

自动化制造单元调度算法综述*

周 珍, 车阿大

(西北工业大学 管理学院, 西安 710072)

摘要: 作为未来先进制造系统的重要发展方向, 自动化制造单元 (robotic cells) 在半导体和印刷电路板制造、化学电镀、钢铁冶炼和机械制造等行业获得了日趋广泛的应用。为全面总结自动化制造单元调度算法的研究现状, 对自动化制造单元进行分类, 在此基础上综述了国内外自动化制造单元调度方法取得的进展及存在的问题, 并指明了其进一步的研究方向。

关键词: 自动化制造单元; 调度; 物料运送机器人; 算法

中图分类号: O211.1; TP278 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)06-2001-05

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.001

Survey on scheduling algorithms for robotic cells

ZHOU Zhen, CHE A-da

(School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: As a significant development direction for future advanced manufacturing systems, robotic cells have more and more broad applications in the areas of printed circuit boards manufacturing, chemical electroplating, steel smelting, mechanical manufacture, and so on. For a detailed survey on robotic cells scheduling algorithms, this paper firstly classified robotic cells. Based on the classification, presented an overview of recent developments in scheduling algorithms for robotic cells at abroad and home and their disadvantages. Finally, gave the possible directions for future research.

Key words: robotic cells; scheduling; material handling robot; algorithms

0 引言

现代化的先进制造系统往往应用计算机控制的物料运送机器人来执行制造系统中工作站之间的工件运送作业, 如集束型半导体制造系统 (cluster tool)^[1,2]、印刷电路板自动化电镀生产线^[3,4]、钢铁冶炼生产线^[5,6]、柔性制造单元^[7,8]等。具有物料运送机器人的自动化制造系统通常被通称为自动化制造单元 (robotic cells)。自动化制造单元的调度比经典的流水车间 (flow-shop) 和单件车间 (job-shop) 调度问题要复杂得多, 因为此类系统的调度不仅要合理安排工件的加工作业, 而且更要有效地规划机器人的物料运送作业。随着制造业竞争的日益加剧, 作为先进制造中生产组织与过程优化的一个重要方面, 生产调度问题受到日益广泛的重视, 调度决策水平已经成为现代制造企业经营过程能否稳定、高效运转的决定性因素之一。

先进制造模式在制造系统中的不断应用迫切需要人们不断完善现代生产调度理论与方法, 以不断适应制造系统运作模式的更新。国内外研究者对经典的生产调度问题 (如 flow-shop 和 job-shop 调度问题) 进行了广泛和深入的研究^[9,10]。但是, 对作为未来制造系统主要发展方向的自动化制造单元的调度研究还没有引起足够的重视。在半导体和印刷电路板等相关产业广阔应用前景的推动下, 自动化制造单元的优化和调度开始成为近年来国际自动化和管理科学领域的研究热点。

1 自动化制造单元调度问题描述和分类

1.1 问题描述

自动化制造单元通常由一系列完成特定加工工序的工作站和用于自动化物料运送的机器人组成, 如图 1 所示。所有工件在加工开始前都已经到达装载站, 并且等待机器人将其搬入制造单元进行加工。工件在工作站上完成一个工序的加工后, 由计算机控制的机器人卸载并搬运至下一个工序所对应的工作站上进行加工。一个工件不能同时在两台或多台工作站上加工, 一台工作站也不能同时加工两个或多个工件。当所有加工工序完成后, 工件从卸载站离开系统。系统中存在一个或多个机器人用于执行搬运作业。对于自动化制造单元而言, 机器人物料运送作业的执行顺序直接影响着系统生产效率的高低。



图1 一个典型的自动化制造单元示意图

自动化制造单元的调度问题可归结为: 并行优化和调度制造单元中工作站和物料运送机器人, 即优化工件加工顺序和机器人的运送作业, 以在保证产品质量的前提下使系统生产率最大。

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2009-12-26 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50605052); 国家教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目 (NCET-06-0875)

作者简介: 周珍 (1983-), 女, 河南新蔡人, 硕士, 主要研究方向为生产计划与调度 (zhouzhenqs@mail.nwpu.edu.cn); 车阿大 (1972-), 男, 浙江郑州人, 教授, 博导, 主要研究方向为生产计划与调度、工业工程等。

1.2 自动化制造单元分类

目前国内外对自动化制造单元调度的研究分布于不同的应用领域中,在经典的英文文献中也就有不同的叫法,如集束型半导体制造系统调度在英文中被称做 cluster tool scheduling^[1,2]、印刷电路板自动化电镀生产线调度被称做 hoist scheduling^[3,4]、制造单元调度被称做 robotic cells scheduling^[7,8]等。本文从工件在工作站上的等待时间、制造单元物理结构和加工工件类型三个角度,对自动化制造单元进行分类归纳。

1.2.1 无限等待、有限等待与无等待自动化制造单元

无限等待、有限等待和无等待这三类制造单元的不同之处在于工件在工作站上完成加工后能否继续在工作站上等待,直到物料运送机器人空闲时来搬运。在无限等待自动化制造单元中,如机械制造系统,工件在某个工作站上的等待时间为无限长,即工件在该工作站上完成加工后必要时可以一直停留在工作站上,直到机器人空闲时来搬运;在有限等待自动化制造单元中,如集束型半导体制造系统,工件(如晶圆^[11])在工作站(处理腔体, chamber)上完成如化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)、物理气相沉积(physical vapor deposition, PVD)、平坦化、光阻曝光处理等^[1,2]化学物理处理后必须在给定的时间内被机器人搬走,以防止废品产生;在无等待自动化制造单元中,如高精度印刷电路板电镀生产线和钢铁冶炼生产线,对工件的加工时间有着精确的要求,工件在工作站(化学处理槽或冶炼炉)上完成处理后必须立刻被机器人从工作站上搬走,否则有可能会产生废品。

1.2.2 简单与复杂自动化制造单元

在传统的自动化制造单元中,各处理工序和处理工作站之间存在着一对一的关系(即每一个处理工序对应惟一个工作站,反之亦然),工件按工艺路线中确定的顺序串行地访问各工序对应的工作站后离开制造单元。在半导体和印刷电路板制造等相关行业的迅猛发展下,自动化制造单元日益向复杂化发展,主要体现在制造单元物理结构的复杂化,即自动化制造单元中可重入工作站和并行工作站的出现。

a) 可重入(re-entrant)工作站。被工件重复访问的工作站,也即被多个处理工序共享的工作站。

b) 并行(parallel)工作站。在加工时间特别长的瓶颈处理工序上所设置的多个同时加工工件的工作站,以有效平衡各工序之间的载荷。

由于可重入工作站和并行工作站的出现,自动化制造单元中工件的流动方向呈现多重入和串并行的特点。本文从制造单元物理结构的角度,将具有可重入工作站和并行工作站的自动化制造单元称为复杂自动化制造单元;将传统的自动化制造单元称为简单自动化制造单元。由于需要有效地协调可重入工作站和并行工作站上的工件加工作业以避免工作站上工件加工冲突,复杂自动化制造单元的调度比简单制造单元调度要复杂得多。

1.2.3 单流与混流自动化制造单元

自动化制造单元日益向复杂化发展的另一个主要体现是加工产品种类的多样化。随着用户对产品的个性化要求越来越高,多品种小批量生产成为企业的主要制造模式。混流生产是近几十年来为了适应多品种生产的需要而发展起来的一种新的生产组织方式。所谓混流自动化制造单元是指在一定时间内,在同一生产系统中混合连续地生产多种类型产品的自动化制造单元。相应地,只生产一种类型产品的制造单元被称为单流自

动化制造单元。混流自动化制造单元的调度比单流制造单元调度要复杂得多,因为它的调度不仅要合理规划各种不同类型工件的加工顺序,更要有效地规划机器人的物料运送作业。

2 自动化制造单元调度算法研究进展

绝大多数自动化制造单元调度问题为 NP 难题(NP-hard),如 Lei 等人^[12]证明了即使只有一个机器人的有限等待简单自动化制造单元调度问题为强 NP 难题,也就是说问题解的个数随问题规模呈指数增长;Brauer 等人^[13]则证明了具有任意工作站布置的无限等待简单自动化制造单元调度问题为强 NP 难题。

大量文献分析表明,自动化制造单元调度问题的研究方法可分为两大类,即精确算法和启发式近优方法。自动化制造单元调度问题的研究最初主要集中在精确算法上(如分支定界法、动态规划、混合整数规划等数学规划方法),解决了一系列有代表意义的调度问题,但精确算法难以解决大规模的复杂调度问题。随着相关学科与优化技术的发展,自动化制造单元调度领域涌现了许多新的启发式优化方法,如基于人工智能和计算智能的调度方法。以下对自动化制造单元的各类研究方法进行系统综述。

2.1 多项式算法

多项式算法(polyynomial algorithm)主要应用于无等待以及具有特殊工作站布置的某些无限等待自动化制造单元调度问题上。

由于无等待制造单元中工件在工作站上完成加工后必须立刻由物料运送机器人搬运到下一个工作站,其调度问题在无限等待、有限等待和无等待这三类制造单元调度问题中具有最严格的约束,这类问题常常存在多项式快速算法。文献中多项式算法求解无等待自动化制造单元调度问题往往先应用禁止区间法(prohibited intervals)建立问题的数学模型,通过数学分析区间分析相结合的方法分析该模型,在此基础上证明问题的最优解必定在有限个特殊点上,从而将高维问题缩减为低维问题,再设计一个特定的可行解检查算法来判断每个特殊点(即缩减的低维问题)的可行性,最后对整个算法的调度复杂性作出分析。遵循以上解决思路和研究方法,研究者在多项式算法上取得了以下成果。

在简单制造单元调度研究上,Levner 等人^[14]在理论上证明了单机器人无等待制造单元调度问题不是 NP 难题,为多项式可解;Karzanov 等人^[15]研究了多机器人无等待制造单元调度问题。上述两项研究都是假设系统中每个机器人在各自独立的并行轨道上运行的,没有考虑单一轨道上多机器人运行时可能存在的碰撞问题。Kats 等人^[16]提出的用于解决多机器人调度问题的多项式算法,能在给定的周期调度下最小化机器人数量,而 Leung 等人^[17]在此基础上提出的多项式算法不仅能最小化任意周期时间长的机器人数量,而且还能在给定的机器人数量下优化生产系统。Liu 等人^[18]、Che 等人^[19]则分别为单一轨道上单向运行的双机器人、多机器人调度问题提出了相应的有效的多项式算法,车阿大等人^[20]进一步扩展了文献[19],解决了单一轨道上双向运行的多机器人调度问题。

在复杂制造单元调度研究上,Kats 等人^[21]为只存在可重入工作站的调度问题提出了多项式算法,该算法不适用于有并行工作站存在的调度问题,Che 等人^[22]证明了同时存在并行工作站和可重入工作站的调度问题为多项式可解,同时他们在文献[23]中最终提出了解决复杂制造单元调度问题的多项式算法。

将多项式算法用于混流自动化制造单元调度问题的研究略少于前两者,主要有:Che等人^[24]首次证明2度无等待制造单元调度问题为多项式可解,并指出该多项式算法可扩展至解决2度无等待混流制造单元调度问题。Agnētis^[5]为分别加工多个相同工件或不同工件的具有两个或三个工作站的混流制造单元开发了多项式调度算法,但当加工多个相同工件时,由于该调度初始工件的特性不同于稳态时的情况,这种算法在一个单位周期内对四个及四个以上工作站的情况不适用。Agnētis等人^[25]研究了只有三个工作站的混流制造单元调度问题,应用了一种多项式算法解决了多种不同类型工件调度问题,但该算法不能解决任意工作站个数的调度问题。

另一方面,任意工作站间距离为常量的无限等待制造单元通常也是多项式可解,即可根据这类调度问题的特性导出最优解的下界(lower bound)。在一般性的假设前提下,可证明出调度问题的某个特殊可行解的最优值等于所导出的最优解的下界。主要工作包括:Dawande等人^[26]用多项式算法解决此类简单制造单元生产率最大化问题;Geismar等人^[27]则为存在并行工作站的单机器人调度问题提出了一种多项式算法;进一步地,Geismar等人^[28]又将该算法扩展至多机器人调度问题,并以三个机器人的制造单元为例,通过仿真模拟验证了该算法优于当时FSI International Inc所使用的一种基于启发式近优算法的调度方案。

2.2 混合整数规划方法

混合整数规划方法(mixed integer programming)主要应用于为NP难题的有限等待简单自动化制造单元调度问题上。应用混合整数规划方法研究自动化制造单元调度问题的基本思路是首先分析所要研究的调度问题特征,在此基础上建立问题的混合整数规划模型,再应用商品化优化软件来求解。Phillips等人^[29]最早为有限等待制造单元调度问题提出了第一个混合整数规划模型,并提供了迄今为止这一研究领域最为权威的基准研究案例。针对他们所提出的混合整数规划模型不能求解有可重入工作站的制造单元调度问题的缺陷和不足,周支立等人^[30]加入适当的松弛变量及其约束方程,提出了一种改进的混合整数规划模型,但是他们的模型均没有考虑同时存在并行工作站和可重入工作站的复杂情况。而Liu等人^[31]则为存在并行工作站和可重入工作站的复杂制造单元调度问题提出了综合的混合整数规划方法。另外,Leung等人^[3,32]分别对多机器人无等待、有限等待制造单元调度问题提出了混合整数规划模型。

2.3 分支定界算法

分支定界算法(branch-and-bound algorithm)大多用于有限等待自动化制造单元调度问题上。在有限等待自动化制造单元中,工件在工作站上完成加工后,必须在预先给定的时间内从工作站上搬走。因此从数学模型的角度看,这类调度问题具有紧约束,通常能够建立起能充分表示其变量之间的内在关系以及调度问题机理的分析性数学模型,适合应用分支定界算法。文献中应用分支定界算法解决自动化制造单元调度问题的基本思路是:首先建立所研究问题的数学模型,然后在对建立的模型进行有效分析的基础上,研究和开发最优解的一些解析性质,再根据这些解析性质和问题的具体结构设计有效的分支定界算法来求解问题。

Shapiro等人^[33]首次把基于枚举的算法用于有限等待简单制造单元调度问题的研究上;之后,在同一问题研究上,Lei

等人^[34]用一组简单代数不等式求出问题的可行解,再用一种基于分支定界的枚举算法从中找出最优解。Chen等人^[35]提出一种明确的分支定界算法,用基于图论的方法求解模型中线性规划问题,大大减低了计算机CPU对该问题的处理时间。Che等人^[36,37]进一步扩展了文献[35]的研究成果,解决了多机器人和复杂制造单元调度问题。Lei等人^[38]用一种分支定界算法搜寻到加工两种类型工件的有限等待混流制造单元调度问题的最优解,并证明了该混流制造单元比单流制造单元应具有更高的生产效率。此外,有关混流制造单元调度问题的研究还可见Mateo等人^[39]在加泰罗尼亚科技大学(Universitat Politècnica de Catalunya)的一份科技报告上。最近,Che等人^[40]用分支定界算法解决了无等待混流制造单元调度问题。特别值得注意的是,上述分支定界算法均通过各种不同的方式直接或间接枚举机器人搬运作业顺序以及工件投放顺序。

2.4 启发式算法

基于数学规划的精确算法尽管能保证获得最优解,但其计算时间随问题规模的增加以指数速度增加,一般只能解决较小规模的自动化制造单元调度问题。对大规模调度问题而言,启发式算法(heuristic algorithms)是一个很好的解决方法。Lei等人^[41]、周支立等人^[42-44]分别为各种类型的有限等待制造单元调度问题提出了特定的启发式算法。Gultekin等人^[45]为无限等待简单制造单元调度问题提出了一种实用的启发式算法。Sriskandarajah等人^[46]则研究了无限等待混流制造单元调度问题,提出了解决两个工作站调度问题的启发式算法,并将其扩展至 m 个工作站的情况。Henrik等人^[47]提出了一种启发式算法解决了有限等待混流制造单元调度问题。

调度规则作为一种最常见的启发式方法,由于简单、易于实现和计算复杂度低,常被用于自动化制造单元动态调度问题中。自动化制造单元的调度规则包括工件调度规则和机器人调度规则两类。工件调度规则主要是决定工件的投放时间(即工件进入制造单元开始加工时间),而机器人调度规则主要是有效地分配工件搬运作业以及确定其执行顺序。

研究者们根据自动化制造单元具体的特点,开发了各种工件调度规则。Song等人^[48]开发了一种称为最早进入时间(earliest start time,EST)的工件调度规则,其基本思想是按照先到先服务的原则来尽可能早地将工件投放到制造单元中。Chauvet等人^[49]改进了该规则,提出了正反向最早进入时间算法(forward-backward earliest start time,FBEST)。Yih等人^[50]则提出了一种结合最早进入时间和工件加工时间窗口的工件调度启发式规则。Thesen等人^[51]提出的工件调度启发式规则要求新工件的进入不会破坏所有工件在制造单元中各个工作站上的加工时间窗口。Sun等人^[52]进一步简化了该规则,他们的算法要求新工件的进入不会破坏工件在制造单元中第一个工作站上的加工时间窗口。Mak等人^[53]则进一步扩展了上述研究,开发了一种新的工件调度启发式规则,该规则保证新工件的进入不会破坏前一个工件在各个工作站上的加工时间窗口。

在机器人调度规则上,Thesen等人^[51]提出了四种机器人动态调度规则,分别为nearest robot first(NRF)、average tank assignment(ATA)、average robot assignment(ARA)和boundary shift by job location(BSJL)。这四种规则除NRF外,其余三种规则均限制机器人只能在其固定的活动范围内执行搬运作业。Sun等人^[52]则开发了一个仿真平台,对NRF、ARA、BSJL三种规则的性能进行了仿真。Mak等人^[53]为了进一步提高机器人

的使用效率,对 ATA、ARA 和 BSJL 三种调度规则进行了改进,增设了相邻机器人的重叠合作区域(overlapping zone),提出了 modified ATA(MATA)、modified ARA(MARA)和 modified BSJL(MBSJL)三种机器人调度规则。

2.5 元启发式算法

元启发式算法(meta-heuristic algorithms)包括遗传算法(genetic algorithm)、模拟退火算法(simulation annealing algorithm)、禁忌搜索算法(tabu search algorithm)、粒子群算法(particle swarm optimization)、蚁群算法(ant colony algorithm)等。近十年来,这些方法被逐渐引入到自动化制造单元调度问题研究中,并取得了一定的研究进展。

2.5.1 遗传算法

遗传算法的设计包括染色体编码、适应值函数计算、初始种群的生成、遗传算子的设计等,其中编码方法是遗传算法设计的关键。从已有文献看出,将遗传算法应用于自动化制造单元调度问题中主要有两种编码方法,即基于工件加工时间的编码方法和基于机器人搬运顺序的编码方法。例如,Lim^[54]、Soukhal 等人^[55]分别采用基于机器人搬运顺序编码方法的遗传算法来求解有限等待、无等待制造单元调度问题;李鹏等人^[56]则采用基于工件加工时间编码方法的遗传算法来求解有限等待制造单元调度问题,并利用混沌初始化技术来生成高效的初始种群,提高了遗传算法的收敛速度和优化质量,但对于大规模调度问题,可能会出现解搜索时间较长的情况。

2.5.2 模拟退火算法

杨广文等人^[57]提出了一种求解多机器人制造单元调度问题的模拟退火算法。他们用大量随机模拟的算例验证了该算法的有效性,并指出该算法在理论上能得到最优解。但在实际中,由于有限计算量条件下最优解的获得和收敛速度对收敛条件和退火时间有很强的依赖性,若要得到大规模的多机器人调度问题的最优解或满意解,如何控制退火过程至关重要。

2.5.3 禁忌搜索算法

赵振宏等人^[58]为无限等待混流制造单元调度问题提出了一种基于极大代数的建模方法,开发了基于禁忌搜索的启发式调度算法。该算法可以同时工件的加工顺序和机器人物料输送顺序进行优化,能够解决较大规模的调度问题,适用于更为复杂的制造单元系统,但通过禁忌搜索过程所得的解是近优解,与最优解尚有一定的偏差。周支立等人^[59]则为双机器人有限等待制造单元调度问题提出了一种基于线性规划模型和禁忌表的搜索算法。该算法的核心是用线性规划模型来求给定机器人分配和运送顺序下的最优解,应用禁忌表来避免相同线性规划问题的求解,量化示例表明了该算法的高效性。

2.5.4 粒子群算法

粒子群算法已被广泛应用于非线性连续优化、组合优化问题的求解中,但将粒子群算法应用于自动化制造单元调度问题的文献较少。Kamalabadi 等人^[60]为有三个工作站的混流制造单元调度问题建立了 S^6 策略假设下基于 Petri 网的数学模型,并提出了一种粒子群算法解决了该问题。但是该算法假设了连续两个工作站之间搬运时间和工件装卸载时间均为一个时间单位,并且只适用于有三个工作站的制造单元调度问题。

3 结束语

虽然自动化制造单元调度问题的研究已取得了一定的研究成果,但由于在这一领域的大部分问题都具有 NP 难特性,

至今尚未有非常高效的解决方法和理论。通过对自动化制造单元调度方法的综述,可以总结出自动化制造单元调度理论和方法的几个未来研究方向:

a)文献中研究的大部分自动化制造单元调度问题都是对于实际生产环境中复杂的、动态随机的调度问题的一种抽象和简化,因此大多数文献研究的都是较简单的调度问题,对于更符合实际应用的自动化制造单元调度问题的研究尚未见报道,如复杂混流制造单元的调度问题。毫无疑问,这些方面的研究将成为未来方向之一。

b)与精确算法相比,元启发式算法尽管相对简单、灵活,计算效率高,但不一定能保证所得解的可行性和全局最优性,甚至在多数情况下,无法分析所得解同最优解的近似程度。因此为了克服各种元启发式算法的缺点和发挥其各自的优势,将两种或两种以上启发式算法结合起来形成更加高效的混合智能启发式算法,将是自动化制造单元调度算法研究的重要方向之一。

c)目前大多数文献研究的都是静态调度问题。由于静态调度无法随着制造环境的变化动态地对调度方案进行调度,大部分有关静态调度问题的研究成果很难应用于动态环境下的自动化制造单元调度中。相对于静态调度而言,动态调度更加符合自动化制造单元的实际生产环境。寻找有效的动态调度算法以解决自动化制造单元动态调度的不确定性、动态性、复杂性难题是今后的研究方向。

参考文献:

- [1] KIM J H, LEE T E. Schedulability analysis of time-constrained cluster tools with bounded time variation by an extended Petri net [J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2008, 5(3):490-503.
- [2] WU Nai-qi, CHU Cheng-bin, CHU Feng, *et al.* A Petri net method for schedulability and scheduling problems in single-arm cluster tools with wafer residency time constraints [J]. *IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing*, 2008, 21(2):224-237.
- [3] LEUNG J, ZHANG Guo-qing. Optimal cyclic scheduling for printed-circuit-board production lines with multiple hoists and general processing sequences [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2003, 19(3):480-484.
- [4] CHE A-da, CHU Cheng-bin, CHU Feng. Multicyclic hoist scheduling with constant processing times [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2002, 18(1):69-80.
- [5] AGNETIS A. Scheduling no-wait robotic cells with two and three machines [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 123(2):303-314.
- [6] TANG Li-xin, XIE Xie, LIU Ji-yin. Scheduling of a single crane in batch annealing process [J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(10):2853-2865.
- [7] DAWANDE M, GEISMARH N, SETHI S, *et al.* Sequencing and scheduling in robotic cells: recent developments [J]. *Journal of Scheduling*, 2005, 8(5):387-426.
- [8] CHE A-da, CHU Cheng-bin. Multi-degree cyclic scheduling of two robots in a no-wait flowshop [J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2005, 2(2):173-183.
- [9] 王书锋, 邹益仁. 车间作业调度(JSSP)技术问题简明综述[J]. *系统工程理论与实践*, 2003, 23(1):49-55.
- [10] 徐俊刚, 戴国忠, 王宏安. 生产调度理论和方法研究综述[J]. *计算机研究与发展*, 2004, 41(2):257-267.
- [11] 潘春荣, 伍乃骥. 晶圆制造自动化组合设备的调度问题研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(3):522-528.
- [12] LEI L, WANG T. A proof: the cyclic hoist scheduling problem is NP-hard [R]. New Jersey: Rutgers University, 1989.
- [13] BRAUNER N, FINKE G, KUBIAK W. Complexity of one-cycle robotic flow shops [J]. *Journal of Scheduling*, 2003, 6(4):355-371.

- [14] LEVNER E, KATS V, LEVIT V E. An improved algorithm for cyclic scheduling in a robotic cell [J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 97(3): 500-508.
- [15] KARZANOV A V, LIVSHITS E M. Minimal quantity of operators for serving a homogeneous linear technological process [J]. *Automation and Remote Control*, 1978, 39(3): 162-169.
- [16] KATS V, LEVNER E. Minimizing the number of robots to meet a given cyclic schedule [J]. *Annals of Operations Research*, 1997, 69(1): 209-226.
- [17] LEUNG J, LEVNER E. An efficient algorithm for multi-hoist cyclic scheduling with fixed processing times [J]. *Operations Research Letters*, 2006, 34(4): 465-472.
- [18] LIU Ji-yin, JIANG Yun. An efficient optimal solution to the two-hoist no-wait cyclic scheduling problem [J]. *Operations Research*, 2005, 53(2): 313-327.
- [19] CHE A-da, CHU Cheng-bin. Optimal scheduling of material handling devices in a PCB production line: problem formulation and a polynomial algorithm [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2008, 2008: 1-21.
- [20] 车阿大, 王远. 无等待多机器人制造单元调度模型和算法研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(3): 525-534.
- [21] KATS V, LEVNER E. A strongly polynomial algorithm for no-wait cyclic robotic flowshop scheduling [J]. *Operations Research Letters*, 1997, 21(4): 171-179.
- [22] CHE A-da, CHU Cheng-bin. A polynomial algorithm for no-wait cyclic hoist scheduling in an extended electroplating line [J]. *Operations Research Letters*, 2005, 33(3): 274-284.
- [23] 车阿大, 晏鹏宇, 杨乃定. 复杂无等待自动化制造系统的调度算法研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(8): 1616-1623.
- [24] CHE A-da, CHU Cheng-bin, LEVNER E. A polynomial algorithm for 2-degree cyclic robot scheduling [J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 145(1): 31-44.
- [25] AGNETIS A, PACCIARELLI D. Part sequencing in three-machine no-wait robotic cells [J]. *Operations Research Letters*, 2000, 27(4): 185-192.
- [26] DAWANDE M, SRISKANDARAJAH C, SETHI S. On throughput maximization in constant travel-time robotic cells [J]. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2002, 4(4): 296-312.
- [27] GEISMAR N, DAWANDE M, SRISKANDARAJAH C. Robotic cells with parallel machines: throughput maximization in constant travel-time cells [J]. *Journal of Scheduling*, 2004, 7(5): 375-395.
- [28] GEISMAR N, SRISKANDARAJAH C, RAMANAN N. Increasing throughput for robotic cells with parallel machines and multiple robots [J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2004, 1(1): 84-89.
- [29] PHILLIPS L W, UNGER P S. Mathematical programming solution of a hoist scheduling program [J]. *AIIE Transactions*, 1976, 8(2): 219-225.
- [30] 周支立, 李怀祖. 一个改进的单抓钩周期性排序模型及其在自动化学处理线中的应用 [J]. *高技术通讯*, 2003, 13(9): 59-62.
- [31] LIU Ji-yin, JIANG Yun, ZHOU Zhi-li. Cyclic scheduling of a single hoist in extended electroplating lines: a comprehensive integer programming solution [J]. *IIE Transactions*, 2002, 34(10): 905-914.
- [32] LEUNG J, ZHANG Guo-qing, YANG Xiao-guang, *et al.* Optimal cyclic multi-hoist scheduling: a mixed integer programming approach [J]. *Operations Research*, 2004, 52(6): 965-976.
- [33] SHAPIRO G W, NUTTLE H W. Hoist scheduling for a PCB electroplating facility [J]. *IIE Transactions*, 1988, 20(2): 157-167.
- [34] LEI L, WANG T J. Determining optimal cyclic hoist schedules in a single-hoist electroplating line [J]. *IIE Transactions*, 1994, 26(2): 25-33.
- [35] CHEN Hao-xun, CHU Cheng-bin, PROTH J M. Cyclic scheduling of a hoist with time window constraints [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1998, 14(1): 144-152.
- [36] CHE A-da, CHU Cheng-bin. Single-track multi-hoist scheduling problem: a collision-free resolution based on a branch and bound approach [J]. *International Journal of Production Research*, 2004, 42(12): 2435-2456.
- [37] CHE A-da, CHU Cheng-bin. Cyclic hoist scheduling in large real-life electroplating lines [J]. *OR Spectrum*, 2007, 29(3): 445-470.
- [38] LEI Lei, LIU Qing. Optimal cyclic scheduling of a robotic processing line with two-product and time-window constraints [J]. *INFOR*, 2001, 39(2): 185-199.
- [39] MATEO D, MANUEL, COMPANGYS P, *et al.* New computational experiences on the hoist scheduling problem for cyclic manufacturing of different products [R]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.
- [40] CHE A-da, YAN Peng-yu, YANG Nai-ding, *et al.* Optimal cyclic scheduling of a hoist and multi-type parts with fixed processing times [J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(5): 1225-1243.
- [41] LEI Lei, ARMSTRONG R, GU Shan-hong. Minimizing the fleet size with dependent time window and single-track constraints [J]. *Operation Research Letters*, 1993, 14(2): 91-98.
- [42] 周支立, 李怀祖. 单抓钩动态排序的启发式算法 [J]. *系统工程理论方法应用*, 2002, 11(2): 136-140.
- [43] ZHOU Zhi-li, LIU Ji-yin. A heuristic algorithm for the two-hoist cyclic scheduling problem with overlapping hoist coverage ranges [J]. *IIE Transactions*, 2008, 40(8): 782-794.
- [44] ZHOU Zhi-li, LI Ling. A solution for cyclic scheduling of multi-hoists without overlapping [J]. *Annals of Operations Research*, 2009, 168(1): 5-21.
- [45] GULTEKIN H, AKTURK M S, KARASAN O E. Scheduling in robotic cells: process flexibility and cell layout [J]. *International Journal of Production Research*, 2008, 46(8): 2105-2121.
- [46] SRISKANDARAJAH C, DROBOUCHEVITCH I, SETHI S, *et al.* Scheduling multiple parts in a robotic cell served by a dual-gripper robot [J]. *Operations Research*, 2004, 52(1): 65-82.
- [47] HENRIK J, BIERWIRTH C, KOPFER H. A heuristic scheduling procedure for multi-item hoist production lines [J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 105(1): 54-69.
- [48] SONG Wen-wei, ZABINSKY Z B, STORCH R L. An algorithm for scheduling a chemical processing tank line [J]. *Production Planning & Control*, 1993, 4(4): 323-332.
- [49] CHAUVET F, LEVNER E, MEYZIN L K, *et al.* On-line scheduling in a surface treatment system [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 120(2): 382-392.
- [50] YIH Y. An algorithm for hoist scheduling problems [J]. *International Journal of Production Research*, 1994, 32(3): 501-516.
- [51] THESEN A, LEI Lei. An expert scheduling system for material handling hoists [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 1990, 9(3): 247-252.
- [52] SUN T C, LAI K K, LAM K, *et al.* A study of heuristics for bidirectional multi-hoist production scheduling systems [J]. *International Journal of Production Economics*, 1994, 33(1-3): 207-214.
- [53] MAK R T, GUPTA S M, LAM K. Modeling of material handling hoist operations in a PCB manufacturing facility [J]. *Journal of Electronics Manufacturing*, 2002, 11(1): 33-50.
- [54] LIM J M. A genetic algorithm for a single hoist scheduling in the printed-circuit-board electroplating line [J]. *Computer and Industrial Engineering*, 1997, 33(3-4): 789-792.
- [55] SOUKHAL A, MARTINEAU P. Resolution of a scheduling problem in a flowshop robotic cell [J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 161(1): 62-76.
- [56] 李鹏, 车阿大. 基于混沌遗传算法的自动化生产单元调度算法研究 [J]. *系统工程*, 2008, 26(11): 75-80.
- [57] 杨广文, 鞠大鹏, 郑纬民, 等. 利用模拟退火技术求解多 Hoist 调度问题 [J]. *软件学报*, 2001, 12(1): 11-17.
- [58] 赵振宏, 肖田元. 机器人制造单元的建模与任务调度策略 [J]. *计算机集成制造系统*, 2001, 7(4): 7-11.
- [59] 周支立, 汪应洛. 无重叠区的两抓钩周期性排序问题的一个搜索求解法 [J]. *系统工程*, 2007, 25(4): 104-109.
- [60] KAMALABADI I N, GHOLAMI S, MIRZAEI A H. Considering a cyclic multiple-part type three-machine robotic cell problem [C]// Proc of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2007: 704-708.