

一种应急指挥系统的设计与实现

宁玉辉¹ 姚喜²

1 山东省人防指挥保障中心 济南 250014

2 山东省水利勘测设计院 济南 250013

摘要 当前,应急事件在社会中不时发生,应急指挥对于处理应急事件、稳定社会秩序具有一定意义。但应急事件发生的种类、时间、程度具有不特定性,应急指挥决策、施策难度相应加大,如何提高应急指挥系统的智能性成为了一项研究课题。鉴于此,文中给出了一种应急指挥系统的设计与实现方法。对系统应用架构、系统功能进行了设计;对系统数据库构成、基于即时通讯的指挥通信等技术进行了详细阐述;将 Petri 网引入系统建模,并进行了适应性修改,实现了智能化应急预案析出、应急资源调度策略生成等功能。最后,搭建了真实的实验环境,通过实验验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 应急指挥;即时通讯;Petri 网;应急预案;资源调度

中图法分类号 TP311

Design and Implementation of Emergency Command System

NING Yu-hui¹ and YAO Xi²

1 Shandong Command and Security Center for Civil Air Defense, Jinan 250014, China

2 Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China

Abstract At present, emergency events occur from time to time in the society. Emergency command has a certain significance for dealing with emergency events and stabilizing social order. However, the types, time and degree of emergency events are not specific, and the difficulty of emergency command decision-making and implementation is correspondingly increased. How to improve the intelligence of emergency command system has become a research topic. In view of this, this paper presents a design and implementation method of emergency command system. The system application architecture and system functions are designed. The system database structure, command and communication technology based on instant messaging are elaborated in detail. The Petri net is introduced into the system modeling, and adaptive modification is carried out to realize the intelligent emergency plan precipitation, emergency resource scheduling strategy generation. Finally, the experimental environment verifies the effectiveness and superiority of the proposed method.

Keywords Emergency command, Instant communication, Petri net, Emergency plan, Resource scheduling

1 引言

当前,应急事件在社会中不时发生,如火灾、地震、病毒、水灾等,较为严重的应急事件对社会经济、环境、安全等都造成了一定影响^[1],如从 2019 年 9 月至 2020 年 3 月的澳洲山火,造成了 600 万公顷林地被烧毁,近 5 亿动物葬身火海,1500 处房屋毁于一旦,无数人流离失所;又如 2020 年初发生的新冠病毒肺炎疫情,迅速蔓延至世界各地,多国被迫宣布进入紧急状态^[2]。除此之外,局部战争、局部国境争端对抗都造成了局部相关地区应急事件的发生,如亚美尼亚、阿塞拜疆冲突等。基于此,应急指挥具有一定社会需求,应急指挥通信系统作为应急指挥的重要工具对于处理应急事件、稳定社会秩序具有一定意义。

当前,针对应急指挥系统的研究成果较为丰富。2020 年, Wang 对震后应急救援移动模型与应急通信系统进行了研究^[3],利用误差比分析方法定义合理的故障告警阈值,从而

为集群监控平台提供准确的链路状态判断依据。2018 年, Tian 提出了一种应急移动通信指挥平台的设计与实施^[4],对应对突发公共事件和平战结合为目的的应急指挥系统的特点进行了研究,并给出了指挥通信平台的组成,对音视频信息采集、无线有线传输进行了综合集成。2015 年, Shao 提出了一种基于散射通信的应急指挥系统^[5],将散射通信应用于机动指挥以及固定指挥中心的通信,同时集成多种通信手段以及多种信息采集处理系统。2020 年, Jamie 等对应急医疗系统进行了研究,将机器学习引入未分类病人的风险预测模型分流机制中,并对相关研究进行了综述^[6]。

随着通信技术的不断发展,应急指挥通信手段不断丰富,如卫星通信、北斗系统、短波通信、超短波通信、5G 通信、无线自组网、有线通信等^[7];应急装备种类不断增多,如应急指挥车、信息采集车、无人机、单兵系统、VSAT 卫星收发装备、应急指挥移动设施等^[8]。但应急事件发生的种类、时间、程度具有不特定性,造成了应急指挥决策、施策的难度加大。在实际

应用中,应急指挥系统大多只能完成操作员给出的一般性命令,而对于基于自动化和智能化的综合研判、数据挖掘、预案有效析出、资源科学调度等智力支持较为薄弱。另外,当前对于应急指挥的文献研究大多基于装备的集成、通信功能实现。在上述背景下,如何提高应急指挥系统的智能性成为了一项研究课题。

鉴于此,本文基于信息化智能技术给出了一种应急指挥系统的设计与实现方法。围绕一般应急指挥流程与环节,对系统应用架构和功能架构进行了设计;构建了基础数据库,实现了多媒体即时通讯功能;引入了 Petri 网^[9],进行了适应性修改,对可达性进行了分析;实现了智能化应急预案析出、应急资源调度策略生成等功能。最后,搭建了真实的实验环境,实验验证了本文方法的有效性和优越性。

本文第 2 节进行了架构设计,给出了系统应用架构及功能架构;第 3 节对基础功能进行了详细设计,主要包括数据库设计、即时通讯功能设计;第 4 节对高级功能进行了详细设计,主要包括应急预案析出、应急资源调度策略生成;第 5 节是实验部分,搭建了实验平台,验证了所提方法;最后总结全文。

2 架构设计

2.1 应用架构设计

图 1 给出了本系统的应用架构设计理念。

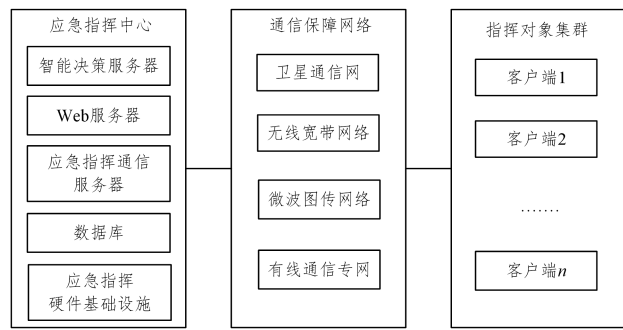


图 1 应用架构设计

Fig. 1 Application architecture design

图 1 中,系统应用架构分为 3 个部分:1)应急指挥中心,其中包括智能决策服务器、Web 服务器、应急指挥通信服务器、数据库、应急指挥硬件基础设施;2)通信保障网络,其中包括卫星通信网、无线宽带网络、微波图传网络、有线通信专网;3)指挥对象集群,其中包括 n 个客户端及其基础设施。应急指挥中心是开展应急指挥活动的信息汇聚中心、措施决策中心、命令发布中心、资源调度中心。应急指挥硬件基础设施可包括大屏幕显示屏、麦克、音响、计算机、调音台、指挥调度集、综合显控设备等,为实现应急指挥中心功能提供硬件平台支持。数据库汇聚了应急指挥相关信息,可以包括人员信息、节点信息、音视频信息、应急预案信息、设备装备信息等,为系统提供数据存储和访问支持。应急指挥通信服务器部署了应急指挥通信即时通信软件,可提供面向文字、音视频、文件、图片等的即时通信功能服务。Web 服务器可部署 Apache、boa 等软件^[10],为系统实现基于 Web 浏览器的应急指挥功能提供支持。智能决策服务器可运行智能决策算法,通过输入判定依据信息,得出应急指挥决策,为系统提供智力支持。通信保障网络融合了多种指挥通信保障手段,为应急指挥系统各节点的通信联络提供数据链路搭建、驳接和数据通信协议支持。

指挥对象集群包括了应急指挥的对象和可调度的资源,并部署了应急指挥即时通信软件,可与指挥中心进行数据互动。

2.2 系统功能架构设计

图 2 给出了本系统的功能架构设计理念。图 2 中,系统功能架构分为两部分:1)基础功能部分,其中包括文字通信、视频通信、音频通信、图片传输、文件传输、数据库管理、用户管理、通信链路管理功能;2)高级功能部分,其中包括群组管理、安全管理、资源调度与决策、数据信息挖掘、应急指挥组织体系管理、应急预案智能析出功能。基础功能主要体现在面向应急指挥的即时通信业务功能层面,即可实现各指挥单元间各类信息的采集、存储、交互。高级功能主要体现在基于基础功能的人工智能业务扩展层面,即可实现基于基础数据的综合研判及智能决策,进而对应急指挥系统资源进行科学调度。

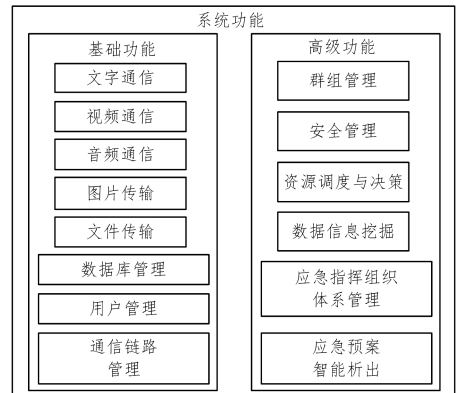


图 2 系统功能架构设计

Fig. 2 System functional architecture design

3 基础功能详细设计

3.1 数据库设计

图 3 给出了本系统的数据库设计理念。图 3 中,数据库主要设计为 4 个部分,其中包括日志管理、账户管理、消息管理、应急指挥管理。日志管理包括管理员日志、音视频日志、故障日志、资源调用日志、智能决策日志、登录日志、文件会话日志等数据表格;账户管理包括联系人分组、用户账户、组织架构、安全问题、群成员等表格;消息管理包括文件、音视频、文字、图片、系统消息、Web 服务、自动回复消息、消息明细、最近项等表格;应急指挥管理包括应急预案表格、应急资源表格、节点地址表格、安全规则、链路协议等表格。面向日志管理的数据表格能够存储系统应用和运行轨迹,可对系统维护、入侵检测、知识积累提供基础数据支持。面向账户管理的数据表格能够存储用户、组织信息、分组、权限信息,可对应急指挥通信系统用户合规有效使用提供支持。消息管理融合了系统涉及的各类通信联络数据管理表格,为物联数据存储、检索提供支持。应急指挥管理记录了应急资源信息,为数据挖掘、智能决策提供基础数据支持。对于每个表格都设计有若干属性,如音视频日志表格的属性包括:序列号、用户 ID、用户名、昵称、联系人用户 ID、联系人用户名、联系人昵称、开始时间、结束时间、时长、生成时间。又如群共享文件表格的属性包括:群 ID、文件 ID、文件 MD5 值、文件名、文件类型、文件大小、下载次数、最后下载时间、上传者用户 ID、上传者昵称、生成时间。



图3 数据库设计

Fig. 3 Database design

3.2 即时通讯功能设计

3.2.1 视频通信

系统视频通信设计为两种方式:1)利用基于硬件的视频会议终端搭建视频会议系统,如中兴、华为的视频会议终端等;2)利用软件形态的视频通信程序,实现视频通信功能。其主要原理为通信双方首先根据视频通信请求建立视频通信通道,进而根据通信双方的个体授权开启本地摄像设备;本地视频信息采集单元将采集到的视频信息压缩后,转换为流媒体实时地向目标地址传输;视频接收方将接收到的视频信息放入到本地缓冲池中暂时存放,并利用播放器实时播放。图4给出了视频通信时序图,部分视频通信代码如下。

```
{ $region'--TP2PVideoSendingItem Video--'}
TP2PVideoSendingItem=class(TObject)
```

```
public
    ItemBytes: Cardinal;
    ItemData: array[0..1500-1] of Byte;
    LastSendTime: Cardinal;
    SendCount: Integer;
end;
{$endregion}
```

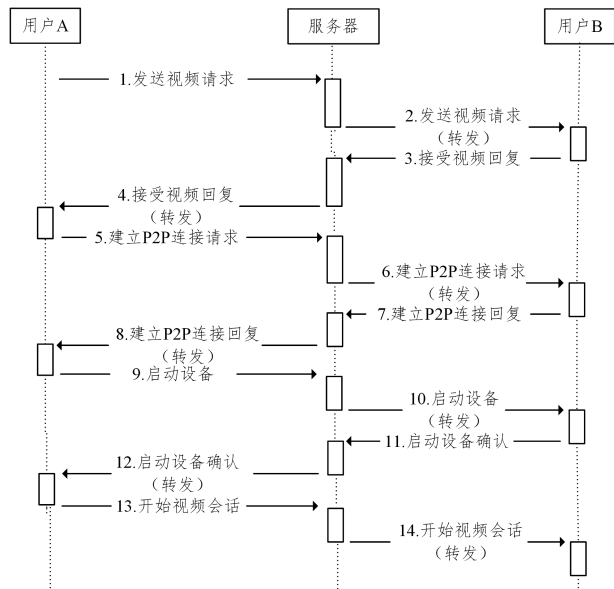


图4 视频通信时序图

Fig. 4 Video communication sequence diagram

3.2.2 音频通信

系统音频通信设计为两种方式:1)利用基于硬件的音频会议讨论系统,如 sony、polycom 等实现音频通信功能;2)利用软件形态的视频通信程序,实现视频通信功能。图5给出了音频通信程序的实现原理。图5中,本系统设计音频通信的原理为:通信双方首先根据音频通信请求建立音频通信通道,若P2P链路构建成功,则优先使用P2P通联模式;否则,在服务器链路畅通的前提下,利用服务器进行语音信息中转;系统根据通信双方的个体授权开启本地音频设备;语音采集在Windows平台使用 DirectShow 技术,通过 AudioCapture 捕获过滤器采集 PCM 音频数据^[11],并设置音频数据为 16 位 8000 Hz 格式。本设计中的语音编解码使用开源的 Speex 语音编解码库对原始语音数据进行压缩,进而通过网络传输到接收方;接收方从网络端口监听到音频信息,并接收暂存到虚拟缓冲池中,通过 Speex 解码还原成 PCM 音频数据格式;进而调用 Windows 平台的 WareOut API 接口,将音频 PCM 数据析出并播放出来。音频通信时序与视频通信时序相似,部分音频通信代码如下。

```
procedure TP2PAudioSendThread, Execute;
var pAudioData: PP2PMsg_AudioData;
begin while not Terminated do
    Begin FSendEvent. WaitFor(INFINITE);
        FSendEvent. ResetEvent;
        if Terminated then Break;
            pAudioData:= GetNextAudioData;
            while pAudioData <> nil do
                begin try
                    FSender. FP2PClient. SendMsg(PP2PMsg_UnknownData(pAudioData));
                    FreeMemory(pAudioData);
                except if Terminated then Break;
                    pAudioData:= GetNextAudioData;
```

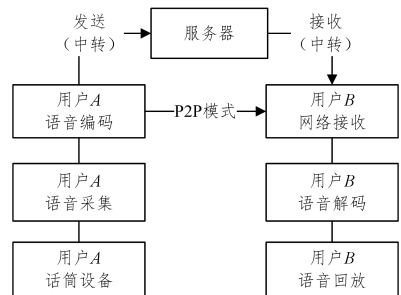


图5 音频通信原理图

Fig. 5 Schematic diagram of audio communication

3.2.3 消息通信

本系统中文本、图片、文件的通信方式为两种。一种是采用基于硬件的消息通信系统实现消息互通效果,如电台、北斗短报文、无线宽带集群通信等。另一种是利用软件基于通信网实现消息通信,其实现原理为:消息格式采用复合文档结构,以 JSON (JavaScript Object Notation (JavaScript 对象表示法))作为消息正文的存储方式,可达到在消息中插入各类信息的效果^[12]。图6为消息发送时序图。图6中,发送消息时,首先开启消息发送线程;若进行文件传输,则需要上传文件附件,通过计算文件的 MD5 值判断是否在服务器中已经存在,若存在则不再上传,否则进行上传;消息通过网络发送到

服务器中保存在聊天记录中,并通知接收方进行消息接收,进而完成消息传输。部分消息的传输代码如下。

```
bGroupChatOpened; = TGlobalClientEvents. OnQueryGroupChat-
Form(AGroupChatMsg, GroupId, 0, 0) <<> 0;
{ $region '有消息时提示' }
if bGroupChatOpened then //消息窗口已打开
objNotification := TNotification_GroupChatMsg. Create;
objNotification. GroupChatMsg. Assign(AGroupChatMsg); TGlobal-
ClientEvents. OnDeliverGroupChatMsg(AGroupChatMsg, GroupId,
0, 0); //投递消息
```

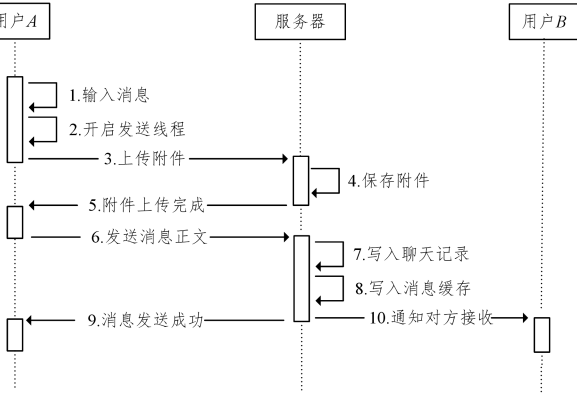


图 6 消息通信时序图

Fig. 6 Message communication sequence diagram

4 高级功能详细设计

4.1 应急预案智能析出

4.1.1 基本定义

定义 1(应急预案) 四元组 $Eplan = (Identity, Con, Prog, Prep)$ 为一个应急预案,其中:

- (1) $Identity$ 唯一标识了一个应急预案;
- (2) $Con = \{Item_1, Item_2, \dots, Item_j\}$ 标识了应急预案的触发条件集;
- (3) $Prog = \{pl_1, pl_2, \dots, pl_i\}$ 标识了应急预案的执行步骤;
- (4) $Prep = \{pr_1, pr_2, \dots, pr_k\}$ 标识了消除的应急预案触发条件。

例如: $Eplan_1 = (Identity_1, Con_1, Prog_1, Prep_1) = (001, (常规通信失灵, 信息传输不畅), 卫星通信, 信息传输恢复)$, 即序号为 001 的应急预案的触发条件是常规通信失灵以及信息传输不畅,采取的措施是进行卫星通信,消除的应急预案触发条件为信息传输恢复。

定义 2(网) $N = (P, T; F)$ 是一个网^[13],其中:

- (1) P 是一个有限库所集;
- (2) T 是一个有限变迁集,且 $P \cup T \neq \emptyset$ 及 $P \cap T = \emptyset$;
- (3) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是一个有限弧集;
- (4) $dom(F) \cup cod(F) = P \cup T$,其中:

$$dom(F) = \{x \in P \cup T \mid \exists y \in P \cup T: (x, y) \in F\},$$

$$cod(F) = \{x \in P \cup T \mid \exists y \in P \cup T: (y, x) \in F\}.$$

定义 3(前置库所及后置库所) $x \in P \cup T$ 是一个 $N = (P, T; F)$ 中的节点。 $\cdot x = \{y \mid (y, x) \in F\}$ 表示 x 的前置库所; $x \cdot = \{y \mid (x, y) \in F\}$ 表示 x 的后置库所。如果 $X \subseteq P \cup T$, 则 X 的前置库所和后置库所分别表示为 $\cdot X = \cup_{x \in X} \cdot x$ 及 $X \cdot = \cup_{x \in X} x \cdot$ 。

定义 4(Petri 网) $PN = (P, T; F, M_0)$ 是一个 Petri 网^[14],其中:

- (1) $N = (P, T; F)$ 是一个网;
- (2) $M: P \rightarrow Z$ 是一个标识函数,其中 M_0 是初始标识, $Z = \{0, 1, 2, \dots\}$ 是一个自然数集;
- (3) 变迁引发规则:
 - 1) 如果 $\forall p \in \cdot t: M(p) \geq 1$, 则 t 在标识 M 下是使能的,表示为 $M[t]$;
 - 2) 如果 t 在标识 M 下是使能的,则 t 能引发,且一个新的标识 M' 从标识 M 中计算得来,表示为 $M[t] > M'$, 其中:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) + 1, & \text{if } p \in t \cdot - \cdot t \\ M(p) - 1, & \text{if } p \in \cdot t - t \cdot \\ M(p), & \text{else} \end{cases}$$

为了使 Petri 网更好地适应应急预案的形式化建模,本文在 Petri 网的基础上对标识计算规则进行了修改。下面给出改进的 Petri 网的形式化定义,简称为 DPetri。

定义 5(DPetri 网) 五元组 $DPN = (P, T; F, Prep, M)$ 为一个 DPetri 网,当且仅当:

- (1) $N = (P, T; F)$ 是一个网;
- (2) $M: P \rightarrow \{0, 1\}$ 是一个标识函数,且 $\forall p \in P, M(p)$ 表示 p 中的托肯(token)数;
- (3) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是一个有向弧集;
- (4) $Prep \subseteq P$;
- (4) 变迁引发规则:

- 1) 如果 $\forall p \in \cdot t: M(p) = 1$, 则 t 在标识 M 下是使能的,表示为 $M[t]$;
- 2) 如果 t 在标识 M 下是使能的,则 t 能引发,且一个新的标识 M' 从标识 M 中计算得来,表示为 $M[t] M'$, 其中:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) + 1, & \text{if } p \in t \cdot - \cdot t \\ M(p) - 1, & \text{if } p \in Prep \\ M(p), & \text{else} \end{cases}$$

4.1.2 形式化建模

下面对单个应急预案进行形式化模型构建。

算法 1 应急预案 DPetri 网的形式化模型构建算法

输入: 应急预案 $Eplan_b = (Identity, Con, Prog, Prep)$

输出: 应急预案的 DPetri 网模型

- Step1 新建一个 DPetri 网 $DPN_a = (P, T; F, Prep, M)$, 新建一个变迁 t , 令 $t \in DPN_a \cdot T$ 。
- Step2 遍历 $Eplan_b \cdot Con$, 假设当前元素为 $Item_j$, 则新建一个库所 p_j , 令 p_j 的标识为 $Item_j$, 令 $p_j \in DPN_a \cdot P$, 令 $p_j \in \cdot t$ 。
- Step3 遍历 $Eplan_b \cdot Prog$, 假设当前元素为 pl_i , 则新建一个库所 p_i , 令 p_i 的标识为 pl_i , 令 $p_i \in DPN_a \cdot P$, 令 $p_i \in t \cdot$ 。
- Step4 遍历 $Eplan_b \cdot Prep$, 假设当前元素为 pr_k , 则新建一个库所 p_k , 令 p_k 的标识为 pr_k , 令 $p_k \in DPN_a \cdot Prep$ 。
- Step5 输出 $DPN_a = (P, T; F, Prep, M)$ 。

下面对多个应急预案的组合进行形式化模型构建。

算法 2 应急预案集合的 DPetri 网形式化模型构建算法

输入: 应急预案集合 $Q = \{Eplan_1, Eplan_2, \dots, Eplan_i\}$

输出: 应急预案集合的 DPetri 网模型

- Step1 新建一个 DPetri 网 $DPN_c = (P, T; F, Prep, M)$ 。
- Step2 遍历应急预案集合 $Q = \{Eplan_1, Eplan_2, \dots, Eplan_i\}$, 假设当前元素为 $Eplan_j$, 则根据算法 1 生成 $Eplan_j$ 的 DPetri 网模型 $DPN_d = (P, T; F, Prep, M)$ 。

Step3 把 DPN_d 的所有库所并入 DPN_c 的库所集中,即 $DPN_c.P = DPN_c.P \cup DPN_d.P$ 。把 DPN_d 的所有变迁并入 DPN_c 的变迁集中,并且令变迁的标记为 $Eplan.Identity$,即 $DPN_c.T = DPN_c.T \cup DPN_d.T$ 。把 DPN_d 的所有连接弧并入 DPN_c 的连接弧集中,即 $DPN_c.F = DPN_c.F \cup DPN_d.F$ 。把 DPN_d 的 $Prep$ 并入 DPN_c 的 $Prep$ 集中,假设 $DPN_d.T$ 在 DPN_c 中的变迁为 t_i ,则令 $Prep$ 的标记为 t_i 。

Step4 输出 DPetri 网 $DPN_c = (P, T; F, Prep, M)$ 。

4.1.3 应急预案组合发现

算法 3 给出了 DPetri 网的可达性分析方法。

算法 3 DPetri 网的可达标识计算算法

输入:DPetri 网 $DPN_a = (P, T; F, Prep, M)$

输出:DPN_a所有可达标识

Step1 构建 DPetri 网一步可达计算规则。

Step1.1 设置标志变量 $Flag=0$,新建一步可达标识为 M' ;假设当前标识为 M_0 ,遍历 $DPN_a.T$,若当前元素为 $t \in DPN_a.T$,则遍历 t ,假设当前元素为 $p_j \in t$,若 $M_0(p_j) \neq 1$,则令 $Flag=1$ 。

Step1.2 若 $Flag$ 等于 0,则 $M[t]$ 。令 $M' = M_0$,遍历 $DPN_a.P$,若当前元素为 p_i ,且 $p_i \in t$,且 $M_0(p_i) = 1$,且 $p_i \in DPN_a.Prep$,则 $M'(p_i) = 0$;若 $p_i \in t'$,则 $M'(p_i) = 1$ 。

Step1.3 若 $Flag$ 等于 1,则变迁不使能, $M' = M_0$ 。

Step2 计算 DPetri 网的所有可达标识。

Step2.1 建立 4 个常量 $z=0, b=1, v=2, u=3$ 。建立两个变量 $k=1, m=0$ 。创建一个三维数组 $A[m][u]$,且 $m = +\infty$ 。

Step2.2 假设 DPetri 网中所有的初始标识集合为 $W = \{M_0, M_1, \dots, M_i\}$ 。遍历集合 W ,假设当前元素为 M_k 。

Step2.3 遍历 $DPN_a.T$,若当前元素为 t_i ,若 t_i 的标识都为 1,则 $M_k[t_i]$ 。根据 DPetri 网一步可达计算规则,计算出 t_i 变迁后的标识 M' ,将标识 M_k 放入 $A[k][z]$ 中,将 M' 放入 $A[k][b]$ 中,将 t_i 放入 $A[k][v]$ 中。

Step2.4 令 l 从 0 到 $k-1$ 变化,如果 $A[k][b]$ 等于 M' ,则返回,否则 $k=k+1$ 。令 M' 为当前标识,返回 Step2.3 进行迭代。

Step2.5 输出 $A[m][u]$ 。

算法 4 给出了应急预案组合发现方法。

算法 4 应急预案组合发现算法

输入:应急预案集合 $Q = \{Eplan_1, Eplan_2, \dots, Eplan_i\}$,应急预案选择先知条件 $Con = \{Item_1, Item_2, \dots, Item_j\}$

输出:应急预案组合

Step1 由算法 2 构建应急预案集合的 DPetri 网形式化模型,假设其模型为 $DPN_a = (P, T; F, Prep, M)$ 。

Step2 由算法 3 获取 DPetri 网的可达标识 $A[m][3]$ 。

Step3 新建一个标识 M_i ,令 $M_i(p) = 0, p \in DPN_a.P$;遍历 $DPN_a.P$,若当前元素为 p_i ,且 $p_i \in Con$,则令 $M_i(p_i) = 1$ 。新建应急预案编号队列 $IDs = \emptyset$ 。

Step4 遍历 $A[m][0]$,假设当前元素为 $A[k][0]$,若 $A[k][0]$ 等于 M_i ,则将变迁 $A[k][2]$ 的标记 $Eplan.Identity$ 放入队列 IDs 中。设定 $M_i = A[k][1]$,返回 Step4 进行迭代。

Step5 输出应急预案编号队列 IDs 。

4.2 资源调度与决策

定义 6 (应急资源) 五元组 $Res = (Identity, Class, EplanId, Prog, State)$ 为一个应急资源,其中:

- (1) $Identity$ 唯一标识了一个应急资源;
- (2) $Class = \{Cl_1, Cl_2, \dots, Cl_j\}$ 标识了应急资源类型;
- (3) $EplanId = \{EId_1, EId_2, \dots, EId_i\}$ 标识了应急资源

适用的应急预案 ID 号;

(4) $Prog = \{Pg_1, Pg_2, \dots, Pg_k\}$ 标识了资源可完成的应急预案执行步骤;

(5) $State$ 标识了资源状态,为布尔类型,0 标识了资源状态不佳,1 标识了资源状态良好。

算法 5 给出了资源调度与决策方法。

算法 5 应急预案组合的资源调度与决策算法

输入:应急预案组合 $Q = \{Eplan_1, Eplan_2, \dots, Eplan_i\}$;应急资源集合

$R = \{Res_1, Res_2, \dots, Res_j\}$

输出:应急预案组合的资源调度策略

Step1 应急预案的资源调度规则。

Step1.1 新建一个应急资源队列 $Rt = \emptyset$;新建一个标志变量 $Flag_b = 0$,假设应急预案为 $Eplan_a = (Identity, Con, Prog, Prep)$ 。

Step1.2 遍历应急预案 $Eplan_a.Prog$,假设当前元素为 p_i ,令 $Flag_b = 0$ 。

Step1.3 遍历应急资源集合 R ,假设当前元素为 $Res_k = (Identity, Class, EplanId, Prog, State)$,若 $Eplan_k.Identity \in Res_k.EplanId$,且 $State$ 等于 1,且 $p_i \in Res_k.Prog$,则将 Res_k 放入队列 Rt 中,并标注 Res_k 所关联的应急预案 $Eplan_a$ 及其所执行步骤 p_i ,令 $Flag_b = 1$ 。

Step1.4 若 $Flag_b = 0$,则返回 $Eplan_a.Prog$ 无对应资源的信息。

Step1.5 生成应急资源队列 Rt 。

Step2 应急预案组合的资源调度与决策。

Step2.1 新建一个应急资源队列集合 $U = \emptyset$;遍历应急预案组合 Q ,假设当前元素为 $Eplan_k$,根据第一环节给出的应急预案的资源调度规则,生成 $Eplan_k$ 的资源调度队列 Rt ,并将 Rt 放入集合 U 中。

Step2.2 输出集合 U 。

5 实验

为验证本文方法的可行性、优越性,基于 Embarcadero RAD Studio 10.2 系统开发平台^[15],采用 Delphi 高级编程语言,部署 SQLite 数据库,集成开发了一套采用 C\S、B\S 复合结构的应急指挥通信软件,软件分为服务器端软件、客户端软件,可实现本文所述的软件技术功能,为本文实验提供支持。

首先,构建测试数据库。根据图 3 给出的数据库表格自定义相关测试数据,如应急资源表格主要自定义了人力资源、装备资源、通信资源、资金保障等资源信息,又如应急预案表格主要根据定义 1 从 $Identity, Con, Prog, Prep$ 4 个方面对应急预案形式化内容进行了数据构建。其次,部署测试单元。在指挥中心部署应急指挥服务器端软件,在应急指挥通信车和应急救援办公室内部署应急指挥客户端软件。然后,搭建实验测试网络链路,开通指挥中心、机动通信车、应急救援办公室中的卫星通信资源,卫星通信带宽为 8M,并在 3 个通信节点构建全链路路由通信协议。最后,设计实验案例,通过系统信息输入接口输入应急预案触发条件信息,测试系统是否析出合适的应急预案,测试系统是否推荐出合适的资源调度与决策信息,测试系统是否能够有效下达应急指挥命令调度应急资源。另外,与文献[16-18]中的方法进行技术比较,突出了所述方法的技术优势。

图 7 给出了应急预案及资源调度策略的智能析出效果。图 7 中,应急预案的触发条件生成途径有两种:1)在应急预案智能析出功能页面中,点击随机生成触发条件按钮,系统在数据库应急预案表格的 Con 属性记录中随机抽取若干数值构

建应急预案触发条件集合;2)在页面中人工输入应急预案触发条件,通过点击人工输入触发条件按钮,系统将捕获文本框中的信息构建应急预案触发条件集。通过点击析出应急预案,系统执行算法4析出符合条件的应急预案,并在文本框中进行显示。通过点击生成资源调度策略,系统根据析出的应急预案执行算法5,析出应急预案组合的资源调度策略,并在文本框中进行显示。

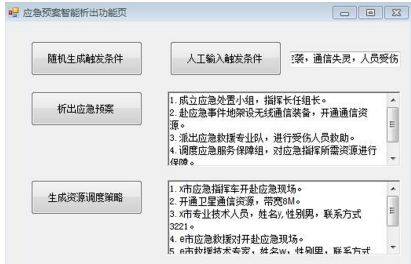


图7 应急预案资源调度策略析出
Fig.7 Generation of emergency plan

应急预案及资源调度策略析出后,指挥长可通过应急指挥通信系统向相关单位下达任务命令。图8给出了应急指挥通信软件的用户账户管理页面。图8中,系统可对用户基本信息、用户等级、用户角色、部门机构等进行设置。为便于测试,构建3个测试账户分别为指挥长、通信专业队队长、应急救援队队长;admin为系统超级管理员。



图8 用户账户管理
Fig.8 User account management

图9给出了指挥长利用软件进行点对点命令下达的效果。图9中,指挥长可以向机构所属成员直接下达应急工作任务,询问应急工作状态。机构成员可根据权限向指挥长进行基于文字、图片、文件的多手段汇报。



图9 点对点指挥通信

Fig.9 Point-to-point command communication

图10中,系统根据应急预案所关联的单位和人员生成了应急指挥工作组,指挥长可通过群组高效便捷地向相关人员下达调度命令。

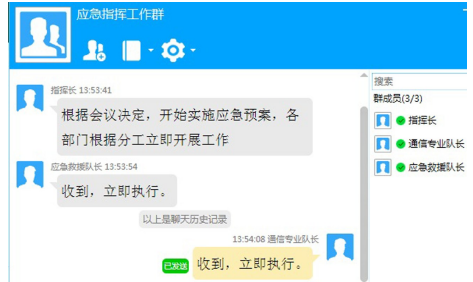


图10 群组指挥通信

Fig.10 Group command communication

图11为指挥长利用软件进行音视频指挥通信的效果图。图11中,指挥长在应急指挥中心通过卫星通信链路,基于应急指挥通信软件与机动通信车管理员进行音视频通信及任务下达。

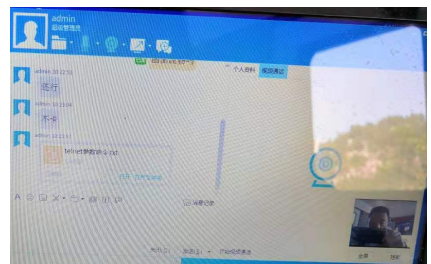


图11 音视频指挥通信

Fig.11 Audio-visual command communication

本文引入BP^[16],PSO^[17],BAS^[18]这3种方法与本文所述方法进行技术比较,如图12所示,本文方法在应急预案查准率方面具有一定优越性。

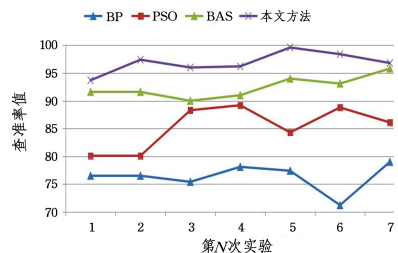


图12 方法比较图

Fig.12 Method comparison chart

结束语 鉴于当前应急事件不时发生,以及应急指挥通信系统智能化水平有待提高的实际需求,本文给出了一种智能化应急指挥通信系统的设计与实现方法。对系统的应用架构、系统功能架构进行了设计;对系统数据库、即时通信功能、应急预案析出、应急资源调度策略生成等功能进行了详细介绍。本文的技术特点有:1)从实际应急指挥一般流程出发,实现了应急预案析出、应急资源调度策略生成、应急指挥信息发布等功能,具有一定的技术方案系统性和完整性;2)引入Petri网进行系统建模,提出了DPetri网的定义和可达性分析方法,具有一定技术新意。实验结果证明了本文方法具有一定的技术性能优势,下一步将对应急指挥系统的形式化建模与验证技术进行研究。

- Principal Component Analysis[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116:149-154.
- [10] LIU Y, YANG Q W, YAO Y H, et al. Current Situation and Existing Problems of Factor Analysis Method[J]. *Journal of Finance and Accounting*, 2019, 7(6):192-199.
- [11] WANG Y, DENG X D. Empirical Study on the Performance Evaluation of Agricultural Products Supply Chain Based on Factor Analysis[J]. *China Business and Market*, 2015, 3:10-16.
- [12] MOSLEM I, DIANAT I, OLFAT I, et al. Selection of elite F3 lines in cucumber using factor analysis method[J]. *International Journal of Vegetable Science*, 2020, 26(5):498-505.
- [13] WANG M M. Research on PTC Cable Materials Based on Principal Component Analysis and Quantitative Correspondence Factor Analysis Method in Big Data Technology[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 493(1):012048.
- [14] WEN R Y, WANG H Y. Evaluation of Air Traffic Complexity Based on Factor Analysis and K-means Clustering[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2016, 47(3):384-388.
- [15] WEIDE A C. A Beauducel. Varimax Rotation Based on Gradient Projection is a Feasible Alternative to SPSS[J]. *Frontiers in Psychology*, 2019, 00645.
- [16] ALAVI S M, EBRAHIMI A, POURMOURDININ E, et al. Identifying and Classifying the Factors Affecting Fast Food Store Selection Using Factor Analysis Method[J]. *Journal of Business Management*, 2018, 9(4):827-854.
- [17] YE Y. Study on the Evaluation Index System of Guangdong's All-for-One Tourism Destination Competitiveness Based on Factor and Cluster Analysis[J]. *Open Journal of Social sciences*, 2019, 7(3):418-428.



LUO Jing-jing, born in 1990, postgraduate, probationer. Her main research interests include air traffic control training data visualization and flight procedure design.

(上接第 618 页)

参 考 文 献

- [1] YANG W X, FAN K L, LEUNG L P. The practice and safety profile of endotracheal intubation in an emergency department: A single-center study in Shenzhen, China [J]. *HongKong Journal of Emergency Medicine*, 2020, 27(6):428-433.
- [2] ANTONIO C, SARA N, DEBORA S, et al. Impact of COVID-19 on the Pattern of Access to a Pediatric Emergency Department in the Lombardy Region, Italy [J]. *Pediatric Emergency Care*, 2020, 36(10):213-225.
- [3] WANG X M. Research on mobile model and emergency communication system of post-earthquake emergency rescue [D]. Donghua University, 2020.
- [4] TIAN Y. Design and implementation of Emergency Mobile Communication Command Platform [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [5] SHAO J W. An emergency command system based on scattering communication [D]. Xidian University, 2015.
- [6] JAMIE M, JANETTE T, RICHARD J, et al. Using machine-learning risk prediction models to triage the acuity of undifferentiated patients entering the emergency care system: a systematic review[J]. *Diagnostic and Prognostic Research*, 2020(10):725-734.
- [7] GE Y, WANG T, XU Y B. Assessment of emergency management capability based on gray analytic hierarchy process [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(12):80-86.
- [8] SHEN H Z. Emergency sequential group decision-making and support system for sudden critical events [M]. Beijing: Science Press, 2011:79-85.
- [9] DU Y Y, JIANG C J, ZHOU M C. A Petri net-based model for verification of obligations and accountability in cooperative systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2009, 39(2):299-308.
- [10] HSIEH M C, WANG M Y, LEE W C, et al. Application of HFACS, fuzzy TOPSIS, and AHP for identifying important human error factors in emergency departments in Taiwan[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2018, 67:171-179.
- [11] OZDEMIRA, TUYSUZ F. An Integrated Fuzzy DEMATEL and Fuzzy ANP Based Balanced Scorecard Approach: Application in Turkish Higher Education Institutions[J]. *Journal of Multiple-Valued Logic & Soft Computing*, 2017, 28:251-287.
- [12] CHEN E Y, YUAN J H, LI Z W. Research on JSON-based sensor source trust evaluation model for Environmental monitoring [J]. *Journal of the Xi'an University of Technology*, 2020(7).
- [13] DU Y Y, NING Y H, LIANG Q. Reachability analysis of Logic Petri Nets using incidence matrix [J]. *Enterprise Information Systems*, 2014, 8(6):630-647.
- [14] DU Y Y, NING Y H. Property analysis of Logic Petri Nets using reachable marking graphs [J]. *Frontiers of Computer Science in China*, 2014, 8(4):684-692.
- [15] ZHEN S Z, DENG Y F. Evaluation System of Urban Public Emergency Response Capability and its application [J]. *Journal of the Liaoning Technical University*, 2006, 25(6):943-946.
- [16] WANG W, CAO Y. Evaluation of Government Emergency Management Capability based on BP neural network [J]. *Research on Science and Technology Management*, 2018(10):117-125.
- [18] YUAN S J, LIANG R W. PSO algorithm based emergency logistics vehicle scheduling [J]. *Logistics Technology*, 2019(7):339-346.
- [19] WANG F. Research on crowd evacuation method and simulation based on BAS algorithm [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2019.



NING Yu-hui, born in 1981, Ph.D., senior engineer. His main research interests include design and application of computer software, command communication and emergency command equipment.