

应急配送车辆调度优化研究综述与展望*

谈晓勇¹, 刘秋菊²

(1. 重庆交通大学 管理学院, 重庆 400074; 2. 河南济源职业技术学院 信息工程系, 河南 济源 459000)

摘要: 应急配送车辆调度优化是物流配送领域近年来的一个新兴的研究方向, 它的研究可大大减少自然灾害和公共卫生事件等突发灾难所带来的损失, 对最大程度保护人民生命和财产安全、推进应急物流管理的完善和发展具有非常重要的意义和广阔的应用前景。对近年来国内相关学者在应急配送车辆调度优化研究中的成果进行了系统整理, 并从模型、算法、研究方法等多个方面进行了述评, 同时讨论了存在的一些问题, 并展望了今后的研究方向。

关键词: 应急; 车辆调度; 优化; 综述

中图分类号: TP391; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)09-3212-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.003

Review and prospect of vehicle scheduling optimization in emergency distribution

TAN Xiao-yong¹, LIU Qiu-ju²

(1. School of Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Dept. of Information Engineering, Jiyuan Vocation- al & Technical College, Jiyuan Henan 459000, China)

Abstract: Vehicle scheduling optimization in emergency logistics distribution is a rising aspect of distribution management. Its research can help minimizing losses brought by natural disasters and public health emergencies. It is of great significance for guaranteeing public life and property safety. Its research also conducts to the development of emergency logistics management and has a brightly application perspective. By searching domestic research papers published over the past years, this paper made a comprehensive review and summary from several aspects such as model, algorithm, research methods, etc. And it discussed the problems existed in the research and some future research topics on it were suggested.

Key words: emergency; vehicle scheduling; optimization; review

0 引言

近年来,地震、洪水等自然灾害和恶性传染病等公共卫生事件不断侵袭着人类,局部性、区域性、甚至全球性的突发事件也时有发生,严重威胁着人类的生命财产安全。在目前的科技水平下,这些自然灾害和公共卫生事件是不可避免的,所造成的损失也是无法估量的^[1-3]。

自然灾害和突发事件发生时往往急需大量的应急物资,以应对灾难发生时的卫生防疫、伤者救助及灾后的恢复生产、灾区重建等问题。科学合理的资源配置能对应急救援起到事半功倍的作用,而应急配送车辆调度优化就是其中的关键环节。应急配送车辆调度优化的重要性已为越来越多的人所认识,很多人对此进行了研究。

文献[4~6]对应急配送车辆调度优化问题的研究意义进行了研究,主要体现在以下几个方面:有利于完善我国突发事件应急管理体制机制和决策机制;有利于提升我国应对突发事件的能力;有利于提高我国灾害应急管理水平的科学性,使灾害应急管理从经验管理走向科学管理;有利于提升自然灾害应急物流运行保障能力。同时,文献[7~9]更多地从理论价值方面研究,指出在现实生产和生活中,邮政投递问题、车船调度

问题、电力调度问题、管道铺设问题、计算机网络拓扑设计问题等都可以抽象为配送车辆调度问题。因此,对应急配送车辆调度优化问题的研究可为相关问题的解决提供思路和方法,促进这些学科领域的理论研究和应用研究。

1 应急配送车辆调度问题描述^[7-9]

按相关文献的结果,可以将应急配送车辆调度优化问题简要描述如下:在一个存在供求关系的应急系统中,有若干车辆、若干应急配送中心、若干潜在的应急需求点,要求合理安排车辆的行车路线和出行时间,在应急环境和条件约束下(分为静态和动态视角),把应急物资或人员从配送中心送达应急需求点,使得多目标函数取得整体优化。

应急配送车辆调度的优化目标可以是:应急物资运达各需求点的总时间最短、配送总成本最低、配送总里程最短、配送车辆总吨位公里数最少、配送车辆满载率最高、配送使用的车辆数最少等。模型中所取的目标函数可以是单个目标或多个目标的有机组合。

一般地,车辆调度问题根据时间窗限制可以分为硬时间窗问题和软时间窗问题。硬时间窗车辆调度问题是指如果车辆无法在要求的时间窗内将货物送达需求点,则可以放弃接收或

收稿日期: 2012-03-12; **修回日期:** 2012-04-25 **基金项目:** 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTCJJA00021)

作者简介: 谈晓勇(1969-),男,甘肃张掖人,副教授,硕士,主要研究方向为智能决策与评价理论(zystxy@163.com);刘秋菊(1970-),女,河南孟州人,副教授,硕士,主要研究方向为计算机应用。

对其进行处罚;软时间窗车辆调度问题是指如果车辆不在规定的时间内将物资送达应急需求点,不论是早到或迟到都可以被接收。

应急情况下的车辆调度问题所实施的是应急事件,凸显的是其时间紧迫性,对应急车辆早到达应急需求点的时间应该没有限制,所以应急情况下的车辆调度问题主要是单边软时间窗的车辆调度问题。

2 我国相关研究文献综述

近年来,国内相关学者就应急配送车辆调度优化问题开展了大量的研究。就其模型实现的主流算法分类,基本可以分为两类。

a) 基于数学规划或网络分析方法的研究,主要代表是数学规划或网络的最大最小流等算法。在20世纪70年代到80年代,国际上先后诞生了一系列具有影响力的算法^[10-15],这些方法包括:Wright提出的节约启发式算法,Kolen等人提出的分支界定法,Fisher提出的利用K树搜索算法,Kinderwate等人提出的巡回改进启发式算法,Fisher等人提出的一般分配法,Gillett提出的扫描法,Christofides建立的不完全树搜索算法等。其中的一些方法被国内学者消化、吸收、扩展后用于早期的应急配送车辆调度优化问题研究。

例如,刘春林等人^[16,17]研究了以“应急开始时间最早”为目标的数学模型及相应解法,其中运用了模糊多目标规划等方法实现了应急组合调度问题的求解。

卢安文^[18]研究了应急情况下只考虑公路运输以及同时考虑多种运输方式的0-1整数规划模型和目标规划模型。

张毅等人^[19]将多属性决策问题转换成单属性决策问题,确立了选择具有最高期望效用方案的方法,并进行了实例分析。

缪成等人^[20]分析了大规模突发性公共事件或自然灾害情况下救援物资运输与商业运输的不同特点,设计了一种多模式分层网络,利用延期费用和划分时段的方法构建了问题的多目标数学规划模型,提出了一个基于拉格朗日松弛法的解决方法,将原问题分解为货物流与车辆流两个子问题,通过多货物流与最小费用循环流算法分别求解,通过实例验证了收敛性与计算效率。

杨晓璐等人^[21]考虑到城市交通系统的复杂性,采用路段信息表描述道路信息,建立了事故救援路线的模型,用Floyd算法构造了时间矩阵,对道路通行时间进行了优化,提高了救援行动的效率。

孙敏等人^[22]以一次性消耗系统为背景,提出了多应急点多出救点以及多资源的复杂网络应急调度模型,以应急点的损失最小和出救点的个数最少为目标,将损失量大小转换为应急时间长短进行衡量,运用理想点法求解,并验证了可行性和有效性。

这类方法能有效地对车辆问题进行求解且比较精确,但也存在问题,如不适合大规模的问题求解,存在“组合爆炸”的现象。

b) 基于人工智能算法的研究。自从1985年Savelsbergh证明了车辆调度问题是NP完全问题以后,有关车辆调度研究的重点逐渐被转移到寻求问题的近似解上,研究人员尝试采用新的智能启发算法来求解车辆调度问题^[10-15]。如Purezza等

人曾运用禁忌搜索法求解车辆优化调度问题;Barrier等人运用遗传算法求解车辆调度问题;Abdolhanid提出用自组织的神经网络算法来求解车辆线路优化问题;Bullnheimer等人用蚂蚁算法来求解车辆优化调度问题等。

人们发现,利用这些算法来研究车辆调度问题可处理较大规模的问题,可移植性强,能在合理的时间内给出问题的接近最优解或者近似最优解。近几年,对应急配送车辆调度优化问题研究的文献大都是这方面的研究成果。有代表性的文献包括:

谢红薇等人^[23]在应急决策系统最优路径研究中提出了一种将模拟退火算法和遗传算法相结合的进化算法GASA,增强了算法的全局收敛性,并对遗传算子(如选择、交叉、变异算子)进行重构,引入了新的交叉算子和变异算子,能根据种群的进化情况提高后期搜索的效率。

潘郁等人^[24]以连续性消耗应急过程为背景,运用了粒子群算法求解多目标的应急资源调度数学模型。

赵彤等人^[25]针对带时间窗的应急救助物资配送车辆路径优化问题进行研究,建立了以运输距离为目标函数的优化模型,并运用了蚁群算法进行求解,取得了较好的效果。

宋晓宇等人^[26,27]构建了基于广义粗糙集的应急物资多目标调度模型,建立了应急开始时间最短、出救点个数最少以及需求约束偏爱度最大的多目标灰色规划模型,并通过算例用遗传算法实现了该问题的求解,通过测试优选了种群数目、交叉率和变异率三种控制参数值以提高算法性能。

刘武阳^[28]构建了突发事件应急处置中的物流优化与调度模型,提出了求解该模型的带有动态参数决策模型的改进蚁群优化算法。

李周清等人^[29]综合建立了一个区际救援物资中转调度动态决策模型,并设计了一种矩阵编码的协进化遗传算法。

陈森等人^[30]考虑了一类大规模自然灾害应急救援情景,基于实际应用条件和需要,建立了最优变路网情况下多库房应急物资调度模型,设计了一种求解问题的动态加速自适应遗传算法。

徐志宇等人^[11]针对应急物流的特点,建立分批配送车辆路径规划模型,通过改进最大最小蚁群算法,设定信息素增量的上下限,避免了结果陷入局部最优。

唐连生等人^[31]提出了一种用于求解突发事件下物流配送多目标优化问题的蚁群聚类优化算法。

陈明华等人^[32]通过分析应急物流车辆调度问题的特点,结合实际情况,确立了一般性非满载应急物流车辆调度优化的数学模型,并采用人工免疫算法对该问题进行了求解。

目前,对应急配送车辆调度优化问题研究的方法主要是采用多种理论、技术、方法的综合集成。如借鉴模糊数学、灰色系统理论、粗糙集、随机过程等不确定理论或博弈论等理论的一些成果和思路。这方面的研究成果很多,大部分仍然是基于模型建立、模型转换、算法实现的研究,其中也有一些是方法探讨、局部问题分析、应急决策支持系统建设方面的研究成果。代表性文献包括:

计雷等人^[33]在动态博弈模型的框架下分析了突发事件应急管理中“危机事件”与“危机管理者”之间的动态博弈过程,探讨了利用博弈模型生成预案的方法。

朱建明等人^[34]基于未满足的需求量和总的物资延误时间

最小建立了突发事件应急医疗物资调度的模型,通过引入随机算法的思想设计了模型的改进随机算法。

王炜等人^[35]通过实例研究了基于马尔可夫决策过程的应急资源调度方案动态优化方法。

刘杨等人^[36]针对城市中应急车辆的救援路径优化问题,分析了基于交通信息中心的应急车辆最优路径的多目标属性,给出了随机网络中各属性的量化计算方法,建立了应急车辆出行前最优路径选择的多目标规划模型。

李梅霞等人^[37]针对应急系统多点出救的特点,研究了以消耗速率为函数的连续型应急资源调度模型。该模型以最早应急时间为目标,同时给出了最早应急时间的求取方法,并用数值算例分析了算法的有效性和实用性。

周德群等人^[38]利用区间数的相关运算规则和多个区间数最大值的求法,给出了基于区间数的多资源连续消耗应急系统的应急时间最早开始与最晚结束的数学模型,并对算法的结果进行了验证和分析。

汪传旭等人^[39]考虑到受灾点对救援物资的需求量为模糊变量,将多出救点到多个受灾点的应急救援运输优化问题视为两阶段决策问题:第一阶段建立救援车辆的路径优化模型,实现运输时间最短;在满足第一阶段最优的情况下,第二阶段建立模糊线性规划模型,在运输成本最小的前提下,确定出救点与受灾点之间的救援物资调运以及受灾点与受灾点之间救援物资的转运量,最后利用具体算例验证了该模型的有效性。

胡红等人^[40]通过对突发事件情况下驾驶员心理与行为特性问卷调查,得到驾驶员在非正常交通环境下的行为差异和经验判断比率分布,提出了基于最小安全跟车间距的应急疏散车辆跟驰模型。

为提高应急物资配送效率与可操作性,针对应急物资调度中面临的运输时间与货物量不确定问题,王玲玲^[41]对多出救点、多受灾点应急物资调度问题,在满足时间约束条件下,建立了以应急出救总行程最短和应急车辆数最少的双目标模型。

李永义等人^[42]对震后交通生命线系统的功能进行了分析,将震后道路里程、车辆速度、行程延误、交通负荷度以及路网连通可靠度等因素遴选为震后交通生命线系统的交通阻抗效用指标,提出将这些效用指标转换为一种广义交通阻抗即运输时间的理论方法。

谢秉磊等人^[43]结合应急物流的特征,研究了应急需求稀少和应急需求密集两种情况下的系统期望时间。

杨继君等人^[44]设计了应急资源调度的多模式分层网络,通过应急资源调度的算例对比分析,验证了所建模型的可行性和求解结果作为调度策略的优越性。

白永秀等人^[45]建立了以总时间、总成本、对物流服务满意度为目标的多目标规划函数的数学模型,并采用层次分析法将多目标函数转换为单目标函数。

王晶等人^[46]采用鲁棒规划建立数学模型解决了应急物资需求不确定下如何进行应急配送中心选址和配送计划的安排等问题。

何正文等人^[47]研究了基于禁止时间窗的应急物资调度车辆路径问题。

李紫瑶^[48]研究了多目标应急救援的单一起点与终点的车辆路径问题。

邹亮等人^[49]研究了城市在风灾情况下进行疏散的模拟方

法,研制了基于 GIS 的灾害疏散模拟及救援调度系统,该系统可对城市防灾减灾规划和灾时应急预案的制定提供决策支持。

朱帅剑等人^[50]提出了基于 3S 技术的应急物流配送车辆导航定位系统研究,将 GIS/GPS/RS 技术应用到应急物流运输中的车辆监控。

基于综合理论与方法进行建模求解的文献近年明显增多,解决的问题也越来越复杂,大大丰富了对应急配送车辆调度优化问题的研究。

从上述文献可以很清晰地看到,目前应急配送车辆调度优化问题的研究热点仍然集中在模型建立和算法分析两个方面,目标的组合和算法的实现是关键,有软硬件研究相结合的研究趋势。但许多文献所讨论的问题基于较强的假设和一些特定的场景,其中所用到的算法和处理方法特质性较强,不具有普遍的适应性。对各类算法和方法进行对比研究的文献还比较少。

3 研究评述及问题分析

应急配送车辆调度因为受多目标和各类不确定信息的干扰,使得此类问题的建构与解决非常复杂。

可以看到,对应急配送车辆调度优化问题的研究基本上沿袭了从静态模型到动态模型、从单目标优化到多目标优化、从单个算法到混合算法、从单一理论到综合理论的演化过程。

从优化目标来看,大多数文献所建立的模型仍然是以成本最小化作为主要目标或者优化目标之一,也多是从商业问题的框架和视角进行迁移性研究,应急物流的特殊性还有进一步挖掘的空间。

应急物流与普通物流、一般车辆调度问题与应急车辆调度问题有相同的地方,同时也存在很多不同之处。例如,普通物流主要考虑的是节省成本,而应急物流除了对成本的考虑,配送过程中要受到严格的时间约束,往往更加注重时效性。另外,应急物资的需求与供给是随时间变化而变化的,灾后路网状况的变化也是动态的,具有动态和不确定性的特征。因此,实时动态决策方法尤为重要。

在重大灾难发生时,应急救援本身往往也是一项极具危险性的活动,如果应急车辆调度不当,不仅达不到预期的救援效果,还有可能造成救援人员新的生命和财产的损失,给后续救援带来负面影响,影响到救援的整体效果。因此,在应急救援中,安全性风险评估也是非常重要的,在应急救援物流配送车辆调度问题的研究中应考虑到救援的安全性风险评估问题,但这方面的研究成果还比较少。

近年来,物流配送、车辆调度相关研究取得了许多新的成果,智能启发式算法及其混合算法在这几年也有了很大的发展,但在应急救援物流配送车辆调度问题的研究进展还不太显著,还有不少问题可以用创新的视角去深入研究。

新的视角和突破必须靠新的理论和方法作支撑。应急救援中的物流配送车辆调度不能孤立看待,需要相关理论、技术和方法的进一步协同创新,需要它们的综合利用和有效集成才可以获得较完美的决策方案。因此,也有必要进一步加强这方面的基础与应用研究。

除了算法研究外,建立算法基准测试平台、对不同算法进行综合评估、提高其适应性也是需要重视的一个重要研究内容。

4 研究动态分析

a) 相关理论、技术、方法的协同创新将进一步加强。基于随机、模糊、灰色系统等不确定性理论和其他新的管理理论,包括预测、评价、决策等理论及方法在应急配送车辆调度优化问题中的综合集成创新应用将是一个明显的趋势。

b) 实时动态优化将是研究的主线。不确定环境和动态变化是应急物流的主要特征。在灾情发生时,静态情境会上升为动态情境,现场对应急资源的需求由潜在、预测变成了现实和评估,并随着灾情的不断变化产生对资源的变化需求,形成了动态的供给需求关系,因此,需要充分研究实时动态决策的方法。

除了目标函数,包括应急物资、车辆、应急配送中心、应急物资需求点、运输网络、约束条件等要素,在应急配送车辆调度中都需要综合考虑。为此,还需要加强相关理论基础、相关技术的集成应用研究,如优化目标组合策略和重构策略的研究、突发事件下信息收集途径和方法的研究、实时动态信息融合技术等创新性研究等。

c) 突发灾难下的路网演变规律研究及应用应受到重视。突发灾难下路网毁坏严重,次生灾害也有可能频频发生,决策环境的不确定性增加,使得可靠信息贫化严重。为此,有必要进行路网演变规律的研究,并在建模中加以利用以支持实时决策。

d) 各种混合智能启发式算法将继续发挥重要作用。应急配送车辆调度是 NP-hard 问题,如果用精确算法来求解,只能解决规模较小的问题,而且求解过程需要的运行时间较长。因此,智能启发式算法(包括遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法、禁忌搜索算法、人工免疫算法、群智能算法以及混合算法等)仍是未来求解该类问题的主要方法。特别是对于大规模客户集的配送路径优化问题或者是多约束的复杂应急配送车辆调度问题,各种混合智能启发式算法仍将发挥重要作用。

5 结束语

总体来看,我国对应急配送车辆调度优化问题的研究尚处于起步阶段,在多目标优化和实时动态优化等方面还有进一步拓展的空间。应该进一步扩大研究视角,进行综合研究和专题研究,建立和完善可以反映实际复杂情况的应急配送车辆调度优化问题的理论体系、方法体系和技术体系,以更好地服务应急管理科学决策。

参考文献:

[1] 魏际刚,张媛. 加快应急物流体系建设增强应急物资保障能力[J]. 管理评论,2009(5):15-17.

[2] 宋传平. 我国应急物流系统的构建和保障条件[J]. 中国流通经济,2011,25(4):21-24.

[3] 沈建国,熊坚. 物流与应急物流略谈[J]. 物流科技,2005(4):4-7.

[4] 何鲜利. 基于地震灾害突发事件的应急物流资源配置研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2009.

[5] 王旭坪,傅克俊,胡祥培. 应急物流系统及其快速反应机制研究[J]. 中国软科学,2005(6):127-131.

[6] 龚卫国. 突发公共事件应急预案评估及预警警示分析[J]. 湖南商学院学报,2007,14(6):41-43.

[7] 郭耀煌,李军. 车辆优化调度[M]. 成都:成都科技大学出版社,1994.

[8] 李军,郭耀煌. 物流配送车辆优化调度理论与方法[M]. 北京:中国物资出版社,2001.

[9] 朗茂祥. 配送车辆优化调度模型与算法[M]. 北京:电子工业出版社,2009:2-17.

[10] 孙丽君,胡祥培,王征. 车辆路径规划问题及其求解方法研究进展[J]. 系统工程,2006,24(11):31-37.

[11] 徐志宇,彭嘉臻,许维胜. 应急物流的分批配送规划及蚁群优化求解[J]. 计算机工程与应用,2011,47(24):1-3,8.

[12] 周露,陈曦,陈宏,等. 一类应急物资调度的优化模型研究[J]. 管理评论,2008,20(12):25-29.

[13] 方金城,张岐山. 物流配送车辆路径问题(VRP)算法综述[J]. 沈阳工程学报:自然科学版,2006,2(4):357-360.

[14] 袁志远. 具有同时配送和收集需求的车辆路径问题研究[D]. 上海:上海海事大学,2007.

[15] 宋明安. 紧急救灾物流配送系统模式构建[D]. 新竹:国立交通大学交通运输研究所,2009.

[16] 何建敏,刘春林. 限制期条件下应急车辆调度问题的模糊优化方法[J]. 控制与决策,2001,5(3):318-320.

[17] 刘春林,何建敏,施建军. 一类应急物资调度的优化模型研究[J]. 中国管理科学,2001,9(3):26-29.

[18] 卢安文. 紧急情况下的物流配送模型[J]. 西南石油学院学报,2003,25(1):80-83.

[19] 张毅,郭晓汾. 应急救援物资车辆运输线路的选择[J]. 安全与环境学报,2006,6(3):51-53.

[20] 缪成,许维胜,吴启迪. 大规模应急救援物资运输模型的构建与求解[J]. 系统工程,2006,24(11):6-12.

[21] 杨晓璐,赵江平,王珂,等. 城市救援最佳路线的确定[J]. 中国安全科学学报,2008,18(10):51-56.

[22] 孙敏,潘郁. 多资源复杂网络的应急调度研究[J]. 运筹与管理,2009,18(6):165-169.

[23] 谢红薇,张晓波,袁占花,等. 基于遗传算法求解应急决策系统中的最优路径[J]. 计算机应用,2005,25(4):737-789.

[24] 潘郁,余佳,达庆利,等. 基于粒子群算法的连续性消耗应急资源调度[J]. 系统工程学报,2007,22(5):556-560.

[25] 赵彤,范厚明,王桂琳,等. 带时间窗的应急救助物资配送车辆路径优化路径模型[J]. 物流技术,2010,29(10):63-68.

[26] 宋晓宇,刘锋,常春光. 基于广义粗糙集的应急物资调度模型[J]. 控制工程,2010,17(1):119-122.

[27] 宋晓宇,刘锋,常春光. 面向应急物资调度的一种灰色规划模型[J]. 计算机应用研究,2010,27(4):1259-1262.

[28] 刘武阳. 突发事件应急处置中的物流优化与调度研究[J]. 湘潭大学自然科学学报,2010,32(3):122-126.

[29] 李周清,马祖军. 区际救援物资中转调度的动态决策模型与算法[J]. 运筹与管理,2011,20(3):46-52.

[30] 陈森,杨婧,陈英武,等. 变路网情况下多库房应急物资调度模型及算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(6):2016-2019.

[31] 唐连生,程文明,梁剑,等. 应急物流配送问题的蚁群聚类算法研究[J]. 铁道运输与经济,2008,30(9):66-69,73.

[32] 陈明华,李迎秋,罗耀琪. 应急物流车辆调配问题的研究[J]. 计算机工程与应用,2009,45(24):194-197,245.

[33] 计雷,池宏. 突发事件应急管理[M]. 北京:高等教育出版社,2005,100-101.

[34] 朱建明,黄钧,刘德刚,等. 突发事件应急医疗物资调度的随机算法[J]. 运筹与管理,2010,19(1):9-14. (下转第3220页)

(上接第 3215 页)

- [35] 王炜,刘茂,王丽. 基于马尔科夫决策过程的应急资源调度方案的动态优化[J]. 南开大学学报:自然科学版,2010,43(3):18-23.
- [36] 刘杨,马立,云美萍,等. 基于随机过程的城市应急车辆数量配置模型[J]. 中国安全科学学报,2008,18(5):46-48.
- [37] 李梅霞,车海涛. 应急资源调度模型及算法[J]. 运筹与管理,2011,20(3):72-76.
- [38] 周德群,张钦,陈超. 应急时间不确定下应急资源调度模型研究[J]. 技术经济与管理研究,2011(5):3-5.
- [39] 汪传旭,邓先明. 模糊环境下多出救点应急救援车辆路径与物资运输优化研究[J]. 系统管理学报,2011,20(3):269-275.
- [40] 胡红,刘小明,杨孝宽. 基于最小安全间距的应急交通疏散车辆跟驰模型[J]. 北京工业大学学报,2007,33(10):1070-1074.
- [41] 王玲玲. 多出救点应急调度研究[J]. 铁道运输与经济,2010,32(7):47-52.
- [42] 李永义,李伯权,储浩. 交通生命线系统震后应急调度模型及方法[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2011,33(1):33-37.
- [43] 谢秉磊,毛科俊,安实. 基于最小安全间距的应急交通疏散车辆跟驰模型[J]. 西南大学学报:自然科学版,2007,29(3):151-155.
- [44] 杨继君,吴启迪,程艳,等. 面向非常规突发事件的应急资源合作博弈调度[J]. 系统工程,2008,26(9):21-25.
- [45] 白永秀,周溪召. 应急物资配送路径选择问题的研究[J]. 物流技术,2009,28(3):88-91.
- [46] 王晶,张玲,黄钧,等. 基于不确定需求的鲁棒应急物流系统[J]. 数学的实践与认识,2009,39(20):53-60.
- [47] 何正文,贾涛,徐渝. 基于禁止时间窗的应急物资调度车辆路径问题[J]. 运筹与管理,2009,18(2):1-6.
- [48] 李紫瑶. 应急救援车辆路径寻优——基于多目标改进蚁群算法[J]. 技术经济与管理研究,2011(9):7-10.
- [49] 邹亮,任爱珠,张新. 基于 GIS 的灾害疏散模拟及救援调度[J]. 自然灾害学报,2006,15(6):141-145.
- [50] 朱帅剑,毛海军. 基于 3S 技术的应急物流配送车辆导航定位系统研究[J]. 交通与计算机,2008,26(5):119-122.