

Application of regeneration recycling water networks design in thermal power plant

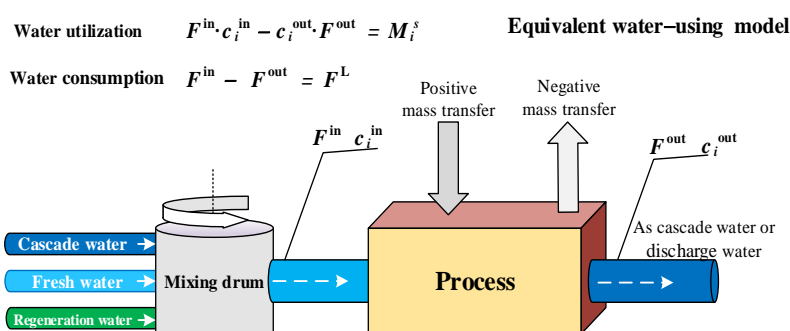
Jun LIU^{1,2}, Baodeng HOU^{2*}, Lihua CHEN¹, Weihua XIAO²

1. School of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China
2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: In order to resolve the problems existing in the application of the water networks integration optimization method in the thermal power plant, the transfer process of mass impurities from water regeneration units was expanded in this study. The complete mass transfer process was used to describe the process of water utilization of impurity load units, and the maximum mass transfer capacity and rate

of regeneration are used to describe the processes of regeneration. In addition, a directed graph was used to describe the connections between units of water networks. Through analyzing the relationship between the maximum concentration, impurity load, and water supply process of water units, the mathematical mechanism of the optimization process was obtained so as to build a regeneration recycling water networks optimization model. A 3300 MW thermal power plant was chosen to conduct model application research. The water networks of the case power plant was divided into 9 water subsystems, and equivalently divided into 11 water units, then a concentration correction model had been constructed for the regeneration unit to achieve the maximum mass removal process. The chloride ion, entire solids of suspended matter, and sulfate ion were picked to perform a water-saving optimization design, and the model was simplified by solving the KKT conditions of the optimization problem. After optimization, the use of fresh water of the water networks was reduced by 6.7%, total emissions of sewage were reduced by 62.9%. The case study showed that the constructed regeneration recycling water networks model based on the "supply-utilization-consumption-discharge" process of water networks was successful, and it could realize the water-saving optimization design of the water networks in thermal power plants considering multiple impurities. Furthermore, it resolved the issues of inaccuracy in the description of the regeneration process in the use of the integrated optimization method of water networks in thermal power plants, as well as the inappropriate description of the water regeneration unit for water-saving reconstruction of water networks.

Keywords: water system integration; optimal design of water networks; process systems; nonlinear optimization; industrial water conservation



收稿: 2022-03-27, 修回: 2022-06-17, 网络发表: 2022-07-04; Received: 2022-03-27, Revised: 2022-06-17, Published online: 2022-07-04

基金项目: 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(编号: WR110145B0042021); 国家重点研发计划(编号: 2018YFE0196000)

作者简介: 刘军, 硕士研究生, 主要从事工业节水研究, E-mail: liujun18256329872@outlook.com; 通讯联系人, 侯保灯, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究, E-mail: houbadeng@163.com

引用格式: 刘军, 侯保灯, 陈立华, 等. 再生循环水网络设计在火电厂的应用. 过程工程学报, 2023, 23(4): 637-648.

Liu J, Hou B D, Chen L H, et al. Application of regeneration recycling water networks design in thermal power plant (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2023, 23(4): 637-648, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.222110.

再生循环水网络设计在火电厂的应用

刘军^{1,2}, 侯保灯^{2*}, 陈立华¹, 肖伟华²

1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004

2. 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

摘要:为解决水网络集成优化方法在火电厂水网络优化应用中存在的问题, 该研究对杂质的传递过程进行了扩展, 使用移质推动描述杂质负荷单元用水过程, 以及用最大移质能力及移除率描述再生过程, 并通过邻接矩阵描述网络单元间的连接关系, 从而构建再生循环水网络模型; 对3300 MW火电厂进行模型应用研究, 将案例水网络划分为9个用水子系统, 等效拆分为11个用水单元并对移质单元构建浓度修正模型从而实现最大移质过程, 选取 Cl^- 、总悬浮固体(SS)、 SO_4^{2-} 三个杂质指标进行节水优化应用, 通过对该优化问题KKT条件进行求解从而实现模型的简化, 优化后水网络新鲜水取用量减少6.7%、排污量减少62.9%。通过案例研究表明, 构建的基于“供-用-耗-排”过程的再生循环水网络模型是成功的, 可实现火电厂多杂质指标、复杂系统考虑再生循环的水网络节水优化设计, 解决了水网络集成优化方法在火电厂应用中单元间回用过程描述不够准确以及再生单元描述不适用于节水改造情景的问题。

关键词: 水系统集成; 水网络优化设计; 过程系统; 非线性优化; 工业节水

中图分类号: TQ021.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2023)04-0637-12

1 前言

再生循环水网络设计可以较好地实现水网络节水优化的目的, 由于考虑了废水在水网络中的循环再生使用过程, 可实现“废水零排放”的水网络设计, 契合于当前的工业节水理念。火电厂用水系统较多且系统间水量、水质需求差别较大, 存在相当大的系统节水潜力, 通过应用再生循环水网络设计, 可优化调整各用水子系统的供水过程、回用过程、再生过程, 达到按品质需求用水并减少取水及排水, 也可用于水网络建设前期的设计参考, 同时该过程也属于水系统集成优化^[1]或水网络集成优化^[2]设计研究的范畴。

水网络集成优化按考虑的回用过程不同可分为废水直接回用、废水再生回用、废水再生循环回用水网络模型, 并常以新鲜水取用量最小^[3]、新鲜水取用量及单元间连接数最优^[4]、用水成本最小^[5]等目标对模型进行优化, 优化求解方法包括数值最优化方法^[6]及水夹点方法^[7]。随着国内水网络集成优化方法在煤制甲醇^[8]、钢铁^[9]、针织^[10]等领域的成功应用, 该方法也开始在用水过程更为复杂的火电企业进行研究与实践。近年来水网集成优化方法已应用于火电企业的研究, 刘佳音^[11]构建了废水直接回用水网络优化模型, 以氯离子作为控制指标, 新鲜水量作为优化目标进行优化, 优化后废水排量减少了46.7%; 包宇航^[12]在以氯离子为控制指标的废水直接回用水网络优化模型基础上, 加入了“总连接数”优

化, 优化后新鲜水取量减少33.2%; 程一杰等^[13]构建了火电厂再生循环水网络优化模型, 选取悬浮物总固体、氯离子作为控制指标, 新鲜水量作为优化目标, 由于未限制再生过程杂质移除量导致出现最大程度的节水, 优化后新鲜水用量减少17.1%, 废水排放量减少100%; 叶旭润^[14]考虑了水源地水质变动对水网络集成优化后水网络的影响, 提出通过调整脱硫、循环冷却水的浓缩倍数的方式抵消新鲜水水质变动的影响; 朱玉蝶等^[15]考虑了用水网络中的水热集成, 构建了火电厂脱硫用水系统“水-热”集成优化模型, 优化后实现脱硫系统各吸收段平均节水53.3%, 节能76.4%。近年来国外对火电厂水网络的集成研究主要侧重于“水-热”集成^[16]、“水-电”联产^[17]、循环冷却水系统供水优化^[18]、锅炉排污余热回收^[19]、烟气“余热-水汽”回收^[20]等以“水-能”集成为主导的研究, 鲜有单以火电厂水系统的集成进行的研究。

现有对火电厂水网络优化的研究对回用过程的描述及控制指标的选取都已比较完善, 但对再生循环水网络设计的研究中未考虑对再生过程进行限制和脱硫过程中硫酸根离子的去除, 需要系统地将火电厂各种回用过程进行整合并考虑目前应用最为广泛的节水改造需求。本工作研究内容主要包括, 通过邻接矩阵描述水网络连接关系, 解析优化目标的驱动机理, 实现再生循环回用水过程的水系统节水优化设计模型, 对水再生单元的再生率和最大杂质移除量进行限制, 从而构建更为完善的火电厂水网络优化模型, 研究旨在解决水网络

集成优化方法在火电厂应用过程中面临的问题,并为火电厂水网络节水改造、节水调控、节水设计、节水潜力评估等提供支持。

2 火电厂水网络优化模型构建

2.1 工业用水过程及水网络模型

2.1.1 基于传质过程的用水单元模型

水网络优化过程可视为将多个用水单元拼接得到

一个用水网络的过程,其中用水单元可通过只考虑“供-用-耗-排”水过程进行概化。基于传质过程的用水单元模型假设每个用水单元的供水(包括新鲜水、串联水、再生水)会经过均匀的混合之后再进入用水单元,之后经过单元的传质过程将生产过程的污染质富集到水流中,同时消耗掉一定质量浓度的水流,最后单元在出口处统一出流,出流作为下一个单元供水或作为排水,用水单元模型如图 1 所示。

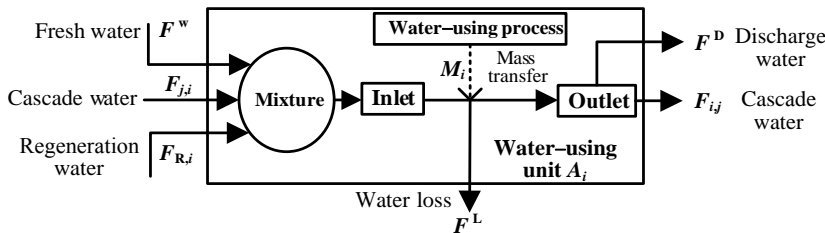


图 1 用水单元模型
Fig.1 Water unit model

2.1.2 水网络模型

设 A 为由用水单元编号 A_i 组成的列向量, A^T 为由用水单元组成的行向量, A 向各单元的供水路径用 F 表示, 则用水单元间供水网络可用式(1)矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} O & A^T \\ A & F \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, F 为单元间的邻接矩阵, 仅当 $F_{i,j} > 0$ 时表示单元 A_i 向 A_j 供水且供水量为 $F_{i,j}$ 。另设 F^w 为单元 A 新鲜水供水量组成的行向量, F^D 和 F^L 分别为单元排水量、耗水量组成的列向量, 则完整的水网络描述模型可用式(2)表示:

$$\begin{bmatrix} O & A^T & O & O \\ A & F & F^D & F^L \\ O & F^w & O & O \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 火电厂主要用水过程分析

火电厂用水量且以循环用水为主,大量水会在特定的工艺中进行循环使用,由于用水过程中会伴有水的使用及排放损耗,需用新鲜水来补充以使整个工业水系统达到平衡;火电厂中生产用水对水质、水量要求严格且多要求补给水为除盐水,辅助生产用水及非生产用水则对水质要求较为宽松。由于较严格的用水过程的排污水水质较好,进而可以直接供向水质要求不高的辅助生产工艺环节进行回用。由于火电厂具有循环用水、梯级用水的特点,整个用水系统可分为若干个相对独立的子系统,并可进行子系统间水的梯级回用,其主要用水过程及用水特点如下:

机组水汽循环系统用水:锅炉生产的蒸汽在汽轮机内做功后,进入凝汽器凝结成水,然后由凝结水泵输送到加热器、除氧器、高压加热器等,再进入锅炉,并开始下一个循环,该过程中以凝汽器凝结、管道及机组部件凝结、供热回水系统凝结方式出现不同程度的水汽凝结,同时也会存在一定的水汽消耗,锅炉定期排污和连续排污也会排放部分以氯离子、悬浮物总固体等为主要杂质的水,并需要不断的补充除盐水以满足生产的安全运行与效率。

冷却系统用水:为提高蒸汽机的热效率,通常会利用凝汽器对蒸汽降温并回收水,凝汽器中常用的换热介质为水,并分为直接供水系统和循环供水系统,直接供水为抽取水源地水换热后排入水体,而循环供水则是通过建造循环冷却塔对水进行冷却并再利用,循环供水系统为了防止杂质浓缩风险,会排出一定的过滤后的循环水浓水并接纳一定的优质水,排水中总悬浮固体为主要杂质。

除尘输灰系统用水:除尘输灰系统可将烟气中的煤粉以及锅炉中的煤渣收集、输送到灰厂进行回收利用并减轻环境污染。除尘输灰系统需要大量的水进行冲灰、输渣、热渣冷却以及用于输灰、湿电除尘,用水对水质要求较低,且排水常直接用于灰库加湿并整体体现为无外排水。

烟气脱硫系统用水:烟气脱硫 (Flue Gas Desulphurization, FGD) 是用于控制燃煤烟气中 SO_2 最有效和应用最广的措施,常见的脱硫工艺如表 1^[21,22]所示。

其中如果是湿式和半湿式脱硫工艺会存在一定用水,其要求的补水水质较低,可以为高盐废水,但硫酸根离子和氯离子含量较高会影响脱硫效率,脱硫的排水则为高盐废水,含有重金属离子以及高浓度悬浮物总固体、氯离子及硫酸根离子等。

表 1 烟气脱硫工艺^[21,22]
Table 1 FGD process^[21,22]

Flue gas desulfurization technology	Common process	Typical process
Wet flue gas desulphurization	Limestone–gypsum handling system	Limestone grout manufacturing technology, ammonia process
Semi dry flue gas desulphurization	Spraying calcium inside the furnace	Circulating fluidized bed process
Dry flue gas desulphurization	Rotary spray drying of desulfurizer	Spray drying desulfurization, electron beam desulfurization

生活、消防用水:生活用水、消防用水是保证厂区生活和生产正常安全进行不可或缺的用水系统,部分厂区会存在使用工业水供给情况,生活用水需要保证用水水质,消防用水需要保证水量以及水压,火电厂废水特点见表 2^[23]。

表 2 火电厂废水特点^[23]
Table 2 Characteristics of thermal power plant wastewater^[23]

Types of wastewater	Name	Main impurity component
Low salinity wastewater	Cooling water	Oil
	Boiler discharge water	Suspended matter, chloride ion, phosphate, oil
	Thermal system hydrophobic	Phosphate, oil
	Surface flushing water	Suspended matter, oil
Concentrated high salt wastewater	Sewage	Organic matter, suspended matter, bacteria, ammonia nitrogen
	Circulating water discharges water	Suspended matter, supersaturated inorganic salt, organic matter, phosphorus
	Acid and alkali waste water	Acids, bases and inorganic salts
Coal-related wastewater	Coal-bearing wastewater	Suspended solids, coal particles, oil, inorganic salts
	Ash and slag waste water	Supersaturated inorganic salts, suspended matter
	The desulfurization wastewater	Suspended solids, inorganic salts, heavy metal ions, reducing substances

2.3 火电厂水网络优化模型

2.3.1 用水过程的分割与等效

为使单元用水过程满足基于传质过程的用水单元模型,需使用水过程可通过单一的传质过程进行描述,进而需要对单元中如下情况的用水过程进行分割:单元

用水过程分阶段,且不同阶段可单独向外供水;单元有多路流出,且流出水质不同;单元中存在核心用水过程,需要严格控制中间过程的水质。单元的等效处理则用于将多个用水单元合并为一个单元,此过程主要目的是不分割部分用水过程及节约成本。单元用水过程的分割与等效过程见图 2。

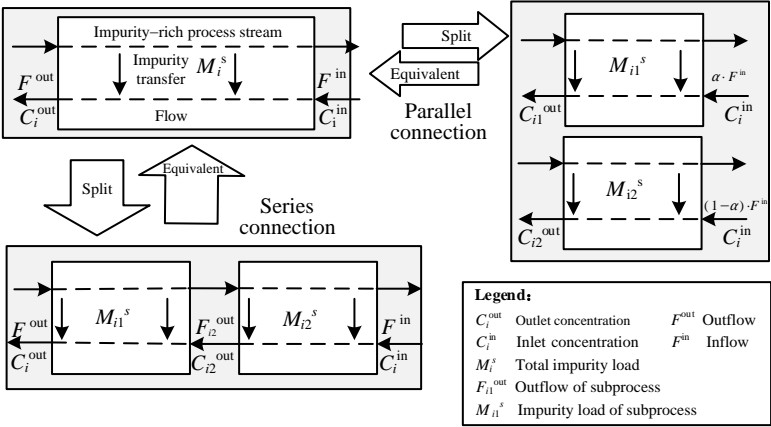


图 2 单元的等效与分割
Fig.2 Equivalence and division of units

2.3.2 带杂质浓度权重的水网络模型

若火电厂用水系统中有 n 个独立的用水单元 A_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 其中各用水单元可为用水节点(水阱)或供水节点(水源)。 A_i 新鲜水用量为 F_i^w , 且新鲜水中含有浓度 c_s^w 的杂质 s ; A_i 向 A_j ($i \neq j$) 的供水水量为 $F_{i,j}^{\text{out}}$, 供水杂质浓度为 $c_{i,j,s}^{\text{out}}$; A_i 排水、耗水水量分别为 F_i^D, F_i^L , 其对应杂质 s 的浓度分别为 $c_{i,s}^D, c_{i,s}^L$ 。 n 个单元的“供-用-耗-排”水关系可用式(2)表述的水网络模型添加单元间供水浓度表示, 水网络模型如表3所示。

表3 水网络模型

Table 3 Water networks model of thermal power plant

	Water sink				Discharge		Consumption
	-	A_1	A_2	\dots	A_n	F_i^D	F_i^L
Water source	A_1	-	$F_{1,2}^{\text{out}}, c_{1,2,s}^{\text{out}}$	\dots	$F_{1,n}^{\text{out}}, c_{1,n,s}^{\text{out}}$	$F_1^D, c_{1,s}^D$	$F_1^L, c_{1,s}^L$
	A_2	$F_{2,1}^{\text{out}}, c_{2,1,s}^{\text{out}}$	-	\dots	$F_{2,n}^{\text{out}}, c_{2,n,s}^{\text{out}}$	$F_2^D, c_{2,s}^D$	$F_2^L, c_{2,s}^L$
	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
	A_n	$F_{n,1}^{\text{out}}, c_{n,1,s}^{\text{out}}$	$F_{n,2}^{\text{out}}, c_{n,2,s}^{\text{out}}$	\dots	-	$F_n^D, c_{n,s}^D$	$F_n^L, c_{n,s}^L$
	F_i^w	F_1^w, c_s^w	F_2^w, c_s^w	\dots	F_n^w, c_s^w	-	-

Note: The unit of concentration is "mg/L" and flow is "t/h".

2.3.3 用水的传质过程

若火电厂用水系统中有 n 个独立的用水单元 A_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 水进入 A_i 后, 经过用水流程或工艺, 部分水转换为产品水或其他形式的消耗, 其余水则在用水过程中不断富集杂质, 最终使得出口处水杂质浓度升高, 用水过程中杂质富集到水中的过程即为用水的传质过程, 传入的杂质总量称为单元的杂质负荷, 对于用水单元 A_i 可由实测单元出口杂质总量与耗水杂质总量之和减去进口杂质总量得到 A_i 的 s 杂质的负荷量 M_i^s (g/h), 计算过程见式(3), 对应水网络关系可参见表(3)。

$$M_i^s = \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{i,j,s}^{\text{out}} \cdot F_{i,j}^{\text{out}} + F_i^D \cdot c_{i,s}^D - \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{j,i,s}^{\text{out}} \cdot F_{j,i}^{\text{out}} - F_i^w \cdot c_s^w - F_i^L \cdot c_{i,s}^L \quad (3)$$

式中, n 为单元数量, $c_{i,j,s}^{\text{out}}, F_{i,j}^{\text{out}}$ 为 A_i 向 A_j 单元供水杂质 s 的浓度及流量, F_i^w, c_s^w 为 A_i 使用的新鲜水流量以及新鲜水中物质 s 的浓度, c_s^D, F_i^D 为 A_i 排水杂质 s 的浓度及流量。

式(3)杂质负荷的计算对于再生单元会出现入口某杂质浓度高于出口浓度, 从而出现负杂质负荷的情况, 该情况可视为单元的杂质移除过程, 负杂质负荷认为是该单元最大的杂质移除能力, 大于该负值时水以最好水质流出, 低于该值则以正常移除过程进行计算, 最好出流水质可按照单元的移除率进行换算或赋固定值, 单元最大杂质移除过程处理如下:

$$c_{i,s}^{\text{out}} = \begin{cases} c_{i,s}^{\text{out}}, & M_i^s < M_i^{s,\max} \\ c_{i,s}^{\text{out},\min}, & M_i^s \geq M_i^{s,\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $M_i^{s,\max}$ 为 A_i 单元杂质 s 的最大移除能力, $c_{i,s}^{\text{out},\min}$ 为 A_i 单元 s 杂质最好出流浓度。

存在最大杂质移除及杂质负荷单元时可统称为最大传质过程单元, 即单元实际的传质与移质速率小于等于该最大值(该小于只出现在再生单元中), 进而实现最大移除能力、移除效率双重指标对再生过程进行描述, 当未达移除能力时遵守再生单元最好水质出流过程, 否则按最大移除能力计算。该过程可通过计算前实现及计算后实现两种方式实现, 计算前实现则需要将式(4)转化为对应的模型的非线性约束条件, 计算后实现是在浓度计算后调整处理单元的实际处理量, 达到对浓度的修正, 是本职工作采取的措施。

2.3.4 极限用水过程

新鲜水、其他单元作为单元 A_i 的供水水源, 基于传质过程的用水单元模型(图1), 供水会提前混合均匀, 并经过用水过程达到出口, $c_{i,s}^{\text{in}}$ 和 $c_{i,s}^{\text{out}}$ 表示入口与出口杂质 s 的浓度, 实际用水过程中需要入口浓度满足用水单元工艺要求, 且出口浓度满足安全生产要求, 即进出口浓度必须低于极限浓度, 极限用水浓度表述如下:

$$c_{i,s}^{\text{in}} < c_{i,s}^{\text{in},\max}, \quad c_{i,s}^{\text{out}} < c_{i,s}^{\text{out},\max} \quad (5)$$

式中, $c_{i,s}^{\text{in},\max}, c_{i,s}^{\text{out},\max}$ 为单元 A_i 杂质 s 的极限进、出口浓度。

2.3.5 极限用水驱动的水网络优化模型

基于用水单元模型, 对于杂质 s , 单元完成传质过程后进出口浓度的计算如下:

$$c_{i,s}^{\text{out}} = c_{i,s}^{\text{in}} + \frac{1}{F_i^{\text{in}}} \cdot \left[F_i^L \cdot (c_{i,s}^{\text{out}} - c_{i,s}^L) + M_i^s \right] \quad (6)$$

$$c_{i,s}^{\text{in}} = \frac{\sum_j F_{j,i} \cdot c_{j,s}^{\text{out}} + F_i^w \cdot c_s^w}{\sum_j F_{j,i} + F_i^w} \quad (7)$$

式中, $F_i^{\text{in}}, c_{i,s}^{\text{in}}$ 分别为各水源向 A_i 供水总水量及混合后杂质 s 浓度, $F_i^L, c_{i,s}^L$ 分别为单元损失水量及损失水中杂质 s 浓度, $c_{i,s}^{\text{out}}$ 为 A_i 富集 M_i^s 杂质后的出口浓度, F_i^w, c_s^w 分别为单元所需的新鲜水水量及新鲜水中杂质 s 浓度。

从式(6)中易得知, 当单元损失水量和损失水浓度与出口浓度差值一定时, 单元出口浓度与入口浓度和入口水量直接相关, 当出口浓度达到最大时对应的入口浓度应不超过最大入口浓度限制(供水影响入口浓度), 否则将出现入口浓度达到最大出口浓度未达最大情况, 两种情况下入口的杂质浓度均会达到一个“最大值”, 如果超出该“最大值”则需要更大的入口水量, 将入口水量中新鲜水占比设为 k , 其他回用供水的平均浓度设为 $\bar{c}_{i,s}$, 式(7)变形后形式如下:

$$k = 1 - \frac{c_{i,s}^{\text{in}} - c_s^w}{\bar{c}_{i,s} - c_s^w} \quad (8)$$

$$\bar{c}_{i,s} = \frac{\sum F_{j,i} \cdot c_{j,s}^{\text{out}}}{\sum F_{j,i}} \quad (9)$$

从式(8)中可知,入口浓度不变情况下,当回用供水的平均浓度越大则入口新鲜水的占比越大,即需要更多的新鲜水混合稀释;当存在再生单元时,总杂质移除量越大对应新鲜水用量越小,即最大进出口浓度、杂质负荷、回用水过程共同决定入口处新鲜水的用量,通过合理分配各单元的回用供水过程、新鲜水供水过程、再生过程,可实现最大化利用水的携污能力,并减少新鲜水用量的目的。以最大传质过程描述用水单元的用水过程,以邻接矩阵描述用水系统网络,可得到以下的用水网络优化模型的数学表达:

$$\min \sum_{i=1}^n F_i^w \quad (10)$$

$$\text{Subject to } F_i^w + \sum F_{j,i} = F_i^D + \sum F_{i,j}^L + \sum F_{i,j} \quad (11)$$

$$F_i^w \cdot c_{i,s}^w + \sum F_{j,i} \cdot c_{j,s}^{\text{out}} + M_i^s = F_i^D \cdot c_{i,s}^D + F_i^L \cdot c_{i,s}^L + \sum F_{i,j} \cdot c_{i,s}^{\text{out}} \quad (12)$$

$$c_{i,s}^{\text{in}} \cdot F_i^{\text{in}} = F_i^w \cdot c_{i,s}^w + \sum F_{j,i} \cdot c_{j,s}^{\text{out}} \quad (13)$$

$$F_i^{\text{in}} = \sum_j F_{j,i} + F_i^w \leq F_i^{\text{in,max}} \quad (14)$$

$$c_{i,s}^{\text{out}} = \max [c_{i,s}^{\text{out}}, c_{i,s}^{\text{out,min}}] \quad (15)$$

$$0 \leq c_{i,s}^{\text{in}} \leq c_{i,s}^{\text{in,max}} \quad (16)$$

$$0 \leq c_{i,s}^{\text{out}} \leq c_{i,s}^{\text{out,max}} \quad (17)$$

$$[0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \leq [F_i^w \ F_{i,j} \ F_i^D]^T \quad (18)$$

其中,式(10)为水网络新鲜水总取用量最小优化目标,式

(11)为 A_i 的进出口水量守恒约束,式(12)为进出口杂质守恒约束,式(13)为入口处杂质守恒,式(14)为入口流量约束,式(15)为最大传质约束,式(16)、(17)为极限用水约束,式(18)为非负约束。

3 案例企业建模与求解

3.1 案例企业用水系统分析

选取山西省某燃煤发电厂作为案例进行模型应用研究,案例电厂总装机容量为3300 MW,厂区日取地下水约70 000 m³,一期建成机组采用“敞开式循环冷却塔”冷却,二期建成机组采用“闭式间接空冷”冷却;烟气脱硫采用“石灰石-石膏”湿法烟气脱硫工艺;一期建成机组采用“水力除渣+湿电除尘”灰渣工艺,二期建成机组采用“物理刮渣+静电除尘”灰渣工艺,并均采用水力运渣;厂区生活消防用水系统使用工业水;建有生活污水处理站处理水主要用于厂区绿化;循环水塔的排污水及新鲜水经过物理正滤、反滤处理后进入离子交换单元进行溶质去除并补给锅炉用水系统;超滤废水、反渗透浓水、离子交换树脂清洗废水都为水处理系统排出的浓水;其他用水系统包括日常道路清洗洒水、洗煤、输煤用水、管网漏损及未知用水。厂区用水过程及用水系统划分见图3。

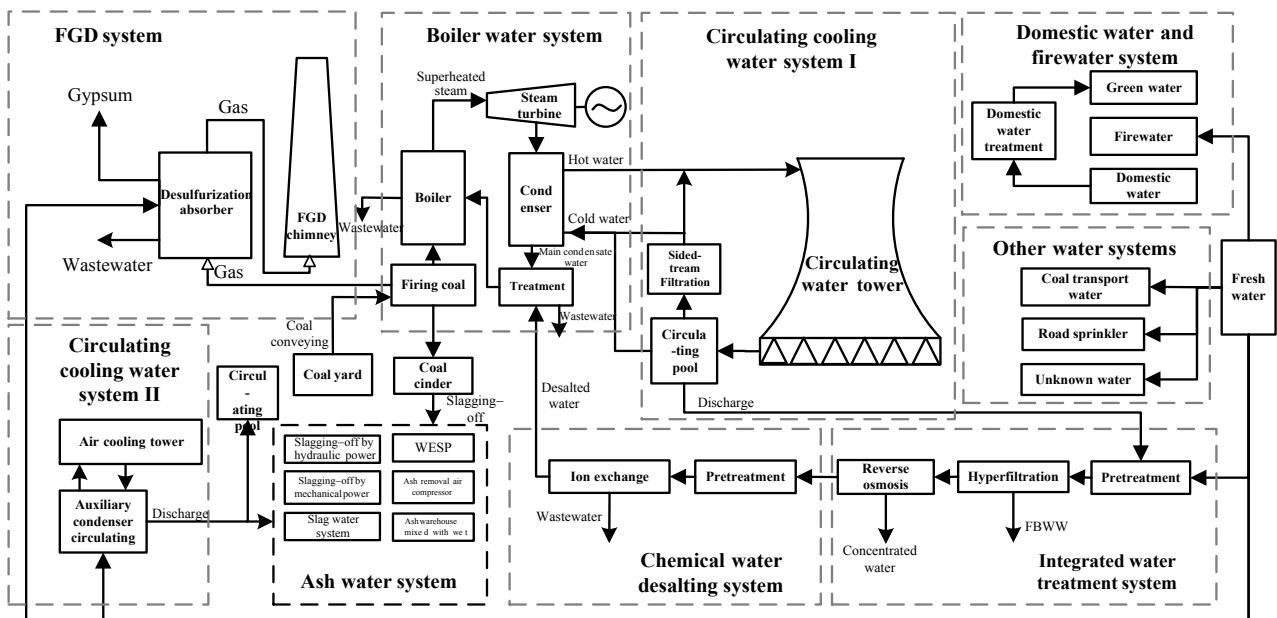


图3 案例火电厂用水过程及用水系统划分

Fig.3 Water-using process and subsystem division of the case thermal power plant

3.2 优化模型构建

将厂区用水过程划分为生活消防水系统、一期循环

冷却水系统、二期循环冷却水系统、锅炉用水系统、脱硫用水系统、灰渣系统、综合水处理系统、化学水处理系

统、其他用水系统等9个用水系统,依次进行单元的等效处理与关键杂质指标的选取,以构建优化模型。

3.2.1 单元的等效与分割

超滤、反渗透、离子交换水处理过程均存在不同浓

度的出流,额外划分出化学水处理系统杂质富集单元、综合水处理系统杂质富集单元,以产水率 α 进行单元间的连接,以满足传质过程模型。水处理过程等效拆分见图4。

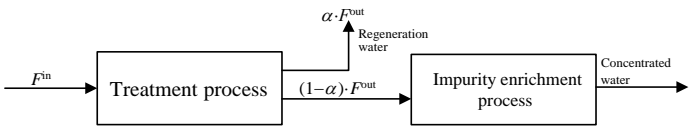


图4 水处理过程等效拆分
Fig.4 Equivalent split of water treatment process

3.2.2 水网络单元用水数据

案例企业用水数据来自企业水平衡测试结果以及厂区实测数据,通过分析厂区主要的杂质控制策略,氯离子(Cl^-)、总悬浮固体(SS)以及硫酸根离子(SO_4^{2-})的浓度最能够反映火电厂水网络用水控制过程。SS主要控制物理正滤、反滤过程的用水,SS较大,则水不可用于化

学除盐水系统的补水以及生活用水系统的补水; Cl^- 浓度主要影响循环冷却塔浓缩倍率、脱硫用水量; SO_4^{2-} 浓度影响脱硫用水及排水过程;其他控制指标如油、磷酸盐、氨氮、酸碱度等本次研究未纳入模型中,选取更多指标可让结果更加接近真实情景。各用水单元优化数据见表4。

表4 各用水单元优化数据
Table 4 Optimize data of each water unit

Unit	Cl^-			SS			SO_4^{2-}			Loss
	$M_i^{\text{Cl}^-}/$ (g/h)	$c_{\text{Cl}^-}^{\text{in,max}}/$ (mg/L)	$c_{\text{Cl}^-}^{\text{out,max}}/$ (mg/L)	$M_i^{\text{SS}}/$ (g/h)	$c_{\text{SS}}^{\text{in,max}}/$ (mg/L)	$c_{\text{SS}}^{\text{out,max}}/$ (mg/L)	$M_i^{\text{SO}_4^{2-}}/$ (g/h)	$c_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{in,max}}/$ (mg/L)	$c_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{out,max}}/$ (mg/L)	
Domestic water and firewater system	314.28	100	300	237.6	0	30	0	300	1000	53.3
Circulating cooling water system I	76750.32	300	1600	20220	10	100	265165	2000	3000	2176
Circulating cooling water system II	11129.5	300	1600	0	10	100	63771	2000	3000	26
Integrated water treatment system (treatment)	15085.4	300	500	-6600	500	0	-216480	2000	30	0
Integrated water treatment system (enrichment)	0	300	500	0	100	300	383040	30	4500	0
Chemical water desalting system (treatment)	-33737.5	300	0.1	0	0	0	33000	300	500	0
Chemical water desalting system (enrichment)	2149.9	0.1	20000	0	0	0	264	300	1000	0
Boiler water system	244	0.1	10	0	0	0	78336	500	3000	59
Desulfurization water system	285263.3	1000	20000	65877	1000	20000	-283077	3000	300	385
Ash water system	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45
Other water systems	-	300	-	-	1000	-	-	2000	-	102

Note: 1) Negative impurity load represents the maximum impurity removal capacity; 2) Water consumption concentration is equal to zero, " $c_{\text{Cl}^-}^{\text{L}}=0$ "; 3) $c_{\text{Cl}^-}^{\text{w}}=18.9\text{ mg/L}$, $c_{\text{SS}}^{\text{w}}=0$, $c_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{w}}=133\text{ mg/L}$; 4) Integrated water treatment system: $\alpha=0.5682$, chemical water desalting system: $\alpha=0.992$; 5) "-" represents unlimited or terminal; 6) Regeneration rate: $r=99.9\%$.

3.3 模型简化与求解

3.3.1 附加约束条件

添加额外的约束条件可让模型结果更加合理,同时也可以缩小搜索空间,达到简化模型的效果。通过以下假设进行模型的简化:单元自身不直接回用,对应邻接矩阵对角线元素都为0;灰渣系统以及其他用水系统为终端单元,不排水、不向外供水;化学水处理系统及综合水处理系统富集单元只接受处理单元的供水;生活用水系统只接受除盐水和新鲜水;厂区锅炉用水系统(水汽

循环系统)用水受厂区发电负荷的调节,并且只能够使用除盐水补给,锅炉用水限制为只使用固定流量的化学除盐水。

3.3.2 非线性约束转化

由于各单元进出口浓度需要小于限制浓度,入口浓度与出口浓度相关联[见式(6)],出口浓度需通过单元杂质守恒(非线性关系)进行计算[见式(12)],如果在控制变量中为每个单元添加出口浓度优化变量,则不仅会多出27个优化变量,还会引入非线性等式约束,导致模型难

以求解,并且实现再生单元的最大杂质移除过程也较为复杂,通过求解各单元的出口浓度,将其以罚因子加入到目标函数中,以解决求解中的问题。通过联立式(11)~(15),可以得到原优化模型KKT条件中单元的浓度控制变量部分,并将浓度控制变量转换为与单元水量之间的

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n F_{i,j} + F_1^D & -F_{2,1} & \cdots & -F_{n,1} \\ -F_{1,2} & \sum_{j=1}^n F_{i,j} + F_2^D & \cdots & -F_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -F_{1,n} & -F_{2,n} & \cdots & \sum_{j=1}^n F_{i,j} + F_n^D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1^{s,\text{out}} \\ c_2^{s,\text{out}} \\ \vdots \\ c_n^{s,\text{out}} \end{bmatrix} = [M^s] + (F_i^w)^T \cdot c_s^w \quad (19)$$

当含有再生单元时,为实现最大传质过程,式(19)中对于再生单元 A_i ,其再生率为 r ,则对应的单元出口浓度计算方程变为

$$c_{i,s}^{\text{out}} = (1-r) \cdot c_{i,s}^{\text{in}} \quad (20)$$

在均匀混合条件下,入口浓度的计算如下:

$$\begin{bmatrix} -F_{i,1} & -F_{i,2} & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^n F_i^{\text{in}}}{1-r} - F_{i,i} & -F_{i,i+1} & \cdots & -F_{i,n} \end{bmatrix} \cdot c_s^{\text{out}} = F_i^w \cdot c_s^w \quad (22)$$

式(22)将以再生率 r ($r \neq 1$)进行出口浓度计算的方程表示为式(19)相同的形式,此时只需要确认需要以再生率进行计算的单元位置,并将式(19)中对应的线性方程替换为式(22)形式即得到完整的浓度计算方程。确定以再生率进行计算的单元位置,需要基于以下已知分析:当再生单元的杂质移除率小于其移除能力时,此时以式(19)求解,表现为出口浓度小于最优出口水质;再生单元只存在式(4)对应最大传质过程的两种状态,不存在未达最大处理能力且产水不为最优水质的情况;式(22)实际是通过调整再生单元的实际杂质移除率使出口浓度达到一个合理的值,当某一再生单元以再生率计算时会使得原出口浓度变大,将导致所有单元的入口浓度、出口浓度变大或不变;对于杂质 s ,各水量不变情况下,当各再生单元的杂质移除率不同时,各单元的出口浓度也不同,需确定各再生单元处理能力分配的优先级,避免出现随机分配情况,本工作以脱硫水处理>综合水处理>化学水处理进行分配。基于以上分析,以再生率计算的单元位置的确定需要依次进行,首先确定以式(19)计算后所有出口浓度异常位置,按优先级依次替换浓度异常位置并求解出口浓度,再剔除超出处理能力的位置,最后重复该过程直至所有的位置均被有效处理。

已知所有单元流量情况下,若整个水网络满足流量守恒关系,对式(19)通过式(22)进行替换的线性方程组有唯一解,进而通过求解原优化问题KKT条件得到控制变量对应的进出口浓度,再通过式(6)计算入口浓度,进而将进出口极限浓度约束以罚函数^[24]形式添加到目标函数中,实现非线性等式约束的转化。限制水网络连

关系,其中水网络中杂质富集单元出口浓度求解线性方程组矩阵形式见式(19),该式认为所有单元都以最大的杂质负荷进行计算,未考虑再生单元未达最大移除能力的情况。

$$c_{i,s}^{\text{out}} = \frac{(F_i^{\text{in}})^T \cdot c_s^{\text{out}}}{\sum_{i=1}^n F_i^{\text{in}}} \quad (21)$$

进而可将再生单元 A_i 出口浓度表示为单元间供水量及新鲜水量的关系,对应的计算式如下:

接数可以防止复杂的结果出现,由于该目标为非对抗目标,故可直接以罚函数添加至目标函数中,连接数可借助符号函数进行统计:

$$P_1(x) = \mu_1 \cdot \sum_{i=1}^n [g^+(c_i^{\text{in}}; c_{i,\text{max}}^{\text{in}}) + g^+(c_i^{\text{out}}; c_{i,\text{max}}^{\text{out}})] \quad (23)$$

$$P_2(x) = \mu_2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{sgn}(F_{i,j}) \quad (24)$$

$$f'(x) = f(x) + P_1(x) + P_2(x) \quad (25)$$

$$g^+(x; x_i^{\text{max}}) = \max\{0, x - x_i^{\text{max}}\} \quad (26)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (27)$$

其中, g^+ 为辅助约束函数, sgn 为符号函数, μ 为罚系数(常数), P 为罚函数, f' 为加罚后的目标函数, f 为原目标函数。将进出口浓度计算集成到目标函数中,可以去掉非线性等式约束的同时减少优化变量的维度,并通过计算后实现的方式实现最大传质过程,但由于目标函数中含有针对浓度和连接数添加的罚函数,使得目标函数为非线性且不保证光滑。

3.3.3 模型的求解

由于目标函数无法给出其导数的解析形式且全局搜索算法需要的计算量巨大,故选择通过构造不同的初始点以局部搜索算法进行求解。局部搜索算法通过数值方法近似求解优化系统的KKT条件对初始点进行迭代,求解非常依赖初始点 x_0 ,对于任意 x_0 可利用等式约束构造满足该约束的初始点以提高搜索效率,对于等式约束 $A_{\text{eq}}x = b_{\text{eq}}$, G 为其广义逆矩阵, x'_0 为需要构造的满足约束的初始点,则有:

$$A_{eq}GA_{eq}=A_{eq} \tag{28}$$

$$x'_0=Gb_{eq}+(I-GA_{eq})x_0 \tag{29}$$

以构造的初始点分别求解该非线性优化问题(NLP),并得到最终的非劣解集,最后分析得到最佳结果。本工作使用 MATLAB 中“Trust-Region Interior-Point Method”^[25]非线性优化算法进行模型的求解,该算法可对高维度的优化问题进行快速求解且不容易出现稀疏矩阵情况。对求解得到的结果绘制了连接数和新水量为目标的 Pareto 前沿图,见图 5。

从“连接数-新鲜水量”散点图中容易发现,最优前

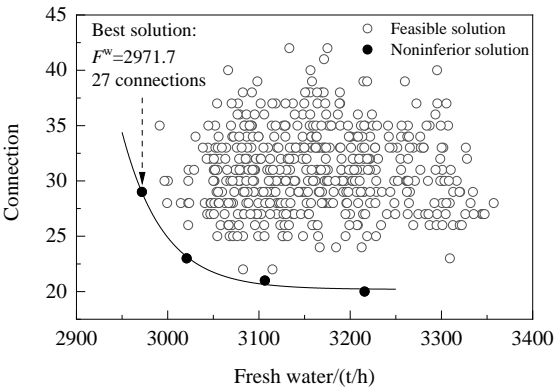


图5 优化结果帕累托前沿图
Fig.5 Pareto front diagram of optimization results

沿对应的 4 个非劣解中,新鲜水用量为 2971.7 t/h、连接数为 27 的结果最好,新鲜水量最小且连接数较少。该解对应的初始点 x'_0 构造的 x_0 元素全为 15.6,该点对应的结果在 MATLAB 并行环境下迭代求得,文章所有计算均在一颗 AMD Ryzen 5800H 8 核心 CPU 上进行、软件环境为 Windows 11 21H2, MATLAB2021b。

3.4 结果分析与比较

优化后新鲜水用量减少 213.1 t/h,较原用水减少 6.7%,直接排污减少 62.9%,优化后水网络出现“一期循环冷却水-综合水处理-化学水处理-一期水处理系统”、“一期循环冷却-综合水处理系统”、“化学水处理-二期循环冷却水系统”3 个水环,优化后一期循环冷却、综合水处理(富集)、FGD、其他用水系统均出现浓度接近极限浓度情况,也验证了前文分析在一定的流量情况下,进出口浓度越接近极限时,对应的的新鲜水用量越少;3 个再生单元对 SO_4^{2-} 的移除均达到了处理能力,但对总悬浮固体及 Cl^- 的移除均未达到处理能力,可能的原因是优化过程中对各单位最大供水水量的限制过于保守。对于结果所能带来的经济效益,按案例电厂装机容量 3300 MW 计算其取水定额,可知其取水低于取水定额,按水价 1 元每立方米计算水资源费,每年可节约 186.7 万元的取水费用,若另计排污费则效益将更大。优化后水网络见图 6,优化效果对比见表 5。

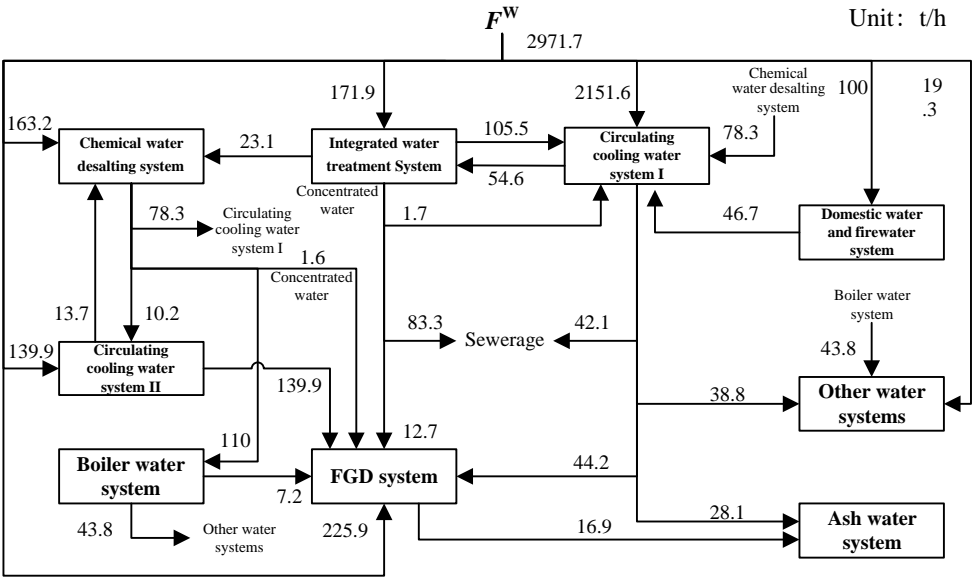


图6 优化后水网络图
Fig.6 Optimized water network diagram

为确定本工作设计的模型的合理性及有效性,分别放松对再生单元处理能力限制以及再生单元供水水量限制,分别对模型进行求解并比较,其中无处理能力限

制情景即为常规的再生循环水网络设计模型,通常还需进一步对总再生杂质量进行优化,以下比较均不涉及二次优化,除再生单元限制外其余均保持相同,优化结果

表 5 优化效果对比表
Table 5 Comparison of optimization effects

System	Fresh water			Discharge water		
	Preceding system/ (t/h)	Optimized system/ (t/h)	Global decrease rate	Preceding system/ (t/h)	Optimized system/ (t/h)	Decrease rate
Domestic water and firewater system	66.8	100.00	-1.0%	13.50	0.0	100.0%
Circulating cooling water system I	2815.0	2151.62	20.8%	143.00	42.1	70.6%
Circulating cooling water system II	105.0	139.85	-1.1%	0.00	0.0	-
Integrated water treatment system (treatment)	0	171.89	-5.4%	0.00	0.0	-
Integrated water treatment system (enrichment)	0	0.00	0.0%	95.00	83.3	12.3%
Chemical water desalting system (treatment)	0	163.18	-5.1%	0.00	0.0	-
Chemical water desalting system (enrichment)	0	0.00	0.0%	1.00	0.0	100.0%
Boiler water system	0	0.00	0.0%	51.00	0.0	100.0%
FGD system	153.0	225.89	-2.3%	35.00	0.0	100.0%
Ash water system	45.0	0.00	1.4%	0.00	0.0	-
Other water systems	0	19.32	-0.6%	0.00	0.0	-
Summation	3184.8	2971.70	6.7%	338.50	125.4	62.9%

比较见表 6。

从对比结果来看,再生单元供水水量限制与再生单元再生能力限制均较大程度地影响优化结果,并且供水水量限制占主导地位;在“再生能力-宽松供水水量限制”情况下总的水量优化结果表现良好,但实际水网络再生单元供水水量巨大,对再生单元的产水压力极大;对于只有总供水水量限制条件下,优化结果水网络中只出现 SO_4^{2-} 超出再生能力情况,总体表现较好,但需要对再生过程进行改进,实施成本较大;当只以宽松的供水水量进行优化时,优化结果较为混乱,任意的回用导致大量的无意义水环出现,但呈现极好的水量优化效果。对比分析得出,对于再生循环水网络模型,同时限制供水水量及再生能力可以得到更为合理的水网络结构和较好的节水效果,在严格的供水水量限制下可以实现较优的节水效果,只有较为宽松的供水水量限制或只有再生能力限制都会使得结果不可靠,同时带有再生能力限制会削弱不合理供水水量限制的不利影响。

4 结论与展望

本工作研究了火电厂再生循环水网络设计模型的构建及应用,在基于传质过程的工业企业用水单元概化模型的基础上,以邻接矩阵描述用水网络中单元间的供水关系并在再生单元处理率的基础上添加最大杂质移除量限制,进而完善了对火电厂再生过程及水网络回用过程的描述,并构建了火电厂再生循环水网络设计模型;选取某 3300 MW 火电厂作为案例,进行了案例火电厂再生循环水网络设计。得到以下结论:

- (1) 以氯离子、总悬浮固体、硫酸根离子为控制指标,并以“节水-连接数”为优化目标构建的火电厂再生循环水网络优化模型,可以实现对新鲜水用量以及水网络回用过程的优化设计。
- (2) 考虑湿法烟气脱硫系统对硫酸根离子的再生过程更加符合火电厂的实际情况,通过调整水网络的供水、再生水、排水过程,可实现对水网络中杂质的定向富集,使得脱硫系统等用水要求较低的单元可以在需求被满足的前提下用水过程被最大化的利用。
- (3) 对再生单元同时添加再生能力和再生水量限制可以削弱不合理再生水量限制的影响,使得结果更加合

表 6 带有不同限制的再生循环水网络优化结果
Table 6 Comparison of optimization results of regeneration recycling water networks with different constraints

Restriction type	Fresh water/ (t/h)	Sewage/ (t/h)	Mean utilization rate of regeneration capacity		
			\bar{F}_{Cl^-}	\bar{F}_{SS}	$\bar{F}_{\text{SO}_4^{2-}}$
Regenerative capacity limitation	2971.7	125.4	30.8%	81.4%	100%
Strict restrictions on water supply					
Regenerative capacity limitation	2961.8	115.5	100%	74.1%	95.7%
Loose restrictions on water supply					
Strict restrictions on water supply	2918.6	72.3	11.2%	95.8%	132.6%
Loose restrictions on water supply	2872.9	26.6	146.7%	23.2%	351.5%

Note: Loose restrictions on water supply mean regeneration units water supply limitation is less than 500, strict restrictions mean integrated water treatment system (treatment) water supply less than 250 t/h and chemical water desalting system (treatment) limitation is less than 200 t/h.

理,也使得以节水改造为目的进行水网络优化设计,可以量化再生处理量并控制改造成本。

本工作研究只完成了基于静态数据的火电厂再生循环水网络优化模型,但火电厂用水具有水量水质波动较大的特点,进一步的研究需对各子系统的用水阈值进

行确定以实现特定阈值下的节水调控;另外本工作研究只考虑用水子系统层面的水网络设计,对更加细化的用水过程进行优化,需对传质过程进行更加详细准确的建模。

符号说明

A_i	第 i 个用水单元	$c_{i,s}^D, c_{i,s}^L$	i 单元排水、耗水中杂质 s 浓度, mg/L
F	邻接矩阵	$F_i^{\text{in}}, F_i^{\text{in,max}}$	i 单元入口流量、最大入口流量, t/h
G	广义逆矩阵	$c_{i,s}^{\text{in,max}}, c_{i,s}^{\text{out,max}}$	i 单元杂质 s 极限进出口浓度, mg/L
F^W	新鲜水水量, t/h	$c_{i,s}^{\text{out,min}}$	处理单元 i , 最好出口浓度, mg/L
F^D	排水水量, t/h	$F_{i,j}^{\text{out}}$	i 单元向 j 单元供水水量, t/h
F^L	耗水量, t/h	$c_{i,j,s}^{\text{out}}$	i 单元向 j 单元供水的杂质 s 浓度, mg/L
c_s^W	新鲜水杂质 s 浓度, mg/L	x_0	优化初始点
M_i^s	i 单元杂质 s 负荷, g/h	x_0'	满足等式约束的优化初始点
Q	出口浓度计算系数矩阵	f, f'	原始目标函数, 加罚之后的目标函数
μ	罚参数	P_1, P_2	进出口浓度罚函数, 连接数罚函数
α	产水率	g^+	辅助约束函数
F_i^W, F_i^D, F_i^L	i 单元新鲜水用量、排水量、耗水量, t/h	sgn	符号函数

参考文献

- 赵月红, 王韶锋, 温浩, 等. 过程集成研究进展 [J]. 过程工程学报, 2005, 5(1): 107-112.
Zhao Y H, Wang S F, Wen H, et al. Research advances in process integration [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2005, 5(1): 107-112.
- Halim I, Adhitya A, Srinivasan R. Multi-objective optimization for integrated water network synthesis [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2012, 31: 1432-1436.
- 丁皓楠, 冯霄. 二级再生循环水网络优化 [J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(3): 239-243.
Ding H N, Feng X. Optimization of water networks with two-stage regeneration recycling [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(3): 239-243.
- 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 Y Z, Duan H T, Feng X. Approach to evaluation of optimal schemes for water networks based on game theory [J]. CIESC Journal, 2009, 60(4): 945-951.
- 李凤喜, 鄢烈祥, 史彬, 等. 基于列队竞争算法的多杂质水网络集成优化 [J]. 计算机与应用化学, 2011, 28(8): 1007-1010.
Li F X, Yan L X, Shi B, et al. Integration and optimization of a water network with multi-contaminants based on line-up competition algorithm [J]. Computer and Applied Chemistry, 2011, 28(8): 1007-1010.
- 段海涛, 刘永忠, 冯霄. 水系统优化的粒子群算法分析 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2007, (2): 41-44.
Duan H T, Liu Y Z, Feng X. Study on particle swarm optimization algorithm for water system integration [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2007, (2): 41-44.
- 王天华, 冯霄. 水系统集成技术在工业应用中的优化策略 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(3): 15-19.
Wang T H, Feng X. Optimization strategy of water integration in industrial application [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2009, 36(3): 15-19.
- 秦杰, 许新乐. 甲醇生产过程的水系统集成与优化 [J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(1): 107-111.
Qin J, Xu X L. Water systems integration and optimization of methanol production [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2016, 45(1): 107-111.
- 赵月红, 谢勇冰, 曹宏斌, 等. 基于全过程污染控制策略的钢铁工业园区水网络全局优化 [J]. 过程工程学报, 2022, 22(1): 127-134.
Zhao Y H, Xie Y B, Cao H B, et al. Global optimization of water network in the steel industrial park driven by the strategy of whole process pollution control [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(1): 127-134.
- 常吟琳, 周律, 辛怡颖, 等. 基于水网络优化的棉针织印染废水回用技术研究 [J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 106-110.
Chang Y L, Zhou L, Xin Y Y, et al. Reuse processes of cotton knitted fabric printing and dyeing wastewater based on water network optimization [J]. China Water Supply and Sewerage, 2013, 29(23): 106-110.
- 刘佳音. 基于全局水网络优化的电厂高盐脱硫废水资源化处理关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2018: 29-38.
Liu J Y. Study on the key technology for reuse treatment processing of high salt desulfurization wastewater in power plant based on the water network optimization [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Process Engineering, CAS), 2018: 29-38.
- 包宇航. 某燃煤电厂水网络优化及末端废水回用工艺可行性研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2021: 26-35.
Bao Y H. Feasibility study on water network optimization and terminal wastewater reuse process in coal-fired power plant [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2021: 26-35.
- 程一杰, 张宁. 水系统集成技术在火力发电厂的应用 [J]. 工业水处理, 2017, 37(1): 105-108.

- Cheng Y J, Zhang N. Application of water system integration technology to thermal power plants [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(1): 105–108.
- [14] 叶旭润. 燃煤电厂脱硫废水“零排放”工艺技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 19–25.
- Ye X R. Study on “zero emission” technology of desulfurization wastewater from coal-fired power plants [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 19–25.
- [15] 朱玉蝶, 杨科玉, 张浩, 等. 乙醇胺乳酸盐离子液体火电厂尾气深度脱硫工艺优化 [J]. *石化技术与应用*, 2019, (2): 125–129.
- Zhu Y D, Yang K Y, Zhang H, et al. Optimization of deep desulfurization process for flue gas from thermal power plant with ethanolamine lactate ionic liquid as absorbing agent [J]. *Petrochemical Technology and Application*, 2019, (2): 125–129.
- [16] Li H R, Sun B, Zhang C H. Capacity design of a distributed energy system based on integrated optimization and operation strategy of exergy loss reduction [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 231: 113648.
- [17] Yang X L, Liu Z Y, Chen J Y, et al. Optimization of heat source side technical scheme of combined heat and water system based on a coal-fired power plant [J]. *Building Simulation*, 2022, 15(8): 1455–1473.
- [18] Wei H M, Wu T, Ge Z H, et al. Entransy analysis optimization of cooling water flow distribution in a dry cooling tower of power plant under summer crosswinds [J]. *Energy*, 2019, 166: 1229–1240.
- [19] Vandani A M K, Bidi M, Ahmadi F. Exergy analysis and evolutionary optimization of boiler blowdown heat recovery in steam power plants [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106: 1–9.
- [20] Shamsi S, Negash A, Cho G, et al. Waste heat and water recovery system optimization for flue gas in thermal power plants [J]. *Sustainability*, 2019, 11(7): 1–20.
- [21] 靳胜英, 赵江, 边钢月. 国外烟气脱硫技术应用进展 [J]. *中外能源*, 2014, 19(3): 89–95.
- Jin S Y, Zhao J, Bian G Y. The advance in application of flue gas desulfurization technologies in foreign countries [J]. *Chinese and Foreign Energy*, 2014, 19(3): 89–95.
- [22] 苑贺楠, 何广湘, 孔令通, 等. 工厂燃煤烟气脱硫技术进展 [J]. *工业催化*, 2019, 27(9): 8–12.
- Yuan H N, He G X, Kong L T, et al. Progress in coal-fired flue gas desulfurization technologies in China [J]. *Industrial Catalysis*, 2019, 27(9): 8–12.
- [23] 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, 2019: 31–32.
- Yang B H, Wang J, Xu Z, et al. Deep water saving and wastewater zero discharge technology for thermal power plants [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 31–32.
- [24] Luenberger D G, Ye Y. *Linear and nonlinear programming* [M]. 3 ed. New York: Springer Science Business Media, 2008: 401–410.
- [25] Byrd R H, Gilbert J C, Nocedal J. A trust region method based on interior point techniques for nonlinear programming [J]. *Mathematical Programming*, 2000, 89(1): 149–185.