

doi: 10.7690/bgzdh.2014.06.005

基于 Petri 网的给水保障方案建模与优化

邹连亮, 敖春来, 吕光辉

(中国人民解放军 68612 部队, 银川 750021)

摘要: 针对现代战争中给水保障面临着保障环境复杂, 保障空间扩大, 净水难度大, 供水保障强度大等问题, 提出一种基于 Petri 网的给水保障方案。利用 Petri 网可对系统资源动态和静态分析的特点, 在分析给水保障方案流程的基础上, 建立基于 Petri 网的保障方案流程模型, 并对模型进行了详细分析, 给出优化的具体方法, 实现了给水保障根据战场态势动态调整的效果。该模型提高了给水保障的能力, 使给水保障适应现代战争的要求。

关键词: 给水保障; Petri 网; 建模; 优化

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Water Supply Programs Modeling and Its Optimization Based on Petri Net

Zou Lianliang, Ao Chunlai, LYU Guanghui

(No. 68612 Unit of PLA, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Under modern warfare conditions, water security faces problems of complex security environment, supply area expanding, difficult to get clean water, and guarantee degree of water-supply, introduce water supply programs based on Petri net. Utilize the characteristics of Petri net which can analyzing the system resources of dynamic and static, based on the analysis of the flow of water protection programs, establish supply programs process model based on Petri net, analyze the model in detail, give the specific optimization method. At last realize water dynamical adjusting according to battlefield situation. This model improves the ability of the water supply, and satisfies water supply requirements of modern warfare.

Keywords: water supply; Petri net; modeling; optimization

0 引言

信息技术的不断进步改变着战争形态, 也改变着后勤保障的模式, 从而产生新的后勤保障模式^[1]。给水保障作为后勤保障的重要组成部分, 改进保障模式势在必行。Petri 网作为描述动态系统的有效工具, 可以很好地解决流程问题。基于此, 笔者详细分析了给水保障的流程, 并利用 Petri 网的特点, 对给水保障流程进行了建模与优化, 解决给水保障能力不足的问题。

1 Petri 网的定义

Petri 网是描述分布、并发、异步特征等离散事件的有效工具。Petri 网有 2 个明显的特点。首先, 它可以形象描述和分析系统内各个因素的并发、同步(或异步)、并行、冲突分布等动态特征。其次, 可以对整个 Petri 网系统进行静态的结构分析和动态的行为分析^[2-4]。

Petri 网由节点和有向箭头组成。节点分为 2 类, 一类为库所(Place), 另一类为变迁(Transition), 2 类元素之间的连接用有向箭头。Petri 网中还有一类元素是标记(Token), 代表整个系统的资源、条件、

状态等因素。Petri 网的定义^[2]如下:

六元组 $PN = (P, T, F, K, W, M)$ 构成 Petri 网的充要条件为:

$$1) P \cup T \neq \Phi;$$

$$2) P \cap T = \Phi;$$

$$3) F \subseteq P \times T \cap T \times P;$$

$$4) \text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = P \cup T;$$

5) K 为 PN 的函数, 表示一个映射: $K: P \rightarrow Z^+ \cup \{\infty\}$, 其中 $Z^+ = \{1, 2, \dots\}$ 为正整数集, $K(P) = \infty$ 表示无穷容量;

6) M 为 PN 上的标志, 表示一个映射: $M: P \rightarrow \{0\} \cup Z^+$ 为非负整数集, 满足条件 $\forall p \in P: M(p) \leq K(p)$;

7) W 为 PN 弧上的权函数: $W: F \rightarrow Z^+$ 。

其中: P 是 1 个集合, 表示有限库所; T 是另 1 个集合, 表示有限变迁。 P 和 T 中的元素分别称为 P 元素和 T 元素。 F 为运动流关系, 是由 1 个 P 元素和 1 个 T 元素组成的集合: $\text{dom}(F)$ 表示运动流关系 F 的第 1 元素的集合, $\text{cod}(F)$ 则表示第 2 元素的集合, 即:

收稿日期: 2014-03-25; 修回日期: 2014-04-21

作者简介: 邹连亮(1975—), 男, 河北人, 硕士, 工程师, 从事工程勘察、给水工程项目管理、水资源评价、给水保障研究。

$$\text{dom}(F) = \{x | \exists y : (x, y) \in F\}, \text{cod}(F) = \{x | \exists y : (x, y) \in F\} \quad (1)$$

在 1 个表示连续时间的 Petri 网中，1 个变迁从可执行到执行需要延时，即从 1 个变迁 t 变成可执行的时刻到它真正执行的时刻之间可以看作是 1 个连续随机变量 x_t (取正实数值)，并且服从于 1 个分布函数：

$$F_t = P\{x_t \leq x\} \quad (2)$$

分布函数的意义随连续时间随机网的不同而改变。在 Molloy 提出的连续 TPN 中，用 1 个指数分布函数定义变迁的分布函数：

$$\forall t \in T : F_t = 1 - e^{-\lambda_t x} \quad (3)$$

实参数 $\lambda_t > 0$ 表示变迁 t 的平均执行速率，其中变量 $x > 0$ 。

2 基于 Petri 网的保障方案流程建模

workflow 管理联盟定义了一个描述 workflow 模型的模型，即 workflow 元模型，该模型描述了 workflow 模型内在联系，可用于描述 workflow 模型内部包含的各个对象、对象之间的关系及对象之间的属性^[4]。

2.1 workflow Petri 网的结构分类

workflow Petri 网根据 Petri 网的类型特征，定义了相应的结构组件，主要有串行、并行、选择和循环这 4 种常见的逻辑过程^[5]。用户可以根据自己建模的实际需要，选择相应的组件，从而可大大提高建模效率。

常见 4 种结构的 Petri 网表示如图 1、图 2、图 3、图 4 所示。

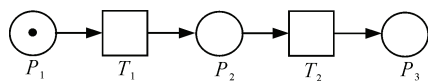


图 1 模型顺序结构

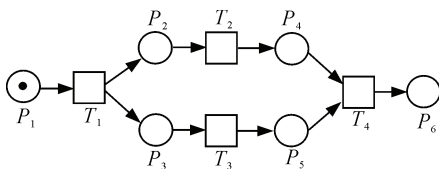


图 2 模型并行结构

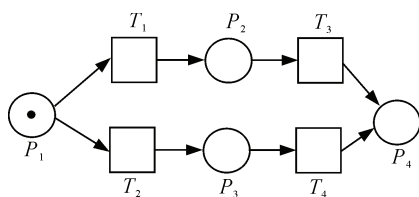


图 3 模型选择结构

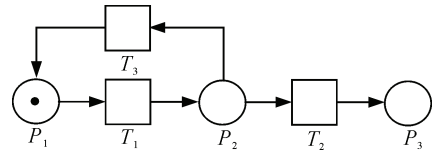


图 4 模型循环结构

1) 顺序结构：表示按顺序执行任务的因果关系。

2) 并行结构：表示可同时进行的分支活动。“与分支”表示并行活动的开始，而“连接”表示并行活动的结束。

3) 选择结构：表示彼此之间有相互排斥制约关系的活动。“或分支”表示选择活动的开始，而“连接”表示选择活动的结束。

4) 循环结构：表示某些任务可以反复执行过程的活动。

这 4 种基本结构是 Petri 网的基本组成，通过组合就可以建立一个功能完整的工作流模型。

2.2 给水保障的基本内容

给水保障是在野战条件下，为保障军队人员和装备用水而采取的各项技术和组织保障措施。其基本内容^[6-9]为：

1) 水源勘察。

水源勘察是在寻找和收集与水源有关的资料的基础上，加以解译的一种方法。给水条件图是反映预定地域水源情况和可供战场利用水源分布的专题要图。该要图主要包括 2 个方面的内容：一是水源的概况，主要包括地表和地下水源的基本分布情况；二是开发利用条件，包括可供利用水源的位置、现状、自然条件等因素。

2) 水源开发。

对保障地域的地下和地表水源开发利用，满足军队的需求。主要方法有修复现有取水构筑物，建立地面给水保障站，使用给水装备构筑地下水给水站等。

3) 取水。

选用可靠合适的水泵，安装符合要求的水管，用水泵、水管等将水源提升、输送到指定的地域或水池，以便于利用。

4) 水源净化。

通过安装净水系统或装置，将不符合饮用标准的水源沉淀、过滤、消毒、软化、去盐、杀菌、消除放射性污染等净化处理流程，保证部队安全使用。

5) 存储水源。

通过建造安全的贮水池或选择合适的储水容器，将符合标准的水源存储在贮水池或容器内，以便供部队使用。

6) 输配水。

根据部队的配置区域和战场实际情况，将符合标准的水源通过输水管道、送水车辆等运送到指定地域。根据需求灵活调配水源供部队使用。

7) 水质检测。

利用水质分析设备，对比水质分析标准要求，对水源进行物理性质、化学成分、病毒、细菌、毒剂、放射性等含量进行检验，从而分析水质状况。

8) 伪装防护。

在战争条件下，给水站是敌人打击的要点之一，因此，必须要做好给水站防护措施。通常利用天然和人工进行伪装防护，必要时运用遮障、迷彩等手段，选择在不易被敌人发现的低洼背山地域构筑。

2.3 给水保障的流程

给水保障是实施给水保障的行动指南。笔者依据现代战争的特点，结合给水保障的内容，在充分考虑现代战争的动态多变性以及给水保障不确定性等因素的基础上，建立了基于给水保障流程的保障方案，如图 5 所示。

保障方案具体说明^[7]如下：

1) 保障计划是依据战争的要求制定的人员和武器装备的水源供给计划，主要内容有：

① 保障地区情况。主要包括战争开始和持续的时间，给水保障的地区，给水保障范围，保障地区的地形地貌，交通情况，地表水源分布以及伪装防护的基本条件等。

② 部队用水需求。包括人员和装备的种类数量、性能指标及活动地域等。

③ 水文地质概况。详细勘察了解保障地域的地表和地下水源位置、类型及大概的供给数量，水质是否符合标准，构建给水站的影响因素，水源水量的变动情况及现存的伪装防护情况。

④ 备用给水计划是给水保障计划的补充完善。主要是为战场态势变化时应急所需。

2) 水源选择是根据保障地域的地质条件选择可供使用的水源。通常有地表和地下水源 2 种类型。

地表水源主要包括江河、水库、湖泊、池塘、海洋等。地表水源易受到核、生、化学武器袭击的污染。

地下水源主要包括岩溶、裂隙和孔隙水 3 种类型。地下水源不易受到敌人的污染，水源稳定，需通过构筑给水站才能使用。

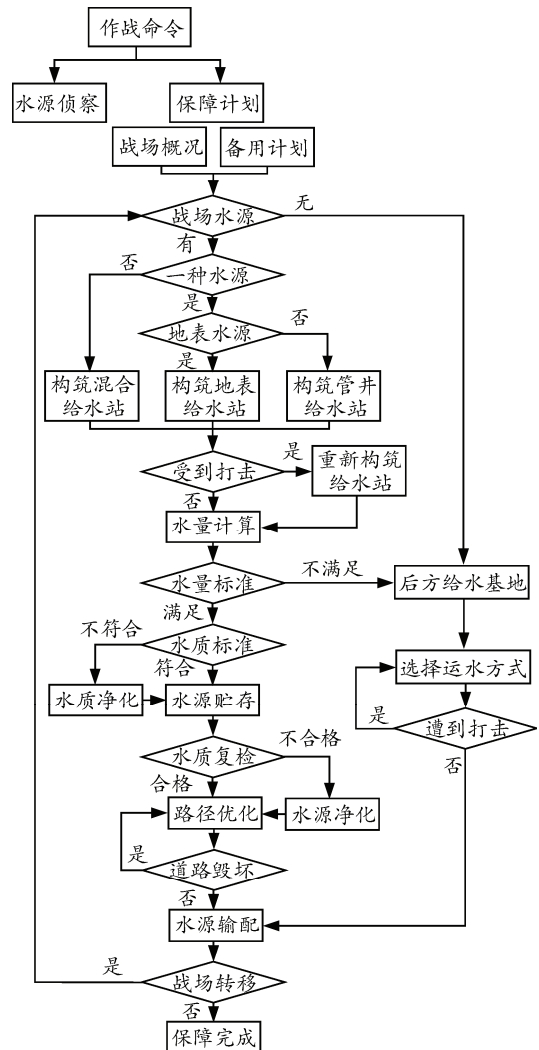


图 5 给水保障方案流程

在现代战争条件下，影响给水保障速度的主要因素是管井构筑时间长。但地下水源水质好，通常不需要净化处理，水源的水量比较稳定可靠。构筑地表水源给水站速度快，但水源水质通常较差，不稳定，易受战场环境影响，需要净化后才能供应部队使用；因此，应根据战场环境及保障的需求合理选择给水站。通常是保障前期使用地表水给水站，保障后期用地下水给水站，地表水给水站作为备用。

3) 给水站构筑通常分为 2 种类型，即地表和地下给水站^[10]。

地表给水站通常的构筑形式有：库坝式取水、河床式取水、岸边式取水、底栏栅式取水、移动式取水、低坝式取水和斗槽式取水。

管井给水站的构筑程序繁杂，时间长，易出现事故故障而延误保障时机；因此，通过优化构筑程序来提高效率及保障成功率是该方案的重点考虑之处。

4) 水源的检验及净化。首先确定水源类型，其次选择净化方式，最后根据不同的保障要求选择的不同指标净化方案。比如装备的洗消可以直接使用，不需要净化；人员的饮用则按照卫生标准严格净化。

5) 水源贮存。水源贮存是把多余的水源存储起来，需要时再进行保障。储存的水首先要保持水源不变质发霉；其次要加强伪装防护，防止贮水设施遭到敌人的破坏。

6) 输运水。主要通过保障车辆或其他机型设备把水源运到保障点。需要根据保障要求及保障地域合理选择保障途径，做到高效、安全、灵活。

7) 给水保障的重要内容就是给水设施的伪装防护^[11]。主要有 2 个方面：一方面是对地表水源、净化设施、检测设备及构筑物等装备的伪装；另一方面是通过先进的技术方法，建设给水设施及装备的防护措施。

综上所述，给水保障是一个复杂的过程。现代战争的动态性又增加了给水保障的难度，比如战场地域的转移，人员装备的变动，给水保障设施遭到破坏，核、生化污染等等因素。因此，给水保障方案制订，考虑不确定因素是一项非常重要的内容。

2.4 给水保障方案 Petri 网流程模型

给水保障方案是一个典型的作业流程，根据上节给出的给水保障的流程，结合战场因素和给水保障的特点，通过如下的步骤来建立给水保障方案流

程的 Petri 网模型。

1) 流程的定义^[12]。

为满足 Petri 网模型要求，对给水保障方案流程的描述主要有 3 个方面：保障流程的要素(流程状态、行为、对象、执行的实体等)、流程各要素间的关系(各要素之间的逻辑关系，以及由此组成的流程结构形式)和保障要素属性(要素的实施时间、占据保障资源的情况等)。

2) 初始化建模。

通过分析保障流程，建立给水保障方案流程到 Petri 网模型的映射关系。确定保障模型中的元素(库所、变迁、托肯)类型和属性项目。列出状态表并确定其对应到库所的标识；列出事件表并确定其相对变迁的标识；最后确定事件条件表即事件和状态的变迁关系。

3) 建立保障方案的 Petri 网模型。

首先建立保障方案的主体模型，然后再根据分析优化的需要，细化其中变迁要素，从而建立相应的详细流程模型以及各个元素之间的相互关系。

4) 确定要素属性值。

依据元素的属性项目，定义模型中各个层面的元素属性值。

给水保障的基本流程是：根据作战命令进行水源侦察，制定水源保障计划，选择合适的给水保障方式，进行给水站的构筑，水量计算，水质检验，水源贮存，水源输配及处置意外情况等。根据上节给出的给水保障流程，建立如图 6 所示的 Petri 网模型。给水保障方案流程的 Petri 模型各元素表示的意义如表 1 所示。

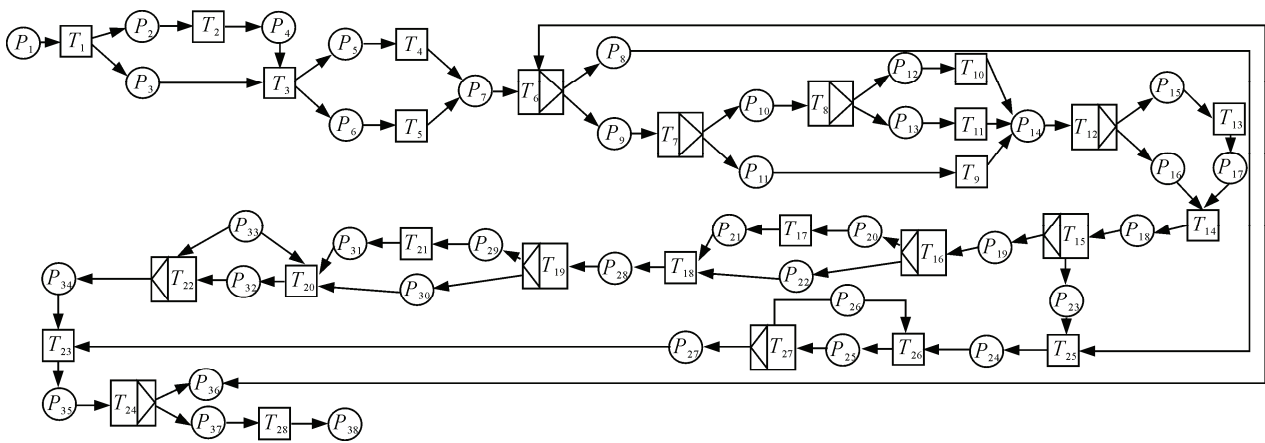


图 6 给水保障方案流程的 Petri 模型

表 1 Petri 模型中各元素的名称及属性

P	库所元素定义	P	库所元素定义	P	库所元素定义	T	变迁定义	T	变迁定义
P ₁	作战命令	P ₁₅	损坏给水站	P ₂₉	不合格水源	T ₁	受领任务	T ₁₅	对比水量标准
P ₂	侦察计划	P ₁₆	未受破坏给水站	P ₃₀	复检合格水源	T ₂	水源侦察	T ₁₆	对比水质标准
P ₃	保障计划	P ₁₇	新构筑的给水站	P ₃₁	净化合格水源	T ₃	制定保障计划	T ₁₇	水质净化
P ₄	侦察成果	P ₁₈	水量计算结果	P ₃₂	输水中的水源	T ₄	分析战场水源情况	T ₁₈	水源贮存
P ₅	战场水源概况	P ₁₉	水质化验结果	P ₃₃	受到破坏的道路	T ₅	制定备用保障计划	T ₁₉	复检水质
P ₆	备用保障计划	P ₂₀	不符合标准水源	P ₃₄	重新选择的输水道路	T ₆	战场有无水源	T ₂₀	输水路径优化选择
P ₇	战场水源保障计划	P ₂₁	净化后合格水源	P ₃₅	输送到给水点的水源	T ₇	战场是否只有一种水源	T ₂₁	水质净化
P ₈	战场后方水源	P ₂₂	合格水源	P ₃₆	新战场水源保障计划	T ₈	战场是否是地表水源	T ₂₂	输水道路遭到破坏
P ₉	战场水源	P ₂₃	补充的后方水源	P ₃₇	完成一次保障	T ₉	构筑混合给水站	T ₂₃	进行水源输配
P ₁₀	战场只有一种水源	P ₂₄	后方水源	P ₃₈	保障完成	T ₁₀	构筑地表给水站	T ₂₄	战场转移
P ₁₁	战场有两种水源	P ₂₅	输送中的水源			T ₁₁	构筑管井给水站	T ₂₅	利用后方给水基地
P ₁₂	战场地表水源	P ₂₆	受到打击的水源			T ₁₂	给水站受到打击	T ₂₆	选择运水方式途径
P ₁₃	战场地下水源	P ₂₇	未受打击水源			T ₁₃	重新构筑给水站	T ₂₇	水源受到打击
P ₁₄	现有给水站	P ₂₈	备用水源			T ₁₄	水量计算	T ₂₈	继续保障

3 给水保障流程模型的优化

现代战争的特点要求给水保障快速高效，适应变化多端的战场环境，上节给出的给水保障流程是一个综合的保障流程，而对于具体的一次战场给水保障来说，战场本身的水源情况是确定的，有 4 种可能：1) 战场根本没有可用水源；2) 战场只有地表水源；3) 战场只有地下水源；4) 战场地表和地下 2 种水源。归纳起来，战场情况只有 2 大类：一类是有水源，一类是没有水源。因此，把给水保障的流程优化为如下 2 种形式。

1) 战场有水源给水保障流程，如图 7 所示。

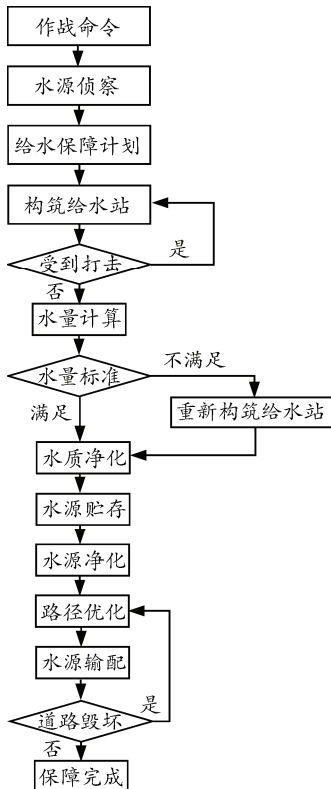


图 7 战场有水源给水保障流程

2) 战场无水源给水保障流程，如图 8 所示。

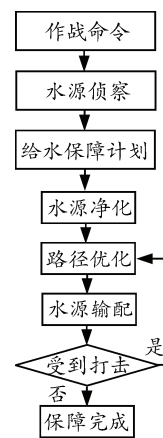


图 8 战场无水源给水保障流程

流程说明：

- 1) 合并优化了保障计划部分，把战场情况和备用计划统称为给水保障计划。
- 2) 把构筑地表给水站，管井给水站和混合给水站统称为构筑给水站。
- 3) 不再进行水质检验，考虑到时间因素直接进行水质净化。
- 4) 对于战场转移来说，就是上述保障流程的重复过程。

根据给水保障流程，建立了如图 9、图 10 所示的 Petri 网模型。

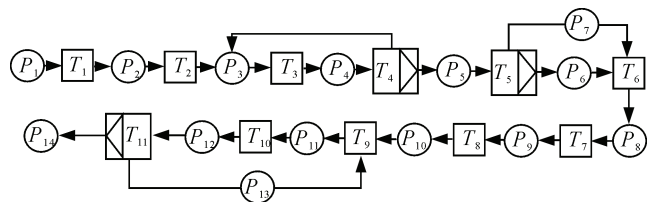


图 9 战场有水源给水保障流程的 Petri 网模型

模型中各元素的意义如表 2 所示。

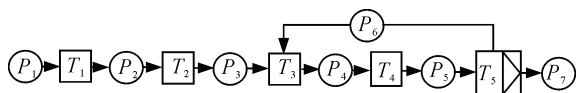


图 10 战场无水源给水保障流程的 Petri 网模型

表 2 战场有水源给水保障 Petri 网模型中各元素的定义

P	库所元素定义	T	变迁定义
P ₁	作战命令	T ₁	受领任务
P ₂	侦察计划	T ₂	水源侦察
P ₃	给水保障计划	T ₃	构筑给水站
P ₄	完好给水站	T ₄	给水站受到打击
P ₅	水量计算结果	T ₅	对比水量标准
P ₆	满足要求的水源	T ₆	水质净化
P ₇	新给水站补充水源	T ₇	水源贮存
P ₈	净化后合格水源	T ₈	水源重新净化
P ₉	待复检水源	T ₉	输配路径优化
P ₁₀	复检合格水源	T ₁₀	水源输配
P ₁₁	待输配水源	T ₁₁	水源受到打击
P ₁₂	输送中的水源		
P ₁₃	新的输配计划		
P ₁₄	保障完成		

模型中各元素的意义如表 3 所示。

表 3 战场无水源给水保障 Petri 网模型中各元素的定义

P	库所元素定义	T	变迁定义
P ₁	作战命令	T ₁	受领任务
P ₂	侦察计划	T ₂	水源侦察
P ₃	给水保障计划	T ₃	输配路径优化
P ₄	待输配水源	T ₄	水源输配
P ₅	输送中的水源	T ₅	水源受到打击
P ₆	新的输配计划		
P ₇	保障完成		

对于现代战争来说，给水保障首先要考虑的就是保障时间问题，因此，对给水保障流程的优化首先体现保障时间的缩短；其次，在保障流程的环节方面，通过优化减少了不必要的保障程序，使保障快捷、高效，灵活应对战场的各种变化。

4 结论

笔者针对现代战争作战地域的广阔性、作战部署的动态性、作战行动的多变性，促使给水保障的理念、方式、手段、形式等发生巨大的变革。给水保障面临保障地域环境复杂多变，保障战场空间无

限扩大，取水净水难度增大，供水保障数量强度大等问题。介绍了 Petri 网类型及特点，划分战场给水环境的类型，分析制约给水保障的战场因素，通过阐述不同战争环境的给水保障模式，建立综合的给水保障流程，并根据保障流程建立基于 Petri 网的保障方案流程模型，对模型进行了详细分析，给出优化的具体方法。

参考文献：

- [1] 江作义, 等. 从海湾战争看我军在现代城市防御作战中的水问题[C]//第四届科学报告会论文集——海湾战争研究专辑. 南京: 中国人民解放军工程兵工程学院, 1991: 18.
- [2] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997: 26-28.
- [3] 张媛, 王明哲, 纪光友. 一种基于 Petri 网的全覆盖想定生成算法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(7): 45-49.
- [4] 牛军钰, 赵宏, 赵大哲. 基于 Petri 网的工作流建模方法[J]. 控制与决策, 1999, 14(增刊): 521-524.
- [5] 曲扬. 基于 Petri 网的工作流建模和分析方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [6] 施培俊, 丁志斌. 野战给水工程[M]. 南京: 工程兵工程学院, 1998: 14-22.
- [7] 邹连亮. 给水工程保障方案评价方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- [8] 肖力, 吴为. 军队和卫勤机关野战给水问题[J]. 军事医学科学院国外医学分册, 1994, 11(2): 72-74.
- [9] 马颖, 方振东. 美军野战供水系统介绍[J]. 给水排水, 2003, 29(8): 14-15.
- [10] 关洪军. 论高技术战场给水保障的特点及一般原则[C]//中国人民解放军工程兵工程学院校庆 40 周年论文集. 南京: 中国人民解放军工程兵工程学院, 2001: 25-34.
- [11] 孙守堂, 付伟, 刘国新. 赴利比亚维和给水保障的经验和启示[J]. 后勤工作研究, 2006, 106(1): 78-79.
- [12] 谷佰军. 基于 Petri 网档案管理系统性能分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2008.