

该书第一版获得“2010年度中国石油和化学工业联合会科技进步一等奖”

水系统集成优化

——节水减排的系统综合方法

冯 霄 等著

The Second Edition

第二版

■ SHUIXITONG JICHENG YOUHUA

JIESHUI JIANPAI DE XITONG ZONGHE FANGFA ■



化学工业出版社



该书第一版获得“2010年度中国石油和化学工业联合会科技进步一等奖”

水系统集成优化

——节水减排的系统综合方法

冯霞

藏书章

王黎 邓春 著

The Second Edition

第二版

■ SHUIXITONG JICHENG YOUHUA
JIESHUI JIANPAI DE XITONG ZONGHE FANGFA ■



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统介绍了水系统集成的理论、方法及应用。介绍了单杂质水系统基于图示法的水夹点技术和常规水网络的废水直接回用系统的数学规划方法,并给出了考虑网络结构、网络柔性及不确定性等因素时的集成策略。阐述了具有常规水网络的废水再生循环和再生回用系统的优化方法。详细阐述了具有中间水道的水网络结构的水系统集成优化新方法,并给出了废水直接回用系统、废水再生循环系统和废水再生回用系统的数学规划方法以及调优策略。通过水夹点图分析了如何合理设置节水工艺以取得进一步节水减排效果的方法。结合作者的理论与工业实践,给出了八个水系统集成优化的工业应用实例。作者还将水系统集成技术应用于市政用水网络的集成优化中。阐述了考虑作为能量载体的蒸汽和循环冷却水的节约方法;阐述了水系统与能量系统同步优化的多目标规划数学方法和实例分析方法。最后简要介绍了一些典型的废水再生或处理技术。

本书不仅可作为工程技术人员节水减排的参考书,也可作为化工、环境和土木及其相关专业学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

水系统集成优化:节水减排的系统综合方法/冯霄等著.
2版. —北京:化学工业出版社,2012.3
ISBN 978-7-122-13414-1

I. 水… II. 冯… III. 节约用水-研究 IV. TU991.64

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第028227号

责任编辑:袁海燕 陈丽
责任校对:蒋宇

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张26 字数647千字 2012年5月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:85.00元

版权所有 违者必究

《水系统集成优化》的第一版于2008年1月正式出版,受到了来自国内大专院校、科研院所和企业的广泛关注。在化学工业出版社的大力支持下,该书于2010年10月获得了中国石油和化学工业联合会所颁发的“中国石油和化学工业科学技术奖科技进步一等奖”。

随着水系统集成技术的发展和我们的研究工作的拓展与深入,希望为读者系统地介绍水系统集成优化的技术前沿和最新进展。因此,在该书第一版的基础上,我们进行了补遗、修订和撰写工作,并调整了部分章节的内容编排,特别是在改进极限水侧形的水网络优化、多水源直接回用和再生循环水系统目标和网络确定、总水网络合成、间歇用水网络的集成以及循环水系统的最优设计等方面进行了有益扩充,使得水系统集成理论、方法与应用的体系和内容更加完整,主要内容也从第一版的13章扩充到了第二版的16章,汇集成了《水系统集成优化》第二版。

本书力图从图示法和数学规划方法两个方面系统阐释水系统集成与优化技术的优化原理和计算技术,使读者能够理解和掌握水系统集成技术的基本原理和应用方法。在介绍了各种优化方法之后,都辅以相应的实例或工程案例来详细阐明其工程应用。因而,本书不仅可以作为水系统集成优化的教科书,还适用于入门研究、工业实践和继续教育的课程。

《水系统集成优化》第二版的具体结构如下:

第1章介绍了水资源的利用现状和水系统集成的主要方法与技术。

第2章阐述了水系统集成方法中涉及的基本概念,为读者顺利理解水系统集成理论和方法提供帮助。

第3章阐述了水夹点方法在单杂质水系统优化中的应用,重点补充了极限水侧形改进的优化方法以及多水源网络目标的确定和网络的设计方法。

第4章阐述了单杂质废水再生循环水系统的水夹点法,补充了改进的问题表法以确定多水源再生循环水网络的目标值,阐述了总水网络的合成方法。

第5章阐述了单杂质废水再生回用水系统的水夹点法。

第6章阐述了多杂质废水直接回用水系统的最优常规水网络设计方法,并着重介绍了水网络结构的简化、水网络结构的柔性和考虑不确定性的水系统集成方法。

第7章阐述了多杂质废水再生循环的最优常规水网络设计方法。

第8章阐述了多杂质废水再生回用的最优常规水网络设计方法。

第9章系统地阐述了具有中间水道的水网络的集成和优化方法。

第10章介绍了通过改变工艺进行节水减排的方法,以及通过图像进行表征的方法。

第11章通过炼油、化工、冶金、造纸和食品行业水系统优化的实例,阐述了水系统集成优化方法在工业中的应用。

第12章阐述了间歇用水系统集成优化的方法,重点介绍了中央储罐、中央废水处理和

间歇操作周期的优化方法。

第 13 章以市政用水系统优化为例，阐述了半连续的间歇用水系统优化方法。

第 14 章介绍了作为能量载体的用水系统优化，着重阐述了循环冷却水系统的优化方法。

第 15 章考虑水系统的能量性能，介绍了在水系统集成时综合考虑能量性能的优化方法，重点阐述了水系统与能量系统同步优化的多目标规划数学方法。

第 16 章简要介绍了目前现有的废水再生处理技术。

在第一版的基础上，本书第二版的作者分工如下。

第 1 章：刘永忠、冯霄；

第 2 章：冯霄；

第 3 章：冯霄、邓春；

第 4 章：冯霄、邓春；

第 5 章：冯霄；

第 6 章：冯霄，刘永忠，沈人杰；

第 7 章：冯霄；

第 8 章：冯霄；

第 9 章：冯霄，刘永忠，沈人杰；

第 10 章：冯霄；

第 11 章：冯霄；

第 12 章：刘永忠；

第 13 章：刘永忠；

第 14 章：冯霄、沈人杰；

第 15 章：冯霄；

第 16 章：王黎；

附录：刘永忠、沈人杰。

第二版全书由冯霄和沈人杰统稿。本书第二版的撰写还得到了李冠华硕士、雷哲硕士和董伟硕士等同学的帮助，特此致谢。

本书的工作还得到国家自然科学基金重点项目“耦合传递过程的归一化系统集成理论及其应用研究”（20936004）的资助，在此表示感谢。也恳请读者对本书的第二版提出宝贵意见。

著 者
2011. 12

水系统集成优化

——节水减排的系统综合方法

第一版前言

减少资源与能源的消耗和浪费是目前国际工业界面临的重要挑战之一。水资源的高效综合利用和工业废水减排是中国工业节水工作的当务之急。

长期以来,水作为工业废弃物和废热的载体,工业界一直将其看作是一种低值商品。然而,在地球淡水资源总量基本保持不变的前提下,世界人口在 20 世纪增长了近 3 倍,淡水消耗量增加了约 6 倍,工业用水增加了 26 倍,水资源短缺的问题日益严重。同时,工业和城市化的迅猛发展导致废水排放和污染又吞食了大量可供人类利用的水资源。目前全世界可供人类使用总量 1/3 的淡水资源受到污染,水资源利用和环境污染的矛盾日益突出。水资源利用和废水排放不仅影响工业和城市的发展,也成为制约国民经济和社会可持续发展的主要因素之一。

化工、冶金、能源、轻工、食品和制药等过程工业和城市用水是水资源的需求大户,同时也是废水产生和排放的主要源头。常规的工业和城市用水节水策略主要通过直观定性分析,通常是着眼于单个用水过程、器具或局部用水网络,通过改进单个和局部的用水过程达到节水的目的。这种基于局部和定性的方法只能达到有限的节水要求,不能使整个用水系统的水资源利用和废水的重复再利用达到最优。而水系统的集成优化技术是将整个用水系统视为一个有机的整体,系统和综合地合理分配各用水过程的水量 and 水质,通过定量计算使全系统的水重复利用率达到最大最优,同时使废水的排放量达到最小最优。水系统集成优化技术可以在现有水处理和水利用技术条件下使用水系统取得最大的节水效果和经济效益。

水系统的集成优化技术是 20 世纪 80 年代出现,到 90 年代中期发展起来的可实现用水系统节水减排的一种重要的新方法。该方法可用于现有用水系统的分析、新用水系统的设计和现有用水系统的改造。

本书作者自 2000 年起涉足水系统集成优化技术的理论与工业应用。在理论研究方面,在前人研究工作的基础上,使水系统集成的理论和方法更趋于系统、完善和深入;在实际应用方面,开展了深入系统的研究和开发工作,已将该技术成功地应用于国内大型炼油、石化和化工企业的节水优化中,取得了显著的社会效益和经济效益。自 2000 年以来,先后在齐鲁石化公司、兰州石化公司、乌鲁木齐石化公司、辽阳石化公司、锦州石化公司、锦西石化公司、大庆石化公司、陕西渭河煤化工集团公司和西安西化热电化工公司等二十余家国内大型企业开展了卓有成效的节水改造研究项目。以齐鲁石化公司用水优化项目为例,针对该公司的烯烃厂和氯碱厂进行水系统的集成优化,取得了节约新鲜水 301 万吨/年,减少污水排放量 301 万吨/年的节水减排效益,直接经济效益达 1043.66 万元/年。水系统集成技术已经从石化和化工行业推广到更广的过程工业(例如冶金、造纸、食品行业等)和城市用水系统。本书是作者在此方面理论研究和开发应用工作的总结。

本书系统介绍了水系统集成的理论、方法与应用,具体结构如下。

第 1 章介绍了节水减排的意义和技术途径以及水系统集成的主要方法与技术。

第 2 章给出了水系统集成方法中的一些基本概念,使读者易于理解后面章节的内容。

第3章介绍了单杂质水系统中基于图示法的水夹点技术,包括废水直接回用、废水再生循环、废水再生回用系统目标值的确定和网络的设计方法。

第4章针对具有常规水网络的废水直接回用系统,基于数学规划模型,给出了考虑网络结构、网络柔性及不确定性等因素时的集成策略。

第5章针对具有常规水网络的废水再生循环系统,基于数学规划模型,分析了各参数对最优结果的影响。

第6章针对具有常规水网络的废水再生回用系统,基于数学规划模型,通过实例给出计算和分析方法。

第7章提出具有中间水道的水网络结构,并给出废水直接回用系统、废水再生循环系统和废水再生回用系统的超结构和数学规划模型以及调优的策略。

第8章通过水夹点图示法阐述了合理设置节水工艺以取得进一步节水减排效果的分析方法。

第9章阐述了八个水系统集成优化方法的工业应用实例。

第10章阐述了水系统集成技术在市政用水网络优化中的理论和应用。

第11章阐述了作为能量载体的蒸汽和循环冷却水的节水方法。

第12章阐述了水系统与能量系统同步优化的多目标规划数学模型和计算分析实例。

第13章简单介绍了废水再生或处理技术。

本书的编写分工为:

第1章:刘永忠、冯霄;

第2章:冯霄;

第3章:冯霄;

第4章:冯霄、刘永忠、沈人杰;

第5章:冯霄;

第6章:冯霄;

第7章:冯霄、沈人杰、刘永忠;

第8章:冯霄;

第9章:冯霄;

第10章:刘永忠;

第11章:冯霄、沈人杰;

第12章:冯霄;

第13章:王黎;

附录:刘永忠、沈人杰。

本书不仅可作为工程技术人员节水减排的参考书,也可作为化工、环境和土木及其相关专业学生的教材。

本书的工作得到了王斌硕士、曹殿良硕士、郑雪松硕士、白洁硕士、马航硕士、李育才硕士、王会民硕士、王宁生硕士、段海涛硕士、张进治硕士、张镇硕士、钱锋硕士等人的帮助,特此致谢。

本书的工作还得到国家自然科学基金(20376066和20436040)的资助,在此表示感谢。由于作者学识有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正,以利日后之修订。

著 者
2008.1

主要符号表

英文字母

$c^{\text{arbitrary}}$	任意给定的最大浓度, mg/L
$c^{\text{D,max}}$	最大允许排放浓度, mg/L
C^{pinch}	夹点浓度, mg/L
$C^{\text{a}}_{\text{pinch}}$	夹点之上限制点的浓度, mg/L
$C^{\text{b}}_{\text{pinch}}$	夹点之下限制点的浓度, mg/L
C^{C}_{R}	限制再生浓度的点所对应的杂质浓度, mg/L
C^{D}_{s}	废水道 D 中杂质 s 的浓度, mg/L
C^{F}_{R}	限制再生水 (新鲜水) 流率的点所对应的杂质浓度, mg/L
$C^{\text{in}}_{j,s}$	用水单元 j 杂质 s 的进口浓度, mg/L
$C^{\text{in}}_{\text{R},s}$	再生单元杂质 s 的进口 (再生前) 浓度, mg/L
$C^{\text{in},*}_{\text{R}}$	最优再生浓度, mg/L
C^{in}_{T}	水处理过程的进口浓度, mg/L
$C^{\text{in,max}}_{j,s}$	用水单元 j 杂质 s 的极限进口浓度, mg/L
$C^{\text{in},v}_{j,s}$	区间 v 中单元 j 的杂质 s 出口浓度, mg/L
$C^{l,\text{in}}_{j,s}$	在第 l 个时间间隔中用水单元 j 杂质 s 的进口浓度, mg/L
$C^{l,\text{in,max}}_{j,s}$	第 l 个时间间隔中用水单元 j 杂质 s 的极限进口浓度, mg/L
$C^{l,\text{out}}_{j,s}$	第 l 个时间间隔中用水单元 j 杂质 s 的出口浓度, mg/L
$C^{l,\text{out,max}}_{j,s}$	第 l 个时间间隔中用水单元 j 杂质 s 的极限出口浓度, mg/L
$C^{\text{out}}_{j,s}$	用水单元 j 杂质 s 的出口浓度, mg/L
$C^{\text{out}}_{\text{R},s}$	再生单元杂质 s 的出口 (再生后) 浓度, mg/L
$C^{\text{out},c}_{\text{R}}$	临界再生浓度, mg/L
$C^{\text{out}}_{\text{T}}$	水处理过程的出口浓度, mg/L
$C^{\text{out,max}}_{j,s}$	用水单元 j 杂质 s 的极限出口浓度, mg/L
$C^{\text{out},v}_{j,s}$	区间 v 中单元 j 的杂质 s 出口浓度, mg/L
C^v	区间 v 的上界浓度, mg/L
C^{v-1}	区间 v 的下界浓度, mg/L
C^{W}	新鲜水的浓度, mg/L
$C^{\text{WM}}_{m,s}$	中间水道 m 中杂质 s 的浓度, mg/L
$C^{\text{new}}_{\text{p}}$	迁移夹点时增加的热容, kW
$C^{\text{old}}_{\text{p}}$	原夹点处的热容, kW

$Cost_{opt}$	总的操作费用, \$/h
$Cost_r$	第 r 股外部水源的价格, \$/t
$Cost_r^{Prioritized}$	第 r 股外部水源的优先成本, \$/t
d	用水单元操作时长, h
$dF_{i,j}$	扰动下用水单元 i 供给用水单元 j 的调节水量, t/h
$dF_{j,k}$	扰动下用水单元 j 排至用水单元 k 的调节水量, t/h
dF_j^D	扰动下用水单元 j 排放的废水调节量, t/h
dF_j^W	扰动下用水单元 j 消耗的新鲜水调节量, t/h
$dM_{j,s}$	用水单元 j 杂质 s 的杂质扰动负荷, g/h
E	单位时间内所花费的成本
e	表示单位成本
ef	冷却塔的效率
$F_{i,j}$	用水单元 i 供给用水单元 j 的水量, t/h
$F_{j,R}$	用水单元 j 排至再生单元的水量, t/h
$F_{R,j}$	再生单元供给用水单元 j 的水量, t/h
F_j^D	用水单元 j 排出的废水（排到废水道）水量, t/h
F_R^D	再生单元 R 的排放废水量, t/h
F^D	废水流股的总流率, t/h
F_m^{in}	进中间水道的水的流率, t/h
F_j^{in}	用水单元 j 的入口流率, t/h
$F_j^{in,lim}$	用水单元 j 的极限进口流率, t/h
$F_j^{out,lim}$	用水单元 j 的极限出口流率, t/h
F_j^{loss}	用水单元 j 水损失的流率, t/h
F_j^{gain}	用水单元 j 水生成的流率, t/h
F_j^{out}	用水单元 j 的出口流率, t/h
F_{pinch}	夹点之上所需要的流率, t/h
$F_{m,i}^{in}$	冷却器 i 由入口水道直接到中间水道的热容流率, kW/°C
$F_{out,i}^{in}$	冷却器 i 由入口水道直接到出口水道的热容流率, kW/°C
$F_{i,j}^l$	第 l 个时间间隔中用水单元 i 供给过程 j 的水量, t/h
$F_{j,k}^l$	第 l 个时间间隔中用水单元 j 排至过程 k 的水量, t/h
$F_j^{l,D}$	第 l 个时间间隔中用水单元 j 排放的废水量, t/h
F_j^{lim}	用水单元 j 的极限流率, t/h
$F_j^{l,W}$	第 l 个时间间隔中用水单元 j 消耗的新鲜水量, t/h
$F_{out,i}^m$	冷却器 i 的由中间水道直接流到出口水道的热容流率, kW/°C
$F_{m,j}^{MP}$	中间水道 m 供给用水单元 j 的水量, t/h
F_j^{out}	用水单元 j 的出口流率, t/h
F_m^{out}	出中间水道的水的流率, t/h
$F_{j,n}^{PM}$	用水单元 j 排至中间水道 n 的水量, t/h
F_{min}^Q	全网络系统最小冷却水热容流率, kW/°C

$F_{F,i}^Q$	冷却器 i 需要的来自冷却塔的冷却水的热容流率, kW/°C
$F_{i,j}^Q$	冷却器 i 提供给冷却器 j 的冷却水的热容流率, kW/°C
$F_{i,D}^Q$	冷却器 i 排向冷却塔的冷却水的热容流率, kW/°C
$F_{j,k}^Q$	冷却器 j 提供给冷却器 k 的冷却水的热容流率, kW/°C
$F_{\min}^R$	最小再生水流率, t/h
$F_{\min}^v$	浓度区间边界 v 处的理论最小流率, t/h
$F_{i,\min}^v$	单元 i 在浓度区间 v 中所需的最小水流率, t/h
$F_{\min}^W$	系统的最小新鲜水用量, t/h
F_j^W	用水单元 j 的新鲜水用量, t/h
$F_{j,\min}^W$	用水单元 j 的最小新鲜水用量, t/h
$F_{\text{cum},m}^{WM}$	中间水道内的累积水量, t/h
$F_{n-1,n}^{WM}$	中间水道 n 排至中间水道 n 的水量, t/h
F^R	再生水流率, t/h
H	间歇用水系统操作周期时长, h
G_i	用水单元 i 中各杂质组分序号的乘积
$\max(T_i^{\text{out},\max})$	所有的冷却器中极限出口温度最大值, °C
$M_{j,s}$	用水单元 j 中移出杂质 s 的质量负荷, g/h
M_j^{net}	用水过程 j 净杂质负荷, g/h
M_j^{loss}	水损失用水过程的虚拟杂质负荷与净杂质负荷的差值, g/h
M_j^{gain}	水生成用水过程的虚拟杂质负荷与净杂质负荷的差值, g/h
M_{pinch}	夹点处的杂质负荷, g/h
M_{pinch}^a	夹点之上限制点处的杂质负荷, g/h
M_{pinch}^b	夹点之下限制点处的杂质负荷, g/h
M_R^C	限制再生浓度的点所对应的杂质负荷, g/h
M_R^F	限制再生水（新鲜水）流率的点所对应的杂质负荷, g/h
$M_{j,s}^l$	第 l 个时间间隔中过程 j 杂质 s 的杂质负荷, g/h.
M_s^R	杂质 s 再生时的杂质质量负荷, g/h
ΔM^v	区间 v 内的杂质总负荷, g/h
ΔM_{cum}^v	区间边界处的累积负荷, g/h
$M_{j,s}^v$	区间 v 中单元 j 的杂质 s 负荷, g/h
NS	用水单元最大排水流股数
$O_{i,s}$	用水单元 i 中杂质 s 在浓度序列中的序号
Q	间歇用水过程水量, t
Q_{act}	冷却塔实际移除的热负荷, kW
Q_i	冷却器单元 i 要传递的热负荷, kW
$Q_{\max}$	冷却塔最大可以移除的热负荷, kW
Q_{pinch}	夹点以下热总负荷, kW
$Q_{i,j}^k$	物流 i 与物流 j 在温度区间 k 中的换热量, kW
$Q_{i,k}^{k,\max}$	物流 i 在温度区间 k 中能够提供的最大热量值, kW

$Q_j^{k, \text{cool}}$	物流 j 在温度区间 k 中所需的冷却公用工程用量, kW
$Q_j^{k, \text{hot}}$	物流 j 在温度区间 k 中所需的加热公用工程用量, kW
$Q_j^{k, Q}$	物流 j 在温度区间 k 中所需的加热量, kW
Q_i^v	区间 v 中单元 i 的热负荷, kW
t	时刻, h
T_m	中间水道的温度, °C
T_{pinch}	夹点温度, °C
T_i^{in}	冷却器 i 的入口温度, °C
$T_i^{\text{in}, \text{max}}$	冷却器单元 i 的极限进口温度, °C
$T_i^{\text{in}, \text{new}}$	冷却器单元 i 在迁移夹点后的进口温度, °C
$T_i^{\text{in}, \text{old}}$	冷却器单元 i 在原夹点时的进口温度, °C
$T_{\text{pinch}}^{\text{new}}$	迁移后的夹点温度, °C
$T_{\text{pinch}}^{\text{old}}$	原夹点温度, °C
$T_{m, i}^{\text{out}}$	冷却器 i 的流进中间水道的温度, °C
T_i^{out}	冷却器 i 的出口温度, °C
$T_i^{\text{out}, \text{max}}$	冷却器 i 的极限出口温度, °C
$T_i^{\text{out}, \text{new}}$	冷却器单元 i 在迁移夹点后的出口温度, °C
$T_i^{\text{out}, \text{old}}$	冷却器单元 i 在原夹点时的出口温度, °C
T^v	对应温度区间 v 间隔处的温度, °C
$T_i^{v, \text{in}}$	区间 v 中单元 i 的进口温度, °C
$T_i^{v, \text{out}}$	区间 v 中单元 i 的出口温度, °C
u	连续变量的 Heaviside 函数
u'	离散变量的 Heaviside 函数
WM	中间水道级数
$y_{i, j}$	描述用水单元 i 是否给用水单元 j 供水的 0, 1 变量
$y_{j, n}^{\text{PM}}$	描述用水单元 j 与中间水道 n 之间是否存在连接的 0, 1 变量
y_j^{D}	描述用水单元 j 与废水道之间是否存在连接的 0, 1 变量
y_n^{M}	描述中间水道 n 是否存在的 0, 1 变量
y_j^{CP}	描述用水单元 j 是否增加系统控制数的 0, 1 变量
$y_{\text{F}, j}^{\text{Q}}$	描述冷却器 j 是否使用来自冷却塔的冷却水的 0, 1 变量
$y_{i, j}^{\text{Q}}$	描述冷却器 i 是否给冷却器 j 提供冷却水的 0, 1 变量
$y_{j, \text{D}}^{\text{Q}}$	描述冷却器 j 是否向冷却塔排水的 0, 1 变量
希腊字母	
Δ	Kronecker 符号
δ	Kronecker 符号
λ_s^{R}	杂质 s 的再生加权因子
η	节水因子
Ω	新鲜水替代系数
ξ, ζ	常数

上标

D	废水（废水道）
e	结束
G	用水损失
in	进口
L	损失
lim	极限
max	最大值
min	最小值
out	出口
P	操作周期指标
R	再生
RI	再生单元的进口
RO	再生单元的出口
s	开始
v	区间
W	新鲜水（新鲜水道）
WM	中间水道
'	扰动

下标

AR	再生后
BR	再生前
cum	总和
F	新鲜水
i	用水单元编号
j	用水单元编号
k	用水单元编号
min	最小值
pinch	夹点
R	再生单元
s	杂质编号
S	缓冲储罐代号
T	缓冲储罐代号
U	用水系统
V	缓冲储罐

集合

C	杂质集合
P	用水单元集合
R	再生单元的集合
T	水处理单元的集合，间歇用水过程进出水时刻集合
WM	中间水道集合

CONTENTS

主要符号表

1 绪论	001
1.1 水资源利用的挑战与对策	001
1.1.1 水资源的危机	001
1.1.2 水资源的消耗	004
1.1.3 水污染的加剧	005
1.1.4 面临的挑战和对策	006
1.2 节水减排的技术途径	007
1.3 水系统集成的方法与技术	009
参考文献	011
2 基本概念	013
2.1 用水单元模型	013
2.1.1 用水单元物理模型	013
2.1.2 水量和杂质的质量衡算	013
2.2 水源与水阱	014
2.3 极限水数据	014
2.4 极限水曲线与极限水复合曲线	015
2.4.1 极限水曲线	015
2.4.2 极限水复合曲线	016
2.5 供水线与水夹点	017
2.6 用水单元的分解	017
2.7 废水直接回用、再生回用与再生循环	018
2.7.1 废水直接回用	018
2.7.2 废水再生回用	018
2.7.3 废水再生循环	019
2.8 图示法与数学规划法	019
参考文献	019
3 单杂质废水直接回用水系统的水夹点技术	020
3.1 废水直接回用系统最小新鲜水目标的确定	020

3.1.1	图示法	020
3.1.2	问题表法	020
3.2	夹点的意义	022
3.3	废水直接回用水网络的设计	022
3.3.1	用水网络的描述	022
3.3.2	最大传质推动力法	024
3.3.3	最小匹配数法	026
3.4	改进的极限水曲线	030
3.4.1	具有水损失的用水过程	030
3.4.2	具有水生成的用水过程	031
3.4.3	具有多股水源进料的用水过程	032
3.5	同时确定直接回用水系统目标值和网络设计	033
3.5.1	单水源固定流率问题	033
3.5.2	单水源固定杂质负荷问题	037
3.5.3	多水源固定流率问题	039
3.6	多源水网络目标值的确定	041
	参考文献	047

4 单杂质废水再生循环水系统的水夹点法 048

4.1	废水再生循环系统最小新鲜水和再生水目标的确定	048
4.1.1	三种典型的用水系统	048
4.1.2	再生循环系统的最小新鲜水目标值	049
4.1.3	再生循环系统的最优再生后浓度	050
4.1.4	再生循环系统的最小再生水流率目标值	053
4.1.5	再生循环系统的最优再生浓度	054
4.1.6	再生后浓度对再生浓度的影响	057
4.1.7	最小再生水流率和最优再生浓度的计算公式	059
4.1.8	采用问题表法确定再生循环系统的目标值	062
4.2	废水再生循环水网络的设计	063
4.3	废水零排放理论及应用	066
4.3.1	不考虑水损失的零排放水系统	066
4.3.2	考虑水损失的零排放水系统	067
4.3.3	某氧化铝厂水系统零排放分析	073
4.4	改进问题表法确定多水源再生循环水网络目标值	076
4.5	总水网络合成	079
4.5.1	同时确定再生循环水网络目标值和网络设计	079
4.5.2	确定最小处理流率目标值	082
4.5.3	总水网络合成步骤	084
4.5.4	案例分析	085
	参考文献	090

5 单杂质废水再生回用水系统的水夹点法 092

5.1	完全再生回用与部分再生回用	092
-----	---------------------	-----

5.2	用水系统 1 的优化	092
5.3	用水系统 2 的优化	095
5.4	用水系统 3 的优化	096
5.5	通用计算公式	098
5.6	问题表法	099
5.7	废水再生回用水网络的设计	100
	参考文献	104

6 多杂质废水直接回用的最优常规水网络 105

6.1	概述	105
6.2	废水直接回用常规水网络的超结构	105
6.3	单杂质水系统的设计方法	106
6.3.1	有关定义	106
6.3.2	最优性必要条件	106
6.3.3	算法设计	107
6.4	单杂质系统与多杂质系统的比较	108
6.5	多杂质水系统的数学规划法	109
6.5.1	非线性数学模型	109
6.5.2	数学模型的求解	110
6.6	考虑最简网络结构的水系统集成	113
6.6.1	优化新鲜水用量	113
6.6.2	优化连接数	114
6.6.3	数学模型的求解	116
6.6.4	实例	116
6.7	考虑系统结构柔性的水系统集成	117
6.7.1	水网络柔性的评价指标	118
6.7.2	水网络系统的柔性化合成方法	118
6.7.3	实例研究	119
6.8	考虑不确定性的水系统集成	122
6.8.1	水网络的扰动工况及其超结构	122
6.8.2	考虑不确定性的用水网络的优化设计步骤	123
6.8.3	模型的求解	126
6.8.4	实例分析	126
	参考文献	133

7 多杂质废水再生循环的最优常规水网络 134

7.1	概述	134
7.2	废水再生循环常规水网络的超结构	134
7.2.1	用水单元的假定	134
7.2.2	再生循环网络的超结构	134
7.3	废水再生循环常规水网络的数学模型	135
7.3.1	优化新鲜水用量	135

7.3.2 优化再生水流率	137
7.3.3 优化杂质再生负荷	138
7.4 实例研究	139
参考文献	144

8 多杂质废水再生回用的最优常规水网络 145

8.1 概述	145
8.2 用水单元分解对水系统的影响	146
8.2.1 用水单元按质量负荷分解	146
8.2.2 用水单元按浓度区间分解	147
8.2.3 分解对再生回用水系统的影响	147
8.3 废水再生回用常规水网络的超结构	149
8.4 废水再生回用常规水网络优化的数学模型	150
8.4.1 新鲜水流率的优化	150
8.4.2 再生水流率的优化	152
8.4.3 再生杂质负荷的优化	152
8.4.4 模型的应用	153
8.5 实例分析	153
参考文献	162

9 具有中间水道的水网络集成 163

9.1 具有中间水道水网络结构的提出及特点	163
9.1.1 常规水网络存在的问题	163
9.1.2 具有中间水道水网络的结构	163
9.1.3 具有中间水道水网络的特点	164
9.2 废水直接回用水网络的数学规划法	164
9.2.1 水网络的超结构	164
9.2.2 数学优化模型的建立	165
9.2.3 实例	167
9.3 多杂质单中间水道用水网络的简化设计方法	173
9.3.1 中间水道浓度的确定	173
9.3.2 各用水单元节水因子的计算	178
9.3.3 各单元进水流率分配	179
9.3.4 实例	180
9.4 基于经验规则的网络调优设计方法	181
9.4.1 问题的提出	181
9.4.2 调优设计的步骤与方法	182
9.4.3 实例	188
9.5 废水再生循环水网络	195
9.5.1 水网络结构	195
9.5.2 水网络的超结构	196
9.5.3 数学优化模型的建立	197

9.5.4 实例	199
9.6 具有中间水道的再生循环水网络的简化设计方法	201
9.6.1 再生浓度的确定	201
9.6.2 简化设计方法	203
9.6.3 实例	204
9.7 废水再生回用水网络	205
9.7.1 一般优化模型	206
9.7.2 考虑单元分解的中间水道再生回用水网络优化	211
9.7.3 单元并联分解的数学模型	211
9.7.4 单元串联分解的数学模型	215
9.8 混合结构水网络	218
9.8.1 具有混合结构的水回用网络与超结构	219
9.8.2 数学优化模型的建立	220
9.8.3 实例	222
参考文献	228
10 通过改变工艺节水减排	229
10.1 概述	229
10.2 极限浓度改变的方向分析	229
10.2.1 增大跨越夹点单元的进出口浓度	230
10.2.2 减小跨越夹点单元的进出口浓度	230
10.2.3 改变夹点左侧单元的进出口浓度	232
10.2.4 改变夹点右侧单元的进出口浓度	232
10.3 杂质负荷改变的方向分析	233
10.3.1 减小夹点左侧用水单元的杂质负荷	233
10.3.2 减小夹点右侧用水单元的杂质负荷	233
10.4 节水工艺的采用	235
10.4.1 空冷代替水冷	235
10.4.2 汽化冷却与水冷却	235
10.4.3 干法熄焦与湿法熄焦	236
参考文献	236
11 水系统集成优化的工业应用实例	237
11.1 水中杂质种类与极限浓度的确定	237
11.2 某氯碱厂水系统集成优化	238
11.2.1 现行水系统概况	238
11.2.2 现行水系统用水状况分析	238
11.2.3 水系统集成优化方案	240
11.2.4 节水成效	243
11.3 某催化剂厂水系统集成优化	243
11.3.1 现行水系统概况	243
11.3.2 初始水网络的生成	245