

城镇圩区排涝泵站群日常运行方案优化

刘静森, 程吉林^{*}, 龚 懿

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009)

摘要: 为降低城镇圩区排涝泵站群日常运行能耗, 提出排涝站群总能耗最小的多方案试验选优、圩外河道水位控制去劣的优化运行调度方法。将圩区泵站群分组作为试验因素、每组泵站的开机方案为试验水平, 以泵站群总能耗为试验结果开展正交试验, 对试验结果应用正交分析得到泵站群若干种优化运行方案序列, 选择总能耗最小且满足圩外河道的水位控制要求的方案为最优运行调度方案。以上海市城区某区域为实例, 应用优化方法编制了2种潮水过程、4种降水条件下的优化调度预案; 在不能利用潮水自排的最不利水文工况下, 应用优化调度方案与现行调度方案相比, 总电功耗最大可节省12%。通过开展优化调度方案与现行方案的节能效益比较, 验证了现行方案的合理性并对现行方案提出了优化建议。一方面可为城镇圩区水行政主管部门优化日常调水预案提供参考, 另一方面也为丰富和完善排涝泵站群优化调度方法的理论研究作了有益尝试。

关键词: 排水; 降雨; 优化; 圩区; 泵站群; 排涝; 正交试验; 运行能耗

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.17.019

中图分类号: S276.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-17-0141-08

刘静森, 程吉林, 龚 懿. 城镇圩区排涝泵站群日常运行方案优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 141-148.
Liu Jingsen, Cheng Jilin, Gong Yi. Scheduling optimization of drainage pumping stations in urbanization polders[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(17): 141-148. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国南方城镇圩区的排水系统一般通过市政雨水管网集中收集区域地表径流, 再通过市政排水泵站排入圩外河道。由于市政排水泵站主要保护的對象多为居民及各类社会资源集中的区域, 各泵站配备的水泵及电机的安全余量通常设置较大。城镇化区域的排涝设计标准与其可容纳的时段降雨量密切相关, 主要有2项指标: 一是最大24 h降雨量, 主要反映区域整体除涝能力, 通常为10~20 a一遇标准; 二是最大1 h降雨量, 主要受区域排水管网的排水能力限制, 一般为0.5~1 a一遇标准。当遭遇超标准降雨时, 各排涝泵站主要以最快时间排除区域降水为首要考虑因素, 调度方案的经济性一般不是首要考虑因素; 但各排涝泵站日常运行时所遇降雨一般不超过区域设计标准, 如果仍按照超标准

降雨的调度思路, 则可能会带来较大能源浪费。

目前, 国内外对排水泵站的优化运行研究对象多侧重于大型泵站, 主要优化内容包括两方面: 一是配有单机组^[1-3]或多机组^[4-9]单一泵站运行方案优化; 二是梯级泵站群调水方案的优化^[10-11]。流量相对较小的圩区排涝泵站群联合优化调度方法^[12-15]研究较少涉及。泵站群联合优化调度方法的主要难点在于多泵站的组合方案多, 相关优化计算工作量随着泵站数量呈指数递增而难以进行。本文以正交试验理论^[16-19]为基础提出城镇圩区排涝泵站群日常优化运行方案的编制方法, 并以上海城区某区域为研究对象, 通过实例计算制定了该区域泵站群日常优化运行调度方案。

1 城镇圩区排涝泵站群优化调度方法

本文所指的城镇圩区排涝泵站群的优化调度主要指各泵站在承担排涝任务时的开机方案的优化, 类似于并联泵站群的联合优化调度。理论上, 可以通过设定一个区域优化目标函数, 再逐一模拟每座泵站所有可能的开机方案, 从所有的开机方案组合中选择若干种满足要求的即为该区域的优化调度方案。从排列组合理论可知, 可行的方案组合与泵站数量及每台泵站的装机量的增加呈几何数量级快速递增: 假定一座泵站仅有3台机组, 当区域内泵站数量超过20座时, 可行方案组合可行的

收稿日期: 2014-05-16 修订日期: 2014-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974099); 教育部博士点基金项目(20093250110002); 江苏省水利科技重点项目(2010060); 2013年度江苏省水利动力工程重点实验室开放课题项目(K13023)

作者简介: 刘静森(1977-), 男, 博士生, 主要从事农业水土工程优化规划与管理研究。扬州 扬州大学水利与能源动力工程学院, 225009。

Email: 45458640@qq.com

*通信作者: 程吉林(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事农业水土工程优化规划与管理研究。扬州 扬州大学水利与能源动力工程学院, 225009。Email: jlcheng@yzu.edu.cn

方案组合即达到 34 亿种之多, 使用穷举法开展优化难以进行。

为降低计算工作量, 可利用正交试验所具备的“均匀分布、整齐可比”的特点, 选择适当正交表及目标函数安排正交试验。编制优化调度方案时, 可对泵站群适当分组, 根据不同的降水条件, 以各泵站组合作为试验因素, 为每组泵站设定不同的运行规则作为试验水平, 选择适合的正交表安排正交试验; 以调度周期内总能耗作为优化目标函数, 通过极差分析^[20-21]得出各试验因素及各因素的试验水平对目标函数影响程度的排序, 并生成包括理论最优运行方案在内的若干优化运行方案序列; 利用非恒定流河网模型模拟各运行方案下圩外河道水位的变化过程, 根据圩外河道水位的控制要求剔除不满足要求的优化运行方案, 剩余可行方案中总能耗最小的为对应降水条件下最优运行方案。

1.1 排涝泵站群总能耗最小正交试验选优

1) 试验因素

以排涝泵站群的分组作为试验因素。具体分组可考虑实际管理需求及排水管网的铺设实际进行划分。分组时应尽可能将相邻的泵站分为一组, 并控制各组内不同排水系统间的最长排水距离基本一致。

2) 试验水平

可根据各区域内排水管网的汇水能力及以往泵站开机经验, 根据不同的降水条件对每组泵站设定相对统一的开机规则作为试验水平。

3) 试验时间

可根据每次试验的方案组合, 以区域总径流量为目标, 开展单目标试算逼近的方法计算出每次试验历时。

4) 优化目标

优化目标函数 F 为一个调度周期内的能耗, 即:

$$F = \sum_{i=1}^n f(x_i) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^k (p(x_{ij}) \cdot t_{ij}) \right) \quad (1)$$

式中: $f(x_i)$ 为第 i 组泵群一个调度周期内的耗电量, kW·h; n 为一次试验分组数; $p(x_{ij})$ 为第 i 组泵站内第 j 个泵站一个调度周期内消耗电功率, kW; k 为第 i 组泵站内泵站数量; t_{ij} 为第 i 组泵站内第 j 个泵站一个调度周期内总开机时间, h。

以一个调度周期内的总能耗最小为优化目标。

5) 试验选优

按照上述确定的试验因素及试验水平, 选择合适的正交试验表排定泵站组不同试验水平的组合, 计算不同组合下目标函数值, 利用极差分析确定各试验因素及各因素的试验水平对目标函数影响程

度的排序, 并生成包括理论最优运行方案在内的若干优化运行方案序列。

1.2 排水水位控制非恒定流模型模拟去劣

城镇圩区内河道根据防汛、生态、景观等要求, 对水位一般有较严格的要求, 上述方法排出的运行方案不一定都满足河道水位控制要求。为此, 可建立河网非恒定流模型, 从理论最优方案开始, 以不超过圩外河道最高水位为检验标准, 对各优化运行方案进行去劣操作。从满足水位要求的泵站调度方案中, 选择总能耗最小的即为对应降水条件下的最优调度方案。

城镇圩区河流规模、河床比降一般较小, 水流水平、垂直方向变化不大, 使用基于圣维南方程组的一维水动力计算模型能够良好地模拟河道水流运动规律, 相关计算方程组见公式 (2)。

$$\begin{aligned} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} &= q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial s} + \left[gA - B \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \right] \frac{\partial Z}{\partial s} \\ &= \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \frac{\partial A}{\partial s} \Big|_z - g \frac{Q|Q|}{AC^2R} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Z 为水位, m; Q 为流量, m^3/s ; B 为水面宽度, m; A 为过水断面面积, m^2 ; R 为水力半径, m; C 为谢才系数; q 为单位长度河道的旁侧入流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; g 为重力加速度, m/s^2 ; t 和 s 分别是时间和空间坐标。

该方程组属于一阶双曲线型拟线性偏微分方程组, 数学上很难求其解析解, 一般可采用隐式差分法利用计算机求解^[22-26]。

2 实例分析计算

2.1 计算区域概况

实例以上海某区域为计算对象。该区域现状由排涝泵站除涝的区域面积约 16.8 km^2 (已扣除河道面积), 设计除涝能力为 20 a 一遇, 排水管网的设计排水能力为 1 a 一遇。区域内现有河道 5 条, 总长约 17 km, 5 条河相互连接呈“吕”字状分布 (见图 1)。区域内平均地面高程 4.8 m (吴淞高程, 下同), 防汛预降水位 2.4 m, 常水位 2.8~3.0 m, 最高控制水位 4.4 m。区域外河与黄浦江相连, 属于中等强度的感潮河流, 呈非正规的半日浅海潮型, 潮流运动基本形态为每天两涨两落, 总历时 24 h 50 min。

区域内共有雨水泵站 21 座, 全部沿河而设。其中, 与外河相连的河口各有一座排水泵站 (泵闸结合), 可向外河排除圩区涝水, 其余 19 座泵站排水方向均为区域内河道。各座泵站装机数量在

2~6 台套，额定装机流量从 1.2~20 m³/s 不等，装机功率从 110~2 000 kW 不等，设计扬程在 6~7.9 m。

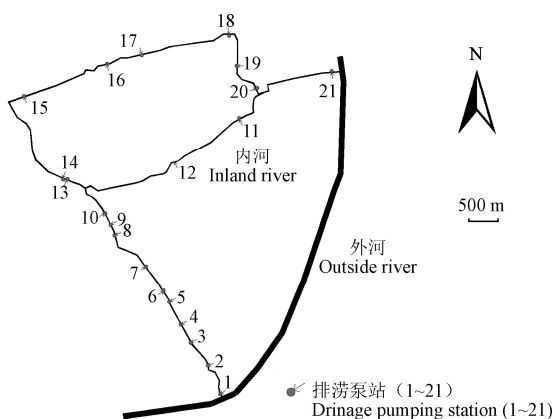


图 1 区域河网分布图
Fig.1 Regional river network

每次降雨量、降雨历时及时程分配有很大随机性，但优化方案的编制需要有一个确定的排水量。结合区域多年降雨资料，对照区域不同除涝能力的频率计算结果，确定若干种不超过区域设计排涝标准的雨量、雨型作为日常降水条件组合开展优化方案的编制。实际应用中，可根据降雨情况选择雨量、雨型相近的优化方案参考。在本例中，低于排涝标准的区域除涝能力定为 5 a 一遇和 10 a 一遇，对应最大 24 h 降雨量分别为 111 和 142 mm；低于排涝标准区域排水能力定为 0.5 a 一遇和 1 a 一遇，对应 1 h 降雨量分别为 27 和 36 mm。据此，日常降水条件组合共有 4 种，详见表 1。

表 1 4 种日常降水条件组合
Table 1 Four daily precipitation conditions

	降水条件组合 Precipitation combination			
	1	2	3	4
24 h 雨量 Precipitation in 24h/(mm·24 h ⁻¹)	111	111	142	142
1 h 雨量 Precipitation in 1 h/(mm·h ⁻¹)	27	36	27	36

2.2 计算区域内现行调度方案

区域内现状泵站的调度模式是初期利用排水系统自身滞涝能力蓄水，最短蓄水时间约 1h 左右；接近排水管网滞蓄水位时，各泵站陆续启动一半机组排水。机组启动后有 3 种情况：如果进水井水位保持稳定或下降缓慢，则保持开机状态至调度结束；如果进水井水位快速下降至停机位则停机，待水位升至接近最高水位后重新开机；若进水井水位继续上升至最高水位则启动全部机组直至降雨结束或至停机位后停机，待水位升至最高水位后重新开机。区域内河道水位超过 3.6 m，即启动 1、21 号泵站全部机组向外河强排，正常情况下，在调度

周期内保持常开。

2.3 优化方案计算

2.3.1 分组方案

1、21 号泵主要承担区域 5 条圩外河道的涝水强排功能，其排水方向为区域外河道，可单独设为 1 组。其余 19 座泵站根据所在区域及管网汇水情况可分为 5 组。分组情况见表 2。

表 2 区域泵站分组情况
Table 2 Regional station groups

泵站分组 Pumping station group	泵站编号 Pumping station number
第 1 组 Group.1	2, 3, 4, 5
第 2 组 Group.2	8, 9, 11, 12
第 3 组 Group.3	6, 7, 10, 13
第 4 组 Group.4	14, 15, 16, 20
第 5 组 Group.5	17, 18, 19
第 6 组 Group.6	1, 21

2.3.2 试验水平确定

试验水平即为各组泵站的开机规则，可根据不同降水条件结合以往排水经验预先设置。经调查：各站在水泵全开的前提下，排水井位从最高开机位降至停机位的时间相差不大，一般在 1 h 左右；在水泵全关的情况下，遭遇 0.5 和 1 a 一遇雨量时，各站的进水井位从停机位到最高开机位历时平均为 60 和 45 min。在遭遇 1 a 一遇降雨，泵站机组从最高开机位启动后保持一半机组常开一般不会出现水位降至停机位的情况，但持续超过 3 h 有可能出现排水管道满蓄翻盖险情；仅开 1 台机组的安全持续开机时间一般不能超过 1.5 h；在 0.5 a 一遇降雨量下，安全持续半开时间在 4 h 左右；仅开 1 台机组的安全持续开机时间按 2 h 取。

由于排水系统自身具有一定的滞涝能力，不同降水条件下排水管网汇流速度有一定差异。影响管网汇流量的主要因素包括雨强与径流系数^[27-29]，而径流系数又与地面透水率密切相关。详细调查区域地面透水率比较困难，但通过区域遥感影像的数据分析可获得较为粗略的区域不透水比例，经测算，该比例约为 70%。根据贺宝根等^[30]给出的上海城市化区域地表径流系数与小时雨强及不透水面积间的计算成果，经插值后可得本区域 1 a 一遇和 0.5 a 一遇降雨强度下径流系数分别为 0.55、0.45。经调查，区域内遭遇 1 a 一遇雨量时，各泵站自降雨开始至排水系统满蓄平均历时 1 h。据此换算，该区域遭遇 0.5 a 一遇时雨量时，各泵站自降雨开始至排水系统满蓄平均历时约为 1.6 h。

优化计算时，为确保各开机方案均可行，可规定遭遇 1 a 一遇和 0.5 a 一遇强度的降雨时首次开机时间分别为降雨开始后 1 和 1.5 h。

结合上述情况,适当考虑安全余量,可对各组的水泵设定如表3的开机规则作为各组的试验水平。

表3 各组泵站的试验水平设置
Table 3 Level set of test subject

分组 Group No.	试验水平 Test level	1a 一遇降雨 In 1 years of rainfall/h	0.5a 一遇降雨 In 0.5 years of rainfall/h
第1组~ 第5组 No.1~5	1	所有机组按照“全开1h-停机45min”的方式循环	所有机组按照“全开1h-停机1h”的方式循环
	2	所有机组按照“半开3h-全开0.5h-停机0.5h”的方式循环	所有机组按照“半开4h-全开0.5h-停机0.5h”的方式循环
	3	所有机组按照“单开1.5h-全开0.5h-停机0.5h”的方式循环	所有机组按照“单开2h-全开0.5h-停机0.5h”的方式循环
	1	全程不开机	全程不开机
	2	圩外水位达到3.2m时,半开至调度结束	圩外水位达到3.2m时,半开至调度结束
第6组 No.6	3	圩外水位达到3.2m时,全开至调度结束	圩外水位达到3.2m时,全开至调度结束
	4	圩外水位达到3.6m时,半开至调度结束	圩外水位达到3.6m时,半开至调度结束
	5	圩外水位达到3.6m时,全开至调度结束	圩外水位达到3.6m时,全开至调度结束
	6	圩外水位达到4.0m时,全开至调度结束	圩外水位达到4.0m时,全开至调度结束

2.3.3 试验工况

1) 水文工况

水文工况包括调度期间的外河潮位变化过程及雨量、雨型等。本区域外河受潮汐影响,一次涨、落潮周期约12h,其中平均涨潮历时为4h,平均落潮历时为8h左右,潮位变化范围为1.6~4.2m。2~20号泵站主要承担圩区内涝水的排除,泵站的启闭与潮水无关;1、21号泵站的启闭分为3种情形:一是调度期全程适逢外河涨潮,则全程需关闭与外河连接的闸门并在必要时将区域涝水强排至外河;二是调度期跨越潮水涨、落潮过渡时段,则在必要时需短期开泵排除区域涝水;三是调度期适逢外河落潮且调度起始水位低于区域最高控制水位,可打开与外河连接的闸门,利用潮水自排,全程一般无需开泵。第2种情况下,随着调度期在潮水涨、落过渡时段的不同,整个调度过程的功耗均有不同,但其上限不超过第1种情况下的功耗,下限不低于第3种情况下的功耗。本例主要考虑第1种和第3种水文工况下的优化运行方案。实际降雨发生时,雨量随时间分布无确定规律,但为便于计算分析,在计算过程中假定各时段雨量按最大时雨量均匀分布。本例所指的泵站日常运行时的降雨条件由5、10a一遇的24h降雨量和0.5、1a一遇的1h雨量两两组合而成,共4种,详见表1。

2) 泵站运行工况

各泵站的集水井水位与圩外水位处于动态变化过程中,水位差变化幅度在1.5m左右,故各水泵的实际出水量和电机输出功率受工况点的移动也不断变化。本例主要目的是阐明优化理论的应用方法,未对三者间的变化关系开展率定,即:假定每台水泵的额定流量即为出水流量,相应电机输入功率即为额定功率。此时所有泵站的总功耗即为各泵站额定功率与开机时间的乘积。

2.3.4 优化调度方案

以最大24h降雨和最大时雨量分别为10a一遇(142mm)和1a一遇(36mm)的降水条件为例给出该条件下的优化方案计算过程,其他3种降水条件直接给出优化结果。

1) 无法利用潮水自排的优化调度方案

泵站首次开机从降雨后1h开始,此时圩外河道水位仅受河面降雨影响,计算可得初始水位为2.44m。根据分组及试验水平的设置,可选用 $L_{18}(3^6 \cdot 6^1)$ 的混合水平正交表,不考虑交互作用,开展正交试验并对结果开展极差分析。从正交分析结果看,第6组和第1组的试验水平对目标函数的影响较大,按各组泵站群对总电功耗影响程度从大到小的排列(1~6)及各组泵站中最优开机方案编号(1~3)见表4。

表4 各泵站群对优化目标的影响排序表
Table 4 Effect degree sort of pumping station groups to optimization goal

影响排序 Effect degree sort	泵站编组 Group number	试验水平排序 Test level sort
1	第6组	1>6>4>2>5>3
2	第1组	1>2>3
3	第4组	2>1>3
4	第2组	3>1>2
5	第5组	1>2>3
6	第3组	2>1>3

利用表4的正交分析结果,按照第6组泵站和第1组泵站分别取排名前3和排名前2的试验水平,其余泵站组均选用最优水平的规则组合生成理论优化运行方案序列(本例共6种运行方案,其中包含一组理论最优运行组合);应用非恒定流模型计算各方案内各条圩外河道的监测断面的水位过程,记录各运行方案下圩外河道的最高水位并与圩外河道的最高控制水位进行比较,剔除不满足要求的

运行方案；从满足圩外河道水位控制要求的方案中按照总能耗从低到高的排序并结合管理需要选择

若干种运行方案作为本区域优化运行方案。选择过程见表 5。

表 5 优化运行方案去劣过程记录表

Table 5 Record of eliminating inferior scheme from optimization ones

优化方案 Optimization scheme number	泵站组及试验水平 Group number and test level						最高计算水位 Maximum calculation water level/m	允许最高水位 Maximum permissible water level/m	是否保留 Whether to retain	总能耗 Total energy consumption/ (kW·h)
	1	2	3	4	5	6				
1	1	3	2	2	1	1	4.46	4.4	剔除	32 247
2	2	3	2	2	1	1	4.46	4.4	剔除	32 284
3	1	3	2	2	1	4	4.32	4.4	保留	35 611
4	2	3	2	2	1	4	4.3	4.4	保留	35 683
5	1	3	2	2	1	6	4.39	4.4	保留	33 600
6	2	3	2	2	1	6	4.33	4.4	保留	35 574

表 5 中，方案 1 的运行组合为正交试验选优所得的理论最优方案。仅从能耗指标看，该方案确为最优方案，但该方案不能满足圩外河道最高控制水位的要求，故予以剔除。其余 4 种方案均能满足圩外河道水位控制要求，其中方案 5 能耗最小可作为最优运行方案。

2) 可充分利用潮水自排的优化调度方案

该水文工况下，调度期内恰逢外河落潮且调度起始水位低于区域最高控制水位，此时可打开 1、21 号泵所在位置的水闸利用潮水将涝水外排（如果外河潮位降至最低控制水位需及时关闭闸门，以防

区域内河道堤防因水位过低受损）。闸门打开后，区域内河道水位主要受潮位影响，由泵站群排水引起的水位抬升影响可忽略不计。根据分组及试验水平的设置，选用 $L_{18}(3^6 \cdot 6^1)$ 的混合水平正交表，不考虑交互作用，开展正交试验并对结果开展极差分析。由于整个调度过程无需考虑区域内河道水位限制条件，则根据极差分析获得的理论最优运行方案组合即为最优方案，该方案下 1~5 组泵站的试验水平分别为 1、1、3、1、3，调度期总功耗为 31 718 kW·h。

利用上述优化方法，4 种降水条件下的最优运行方案汇总情况见表 6。

表 6 4 种降水条件下最优运行方案

Table 6 Optimal schemes of four kinds of precipitation conditions

降水条件 Precipitation condition		外河潮水条件 Tide conditions of outside river	泵站组及试验水平 Group number and test level						调度期内总能耗 Total energy consumption/ (kW·h)	备注 Remarks
最大 24 h 雨量 Maximum precipitation in 24 h/mm	最大 1 h 雨量 Maximum precipitation in 1 h/mm		1	2	3	4	5	6		
111	27	不考虑潮水自排	1	3	2	1	1	1	20 628	调度从降雨开始后 1.5 h 开始，总历时 4.25 h
		充分利用潮水自排	1	1	3	1	3	1	20 320	调度从降雨开始后 1.5 h 开始，总历时 5.30 h
111	36	不考虑潮水自排	1	3	2	1	1	1	25 353	调度从降雨开始后 1 h 开始，总历时 4.56 h
		充分利用潮水自排	1	1	3	2	3	1	24 882	调度从降雨开始后 1 h 开始，总历时 5.13 h
142	27	不考虑潮水自排	1	3	2	2	3	1	26 050	调度从降雨开始后 1.5 h 开始，总历时 5.86 h
		充分利用潮水自排	1	1	3	2	3	1	25 797	调度从降雨开始后 1.5 h 开始，总历时 6.07 h
142	36	不考虑潮水自排	1	3	2	2	1	6	33 600	调度从降雨开始后 1 h 开始，总历时 5.25 h
		充分利用潮水自排	1	1	3	1	3	1	31 718	调度从降雨开始后 1 h 开始，总历时 6.37 h

2.3.5 节能效益比较

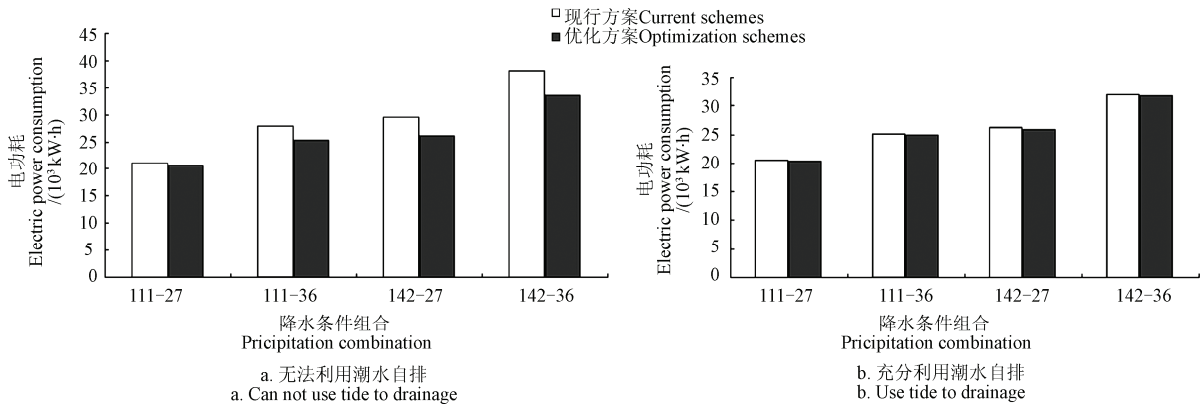
现行排水调度预案主要以机组半开为主，全开为辅，实际调度中情况较为复杂，难以精确统计。但根据 2.2 节，若假定按照各泵站机组自开机后持续保持半开，则其总计算功耗一般小于实际总电功耗，以该运行模式代替现行方案与优化方案比较，其比较结果偏于保守。

调度期内无法利用潮水自排的水文工况下：按现状调度方案运行 4 种降水条件（排序对应表 6）

下的总电功耗分别为 21 047、27 989、29 451、38 220 kW·h；按优化调度方案运行 4 种降水条件下的总电功耗与现状方案相比分别可减少 2%、9.4%、11.5%、12.1%。

调度期内全程可利用潮水自排的水文工况条件下：按现状调度方案运行 4 种降水条件下的总电功耗分别为 20 540、25 186、26 164、32 032 kW·h；按优化调度方案运行 4 种降水条件下的总电功耗与现状方案相比分别可减少 1%、1.2%、1.4%、1%。

上述 2 种潮水过程下, 不同降水条件的节能效益比较见图 2。



注: 降水条件组合由最大 24 h 降雨和最大 1 h 降雨组成。横坐标中“111-27”表示最大 24 h 降雨量为 111 mm、最大 1 h 降雨量为 27 mm。
Note: The precipitation combinations including a maximum precipitation in 24 h and a maximum precipitation in 1 h, and the abscissa value of “111-27” represents that a maximum precipitation in 24 h is 111 mm and a maximum precipitation in 1 h is 27 mm.

图 2 不同降水条件下节能效益比较

Fig.2 Energy saving comparison of different rainfall conditions

从图 2 可知: 在可充分利用潮水自排时, 优化运行方案与现行运行方案相比总电功耗基本持平, 节能效益不明显; 在无法利用潮水自排时, 4 种降水条件下, 优化运行方案与现行运行方案相比总电功耗分别减少 2%~12.1%, 节能效益比较明显。分析 2 种水文工况节能效益差异的根源在于 1、21 号强排泵的工作状态: 在可充分利用潮水自排的工况下, 1、21 号泵无需启动; 在无法利用潮水自排的工况下, 1、21 号泵在现行方案下启动时间较长, 由此造成电功耗的明显上升。

从上述分析可知, 相同降水条件下: 2~19 号泵站的现行运行方案基本合理, 调度期内总电功耗略大于优化运行方案, 管理部门可沿用现行方案或参照优化运行方案对现行方案微调; 1、21 号泵主要承担涝水向外河的强排任务, 对照优化方案, 现行方案偏于保守, 可将 1、21 号泵的启动条件从现行的“区域内河道水位超过 3.6 m 时全部启动”调整为“区域内河道水位超过 4.0 m 时全部启动”。

3 结论

本文研究成果可概括为以下 3 点:

1) 圩区排涝泵站群的优化调度方案研究的主要难点在于随着泵站数量及单站装机量的增加, 可行方案的组合数量增长过快直至难以计算。本文在实例计算中, 根据圩区内排水泵站的布设实况对泵站群适当分组并将其作为试验因素, 结合实践经验概化出有限种运行方案作为试验水平并开展有限次正交试验, 对试验结果利用极差分析和区域河道的水位限制条件快速获得了不同降水条件下的优化调度方案。

2) 在实例计算中, 通过对不同降水条件下对现行方案和优化方案开展节能效益比较一方面验证了现行方案的合理性, 另一方面也发现了现行方案在最不利工况下能耗较高的原因并提出了针对性优化措施。

3) 实例所选区域的水文地质情况在东部沿海城镇圩区具有较强的代表性, 故本文所采用的优化调度方案的编制方法在类似区域同样适用; 此外, 实例中包含无法利用潮水自排的最不利工况条件下的优化结果。该方法对其他非沿海平原圩区排涝泵站群的优化调度同样具有较强的参考价值 and 实用意义。

[参 考 文 献]

- [1] Pezeshk S, Helweg O J. Adaptive search optimization in reducing pump operating costs[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1996, 122(1): 57-63.
- [2] 袁尧, 刘超. 蚁群算法在泵站单机组优化运行中的应用[J]. *水利发电学报*, 2010, 41(9): 27-31.
Yuan Yao, Liu Chao. Application of ant colony algorithm to optimal operation of single pump unit at pumping stations[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 41(9): 27-31. (in Chinese with English abstract)
- [3] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站单机组叶片调节与变频调速组合日运行优化方法研究[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(6): 217-222.
Cheng Jilin, Zhang Lihua, Zhang Rentian, et al. Study on optimal method of combination operation of adjustable blade with variable speed for single pump unit[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(6): 217-222. (in Chinese with English abstract)
- [4] Yin Mark T, Andrews John F, Stenstrom Michael K. Optimum simulation and control of fixed-speed pumping stations[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1996,

- 122(3): 205—211.
- [5] Afshar Abbas, Zahraei Ali, Mariño Miguel A, et al. Large-scale nonlinear conjunctive use optimization problem: Decomposition algorithm[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010, 136(1): 59—71.
- [6] Abdelsalam N M, Aziz M S, Zobaa A F, et al. Optimizing operation at the Mubarak pumping station in Egypt[J]. *International Journal on Hydropower and Dams*, 2010, 17(6): 87—91.
- [7] 专祥涛, 李明龙. 基于移峰填谷的排水泵站优化调度研究[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2011, 44(6): 773—778.
Zhuan Xiangtao, Li Minglong. Optimal operation study of pumping stations with load shifting[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(6): 773—778. (in Chinese with English abstract)
- [8] 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 泵站多机组叶片全调节优化运行分解-动态规划聚合方法[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9): 27—31.
Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Study of optimal operation method on multiple pump units with adjustable blade for single pumping station based on decomposition dynamic programming aggregation method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [9] 徐芸青, 屈利娟. 排水泵站的优化调度方法和实现[J]. *农机化研究*, 2007(7): 54—57.
Xu Yunqing, Qu Lijuan. Study on optimal dispatching of pumping stations and its application[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(7): 54—57. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨鹏, 纪晓华, 史旺旺. 基于遗传算法的泵站优化调度[J]. *扬州大学学报: 自然科学版*, 2001, 4(3): 72—74.
Yang Peng, Ji Xiaohua, Shi Wangwang. Genetic algorithm in optimal operation of pumping station[J]. *Journal of Yangzhou University: Natural science edition*, 2001, 4(3): 72—74. (in Chinese with English abstract)
- [11] 金明宇, 徐青, 陈守伦. 大型引水工程梯级水位优化模型研究[J]. *水电自动化与大坝监测*, 2004, 28(1): 67—69.
Jin Mingyu, Xu Qing, Chen Shoulun. Study on optimal water level models of large water diversion projects[J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2004, 28(1): 67—69. (in Chinese with English abstract)
- [12] Sebti Anas, Bennis Saad. Cost-optimization of hydraulic rehabilitation of an Urban drainage network[J]. *Revue des Sciences*, 2012, 25(2): 121—137.
- [13] 张礼华, 程吉林. 中小型灌区排涝泵站优化运行模式研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(5): 33—35.
Zhang Lihua, Cheng Jilin. Study on optimal operation mode of drainage pumping stations in small or medium irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(5): 33—35. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张礼华, 龚懿. 基于大系统分解协调技术的中小型圩区除涝排水规划探讨[J]. *中国农村水利水电*, 2010(10): 142—144.
- [15] 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 并联泵站群日优化运行方案算法[J]. *排灌机械工程学报*, 2011, 29(3): 230—236.
Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Algorithm of daily operation scheme of parallel pumping stations[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011, 29(3): 230—236. (in Chinese with English abstract)
- [16] 程吉林, 金兆森, 沈洁, 等. 大型非线性系统的试验选优方法[J]. *系统工程学报*, 1996, 11(3): 35—39.
Cheng Jilin, Jin Zhaosen, Shen Jie, et al. An experimental optimization method for the large scale nonlinear system[J]. *Journal of Systems Engineering*, 1996, 11(3): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [17] 程吉林, 金兆森, 沈洁, 等. 大系统数学规划试验选优方法及应用[J]. *中国科学 (E 辑)*, 1998, 28(3): 105—108.
- [18] 程吉林. 大系统试验选优理论与应用[M]. 上海: 上海科技出版社, 2002.
- [19] 程吉林, 郭元裕, 金兆森, 等. 大系统试验选优理论研究[J]. *数学物理学报*, 2004, 24A(1): 8—15.
Cheng Jilin, Guo Yuanyu, Jin Zaosen, et al. The research of an optimal experimental method for large-scale systems[J]. *Acta Mathematica Scientia*, 2004, 24A(1): 8—15. (in Chinese with English abstract)
- [20] 苏宏华, 姚正军. 多指标正交试验的模糊分析方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, 36(1): 29—33.
Su Honghua, Yao Zhengjun. Fuzzy analysis method for multi-index orthogonal test[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 36(1): 29—33. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52—55.
Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52—55. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李义天. 河网非恒定流隐式方程组的汉点分组解法[J]. *水利学报*, 1997(3): 49—57.
Li Yitian. A junctions group method for unsteady flow in multiply connected networks[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(3): 49—57. (in Chinese with English abstract)
- [23] 徐小明. 求解大型河网非恒定流的非线性方法[J]. *水动力学研究与进展*, 2001(3): 1—3.
Xu Xiaoming. Nonlinear method on large scale river networks unsteady flow[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2001(3): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵克玉. 天然河道一维非恒定流数学模型[J]. *水资源与水工程学报*, 2004, 15(1): 38—40.
Zhao Keyu. Numerical model of unsteady flow in natural river[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2004, 15(1): 38—40. (in Chinese with English abstract)
- [25] 周晓岚, 刘江, 罗秋实, 等. 河道一维非恒定流数值模拟深化研究[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2010, 43(4): 443—446.

- Zhou Xiaolan, Liu Jiang, Luo Qiushi, et al. Further research of 1D numerical simulation of unsteady channel flow[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2010, 43(4): 443–446. (in Chinese with English abstract)
- [26] 汪德燿. 计算水力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [27] 武晟, 汪志荣, 张建丰, 等. 不同下垫面径流系数与雨强及历时关系的实验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2006, 11(5): 55–59.
- Wu Sheng, Wang Zhirong, Zhang Jianfeng, et al. Experimental study on relationship among runoff coefficients of different underlying surfaces rainfall intensity and duration[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11(5): 55–59. (in Chinese with English abstract)
- [28] 邓培德. 城市雨水道设计洪峰径流系数法研究及数学模型法探讨[J]. *给水排水*, 2014, 40(5): 108–112.
- Deng Peide. Study on the flood-peak runoff coefficient method of urban storm water pipe design and mathematic model[J]. *Water and Wastewater Engineering*, 2014, 40(5): 108–112. (in Chinese with English abstract)
- [29] 孙明. 平原区天然降雨极值强度与径流系数的关系研究[J]. *海河水利*, 2006(6): 49–52.
- [30] 贺宝根, 陈春根, 周乃晟. 城市化地区径流系数及其应用[J]. *上海环境科学*, 2003(7): 472–475.
- He Baogen, Chen Chungeng, Zhou Naisheng. Urbanized area runoff coefficient and its application[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003(7): 472–475. (in Chinese with English abstract)

Scheduling optimization of drainage pumping stations in urbanization polders

Liu Jingsen, Cheng Jilin, Gong Yi

(College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: For guaranteeing flood control security, the drainage pumping stations with large installed capacity were distributed densely at urbanization areas set with embankments. Conducting optimization research on operation scheme under different precipitation conditions lower than drainage standard should effectively decrease energy consumption. The main difficulty of operation scheme optimization of urban drainage pumping stations was that with the increase of pumping station quantity and single station's installed capacity, the combination number of feasible schemes increased too fast to be difficult to calculate. This paper proposed an optimization method which selected the lowest total energy consumption from multiple schemes with orthogonal test and eliminated unqualified schemes with controlling river water level outside the polder. Using this method, pumping stations in the drainage area were divided into different groups according to their actual layout, and a certain quantity of start-up schemes combined with practical experience were established for each group of pumping stations under different precipitation conditions. Then, taking pumping station group as the test factor, start-up scheme as the test level, and the lowest total electric power consumption as the objective function, the orthogonal experiment was carried out. The sequence of influence extent of various test factors and levels as well as the best test lever of each test factor to the target function could be obtained by conducting orthogonal analysis on test results. Thus the sequence of multiple optimized operation schemes including theoretically the best one could be obtained. Using the unsteady flow model to calculate each level of river water for each optimization scheme, and if each level of river water was within the allowable variation amplitude, the scheme was optimal and feasible, otherwise, the scheme could be crossed out. The operation scheme which met the requirement of the lowest total electric power consumption was found out from all of the feasible schemes, and taken as the best optimized scheduling method under the specific precipitation condition. Taking certain area of Shanghai as a study case, the optimized scheduling schemes under four common precipitation conditions lower than the drainage standard were worked out respectively for the two hydrological conditions, i.e. self-draining via the tide outside the river and self-draining that cannot utilize the tide outside the river. On the most unfavorable hydrological condition that could not utilize the tide outside the river for self-draining, the total electrical power consumption of the optimized scheduling scheme could be saved about 12% compared with the current operation scheme. By comparing energy-saving benefit between optimal scheduling schemes and current schemes, the rationality of current scheme had been verified, and the optimization suggestion was proposed in this paper as well. The method proposed in this paper was a beneficial attempt to enrich and improve the method of optimizing operation scheme of pumping stations.

Key words: drainage; rain; optimization; polder area; pumping stations; storm drainage; orthogonal test; energy cost