

上海科学普及出版社

现代排序论

唐国春 张 峰 罗守成 刘丽丽 著

THEORY OF
MODERN
SCHEDULING

上海科技专著出版资金

现代排序论

Theory of Modern Scheduling

唐国春 张 峰 罗守成 刘丽丽 著

上海科学普及出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代排序论/唐国春等著. —上海: 上海科学普及出版社, 2003.5

ISBN 7-5427-2167-4

I. 现... II. 唐... III. 排序 IV. 0223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 093522 号

本书由上海科技专著出版资金资助

责任编辑 陈英黔

现代排序论

唐国春 张 峰 罗守成 刘丽丽 著

上海科学普及出版社出版发行

(上海中山北路 832 号 邮政编码 200070)

各地新华书店经销 商务印书馆上海印刷股份有限公司印刷

开本 787 × 1092 1/16 印张 22.75 字数 575000

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—1100

ISBN 7-5427-2167-4/O·50 定价: 78.00 元

内 容 简 介

排序论作为运筹学的一个分支,有着深刻的实际背景和广阔的应用前景。排序论一直受到国际上学术界的重视。从深层次和长远来看,排序论对提高效率、资源的开发和配置、工程进展的安排以及经济运行等方面都能起到辅助科学决策的作用,管理层和决策层不能不了解有关排序的理论和应用。

排序分为经典排序和现代排序。现代排序是相对于经典排序而言,也就是非经典的、新型的排序。现代排序的特征是突破经典排序关于资源类型、确定性、可运算性、单目标和正则性等基本假设,主要有可控排序、成组分批排序、在线排序、同时加工排序、准时排序和窗时排序、不同时开工排序、资源受限排序、随机排序、模糊排序、多目标排序等10种。本书是国内外第一本系统论述现代排序这10个研究方向的专著。本书的引论介绍排序论的基本概念,介绍经典排序的基本假设和现代排序的特征,介绍排序问题的三参数表示。第1章到第10章介绍10种现代排序。最后有3个附录。附录1“英汉排序词汇”有利统一排序的术语,附录2“排序问题计算复杂性汇总”和附录3“国内外排序文献目录”对学习和研究排序问题带来很大的方便。

本书是关于现代排序论的专著。阅读本书需要有微积分、线性代数和概率统计的知识,还需要了解经典排序的基本内容。本书可作为相关专业大学生和研究生的教材,也可作为运筹学、组合最优化和排序学科领域的理论工作者和应用工作者的参考书。

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

序 言

数学,作为一门学科,它所研究的问题至少包含两个方面.一类是由数学本身的发展所引起的,一类是起源于实际的.

有些出自于数学发展中必然遇到的问题,例如五次或五次以上方程是否存在一个代数解法的问题,也就是说,是否能把五次或五次以上方程的根用它的系数的代数式子表达出来;又如一个代数方程是否具有实根的问题,等等.这些问题的解决可以省去千万人的劳力,对数学的发展起到非常重要的作用.有些问题则出自数字间存在的关系,像 Goldbach 问题, Fermat 问题等.有些出自于图形的几何结构,像初等几何中的许多问题、四色问题等.有些则是某些数学工作者在工作过程中,出于一时的灵感或好奇,提出的一些问题,像单叶函数中的 Bieberbach 问题.这些问题的解决与否,虽不能断然说无关于实际,但确实与生产实际相隔甚远.其中某一问题若得到解决,解决者固然高兴,其余从事这一问题的人则不免产生一种惘然若失、无所适从之感.为了避免此种现象的出现,我认为,这类问题,特别是那些在解决之后可望给国家带来某种荣誉的问题,可以作为某些数学工作者,例如学校的数学教师的一种业余追求.对于其中某些在研究过程中取得某种程度的突破的人,则在时间上和物质上给予适当资助.就像培养运动员那样,经常进行选拔和淘汰.这样,取得成功的希望可能会大一些.那些即使在这问题上没有做出实质性贡献的人,由于其在教学工作中已作出成绩,也不致感到虚度此生.上述这类问题我们称之为纯数学或理论数学问题.

另一类所谓应用数学问题起源于实际:由于研究物体的运动规律而引发的微分方程的研究,由于研究事物发生的可能性而引发的概率和统计,等等.它们各自在社会生产中起到特有的作用.

数学作为一种重要的生产力只是在近代工业的发展中才逐渐显露出来.近代工业的发展表现在生产规模和产品更新的迅速变化方面.因此,生产的组织、市场的管理、交通运输的安排,以至战场的指挥,特别是现代高科技电子战争的指挥,等等,比过去发生了巨大的变化.个人的经验和智慧不得不让位于精密的分析和快速的计算;也就是说,在解决问题时,要求对有关的主要因素之间的依存关系作出有说服力的表达,并快速从中获取有关的数量.而这正是数学工作者喜爱的工作.但要培养在这方面具有适应能力的高级人才,没有长期不懈的努力很难奏效.因此,多出版一些有关的著作,激发年轻有为的人才投入这方面的研究工作,对加快我国的工业化建设必能有所裨益.

作为一门新兴的应用数学,我们的工作既不同于传统的数学研究,即证明某一命题的是或非,也不同于去解决某一实际课题.我们是要从众多的实际问题中提炼出某些带有普遍性的问题,将问题用某种数学形式表达出来之后(一般说来,一个问题往往是一个带有许多参数的问句),我们就要为之寻找某种算法.这种算法不同于所谓“软件包”.我们所给出的结果应是可以严格地被证明就是我们所需要的结果.使得当参数的值具体给定之后(即

给出实例),根据这一算法,我们即可求出所要的答案.因此,我们所要做的是:对问题进行分析,研究它的可解性以及提出有关的算法.由于实际问题涉及的因素很多,这也就刺激了大型计算机的发展.本书所讲的内容是属于这类问题.

排序理论是组合优化这门学科的一个重要组成部分.排序问题是工业生产中一类带有普遍性的问题.将原材料通过各种机器加工成某些所要的零件需要排序;将生产出来的许多零件组装成某种产品需要排序;一个大型的工程在兴建当中,必须要对各类人员进行安排、对各种器材的供应进行调度,都需要排序.这类问题,何时无之,何地无之.对于大型的、复杂的工作,排序的好坏对工程费用的大小影响至大.排序问题也与其他组合优化问题相似,不同的模型需要用不同的方法去处理.有时,即使是同一模型,由于参数取值范围的不同,问题的难度就有天渊之别.此中况味,不入此道者难以体会.在 20 世纪 80 年代以前,对排序问题的研究主要集中在一些所谓的经典模型上;近十多年来,则出现了许多新的模型.这两者的差异主要表现在加工方式和目标函数上(可参考本书引论的第 0.2 节),从而也表现在用来解决问题的方法上.关于经典问题,国内外都存在一些可供参考的书籍.但对于近代的模型来说,据我所知,这是第一本将有关成果、根据不同的模型分门别类整理成册的著作.通过它,读者可以了解到当今排序理论的发展.它既可作为大学里有关课程的教本,也可作为想进入这一研究领域的学者的参考书.由于涉及的面相当广泛,某些定理的证明不可能写得仔细,但读者可以根据所引文献,深入思考,溯流寻源,由此即可进入研究领域.

本书的问世必将有助于组合优化这门学科在我国得到推广和发展,故乐为之序.

越民义

2002 年 8 月 29 日

目录

序言	1
引论	1
第 0.1 节 排序和安排时间表	1
第 0.2 节 现代排序的特征	4
第 0.3 节 三参数表示	5
1 可控排序	15
第 1.1 节 加工时间可控的排序问题	16
第 1.2 节 就绪时间可控的排序问题	30
第 1.3 节 交货期可控的排序问题	33
第 1.4 节 离散加工时间的可控排序问题	34
第 1.5 节 最大控制费用的可控排序问题	36
2 成组分批排序	40
第 2.1 节 成组分批排序问题的数学模型	41
第 2.2 节 成组排序问题	43
第 2.3 节 分批排序问题	50
第 2.4 节 单台机器加工时间相同的分批排序	51
第 2.5 节 单台机器加工时间不相同的分批排序	55
3 在线排序	57
第 3.1 节 单台机器在线排序	58
第 3.2 节 平行机在线排序	59
第 3.3 节 自由作业在线排序	67
第 3.4 节 半在线排序	73
4 同时加工排序	83
第 4.1 节 机器容量有限的同时加工排序问题	84
第 4.2 节 机器容量无限的同时加工排序问题	107
5 准时排序和窗时排序	114
第 5.1 节 按时完工的窗时排序问题	115

第 5.2 节	共同交货期的准时排序问题	118
第 5.3 节	共同交货期的窗时排序问题	125
6	机器不同时开工排序	129
第 6.1 节	起作用的机器	129
第 6.2 节	最大完工时间为最小的机器不同时开工排序	132
第 6.3 节	最小完工时间为最大的机器不同时开工排序	139
7	资源受限排序	146
第 7.1 节	可恢复资源的排序问题	147
第 7.2 节	不可恢复资源的排序问题	152
第 7.3 节	多资源排序问题	155
第 7.4 节	机器加工能力受限排序问题	160
8	随机排序	166
第 8.1 节	随机排序问题	166
第 8.2 节	单台机器随机排序	169
第 8.3 节	串联机随机排序	176
第 8.4 节	平行机随机排序	180
9	模糊排序	182
第 9.1 节	模糊交货期的排序问题	182
第 9.2 节	模糊加工时间的排序问题	191
10	多目标排序	202
第 10.1 节	第 1 类多目标排序	202
第 10.2 节	第 2 类多目标排序	207
第 10.3 节	第 3 类多目标排序	211
第 10.4 节	多目标排序之间的关系	212
附录 1	英汉排序词汇	213
附录 2	排序问题计算复杂性汇总	224
附录 3	国内外排序文献目录	253
后记		352

CONTENTS

Preface	1
Introduction	1
Section 0.1 Sequencing and Scheduling	1
Section 0.2 Characteristics of New Classes of Scheduling	4
Section 0.3 Three-Field Representation	5
Chapter 1 Controllable Scheduling	15
Section 1.1 Scheduling Problems with Controllable Processing Times	16
Section 1.2 Scheduling Problems with Controllable Release Times	30
Section 1.3 Scheduling Problems with Controllable Due Dates	33
Section 1.4 Scheduling Problems with Discretely Controllable Processing Times	34
Section 1.5 Controllable Scheduling for Maximum Control Costs	36
Chapter 2 Scheduling with Batching and Lot-Sizing	40
Section 2.1 The Model of Scheduling with Batching and Lot-Sizing	41
Section 2.2 Scheduling with Batching	43
Section 2.3 Scheduling with Lot-Sizing	50
Section 2.4 Scheduling with Lot-Sizing for Identical Jobs on a Single Machine	51
Section 2.5 Scheduling with Lot-Sizing for Non-Identical Jobs on a Single Machine	55
Chapter 3 On-Line Scheduling	57
Section 3.1 On-Line Scheduling on a Single Machine	58
Section 3.2 On-Line Scheduling on Parallel Machines	59
Section 3.3 On-Line Scheduling on Open Shops	67
Section 3.4 Semi On-Line Scheduling	73
Chapter 4 Scheduling a Batching Machine	83
Section 4.1 The Bounded Model for Scheduling a Batching Machine	84
Section 4.2 The Unbounded Model for Scheduling a Batching Machine	107
Chapter 5 JIT Scheduling and Due Windows Scheduling	114

Section 5.1	Due Windows Scheduling for on Time	115
Section 5.2	JIT Scheduling with Common Due Date	118
Section 5.3	Due Windows Scheduling with Common Due Date	125
Chapter 6	Scheduling with Nonsimultaneous Machine Available Time	129
Section 6.1	Active Machines	129
Section 6.2	Scheduling Parallel Machine to Minimizing Makespan	132
Section 6.3	Scheduling Parallel Machine to Maximizing the Minimum Machine Completion Time	139
Chapter 7	Resource-Constrained Scheduling	146
Section 7.1	Scheduling Problems with Discrete Renewable Resource	147
Section 7.2	Scheduling Problems with Nonrenewable Resource	152
Section 7.3	Multiple Resource-Constrained Scheduling Problems	155
Section 7.4	Machine Capability-Constrained Scheduling Problems	160
Chapter 8	Stochastic Scheduling	166
Section 8.1	Stochastic Scheduling Problems	166
Section 8.2	Stochastic Single Machine Scheduling	169
Section 8.3	Stochastic Shop Scheduling	176
Section 8.4	Stochastic Parallel Machine Scheduling	180
Chapter 9	Fuzzy Scheduling	182
Section 9.1	Scheduling Problems with Fuzzy Due Date	182
Section 9.2	Scheduling Problems with Fuzzy Processing Time	191
Chapter 10	Multicriteria Scheduling	202
Section 10.1	Multicriteria Scheduling I - Hierarchical Solution	202
Section 10.2	Multicriteria Scheduling II - Efficient Solution	207
Section 10.3	Multicriteria Scheduling III - Weighted Criteria	211
Section 10.4	Relationships among Three Types of Multicriteria Scheduling	212
Appendix 1	English-Chinese Scheduling Vocabulary	213
Appendix 2	Complexity Results for Scheduling Problems	224
Appendix 3	Bibliography	253
Afterword		352

引 论

在排序论中,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;安排时间表(scheduling)是在一定的约束条件下对工件和机器按时间进行分配和安排次序,使某一个或某一些目标达到最优.安排次序(sequencing)是一种特殊的安排时间表问题,是只要确定工件的次序就完全确定工件的加工.现在把 sequencing 和 scheduling 都称为排序,是尊重使用的习惯和方便.排序有两种涵义:狭义的是 sequencing,是安排次序;广义的是 scheduling,是安排时间表. Timetabling 也是安排时间表,是指安排课程表,安排(火车或飞机)时刻表等.与作为最优化问题的 scheduling 不同, timetabling 要解决的是“存在性”问题,是判别和设计是否存在符合某些要求的时间表.本书研究现代排序论,是研究组合最优化中的新型的排序问题.本章介绍排序论的基本概念,介绍经典排序的基本假设和现代排序的特征,介绍排序问题的三参数表示.

第 0.1 节 排序和安排时间表

排序论又称为时间表理论,其作为运筹学的一个分支,作为一门应用科学,有着深刻的实际背景和广阔的应用前景.题为《美国国防部与数学科学研究》的报告认为,20 世纪 90 年代以至整个 21 世纪数学发展的重点,将从连续的对象转向离散的对象,并且组合最优化将会有很大的发展,因为“在这个领域内存在着大量急需解决而又极端困难的问题,其中包括如何对各个部件进行分隔、布线和布局的问题”^[2346].这“分隔、布线和布局”就与排序有关.排序的英文用词是 scheduling,在自动化学科中又称为调度(《英汉自动化词汇》疏松桂等编,科学出版社,1985 年 4 月第 1 版第 480 页).然而,用“排序”或“调度”来作为 scheduling 的中文译名都只是描述 scheduling 的一个侧面. Scheduling 既有“分配(allocation)”的作用,是把被加工的对象“工件”分配给提供加工的对象“机器”以便进行加工;又有“排序”的功能,有被加工的对象“工件”的次序和提供加工的对象“机器”的次序这两类次序的安排;还有“调度”的效果,是在于把“机器”和“工件”按时间进行调度.“工件”何时就绪,何时安装,何时开始加工,何时中断加工(preempt),何时更换“工件”,何时再继续加工原“工件”,直到何时结束加工;“机器”何时就绪,何时进行加工,何时空闲(idle),何时更换“机器”等等.这些都是按时间进行“分配”、“排序”和“调度”.单纯的分配问题,单纯地把“工件”分配给“机器”以便进行加工,是一个数学规划问题.单纯的次序安排问题是 sequencing 问题.从词义和词性上来分析,把 sequence(次序)的动名词 sequencing 可以译成“安排次序”,即“排序”;而把 schedule(时间表)的动名词 scheduling 可以译成“安排时间表”.因而,从最优化的角度来讲,安排时间表

(scheduling)是为完成若干项任务(如要加工若干个“工件”),而把所需要用到的人、财、物等资源(如加工“工件”所需要的“机器”)按时间进行最优分配、最优排序和最优调度。Sequencing 是一种特殊的 scheduling,是只要确定“工件”的次序就完全确定加工的时间表(schedule)问题。现在把 sequencing 和 scheduling 都称为“排序”,是尊重使用的习惯和方便。我们应该把“排序”理解为具有两种涵义:狭义的涵义是 sequencing,是安排次序;广义的涵义是 scheduling,是安排时间表。我们应该视不同的情况理解为不同的涵义。在英文文献中有时也使用 processor(处理机)而不使用 machine(机器);使用 task(任务)而不使用 job(工件),不过明显的趋势是越来越多的文献中使用“机器”和“工件”这两个术语。早在 1974 年 Baker^[100]就指出:“排序领域内许多早期的工作是在制造业推动下发展起来的,所以在描述排序问题时很自然会使用制造业的术语。虽然排序问题在许多非制造业的领域内取得了相当有成果,但是制造业的术语仍然经常在使用。因而,往往把资源(resources)称为机器(machines),把任务(tasks)称为工件(jobs)。有时工件可能是由几个先后次序约束相互联系着的基本任务(elementary tasks)所组成。这种基本任务称为工序(operations)。例如,对门诊病人到医疗诊所看病的排序问题也描述成为‘工件’在‘机器’上‘加工’的过程。”排序论中的“机器”和“工件”已经不是机器制造业中的“车床”和“车床加工的螺丝”,已经从“车床”和“螺丝”等具体事物中抽象出来,是抽象的概念。“机器”和“工件”与“车床”和“螺丝”的关系是“一般”与“特殊”,“抽象”与“具体”,“理性”与“感性”,“理论”与“经验”,“概念”与“感觉”的关系。正好比“水果”是从“香蕉”、“苹果”等具体事物中抽象出来,“水果”可以是“香蕉”、“苹果”等。排序论中的“机器”可以是数控机床、计算机 CPU(中央处理器)、医生、机场跑道等,“工件”可以是零件、计算机终端、病人、降落的飞机等。例如,计算机科学并行计算机的出现,促进排序论中对多台平行机(parallel machine)的深入研究;反过来,排序论中的平行机可以应用到具体的计算机科学并行计算机中去,平行机排序的成果在一定程度上推动并行计算机的发展。

因此,在排序论中,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;安排时间表是在一定的约束条件下对工件和机器按时间进行分配和安排次序,使某一个或某一些目标达到最优;排序是安排时间表的简称。

英文中表示“时间表”的词除了用 schedule 外还有 timetable。Timetable 的动名词 timetabling 也是“安排时间表”^[762]。然而, timetabling 通常是指“安排课程表”,“安排(火车或飞机)时刻表”等。与作为最优化问题的 scheduling 不同, timetabling 要解决的是“存在性”问题,是判别和设计是否存在符合某些要求的时间表,而不是最优化问题。

从更为严格的意义上讲,本书所涉及到的仅仅是机器排序(machine scheduling)。除此之外,还有项目排序(project scheduling)和数据排序。项目排序包括 CPM(关键路线法)和 PERT(计划评审技术)等^[762]。数据排序又称为整序(sorting),是更为特殊的一类 sequencing 问题,仅仅是一些“元素”(即“工件”)按照某种要求重新安排次序的问题,并不涉及到“机器”的因素,例如冒泡整序和快速整序等。

早在 20 世纪 60 年代中国科学院钱民义就注意到排序问题的重要性和在理论上的难度。1960 年,他编写国内第一本排序理论讲义。70 年代初他和韩继业一起研究同顺序流水作业(同序作业)排序问题。他们发表在《中国科学》上的著名论文[2263]开创了中国研究排序

论的先河.在他们两位的倡导和带动下,国内的排序理论研究和应用研究有了较大的开展.例如,文献[2370]是在实际生产中应用[2263, 2265 – 2267]的理论成果提高生产率的成功例子.最近越民义出版《组合优化导论》^[2275],精心撰写许多著名的多项式时间可解的排序问题.1987年陈荣秋编著《排序的原理与方法》^[425],是国内第一本正式出版的排序论著作.1992年7月中国运筹学会排序专业委员会在桂林举办生产作业计划与机器加工顺序(排序)研讨班.桂林研讨班编印的《排序论讲义》凝聚排序专业委员会各位委员的研究成果和国内外最新发展.在这次研讨班上,张正铀介绍他1982年提出的散列排序^[2314].这种数据排序的方法是构造一个映射函数来决定数据在排序中新的位置.这个方法引起国际上的关注.秦裕琰^[1711 – 1712]从抽象的观点研究排序问题,林诒勋^[1386 – 1392]揭示排序问题的结构性质,都取得很有意义的成果.1997年林诒勋编著《动态规划与序贯最优化》^[1391],不但把经典排序的主要成果概括进去了,而且有许多独到的见地,令人耳目一新.常庆龙也是较早涉足排序研究的^[359].他著的《排序与不等式》^[364]用通俗易懂的语言介绍排序论的一些最基本的模型和算法,介绍华罗庚先生在“《全国中学数学竞赛题解》前言”中提出的引理——“排序原理”——及其在不等式上的应用. Baker 在那本著名的排序教材《Introduction to Sequencing and Scheduling》^[100]中用两个方法证明 SPT (shortest processing time) 序的最优性.一是用相邻交换法,一是用向量的数量积.这后一种方法用的就是“排序原理”.这里“排序原理”中的“排序”是 sequencing.1998年陈礴等的论文[393]是迄今为止对排序研究最为完整的综述,介绍 574 篇论文的成果.国内研究排序论的情况可参考文献[2009, 2012].

普遍认为 1954 年 Johnson 的论文[1074]是经典排序的第一篇^[1260].从这篇论文问世以来的半个世纪中全世界已经发表排序文献 2 千多篇(见本书附录 3),其中包括排序专著和教材 40 余种(见表 0.1).这些排序的论文和书籍中绝大部分是在过去 10 年中发表的.排序论的长足发展,特别是新型排序的丰硕成果,使排序论已经成为发展最迅速、研究最活跃、成果最丰硕、前景最诱人的学科领域之一.

表 0.1 排序论书籍出版情况

年 份	数 目	本书附录 3 中的编号
1963 ~ 1967	2	565, 1537
1974 ~ 1976	3	100, 550, 1753
1980 ~ 1989	6	152, 236, 425, 626, 762, 1883
1990 ~ 1999	33	95, 112, 196, 197, 232, 328, 364, 386, 541, 680, 708, 737, 742, 872, 875, 970, 1076, 1391, 1455, 1520, 1521, 1545, 1617, 1642, 1648, 1732, 1913, 1930, 1999, 2000, 2136, 2253, 2362
2000 ~ 2001	4	282, 1161, 1647, 1798
总 计	48	

我们学习和研究排序论必须要了解整个组合最优化的发展和成果.越民义的《组合优化导论》^[2275]可以引导我们进入组合最优化的学科领域.此外,1980 年美国华盛顿大学 V. Klee 教授的论文[1153]概述从 20 世纪 50 年代到 70 年代的 30 年中组合最优化所取得的 3

个主要成果,3个次要成果,3个近期(指20世纪70年代)成果和3个研究方向.本书的附录3列出其他组合最优化的专著和综述[1, 3, 670, 850, 1109-1110, 1221, 1246, 1257, 1580, 1612, 1702]都是很有参考价值的.

第0.2节 现代排序的特征

如果按数学分为理论数学和应用数学,那么排序论可以分为排序的理论部分和排序的应用部分.排序的理论部分又可分为经典排序(classical scheduling)和现代排序(modern scheduling).Brucker和Knust在“Complexity results of scheduling problems”(见<http://www.mathematik.uni-osnabrueck.de/research/OR/class/>)中使用classical和extended两个词来区别经典的和非经典的(推广的)两类排序问题.他们也用new classes of scheduling problems(新型排序)来表示非经典的排序问题.因此,现代排序就是非经典的,也就是新型的排序.这是本书的书名《现代排序论》的由来.

现代排序或新型排序是相对经典排序而言,其特征是突破经典排序的基本假设.根据1993年E.L.Lawler, J.K.Lenstra, A.H.G.Rinnooy Kan和D.B.Shmoys等^[1260]的观点,经典排序有4个基本假设.

(1) 资源的类型.机器是加工工件所需要的一种资源.经典排序假设,一台机器在任何时刻最多只能加工一个工件;同时还假设,一个工件在任何时刻至多在一台机器上加工.作为这个基本假设的突破,有成组分批排序、同时加工排序、不同时开工排序和资源受限排序等.

(2) 确定性.经典排序假设决定排序问题的一个实例的所有(输入)参数都是事先知道的和完全确定的.作为这个基本假设的突破,有可控排序、随机排序、模糊排序和在线排序等.

(3) 可运算性.经典排序是在可以运算、可以计算的程度上研究排序问题,而不去顾及诸如如何确定工件的交货期,如何购置机器和配备设备等技术上可能发生的问题.如果考虑实际应用中有关的情况和因素,就是应用排序(applied scheduling)问题.如人员排序(employee scheduling)^[1545]和智能排序(intelligent scheduling)^[232, 2362]等.

(4) 单目标和正则性.经典排序假设排序的目的是使衡量排法好坏的一个一维目标函数的函数值为最小,而且这个目标函数是工件完工时间的非降函数.这就是所谓正则目标.多目标排序、准时排序和窗时排序等是这个假设的突破.

因此,上述10种经过推广的排序(可控排序、成组分批排序、在线排序、同时加工排序、准时排序和窗时排序、不同时开工排序、资源受限排序、随机排序、模糊排序、多目标排序等)就构成现代排序论的主要内容,也就是本书的主要内容.当然,这10种排序不可能包括层出不穷、不断涌现的新型排序,没有涉及到的新型排序有scheduling with transportation (communication) delays^[393](带有传输时间的排序)、scheduling multiprocessor jobs^[393](多台机器同时加工工件的排序)和杨承恩^[2209]早在1986年就研究过的工件加工时间随加工次序变动的排序等.本书主要介绍现代排序,即新型排序,而不去展开经典排序的内容.我们认为本

书的读者已经了解经典排序的基本内容.关于经典排序可以参考第 0.1 节表 0.1 列出排序论书籍,可以参考越民义的《组合优化导论》^[2275]等中文著作,可以参考 Pinedo 的《Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems》^[1642]等英文著作.本书第 1 章到第 10 章分别介绍上述 10 种现代排序.最后有 3 个附录.附录 1 是“英汉排序词汇”.国内外排序术语正在逐步统一.这是学术交流的需要,也是学科成熟的标志.在附录 1 中列出的往往不止一种正在使用的中文用词和英文用词,以供读者比较和选择.本书采用的是附录 1 中英文用词后面对应的第一个或第二个中文用词.附录 2 是“排序问题计算复杂性汇总”.附录 3 是“国内外排序文献目录”.为了读者便于查阅,这 3 个附录既收录有关现代排序的,也收录有关经典排序的,附录 3 还收录部分重要的运筹学和组合最优化的文献.本书的酝酿、准备和写作得到我国运筹学的开创者越民义以及许多前辈、专家和同仁的支持、鼓励和帮助;越民义和韩继业仔细审阅本书的初稿,为提高本书的理论水平提出重要的意见;上海科学普及出版社陈英黔多年来一直关注和促进本书的出版;邵玲玲和金家韵把书稿输入计算机付出了巨大的努力.在此,向他们表示深深的感谢.

第 0.3 节 三参数表示

排序问题按静态(static)和动态(dynamic)、确定性(deterministic)和非确定性(non-deterministic)可以分为 4 大类.本节介绍静态的确定性排序的三参数表示.这是了解和研究现代排序论的工具.

对 m 台机器和 n 件工件进行安排的排序问题,在本书中我们用 $M_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 台机器,用 $M = \{M_1, \dots, M_m\}$ 表示这 m 台机器的集合;用 $J_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 j 个工件,用 $J = \{J_1, \dots, J_n\}$ 表示这 n 个工件的集合.在不至于混淆的情况下,我们有时用工件 J_j 的下标 j 来表示这个工件,用 $J = \{1, \dots, n\}$ 或 $N = \{1, \dots, n\}$ 表示 n 个工件的集合.如果把 n 个自然数 $(1, 2, \dots, n)$ 的一个(全)排列记为 $\pi = (\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(n))$,那么可以用 π 来表示工件 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ 的一个加工次序是 $J_{\pi(1)}, J_{\pi(2)}, \dots, J_{\pi(n)}$,其中 $\pi(j) (j = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 j 个加工的工件是 $J_{\pi(j)}$.我们还用 Π 表示 $(1, 2, \dots, n)$ 的所有(全)排列的全体.

0.3.1 机器的分类

机器可以分成 2 大类:通用平行(parallel)机和专用串联(dedicated)机.对于不允许中断加工的情况来讲,一个工件在 m 台平行机上的加工是只需要在这 m 台机器中的任何一台机器上加工一次;一个工件在 m 台串联机上的加工是需要在这 m 台机器中的每一台机器上都加工一次.平行机又可分成 3 类:具有相同加工速度的同型(identical)机、具有不同的加工速度但此速度不依赖于工件的同类(uniform)机和随加工的工件不同加工速度也不同的非同类型(unrelated)机.串联机也可分为 3 类:每一个工件以特定的相同的机器次序在这些机器上加工的流水作业(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)和每一个工件以各自特定的机器次序进行加工的异序作业(job shop).

这里要说明一下,我们是怎么样考虑对 3 种平行机 identical, uniform 和 unrelated 的中文

译名的.对于不允许中断加工的情况来讲,一个工件在 m 台平行机上的加工是只需要在这 m 台机器中的任何一台机器上加工一次.这 m 台机器对同一个工件加工的“效果”是一样的,或者说“功能”是相同的,虽然对同一个工件不同的机器对其进行加工所需要的时间(加工时间)可能会不相同.有的机器类型比较新,或者型号比较新,那么它的加工速度比较快,加工时间比较短.因此,按照中文的表达习惯,可以把平行机分为两种:同类型的(related)和非同类型的(unrelated);对同类型的平行机又可以分为两种:同型(号)的(完全一样的,即 identical)和同类(别)的(型号不一样,但加工速度的方式对所有的工件是一致的,即 uniform).这是我们在反复比较各种可能的中文译名后才提出的.正如在前面的对 scheduling 的中文译名“排序”和“调度”分析时指出那样,不同语言的表达方式是可能完全一致的.我们只能做到对比各种译法,选择一个相对比较确切的译名,同时还要考虑到已经使用的习惯和方便.又如,对 job shop 的译名,按词义直译是“单件车间”,而按其“意思”(即按英文的含义)来讲似乎用“异序作业”相对来讲比较确切一点.其实英文用词也是不完全统一的.前面已经提到,除了用 machine 和 job 以外,还有用 processor 和 task 的.此外,如果说的平行机的英文用词 parallel 还比较一致的话,那么对串联机的英文用词除了 dedicated^[190, 254]之外,至少还有三种:shop scheduling^[238, 832], multi-operation(多工序)models^[186, 1260]和 multi-stage systems^[393, 2000].又如,本书采用中文用词“就绪时间”相应的英文用词有许多,有 arrival time(到达时间),ready time(准备时间)和 release time(释放时间或放行时间)等等.可以看出中文用词“就绪时间”比上述英文用词都要确切一些.

0.3.2 工件的工序

对于不允许中断加工的情况来讲,一个工件在 m 台串联机上的加工是需要在这 m 台机器中的每一台机器上都加工一次.我们把工件 J_j 在一台串联机上的加工称工序(operation),并记为 O_{ij} .对流水作业而言,不妨假设每一个工件 J_j 的工序 O_{ij} 都是在机器 M_i 上进行的.对自由作业而言,工件 J_j 的加工也是分为 m 个工序,但这 m 个工序是在哪台机器上加工并不指定,是可以任意选择的.对异序作业而言,每个工件 J_j 工序的数目 m_j 和次序都可以不同,但都是事先已经给定的.流水作业是一种特殊的异序作业,自由作业可以理解成“松弛”的异序作业.

0.3.3 输入参数

(1) 加工时间(processing time)、服务时间(service time)或执行时间(execution time)都是指工件 J_j 在机器 M_i 上加工所需的(非负的)时间,可以用 p_{ij} 来表示.对同型机有 $p_{ij} = p_j (i = 1, \dots, m)$.对同类机有 $p_{ij} = \frac{p_j}{s_i} (i = 1, \dots, m)$,其中 p_j 是工件 J_j 的标准工时(通常是指在速度最慢的机器上的加工时间), s_i 是机器 M_i 的“速度”.对同一个工件 J_j ,如果机器 M_i 的 s_i 越大,那么加工时间 $p_{ij} = \frac{p_j}{s_i}$ 越小,表示机器 M_i 加工的这个工件 J_j 越快.

(2) 就绪时间、到达时间(arrival time)、准备时间(ready time)或释放(放行)时间(release time)都是指工件 J_j 可以开始加工的时间,可以用 r_j 来表示.如果所有的工件都同时就绪,可