

文章编号: 1001-4632 (2008) 04-0132-06

大型公共建筑物人员应急疏散模型

王富章^{1,2}, 王英杰², 李平²

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 中国铁道科学研究院 电子计算技术研究所, 北京 100081)

摘要: 已经完成和正在开发的大型公共建筑物人员应急疏散模型有 20 多种, 基本上可归结为网络节点模型。不同模型的主要区别在于模型的空间划分、疏散人员特征的处理和疏散人员个体行为特性的处理 3 个方面。模型的空间划分大体分为细网格和粗网格 2 类; 疏散人员特征处理方法分为个体或群集 2 种; 疏散人员个体行为特性处理方法分为不考虑人员的行为、方程式行为分析、行为隐含、行为准则、人工智能模拟 5 大类。国外比较典型的模型有 EXITT, EVACNET, SIMULEX, EXODUS 和 BFIRE。国内比较典型的模型有疏散时间计算模型、群集疏散模型、地下商业建筑疏散预测模型、网格疏散模型和地下大型商场疏散模型。铁路大型客运站应研究建立风险评估模型、三维多尺度模型、预警及疏散模型和多维可视化预案。

关键词: 应急疏散模型; 大型公共建筑物; 公共安全

中图分类号: U298: X913 文献标识码: A

城市的交通枢纽、体育场馆、购物中心等大型公共建筑物一旦发生火灾、人员拥挤踩踏、恐怖袭击等突发性公共安全事件, 如果处置不当, 会给人的生命和财产带来巨大的损失。国内外专家学者从不同角度对此进行了一系列研究, 本文概述大型公共建筑物应急疏散问题研究方法、国内外典型的公共建筑物应急疏散模拟软件及数学模型, 以供研究建立我国铁路大型客运站旅客应急疏散模型借鉴。

I 应急疏散研究方法及模型

20 世纪 80 年代起, 随着计算机的发展, 人们开发了许多用以描述建筑物内人员疏散特性的软件和模型。据统计已经完成的和正在开发的疏散模型超过 20 种^[1]。总体上, 这些模型都可归结为网络节点模型, 即建筑各部分的空间布局用网络来表示, 然后在此网络的基础上确定人员在建筑物内的位置及疏散移动路线, 进而确定疏散时间。虽然每个模型分别从不同角度来模拟人员在建筑物内的疏散行为, 其性能、效果及适用范围各不相同, 但从目前建立的数学模型及模拟方法来看, 主要区别在于模型的空间划分、人员个体特性、行为特性 3 个方面。

1.1 模型的空间划分

模型的空间划分是指建立模型时如何分隔建筑物空间。目前空间划分方法大体分 2 类: 细网格类 (Fine Network) 和粗网格类 (Coarse Network)。

细网格类不考虑建筑实体的具体物理分隔, 如房间、楼道、走廊等, 而是把整个建筑平面分割成同样形状和面积的网格, 如正方形、六边形等。采用细网格法的模型主要有 BG RAF, EXODUS^[2-4], EG RESS^[5, 6], SGEM、MAGNETMODEL, VEGAS, SIMULEX 等。这些模型利用各个网格的“占据”或“空缺”来表示每个人在建筑物内的移动, 因此能够反映人与人之间的互相关系、环境的影响等诸多因素, 模拟结果的精度较高。但是, 现代建筑特别是高层建筑, 建筑单元众多, 结构复杂, 因而计算处理信息量也相当大, 几乎呈指数增长, 所以这种模型目前还较少用于模拟计算高层建筑的人员疏散问题。

粗网格类是根据实际建筑物格局来分割建筑空间, 即将房间、楼道、走廊看作网络中的“节点”, 连接任意两节点的门或通道的转折点看作网络中的“弧”。同一模型中每个节点的面积、形状不一定相同。在疏散过程中, 人员移动以人群的方式从一个节点移动到另一个节点, 根据各建筑单元的出

口容量确定人员在建筑物内的移动速度并确定相应的几何位置。这种方式能够进行大容量的人员计算，然而由于不能反映个体成员的确切位置，因此很难对个体移动以及个体之间相互作用进行详细计算，进而无法反映个体人员的基本行为特性，计算精度较低。这种模型适用于大型建筑，尤其是功能复杂且人员众多的建筑。有代表性的这类模型主要有 CRISP, DONEGAN'S, EXIT89, EXITT, E-SCAPE, EVACSIM, EVACNET^[7-9], PAXPORT, TAKAHASHI'S MODEL, WAYOUT 等。

1.2 疏散人员的特征

疏散人员的特征可以用 2 种方法来处理：个体的方法或群集的方法。

个体的方法就是考虑个体的行为差别，疏散人员不是一个均质的群体，而是内部特征不完全一样的人群。在模拟疏散过程时，这些不同的个体特征就是计算的关键条件。它按单个人员检查和分配各自的移动特征，因此需要较多的计算开销，程序处理的难度也稍大。目前采用个体方法描述疏散人员特征的模型有 BGRAF, CRISP, EXITT, EGRESS, E-SCAPE, EVACSIM, EXODUS, MAGNETMODEL, SGEM, SIMULEX, VEGAS。

群集的方法是将一群或一组人按同一特性考虑，他们将按同一速度移动，并同时到达或离开建筑物的某个网络节点。采用这种模型计算建筑物内人员疏散，操作简单，使用方便，运行速度较快；缺陷在于无法详细描述个体特征，难以描述突发事件对个体的影响。采用这种方法的模型有 DONEGAN'S ENTROPY, EXIT89, EVACNET+, PAXPORT, TAKAHASHI'S MODEL, WAYOUT, 温丽敏等的火灾中群集疏散模型、刘文利等的地下商业街建筑疏散预测模型。

1.3 疏散人员的行为特征

疏散人员的行为包括对火灾的反应、逃生的决策等，与单纯的物理移动不同，在面对危险时，人们会有什么样的心理，会做出怎样的逃生决策，都是非常复杂的。而且，不同的建筑环境、不同的人群拥挤状况等等都会影响逃生的决策。因此，如何更好地在模型中表现出人员的行为，已经成为当今疏散模型研究的重点。目前建立的众多疏散模型中，对行为特征的处理方法可以分为以下 5 大类。

第 1 类是根本不考虑人员的行为，只考虑人员

EVACNET^[7-9]。

第 2 类是方程式行为分析方法。这种方法将一个或一系列的方程式应用于疏散人员全体，每个人的行为都由方程式决定。这种方法虽然可以确定个体的行为，但是所有人对外界危险的反应都是一样的，采取的行动措施也是相同的。此类模型有 MAGNETMODEL, TAKAHASHI'S MODEL。

第 3 类方法是将人员行为隐含在复杂的物理模型中。这种方法以第 2 手数据为基础，而这些数据已经将心理的或者社会的因素包含在其中，所以不再需要另外考虑各种心理对行为的影响。这类模型的可靠性和准确性取决于第 2 手数据。此类模型有 EXIT89, PAXPORT, SIMULEX, WAYOUT。

第 4 类方法是建立一系列基于行为系统的准则，人们在逃生时的行为将根据这些准则进行。这些准则通常与环境有关，不同的环境将决定不同的行为。此类模型有 BGRAF, CRISP, E-SCAPE, EXITT, EVACSIM, EXODUS。

第 5 类方法是利用人工智能模拟特定环境下人员对于环境因素的反应，以此决定人员在建筑物内的移动。这类方法虽然提高了模拟决策过程的准确性，但目前还不十分成熟。此类模型主要有 DONEGAN'S ENTROPY MODEL, EGRESS, VEGAS。

2 国外典型应急疏散模型

2.1 EXITT^[10, 11]

EXITT 是火灾危险综合分析程序 HAZARD 的组成部分，专门用于计算火灾时建筑物内人员疏散的时间。该模型使用网络描述建筑结构环境，用户必须建立能够表示人员位置、可能的出口与疏散路线的节点网络。程序允许用户定义若干个影响得疏散人员响应方式的个体特征，包括年龄、性别、当时是否清醒、疏散时是否需要别人帮助等。一旦人员发现火灾并决定逃生时，程序便可根据一些规则模拟他们的逃生路径。程序首先选出某人所在的位置到出口之间距离最短的路径，并优先选择门作为出口。然后模拟该人通过这条路径的情况。如果最先选择的路径变得不安全，或者对比其他路线后认为不可取，程序就会选择其他的路径。

2.2 EVACNET

节点人员疏散模型，而且完全不考虑人员的行为。该模型中人员的疏散路线按疏散时间最小选取最优路线，而且通过采取一些相应的措施使疏散按照一种适当的方式进行。该模型基本上是一个运输模型，其中源节点代表计算起点，中间节点代表建筑物的某些部分，目标节点则是建筑物的疏散出口，节点则由弧线连接。用户需要确定每个节点的容量、每条弧线的通过能力及人员通过弧线所需的时间。该模型可进行多种类型建筑物内的人员疏散模拟，可以模拟部分楼层，也可以模拟整个楼层。由于该模型没有考虑人员的个体行为，即认为所有的人员具有相同的疏散特征，因此由它计算出来的疏散时间可能比实际疏散时间要短一些。

2.3 SIMULEX^[12]

SIMULEX 是能够在 PC 机上模拟很多人从大型公共建筑物中疏散的模型。用户利用 CAD 软件创建建筑物的 3D 模型，定义建筑物“最终”的外郭出口，SIMULEX 据此可以自动确定和计算整个建筑物空间里所有人的行进路线和距离，进行疏散过程的模拟。关于单个人运动的算法，是先利用摄影技术拍摄实际生活中人们的运动，然后利用计算机技术对这些图像进行分析进而得到的。

2.4 EXODUS

EXODUS 是模拟人群从围合区域疏散的软件，该套软件现已投入商业应用。EXODUS 包含人员、运动、行为、毒性和危险 5 个相互作用的子模型。建筑布局由 CAD 生成的 DXF 文件或者提供的交互式工具生成，网格由节点和弧构成。每个人选择的疏散策略（行为子模型）是他们和围护结构、其他人及火灾危险之间交互作用的产物。EXODUS 模型家族包括适用于大型建筑的 BUILDINGEXODUS、应用于飞机的 AIREXODUS 和应用于航海的 MARITIMEEXODUS，适用于铁路系统的 Rail 版本目前正在开发中。

2.5 BFIRES^[13]

BFIRES 是基于人员行为的火灾时期紧急疏散模拟模型，该模型应用于医疗类型的建筑中。模拟结果对以下参数敏感：①楼层平面的布置；②人员所在的空间位置；③任何阻碍人员行走的因素；④人员对建筑物结构的熟悉程度；⑤允许的人员密度水平。BFIRES 把建筑火灾事件抽象化为一个离散的时间框架链，在每个时间节点，每个人员根据他

个人信息处理、决策制定以及对火灾反应的唯一的计算机模型。

3 国内典型应急疏散模型

我国针对紧急疏散问题的研究开始于 20 世纪 90 年代末，目前尚没有比较成熟的模型和软件，也缺少有影响的工程应用范例^[14]。国内对应急疏散模型的研究主要侧重研究建筑物发生火灾时人员疏散模型。比较典型的模型如下。

3.1 疏散时间计算模型

袁理明等提出了一种计算疏散时间的数学模型^[15, 16]。该模型提出安全疏散时间即为火灾探测系统发出报警信号的预警时间加上人员安全疏散至建筑物的时间，采用时间序列法计算人员开始疏散直到最终到达安全出口所需的时间，没有考虑人们听到或发现报警信号后的确认反应时间。

3.2 群集疏散模型

温丽敏等提出了一种火灾时群集疏散的模型^[17-19]。采用计算机仿真计算人员疏散时间。该模型的前提是“疏散人员井井有条地按照设计人员设计的疏散通道疏散”。由于疏散人员的性别、年龄、身体条件等不同，疏散能力也各不同，模型采用降低整个疏散能力平均值的方法，以描述具有不利于疏散的疏散人员特征。

3.3 地下商业建筑疏散预测模型

刘文利等提出地下商业街建筑人员疏散模型^[20]。该模型采用网络型控制方法进行空间模式化，将地下商业街的各个店铺、通道等地点分别作为网络的节点，它们之间的联系为连接（link）；对人的行为按照行能力不同，划分为正常人、老年人（含活动不便的人）以及由儿童和其家长组成的家庭等 3 个集团；在疏散过程中，人的流动以单向型人流对待。

3.4 网格疏散模型

香港城市大学的 Lo S M 等提出了利用计算机虚拟现实的技术，收集人员在火灾中行为量化数据的调查方法，并结合火灾后的问卷调查及疏散演习等手段收集大量有关火灾中人员行为的数据，研究建筑物防火通道内的标识（如灯光、张贴、广播等）对人员疏散行为的影响，建立网格疏散模型（SGEM）^[21-23]。该模型在几何空间上将建筑物分成反映人员具体位置的细网格，并利用楼梯出口划分每层上层与下层建筑物

了较为成功的疏散模拟。

1.5 地下大型商场疏散模型

王志刚开发了地下大型商场火灾时期人员疏散计算机模型 FEGress^[24]。该模型可以计算在建筑物内不同位置处发生火灾时，从火灾发生到人员疏散结束所需的时间，与火灾模拟软件相结合，可以评估发生火灾时人员生命的安全性。

4 铁路大型客运站旅客应急疏散模型

针对铁路大型客运站站场结构、列车开行状况、人员聚集状况、交通疏解等行业特点，借鉴国内外既有研究的成果，研究建立发生突发公共事件时人员应急疏散模型，制定科学的、操作性强的应急预案，为应急指挥提供决策依据。这一领域有待研究建立的模型包括如下方面。

(1) 铁路大型客运站风险评估模型

研究建立铁路大型客运站风险评估方法^[25]及模型，可评估铁路大型客运站各类突发事件发生的可能性、突发事件可能会对人民生命财产安全以及环境造成的损害和影响；通过风险识别、风险分析评估、风险处置，对突发事件隐患进行主动预防，从根本上消除和防范各类突发事件发生。

(2) 铁路大型客运站三维多尺度模型

地理信息系统已在铁路上得到很大应用^[26-30]。根据铁路大型客运站各种不同比例尺的地理信息，

包括分布/规划图、建筑平面图、照片或影像、危险源等资料，研究应急 GIS 技术及虚拟现实技术，构建铁路大型客运站三维多尺度模型。

(3) 铁路大型客运站预警及疏散模型

通过对各类相关信息进行综合分析，结合铁路大型客运站三维多尺度模型，研究铁路客运站人员疏散模型，得出不同时段、不同数量人员聚集情况下的疏散方案和路线。

(4) 铁路大型客运站多维可视化预案

根据铁路大型客运站人员疏散等相关模型，研究突发公共事件人员疏散应急预案，利用详细的大客运站二维、三维建筑模型，研究生成不同突发事件的多维可视化应急预案，以便用于各种演练和实战，提高应急处置的科学性和效率。

5 结束语

GIS 技术^[31]及虚拟现实技术^[32]具有形象直观的特点，国内外许多研究人员开始将其运用到公共安全领域^[33, 34]，用以研究大型公共设施的安全问题。利用 GIS 技术及虚拟现实技术，可以快速构建大型公共设施的三维模型和场景，用以模拟公共设施中可能发生的各种公共安全事件，并同步模拟和展示其中大规模人群的行为和运动，这种具有直观可视化特点的方法将是大型公共设施疏散模型和软件的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Gwynne S, Galea E R, Owen M, et al. A Review of the Methodologies Used in the Computer Simulation of Evacuation from the Built Environment [J]. Building and Environment, 1999, (34): 741-749.
- [2] 简贤文, 陈文龙, 沈子胜, 等. 运用 buildingEXODUS 评估台北捷运地下车站避难安全——以捷运新店站为例 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (S2): 363-367.
- [3] Gwynne S, Galea ER. A Systematic Comparison of Model Predictions Produced by the BuildingExodus Evacuation Model and the Tsukuba Pavilion Evacuation Data [J]. Journal of Applied Fire Science, 1998, 7 (3): 234-266.
- [4] Gwynne S, Galea E R, Lyster C, et al. Analysing the Evacuation Procedures Employed on a Thames Passenger Boat Using the maritimeEXODUS Evacuation Model [J]. Fire Technology, 2003, 39 (3): 225-246.
- [5] Purser D A. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [M]. 3rd ed. Bethesda: Society of Fire Protection Engineers, 2002.
- [6] Fruin J J. Pedestrian Planning and Design [M]. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.
- [7] Kisko T M, Francis R L. EVACNET+: A Computer Program to Determine Optimal Evacuation Plans [J]. Fire Safety Journal, 1985 (9): 211-222.

- [9] Taylor I R. A Revised Interface for Evacnet+ [C] // Proceedings of the Seventh International Fire Science and Engineering Conference. London: Interscience Communications, 1996: 1010-1015.
- [10] Fahy R E. An Evacuation Model for High Rise Buildings [C] // Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Safety Science. Edinburgh: IAFSS (The International Association for Fire Safety Science), 1991: 8-15.
- [11] Levin B M. EXITT-A Simulation Model of Occupant Decisions and Actions in Residential Fires [C] // Proceeding of 2nd International Symposium on Fire Safety Science. London: The International Symposium on Fire Safety Science, 1988: 561-570.
- [12] Thompson P, Marchant E. A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations [J]. Fire Safety Journal, 1995 (24): 131-148.
- [13] Stahl F. BFIRE II: A Behavior Based Computer Simulation of Emergency Egress during fires [J]. Fire Technology, 1982, 18 (1): 49-65.
- [14] 姜传胜, 杨 铸. 公共安全之人员应急疏散 [J]. 安全, 2004, 25 (1): 7-9.
- [15] 袁理明, 范维澄. 建筑火灾中人员安全疏散时间预测 [J]. 自然灾害学报, 1997, 6 (2): 30-35.
(YUAN Liming, FAN Weicheng. The Prediction of Safety Evacuation in Building Fires [J]. Journal of Natural Disasters, 1997, 6 (2): 30-35. in Chinese)
- [16] 袁理明. 建筑物火灾危险性评估的一种工程方法 [J]. 中国安全科学学报, 1997, 7 (5): 25-28.
(YUAN Liming. An Engineering Method for Building Fire Risk Assessment [J]. China Safety Science Journal, 1997, 7 (5): 25-28. in Chinese)
- [17] 温丽敏, 陈 全, 陈宝智, 等. 火灾中群集疏散的设计方法及计算机仿真 [J]. 东北大学学报, 1998, 19 (6): 1-4.
(WEN Limin, CHEN Quan, CHEN Baozhi, et al. Human Evacuation Scenarios in Case of Fire and Simulation by Computers [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1998, 19 (6): 1-4. in Chinese)
- [18] 温丽敏, 陈宝智. 重大事故应急疏散模型研究 [J]. 中国安全科学学报, 1999, 9 (6): 69-73.
(WEN Limin, CHEN Baozhi. Study on the Model of Emergency Evacuation in Case of Major Accident [J]. China Safety Science Journal, 1999, 9 (6): 69-73. in Chinese)
- [19] 温丽敏. 重大事故应急疏散研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2000.
- [20] 刘文利, 熊 洪. 地下商业街建筑人员疏散预测 [J]. 火灾科学, 1999, 8 (3): 72-79.
(LIU Wenli, XIONG Hong. Evacuation Prediction in the Underground Shopping Street [J]. Fire Safety Science, 1999, 8 (3): 72-79. in Chinese)
- [21] Lo S M, Fang Z, Zhi G S. The Development of SGEM: An Evacuation Model for Fire Safety Design in Building [J]. The HongKong Surveyor, 2001 (2): 8-14.
- [22] Lo S M, Fang Z, Lin P, et al. An Evacuation Model: the SGEM Package [J]. Fire Safety Journal, 2004 (39): 169-190.
- [23] Lo S M, Fang Z. A Computer Model for the Evacuation for Building [J]. Journal of Fire Science, 2000, 18 (9): 376-394.
- [24] 王志刚. 地下大型商场火灾时期人员疏散计算机模型 [J]. 火灾科学, 2001, 10 (1): 57-62.
(WANG Zhigang. An Occupant Evacuation Model for the Underground Shopping Mall during Fire Incidents [J]. Fire Safety Science, 2001, 10 (1): 57-62. in Chinese)
- [25] 周光辉, 汪 智, 王富章, 等. 2008年北京奥运会期间铁路突发公共事件风险评估研究 [J]. 中国铁路, 2008, 548 (2): 69-73.
- [26] 王英杰, 贾利民, 秦 勇, 等. 地理信息系统在铁路上的应用 [J]. 中国铁道科学, 2002, 23 (5): 23-28.
(WANG Yingjie, JIA Limin, QIN Yong, et al. Review on Applications of GIS in Railways [J]. China Railway Science, 2002, 23 (5): 23-28. in Chinese)
- [27] 贾利民, 王英杰, 秦 勇. 铁路地理信息系统 (RGIS) 框架体系 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24 (1): 3-8.
(JIA Limin, WANG Yingjie, QIN Yong. Framework of China Railway Geographic Information System [J]. China Railway Science, 2003, 24 (1): 3-8. in Chinese)

- (LAI Wenbin, ZHOU Zhimin, WANG Yingjie, et al. Temporal Geographical Information System and Its Application in Holiday Passenger Information System [J]. China Railway Science, 2004, 25 (5): 125-129. in Chinese)
- [29] 贾利民, 秦 勇, 刘 峰. 全国铁路地理信息系统应用服务共享平台的研究 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24 (2): 24-27.
(JIA Limin, QIN Yong, LIU Feng. Research on Application Service Sharing Platform for China Railway Geographic Information System [J]. China Railway Science, 2003, 24 (2): 24-27. in Chinese)
- [30] 秦 勇, 刘 峰, 周志民, 等. 铁路地理信息系统路局应用框架的研究 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24 (1): 7-11.
(QIN Yong, LIU Feng, ZHOU Zhimin, et al. Research on Application Framework of Railway Geographic Information System in China Railway Administration [J]. China Railway Science, 2003, 24 (1): 7-11. in Chinese)
- [31] Longley P A, Goodchild M F, Maguire D J, et al. 地理信息系统 [M]. 唐中实, 黄俊峰, 尹 平, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [32] 汪成为, 高 文, 王行仁. 灵境(虚拟现实)技术的理论、实现及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [33] 陈 涛, 翁文国, 孙占辉, 等. 基于火灾模型的消防应急平台架构和功能分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47 (6): 863-866.
(CHEN Tao, WENG Wenguo, SUN Zhanhui, et al. Architecture of a Fire Emergency Response System Based on Fire Model [J]. Journal Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47 (6): 863-866. in Chinese)
- [34] 毛天露, 王兆其. 虚拟现实技术——研究大型公共设施安全问题的月光宝盒 [J]. 中国计算机学会通讯, 2007, 1 (5): 32-37.

Emergency Evacuation Model for Massive Public Building

WANG Fuzhang^{1, 2}, WANG Yingjie², LI Ping²

1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: There are over 20 kinds of completed or to be developed emergency evacuation models for massive public buildings. Basically they belong to network-nod models, which use network to describe a building. By this way, the position of people in the building can be determined and the evacuation time can be calculated. The difference among different models manifests in the grid/structure partition, character and behavior of occupants. The subcategory of grid/structure includes fine network and coarse network models. There are two ways that a model can view the occupant's character, individually and globally. The behavior of the occupants is represented in many different ways: no behavior, functional analogy behavior, implicit behavior, rule-based behavior and artificial intelligence based behavior. Typical international evacuation models include EXITT, EVACNET, SIMULEX, EXODUS, BFIRE and etc. Typical internal evacuation models include SGEM, FEgress and etc. Risk evaluation model, 3D model and warning and evacuation model for large-scale railway passenger transport station should be researched in China.

Key words: Emergency evacuation model; Massive public building; Public security

(责任编辑 刘卫华)