高技术通讯 2022 年 第 32 卷 第 11 期:1166-1177

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2022.11.007

城市天然气管网巡检和抢修协同动态调配策略①

董红召② 胡文静 张 楠 佘翊妮③

(浙江工业大学智能交通系统联合研究所 杭州 310014)

摘 要 城市天然气管网巡检和管网事故发生后的抢修调度都是保障天然气管网安全至关重要的任务,但目前缺少同时考虑巡检工作分配和应急抢修调度之间相关性的劳动组织架构与应急管理的动态优化方法。为此本文提出了一种工作人员协同完成天然气管网巡检和抢修的检修区域一体化管理模式,基于此及实际场景不确定性和管网抢修时长不确定性,构建以最小抢修响应时间和最大调度偏好为目标的动态协同调度模型。在获取实时道路行程时间的基础上,考虑抢修任务新增、抢修任务撤销和抢修任务未按时完成 3 种动态事件对调配策略的影响,结合滚动时域法和改进双基因位传算法完善动态算法框架,并用杭州燃气管网事故抢修历史数据进行验证分析。结果表明,检修区域一体化下的协同调配策略在应急抢修响应时间和员工劳动效率方面都有较大提升。

关键词 应急调度;管网巡检;调度偏好;响应时间;抢修调度;不确定性;巡检抢修协同;管网安全

0 引 言

提升管道安全保障能力同时提高工作人员劳动效率对城市天然气管网运行管理有重大意义。当前天然气管网抢修工作人员在管网事故发生后及时前往事故现场,但是其等待事故上报的时间缺少利用,存在大量时间空白。与此同时,天然气管道网络规模逐年增大,仅靠有限的巡检人力完成日常巡检维护工作压力倍增。为此,尝试淡化巡检员工和抢修员工的工作界限,提出巡检抢修一体化动态协同调配策略,让所有员工协同完成巡检抢修工作,以提高天然气管网巡检自查率的同时提高抢修响应效率。为使叙述逻辑清晰,下文统称巡检员工和抢修员工为检修单元。

巡检抢修协同工作模式的全面实现受到多方面的阻力。一方面,检修单元技术等级差异明显、城市拥堵状况未知、抢修环境优劣程度难以判断等原因,使得天然气管道抢修响应时长和抢修完成时长存在极大不确定性;另一方面,抢修新增、抢修撤销和抢修任务需求变化等动态事件的发生对调配策略的整体影响,为管网的最优抢修调度决策增加了难度。另外,因为检修单元同时参加抢修任务和日常的巡检维护任务,抢修工作量分配的均衡程度造成巡检工作的完成差异,甚至会影响抢修服务质量。

近年来,学者们在应急调度方面研究的侧重点在于急迫性和经济性[1-3],即建立多目标模型时关注调度方法的时效性和调配方案的成本[4-5]。关于不确定条件下的应急资源调度,现有研究侧重点为人力物力资源量化后的不确定性需求。周蕾[6]针对突发事件后,应急需求的高度时变、随机、复杂特性,将服务覆盖面问题引入到应急车辆调度问题。Wang 等人[7]划分应急调度需求为确定性需求和需要预测的不确定性需求,引入概率函数表示不确定

① 国家自然科学基金(61773347),浙江省重点研发计划(2020C03078)和浙江省科技计划项目(LGF18E080018)资助。
② 男,1969 年生,博士,教授;研究方向:智能交通;E-mail: its@zjut.edu.cn。
③ 通信作者,E-mail: qiche@zjut.edu.cn。
(收稿日期:2021-03-31)

性需求,构建考虑需求未满足度的应急调度优化模型。Zhu 等人[8]将调度对象的调度需求划分为多个周期,根据多个子周期的交通变化,提出时变多智能体遗传算法求解的应急资源调度优化模型。针对应急救援的动态特性,Shen[9]研究了自然灾害发生后短期时间内对居住场所的需求,以此为研究对象提出一种短周期时变分配模型。现有调度研究在时间方面多是基于预测信息准确的前提下完成后续模型的建立,极少有针对工作时长不确定性进行深入研究,已有研究不能完全适应于抢修过程时间不确定性和具有任务累计效应的天然气管网巡检抢修协同调度。综上所述,面对天然气管网管理严峻形势,巡检自查和事故抢修的协同调配管理以保证燃气管道网络的安全运行就凸显了其迫切性和重要性。因此,结合动态道路网络信息,考虑平衡巡检自查和事故抢修的天然气管网动态协同调配策略研究不容忽视。

1 巡检抢修一体化协同调配现状

在巡检抢修一体化工作模式下,因为检修单元技术等级差异,巡检抢修协同工作机制并不是单纯的让抢修员工和巡检员工的工作内容完全重合。原抢修员工改变固定站点等待管网事故上报的工作机制,以预防、发现并处理天然气管网事故为目的协助原巡检员工执行管网安全巡检工作,这样减少了等待任务上报的时间浪费,可以有效提高管网安全维护效率。原巡检员工自查天然气管网的故障,在发现管网事故有安全隐患时提前预警,联系区域内原抢修员工协作完成问题管道的修复工作,可以有效简化管道事故的上报流程,减少上报延迟的情况。

当前当巡检员工发现管网抢维修事故,联系最靠近事故点位置的原抢修员工执行抢修任务(以下统称“最短路调配策略”),该调配策略充分考虑距离因素,但对于检修单元协同工作与管网事故不确定性大的天然气管网安全维护和管理而言存在诸多弊端,导致抢修响应时间超过调度管理部门硬性要求时间窗情况多、检修单元工作量差异大、抢修报修服务反馈较差等问题。

巡检抢修一体化工作模式拓宽了管网抢修报修时可选调度人员的范围,为优化调配创造了机会。计及抢修任务不确定抢修耗时和动态事件生成的不确定需求,本文提出综合考虑抢修效率和检修工作分配管理的动态协同优化调配策略。

2 巡检抢修一体化协同优化调配策略

天然气管网抢修事故(下文统称“抢修任务”)的优化调配问题是一个多类型调配主体匹配多类型任务的组合优化问题[10-11]。已知抢修任务调度需求、检修单元资源配置和抢修任务地理位置等信息,首先提出抢修任务可靠性调配策略,给出抢修响应阶段不确定的抢修响应时间、抢修执行阶段不确定的抢修耗时的可靠确定方法。再提出抢修任务公平性调配策略以均衡检修单元工作量。结合公平性和可靠性调配策略,构建管网检修一体化协同调配模型,满足燃气调度管理部门规定的抢修响应硬性时间窗和抢修任务调度需求等约束,得到抢修响应时间短和抢修任务分配公平 2 个优化目标的动态调配策略。

2.1 抢修任务可靠性调配策略

国内外学者对应急调度中不确定因素的确定方法[12-14]进行了深入研究,大部分研究都关注资源需求的不确定性[15-16]。但是城市燃气管网抢修调度高度依赖于实时环境的影响,如果要及时反馈接收到的实时信息,便需要应对由各种动态事件导致的实时道路信息变化、抢修调度需求变化等,由此提出抢修任务可靠性调配策略。计算抢修任务的抢修耗时的预测区间,给出抢修响应时间在不同动态环境背景的求解方法,提高调配策略的鲁棒性。

定义抢修任务的抢修响应时间为管网事故发出抢修调度需求到检修单元开始执行任务的时间,主要与到达抢修任务现场的行程时间、检修单元之间的协作等待时间有关。定义抢修耗时为抢修任务从执行开始到执行完成的时间。

2.1.1 抢修耗时可靠经验值

燃气管网的抢修耗时分析是日常巡检抢修任务分配和抢修调度管理的重要参考因素,抢修耗时与

抢修任务的调度需求之间有很强的相关性。因此，通过调研将抢修任务按照实际抢修调度需求分为五大类，记为 $L=\{1,2,3,4,5\}$，1～5 分别表示任务类型 1～任务类型 5，对应调度需求为 1 名原骑行电瓶车的抢修员工；2 名原骑行电瓶车的抢修员工；1 名原驾驶机具车的抢修员工；1 名原骑行电瓶车的抢修员工和 1 名原驾驶机具车的抢修员工；2 名原驾驶机具车的抢修员工。基于此，考虑未知拟合线型的抢修数据，通过贝叶斯综合模型法[17]给出抢修耗时分布模型。管网抢修任务的抢修耗时分布确定过程具体如下。

计算历史抢修案例数据属于备选线型的先验概率。选取 4 条备选线型组成备选线型集合记为 $M=\{1,2,3,4\}$，1～4 分别表示伽马分布、威布尔分布、对数正态分布和广义极值分布。为得到抢修耗时变量 H 属于线型 M_i 的先验概率 $p(M_i)$，选取 4 种评价准则和一个数据样本 X 统计量提出一种综合评价函数[14]。评价指标集合记为 $Q=\{1,2,3,4,5\}$，1～5分别表示 RMSE（均方根误差最小）准则、ABS（离差绝对值和最小）准则、AIC（信息量最小）准则、K-S 检验、标准差（standard deviation）。则综合评价函数的表达式为

$$CEI(i)=\frac{1}{N}\left\{\sum_{j=1}^{n}\frac{x_{ij}}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant k}\{x_{ij}\}}\right\} \tag{1}$$

式中 x_{ij} 表示第 i 个备选线型的第 j 个评价指标值，N 表示评价指标个数，k 表示备选线型个数。综合评价函数可以量化多个备选线型的实际拟合效果，同时增加标准差为评价指标之一，可以描述抢修耗时数据离散程度变化规律。

计算数据样本属于线型 M_i 的先验概率 $p(M_i\mid X)$ 的表达式为

$$P(M_i\mid X)=\frac{P(M_i)l(X\mid M_i)}{\sum_{j\in k}P(M_j)l(X\mid M_j)} \tag{2}$$

式中 k 表示备选线型的个数，$l(X\mid M_j)$ 表示数据样本 X 来自线型 M_j 条件下的似然函数。由不同备选线型计算对应加权后验概率 $p(M_i\mid X)$，由此抢修耗时变量 H 的概率密度函数可以由全概率公式表示为

$$A(H\mid X)=\sum_{i\in k}f_i(H\mid M_i)p(M_i\mid H) \tag{3}$$

式中 $f_i(H\mid M_i)$ 表示属于第 i 种待选线型的概率密度函数，可以得到指定频率 P 下的抢修耗时 H_p 即可表示为

$$\begin{aligned}F(H\geqslant H_p\mid X)&=\int_{H_p}^{+\infty}A(H\mid X)\mathrm{d}H\\&=\int_{H_p}^{+\infty}\sum_{i\in k}f_i(H\mid M_i)p(M_i\mid H)\mathrm{d}H\end{aligned} \tag{4}$$

用上述综合评价函数修正抢修耗时求解，则考虑样本数据拟合程度的前提下，指定频率 P 下的抢修耗时 H_p 即可表示为

$$F_c(H\geqslant H_p\mid X)=F\left(H\geqslant\frac{H_p}{CEI(i)}\,\middle|\,X\right) \tag{5}$$

2.1.2 不同调度情景的抢修响应时间

时间的紧迫性是城市天然气管道事故抢修调度最突出的特性，缩短抢修任务的抢修响应时间是抢修调配策略的关键目标函数之一。

通过调研并综合行业经验，检修单元与抢修任务之间存在多种数量对应关系，由此存在多种调度情景的抢修调度方案。在有限检修单元数量的约束下，为讨论不同调度情景与抢修调配策略之间的相互影响关系，分别考虑一般抢修调配情景和资源冲突抢修调配情景。一般抢修调配情景描述为可及时响应的检修单元的数量能满足抢修任务数量。资源冲突抢修调配情景的燃气抢修任务与检修单元数量不平衡，如城市工程建设或季节原因，可能导致某段时间内的调度需求大幅增加，随时会出现检修单元数量不能满足抢修任务的情况。

（1）一般抢修调配情景的抢修响应时间

在一般抢修调配情景，充分考虑时间紧迫性，优先调度可以及时响应的检修单元，此时抢修任务的抢修响应时间主要与到达抢修任务位置的行程时间和检修单元之间的协作等待时间有关。易知抢修任务的剩余修复时间 S_i 由抢修耗时可靠经验值 P_l 与已完成时间的差值得到。抢修响应时间因为不同的任务类型又分为 2 种子情况。

情况 1 当抢修任务为类型 1 或者类型 3 时，调度需求为一个检修单元，此时抢修任务 k 的抢修响应时间 R_k 只包括检修单元 i 到达抢修任务现场的行程时间，此时表达式为

$$R_k = A_{ik} \cdot J_{ik},\ \forall i \in I,\ \forall k \in T \tag{6}$$

式中 A_{ik} 表示检修单元 i 与抢修任务 k 之间分配关系的布尔变量,$A_{ik}=1$ 表示检修单元 i 执行抢修任务 k,否则为 0;R_k 表示抢修任务 k 的抢修响应时间;J_{ik} 表示检修单元 i 到达抢修任务 k 现场的实时行程时间;I 是所有检修单元集合,T 是实时新增抢修任务的集合。

情况 2 当抢修任务为类型 2、类型 4 或者类型 5 时,调度需求为由 2 个检修单元组成的抢修集合,2 个检修单元之间存在协同等待时间,表示为 W_{ij},此时抢修任务的抢修响应时间包括 2 部分时间,即:

$$W_{ij} = |A_{ik} \cdot J_{ik} - A_{jk} \cdot J_{jk}|,\quad i \neq j,\ \forall i, j \in I,\ \forall k \in T \tag{7}$$

$$R_k = \max\{A_{ik} \cdot J_{ik}, A_{jk} \cdot J_{jk}\},\quad i \neq j, \forall i, j \in I,\ \forall k \in T \tag{8}$$

(2)资源冲突抢修调配情景

因为检修单元数量紧张,有必要考虑所有检修单元以缓解抢修调度需求增加但是检修单元数量不变产生的调度压力。此时抢修任务的抢修响应时间主要与负责修复的上一抢修任务的剩余修复时间、到达抢修任务位置的行程时间和检修单元之间的协作等待时间有关。

情况 1 当抢修任务为类型 1 或者类型 3 时,调度需求为一个检修单元,此时抢修任务的抢修响应时间为

$$R_k = A_{ik} \cdot (F_i \cdot S_i + J_{ik}),\ \forall i \in I,\ \forall k \in T \tag{9}$$

式中 S_i 表示检修单元 i 的剩余抢修时间。F_i 表示检修单元 i 是否有剩余抢修任务的布尔变量,$F_i=1$ 表示检修单元 i 还在执行抢修任务,否则为 0。

情况 2 当抢修任务为类型 2、类型 4 或者类型 5 时,调度需求为 2 个检修单元,此时抢修任务的抢修响应时间为

$$W_{ij} = |A_{ik} \cdot (F_i \cdot S_i + J_{ik}) - A_{jk} \cdot (F_j \cdot S_j + J_{jk})|,\quad i \neq j, \forall i, j \in I, \forall k \in T \tag{10}$$

$$R_k = W_{ij} + \min\{A_{ik} \cdot (F_i \cdot S_i + J_{ik}), A_{jk} \cdot (F_j \cdot S_j + J_{jk})\},\quad i \neq j, \forall i, j \in I, \forall k \in T \tag{11}$$

2.2 抢修任务公平性调配策略

考虑抢修工作量分配的公平性是燃气事故抢修调度策略目标函数之一。在多目标动态公平调度[18-19]方面,有少数学者会关注调度方案最大程度提高服务水平[13],但极少有研究关注抢修任务分配公平程度对整体抢修质量的反向影响。检修单元抢修任务的分配直接影响检修单元的工作时长,由此提出抢修任务公平性调配策略。给出检修单元的抢修任务工作量差异的表示方式,并提出调度偏好函数作为工作量分配公平性的评价指标,调整检修单元的任务分配,得到工作分配量更公平合理的调配策略。

检修单元之间的抢修工作量的差异程度主要指完成抢修任务的累计时长的差异,因此选取检修单元累计抢修耗时总时长表示其抢修工作量,记为 C_i。因为配置电瓶车的骑行抢修员工和配置机具车的驾驶抢修员工承载工作压力的能力不同,所以有必要考虑调度主体类型的不同,按检修单元种类划分成 2 个集合分别求解,分别记为 M 和 C,其中 M 表示配置电瓶车的骑行抢修员工集合,C 表示配置机具车的驾驶抢修员工集合,$I = M \cup C$。则求取时刻的抢修运行工和抢修机具车分别的抢修工作量差异 D_i 表示为

$$D_i = \left(\sum\nolimits_{i \in M} C_i\right)/i - A_{ik} \cdot (C_i + P_l),\ l \in L \tag{12}$$

$$D_i = \left(\sum\nolimits_{i \in C} C_i\right)/i - A_{ik} \cdot (C_i + P_l),\ l \in L \tag{13}$$

式中 C_i 表示检修单元 i 的抢修工作时长月累计值,D_i 表示检修单元 i 的抢修量差异值,P_l 表示 2.1.2 节中计算的抢修耗时可靠经验值,L 表示抢修任务类型。因为抢修工作量的差异程度大对检修单元整体工作完成情况来讲,会降低日常巡检工作完成进度,甚至影响抢修任务完成质量。构建调度偏好函数记为 $\Psi(D_i)$,近似刻画抢修任务分配与检修单元整体工作进程的负相关性[14-15],调度偏好函数表达式为

$$\Psi(D_i) = b_0 \cdot (e^{a_0} \cdot D_i - 1),\ \forall i \in I \tag{14}$$

式中 a_0 表示调度偏好函数趋势参数,b_0 表示调度偏好函数平稳参数,a_0、b_0 均为常数。

3 巡检抢修协同调配模型的构建

基于以上分析,同时考虑公平性和可靠性 2 个方面调配策略,构建考虑可靠度的巡检抢修动态协同调配模型:

$$f_1(M_{kij}) = \min\left(\sum_{k\in T} R_k\right) \tag{15}$$

$$f_2(M_{kij}) = \max\left(\sum_{i\in I} A_{ik}\cdot \Psi(D_i)\right) \tag{16}$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_{ik} = \{1 \mid l = 1\},\ \forall i \in M, \forall k \in T \tag{17}$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_{ik} = \{2 \mid l = 2\},\ \forall i \in M, \forall k \in T \tag{18}$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_{ik} = \{1 \mid l = 3\},\ \forall i \in C, \forall k \in T \tag{19}$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_{ik} = \{1 \mid l = 4\},\ \forall i \in M, \forall k \in T \parallel \sum_{i=1}^{n} A_{ik} = \{1 \mid l = 4\}, \forall i \in C, \forall k \in T \tag{20}$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_{ik} = \{2 \mid l = 5\},\ \forall i \in C, \forall k \in T \tag{21}$$

$$J_i \leqslant 30 \tag{22}$$

$$\sum_{i=0}^{m} A_{ik} \leqslant 1 \tag{23}$$

式中 M 为原骑行电瓶车的抢修员工,C 为原驾驶机具车的抢修员工。目标函数式(15)表示实现检修单元从收到新抢修任务到到达抢修任务现场的总时长最小,体现抢修调度方案的响应效率和执行效率。目标函数式(16)表示最大化检修单元的调度偏好,即最小化抢修调度过程中检修单元之间额外工作量的差异,体现抢修调度方案的公平性。

约束式(17)~(21)分别表示情况类型为 1~5 的抢修任务对应需要调度的抢修集合组合方式约束,约束式(22)是根据燃气集团给出的抢修调度到达抢修任务现场的硬性时间窗,检修单元必须在 30 min 的有效响应时间之内到达抢修任务现场。约束式(23)表明,一个检修单元同一时间最多只能抢修一个抢修任务。

4 双基因位组合动态遗传算法求解

以上建立的燃气抢修动态调度模型属于非线性、多目标的离散组合优化问题[20],同时管网抢修任务协同调度过程中动态事件的发生是离散不确定性的。参考国内外学者研究,滚动时域法是解决时变条件下的协同调度模型的有效方法[21],因此将滚动时域法与遗传算法相结合,得到优化动态调配策略。动态算法求解的本质就是将问题划分为多个静态问题,因此静态子问题的求解和时域划分是动态问题求解的关键。

设计优化的多基因位组合动态遗传算法求解[22-23],先求解动态问题划分后的初始静态子问题的解,然后在调度时域划分基础上使用动态算子描述问题发生的动态不确定性事件。算法流程图如图 1所示。

4.1 遗传算法求解静态调配策略

步骤 1 提出双基因位实数编码方式初始化种群编码,输入抢修任务集合,随机产生抢修单元组合和任务分配方案 M_{ijk}。编码策略示例如图 2 所示,表示抢修任务 1 同时调配 1 号和 34 号检修单元,…,第 n 个抢修任务调度 40 号检修单元。

步骤 2 动态调用第三方骑行和驾驶路径规划接口获得实时行程时间,以同条染色体上的连续双基因位作为单位计算染色体的适应度,即得到初始抢修任务集的实时行程时间和规划路线。选择算子采取动态适应度函数值和锦标赛法结合选择子代个体。采用自适应交叉算子和自适应变异算子,其交叉和变异概率随着种群平均适应度值的增加呈现减少趋势,以提高算法的求解速度,对应的概率计算公式如式(24)所示,利用设计的交叉和变异概率函数更新染色体,执行步骤 3。

$$p_c = In\left(\mu_0 \overline{\sum_{i\in h}\sum_{j\in m} y_{fit}} + e\right) / \left(\overline{\sum_{i\in h}\sum_{j\in m} y_{fit}} + e\right),\quad \mu_0 \geqslant 0,\ \mu_0 \in C \tag{24}$$

式中 μ_0 为交叉概率约束参数,p_c 表示交叉和变异概率,y_{fit} 表示每一代种群所有个体的适应度值。

步骤 3 基于以上更新后的染色体,可以得到抢修人员与抢修任务之间的分配关系,从而得到抢

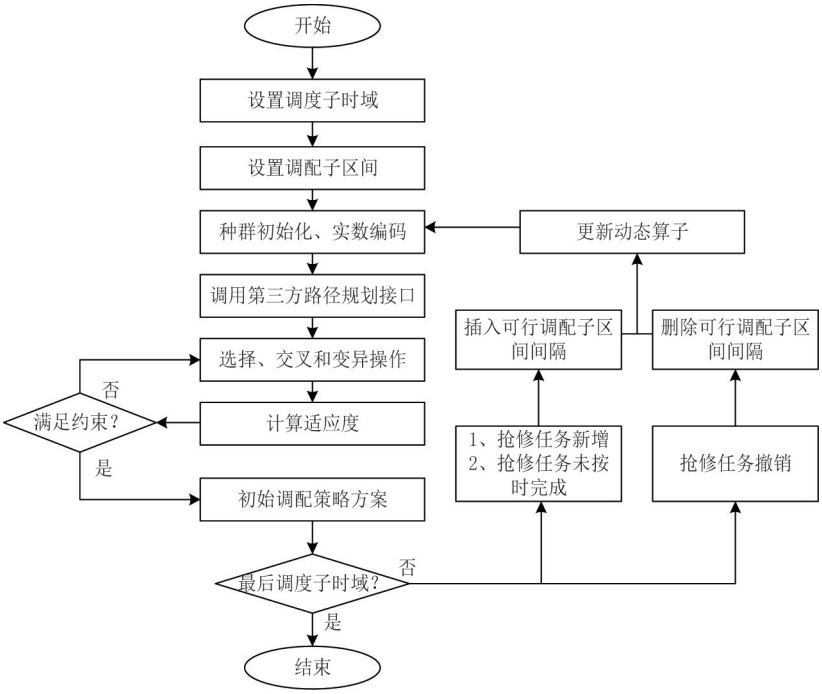


图 1　双基因位组合动态遗传算法流程图

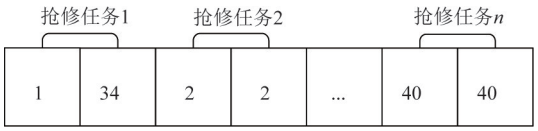


图 2　染色体编码策略

修调配方案和调度路径结果,依此更新所有检修单元集合的状态。判断是否满足巡检抢修协同调配模型的多约束条件,如果满足,进入下一步判断;否则,转到步骤 2。

步骤 4　判断是否满足算法终止条件或者算法运行达到预先设置的迭代次数,若满足终止运算,得到种群的历史最佳结果,等待下一次输入;否则,转到步骤 2。

4.2　动态算子修正

基于 4.1 节对静态初始调配策略的求解,当有动态事件发生时会影响整体的调配策略,本文主要考虑抢修任务新增、抢修任务撤销和抢修任务未按时完成 3 种动态事件。因此提出动态算子表征动态事件的发生,完善算法框架,修正为动态算法。

将整个调度时域划分为多个调度子时域,在子时域区间之间,抢修任务存在已完成、未执行和未完成 3 种情况。将整个调配策略划分为多个调配子区间,在已有染色体编码策略基础上,以一个连续双基因位为基因单位,记为 G_0。将算法内部的整个调度策略按 n 个基因单位为单位,$n = \{1,\cdots T\}$,T 表示抢修任务数量,即 nG_0 为单位长度划分为多个调配子区间。当有动态事件发生时,采用未固定请求插入方法,根据初始调配策略,抢修单元 i 被分配执行抢修任务 k,但是由于检修单元还在处理上一个抢修任务或者实时道路拥堵等原因,检修单元 i 和抢修任务 k 之间的分配关系还没有成立,即 $A_{ik} = 0$,此时称为未固定请求。

未固定请求插入法具体为检查现有调配策略结果中所有可以新增、减少或替换抢修任务对应检修单元集合的可行插入调配子区间。这里的可行位置主要指满足 2 点需求的调配子区间:(1)检修单元和抢修任务之间的分配关系还没有成立;(2)满足 4.1 节中改进双基因位遗传算法已经设置好的所有约束条件。

基于此,以动态双基因的形式,将动态事件映射为动态算子。如图 3 所示,取 $n = 1$,在调配子区间之间,当有新的动态事件信息插入,清除初始抢修调度策略结果中的对未固定请求的考虑,然后再将新的动态事件信息和为固定请求一同插入到更新的抢

修调配策略中,初始化出一个新的抢修任务的调度策略,计算所有可行插入位置的适应度函数,选择最小适应度值的未知插入,并迭代更新保存现在的抢修调度策略结果。

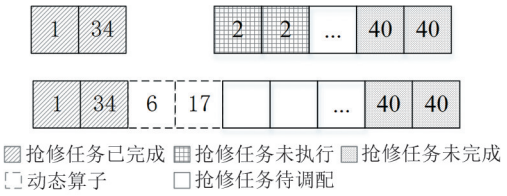


图 3　动态算子实现未固定请求插入法

5　实例验证与分析

以杭州燃气集团抢修案例数据为例,结合真实数据和部分仿真参数设置,将设计的遗传算法应用于求解所构模型,对比分析巡检抢修一体化协同优化调配策略与最短路调配策略,并选择评判标准以量化巡检抢修一体化协同优化调配策略的优越性。巡检抢修协同调配模型和双基因位组合动态遗传算法部分程序用 Python 3.0 编写,路径规划部分程序由 C#编写,实验运行环境为 Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU。

5.1　数据来源及参数设置

选择杭州燃气管网抢修历史案例为数据来源,对 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 6 月 30 日的 2375 条抢修案例历史有效数据进行分析。分别绘制 5 种类型抢修单元的抢修耗时时长的密度概率直方图,通过非参数估计的方法绘制相应的核密度估计曲线,由第 2 节的贝叶斯综合法,可以得到抢修耗时时长与 4 种备选线型的拟合图,曲线参数如表 1所示,具体的拟合曲线如图 4 所示,图 4(a) ~ (e)分别对应 5 种类型的抢修任务。

表 1　抢修任务的待选线型拟合参数表

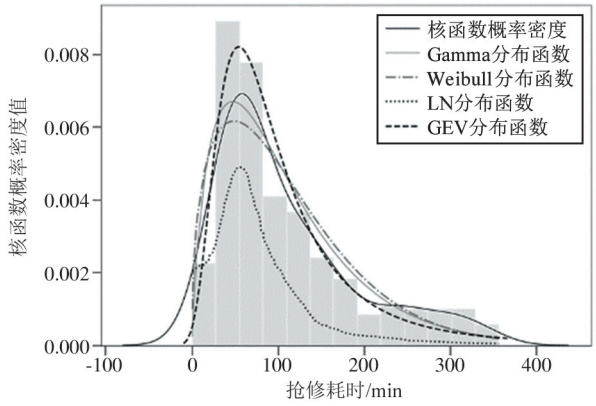
按调度需求不同分类的任务类型	Gamma(伽马)分布		Weibull(威布尔)分布		LN(对数正态)分布		GEV(广义极值)分布	
	α	β	α	β	α	β	α	β
类型 1	3.26	41.74	826.68	0.56	3.01	47.29	0.06	29.58
类型 2	1.51	63.28	624.53	2.35	5.61	51.22	0.51	42.80
类型 3	2.631	44.65	698.02	1.08	3.18	68.42	0.38	76.58
类型 4	1.78	67.64	508.25	4.21	1.09	80.56	0.06	70.40
类型 5	2.62	43.89	745.98	3.86	5.23	40.27	0.002	56.29

给出所有工作人员配置数量,其中原骑行电瓶车的抢修员工集合 I 的数量为 67,原驾驶机具车的抢修员工集合 C 的数量为 20,调度偏好函数中的系数分别设置为 0.05、2,算法相关参数设置为种群个数为 50,最大迭代步数为 100,算法接入路径规划第三方接口选择高德地图应用程序接口。因为历史数据所依托路网信息与实时路网信息不能保证完全相同,因此通过控制时间段、节假日、天气优劣等因素影响减小实验误差,并多次实验求取平均值。

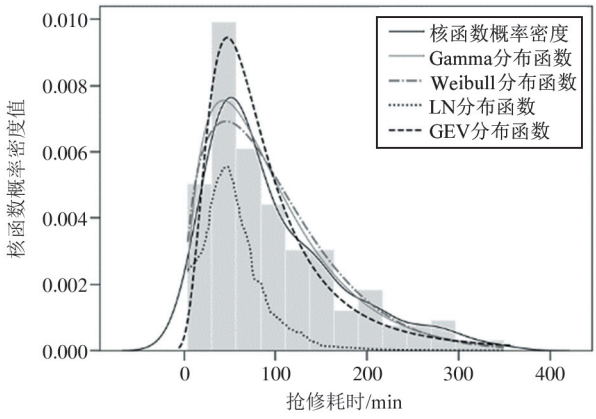
5.2　路径规划对抢修响应时间对比分析

为验证检修协同动态调配策略的路径优化结果对抢修响应时间的影响,取杭州市上城区路网作为研究对象,并分别对道路交叉口节点标记为 J1,J2,J3,…,J117,绘制路网有效信息图,如图 5 所示。以一个抢修任务为例,用带叹号的三角符号表示,通过原调配策略、由改进的调配策略模型对该抢修任务的调配结果,得到的检修单元路径规划结果,可视化在路网有效信息图上,调度策略对路径的选择对比如图 6 所示。

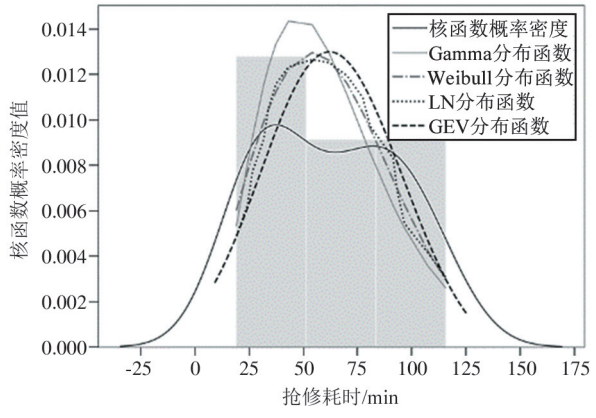
不同调配策略的路径规划结果对应的路程时间和路程距离如表 2 所示。通过对比可以看出,原调配策略依赖人工经验,关注路程最短导致行程时间长,从而会影响抢修响应的效率。另一方面,原调配策略因为缺少对检修单元任务分配量维度的思考,造成任务分配的公平性比改进调配策略低。



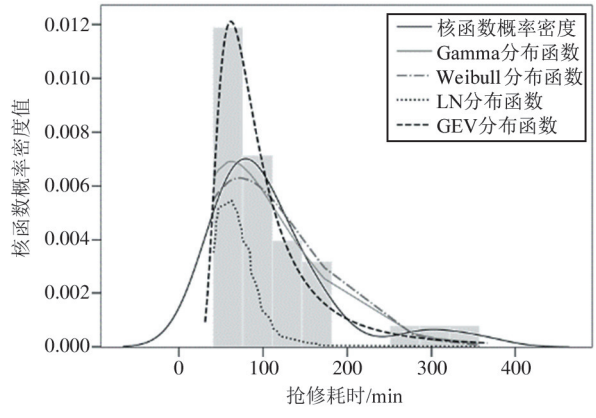
(a) 类型 1 抢修耗时时长分布



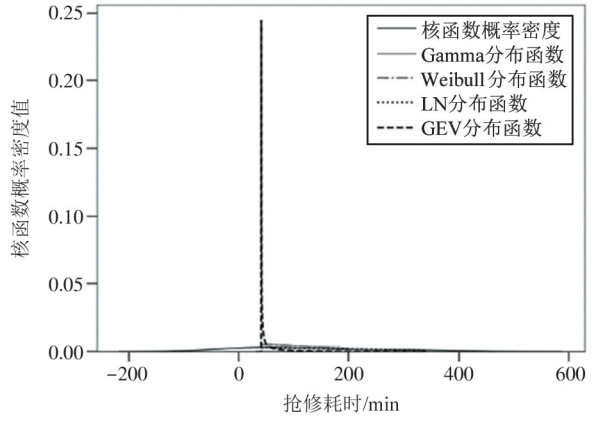
(b) 类型 2 抢修耗时时长分布



(c) 类型 3 抢修耗时时长分布



(d) 类型 4 抢修耗时时长分布



(e) 类型 5 抢修耗时时长分布

图 4　抢修任务抢修耗时时长分布

5.3　检修动态协同调配策略累计效果分析

为探究最短路调配策略和检修协同动态调配策略在较长应用周期下的结果差别,以杭州燃气集团提供的真实抢修数据为例,选择数据信息较为完整的 2020 年 6 月 1 日至 2020 年 6 月 30 日的历史抢修案例数据进行验证,共 157 条历史有效数据。

求解 2 个策略下抢修任务的抢修响应时间和检修集合累计抢修耗时方差,以比较 2 种策略的抢修效率和工作分配均衡程度。为了得到更直观的对比效果,将图 7 中的抢修任务顺序进行调整,按照最短路调配策略得到的抢修响应时间由小到大排序,进而得到一个月内抢修任务总体趋势上升的响应时间折线图。图 8 为选择区间内按序发生的抢修任务,由此可以得到如下结论。

(1)巡检抢修一体化协同优化调配策略考虑城市道路信息动态变化的情况,拓宽了调度可选的检修单元的范围。考虑动态时间对初始调配策略影响,因此其抢修响应时间明显比最短路调配策略更短,本文所提策略提高了 87.35% 抢修任务的抢修响应时间。

(2)检修集合累计抢修耗时方差总体呈震荡下降趋势,因为考虑可靠度的燃气公平调配策略对抢修单元整体利用率最高,所以该调度策略在这个背景下平衡所有抢修单元工作差异方面具有更大优

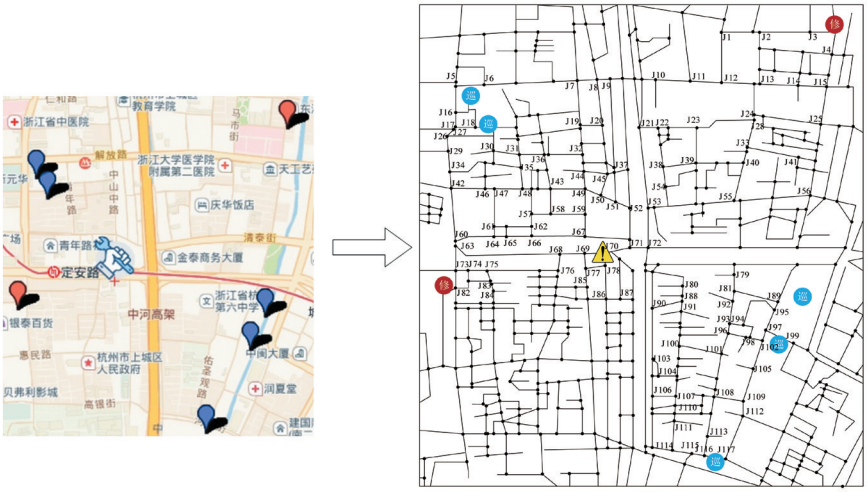


图 5　路网有效信息图

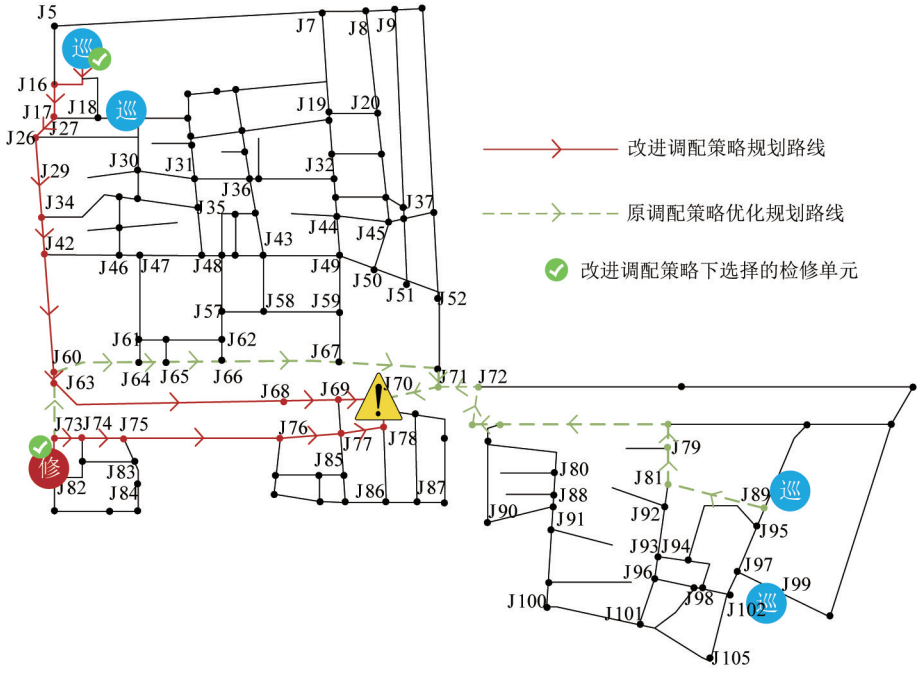


图 6　检修单元路径规划示意图

表 2　调配方案优化前后信息对比表

	调配检修单元编号	响应时间/min	路径长度/m	抢修累计耗时方差	规划路径
原调配策略	6	22	4743	153.68	[J16,J17,J27,J26,J29,J34,J42,J60,J63,J68,J69,J70]
	30	24	6938	153.68	[J73,J74,J75,J76,J77,J78,J70]
改进调配策略	12	18	4142	147.65	[J89,J81,J79,J72,J71,J70]
	30	22	6402	147.65	[J73,J60,J63,J64,J65,J66,J67,J71,J70]

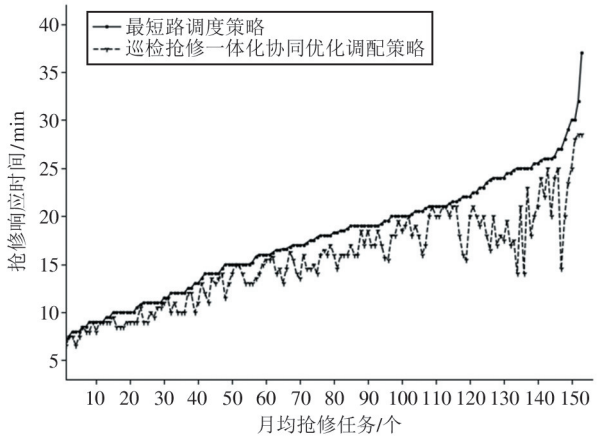


图 7　不同调度策略月抢修响应时间对比

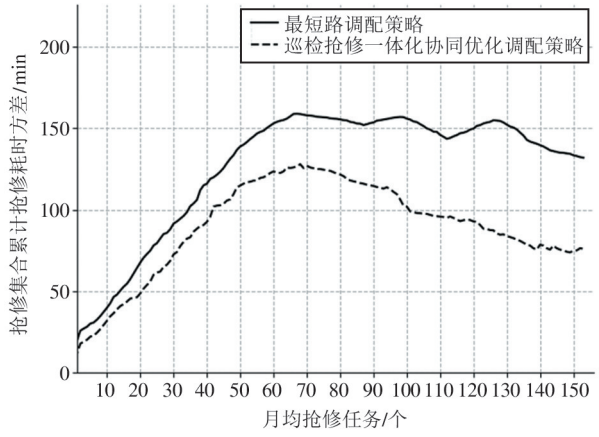


图 8　不同调度策略月抢修公平程度对比

势。抢修任务的分配公平度得到明显优化,并且优化效果随时间累计呈变大趋势,相较于最短路调配策略,该策略的抢修集合累计抢修耗时方差最低降低比率分别为 2.26%、2.13%,最高降低比率分别为 43.72%、42.31%,平均降低比率分别为 26.39%、22.28%。

6　结　论

为了切实保障城市天然气管网安全,并优化员工工作负荷管理,在考虑燃气挂网事故动态不确定性的基础上,得到高效率和高质量的巡检抢修协同优化调配策略。本研究细分 2 种调度情景,给出对应抢修响应时间的求解方法。综合考虑多种评价指标,给出未知拟合线型的抢修耗时时长分布函数;在模型构建中综合考虑调配策略结果与抢修工作量分配的相关性,实现抢修工作量差异程度的量化,均衡了工作周期内动态新增抢修工作量的分配公平程度,提供了任务分配方式定量分析的新角度;考虑抢修任务新增、抢修任务撤销和抢修任务未按时完成 3 种动态事件对调配策略的影响,在获取实时道路信息的同时,结合滚动时域法和改进遗传算法完善动态算法框架,实现了动态调配问题的求解。

结合实验结果可得,提出的调度方法有效缩短了天然气管网抢修任务的抢修响应时间并提高了调度方案的求解效率,缩减了检修单元的工作空白时间,平衡了检修单元的工作负荷,从而科学优化了检修单元的工作负荷管理。天然气管网巡检抢修协同动态优化调配策略可为解决多阶段、多类型任务、存在不确性时间的实时动态应急抢修调度问题的建模和求解提供参考,为天然气背景的抢修调度管理提供理论分析支持,从而有效提高天然气管网的安全保障能力。

研究内容不仅可以解决同一时刻发生的单抢修任务的调度,也可以应对同一时刻发生多起抢修任务的情况。但是因为历史数据中同一时刻发生多抢修任务的情况极少,故难以验证模型在多任务时的性能,因此需要持续获取有效数据用模型进一步验证并行多抢修任务情况,从而优化多任务同时发生的巡检抢修一体化协同调配策略作为后续研究方向之一。模型中抢修单元的分类主要根据获取数据关注抢修单元载具的不同,还可以通过更深的调研,把抢修单元的抢修运行工年龄和抢修任务工作经验等特征加入模型的考虑中,精细化抢修单元类型与抢修调度之间的影响关系。

参考文献

[1] LI Z, JIN C, HU P, et al. Resilience-based transportation network recovery strategy during emergency recovery phase under uncertainty[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, 188: 503-514

[2] 文仁强, 钟少波, 袁宏永, 等. 应急资源多目标优化调度模型与多蚁群优化算法研究[J]. 计算机研究与发展, 2013(7): 1464-1472

[3] RWZAPOUR S, NADERI N, MORSHEDLOU N, et al. Optimal deployment of emergency resources in sudden on-

set disasters[J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 204: 365-382

[4] KNIGHT V A, HARPER P R, SMITH L. Ambulance allocation for maximal survival with heterogeneous outcome measures[J]. *Omega-International Journal of Management Science*, 2012, 40(6): 918-926

[5] OLIVEIRA F, NUNESP M, BLAJBERG R, et al. A framework for crude oil scheduling in an integrated terminal-refinery system under supply uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 252(2): 635-645

[6] 周蕾. 基于动态信息的应急疏散与车辆调度研究[D]. 杭州:浙江大学管理学院, 2012

[7] WANG H, DU L, MA S. Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 69: 160-179

[8] ZHU Q, WU N, QIAO Y, et al. Optimal scheduling of complex multi-cluster tools based on timed resource-oriented Petri nets[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 2096-2109

[9] SHEN J B. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters[J]. *Transportation Research Part E*, 2010, 46: 1-17

[10] HOLGUIN-VERAS J, JALLER M, VAN W, et al. On the unique features of post-disaster humanitarian logistics[J]. *Journal of Operations Management*, 2012, 30(7-8): 494-506

[11] HOLGUÍN-VERAS J, PÉREZ N, JALLER M, et al. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models[J]. *Journal of Operations Management*, 2013, 31(5): 262-280

[12] CORTEZ B, CARRERA B, KIM Y J, et al. An architecture for emergency event prediction using LSTM recurrent neural networks[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 97: 315-324

[13] RODRIGUEZ-ESPINDOLA O, ALBORES P, BREWSTER C. Dynamic formulation for humanitarian response operations incorporating multiple organisations[J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 204: 83-98

[14] LONG J, SUN Z, PARDALOS P M, et al. A robust dynamic scheduling approach based on release time series forecasting for the steelmaking-continuous casting production[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 92: 106271

[15] MORARIU C, MORARIU O, RĂILEANU S, et al. Machine learning for predictive scheduling and resource allocation in large scale manufacturing systems[J]. *Computers in Industry*, 2020, 120: 103244

[16] YUAN D, LU Z, ZHANG J, et al. Integrative design of an emergency resource predicting-scheduling-repairing method for rail track faults[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 155686-155700

[17] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 水文频率线型选择与综合过程中贝叶斯因子求解新方法[J]. 自然资源学报, 2013, 28(4): 687-695

[18] CURCIO E, AMORIM P, ZHANG Q, et al. Adaptation and approximate strategies for solving the lot-sizing and scheduling problem under multistage demand uncertainty[J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 202: 81-96

[19] LIU L, WANG J J, LIU F, et al. Single machine due window assignment and resource allocation scheduling problems with learning and general positional effects[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, 43: 1-14

[20] 朱莉,曹杰,顾珺,等. 公平缓解灾民创伤下的应急物资动态调配研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020,40(9): 2427-2437

[21] 孙宝凤, 杨悦, 史俊妍, 等. 考虑真实场景动态事件的动态取送货问题[J]. 浙江大学学报, 2020, 54(8): 1605-1612,1644

[22] 孙昱, 姚佩阳, 张少华, 等. 含区间参数的战场资源动态调度模型及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(4): 1080-1088

[23] 李建斌, 周泰, 徐礼平, 等. 货运 O2O 平台有时间窗同城零担集货匹配优化决策[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(4): 978-988

Dynamic coordination deployment strategy for inspection and repair of urban natural gas pipeline network

DONG Hongzhao, HU Wenjing, ZHANG Nan, SHE Yini
(Joint Institute of Intelligent Transportation System, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract

The inspection and emergency repair scheduling of urban natural gas pipeline network are the most important tasks to ensure the safety of natural gas pipeline network. However, there is a lack of dynamic optimization method of labor organization structure and emergency management considering the correlation between inspection work allocation and emergency repair scheduling. In order to solve this problem, an integrated maintenance area management model is proposed, in which the staffs cooperate to complete the inspection and repair of natural gas pipeline network. Based on this model, considering the uncertainty of actual scene and pipeline repair time, a dynamic collaborative scheduling model with the minimum repair response time and maximum scheduling preference as the objectives is constructed. On the basis of obtaining real-time road travel time, considering the impact of three dynamic events on the deployment strategy, which are the addition of repair task, the cancellation of repair task, and the failure to complete repair task on time, the dynamic algorithm framework is improved by combining the rolling time domain method and the improved double gene bit transfer algorithm, and the historical data of Hangzhou gas pipeline network accident repair is used for verification and analysis. The results show that the coordinated deployment strategy under the regional integration of maintenance can greatly improve the response time of emergency repair and the labor efficiency of employees.

Key words: emergency dispatch, pipeline network inspection, scheduling preference, response time, emergency repair scheduling, uncertainty, inspection and repair cooperation, pipeline network safety