

基于扩展 WF-Net 的配电网故障诊断与抢修流程优化^①

杨云涛

(陕西省地方电力(集团)有限公司 配电网研究中心, 西安 710061)

摘要: 基于扩展 WF-Net 对配电网故障诊断与抢修流程进行了建模与优化. 首先将流程涉及的信息系统封装成具有松散耦合特性的 IT 服务;然后扩展了 WF-net 的时间集和颜色集, 提出了基于 IT 服务的赋时有色工作流网 (TCWFN-ITS), 以显式地表达业务流程与 IT 服务的调用关系. 最后, 针对某电力公司配电网故障诊断与抢修流程, 采用 TCWFN-ITS 进行建模, 使用 Petri 网建模工具 CPN Tools 进行仿真分析, 通过并行执行任务、合并任务、优化服务占用端口数量等手段, 实现了配电网故障诊断与抢修流程性能提升和 IT 服务的平衡配置, 验证了所提方法的可行性和有效性.

关键词: 配电网; 故障诊断; 抢修流程; IT 服务; 流程优化; Petri 网

Optimization of Distribution Network Fault Diagnosis and Repair Process Based on Extended WF-Net

YANG Yun-Tao

(Distribution Network Research Center, Shaanxi Regional Electric Power Group Co., Ltd. Xi'an 710061, China)

Abstract: The modeling and optimization of distribution network fault diagnosis and repair process has been researched, based on the extended WF-net. Firstly, information systems were encapsulated into the loosely-coupled IT services. Secondly, the time set and color set of WF-net were extended, then the Timed Colored WF-net with IT Services (TCWFN-ITS) was put forth to explicitly demonstrate the calling relationship between business processes and IT services. Finally, this paper illustrates with a power company's distribution network fault diagnosis and repair process, employs TCWFN-ITS for modeling, and applies Petri net tool-CPN Tools for simulation analysis to enhance the performance of business processes and balance the calling of IT services, and verify the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

Key words: distribution network; fault diagnosis; repair process; IT services; process optimization; petri net

故障诊断与抢修流程是配电网运行过程中使用频率较高的业务流程之一, 对确保配电网的可靠安全运行具有重要作用. 供电公司配电网故障诊断与抢修流程一般建立在企业综合业务平台上, 抢修调度员通过调用不同应用系统提供的 IT 服务, 获取故障诊断所需的数据, 依据数据进行故障处理决策.

故障诊断与抢修流程优化问题是一个业务流程建模与优化问题. 目前, 有许多针对业务流程的建模与优化方法, 如 UML 活动图、事件驱动过程链(EPC)、

Petri 网等. 其中, Petri 网由于具有良好的形式化语义和图示化表达, 以及大量成熟的分析方法, 被广泛用于业务流程的建模和分析. 但由于基本 Petri 网中未对标记加以区别, 变迁被触发后将向它所有的后置库所中分发标记, 这种机制使基本 Petri 网在描述含有大量数据和控制信息的复杂业务流程时, 可达事件与状态数目增多, 模型结构变得非常复杂, 既不利于用户理解, 还影响了计算的效率.

针对 Petri 网建模的这一弱点, 目前主要采用两种

① 收稿时间:2013-11-06;收到修改稿时间:2013-12-05

方法解决: ①给标记添加属性或使用颜色加以区别, 提出了各种高级 Petri 网模型, 如有色 Petri 网(CPN)、时间 Petri 网(TPN)、面向对象 Petri 网(OOP)、谓词 Petri 网等, 文献[1]应用有色 Petri 网工具, 建立和验证了基于分类服务的配电网故障诊断有色 Petri 网模型. 文献[2]采用图形化和解析式对电网故障诊断过程进行描述, 提出基于 Petri 网理论的地区电网故障分层诊断方法, 根据变迁的发生及库所中托肯的转移得到稳态 Petri 网模型;②根据实际的应用领域定义相应的 Petri 网模型. 在基于 Petri 网的业务流程建模方法中, 比较典型的是 Van der Alast 提出的工作流网(WF-net). 文献[3]提出了基于时间有色 Petri 网(TCPN)的复杂航空器推出模型, 结合 TCPN 仿真软件 CPNTools 中的状态空间分析法, 对模型的可行性进行了分析. 文献[4]提出了受控工作流资源网(CWFR), 通过仿真等手段对资源的性能进行度量, 根据仿真结果对模型实施资源控制策略, 从而实现资源的合理分配, 以提高资源的利用率. 文献[5]采用资源共享工作流网(WFRS)对医院手术室流程进行建模, 通过仿真分析来发现过程中的瓶颈, 从而进行相应改进以提高流程的效率.

以上两种方法在资源表示以及资源配置等方面存在不足: 第 1 种方法未能提出对业务流程涉及的 IT 服务进行优化配置的具体方法;第 2 种方法囿于模型的表达能力(无法对资源进行显式表达), 只能用于分析资源的静态配置, 未能涉及对资源的动态调配方法. 本文扩展了 WF-net, 提出了基于 IT 服务的赋时有色工作流网 (Timed Colored WF-net with IT Services, TCWFN-ITS), 将配电网故障诊断与抢修流程涉及的信息系统封装成具有松散耦合特性的 IT 服务, 以显式地表达业务流程所涉及的 IT 服务, 从而能够对 IT 服务配置进行仿真及优化, 进而改善业务流程的性能. 最后采用 Petri 网建模工具 CPN Tools, 分析并验证基于 TCWFN-ITS 构建的实例模型.

1 TCWFN-ITS建模与分析方法

1.1 IT 服务

定义 1. IT 服务(IT Services, ITS) IT 服务是为了满足业务流程需求, 以提供信息技术支持与信息资源管理为内容的服务过程.

配电网故障诊断与抢修流程涉及到对决策支持系统(DSS)、地理信息系统(GIS)、客户服务系统(CRM)

等多个信息系统的调用, 为便于建模, 将这些系统封装成 IT 服务, 如表 1 所示.

表 1 配电网故障诊断与抢修流程中涉及的 IT 服务

序号	IT 服务名称	IT 服务内容
1	DIA	故障诊断流程管理
2	DTMS	配变负荷数据监测
3	TAS	配电线路运行监控
4	ON3000	综合调度自动化系统集成
5	DSS	数据集成与故障处理决策
6	GIS	网络拓扑服务
7	CRM	客户信息查询

1.2 TCWFN-ITS

对工作流的控制维度建模的 Petri 网被称为工作流网(WF-net). WF-net 孤立地定义了单个案例的动态行为. 尽管 WF-net 能够很好地表达业务流程的各种逻辑结构, 如顺序、选择等, 但是 WF-net 中未涉及业务流程相关的资源, 因此不能用于分析业务流程的 IT 服务配置. 在 WF-net 的基础上, 本文扩展了 WF-net 的时间集和颜色集, 提出了基于 IT 服务的赋时有色工作流网(TCWFN-ITS)模型.

定义 2. TCWFN-ITS 基于 IT 服务的赋时有色工作流网是一个多元组

$TCWFN-ITS = (\Sigma, P, T, F, A, N, C, G, W, R, M, r_0)$, 且满足下列条件:

- (1) $PN = (P, T, F, W)$ 是一个合理的 WF-net;
- (2) Σ 是一个类型的非空有限集, 即颜色集;
- (3) P 是库所的有限集, $P = P_s \cup P_{ITS} \cup P_c$, 其中 P_s 、 P_{ITS} 、 P_c 分别为状态库所、服务库所、控制库所的集合, 且 $P_{ITS} \neq \emptyset$, $P_s \cap P_{ITS} \cap P_c = \emptyset$;
- (4) T 为变迁的有限集;
- (5) F 表示系统转移, $F = F_s \cup F_{ITS} \cup F_c$, F_s 表示状态的转移, $F_{ITS} \subseteq (P_{ITS} \times T) \cup (T \times P_{ITS})$ 表示服务的调用及释放, $F_c \subseteq (P_c \times T) \cup (T \times P_c)$ 表示对某任务的服务调用请求的控制;
- (6) A 为有向弧的集合, 且 $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$;
- (7) N 为节点函数, $N: A \rightarrow (P \times T \cup T \times P)$;
- (8) C 为颜色函数, $C: P \rightarrow \Sigma$;
- (9) G 为守卫函数;
- (10) W 为弧表达式函数, $W = W_s \cup W_{ITS} \cup W_c$, W_s 表示状态库所输入输出弧上的弧函数, W_{ITS} 表示服务

库所输入输出弧上的弧函数, W_c 表示控制库所输入输出弧上的弧函数;

(11) R 为时间集合, 称为时间戳, 代表库所的时间;

(12) M 为初始化函数, $M = M_s \cup M_{ITS} \cup M_c$, M_{s0} 、 M_{ITS0} 、 M_{c0} 分别表示模型中状态、服务和控制库所的初始参数;

(13) r_0 为开始时间, 且 $r_0 \in R$.

由定义 2, 可采用 TCWFN-ITS 来建立业务流程模型, 但在所建模型中可能存在一些影响业务流程正确执行的错误, 如死变迁、死锁等, 因而必须验证模型的合理性^[6,7].

1.3 基于 TCWFN-ITS 的业务流程分析方法

采用 TCWFN-ITS 来建模业务流程, 并进一步对其进行正确性分析和性能分析, 能够帮助组织发现业务流程中的瓶颈, 从而进行相应改进以提高业务流程的性能, 基于 TCWFN-ITS 网的建模和分析方法具体步骤如下:

Step1: 业务流程建模 根据流程中各任务调用的 IT 服务及其相关的控制策略, 设计服务和控制表示, 建立初始 TCWFN-ITS 模型, 声明模型涉及的变量与函数;

Step2: 合理性验证 验证所建立模型的合理性;

Step3: 性能分析 对模型进行仿真分析, 计算业务流程的性能指标;

Step4: 模型优化 依据性能分析的结果, 分析业务流程存在的瓶颈, 通过优化 IT 服务配置等方法对模型进行改进.

2 实例

2.1 业务流程建模

一般情况下, 配电网故障报修频率为 1-2 件/h, 如遇用电高峰, 或恶劣天气时, 配电网故障报修的数量通常会剧增. 接到故障报修后, 流程按以下步骤执行^[8]:

Step1: 进行故障登记, 为每个故障报修分配一个 ID;

Step2: 调用 DIA 服务启动故障诊断流程, 组织相关服务调用、人员安排和设备准备;

Step3: 首先完成故障数据集成分析准备, 然后分别调用 DTMS、TAS、ON3000 服务获取配变、线路、变电站实时状态数据与故障报警信息;

Step4: 综合集成设备状态数据与报警信息, 通过故障诊断算法分析故障原因, 调用 DSS 服务进行故障抢修决策, 依据故障规模对故障分类, 如为一般故障, 转到 Step5, 否则转到 Step6;

Step5: 针对一般故障(约占故障总数的 60%), 直接启动抢修流程;

Step6: 复杂故障(约占故障总数的 40%)需要进一步启动复杂故障处理流程;

Step7: 调用 GIS 服务判断故障影响区域, 调用 CRM 服务分析受故障影响的客户信息;

Step8: 复杂故障处理决策, 启动故障抢修流程;

Step9: 故障资料归档.

现有流程中, 企业综合业务平台分配给 DIA 服务和 DSS 服务的端口数量各为 4 个, 其他服务均为 1 个. 使用 CPN Tools 建立配电网故障诊断与抢修流程 TCWFN-ITS 模型, 如图 1 所示, 模型中各变迁的含义、调用的 ITS 及响应时间如表 2 所示.

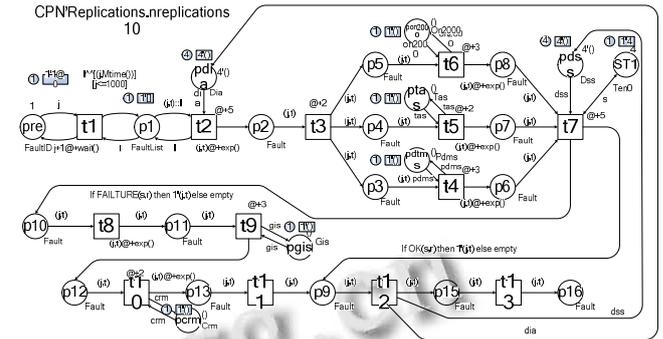


图 1 配电网故障诊断与抢修流程 TCWFN-ITS 模型

表2 TCWFN-ITS中变迁的含义

变迁	任务	$P(ri)$ %	调用的 ITS	响应时间 T/min
t1	故障登记	100	/	
t2	故障诊断流程管理	100	DIA	5
t3	故障数据集成分析准备	100	/	
t4	配变负荷数据监测	100	DTMS	3
t5	配电线路运行监控	100	TAS	2
t6	综合调度自动化系统集成	100	ON2000	3
t7	数据集成与故障处理决策	100	DSS	5
t8	启动复杂故障处理流程	40	/	
t9	网络拓扑服务	40	GIS	3
t10	客户信息查询	40	CRM	2
t11	复杂故障处理决策	40	/	
t12	故障抢修流程	100	/	
t13	资料归档	100	/	

注: 未调用 ITS 的任务在企业综合业务平台上完成.

2.2 合理性分析

采用 CPN Tools 验证 TCWFN-ITS 模型的合理性. 检验可完成条件、正确完成条件和无死任务条件, 分

别等价于模型的活性、有界性、无死变迁^[9]. CPN Tools 生成的模型活性分析报告如表 3 所示, M23 为惟一死标识(Dead Markings), 在 M23 下, 终止库所 P15 发生动态死锁, 表明故障抢修流程正确终止;模型中不存在死变迁(Dead Transition);模型同样不存在活的变迁(Live Transition), 因为该模型存在死标识状态, 在该标识下, 任何变迁都不可能发生;根据仿真分析, 每个库所包含的 Token 数量最大值为 4, 因此模型是有界的. 由上述验证过程可知, 该 TCWFN-ITS 模型是合理的.

表3 CPN Tools产生的模型活性分析报告

Liveness Properties		
Dead Markings	Dead Transition Instances	Live Transition Instances
[23]	None	None

2.3 性能分析

对故障报修频率较高时, 故障诊断与抢修流程的性能进行分析, 假设用电高峰或恶劣天气情况下, 单位时间内故障报修次数服从泊松分布($\lambda = 1/10$), 函数定义为:

fun wait()=round(exponential(1.0/10.0));

假设服务调用的延迟时间服从 $\lambda = 1/2$ 的指数分布, 函数定义为:

fun exp()=round(exponential(1.0/2.0));

通过仿真处理 1000 个以上的案件, 得到该报修频率下的性能仿真数据, 即模型中案例的平均处理时间(Flow_time, FT)、等待处理的案例数量(List_length, LL)、DIA 服务的空闲时间(Marking_size_pdia, MDIA)、DSS 服务的空闲时间(Marking_size_pdss, MDSS)等.

通过对原有流程的仿真, 得到各指标在 90%置信区间下的计算结果: FT=[26.689, 26.087], LL=[0.285, 0.215], MDIA=[1.627, 1.540], MDSS=[3.153, 3.117].

2.4 服务配置优化

(1) 第 1 次优化: 将变迁 t9 和 t10 由原来的串行优化为并行

分析现有流程, 可以看到变迁 t9 和 t10 调用的 IT 服务 GIS 和 CRM 处于串行状态, 研究复杂故障的处理流程, GIS 和 CRM 服务没有依赖关系, 在获取故障 ID 的前提下, 两项服务可以并行调用. 将变迁 t9 和 t10 并行后(如图 2 所示), 仿真结果显示, 案例的平均处理时间有所减少, FT=[24.486, 23.881], 等待处理的案例

数量大幅减少, LL=[0.186, 0.134], MDIA 与 MDSS 没有显著改善.

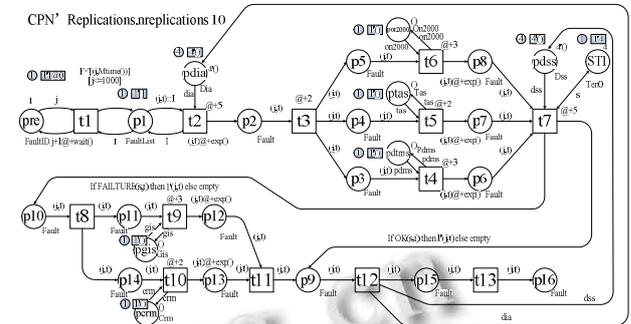


图 2 第 1 次优化后的 TCWFN-ITS 模型

(2) 第 2 次优化: 将原来的变迁 t2 和 t3 合并, 时间由 @+5 和 @+2 合并为 @+7

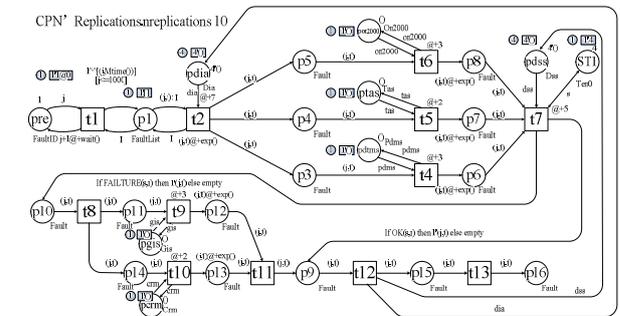


图 3 第 2 次优化后的 TCWFN-ITS 模型

考虑到变迁 t3 对应的任务是准备过程, 未调用 IT 服务, 将其与变迁 t2 合并, 一般认为, 将两个任务合并成一个较大的任务, 由于节省了预热时间, 新任务的平均处理时间小于原有两个任务的处理时间之和. 这里只考虑新任务处理时间等于原任务处理时间之和, 合并后, 新的 t2 响应时间为 @+7(@+5 与 @+2 之和, @为 CPN Tools 定义的时间标识符), 通过对合并变迁后的模型(如图 3 所示)进行仿真分析, 案例的平均处理时间继续减少, FT=[22.036, 21.650], 等待处理的案例数量亦有减少, LL=[0.134, 0.110], MDIA 与 MDSS 没有显著改善.

(3) 第 3 次优化: 将服务 DIA、DSS 占用企业综合业务平台的端口数量(各为 4)优化为 DIA(5)、DSS(3)

前 2 次优化改善了案例的平均处理时间和等待处理的案例数量, 但对 MDIA 与 MDSS 没有显著影响, 分析仿真结果, 发现 DIA 服务空闲的时间较短, 即长期处于调用状态, 而 DSS 服务空闲时间较长, 由于企

