

以可控延误为目标的有限队列离散仿真在电梯扩建设计中的应用

乔静宇

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市200092]

摘要: 上海闵浦三桥非机动车垂直交通系统为应对电动自行车电池安全隐患,管理方实施人车分乘模式测试,结果显示通行效率显著下降。为此,通过分析压力测试数据,建立了运送能力与可控延误时间的离散映射关系。并以20 min为延误目标进行微观仿真,结果表明:不同流量工况下的预估方法与微观仿真分析结果差异很小,能满足快速估算运输能力的需求;所提出的可控延误预测模型和有限队列离散仿真方法,为类似交通设施的资源配置提供了有效工具,同时指出了考虑客流时变性和经济性的未来优化方向。研究结果对跨江通道非机动车设施扩建规模具有重要指导意义。

关键词: 闵浦三桥;电动自行车;延误预测;排队模型;交通优化

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0328-05

Application of Finite Queue Discrete Simulation with Controllable Delay Targets in Elevator Expansion Design

QIAO Jingyu

[Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In response to the safety hazards of electric bicycle batteries for the non-motorized vehicle vertical traffic system on Minpu Third Bridge in Shanghai, the managers have implemented a test on the passenger-vehicle separation mode. The results show a significant decrease in traffic efficiency. Therefore, by analyzing the pressure test data, a discrete mapping relationship between transport capacity and controllable delay time is established. And the microscopic simulation is conducted with a delay target of 20 min. The results indicate that the estimation methods under different flow conditions have little difference from the results of microscopic simulation analysis, which can meet the demand for rapid estimation of transportation capacity. The proposed controllable delay prediction model and finite-queue discrete simulation method provide an effective tool for resource allocation in similar transport infrastructures, and also the future optimization direction considering the passenger flow variability and economic efficiency is identified. The research results have significant guiding significance for the expansion scale of non-motorized vehicle facilities in cross-river passages.

Keywords: Minpu Third Bridge; electric bicycles; delay prediction; queuing model; traffic optimization

1 概况

上海闵浦三桥作为连接上海市闵行区与奉贤区的跨黄浦江通道,桥梁结构底缘距黄浦江设计水位面的垂直净空高度28 m,是一座采用双层结构的特大型桥梁。其上层桥面专用于机动车交通系统,下层桥面则设计成非机动车专用通道,形成“机非分离”的立体化交通组织模式。大桥采用16部垂直电

梯,双向对称布局,每个通行方向均设置4部上行电梯、4部下行电梯,形成了双向独立的循环非机动车垂直交通系统^[1]。

近年来,电动自行车电池自燃起火事故增多,电池在电梯内自燃并烧伤多人的事故也见诸报道。为降低此类风险,大桥管理方于2022年某日进行了压力测试。

测试时,骑手与电动自行车分别乘坐不同电梯,同时上下桥过江。上桥时,骑手先将电动自行车停到电梯轿厢内,熄火离开并转乘骑手专用电梯上桥。2部电梯最大可载12辆电动自行车,随同载12名骑

收稿日期: 2025-06-20

作者简介: 乔静宇(1974—),男,学士,高级工程师,从事道路桥梁设计工作。

手的另1部电梯一并上桥,剩余1部电梯专为零星脚踏车和步行者专用。这样,上桥时骑手需要从1部电梯转移到另1部电梯,下桥时也需要从骑手专用电梯转到电动自行车专用电梯驶出自己的电动自行车,其效率远较常规的人车同一轿厢一并上桥的效率低。如何为高流量非机动车交通提供优质公共服务设施,是需要进一步考虑的问题。

2 实测数据^[2]

2.1 人车不分离情况下的非机动车流量

自闵浦三桥电梯和人非通道正式开通以来,通过1年半的运营,人非流量逐步增加,使用非机动车垂直交通系统的日流量维持在4 500辆左右,另有1 500辆从桥面过江,时间分布不明。

使用非机动车垂直交通系统的流量呈现明显潮汐现象,通常在早高峰6:30~8:30奉贤往闵行方向,16:00~18:00闵行往奉贤方向迎来高峰流量,高峰期单向流量已在500辆/h以上。脚踏车与行人占比7%。经现场计时,早晚高峰排队骑手的平均过江时间约为20 min,排队长度保持在50~70 m。非高峰期无需等候,骑手平均过江时间约6 min。

日常电动自行车早、晚高峰流量见表1、表2。

表1 日常电动自行车早高峰流量 单位:辆

时间	南向北(C1工况)	北向南
早6~7点	192	79
早7~8点	505	187
早8~9点	167	120
早10点*	90	60
小计	954	386

表2 日常电动自行车晚高峰流量 单位:辆

时间	南向北	北向南(C2工况)
晚4~5点	98	423
晚5~6点	131	406
晚6~7点	84	159
晚8点*	42	80
小计	355	1 068

根据平日统计,使用电梯的电动自行车在1 000辆/h左右。因未统计使用机动车道过桥的电动自行车,测得的数据偏小。实测数据包括前3个小时;带*号的为推测数据,按第3个小时的一半计。早高峰最高流量为南向北505辆/h,标记为C1工况;晚高峰最高流量为北向南423辆/h,标记为C2工况。

2.2 人车分离情况下的非机动车流量

压力测试当天流量见表3。

表3 压力测试当天流量 单位:辆

时间	南向北(C3工况)	北向南(C4工况)
早5~6点	215	247
早6~7点	624	700
早7~8点	374	333
早8~9点	185	206
小计	1 398	1 486

测试当日,早高峰获得的数据完整,收集到的数据可靠,晚高峰自下午4:10起突发暴雨,测试在17:00暂停,观测到的数据不完整,不在此罗列。

测试当日,7:30左右迎来最高峰,排队长度达到200 m,预测过江排队需2 h左右。

电梯往返时间(即骑手进入电梯停放车辆直至电梯往返、下一批骑手进入)由原来的1 min50 s增加到5 min左右。平时电动自行车过江所需时长约6 min,人车分离实施当日电动自行车过江时间约10 min。人车分离测试前,人非电梯流量为450辆/h左右;人车分离测试时,人非电梯流量为150辆/h。

上述人非电梯流量150辆/h和5 min/班次,这2种数据只有1种是准确的。例如,2部电梯满载12辆电动自行车,5 min/班次,则1 h的极限运输能力为144辆,与压力测试时记录的150辆/h稍有出入。这可能是实际运行效率稍快于5 min/班次导致的。

3 经典排队理论适用性评价

该工程的排队情况一般采用单队列多服务台排队模型(M/M/c)模拟^[3],此模型是排队论中的经典模型。其核心假设为:顾客到达服从泊松过程,到达间隔时间服从负指数分布,服务时间服从负指数分布,系统有c个同质服务台,队列容量无限,遵循先到先服务规则。理论简洁,解析解可快速计算关键指标如系统利用率、平均队列长度、平均等待时间等。能在给定到达率和服务率下,计算得到平衡成本(服务台增加的成本)与收益(降低等待时间的收益)。

排队模型(M/M/c)对顾客只能宏观地得到一些平均评价指标,无法处理系统过载和资源耗尽后队列中顾客的等候状况,无法给出最大等待时间,也缺乏对在规定时间内完成服务的延误评估以及顾客放弃行为的评估^[4]。

现有其他模型研究缺乏类似地对排队顾客等候时间的刻划,缺乏可控延误时间下的服务台配置仿真框架。

4 研究目标和方法

4.1 方法

在单队列多服务台队列的情况下,顾客的延误次数可以表达为自然数集,而本例中的电梯运送能力因受轿厢尺寸和服务时间限制,表现为6的倍数。设计运送能力需要找到与自然数集映射的离散函数^[5]。

由于人流随时间逐步到达,且先来先走,因此只需考察最后离开的人流延误次数即可得到与运送能力之间的关系映射。

假定计算时间段 T 内流量为 Q ,电梯运送能力为 Δ 。单次剩余骑手($\frac{Q}{T/t} - \Delta$)会累计至最后,将之与运送次数($\frac{T}{t}$)相乘,可以得到最终的剩余顾客数量。将该数量与设计运送能力相除,即得需要运送完剩余骑手的次数,见式(1)。转化为电梯运送能力 Δ 的表达式见式(2)。

$$\frac{(\frac{Q}{T/t} - \Delta) \frac{T}{t}}{\Delta} = n \quad (1)$$

$$\Delta = f(n) = \frac{Q \cdot t}{n \cdot t + T} \quad (2)$$

4.2 可控延误时间目标选择

在进行测算时,合理地选择顾客耐受能力作为约束的选优目标,是计算得到恰当规模的关键,目前对队列延误的研究较少。

Chuo等^[6]探讨了主题公园中游客对喜爱游乐设施排队等待时间的相关问题,研究选取了5家主题游乐园的1440名游客样本,以了解游客对喜爱的游乐设施可接受排队时间的容忍度,发现30 min是游客等待的心情转折点。在未达到30 min前,游客对游乐设施品质的感知会随着等待时间的延长而提高。尹晓丽^[7]对大型机场航站楼旅客拥挤感知和可接受等待时间进行问卷统计,认为旅客在机场排队时的可接受时间在16~20 min范围。该工程可以选择邻近的西渡轮渡每班次间隔20 min^[8]作为参考,以最长等待时间20 min作为约束条件。

4.3 计算结果

如上所述, $t=5$ min, $T=60$ min, Q 为已知,选择C1~C4的流量数据作为工况进行试设计。既定延误目标下需要的运送能力预估见表4。

表4 既定延误目标下需要的运送能力预估

单位:辆/次

延误次数	延误时间/min	C1 工况		C2 工况		C3 工况		C4 工况	
		192	505	423	406	624	374	700	333
1	5	15	39	33	31	48	29	54	26
2	10	14	36	30	29	45	27	50	24
3	15	13	34	28	27	42	25	47	22
4	20	12	32	26	25	39	23	44	21
5	25	11	30	25	24	37	22	41	20
6	30	11	28	24	23	35	21	39	19
7	35	10	27	22	21	33	20	37	18
8	40	10	25	21	20	31	19	35	17

由表4可见:

(1)C1 工况需要每次带走32辆的设计运送能力,受装载轿厢限制,下限可选30辆,上限36辆。

(2)C2 工况需要每次带走26辆的设计运送能力,下限可选24辆,上限30辆。

(3)C3 工况需要每次带走39辆的设计运送能力,下限可选36辆,上限42辆。

(4)C4 工况需要每次带走44辆的设计运送能力,下限可选42辆,上限48辆。

以上的设计是粗略的,实际的电梯装载能力是6的倍数,运送能力数值受取整影响。要精确计算延

误时间,复核是否满足既定可控延误目标仍需要进行队列运送逻辑模拟。

4.4 验证

搜集到的流量以小时流量表达,用泊松分布假定来生成骑手到达时间,既有数据集不完整。为方便计算,假设前来坐电梯的电动自行车流量在自身小时内均匀发生。

为此,用python语言编写了people_arrive代码产生骑手到达时刻表,由elevator_20程序进行电梯运送逻辑计算^[9],程序已上传至GITHUB。

计算4个工况下的运送能力和运行情况,结果见表5至表8。

表 5 C1 工况运送能力和运行情况汇总表

运送能力/辆	最大排队人数	等待时间/min			总运行时间/min	超 20 min 比例/%
		平均值	最大值	最小值		
18	315	42	87	0	275	69
24	241	21	50	0	240	50
30	175	11	29	0	240	20
36	109	5	15	0	240	0

表 6 C2 工况运送能力和运行情况汇总表

运送能力/辆	最大排队人数	等待时间/min			总运行时间/min	超 20 min 比例/%
		平均值	最大值	最小值		
18	415	66	115	1	300	88
24	277	29	57	0	240	68
30	139	10	23	0	240	5
36	47	3	7	0	240	0

表 7 C3 工况运送能力和运行情况汇总表

运送能力/辆	最大排队人数	等待时间/min			总运行时间/min	超 20 min 比例/%
		平均值	最大值	最小值		
24	446	49	93	0	310	73
30	318	28	52	0	260	65
36	228	15	31	0	240	42
42	162	7	19	0	240	0
48	99	4	11	0	240	0

表 8 C4 工况运送能力和运行情况汇总表

运送能力/辆	最大排队人数	等待时间/min			总运行时间/min	超 20 min 比例/%
		平均值	最大值	最小值		
24	481	55	100	0	320	75
30	370	34	61	0	270	69
36	304	19	41	0	240	51
42	238	11	28	0	240	17
48	172	6	18	0	240	0

由表 5 可见:在最大流量 505 辆/h 的 C1 工况下,经校验,采用 36 辆运送能力,可以达到最大延误时间小于 20 min 的目标;而采用低限设计(30 辆)时,最大等待时间达到 29 min,超时等待的骑手比例也达到 20%。在该工况下,甚至可以在运送能力在 24 辆的情况下,也可以在 1 个周期(240 min)内消化完所有队列。

由表 6 可见:在最大流量 423 辆/h 的 C2 工况下,经校验,采用上限 30 辆运送能力时,最大等待时间达到 23 min,超过预想的小于 20 min 的目标,需要采用 36 辆运送能力才能满足要求。C2 工况的到达流量为(423、406、159、80),第 1 小时和第 2 小时到达流量相近,此种情况下,估算得到的参考值因时段较长导致延误时间增加。若采用 30 辆的上限设计,最大等待时间为 23 min,超时等待的骑手比例仅 5%。

由表 7、表 8 可见:在最大流量 624 辆/h 的 C3 工

况下,采用设计的 42 辆运送能力可以达到预期效果。在最大流量 700 辆/h 的 C4 工况下,采用设计流量 48 辆运送能力可以达到预期效果。

综上,在目前流量下,要求上下行均达到 48 辆的运输能力,即 8 台运车电梯,外加 4 台运人电梯。目前规模(4 台电梯)尚缺 8 台电梯。全桥共需要 48 台电梯,需增加 32 台电梯。

5 结 语

(1)本研究基于电梯系统的运行间隔特性,构建了一种超负荷运转场景的可控延误预测模型。该模型通过解析骑手在可控时段内的延误情况,实现了以既定延误时间为目标的设计运送能力预估。此方法可迁移应用于交叉口车道数量预估、超负荷收费站延误评估等交通领域,为高并发场景下的资源配置提供仿真框架。

(2)通过引入有限队列假设的离散事件仿真算法,本研究实现了对骑手微观等待状态的精确建模和动态追踪。相较于传统宏观流量分析法,该算法能够捕捉个体层面的排队行为,进而校核基于宏观参数(如平均延误、吞吐量)预估的服务台规模是否符合实际运营需求。这一仿真校核机制显著提升了规模设计方案的可靠性。预测在目前流量下,全桥需要48台电梯,共需增加32台电梯。

(3)当前模型假设骑手到达过程服从均匀分布且服务时间恒定,这一简化可能掩盖实际场景中的客流时变性(如早晚高峰突变)和服务异质性(如电梯故障导致的速率波动)。未来研究拟引入非齐次泊松过程来刻画客流强度随时间的动态变化。此外,将构建建设-运营一体化经济分析模型,量化动态扩容策略的经济性,为决策者提供多目标优化依据。

参考文献:

- [1] 魏华.垂直电梯在越江桥梁工程中的应用初探[J].城市道桥与防洪,2019(10):193-195.
- [2] 上海城建城市运营(集团)有限公司.闵浦三桥电梯人车分离运行方案[R].上海:上海城建城市运营(集团)有限公司,2022-07-28.
- [3] 甘应爱,田丰,李维铮,等.运筹学[M].3版.北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 魏杰.基于车牌数据的信号交叉口最远排队长度实时估计[D].成都:西南交通大学,2023..
- [5] 肯尼思·H·罗森.离散数学及其应用[M].徐六通,杨娟,吴斌,等译.北京:机械工业出版社,2020.
- [6] CHUO H Y, HEYWOOD J. An optimal queuing wait for visitors most favorite ride at theme parks[C]//Advances in Hospitality and Leisure. Emerald Group Publishing Limited, 2014: 57-73. <https://dx.doi.org/10.1108/S1745-354220140000010003>.
- [7] 尹晓丽.大型机场航站楼旅客拥挤感知及控制策略研究[R].天津:中国民航大学,2019-05-16.
- [8] 本地宝.上海西闵线轮渡时刻表2022[EB/OL]. [2025-06-10].<https://m.sh.bendibao.com/traffic/248665.html>.
- [9] FINGAL T. Finite-queue-elevator[EB/OL]. [2025-06-19]. <http://github.com/fingalT/Finite-Queue-Elevator>.

(上接第327页)

- [12] 黄建华,李瑞.基于HS-Small模型临江深基坑降水变形特性分析[J].水电能源科学,2023,41(11):116-120;203.
- [13] 杨洁,赵燕容,董小松,等.已开挖基坑对于邻近基坑降水诱发地面沉降的影响[J].中国煤炭地质,2025,37(2):47-53.
- [14] 李光明,李明生.悬挂式止水帷幕基坑降水控制措施研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(3):921-932.
- [15] 刘艳敏.武汉临江地区承压水水位特征及深基坑地下水控制研究[D].武汉:中国地质大学,2022.