

专论与评述

# 企业公用工程系统节能减排的发展现状

杨友麒

(中国化工信息中心,北京 100029)

**摘要:** 炼油化工企业的公用工程系统因处于总能量转化地位,其效率高成为企业能耗高低的重要关键之一。本文就公用工程系统节能减排国内外发展概况进行了综述。首先从热电联产系统的节能减排入手,考察了信息技术在公用工程系统节能减排中的应用进展,最后讨论了近年来低碳发展对公用工程系统的挑战。

**关键词:** 炼化企业;公用工程;能量转换;热电联产;信息技术;低碳经济

中图分类号:TE-9

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2010)12-0001-06

## Current development situation of energy conservation and waste reduction in enterprise utility system

YANG You-qi

(China National Chemical Information Center, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Since the utility system of a refining and chemical enterprise is in the position of processing whole energy of the enterprise, its efficiency is one of the key factors on the whole energy consumption. The recent progress in energy saving and waste reduction of utility system at home and abroad is reviewed. Firstly, the progress in combined heat and power system (CHP) is described. Then the application of information technology in utility system is reviewed including Energy Management System (EMS). Finally, the challenge of developing low-carbon economy for utility system of refining and chemical enterprises is discussed.

**Key words:** refining and chemical enterprise; utility system; energy conversion; combined heat and power; information technology; low-carbon economy

### 1 公用工程系统在炼化企业中的地位与作用

一个企业的公用工程系统的作用主要就是将外部的一次能源(煤、石油、天然气、新鲜水等)转化为内部工艺制造过程所需要用的蒸汽、电、水、气(燃气及氢气等)、风等二次能源,所以它是每个企业的能源转换部门,担负着整个企业的能源供应任务。如果按照“过程系统三环节能量流结构模型”将企业的能量系统分为:能量转换环节—能量利用环节—能量回收环节的话,公用工程系统就相当于能量转换环节。

由于作为能量转换环节要处理全企业所用的所有能量,所以公用工程系统的能量转换效率就具有特别重要意义。它处理的总量特别大,效率提高1个百分点都意味着巨大的节能量。可是,过去由于它被当成“辅助部门”,不论它的建设还是它的操作,都只要求满足主要工艺部门的要求就可以,很少认真地将其优化,所以公用工程系统往往相对比较落后。

公用工程系统的组成如图1所示,通常包括蒸汽发生的锅炉、包括蒸汽透平在内的蒸汽管网系统、燃气及氢气系统、电力系统、水系统等,它代表能量的供应方。而下方的生产工艺装置A、B、C、D代表生产的用能需求方。

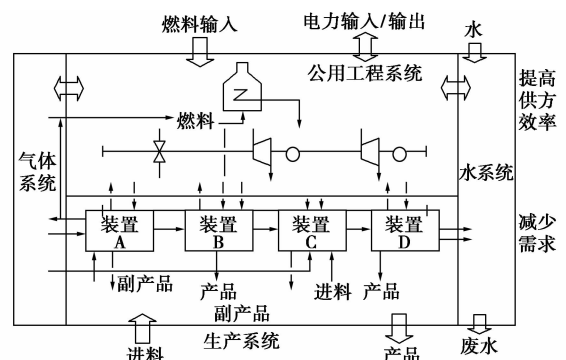


图1 公用工程系统的组成结构图

炼油化工企业的特点是大量使用蒸汽加热,同时也需要输入电力,所以热电联产系统在全厂公用工程系统中占有重要地位。本文从考察热电联产系统入手,考察信息化时代的公用工程系统节能减排

收稿日期:2010-10-08

作者简介:杨友麒(1935-),男,大学,教授级高工,中国系统工程学会过程系统工程专业委员会副主任,从事化学工程、过程系统工程、计算机应用等方面的研究,yang@pku.edu.cn。

的发展,最后讨论近年来低碳发展对公用工程系统的挑战。

## 2 热电联产系统

### 2.1 热电联产系统 (Combined Heat and Power System, CHP) 的概念<sup>[1-4]</sup>

同时产生热量和轴功(通常是发电)的工业化热机有 3 种:蒸汽透平、燃气透平和柴油/天然气内燃机。3 种热机在工业中都有应用,但如何选择热机取决于生产规模和现场的热功比、输出动力潜力和过程需要热的温度,具体数据如表 1 所示。

表 1 典型的热电联产系统

CHP 系统	动力/ 热比值	热/动力 比值	典型大小/ MW(th)	常规大小/ MW(e)	加热 温度/°C
蒸汽透平	<0.20	>5.0	3.0~50.0	0.5~10.0	100~200
燃气透平	0.20~0.67	1.5~5.0	2.0~30.0	1.0~20.0	100~500
柴油/天然 气内燃机	0.50~1.25	0.8~2.0	0.2~5.0	0.2~5.0	100~300 <80

由于炼油化工企业通常大量用热,热/动力比值较高,传统工艺均采用蒸汽管网及蒸汽透平。然而,由于近 20 年来燃气透平的长足进步,其适用领域已扩大了很多,从表 1 看,数值几乎与蒸汽系统差不多,而由于其转换效率比蒸汽系统高得多,所以成为国外大部分炼油化工企业的首选。而内燃机由于热/动力比太小、提供的功率也小,在炼油化工企业很少使用。

如果计算从一次能源转化为电力的效率,就可以发现:如果烧煤锅炉通过蒸汽朗肯循环发电,效率只有 35%;而天然气通过燃气透平及废热锅炉热电联产,其效率可达 50%~55%。这意味着仅在这一环节效率就差了 15%~20%。而如果采用冷热电联产(CCHP),其效率更可以达到 70%。而且天然气 CCHP 生产单位热量的 CO<sub>2</sub> 排放只有燃煤锅炉蒸汽发电排放量的 1/4。所以提高公用工程系统技术水平乃是化工炼油产业低碳化的重要环节<sup>[3]</sup>。

与已经实现工业化的发达国家相比,中国工业的特殊性在于:煤在一次能源中比率过高,占 70%(世界平均 28%),天然气则过低(为 3.5%,世界平均 23%),加上经济的粗放性,致使能源利用效率低(36.8%,低于世界平均的 50%)。2010 年 6 月底麻省理工学院 MIT 公布的报告称:非常规天然气已成为当今世界新能源发展的重要方向,世界天然气剩

余可采储量为 453 万亿 m<sup>3</sup>,可用 150 年,其中 56% 可以用 4 美元/MMBtu (1 Btu = 1 055.06 J) 的开采成本开采。所以天然气可能是最现实的过渡低碳能源<sup>[5]</sup>。2009 年,美国凭借快速开发页岩气扭转了天然气逐年减产的颓势,成了全球最大的天然气生产国。我国也将转向大力开采和利用天然气的方向。

### 2.2 燃气轮机 CHP 系统的优势<sup>[6]</sup>

图 2 表示燃气轮机 CHP 系统的工作原理。燃料气(活油)喷入高压燃烧室后,高温的燃烧气体导入膨胀机做功,在这里是同轴带动发电机和空气压缩机,而尾气温度仍高达 500~600°C,送入废热锅炉去发生蒸汽(转换成热量)。这样的组合完全可以满足炼化企业对加热和电力的需求,从而消除了传统的锅炉房。

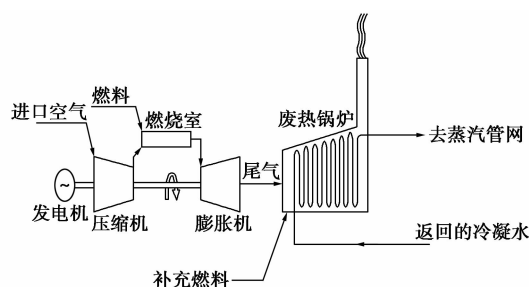


图 2 燃气透平 + 废热锅炉组合原理

燃气透平具有以下明显优势:投资成本低;高灵活性和适应性;装置简单,可靠性性好;起动快,开工时间短,加载快,从而使公用工程对满足临时性负荷快,不需要热设备,因此成本最低;在控制污染及温室气体方面性能好。燃气透平的排气在 600°C 以内温度范围内放热。因此,燃气透平特别适合于高温热需求的场合,如热空气干燥器或高温反应。对热需求一定的场合,燃气透平比蒸汽轮机产生的动力要多得多。

1980 年前,大多数商业上应用的燃气透平规模在 10~50 MW,但此后出现了中等规模(1~10 MW)的燃气透平,源于航空发动机,非常适用于工业现场应用。现在国外石油化工企业已大量采用燃气透平驱动的热电联产系统。例如,至 2004 年,热电联产发电量占埃克森美孚(Exxon-Mobil)公司其发电总量的 90% 以上,可比传统的发电厂减少温室气体排放 700 万 t/a。道达尔(Total)公司位于阿联酋的 Taweelah 1 430 MW 热电联产装置,单位发电量的 CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量分别降低了 50% 和 90%。该装置产生的废热用于海水淡化。

蒸汽透平曾经主导 CHP 系统。但是,因为其低

动力产生和燃气透平取得了长足进展,实际上最近已不再安装蒸汽透平了。更广泛地说,很多工业过程的夹点温度 $\geq 100^{\circ}\text{C}$ ,燃气透平成为这些装置的标准选择。蒸汽动力系统的高投资费用意味着低于10 MW已不大经济。相反,一些现有蒸汽透平 CHP 系统的工厂着手进行燃气透平改造。

2.3 热电联产优化的 R-曲线 [7-9]

当一个工厂现场需要扩大产量,或者要增加新的工艺装置时,已有的公用工程可能不能满足新的热源及电力需求,这时就要考虑增加锅炉、透平机组及蒸汽总管来脱除瓶颈。此时应该用 R-曲线方法,来重新规划热电联产的最优方案,找到最经济的扩建方案。

2.3.1 R-曲线的概念

在一个公用工程系统中,燃料能量转化为蒸汽热量  $Q_{\text{heat}}$  和电力  $W$ ,还有一部分能量  $Q_{\text{loss}}$  不可避免损失在这个转化过程中,如图 3 所示。

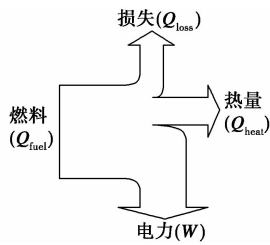


图 3 联产效率的概念图

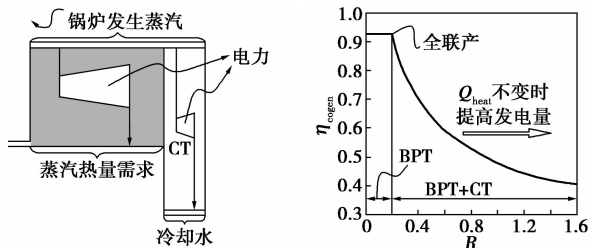
这样一个转化过程的效率  $\eta_{\text{cogen}}$  定义如下:

$$\eta_{\text{cogen}} = (W + Q_{\text{heat}}) / Q_{\text{fuel}} \quad (1)$$

$$R = W / Q_{\text{heat}} \quad (2)$$

其中  $Q_{\text{heat}}$  表示净蒸汽热量需求,包括蒸汽加热用量及工艺过程(如汽提塔、蒸汽变换等)用蒸汽。

R 定义为联产电热比,如公式(2)所示。简单的公用工程系统的 R-曲线如图 4 所示,这是早在 1984 年 Kenney 就提出来的理想化的 R-曲线,它显示的是最大联产效率与电热比之间的关系,同时也指出了对于一定要求的电热比 R 时最佳的组合



(a) 简单共用工程示意图 (b) 典型的 R-曲线

图 4 简单的公用工程系统的 R-曲线

配置。其中  $Q_{\text{fuel}}$  表示产生全部蒸汽所消耗的热量(来自燃料);  $Q_{\text{heat}}$  为背压透平出口蒸汽为系统提供的热量;  $W$  为联产得到的电功率; BPT 是背压透平; CT 是冷凝器透平。

2.3.2 技术改造用的 R-曲线

上面这种 R-曲线图不能用于复杂的多级蒸汽网络系统,而且它是基于所有蒸汽透平都以最高等熵效率操作,也不符合实际情况。如果我们处理的对象是多层次复杂蒸汽网络系统,那就要利用全局组合曲线 TSP,重新制作 R-曲线。这种过程如图 5 所示。

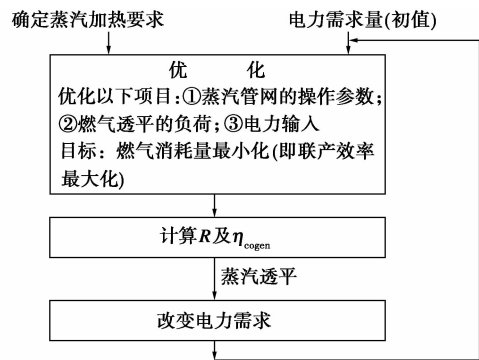
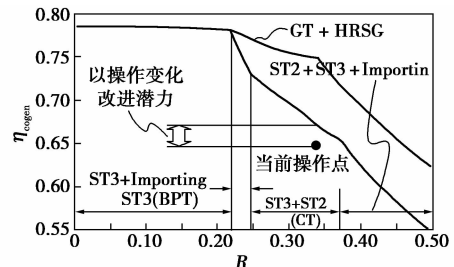


图 5 复杂公用工程系统的 R-曲线制作过程

这里要记住,此处优化是对给定热量需求及电力需求的前提下进行的,因此,按  $\eta_{\text{cogen}}$  定义,联产效率的最大化就意味着燃料消耗最小化。为了得到不同 R 值下的最大化的联产效率  $\eta_{\text{cogen}}$ ,就必须一方面考虑优化公用工程各部位的操作参数;一方面考查输入电力的机会。某个复杂多级蒸汽网络系统的 R-曲线图如图 6 所示,从图 6 可以看到现在操作点与最佳  $\eta_{\text{cogen}}$  的差距及改进的潜力。



CT 为燃气透平;ST 为蒸汽透平;HRSG 为废热锅炉

图 6 复杂的多级蒸汽网络系统的 R-曲线图

综合应用以上一些概念和方法来进行灵活性的共用工程系统设计方法研究,Smith<sup>[10-12]</sup> 和 Kokossis<sup>[13-14]</sup> 等最近发表了一系列文章。

但是,使用 R-曲线这个工具有其天生的局限性。作为一种纯热力学第一定律技术,它并未考虑

成本。例如,它没有考虑具有不同价格的不同燃料,也许燃烧比较便宜燃料的低效率锅炉会比燃烧高价燃料的高效锅炉更合适。这种方法也没有指出提高效率的途径;从这种意义上讲,公用工程最高效率的运行并非总意味最低成本的运行。

### 3 信息技术在公用工程系统中的应用

#### 3.1 自动控制技术<sup>[15]</sup>

表2从降低用能和减少供能成本2个方面列举了可以采用的自动控制技术。其中为了改进燃烧系统的控制,燃烧气体的流量控制是关键变量。但是燃料气的组分及热值波动很大,直接影响加热炉/裂解炉的燃烧控制,使空气/燃料比偏离最佳值。新的控制将体积流量控制改为质量流量控制,流量计改用质量流量计,就可以消除体积流量波动影响;这种情况可以从表3中看出来。

表2 各种自动化节能策略

降低用能需求量	减少供能成本	
	提高内部公用工程生产效率	减少外部采购成本
先进控制及优化(加热炉、激冷、蒸馏、压缩机等)	改善燃烧效率	
改善控制回路性能	蒸汽透平/电机拖动的优化选择	EMS 能源管理系统(电力、燃料、购入)
最大化工艺热回收及最小化损失	蒸汽动力系统管理:①蒸汽总管管理(放空最小化;蒸汽等优化)	
最大化蒸汽回收	减温减压最小化;压降最小化);②蒸汽回收最大化;	
最小化压降损耗	③锅炉排污控制	
改善低负荷下的控制	最小化透平及锅炉的待机	

表3 各种燃料组分重量燃烧热及体积燃烧热的变化

组分	基于体积的总燃烧热	基于质量的总燃烧热
	Btu/ft <sup>3</sup>	Btu/Lb
氢气	320	60957
甲烷	1011	23861
乙烷	1783	22304
丙烷	2563	21646
丁烷	3374	21293

注:1 ft<sup>3</sup> = 0.929 m<sup>3</sup>; 1 Lb = 0.4536 kg。

大型压缩机的防喘震阀开度是否合适,往往是节能的关键:开得太大,就会使大量气体回流,浪费

了能量;开太小就可能引发喘震,损失更大。多级压缩机的防喘震阀安排见图7所示,我们希望操作线尽量靠近压缩机喘震线,因为同样压缩比的流量会小一些,相应能耗就少。但实际上老的防喘震阀由于性能差,通常操作线远离压缩机喘震线,这样才比较放心。而近年开发了新防喘震阀,它从关闭到全开只需要2 s,所以就可以放心地将操作线靠近压缩机喘震线。如果一个50万t/a乙烯厂有25%时间为低负荷操作,减少再循环流的费用相当于12.5万美元/a。

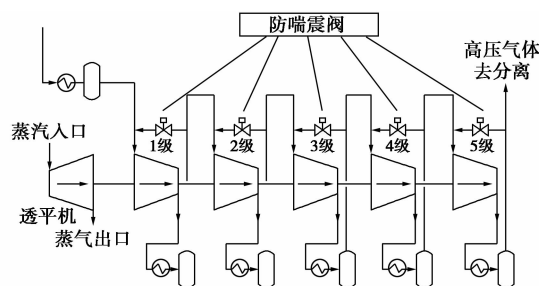


图7 多级压缩机的防喘震阀布置

#### 3.2 能源管理系统 EMS

21世纪以来,由于节能减排重要性越来越高,特别是在能量消耗量大的过程工业中,要求用现代信息技术对公用工程实行精细化能量管理呼声也越来越大,从20世纪90年代起学术界就开发了各种公用工程的数学模型,用计算机来优化公用工程的设计与操作,其中应提及英国以Smith教授为代表的曼彻斯特学派<sup>[10,13-14,16-20]</sup>和我国华南理工大学<sup>[11-12,21-22]</sup>、大连理工大学<sup>[23-24]</sup>在这方面做过许多贡献。到21世纪以AspenTech、EMERSON、Sotetica、ABB、HONEYWELL、YOKOGAWA、KBC Linnhof March、日立集团等为代表的工业软件公司应运推出了一批能源管理系统EMS软件,国内也有宝信软件集团公司、北京研智科技公司等推出类似软件。这类软件通常具有以下主要功能<sup>[25-26]</sup>:①采集工厂实时操作真实数据,用来标定过程设备的效率计算模型;②离线及实时在线的优化操作参数计算;③配置锅炉及透平的负荷;④用能负荷需求预测及最佳运行计划制定与调整;⑤掌握能源资源的实际消耗状况,监控电力、新鲜水、循环水、冷却水、燃料油、瓦斯等公用工程的运行和能源资源的利用;⑥动力设备运行控制,绩效统计等功能;⑦排放监测及预测。

这些商品化的软件如表4所示,采用计算机来监测、管理,乃至实时优化,具有很高的经济效益,投入软件和实施的费用通常不到一年就可以回收。

表 4 国内外商品化 EMS 软件一览表

公司名称	软件名称	特点	应用情况
ASPEN TECH	Energy Cost Manager	需求方用能监测,找出真实耗能与目标差距;提出减少能耗途径	Valero 能源公司应用后使操作成本下降了 12%,天然气用量下降 4%
	Utility Planner	有公用工程设备严格模型,可对蒸汽动力系统建模;有线性规划等优化算法	荷兰国家矿业公司 DSM 使用使量优化效益占总成本 3%~4%,投资回报率高,通常小于 1 年
	Utility Operation	跟踪绩效,监测供应方系统运行情况	
Sotetica	Visual MESA	基于过程模拟的炼油化工厂能源整体管理和优化系统,在对全厂公用工程建模基础上,可以通过优化计算,给出优化操作方案	某炼油厂投用后,节能 5%以上,投资回收期只有半年;通常可使总能耗下降的 2%~4%,投资回收期小于 1 年
日本横河 Yokogawa	Smart Util Enemap	包括优化计算在内的实时模拟监测系统。根据需求负荷预测,编制能源供应最佳运行计划	对发电厂锅炉操作优化,可以使发电成本减少 3%
ABB	Cpm Plus Energy Manager	主要在开放的供电市场中,预报需求方电力要求,协调自产电、采购/销售电力	据报道,可以使使用电成本下降 2%~5%
日立集团公司	FEMS(Factory Electricity Management System)工厂电力能源管理系统	覆盖公用工程、生产设备用点及空调、照明等所有电力消耗系统	
上海宝信软件公司	能源管理中心系统	覆盖蒸汽动力系统、电力系统、给排水系统、环保监测、空分系统等的实时在线能源管理及基础能源管理;专业能源管理;并有预测、调度等功能	在钢铁冶炼企业已有多个企业推广应用,正开始在石油化工企业推广
北京研智杰能科技有限公司	PROSS	蒸汽管网严格在线模拟与智能监测系统	已在中石化、中石油一些企业应用

#### 4 低碳经济对公用工程系统的挑战

2009 年 12 月召开的哥本哈根会议世界 192 个国家就低碳经济取得了共识,重申了“共同但有区别的责任”,明确了减排的长期目标,即全球排放量减到 1990 年(209 亿 t 碳当量)的一半;发达国家则应至少减排其 1990 年排放量的 80%。这将导致一次能源结构发生以下变化:①核能及可再生能源比重大为提高,化石能源比例下降;②天然气超过石油,成为 2030 年前提高能效、减排的主力;③煤的 CO<sub>2</sub> 捕集和存储技术 CCS 将获得广泛应用,2020 年将占 10%;④煤的富氧气化/多联产技术大规模应用。

作为担负能源转换任务的公用工程系统当然也要跟随发生变化。鉴于全球范围来看,天然气将超过石油成为低碳减排的主力,发展燃气轮机驱动的公用工程系统,并结合供热或空调供冷负荷的“分布式冷热电联供能源系统”(Distributed Energy System, DES/CCHP)。通过天然气发电以后的余热梯级利用与制冷和供热等低品位的终端利用,和冷、热、电均在负荷中心就地直供,可使能源利用效率提高到 70%~80%。

但是我国一次能源以煤为主,有近 70 万台蒸汽锅炉和热水锅炉,85% 燃煤,92% 是不到 10 t/h 的低压小锅炉。它们乃是燃煤造成的环境污染的主力,也是低效用能的最大群体。在珠三角、东南沿海等生态敏感地区,它们也是 CO<sub>2</sub> 减排的潜在主要对象。在 2030 年以前可能还会以烧煤的锅炉——蒸汽动力系统为主要形式,辅以烧天然气或液化天然气(LNG)的燃气透平。因而改进公用工程系统能源利用效率,节能减排就成为适应低碳发展的现实选择<sup>[27]</sup>。

英国曼彻斯特大学 UMIST 以 SMITH 教授为首的学派,近年来利用自己开发的公用工程系统模拟模型,研究了碳排放对优化决策的影响,得到以下结论<sup>[28]</sup>:①当前 CO<sub>2</sub> 减排最便宜的途径是提高能效,但有一定限度;②利用提高 CO<sub>2</sub> 排放税、提高燃料费可以寻求低 CO<sub>2</sub> 排放、减少燃料用量的最优化方案。但只能提高到一定水平,再高就没有用了;③其次的经济选择是利用生物燃料实现碳的封闭循环;④CCS 也应开始考虑,随技术成熟而逐步采用。

#### 5 结语

(1) 公用工程是实现外部的能源转化为内部

工艺制造过程所需要用的蒸汽、电、水、气(燃气及氢气等)、风等工艺装置用能的主要环节,公用工程的效率提高是节能减排的重要关键,因涉及全厂总用能量。

(2) 热电联产系统具有较高的能源利用效率,特别是带有燃气透平的热电联产系统已成为国外公用工程系统的主流,实际上国外已经普遍采用,新厂已不再建传统锅炉蒸汽动力系统了。

(3) *R*-曲线是分析热电联产热力学最优化潜力的工具;它可以为找寻实际改善公用工程效率、从而为节省成本提供指南。但是,使用这个工具有其局限性,因为它只涉及热力学第一定律,不能代替热力学第二定律的有效能分析。

(4) 信息技术在公用工程系统中的应用对其节能减排有重要作用,不论是自动控制技术,还是能源管理系统 EMS,均可以明显降低公用工程系统的能耗,采用这类技术的投资回收期均比较短。这也是我国炼化行业公用工程系统与国外差距之处。

(5) 低碳经济对公用工程系统提出的挑战表明:在将来可以采取的对策中,第一要转变一次能源选择,尽量采用以天然气为原料的冷热电联供系统;第二要充分利用信息技术来提高传统公用工程系统的效率,实现大幅度节能减排。这种 CO<sub>2</sub> 减排空间还是不小的。

### 参考文献

- [1] Kemp I C. Pinch Analysis and Process Integration, Elsevier, Singapore, 2007//能量的有效利用:夹点分析与过程集成[M]. 项曙光,等译. 杨友麒,审订. 北京:化学工业出版社,2010.
- [2] 华贲. 低碳能源时代中国热电联产的发展趋势[J]. 沈阳工业学院学报:自然科学版,2010(2):97-101.
- [3] Varbanov P S. Optimization and synthesis of process utility systems [D]. Manchester; University of Manchester Institute of Science and Technology, 2004.
- [4] 华贲. 中国炼油工业能源结构和能量转换技术的发展趋势[J]. 炼油技术和工程,2005,35(11):1-5.
- [5] MIT, The Future of Nature Gas: An interdisciplinary MIT Study Interim Report[R]. Massachusetts Cambridge: MIT, 2010.
- [6] Najjar Y S H. Efficient use of energy by utilizing gas turbine combined systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21: 407-438.
- [7] Kimura H, Zhu X X. R-Curve concept and its application for industrial energy management[J]. Ind Eng Chem Res, 2000, 39: 2315-2335.
- [8] Zhu X X, Asante N D K. Diagnosis and optimisation approach for heat exchanger network retrofit[J]. AIChE J, 1999, 45(7): 1488-1504.
- [9] Singh H R, Smith R, Zhu X X. Economic achievement of environmental regulation in chemical process industries[J]. Comput Chem Engg, 1998, 33: 741-744.
- [10] Lygeros A, Maroulis Z, Prokopoulos G J. An integration software package for total site integration and utilities design[J]. Computers & Chem Eng, 1996, 20(Suppl): s1607-s1612.
- [11] 华贲. 炼油厂能量系统优化技术研究和应用[M]. 北京:中国石化出版社,2008.
- [12] 罗向龙, 华贲, 尹洪超. 石化企业蒸汽动力系统优化设计策略研究[J]. 化学工程, 2009, 37(7): 67-71.
- [13] Marechal F, Kalitventzeff B. Targeting the integration of multi-period utility systems for site scale process integration [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 1763-1784.
- [14] Kentaro Hirata, Pang Chan, Kwok-Yuen Cheung, et al. Site-model utility system optimisation-Industrial case study of KKEPC[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 2687-2692.
- [15] White D C. Save energy through automation[J]. Chem Eng Progress, 2010(1): 26-33.
- [16] Aguilar O, Perry B J, Smith R. Design and optimization of flexible utility systems subject to variable conditions: Part I, Modeling framework, trans [J]. I Chem E: Part A, 2007, 85(A8): 1136-1148.
- [17] Aguilar O, Perry B J, Smith R. Design and optimization of flexible utility systems subject to variable conditions: Part II, Methodology and applications, trans [J]. I Chem E: Part A, 2007, 85(A8): 1149-1168.
- [18] Bruno J C, Fernandez F, Grossmann I E. A rigorous MINLP model for the optimal synthesis and operation of utility plants[J]. Chem Eng Research & Design, 1998, 76: 246-258.
- [19] Hirata K, Sakamoto H, O'Young L, et al. Multi-site utility integration: An industrial case study [J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(1/2): 139-148.
- [20] Wolff A, Groebel M J, Janovsky R. SiteModelling™: A powerful tool for total site energy optimization [J]. Computers & Chem Eng, 1998, 22(Suppl): s1073-s1084.
- [21] 罗向龙, 华贲. 石化企业蒸汽动力系统优化设计建模及应用[J]. 化学工程, 2009, 37(9): 67-71.
- [22] 吴大为, 王如竹, 吴静怡. 微型分布式冷热电联产系统的热力过程综合优化[J]. 化工学报, 2008, 59(S2): 169-175.
- [23] 李振民, 朱新雄. 公用工程与工艺过程热集成的综合分析方法研究[J]. 石油炼制与化工, 2002, 33(4): 58-61.
- [24] 范继宽, 尹洪超. 全局过程公用工程系统改造顶层分析法及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(1): 59-63.
- [25] 戴宇航. 国内外炼油化工企业能源管理系统 EMS 的进展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2010(增刊): 80-86.
- [26] 冯为民. 能量管理中心系统的应用实践[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2010(增刊): 8-16.
- [27] 杨友麒. 化工产业低碳发展路在何方[J]. 中国化工信息, 2010(38)A: 4-5.
- [28] Varbanov P, Smith R. Synthesis of industrial utility systems: Cost effective de-carbonisation[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(7): 985-1001. ■