

Nuclear Emergency Evacuation Road Planning Method with Limited Evacuation Time

Bin Han¹, Wenchao Zheng², Zhenyu Mei^{2,3}

¹Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou Zhejiang

²College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang

³Modern Urban Transportation Technology, Jiangsu Colleges Collaborative Innovation Center, Nanjing Jiangsu
Email: 68130775@qq.com

Received: Aug. 25th, 2015; accepted: Sep. 8th, 2015; published: Sep. 14th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Due to the lack of relevant research on nuclear emergency evacuation, this paper focuses on nuclear emergency evacuation road planning study. The paper starts from the analysis of the emergency evacuation process. According to the different stages of evacuation traffic behavior and routing characteristics of the nuclear emergency evacuation, the road network system is divided into three levels to propose emergency evacuation time prediction method. And the key technologies of evacuation route optimization options, evacuation road network hierarchical division, evacuation time estimation and traffic assignments are integrated. On the basis of these, the evacuation routes and evacuation road network planning methods are proposed.

Keywords

Nuclear Emergency Evacuation, Limited Evacuation Time, Three Levels, Road Network Planning

疏散时间约束下核应急疏路网规划方法

韩 斌¹, 郑文超², 梅振宇^{2,3}

¹浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州

²浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州

³现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 江苏 南京

Email: 68130775@qq.com

收稿日期: 2015年8月25日; 录用日期: 2015年9月8日; 发布日期: 2015年9月14日

摘要

本文针对核应急疏散相关研究的不足,对核应急疏散道路展开研究。论文从分析应急疏散的过程入手,根据疏散不同阶段的交通行为和路径选择特点,将核应急疏散路网系统分为3个层次,提出应急疏散时间预测方法,将疏散路径优化选择、疏散路网层次划分、疏散时间估计、应急疏散交通分配等交通关键技术有机整合,提出疏散路线和疏散路网规划方法。

关键词

核应急疏散, 疏散时间约束, 三级, 道路网规划

1. 引言

随着科学技术的发展,核能作为一种清洁、安全的能源越来越受到人们的青睐,利用越来越广泛。但核电站一旦发生重大事故,其危害和后果是十分严重的。因此,在发生重大事故的情况下,如何避免造成人员伤亡、辐射遗传效应和环境污染等危害和损失,即核电站严重事故应急疏散问题,已成为各国政府、核电站开发者和社会公众共同关心的一个重大问题。区域人口疏散一般具有时间紧、任务重、情况复杂的特点,如何提高区域人口疏散应急运输效能,让区域人口“出得去、走得快、散得开”,是核应急疏散道路网规划必须首要研究解决的问题。

2. 核应急疏散及核应急疏散过程概述

2.1. 核应急计划区及核应急疏散概述

核应急计划区目前是根据距离核反应堆距离的远近主要分为烟羽区(0~10 km)、食入应急计划区(0~30 km)两类。烟羽区是指对放射性烟羽引起的照射而建立的应急计划区。在烟羽区应急计划之外,所考虑的后果最严重事故序列使公众个人可能受到的最大预期剂量不应超过 HAD002/03 所给出的发生严重确定性效应的剂量阈值。对各种设计基准事故和大多数严重事故序列,相应于特定行动的可防止的一般应不大于 HAD002/03 所规定的相应通用干预水平,即一般不需要采取隐蔽、撤离等紧急防护行动[1]-[3]。

鉴于目前严重事故研究方面的实际情况,结合核电站实际按严重事故研究成果来定量计算核动力厂应急计划区范围,往往不确定性较大。在国标 GB/T17680-1999《核电厂应急计划与准备准则》中,推荐我国压水堆核电厂烟羽区范围如图 1 所示:以核反应堆中心为半径,内区:3~5 km(撤离时,不分方位);外区:7~10 km(撤离时,按风向扇形撤离)[1]-[3]。

目前国内外关于核应急疏散的研究主要集中于应急疏散的微观仿真与计算,研究工作大致分为两部分:一是数学分析方法[4]-[6],二是计算机仿真方法[7]-[9]。侧重于对人群疏散决策特征、疏散路径选择的研究。但对于如何规划高效、快速、畅通的核应急疏散道路网系统还未见相关报道。因此,有必要结合核应急疏散的路径选择和交通组织特点,提出核应急交通疏散路网规划系统方法,为制定科学合理的核应急方(预)案的制定提供技术支持。

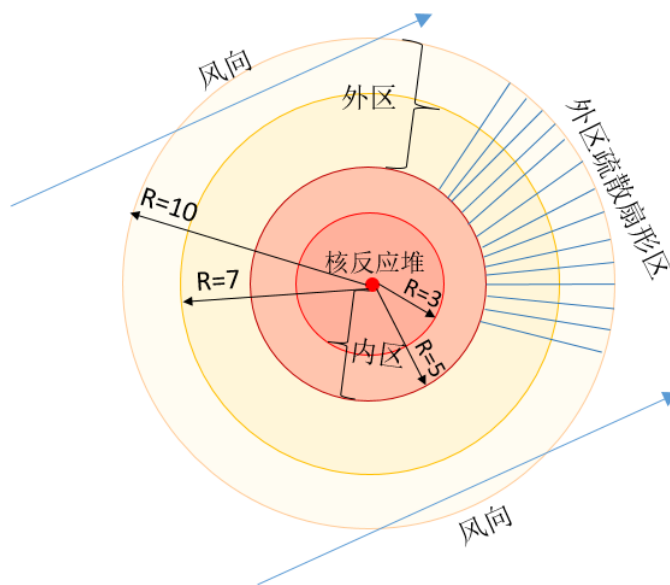


Figure 1. Nuclear power plant plume emergency planning zone range
图 1. 核电厂烟羽应急计划区范围

2.2. 核应急疏散过程描述

当核电站突发事件爆发后，首先要判断事件的性质、类型、严重程度及影响范围，确定是否需要人员进行疏散。一旦需要实施疏散，就必须确定出需要疏散的区域范围和疏散人数，同时确定疏散路径，疏散目的地和疏散车辆数量。核应急道路网规划就是要在最不利风向条件下，以疏散影响区域所有人口需要的时间满足规定值作为条件，进行核应急疏散路网系统规划。

在核应急疏散过程中，很重要的一个环节是确定核突发事件的影响区域，从而估算出要疏散的人数。根据 2006 年颁布的《国家核应急预案》，核突发事件影响区域(7 至 10 公里)可以称为核应急烟羽区。

当突发事件发生时，烟羽区往往成为首要交通管制区域，除了疏散车辆和特种救援车辆。其他社会车辆一律不许进入，交通组成基本上为行人交通、应急疏散车辆和特种救援车辆。烟羽区的疏散过程主要为三个阶段：一、烟羽区居民接到信息后利用短距离农村公路快速步行、骑自行车或私家车至集结点等待疏散车辆；二、安全有序乘车后利用中距离道路进行快速撤离，进入干道路网主要出入口；三、快速畅通的利用长距离道路驶离影响区域，达到疏散安置点。合理规划疏散三个阶段的路网成为核应急路网规划的关键。

3. 疏散时间约束下核应急疏散路网系统规划

3.1. 应急疏散时间预测

疏散时间是核应急疏散的关键因素，能否在约定的疏散时间内将车辆和人疏散出去是核应急疏散的首要任务[10]。

3.1.1. 预测的前提与假设

(1) 确定核电基地所在地邻近区域以及烟羽应急计划区的详细地图，该地图应当清晰易懂，并标有交通网络、地形特征和行政区边界。

(2) 根据应急计划区内居民交通工具的调查确定小汽车利用因子，确定道路容量的方法和估算居民的方法等。

3.1.2. 疏散时间分析的步骤

- (1) 人员分类：考虑三个可能的居民组，永久居民、临时居民和在特殊设施内的人员。
- (2) 撤离方向：根据风向及地理条件确定应急区内人员撤离方向。
- (3) 交通容量：统计用于撤离的道路设施，包括其位置、类型及容量。对交通网络作完整的评述，并分析车辆通行时间和在狭窄通道处发生严重堵塞的可能位置。
- (4) 撤离时间估算：根据不同人群、小汽车利用因子、大型车辆使用，天气状况和用于疏散道路容量估算撤离时间。

3.1.3. 疏散时间预测方法

疏散时间预测必须按照最不利风向进行考虑，利用下面公式按最不利的风向进行疏散时间预测。

疏散时间的计算可采用美国联邦公路局的 BPR 函数进行计算，BPR 函数形式如下：

$$t_{\alpha} = t_0 \left[1 + \alpha \times \left(\frac{q}{c} \right)^{\beta} \right] \quad (1)$$

式中： t_{α} 为道路路段阻抗(时间)；

t_0 为零流路段阻抗(时间)；

q 为道路流量(pcu)；

c 为道路实际通行能力；

α, β 为阻抗影响参数经过海盐县道路实际流量的标定，取 $\alpha = 0.925$ ， $\beta = 0.777$ 。

BPR 函数可以表示为：

$$t_{\alpha} = t_0 \left[1 + 0.925 \times \left(\frac{q}{c} \right)^{0.777} \right] \quad (2)$$

因此，考虑最不利的风向情况下撤离的最远距离所需要的时间计算如下：

$$T = \frac{L}{V} \times \left[\alpha \times \left(\frac{S}{P \times N} \right)^{\beta} \right] \quad (3)$$

式中： L 为撤离的最远距离(按最不利风向情况下撤离的最远距离)；

V 为零流下道路速度(一般根据不同道路等级取值，主干路取 70 km/h，次干路取 50 km/h，支路取 30 km/h)；

S 为撤离的车辆数；

P 为单车道通行能力，一般取 2200 辆/h；

N 为车道数。

假设已知 T 的情况下，则 N 可以求解如下：

$$N = \frac{S}{P} \left(\frac{\alpha L}{T \times V} \right)^{-\beta} \quad (4)$$

3.2. 基于最短疏散时间路网规划方法

3.2.1. 应急疏散路网层次划分

烟羽区道路的功能等级划分(如表 1 所示)是烟羽区道路规划的基础，烟羽区道路系统按疏散主骨架路、疏散主干路及疏散一般道路三个等级层次规划建设，其交通功能与应急疏散的关系分别为：

- 1) 第一层次：主骨架路

Table 1. Road function level division of plume zone

表 1. 烟羽区道路功能层次划分

道路等级	道路功能	服 务	路权优先等级
主骨架路	烟羽区对外、长距离	不直接服务疏散集结点	1
主干路	较长距离交通联系	交通联系服务水平较高	2
一般道路	交通集散	直接服务疏散集结点	3

主骨架路是疏散区路网主骨架，支持烟羽区疏散布局和功能结构组织，不直接服务于烟羽区用地，主要提供快速的跨区域交通联系，不提供直接的点到点服务，是担负烟羽区对外进出交通的快速集散通道，同时联系烟羽区与外围各经济中心的快速通道。主骨架路一般技术等级为二级公路以上。

2) 第二层次：主干路

与主骨架路共同构成烟羽区主要道路系统，承担主要疏散点的交通疏散。主干路是联系各疏散点的重要网络系统。

主干路的功能为解决烟羽区对外及区内的交通联系和应急疏散，以承担客运交通为主。作为主骨架路和一般道路之间的衔接，即满足主骨架路通畅的要求，又与一般道路有便捷的可达性，以服务烟羽区内交通联系和应急疏散为主。主干路技术等级一般为二级路以上。

3) 第三层次：一般道路

集散和分流主干路交通，是交通疏散的集散道路。一般道路把主干路与疏散点之间有机地连接起来，形成完整的网络系统。一般道路，一般为村道，技术等级为四级以上。

3.2.2. 疏散路线与疏散路网规划

当核突发事件发生时，把突发事件直接影响区域和间接影响区域定义为危险区和缓冲区，并对各区域路径功能定义为：

1) 第一级疏散：指从危险区的主要出入口至区内公共疏散车辆乘车地点的各条可用通道，也即是直接服务于交通疏散的一般道路；

2) 第二级疏散：指从危险区各疏散车辆装载行人的站点至烟羽区边界与区外出口处之间的路径。通过这些路径疏散车辆能将危险区的避难人群疏散至突发事件的直接威慑范围之外，也即是服务于较长距离交通联系的主干路；

3) 第三级疏散：指疏散车辆载运疏散人群从烟羽区快速驶至区外的避难场所，该级别主要为烟羽区对外长距离的主骨架道路。

不同的区域路径使用功能及其与突发事件危害程度的联系不同，第一级行人疏散路线与疏散路网的规划目标是确保遇险人群在规划的时间内，以最短的途径奔跑、自行车或私家车至距其最近的疏散集结点。同时以警力确保在人群通行过程中不发生因恐慌而导致的混乱。这一级别疏散路网主要是提高重要农村公路和连接集结点的道路的等级。确保第一级疏散的高效。

第二级疏散路径规划的目标是根据疏散交通需求，选择从疏散集结点到烟羽区最近的出口路径，以确保疏散公共车辆在最短的时间内驶离危险区域并保证出口路段的畅通性。这一级别疏散路网主要是加强主干道的建设，实施主干道的内联。实现第二级别的快速。

第三级路径规划的目标，重在优化区域骨架路网通行能力，确保疏散车辆和社会车辆在畅通有序的交通状态下驶离烟羽区，以最短时间抵达避难场所或者既定的目的地。这一级别疏散路网主要是以现有的高速公路为基础，提升对外公路等级，实现对外公路的外畅。实现第三级别的畅通。

每一级别需要的车道数可用式(4)进行计算。

三级疏散线路与疏散路网的主要规划内容如图 2 所示。

4. 实例分析

浙江省海盐县秦山核电站总装机容量达 620 万千瓦，同时基地建在人口稠密、经济比较发达的地区，且又是世界上少有的多核机组、多堆型、多业主的核岛群，为此，核应急疏散成为各级政府和广大群众越来越关注的问题。根据浙江省近年组织的三次大型核应急演习看，实际可用于道路撤离的时间只有 1 小时左右，因此确定疏散时间 $T = 1h$ 。图 3 为核应急区公路运输通道示意图，核应急疏散主要任务是将应急区群众疏散到外围的第 1、2、3、4、5 号道路上。重点计算的为规划的内部的第 6、7、8 号道路疏散时间。其中第 6 号道路为核应急区——海盐县县城的主骨架道路(秦山大道)；第 7 号为核应急区——南王公路的主干路(翁金公路)；第 8 号为核应急区-01 省道的一般道路(落塘至通元的乡村公路)。

首先根据海盐县道路实际流量对 BPR 函数关键参数进行标定，得到 $\alpha = 0.925$ ， $\beta = 0.777$ 。则 BPR 函数可以表示为：

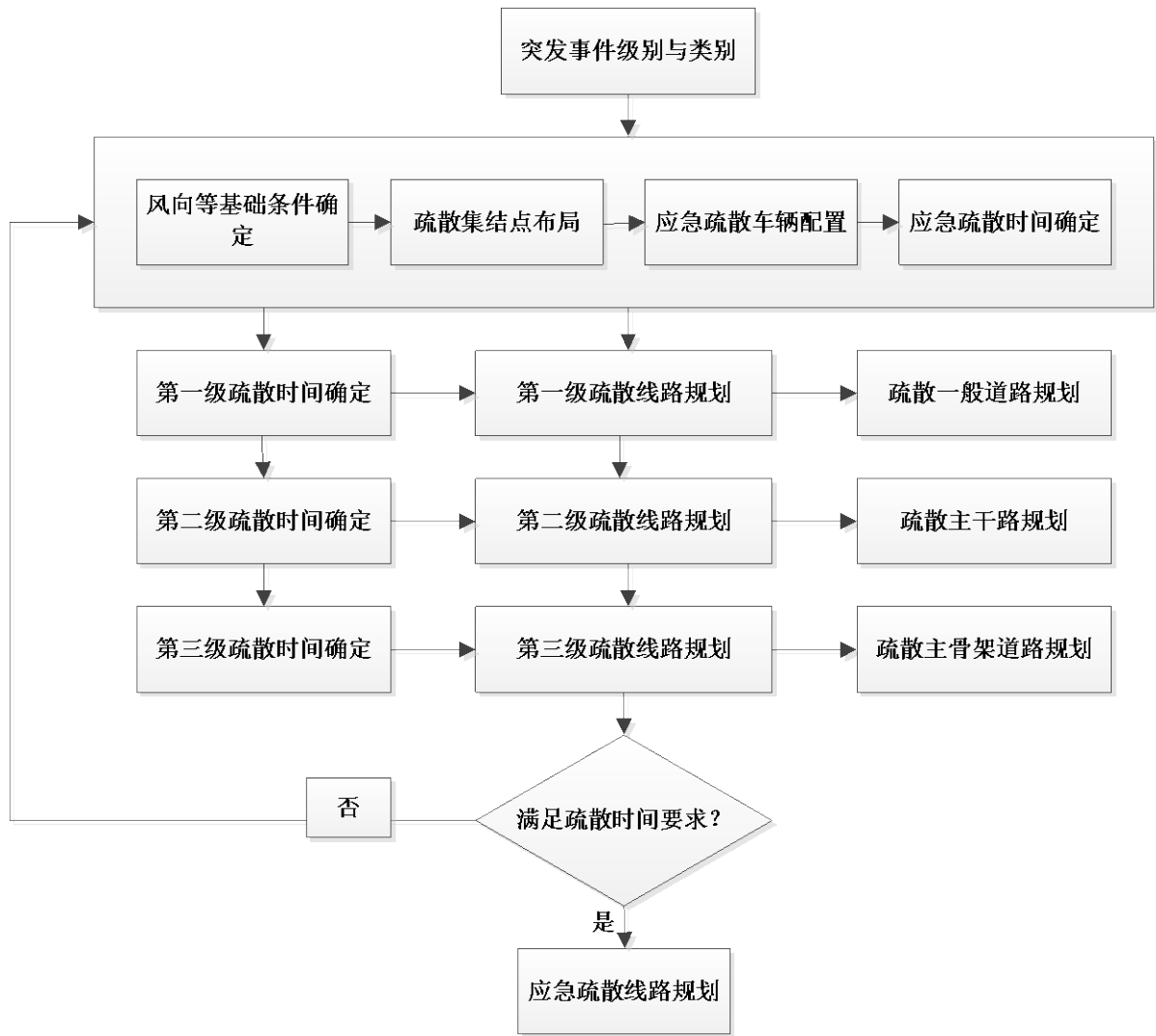


Figure 2. Planning evacuation routes flow chart with limited evacuation time
图 2. 疏散时间约束下规划疏散线路流程图

$$t_{\alpha} = t_0 \left[1 + 0.925 \times \left(\frac{q}{c} \right)^{0.777} \right] \quad (5)$$

车道数 N 可根据公式(4)改写为:

$$N = \frac{S}{P} \left(\frac{0.925L}{T \times V} \right)^{-0.777} \quad (6)$$

V 取主骨架路 70 km/h, 主干路 50 km/h, 一般道路 30 km/h, 利用公式(6)对来年通道疏散流量和疏散时间进行分析(表 2)。



Figure 3. Planning evacuation routes flow chart with limited evacuation time
图 3. 疏散时间约束下规划疏散线路流程图

Table 2. Channel evacuation flow and evacuation time of the resettlement planning evacuation routes
表 2. 规划撤离安置路线的通道疏散流量和疏散时间

序号	规划疏散通道	车道数 N	疏散流量 q (pcu)	与规划道路通行能力比值 q/c	利用规划道路疏散时间(分钟)
通道六	秦山大道	8	35431	0.8	60
通道七	翁金线	6	8858	0.6	
通道八	落许线	4	5315	0.6	
	杨核线	2	3543	0.6	

5. 结论

核应急疏散是核应急道路规划的首要考虑的问题, 本文针对核应急疏散时间约束下的核应急道路规划相关研究的不足, 对核应急疏散道路规划展开研究。论文从分析应急疏散的过程入手, 以疏散时间作为整体疏散的约束条件, 根据疏散不同阶段的交通行为和路径选择特点, 将核应急疏散路网系统分为 3 个层次, 即主骨架路、主干路和一般道路, 通过引入 BPR 函数对应急疏散时间进行预测, 在固定的疏散时间约束下对核应急路网的各层次道路的车道数进行反推计算, 建立疏散时间约束下核应急疏散路网规划的一整套方法, 最后以浙江省海盐县秦山核电站的核应急疏散作为案例, 给出基于疏散时间约束下核应急疏散时间的计算结果。

基金项目

浙江省自然科学基金(LY15E080008)资助。

参考文献 (References)

- [1] 国务院 (1986.10) 中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例。
- [2] 国务院 (1993.8) 核电厂核事故应急管理条例. 国务院第 124 号令。
- [3] 国家核应急预案(公开版). 2005.5.
- [4] Tanaka, K., Nagatani, T. and Hanaura, H. (2007) Traffic congestion and dispersion in hurricane evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **376**, 617-627.
- [5] Li, F. and Feng, P. (2007) Model and application of evacuation system for flood control. *Journal of Tianjin University Science and Technology*, **40**, 731-735.
- [6] 崔喜红, 李强, 陈晋 (2005) 大型公共场所人员疏散模型研究——考虑个体特性和从众行为. *自然灾害学报*, **6**, 133-140.
- [7] 方正, 卢兆明 (2001) 建筑物避难疏散的网格模型. *中国安全科学学报*, **4**, 10-13.
- [8] Helbing, D. and Molnar, P. (1995) Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, **51**, 4282-4286. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>
- [9] Toshiyuki, A. (1993) Prediction system of passenger flow. In: Smith, R.A. and Dickie, J.F., Eds., *Engineering for Crowd Safety*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 249-258.
- [10] 李强, 崔喜红, 陈晋 (2006) 大型公共场所人员疏散过程及引导作用研究. *自然灾害学报*, **4**, 92-99.