



国家出版基金资助项目  
“十三五”国家重点图书出版规划项目  
智能制造与机器人理论及技术研究丛书



总主编 丁汉 孙容霖

# 制造系统智能调度方法与云服务

张洁 秦威◎著



ZHIZAO XITONG ZHINENG DIAODU FANGFA  
YU YUNFUWU



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

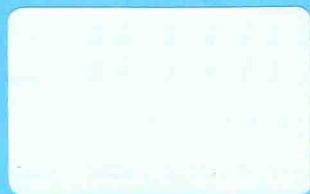


国家出版基金资助项目  
“十三五”国家重点图书出版规划项目  
智能制造与机器人理论及技术研究丛书

总主编 丁汉 孙容磊

# 制造系统智能调度方法与云服务

张洁 秦威◎著



ZHIZAO XITONG ZHINENG DIAODU FANGFA  
YU YUNFUWU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书在系统、全面介绍制造系统中的多种复杂调度问题的基础上,重点介绍了面向几类典型制造系统的智能化调度方法,具体包括非等效并行机智能调度方法、多工艺路线作业车间智能调度方法、混合流水车间智能调度方法以及混流装配线智能调度方法。考虑到云计算是实现分布式计算机群的海量数据资源和CPU资源高效整合的协同计算方法,本书还特别介绍了不同调度方法的云端化技术与实现方式,搭建了基于云计算的制造车间智能调度及服务系统。本书提出的方法和技术将为广大企业、科研院所、高等院校进一步深入研究制造系统调度问题提供理论基础,为推动我国制造业的智能化发展和企业应用提供参考,对提升我国制造业的核心竞争力具有重要意义。

本书主要面向从事制造系统调度优化方面研究的学者和工业界中长期寻找有效的制造系统调度方法的生产管理人员。本书也可作为机械工程、工业工程、自动化、计算机工程、管理工程等相关专业的研究生和高年级本科生的教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

制造系统智能调度方法与云服务/张洁,秦威著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.4  
(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)  
ISBN 978-7-5680-3592-7

I. ①制… II. ①张… ②秦… III. ①智能制造系统 IV. ①TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 063115 号

制造系统智能调度方法与云服务

张 洁 秦 威 著

Zhizao Xitong Zhineng Diaodu Fangfa yu Yunfuwu

策划编辑:万亚军

责任编辑:万亚军 邓 薇

封面设计:原色设计

责任校对:何 欢

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:武汉市金港彩印有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:15

字 数:245千字

版 次:2018年4月第1版第1次印刷

定 价:118.00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



# 智能制造与机器人理论及技术研究丛书

## 专家委员会

**主任委员** 熊有伦（华中科技大学）

**委 员**（按姓氏笔画排序）

卢秉恒（西安交通大学）      朱 荻（南京航空航天大学）      阮雪榆（上海交通大学）  
杨华勇（浙江大学）      张建伟（德国汉堡大学）      邵新宇（华中科技大学）  
林忠钦（上海交通大学）      蒋庄德（西安交通大学）      谭建荣（浙江大学）

## 顾问委员会

**主任委员** 李国民（佐治亚理工学院）

**委 员**（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）      王飞跃（中国科学院自动化研究所）  
王田苗（北京航空航天大学）      尹周平（华中科技大学）  
甘中学（宁波市智能制造产业研究院）      史铁林（华中科技大学）  
朱向阳（上海交通大学）      刘 宏（哈尔滨工业大学）  
孙立宁（苏州大学）      李 斌（华中科技大学）  
杨桂林（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）      张 丹（北京交通大学）  
孟 光（上海航天技术研究院）      姜钟平（美国纽约大学）  
黄 田（天津大学）      黄明辉（中南大学）

## 编写委员会

**主任委员** 丁 汉（华中科技大学）      孙容磊（华中科技大学）

**委 员**（按姓氏笔画排序）

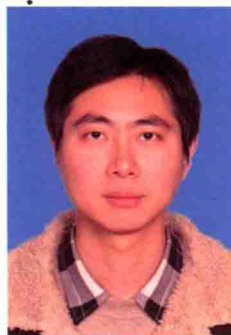
王成恩（东北大学）      方勇纯（南开大学）      史玉升（华中科技大学）  
乔 红（中国科学院自动化研究所）      孙树栋（西北工业大学）      杜志江（哈尔滨工业大学）  
张定华（西北工业大学）      张宪民（华南理工大学）      范大鹏（国防科技大学）  
顾新建（浙江大学）      陶 波（华中科技大学）      韩建达（中国科学院沈阳自动化研究所）  
蔺永诚（中南大学）      熊 刚（中国科学院自动化研究所）      熊振华（上海交通大学）



# 作者简介



▶ **张洁** 东华大学机械工程学院院长、教授、博士生导师。获南京航空航天大学博士学位，华中科技大学和香港大学博士后。法国里昂二大、美国加州大学伯克利分校、美国伊利诺伊大学香槟分校高级访问学者，上海交通大学教授、博士研究生导师，中国人工智能学会智能制造专业委员会副主任，中国科学技术协会智能制造学会联合体专业委员会委员。目前从事智能制造、大数据与人工智能领域的教学和科研工作，主持国家自然科学基金重点项目“大数据驱动的智能车间运行分析与决策方法的研究”和国家重点研发计划项目“面向纺织行业的机器人自动化生产线示范应用”，主持和参与多项工信部开展的智能制造专项项目。已经主持完成国家自然科学基金面上项目5项和国家科技部863计划项目5项，出版专著8部，发表论文两百余篇，获得专利和软件著作权近30项。



▶ **秦威** 上海交通大学副教授、博士研究生导师。2004年毕业于上海交通大学，之后分别于2006年、2011年获清华大学硕士学位和香港大学博士学位。长期从事复杂性科学，特别是复杂制造系统建模、优化与控制，智能制造，制造大数据分析挖掘等领域的研究工作。



## 总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人瞩目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是中国制造 2049 创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,制造科学和机器人学也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,Cybernetics 与 *Engineering Cybernetics* 等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等发展迅速,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎专家、教授从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成型和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、车联网、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版社等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值,扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,各界人士、高校师生、各领域专家和科技工作者对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者、编者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学教授

中国科学院院士

2017年9月



## 前言

近年来,随着大规模定制和协同生产模式的发展,制造企业需要获取客户的个性化定制数据和分布式环境下的车间制造数据,通过网络实现生产资源的合理配置。面对日益复杂的生产制造环境,企业与企业、车间与车间之间的互联程度越来越高,现代化制造系统正在逐渐向一个大类数据和信息汇聚的系统演变。优化制造调度系统是企业实现高效率的组织生产、快速响应市场变化、制造性价比优良、满足用户多样化需求的根本途径。

以计算机和互联网为主的信息技术革命已对我国制造业产生了深刻的影响,使制造业的资源配置向信息、知识密集的方向发展,具体表现为:①企业内部柔性化水平越来越高,多种生产模式混合;②企业之间的合作越来越密切,信息流量越来越多;③复杂的数据处理流程、异构的数据类型和纷繁多样的调度算法,需要通过相关技术协同完成任务;④系统的数据量、反应与执行速度要求越来越高;⑤系统的任务调度和计算过程需要向用户和调度人员公开。以上这些特点对传统封闭式的制造车间调度方法形成了巨大的挑战。随着云计算技术的飞速发展,将虚拟化技术与云服务结合,可以克服以上瓶颈,极大提升调度系统的运作能力,实现“按需即用,随需应变”,从而适应现代制造系统服务化创新的需求。

本书在系统、全面介绍制造系统中的多种复杂调度问题的基础上,重点介绍了面向几类典型制造系统的智能化调度方法,具体包括非等效并行机智能调度方法、多工艺路线作业车间智能调度方法、混合流水车间智能调度方法以及混流装配线智能调度方法。考虑到云计算是实现分布式计算机群的海量数据资源和 CPU 资源高效整合的协同计算方法,本书还特别介绍了不同调度方法的云端化技术与实现方式,搭建了基于云计算的制造车间智能调度及服务系统。本书提出的方法和技术将为广大企业、科研院所、高等院校进一步深入研





究制造系统调度问题提供理论基础,为推动我国制造业的智能化发展和企业应用提供参考,对提升我国制造业的核心竞争力具有重要意义。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金重点项目“大数据驱动的智能车间的运行分析与决策方法的研究”(No. 51435009)和面上项目“基于复杂网络理论的晶圆制造自动化物料运输系统动态调度方法”(No. 51775348)的资助,在此表示感谢!

本书主要面向从事制造系统调度优化方面研究的学者和工业界中期望寻找有效的制造系统调度方法的生产管理人员。本书也可作为机械工程、工业工程、自动化、计算机工程、管理工程等相关专业的研究生和高年级本科生的教材和参考书。

在本书编写过程中,研究生杨俊刚和张朋等承担了不少任务,付出了大量心血,研究生潘聪、汪俊亮、查栋焯等也参加了部分编写工作,在此对他们一并表示感谢。书稿编写过程中参考了大量的文献,作者在书中尽可能地标注了,有疏忽未标注的,敬请有关作者谅解,同时表示由衷的感谢。另外,华中科技大学高亮教授对本书的撰写提出了不少建设性的意见,华中科技大学出版社的编辑们也为本书的出版付出了大量的心血,在此表示由衷感谢!

智能制造系统调度的相关理论、方法和应用还处在迅速发展之中,已经引起越来越多的研究和应用人员的关注。由于作者的水平和能力有限,书中的缺点和疏漏在所难免,在此欢迎广大读者批评指正。

作者

2017年9月

# 目 录

第 1 章 制造系统调度 .....	(1)
1.1 制造系统调度概述 .....	(1)
1.2 制造系统调度基本问题模型 .....	(2)
1.2.1 单机调度 .....	(4)
1.2.2 并行机调度 .....	(5)
1.2.3 流水车间调度 .....	(5)
1.2.4 作业车间调度 .....	(6)
1.2.5 流程车间调度 .....	(8)
1.2.6 混合车间调度 .....	(11)
1.3 制造系统调度常用方法 .....	(12)
1.3.1 运筹学方法 .....	(12)
1.3.2 启发式规则 .....	(13)
1.3.3 智能优化算法 .....	(15)
1.4 本书的主要内容和结构体系 .....	(18)
第 2 章 制造系统智能调度方法 .....	(21)
2.1 智能调度方法概述 .....	(21)
2.2 蚁群算法 .....	(22)
2.2.1 蚁群算法基本原理 .....	(22)
2.2.2 蚁群算法在制造系统调度中的应用 .....	(24)
2.3 遗传算法 .....	(25)
2.3.1 遗传算法基本原理 .....	(25)
2.3.2 遗传算法在制造系统调度中的应用 .....	(26)
2.4 其他智能调度算法 .....	(27)



2.4.1	模拟退火算法 .....	(27)
2.4.2	禁忌搜索算法 .....	(29)
2.4.3	粒子群算法 .....	(31)
2.4.4	帝国竞争算法 .....	(33)
2.5	本章小结 .....	(34)
	参考文献 .....	(35)
<b>第3章</b>	<b>基于云计算的制造系统调度服务体系 .....</b>	<b>(38)</b>
3.1	云计算与服务型制造 .....	(38)
3.1.1	云计算的提出与发展 .....	(38)
3.1.2	云计算技术 .....	(39)
3.1.3	基于云计算的服务型制造 .....	(42)
3.2	制造系统云调度服务 .....	(43)
3.2.1	云调度服务的意义 .....	(43)
3.2.2	云调度服务的功能 .....	(44)
3.2.3	云调度服务的核心思想 .....	(44)
3.2.4	制造系统调度的云服务实现要素 .....	(46)
3.3	面向多制造过程的智能调度插件 .....	(49)
3.4	制造系统云调度服务平台商业模式 .....	(51)
3.5	本章小结 .....	(52)
	参考文献 .....	(52)
<b>第4章</b>	<b>非等效并行机智能调度方法 .....</b>	<b>(53)</b>
4.1	非等效并行机调度问题描述 .....	(53)
4.2	等效并行机调度方法综述 .....	(53)
4.3	针对可重入特性的非等效并行机调度 PD-SRPT 规则 .....	(55)
4.4	基于递阶混合帝国竞争算法的非等效并行机动态调度算法 .....	(55)
4.4.1	时间窗口滚动策略 .....	(55)
4.4.2	编码解码策略 .....	(56)
4.4.3	集成 PD-SRPT 规则的递阶混合帝国竞争算法 .....	(58)
4.5	应用验证 .....	(59)
4.5.1	算法参数实验 .....	(59)
4.5.2	关键影响因子分析 .....	(61)

4.5.3	算法性能对比实验 .....	(62)
4.6	非等效并行机智能调度算法的云端化处理 .....	(64)
4.7	本章小结 .....	(64)
<b>第5章</b>	<b>多工艺路线作业车间智能调度方法 .....</b>	<b>(65)</b>
5.1	多工艺路线作业车间调度问题描述 .....	(65)
5.2	多工艺路线作业车间调度方法综述 .....	(68)
5.3	面向多目标优化的三阶段蚁群调度算法 .....	(71)
5.3.1	多工艺路线作业车间调度模型 .....	(71)
5.3.2	蚁群状态转移规则 .....	(74)
5.3.3	基于 Pareto 排序的信息素更新策略 .....	(75)
5.3.4	局部搜索策略 .....	(76)
5.4	实验验证 .....	(78)
5.4.1	多目标 FJSP-PPF 算例 Pareto 解分布实验 .....	(78)
5.4.2	文献算例对比实验 .....	(81)
5.4.3	单目标与多目标 TMACO 对比实验 .....	(85)
5.5	多工艺路线作业车间智能调度算法的云端化处理 .....	(89)
5.6	本章小结 .....	(89)
	参考文献 .....	(90)
<b>第6章</b>	<b>混合流水车间智能调度方法 .....</b>	<b>(92)</b>
6.1	混合流水车间调度问题描述 .....	(92)
6.2	混合流水车间调度方法综述 .....	(92)
6.2.1	静态调度 .....	(92)
6.2.2	动态调度 .....	(94)
6.3	混合流水车间静态调度算法 .....	(97)
6.3.1	数学模型 .....	(97)
6.3.2	基于三阶段蚁群搜索算法的效用函数法 .....	(101)
6.3.3	基于改进三阶段蚁群搜索算法的 Pareto 优化方法 .....	(107)
6.3.4	实验验证 .....	(114)
6.4	混合流水车间智能调度算法云端化处理 .....	(124)
6.5	本章小结 .....	(124)
	参考文献 .....	(125)





<b>第 7 章 混流装配线智能调度方法</b> .....	(129)
7.1 混流装配线调度问题描述 .....	(129)
7.2 混流装配线调度方法综述 .....	(130)
7.2.1 正向调度 .....	(130)
7.2.2 逆向调度 .....	(133)
7.3 混流装配生产正向智能调度方法 .....	(137)
7.3.1 混流装配生产正向调度数学模型 .....	(137)
7.3.2 基于改进两级遗传算法的正向调度求解方法 .....	(139)
7.3.3 正向调度算法性能验证 .....	(145)
7.3.4 实例验证 .....	(149)
7.4 混流装配线逆向智能调度方法 .....	(152)
7.4.1 平尾装配生产逆调度问题的数学模型 .....	(152)
7.4.2 基于自适应容忍度驱动机制的逆调度策略 .....	(156)
7.4.3 基于混合遗传算法的逆调度求解方法 .....	(158)
7.4.4 逆调度方法性能验证 .....	(164)
7.4.5 实例验证 .....	(173)
7.5 混流装配线智能调度算法云端化处理 .....	(175)
7.6 本章小结 .....	(175)
参考文献 .....	(176)
<b>第 8 章 面向多制造过程的调度算法库与插件</b> .....	(181)
8.1 应用背景 .....	(181)
8.2 总体设计 .....	(181)
8.2.1 开发思想 .....	(181)
8.2.2 系统架构 .....	(182)
8.2.3 关键业务功能与流程 .....	(182)
8.2.4 系统开发环境 .....	(184)
8.3 功能实现设计 .....	(184)
8.3.1 概述 .....	(184)
8.3.2 通用功能 .....	(187)
8.3.3 问题定义 .....	(190)
8.3.4 算法插件 .....	(193)

8.3.5	模型建立	(194)
8.3.6	算法求解	(197)
8.3.7	结果输出	(198)
8.4	平台集成	(199)
8.4.1	算法库提供的 WebService	(199)
8.4.2	算法库提供的方法参数说明	(199)
8.5	本章小结	(202)
<b>第 9 章</b>	<b>制造系统智能调度云服务平台原型系统</b>	<b>(203)</b>
9.1	应用背景与概念定义	(203)
9.1.1	应用背景	(203)
9.1.2	概念定义	(204)
9.2	平台原型系统总体设计	(205)
9.2.1	制造系统调度云服务核心思想	(205)
9.2.2	系统体系架构	(206)
9.2.3	功能设计	(207)
9.2.4	系统集成	(208)
9.3	关键功能模块实现	(210)
9.3.1	数据采集模块	(210)
9.3.2	数据存储模块	(211)
9.3.3	调度算法库模块	(212)
9.3.4	调度方案执行监控模块	(213)
9.3.5	服务封装与发布模块	(214)
9.3.6	用户在线交互模块	(215)
9.4	应用实例	(216)
9.4.1	平台配置	(217)
9.4.2	制造系统算法集成	(217)
9.4.3	平台测试	(218)
9.5	本章小结	(220)



# 第 1 章

## 制造系统调度

### 1.1 制造系统调度概述

制造业在一个国家乃至整个世界的经济和社会发展中起着举足轻重的作用。进入二十一世纪以后,随着全球制造时代的到来,市场经济正朝着国际化、全球化方向发展。市场变化迅速、竞争激烈,导致制造领域的市场竞争更加激烈。一方面,新技术正以前所未有的速度发展和更新,同时新材料、新工艺不断涌现,使得产品更新速度加快,产品的开发周期越来越短。另一方面,顾客对产品的需求日益多样化、个性化,要求产品更新换代更快、质量更好、价格更低、产品的知识和技术含量更高。这就要求制造企业能够快速地将新技术、新功能有效地集成到现有系统中,并能高效率地组织生产,快速响应市场的变化,制造出性价比高的、满足用户要求的产品。为此,制造企业迫切需要寻求先进的制造技术及现代管理技术,以适应市场竞争。

近年来,随着大规模定制和协同制造生产模式的发展,制造企业需要实时获取客户的个性化定制数据和分布式环境下的制造车间在线信息,并通过网络系统配置各方资源,组织生产。面对日益复杂的生产制造环境,企业与企业之间,车间与车间之间的互联程度也越来越高,现代化制造系统正在逐渐向一个大类数据和信息汇聚的系统演变。制造车间智能调度系统作为企业组织生产的核心工具,也将面临向多车间协同管理的运行模式转变。国务院于 2015 年发布的《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》中,“互联网+”协同制造就是重点行动之一,旨在推动互联网与制造业融合,提升制造业数字化、网络化、智能化水平,加强产业链协作,发展基于互联网的协同制造新模式。在重



点领域推进智能制造、大规模个性化定制、网络化协同制造和服务型制造,打造一批网络化协同制造公共服务平台,加快形成制造业网络化产业生态体系。因此,在这一行动中,寻求制造车间智能调度系统新的技术支持,提升制造系统智能化水平成为目前亟须解决的问题。

生产调度问题是生产过程中最古老的问题之一,伴随着大生产的进程而产生。但其真正的发展是近几十年的事,特别是在管理成为制约现代企业发展的重要因素的情况下,人们逐渐认识到车间调度已成为生产过程的关键瓶颈之一。生产调度的优化是先进制造技术和现代管理技术的核心技术。国际生产工程学会(CIRP)曾总结了40种先进的制造模式,无论哪一种制造模式都是以优化的生产调度为基础的。有关资料表明,制造过程95%的时间消耗在非切削过程中,因此制造过程的调度技术,将在很大程度上影响制造的成本和效率。当前,我国引进了大量的国外先进制造技术,如ERP(enterprise resource planning,企业资源计划)等,但如果不能研制开发出适应这些技术的生产技术(如调度优化技术),那么这些技术的效用将大打折扣,甚至完全失效。有效的调度方法与优化技术,将在我国由制造业大国向制造业强国迈进的过程中发挥积极的促进作用。因此,研究先进的制造系统调度技术对于我国制造业的发展意义重大。

调度问题是在实际工作中广泛应用的运筹学问题,可以定义为“把有限的资源在时间上分配给若干个任务,以满足或优化一个或多个目标”。调度不只是排序,它还根据得到的排序确定各个任务的开始时间和结束时间。而制造系统中的有限资源包括设备、人员、工装、零部件等,因此,制造系统调度是指针对一项可分解的工作(如产品制造),在尽可能满足约束条件(如工艺路线、资源情况、交货期等)的前提下,通过下达生产指令,安排其组成部分(操作)所使用的资源、加工时间及加工的先后顺序,以实现产品制造时间、成本等的最优化。

## 1.2 制造系统调度基本问题模型

制造系统调度问题一般可以描述为: $n$ 个工件在 $m$ 台机器上加工。一个工件分为 $k$ 道工序,每道工序可以在若干台机器上加工,并且必须按一些可行的工艺次序进行加工;每台机器可以加工工件的若干工序,并且在不同的机器上



加工的工序集可以不同。调度的目标是将工件合理地安排到各机器,并合理地安排工件的加工次序和加工开始时间,使约束条件被满足,同时优化一些性能指标。在实际制造系统中,还要考虑刀具、托盘和物料搬运系统的调度问题。

### 1) 离散制造系统调度问题

一般制造系统调度问题采用“ $\alpha|\beta|\gamma$ ”的三元组符号来表示,其中 $\alpha$ 表示制造系统机器环境,如设备数量等,直观反映了问题复杂度; $\beta$ 表示制造系统的加工特性,如生产约束条件(如调整时间约束、交货期约束等); $\gamma$ 表示生产调度性能指标(如最大完工时间、生产周期、准时交货率等)。根据加工系统的复杂度,Graves等人将车间调度问题分为以下四类。

(1) 单机调度问题:加工系统只有一台机床,待加工的零件也都只有一道工序,所有零件都在该机床上加工。单机调度问题是最简单的调度问题,当生产车间出现瓶颈时,机床的调度就可视为单机调度。

(2) 并行机调度问题:加工系统有一组功能相同的机床,待加工的零件都只有一道工序,可选任一台机床来加工零件。其中,根据相同功能的设备组内设备的加工能力是否相同,又可以将并行机调度问题分为等效并行机调度问题和非等效并行机调度问题。

(3) 流水车间调度问题:加工系统有一组功能不同的机床,待加工的零件包含多道工序,每道工序在一台机床上加工,所有零件的加工路线都是相同的。

(4) 作业车间调度问题:加工系统有一组功能不同的机床,待加工的零件包含多道工序,每道工序在一台机床上加工,零件的加工路线互不相同。

以上生产调度问题均属于离散制造系统调度问题。其生产的产品一般是由多个零件装配成的,这些零件的制造过程不连续,各阶段、各工序之间存在明显的停顿和等待时间。

事实上,除了离散制造系统调度问题之外,还有如下系统调度问题。

### 2) 流程车间调度问题

在化工、冶金、石油、电力、橡胶、制药、食品、造纸、塑料、陶瓷等行业还存在着区别于离散制造系统调度的流程车间调度问题,这类车间通过混合、分离、成形或化学反应使原材料增值,其生产过程一般是连续的或成批量的,需要严格的过程控制和安全措施,具有工艺过程相对固定、生产周期短、产品规格低、批量大等特点。