

文章编号: 1005-8451 (2013) 01-0033-05

基于Petri网技术的动车组检修作业 workflow 系统研究

郭 悦, 张惟皎, 王 辉

(中国铁道科学研究院 电子计算技术研究所, 北京 100081)

摘 要: 针对目前动车组检修业务, 抽象出作业过程规则, 并建立动车组检修作业 workflow。通过 workflow 和 Petri 网的相关理论对该 workflow 进行建模, 并利用 Petri 网技术分析方法, 从模型的正确性分析和性能评价两个方面对所建立的 Petri 网模型进行分析。

关键词: 动车组检修; Petri 网; workflow

中图分类号: U266.2 : TP39 **文献标识码:** A

Research on workflow of maintenance of EMUs based on Petri-net

GUO Yue, ZHANG Weijiao, WANG Hui

(Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Facing with the current inspection and maintenance of EMUs, this paper abstracted the rules of working process, established the workflow. Based on workflow and Petri-net technology, the paper established the model of this workflow, analyzed the established Petri-net model from the two aspects of correctness and functions by using the method of workflow Petri-net technology.

Key words: maintenance of EMUs; Petri-nets; workflow

动车组管理的主要特点体现在检修专业化、流程程序化和集约化管理。其中, 动车组的检修过程主要包括动车组本身的检修、车体内外部保洁、三电检测等多个方面, 涉及到客运、车辆、机务、铁通、电务等多个部门。本文分析动车组检修业务, 抽象出作业过程规则, 并建立动车组检修作业 workflow。通过一体化的作业流程管理, 实现动车组以可靠性为中心的检修, 进而保障动车组的安全运行。

1 动车组检修作业业务分析

1.1 动车组检修业务流程

动车运用所调度部门根据月计划与周计划安排动车组的检修日计划并下发, 运用所涉及作业的相关部门执行此计划。其中, 检修工长根据接收到的本班检修任务和检修人员情况进行任务派工, 并对检修人员的检修情况进行监控。检修人

员按照工长分配的任务, 在检修过程中完成作业过程的一系列相关工作, 包括供断电作业申请、有电作业、无电作业、联检作业、协同作业、检修记录回填、故障处理等。检修作业的业务流程如图 1 所示。

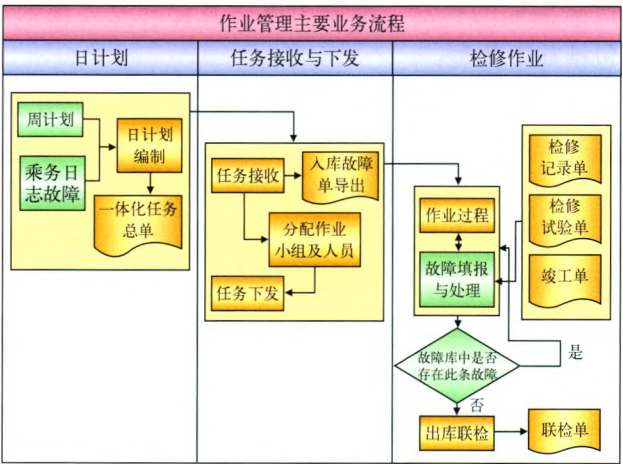


图1 动车组检修作业流程图

1.2 多专业一体化协同检修作业

动车组检修过程工艺繁多, 检修工序复杂, 设备种类多, 规格复杂, 技术含量高, 对检修质量、可靠性、安全性和时效性等方面都有很高的

收稿日期: 2012-11-12

基金项目: 铁道部科技研究开发计划 (2011J002)。

作者简介: 郭 悦, 助理研究员; 张惟皎, 副研究员。

要求。从管理上也需要通过信息化系统固化管理流程和作业方式,提供安全作业过程的可靠工作流程。在传统的开发信息系统的过程中,开发模式通常是业务流程编码到应用系统的整体结构中,各模块之间的关系也是固定的。在动车组检修过程中,各个运用所根据各自的管理要求,管理的主要目的和力度也不完全一致,因此检修流程也不完全一致,而系统对于每次业务流程的修改都可能引起程序结构的大幅变动。一旦用户业务流程需要调整,信息系统就要做很大的改变。

1.3 主要问题与引入工作流的必要性

通过以上讨论可以看出,检修作业过程复杂,且各个运用所不具有通用性,主要体现在以下几个方面:

- (1) 同一运用所相同车型检修流程复杂。
- (2) 同一运用所不同车型检修流程不一致。
- (3) 不同运用所相同车型检修流程不一致。
- (4) 不同运用所不同车型检修流程不一致。
- (5) 不同运用所相同角色拥有的操作权限不一致。

同时,检修过程涉及到人员众多,主要包括:隔离开关操作员、运用所调度员、地勤机械师、检修组长、质检员、外协人员(外保洁、内保洁、主机厂)等,并且各个角色拥有的操作权限不一致,不利于统一配置。

规则方面,经过调研并综合各地动车组运用检修流程的特点,抽取出灵活易变的业务规则,包括如下几类:

- (1) 依赖规则:作业流程各个节点之间存在相互依赖关系。
- (2) 互斥规则:作业流程节点的互斥关系。
- (3) 有电规则:在股道有电状态下的流程执行规则。
- (4) 无电规则:在股道无电状态下的流程执行规则。
- (5) 登顶卡规则:登顶卡借还状态下流程的执行规则。
- (6) 人员角色规则:不同角色、人员对于流程执行过程的执行规则。

通过以上分析可以看出,流程、角色权限和业务规则都存在很大的不确定性,各个运用所检修作业流程无统一规律可循,难于配置。因此,

通过技术手段来减少程序结构的改变,增加系统的灵活性是十分必要的,而 workflow 技术正符合这种要求。

2 基于Petri网技术的动车组检修作业 workflow 建模

2.1 Petri网的基本概念

Petri 网是一个图形化的数学建模工具,定义成三元组 $PN=\{P, T, F\}$, 其中:

$P=\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$, 是库所的有限非空集。

$T=\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$, 是变迁的有限非空集。

$F=P \bullet T \cup T \bullet P$, 是有向弧的集合, P 和 T 满足 $P \cap T = \emptyset$ 且 $P \cup T \neq \emptyset$ 。

Petri 网由库所和变迁组成,圆圈表示库所,矩形表示变迁,库所和变迁用有向弧连接。Petri 网的动态行为用托肯(token)的分配来描述,用(●)表示, Petri 网结构是固定的,而库所中托肯的分布是可以变化的。

在工作流的范畴中,用 workflow 过程表示企业的一个业务流程,用库所表示条件,其中包含一个开始库所和一个结束库所,分别对应了过程的开始和结束,用变迁表示任务,任务的执行方式由路由决定。根据国际 workflow 管理联盟(WFMC)的定义, workflow 应该包括 4 种基本的路由结构,分别是顺序、分支、并行、循环,由它们构造出复杂的流程。

2.2 基于Petri网技术的动车组检修作业流程模型

用 Petri 网的三元组 (P, T, F) 定义进行过程描述,其中 P 表示库所集, T 表示过程变迁集, F 表示流程关系集。动车组检修针对检修业务流程与角色紧耦合的特点,将系统的工作流模型划分为一个四元组 $N=\{R, B, T, F\}$, 其中:

R : 角色集 (Role Set)。

B : 业务集 (Business Set)。

T : 过程变迁集 (Transition Set)。

F : 流程集 (Flow Set)。

$R=\{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, \dots\}=\{\text{检修组长, 地勤机械师, 隔离开关操作员, } \dots\}$ 。

$B=\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, \dots\}=\{\text{断电申请, 断电开始, 断电结束, 无电作业开始, 无电作业结束, 无电作业完毕, 供电申请, 供电开始, 供电结束, } \dots\}$ 。

有电作业开始,有电作业结束,有电作业完毕, …}。

$T=\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, \cdots\}=\{\text{条件 1, 条件 2, 条件 3, 条件 4, } \cdots\}$ 。

在定义中, 每个流程集中的元素 F 对应一个 (R, B, T) 三元组, 即 $F \subseteq R \bullet B \bullet T$ 。流程集中, 对于任意两个流程集中的元素 f_i 和 f_j ($i \neq j$), 都有 $f_i \cap f_j \neq \phi$, 即各个流程集中的元素间是相互独立的。

根据 Petri 网与动车组检修业务流程定义的工作流模型, 建立 WF-net 模型如图 2 所示。

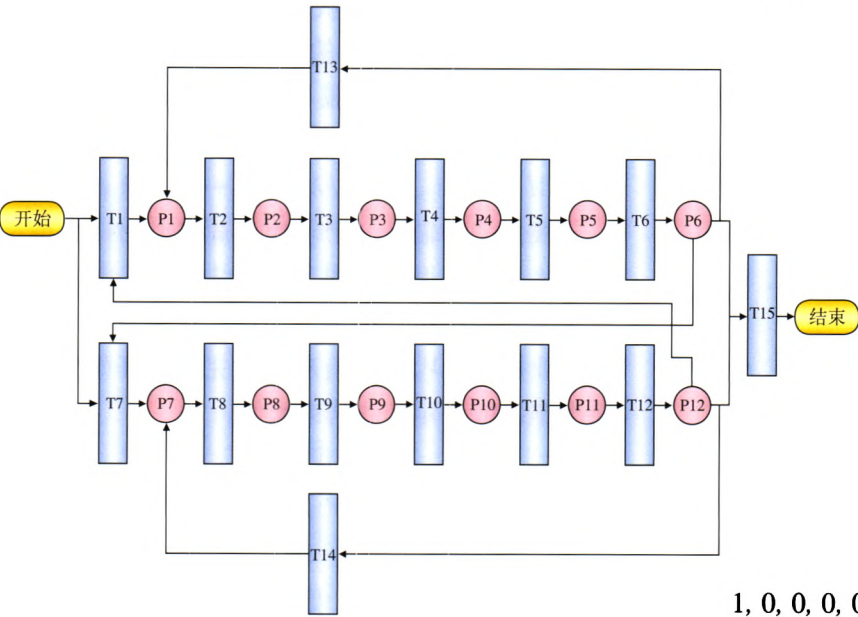


图2 基于Petri网技术的动车组检修作业 workflow WF-net模型

图 2 中, 各库所 P_i 和变迁 T_i 的含义如表 1 所示。

3 动车组检修作业流程的模型分析与评价方法

3.1 Petri网的分析方法

在完成 Petri 网 workflow 建模后, 需验证其正确并且有效。本章将提供一定的方法用于动车组检修作业流程 Petri 网模型的验证。

在工作流管理系统中, 正确性、有效性和效率是 3 个重要的方面。本文将从检修作业流程模型的正确性和检修作业流程模型的性能两方面进行分析。

3.2 动车组检修作业流程模型的正确性分析

动车组检修 workflow 过程正确是指 workflow 建立的模型过程正确, 并且不会出现运行结果不正确、

死锁等现象。参照图 2, 对动车组检修作业流程模型正确性分析过程如下。

初始状态: $Now=\{M_0(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)\}=P_s$; $History=\{M_0\}$; $New=\phi$; $Transition=\phi$; $Place=\{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ 。

步骤 1: 变迁 T_1, T_7 可触发, 得到状态:
 $M_1=\{M_1(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)\}=P_s+P_1$;

$M_7=\{M_1(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)\}=P_s+P_7$;

$History=\{M_0, M_1, M_7\}$;
 $Place=\{1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ 。

步骤 2: 变迁 T_2, T_8 可触发, 得到状态:

$M_2=\{M_2(0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)\}=P_2+P_7$;

$M_8=\{M_7(0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)\}=P_1+P_8$;

$History=\{M_0, M_1, M_2, M_7, M_8\}$;

$Place=\{1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ 。

表1 基于Petri网技术的动车组检修作业 workflow WF-net模型库所和变迁含义

库所	含义	变迁	含义
P1	断电申请	T1	检修组长进行断电申请操作
P2	断电开始	T2	隔离开关操作员进行断电开始操作
P3	断电结束	T3	隔离开关操作员进行断电结束操作
P4	无电作业开始	T4	检修组长、地勤机械师完成无电作业开始操作
P5	无电作业结束	T5	检修组长、地勤机械师完成无电作业结束操作
P6	无电作业完毕	T6	检修组长完成无电作业完毕操作
P7	供电申请	T7	检修组长进行供电申请操作
P8	供电开始	T8	隔离开关操作员进行供电开始操作
P9	供电结束	T9	隔离开关操作员进行供电结束操作
P10	有电作业开始	T10	检修组长、地勤机械师完成有电作业开始操作
P11	有电作业结束	T11	检修组长、地勤机械师完成有电作业结束操作
P12	有电作业完毕	T12	检修组长完成有电作业完毕操作
		T13	检修组长再次进行无电申请操作
		T14	检修组长再次进行有电申请操作
		T15	有电作业和无电作业全部完成

步骤3: 变迁 T3, T9 可触发, 得到状态:

$$M_3 = \{M_3(0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0)\} = P_1 + P_3 + P_7 + P_8;$$

$$M_9 = \{M_9(0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)\} = P_1 + P_8;$$

$$History = \{M_0, M_1, M_2, M_3, M_7, M_8, M_9\};$$

$$Place = \{1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0\}.$$

步骤4: 变迁 T4, T10 可触发, 得到状态:

$$M_4 = \{M_4(0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0)\} = P_1 + P_2 + P_4 + P_7 + P_8 + P_9;$$

$$M_{10} = \{M_{10}(0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)\} = P_1 + P_2 + P_3 + P_7 + P_{10};$$

$$History = \{M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_7, M_8, M_9, M_{10}\};$$

$$Place = \{1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0\}.$$

步骤5: 变迁 T5, T11 可触发, 得到状态:

$$M_5 = \{M_5(0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0)\} = P_1 + P_2 + P_3 + P_5 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10};$$

$$M_{11} = \{M_{11}(0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0)\} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{11};$$

$$History = \{M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_7, M_8, M_9, M_{10}, M_{11}\};$$

$$Place = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0\}.$$

步骤6: 变迁 T6, T12 可触发, 得到状态:

$$M_6 = \{M_6(0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0)\} = P_1 + P_2 + P_3 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11};$$

$$M_{12} = \{M_{12}(0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0)\} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{12};$$

$$History = \{M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_7, M_8, M_9, M_{10}, M_{11}, M_{12}\};$$

$$Place = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0\}.$$

步骤7: 变迁 T15 可触发, 得到状态:

$$End = \{M_e(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)\} = P_e;$$

$$History = \{M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_7, M_8, M_9, M_{10}, M_{11}, M_{12}, M_e\};$$

$$Place = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}.$$

由以上程序运行可知, 该程序顺利退出, 所以该 Petri 网表示的动车组检修系统业务流程满足正确性要求。

3.3 动车组检修作业流程模型的性能评价

根据国际工作流管理联盟 (WFMC) 的定义,

工作流应该包括4种基本的路由结构, 分别是顺序、分支、并行和循环, 由他们构造出复杂的流程。对图2基于Petri网技术的动车组检修作业 workflow 模型进行分析可以看出, 动车组检修作业流程包括选择结构和顺序结构, 其中, 分为: 先无电再有电结构和先有电再无电结构。选择执行流程变迁的概率 α_i , 且 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ 。

根据铁道部动车组检修规程, 以2C车型为例, 无电作业和有电作业时长分别为60 min和90 min。假设图中变迁的执行时间分别为 t_1, t_2, \dots, t_{15} , 并且这15个串联变迁的执行时间为15个变迁相互独立的随机变量, 服从参数为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{15}$ 的指数分布, 即15个变迁的平均执行时间分别为 $1/\lambda_1, 1/\lambda_2, \dots, 1/\lambda_{15}$, 且 $1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 + \dots + 1/\lambda_{15} = 150$ 。

根据一个输入一个输出化简原则对图2模型进行化简, 可得到如图3所示结构, 其中, V_1 表示作业开始操作; V_2 表示无电作业完成, 开始有电作业操作; V_3 表示有电作业完成, 开始无电作业操作; V_4 表示作业结束操作。

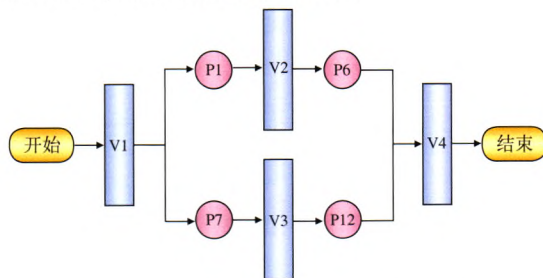


图3 基于Petri网技术的动车组检修作业 workflow 模型 (化简后)

动车组检修工作流的平均时间性能分析如下:

(1) 图3中, 变迁 V_1 等同于时间变迁 v_1, v_2, v_3, v_4 的平均执行时间, 分别为:

$$v_1 = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_7$$

$$v_2 = 1/\lambda_{2+3+4+5+6} = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3 + 1/\lambda_4 + 1/\lambda_5 + 1/\lambda_6$$

$$v_3 = 1/\lambda_{8+9+10+11+12} = 1/\lambda_8 + 1/\lambda_9 + 1/\lambda_{10} + 1/\lambda_{11} + 1/\lambda_{12}$$

$$v_4 = 1/\lambda_{15}$$

(2) 假设图3中选择执行流程变迁的概率

α_i , 且 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$, 则平均性能时间为:

$$t = v_1 + \alpha_i v_2 + (1 - \alpha_i) v_3 + v_4$$

(下转 P39)

面，尽量回避键盘录入，多使用屏幕点选，且每屏显示内容适当，文字大小适中，以适应各种年龄段用户的使用习惯，从而保证了操作使用的高效、方便和快捷。例如，在用户登录界面，用户名录入采用数字而非字母方式，提高录入效率，同时用户登录后，系统自动记录用户信息，下次登录时，用户名处会自动保留前5次登录的用户信息，以供选择；在作业录入界面，车号、作业面、部位等都采用下拉框方式，且各信息之间采用词典关联关系，相互限定，减少选择的项目，使用户选择的信息更加简洁；在故障处理界面，故障现象与故障处理尽量采用词典方式，用户通过录入关键字，自动列出相关词条，供用户选择。

(3) 规范设备日常管理

规范设备日常维护，确保管理方法的可行性。由于手持机相对体积较小容易丢失，而数量有限须轮换使用，所以日常管理尤其重要，为此采用集中存放、专人管理，并设置借用登记本，借还进行状态检查和签字确认，保证能够定时充电和设备运行状态良好。同时为了避免使用中磕碰、淋水，方便作业人员携带，为手持机配备专用挎包。

3 结束语

便携式移动手持终端与固定的工位终端功能互补、协同工作，对提升动车组检修管理水平有重要的作用：(1) 规范检修作业，通过检修项目明细、必检项的设置管理作业过程、卡控作业内容、规范作业；(2) 方便作业管理，检修人员根据作业项目设置和检查实际，实时录入检修信息，动态显示作业进度，方便进行作业管理和生产指挥决策；(3) 提高作业效率，系统对新派发的故障及时进行提示，对检修人员检修进度、工长复查及质检验收的结果实时显示，方便检修人员、工长、质检之间信息共享，提高作业效率。

参考文献：

[1] 王忠凯，史天运，张惟皎. 动车组管理信息系统便携式移动终端的设计与实现 [J]. 铁路计算机应用，2012，21 (2)：31-33.

[2] 郭靖寒，张 春. 动车段信息化管理系统中的信息终端 [J]. 铁路计算机应用，2009，15 (2)：24-26.

责任编辑 陈 蓉

(上接 P36)

$$\begin{aligned} &=1/\lambda_1+1/\lambda_7+\alpha_i/\lambda_2+\alpha_i/\lambda_3+\alpha_i/\lambda_4+\alpha_i/\lambda_5+\alpha_i/\lambda_6+(1-\alpha_i)1/\lambda_8+(1-\alpha_i)1/\lambda_9+(1-\alpha_i)/\lambda_{10}+(1-\alpha_i)/\lambda_{11}+(1-\alpha_i)/\lambda_{12}+1/\lambda_{15} \\ &=1/\lambda_1+1/\lambda_2+\cdots+1/\lambda_{15} \\ &=150 \end{aligned}$$

因此，图3基于Petri网技术的动车组检修作业 workflow 系统平均执行时间为150 min，满足一级修要求。如果要进一步提高动车组检修工作效率，就需要对各个时间变迁的用时进行压缩，或者对动车组业务流程进行改进。

通过以上分析可以看出，利用Petri网技术将随机触发时间引入动车组检修 workflow 网，使模型具有了分析时间性能的能力。同时，利用随机Petri网基本结构的时间性能等价化简模型和时间性能等价公式，计算出整个动车组检修业务流程的检修时间，由此可以判定动车组检修业务流程的可行性。

4 结束语

本文分析了动车组检修业务，并提出面对的主要问题，以及引入工作流的必要性。以Petri网为建模工具，描述并分析了动车组检修业务流程建模过程。以该技术为基础开发出的动车组管理信息系统在全路23个运用所的实际应用中取得了良好效果。

参考文献：

[1] 范玉顺. 工作流管理技术基础 [M]. 北京：清华大学出版社，2001.

[2] 袁崇义. Petri网原理 [M]. 北京：电子工业出版社，1998.

[3] 王少峰，王克宏. 工作流管理系统中同步关系的实现方法 [J]. 计算机集成制造系统，2001，7 (3)：37-41.

[4] 陈传波，李梅生. 一种基于扩展Petri网的工作流建模方法 [J]. 计算机工程与科学，2004，26 (12) .

责任编辑 杨利明