

多模块网格仓储系统最优循环拣选方法^{*}

郭鹏辉, 肖 飞, 贾正荣, 芮万智, 许 金

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 为研究与电机智能制造生产线相匹配的高存储密度仓储系统, 提出一种由多个回型存储模块连接而成的多模块网格仓储系统, 并提出一种最优循环动作方法, 使系统内的负载快速地循环移动出库。将系统抽象为节点和边组成的图模型, 提出环和循环移动的概念, 证明得到一次循环移动所需的最少动作步数。结果表明: 在规定的负载配置下, 最少可通过 2 步动作完成一次全库负载的循环移动。最后以一个系统实例为对象, 利用所提方法构建最优循环移动, 实现系统全负载的快速循环移动与拣选。研究结果可为多模块网格仓储系统的性能分析和设计优化提供理论依据。

关键词: 仓储; 多模块网格仓储系统; 最优循环; 图模型; 环; 循环移动

中图分类号: TM 305; TH 692.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)05-0093-06

doi: 10.12177/emca.2021.012

An Optimal Cyclic Picking Method for Multi-Module Grid-Based Storage System^{*}

GUO Penghui, XIAO Fei, JIA Zhengrong, RUI Wanzhi, XU Jin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to study the storage system with high storage density for the intelligent manufacturing line of motor, a multi-module grid-based storage system which is composed of multiple storage modules is put forward. An optimal cyclic moving method is proposed to make the load in the system move and be picked quickly. The storage system is abstracted as a graph model composed of nodes and edges and the concepts of ring and circular movement are proposed. The minimum number of action steps required for a cyclic movement is proved. The results show that a cyclic movement of all loads in the system can be completed within a minimum of 2 steps. Finally, taking a system instance as the object, the proposed method is used to construct the optimal circular movement and realize the fast cyclic moving and picking of all loads in the system. A theoretical basis for the performance analysis and design optimization of multi-module grid-based storage systems is provided.

Key words: storage; multi-module grid-based storage system; optimal cycle; graph model; ring; circular movement

0 引 言

在电机智能制造领域, 大规模自动化生产线极大地减少了人力成本, 提高了生产效率, 但是对

企业仓储系统的存储密度和拣选出货效率提出很高要求。仓储系统是现代物流系统和供应链的重要组成部分^[1-2]。用于制造业的传统仓储系统以自动化立体仓库^[3-4]为代表, 由于过道设施的存

收稿日期: 2021-01-29; 收到修改稿日期: 2021-03-09

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(52077218)

作者简介: 郭鹏辉(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

贾正荣(1992—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为武器控制与航路规划、系统工程。(通信作者)

在,其存储密度受限,进而容易导致物流补货滞后的现象。因此,现代电机生产制造企业迫切需要新型的智能仓储技术和车间物流方案,实现高密度的存储和高效智能化生产^[5-6]。

为实现高密度存储,物流领域研究了一种新兴的网格化存储(GBS)系统^[7-8](又称PBS系统)。该系统具有存储密度大、易于安装布局等特点,已应用于仓库和配送中心、自动化停车库、码头集装箱等领域^[8-10]。现有文献主要研究不同配置下的GBS系统中单个负载或多个负载拣选到系统出口的方法,其中配置主要指空位的数量和初始分布。多数文献研究单一负载拣选问题。Gue^[7]提出GBS形式的高密度存储系统,研究了单一负载出库的最优方法,其研究假设单个空位在出口处或多个空位在出口处排成一行。Kota等^[11]在文献[7]的基础上进一步推导了单一负载拣选时间的闭合表达式,其研究假设空位随机分布,对于单个和2个空位给出了最优解,而对于2个以上的空位则给出一种启发式方法。Alfieri等^[12]研究了使用自动导引小车进行负载移动的GBS系统变体,其研究假设初始时刻多个空位在出口处排成一行,并采用了与文献[7]类似的启发式方法。Yalcin等^[13]则研究了更一般情况下的单一负载拣选最优方法,适用于一定规模的GBS系统下多个空位任意分布的情况,采用经典的A*搜索算法,对于较大规模的问题,则采用启发式方法。

对于多负载拣选,Mirzaei等^[14]研究了多负载联合拣选问题,对于双负载联合拣选给出最优方法,而对于更多数量负载的联合拣选给出启发式方法,其研究假设空位初始时刻位于系统出口处。

上述文献的研究以单一模块形式的GBS系统为对象,研究若干个负载拣选出库的方法。与上述文献不同,本文研究一种由多个回型GBS模块连接而成的多模块网格仓储(MMGBS)系统,考虑系统全部负载拣选出库的工况,先前的研究方法难以适用。为此,基于图论模型将MMGBS系统抽象为节点和边组成的仓库结构图,根据不同的节点属性,提出环与循环移动的概念,在此基础上证明了最优循环移动所需的动作数量以及对应的系统配置,实现系统全负载的拣选出库。

1 问题概述

1.1 MMGBS 系统概述

GBS系统由多个矩形储位单元密集排列而成,每个储位上为负载或者空位,负载可以移动到相邻的空位,如图1所示。

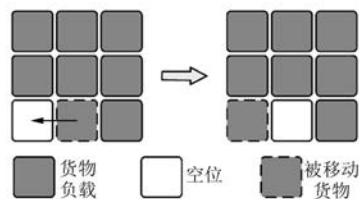


图1 GBS系统运行示意图

在GBS系统的基础上,本文提出的MMGBS系统如图2所示。系统分为拣货区和备货区。备货区配置1个备货模块;拣货区配置多个拣货模块。各存储模块为回型循环网格结构。每个拣货模块都与备货模块相连通,各拣货模块的左下角为拣选点,因此MMGBS具有多个拣选点,与拣货模块一一对应。负载置于可移动的托盘上,经拣选点出库时与托盘分离,因此系统中的托盘和空位数量保持不变。

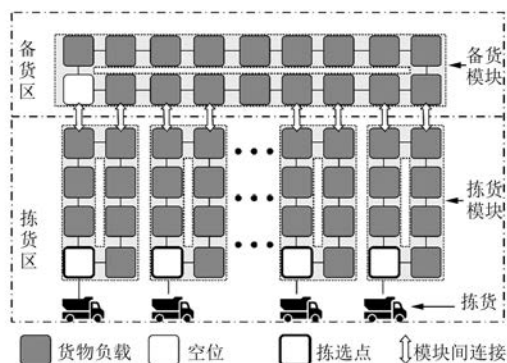


图2 MMGBS系统组成

1.2 动作规则和假设

系统中有以下3类动作规则。

(1) 基本动作:一个负载从某一储位移动到相邻空位的过程,如图1所示。

(2) 块动作:一条直线上连续的负载,可以作为一个负载块,同时移动一步到相邻空位,如图3(a)所示。

(3) 并行动作:移动路径不冲突的基本动作或块动作,可以并行发生,如图3(b)所示。

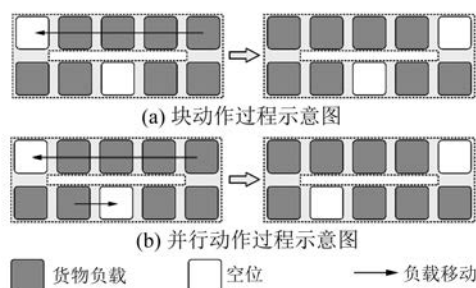


图3 块动作与并行动作过程

本文的研究工作假设如下:(1)所有的基本动作、块动作、并行动作耗时相同,为1步;(2)不考虑负载的拣选出库时间,待拣选负载到达拣选点后即完成出库。

1.3 全负载拣选

在实际应用中,系统的库存管理维护需要将系统全部负载拣选出库。此时关注的问题不是拣选中单一负载或若干负载的方法,而是如何尽快地将系统中的各负载托盘依次移动至拣货模块的拣选点出库。单个存储模块为回型结构,可实现与传统旋转货架系统^[13]类似的循环移动,但系统中的备货模块没有拣选点,无法通过自身的循环移动使负载出库。为此,本文在1.2节所述的系统动作规则下,探究一种移动动作组合,使系统中的所有负载形成一种循环移动,从而依次从拣选点出库。

2 基于图论模型的系统结构抽象

2.1 位置类型

将MMGBS系统中的每个储位作为一个节点,储位之间的连接关系通过边表示,通过节点与边构成的集合描述的系统结构称为系统结构图,则图2所示的MMGBS系统结构可以抽象为图4。

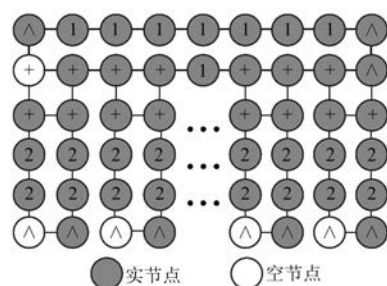


图4 系统结构图抽象

根据节点的位置,可以将节点分为以下3种类型,如图4。

(1) 直线节点“1”和“2”:“1”和“2”分别代表水平和垂直方向。

(2) 转向节点“ $\wedge$ ”:转向节点表示转向(90°),在转向节点两边的直线节点方向不同。转向节点至多能够连接2个节点。

(3) 交叉节点“+”:交叉节点至少连接3个节点,至多连接4个节点。交叉节点表示多个节点的交汇。

另外,节点具有实节点和空节点2种属性。如果一个节点对应的储位上放置有托盘,该节点被占用,称为实节点;对应地,没有托盘的节点称为空节点。实节点上的负载能够向空节点移动,一次只能移动至相邻的节点。

2.2 环与循环移动

2.2.1 环

定义1:在系统结构图(节点与边的集合)中,由若干个节点和边构成一个子集,如果有:(1)子集中任意一个节点均有子集中的2个其他节点与之相连;(2)在该子集内,所有转向节点与交叉节点数量之和为4的正整数倍;(3)该子集的真子集均不满足条件(1)和(2),则该子集称为环。

当子集有任意真子集满足上述条件(1)和(2)时,该子集并非环,而是多个环的并集。

图5所示均为环。

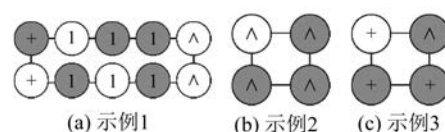


图5 环的示例

另外,环作为仓库结构图的子集,其中交叉节点只保留2个边,因此对于环而言,原本的系统结构图中的交叉节点变换为在环内的直线节点或转向节点。

因此,图5所示环的示例应当变为图6所示。

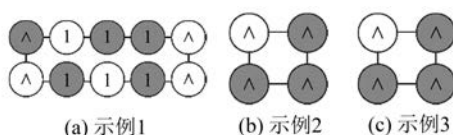


图6 改变交叉节点后的环示例

经过变换后,环内转向节点的数量总为 4 的正整数倍。

2.2.2 循环移动

引入环的概念后,期望在环内形成一种特殊的动作组合,执行该动作组合后,可以实现环内负载的快速循环,从而提高调度效率。

定义 2: 经过一定的动作,使每一负载移动至其所在实节点后(或前)的第一个实节点位置,称为一次循环移动。

循环移动如图 7 所示。图中有字母标注的节点为带有负载的实节点,无字母标注的为空节点。

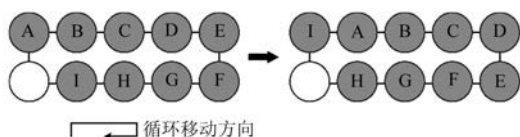


图 7 循环移动

一次循环移动所需的动作数量决定了仓库系统的调度效率。

3 最优循环移动

循环移动通过 1.2 节所述的系统动作规则实现,因此其一次循环移动所需的动作数量 ≥ 1 。如果能够找到动作数量最少的循环移动动作组合,且该动作组合中的实节点数量最多,则该循环移动是最优的,对应最优调度效率。

引理 1: 不存在动作数量为 1 的循环移动。

证明:

采用反证法。

假设存在动作数量为 1 的循环移动,由于每个负载只能动作 1 次,且动作只能移动至相邻的节点,根据循环移动的定义(定义 2),对于每一个实节点处的负载,其相邻的前一个位置上必然存在负载,是实节点。

故环内每个节点均是实节点,且能够进行块动作移动,因此环应当如图 8 所示。

显然,该“环”不符合环的定义,其转向节点数量为 0,而不是 4 的正整数倍,假设不成立。证毕。

根据引理 1,循环移动所需的动作数量 ≥ 2 ,因此,如果存在动作数量为 2 的循环移动,则该动

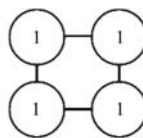


图 8 动作数量为 1 的循环移动对应的环

作组合为效率最优。

注意到在一个环内只存在直线节点与转向节点。转向节点将直线节点集隔开,因此可以根据环对应的实际仓库储位和转运路径,简化环的结构,如图 9 所示,将环内的转向节点用顶点表示,被转向节点隔开的直线节点集用点划线表示。

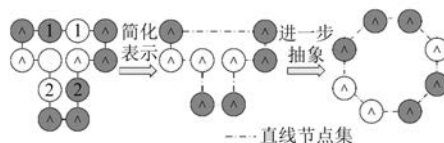


图 9 环结构的简化

结合环的简化,引入环的顶点的概念。

定义 3: 在环内,转向节点是顶点,2 个顶点之间为直线节点集或者没有任何节点。

当 2 个顶点之间为直线节点集时,直线节点集连同与之相连的 2 个顶点可以执行 1.2 节所述的块动作;2 个顶点之间没有任何节点可以视为直线节点集的特殊情形(即 2 个顶点之间为空节点集),此时 2 个顶点可以执行 1.2 节所述的基本动作。

定理 1: 对于顶点数量为偶数的环,最优循环移动需要 2 步并行动作,如图 10 所示。

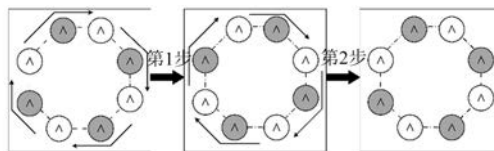


图 10 最优循环移动

图 10 中,环外的实线表示对应的顶点之间的直线节点上均有负载,实线转折处的顶点也有负载。并且,对应最优循环移动的各节点初始布置为:(1)所有非顶点的节点放置负载;(2)相邻的 2 个顶点,一个为空节点,另一个为实节点。

那么,以上初始的仓库负载布置称为最优负载布置。

进而,设环内节点数量为 n_{node} ,顶点数量为

n_{vertex} , 在最优负载布置下, 所需的空节点数量为 $n_{\text{vertex}}/2$, 可以放置的负载数量 n_{cap} 为

$$n_{\text{cap}} = n_{\text{node}} - n_{\text{vertex}}/2 \quad (1)$$

最优负载布置下环内可以放置的负载数量 n_{cap} 称为环的载货量。

证明:

最优性包含 2 个层面。第 1 层面为循环移动所需的动作数量最优; 第 2 层面为在最优循环移动的基础上使环内的负载数量(即实节点数量)最大化。

首先证明循环移动动作数量最优。

最优循环移动的动作数量为 2。

根据引理 1, 不存在动作数量为 1 的循环移动, 因此定理 1 中, 通过 2 步动作实现循环移动即为最优的动作数量。

然后证明环内的负载数量最大。

定理 1 对应的最优负载配置中, 相邻的 2 个顶点一个为空节点、一个为实节点, 其余所有节点也为实节点。在此基础上增加负载, 则负载只能放置于空的顶点处, 无论放置于哪个顶点, 环内至少存在 3 个相邻的顶点均为实节点, 如图 11 所示。对于图 11 中的情况, 任选一个方向, 3 个相邻顶点中必然存在一个节点, 其移动到下一实节点位置至少需要 3 步, 即该情况下循环移动所需的动作数量 ≥ 3 。

可见, 环内负载数量更多的情况, 其循环移动的动作数量并非最优。

证毕。

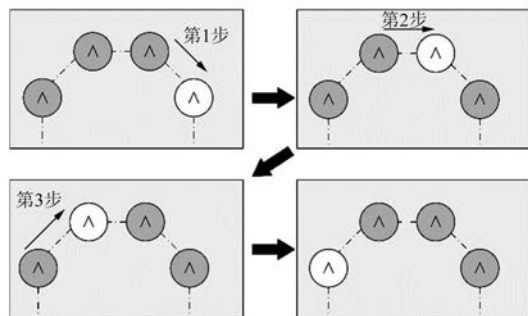


图 11 3 个相邻顶点均为实节点的情况

4 实例分析

根据上述理论结果, 对 MMGBS 系统案例进行分析验证。为使循环移动的过程图描述清晰,

以一个简化的 MMGBS 系统为对象构建循环移动, 其基本模块配置为: 1 个备货模块, 共 $2 \times 7 = 14$ 个储位; 2 个拣货模块, 每个模块有 $2 \times 3 = 6$ 个储位。对于更大的 MMGBS 系统, 构建原理相同。

根据系统的连接关系, 构建经过系统所有负载的环, 并确定环的转向节点(即顶点), 如图 12 所示。则由定理 1, 可确定系统最优循环移动所需的初始负载配置以及循环移动的过程, 如图 13 所示。图 13(a) 为环简图表示的循环移动过程, 图 13(b) 为实际的循环移动过程。

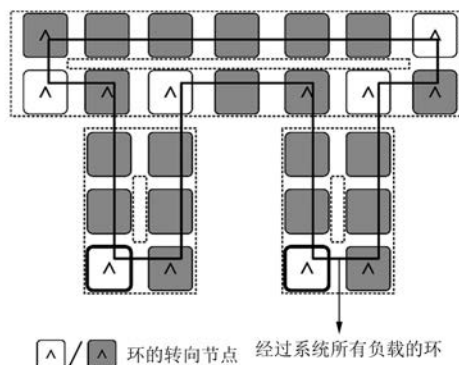


图 12 系统环构建示意图

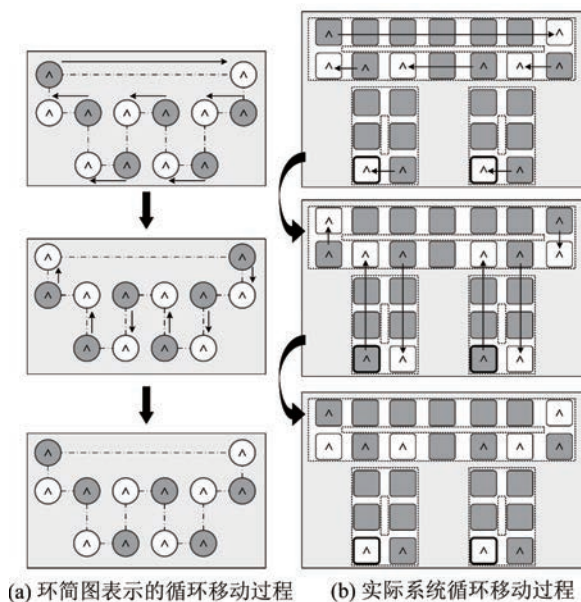


图 13 系统最优循环过程

图 13 所示的循环移动过程中, $n_{\text{node}} = 14 + 6 + 6 = 26$, $n_{\text{vertex}} = 12$, 则实现最优循环移动对应的系统负载容量为

$$n_{\text{cap}} = n_{\text{node}} - n_{\text{vertex}}/2 = 20 \quad (2)$$

每次循环移动经过 2 步动作,将 2 个负载移动至拣选点然后出库,则经过 10 次循环移动后,系统中的负载全部经由拣选点出库。

5 结 语

针对传统仓储系统存储密度与现代电机智能制造生产线不匹配的问题,本文提出了一种 MMGBS 系统,并针对 MMGBS 系统中全负载拣选的实际应用需求,提出了一种最优循环移动方法。建立了系统结构的图模型,提出了环和循环移动的概念,通过构建经过系统所有负载的环,得到了系统最优循环的移动动作方案和负载配置。最后,以一个 MMGBS 系统实例为对象,实现了本文所提最优循环移动的构建,满足了系统全负载快速拣选出库的工况需求。此外,本文所提出的最优循环移动方法,可给出多模块网格仓储系统的总体出库效率上界,评估不同配置系统的性能,为系统的性能分析和设计优化提供一定的理论依据。

【参 考 文 献】

- [1] NILS B, KOSTER R D, FELIX W. Warehousing in the e-commerce era: a survey [J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 277: 396.
- [2] AZADEH K, KOSTER R D, ROY D. Robotized and automated warehouse systems: review and recent developments [J]. *Transportation Science*, 2019, 53 (4): 917.
- [3] BOZER Y A, WHITE J A. Travel time models for automated storage/retrieval systems [J]. *IIE Transactions*, 1982, 16(4): 329.
- [4] 万英和, 卢宗慧, 饶金海, 等. 自动化立体仓储系统在高速动车组关键零部件智能制造中的应用 [J]. *制造业自动化*, 2019, 41(6): 114.
- [5] 郭峰, 张海军. 轨道交通电力机车核心部件智能制造新模式应用 [J]. *中国高新科技*, 2020(22): 108.
- [6] 夏显超, 江涛, 龙罡. 电机工厂智能制造评价指标及评估方法探讨 [J]. *工程建设与设计*, 2020 (1): 168.
- [7] GUE K R, KIM B S. Puzzle-based storage systems [J]. *Naval Research Logistics*, 2007, 54(5): 556.
- [8] YALCIN A, KOBERSTEIN A, SCHOCKE K O. Motion and layout planning in a grid-based early baggage storage system [J]. *OR Spectrum*, 2019, 41 (3): 683.
- [9] GUE K R. A high-density, puzzle-based order picking system [C]. *12th IMHRC Proceedings*, 2012.
- [10] ZAERPOUR N, YU Y, DE KOSTER R, et al. Small is beautiful: a framework for evaluating and optimizing live-cube compact storage systems [J]. *Transportation Science*, 2017, 51(1): 34.
- [11] KOTA V R, TAYLOR D, GUE K R. Retrieval time performance in puzzle-based storage systems [J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2015, 26(4): 582.
- [12] ALFIERI A, CANTAMESSA M, MONCHIERO A, et al. Heuristics for puzzle-based storage systems driven by a limited set of automated guided vehicles [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, 23 (5): 1695.
- [13] YALCIN A, KOBERSTEIN A, SCHOCKE K O. An optimal and a heuristic algorithm for the single-item retrieval problem in puzzle-based storage systems with multiple escorts [J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 57(1/2): 1.
- [14] MIRZAEI M, DE KOSTER R B M, ZAERPOUR N. Modelling load retrievals in puzzle-based storage systems [J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(21/22): 1.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

