

混合电梯群控系统建模及新型优化调度策略*

赵小翠, 罗飞, 许玉格

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广州 510640)

摘要: 为了简化电梯系统建模问题的复杂性, 国内外学者一直将电梯系统作为离散事件动态系统来分析, 然而实质上电梯群控系统是一种典型的混合系统, 包含了连续状态和离散状态以及复杂的人为逻辑策略。针对这一情况, 打破此传统分析方法, 将电梯作为混合动态系统进行分析, 以细胞自动机理论为基础, 加入多种连续速度曲线, 建立了完整的混合电梯群控模型。仿真结果表明该模型结构简单, 具有较强适应能力和可扩展性。同时, 针对粒子群算法容易陷入局部最小值的缺陷, 对其加以改进, 提出一种新型的调度策略, 并应用到混合电梯群控系统模型中, 进行优化派梯。仿真结果表明该策略具有一定的可行性与优越性。本派梯策略为电梯群控算法提供了新思路与新方法, 并扩展了粒子群算法的应用范围。

关键词: 电梯群控; 混合系统; 细胞自动机; 粒子群算法; 模拟退火算法

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)09-3290-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.09.023

Hybrid elevator group control system modeling and new scheduling strategy

ZHAO Xiao-cui, LUO Fei, XU Yu-ge

(School of Automational Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To simplify the complexity of elevator system modeling, analyzed the elevator group control system (EGCS) as a discrete event dynamic system. In fact, EGCS was a kind of typical hybrid dynamic system including continuous states, discrete states and complex human logic strategy. This paper broke the traditional method, researched EGCS as the hybrid system. Based on the cellular automata theory and several speed curve added in, built up the complete hybrid model of elevator system. This model is simple, has strong adaptability and scalability, can be applied in many different fields. This paper also proposed a new scheduling strategy by introducing simulated annealing to PSO, which overcame PSO's weakness trapping in the local optimum easily, applied the new scheduling strategy to the hybrid elevator system. The simulation results demonstrate its feasibility and superiority in optimizing scheduling. This paper added the new scheduling algorithm, provided new ideas and new ways for EGCS, and expanded the application of genetic algorithm and particle swarm optimization.

Key words: EGCS; hybrid system; cellular automata; particle swarm optimization (PSO); simulated annealing algorithm

0 引言

随着社会的进步, 电梯在使用需求和新技术应用方面进入了全面发展时期, 已经从简单的单台电梯发展为并联控制电梯系统, 即电梯群控系统。为了便于研究和节约成本, 一般情况下要建立电梯群控系统逻辑层次的数学模型, 用数学规则来描述系统的动态行为, 并利用计算机建立正确且有效的系统仿真平台, 进一步研究群控系统性能层次的分析 and 优化, 如早期的时态逻辑分析^[1]、基于 Petri 网的电梯建模^[2]、面向 agent 的模拟电梯模型^[3]等。建立能够准确、全面地反映电梯系统运行的模型, 有利于对电梯控制技术进行更加深入的研究, 因此, 电梯群控制系统的数学建模是研究电梯群控制方法的重要前提。电梯群控系统是一个非常复杂的系统, 具有不确定性、随机性、非线性等因素, 控制时需要考虑的参数多而且复杂。在过去的电梯群控制系统的建模研究中, 为简化问题的复杂性, 国内外学者都将电梯群控制系统看做离散事件动态系统来分析。但

是从本质上来说, 电梯群控系统是包含离散事件动态系统和连续变量动态系统的混合动态系统。本文打破将电梯作为离散事件动态系统的传统分析方法, 将电梯作为混合动态系统进行分析, 以细胞自动机理论为基础, 加入具有多种运行模式的速度曲线, 建立了完整的电梯群控混合模型。

由于电梯群控制系统的自身特点, 用传统的控制方法已经很难得到高质量的性能指标。人工智能控制由于具有拟人或仿人的智能, 在处理复杂性、不确定问题上具有较强的能力, 成为电梯群的优化控制的有效方式。粒子群算法是一种新型的基于种群寻优的启发式搜索算法, 由于其概念简单、易于实现、收敛速度快, 自其提出以来, 受到众多研究者的青睐, 并且被运用到了越来越广泛的领域之中, 但是该算法容易陷入局部最小值。针对这一情况, 本文利用基于概率的模拟退火算法对粒子群算法进行改进, 提出一种新型的调度策略, 并将其运用到混合电梯群控系统当中。用 MATLAB 进行仿真, 并与标准粒子群算法相比, 表明该新策略具有一定的可行性与有效性, 能有

收稿日期: 2010-03-04; 修回日期: 2010-04-23 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60774032); 国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金(新教师基金课题)资助项目(20070561006)

作者简介: 赵小翠(1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制(zhaoxc1027@163.com); 罗飞(1957-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为运动控制系统与人工智能; 许玉格(1978-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为混合系统建模与智能控制。

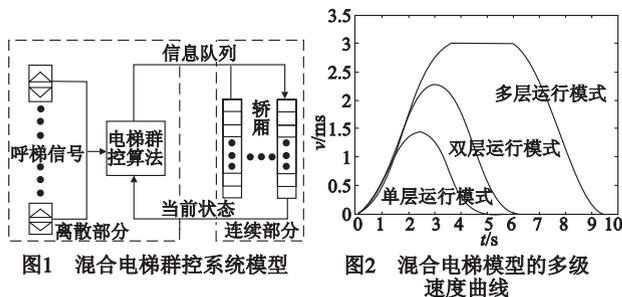
地提高电梯群控系统的性能与服务质量。该策略为电梯群控系统提供了新思路、新方法,并扩展了粒子群算法的应用范围。

1 基于细胞自动机的电梯群控混合系统模型

1.1 电梯群控混合系统整体设计

在当前的电梯群控制系统的建模研究中,为简化问题的复杂性,国内外学者们都将电梯群控系统看做离散事件动态系统来分析。然而从本质上来说,电梯群控系统是包含离散事件动态系统和连续变量动态系统的混合动态系统,其中运行速度和位移是其连续变量,遵循物理运动定律而变化发展,而呼梯信号、人为设定的各种电梯群控算法以及由其所产生的派梯命令则是驱动电梯系统的动态离散事件。本文采用细胞自动机^[4]与连续系统相结合的方法建立混合电梯群控系统模型。图1为混合电梯群控系统的模型。

电梯作为一种交通工具,对于快速性的要求是必不可少的,这对于处在快节奏的现代社会中的乘客是很重要的。当轿厢静止或匀速升降时,轿厢的加速度、加加速度都是零,乘客不会感到不适;而在轿厢由静止启动到以额定速度匀速运动的加速过程中,或由匀速运动状态制动到静止状态的减速过程中,既要考虑快速性的要求,又要兼顾舒适感的要求。因此,有必要设计电梯运行速度曲线,让轿厢按照设定的速度曲线运行,既能满足快速性的要求,也能满足舒适性的要求,科学、合理地解决快速性与舒适性的矛盾。随着电梯技术的发展,电梯的额定速度 V_n 得到了很大的提高,启动、制动距离增大,在电梯运行距离较短(单层、二层等)的情况下,尚未达到额定速度便要减速停车,这使得电梯存在多种运行模式,各种运行模式的速度曲线不相同,额定速度越高,需要制订的运行模式就越多。在该仿真模型中,电梯的额定速度 $V_n = 3 \text{ m/s}$,加速度 $a = 1.2 \text{ m/s}^2$,加加速度 $\rho = 1 \text{ m/s}^3$,制动距离为 5.55 m ,当其在层高均为 3 m 的建筑物中运行时,单层运行和双层运行方式都不能达到最高额定速度,因此应设三种运行模式,其速度曲线如图2所示(其中 v 为速度, t 为时间)。



1.2 细胞自动机电梯运行模型

细胞自动机可视为由若干小单元构成的动态阵列,其中每一个单元具有有限个状态。在离散步序中,每一小单元按照一致的法则,由其原状态及其邻居单元的状态决定新的状态。根据电梯停靠具有显著的层站式特点,将电梯运行空间按照电梯层站进行离散,以层站空间为细胞建立二维 CA,以系统其余变量(派梯信号、运行速度等)为细胞状态,以变量的变化函数、驱动关系、派梯策略等作为演化规则,推动全局状态的转移发展。细胞自动机模型的演化是通过所有细胞同步地进行状态

刷新来实现。首先将多台电梯横向排列,对其运行空间按照电梯层站进行离散,形成一系列规则的细胞,建立二维 CA。对于每个细胞 $C(i, j)$,上下相邻及同一楼层细胞称为邻居,由于轿厢的运动,运行方向细胞的速度等状态有直接函数关系,同楼层细胞因共享外呼梯信号也与之有直接关联。

1) 细胞状态 该状态应包含系统中的所有重要变量,现定义细胞状态参数: i 为第 i 号电梯; j 为楼层; car 为有无轿厢; $call$ 为外呼梯信号; v 为当前速度; $foolhigh$ 为楼层高度。 $C(i, j) = \{car; obfool; V; foolhigh\}$ 。其中: $j = 1, 2, 3, \dots, n$, 为建筑物规模; $car = \{0, 1\}$; $call = \{0, 1\}$, 由随机到达的乘客产生; V 为 $-V_n \sim +V_n$, 根据速度函数在额定值 V_n 内实时变化的连续变量, $+$ 表示上行, $-$ 为下行, 0 为停止; $foolhigh$ 为当层的实际高度。

2) 细胞活动规则 根据实际情况,每台电梯中有且仅有一台轿厢,所以在模型中,每列中表示轿厢的细胞是惟一的。该细胞下一状态的演化结果与该细胞的当前状态、其邻居细胞状态以及外界输入情况相关,与其他非相邻细胞状态无关。

a) 当所有细胞 $call = 0$ 时,即无呼梯请求,电梯处于停止状态,速度置 0 ;

b) 当有 $call = 1$ 时,先判断电梯的当前状态和乘客的呼梯信号,然后根据群控算法进行派梯;

c) 派梯调度和轿厢内乘客产生的内呼梯信号经顺序组合,形成派梯信息队列,队列最前端即为当前派梯命令;

d) 电梯读取派梯命令并向该目标层运行,运行速度按设定的分段连续速度函数变化,对速度进行积分后即得电梯的位移, $s = \int_t^{t+\Delta t} c(i, j) \times v dt$;

e) 当位移大于当前楼层层高, $S \geq (i, j) \cdot foolhigh$, 运行方向的邻居细胞轿厢状态发生变化 $C(i, j) \cdot car = 0, C(i, j \pm 1) \cdot car = 1$, 并刷新所有细胞状态,电梯到达目标楼层后,将该层的 $call$ 状态清零。

基于细胞自动机的建模思想使整个数学模型变得直观可控,很好地包容和统一了电梯群控系统的运行和管理,与以往电梯群控系统模型相比,基于细胞自动机的混合电梯群控系统模型具有以下优点:

a) 实时性。模型把电梯定性为混合系统,深入细致地分析了电梯运行物理特性,模型接近实际情况,大大提高了运行精度。

b) 连续性。本模型改变了以往把额定速度作为运行速度的做法,根据电梯运行的物理特性公式获得连续函数,实时计算当前时刻的速度 v ,使得细胞状态在派梯命令、速度及位移变化等事件驱动下实时刷新。

c) 简单通用。在本模型的基础上,加入交通流模块、派梯队列模块和群控算法模块,即可组成电梯群控系统模型。同时建筑物及电梯系统规模的变化不会对模型产生太大的影响。

d) 模型简洁。细胞及细胞状态的概念与高级语言中的单元结构、数据结构体概念相类似,易于在计算机上实现虚拟仿真。

2 新型混合电梯群控派梯策略

2.1 粒子群——模拟退火算法的思想

粒子群算法(PSO)是由 Eberhart 等人^[5]提出的一种基于

种群寻优的启发式搜索算法,通过个体之间的协作来寻找最优解。PSO 初始化为—群随机粒子(随机解),通过迭代找到最优解:在每一次迭代中,粒子们不断地追随两个最优解,一个就是粒子本身所找到的个体极值 p_{best} ;另一个是整个种群目前找到的全局最优解 g_{best} 。在找到这两个最优值后,粒子通过更新公式来更新自己的速度和位置^[6]。迭代终止条件根据具体问题,一般选为最大迭代次数或微粒群迄今为止搜索到的最优位置满足预定最小适应阈值^[7]。粒子群优化算法概念简单、易于实现、收敛速度快,并且具有较好的寻优特性。但是经过若干次迭代后,粒子失去了多样性,整个粒子群表现出强烈的趋同性,收敛速度变慢,极易陷入局部最小,解的精度较差。

模拟退火 20 世纪是 80 年代初发展起来的一种随机性组合优化方法,它模拟高温金属降温的热力学过程,并广泛应用于组合优化问题。模拟退火在进行优化时先确定初始温度,随机选择一个初始状态并考察该状态的目标函数值;对当前状态附加一小扰动,并计算新状态的目标函数值;以概率 1 接受较好点,以某种概率 P_r 接受较差点,直到系统冷却。模拟退火方法在初始温度足够高、温度下降足够慢的条件下,能以概率 1 收敛到全局最优值。它以某种概率接受较差点,增加了粒子的多样性,避免陷入局部最优,因此模拟退火的解具有质量高、初值鲁棒性强等优点^[8]。

根据粒子群算法与模拟退火算法具有互补性的优缺点,得出粒子群—模拟退火混合优化算法,利用粒子群算法的易实现性、快速收敛性以及模拟退火算法的概率突跳特征,增加粒子群体的多样性,通过两种算法的协同搜索,有效地克服了粒子群算法的早熟现象,既提高了最优解的质量,又保证了较快的收敛速度。

2.2 基于粒子群—模拟退火混合算法的派梯策略

基于混合算法的派梯策略具体步骤如下:

a) 综合考虑电梯群控系统的非线性、随机性的特点,乘客的心理和生理的要求,以及能源节约等问题,本文中采用的评价标准为平均候梯时间、长时等待率和运行量,并利用加权法制定目标函数:

$$J = \sum_{i=0}^m \lambda_1 T_i + \lambda_2 P_i + \lambda_3 R_i \quad (1)$$

其中: $i = 1, 2, 3, \dots, m$, m 为总的呼梯信号; T_i 、 P_i 、 R_i 分别为响应第 i 个呼梯信号的候梯时间、长时等待率以及电梯的运行量; λ 为加权系数, $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$, 根据目标函数的侧重点不同,可以适当调整三者的大小,取 $\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.3$, $\lambda_3 = 0.2$ 。

b) 根据乘客的呼梯信号和电梯的当前状态,由目标函数式(1)分别计算出各个适应值,将这些适应值看做粒子群算法中的粒子,利用更新方程对其进行更新。本文中采用的更新方法为含有惯性权值的更新方程,如式(2)(3)所示:

$$v_i = wv_i + c_1 r_1 (p_b - J_i) + c_2 r_2 (g_b - J_i) \quad (2)$$

$$J_i = J_i + v_i \quad (3)$$

其中: J_i 表示粒子的位置; v_i 为粒子的飞行速度; p_b 为粒子到目前为止经历的最好位置; g_b 为所有粒子目前经历的最后位置; w 为惯性权值,它使微粒保持运动惯性,使其具有扩展搜索空间的趋势,有助于新区域的搜索; c_1 、 c_2 为正实数,称为加速度常数; r_1 、 r_2 为在区间 $[0, 1]$ 中变化的随机数,取 $v_i = 65$, $c_1 = 0.15$, $c_2 = 0.3$ 。

c) 根据模拟退火机制,对粒子群中的每个粒子进行退火处理,增加粒子群的多样性,防止陷入局部最小。本文中采用的退火机制为 $T_k = (L - k) / L \times T_0$ 。其中: L 为控制参数值的衰减步数,起始温度 $T_0 = K \times \delta$, $\delta = \max(J_i) - \min(J_i)$, K 为充分大的数,取 $K = 1\ 000$, $L = 20$ 。

d) 判断是否达到迭代终止条件,若否,则转 c); 若是,则进行全局搜索,选出最优适应值,确定目标层,进行派梯,更新各电梯状态。

e) 判断仿真时间到否,若否,则转 b); 若是,则仿真结束并输出仿真结果。

程序流程如图 3 所示。

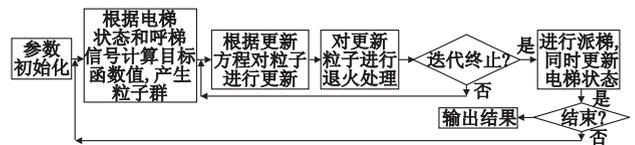


图3 混合算法派梯策略流程图

3 仿真及结果分析

为了验证细胞自动机混合电梯群控模型的运行效果和基于改进粒子群的混合电梯群控系统派梯策略的有效性,进行仿真实验。以四部电梯 16 层站的混合电梯群控系统作为仿真对象,在 MATLAB 中依据流程图编写混合电梯群控系统的模型和派梯策略的仿真程序。设定仿真开始时所有的电梯都在 1 层处于空闲状态,乘客流随机产生,最大速度为 3.0 m/s,最大加/减速度为 1.2 m/s²,最大加速/减速度为 1 m/s³,乘客进出/门的平均时间为 2 s,开/关门平均时间为 2 s,额定载荷为 1 000 kg(15 人),平均楼层高度为 3 m。仿真曲线如图 4 所示。

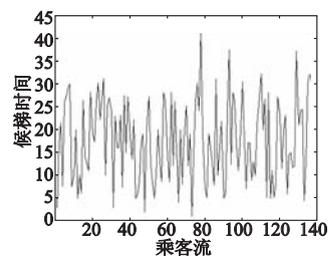


图4 乘客候梯时间曲线图

由仿真图可知,乘客的候梯时间大部分集中在 20 s 左右。可见,利用细胞自动机理论和混合动态系统理论建立的电梯运动模型能够正确描述电梯系统的动态行为,模型运行流畅,不仅重视电梯系统在时间和空间上的离散性以及随机性,而且考察了以往建模时所忽视的系统连续变量,基本上重现了电梯系统的运行特征。通过对电梯运行速度进行细致分析,在电梯运行模型中引入准确的速度连续函数,很大程度地提高了电梯运行时间精度,使电梯群控系统的仿真检验平台更为准确、可靠。

为了验证混合算法的有效性,用同样的模型,在同一乘客流下,将粒子群算法与混合算法进行比较。由仿真数据(表 1~3)可得,混合算法的平均候梯时间、长时等待率以及运行量的平均值与粒子群算法相比均有不同程度的提高,其中平均候梯时间减少了 1.97 s,长候梯率的平均值减少了 2.78%,运行量的平均值减少了 2.4 次。各项重要指标理想,其衡量混合电梯群控系统的三大指标性能均比粒子群算法有较大提高。

表 1 候梯时间比较/s

控制方式	1	2	3	4	5	均值
粒子群	21.45	21.26	21.66	20.58	20.14	21.02
混合算法	19.48	18.65	18.95	19.98	18.18	19.05

表 2 长时等待率比较/%

控制方式	1	2	3	4	5	均值
粒子群	6.06	5.84	6.67	6.21	5.66	6.11
混合算法	3.75	3.20	3.17	3.40	3.14	3.33

表 3 系统能耗比较/次数

控制方式	1	2	3	4	5	均值
粒子群	31	30	30	31	28	30.0
混合算法	29	28	27	28	26	27.6

4 结束语

本文打破将电梯作为离散事件动态系统的传统分析方法,将运行速度和位移视为连续变量,并以细胞自动机理论为基础,建立了电梯混合系统模型。由仿真程序可知,基于细胞自动机理论建立的混合电梯群控系统模型可以直观、正确地模拟电梯的运动行为。在此基础上建立的电梯群控系统计算机仿真实验平台能够提供各种高质量的性能指标参数,从而准确、有效地对控制算法进行验证。该模型结构简单,程序的通用性和可扩展性较强,建筑物楼层数可以方便地更改,轿厢数量的增减,甚至是派梯算法的改变均可通过修改少量代码实现,模型中使用的细胞活动规则数量有限,减少了编程的工作量。本文将粒子群算法与模拟退火算法相结合,利用模拟退火的概率选择性增加粒子群的多样性,防止陷入局部最小,提出一种基于改进粒子群的新型调度策略,经仿真后其优化派梯效果理想,但是在电梯节能方面改善不够,还需作进一步改进。

参考文献:

[1] 田国会,刘长有. 电梯服务系统的时态逻辑描述、分析与控制 [C]//中国控制欲决策学术年会论文集. 1996:188-192.

(上接第 3286 页)

本文根据不同需求的优先级把救灾物资分为急需物品和普通物品,建立多品种、多运输方式的随机动态 LRP 多目标优化模型,而地震物流设施多级特征显著,如灾区外围救灾物资集散点、灾区应急配送中心等应急设施,由此多级设施 LRP 有待进一步研究;另外震后应急物流系统具有很强的不确定性,因而进一步的研究还应考虑应急物资需求、救援车辆行驶时间等方面的多种随机性或模糊性因素。

参考文献:

[1] OZDAMAR L, EKINCI E, KUCUKYAZICI B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 129(4): 217-245.
 [2] BARBAROSOGLU G, OZDAMAR L, CEVIK A. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 140(1):118-133.
 [3] YUAN Yuan, WANG D. Path selection model and algorithm for emergency logistics management[J]. *Computer & Industrial Engineering*, 2009, 56(2):1081-1094.
 [4] SHEU J B. Challenges of emergency logistics management [J]. *Transportation Research Part E*, 2007, 43(2):655-659.
 [5] SHEU J B. Dynamic relief-demand management for emergency logis-

[2] LIN Chu-hui, FU Li-chen. Petri net based dynamic scheduling of an elevator system[C]//Proc of IEEE Internatione Conference on Robotics and Automation. 1996:192-199.
 [3] 宗群,何彦召,魏利剑. 面向 agent 的电梯群控仿真系统建模研究[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(5):1391-1393.
 [4] XU Yu-ge, FEI Luo, WANG Jian-guo. A new modeling method for elevator group control system with cellular automata[C]//Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou:IEEE, 2004: 3596-3599.
 [5] EBERHART R C, SHI Yu-hui. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C]//Proc of Congress on Evolutionary Computation. 2001: 81-86.
 [6] 黄少荣. 粒子群优化算法综述[J]. *现代计算机*, 2009(8):1977-1980.
 [7] 高鹰,谢胜利. 基于模拟退火的粒子群优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(1):47-50.
 [8] 王振树,李林川,李波. 基于粒子群与模拟退火相结合的无功优化算法[J]. *山东大学学报*, 2008, 38(6):15-20.
 [9] SONG M, GU G. Research on particle swarm optimization: a review [C]//Proc of the 3rd International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Shanghai:[s. n.], 2004:2236-2241.
 [10] 孙亮,代存杰,张克云. 新型混合粒子群优化算法[J]. *重庆工学院学报*, 2008, 22(2):146-149.
 [11] 田晓丹,罗飞,许玉格. 基于细胞自动机的电梯混合系统建模及仿真[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(10):2740-2745.
 [12] 宗群,童玲,薛丽华. 电梯群控系统智能优化调度方法的研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(8):939-942.
 [13] 王鹏,杨明,靳祯. 细胞自动机及 MATLAB 仿真[J]. *中北大学学报*, 2006, 27(5):388-391.
 [14] 王华秋,曹长修. 基于模拟退火的并行粒子群优化研究[J]. *控制与决策*, 2005, 20(5):500-505.

tics operations under large-scale disasters[J]. *Transportation Research Part E*, 2010, 46(4):1-17.
 [6] MIN H, JAYARAMAN V, SRIVASTAVA R. Combined location-routing problems: a synthesis and future research directions[J]. *European Journal of Operational Research*, 1998, 108(1): 1-15.
 [7] NAGY G, SALHI S. Location-routing: issues, models and methods [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(2): 649-672.
 [8] 汪寿阳,赵秋红,夏国平. 集成物流管理系统中的定位—运输线路安排问题的研究[J]. *管理科学学报*, 2000, 3(2):69-75.
 [9] 林岩,胡祥培,王旭茵. 物流系统优化中的定位—运输路线安排问题(LRP)研究评述[J]. *管理工程学报*, 2004, 18(4):45-49.
 [10] YI W, OZDAMAR L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(3): 1177-1193.
 [11] TOMASINI R M, WASSENHOVE L N van. Pan-American health organization's humanitarian supply management system: depoliticization of the humanitarian supply chain by creating accountability [J]. *Journal of Public Procurement*, 2004, 4(3):437-49.
 [12] 徐琴,马祖军,李华俊. 城市突发公共事件在应急物流中的定位—路径问题研究[J]. *华中科技大学学报:社会科学版*, 2008, 22(6): 65-68.