

# 基于 Petri 网出现序列的继电保护业务模型

郭 鹏, 王文焕, 詹荣荣, 杨国生, 李妍霏, 王丽敏, 申 华

(中国电力科学研究院有限公司继电保护研究所, 北京 100192)

**摘 要:**针对现有 UML 等对象化的继电保护业务建模方法难以进行语义分析和校验的问题, 根据 Petri 网能定量分析系统安全性、可达性和有界性的特点, 提出一种基于 Petri 网的继电保护业务模型。通过 UML 活动图初步构造继电保护业务模型, 将活动图映射成 Petri 网模型, 再将该 Petri 网进一步转化成出现序列, 对出现序列的结构和语义进行校验, 发现并修正 Petri 网中与实际业务不符的分支或过程, 直到 Petri 网对应的出现序列通过验证。最后, 将 Petri 网转换成继电保护业务模型。实例应用证明该方法可以显著提高继电保护业务模型的有效性。

**关 键 词:** Petri 网; 出现序列; 继电保护; 业务模型

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.023 中图分类号: TM731 文章编号: 1673-9140(2020)04-0169-07

## Research on model of protection relay procedure based on the Petri net occurrence sequence

GUO Peng, WANG Wenhuan, ZHAN Rongrong, YANG Guosheng,  
LI Yanfei, WANG Limin, SHEN Hua

(Protection Relay Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** It is difficult to analyze and verify the semantics of existing modeling methods for the object-oriented protection relay service such as UML. In this paper, according to the characteristics of Petri net, which can quantitatively analyze the security, accessibility and boundedness of system, a protection relay service model based on the Petri net is proposed. Through the UML activity diagram, the protection relay service model is initially constructed, and the activity diagram is mapped into a Petri net model. And then the Petri net is further transformed into an occurrence sequence and the structure and semantics of the occurrence sequence are verified. The branch or process in Petri net that is inconsistent with the actual procedure is searched and corrected until the occurrence sequence corresponding to the Petri net is verified. Finally, the Petri net is transformed into a protection relay service model. The case application of Petri net proves that the method can significantly improve the effectiveness of the model of protection relay services.

**Key words:** Petri net; occurrence sequence; protection relay; service model

继电保护全业务数据模型是继电保护运行评价平台的重要数据基础, 是利用大数据技术<sup>[1]</sup>支撑继电保护全业务开展的必备条件, 继电保护业务模型

是其中的重要组成部分。良好的继电保护业务模型不仅有效促进继电保护业务协调运转, 而且更有利于开展基于大数据技术的深入数据挖掘, 实现对继

电保护装置运行及管理的高效支撑,同时为继电保护专业多源数据的高效融合及分析利用创造良好的技术条件。

目前,继电保护数据建模方面已经开展了研究和应用。应用结构化的数据建模方法,建立了继电保护装置台账、动作、缺陷、检修以及与电网一次设备关联的数据模型,并开发了继电保护统计分析等应用系统,实现了对保护装置信息的管理。IEC 61850 实现了对变电站内部智能电子装置的能力和服务建模<sup>[2]</sup>,CIM 采用统一建模语言(unified modeling language, UML)实现电力系统一次设备建模<sup>[3]</sup>,由于 UML 语言属于半形式化语言,故对其语法分析及正确性检验不易实现。目前有文献开展了融合 IEC 61850 及 CIM 模型的研究<sup>[4-8]</sup>,但通用性不强、未取得广泛的推广应用。与此同时,保护装置全寿命周期信息管理等业务在保证继电保护全寿命周期信息管理的高效性、准确性发挥关键性作用,然而业务模型研究相对匮乏,并且缺乏验证其准确性、有效性的技术手段,不利于继电保护业务的高效开展。文献[5]应用 UML 状态图描述特定对象在其生命周期内所有可能发生的状态以及引起状态转移的事件,但难以对生成的状态图进行语义分析和校验。

Petri 网<sup>[9-11]</sup>是对离散并行系统的数学表示,由德国的 C·A·Petri 于 1962 年提出,在金融、物理、计算机等众多领域获得了广泛的应用。Petri 网是一种非常成熟的形式化理论,能够定性定量地分析系统的安全性、可达性、有界性等一系列特性,对于弥补现有模型语言缺乏形式化的缺点具备理论上的优势,能够成为继电保护业务模型验证的有效工具。

该文针对现有 UML 等建模语言不具备校验功能的不足,以及保护装置全寿命周期管理业务建模的迫切需求,依托 Petri 网能够定量分析系统安全性、可达性、有界性的优势,建立基于 Petri 网的继电保护业务模型,通过验证 Petri 网出现序列来校验继电保护业务模型的准确性,为继电保护业务开展提供准确的模型。

## 1 继电保护业务建模需求

继电保护全业务数据模型涵盖对继电保护装置

状态监视及预警、定值计算及校核、装置画像、故障分析及预测、缺陷管理、检修反措、技术监督等,涉及继电保护装置设计、制造、投运、动作、检修、消缺、反措、退役等全寿命周期管理的各个环节<sup>[12-16]</sup>。数据模型集中反映了继电保护全业务数据的组织方式,为继电保护专业全业务的高效开展提供优化的数据结构。业务模型作为数据模型的一个重要分支,反映了继电保护全业务开展的具体流程和步骤,并通过与相关核心算法结合,不断提升对数据的管理水平。继电保护全业务数据模型涉及数据及服务众多,具备数据多源融合、结构化程度高、异构数据逐步增多、体量较大等特征<sup>[17]</sup>,而在众多的继电保护数据及业务中,继电保护装置台账信息的数据建模和台账生成过程的业务建模既是继电保护全业务数据模型的基础环节,在建模方法上也具有代表性。继电保护装置台账数据以保护装置出厂数据、检测数据、标准数据为基础,依托保护装置实物“ID”,实现保护装置与台账、动作、告警、故障、缺陷、检修、巡检巡视、定值等继电保护全业务数据的关联<sup>[18]</sup>。保护装置台账及生成保护装置台账所需的基础数据的释义如表 1 所示。

表 1 生成继电保护装置台账的基础数据

Table 1 Basic data of generate protection relay device account

数据类型	释义
装置台账	不同类型装置的基础信息、板卡与一次设备的关联关系信息
检测数据	检测机构信息及其发布的专业检测结果
出厂信息	装置出厂时装置基本信息
标准数据	包括装置型号信息、软件版本、ICD 信息的标准化数据(装置型号版本信息标准库)以及数据属性及分类规则标准库
图档文档资料	继电保护专业标准、规定规范、管理办法、变电站相关图纸、装置定值单、装置说明书等资料
调控云提供的基础信息	包括厂站信息、一次设备信息、电网及厂站拓扑结构、组织机构及人员信息、GIS 地理信息

继电保护装置台账生成的过程:

1)继电保护装置台账基础信息录入继电保护运行评价平台。如表 1 所示,检测机构录入检测数据、厂家提供出厂数据、收集继电保护装置相关的标准数据、图档文档资料等录入继电保护运行评价平台,

通过将具体的继电保护装置与这些数据关联,这些数据的属性字段将赋予继电保护装置从而生成台账数据。

2) 将继电保护装置台账基础信息下装台账 APP。

3) 当继电保护装置安装检验完毕准备入网时,现场运行人员手持台账 APP 扫描装置二维码,将装置与继电保护运行评价平台中的基础数据相关联(平台信息已下装到台账 APP),若关联成功,则为该继电保护装置生成台账数据,若关联失败,则由现场运行人员手动添加继电保护装置台账信息,最后,将继电保护装置台账回存继电保护运行评价平台。

4) 专责审核新录入的继电保护装置台账数据,对于错误的台账信息需要重新扫码关联基础数据、生成台账。

## 2 Petri 网出现序列及模型验证方法

### 2.1 Petri 网

Petri 网是一个四元组  $PN = (P, T; F, M_0)$ :

1)  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  是库所(place)的有限集合,用于存储标记(token);

2)  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  是变迁(transition)的有限集合;

3)  $F \subseteq ((P \times T) \cup (T \times P))$  是库所与变迁之间的流关系(“ $\times$ ”为笛卡尔积);

4)  $M: P \rightarrow Z$  (非负整数集) 为标识函数,指库所中 token 的个数,  $M_0$  是初始标识。在继电保护业务中,库所可以表示业务执行的中间结果或最终结果,变迁则表示某项具体的业务操作。

可见, Petri 网是严格依托集合理论定义的对象转化模型,数学基础扎实。

设  $x \in X$  为  $PN$  的任一元素,  ${}^\circ x = \{y | (y, x) \in F\}$  为  $x$  的前集,  $x^\circ = \{z | (x, z) \in F\}$  为  $x$  的后集。

若  $\forall p \in {}^\circ t: M_0(p) \geq 1$  (记作  $M_0[t >]$ ), 则称变迁  $t \in T$  在标识  $M_0$  下是使能的, 该标识被变迁  $t$  激发后得到的标识  $M$  表示为

$$M(p) = \begin{cases} [M_0(p) - 1, & \text{若 } p \in {}^\circ t - t^\circ \\ M_0(p) + 1, & \text{若 } p \in t^\circ - {}^\circ t \\ M_0(p), & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

记作  $M_0[t >] M$ , 含义为  $M$  是  $M_0$  的后继。

### 2.2 出现序列及模型验证方法

为了验证继电保护业务模型与实际的继电保护业务操作是否统一, 可通过验证 Petri 网的出现序列实现。  $PN$  的一个有限出现序列  $\sigma = M_0 t_1 M_1 t_2 \dots t_n M_n$  定义: 对  $\forall i, i = 1, 2, \dots, n, M_{i-1}[t_i >] M_i$ ,  $n$  称为  $\sigma$  的长度, 则  $\tau = t_1 t_2 \dots t_n$  为  $PN$  对应  $\sigma$  的变迁序列。构造 Petri 网出现序列的方法:

1) 初始状态取初始标识  $M_0$ , 并为  $M_0$  添加记号 new, 初始化可达状态集  $S$  为  $\{M_0\}$ , 可达变迁集  $T$  为  $\emptyset$  (可达状态集是出现序列中出现的  $M$  的集合)。

2) 若  $S$  中存在记号为 new 的状态, 则

① 取出其中任意一个记号为 new 的状态  $M_k$ 。首先删除  $M_k$  的记号, 然后搜索从  $M_0$  到  $M_k$  的路径上是否存在状态  $M_i = M_k$ , 若存在则说明已有循环存在, 为  $M_k$  添加记号 again, 重新执行此步骤;

② 检查目前的出现序列, 若存在  $M_i = M_k$ , 说明 2 个状态的执行情况相同, 则为  $M_i$  添加记号 again, 返回①;

③ 若 Petri 网在状态  $M_k$  下没有可激发的变迁, 表示在状态  $M_k$  下发生了死锁, 为  $M_k$  添加记号 dead, 回到①;

④ 若 Petri 网在  $M_k$  下存在使能的变迁, 变迁激发后状态变为  $M_j$ , 则将此标识加入到可达变迁集  $T$  中。若  $M_j = M_n$ , 则出现正常终止, 为  $M_j$  添加记号 end, 返回①; 否则, 为  $M_j$  添加记号 new, 将  $M_j$  及连接弧  $M_k M_j$  添加至出现序列图中, 并将  $M_j$  加入可达状态集  $S$  中;

3) 出现序列构造结束。

当正确终止标识  $M_n$  存在且唯一, 并且不存在任意死标识, 同时满足对任何  $M \in [M_0 >$ , 当  $M = M_n$  时, 结束库所  $o$  的  $M(o) = 0$ , 并且所有变迁  $t \in T$  均位于某个从  $M_0$  到  $M_n$  的变迁序列上, 则可判断 Petri 网正确<sup>[19]</sup>。可见, 该方法对贴近于实际的出现序列开展验证, 保证从理论和操作上符合继电

保护业务建模的需要。

### 2.3 活动图到 Petri 网的映射

为了应用 Petri 网出现序列验证继电保护业务模型的准确性,需要将基于活动图的继电保护业务模型映射成 Petri 网模型。活动图是 UML 语言的一种形式,通过流程化模型表现。活动图由决策、条件以及特定状态下的并发性行为构成,可以描绘系统的工作流程及执行条件。另外,在活动图中,当一个活动执行完毕,自动转变成另外一个活动状态,活动之间的衔接不需要明显的触发器事件,所以非常适合于继电保护业务建模,但是活动图本身不具备模型校验功能。

通过将待验证的活动图中的元素映射转化成 Petri 网中的元素,如表 2<sup>[20]</sup>所示,可生成与活动图对应的 Petri 网模型。

基于 Petri 网出现序列的继电保护业务模型验证策略如图 1 所示。在全面了解继电保护业务需求的基础上,使用 UML 语言活动图初步建立继电保护业务模型,根据 Petri 网定义将基于 UML 语言描

表 2 UML 活动图到 Petri 网的映射规则

Table 2 Mapping rules from UML activity diagram to Petri net

UML 活动图元素	Petri 网图形元素
处理活动	变迁
不同部门之间的消息交换	库所 1 一变迁一库所 2
处理活动之间的关系	弧一库所一弧
条件分支	含一个 Token 的库所

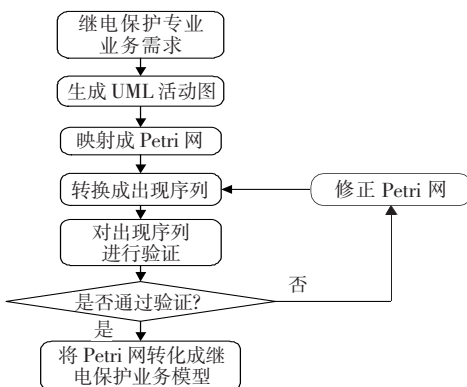


图 1 继电保护业务模型验证策略

Figure 1 Verification strategy of protection relay service model

述的活动图映射成 Petri 网,然后将该 Petri 网进一步转化成出现序列,对出现序列的结构和语义进行验证,发现 Petri 网中的错误并进行修正,直到该 Petri 网对应的出现序列的结构和语义通过验证,最后,将 Petri 网转化成继电保护业务模型。

### 3 实例应用

应用 Petri 网出现序列,对继电保护全业务流程模型中典型的保护装置台账生成服务模型进行验证,并给出修改的建议。由继电保护装置台账的生成过程可设计出继电保护装置台账生成的活动图模型,如图 2 所示,增量基础数据指检测数据、出厂信息、标准数据、图档文档资料、调控云提供的基础信息;数据更新子系统是指更新检测数据等基础信息的一系列操作(受篇幅所限,具体过程不再赘述)。

依据活动图到 Petri 网的映射方法,将图 2 继电保护装置台账生成的活动图映射成对应的 Petri 网形式,如图 3 所示。得到继电保护装置台账生成活动图对应的 Petri 网后,依据出现序列构造方法,构造与该 Petri 网对应的出现序列,如图 4 所示,分析继电保护装置台账生成业务的出现序列,检查对应的 Petri 网是否存在错误。

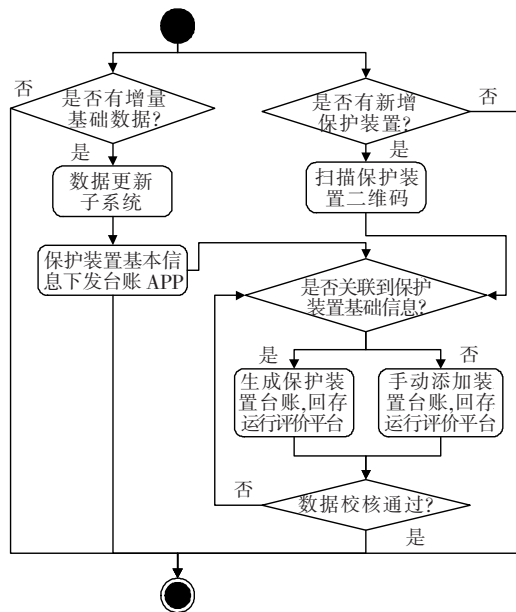


图 2 继电保护装置台账的活动图模型

Figure 2 Activity diagram model of protection relay devices account

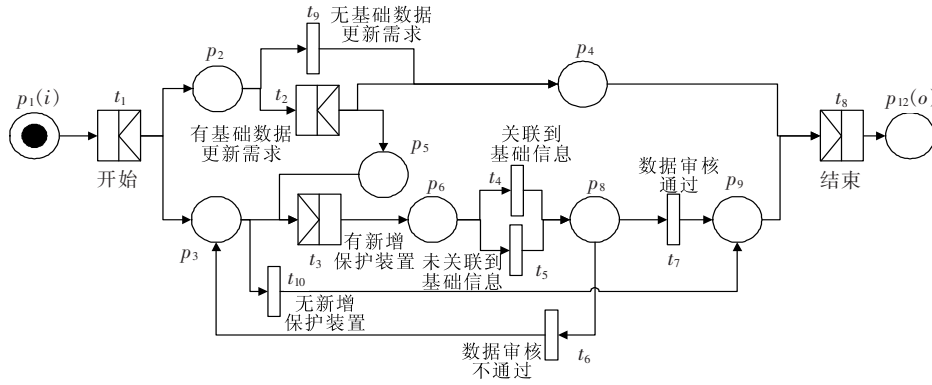


图 3 继电保护装置台账的 Petri 网

Figure 3 Petri net of protection relay device account

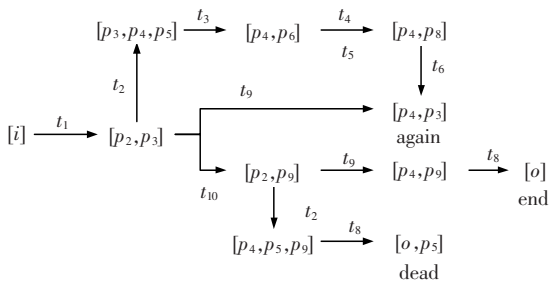


图 4 Petri 网出现序列

Figure 4 Petri net occurrence sequence

设图 4 中标识  $[p_4, p_3]$  为  $M_1$ , 由于任何变迁都不能使  $M_1$  发生变化, 即产生了死锁, 以  $M_1$  为最终状态推演 Petri 网出现序列可见,  $t_1 t_2 t_3 t_4 t_6$ 、 $t_1 t_2 t_3 t_5 t_6$ 、 $t_1 t_9$  都在  $M_1$  终止。以变迁序列  $t_1 t_2 t_3 t_4 t_6$  为例, 其执行过程: 根据继电保护装置台账基础数据的录入需求, 将基础数据录入继电保护运行评价平台, 并将数据下装到台账 APP, 现场运行人员手持台账 APP 完成扫码和关联操作, 生成继电保护装置台账回存继电保护运行评价平台。专责审核新录入的台账数据并发现错误, 要求现场运行人员重新扫码和关联。现场运行人员重新扫码和关联期间需  $p_3$  和  $p_5$  各付出一个 token, 而此刻  $p_5$  里面不存在 token, 导致模型死锁。在实际业务中, 继电保护台账基础数据更新后一次下装台账 APP 即可满足后期应用需求, 不必在每次扫码关联保护装置台账信息时持续下装。

再分析非正常终止的标识,  $M_2 = [o, p_5]$ , 观察得知  $M_2$  是通过变迁序列  $t_1 t_{10} t_2 t_8$  发生的, 其演变过程: 根据继电保护装置台账基础数据的录入需求, 将基础数据录入继电保护运行评价平台, 并将基础数据下装到台账 APP, 然而当前没有新增继电保护

装置台账的需求。该情况下应当在基础数据下装到台账 APP 后结束继电保护装置台账生成服务, 但在  $p_5$  里还存在一个 token, 表示 Petri 网无法正常终止。这是  $p_4$  和  $p_5$  并发执行所导致的。

通过分析图 4 中继电保护装置台账生成业务的 Petri 网出现序列发现, 继电保护装置台账基础信息的更新和继电保护装置台账信息的生成为相互独立的过程, 考虑到基础信息的更新及基础信息下装台账 APP 是继电保护装置台账信息生成的必要基础, 对 Petri 网进行调整, 修改后的继电保护装置台账生成服务的 Petri 网如图 5 所示。

可见, 将继电保护装置台账基础信息的更新和继电保护装置台账信息的生成之间调整为先后关系, 在基础信息的更新及基础信息下装台账 APP 后, 再进行扫描装置二维码、与基础数据相关联和专责审核继电保护装置台账数据等操作。根据图 5 重新生成 Petri 网序列, 如图 6 所示, 典型变迁序列对应的实际含义如下:

1)  $t_1 t_3 t_4 t_5 t_7$  表示根据需求完成继电保护装置台账基础信息的更新和下装 APP 操作, 现场运行人员手持台账 APP 扫描装置二维码, 成功关联到继电保护运行评价平台中的继电保护装置台账基础信息, 生成继电保护装置台账, 专责审核通过;

2)  $t_1 t_3 t_4 t_6 t_8 t_4 t_6 t_7$  表示根据需求完成继电保护装置台账基础信息的更新和下装 APP 操作, 现场运行人员手持台账 APP 扫描装置二维码, 未关联到继电保护装置台账基础信息, 通过手动添加完成继电保护装置台账的录入, 专责审核发现错误, 现场运行人员再次扫描装置二维码手动修改继电保护装置台账, 专责审核通过;

3)  $t_2, t_9, t_{10}$  表示既没有继电保护装置台账基础信息更新需求,也没有继电保护装置台账的录入需求。可见,修正后的 Petri 网出现序列的实际意义

与继电保护装置台账录入的流程一致,满足继电保护装置台账生成业务的建模需求。修正后的继电保护装置台账生成活动如图 7 所示。

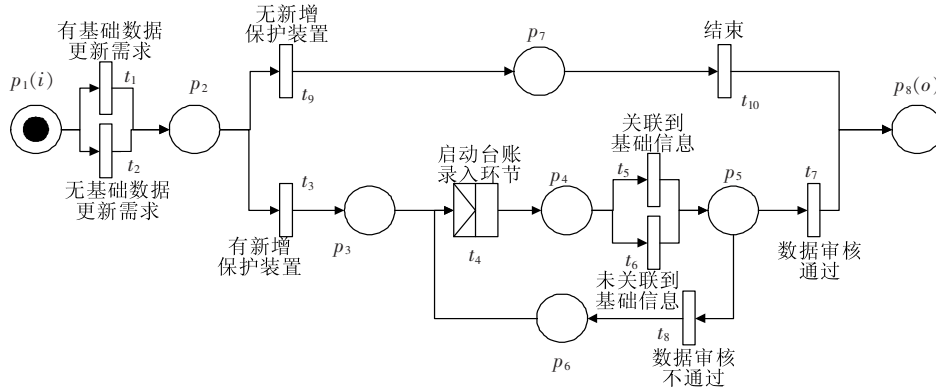


图 5 修正后的继电保护装置台账 Petri 网

Figure 5 Modified Petri net of protection relay devices account

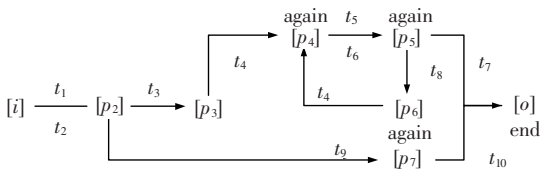


图 6 新生成的 Petri 网出现序列

Figure 6 Newly generated Petri net occurrence sequence

在死循环、死锁的隐患,基于 Petri 网理论的模型具备数学基础扎实、模型语义清晰的特点,通过校验 Petri 网出现序列能够校验业务模型的合理性。该文以继电保护装置台账生成业务建模为例,详细阐述了应用 Petri 网出现序列发现并修正业务模型中与实际业务不符的分支或过程的方法,修正后的 Petri 网变迁序列与实际业务流程相符,可见 Petri 网模型校验方法修正了原有业务模型中的不足,提高了继电保护业务模型的有效性。

参考文献:

[1] 李志强,高大兵,苏盛,等. 基于大数据的智能电表入侵检测方法[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(1):121-126.  
 LI Zhiqiang, GAO Dabing, SU Sheng, et al. Big data based intrusion detection method of smart meters[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016,31(1):121-126.

[2] 胡迅,彭道刚,张浩,等. 基于 IEC 61850 的智能馈线自动化通信技术研究[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(4):108-114.  
 HU Xun, PENG Daogang, ZHANG Hao, et al. Research on communication technology for smart feeder automation based on IEC 61850[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017,32(4):108-114.

[3] 罗阳百,郑华,孙鹏,等. 基于 CIM/E 的 BPA 电网模型共享与拼接[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(4):146-153.  
 LUO Yangbai, ZHENG Hua, SUN Peng, et al. Study on model sharing and combination of BPA based on CIM/E [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017,32(4):146-153.

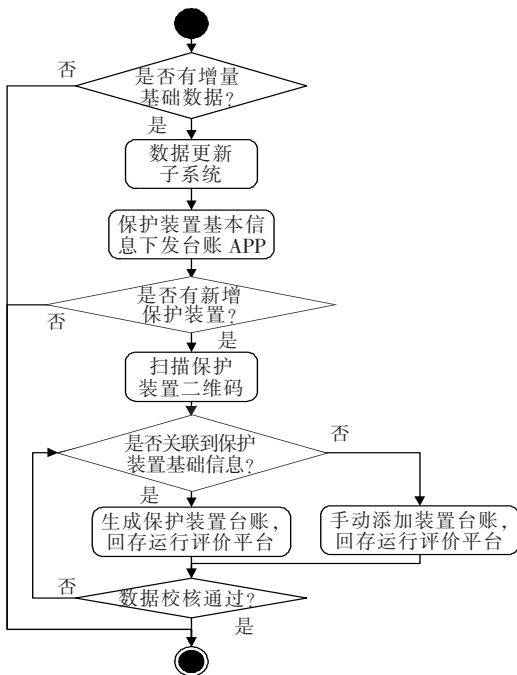


图 7 修正后的继电保护装置台账活动图模型

Figure 7 Revised activity diagram model of protection relay device account

4 结语

未经形式化校验的继电保护全业务流程模型存

- [4] 胡绍谦,李力,祁忠,等. 保护信息系统 IEC 61850 建模及 CIM 扩展的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6):119-125.  
HU Shaoqian, LI Li, QI Zhong, et al. Research on and application of IEC 61850 modelling and CIM extension for protection relay information management system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 119-125.
- [5] 戴观权,蔡泽祥,蔡煜,等. 基于 IEC 61850 的配电网网络化保护通信建模与实时性可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20):97-103.  
DAI Guanquan, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Modeling and real-time reliability analysis of communication network for networked protection of distribution network based on IEC 61850 [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 97-103.
- [6] 高志远,姚建国,曹阳,等. 公共信息模型和 IEC 61850 模型协调方案评析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16):9-14.  
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang, et al. A survey of coordination scheme between CIM and IEC 61850 model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 9-16.
- [7] 邹振宇,孙中尉,修黎明,等. 智能变电站信息模型组态解耦技术研究[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 78-82.  
ZOU Zhenyu, SUN Zhongwei, XIU Liming, et al. The research of decoupling technology used to smart substation model configuration[J]. Electric Power, 2018, 51(1):78-82.
- [8] 李劲松,陆鑫,张金虎,等. 基于 IEC 61850 的智能变电站数据隐私保护方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7):69-75.  
LI Jingsong, LU Xin, ZHANG Jinhu, et al. Smart substation data privacy protection method based on IED 61850[J]. Smart Power, 2019, 47(7):69-75.
- [9] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [10] 刘勇业,马宏忠,李勇,等. 基于气体检测和模糊 Petri 网的 GIS 故障诊断方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 141-146.  
LIU Yongye, MA Hongzhong, LI Yong, et al. GIS fault diagnosis based on SF<sub>6</sub> gas detection and Fuzzy Petri Nets[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 141-146.
- [11] 汤双权. 基于 Petri 网的工作流建模和分析方法研究[D]. 株洲:湖南工业大学, 2008.
- [12] 赵宇皓,郝晓光,耿少博,等. 智能变电站二次设备安全措施在线预演及防误预警的研究与实现[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 173-178.  
ZHAO Yuhao, HAO Xiaoguang, GENG Shaobo, et al. Research and realization of security measures online rehearsal and anti-error warning of intelligent substation secondary equipment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 173-178.
- [13] 陈仲伟,黄来,王逸超,等. 基于全寿命周期理论的电网技术经济评价体系[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(4):120-124.  
CHEN Zhongwei, HUANG Lai, WANG Yichao, et al. Technical economic evaluation system of power grid based on the whole-life-cycle theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4):120-124.
- [14] 龙翩翩,蔡泽祥,张延旭,等. 智能变电站继电保护信息交互失效模型与薄弱环节分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1):29-36.  
LONG Pianpian, CAI Zexiang, ZHANG Yanxu, et al. Analysis of failure mode and weak points for relay protection information interaction in smart substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 29-36.
- [15] 刘宇阳,龚庆武,梁志远. 基于改进 GO 法的继电保护系统可靠性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4):129-135.  
LIU Yuyang, GONG Qingwu, LIANG Zhiyuan. Reliability analysis for protection system with the advanced GO method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4):129-135.
- [16] 黄道珊. 基于设备全寿命周期的配电系统可靠性评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2):72-78.  
HUANG Daoshan. Reliability evaluation method of distribution system based on electrical equipment life-cycle theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2):72-78.
- [17] 王继业,王德林,杨国生,等. 大数据技术在继电保护领域的研究与应用[J]. 电力信息化, 2016(12):1-8.  
WANG Jiye, WANG Delin, YANG Guosheng, et al. Research and application of big data technology in relay protection[J]. Electric Power Information Technology, 2016(12):1-8.
- [18] 江知瀚,王文煊,刘蔚,等. 继电保护基础数据与业务协同平台研究与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(Z1):134-137.  
JIANG Zhihan, WANG Wenhuan, LIU Wei, et al. Research and application of basic relay protection data and operation collaboration platform[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(S1):134-137.
- [19] 黄经宇. 输变电设备的全景信息建模与应用[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- [20] 宋瑜辉. 基于 UML 和 Petri 网建模的研究与应用[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2009.