



"十二五"国家重点图书出版规划项目
先进生产规划与调度理论研究丛书

丛书总主编 李培根

作业系统调度优化 理论与方法

Zuoyexitong Diaoduyouhua Lilun yu Fangfa

罗亚波 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

作业系统调度优化 理论与方法

Zuoyexitong Diaoduyouhua Lilun yu Fangfa

»»» 罗亚波 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

作业系统调度优化理论与方法/罗亚波 著. — 武汉: 华中科技大学出版社, 2011. 11
ISBN 978-7-5609-7019-6

I. 作… II. 罗… III. 生产调度-系统最优化 IV. F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 056192 号

作业系统调度优化理论与方法

罗亚波 著

策划编辑: 王连弟

责任编辑: 吴 晗

封面设计: 范翠璇

责任校对: 李 琴

责任监印: 张正林

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027)87557437

录 排: 武汉楚海文化传播有限公司

印 刷: 武汉中远印务有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

印 张: 11

字 数: 221 千字

版 次: 2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 39.80 元



本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

作业系统是指由任务和相应的工作单元组成的系统。作业系统调度优化,是指在满足各种约束的条件下,以某些指标为目标,将任务合理地分配到工作单元上,从而达到目标的优化。作业系统中包含着复杂的约束关系,如任务之间的串行约束、项目的工期约束、工作单元的功能约束、物流路径约束等。作业系统调度优化程度有不同的评价指标,如:设备利用率最高、总工期最短、物流效率最高等。这些评价指标之间往往是相互关联的,因此,多数情况下,只选用其中之一作为优化目标。国内外围绕作业系统调度优化问题,开展了很多研究,并发布了相关研究成果。然而,由于作业系统调度优化问题是 NP-hard 问题,目前还没有公认的成熟的求解方法。

在机械领域,生产作业任务与生产作业资源分配系统,是典型的作业系统。当作业任务的性质比较单一和稳定,作业规模比较小时,通过手工方法,可以得到较好的可行方案,即可行解。然而,当作业任务由大规模小批量任务,甚至若干单件任务组成,并且作业任务之间、作业资源之间、任务与资源之间,都存在复杂的关联关系时,求解的复杂度就会呈几何级数上升,用手工方式难以得到可行解,要得到比较满意的可行解,就需要求助于计算机和算法。

随着经济的发展,“大规模小批量”已经成为现代化生产的主要特征之一,传统的手工调度方式,已经越来越难以适应现代化生产的需求。近年来,对于生产作业系统调度优化理论与方法的研究,已成为研究的重点,研究工作主要集中于先进优化算法在生产作业系统调度中的应用适应性研究,如:研究如何采用遗传算法、人工神经网络、蚁群算法等来求解生产调度优化问题。总的来说,研究工作主要针对独立的具体问题,系统化程度不高,同时,对于传统优化方法对作业系统的适应性研究,还是空白。

近年来,依托国家自然科学基金(50705072)、湖北省青年杰出人才基金(2005ABB023)、武汉市青年科技晨光计划(20055003059-4)、中央高校基本科研业务费专项资金(2010-Ia-033,2010-ZY-JD-024)资助,本研究组在作业系统调度优化领域开展了长期的研究工作,在传统优化方法对于作业调度系统的适应性、改进的随机控制方法求解作业调度系统等方面,取得了较系统的成果。本书就是对这些成果的归纳和总结。

全书主要内容如下。

绪论介绍了作业调度系统的国内外研究进展、重点和难点,同时,阐明了作业调度系统的基础模型。



第1章,作业系统调度问题的优化模型。阐述了作业系统的一般假定、约束和目标,分别从优化目标和约束条件两方面,提出了作业系统的数学表达式,建立了作业系统的优化模型。

第2章,复合形法在作业系统调度中的应用。分析了复合形法应用于求解作业调度问题的性能,提出了复合形法的改进策略,以使其适应于求解作业调度问题,构造了完整的针对作业调度问题的改进算法。

第3章,惩罚函数法在作业系统调度中的应用研究。分析了惩罚函数法应用于求解作业系统调度问题所具有的各种特性,构造了作业调度问题的惩罚函数法优化模型,并提出改进策略。

第4章,遗传算法及其在作业系统中的应用。首先详细介绍了遗传算法的基本原理,然后,以设备布局为例,阐述了改进的遗传算法的具体实现步骤与方法,最后,介绍了遗传算法在作业系统调度中应用研究的国内外进展。

第5章,Hopfield神经网络在作业调度中的应用与改进。在介绍人工神经网络基本原理的基础上,针对作业调度优化的求解,提出了改进的人工神经网络方法,并通过软件实验证明了改进方法的可行性和有效性。

第6章,蚁群算法在作业调度中的应用与改进。详细介绍了蚁群算法的基本原理,以TSP为例,阐述了蚁群算法求解调度问题的一般步骤和实现方法。通过具体实例和软件实验,阐述了蚁群算法在作业系统调度中的应用方法。

第7章,数控加工作业系统相似关联调度理论与方法。将作业系统作为相似系统进行建模,并作为约束满足问题来求解。阐述了禁忌搜索算法与贪婪算法相结合的求解方法。软件实验表明了这一新的求解思路的有效性。

第8章,面向数控作业系统的网格优化方法。阐述了网格优化的基本原理,然后,建立了作业系统网格模型,并采用展望算法和回顾算法等方法,求解作业调度系统网格模型。软件实验验证了这一方法的可靠性。

本书各章均采用基本原理、改进策略、软件实现的结构形式,便于阐述的循序渐进、由浅入深。通过本书,既可以系统学习传统的和前沿的优化方法,又可以了解作业系统的基本模型和求解方法。本书可以作为工业工程学、信息与系统科学、计算机科学等专业本科生和研究生教学用书,也可以用于最新学术成果的交流,或作为企业生产管理人员的参考用书。

感谢凌鹤、林鑫、禹晓蕾、唐铭春、陈冲、袁慧萍、刘慧玲等为本书的撰写付出的辛勤工作。由于作者水平所限,书中难免出现错漏,望读者海涵并提出宝贵意见。

罗亚波

2011年4月

于 武汉理工大学

目 录

绪论	(1)
第 1 章 作业系统调度问题的优化模型	(6)
1.1 作业系统调度问题的模型分析	(6)
1.2 优化模型的目标函数	(7)
1.3 优化模型的约束条件	(8)
1.4 作业调度问题的数学模型	(9)
1.5 问题的解的表示及分析	(10)
1.6 小结	(11)
第 2 章 复合形法在作业系统调度中的应用	(12)
2.1 复合形法的基本思想和一般步骤	(12)
2.2 复合形法在作业调度问题中的应用方法	(14)
2.3 算法的流程及其编程实现	(16)
2.4 复合形法求解作业调度问题的性能分析	(18)
2.5 小结	(19)
第 3 章 惩罚函数法在作业系统调度中的应用研究	(20)
3.1 惩罚函数法的基本思想及其分类	(20)
3.2 惩罚函数法的一般方法与步骤	(20)
3.3 惩罚函数法在 JSP 中的应用	(22)
3.4 小结	(27)
第 4 章 遗传算法及其在作业系统中的应用	(28)
4.1 遗传算法的形成和发展	(28)
4.2 遗传算法的原理与模型	(29)
4.3 遗传算法的特点与应用	(30)
4.4 实例分析:遗传算法在车间设备布局中的应用	(32)
4.5 遗传算法在作业调度中的研究现状	(43)
4.6 小结	(44)
第 5 章 Hopfield 神经网络在作业调度中的应用与改进	(45)
5.1 人工神经网络工作原理及应用	(45)
5.2 Hopfield 神经网络算法	(49)
5.3 Hopfield 神经网络算法用于作业系统调度	(60)



5.4	基于 Hopfield 神经网络的单机作业调度实例分析	(68)
5.5	小结	(74)
第 6 章	蚁群算法在作业调度中的应用与改进	(75)
6.1	蚁群算法概述	(75)
6.2	蚁群算法原理与流程	(82)
6.3	标准蚁群算法与改进蚁群算法	(85)
6.4	蚁群算法应用实例	(89)
6.5	蚁群算法在作业调度中的应用实例	(92)
6.6	小结	(94)
第 7 章	数控加工作业系统相似关联调度理论与方法	(95)
7.1	面向相似关联分析的数控任务特征建模	(95)
7.2	基于相似原理的数控代码关联关系分析	(101)
7.3	基于相似关联分析的数控任务调度自动化	(111)
7.4	基于相似关联分析的作业调度系统实例	(120)
7.5	数控任务分析与调度用例	(125)
7.6	小结	(128)
第 8 章	面向数控作业系统的网格优化方法	(129)
8.1	数控作业系统调度问题优化模型	(129)
8.2	网格节点特征描述	(131)
8.3	基于约束满足的数控资源网格调度算法	(136)
8.4	基于约束满足的数控资源网格调度算法	(141)
8.5	网格调度软件的研发及比较试验研究	(149)
8.6	小结	(161)
参考文献		(162)

绪 论

1. 作业系统调度问题的定义及研究意义

作业系统调度问题(job-shop scheduling problem, JSP)可以描述为: n 个工件在 m 台机器上加工, 一个工件的加工分为 k 道工序, 每道工序可以在若干台机器上进行, 每一台机器在某个时刻只能加工某个工件的某道工序, 而且, 每道工序只能在其前道工序加工完成后才能开始, 在这些条件的约束下, 寻找使所有作业完成时间(makespan)最短的调度方案^[1]。

JSP 是一类满足任务配置和顺序约束要求的资源分配问题, 是一个典型的 NP-hard 问题。目前, 制造业的竞争日益激烈, 制造企业正朝着有不同完工时间和产品要求的多类型、小批量的生产模式发展。如何利用现有的资源(加工能力), 满足加工任务所需的各种约束(加工次序、加工能力), 使所有的任务能尽量按时完成(性能指标最小), 即如何有效地解决 JSP, 就成为一个十分现实和迫切的问题。高效调度算法, 可以大大提高生产效益和资源利用率, 从而增强企业的竞争能力, 因此对 JSP 的研究有非常重要的理论和实用价值。

2. 作业车间调度问题基本数学模型

1) 整数规划模型

Baker^[2] 给出了 JSP 的整数规划模型, 如 $n/m/G/C_{\max}$ 调度问题可用如下数学模型描述:

$$\min \max_{1 \leq k \leq m} \{ \max_{1 \leq i \leq n} C_{ik} \} \quad (0-1)$$

$$\text{s. t. } C_{ik} - p_{ik} + M(1 - a_{ihk}) \geq C_{ih} \quad (i=1, 2, \dots, n; h, k=1, 2, \dots, m)$$

$$C_{jk} - C_{ik} + M(1 - x_{ijk}) \geq p_{jk} \quad (i, j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m)$$

$$C_{ik} \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (i, j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m) \quad (0-2)$$

式(0-1)表示目标函数; 式(0-2)表示工艺约束条件决定的每个工件的操作先后顺序, 以及加工每个工件的每台机器的先后顺序。式(0-2)中, C_{ik} 和 p_{ik} 分别为工件 i 在机器 k 上的完成时间和加工时间; M 是一个足够大的正数; a_{ihk} 和 x_{ijk} 分别为指示系数和指示变量, 其含义为

$$a_{ihk} = \begin{cases} 1 & (\text{若机器 } h \text{ 先于机器 } k \text{ 加工工件 } i) \\ 0 & (\text{非上述情况}) \end{cases} \quad (0-3)$$



$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & (\text{若工件 } i \text{ 先于工件 } j \text{ 在机器 } k \text{ 上加工}) \\ 0 & (\text{非上述情况}) \end{cases} \quad (0-4)$$

2) 线性规划模型

JSP 必须满足以下两个约束条件: ① 每个作业在机器上的加工次序给定; ② 每台机器在任何时刻最多只能加工一个作业。

Adams^[3]给出了线性规划模型,假定 $J = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示工件集合; $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示机器集合; $V = \{0, 1, \dots, r+1\}$ 表示工序集合,其中,0 和 $r+1$ 是“开始”和“结束”哑元工序; A 为受约束条件①限制的优先关系工序对的集合; V_k 为在机器 k ($k \in M$) 上加工的约束工序对的集合, $E_k \subset V_k \times V_k$,因此要受约束条件②限制; d_i 和 t_i ($i \in V$) 分别表示工序 V 的加工时间(固定)和开工时间(可变),工序 0 和工序 $r+1$ 的加工时间都为 0,即 $d_0 = d_{r+1} = 0$,则 JSP 可以描述为

$$\min \quad t_{r+1} \\ t_j - t_i \geq d_i \quad (i, j \in A) \quad (0-5)$$

$$t_j - t_i \geq d_i \vee t_i - t_j \geq d_j \quad (i, j \in E_k, k \in M) \quad (0-6)$$

$$t_i \geq 0 \quad (i \in V) \quad (0-7)$$

从式(0-7)可以得出,当 $t=0$ 时,工序的初始运行时间为 0。任何满足以上约束条件的一组 t_i ($i=0, 1, \dots, r+1$) 都称为一个调度,问题的目标就是需要找出一个 t_{r+1} 尽可能小的调度。

3) 析取图模型

析取图^[4]是描述 JSP 的常用工具。对于 n 个工件、 m 台机器(共 N 个操作)的 JSP,所对应的析取图 $G=(V, A, E)$ 如图 0-1 所示。其中, V 为所有操作构成的顶点集; A 为通常的连接边的集合; E 为 m 条子边构成的弧集,子弧(虚线)表示同一机器上加工各操作的连接。图 0-1 给出了一个 4 个工件在 4 台机器上加工,共有 12 个工序的实例。工件 1 的加工顺序为(1, 2, 3, 4),工件 2 的加工顺序为(5, 6, 7),工件 3 的加工顺序为(8, 9),工件 4 的加工顺序为(10, 11, 12)。图中节点对应工序,有向边对应工件中的工序约束关系,边上的数字为加工时间,分离边对应在不同机器上执行的工序对。

3. 作业调度问题的研究现状

对 JSP 的研究虽然已经有几十年的历史,但其研究只集中在某些特定方面,至今尚未形成一套系统的理论与方法。一般而言,作业调度算法大致分为两类:一类是传统的最优化算法,另一类是启发式算法。

最优化算法一般以获取调度问题最优解为目标,尽管优化方法比较成熟,但只能有效地解决小规模优化问题。对于复杂的大规模生产调度问题,随着任务数的增加,其解析模型会很复杂,最优化算法难以满足调度问题的需求,而启发式算法在这方面有较大的优势。

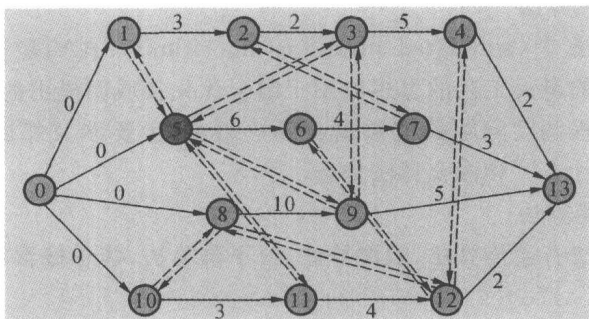


图 0-1 4 个工件、4 台机器的 JSP 析取图

启发式算法是从问题的现有角度出发,根据任务所处的状况进行合理调度,从而保证局部最优的算法,但其难以保证全局最优。鉴于该算法具有易于理解、运算速度快、适应动态调度环境等优点,从 20 世纪 90 年代开始,学术界将理论研究的重心转移到将这一经典的算法更多地与实际的调度问题相结合上,更加重视对复杂调度问题的启发式算法的研究。

启发式算法与最优化算法比较,各有利弊。随着调度问题的复杂化,单一的算法难以得到理想结果,在实际研究中,常将多类方法有机结合形成新的算法,如遗传算法与模拟退火算法结合^[6],数学规划方法和人工智能技术、专家系统结合等^[6]。

1) 最优化算法

最优化算法主要包括线性规划(linear programming, LP)、非线性规划(nonlinear programming, NLP)、动态规划、拉格朗日乘子法以及分支定界等。由于很多实际问题不能以简单的线性关系精确表达,LP 的应用范围还很有限。在 JSP 中,分支定界方法的研究主要集中在分支方法^[7-8]和上下界确定方法^[9-10]上。动态规划是由 Bellman 等^[11]于 1952 年提出的求解多阶段决策过程优化问题的一种最优化方法,在 JSP 中动态规划方法的研究主要涉及步长改进方法^[12]和状态变量维数化简方法^[13]等。拉格朗日乘子法是一种求解约束优化问题的近似优化方法^[14],近年来受到学术界的广泛重视。

2) 启发式算法

(1) 神经网络方法

神经网络(neural network, NN)具有自组织、自学习、鲁棒性强等优点,可作为联想记忆和优化计算工具。Y. P. S. Foo 和 Y. Takefuji 最早提出的用 Hopfield 神经网络求解 JSP 的方法^[15],是一个比较有影响的方法。2000 年 Yang S. X^[16]等采用满足约束条件的神经网络和启发式算法用于通用车间的调度。王万良在 2002 年给出了基于神经网络的 JSP 的约束条件、Hopfield 神经网络结构与权值解析表达式^[17]。将神经网络与其他启发式算法相结合仍然是当前研究的热点。



(2) 模拟退火算法

模拟退火算法^[18] (simulated annealing algorithms, SAA) 是 Kirkpatrick 等人将金属热加工中的退火工艺的思想应用于组合优化领域而提出的一种新的搜索方法。面向生产过程调度问题的模拟退火算法研究, 主要涉及邻域结构定义^[19-20]、温度下降规则设计^[21-22] 和混合算法构造^[23-25] 等。

(3) 人工智能算法

人工智能算法有遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、禁忌搜索算法和基于 Petri 网的仿真方法。

① 遗传算法 遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是由 Holland 在 1975 年提出的一类基于自然遗传和进化过程的随机搜索算法^[26]。它在 JSP 中将问题的求解表示成染色体的适者生存过程, 通过染色体种群的一代代不断进化, 包括选择、交叉和变异等操作, 最终收敛到“最适应环境”的个体, 从而求得问题的最优解或满意解。近年来, 一些学者尝试将免疫算法^[27]、模拟退火算法^[28]、禁忌搜索算法^[29]、神经网络算法^[30]、模糊逻辑算法^[31] 等融合到遗传算法的各个环节中去, 以提高算法的收敛速度或对不确定调度环境的适应性。

② 蚁群算法 蚁群算法 (ant colony algorithm, ACC) 是由 Dorigo、Colormi 等^[32] 于 1991 年提出的一种模拟蚁群觅食行为的进化计算方法, 该学者于 1994 年首先将蚁群算法应用于求解 JSP^[33], 在 JSP 中蚁群算法的研究主要涉及状态转移策略、信息素更新方法、邻域拓扑结构设计方法以及算法参数确定方法等。另外, 一些学者针对不同类型的生产过程调度问题, 将遗传算法、免疫算法^[34]、禁忌搜索算法^[35] 等方法与蚁群算法相融合, 以提高算法的搜索效率和解的性能。

③ 粒子群算法 粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是由 Kennedy 等^[36] 于 1995 年提出的一种模拟鸟群觅食行为的进化计算方法, 该算法通过个体之间的协作来进行迭代优化。采用粒子群优化算法求解生产过程调度问题一般要涉及编码、粒子位置和粒子速度更新、邻域拓扑结构确定以及算法参数确定等^[37]。粒子群优化算法是近几年发展起来的新型优化算法, 其在 JSP 的研究中应用相对较少。

④ 禁忌搜索算法 禁忌搜索算法 (tabu search, TS) 是由 Glover^[38] 提出的模拟智能过程的一种采用禁忌技术、基于邻域搜索机制的寻优算法。在 JSP 中, 为了提高禁忌搜索方法的效率, 一些学者还将模糊理论^[39]、神经网络^[40] 等与禁忌搜索算法相结合, 以进一步提高相应调度算法效率和性能。

⑤ 基于 Petri 网的仿真方法 Petri 网是由德国学者 Petri 在 1962 年提出的一种用于描述复杂系统动态过程的图形化建模方法, 早在 20 世纪 70 年代初, Petri 网就被用于 JSP 建模中^[41]。Rippin(1993) 和 Baudet(1995) 等在离散事件表构造的仿真描写基础上进行间隙生产调度研究^[42-43]。目前, 有关 Petri 网的分解简约

方法^[44]、染色 Petri 网^[45]以及 Petri 网建模方法与其他建模方法的结合^[46]越来越受到人们的重视。

4. 小结

随着生产系统的日益复杂,JSP,尤其是具有复杂关联属性的 JSP,已经日益引起工程人员和研究者的重视。然而,由于复杂的作业调度系统是典型的 NP-hard 问题,目前,尚未有比较成熟的通用求解方法。一般认为,由于定义域和优化目标性状的高度复杂性,传统的优化方法难以用于求解作业系统调度问题。但目前尚没有传统优化方法对于作业调度问题适应性的系统研究。对于启发式算法在作业调度中的应用研究比较多,是近年来的研究热点。但研究尚处于初级阶段,系统的研究还比较少。本书基于一系列研究项目的最新进展和成果,在理论研究和实验分析两方面,系统地介绍了复杂作业系统数学模型、传统优化方法对于作业系统优化问题的适应性、传统优化方法的改进策略、各种启发式算法在作业系统中的一般应用方法、针对作业调度问题的改进策略等。

第 1 章 作业系统调度问题的优化模型

1.1 作业系统调度问题的模型分析

1954 年 M. S. Johnson 提出 2 台设备加工 n 个工件的调度算法,标志着调度理论研究的开始,也揭开了研究作业调度问题的序幕。在该问题的研究中,给定了如下的概念。

任务——一个任务代表着加工的一个工件,每个任务中都包含着特定的加工工序。

工序——每个工件在某一设备上进行一次加工。

工艺路线——任务中工序的加工路线,即工序按加工先后排列成的线性序列。

前序工序——某一工序必须在特定的工序加工完成后才能开始加工,则特定的工序就称为该工序的前序工序。

可并行的工序——任务的加工过程中,在完成一定的工序之后,如果有 2 个或 2 个以上的工序可以进行加工,那么,这些可以加工的工序便称为可并行的工序。

JSP 研究的是在时间上对系统有限的资源进行合理有效的配置,以达到满足特定目标的要求。问题可以描述为: n 个任务要在 m 个设备中加工完成,每个任务包含 k 个工序(k 的值可以不同),各个工序都由相应加工类型的设备来加工,在满足一定的约束条件下,对所有的工序分配加工设备并确定开始时间,以达到满足给定目标要求的调度优化。

本书中,对 JSP 有如下的假设:

- ① 所有的任务都是相互独立的,不存在加工的优先次序关系;
- ② 每个任务的工序之间有一定的加工顺序关系;
- ③ 每个设备同一时刻只能加工一个工件,即只能进行一个工序的加工,并且工件一旦开始加工,在该工序内不能中断;
- ④ 每个任务同一时刻只能进行一道工序的加工,即工件是不能拆分的;
- ⑤ 每道工序只需在一个设备上加工就可以完成,即每道工序只要进行一次;
- ⑥ 每个设备只有一个特定的加工功能;
- ⑦ 每种功能的设备可以不止一台;
- ⑧ 每个任务的工艺路线可以不是唯一的,可以有多种可行的工艺路线。

作为一个典型的组合优化问题,JSP 具有计算复杂性和约束复杂性的特点。

随着问题规模的增大,包括系统中任务数目和设备数量的增加,可能出现的解的数量会呈指数级增长,使计算过程更加复杂。由于问题中的每个工序都有着一定的约束,因此约束条件也会随着问题规模的增大而增加,并随着工序间的相互制约关系的增强而更加复杂。这些特点给 JSP 的求解增加了难度。

1.2 优化模型的目标函数

JSP 的求解,往往要考虑生产调度实际期望达到的优化指标。问题的目标函数恰好是这些优化指标的抽象表示。在 JSP 过程中重点考虑的因素不同,目标函数也不同。通常,JSP 所考虑的优化目标有如下几种。

1. 任务的最大完工时间最短

任务的最大完工时间最短即完成所有任务所需的时间最短,有利于提高单位时间内设备的利用率,从而提高生产的实际效率,对该指标的优化有着实际的意义。

假设任务 i 的完工时间为 C_i ,任务的总数目为 n ,那么,目标函数可以表示为

$$\min[\max\{C_i\}] \quad (1-1)$$

2. 任务的总的拖期最短

在实际问题中,如果考虑任务的交货期,则希望每个任务都能够在交货期之前完成。然而,在加工容量有限的情况下,有时无法保证所有任务都在交货期前完成,即形成“拖期”。如果能够控制总的拖期时间达到最短,也就可以将损失降低到最小。因此,该指标往往是目标函数所要考虑的因素。

假设任务 i 的完工时间为 C_i ,任务 i 的交货期为 d_i ,那么,任务 i 的拖期为 $\max\{0, C_i - d_i\}$,因此,总的拖期最短的目标函数可以表示为

$$\min\left(\sum_{i=1}^n \max\{0, C_i - d_i\}\right) \quad (1-2)$$

3. 任务的提前/拖期惩罚代价最小

在准时制(JIT)的生产模式下,任务提前完成或拖期完成都会对企业的经济效益造成负面影响,提前完成可能会造成库存成本的增加,拖期完成又会影响产品的交货期。因此,企业希望任务能在交货期允许的某一较小的时间区间内完成,以降低企业的生产成本。

假设任务 i 的完工时间为 C_i ,任务的理想交货期时间域为 $[D_a, D_b]$, D_a 为任务 i 的最早交货时间, D_b 为任务 i 的最晚交货时间;提前完工的单位惩罚系数为 λ_i ;拖期完工的单位惩罚系数为 μ_i ,那么,任务 i 的提前/拖期惩罚代价可以表示为

$$\lambda_i \times (\max\{0, D_a - C_i\}) + \mu_i \times (\max\{0, C_i - D_b\}) \quad (1-3)$$



因此,任务的提前/拖期惩罚代价最小函数可以表示为

$$\min \left[\sum_{i=1}^n (\lambda_i \times (\max\{0, D_{a_i} - C_i\}) + \mu_i \times (\max\{0, C_i - D_{b_i}\})) \right] \quad (1-4)$$

JSP 模型的目标函数随着企业所考虑因素的不同而改变,它可以是从单因素考虑的单目标函数,也可以是从多因素考虑的多目标函数。

1.3 优化模型的约束条件

JSP 对每道工序进行设备的分配和加工时间的制定,可行的调度方案要满足任务的工艺路线、设备的能力、工序的加工要求及任务的加工要求等约束条件。

1. 任务的工艺路线约束

每个任务都有其工艺路线,而工艺路线确定了工序间的先后关系,这些关系包括串行约束和并行约束。串行约束是指某个工序必须在其前序工序完成后才能开始。如表 1-1 给定的工序 102 要在工序 101 完成后才能开始。并行约束是指某些工序之间并没有明确的先后顺序关系。表 1-1 的工序 102 和工序 103,它们中的任意一个都可以在工序 101 完成后开始。由于工序间并行关系的存在,对于一个特定的任务,可以不止有一种可行的工艺路线。如表 1-1 的工艺路线可以是{101, 102, 103, 104},也可以是{101, 103, 102, 104}。总之,在任务的工艺路线约束中,工序间的串行约束是不能改变的。

表 1-1 JSP 的任务实例

任务	工序	设备	前序工序	加工时间
1	101	车		10
1	102	铣	101	15
1	103	钻	101	15
1	104	磨	102, 103	20
2	201	车		20
2	202	铣	201	10
2	203	磨	202	15

2. 设备的能力约束

根据之前对问题的假设,每个设备同一时间只能加工一道工序。因此,设备的能力约束就是分配在同一设备上的工序间的时间重叠约束。当被分配在同一设备上的工序出现加工时间段的重叠时,就会有一道工序不能按调度的方案准时完成,

这样的调度结果是不可行的。因此,在问题的约束中,必须保证同一设备上加工的工序间不存在时间重叠的情况。

3. 工序的加工要求约束

工序的加工要求包括工序的加工类型和工序加工过程的连续性要求。每道工序的加工设备的功能必须与工序的加工类型相一致,否则,工序就无法正常进行。如表 1-1 所示的工序 101 只能安排在具有车加工功能的设备上进行。同时,每道工序的加工过程是连续的,即一旦确定了工序的开始时间,就可以根据工序的加工时间来确定工序的完工时间,在加工的过程中不允许有间断。

4. 任务的加工要求约束

每个任务代表着一个工件的加工过程,因此,每个任务不能有两道工序同时在进行。具有串行关系的工序有着明确的先后顺序,它们之间不存在同时进行的可能性。但是,对于并行关系的工序,它们之间并没有确定的先后顺序,因此,在调度的过程中,必须保证这些工序之间不能存在加工时间重叠的情况。如表 1-1 中的工序 102 和工序 103 就不能出现加工时间的重叠。

JSP 的可行解都必须满足以上的约束条件。如果在给定的问题中还有其他必须满足的条件,如任务的交货期,生产的库存数量等,就要在建立模型和求解的过程中考虑这些附加约束条件。

1.4 作业调度问题的数学模型

在描述 JSP 的模型中通常要用到的符号及其含义如下。

$O_{i,j}$ ——任务 i 中的第 j 道工序。

$O_{i,j-1}$ ——任务 i 中的第 j 道工序的前序工序。

E^k ——第 k 个设备。

$BT_{i,j}$ ——任务 i 中第 j 道工序的开始时间。

$pT_{i,j}$ ——任务 i 中第 j 道工序的加工时间。

C_i ——任务 i 的完工时间。

$CT_{i,j}$ ——任务 i 第 j 道工序的完工时间。

$E_{i,j}^k$ ——任务 i 中的第 j 道工序的加工设备。

$F(O_{i,j})$ ——任务 i 中的第 j 道工序的加工类型。

$F(E^k)$ ——设备 k 的加工功能。

以任务的最大完工时间最短作为 JSP 模型的目标函数,那么,一个包含 n 个任务、 m 个设备的 JSP 可以建立如下的模型:

$$\min f = \max\{C_i\} \quad (1-5)$$



$$\text{s. t. } BT_{i,j} > CT_{i,j-1} \quad (1-6)$$

$$(BT_{i,j}, CT_{i,j}) \cap (BT_{i,l}, CT_{i,l}) = \emptyset \quad (j \neq l) \quad (1-7)$$

$$(BT_{i,j}, CT_{i,j}) \cap (BT_{u,v}, CT_{u,v}) = \emptyset \quad (E_{i,j}^k = E_{u,v}^k) \quad (1-8)$$

$$BT_{i,j} + PT_{i,j} = CT_{i,j} \quad (1-9)$$

$$F(O_{i,j}) = F(E_{i,j}^k) \quad (1-10)$$

在模型中,式(1-5)表示目标函数,式(1-6)至式(1-10)表示目标的约束条件。其中,式(1-6)表示任务工艺路线约束中的工序串行加工约束;式(1-7)表示任务的加工要求约束,即同一任务中不能有加工时间重叠的工序;式(1-8)表示设备加工能力约束,即同一设备中不能有时间重叠的工序;式(1-9)表示工序加工要求中的加工过程连续性约束;式(1-10)表示工序的加工类型和加工设备的功能匹配约束。

同时,每个任务的完工时间是该任务中所包含的工序的最大完工时间,即

$$C_i = \max\{CT_{i,j}\} \quad (1-11)$$

1.5 问题的解的表示及分析

一个JSP的解包含问题中所有工序的开始时间和加工设备的安排情况,将每个工序的调度情况看做是解中的一个元素,那么,可以用集合来表示作业调度的解。假设工序 $O_{i,j}$ 在调度结果中确定的开始时间 $BT_{i,j}$ 和加工设备 $E_{i,j}^k$ 形成解元素中的一个二维变量 $[BT_{i,j}, E_{i,j}^k]$,那么,JSP的解就可以表示为包含所有工序调度结果的集合 S ,即

$$S = \{[BT_{i,j}, E_{i,j}^k]\} \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (1-12)$$

JSP的解还可以用甘特图来表示。甘特图用图示的方式以活动列表和时间刻度形象地表示出工序的加工顺序和持续时间。图1-1所示的就是表1-1中任务的一个调度方案的甘特图。

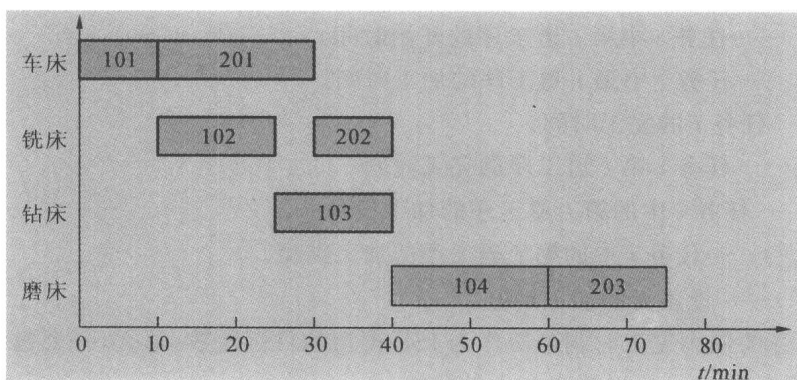


图 1-1 JSP 的解的甘特图实例