

绿色供热系统——经济建设中的重大课题

宋之平

(华北电力大学研究生部, 北京 100085)

[摘要] 提出了一个术语“绿色供热系统”, 并阐述了它应有的特征。为此, 介绍了可逆型供热系统的概念和一般化供热系统模型。为了界定绿色供热系统, 使用了作者设计的《单耗分析》的理论和办法。基于绿色供热系统所界定的原则, 把排放物的量和有害成分大幅度地降下来的供热方案具有现实的可行性, 如再与诸如蒸馏法海水淡化等技术相结合, 不但具有可持续发展空间, 单就其可能产生的水量、水质以及造水成本而言, 均堪与流域调水方案相竞争。

[关键词] 可持续发展; 水资源; 热电联产; 热泵; 多联产

1 引言

和平与发展是世界面临的两大主题。要发展就只能走可持续发展的路。能源、水源和环境, 是可持续发展战略中具有支柱性的三大问题。绿色供热系统是解决这三大问题的关键技术之一, 因而在实施可持续发展战略中有其特殊的重要性。

从能源的角度, 文明用能应是新世纪用能战略的基本原则。能源损失与浪费的原因五花八门, 但从本质的高度, 原因只有一个, 那就是不可逆性。不可逆性的定量表示, 就是熵产。熵产降低了在给定环境下能源的可用性, 其所降低的值称为熵耗损。因此, 在技术、经济与环境的客观制约下, 与不可逆性斗争, 减少熵产、减少熵耗损, 就是文明用能的指南。

文明用能的一个最重要方面就是对热能的文明利用。一次能源的利用无非是热利用、电利用、动力利用和物质转换方面的利用, 其中, 近2/3的一次能源在终端利用中是以热能的形式被消耗的。热能属于低品位能量, 又常以高品位的化石燃料来供应, 由于品位的严重失配, 不可逆性极高, 是社会能源利用效率低下的最重要根源。

解决水资源问题的方案无外乎四类, 一是采地下水, 二是调水, 三是“造水”, 指的是用净化法使不能用的水变为能用的水, 四是节水。其中, 长期无度地超采地下水是危险的, 调水方案不但常伴有难以预测的生态等不良后果, 而且受到严格的地理限制和资源限制, 不用很久就会出现“无水可调”的局面。所以, 造水和节水是将来解决水资源问题的主要途径。使用化石燃料的规模能量系统一般都是耗水大户。能不能把耗水大户变为节水大户, 进而变为造水大户, 是绿色供热系统研究的另一任务, 它将为缓解和解决水资源问题作出重大贡献。提出绿色供热系统这一术语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热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。那么“绿色供热系统”这一术语的定义是什么? 科学技术上的任何一个术语都应对其内涵有个明确的界定。从字面上讲, 绿色供热系统就是具有高度环境相容性的供热系统。但要相容到什么程度呢? 它的理论根据是什么? 在技术上和结构上应有什么特点? 它是一成不变的呢, 还是具有相对性和动态性? 本文将循序地对它给以界定和规范。

[收稿日期] 2000-11-29

[基金项目] 博士点基金资助项目(2000007903)

[作者简介] 宋之平(1933-), 男, 北京市人, 华北电力大学教授, 博士生导师

2 供热的理论最低单耗：通向“绿色化”的理论可能性

文中“单耗”这一术语指的是单位量的终端产品所消费的一次能源量 b 和成本 c 。理论最低煤耗(标准煤当量,下同) b_{\min} 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(它们的寿命期为无限长),不消耗任何管理、税金和其他的固定费用,所以理论最低成本就是最低煤耗的成本。于是供热的理论最低煤耗和理论最低成本分别为^[1,2]:

$$b_{\min,q} = 31.42(1 - T_0/T) \text{ kg/GJ} \quad (1)$$

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

设环境温度 $T_0 = 270 \text{ K}$ ($-3 \text{ }^\circ\text{C}$), 用户所需温度 $T = 293 \text{ K}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), 煤(标准煤当量,下同)价(人民币,下同)为 $c_f = 0.3 \text{ 元/kg}$, 则理论上的供热最低煤耗为 3.2 kg/GJ , 最低成本为 0.96 元/GJ 。

海水是多组元的溶液。设有 n 个组元, 其中第 J 个组元的摩尔分数为 x_J , 活度为 a_J , 则分离每摩尔海水中所需的最小焓如下式所示^[1]:

$$e = -R_M T_0 \sum x_J \ln a_{0,J} \quad (3)$$

沿海岸海水的成分受多种因素的影响。为了利用上式得出一个定量的概念, 参照海水的大成分, 设海水中只含 NaCl 和 MgCl_2 两种杂质, 其摩尔分数分别为 8.51×10^{-3} 和 9.95×10^{-4} , 两种杂质和水在环境中的活度 a 分别为 5.787×10^{-3} , 6.963×10^{-4} 和 0.9905 , 标准煤价 $c_f = 0.3 \text{ 元/kg}$, 代入(3)式后可知, 分离每 t 海水所需的焓为 $e = 0.008139 \text{ GJ}$, 折合理论最低煤耗和最低成本分别为

$$b_{\min,w} = (34.12 \text{ kg/GJ}) \times 0.008139 \text{ GJ} = 0.2778 \text{ kg}$$

$$c_{\min,w} = (0.3 \text{ 元/kg}) \times 0.2778 \text{ kg} = 0.083 \text{ 元}$$

若用蒸馏法造水, 每 kg 蒸汽凝结放出的热量为 $r = 2500 \text{ kJ}$, 供热蒸汽的凝结温度 $T = 350 \text{ K}$, 环境温度 $T_0 = 300 \text{ K}$, 则分离每 t 海水所需要的理论最低蒸汽量为

$$m = e/[r(1 - T_0/T)] =$$

$$8139 \text{ kJ}/[2500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \times (1 - 300/350)] = 22.7 \text{ kg}$$

即在假设的前提下, 蒸汽的理论最高造水比为 44 ^[3], 换言之, 每 t 蒸汽的理论最高造水量为

44 t 。

3 可逆型供热系统：绿色供热系统的基础

从一次能源的投入直到把能量系统的最终产品送到用户这样一个能量系统的整体, 称为“总能系统(total energy system)”。任何现实的供热总能系统都是不可逆的, 但不可逆的程度可以有很大不同。作者从范畴上区分两类供热总能系统, 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, 在一次能源投入和终端用户消费间具有好的谐时性, 且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(如电能、动力或体现在一次能源中间产物中的化学能等)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, 这样的供热系统本文把它定义为“可逆型供热系统”^[4] (reversible mode of heating system)。

最典型的可逆型供热系统就是电动热泵供热总能系统。热电联产供热总能系统(包括热电联产海水淡化系统、热电联产集中制冷系统)以及多联产(如热—电—煤气联产或热—电—甲醇联产)供热总能系统也是最重要的可逆型供热系统。热泵供热和热电联产供热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6个子系统^[5], 即: 燃料能释放与转移子系统、燃料能转换为电能和/或其他非热能子系统(简称电量发生子系统)、电能和/或其他非热能输配子系统(简称电能输配子系统)、热量发生子系统、热能输配子系统和热用户子系统。由这六个子系统组成的供热系统也可称为“一般化供热总能系统”, 因为一切供热系统, 包括非可逆型供热系统均可视为这一系统的特例。

4 “单耗分析”——绿色系统定量化界定的方法

“单耗分析”方法是笔者1992年在现代焓分析和焓经济学的基础上设计的^[2]。“单耗分析”认为, 单耗是由理论最低单耗和附加单耗构成。应用于供热系统^[6], 理论最低单耗为 $b_{\min,q}$ 和 $c_{\min,q}$ 。附加煤耗主要是由总能系统中的每一子系统的不可逆性造成的, 其值为 $b_{\min,q} (1/\Pi_{k=1}^6 \eta_k - 1)$, (其中

η_K 分别为 6 个子系统的焓效率 η_b 、 η_w 、 η_{WD} 、 ϵ_Q 、 η_{QD} 和 η_{US} 。还有一些非主流的“额外附加煤耗” $b_{0,q}$ ，如为了机组启动所消耗的燃料和其他一些不可避免的燃料损失等。附加成本是由总能系统中分摊到每一子系统和单位量终端产品的固定费用（包括由投资折旧、工资、福利、税金、经营管理等费用构成的“额外附加成本”） $c_{z,k,q}$ 和由附加煤耗费用等运行费造成的。于是供热系统的单耗可表示为：

$$b_q = b_{0,q} + 34.12[1 - T_0/T] / [\eta_b \eta_w \eta_{WD} \epsilon_Q \eta_{QD} \eta_{US}] \text{ kg/GJ} \quad (4)$$

$$c_q = c_f b_g (1 + \epsilon) + \sum_{k=0}^6 C_{z,k,q} \quad (5)$$

其中， ϵ 是考虑污染税引入的系数

式 (4) 和式 (5) 具有原则的重要性，是文中基础性的表达式。从式中可以看出，如不计额外附加单耗，6 个子系统中每个子系统的焓效率均以同等的力度影响着用户终端煤耗，且它们都与煤耗值成反比例。成本中的燃料费用也具有同样的性质。

5 供热子系统分析——深层次揭示绿色化的现实可能性

5.1 “热端”的可逆性与环境相容性

在供热总能系统的 6 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与转移子系统（如蒸汽电站中的锅炉）和电量发生子系统。在研究供热系统时，时常把上述两个子系统的焓效率一起考虑，从而得到热端焓效率 $\eta_b \eta_w$ 。现今的供热系统多数还是传统的非可逆型供热系统，其热端焓效率极低，仅处于 12%~16% 的水平。

提高热端可逆性是绿色供热的本质性特征，是大幅度减少供热总能系统向环境排放有害物质总量的本质性措施。迄今尽管业内人士对发、供电的热端可逆性有足够的认识，但对于供热时热端可逆性的极端重要性则常估计不足，以致于在环境问题如此紧迫的今天，即使属于可逆型供热的热电联产系统仍是低效发电机组统治的世界，其热端焓效率只不过是 20% 左右的水平，而当代成熟技术所能提供的热端焓效率则是 35%~55%，且有进一步提高的趋势。这固然有燃料结构等客观原因，但这毕竟意味着热端可逆性存在着现实的巨大节能减排的潜力，低效机组可逆型供热系统的排放物总量约为高

效机组系统的 1.6 至 2.5 倍。

为了减少供热总能系统排放物中的有害物成分，最简单的措施就是改变燃料结构，增加天然气一类清洁能源的比重。利用天然气等清洁能源结合燃气—蒸汽联合循环等高效动力循环，往往可同时收到大幅度降低向环境的排放总量和大幅度降低有害物成分的双重效果。目前，我国天然气在一次能源中的比例仅相当于美国等发达国家的 1/10 左右，我国以煤为主的局面在相当长的时期内难以有重大的改变。在此情况下，要提高供热总能系统热端的环境相容性，主要应改变煤的粗放型使用方式，使供热系统与洁净煤技术结合起来，如循环流化床（包括 AFBC 和 PFBC）燃烧技术，整体煤气化联合循环技术（IGCC 等），和以煤的气化为基础的多联产（polygeneration）技术^[7,8]。

5.2 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。在可逆型供热系统中如使用电动热泵供热，热量发生子系统的焓指数 [即式 (4) 与式 (5) 中的，下同] ϵ_Q 就是热泵机组的焓效率，其值约为 0.2~0.4；但涉及热电联产时， ϵ_Q 的值依变于供热温度，可能达到 0.8~2.5 或更高。认识这一点对我们客观、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。

迄今，不少业内人士认为热电联产是有近百年历史的传统技术，热泵才是高新技术。诚然，电动热泵供热系统本身属于可逆型供热，具有节能、环保以及供、需间谐时性好等特点，与电炉、电锅炉和小锅炉一类的非可逆传统型供热系统不可同日而语，在低温热源温度波动不大且要求热泵提升的温度不太高时，热泵特别适用于远离热源点的分散用户。在当前我国的具体情况下，煤是热电的主要一次能源，高效的热端时常是远离热负荷用户的大容量机组，电动热泵则是把高效热端的实惠带到远程用户的最好中间媒介。然而，不要忘记，由于热电联产的 ϵ_Q 值很高，在如今世界上兴起的分布式能量系统（decentralized/distributed energy system）中它有更大的优势，可以使供热系统有低得多的排放总量。可以说，由于科技水平的提高和对环境要求的日益严格，热电联产是个既古老又年轻且充满活力的技术。所以，只要热负荷比较集中、稳定，

且与热源点地理位置不远,应对以热定电的热电联产在节能减排上的特殊优越性有充分的认识。

5.3 关于供热总能系统的“冷端”单耗

供热总能系统的“冷端”包括热量输配子系统和用户子系统。对于供热系统来说,通过提高“冷端”可逆性以大幅度地降低排放总量存在着巨大的潜力。

输配特性是能量系统的一个重要特性。输配特性最好的是电能。化学能的输配特性也很好。化工产品输送线或煤气管道实际就是化学能的输配。以大气、地表和海洋为环境,淡水也是化学能的载体。在供热总能系统中把联产电就地送上电网,把联产的化工产品包括由联产热所生产的淡水也就地加以管道输配,是提高总体输配特性的重要方法。

热能是所有能量形式中输配特性最不好的一种能量形式。这是热能的一个基本特性。尽管如此,以联产的方式直接产生热即热电联产,还是独具优势的,其主要原因是因为其热量发生子系统有甚高的焓指数 ϵ_Q 。不过基于热在输配上的特性,热网规模应适度,不要陷入“规模效益”误区,认为热网也和电网一样,越大越好^[9]。所以应使用中小型热网,减小热输配管道的范围和总长度,以减小管网的铺设投资以及运行中的不可逆损失和不谐时性所带来的附加单耗;使用直接式热网,取消一次网与二次网之间的换热环节,以明显提高热输配子系统的焓效率 η_{QD} 。

挖掘冷端潜力的另一关键就是在用户处使用“焓效率”高的换热器,以降低用户对供热温度水平 T 的需求^[10,11],提高用户子系统的焓效率 η_{US} 。

通过这些措施有可能把目前多数冷端的附加单耗降低一半以上(详见文献[4]),收益很大且投资代价不高,有时甚至会降低投资。这是个值得高度重视的问题。但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,更与可持续发展的客观需求不相适应。

6 对绿色供热系统的界定

“绿色供热系统”这一术语不过是笔者的一建议,是否采用取决于广大同行专家的认同。至于对它加以界定就更是能源的权威管理部门的事,笔者不敢贸然规定。在这里不过是谈些原则性看法。笔者认为,绿色供热系统就是具有高度环境相容性

的供热系统,它的定量标准不应是一成不变的,而应是动态的、发展的。为此,首先要求这类系统的单耗低,也就是说对于给定的供热量,向环境排放物的总量要低。其次,排放物中的有害成分也要低,而且供热成本低,具有经济上的可行性。此外还应尽量把供热系统与满足环境生态的其他要求(如水资源问题,CO₂的纯化与填储问题)结合起来。现阶段不妨对绿色供热系统作如下原则性的界定:

1. 绿色供热系统都应是可逆型供热系统,它的容量和用户负荷总需求量以及在运行中的供、需能量之间,具有较高的谐时性^[12];

2. “热端”可逆性较高,其焓效率($\eta_b \eta_w$)应不低于大电网的供电效率(目前此值为31%),尽量通过使用高效动力机械与先进动力循环,使焓效率($\eta_b \eta_w$)接近当代供电效率的先进值(目前此值约为55%);

3. 供热系统中“冷端”的可逆性较高,力图符合上节中所提对冷端的各项要求;

4. 鉴于热电联产的热量发生子系统的焓指数 ϵ_Q 特别高,应优先使用热电联产技术供热,必要时,如条件有利,则采用电动热泵供热技术;

5. 基于相同的原因,应充分考虑利用热电联产所提供的热量,施用诸如蒸馏法海水淡化之类的造水技术以解决淡水资源问题的可能性和有利性;

6. 基于相同的原因,应注意比较和研究利用热电联产所提供的热量,进行吸收式集中制冷的热、电、冷三联供在技术、经济和环保方面的有利性;

7. 利用除尘、脱硫、脱硝等环保技术,使供热总能系统有害排放物的成分明显低于常规供热系统的水平。

进一步的要求应是:

8. 优化能源结构,提高供热系统中使用天然气、LNG等清洁能源的比重;

9. 发展与垃圾处理技术和缓解资源、环境问题的其他技术相结合的供热系统;

10. 与洁净燃烧技术结合(如FBC和HAT燃烧方式);

11. 与洁净煤技术结合,如IGCC、IGHAT和以煤的气化为基础的多联产等;

12. 在条件成熟时发展燃料电池热电联产系统。

7 结论

在我国约40%以上的煤炭都是用于直接燃烧的。分散小锅炉的效率约为55%，在热网入口处折合煤耗62 kg/GJ；集中供热效率约70%，折合49 kg/GJ；电热锅炉的一次能源效率更低，仅约30%，煤耗高达114 kg/GJ。从文中分析可知，通过使用绿色供热系统大幅度地降低单位供热量向环境的排放总量和降低排放物中的有害成分，是完全可能的。

以一个具有供暖用热的温度水平的供热系统为例(具体算法参照文献[4])，用常规煤炉供热，其总焓效率值为4%，通过6 MW小型蒸汽轮机把供热系统变成热电联产可把总焓效率提高到8.5%，如再加上冷端改进，把供、回水温度分别由100、70℃降为55、35℃，焓效率可升至20%，若在此基础上进一步把6 MW小型低效的蒸汽轮机循环改造成燃气蒸汽联合循环，且把燃料由煤炭改为天然气，则总焓效率可高达55%。与此相应，用户终端供热煤耗由常规供热系统的67 kg/GJ，依次变为32 kg/GJ，13 kg/GJ，和5 kg/GJ。可以看出，仅仅使用当前的先进技术，就有可能把同样终端供热量下的总排放量如此大幅度地降下来！

电动热泵也是可逆型供热。如果计入线损后到达用户的供电煤耗能达到400 g/kWh，那么在热泵性能和外部条件的综合作用下若能保证供热的COP值不低于2.5，供热的一次能源终端煤耗就会不高于44 kg/GJ，此排放指标远优于传统小锅炉供热。与热电联产相比，电动热泵的最大优点就是能充分挖掘“谐时性”降耗潜力，能够随时按需供能。相反，热电联产由于对热负荷估计上的失误，预期的热负荷长期不能到位，以及用户在运行中供、需负荷不能匹配等不利影响所造成的不谐时损失是不可低估的。

把绿色供热系统与大中型热电厂相结合施行蒸馏法海水淡化，以解决沿海地区水资源问题是很有前景的。这种造水方案与调拨江河水流的方案相比不但具有可持续发展的特性，而且就其可供应的水量、水质和供水成本以及生态后效等诸多方面，有可能比调水工程有更大的优越性。目前，在新建电厂中 10^6 kW级已是常见的规模。一个 10^6 kW的火力发电厂每天的废蒸汽量约为 6×10^4 t，使用蒸馏

法海水淡化，造水比为10，其供水量可达每天 60×10^4 t，水中杂质的质量分数可达 5×10^{-6} ，在相当多的情况下其造水成本有可能低于目前流域调水的成本。

以上所举出的这类在单耗和与环境相容性的指标上不是一般地优于现行供热系统，而是高出几个“档次”的供热系统，应是“绿色供热系统”的外部特征。

从生产者的角度，节能、节水历来是降低成本提高市场竞争能力获取经济效益的基本手段之一，当节能、节水对经济收益的效果不明显时，它就失去了推进的动力。另外，在一个高消费社会中的用户看来，他们主要关心的倒不是经济上的花费，而是生活上的方便和舒适。所以就目前而言，单纯从经济收益和生活质量的角度，绿色供热系统不一定是最好的选择，更不会是唯一的选择。然而，如果把绿色供热系统与可持续发展战略联系起来，把绿色供热系统与全球性的“环境与发展”问题联系起来就有了全然不同的涵义。因为，在使用化石燃料供热的情况下，要大幅度降低CO₂等温室气体和其他对环境有害物质的排放量，包括有效地解决淡水资源特别是沿海淡水资源问题，基于绿色供热系统的节能和造水技术乃是唯一的选择。因此，研究绿色供热系统技术，发挥其巨大的节能减排潜力，大幅度地提高其资源效益、环境效益和经济效益，并与消费者生活质量有机地结合起来，对于实施可持续发展具有战略的重要性。^[12]

参考文献

- [1] 宋之平,王加璇. 节能原理[M]. 北京:水利电力出版社, 1985
- [2] 宋之平. 单耗分析的理论 and 实施[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(4)
- [3] Song Z P, Xhou S X, Hu S G. Indigenous construction of sizable desalination units for dual - purpose power plant in China[J]. Energy, 1991, 16(4): 721~726
- [4] Song Z P. Total Energy System Analysis of Heating[J]. Energy, 2000, 25:807~822
- [5] Baehr H D. Zur Thermodynamik des Heizens[J]. BWK 1980, 32(1):10~15
- [6] 宋之平. 供热系统“单耗分析”模型[J]. 热能动力工程, 1996, 11(5):
- [7] 倪维斗,李政,薛元. 以煤气化为核心的多联产能源系统[J]. 中国工程科学, 2000, 2(8):59~68
- [8] 朱雪芳. 煤净化燃烧及伴生物产品化[J]. 中国工程

- 科学, 1999, 1(1):53~57
- [9] Orchard W R H. Combined Heat and Power Whole City Heating[M]. New York & Toronto: John Wiley & Sons, 1980
- [10] Drysdale A, et al. Consumer Connection Stations for Low Temperature District Heating in Denmark [J]. EUROHEAT & POWER, 1996, (3):141~145[11] Kraft G. Low Temperature Heating System[M]. (in Russian, translated from Germany). Moscow: 1983 [12] 宋之平. 从可持续发展的战略高度重新审视热电联产[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4)

Green Heating System——A Topic of Critical Importance

Song Zhi-ping

(North China Electric Power University, Beijing 100085, China)

[Abstract] Nowadays a topic of most concern is how to protect the global climate change and meet the increasing demand of fresh water. To meet this challenge an intelligent use of energy is urgently needed.

The term "Green Heating System" is synonymous with "Environmentally Friendly Heating System". This term is academically defined in this paper. To this end the paper introduces the concepts of reversible mode of heating and generalized total heating system which consists of six subsystems, involving three sections, namely "hot end", "cold end" and "heat generation section". The exergy - based Specific Consumption Analysis Approach proposed by the author was adopted to quantitatively evaluate the effect of these subsystems on performance of the global system. It is found that emissions caused by heating systems are expected to be enormously reduced as a result of fuel saving potential explored by means of enhancement of exergy efficiencies of the above - mentioned subsystems. In addition, an integration of a large - scale green heating system with sea - water desalination plant will provide an alternative of fresh water supply which could compete with that of water source reallocation projects.

[Key words] sustainable development; water resource; combined heat and power; heat pump; poly generation

《中国工程科学》2001 年第 3 卷第 7 期要目预告

- | | | | |
|------------------------------|------|-----------------------------|------|
| 航空环境工程与科学 | 张彦仲 | 重大环境污染事故风险模糊排序方法研究 | |
| 制造业信息化的内涵与策略 | 张 曙 | | 熊德琪等 |
| 林业生态工程与血吸虫病防治 | 彭镇华 | 溶液聚合合成橡胶节能技术和节能型橡胶的开发 | |
| 21 世纪我国光伏产业发展战略思考 | 赵玉文 | | 曹湘洪等 |
| 焊接电弧光谱信息测控技术及其应用 | | 解决地下通信技术难题的方案及关键设备 | |
| | 李俊岳等 | | 司徒梦天 |
| 论我国饲料工业的标准化工作及其产品的质量管理 | 张子仪 | 一水硬铝石氧化铝生产工艺创新 | 宋培凯 |
| | | 泛曲线齿锥齿轮的创新设计与应用的二次开发 | |
| 生物技术 在养羊科学研究中的应用 | 刘守仁 | | 梁桂明 |
| 负能量问题——超光速研究的重要方向 | | 钢复合结构压力容器技术 | 朱国辉等 |
| | 黄志洵 | 抗磨蚀材料失效过程的微观特性 | 王 颢等 |
| 节水灌溉管理智能决策支持系统研究 | 汪志农等 | CLA 的生理活性和应用前景 | 张根旺等 |
| 非线性系统的自适应可拓控制器设计 | | | |
| | 翁庆昌等 | | |