



铁路客运站旅客候梯时间对扶梯能耗影响

马卫武, 胡 蓓, 刘启一, 雷先鹏, 周成建

中南大学能源科学与工程学院, 长沙 410083

摘要 在李太勒公式的基础上, 利用单通道和多通道 $M/D/n$ 经典排队模型, 确定了旅客平均排队队长、最大等待时间、扶梯服务强度之间的相互联系, 建立了等待时间计算模型。结合中国某特大型客运站 A 站的旅客发送数据, 在候车时间概率分布模型的基础上, 按照等待时间的不同, 对旅客发送最多日、节假日和普通工作日的扶梯配置、功率和能耗进行了细致分析, 比较研究了等待时间为 5、10、30 s 时的固定能耗和可变能耗。分析结果表明, 候梯时间的设置影响扶梯的配置和扶梯能耗, 扶梯能耗中固定能耗占 70%, 可变能耗占 30%。

关键词 候梯时间; 排队模型; 李太勒公式; 扶梯配置; 固定能耗; 可变能耗

中图分类号 TU857

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)24-0070-06

Influence of Passenger Waiting Time on the Energy Consumption of Escalators in Railway Stations

MA Weiwu, HU Qiang, LIU Qiyi, LEI Xianpeng, ZHOU Chengjian

School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Our research is based on the Little Formula and the classical queuing model of multi-channel $M/D/n$. The escalator allocation and the influencing factors of the energy consumption are studied. The relations between the average queue length, the maximum waiting time and the escalator service intensity are obtained. The waiting time simulation model is built. The passenger delivery data at a railway station in China is used. With the probability distribution model of waiting time, an analysis is made on the escalator allocation, power and energy consumption on three kinds of working days, that is, holidays, ordinary working days and the largest-passengers-volume days. Meanwhile, the fixed and variable energy consumption rates for different waiting times are compared. For example, the waiting time can take values of 5, 10 and 30 seconds. The result shows that the waiting time settings

affect the allocation of the escalators and the energy consumption of the escalators. The fixed energy consumption takes 70% of the whole. Variable energy consumption takes 30%.

Keywords waiting time; queuing model; Little formula; escalator allocation; fixed energy consumption; variable energy consumption

自动扶梯作为建筑物内重要传输设备, 目前已在商场、博览中心、火车站、地下通道等公共场所得到广泛应用。调查结果显示, 客运站的自动扶梯能耗在其总能耗中占重要比例^[1]。因此, 在提供给旅客最优化服务的基础上, 如何实现节能控制, 使扶梯服务实现最佳性价比, 是客运站在配置扶梯台数时应考虑的重要问题。

自动扶梯配置是复杂的系统工程, 配置时应认真了解建筑物的自身情况和使用环境, 建筑物的用途、规模、高度、客流量等, 应充分了解扶梯交通系统的二重性, 即规律性和随机性^[2]。自动扶梯优化配置的关键是对扶梯服务系统的工作特点及服务对象作合理分析, 了解实际交通流特点及其变化规律, 建立合理的数学模型, 对扶梯交通进行合理且有效的分析, 这是设计高质量的扶梯服务系统和客运站节能的基础。

1 等待时间计算模型

1.1 排队系统队长理论

经典的排队模型用多个符号表示, 在符号之间用竖线隔开, 将排队模型符号定义为 $M/D/n$ ^[3]。对于扶梯系统, 令 M 为旅

收稿日期: 2009-04-26

基金项目: 铁道部科技研究开发重点项目(2007Z011); 国家自然科学基金项目(20676154)

作者简介: 马卫武, 讲师, 研究方向为建筑节能, 电子信箱: maweiwu@yahoo.com.cn

客到达的规律,即负指数分布^[4]; D 为服务时间的概率分布,即定长服务^[5]; n 为扶梯开启台数。

1.1.1 单通道排队模型 MDI_1

在经典排队论中著名的李太勒公式的内容是:在极限平衡状态下,排队服务系统内,顾客的平均数 L 与顾客在系统内的平均停留时间 $W(\min)$ 之间有关系^[6]

$$L=W \cdot \lambda \quad \text{或} \quad W=L/\lambda \quad (1)$$

式中, λ 为排队系统输入速度,人/min。

李太勒公式的重要性在于,任何排队系统和相关的输入流或输出流,在极限平衡状态时,单位时间内到达顾客的平均数等于离去顾客的平均数,两个事件流具有相同强度 λ ^[7-8]。

根据李太勒公式,且 $\rho=\lambda/\mu$,则有

$$\lambda=\mu\rho \quad L=\rho\mu W$$

式中, ρ 为服务强度, $0<\rho<1$; μ 为单台扶梯输入强度,人/min。

又因为服务系统内的顾客数等于排队的顾客加正在被服务的顾客,即

$$L_t=L_{t-1}+\rho=\rho\mu W+\rho=\rho(1+\mu W) \quad (2)$$

$$W=\frac{L}{\lambda}=\frac{\rho(1+\mu W)}{\lambda} \quad (3)$$

式中, L_t 为 t 时刻排队系统长度。

顾客到达为最简单流,服务时间固定时为

$$\mu W=\frac{\rho}{2(1-\rho)}$$

则每台扶梯前排队系统队长为

$$L=\frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \quad (4)$$

1.1.2 多通道排队模型 MDI_n

当单台扶梯无法满足输送要求,导致旅客排队时间较长,则多数旅客会选择楼梯,放弃扶梯服务,此时则应加开扶梯。当旅客到达后,会优先选择空闲扶梯去接受服务,此时应配置多台并列扶梯^[9]。

设乘客按编号大小顺序到达,到达间隔时间分别为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 。在开始服务时,第 1 个到达的乘客由一号服务台服务,第 n 个到达的乘客由 n 号服务台服务。以 2 个服务台的情况为例:第 1 个旅客服务完成时刻早于第 2 个旅客,因而第 3 个到达的乘客由一号服务台服务,依次类推。

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \mu_2 & \mu_1 + \mu_2 &= \mu & \rho &= \lambda/\mu & 0 < \rho < 1 \\ \rho_1 &= \lambda_1/\mu_1 & \rho_2 &= \lambda_2/\mu_2 & \rho_1 &= \rho_2 = \rho \end{aligned}$$

则每台扶梯前,排队乘客的平均数为

$$L^1=L^2=\frac{\rho^3}{2(1-\rho^2)}$$

系统内排队乘客的平均数为

$$L=L^1+L^2=\frac{\rho^3}{1-\rho^2}$$

同理,可以推导出多通道排队系统队长公式,结果列于表 1。

1.2 等待时间模拟系统

本文运用李太勒公式对候梯时间与排队队长的关系做

表 1 多通道排队系统队长计算

Table 1 Queue length of the multi-channel queuing system

通道数	队长/人	通道数	队长/人
通道 1	$\frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$	通道 5	$\frac{2.5\rho^{5.27}}{(1-\rho^{4.27})}$
通道 2	$\frac{\rho^3}{(1-\rho^2)}$	通道 6	$\frac{3\rho^{5.93}}{(1-\rho^{4.93})}$
通道 3	$\frac{1.5\rho^{3.8}}{1-\rho^{2.8}}$	通道 7	$\frac{3.5\rho^7}{(1-\rho^6)}$
通道 4	$\frac{2\rho^{4.58}}{1-\rho^{3.58}}$		

了说明;另外,对单通道系统和多通道系统的队长 L 进行了计算。在模拟系统中,需要同时保证 $\rho<1$ 和 W 小于指定等待时间,计算出来的扶梯数量才是正确的扶梯配置^[10]。

依据上述公式和配置条件,系统流程图如图 1。

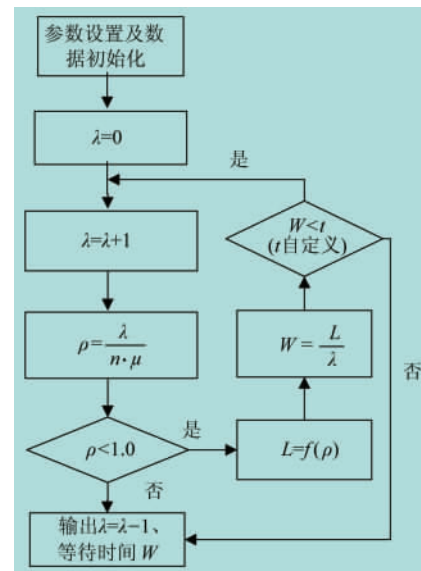


图 1 最长等待时间模拟流程图

Fig. 1 Simulation flow of the max waiting time

① 输入开启扶梯数量 n 、每台扶梯的输送能力 μ ,并初始化旅客到达率 λ ;② 将 $\lambda+1$ 赋值给 λ ,即增加到达率,并计算服务强度 ρ ,使之小于 1;③ 若 $\rho<1$,则循环累加到达率,并检测候梯时间 $W<t$ 的真实性;若是,则继续累加;若否,则需增加扶梯,并重新检测 ρ ,记录上一时刻 λ ,计算 W ;④ 若 $\rho>1$,则输出上一时刻 λ ,并计算 W 。

根据图 1 所示模拟系统可计算不同容许等待时间下的旅客最大等待时间,某一时间段内的扶梯配置应按最不利情况考虑,以某段时间内的最高进站人数点作为扶梯配置的界限。将旅客容许等待时间分别设置为 5,10,⋯,30 s,根据图 1 所示流程图即可实现最长等待时间模拟,结果如表 2 所示。

由表 2 数据可知,容许等待时间为 15~25 s 时的最长等待时间为 14.33 s,实际可输送人数为 43 人/min,与 10,30 s

发送最多日,这3种典型工作日为例,利用拟合方程乘以每趟列车旅客发送量,即可得出各时刻进入候车室等待该趟列车的旅客数量;将各列车各时刻进站候车旅客数量按时刻累加,即可得出各时刻进站旅客分布曲线。应用PowerBuilder 9.0和SQL Server 2005数据库可得出图2计算曲线。

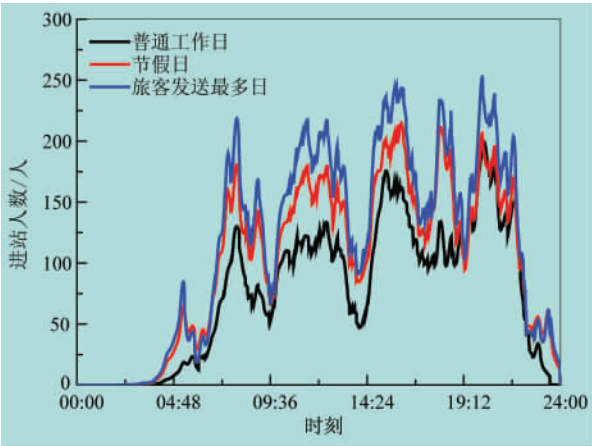


图2 A站3种工作日下午客流到达曲线
Fig. 2 Passenger arrival curve of three kinds of working days at the railway station A

3.2 扶梯能耗分析

3.2.1 扶梯配置

根据A站的采集数据(图2),按客流到达最高峰时旅客数量计算最大配置扶梯数量,取等待时间为5 s,因为等待时间为5 s时,对扶梯配置要求最高,如表1所示,此时单台扶梯输入率为39人/min。图2客流到达曲线显示,扶梯最高到达率为 $\lambda=252$ 人/min,将各参数代入 $\rho=\lambda/\mu$,即 $\rho=\frac{\lambda}{n\cdot\mu}=\frac{252}{n\cdot39}$ 且 $0<\rho<1$,可求得 $n>6.4$ 。

当 $n=7$ 时, $\rho=\frac{\lambda}{n\mu}=0.9$,平均等待时间: $W=\left(\frac{3.57\rho^7}{1-\rho^6}\right)/(\lambda/n)=4.46$ s。

因此,在5 s的等待时间下,A站需配置7台上行扶梯。据现场调查,A站共设置了8台扶梯,其中开启一台下行扶梯,计算结果与实际情况接近。

3.2.2 自动扶梯能耗计算

根据第2.2节扶梯固定能耗和可变能耗计算公式以及图2所示各时刻进站人数模拟结果,即可求出各时刻对应的分项能耗值。等待时间越短,对扶梯服务质量要求越高,即到即服务,造成扶梯开启台数及功率偏大。等待时间偏长,则旅客舒适度下降,排队时间偏长。但是如果等待时间太长,则多数旅客会放弃扶梯服务,选择走楼梯进入上层候车室,此时,扶梯则失去了应有的作用,同样造成能源浪费。因此,适当设置等待时间、扶梯数量既可保证优质的服务,又可节能。

3种工作日下午,不同等待时间对应的扶梯能耗如图3所示。

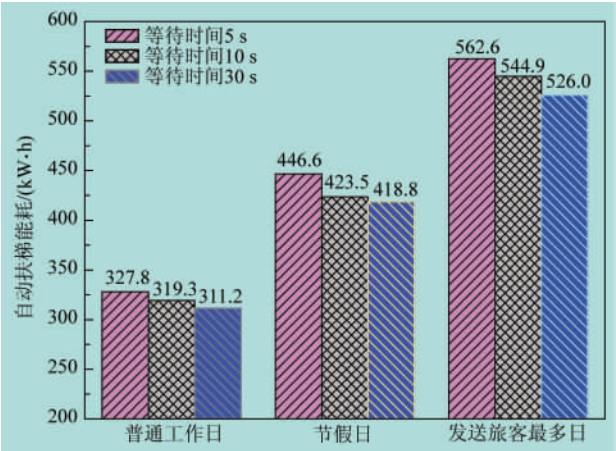


图3 不同等待时间时的扶梯能耗
Fig. 3 Energy consumption of escalators with different waiting times

由图3可知,对不同工作日,若等待时间相同,旅客发送量越大,能耗越大;对同一工作日不同等待时间,等待时间越短,能耗越大。全年各工作日中,最高能耗为562.6 kW·h,为发送旅客最多日等待时间为5 s时产生;最低能耗为311.2 kW·h,为普通工作日等待时间为30 s产生。

由于对扶梯的舒适性要求不同,等待时间10 s和30 s相对于等待时间5 s,节能比例有所差别。由图3可以分析出各等待时间的节能潜力如表5所示。

表5 等待时间为10,30 s相对5 s的节能百分比 Table 5 Energy-saving percentage at the waiting time of 10 and 30 s as compared to 5 s			
等待时间/s	普通日	节假日	人数最多日
10	2.61	5.18	3.15
30	5.06	6.23	6.51

表5列出了等待时间为10 s和等待时间为30 s时自动扶梯的节能潜力,等待时间为10 s时,相对5 s最多可节能5.18%,等待时间为30 s时,相对等待时间为5 s最多可节能6.23%。

3.3 等待时间对扶梯配置的影响

由于凌晨时刻扶梯处客流量很小,将等待时间设置为5,10,30 s时,3种等待时间下的扶梯功率及扶梯开启台数差别甚微,为突出等待时间对扶梯功率及扶梯数量的影响,在此取06:50-22:10时间段进行分析,如图4所示。

在10:45-13:17时间段,等待时间为5和30 s时,开启扶梯数量为6台;若为10 s,扶梯台数变化了4次,此时间段节能效果明显。在13:50-14:25时间段,等待时间为5和30 s时需开启4台扶梯;而为10 s时开启3台。在15:56-16:18时间段,如图4所示,进站人数达全天最高峰,此时3种等待时间下的扶梯数量均为7台。在17:54-18:25时间段,等待时间为5和10 s需再次开启7台扶梯,而等待时间为30 s时开启6

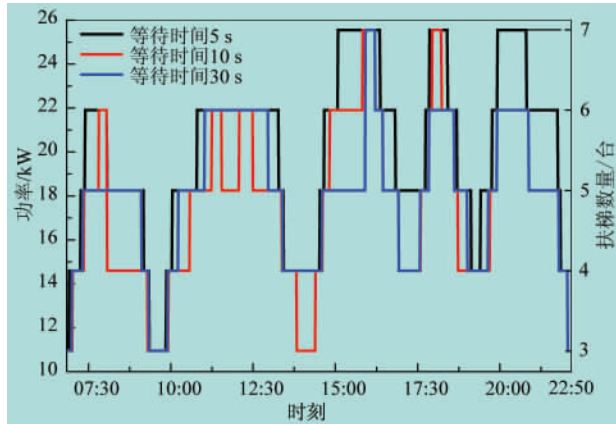


图4 不同等待时间下的固定功率(旅客发送最多日)
Fig. 4 Fixed power on the largest passenger volume day for different waiting times

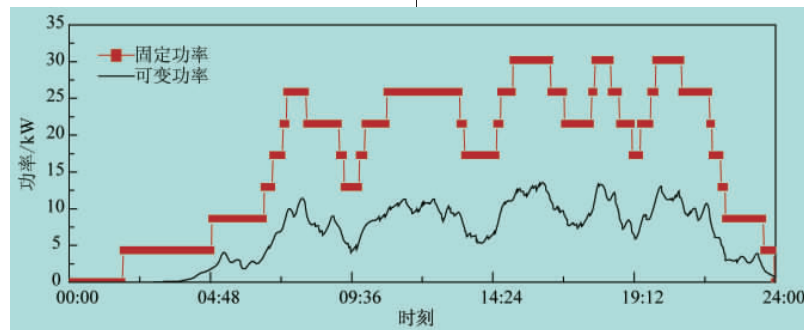
台即满足要求。

3.4 分项能耗比较分析

由于固定功率不随时间变化, 可变功率随时间变化, 为分析可变能耗和固定能耗的区别, 故采用功率的形式进行分析。A站扶梯层间高度设置为 $H=5\text{ m}$ 。以等待时间 5 s 为例, 3种不同工作日固定功率和可变功率如图5所示。

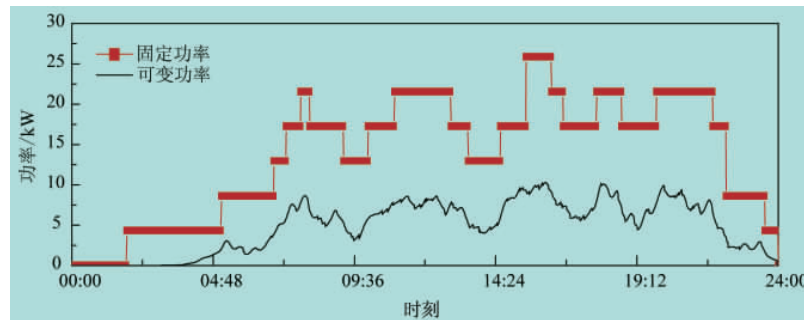
图5中固定功率所显示的梯级变化即为扶梯开启台数变化, 当可变功率增加时, 固定功率增加, 扶梯开启台数增加; 可变功率减小时, 固定功率随之减小, 扶梯开启台数减少。可变功率处于峰值时, 扶梯开启台数达最多。图5所示可变功率的变化规律与图2进站人数变化趋势一致。以图3所示功率值乘以相应的时间段并累加即可得等待时间为 5 s 时各工作日可变能耗和固定能耗的值。

1) 可变能耗约占总能耗的 30% , 固定能耗约占 70% 。可变能耗的影响因素主要是搭乘扶梯的旅客人数; 固定能耗的



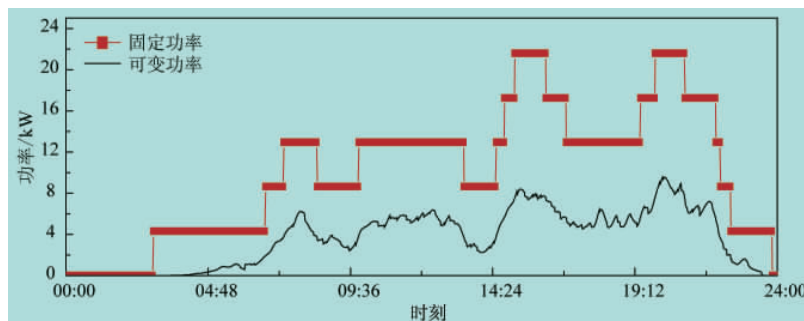
(a) 旅客发送最多日

(a) Largest-passenger-volume day



(b) 节假日

(b) Holiday



(c) 普通工作日

(c) Ordinary working day

图5 3种工作日下的固定功率和可变功率(等待时间为 5 s)

Fig. 5 Fixed and variable power of three kinds of working days for waiting time of 5 s

