

Study on Secondary Priority Polling Mechanism of Order-Picking

Wenxue Ran^{1,2}, Xinling Shi¹, Guomin Yang²

¹Department of Communication and Information, Yunnan University, Kunming

²Department of Business, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming
Email: ranwxa@vip.sina.com

Received: Jan. 23rd, 2013; revised: Feb. 24th, 2013; accepted: Mar. 10th, 2013

Copyright © 2013 Wenxue Ran et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: According to the characteristics of order-picking system, the VC queues are classified into priority queues (priority order) and multiple common queues (common order). In this paper, according to the requirements of rapidity, real-time and fairness of the unit material automation order-picking control, exhaustive service strategy is explored to apply in priority order to achieve the priority control, while the limited service strategy is explored to apply in common order to achieve the fairness control, both two service strategies are adopted to parallel scheduling. In this paper, embedded Markov chain and probability generating function are adopted to solve the control mechanism. Combined with the real-world priority parameters of order-picking, this paper studies the actual value of order-picking polling system by way of simulation.

Keywords: Order-Picking; Polling Mechanism; Secondary Priority Control

订单分拣二级优先轮询控制机理研究

冉文学^{1,2}, 施心陵¹, 杨国敏²

¹云南大学信息学院, 昆明

²云南财经大学商学院, 昆明

Email: ranwxa@vip.sina.com

收稿日期: 2013年1月23日; 修回日期: 2013年2月24日; 录用日期: 2013年3月10日

摘要: 本文研究根据订单分拣的系统特性要求将订单 VC 队列划分为两级, 其中包括一个优先队列, 即订单优先(Priority Order)部分, 和多个普通队列, 即普通订单(Common Order)部分。研究中, 针对单元物料自动化订单分拣控制的快捷性、实时性和公平性要求, 对两种不同的订单队列采用不同的控制策略——对优先订单队列采用完全轮询服务策略, 实现其服务的优先级控制; 对普通订单队列采用限定轮询服务策略, 实现其服务的公平性控制, 并对两种策略采用并行调度。采用嵌入式 Markov 链和概率母函数方法, 对该轮询系统模型的控制机制及一阶、二阶特性参数进行精确求解; 并结合订单分拣的实际生产优先级参数, 进行仿真分析。

关键词: 订单分拣; 轮询机理; 二级优先控制

1. 引言

现代物流是新兴规模经济的支撑基础, 特别是近

一两年来, 随着电子商务的飞速发展, 促进了物流配送的大发展。规模经济背景下的物流配送中心属于多

品种、小批量、规模化、进出频繁的物流中心，需要研究新型的具有更高效率的配送中心分拣技术，以满足电子商务规模化生产的实际需求。

此外，随着消费者个性化需求的增加，对系统提出了各种各样的特殊要求，比如，在一批订单里面，普通订单可以按部就班的进行处理，但有的VIP订单，需要优先处理；而在单一订单里面，有的商品分拣数量大，有的一般，有的稀少；商品的价值，有的昂贵，有的廉价。不同的商品，需要采用不同的分拣方式，分类进行分拣配单，能够提高生产效率。而且，为用户提供差异化的、满足消费者个性化需求的物流配送服务，是提高物流配送中心经济效益的一个选项，这是在规模经济条件下急需研究的问题。

针对上述问题，国内学者早已展开相关研究，比如，本文作者于2003年经过研究，提出了单元物料自动化分拣的“虚拟视窗”控制算法^[1]。张贻弓等^[2]针对自动分拣系统的订单合流和排序优化问题，提出一种通过压缩货物间距减少订单分拣时间的方法，对该方法中的订单排序问题建立了分拣时间最小化的数学模型，并设计了一种最大最小蚁群算法对模型进行求解。熊红云等^[3]提出可以通过合理安排订单的分拣顺序，减少自动分拣系统补货任务的不平衡。以补货任务不平衡最小化为目标建立了时间标尺、均匀间距和最大最小间距三种优化模型，并利用模拟退火算法对模型进行求解，求解结果验证了模型的正确性和有效性等。2009年，本文作者对物流配送中心的组成设备进行了系统的论述^[4]。

然而，以上研究对分拣机的吞吐量存在一个认识的误区，即认为分拣线的能力等于各分拣机的能力的总和。其实不是这样，在串行的分拣线结构中，传统控制下的系统订单吞吐能力可能小于某一分拣机个体的能力。当然，对于串行分拣线机构的研究在分拣成本方面的研究取得了一些进展，比如，刘德宝博士^[5]研究给出了订单在串行分拣线上的分拣耗用时间，从而可求出单位时间里订单的吞吐量；肖际伟博士^[6]建立了订单分拣用时、分拣成本和分拣线组合的关系，依据设备特点(如：卧式分拣机为大流量自动分拣机，A字架分拣机为普通流量自动分拣机)推导出固定成本、最小可变成本、最小分拣用时的计算公式，建立了分拣成本最小化为目标的优化模型，并设计了搜索最优解的回溯方法。

从以上研究状况来看，这些研究虽能在很大程度上提高分拣效率，但仍然无法满足多品种、小批量、规模化、多频次、以及客户化的分拣要求，因此，本文研究单元物料的分拣控制策略，采用新型的订单控制单元——虚拟容器VC(Virtual Container, VC)，在系统设备精确运行的基础上，基于精确计算控制。根据自动分拣作业的性质，自动化分拣线运行过程中，以订单大小划分VC后，精确计算VC的达到时间，匹配分拣服务时间、以及分拣机作业的切换时间，所配货物放置于VC之中，并且匀速在自动输送带上顺序运动。相邻两个订单的分界是两个VC间的间隔距离，这个距离由分拣机的切换时间所决定，相邻两个订单不能任何出现叠加或错单现象。每个虚拟容器的容积是随机的，根据消费者提出的订单的具体需求而随机确定的，虚拟容器有根据订单自动“生成”和完成订单后自动“消失”的特性。当*i*号订单生成进入输送线上时，虚拟容器*i*开始生成，订单*i*随着输送机在向前运动，相隔 l_i 距离后，订单*i+1*自动生成进入输送线，虚拟容器*i+1*开始生成。当订单*i*离开控制输送线完成后时，虚拟配容器*i*自动消失。

本文研究根据订单分拣的系统特性要求将订单VC队列划分为两级，其中包括高优先级的一个优先队列，即优先订单(Priority Order)，和低优先级的多个普通队列，采用不同的控制策略，实现单元物料自动化订单分拣控制的快捷性、实时性和公平性要求。

2. 订单分拣完全——限定($k=1$)二级轮询机理

2.1. 二级轮询系统模型

设VC在如图1所示的系统模型中，VC队列中有 $N+1$ 个队列，其中包括一个优先订单VC队列*h*和*N*个普通订单VC队列；假设根据业务的需要，优先订单VC队列*h*作为轮询系统的第一级，接受优先服务，采用完全服务策略作为分拣控制策略，*N*个普通VC队列作为第二级，接受普通服务，采用限定($k=1$)轮询服务作为分拣控制策略。

如图2所示。设在 t_n 时刻，分拣机有没有接受到优先订单分拣服务指令，如果接到，则分拣机对优先订单按设定的服务策略进行分拣作业；在 t_n 时刻有没有接受到普通订单分拣作业指令，若收到，则分拣机对普通订单按设定的服务机理进行分拣作业。如此循

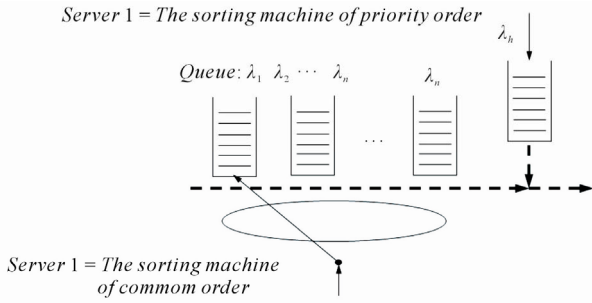


Figure 1. Priority-based order-picking secondary polling mechanism model
图 1. 基于优先级的订单分拣二级轮询控制机理模型

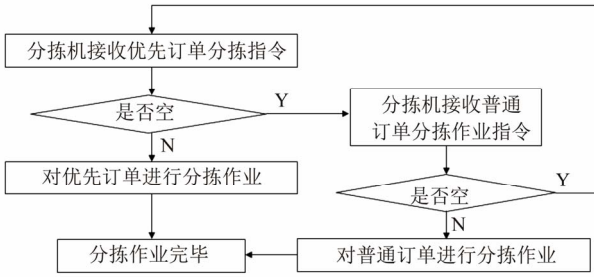


Figure 2. Priority-based order-picking strategy
图 2. 基于优先级的订单分拣策略

环, 一个转换时间后, 再进行 t_{n+1} 时刻的循环, 直至订单分拣作业完毕。

2.2. 变量定义

为了完成系统的精确分析, 定义以下随机变量:

$\xi_i(n)$: 普通 VC 队列 i ($i=1, 2, \dots, N$) 在 t_n 时刻其队列内的单元物料数;

$\xi_h(n)$: 在 t_n 时刻系统优先 VC 队列中的单元物料总数;

$\xi_h(n^*)$: 从队列 i 转换分拣优先队列 t_n^* 时刻优先 VC 队列中的单元物料总数;

v_i : 普通 VC 队列中 i 的订单队列分组数的分拣服务时间;

v_h : 优先 VC 队列的订单队列分组数的分拣服务时间;

u_i : 由队列 i 转向优先队列的转换时间;

$\eta_j(v_i)$: 在 v_i 时间内进入第 j 号队列 ($i=1, 2, \dots, N, h$) 内需分拣的普通订单队列数;

$\eta_j(v_h)$: 在 v_h 时间内进入第 j 号队列 ($i=1, 2, \dots, N, h$) 内需分拣的优先订单队列数;

$\mu_j(u_i)$: 在 u_i 时间内转换进入第 j 号队列 ($i=1, 2, \dots, N, h$) 内需分拣的订单队列数。

根据以上分析, 数学模型在 t_n 、 t_n^* 和 t_{n+1} 时刻 ($t_n < t_n^* < t_{n+1}$), 系统的状态可以用马尔可夫链来描述, 且是非周期的和各态历经的。即在到达过程考虑分拣机在 t_n 时刻为第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个普通 VC 进行分拣, 该站点中等待分拣的 VC 有 $\xi(n)$, 需要优先分拣的 VC 有 $\xi_h(n)$, 此时系统的状态变量为 $\{\xi_1(n), \xi_2(n), \dots, \xi_N(n), \xi_h(n)\}$ 。同理, 在 t_n^* 时刻, 系统状态变量为 $\{\xi_1(n^*), \xi_2(n^*), \dots, \xi_N(n^*), \xi_h(n^*)\}$; 在 t_{n+1} 时刻, 系统状态变量为 $[\xi_1(n+1), \dots, \xi_N(n+1), \xi_h(n+1)]$ 。

2.3. 系统状态的概率母函数

分拣机在 t_n 时刻轮询分拣 i 号订单队列, 在 t_{n+1} 时刻轮询分拣第 $i+1$ 号订单队列。当分拣机在 t_{n+1} 时刻开始对第 $i+1$ 号订单 VC 队列服务时, 有:

其中 $v_h(n)$ 是分拣机对优先队列中订单的分拣作业时间, 则 $\eta_j(v_h)$ 是在 v_h 时间内进入第 j 号订单 VC 队列内的订单数。

所设轮询系统模型在 $\sum (\lambda_i \beta_i + \lambda_i r_i) + \lambda_h \beta_h < 1$, $i=1, 2, \dots, N$ 的条件下达到稳态状态, 即 $N \lambda \beta + N \lambda r + \lambda_h \beta_h < 1$ 。

由此, 分拣机在 t_n^* 时刻系统状态变量的概率母函数为:

$$\begin{cases} \xi_h(n^*) = \xi_h(n) + \mu_h(u_i) + \eta_h(v_i) \\ \xi_i(n^*) = \xi_i(n) + \mu_i(u_i) + \eta_i(v_i) - 1 \\ \xi_j(n^*) = \xi_j(n) + \mu_j(u_i) + \eta_j(v_i), j=1, 2, \dots, N, h, j \neq i \\ \xi_h(n+1) = \mu_h(u_i) \\ \xi_j(n+1) = \xi_j(n^*) + \mu_j(u_i) + \eta_j(v_h), j=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

$$G_{ih}(z_1, z_2, \dots, z_i, z_N, z_h) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left(\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j^{(n)}} \cdot z_h^{\xi_h^{(n)}} \right) = R_i(A_h(z_h)) \prod_{j=1}^N (A_j(z_j)) \left\{ \frac{1}{z_i} B_i(A_h(z_h)) \prod_{j=1}^N (A_j(z_j)) \right. \\ \cdot [G_i(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_N, z_h) - G_i(1, 1, \dots, 0, \dots, 1, 1)] \\ \left. + G_i(1, 1, \dots, 0, \dots, 1, 1) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

分拣机在 t_{n+1} 时刻轮询分拣订单 $i+1$ 时，系统状态变量的概率母函数为：

$$G_{i+1}(z_1, z_2, \dots, z_i, z_N, z_h) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left(\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j^{(n+1)}} \cdot z_h^{\xi_h^{(n+1)}} \right) = G_{ih} \left(z_1, z_2, \dots, z_i, z_N, B_h \left(\prod_{j=1}^N A_j(z_j) Q_h \prod_{j=1}^N (A_j(z_j)) \right) \right) \quad (3)$$

式中， $i = 1, 2, \dots, N$ ；

$$Q_h(z_h) = A_h(B_h(z_h Q_h(z_h)))$$

$$G_{ih}(z_h) = R_i(A_h(z_h)) B_i(A_h(z_h)) \cdot \{ [1 - G_i(1, 1, \dots, 0, \dots, 1, 1)] + G_i(1, 1, \dots, 0, \dots, 1, 1) \}$$

$Q_h(z_h)$ 的一阶导数为：

$$Q'_h(z_h) = A'_h \{ B'_h [Q_h(z_h) + z_h Q_h(z_h)] \} \\ q_h = Q'_h(1) = \lambda_h \beta_h [1 + Q'_h(1)]$$

所以，有

$$q_h = Q'_h(1) = \frac{\lambda_h \beta_h}{1 - \lambda_h \beta_h} \quad (4)$$

$Q_h(z)$ 的二阶导数为：

$$Q''_h(z_h) = A''_h(z_h) (B'_h(z_h))^2 (1 + Q_h(z_h))^2 \\ + A'_h(z_h) B''_h(z_h) (1 + Q_h(z_h))^2 \\ + A'_h(z_h) B'_h(z_h) (2Q'_h(z_h) + Q''_h(z_h))$$

即

$$Q''_h(1) = A''_h(1) \beta_h^2 (1 + Q_h(1))^2 + \lambda_h B''_h(1) (1 + Q_h(1))^2 \\ + \lambda_h \beta_h (2Q'_h(1) + Q''_h(1))$$

求解得

$$Q''_h(1) = \frac{1}{(1 - \lambda_h \beta_h)^3} [A''_h(1) \beta_h^2 + B''_h(1) \lambda_h + 2\lambda_h^2 \beta_h^2 (1 - \lambda_h \beta_h)] \quad (5)$$

2.4. 完全 - 限定二级轮询系统特性分析

1) 优先订单队列的平均排队队长

设 t_n^* 时刻优先订单队列接受服务时， j 号队列中的订单 VC 队列数为优先订单队列的平均排队队长

(Mean Queue Length of Priority Order，简称为 MQLOPO)，为 $g_{ih}(j)$ ；根据概率母函数的性质， $g_{ih}(j)$ 分别为：

$$g_{ih}(j) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_N, z_h \rightarrow 1} \frac{\partial G_{ih}(z_1, z_2, \dots, z_N, z_h)}{\partial z_j} \quad (6) \\ i = 1, 2, \dots, N, h; \quad j = 1, 2, \dots, N, h$$

将式(2)、式(3)别代入式(6)中求导、迭代、化简后得 MQLOPO 为

$$g_{ih}(h) = \lambda_h \left(r + \frac{Nr\lambda\beta}{1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta} \right) \quad (7)$$

2) 平均循环周期

轮询系统的平均循环周期(Mean Cyclic Period, 简称为 MCP)为分拣机对系统中的 $N+1$ 个订单队列按设定的服务规则完成一个作业服务所用时间的统计平均值，它由分拣时间和轮询转换时间所组成，用 T_C 表示。

利用概率母函数关系求得：

$$G_{i0} = G_i(1, 1, \dots, z_i, 1, \dots, 1) \Big|_{z_i=0}$$

$$1 - G_{i0} = 1 - G_i(1, 1, \dots, z_i, 1, \dots, 1) \Big|_{z_i=0} = \frac{\lambda_i \left(\sum_{i=1}^N r_i \right)}{1 - \lambda_h \beta_h - \sum_{i=1}^N \lambda_i \beta_i}$$

而

$$1 - G_{i0} = \lambda_i T_C$$

所以，有

$$T_C = \frac{Nr}{1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta} \quad (8)$$

3) 系统能力

系统能力即系统的吞吐量(System Throughput, 简称为 ST)是指单位时间内该系统所能完成分拣配单的订单数, 反映了分拣线的理论分拣能力, 相应的表达式为:

$$O = N\lambda\beta + \lambda_h \beta_h \quad (9)$$

4) 优先 VC 的联合矩

定义优先订单队列随机变量 (x_j, x_k) 的联合矩为 $g_{ih}(j, k)$, 由概率母函数性质得:

$$g_{ih}(j, k) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_N, z_h \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_{ih}(z_1, z_2, \dots, z_N, z_h)}{\partial z_j \partial z_k} \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, N, h; \quad k = 1, 2, \dots, N, h$$

同样, 将式(2)代入式(10), 计算迭代、化简的优先 VC 队列的二阶原点距为:

$$\begin{aligned} g_{ih}(h, h) &= \lambda_h^2 R''(1) \\ &+ \left(r + \frac{N\lambda\beta r}{1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta} \right) A_h''(1) \\ &+ \frac{N\lambda\lambda_h^2 r}{1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta} B''(1) \\ &+ \frac{2N\lambda\beta\lambda_h^2 r^2}{1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta} \end{aligned} \quad (11)$$

5) 普通订单队列的平均排队队长

设在 t_n 时刻第 i 号普通订单 VC 队列开始分拣服务时, 其中的订单 VC 队列数为普通订单队列的平均排队队长(Mean Queue Length of Common Order, 简称为 MQLOCO)为 $g_i(i)$, 其求解较为复杂。定义普通订单队列随机变量 (x_j, x_k) 的联合矩为 $g_i(j, k)$, 由概率母函数性质得:

$$g_i(j, k) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_N, z_h \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_i(z_1, z_2, \dots, z_N, z_h)}{\partial z_j \partial z_k} \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, N, h; \quad k = 1, 2, \dots, N, h$$

将式(3)代入式(12), 并求导、计算、迭代、化简后得普通队列的平均排队队长(Mean Queue Length of Common Order, 简称为 MQLOCO) $g_i(i)$:

$$\begin{aligned} g_i(i) &= \frac{Nr\lambda^2}{2(1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda r - N\lambda\beta)} \left\{ \frac{R''(1)}{r(1 - \lambda_h \beta_h)} \right. \\ &+ \frac{(r - r\lambda_h \beta_h - r\lambda\beta(N-1))A''(1)}{\lambda^2(1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta)} \\ &+ \frac{Nr\lambda B''(1)}{(1 - \lambda_h \beta_h)(1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta)} \\ &- \frac{\lambda_h(\beta_h A_h''(1) + B_h''(1))}{(1 - \lambda_h \beta_h)(1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta)} + \frac{1 + \lambda_h \beta_h - \lambda\beta}{1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta} \\ &+ r(N-1) \left(\frac{1}{1 - \lambda_h \beta_h} - \frac{1 + \lambda\beta}{(1 - \lambda_h \beta_h)(1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta)} \right) \\ &\left. + \frac{2}{\lambda} - 1 - (N+1)r \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

6) 订单分拣平均时延

设订单分拣作业的等待时间为 w_j , 即从订单进入 $j(j=1, 2, \dots, N, h)$ 队列到其分拣完毕被发送出去的这段时间, 设其概率母函数为 $W_j(z_j)$, 系统状态变量的概率母函数为 $Q_j(z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_N, z_h)$ 优先队列的平均等待时延(Mean Waiting Time of Priority Order, 简称为 MWTOPO)为 $E(w_h)$ 、普通队列顾客的平均等待时延(Mean Waiting Time of Common Order, 简称为 MWTOCO)为 $E(w_i)$ 。

根据文献3的计算方法, 计算得到订单 VC 队列普通级业务的平均时延为:

$$\begin{aligned} E(w_i) &= \frac{1}{\lambda^2 T_C} \left(g_i(i) - \frac{1}{2} A''(1) \right) - \frac{1}{\lambda} \\ &= \frac{1 - \lambda_h \beta_h - N\lambda\beta}{N\lambda^2 r} \left(g_i(i) - \frac{1}{2} A''(1) \right) - \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad (14)$$

根据文献4的计算方法, 计算优先订单 VC 队列业务的平均时延为:

$$\begin{aligned} E(w_h) &= \frac{g_{ih}(h, h)}{2\lambda_h(1 + \lambda_h \beta_h)g_{ih}(h)} \\ &- \frac{(1 - \lambda_h \beta_h - \lambda_h^2 \beta_h^2)A_h''(1)}{2\lambda_h^2(1 - \lambda_h^2 \beta_h^2)} \\ &+ \frac{\lambda_h B_h''(1)}{2(1 - \lambda_h^2 \beta_h^2)} + \frac{\beta_h^2 A_h''(1)}{2(1 - \lambda_h^2 \beta_h^2)} \\ &= \frac{g_{ih}(h, h)}{2\lambda_h g_{ih}(h)} + \frac{\lambda_h B_h''(1)}{2(1 - \lambda_h \beta_h)} - \frac{A_h''(1)}{2\lambda_h^2(1 + \lambda_h \beta_h)} \end{aligned} \quad (15)$$

3. 结果仿真分析

根据实际生产情况，设单元物料的包装规范，配单时为单元物料的整数倍组合，分拣订单使用自动化单元物料分拣设备，有如表 1 所示两组顾客订单，设一组为优先订单，一组为普通订单。

设商品为同一种商品，物料的包装宽带为 98 mm，订单输送机的速率为 90 m/min，即 1.5 米/秒，每单元物料的分拣速度为 0.3 秒，订单的转换时间为 10 秒。在本文研究结果的基础上，使用 MATLAB 编程方式对轮询系统进行仿真实验。并设定每个订单 VC 均为单元物料的组合，匀速输送到达。理论计算分析采用相同的归一化参数，取 $\beta_h = \beta_i = \beta$ ， $\lambda_h = \lambda_i = \lambda$ ， $r = r_i$ ，系统满足 $\sum_{i=1}^N (\lambda_i \beta_i + \lambda_i r_i) + \lambda_h \beta_h < 1$ ，即

$$N\lambda\beta + N\lambda r + \lambda_h \beta_h < 1, \quad i=1,2,\dots,N \text{ 的稳定条件。}$$

计算后得到表 2 和表 3 所示仿真计算结果。

表 2 中，给出了随机构建的 13 个订单数据，这

些订单包括优先订单组成部分和普通订单组成部分， $D = (sh, s)$ 表示订单的单元物料的总数为 D ，其中优先订单部分的单元物料数为 sh ，普通订单部分的单元物料数为 s ，按照完全 - 限定($k = 1$)订单分拣系统的事先假设，优先订单部分按完全服务规则得到优先分拣服务，普通级订单则按照限定($k = 1$)服务规则得到公平服务，由此而仿真求出各订单的优先部分、普通部分的平均排队队长、平均等待时间、以及每个订单的完成周期。

根据计算结果，分析结论如下：

1) 理论值与优化值非常接近、吻合，表明建立的完全 - 限定($k = 1$)模型、系统分析方法、系统特性的研究结果是正确的；

2) 从控制机理可知，在一次对 $N+1$ 个队列全部轮询分拣作业中，优先订单 VC 队列得到了 N 次完全机理的分拣机会，而每个普通队列仅得到一次限定机理的分拣机会，所以，优先订单 VC 队列的平均排队

Table 1. Customer order
表 1. 某商品顾客订单数据

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	22
优先	13	17	8	16	10	9	1	3	4	21	0
普通	3	4	7	5	8	1	2	6	9	0	8

Table 2. Simulation results
表 2. 仿真计算结果

订单构成	MQLOCO(T)	MQLOCO(S)	MQLOPO(T)	MQLOPO(S)
16 = (13,3)	0.0089	0.0044	0.0024	0.0024
21 = (17,4)	0.00155	0.0078	0.0030	0.0031
15 = (8,7)	0.0192	0.0097	0.0014	0.0015
21 = (16,5)	0.0193	0.0097	0.0029	0.0029
18 = (10,8)	0.0263	0.0133	0.0018	0.0018
10 = (9,1)	0.0019	0.0009	0.0017	0.0017
3 = (1,2)	0.0010	0.00055	0.000153	0.000185
9 = (3,6)	0.0100	0.005	0.000541	0.00055
13 = (4,9)	0.0215	0.0108	0.000759	0.000725
21 = (21,0)	0	0	0.0038	0.0039
8 = (0,8)	0.0118	0.0059	0	0
1 = (1,0)	0.00017	0.000093	0	0
1 = (0,1)	0	0	0.00024	0.000185

Table 3. Simulation results
表 3. 仿真计算结果

订单构成	MWTOCO(T)	MWTOCO(S)	MWTOPO(T)	MWTOPO(S)	MCP(T)	MCP(S)
16 = (13,3)	79.2748	78.6645	4.5042	4.3958	158.5955	158.6049
21 = (17,4)	104.7491	103.2509	4.5438	4.3635	206.8120	206.8211
15 = (8,7)	73.9946	73.6005	4.4795	4.4349	147.1820	147.1731
21 = (16,5)	104.1000	103.2578	4.5458	4.3712	206.0330	206.0413
18 = (10,8)	89.2413	88.2740	4.4822	4.4183	175.3817	175.3880
10 = (9,1)	49.4169	48.7709	4.5228	4.4280	99.8134	99.8178
3 = (1,2)	14.3636	14.4480	4.4413	4.4920	29.9688	29.9668
9 = (3,6)	44.3504	44.0597	4.6099	4.4755	89.1153	89.1176
13 = (4,9)	64.4853	63.5679	4.3627	4.4665	127.2811	127.2825
21 = (21,0)	NaN	NaN	4.4973	4.3320	210.0270	210.0274
8 = (0,8)	39.3984	38.9932	NaN	NaN	79.0693	79.0748
1 = (0,1)	4.2941	4.4920	NaN	NaN	9.9983	9.9982
1 = (1,0)	NaN	NaN	3.6667	4.4920	10.0000	10.0000

队长、高优先级的订单的平均等待时延都远远小于普通订单 VC 队列的平均排队队长和平均等待时延，因而，系统从控制过程中最大能力的保证了优先订单的优先分拣作业，特别是该模型能较好的满足核心业务和中心任务的实时性分拣的要求，达到了系统分析预想的要求。而普通订单分拣的分拣控制采用限定($k = 1$)轮询服务策略，由于限定($k = 1$)轮询服务系统的特性， N 个普通订单 VC 队列每次查询周期中仅得到一次分拣作业机会，保证了普通订单分拣作业的公平性。

3) 仿真过程中，设优先订单部分的单元物料数为 $sh = 0$ ，说明系统已经退化为限定($k = 1$)服务系统，此时，系统的分拣服务控制策略按限定($k = 1$)轮询策略；而当普通订单部分的单元物料数为 $s = 0$ ，系统则退化为完全服务系统，此时，系统的分拣服务控制策略按完全轮询策略。

在系统退化的基础上，设定订单为 1 单元物料进行仿真，订单 $1 = (1,0)$ 与订单 $1 = (0,1)$ 的仿真结果，较为接近；订单 $1 = (1,0)$ 与订单 $21 = (21,0)$ 相比较，分拣系统退化为完全服务系统，订单完成服务周期基本为倍数关系，而优先订单部分的平均排队队长变化不明显；订单 $1 = (0,1)$ 与订单 $8 = (0,8)$ 相比较，分拣系统退化为限定($k = 1$)服务系统，订单完成服务周期亦基本为倍数关系，而普通订单的平均排队队长变化则非常明显。

以上分析验证了，采用完全策略的优先订单队列，获得分拣作业的能力显著，而普通订单采用限定($k = 1$)策略，由于限定($k = 1$)轮询服务机理的特性，从而保证了系统的公平性，这个结论，差异化处理订单分拣业务的控制策略，对实际生产有积极意义。

参考文献 (References)

- [1] 冉文学等. 虚拟视窗算法在成品烟自动分拣控制中的应用[J]. 昆明理工大学学报, 2004, 1: 65-68.
- [2] 张贻弓, 吴耀华. 可合流的自动分拣系统订单排序优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(5): 67-71.
- [3] 熊红云, 凯赵, 戴建民等. 成品烟自动分拣系统的补给优化方法[J]. 控制工程, 2009, 16(1): 73-75.
- [4] 冉文学等. 超高速单元物料分拣设备及技术[J]. 物流技术与应用, 2009, 9: 109-112.
- [5] 刘德宝. 复合式卷烟分拣系统研究与设计[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [6] 肖际伟. 配送中心拣货系统优化[D]. 济南: 山东大学, 2010.