

Global optimization of water network in the steel industrial park driven by the strategy of whole process pollution control

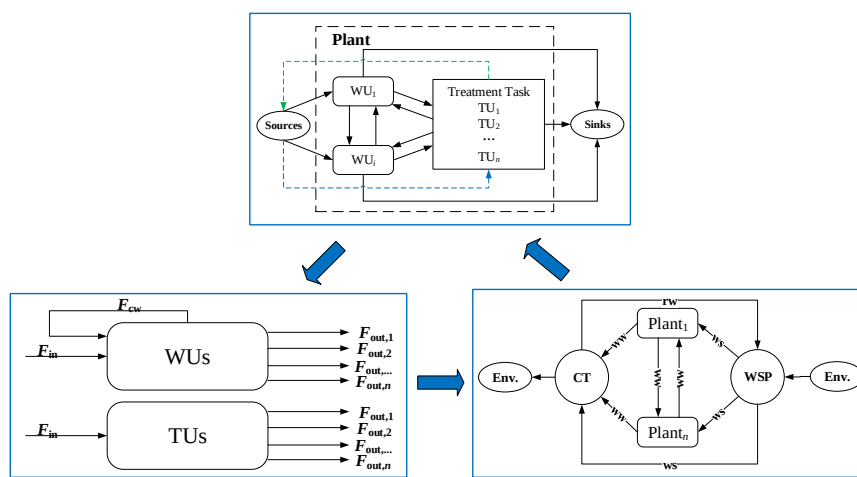
Yuehong ZHAO^{1,2,3*}, Yongbing XIE^{1,3}, Hongbin CAO^{1,3}, Hao WEN¹

1. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. CAS Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: As a high water consumption industry, water conservation is one of the challenges needed to be conquered in order to achieve the sustainable development for Chinese iron and steel industry. Based on the idea of Whole Process Pollution Control (WPPC), global optimization of water network in the steel industrial park was carried out in this work. Firstly, the configurational and operational



characteristics of the water network in the typical steel industrial park were investigated, and a multi-scale modeling method was proposed to describe the water network. Wherein different scale water systems, including water-use/treatment unit, process-scale water network, park-scale water network, and their interactions were discussed. Secondly, a superstructure was built to represent all possible water network configurations. Thirdly, an optimization model tailored for the steel industrial park was set up with the aim of minimizing the comprehensive water-use cost. The water conservation and pollutants balance of different scale water systems, together with some limits on structure and operation of the water network, were described as constraints. Lastly, to validate the proposed model, global optimization of water network in a steel industrial park with 5 million tons of crude steel production capacity per year was studied by constructing and solving the mathematical model. The results of study cases showed that the case driven by WPCC strategy achieved the best performance compared to other cases, i.e., lowest comprehensive water-use cost and lowest fresh water consumption. Compared to the current water-use index of the studied park, the index of the case driven by WPCC decreased by more than 20% at least. In terms of the results, the case studies also indicated the applicability of the proposed multi-scale optimization model, and all these data can help the steel industrial park to make decisions for implementing global optimization of water network.

Key words: whole process pollution control; steel industrial park; water network; multi-scale; global optimization

收稿: 2020-11-19, 修回: 2021-03-01, 网络发表: 2021-03-31; Received: 2020-11-19, Revised: 2021-03-01, Published online: 2021-03-31

基金项目: 国家科技重大专项(编号: 2017ZX07402001); 国家自然科学基金资助项目(编号: 2156112001)

作者简介: 赵月红(1973-), 男, 内蒙古自治区包头市人, 博士, 副研究员, 化工过程系统工程, E-mail: yhzha@ipe.ac.cn.

引用格式: 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. 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 (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2022, 22(1): 127-134, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220373.

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

赵月红^{1,2,3*}, 谢勇冰^{1,3}, 曹宏斌^{1,3}, 温浩¹

1. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院绿色过程与工程重点实验, 北京 100190

摘要: 作为典型的高耗水工业, 节水减排是我国钢铁工业可持续发展亟须解决的关键问题之一。本研究基于全过程污染控制策略, 提出了面向钢铁工业园区水网络特点的多尺度优化建模方法, 充分考虑了钢铁园区涉水单元-工序水网络-园区水网络等不同尺度水系统的用排水特点及相互作用, 有助于进一步发掘园区节水减排新空间。在此基础上建立了园区水网络全局优化模型, 利用数学规划方法来探索综合用水成本最低的园区水网络优化方案。一年产能为500万吨钢材的钢铁工业园区水网络优化案例研究表明, 采用全过程污染控制策略的钢铁园区水网络全局优化方案, 综合用水成本、新水用量及新水成本占比等用水指标与其他采用局部水污染控制技术的方案相比有较大幅度的降低, 与园区现用水指标相比, 各指标均降低20%以上。案例研究表明所提出的园区水网络优化模型可行有效, 优化结果对于钢铁园区水污染控制技术的集成和水网络全局优化方案的精准确定具有重要的参考价值。

关键词: 全过程污染控制; 钢铁工业园区; 水网络; 多尺度; 全局优化

中图分类号: X757

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2022)01-0127-08

1 前言

我国水资源短缺、水污染严重、水生态恶化等问题突出, 迫切需加强高耗水工业的用水管理与水污染控制水平。国际钢协已将水资源看作继气候变化和空气质量之后, 钢铁工业可持续发展需要解决的重要问题^[1]。作为典型的高耗水工业, 我国钢铁行业高度重视用水及水污染控制, 积极推动钢铁企业采用工艺过程节水、循环用水、串联用水、废水处理及回用等技术, 节水减排成效显著。钢铁行业重点统计企业吨钢取水量由2005年的8.71 m³降至2015年的3.53 m³, 水重复利用率由2005年的94.3%升至2015年的97.6%, 废水排放量由2005年的吨钢4.88 m³降至2015年的0.81 m³, 部分工艺过程节水和水污染控制技术已达到国际先进水平, 同时网络化的水系统构建也已初步完成^[2]。但钢铁行业的节水减排工作重点集中在单元尺度的节水减排和工序尺度的用水网络优化, 以解决局部问题为主; 对于水污染控制则集中于焦化废水、冷轧废水等典型废水末端治理技术的研究, 水污染控制单元技术选择和集成大都基于工程经验, 对于其与园区水网络中其他水系统的相互作用考虑不多, 难以实现不同功能水系统间的协同调控, 限制了园区节水减排总体效益提升。在当前越来越严格的用水、排水要求的情况下, 单纯依靠局部生产工艺单元用水、水污染控制技术改造创新, 实现进一步的节水减排, 技术难度越来越大, 且水污染控制成本不断上涨, 影响

企业采用的积极性, 控污成本有效控制已成为制约行业可持续发展的重大瓶颈。如何从园区整体的角度出发, 通过水污染控制技术集成以及节水减排策略综合应用, 构建综合用水成本可控的园区水网络全局优化方案是钢铁生产可持续发展面临的一个急需解决的问题^[3]。

水网络优化是工业生产节水减排的重要方法, 该方法是将整个用水系统作为一个有机整体进行考虑, 通过汇集、混合、循环、再生及回用等用水方式的组合优化, 以减少新水用量、废水排放及用水成本, 实现节水效益最大化。该方法主要分为两类: 图示法和数学规划法^[4]。前者是1994年Wang等^[5]提出的用以解决最少新水用量问题的方法, 又称为水夹点法。由于该方法直观、形象、物理意义明确, 在20世纪90年代图示法是研究水网络的主要方法^[6]。数学规划法的首次提出是在1980年, Takama等^[7]基于多污染物组分用水网络超结构设计, 建立了水网络非线性数学规划模型(NLP), 用以支持水网络的优化。由于该方法在表达考虑多污染物组分的复杂水网络、设定优化目标及约束条件等方面较水夹点法体现出较大的优势, 在20世纪90年代以后逐渐成为研究复杂用水网络优化问题的重要方法^[8]。近年来, 该方法迅速发展, 在工业领域应用广泛, 通过构建合理的水网络超结构及数学模型, 即可获得单元、工序、企业甚至工业园区尺度上水资源的优化利用方案。研究表明, 通过水网络优化技术, 炼油厂可节约新水15%~30%, 化工

企业为25%~35%，精细化工企业可达20%~60%^[9]。近年来，一些研究人员在用水网络优化的基础上，开展了水源预处理和废水处理技术在用水网络中的综合集成，以及工业园区尺度水网络优化的研究，提出了全水网络优化^[10,11]和面向生态工业园区水网络构建的优化方法^[12]，以期为工业生产的进一步节水减排、可持续发展提供新的思路和方法。目前，这类方法在化工园区水网络优化中有较多的探讨，在钢铁园区水网络优化中则报道很少，仅Lim等^[13]及Tian等^[14]探讨了钢铁园区水网络优化问题，但均未考虑园区水网络多尺度特点及全局优化。与化工园区相比，钢铁园区生产流程结构、用排水特点有很大的不同，直接使用现有的水网络优化建模方法存在一定的难度。本课题组基于水网络优化方法，对国内典型的钢铁园区水网络全局优化开展了初步的探索^[15,16]，研究表明，钢铁园区水网络具有很大的优化空间，但目前还没有形成系统的理论、方法和工具。

全过程水污染控制策略是通过源头治理、工艺过程节水及末端治理等水污染控制单元技术在水网络中的综合集成，并结合废水直接/再生后重用和循环使用等水网络优化基本方法的应用，以综合用水成本最低为目标，进行水网络优化，是全过程污染控制策略^[17]在水网络优化中的一种拓展和应用。本工作基于全过程水污染控制策略，提出了钢铁工业园区水网络多尺度优化建模方法；以典型钢铁园区水网络为研究对象，建立了其水网络优化数学模型；通过水网络优化模型的求解分析，获得了不同情景条件下，典型钢铁园区最小综合用水成本的水网络全局优化方案。研究表明所建立的多尺度优化建模方法可有效的描述钢铁园区水网络多尺度的特点及不同尺度水系统间的相互作用，对于钢铁园区水网络优化决策具有重要的参考价值。

2 钢铁工业园区水网络多尺度优化建模方法

钢铁工业园区集合多个生产工序(或分厂)，聚集多种生产要素，使资源、能源在工序间的协同利用成为可能。然而园区运行区别于工序，各工序有一定的独立性，又相互影响。对于钢铁工业园区水网络来说，从空间尺度看，由涉水工艺单元、工序水网络及园区水网络三个尺度的水系统构成，具有明显的多尺度特征，是一个典型的多尺度协调优化问题。如何描述不同尺度水系统及其相互作用关系，是钢铁工业园区水网络优化的难点。需要针对园区不同尺度水系统用排水及水网络结构特点，建立有针对性的建模方法对各尺度水系统进行描述，从而实现水资源在园区不同尺度水系统内的合理分配。

2.1 钢铁园区水网络多尺度超结构表达

2.1.1 涉水单元超结构

通常水网络超结构设计时，涉水单元一般被定义为一个简单的单进口、单出口模型，只考虑主要排水的可能重用。实际上，很多涉水单元有多个出口，如反渗透法制脱盐系统有脱盐水、反洗水和浓盐水三个出口；循环冷却水系统的排污水和反洗水分别有独立出口管路，均有回用的可能。基于涉水单元的这一特点，为了实现涉水单元排水按质重用以及统一的模型表达，建立了典型涉水单元(用水单元WUs、水处理单元TUs)统一的超结构表达—多出口涉水单元模型，如图1所示，图中 F 为流股流量，下标in, out, cw分别指进口、出口和循环流股。为提高涉水单元的优化潜力，涉水单元进水可由多种供水混合而成。

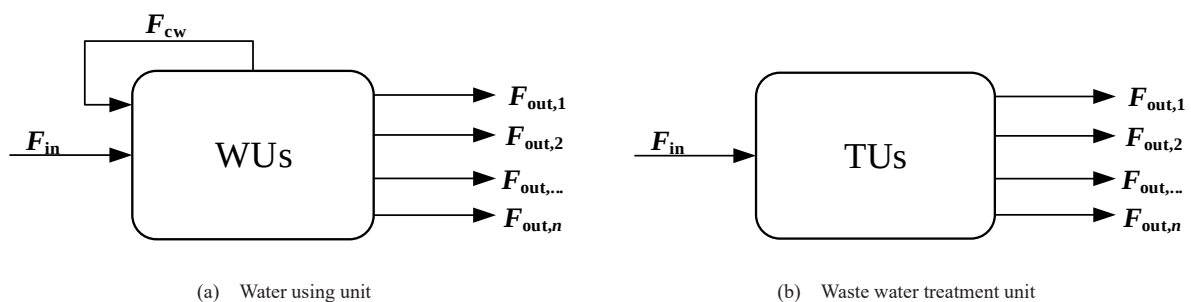


图1 涉水单元超结构表达

Fig.1 Superstructure representation of water using unit and waste water treatment unit

2.1.2 工序水网络超结构

以多出口涉水单元为基础，综合工序内各用水单元用水水质要求不同，排水水质存在差异的特点，采用直

接串接使用、再生后循环或串接使用等工业生产中常用废水重用方式，设计工序水网络超结构，如图2所示。其中，工序水源(Sources，指工序用水单元可使用的各类供

水)包含园区供水以及来自其他工序的可被工序内用水单元(WU)使用的废水;用水单元(WU)指在工序内的用水系统,由水源供水及串接工序内其他用水单元(WU)排水和水处理单元(TU)出水满足其用水需求,其排水可重用于其他用水单元(WU)或排入废水处理单元(TU)进行处理;对于废水处理单元(TU),则根据其水污染控制的任务需求,构建其超结构,以表达所有可选水污染控制单元技术,并通过流股建立各废水处理单元技术与用水单元、工序水源、工序水阱(Sinks,指接收工序内涉水单元排水的系统,如下水道、中间水道等)的可能连接,从而表达水污染控制单元技术在工序水网络中可能的集成方式。由于满足某一水污染控制任务要求的水污染控制单元技术可能有众多的可用替代技术,且其出水与用水单元有多种可能的连接方式,如采用组合方式构建超结构,将会形成包含大量不可行组合的巨大的搜索空间,造成求解困难。为克服这一困难,在超结构设计时,可基于专家经验和工程实践,对一些不合理的组合进行剔除。

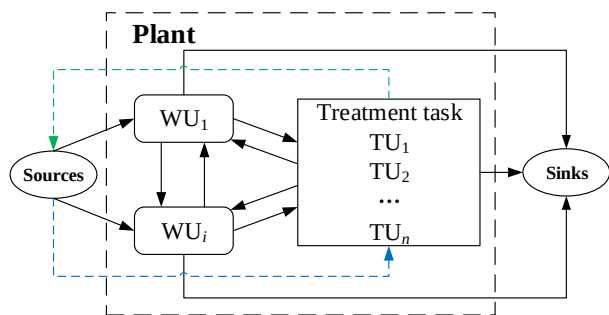


图2 工序水网络超结构
Fig.2 Superstructure of plant scale water network

2.1.3 园区水网络超结构

在工序水网络超结构的基础上,构建以园区供水、排水及废水处理为核心功能的园区水网络超结构(图3),以表达各工序间的可能连接方式。其中,为实现特种废水(如焦化废水、冷轧废水、脱盐浓水等水量较大且水质差,需要单独进行处理的废水)分质利用,设计特种废水专用中间水道,直接连接特种废水产生工序(产水点)和用水工序(用水点),设计了工序间水源-水阱的直接集成方式。此类中间水道可视为一类虚拟的园区供水管路,有利于简化园区水网络的超结构模型表达。根据钢铁工业园区供水和综合废水处理的常用中心式布局情况,设计了通过园区供水管道ws、废水排放下水道ww和回收水rw,构成以综合废水处理厂(CT)和园区供水厂(WSP)为中心的工序间接集成方式。从而实现综合利用直接集成和间接集成两种方式的优点,充分发掘园

区分质供水、按需用水及部分用水单元消纳废水的潜力。

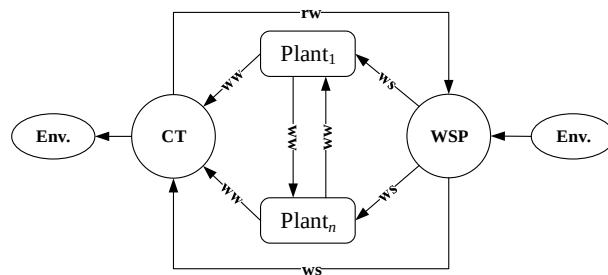


图3 园区水网络超结构
Fig.3 Superstructure of park scale water network

2.2 钢铁园区水网络多尺度优化模型

根据建立的单元、工序、园区三个尺度的水网络超结构,建立以水量平衡、典型污染物平衡为基础的多尺度水网络优化模型。模型中,成本类参数/变量采用单位为RMB/h,价格类参数/变量采用单位为RMB/m³,水流量采用单位为m³/h,污染物浓度为mg/L。

2.2.1 目标函数

基于全过程水污染控制策略,以综合用水成本最低为目标。其中,综合用水成本由供水成本、废水处理成本和废水排放费用3部分构成,定义如下:

$$TOC = \sum_{sw \in sw0lc} C_{sw} F_{sw} + \sum_{tu \in tu0lc} OC_{tu} F_{tu} + C_{dis} F_{dis} \quad (1)$$

式中,sw0lc为园区供水种类集合,tu0lc为园区废水处理单元集合,TOC为综合用水成本(RMB/h), C_{sw} 为供水价格(RMB/m³), F_{sw} 为供水量(m³/h), OC_{tu} 为废水处理成本(RMB/m³), F_{tu} 为废水处理量(m³/h), C_{dis} 为废水外排费用(RMB/m³), F_{dis} 为废水外排量(m³/h)。对于新建园区,或现有园区改造,如需要考虑新建相关水处理设施的投资,则需在综合用水成本中增加相关水污染控制单元投资成本 C_{inv} ,见方程(2)。

$$C_{inv} = IC_{tu} F_{tu}^{\alpha} \quad (2)$$

式中, IC_{tu} 为水污染控制单元投资参数, α 为单元规模效应参数(一般为0.6~0.8), F_{tu} 为废水处理量。考虑到在很多情况下,这两个参数很难获得,为简化计算,可以根据工程实践经验,采用单位废水处理量的经验投资数据进行估算,此时, $\alpha=1$, IC_{tu} 为水污染控制单元单位废水处理量的投资。使用投资成本方程(2)时,需要根据目标函数的定义,使用合适的年化投资参数(为简化计算可采用设备寿命期内,年平均等值投资的方式)。

2.2.2 涉水单元模型

涉水单元模型主要描述该单元的水量和污染物平衡,见方程(3)~(5)。

$$F_{out,i} = r_i F_{in} \quad (3)$$

$$\sum_j F_{out,i} C_{i,j} = F_{in,j} C_{in,j} \quad (4)$$

$$C_{i,j} = Re_{i,j} C_{in,j} \quad (5)$$

式中, F 代表流股流量, C 代表污染物浓度, 下标 in, out 分别代表涉水单元进口和出口流股, 下标 i 代表第 i 个出口流股, 下标 j 代表流股中第 j 个污染物。各出口流股 i 流量占进口流量比例 r_i 及各出口流股 i 中污染物 j 去除率 $Re_{i,j}$, 需根据相关涉水单元的特点, 建立模型通过计算获得, 或根据企业运行数据设定。其进水由工序水源 Sources 提供, 详见工序水网络模型。

2.2.3 工序水网络模型

工序内各涉水单元通过流股连接构成工序水网络, 并通过工序边界的水源和水阱集成到园区水网络中。通过水源、水阱及涉水单元水量和污染物的守恒关系描述, 即可建立工序水网络模型。

在一工序内, 对于供水管道提供的水源 ws , 其供水去向为工序内各用水单元 wu 及水处理单元 tu , 符号中 2 表示水流去向, 如 $ws2wu$ 表示水源向用水单元供水。相关水量平衡和污染物平衡如下:

$$F_{ws} = \sum_{wu \in WU} F_{ws2wu} + \sum_{tu \in TU} F_{ws2tu} \quad (6)$$

$$C_{ws2wu,j} = C_{ws2tu,j} = C_{ws,j} \quad (7)$$

在一工序内, 对于用水单元 wu , 其用水来源主要为水源 ws , 其他用水单元 wu' 排水和水处理单元 tu 产水, 且必须满足其用水水质的要求, 具体表达为方程(8)~(10)。

$$F_{wu,in} = \sum_{ws \in WS} F_{ws2wu} + \sum_{wu' \in WU} F_{wu'2wu} + \sum_{tu \in TU} F_{tu2wu} \quad (8)$$

$$F_{wu,in} C_{wu,in,j} = \sum_{ws \in WS} F_{ws2wu} C_{ws2wu,j} + \sum_{wu' \in WS} F_{wu'2wu} C_{wu'2wu,j} + \sum_{tu \in TU} F_{tu2wu} \quad (9)$$

$$C_{wu,in,j} \leq C_{wu,in,j}^{\max} \quad (10)$$

在一工序内, 用水单元 wu 排水去向为其他用水单元 wu' 、水处理单元 tu 和水阱 wd , 可表达为方程(11)~(14)。

$$F_{wu,out} = \sum_{wu' \in WU} F_{wu2wu'} + \sum_{tu \in TU} F_{wu2tu} + \sum_{wd \in WD} F_{wu2wd} \quad (11)$$

$$C_{wu2wu',j} = C_{wu,out,j} \quad (12)$$

$$C_{wu2tu,j} = C_{wu,out,j} \quad (13)$$

$$C_{wu2wd,j} = C_{wu,out,j} \quad (14)$$

水处理单元 tu 接收水源供水 ws 、用水单元 wu 排水, 处理后根据水质情况和设计用途, 提供给工序用水单元 wu 或排入水阱 wd 。当工序(如综合废水处理厂和供水厂)水处理单元产水, 如中水、软水、脱盐水等, 作为水源进入园区供水管道(或中间水道)。水处理单元进水来源

和排水去向相关的水量平衡和污染物平衡如下:

$$F_{tu,in} = \sum_{wu \in WU} F_{wu2tu} + \sum_{ws \in WS} F_{ws2tu} \quad (15)$$

$$F_{tu,in} C_{tu,in,j} = \sum_{wu \in WU} F_{wu2tu} C_{wu2tu,j} + \sum_{ws \in WS} F_{ws2tu} C_{ws,j} \quad (16)$$

$$F_{tu,out} = \sum_{wu \in WU} F_{tu2wu} + \sum_{wd \in WD} F_{tu2wd} + \sum_{sw \in SW} F_{tu2sw} \quad (17)$$

$$C_{tu2wu,j} = C_{tu,out,j} \quad (18)$$

工序内涉水单元排放废水进入下水道或中间水道两类水阱单元, 离开工序, 进入园区水网络, 相关的水量平衡和污染物平衡详见园区水网络超结构模型。

2.2.4 园区水网络模型

园区水网络通过园区尺度的供水、排水管路及中间水道连接各工序水源和水阱, 构成复杂的供排水网络。园区各类供水 sw (含废水)通过工序 p 的水处理单元 tu 处理达标后, 经供水管道(或中间水道)供各工序内涉水单元 wu/tu 使用; 各涉水单元产生废水除在工序内部分回用外, 其余排入下水道 ww 进入综合污水处理厂。园区水网络模型的重点为建立连接各工序的供水管道、中间水道各类供水的产生和去向, 以及园区下水道废水汇集各工序排水的水量平衡, 具体见方程(19)~(21):

$$F_{sw} = \sum_{p \in P} \sum_{tu \in TU} F_{tu2sw}^p \quad (19)$$

$$F_{sw} = \sum_{p \in P} \sum_{wu \in WU} F_{sw2wu}^p + \sum_{p \in P} \sum_{tu \in TU} F_{sw2tu}^p \quad (20)$$

$$F_{ww} = \sum_{p \in P} \sum_{wu \in WU} F_{wu2ww}^p + \sum_{p \in P} \sum_{tu \in TU} F_{tu2ww}^p \quad (21)$$

式中, p 代表工序, 符号中 2 表示水流去向, 如 $tu2sw$ 表示水处理单元产水作为园区供水, F_{tu2sw}^p 则表示工序 p 内水处理单元产水作为园区供水的水量。

2.2.5 园区水网络多尺度优化模型

方程(1)~(21)构成了钢铁园区水网络优化模型。由于水量和污染物浓度乘积形成的双线性项以及目标函数中设备投资的幂函数表达, 水网络优化模型是一个复杂的非线性优化问题(NLP)。此外, 还需根据园区水网络的特点, 增加描述工序水网络结构(工序内涉水单元连接关系约束)、园区水网络结构(工序间用水、排水连接关系), 以及园区各类用水、排水操作条件等的相关非等式约束方程。在涉水单元的选择以及涉水单元间是否建立连接, 还需要引入二元变量予以表达。在这种情况下, 水网络优化模型各方程中引入二元变量, 此时优化模型为MINLP问题。

3 钢铁园区水网络全局优化

基于所提出的钢铁工业园区水网络优化模型, 以国内一年产能为 500 万吨钢材的钢铁园区水网络为对象, 开展园区水网络全局优化方案研究。

3.1 问题定义

利用钢铁工业园区水网络优化方法和模型,以园区综合用水成本最低为目标,对园区水污染控制技术集成和节水减排方案进行研究,以期对园区水网络全局优化提供思路 and 参考。

3.2 园区水网络调研和分析

基于全过程水污染控制策略,开展调研和分析,主要内容包括:对园区生产概况(工艺流程、主要产品及产量等)及用水排水情况(新水用量、外排废水量、水平衡等)、各工序基本生产情况(如工艺流程、工序物料处理量、产品设计产量及实际产量、工序产品单位产量水耗、单位产量排水量等)进行调研,形成支持园区水网络优化的数据集,如园区水网络基本参数、用水单元基本参数、水处理单元基本参数和供水基本参数;综合钢铁园区水网络调研及典型节水控污技术的文献分析,确定焦化废水深度处理、高炉煤气干法除尘、中水深度处理提质替代新水、调整废水回用方式作为园区水污染控制和节水减排主要技术途径,并据此构建园区水网络超结构。

3.3 园区水网络超结构表达

基于园区水网络优化方法,对钢铁园区中典型涉水单元建立了统一的多出口单元模型,以描述园区各类典型涉水单元,如软闭环 IC、净环 IO、浊环 DO、直流用水 PU、产水过程 SU、耗水过程 DU、脱盐系统 DS 和废水处理单元 TU 等。并根据调研数据,建立了钢铁园区典型涉水单元模型的变量和参数。

对于钢铁生产,用于设备和产品冷却的净环和浊环是主要用水系统,用水量占园区总用水量的 80% 以上。由于净环水质较好,其排水可串接用于用水水质要求较低的用水单元(如浊环、直流用水、耗水单元等);而浊环排水则由于水质较差且含油,一般只能串接用于水质要求更低的一些直流用水和耗水过程;产水单元(如蒸汽冷凝水、工艺冷凝水等)排水则需根据具体水质情况,定义其串接使用方案,一般可设计其串接用于满足用水水质要求的各类用水单元;各用水系统的反洗水由于悬浮物(SS)过多,一般经沉淀处理(TU)后排下水道或用于浊环系统补水等水质要求不高的用水单元。根据以上钢铁园区工序用排水特点,基于园区水网络优化方法,构建了工序水网络超结构方案。对于需要考虑替代水污染控制技术的工序,则需在工序水网络超结构中增加相应的表达,如炼铁工序干法除尘替代湿法除尘。

为实现特种废水(焦化废水、冷轧废水、脱盐浓水等)的利用,在钢铁园区水网络超结构设计时,设计特种废水专用中间水道,连接特种废水产生工序和用水工序,

构建工序间水源-用阱的直接集成方式。同时,根据案例中钢铁园区供水和综合废水处理的中心式布局情况,设计了以综合废水处理厂和园区供水厂为中心的工序间供水-用水-排水的间接集成方式。

3.4 园区水网络优化模型

在案例中钢铁园区水网络优化模型建立过程中,主要的难点在于根据调研数据的情况,进行水网络优化模型的实例化,建立案例的目标方程和约束方程。在本工作中,主要目标是现有园区水网络的全局优化方案研究,因此,建立了由供水成本、废水处理成本和废水排放费用三部分构成的综合用水成本目标方程,未考虑投资成本;参照上文建立的钢铁园区水网络优化模型,建立了工序水网络、园区水网络和各类涉水单元的水量、水质平衡关系,作为等式约束方程;进一步,根据专家经验和园区水网络操作的具体情况,增加必要的非等式约束方程,以表达水网络操作的控制条件。如定义工序内最小串接用水量 F_{lo} 、最大串接用水量 F_{up} 和表达流股是否存在的二元变量 y ,并引入逻辑约束($F_{lo}y \leq F \leq F_{up}y$)加以实现。

由于园区水网络结构复杂,包含工序和涉水单元多,形成的优化模型为大型非线性非凸的 MINLP 问题,求解困难。为降低求解难度,设定各用水单元出水及水处理单元出水水质为调研的该类单元平均水质,此时,MINLP 模型简化为 MILP 模型。使用商业优化软件 GAMS^[18]进行建模,利用 CPLEX 求解器求解。

3.5 案例钢铁园区水网络优化

利用建立的钢铁园区水网络优化模型,以园区目前水网络操作参数及用排水水质控制指标为参考,分别考察单独采用水网络优化方法、过程节水技术(高炉煤气干法除尘替代湿法除尘)、先进废水处理技术(焦化废水深度处理、综合废水深度处理)、新的中水回用策略(中水与其他高质水混合作为净环补水)以及全过程水污染控制情景下的园区全局水网络优化,并对各方案园区用水指标进行对比分析。具体设计案例如下:Case 0:水网络当前状况;Case 1:当前水网络条件下的优化;Case 2:焦化废水采用深度处理条件下的水网络优化;Case 3:高炉煤气采用干法除尘条件下的水网络优化;Case 4:回用水用于净环补水条件下水网络优化;Case 5:全过程水污染控制方案 I 条件下的水网络优化;Case 6:全过程水污染控制方案 II 条件下的水网络优化。

其中,Case 5 和 Case 6 采用全过程水污染控制策略,即:焦化废水深度处理,出水回用;净环补水可使用新水和回用水;高炉煤气采用干法除尘工艺。不同的是,Case 5 综合废水未进行深度处理,Case 6 则采用综合

废水深度处理方法。各情景案例园区水网络优化结果见图4。各情景条件下,园区水网络优化计算结果见表1。由表和图可知,基于全过程水污染控制策略的钢铁园区水网络优化(Case 6),园区用水指标(综合用水成本、新水用量、新水成本在综合用水成本中占比)最好。与Case 0相比,综合用水成本、新水用量、新水成本在综合用水成本中占比分别降低27%, 72%和61%,详见图4(a)~4(c)。其中,综合废水深度处理产水替代新水、中水回用作为净环补水以及水网络优化方法的综合应用是产生这一结果的主要原因。

由表1可知,Case 1, Case 2, Case 3三种条件下,园区新水用量保持不变。因此,可确定Case 2和Case 3采用的节水减排技术并不能降低新水消耗,但与Case 0相比,综合用水成本和新水成本占比有一定的降低,这主要是由于:(1)深度处理后的焦化废水,水质仍无法达到新水标准,但其出水水质已满足部分用水点回用要求,可替代部分回用水,因此回用水量降低,相应的综合用水成本也有一定的降低;(2)高炉煤气湿法除尘用水对水质要求较低,其他用水点排水或回用水水质即可满足要求,并不需要消耗新水,因此采用干法除尘替代后,并不会影响新水用量。

由于在钢铁园区,净环用水是新水的主要用户,在回用水水质达标,且允许用于净环补水的条件下,可实现新水用量的大幅下降。与Case 0相比,Case 4新水用量降低48%,同时综合用水成本降低22%;Case 6综合废水深度处理产水($487 \text{ m}^3/\text{h}$)用于替代新水,使新水用量进一步至 $731 \text{ m}^3/\text{h}$ 。焦化废水深度处理后,出水并不能替代新水,且由于处理成本较高,采用该技术的方案(Case 5)综合用水成本与Case 4相比有一定增加。但采用焦化废水深度处理后,可消除以往由于焦化废水进入综合废水系统造成整个水系统运行不稳定的问题,这一点在制定水污染控制方案需要注意。

除了能得到优化的园区水网络基本用水指标(表1)外,通过水网络优化还可得到园区水网络涉水单元、工序及园区三个尺度优化的水网络结构参数和操作参数,可作为园区水网络结构和运行优化的参考数据。由于篇幅限制,本工作不做详细介绍。

4 结 论

当前国内钢铁企业面临巨大节水减排压力,且对水污染控制成本承受能力有限。如何从园区整体的角度

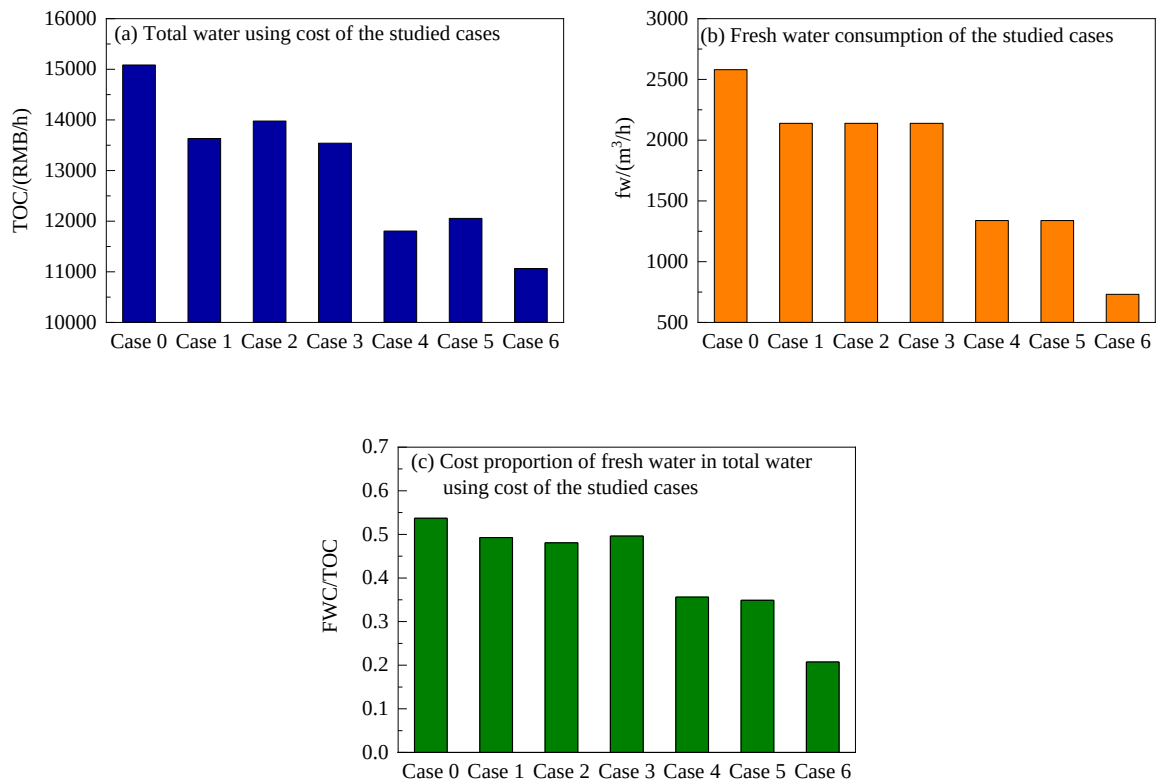


图4 各情景案例园区水网络优化结果

Fig.4 Optimal results of the water network in the studied steel park of the studied cases

表1 各情景案例园区水网络优化用水情况
Table 1 Optimal water using results of the studied cases

Case	fw/(m ³ /h)	rw/(m ³ /h)	dw/(m ³ /h)	TOC/(RMB/h)
0	2580	1151	24	15084
1	2139	1596	24	13633
2	2139	1378	24	13977
3	2139	1492	24	13540
4	1339	2356	24	11805
5	1339	2033	24	12055
6	731	2652	105	11065

Note: fw means fresh water, rw means reclaimed water, dw means desalted water.

出发,通过水污染控制技术集成以及节水减排策略的综合应用,构建综合用水成本可控的园区水网络全局优化方案是一个亟急需解决的问题。基于全过程水污染控制策略,提出了园区水网络多尺度建模方法,建立了钢铁工业园区水网络全局优化模型,利用数学规划方法来获得综合用水成本最低的园区水网络全局优化方案。以一年产 500 万吨钢材的典型钢铁工业园区为例,进行了园区水网络全局优化案例研究。案例研究结果表明,提出的钢铁园区水网络多尺度优化建模方法,可准确描述钢铁园区复杂的水网络及其多尺度特点,特别是引入中间水道表达工序间废水直接回用,简化了模型表达;案例研究表明由于综合废水深度处理产水替代新水、中水回用作为净环补水以及水网络优化方法的综合应用,采用全过程水污染控制策略的钢铁园区水网络优化方案,综合用水成本、新水用量及新水成本占比等指标与其他方案相比有较大幅度的降低(>20%);优化计算可得到单元、工序、园区三个尺度优化的水网络结构和操作参数。研究结果对于钢铁园区水污染控制技术集成和水网络优化方案的确定有重要参考价值,通过进一步的功能拓展,也可应用于其他类型工业园区水网络全局优化。

参考文献

[1] Suvio P, Van H A, Szabo M, et al. Water management for sustainable steel industry [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2012, 39 (4): 263–269.

[2] 武建国, 程继军. 钢铁企业水系统优化探讨 [J]. 冶金设备, 2018, 241: 76–80.

Wu J G, Cheng J J. Discussion on the optimization of water system in iron and steel enterprises [J]. Metallurgical Equipment, 2018, 241: 76–80.

[3] 曹宏斌. 钢铁水污染全过程控制技术与应用 [C]//中国金属学会. 第十二届中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2019: 165.

Cao H B. Whole process pollution control technology and its application in water pollution control in iron and steel industry

[C]//The Chinese Society for Metals. Proceedings of the 12th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019: 165.

[4] Khor C S, Chachuat B, Shah N. Optimization of water network synthesis for single-site and continuous processes: milestones, challenges, and future directions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(25): 10257–10275.

[5] Wang Y P, Smith R. Wastewater minimization [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(7): 981–1006.

[6] 白洁, 冯霄. 节水减排的水系统集成优化研究进展 [J]. 计算机与应用化学, 2008, 10: 1215–1219.

Bai J, Feng X. Research progress on water system integration [J]. Computers and Applied Chemistry, 2008, 10: 1215–1219.

[7] Takama N, Kuriyama T, Shiroko K, et al. Optimal planning of water allocation in industry [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1980, 13(6): 478–483.

[8] 杨友麒, 贾小平, 石磊. 水网络与虚拟水的过程系统工程研究进展 [J]. 化工学报, 2015, 66(1): 32–51.

Yang Y Q, Jia X P, Shi L. Progress of process systems engineering for water network and virtual water studies [J]. CIESC Journal, 2015, 66(1): 32–51.

[9] 杨友麒, 庄芹仙. 炼油化工企业节水减排的进展和存在问题 [J]. 化工进展, 2012, 31(12): 2780–2785.

Yang Y Q, Zhuang Q X. Water conservation and waste water reduction of chemical and refinery enterprises: progresses and problems [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(12): 2780–2785.

[10] Bagajewicz M J, Faria D C. On the appropriate architecture of the water/wastewater allocation problem in process plants [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2009, 26(9): 1–20.

[11] Putra Z A, Amminudin K. Two-step optimization approach for design of a total water system [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47: 6045–6057.

[12] Castro E I, Ortega J M, González M, et al. Optimal reconfiguration of multi-plant water networks into an eco-industrial park [J]. Computers & Chemical Engineering, 2012, 44: 58–83.

[13] Lim S R, Park J M. Interfactory and intrafactory water network system to remodel a conventional industrial park to a green eco-industrial park [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49: 1351–1358.

[14] Tian J R, Zhou P J, Lü B. A process integration approach to industrial water conservation: a case study for a Chinese steel plant [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 86: 682–687.

[15] Zhang K L, Zhao Y H, Cao H B, et al. Optimization of the water network with single and double outlet treatment units [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56: 2865–2871.

[16] Zhang K L, Zhao Y H, Cao H B, et al. Multi-scale water network optimization considering simultaneous intra- and inter-plant integration in steel industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 663–675.

[17] Cao H B, Zhao H, Zhang D, et al. Whole-process pollution control for cost-effective and cleaner chemical production—a case study of the tungsten industry in China [J]. Engineering, 2019, 5 (4): 768–776.

[18] GAMS Development Corporation. Gams user guide [EB/OL]. [2020-10-10]. https://www.gams.com/latest/docs/UG_MAIN.html.