

通航调度的 理论研究与工程实践

齐欢 肖恒辉 张晓盼 著

三峡

葛洲坝



科学出版社
www.sciencep.com

三峡-葛洲坝通航调度的理论、 研究与工程实践

齐 欢 肖恒辉 张晓盼 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对三峡-葛洲坝联合调度系统固有的特性和复杂性,利用系统工程的理论与方法,建立了联合调度的数学模型、集中调度与分散调度的数学模型、时间表优化模型,设计了混合整数规划算法;从系统角度研究了闸室编排与锚地停靠的关系,建立了闸外编排的模型与计划调整的算法;分析了不确定调度系统的特点,提出了异步滚动时域调度策略,利用对来船时间的混沌分析,研究了滚动调度的周期;提出了将多智能体(MAS)应用于通航调度的算法;研究了三峡-葛洲坝通航调度系统的稳定性及其改进方法。

本书可供交通运输与生产调度等领域的工程技术人员以及管理科学与工程、系统工程、工业工程、应用数学、计算机应用等专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

三峡-葛洲坝通航调度的理论与工程实践/齐欢,肖恒辉,张晓盼著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-028136-4

I. ①三… II. ①齐…②肖…③张… III. ①三峡工程—船舶调度—研究 IV. ①U692.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 120251 号

责任编辑:赵彦超/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

骏主印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 7 月第一次印刷 印张: 13 ½

印数: 1—2 500 字数: 260 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

三峡工程的修建大大改善了长江中上游航道的通航条件,但不可否认的是,随着长江中上游航运的日益繁忙,三峡大坝和葛洲坝必将成为这一水域的通航瓶颈。“十一五”期间,在交通运输部计划投资 150 亿元人民币实施的长江黄金水道建设中,重点推进的六大工程就包括三峡过坝运输扩能(其他五项工程分别是航道治理、港口建设、船型标准化、水运保障及干支联动)。由于三峡大坝和下游的葛洲坝相距不到 40km(普通船只 2~4h 的航程),两者构成了一个有机的整体,因此要充分发挥该水域的航运能力,就必须对两座大坝的通航设施(包括三峡大坝的双线五级船闸和目前尚未投入使用的升船机以及葛洲坝的三线单级船闸)和所有过坝船只实行统一的通航调度管理,针对船舶过坝的联合通航调度是这一管理模式中的主要环节,而设计稳定高效的调度算法是实现联合通航调度稳定高效的关键。由于三峡-葛洲坝联合调度系统固有的特性和复杂性,本书基于“三峡-葛洲坝水利枢纽通航调度系统工程”项目,借鉴调度问题上已有的研究工作和通航部门的调度经验,对具体的系统工程问题提出了有效的模型和方法,着力于联合通航调度的数学模型、调度策略、不确定性下的滚动时窗调度、闸外编排和计划调整等问题的研究。

三峡-葛洲坝联合通航调度系统是长江三峡河段上特有的一种内河航运调度系统。本书研究了联合通航调度系统,建立了数学模型,定义了目标函数和相应的约束条件,将联合调度系统的数学模型归结为一个多目标非线性规划问题。求解三峡-葛洲坝两坝联合调度模型就是根据船舶流序列生成时间表序列。从这个意义上看,这是个时间上的时间表问题。由于船舶需要编排到船闸之中,根据时间表序列对二维空间(船闸闸室)进行排档(排档结果包括船舶在船闸内的位置信息),即空间上的装箱问题。二者耦合在一起是一个非常复杂的组合优化问题,具有强 NP-难的复杂度,并且在实际的通航调度系统中变量结构相当复杂,因此精确优化算法是不现实的。本书针对调度模型的目标和约束条件,采用逐步最优化算法 POA(progressive optimality algorithm)求解,取得很好的效果。POA 算法是求解多阶段决策问题的一种方法,采用多层循环迭代寻优的策略,适合于多约束的时间表问题的求解。

鉴于三峡大坝与葛洲坝之间的距离为 38km,不近不远,本书研究了两坝联合调度最优策略——中心集中协调、两坝分坝实施的策略。从两坝之间距离“不近”

的角度来看,调度策略归结为分坝调度,其特点是两坝分坝调度,其性质接近船闸的现场调度,优点是便于计划调整,灵活性很强,可尽量发挥两坝的分坝通过能力,其缺点是两坝间衔接不够,通常会使得两坝间船舶大量积压,造成长江航道的不畅通和安全隐患;从两坝之间距离“不远”的角度来看,调度策略归结为可集中调度,即统一编制调度计划,优点是计划衔接和两坝间衔接比较合理,缺点是受通过能力小的一坝约束,使得整体通过能力受到影响。本书针对两种调度模式进行比较分析,根据调度实际情况,引入了两坝间的面积缓冲和待闸时间的惩罚,建立了数学模型,得到两坝联合调度的最优策略。

由于三峡-葛洲坝通航问题的独特性,联合通航调度问题在理论和方法上都有其自身的特点。针对这一现状,本书借鉴车间调度问题的研究成果,提出了联合通航调度问题的非线性混合整数规划模型。这一模型主要基于联合通航调度问题与柔性制造调度问题的相似性,从柔性制造调度问题的混合整数规划模型演化而来,结合二维装箱模型描述了船舶在闸室中停泊位置的优化编排问题,该模型是一种强 NP-难复杂度的组合优化问题。本书利用混合优化算法,将针对船舶过坝时间表的优化计算转化为针对船闸闸次时间表的优化计算。闸次时间表优化模型也是一种混合整数规划模型,提出的混合优化算法是一种具有启发式变换策略的随机局域搜索算法和模拟退火算法的合成,其中随机局域搜索算法针对整数型优化变量,而模拟退火算法针对实数型优化变量。基于实际通航数据的测算表明,该算法性能稳定,计算速度和优化效果能够满足实际应用的需要。

从优化全程调度的角度出发,本书提出了闸外编排和计划调整的概念。在分析了船舶在进闸调度的操作流程和锚地停靠原则后,以安全性和进闸耗时为目标,建立了闸外编排的数学模型,设计了相应的启发式求解算法,将模型的目标和约束条件通过启发式方法生成船舶在闸外的排序法则。本书同时分析了现场调度中的计划调整问题。计划调整主要用来实现现场船舶调度的优化和应急,相对闸外编排而言,计划调整是一种闸内编排。本书提出了将闸外编排和计划调整综合考虑的策略。实验表明,将闸外编排和计划调整综合考虑是切实可行的,在节省船舶进闸时间和保证安全的原则下,可以增加日开闸次数,提高船闸通过能力。

在三峡-葛洲坝联合通航中,更具有实用价值的是复杂环境中的动态调度算法。本书借鉴了加工制造领域在加工车间(job shop)问题中的滚动时域方法(rolling horizon procedure, RHP),设计了基于闸次时间表优化的联合通航调度滚动时域算法,在滚动时段内采用具有启发式剪枝策略的分枝定界算法搜索最优解。在静态调度模型下的测试结果表明,该算法的全局优化能力和计算速度均优于全局混合优化算法。进一步,针对实际动态调度环境中系统参数和船舶航行参数的随机性,设计了一种异步滚动时域调度策略以提高滚动时域方法的灵活性并降低

重调度的计算量。本书通过混沌时间序列分析的小数据量方法对船舶的历史过闸数据进行计算,得出了船舶过闸的混沌特性,根据混沌时间序列的短期预报方法,获得了能保证调度计划准确性的预测时窗范围。借鉴滚动调度的思想,根据混沌时间序列预报提供的参考时窗,设计了滚动时窗调度。对通航调度的实际数据分析表明滚动时窗调度切实可行。利用合适时窗的滚动调度得出的过闸计划与船舶的实际过闸记录更为接近。因此,滚动时窗调度可以生成更准确的调度计划来指导船舶的现场调度,有效改善两坝的通航安全性,提高两坝通航能力。本书还探讨了利用多智能体(multi-agent systems, MAS)生成初始调度方案的方法。

本书介绍了联合通航调度算法在实际的航运管理系统中的应用(包括计划编制子系统和信息管理子系统)。以本书的理论与方法为基础的三峡-葛洲坝水利枢纽通航调度系统已经成功应用,并取得了巨大的经济效益与社会效益,同时得到了调度专家们的一致认可,可为交通运输中的公路、铁路、航空、航运的调度提供参考与借鉴。

感谢项目组成员卢方勇、刘云峰、赖炜、王小平、曾亮、孙波、王俊峰、甘勇、王珊珊和赵亮,感谢长江航运管理局科研所余绍明教授和长江三峡通航管理局胡洋、冯小检、南航、王雁飞、胡礼波等同志。

本书的出版得到了国家自然科学基金和中央高校基金科研业务费专项资金的资助。

作 者

2009年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目的和意义	1
1.2 联合调度问题概述	2
1.3 国内外研究现状	4
第 2 章 三峡双线五级船闸的运行与调度	15
2.1 三峡双线五级船闸的运行原则	15
2.2 运行方式决策的数学描述	16
2.3 各种运行方式可行性的判断	17
2.4 船闸编排的数学模型	23
2.5 船闸编排算法设计	29
2.6 三峡双线五级船闸二维可视化仿真	37
第 3 章 联合通航调度的时间表模型和算法	47
3.1 三峡-葛洲坝联合通航调度的基本概念	47
3.2 广义多坝航运网络的船舶过坝联合调度静态模型	55
3.3 基于闸次时间表优化的静态联合通航调度算法	61
3.4 闸次时间表优化的混合式算法	66
3.5 实例分析	70
第 4 章 联合通航调度的数学模型与计划编制	74
4.1 计划编制的需求	74
4.2 联合调度的数学模型	75
4.3 编排调度算法设计	79
4.4 调度计划编制系统的实现	88
第 5 章 联合调度策略的理论分析	91
5.1 联合调度的策略研究进展	91
5.2 调度策略模型	92
5.3 调度策略分析	95
5.4 调度算法	96
5.5 实验分析	108

第 6 章 闸外编排和计划调整	112
6.1 引言	112
6.2 闸外编排的提出及其原理	113
6.3 闸外编排的模型及其算法	114
6.4 闸外编排的实现	116
6.5 现场调度的计划调整	117
6.6 计划调整的实现	120
第 7 章 两坝联合通航调度的滚动时域算法	123
7.1 引言	123
7.2 滚动时域调度的基本理论和方法	123
7.3 联合通航调度滚动时域算法的优化模型	126
7.4 滚动时域内调度子问题的优化算法	129
7.5 异步重调度策略	137
7.6 实例分析	140
7.7 不确定性条件下的滚动时窗调度	143
第 8 章 基于 MAS 的动态调度模型	156
8.1 MAS 的基本概念及在加工制造系统中的应用	156
8.2 动态联合通航调度 MAS 模型的特征	158
8.3 动态调度 MAS 模型的结构	159
8.4 分布式的调度计划编制和调整	161
8.5 缓冲区容量控制	163
第 9 章 联合调度系统的稳定性分析	166
9.1 图的建模方法与系统冲量过程的稳定性判断	166
9.2 冲量稳定	167
9.3 联合调度系统两坝五闸的稳定性分析	167
9.4 联合调度系统在黄柏河影响下的稳定性分析	171
第 10 章 联合通航调度算法的实际应用	176
10.1 两坝联合通航调度系统的总体结构	176
10.2 两坝联合通航调度的工作流程	178
10.3 自动编制方式的算法设计	180
第 11 章 三峡-葛洲坝水利枢纽通航调度的管理信息系统	185
11.1 项目背景	185
11.2 任务概述	186
11.3 三峡-葛洲坝水利枢纽通航调度系统的体系结构设计	192

11.4 管理信息系统实现	195
结语	200
参考文献	203

第 1 章 绪 论

1.1 目的和意义

本书的材料来源于长江三峡通航管理局(简称为三峡局)的“三峡-葛洲坝水利枢纽通航调度系统工程(专业软件研究与应用)”项目的研究总结。

交通运输包括公路、铁路、航空、水路运输等,近年来,公路、铁路、航空都得到了长足的发展,关于公路、铁路、航空运输的管理研究成果也比较丰富,水路运输由于其成本低、噪声小、污染少等优点在交通运输体系中起着举足轻重的作用,然而关于水路运输管理尤其是内河航运管理的成果还比较少见^[1]。随着我国经济的快速发展,许多内河船闸的通过量已大大超过船闸设计通过能力。目前,解决船闸拥挤状况的途径有两条:一是粗放型外张方式,通过建设复线船闸甚至三线船闸增加船闸规模来增加过闸船舶的数量;二是集约型内敛方式,即通过加强对船闸运行调度的管理,提高船闸的运行效率,以达到减少船舶待闸时间、增加过闸船舶数量的目的。由于第一种方式不仅投资巨大,而且将占用大量的土地资源,目前多采用第二种方式^[2]。因此,通过运用一些先进技术手段来提高船闸的航运通过能力是实现船闸优化运行调度的关键环节,这一问题的有效解决对我国经济发展与社会安全具有重要的理论意义和现实意义。

长江水运是长江流域综合运输体系的主骨架,是长江沿江经济快速发展和沿江产业带形成的重要支撑,是促进我国东、中、西部地区经济协调发展的重要纽带,是实现经济社会可持续发展的重要战略资源。随着我国经济的高速发展,长江水运货运量已经超过了莱茵河跃居世界第一。而三峡工程的修建进一步改善了长江中上游航道的通航条件,对上可以渠化三斗坪至重庆江段,对下可以增加葛洲坝以下长江中游航道枯水季节流量,提高水位,满足长江中上游航运事业远期发展的需要。三峡-葛洲坝水利枢纽设计年单向通过能力为 5152 万吨,由于经济的快速增长,到 2004 年过坝货运量已经达到了 4300 万吨。不可否认的是,随着长江中上游航运的日益繁忙,三峡大坝和葛洲坝必将成为这一水域的通航瓶颈,“十一五”期间,交通运输部计划投资 150 亿元人民币实施的长江黄金水道建设中,重点推进的六大工程就包括三峡过坝运输扩能(其他五项工程分别是航道治理、港口建设、船型标准化、水运保障及干支联动)。

在我国对长江“黄金水道”的开发进程中,在增强服务意识、提高服务质量与管理信息化科学化的推动下,研究三峡-葛洲坝的联合调度数学模型和求解算法,开发两坝联合调度的计划编制系统,是一件十分重要而又紧迫的工作。

长江三峡河段(庙河至中水门)全长 59km,是三峡-葛洲坝梯级枢纽所在的航道,这一段是长江“黄金水道”的咽喉部分。由于三峡-葛洲坝梯级枢纽是一个有机的整体,因此必须对三峡船闸与葛洲坝船闸实行统一的行业调度管理体制,以提高三峡和葛洲坝枢纽的船闸通过能力,综合管理三峡大坝和葛洲坝两大水利枢纽的通航设施,实现船舶过闸便捷、通畅和有序。为此,长江三峡通航管理局(简称三峡局)从 1998 年起着手建立两坝通航“统一调度、联合运行”的调度体系,对船舶过坝实行“一次申报、一次计划、统一调度、分坝实施”。2004 年底长江三峡通航管理局启动了“三峡-葛洲坝水利枢纽通航调度系统”工程,在“三峡局信息化(一期)系统工程”和“三峡坝区船舶过坝优化调度辅助决策系统”的应用基础上,通过对调度业务的调研,优化工作流程,建立数学模型,综合运用计算机、自动控制、运筹决策等技术,建立数字化、自动化的通航调度系统,提供及时、规范的信息采集、生成、交换、共享、管理手段,使各级管理人员能够全面、准确、迅速地获取信息,优化调度决策,下达各项指令,以满足三峡-葛洲坝两枢纽船闸联合运行统一调度的管理需求,逐步实现调度工作智能化,确保三峡通航“安全、有序、畅通”。在组织机构上,“长江三峡通航管理局调度指挥中心”于 2005 年 11 月正式成立,负责对三峡河段的通航实施统一调度。其核心问题在于建立两坝联合通航调度(以下简称“联合调度”)的优化数学模型,提供联合调度计划编制的优化算法,使整个调度系统能够根据航区的船舶动态信息,快速高效地编制任意起点任意时段的两坝统一调度计划。

本书从联合调度的数学模型出发,对两坝的调度策略进行深入的分析 and 探讨,得出更加有效可行的调度策略,通过对不确定问题(船舶流的随机到达和调度计划执行中的不确定性)进行混沌时间序列分析,得出滚动时窗调度,从全流程调度的角度,提出了闸外编排和计划调整来帮助调度人员更好地现场调度,最后给出系统的稳定性分析和调度系统的工程实例。

1.2 联合调度问题概述

联合调度的系统分析可以从下面的 7 个方面来概述。

1. 建模复杂性

首先,从系统建模的角度来分析,联合调度首要考虑三个方面的问题:第一,两坝的协调问题;第二,葛洲坝三个船闸的均衡问题;第三,从船舶的待闸面积来看,

存在着上游水域和下游水域船舶面积比例的兼顾问题。其次,从两坝的调度策略的角度来分析,联合调度需要考虑两坝集中调度和两坝分坝调度的比较,通过设计两坝间的缓冲区来提高船闸的通过能力。再次,根据时间序列的方法来分析历史过闸数据,通过混沌时间序列的预报窗口来设计滚动调度。最后,从船舶调度的全流程来分析,联合调度需要考虑船舶从坝区外申报开始到通过两坝船闸的过程,这包括锚地的指泊调度、闸外静水航道的船舶进闸调度和进入闸室的闸内编排(计划调整)。

2. 多目标和多约束性

联合调度问题的优化指标众多,是一个多目标优化问题。联合调度计划优化指标主要有 8 条,即计划期内船闸的通航能力、平均闸室面积利用率、船舶待闸时间、船舶两坝间待闸时间、转闸拖轮待闸时间、跨台班(跨计划期)船舶数量、确定合理的船舶权重系数和葛洲坝三个船闸的工作量均衡性。这些指标互相联系又互相制约,增加了数学模型和调度算法的难度。另外,上述指标主要针对长计划期(24h 或 12h)的调度计划,当调度模式升级为“滚动申报、动态计划”之后,调度计划将没有起点时间和计划时长的限制,在这种新的模式下如何处理各种优化指标将是一个需要深入研究的问题。

3. 多站点航运协调调度的网络特性

在生成多站点航运协调调度计划时,由于船舶的多样性和各个船舶运行的不一致,以及各个站点调度计划的相互耦合,如果某一站点的调度计划做出一些调整,就会导致后续的调度计划都必须做出相应的调整。因此,如何保证多站点航运协调调度中各艘船舶的调度时间衔接将是一个关键问题。

4. 不确定性

不确定性主要包括随机性、模糊性和信息不完全。航区通航环境、船舶航行状态和船闸工作状态复杂多变。复杂多变的环境因素和系统状态增加了调度计划的不确定性,如果仅依靠申报信息来编制计划,随着时间的推移,调度计划与实际情况必将越来越脱节,从而失去了计划的指导意义。船舶的数量、类型和过坝方式的多样化以及申报时间的随机性都会增加系统的不确定性。从滚动调度的角度来看,在每个调度时刻,计划的执行仍然存在很多的不确定因素,随着计划的不断执行,船舶数据不断更新,而计划编制的滚动方法本质上是一种具有时序关系的仿真方法,如果船舶某个阶段的调度计划未知,那么其后序阶段的计划时间就是不确定的。因此,系统的不确定性归结于三个方面:来自系统外的不确定性、计划执行中

产生的不确定性和离散性异常(设备故障或者突发事件)。

5. 离散动态特性

过坝船舶流是随时间的推移而发生变化的,联合调度计划编制问题是将船舶流序列按照一定的优先级排入一个闸次时间表中,因此,该系统是一个离散动态系统。这里所指的“动态”包含两方面的意思:首先,对于每一条船闸来说,其需要调度的船舶并不是在调度开始时刻全部处于锚地待闸,而是在调度过程中陆续到达;其次,船舶在每个阶段的航行时间和状态存在不确定性。本书根据混沌时间序列分析理论设计了适应动态变化环境的滚动时窗来满足系统的动态特性。

6. 计算复杂性

联合调度的算法属于时间表和二维空间上的装箱问题的耦合问题,求解该问题需要通过先设计调度框架,然后进行单个船闸计划编制的详细编排与优化,因此,算法涉及逐层优化,将目标和约束逐步松弛求解。由于多数调度问题是 NP-难的组合优化问题,存在较高的计算复杂性,不存在多项式时间的最优算法,本书对通航调度问题也采用启发式方法或邻域搜索算法。

7. 稳定性

从系统动力学的角度来分析系统的稳定性。稳定性分析对一般调度系统并非十分必要,但是由于三峡-葛洲坝通航的特殊性,调度系统的稳定性分析就显得非常重要。从宏观的角度来看,将船舶流过坝看成连续的变量通过冲量过程的方法来分析系统,通过系统的网络结构和输入输出流量来判断系统的冲量稳定。

目前两坝联合通航调度问题无论是理论上还是方法上都缺乏足够的研究,国外没有类似复杂的水利工程,也没有经验可借鉴。本书针对上述难点从数学模型和调度算法两方面对这一复杂的多目标优化问题进行探讨,并希望通过该问题的研究将三峡-葛洲坝的航运管理经验推广至整个长江流域,甚至其他的内河航运管理上,这一研究具有积极的科学理论意义和现实的社会效益。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 三峡-葛洲坝通航调度的研究进展

1998年三峡大坝临时船闸建成,三峡工程进入为期6年的二期施工期,从航运管理角度来说,这一时期可以分为两个阶段:

(1)2002 年明渠截流之前采取明渠和临时船闸相结合的通航方案,当长江流量小于 $10000\text{m}^3/\text{s}$ 时,过坝船舶均从明渠航行;长江流量在 $10000\sim 26000\text{m}^3/\text{s}$ 时,大型船舶从明渠通过,小型船舶从临时船闸通过;当流量在 $20000\sim 45000\text{m}^3/\text{s}$ 时,大小船舶(队)均由临时船闸通过。

(2)明渠截流之后到 2003 年永久船闸(即双线五级船闸)通航前,临时船闸将独立承担船舶通过大坝的任务。薛林桥和刘念早在 1995 年^[3]就对明渠和临时船闸相结合的通航方案进行了预研,他们以葛洲坝船闸的运行方案为基础,结合排队论模型和多目标规划方法对三峡工程通航设施的通过能力进行了评估,提出了完成经济运量的最优方案。也正是在这一时期,长江三峡通航管理局首次施行了三峡-葛洲坝船舶统一调度的航运管理模式,并建立了网络化信息化的船舶过坝优化调度辅助决策系统;对两坝联合通航调度问题的研究也主要集中于这一时期。余绍明等^[4,5]研究了辅助决策系统的设计方案、工作模式、网络环境及信息标准等特征,同时提出了联合调度系统的工作原则,即在汛期联合调度系统以三峡大坝船舶调度为核心,着眼于明渠和临时船闸通航能力的发挥,而葛洲坝船闸调度以控制、调节两坝间交通流量支持三峡大坝调度为主要任务;在非汛期系统主要处理葛洲坝船闸调度问题,着眼于合理、协调安排船舶通过葛洲坝 1~3 号船闸^[6]。这一原则保证了在三峡工程二期施工期复杂的水文及交通环境下调度系统能稳定高效运行,同时对三峡永久船闸运行之后新的联合调度系统也具有深远的指导意义。杜经农等^[7,10]详细研究了辅助决策系统的网络拓扑结构以及软件设计方案和关键技术,其中的核心问题是计算机自动编制 3h 船闸调度计划的数学模型和算法,这也是首次对这一复杂的调度问题进行全面细致的建模分析。他们将该问题分解为两个子问题,即船舶进闸调度问题(船舶优先级的计算和闸室中的停泊位置的优化编排)和船闸整体运行计划问题(确定所有闸次的开闸时间和航向),并以葛洲坝船闸运行模式为基础,提出了三种优化目标和一种基于离散时间系统和动态规划方法的闸次运行时间表生成算法。余绍明和曹雄^[5]将层次分析法应用于船舶优先级的计算也取得了比较好的效果。王刚等^[9]对 1998 年、1999 年的两坝联合调度模式初期实践进行了回顾和总结,介绍了统一调度的特点和工作流程,并通过详实的数据分析说明了这种模式在缩短船舶待闸时间、提高闸室利用率和确保航运安全等方面取得的明显效果。

2003 年 6 月永久船闸投入试运行,船舶将经过双线五级船闸通过三峡大坝。在升船机建成以前,永久船闸将成为三峡大坝的唯一航运通道,因此提高永久船闸的通航能力是充分发挥三峡工程航运效益的关键。长江委设计院三峡船闸设计总工程师宋维邦教授在试航一个月之后撰文对船闸运行情况和通过能力进行了分析^[11],文中指出,试航一个月以来双线五级船闸的实际日平均闸次数不到设计指

标的一半,如何进一步缩短船闸操作时间,同时优化船舶过闸工艺,逐步减少船舶进出闸时间是试运行期间的一项重要课题。高雄在试航半年简析^[12,13]中指出,船闸操作和船舶过闸工艺的优化工作已经初见成效,船闸通航率超过设计通航保证率,日均闸次数提高了一倍以上,接近设计指标。

华中科技大学齐欢教授及其领导的研究团队在联合调度问题上做了大量的工作,具体包括如下几个方面。

1. 关于船闸方面的研究

赖炜^[15]扩展了上述二维装箱模型,结合多属性决策方法综合考虑了闸室面积利用率、待闸时间、船舶类型和紧急级别等多种因素对闸室优化编排方案的影响;卢方勇等^[14,15]对闸室编排算法做了进一步优化研究,其中刘云峰^[16,17]用改进的深度优先搜索(deep-first-search,DFS)算法较好地解决了闸室面积利用率和船闸优先级之间的矛盾,孙波提出了一种基于降维思想的启发式编排算法^[18],进一步提高了编排方案的闸室面积利用率。这一系列工作比较好地解决了船舶进闸调度问题,目前的算法在实际应用中编排一个闸次所需的时间不到0.1s,平均闸室利用率完全可以满足实际调度系统的需要。

2. 联合调度模型和算法

基于前面关于船闸方面的研究,齐欢、肖恒辉等首次建立了完整全面的联合调度数学模型^[19]。张晓盼在传统的24h模式下提出了基于闸次时间表优化的静态调度算法,根据闸次时间表与船舶待闸成本的关系,推导出了闸次的“力矩效应”性质,从而将针对船舶的优化目标转化为针对闸次的优化目标,并根据这一性质设计了一种具有启发式变换策略的随机局域搜索和模拟退火相结合的混合式优化算法^[20]。王小平等研究了联合通航调度信息系统的组织结构和一种模拟人工编制过程的整体计划启发式编制算法^[21,22]。

综上所述,对于三峡双线五级船闸投入使用之后的两坝联合通航调度问题,在船舶进闸调度问题上取得了比较满意的成果,而在船闸整体运行计划方面、在联合调度的策略上、不确定性条件下的动态调度问题上,以及在调度系统的稳定性问题上,无论从理论上还是方法上都缺乏足够的研究,而这正是本书的研究重点。船闸整体运行计划问题虽然属于交通领域的调度问题,但是与传统的列车或者公交时间表调度并不相同,后一类时间表问题主要考虑对运输工具本身行驶状态的控制,而两坝通航调度除了考虑船舶航行控制之外,更重要的是安排运输工具的承载设备——船闸的运行计划。另外,与作为流量控制问题的交通信号灯控制相比,船闸设备的运行特点和操控约束显然更加复杂,因此从交通调度以外的其他领域借鉴

研究思路和方法是非常必要的。

下面分 4 个部分来介绍需要借鉴的研究理论和方法:调度问题以及经典的运筹学方法、离散事件动态系统及其优化方法、大规模调度的分解方法和研究不确定性的相关方法^[23~25]。

1.3.2 调度问题以及经典的运筹学方法

传统的加工车间调度指的是对一个可用的制造资源集在时间上进行加工任务(加工工件)集的分配,将作业(加工操作)均衡地安排到各机器,并合理地安排作业加工次序和开始时间,同时优化性能指标,在执行这些任务或者作业时需要满足限制条件,如任务到达时间、完工的时间限制、任务的加工顺序、资源对加工时间的影响等。柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS)调度问题是从加工车间调度问题发展而来的,它较加工车间问题更为复杂之处在于 FMS 独有的高速传输性和柔性,使得 FMS 调度既使用传统加工车间调度的概念,又考虑可变加工路线、工序顺序和缓冲存储器规模的限制等特殊系统特征。FMS 调度问题可以分为两类:第一类是静态环境下的路径规划问题,目标是根据一定的性能指标,在满足技术上的制约因素(如机床刀库容量和机床生产能力)的条件下,从上层计划给出的应加工的工件中选出一个适合加工的工件集合,并将其所有工序和所需刀具分配到各机床上,而工件的数量和到达时间、机床的数量和连接形式以及刀具的配置是已知并且固定的,因此称作静态调度。该问题的关键是零件分批和机床负荷分配。第二类是动态调度,它是指在加工过程中根据系统当前的实时状态,对生产活动进行动态优化控制。动态调度的目标是在整个加工过程遇到扰动和故障时,能够根据系统监控到的实时情况修改原定的加工顺序,调度系统的所有资源,使 FMS 持续、优化的运行。张晓盼^[25]在对 FMS 调度问题所作的综述中归纳了 7 种常用的调度优化指标,分别是:调度持续时间、平均流通时间、最大延迟时间、平均延误时间、延误作业数、平均完工时间以及系统利用率。由于 FMS 调度问题的研究通常以加工车间调度为基础,因此下面对这两者的研究现状做一个综合回顾。

总体上说,加工车间或 FMS 调度问题的求解主要基于两类方法:第一类是基于组合优化的方法,这类方法通常全盘考虑所有的加工操作和约束条件,然后建立一种统一的数学描述模型,一般是混合整数规划模型(如 FMS 问题的全局优化混合整数线性规划模型^[23]),或者表格描述模型(如针对遗传算法提出的操作时间表表示法^[24]),在此基础上运用各种组合优化方法一次性地求解出所有工件的调度计划;第二类是基于决策过程的方法,这类方法不像组合优化方法针对每一具体的加工操作进行数学建模,而是着眼于对调度过程的描述,通常采用控制论模型(如 Ceylan 等^[25]提出的基于动态神经网络的实时控制模型),或者马尔可夫决策过程

模型(如李响等^[26]提出的动态不确定性环境中的持续规划系统),将整个调度问题分解为序贯执行的决策问题的集合。一般来说,组合优化方法适合于静态调度问题的求解,在问题规模较小时可以得到精确的最优调度方案,决策过程的方法适合于动态环境下的调度问题,由于在每个决策阶段面临的是比原问题更简单、规模更小的子问题,因此这种方法有利于处理对速度要求较高或者不确定因素较多的环境。随着现代柔性制造系统的结构越来越复杂,加工模式越来越灵活,这两类方法有互相融和的趋势。一方面,有学者认识到将某些决策过程类的方法应用到静态调度问题中来,有利于降低数学模型的复杂性,减小组合优化的计算量,比如王冰^[28]提到的滚动时域调度在处理大规模单机加工车间问题上收到了较好的效果;另一方面,在处理复杂动态调度问题时,决策子问题往往也相当复杂,刘飞等^[27]的研究表明,在决策子问题中采用组合优化方法(文中使用遗传算法)得到的结果优于大多数的启发式调度规则。

经典的运筹学方法有以下几个方面。

(1)线性规划法:线性规划是在满足一组线性约束的条件下,求取多变量线性函数的最优解。首先将生产调度问题的目标函数与约束条件用线性规划方程表示出来,然后利用单纯形法对问题求解^[29]。

(2)整数规划法:整数规划是指自变量限制为整数的数学规划。解决整数规划问题常用的数学方法有割平面法、隐枚举法和分枝定界法等。大多数的生产调度问题都可以表示为整数规划的形式,但其有效解采用的是组合规划,等效于分枝定界法和动态规划法的求解^[30]。

(3)动态规划法:动态规划法是求解多阶段决策过程的最优化方法。最早由 Bellman 提出,在很多优化领域得到了广泛应用。自 1962 年 Held 和 Karp 将动态规划方法应用到生产调度问题中以来,动态规划已经成功应用于生产计划、资源分配等问题^[31]。

(4)分枝定界法:分枝定界法是一种隐枚举方法,适用于任何离散的规划问题。分枝定界法的求解思路是把问题的全部可行空间反复地分割成越来越小的子集(分枝),并对每个子集内的解集计算一个目标上界或者下界(定界)。对于调度问题,分枝定界法是应用比较广泛的精确算法。分枝定界法适用于求解小规模调度问题,当问题规模增大时,计算量将急剧膨胀,这限制了它在大规模调度问题中的应用^[32]。

对于小规模调度问题,上述经典的运筹学方法可以在合理的时间内求得问题的最优解^[33]。随着问题规模的增大,问题复杂度的增加,求解难度呈指数规律递增,所以对大规模问题而言经典的运筹学方法不具有实际可用性。Maccarthy 和 Liu^[34]指出经典的调度优化理论在实际生产中应用很少,最优化方法一般只具