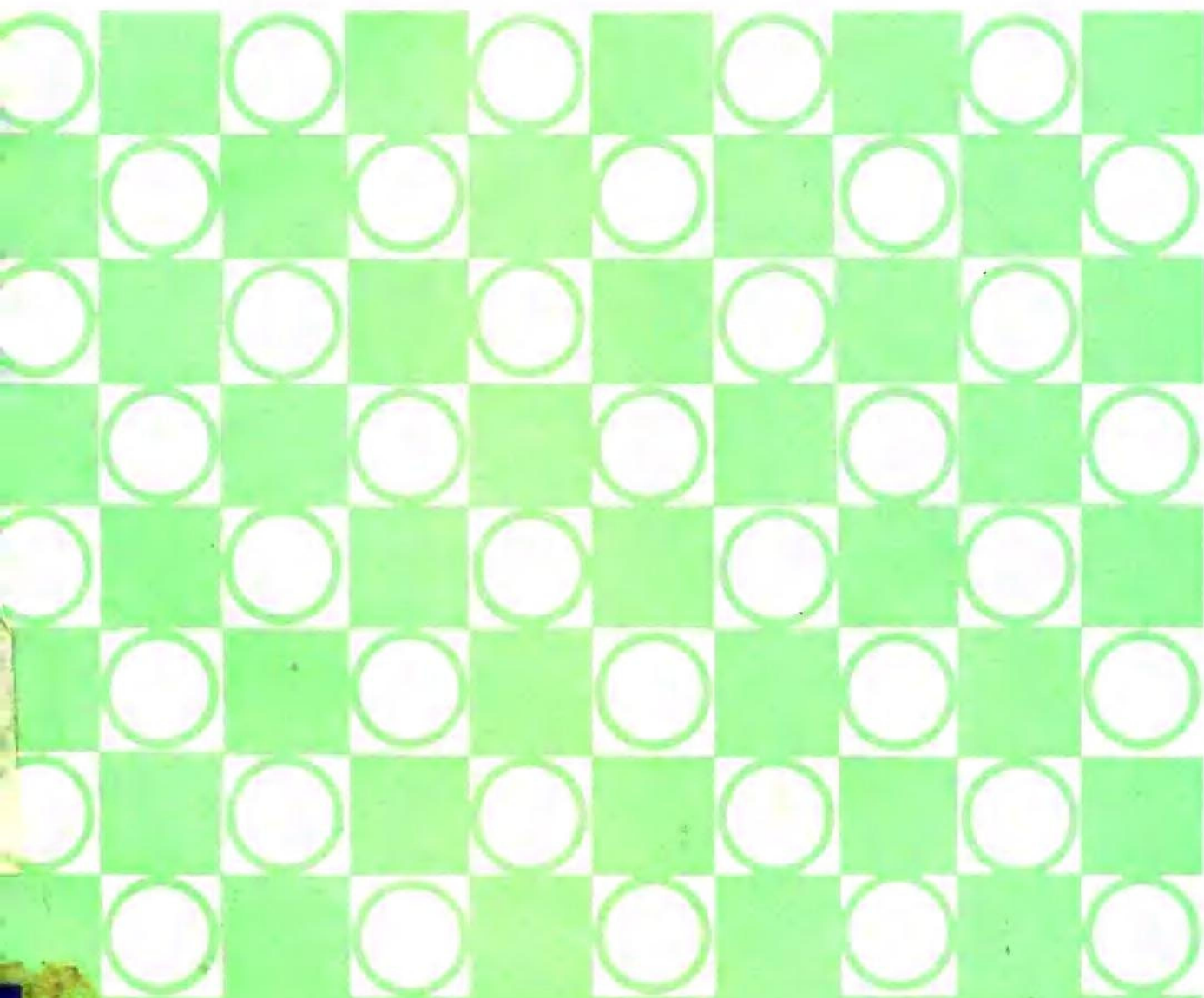


热力学分析与节能

· 论文集 ·

第六届全国热力学分析与节能学术会议学术委员会 编



科学出版社

热力学分析与节能论文集

第六届全国热力学分析
与节能学术会议学术委员会 编

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书收编了 1992 年 12 月在广州召开的第六届全国热力学分析与节能学术会议上宣读的 43 篇论文,这些论文是从 120 篇论文中经会议学术委员会选录的。

本论文集反映了自 1990 年 7 月第五届会议以来国内在热力学分析、热(烟)经济学研究及其在工业节能中的应用的进展。本届会议的主题是能量系统的分析和优化综合。

这些论文的特点是:更加注重热力学分析与热(烟)经济学在各种实际过程中的应用,运用烟经济方法和最优化技术进行过程能量系统的模拟、综合和优化,理论研究同实际应用的结合更加紧密,涉及的专业面不断扩大。除了一般能量系统外,还有许多涉及化工、炼油、石油化工、造纸、能源、制冷、水泥等诸方面的应用实例。

英国曼彻斯特大学过程能量综合中心负责人 Bodo Linnhoff 教授等也出席了会议,这本论文集中收入了他们的一篇论文,反映了挟点技术用于系统全局能量综合的最新进展。

本书可供石油、化工、冶金、工程热物理、热能工程、空调制冷、建材、轻工等领域的研究、设计、管理等工程技术人员和高等院校师生参考。

热力学分析与节能论文集

第六届全国热力学分析
与节能学术会议学术委员会 编

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993 年 10 月第一版 开本:787×1092 1/16

1993 年 10 月第一次印刷 印张:15 1/2

印数:1-2 300 字数:350 000

ISBN 7-03-003643-3/TK·8

定价:13.80 元

序

能源及其利用对发展国民经济与提高生活水平的重要作用，已经为世人周知。不可能设想在能源供应稀缺而其利用又很浪费的条件下，能建成一个现代化的社会。所以，研究如何解决能源问题（有时还更严重地被称为能源危机）就成为世界上所有政治领导人及与能源有关的各类人员的重大任务。能源问题对我国同样非常重要，多年来能源生产远远赶不上国民经济的发展，成为一个不可忽视的战略问题。尤其是二次优质能源——电能等的严重不足，更是大大影响我国发展工农业生产与提高人民生活水平的一个卡脖子的要害。再加上我国人口众多，人均能源资源贫乏，而能源利用水平又较低的具体情况，更要求我们重视能源问题。于是，能源科学这个名词就应运而生。有的人还把能源与信息、材料一同称为目前三大发展支柱。

但是，什么是能源科学呢？好像并没有严格的定义。曾经有人问过我，但我也没说出满意的答案。如果以有能量起作用的现象与过程作为能源科学的研究对象，那么似乎世界上所有的自然科学与生产技术都可以包括在能源科学之内，因为不可能存在没有包含能量的现象与过程。如此定义当然有点口气太大，荒诞可笑。退一步，也许可以这么认为：直接与人类大规模有目的生产与利用能源的学问，可称之为能源科学。这样，包含的内容还是不少，与能源生产有关的如挖煤、采油和修筑电站水坝等等，与能源利用有关的如各种动力机械以及取暖、用电等等。但是，至少一些不是直接以用能为目标的学问就不在内了，如盖房子、种庄稼等等。可是，也有人习惯上只把能源利用或者能源生产作为能源科学的内容。总之，还没有统一的定义。不过，可以设想，能源科学不像数学、物理、化学那样有比较明确的学科研究对象，它所研究的物质运动内容覆盖面很广，或者可以说是一门广义的交叉学科。另外，由于能源利用是各种污染的主要来源，所以能源科学与环境科学之间的关系也日益密切。

然而，可以认为，能源科学的核心是工程热力学，因为后者的主要研究内容就是各种能量的相互转换及其规律。而作为一个系统来考虑利用好各种能源，节约用能，则更是离不开工程热力学。所以，近 10 多年来，不论是国际上还是在国内，都举行过多次各式各样的工程热力学与节能学术会议，以促进这方面工作的开展。例如，美国机械工程师协会（ASME）的先进能源系统分会（Advanced Energy Systems Division），近年来就多次发起在世界各地轮流召开此类国际会议，且自 1989 年以来已形成每年夏初举行一次的惯例：1989 年在北京召开的 TAIES，1990 年在佛罗伦萨召开的 FLOWERS，1991 年在雅典召开的 ATHENS，1992 年在萨拉戈萨召开的 ECOS，以及 1993 年即将在克拉科夫举行的 ENSEC。近年还有可能再在中国召开一次。在国内按不同行业（如石油、冶金、化工等）与按学科本身（如工程热物理学会及其工程热力学分会与能源利用专业委员会等）也举行过多次这类会议。一般地说，前者比较结合某一具体行业的实际，而后者比较更多着眼于一般性的问题与理论分析。由于这些学术会议的推动，我国各行业对节能的认识在近 10 多年内已有很大的进步：70 年代末，很多企业还只强调热力学第一定

律范畴内的节能;而目前,包括了热力学第二定律含义下的节能已初步普及,有关的科研与实践也都上了一个台阶。

全国热力学分析与节能学术会议是上述这类学术会议之一。它开始于1981年,在中国工程热物理学会的支持下,国内一些热衷于有效能分析研究的同行专家们自行组织起来,并已先后召开了六届会议。在第二届会议之后,确定每两年举行一次,由申办单位自筹经费轮流在各地召开。会议规模逐届扩大,论文质量每届也都有所提高,给予支持和赞助的单位也随之增多,这对推动我国节能与热力学分析的发展起到了积极的作用。从第五届会议起,得到科学出版社的支持,此后每届会议都将出版《热力学分析与节能论文集》。

企业单位的人员参加会议宣读论文具有重要意义,它反映着热力学分析新方法的工程实用化,并可进一步推动其工程化的进程。本次会议在这方面有所进展。参加会议的人数由上届的87人增加到114人,宣读的论文120篇,经学术委员会认真讨论,选入论文集的有43篇。此外,这次会议上还有英国曼彻斯特大学过程能量综合中心负责人 Bodo Linnhoff 教授及其助手从英国赶来参加,并且和与会同行探讨了挟点技术与换热网络的合成方面的进展与问题,开创了这项学术会议有国外著名学者前来参加的先例,他们宣读的论文有一篇被选入论文集。

本届会议由中国节能协会石化节能与系统分析委员会、中国能源研究会节能与企业能源管理专业委员会、中国工程热物理学会工程热力学分会与能源利用专业委员会、广州市能源学会及华南理工大学化学工程研究所联合主办,还得到中国石化总公司生产部、广州石化总厂、石家庄炼油厂、广州市科学技术协会等单位的支持。

正如前述,能源科学及其核心之一的工程热力学以及节能技术,是目前的一个热门课题。整体来说,我国与世界先进水平还有很大差距,但就部分而言,尤其是在理论分析方面,也有个别达到世界水平的先进成果。希望通过这本论文集的出版,能够为促进和宣传我国的能源科学与节能技术作出贡献,也希望能为读者提供一些有益的信息与知识。

谨向为召开本次学术会议与出版本论文集而努力的所有同志表示敬意与谢意。

蔡睿贤

1993年春节写于北京红霞公寓

第六届全国热力学分析与节能 学术会议组织委员会

主任: 王加璇

副主任: 刘士武 杨友麒 房广信

委员: (以姓氏笔划为序)

王 玲 王以刚 王加璇 华 贲 朱其定 朱克雄 朱明善 刘士武
李玉明 杨东华 杨泽亮 杨友麒 宋之平 陈烈强 张管生 房广信
孟昭利 项新耀 钱立伦

第六届全国热力学分析与节能 学术会议学术委员会

主任: 华 贲

副主任: 史美声 宋之平 项新耀

委员: (以姓氏笔划为序)

王 玲 王加璇 尹清华 冯 霄 史美声 华 贲 朱克雄 朱明善
宋之平 宋世谟 杨东华 杨志荣 杨友麒 陈文芳 李有润 李世武
房广信 郑丹星 项新耀 姚平经 钱立伦 曹同勤

目 录

第一部分 热力学分析、热(焓)经济学基础研究

9201	能量系统的单耗分析·····	宋之平 胡三高 周少祥	2
9202	面向“智力圈”经济学——在经济发展预测中的焓方法与生态学·····	王加璇 Brodyansky V. M.	7
9203	浅述焓传递·····	项新耀	11
9204	功损失作为过程可能性判据·····	宋世谟 李文斌 史宇文	17
9205	燃气轮机估价方程·····	张 娜 蔡睿贤 林汝谋 方 钢	23
9206	注蒸汽燃气轮机燃烧室不可逆损失计算方法·····	周伏秋 王克光 严家骥	28
9207	回热器对低温脉管制冷机性能影响的热力学分析·····	张 力 钱立伦 吴沛宜	33
9208	制冷循环最佳温差的有限时间热力学分析·····	严子浚 陈丽璇	38
9209	原电池的 Gibbs-Helmholtz 方程成立的条件性 ·····	谢元祥	41

第二部分 实际过程的热力学分析、热(焓)经济学分析及工业应用

9210	合成氨装置一段转化炉系统焓分析·····	张永贵 李东明 项新耀	48
9211	相变贮能器贮能过程中的焓损失分析·····	金援越 张 力 王启杰 陈钟顺	52
9212	喷雾干燥塔内的焓分析·····	赵玉珍 李爱滨 金朝铭 靳彩萍	57
9213	乙酸合成系统的热经济分析·····	王爱志 周维德 杨东华	62
9214	一种新型集油系统的热力学分析及其经济性·····	李东明 张永贵 吴照云	69
9215	造纸厂全系统焓经济分析·····	朱克雄 赵勤攻 雷亨顺	73
9216	某炼油厂 80 万吨/年蒸馏装置用能评价分析·····	李东明 王志国 吴照云	80
9217	东营原油库用能系统焓分析及节能改进·····	朱法银 黄银山	86

第三部分 过程能量系统的模型化、模拟、综合与优化

9218	化工过程数据的筛选与校正·····	杨友麒 王擎天	92
9219	过程系统的能量综合和优化·····	华 贲	105
9220	大型尿素生产装置的能量与焓衡算·····	刘景富 翟立英 王 海	110
9221	蒸发系统的热经济学优化·····	谭志明 华 贲 邓颂九	118
9222	热能输送网路的热经济最优合成·····	李世武 胡卫东	125
9223	石化企业热能动力系统的优化调度·····	汝方济 赵士杭 华 贲	131
9224	能量供需在我厂的合理匹配·····	汤为华 张沛生	135

9225	管壳式换热器的优化选型·····	吴国东 尹清华 华 贲 徐天华	140
9226	糠醛精制装置过程用能焓分析及改进·····	李志英	146
9227	小氮肥余热回收系统的综合与优化·····		
	·····	李伟忠 胡润华 董新法 涂淑凤 华 贲	151

第四部分 挟点技术与换热网络的合成

9228	挟点技术在减少 CO ₂ 排放和全局能量综合中的应用 ·····		
	·····	Bodo Linnhoff and Vikas R. Dhole	156
9229	用双最小换热温差设计价格最优换热网络——计算机自动合成·····		
	·····	谢启明 杨东华	165
9230	换热网络设计方法的回顾和评述·····	肖云汉 朱明善 王补宣	174
9231	换热网络弹性分析方法的研究·····	李国庆 华 贲 刘伯龙 吴广荣	181
9232	窄点技术的超目标应用——换热系统窄点温差的超前优化·····		
	·····	郭文豪 李 昆 史美声	187

第五部分 能量转换联产和能量升级系统的分析及优化

9233	热电联产供热系统优化设计的研究·····	邓永红 王 玲 王汝武	194
9234	热机-热泵联合循环热力学综析与热泵动力选择·····	张秉汉	199
9235	压缩式热泵蒸发系统的热经济学优化设计·····	冯 霄	204
9236	高温吸收式太阳能热泵集热器的最佳工作温度·····	陈金灿 严子浚	208
9237	电厂-热泵系统与热电联产系统的节能分析·····	杨泽亮 陈如洵	211
9238	论现阶段我国热泵科研的方针·····	陈如洵 杨泽亮	214

第六部分 节能技术与企业能源管理

9239	企业能量平衡模式研究·····	孟昭利 蔡子群	218
9240	电力拖动加工设备有效利用能量的计算方法·····	杨志荣 蔡子群	222
9241	以焓平衡观点评判水泥窑炉的能耗和节能潜力·····		
	·····	解焕民 刘宗明 程晓舫 朱志辉	225
9242	热电厂利用供热蒸汽过热度——一种节能的新方法·····		
	·····	陈国慧 林万超 邢秦安	229
9243	内燃机车高温排气的利用·····	侯竟成 吴 华	233

CONTENTS

Part 1 FUNDAMENTALS OF THERMODYNAMIC ANALYSIS AND THERMOECONOMICS

- 9201 Consumption Rate Analysis of Energy Systems *Song Zhiping, Hu Sangao and Zhou Shaoxiang* (Graduate School, North China Institute of Electric Power) 2
- 9202 Towards "Noosphere" Economics—The Exergetic Method and Ecology in Economic Development Forecast *Wang Jiaxuan* (Graduate School, N. China Inst. of Elec. Power) and *Brodyansky, V. M.* (Moscow Power Engineering Institute) 7
- 9203 Primary Analysis on Energy Transfer *Xiang Xinyao* (Daqing Petroleum Institute) 11
- 9204 Work Loss as a Criterion for Probility of Process *Song Shimo, Li Wenbin and Shi Yuwen* (Dept. of Chemistry, Tianjin University) 17
- 9205 Price Estimation Formulas for Gas Turbine Generation Sets *Zhang Na, Cai Ruixian, Lin Rumou and Fang Gang* (Institute of Engineering Thermophysics, Academia Sinica and Zhonghua Gas Turbine R & D Corporation) 23
- 9206 A Method for Calculating the Irreversible Loss in a Gas Turbine Combustion Chamber with Steam Injected *Zhou Fuqiu, Wang Keguang and Yan Jialu* (Harbin Institute of Technology) 28
- 9207 Thermodynamically Analyzing the Effect of Regenerator on a Pulse Tube Refrigerator Performance *Zhang Li, Qian Lilun and Wu Peiyi* (Dept. of Power Machinery Engineering, Xi'an Jiaotong University) 33
- 9208 Finite-Time Thermodynamic Analysis for Optimal Temperature Differences of Refrigeration Cycles *Yan Zijun and Chen Lixuan* (Dept. of Physics, Xiamen University) 38
- 9209 The Tenable Conditions of the Gibbs-Helmholtz Equation in Chemical Cells *Xie Yuanxiang* (Chemistry Dept. Jinan University) 41

Part 2 THERMODYNAMIC AND THERMOECONOMIC ANALYSIS OF PRACTICAL PROCESS WITH INDUSTRIAL APPLICATIONS

- 9210 Exergy Analysis of the First Section Transformed Heater for a System of Synthetic Ammonia *Zhang Yonggui, Li Dongming and Xiang Xinyao* (Daqing Petroleum Institute) 48
- 9211 Analysis of the Exergy Dissipation during Storing Energy in Phase Change Energy Storage *Jin Yuanyue, Zhang Li, Wang Qijie and Chen Zhongqi* (Dept. of Power Machinery Engineering, Xi'an Jiaotong University) 52

9212	The Exergy Analysis for the Atomizing Drying Tower <i>Zhao Yuzhen, Li Aibin, Jin Chaoming</i> and <i>Jin Caiping</i> (Harbin Institute of Technology)	57
9213	Thermoeconomic Analysis for a System of Synthetic Acetic acid <i>Wang Aizhi</i> (Shanghai Institute of Chemical Technology), <i>Zhou Weide</i> and <i>Yang Donghua</i> (East China University of Chemical Technology)	62
9214	Thermodynamic Analysis of a New Kind of Gas-oil Collection and Transportation System and Its Economics <i>Li Dongming, Zhang Yonggui</i> and <i>Wu Zhaoyun</i> (Daqing Petroleum Institute)	69
9215	Exergy-Economic Analysis for Complete System of a Paper Plant <i>Zhu Kexiong, Zhao Qingong</i> and <i>Lei Hengshun</i> (Dept. of Heat Power Engineering, Chongqing University).....	73
9216	The Energy Utilization Analysis on 800,000 t/a Distillation Units of a Refinery Plant <i>Li Dongming, Wang Zhiguo</i> and <i>Wu Zhaoyun</i> (Daqing Petroleum Institute)	80
9217	Exergy Analysis and Energy-saving Improvement for the Energy-utilizing System of Dongying Crude-oil Storage <i>Zhu Fayin</i> and <i>Huang Yinshan</i> (Dept. of Petroleum Engineering, College of Staff and Workers at Shengli Oilfield)	86

Part 3 MODELLING, SIMULATION, SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF ENERGY SYSTEM

9218	Process Data Screening and Reconciliation <i>Yang Youqi</i> and <i>Wang Qingtian</i> (China National Chemical Information Center).....	92
9219	Energy Integration and Optimization of Process Systems <i>Hua Ben</i> (South China University of Technology)	105
9220	Calculation of Energy and Exergy Balance for Large-Scale Urea Production Assemblage <i>Liu Jingfu</i> (School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology), <i>Zhai Liying</i> and <i>Wang Hai</i> (Cangzhou Chemical Fertilizer Plant)	110
9221	Thermoeconomic Optimization of Evaporation Systems <i>Tan Zhiming, Hua Ben</i> and <i>Deng Songjiu</i> (South China University of Technology)	118
9222	The Thermoeconomic Optimal Synthesis of the Thermal Energy Transport Network <i>Li Shiwu</i> and <i>Hu Weidong</i> (Dept. of Aircraft Engine, Northwestern Polytechnical University)	125
9223	Optimal Dispatch of Steam and Power System for Petrochemical Plants <i>Ru Fangji</i> (Manufacturing & Management Division of SINOPEC) <i>Zhao Shihang</i> (Dept. of Thermal Engineering, Tsinghua University) and <i>Hua Ben</i> (Chemical Engineering Research Institute, South China University of Technology).....	131
9224	Optimum Match of the Energy Supply and Demand in Our Refinery <i>Tang Weihua</i> and <i>Zhang Peisheng</i> (Shijiazhuang Refinery)	135
9225	The Optimal Selection for Tube-shell Heat Exchanger <i>Wu Guodong, Yin Qinghua</i> <i>Hua Ben</i> and <i>Xū Tianhua</i> (Chemical Engineering Research Institute, South China University of Technology).....	140

9226	Exergy Analysis and Improvement of Furfural Refinery <i>Li Zhiying</i> (Refinery of Maoming Petrochemical Engineering Co.).....	146
9227	The Synthesis and Optimization of Heat Recovery System of Nitrogen Fertilizer Factory <i>Li Weizhong, Hu Runhua, Dong Xinfu, Tu Shufeng</i> and <i>Hua Ben</i> (South China University of Technology).....	151

Part 4 PINCH TECHNOLOGY AND HEAT EXCHANGER NETWORK SYNTHESIS

9228	Targeting for CO ₂ Emission for Total Site <i>Bodo Linnhoff</i> (Linnhoff March Ltd) and <i>Vikas R Dhole</i> (The University of Manchester Institute of Science and Technology)	156
9229	Automatic Synthesis of Cost Optimal Heat Exchanger Networks with a Microcomputer using Dual Approach Temperatures <i>Xie Qiming</i> and <i>Yang Donghua</i> (East China University of Chemical Technology)	165
9230	Review and Analysis of Heat Exchanger Network Synthesis <i>Xiao Yunhan, Zhu Mingshan</i> and <i>Wang Buxuan</i> (Thermal Eng. Dept., Tsinghua University)	174
9231	Study for Flexibility Analysis of Heat Exchanger Network <i>Li Guoqing, Liu Bolong, Wu Guangrong</i> (Changlin oil Refinery) and <i>Hua Ben</i> (South China University of Technology)	181
9232	Supertargeting Application of Pinch Technology—The Optimization of Pinch Temperature Difference Ahead of Design <i>Guo Wenhao, Li Kun</i> (Luoyang Petrochemical Engineering Co.) and <i>Shi Meisheng</i> (Design Institute of Shanghai Petrochemical Complex)	187

Part 5 ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF COGENERATION AND UPGRADING SYSTEMS

9233	Study on the Optimization of Design for the Heat Supply System of Heat-Electricity Cogenerating Station <i>Deng Yonghong, Wang Ling</i> (Dalian University of Technology) and <i>Wang Ruwu</i>	194
9234	Thermodynamic Synthetic Analysis of the Heat Engine/Heat Pump Combined Cycle and Selection for the Heat-Pump Power <i>Zhang Binghan</i> (Petroleum University)	199
9235	Optimum Design of Mechanical-Recompression Evaporator <i>Feng Xiao</i> (Dept. of Chemical Engineering, Xi'an Jiaotong University).....	204
9236	The Optimum Operating Temperature of a Solar Concentrator in a High-Temperature Absorption Solar Heat Pump <i>Chen Jincan</i> and <i>Yan Zijun</i> (Dept. of Physics, Xiamen University)	208
9237	Energy-Saving Analysis for Power Plant-Heat Pump Systems and Cogenerating Systems <i>Yang Zeliang</i> and <i>Chen Ruxun</i> (South China University of Technology).....	211
9238	On the Scientific Research and Development for Heat Pump in China at Present <i>Chen Ruxun</i> and <i>Yang Zeliang</i> (South China University of Technology)	214

**Part 6 ENERGY SAVING TECHNOLOGY AND ENTERPRISES
ENERGY MANAGEMENT**

9239	Study on Model of Energy balance for Enterprises <i>Meng Zhaoli</i> (Tsinghua University) and <i>Cai Ziqun</i> (Institute of High Energy Physics, CAS)	218
9240	A Method for Useful Energy Calculation of Electric Power Equipment <i>Yang Zhirong</i> (Energy Research institute, Spc-CAS) and <i>Cai Ziqun</i> (Institute of High Energy Physics, CAS)	222
9241	Judgment on the Energy Consuming and Saving Potentiality of Cement Kiln from the Viewpoint of Exergy Equilibrium <i>Xie Huanmin</i> , <i>Liu Zongming</i> (Shandong Institute of Building Materials), <i>Cheng Xiaofang</i> and <i>Zhu Zhihui</i> (University of Science and Technology of China).....	225
9242	Steam Power Heating Plant Utilizing the Superheated Steam of the Steam Supplied—A New Way of Energy-saving <i>Chen Guohui</i> , <i>Lin Wanchao</i> and <i>Xing Qin'an</i> (Dept. of Energy, Xi'an Jiaotong University).....	229
9243	Heat Recovery of the Exhausted Gas in a Locomotive <i>Hou Jingcheng</i> and <i>Wu Hua</i> (Technical Information Research Institute of the Ministry of Railways)	233

第一部分 热力学分析、热 (烟)经济学基础研究

能量系统的单耗分析

宋之平 胡三高 周少祥

(华北电力学院北京研究生部)

摘 要

单耗分析是在焓和焓经济学的基础上所设计的能量系统分析的理论和方法,以产品单耗作为降耗节能的主要指标,分析单耗的构成及其分布和变化的图景,为节能降耗技术提供实用的理论依据。

一、单耗分析法的提出

所谓单耗就是生产单位产品所消耗的能源和原材料,它比热效率指标更直观更明确,因而在产业部门得到了广泛的使用。

八五期间乃至在今后的一个长时期内,节约能源和降低原材料的单耗将是技术进步的重点任务之一。通常为了生产能量或物质所需的能源和原材料的单耗的数据实际上是个平均值,是生产中各个设备、各个环节在各个时刻运行状态的综合结果。为了降低单耗,不仅需要了解单耗的最后综合结果,而且需要了解单耗的结构、单耗在生产各环节、各设备中的分布情况,以及它们在不同时刻的动态变化,也就是说要了解单耗的时、空构成及其变化。此外,为了节能降耗,不仅应从技术的角度还要从经济的角度来科学地决策一个设备是否应该检修、更换或者做必要的技术改进。单耗分析就是为这些目的服务的。单耗分析还将有助于从现行的系统出发按科学的路线进行调整,改善系统结构使之逼近最优设计。

焓的概念体现着用能和节能的实质,利用焓的概念可以把不同的能量或物质生产过程的单耗分析统一起来。焓分析虽然克服了能量分析的不足,然而实践证明它依然未在工程界得到广泛的应用,这固然有历史传统的原因,但也反映了它依然存在着不足,阻碍着它的作用的发挥。单耗分析是在焓分析和焓经济学的基础上作了一些重要的改进形成的。

首先是直观性问题。单耗这个术语已在生产实践中被广泛采用,焓则不然,它依然停留在学术界和少数工程技术人员中,原因是焓依然比较抽象。此外,焓效率指标的多义性、多值性^[1]、在燃料产品定义和成本分摊中的人为规定性^[3,4]以及规定基准环境时遇到的困难、焓数据的缺乏也制约着焓分析的广泛使用。本文使用单耗的概念,但又不是在传统的高度上使用,而是溶入能量系统分析方法的近代进展,并提供了一种形式,使得有可能把焓分析、焓分析以及能量分析结合起来,确定单耗的分布、变化和构成,以期推进现代节

能理论的实用化。

二、产品单耗的时空分布

任何能量系统,如发电系统、化工系统、炼油系统等的单耗都是由两部分组成:理论最低单耗 b_{\min} 和附加单耗 $\sum_I b_I$ 。理论最低单耗本质上就是单位产品所蕴涵的焓值与单位燃(原)料所蕴涵焓值的比值(焓值的具体算法见参考文献[1])。对于给定的最初燃(原)料和给定的最终产品,理论最低单耗是个定值,不存在时空分布问题,它的数值可表示为

$$b_{\min} = (F/e_F)/(P/e_P) = e_P/e_F \quad (1)$$

其中, e_P , e_F 分别为单位产品和单位燃料(或原材料)的焓, F 和 P 分别为系统总体的燃料焓和产品焓。部分产品的理论最低能量单耗如表 1。

表 1 部分产品的最低理论能量单耗[吨标煤/吨]

钢	水泥	铝	原油	纸	电力	供暖热能
0.216	0.025	0.90	0.014	0.007	123 g/(kW·h)	3.4 kg/GJ

附加单耗 b_I 是为了使系统中设备 I 的运转所支付的焓代价,它的数值因设备而异,对于同一设备又因该设备的结构状态和运行状态而异,因而有“时空分布”问题。产品的附加单耗随时等于系统中所有设备的附加单耗之和。求取单耗时空分布的目的在于把单耗的粗放型审计模式变为科学的结构审计。

把系统中的所有设备和流分别编号,构造设备与流的“联系矩阵” \mathbf{A} , 该矩阵以设备序号 I 为行,以流的序号 J 为列,矩阵元素 a_{IJ} 为 0,表示该行的设备与该列的流没有直接联系,元素为 +1 和 -1 分别表示该列的流流入和流出该行设备。给定的系统具有给定的联系矩阵,它不随时间而变化,这给我们的计算带来很多方便。设系统中有 n 个设备、 m 个流,全系统各个设备的附加单耗组成一个 n 维的向量 \mathbf{b} , 每个流的焓组成一个 m 维向量 \mathbf{E} 。定义

$$\mathbf{b} \equiv \{b_1 b_2 \cdots b_n\}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{E} \equiv \{E_1 E_2 \cdots E_m\}^T \quad (3)$$

其中, E_1, E_2, \cdots, E_m 表示各股流的焓,角标 T 表示矩阵的转置。 \mathbf{b} 和 \mathbf{E} 不仅依系统不同而异,而且一般是时间的函数,常记为 $\mathbf{b}(\tau)$, $\mathbf{E}(\tau)$ 。在 $P > 0$ 的前提下,各个设备的附加单耗可通过以下的矩阵式求取:

$$\mathbf{b}(\tau) = [(e_P/e_F)/P] \mathbf{A} \mathbf{E}(\tau) \quad (4)$$

三、设备的特征结构参数

对设备品质的评估不论使用焓效率指标还是使用设备附加单耗指标,指标数值的变化不一定是由于设备本身品质和状态的变化,还可能由于运行工况的变化或是外界条件的变化造成的。为了评价设备本身的状态与品质,在单耗分析中我们引入设备特征结

构参数 K , 它应能综合反映设备本身的本质性能; 能与设备造价有直接的简单联系, 其数值应易于监测和确定, 最好是单一参数。

特征结构参数常可通过机理分析求得。例如, 对于板式太阳能集热器

$$K = [F'(\alpha\tau)_c/U]/[H_{sc}/\Delta t_{bi}]$$

可作为特征结构参数。定义式中的符号分别代表采热板效率因数、穿透-吸收率、总散热系数、太阳常数和介质的沸冰点温差。利用集热器的 K 值可预测集热器在各种气象条件下的动态特性^[6]。

对于逆流表面式换热器, 以角码 c 和 h 分别代表冷流体和热流体, 如果传热系数 U , 传热面积 A , 冷、热流体的质量流量和比热的乘积 $W_c \equiv M_c C_c$, $W_h \equiv M_h C_h$ 均为常数, 定义 $(1/W) \equiv (1/W_h) - (1/W_c)$, 则

$$K \equiv UA/W \quad (5)$$

就是逆流换热器比较理想的特征结构参数, 因为它不但能反映换热器的本质性能, 而且可以很容易地与换热器的造价联系起来[见下文中的式(12)]。不但如此, 它还可以把运行中冷、热流体的温度变化关联起来, 从而使该参数很容易通过所测取的运行数据计算出来, 也可以通过该参数预测不同工况下冷、热流体温度的变化规律。流体温度与换热器的特征结构参数 K 的关系是

$$T_h'' - T_c' = (T_h' - T_c'') \exp(-K) \quad (6)$$

$$-K = LN[(T_h'' - T_c')/(T_h' - T_c'')] \quad (7)$$

其中, 上角标“'”和“''”分别代表入口和出口。

四、设备的降耗效应和相对降耗效应

在能量系统中, 有一类设备的作用主要在于完成系统总体所规定的物质生产或能量转换任务, 另一类设备的作用主要在于节能降耗。第二类设备的降耗效应 β 是在设计工况下解列该设备所造成的系统总体单耗的提高值。

很明显, 设备的降耗效应必然与设备的特征结构参数有密切的关系。在设计工况附近, 若设备 I 的特征结构参数的变化为 ∂K_I , 相应的系统单耗的变化为 ∂b , 则比值

$$\beta_I' \equiv -(\partial b/\partial K_I) \quad (8)$$

称为设备 I 的相对降耗效应。不论第一类设备或第二类设备, 相对降耗效应应在设计优化和技术改进决策中都有很重要的作用。从降耗的角度看最优设计应使设备的相对降耗效应为 0。当一个设备的相对降耗效应等于或小于 0 时, 再提高设备的结构性能就没有意义了。

五、节能降耗投资的经济效益

若设备 I 的投入费用为 C_I , 均摊到单位产品后可得

$$c_{I,P} = C_I/(P/c_P) \quad (9)$$

设 c_P 为燃料单价, 则降耗投资的经济效益

$$\gamma_I = c_P \beta_I - c_{I,P} \quad (10)$$

表示由于装设设备 I 而造成的单位产品成本的降低。降耗投资相对经济效益

$$\gamma'_i \equiv -\partial C_F / \partial C_I = -c_F \partial b / \partial c_{I,P} = -c_F \beta'_i (P / e_P) / (\partial C_I / \partial K_I) \quad (11)$$

表示燃料费用的节省对于投资费用的变化率。 C_I 与设备的特征结构参数 K_I 的关系视具体设备而异。对于蒸汽发电厂中的回热加热器,设 $W_h = \infty$,则其价格一般可表示为如下形式:

$$C_I = aK_I^R \quad (12)$$

六、结 论

单耗分析的理论基础是焓分析,是焓分析的一种形式。它便于把焓分析用于节能降耗的实践。某个发电厂的热力系统单耗分析的实例表明,它确有直观性强、实用性强的特点,可用于热力系统热经济性的在线监测,所使用的“设备特征结构参数”被证明是成功的。可以预期,该法同样可成功地用于其他能量系统的分析,但对于不同的设备所使用的特征结构参数的构成还要进行具体分析和设计。

附 录

单耗分析可以有多种应用。这里选择了一个简化的发电厂热力系统,并作了一些简化假设。

分析对象是一个50MW汽轮发电机组,其热力系统和在某个时刻在额定功率下的运行参数如图1所示,是#1低加有缺陷的工况。由热力系统图所确定的联系矩阵如表2所示,算得结果如表3所示。算得的其他参数为: $\sigma_{IV} = -2.8$, $K_{IV} = 1.5116$, $\beta_{IV} = 2.83 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$, $\beta'_{IV} = 1.952 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$, $C_{IV} = 38000 K_{IV}^0 \text{ ¥}$ 。今把有缺陷的#1低加修复使系统恢复设计工况,并设设备年利用小时数为4000,寿命为20年,燃料价格为每吨70元,则 $C_{IV,P} = 1.736 \times 10^{-2} \text{ ¥/(kW}\cdot\text{h)}$, $\gamma_{IV} = 1.81 \times 10^{-4} \text{ ¥/(kW}\cdot\text{h)}$, $\gamma'_{IV} = 22.4$,这相当于每年净节约36142 ¥。

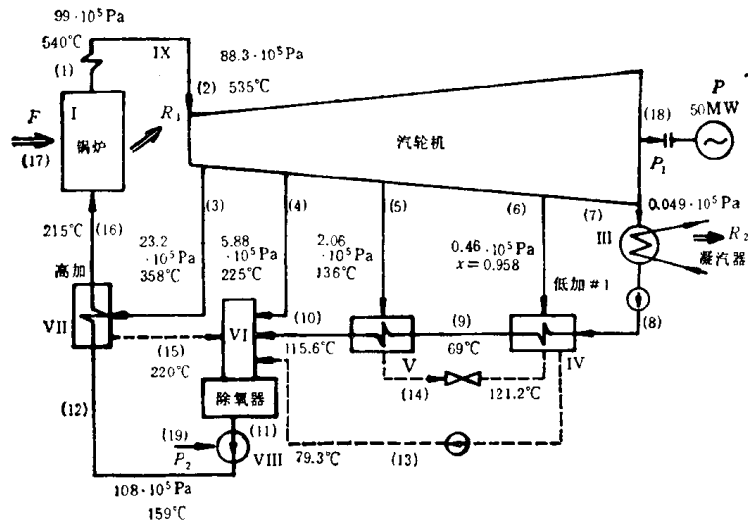


图1 被简化的发电厂热力系统