

基于RPSO的分布式电梯群控系统调度算法的优化

顾妍午

(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)

摘要 为了获取电梯群控系统调度问题的全局优化解,必须要找到一种具有全局优化功能的智能算法。对电梯群控系统不同的客流模型及控制机制进行了分析,提出了一种实时粒子群算法,用来优化电梯群控系统的动态调度问题。仿真结果表明,该算法不仅可以有效地调度分布式电梯群控系统,并且在电梯忙碌或者超载情况下,实现了对任务进行再分派的功能。基于RPSO算法的分布式电梯群控系统可以使乘客平均候梯时间减少一半,使乘客的电梯使用时间减少三分之一。

关键词 电梯群控系统,分布式,实时粒子群算法,上行高峰

中图分类号 TP39 **文献标识码** A

Distributed Elevator Group Control System Scheduling Based on Real-time Particle Swarm Optimization Algorithm

GU Yan-wu

(School of Electronics & Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract In order to get a globally optimized solution for the elevator group control system(EGCS) scheduling problem,an algorithm with an overall optimization function is needed. This study analyses different traffic patterns and control mechanisms,and proposes a real-time particle swarm optimization(RPSO) as an optimal solution to the EGCS scheduling problem. Simulation results show that distributed EGCS using RPSO can be scheduled well. Besides,the elevator real-time scheduling and re-allocation functions are realized in case the elevator is unavailable or full. RPSO algorithm can reduce the waiting time of the passengers by almost 50%,and reduce passengers' riding time by almost one third.

Keywords Elevator group control system,Distributed,Real-time particle swarm optimization,U_p-peak

1 引言

电梯是安装在建筑物内的垂直交通工具,以满足楼梯间运送货物及资源的需要。随着社会的日益发展,人们对生活品质和环境质量的要求也日益提高,需要安装多台电梯才能满足整栋大楼的运送需求。电梯群控(Elevator Group Control,EGC)是一类特殊的计划与调度问题。其特点是解的状态空间大、资源约束量大、不确定因素多、不确定性严重。比如,乘客可以随机地到达不同的楼层去搭乘电梯,在乘客没有进入轿厢按下相应的停层按钮之前,他们要到达的目的层是未知的,乘客数量、到达的时间也都是未知的。电梯群控系统的任务是要为每个呼梯信号指派响应的电梯,并使乘客候梯时间最小化、运送乘客数目最大化、能耗最低化。Seckinger和Koehler证明电梯群控系统的调度问题为NP难问题^[1]。

近些年来,研究人员针对电梯群控系统研究了各种算法。Kim等人^[2]将模糊逻辑(Fuzzy Logic,FL)应用于电梯群控系统,但是模糊逻辑不具备自学习功能,系统不能意识到当前所有的状态,因此控制器很难对系统进行动态实时控制。Zhu等人^[3]利用神经网络(Neural Networks,NN)优化电梯群控

系统调度问题,但是由于神经网络学习速度较慢,控制器很难找到全局优化解。此外,神经网络容易产生早熟现象,容易陷入局部最优解,系统容易把局部最优解误当作全局最优解。Imasaki等人^[4]提出了模糊神经网络(Fuzzy Neural Network,FNN),它克服了模糊逻辑和神经网络中存在的问题,但是并没有实现任务再分派功能。Yang等人^[5]提出了基于旅行商问题(Traveling Salesman Problem,TSP)的粒子群算法(Particle Swarm Optimization,PSO),并对粒子群算法进行了相应的修改。它有效地改善了电梯群控系统的调度问题,但是并没有满足系统对于实时控制的要求。Li等人^[6]根据客流模型的预测,应用粒子群算法对电梯进行动态分区。然而,了解当前大楼的客流模型和趋势需要时间,需要对资源进行分析和学习,并且客流模型在楼宇和楼宇之间有很大不同。

为了获得电梯群控系统调度问题的全局优化解,必须找到一种具有全局优化功能的算法。本文通过对粒子群算法(Particle Swarm Optimization,PSO)的研究和分析,提出了实时粒子群算法(Real-time Particle Swarm Optimization,RP-SO)用来优化电梯群控系统的调度问题。此外,因为实时系统中的不确定性,各台电梯不仅需要调度配合,当某个电梯忙

本文受国家自然科学基金项目(60674076)资助。

顾妍午(1982-),女,博士生,主要研究方向为智能控制技术、复杂系统建模与调度等,E-mail:yanwu_gu@163.com。

碌被占用时,还需要任务再分派。无论何种信号,轿厢指令或呼梯信号一经发出,都将参与调度中心的派梯决策环节。仿真结果表明,将分布式多代理控制机制和 RPSO 算法相结合,不仅可以优化电梯群控系统的调度问题,还可以完成实时的任务再分配功能。基于 RPSO 算法的分布式电梯群控系统可以使乘客平均候梯时间减少一半,使乘客的电梯使用时间减少三分之一。本研究为电梯群控系统的调度问题提出了一个新的解决方案,扩展了 PSO 算法的应用范围。

2 问题描述

电梯群控在对梯群进行调度分派时,需要综合考虑两类对电梯轿厢的请求信号:

(1)轿厢内的停层控制信号,也叫轿厢指令(Car Call)。这是每个电梯必须响应的信号,响应顺序按“最近优先”的原则,即顺向响应离电梯当前所在楼层最近的轿厢指令。

(2)楼层呼梯信号,简称为呼梯信号(Hall Call)。调度系统经优化后将各呼梯信号分派给不同的电梯作为停层信号。呼梯信号属中断响应信号,需要与轿厢当前楼层相比较,响应离当前楼层最近的呼梯信号。

电梯群控系统的各种不确定性因素让电梯群控系统调度成为 NP 难问题。这些不确定性因素包括:每层楼需要搭乘电梯的乘客数目、每位乘客的起始层和目的层、客流模型等。此外,一栋大楼内所安装的电梯数目也影响和限制了群控系统的运作效率。但总体说来,电梯群控系统的效率受客流模型的影响比较大^[7]。客流模型大致分为:上行高峰(up-peak traffic)、下行高峰(down-peak traffic)、层间交通(inter-floor traffic)。通常情况来说,现实生活中,一栋大楼的客流模型是 3 者的综合。总体来讲,乘客的到达时间服从泊松分布(Poisson Distribution)^[8],如下所示:

$$f(n; \lambda) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad (1)$$

式中, n = 到达乘客的数目, $\lambda = \mu I$, μ 为泊松分布的均值, I = 间隔时间。

然而,对于不同的客流模型来说,相同的调度算法甚至给出不同的仿真结果,客流模型的选择对于调度效果的影响甚至要大于调度算法^[8]。

2.1 分布式与集中式控制机制

电梯群控系统是一类多目标动态调度问题,其系统复杂度较高,并且有实时处理要求。电梯群控系统把一组电梯看成一个有机的整体,使用一个群控器来调度和配合每个单梯的运行。电梯群控系统调度的优化目标是提高电梯的运行效率和服务质量,减少乘客的等待时间、乘梯时间,使乘客以最短的时间到达他们的目的楼层,同时减少电梯群控系统整体能耗。

电梯群控系统控制器包括单梯控制器和群控器。单梯控制器负责控制梯群中的每部电梯的逻辑行为,电梯群控器对整个梯群进行全局调度。作为电梯系统协调调度的核心部分,群控器实时指派轿厢为呼梯信号提供服务,从整体上优化服务质量、交通运输能力或能量消耗。目前最常用的电梯群控系统的控制机制为集中式电梯群控系统(Centralized Elevator Group Control System),即单梯控制器接受派梯信号,负责控制电梯的逻辑行为,执行乘客运送任务;群控器负责各

台电梯之间的调度与优化,发送派梯信号。但是随着客流模型复杂度的提高,群控器的任务过度负载成为电梯群控系统调度优化问题的瓶颈^[9]。

王遵彤等人^[10,11]将多代理思想(Multi-Agent System, MAS)引入电梯群控系统,即每台单梯控制器分别给出报价,群控器负责比较这些报价,看哪台电梯更加适合完成当前乘客的运送任务。从某种程度来说,多代理控制机制减少了群控器的任务量,有利于电梯群控系统调度问题的优化。单梯控制器提供报价,电梯群控器做出任务分配的最终决断,这种控制机制称为分布式电梯群控系统(Distributed Elevator Group Control System)。分布式电梯群控系统由多代理,即各台轿厢、群控器和一个虚拟的管理单元构成,所以分布式电梯群控系统是一个多代理系统(Multi-Agent System, MAS)。

因为分布式电梯群控系统引入了多代理的概念,多个代理通过配合组成了系统最优解的寻优网络。任务分解和多代理的配合,使系统的多个性能指标得到了最大程度的优化。现在,多代理技术正被广泛地应用于各个领域,以解决 NP 难问题或者其他算法不容易解决的问题。

2.2 多目标优化

多目标优化(Multi-objective Optimization, MO)是指考虑多个优化目标的联合优化问题。多目标优化的目的是要找到一组决策变量的向量,满足约束条件而且最优化一组以目标函数为元素的函数向量。在现实生活中,一个问题通常有一个最优解,但是多目标优化的目的并不只是获得这个解,同时还要满足一些其他的要求,优化这些目标是获得“最优解”的过程当中必不可少的一部分。事实上,多目标优化问题的最终目的是获得一个“妥协解”^[12]。这个“妥协解”不仅可以优化当前的系统,还满足各种优化目标,即性能指标。

多目标优化(Multi-objective Optimization, MO)问题可以用下面的数学公式来描述^[13]:

$$\text{Minimize } F(x) = [F_1(g_1), F_2(g_2), \dots, F_p(g_p)]^T \quad (2)$$

式中, $F_i(x)$ 代表系统 p 个可能解中的任何一个。这 p 个解满足 $F(x)$ 的联合优化函数 $g_i = [y_1, y_2, \dots, y_q]^T$,其中, y_i 代表以 q 个目标函数为元素组成的函数向量,即 q 个系统的性能指标。

电梯群控系统里,想要获得的优化目标包括缩短乘客的平均等待时间、缩短电梯运送乘客到目的层所需要的时间、平衡调度各台电梯、减少电梯群控系统的能耗等,是典型的多目标优化问题。

2.3 电梯群控系统性能指标

对于电梯群控系统来说,性能指标包括乘客的平均等待时间(Average Waiting Time, AWT)、等待时间标准差(Standard Deviation of Waiting Time, STD_w)、乘客平均上升时间(Average Riding Time, ART)、上升时间的标准差(Standard Deviation of Riding Time, STD_r)、电梯利用率分布(Distribution of Elevator Utilization, DEU)、电梯利用率标准差(Standard Deviation of Elevator Utilization, STD_u)、乘客等待时间分布(Distribution of Passenger Waiting Time)、长候梯率(Long Waiting Rate)、长候梯时间分布(Distribution of Long Waiting Time),共 9 个性能指标参数来评价和判定电梯群控系统。

1)平均等待时间(Average Waiting Time, AWT)

等待时间(Waiting Time, WT)是指从乘客进入电梯群控系统,做出呼梯信号的时刻开始计算,一直到有电梯轿厢来到乘客所在楼层提供运送服务为止。在 eM-Plant 仿真平台中,等待时间从乘客在客流发生器中产生的一刻开始计算,一直到电梯来运送该位乘客为止。对于乘客 i ,等待时间为 $wt(i)$,平均等待时间计算公式为:

$$AWT = \frac{\sum_{i=1}^n wt(i)}{n} \quad (3)$$

2)等待时间标准差(Standard Deviation of Waiting Time, STD_{wt})。

标准差是数理统计中的一个概念,用来描述数据分散程度的一种度量。平均数相同,标准差却未必相同。较大的标准差代表大部分数据偏离平均值的程度较大,较小的标准差代表大部分数据比较接近平均值。等待时间标准差表明了乘客等待时间偏离所有乘客平均等待时间的离散程度。计算公式为:

$$STD_{wt} = \sigma_{wt} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n wt^2(i) - (\sum_{i=1}^n wt(i))^2}{n^2}} \quad (4)$$

3)乘客平均上升时间(Average Riding Time, ART)

乘客的上升时间是指从乘客进入电梯轿厢开始,直到轿厢完成该位乘客运送任务,乘客离开轿厢为止。对于乘客 i ,上升时间为 $rt(i)$,平均上升时间计算公式为:

$$ART = \frac{\sum_{i=1}^n rt(i)}{n} \quad (5)$$

4)上升时间的标准差(Standard Deviation of Riding Time, STD_{rt})

上升时间标准差是指乘客的上升时间偏离系统平均上升时间的波动程度,反映了乘客上升时间的离散程度,计算公式为:

$$STD_{rt} = \sigma_{rt} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n rt^2(i) - (\sum_{i=1}^n rt(i))^2}{n^2}} \quad (6)$$

5)电梯利用率分布(Distribution of Elevator Utilization, DEU)

电梯群控系统中每台电梯能否充分被调度利用,是电梯群控系统内调度智能算法是否有效的一个最直观和明显的反映。因此,本研究记录了每台电梯被使用的次数。用 E_i 代表第 i 台电梯, $i=1, \dots, n$,那么 $N(E_i)$ 代表第 i 台电梯被使用的次数。

6)电梯利用率标准差(Standard Deviation of Elevator Utilization, STD_{eu})

电梯利用率标准差(Standard Deviation of Elevator Utilization, STD_{eu})是用来描述各台电梯被调用次数分布的离散程度。离散程度越小,说明各台电梯越能被平稳和充分地调用,说明电梯群控系统利用率越高。电梯利用率标准差的计算公式为:

$$STD_{eu} = \sigma_{eu} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n N^2(E_i) - (\sum_{i=1}^n N(E_i))^2}{n^2}} \quad (7)$$

7)乘客等待时间分布(Distribution of Passenger Waiting Time)

在电梯群控系统中,乘客的等待时间是判断一个系统运

送能力的重要依据之一。把乘客的等待时间分为 0~10 秒, 11~20 秒, 21~30 秒, 31~40 秒, 41~50 秒, 51~60 秒, 60 秒以上, 7 个段位进行统计。

8)长候梯率(Long Waiting Rate)

考虑到乘客等候轿厢服务时的心理状态,当乘客的等待时间大于 1 分钟(即 60 秒)时^[14,15],乘客会变得不耐烦,甚至急躁不安。研究人员希望把每位乘客的等待时间控制在 60 秒以内。等待时间超过 60 秒的人数与系统运送所有乘客人数之间的比例称为长候梯率(Long Waiting Rate),计算公式为:

$$LWR = \eta = \frac{N(wt(i) | wt(i) > 60)}{n} \quad (8)$$

9)长候梯时间分布(Distribution of Long Waiting Time)

为了更好地控制乘客的等待时间,本文把等待时间大于 60 秒的乘客等待时间进行了更为详细的统计。把等待时间大于 60 秒的情况称为长候梯时间,分为 61~65 秒, 66~70 秒, 71~75 秒, 76~80 秒, 81~85 秒, 86~90 秒, 91~95 秒, 96~100 秒, 106~110 秒, 111~115 秒, 116~120 秒, 120 秒以上,共 12 个段位进行统计。

3 实时粒子群算法(Real-time Particle Swarm Optimization)

3.1 粒子群算法(Particle Swarm Optimization)

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是群体智能(Swarm Intelligence, SI)算法的一种。Gerardo Beni^[16]于 1989 年研究蜂窝机器人系统时提出了群体智能(Swarm Intelligence, SI)的概念。群体智能这个概念来自于对自然界中昆虫群体的观察,群居性生物通过协作表现出的宏观智能行为特征被称为群体智能,是通过模拟自然界生物群体行为来实现人工智能的一种方法。1995 年 Eberhart 和 Kennedy 提出了基本粒子群算法^[17],算法中的参数是固定的。粒子群算法模拟鸟群的捕食行为。在粒子群算法中,问题的每一个解都是寻优空间内一直飞翔的小鸟,也被称为粒子(Particle)。每一个粒子都有一个适应值(Fitness Value),该适应值和待优化目标决定的代价函数有关。速度决定了粒子飞翔的方向和距离,粒子通过追寻解集中当前最优解来获得全局最优解。

PSO 初始值为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个就是粒子本身所找到的最优解,这个解叫做个体极值 pBest。另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值 gBest。另外也可以不用整个种群而只是用其中一部分作为粒子的邻居,那么在所有邻居中的极值就是局部极值^[13]。

对于一些需要全局优化的问题来说,利用基本粒子群算法寻找的全局最优解不那么精确,而且经常产生早熟现象,并误把局部最优解当作全局最优解^[17]。Shi 等人^[18]在 1998 年将惯性因子(inertia weight)引入传统的基本粒子群算法,有效地提高了传统的基本粒子群算法。

3.2 实时粒子群算法(Real-time Particle Swarm Optimization)

粒子群算法为大规模的 NP 难问题提供了一个近似解^[19,21],然而电梯群控系统需要群控器对呼梯信号(Hall

Call)或停层信号(Car Call)做出快速决断。于是,本文讨论了粒子群算法在这些实时调度需求问题中的应用,包括:1)电梯群控系统调度问题的复杂度;2)粒子群算法的有效性。

1) 电梯群控系统调度问题的复杂度

众所周知,粒子群算法是用来解决大范围问题的,但是它是否依然适用于电梯群控系统调度问题,这很重要。本文在前面已经分析过,群控器对于响应呼梯信号(Hall Call)或停层信号(Car Call)的请求,并完成任务指派是个不容易解决(non-trivial)的问题。证明如下:

假设有 n 位乘客在等待,需要运送。此刻,有 m 台电梯可用,把每台电梯记为 m_i , m' 为当前时刻可用的电梯的数目。 $i=1,2,\dots,e$ 。 e 为大楼内安装电梯的总台数。一台轿厢是否可用取决于很多因素,包括电梯是否可用、是否满载等。当呼梯信号发生时,一台轿厢可能离呼梯信号所在的楼层距离很远,或者不同电梯可能离呼梯信号所在楼层距离不同,所以若假设每台电梯都具有相同的优先等级来响应该呼梯信号,那么注定是没有效率的。因此,可以记为 $m' \leq m$ 。此外, $A(m_i)$ 代表一台电梯的可用度, $C(m_i)$ 为各台电梯相应当前服务请求的代价函数(cost function)。因此,电梯群控系统需要同时为 n 位想要搭乘电梯的乘客优化 $A(m_i)$ 和 $C(m_i)$ 两个函数。此外,还有许多与 $A(m_i)$ 和 $C(m_i)$ 相关的优化目标,比如乘客的等待时间、上升时间等。因此,想要完成这些所有的目标并不是一个容易的问题。

2) 粒子群算法的有效性

每个粒子都有 3 种属性:位置、代价函数和飞翔速度。拟被指派电梯代号(ID)为粒子的位置属性,即初始解(initial solution);电梯需要完成该运送任务所要付出的代价为代价函数属性;每个粒子飞翔的速度即为速度属性。粒子通过比较代价函数,获得局部最优解 pBest,到达迭代极限时,局部最优解的最优解即为最终全局最优解 gBest。

电梯群控系统调度包括动态调度的问题。每一次有新的任务到来时,电梯群控器都会用本 PSO 算法优化解集,计算并寻找最优解。当指派电梯忙碌被占用时,电梯群控器会重新计算,响应任务呼叫,完成任务指派工作。所以本文所使用的 PSO 算法,不仅有实时调度的功能,还能够实现任务再分派,所以这个算法被称为实时粒子群算法(Real-time Particle Swarm Optimization, RPSO)。

在使用 RPSO 算法时,随机数用来在种群内随机选择初始解,并且随机数在指定步长内不得重复。本研究通过一个预先设定的步长来保证随机产生的随机数的不重复性。

假设, P =随机数集; B =粒子群算法计算过程中所需要的随机数,和相应种群长度有关。

从随机数集 P 中选择随机数集 B ,想要保证直到数集 B 达到种群长度之前,随机数集 P 中的随机数没有重复。在调试代码的过程中,本研究发现在 eM-Plant 仿真平台中 SimTalk 语言产生随机数有重复现象。比如,当使用 SimTalk 产生随机数时,可能选择“2,3,4,4”这样的粒子。因为解“4”有重复,白白浪费了算法运算的时间。因此,本研究特别用 Visual Basic. Net 设计了一个随机数发生器,可以保证在指定步长内产生的随机数没有重复现象。

在这个随机数发生器中,若步长设置为 8,则步长为 8 的

随机数内不会有重复,从而可以保证种群长度为 8 时,不会产生重复解,比如“2,3,4,7,2,5,8,3”,解“2”重复了两次,解“3”重复了两次。随机数发生器可以保证实时例子群算法避免重复计算,可以更快的速度获得全局最优解。

3.3 多目标控制与电梯再分派

控制理论中,经典的系统分析方法包括使用系统的描述函数^[22]。在基于 RPSO 算法的电梯群控系统中,系统的控制机制可以用一个目标函数来描述控制器选择和比较电梯的思路,该目标函数也是算法中的代价函数。当一位乘客发出呼梯请求时,目标函数计算方法如式(9)所示:

$$V = \lambda_1 WT_{cur} + \lambda_2 RT_{cur} + \lambda_3 LI \quad (9)$$

式中, WT_{cur} (当前等待时间),与 RT_{cur} (当前上升时间)、单梯当前楼层、该位乘客的目标层、当前电梯承载的任务数相关。

LI 为负载系数:

$$LoadIndex = \frac{CurrentWeight}{MaximumAllowedWeight} \quad (10)$$

式中, λ_i ($i=1,2,3$) 为权重因子, $\sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1$ 。

粒子群算法可以用来解决规模较大的问题,还可以用来解决实时动态问题。前面证明过,电梯群控系统的实时调度问题并不容易解决(non-trivial)。后来的仿真结果证明 RPSO 算法的引入可以显著地提高要优化的多个目标。

RPSO 算法总结如下:

- (1) 初始化种群大小、种群长度;
- (2) 根据代价函数初始化每个粒子的值,初始化每个粒子的初始速度;
- (3) 生成新的随机解集,随机选择电梯解;
- (4) 比较解集内粒子的值,更新粒子的速度,寻找局部最优解 pBest;
- (5) 迭代后更新 pBest;
- (6) 判断当前局部最优解 pBest 是不是比当前全局最优解 gBest 更加优秀,如果是,更新 gBest;
- (7) 判断是不是已经到达迭代极限,满足迭代终止条件,如果还没有,返回(3);
- (8) 当前 gBest 已经到达终止条件,当前全局最优解 gBest 即为最终全局最优解 gBest;
- (9) 输出 gBest。

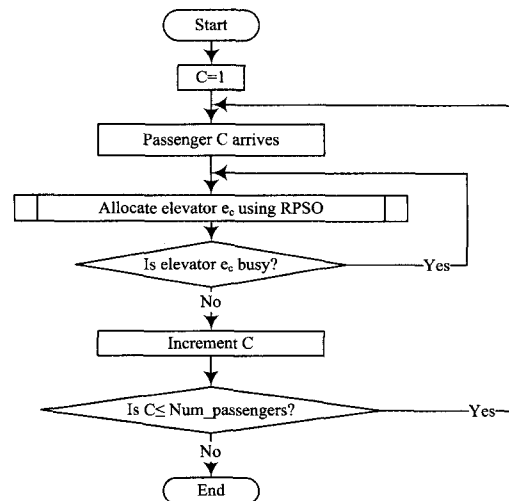


图 1 基于 RPSO 的电梯任务分派与再分派

实时粒子群算法 (Real-time Particle Swarm Optimization, RPSO) 运作流程如图 1 所示。当一个乘客到来时, 电梯群控器利用 RPSO 算法决策由哪台电梯来完成该名乘客的运送任务, 所以这是一个动态的实时控制。但是, 电梯群控系统的调度问题是一个实时问题, 群控器中调度算法选择的电梯很有可能已经在忙碌中, 或者由于满载等原因, 不能完成该乘客的运送任务。这种情况下, 群控器需要利用 RPSO 算法重新计算, 重新选择一台电梯, 即电梯控制器需要有任务再分派的功能。算法中的循环一直持续到电梯把所有的乘客都运送到他们的目的层去。

3.4 基于 RPSO 的多代理分布式电梯群控系统

在基于 RPSO 算法的分布式电梯群控系统 (Distributed Elevator Group Control System) 中, 每一台单梯都有自己的控制器。乘客停层信号发出后, 每一台单梯的控制器执行并行计算, 计算要完成该任务需要付出的代价, 计算结束后向群控器给出自己的报价。在群控器中, 控制单元比较分析每台单梯控制器的报价, 即该报价即为群控器中 RPSO 算法的粒子值。在基于 RPSO 算法的分布式电梯群控系统中, 群控器随机选择初始粒子, 通过迭代寻找局部最优 pBest。所有局部最优的最优解为最终的全局最优解 gBest。一旦获得了全局最优 gBest, 即将完成该乘客运送任务的电梯也已经被选定。

基于 RPSO 算法的分布式电梯群控系统的最大区别在于代价函数计算环节的不同。停层信号发出后, 每个单梯控制器给群控器发送自己的报价, 群控器利用 RPSO 算法决策由哪台电梯完成该位乘客的运送任务。然而集中式电梯群控系统与此不同。在集中式控制机制中, 群控器不仅计算每台电梯需要完成该运送任务的代价函数, 还负责比较分析每台电梯的代价函数, 分析计算结束后, 发送任务指派信号。分布式控制机制中, 计算代价函数和分析比较代价函数各有分工: 单梯控制器负责代价函数的计算并给出报价, 群控器负责比较代价函数, 并根据拟市场规则给出最优解。

4 基于 RPSO 的分布式电梯群控系统仿真结果与分析

4.1 仿真参数设置

本仿真试验模拟了一栋大楼在运行过程中的真实情况。假设这是一台安装在办公大楼的电梯, 并且没有乘客按错按钮。忽略所有加速减速的情况, 电梯以匀速 2.5m/s 运行。所有的客流模型, 上行高峰、下行高峰、层间交通都是本文仿真的对象。

- 上行高峰: 90% 的乘客上行, 5% 的乘客层间交通, 5% 的乘客下行;
- 层间交通: 5% 的乘客上行, 90% 的乘客层间交通, 5% 的乘客下行;
- 下行高峰: 5% 的乘客上行, 5% 的乘客层间交通, 90% 的乘客下行。

用客流发生器分别生成 3 种客流模型的乘客仿真数据, 乘客总数均为 2500, 仿真时间 60s, 所有客流模型的乘客到达时间服从均值为 6 的泊松分布^[23]。每层楼层高 3m, 电梯运行速度 2.5m/s, 每台电梯从底层到顶层大约需要 20s。这 20s 内, 有大约 10 位左右的乘客到达。

我们对电梯群控系统的工作量进行了分析。首先, 乘客的到达率并不是一个常数, 所以呼梯信号的产生并不是一个线性行为。其次, 乘客选择的楼层也并不是线性的, 所以等待大厅中积累的等待运送的乘客加重了电梯的负载。第三, 完成该乘客运送任务的轿箱的选择与电梯当前服务的楼层相关。

此外, 电梯以及 RPSO 算法其他参数设置如下^[24]:

- 电梯总台数: $n=8$
- 每台电梯最大载重量: $\text{Max}=1000\text{kg}$
- 电梯的运行速度: $v=2\text{m/s}$
- 大楼总楼层数: $Q=16\text{floors}$
- 每层楼高度: $h=3\text{m}$
- 乘客到达速率: $\lambda=50\text{p}/3\text{mins}$

以上行高峰客流模型为例, 乘客到达时间分布如图 2 所示。

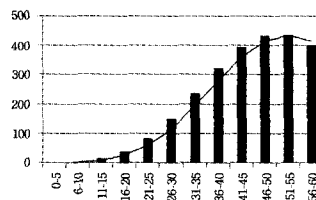


图 2 上行高峰乘客到达时间分布

4.2 基于 RPSO 的分布式电梯群控系统仿真结果

王遵彤等人^[10]将多代理思想引入了电梯群控系统, 提出了分布式电梯群控系统。本文的仿真思路如下: 首先比较集中式与分布式控制机制的优劣; 然后把实时粒子群算法分别引入集中式与分布式电梯群控系统, 再将两者相互比较。本研究对 3 种客流模型的情况分别进行了对比与分析。

本文利用 RPSO 算法优化电梯群控系统, 基于不同的数据和性能指标来分别比较集中式、分布式控制, 基于 RPSO 算法的集中式、分布式电梯群控系统, 结果如下。

1) 3 种客流模型仿真结果

比较电梯群控系统调度问题最通常的方法就是比较平均等待时间和乘客上升时间。表 1 针对 3 种客流模型的仿真结果, 比较了集中式和基于 RPSO 算法的集中式电梯群控系统。

表 1 3 种客流模型的集中式和基于 RPSO 算法的集中式 EGCS 的仿真结果

| Traffic Pattern | | Waiting Time | Riding Time | LWR (100%) |
|-----------------|----------|--------------|-------------|------------|
| Up-peak | CMO | 46.37 | 38.79 | 38.95 |
| | CMO-RPSO | 36.83 | 38.14 | 36.01 |
| Inter-floor | CMO | 19.89 | 20.91 | 5.59 |
| | CMO-RPSO | 16.73 | 20.79 | 2.75 |
| Down-peak | CMO | 25.96 | 20.89 | 11.20 |
| | CMO-RPSO | 17.63 | 20.38 | 2.75 |

从表 1 中可以看到, 即使相同的调度算法, 对于不同的客流模型也会产生不同的仿真数据。通常情况下, 无论使用何种调度算法, 层间交通的客流模型都可以得到最好的仿真数据, 下行高峰比上行高峰的仿真结果好一些。但是, 无论何种客流模型, RPSO 都有优化效果。此外, 本文还观察到乘客的等待时间大体服从指数分布 (Exponential Distribution), 上升时间大体服从伽玛分布 (Gamma Distribution)。

图3描述了3种客流模型下集中式和基于RPSO算法的集中式电梯群控系统长候梯时间分布。

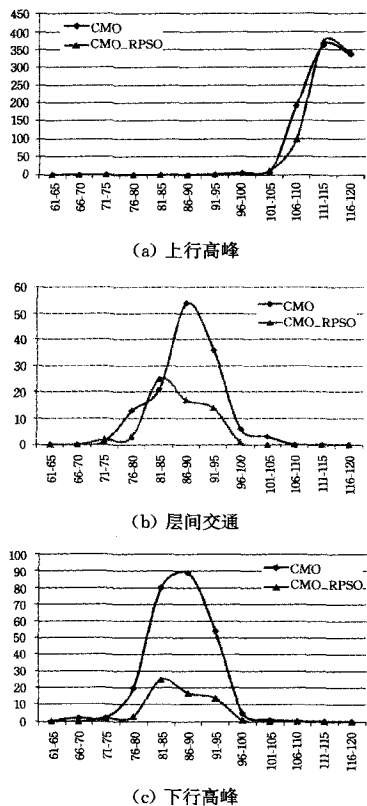


图3 3种客流模型下集中式和基于RPSO的集中式电梯群控系统长候梯时间分布

图3中,x轴代表乘客的长候梯时间(大于60s),y轴代表相应统计时间段内的乘客数目。可以看到,通常情况下,RPSO算法可以优化乘客的长候梯时间,然而每一个小图内都会有一个峰值,这个峰值从上行高峰到层间交通,从层间交通到下行高峰,随着客流模型的变化,不断地向前水平移动。这说明客流模型的选择对电梯群控系统乘客的等待时间和上升时间比算法的选择有着更大的影响。

2)等待时间 (Waiting Time, WT) 和上升时间 (Riding Time, RT)

对于一栋办公写字楼来说,早晨往往是最为忙碌的时候,为上行高峰客流模型,也是最考验电梯群控系统调度能力的时候。本文对上行高峰客流模型做了更加深入的比较和研究。表2为上行高峰客流模型下,集中式、分布式、基于RPSO算法的集中式电梯群控系统仿真结果中等待时间和上升时间的比较,此外还有等待时间标准差、上升时间标准差、长候梯率。

表2 上行高峰客流模型下,集中式、分布式、基于RPSO算法的电梯群控系统仿真结果

| Performance Indices | CMO | DMO | CMO-RPSO |
|---------------------|-------|-------|----------|
| WT | 46.37 | 41.80 | 36.83 |
| StdDev of WT | 47.48 | 42.70 | 35.11 |
| RT | 38.79 | 38.80 | 38.14 |
| StdDev of RT | 19.30 | 19.23 | 19.73 |
| WT+RT | 85.16 | 80.60 | 74.97 |
| StdDev of WT+RT | 55.86 | 52.41 | 44.96 |
| LWR(100%) | 38.95 | 37.48 | 36.01 |

从表2中可以看到,因为多代理思想(Multi-Agent System, MAS)的引入,分布式控制机制仿真结果要好于集中式控制机制的仿真结果;由于RPSO算法的引入,基于RPSO算法的集中式分布机制主要的性能指标,如等待时间等,比分布式控制机制的仿真结果得到更显著的优化。

3)基于RPSO算法的集中式、分布式控制机制比较

本研究也把RPSO算法引入了分布式电梯群控系统,仿真结果如表3所列。

表3 上行高峰客流模型下,基于RPSO算法的集中式、分布式电梯群控系统仿真结果

| Performance Indices | CMO-RPSO | DMO-RPSO |
|---------------------|----------|----------|
| WT | 36.83 | 18.82 |
| StdDev of WT | 35.11 | 18.26 |
| RT | 38.14 | 35.43 |
| StdDev of RT | 19.73 | 19.85 |
| WT+RT | 74.97 | 54.25 |
| StdDev of WT+RT | 44.96 | 30.28 |
| LWR(100%) | 36.01 | 1.88 |

仿真结果再一次地表明多代理思想的有效性。多代理的并行计算和相互配合不仅优化了乘客的等待时间,还减少了乘客等待时间的离散度。基于RPSO算法的分布式电梯群控系统比集中式电梯群控系统把等待时间减少了49%,几乎减少了一半。此外,基于RPSO算法的分布式EGCS把等待时间的标准差,即离散度减少了48%,表明每位乘客的等待时间都得到了减少。同时,等待时间均值的标准误差(Standard Error of Mean, SEM)也可以非常有效地预测集中式和分布式电梯群控系统运行的稳定性。经计算,基于RPSO算法的集中式电梯群控制系统的等待时间均值标准差 SEM_{WT} 为0.7022,基于RPSO算法的分布式电梯群控制系统的等待时间均值标准差为0.3652,意味着基于RPSO算法的分布式电梯群控系统可以稳定地给出更好的仿真结果。

此外,候梯时间大于60s的乘客数目显著地减少了,长候梯率(Long Waiting Rate, LWR)从36.01%减少到了1.88%,是一个相当大的改善。

4)乘客等待时间分布

对于上行高峰客流模型,乘客的等待时间分布如图4所示。

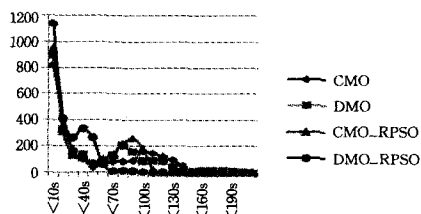


图4 乘客等待时间分布

从图4可以看到,RPSO算法的引入不仅减少了乘客的等待时间,还提高了10s内电梯运送的乘客数目。

但是本文注意到,任何一种调度策略曲线中,都有一个峰值。对于集中式EGCS,峰值发生于大概100s左右;分布式EGCS,峰值发生在83s左右;基于RPSO算法的集中式EGCS,峰值发生在85s左右;基于RPSO算法的分布式

EGCS,峰值发生在 40s 左右。峰值发生的原因是乘客到达时间的分布服从泊松分布,泊松分布中也有一个峰值。可以从图 2 中看到,上行高峰客流模型中,在 46~55s 时,乘客到达率达到了一个峰值,这是图 4 中峰值发生的原因。当很多乘客同时到达时,高密度的到达人数拉长了此时此刻乘客的等待时间。但是,如果把集中式、基于 RPSO 的集中式 EGCS,分布式、基于 RPSO 的分布式 EGCS 分别相互比较,会发现峰值分别向前平移了 25%和 51.8%,这个数字和乘客等待时间的缩短比率十分接近。即便在乘客到达率达到了一个高峰的时候,RPSO 算法的引入也可以相应缩短乘客的等待时间。

此外,在基于 RPSO 算法的分布式电梯群控系统中,98.24%的乘客在 60s 内到达了目的层,完成了运送任务。

5) 电梯利用率分布

图 5 表明了上行高峰客流模型下,电梯利用率的情况。

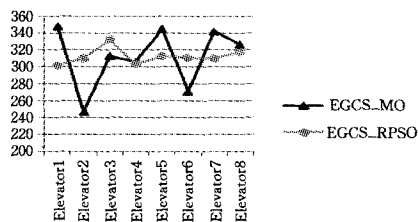


图 5 电梯利用率分布

从图 5 中可以看到,由于 RPSO 算法的引入,电梯被调用的情况平衡了许多,调用次数平稳的波动于 302 次和 332 次之间。同时,本文还计算了电梯利用次数的标准差,对于多目标电梯群控系统,电梯利用次数标准差 $STD_{\alpha} = 36.75$;引入 RPSO 算法后,电梯利用次数标准差 $STD_{\alpha} = 9.31$ 。

6) 电梯群控系统任务再分配

仿真结果还表明,基于 RPSO 算法的分布式电梯群控系统中,有 3.56%的呼梯信号经历了任务再分配,基于 RPSO 算法的集中式电梯群控系统,只有 1.2%的呼梯信号经历了任务再分配。很明显,基于 RPSO 算法的集中式电梯群控系统比分布式电梯群控系统经历较少的任务重新再分配这个环节,大约减少了 66%,即在选择最优电梯时,基于 RPSO 算法的集中式控制机制更为有效。完成任务最好的电梯不单应该代价最小,还应该是最自由、最可用的。

4.3 分析与讨论

仿真结果表明,引入 RPSO 算法时,等待时间和上升时间都有所改善和提高,等待时间的改善尤为明显。

1) RPSO 算法的有效性

RPSO 算法的引入,使在集中式电梯群控系统中,乘客等待时间提高了 20%;而分布式电梯群控系统中,等待时间提高了 55%。RPSO 算法的引入,使乘客等待时间减少,本研究对此给出的解释为:RPSO 算法中比较次数的减少节省了控制器的计算时间,从而减少了乘客的等待时间。群控系统的控制器基于每台电梯的代价函数做出决断。当有 m 台电梯、 n 位乘客时,控制器通常需要比较 $m \times n$ 次来选择代价函数最小的电梯。然而,在 RPSO 算法中,解空间的大小取决于种群大小($swarm\ size$)和种群长度($flock\ size$)。RPSO 算法中,控

制器需要比较的次数和种群长度的大小有关。RPSO 算法随机选择所要比较的电梯,代价函数最小者即为局部最优。再根据种群大小,迭代更新局部最优解,直到获得最终满意的全局最优解。结果,RPSO 算法中,需要比较的次数由种群大小($swarm\ size$)和种群长度($flock\ size$)来控制。事实上,种群大小($swarm\ size$)和种群长度($flock\ size$)满足:

$$swarm_size \times flock_size < m \quad (11)$$

所以,RPSO 算法中控制器的比较次数永远小于 $m \times n$,这是乘客等待时间减少的原因。

如果 $swarm_size \times flock_size \geq m$,RPSO 算法并不那么有效。当 $swarm_size \times flock_size = m$ 时,RPSO 算法的引入和没引入之前的效果是一样的;几乎确定的是,当 $swarm_size \times flock_size > m$ 时,RPSO 算法的引入使系统的调度结果变得更差而不是更好。

此外,RPSO 算法可以提高乘客的电梯使用时间。可以以乘客的等待时间和上升时间的总和($WT + RT$)为例,对于基于 RPSO 算法的集中式 EGCS,乘客的电梯使用时间减少了 12%;对于基于 RPSO 算法的分布式 EGCS,乘客的电梯使用时间减少了高达 33%。

2) RPSO 算法中的随机数

本研究还观察到 RPSO 算法的运行过程中,决定最终全局最优解时,随机数起了很重要的作用。本文可以对此给出这样的解释,在寻找局部最优解时,需要随机选择等同于种群长度($flock\ size$)台的电梯,假设种群长度为 m' ,需要随机选择 m' 台电梯作为初始解,其中 $m' < m$ 。但是,不同硬件或软件仿真平台中,随机数产生的速率并不相同。要想获得好的仿真结果,随机数的产生速度必须要快,并且随机数要足够离散和随机。在本文的仿真试验中,特别设计了一个随机数发生器,保证了随机数在指定步长内没有重复。

3) 将分布式控制机制与 RPSO 算法相结合

上面仿真结果很清晰地表明,无论 RPSO 算法引用与否,基于多代理思想的分布式电梯群控系统通常情况要比集中式电梯群控系统给出更好的仿真结果。本文对此给出的解释是,单台电梯多代理的并行计算节省了控制器的运算时间,有利于控制器更快地做出决策。

本文还注意到,对于任务再分配的功能,基于 RPSO 算法的分布式控制机制可给出更好的仿真结果。对此,本研究给出的解释是,分布式电梯群控系统中,单梯控制器在计算代价函数并发送报价时,可能并没有考虑到其他电梯的情况,因此每台单梯控制器并没有一个全局的实时视角。然而,基于 RPSO 算法的分布式电梯群控系统的确可以显著地减少乘客的等待时间。这是因为单梯控制器的并行计算减少了群空器整体的决策时间。总而言之,基于 RPSO 算法的情况下,分布式控制机制可以更有效地调度电梯群控系统。

结束语 在现代快速发展的社会中,通常一台电梯并不能满足整栋大楼的运送要求,需要安装多台电梯。如何让这些电梯充分配合,如何能够充分调度和利用电梯群控系统,引发了研究人员对调度问题的研究,给人们带来了新的挑战。

电梯群控系统的调度问题中包括很多不可知因素,解的状态空间也相对较大,限制条件也比较多,这都让电梯群控系统(Elevator Group Control System, EGCS)的调度问题变成了一个 NP 难问题^[25]。近来,人们针对电梯群控系统调度问题研究了各种算法,然而,大部分的算法并没有完全满足电梯群控系统中所要求的实时决策。为了获得电梯群控系统调度问题的全局最优解,本论文提出了实时粒子群算法(Real-time Particle Swarm Optimization, RPSO)。仿真结果表明,RPSO 算法可以有效地优化电梯群控系统的调度问题,特别是结合了多代理思想后,基于 RPSO 算法的分布式电梯群控系统可以使乘客平均候梯时间减少一半,使乘客的电梯使用时间减少三分之一。

参 考 文 献

- [1] Seckinger B, Koehler J. Online-Synthese von Aufzugssteuerungen als Planungsproblem (In German)[C]// Workshop Planen und Konfigurieren Interner Bericht des Instituts für Informatik der Universität Würzburg. 1999; 127-134
- [2] Kim C B, Seong K A, Hyung L K. Design and implementation of a fuzzy elevator group control system[C]// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A. 1998, 28; 277-287
- [3] Zhu D W, Jiang L, Zhou Y W. Modern elevator group supervisory control systems and neural networks technique[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems. Beijing, 1997; 528-532
- [4] Imasaki N, Kubo S, Nakai S, et al. Elevator group control system tuned by a fuzzy neural network applied method[C]// Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 1995; 1735-1740
- [5] Yang Zhen-shan, Shao Cheng, Li Gui-zhi. Multi-objective optimization for EGCS using improved PSO algorithm[C]// Proceedings of the 2007 American Control Conference. 2007; 5059-5063
- [6] Li Z, Tan H Z, Zhang Y. Particle swarm optimization applied to vertical traffic scheduling in buildings[C]// 11th International Conference on Knowledge-based Intelligent Information and Engineering Systems. 2007; 831-838
- [7] Luo F, Xu Y G, Cao J Z. Elevator traffic flow prediction with least squares support vector machines[C]// International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2005, 7; 4266-4270
- [8] Hakonen H, Siikonen M L. Elevator traffic simulation procedure [J]. Elevator World, 2008, 57(9); 180-190
- [9] Susi T, Sorsa J, Siikonen M L. Passenger behavior in elevator simulation[J]. Elevatori, 2005, 34(5); 28-37
- [10] 王遵彤, 纪德法, 乔非, 等. 基于 MAS 技术的电梯群控系统建模及 agent 协商机制与梯群调度算法[J]. 控制与决策, 2007, 22(10); 1184-1188
- [11] Koehler J, Ottiger D. An AI-based approach to destination control in elevators[J]. AI Magazine, 2002, 23
- [12] Zitzler E, Laumanns M, Bleuler S. A tutorial on evolutionary multiobjective optimization[C]// Metaheuristics for Multi-objective Optimization. 2003; 3-38
- [13] Marler R T, Arora J S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(6); 369-395
- [14] Americans with Disabilities Act (ADA). USA Department of Justice[EB/OL]. <http://www.ada.gov>, 2011
- [15] Popular Science[J]. Bonnier Corp, 1956, 169(1); 94
- [16] Eric B, Marco D, Guy T. Swarm intelligence: from natural to artificial systems[M]. New York: Oxford University Press, 1999
- [17] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks. 1995; 1942-1948
- [18] Shi Yu-hui, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer[C]// IEEE International Conference on Evolutionary Computation. 1998; 69-73
- [19] Pedrycz W, Kirota K. Fuzzy vector quantization with the particle swarm optimization; a study in fuzzy granulation-degranulation information processing[J]. Signal Process, 2007, 87(9); 2061-2074
- [20] Pedrycz W, Park B J, Pizzi N J. Identify core sets of discriminatory features using particle swarm optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3); 4610-4616
- [21] Xiong Bo, Luh P B, Chang Shi-chung. Group elevator scheduling with advanced traffic information for normal operations and coordinated emergency evacuation[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005; 245-258
- [22] The Wikibook of Automatic Control Systems and Control Systems Engineering with Classical and Modern Techniques and Advanced Concepts [EB/OL]. Wikibooks, <http://wikibooks.org>, 2010
- [23] 王遵彤, 孙栋, 詹国钟, 等. 电梯群控系统标准客流模型的设计与实现[J]. 机电一体化, 2009, 15(5); 29-33
- [24] 中国建设招标网. 电梯详细技术参数要求[EB/OL]. <http://www.zhaobiao.gov.cn>, 2011
- [25] Seckinger B, Koehler J. Online-synthese von aufzugssteuerungsplanungsproblem (In German)[C]// Workshop Planen und Konfigurieren Interner Bericht des Instituts für Informatik der Universität Würzburg. 1999; 127-134