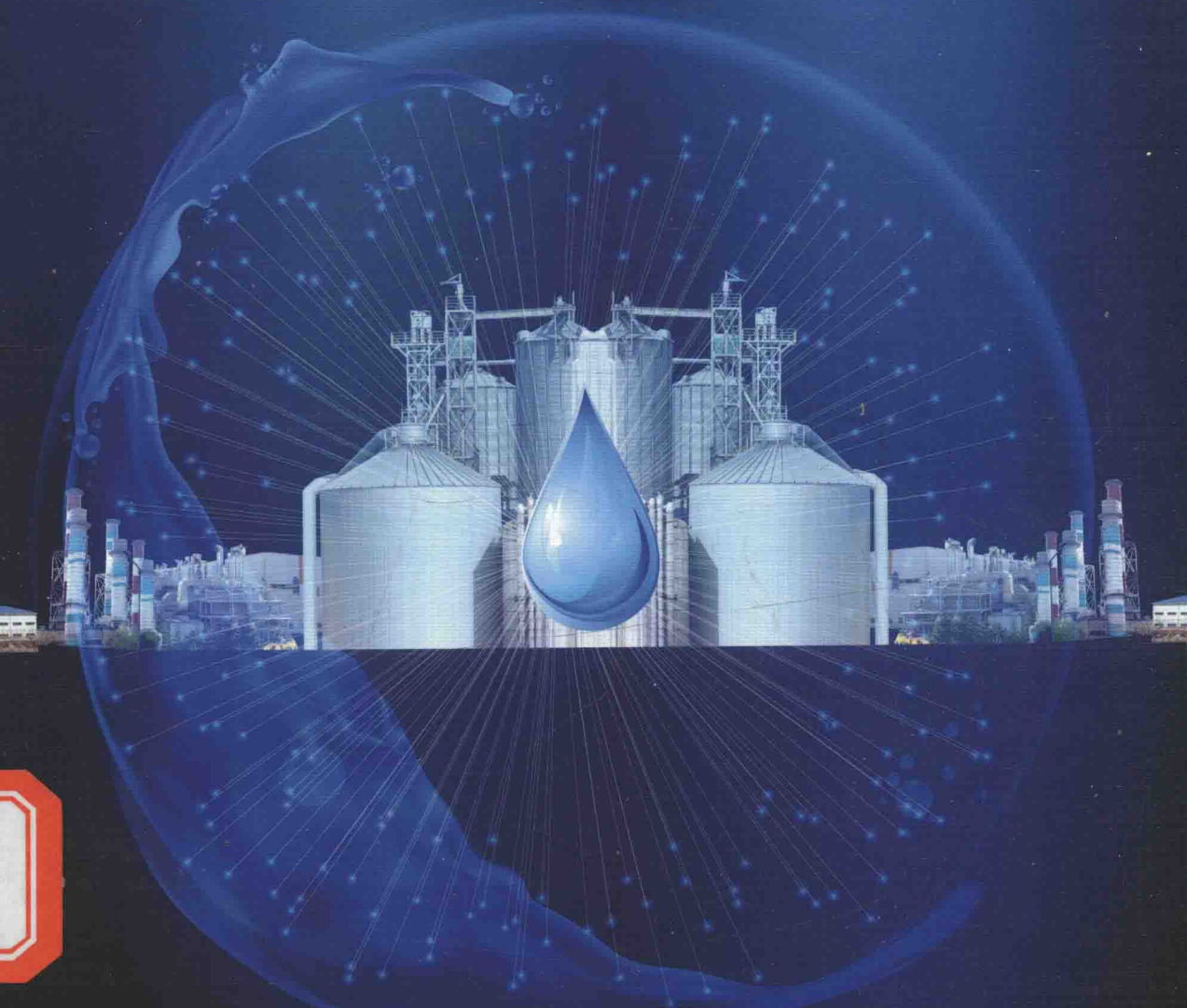


HUAGONG JIENENG JIESHUI GAIZAO ANLI

化工节能节水 改造案例

王彧斐 邓春 冯霄 著



化学工业出版社

HUAGONG JIENENG JIESHUI GAIZAO ANLI

化工节能节水 改造案例

王曦斐 邓春 冯霄 著



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工节能节水改造案例》系统介绍了采用系统集成技术实现化工节能、节水、节氢的基本概念、改造步骤和工业应用案例,包括12个能量系统集成优化的工业应用案例,14个水系统集成优化的工业应用案例和1个氢气系统集成优化的工业应用案例,这些实例均是系统集成技术与企业实践相结合的结果。

全书内容系统,概念清晰,理论联系实际,实用性较强。可供化工、环境、轻工、冶金等过程工业及其相关专业领域的工程技术人员使用,也可作为相关专业领域师生的参考书。

化工节能节水改造案例

王彧斐 邓春 冯霄 著

化学工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工节能节水改造案例/王彧斐,邓春,冯霄著. —北京:
化学工业出版社, 2018.2

ISBN 978-7-122-31263-1

I. ①化… II. ①王…②邓…③冯… III. ①化学工业-节
能-案例②化学工业-节约用水-案例 IV. ①TQ

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第325112号

责任编辑:袁海燕

文字编辑:向东

责任校对:边涛

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:北京京华铭诚工贸有限公司

装订:三河市瞰发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数365千字 2018年4月北京第1版第1次印刷

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

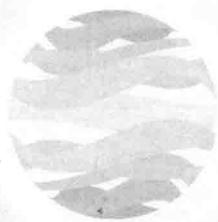
网址: <http://www.cip.com.cn>

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: 78.00 元

版权所有 违者必究

前言



随着世界人口的不断增长和工业的持续发展,能源和水资源等自然资源越来越短缺,过程系统作为工业系统节约能源和资源的有效手段,受到各国政府和工业企业的高度重视。

《化工节能节水改造案例》的作者自 20 世纪 80 年代开始涉足能量系统集成,2000 年起进行水系统和氢气系统集成的理论研究和工业应用。理论研究方面,在前人研究工作的基础上,使得能量/水/氢气系统集成优化的理论和方法更趋于系统、完善和深入;实际工业应用方面,开展了深入系统的研究和开发工作,已将这些技术成功应用于国内的大型炼油、石化和化工企业的节能节水优化、炼油企业的节氢优化中,取得了显著的社会效益和经济效益。

本书简单介绍了能量系统、水系统和氢气系统集成的基本原理和步骤,给出了 27 个工业应用案例。

本书的编写分工为:第 1 章,邓春、冯霄;第 2 章,王彧斐、邓春、冯霄;第 3 章,王彧斐、冯霄;第 4 章,冯霄、邓春;第 5 章,邓春、冯霄。

希望本书能够作为化工、环境、轻工、冶金等过程工业及其相关专业领域的工程技术人员节能节水节氢改造的参考书,以及相关专业学生的辅助参考书。

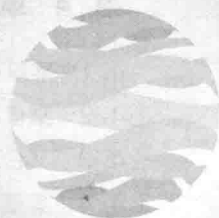
本书的部分工作还得到国家重点基础研究发展计划项目(2012CB720500)和国家自然科学基金项目(21276204, 21576287 和 U1162121)的资助,在此表示感谢!

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

2018 年 1 月

目录



第 1 章 绪言 / 001

1.1 化工行业能耗水耗现状 / 001

1.2 国家节能节水政策 / 003

1.3 采用过程集成节能节水 / 005

参考文献 / 006

第 2 章 能量系统和水系统集成优化的基本原理与步骤 / 007

2.1 换热网络改造综合的基本原理与步骤 / 007

2.2 塔系统集成的基本原理与步骤 / 008

2.3 公用工程系统集成的基本原理与步骤 / 009

2.4 厂际热联合与低温热利用的基本原理与步骤 / 010

2.5 水系统集成的基本原理与步骤 / 010

参考文献 / 011

第 3 章 化工节能改造案例 / 012

3.1 某乙烯装置能量系统集成优化 / 012

3.2 某芳烃联合装置能量系统集成优化 / 042

3.3 某苯乙烯装置塔系热集成 / 061

3.4 某乙二醇装置能量系统集成优化 / 064

3.5 某己内酰胺装置能量系统集成优化 / 073

3.6 某聚氯乙烯装置能量系统集成优化 / 090

3.7 某连续重整装置能量系统集成优化 / 095

3.8 催化裂化装置和气体分馏装置的热联合 / 109

3.9 渣油加氢装置换热网络优化 / 115

3.10 柴油加氢改质装置换热网络优化 / 121

3.11 某蜡油加氢装置弹性换热网络的合成 / 129

3.12 某循环水系统的集成优化 / 132

参考文献 / 136

第 4 章 化工节水改造案例 / 138

- 4.1 某氯碱厂水系统集成优化 / 138
 - 4.2 某催化剂厂水系统集成优化 / 143
 - 4.3 某合成氨厂水系统集成优化 / 149
 - 4.4 某氧化铝厂水系统集成优化 / 158
 - 4.5 某造纸厂水系统集成优化 / 163
 - 4.6 某啤酒厂水系统集成优化 / 170
 - 4.7 某甲醇厂水系统集成优化 / 176
 - 4.8 某腈纶厂水系统集成优化 / 179
 - 4.9 某橡胶厂水系统集成优化 / 183
 - 4.10 某塑料厂水系统集成优化 / 184
 - 4.11 某炼油厂水系统集成优化 / 185
 - 4.12 某石化企业炼油污水处理回用水系统集成优化 / 190
 - 4.13 炼油厂水系统优化模型开发与应用 / 195
 - 4.14 工业多水源供水网络优化设计 / 202
- 参考文献 / 208

第 5 章 炼油厂氢气系统集成优化 / 209

- 5.1 氢气系统集成的基本原理与步骤 / 209
 - 5.2 某炼油厂氢气系统集成优化 / 211
- 参考文献 / 217

第1章

绪言

1.1 化工行业能耗水耗现状

石油和化学工业是国民经济的重要基础和支柱产业，在服务国民经济发展的过程中，自身也消耗着大量的能源和资源。“十二五”以来，我国石油和化工行业把节能节水减排摆在“调结构、转方式”的战略位置，持续深入推进，取得了显著成效。石油和化学工业七种主要高能耗产品（原油加工、乙烯、烧碱、纯碱、合成氨、电石、黄磷）的2010年和2015年的平均能耗如图1-1所示。计算可知，原油加工、乙烯、烧碱、纯碱、合成氨、电石、黄磷能耗分别降低了7.56%、7.85%、13.53%、37.58%、6.76%、3.13%和8.99%。其中，原油加工能耗由2010年的99.2kg标准煤/t降低为2015年的91.7kg标准煤/t，尚未达到“十二五”的节能指标86kg标准煤/t。乙烯能耗由2010年的880.7kg标准煤/t降低为2015年的811.6kg标准煤/t，超额完成“十二五”的节能指标857kg标准煤/t。合成氨能耗由2010年的1402kg标准煤/t降低为2015年的1307.2kg标准煤/t，也超额完成“十二五”的节能指标1350kg标准煤/t。

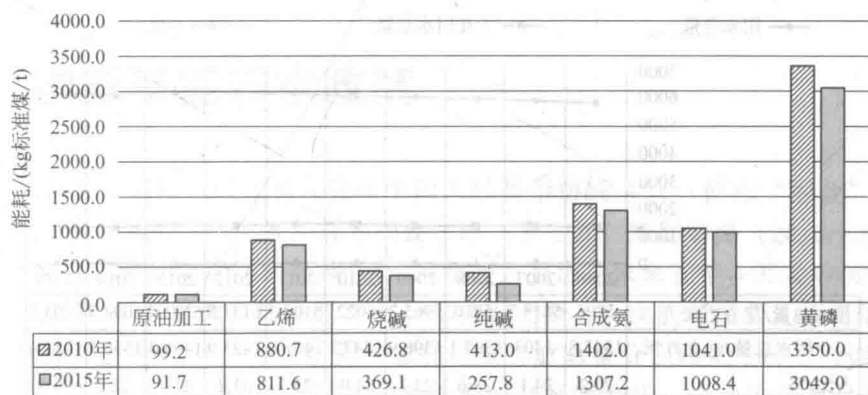


图 1-1 “十二五”主要产品能耗对比

图 1-2 显示了中国石油和化工全行业能源消耗总量、工业增加值和单位工业增加值能耗量的变化趋势。可见，随着经济的快速发展，中国石油和化工全行业能源消耗总量由 2010 年的 4.12 亿吨标准煤，逐年递增，自 2013 年突破 5 亿吨标准煤，2015 年达到 5.5 亿吨标准煤，相对于 2010 年，全行业能源消耗总量增加了 33.56%。全行业工业增加值也逐年增加，于 2014 年突破 3 万亿元，2015 年达到 3.33 万亿元，相对于 2010 年，全行业工业增加值增加了 52.39%。显然，全行业工业增加值的增加幅度高于全行业能源消耗总量的增加幅度。单位工业增加值能耗由 2010 年的 1.88t 标准煤/万元降低为 1.65t 标准煤/万元，降低了 12.36%，表明消耗单位能耗所产生的工业增加值得到提升。

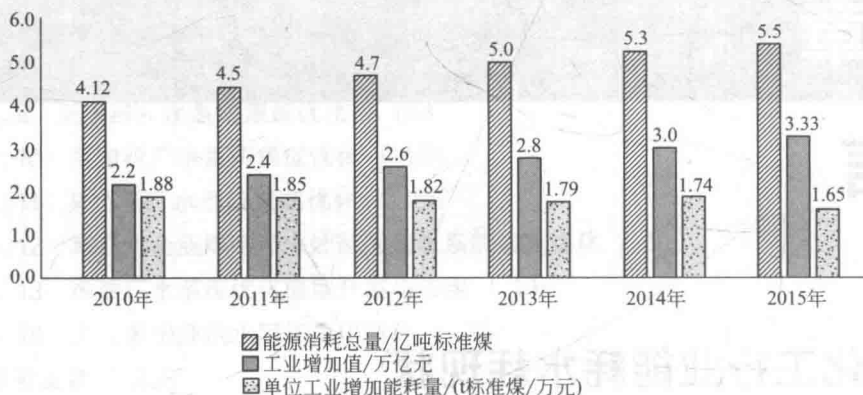


图 1-2 中国石油和化工行业工业增加值及能耗

“十二五”期间全国用水总量平均值为 6126.3 亿立方米，比“十一五”期间的平均值 5902.2 亿立方米，高出 3.79%。工业用水总量基本保持在 1396 亿立方米。由图 1-3 中的数据可知，“十二五”期间工业用水总量呈现下降趋势，于 2015 年降低至 1334.8 亿立方米，且占全国用水总量的比值也逐年下降，于 2015 年降低到 21.9%。由图 1-4 可知，“十一五”期间，全国废水排放总量逐年增加，工业废水排放量于 2007 年达到较高值 246.6 亿立方米，随后逐年降低。工业废水排放量占全国废水排放总量的比值由 2006 年的 44.7%，逐年降低，于 2010 年达到 38.5%。整体上来看，“十一五”工业废水达标排放率逐年增加（除 2007 年略有降低之外），于 2010 年达到 95.3%。此外，由图 1-5 可知，“十一五”期间，工业用水重复率逐年增加，2010 年比 2006 年高出 5 个百分点。我国万元工业增加值用水量由 2006 年的 151m³，稳步降低，于 2016 年达到 53m³，降低了 98m³，表明我国工业用水效率显著提高。

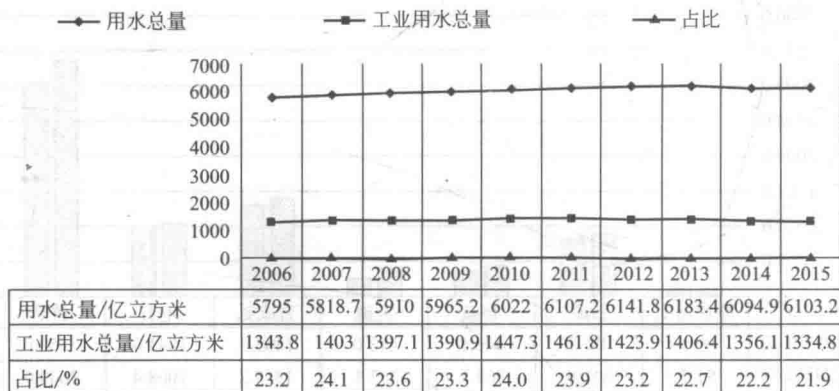


图 1-3 2006~2015 年全国用水总量情况

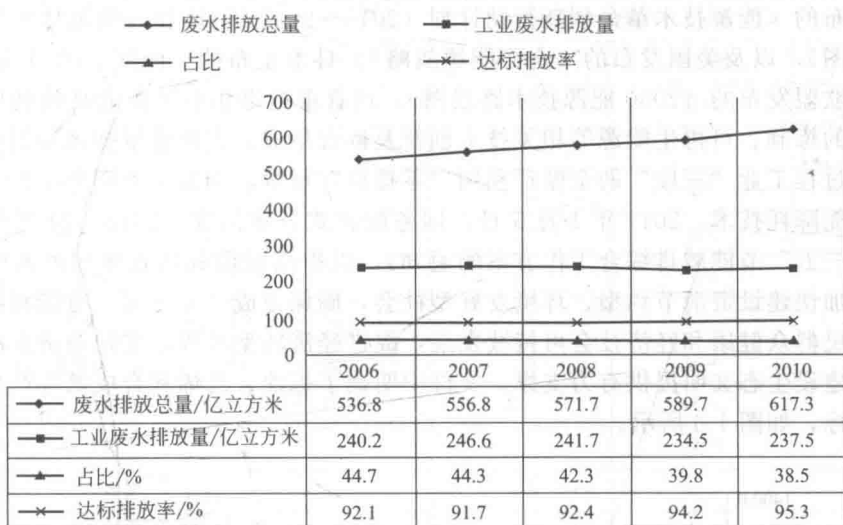


图 1-4 2006~2010 年全国废水排放情况



图 1-5 2006~2016 年万元工业增加值用水量

1.2 国家节能节水政策

2016年3月,全国人民代表大会和中国人民政治协商会议(简称“两会”)发布我国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要,即“十三五”规划纲要(2016~2020年)。对于石化行业关注的资源、能源和环境目标,《纲要》提出,未来五年,万元GDP用水量累计下降23%,单位GDP能源消耗降低15%,非化石能源占一次能源消费比重增加3%,单位GDP二氧化碳排放降低18%,化学需氧量和氨氮排放总量分别降低10%。《纲要》明确要求全面推动能源节约,推进工业领域节能和能源综合梯级利用;全面推进节水型社会建设,落实最严格的水资源管理制度,对水资源短缺地区实行更严格的产业准入、取水定额控

制；有效控制温室气体排放，控制电力、钢铁、建材、化工等重点行业的碳排放。2016年4月，我国发布的《能源技术革命创新行动计划（2016~2030年）》和《能源技术革命重点创新行动路线图》，以及美国发布的《全面能源战略》、日本发布的《面向2030年能源环境创新战略》和欧盟发布的《2050能源技术路线图》，均着重指出化石能源的高效利用，强调加强化石能源的炼制、可再生能源等相关技术创新及耦合集成，实现能量梯级利用和物质循环利用，研发过程工业“三废”的全循环利用“零排放”技术，创新能源资源综合利用等全局优化系统节能降耗技术。2017年1月5日，国务院正式发布国发〔2016〕74号《国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知》，以提高能源利用效率和改善生态环境质量为目标，加快建设资源节约型、环境友好型社会，确保完成“十三五”节能减排约束性目标，保障人民群众健康和经济社会可持续发展，促进经济转型升级，实现经济发展与环境改善双赢，为建设生态文明提供有力支撑。文件中明确了炼油、乙烯和合成氨等产品的综合能耗的节约目标，如图1-6所示。

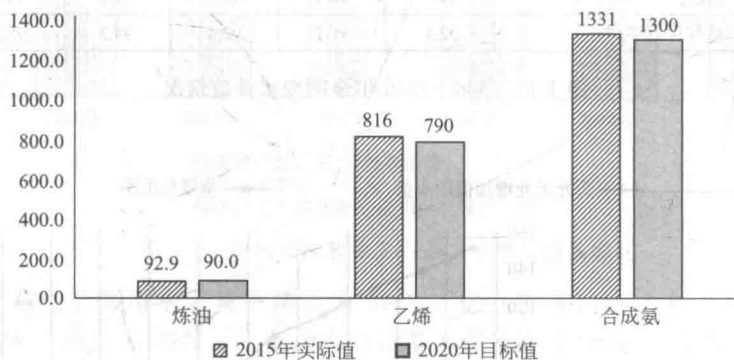


图 1-6 “十三五”主要石油化工产品综合能耗节能指标

国家在“十二五”期间陆续出台了一系列的相关政策文件和国家标准，对系统节水工作提出了更高要求。2011年9月，GB/T 26926—2011《节水型企业 石油炼制行业》国家标准正式发布。2015年10月，GB/T 32164—2015《节水型企业 乙烯行业》国家标准正式发布。这两份标准规定了石油炼制和乙烯节水型企业的取水量、重复利用、漏损和排水各项指标。2012年2月，国务院颁发了国发〔2012〕3号文件《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》，实行总量控制。2012年9月，工业和信息化部、水利部、全国节约用水办公室发布《三部门联合发布深入推进节水型企业建设工作的通知》，要求2015年底前石油炼制行业全部达到节水型企业标准。2013年9月，由工业和信息化部、水利部、国家统计局、全国节约用水办公室四部门联合印发《重点工业行业用水效率指南》，规定了单位产品取水量先进值、平均值、限定值和准入值，并将其作为衡量和评价石油炼制企业用水效率水平的核心指标。其中石化和化工行业单位产品取水量指标如表1-1所示。2013年9月，GB/T 29749—2013《工业企业水系统集成优化导则》正式发布，系统阐述了工业企业水系统集成与优化的步骤和方法。2015年4月16日，环境保护部、国家发展和改革委员会、科学技术部、工业和信息化部、财政部、国土资源部、住房和城乡建设部、交通运输部、水利部、农业部、国家卫生和计划生育委员会、国家海洋局12个部门共同编制的《水污染防治行动计划》（简称水十条）正式出台。文件中明确指出加强工业水循环利用，促进再生水利用，开展节水诊断、水平衡测试，控制用水总量，提高用水效率，实施最严格水资源管理等。

表 1-1 石化和化工行业单位产品取水水量指标

分类		单位产品取水水量/(m ³ /t)			
		先进值	平均值	限定值	准入值
石油炼制	石油炼制	0.50	0.70	0.75	0.60
合成氨	天然气	12	15	13	—
	煤	12	23	27	—
硫酸	硫铁矿制酸	4.2	4.6	4.5	—
	硫黄制酸	3.2	3.5	3.3	—
烧碱	离子膜法(30%)	6.0	7.5	20.0	—
	隔膜法(42%)	8.0	9.0	38.0	—
聚氯乙烯	电石法	9.0	12.0	16.5	—
	乙烯法	7.5	10.0	14.5	—
尿素	气提法	3.0	3.5	3.3	—
	水溶液全循环法	3.5	3.8	3.6	—
纯碱	氨碱法	12.0	16.0	15.0	—
	联碱法	3.0	10.0	22.0	—
乙烯	乙烯生产(不含煤制烯烃)	8	12	15	12

1.3 采用过程集成节能节水

从原料到产品的化工过程,始终伴随着能量的供应、转换、利用、回收、排弃等环节,例如预热原料、进行反应、精制分离、冷却产物、气体的压缩和液体的泵压等。这不仅要求提供动力和不同温度下的热量,而且又有不同温度的热量排出。根据外供的和过程本身放出的能量的品位,匹配过程所需的动力和不同温度的热量;根据工艺过程对能量的需求和热回收系统的优化综合,对公用工程提出动力、加热公用工程量和冷却公用工程量,并进行工艺过程的调整;这些就是过程能量系统集成的内容。以前的节能工作主要着眼于局部,但系统各部件之间会有着有机的联系。随着过程系统工程和热力学分析两大理论的发展及其相互结合与渗透,产生了过程能量系统集成的理论与方法,把节能工作推上了一个新的高度。能量系统集成方法的研究始于20世纪70年代中期,80年代在理论上逐渐成熟、方法上逐渐完善,并在工业实践中取得了巨大的节能和经济效益。

常规的节水策略主要通过直观定性分析,通常着眼于单个的用水过程、器具或局部用水网络,通过改进单个或者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新鲜水用量和废水排放量达到最小。而水系统集成技术是将企业的整个用水系统视为一个有机的整体来对待,系统和综合地合理分配各用水过程的水量水质,以使全系统水的重复利用率达到最大,同时废水的排放量达到最小。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,并在工业实践中取得了巨大的节水效益。

重质高硫原油的加工量日益增加,而环保法规对清洁油品的硫含量的要求却越来越苛

刻，这必然导致炼油厂增加加氢过程的比例，通常需要从外界购买或者新建制氢装置制取氢气。加氢过程及参与供氢的过程构成氢网络。氢气系统集成是指通过合理匹配氢气的供给和需求、提高系统的氢气回收利用率，减小系统的新氢消耗。氢气系统的集成优化技术是 20 世纪 90 年代出现，到 21 世纪初在理论上逐渐成熟，方法上逐渐完善，并在工业实践中取得了巨大的节氢和经济效益。

参考文献

- [1] 中国化工节能技术协会. 中国石油和化工行业节能进展报告 (2016 年) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.

水行論許如業野以用采 3

... 水... 行... 論... 許... 如... 業... 野... 以... 用... 采... 3

第2章

能量系统和水系统集成优化的基本原理与步骤

2.1 换热网络改造综合的基本原理与步骤

2.1.1 基本原理

在过程工业的生产系统中，通常总是有若干冷物流需要被加热，而又有另外若干热物流需要被冷却。对于多股热流，我们可将它们合并成一根热复合曲线；对于多股冷流，我们也可将它们合并成一根冷复合曲线，然后将两者一起表示在温焓图上。确定了夹点温差之后的冷热复合曲线图如图 2-1 所示。图中，冷、热曲线的重叠部分为过程内部冷、热流体的换热区，冷复合曲线上端剩余部分为在该夹点温差下所需的最小加热公用工程量 $Q_{H,\min}$ ；热复合曲线下端剩余部分为在该夹点温差下所需的最小冷却公用工程量 $Q_{C,\min}$ 。

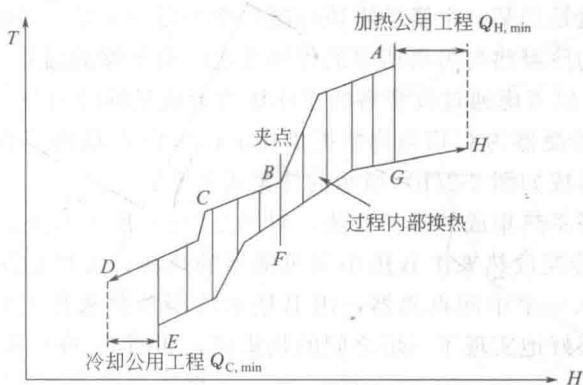


图 2-1 冷热复合温焓图

夹点是冷热复合温焓线中传热温差最小的地方。夹点的出现将整个换热网络分成了两部

分, 夹点之上是一个净热阱, 夹点之下是一个净热源, 在夹点处热通量为零。

因此, 为达到最小加热和冷却公用工程量, 夹点方法的设计原则是:

- ① 夹点之上不应设置任何公用工程冷却器;
- ② 夹点之下不应设置任何公用工程加热器;
- ③ 不应有跨越夹点的传热。

2.1.2 步骤

已有的换热网络的改造综合的步骤如下。

(1) 冷热物流数据提取

提取所有流经换热器的物流的参数, 包括温度、压力、组成、流量、热负荷。不能直接提取热负荷时, 可根据其他参数, 通过流程模拟软件, 计算出热负荷。据此, 确定所有冷热物流的供应温度、目标温度和热负荷。对于有相变的物流, 要确定其相变点。根据公用工程物流数据, 确定实际加热和冷却公用工程量。

(2) 夹点计算

参考现行换热网络的最小温差, 确定夹点温差。将物流数据输入夹点计算软件, 可以求得夹点位置、最小加热和冷却公用工程量。

(3) 换热网络分析

根据夹点位置和实际换热网络, 分析有无夹点之上的冷却器, 有无夹点之下的加热器, 有无跨越夹点的传热。根据最小和实际公用工程量, 确定换热网络的节能潜力。

(4) 换热网络优化

维持现有换热网络的基本结构, 考虑消除具有较大热负荷的夹点之上的冷却器, 夹点之下的加热器, 及跨越夹点的传热。

2.2 塔系统集成的基本原理与步骤

2.2.1 塔系的热集成

塔系的热集成, 就是用某一个塔的塔顶冷凝热作为另一个塔的塔底再沸热源。但这样的直接热集成要求某塔的冷凝热与另塔所需的再沸热之间有足够的温差。当温差不足时, 例如图 2-2 中所示情况, 可以考虑通过改变塔的操作压力形成足够的温差。可以提高塔 B 或降低塔 C 的压力, 使塔 B 冷凝器为 C 塔再沸器提供热量; 提高 A 塔的压力, 使 A 塔冷凝器为 B 塔再沸器提供热量, 形成如图 2-2(b) 所示的热集成关系。

改变塔压并不是塔系热集成的唯一方法。对图 2-2(a) 所示系统, 若给 B 塔引入一个中间再沸器, 用 A 塔的冷凝放热来作 B 塔中间再沸器的热源, A 塔的压力不仅不必升高, 还可降低; 再给 C 塔引入一个中间再沸器, 用 B 塔的冷凝放热来作 C 塔中间再沸器的热源, 也不必降低塔压, 就很好地实现了三塔之间的热集成, 如图 2-2(c) 所示。

2.2.2 塔系在整个过程系统中的合理设置

塔器在过程系统中的设置原则是: 不跨越夹点。当塔器设置在夹点之上时, 其冷凝器放

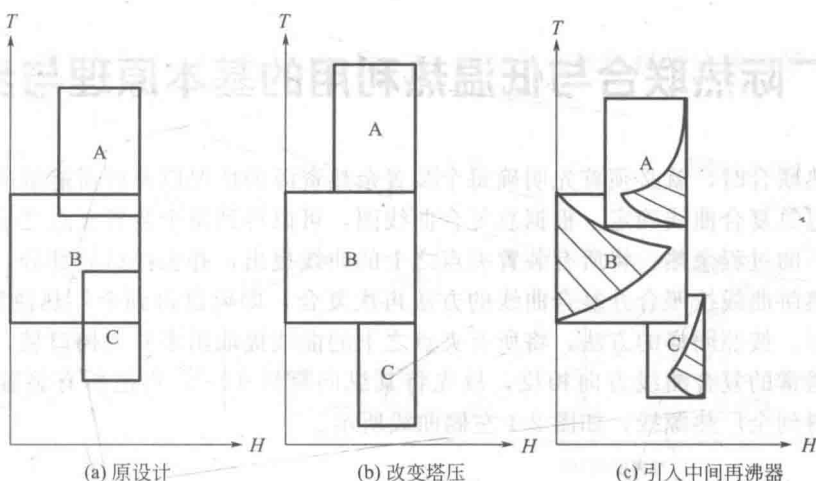


图 2-2 塔系的热集成

出的热量可以用来加热过程冷物流；当塔器设置在夹点之下时，其再沸器所需的热量可以由过程热物流提供。若一分离系统正好跨越夹点，可以通过改变压力将其位置移到夹点之上或之下，以实现与过程的热集成。

当精馏过程的热量远大于过程所需或所能提供的热量时，可以通过减小回流比、多效、改变塔压、设置中间换热器等方法，实现塔系和整个过程系统的热集成。

2.3 公用工程系统集成的基本原理与步骤

在公用工程系统集成中，所用的工具是总复合曲线图。总复合曲线可以从冷热复合曲线转化获得。它以冷、热流体的平均温度为纵坐标，焓为横坐标，表示了温位与热通量的关系。

在夹点之上，为了减少加热公用工程的费用，根据总复合曲线应选择尽量接近净热阱的加热公用工程级别。

例如如图 2-3 所示总复合曲线，若可采用三种级别的加热蒸汽，则可按图示的方式选择（即图中的 a 、 b 、 c 三级）。图中的 a 、 b 、 c 三条线段，表示三级不同温度的加热公用工程，其纵坐标表示公用工程的温度（注意，图上是平均温度，真实温度应加上半个夹点温差），其长度表示所需要的公用工程的热量。

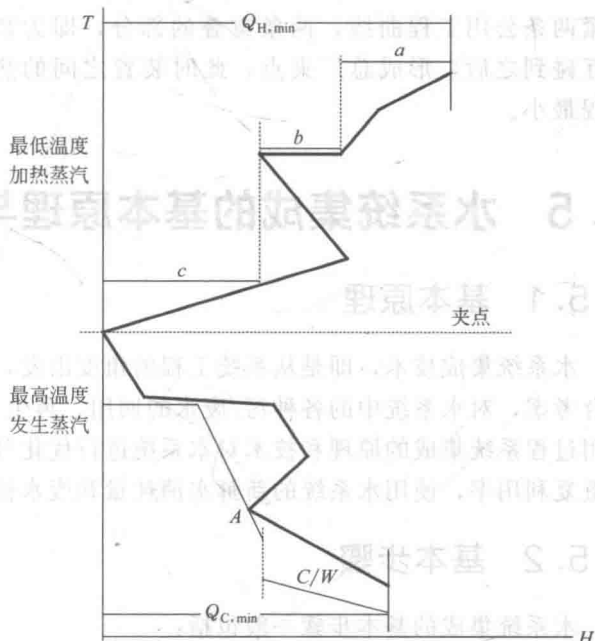


图 2-3 应用总复合曲线确定各加热公用工程级别的用量

2.4 厂际热联合与低温热利用的基本原理与步骤

当考虑热联合时，就必须首先明确每个装置余热资源的情况以及所需能量的情况，这个情况可以通过总复合曲线确定。根据总复合曲线图，可以得到每个装置夹点之上所需的能量以及夹点之下的过程余热。将所有装置夹点之上的曲线提出，并去掉口袋部分，再将各个装置所提出的热阱曲线按照合并复合曲线的方法再次复合，即可以得到全厂热阱线，如图 2-4 右侧曲线所示。按照同样的方法，将所有夹点之下的曲线提取出来并去掉口袋，因为提取的热源曲线与通常的复合曲线方向相反，故先将其纵向翻转 180°，再把所有装置的热源曲线复合，即可得到全厂热源线，如图 2-4 左侧曲线所示。

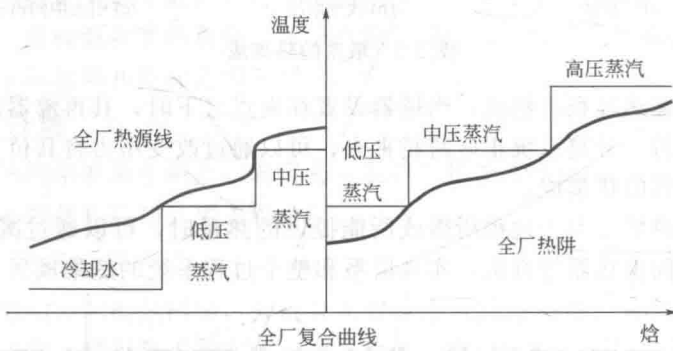


图 2-4 全厂复合曲线及能量目标的确定

按照各个等级公用工程的温度在全厂复合曲线上作出相应的水平线（图 2-4 中各个等级公用工程线），把图两侧的公用工程曲线提取出来，并像复合曲线中求解夹点时一样，夹紧两条公用工程曲线，两条重叠的部分，即为装置之间热回收的量。当两条蒸汽曲线相互碰到之后，形成总厂夹点，此时装置之间的热回收量最大，所需的加热和冷却公用工程最小。

2.5 水系统集成基本原理与步骤

2.5.1 基本原理

水系统集成技术，即是从系统工程的角度出发，将整个水系统作为一个有机的整体进行综合考虑，对水系统中的各种污/废水的回用、再生和循环的所有可能的机会进行综合考察，采用过程系统集成的原理和技术对水系统进行优化分配，按品质需求逐级用水，提高水系统的重复利用率，使用水系统的新鲜水消耗量和废水排放量同时减少。

2.5.2 基本步骤

水系统集成基本步骤一般包括：

第一步，确定潜在的水源和水阱；水源包括新鲜水、再生水和用水过程的排水。需要水的用水过程都属于水井。识别关键杂质和非关键杂质，提取水源和水阱的水量，杂质的极限

进、出口浓度。

第二步, 利用水夹点法 [如图 2-5(a) 和 (b) 所示] 和数学规划法确定最小的新鲜水用量和废水排放量。

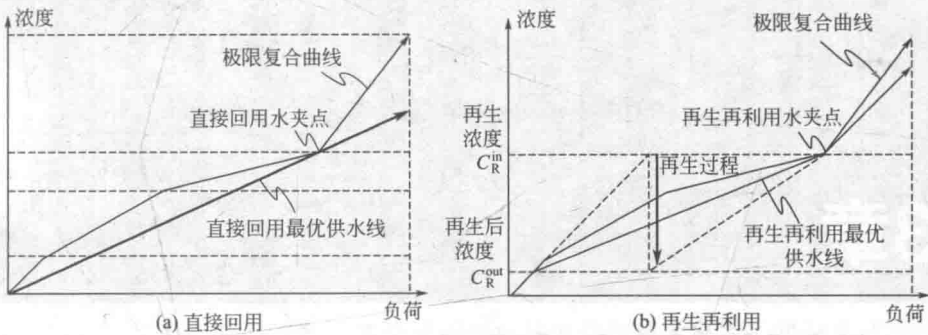


图 2-5 水夹点图

第三步, 利用水夹点法和数学规划法综合出一组候选的水系统。

第四步, 对上述系统进行调优, 得出适宜的方案。

第五步, 对方案进行技术经济评价和系统操作性分析, 如对结果不满意, 返回第二步, 重复上述步骤, 直至满意。

参考文献

- [1] 冯霄, 王彧斐. 化工节能原理与技术 [M]. 第 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [2] 冯霄, 刘永忠, 沈人杰, 等. 水系统集成优化: 节水减排的系统综合方法 [M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2012.