

文章编号:1001-9081(2014)05-1516-05

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.05.1516

## 基于模拟植物生长算法的超市收银口优化调度

王婷婷, 杨琴\*

(四川师范大学 商学院, 成都 610101)

(\*通信作者电子邮箱 27524363@qq.com)

**摘要:** 超市作为服务型企业,能否最大限度地使顾客满意,直接关系到企业的利润收益和市场竞争力,因此对超市收银口的优化调度研究具有重要的现实意义。首先运用三元组  $\alpha/\beta/\gamma$  方法对问题进行描述,将收银口调度描述为一类以最大化顾客满意度为主要目标,最小化经营成本为次要目标,具有机器使用限制和先入先出(FIFO)原则的优化调度问题,并建立了相应的数学模型;接着运用模拟植物生长算法(PGSA)进行了算法设计;最后用实际案例进行了数值仿真,验证了方法的有效性和可行性。

**关键词:** 收银口; 优化调度; 模拟植物生长算法; 满意度; 成本

**中图分类号:** TP18    **文献标志码:** A

### Retail checkout optimized scheduling based on plant growth simulation algorithm

WANG Tingting, YANG Qin\*

(Business School, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan 610101, China)

**Abstract:** Maximizing customer satisfaction is directly related to the enterprise profit and market competitiveness for the supermarket as a service enterprise, so it is important to optimize the retail checkout operation. Firstly, the retail checkout scheduling problem was described by a triplet of  $\alpha/\beta/\gamma$ , maximizing customer satisfaction was taken as the first goal and minimizing operating cost was taken as the second goal with machine usage restriction and the rule of First In First Out (FIFO). The corresponding mathematical model was established, and then an algorithm was designed using plant growth simulation algorithm. Finally, a numerical simulation of actual cases was used to verify the effectiveness and feasibility of the method.

**Key words:** checkout; optimized scheduling; Plant Growth Simulation Algorithm (PGSA); satisfaction; cost

### 0 引言

随着社会经济的发展,超市这一零售业越来越被中国民众所接受,顾客满意度问题因此也越来越被关注。作为超市与消费者最终完成交易的环节——收银系统占到一个突出重要的位置。因此优化收银系统,为顾客提供最佳的服务,为顾客创造和谐、高效的环境是超市面临竞争的必然选择。在当今节奏越来越快的社会里,在一定的排队情形下如何根据客流量及购买量合理地调整收银台数目和种类,缩短顾客排队等待时间使顾客满意,在此基础上降低超市经营成本,提高效益,显得尤为重要。

目前,对于这一应用环境下使用算法的研究还比较缺乏,但是与其相关的某些内容已有了大量的研究成果。文献[1]对工作休假的 M/M/1 的排队问题进行分析。文献[2]中研究了伴有休假中止的 M/M/1 的排队系统。随着技术的发展一些学者用动态规划的方法对排队系统进行了研究<sup>[3-4]</sup>。但排队论完全基于概率论和随机过程理论,对输出过程有一定的局限性。因此本文将结合模拟植物生长算法计算合理的开放收银台的数量,以优化系统,使顾客达到最大的满意度。

因此,本文对成都市某超市收银口开放数目的优化调度

问题进行了研究。由于超市属于服务性企业,所以超市的主要目标为最大限度地使顾客满意,次要目标为降低经营成本,因此该调度问题可以看作在满足最大化顾客满意度的所有调度集合内使开放收银口数量最少的调度问题。在以往理论研究的基础上,首先深入剖析问题的特性,然后建立数学模型;其次设计了超市收银口优化调度问题的模拟植物生长算法;最后通过实际案例进行数值仿真,并验证了该研究的有效性和可行性。

### 1 基于顾客满意度的队列分类分析

#### 1.1 收银口分类分析

经常看到这些现象:旺季时,超市收银口处排队严重,有的顾客购物数量很少也要排半个小时;淡季时,超市门可罗雀,可仍开有很多的收银口导致人力资源的浪费。国内外很多学者对分类队列进行了研究:Bialik 提出为购买量较少的顾客提供快速通道;Schwartz 建立了 n 种顾客 n 种服务台的 LS 模型;某些超市采取了使用类似银行的单队列排队系统<sup>[5]</sup>,为部分顾客增设特殊通道等。Whole Foods 还把服务区分成了快速服务区和高购买量服务区。本文根据阅读参考文献及调查显示不同顾客的时间成本并不一样,因此可以为高

收稿日期:2013-10-14;修回日期:2013-12-20。基金项目:国家自然科学基金资助项目(71202166);教育部人文社科青年基金资助项目(13YJC630202);四川省教育厅重点项目(14ZA0026);四川师范大学教改项目;四川师范大学科学创新项目。

作者简介:王婷婷(1989-),女,山西晋城人,硕士研究生,主要研究方向:优化调度;杨琴(1978-),女,四川宜宾人,副教授,博士,主要研究方向:优化调度。

时间成本的顾客设计快速通道来降低顾客整体的时间成本,为高购买量的顾客设计特殊通道来提高顾客的满意度。如果购买商品中有同类商品,多件同类商品抵一件商品,服务时间比不同类商品一件多两秒。本文决定根据购买量将收银口设置为3种类型:

- 1) 快速通道称为设备A。购买不同类商品数量小于或等于5件。
- 2) 普通通道称为设备B。所有顾客均可在此设备上结账。
- 3) 特殊通道称为设备C。购物数量大于25件的顾客在此设备上结账。

如何合理地开启快速通道、普通通道和特殊通道这是本文研究的初衷。根据顾客的种类和数量,开辟不同种类的收银口,使特定运营策略下可能出现的极端的状况如某个队列特别长而其他队列较短甚至空闲等情况迅速被平抑。

## 1.2 基于顾客行为习惯分析顾客满意与等待时间的关系

顾客满意的观点由美国学者 Cardozo 于 1965 年首次提出的。顾客满意主要研究顾客心理特征与活动的关系。影响顾客满意度模型<sup>[6-8]</sup>的变量主要有:顾客预期、感知质量、感知价值、顾客抱怨、顾客忠诚等。本文主要研究的是在既定的队列下优化排队问题。在选定超市以后,顾客的满意度与预期等待时间有关。其他变量对其满意度影响不大。因此本文采用 Oliver 的“期望-不一致”模型,其核心思想是顾客将购买后感受到的产品或服务绩效与购买前的期望进行比较,二者的差距形成不一致,当产品效益超过期望时,导致满意;当产品效益低于期望时,导致不满意。

在实际生活中不同时间段不同年龄的顾客的预期等待时间是不同的。比如:非节假日的早晨,老人所能承受的等待时间较长;下班时间工薪族所能承受的等待时间较短;节假日顾客所能承受的等待时间较长等。本文只重点模拟某一时间段、某类顾客对不同等待时间的满意度,其他时间段或其他顾客只需在模型中改变相应的所能承受的等待时间即可。

基于此理论对某超市进行调查,根据搜集的数据给非常满意、满意、不满意、非常不满意分别赋值为 4, 3, 2, 1, 用 Matlab 绘出节假日顾客满意水平与等待时间分布图,横轴表示等待时间,竖轴表示满意水平,如图 1 所示。

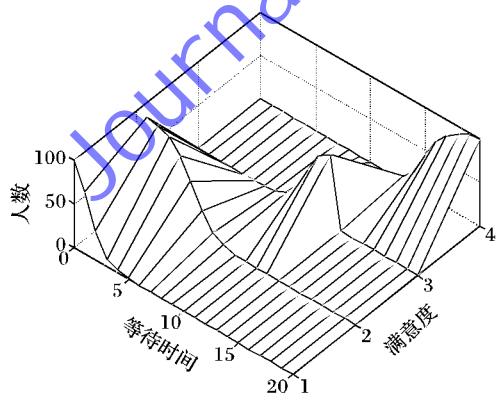


图 1 顾客满意水平与等待时间分布

从实际意义可知,当实际等待时间超过预期时,超出程度越大,对顾客情感和满意的消极影响就越大。即随着等待时间的增加顾客的满意度边际递减。根据节假日顾客满意水平与等待时间的调查结果进行回归分析,二次函数的拟合效果

优于一次函数,因此得到的满意度与等待时间的函数关系如下:

$$S(T_j) = 0.0037T_j^2 - 0.0044T_j + 4.0686 \quad (1)$$

可决系数达到 0.9278,式(1)为求解的满意度公式。

## 2 问题的描述及建模

根据客流量及所需的交费时间合理地开放收银口的数目和种类,从而达到顾客满意且经营成本较低的目的。该问题可以描述为以并行异速机的最大化顾客满意度作为主要目标,最小化经营成本作为次要目标的调度问题。基于它们之间的共性,可以用一个三元组  $\alpha/\beta/\gamma$  来描述该调度问题,其中:  $\alpha$  域主要描述资源环境,  $\beta$  域分析约束条件,  $\gamma$  域则阐明了优化调度目标。该调度问题可以看作并行多机存在机器适用限制的多目标调度问题。

### 2.1 问题特征描述

#### 2.1.1 资源环境 ( $\alpha$ 域)

顾客在收银台结账时,可以根据购买数量的多少选择不同的收银口,每个收银口的服务水平与购买数量正相关,相当于并行异速机,用  $m$  来度量它的总量。例如: $m$  个收银台,其中  $a$  个快速通道,  $b$  个普通通道,  $c$  个特殊通道,顾客可以根据自己的购买数量选择合适的一台结账。

#### 2.1.2 约束和任务特征 ( $\beta$ 域)

每位顾客根据自己的购买量不同选择合适的机器接受服务,所以具有机器适用限制,用  $M_j$  表示;在顾客确定所选的机器后,每台机器前的队列受优先约束的限制,即在下一个顾客开始结账之前,前一个顾客必须先完成服务。在每台机器前的队列遵循先进先出 (First In First Out, FIFO) 规则。

#### 2.1.3 调度目标 ( $\gamma$ 域)

等待具有消极作用,如果收银口开放数目过少,随着消费者的等待时间增加,顾客满意度边际递减。但由于超市属于服务性行业,顾客要放在首要地位。因此设置第一目标函数为最大化顾客满意度—— $\max \sum_{j=1}^n S(T_j)/n$ , 其中  $T_j = \max(c_j - d_j, 0)$ ,  $T_j$  表示顾客的滞后时间,  $d_j$  表示顾客  $j$  的预期完成时间;  $c_j$  表示顾客  $j$  离开系统的实际时间; 第二目标函数为最小化收银口数—— $\min \sum_{j=1}^n (a_{ij} + b_{ij} + c_{ij})$ , 其中  $\sum_{j=1}^n a_{ij}$ 、 $\sum_{j=1}^n b_{ij}$ 、 $\sum_{j=1}^n c_{ij}$ , 分别表示开启快速通道、普通通道、特殊通道的数量。

### 2.2 参数设计

$m$  表示收银口总数,  $i$  表示任意一个收银口, 取值  $i \in [1, m]$ ;  $n$  表示顾客总数,  $j$  表示任意一位顾客, 取值  $j \in [1, n]$ ;  $\lambda$  表示单位时间内到达收银口的总人数, 计为总的到达率,  $\lambda$  服从泊松分布;  $\mu$  表示单位时间内被服务完成的顾客数, 计为服务率,  $\mu$  服从负指数分布;  $p_j$  表示顾客  $j$  在收银台上的服务时间, 与顾客  $j$  购买的商品数量有关;  $q_j$  表示顾客  $j$  购买的商品数量;  $v$  表示收银机器对单件商品的服务速度;  $s_{jk}$  表示为顾客  $j$  服务完成后为顾客  $k$  服务所需要的准备时间;  $r_j$  表示顾客  $j$  的提交时间;  $d_j$  表示顾客  $j$  的期望完成时间;  $c_j$  表示顾客  $j$  离开系统的实际时间;  $T_j$  表示顾客的滞后时间。决策变量如下:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{顾客 } j \text{ 正在接受服务} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{顾客 } j \text{ 在 } A \text{ 类设备上接受服务}, i \in A \\ 2, & \text{顾客 } j \text{ 在 } B \text{ 类设备上接受服务}, i \in B \\ 3, & \text{顾客 } j \text{ 在 } C \text{ 类设备上接受服务}, i \in C \end{cases}$$

### 2.3 基本假设

- 假设 1 每位顾客只选择一台机器结账；
- 假设 2 任一机器对每一件物品的服务时间是相同的；
- 假设 3 等待时间超过一定的范围后，顾客会自动离开；
- 假设 4 超市实行先来先服务原则，顾客选择队列后就不再更换。

### 2.4 模型设计

综上所述，该问题可以描述为具有优先约束限制及 FIFO 的规则，以平均满意度最大化为主要目标，开放机器数量最小化为次要目标的并行异速机调度问题 ( $Qm/prec$ )，

$M_j / \left( \max \sum_{j=1}^n S(T_j) / n \text{ (opt)} \right), \min \sum_{j=1}^n (a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}) \right)$  超市属于服务型行业，最大化顾客的满意度是企业的最高目标，所以本文把最大化顾客平均满意度作为第一目标，最小化收银口数量作为第二目标函数，建立双目标函数，相应的数学模型如下所示：

$$\max \sum_{j=1}^n S(T_j) / n \text{ (opt)} \quad (2)$$

$$\min \sum_{j=1}^n (a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}) \quad (3)$$

$$\text{s. t. } T_j = \max(c_j - d_j, 0) \quad (4)$$

$$S(T_j) = 0.0037T_j^2 - 0.0044T_j + 4.0686 \quad (5)$$

$$p_j = q_j \cdot v \quad (6)$$

$$d_j \geq p_j + r_j \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_{ij} = D_{ij}x_j \\ b_{ij} = \frac{1}{2}D_{ij}x_j \\ c_{ij} = \frac{1}{3}D_{ij}x_j \end{cases} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m (a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}) = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n (a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}) \leq m \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_j \in \{0, 1\} \\ D_{ij} \in \{0, 1, 2, 3\} \end{cases} \quad (11)$$

模型中，式(2)为主要目标函数，式(3)为次要目标函数，式(4)~(11)为约束条件。其中：式(3)度量了顾客  $j$  的延迟时间；式(5)度量了顾客  $j$  的满意度；式(6)确立了为顾客  $j$  的服务时间和购买数量的关系；式(7)保证顾客  $j$  的预期完成时间；式(8)表明顾客  $j$  在哪类机器上接受服务；式(9)确保每位顾客只能被一台机器服务一次；式(10)确保开启的机器数量小于总机器数；式(11)保证了决策变量的取值范围。

## 3 超市收银口调度问题的模拟植物生长算法

模拟植物生长算法 (Plant Growth Simulation Algorithm, PGSA) 是由李彤等<sup>[9]</sup>于 2005 年提出的一种源于大自然的仿生类智能搜索算法。它将调度问题规划模型的可行域作为植物的生长环境，根据各可行解的目标函数变化情况确定植物的形态素浓度，进而模拟出向全局最优解迅速生长的植物生

长动力学模型。该算法对参数的要求简单，因而具有良好的应用前景，目前在工程技术领域已逐步开始被许多学者应用<sup>[9~14]</sup>。

### 3.1 植物生长机理

植物可看作由大量枝、节组成的系统。模拟植物的生长演绎方式是采用以简单的重写规则和分支规则来描述、分析和模拟植物生长的形式语言，称为 L-系统。L-系统作为人工植物的生长演绎方式的源模式，生长点是每一次生长的位置点。植物生长过程是生长点按  $2n$  个方向生长并产生新枝，分支长度设定为 1。

### 3.2 生长点表示

本文研究的超市收银口  $d_h$  有 4 种模式，分别用 0, 1, 2, 3 来表示。采用模拟植物生长算法求解收银口的调度问题：

$$d_h = \begin{cases} 0, & \text{第 } h \text{ 个收银台未开启} \\ 1, & \text{第 } h \text{ 个收银台开启快速通道} \\ 2, & \text{第 } h \text{ 个收银台开启普通通道} \\ 3, & \text{第 } h \text{ 个收银台开启特殊通道} \end{cases}; h = 1, 2, \dots, m$$

在超市收银系统中，可将收银台的开放种类看作生长点  $x_h = (0, 0, \dots, 0, 1, \dots, 1, 2, \dots, 2, 3, \dots, 3)$ 。其中：0 表示该收银台未开放，1 表示开启快速通道，2 表示开启普通通道，3 表示开启快速通道。在每个收银台接受服务的顾客取决于其购买数量。

### 3.3 模拟植物向光性的概率生长模型

植物的向光性问题涉及生物学理论中的形态发生模型。该模型认为每个细胞都含有一种生长素，叫形态素。形态素的浓度是模型的观察参数，决定细胞的生长函数是否开始起作用，即细胞分裂，新枝芽出现。当新的生长点产生后，形态素浓度将根据新系统所在环境的改变，在多细胞系统重新进行分配，据此植物表现出明显的向光性特点。模拟这一过程，设有  $n$  个初始点  $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，每个生长点的形态素浓度为  $P_i = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ ，计算各生长点的浓度值为：

$$p_h = \frac{S(T_j)}{\sum S(T_j)} \quad (12)$$

其中  $S(T_j)$  为目标函数值。式(12)中各生长点的形态素浓度是由各点的相对位置以及该位置的目标函数值所确定的，因此  $n$  个生长点对应  $n$  个形态素浓度值，每次产生新枝，该浓度都将发生变化。由式(12)可知：

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (13)$$

在确定了形态素浓度后，就可建立植物向光性机制，即形态素浓度较高的生长点具有较大的优先生长机会。利用产生位于区间  $[0, 1]$  的随机数，该随机数落在  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$  的某一个状态空间内，其对应的生长点就优先长出新枝。在新枝长成后，所有生长点的形态素浓度值都将发生变化。该过程反复进行，直至没有新枝产生为止。这就是 PGSA，形态素浓度状态空间如图 2 所示。

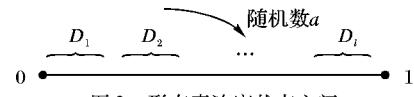


图 2 形态素浓度状态空间

### 3.4 生长步长的选取与新生长点的产生

在迭代中，当  $x_{hi} = 0$  时，步长选取 1，即由关闭状态变为

快速通道;当 $x_{hi} = 1$ 时,步长选取1或-1,选取1即由快速通道变为普通通道,选取-1即由快速通道变为关闭状态;当 $x_{hi} = 2$ 时,步长选取1或-1,选取1即由普通通道变为特殊通道,选取-1即由普通通道变为快速;当 $x_{hi} = 3$ 时,步长选取-1,即由特殊通道变为普通通道。

### 3.5 算法流程及步骤

具体迭代步骤如下。

1)确定初始优先生长点。初始优先生长点即树干,也就是控制变量的初值 $\mathbf{x}^0$ , $\mathbf{x}^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ , $x_i^0 = 0, 1, 2, 3$  $(i = 1, 2, \dots, m)$ ,选取原则是必须满足所有约束条件,且对应的目标函数值不宜太小。求出对应 $\mathbf{x}^0$ 的目标函数值 $f(\mathbf{x}^0)$ ,并令最优解及对应的目标函数的初值为 $\mathbf{x}^{max} = \mathbf{x}^0$ 和 $f_{max}(\mathbf{x}^{max}) = f(\mathbf{x}^0)$ ,设定最大的迭代次数。

2)计算各生长点的形态素浓度: $p_h = S(T_j)/\sum S(T_j)$ 。

3)寻找优先生长点。对上一步中计算得到的形态素浓度按 $\sum p_m = \sum_{h=1}^m p_h$ 进行累加计算,得到 $\sum p_1, \sum p_2, \dots, \sum p_m$ 。在 $[0, 1]$ 区间任选一个随机数 $\eta$ ,根据随机数选择本次迭代生长点 $x^h$ 。

4)求出新的生长点。过优先生长点做平行各坐标轴、且满足 $a \leq x \leq b$ 的直线段。其中: $a = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ 为控制变量的下限,对于超市收银口来说这个向量的元素都为0; $b = [b_1, b_2, \dots, b_m]$ 为控制变量的上限,对于超市收银口来说这个向量的所有元素均为3。以优先生长点为中心,沿坐标轴的正负方向以整数1为步长在各直线段上寻找可能的新生长点。对寻找到的可能生长点进行检验,若不满足约束条件,直接剔除该点;否则继续计算该点的目标函数值,并将其与 $f(\mathbf{x}^0)$ 进行比较,进一步剔除目标函数值小于 $f(\mathbf{x}^0)$ 的点,保留下来的新生长点并入待生长点集。

5)保存目标函数的最优解。求出新生长点中最大目标函数值并与 $f_{max}(\mathbf{x}^{max})$ 进行比较,若这个值大于 $f_{max}(\mathbf{x}^{max})$ ,则置换 $\mathbf{x}^{max}$ 及 $f_{max}(\mathbf{x}^{max})$ 。

6)判断是否满足收敛条件。若新的生长点均不优于原生长点,或达到设定的迭代次数,得到全局最优解或局部最优解,计算结束。

7)在所有最优解中找出开放收银口数目最少的解。

模拟植物生长算法的流程如图3。

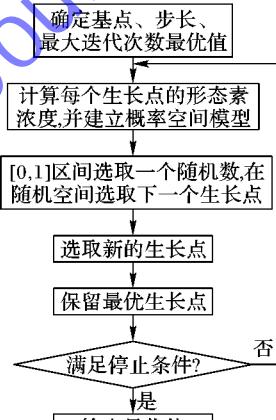


图3 PGSA流程

### 4 实例研究

以四川省成都市某超市为研究对象,对周末高峰期(15:00—16:00)超市收银口进行优化调度。该超市共有12个窗口,通过记录数据分析,收银台的服务人员每扫描一件物品平均需要4 s,服务率服从 $\lambda = 0.25$ 件/s的负指数分布。该时间段结账的人数为272人,顾客的到达率服从 $\lambda = 0.24$ 人/s的泊松分布。通过Matlab软件编程实现对超市收银口优化调度问题的进行求解,迭代次数设定60次,并在Windows7,酷睿2双核,主频2.20 GHz的平台下运行3次,其平均运行时间为60 s,其收敛图如图4所示。

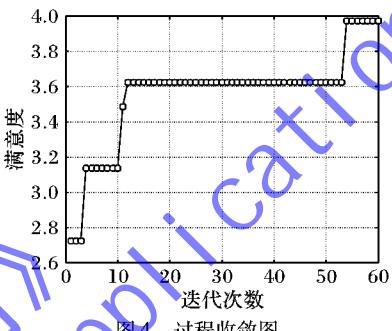


图4中曲线反映了模拟植物生长算法在求解超市收银口调度问题时的迭代收敛过程。由图可知顾客的平均满意度在不断增加,并能够在较少的迭代次数内趋于稳定值,表明了算法的优越性和有效性。

本文算法的仿真测试结果如表1所示。表1对超市收银口优化前后开放收银口的数量及种类进行了比较,优化前超市仅采用了一种通道,打开了10个收银台,等待时间超过15 min的有32人,而优化后,在满意度达到3.9723的方案中选取开放收银口最少的方案。在所选的方案中打开了10个收银台,但只有9位顾客的等待时间超过15 min,优化后的满意度高于优化前的满意度。表明超市可以使收银台窗口多样化,合理的调节窗口数量和种类不仅可以有效地提高顾客的满意度而且可以降低经营成本,实现超市服务系统的最佳运营。因此,在购物高峰期动态的调整收银台数量及种类是一种合理的选择。

表1 超市收银口的调度优化前后对比(15:00—16:00)

基本统计量	统计项目	当前现状	优化后
开放收银口数量	快速通道	0	2
等待人数	普通通道	10	4
等待时间0~5 min	特殊通道	0	4
等待时间6~10 min	等待时间0~5 min	94	136
等待时间11~15 min	等待时间6~10 min	68	110
等待时间>15 min	等待时间11~15 min	78	17
满意度	等待时间>15 min	32	9
	满意度	2.8191	3.9723

### 5 结语

通过学习和总结前人经验,就超市排队服务问题进行研究分析。根据购买商品数量不同开辟不同种类的收银口,运用模拟植物生长算法来动态地调整收银口的数量和种类,使顾客满意度达到一定水平,同时控制企业的运营成本。研究结合了实例进行仿真,结果显示,开辟快速通道和特殊通道有

利于满足特殊人群的需求,使平均满意度达到最大。虽然本文的研究发现开设多种类型的通道对顾客的整体福利有利,但如何减小被损害的顾客对损害的感知等方面值得深入研究。在此基础上,如何针对不同人群、不同时间段对收银系统合理有效的调度,将是下一步需要研究的课题。

#### 参考文献:

- [1] LIU W Y, XU X L, TIAN N S. Stochastic decomposition in the M/M/1 queue with working vacation [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, 204(1): 478 – 484.
- [2] LI J H, TIAN N S. The M/M/1 queue with working vacation and vacation interruptions [J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2007, 16(1): 121 – 127.
- [3] MILLER B M. Optimization of queueing system via stochastic control [J]. *Automatica*, 2009, 45(6): 1423 – 1430.
- [4] ZHENG H, GU F. Optimization of the queuing system in large supermarket [J]. *Chinese Journal of Management*, 2005, 2(2): 171 – 173. (郑欢, 古福文. 大型超市顾客交费排队系统优化分析 [J]. 管理学报, 2005, 2(2): 171 – 173.)
- [5] BLACKBURN J D. Optimal control of a single-server queue with balking and reneging [J]. *Management Science*, 1972, 19(3), 297 – 313.
- [6] O'SULLIVAN D, McCALLIG J. Customer satisfaction, earnings and firm value [J]. *European Journal of Marketing*, 2012, 115 (3): 367 – 370.
- [7] FIEMS D, MAERTENS T, BRUNEEL H. Queueing systems with different types of server interruptions [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 188(3): 838 – 845.
- [8] EVANSCHITZKY H, SHARMA A, PRYKOP C. The role of the sales employee in securing customer satisfaction [J]. *European Journal of Marketing*, 2005, 41(1): 10 – 20.
- [9] LI T, WANG Z. Optimization layout of underground logistics network in big cities with plant growth simulation algorithm [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 8(4): 76 – 85. (李彤, 王众托. 大型城市地下物流网络优化布局的模拟植物生长算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 8(4): 76 – 85.)
- [10] LI J, YANG Q. Study on optimization scheduling of fast bus based on the plant growth simulation algorithm [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2013, 9(8): 146 – 151. (李金奇, 杨琴. 基于模拟植物生长算法的快线公共车辆优化调度研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(8): 146 – 151.)
- [11] LI T, WANG Z. Plant growth simulation algorithm and the thinking in knowledge innovation [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2010, 13(3): 87 – 96. (李彤, 王众托. 模拟植物生长算法与知识创新的几点思考 [J]. 管理科学学报, 2010, 13(3): 87 – 96.)
- [12] TANG H, YE C, ZHANG X. Plant growth simulation algorithm for permutation flow shop scheduling to minimize makespan [J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(10): 3670 – 3672. (唐海波, 叶春明, 张新功. 应用模拟植物生长算法求解置换流水车间调度问题 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(10): 3670 – 3672.)
- [13] WANG C, CHENG H. Transmission network optimal planning based on plant growth simulation algorithm [J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2009, 19(2): 291 – 301.
- [14] XI Y, MA L, DAI Q. Plant growth simulation algorithm for multi-criteria traveling salesman [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(10): 3733 – 3735. (郗莹, 马良, 戴秋萍. 多目标旅行商问题的模拟植物生长算法求解 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(10): 3733 – 3735.)

(上接第 1510 页)

由于民航信息交换过程涉及参数众多,抽象过程中并没有考虑到数据资源的 I/O 性能、负载情况等,这些是以后进一步研究的重要方面。另外,在求解问题的过程中,下一步可针对民航信息交换网络特点,提出更有针对性的启发式算法进一步优化。

#### 参考文献:

- [1] YANG J. How China faces significant changes in international AIS field [J]. *China Civil Aviation*, 2006, 71(11): 39 – 40. (杨京. 中国如何面对国际 AIS 领域的重大变革 [J]. 中国民用航空, 2006, 71(11): 39 – 40.)
- [2] BRUNK B K, POROSNICU E. A tour of the AIXM concept [C]// Proceedings of the 2004 ESRI International Users Conference. San Diego: [ s. n. ], 2004: 2190.
- [3] LI Y, WANG J. Research of flight procedure data sharing and exchanging technology XML-based [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2011. (李亚娟, 王洁宁. 基于 XML 的飞行程序数据共享与交换技术研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2011.)
- [4] LIU Y, LIAN D. Design of task scheduling model of data exchange platform [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2013, 34(7): 1543 – 1546. (刘应明, 廉东本. 数据交换平台的任务调度模型设计 [J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(7): 1543 – 1546.)
- [5] FENG J, QI D, QIAN Z. Job scheduling solution based on data exchange and synchronization [J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(11): 3165 – 3170. (冯家耀, 齐德昱, 钱正平. 基于数据交换与同步的作业调度方案 [J]. 计算机应用, 2009, 29(11): 3165 – 3170.)
- [6] LENSTRA J K, RINNOOY KAN A H G. An introduction to multiprocessor scheduling [J]. *Quæstio*, 1981, 5(1): 49 – 57.
- [7] HOU E S H, ANSARI N, REN H. A genetic algorithm for multiprocessor scheduling [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1994, 5 (2): 113 – 120.
- [8] TAURA K, CHIEN A A. A heuristic algorithm for mapping communicating tasks on heterogeneous resources [C]// HCW '00: Proceedings of the 9th Heterogeneous Computing Workshop. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 102 – 115.
- [9] WINTER P, ZACHARIASEN M. Euclidean Steiner minimum trees: an improved exact algorithm [J]. *Networks*, 1997, 30(3): 149 – 166.
- [10] GANLEY J L. Computing optimal rectilinear Steiner trees: a survey and experimental evaluation [J]. *Discrete APPI Mathematics*, 1999, 90(1/2/3): 161 – 171.
- [11] KARP R M. Reducibility among combinatorial problems [M]// Complexity of Computer Computations. New York: Plenum Press, 1972: 85 – 103.
- [12] MELZAK Z A. On the problem of Steiner [J]. *Canadian Mathematical Bulletin*, 1961, 4(2): 143 – 148.
- [13] PRÜFER H. Neuer beweis eines satzes über permutationen [J]. *Archiv der Mathematik und Physik*, 1918, 27: 142 – 144.
- [14] LUAN W. Multi-objective GA for the Steiner tree problem [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (栾威. 基于多目标遗传算法求解 Steiner 树问题 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.)