

国家自然科学基金项目·管理科学与工程系列丛书

复杂生产环境下流程工业 生产调度优化方法

王 恺 著



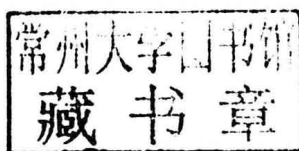
科学出版社

国家自然科学基金项目·管理科学与工程系列丛书

复杂生产环境下流程工业 生产调度优化方法

王 恺 著

本书由国家自然科学基金青年基金项目“不确定条件下基于分群策略的柔性 Flow Shop 调度问题研究”(71301124)、教育部人文社会科学一般项目“不确定环境下基于分布估计算法的调度方法研究”(13YJC630165)、教育部博士点新教师基金项目“复杂生产环境下面向节能的柔性流水车间调度研究”(20130141120071)资助出版



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以复杂生产环境下的流程工业生产调度为研究背景,介绍流程工业生产特点以及相关的生产调度方法。针对流程工业中常见的置换流水车间和柔性流水车间,在考虑实际生产中不确定事件的基础上,系统地讨论生产调度的建模方法和相应的数学规划模型。对于复杂生产环境下的置换流水车间调度问题和柔性流水车间调度问题,本书分别介绍基于仿真的优化方法和分群调度方法,并通过仿真算例对以上两种调度方法的有效性进行验证。

本书可作为管理科学与工程专业的研究生教材和课外读物,也可供从事生产调度研究的教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂生产环境下流程工业生产调度优化方法/王恺著. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050241-4

I. ①复… II. ①王… III. ①工业生产-生产过程-生产调度-最优化算法 IV. ①F406.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 253275 号

责任编辑:徐 倩/责任校对:张 红
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:220 000

定价:62.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

王恺，2010年毕业于香港大学工业及制造系统工程系，获哲学博士学位。现为武汉大学经济与管理学院副教授、硕士生导师，主要研究生产运作与供应链管理、医疗服务管理、运筹与仿真优化、智能计算等。



前 言

流程工业在工业生产中占有十分重要的地位，它涵盖了石油、化工、电力、冶金、制药、建材、造纸等在国民经济中占有重要经济地位的行业。进入 21 世纪以来，随着经济全球化和信息全球化步伐的日益加快，流程工业面临着更加开放和激烈的竞争环境。我国的流程工业普遍存在着能耗大、自动化水平低、信息集成度低、调度决策能力差、管理水平低、综合竞争力弱等缺陷，与发达国家相比差距很大，这使得我国的流程工业企业在国际竞争中面临着严峻的考验。

生产调度是流程工业企业生产管理的核心和关键技术。它围绕企业的生产经营目标，对生产活动进行有效组织和协调，及时应对生产中的各种问题，维持整个生产经营活动正常、有序、高效地运行。流程工业企业的生产一般是连续或批处理过程，具有复杂性、不确定性、非线性、多目标、多约束、多资源相互协调等特点。因此，合理、有效的生产调度将为流程工业企业带来显著的经济效益和社会效益。

由于调度问题的复杂性及其在流程工业生产中的重要性，流程工业生产调度研究历来为国内外学者和领域专家所关注。出于简化系统模型的需要，以往针对该调度问题的多数研究往往只考虑静态、无干扰环境下的生产调度，而实际生产环境具有复杂多变的动态特性，存在各种各样的不确定因素，如机器故障 (machine breakdown)、工件加工时间不确定、紧急订单等。这些不确定因素将会导致生产调度方案无法按预定目标正常执行，最终造成生产企业的成本增加和效益下降。为了区别传统生产调度研究中所假设的静态生产环境，生产调度领域的学者和专家将不确定、动态的实际生产环境定义为复杂生产环境。不确定因素的存在极大地制约了传统优化调度理论和方法在实际生产调度中的应用，使得静态环境下的生产调度研究无法满足复杂生产环境下生产调度的需要。

作为流水线生产调度问题的简化模型，置换流水车间调度问题 (permutation flowshop scheduling problem, PFSP) 和柔性流水车间调度问题 (flexible flowshop scheduling problem, FFSP) 都在流程工业中有着较为广泛的应用。本书在考虑多

种不确定因素的基础上,将 PFSP 和 FFSP 从严格限定的理想生产环境拓展到贴近现实的实际生产环境中,为流程工业企业制订科学的生产调度方案,对控制车间的在制品库存、缩短产品生产周期、确保产品交货期、降低生产成本均具有重大的实用价值。

PFSP 和 FFSP 已被学术界认为是较难求解的组合优化问题。如果再考虑实际生产环境中的不确定因素,这两个调度问题将变得更为复杂。近年来,关于复杂生产环境下生产调度问题的研究已经突破了最初的运筹学范畴,在管理科学、工业工程、系统工程、控制论、人工智能等领域均有学者在利用各自领域的知识尝试进行求解。因此,通过对此类生产调度问题的研究可以极大推动各种优化算法的发展和学科融合。

本书紧密围绕复杂生产环境下的 PFSP 和 FFSP,分别介绍两种较为新颖的优化调度算法,即基于遗传算法 (genetic algorithm, GA) 和分布估计算法 (estimation of distribution algorithm, EDA) 的仿真优化方法与分群调度方法。全书分为三篇,共 8 章。

第一篇为基本理论,包括第 1 章和第 2 章。第 1 章简要介绍流程工业的生产特点、调度模型、调度方法,以及流程工业中较为常见的 PFSP 和 FFSP。第 2 章介绍不确定事件的分类和描述方法,以及用于求解复杂生产环境下调度问题的三类优化调度方法,即完全反应式方法 (completely reactive approach)、鲁棒式方法 (robust approach) 和预测-反应式方法 (predictive-reactive approach)。

第二篇为基于仿真优化策略的置换流水车间调度,包括第 3 章和第 4 章。对于复杂生产环境下的 PFSP,第 3 章详细介绍了 GA 和 EDA 的仿真优化方法。该方法能够充分发挥 GA 和 EDA 各自的优势,具有较好的全局搜索和局部搜索能力,而且计算复杂度较低。为了验证该仿真优化方法的有效性,第 4 章对三类不同的 PFSP 进行了求解,包括考虑机器故障的 PFSP、考虑加工时间变动的 PFSP、考虑机器故障和加工时间变动的 PFSP。

第三篇为基于分群策略的柔性流水车间调度,包括第 5 章~第 8 章。第 5 章结合柔性流水车间 (flowshop) 的生产特点,详细介绍考虑单一不确定事件的分群调度方法。该调度方法能够根据生产环境中随机特性的大小动态选择预测-反应式方法或完全反应式方法生成调度方案。为了分析分群调度方法的优化性能,第 6 章使用该方法分别对考虑机器故障的 FFSP 和考虑加工时间变动的 FFSP 进行求解。第 7 章对第 6 章介绍的单一不确定事件下的分群调度方法进行扩展,用于求解考虑多种不确定事件的 FFSP。为了验证扩展后的分群调度方法的有效性,第 8 章对同时考虑机器故障和加工时间变动的 FFSP 进行求解。

本书所涉及的部分研究成果是在国家自然科学基金青年基金项目“不确定条件下基于分群策略的柔性 FlowShop 调度问题研究”(71301124)、教育部人文社会科学一般项目“不确定环境下基于分布估计算法的调度方法研究”(13YJC630165)、

教育部博士点新教师基金项目“复杂生产环境下面向节能的柔性流水车间调度研究”（20130141120071）等项目的资助下获得的。

本书由武汉大学经济与管理学院的王恺副教授完成。此外，武汉大学经济与管理学院的刘祝智硕士、马文琼硕士、陈夏硕士和万昕月硕士参与了相关研究工作。由于笔者学术水平有限，书中难免存在疏漏甚至不足之处，许多内容仍有待进一步完善，还请读者批评指正。

王恺

2016年6月

目 录

第一篇 基本理论

第 1 章 绪论	3
1.1 流程工业的生产调度	3
1.2 置换流水车间调度问题	9
1.3 柔性流水车间调度问题	11
1.4 本书的结构和主要内容	12
第 2 章 复杂生产环境下生产调度理论与方法	15
2.1 复杂生产环境下不确定事件的分类及描述	15
2.2 复杂生产环境下调度方法的分类	18
2.3 完全反应式方法	19
2.4 鲁棒式方法	24
2.5 预测-反应式方法	26
2.6 完全反应式方法和预测-反应式方法性能比较	29
2.7 复杂生产环境下的流水车间调度	30

第二篇 基于仿真优化策略的置换流水车间调度

第 3 章 基于遗传算法和分布估计算法的仿真优化策略	35
3.1 引言	35
3.2 复杂生产环境下的置换流水车间调度问题	36
3.3 遗传算法和分布估计算法的基本理论	37
3.4 基于仿真的优化方法	51
3.5 基于遗传算法和分布估计算法的仿真优化模型	53
3.6 本章小结	67

第 4 章 复杂生产环境下基于仿真优化策略的置换流水车间调度..... 68

4.1 引言 68

4.2 考虑机器故障的置换流水车间仿真优化调度..... 69

4.3 考虑加工时间变动的置换流水车间仿真优化调度..... 78

4.4 考虑机器故障和加工时间变动的置换流水车间仿真优化调度..... 83

4.5 本章小结 88

第三篇 基于分群策略的柔性流水车间调度

第 5 章 考虑单一不确定事件的分群调度策略..... 91

5.1 引言 91

5.2 单一不确定事件下柔性流水车间调度问题..... 92

5.3 单一不确定事件下基于分群策略的调度框架..... 93

5.4 机器群组生成机制 95

5.5 机器群组调度方法选择策略 101

5.6 机器群组调度问题求解方法 103

5.7 本章小结 108

第 6 章 单一不确定事件下基于分群策略的柔性流水车间调度..... 109

6.1 引言 109

6.2 考虑机器故障的柔性流水车间分群调度..... 109

6.3 考虑加工时间变动的柔性流水车间分群调度..... 120

6.4 本章小结 129

第 7 章 考虑多种不确定事件的分群调度策略..... 130

7.1 引言 130

7.2 基于分群策略的调度扩展模型 131

7.3 调度扩展模型的缺陷 133

7.4 本章小结 134

第 8 章 多种不确定事件下基于分群策略的柔性流水车间调度..... 136

8.1 引言 136

8.2 考虑机器故障和加工时间变动的柔性流水车间分群调度..... 136

8.3 本章小结 147

参考文献 148

英文缩写对照表 160

第一篇

基本理论



第1章 绪 论

1.1 流程工业的生产调度

流程工业在工业生产中占有十分重要的地位，它涵盖了石油、化工、电力、冶金、制药、建材、轻工、食品、造纸、采矿等在国民经济中占有重要经济地位的行业^[1,2]。作为国家经济发展的重要支柱，流程工业的发展状况直接影响着国家的经济繁荣和社会稳定。流程工业企业往往根据市场的需求预测、原材料与能源的供给情况、自身的生产加工能力，利用全局性和整体性的思想，确定生产目标，制订生产计划，并以此来协调生产过程以达到企业总体最优目标^[3,4]。作为连接计划和生产的关键活动，生产调度以生产作业计划为依据，结合生产流程的实际情况进行优化排产，通过合理调配物料和能源使各生产环节能紧密衔接，确保生产均衡、稳定、安全地进行，从而保证企业生产作业计划的顺利完成。

流程工业的生产调度目标主要包含经济指标和性能指标两大类，最终体现为成本最低或利润最大。流程工业的生产调度信息主要包括^[1,2]：整个生产过程的状态数据；原材料、半成品的品种、规格、质量和数量；生产设备状况、运输车辆安排；产品销售量、库存以及市场需求变化；能源的供应和使用情况；人员的配备；等等。在满足作业优先级、设备能力、交付日期等多种生产约束的前提下，生产调度需要在生产过程中实现人员、材料、机器等资源的有效配置，以达到企业生产成本最低或产品利润最大的目标。流程工业企业在制订生产计划时，往往需要考虑多个优化目标、几千个约束条件、上万个变量，而生产过程中的这些变量可以是离散变量和连续变量。此外，流程工业生产过程还存在大量不确定因素，它们会导致实际调度方案偏离原始调度。因此流程工业的生产调度问题是多约束、多目标、随机不确定优化的问题，该类问题往往属于 NP 难（Np-hard）或者 NP 完全（Np-complete）问题，其求解规模随问题的增大呈指数增长。

求解生产调度问题的关键在于构建有效的生产调度模型并使用高效的优化求

解方法。在过去几十年,流程工业的生产调度问题得到了学术界和工业界的广泛关注,主要有以下两个方面的原因^[5]:①日趋激烈的市场竞争使得流程工业企业提高效率 and 减小成本的压力越来越大,良好的生产调度方案可以为企业带来可观的经济效益;②随着对流程工业生产调度问题研究的不断深入,调度问题本身的复杂性逐渐引起了相关学者和专家的关注。

1.1.1 流程工业的生产特点

流程工业的生产过程具有复杂性、不确定性、非线性、多目标、多约束、多资源相互协调的特点,需要克服多变量、多扰动等因素的影响,因此对生产过程的控制要求较高。流程工业的核心问题是要保证企业生产的均衡、平稳,对生产计划进行分解,同时根据车间的实际生产情况,采用生产调度优化模型生成调度方案,及时指挥和组织日常生产、处理异常事件。同时由于流程工业的生产过程中往往会受到各种干扰,因此在制订生产计划和生产调度时必须充分考虑到这些干扰所带来的不确定因素^[6,7]。

流程工业主要有连续过程、半连续过程和间歇过程三种生产方式。其中,连续过程属于传统的流程工业范畴,适合于固定的大批量产品的生产。在连续过程中,生产工艺流程基本不变,物料流是连续的,前一个生产装置的产品是后续生产装置的原料。这种生产方式处理量大,单位设备的生产效率高,长期以来在整个流程工业的生产中占有较大的比例。连续过程除了具有流程工业的共同特征外,还具有以下特点^[8,9]。

(1) 生产过程连续,通常以大批量、少品种的生产方式进行生产,生产过程往往伴随着大量不确定性和突发性等因素。

(2) 工艺路线一般保持不变,按照相对固定的工艺路线进行生产,生产装置间物流连续,或者有复杂而有限的中间存储。

(3) 强调生产过程的整体性,在全局优化过程中需要把不同装置和生产过程作为一个整体进行求解。

(4) 作为一个混杂动态系统,连续过程既包括连续过程变量(如物流的连续运作),也包括离散过程变量(如生产方案的切换、调度指令的下达、随机事件的引入等)。

随着产业结构的调整、市场竞争的日趋激烈和生产技术上的突破,间歇过程近年来已逐渐成为现代流程工业的一个重要分支。与连续过程相比,间歇过程具有启停频繁、动态特性变化快、时序操作严格等特点,其固有的灵活性决定了高效的生产调度方案可以带来较好的经济效益。该生产过程具有设备投资小、生产更新快、产品批量小、品种多样化等特点,目前在制药、染料和化工等生产行业中有着广泛的应用。

间歇生产过程根据其产品生产工艺的相似程度可以分为两类——多产品（multi-product）间歇生产过程和多用途（multi-purpose）间歇生产过程。间歇过程一般具有如下生产特性^[1,2]。

（1）间歇过程的生产方式为小批量生产，能够加工和生产多种物料与产品。该生产过程灵活多变，可以根据市场需求选择生产高效益的产品。

（2）生产工艺流程可根据不同的产品生产需求随时变化。生产物流可以不连续，设备间可以通过缓冲区或库存等方式调节不同设备间生产能力的差异，因此生产流程能够并行，也可以异步进行。

（3）生产设备的功能冗余度大，一般可以实现多种物料或产品的加工，对某一产品往往有多种实现路径可供选择。

（4）与连续过程相比，间歇生产过程一般是简单的化学或物理变化，物料物性对生产设备加工运行参数的影响较小。

（5）生产设备能够频繁启停和切换，能够快速完成生产任务，生产代价小。

（6）由于生产设备功能的冗余性及设备间存在缓冲的特点，间歇生产过程具有较强的柔性。

为了进一步提高生产的灵活性，一些化工企业的生产流程同时具有间歇和连续生产装置，呈现一种半连续的生产模式。该生产模式同时具有间歇过程和连续过程的生产特点。无论采用何种生产方式，充分利用信息技术实现对生产企业的综合管理是提高流程工业企业生存能力的基础，其中如何进行高效的生产调度是亟待解决的关键问题之一。

1.1.2 流程工业的调度模型

流程工业企业的生产计划是在宏观上对生产进行调控，而生产调度则是在细节上对生产的具体操作^[10]。生产调度应以生产作业计划为依据，密切围绕企业的生产经营目标，在结合企业实际生产流程和生产能力的基础上，进行优化排产，合理调配物料和能源，以保证企业生产作业计划的完成。因此，生产调度的任务是在尽可能满足各种约束条件（如交货期、工艺路线、资源情况）的前提下，安排生产系统的各组成部分进行生产，以实现生产计划的结果要求。

流程工业的生产线一般都比较复杂，近年来关于流程工业调度模型的研究引起了国内外学者和专家的广泛关注。根据相关学者和专家的研究成果，流程工业的生产调度模型可以按以下几种方式分类^[11~13]。

1. 按生产过程划分

根据流程工业的生产特点，可以分为连续过程调度模型、间歇过程调度模型和半连续过程调度模型。其中，间歇过程和连续过程的生产调度模型是当前研究

的热点。间歇过程调度理论已经比较成熟,但仍有一些问题尚未得到较好解决;连续过程的生产调度研究起步稍晚,相关调度理论尚不完善。

2. 按时间表达方式划分

根据时间表达方式的不同,流程工业的调度模型可以分为离散时间模型和连续时间模型两类。离散时间模型通常将调度时域划分为多个等长的时间段,而连续时间模型则是将调度时域划分为多个不等时间长度的时间段。

3. 按生产环境划分

流程工业的实际生产环境(包括生产过程和市场供求)是动态变化的。按照对生产环境变化响应方式的不同可以分为静态调度和动态调度。若不考虑实际生产环境中的动态特性,则所构建调度模型的参数都是确定的,称为静态调度模型。若所构建的调度模型考虑了生产过程中的不确定因素,则模型将含有随机性、模糊性或完全不确定性的参数,这类模型统称为动态调度模型。不确定优化理论已成为研究动态调度问题的理论基础,如随机规划、模糊规划、鲁棒优化等。此外,也可以通过动态响应生产环境变化的重调度(rescheduling)来进行优化求解。

4. 按逻辑表达划分

流程工业的生产调度往往需要考虑许多逻辑关系和经验规则,根据是否结合和体现这些逻辑规则,生产调度模型可以划分为经典数学规划模型和逻辑规划模型。经典数学规划模型是一类基于经典运筹学方法的优化调度模型,主要包括线性规划、非线性规划、整数规划、混合整数规划等;已有的逻辑规划方法主要包括约束逻辑规划、混合逻辑/线性规划、广义析取规划等。

尽管流程工业的调度模型种类繁多,但是流水车间调度在流程工业中有着十分广泛的应用。流水车间调度问题是最经典的生产调度问题之一,它是许多实际流水线生产调度问题的简化模型。其中,PFSP和FFSP是最为常见的两类组合优化问题,近年来吸引了众多学者的关注。

1.1.3 流程工业的调度优化方法

生产调度优化方法可分为基于模型的调度和基于规则的调度两大类。基于模型的调度方法根据所定义的调度问题构建调度优化模型,并结合一定的性能指标运用适当的调度方法进行求解。对于规模小、相对简单的调度问题来说,基于模型的调度方法往往能得到令人满意的最优解,但随着调度问题规模的增大,将难以求得最优解。基于规则的调度方法则根据事先设定的调度规则或策略来确定生产过程中的下一步操作,其特点是不必进行大量的计算就能生成调度方案。

流程工业中不合理的生产调度方案容易造成生产企业高库存、低效的资金利用和操作成本的增加,因此寻找有效的优化调度方法来改进生产调度方案,可大

大提高生产效率和资源利用率,增强企业的综合竞争力。作为一个混杂动态生产系统,流程工业生产中往往同时存在连续过程、离散过程和间歇过程,这为其生产调度带来了很大的困难。针对流程工业的生产调度问题,相关学者和专家近年来提出了很多优化调度方法,主要可以分为以下四类^[14~18]。

1. 最优化方法

最优化方法通过建立相应的优化模型,将调度问题转换成优化问题。Harjunkski 和 Grossmann 提出了使用数学规划方法的分解策略求解大规模调度问题,即采用分解策略生成小的程序来求解全局优化问题^[19]。Roslöf 等提出了一种基于混合整数线性规划问题(mixed integer linear problem, MILP)的新算法,并将其成功应用于造纸和制药企业的生产调度问题中^[20]。类似地,Göthe-Lundgren 等也使用 MILP 方法解决了炼油厂的优化调度问题^[5]。为了减少调度算法的时间复杂度,Ierapetritou 和 Floudas 提出了一种基于连续时间的 MILP 数学模型^[21]。该模型能够显著减少决策变量的数量。尽管数学规划方法能够求得生产调度问题的全局最优解,但往往难以在有限时间内获得规模较大的调度问题的最优解,而且调度问题的微小变化也容易使模型失效,因此如何建立合理的数学模型是使用数学规划方法的关键所在。

2. 启发式方法

启发式(heuristic)方法大多基于启发推理规则,根据决策时刻车间的状态进行实时调度。该方法能够保证局部最优。Kudva 等使用启发式方法为具有有限中间存储的多产品批处理和半连续企业生成调度方案^[22]。Wu 和 Ierapetritou 提出了一系列基于启发式的不同分解方法,并应用这些方法对大规模调度问题进行了求解^[23]。Liao 和 Yu 研究了流程工业中聚丙烯的生产调度问题,利用启发式方法求得调度问题的次优解,并通过实际数据测验证了该方法的有效性^[7]。

3. 随机搜索优化方法

模拟退火(simulated annealing, SA)算法、禁忌搜索(tabu search, TS)算法、GA、蚁群(ant colony optimization, ACO)算法、粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法等随机搜索优化方法近年来已经开始广泛应用于生产调度问题的求解。李艳君和吴铁军提出了一种并行的多目标 GA,用于求解柔性流程工业的生产调度问题^[9]。Raaymakers 和 Hoogeveen 利用 SA 算法对一类带有零等待中间存储策略的批处理过程进行了求解^[12]。目前利用随机搜索优化方法求解调度问题已经取得了不错的效果,只是该方法的缺陷在于收敛速度慢,不易判断解的优劣。

4. 规划调度方法

规划调度方法是在生产过程中根据预设的规则和策略来决定下一步操作的优

化调度方法。由于基于规则、知识的专家系统简单实用且易于实现,因此在实际生产调度中得到了广泛应用。分派规则(dispatching rule)是一种非常典型的规划调度方法,该方法可以根据待加工工件和机器的属性确定工件加工的先后顺序。此外,还可以通过神经网络和模糊推理等方法来构建和学习用于求解调度问题的规则集,以便能够根据车间的生产状态动态选择启发规则,改善调度性能。虽然规则调度方法在流程工业中的应用相对不多,但考虑到生产环境中存在着大量难以用数学规划模型精确描述的不确定因素,因此如何将分析规则方法应用于流程工业的生产调度是一个非常值得研究的方向。

在利用各种优化调度方法求解流程工业的生产调度问题时,需要对以上这些方法的性能进行评价。评价方法主要分为两种,即理论分析和实例仿真分析。理论分析主要以数学方法作为研究手段,考察调度方法所得解的概率分布、最差情形等。实例仿真分析则是使用调度方法对实例进行求解,通过大量测试得到调度方法的优化性能指标,从而对调度方法的性能进行定量评价。实例仿真分析简便易行、实用性强,是最为常用的一类评价方法。而对于调度方法的性能评价,通常采用以下三种基本指标。

1. 优化性能指标

优化性能指标通常采用相对偏差百分比来衡量调度算法的优化性能,具体指标如下:

$$E_m = \frac{C_{\text{best}} - C^*}{C^*} \times 100 \quad (1.1)$$

其中, C_{best} 为某调度算法运行一定次数后所求得的最佳解的性能指标值; C^* 则表示所求解问题的最优解的性能指标值。当最优解未知时,可以用理论界目前找到的该问题最好解的性能指标值代替。显然, E_m 的值越小,调度算法的优化性能就越好。

2. 时间性能指标

时间性能指标用来衡量调度方法求解的效率,其计算公式如下:

$$E_t = \frac{I_a \times T_0}{I_{\max}} \times 100\% \quad (1.2)$$

其中, I_a 为调度算法满足终止条件时的平均迭代次数; $I_{\max}$ 为调度算法给定的最大迭代次数; T_0 为调度算法进行一次迭代所需平均计算时间。因此,在给定 $I_{\max}$ 的情况下, E_t 的值越小,调度算法的收敛速度就越快,求解效率也就越高。

3. 鲁棒性指标

通常用调度算法的波动率作为鲁棒性指标,其计算公式如下: