

12-12-2019

## Fire Emergency Evacuation Simulation of Vertical Ship Lift

Jianping Wang

*1. Hubei Key Laboratory of Hydropower Project Construction & Management (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;;2. College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;;*

Meiru Wang

*2. College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;;*

Chen Shu

*1. Hubei Key Laboratory of Hydropower Project Construction & Management (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;;*

Chengyou Liu

*2. College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Fire Emergency Evacuation Simulation of Vertical Ship Lift

## Abstract

**Abstract:** In order to analyze the fire evacuation efficiency of vertical ship lift, *the influence of population characteristics on evacuation is analyzed quantitatively from three aspects, such as age structure, population density and flow velocity.* According to the emergency evacuation path of vertical ship lift, the three-stage evacuation time is divided into three parts. In order to obtain fire evacuation time, *the model of vertical ship lift with the passenger ship is established and parameters of evacuation time are set up by using the simulation technology.* The actual case of the Three Gorges ship lift shows: 1) the evacuation time of vertical ship lift is much larger than that of the passenger ship; 2) when people complete evacuation through left side of carrying vessel, the flow velocity of No.3 evacuation passage is faster than that of No.2; 3) when people complete evacuation through two side of carrying vessel, the flow velocity of No.3 and No.4 evacuation passage is faster than that of No.1 and No.2.

## Keywords

fire evacuation, population characteristics, time model, simulation test, vertical ship lift

## Authors

Jianping Wang, Meiru Wang, Chen Shu, Chengyou Liu, and Li Zhi

## Recommended Citation

Wang Jianping, Wang Meiru, Chen Shu, Liu Chengyou, Li Zhi. Fire Emergency Evacuation Simulation of Vertical Ship Lift[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(6): 1142-1149.

# 垂直升船机火灾疏散时间仿真研究

王建平<sup>1,2</sup>, 王美如<sup>2</sup>, 陈述<sup>1\*</sup>, 刘成友<sup>2</sup>, 李智<sup>3</sup>

(1. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002;  
3. 中国长江三峡集团公司机电工程局, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 为分析垂直升船机火灾疏散效率, 从疏散人群的年龄结构、人流密度、人流速度等三方面, 定量分析人群特性对疏散的影响; 依据应急疏散路径, 划分三阶段疏散时间, 构建疏散时间模型; 利用仿真技术, 建立载有客船的垂直升船机模型, 设置各项参数, 求解火灾疏散时间。三峡升船机实例表明: 垂直升船机本体火灾疏散时间远大于过机客船; 承船厢左侧通道完成疏散时, 3号疏散通道的流速大于2号; 承船厢两侧通道完成疏散时, 3、4号疏散通道的流速大于1、2号。

**关键词:** 火灾疏散; 人群特性; 时间模型; 仿真试验; 垂直升船机

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2019)06-1142-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0205

## Fire Emergency Evacuation Simulation of Vertical Ship Lift

Wang Jianping<sup>1,2</sup>, Wang Meiru<sup>2</sup>, Chen Shu<sup>1\*</sup>, Liu Chengyou<sup>2</sup>, Li Zhi<sup>3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Hydropower Project Construction & Management (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;  
2. College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
3. Mechanical and Electrical Department, China Three Gorges Company, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to analyze the fire evacuation efficiency of vertical ship lift, the influence of population characteristics on evacuation is analyzed quantitatively from three aspects, such as age structure, population density and flow velocity. According to the emergency evacuation path of vertical ship lift, the three-stage evacuation time is divided into three parts. In order to obtain fire evacuation time, the model of vertical ship lift with the passenger ship is established and parameters of evacuation time are set up by using the simulation technology. The actual case of the Three Gorges ship lift shows: 1) the evacuation time of vertical ship lift is much larger than that of the passenger ship; 2) when people complete evacuation through left side of carrying vessel, the flow velocity of No.3 evacuation passage is faster than that of No.2; 3) when people complete evacuation through two side of carrying vessel, the flow velocity of No.3 and No.4 evacuation passage is faster than that of No.1 and No.2.

**Keywords:** fire evacuation; population characteristics; time model; simulation test; vertical ship lift

## 引言

垂直升船机是利用机械装置沿垂直方向升降

船舶以克服航道上集中水位落差的通航建筑物, 可大幅度降低升船功率, 提高过船速度, 应用广泛<sup>[1]</sup>。然而, 垂直升船机呈相对密闭的包络箱体结构, 一旦发生火灾, 将导致烟雾难扩散, 逃生空间受限, 应急救援困难。因此, 分析火灾疏散过程、明确疏散时间对提高垂直升船机疏散效率、保障通航安全具有重要意义<sup>[2]</sup>。

火灾疏散是高层建筑设计的重要内容, 国内外



收稿日期: 2017-05-15 修回日期: 2017-08-05;  
基金项目: 国家自然科学基金(51609128), 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2016KSD03);  
作者简介: 王建平(1972-), 男, 福建长泰, 博士, 副教授, 研究方向为安全管理; 王美如(1993-), 女, 湖北襄阳, 硕士生, 研究方向为安全管理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1142 •

众多学者进行了诸多研究: Von Neumann 等<sup>[3]</sup>建立元胞自动机模型, 提出具有智能性的人员应急疏散应遵循的局部规则; Helbing 等<sup>[4]</sup>构建群体疏散恐慌状态下模型, 实现了一个自我驱动的多粒子系统; Yohei 等<sup>[5]</sup>针对危机控制的多智能体仿真研究应急疏散; 吴健宏等<sup>[6]</sup>利用 Repast 仿真平台, 提出加强避难空间信息的发布可缩短疏散时间; 苗志宏等<sup>[7]</sup>将火灾动力学模拟结果耦合到疏散模型中, 研究人员疏散状态和失能情况; 刘箴等<sup>[8]</sup>构建恐慌情绪感染模型, 研究人行桥上突发事件人群疏散行为; 陈淼等<sup>[9]</sup>考虑人员性别、年龄等个体属性, 建立船舶人员 Agent 仿真模型, 研究人员应急疏散行为; 北京劳动保护科学研究所<sup>[10]</sup>用人员疏散模拟技术, 研究了大型场馆在各种应急状态下的人员疏散。

以上研究主要针对体育场馆、机场、火车站、地铁站等大型公共建筑领域的应急疏散, 但水电通航领域涉及较少, 也很少定量分析疏散人群特性对疏散时间的影响。而垂直升船机相对密闭的包络箱体结构、高人群密集度等特点, 使定量研究疏散时间成为必要。鉴于此, 本文拟通过定量分析垂直升船机疏散人群特性, 根据火灾应急疏散路径及疏散时间仿真流程, 构建疏散时间模型, 确定疏散时间, 以为垂直升船机火灾疏散工作提供指导。

## 1 疏散的影响因素分析

人群是垂直升船机火灾疏散主体, 为提高疏散时间精确性, 结合客船人群特性及《新客船和现有客船撤离分析暂行指南》<sup>[11]</sup>, 甄选出年龄结构、人流速度、人流密度等直接影响疏散效率的 3 个因素<sup>[12]</sup>。

### 1.1 人群年龄结构

人群年龄结构影响主要体现在对危险的感知、认知能力及行走速度<sup>[13]</sup>。根据 2016 年邮轮行业发展分析, 将人群年龄划分为青年人(18~35 岁)、中年人(36~50 岁)、老年人(50 岁以上), 其中 18 岁以下(不包含 18 岁)人员疏散时跟随父母。

### 1.2 人流密度

人流密度  $D$  疏散走道上单位面积的人员水平投影面积, 反映了人员分布的稠密程度<sup>[14]</sup>, 人流密度越大, 疏散时产生拥堵或堵塞的可能性越大; 人流密度越小, 将延迟疏散时间。

$$D = \frac{Nf}{WL} \quad (1)$$

式中:  $N$  为人流内人员数目, 人;  $f$  为单人水平投影面积,  $m^2$ ;  $W$  为人流宽度;  $L$  为人流长度。

$$f = y \times a + m \times b + o \times c \quad (2)$$

式中:  $f$  为单人水平投影面积,  $m^2$ ;  $y, m, o$  分别为青年人、中年人、老年人平均单人水平投影面积,  $m^2$ ;  $a, b, c$  分别为青年人、中年人、老年人在人群中占比, %。

### 1.3 人流速度

人流速度  $V$  指疏散人群行进速度<sup>[15]</sup>, 与疏散时间呈负相关, 是人员最大行走速度、人流密度的函数:

$$V = k_v(g, f) \times V_b \quad (3)$$

式中:  $k_v(g, f)$  为速度修正值, 若疏散开始时未进行速度修正, 则疏散至  $g$  时, 将其速度降低为原来的  $f$  %。

$$V_b = V_{\max} \times V_f(D) \times V_{fi} \quad (4)$$

式中:  $V_{\max}$  为人员最大行走速度, 依据《新客船和现有客船撤离分析暂行指南》, 得到  $V_{\max}$  值, 见表 1。

表 1 最大行走速度

| 疏散方向 | 乘客   |      |      | 船员   |
|------|------|------|------|------|
|      | 青年人  | 中年人  | 老年人  |      |
| 楼梯上行 | 0.82 | 0.77 | 0.63 | 0.82 |
| 楼梯下行 | 1.10 | 0.94 | 0.80 | 1.10 |
| 平台   | 1.70 | 1.41 | 1.17 | 1.70 |

$V_f(D)$  是人流密度的函数<sup>[15-16]</sup>:

$$V_f(D) = \begin{cases} 1, & D < 0.55 \text{ pers/m}^2 \\ \max \left[ V_{f\min}, \frac{1-0.266D}{0.85} \right], & D \geq 0.55 \text{ pers/m}^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中： $V_{fmin}$  为最小速度值，默认值为 0.15 m/s。

$V_{fi}$  是影响人流速度的常数<sup>[16]</sup>，与人员疏散的位置相关。

$$V_{fi} = k/1.4 \tag{6}$$

式中： $k$  的取值<sup>[16]</sup>见表 2 所示。

表 2  $k$  的取值  
Tab. 2 Value of  $k$

| 楼梯高/cm | 楼梯踏板宽/cm | $k$ 取值 |
|--------|----------|--------|
| 19.05  | 25.4     | 1.00   |
| 17.78  | 27.94    | 1.08   |
| 16.51  | 30.48    | 1.16   |
| 16.51  | 33.02    | 1.23   |

## 2 疏散时间模型

当垂直升船机发生本体火灾(包括塔柱结构、液压系统、配电机房等)或过机客船火灾(烟头火种、易燃物等)<sup>[17]</sup>，且影响承船厢正常运行时，立刻停机，可调节楼梯与对侧塔柱(或就近塔柱)对接，人员从船厢两侧甲板，经疏散通道口，进入防烟楼梯间电梯、楼梯，最后到达上、下游安全区。根据垂直升船机火灾应急疏散路径<sup>[18]</sup>，将垂直升船机火灾疏散时间  $t$  划分三个阶段<sup>[19]</sup>：

$$t = t_1 + t_2 + t_3 \tag{7}$$

式中， $t_1$  为垂直升船机停机所需时间； $t_2$  为人群从客船安全到达疏散通道口的时间； $t_3$  为从疏散通道口，经过防烟楼梯间电梯、楼梯疏散到上、下游安全区的时间。

### 2.1 疏散时间的第一阶段

$t_1$  主要与垂直升船机发生火灾时运行高程、运行速度及停机加速度等 3 个参数相关。

$$t_1 = \frac{1}{g_i} \min \left\{ g_1 \sqrt{\frac{2|H_t - H_0|}{g_1}}, v_{max} \right\} \tag{8}$$

式中： $H_t$  为火灾时运行高程； $H_0$  为客船进入(或离开)垂直升船机时的高程； $v_{max}$  为最大运行速度，即匀速运行速度； $g_i$  为垂直升船机停机加速度，根据《垂直升船机设计规范》<sup>[20]</sup>可知：正常运行加速度  $g_1$  为  $\pm 0.01 \text{ m/s}^2$ ，电气制动停机加速度  $g_2$

为  $-0.04 \text{ m/s}^2$ ，主提升机安全制动系统停机加速度  $g_3$  为  $-0.08 \text{ m/s}^2$ ，可依火势大小确定。

当  $g_1 \sqrt{\frac{2|H_t - H_0|}{g_1}} < v_{max}$  时，垂直升船机在加速或减速运行过程发生火灾。

当  $g_1 \sqrt{\frac{2|H_t - H_0|}{g_1}} \geq v_{max}$  时，垂直升船机在匀速运行过程发生火灾。

### 2.2 疏散时间的第二阶段

$t_2$  与  $t_1$ 、垂直升船机结构设置、疏散人群特性等参数相关。假设停机与人员疏散同时进行，只有完全停机后，可调节楼梯与塔柱方可对接，继续完成疏散<sup>[21]</sup>。

$$t_2 = \max \{t_1, t_{2min}\} + (t_{2max} - t_{2min}) \tag{9}$$

式中： $t_{2min}$  为最早到达可调节楼梯的时间； $t_{2max}$  为最后一人到达疏散通道口的时间，均通过 Pathfinder 仿真得到，疏散时间  $t_2$  的仿真流程见 3.1~3.2 节。

当船厢甲板高于  $A$  层疏散通道口 1 m 时，认为人员从船厢甲板向  $A$  层疏散通道口疏散的行为属于不安全行为，此时只能通过升起可调节楼梯向  $A+1$  层疏散，见图 1。

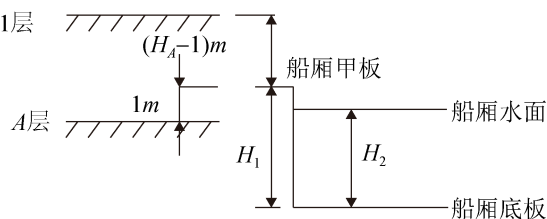


图 1 垂直升船机疏散通道口  
Fig. 1 Escape passageway of vertical ship lift

### 2.3 疏散时间的第三阶段

$t_3$  与防烟楼梯间电梯、疏散楼梯(见图 2)参数设置相关，因进入防烟楼梯间，相对安全，所以假设人员匀速行走。

$$t_3 \leq \max \{t_{3(上行)}, t_{3(下行)}\} \tag{10}$$

式中： $t_{3(上行)}$ ， $t_{3(下行)}$  分别表示人员疏散至上、下游安全区的时间，其值由人员疏散过程中上下楼的

时间和通过休息平台时间决定。

$$t_{3(\text{上行})} = \frac{\sum_{j=A+1}^n 2L_j}{v_{i(\text{上行})}} + \frac{[2(n-A-1)+1]S}{v_{i(\text{平台})}} \quad (11)$$

$$t_{3(\text{下行})} = \frac{\sum_{j=A+1}^m 2L_j}{v_{i(\text{下行})}} + \frac{[2(A+1-m)+1]S}{v_{i(\text{平台})}} \quad (12)$$

式中:  $H_j$  为第  $j$  层高,  $\theta$  为楼梯坡度,  $L_j$  为第  $j$  层楼梯长 ( $H_j/2\sin\theta$ );  $S$  为梯道平台宽;  $v_i$  (其中  $i=1, 2, 3$ ) 分别表示青年人、中年人、老年人匀速行走速度, 依据《新客船和现有客船撤离分析暂行指南》得到  $v_i$ , 见表 3;  $m, n$  分别为乘客疏散至上、下游安全区的楼层号。

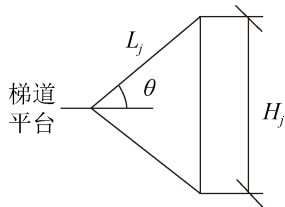


图 2 楼梯分布图

Fig. 2 Stair distribution map

表 3 匀速行走速度

Tab. 3 Uniform walking speed / (m/s)

| 疏散方向 | 乘客   |      |      | 船员   |
|------|------|------|------|------|
|      | 青年人  | 中年人  | 老年人  |      |
| 楼梯上行 | 0.65 | 0.61 | 0.50 | 0.65 |
| 楼梯下行 | 0.88 | 0.76 | 0.64 | 0.88 |
| 平台   | 1.36 | 1.13 | 0.94 | 1.36 |

### 3 疏散时间仿真流程

为确定疏散的第二段时间  $t_2$ , 首先根据获取的垂直升船机数据, 采用 Pathfinder 仿真软件建立载有客船的垂直升船机结构模型<sup>[22]</sup>; 然后设置影响疏散效率的参数; 其次进行仿真试验、获取仿真数据; 最后对仿真结果进行可靠性检验及分析。具体仿真流程见图 3。

#### 3.1 仿真参数设置

首先, 根据客船乘客总量及 1.1 分析的人群年龄结构, 确定青年人、中年人、老年人的人员数量;

按照客船各层结构差异, 确定各层人群年龄结构及数量; 由《新客船和现有客船撤离分析暂行指南》知, 每层的人员分布服从均匀分布。

其次, 根据 1.3 对人流速度的分析, 在仿真软件中, 按照表 1 的速度值对人群疏散的最大行走速度进行设置, 人群疏散的实际疏散速度不超过设置的数值。

最后, 根据垂直升船机本体火灾及客船火灾的疏散通道差异, 限定疏散人群的疏散行为, 即当垂直升船机右侧本体发生火灾, 在下游闸首搭设交通疏散桥, 乘客可通过交通疏散桥, 从左侧 2、3 号两个安全通道撤离; 当过机客船发生火灾, 乘客可从 1、2、3、4 号疏散通道撤离。

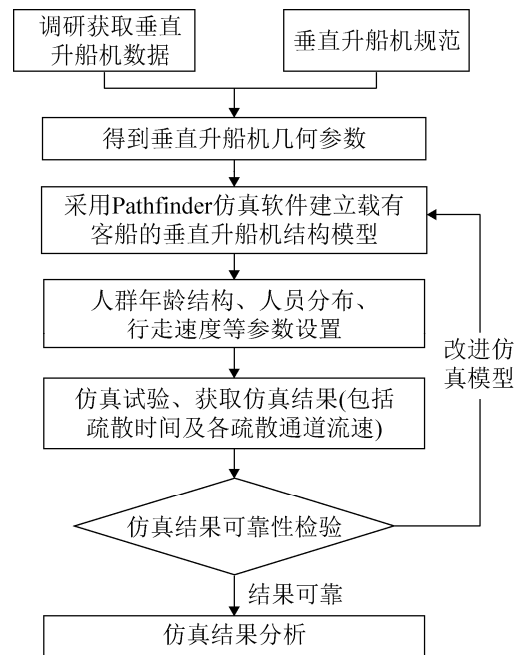


图 3 垂直升船机仿真流程图

Fig. 3 Simulation flow chart of vertical ship lift

#### 3.2 仿真结果分析

运行 Pathfinder 软件, 得到仿真试验结果, 并进行可靠性检验, 若仿真结果不符合疏散实际要求, 则修正模型, 合理调整参数, 直到仿真结果可靠为止。其中, 可靠性检验方法是将垂直升船机的消防演练数据与仿真模型输出结果进行对比, 分析两者之间的相似程度, 若相似度较高, 则本文的仿



真结果可靠。

根据仿真软件输出结果得到疏散时间  $t_2$ ，并绘制各疏散通道人员流速图，分析流速变化趋势，确定各疏散通道的疏散效率，为制定高效的疏散方案，缩短疏散时间，提高疏散效率提供可靠依据。

## 4 案例分析

### 4.1 工程概况

三峡升船机为我国最大的齿轮齿条爬升式全平衡式垂直升船机，3000 t 级设计船型为 84.5 m (总长)×17.2m(总宽)，两侧塔柱设有 4 个安全疏散楼梯、电梯，承船厢与塔柱结构通过可调节楼梯连接(其尺寸按照《升船机设计规范 SL660-2013》规定)。

现三峡升船机载有一艘 86.8m(总长)×14.7m(总宽)的五层 3000 t 级客船，载客量为 525 人，年龄结构分布见表 4，各楼层人数随机分布(见表 5)。当升船机白天下行过程发生火灾，停机至 134.0m 高程(25 层)，疏散时在船舶一层中部大厅处铺设跳板和安全网，由于船厢甲板高于 25 层疏散通道口 1m，因此升起可调节楼梯向 26 层疏散。

表 4 乘客的年龄结构分布

Tab. 4 Age structure distribution of passengers

| 年龄结构 | 青年人   | 中年人   | 老年人  |
|------|-------|-------|------|
| 比例%  | 74.48 | 20.95 | 4.57 |

根据已收集的三峡升船机几何参数数据，利用 Pathfinder 软件建立载有五层 3000 t 级客船的三峡升船机模型，并按照 3.1 进行仿真参数设置。

表 5 楼层人数分布

Tab. 5 Distribution of number in each layer

| 客船楼层 | 青年人    | 中年人    | 老年人   | 合计  |
|------|--------|--------|-------|-----|
|      | 74.48% | 20.95% | 4.57% |     |
| 负一层  | 28     | 22     | 0     | 50  |
| 一层   | 53     | 15     | 4     | 72  |
| 二层   | 63     | 16     | 4     | 83  |
| 三层   | 108    | 25     | 7     | 140 |
| 四层   | 139    | 32     | 9     | 180 |
| 合计   | 391    | 110    | 24    | 525 |

### 4.2 求解疏散时间

#### 4.2.1 疏散时间的第一阶段

三峡升船机船厢升降速度为 0.2 m/s，因火灾事故危险性大，所以选择主提升机安全制动系统停机，加速度  $g$  为 -0.08 m/s<sup>2</sup>。由式(8)知，升船机的停机时间  $t_1$  为：

$$t_1 = \frac{1}{0.08 \text{ m/s}^2} \min \{0.91 \text{ m/s}, 0.2 \text{ m/s}\} = 2.5 \text{ s}$$

所以，三峡升船机疏散时间的第一阶段  $t_1$  为 2.5 s。

#### 4.2.2 疏散时间的第二阶段

(1) 当三峡升船机右侧本体发生火灾，在下游闸首搭设交通疏散桥，乘客从左侧 2、3 号 2 个安全通道撤离，三峡升船机右侧本体火灾应急疏散路径见图 4。

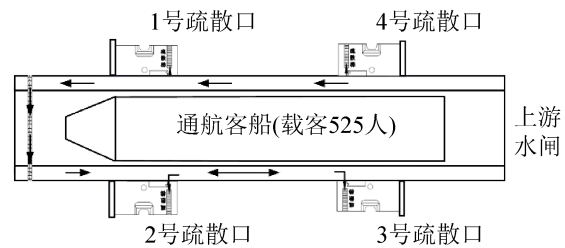


图 4 三峡升船机右侧本体火灾应急疏散路径图

Fig. 4 Fire evacuation path map of right body in the Three Gorges ship lift

(2) 当过机客船发生火灾，乘客从两侧 4 个安全通道撤离，三峡升船机客船火灾应急疏散路径见图 5。

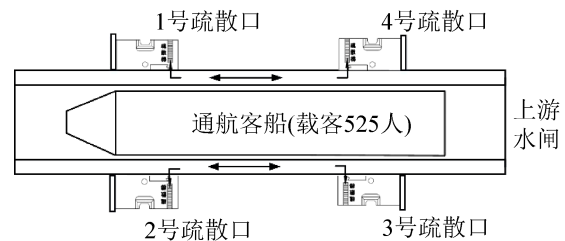


图 5 三峡升船机客船火灾应急疏散路径图

Fig. 5 Emergency evacuation route chart of passenger ship in the Three Gorges ship lift

经 Pathfinder 软件仿真得：两种情况下火灾疏

散的  $t_{2min}$ ,  $t_{2max}$ , 见表 6。

表 6 人员疏散时间表  
Tab. 6 Personnel evacuation schedule /s

| 疏散时间       | 本体火灾疏散时间 |       | 客船火灾疏散时间 |       |
|------------|----------|-------|----------|-------|
|            | 仿真时间     | 演练时间  | 仿真时间     | 演练时间  |
| $t_{2min}$ | 8.8      | 7.9   | 8.8      | 7.9   |
| $t_{2max}$ | 387.3    | 368.4 | 168.8    | 157.2 |

将表 6 仿真疏散时间与三峡升船机应急疏散演练时间对比分析知, 无论是三峡升船机本体发生火灾还是过机客船发生火灾, 仿真疏散得到的最早到达可调节楼梯的时间  $t_{2min}$  和最后一人到达疏散通道口的时间  $t_{2max}$  均略大于演练时间, 所以仿真疏散时间可靠。

因此, 由式(9)知, 疏散时间第二阶段  $t_2$ 。

三峡升船机本体火灾的  $t_2$  如下, 选定疏散通道的流速见图 6。

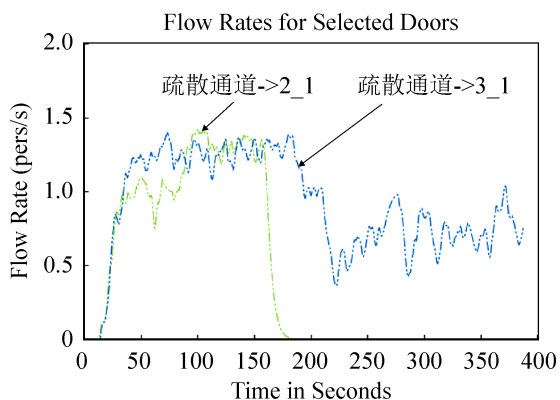


图 6 选定疏散通道流速  
Fig. 6 Flow rate for selected evacuation channel

$$t_2 = \max \{2.5, 8.8\} + (387.3 - 8.8) = 387.3s$$

过机客船火灾的  $t_2$  如下, 选定疏散通道的流速见图 7。

$$t_2 = \max \{2.5, 8.8\} + (168.8 - 8.8) = 168.8s$$

由疏散时间第二阶段  $t_2$  知, 受可用安全通道数量限制, 升船机本体发生火灾的疏散时间比客船长 218.5s, 因此升船机本体火灾危害性比客船大。

由图 6 知, 3 号疏散通道的疏散时间远大于 2 号, 然而 3 号疏散通道的流速略大于 2 号, 说明通过 3 号疏散通道的人数远大于 2 号, 导致 3 号

疏散通道发生拥堵或碰撞, 使流速波动幅度较大。在实际疏散过程中, 可适当将 3 号疏散通道的人员分流到 2 号疏散通道, 减缓 3 号疏散通道的疏散压力。

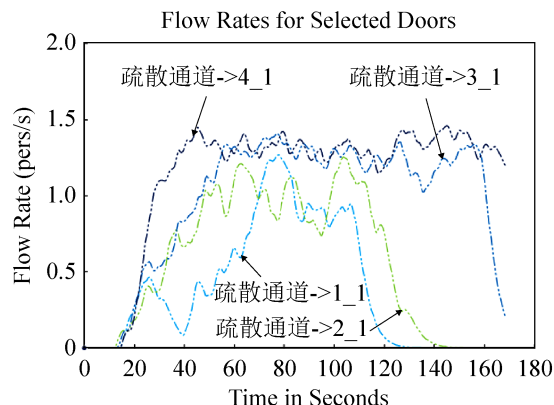


图 7 选定疏散通道流速  
Fig. 7 Flow rate for selected evacuation channel

由图 7 知, 3、4 号疏散通道的疏散时间大于 1、2 号, 然而 4 号疏散通道的流速波动幅度较其它 3 个疏散通道小, 表明 4 号疏散通道疏散流畅, 较少发生拥堵或碰撞的。在实际疏散过程中, 重点关注 1、2、3 号疏散通道, 多安排疏导人员, 减少拥堵或碰撞事故。

### 4.2.3 疏散时间的第三阶段

在防烟楼梯间疏散过程中, 乘客等比例从 26 层安全通道的电梯及上行、下行楼梯疏散至高程 185.0 m 坝顶或 84.0 m 下游平台的安全区。三峡升船机的楼层间距  $H_j$  见表 7, 楼梯坡度  $\theta$  为  $30^\circ$ , 梯道平台宽  $S$  取 2.2 m,

由式(11)和式(12)知:

$$t_{3(上行)} = \frac{2(3.5 \times 13 + 3)m}{0.5m/s} + \frac{(2 \times 14 + 1) \times 2.2m}{0.94m/s} = 257.8s$$

$$t_{3(下行)} = \frac{2(3.5 \times 10 + 3.2 + 3.8 + 3.5 + 3.5 + 3)m}{0.64m/s} + \frac{(2 \times 15 + 1) \times 2.2m}{0.94m/s} = 235.1s$$

$$由式(10)知: t_3 \leq \max \{257.8s, 235.1s\} = 257.8s$$



由于  $t_3$  不超过 257.8 s，因此，为确保疏散安全性， $t_3$  取极限值 257.8 s，即疏散时间的第三阶段为 257.8 s。

表 7 三峡升船机楼层分布  
Tab. 7 Floor distribution of the Three Gorges ship lift

| 层号    | 高程/m        | 楼层间距/m |
|-------|-------------|--------|
| 11    | 84.5        | 3      |
| 12    | 87.5        | 3.5    |
| 13    | 91          | 3.5    |
| 14    | 94.5        | 3.8    |
| 15    | 98.3        | 3.2    |
| 16~38 | 101.5~178.5 | 3.5    |
| 39    | 182         | 3      |
| 40    | 185         | 4      |

#### 4.2.4 求解疏散时间

由式(7)知：

当升船机本体发生火灾，乘客的应急疏散时间为：

$$t_{(1)} = t_1 + t_2 + t_3 = 2.5 + 387.3 + 257.8 = 647.6\text{s}$$

当过机船舶发生火灾，乘客的应急疏散时间为：

$$t_{(2)} = t_1 + t_2 + t_3 = 2.5 + 168.8 + 257.8 = 429.1\text{s}$$

#### 4.3 结果分析

(1) 三峡升船机本体火灾、过机船舶火灾应急疏散时间分别为 647.6 s，429.1 s，受疏散通道数量限制，三峡升船机本体发生火灾的疏散时间比客船长 218.5 s，三峡升船机本体火灾危害性比客船大。

(2) 承船厢左侧疏散通道完成疏散时，3 号疏散通道的人流速度大于 2 号疏散通道。

(3) 承船厢两侧疏散通道完成疏散时，3，4 号疏散通道的人流速度大于 1，2 号疏散通道。

### 5 结论

(1) 为确定垂直升船机火灾疏散时间，探究人群疏散规律，考虑了疏散人群特性，依据垂直升船机火灾应急疏散路径，确定疏散时间 3 个阶段，构建火灾应急疏散时间模型，利用仿真技术，建

立载有客船的垂直升船机模型，设置影响疏散时间的参数。

(2) 三峡升船机实例表明：受疏散通道数量限制，垂直升船机本体火灾疏散时间远大于过机客船；承船厢左侧疏散通道完成疏散时，3 号疏散通道的人流速度大于 2 号疏散通道；承船厢两侧疏散通道完成疏散时，3，4 号疏散通道的人流速度大于 1，2 号疏散通道。

(3) 该方法确定了火灾疏散时间，为垂直升船机火灾应急疏散工作提供指导，然而该研究仅考虑影响程度较大的因素，缺乏全面性，加强参数、变量设计，以及经验数据的收集，提高模型的真实性是下一步研究的方向。

#### 参考文献：

- [1] Tom Krebs. Recursive equilibrium in endogenous growth models with incomplete markets[J]. *Economic theory* (S0938-2259), 2006, 29(3): 505-523.
- [2] 陈述, 陈云, 王建平, 等. 三峡升船机贝雷架吊装作业人员风险认知能力研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(1): 22-27.  
Chen Shu, Chen Yun, Wang Jianping, et al. Risk perception ability of crane driver in hoisting bailey truss of Three Gorges ship lift[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(1): 22-27.
- [3] Varas A, Cornejo M D, Mainemer D, et al. Cellular automaton model for evacuation process with obstacles[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications* (S0378-4371), 2007, 382(2): 631-642.
- [4] Society of fire protection engineers. SFPE Handbook of fire protection engineering (2002 Edition)[M]. Quincy, MA: National fire protection association (NFPA), 2003.
- [5] Murakami Y. Multi-agent simulation for crisis management[C]. *IEEE Workshop on Knowledge Media Networking*. IEEE Computer Society, 2002
- [6] 吴健宏, 翁文国, 倪顺江. 基于 GIS 和 Multi-Agent 的城市应急疏散[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(8): 1168-1172.  
Wu Jianhong, Weng Wenguo, Ni Shunjiang. Urban emergency evacuation plans based on GIS and multi-agent systems[J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2010, 50(8): 1168-1172.
- [7] 苗志宏, 李智慧. 火灾环境下人员疏散耦合 SPH 模型及仿真[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(2): 292-300.

- Miao Zhihong, Li Zhihui. Coupling SPH Model for Occupant Evacuation in Fires and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 292-300.
- [8] 刘箴, 黄鹏. 人行桥上突发事件下的人群恐慌行为模型研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1950-1953.
- Liu Zhen, Huang Peng. Study of Panic Behavior Model for Crowd on Pedestrian Bridge in Emergent Event[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(9): 1950-1953.
- [9] 陈淼, 韩瑞峰, 于洋, 等. 基于 Agent 的船舱人员疏散模型研究[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(4): 163-167.
- Chen Miao, Han Ruifeng, Yu Yang, et al. Ship passenger evacuation model based on Agent theory[J]. Computer Engineering & Science, 2013, 35(4): 163-167.
- [10] 汪彤, 淡默. 虚拟现实技术在城市应急救援训练中的应用[J]. 安全科学技术, 2015, 36(1): 11-15.
- Wang Tong, Dan Mo. Application of virtual reality technology in city emergency rescue training[J]. Safety science and technology, 2015, 36(1): 11-15.
- [11] 海上安全委员会. 新客船和现有客船撤离分析暂行指南[S]. 2002.
- Maritime Safety Committee. The evacuation analysis guidelines of new and existing passenger ship[S]. 2002.
- [12] 方昊, 刘箴, 陆涛, 等. 突发事件中人群跟随现象的一种仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(10): 2432-2438.
- Fang Hao, Liu Zhen, Lu Tao, et al. Simulation Model of Crowd Following Phenomenon in Emergencies[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2432-2438.
- [13] 杜宝江, 查亮, 林灵. 消防安全教育虚拟火灾逃生体验舱系统的设计[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(2): 453-461.
- Du Baojiang, Zha Liang, Lin Ling. Key Technology of Fully Immersive Virtual Experience Cabin[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(2): 453-461.
- [14] 黄敏, 钮中铭, 张小兰. 基于 GIS-T 的交通仿真网构建研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(3): 531-536.
- Huang Min, Niu Zhongming, Zhang Xiaolan. Research of the Construction of GIS-T Traffic Simulation Road Network[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 531-536.
- [15] 徐武雄, 初秀民, 陈先桥. 桥区航道交通流仿真中船舶生成方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(8): 1644-1651.
- Xu Wuxiong, Chu Xiumin, Chen Xianqiao. Methods of Generating Vessels for Traffic Flow Simulation of Bridge Areas Waterway[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(8): 1644-1651.
- [16] 杜长宝, 朱国庆, 李俊毅. 疏散模拟软件 STEPS 与 Pathfinder 对比研究[J]. 消防科学与技术, 2015(4): 456-460.
- Du Changbao, Zhu Guoqing, Li Junyi. Comparative study of evacuation simulation software STEPS and Pathfinder[J]. Fire science and technology, 2015, 34(4): 456-460.
- [17] 王建平, 王美如, 陈述, 等. 垂直升船机火灾多米诺效应致因的逆向推理[J]. 消防科学与技术, 2017,36(05):704-708.
- Wang Jianping, Wang Meiru, Chen Shu, et al. Reverse inference on the cause of domino effect in the vertical ship lift fire[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(05):704-708.
- [18] 陈述, 余迪, 郑霞忠, 等. 重大突发事件的协同应急响应应研[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(1): 156-162.
- Chen Shu, Yu Di, Zheng Xiazhong, CHEN Ai-hua. Study on synergistic emergency response to major events[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(1): 156-162.
- [19] 王建平, 聂本武, 张丰宇, 等. 水利水电工程立体交叉作业安全管理执行传递机制设计[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6): 116-122.
- Wang Jianping, Nie Benwu, Zhang Fengyu, et al. Transmission mechanism design for grade cross operations safety management execution in hydraulic and hydroelectric project[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 116-122.
- [20] 中华人民共和国水利部. 升船机设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification for design of ship lift[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2013.
- [21] 王建平, 张丰宇, 聂本武. 目视安全管理在升船机工程施工中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(7): 60-64.
- Wang Jianping, Zhang Fengyu, Nie Benwu. Application of visual safety management in construction of ship lift. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(7): 60-64.
- [22] 杨文博, 宋银灏, 赵新. 空间布局仿真虚拟现实系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(10): 2575-2581.
- Yang Wenbo, Song Yin hao, Zhao Xin. Development of A Virtual Reality System for Space Planning Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2575-2581.