

灾后动态环境下基于MPC的应急运输实时调度

刘亚杰[†], 吴志永

(国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073)

摘要: 应急资源运输是灾后应急响应中的一类重要行动. 针对强地震后灾区物资供应和伤员转运需求, 建立一个多周期应急运输调度模型, 基于模型预测控制(MPC)的多周期滚动优化框架, 提出相应的运输计划动态调整策略, 以适应供应与需求等决策参数的预计不准确性和动态演变性. 数值实验验证了所建运输调度模型及所提出动态调整框架的有效性. 与传统基于多周期应急运输调度方法相比, 所提出方法能够有效减少运输调度的不满足量, 并能显著消除预测结果不准确性的影响.

关键词: 应急救援; 运输调度; MPC; 动态性; 不准确性的影响

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Real-time relief transportation planning based on MPC in post-disaster dynamic environment

LIU Ya-jie[†], WU Zhi-yong

(College of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Emergency resource transportation is a kind of important activity in post-disaster emergency response campaign. A multi-period emergency transportation model is proposed, in which both the delivery of relief commodities and the evacuation of critical population are considered. Then, a rolling-horizon framework based on the model predictive control(MPC) method is innovatively introduced. After that, an adjustment policy is proposed to adapt to the evolution of supply and demand and to satisfy the real-time adjustment requirement caused by the inaccuracy of prediction on supply and demand. The numerical experiments validate the effectiveness of the proposed multi-period relief transportation model and the MPC based rolling-horizon framework. Additionally, compared with the traditional multi-period relief transportation planning method, the proposed method can effectively decrease the amount of total weighted unmet demand, and obviously eliminate the influence on the optimization objective caused by the inaccuracy of predictions.

Keywords: emergency relief; transportation planning; MPC; dynamic; inaccuracy

0 引言

我国是一个地震多发的国家,地震灾害严重威胁人民的生命财产安全,给我国国民经济发展带来不利影响. 新世纪以来,我国先后经历了2008年汶川地震、2010年玉树地震、2013年雅安地震... 这些地震灾难均造成了重大人员伤亡及财产损失. 强地震灾害发生后,因通信基础设施毁损,导致对受灾地点物资需求和伤员数量、供应地点物资可供量和医疗处置能力等因素的预测估计都难以准确,而且随着时间的推移和救灾进度不断推进,灾情信息将不断更新,这些因素也将不断发生变化. 对此,如何让救灾指

挥部门根据战略储备仓库的位置、救灾物资存量,受灾地点的分布、需求,医院位置及道路条件、运输工具等情况作出科学、合理、有效的应急资源调度决策,以便及时、迅速地运输救援物资,抢救转移伤病员,对降低地震灾害所造成的生命和财产损失具有重要意义.

由于全球范围内地震灾害频发,以灾后应急资源运输调度为代表的应急物流得到了国内外学者的广泛研究. 针对灾后应急资源调度过程中相关环境条件的动态性,研究人员提出了基于多周期规划、干扰管理、贝叶斯决策等为主的研究方法. 在基于多周期

收稿日期: 2017-07-11; 修回日期: 2017-09-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71371181).

责任编委: 唐加福.

作者简介: 刘亚杰(1975-), 男, 副教授, 博士, 从事动态不确定性优化方法及其在应急物流、微电网等的应用研究;
吴志永(1992-), 男, 硕士生, 从事应急物流的研究.

[†]通讯作者. E-mail: liuyajie@nudt.edu.cn

规划研究方面,Özdamar等^[1]基于实时动态的供应和需求信息,对多类物资、多种运输模式下的配送调度优化问题展开研究,提出了基于多周期规划的配送调度动态优化模型;Yi等^[2]在多周期动态调度中综合考虑了物资前送和伤员后撤两种情形;Najafi等^[3]将物资运输与伤员回撤统一考虑,在地震响应阶段建立了一个基于多目标、多运输模式、多物品、多周期的应急运输调度模型.在后续研究中,Najafi等^[4]构建了同时考虑物资流与伤员流的车辆分配与路径规划的动态模型;Ren等^[5]考虑灾后路网连通性和运输时间的不确定性,建立了一个应急物资多周期动态运输调度模型;Lu等^[6]针对灾后救援物资实时分配问题提出一种基于“滚动物理”的方法,即面向救灾物资需求与运输时间的区间预测方法,在此基础上构建了一个灾后实时物资分配模型,以实现满足救灾物资需求的总时间最小,但其模型中未考虑伤员后撤产生的运输流,而且模型中物资供应大于需求,在大规模地震发生初期并不能满足;朱佳翔等^[7]考虑鲁棒不确定性参数对决策结果的影响,提出了一个应急物资配送多阶段、多目标鲁棒优化模型;刘长石等^[8]综合物资模糊需求、时间窗、受灾路网的动态修复、车辆随机运行时间、大需求节点的需求分割策略、配送模式等因素,提出一个多周期的模糊动态LRP规划模型.在干扰管理研究方面,傅克俊、胡祥培等^[9-11]对干扰管理的研究现状及进一步研究方向进行了说明;王旭坪等^[12]针对车辆路径问题中车辆受损的救援需求,基于干扰管理思想建立了车辆路径问题扰动恢复模型;胡祥培等^[13]采用干扰管理思想,建立了以最小化客户不满意度、配送成本和路径偏离程度为目标的配送系统干扰管理模型;俞虹^[14]以最小化物资延误时间为目标,运用字典序法建立了一个以灾民不满意度偏离最小为一级目标的干扰管理模型;闫卓男等^[15]以干扰管理思想为指导,以最小化总的物资延误时间为目标,构建了城市应急资源配送的干扰管理模型;刘长石等^[16]考虑震后初期应急物资配送中的灾区需求、指挥机构、实施人员等干扰事件,研究实时的干扰事件决策方法,以总配送时间最短为目标建立了震后应急物流LRP的优化模型;阮俊虎等^[17]以应急医疗物资为研究背景,以应急响应中的中转节点变化干扰事件为研究对象,针对到达时间、配送路径、运力使用情况进行扰动度量,提出了干扰恢复模型.在基于贝叶斯决策理论的研究方面,詹沙磊等^[18]考虑到灾害预测的准确性与物流成本效率时间存在背反关系,将贝叶斯分析和最优停止问题应用于应急选址-分配问题,提出一个基于灾情信息更新的应急

物资配送多目标随机规划模型;叶永等^[19]综合运用贝叶斯分析、最优化理论,考虑道路损坏率信息的更新,建立了应急资源序贯决策问题的相关模型;张怡等^[20]运用贝叶斯概率的相关理论对应急物流中快速信任的影响因素进行研究,提出了相应的评估模型.

从当前的研究来看,对应急物资的动态调度的研究主要基于多周期规划、干扰管理、贝叶斯决策等方法展开:基于多周期规划的应急资源调度仅考虑了基于当前时刻作出未来一段时期内的应急资源调度计划,未考虑计划执行过程中信息“反馈”对调度计划的影响;基于干扰管理思想的动态调度研究主要集中在常规情况下突发事件的研究,并侧重干扰事件发生后对原计划的“局部调整”;基于贝叶斯决策理论的应急资源运输调度研究,对贝叶斯风险的设计有赖于先验概率和研究者的主观意识与水平,客观性相对不足.本文研究强地震灾害发生后,救灾指挥部门如何根据不断更新、披露的信息进行多周期的运输规划及动态调整,通过引入模型预测控制(Model predictive control, MPC)方法,根据信息不断更新的结果对应急资源调度计划进行动态优化和调整,使其更能适应强地震灾害救援期间需求和供应预测不准确性、动态性的特点,确保作出的决策更具有科学性和实用性.

1 灾后应急资源多周期运输调度模型构建

本文所关注的灾后应急资源运输调度问题可以描述为:基于指定的资源约束条件和给定的多个调度周期,尽快地将救援物资运送到各需求点,将伤病员送达医疗救治节点,使得多周期内总的物资不满足量和未救治的伤员数量最小.对此,在构建相应的模型前,先作如下假设:

1) 灾害发生后会在灾区周围选定若干临时性的应急物资供应节点和医疗节点,分别作为面向灾区救援的物资中转地和伤病员的转移接收地.在多周期内,各节点的供应或接收能力是变化的,且所有节点在多周期内总的中转接收能力不小于灾区的总需求.

2) 在总的调度周期内,每个受灾点物资需求量和伤员数量是动态且不确定的,而且次生灾害可能导致物资需求量与伤员数量发生显著变化;此外,供应点物资供应量和医疗处置能力也具有动态性.

3) 允许一个供应点向多个需求点进行供应,允许单个需求节点同时接受多个供应点的供应,也允许物资或伤员在节点间进行中转.

4) 鉴于强地震发生对地面交通设施的破坏严重且往往在短时间内难以修复,在灾区内部的运输只考

考虑直升机. 每个供应节点或医疗节点有若干不同型号的直升机, 直升机容量有限, 直升机可以在各个节点之间中转, 并不要求必须回到初始节点.

1.1 符合说明

本模型所涉及的集合说明如下: T 表示总的调度周期长度; M 表示直升机类型集合; A 表示临时供应点、受灾点及其之间的路径集合; CS 表示物资类型集合; WS 表示伤员类型集合; DN 表示需求节点集合; SN 表示物资供应节点集合; HN 表示医疗处置节点集合; N 表示节点集合, $N = HN \cup SN \cup DN$.

模型中定义的参数有: t_{op} 表示直升机经过路径 (o, p) 所需时间; \tilde{d}_{cpt}^R 表示 t 时刻节点 p 对 c 类型物资的需求数量; \tilde{d}_{hlt}^W 表示 t 时刻节点 l 产生的 h 类型伤员的数量; \tilde{s}_{cot}^R 表示 t 时刻节点 o 对 c 类型物资的供应数量; \tilde{s}_{hot}^W 表示 t 时刻节点 o 对 h 类型伤员的处置容量(能力); θ_c 表示 c 类型物资的单位重量; av_{omt} 表示 t 时刻增加到节点 o 的 m 类型直升机数量; cap_m^R 表示 m 类型直升机的最大载货重量; cap_m^W 表示 m 类型直升机可载伤员的最大数量; ρ_c^R 表示优先满足 c 类型物资的权重系数; ρ_h^W 表示优先救治 h 类型伤员的权重系数; $\delta_{\tau opt}$ 为 0-1 参数, 若任一直升机在 τ 时刻离开节点 o , 在 t 时刻之前到达节点 p , 则 $\delta_{\tau opt} = 1$, 否则 $\delta_{\tau opt} = 0$; ℓ 表示大数.

决策变量包括: $X_{c opt}^R$ 为 t 时刻从节点 o 运往节点 p 的 c 类型物资的数量; $X_{h opt}^W$ 为 t 时刻从节点 o 运往节点 p 的属于 l 节点的 h 类型伤员的数量; DEV_{cpt}^R 为 t 时刻节点 p 处 c 类型物资的需求未满足数量; DEV_{hlt}^W 为 t 时刻节点 l 未救治的 h 类型伤员数量; Y_{opmt} 为 t 时刻从节点 o 飞往节点 p 的 m 类型直升机数量.

1.2 多周期调度模型

基于以上描述, 应急资源多周期调度模型可描述如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{c \in CS} \sum_{p \in DN} \sum_{t \in T} \rho_c^R DEV_{cpt}^R + \\ & \sum_{h \in WS} \sum_{p \in DN} \sum_{t \in T} \rho_h^W DEV_{hpt}^W. \quad (1) \\ \text{s.t.} & \sum_{\tau=1}^t \left[\sum_{o \in DN \cup SN} \delta_{\tau opt} X_{cop\tau}^R - \sum_{p' \in DN} X_{cpp'\tau}^R \right] \geq \\ & \sum_{\tau=1}^t \tilde{d}_{cpt}^R - DEV_{cpt}^R, \quad \forall c \in CS, p \in DN, t \in T; \quad (2) \\ & \sum_{\tau=1}^t \sum_{p \in DN \cup SN} X_{cop\tau}^R \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau=1}^t \sum_{o' \in SN} \delta_{\tau o' ot} X_{co'o\tau}^R + \sum_{\tau=1}^t \tilde{s}_{cot}^R, \\ & \forall c \in CS, o \in SN, t \in T; \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau=1}^t \sum_{p \in HN} \left[\sum_{o \in DN \cup HN} \delta_{\tau opt} X_{hop\tau}^W - \sum_{p' \in HN} X_{hpp'\tau}^W \right] \geq \\ & \sum_{\tau=1}^t \tilde{d}_{hlt}^W - DEV_{hlt}^W, \quad \forall h \in WS, l \in DN, t \in T; \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau=1}^t \sum_{p \in DN \cup HN} X_{hlp\tau}^W \leq \sum_{\tau=1}^t \tilde{d}_{hlt}^W, \\ & \forall h \in WS, l \in DN, t \in T; \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau=1}^t \sum_{p' \in DN \cup HN} X_{hpp'\tau}^W \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{o \in DN} \delta_{\tau opt} X_{hop\tau}^W, \\ & \forall h \in WS, p \in DN, l \in DN, t \in T, l \neq p; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau=1}^t \sum_{p' \in HN} X_{hpp'\tau}^W \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{o \in DN \cup HN} \delta_{\tau opt} X_{hop\tau}^W, \\ & \forall h \in WS, p \in HN, l \in DN, t \in T; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau=1}^t \sum_{l \in DN} \left[\sum_{p \in DN \cup HN} \delta_{\tau pot} X_{hpot}^W - \sum_{o' \in HN} X_{hoo'\tau}^W \right] \leq \\ & \sum_{\tau=1}^t \tilde{s}_{hot}^W, \quad \forall h \in WS, o \in HN, t \in T; \quad (8) \end{aligned}$$

$$Y_{opmt} \leq \ell t_{op}, \quad \forall (o, p) \in A, m \in M, t \in T; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sum_{c \in CS} \theta_c X_{c opt}^R}{cap_m^R} + \frac{\sum_{l \in DN} \sum_{h \in WS} X_{h opt}^W}{cap_m^W} \leq Y_{opmt}, \\ & \forall (o, p) \in A, m \in M, t \in T; \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau=1}^t \sum_{p \in N} \delta_{\tau pot} Y_{pom\tau} + \sum_{\tau=1}^t av_{omt} \geq \sum_{\tau=1}^t \sum_{p \in N} Y_{opm\tau}, \\ & \forall o \in N, m \in M, t \in T; \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & X_{hlp\tau}^W, DEV_{hlt}^W, Y_{opmt} \geq 0 \text{ 且为整数,} \\ & X_{c opt}^R, DEV_{cpt}^R \geq 0. \quad (12) \end{aligned}$$

在本模型中, 目标函数(1)表示最小化多周期内物资未满足量和伤员未救治数量的加权之和. 式(2)和(3)是对物资流的约束, 分别保证每个调度周期内需求节点和供应节点的物资流量平衡, 同时确定了每个周期内物资未满足量的计算方式. 式(4)~(8)是对伤员的约束. 式(4)定义了在任一调度周期内需求节点仍未救治的伤员数量, 在本模型中, 伤员的救治与否以其是否到达最终医疗节点为界; 式(5)~(7)保证任一周期内伤员产生节点、伤员转运途径的需求节点、医疗节点的流量平衡; 式(8)确保任一医疗节点处理的伤员数量在医院的处置能力范围内. 式(9)~(11)是对直升机的限制. 式(9)旨在表明是否允许直升机在两节点之间航行; 式(10)表示任一周期内

节点间物资和伤员的转运量在直升机的运输能力范围内;式(11)的目的是平衡任一周期内各节点之间的直升机流.式(12)表示决策变量为非负,且伤员运输量与不满足量、直升机运输次数等决策变量取整数.

2 基于MPC应急资源运输调度模型构建

上述多周期模型虽然能生成给定情形条件下的应急运输调度计划方案,但在实际情况中,随着决策周期的不断推进,救灾指挥部门获得的信息将不断更新,其中包括:

1) 一方面随着已执行周期真实需求、供应的陆续揭晓,这些需求、供应可能与制定决策方案时所预测的需求、供应值存在偏差;另一方面,随着时间的推移,后续周期的需求、供应预测值可能与先前制定计划时所基于的预测值存在较大的偏差.因此,救灾指挥部门可能需要基于已执行的决策、已揭晓的真实需求与供应和已更新得到的预测结果对后续决策进行调整.

2) 一些自然灾害特别是重大自然灾害发生后往往会衍生一些次生灾害,导致灾情本身会不断发生变化,对决策者而言这些不断更新的信息本身就是动态的,需要决策者根据获取的最新信息和最新的预测结果对后续周期的调度决策进行调整.

对此,本文在上述多周期应急运输调度模型的基础上,进一步提出动态环境下基于MPC的应急资源运输调度框架、模型和调整策略.

2.1 基于MPC的应急资源运输调度框架

模型预测控制出现于20世纪70年代,经过几十年的发展,模型预测控制在工业过程中得到广泛应用,取得极大的成功.模型预测控制在处理复杂约束问题方面具有较大优势,因此近些年在能源、航空航天、先进制造等领域也出现模型预测控制的应用研究^[21].目前在国内外的相关研究中,还没有见到将模型预测控制方法应用到应急物流领域的研究成果.本文将模型预测控制应用于多周期的应急资源运输调度决策中,用于处理应急资源调度中需求等因素的不确定性和动态性,以提高决策的科学性和可行性.本文所提出的基于MPC的应急资源运输调度框架如图1所示.其中: T 表示应急资源调度的整个决策周期,假设救灾指挥部门规划窗口为 $E(E \leq T)$;斜线部分表示历史规划周期已执行的调度计划,黑色部分表示当前时刻需要执行的调度计划.在 $r = 1$ 时刻,基于当前周期需求与供应的预测值,决策者作出 $1 \sim E$ 时刻的调度计划,但只执行 $r = 1$ 时刻的计划结果;随着救灾行动的实施与信息的更新,到 $r = 2$

时刻时,决策者可以基于历史时刻($r = 1$)已经揭晓的实际需求、救灾实际进展和更新的预测信息,作出 $2 \sim E + 1$ 周期内的调度计划,并只执行 $r = 2$ 时刻的调度结果.依次“滚动”机制类推,直至整个决策周期结束.

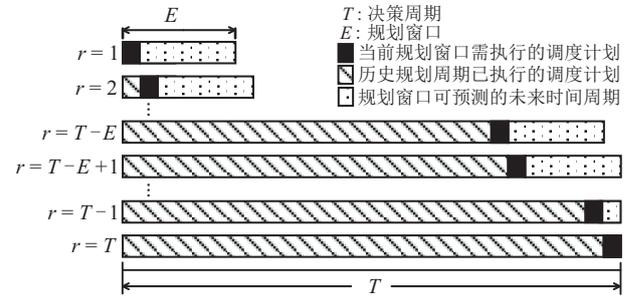


图1 基于MPC的灾后应急资源动态调度框架

该流程的核心机制主要体现在以下几个方面:1) 针对应急资源调度动态优化决策将整个决策时段划分为 T 个周期,允许决策者在每个决策周期内都可以基于更新的信息对决策结果进行动态调整;2) 在决策时刻生成面向后续 E 个周期的调度计划,但只执行第1个周期的计划,使得决策结果具有一定的全局性;3) 除初始决策外,其他每个周期内的决策都将充分考虑前一周期优化决策的部署进展,确保决策结果的渐近性和序贯性.下面基于第1节所构建的多周期运输调度模型,给出任意调度决策时刻基于MPC的运输调度模型.

2.2 基于MPC的应急资源运输调度模型

设系统当前的调度决策实施时刻为 $r(r \in T)$,考虑到任一历史时刻 $t(1 \leq t < r)$ 上的需求和供应的不确定性参数 $\tilde{d}_{cpt}^R, \tilde{d}_{hpt}^W, \tilde{s}_{cot}^R$ 和 \tilde{s}_{hot}^W 的值均已揭晓,分别用 $\check{d}_{cpt}^R, \check{d}_{hpt}^W, \check{s}_{cot}^R$ 和 \check{s}_{hot}^W 表示.与目标函数(1)类似, r 时刻的调度目标可表示为

$$\min \sum_{c \in CS} \sum_{p \in DN} \sum_{t \in \{r, \dots, r+E-1\}} \rho_c^R \text{DEV}_{cpt}^R + \sum_{h \in WS} \sum_{p \in DN} \sum_{t \in \{r, \dots, r+E-1\}} \rho_h^W \text{DEV}_{hpt}^W. \quad (13)$$

与式(1)相比,新的调度目标中没有考虑 r 时刻之前的各类需求不满足量,这是因为 r 时刻之前的不满足量已经确定,所以不需要在优化目标中继续考虑.

对于约束(2),考虑资源在节点间的运转时需要一定时间, r 时刻针对需求节点 p 制定后续周期的资源调度计划时,仍需要考虑 r 时刻之前供应节点或其他需求节点向节点 p 所运送的物资,特别是仍在运输途中的资源.因此,表达式(2)可转换如下:

$$\sum_{\tau=1}^{r-1} \left[\sum_{o \in DN \cup SN} \delta_{\tau opt} \check{X}_{cop\tau}^R - \sum_{p' \in DN} \check{X}_{cpp'\tau}^R \right] +$$

$$\sum_{\tau=r}^t \left[\sum_{o \in \text{DN} \cup \text{SN}} \delta_{\tau \text{opt}} X_{\text{copr}}^R - \sum_{p' \in \text{DN}} X_{\text{cpp}'\tau}^R \right] \geq \sum_{\tau=1}^{r-1} \check{d}_{\text{cpr}}^R + \sum_{\tau=r}^t \tilde{d}_{\text{cpr}}^R - \text{DEV}_{\text{cpt}}^R, \quad \forall c \in \text{CS}, p \in \text{DN}, t \in \{r, \dots, r+E-1\}, \quad (14)$$

其中 $\check{X}_{\text{copr}}^R$ 表示基于预测需求制定的调度计划中已执行的运输计划。类似地,约束(3)~(11)分别可以转换为

$$\sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{p \in \text{DN} \cup \text{SN}} \check{X}_{\text{copr}}^R + \sum_{\tau=r}^t \sum_{p \in \text{DN} \cup \text{SN}} X_{\text{copr}}^R \leq \sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{o' \in \text{SN}} \delta_{\tau o' \text{ot}} \check{X}_{\text{co}'\text{o}\tau}^R + \sum_{\tau=r}^t \sum_{o' \in \text{SN}} \delta_{\tau o' \text{ot}} X_{\text{co}'\text{o}\tau}^R + \sum_{\tau=1}^{r-1} \check{s}_{\text{cot}}^R + \sum_{\tau=r}^t \tilde{s}_{\text{cot}}^R, \quad \forall c \in \text{CS}, o \in \text{SN}, t \in \{r, \dots, r+E-1\}; \quad (15)$$

$$\sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{p \in \text{HN}} \left[\sum_{o \in \text{DN} \cup \text{HN}} \delta_{\tau \text{opt}} \check{X}_{\text{hopr}}^{\text{Wl}} - \sum_{p' \in \text{HN}} \check{X}_{\text{hpp}'\tau}^{\text{Wl}} \right] + \sum_{\tau=r}^t \sum_{p \in \text{HN}} \left[\sum_{o \in \text{DN} \cup \text{HN}} \delta_{\tau \text{opt}} X_{\text{hopr}}^{\text{Wl}} - \sum_{p' \in \text{HN}} X_{\text{hpp}'\tau}^{\text{Wl}} \right] \geq \sum_{\tau=1}^{r-1} \check{d}_{\text{hl}\tau}^{\text{Wl}} + \sum_{\tau=r}^t \tilde{d}_{\text{hl}\tau}^{\text{Wl}} - \text{DEV}_{\text{hlt}}^{\text{Wl}}, \quad \forall h \in \text{WS}, l \in \text{DN}, t \in \{r, \dots, r+E-1\}; \quad (16)$$

$$\sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{p \in \text{DN} \cup \text{HN}} \check{X}_{\text{hlp}\tau}^{\text{Wl}} + \sum_{\tau=r}^t \sum_{p \in \text{DN} \cup \text{HN}} X_{\text{hlp}\tau}^{\text{Wl}} \leq \sum_{\tau=1}^{r-1} \check{d}_{\text{hl}\tau}^{\text{Wl}} + \sum_{\tau=r}^t \tilde{d}_{\text{hl}\tau}^{\text{Wl}}, \quad \forall h \in \text{WS}, l \in \text{DN}, t \in \{r, \dots, r+E-1\}; \quad (17)$$

$$\sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{p' \in \text{DN} \cup \text{HN}} \check{X}_{\text{hpp}'\tau}^{\text{Wl}} + \sum_{\tau=r}^t \sum_{p' \in \text{DN} \cup \text{HN}} X_{\text{hpp}'\tau}^{\text{Wl}} \leq \sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{o \in \text{DN}} \delta_{\tau \text{opt}} \check{X}_{\text{hopr}}^{\text{Wl}} + \sum_{\tau=r}^t \sum_{o \in \text{DN}} \delta_{\tau \text{opt}} X_{\text{hopr}}^{\text{Wl}}, \quad \forall h \in \text{WS}, p \in \text{DN}, l \in \text{DN}, l \neq p, t \in \{r, \dots, r+E-1\}; \quad (18)$$

$$\sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{p' \in \text{HN}} \check{X}_{\text{hpp}'\tau}^{\text{Wl}} + \sum_{\tau=r}^t \sum_{p' \in \text{HN}} X_{\text{hpp}'\tau}^{\text{Wl}} \leq \sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{o \in \text{DN} \cup \text{HN}} \delta_{\tau \text{opt}} \check{X}_{\text{hopr}}^{\text{Wl}} + \sum_{\tau=r}^t \sum_{o \in \text{DN} \cup \text{HN}} \delta_{\tau \text{opt}} X_{\text{hopr}}^{\text{Wl}}, \quad \forall h \in \text{WS}, p \in \text{HN}, l \in \text{DN}, t \in \{r, \dots, r+E-1\}; \quad (19)$$

$$\sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{l \in \text{DN}} \left[\sum_{p \in \text{DN} \cup \text{HN}} \delta_{\tau \text{pot}} \check{X}_{\text{hopr}}^{\text{Wl}} - \sum_{o' \in \text{HN}} \check{X}_{\text{hoo}'\tau}^{\text{Wl}} \right] +$$

$$\sum_{\tau=r}^t \sum_{l \in \text{DN}} \left[\sum_{p \in \text{DN} \cup \text{HN}} \delta_{\tau \text{pot}} X_{\text{hopr}}^{\text{Wl}} - \sum_{o' \in \text{HN}} X_{\text{hoo}'\tau}^{\text{Wl}} \right] \leq \sum_{\tau=1}^{r-1} \check{s}_{\text{ho}\tau}^{\text{Wl}} + \sum_{\tau=r}^t \tilde{s}_{\text{ho}\tau}^{\text{Wl}}, \quad \forall h \in \text{WS}, o \in \text{HN}, t \in \{r, \dots, r+E-1\}; \quad (20)$$

$$Y_{\text{opmt}} \leq \ell t_{\text{op}}, \quad \forall (o, p) \in A, m \in M, t \in \{r, \dots, r+E-1\}; \quad (21)$$

$$\frac{\sum_{c \in \text{CS}} \theta_c X_{\text{copr}}^R}{\text{cap}_m^R} + \frac{\sum_{l \in \text{DN}} \sum_{h \in \text{WS}} X_{\text{hopr}}^{\text{Wl}}}{\text{cap}_m^{\text{Wl}}} \leq Y_{\text{opmt}}, \quad \forall (o, p) \in A, m \in M, t \in \{r, \dots, r+E-1\}, \quad (22)$$

$$\sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{p \in \text{N}} \delta_{\tau \text{pot}} \check{Y}_{\text{pom}\tau} + \sum_{\tau=1}^t \text{av}_{\text{om}\tau} + \sum_{\tau=r}^t \sum_{p \in \text{N}} \delta_{\tau \text{pot}} Y_{\text{pom}\tau} \geq \sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{p \in \text{N}} \check{Y}_{\text{opm}\tau} + \sum_{\tau=r}^t \sum_{p \in \text{N}} Y_{\text{opm}\tau}, \quad \forall o \in \text{N}, m \in M, t \in \{r, \dots, r+E-1\}. \quad (23)$$

根据以上描述,基于MPC的多周期应急资源运输调度模型可以表示如下:

目标函数:式(13);

约束条件:式(12)、(14)~(23).

2.3 基于MPC的应急资源运输调度调整策略

基于上述调度框架和模型,虽然在 r 时刻生成了未来一段时间的运输规划并只执行 r 时刻的规划结果,但依据该结果相关直升机到达相关受灾点后,仍可能发现对 r 周期所预计的需求、供应与实际揭晓的需求、供应不一致,从而导致该周期内相关节点的物资、伤员的实际转运数量与模型求解数量不一致,进而导致实际需求不满足量与基于预测值所得到的模型决策变量 ($\text{DEV}_{\text{cpr}}^R$ 和 $\text{DEV}_{\text{hpr}}^{\text{Wl}}$) 不一致。为了能够真实地反映各周期各个节点的不满足量,需要对运输计划进行调整,在此基础上求解 r 时刻真实的 $\text{DEV}_{\text{cpr}}^R$ 、 $\text{DEV}_{\text{hpr}}^{\text{Wl}}$ 。

调整策略如下。

Step 1: 对于任意物资供应节点的任一类物资,首先依据式(3),比较截至 r 时刻该物资的累计转出量 (用 $\sum_{\tau=1}^r \sum_{p \in \text{DN} \cup \text{SN}} X_{\text{copr}}^R$ 表示) 与实际可用量 (用 $\sum_{\tau=1}^r \check{s}_{\text{cot}}^R + \sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{o' \in \text{SN}} \delta_{\tau o' \text{ot}} X_{\text{co}'\text{o}\tau}^R$ 表示) 的大小。若前者小于后者,则不作调整,否则根据式(3)按以下原则减少 r 时刻的物资转出量:首先削减从该节点运往其

他供应节点的运输,若全部削减为0后仍无法满足式(3)($t = r$),则进一步减少从该节点到相关需求节点的运输量,直至满足式(3)($t = r$)为止。

Step 2: 对于任意受灾点的任一类物资需求,根据下式:

$$\text{DEV}_{cpr}^R = \sum_{\tau=1}^r \check{d}_{cpr\tau}^R - \sum_{\tau=1}^r \left[\sum_{o \in \text{DNUSN}} \delta_{\tau opr} \check{X}_{copr\tau}^R - \sum_{p' \in \text{DN}} \check{X}_{cpp'\tau}^R \right], \quad \forall c \in \text{CS}, p \in \text{DN} \quad (24)$$

求解并记录当前 r 时刻物资真实不满足量。若截至 r 时刻保留在该受灾点的物资数(用 $\sum_{\tau=1}^r \left[\sum_{o \in \text{DNUSN}} \delta_{\tau opr} \check{X}_{copr\tau}^R - \sum_{p' \in \text{DN}} \check{X}_{cpp'\tau}^R \right]$ 表示)大于该节点的累计需求量($\text{DEV}_{cpr}^R < 0$),表示节点 p 的物资供大于求,则该多余的物资实际上既可以作为该节点后续周期相关需求的供应,也可以在后续周期作为供应转运到其他需求节点,此时直接令 $\text{DEV}_{cpr}^R = 0$,这种处理方式对模型中的约束条件并无实际影响;若前者小于后者,则直接记录物资真实不满足量即可。

Step 3: 对于任意受灾点 l 处待转运的伤员而言,由于需求预测值与真实值之间的差异,可能导致 r 时刻约束(5)不满足,即截至 r 时刻该节点伤员的计划转出量大于实际需求量,对此优先对 r 时刻节点 l 与其他需求节点之间的运输量进行调减;若全部调减为0后仍无法满足约束(5),则再对节点 l 与医疗节点之间的运输量进行调减,直至满足式(5),由于后续的伤员转运是确定性的无需调整;最后根据下式求 r 时刻 l 节点伤员的未救治数量:

$$\text{DEV}_{hlr}^W = \sum_{\tau=1}^r \check{d}_{hl\tau}^W - \sum_{\tau=1}^r \sum_{p \in \text{HN}} \left[\sum_{o \in \text{DNUSN}} \delta_{\tau opr} \check{X}_{hopr\tau}^W - \sum_{p' \in \text{HN}} \check{X}_{hpp'\tau}^W \right], \quad \forall h \in \text{WS}, l \in \text{DN} \quad (25)$$

Step 4: 对于任意医疗节点而言,由于预测值与实际值之间的差异,可能出现 r 时刻运到医疗节点的伤员数量大于该节点的当前处置能力,即约束(8)不满足,对此在统计当前时刻的伤员不满足量时增加这些滞留伤员的数量,并将这些滞留伤员留待本医疗节点待有新增救援资源后予以救治或转运至其他医疗节点救治。

3 数值实验

3.1 实验参数设置

为了验证本文所提出的基于MPC的应急资源运输调度模型的有效性,以汶川大地震的部分救援数据为背景进行了如下的实验测算。图2给出了受灾地点和供应地点的位置分布。其中:A~H为需求节点(以圆圈表示),共8个;F1~F3为物资供应节点与医疗节点(以三角表示),共3个。实验中,选择实际情况下最急需的两种救援物资:食品、药品,分别用C1、C2表示,其单位重量分别是14kg、16kg;选择一种类型的伤员:H1。表1和表2分别给出了不同时刻各需求节点新增救援物资需求量与伤员数量的期望值 \bar{d}_{cpt} 、 \bar{d}_{hpt} 。类似地,不同时刻各供应(医疗)节点新增的物资数量和医疗处置能力的期望值以 \bar{s}_{cot} 、 \bar{s}_{hot} 表示,F1节点因基础设施较好,其总物资供应能力和伤员救助能力高于其他两个节点。实验中有3种类型的直升机(Z8s, S70g, M171s),其最大载货数量(cap_m^R)与最大载人数量(cap_m^W)分别为4000、3500、4500与15、9、16。表3给出了不同时刻各供应(医疗)节点新增的不同类型直升机的数量(如第1行第1列中的(10, 5, 5)表示 $t = 1$ 时刻,F1节点新增各型号直升机分别为Z8s = 10, S70g = 5, M171s = 5)。



图2 需求地点和供应地点位置分布图

实验中总的运输调度决策时间为3d,每天有效运输时间设置为16h,调度周期之间的时间间隔为2h,所以总的调度周期数为24。与此相对应的是将MPC调度窗口大小参数 E 设置为 $E = 8$ 。对于3类需求权重的确定,考虑到一方面物资与伤病员的总需求数量不在同一个数量级,另一方面物资与伤员的主要运输方向不同,因此令

表1 需求节点各周期物资需求预测值

单位1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
C1	A	1585	-	906	-	996	-	-	679	-	362	-	-	226	-
	B	1008	-	576	-	634	-	-	432	-	230	-	-	144	-
	C	5939	-	3394	-	3733	-	-	-	2545	-	1357	-	848	-
	D	1106	-	632	-	-	695	-	-	474	253	-	-	158	-
	E	4763	-	-	2722	-	2994	-	-	2041	1089	-	-	-	680
	F	1142	-	-	653	-	718	-	490	-	261	-	-	-	163
	G	4570	-	-	2611	-	2872	-	1958	-	-	1044	-	-	653
	H	2285	-	-	1306	1436	-	-	979	-	-	522	-	326	-
C2	A	792	-	453	-	498	-	-	340	-	181	-	-	113	-
	B	504	-	288	-	317	-	-	216	-	115	-	-	72	-
	C	2969	-	1697	-	1866	-	-	-	1273	-	679	-	424	-
	D	553	-	316	-	-	348	-	-	237	126	-	-	79	-
	E	2381	-	-	1361	-	1497	-	-	1021	544	-	-	-	340
	F	571	-	-	326	-	359	-	245	-	131	-	-	-	82
	G	2285	-	-	1306	-	1436	-	979	-	-	522	-	-	326
	H	1142	-	-	653	718	-	-	490	-	-	261	-	163	-

表2 需求节点各周期伤员数量预测值

人

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
H1	A	112	-	64	-	70	-	-	48	-	26	-	-	16	-
	B	56	-	32	-	35	-	-	24	-	13	-	-	8	-
	C	328	-	187	-	206	-	-	-	140	-	75	-	47	-
	D	61	-	35	-	-	38	-	-	26	14	-	-	9	-
	E	263	-	-	150	-	165	-	-	113	60	-	-	-	38
	F	63	-	-	36	-	40	-	27	-	14	-	-	-	9
	G	252	-	-	144	-	158	-	108	-	-	58	-	-	36
	H	126	-	-	72	79	-	-	54	-	-	29	-	18	-

表3 需求节点各周期物资需求预测值

	1	2	3	4	5	6
F1	(10,5,5)	(0,5,8)	(7,0,0)	(5,0,7)	(0,5,3)	(0,0,0)
F2	(7,5,6)	(0,7,0)	(8,0,5)	(0,3,0)	(0,0,5)	(0,0,0)
F3	(6,7,5)	(0,0,8)	(4,5,0)	(0,0,7)	(0,4,0)	(3,0,0)

$$\rho_h^W = \frac{\sum_c \sum_p \sum_t \bar{d}_{cpt}^R}{\sum_c \sum_p \sum_t \bar{d}_{cpt}^R + \sum_p \sum_t \bar{d}_{hpt}^W}$$

$$\rho_c^R = (1 - \rho_h^W) \frac{\sum_{c' \in CS \setminus \{c\}} \sum_p \sum_t \bar{d}_{c'pt}^R}{\sum_{c''} \sum_p \sum_t \bar{d}_{c''pt}^R}$$

即在保持不同类别的需求权重之和为1的基础上,使总需求数量多的需求权重相对较小,反之亦然。

数值实验基于优化软件ILOG CPLEX12.5.1进行,为加快模型求解算法的收敛速度,将CPLEX软件中的相对MIP容差由缺省的0.01%更改为0.1%,实验用计算机的配置为Intel(R)Core(TM) i7-5500U CPU @2.40 GHz, RAM = 8.00 GB。

3.2 实验结果及分析

首先基于以上数据,令需求和供应的不确定程度 $\alpha = 0.10$,即各个受灾点的实际物资需求量和伤

员数量分别在区间 $[(1 - \alpha)\bar{d}_{cpt}^R, (1 + \alpha)\bar{d}_{cpt}^R]$ 和 $[(1 - \alpha)\bar{d}_{hpt}^W, (1 + \alpha)\bar{d}_{hpt}^W]$ 内随机取值,各供应点的实际物资供应量和伤员处理容量在区间 $[(1 - \alpha)\bar{s}_{cot}^R, (1 + \alpha)\bar{s}_{cot}^R]$ 和 $[(1 - \alpha)\bar{s}_{hot}^W, (1 + \alpha)\bar{s}_{hot}^W]$ 内随机取值,进行相关实验。图3为在上述条件下模型运输计划汇总表和各时刻的运输计划表。其中,各需求地点在各时刻具体的转运计划以运输计划表的形式列示。在运输计划表中,每一个表格表示一个需求节点在决策周期内的物资转入和伤员转出计划,第1列表示该物资转入或伤员转出的开始时刻,第2~第4列分别表示转入该需求节点物资的供应节点或接收该需求节点伤员的医疗节点。表格中数据分别表示物资C1、C2和伤员H1的数量,正值表示转入需求节点,负值表示转出该需求节点。例如需求节点H在 $t = 4$ 时刻与供应节点(或医疗节点)F2间的转运计划为:由F2运往H的物资C1(338.8单位)、C2(1016单位),由H运往F2的伤员H1(36人);此外,运输计划图则给出了各供应地点和需求地点之间在整个决策周期内的转运总量,有向虚线上括号内的数值分别表示汇总的物资C1、C2和伤员H1的数量,“-”表示运输方向与箭头所示方向相反。例如供应节点(或医疗节点)F1与需求节点B之间的数据(647.5; 656.3; -107)

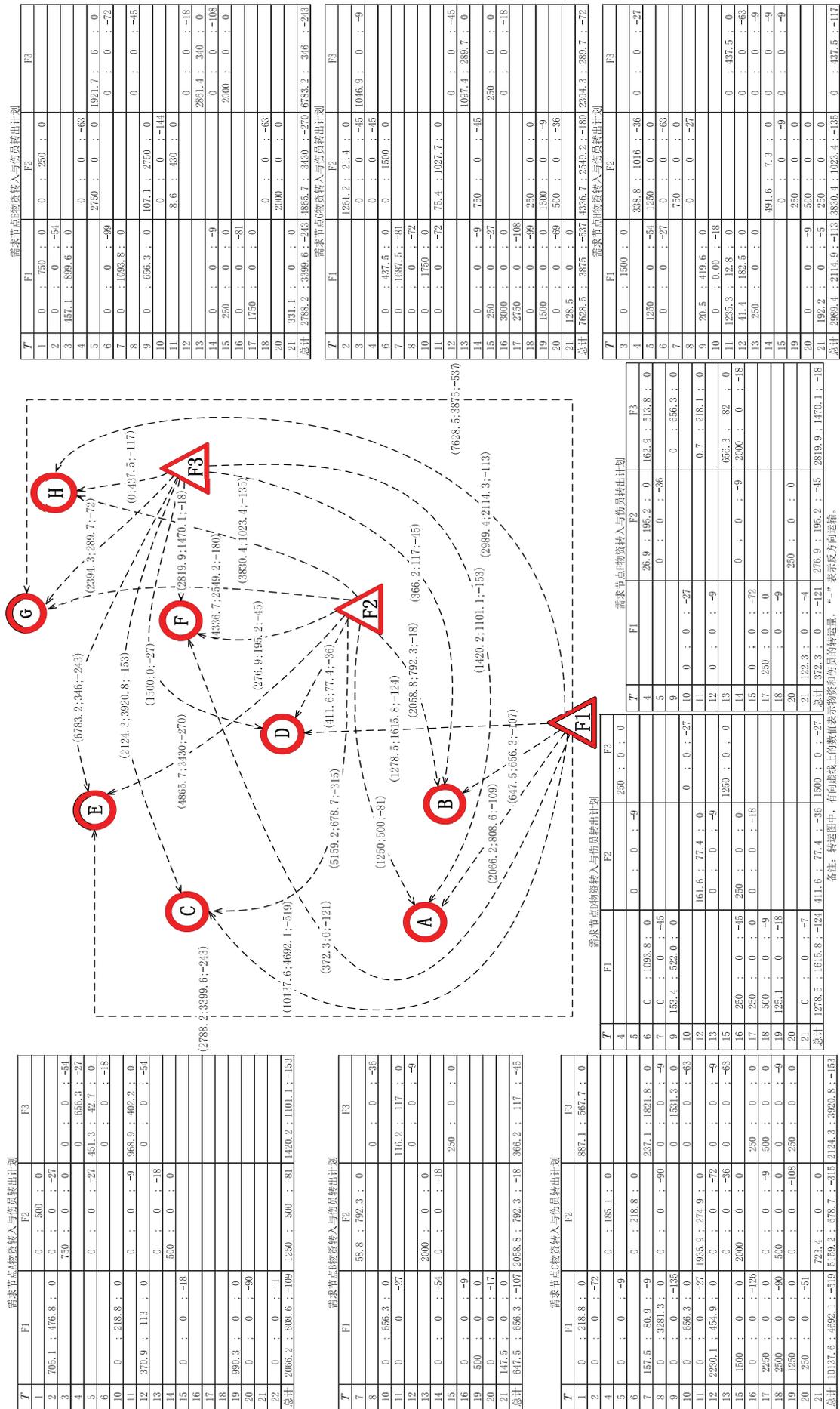


图3 节点间运输计划汇总图和各时刻运输计划表

表示在整个决策周期内由F1运往B的物资C1(647.5单位,为运输计划表中 $t = 19、21$ 时刻物资C1转运数量之和)、C2(656.3单位,为运输计划表中 $t = 10$ 时刻物资C2转运数量),由B运往F1的伤员H1(107人,为运输计划表中 $t = 11、14、16、20$ 时刻伤员转运数量之和)。

由图3可知,大部分需求节点均由3个供应节点(或医疗节点)共同供应物资(或接收伤员)。但针对不同的需求节点,其物资输入与伤员输出的方向却存在差异。由表1可知,需求节点C、E、G为重灾区,物资需求与伤员数量均较大。观察图3可发现,均有来自其他3个供应节点的较大数量的物资,但由于F1的交通条件较好,物资供应较多,因此承担了较大比重的物资供应;C的伤员运往3个医疗节点,但以F1居多,E的伤员由F1、F2、F3共同接收,其中F1、F3接收伤员的数量相同;与F2数量差别不大,G的伤员主要由F1、F2接收。此外,A的物资主要来源于F1、F3,但伤员主要由F1、F3接收,部分伤员由F2接收;B有来自3个供应节点的物资,但来自F2的物资最多,伤员则由F1接收为主,F2、F3接收的伤员数量较少;D需求的C1绝大部分来自F1、F3,C2则来自F1、F2,伤员由3个节点共同接收,但F1接收了绝大部分伤员,F2、F3接收的伤员数量较少;F的物资C1主要来源于F3,C2来自于F2、F3(数量相近),F3居多,但伤员主要由F1接收;H节点的物资主要来源F1、F2,伤员由3个供应节点共同接收,数量差异较小。不难发现,运输计划一定程度上打破了以往就近供应的认知,例如D距离F2最近,但D所需物资却主要来自于F1、F3,伤员也主要由F1接收;H距离F3最近,但其物资主要由F1和F2供应。这种认知的突破将有助于实现最小化物资不满足量和伤员未救治数量的目标。

此外,为了更加直观地反映在多周期应急资源运输调度模型中运用模型预测控制(MPC)的效果,将多周期模型与基于MPC的运输调度模型的实验结果进行对比分析。第2节中介绍了基于MPC的运输调度模型的调整策略,由于多周期运输模型运行一次会生成整个决策周期内的运输计划,下面将介绍多周期运输调度模型的调整策略。

Step 1: 对于物资供应节点而言,其调整策略与基于MPC的运输模型的调整策略Step1相同。

Step 2: 对于任意受灾点的任一类物资需求,需要进行两方面的处理:一是根据式(2)比较截至 r 时刻该受灾点的累计转入量(用 $\sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{o \in DN \cup SN} \delta_{\tau opr} X_{copr}^R$

表示)与转出量(用 $\sum_{\tau=1}^r \sum_{p' \in DN} X_{cpp'\tau}^R$ 表示),若转出量大于转入量,则根据式(2)以随机方式减小 r 时刻向其他节点的转出量,直至该大于关系不成立;二是求解真实的物资不满足量,其方法与基于MPC的运输模型的调整策略Step2相同。

Step 3: 对于任意受灾点的伤员而言,也需要进行两方面的处理。首先根据式(5)对源节点的伤员输出进行调整,调整策略与基于MPC的运输调度模型的调整策略相同;其次,还需根据调整结果对其他转运节点和医疗节点之间的伤员运输量进行调整,保证式(6)和(7)的成立,最后求解伤员真实的不满足量。

Step 4: 与基于MPC的运输模型的调整策略Step4相同。

对比实验中,设置3种不同类型的预测需求与供应:乐观($d_{cpr} = (1 - \alpha)\bar{d}_{cpr}, s_{cor} = (1 + \alpha)\bar{s}_{cor}$)、中性($d_{cpr} = \bar{d}_{cpr}, s_{cor} = \bar{s}_{cor}$)、悲观($d_{cpr} = (1 + \alpha)\bar{d}_{cpr}, s_{cor} = (1 - \alpha)\bar{s}_{cor}$),需求和供应的不确定程度 α 分别取0.05、0.10、0.15、0.20,两种模型采用相同的实验数据。图4为多周期模型与基于MPC的运输模型在不同的不确定程度、需求预测态度下的目标函数值;图5为多周期模型与基于MPC的动态模型的物资多余量,表示各需求节点在各时刻累积的物资供大于求的数量;图6为多周期模型与基于MPC的动态模型的伤员无效运输数量,表示伤员计划转出量超过伤员实际数量的部分。

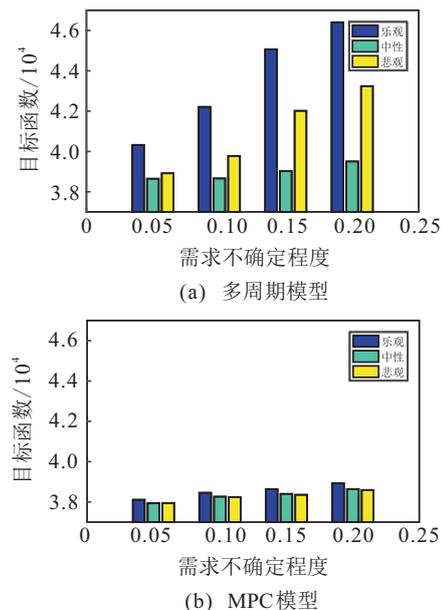


图4 多周期模型与基于MPC的运输模型的目标函数对比分析

通过观察图4多周期模型的目标函数可以发现,在需求和供应预测中性条件下的目标函数值最小,表

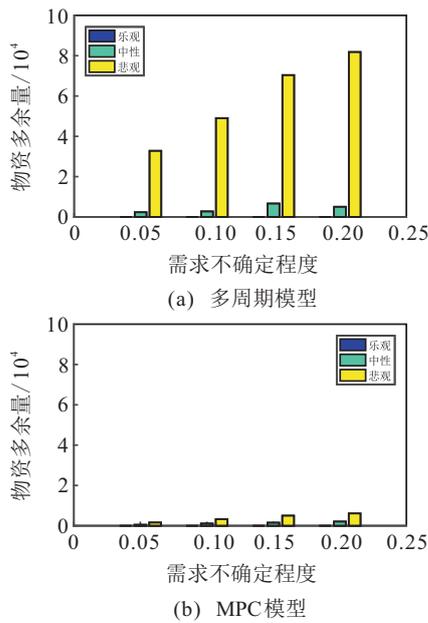


图5 多周期模型与基于MPC的运输模型的物资多余量对比分析

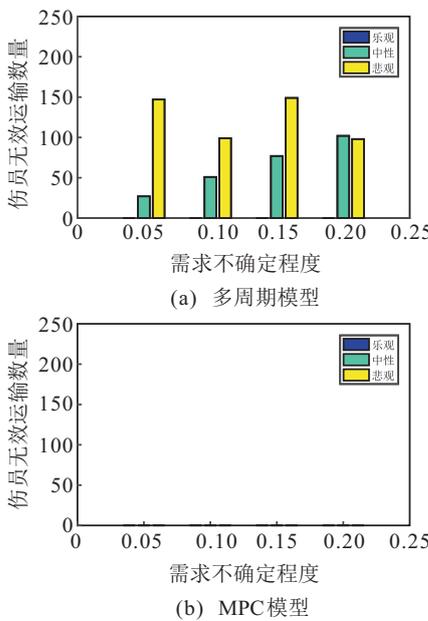


图6 多周期模型与基于MPC的运输模型的伤员无效运输数量对比分析

明此时的物资和伤员不满足量最小. 预测悲观情况下虽然最大限度地满足了需求地点的物资和伤员处置需求, 但由图5可知, 部分需求地点占用大量的物资, 导致该部分需求地点物资供大于求. 由于实际伤员数量低于悲观情况下的伤员预测数量, 由图6可知存在大量的无效运输, 使得模型在满足部分需求节点的同时其他大量需求节点的需求得不到满足. 此外, 供应的悲观预测导致供应节点在进行计划时无法充分利用其物资供应量和伤员处置能力, 最终导致其目标函数值大于中性预测下的目标函数值; 乐观情况下的目标函数值高于其他两种情况, 而且随需求不确定程度的增加, 目标函数值的增加显著快于其他两种

情况. 这是由于以乐观预测进行应急资源调度时, 实际供应低于预测供应, 导致各供应节点并没有充足的物资和伤员处置容量, 且各需求节点的实际需求高于预测需求, 需求节点的物资需求并不能得到满足. 由图5可知, 乐观情况下的物资多余量、伤员无效运输量均为0, 表明不存在物资供大于求和伤员无效运输的情况, 这将导致节点间的运输次数增加, 需求满足的时间延后, 目标函数值增大.

由图4(b)中基于MPC的应急资源动态调度模型的目标函数值可以发现, 在不同的需求不确定程度、不同预测情况下目标函数值相近, 并未导致目标函数值的剧烈变化, 因此MPC在应急资源调度模型中的应用大大消除了由预测不准确导致的不满足量的增加; 除 $\alpha = 0.05$ 外, 其余3种条件下的目标函数值中: 乐观 > 中性 > 悲观, 区别于多周期模型中性条件下目标函数最小的特征. 因此, 基于MPC的应急资源调度模型在进行应急资源调度时, 选择相对悲观的预测不但不会造成加权不满足量的增加, 反而能够降低加权不满足量. 对比图4(a)和图4(b), 基于MPC的动态调度模型的目标函数值在不同的需求不确定程度下, 目标函数值均低于多周期模型的目标函数值. 以悲观的预测为例, 在4种不同的预测不确定程度下, 其目标函数分别降低了2.5%、3.84%、8.71%、10.74%. 可以发现, 随着不确定程度的增加, 基于MPC的动态调度模型目标函数降低的比例也增加. 此外, 目标函数增长的速度显著低于初始模型, 表明MPC机制可以降低需求不确定程度对目标函数值的影响. 由图5和图6可知, 基于MPC的动态模型的物资多余量在乐观情况下为0, 而伤员无效运输数量在所有情况下均为0, 均优于多周期模型.

4 结论

本文针对动态环境下地震灾害应急资源运输调度中信息不断披露、更新和需求动态变化这一特点, 考虑受灾地点需求、供应地点供应不确定的情况, 构建了动态环境下基于MPC的灾后应急资源运输调度模型, 并提出相应的调整策略. 数值实验表明: 模型能够消除预测不准确导致的不满足量的剧烈变化; 在不同的需求不确定程度下, 模型能够降低受灾地点物资和伤员的不满足量, 显著降低物资的多余数量和伤员的无效运输; 基于MPC的应急资源调度模型在悲观预测情况下的目标函数值更小, 更能降低受灾节点物资和伤员的不满足量. 本文所提出的滚动优化方法需要多次求解多周期运输调度模型, 而目前对模型的求解没有提出特别的算法来提高模型求解速度, 因此, 下一步拟开展相应的算法设计研究. 此外, 鉴于

当前模型中的运输工具仅仅考虑了直升机,今后还可以对地震救灾中多式联运进行进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Özdamar L, Ekinçi E, Küçükyazıcı B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 129(1): 217-245.
- [2] Yi W, Özdamar L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 179(3): 1177-1193.
- [3] Najafi M, Eshghi K, Dullaert W. A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase[J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2013, 49(1): 217-249.
- [4] Najafi M, Eshghi K, Leeuw S D. A dynamic dispatching and routing model to plan/ re-plan logistics activities in response to an earthquake[J]. *OR Spectrum*, 2014, 36(2): 323-356.
- [5] Ren X, Zhu J, Huang J. Multi-period dynamic model for emergency resource dispatching problem in uncertain traffic network[J]. *Systems Engineering Procedia*, 2012, 5: 37-42.
- [6] Lu C C, Ying K C, Chen H J. Real-time relief distribution in the aftermath of disasters – A rolling horizon approach[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, 2016, 93: 1-20.
- [7] 朱佳翔, 谭清美, 蔡建飞, 等. 基于双重不确定性的应急物流配送策略[J]. *系统工程*, 2016, 34(3): 1-8.
(Zhu J X, Tan Q M, Cai J F, et al. Emergency logistics distribution strategy based on double uncertainty[J]. *Systems Engineering*, 2016, 34(3): 1-8.)
- [8] 刘长石, 寇纲, 刘导波. 震后应急物资多方式供应的模糊动态LRP[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(10): 61-72.
(Liu C S, Kou G, Liu D B. Fuzzy dynamic LRP for post-earthquake multimodal relief delivery[J]. *J of Management Sciences in China*, 2016, 19(10): 61-72.)
- [9] 傅克俊, 胡祥培, 王旭坪. 供应链系统突发事件与应急管理研究综述[J]. *铁道运输与经济*, 2008, 30(12): 61-64.
(Fu K J, Hu X P, Wang X P. Comprehensive literature review on emergency management in supply chain system[J]. *Railway Transport & Economy*, 2008, 30(12): 61-64.)
- [10] 胡祥培, 丁秋雷, 张漪, 等. 干扰管理研究评述[J]. *管理科学*, 2007, 20(2): 2-8.
(Hu X P, Ding Q L, Zhang Y, et al. A Review on disruption management[J]. *J of Management Sciences*, 2007, 20(2): 2-8.)
- [11] 胡祥培, 张漪, 丁秋雷, 等. 干扰管理模型及其算法的研究进展[J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 28(10): 40-46.
(Hu X P, Zhang Y, Ding Q L, et al. Review on disruption management model and its algorithm[J]. *System Engineering – Theory & Practice*, 2008, 28(10): 40-46.)
- [12] 王旭坪, 牛君, 胡祥培, 等. 车辆路径问题的受扰救援策略[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(12): 104-110.
(Wang X P, Niu J, Hu X P, et al. Rescue strategies of the VRPTW disruption[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2007, 27(12): 104-110.)
- [13] 胡祥培, 于楠, 丁秋雷. 物流配送车辆的干扰管理序贯决策方法研究[J]. *管理工程学报*, 2011, 25(2): 186-190.
(Hu X P, Yu N, Ding Q L. Sequential decision methods for disruption management in distribution[J]. *J of Engineering Management*, 2011, 25(2): 186-190.)
- [14] 俞虹. 自然灾害应急物流配送干扰管理系统模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学管理学院, 2012.
(Yu H. Research on model of disruption management system in natural disaster emergency logistics distribution[D]. Harbin: College of Management, Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [15] 闫卓男, 王承文, 俞虹. 城市灾害应急物流配送干扰管理系统模型研究[J]. *工程管理学报*, 2014, 28(2): 61-65.
(Yan Z N, Wang C W, Yu H. Emergency logistics distribution management system of city disaster interference model[J]. *J of Engineering Management*, 2014, 28(2): 61-65.)
- [16] 刘长石, 朱征, 刘立勇. 震后初期应急物资配送LRP中的干扰管理研究[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(20): 224-230.
(Liu C S, Zhu Z, Liu L Y. Disruption management of location-routing problem(LRP) for emergency logistics system in early stage after earthquake[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, 53(20): 224-230.)
- [17] 阮俊虎, 王旭坪. 中转点变化的应急医疗物资联合运送干扰管理研究[J]. *运筹与管理*, 2016, 25(4): 114-124.
(Ruan J H, Wang X P. Disruption management of emergency medical supplies intermodal transportation with updated transit centers[J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(4): 114-124.)
- [18] 詹沙磊, 刘南. 基于灾情信息更新的应急物资配送多目标随机规划模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(1): 159-166.
(Zhan S L, Liu N. Multi-objective stochastic programming model for relief allocation based on disaster scenario information updates[J]. *System Engineering – Theory & Practice*, 2013, 33(1): 159-166.)
- [19] 叶永, 刘南, 詹沙磊. 基于信息更新的应急资源配置序贯决策方法[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2013, 47(12): 2212-2220.
(Ye Y, Liu N, Zhan S L. Information update based sequential approach for emergency resources allocation planning[J]. *J of Zhejiang University: Engineering Science*, 2013, 47(12): 2212-2220.)
- [20] 张怡, 张鹏, 冯春. 人道救援物流快速信任的评估模型研究[J]. *系统科学学报*, 2016, 16(3): 86-90.
(Zhang Y, Zhang P, Feng C. Research on the evaluation model of the swift trust in humanitarian rescue logistics[J]. *J of System Science*, 2016, 16(3): 86-90.)
- [21] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. *自动化学报*, 2013, 39(3): 222-236.
(Xi Y G, Li D W, Lin S. Model predictive control – status and challenges[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(3): 222-236.)

(责任编辑: 孙艺红)