

Research on Subway Station Emergency Evacuation Network Conformation and Application Based on Blocking Flow Theory

Yanfang Zhou, Leishan Zhou, Yixiang Yue

Traffic and Transportation School of Beijing Jiaotong University, Beijing, China

Email: yanfangzhou421@163.com, lszhou@263.com

Abstract: By analyzing and abstracting the features of subway station, This paper designs subway station emergency evacuation network chart based on passenger group behavior of emergency evacuation analysis, and confirms the blocking point and blocking section of the bottleneck of subway station by applying blocking flow theory. This paper improves the minimum-time flow model of static metro emergency evacuation incorporating with the characteristics of subway station emergency evacuation, puts forward that dynamic evacuation network minimum-time flow model of time changing, and gives the steps of resolution. In addition, the paper takes the evacuation stimulation case used by Beijing Wukesong Subway Station as an example to illustrate the application of the model, which can be used for subway stations as well as in large public buildings.

Keywords: subway station; emergent evacuate tactics; minimum flow; network; blocking flow

基于堵塞流的地铁站紧急疏散网络构造及应用研究

周艳芳, 周磊山, 乐逸祥

北京交通大学交通运输学院, 北京, 中国, 100044

Email: yanfangzhou421@163.com, lszhou@263.com

【摘要】本文通过分析地铁车站的结构特征, 对其进行了结构的点、线抽象, 并以紧急疏散群体行为分析为基础, 以网络中弧流量、容量与时间三者之间的关系分析为依据对网络弧赋权, 构造了地铁站紧急疏散网络图, 使得借由成熟的网络流模型研究紧急疏散问题变得可能, 为实际研究网络产生堵塞流动时地铁站的疏散能力和疏散最短时间问题打下了基础。构建了静态的地铁站紧急疏散网络最小时间流模型, 在此基础上结合地铁站紧急疏散的特点将动态性变化因素引入到静态模型中, 构筑了时变的地铁动态紧急疏散网络最小时间流模型, 给出了基于独立通路的最小时间流求解过程, 通过北京地铁五棵松站的疏散仿真案例对模型的应用进行了说明。模型不仅适用于地铁站紧急疏散, 也适用于大型公共建筑内的人群紧急疏散指挥工作。

【关键词】地铁站; 紧急疏散; 最小流; 网络; 堵塞流

1 引言

地铁车站是城市居民生活与出行的结合部。大部分的车站都是集购物、休闲、客流集散以及轨道系统内部换乘功能于一体, 致使车站规模巨大, 结构复杂。当紧急情况如火灾、爆炸发生时, 由于疏散距离长, 成灾时间短, 排热排烟困难, 人员密度大, 容易造成人员伤亡。文献[1]分析了地铁站紧急疏散状态下的人群行为, 主要

包括行为的盲目性、无序性、多向性、排他性。尽管迄今为止我国还没有发生过地铁运营系统的重大安全事故, 但在事故频发的安全生产形势迫切要求下, 必须提高警惕, 为可能面对的情况作好准备。为了保证危险情况下地铁车站高密度聚集的乘客的安全疏散, 应针对其特定的环境研究紧急疏散策略。

目前对地铁站客流的紧急疏散主要集中于基于Agent的微观仿真模型, 包括以元胞自动机模型^[2]为代表的离散仿真模型及以“社会力”模型^[3]、网络模型等为

基金支持: 北京市自然科学基金资助项目 (9082012)

主的连续型仿真模型。这些以人的行为为主体研究对象的模型极少考虑到环境与人的行为间的互动性，是以疏散时每一个流动单元都按照制定规则运动使得网络达到最大流的理想情况为前提的。在实际的疏散过程中，不同主体出行行为的选择不同造成疏散流动的随机性和疏散网络结构的不合理性产生迭加时，就可能出现堵塞现象。主要表现为慌乱的人群不会按照指定的规则运动，堵塞发生时，个体无法继续前移，而各流动单元又不愿意回撤或无法回撤，产生网络的堵塞流动，当堵塞流动无法消除时，就会造成疏散网络系统的堵塞，影响网络的疏散效率^[9]。

地铁车站特定的环境导致了其紧急疏散网络中常见堵塞流动，而以往对紧急疏散的研究极少考虑到疏散网络系统堵塞的情况，这是不现实的。本文通过分析地铁车站的结构特征，对其进行了结构的点、线抽象，并通过网络弧赋权得到了地铁站紧急疏散网络图，使得借由成熟的网络流模型研究紧急疏散问题变得可能，为实际研究网络产生堵塞流动时地铁站的疏散能力和疏散最短时间问题打下了基础。通过对网络图堵塞流动的分析，可以找出影响地铁站疏散能力的瓶颈，增强地铁站防灾能力，为疏散策略的制定提供理论依据。

2 地铁车站的紧急疏散网络图构造

应用网络流理论研究地铁车站的紧急疏散问题的基础是地铁车站能以网络的形式表现。由图与网络的定义可知，有向图的构造是形成有向网络的基础。网络是对有向图中的弧赋权而得，因此，地铁车站的紧急疏散网络图的构造首先应将车站结构图化，再根据乘客在车站的各设施设备中通行相关的各参数给图化网络中的弧赋权。具体的过程如图 1 所示。

网络流理论在紧急疏散网络的应用中主要有紧急疏散网络的防堵塞改造^{[16][8]}，网络最小流控制及最大流控制。网络最小流控制是通过网络内的流向和流量的控制达到优化疏散效率的效果，而最大流控制则是应用容量-时间网络流理论研究地铁站的最小时间最大流。此外，在疏散总时间确定的情况下的最大流问题在网络流理论中也就是典型的预算固定的最大流问题^[22]。地铁站紧急疏散网络的现实应用问题将在后续的论文中详细论述。地铁车站结构的成功网络化是后续研究的基础，现以图 1 所示的思路，介绍地铁站积极疏散网络的构造过程。

2.1 地铁车站的结构图化

地铁车站通过相互连通的通道以及相关的设施设备发挥了其作为乘客集散中心的功能。通道、售检票

系统、电梯、站台等设施设备组成了紧急疏散时地铁疏散网络的基本框架。站内主要有进站、出站以及换

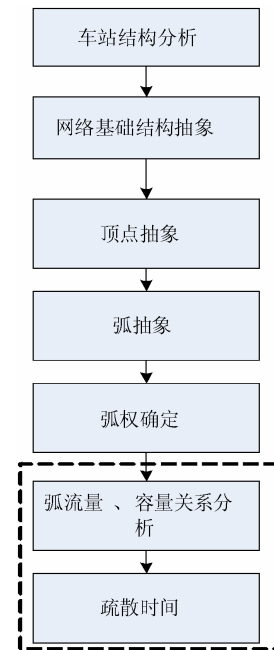


Figure 1. conformation process of subway station emergency evacuation network

图 1. 地铁站紧急疏散网络图构造过程

乘三种客流流线，由于地形约束，无法将三种流线彻底的分开，站内必然会有流线的交织。一般情况下，当各方向的客流压力都很大时，对流的流线就会产生拥堵，影响地铁站的集散功能，因此，许多车站对能力紧张的通道进行了划分，将各种客流流线人为的进行分离。而在紧急疏散情况下，客流都是从站内向站外疏散，客流的的方向具有一致性。在确定疏散路径时，应以总疏散时间最小为目标规定各通道通行方向。这与一般情况下的站内路径诱导网络是不一样的，会产生相对的“逆行”现象。如只允许从上到下的楼梯会允许客流从下往上层站台疏散，某出口无法通行时群体可以回撤等。实际疏散时，必须充分利用车站内的通道通行能力并根据实际的情况对通道的利用进行调整。产生网络堵塞流动的情况下，应允许网络中点与点之间的互通，允许相邻节点间“逆行”。

地铁站紧急疏散网络图是将车站的所有设施设备以及其中的人群流动进行点线抽象，赋予线路以方向和弧权形成有向网络图。具体的做法是，将地铁站各个构造部分包括进出口通道、换乘通道及电梯、自动扶梯、楼梯、售票厅等出入口抽象为点，连接各点之间的通道为弧，弧权为通道走行时间。对采取了自动

售检票系统和安检系统的车站，必须考虑到各种设备对通过能力的影响。为了刻画这种影响，可以加入两个点，以连接这两个点之间的时间即设备的服务时间为弧权。对于两点之间有平行进路的通道，增设虚拟点 v_i' ，与实际的起点 v_i 以弧相连接，通过时间赋值为 0。

在所有的有向网络图中，都会有一个源点和汇点。地铁站由于通道多，从站台疏散时有多条路径可以选择，疏散的目的地也有多个。为了计算方便，设置一个虚拟的源节点 v_s 和终节点 v_t 。网络上所有的发点都是从 v_s 发出，而所有的终点和 v_t 相连。为了使这样扩充后的网络与实际网络容量一致，可以令连接虚发点和实发点、虚终点和实终点的弧容量为无限大^[6]。与紧急疏散网络图发点相关的问题是站台上的乘客出口选择问题。可以认为，乘客都能理性的就近选择出口，当几个出口距离一样时，乘客会趋向于选择右侧出口，就此可以对站台客流疏散方向做一个硬性的划分。

2.2 网络流模型参数确定

车站结构的图化过程得到了由顶点、边及以时间为权组成的紧急疏散网络图 $G(V, A, W)$ 。在实际的网络中，流量和时间、容量是相互影响的，这一特性和城市道路上的交通流一样，流量和容量是描述地铁站紧急疏散网络图 $G(V, A, W)$ 性能的参数。在所有有个体意识参与的网络中，网络的性能都会受个体行为的影响。个体的通行速度随着通道内的流量而发生变化。当流量远远的低于通道容量时，个体能以最大速度行动，随着流量增加，个体通行速度逐渐下降，在弧流量达到饱和时，就不可能再增加流量。因此确定网络容量时，要考虑到堵塞流动对通行能力的影响。

地铁站紧急疏散网络流为典型的连续流，其特性可以用流量、速度和密度三个参数予以确定。三个参数的关系式可以表示为：

$$f = \bar{v}\rho \tag{1}$$

其中， \bar{v} 是平均速度， ρ 是人群密度。流量指在单位时间里通过某一区域断面的人数，可以以单位时间内每平米的宽度通过多少人或是整个区域的宽度通过多少人来计算，单位为人/平方米^[7]，在网络流图中表现为网络流的交变点即顶点之间通过的流量，以 f_{ij} 表示。

实际的疏散过程中，人群的疏散速度是和通道的特性以及人群密度密切相关，在平过道上，人群速度和密度有如下函数关系^[5]：

$$v = -0.0006\rho^4 + 0.0093\rho^3 + 0.0007\rho^2 - 0.4246\rho + 1.7744$$

(2)

取 $\max f = v_m\rho_m$ 为通道的最大流量，这个流量通常也称为饱和流。式中 v_m 、 ρ_m 分别称为临界速度和临界密度。设该值为弧 $a(v_i, v_j)$ 的容量上限，则容量下限为通道呈堵塞状态时断面通过的最大人数，容量的上限和下限分别表示为 \bar{c}_{ij} 、 \underline{c}_{ij} 。利用式 1、2 插值计算 $\max f = v_m\rho_m$ 得到人群密度在 2.42 人/平米，速度在 1.14 米/秒时， f 值最大。

设 l_{ij} 是通道 $a(v_i, v_j)$ 的长度，则乘客通过该通道的实际时分 t_{ij} 为 l_{ij}/v ， t_{ij} 即弧 $a(v_i, v_j)$ 的时间费用。Frui 专门针对坡道上的人员运动速度进行了统计和分析，结果证实：人员行走在坡度不超过 5% 的坡道上不会减速；而当坡度达到 10% 则会减速 10% 左右；当坡度高达 20% 时，人员速度将降低 25%^[7]。因此考虑到乘客在不同的设施上具有不同的速度，应以平过道为标准对乘客在不同的设施的通过时间进行修正。设 λ 为修正系数 ($0 \leq \lambda \leq 1$)， λ 可以通过实测的数据进行拟合，则某条弧 $a(v_i, v_j)$ 的实际通过时间 t_{ij} 为：

$$t_{ij} = \frac{l_{ij}}{v} (1 + \lambda) \tag{3}$$

综上，得到地铁站紧急疏散网络 $G(V, A, F, C, T)$ 。

现以北京地铁五棵松站的紧急疏散网络构造过程对网络构造过程进行说明。五棵松站一共有四个出口，格局对称性好，这点从图可以看出。站台中间距两侧出口距离约 70 米长，疏散时应从站台向南北两侧疏散，站台终点处连接了一组 2 跑楼梯，楼梯上来后是大厅，距楼梯 5 米处设立了自动检售票机。乘客从自动检售票口出来后可以选从东西两个方向疏散，大厅和通道相连接，通道末端处连接由 2 跑楼梯组成的南北向两个出口，A、B、C、D 口均是相同的格局。

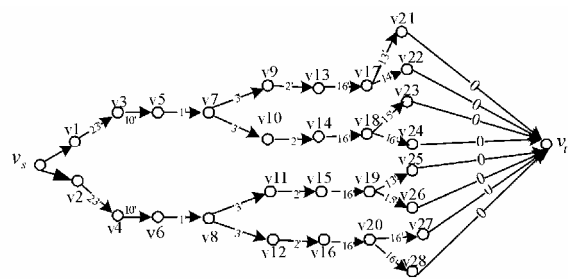


Figure 2. Emergency evacuation network of Wukesong subway station

图 2. 五棵松地铁站紧急疏散网络图

3 地铁站紧急疏散网络最小时间流模型

地铁站紧急疏散网络图是对现实情况下地铁车站紧急疏散状况的一种抽象。根据地下铁道设计规范,紧急情况下,车站的通道设施应满足6分钟内将乘客安全疏散出事故现场的规定。如何在最短的时间内将所有的人员安全撤离是研究地铁站紧急疏散网络的目的,这就形成了直观的最小时间流问题。

地铁站紧急疏散网络的最小时间流模型问题表述如下:设 $G(V, A, C, T)$ 是一个带源点 v_s 和汇点 v_t 的容量—时间网络,其中 $A = \{a(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V\}$ 为弧集, $a(v_i, v_j)$ 存在表示节点 v_i, v_j 之间的单向弧存在; $C = \{c_{ij} | (v_i, v_j) \in A\}$, c_{ij} 表示弧 $a(v_i, v_j)$ 的容量; $T = \{t_{ij} | (v_i, v_j) \in A\}$, t_{ij} 表示流 f_{ij} 经过弧 $a(v_i, v_j)$ 所需时间, $0 \leq f_{ij} \leq c_{ij}$ 。设 Q 为车站需要疏散的总人数,最小时间流问题就是在网络 G 中求一个流值为 Q 的疏散时间最小的可行流,这个可行流称为最小时间流。

问题转化为网络优化模型:在带源点和汇点的网络系统中寻找一个流值为 Q 的可行流 f ,使得流 f 通过网络的时间 T 最短。模型表述如下:

$$\min \max_T \{ \sum_{(v_i, v_j) \in P} t_{ij} | P \text{ 为正向路} \}$$

s.t.

$$\begin{aligned} \sum_{(v_i, v_j) \in A} f_{ij} - \sum_{(v_j, v_i) \in A} f_{ji} &= 0, v_i, v_j \in V, i \neq 0, n \\ \sum_{(v_i, v_j) \in A} f_{ij} - \sum_{(v_j, v_i) \in A} f_{ji} &= Q \\ \sum_{(v_i, v_j) \in A} f_{ij} - \sum_{(v_j, v_i) \in A} f_{ji} &= -Q \\ 0 &\leq f_{ij} \leq c_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

现实中高密度人群疏散时,自利性驱使所有的人都涌向距其最近的通道,通道的人群密度不好控制,因此,无法保证每条弧都是最大流即饱和流,文献[7]指出定义网络容量时,应以堵塞状态下网络的最小流作为容量的下限。然而在由主观意识强烈的地铁站紧急疏散网络中,通道的状态时时变化着,人群的密度和人群的行为密切相关,对通行速度和时间的影响也无法精确计算。因此,在求解地铁站紧急疏散网络的最小时间流问题时,假定乘客都是理性的,服从疏散

指挥,使得网络能以最优的流量和速度疏散,即须先求解静态疏散网络的最小时间流问题。在此基础上,计算通道密度变化时对时间的影响程度,在仿真计算的过程中以秒为步长对通道的密度状态进行修正,计算网络的最小疏散时间。

令 $g_{ij} = f(f_{ij})$ 为动态疏散网络下弧 (v_i, v_j) 的流量, P_{ij} 为弧 (v_i, v_j) 硬件设施环境变化对疏散时间的影响概率。 g_{ij}, t_{ij} 都是关于人群密度 ρ 的函数,设 ρ_{ij} 为弧 (v_i, v_j) 的人群密度, s_{ij} 为 (v_i, v_j) 的面积,则 $\rho_{ij} = g_{ij} / s_{ij}$ 。在不考虑 P_{ij} 时, ρ_{ij} 的变化可以利用递归运算得到。设源点出弧 (v_s, v_i) 的初始密度为 ρ_{si} ,流出顶点 v_i 的弧为 $v_{i, \{t\}}$,流出 (v_s, v_i) 选择弧 $(v_i, v_l) \in (v_i, v_{\{t\}})$ 的概率为 p_{il} ,则单位时间内进入弧 (v_i, v_l) 的流量 g_{sl} 的计算公式为:

$$g_{sl} = p_{il} \times \rho_{si} \times v \quad (5)$$

流出弧 (v_i, v_l) 的流量则为:

$$g_{il} = \rho_{il} \times v \quad (6)$$

单位时间内通道 (v_i, v_l) 的密度为:

$$\rho_{ij}(T_i) = (g_{sl} - g_{il}) / s_{ij} \quad (7)$$

上式中, T_i 是指定的仿真时刻段。

则地铁站动态疏散网络中 \bar{t}_{ij} 的计算为:

$$\begin{aligned} \bar{t}_{ij} &= (t_{ij} / (-0.0006\rho_{ij}(T_i)^4 + 0.0093\rho_{ij}(T_i)^3 \\ &+ 0.0007\rho_{ij}(T_i)^2 - 0.4246\rho_{ij}(T_i) + 1.7744)) \\ &\times (1 + P_{ij}) \times (1 + \lambda) \end{aligned} \quad (8)$$

得到地铁站紧急疏散网络的动态疏散优化模型如下:

$$\min \max_T \{ \sum_{(v_i, v_j) \in P} \bar{t}_{ij} | P \text{ 为正向路} \}$$

s.t.

$$\begin{aligned} \sum_{(v_i, v_j) \in A} g_{ij} - \sum_{(v_j, v_i) \in A} g_{ji} &= 0, v_i, v_j \in V, i \neq 0, n \\ \sum_{(v_i, v_j) \in A} g_{ij} - \sum_{(v_j, v_i) \in A} g_{ji} &= Q \\ \sum_{(v_i, v_j) \in A} g_{ij} - \sum_{(v_j, v_i) \in A} g_{ji} &= -Q \\ 0 &\leq g_{ij} \leq c_{ij} \end{aligned} \quad (9)$$

在考虑总疏散时间不得大于 6 分钟的条件限制时，模型也可以转化为预算固定的最大流问题。预算固定的最大流问题增加了时间约束 T_0 ，需要反复判断流 f 的时间 T 是不是大于给定的预算 T_0 ，求解过程中对超过预算的流停止配流。预算固定的最大流问题可以计算出安全撤离时间内可以疏散的总人数，而最小时间最大流模型求出的则是疏散总人数为 Q 时需要的最小时间，实际制定疏散策略时二者都需要考虑。最小时间流和经典图论中最小费用流求解思路基本一致，不同的是在地铁站紧急疏散网络中疏散时间 t_{ij} 是随着环境变化如密度变化而不断动态变化的，因此计算时间的方法和最小费用流不一样。式 4 所示模型求解的基本思路是：以零流为初始可行流开始，在始点到终点的所有可能增加流量的增广路中寻求总时间最短的路，并首先在这条路上增加流量，得到流量为 f_1 的最短时间流。再对 f_1 求寻求所有可能增加流量的增广路，并在其中总时间最小的增广路上继续增加流量，得到流量为 f_2 的最短时间流，对 f_2 进行增广……依次类推，重复以上步骤，直到网络中不再存在增广路，不能再增加流量为止，此时得到的可行流就是 G 的最小时间流。现给出基于独立通路思想的地铁站紧急疏散网络模型的通用求解方法：

Step 1: 网络初始化: 给定 ρ_{ij} , c_{ij} , 取零流 f_0 为初始可行流，增广通路数初始值赋 1。如果 $v(f_0) = Q$ ，结束， f_0 为 G 的最小时间流，否则转下一步；

Step2: 寻边。

2.1 将 v_s 作为寻边始节点寻找以 v_s 为始节点的未饱和弧集合，标 v_s 为 $(v_s, 0)$ 并将增广通路置为空。

2.2 对已标号节点 $(v_i, t_{\bullet i})$ ，以 $\{\min t_{il} \mid (v_i, v_l) \in A, l = s, 1, 2 \dots n - 2\}$ ，标节点 $l(v_i, t_{il})$ ，直到 $l = t$ 为止；由此得到从 v_s 到 v_t 的一条最短时间路 P_k 。

Step 3 增广。对正向路 P_k ，以所有得到标号的节点之间弧容量最小值 $\theta = \min\{c(P_k), Q - v(f_i)\}$ 为增广路 P_k 的增广量，对 P_k 进行增流得到流值为 $v(f_k) = v(f_i) + \theta$ 的可行流，如果 $v(f_k) = Q$ ，结束，增广路序号增加 1；否则继续寻路，增广；

Step 4 构造增量网络。删去 P_k 中的饱和弧即 $f_{ij} = c_{ij} \mid (v_i, v_j) \in A$ ，令 P_k 中所有的弧容量为

$\tilde{c}_{iv} = c_{iv} - \theta$ ，删去所有节点标号，得到 G 的增量网络 $AD(f_k)$ 。在 $AD(f_k)$ 中继续步骤 2 和 3，得到新的增广路 P_d ，增广，再构造 $AD(f_d)$ ，直到从 v_s 到 v_t 不再存在增广路或者 $v(f_m) = Q$ 结束。

经过有限步的增广后，得到的 G 的可行流 f_k ， G 中不再有 f_k 的增广链，此时可以得知网络 G 中或者不含流值为 Q 的最小时间流，或者得到流值为 Q 的最小时间流。

静态疏散网络模型的求解得出的是网络的最优疏散，然而实际疏散中环境的变化对疏散时间的影响也不容忽视。最优疏散时间可以作为地铁车站规划和设计的参考依据。实际的疏散指挥应以动态的疏散网络模型为依据，对各种可能发生的情况对疏散工作的影响进行估计，有效的控制疏散节奏和效率，使实际疏散工作达到最优。时变动态紧急疏散网络模型的求解涉及到乘客的通道选择概率、个体行为差异性对群体速度的影响以及硬件环境的不稳定性，需要处理好各方面的关系。求解时给定网络初始化的 ρ_{ij} ，根据式 1、式 2 分别计算各弧的流量和速度及通过时间。仿真时通过调节通道的人群密度，结合乘客在紧急疏散时的特性改变人群的通道选择概率，可以得到不同的总疏散时间。动态疏散网络的求解能为疏散时人群最优控制提供定量的依据，并为人群自组织状态下事态发展趋势提供参考。

对图 2 所示的五棵松地铁紧急疏散网络进行计算，结果如图 3 所示：

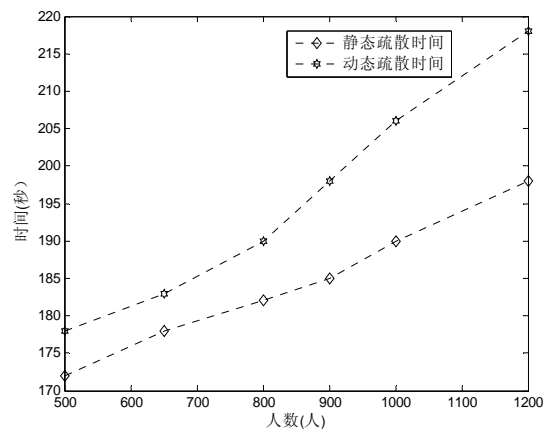


Figure 3. Wukesong subway station Evacuation time compare illustration

图 3. 五棵松地铁站动、静态紧急疏散时间对比图

由图可知，在疏散总量相等时，时变动态疏散网络的疏散时间相比静态疏散网络疏散总时间大，也就是说，实际的疏散时间肯定会比最优疏散时间长。考

考虑到人群动态特性时乘客总体的疏散时间大于静态疏散总时间，并且，随着疏散总量的增加，动态疏散总时间增长得更快。当疏散总量达到一定时，初始密度值增大，网络产生了源点疏散缓慢现象，网络的疏散功能不能充分发挥。

4 结论

地铁站由于客流量大，客流密度高，疏散困难，紧急情况下保证所有的乘客生命财产安全已经成为了应急指挥的重要内容。抛开地铁车站各种设施设备的物理属性，只考虑其几何拓扑连接关系，并结合地铁车站人群的通行特性参数得到的地铁站紧急疏散网络构造使得应用成熟的网络流理论解决地铁站紧急疏散问题成为可能，为加强地铁站的流线管理和疏散指挥工作提供了依据，运用最小流、最大流控制理论和方法，对地铁站疏散策略的制定、设施改造方案的选取等都提供了参考。网络的构造过程具有通用性，对于具备多条疏散路径的大型建筑人群紧急疏散路径诱导和控制问题同样适用。

References (参考文献)

- [1] Xu Gao, Study of the Simulation of Evacuation Dynamics [D]. ChengDu: SouthWest JiaoTong university, 2003.3.4.
徐高, 人群疏散的仿真研究[D]. 成都:西南交通大学, 2003. 3-4.
- [2] Blue V J, Adler J L. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata micro-simulation [J]. Transportation Research Record, 1998, 1644: 29-36.
- [3] Dirk Helbing, Peter Molnar. Social force model for pedestrian dynamics [J]. Physical Review E, 1995, 5 1(5), 4 282-4285.
- [4] Huang Xiaopeng, Study on the use of blocking flow theory in the way-network capacity and the minimum time flow[D], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.3.
黄孝鹏, 堵塞流理论在路网容量和最短时间流中的应用研究[D], 南京航空航天大学, 2007年3月.
- [5] Wu Weiwei, Ning xuanxi, research of improving the blockage of emergency network [J], journal of system engering, 2006. 6. 3, Vol. 21.
吴薇薇, 宁宣熙, 紧急疏散网络防堵塞改造研究[J], 系统工程学报, 2006年6月第21卷第3期.
- [6] Ning Xuanxi, Blocking flow theory and application [M], Science and Technology Press, 2005.5.
宁宣熙著, 堵塞流理论及其应用[M], 科学技术出版社, 2005.5.
- [7] Hu Qingmei, Research of Pedestrian crowding mechanism and Behavior in large-scale Public building [D], Beijing Jiaotong university, 2006.12.
胡青梅, 大型公共建筑环境中人群拥挤机理及群集行为特性的研究[D]. 北京交通大学, 2006.12.
- [8] code for design of under-ground railway, GB50157-92, No.12.2.11.
地下铁道设计规范 (GB50157-92)第 12.2.11 条.
- [9] Wang lida, Study on Simulation of Evacuation Dynamics in Metro Station[D], Beijing Jiaotong university, 2006.12.
王理达, 地铁车站人群疏散行为仿真研究[D]. 北京交通大学, 2006.12.
- [10] Ning Xuanxi, Qian Lei, Sun Yu, research on stochastic flow in a transportation network by simulational method[J], Data acquisition and processing, 2002.9.3, Vol.17.
宁宣熙, 钱雷, 孙宇, 流通网络中随机流动的仿真研究[J]. 数据采集与处理 2002年9月第17卷第3期.