

## 交叉环单向循环搬运系统中交叉环位置的优化

夏琨<sup>1</sup>, 李军涛<sup>1</sup>, 陈淑侠<sup>2</sup>, 木濂洋<sup>3</sup>

(1. 上海海洋大学, 上海 201306; 2. 南通职业大学, 南通 226019;

3. 京都工艺纤维大学, 京都 601-8585)

**摘要:** **目的** 为了提高交叉环单向循环搬运系统的搬运量和系统效率, 优化交叉环设置位置。 **方法** 构建交叉环单向循环搬运系统的数学模型, 对设置在不同位置的交叉环进行理论分析, 并进行2种不同调度规则下交叉环的设置与搬运量关系的仿真实验。 **结果** 交叉环设置在不同位置时, 在不同车辆数和不同调度规则的影响下, 单位时间搬运量不同。通过理论分析, 当交叉环设置于处理站点 $S_i$ 和 $S_{i+1}$ 的中间位置时, 单位时间搬运量最多, 系统搬运效率最高。 **结论** 交叉环设置在最优位置时可增加系统单位时间搬运量, 提高系统效率, 仿真实验结果证实了理论分析的正确性。

**关键词:** 自动化; 物料搬运系统; 交叉环; 优化

**中图分类号:** TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)01-0089-05

## Optimization on Locations of Shortcut in a Unidirectional Circulation-type Material Handling System

XIA Kun<sup>1</sup>, LI Jun-tao<sup>1</sup>, CHEN Shu-xia<sup>2</sup>, KISE Hiroshi<sup>3</sup>

(1. Shanghai Ocean University Shanghai, Shanghai 201306, China; 2. Nantong Vocational University, Nantong 226019,

China; 3. Kyoto Institute of Technology, Kyoto 601-8585, Japan)

**ABSTRACT:** This experiment aimed to optimize the location of shortcut so as to increase the throughput and improve the performance of the unidirectional circulation-type material handling system. This paper made a mathematical model of this system, analyzed the locations of short-cut layout and then carried out the simulation experiments of the relation between the short-cut setting and throughput under the condition of two different scheduling rules. The throughput per unit time was different under the conditions of different scheduling rules and different number of vehicles with shortcut set in different places. According to the analysis, when the shortcut was set between  $S_i$  and  $S_{i+1}$ , the maximum throughput can be achieved and the system efficiency became optimal. The optimal location of shortcut can not only increase the throughput per unit time but also improve the performance of the system. The experimental results confirmed the validity of the theoretical analysis.

**KEY WORDS:** automation; material handling system; shortcut; optimization

近年来, 半导体行业竞争日趋激烈, 在半导体晶圆制造系统中, 为提高搬运效率、减少人工搬运等而应运而生的自动化物料搬运系统(AMHS)扮演着重要角色<sup>[1]</sup>。AMHS系统不仅可以有效地利用有限的洁净

室生产空间, 还可以提高生产设备的利用率, 减少在制品量, 缩短周期时间等。单环单向循环搬运系统不仅是半导体晶圆制造自动化物料搬运系统的典型和基本环节, 而且是自动化集成系统中从装卸点到立体

收稿日期: 2015-03-30

基金项目: 上海教育创新研究基金(12ZZ167)

作者简介: 夏琨(1991—), 女, 宁夏银川人, 上海海洋大学硕士生, 主攻物流搬运系统的调度优化。

通讯作者: 李军涛(1974—), 男, 湖北荆门人, 博士, 上海海洋大学副教授, 主要研究方向为物流搬运系统优化与仿真。

仓库出库点、入库点的重要衔接子系统,在日本工厂自动化集成系统中得到了广泛运用。国外学者 Sandor Markon 和 Hiroshi Kise<sup>[2]</sup>等对其进行了许多理论研究,在这样的系统中,一系列小车沿着一个单环单向循环运行,在装载货物送往路径上设置处理站点,处理完毕后将货物送到卸货点或者其他站点。小车不断循环往复直到所有货物都被处理完成,由于车辆间不能超越,所以很难避免小车之间堵塞情况的发生<sup>[3-4]</sup>。在单环单向搬运系统中增加交叉环,可以避免小车间不必要的等待时间,为单环单向搬运系统提供捷径。在带有交叉环的单向循环搬运系统(见图1)中,由于系统的复杂性,合理设置交叉环的位置对整个系统的效率有着十分重要的作用。由此,优化交叉环单向循环搬运系统中交叉环的设置,可提高搬运效率,消除浪费,降低生产成本,对实现企业降低成本,提高效率有重要意义。

针对搬运系统的优化,多数学者主要是从车辆路径优化、车辆调度优化以及设施布局优化对其进行研究。对于车辆路径的优化, Pierpaolo Caricato<sup>[5]</sup>和 Srinivasan Rajagopalan<sup>[6]</sup>等对最优装卸货点的定位问题进行了研究。Che-Fu Hsueh<sup>[7]</sup>, Samia Maza<sup>[8]</sup>等对搬运系统路径的优化做了研究。曹平方<sup>[9]</sup>等人用分支界定法对车辆路径问题进行了算法优化。张元标<sup>[10]</sup>等人用混合粒子群算法求解物流配送车辆路径优化问题。周炳海<sup>[11]</sup>、沈正花<sup>[12]</sup>等人对半导体晶圆制造工厂的自动物料搬运系统和高空提升运输中车辆调度进行了优化研究。对于设施布局的优化, Jawahar, Aravindan<sup>[13]</sup>等提出了3种可以避免冲突和死锁的布局:单回路、串联结构和分流结构。Tharma Ganesharajah<sup>[14]</sup>等对单回路布局问题中的线性布局、环形布局和复杂网络布局进行了研究和分析。Ying-Chin Ho<sup>[15]</sup>等人提出了动态区域策略,用区域划分设计和动态区域控制来避免车辆间的堵塞,维持系统平衡。鉴于交叉环单向循环搬运系统的复杂性,涉及到此系统的研究较少,交叉环的设置往往依赖于系统仿真观察后来确定,其设置点具有一定的随意性,搬运效率很难达到全局最优。文中针对在2种基本调度规则的情况下,对交叉环单向循环搬运系统中交叉环的最优设置点进行理论分析研究并通过实验数据进行验证,从而提高系统效率和单位时间的搬运量。

## 1 问题描述

如图1所示,交叉环单向循环搬运系统是由长度

为  $L$  的总环线、长度为  $L_b$  的支线(branch)、 $n_s$  辆小车(automated guided vehicle,简称AGV)、 $n_s$  个具有相同功能的处理站点(processing station,用于自动化立体仓库出入库站点存取货物处理或平行机的加工处理)和装卸点  $I/O$ (含一个装货站点  $S_0$  和一个卸货站点  $S_{n_s+1}$ ) 组成。 $n_s$  辆小车的集合为  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_{n_s}\}$ ,  $n_s$  个处理站的集合为  $S_p = \{S_1, S_2, \dots, S_{n_s}\}$ 。

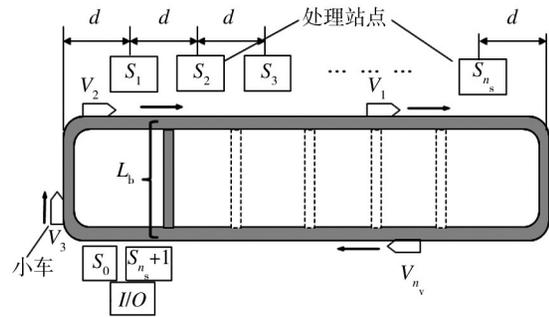


图1 交叉环单向循环系统排列模型

Fig.1 The permutation of unidirectional circulation-type material handling system with shortcut

在这个系统中,  $n_j$  个作业(或是货物 job)  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_{n_j}\}$  的集合按照  $S_0$  的出发顺序进行编码,每个作业  $J_i$  在  $S_0$  的位置被装载,再由车辆搬运到某个处理站  $S_m (1 \leq m \leq n_s)$  并进行处理(或存储),在处理站被处理(或拣选)完成后运送到  $S_{n_s+1}$  进行卸载。作业  $J_i$  在站点  $S_m$  的处理时间称为  $P_m(i)$ 。车辆在搬运过程中,除在交叉汇合点外,不能被超越,所以会产生前一辆车在处理站点上进行处理的同时后一辆车被迫等待的情况,即发生堵塞,产生一定的干涉时间,影响系统的搬运效率。

假设所有的处理站(不包括装载和卸载站)都具有相同功能,每个作业的处理过程都相同,一般来说,这是个可以提供高效率和高可靠性的平行机调度排序系统。假设处理时间  $P_m(i)$  不依赖于站点  $S_m$  和作业  $J_i$  时,换言之,如果作业  $J_i$  在  $S_m$  被处理,则  $P_m(i) = P_p$  (常数),否则  $P_m(i) = 0$ 。根据实际生产,当卸货点的卸货时间  $P_{n_s+1}(i) = P_{n_s+1} < P_p$ ,则在装载点和卸载点之间永远不出现瓶颈现象,不失一般性,设  $P_0(i) = 0$ ,此情况适用于每个作业只做货物出库工作时。

## 2 车辆调度规则

针对该系统提出2种基于作业处理顺序的调度规则——随机调度规则和顺序调度规则,对交叉环单向

循环搬运系统中的交叉环位置进行优化分析。以相同的概率 $(1/n_s)$ 随机分配一个作业到任何一个处理站的车辆调度原则被称为随机调度规则。如果分配作业 $J_i$ 至站点 $S_m(i)$ ,满足条件:

$$m(i)=n_s+1-i+\lceil(i-1)/n_s\rceil n_s \quad (1)$$

其中 $\lceil x \rceil$ 为不超过 $x$ 的最大整数,这种车辆调度原则被称为顺序调度规则,即以 $S_n, S_{n-1}, \dots, S_1$ 的顺序重复分配作业 $J_1, J_2, \dots, J_{n_j}$ 至各个站点,直到所有作业分配完成。

### 3 理论分析

根据所提出的系统模型,同时设置多个交叉环会导致货物在交叉汇合处的堵塞情况增加,因此实际自动化集成系统中多采用设置一个交叉环的形式<sup>[16]</sup>。假设处理站点之间的距离相同为 $d$ ,平均每个处理站点的存取货物数相同为 $n_{a_j}$ ,且 $n_{a_j}=n_j/n_s$ ,其中 $n_s$ 为处理站点数, $L_b$ 为支线长度。

当未设置交叉环时,即单环单循环搬运系统中,货物的总搬运行程 $D$ 为:

$$D = n_{a_j} n_s [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (2)$$

当交叉环设置在处理站点之间的中点位置( $x=1$ )时,货物的总搬运行程 $D_1$ 为:

$$D_1 = 1 \times n_{a_j} [2L_b + 2(1 + 1/2)d] + (n_s - 1)n_{a_j} [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (3)$$

当交叉环设置在处理站点 $S_2$ 和 $S_3$ 之间的中点位置( $x=2$ )时,货物的总搬运行程 $D_2$ 为:

$$D_2 = 2 \times n_{a_j} [2L_b + 2(2 + 1/2)d] + (n_s - 2)n_{a_j} [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (4)$$

同理,当交叉环设置在处理站点 $S_x$ 和 $S_{x+1}$ 之间的位置 $x$ 处时,货物的总搬运行程 $D_x$ 为:

$$D_x = x \times n_{a_j} [2L_b + 2(x + 1/2)d] + (n_s - x)n_{a_j} [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (5)$$

即:

$$D_x = n_{a_j} \{ [2x + 2(n_s - x)]L_b + [x(2x + 1) + 2(n_s + 1)(n_s - x)]d \} = n_{a_j} \{ 2n_s L_b + [2x^2 - (2n_s + 1)x + 2n_s^2 + 2n_s]d \} \quad (6)$$

在 $x \in (0, n_s)$ 时, $D_x$ 恒小于 $D$ ,即设置交叉环后,货物总搬运行程减小。要使搬运行程总和最短,即 $dD_x/dx=0$ 时, $D_x$ 取最小值,此时考虑到交叉环的位置设置处 $x$ 为整数,故取 $x=\lceil(2n_s+1)/4+0.5\rceil$ 。所以,当交叉

环设置在位置 $x=\lceil(2n_s+1)/4+0.5\rceil$ 处为最优位置。

系统中最重要绩效指标之一是单位时间搬运量,这是由单位时间内从装货点输出的货物数决定的,使 $F_{\max}$ 为处理 $n_j$ 个货物的总完工时间,则单位时间搬运量被定义为 $T_p=n_j/F_{\max}$ 。

为避免车辆间碰撞,设置相邻车辆间的最小距离为 $d_b$ 。在自动化集成系统中轨道路径系统考虑成本等因素往往要求结构比较紧凑,同时要求在有限的时间里能搬运更多的货物,假设当车辆在第一圈离开 $I/O$ 站点时,每2个相邻车辆之间的距离同为 $d_b$ (简称为最小发车间隔)。文中假设车辆的加速度和减速度是无穷大,每辆车辆以相同恒定不变的速度运行,因此对应的搬运距离是通过总完工时间乘以车辆速度获得的(在不考虑干涉发生时),下面将实验验证交叉环的设置位置对单位时间搬运量的影响。

### 4 实验验证

实验条件:系统货物数 $n_j=600$ ,处理站点数 $n_s=6$ ,AGV小车每次装载货物数为1,卸载货物时间 $P_{n+1}=1$ s,AGV车速为1 m/s,加速度/减速度趋于 $\infty$ ,货物处理加工时间 $P_p=7$ s,总环线长度 $L=210$ m,支线长度 $L_b=35$ m,处理站点间距 $d=10$ m,最小发车间隔 $d_b=5$ m,车辆数 $n_v$ 为2~20,交叉环的设置,按照从左到右的顺序分别为位置1至位置5。

#### 4.1 随机调度规则情况下交叉环位置的优化

在随机调度规则的情况下交叉环设置在5处不同位置时,系统的单位时间搬运量与车辆数之间的关系见图2(位置2和位置4的数据近似,所以图像几乎重合)。从图2可以看出,随机调度规则中,交叉环设置在 $S_3$ 和 $S_4$ 之间的位置3时,当车辆数相同时,单位时间系统搬运量最大。文中抽取 $n_v=10$ 的详细情况进行分析,交叉环的设置点与搬运量的关系见图3,可知车辆数相同时,当交叉环设置在 $S_3$ 和 $S_4$ 之间的位置3时,单位时间系统搬运量最大,系统平均完工时间最短,即在 $x=\lceil(2n_s+1)/4+0.5\rceil$ 处取得最优,搬运效率最高,验证了理论分析的正确性。

#### 4.2 顺序调度规则情况下交叉环位置的优化

在顺序调度规则情况下,交叉环设置在5处不同位置时系统的单位时间搬运量与车辆数之间的关系见图4。顺序调度规则的情况与随机调度规则的情况相同,在车辆数相同时,交叉环设置在 $S_3$ 和 $S_4$ 之间

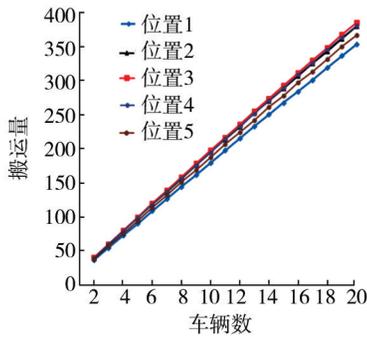


图2 随机调度规则下交叉环设置在不同位置时车辆数与搬运量间的关系

Fig.2 The relationship between the vehicle number and the throughput per unit time at different locations of shortcut in sequential scheduling

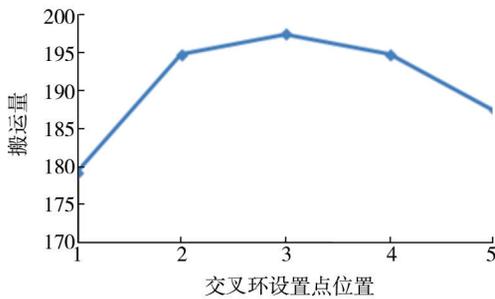


图3 随机调度规则下  $n_s=10$  时交叉环设置在不同位置与搬运量的关系

Fig.3 The relationship between the location of shortcut and the throughput per unit time at  $n_s=10$  in random scheduling

的位置3的单位时间搬运量总是最多。车辆数确定时( $n_s=10$ )交叉环设置在不同位置时的单位时间搬运量见图5。可以看出,在 $n_s=6$ (处理站点数为偶数)时,顺序调度规则情况下交叉环的最佳位置应设置

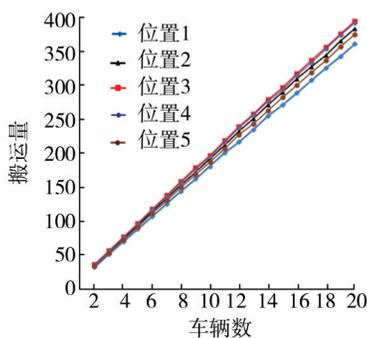


图4 顺序调度规则下交叉环设置在不同位置时车辆数与搬运量间的关系

Fig.4 The relationship between the vehicle number and the throughput per unit time at different locations of shortcut in sequential scheduling

在  $S_3$  和  $S_4$  之间的位置3,即位置  $x=\lceil (2n_s+1)/4+0.5 \rceil$  处。同理,当处理站点数为奇数时,以上结论仍然成立。综上所述,在2种不同基本调度规则下,交叉环的最佳位置设置点  $x=\lceil (2n_s+1)/4+0.5 \rceil$ ,实验证明了理论分析的正确性。

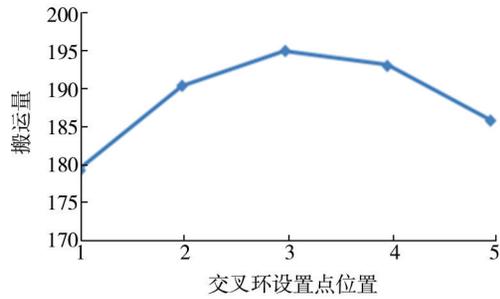


图5 顺序调度规则下  $n_s=10$  时交叉环设置在不同位置与搬运量的关系

Fig.5 The relationship between the location of shortcut and the throughput per unit time at  $n_s=10$  in sequential scheduling

### 5 结语

单环单向循环搬运系统广泛地运用在半导体晶圆制造自动化搬运系统中,其搬运效率的叠加往往决定着整个系统的效率。交叉环的设置问题是影响整个系统搬运效率的主要因素,为了提高搬运系统的搬运量和系统效率,文中构建了交叉环单向循环搬运系统的数学模型,理论分析了交叉环的最优设置问题,分析得出,当交叉环处于处理站点的中间位置时,单位时间搬运量最多,系统搬运效率最高,针对设置多个交叉环的情况,仍在进一步研究中。通过在2种不同基本调度规则下对交叉环的设置与搬运量之间的关系进行实验,验证了理论分析的正确性。实验验证得出的交叉环最优设置点对实际的交叉环单向循环搬运系统的设计与优化有着科学的理论指导价值。

### 参考文献:

- [1] WU L H, MOK P Y, ZHANG J. An Adaptive Multi-parameter Based Dispatching Strategy for Single-loop Interbay Material Handling Systems[J]. Computer in Industry, 2011, 62: 175—186.
- [2] SANDOR M, HIROSHI K, HAJIME K, et al. Control of Traffic Systems in Buildings[M]. London: Springer, 2006.
- [3] LI Jun-tao. A Study on Scheduling Problems for Robotic Systems[D]. Kyoto: Kyoto Institute of Technology, 2006.
- [4] LI Jun-tao, KUWATA J, LU Ming-zhe, et al. Analysis and Optimization for Automated Vehicle Routing on a Single Loop

- [J]. Journal of the Operation Research Society of Japan, 2006, 49:202—221.
- [5] PIERPAOLO C, GIANPAOLO G, ANTONIO G. Improved Formulation, Branch-and-cut and Tabu Search Heuristic for Single Loop Material Flow System Design[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 178:85—91.
- [6] SRINIVASAN R, SUNDERESH S H, TAYLOR G D. A Lagrangian Relaxation Approach to Solving the Integrated Pick-up/Drop-off Point and AGV Flowpath Design Problem [J]. Appl Math Modelling, 2004, 28:735—750.
- [7] HSUEH C H. A Simulation Study of a Bi-directional Load-exchangeable Automated Guided Vehicle System[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58:594—601.
- [8] SAMIA M, PIERRE C. A Performance-based Structural Policy for Conflict-free Routing of Bi-directional Automated Guided Vehicles[J]. Computers in Industry, 2005, 56:719—733.
- [9] 曹平方, 李灵, 李诗珍. 基于分枝界定的VRP模型精确算法研究及应用[J]. 包装工程, 2014, 35(17):97—101.  
CAO Ping-fang, LI Lin, LI Shi-zhen. Research and Application of the Accurate Algorithm of VRP Model Based on Branch and Bound Method[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17):97—101.
- [10] 张元标, 吕广庆. 基于混合粒子群算法的物流配送路径优化问题研究[J]. 包装工程, 2007, 28(5):10—12.  
ZHANG Yuan-biao, LYU Guang-qing. Study of Physical Distribution Routing Optimization Problem Based on Hybrid PSO Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(5):10—12.
- [11] 周炳海, 胡新宇, 孙超. 基于改进型多目标粒子群算法的晶圆制造系统瓶颈工作站调度[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1):63—68.  
ZHOU Bing-hai, HU Xin-yu, SUN Chao. Scheduling of Bottleneck Workstation in Wafer Fabrication System S Based on Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2014, 35(1):63—68.
- [12] 沈正花, 陆志强. 基于仿真的半导体自动物料搬运系统调度优化[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(1):85—90.  
SHEN Zheng-hua, LU Zhi-qiang. Simulation Based Dynamic Scheduling Optimization for Automated Material Handling Systems in Semi-conductor Manufacturing[J]. Industrial Engineering and Management, 2011, 16(1):85—90.
- [13] JAWAHAR N, ARAVINDAN P, SURESH P K. AGV Schedule Integrated with Production in Flexible Manufacturing Systems[J]. Int J Adv Manuf Technol, 1998, 14:428—440.
- [14] THARMA G, NICHOLAS G. Hall and Chelliah Sriskandarah. Design and Operational Issues in AGV-served Manufacturing Systems[J]. Annals of Operations Research, 1998, 76:109—154.
- [15] HO Y C, LIAO T W. Zone Design and Control for Vehicle Collision Prevention and Load Balancing in a Zone Control AGV System[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56:417—432.
- [16] LI Jun-tao, ZHANG Li-zhen, SHANGGUAN Chun-xia, et al. A GA-based Heuristic Algorithm for Non-permutation Two-machine Robotic Flow-shop Scheduling Problem of Minimizing Total Weighted Completion Time[J]. The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2010, 56:1281—1285.
- [17] 李妍峰, 高自友, 李军. 动态网络车辆路径派送问题研究[J]. 管理科学学报, 2014, 17(8):1—9.  
LI Yan-feng, GAO Zi-you, LI Jun. Dynamic Vehicle Routing and Dispatching Problem[J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(8):1—9.
- [18] 周炳海, 周琪, 王腾. 基于滚动时域的整体式自动物料搬运系统避碰调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(7):1691—1699.  
ZHOU Bing-hai, ZHOU Qi, WANG Teng. Conflict-free Scheduling for United AMHS Based on Rolling Horizon[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(7):1691—1699.
- [19] 刘晓斌, 周炳海. 基于Petri网的OHT搬运系统防死锁调度方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11):4745—4752.  
LIU Xiao-bin, ZHOU Bing-hai. Deadlock-free Scheduling of OHT Transport Systems Based on Petrinets[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(11):4745—4752.

(上接第42页)

- [11] 叶翀, 庄文娟, 陈婷. 我国物流包装的发展现状及问题初探[J]. 物流工程与管理, 2012(5):3—5.  
YE Zhong, ZHUANG Wen-juan, CHEN Ting. Research on the Development of China's Packaging Logistics[J]. Logistics Engineering and Management, 2012(5):3—5.
- [12] 胡青霞, 丁香乾, 侯瑞春. 基于物联技术的MES可视化系统研究[J]. 现代电子技术, 2013(16):49—51.  
HU Qing-xia, DING Xiang-qian, HOU Rui-chun. Research on MES Visualization System Based on IOT Technology[J]. Modern Electronic Technology, 2013(16):49—51.
- [13] 丁治国. RFID关键技术研究及实现[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2009.  
DING Zhi-guo. Research and Realization on the Key Technology of RFID[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.