



"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

流水车间调度 及其优化算法

Liushuichejian Diaodu Jiqi Youhua Suanfa

»»»» 潘全科 高亮 李新宇 著



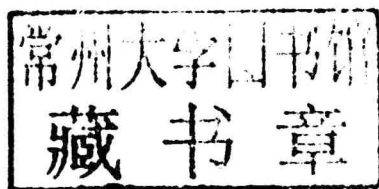
华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

流水车间调度 及其优化算法

Liushuichejian Diaodu Jiqi Youhua Suanfa

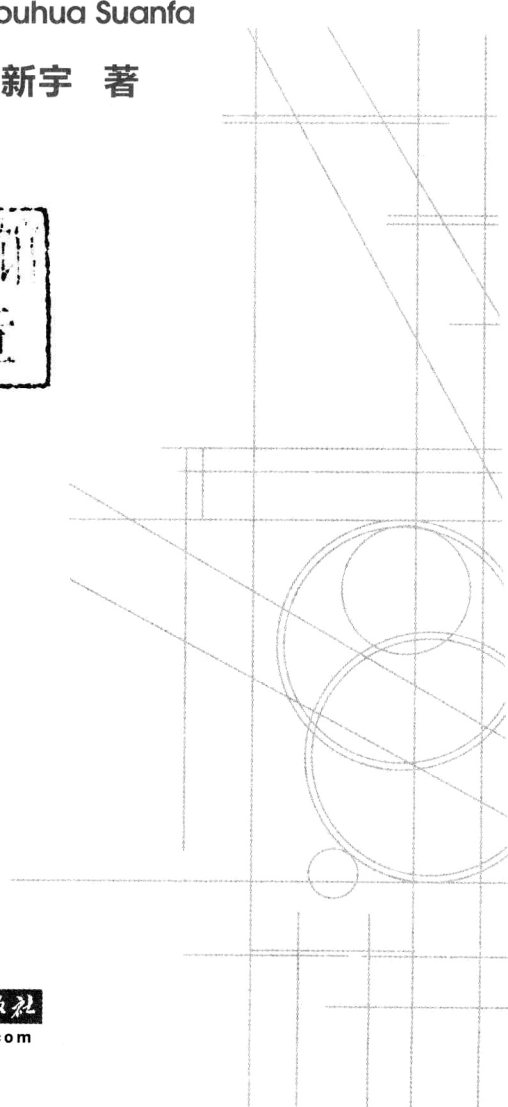
»»» 潘全科 高亮 李新宇 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉



内 容 提 要

流水车间调度问题是一类重要的生产调度问题,有广泛的工程应用背景。近60年来,诸多学者对其进行了深入研究。本书力图总结作者和国内外同行在流水车间调度问题方面所取得的一系列研究成果,主要讨论和介绍置换流水车间调度、零空闲流水车间调度、阻塞流水车间调度、零等待流水车间调度和批量流水车间调度等问题的数学模型、问题特性及优化方法。

本书可作为控制理论与控制工程、计算机科学与技术、管理科学与工程、机械工程等相关学科的教师、学生和研究人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流水车间调度及其优化算法/潘全科 高亮 李新宇 著. —武汉:华中科技大学出版社,2013.2

ISBN 978-7-5609-8423-0

I. 流… II. ①潘… ②高… ③李… III. 工业生产-流水生产线-车间调度-生产调度 IV. F406.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 236800 号

流水车间调度及其优化算法

潘全科 高亮 李新宇 著

策划编辑:王连弟

责任编辑:周忠强

封面设计:范翠璇

责任校对:刘峻

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)81321915

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:22

字 数:430千字

版 次:2013年2月第1版第1次印刷

定 价:88.00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

研究复杂制造系统的优化调度理论与方法是目前国际学术界和工业界一个跨学科的前沿研究方向,具有很强的工程应用背景,涉及系统工程、运筹学、人工智能、控制理论、计算机技术、管理工程等多门学科。有效调度算法和优化技术的研究与应用,是制造企业实现生产过程合理化、自动化、集成化,提高生产效益与市场竞争力的基础和关键。调度研究的问题是将稀缺资源分配为一定时间内的不同任务。具体地说,就是针对某项可以分解的工作,在满足一定技术和资源约束的条件下,合理安排各部分工作所占用的资源、加工时间及加工次序,最终使某项或多项性能指标达到最优或近优。生产调度问题具有诸多复杂性,譬如建模困难(表现为数学模型或仿真模型难以建立等)、计算复杂(表现为数学模型难以求解、性能评价费时甚至不准确等)、存在多约束(表现为工艺条件约束、加工能力约束等)、不确定(表现为加工数据或生产环境的随机性等)、多极小(表现为相应的优化曲面存在多个分布不规则的极小解等)、大规模(表现为工件数量庞大,解空间可能随问题规模的增长而呈指数增长等)、多目标(表现为必须同时考虑多个冲突目标的优化等)、离散和连续变量并存(表现为组合优化与函数优化的混合)等因素。研究表明,绝大多数调度问题属于 NP-hard 性质的问题,因此,其研究具有重要的学术意义和工程价值。

近年来,人们对调度问题进行了广泛的研究,其范围涉及单机调度问题、流水车间调度问题、作业车间调度问题和开放车间调度问题等。有关资料表明:约有 25% 的生产制造系统、组装线和信息服务设施可简化为流水车间模型。因此,流水车间调度问题成为研究最广泛的生产调度问题之一。本书力图总结作者和国内外同行在流水车间调度问题方面所取得的一系列研究成果,主要讨论置换流水车间调度、零空闲流水车间调度、阻塞流水车间调度、零等待流水车间调度和批量流水车间调度等问题的数学模型、问题特性及优化方法。全书共分 7 章,主要内容如下。

第 1 章为绪论,简要介绍调度问题的描述、分类及常见的生产调度方法。

第 2 章介绍以最大完成时间为优化目标的置换流水车间调度问题,包括问题的研究进展、数学模型、最大完成时间的计算方法、插入邻域的快速评价方法、启发式算法(包括 Johnson 算法、Campbell-Dudek-Smith 算法、Palmer 算法、Gupta 算法、Rapid Access 算法、NEH 算法、Raj 算法和 FRB 算法等)、离散微粒群及其混合算法等。

第 3 章介绍以总流经时间为优化目标的置换流水车间调度问题,包括有关优化算法的研究进展、简单启发式算法(如 Raj 算法、Ho 算法、RZ 算法、LIT 规则、SPD 规则、WY 算法、FL 算法和 LR 算法等)、复合启发式算法(如 IH 算法和 ICH 算法等)、离散微粒群调度算法和 Memetic 调度算法。



第4章介绍零空闲流水车间调度问题,包括有关优化算法的研究进展、混合整数规划模型和有向图模型、调度指标的计算方法、快速邻域搜索算法、特殊的零空闲流水车间调度问题及其特性、启发式算法(包括SGM算法、KK算法、IGA_BM算法和RVF算法等)、离散微粒群调度算法、基于和声搜索的多目标调度算法等。

第5章介绍阻塞流水车间调度问题,包括有关优化算法的研究进展、混合整数规划模型和有向图模型、调度指标的计算方法、启发式算法(如MM算法、PF算法、wPF算法、PW算法、PFE算法、PF-NEH算法、wPF-NEH算法、PW-NEH_{LS}算法和PF-NEH_{LS}算法等)、离散和声搜索算法及离散人工蜂群算法等。

第6章介绍零等待流水车间调度问题,包括有关优化算法的研究进展、问题描述和数学模型、调度指标的计算方法、快速邻域搜索算法、零等待调度问题的特征、启发式算法(包括NEH算法、Edy算法、SDH算法和Dipak算法等)、智能优化方法(如离散微粒群调度算法、离散和声搜索算法、离散差分进化算法等)。

第7章介绍批量流水车间调度问题,包括问题分类、有关优化算法的研究进展、E/T指标问题的优化调度方法(如差分进化算法、混合差分进化算法、离散差分进化算法等)、带有工件启动时间的批量流水车间调度问题(包含指标计算、快速插入邻域评价和人工蜂群调度算法等)、带有序列相关启动时间的等批量流水车间调度问题(包含指标计算、快速插入邻域评价和分布估计算法)等。

本书所涉及的研究成果是在国家自然科学基金创新群体项目(51121002)、国家自然科学基金重点项目(51035001)、国家863重点项目(2009AA044601)、国家自然科学基金项目(60874075、60973086、51005088、61174187、61104179)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0232)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2010DX005)等项目的资助下取得的。

本书的第1章主要由聊城大学计算机学院李俊青副教授完成,第2章由流程工业综合自动化国家重点实验室(东北大学)、聊城大学计算机学院潘全科教授完成,第3、4章分别由数字制造装备与技术国家重点实验室(华中科技大学)高亮教授和李新宇完成,第5章主要由聊城大学计算机学院硕士生韩玉艳完成,第6章主要由聊城大学研究生处高开周讲师完成,第7章主要由聊城大学数学科学院桑红燕讲师完成。此外,华中科技大学机械学院博士生张利平等参与了有关研究工作。

本书可作为控制理论与控制工程、计算机科学与技术、管理科学与工程、机械工程等相关学科的教师、学生和研究人员参考书。由于作者的水平有限,本书许多内容还有待完善和深入研究,不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

潘全科 高亮 李新宇

2011年10月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 调度问题描述及其分类	(1)
1.1.1 调度问题	(1)
1.1.2 调度问题模型及其分类	(2)
1.1.3 调度问题举例	(5)
1.2 生产调度方法	(9)
1.2.1 启发式调度方法	(10)
1.2.2 单解智能算法	(10)
1.2.3 基于群体的智能算法	(12)
本章参考文献	(15)
第 2 章 置换流水车间调度问题	(20)
2.1 $F_m prmu C_{\max}$ 的算法概述	(21)
2.2 $F_m prmu C_{\max}$ 的数学模型	(25)
2.2.1 混合整数规划模型	(25)
2.2.2 有向图模型	(26)
2.3 加工性能指标的计算	(29)
2.3.1 前向算法	(29)
2.3.2 反向算法	(30)
2.3.3 双向计算	(31)
2.4 $F_m prmu C_{\max}$ 的插入邻域快速评价	(32)
2.5 Taillard 曲型问题	(34)
2.6 启发式算法	(37)
2.6.1 Johnson 算法	(38)
2.6.2 Campbell-Dudek-Smith(CDS)方法	(38)
2.6.3 Palmer 启发式算法	(39)
2.6.4 Gupta 算法	(39)
2.6.5 RapidAccess(RA)算法	(40)
2.6.6 RACS 和 RAES 算法	(40)
2.6.7 Pour(PO)算法	(41)
2.6.8 Nawaz-Enscore-Ham(NEH)算法	(41)
2.6.9 NEH_D 算法	(43)
2.6.10 NEH_KK 算法	(45)



2.6.11	NEH_KK1 算法	(46)
2.6.12	Raj 算法	(47)
2.6.13	B5Cmax 算法	(48)
2.6.14	FRB 算法	(49)
2.6.15	PGh 和 NEH _{P1} 启发式算法	(51)
2.6.16	启发式算法的性能比较	(52)
2.7	DPSO 调度算法	(57)
2.7.1	解的表达	(57)
2.7.2	初始化	(57)
2.7.3	微粒的位置更新	(58)
2.7.4	微粒群的更新	(63)
2.7.5	DPSO 调度算法的流程	(63)
2.7.6	数值仿真研究	(63)
2.8	混合 DPSO 调度算法	(71)
2.8.1	解的扰动	(71)
2.8.2	邻域搜索	(72)
2.8.3	解的接收标准	(72)
2.8.4	HDPSO 调度算法	(73)
2.8.5	数值仿真研究	(73)
	本章参考文献	(80)
第 3 章	置换流水车间调度问题 (Total Flowtime)	(86)
3.1	$F_m pmu \sum_{j=1}^n F_j$ 的算法概述	(86)
3.1.1	启发式算法	(86)
3.1.2	智能优化算法	(91)
3.2	性能指标的计算	(94)
3.2.1	总流经时间	(94)
3.2.2	机器空闲时间	(94)
3.2.3	$F_m pmu \sum_{i=1}^m I_i$ 的插入邻域快速评价	(95)
3.2.4	$F_m pmu \sum_{i=1}^m F_i$ 的插入邻域快速评价	(96)
3.2.5	Taillard Benchmark 问题上界	(96)
3.3	启发式算法	(97)
3.3.1	Raj 算法	(97)
3.3.2	Ho 算法	(98)
3.3.3	RZ 算法	(99)

3.3.4	LIT 规则和 SPD 规则	(100)
3.3.5	WY 算法	(102)
3.3.6	FL 算法	(103)
3.3.7	LR 算法	(104)
3.3.8	IH 算法	(106)
3.3.9	IH-FL 算法	(106)
3.3.10	C1_FL 和 C2_FL 算法	(107)
3.3.11	ICH 算法	(107)
3.3.12	改进 LR 算法	(108)
3.3.13	启发式算法的性能比较	(108)
3.4	DPSO 调度算法	(112)
3.4.1	初始化	(112)
3.4.2	数值仿真研究	(112)
3.4.3	混合 DPSO 算法	(118)
3.5	Memetic 算法	(123)
3.5.1	算法编码与初始化	(123)
3.5.2	选择、交叉和变异	(123)
3.5.3	局部算法	(128)
3.5.4	种群的更新	(128)
3.5.5	多样性控制策略	(129)
3.5.6	MA 的算法步骤	(130)
3.5.7	MA 的标定	(131)
3.5.8	MA 的试验评价	(134)
	本章参考文献	(137)
第 4 章	零空闲流水车间调度问题	(142)
4.1	零空闲调度问题的算法概述	(143)
4.2	零空闲调度问题的数学模型	(144)
4.2.1	问题描述	(144)
4.2.2	混合整数规划模型	(144)
4.2.3	有向图模型	(145)
4.3	加工性能指标的计算	(147)
4.3.1	方法一	(147)
4.3.2	方法二——Kalczyński 和 Kamburowski 方法	(148)
4.3.3	方法三——前向计算法	(149)
4.3.4	方法四——反向计算法	(150)
4.3.5	方法五——双向计算法	(151)
4.4	快速邻域搜索	(153)



4.5	特殊的零空闲流水车间调度问题	(155)
4.5.1	$F_2 perm, no - idle C_{max}$	(155)
4.5.2	$F_3 perm, no - idle C_{max}$	(156)
4.5.3	$F_3 perm, no - idle C_{max}$ 的不规则现象	(158)
4.5.4	满足特定条件的 $F_3 perm, no - idle C_{max}$	(158)
4.5.5	满足特定条件的 $F_m perm, no - idle C_{max}$	(159)
4.6	启发式算法	(160)
4.6.1	SGM 算法	(160)
4.6.2	NEH 算法	(161)
4.6.3	KK 算法	(162)
4.6.4	IGA_BM 算法	(163)
4.6.5	RVF 算法	(164)
4.6.6	IsSGM 和 IiSGM 算法	(165)
4.6.7	IsKK 和 IiKK 算法	(165)
4.6.8	启发式算法的性能比较	(166)
4.7	DPSO 调度算法	(170)
4.7.1	$F_m perm, no-idle C_{max}$ 的优化	(170)
4.7.2	$F_m perm, no-idle \sum F_j$ 的优化	(175)
4.8	多目标零空闲流水车间调度问题	(178)
4.8.1	C_{max} 和 T_{max} 的计算	(178)
4.8.2	基于 Pareto 档案的和声搜索调度算法	(178)
4.8.3	仿真实验	(181)
	本章参考文献	(183)
第 5 章	阻塞流水车间调度问题	(188)
5.1	阻塞流水车间调度问题的算法概述	(188)
5.2	阻塞流水车间调度问题	(189)
5.2.1	问题描述	(189)
5.2.2	混合整数规划模型	(189)
5.2.3	有向图模型	(190)
5.3	性能指标的计算	(191)
5.4	启发式算法	(193)
5.4.1	MM 算法	(193)
5.4.2	MBT 算法	(194)
5.4.3	PF 算法	(194)
5.4.4	wPF 算法	(196)
5.4.5	PW 算法	(197)
5.4.6	PFE 启发式算法	(199)

5.4.7	PF-NEH(x)、wPF-NEH(x)与 PW-NEH(x)算法	(200)
5.4.8	PF-NEH _{LS} (x)、wPF-NEH _{LS} (x)和 PW-NEH _{LS} (x)算法	(202)
5.4.9	启发式算法的性能比较	(202)
5.5	离散和声搜索调度算法	(210)
5.6	离散人工蜂群调度算法	(219)
	本章参考文献	(227)
第 6 章	零等待流水车间调度问题	(230)
6.1	零等待调度问题的算法概述	(231)
6.2	零等待调度问题的模型	(232)
6.2.1	问题描述	(232)
6.2.2	整数规划模型	(232)
6.2.3	有向图模型	(233)
6.3	加工性能指标	(234)
6.3.1	C_{\max} 计算方法一	(234)
6.3.2	C_{\max} 计算方法二——Kalczynski 和 Kamburowski 算法	(236)
6.3.3	$\sum F_i$ 计算方法一	(236)
6.3.4	$\sum F_i$ 计算方法二——基于 Kalczynski 和 Kamburowski 算法	(237)
6.4	快速邻域搜索算法	(237)
6.4.1	快速插入邻域搜索算法	(237)
6.4.2	快速交换邻域搜索算法	(241)
6.5	零等待调度问题的特征	(243)
6.5.1	$F_2 \mid perm, no-wait \mid C_{\max}$	(243)
6.5.2	$F_m \mid perm, no-wait \mid C_{\max}$ 的块结构及其性质	(244)
6.5.3	$F_m \mid perm, no-wait \mid C_{\max}$ 的多重插入移动	(244)
6.5.4	$F_m \mid perm, no-wait \mid C_{\max}$ 的不规则现象	(246)
6.6	启发式算法	(249)
6.6.1	NEH 算法	(249)
6.6.2	Edy 启发算法	(250)
6.6.3	SDH 算法	(251)
6.6.4	Dipak 算法	(252)
6.6.5	SDH+Dipak 算法	(252)
6.6.6	仿真实验	(253)
6.7	智能计算方法	(257)
6.7.1	$F_m \mid perm, no-wait \mid C_{\max}$ 问题	(257)
6.7.2	$F_m \mid perm, no-wait \mid \sum F_j$ 的优化	(261)



6.7.3	NWFSP 的多目标优化	(266)
	本章参考文献	(276)
第 7 章	批量流水车间调度问题	(281)
7.1	批量流水车间调度问题分类	(282)
7.1.1	根据分批策略分类	(282)
7.1.2	根据启动时间分类	(283)
7.1.3	根据机器空闲时间分类	(283)
7.1.4	其他分类	(284)
7.2	批量流水车间调度问题研究进展	(284)
7.3	$LF_m \mid pmu \mid \sum_{j=1}^n \alpha_j E_j + \beta_j T_j$ 问题	(287)
7.3.1	问题描述	(287)
7.3.2	指标计算	(287)
7.3.3	批量移动法	(288)
7.3.4	DE 调度算法	(290)
7.3.5	混合 DE 调度算法	(291)
7.3.6	离散差分进化调度算法	(296)
7.4	$LF_m \mid pmu \text{ sequent-independent setup time} \mid C_{\max}$ 问题	(301)
7.4.1	问题描述	(301)
7.4.2	最大完成时间的计算方法	(301)
7.4.3	插入邻域快速算法	(304)
7.4.4	人工蜂群算法	(305)
7.4.5	离散 ABC 算法	(309)
7.5	$LF_m \mid pmu \text{ sequent-dependent setup time} \mid C_{\max}$ 问题	(316)
7.5.1	问题描述	(316)
7.5.2	最大完成时间的计算	(317)
7.5.3	基本 EDA 算法	(319)
7.5.4	EDA 调度算法	(320)
	本章参考文献	(333)

第 1 章 绪 论

调度研究的问题是将稀缺资源分配给在一定时间内的不同任务。它是一个决策过程,在大多数制造和生产系统及信息处理环境中扮演着重要的角色^[1]。随着生产规模的不断扩大,调度和决策对企业的管理和生产的重要性日渐凸显。好的调度方案可以提高企业的生产水平,使资源利用更合理,并提高市场竞争力。生产调度的研究主要可分为问题建模和调度算法设计两个方面,它是一个交叉性研究领域,涉及运筹学、计算机技术、控制理论、数学、工业工程等多个学科。问题建模主要研究调度模型、调度规则、目标函数等;调度算法设计主要研究算法复杂性、算法收敛性、算法质量等^[1-6]。本章主要介绍车间调度问题的基本概念、分类方法、典型问题及优化算法等。

1.1 调度问题描述及其分类

1.1.1 调度问题

调度问题一般是指在一定时间内,通过可用共享资源的分配和生产任务的排序,来满足指定的性能指标^[3,4]。生产调度问题一般可以描述为:针对某项可以分解的工作(如钢铁加工等),在一定的约束条件下(如工艺次序约束、资源约束、交货期约束等),如何安排其组成部分(工序)所占用的资源(如加工机床、缓冲区等)、加工时间及先后次序,以便使得某项或多项目标(如最大完成时间、总流经时间、等待时间等)最优化。

生产调度问题受多种因素影响^[4],包括产品的加工次序、车间生产能力,加工设备性能,原料的可用性、批量大小、加工成本,产品的投产期、交货期,零等待约束、零空闲约束、设备维修时间约束、模糊时间约束等。上述约束条件中,有些是生产过程中必须满足的,如交货期、生产能力、原材料供应、设备维修、产品加工次序等;有些约束条件则需要达到一定的满意度,如生产成本、批量大小等;另外,还有些约束条件是动态变化的,具有一定的不确定性,如设备故障维修、原材料供应的变化、模糊加工时间等。生产调度约束条件分类如图 1.1 所示。

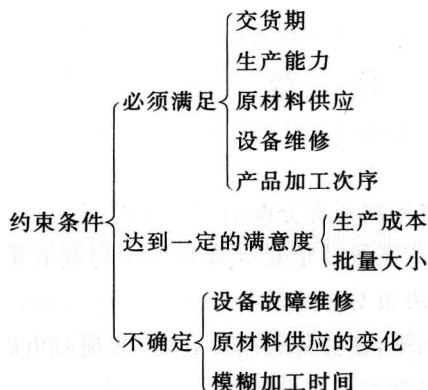


图 1.1 生产调度约束条件分类

生产调度问题的性能指标是评价调度方案优劣的依据,实际生产调度问题涉及的主要性能指标包括成本最低、费用最小、生产周期最短、设备利用率最高、约束惩罚最小、客户满意度最高、利润最大化等。其性能指标分类如图 1.2 所示。

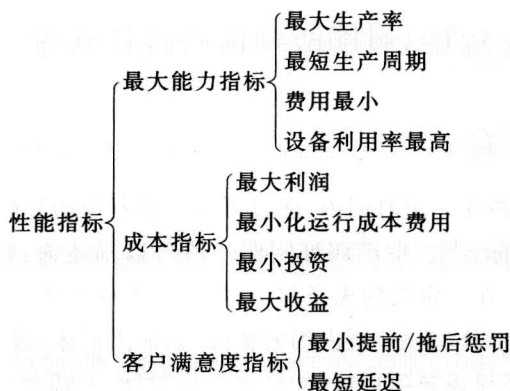


图 1.2 生产调度性能指标分类

1.1.2 调度问题模型及其分类

在调度问题中,一般存在 m 台机器(machine) $\{M_1, \dots, M_m\}$, n 个工件(Job) $\{J_1, \dots, J_n\}$, 每个工件有 h_i 道工序。一个调度问题通常用三元组 $\alpha|\beta|\gamma$ 来描述^[1], 其中, α 描述机器环境; β 提供加工特征和约束的细节, 可能包含任何一项, 也可能包含多个选项; γ 描述最小化的目标, 可以包含一个目标, 也可以包含多个目标。调度问题分类及其模型如表 1.1 所示。

表 1-1 调度问题分类及其模型

域	标志	含义
α	1	单一机床,加工所有工件
	P_m	并行的 m 台性能相同的机床,每个工件在指定的机床集合中选择一个进行加工
	Q_m	并行的 m 台性能不同的机床,每个工件在指定的机床集合中选择一个进行加工
	F_m	流水车间调度, m 台机床串行,每个工件按照相同的加工路径经过每台机床
	FF_c	柔性流水车间调度,是流水车间调度 F_m 和并行机 P_m 的一般化。有 c 个串行的工位,每个工位有多台并行同速机,每个工件可以在多台性能相同的机床(同一个工位)中选择一台进行加工,所有工件加工路径相同
	J_m	作业车间调度, m 台机床,每个工件有自己的加工路径
	FJ_c	柔性作业车间调度,是作业车间调度 J_m 和并行机 P_m 的一般化。有 c 个串行的工位,每个工位有多台并行同速机,每个工件可以在多台性能相同的机床(同一个工位)中选择一台进行加工,工件有自己独立的加工路径
	O_m	开放车间调度, m 台机床,每个工件在每台机床上都进行多次加工,但有些加工时间可以是零,每个工件的加工路径没有限制
β	r_j	工件释放时间,工件 j 不可能在它的释放时间 r_j 前开始加工。若约束中没有 r_j ,则工件 j 在 0 时刻即可以加工
	s_{ij}	工件切换时间,代表在同一机床上,工件 i 加工完毕,加工工件 j 需要的准备时间。若工件 j 是第一个工件,则 s_{0j} 表示工件 j 的准备时间;若工件 j 是最后一个工件,则 s_{j0} 表示工件 j 之后的清理时间;若 s_{ij} 是依赖于每台机床的,则用 s_{ijk} 表示在机床 k 上工件 i 和工件 j 的加工切换时间
	$prmp$	中断,允许中断一项正在加工的工件,然后把另一个工件放在该机床上加工。当中断的工件重新回到原来的机床上加工时,其之前的工作可以继续
	$prec$	优先(偏序)约束,当一个工件开始加工前,另一个或多个工件必须已经完成。如果每个工件最多有一个前驱,最多有一个后继,则称为链式优先约束;若每个工件最多有一个后继,则称为入树;若每个工件最多有一个前驱,则称为出树
	$Brkdwn$	机床故障,该约束分为固定时间段机床故障和可变时间段机床故障,在机床故障需要维修的时间段,工件不能在此机床上加工
	M_j	机床约束,该约束适用于并行机和柔性调度的环境中。集合 M_j 表示工件 j 的可选加工机床集合。集合 M_j 不出现,表示工件 j 可以在任意机床上加工
	$block$	阻塞约束,在一个流水车间中,若两台连续的机床之间有无限容量的缓冲区,则不会出现工件加工完毕阻塞在原机床的现象;若机床之间没有足够的缓冲区,则加工完毕的工件会阻塞在上游机床,从而不能进入下一道工序



域	标志	含义
β	nwt	无等待约束,在流水车间中,工件加工不允许在两台连续的机床间等待。为保证该约束,工件第一道工序的加工时间必须推迟。该约束一般用于对温度或特定环境要求严格的情况,如钢材加工等
	$recrc$	若工件允许再次访问同一台机床,则称为再循环约束
γ	C_{\max}	生产周期, $C_{\max} = \max\{C_1, \dots, C_n\}$ 其中, $C_i (i=1, \dots, n)$ 表示工件 i 的最后一道工序的完工时间。生产周期最小化意味着机器的高利用率
	F_{\max}	最大流经时间, $F_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} \{F_i\} = \max_{1 \leq i \leq n} \{C_i - r_i\}$, 其中, $C_i (i=1, \dots, n)$ 表示工件 i 的最后一道工序的完工时间, r_i 表示工件 i 的释放时间, F_i 表示工件 i 从开始释放到加工完毕离开系统所经历的时间,即工件 i 的流经时间
	W_{\max}	机床最大负载, $\min W_{\max} = \max_{1 \leq k \leq m} \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} p_{i,j,k} \right\}$, 其中, $p_{i,j,k}$ 表示工件 i 的第 j 道工序在机床 k 上加工的加工时间, n_i 表示工件 i 的工序数目
	W_{total}	机床总负载, $\min W_{\text{total}} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} p_{i,j,k} x_{i,j,k}$, 其中, $x_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & O_{i,j} \text{ 在机床 } M_k \text{ 上加工} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$
	C_{total}	总生产周期, $C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i$
	F_{total}	总流经时间, $F_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n F_i$
	\bar{W}	平均机床负载, $\bar{W} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_k$
	\bar{F}	平均完工时间, $\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i$
	L_{\max}	最大延迟, $L_{\max} = \max\{L_1, \dots, L_n\}$, 其中, $L_i (i=1, \dots, n)$ 表示工件 i 违反工期的惩罚
	L_{total}	总延迟时间, $L_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n L_i$
	\bar{L}	平均完工时间, $\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$
	\bar{N}_c	平均已完成工件数
	\bar{N}_u	平均未完成工件数
	\bar{I}	平均机器空闲时间
I_{\max}	最大机器空闲时间	

1.1.3 调度问题举例

1. 流水车间调度问题

流水车间调度问题(flow-shop scheduling problem, FSP)是工业生产领域中常用模型,也是目前学术界研究的热点问题^[6-20]。FSP 一般描述为: n 个工件在 m 台机床上加工,每个工件包含 h 道工序,每道工序分配到不同的机床上加工。 O_{ij} 表示第 i 个工件的第 j 道工序, n 个工件的 h 道工序的加工路径相同,即 $\text{Machine}(O_{ij}) = \text{Machine}(O_{uj})$,其中 $i \neq u, j = 1, \dots, h$ 。 O_{ij} 被指定在机床 $M_k (k = 1, \dots, m)$ 上加工, $p_{ijk} (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, h, k = 1, \dots, m)$ 表示其加工时间。固定分配机床的 FSP 问题是一般流水车间调度问题,每道工序被唯一指定在一台机床上加工,机床不能选择,即 $h = m$ 。FSP 调度任务是确定各个工件的加工次序,其目标是最大完成时间最小化。

FSP 假设如下:

- (1) 每个工件加工路径相同,不允许改变;
- (2) 每个时刻,每台机床只能加工一道工序,工序不允许中断;
- (3) 一个工件不能同时在不同机床上加工;
- (4) 工序的准备时间忽略不计,或者包含在加工时间中。

【例 1.1】某炼钢车间 FSP 举例。

假设有 A、B、C、D 四种工件,都需要经过冶炼、精炼、浇铸、精整四个流程,分别在电炉、钢包、模铸、修磨四台设备上加工,其生产线工业流程如图 1.3 所示,其加工时间如表 1.2 所示。其中 A、B、C、D 代表需要加工的工件,每个工件包含四道工序。该例题中, $n = 4, m = 4, h = 4$ 。

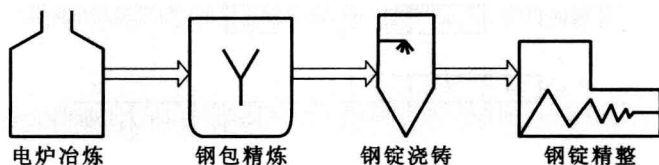


图 1.3 某生产车间工业流程图

表 1.2 FSP 加工时间表

工件名称	电炉工时/h	钢包工时/h	模铸工时/h	修磨工时/h
A	5	10	7	2
B	10	2	8	9
C	3	6	7	8
D	8	10	1	6
合计	26	28	23	25



如图 1.3 所示,每个工件有四道工序,每个工件加工路径相同,即经过电炉→钢包→模铸→修磨四台设备。

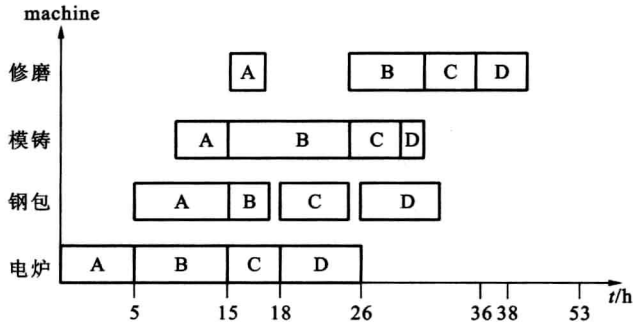


图 1.4 A→B→C→D 次序加工甘特图

图 1.4、图 1.5、图 1.6 分别给出了加工路径为 A→B→C→D、A→B→D→C、B→D→C→A 的甘特图,由图可知,三种加工次序的生产周期均为 53 h。虽然加工生产周期相同,但三种加工路径中,各台机床空闲时间段不同。例如,图 1.3 中,所有机床总空闲中断次数为 3 次,图 1.4 中,该数目为 2 次,而图 1.5 中为 6 次。因而,不同的调度虽然生产周期目标相同,但其他指标可能不同,导致调度具备多样性。

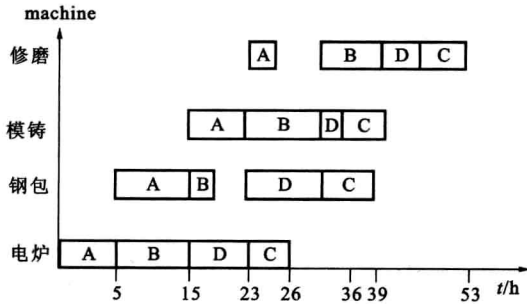


图 1.5 A→B→D→C 次序加工甘特图

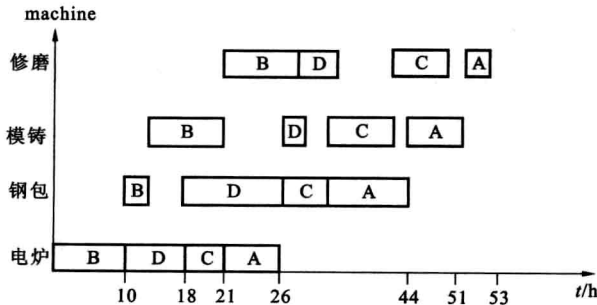


图 1.6 B→D→C→A 次序加工甘特图