

基于 ABC-SA 混合算法的群控电梯优化调度

闫秀英¹, 郭普静¹, 范凯兴²

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055)

摘要:为解决电梯群控系统 (elevator elevator group control system, EGCS) 时间和能耗性能不理想的问题, 提出一种基于改进人工蜂群的电梯群控多目标优化调度算法; 首先, 针对 EGCS 控制目标复杂性, 建立具有多评价指标的群控电梯调度模型, 依据该模型的适应度值进行合理派梯选择; 其次, 引入模拟退火准则优化基本人工蜂群算法结构, 以解决算法易陷入局部最优解的问题, 使用混合改进的人工蜂群算法进行多目标优化调度; 仿真结果表明, 所提算法在侯梯时间、乘梯时间和停靠次数 3 个性能指标上对比基本人工蜂群算法均有所提高, 有效说明该方法在求解柔性多目标群控电梯优化调度时具有一定的优越性。

关键词: 电梯群控; 多目标优化; 人工蜂群; 模拟退火

Optimal Scheduling of Group-controlled Elevators Based on ABC-SA Hybrid Algorithm

Yan Xiuying¹, Guo Pujing¹, Fan Kaixing²

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To solve the problem of unsatisfactory time and energy consumption of elevator group control system (EGCS), a multi-objective optimization scheduling algorithm for elevator group control based on improved artificial bee colony algorithm is proposed. Firstly, for the complexity of EGCS control target, a group-controlled elevator dispatching model with multiple evaluation indexes is established, and reasonable elevator scheduling solution is selected according to the fitness value of the model. Then, the simulated annealing algorithm is introduced to solve the defect that the artificial bee colony algorithm is easy to fall into the local optimal solution, and it uses hybrid improved artificial bee colony algorithm for multi-objective optimal scheduling. The simulation results show that the proposed algorithm compared with the artificial bee colony algorithm on the three performance indicators of waiting time, riding time and stopping times is improved, which effectively shows that the method is effective certain advantages in solving the flexible multi-objective group-controlled elevator optimal scheduling.

Keywords: elevator group control; multi-objective optimization; artificial bee colony; simulated annealing

0 引言

随着城镇化进程的加快, 电梯和电梯组的发展伴随高层智能建筑的不断发展而逐渐增加。电梯群控系统 (elevator elevator group control system, EGCS) 是根据建筑物内的交通流状况, 合理地分配多部电梯, 根据管理目标、服务质量、服务数量及能量消耗的要求, 电梯群控制器能合理、优化调度多部电梯以满足服务目标要求^[1]。建筑物中一组电梯的调度本质上是资源合理分配的组合优化。对于 EGCS 而言, 寻找一种高效的调度优化算法能够根据当前状态决定调度某台电梯响应某层呼梯信号至关重要。

以往群控电梯调度的研究主要集中在遗传算法、模糊控制、神经网络、最小等待时间法和专家系统等方法上。Beamurgia 等人将遗传算法应用于电梯调度问题, 分析乘客

的等待时间, 电梯性能得到了改善但遗传算法在搜索函数最优解时会花费较长时间^[2], 王志华设计了基于模糊控制的群控电梯系统, 但模糊控制缺少学习能力, 难以实时调整模糊隶属度函数^[3], 神经网络应用于电梯群控系统时训练时间过长并且参数不易选择^[4], 专家系统不适合复杂多变的电梯系统, 控制规则有限, 适用于楼层较低的建筑物, 最小等待时间法仅考虑了电梯的时间性能而忽略了现如今比较关注的其他能耗性能^[5]。在节能时代, 较好的 EGCS 应能满足不同交通模式下的乘客需求, 尤其是高峰交通模式。电梯群调度最大化节省时间的同时也应更加关注电梯节能调度, 最大化地减少电梯群控系统的能耗并使时间性能保持在可接受范围内。本文提出综合考虑乘客乘梯及侯梯时间、减少系统能耗的优化思想进行群控电梯多目标优化。

在求解优化问题上, 人工蜂群 (artificial bee colony, ABC) 算法具有参数设置简单、易于实现的特点^[6-7]。李彦苍等人设计了引用信息熵的改进人工蜂群算法求解组合优化问题^[8], 郎曼等人提出了采用人工蜂群算法对电梯群控进行节能优化^[9], 王志刚等人应用 ABC 算法求解车辆路径

收稿日期: 2019-12-22; 修回日期: 2020-01-15。

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2017ZDXM-GY-025)。

作者简介: 闫秀英 (1980-), 女, 河北新乐人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事建筑智能化与节能研究。

规划问题^[10]。人工蜂群算法尽管具有鲁棒性强、计算简单等优点，但仍存在收敛速度慢、易早熟等缺陷。

基于此，研究电梯群控优化调度时在基本人工蜂群的基础上引入模拟退火 (simulated annealing, SA) 机制，以改善蜂群算法在迭代后期易于陷入局部最优而得到假象最优解的缺点，从而改善求解质量。并充分考虑影响电梯群控质量的关键因素，结合多目标优化思想建立多目标评价函数，利用 ABC-SA 混合算法对该目标函数进行求解，以得到更好的求解质量响应派梯策略，在节省乘客使用时间的同时节约系统能耗。

1 群控电梯多目标数学模型

1.1 优化目标

根据 EGCS 的随机性，非线性特征以及乘客心理和生理上的需求，本文综合考虑动态性能指标平均乘梯时间 ART，平均候梯时间 AWT 和系统运行能耗 ANT，以实现电梯群调度的多目标优化。

1.1.1 乘梯时间评价函数

乘梯时间为 t_r ，电梯输送乘客运行时间和电梯在此过程中停靠时间 t_s 之和，电梯停靠时间由乘客进出门时间 t_{ps} 和电梯开关门时间 t_{α} 组成。N 为电梯内乘客总人数，RT (i, j) 为第 i 部电梯运行到第 j 层时电梯内乘客的乘梯时间， s_r 为电梯群总台数， s_c 为楼层数。平均乘梯时间 ART 如式 (3) 所示：

$$RT(i, j) = t_r + t_s \quad (1)$$

$$t_s = t_{\alpha} + t_{ps} \quad (2)$$

$$ART = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{s_r} \sum_{j=1}^{s_c} RT(i, j) \quad (3)$$

当正在输送乘客时，期待随着乘梯时间的增多，评价函数可信度降低，也就是评价价值越高时，说明某一时刻电梯组时间性能良好，建立乘梯时间评价函数如式 (4) 所示。调度优化时希望所用时间越少越好，即随着乘客乘梯时间的增长，乘梯时间评价函数逐渐减少并接近于 0。

$$f_r = \begin{cases} 1 & RT(i, j) = 0 \text{ s} \\ e^{-\alpha * RT^2(i, j)} & RT(i, j) = 110 \text{ s} \end{cases} \quad (4)$$

设乘梯时间为 110 s 时，此时乘梯时间评价函数值为 0.000 1，则可根据乘梯时间函数求解评价函数的相关参数，即乘梯时间评价函数 f_r 如下所示：

$$f_r = e^{-0.00076RT^2(i, j)} \quad (5)$$

将公式 (5) 每 20 s 记录一次 f_r 评价函数值，由表 1 得出随着乘梯时间 RT (i, j) 的增加乘梯时间评价函数 f_r 逐渐减小。

表 1 乘梯时间函数评价表

RT(i, j)	10	30	50	70	90
f_r	0.931	0.523	0.165	0.085	0.003

1.1.2 候梯时间评价函数

候梯时间定义为呼梯信号响应开始到电梯到达召唤层所

用时间。候梯时间评价函数与乘梯时间评价函数类似，不做具体说明。WT (i, j) 为第 i 部电梯运行到第 j 层响应外呼信号所用的时间，候梯时间评价函数 f_w 表达式如式 (6)：

$$f_w = e^{-0.0025WT^2(i, j)} \quad (6)$$

1.1.3 系统能耗评价函数

电梯系统的能耗包括启停能耗和运行时的能耗。一般来说启停能耗都要大于运行能耗，因此可通过减少电梯停靠次数来降低能耗。第 i 部电梯停靠次数记作 $n(i)$ ，系统能耗评价函数 f_n 表达式为：

$$f_n = e^{0.016n^2(i)} \quad (7)$$

1.2 建立多目标数学模型

电梯群控系统的优化属于柔性多目标优化问题，能够协调目标以使所有目标功能尽可能最佳地解决此类问题的关键。电梯群调度采用群智能多目标优化算法，综合 3 个评价标准，采用加权组合法对 3 个指标进行加权求和，数学表达式如下：

$$F(x) = W_1 f_w + W_2 f_r + W_3 f_n \quad (8)$$

式中， $F(x)$ 为多目标评价函数，评价函数值越大，评价派梯的可信度越高。 f_w 、 f_r 、 f_n 分别为候梯时间评价函数、乘梯时间评价函数、系统能耗评价函数； W_1 、 W_2 、 W_3 为评价函数 f_w 、 f_r 、 f_n 对应的系数权重，其中：

$$\sum_{i=1}^3 W_i = 1 \quad (9)$$

W_i 体现了在不同交通模式下各评价指标的侧重。当前电梯为上行或下行客流高峰时以减少乘客候梯时间和乘梯时间为主要目标，因此考虑适当增大 f_w 、 f_r 的权重系数 W_1 、 W_2 ；同理电梯运行在层间或空闲交通模式下时以减少系统能耗为主，因此可增大 f_n 的权重系数 W_3 。

2 基于 ABC-SA 算法的电梯群控系统

2.1 ABC 算法及 SA 算法的思想

人工蜂群 (ABC) 算法是一种模拟群体蜜蜂觅食特性的智能优化算法，该算法是土耳其学者 Karaboga 于 2005 年提出，通过模拟蜜蜂采蜜觅食的行为而寻找优化问题的解^[11-13]。算法包括食物源 (蜜源)、雇佣蜂 (引领蜂)、跟随蜂和侦查蜂 4 种基本要素。使用 ABC 算法进行电梯优化调度时，蜜源对应于群控电梯优化问题的一个可行解，其收益率即适应度值代表解的质量。每个雇佣蜂对应一个确定的蜜源也就是解向量，在不断迭代过程中对蜜源的邻域进行搜索。

基本 ABC 算法在搜索开始阶段，引领蜂根据式 (10) 搜索新蜜源：

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (10)$$

式中， $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ ， D 为待优化问题参数维度， $i \in \{1, 2, \dots, SN\}$ ， $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ ， SN 为种群规模， φ_{ij} 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数。

引领蜂在完成搜索后，会回到蜂巢进行资源分享，采用摇摆舞的方式将信息传递给跟随蜂，跟随蜂对蜜源的选择概率根据式 (11) 使用轮盘赌的方式进行，其中 fit_i 为第 i 个

蜜源的收益率, 蜜源越丰富, 被跟随蜂选择的概率越大。

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{k=1}^{SN} fit_k} \quad (11)$$

跟随蜂完成搜寻后判断是否有要放弃的蜜源, 当某一蜜源位置经过一个蜜源限制开采次数 $limit$ 循环仍没有探索到更好的, 则放弃该蜜源, 引领蜂转变成侦查蜂依据式 (12) 搜寻新的蜜源, x'_{max} 、 x'_{min} 分别为第 j 个参数的上限和下限, 无限次重复这个过程直至迭代达到最大次数或满足终止条件为止。

$$x_{j'} = x'_{min} + rand(0,1)(x'_{max} - x'_{min}) \quad (12)$$

模拟退火 (SA) 算法不仅是一种启发式随机搜索方法, 而且还是一种有效的全局优化算法, 它的凝结源于固态物理退火过程, 是由 Kirkpatrick 于 1983 年提出并首次应用于组合优化问题^[14-15]。SA 算法采用 Metropolis 验收准则, 该算法在搜索策略过程中可以避免陷入局部最优, 其原因是在模拟退火的优化过程中, 较好地解决方案被完全接受, 较差的解决方案也以一定的接受概率被接受, 增加了算法的多样性。

SA 算法中退火温度 T 决定蜜蜂接受低收益率食物源的概率, 温度 T 越高则蜜蜂接受低收益率食物源的概率越大, 温度 T 越低则蜜蜂接受低收益率食物源的概率越小, 因此算法初期温度 T 应该较大使得算法趋于全局搜索, 迭代后期温度 T 越小使算法越趋于局部重点搜索, 加快算法收敛速度。因此, 温度下降函数 选取如式 (13) 所示:

$$T(t+1) = \lambda T(t) \quad (13)$$

式中, λ 为退火系数, 一般取值范围为 $[0.9, 1)$ 。

2.2 基于 ABC-SA 算法的电梯群控系统派梯策略

基本 ABC 算法中侦察蜂的功能是保证算法跳出局部最优, 收敛到全局最优, 但对复杂的优化问题进行求解时算法往往很难收敛到全局最优。引领蜂和侦查蜂在进行邻域搜索后利用贪婪选择策略进行蜜源选择, 对初期适应度值较差的蜜源缺乏关注, 提前将有潜力的蜜源淘汰, 寻访过度依赖算法优化前后蜜源好坏, 忽略拥有巨大潜力的蜜源。为进一步挖掘潜力蜜源, 避免 ABC 算法求解多目标问题时陷入局部最优解, 从算法选择机制角度出发, 引入模拟退火扩大选择机制, 提出一种混合 ABC-SA 算法来解决 EGCS 优化调度问题。所提 ABC-SA 混合算法是一种结合人工蜂群算法的快速计算优势以及模拟退火利用高温状态下粒子的高速无序性, 有效避免陷入局部最优解的方法以提高全局搜索能力。混合算法可以拓宽解的搜索方向, 加强算法的全局搜索能力, 并且根据模拟退火的特性, 初始温度在较高的情况下, 算法容易接受恶化解, 从而能够跳出局部最优解, 减少算法对初始解的依赖。而通过缓慢地降低温度 T , 当 T 趋于零时不再接受恶化解, 逼近全局最优解, 此过程对整体算法后期求解更加有益。

模拟退火的选择策略如式 (14) 所示, $fit(x_j)$ 、 $fit(x_i)$ 为原始蜜源的适应度和邻域搜索后新蜜源的适应度。

若 $fit(x_j) > fit(x_i)$, 则接受新蜜源; 若 $fit(x_j) \leq fit(x_i)$, 则以概率计算公式接受新蜜源。模拟退火的选择策略在一定程度上保留了原有算法贪婪选择策略的择优选择思想, 同时也以一定的概率接受有潜力的蜜源, 在一定程度上增强了基本 ABC 算法跳出局部最优的能力。

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & fit(x_j) > fit(x_i) \\ \exp\left(\frac{-fit(x_j) - fit(x_i)}{T}\right), & fit(x_j) \leq fit(x_i) \end{cases} \quad (14)$$

在群控电梯优化调度中, 根据某一时刻每台电梯当前所在状态楼层、电梯内信息、呼梯信号信息、候梯人数等数据对 1.2 节所建目标函数进行优化, 优化过程是寻找评估函数极值的过程。基于 ABC-SA 混合算法的 EGCS 调度流程如图 1 所示。

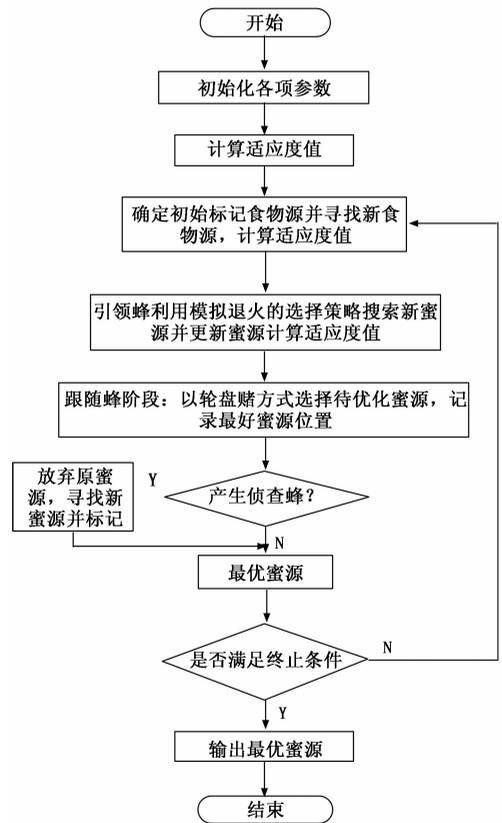


图 1 基于 ABC-SA 算法的 EGCS 调度流程图

Step1: 初始化算法参数, 如种群规模 SN 、蜜源限制开采次数 $limit$ 、最大迭代次数 $Maxcycle$ 、模拟退火的初始温度 T 等;

Step2: 蜜源初始化并计算其适应度值;

Step3: 雇佣蜂 (引领蜂) 阶段。按照式 (10) 进行邻域搜索寻找新食物源并计算适应度值;

Step4: 进行模拟退火操作。当引领蜂进行邻域搜索后, 利用贪婪选择策略进行蜜源选择, 尽管可以较快地找到局部最优的蜜源, 但会失去当前适应度不高且更接近于全局最优的蜜源。利用模拟退火的选择概率, 比较原始食物源

和新食物源的适应度，若新食物源适应度大于原始蜜源的适应度，则接受该食物源，否则以式 (14) 求出的概率接受新食物源。

Step5: 跟随蜂阶段。根据式 (11) 计算食物源的概率，依照概率选择食物源；

Step6: 判断是否有要放弃的蜜源，若有侦查蜂产生，则放弃原蜜源按照式 (12) 寻找新蜜源并标记；若没有侦查蜂，更新最优蜜源，记录当目前为止最优解；

Step7: 判断是否达到循环终止条件，若满足循环结束，输出最优蜜源，否则返回 Step3 继续搜索。

2.3 模型约束

利用混合模拟退火改进人工蜂群算法解决电梯群控调度问题时，应充分考虑电梯当前运行状态和运行逻辑，即模型约束条件：

1) 当电梯产生 m 个向上的呼梯信号时，此时电梯首先响应较低楼层的乘客，然后再响应较高楼层的乘客。

2) 当电梯计划服务于 n 个下行信号的乘客时，电梯首先承载较高楼层的乘客，然后再承载较低楼层的乘客。

3) 电梯实际载重量超过额定载重量时，不响应任何呼梯信号。

4) 行驶过程中，当同时有向上或向下的呼梯请求时，电梯顺应当前行驶路径预先响应相同方向的信号。

5) 分散待机策略：无任何呼梯请求时，电梯均匀分布于各个楼层为自由梯状态；上高峰时间段内，电梯均处于基层呈基梯状态。

3 模拟仿真及结果分析

3.1 模拟仿真

为验证混合 ABC-SA 算法应用于电梯群控系统派梯调度策略的有效性，以常见办公大楼 3 部电梯 24 层建筑物群控电梯系统作为模拟对象，当前状态下设置楼层内电梯运行情况参数如表 2，仿真代码在 Matlab 平台上编译。

表 2 EGCS 群控电梯参数

参数项目	参数值
楼层数/层	24
电梯数量/台	3
开关门时间/s	5
进出门时间/s	3
运行速度/(m/s)	2
平均楼层高度/m	3.5
额定载重量/kg	1 200
最大载重人数/人	16

分别进行上高峰、下高峰、层间交通模式 3 种情况下的仿真实验，目标函数的权重系数取值如表 3 所示。上高峰模式下人群密集，乘梯需求多集中于基层并向上行驶，且上高峰多发生在早上上班期间，以输送人流为主要目的，因此乘梯时间、候梯时间、系统能耗权重分别为 0.4、0.65、0.1。下高峰多发生在下班期间，以输送乘客为主，

乘梯时间、候梯时间、系统能耗权重设置为 0.4、0.4、0.2；同理层间交通模式下人流量少以能耗为主时间性能为辅，权重设置分别为 0.2、0.2、0.6，在不同模式权重下对群控电梯进行多目标调度仿真研究。

表 3 不同交通模式下的权重

交通模式	W_1	W_2	W_3
上高峰模式	0.4	0.5	0.1
下高峰模式	0.4	0.4	0.2
层间交通模式	0.2	0.2	0.6

3.2 结果分析

针对 1.2 节建立的多目标优化函数，在 Matlab 仿真软件中采用基本 ABC 算法和混合 ABC-SA 算法对 3.1 节所设置的 3 种不同模式进行仿真研究，群控电梯多目标优化前后适应度曲线对比结果如图 2~4 所示。

由图 2~4 可以看出，基本 ABC 算法在 3 种模式下均容易陷入局部最优解，而改进的 ABC-SA 混合算法却能跳出局部最优最终达到全局最优解。且在基本 ABC 算法调度下上高峰、下高峰和层间模式的适应度分别为 0.378、0.31 和 0.295，ABC-SA 算法调度下适应度分别为 0.395、0.357 和 0.314。可以看出无论处在哪种交通模式下，混合 ABC-SA 算法优化后的适应度值结果都优于基本 ABC 算法的求解结果，选择适应度大的结果进行派梯，验证了混合算法的有效性。

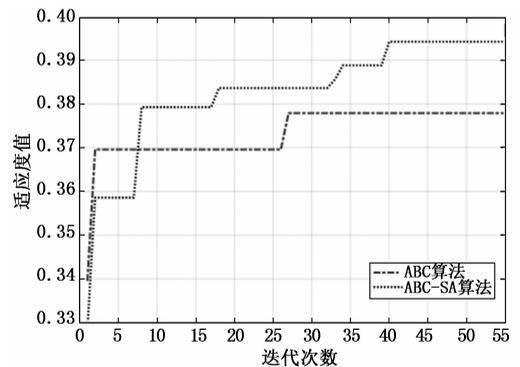


图 2 上高峰模式两种算法的收敛对比图

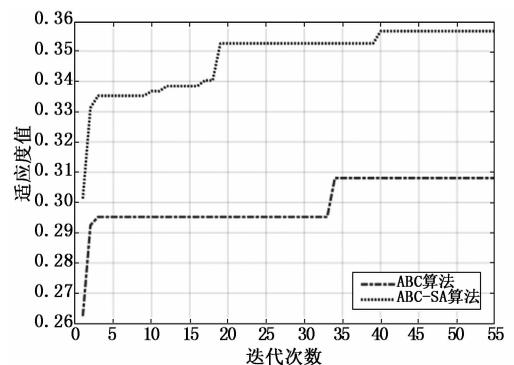


图 3 下高峰模式两种算法的收敛对比图

为进一步说明结果的有效性，通过对平均候梯时间、

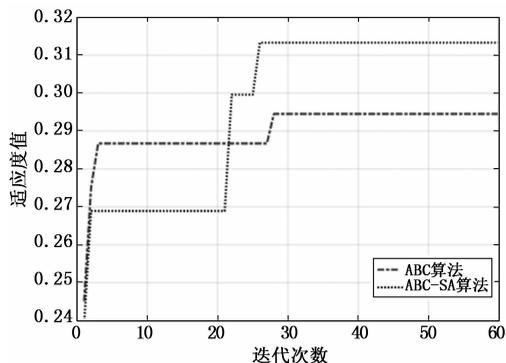


图 4 层间模式两种算法的收敛对比图

平均乘梯时间、停靠次数的多组数据进行优化, 然后取各指标值的平均值。表 4~6 为上高峰模式下混合 ABC-SA 算法与基本 ABC 算法进行比较的仿真结果。仿真数据表明, 与基本 ABC 算法相比, 混合算法的平均候梯时间, 平均乘梯时间以及停靠次数的平均值都有不同程度的提高, ABC-SA 算法下的平均等待时间减少 19.69 s, 平均乘梯时间减少 4.57 s, 停靠次数减少 4 次, 各项重要指标均比较理想, 其衡量电梯群控系统的 3 大指标性在混合 ABC-SA 算法下均比基本 ABC 算法有所提高。

表 4 平均候梯时间比较 s

不同方式	1	2	3	4	5	均值
ABC 算法	58.11	59.46	44.27	64.44	42.47	53.76
ABC-SA 算法	36.67	37.73	29.94	36.67	29.32	34.07

表 5 平均乘梯时间比较 s

不同方式	1	2	3	4	5	均值
ABC 算法	20.54	15.98	19.13	20.15	19.32	19.03
ABC-SA 算法	15.66	14.19	13.44	15.45	13.56	14.46

表 6 停靠次数比较 n

不同方式	1	2	3	4	5	均值
ABC 算法	26	25	38	27	37	31
ABC-SA 算法	26	24	28	27	27	27

表 7 不同模式下调度算法对比

交通模式	调度算法	平均候梯时间/s	平均乘梯时间/s	启停次数/n
上高峰	ABC	53.76	19.03	31
	ABC-SA	34.07	14.46	27
下高峰	ABC	69.59	18.29	25
	ABC-SA	44.7	12.64	22
层间	ABC	35.85	9.38	16
	ABC-SA	25.23	9.25	14

表 7 为两种算法在 3 种模式下的各指标数据值, 可以看出在不同的交通模式下, ABC-SA 算法的求解质量相对于

基本 ABC 算法的求解质量具有一定优势。尤其是在上高峰和下高峰模式, ABC-SA 算法的优势比层间模式下的优势更为明显。其仿真结果表明了该算法具有一定的可行性和有效性, 能有效地提高群控电梯系统的性能和服务质量。

4 结束语

电梯群控系统具有庞大的状态空间和随机的乘客到达等特点, 且需同时兼顾乘客的时间请求以及能耗请求, 这使得调度问题变得复杂。文中提出一种混合改进的人工蜂群算法实现对群控电梯优化调度策略的研究, 通过确定影响群控电梯性能的关键因素建立多目标数学模型, 根据基本人工蜂群算法求解易陷入局部最优解进而引入模拟退火思想改善算法性能, 经仿真研究 ABC-SA 混合算法求解结果相对于基本人工蜂群算法在乘梯时间、候梯时间和停靠次数方面均有一定提高, 对电梯群控系统多目标调度的优化有一定的应用参考价值。

参考文献:

- [1] 高东, 许欣. 电梯群控算法评价指标与验证平台的研究与实现 [J]. 计算机工程与应用, 2018 (5): 231-235.
- [2] Beamurgia M, Basagoiti R, Rodriguez I, et al. A modified genetic algorithm applied to the elevator dispatching problem [J]. Soft Computing, 2016, 20 (9): 3595-3609.
- [3] 王志华. 基于模糊控制的电梯群控系统 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
- [4] 李晓理, 王志磊, 刘德馨, 等. 多模型电梯群控的自寻优策略 [J]. 控制理论与应用, 2014 (3): 100-108.
- [5] 吕增及. 改进型遗传算法在群控电梯中的应用 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2007.
- [6] Karaboga D, Basturk B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8 (1): 687-697.
- [7] Karaboga D, Ozturk C. A novel clustering approach: artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11 (1): 652-657.
- [8] 李彦苍, 彭扬. 基于信息熵的改进人工蜂群算法 [J]. 控制与决策, 2015, 30 (6): 1121-1125.
- [9] 郎曼, 李国勇, 徐晨晨. 电梯群控系统的节能调度优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2017, 34 (2): 375-379.
- [10] 王志刚, 夏慧明. 求解车辆路径问题的人工蜂群算法 [J]. 计算机工程与科学, 2014, 36 (6): 1088-1094.
- [11] 邓小冬, 杜成斌, 金立成, 等. 改进人工蜂群算法识别结构缺陷问题 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2019 (6): 23.
- [12] 刘三阳, 张平, 朱明敏. 基于局部搜索的人工蜂群算法 [J]. 控制与决策, 2014 (1): 126-131.
- [13] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [R]. Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department, 2005.
- [14] Assad A, Deep K. A Hybrid Harmony search and Simulated Annealing algorithm for continuous optimization [J]. Information Sciences, 2018, 450: 246-266.
- [15] 卢宇婷, 林禹攸, 彭乔姿, 等. 模拟退火算法改进综述及参数探究 [J]. 大学数学, 2015, 31 (6): 96-103.