

基于等间隔运行模式的群组电梯系统优化调度方法

彭云建^{1†}, 杜艺聪¹, 仲兆峰²

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 日立楼宇技术(广州)有限公司, 广东 广州 510670)

摘要: 针对群组电梯系统运行调度优化问题, 本文采用多目标优化模型, 基于电梯群组等间隔运行模式的操作规则, 建立一类以乘客平均候梯时间最短为主要目标的群组优化策略. 通过分析群组电梯系统运行中乘客候梯时间、服务时间、轿厢拥挤度和电梯能耗等指标, 建立电梯系统运行的动态指标评价模型, 考虑电梯客流的随机性因素, 提出乘客候梯等间隔派梯规则和算法, 实现了电梯系统多目标优化的动态调度方法. 实验结果表明, 对比传统的最短距离调度算法, 本文方法可以降低乘客平均候梯时间13.1%, 提高群组电梯系统工作性能.

关键词: 电梯群组调度; 等间隔运行; 多目标优化; 乘客平均候梯时间

引用格式: 彭云建, 杜艺聪, 仲兆峰. 基于等间隔运行模式的群组电梯系统优化调度方法. 控制理论与应用, 2023, 40(5): 949–956

DOI: 10.7641/CTA.2021.10675

Optimal scheduling method of group elevator system based on equal interval operation mode

PENG Yun-jian^{1†}, DU Yi-cong¹, ZHONG Zhao-feng²

(1. School of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China; 2. Hitachi Building Technology (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510670, China)

Abstract: In this paper, a multi-objective optimization model is proposed based on the operation rules for the group elevators working in an equal interval mode. Accordingly, an optimized dispatching strategy is established to achieve the shortest average waiting time of passengers, which is also primary optimization target. For such we formulate the dynamic performance evaluation of group elevators' operation with the indexes such as passengers' waiting time, taking-on service time, elevator-cars' full-load-rate and up-down energy consumption. Considering the randomness of elevator passengers' flow, the rules and algorithm of equal interval dispatching for passengers' waiting time are developed to implement the dynamic scheduling method of multi-objective optimization of the group elevators. Finally, in simulation and testing experiment, the results show that the proposed method reduces the average waiting time of passengers by 13.1% and improves the performance of group elevator system, which is comparing with the traditional shortest distance scheduling algorithm.

Key words: elevator group dispatch; equal interval operation; multi-objective optimization; average waiting time of passengers

Citation: PENG Yunjian, DU Yicong, ZHONG Zhaofeng. Optimal scheduling method of group elevator system based on equal interval operation mode. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(5): 949–956

1 引言

电梯系统是现代高楼的必备特种装置, 特别对于写字楼、商业楼、医院门诊楼等大型高层建筑物, 不仅电梯服务楼层高, 而且客流量大, 对电梯服务要求高, 因此, 在电梯系统设计、安装和运行调度管理中人们提出了很多新课题. 其中, 如何合理配置电梯并优化电梯运行过程以充分发挥电梯的运输能力和提高乘客舒适性, 是近年来对群组电梯系统非常有意义的问

题. 早至1983年, Strakosch^[1]提出电梯系统分区方法, 即将同一建筑物中多台电梯分楼层区域运行, 每台电梯响应指定服务区域内楼层的乘梯召唤信号(外召), 空闲时停留服务区的合适楼层. 分区方法可以实现多台电梯服务高楼层时合理地分组, 使得电梯能够尽快响应乘客的召梯信号. 该方法对客流量大的电梯系统非常有效, 但在电梯调度方面缺乏灵活性. 1991年, Tobita等^[2]基于模糊规则系统选择系数和估计函数,

收稿日期: 2021–07–26; 录用日期: 2021–12–29.

[†]通信作者. E-mail: pengyj@scut.edu.cn; Tel.: +86 13760608082.

本文责任编辑: 宗群.

国家自然科学基金项目(62173151, 61573154)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62173151, 61573154).

提出了按照预计候梯时间、乘梯时间和乘客人数加权总和最优的实时派梯策略,该方法需要大量的电梯状态计算,且未考虑客流的随机不确定性.文献[3]采用专家系统和模糊推理方法提出了混合调度的系统,利用专家经验和知识缩短各种交通流下乘客等待时间,但基于规则的专家系统不具备从经验中学习的能力.1994年, Bao等^[4-5]针对电梯下行客流高峰提出最长队列优先(longest queue first, LQF)算法和最高未答复楼层优先(highest unanswered floor first, HUFF)算法,前者按照候梯人数派梯,后者按照外召信号发生楼层派梯,这两种算法仅考虑了电梯下行高峰流量下最优调度方法,对其他类型的客流模式不具有优化能力.

由于客流的随机性,电梯系统需要根据不同的客流模式对电梯群控算法作逻辑调整:电梯在上行高峰时,侧重优化乘客的候梯时间.上行高峰模式下,无法提前预知乘客的目的楼层,也无法干预乘客上电梯顺序,可以采用一个外召请求信号派多台电梯的策略.电梯在下行高峰时,侧重优化乘客的乘梯时间,采用飞站策略,即有选择地停靠有外召请求的楼层.电梯在较空闲时段,侧重优化电梯的启停次数和能耗,采用一个外召请求信号派一台电梯的策略.

为了适应不同客流,本文提出一种多目标优化调度策略,该调度策略将预测外召的候梯时间、乘梯时间、电梯的拥挤度和能耗与对应的权重值进行计算,得到对应每台电梯的综合指标,取综合指标最优值对应的电梯作为当前外召的最优派梯策略.由于候梯时间这个指标最容易影响乘客的满意度,提出了一种改进的调度方法:基于等间隔运行模式的群组电梯系统优化调度方法,进一步优化乘客候梯时间.

本文的结构如下:首先,提出多目标优化调度策略和多目标动态优化模型;其次,提出改进方法:基于等间隔运行模式的群组电梯系统优化调度方法;最后,设计实验和对比方案,并对实验结果分析讨论,验证了本文算法的可行性和有效性.

2 多目标优化调度策略

多目标优化调度策略根据预测外召候梯时间、预测外召乘梯时间、当前电梯的拥挤度和电梯能耗,计算评价指标值,然后根据评价指标值进行分配控制.

评价函数中用到的权重值可以根据不同客流模式手动调整,也可以将一定时间段的客流记录下来,通过蜂群算法不断进行模拟并调整权重值^[6-9].

2.1 电梯运行的评价指标

2.1.1 预测候梯时间

每个外召对应的候梯时间主要由已候梯时长和继续候梯时长两部分组成的,即

$$T_{wt}(t) = T_1(t) + T_2(t), \quad (1)$$

其中: $T_1(t)$ 是指乘客到达出发楼层,按下外召按钮的时刻 t_0 到电梯群组计算各个外召综合指标的时刻 t 的时间长度,则 $T_1(t) = t - t_0$;预测该外召继续候梯时间 $T_2(t)$ 是指电梯接收到调度信号的时刻 t_1 到电梯到达乘客的出发楼层的时间 t_2 的时间长度. $t_1 = t + \delta$, δ 是电梯群组开始计算综合指标到发出调度信号的时间.

T_2 的计算公式为

$$T_2(t) = \frac{\sum_{i=a}^b c_i}{v} + n_1 t_p, \quad (2)$$

其中: $\sum_{i=a}^b c_i$ 是指在 t_1 时,电梯从当前所在的楼层 a 运行到乘客出发楼层 b 的距离; n_1 是指电梯从当前所在的楼层到乘客的出发楼层需要停靠下客的次数; t_p 是指平均每次乘客下电梯消耗的时间.

联立式(1)-(2), $T_{wt}(t)$ 的计算公式为

$$T_{wt}(t) = (t + \delta - t_0) + \frac{\sum_{i=a}^b c_i}{v} + n_1 t_p. \quad (3)$$

2.1.2 预测乘梯时间

乘客的乘梯时间主要由以下两部分组成:

$$T_{rt}(t) = T_3(t) + T_4(t), \quad (4)$$

$$T_3(t) = \frac{\sum_{i=b}^d c_i}{v}, \quad (5)$$

其中 T_3 是指电梯空载从乘客出发楼层 b 运行到乘客的目的楼层 d 的总时间.

$$T_4(t) = n_2 t_p, \quad (6)$$

$T_4(t)$ 是指在 t 时刻,电梯从乘客出发楼层 b 运行到乘客的目的楼层 d 时,由于电梯此时可能有乘客在电梯内按下目的楼层的按钮(内召信号)并且有些内召信号在到达乘客出发楼层时需要进行处理,所以电梯在响应乘客的外召信号时需要计算停靠时间,停靠时间为停靠次数 n_2 ,平均每次乘客下电梯的时间 t_p .

联立式(4)-(6),预测乘梯时间 $T_{rt}(t)$ 的计算公式为

$$T_{rt}(t) = \frac{\sum_{i=b}^d c_i}{v} + n_2 t_p. \quad (7)$$

假设电梯群组中所有电梯速度在配置上是相等,则每台电梯的 $T_3(t)$ 值都相等,式(7)可简化为

$$T_{rt}(t) = n_2 t_p. \quad (8)$$

2.1.3 电梯拥挤度

由于无法准确获取电梯中的乘客数,所以选取电梯载重量作为电梯的拥挤度的计算参考值.取电梯最大核载重量的80%作为满载.综上,定义电梯拥挤度

指标函数 f_{cr} 为

$$f_{cr}(t) = \frac{w_t(t)}{0.8w_c}, \quad (9)$$

其中: $w_t(t)$ 是指电梯在 t 时刻的载重量, w_c 是指电梯的最大核载总重量.

2.1.4 电梯能耗

电梯匀速运行产生的能耗远小于电梯的启停所产生的能耗, 则可将启停次数作为电梯能耗的重要参考值, 电梯能耗指标函数 $f_{en}(t)$ 定义为

$$f_{en}(t) = n_3 E n_{avg}, \quad (10)$$

其中: n_3 是指电梯在 t 时刻从电梯当前楼层到乘客的目的楼层之间的启停次数, n_3 可以根据乘客在轿厢内按下目的楼层的按钮(内召)来确定; $E n_{avg}$ 是指平均电梯每次启停的能耗量^[10].

2.2 多目标动态优化模型

在电梯群组调度问题上存在多个目标需要优化, 所以提出多目标动态优化问题, 建立群组优化调度的目标评价函数, 并以此为调度优化目标, 指导电梯群组进行策略调度优化. 多目标优化问题的目标评价函数一般表达式为

$$\max [f_1(x) \ f_2(x) \ \cdots \ f_n(x)]^T. \quad (11)$$

评价函数法是多目标优化问题中常用的一种方法, 即通过各种组合将多个目标结合为单个数值目标. 本文采用线性加权和法, 根据各个子目标的重要性给出相应的权重, 然后将每个子目标乘以各自的权重, 最后相加形成统一的目标函数, 具体如下:

$$F(x) = \max \sum w_i f_i(x), \quad (12)$$

其中: w_i 为各子目标的权重系数, 其取值范围为(0,1), 且 w_i 需满足 $\sum_{i=1}^n x_i = 1$ ^[11].

本文多目标动态优化模型是实时计算每个外召对应每台电梯的综合指标值, 每个外召由所有电梯中综合指标值最优的响应.

根据电梯群调度问题的特点, 对于外召信号, $x_i = 1$ 表示电梯 A_i 调度给该外召信号, $x_i = 0$ 表示电梯 A_i 不调度给该外召信号, 在 t 时刻, 候梯时间指标 $F_{wt}(X, t)$ 、乘梯时间指标 $F_{rt}(X, t)$ 、拥挤度指标 $F_{cr}(X, t)$ 、能耗指标 $F_{en}(X, t)$ 分别为

$$F_{wt}(X, t) = \sum_{i=1}^n x_i T_{wt}(t), \quad (13)$$

$$F_{rt}(X, t) = \sum_{i=1}^n x_i T_{rt}(t), \quad (14)$$

$$F_{cr}(X, t) = \sum_{i=1}^n x_i f_{cr}(t), \quad (15)$$

$$F_{en}(X, t) = \sum_{i=1}^n x_i f_{en}(t), \quad (16)$$

其中: n 为电梯的数量; $X = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $x_i = 0 \cup x_i = 1$, $\sum_{i=1}^n x_i = 1$, $i = 1, 2, \cdots, n$.

令 $F(X, t) = [F_{wt}(X, t) \ F_{rt}(X, t) \ F_{cr}(X, t) \ F_{en}(X, t)]^T$, $W = [w_{wt} \ w_{rt} \ w_{cr} \ w_{en}]$, 则电梯群调度问题可表示为

$$\min_{X \in \mathbb{R}^{n \times 1}} H(F(X, t)) = WF(X, t), \quad (17)$$

则多目标最优派梯策略 $X^*(t)$ 为

$$X^*(t) = \arg \min_{X \in \mathbb{R}^{n \times 1}} H(F(X, t)), \quad (18)$$

其中: w_{wt} , w_{rt} , w_{cr} 和 w_{en} 为一组权重, 分别代表预测外召候梯时间指标权重、预测乘梯时间指标权重、当前电梯拥挤度指标的权重和电梯能耗指标的权重. 列向量 X^* 中 $x_i = 1$ 对应的下标号 i 则是计算出最优派梯策略对应的电梯序号.

3 基于等间隔运行模式的群组电梯系统优化调度方法

根据预测的候梯时间、预测的乘梯时间、电梯的拥挤度以及电梯的能耗计算出评价指标值, 然后根据该评价函数值进行分配控制. 在上述电梯群管理系统中, 例如出现新外召信号时, 计算各台电梯对应此外召信号的综合指标值, 并将外召信号分配给综合指标值最优的电梯. 但该分配存在以下两个问题:

1) 针对已经发生的外召信号进行了最佳的派梯, 但没有就将来可能出现的外召信号的影响作出充分的考虑;

2) 由于关注的是外召信号的综合指标, 缺少对长候梯这一指标的关注, 而长候梯是乘客比较关注的问题.

针对上一章节提出多目标动态优化算法的不足, 解决上述算法所存在的问题, 本章节提出了一种解决方案, 其基本思想可归纳为: 在多目标优化算法分配下, 将多个未响应的电梯呼叫信号的候梯时间尽可能等份分配给各台电梯, 减少长候梯情况的出现, 优化电梯之间的相对位置, 避免电梯间间隔过长时, 造成某些外召信号等待时间过长, 减少乘客平均候梯时间.

3.1 基于候梯楼层等间隔分配算法

本文通过分析 n 台电梯对应 m 个外召信号之间的派梯关系, 进而阐述候梯时间等间隔分配算法的设计思想.

若由 n 台电梯组成的电梯群组系统, 在某一时刻产生 m 个外召信号. 按照如下几种情况分析哪种情景需要运用等间隔分配算法.

情形 1 当 $n = 1$ 时, 假设只安装一台电梯, 无论外召信号有多少个, 由于等间隔分配算法需要多梯分配, 所以对于单梯无法发挥其优势.

情形2 当 $m = 1$ 时, 假设当前时刻只有一个外召信号, 只需派距离最近的电梯去响应该信号即可.

情形3 当 $1 < m \leq n$ 时, 电梯台数多于该时刻外召信号个数时, 每个外召信号由一台电梯进行响应.

情形4 当 $1 < n < m$ 时, 当该时刻外召信号个数多于电梯台数时, 此种情形最为常见, 最需要群控派梯策略.

根据情形4的条件, 分析下图两种情况. 电梯从大厅运行到顶层, 再从顶层再往下运行至大厅, 称为电梯一周运行周期. 将其画成一个圆, 并将门厅呼叫信号的方向以及所在的楼层号根据弧度依次标记在运

行周期圆上, 如图1, 上行外召信号有2楼、9楼、17楼和28楼, 下行外召信号有30楼、25楼、15楼、13楼和10楼. 同时将电梯的运行位置以及方向标记在运行周期圆上, 一号电梯处于20楼, 方向是上行, 二号电梯向上运行在7楼, 三号电梯在14楼, 方向是向下的.

图1(a)所示, 等间隔运行要求派梯外召楼层之间的弧度尽可能相等, 或者楼层所在的圆周角相等, 即

$$\text{rad} = \frac{360^\circ}{n}, \tag{19}$$

其中 n 为电梯的台数. 式(19)求出运行周期圆分成 n 等分的弧度.

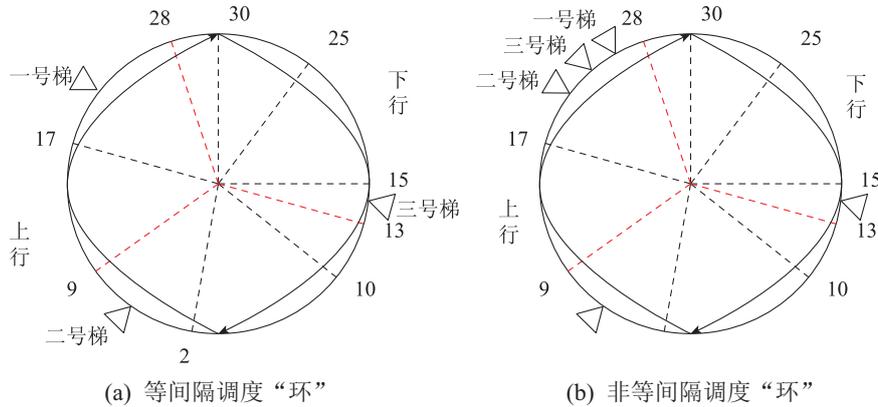


图1 运行周期圆图

Fig. 1 Diagram of operation cycle

由式(19)计算所得, 3台电梯, 每台电梯接管大约 120° 的运行周期圆内的外召信号. 图1(a)中将28楼上行信号、13楼下行信号和9楼上行信号标记为红色, 这几个外召在运行周期圆上大约呈以 120° 弧度分布. 这种情况下, 等间隔分配期望一号梯接管28楼上行信号, 顺时针依次响应30楼下行信号、25楼下行信号和15楼下行信号. 同样的, 三号梯接管它运行周期圆顺时针 120° 之内的外召信号. 二号梯则响应9楼和17楼的上行外召信号.

这种调度的好处是3台电梯基本在运行周期圆中呈空间等间隔分布, 即使有新的外召产生于任意楼层, 由于电梯群一直处于动态等间隔空间分布, 该外召信号的候梯时间不会过长.

图1(b)所示, 外召信号方向及外召所在楼层与图1(a)相同, 但3台电梯拥挤在运行周期圆的较小弧度内, 若按最短距离算法作为群控算法, 则三台梯可能频繁加速减速争抢响应同个外召信号, 这样不仅造成能耗损失严重, 更重要的是增加其他外召的候梯时间, 大大增加了长候梯的情况的产生. 实行空间等间隔运行算法, 分配一号梯响应28楼上召信号, 三号梯则采用“飞站”的形式越过一号电梯接管的 120° 区域, 直接响应下一个 120° 区域内的外召信号. 二号梯同样的

响应它逆时针的 120° 区域内的外召信号.

上述两个例子体现了空间等间隔算法的优越性, 很大程度减少乘客的候梯时间, 同时电梯群在运行周期圆上基本处于等间隔分布, 对未来发生的外召信号也有一定的预先优化作用. 但空间等间隔算法也有其缺点, 它并没有像多目标优化算法一样, 将其他指标也考虑进去, 没办法调节其他指标过差的情形^[12-13].

3.2 基于候梯时间等间隔分配算法

由式(1)可知, 每个外召对应的候梯时间主要由已候梯时长 $T_1(t)$ 和继续候梯时长 $T_2(t)$ 两部分组成的, 所以每个外召对应的候梯时间优化体现在 $T_2(t)$ 上. 则每个派梯策略中多个外召继续候梯时长总和和可记为

$$T(X, t) = \sum_{i=1}^m T_2(C_i, t), \tag{20}$$

其中: m 指在 t 时刻外召数量; n 为电梯组中电梯数量; X 表示当前多个外召的总派梯策略, $X = [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_m] \in \mathbb{R}^{n \times m}$; C_i 表示第 i 个外召的派梯策略, C_i 中 $x_j = 1$ 表示当前派第 j 台电梯响应第 i 个外召, $C_i = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $x_j = 0 \cup x_j = 1$, $\sum_{j=1}^n x_j = 1, j = 1, 2, \dots, n$.

保证多个外召继续候梯时长总和最小, 即当前派

梯策略为最优派梯策略. 则总的派梯策略为

$$X^*(t) = \arg \min_{X \in \mathbb{R}^{n \times m}} T(X, t). \quad (21)$$

候梯楼层等间隔分布的思想是将一个 360° 的圆等分为60份(建筑物高30层, 上行外召和下行外召分开), 每份6度, 再通过电梯台数及电梯所在位置, 分配各台电梯的响应的区域. 候梯时间等间隔分配算法是将某一时刻的所有未响应的外召信号的已候梯时间累加起来, 总候梯时间构成一个运行周期圆, 每个外召不再固定占据相当于一层楼在运行周期圆占据的弧度, 而是根据每个外召信号已候梯时间占所有外召信号累加候梯时间的比重占据在运行周期圆中的弧度.

如图2(a), 有9个未响应的外召分布在运行周期圆上, 每个外召已候梯时间记录在楼层序号后面. 将每个外召已候梯时间累加起来, 共计120 s, 则每1 s候梯时间占据整个运行周期圆3 rad. 28楼上行的外召已候梯时长为4 s, 则占据整个运行周期圆12 rad. 依次将所有外召已候梯时长通过圆弧大小记录在运行周期圆上, 根据电梯台数 n , 将整个运行周期圆分为大致 n 等分, 并划分区域, 每台电梯负责一个区域的外召信号. 例如: 将28楼的上召信号、30楼的下召信号、25楼的下召信号和15楼的下召信号分成一个区域, 该区域累计已候梯时间为38 s, 在运行周期圆上占114 rad接近圆的120 rad. 其它区域也按同样方法进行分配.

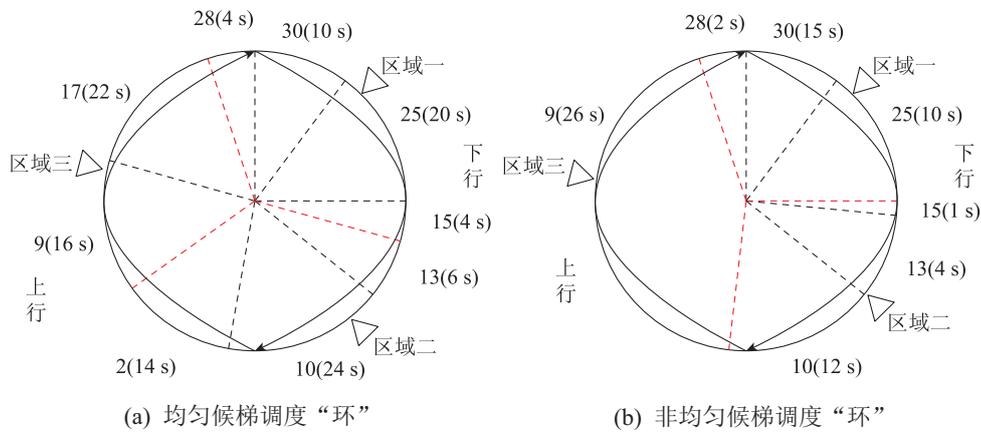


图 2 候梯时间等间隔分配图

Fig. 2 Diagram of equal interval allocation of waiting time

如图2(b), 当一个外召信号已候梯时间过长, 占据弧度远大于平均每个区域本该分配的弧度时, 将该单个外召独占一个区域, 能尽快得到电梯的响应, 减少候梯时间.

候梯时间等间隔分配能够有效避免长候梯情况的产生, 基于每个外召已候梯时长进行统筹派梯策略, 有效减少总体平均候梯时间.

3.3 候梯时间等间隔分配算法实现

电梯群控如何分配 n 台电梯去对应到分配好的区域, 以及如何将该算法运用到前文介绍的多目标动态优化算法中. 首先, 根据群组电梯系统优化算法计算出各个外召信号对应的各台电梯的综合指标, 并依据综合指标越小越优先的原则进行排序. 选取综合指标最小对应的外召信号作为区域划分的起始点, 综合指标最小对应的电梯则直接响应区域内的所有外召, 将该区域内的外召信号及该电梯从排序队列中删除, 根据删除过后的队列并进行第二区域电梯的选取, 依次选取, 直至电梯与划分区域一一对应. 最后进行电梯群组派梯环节. 算法流程图如图3.

4 仿真实验设计和实验结果

本章节将传统群控算法、多目标动态优化算法和基于候梯时间等间隔运行模式的多目标动态优化调度算法这3个不同算法在上行高峰模式、层间交通模式和下行高峰模式等不同客流模式下, 2种电梯群结构分别为4台电梯20层楼和3台电梯15层楼下进行模拟仿真. 其中传统群控算法^[14]是采用单一指标: 距离外召最近的电梯优先响应, 多目标动态优化算法是第2节提出的算法, 基于候梯时间等间隔运行模式的多目标动态优化调度算法是第3节提出的算法.

本文实验是在本实验室自主开发的电梯系统上进行模拟仿真, 实验机器配置为: Intel-I5 3.40 GHz中央处理器、4 GB内存, 软件环境为Win10 + Visual studio 2019.

4.1 实验参数

仿真平台以办公大楼为示例, 建立一个4台电梯20层楼高的系统模型, 每层楼高3.2 m, 如图4. 每台电梯的配置如下: 额定载重为1600 kg, 核定人数为16人, 额定速度为4 m/s, 额定加速度为 0.8 m/s^2 , 额定加加速度为 0.3 m/s^3 .

每层楼常驻人数为100人,第1层是大厅,建筑物常驻人数大约为1900人,根据时间段配置乘客的出勤率,每个时间段再根据泊松分布或者是根据蒙特卡罗随机采样产生上行客流,下行客流是根据均匀分布或是正态分布对乘客停留时间在设定时间段内进行随机采样.

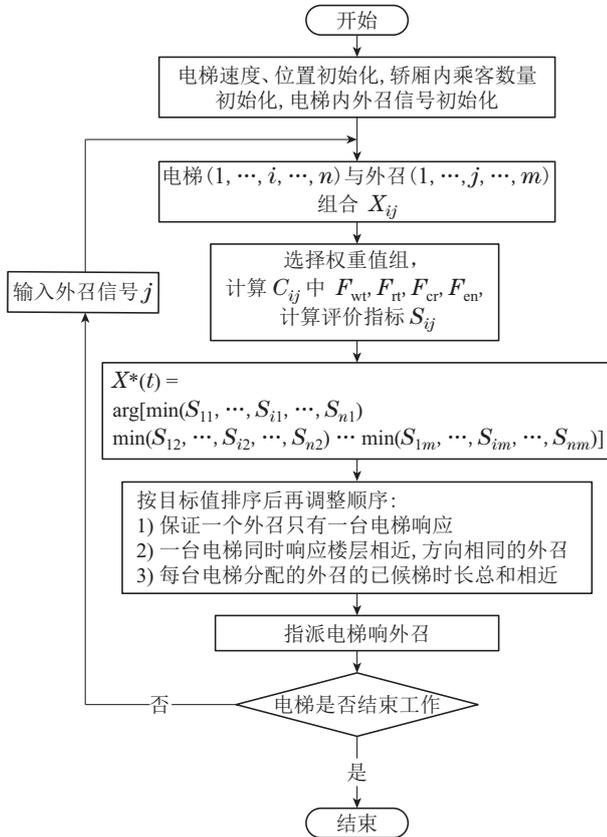


图3 候梯时间等间隔分配算法流程图

Fig. 3 Flow chart of waiting time equal interval allocation algorithm

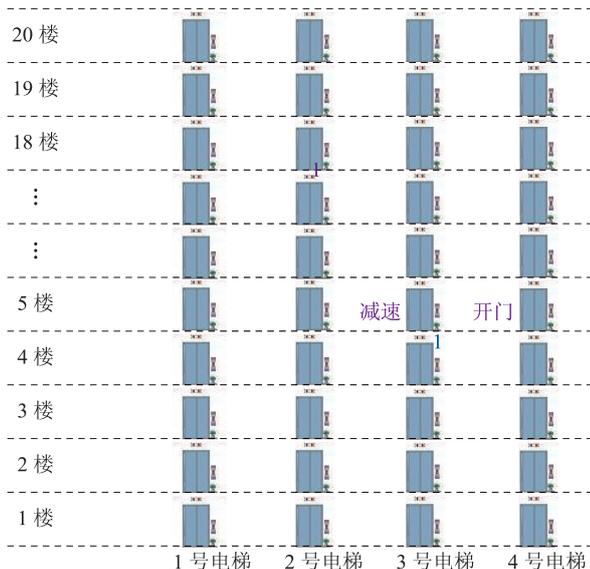


图4 实验仿真的电梯系统模型: 4台电梯20层楼

Fig. 4 Elevator system model of experimental simulation: 4 elevators, 20 floors

图5和图6为配置后整个建筑物从0点到24点客流的分布情况. 8点到9点上班高峰,乘客大都从一楼大厅出发,到达各自的办公楼层,14点也是一个上行小高峰. 12点半过后是下行高峰,乘客纷纷从各自的办公楼层下行到大厅,18点左右也是一个下行高峰,持续时间相对久一点.

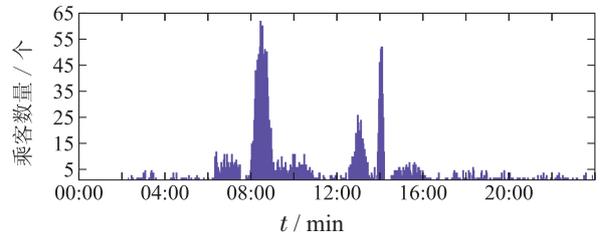


图5 上行客流

Fig. 5 Upward traffic flow

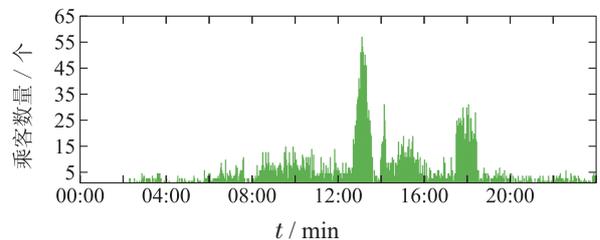


图6 下行客流

Fig. 6 Downward traffic flow

上行高峰模式采用8点到9点之间的客流,层间交通采用9点30分到10点30分之间的客流,下行高峰模式采用17点30分至18点30分之间的客流. w_{wt} , w_{rt} , w_{cr} , w_{en} 的值由不同交通模式而确定,高峰模式侧重于乘客的时间,电梯群组系统能耗不着重考虑,层间及空闲模式重点考虑系统能耗,可根据表1选择交通模式对应加权系数.

表1 交通模式对应加权系数

Table 1 Corresponding weighting factors for traffic modes

| 交通流模式 | w_{wt} | w_{rt} | w_{cr} | w_{en} |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 上行高峰模式 | 0.50 | 0.40 | 0.05 | 0.05 |
| 层间交通模式 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.40 |

4.2 实验结果

表2-4的实验是控制电梯系统参数相同,客流相同情况下,只改变控制算法,得到各个性能指标,且表中的实验结果是在5次相同条件下模拟运行取平均值.

从表2-4可得出以下的结论:

1) 在不同的交通模式下,在不同建筑物及电梯台数下,本文提出的多目标动态优化算法和基于等间隔运行模式的优化调度方法都明显优于传统群控算法,乘梯时间加上候梯时间明显小于传统群控算法的总

服务时间, 并且长候梯率也大大降低. 原因: 传统群控算法采用最短距离优先派梯, 只考虑距离这单一指标. 本文在第2、3节提出的算法考虑到其他不同指标, 且分配结果在该外召信号未响应前实时计算调整, 保证了该算法是动态调度的过程.

2) 在不同交通模式下, 基于等间隔运行模式的优化调度方法略优于多目标动态优化算法主要体现在候梯时间以及长候梯率上, 基于等间隔运行模式的优化调度方法在多目标动态优化算法分配的基础上, 根据各个外召的候梯时间对分配结果进一步调整, 可以有效避免单个外召候梯时间过长, 更加注重了乘客的候梯时间, 减少长候梯情况的产生.

3) 等间隔运行模式的优化调度方法在层间交通模式和下行高峰模式整体优于多目标动态优化算法, 但在上行高峰模式体现不明显, 主要原因是上行高峰模式中, 乘客出发楼层为一楼大厅, 难以运用等间隔运行模式的思想.

表2 上行高峰模式的实验结果

Table 2 Experimental results of up-peak mode

| 层数 | 梯数 | 控制算法 | T_{ar} | T_{aw} | $R_{aw}/\%$ |
|----|----|---------|----------|----------|-------------|
| 20 | 4 | 传统群控 | 54.8 | 37.3 | 28.4 |
| 20 | 4 | 多目标动态优化 | 47.5 | 30.9 | 20.5 |
| 20 | 4 | 等间隔运行模式 | 47.1 | 24.5 | 13.9 |
| 15 | 3 | 传统群控 | 49.8 | 31.3 | 19.0 |
| 15 | 3 | 多目标动态优化 | 41.1 | 28.7 | 13.8 |
| 15 | 3 | 等间隔运行模式 | 42.1 | 27.2 | 12.2 |

表3 层间交通模式的实验结果

Table 3 Experimental results of inter-floor mode

| 层数 | 梯数 | 控制算法 | T_{ar} | T_{aw} | $R_{aw}/\%$ |
|----|----|---------|----------|----------|-------------|
| 20 | 4 | 传统群控 | 27.0 | 17.3 | 2.0 |
| 20 | 4 | 多目标动态优化 | 26.7 | 15.6 | 0.7 |
| 20 | 4 | 等间隔运行模式 | 24.8 | 14.0 | 0.0 |
| 15 | 3 | 传统群控 | 21.4 | 14.3 | 1.0 |
| 15 | 3 | 多目标动态优化 | 21.0 | 13.5 | 0.0 |
| 15 | 3 | 等间隔运行模式 | 20.9 | 12.8 | 0.0 |

表4 下行高峰模式的实验结果

Table 4 Experimental results of down-peak mode

| 层数 | 梯数 | 控制算法 | T_{ar} | T_{aw} | $R_{aw}/\%$ |
|----|----|---------|----------|----------|-------------|
| 20 | 4 | 传统群控 | 39.3 | 34.1 | 14.8 |
| 20 | 4 | 多目标动态优化 | 34.6 | 34.0 | 10.6 |
| 20 | 4 | 等间隔运行模式 | 34.9 | 29.4 | 8.9 |
| 15 | 3 | 传统群控 | 30.2 | 29.6 | 8.6 |
| 15 | 3 | 多目标动态优化 | 29.2 | 23.3 | 4.4 |
| 15 | 3 | 等间隔运行模式 | 27.7 | 23.1 | 3.5 |

5 结论

本文提出了一种多目标动态优化算法. 该算法将每台电梯和每个外召信号一一对应, 根据不同客流模式选取权值组, 计算每个对应关系的综合指标, 综合指标值最小为当前最优派梯策略. 一方面, 由于该算法未能考虑到长候梯率这一指标, 另一方面, 就将来可能出现的外召信号的影响未作出充分的考虑. 本文提出一种改进的算法: 基于等间隔运行模式的优化调度方法. 该算法在多目标动态优化算法作出派梯策略后, 进行再次调整. 主要的思路是对当前多个未响应外召信号的已候梯时长进行了进一步处理, 将候梯时长记录在运行周期圆, 将运行周期圆进行区域划分, 对应到每台电梯. 该算法能够充分利用候梯楼层等间隔算法的优点, 同时解决候梯楼层等间隔未能充分考虑其他性能指标所带来的负面影响, 形成更完善的派梯策略. 实验结果表明, 本文提出的基于等间隔运行模式的优化调度方法, 相比其他算法性能更好, 验证了本文思想的有效性.

参考文献:

- [1] STRAKOSCH G R. *Vertical Transportation, Elevators and Escalators*. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [2] TOBITA T, FUJINO A, INABA H, et al. An elevator characterized group supervisory control system. *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*. Kobe, Japan: IEEE, 1991, 3: 1972 – 1976.
- [3] UJIHARA H, TSUJI S. The revolutionary AI-2100 elevator-group control system and the new intelligent option series. *Mitsubishi Electric Advance*, 1988, 45(11): 5 – 8.
- [4] BAO G, CASSANDRAS C G, DJAFERIS T E, et al. Elevator dispatchers for down peak traffic. *ECE Department Technical Report*. Amherst: University of Massachusetts, 1994.
- [5] CRITES R H, BARTO A G. Elevator group control using multiple reinforcement learning agents. *Machine Learning*, 1998, 33(2/3): 235 – 262.
- [6] ZHANG Liang. *Research on multi-objective dispatching planning of elevator group*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
(张梁. 电梯群的多目标规划调度研究. 武汉: 华中科技大学, 2007.)
- [7] ZONG Qun, TONG Ling, XUE Lihua. Research on intelligent optimal dispatching method in elevator group control systems. *Control and Decision*, 2004, 19(8): 939 – 942.
(宗群, 童玲, 薛丽华. 电梯群控系统智能优化调度方法的研究. 控制与决策, 2004, 19(8): 939 – 942.)
- [8] ZONG Qun, YUE Youjun, SHANG Xiaoguang, et al. A multi-object dispatching method in elevator group control system. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2001, 21(11): 129 – 133.
(宗群, 岳有军, 尚晓光, 等. 一种电梯群控多目标调度方法. 系统工程理论与实践, 2001, 21(11): 129 – 133.)
- [9] LUO Fei, XU Yuge, CAO Jianzhong. Modeling and control in elevator group control system with destination registration. *Control and Decision*, 2006, 21(10): 1159 – 1162.
(罗飞, 许玉格, 曹建忠. 基于目的层预约的电梯群控系统建模与控制. 控制与决策, 2006, 21(10): 1159 – 1162.)
- [10] PENG Kerong. *Elevator Traffic Analysis, Design and Control*. Langfang: Research Institute of Construction Mechanization, China Academy of Building Sciences, 1993.

- (彭克荣. 电梯交通分析、设计与控制. 廊坊: 中国建筑科学研究院建筑机械化研究所, 1993.)
- [11] Guo Pujing. *Research on traffic pattern recognition and optimal scheduling of group control elevator*. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
(郭普静. 群控电梯交通模式识别与优化调度研究. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.)
- [12] Ji Chuanmiwen, CUN Gangyishi, NIAO Gubuxun, et al. *Elevator Group Management System and Its Control Methods*. Japan: CN1939830, 2007-04-04.
(吉川敏文, 村冈一史, 鸟谷部训, 等. 电梯群管理系统及其控制方法. 日本: CN1939830, 2007-04-04.)
- [13] Carionimi A, Suriname A, Karsted P. *Method for Controlling the Movement of Elevator Cars, Multi Car Elevator Systems, and Operation Entities*. Finland: CN111196537A, 2020-05-26.
(卡里奥尼米, 萨里莱南, 卡尔斯特德. 控制电梯轿厢的移动的方法、多轿厢电梯系统和操作实体. 芬兰: CN111196537A, 2020-05-26.)
- [14] XU Xinren, LI Shulan, ZHU Enfang, et al. Study on elevator group control technology based on the principle of PLC shortest distance scheduling. *Journal of Shangrao Normal University*, 2020, 40(6): 4-9.
(徐新仁, 李淑兰, 朱恩芳, 等. 基于最短距离调度原则的电梯群控技术研究. 上饶师范学院学报, 2020, 40(6): 4-9.)

作者简介:

彭云建 教授, 硕士与博士生导师, 目前研究方向为随机系统建模与控制、电力系统分析与控制、信息系统工程, E-mail: pengyj@scut.edu.cn;

杜艺聪 硕士研究生, 目前研究方向为电梯系统优化调度, E-mail: 201921017085@scut.edu.cn;

仲兆峰 电气高级工程师, 目前研究方向为智慧楼宇控制系统、电梯智能控制系统、电梯物联网、电梯大数据分析, E-mail: zhongzhao.feng@hitachi-helc.com.