,采用 CPN Tools 软件进行维修作业建模和仿真模拟,详细说明维修作业建模及维修工效分析的具体方法和步骤。

模型主要关注人员工作时间和工作负荷的计算,为了方便建模,这里假设轮胎拆卸作业中使用的工具、备件等资源均满足要求,仅把人员作为作

业保障资源考虑。

根据 A320 飞机前起落架维修要求,参考轮胎产品结构图(见图 2),按轮胎拆卸步骤确定作业活动,为每个活动建立变迁如下:

(1)拆卸螺钉(7)和垫圈(8)(各 3 个):SW1, SW2, SW3;

(2)拆卸毂盖(6):HC;

(3)拆除开口销(4)(各 2 个):CP1, CP2;

(4)拆卸螺帽(3)、垫圈(2)和螺栓(5)(各 2 个):NWB1, NWB2;

(5)拆卸套筒(9):CAS;

(6)拆卸轮轴螺帽(10):AXN;

(7)拆卸轮子:TIRE(完成)。

其中,第(1, 3, 4)步存在并发活动。

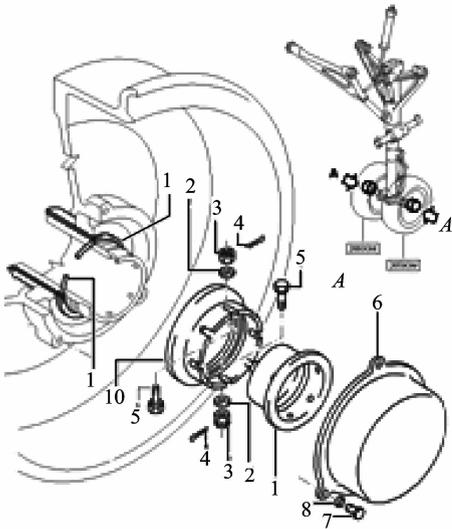


图 2 轮胎产品结构图

Fig. 2 Structure diagram of landing gear tire

相应地,为每一个拆卸步骤建立待拆卸状态 $P_i(P_{ij})$ 和拆卸完毕状态 $D_i(D_{ij})$ 两类状态库所,最后一步拆卸活动完成后进入结束状态(END)。建立人员资源库所(Staff),根据维修要求,拆卸轮子的步骤需要两个人同时进行。因此,作业初始时在 Staff 库所中放置两个人员托肯,即{"Tom", 0, 0}和{"Jack", 0, 0}。

通过基本 Petri 网结构图间的结合描述活动间顺序和并发关系,建立轮胎拆卸作业的 CPN 模型,如图 3 所示。图中,Staff 表示人员库所(含 2 托肯);P11, P12, P13 表示 3 个螺钉及其垫圈待拆卸状态;D1 表示螺钉及其垫圈拆卸完毕状态;P2 表示毂盖待拆卸状态;D2 表示毂盖拆卸完毕状态;P31 和 P32 表示两个开口销待拆除状态;D31 和 D32 表示开口销拆除完毕状态;P41 和 P42 表示 3

个螺帽及其垫圈和螺栓待拆卸状态;D4 表示螺帽及其垫圈和螺栓拆卸完毕状态;P5 表示套筒待拆卸状态;D5 表示套筒拆卸完毕状态;P6 表示轮轴螺帽待拆卸状态;D6 表示轮轴螺帽拆卸完毕状态;P7 表示轮子待拆卸状态;END 表示目标部件轮子拆卸完毕,拆卸作业结束状态。

初始状态, P 库所中均含有状态 token(e), D 库所为空(即所有部件处于未拆卸状态), SW1, SW2, SW3 三个变迁处于可触发状态(表明该拆卸操作可直接执行,作为拆卸作业的开始);执行触发操作,模型将随机触发任一可执行变迁(如 SW1);SW1 触发时消耗 P11 的状态 token(e)和 Staff 的任一人员 token(s),经过一定延时(@+delay),产生 D1 的状态 token(e)和 Staff 的人员 token(t),至此,完成一次变迁触发操作(即 SW1 所代表的部件拆卸完毕)。待 SW2 和 SW3 均执行完毕, D1 中含有 3 个状态 token(e)(表明可并发操作的 3 个部件拆卸完毕),满足变迁 HC 的触发条件(即可执行拆卸毂盖的操作),由此依次触发可执行变迁,直到进入 END 状态(表明机轮拆卸作业完成)。模型实现了对机轮拆卸作业过程的模拟,有效地描述了拆卸操作过程中维修人员及机轮各部件的状态变化。

由于 Petri 网变迁触发具有唯一性和瞬时性,在进行作业仿真时,处于并发关系的多个活动可能只有一个人顺序执行,而此时资源库所尚有多余的空闲人员。为了解决这个问题,在 Petri 网中引入延时概念,并发活动中某一活动执行时,选中的人员托肯并不瞬时改变状态返回资源库所,而是被变迁占用一定延时,在另一活动执行时选择资源库所中的空闲人员,可以确保不会选中相同的人员而导致缺乏并发机制。

3 模型仿真与人机工效分析

在实际维修作业过程中,维修人员在执行维修操作前后通常处于不同的状态,因此,在 CPN 模型中把人员作为可消耗的资源,在执行活动即触发变迁时,消耗所需的人员 token,产生新的人员 token,使新产生的人员 token 具有与消耗的人员 token 相同的名字,但工作负荷和工作时间两个属性被赋予新值,从而描述了实际作业过程中相同的人员在活动执行前后不同的生理状态。由图 3 的机轮拆卸作业 CPN 模型,采用 Petri-PERT 建模方法,可得轮胎拆卸作业 PERT 模型,如图 4 所示。

与图 3 中的 CPN 模型相对应,图 4 中每个节

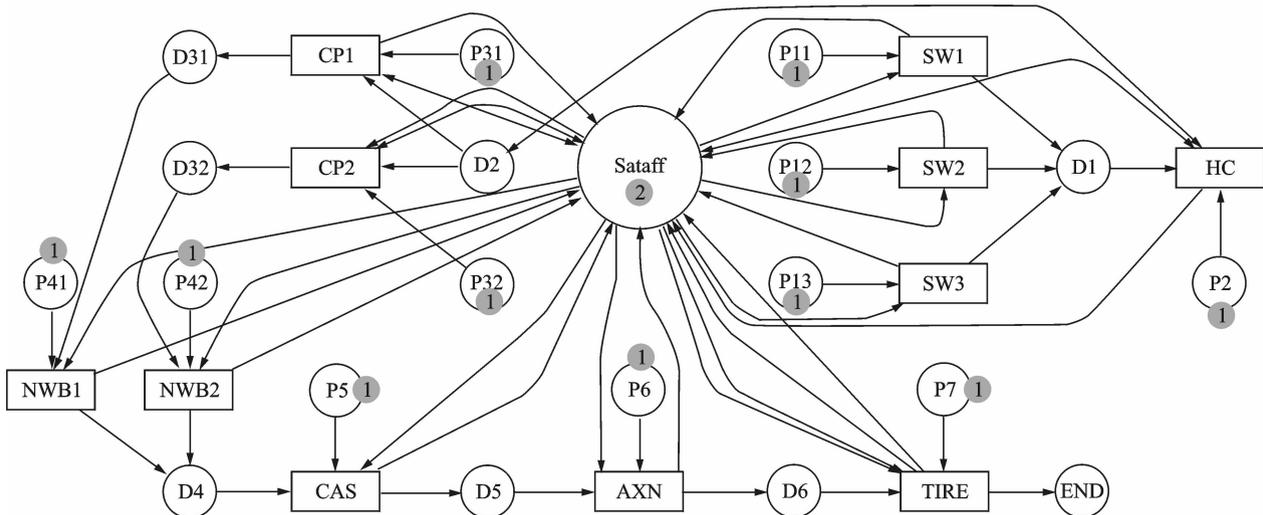
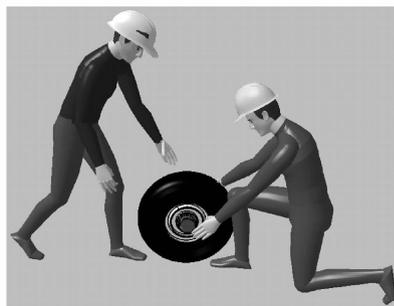


图 3 轮胎拆卸作业 CPN 模型

Fig. 3 CPN model of landing gear tire disassembly work

点代表一个维修操作(在图中相应标出),如拆卸螺钉垫圈(SW)、拆除开口销(CP)、拆卸套筒(CAS)等。在建立 PERT 图模型时,采用了层次化建模的方法,将 CPN 模型中表示并行操作的结构图用一个复合节点表示,进而在复合节点的子节点中描述这种并行操作的关系。采用数字样机特征行为仿真以及人体模型运动仿真方法,为每个维修操作节点建立其仿真运动过程,如机轮各部件拆卸特征行为、人员行走、姿势改变、拿起和放置行为等,包含在维修操作节点中。开始机轮拆卸操作前,维修人员需要行走至拆卸部位附近并调整作业姿势。拆卸机轮操作时的仿真状态如图 5 所示,拆卸的主要部件如图 6 所示。



(a) 开始机轮拆卸



(b) 机轮拆卸完毕

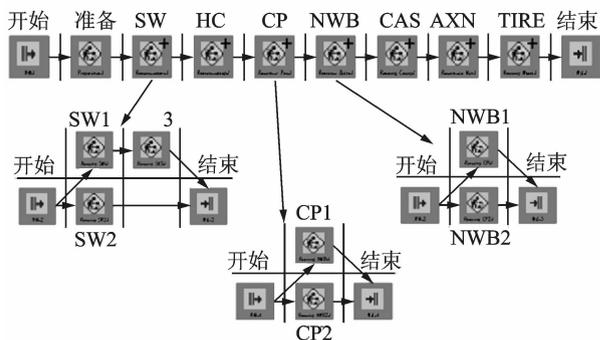


图 4 轮胎拆卸作业 PERT 模型

Fig. 4 PERT model of landing gear tire disassembly work

在建立的虚拟维修仿真模型的基础上,研究虚拟维修人员的人机工效分析。为了对作业中的人员工作负荷和工作时间进行定量计算,需要分析建

模过程中相关的所有拆卸活动,明确执行这些活动所需要的工作量和工作时间,在模型中把维修人员作为可消耗的资源看待,活动执行即变迁触发时,消耗所需的人员托肯,产生新的人员托肯,新产生的人员托肯具有与消耗的人员托肯相同的名字,但工作负荷和工作时间两个属性被赋予新值,描述实

图 5 拆卸机轮操作仿真状态
Fig. 5 Simulation state removing wheel when in operation

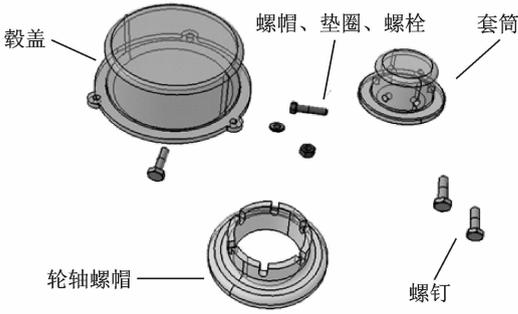


图6 主要拆卸部件图

Fig. 6 Main components of disassembly

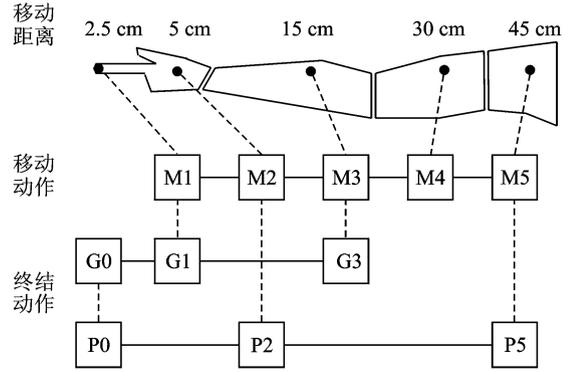


图7 上肢动作示意图

Fig. 7 Schematic diagram of upper limb movements

际作业过程中相同的人员在拆卸活动执行前后不同的生理状态。在 CPN Tools 建模中,利用每个变迁的代码实现维修人员工作负荷和工作时间的定量计算,代码的关键部分如下

$$\# \text{ name } t = \# \text{ name } s; \quad (1)$$

$$\# \text{ workload } t = \# \text{ workload } s + wli; \quad (2)$$

$$\# \text{ worktime } t = \# \text{ worktime } s + wti; \quad (3)$$

式中: s 和 t 分别为消耗和产生的人员托肯变量; $\# \text{ name}$, $\# \text{ workload}$ 和 $\# \text{ worktime}$ 分别为 s 和 t 的属性; wli 和 wti 分别为第 i 步拆卸活动所需要的工作量和工作时间,式(1)使 t 赋予 s 的名字代表相同的操作人员,式(2,3)分别将 s 的工作负荷和工作时间属性值加上 wli 和 wti 。

基于建立的维修作业模型及其维修操作,采用 MODAPTS 法^[17] 计算每一步操作所需的时间值(MOD),把身体各部位动作分为 21 个,每个动作以代号、图解、符号、时间值表示。以上肢动作为主,说明 MODAPTS 的动作分析方法,图 7 给出了上肢动作示意图,图中, $M1$ 表示手指动作, $M2$ 表示手腕动作, $M3$ 表示小臂动作, $M4$ 表示大臂动作, $M5$ 表示大臂尽量伸直的动作, $G0$, $G1$ 和 $G3$ 分别表示触及动作、简单抓握和复杂抓握, $P0$, $P2$ 和 $P5$ 分别表示无意识放置、略需注意力配合和精确配合。DELMIA 软件中的 Human Task Simulation 模块可以进行人体运动的仿真,结合 MODAPTS 方法可以确定 PERT 图(图 4)中每个节点所描述的作业活动时间值。

采用 Grag 等^[18] 人体动作代谢能耗预测模型获得每个操作的能耗值(E_T),该模型采用基于动作分解的方法,将维修操作分解为基本的维修动素,通过维修动素的能量消耗累加得到执行维修作业的总能耗。

$$E_T = \sum_{i=1}^n E_i + E_{\text{std}} + E_{\text{sit}} + E_{\text{bet}} \quad (4)$$

式中: E_T 为作业的总能耗; E_i 为单个基本动作的能耗($i=1,2,\dots,n$, n 为基本动作数量); E_{std} 为站姿能耗; E_{sit} 为坐姿能耗; E_{bet} 为屈身能耗。采用上述两种方法计算拆卸活动的工作量和工作时间,见表 1,表中 SW_i 表示拆卸螺钉和垫圈, HC 表示拆卸毂盖, CP_i 表示拆卸开口销, NWB_i 表示拆卸螺帽、垫圈和螺栓, CAS 表示拆卸套筒, AXN 表示拆卸轮轴螺帽, $TIRE$ 表示拆卸机轮。

表 1 各拆卸活动的工作量和工作时间

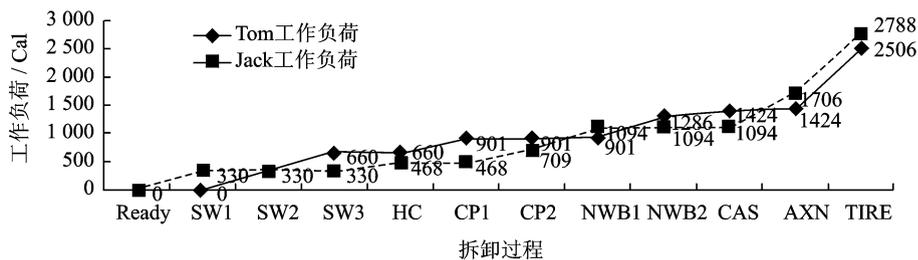
Tab. 1 Workload and work time of each disassembly activity

拆卸活动	SW_i	HC	CP_i	NWB_i	CAS	AXN	$TIRE$
工作量/Cal	330	138	241	385	138	612	1 082
工作时间/ MOD	57	27	42	61	27	73	97

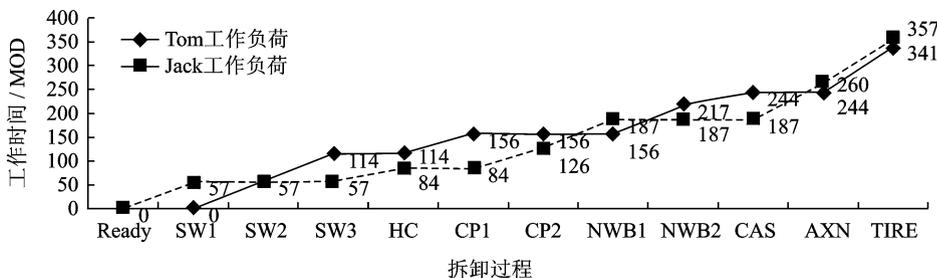
注:MOD 为模特法的基本时间单位(1MOD = 0.129 s)。

利用 CPN Tools 软件进行仿真分析,每触发一个可执行变迁相应记录下触发前后库中所托肯数量及托肯属性的变化,图 8 记录了维修人员工作负荷和工作时间随拆卸作业过程进行的变化曲线,其中横坐标表示拆卸飞机前起落架轮胎的主要步骤,图 8(a)的纵坐标表示工作负荷,图 8(b)的纵坐标表示工作时间。

由图 8 可知,随着拆卸过程的进行,两个维修人员的工作负荷基本随工作时间增加而增长,没有出现人员短时间内工作负荷增长过快的现象;同时,两个维修人员的工作负荷和工作时间基本同步增长,没有出现人员间作业差别过大的现象,表明在两个维修人员参与作业的情况下,轮胎拆卸作业可以顺利完成。此外,模型充分考虑了并发机制,在多人参与的并发活动中能够实现资源的合理分配。



(a) 工作负荷



(b) 工作时间随拆卸作业过程变化曲线

图 8 维修人员工作负荷和工作时间随拆卸作业过程变化曲线

Fig. 8 Workload and work time changing with disassembly process for maintenance staff

4 结束语

基于着色 Petri 网,提出了维修作业过程的建模方法,采用 CPN Tools 平台,进行维修作业建模与仿真,实现了作业序列的控制以及维修人员工作负荷和工作时间的定量计算,并通过实例验证了模型和方法的有效性与可行性。该方法引入了传统维修作业模型中没有涉及的人机工效因素,能够有效评价维修人员的作业舒适性。今后的工作是进一步研究如何在模型中引入人体疲劳、舒适性等因素的分析。

参考文献:

[1] U. S. Department of Defense. MIL-STD-470B maintainability program requirements for systems and equipment [S]. Ohio: Aeronautical System Center, 1989.

[2] U. S. Department of Defense. MIL-HDBK-472 maintainability prediction[S]. Ohio: Aeronautical System Center, 1966.

[3] Cai Jing, Zuo Hongfu, Zhu Lei. Delay-time model based on imperfect inspection of aircraft structure within finite time span [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 29(2):159-163.

[4] 刘坚,于德介,李蓉,等. 基于广义随机 Petri 网的维护系统仿真与应用[J]. 机械工程学报,2005,41(10):

164-169.

Liu Jian, Yu Dejie, Li Rong, et al. Research on general stochastic Petri net based maintenance system simulation and optimization [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(10):164-169.

[5] Masscaro S. Hand-in-glove human-machine interface and interactive control: Task process modeling using dual Petri nets[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York:IEEE, 1998:1289-1295.

[6] Cai Jing, Zuo Hongfu, Lu Defeng. Availability simulation of multi-component system based on opportunistic maintenance policy [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 26(3):219-223.

[7] Lu Zhong, Sun Youchao. Research on maintainability evaluation model based on fuzzy theory[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(5):402-407.

[8] Chen Lu, Cai Jianguo. Using vector projection method to evaluate maintainability of mechanical system in design review [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003(81):147-154.

[9] Tjiparuro Z, Thompson G A. Review of maintainability design principles and their application to conceptual design[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part E-Journal of Process Mechanical Engineering, 2004, 218(2):103-113.

[10] Wani M F, Gandhi O P. Development of maintain-

- ability index for mechanical systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1999, 65(3): 259-270.
- [11] 陆中, 孙有朝, 吴海桥. 基于着色随机时间 Petri 网的维修性建模方法 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(10): 185-191.
Lu Zhong, Sun Youchao, Wu Haiqiao. System maintainability modeling method based on colored stochastic time Petri net [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(10): 185-191.
- [12] 马麟, 吕川. Petri 网在维修工作分析中的应用研究 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(3): 249-253.
Ma Lin, Lv Chuan. Research on the application of Petri net to MTA [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(3): 249-253.
- [13] 蒋双双, 刘鹏远, 张锡恩. 一种基于 Petri 网的虚拟维修过程建模方法 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(11): 2488-2491.
Jiang Shuangshuang, Liu Pengyuan, Zhang Xien. Method of process-modeling in virtual maintenance based on Petri net [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11): 2488-2491.
- [14] 徐宗昌, 朴允华, 刘义乐. 基于 Petri 网的维修保障系统建设方案研究 [J]. *系统工程理论与实践*. 2004(8): 141-144.
Xu Zongchang, Piao Yunhua, Liu Yile. Research on a Petri-net-based method to establish the maintenance support system [J]. *System Engineering Theory & Practice*, 2004(8): 141-144.
- [15] 吴哲辉. Petri 网导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 181-188.
Wu Zhehui. Introduction of Petri net [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 181-188.
- [16] Meta Software Corporation. CPN tools versin 2. 2. 0 [M]. Cambridge MA, USA: University of Aarhus, 2006.
- [17] International MODAPTS Association, Inc. Modular arrangement of predetermined time standard [S]. Kalamazoo: International MODAPTS Association, Inc, 2007.
- [18] Garg A, Chaffin D B, Herrin G D. Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs [J]. *American Industrial Hygiene Association (S0002-8894)*, 1978, 39(8): 661-674.