

滑块式分拣系统的仿真研究

但正刚¹, 蔡临宁¹, 岳秀江², 郑力¹

(1. 清华大学工业工程系, 北京 100084; 2. 北京机械工业自动化研究所, 北京 100011)

摘要: 由于大规模集中配送的成本优势, 兴建配送中心成了大中型企业改善物流的重要举措。作为配送中心的核心设备, 滑块式分拣系统也随之成为了国内物流设备企业的研发热点。本文针对卷烟商品具有几何形状单一、最小存储单元(SKU)标准统一的特点, 建立了应用于该商品配送中心的滑块式分拣系统的通用仿真模型。通过仿真实验发现影响系统性能的主要因素是平均每批、每种产品的需求量以及上货点到扫描点间的平均最短传送时间。同时, 仿真试验证明这两个因素对系统性能具有相对独立性影响, 并结合数学分析给出一个在一定范围内适用的系统性能与这两个因素的关系式, 该关系式可以用来评估系统的性能。

关键词: 配送中心; 分拣系统; 仿真; 方差分析

Simulation study of sorting system

DAN Zheng-gang¹, CAI Lin-ning¹, YUE Xiu-jiang², ZHENG Li¹

(1. Department of Industrial Engineering of Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry, Beijing 100011, China)

Abstract: In this thesis, a common simulation model of the shoe-sorters used in product retailing was constructed, in which the goods have the same geometrical shape and the inventory has the standard SKUs. From the simulation, it was found that two factors, average demand per product per wave and average shortest transferring time between uploading points and scanner, affect the performances of the shoe-sorter mostly and independently. Further more, a formula including the two factors to estimate the performances of shoe-sorters was found.

Key words: distribution center; sorter; simulation; variance analysis

0 引言

某市卷烟配送中心每天大约要配送 400 箱 (最小存储单元, 每箱 50 条) 卷烟, 即要分拣 20,000 条到市区各零售户的订货单。目前中心采用人工分拣, 总共需要 33 个工人, 需时 7.5 小时。作业强度大、分拣准确度低, 因而该中心计划引进一条滑块式自动分拣系统并重新设计作业流程。

目前配送中心规划中比较难以解决的问题就是如何确定的是各个流程的工人数与出口数量。通过配送中心分拣作业的流程发现, 它是一个通过订单拉动而运作的系统, 影响系统性能的因素众多, 比如订单需求结构、产品数量、上货过程、出货过程、不同的硬件参数等。这些参数大都是随机的, 因而

难以对分拣系统建立一个完善的解析模型, 需要通过仿真来评估系统, 并研究确定系统参数的方法。

关于分拣系统, 研究人员从各个角度、综合应用仿真与解析的方法进行了深入的研究。Masel Dale (1997)^[1]从分拣系统设施规划的角度, 通过仿真来研究出口的分配问题。Masel D.T(2001)^[2]则研究了现有的关于评估分拣固定形状货物的环形分拣系统的分拣时间的解析公式。Norman Saenz JR (2002)^[3]从配送中心里物料搬运的角度研究了分拣系统传送带的构建, 以及如何搭配各种传送带, 配置一个好的分拣搬运系统。Aughan, Mark(1999)^[4]把分拣系统归纳为 6 个子系统: 订单挑选、合并前聚集、合并、感应、分拣、搬运, 从而将订单获得与不同传送带有机地结合成一个高效的分拣系统。另外, 关宏等

收稿日期: 2005-12-12

基金项目: 国家自然科学基金 (70201008); 教育部博士点基金 (20020003092)

作者简介: 但正刚 (1978 -), 男, 博士研究生。

制造业自动化

(2003)^[5]介绍了一套运用于烟草行业中,将访销、仓储、分拣、运输有机结合的条烟销售系统。

1 建模

如前所述,分拣过程是个离散的过程,所以本文采用 Witness 2003 离散事件仿真软件,它适合在总体规划完成后,采用搭积木式(Add-On)的方法来构建一个复杂系统的模型。(由于本文侧重研究分拣系统的性能,所以没有涉及配送中心具体采用的库存管理策略,而认为分拣的订单都是经过确认过的有足够库存来满足的。)根据对分拣系统的结构与运作流程分析,归纳出系统的主要驱动事件流程如图 1:

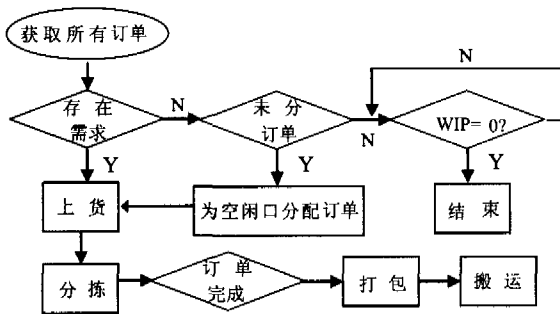


图1 简化后的离散驱动事件

为了方便建模与正确性验证,并适应上面所提到的搭积木的建模方法,将分拣模型分成4个子模型:订单生成模型,上货与搬运模型,分拣传送带模型,打包与搬运模型。

(1) 订单生成模型

配送中心分拣数量不同的多种产品,为了使模型有较好的代表性与适应性,模型里的产品数量设为可变参数。另一方面为了简化模型计算的复杂程度,本文采用被广泛接受的ABC分类法分析不同产品的需求,将所有产品分成ABC 3类,它们的需求比是:

$$D_A : D_B : D_C \approx 5 : 3.5 : 1.5 \quad (1)$$

产品类别数量比是:

$$k_A : k_B : k_C \approx 1 : 2 : 7 \quad (2)$$

因为分拣是在固定工作时段分拣一批数量的订单,所以单个客户的需求随时间的变化并不重要。为了便于改变模型的参数进行不同的仿真实验,具体的订单通过下面的公式产生:

$$d_{ij} = D_i P_{ij} \quad (3)$$

其中, d_{ij} 是第 i 个客户的对第 j 种产品的需求量(单位:条), D_i 是第 i 个客户的总需求(单位:条), P_{ij} 表示第 i 个客户对第 j 种产品的需求权重, P_{ij} 满足下

面的关系式(其中, n 表示客户数量, k 表示产品数量,为了便于计算,一般 k 可近似取 10 的倍数):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^k P_{ij} = 1 \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{0.1k} E(P_{ij}) : \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1k+1}^{0.2k} E(P_{ij}) : \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.3k+1}^{0.7k} E(P_{ij}) = 5 : 3.5 : 1.5 \\ P_{ij} \geq 0, 0 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq k \end{cases} \quad (4)$$

对分拣过程来说,订单具有无序性,即:连续分拣的一批订单里,订单分拣次序与到达次序无关,所以改变 D_i 与 P_{ij} 的分布函数即可研究不同的需求结构对系统性能的影响情况。

(2) 拆包上货与搬运模型

为了使系统具有良好的鲁棒性,这里细化了业务分工。上货区的工人分成两部分,一部分只负责从箱子里往聚集皮带上放条烟,另一部分人则从仓库里搬运货物到上货区。

(3) 分拣传送带模型

分拣中心使用了两种类型的传送带。一种是具有堆积功能的聚集皮带,它将条烟从各个上货点汇集到扫描仪前,聚集皮带上的条烟间距是可变的,它的速度较快并且是可调的。另一种是链-辊轴传送带,它将条烟按一定的间距与速度通过扫描仪,运转比较准确,并且传送能力在模型里是一个常量。

(4) 打包下货与搬运模型

与上货区一样,为了提高系统运作的鲁棒性,出货口处的工人也分成两部分,一部分工人专门负责打包订单并更换出口处的容器,而另一部分人专门把打包后的订单搬运到配送中心的出货区,这个过程可以是人工搬运或者使用叉车等工具。

2 仿真研究评估系统性能的公式

经过仿真试验发现,影响分拣系统性能的分拣系统的主要因素已经集中为两个因素:平均每批每种产品的需求量 Q 与从上货点到扫描仪的平均最短传送时间 t_m (具体仿真实验内容可以参考黄昭献的学位论文^[6])。

下面将讨论这两个因素之间,以及与系统性能的关系。虽然 Q 的变动范围较大,但是当 Q 增加到一定程度以后,系统的性能就趋于 100%。对 $Q > 11$ 以上的系统相对能力 Cr 进行一次单因素分析,结果显示当 $Q > 11$ 时, Q 对系统性能没有显著影响,考虑到实验是在相同的平均最短传送时间下进行的,因而适当地扩大 Q 的范围 $Q < 15$ 。但是当 $Q < 5$ 时,系

制造业自动化

统性能低于50%，因而取 $5 \leq Q \leq 15$ 条。而平均最短传送时间则根据工厂调研的数据确定在 5s 和 40s 之间。对这两个因素分别取几个水平，重复次数为 5 的实验结果如表 1。

表 1 不同 Q 与 \bar{t}_m 对应的系统相对能力

相对能力 Cr	平均每批每种产品需求 Q(条)						
	5	7.5	9.00	10.50	13.00	15.00	
\bar{t}_m	37.69	59.24%	63.07%	77.03%	80.75%	87.29%	91.14%
(s)	28.27	68.50%	72.62%	84.05%	88.97%	92.77%	94.80%
	18.84	76.52%	82.60%	89.85%	93.85%	95.91%	97.11%
	14.13	81.86%	86.50%	93.05%	95.12%	96.89%	97.97%
	9.42	88.35%	91.32%	95.10%	96.28%	97.91%	98.43%
	7.07	90.99%	93.94%	96.18%	97.25%	97.83%	98.30%
	5.65	91.77%	95.79%	96.87%	97.42%	97.80%	98.03%

对上述数据进行无交互作用的双因素方差分析结果如表 2，从中可以看出这两个因素对系统性能都有着显著的影响。

表 2 需求平均值与 \bar{t}_m 的双因素方差结果

因素	需求平均值 FA	订单大小的分布 FB
概率	PA=0.0000	PB=0.0000

平均每批每种产品的需求量 Q 与货物从上货点到扫描仪的平均最短时间 \bar{t}_m 值对系统性能有着互相独立的影响。因为上述的实验并没有检验两个参数是否独立，因此本文选用 linear 线性模型与 full quadratic 完全二次模型分别来拟合系统性能与这两个因素之间的关系。为了提高拟合精确度，缩小置信区间的半长，去掉了实验数据中相对能力 Cr 小于 80% 的点，拟合结果如表 3。

表 3 两种模型的拟合结果(x_1 为 \bar{t}_m , x_2 为 Q)

模型	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1$ + $\beta_2 x_2$	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2$ + $\beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2$
剩余标准差 rmse	0.02242	0.01192 8.342E-01
回归系数 beta	8.657E-01 -3.954E-03 1.171E-02	-1.170E-02 3.011E-02 8.333E-04 -5.868E-05 -1.375E-03

对比两个模型拟合的剩余标准差，完全二次模型的剩余标准差比线性模型的要小的多，并且完全二次模型的拟合剩余标准差 $Rmse=0.01192=1.19\%$ ，精度已经在可接受范围了，因而选用完全二次模型的结果。整理后的估计系统性能的公式如下：

$$C_r = 8.342 \times 10^{-1} - 1.170 \times 10^{-1} \bar{t}_m + 3.011 \times 10^{-1} Q + 8.333 \times 10^{-4} \bar{t}_m \cdot Q - 5.868 \times 10^{-5} (\bar{t}_m)^2 - 1.375 \times 10^{-3} Q^2 \quad (5)$$

根据拟合的曲线，以及拟合所采用的原始数据，因而公式应用于相对能力不小于 80% 的时候才有较高的可信度，Q(条)与 \bar{t}_m (s) 应满足：

$$\begin{cases} 5 \leq Q \leq 15 \\ 5 \leq \bar{t}_m \leq 40 \end{cases} \quad (6)$$

接下来将用实际的需求分布与实际的分拣线参数来验证该公式在适用范围内、0.95 置信水平上的正确性。

3 实例分析

某市配送中心引进自动分拣线后的最大分拣能力 C_m 为 6000 条/小时，设计目标为实际能力 C_a 大于 5000 条/小时。中心设计有 3 个上货区域，根据存储计划与需求数据统计分析，从 3 个上货区域上货的数量比为：

$$N_1 : N_2 : N_3 \approx 2 : 2 : 1 \quad (7)$$

3 个区域中心点到条码识别器(即扫描仪)的距离分别为：

$$\begin{cases} L_{u1} = 7.5m \\ L_{u2} = 17.5m \\ L_{u3} = 17.4m \end{cases} \quad (8)$$

聚集皮带速度为：

$$V_{ac} = 3.0m/s \quad (9)$$

(1) 应用拟合公式评估系统性能

6000 个订单的需求分布如图 2：

\bar{t}_m 和 Q 的公式如下所示：

$$\bar{t}_m = \frac{\sum_{i=1}^m L_{ui} N_i}{\sum_{i=1}^m N_i} V_{ac}^{-1} = (7.5 \times 2 + 17.5 \times 2 + 17.4 \times 1) / [(1+2+2) \times 3] = 9.42(s) \quad (10)$$

$$Q = N_e \cdot q = \frac{\bar{D} N_e}{k} = 29.06 N_e / 50 = 0.5812 N_e \quad (11)$$

根据拟合的评估系统性能的公式(5)与(6)得到满足设计并符合公式适用范围的不同出口数对应的相对能力 C_r 及其置信区间如表 4。

表 4 公式估计的系统相对能力及其置信区间 ($\alpha = 0.95$)

出口数	9	10
估计的 Cr 值	88.81%	90.14%
置信区间	[87.10, 90.51%]	[91.55%, 88.72%]
实际能力(条/小时)	5328	5408

制造业自动化

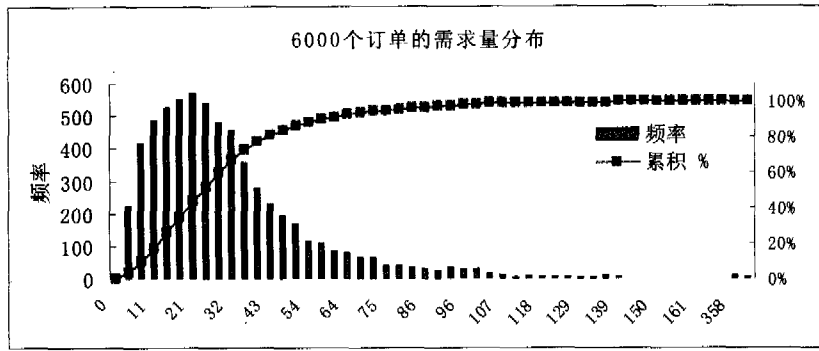


图2 需求量 D_i 的分布($\bar{D}=31.06$ 条, 产品数量 $k=50$.)

(2) 调整参数后的模型与实验结果

结合规划布局, 应用数学分析的方法即可以确定关于工人的参数如表5。

表5 数学分析方法所确定的关于劳动力的参数

区域	工人数
上货区域 1	一名上货工人, 一名搬运工人
上货区域 1	一名上货工人, 一名搬运工人
上货区域 1	一名上货工人, 一名搬运工人
出货区域	两名操作工, 3名搬运工人

在模型里引入3式里需求量 D_i 的分布, 并设定相应的上货点位置等其他参数, 每次实验分拣20,000条烟。对9个出口与10个出口两个条件下分别做5组实验, 每组实验为重复5次分拣的平均值(这样才能近似地将结果看作正态分布, 并用基于正态分布的t检验来验证拟合公式的可信度)。仿真结果如表6。

表6 每组重复5次的5组仿真实验结果

组别	$N_c=10$	$N_c=9$
1	90.52%	88.50%
2	91.13%	88.43%
3	89.77%	88.48%
4	90.38%	89.06%
5	91.62%	88.72%

对表的两列数据分布进行双侧的t-检验, 结果如表7所示。因而上述的检验结果证明了公式5在其适用范围内的置信水平为0.95。

表7 双侧t-检验结果

组别	$N_c=10$	$N_c=9$
h	0(接受 H_0)	0(接受 H_0)
p	0.1629	0.2143
置信区间	[0.8957 0.9179]	[0.8823 0.8904]

H_0 : 5组实验结果的平均值与公式的估计值一样。Alpha=0.025

最后, 综合考虑每个出口的购置与运行成本, 以及分拣线的实际功能要求, 建议该配送中心选用9个出口, 劳动力选用表5里的参数, 分拣系统的相对能力为88.23%~89.04%, 实际能力为5293~5342条/小时。

4 结论

本文建立了滑块式分拣系统的仿真模型, 并且得出影响系统性能主要因素是从上货点到扫描点的平均最短通过时间与平均每批每种产品的需求量的结论, 然后对大量的仿真实验数据分析以后, 拟合出一个通过这两个变量来快速评估系统性能的公式, 并通过具体的分拣中心实例验证了公式在其适用范围内、0.95统计意义水平上的正确性。

参考文献:

- [1] MASEL D, GOLDSMITH D. Using a simulation model to evaluate the configuration of a sortation facility[A]. Winter Simulation Conference Proceedings[C]. 1997. 1210-1213.
- [2] MASEL D T, MEDEIROS D J. Analytical models for estimating sortation time in discrete, partially filled, and multiple-lane conveyor systems[J]. International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice, 2001, 8(3): 220-229.
- [3] NORMAN S J R. Which way to convey[J]. IIE Solutions, 2002, 34(7): 35-41.
- [4] VAUGHAN M. Conveyor sortation systems[J]. Plant Engineering, 1999, 53(6): 66.
- [5] 关宏, 张勇, 等. 条烟配送系统规划研究[J]. 物流技术, 2003.