航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Feb. 15 2018 Vol. 29 No.02 61-66

# 面向多层次赋时 Petri 网的维修动作要素时间度量方法研究

周岩 *，李硕，周扬，曾照洋

中国航空综合技术研究所 质量工程技术中心，北京 100028

**摘　要**：针对装备研制阶段维修时间度量缺乏有效方法的问题，探讨了一种基于虚拟维修模型的维修动作要素（简称动素）时间度量方法，为后续深入开展基于多层次赋时 Petri 网（HTPN）的维修时间度量奠定基础。首先，在虚拟维修仿真的基础上，按照维修事件分层设计的方法，提出了“维修事件－维修活动－维修动素”的维修过程层次化分解结构。针对底层维修动素时间度量问题，提出了基于改进模特法的维修动素时间度量方法。然后，将维修动素流程数据映射至 Petri 网，构建了基于 HTPN 的维修过程模型。最后，通过实例对上述方法进行了应用分析。

**关键词**：维修动作要素；时间度量；Petri 网；维修过程

**中图分类号**：V219　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.02.061

随着计算机软硬件技术、信息技术、虚拟现实技术的不断发展与成熟，数字样机逐渐取代用于工程分析的实物模型或全尺寸样机，产品维修性数字化设计已经成为趋势。采用基于数字样机的虚拟维修技术，可以克服物理样机制造周期长、成本高、难以修改更新的不足，及时暴露产品维修性设计中存在的问题，实现维修性设计水平的有效提升。但基于数字样机的虚拟维修模型更多是从定性的角度去分析产品维修性是否满足要求，不便于直接度量产品维修性水平的优劣程度，因此，还需要结合维修性数学模型对产品的维修性水平进行定量描述[1,2]。

维修性数学模型尤其是以 Petri 网为代表的数字仿真技术的不断发展，为实现基于虚拟现实技术的复杂产品维修性定量分析提供了有力的技术支撑。其中，多层次赋时 Petri 网（HTPN）由于能以图形化方式形象、深刻地描述离散事件动态系统的维修过程，开始被广泛应用到复杂系统的维修性研究领域[3~5]。但传统基于 HTPN 的维修时间度量方法通常只将维修过程分解至维修活动层，各维修活动的时间度量是通过直接观察和测定来确定，实施过程要求具备现实的动作操作对象实体和操作环境。而这种时间度量方法通常在研制阶段后期基于物理样机开展，度量时机较为滞后。因此，在装备研制阶段，需要借助虚拟维修建模与仿真的手段，进一步将维修过程分解至维修动作要素（简称动素）层，以尽早实现对维修过程的准确描述与时间度量[6]。

## 1 基于 HTPN 的复杂维修过程建模

### 1.1 维修过程层次化分解

传统的维修工作分解通常只分解到维修活动层，这种维修活动描述过于概括，划分比较粗糙，在虚拟维修仿真中无法准确地描述。因此，在装备研制阶段需要借助虚拟维修建模与仿真的手段，进一步将维修工作分解至维修动素层，以尽早实现对维修过程的准确描述与时间度量[7]。为此，本文按照维修事件分层设计的方法，提出了“维修事件－维修活动－维修动素”的维修过程层次化分解结构，如图 1 所示。

基于上述层次化分解方法，可以将复杂维修事件层层分解为各类简单的维修动素。维修动素作为具有最基本维修语义的动作单位，其分解“粒度”便于理解、描述和时间度量。

收稿日期：2017-10-16；　退修日期：2017-10-31；　录用日期：2018-01-06

* 通信作者 . Tel.：15011580850　E-mail：zhouyan_buaa@163.com

*引用格式：Zhou Yan, Li Shuo, Zhou Yang, et al. Research on the method of HTPN-oriented maintenance therblig time measurement [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (02): 61-66. 周岩，李硕，周扬，等．面向多层次赋时 Petri 网的维修动作要素时间度量方法研究 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (02): 61-66.*

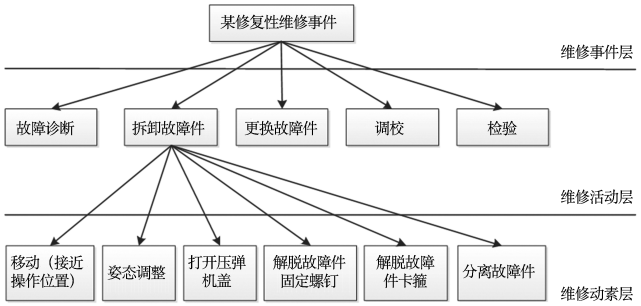


图 1 维修过程层次化分解

Fig.1 Maintenance process hierarchical decomposition

### 1.2 基于 HTPN 的多层次维修作业表示方法

维修作业是引起维修过程模型状态改变的基本原因，基于 HTPN 的维修过程模型用变迁表示维修作业，变迁的实施时间表示维修作业时间。依据维修作业的不同粒度，将表示维修作业的变迁分为基本变迁与复合变迁两类，并利用复合变迁与基本变迁分层次建立相应的维修过程模型，如图 2 所示。

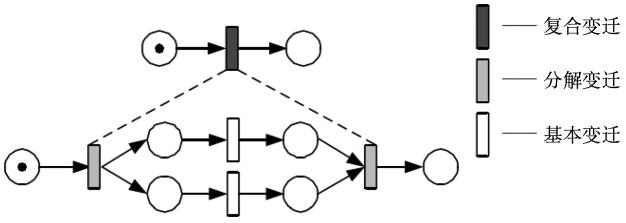


图 2 多层次 Petri 网模型

Fig.2 Hierarchy Petri net model

多层次维修作业表示方法为：在顶层维修过程模型中，用复合变迁表示复杂维修作业，然后自上而下地为每一层模型中的复合变迁建立子网模型，用子网模型代替父网中对应的复合变迁，直到所有复合变迁都被包含基本变迁的子网代替，最终建立由简单到详细的多层维修过程模型。将复杂维修过程进行分层次建模，可以有效地避免由于模型过度复杂而造成建模困难的问题。

## 2 基于改进模特法的维修动素时间度量

在底层维修动素的时间度量方面，模特法是目前最常用的一种方法。但传统模特法度量的是维修人员在理想操作条件下完成某一个维修动素的时间，而在某些不利的维修场景条件下，维修人员显然需要更多的时间来完成维修动素。为此，本文提出一种基于改进模特法的维修动素时间度量方法，借助虚拟维修仿真对不利的维修场景进行可视化展示，分析其对维修动素时间的影响，并提出相应的维修动素时间补偿方法，从而得到更加准确的维修动素时间。

### 2.1 维修场景影响因素分析

影响维修动素时间的维修场景主要有视野条件、操作空间和工作姿态，针对不同的维修动素，这些维修场景及其不同等级对维修动素时间有着不同程度的影响系数。

（1）视野条件

在视野条件不佳的情况，维修人员在操作过程中很大程度上是凭借触觉和经验，需要花费更多的时间来寻找定位、调整操作等，造成维修时间增长。在虚拟维修仿真中，采用视锥法对视野条件等级进行判断，如图 3 所示。视野条件评价准则见表 1。

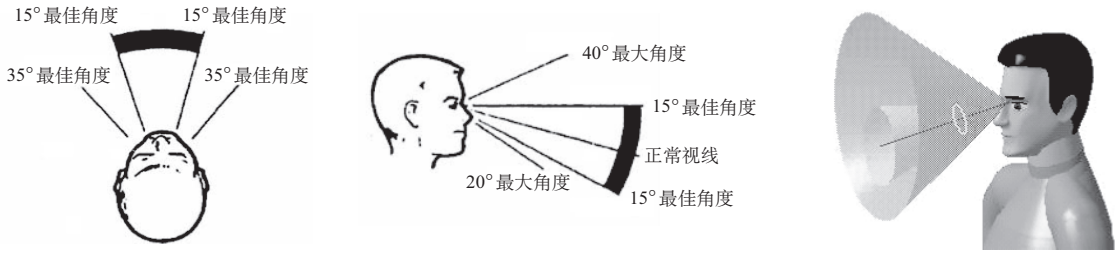


图 3 人体视锥

Fig.3 Human cone

表 1 视野条件评价准则

Table 1 Vision condition evaluation criteria

| 视野条件等级 | 评价准则 |
|---|---|
| Ⅰ | 维修对象或维修部位始终处在最佳视野区域内，且没有遮挡物遮挡，视野条件良好 |
| Ⅱ | 维修对象或部位开始时处于最大视锥区域内，需要维修操作时部分被遮挡，视野条件一般 |
| Ⅲ | 维修对象或维修部位始终不在视锥范围内，需要依靠维修维修人员的触觉和经验进行维修操作，视野条件差 |

（2）操作空间

良好的操作空间是指手部或工具有足够的空间进行维修操作，与周围的设备无碰撞发生。在虚拟维修过程中，利用虚拟维修仿真中的碰撞检测功能，实时分析维修动素开展过程中的操作空间问题，如图 4 所示。操作空间评价准则见表 2。

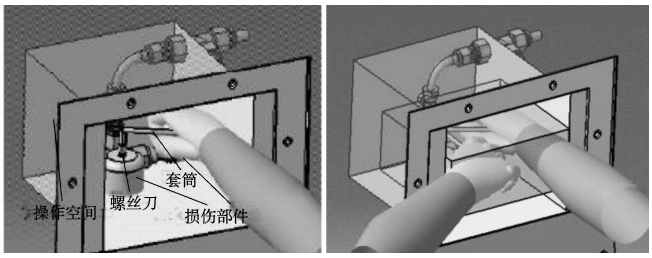


图 4　碰撞检测显示
Fig.4　Collision detection display

表 2　操作空间评价准则
Table 2　Operational space evaluation criteria

| 操作空间等级 | 评价准则 |
|---|---|
| Ⅰ | 操作过程中维修人员上肢周边实体模型基本没有干涉，操作空间充足 |
| Ⅱ | 维修人员经过一定的姿态调整后，上肢与周边实体模型会发生少量干涉，操作空间一般 |
| Ⅲ | 维修人员经过一定的姿态调整，手部和周围模型仍频繁出现干涉现象，操作空间状况狭小，维修操作困难 |

（3）工作姿态

工作姿态主要考虑的是维修过程中人体的舒适程度。如果维修人员在工作中身体处于不舒适的姿态，会容易造成身体疲劳，降低工作效率，延长工作时间。本文采用快速上肢分析（RULA）（如图 5 所示）来评价人员的舒适程度，工作姿态评价准则见表 3。

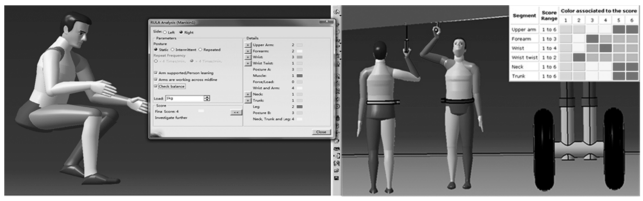

图 5　RULA 分析
Fig.5　RULA analysis

表 3　工作姿态评价准则
Table 3　Working gesture evaluation criteria

| 工作姿态舒适度等级 | 评价准则 | RULA 分值 |
|---|---|---|
| Ⅰ | 维修人员能舒适地完成维修动作 | 1~2 |
| Ⅱ | 维修人员舒适性一般，维修过程需要消耗较多体力 | 3~5 |
| Ⅲ | 维修人员舒适性很差，完成维修工作需要消耗大量体力，且存在肌肉或骨骼损伤的风险 | 6~7 |

### 2.2 维修动素时间补偿方法

维修动素时间补偿方法是利用虚拟维修仿真开展维修性分析评价确定维修场景的影响水平与等级，利用维修场景对维修动素时间的影响系数实现对维修动素时间的补偿。补偿方法用式（1）表示：

$$T = T' \times \left(1 + \sum_{i=0}^{n} A_i\right)$$

式中：$T'$ 为补偿前的维修动素时间（由模特法直接算得）；$n$ 为影响维修动素时间的维修场景、种类；$A_i$ 为维修场景对修动素时间的影响系数；$T$ 为补偿后的维修动素时间。

## 3 维修动素流程的 Petri 网映射模型

根据上述维修动素时间度量方法可知，用维修动素时间作为维修性建模的底层输入数据，具有客观可行性。因此，本文在维修动素时间度量方法研究的基础上，进一步结合 Petri 网的建模方法和原理，将维修动素流程数据映射至 Petri 网，从而构建基于 HTPN 的维修过程模型。

多层次赋时 Petri 网可以用六元组 $\sum=(S, T, F, W, H, TT)$ 表示，其中：

（1）$S=\{s_1, s_2, \ldots, s_p\}$ 是对象库所的集合；

（2）$T=T_M \cup T_F$ 为表示维修作业的变迁与辅助变迁的集合；

（3）$F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$ 定义了库所与变迁之间的有向弧；

（4）$W \rightarrow N^+$，其中 $N^+=\{1, 2, 3, \ldots\}$ 定义了弧集合上的权函数，缺省情况下为 1；

（5）$H=\{h_1, h_2, \ldots, h_x\}$ 为子层网的有限集合；

（6）$TT=\{tt_1, tt_2, \ldots, tt_q\}$ 为变迁实施时间的集合。

根据上述定义可知，基于 HTPN 的维修过程模型能够对维修状态与维修作业的相互关系、维修作业之间的逻辑关系进行描述，适用于复杂维修过程的建模与分析。

基于 HTPN 的维修过程模型采用子网的形式按维修事件层－维修活动层－维修动素层进行逐级细化，如图 6 所示。

在上述 HTPN 模型中通过定义各维修动素的维修时间，可以统计得出各维修活动以及维修事件的维修时间和维修资源需求，进而支持维修性的定量分析与评价。

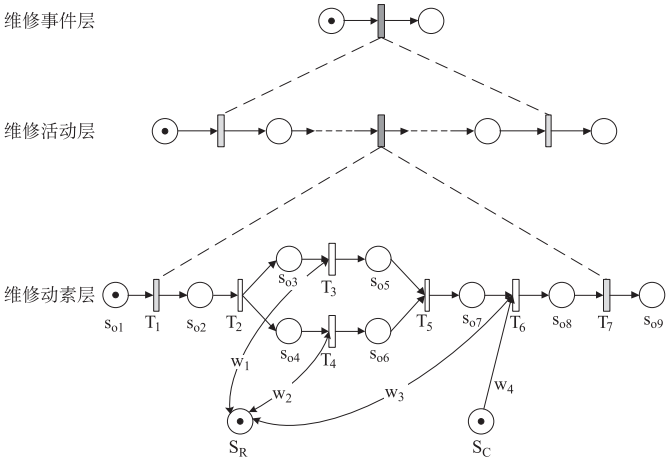


图 6 基于 HTPN 的维修过程模型

Fig.6 Maintenance process model based on HTPN

## 4 应用案例分析

以“拆卸启动器”为例，结合虚拟维修仿真开展维修工作分解和维修动素时间度量，构建基于 HTPN 的维修过程模型，以说明该方法的合理性和有效性。

### 4.1 维修过程分解

(1) 虚拟维修仿真

在 DELMIA 环境中对维修过程进行虚拟维修仿真，仿真示意图如图 7 所示。

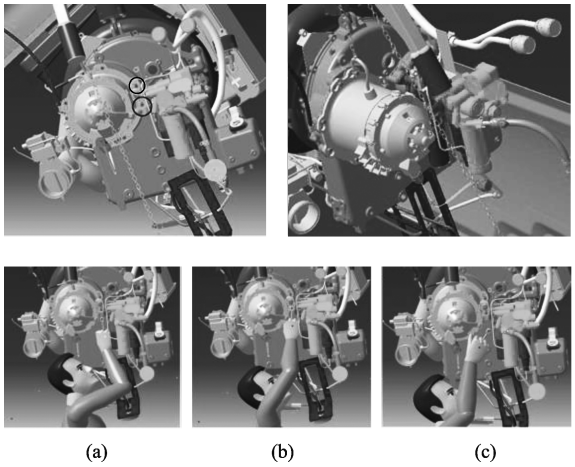


图 7 “拆卸 APU 启动器”维修过程仿真示意图

Fig.7 Maintenance process simulation of “disassemble the APU starter”

(2) 维修过程分解

按照维修工作层次化分解方法，将“拆卸启动器”这一维修活动分解至维修动素层级，维修过程分解示意图如图 8 所示。

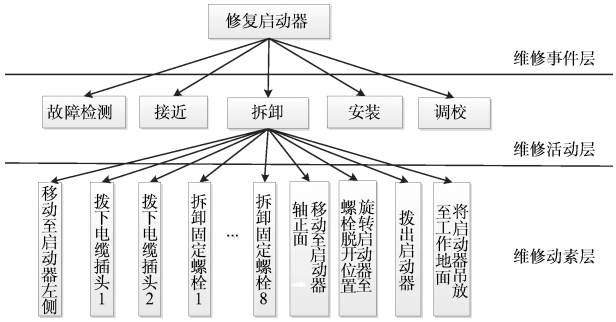


图 8 “修复启动器”维修过程分解示意图

Fig.8 “Repairing starter” repair process exploded illustration

### 4.2 维修动素时间度量

利用改进模特法对上述分解的各维修动素进行时间度量，确定维修场景对维修动素时间的影响系数，得到“拆卸启动器”所有包含的维修动素时间度量结果见表 4。

表 4 维修动素时间度量

Table 4 Maintenance therblig time measurement

| 维修动素 | 标准时间 /s | 补偿系数 | 正常时间 /s |
|---|---|---|---|
| 移动至启动器左侧 | 12.5 | — | 12.5 |
| 拔下电缆插头 1 | 1.032 | 0.45 | 1.496 |
| 拔下电缆插头 2 | 1.032 | 0.45 | 1.496 |
| 拆卸固定螺栓 1 | 24.381 | 0.51 | 36.815 |
| 拆卸固定螺栓 2 | 23.736 | 0.51 | 35.841 |
| 拆卸固定螺栓 3 | 23.736 | 0.51 | 35.841 |
| 拆卸固定螺栓 4 | 23.736 | 0.51 | 35.841 |
| 拆卸固定螺栓 5 | 23.736 | 1.58 | 61.239 |
| 拆卸固定螺栓 6 | 23.736 | 2.74 | 88.773 |
| 拆卸固定螺栓 7 | 23.736 | 2.00 | 71.208 |
| 拆卸固定螺栓 8 | 23.736 | 1.27 | 53.881 |
| 移动至启动器轴正面 | 3.4 | — | 3.4 |
| 旋转启动器至螺栓脱开 | 1.419 | 0.45 | 2.058 |
| 拔出启动器 | 1.806 | 0.45 | 2.619 |
| 将启动器吊放至地面 | 3.999 | 0 | 3.999 |

(3) 基于 HTPN 的维修过程建模

建立基于 HTPN 的维修过程模型如图 9 所示。

图 9 中，$T_2$、$T_5$、$T_6$、$T_{15}$ 为辅助变迁，无实际含义；$T_1$、$T_3$、$T_4$ 分别表示“移动至启动器左侧”“拔出电缆插头 1”“拔出电缆插头 2”；$T_7$~$T_{14}$ 分别表示八角螺栓 1~8 的拆卸；$T_{16}$、$T_{17}$、$T_{18}$、$T_{19}$ 分别表示“移动至启动器正面”“旋转启动器至螺栓脱开位置”“拔出启动器”“吊放启动器”。图中占用型资源库所 PA 与变迁相连接弧的权值 w1~w14 取值均为 $c_{r1}$，$w_{15}$ 取值为 $2c_{r1}+c_{r2}$。

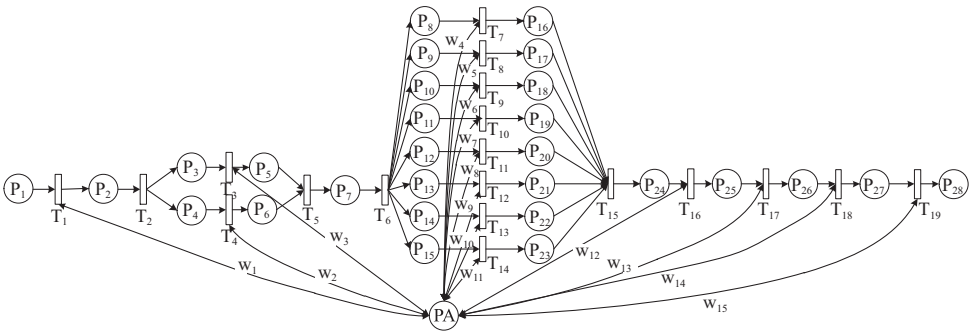


图 9　启动器拆卸过程的 Petri 网模型

Fig.9　Petri net model of starter disassembly process

## 5 结论

本文结合虚拟维修模型，将维修过程分解至维修动素层级，并提出了基于 HTPN 的多层次维修作业表示方法。针对底层维修动素时间度量问题，提出了基于改进模特法的维修动素时间度量方法，并构建了基于 HTPN 的维修过程模型。该研究成果可以为研制阶段开展基于虚拟维修模型和 HTPN 的维修时间度量提供有效支撑，为并行工程集成框架下的维修性设计分析提供技术依据，有效缩短装备的研制周期、降低装备的全寿命周期费用、提高装备维修性水平。

## 参考文献

[1] 于永利，朱小冬，郝建平，等 . 系统维修性建模理论与方法 [M]. 北京：国防工业出版社，2007.
Yu Yongli，Zhu Xiaodong，Hao Jianping，et al. System maintainability modeling theory and technology[M]. Beijing：National Defense Industry Press，2007.（in Chinese）

[2] 王小强，王金利，冯恒 . 基于 DELMIA 的虚拟维修过程建模及应用 [J]. 航空科学技术，2014，25（12）：73–76.
Wang Xiaoqiang，Wang Jinli，Feng Heng. DELMIA-based modeling and application of virtual maintenance process[J]. Aeronautical Science & Technology，2014，25（12）：73–76.（in Chinese）

[3] 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. Research on general stochastic Petri net based maintenance system simulation and optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2005，41（10）：164–169.（in Chinese）

[4] 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]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2011，47（10）：185–191.（in Chinese）

[5] 刘勇，徐廷学，孙臣良，等 . 基于拆卸及扩展广义随机 Petri 网的维修性仿真 [J]. 海军航空工程学院学报，2013（5）：555–561.
Liu Yong，Xu Tingxue，Sun Chenliang，et al. Maintainability simulation based on disassembly and extended generalized stochastic Petri nets[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University，2013（5）：555–561.（in Chinese）

[6] 张中波 . 基于 Petri 网的虚拟维修动作流程层次化建模研究 [J]. 制造业自动化，2012，34（3）：57–59.
Zhang Zhongbo. Research on hierarchical model of virtual maintenance action process based on Petri net[J]. Manufacturing Automation，2012，34（5）：57–59.（in Chinese）

[7] 李星新，郝建平，柳辉 . 虚拟维修仿真中维修动素的设计与实现 [J]. 中国机械工程，2005，16（2）：156–160.
Li Xingxin，Hao Jianping，Liu Hui. Design and realization of maintenance therblig model in virtual maintenance simulation [J]. China Mechanical Engineering，2005，16（2）：156–160.（in Chinese）

（责任编辑　朱赫）

## 作者简介

周岩（1988－ ）男，硕士，工程师。主要研究方向：维修性、维修保障。

Tel：15011580850　　E-mail：zhouyan_buaa@163.com

# Research on the Method of HTPN-oriented Maintenance Therblig Time Measurement

Zhou Yan*, Li Shuo, Zhou Yang, Zeng Zhaoyang

*Quality Engineering Center, China Aero-Polytechnology Establishment (CAPE), Beijing 100028, China*

**Abstract:** Aiming at the lack of effective method for the initial maintenance time measurement in the equipment development stage, a method of maintenance momentum measurement based on virtual maintenance model was discussed in order to lay foundation for the further development of the maintenance time based on Hierarchy Time Petri Net (HTPN). Firstly, on the basis of virtual maintenance simulation, according to the hierarchical design of maintenance events, a hierarchical decomposition structure of the maintenance process of "maintenance events–maintenance activities-maintenance initiatives" was proposed. And aiming at the problem of maintenance therblig time measurement at the bottom, a method of maintenance therblig time measurement based on improved model method was proposed. Then, the maintenance process data were mapped to the Petri net, and the maintenance process model based on HTPN was constructed. Finally, the application of the above method was analyzed.

**Key Words:** maintenance therblig; maintenance time; Petri net; maintenance process

**Received:** 2017-10-16; **Revised:** 2017-10-31; **Accepted:** 2018-01-06

***Corresponding author.Tel.:** 15011580850 **E-mail:** zhouyan_buaa@163.com