

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.019

垂直升船机初期火灾疏散路径人群流量分配研究*

陈 述^{1,2}, 任亚萍¹, 席 炎³, 王建平¹, 李 智⁴

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌, 443002; 2. 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; 3. 中南建筑设计院股份有限公司, 湖北 武汉, 430071; 4. 中国长江三峡集团公司机电工程局, 湖北 宜昌, 443002)

摘要: 为合理分配垂直各疏散路径的人群流量, 通过分析垂直升船机的结构特征, 确定升船机综合使用电梯与楼梯进行垂直疏散的可行路径, 分别计算从电梯向最近出口疏散、经楼梯向上游平台疏散、经楼梯向下游平台疏散等三条路径上的疏散时间, 取三者较大值作为升船机垂直疏散时间, 并以此时间最小化为目标函数, 运用粒子群算法, 仿真求解使用楼梯比例及向上游平台疏散比例等流量分配系数。结果表明: 停靠高程 $\in [62, 128]$ m时, 楼梯使用比例可适当增大, 使用楼梯向上游疏散比例为0; 停靠高程 $\in (128, 147]$ m时, 楼梯使用比例可进一步增大; 停靠高程 $\in (147, 175]$ m时, 楼梯使用比例可适当减小, 使用楼梯向上游疏散比例为1, 经流量分配后疏散时间被有效缩短。

关键词: 垂直升船机; 仿真模拟; 初期火灾; 流量分配; 火灾疏散

中图分类号: U642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0152-07

Crowd Flow Distribution of Evacuation Path for Vertical Ship Lift on Initial Fire

CHEN Shu^{1,2}, REN Yaping¹, XI Yan³, WANG Jianping¹, LI Zhi⁴

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Hubei Key Laboratory of Hydropower Project Construction & Management (China Three Gorges University),
Yichang 443002, China; 3. Central-South Architectural Design Institute, Wuhan 430071, China;
4. Mechanical and Electrical Department, China Three Gorges Company, Yichang 443133, China)

Abstract: This paper aims to distribute the crowd flow of vertical evacuation paths reasonably. Firstly, the structure and evacuation channel of the vertical ship lift are analyzed to identify the feasible path of vertical evacuation by using elevators and stairs. Subsequently, the evacuation time from elevators to nearest exits, from stairs to upstream platforms, and from stairs to downstream platforms is calculated, respectively, to determine the vertical evacuation time. Finally, the shortest vertical evacuation time is taken as the target to obtain the optimal crowd flow distribution coefficient based on particle swarm optimization (PSO). The results show that when the elevation is between 62 m and 128 m, the proportion of stairs can be increased appropriately, and the proportion of staircases to upstream is 0. When the elevation is between 128 m and 147 m, the proportion of stairs can be further in-

* 收稿日期:2018-11-19;修回日期:2018-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(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)资助

作者简介:陈述(1986—),男,副教授,博士。主要从事应急管理方面的教研工作。E-mail: chenshu@ctgu.edu.cn

通讯作者:席炎(1996—),男,硕士。主要从事水利工程管理。E-mail: 1336842214@qq.com

creased. When the elevation is between 147 m and 175 m, the proportion of stairs can be reduced appropriately, and the proportion of staircases to upstream is 1. In this case, the evacuation time is effectively shortened after flow distribution.

Keywords: vertical ship lift; simulation test; initial fire; optimal evacuation plan; fire evacuation

引言

垂直升船机是利用机械装置沿垂直方向升降船舶的升船机型式,被广泛应用于高坝通航中^[1]。然而,因其高程落差大、结构包络封闭、内部空间狭窄,火灾成为垂直升船机安全运行的最大挑战^[2]。火灾初期是应急疏散关键时期,合理分配各疏散路径上的人群流量直接影响疏散效率^[3]。因此,在火灾初期电梯安全系数较高的情况下,研究各疏散路径上的人群分配,对于保障升船机运行安全具有重要意义。

疏散路径人群分配是减小疏散时间的重要手段,国内外学者开展了诸多研究:V.Bazjanac^[4]为提高高层建筑火灾疏散效率,提出了紧急情况下应考虑电梯疏散的思想;A.Sekizawta等^[5]、M.J.Kinsey等^[6]研究了在高层建筑中使用疏散电梯疏散方案的可行性;Y.C.Ding等^[7]、张鹏等^[8]等建立了包括楼梯疏散和电梯疏散两种方式的高层建筑垂直应急疏散方案仿真模型;袁媛等^[9]、E.Ronchi等^[10]以通过疏散网络中的总疏散时间最短为目标,优化疏散路径选择模型;Z.Y.Han等^[11]、丁雨淋等^[12]根据火灾发展演变态势构建了疏散路线动态调整和优化方法。

以上研究为垂直升船机火灾疏散提供了重要参考,然而相对于一般民用建筑,垂直升船机有电梯与楼梯两种疏散工具,发生火灾高程具有不确定性,且使用楼梯还面临向上下平台疏散的路径选择问题。鉴于此,本文针对垂直升船机结构特征,分析火灾疏散路径,以楼梯使用比例、楼梯向上游疏散比例等路径分配系数为自变量,构建各路径上的疏散时间函数,模拟不同火灾高程下的疏散情景,以垂直疏散时间最短为目标求解最优路径分配系数,以期垂直升船机火灾疏散提供依据。

1 疏散路径人群流量分析

垂直升船机主要由塔柱、承船厢等组成,塔柱支承承船厢,承船厢运载过往船舶沿垂直方向升

降。左右对称布置的塔柱为钢筋混凝土结构,抗火性能好,内部各楼层均有电梯与楼梯入口,可作为升船机应急疏散通道。为了加快疏散速度,垂直升船机一般布置有上下游两个疏散平台出口,上游疏散平台与坝顶相连,下游疏散平台与岸边道路相通,介于大坝上游水位和下游水位之间,如图1所示。

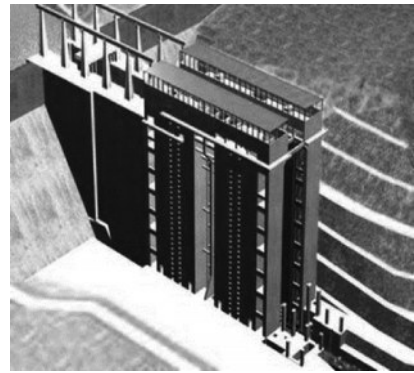


图1 垂直升船机结构

Fig.1 Vertical ship lift structure

火灾初期火焰不高,辐射热不强,烟和气体在塔柱内流动缓慢,疏散人员使用电梯疏散的安全性较高。过往船舶一旦发生火灾,承船厢立即停靠,船舶上的人群首先经承船厢内的可调节扶梯向上进入就近塔柱楼层,再乘疏散电梯向距离最近的疏散平台疏散(路径1),也可以由楼梯向上游(路径2)或下游(路径3)疏散平台疏散,如图2所示。假设 m 个疏散人员,使用楼梯比例 $\alpha \in [0, 1]$,向上游疏散比例 $\beta \in [0, 1]$,则3条疏散路径的人群流量分别为 $m(1-\alpha)$ 、 $m\alpha\beta$ 、 $m\alpha(1-\beta)$ 。

2 疏散时间

2.1 电梯疏散时间

疏散人员使用电梯疏散(路径1)的疏散时间 T_e 包括电梯的行程时间 t_x 和停层时间 t_c :

$$T_e = \sum_{j=1}^k (t_x + t_c) \quad (1)$$

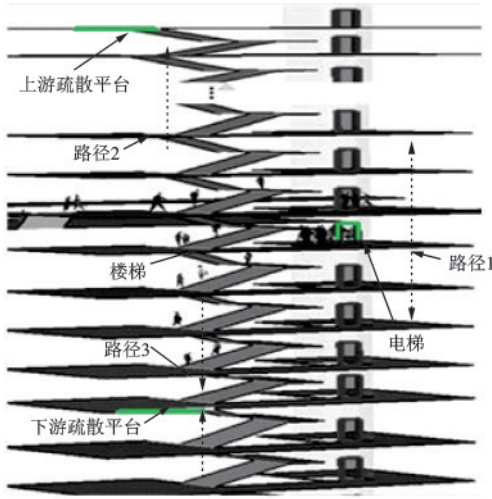


图2 楼梯及电梯疏散

Fig.2 Staircase and elevator evacuation

式中, k 为电梯的运行次数, 与使用电梯的人员数量 $m(1-\alpha)$ 、电梯的最大荷载人数 z 有关:

$$k = \frac{m(1-\alpha)}{z} \quad (2)$$

停层时间 t_c 包括电梯的启闭时间 t_o 、人员进入或离开电梯的时间 t_p :

$$t_c = 2\mu(t_o + t_p) \quad (3)$$

式中, μ 为停层时间损耗系数。

承船厢停靠后, 疏散人员经承船厢内的可调节扶梯, 向上进入就近塔柱内楼层(楼层高程 h), 使用电梯向最近出口疏散, 则电梯的运行路程为:

$$h_e = \min(|h - H_1|, H_2 - h) \quad (4)$$

式中, H_1 为下游疏散出口高程; H_2 为上游疏散出口高程。

电梯疏散运行从启动到停止通常包括加速、匀速和减速三个阶段, 依据电梯运行路程 h_e 将电梯的行程时间 t_e 分为两种情况。

(1) $h_e \leq \frac{V_m^2}{4a}$ 时, 电梯运行只包括加速、减速阶段, 即电梯未达到最大速度 V_m 就减速:

$$t_e = 2\sqrt{\frac{h_e}{a}} \quad (5)$$

(2) $h_e > \frac{V_m^2}{4a}$ 时, 电梯运行经历加速、匀速和减速三个阶段:

$$t_e = \frac{2V_m}{a} + \frac{h_e - \frac{V_m^2}{4a}}{V_m} = \frac{h_e}{V_m} + \frac{V_m}{a} \quad (6)$$

2.2 经楼梯向上疏散时间

人群密度 D 是疏散走道上单位面积人员的水平投影面积, 反映了人群的拥挤程度, 是疏散的基本参数:

$$D = \frac{maf}{wc \sin \theta} \quad (7)$$

式中, f 为人的平均水平横截面积; w 为楼梯的宽度; θ 为楼梯坡度; c 为楼层层高。

人群沿楼梯上行速度是人群密度的函数^[13]:

$$V_1 = 0.564 - 0.0765D \quad (8)$$

在发生火灾情况下, 恐惧致使人群疏散速度增大, 沿楼梯上行疏散速度^[14]为:

$$V_u = \epsilon V_1 \quad (9)$$

式中, ϵ 为应急疏散速度修正系数, $\epsilon = 1.21$ 。

疏散人群使用楼梯向上(路径2或路径3)的疏散时间 T_{su} 与人群流动系数 g 、向上疏散速度 V_u 等有关:

$$T_{su} = \begin{cases} \frac{H_1 - h}{V_u \sin \theta} + \frac{m\alpha(1-\beta)}{g\omega}, & H_1 > h \\ \frac{H_2 - h}{V_u \sin \theta} + \frac{m\alpha\beta}{g\omega}, & H_1 \leq h \end{cases} \quad (10)$$

2.3 经楼梯向下疏散时间

人群沿楼梯向下游疏散平台疏散时的疏散速度为^[13]:

$$V_2 = 0.6502 - 0.0972D \quad (11)$$

火灾情况下人群沿楼梯下行速度为^[14]:

$$V_d = \epsilon V_2 \quad (12)$$

人群沿楼梯向下游(路径3)的疏散时间为:

$$T_{sd} = \frac{h - H_1}{V_d \sin \theta} + \frac{m\alpha(1-\beta)}{k\omega} \quad (13)$$

2.4 疏散流量分配

比较3条疏散路径的疏散时间, 取较大值作为升船机垂直疏散时间:

$$T(\alpha, \beta) = \max(T_1, T_2, T_3) \quad (14)$$

为了能够实现人员高效快速的疏散, 应该确保火灾发生后能在最短时间内将所有待疏散人员安全送出安全出口^[15]。以疏散人群使用楼梯比例 α 及向上游疏散比例 β 为自变量, 计算不同火灾发生高程组合情景下的垂直疏散时间。以垂直疏散时间最短为目标, 确定火灾发生高程 H 下的疏散流量分配系数 (α_i, β_j) :

$$\text{opt}T = \min_{(\alpha, \beta)} T = \min [T_4(0, 0), \dots, T_4(\alpha_i, \beta_j), T_4(1, 1)] \quad i, j \in [1, N] \quad (15)$$

3 疏散仿真流程

粒子群算法是根据生物界中的种群行为而发明的一种算法,其原理简单、优化速度快,是解决优化问题常用的一种算法^[16]。由于垂直升船机应急疏散涉及变量多,流量分配系数计算复杂,运算量大,因此利用改进粒子群算法进行仿真优化求解。

首先初始化升船机停靠高程 H 、人群使用楼梯比例 α_i 及向上游疏散比例 β_j 等参数,然后比较各路径的疏散时间,确定垂直疏散时间;将此时 α_i, β_j 下的疏散时间看成局部最优,并与其它比例下的疏散时间信息与对比交换,不断迭代从而达到全局最优;确定在高程 H 下的最短疏散时间 $\min_{(\alpha, \beta)} T$ 、疏散流量分配系数 (α_i, β_j) ,仿真流程如图3所示。

步骤一:设置升船机下游、上游疏散平台高程

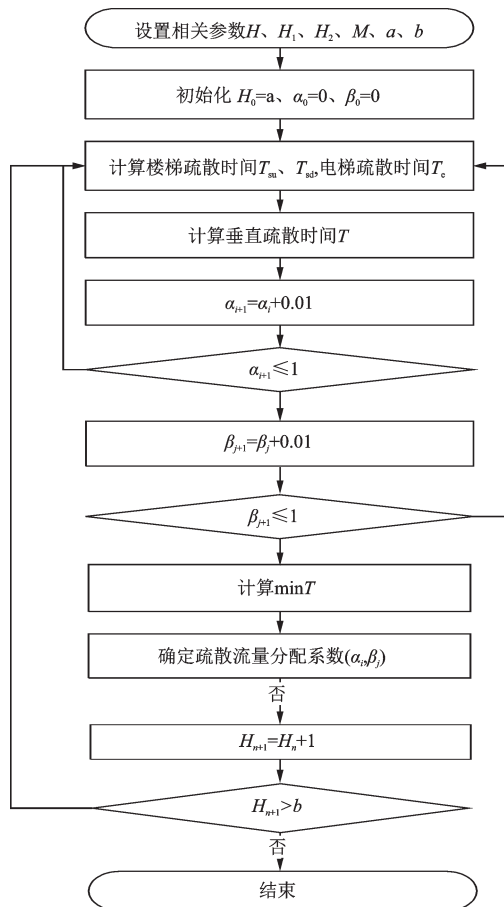


图3 疏散仿真流程

Fig.3 Evacuation simulation process

H_1, H_2 , 升船机下游通航水位 a , 上游水位 b , 停靠高程 H , 疏散人数 M , 楼梯使用比例 α_i , 上游平台疏散比例 $\beta_j, H \in [a, b], a < H_1 < b < H_2$ 。

步骤二:初始化停靠高程 $H_0 = a$, 楼梯使用比例 $\alpha_0 = 0$, 上游疏散比例 $\beta_0 = 0$ 。

步骤三:计算三条疏散路径上楼梯向上疏散时间 T_{su} 、楼梯向下的时间 T_{sd} 、电梯疏散时间 T_e 。

步骤四:比较三条疏散路径的疏散时间,计算垂直疏散时间 $T(\alpha, \beta)$ 。

步骤五:更新楼梯使用比例 $\alpha_{i+1} = \alpha_i + 0.01$, 若 $\alpha_{i+1} \leq 1$ 则重复步骤三至五, 若 $\alpha_{i+1} > 1$ 则转至步骤六。

步骤六: $\beta_{j+1} = \beta_j + 0.01$, 若 $\beta_{j+1} \leq 1$ 则重复步骤三至六, 若 $\beta_{j+1} > 1$ 则转至步骤七。

步骤七:计算停靠高程 H_0 条件下的最短垂直疏散时间 $\min_{(\alpha, \beta)} T^{H_0}$ 。

步骤八:输出疏散流量分配系数 (α_i, β_j) 。

步骤九: $H_{n+1} = H_n + 1$, 若 $H_{n+1} \leq b$ 则重复步骤三至九, 若 $H_{n+1} > b$ 则仿真终止。

4 仿真模拟

4.1 工程概况

某垂直升船机上、下游疏散平台高程分别为84 m和185 m, 通航水位为62~175 m; 升船机内部共有4个结构塔柱, 各塔柱内设有1个安全疏散楼梯与1个电梯; 电梯运行速度为2.5 m/s, 荷载人数为19人, 楼梯宽度为250 cm; 过坝船型极限载容量900人, 假设疏散人群均匀进入4个塔柱疏散。

4.2 疏散时间计算

4.2.1 电梯疏散时间

电梯单次运行尽量满载, 疏散人员使用电梯经路径1疏散时, 电梯的疏散时间在不同楼梯使用比例下与停靠高程的关系如图4所示。同一楼梯使用比例下, 电梯疏散时间 T_e 在135 m处最大, 在84 m下游疏散平台处最小。并且在同一高程下, 电梯疏散时间 T_e 随楼梯使用比例增大而减小, 表明当疏散人员距下游疏散平台和上游疏散平台越远, 电梯使用次数越多, 电梯疏散时间越长。

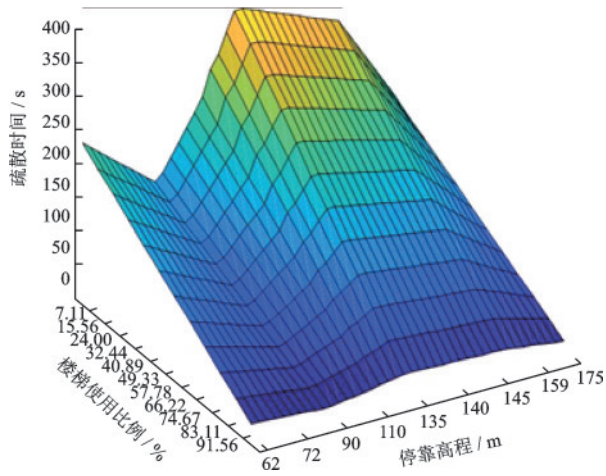


图4 电梯疏散时间

Fig.4 Elevator evacuation time

4.2.2 经楼梯向上疏散时间

当停靠高程在下游疏散平台以下时,疏散人员经楼梯向上通过下游疏散平台疏散(路径3);当停靠高程在上、下游疏散平台之间时,疏散人员向上通过上游疏散平台疏散(路径2),如图5所示。停靠高程 $\in [62, 84]$ m时,在同一楼梯使用比例下,疏散时间随停靠高程的增大而减小;在停靠高程固定条件下,楼梯使用比例越小,疏散时间越短,在84 m下游疏散平台处, T_{su} 达到最小;停靠高程 $\in (84, 128]$ m时,疏散人员经楼梯向下通过下游疏散平台疏散;停靠高程 $\in (128, 175]$ m时,相同楼梯疏散比例条件下,疏散时间随着停靠高程的增大而减小。由此说明当疏散人员距疏散平台越近、楼梯使用比例越小,楼梯疏散时间越小,和实际情况相符。

有且仅有路径2、路径3疏散时间相等时,垂直

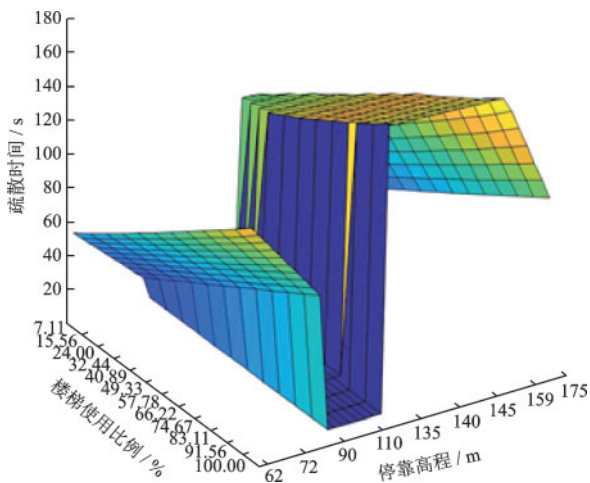


图5 经楼梯向上疏散时间

Fig.5 Evacuation time up the stairs

疏散时间最短,由此可得在最优疏散条件下使用楼梯向上游疏散平台疏散的比例 β 随停靠高程和楼梯使用比例变化如图6所示。当停靠高程 $\in [84, 128)$ m时,疏散人员可直接经下游疏散平台疏散。当停靠高程 $\in [128, 147)$ m时,在同一楼梯使用比例条件下, β 随停靠高程的增加而增大;在同一停靠高程下, β 随楼梯使用比例的增大而增大。当停靠高程 $\in [147, 175]$ m时, $\beta = 1$ 。

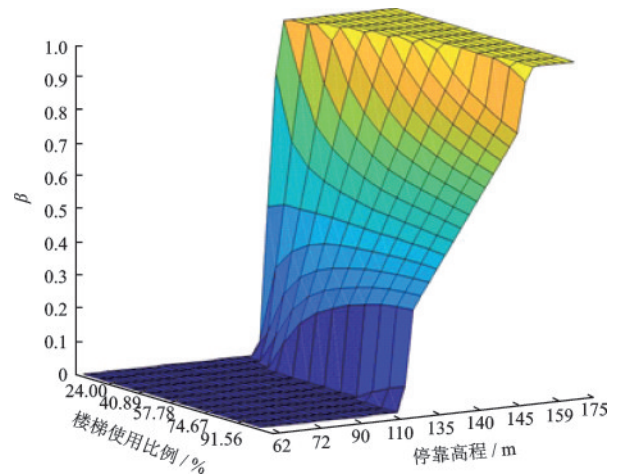


图6 使用楼梯向上游平台疏散比例

Fig.6 Proportion of staircases to upstream

4.2.3 经楼梯向下疏散时间

在上、下游疏散平台之间,疏散人员使用楼梯向下由下游疏散平台疏散(路径3),如图7所示。当高程 $\in [84, 128)$ m时,相同楼梯使用比例下的楼梯向上疏散时间随停靠高程的增大而增大,当停靠高程 $\in [128, 147)$ m时,楼梯使用比例固定,楼梯向上

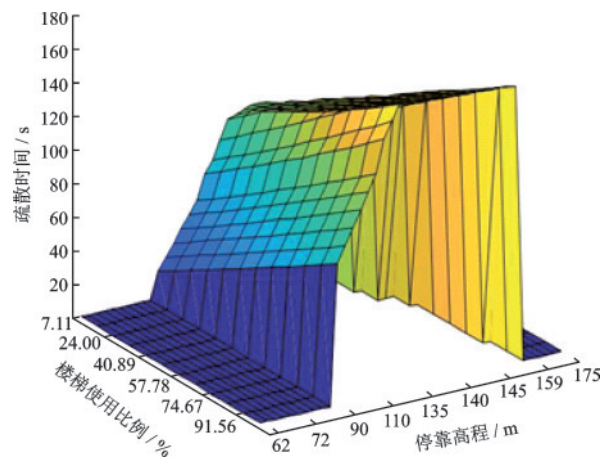


图7 经楼梯向下疏散时间

Fig.7 Evacuation time down the stairs

疏散时间随停靠高程的增大缓慢减小,并且停靠高程固定条件下楼梯使用比例越小、疏散时间越短。说明随着停靠高程与下游疏散平台距离逐渐增大,可以安排疏散人员同时向上或向下疏散,由此疏散时间减小。

4.2.4 疏散流量分配

垂直疏散时间随停靠高程、楼梯使用比例变化关系曲线如图8所示。楼梯使用比例固定,垂直疏散时间随停靠高程的增加呈先减小再增大再减小的变化规律;停靠高程固定,垂直疏散时间随楼梯使用比例的增大呈现先减小再增大的趋势;停靠高程 $\in [62, 72]$ m时,适当调整楼梯使用比例可以使垂直疏散时间最短;停靠高程 $\in (72, 110]$ m,与下游疏散平台距离减小,楼梯使用比例可进一步增大;停靠高程 $\in (110, 128]$ m,与下游疏散平台距离逐渐增大,楼梯使用比例相对减小;停靠高程 $\in (128, 139]$ m,此时疏散人群可同时向上、下游疏散平台疏散,楼梯使用比例相对增大;停靠高程 $\in (139, 147]$ m疏散人群仍可同时向上、下游疏散平台疏散,但与下游疏散平台距离进一步增大,楼梯使用比例相对减小;停靠高程 $\in (159, 175]$ m,疏散人员距上游疏散平台距离减小,但人群只由上游平台疏散,楼梯使用比例相对不变。

在楼梯使用比例 α 最优的条件下,随高程的增加,使用经楼梯向上游平台疏散的比例 β 变化如图9所示。

结合图8、图9,可得出不同停靠高程下的最优疏散路径流量分配见表1。

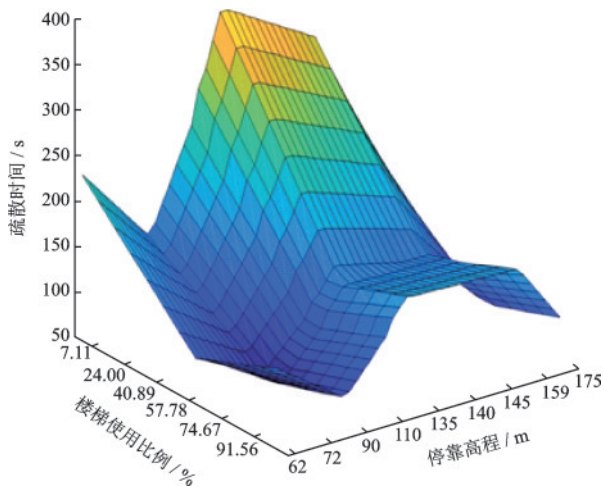


图8 垂直疏散时间

Fig.8 Vertical evacuation time

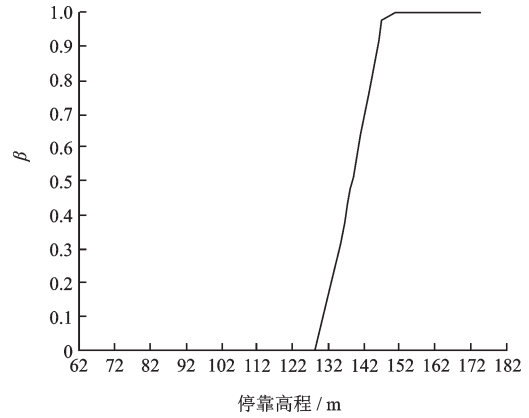


图9 流量分配系数

Fig.9 Flow distribution coefficient

表1 最优疏散路径流量分配

Table 1 Optimal evacuation route flow distribution

停靠高程/m	路径选择	流量分配	
		$\alpha/\%$	β
[62,72]	路径1	57.78	0
	路径3		
(72,110]	路径1	66.22	0
	路径3		
(110,128]	路径1	57.78	0
	路径3		
(128,139]	路径1	66.22	图9
	路径2		
	路径3		
(139,147]	路径1	57.78	图9
	路径2		
	路径3		
(159,175]	路径1	57.78	1
	路径2		

5 结论

(1)通过分析垂直升船机疏散路径,比较计算电梯疏散时间、经楼梯向上、向下疏散时间,确定垂直疏散时间最短下的流量分配系数,并运用改进粒子群算法进行仿真模拟求解,可为垂直升船机初期火灾的应急疏散提供指导,提高疏散效率。

(2)案例结果表明:在高程为 $[62, 128]$ m时,所有疏散人员经路径1或路径3由下游疏散平台疏散,经楼梯向上游平台疏散比例为0,并且距下游疏散平台越近,楼梯使用比例越大;在高程为 $(128, 147]$ m时,疏散人员可同时经三条路径经上、下游疏散平台疏散,并且距疏散平台越远,楼梯使用比

例越小;在高程为(147,175] m时,所有疏散人员路径1或路径2由上游疏散平台疏散,经楼梯向上游平台疏散比例为1。

(3)疏散场景模型及结果从理论上说明了垂直升船机疏散人群流量分配提高疏散效率的可行性和优越性。本文对此仅做了初步探讨,楼梯和电梯作为垂直升船机的主要疏散工具,对其协同垂直疏散的影响参数分析还需做进一步的研究。

参考文献:

[1] Cheng X, Shi D, Li H, et al. Stability and parameters influence study of fully balanced hoist vertical ship lift [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2018, 66(5):583-594.

[2] 陈述,申浩播,王越,等.垂直升船机初期火灾应急疏散策略研究[J].中国安全科学学报,2018,28(2):187-192.
Chen Sh, Shen H B, Wang Y, et al. Strategy for emergency evacuation from vertical ship lift on initial fire[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2):187-192. (in Chinese)

[3] Ronchi E, Nilsson D. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behavior and modelling research[J]. Fire Science Reviews, 2013, 2(1):7.

[4] Bazjanac V. Simulation of elevator performance in high-rise buildings under conditions of emergency[J]. Human Response to Tall Buildings, 1977, 31(3):316-328.

[5] Sekizawa A, Ebihara M, Nakahama S, et al. Feasibility study of use of elevators in fire evacuation in a high-rise building[J]. Fire Safety Science, 2004, 6: 4a-5a.

[6] Kinsey M J, Galea E R, Lawrence P J. Stairs or lifts? - a study of human factors associated with lift/elevator usage during evacuations using an online survey[M]. Berlin: Pedestrian and Evacuation Dynamics Springer, 2011:627-636.

[7] Ding Y C, Weng F L. A comparative study of evacuation strategies for high-rise building via combination of stair and elevator based on computer simulation[J]. International Journal of Emergency Management, 2016, 12(1):41-54.

[8] 张鹏,朱昌明,杨广全.高层建筑垂直应急疏散系统的仿真研究[J].系统仿真学报,2005,17(5):1226-1229.
Zhang P, Zhu Ch M, Yang G Q. Simulation research on vertical emergency evacuation system in high-rise buildings[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5):1226-1229. (in Chinese)

[9] 袁媛,汪定伟.灾害扩散实时影响下的应急疏散路径选择模型[J].系统仿真学报,2008,20(6):1563-1566.
Yuan Y, Wang D W. Route selection model in emergency evacuation under real time effect of disaster extension [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6):1563-1566. (in Chinese)

[10] Ronchi E, Nilsson D. Modelling total evacuation strategies for high-rise buildings [J]. Building Simulation, 2014, 7(1):73-87.

[11] Han Z Y, Weng W G, Zhao Q L, et al. Investigation on an integrated evacuation route planning method based on real-time data acquisition for high-rise building fire[J]. Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2):782-795.

[12] 丁雨淋,何小波,朱庆,等.实时威胁态势感知的室内火灾疏散路径动态优化方法[J].测绘学报,2016,45(12):1464-1475.
Ding Y L, He X B, Zhu Q, et al. A dynamic optimization method of indoor fire evacuation route based on real-time situation awareness[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(12):1464-1475. (in Chinese)

[13] Fruin J J. Pedestrian planning and design[M]. New York: Metropolitan Association of Urban Designer and Environmental Planners, 1971.

[14] Predtechenskii V M, Milinskii A I. Planning for foot traffic flow in buildings [M]. New Delhi: Amerind Publishing Company, Inc., 1978.

[15] 任文,赵金城,华莹.火灾下建筑结构抗火性能和人员疏散研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):168-177.
Ren W, Zhao J Ch, Hua Y. Study of fire resistance of building structures and evacuation under fire[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1):168-177. (in Chinese)

[16] 张利彪,周春光,马铭,等.基于粒子群算法求解多目标优化问题[J].计算机研究与发展,2004,41(7):1286-1291.
Zhang L B, Zhou Ch G, Ma M, et al. Solutions of multi-objective optimization problems based on particle swarm optimization [J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(7):1286-1291. (in Chinese)

[17] Han H G, Lu W, Hou Y, et al. An adaptive-PSO-based self-organizing rbf neural network [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(1):104-117.

(本文责编:池营营)