

第一章 引言

智能制造是推进中国制造强国战略的主攻方向,也是推动中国制造业创新发展的重大历史机遇的关键技术。“十四五”期间,我国将全面深入推进智能制造,实现中国制造业的数字化、网络化升级,重塑制造业的技术体系、生产模式、产业形态,并将引领制造业走向真正意义上的工业 4.0 道路。智能制造中的数字化、网络化和智能化是当前值得研究和总结的学术研究的前沿课题。

智能制造也是国内外制造业发展的大势所趋,先进的现代化信息手段,为国内外制造业提供了广袤的空间,引领着行业朝着更好的方向不断进步。国家《“十四五”智能制造发展规划》提出,要想推进智能制造发展,就必须发展适应智能制造的工艺产品加工技术。现阶段,我国正在加强先进工艺技术攻关的力度,推进行业数字化改造,推进工艺数字化、智能化,加大对制造技术创新的支持力度,进一步突破智能制造工艺的制约瓶颈。

随着社会的进步,人们对产品多元化和个性化的需求不断增加,这促使产品生产逐渐趋向多品种、小批量。针对复杂工艺产品,解决其一般综合调度问题可以提高制造效率约 30%,满足了发展装配制造业国情和振兴东北老工业基地省情的需要。

本书不仅是创新应用研究的成果,而且可以解决当下产品多样化需求和重要资源分布不均衡的问题。著作中的内容通过发挥智能制造的集群化优势,既可以促进综合调度和协同计算的研究,又可以更合理地优化组织生产,缩短生产周期,降低成本,提高生产效率。著作中相关调度方法的研究与实现,也符合当前国家大力发展装备制造业的国情,有重要的理论和社会意义,将会产生可观的经济效益。

综合调度是智能制造的组成部分,是实现中国制造 2025 的重要手段。本书的研究内容不仅扩展了制造调度解决的问题范围,而且推动了装备制造业的发展,在调度学术研究、国民经济发展和人才培养等方面将发挥积极的作用。

1.1 简介

产品制造的调度问题是影响制造业生产效率的重要因素,在企业设备、资源等条件固定的前提下,调度的效率直接决定了企业的生产效率。在大规模生产时代,调度的主要过程是“拆分→加工→装配”的生产过程:首先将产品拆分成若干可单独加工的工件,然后分别加工这些独立工件,最后将加工完毕的工件组装成为最终所需的产品。这种加工和装配彼此独立的生产方式较好地解决了调度领域中单一加工(或装配)的问题,如大批量相同产品的车间调度(Job-shop)和流水调度(Flow-shop)问题。

在人们物质生活水平不断提高,科技生产力迅速发展的条件下,人工智能技术、网络技

术、生产制造技术等相关技术的发展,促进了各个领域众多行业的消费和需求日益趋向个性化、多元化和定制化,所以原始的、传统的、批量的生产生活方式受到了前所未有的挑战。据《2020 中国消费人群调查报告》数据显示,个性化定制将成为常态^[1-2]。例如,“‘00 后’人群中 90.3% 的人对个性化定制消费感兴趣,大部分消费群体非常青睐产品的独特性。未来,随着计算机技术和企业智能生产的发展,个性化的定制生产规模将逐步扩大和普及。”

截至 2024 年 4 月,在中国知网上,以“个性化”作为“篇关摘”的检索词进行检索,共获得 33.41 万条相关记录;以“个性化”+“产品”为主题词进行检索,共检索到 2.78 万条文献记录,检索结果涵盖了企业经济、工业技术、计算机软件及计算机应用技术、工业通信、自动化技术、互联网技术、计算机硬件技术等多个领域;以“个性化”+“定制”为主题词进行检索,共检索到 1.5 万条文献记录,其中与工业和计算机相关的文献有 3183 条,位居检索结果的首位;以“个性化”+“产品”+“定制”为主题词进行检索,共检索到 7603 条文献记录,计算机软件和经济效益的文献占到了 59.94%。在这些检索中,每年产生文献成果数量呈现出递增趋势,可见,近年来,“个性化定制产品”已成为学术界的研究热点问题。

综上所述,未来在大规模批量生产的基础上,生产制造行业将以满足“个性化”“小批量”“复杂型”的产品需求为主要生产方式。

随着消费者日益追求个性化产品,企业订单模式呈现出了由大批量向多品种单件或者小批量的发展趋势,那么以往的大批量生产模式将严重影响企业的生产效率。随着订单模式的发展,产品的加工和装配也出现了新的问题,在生产加工多品种单件或者小批量产品时,如果某一工件加工完毕,就应该考虑工件的适时装配问题,也就是说,如果加工工序与装配工序可以同步进行,将有效提高产品的生产效率。为此,谢志强^[3]提出了继 Flow-shop 和 Job-shop 之后的第三类综合调度。第三类综合调度同步实现了产品的加工活动和装配活动,弥补了 Flow-shop 与 Job-shop 问题在处理少量产品订单时的缺陷,为单件小批订单的生产提供了切实可行的解决方案。

综合调度问题是制造系统的关键性环节,高效的调度系统既可以降低产品制造的各项成本,又可以提高企业的经济效益、社会效益等,受到了各界专家和学者们的一致关注。其主要研究内容是提高多品种、小批量具有树状复杂结构产品的生产效率问题。将此类复杂产品的加工活动与装配活动同步进行,弥补了单一加工或装配调度中因忽略调度过程中的约束和并行等问题而形成的影响生产制造的缺陷,提高了产品制造的效率,减少了产品制造的成本。

智能制造是制造业和信息技术深度融合的产物,而综合调度作为智能制造的重要组成部分,是实现 2035 中国制造智能升级的重要手段,其研究不仅扩展了生产调度解决的问题范围,而且推动了虚拟化集成制造、精密制造和下一代智能制造技术的发展,研究成果在调度研究、人才培养及国民经济发展等方面将发挥积极的作用。

1.2 研究方法与分析

产品制造的调度问题是影响制造业生产效率的重要因素,在企业设备、资源等条件固定的前提下,调度的效率直接决定了企业的生产效率。早期,专家学者们提出了“任务调

度和分配是分布式系统的一个重要研究课题,主要技术有:图论、数学建模方法、计算机程序设计方法和决策方法等。”^[4-9]。1967年,Conway等发表的 *Theory of Scheduling* 一文被视为调度理论研究的正式开始^[10]。20世纪70年代末至80年代初,调度问题在应用数学范畴中形成了经典理论,并逐渐过渡到实际应用领域,主要采用基于数学思维的规划方法、基于启发式的搜索方法、基于建模的系统仿真方法、基于智能技术的人工智能方法、企业计算方法和实时调度方法等。

随着调度相关研究的不断深入,沈亚菲等在1993年发表的《生产调度算法的研究》一文中首次提出了关于小批量、多品种生产的调度问题,采用的是人为控制调度区间的加班算法压缩加工工时^[11]。

在理论上,大部分调度问题被证明为 NP-hard(Non-deterministic Polynomial hard)问题。之后,人们开始致力于寻求解决调度问题的新方法,与此同时,调度理论也愈发完善。随着现代管理技术、计算机相关技术的发展,机械工程技术、控制技术、人工智能技术等的相互交叉和应用,为协同调度问题提供了新的思路。调度问题的主要研究方法分为经典理论法、系统仿真法和智能优化法三大类。

1.2.1 经典理论法

借鉴经典理论法解决调度问题的主要方法包括:基于数学基础知识的数学规划法、基于搜索和迭代理论的分支定界法以及基于转化思想的拉格朗日松弛法等。

1. 数学规划法

数学规划法是在19世纪初由美国哈佛大学的 Robert Dorfman 提出的,在涉及生产制造调度的领域内,多用于解决在一定的资源和条件限制下,将任务完成时间、任务完成成本、资源利用率等某个或某些目标最大化或最小化的问题。例如,Solis等提出了一种基于数学规划的两阶段迭代启发式算法,解决了多阶段装配产品利润最大化的批量规划与资源调度问题^[12];Assarzadegan等应用基于 Grey-Wolf 优化算法的组合元启发式算法,提出了加快生产调度的不同规划建模^[13];肖晶等针对批量调度问题,以具体行业为例,运用 MIP(Mixed Integer Programming)模型解决了产品和设备的赋能约束等问题^[14];刘士新等针对调度过程中存在的受限和约束问题,利用约束规划技术优化了生产质量和生产成本^[15];杜璞基于网络多源调度问题,利用多目标数学规划的方法,同步优化了调度任务的时间、成本和资源利用率^[16]。

2. 分支定界法

分支定界法具有很好的搜索和迭代功能,在有约束条件和资源限制的调度系统中,算法可以根据生产调度中的具体条件选择出不同的分支变量,或者建立不同的子问题分支,进而求得原问题的近似最优解^[17-20]。例如,梁建恒等以极小化最大完工时间和为目标函数,利用分支定界法建立了混合整数规划模型并进行最优求解,解决了带有释放时间的单机双代理调度问题^[21];Martin等以热太阳能发电厂为具体研究背景,利用分支定界法和

遗传算法,设计并实现了单任务、单机器、多机器等多种情况下的任务分配和调度问题^[22];Kolpakov等针对所有物品重量都相同的一类特殊背包问题,利用分支界定法设计求出了这类问题的最优策略^[23];Ren等针对流水车间中资源转移的问题,运用分支定界法和嵌入式算法优化了产品完工的时间成本^[24]。

3. 拉格朗日松弛法

拉格朗日松弛法的基本思想是“转化”,包括转化求解问题的约束条件和转化变量因子等,在求解最小化问题时,具有较好的优化性。算法的原理还是数学方法,通过线性结合求解问题的难易程度与优化目标时,降低了原问题的约束度,从而使原问题更容易得到更优解。例如,张炆等根据多组约束条件,利用改进的拉格朗日松弛法构建了协同机组同步调度的算法模型^[25];谢杏子等基于拉格朗日松弛法的启发式解决了单机订单接受与加工的调度优化决策问题^[26];周炳海等基于拉格朗日松弛法,将生产实际中的检修问题转化成与工件相关的子问题,在流水车间中优化了最小化加工时间的目标^[27];Sun等以炼钢产业的生产调度问题为研究背景,在加工时间不确定的条件下,采用拉格朗日松弛法解决了扰乱物流与时间的动态平衡和降低产品结构 with 生产能力的柔性匹配问题^[28]。

1.2.2 系统仿真法

系统仿真法的本质是采用一种计算技术,即以科学技术,尤其以计算机和其他设备作为使用工具,融合数学建模理论、逻辑思维、动力分析及评价体系等多方面的技术和方法,来求解难以直观建立物理或者客观模型的问题,多用于离散事件的量化或者定性分析。

在调度领域,系统仿真法是根据问题优化目标,建立符合调度系统中各个因素约束关系和可用资源的性能参数的仿真模型来进行试验,再根据试验结果分析判断调度算法的有效性和仿真过程的正确性。例如,赵男男提出了一种非定期任务并行调度方法,并在云计算平台中利用系统仿真方法验证了所提方法的有效性^[29];欧鑫等结合多功能系统工作模式,提出了一体化系统资源调度算法,通过 VC++(Microsoft Visual C++)实现自适应调度仿真软件验证了资源调度算法的有效性和仿真过程的正确性^[30];文笑雨等利用仿真技术和智能优化算法,针对车间调度中存在的不明确实时干扰的问题,提出了带有缓冲区的调度方案,并利用 Plant Simulation 软件通过实例验证了算法的有效性^[31];陆煜铤等构建了一种基于改进灰色关联的异构网络任务调度方法,并通过 MATLAB R2012a 软件验证了调度仿真的效果以及可行性^[32];熊禾根等针对柔性且动态 Job-shop 调度问题,以汽车生产行业为应用开发领域,利用 Java 语言设计了系统仿真模型,解决了工件的批量生产与交付问题^[33]。

值得注意的是,作为图形可重塑化的系统建模软件,Petri 网可以非常直接客观地描述离散、异步和并发等过程^[34-35]。Petri 网的建模仿真能够直观地描述系统结构、展现流程情况、模拟系统的运行。早在 1990 年,庞小红等就将 Petri 网的相关知识应用于常规调度算法中^[36-37]。在众多系统仿真方法中,Petri 网作为一种仿真软件,在求解制造系统的

调度问题中又得到了广泛的应用。例如,李大成等为了消除制造系统调度层和控制层之间的隔阂,实现对生产事件快速灵活的响应,利用平行 Petri 网提出了一种调度与控制一体化的方法^[38];王庆等以 Petri 网的理论为基础,设计并实现了以数控机床为主的制造调度模型^[39];高佳等针对含有并行机器组、可进行多品种小批量生产的航空发动机装配车间,采用分层有色赋时 Petri 网仿真技术,分析验证了三种调度规则的性能差异,并依据实验结果有效地改善了系统性能^[40]。

1.2.3 智能优化法

智能优化法是一种启发式优化算法,主要通过算法来解决具体问题,对各类复杂问题的优化具有很好的实践性,包括起源于生物学的遗传算法、启发式算法中的禁忌搜索算法、经典局部搜索的模拟退火算法、基于群智的蚁群算法、编码功能突出的粒子群算法、目标明确的捕食搜索算法和基于动力学系统的神经网络算法等。

1. 遗传算法

神奇的自然界有其自己的生存法则和发展规律,它能够在众多的自然基因中选择比较优良的部分进行遗传进化,从而培育出更具有竞争力、更加强大、更加适合生存的基因。遗传算法是一种基于达尔文的进化论,将生物学和遗传学的相关知识拓展到计算机学科,并进行交叉融合发展的多学科智能优化方法,目前在各个领域中都得到了非常广泛的应用和发展。遗传算法是根据生物界的进化过程与选择机制而提出的一种启发式搜索算法^[41-42],基本原理是自然界的生物进化理论,即将生物学中的遗传、变异、交叉、复制等自然现象运用到可数学化的实际问题中,通过适应度的不断更迭求出问题的最优解。遗传算法作为一种智能方法,在解决实际生产的调度问题时,会将染色体对应调度方案,综合考虑约束条件之后,再模拟自然选择、物竞天择、适者生存的规则,通过选择调度结果更好的染色体进行交叉和变异操作,产生调度结果更优的染色体种群,类比自然界中生物的繁衍过程,使得每一代染色体种群比前一代更接近于调度目标。

刘闯等通过内外双层的遗传算法,优化了分布式调度中涉及混合流水线生产中的订单分配和生产顺序的问题^[43];姚敏以柔性资源为研究对象,优化了柔性资源受限项目调度中最小化最大完工的时间问题^[44];王召阳等采用赋权遗传算法,针对大批量的生产调度问题,同步优化了调度排程和时间^[45];阳光灿等基于操作和决策,利用改进的遗传算法优化了柔性车间调度的时间成本问题^[46]。

2. 禁忌搜索算法

禁忌搜索(Tabu Search 或 Taboo Search, TS)算法是一种元启发式优化算法,最早由 Glover 提出^[47]。禁忌搜索算法通过模仿人类的记忆功能来实现搜索功能,已经在生产调度和优化组合等多个领域取得了迅速的发展。禁忌搜索算法中包含了邻域、禁忌表、禁忌长度等基本因素,其中,邻域规定了算法搜索的有效范围,禁忌表较好地解决了算法易在局部出现最优解的问题,禁忌长度能够较好地保证算法搜索结果的多样性。控制禁忌对

象对应当前最优解的迭代次数,从而达到全局优化的目的。

Ali 等以最小化总完工时间为目标,利用禁忌搜索算法针对分布式置换流水车间调度问题(DPFSP),提出了一种 MILP 配方^[48]; Gao 等基于优先级和设备驱动的方式,通过禁忌搜索和遗传算法,优化了综合调度的最小化最大加工时间^[49]; Vela 等以到期满意度的最大化为优化目标,将禁忌搜索与其他遗传算法相结合,解决了车间作业调度的问题^[50]; Lee 等将路径节点融入禁忌算法中,解决了局限范围内的多机器人任务调度问题^[51]。

3. 模拟退火算法

模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法是由 Steinbrunn 在 1953 年提出的^[52],但是直到 1983 年, Kirkpatrick 才成功将其应用在组合最优化问题的求解中^[53]。模拟退火算法是一种具有随机性的寻找更优解的算法,基于物理退火过程和数学概率性能,具有很好的全局最优性。在生产制造业的调度问题中,该算法首先设定一个搜索范围,再将搜索范围内的节点看作空气中的分子物质,从某一个设定的具有较高初温的节点开始,随着温度参数的不断下降,在解空间中随机搜索目标函数的最优解,从而能够有效避免陷入局部最小值,最终求得目标问题的近似最优解。

Huang 将模拟退火算法与物联网技术相结合,以突发重大公共时间为研究背景,建立了分布式仓储的最佳调度方案^[54]; 王喆等在模拟退火算法中结合调度任务的起止时间需求,针对不同调度任务周期提出了一种更加稳定的异构分布式调度模型^[55]; 景会成等基于改进的模拟退火算法和 PSO-GA 算法,以生产路线中的工序数量为研究对象,提高了柔性流水车间作业的时效^[56]; 黎阳等以改进模拟退火算法中的温度设置为研究角度,以置换流水车间调度问题为研究背景,优化了大规模任务调度的时间成本^[57]。

4. 蚁群算法

蚁群算法起源于 20 世纪 90 年代,是根据自然界中蚂蚁觅食行为发展起来的群智算法。算法中包含了搜索范围、环境信息、觅食规则、移动规则、避障规则和信息素等要素。蚂蚁在其活动范围内根据觅食路径上是否存在障碍、是否存在最佳路径等情况释放具有不同浓度特征的信息素,蚁群的数量越多,或者蚁群觅食的路径越短,信息的浓度则越高,那么信息素浓度最高的路径便是觅食过程的最短路径,即最优解;而蚁群走过的所有路径便构成了优化问题的所有解集。目前蚁群算法已经普遍应用于众多领域。

赵小惠等通过精英策略改进蚁群算法,提高了柔性车间在作业时的效率问题,有效地缩小了解的范围^[58]; Fatima 等在云计算的任务调度中,通过改进的多目标蚁群算法,同步实现了提高资源利用率和减少能耗的优化目标^[59]; 霍运通等以航空运输为应用场景,通过蚁群算法建立了机场落地终端优化模型,并通过仿真实验证明了模型的有效性^[60]。

5. 粒子群算法

粒子群算法是一种模仿鸟群觅食活动的群智算法,基于计算进化技术将鸟群搜寻食

物的范围对应优化问题的可行域,每只飞鸟对应一个独立主体,每个主体具有两个明显的特征:飞行的速度和飞行的方位。每个粒子在搜寻的过程中会通过改变飞行速度的快慢和飞行的方位来确定最优解,并与其他粒子通过共享信息和彼此协作等,完成搜寻最优解的过程。

Yu 等针对 Job Shop 调度问题,提出了一种基于非线性惯性权重和高斯变异的混合粒子群优化算法^[61]; Zheng 等利用粒子群算法,与数据驱动相结合,解决了装配作业车间的调度问题^[62]; 吕媛媛等提出了一种多目标粒子群算法,以最小化最大完工时间和最小化总拖延时间为优化目标,解决了混合多处理任务作业车间的调度问题^[63]。

6. 捕食搜索算法

捕食搜索(Predatory Search, PS)算法是由巴西学者 Alexandre Linhares 在 1998 年提出的一种用于解决组合优化问题的模拟动物捕食行为的空间搜索策略^[64-66]。该算法是基于仿生计算方法的群智算法,搜索过程主要分为三部分:首先,在一定范围内搜索较优解;其次,以此解为基准,在领域范围进行集中搜索,如果经过多次搜索仍然没有更优的解,则将搜索范围扩展到全域;最后,重复上述过程,直到发现近似最优解。

同样地,捕食搜索算法在优化组合领域也得到了较广泛的应用。例如, Jiang 等以航班总延误时间最小为优化目标,提出了一种改进的捕食搜索算法,解决了航班进场的调度问题^[67]; 王云等在网格调度任务中,采用分区结合精准搜索的策略改进捕食搜索算法,扩张了任务调度中求得更优解的范围^[68]。

7. 神经网络算法

神经网络算法是基于逻辑思维的基础,在 1943 年由心理学家 Warren McCulloch 和数理逻辑学家 Walter Pitts 提出来的。该算法将分布式信息经过符号化处理后,转换成可以同步并行的众多神经元,以完成网络系统所能实现的求解问题。神经网络算法是一个非线性动力学系统,主要研究方向可分为以下几个方面。

(1) 基础研究:这类研究是神经网络算法的原生研究领域,主要包括神经系统直接涉及的生理学、心理学等生物科学方面的研究,用以直观地求解具体问题。

(2) 数理研究:此类研究是在基础研究的基础上,模拟生物原型,建立基于神经元、神经网络的概念模型、知识模型和数学模型等。

(3) 应用研究:在基础研究和数理研究的基础上,进一步构建神经网络模型,通过计算机技术、网络技术和人工智能等技术,实现计算机仿真建模和模式识别的研究等。

段世豪基于遗传算法和神经网络深度学习的优点,提出了经过深度学习神经网络优化的遗传算法,解决了柔性作业车间的智能调度问题^[69]; Ismayilov 等设计了基于神经网络的云计算工作流动态调度多目标进化算法^[70]; Park 等针对车间作业的调度问题,提出了一种将图神经网络和强化学习相结合的智能调度框架^[71]; Ren 等利用神经网络解决了流水车间调度问题^[72]。

1.3 研究现状与分析

目前,调度问题主要分为车间调度、流水调度和综合调度三大类。车间调度和流水调度这两类调度方式主要适用于传统的生产大批量相同产品的调度,多采取先加工后装配的方式,通过加工流水线和装配流水线来高效率完成产品的生产制造^[73-74]。但是,对于生产批量较小甚至是单件的具有比较复杂结构的产品,例如生产加工具有严格约束要求的产品,如果仍采取加工和装配分别独立进行的传统制造方式,势必会割裂产品加工装配的并行处理和约束关系,从而影响复杂产品的制造效率。于是,有专家学者发现、提出并实现了针对多品种单件或小批量的具有约束关系的复杂产品“加工和装配同步处理”的第三类产品制造调度模式^[3],这也是继产品加工调度和产品装配调度之后的第三类产品制造调度模式。对综合调度问题研究现状阐述如下。

1. 综合调度研究目标

当前综合调度领域问题的研究目标主要有单目标和多目标两大类。

(1) 单目标综合调度问题。这类综合调度问题只有一个优化目标,例如最小化产品总加工用时。

(2) 多目标综合调度问题。这类综合调度问题存在着两个或两个以上优化目标,往往不追求某一个解为最优值,而是根据多目标的达成情况在中间平衡择优,例如,最小化产品总加工用时,满足产品交货期要求,减少生产成本等。

2. 综合调度研究角度

(1) 基于工序的综合调度问题。这类综合调度问题的研究切入点是工序,根据加工工艺树中与工序相关联的因素,如加工时间、对应加工设备、约束关系等确定工序加工的先后次序。

(2) 基于车间的综合调度问题。这类综合调度问题的研究切入点是车间,可以分为产品加工和装配活动只在1个车间中完成的单车间综合调度问题,加工和装配活动需在2个不同车间中完成的二车间综合调度问题以及产品加工和装配活动需在3个或更多车间中完成的多车间综合调度问题。

(3) 基于设备的综合调度问题。这类综合调度问题的研究切入点是设备,按设备资源类型可以分为以下三种。

① 单处理设备综合调度问题:单处理设备是指对于1台加工或装配设备来说,一次只能处理1道工序。这种设备在综合调度领域比较常见,在没有特殊说明的一般情况下,设备就是指单处理设备。

② 多批处理设备综合调度问题:多批处理设备是指对于1台加工或装配设备来说,能够同时处理2道及以上的工序。

③ 柔性综合调度问题:当前此类问题只对柔性设备进行研究。柔性设备是指1台加

工或装配设备可以加工或装配两种或更多种工序。某道工序可以在若干台不同设备上加工或装配。这样,在调度工序时会有多台设备可供选择。

3. 综合调度问题分类

关于综合调度优化问题的研究主要集中在以下三类。

(1) 一般综合调度研究(单产品综合调度)。在这类综合调度问题中,复杂产品基本只具有两种结构:一是以叶节点工序为主的独立工序;二是工序紧前紧后约束关系只具有纵向唯一性,然后通过算法的分析和设计,找到并实现更优解。例如,通过虚拟加工树,动态调整工序优先级,建立工序调度集的调度算法^[75];通过分解加工树,分类、分法、分设备进行紧凑调度的算法^[76];多设备紧凑的复杂产品调度优化算法^[77];考虑工序不同加工时间的动态实质路径的调度算法^[78];以及基于事件驱动原理、从设备找工序角度弥补加工空闲的调度算法^[79]等。

(2) 特殊产品综合调度。在特殊产品综合调度研究中,根据工序的紧密衔接程度又分为工序非紧密衔接调度研究和工序紧密衔接调度研究。

在传统的生产调度中,无论是连续型加工还是离散型加工,在工件的加工和工件的装配等过程中,都存在如下特点:在生产形态方面,产品的结构和工件配套关系相对固定,虽然包括多个工件,但是工件之间的约束关系并不强,产品工艺只有顺序约束和等待约束,即工件和工件之间除了顺序串行外,还存在加工的延时,只有在前面工件加工完成的一段时间以后,排在后面的工件才能开始加工;在产品种类方面,呈现出品种多类性和系列性;在生产过程方面,呈现出多样性和不确定性,或者独立加工,或者并联加工,或者串联加工,或者组合加工,此时生产加工活动受工件之间的工艺约束影响较小,同样工件之间的约束关系仍然不是很强。在综合调度中将具有前述约束关系较弱的调度问题视为非紧密衔接工序调度问题,代表性成果有:文献[80]基于工序约束关系和启发式算法建立的动态 Job-shop 调度问题的组合式调度规则,文献[81]通过将非紧密约束关系工序转换为紧密约束工序,对转换后的三种不同关系工序分别采用不同的调度方案,再结合关键设备最终完成车间调度问题^[82]等;关于工序紧密衔接综合调度的代表性成果有:文献[83]通过虚拟化无等待约束工序的方法,分别对虚拟化后形成的标准工序、扩展工序等顺序工序采用不同的调度方法,解决了无等待约束这类产品的调度问题;文献[84]设计了将具有紧密衔接关系工序组与其前序工序及其余工序一起联动的算法等。

(3) 特殊设备综合调度。在综合调度中将特殊设备又分为相同设备、柔性设备和瓶颈设备三类。

对于具有相同设备的单产品,综合调度首先根据复杂产品的树形特征,确定具有加工优势的关键路径等,据此将工艺树分解为若干段,然后根据段内工序和相同设备之间的特殊性,对段内工序采用相应的算法或制定相应的调度规则完成综合调度的优化目标。

在设备具有相同性的前提下,将前述单产品综合调度拓展到多产品综合调度时,可先采用虚拟化的方法构建更加复杂的产品,然后将单产品相关的调度方法拓展到虚拟化后建立的工艺树,完成多产品的优化目标。

对于具有相同设备的动态综合调度,调度的解决方法是在虚拟化的基础上辅以动

态化的手段。根据复杂产品调度过程中工序分别处在正在加工、动态到达和剩余等待的不同状态,将加工树构造成虚拟树,并对其采用相应的动态调度算法,完成优化目标。

柔性设备是指 1 台加工或装配设备可以加工或装配两种或更多种工序。某道工序可以在若干台不同设备上加工或装配。这样,柔性调度工序时便有多台设备可供选择,这是更难求解的 NP-hard 问题。针对文献[3]中提出的工序之间存在约束关系的复杂产品柔性综合调度问题,文献[85]围绕树形复杂产品的柔性调度问题,分别从复杂单产品、复杂多产品和动态复杂多产品三个角度提出了不同的算法。针对第一类复杂单产品柔性综合调度问题提出了基于分布式思想的调度算法,在短用时原则和设备均衡方法的基础上,以优化工序的分配和调度为出发点,将柔性调度问题转换为一般综合调度问题;针对第二类复杂多产品柔性调度问题,采取了虚拟化方式将多产品调度问题回归到单产品的问题进行求解;针对第三类动态复杂多产品柔性调度问题,将剩余的部分复杂产品与动态到达的复杂产品采用虚拟化的方法,建立一种结构更加复杂的树形产品,最终也是通过单产品的调度方法进行求解。文献[86]在柔性综合调度问题中,基于网络设备协作,针对树形工艺约束的复杂结构和柔性加工设备的不确定性,运用动态扰动步长和迁移时间因子改进了人工蜂群算法,有效地减少了生产调度的时间成本。

所谓瓶颈设备,无论是在生产制造行业还是学术界,都还没有统一且明确的严格定义。但是瓶颈设备往往与设备的生产能力、加工效率和加工工序数量相关,通常情况下将调度系统中资源受限或者加工数量最多的设备看作瓶颈设备。针对瓶颈设备的调度问题,文献[87]将并行加工时间最长的设备定义为瓶颈设备,综合运用重叠投影、虚拟根节点、剩余工序优先和拟关键路径方法,以减少综合调度加工时间为目标,提出了静态并行时间确定可增加瓶颈设备的算法。

(4) 二车间综合调度问题。关于二车间的调度问题,谢志强等展开了广泛的研究,并取得了较好的成果,主要分为资源完全对称型和非对称型两种^[88-92]。在资源完全对称型的二车间综合调度算法中,文献[88]以减少工序在两个车间之间的迁移和产品的完成时间为优化目标,以可调度的工序为研究对象,基于均衡策略提出了可调度工序均衡处理的算法。文献[89]基于纵向优化思想,提出了拟关键路径的二车间调度算法,首先使用拟关键路径法确定排序策略,其次根据工序入度是否小于 2 以及车间完工时间相近的策略确定分配方案,同样完成了工序在车间之间的迁移更少和产品的完成时间更短的优化目标。文献[90]基于邻域渲染策略和关键设备均衡策略建立了车间分配方案,基于动态关键路径和短用时策略建立了车间的调度方案,优化了对称型二车间调度效果。文献[91]基于择时的思想首先将复杂产品工艺树分解为多组工序序列,然后以工序组路由大到小的策略确定调度方案,最后根据当前部分产品加工用时最小的原则确定分配方案,进一步优化了对称型二车间调度效果;在非对称型二车间综合调度中,文献[92]基于动态关键路径策略和迁移工序结束时间最小策略,设计了非对称型二车间综合调度算法,实现了减少产品完工时间和迁移时间的优化目标。

综上所述,综合调度自提出以来,无论是在算法的持续改进方面,还是在特定问题的应用方面,都取得了丰硕的成果。从最初的拟关键路径算法和最佳适应调度算法逐步发