

三峡工程两坝联合通航调度的混合模拟退火算法

张晓盼¹, 齐 欢¹, 袁晓辉²

(1. 华中科技大学 系统工程研究所, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 对三峡大坝和葛洲坝的一共5座船闸进行统一的船舶通航调度管理, 是提高长江三峡水域航运能力的关键, 然而其优化调度算法还缺乏必要的研究. 本文首先提出了该问题的混合整数非线性规划模型, 在实际通航调度环境中, 该模型属于强NP-hard复杂度的大规模组合优化问题, 因此设计了一种混合模拟退火算法来搜索次优化调度方案, 该算法将解分解为闸次时间表和船舶调度计划两部分, 在搜索过程中用启发式规则对闸次时间表进行调整, 然后用深度优先搜索(DFS)算法根据闸次时间表求解船舶调度计划, 最后根据Metropolis规则对当前解进行更新. 针对实际通航数据的测试结果表明其优化效果明显优于原有的启发式算法. 目前该算法已经成功地应用于实际的两坝联合通航调度系统中.

关键词: 三峡工程; 联合通航调度; 多目标规划; 模拟退火

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Hybrid simulated annealing algorithm on navigation co-scheduling to the two dams of the three gorges project

ZHANG Xiao-pan¹, QI Huan¹, YUAN Xiao-hui²

(1. Institute of System Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China;

2. School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: A mixed-integer nonlinear programming model is proposed to improve the transportation capacity of the 5 locks in the Three Gorges Dam and the Gezhouba Dam. Since the model is a large scale and NP-hard combinational optimization problem in the real navigation environment, a hybrid simulated annealing algorithm is employed to search the suboptimal solution composed of a lockage timetable and a ship scheduling. The search starts by trimming the existing lockage timetable based on heuristic rules; the result is then used to compute the ship scheduling by the depth-first-search (DFS) algorithm. The obtained solution is finally updated by the Metropolis rule. The experimental test in real navigation conditions shows that the algorithm is more desirable than the original heuristic approach. This algorithm has been successfully put in the real navigation co-scheduling system for operation.

Key words: The Three Gorges Project; navigation co-scheduling; multi-objective programming; simulated annealing

1 引言(Introduction)

本文来源于华中科技大学系统工程研究所与长江三峡通航管理局合作开展的三峡工程两坝(即上游的三峡大坝和下游的葛洲坝)联合通航优化调度研究, 两坝联合通航调度(以下简称联合调度)指的是对三峡大坝的双线五级船闸和葛洲坝的三线单级船闸和所有过坝船只实行统一的调度管理, 包含闸次时间表调度(即各闸次的开闸时间、航向等)和船舶过闸调度(即船舶进闸时间、闸室泊位编排等)两个部分.

航运部门关心的调度计划优化目标有很多, 本文

考虑以下两个目标: 1) 使船舶过闸的等待时间尽量小; 2) 提高船闸的闸室利用效率. 这也是评价船闸通航质量的主要目标. 由于三峡工程的独特性, 目前对于该问题还缺乏足够的研究, 已有的研究成果包括, 联合调度问题的串联排队网络模型和启发式算法^[1], 船舶调度的多属性决策模型^[2], 闸室中船舶的优化编排^[3,4]以及葛洲坝船闸优化调度的动态规划算法^[5], 本文将从多目标非线性规划规划的角度研究该问题的数学模型和优化算法.

2 数学模型(Mathematical model)

如果将船舶看作工件, 将船闸看作加工机器, 则

联合调度问题类似于柔性制造调度问题(FMS, flexible manufacturing scheduling). 借鉴文献[6~8]中介绍的FMS规划模型, 我们提出联合通航调度问题的多目标混合整数非线性规划模型. i 表示船舶的编号, $j(i)$ 表示船舶 i 的计划过坝次数, v_{ij} 和 τ_{ij} 分别表示船舶 i 在第 j 次过坝时的航行(0表示上行, 1表示下行)及航行时间. $l_{ij}, w_{ij}, \alpha_{ij}$ 分别表示船舶 i 在第 j 次过坝时船长、船宽和重要等级. k 表示船闸的编号(1,2分别表示三峡升船机、南线船闸和北线船闸; 3,4,5分别表示葛洲坝1号、2号和3号船闸), $m(k)$ 表示计划期内船闸 k 的最大允许闸次数, l_k, w_k, p_k 分别表示船闸 k 的闸室有效长度、有效宽度和船舶通过时间. t_k^s, t_k^c 分别表示船闸 k 在计划时段内的最佳闸次数均衡比例、船闸 k 的闸次最短间隔时间和船闸 k 的倒闸时间. t_b, t_e 分别表示计划期开始时间和结束时间.

联合调度模型的决策变量是: $r_{km} \in \{0, 1\}$, $t_{km} \in \mathbb{R}^+$, $d_{km} \in \{0, 1\}$, $z_{ijkm} \in \{0, 1\}$, $x_{ij} \in \mathbb{R}^+$, $y_{ij} \in \mathbb{R}^+$, 它们的含义分别是: r_{km} 指定船闸 k 的第 m 个闸次是否有意义, 其中1表示有意义, 0表示无意义, 闸次“有意义”指的是该闸次中必须有过坝船舶; t_{km}, d_{km} 分别表示船闸 k 第 m 个闸次的开始时间和航向; z_{ijkm} 表示船舶 i 在第 j 次过坝时是否通过船闸 k 的第 m 闸次.

2.1 约束条件(Constraints)

$$r_{km-1} \geq r_{km}, \quad (1)$$

$$t_{km-1}r_{km} \leq t_{km}r_{km}, \quad (2)$$

$$t_b r_{km} \leq t_{km} r_{km} < t_e r_{km}, \quad (3)$$

$$r_{km}(t_k^s + t_k^c |d_{km} - d_{km-1}|) \leq r_{km}(t_{km} - t_{km-1}), \quad k \in \{1, 2\}, \quad (4)$$

$$r_{km}[t_k^s + t_k^c (1 - |d_{km} - d_{km-1}|)] \leq r_{km}(t_{km} - t_{km-1}), \quad k \in \{3, 4, 5\}. \quad (5)$$

这些约束条件保证闸次序列的合理性, 其中式(1)~(3)表示需要执行的闸次应该是连续的并且按照时间排列, 式(4)(5)保证闸次时间间隔的合理性.

$$z_{ijkm}r_{km} = z_{ijkm}, \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K(i,j)} \sum_{m=0}^{m(k)-1} z_{ijkm} \leq 1, \quad (7)$$

$$\sum_{k \in (K-K(i,j))} \sum_{m=0}^{m(k)-1} z_{ijkm} = 0, \quad (8)$$

$$\sum_{(k,m) \in G} z_{ijkm} \leq \sum_{(k,m) \in G} z_{i(j-1)km}, \quad (9)$$

$$d_{km}z_{ijkm} = v_{ij}z_{ijkm}, \quad (10)$$

$$\Delta t_{ij} \geq 0. \quad (11)$$

其中 Δt_{ij} 表示船舶 i 在第 j 次过坝时的等待时间, 根

据下式计算:

$$\Delta t_{ij} = \sum_{(k,m) \in G} z_{ijkm} t_{km} - \sum_{(k,m) \in G} z_{i(j-1)km} (t_{km} + p_k + \tau_{ij}).$$

这些约束保证船舶与其计划通过闸次的匹配, 同时等待时间必须不小于0.

$$0 \leq z_{ijkm} x_{ij} \leq z_{ijkm} (l_k - l_{ij}), \quad (12)$$

$$0 \leq z_{ijkm} y_{ij} \leq z_{ijkm} (w_k - w_{ij}), \quad (13)$$

$$z_{ijkm} z_{pqkm} \mu(x_{pq} + l_{pq} - x_{ij}) \mu(y_{pq} + w_{pq} - y_{ij}) \times \mu(x_{ij} + l_{ij} - x_{pq}) \mu(y_{ij} + w_{ij} - y_{pq}) = 0. \quad (14)$$

其中 $\mu(x)$ 为阶梯函数:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$$

这些约束保证船舶在船闸中的停泊位置不发生重叠^[3,4].

2.2 优化目标(Objectives)

船舶 i 在第 j 次过坝的待闸成本函数 $Z(i, j)$ 为

$$Z(i, j) = l_{ij} w_{ij} (\alpha \Delta t_{ij} + 0.01 \Delta t_{ij}^2). \quad (15)$$

其中 Δt_{ij} 表示船舶 i 在第 j 次过坝时的等待时间.

船闸 k 平均闸室利用成本定义为

$$H(k) = \frac{\sum_{m=0}^{m(k)-1} r_{km} (l_k w_k - \sum_{(i,j) \in U} z_{ijkm} l_{ij} w_{ij})}{\sum_{m=0}^{m(k)-1} r_{km} l_k m_k}. \quad (16)$$

基于上述的成本函数, 调度计划的优化目标可以表示为

$$\min J(S) = \alpha_1 \sum_{(i,j) \in U} Z(i, j) + \alpha_2 \sum_{k \in K} h_k H(k). \quad (17)$$

3 混合模拟退火算法(Hybrid simulated annealing algorithm)

上述混合整数非线性规划模型是具有强NP-hard复杂度的组合优化问题, 并且实际通航调度系统的优化变量规模相当大, 笔者提出一种混合模拟退火算法来搜索该问题的近似最优解. 定义 $S = (K, U)$ 表示调度计划, 其中 K 表示闸次时间表, 包括变量 r_{km}, t_{km} 和 d_{km} , U 表示船舶调度计划, 包括变量 z_{ijkm}, x_{ij} 和 y_{ij} , 算法总体流程如下:

a) 初始化闸次时间表 K . 估计各船闸的闸次数 $n(k) \leq m(k)$, 对船闸 k , 如果 $0 \leq m < n(k)$, 则 $r_{km} = 1$, 否则 $r_{km} = 0$. 在满足闸次序列约束(1)~(5)的条件下, 确定所有 $r_{km} = 1$ 的闸次的初始开闸时间 t_{km} 和航向 d_{km} . 基于闸次时间表 K 编制

船舶调度计划 U .

b) 定义初始温度 T , 降温系数 r , 降温次数 N , 初始化 $n = 0$. 设置最优计划 $S^* = (K, U)$, $J^* = J(S)$.

c) 如果计划满足要求或者 $n > N$, 则停止编制过程并输出 S^* , 否则对闸次时间表 K 进行启发式邻域变换, 得到新的闸次时间表 K^c , 基于 K^c 编制船舶调度计划 U^c .

d) 计算 $\Delta = J(K^c, U^c) - J(K, U)$.

e) 如果 $\Delta \leq 0$, 令 $(K, U) = (K^c, U^c)$. 如果 $J(K^c, U^c) < J^*$, 则令 $J^* = J(K^c, U^c)$, $S^* = (K^c, U^c)$.

f) 如果 $\Delta > 0$, 选择一个 $(0, 1)$ 平均分布的随机数 X , 如果 $e^{-\Delta/T} > X$, 则令 $(K, U) = (K^c, U^c)$.

g) 令 $n = n + 1$, $T = r \times T$; 转到c).

编制船舶调度计划时首先按照时间顺序将 K 中的所有需执行闸次按照 t_{km} 的顺序排列为闸次序列 G , 然后依次为 G 中的每一个闸次制定满足约束条件(6) ~ (14)的船舶进闸方案. 船舶调度规则可以表示为下列关于 z_{ijkm} 的0-1规划问题:

$$\begin{cases} \max \xi(U_{km}) = \sum_{(i,j) \in U_{km}} z_{ijkm} l_{ij} w_{ij} \pi_{ij}, \\ \text{s.t. 式(12) ~ (14)}. \end{cases} \quad (18)$$

上式与文献[3,4]中三峡永久船闸的带权重排档模型是等价的, 可以使用文献[3]中的DFS算法较快的求得优化编排方案, 其中 $\pi_{ij} = \alpha_{ij} + 0.02\Delta t_{ij}$ 称为船舶 i 在第 j 个阶段的“动态权重”.

3.1 闸次时间表的启发式邻域变换(Heuristic moves of the lockage timetable)

闸次时间表的启发式邻域变换是指, 对每一个船舶随机选择下列五种变换中的一种.

1) 对船闸 k 中所有 $r_{km} = 1$ 的闸次计算 $\psi_{km} = 1/\xi(U_{km})$ 及总和 ψ_k , 以概率 ψ_{km}/ψ_k 随机选择闸次 (k, m) , 令 $t_{km} = \min(t_{km} + \Delta t, T)$, 其中 T 为满足约束条件(2) ~ (5)的船闸 k 第 m 闸次开闸时间的最大允许值, Δt 为时间步长.

2) 对船闸 k 中所有 $r_{km} = 1$ 的闸次计算闸室利用率 p_{km} 及总和 p_k , 以概率 p_{km}/p_k 随机选择闸次 (k, m) , 令 $t_{km} = \max(t_{km} - \Delta t, t)$.

3) 随机选择一个船闸, 选择闸次 (k, m) 满足 $r_{km} = 1$, $r_{km+1} = 0$ 且 $t_e > t_{km} + t_k^s$, 令 $r_{km+1} = 1$, $t_{km+1} = t_{km} + t_k^s$; 如果 $k \in \{1, 2\}$, $d_{km+1} = d_{km}$; 如果 $k \in \{3, 4, 5\}$, $d_{km+1} = 1 - d_{km}$.

4) 对船闸 k 中所有 $r_{km} = 1$ 的闸次计算闸室

空余面积 s_{km} 及总和 s_k , 以概率 s_{km}/s_k 随机删除闸次 (k, m) , 即从 $n = m$ 到 $n = m(k) - 2$, 令 $r_{kn} = r_{km}$, $t_{kn} = t_{km}$, $d_{kn} = d_{km}$.

5) 对葛洲坝船闸 k , 如果存在连续3个执行闸次同方向, 则转换中间一个闸次的方向, 即 $d_{km} = 1 - d_{km}$; 否则计算 $r_{km} = 1$ 的闸次开闸时刻的反向船舶待闸成本 ρ_{km} 及总和 ρ_k , 以概率 ρ_{km}/ρ_k 随机转换闸次 (k, m) 的方向.

4 实验结果(Experimental result)

下面针对实际的申报数据给出24h通航调度计划编制的测试结果. 为了测试算法效率, 随机选取4天的申报数据, 测试每份数据下的算法优化效率(优化效率=(初始值-优化结果)/初始值).

其中初始调度计划由文献[1]提出的启发式算法得到, 模型主要参数定义如下: 计划期时长为24h, h_1 至 h_5 全部设为1.0, $c_1 = c_2 = 20.0$, $c_3 = c_4 = c_5 = 1.0$, $e_3 = e_4 = e_5 = 1.0$, $\alpha_1 = 50.0$, $\alpha_2 = 2.0$, 最大调整次数 $N = 100$, 初始温度 $T = 1.5 \times 10^6$, 降温系数 $r = 0.95$. 测试结果如图1所示, 图中横坐标表示测试数据编号, 系列1的纵坐标表示艘次, 系列2的纵坐标表示算法优化率 $\times 1000$.

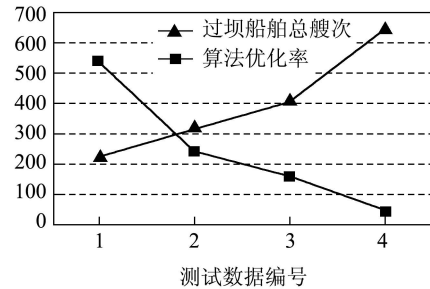


图1 比较测试结果

Fig. 1 results of comparison test

从图1可以看出, 算法可以有效的对文献[1]提出的启发式算法进行优化, 最好的优化率达到了50%以上, 另一方面优化效果与过坝船舶总艘次成反比, 这是由于过坝船舶艘次越大初始调度计划中的闸次越密集, 可用于启发式调整的空间越小.

5 总结(Conclusion)

三峡工程两坝联合通航调度是一种大规模的强NP-hard组合优化问题, 我们提出的混合模拟退火算法对闸次时间表和船舶调度计划进行分别处理, 同时运用启发式规则对闸次时间表进行调整, 有效的减小了计算量并提高了搜索效率, 测试结果表明其优化能力明显优于原有的启发式算法. 目前该算法已经应用于长江三峡通航管理局实际的通航调度系统中, 并取得了较好的效果.

(下转第716页)

- Yanwen, HE Zhen. H-infinity mixed sensitivity for sampled-data system[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 351 – 354.)
- [7] 年珩, 贺益康, 周媛. 内插式永磁型无轴承电机磁悬浮力模型及其关键参数萃取[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 53 – 58.
(NIAN Heng, HE Yikang, ZHOU Yuan. Analytical modeling and parameter extraction of the magnetic levitation force for an inset permanent magnet type bearingless motor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(10): 53 – 58.)
- [8] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

作者简介:

黄雷 (1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为无轴承电机控制, E-mail: huangleizju@yahoo.com;

赵光宙 (1946—), 男, 博士生导师, 研究方向为电气传动及其自动化、非线性系统控制、计算机控制技术等;

年珩 (1978—), 男, 博士, 研究方向为无轴承电机设计及其控制, E-mail: nianheng@zju.edu.cn;

贺益康 (1941—), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为电机及其控制、电力电子技术.

(上接第710页)

参考文献(References):

- [1] 王小平, 齐欢, 肖恒辉, 等. 基于串联排队网络的三峡-葛洲坝水利枢纽联合调度模型[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 82 – 86.
(WANG Xiaoping, QI Huan, XIAO Henghui, et al. Co-scheduling model of Three Gorges-Gezhou Dam based on series queuing network[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2006, 6(3): 82 – 86.)
- [2] 赖炜, 齐欢. 三峡船闸运行调度中的多属性决策问题[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 163 – 166.
(LAI Wei, QI Huan. The MADM of Three Gorges ship gates running[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(2): 163 – 166)
- [3] 刘云峰, 齐欢. DFS算法在三峡永久船闸优化编排中的应用[J]. 计算机工程, 2002, 28(8): 224 – 226.
(LIU Yunfeng, QI Huan. Application of DFS algorithm in the arranging of Three Gorges permanent lock chamber[J]. *Computer Engineering*, 2002, 28(8): 224 – 226.)
- [4] 刘云峰, 齐欢. 二维优化编排启发算法及其在三峡永久船闸调度决策系统中的应用[J]. 计算机与现代化, 2002, (1): 1 – 3.
(LIU Yunfeng, QI Huan. The Two-dimension optimization arranging heuristic algorithm and its application in the Yangtse Gorges permanent ship lock decision system[J]. *Computer and Modernization*, 2002, (1): 1 – 3.)
- [5] 杜经农, 余绍明. 三峡工程船舶智能调度系统的动态规划建模与算法[J]. 计算机与数字工程, 2003, 31(3): 47 – 50.

(DU Jingnong, YU Shaoming. Dynamic programming model and algorithm of shiplock scheduling problem[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2003, 31(3): 47 – 50.)

[6] LIU J Y, MACCARTHY B L. A global MILP model for FMS scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 100(3): 441 – 453.

[7] LOW C Y, YIP Y, WU T H. Modelling and heuristics of FMS scheduling with multiple objectives[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(3): 674 – 694.

[8] LOW C Y, WU T H. Mathematical modelling and heuristics approaches to operation scheduling problems in an FMS environment[J]. *International Journal of Product Research*, 2001, 39(4): 689 – 708.

作者简介:

张晓盼 (1978—), 男, 博士, 讲师, 从事调度问题以及复杂系统分析与集成研究, E-mail: zxp.china@gmail.com;

齐欢 (1948—), 男, 教授, 博士生导师, 从事大系统建模以及集成、决策理论和方法等研究;

袁晓辉 (1971—), 男, 博士, 副教授, 从事智能优化算法理论和应用等研究.