

# 城市轨道交通突发事件下的 公共汽车应急调配方法\*

胡 华 刘志钢 朱海燕

(上海工程技术大学城市轨道交通学院,201620,上海//第一作者,讲师)

**摘 要** 在城市轨道交通突发事件下,利用公共汽车联动调度的方式快速运输城市轨道交通车站的大量滞留乘客到疏散目的地,对于提高城市轨道交通应急处置能力具有重要实用价值。从事件链的角度分析了公共汽车应急联动调度决策流程;以疏散受突发事件影响的城市轨道交通车站的聚集客流为对象,建立公共汽车应急联动调配模型,并提出了能够适应在线辅助决策的高效优化算法。实例分析表明,提出的优化方法不但能够有效缩短疏散时间和降低疏散能耗,还能使实际调用的公共汽车车辆数减少,从而提高城市轨道交通突发事件下车站客流疏散的时效性、经济性和可靠性。

**关键词** 城市轨道交通;突发事件;公共汽车联动调配

中图分类号 U 492.4<sup>+</sup>34

## Bus Emergency Dispatching Method in Emergent Events of Urban Rail Transit

Hu Hua, Liu Zhigang, Zhu Haiyan

**Abstract** In case of emergency events that happened in urban rail transit (URT) system, it is crucial to improve the rail transit emergency response ability by coordinating bus dispatching and evacuation operation planning, including dispatching buses to the affected areas at URT stations and transferring URT passengers to the evacuation destination timely. From the angle of event-chain, firstly, the bus emergency dispatching decision-making procedure is analyzed; secondly, a general bus coordinated dispatching model for passenger evacuation is established; and thirdly, an effective algorithm that is suitable to the on-line decision-making is put forward. The analysis of a practical example shows that the proposed method will decrease not only the time and cost in passenger evacuation, but also the number of buses dispatched for the emergency evacuation. This optimum method could improve the efficiency and reliability of passenger evacuation in the emergent condition at URT stations.

**Key words** urban rail transit; emergent event; bus linkage dispatching

**First-author's address** College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

城市轨道交通突发事件具有随机性强、危害性大、紧迫性高等特点,且往往会导致事件影响范围内某些城市轨道交通车站(以下简称为受影响轨道交通车站)高密度的客流滞积。在城市轨道交通网络化运营条件下,这种客流突变将从发生车站沿本线下游方向或通过换乘站向路网中其他线路车站逐渐扩散。由点至线、由线至网,整个城市轨道交通网络的服务水平都会受到不同程度的影响。为最大程度降低突发事件对城市轨道交通线网服务水平和运营安全的影响,需要迅速组织多种资源对某些受影响车站内的大量滞留乘客进行快速、有效的应急联动疏散<sup>[1]</sup>。运营灵活、布设广泛的公共汽车有必要、也能够成为城市轨道交通系统提供备份和接续功能的运输方式<sup>[2-3]</sup>。我国北京、上海等城市的轨道交通突发事件应急处置总体预案亦表明,公共汽车是城市轨道交通突发事件下车站客流疏散的高效应急联动支援方式。

在车辆应急调配研究方面,欧美等国家较多地针对可提前预报的飓风、洪灾等自然灾害或者无法提前预报的人为破坏、恐怖袭击等重大突发事件实施区域性应急疏散行动<sup>[4]</sup>,相关研究大多集中于疏散需求预测、疏散路线规划及疏散仿真等方面。在此种情况下,他们通常利用小汽车作为应急疏散交通工具,涉及公共汽车车辆调配的应急疏散研究较少<sup>[5]</sup>。国内关于公共汽车车辆应急调配研究多见诸于大型活动期间突发大客流或突发事件时的应急疏

\* 上海高校青年教师培养资助计划(shgcjs022);上海市科委科技攻关重点项目(11170501400)

散问题。文献[6]以北京奥体中心体育场大型场馆的周边路网为对象,初步研究了公共汽车应急疏散路径选择原则和优化思路。文献[7]研究了居民应急疏散时的公共汽车路径优化问题。文献[2]考虑应急响应时间要求,针对新建情况提出了公共汽车车辆应急备车点的选址方法和储备运能计算方法。由此可见,面向城市轨道交通突发事件下的公共汽车应急调配优化尚未得到深入研究。

目前在实际应用层面,我国对公共汽车的应急调度仍普遍采用人工决策的方式,无法满足应急处置的时效性要求,由此对城市轨道交通突发事件下公共汽车应急联动处置的动态、在线决策提出了现实需求,而制定决策流程、判定待救援车站及建立模型和算法是辅助在线决策优化的关键内容[8]。

本文以城市轨道交通突发事件下受影响车站滞留乘客的快速疏散为目的,分析公共汽车应急联动调度决策流程,并在此基础上建立公共汽车应急联

动调配模型与算法。

### 1 城市轨道交通突发事件下公共汽车应急联动调度决策流程

从事件链的角度分析,突发事件下的交通应急管理决策过程包括事件检测及确认、事件响应、事件处理和交通恢复等 4 个阶段[8](见图 1)。本文针对城市轨道交通车站的客流疏散,提出公共汽车应急联动调度决策流程(见图 2)。以突发事件检测和确认为前提条件,通过对受影响的城市轨道交通车站数及影响程度的判定,确定需要实施公共汽车应急联动疏散的城市轨道交通车站(以下称为待疏散轨道交通车站);在此基础上考虑路网中应急公共汽车的配车点布局,建立调度模型和算法,制定最优决策方案并加以执行;最后对突发事件下的城市轨道交通运营方案进行调整和优化(见参考文献[9],本文不再涉及)。

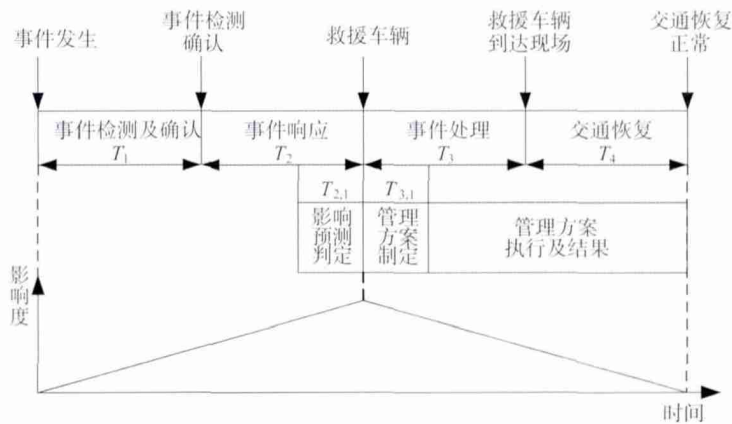


图 1 基于事件链的交通应急管理决策流程

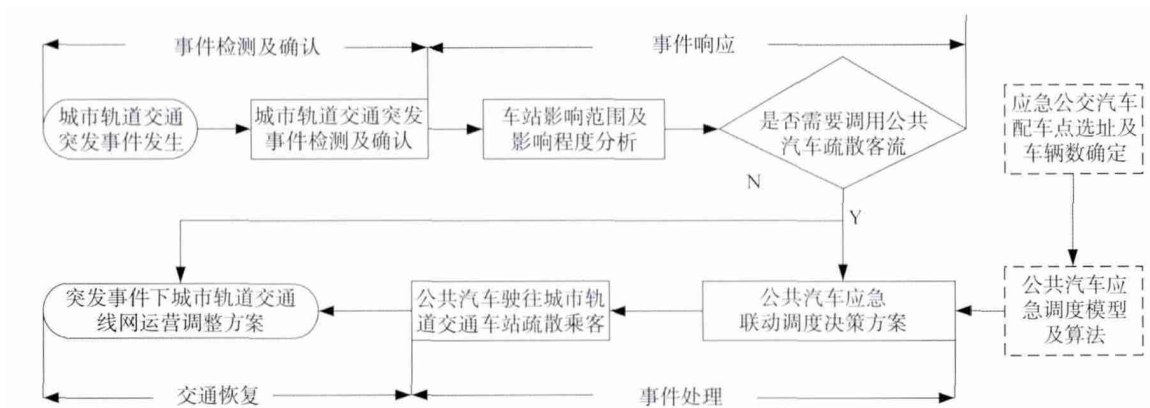


图 2 城市轨道交通突发事件下公共汽车应急联动调度决策流程

## 2 公共汽车应急联动调度模型

城市轨道交通突发事件具有特定的时间和空间影响范围,且各车站受影响的严重程度各不相同。实践中,往往只针对部分车站(一般为“严重影响”及以上级别的车站)调配公共汽车疏散聚集的客流,本文称之为待疏散轨道交通车站,其数量一般少于受影响的车站数。在确定了待疏散轨道交通车站后,公共汽车应急调度决策主要包括疏散目的地的选择和调度方案的在线生成两部分内容。对于前者,一般采取人工决策的方式即可满足要求,从广义上讲,可选择车站附近的大型交通枢纽或大容量公共设施作为疏散目的地<sup>[10]</sup>;而对于后者,建立优化模型和算法是实现在线决策的关键。

### 2.1 问题描述

面向城市轨道交通车站客流疏散的公共汽车应急调度问题可描述为:已知有  $m$  个配车点,每个配车点有  $X_i(i=1,2,\dots,m)$  辆应急公共汽车;发生突发事

件后有  $n$  座轨道交通车站需要疏散乘客,每座车站待疏散客流量为  $Q_j(j=1,2,\dots,n)$ ;设每辆公共汽车的载客数均为  $\gamma$ ,则每座车站需要的公共汽车车辆数为  $N_j=Q_j/\gamma(j=1,2,\dots,n)$ ;每座车站的乘客均被疏散到指定的目标疏散地;考虑可循环调车方式,即公共汽车车辆多次往返把乘客由车站运往疏散地,并指定车辆最大循环次数为  $K(K=0$  时即为无循环调车)。以疏散能耗(为疏散车辆数与车辆行驶距离的乘积,能够同时反映疏散效率和经济消耗两项评价指标)最小、同时尽量使实际调用的公共汽车车辆数最少为优化目标,求解由各配车点派往各车站的公共汽车最优应急调度方案,包括配车点  $i$  派往车站  $j$  的车辆数  $x_{i,j}$ (辆)及配车点  $i$  的公共汽车车辆在车站与疏散目的地之间的循环行驶次数  $k_i$ 。面向待疏散的城市轨道交通车站的公共汽车应急联动调度示意图 3。图 3 中,  $s_{i,j}$  是公共汽车配车点  $i$  至轨道交通车站  $j$  的最短行程距离,单位为 km;  $d_j$  是轨道交通车站  $j$  至疏散目的地的最短行程距离,单位为 km。

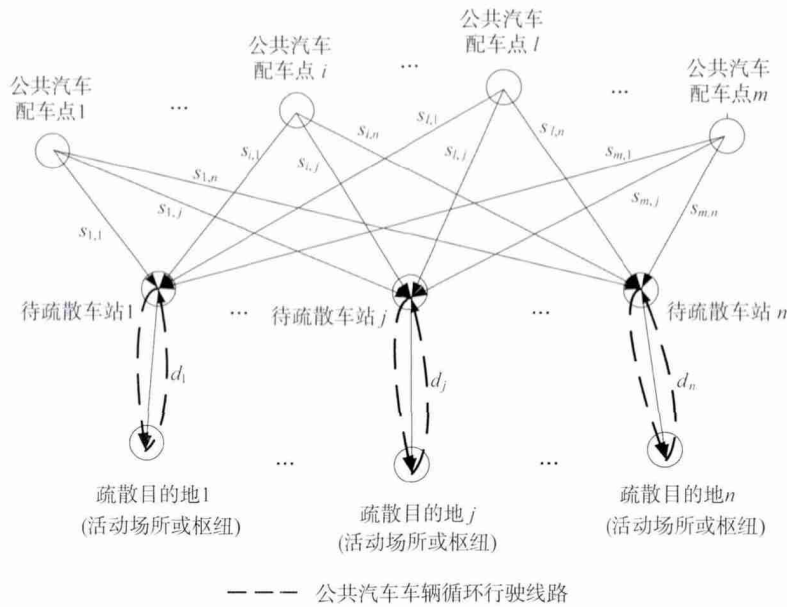


图 3 城市轨道交通突发事件下公共汽车应急联动调度示意图

### 2.2 优化模型

对应图 3 的优化模型见式(1),式(1)的约束条件见式(2)。

$$\min P = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [x_{i,j} \cdot (s_{i,j} + d_j + k_i \cdot 2d_j)] = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} (s_{i,j} + k_i d_j) + \sum_{j=1}^n d_j \cdot \frac{Q_j}{\gamma} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{i,j} (1 + k_i) = \frac{Q_j}{\gamma} = N_j & (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n x_{i,j} \leq X_i & (i = 1, 2, \dots, m) \\ k_i \leq K & (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_{i,j}, k_i \in Z & (Z = 0, 1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $P$  是疏散能耗(辆·km), 其余参数意义同上。

由式(1)、(2)可见, 若存在  $\forall k_i \neq 0 (i=1, \dots, m)$  时, 即至少有一个配车点的车辆可以循环利用, 则实际调用车辆总数  $N = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j}$  就会小于无循环调用时( $K=0$ )的车辆总数  $N_0 = \sum_{j=1}^n N_j = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (1+k_i) x_{i,j} = \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{\gamma}$ 。即式(1)、(2)的优化目标不仅包含了总疏散能耗最小, 还由于循环调车次数  $k_i$  的引入使式(1)、(2)包含了实际调用的公共汽车车辆数最少的优化目标。这样, 一方面可以解决应急公共汽车车辆资源不足时的车站客流疏散问题; 另一方面, 可以使更多的应急公共汽车车辆在驻车点原地待命, 以应对其他轨道交通车站的应急疏散, 从而提高了整个城市轨道交通应急系统的稳定性和可靠性。

突发事件下城市轨道交通待疏散车站的客流需求在时间分布上具有高度集中的特点, 客流疏散存在运输时限的约束, 体现在优化式(2)中的约束条件  $k_i \leq K$  中。优化模型中的车辆循环次数上限  $K$  是系统地考虑公共汽车车辆的循环次数上限与运输时限的关系, 由人工经验给定。此外, 优化模型中的疏散能耗体现了疏散行程最小化(在车辆平均运营速度一定的前提下, 亦体现了疏散时间最小化)的目标, 可以有效地保证公共汽车车辆的应急疏散效率和效益。

### 3 模型求解

当采用循环调车方式( $K > 0$ )时, 式(1)、(2)描述的问题属于非线性整数规划问题(Nonlinear Integer Programming, 简称 NIP), 可采用启发式算法如遗传算法求解。但是由于该类算法是通过随机搜索获得最优解, 与经典的最优化算法相比, 启发式算法不能保证在每次优化中总是获得最优解, 且求解效率也相对较低<sup>[12]</sup>。为了提高优化模型的求解精度及效率, 本文通过引入等效虚拟配车点将式(1)、(2)转化为标准的运输问题。含等效虚拟配车点的公共汽车应急联动调度示意图如图 4。

由图 4 可见, 引入等效虚拟配车点, 将待疏散车站每一次循环调用的车辆看作是从一个等效虚拟配车点重新发出的车辆, 从而把循环调车问题转换成非循环调车问题, 则等效虚拟配车点的个数应小于等于  $Km$ 。不难看出, 等效虚拟配车点的引入将图 3

中的循环调车问题转换成图 4 中的等价运输规划问题。

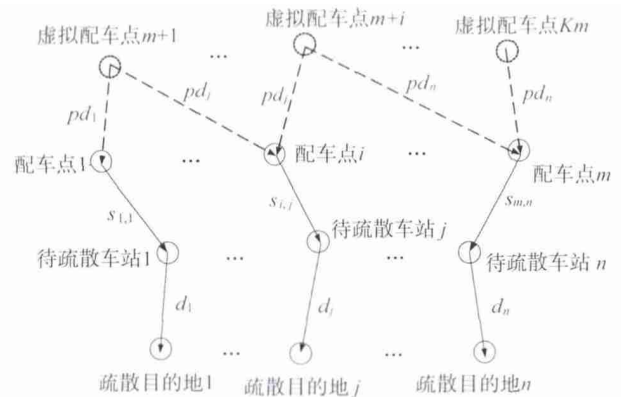


图 4 含等效虚拟配车点的公共汽车应急联动调度示意图

含等效虚拟配车点的优化模型见式(3)。

$$\min P = \sum_{p=0}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{pm+i,j} \cdot s_{pm+i,j} + \sum_{j=1}^n d_j \cdot \frac{Q_j}{\gamma} = \sum_{p=0}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{pm+i,j} \cdot (s_{i,j} + pd_j) + \sum_{j=1}^n d_j \cdot \frac{Q_j}{\gamma} \quad (3)$$

式中:

$p$ ——指含等效虚拟配车点后的公共汽车车辆在车站与目的地之间的循环次数,  $p=1, 2, \dots, K$ ;

$x_{pm+i,j}$ ——配车点( $pm+i$ )调往车站  $j$  的公共汽车车辆数, 且这些公共汽车车辆的循环次数指定为  $p$  次;

$s_{pm+i,j}$ ——配车点( $pm+i$ )至车站  $j$  的最短行程距离, 等于  $s_{i,j} + pd_j$ 。

式(3)中  $\sum_{j=1}^n d_j \cdot \frac{Q_j}{\gamma}$  表示不循环调车时公共汽车车辆由车站至疏散目的地的疏散能耗, 其为常数, 不影响模型求解。因此, 优化模型可简化为式(4)。

$$\min P_1 = \sum_{p=0}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{pm+i,j} \cdot s_{pm+i,j} \quad (4)$$

式(4)的约束条件见式(5)。

不难看出, 式(4)是一个供需不平衡的运输问题。求解时通过增设虚拟车站  $n+1$  将其转化为供需平衡的运输问题。此问题已有成熟的求解方法<sup>[13]</sup>, 不再赘述。进一步分析, 本文运输问题的优化变量个数随着配车点数  $m$ 、车站数  $n$  和最大循环次数  $K$  的增加成几何级数增长, 求解难度也相应增

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{pm+i,j} \leq X_i & (\forall p = 0, 1, \dots, K; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{p=0}^K \sum_{i=1}^m x_{pm+i,j} = N_j & (\forall p = 0, 1, \dots, K; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \\ s_{pm+i,j} = s_{i,j} + pd_j & (\forall p = 0, 1, \dots, K; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \\ x_{pm+i,j} \in Z & Z = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

大。并且在实际应用中,公共汽车应急调度辅助决策必须具有快速性和多方案提供能力。鉴于 MATLAB 软件在求解线性规划问题方面的高效性,本文的模型求解均通过 MATLAB 软件编程实现。

#### 4 算例应用

已知某城市共设有 5 个公共汽车应急调度分中心,每个调度分中心看作一个配车点,即  $m=5$ 。假设某时段有 3 座轨道交通车站需要公共汽车车辆前往疏散客流,即  $n=3$ 。取每辆公共汽车的平均载客量为 50 人,每座车站需疏散的总人数、所需的公共汽车车辆数见表 1。利用 Dijkstra 算法结合 GIS 地图计算出车站与疏散目的地<sup>[14]</sup>、配车点与车站之间的最短行程距离,分别见表 1 和表 2。设每个配车点公共汽车车辆的最大循环次数  $K=2$ ,求解公共汽车车辆最优应急调度方案。

表 1 车站待疏散乘客数及公共汽车车辆需求数

项目	车站 1	车站 2	车站 3
待疏散乘客数/人	4 000	3 000	3 500
公共汽车车辆需求数/辆	80	60	70
车站至疏散目的地距离/km	3	4	5

表 2 应急调度有关参数表

配车点号	各配车点至各车站的最短行程/km			各配车点配车数/辆
	车站 1	车站 2	车站 3	
配车点 1	17.9	20.5	9.4	100
配车点 2	18.0	4.6	28.5	80
配车点 3	20.6	22.3	2.6	90
配车点 4	17.9	7.1	25.4	80
配车点 5	9.7	24.8	12.2	60

由  $K=2$ ,相当于对应每个实际配车点均增加两个虚拟配车点,则虚拟车站 4 的应急车辆需求量为  $410 \times 3 - (80 + 60 + 70) = 1\ 020$ (辆)。含有虚拟配车点的应急调度参数见表 3。

表 3 含虚拟车站和虚拟配车点的公共汽车车辆应急调度参数表

循环次数	配车点号	各配车点至各车站的最短行程/km				各配车点配车数/辆
		车站 1	车站 2	车站 3	车站 4(虚拟)	
不循环	配车点 1	17.9	20.5	9.4	0	100
	配车点 2	18.0	4.6	28.5	0	80
	配车点 3	20.6	22.3	2.6	0	90
	配车点 4	17.9	7.1	25.4	0	80
	配车点 5	9.7	24.8	12.2	0	60
循环 1 次 (虚拟)	配车点 1	20.9	24.5	14.4	0	100
	配车点 2	21.0	8.6	33.5	0	80
	配车点 3	23.6	26.3	7.6	0	90
	配车点 4	20.9	11.1	30.4	0	80
	配车点 5	12.7	28.8	17.2	0	60
循环 2 次 (虚拟)	配车点 1	23.9	28.5	19.4	0	100
	配车点 2	24.0	12.6	38.5	0	80
	配车点 3	26.6	30.3	12.6	0	90
	配车点 4	23.9	15.1	35.4	0	80
	配车点 5	15.7	32.8	22.2	0	60
公共汽车需求数/辆		80	60	70	1 020	

由表3可见,增设虚拟配车点和虚拟车站后使公共汽车车辆应急调车问题转化为供需平衡的运输问题。应用MATLAB软件编程求解结果见表4,

其中由配车点5派往车站1的60辆车中有20辆车被循环利用一次。同理可求解得到不循环行驶条件下的公共汽车车辆最优应急调度方案,见表5。

表4 循环调车下公共汽车车辆应急调度最优方案

循环次数	配车点号	各配车点派往各车站的公共汽车数量/辆				各配车点配车数/辆
		车站1	车站2	车站3	车站4(虚拟)	
不循环	配车点1	0	0	0	100	100
	配车点2	0	60	0	20	80
	配车点3	0	0	70	20	90
	配车点4	0	0	0	80	80
	配车点5	60	0	0	0	60
循环1次	配车点1	0	0	0	100	100
	配车点2	0	0	0	80	80
	配车点3	0	0	0	90	90
	配车点4	0	0	0	80	80
	配车点5	20	0	0	40	60
循环2次	配车点1	0	0	0	100	100
	配车点2	0	0	0	80	80
	配车点3	0	0	0	90	90
	配车点4	0	0	0	80	80
	配车点5	0	0	0	60	60
公共汽车需求车数/辆		80	60	70	1 020	

表5 不循环调车下的公共汽车车辆最优应急调度方案

配车点号	各配车点派往各车站的公共汽车数量/辆				各配车点配车数/辆
	车站1	车站2	车站3	车站4(虚拟)	
配车点1	9	0	0	91	100
配车点2	0	60	0	20	80
配车点3	0	0	70	20	90
配车点4	11	0	0	69	80
配车点5	60	0	0	0	60
需求车数/辆	80	60	70	200	

设每辆公共汽车的运营成本为15元/km,对比循环和不循环调车方式下的公共汽车车辆最优应急调度方案,见表6。

表6 不循环和循环调车时的公共汽车车辆应急调度方案对比

是否循环	疏散总能耗/(km·辆)	疏散总成本/元	实际调用车辆数/辆
不循环调车	1 398	20 970	210
循环调车	1 294	19 140	190
下降率/%	7.4	7.4	9.5

由表6可见,公共汽车车辆的循环调用不但使得疏散能耗和疏散成本减小,同时使实际调用的公

共汽车车辆数减少。但是,由于循环调车也使车站1部分乘客的疏散时间延长(为车辆从车站1至疏散目的地1的往返行程时间),因此在实际决策中应结合具体情况对不同K值下的多个应急调度方案进行评价后再优选。

## 5 结语

城市轨道交通由于线路运行相对独立,并且运行过程与人和环境交互,对机电自动化设施及设备高度依赖,所以,运营过程具备高可靠性的同时又存在遭遇突发事件的脆弱性。公共汽车以其调度灵活、运能机动、部署快捷的特点成为城市轨道交通发生突发事件后的“反应和避难”阶段及“修复和恢复

服务”阶段的有利联动支持方式。本研究对于提高城市轨道交通突发事件下车站客流应急联动疏散的时效性、经济性和可靠性具有实用价值。进一步考虑到道路交通状况、城市轨道交通车站周边公共汽车站点布局等因素,研究城市轨道交通突发事件下公共汽车应急联动调度模型及算法将是下一步的研究方向。

### 参考文献

[1] 邵伟中,朱效洁,徐瑞华,等.城市轨道交通事故故障应急处置相关问题研究[J].城市轨道交通研究,2006(1):3.  
 [2] 滕靖,徐瑞华.城市轨道交通突发事件下公交应急联动策略[J].铁道学报,2010,32(5):13.  
 [3] 胡华,刘志钢,高云峰.面向换乘枢纽的轨道交通与道路公交协调调度方法[J].城市轨道交通研究,2011(10):49.  
 [4] Cova T J,Johnson J P. A network flow model for lane-based evacuation routing [J]. Transportation Research Part A, 2003,37(7):579.  
 [5] Gunes A E,Kovel J P. Using GIS in emergency management operations[J]. Journal of Urban Planning and Development,

2000,126(3):136.  
 [6] 宫建.奥运应急交通疏散路径选择模型研究[D].北京:北京工业大学,2007.  
 [7] 宋瑞,何世伟,章力.紧急疏散情况下的公交车运行计划优化研究[J].交通运输系统工程与信息,2009,9(6):154.  
 [8] 杨孝宽,魏恒.突发事件应急交通规划方法与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
 [9] 王祎南.突发特大客流城市轨道交通运营组织研究[D].北京:北京交通大学,2008.  
 [10] 王志强.城市轨道交通应急决策辅助技术研究[D].上海:同济大学,2008.  
 [11] 胡华,刘志钢,高云峰.面向换乘枢纽的轨道交通与道路公交协调调度方法[J].城市轨道交通研究,2011(10):44.  
 [12] TRB. Highway capacity manual [R]. Washington, DC: National Research Council,2000.  
 [13] 张伯生.运筹学[M].北京:科学出版社,2008.  
 [14] Zhan F B. Three fasted shortest path algorithms on real road networks: data structures and procedures [J]. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 1995, 1 (1):69.

(收稿日期:2012-05-30)

(上接第 66 页)

电器状态,将建立以 JD2 为始端的入段进路,并开放 JD2 信号机;当 JD2 信号机开放,车辆段联锁系统将 JD2 XJ 处于吸起状态,连续地送给正线信号系统;正线信号系统收到此信息,开放 X106。入段过程中,正线与车辆段之间通过安全继电器传送信息的过程如图 5 所示。

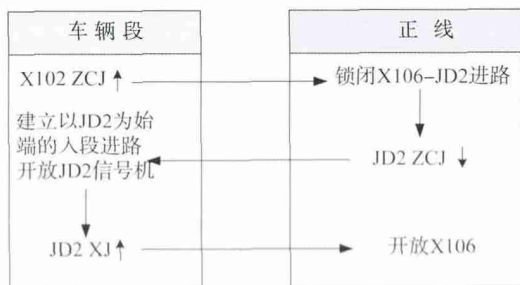


图 5 入段接口电路时序逻辑图

### 6 结语

本文选取的研究对象,是 CBTC 系统下控制的线路,当然传统 ATC(列车自动控制)下的线路与停

车场之间也存在信号系统之间的接口问题。

正线信号系统和车辆段联锁系统的接口电路,应遵循敌对照查的联锁关系,不仅要保证行车安全,还要满足出入段能力的要求,并且方便值班员的操作,使车辆段与正线能够完美地结合起来,从而保证整个信号系统的完整性。本文通过对列车出/入段的控制原理进行分析,进而结合实际线路的信号平面图,给出利用安全继电器完成两个控制区之间的信息交换,实现进路的安全控制,可供其他城市轨道交通建设作借鉴。

本研究得到上海申通地铁集团有限公司下述课题的支持:①JS-KY12R014-2 地铁无线 AP 信号质量监测系统研发;②JS-KY12R025 基于 ATS 调整的轨道交通高效运行运营模式研究。

### 参考文献

[1] 徐金祥,冲蕾.城市轨道交通信号基础[M].北京:中国铁道出版社,2010.

(收稿日期:2012-06-09)