

MIANXIANG

CHENGTAODINGDANDESHENG

CHANZUOYEDIAODU

面向成套订单的
生产作业调度

周水银 © 著

MIANXIANGCHENGTAODINGDANDE
SHENGCHANZUOYEDIAODU

中国物资出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

面向成套订单的生产作业调度/周水银著. —北京: 中国物资出版社, 2010. 1
ISBN 978 - 7 - 5047 - 2952 - 1

I. 面… II. 周… III. 企业管理: 生产管理 IV. F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 159802 号

策划编辑 王宏琴

责任编辑 王宏琴

责任印制 何崇杭

责任校对 孙会香 杨小静

中国物资出版社出版发行

网址: <http://www.clph.cn>

社址: 北京市西城区月坛北街 25 号

电话: (010) 68589540 邮政编码: 100834

全国新华书店经销

中国农业出版社印刷厂印刷

开本: 710mm×1000mm 1/16 印张: 16 字数: 296 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978 - 7 - 5047 - 2952 - 1/F · 1155

定价: 28.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

内容提要

成套订单是指订单中的零部件，虽然具有不同的完工期限和数量，可以分期分批交货，但这些零部件都是配套使用的。在现代企业转向定制生产方式的情况下，成套订单问题具有广泛的实际背景。

本书在作者多年研究的基础上，系统地介绍了面向成套订单的生产作业调度的最新研究成果。全书共分为七章，第一章从现实生产背景出发提出了成套订单问题，并分析了成套订单研究的重要性，简单介绍了一般作业调度的方法，综述了现代调度的研究文献；第二章介绍了一般作业调度的启发式方法，是后面章节研究的基础；第三章至第六章分别针对单机生产环境、并行机生产环境、流水车间生产环境、作业车间生产环境，介绍了成套订单的调度处理方法；第七章研究了调度与工序集成、紧急订单的插单两个问题，这也是企业普遍存在的现实问题。

本书适合于高等院校工商管理专业、管理科学与工程专业高年级本科生、研究生阅读，可以作为教学与研究参考书，也可以作为实际生产管理人员的参考书。

本书来源于国家自然科学基金课题（70572032）的相关研究，得到国家自然科学基金的赞助。

序

为抢占市场、赢得顾客，现代企业必须从以产品为中心的运作转向以顾客为中心的运作，必须从备货型生产转向订货型生产。这种转向，意味着以成本、质量为核心的竞争转变为以时间、服务为核心的竞争。新的竞争模式需要新的运作管理的理论与方法。传统的运作计划是备货型的，是建立在以成本和质量为目标的基础之上的；而新的竞争模式则是以顾客为中心，成本和质量虽然重要，但响应速度、全面满足才是赢得顾客订单的根本。

《面向成套订单的生产作业调度》就是一本研究如何高速、全面满足顾客订单的生产调度理论和方法的书。本书针对成套订单的生产调度问题，从传统排序理论入手，由浅入深、由易到难，系统地阐述了在不同生产环境下（包括单机、并行机、流水车间、作业车间）的成套订单调度的方法，应用了一些构造启发式和搜索启发式算法，并采取模拟的方法，对这些算法进行了验证。本书是作者这几年在运作管理方面所作探索的成果积累。

本书体现出作者所具备的生产运作方面的探索精神。在我负责的一项国家自然科学基金重点项目《基于时间竞争的新理论与新方法研究》中，周水银参加了几家汽车总装厂的调研工作，在调研中发现了由于订单的不成套经常导致总装线停线的情况，因而提出了成套订单的调度问题，据此获得了国家自然科学基金项目的资助。

管理的理论和方法来自于生产实际，其目的也是服务于生产实际。我相信，本书的出版将在推动生产管理的理论与实际相结合的进程中起到积极作用。

陈荣秋

2009年9月于华中科技大学

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 成套订单及其重要性	(1)
第二节 一般生产作业计划问题	(4)
第三节 生产调度问题的求解方法	(10)
第二章 作业调度启发式算法	(16)
第一节 单机调度	(16)
第二节 流水车间问题	(19)
第三节 作业车间问题	(27)
第三章 单机成套订单调度	(36)
第一节 单机成套订单基本模型及求解方法	(36)
第二节 有机器调整时间的单机成套订单调度	(44)
第三节 单机成套订单的赶工调度	(50)
第四节 单机成套订单生产运输协调调度	(59)
第五节 不确定环境下的单机成套订单鲁棒调度	(71)
第四章 并行机成套订单调度	(77)
第一节 基于瓶颈分析的启发式算法思想	(77)
第二节 基于瓶颈分析多机成套订单调度算法	(85)
第三节 模拟实验和结果分析	(94)
第五章 流水车间成套订单调度	(101)
第一节 两台设备流水车间成套订单调度	(101)
第二节 一般流水车间成套订单调度	(106)
第三节 流水车间成套订单的赶工调度	(115)
第四节 服务水平约束下流水车间成套订单调度	(126)
第五节 流水车间成套订单生产与配送协调调度	(142)

第六章 作业车间成套订单调度	(170)
第一节 基于移动瓶颈的作业车间调度求解方法	(170)
第二节 单瓶颈作业车间成套订单调度	(177)
第三节 多瓶颈成套订单作业车间调度	(192)
第七章 成套订单其他问题调度	(206)
第一节 成套订单的工艺规划与调度集成	(206)
第二节 紧急成套订单的插单调度	(218)
第三节 流水车间成套订单材料可变更调度	(227)
参考文献	(237)



第一章 绪 论

随着科学技术的发展,企业的生产规模越来越大,生产的复杂性程度也越来越高,这些都对企业生产过程的管理提出了更高的要求,特别是对生产计划的要求。自泰勒在 20 世纪初提出科学管理以来,生产计划与控制一直是企业生产管理的核心内容,并且随着环境的变化始终在不断地改进和发展,生产计划与控制一些方法的应用范围早已超出生产的范围,已经广泛应用到财务、供应、生产、销售、人事等领域。在这些方法的不断演变和发展过程中,出现了诸如订货点法、经济生产批量、物料需求计划(MRP)、制造资源计划(MRP II)、企业资源计划(ERP)等计划与控制技术,这些技术极大地提高了生产以及其他资源计划的准确性和适应性,使得企业能够更快、更好,并以更低的成本来满足顾客的需要。

进入 20 世纪 90 年代后,随着 Internet 的普及和世界经济的全球化,企业所面临的环境、顾客需求的模式、企业的组织结构、企业的战略等都发生了翻天覆地的变化,传统的生产计划与控制方法受到了前所未有的挑战,暴露出了极大的不适应性。由生产计划技术演变而来的各类计划技术也面临着全新的挑战,需要进一步更新与发展,以适应基于 Internet 的新经济时期的需要。其中最显著的变化在于生产模式的变化,原来以产品为中心的生产模式转换为以客户为中心的生产模式,备货型生产转换为订货型生产,因此,围绕订单来组织生产安排计划成为越来越多的企业必须采取的方式。

第一节 成套订单及其重要性

一、成套订单问题的提出

随着市场竞争的激烈化和顾客需求的个性化,现代生产企业不得不转向大规模定制生产模式,顾客订单成了现代企业运作管理的中心。成套订单是

指订单中的零部件,虽然具有不同的完工期限和数量,可以分期分批交货,但这些零部件都是配套使用的。实际上,顾客需求的满足有一个配套的问题。一个订单常常包括多种零部件,每种零部件都有各自的完工期限,若在顾客成套订单中有一个工件误工,则该顾客就是不满意的。通过调研发现,配套问题具有广泛的实际背景,有相当一部分采用定制生产方式的企业(如大型工程、船舶制造等),在生产调度中经常碰到类似问题。例如,企业 A 给企业 B 提供一些零部件,虽然这些零部件要求完工工期各不相同,但都属于企业 C 向企业 B 定制的某个产品的成套配件,这样只要企业 A 有一个零部件不能按时提交,企业 B 就不可能按时完成企业 C 定制的产品,因而企业 B 是不满意的。

由于在订单中不同工件的完工期限各不相同,不同订单的不同工件可以交叉安排加工,因而本问题不同于成组或分批排序问题(分组或分批后将同组或同批的工件安排在一起加工)。与本问题相近的研究是误工工件数最小的问题,然而二者仍然存在着很大的不同。如假设企业接到 10 个顾客的订单,每个订单中有 10 个配套的零件(这 10 个零件是该顾客组装在 1 个产品上的)。如果某种排序导致 5 个零件误工,则误工率为 5%;若这 5 个零件又分别属于 5 个不同的订单,则这 5 个订单的 5 个产品都不能按时组装完工,这样就会使这 5 个顾客都不满意,从而造成 50% 的不配套率;若这 5 个零件属于一个订单,则在误工率同样为 5% 的情况下,不成套订单数为 1 个,而成套率提高了 90%。从上述这个例子可以看出,与工件延误数相比较,成套订单数更能体现定制条件下的服务水平。另外对单机排序误工工件数最小的问题,著名的 Moore 算法给出了最优解,在本问题中如果按照该算法,则可能每个订单都有工件在排序的过程中被删除而排在后面,从而出现配套率为 0 而使所有顾客都不满意的最差情况。

二、成套订单调度的难点

成套订单问题通常出现在工程项目的订单中。然而在目前的经济环境下,由于顾客需求的多样化和个性化,造成生产的重复性程度越来越低,每个顾客的订单都可以看做一个不同的项目,这样围绕订单的供应链企业间的合作,都可以看做是成套订单问题。因此在现代企业转向定制生产方式的情况下,成套订单问题具有广泛的实际背景。事实上,通过对十余家汽车零部件公司调研中发现,由于这些公司提供的零部件在品种、数量和时间上供应不配套,



经常造成客户汽车总装线（混流生产方式）停线，从而导致惨重的罚款损失（甚至失去顾客）。

如何以大规模生产的成本和速度来满足顾客的需要，是大规模定制生产模式的难点，国内外大量学者对此进行了深入的研究，但目前尚未形成成熟的理论。当前的一个研究热点是面向大规模定制的产品设计（DFMC），现有的研究成果主要是从产品的相似性来构造诸如产品族一类的方法，以增加设计制造的规模和速度，由此形成模块化，再通过延迟制造等技术来提高响应效率。但对产品设计出来之后的车间作业管理方面的有关研究并不多见，在成套订单上也存在着传统的生产运作理论和方法不能解决的问题，主要体现在生产时间响应性和生产成套性（包括品种、数量和时间上配套）两个方面。

1. 时间响应性

产品设计出来后的生产，在大规模定制环境和大规模生产环境中存在着很大的不同，这种不同极大地影响订单响应时间。这里涉及工艺规划与作业计划两个方面，其中工艺规划是确定加工路线（加工设备和相应参数），而作业计划则是在企业有限的资源约束下，确定工件在相关设备上的加工顺序和加工时间。大规模生产的前提是大批量、少品种，其生产的产品以及相应的BOM数量有限，工艺流程变化不大，因而工艺规划与作业计划可以独立进行。实际运作中，工艺规划是由工程技术部门在产品设计出来后立即进行的，而作业计划是由生产管理部门在计划集中期进行的（有时要比工艺规划晚几个月甚至一年），并且二者都是基于单体企业来考虑的。但大规模定制环境下的生产完全不同，顾客个性化需求的多样性贯穿于制造供应链的全过程，这种多样性衍生出大量的设计变体，从而使BOM产生大量变异，相应又使得所需资源的种类和数量频繁变化，继而影响了零部件的全球采购策略及相应的合作供应链网络，这样事先准备的工艺规划往往会由于某个资源“瓶颈”而变得不可行，如果在现场进行修改就会增加响应时间、规划质量和相应的成本。因而在大规模定制生产模式下，工艺规划与作业计划不能独立进行，并且由于围绕成套订单的生产涉及多个合作伙伴，二者的集成必须是基于供应链合作网络基础上的，这是现有生产运作管理理论所没有解决的问题，因而需要对其进行全新的研究。

2. 生产成套性

在对某一时期的生产任务进行作业安排时，现有的生产运作管理理论通常是将该期所有订单中的任务以最大完工时间、最大延误时间、最小误工件

数等作为目标来考虑的,没有考虑订单的成套性。考虑到供应链合作伙伴的资源、工艺流程的不稳定和工件加工时间的不确定性,面向成套订单的作业管理的难度就会大幅度增加。虽然现有的作业计划在解决大规模问题时的一些思路可以借鉴,但由于现有的作业计划方法没有考虑成套目标,也没有考虑工艺规划的柔性及成套订单的其他特点,因而不能完全解决订单的成套问题,必须对其进行修改和创新。

综上所述,成套订单的时间响应性和成套性是现有生产运作管理理论所没有解决的问题,也是以顾客为中心的现代企业急需解决的实际问题,因此对其研究极具理论价值和现实意义。

第二节 一般生产作业计划问题

生产作业计划是企业年度生产计划和 MRP 输出的具体执行计划,是协调企业日常生产活动的中心环节。它根据年度生产计划的要求对每个生产单位(车间、工段、班组等),在每个具体时期(月、旬、周、日、轮班、小时等)内的生产任务作出详细的安排并规定实现的方法,从而保证企业按数量、品种、质量、交货期的要求全面完成生产计划。当计划制订好之后在具体实施的过程当中还需要对生产作业过程实施有效的控制,以确定实际生产和计划的要求相一致。

一、生产作业计划概述

1. 生产作业计划的主要内容

生产作业计划的主要任务是将主生产计划或 MRP 中的零部件投入/产出计划细化,它是 MRP 的具体执行计划,具体、详细地规定了各车间、工段、班组乃至每个工作地在较短的时间内(月、旬、周、日、轮班、小时)的生产运作任务。因此,它不是站在企业整体的角度,而是站在企业的每个生产运作单位或工作地的角度解决生产什么、生产多少、什么时候完成的问题。车间月度生产作业计划、班组周生产作业计划、工作地轮班作业计划等,都是生产作业需要安排的内容。生产作业计划在时间上细化到每个工作日甚至每小时,在单位上落实到每台设备每个人,即把计划工作负荷分解成一个个精确具体的短期计划。企业生产作业管理主要包括以下一些内容:



(1) 把生产任务(在这里主要是工序)落实到执行人员、设备或工作中心或工作地上,并且要避免资源负荷的超载,即要达到资源负荷的平衡,避免“瓶颈”现象;

(2) 确定零部件的加工顺序;

(3) 按已经排好的顺序将零部件安排到具体的工作中心或工作地或设备上,即实际中的派工;

(4) 进行生产作业控制即车间控制,不断地检查任务的执行情况和设备的负荷情况,及时为拖后的任务制定相应的赶工单,以保证计划的如期完成;

(5) 根据设备运转的好坏和新指令的到来,不断地修订作业计划,以适应变化;

(6) 控制作业过程中的质量问题。

2. 生产作业计划的作用

生产作业计划是生产计划的继续、延伸和补充,与生产计划一起构成一个紧密联系的体系。因此,没有一个好的生产作业计划,就不可能很好地保证实现主生产计划,特别对加工装配型企业来说。具体地说,生产作业计划的主要作用可概括为两个方面:

(1) 保证主生产计划规定的生产运作任务的完成

生产作业计划把生产运作任务在空间上细分到车间、工段、班组、工作地和个人;在时间上细分到月、旬、周、日、轮班、小时;在计划对象上把整台产品细分到总成、部件、零件,因此,起着具体落实主生产计划的作用。由于生产作业计划具有更强的可操作性,为组织日常生产运作活动提供了依据和标准,有利于保证主生产计划任务的顺利完成。

(2) 保证企业获取更好的经济效益

编制 MRP 时虽然也经过了综合平衡计算,但由于时间跨度较长,且影响因素多,故工作比较粗略。而生产作业计划的“细分”特性使得企业既有必要,也有可能更加细致、具体地进行综合平衡,针对企业当前的实际情况科学安排生产运作任务,努力实现资源的合理配置,提高企业的经济效益。

二、作业排序

1. 排序的基本概念

排序问题已被广泛应用于生产管理、计算机系统、运输排序等领域。排序问题是一类重要的组合优化问题,一般来说,凡是有多个不同的任务要完

成,就有作业排序与作业计划问题,几批不同的工件要加工,几个程序等待要运行,几个问题要处理等,都有作业排序。这些问题的共同特征是要将不同的工作任务安排一个执行的顺序和时间,使得目标最优化。所以作业排序实质上是要解决如何按时间的先后,将有限的资源分配给不同的工作任务,使预定的目标最优化的问题。

需要说明的是,在生产管理中常用到编制作业计划、排序、派工、控制、赶工等名词。一般来说,作业排序只确定工件在机器上的加工顺序,而编制作业计划不仅确定工件的加工顺序,而且还包括确定每个工件的开始时间和完成时间,这样才能指导工人的生产活动。由于当各台机器上工件的加工顺序确定后,就可以按最早可能开始时间安排所有工件的计划,这样就可以编制好初始可行的作业计划,因而编制作业计划的主要问题就是作业排序问题。派工是按作业计划的要求,将具体的生产任务安排到具体的机器上并交给相应的操作工人负责;控制是监控实际生产过程,并使其和计划保证一致的过程;排序是在加工制造发生之后,发现实际进度已经偏离计划而采取的调配资源的行动,排序属于控制的范围;而赶工是在实际进度已经落后于计划进度时采取的追赶进度的行动,属于排序的范围。如火车时刻表是事先确定的一种作业计划,各列火车都按该计划来执行;在实际执行过程需要监控所有火车的运行情况,根据这些运行信息采取相应措施以确保计划的完成,这种监控、采取的预防和实际措施的过程就是控制;其中实际运行情况偏离了计划所采取的措施就是排序;如果火车发生晚点,采取加快运行速度来赶上计划时间就是赶工。

2. 排序问题的描述

最初的排序研究与应用是加工制造企业,一般使用机器、工件、加工路线、工序和加工时间来描述一个排序作业的任务,即假定有 n 个工件要按一定的加工路线经过 m 台机器加工,其中加工路线是由工件加工的工艺过程决定的,是工件加工在技术的约束,是工件所需要的加工工序的顺序。而排序就是确定这 n 个工件在 m 台机器上加工的先后顺序。随着排序在其他各行各业的应用,原有的“机器”、“工件”、“工序”和“加工时间”的意义已经发生了变化,如“机器”的意义已经扩展到“服务者”,“工件”则泛指“服务对象”,工序则指“服务活动”,加工时间则是“服务时间”。如计算机网络的服务器(机器)同时接到多个电子邮件请求(工件)经过处理并发到请求的用户信箱,多艘轮船(工件)同时要停靠码头(机器),维修工人(机器)



维修多个机器设备（工件），等等。

（1）机器

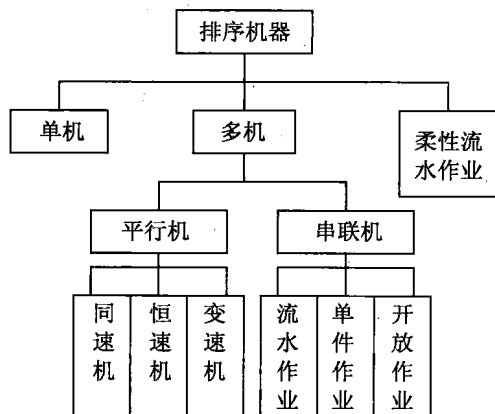
只有一台机器的排序问题称为单机排序问题，否则称为多机排序问题。

在多机排序问题中机器分为两大类：通用平行（Parallel）机和专用串联（Dedicated）机。如果所有机器的功能相同，称为同类机或平行机，即一个工件需要在多台平行机的一个机器上加工一次；而串联机则是机器具有不同的功能，工件需要在不同的机器上加工。

平行机又可分成三类：具有相同速度的同速（Identical）机、具有不同加工速度，但此速度不依赖于工件的恒速（Uniform）机和随加工的工件不同加工速度也不同的变速（Unrelated）机。

串联机也可分为三类：第一个工件以特定的相同机器顺序加工的流水作业（Flow Shop），工件依次在机器上加工的次序并不指定、可以任意的自由作业（Open Shop）和每一工件以各自特定的机器次序进行加工的单件作业（Job Shop）。

还有一类更复杂的情况，就是柔性流水作业（Flexible Flow Shop），它是流水作业和平行机的推广。在柔性流水作业中，有多类机器，每个工件有多道工序，每道工序需要在每类机器中的一台机器上加工，且每个工件的加工顺序相同。机器的分类情况见下图。



机器类型

(2) 工件和工序

对不允许中断加工的情况来说, 一个工件 ($J_j, j=1, 2, \dots, n$) 在一台机器 ($M_i, i=1, 2, \dots, m$) 上连续加工的过程称为工序 (Operation)。按工件到达车间的不同, 可以将排序分为静态和动态两种。当进行排序时所有工件都已经到达, 可以一次对它们进行排序, 这是静态排序问题; 若工件是陆续到达的, 要随时对它们进行排序, 这是动态排序问题。

排序中的约束条件, 主要指的是工件的性质以及它们在加工过程中的要求和限制, 包括:

① 加工时间

一个工件的加工时间: $p_j = (p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{mj})^T$; n 个工件的加工时间 P 则用矩阵来表示:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}$$

其中, p_{ij} 是工件 J_j 在机器 i 上所需要的加工时间。

② 到达时间 (Arrival Time) 或就绪时间 (Ready Time)

到达时间或就绪时间 r_j 是工件已经准备好可以马上被加工的时间, 若所有工件的就绪时间相同, 则取 $r_j = 0, j=1, 2, \dots, n$ 。则有:

$$r = (r_1, r_2, \dots, r_n)$$

③ 工件工期 (Due Date) 或截止期限 (Deadline)

工期 d_j 表示对工件 J_j 限定的完工时间, 若不按期完工, 就会受到一定的惩罚。绝对不允许延误的工期称为截止期限。

$$d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$$

④ 工件权重 (Weight)

工件权重是相对于其他工件而言工件的重要性程度, 用 W 表示。

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$$

(3) 目标函数

用 $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ 表示工件的完工时间, 一般来说, 要极小化的目标函数问题是完工时间 C_j 的函数。在排序问题中, 目标函数主要有以下几种:

① 最大完工时间或时间表长 (Schedule Length, Make-span)



时间表长可定义为: $C_{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} \{C_j\}$, 即为最后一个被加工完的工件的完工时间。

② 加权流程时间 (Weighted Flow Time) 和加权完工时间

一个工件的流程时间是指工件从到达系统开始一直到加工完为止的时间, 包括在系统中的等待时间和加工时间:

$$F_j = C_j - r_j$$

系统的平均加权流程时间:

$$F = \sum_{j=1}^n (w_j F_j) / \sum_{j=1}^n w_j$$

将上述平均流程时间转换一下: $F = \sum_{j=1}^n (w_j C_j) / \sum_{j=1}^n w_j - \sum_{j=1}^n (w_j r_j) / \sum_{j=1}^n w_j$, 由于第二项是常数, 第一项的分母也是常数, 因此极小化平均加权流程时间相当于极小化总加权完工时间 (Total Weighted Completion Time):

$$C = \sum_{j=1}^n w_j C_j$$

③ 最大延误时间 (Maximum Lateness)

工件的延误时间定义为: $L_j = C_j - d_j$

最大延误时间: $L_{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} \{L_j\}$

④ 加权总误工 (Total Weighted Tardiness)

一个工件当其完工时间大于其完工期限时称为误工: $D_j = \{C_j - d_j, 0\} = \{L_j, 0\}$

加权总误工: $D = \sum_{j=1}^n w_j D_j$

⑤ 加权误工工件数 (Weighted Number of Tardy Jobs)

用 0/1 来表示某工件是否误工: $U_j = \begin{cases} 1, & C_j > d_j \\ 0, & C_j \leq d_j \end{cases}$

加权误工工件数: $U = \sum_{j=1}^n w_j U_j$

总之, 在排序中, 工件是被加工的对象, 是要完成的任务; 机器是提供加工的对象, 是完成任务所需要的资源; 排序是安排一个时间表, 以在一定约束条件下对工件和机器按时间进行分配和安排次序, 使某一或一些目标达到最优。

3. 排序问题的分类与表示方法

排序问题的类别有多种划分方法,如前面按机器、按工件有不同的划分方法,另外根据参数的性质还可以划分为确定型与随机型排序,即加工时间和其他有关参数是已经知道确定的量,就称为是确定型排序;而加工时间和相关参数是随机型的量则称为是随机型排序。由机器、工件、加工参数和目标函数的不同特征及其他方面的差别,构成了多种不同的排序问题。这里采用国际上使用的三参数表示方法来描述排序问题 $\alpha/\beta/\gamma$ 。

α 域表示机器的数量、类型和环境: $\alpha = \alpha_1 \alpha_2$, 其中 $\alpha_1 = \{ \cdot, P, Q, R, O, F, J, FF \}$, 各符号分别代表单机、同速机、恒速机、异速机、自由作业、流水作业、单件作业和柔性流水作业; $\alpha_2 = \{ \cdot, m \}$, 分别表示机器的数目不确定和有 m 台机器。

β 域表示工件的性质、加工要求和限制,资源的种类、数量和对加工的影响等,它可以同时包含多项,可能的项有 r_j (工件有不同的到达时间)、 s_{jk} (工件顺序加工的设备调整时间)、 $prmp$ (允许中断)等。

γ 域表示要优化的目标函数: $C_{\max}$ (时间表长)、 $\sum w_j C_j$ (加权总完工时间)、 $L_{\max}$ (最大延误时间)、 $\sum w_j D_j$ (加权总误工)、 $\sum w_j U_j$ (加权误工件数)等。

如 $1 \parallel \sum D_j$ 表示单机排序问题,目标函数是总延误时间最小; $Pm \parallel C_{\max}$ 表示有 m 台同速机的排序问题,目标函数是极小化时间表长;而 $Fm | p_{ij} = p_j | \sum w_j C_j$ 表示一个由 m 台机器组成的流水作业排序问题,每个作业的所有工序的加工时间都相等,目标是加权总完工时间最小; $J2 | m_j \leq 2 | C_{\max}$ 表示两台机器单件作业排序问题,每个工件在每台机器上至多加工一次,其目标函数是时间表长最小。

第三节 生产调度问题的求解方法

自 20 世纪 50 年代起,大量国内外学者就对生产调度问题进行了大量研究,并形成了运筹学的一个分支学科——排序。最开始,排序问题是作为一个纯粹的数学问题加以讨论的。1954 年,Johnson 提出了求解 $F2 \parallel C_{\max}$ 最优算



法,标志着排序理论和方法研究的开始。此后一直持续到 20 世纪 60 年代,排序理论和方法的研究始终围绕着用混合或纯整数规划、动态规划和分枝定界法来进行,解决了一系列有代表意义的简单排序问题。20 世纪 70 年代,随着研究的深入,很多问题找不到最优算法,因而产生了复杂性理论和 NP-完全 (NP-complete) 问题,学者开始注意并重视排序问题的复杂性研究,证明了许多排序问题都是 NP 难题,因此转而寻找近优或满意算法,从而产生大量的不同类别的启发式算法 (构造启发式、改进启发式、智能搜索启发式)。这里简单介绍近似启发式和基于领域搜索算法这些方法的思想,具体文献及方法在以后章节中介绍。

一、近似启发式排序方法

1. 基于启发式规则的排序方法

对生产加工任务进行排序的最传统的方法是使用排序规则 (Dispatching Rules), 已经有许多排序规则被应用, 因其排序规则简单、易于实现、计算复杂度低等, 能够用于动态实时排序系统中, 许多年来一直受到学者们的广泛研究, 并不断涌现出新的排序规则。许多学者在这方面已进行了探索及大量工作, 如研究与制定较优的单元零件加工排序算法, 在减少等待时间、提高生产率等诸多约束条件下达到了一种较为科学有效的排序效果。

文献 [1]^① 中总结了 113 条规则, 并将它们分为了三类: 简单规则、复合规则、启发式规则。文献 [2]^② 中列举了常见的 20 条规则, 并针对一个实际调度, 分析了这些规则对系统性能如作业的平均等待时间、机床的平均利用率、作业总加工时间等的影响。随着计算机运算速度的飞速提高, 人们希望寻找新的近似排序方法, 它以合理的额外计算时间代价, 换得比单纯启发式规则所得到的排序更好的排序, 如文献 [3]^③ 中提出的移动瓶颈方法。

总的来说, 启发式规则直观、简单、易于实现。但是近十年的研究表明并不存在一个全局最优的排序规则, 它们的有效性依赖于对特殊性能需求的

① S S PANWALKAR, W ISKANDER. A survey of scheduling rules [J]. Operations Research, 1977, 25 (1): 45-61.

② M MONTAZERI, L N WASSEHOVE. Analysis of Scheduling rules of an FMS [J]. Int J Prod Res, 1990, 28 (4): 785-802.

③ J ADAMS, E BALAS, D ZAWACK. The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling [J]. Management Science, 1988, 34 (3): 391-401.