

谭帅玉,叶青. 高层办公建筑楼梯与电梯协同疏散策略[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(3):9-18. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.002

TAN S Y, YE Q. Cooperative Evacuation Strategy of Stairs and Elevators in High-Rise Office Buildings [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(3):9-18. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.002

高层办公建筑楼梯与电梯协同疏散策略

谭帅玉,叶青*

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:针对高层办公建筑楼梯疏散效率较低的问题,利用人员疏散模拟软件 Pathfinder 进行仿真模拟,研究分析了楼梯与可疏散电梯的协同关系、疏散时间、电梯承载量等指标,探究优化电梯停靠方式的可行性.首先,对楼梯与电梯单一途径疏散及影响因素进行了研究;然后,提出协同疏散策略,优化电梯疏散模式,研究电梯承载量对疏散效率的影响.结果表明:顶层优先疏散策略中存在电梯最佳分离层使得协同疏散的效率最高;优化电梯的停靠方式能扩大电梯可疏散的建筑层数范围;集中疏散策略中电梯最佳直达层随建筑高度的增加呈阶梯式上升趋势且越来越远离顶层;随着电梯最大承载量的逐渐增加,电梯最佳直达层呈阶梯式的下降趋势.

关键词:高层办公建筑;协同疏散;楼梯;电梯承载量;电梯停靠方式

中图分类号:X913 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)03-0009-10

Cooperative Evacuation Strategies for Stairs and Elevators in High-rise Office Buildings

TAN Shuaiyu, YE Qing

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In view of the low evacuation efficiency of stairs in high-rise office buildings, the simulation software Pathfinder is used to study and analyze the synergistic relationship between stairs and evacuation elevators, evacuation time, elevator carrying capacity and other indicators, and explore the feasibility of optimizing the way of elevator parking. First of all, the single way evacuation of stairs and elevators and its influencing factors are studied. Then, the cooperative evacuation strategy is proposed to optimize the elevator evacuation mode, and the influence of elevator carrying capacity on evacuation efficiency is studied. Results show that the optimal separation layer exists in the top priority evacuation strategy, which results in the highest efficiency of coordinated evacuation. Optimizing the parking way of elevator can enlarge the range of building floors that can be evacuated by elevator. In the centralized evacuation strategy, the optimal direct floor of elevator rises with the increase of building height and is further away from the top floor. With the gradual increase of the maximum carrying capacity of the elevator, the best direct floor of the elevator presents a stepped downward trend.

Keywords: high-rise office building; collaborative evacuation; stair; elevator capacity; elevator parking mode

近年来,中国的城镇化建设出现新局面,城镇人口持续稳步增长,据统计,2020年末城镇人口比重达

63.89%^[1],土地资源日趋紧张的同时,各类建筑沿高层化建设的趋势日益明显.高层建筑在有效缓解土地资源利用问题的同时,对其内部人员的疏散带来了极大的挑战.2018年,美国有线电视新闻网(CNN)纽约市办公所在地时代华纳大楼突然受到炸弹威胁,全部人员花费近2h才完成紧急疏散.2021年,深圳市福田区地标性建筑赛格广场大楼发生有感振动,所有人员从建筑内疏散完毕花费近1.5h.因此,对高层办公建筑探索有效的人员紧急疏散策略具有重要的现实意义.

高层建筑使用单一楼梯疏散,存在疏散效率较低、易发生踩踏等危险行为的局限性,而电梯疏散方式在安全技术水准日渐提高的同时,对处于高楼层人员的疏散显得更为及时与有效.国内外学者针对紧急状况下高层建筑使用电梯疏散的可行性进行了研究,主要集中在实验和计算机模拟仿真的研究上.实验研究主要基于对真实案例或疏散演练的统计数据进行研究.20世纪70年代BAZJANAC^[2]揭示了在紧急状况下高层建筑内电梯疏散的作用以及对整体疏散时间的影响;PAULS^[3]通过统计大量办公楼内人员的疏散演习数据,提出楼梯“有效宽度”的概念;KLOTE^[4]探讨了电梯用于人员竖直疏散时疏散时间的计算;PROULX^[5]分析了电梯用于紧急疏散的优先策略问题;SEKIZAWA等^[6]通过问卷调查和电话访谈的方式对广岛市高层建筑疏散中幸存者进行研究,首次发现疏散延迟现象,并发现人员居住楼层数将影响其逃生时的路线选择行为;MELINEK等^[7]通过大量的疏散演习实验统计人员疏散时间和速度.在我国,宋卫国等^[8]对高层建筑内人员疏散特性开展了大量的疏散演习系列研究;杨立中等^[9]也基于众多的疏散演习对多障碍房间和楼梯的群体疏散特性开展了广泛的研究;阎卫东^[10]通过问卷调查和疏散演习的方式对疏散时建筑物内人员的行为规律进行研究,分析影响人员疏散行为和时间的各类因素.

20世纪80年代,随着计算机科学水平的提高,通过计算机模拟的仿真研究日益增加,建立合理有效的疏散行为模型成为研究的重点.FANG等^[11-12]基于Pathfinder建立了不同楼层结构下的人员疏散仿真模型,发现不同楼层结构的疏散仿真模型具有相同的疏散时间及效率变化趋势;曹奇等^[13]通过人员疏散速度的实验与数值模拟研究,发现电梯疏散人数占总体疏散人数的40%时,疏散总时间最短;朱孔金^[14]基于对楼梯与电梯的数学计算,发现利用电梯疏散的最佳人员比例随楼层高度的增加而逐渐减小;丁元春^[15]通过数值仿真与数学建模相互印证,发现选择适当比例的人员采用电梯疏散达到更短疏散时间非常重要;廖瑶剑^[16]对电梯辅助人员疏散建模并进行理论和模拟实验分析,高层建筑的电梯疏散时间可以表达为一个模拟经验公式;郭晓明等^[17]通过对疏散过程进行数学建模,发现电梯最优停靠层不受疏散人数的影响,随电梯最大承载量和电梯平均运行速度呈阶梯式下降;张鸿武^[18]基于Pathfinder对上海中心大厦进行模拟发现,优化后的电梯辅助疏散,将疏散时间缩短了34.5%,明显提升了疏散效率;杨海明等^[19]运用Building EXODUS模拟发现,任何层数的高层建筑都存在一个或数个最佳分离楼层使得楼梯电梯耦合疏散的效率最高;宋英华等^[20]运用Pathfinder建立模型,发现电梯最佳停靠层随楼层总数的增加,呈现“平台阶变”的特征和线性增加的趋势;俞苗^[21]采用STEPS软件发现电梯辅助疏散时间与建筑整体疏散时间两者之间存在一个合适的人员分配比例.

综上所述,目前的研究从微观上考虑了疏散人员的特征和差异以及环境对个体生理、心理的影响,从宏观上研究了楼梯、电梯以及两者协同疏散时人员分配比例等因素对疏散效率的影响,但对楼梯与电梯协同疏散的策略与电梯停靠方式还缺乏一定的研究.针对上述研究的不足,在保障电梯安全技术措施的前提下,基于Pathfinder软件建立高层建筑楼梯与电梯的协同疏散模型,在探讨人员数量、建筑高度与疏散时间、电梯最佳分离层、电梯最佳直达层三者关系的基础上,模拟不同疏散策略的效果,对顶层优先疏散策略中电梯的停靠方式进行优化研究,从而探究进一步重构协同关系以及优化改进的可能性.

1 建立疏散模型

1.1 建筑结构建模及尺寸

选取某高层办公建筑进行研究,模型建立共有21层,近13 000 m²,首层为安全出口对外疏散层,层高

5.4 m, 2层及以上为标准层, 即除首层外, 其余 20 层结构相同, 且层高均为 3.8 m, 通过平台承接上下楼梯进行层连。该高层办公建筑模型首层和标准层的结构平面如图 1 所示。首层共设有 3 个安全出口, 首层平面图下侧的出口宽度为 4 m, 左右两侧有 2 个各为 2 m 宽的安全出口; 标准层长 36 m, 宽 18 m, 宽度为 4 m 的横直走廊两侧设置有 6 个空间布局中心对称的办公室, 其中 2 个大型办公室长 10 m、宽 7 m, 4 个小型办公室长 8 m、宽 7 m, 办公室与走廊连接的门出口宽度为 1 m。

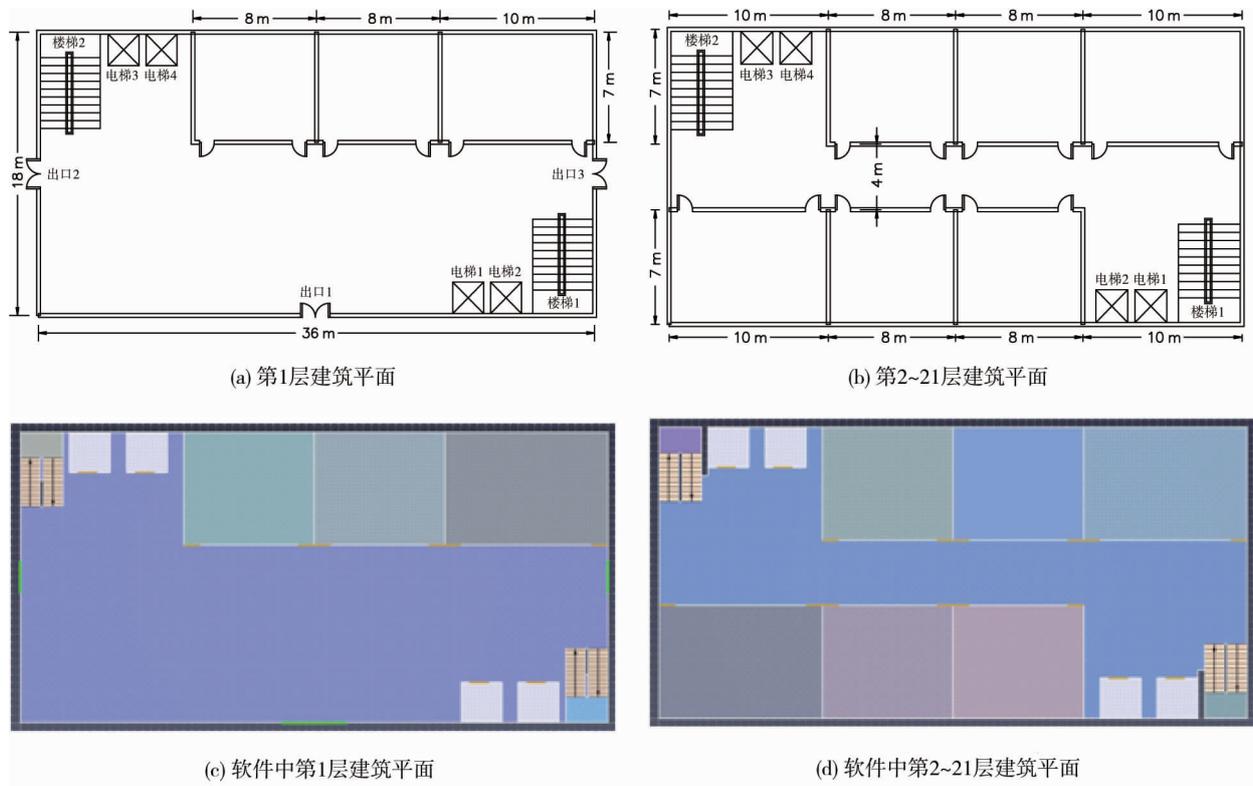


图 1 某高层办公建筑结构平面

1.2 可疏散楼梯

大楼内部左上和右下对角共设置有 2 部楼梯。楼梯的结构及部分参数见图 2。

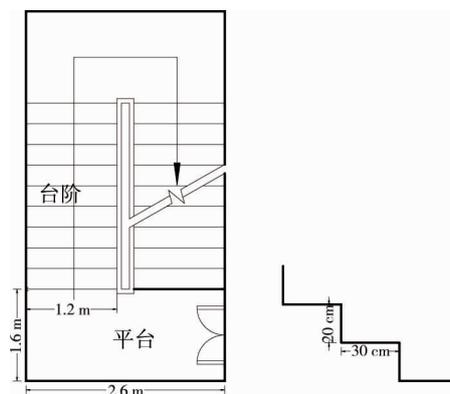


图 2 楼梯结构及部分参数

楼梯疏散时假定人群为连续的行人流, 疏散时间包括走楼梯的运动时间和在楼梯出口处的通行时间两部分。由于楼梯的通行能力是一定的, 当需要疏散的人员数量达到楼梯可正常流动疏散的极限时, 人员无法进入楼梯, 只能在本楼层楼梯入口处等待。

此时, 分 2 种情况考虑, 若第 $(i - 1)$ 层的人员疏散完毕, 则第 i 层人员的疏散时间仅受疏散距离影响, 此时楼梯最大疏散时间等于顶层人员的疏散时间; 若第 $(i - 1)$ 层的人员未疏散完毕, 则第 i 层人员需

要在本层楼梯入口处排队等待,疏散时间同时受到疏散距离和出口疏散效率的影响,此时最大疏散时间为第一层人员疏散至安全出口的时间加上所有人员的出口通行时间.因此,楼梯疏散时间的控制方程如式(1)所示^[14].

$$T_{\text{stairs}} = \begin{cases} \frac{F\left(\frac{h}{\sin \alpha}\right)}{v} + \frac{N}{qd}, \frac{h}{v \sin \alpha} > \frac{N}{qd}; \\ \frac{h}{v \sin \alpha} + \frac{\sum_i^F N_i}{qd}, \frac{h}{v \sin \alpha} \leq \frac{N}{qd}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为建筑层数; h 为建筑层数高度; α 为楼梯坡度; v 为楼梯上人群的平均运动速度; N 为待疏散人数; q 为楼梯出口处单位时间单位宽度的人流量; d 为楼梯有效宽度.

1.3 可疏散电梯

大楼内部左上和右下临近楼梯处共设置 4 部电梯.假设电梯在满足安全运行条件下进行人员的疏散.电梯的具体参数见表 1.其中电梯开门状态持续时间指的是电梯门在疏散层保持打开状态的最短时间,电梯开关门延迟时间指的是在疏散层的最后一名人员进入电梯后的关门延迟时间.人员出入电梯所需时间虽然对整个疏散时间具有较大的影响,但本文从电梯开门时间中已经考虑到,人员出入电梯所需时间对整体的规律变化几乎无影响.

表 1 某高层建筑电梯属性参数

参数	参考值
最大承载量/人	19.00
运动加速度/(m/s^2)	± 1.20
最大运行速度/(m/s)	3.00
开门状态持续时间/s	10.00
开关门延迟时间/s	5.00

采用电梯疏散时假定人员有秩序的在电梯口等待.考虑一次完整的电梯运输过程:电梯从地面层释放上升至疏散层,打开电梯门,人员进入电梯,电梯门关闭,电梯下降至地面层,电梯门打开,人员离开电梯,电梯门关闭.电梯上升过程和下降过程对称相同.电梯从静止开始,经匀加速运动、变加速运动、匀速运动、变减速运动和匀减速运动,且匀加速和匀减速运动阶段耗时相同.电梯疏散在过程中需要考虑是否被充分利用的问题.

当所有电梯组恰好被充分利用时,即 $N/(nP)\% \leq P$, $\%$ 为取余数,电梯疏散时间的控制方程如式(2)所示^[14].

$$T_{\text{elevator}} = \sum_{i=1}^m T_i = \sum_{i=1}^m \left(\left[\frac{N}{nP} \right] \left(\frac{2(V_m^2 - V_1^2)}{V_1 a} + \frac{4V_1}{a} + \frac{2L_i - 4s_2}{V_m} + 2\tau \right) \right). \quad (2)$$

而当电梯未能充分利用时,则电梯疏散时间为式(3)和(4)所示^[14].

$$T_{\text{elevator}} = \max \left\{ \begin{aligned} & \left(\left[\frac{N}{nP} \right] - 1 \right) \left(+ \frac{2L_m}{V_m} \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \left[\left(\frac{N}{(n-1)P} - 1 \right) \left(+ \frac{2L_i}{V_m} \right) \right]; \\ & \left(\left[\frac{N}{nP} \right] - 1 \right) + \left[\frac{N\%(nP)}{P} \right] \left(+ \frac{2L_m}{V_m} \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \left[\left(\frac{N\%(nP-P)}{P} \right) \left(+ \frac{2L_i}{V_m} \right) \right]. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\xi = \frac{2(V_m^2 - V_1^2)}{V_1 a} + \frac{4V_1}{a} + 2\tau - \frac{4s_2}{V_m}. \quad (4)$$

式中: N 为待疏散人数; n 为建筑内可用电梯数; P 为电梯最大承载量; $[N/P]$ 表示取不小于数值 N/P 的最小整数; V_m 为电梯最大运行速度; V_1 为电梯匀加速运动阶段的最大速度; a 为电梯匀加速运动的加

速度; L_i 为地面层与第 i 层待疏散人员的竖直距离; s_2 为变加速运动阶段电梯的位移; τ 为人员进入(离开)电梯所需时间。

1.4 疏散人员属性

由于选取的某建筑主要用途为办公,因此,在不考虑老人和小孩的情况下,对所有人员进行一种设定,办公室内每 3 m^2 1 人,大厅走廊中每 10 m^2 1 人,且成年男女比例为 1:1,男性年龄和女性年龄在 $[20, 60]$ 内均匀分布。因此,第 1 层人数为 100,第 2 层~第 21 层的标准层中每层人数为 136,该高层办公大楼中总的疏散人数为 2 820。

调查显示,男性疏散的行走速度应比女性疏散快 10%,行走速度随着年龄的增加有所衰减,因此,可以设定衰减为前一年龄段的 90%,并且暂不考虑由于疏散时间过长等外部环境以及人员心理因素对人员在疏散状态下行走速度的影响^[22]。人员的具体属性见表 2。

表 2 人员物理属性值

性别	年龄区间/岁	占比/%	速度/(m/s)	肩宽/m
男	20~30	12.5	1.350	0.52
女	20~30	12.5	1.215	0.46
男	30~40	12.5	1.220	0.52
女	30~40	12.5	1.100	0.46
男	40~50	12.5	1.100	0.52
女	40~50	12.5	1.000	0.46
男	50~60	12.5	1.000	0.52
女	50~60	12.5	0.900	0.46

1.5 模拟疏散策略

高层建筑楼梯与电梯疏散时的效率与自身的固有属性密切相关,如楼梯宽度、电梯加速度等,但同时也会受到建筑高度和人员数量两者各自的影响。为探究这两者各自对不同疏散策略疏散时间的影响趋势,可选择人员数量分别为 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 人共 10 种不同人员密度均匀分布的场景进行模拟疏散,另外,可设定建筑层数分别为 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 层共 10 种不同建筑高度的场景进行模拟疏散。

本文提出 3 种不同的疏散策略,分别探究人员数量和建筑高度在不同疏散策略下对总疏散时间等参数的影响。

策略 1: 楼梯或电梯作为单一途径疏散。除首层人员直接通过对外疏散出口离开建筑外,其余各层人员仅使用楼梯或仅使用可疏散电梯进行疏散。电梯在确认可安全运行后从首层出发,优先停靠在人员所在最顶层进行疏散,电梯满载或确认该层全部人员进入电梯后直达首层,中间层均不停靠,所停靠楼层全部人员疏散完毕后,继续选择下一楼层进行疏散,自上而下地选择停靠楼层直至建筑内所有人员疏散完毕。

策略 2: 顶层优先疏散策略。将高层建筑的某一楼层作为电梯分离楼层,该楼层及以上楼层中的人员全部选择在本楼层等待电梯进行疏散,分离楼层以下人员则只使用楼梯进行疏散。4 部电梯允许在首层和分离层及以上楼层停靠,且优先停靠在顶层进行人员疏散,当顶层所在人员疏散完毕后,电梯自上而下选择停靠下一楼层进行疏散,直至停靠在分离层并疏散完最后一批人员后最终停靠在首层为止。因此,顶层优先疏散策略中存在一个电梯最佳分离层,使得电梯疏散时间与楼梯疏散时间两者尽可能地相差小,此时,总的疏散时间最短。

策略 3: 直达层集中疏散策略。将高层建筑的某一楼层设置为电梯直达楼层,即电梯只允许在首层和直达层停靠并向首层运送人员,在疏散开始前,4 部电梯均停靠在首层。电梯直达层及以上楼层的所有人员通过所在层的楼梯疏散到直达层的电梯处,4 部电梯持续的以满载的状态向首层运送人员;直达层以下的所有人员均选择楼梯向下疏散。因此存在一个电梯最佳直达层,在楼梯疏散和电梯疏散两者的时间差距不

大的情况下,使得总疏散时间最短.

2 高层建筑楼梯与电梯疏散模拟结果与分析

2.1 楼梯或电梯作为单一途径疏散

图3为疏散时间分别随每层人数、总建筑层数增加的变化曲线.在仅使用楼梯进行疏散的模拟中,建筑内人员通过楼梯进行疏散的时间与每层人数、总建筑层数大致呈线性增长趋势,这说明楼梯的疏散效率与自身的物理属性有关,其疏散效率是恒定的.

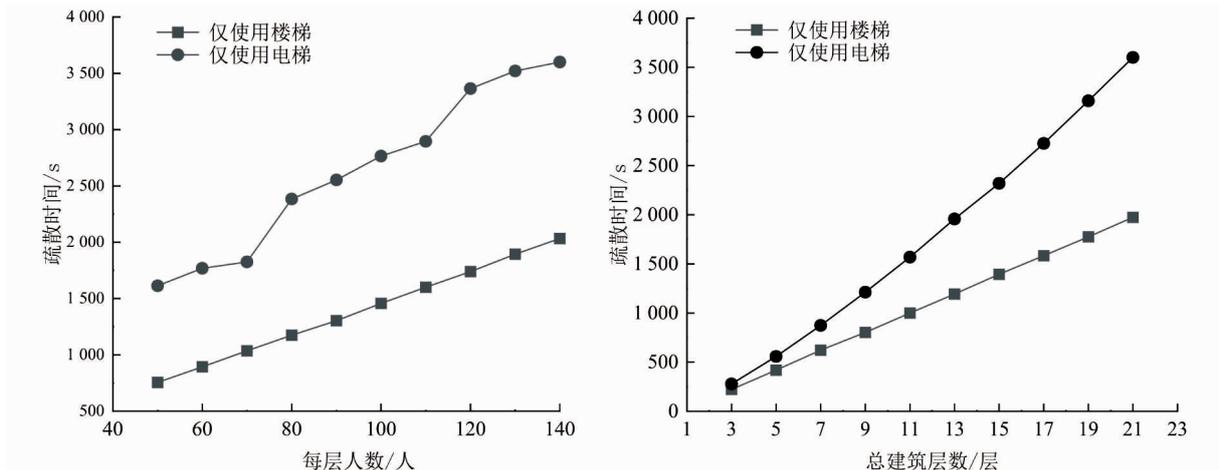


图3 疏散时间随每层人数、总建筑层数的变化

在仅使用电梯进行疏散的模拟中,图3表明随着每层人数逐渐增加,电梯疏散时间呈线性分段式的增加趋势.疏散时间分段变化的原因在于电梯停靠次数的增加.每层人数由70人增加至80人、110人增加至120人时疏散时间均出现陡增,这是因为4部电梯若停靠一次在满载情况下仅可以疏散76人,剩余人员必然增加其中至少一部电梯每层的往返次数,因此最终的疏散时间呈非线性分段变化趋势.另外,图3表明随着总建筑层数的增加,电梯疏散时间呈指数变化趋势,且逐渐拉大与单一楼梯疏散时间的差距.这是因为随着建筑高度的增加,疏散的人员载荷增大的同时,电梯往返次数与电梯往返路程的增加会导致疏散时间的增加,并且建筑层数越多,电梯往返运行的时间也会大大增加.同时可以看出,楼梯对低楼层人员的疏散具有较好的效果,电梯则对高楼层人员的疏散相对更加及时有效.

2.2 顶层优先疏散策略

图4中左图表明随着每层人数的等比例增加,最佳分离层呈现波动性平稳变化,协同疏散时间平稳线性增加.当每层人数从70人增加到80人、从100人增加至110人这2个状况时,电梯最佳分离层从16层上升为17层.电梯最佳分离层的这种变化可以分为2种情况进行分析:第一,4部电梯停靠一次仅可以疏散76人,当每层人数为80人时,剩余未疏散人员必然会增加电梯的往返次数,从而增加电梯疏散时间;第二,电梯最佳分离层的上升一方面会导致电梯疏散总人数的减少,电梯往返次数也会随之减少,但另一方面则会增加电梯单次往返路程.因此,协同疏散时间的大小取决于三者的综合作用.从协同疏散时间持续上升的趋势可以看出:疏散人数的增加占据主导作用,也就是说,疏散人员的增加与电梯承载量不匹配,导致电梯往返次数增加,且电梯往往会出现不能满载的现象,电梯资源利用率没有充分利用,此时,为达到最短协同疏散时间,可增加楼梯疏散人数,减少电梯疏散人数,从而电梯最佳分离层就会上升.

图4中右图为电梯最佳分离层和协同疏散时间随总建筑层数的变化曲线,表明随着总建筑层数的增加,电梯最佳分离层呈现阶梯式的上升趋势,即当建筑层数为15层和16层、18层和19层这2种情况下的最佳分离层没有改变,协同疏散时间总体呈上升趋势.电梯最佳分离层出现阶梯式变化的原因:虽然建筑层数有所增加,从而导致电梯疏散的人员负载增加,但楼梯疏散时间仍占据主导地位,协同疏散时间主

要取决于楼梯疏散时间.总建筑层数在 15 层和 16 层,最佳分离层都为 12 层,协同疏散时间出现轻微下降,这是因为建筑层数为 15 层时,电梯疏散时间大于楼梯疏散时间;建筑层数为 16 层时,楼梯疏散时间大于或等于电梯疏散时间,在最佳分离层不变的情况下,随着总建筑层数的增加,楼梯疏散的时间不会变化,但电梯疏散时间有所增加.协同疏散时间的大小取决于二者的最大值.另外,从图 4 中还可以看出,电梯最佳分离楼层是越来越远离顶层的.

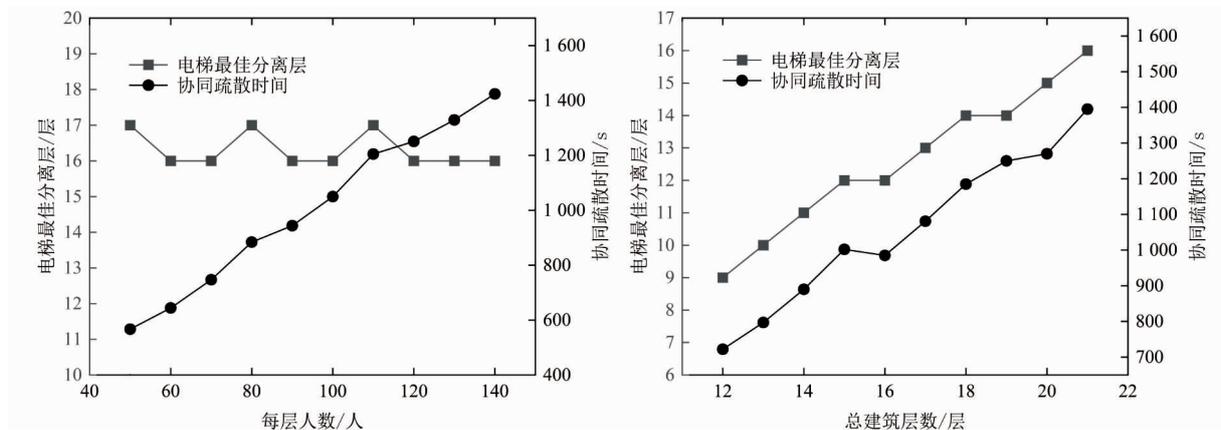


图 4 电梯最佳分离层和协同疏散时间随每层人数、总建筑层数的变化曲线

2.3 直达层集中疏散策略

图 5 为电梯最佳直达层和协同疏散时间随每层人数、总建筑层数的变化曲线.图 5 中左图表明,对于一栋 21 层的建筑而言,电梯最佳直达层始终为定值 15 层且与每层所需疏散的人数没有关系,也就是说,楼梯与电梯的疏散效率在电梯直达层确定后达到平衡,每层人数的等比例增长对两者增加负载后所需要的疏散时间是一样的.当然,协同疏散时间随每层人数的增加是呈线性增加趋势.

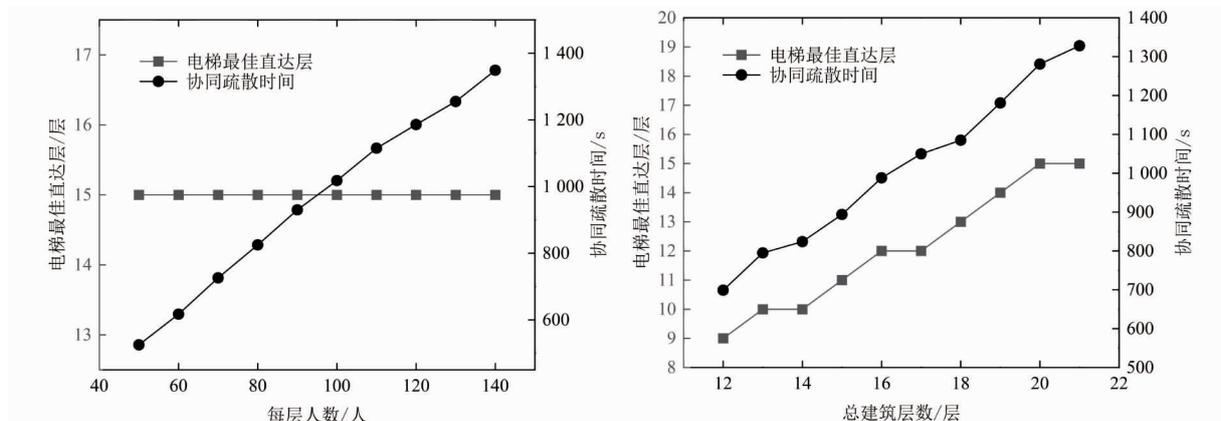


图 5 电梯最佳直达层和协同疏散时间随每层人数、总建筑层数的变化曲线

从图 5 中右图可以看出:随着总建筑层数增加,建筑内所需疏散的人数随之增多,电梯所需要疏散的负载也就越大,为了使协同疏散的时间达到最优,电梯最佳直达层必然随之上升.但同时也会看到,建筑层数在 13 与 14 层、16 与 17 层、20 与 21 层时,电梯最佳直达层没有发生变化,具有平台阶梯式的变化趋势.这有两方面的原因,一是楼梯的疏散时间大于电梯疏散时间,此时协同疏散时间取决于楼梯疏散时间,而电梯疏散时间在层数增加的情况下,多疏散一层人员而增加的时间并没有超过楼梯疏散人员所需时间;二是从模拟中可以看到,虽然电梯需要疏散的总人数增加,电梯在运送最后一批人员的时候几乎是满载的情况,减少了电梯因不能满载而导致往返次数增加的现象.

同时可以看到,直达层集中疏散策略对比顶层优先疏散策略,其协同疏散时间总是偏小的.原因在于电梯直达层集中疏散策略将所有人员集中到某一层进行疏散,减少了顶层优先疏散策略中电梯在疏散各

层中不能满载甚至空载现象的往返次数,提高了电梯的利用效率。

3 策略优化及影响因素分析

3.1 对顶层优先疏散策略的优化

从上述的分析中可以看到,顶层优先疏散策略中存在因人员数量与电梯承载量不匹配从而导致电梯往返次数增加的现象,因而往往不能充分利用电梯资源.为解决这一问题,本文从电梯运行机制的角度出发,提出4种不同的电梯停靠方式,寻求不同停靠方式下最大化电梯承载量来增加电梯可疏散人数以及可疏散层数范围的优化可能性.

为研究电梯停靠方式对顶层优先协同疏散时间的影响,可以设置4种停靠方式.

停靠方式一:设置4部电梯在可疏散楼层每层仅停靠一次,按电梯最大承载量计算,每层可电梯疏散76人,剩余60人选择楼梯疏散.

停靠方式二:将高层建筑的电梯分离层及以上楼层划分出上下相邻的2个相同区间层数,2部电梯在上区间层数疏散,另外2部电梯在下区间层数疏散.上、下区间层数的电梯在各自区间范围内以顶层优先疏散策略疏散,每层仅停靠一次,按电梯最大承载量计算,每层可电梯疏散38人,剩余60人选择楼梯疏散.

停靠方式三:在方式二的基础上,电梯每层变为可停靠2次,按电梯最大承载量计算,每层疏散76人,剩余60人选择楼梯疏散.

停靠方式四:在方式二的基础上,电梯每层变为可停靠3次,按电梯最大承载量计算,每层疏散114人,剩余22人选择楼梯疏散.

对于分区间的顶层优先疏散策略,进行上区段电梯疏散第21层和下区段电梯疏散第20层;上区段电梯疏散20~21层、下区段电梯疏散18~20层等10组场景的模拟计算.电梯不同停靠方式下协同疏散时间的模拟结果如表3和表4所示.

表3 方式一下不同电梯分离层的协同疏散时间

电梯分离层	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
协同疏散时间	1 533	1 420	1 362	1 387	1 429	1 477	1 519	1 570	1 611	1 644

表4 分区间不同电梯分离层的协同疏散时间

方式	场景									
	21层	20~21层	19~21层	18~21层	17~21层	16~21层	15~21层	14~21层	13~21层	12~21层
	20层	18~19层	16~18层	14~17层	12~16层	10~15层	8~14层	6~13层	4~12层	2~11层
方式二疏散时间	1 897	1 845	1 785	1 750	1 695	1 644	1 597	1 540	1 470	1 435
方式三疏散时间	1 851	1 745	1 626	1 535	1 427	1 352	1 566	1 768	1 948	2 120
方式四疏散时间	1 801	1 630	1 468	1 383	1 683	2 012	2 311	2 618	2 934	3 200

由表3可知:在4部电梯每层仅停靠一次的情况下,随着电梯分离层的逐渐上升,协同疏散时间先下降后上升,最短协同疏散时间为1 362 s,此时的电梯分离层为第9层,疏散人数988人.

由表4可知:随着上下电梯疏散区间层数的增加,停靠方式二协同疏散时间始终呈下降趋势,这是因为此时楼梯的疏散时间始终大于电梯疏散时间,协同疏散时间的大小取决于楼梯疏散时间的大小.

停靠方式三的最短疏散时间为1 352 s,上区段停靠楼层为16~21层,下区段停靠楼层为10~15层;停靠方式四的最短疏散时间为1 383 s,上区段停靠楼层为18~21层,下区段停靠楼层为14~17层.协同疏

散时间的变化趋势都是先下降后上升,但在最短协同疏散时间下,方式三相比方式四用电梯疏散的层数更多,主要是因为停靠方式四下电梯的往返次数更多,且电梯单次往返的路程更长,二者作用下,停靠方式三电梯可疏散层数更多。

顶层优先疏散策略下的电梯最佳分离层为第16层,电梯疏散人数为816人。改变电梯的停靠方式之后,可疏散人数增加96人,同时,电梯可疏散楼层范围从6层扩大到12,这对于建筑中层区域人员的疏散有重要的意义。

3.2 对疏散策略中电梯最大承载量的影响分析

图6表明随着电梯最大承载量的逐渐增加,电梯的最佳分离层和最佳直达层呈阶梯式下降趋势,协同疏散时间呈减少趋势。右图中,电梯最大承载量由11人增加至13人,17人增加至19人,25人增加至27人时电梯最佳直达层下降。电梯直达层的下降对疏散时间有三方面的影响,首先是电梯最大承载量的增加可以减少电梯总的往返次数,降低电梯运行时间;其次是电梯直达层的下降导致疏散人数的增加,电梯的往返次数可能会增加,延长电梯运行时间;最后是电梯直达层的下降导致电梯单次往返的路程有所减少,电梯的运行时间会有所降低。因此协同疏散时间取决于三者的大小加和。

对比图6中的左图可以发现:顶层优先疏散策略下电梯承载量对最佳分离层的影响与图6中的右图的趋势几乎是一致的,另外,电梯最佳分离层总是高于电梯最佳直达层的显著原因是后者电梯资源的利用率大于前者。

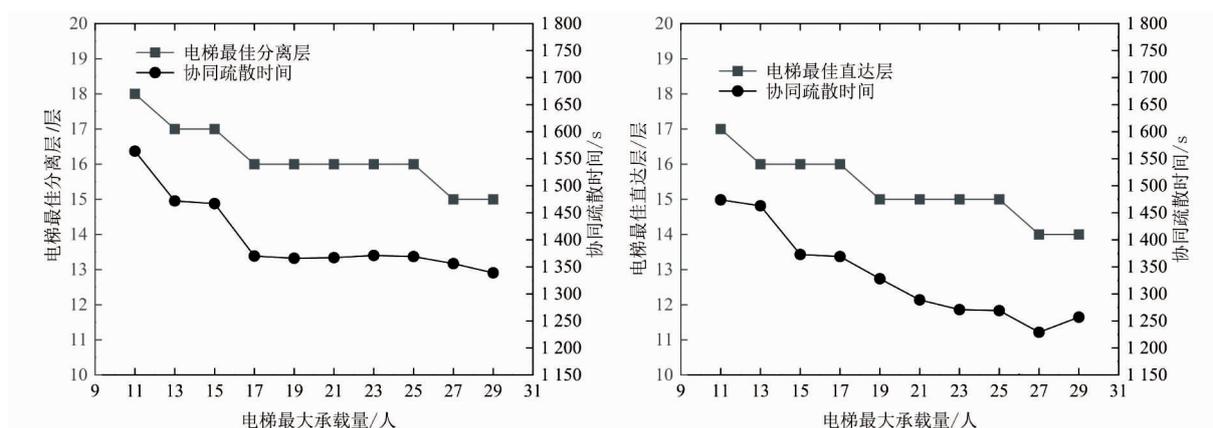


图6 电梯最佳直达层、最佳分离层及疏散时间随电梯最大承载量的变化曲线

4 结论

1) 顶层优先疏散策略下存在电梯最佳分离层。人员数量对最佳分离层的影响较小,而随着建筑层数的增加,电梯最佳分离层呈阶梯式的上升趋势且越来越远离顶层。

2) 分区间的顶层优先疏散策略优化了电梯停靠方式,加强了对电梯资源的利用,扩大了电梯可疏散的人员数量,增加了电梯可疏散的建筑层数范围。

3) 电梯直达层集中疏散策略提升了电梯资源的利用率,电梯最佳直达层与人员数量无关,但随建筑层数的增加呈阶梯式上升,其最佳直达层越来越远离顶层。

4) 电梯最大承载量逐渐增加,最佳分离层和最佳直达层呈阶梯式下降趋势,协同疏散时间呈波动下降的趋势。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 北京:中国统计出版社,2021.

- [2] BAZJANAC V. Interactive simulation of building evacuation with elevators[C]//Annual Simulation Symposium (IEEE Cat n 76CH1055-3C), University of California, Berkeley, Tampa, Florida, 1976: 15-29.
- [3] PAULS J. Effective-width model for crowd evacuation flow on stairs[C]//Proceedings of 6th International Fire Protection Engineering Seminar, Karlsruhe, Germany, 1982: 295-306.
- [4] KLOTE J H. A method for calculation of elevator evacuation time[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 1993, 5(3): 83-95.
- [5] PROULX G. Evacuation by elevators; who goes first[C]//Workshop on the use of elevators in fires and other emergencies, 2004.
- [6] SEKIZAWA A, EBIHARA M, NOTAKE H, et al. Occupants' behaviour in response to the high-rise apartments fire in Hiroshima City[J]. Fire and Materials, 1999, 23(6): 297-303.
- [7] MELINEK S J, BOOTH S. An analysis of evacuation times and the movement of crowds in buildings[M]. Building Research Establishment, 1975.
- [8] FANG Z M, SONG W G, LI Z J, et al. Experimental study on evacuation process in a stairwell of a high-rise building[J]. Building and Environment, 2012, 47: 316-321.
- [9] YANG L, RAO P, ZHU K, et al. Observation study of pedestrian flow on staircases with different dimensions under normal and emergency conditions[J]. Safety Science, 2012, 50(5): 1173-1179.
- [10] 阎卫东. 建筑物火灾时人员行为规律及疏散时间研究[D].沈阳:东北大学,2006.
- [11] FANG T, YU J, WANG J. Study on effect of different architectural plane forms on evacuation[J]. Journal of Applied Fire Science, 2011, 21(4): 329.
- [12] FANG T, YU J, WANG J. Study of staircase design effects on evacuation in architectural plane design[J]. Journal of Applied Fire Science, 2012, 22(1): 69-80.
- [13] 曹奇,黄丽丽,肖修昆. 超高层建筑人员电梯辅助疏散及其影响参数研究[J].火灾科学,2013,22(4):207-212.
- [14] 朱孔金. 建筑内典型区域人员疏散特性及疏散策略研究[D].合肥:中国科学技术大学,2013.
- [15] 丁元春. 高层建筑人群垂直疏散特性与疏散策略计算机仿真研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.
- [16] 廖瑶剑. 基于电梯的人员疏散模型研究及其在超高层建筑安全疏散设计中的应用[D].合肥:中国科学技术大学,2015.
- [17] 郭晓明,姚斌,李震,等. 高层建筑电梯楼梯协同人员疏散的优化模式研究[J].火灾科学,2018,27(1):53-61.
- [18] 张鸿武. 上海中心大厦电梯辅助疏散技术应用设计[J].建筑学报,2019(3):40-45.
- [19] 杨海明,赵道亮,刘沛辰,等. 高层建筑楼梯与电梯耦合的安全疏散策略研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(1):169-174.
- [20] 宋英华,余武静,吕伟. 高层公寓式住宅建筑电梯协同楼梯疏散策略研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(6): 116-121.
- [21] 俞苗. 某超高层建筑电梯辅助疏散系统疏散模式研究[J].消防科学与技术,2018,37(5):615-617.
- [22] 胡玉玲. 基于 ACP 方法的高层建筑火灾中人员疏散策略研究[D].北京:北京理工大学,2015.