

柔性存储自动货柜控制系统设计

梁浩,游有鹏,柏利春

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对大中型货箱的存储需求,以节约、安全、高效为目标,设计一套柔性存储自动货柜控制系统。为满足大中型货箱的柔性存储,货柜采用方钢焊接的高稳定性框架结构,并在竖直方向采用等高隔档的机械结构;控制系统采用工控 PC 和 DSP 组成的上下位机架构,实现了人机交互、柔性存储规划、运动控制、状态检测等功能。针对单货箱入库问题,制定存放原则并提出三维度影响价值体系用于量化存储规划原则的符合程度;针对多货箱入库存储位置规划及其实时性要求,采用简化的遗传算法进行实时规划,实现了多货箱入库的柔性存储规划。

关键词:自动货柜;控制系统;柔性存储;快速遗传算法

中图分类号:TH165+.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0172-04

Design of Flexible Storage Automatic Container Control System

LIANG Hao, YOU Youpeng, BAI Lichun

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To meet the storage requirements of large and medium-sized containers, a flexible storage automatic container control system is designed for economy, safety and efficiency. To fulfill the flexible storage of large and medium-sized containers, the containers are structured with a high-stability frame welded by square steel, and an equal-height mechanical structure is adopted in the vertical direction. The control system adopts the upper and lower computer architecture composed of industrial PC and DSP to realize functions of human-machine interaction, flexible memory planning, motion control and state detection. For single container warehousing, the storage principle is formulated and three-dimensional impact value system is put forward to quantify the conformity of the principle. For multi-container warehousing and its real-time requirement, a simplified genetic algorithm is applied for real-time planning, which realizes flexible storage planning for multi-container warehousing.

Keywords: automatic container; control system; flexible storage; simplified genetic algorithm

0 引言

随着智能制造和电子商务的快速发展,物品中转、存储、流通的速度要求越来越高,促进了现代仓储与物流业的技术进步。柔性存储货柜凭借较传统仓储方式更好的空间利用率和高效的储存能力,在企业自动化仓储系统中逐渐获得日益广泛的应用。

目前国外的自动货柜生产厂家有:德国的 Hanel、瑞士的 Kardex、美国的 Fki 等^[1];国内也有成都的三极科技有限公司、西安的威仁自动化科技有限公司等。但国外的货柜主要用于轻量化储存,难以满足工业上大型工件的存储需求,国内虽然有大型货柜的产品,固定的层高不能满足多类型货物的存储需求,同时存储方案智能化较低,货柜的存放依赖于人工规划,难以充分利用货柜的垂直空间。

本文设计开发一种面向大中型货箱仓储的柔性存储自动货柜,自动柔性货柜可根据不同货箱高度动态分配层

高,同时为提高安全性、经济性和利用率,制定了存放原则。为解决单货箱入库提出了三维度影响价值体系用于量化原则符合度;并在多货箱存储时,简化遗传算法,通过迭代得出总综合影响价值最优解或最优近似解。

1 总体方案

当前用于自动存储的结构主要有两种,分别是以堆垛机为基本操作单元的自动化立体仓库形式和立体货柜形式。前者的货格大小统一,优点是结构强度高,缺点是空间利用率低;后者的结构由两组对称的支架构成,中间竖直分布等间距支撑筋,中间的区域没有直接分隔开,托盘可以根据需要放到想要的高度,这样能通过柔性储存算法实现空间利用率更高的排布,目前多应用于小型货品的存储。

结合两者的优点,本文设计了一种兼顾结构刚度的大中型柔性存储自动货柜。该货柜分为 A、B 两个存储区,左右对称分布,B 区的底部为托盘入口口;货架的结构采

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB1309203)

第一作者简介:梁浩(1995—),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为智能制造。

用垂直分布的支撑筋,不同高度的货箱可通过柔性规划实现紧密排布;两个储存区中间为升降通道,货箱放置在伸缩货叉上竖直移动。图1是自动货柜侧面的结构简图^[2]。

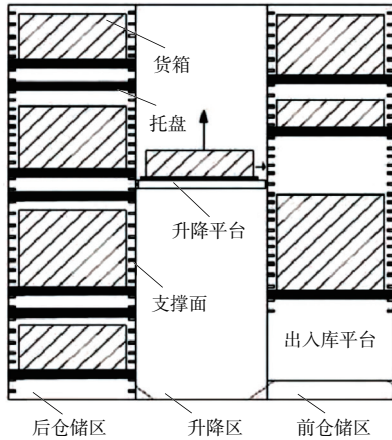


图1 自动货柜整体结构简图

为满足大中型货物的柔性存储,自动货柜的承重墙结构采用方钢等间距焊接在两侧的立柱上,两侧的支撑墙也采用强度较高的方钢焊接而成,两组承重墙上焊接横梁、斜拉筋和纵梁,确保整体框架的稳定性^[3],如图2所示。这种结构设计不仅结构强度高,满足大中型货物的柔性存储要求,而且造价低廉。货物存取系统包括垂直的升降机构和水平的平移机构,其中升降机构采用平稳可靠的链条提升机构,使用大功率的电机通过传动轴带动提升链条;平移机构采用通用的平移货叉^[4]。

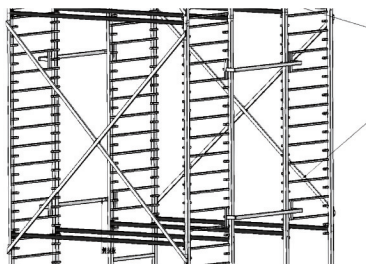


图2 承重墙三维建模视图

2 控制系统设计

2.1 控制系统总体设计

根据柔性存储自动货柜的工作要求,其控制系统需完成入料口货物的信息采集、存储位置柔性算法、存取动作的电机控制、存储货物的数据管理与人机交互、故障报警及条形码扫描打印等功能。

工作流程:需要入库的货箱放置在入料口的托盘中,系统通过光幕等传感器测量货箱的高度和质量信息,控制系统采集信息后通过柔性算法规划最优的存放位置。控制系统驱动电机带动托盘上的货箱将其放入指定位置,数据库同时更新货柜的储存信息。入库流程图如图3所示。

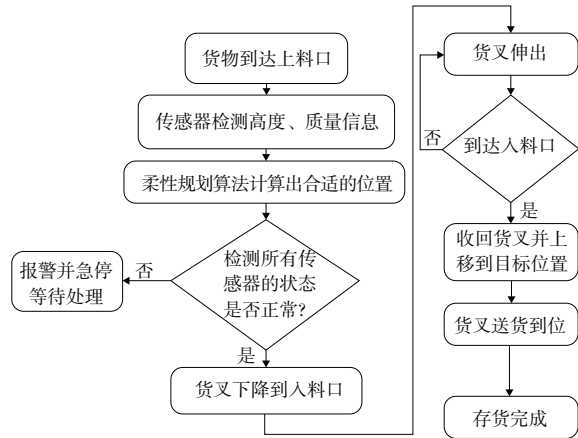


图3 入库流程图

2.2 控制硬件设计

传统的PLC控制虽然实现简单,但闭环控制的能力较弱,同时难以满足柔性规划的要求。所以本控制系统采用DSP+PC的架构^[5],由DSP完成运动控制、IO读取等基础功能,而PC进行柔性规划、运行状态和报警等信息的记录和处理以及参数设置等功能。

控制系统结构组成如图4所示。操作者通过触摸屏操作完成人机交互,PC端软件与条形码、打印机等外围设备连接,同时PC通过RS232与DSP连接完成数据的传输。机械结构的运动系统由三相交流电源、交流接触器、变频器和异步电动机等部分构成。变频器的控制由DSP输出的模拟型号实现。

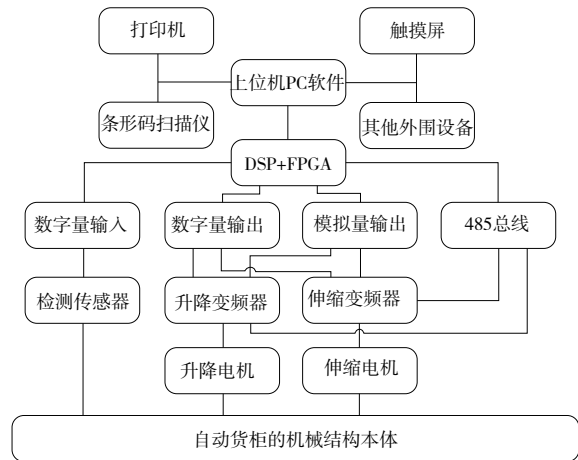


图4 控制系统结构图

为实现柔性算法和控制系统的运行,控制系统中包含了一系列传感器用于状态的检测,比如用于检测货箱的高度和质量的光栅传感器和压敏传感器、运动位置的限位传感器等,传感器的I/O量与FPGA连接。为了避免单个传感器损坏带来不良后果,自动货柜的检测采用双路冗余设计,只在两路状态相同时采用检测结果,否则判定检测装置故障。FPGA同时接入变频器脉冲的一路信号用于计数作位置闭环控制^[2]。

2.3 控制软件设计

控制系统的软件分为上、下位机两个部分。上位机软件包括4个模块:人机交互模块、柔性规划算法模块、上位机通信模块、下位机通信模块、数据库交互模块,主要负责人机交互、数据库管理、条形码扫描打印、自动货柜状态信息读取与显示以及下位机的操作命令生成与通信等任务。下位机 DSP 软件主要实现具体的运动控制与逻辑控制,如将存取动作拆分为具体的电机运动以及各个传感器的 IO 读写和预处理等。

3 柔性存储规划算法

本文设计的自动货柜不仅可适用于大小不同的大中型货箱,而且能通过存储位置的柔性规划充分利用垂直空间。货柜竖直方向采用等高格挡的结构特点,如图1、图2所示。柔性存储规划的目标是根据货箱的高度、质量和使用频率规划存放位置,使货柜整体的安全性、经济性以及存取效率更优。为此,特制定以下柔性存储位置规划原则。

3.1 柔性存储规划原则

- 1) 底部优先原则:单个货柜入库时应遵从优先在底部空余位置存放,然后再考虑往上堆叠。
- 2) 高度优先原则:出于安全和空间利用考虑,较高的货柜应优先放在下部空间,并与临近货箱保持最小间隙。
- 3) 重物优先原则:为了经济和安全考虑,重物应该优先放在下部。
- 4) 频率优先原则:为提高存取效率,存取频率高的货箱应优先存储在货柜离出料口更近的位置。

3.2 三维度影响价值体系

实际存储过程中,由于货箱的参数各异,往往原则间是相互矛盾的,依靠上述非量化的原则难以规划出最优解。同时,针对不同的存储需求,各个原则的优先度应该可以对应改变。

为使上述原则能在货箱入库时得到贯彻,本文将上述各原则的符合程度进行量化,提出3个维度的主要影响价值 v_{hi} (高度)、 v_{wi} (质量)、 $v_{\eta i}$ (频率),如式(1)所示。其中主要影响价值是随存储层数 i 变化的系数,价值收敛于 $(0,1)$ 。

$$\begin{cases} v_{hi} = 1/[(i-1)^2+1] \cdot k_h \cdot \lambda_h \cdot h \\ v_{wi} = 1/[(i-1)^2+1] \cdot k_w \cdot \lambda_w \cdot w \\ v_{\eta i} = 1/[(i-1)^2+1] \cdot k_{\eta} \cdot \lambda_{\eta} \cdot \eta \\ v_i = v_{hi} + v_{wi} + v_{\eta i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_h 、 k_w 、 k_{η} 是权重系数,可根据用户对三者的侧重不同进行调整,数值在1~10之间; λ_h 、 λ_w 、 λ_{η} 是归一化系数,可将有量纲的货箱高度 h 、质量 w 、频率 η 转换为无量纲的价值并平衡其数量级; v_i 为货箱存储在第 i 层的三维度影响价值的总和,简称综合价值。

单个货箱的综合价值和存储高度成反比,但货柜的底

层位置有限,为提高货柜中货箱综合价值的总和,应将同一高度下综合价值高的货箱放在底部,而将综合价值小的放在高层。建立上述体系,能有效评估货箱在不同层高下是否符合相关的存放原则。

在货柜的存储规划中,可分为两种情况:首次使用时众多货箱一次性入库的存储方案规划和单个货箱入库的存储位置规划。后者只用计算其综合价值函数,在存储时应尽量与综合影响价值系数相近的货箱处于同一层高。但前者情况较为复杂,因为此时各货箱的高度、质量、使用频率各不相同,直接按照各货箱的综合价值排序,难以获得全部货箱综合价值总和最高的最优解。

为解决多货箱入库的存储规划问题,本文提出了基于遗传算法的快速遗传算法。

3.3 柔性存储规划的快速遗传算法

问题描述: n 个货箱(J_1, J_2, \dots, J_n)要在自动货柜中连续存储,货箱连续空位的基准层数为 x ,总空余层为 y ,货柜的横向空间有限, n 个货箱需排序叠放入库。所以,本问题是 n 个货箱的综合价值总值最大化的问题。

$$V = \sum_{m=1}^n (v_{hi} + v_{wi} + v_{\eta i})_{j_m} \quad (2)$$

$$i \in I \{x, x+1, x+2, \dots, x+y\} \quad (3)$$

式中: V 是综合价值总和; i 是存放层数;单个货箱 j_m 存放在 i 层的综合价值表示为 $(v_{hi} + v_{wi} + v_{\eta i})_{j_m}$; I 集合是自动货柜当前可放置的空余层合集。

约束条件:货柜单层横向只能放一个货箱,单个货箱根据其自身高度将占据对应层数,例如 h_m 为货箱 J_m 高度对应所占据的层数,若 J_m 的放置起始层为 k ,则 k 到 $k+h_m$ 将从集合 I 中剔除不再被其他货箱选择。

多货箱入库的存储规划问题与车间调度问题有相似之处。通过遗传算法多次迭代能解决该问题,但复杂的算子会导致迭代速度慢,不适合本工况需要的工作时间^[6]。本问题的复杂程度较柔性车间调度问题更为简单,通过简化选择、交叉、变异算子能有效减少迭代所需要的计算时间。

以6个货箱入库为例,货箱存储染色体编码如图5所示。基因位的值表示该货箱在6个货箱中的序列,从下往上递增,数值为1~6的数组。

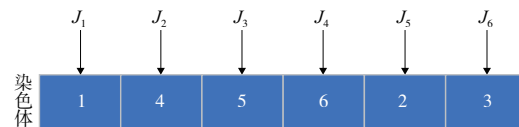


图5 染色体编码

整体算法具体算法步骤如下:

步骤1 种群的初始化

采用 GLA 序列选择初始化的方式^[7],包括全局随机排序(global random rank, GRR)、局部随机排序(local random rank, LRR)和全随机排序(all random rank, ARR)。全局随机排序中按各货箱的综合价值进行排序再进行有限次的随机换位,旨在从安全、经济和效率3个维度上保

证均衡;局部随机排序是3个维度上各自进行排序后有限次随机换位,旨在各个维度上保证单独该价值的排序;全随机排序就是无规则的排序方式,旨在提高初始族群的多样性。初始族群由3种族群按各自比例组成,该方法可显著提升初始族群种染色体的质量。

步骤2 选择交叉变异

遗传算法中每迭代一次都需要经过选择交叉和变异的过程。

选择:从父代族群中选择出部分子代进行交叉操作和变异操作。本文中子代族群的选择策略采用轮盘赌的方式。计算出父代中各个体的综合价值,按照价值决定被选择的概率,这种方式提高了父代族群中较优个体被选择的几率,同时保证了每一个个体都能有被选择的可能。

$$P_v = \cos\left(\frac{\pi}{N-1} \times \frac{n}{2}\right) \quad (4)$$

交叉:在交叉操作前,根据式(4)可以得到一个随着迭代次数 n 增加而从0趋近于1的交叉方式概率 P_v 。式中 N 为最大迭代次数,子代族群中 P_v 的个体和保优库中的个体交叉,其余子代两两交叉。货箱排序染色体采用半保留交叉操作,如图6所示,AB两个父代染色体进行交叉遗传,将A的染色体分为上、下两个部分,保留下部分的染色体作为子代C的下序列,将上半部分种基因值数集对应另一父类种的排序作为子代C的上序列。AB交换进行同样的操作得到子代D。

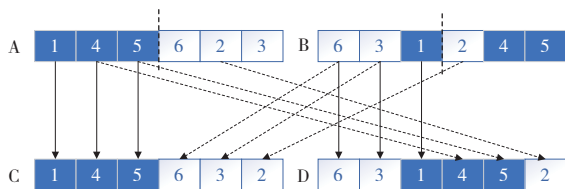


图6 半保留交叉

变异:采用随机插入方式,在货箱存储编码种随机选取一个基因插入到该染色体的随机位置上。

步骤3 保优策略

为防止每次迭代子群中的优秀个体不会在下一轮中被破坏和过早收敛导致局部最优解的出现,本文采用保优策略,将单次迭代中综合价值影响前2%的子代加入保优库中保护,在下一代迭代中提供交叉个体。

步骤4 重复迭代

判断迭代次数 n 是否小于最大迭代次数 N 。如果小于则重复步骤2和步骤3,否则输出最优解或者最优近似解。

以10个货箱同时入库为例,实验中归一系数为 $\lambda_h = 6, \lambda_w = 3, \lambda_\eta = 2$;权重系数为 $k_h = 1, k_w = 1, k_\eta = 1$ 。各个货箱的参数如表1所示,快速遗传算法能在1s以内完成2000次迭代,且在固定参数下200次后完成收敛,结果见表2。可见本算法可方便实现自动货柜的多货箱柔性存储规划,且规划时间可满足实际工况的实时性要求。

表1 实验设计参数

货箱号	h	w	η
J_1	3	19	14
J_2	1	7	13
J_3	3	8	12
J_4	3	7	6
J_5	2	14	19
J_6	1	12	14
J_7	2	5	18
J_8	2	9	19
J_9	4	9	7
J_{10}	4	9	12

表2 实验结果

项目	数值
初始价值	90
迭代次数	2 000
输出结果	$R = \{7, 5, 1, 4, 8, 10, 2, 9, 6, 3, 1\}, v_{\text{blue}} = 128$
时间/ms	616

4 结语

本文设计了一种可柔性存储的自动货柜,参考了堆垛机的结构,同时在竖直方向等间距分布支撑筋用于货箱放置,可实现大中型不同高度货箱的柔性存储。控制系统的设计采用了PC+DPS的上下位机架构,上位机实现人机交互、数据库管理、通讯等功能;下位机实现运动控制、IO检测和报警经停操作等功能。针对货箱柔性存储规划,归纳了存放原则,提出三维度影响价值体系用于量化优化目标,采用快速遗传算法实现了多货箱同时入库的柔性存储。该设计方案已获得实际应用,为中大型货物的柔性存储提供了一种有效可行的方案。

参考文献:

- [1] 姜运清. 第四届广东海事高级论坛论文集[M]. 大连:大连海事大学出版社,2012:28~31.
- [2] 柏利春,游有鹏,罗福源. 一种垂直横移式智能立体货柜的设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [3] 丁荣生. 自动升降货柜波纹墙板的组装及塞焊工艺[J]. 焊接技术,2009,38(6):26-28,2.
- [4] 梁秀英,段成财,李庆伟. 巷道平移式立体车库结构和控制系统设计[J]. 制造业自动化,2010,32(2):181-183.
- [5] 马幼捷,张海涛,周雪松,等. 基于DSP芯片的多层循环式立体车库控制系统[J]. 制造业自动化,2009,31(10):86-89,170.
- [6] 吴树景,游有鹏,罗福源. 变邻域保优遗传算法求解柔性车间调度问题[J]. 计算机工程与应用,2020,56(22):236-243.
- [7] 尚宇晴,左钱,王腾,等. 改进遗传算法及性能测试[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):60-64.

收稿日期:2021-12-07