

航空复材生产车间的智能服务化排产调度研究

金航数码科技有限责任公司 孙棋棋

中国航空工业集团公司基础技术研究院 丁谋

复合材料相比传统金属材料来说,具有轻质量、高强度、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性强以及成本低等特点,不仅在航空产品上的应用比例越来越高,而且正在迅速扩展到国民经济的其他领域。随着复合材料的广泛应用和对复合材料需求量的快速提升,对复合材料零部件的生产提出更高的要求,需要更高效的生产、更优良的质量及更低廉的成本。复材生产管理的特点如下。

(1) 由于制造过程多以传统手工为主,在车间级的生产管理多是以人工管理,纸质文件传递,口头信息交互,尽管多数企业已经实施 ERP 等企业管理系统,但是就底层而言,其管理信息化水平偏低。

(2) 复材产品属于高成本高科技产品,受市场需求的限制,产品型号变化大,数量较少。

(3) 绝大部分复合材料零部件的生产需要专用工装,生产对工装依赖性较强。对手工生产来说,从下料到铺叠、固化,都离不开工装。

(4) 受瓶颈资源约束明显,生产计划的制定和作业过程的调度都要以这些瓶颈资源为中心。如大型热压罐是高精度设备,技术含量较高,大多需要进口,价格极高,因而数量不多,属于瓶颈资源。

(5) 由于复材的特殊性,所需的生产材料和辅料通常有保管期,例如胶液等,出库入库时间、次数及剩余可用时间等都有限制。

航空复材生产过程中手工生产、多品种小批量、瓶颈资源显著等特点,对于车间计划管理,尤其是现场的作业计划管理来说是巨大的挑战。本项目以中国航空工业集团公司基础技术研究院复材中心(以下简称“复材中心”)的零部件车间作为对象,针对航空复材生产车间排产调度困难的问题,研究智能服务排产调度技术,开展排产调度服务化架构研究、车间技术要素分析和排产调度算法库构建工作,提高设备利用率和生产效率,从而降低生产成本、减少能源消耗。

一、航空复材生产车间排产调度服务化架构

传统的中央式排产调度系统(如图1所示)是一种缺少生产适应性的刚性系统,很难适应组织分散、决策分散的分布式多品种管理的要求。

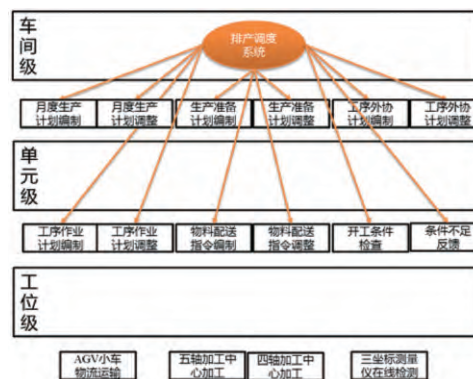


图1 传统的、中央控制式排产与调度

多品种、变批量的生产模式是当前航空企业面对的主要问题之一。多品种、变批量的排产与调度具有不同于传统集中式调度的特征：（1）并行性，各类产品生产之间的消息传输、协调中的决策过程、局部计划和调度以及设计与制造过程都是并行的；（2）分布性，各类产品生产在地理上、信息上都是分布的；（3）协同性，各产品的生产参与者之间必须部分信息共享，存在信息交互的行为。因此，在交叉并行的多品种、变批量生产管理中，必须强调协同性与适应性，通过服务化架构解决该类排产与调度问题。

赛博物理生产系统(CPPS)呈现出“系统之系统(SoS)”架构：在整线级、区域级和站位级，都要实现感知、判断和决策流程的自动化，这都需要一个类似大脑的控制中枢。各级控制中枢的分工不同，需要提供层级化的智能排产和调度服务。基于 CPPS 的分层设计思路，提出了排产与调度的服务化架构（如图 2 所示），用服务驱动 CPPS 各层技术元素的通讯、计算和控制，实现生产系统智能化的提升，该架构具有敏捷、灵活与实时的特点，一方面可以实现代理 Agent 分布式自主决策，另一方面各个代理 Agent 之间可以协同工作。但是纯扁平化的服务化架构只能保证局部优化，难以达到整体最优。因此，本项目的排产与调度服务化架构分为三层，即车间级、单元级 / 生产线和工位级。根据计划层级不同，响应时间的要求也不同，比如生产规划（对应车间级）的响应时间超过 8 小时，作业计划（对应单元级）的响应时间要在 8 小时之内，而响应式调度（对应工位级）对时效性要求更高，需要在 3 分钟内进行响应。每一层级包含各类业务代理 Agent，提供相关业务服务，可以被业务活动所调用；此外，还包含一个总代理 Agent，进行各层级之间的沟通与协同。

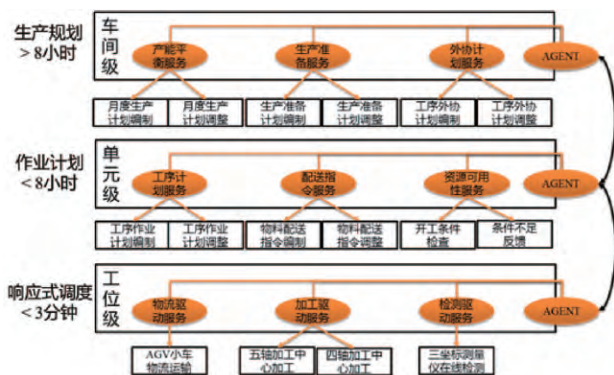


图2 排产与调度的服务化架构

以物料的准时配送为例，在车间级，通过生产准备服务调用，完成生产准备计划编制，其中包含物料配送计划，即何时完成物料配送；在单元级，通过配送指令服务调用，完成物料配送指令编制，即何时进行何种物料配套，何时配送物料到何地，由何人配送，通过何种设备配送。最后，在工位级，通过物流驱动服务调用，由 AGV 小车自动完成物料配送。至此，物料准时配送过程完成。当生产过程中遇到异常情况，如任务插单、设备故障和质量事故等，通过各层级代理 Agent 的沟通与协同，分析异常情况对物料配送的影响，通过生产准备服务、配送指令服务调用，完成生产准备计划调整和物料配送指令调整，并通过物流驱动服务调用，由 AGV 小车执行调整后的配送指令。

二、航空复材生产车间排产调度要素分析

进行质量异常影响因素分析时，经常使用 5M1E 分析法，如图 3 所示，5M 即是人员 (Man)、机器 (Machine)、物料 (Material)、方法 (Method)、测量 (Measurement)，1E 即是环境 (Environment)。

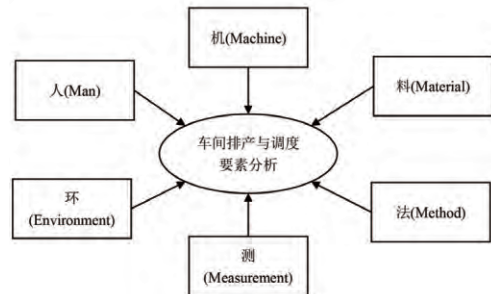


图3 5M1E 分析法

在这里，本项目借用 5M1E 分析法对车间要素进行分析，与传统排产调度主要考虑设备因素不同，智能排产调度在考虑车间要素时一方面更加全面，除设备外，还要考虑物料、人员和工装工具等因素；另一方面更加精细，比如设备细分为加工设备、检测设备以及物流设备等，又如物料细分为原材料、在制品与成品等。具体的分析内容如表 1 所示。

三、航空复材生产车间排产调度算法库构建

在已有的理论研究和企业应用基础上，总结了六类常用排产算法，包括基于规则的排产算法、约束理论、模拟退火算法、禁忌搜索算法和遗传算法。通过分析各类算法的优

表 1 传统排产调度与智能排产调度考虑车间要素对比

要素	类别	传统排产调度	智能排产调度
人	单元长	不涉及	出勤信息、操作资质、派工到个人、异常问题处理
	操作工	不涉及	出勤信息、操作资质、派工到个人
机	加工设备	设备日历、设备标准工时	设备日历、设备标准工时、开关机状态、NC 程序运行状态、设备故障报警、设备潜在风险预警
	运输设备	不涉及	运输耗时、运输设备定位、运输路径优化、运输设备故障报警
	检测设备	不涉及	检测耗时、检测设备任务安排、检测设备故障报警
	原材料	不涉及	原材料库存数量、采购在途、库位信息
料	在制品	在制品数量	在制品数量、所在工序、计划交付时间、预计交付时间
	成品	不涉及	成品库存数量、库位信息
	工装工具	不涉及	库存数量、库位信息
法	工艺信息	不涉及	标准工艺包，包含完整工艺路线、工装清单、数控刀具清单、材料卡、检验计划、NC 程序等
测	测量方法	不涉及	在线检测，实时读取检测数据并储存，可以实现在线检测数据分析与
环	与硬件设备集成	没有	与硬件设备高度集成，实现基于物联网的智能排产调度
	与信息系统集成	没有或部分集成	与其它信息系统高度集成，实现数据与信息的共享

缺点以及应用场景，构建航空复杂制造环境的排产与调度的算法库，便于在不同的生产环境中选用合适的算法，以提升排产效率并获得最优排产方案。接下来对各种排产算法进行说明。

(1) 基于规则的排产算法。基于规则的排产算法即是运用已有规则对工序任务进行排序，排序靠前的工序任务优先安排资源（包括原材料、设备、工装等），后续工序任务则依次分配未被占用的资源，直到所有工序任务排完。该算法中常用的规则如表 2 所示。

基于规则的排产算法实现较简单，思想易于理解，而且无须搜索、枚举等。但不足的是，通过该算法获得的是可行解，而不是最优解。该算法适用于车间初步应用排产系统时，其原理简单，且能积累重要的基础数据。

(2) 约束理论。约束理论（Theory of Constraint，TOC）是 以色列物理学家、企业管理顾问戈德拉特博

表 2 常用的排产规则

序号	规则代码	规则说明	规则目标
1	FCFS	优先选择最早进入可排工序集合的工件，即先到先加工	来自排队论，对工件较公平。
2	SPT	优先选择加工时间最短的工件	使工件的平均流程时间最短，从而减少在制品量。
3	EDD	优先选择完工期限最紧的工件	使工件延误时间最小
4	MWKR	优先选择余下加工工时最长的工件	使不同工作量的工件完工时间尽量接近。
5	LWKR	优先选择余下加工工时最短的工件	使工作量小的工件尽快完成。
6	MOPNR	优先选择余下加工工序最多的工件	使不同工作量的工件完工时间尽量接近，侧重考虑工件在不同机器上的流转等待时间
7	SCR	优先选择临界比最小的工件 临界比 = 工件允许停留时间 / 工件余下加工时间	使工件延误最少
8	PQ	优先选择优先级高的工件	使人为设置的优先级高的工序先完工
9	RDM	随机挑选	

士在他开创的优化生产技术（Optimized Production Technology，OPT）基础上发展起来的管理方法，可以帮助企业识别出在实现目标的过程中存在着哪些制约因素，并进一步指出如何实施消除这些约束，从而更有效地实现企业目标。在制造系统中应用约束理论制定生产计划，其所涉及到的关键技术和步骤包含以下三个方面：①瓶颈资源识别。对于制造系统，瓶颈资源就是指那些生产任务量大于其生产能力的设备 / 制造单元。②瓶颈资源排产。为保证瓶颈资源的充分利用，需按照生产订单的重要、紧急程度对瓶颈资源上的生产任务按照一定规则、合理的批量进行排序。③推拉结合排产。选取合适的批量，瓶颈资源之前的工序按照“拉动”方式进行，瓶颈资源之后的工序按照“推动”方式进行，完成计划期内所有任务的排产。

约束理论考虑到现实中的各种约束，更贴近实际应用，易于理解；当约束较少时可得到较好结果，即存在较少可行解，可直接得到最优解。该算法的不足之处在于约束形式的多样性要求优化规则库的规模较大；当约束较松弛时无法获得较小子问题，需要结合其他优化算法解决；功能限于缩小原始问题，无法保证得到最优解。该算法适用偏宏观排产，

建议在生产过程中瓶颈资源种类较少且明确时选用。

(3) 模拟退火算法。模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA) 是基于热力学原理建立的一种随机搜索算法, 顾名思义模拟退火算法的基本思想源于热力学固体物质退火过程与组合优化问题的相似性, 由一较高初始温度开始, 利用具有概率突跳特性的 Metropolis 抽样策略在解空间中进行随机搜索, 伴随温度的不断下降重复抽样过程, 最终得到问题的全局最优解。

这种算法由于能针对具有 NP 复杂性的问题提供有效地近似求解算法, 并且克服了优化过程中会陷入局部极小和对初值依赖性的问题, 在工程中得到了广泛的应用, 而且模拟退火算法的实验性能具有质量高、初值鲁棒性强、通用易实现的优点。但由于 SA 算法通常要求足够多的抽样, 因而优化的过程较长, 这也是 SA 算法最大的缺点, 同时 SA 算法全局收敛时间性能差等缺陷。该算法适用于产品的品种较少、批量较大的生产车间。

(4) 禁忌搜索算法。禁忌搜索算法 (Tabu Search, TS) 是在传统的局部搜索算法基础上引入禁忌技术而产生的一种基于邻域的寻优方法。由于传统的局部搜索算法只能沿目标函数值下降的方式进行搜索, 所以对于较复杂的优化问题容易陷入局部最优解而无法得到全局最优解。禁忌搜索算法通过建立一个可记录 L 个禁忌对象的禁忌表 T (禁忌表长度设为 T), 表中的禁忌对象为已搜索过的局部最优解或可能的局部最优解, 在搜索算法迭代的过程中通过避开禁忌表中的禁忌对象, 从而可以获取更广泛的解空间, 使算法不易陷入局部极值点, 进而提高算法的搜索性能。

禁忌搜索算法相比于其他传统搜索算法由于在搜索过程中可以接受劣质解, 因此具有较强的“爬山”能力; 同时因其不是沿目标函数值方向进行搜索, 故获取最优解的几率更大, 所以禁忌搜索算法是一种局部搜索能力很强的全局迭代寻优算法。但是禁忌搜索也有明显的不足, 即对初始解的依赖性较强, 好的初始解有助于搜索很快的达到最优解, 而较差的初始解往往会使搜索很难或不能够达到最优解; 而且迭代搜索过程是串行的, 仅是单一状态的移动, 而非并行搜索, 这使得搜索地效率不够高。该算法适用范围较大, 但处理速率较慢, 建议对调度响应时间不敏感的生产车间选用。

(5) 遗传算法。遗传算法就是一类模拟生物在自然界的遗传和进化过程的随机搜索算法, 它的基本思想是: 按照

达尔文 (Darwin) 的自然选择原理, 个体在其生殖繁衍的过程中会不断的得到进化, 在进化的过程中每个个体对于自然选择要求的适应程度是不同的, 根据适者生存的道理, 适应度低的个体将会被淘汰, 而适应度高的个体则会继续进行进化繁衍, 直到得出适应度最高的个体。遗传算法主要由染色体编码、种群的初始化、染色体的交叉及变异、优质染色体的选择等操作来完成。

遗传算法对问题领域本身的限制较少, 具有很强的通用搜索能力; 搜索从群体出发, 具有潜在的并行性, 可以进行多个个体的同时比较; 搜索使用评价函数启发, 过程简单且适用性强; 使用概率机制进行迭代, 具有随机性; 可扩展性强, 容易与其他算法进行有效的结合。但是遗传算法也有其局限性, 一是群体规模要求高, 重复分析次数过多, 导致搜索速度较慢; 二是该算法对初始种群的选择有一定的依赖性, 同时有些参数的选择过于依靠经验; 三是局部搜索能力不足, 易出现早熟收敛和随机漫游等现象。该算法适用范围较大, 适用于工艺较为复杂、涉及资源较多的生产车间, 可与其它方法组合使用。

(6) 算法库的构建, 建立算法与典型运行场景的映射机制。通过以上对各类算法的研究与分析, 包括各类算法的优缺点以及应用场景, 构建航空复杂制造环境的排产与调度的算法库, 建立排产算法与复杂制造环境之间映射关系, 便于在不同的复杂生产环境中选用合适的排产算法, 以提升排产效率并获得最优排产方案。

四、研究意义

针对航空复材生产车间排产调度困难的问题, 突破服务化架构技术, 以航空复材中心零部件车间为应用对象, 开展排产调度服务化架构研究、车间技术要素分析工作, 具有如下的重要意义。

(1) 实现复材生产车间排产调度的服务化应用。传统的、中央式排产调度系统是一种缺少生产适应性的刚性系统, 很难适应组织分散、决策分散的分布式多品种管理的要求。多品种、变批量的排产与调度具有不同于传统集中式调度, 需要建立分布式服务化架构, 一方面可以实现代理 Agent 分布式自主决策, 另一方面各个代理 Agent 之间可以协同工作, 从而提升排产与调度的服务效率。

(2) 实现复材生产车间排产调度要素的多元化分析。

特殊风力机叶片实体建模方法研究

四川城市职业学院 周梅

风力机叶片的制造过程中，无论是叶片模具型腔的设计加工，还是复合材料叶片的铺层设计，都需要使用叶片的三维实体或曲面模型。因此，将叶片曲面方程转化为相应的三维实体或曲面模型，是叶片从设计变成产品必不可少的一环。本文以某风力发电机叶片方程为例，研究了特殊风力发电机叶片实体建模的实现方法。实际建模效果证明，本文提供的方法能够快速精确地建立叶片模型，为后续制造环节提供强有力的支撑。

一、叶片实体建模思路

通常的叶片设计方法，采用离散方法进行，即选取几个截面，计算这些截面的最佳截面形状，然后将这些截面光滑的连接起来，得到叶片的模型。这种方法的优点是计算量小，但缺点是使用较少的截面，无法对叶片形状进行精确的描述，常导致设计出的叶片工作性能不佳。

本文采用解析法进行叶片设计，可以避免这一问题，即通过解析计算，直接得到叶片的曲面方程，然后通过曲面方程获得叶片模型。解析法的优点是能够精确描述叶片的曲面，只要建模精度足够，获得的叶片工作性能与理论设计结果一致。缺点是叶片的方程较为复杂，通过方程直接建立叶片曲面模型，技术上比较复杂。

根据业务需求，对智能服务化排产与调度的要素进行详细分析，依据制造系统的分层架构，逐层分析和判断各要素对制造系统的影响，有选择的保留对制造系统有重要影响的要素，忽略影响较小的要素。明确智能服务化排产与调度的要素，通过物联网将车间各要素进行关联，包括设备、物料、工装工具、人员等，实现各要素状态可感知、数据可采集以及过程可监控。

二、三维建模实现方法

本文通过一个实际案例，重点讨论根据叶片曲面方程建立叶片精确实体模型的技术路线，以及在此过程中可能需要注意的问题。本文拟定的技术路线为：通过 SolidWorks 二次开发，计算得到叶片任意截面上的型线，并自动插入 SolidWorks 建模环境；然后通过放样、拼接等操作，生成完整叶片模型。

1. 插入截面曲线

(1) 曲面方程及其讨论。定义叶片坐标系如图 1 所示： y 轴为翼型弦线方向（由前缘指向后缘为正）， z 轴与远方风速方向相同， x 轴与 Oyz 平面垂直（由叶根指向叶尖方向为正）。

(3) 通过排产调度算法库构建，实现智能服务化排产调度向同行业推广。在已有的理论研究和企业应用基础上，总结了六类常用排产算法，包括基于规则的排产算法、约束理论、模拟退火算法、禁忌搜索算法和遗传算法。通过分析各类算法的优缺点以及应用场景，构建航空复材生产车间排产调度算法库，便于在不同的生产环境中选用合适的算法，以提升排产效率并获得最优排产方案。