

绿色供暖(空调)系统

(华北电力大学研究生部, 北京 100085) 宋之平

摘要: 本文提出了一个新的术语“绿色供暖(空调)系统”, 即低排放供暖总能系统, 为的是通过这一术语的提出能从供暖空调这一领域对推进可持续发展战略有所助益。为了对“绿色供暖(空调)系统”的范畴加以科学地界定和量化, 本文介绍了可逆型供热系统的概念和作者设计的“单耗分析”的理论和方法, 在这一基础上, 指出了这类系统所应具备的特征, 并结合某地的具体条件提出了该系统的技术实施方案, 计算了它的性能指标, 分析了其技术经济上的可行性及需要研究讨论的问题。

关键词: 供暖系统; 空调系统; 可持续发展; 热电联产
中图分类号: TK01 TK11 TK47 文献标识码: A

1 问题的提出

当前的各种热门课题中莫过于“可持续发展战略”, 能源领域在可持续发展中占有特殊重要的地位。在一次能源中以热的形式作为终端消费的, 将近一次能源总消费量的三分之二, 其中低于 100 °C 的低品位热约为一次能源总耗量的三分之一至五分之一, 可见供暖系统的重要地位。

现行各类供暖系统的一次能源消耗率大不相同。分散小锅炉的效率约为 55%, 折合煤耗为标准煤 62 kg/GJ, 高效热电联产的供热效率可高达 88%, 折合标准煤 39 kg/GJ。如果有一种供暖系统, 既有技术上的可行性, 又有经济上的合理性, 而且它在煤耗和与环境相容性的指标上不是一般地高于现行先进供暖系统的指标, 而是高出一、两个“档次”(比如煤耗和向环境排放的有害物质达到现行先进系统的 50% 以下), 那么应称它为什么样的供暖系统呢? 作者认为, 不妨称它为“绿色供暖系统”, 或称“低排放供暖总能系统”, 以别于一般性先进的供暖系统。这样的系统有无可能性呢? 答案是肯定的^[1~14], 如能和空调系统结合则在效益方面会更好, 可以称它为“绿色供暖(空调)系统”。这就是讨论这一问题的现实性。

从字面上讲, 绿色供暖(空调)系统就是具有高度环境相容性的系统。但要相容到什么程度呢? 它

在技术上和结构上应有什么特点呢? 它是一成不变的呢, 还是具有相对性和动态性? 技术上的任何一个术语都应对其内涵有个明确的界定。

提出绿色供暖系统这一术语并加以界定和规范的目的并非只是出于标新立异的动机, 主要是想通过这一提法对供暖系统的改进起到标志作用和激励作用, 以服务于可持续发展战略的实施。

2 有关绿色供暖(空调)系统的几个基本问题

2.1 理论最低单耗: 通向“绿色化”的理论可能性

本文中“单耗”这一术语指的是煤耗和成本的总称。

通向“绿色化”的基础性措施就是大幅度地节能降耗。通晓节能的理论限度是重要的, 它可使我们既不会超越客观可能性去奢求过高的节能降耗目标, 也不会节能降耗方面轻率地下无所作为的结论。供暖系统的理论最低煤耗 $b_{\min q}$ 发生在可逆系统中; 理论最低成本 c_{\min} 是这样的成本, 它在生产中, 没有不可逆现象发生, 设备没有任何耗损(子系统的寿命期为无穷长), 不消耗任何管理、税金和其它的固定用, 所以它就是最低煤耗的成本。所以

$$b_{\min q} = 31.42(1 - T_0/T_r) \text{ 标准煤 kg/GJ} \quad (1)$$

$$c_{\min} = c_f b_{\min q} \quad (2)$$

设环境温度 $T_0 = 270 \text{ K} (-3 \text{ } ^\circ\text{C})$, 室温 $T_r = 293 \text{ K} (20 \text{ } ^\circ\text{C})$; 热源温 $T = 1800 \text{ K} (1527 \text{ } ^\circ\text{C})$, 则理论上的供暖最低煤耗为标准煤 3.2 kg/GJ

2.2 可逆型供暖系统: 绿色供暖(空调)系统的基础

任何节能措施的本质都是使所涉及的能量系统向可逆系统逼近, 逼近的合理程度取决于当时当地的技术、经济环境和社会条件。

任何现实的供热系统都是不可逆的, 但不可逆的程度可以有很大不同。为此我们从范畴上区分两类供热系统, 即可逆型和非可逆型供热系统。设一个能量系统的目的是从非热的一次能源获取热量, 在

能量转换和终端利用的整个过程中以热能为唯一出现形式的系统称为非可逆型供热系统。如果一个供热系统,其非热的一次能源在能量转换中除热能外还有非热的形式(如电、功等)出现,且牺牲所出现的部分或全部非热能量用于汲取并溶入环境热或余热源热量后供给热用户,则称为“可逆型供热系统”(reversible mode of heating system 或 thermodynamic heating system)。可逆型供热系统是绿色供暖(空调)系统的基础。

最典型的可逆型供热系统就是热电联产供热总能量系统和热泵供热总能量系统,二者在技术实施上虽各有特点,但具有热力学的等价性,它们包括六个子系统,即:燃料能释放与转移子系统、电量发生子系统、电能输配子系统、热量发生子系统、热能输配子系统和热用户子系统。在这六个子系统中,对系统的目的(供热)来说必不可少的子系统,如燃料释放与转移子系统、能量输配子系统、用户子系统等称为“第一类子系统”,缺少了第一类子系统,系统的目的就不可能达到。另一类子系统对达到系统的目的来说并非必不可少,它们的作用只是在于能提高过程的可逆性或降低产品的成本,称为“第二类子系统”。所以由这六个子系统组成的供热系统也可称为“一般化供热系统”,非可逆型供热系统可视为这一系统的特例。

“可逆型供热系统”这一术语始见于世界著名的热学专家、现代节能理论的先行者,德国的 Behr, H. D. 教授的著作^[1],作者发展了他的这一思想并对可逆型供热系统作了更明确的界定。

2.3 “单耗分析”:绿色系统定量化界定的方法

2.3.1 “单耗分析”原理

各种多联产能量系统的产品单耗分摊历来是个棘手的问题,热电联产系统也不例外^[9]。作者1992年提出的“单耗分析”的理论和方法^[4-10]是在现代 $\eta_{\text{燃}}$ 和 $\eta_{\text{电}}$ 经济学的基础上设计的,特点有四,一是它与当代许多 $\eta_{\text{燃}}$ 经济学文献不同,只针对总能量系统定义单耗,消除了单耗的多义性;二是以一次能源消耗作为能耗指标,从而把能耗与资源、环境联系起来;三是把煤耗和成本折算到用户处,即总能量系统的终端;四是结合用能周期的负荷持续曲线,计入了单耗的时空分布和总能量系统运行的动态性。把这一方法用于热、电单耗分摊,可突出分摊中的“客观实在性”,把“人为规定性”减到最低限度^[9],因而使单耗指标具有科学性、统一性和可比性,在可持续发展战略被世界上高度关注的今天,这类指标有被实际采用的前景。

“单耗分析”认为单耗是由理论最低单耗和附加单耗构成,附加煤耗主要是由总能量系统中的每一

子系统的不可逆性造成的,还有一些非主流的“额外附加煤耗”,如为了机组启动所消耗的燃料和其它一些不可避免的燃料损失等。附加成本主要是由总能量系统中的每一子系统的投资折旧和附加煤耗等运行费用造成的,还有一些非主流的由工资、福利、税金、经营管理等费用造成的“额外附加成本”。设有 n 个子系统 m 个流,它们的联系矩阵为 A ,流的列向量为 E ,终端产品总 $\eta_{\text{用}}$ 为 P ,则由 $\eta_{\text{用}}$ 平衡可通过下式定出 n 个子系统的附加单耗列向量 b, c 为:

$$b = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T = \begin{pmatrix} b_{\text{min}}/P \\ \end{pmatrix} AE \quad (3)$$

$$c = [c_{F1} \ c_{F2} \ \dots \ c_{Fn}]^T = \begin{pmatrix} c_f \ b_{\text{min}}/P \\ \end{pmatrix} AE$$

用 b_0, c_0 表示额外附加单耗,用户终端处产品单耗为:

$$b = b_{\text{min}} + \sum_0^n b_1 \quad (4)$$

$$c = (c_{\text{min}} + \sum_0^n c_{Fi})(1 + \epsilon) + \sum_0^n c_{Zi} \quad (5)$$

上式中 ϵ 为环境治理系数。

从“单耗分析”的观点,第二类子系统的作用是节能降耗,但其本身又消耗燃料和费用,前者与后者的差值称为其“降耗效应”,等于在给定的工况下,某第二类子系统被解裂所造成的单耗提高值,据此第 I 子系统燃料的降耗效应 β 和成本降耗效应 θ 分别为:

$$\beta_I(\tau) = (\Delta b)_{I-\text{vanish}} \quad (6)$$

$$\theta_I(\tau) = (\Delta c_p)_{I-\text{vanish}} \quad (7)$$

其中角码 I-vanish 表示该子系统的消失或解裂。第二类子系统的降耗效应,也存在着时空分布,这一分布对于理解可逆型供暖(空调)系统诸环节的必要性,对于监控运行和指导优化设计都具有重要的作用。

2.3.2 “单耗分析”在供热系统中的应用

把“单耗分析”理论具体应用于供热系统,就得到了供热系统单耗分析模型^[7]:

$$b_q = b_{0q} + b_{\text{min}q} / \prod_{j=1}^N \eta_j \quad (8)$$

$$c_q = (c_{F0q} + c_{\text{min}q} / \prod_{j=1}^N \eta_j)(1 + \epsilon) + \sum_0^n c_{Zi} \quad (9)$$

从“单耗分析”理论导出的式(8)、式(9)具有明确的物理意义,对可逆型供热系统的节能降耗具有指导价值。以式(8)而论,如不计额外附加煤耗,它的物理意义就是 $EECR \times b/Q_r$,即因供热而造成的供电量减少值与供电煤耗的乘积和用户实得热量的比值。附加单耗在诸子系统间的分配,对于子系统 I 有:

$$bI_q = (b_{\text{min}q} / \prod_{j=I+1}^N \eta_j)(1/\eta_I - 1) \quad (10)$$

$$cI_q = (cf b_{\text{min}q} / \prod_{j=I+1}^N \eta_j)(1/\eta_I - 1) \quad (11)$$

其中, $\eta_j = E_j^{\text{out}}/E_j^{\text{in}}$ 为子系统 J 的 $\eta_{\text{燃}}$ 效率或 $\eta_{\text{电}}$ 指

数, 序号是从燃料能释放子系统向用户子系统递增的, 所以 η_j 顺序代表 $\eta_b, \eta_w, \epsilon_Q, \eta_{QL}, \eta_{QD}$ 和 η_{US}

上述模型为不同类型供暖系统的对比提供了共同的基础。设环境温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$, 热用户的室温要求为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 在用户处供回水温度分别为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $90\text{ }^\circ\text{C}$, 在一定的原始数据下不计 b_0 , 根据式 (8) 可以算出不同供暖系统的煤耗:

$$\text{锅炉供暖 } b_q = 34.12(1 - 273/293)/(0.147 \times 0.301) = 52.8 \text{ kg/GJ}$$

$$\text{电热供暖 } b_q = 34.12[1 - 273/293]/[0.512 \times 0.688 \times 0.92 \times 0.227 \times 0.301] = 105.3 \text{ kg/GJ}$$

$$\text{热泵供暖 } b_q = 34.12[1 - 273/293]/[0.512 \times 0.688 \times 0.92 \times 0.205] = 34.2 \text{ kg/GJ}$$

$$\text{热电联产供暖 } b_q = 34.12[1 - 273/293]/[0.512 \times 0.688 \times 1.5 \times 0.789 \times 0.301] = 18.6 \text{ kg/GJ}$$

“单耗分析”在发电子系统和供热总能系统的应用, 详见文献[17, 18]

3 供暖总能系统子系统分析: 深层次揭示大幅度节能降耗的现实可能性

3.1 发电厂子系统 $\eta_{\text{用}}$ 效率与“热端”可逆性

在供暖总能系统的六个子系统中, 可以以热量发生子系统为中心, 其上称为“热端”, 其下称为“冷端”。热端包括燃料能释放/转换子系统(如蒸汽电站中的锅炉)和电量发生子系统。在研究热电联产时, 时常把上述两个子系统的 $\eta_{\text{用}}$ 效率一起考虑, 从而得到发电厂子系统的 $\eta_{\text{用}}$ 效率。

$$\eta_b \eta_w = W_{\Sigma} / (\Sigma E_f) \quad (12)$$

其中 W_{Σ} 是在给定的 $\Sigma(E_1^{\text{out}} - E_1^{\text{in}})$ 下, 机组不供热时的供电量, E_1^{out} 和 E_1^{in} 为工质在燃料能释放/转换子系统的出口 $\eta_{\text{用}}$ 与入口 $\eta_{\text{用}}$, E_f 为燃料的化学 $\eta_{\text{用}}$ 和物理 $\eta_{\text{用}}$ 之和。

可逆型供热系统的单耗与非可逆型不可“同日而语”^[15], 前者为单耗的降低开辟了无比广阔的空间。热端可逆性是可逆型供热系统的必要条件。式 (8) 指出, 如不计额外附加单耗, 同是可逆型系统, 不同形式、容量及参数的机组的发电厂子系统 $\eta_{\text{用}}$ 效率相差很多, 如: 6 MW 机组约为 22%; 300 MW 机组约 35%; 流体燃料联合循环机组约 55%。受其影响, 低效机组系统的供热煤耗是高效机组系统的 1.6 至 2.5 倍。热端可逆性对供热系统的重要性可见一斑。

对于发供电总能系统, 热端可逆性的重要性已

被广泛地认识, 是多年来电力工作者不懈追求的目标。对于供热总能系统, 它的重要性虽也被经常提及, 但多数停留在能量平衡的基点上, 对其战略上的极端重要性估计不足, 所以在环境问题如此紧迫的今天, 可逆型供热系统中的热电联产系统仍是小机组统治的世界, 这一现状具有世界的性质, 这就是可逆型供热系统的研究至今未提到应有地位的原因。1997 年 12 月在东京召开的联合国气候变化公约第三次缔约方会议上, 不少人认为《为了环境应减少电能的消费》, 而国际能源机构却发表了 IEA 报告《电力技术: 步入 21 世纪和可持续发展未来的桥梁》。这一理应被专家早已明确的论点在会上却被一些人认为是个新颖概念。

3.2 热量发生子系统

对热量发生子系统的深刻认识也至关重要。

在可逆型供热系统中, 热量发生子系统指的是热电联产中的热网换热器或热泵系统中的热泵机组。按定义热量发生子系统的 $\eta_{\text{用}}$ 指数。

$$\epsilon_Q = E_{R0} / EECR \quad (13)$$

其中: E_{R0} 代表该子系统出口处所给出的热 $\eta_{\text{用}}$ 。EECR (Equivalent Electricity Consumption Rate) 是因供热而牺牲的供电量, 它的定义是在发电厂子系统中燃料总量、工质初参数和流量均给定的情况下不供热时的供电量 W_{Σ} 与供热时供电量 W 之差, 即:

$$EECR = W_{\Sigma} - W \quad (14)$$

热量发生子系统的 $\eta_{\text{用}}$ 指数 ϵ_Q 主要依变于子系统出口处的供回水温度 $T_{R0}^{\text{out}}, T_{R0}^{\text{in}}$ 和与之相应的 EECC, 如使用电动热泵供热, 该指数就是热泵机组的 $\eta_{\text{用}}$ 效率, 其值总是小于 1; 但涉及热电联产时, 其值有可能大于 1, 且依变于热网加热器传热的端温差 ΔT_{R0} 、供热抽汽管压损以及加热级数等。图 1(a) 是某热电联产系统中热量发生子系统的 $\eta_{\text{用}}$ 指数。在计算中把注意力集中在 ϵ_Q 的变化规律上, 暂不考虑机组结构问题。从图中可以看出, 热电联产系统中热量发生子系统的 $\eta_{\text{用}}$ 指数可能比 1 大出许多, 而 $\eta_{\text{用}}$ 指数的变化如不计额外附加煤耗对煤耗和运行成本有几乎是成反比例的影响。明确这一点对我们客观冷静因地制宜地综合权衡热电联产这一传统技术和热泵这一近年兴起的新技术有重要意义。

3.3 关于供热总能系统的“冷端”可逆性

供热总能系统的“冷端”包括热量输配子系统和用户子系统。设用户子系统的入口 $\eta_{\text{用}}$ 为 E_R , 则热量输配子系统的 $\eta_{\text{用}}$ 效率为:

$$\eta_{QL} = E_R / E_{R0} \quad (15)$$

此效率取决于输热管道长度、单位长度的散热损失、载热介质平均温度和热量发生子系统出口温程 (temperature range) 等, 如图 1(b) 所示。

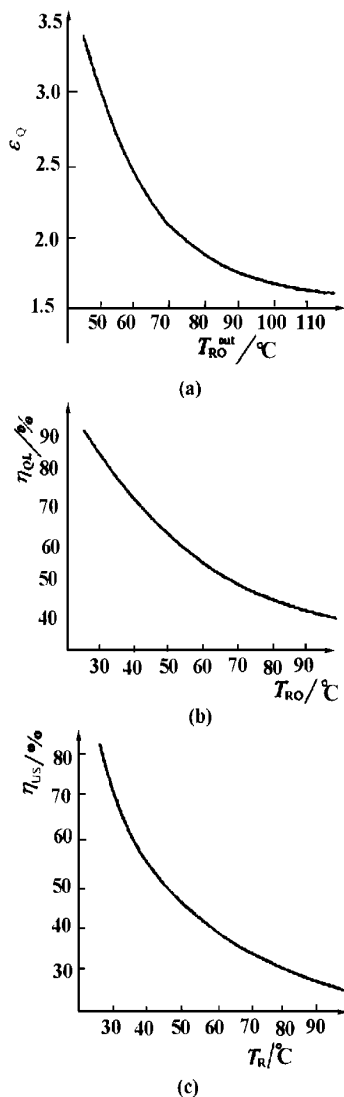


图 1 热网加热器火用指数和“冷端”火用效率

热用户子系统的火用效率 η_{US} 示于图 1(c), 它是用户实际得到的火用 E_r 与 E_R 之比:

$$\eta_{US} = E_r / E_R = (Q_r / Q_R) \times [(1 - T_0 / T_r) / (1 - T_0 / T_R)] \times [(1 - \epsilon_r) / (1 + \epsilon_R)] \quad (16)$$

其中 ϵ_r 和 ϵ_R 分别为用户子系统的用户侧和该子系统的热网侧流体输送功与热量火用之比^[2]。

从图 1 可以看出, 对于供暖系统来说, 通过提高“冷端”可逆性以大幅度节能降耗有着巨大的潜力, 而挖掘这一潜力的关键就是降低冷端的温度水平^[16], 其前提性条件就是提高用户子系统的火用效果, 使用诸如风机盘管换热器、地板顶

棚换热器等的高火用效换热器, 提倡使用直接热网, 取消一次网与二次网之间的换热环节。

蒸汽循环供电总能系统的冷端可逆性问题解决得较好。遗憾的是直到今天解决供热总能系统冷端可逆性的技术措施远滞后于技术、经济的发展所提供的可能性, 更与对可持续发展的客观需求不相适应。

4 绿色供暖(空调)系统的界定

4.1 绿色供暖(空调)系统的基础性特征

综观上面的分析, 参照式(8)式、(9)可以看出, 六个子系统中每个子系统的火用效率都有不小的潜力可以挖掘, 且各子系统的火用效率/指数均以同等的力度影响着用户终端煤耗、成本和向环境排放物

的数值。据此, 就现阶段而言不妨把“绿色供暖(空调)系统”界定为如下的几条:

- 它应是可逆型供热系统;
- “热端”可逆性较高
- “冷端”可逆性较高, 尽量用低品位能量供应用户;
- 直接式热网的热电联产供暖技术应得到充分发挥;

◦ 可逆型供暖系统中的电能如也作热利用, 应基于热泵原理, 且具有结合地区的有利纬度即气候条件、或能与地下水抽取/回灌技术和其它低温热源利用和余热源利用技术相结合等条件;

◦ 使用高火用效散热器一般应与空调系统结合, 使用户处的高(火用)效散热器有冬夏两用的可能, 同时降低制冷工况的一次能源消耗率, 使“绿色系统”有经济活力。

4.2 进一步的要求

绿色供暖(空调)系统的界定标准不应是一成不变的, 而应是动态的、发展的。绿色供暖(空调)系统有广阔的发展余地, 总的原则应是把上述基础性特征与其它能改善环境相容性的措施多管齐下地加以实施, 如:

- 与先进动力机械与先进动力循环结合, 使“热端”可逆性得到更大的提高;
- 与燃用天然气、LNG 或其它清洁燃料的使用相结合、与洁净燃烧技术结合(如 HAT 燃烧方式), 降低所排放的有害物质质量;
- 与洁净煤技术结合(如煤的液化 PFBC IGCC 等);
- 与海水淡化等水资源技术结合;
- 与垃圾处理技术和缓解资源、环境其它要素的技术相结合。

4.3 技术方案示例

绿色供暖(空调)系统的技术方案可以有多种, 举例如下:

4.3.1 一个只提高“冷端”可逆性的方案

某市区工厂有一自备电厂, 装有一台 6 MW 的凝汽式汽轮发电机组, 供电煤耗为每千瓦小时 550 g 标准煤。厂区附近生活水平已达到了应用供暖(空调)系统的阶段。在此范围内, 常年都有不低于 10 °C 的地下水资源可供汲取热量后回注地下, 另有 500 吨/时 35 °C 的余热水资源多处。根据所给的条件, 用凝汽器兼作热网加热器, 把凝汽温度由原汽轮机额定的 32 °C 提高为 60 °C, 使得在锅炉投入煤量和蒸汽初参数、蒸汽流量保持原汽轮机额定值不变的情况下, 发电量由原来的 6 MW 减为 5.12 MW, 即牺牲了 0.88 MW 的电力, 但因此却赢得了 14.88

MW 的热功率供给附近的热用户。按煤耗构成机理, 根据式(8), 这部分热量煤耗仅为 $EECR \times b / Q_r =$ 标准煤 9 kg/GJ 如无使用热泵的条件, 可把多余电量上网, 按目前通行的“好处归电”的算法, 其上网的供电煤耗为标准煤 170 g/(kW·h), 比一般 6 MW 机组在额定进汽量 30×10^3 t/h 下供暖时的联产供电煤耗(360 g/(kW·h)左右)降低了 53%。这就是提高“冷端”可逆性所带来的好处。但根据所给定的客观条件, 可以通过电动热泵把余热源和地下水中的热量利用起来。设 500 t/h 的余热源从 35 °C 放热至 25 °C 时被排放, 在这一温度下热泵 COP 值取为 5, 可得到热功率 7 267 kW, 需消耗电功率 1 453 kW。此时除厂用电外尚余下电力 3 070 kW, 用于汲取温度不低于 10 °C 的地下水热量, 在这一温度下热泵的 COP 值取为 3, 相应的热功率为 9 210 kW。利用 6 MW 机组所得到的总热功率为 $14.88 + 7.27 + 9.21 = 31.36$ MW, 综合的供暖煤耗为标准煤 26.6 kg/GJ, 比一般 6 MW 机组的联产供暖煤耗(44 kg/GJ 左右)降低了约 40%。可见提高供暖系统与环境的相容性的潜力很大, 既具有技术可行性, 也有经济活力。

4.3.2 联合循环方案

燃用流体燃料的燃气—蒸汽联合循环已是国内外很流行的方案, 仍以 6 MW 蒸汽轮机为基础构成联合循环, 其总功率可达 22.8 MW, 供电效率取 50%。此时蒸汽底循环以热电联产方式产生的热功率仍为 14.88 MW, 除欠供电力外尚余 21.92 MW 的电力, 燃料消耗量为 5.6 t/h, 如不使用热泵供暖, 则供热的真实煤耗仅为 3.6 kg/GJ, 如按“好处归电”法计算, 则上网电的煤耗为标准煤 158 g/(kW·h)。如仍按上节指标用所余电力通过热泵供暖热功率 79.79 MW, 即把联合循环厂变为纯供热厂, 与底循环总计供热热功率为 94.67 MW, 且不再存在热、电分摊问题, 供热的标准煤耗为标准煤 16.6 kg/GJ。

5 结论

只要能源结构是以煤和化石燃料为主, 供暖系统的节能改进就必然是可持续发展的一个重大问题。通过本文分析可以看出, 大幅度地降低供暖总能系统向环境排放的温室气体和其它有害环境物质总量不仅在理论上充分依据, 而且就世界和我国的技术、经济发展阶段而言是可行的, 有生命力的。文中对“绿色供暖(空调)系统”作了界定, 特别强调了充分运用热电联产形式和提高“冷端”可逆性的重要性, 并以现实可达且偏于保守的指标计算了两个

技术方案。

计算表明, 供暖的终端真实煤耗达到标准煤 9 ~ 3.6 kg/GJ, 具有技术的和经济的现实可行性。按现行算法计算其上网电煤耗也可达到标准煤 170 ~ 158 g/(kW·h), 如果结合热泵的使用把热源厂转变为具有单一最终产品的供暖厂, 则不再存在热、电分摊一类的问题, 供暖煤耗可达标准煤 26.6 ~ 16.6 kg/GJ, 具有这样指标的供暖总能系统应无愧于“绿色”的称号。

参考文献

- [1] Behr, H. D. Thermodynamik. Berlin; Springer-Verlag, 1978.
- [2] 宋之平, 王家璇. 节能原理. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [3] Song Zhi-Ping. Indigenous construction of sizable desalination units for dual purpose power plant in China. Energy, 1991, 16(4): 721 ~ 726.
- [4] 宋之平. 单耗分析的理论和实施. 中国电机工程学报, 1992, 12(4): 15 ~ 21.
- [5] 宋之平等. 能量系统的单耗分析. 见: 热力学分析与节能论文集. 北京: 科学出版社, 1993, 10: 2 ~ 6.
- [6] 宋之平. 单耗分析中经济因素的考虑. 热能动力工程, 1995, 10(2): 78 ~ 83.
- [7] 宋之平. 供热系统“单耗分析”模型. 热能动力工程, 1996, 11(5): 305 ~ 310.
- [8] 宋之平等. “单耗分析”案例. 工程热物理学报, 1996, 17(2): 397 ~ 399.
- [9] 宋之平等. 试论联产电厂热电单耗分摊中的人为规定性与客观实在性. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 217 ~ 220.
- [10] 宋之平. 联产机组供热的“单耗分析”方法. 热能动力工程, 1997, 12(1): 1 ~ 4.
- [11] 宋之平. 新概念热电联产. 现代电力, 1997, (2): 1 ~ 5.
- [12] 宋之平. 新模式热电联产系统: 联产供热的一个发展. 工程热物理学报, 1997, 18(5): 536 ~ 539.
- [13] Song Z. P. Improvements of Utility-based CHP Heating Systems. Proceedings, Intern. Symp. on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems 1997
- [14] 宋之平. 以总能系统观点和用热终端高效化为特征的大中型火电厂联产供热系统新模式. 中国电机工程学报, 1998, 18(1): 1 ~ 5.
- [15] 宋之平. 从可持续发展的战略高度重新审视热电联产. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 225 ~ 230. 中国能源(转载), 1998(11): 23 ~ 28, 32.
- [16] Крѣф Г. Системы низко-температурно о отопления. Стройиздат 1983.
- [17] 李洪涛. 火电厂单耗分析及其软件实施. [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 1994.
- [18] 尚玉琴. 单耗分析理论在热电联产供热系统中的应用. [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 1997.
- [19] Diamant, R. M. E. District Heating and Cooling for Energy Conservation. London; John Wiley & sons, 1981
- [20] 能源利用中的单耗分析方法技术导则(GB/T 14909-94, 1994-01-05 发布, 1994-10-01 实施)

(复 编)

压气机湿压缩研究的发展 = **New Developments Concerning the Study of Compressor Wet Compression** [刊, 汉] / Liu Jiancheng, Wen Xueyou (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 87 ~ 90

Wet compression as an approach for enhancing turbine compressor efficiency has been receiving increasing attention nowadays. This paper focuses on recent developments concerning the wet compression theory both at home and abroad. **Key words:** compressor, wet compression, water spray

燃煤电厂脱硫的现状分析和防治对策 = **An Analysis of the Current Status of Coal-fired Power Plant Desulfurization Technology and Some Measures Taken for its Further Advancement** [刊, 汉] / Gu Nianzu (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2000, 15(2). — // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 91 ~ 92, 115

A brief description is given of the present status of SO₂ emissions by coal-fired power plants and its development tendency. With the further development of power industry relevant measures have been taken to address the issue of environmental protection. Also discussed in this paper are some countermeasures adopted to reduce the desulfurization costs. **Key words:** sulfur dioxide, coal-fired power station, desulfurization, environmental pollution

绿色供暖(空调)系统 = **Green Heat Supply (Air Conditioning) System** [刊, 汉] Song Zhiping (North China Electric Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 93 ~ 97
This paper introduces a new technical term, “green heat supply (air conditioning) system”, i. e., “low-emission heat-supply total energy system”. It is hoped that the coining of this technical term will render some help in implementing a sustainable development strategy from the perspective of heat supply and air conditioning. To scientifically delimit and quantify the category of green heat supply (air conditioning) system, the paper describes the conception of a reversible heat supply system and the theory and methodology of “unit consumption analysis” designed by the author. On this basis the characteristics essential for the above-cited system are designated. Furthermore, in connection with the specific conditions of a certain locality a technical scheme has been proposed to implement the system. The performance indexes of the system have been calculated. In addition to an analysis of the system’s technical and economic feasibility other related issues are also discussed and studied in this paper. **Key words:** heat supply system, air conditioning system, sustainable development, combined heat-and-electricity cogeneration

考虑生态效应的能量系统三重优化分析方法 = **A Triple Optimal Analysis-method Used for an Energy System with Ecological Effects Being Taken into Account** [刊, 汉] Liu Shiqiang, Yang Yunshun (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 98 ~ 99

By incorporating an item of total expenses of environmental protection into the energy cost equation of the existing thermoeconomics one can perform a quantitative analysis in thermoeconomics with ecological effects being taken into account. On the above basis the authors have come up with a triple optimal analysis-method. **Key words:** thermoeconomics, energy system, optimal analysis

热声热机及其应用 = **Thermoacoustic Engines and Their Applications** [刊, 汉] / Dong Kaijun, Luo Yunwen (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 100 ~ 103

Due to their outstanding merits thermoacoustic engines have received a widespread attention from the general public. Described in this paper are the basic structure of the engine as well as the mechanism and conditions of a thermoacoustic conversion. In addition, a brief account is given of the present status of the thermoacoustic engine applications, its future development trends and further measures to be taken for its improvement. **Key**