

基于梯级用水的工业水系统节水优化研究

朱丽珊¹, 刘 军^{1,2}, 侯保灯¹, 肖伟华¹, 马 静¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

[摘要] 水系统节水优化是一种从系统层面分析水系统节水潜力的方法, 借助数学模型可实现节水的量化研究。阐述了一种基于外排水再利用的水系统节水优化模型, 并利用 Vogel 方法实现模型的求解。以火电企业为典型用水案例进行研究, 将案例企业用水系统划分为 6 个子系统(循环冷却水系统、灰渣水系统、化学除盐水系统、脱硫用水系统、生活消防用水系统、其他杂用水系统), 在污水排放改造的基础上构建了基于成本最优的节水优化模型并进行了求解。经案例研究发现, 优化带来的经济效益最为明显, 其次是节水、生态效益。案例企业优化后综合发电耗水、总用水成本、新鲜水取用量降幅分别为 10.3%、13.6%、11.2%, 对缓解当地水环境污染以及地下水开采压力具有积极意义。

[关键词] 工业节水; 梯级用水; 水系统节水优化; Vogel 最佳路径分析

[中图分类号] TB495 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)01-0179-08

Optimization of water saving in industrial water system based on cascade use of water

ZHU Lishan¹, LIU Jun^{1,2}, HOU Baodeng¹, XIAO Weihua¹, MA Jing¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Water saving optimization of water system is a method to analyze the water saving potential of water system from the system level, and the quantitative study of water saving can be realized with the help of mathematical model. An optimization model of water system water saving based on the reuse of external drainage was presented, and the Vogel method was used to solve the model. A case study was carried out with a thermal power enterprise as a typical water use case. The water use system of the case enterprise was divided into six water sub-systems (circulating cooling water system, ash slag water system, chemical desalination water system, desulfurization water system, domestic fire water system, and other miscellaneous systems), and a cost-optimized water-saving optimization model was constructed and solved based on the sewage discharge transformation. The case study found that the economic benefits brought by optimization were the most obvious, followed by water saving and ecological benefits. After the optimization of the case companies, the reduction rates of comprehensive power generation water consumption, total water cost, and fresh water consumption were 10.3%, 13.6%, 11.2%, respectively, which is of positive significance for alleviating local water environmental pollution and pressure on groundwater extraction.

Key words: industrial water saving; cascade use of water; water saving optimization of water system; Vogel transportation route analysis

2019 年, 全国工业用水量为 1 217.6 亿 m³, 占到全国用水总量的 20.2%, 万元工业增加值用水量为 38.4 m³^[1], 超过了发达国家的 2 倍^[2], 与当前国际先

进工业用水水平仍有较大的差距。工业节水是通过工业水的循环使用、串级使用、处理再用^[3], 来提高工业用水的效率, 进一步降低工业用水量。

[基金项目] 国家重点研发计划(2018YFE0196000); 国家自然科学基金项目(51625904)

目前常规的用水网络的研究,主要集中在新鲜水用量优化方法上,包括水夹点法和数学规划法。在1980年国外学者就首次将数学规划方法用于工业用水系统的用水优化配置^[4],以实现工业水的串级使用。之后有研究者对传质型用水网络提出了一种利用杂质负荷曲线和供水负荷曲线的夹点来确定最小新鲜水用量的办法——水夹点法(water pinch)^[5]。2002年,冯霄等^[6]将水夹点技术用于国内工业用水系统的分析中。针对水夹点方法在处理超结构水网络以及多杂质水系统优化问题中的不足,国内学者开展了多角度多层次的研究,不断地对水系统集成理论及方法进行完善。刘永健等^[7]针对单组分杂质用水和废水处理网络同步集成优化问题,以最小总操作费用为目标,建立了非线性规划模型进行求解。刘永忠等^[8]针对水系统集成优化中的新鲜水用量、用水系统的柔性和用水网络结构复杂程度三方面的目标,提出利用博弈理论对水网络优化方案分析的方法。丁力等^[9]为了解决优化后的水网结构复杂的问题,建立了冷却塔循环水量最小、流股数最少的多目标水系统优化模型,能够得到结构相对简单的用水网络。韩政^[10]针对循环冷却系统中回水重用问题,构建了最大回用冷却水为目标的水网优化模型。李爱红^[11]针对水网络中的多杂质问题,提出了具有再生单元的多杂质间歇过程用水水网络集成方法。

工业用水系统优化研究方面,前人主要围绕水质指标进行节水优化研究,弱化了各个用水单元的需水量以及排水量因素,得到的复杂水网络模型难于指导实践。笔者针对前人研究中出现的不足,以整个工业水系统为研究对象,根据不同的用水功能将工业用水系统划分为若干个特定的子系统,通过构建基于各用水子系统的供需水关系的水系统优化模型,以用水成本最小为目标进行优化配置,运用沃格尔(Vogel)最佳路径分析方法^[12]求解最优水量分配方案,最后对节水优化带来的综合效益进行了分析。

2 模型构建

2.1 问题描述

若供工业用水系统中有 m 个独立水源分别为 $A_i(i=1, 2, \dots, m)$,包括一次水源、二次水源和补充水

源,各个水源的可供水量为 a_i ;根据不同的用水功能将工业用水系统划分为 n 个用水子系统 $B_j(j=1, 2, \dots, n)$,各个用水子系统的需水量为 b_j ;水源 A_i 将可供水量 a_i 分配给各用水子系统 B_j ,各用水子系统得到的水量为 x_{ij} ,分配水量的单位成本为 C_{ij} 。

基于梯级用水的工业水系统优化问题是一个关于 m 个水源、 n 个用水部门的水量优化分配问题。该模型的目标是合理确定水源 A_i 分配到用水子系统 B_j 的水量 x_{ij} ,使得整个工业水系统的用水总成本最低。

2.2 数学建模

基于梯级用水理念的工业水系统优化模型目标函数一般形式如下:

$$\text{Min}[F(x)] = \text{Min}\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot C_{ij}\right] \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个水源 A_i 分配到第 j 个用水子系统 B_j 的水量, m^3/h ; C_{ij} 为水源 A_i 给用水户 B_j 单方水的配水成本单价,元/ m^3 ; $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。

配水成本单价 C_{ij} 是优化模型中非常重要的参数,数值直接影响到配水量 x_{ij} 的数值,从水源 A_i 把单位水量分配到用水子系统 B_j 所需的费用 C_{ij} 由水处理费用和输送费用两部分组成。水处理费用的确定由水源和用水子系统的水质差距决定,差距越大,水处理费用越高,其包括水资源税费、药剂费、工人工资、设备折旧费和维护检修费等。在此研究中,厂区内的输送费用不计,补给水源考虑输水费用。

2.3 约束条件

(1) 供水量约束。

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i \quad (2)$$

(2) 需水量约束。

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j \quad (3)$$

(3) 供需平衡约束。

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (4)$$

(4) 非负约束。

$$x_{ij} \geq 0 \quad (5)$$

式中: x_{ij} 为水源 A_i 给用水户 B_j 分配的水量; a_i 为第 i 个水源 A_i 的可供水量; b_j 为第 j 个用水子系统 B_j 的需水量; $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。

用水单元数据见表1。

表 1 用水单元数据

		用水单元				排水量
		B_1	B_2	\cdots	B_n	
水源	A_1	x_{11}, C_{11}	x_{12}, C_{12}	\cdots	x_{1n}, C_{1n}	a_1
	A_2	x_{21}, C_{21}	x_{22}, C_{22}	\cdots	x_{2n}, C_{2n}	a_2
	\cdots	\cdots	\cdots	\cdots	\cdots	\cdots
	A_m	x_{m1}, C_{m1}	x_{m2}, C_{m2}	\cdots	x_{mn}, C_{mn}	a_m
需水量		b_1	b_2	\cdots	b_n	

2.4 求解方案

基于梯级用水的工业水系统优化模型当各水源的排水总量与各用水单元的需水总量相等时,可以视为供需平衡的运输问题,若供需不平衡则需要通过特定的处理将问题转换为供需平衡问题,可以使用 Vogel 法对模型进行优化求解^[12];求解可按过程分为,模型实例化、利用 Vogel 法进行求解、结果的分析与验证。

模型实例化需要结合企业梯级用水方案进行具体分析,确定需要优化的单元,也可针对用水子系统进行两层优化。如果优化问题为供需不平衡的问题可以通过模型层面添加假想的用水单元(外排水),或通过机理层面优化单元排水将问题转换为供需平衡问题,本研究案例使用转换措施为后者。待优化单元的需水量以及排水量需要根据梯级用水方案以及稳定状态下的单元运行数据进行确定,用水单元间的配水成本需要对企业历史运行数据进行分析,将各方面的成本进行累加得到总的单位配水成本,构建模型所需的数据与表 1 所需数据一致。

Vogel 法求解工业水系统优化问题计算步骤为:

(1) 计算用水单元数据表中各行各列最小以及次小配水成本(C_{ij})的差额。

(2) 在所有行差额、列差额中找出最大的差额,按差额最大者进行最小配水成本优先分配水量(如果遇到最大差额有多个,任选 1 个)。即选择最大差额所在行或列的最小配水成本 $C_{i,j}$,令对应位置的决策变量 $x_{i,j}$ 取最大值。

(3) 调整剩余供应量或需求量缺口, $a_{i,2}=a_{i,1}-x_{i,j}$, $b_{j,2}=b_{j,1}-x_{i,j}$ 。

(4) 重复(1)、(2)、(3),直至 $\{a_{i,n}=0\}$, $\{b_{j,n}=0\}$, 所有的需求量缺口均被满足,对应用水数据表中供需水量均为 0。最后将未调整的 $x_{i,j}$ 均赋为 0。

(5) 对优化结果进行验证,查看是否存在奇

异值。

基于优化的结果,与生产实际进行对应,调整不合理的用水路径,并得到最终的用水网络,即为当前梯级用水情景下的最佳水网流通过程。

3 案例分析

选取山西省某火力发电厂作为典型工业水系统进行优化,电厂总装机容量为 3 300 MW,机组日取地下水水量约 70 000 m³,一期建成机组采用逆流式自然通风冷却塔冷却,二期建成机组采用间接空冷冷却,脱硫系统采用的是“石灰石-石膏”湿法烟气脱硫技术,电厂各用水系统存在一定的节水空间。电厂存在 364 m³/h 的直接外排水量,为供需不平衡问题,现通过节水设计和运行优化将该水系统处理为供需平衡水系统。

3.1 用水现状分析

通过水平衡测试可知,全厂新鲜水取用量为 3 255 m³/h,总用水量为 230 235 m³/h,其中循环水量为 226 362 m³/h,回用水量为 618 m³/h,重复用水量 226 980 m³/h;循环水率为 98.32%,重复利用率为 98.59%;总耗水量为 2 891 m³/h,总排水量为 364 m³/h,排水率为 11.18%。各用水系统水消耗途径及需水量见表 2。

表 2 各用水系统耗水途径及需水量

Table 2 Water consumption ways of each water system		
用水系统	耗水途径	需水量/(m ³ ·h ⁻¹)
一期循环冷却水系统	蒸发损失及风吹损失	2 699
二期循环冷却水系统	蒸发损失及风吹损失	105
除灰渣系统	捞渣机捞渣带水	93
化学除盐系统	氢站用水、实验室用水、漏损	209
锅炉用水	蒸汽漏失	110
脱硫用水系统	脱硫烟气蒸发、脱硫烟气带水、脱硫石膏带水	420
生活用水系统	消防用水、绿化用水、消耗以及泄漏	67
其他杂用水系统	输煤抑尘用水、路面抑尘洒水及未知用水	110

3.2 节水设计和优化运行

循环冷却水系统用水占电厂总用水的 70%~90%^[13],具有较大的节水潜力,循环冷却水系统的水损失主要有 3 种:蒸发损失、风吹损失、排污损失,三者之和约等于整个循环冷却水系统的补水量。蒸发损失量约占循环水量的 1.2%~1.6%,受气温影响,没有较好的方法进行回收;风吹损失量约占循环水量

的0.3%~0.5%,若安装收水器可降至0.1%,这部分水量较小可忽略^[14]。循环冷却水系统耗水、补水、排水受到浓缩倍率的影响,其具体关系见式(6)、(7)。

循环冷却水系统排水量 Q_p :

$$Q_p = \frac{1}{e-1} (K\Delta t Q_x - rQ_x) \quad (6)$$

循环冷却塔补给水量 Q_b :

$$Q_b = \frac{e}{e-1} K\Delta t Q_x \quad (7)$$

式中: Q_x ——循环水量, m^3/h ;

K ——浓缩倍率;

e ——蒸发损失系数,与气温有关, $^\circ\text{C}^{-1}$;

Δt ——冷却塔进出口温度差, $^\circ\text{C}$;

r ——风吹损失系数^[15]。

通过在循环冷却水系统中添加缓蚀剂和阻垢剂等处理方法来提高循环冷却水系统的浓缩倍率,从而降低用水量,电厂单350 MW机组的浓缩倍率对应的排污率见表3。

表3 单350 MW机组浓缩倍率与节水量关系

Table 3 Relationship between concentration multiple and water saving amount of a single 350 MW generator set

浓缩倍率	1.4	1.5	1.6	1.8	2	2.5	3	3.5	4	4.5
排污率/%	2.8	2.2	1.8	1.3	1.0	0.6	0.4	0.23	0.2	0.17
排污量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	857	673	551	398	306	184	122	70	61	51.67

电厂一期循环冷却水系统有6座自然通风逆流式冷却塔,具有较大的节水潜力,且都保持低浓缩倍

率运行。通过添加缓蚀剂、阻垢剂、除垢剂或阴极电化学除垢等措施^[16-18],调整补给水量,提高浓缩倍率从而达到减少排污率,当提高浓缩倍率至4.5时,单机排污量为 $51.67 \text{ m}^3/\text{h}$,整个工业水系统的新鲜水取用量等于耗水量,系统达到供需平衡状态,此时新鲜水补给量为 $2\,486 \text{ m}^3/\text{h}$,减少新鲜水取用量 $329 \text{ m}^3/\text{h}$ 。提高浓缩倍率的同时必然会增加循环冷却水的结垢及腐蚀倾向^[19],必须依据对日常水质监测数据进行比对判断,防止出现结垢现象。

电厂脱硫系统用水主要包括石灰石制浆用水、设备冷却用水、除雾器冲洗用水以及废水处理系统用水等,水消耗主要来自脱硫产物石膏中带走的结晶水以及附着水、烟气中蒸发的水分,并有部分的脱硫排水。脱硫用水对于水质的要求低,将难处理的高浓缩倍率循环冷却水系统排污水用于脱硫,可以极大程度上减少新鲜水的使用;脱硫排水含有大量的重金属离子、硫酸钙和亚硫酸钙盐、悬浮物和杂质等,难于处理,常用于灰库的拌湿用水,也可设置终端处理设施进行处理达标排放或再利用^[20]。

3.3 水系统建模与优化

3.3.1 水量参数

(1)新鲜水用量。基于梯级用水的原理对新鲜水水量进行控制,让新鲜水量和各用水单元的总耗水量相等,达到整个厂区的无废水直接排放,厂区各个耗水单元的耗水量见表4。

表4 各单元耗水量

Table 4 Water consumption of each unit

用水单元	一期循环冷却水系统	二期辅机循环水系统	一期除灰渣系统	二期除灰渣系统	化学除盐水系统	锅炉	脱硫用水系统	生活消防用水系统	其他杂用水系统	新鲜水供水量 a_i
耗水量	2 176	26	32	44	2	59	397	53	102	2 891

(2)用水单元供需水量。通过提高循环冷却水系统的浓缩倍率,使整个工业水系统达到供需平衡,此时一期循环冷却水系统的排水量为 $310 \text{ m}^3/\text{h}$ 、需水量为 $2\,486 \text{ m}^3/\text{h}$;调整后的化学除盐水系统需水量为 $220 \text{ m}^3/\text{h}$,排水量为 $218 \text{ m}^3/\text{h}$;其他用水系统供需水量取水平衡测试结果数据。各用水系统排水以及需水量数据见表5。

3.3.2 配水成本单价的确定

单元之间的配水单价包括水处理费用和水输送费用,水处理费用根据常用水处理费用函数确

定^[21]。根据山西省水资源管理条例,工业行业在用水定额内取用地下水的水资源税为 $2 \text{ 元}/\text{m}^3$,不同单元之间水串级使用处理措施见表6。

不同的水源向循环冷却水系统配水时,处理的费用与循环冷却水的浓缩倍率有关,具体数值如下:

不进行处理: $K=1.5, c(K)=0 \text{ 元}/\text{m}^3$;水质稳定处理: $K=2.25, c(K)=0.05 \text{ 元}/\text{m}^3$;弱酸树脂处理/石灰软化: $K=3.5, c(K)=0.58 \text{ 元}/\text{m}^3$;水质稳定处理+弱酸树脂处理/石灰软化: $K=5.58, c(K)=0.77 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

通过分析计算,电厂配水成本单价见表7。

表5 供需平衡情境下水系统供需水量

Table 5 Water supply and demand of water system under zero discharge situation m³/h

	一期循环冷却水系统	二期辅机循环水系统	一期除灰渣系统	二期除灰渣系统	化学除盐水系统	锅炉用水	脱硫用水	生活消防用水系统	其他杂用水系统	供水量 a_i
新鲜水	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	2 891
一期循环冷却水系统排水	x_{22}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	310
二期辅机循环水系统排水	x_{33}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	79
一期除灰渣排水	x_{44}	x_{42}	x_{43}	x_{44}	x_{45}	x_{46}	x_{47}	x_{48}	x_{49}	20
化学除盐水系统排水	x_{55}	x_{52}	x_{53}	x_{54}	x_{55}	x_{56}	x_{57}	x_{58}	x_{59}	218
锅炉排水	x_{66}	x_{62}	x_{63}	x_{64}	x_{65}	x_{66}	x_{67}	x_{68}	x_{69}	51
脱硫系统排水	x_{77}	x_{72}	x_{73}	x_{74}	x_{75}	x_{76}	x_{77}	x_{78}	x_{79}	36
生活排污水	x_{88}	x_{82}	x_{83}	x_{84}	x_{85}	x_{86}	x_{87}	x_{88}	x_{89}	14
需水量 b_i	2 486	105	52	44	220	110	433	67	102	3 619

表6 火电水系统排污水处理方法及回用途径

Table 6 Disposal methods and reuse of waste water from thermal power system

排污回用途径	循环冷却水系统	除灰渣系统	脱硫用水系统	化学除盐水系统	生活消防用水系统	杂用水系统
循环冷却水排污水	超滤+反渗透	不处理	不处理	超滤+反渗透	过滤+电渗析+消毒	过滤+消毒
锅炉用水排污水	冷却降温	不处理	不处理	除盐+除铁	除悬浮物+除铁+除盐	不处理
化学除盐水排污水	超滤+反渗透	不处理	不处理	超滤+反渗透	过滤+电解析+消毒+吸附	不处理
脱硫废水排污水	不回用	化学沉淀	末端处理	不回用	不回用	不回用
生活用水排污水	水质稳定+深度处理	化粪池、沉淀	生物接触氧化	生物接触氧化	过滤+消毒	生物接触氧化

表7 配水成本单价

Table 7 Price table of water distribution cost 元/m³

水价	一期循环冷却水系统	二期辅机循环水系统	一期除灰渣系统	二期除灰渣系统	化学除盐水系统	锅炉用水	脱硫用水	生活消防用水系统	其他杂用水系统
新鲜水	2.17	2.12	2	2	3	—	2	2.16	2
一期循环冷却水系统排水	1.28	1.4	0	3	2.56	—	0	1.45	0.25
二期辅机循环水系统排水	0.73	0.15	0	0	1.53	—	0	0.45	0.15
一期除灰渣排水	1.43	1.43	0.03	0.03	2.95	—	0.03	1.72	0.15
化学除盐水系统排水	1.66	1.66	0	0	2.94	0	0	1.96	1.28
锅炉排水	0	0	0	0	2.74	—	0	1.5	0
脱硫系统排水	1.43	1.43	0.03	0.03	2.95	—	0.03	1.72	0.15
生活排污水	1.08	0.42	0.1	0.01	1.87	—	0.1	1.5	0.42

3.4 优化结果分析

通过构建数学模型,借助 MATLAB 的数学计算库编写 Vogel 最佳路径分析方法程序,根据用水单价矩阵以及供需水向量数据,对各单元的用、排水水

量进行优化,优化后的水平衡数据见表 8。

3.4.1 合理性分析

对各用水单元用水来源以及排水去向依次做合理性分析:

表8 优化后的水系统水量平衡数据

Table 8 Optimized water balance data of water system m³/h

	一期循环冷却水系统	二期辅机循环水系统	一期除灰渣系统	二期除灰渣系统	化学除盐水系统	锅炉补水	脱硫用水系统	生活消防用水系统	其他杂用水系统	供水量 a_i
新鲜水	2 435	105	0	0	127	0	55	67	102	2 891
一期循环冷却水排水	0	0	0	0	0	0	310	0	0	310
二期辅机循环水排水	0	0	0	0	79	0	0	0	0	79
一期除灰渣排水	0	0	0	20	0	0	0	0	0	20
化学除盐水排水	0	0	52	24	0	110	32	0	0	218
锅炉排污水	51	0	0	0	0	0	0	0	0	51
脱硫系统排水	0	0	0	0	0	0	36	0	0	36
生活排污水	0	0	0	0	14	0	0	0	0	14
需水量 b_i	2 486	105	52	44	220	110	433	67	102	3 619

(1)新鲜水总用量为 2 891 m³/h,其中 84.2%用于一期循环水系统,其他分别供二期循环水系统、化学除盐水系统、脱硫用水系统、生活消防用水系统、其他杂用水系统使用。

(2)一期循环冷却水系统用水分别来自新鲜水和锅炉排水,水质均可达到用水标准,排水全部供脱硫系统使用。

(3)二期辅机循环水系统用水全部来自新鲜水,排水全部用于化学除盐水系统。二期辅机循环水系统排水为含油污水,含其他杂质较少,可通过添加除油器净化后供化学除盐水系统使用。

(4)一期除灰渣系统用水全部来自化学除盐水系统排水,排水供二期除灰渣系统使用。

(5)二期除灰渣系统用水分别来自化学除盐水系统和一期除灰渣系统,全部消耗,无外排。

(6)化学除盐水系统用水来自新鲜水和二期辅机循环水系统排水以及生活排污水。化学除盐水中一部分除盐水排向锅炉,另一部分浓缩污水排向除灰渣系统以及脱硫用水。因生活消防输水管线分散杂乱,不宜向工业生产区域输水,通过人为调整将生活排污水处理后用于其他杂用水系统,而化学除盐水系统所需的 14 m³/h 则由新鲜水提供。

(7)锅炉用水全部来自化学除盐水系统,排水供一期循环水系统使用。

(8)脱硫用水系统用水 13% 来自新鲜水、72% 来自一期循环冷却塔排污水、7% 来自除灰渣系统排水和 8% 来自化学除盐水排水,并将全部的排水(36 m³/h)排向自身。由于脱硫排水后被分配导致最优的路径无法完全消纳其排水,而用于自身运价又偏低,故出现了排往自身的情况。结合实际情况将这部分水排向脱硫用水处理单元,处理后排往除灰渣系统。

(9)生活用水全部来自新鲜水,排水用于化学除盐水系统,调整后排水排往其他用水系统。

优化调整后的全厂水平衡情况见图 1。

3.4.2 优化效益分析

(1)经济效益分析。优化前后效益对比见表 9。梯级用水优化后新鲜水取用量减少了 364 m³/h,取水费用降幅 11.2%;新鲜水用量的减少也导致处理水量、费用的大幅度下降,水处理的总费用下降了 22.4%;由于达到梯级用水,预计每年可节省全部的排污费用 255 万元;梯级用水和水系统优化

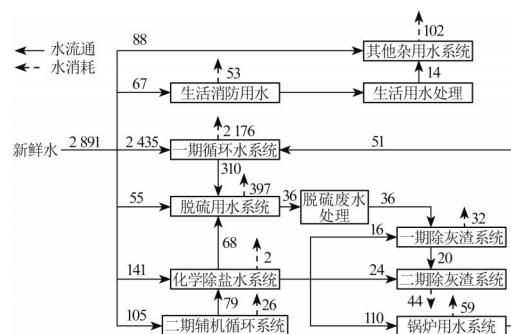


图 1 优化后的全厂水平衡图

Fig. 1 Water balance diagram of the whole plant after optimization

后预计每年可减少总用水费用 1 252 万元,降幅达 16.5%。

表 9 优化前后效益对比

效益指标	优化前	优化后	变化率/%
综合发电水耗率/(m ³ ·s ⁻¹ ·GW ⁻¹)	0.39	0.35	-10.3
总用水成本/(元·h ⁻¹)	8 369	7 231	-13.6
取水费用/(万元·a ⁻¹)	5 703	5 065	-11.2
运行处理费用/(万元·a ⁻¹)	1 859	1 449	-22.05
排污费用/(万元·a ⁻¹)	255	0	-100
总费用/(万元·a ⁻¹)	7 586	6 334	-16.5

(2)社会、生态效益。按 70% 的发电负荷计算,优化后电厂的综合发电水耗率为 0.35 m³/(s·GW),比优化前降低了 10.3%,对于实现经济社会的可持续发展具有积极意义。

优化后每年可减少取水量以及排污量各 318.86 万 t,对保护地下水资源以及缓解水资源的供需矛盾具有积极意义,并有利于缓解当地的水环境污染问题,对保护水生态环境作出积极贡献。

4 结论

通过研究发现,对现有的工业用水系统进行用水、耗水水量分析,并进行节水改造是减少工业用水量的直接措施。利用 Vogel 进行最佳路径分析,可对用水改造后的水网进行二次改造,让水尽量串联使用,达到能再用的水尽量拿来用的目的。借助梯级用水的方法对案例企业分析得到,在 3 300 MW 的总装机容量的热电厂中,实施梯级用水节水改造以及用水网络优化后每年可产生 1 252 万元的利润,其中 29% 的利润贡献来自用水网络优化、71% 来自节水改造。

本研究基于梯级用水,是对前人工业水系统集

成优化理论的简化,针对工业系统中用新鲜水去稀释单元用水以及单元间配水成本消耗问题,以及基于杂质负荷优化得到的用水网络难于实现等问题,构建了简化的水网络用水运输模型,按照各单元间的配水成本进行水量的分配,在简化水系统优化过程的同时可以得到与当下用水系统更加贴合的水网结构。

本研究对于用水单元系统间的水串级使用难度使用配水成本进行刻画,存在很强的主观性,所以只适用于水系统的结构初步调整中,对于水量的实时调整需要结合实时的监测水质对单元间配水的难度进行刻画,如水质映射的配水成本函数。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 2019年中国水资源公报[R]. 2020.
Ministry of water resources of the people's republic of China. China Water Resources Bulletin 2019 [R]. 2020.
- [2] 谭粤元. 中国工业用水效率研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018.
TAN Yueyuan. Study on the utilization efficiency of China's industrial water [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [3] 李晓芸, 张华, 席兵. 火电厂用水与节水技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 140-150.
LI Xiaoyun, ZHANG Hua, XI Bing. Water and water saving technology in thermal power plants [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008: 140-150.
- [4] TAKAMA N, KURIYAMA T, SHIROKO K, et al. Optimal water allocation in a petroleum refinery[J]. Computers & Chemical Engineering, 1980, 4(4): 251-258.
- [5] WANG Y P, SMITH R. Wastewater minimisation[J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(7): 981-1006.
- [6] 冯霄. 节水减污过程水系统集成技术[J]. 中国能源, 2002(1): 22-24.
FENG Xiao. Water system integration technology for water saving and pollution reduction process [J]. Energy of China, 2002(1): 22-24.
- [7] 刘永健, 罗伟青, 袁希钢. 过程工业水分配网络系统集成的NLP模型[J]. 计算机与应用化学, 2006(7): 615-618.
LIU Yongjian, LUO Yiqing, YUAN Xigang. NLP model for water network synthesis in process industry [J]. Computers and Applied Chemistry, 2006(7): 615-618.
- [8] 刘永忠, 段海涛, 冯霄. 水系统集成优化方案的博弈分析与评价方法[J]. 化工学报, 2009, 60(4): 945-951.
LIU Yongzhong, DUAN Haitao, FENG Xiao. Approach to evaluation of optimal schemes for water networks based on game theory [J]. CIESC Journal, 2009, 60(4): 945-951.
- [9] 丁力, 鄢烈祥, 史彬, 等. 冷却塔水循环系统的集成优化[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(11): 1469-1472.
DING LI, YAN Liexiang, SHI Bin, et al. Integration and optimization of water cooling tower system [J]. Computer and Applied Chemistry, 2010, 27(11): 1469-1472.
- [10] 韩政. 炼化企业水系统集成优化研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
HAN Zheng. Study on water system integration optimization of dalian petroleum refinery [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [11] 李爱红. 多杂质水网络的规律分析与优化设计[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
LI Aihong. Analysis and design of water networks with multiple contaminants [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [12] 张兆宁, 卢飞. 基于Vogel法求解的单机场地面等待策略模型[J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 7(4): 1-5.
ZHANG Zhaoning, LU Fei. Single airport ground-holding strategy model solved with vogel method [J]. Journal of Transportation Engineering and Information Technology, 2009, 7(4): 1-5.
- [13] 郭锐敏. 火力发电厂二次循环冷却水系统节水理论分析[J]. 福建建筑, 2018(8): 127-130.
GUO Ruimin. Theoretical analysis of water saving for circulating cooling water system in thermal power plant [J]. Fujian Architecture, 2018(8): 127-130.
- [14] 马利斌. 环境侧风对自然通风逆流湿式高位收水冷却塔冷却性能的影响与模拟[D]. 上海: 上海电力大学, 2019.
MA Libin. The influence of ambient crosswind on the cooling performance of natural ventilation counter-current wet high water intake cooling tower and its simulation [D]. Shanghai: Shanghai Dianli University, 2019.
- [15] GB/T 12452—2008 企业水平衡测试通则[S].
GB/T 12452—2008 General rules of enterprise water balance test [S].
- [16] 刘亮, 曹婷婷, 张岐伟, 等. ClO_2 与有机磷缓蚀剂复配的RSM-BBD模型优化[J]. 工业水处理, 2018, 38(12): 68-72.
LIU Liang, CAO Tingting, ZHANG Qiwei, et al. Optimization of RSM-BBD model composited with chlorine dioxide and organophosphorus corrosion inhibitor [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(12): 68-72.
- [17] 王虎传, 彭成军, 边旭, 等. 改性PPG多羧基阻垢剂的合成及阻垢性能研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(6): 35-38.
WANG Huchuan, PENG Chengjun, BIAN Xu, et al. Research on the synthesis of modified PPG polycarboxylic scale inhibitor and its scale inhibiting capability [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(6): 35-38.
- [18] 栾谨鑫, 李鑫浩, 王立达, 等. 复合网状阴极增强电化学水软化系统性能研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(2): 67-70.
LUAN Jinxin, LI Xinhao, WANG Lida, et al. Research on enhanced performance of electrochemical water softening system by

multi-meshes coupled cathodes[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(2): 67-70.

- [19] 孟秀娟, 韩燕. 敞开式循环冷却水水质的监督控制[J]. 宁夏电力, 2012(6): 56-59.

MENG Xiujian, HAN Yan. Monitoring and control of the quality for open-type circulating cooling water[J]. Ningxia Electric Power, 2012(6): 56-59.

- [20] 陈忠. 电厂脱硫废水零排放控制与研究[J]. 中国标准化, 2019(24): 287-288.

CHEN Zhong. Zero-discharge control and research on desulfurization wastewater from power plants[J]. China Standardization, 2019

(24): 287-288.

- [21] 刘希波, 尹连庆, 何凤鸣, 等. 火电厂水系统数学模型的建立与应用[J]. 中国电力, 1994(4): 17-21.

LIU Xibo, YIN Lianqing, HE Fengming, et al. Establishment and application of mathematical model for water system in thermal power plant[J]. China Electric Power, 1994(4): 17-21.

[作者简介] 朱丽珊(1994—), 硕士。E-mail: 18701110626@163.com。侯保灯, 高级工程师, 博士。E-mail: houbaodeng@163.com。

[收稿日期] 2021-11-27(修改稿)

(上接第178页)

烟气约 10 275 Nm³/h, 锅炉热效率下降为 0.29%~0.33%, 不影响锅炉的正常运行。

(3) 旁路烟气蒸发处理吨水发电煤耗增加值为 0.27~0.31 g/(kW·h), 运行成本为 66.68~70.48 元/(m³·h), 粉煤灰可以实现综合利用, 实现了脱硫废水低成本零排放处理。

参考文献

- [1] 马淑杰, 朱黎阳, 王雅慧. 我国高耗水工业行业节水现状分析及政策建议[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(2): 43-47.

MA Shujie, ZHU Liyang, WANG Yahui. Analysis and suggestions on water conservation of high waterintensive industries in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35(2): 43-47.

- [2] 潘荔, 刘志强, 张博. 中国火电节水现状分析及措施建议[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 158-163.

PAN Li, LIU Zhiqiang, ZHANG Bo. Comprehensive analysis and related measures on current situation of water saving of thermal power generation in China[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 158-163.

- [3] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2020[EB/OL]. (2020-06-12) [2020-07-10]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?1-284218>.

China Electricity Council. Annual development report of China's power industry 2020 [EB/OL]. (2020-06-12) [2020-07-10]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?1-284218>.

- [4] 杨宝红. 新形势下火电厂节水减排工作特点及关键[J]. 热力发电, 2016, 45(9): 95-99.

YANG Baohong. Features and key process of water saving and wastewater discharge reduction in thermal power plants at current situation[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(9): 95-99.

- [5] 孙振宇, 沈明忠. 燃煤电厂脱硫废水零排放工程案例研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(10): 102-105.

SUN Zhenyu, SHEN Mingzhong. Case study on zero discharge engineering of desulfurization wastewater in coal-fired power plants[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(10): 102-105.

- [6] 邵国华, 方棣. 电厂脱硫废水正渗透膜浓缩零排放技术的应用[J]. 工业水处理, 2016, 36(8): 109-112.

SHAO Guohua, FANG Dai. Application of MBC zero liquid discharge technology to desulfurization wastewater treatment in a power plant[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(8): 109-112.

- [7] 万勇刚, 徐峰, 田旭峰, 等. 国电汉川发电有限公司脱硫废水蒸发结晶项目工艺解析[J]. 华电技术, 2017, 39(10): 74-76.

WAN Yonggang, XU Feng, TIAN Xufeng, et al. Guodian hanchuan power generation company limited desulfurization waste water evaporative crystallization project process analysis [J]. Huadian Technology, 2017, 39(10): 74-76.

- [8] 杨宝红, 王璟, 许臻, 等. 火电厂深度节水及废水零排放[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 294-299.

YANG Baohong, WANG Jing, XU Zhen, et al. Deep water saving and zero wastewater discharge in thermal power plants [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 294-299.

- [9] 姚子麟, 袁伟中, 陈彪, 等. 燃煤电厂末端废水调质与干化技术研究及其工程示范[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 48-53.

YAO Zilin, YUAN Weizhong, CHEN Biao, et al. Technical study and demonstration project on the quality control and drying of terminal wastewater in coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 48-53.

- [10] 白璐, 陈武, 王凯亮, 等. 燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(4): 16-20.

BAI Lu, CHEN Wu, WANG Kailiang, et al. Research progress in the zero-discharge treatment technology for desulfurization wastewater from coal-fired power plants [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(4): 16-20.

- [11] GB/T 3558—2014 煤中氯的测定方法[S].

GB/T 3558—2014 Determination of chlorine in coal[S].

- [12] GB/T 1574—2007 煤灰成分分析方法[S].

GB/T 1574—2007 Test method for analysis of coal ash[S].

[作者简介] 李亚娟(1983—), 高级工程师。E-mail: liyajuan@tpri.com.cn。

[收稿日期] 2021-11-26(修改稿)