

# Energy Saving Analysis of CHP in the Heat Supply Modification

Hongbin Zhao<sup>1,2</sup>, Xuan Hou<sup>1,2</sup>, Jiawang Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Machinery and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, Beijing

Email: hbzhao@cup.edu.cn

Received: Jan. 17<sup>th</sup>, 2018; accepted: Feb. 2<sup>nd</sup>, 2018; published: Feb. 11<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Taking the reconstruction project of one central heating system as an example, this paper puts forward the transformation scheme of the combined heat and electricity generation, and analyzes the energy consumption of the transformed heating system. The total coal consumption of power generation and heating was saved 513,386 t per year after energy saving transformation. The exergy efficiency of the original heating boiler is 15.35%, after transforming, it's 42.6%. While through exergy analysis, it is found that the boiler' exergy loss rate is the maximum, accounting for 81.2% of the system's total exergy loss. Additionally, the thermal performance of thermal power plant is analyzed, and the total efficiency of thermal power plant can be improved obviously by increasing the amount of air supply. Thus it can be seen that this reform scheme can effectively improve system efficiency and has certain promotion value.

## Keywords

CHP (Combined Heat and Power), Central Heating, Analysis of Energy Consumption

---

# 热电联产在集中供热改造中的节能分析

赵洪滨<sup>1,2</sup>, 侯 萱<sup>1,2</sup>, 李佳旺<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京

<sup>2</sup>过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京

Email: hbzhao@cup.edu.cn

收稿日期: 2018年1月17日; 录用日期: 2018年2月2日; 发布日期: 2018年2月11日

---

## 摘 要

本文以某一集中供热系统改造工程为例, 提出实施热电联产的改造方案, 并对改造后的供热系统进行能

耗分析。节能改造后,发电和供热年总煤耗量共节约513,386 t。原供热锅炉的焓效率为15.35%,改造后的锅炉焓效率为42.6%。通过焓分析发现,锅炉的焓损率最大,占系统总焓损失的81.2%。对热电厂的热力性能分析得出,增加供热抽汽量能够明显提高热电厂的总效率。由此可见,该改造方案能够有效提高系统效率,具有一定的推广价值。

## 关键词

热电联产, 集中供热, 能耗分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着城市建设的持续发展,集中供热系统的建设规模也在不断扩大,为了满足人们的生活需求和实现能源的可持续发展,需要建立一套安全环保、节能低耗的城市集中供热系统。集中供热系统的节能减排是我国建筑节能的重要组成部分,《民用建筑节能设计标准》中对集中供热提出了降低能耗 50%的要求,其中集中供热系统应达到节能 20%的目标[1]。目前,我国城市集中供热系统缺少行之有效的节能办法,供热系统的整体效率偏低,技术相对发达国家较为落后,我国目前的集中供热系统单位建筑面积能耗量较高,仍存在巨大的节能潜力[2]。为了实现降低能耗的目标,必须对当前的集中供热系统实施较为全面的改造。

热电联产与热电分产是目前我国供热的两种主要方式[3]。在热电联产中,热电厂将高品位的热能转变为功并产生电能,并利用在此过程中产生的热供给周围热用户。热电分产一般是利用凝汽式发电机组生产电能、利用区域锅炉房进行供热。由于凝汽式发电机组的冷源损失较大,且区域锅炉房容量较小,热效率相对较低,因此普遍认为热电联产的经济效益优于热电分产[4]。

目前,随着城市集中供热系统的不断发展,热电联产逐渐成为一种主要的供热方式。实际数据显示,热电联产的供热方式与热电分产相比更加节能。通常情况下,规模较大的火力发电厂的发电效率往往只有不到 40%,而如果在采暖季使用热电联产,热电厂的总效率能够达到 70%以上[5]。与传统的区域锅炉房供热相比,热电联产是一种节能环保、更具有经济效益的供热方式。

本文基于克拉玛依集中供热系统实际改造工程,结合当地集中供热系统的特点,针对当前存在的主要问题,提出切合实际的改造方案,并对改造前和改造后的集中供热系统进行能耗分析对比。

## 2. 方案概述

克拉玛依城区现有的供热锅炉房中,有一半以上是在 2000 年之前建设完成并投入运行的,设备老旧,故障率较高。同时小容量的燃煤锅炉热效率低,能耗较大,导致严重的能源浪费,同时污染物排放也难以达到国家环保政策要求。中心城区各锅炉房各自独立,热源之间不能做到互为备用。锅炉房在实际运行中没有采取有效的节能手段,同时管理模式较为粗放,因此需要对当前的集中供热系统进行热源的节能改造。

为解决目前集中供热系统存在的问题,提出热电联产的技术方案,盘活现有集中供热资源,建设集中供热管网。南热北送,将国电克拉玛依电厂的热负荷引入城北区,使其承担基础负荷,并与城北区现

有热源以多热源联网形式供热，在城北区分期建设集中供热环网，提高供热经济性。城南区实现国电、南泉锅炉房、西南锅炉房多热源联网供热。城南区、城北区分别形成多热源联网格局，热源之间可以互为补充，提高供热安全性。在实际运行中，尤其是在供热初期和末期，优先启动经济性好的热源，承担热网基础负荷，降低供热成本。

目前，克拉玛依集中供热系统采用区域锅炉房供热，锅炉设备老旧，热效率低，热源相对分散独立，不能互为补充，集中供热年供热量为 15,197,912 GJ。现有供热热源状况如表 1。

实施热电联产改造方案后，由国电克拉玛依电厂提供基础供热负荷，保留的高效率锅炉房提供补充和调峰热负荷，年总供热量为 15,197,912 GJ，其中热电厂年供热量为 9,220,000 GJ，热电厂年供电量为 3,850,000,000 kWh，集中供热锅炉房年供热量为 5,977,912 GJ，改造后的热源状况如表 2。

**Table 1.** Statistics table for original source of heat

**表 1.** 现有热源状况统计

城北区				
序号	锅炉房	投产时间	装机容量	实际热效率(%)
1	永安锅炉房	2013	3 × 29	93.9
2	曙征锅炉房	2013	3 × 10.5	93.4
3	红山锅炉房	1996, 2002	6 × 7	67.2
4	东南锅炉房	1991, 2004	5 × 7 + 1 × 14	66.3
5	胜利锅炉房	1986, 1989	5 × 7	65
6	古田锅炉房	1992	5 × 7	68.5
7	昆仑锅炉房	2003, 2008	3 × 29 + 1 × 58	70
8	银河锅炉房	1992, 1994	5 × 7	67
9	文化锅炉房	1993, 2001	2 × 7 + 6 × 5.6	68.4
10	西北锅炉房	1996, 2007	1 × 7 + 8 × 14	67.3
11	前进锅炉房	2005, 2010	2 × 46 + 1 × 70	81.6/93.3
12	向阳锅炉房	2004, 1996	2 × 14 + 7 × 5.6	68
13	八一	2004, 1996	2 × 14 + 7 × 5.6	68
14	农 136 团	1998	1 × 2.8 + 1 × 4.2	65
15	农七师兵团	1999	1 × 10.5 + 2 × 7	68.5
16	红旗高层	1990	1 × 2.8 + 1 × 4.2	65
17	通讯花苑小区	2011	2 × 2.85	66
18	南泉锅炉房	2000, 2008	3 × 29 + 1 × 70	90.1
19	西南锅炉房	2003, 2009	3 × 29 + 1 × 70	92.4
20	工业园	2004	4 × 7	70

**Table 2.** Statistics table for improved source of heat  
**表 2.** 改造后热源状况统计

序号	锅炉房	装机容量(MW)	热源方案	备注
1	永安锅炉房	3 × 29	保留	燃气、间供
2	曙征锅炉房	3 × 10.5	保留	燃气、直供
3	红山锅炉房	6 × 7	拆除、改建 24 MW 热力站	燃煤、直供
4	东南锅炉房	5 × 7 + 1 × 14	拆除、改建 34 MW 热力站	燃煤、直供
5	胜利锅炉房	5 × 7	拆除、改建 32 MW 热力站	燃煤、直供
6	古田锅炉房	5 × 7	拆除、改建 40 MW 热力站	燃煤、直供
7	昆仑锅炉房	3 × 29 + 1 × 58	保留	燃煤、间供
8	银河锅炉房	5 × 7	拆除、改建 44 MW 热力站	燃煤、直供
9	文化锅炉房	2 × 7 + 6 × 5.6	拆除、改建 46 MW 热力站	燃煤、直供
10	西北锅炉房	1 × 7 + 8 × 14	拆除、改建热分配站	燃煤、间供
11	前进锅炉房	2 × 46 + 1 × 70	保留	燃煤、燃气间供
12	南泉锅炉房	3 × 29 + 1 × 70	保留	燃气、间供
13	西南锅炉房	3 × 29 + 1 × 70	保留	燃煤、间供
14	国电克拉玛依热电厂	700	保留	间供

### 3. 模型建立

#### 3.1. 热电联产的能耗计算模型

本文以热量法作为热电分摊的计算方法。热量法是我国法定通用的热电成本分摊方法，其建立的理论基础是热力学第一定律。该方法是从生产电能和热能所消耗的热耗量的数量上入手，按两者的数量比例来进行热电厂总热耗量划分的。热电联产的能量平衡简图如图 1 [6]。

$B_{d1}$ ——生产电能的年消耗燃料量； $B_{d2}$ ——供应热能的年消耗燃料量； $Q_0$ ——热电联产总耗热量； $Q_c$ ——抽汽供热量； $Q$ ——热用户所需热量； $W_d'$ ——热电厂年产电量。

考虑再热的大型热电厂机组的总热耗量  $Q_0$  为：

$$Q_0 = D_0 (h_0 - h_0') + D_{zr} \times \delta \quad (1)$$

式中， $D_0$  为主蒸汽流量，单位 t/h； $D_{zr}$  为再热蒸汽流量，单位 t/h； $h_0$  为主蒸汽焓值，单位 kJ/kg； $h_0'$  为锅炉给水焓值，单位 kJ/kg； $\delta$  为再热蒸汽焓升，单位 kJ/kg。

热电联产抽汽供热的热耗量  $Q_r$  为[7]：

$$Q_r = D_r \times (h_r - h_r') \quad (2)$$

式中， $D_r$  为供热抽汽流量，单位 t/h； $h_r$  为供热抽汽焓值，单位 kJ/kg； $h_r'$  为供热抽汽回水焓值，单位 kJ/kg。热电联产机组的发电热耗量  $Q_d$  为：

$$Q_d = Q_0 - Q_r \quad (3)$$

热电联产机组的发电热耗率  $q_d$  的通用计算式为：

$$q_d = \frac{Q_d}{P_e} \quad (4)$$

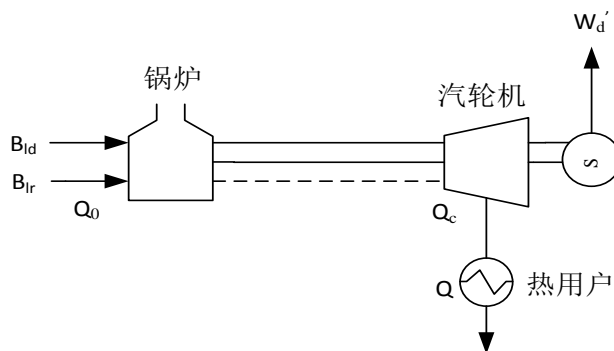


Figure 1. The energy balance of CHP

图 1. 热电联产能量平衡简图

式中,  $P_e$  为机组发电功率, 单位 kW。

热电联产机组发电的标准煤耗率为:

$$b_{ld} = \frac{Q_d}{P_e \times 29271} \quad (5)$$

热电厂中生产电能的年总燃料消耗量为:

$$B_{ld} = b_{ld} \times W'_d \quad (6)$$

式中,  $W'_d$  为热电厂热电联产汽轮机组的年发电量, 单位 kWh。

在热电联产中实现供热的标准煤耗量通用计算式为:

$$b_{lr} = \frac{10^6}{29271\eta_{lr}} = \frac{34.2}{\eta_{lr}} \quad (7)$$

$$B_{lr} = b_{lr} \times Q_{nr} \quad (8)$$

式中,  $b_{lr}$  为热电厂供应热能的煤耗率, 单位 kg/GJ;  $\eta_{lr}$  为热电厂的锅炉效率;  $B_{lr}$  为热电厂生产热能的年煤耗量, 单位 kg;  $Q_{nr}$  为在热电分产中的年供热量, 单位 GJ。

热电联产的年总煤耗量  $B_l$  的计算公式为:

$$B_l = B_{ld} + B_{lr} \quad (9)$$

### 3.2. 热电厂的热力性能计算模型

对热电厂的实际运行数据进行计算分析时, 主要分发电量和供热量两方面进行研究。本文选取的主要热力性能分析计算参数有热电厂总效率、热电比、发电热效率、供热效率和发电热耗率, 以上几个主要计算参数不仅能够反映热电厂的能耗情况, 还能体现出热电厂的经济效益, 比较具有代表性。

#### 3.2.1. 热电厂总效率

热电厂的总效率是指在热电厂锅炉燃料燃烧产生的全部热量中, 发电量和供热量之和所占的比例。

热电厂总效率  $\eta_z$  按下式计算:

$$\eta_z = \frac{3600W_z + Q_r}{Q_{br}} \quad (10)$$

式中,  $W_z$  为热电厂的发电量, 单位 kWh;  $Q_{br}$  为燃料燃烧消耗的总热量, 单位 kJ。

$Q_{br}$  可按下式计算:

$$Q_{br} = 29271 \times B \quad (11)$$

式中,  $B$  为锅炉的燃料消耗量, 单位 kg。

从热电厂总效率的公式可以看出, 其影响因素主要是热电厂的发电量和热电厂的供热量。这种计算方法实质上是把高品位的电能换算成热能进行考虑, 将发电量与供热量进行数量上的相加。这种计算方式只能从数量上反应发电量与供热量的关系, 而忽略了电能这种高品位能源在能源等级上的优势, 只能反映燃料能量单纯在数量上的利用效果。

### 3.2.2. 热电比

热电比是指热电联产中供热量与发电量之比, 其计算公式为:

$$\theta = \frac{Q_r}{3600 \times W_z} \quad (12)$$

由热电比的公式能够得出, 热电比主要受到热电联产中发电量与供热量这两个方面的影响。由于热电联产的发电量与供热量的影响因素较多。为尽量降低汽轮机的冷源损失, 保证一定比例的抽汽发电量, 热电比应保证一定的数值。

### 3.2.3. 发电热效率

$$\eta_{fd} = \frac{3600 \times W_z}{Q_{br}} \quad (13)$$

由郎肯循环的基本原理可知, 提高热源参数的数值和降低冷源参数的数值都能够增加参数之间的差值, 从而使郎肯循环的热效率得到提高。热电厂汽轮机的循环也属于郎肯循环, 为使热电厂汽轮机组的发电量得到提高, 应该尽量提高汽轮机的热效率, 也就是尽可能提高汽轮机组的进汽参数并降低排汽参数。在实际运行中, 往往进汽参数是确定不变的, 因此应尽量降低排汽参数, 从而提高热电联产中汽轮机的发电效率, 增加热电厂的发电量。

### 3.2.4. 供热效率

供热效率的计算公式如下:

$$\eta_{gr} = \frac{Q_r}{Q_{br}} \quad (14)$$

## 3.3. 热电联产的焓分析计算模型

### 3.3.1. 锅炉的焓损失计算

热电厂锅炉的黑箱模型如图 2 所示[8]。

锅炉的焓平衡方程为:

$$E_{rl} + E_k = E_{yx} + I_g \quad (15)$$

式中,  $E_{rl}$  为锅炉的燃料焓, 单位 kJ/h;  $E_k$  为预热空气带入的焓值, 单位 kJ/h;  $E_{yx}$  为锅炉的有效焓, 单位 kJ/h;  $I_g$  为锅炉的焓损失, 单位 kJ/h。

其中, 锅炉有效焓  $E_{yx}$  按下式计算:

$$E_{yx} = D_{m0} e_b - D_{fw} e_{fw} + D_{mr} (e_{rc} - e_{rj}) \quad (16)$$

式中,  $D_{m0}$  为锅炉主蒸汽的流量, 单位 kg/h;  $D_{fw}$  为锅炉给水的流量, 单位 kg/h;  $D_{mr}$  为锅炉再热蒸汽的流量, 单位 kg/h;  $e_b$  为锅炉出口的主蒸汽焓, 单位 kJ/kg;  $e_{fw}$  为锅炉主给水的焓, 单位 kJ/kg;  $e_{rc}$  为锅炉

再热器出口蒸汽的焓, 单位 kJ/kg;  $e_{rj}$  为锅炉再热器入口蒸汽的焓, 单位 kJ/kg。

锅炉的焓损失为:

$$I_g = E_{rl} + E_k - E_{yx} \quad (17)$$

锅炉的焓效率为:

$$\eta_{eb} = \frac{E_{yx}}{E_{rl}} \times 100\% \quad (18)$$

### 3.3.2. 汽轮机的焓损失计算

汽轮机的黑箱模型如图 3 所示。

汽轮机的焓平衡方程为:

$$D_{m0}e_q + D_{mr}e_{rz} - D_{mg}e_{rg} = \sum_{i=1}^7 D_i e_i + D_n e_n + D_c e_c + W_t + I_{qj} \quad (19)$$

式中,  $D_{mg}$  为汽轮机高压缸的排汽流量, 单位 kg/h;  $D_i$  为汽轮机各级抽汽的流量, 单位 kg/h;  $D_n$  为汽轮机的排汽量, 单位 kg/h;  $D_c$  为供热抽汽流量, 单位 t/h;  $e_q$  为汽轮机入口的蒸汽焓, 单位 kJ/kg;  $e_{rz}$  为汽轮机中压缸的进汽焓, 单位 kJ/kg;  $e_{rg}$  为汽轮机高压缸的排汽焓, 单位 kJ/kg;  $e_i$  为汽轮机各级抽汽的焓, 单位 kJ/kg;  $e_n$  为汽轮机低压缸的排汽焓, 单位 kJ/kg;  $e_c$  为供热抽汽的焓, 单位 kJ/kg;  $W_t$  为汽轮机的做功热当量, 单位 kJ/h;  $I_{qj}$  为汽轮机的焓损失, 单位 kJ/h。

汽轮机的焓损失  $I_{qj}$  为:

$$I_{qj} = D_{m0}e_q + D_{mr}e_{rz} - D_{mg}e_{rg} - \sum_{i=1}^7 D_i e_i - D_c e_c - D_n e_n - W_t \quad (20)$$

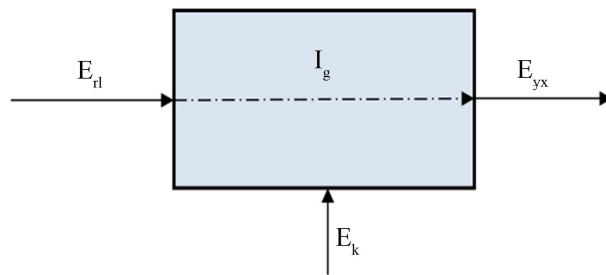


Figure 2. Black-box model of boiler

图 2. 锅炉黑箱模型

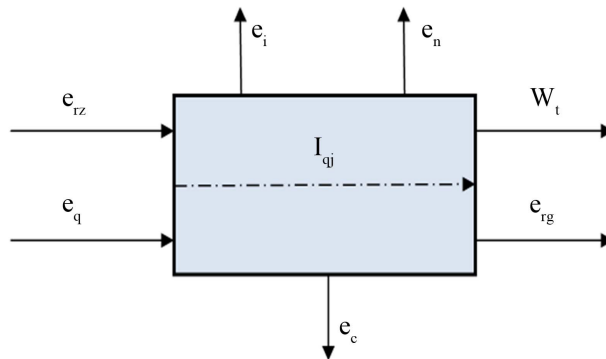


Figure 3. Black-box model of steam turbine

图 3. 汽轮机黑箱模型

汽轮机的焓效率为:

$$\eta_{et} = \frac{W_t + D_c e_c}{D_{m0} e_q + D_{mr} e_{rz} - D_{mg} e_{rg} - \sum_{i=1}^7 D_i e_i - D_n e_n} \times 100\% \quad (21)$$

### 3.3.3. 高压加热器的焓损失计算

高压加热器的黑箱模型如图 4 所示。

1 号高压加热器的焓平衡方程为:

$$D_1 e_1 = D_{fw} (e_{w1} - e_{w2}) + D_1 e_{d1} + I_{g1} \quad (22)$$

2 号高压加热器的焓平衡方程为:

$$D_2 e_2 + D_1 e_{d1} = D_{fw} (e_{w2} - e_{w3}) + (D_1 + D_2) e_{d2} + I_{g2} \quad (23)$$

3 号高压加热器的焓平衡方程为:

$$D_3 e_3 + (D_1 + D_2) e_{d2} = D_{fw} (e_{w3} - e_{w4}) + (D_1 + D_2 + D_3) e_{d3} + I_{g3} \quad (24)$$

式中,  $e_{wi}$  为给水的焓, 单位 kJ/kg;  $e_{di}$  为各级高压加热器疏水的焓值, 单位 kJ/kg;  $I_{gi}$  为各级高压加热器的焓损失, 单位 kJ/h。

则高压加热器的总焓损失为:

$$I_{gj} = I_{g1} + I_{g2} + I_{g3} \quad (25)$$

高压加热器的焓效率为:

$$\eta_{eh} = \frac{D_{fw} (e_{w1} - e_{w4})}{\sum_{i=1}^3 D_i e_i - e_{d3} \sum_{i=1}^3 D_i} \times 100\% \quad (26)$$

### 3.3.4. 除氧器的焓损失计算

除氧器的黑箱模型如图 5 所示。

除氧器的焓平衡方程为:

$$D_4 e_4 + e_{d3} \sum_{i=1}^3 D_i = D_{fw} e_{w4} - D_{cw} e_{w5} + I_{cy} \quad (27)$$

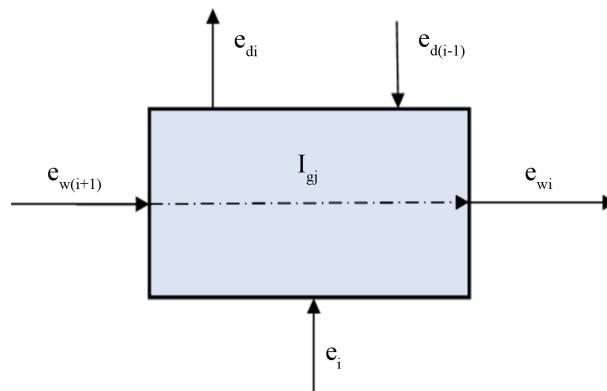


Figure 4. Black-box model of high pressure heater  
图 4. 高压加热器黑箱模型



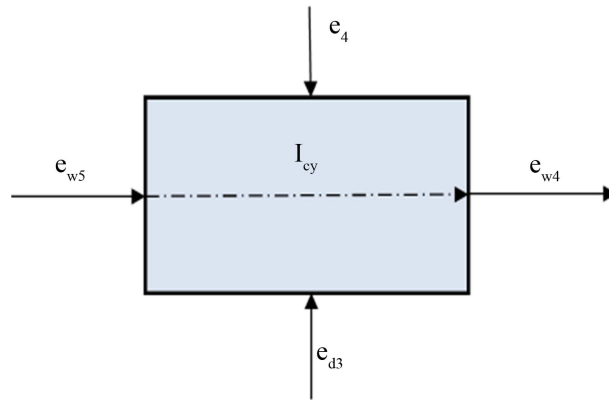


Figure 5. Black-box model of deaerator  
图 5. 除氧器黑箱模型

除氧器的焓损失为:

$$I_{cy} = D_4 e_4 + e_{d3} \sum_{i=1}^3 D_i + D_{cw} e_{w5} - D_{fw} e_{w4} \quad (28)$$

除氧器的焓效率为:

$$\eta_{ec} = \frac{D_{fw} e_{w4} - D_{cw} e_{w5}}{D_4 e_4 - e_{d3} \sum_{i=1}^3 D_i} \times 100\% \quad (29)$$

### 3.3.5. 低压加热器的焓损失计算

低压加热器的黑箱模型与高压加热器相同。

5号低压加热器的焓平衡方程为:

$$D_5 e_5 = D_{cw} (e_{w5} - e_{w6}) + D_5 e_{d5} + I_{d5} \quad (30)$$

6号高压加热器的焓平衡方程为:

$$D_6 e_6 + D_5 e_{d5} = D_{cw} (e_{w6} - e_{w7}) + (D_5 + D_6) e_{d6} + I_{d6} \quad (31)$$

7号高压加热器的焓平衡方程为:

$$D_7 e_7 + (D_5 + D_6) e_{d6} = D_{cw} (e_{w7} - e_{w8}) + (D_5 + D_6 + D_7) e_{d7} + I_{d7} \quad (32)$$

式中,  $D_{cw}$  为凝结水流量, 单位 kg/h。

则低压加热器的总焓损失为:

$$I_{dj} = I_{d5} + I_{d6} + I_{d7} \quad (33)$$

低压加热器的焓效率为:

$$\eta_{ei} = \frac{D_{cw} (e_{w5} - e_{w8})}{\sum_{i=5}^7 D_i e_i - e_{d7} \sum_{i=5}^7 D_i} \times 100\% \quad (34)$$

### 3.3.6. 凝汽器的焓损失计算

凝汽器的黑箱模型如图 6 所示。

凝汽器的焓平衡方程为:

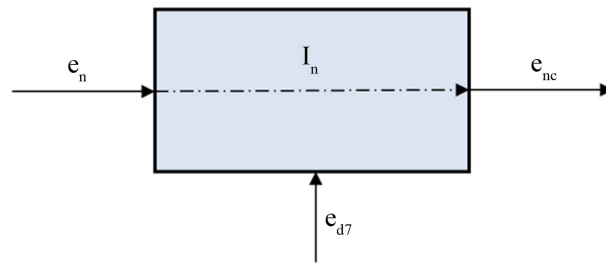


Figure 6. Black-box model of condenser

图 6. 凝汽器黑箱模型

$$D_n e_n + e_{d7} \sum_{i=5}^7 D_i = D_{cw} e_{nc} + I_n \quad (35)$$

式中,  $e_{nc}$  为凝汽器的出水焓, 单位 kJ/kg。

凝汽器的焓损失为:

$$I_n = D_n e_n + e_{d7} \sum_{i=5}^7 D_i - D_{cw} e_{nc} \quad (36)$$

### 3.3.7. 热网的焓损失计算

供热抽汽经过热力管网向热用户输送热量, 在此过程中产生的焓损失就是热网焓损失。其计算公式如下:

$$I_{rw} = D_c (e_c - e_r) \quad (37)$$

式中,  $e_r$  为热用户所需的热水焓, 单位 kJ/kg。

### 3.3.8. 各设备焓损失率的计算

焓损失率是各个设备的焓损失与系统总焓损失的比值, 计算公式如下:

$$e_{li} = \frac{I_i}{I_{qjz}} \quad (38)$$

式中,  $I_i$  为系统中各个设备的焓损失, 单位 kJ/h;  $I_{qjz}$  为系统的总焓损失, 单位 kJ/h。

其中, 系统的总焓损为各个设备的焓损之和, 其计算公式为:

$$I_{qjz} = I_g + I_{qj} + I_{gj} + I_{cy} + I_{dj} + I_n + I_{rw} \quad (39)$$

## 4. 计算结果及能耗分析

### 4.1. 热电联产与热电分产的能耗对比

改造前的供热系统热源以燃煤锅炉房为主, 能耗主要来自于供热锅炉和凝汽式电厂的煤耗。实施热电联产改造方案后, 系统的热源结构将得到改变, 热电联产在总供热量中所占的比例将大幅增加。改造后系统的能耗由两部分组成: 一是热电联产的耗煤量, 二是燃煤锅炉房的耗煤量。结合克拉玛依集中供热系统改造工程项目的相关资料和实际数据, 根据热电联产的能耗计算模型, 得出如下相关计算结果。

改造前的供热系统为热电分产的方式, 电能由凝汽式电厂进行生产, 如表 3 所示, 其年发电量为 3,850,000,000 kWh, 煤耗率取标准值 0.31 kg/kWh 进行计算, 则凝汽式电厂生产电能的年煤耗量为 1,193,500 t。热能由区域锅炉房生产, 如表 4 所示, 年供热量为 15,197,912 GJ, 由于区域锅炉房容量较小, 其平均热效率只有 70%, 因此其供热煤耗率较高, 为 48.8 kg/GJ, 热电分产的供热年煤耗量为 741,658 t。

实施热电联产节能改造后, 电能由热电厂进行生产, 年发电量保持不变的情况下, 如表 5 所示, 发电煤耗率为 0.225 kg/kWh, 则改造后热电联产的年发电煤耗量为 866,250 t。热能由热电厂锅炉和保留的高效率区域锅炉房共同供应, 其中热电厂锅炉占主要部分, 年供热量为 9,220,000 GJ, 保留区域锅炉房的年供热量为 5,977,912 GJ。改造后热电厂锅炉的热效率为 93.8%, 保留锅炉房的热效率为 93.2%, 其热效率得以提高, 供热煤耗率降低, 分别为 36.46 kg/GJ 和 36.70 kg/GJ, 而热电厂的年供热煤耗量为 336,161 t, 保留区域锅炉房的年供热煤耗量为 219,361 t, 分别见表 6 和表 7。

热电分产与热电联产的煤耗量对比见表 8, 根据计算结果绘制出热电联产与热电分产的煤耗量对比图, 如图 7 所示。

在发电方面, 凝汽式电厂生产电能的煤耗率与热电厂生产电能的煤耗率相比降低了 0.085 kg/kWh, 节能效果较为明显。按照年发电量 3,850,000,000 kWh 进行计算, 热电厂的发电年煤耗量比普通凝汽式电厂的发电年煤耗量节约 327,250 t。

在供热方面, 热电分产的区域锅炉房平均热效率仅为 70%, 而实施热电联产改造后的锅炉房综合热效率为 93.6%, 锅炉房的整体热效率提高了 23.6%。改造前热电分产生产热能的煤耗率为 48.8 kg/GJ, 而实施热电联产改造后的整体供热煤耗率为 36.55 kg/GJ, 改造后系统的供热煤耗率降低了 12.25 kg/GJ, 节能效果十分明显。在年供热保持不变的情况下, 改造后系统的供热年煤耗量比改造前的供热年煤耗量节约 186,136 t。

总体上, 实施热电联产改造方案后, 系统的发电和供热年总煤耗量共节约 513,386 t, 全年总能耗下降 26.5%。可见实施该改造方案后热源的能源利用效率得到明显提高, 节能效果显著。

**Table 3.** Coal consumption of electric energy in condensing power plant

**表 3.** 凝汽式电厂生产电能的煤耗量

发电量(kWh)	煤耗率(kg/kWh)	煤耗量(t)
3,850,000,000	0.31	1,193,500

**Table 4.** Coal consumption of heat energy in district boilers

**表 4.** 区域锅炉房生产热能的煤耗量

生产热能的煤耗率(kg/GJ)	区域锅炉房的锅炉效率	热电分产方案的年供热量(GJ/年)	煤耗量(t)
48.8	0.7	15,197,912	741,658

**Table 5.** Coal consumption of electric energy in CHP

**表 5.** 热电联产生产电能的煤耗量

总耗热量(kJ/h)	抽汽供热的 耗热量(kJ/h)	发电热 耗量(kJ/h)	发电热耗率 (kJ/kWh)	热电厂生产电能的 煤耗率(kg/kWh)	热电联产发电 总煤耗量(t)
2822.2	1044.2	1778.1	6585.98	0.225	866250

**Table 6.** Coal consumption of heat energy in thermal power plant

**表 6.** 热电厂供应热能的煤耗量

热电厂锅炉房生产热能的煤耗率(kg/GJ)	热电厂锅炉效率	热电厂锅炉房的年供热量(GJ/年)	煤耗量(t)
36.46	0.938	9,220,000	336,161

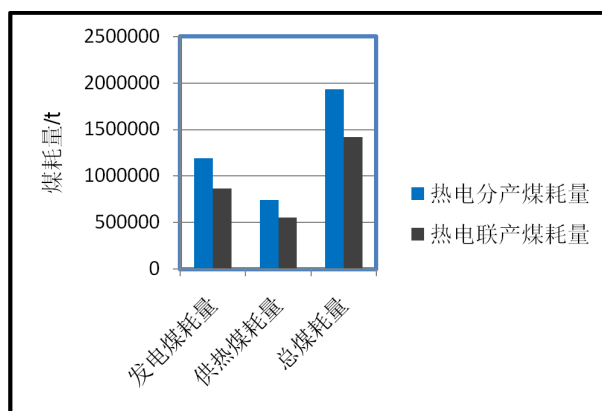
**Table 7.** Coal consumption of heat energy in reserved district boilers

**表 7.** 保留区域锅炉房供应热能的煤耗量

保留区域锅炉房生热能的煤耗率(kg/GJ)	保留锅炉房效率	保留区域锅炉房的年供热量(GJ/年)	煤耗量(t)
36.70	0.932	5977912	219361

**Table 8.** Comparison of Coal consumption in two different methods  
**表 8.** 热电分产与热电联产煤耗量对比

方式	热电联产	热电分产	差值
发电煤耗量(t)	866,250	1,193,500	327,250
供热煤耗量(t)	555,522	741,658	186,136
总煤耗量(t)	1,421,772	1,935,158	513,386



**Figure 7.** Black-box model of condenser  
**图 7.** 凝汽器黑箱模型

## 4.2. 热电厂的热力性能分析

在不同工况下，结合实际数据根据模型进行计算，得出不同工况下的热电厂总效率、热电比、发电热效率、供热效率和发电热耗率的数值。

### 4.2.1. 热电厂技术指标随抽汽量的变化

热电厂把在汽轮机中做完功的蒸汽抽出一部分，用于向热用户供热。由于发电的蒸汽和供热的抽汽在数量上相互影响，因此热电厂供热抽汽量的变化会影响到其他技术指标。为研究抽汽量发生变化时其他技术指标的情况，需要计算不同供热抽汽量下各个技术指标的数值。根据计算模型，可分别计算出热电厂总效率、热电比、发电热效率、供热效率和发电热耗率的数值，根据计算数据绘制变化趋势图，见图 8~图 10。

由图 8 可见，热电比随供热抽汽量的增加而逐渐增加，且变化趋势较为明显，当供热抽汽量为 320 t/h 时，热电比达到 1.1，供热抽汽量所占比例较大。热电厂的总效率也呈现出不断增加的趋势，随着供热抽汽量的增加，总效率由原来的 40% 增加到 67%，增长幅度较大，说明在一定的范围内增加供热抽汽量能够明显提高热电厂的总效率。

由图 9 和图 10 可见，随着供热抽汽量的不断增加，热电厂的供热效率从 0 增长到 34%，而发电热效率呈现出降低的趋势，从原来的 40% 下降到 30.2%，降低了 9.8%，热电厂发电热耗率不断增加，由 7621 kJ/kWh 增加到了 8273 kJ/kWh，说明供热抽汽量的增加对热电厂发电方面影响较大，对发电效益带来不利影响。

由以上分析可以看出，增加热电厂的供热抽汽量能够在很大程度上使总效率得到提高。因此，在热电厂实际运行中应该优先使抽汽量达到额定数值，尽量提高总效率，从而达到节能的目的。仅从数量关系上进行分析，抽汽供热量的增加能够提高总效率，但在热电厂实际运行中，随着供热抽汽量的不断增

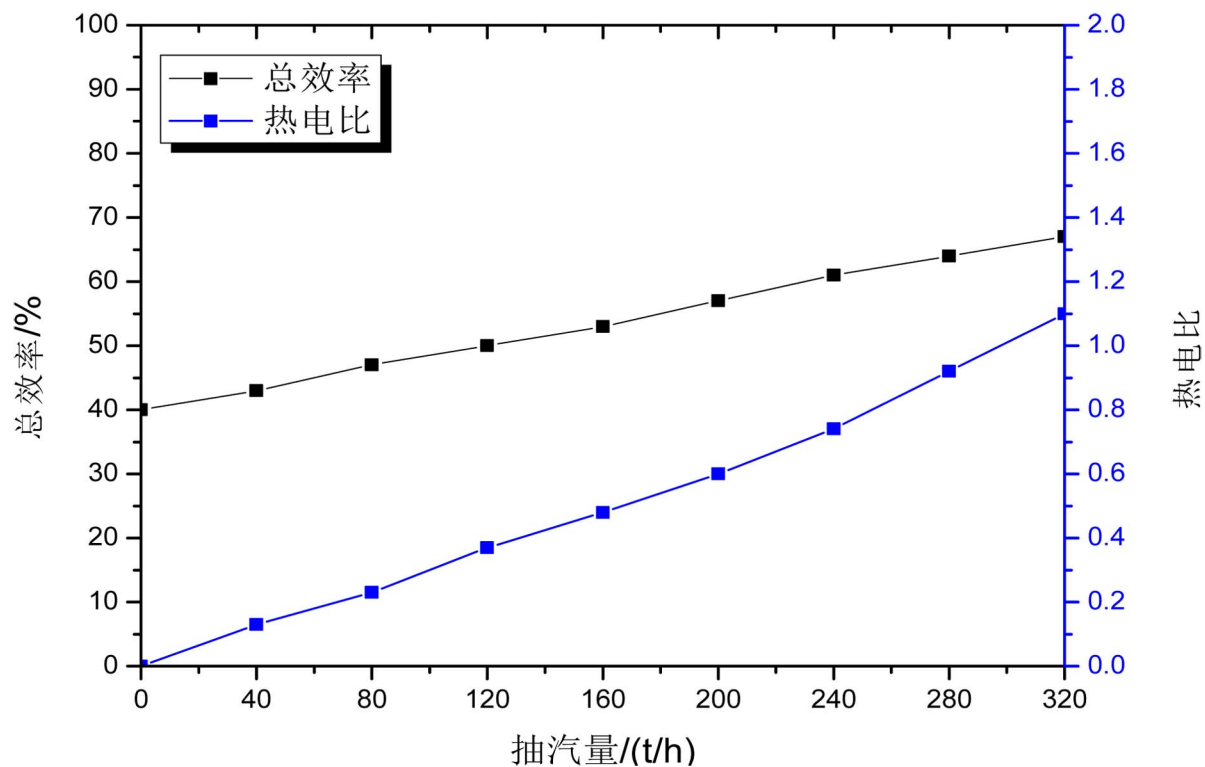


Figure 8. The change of overall efficiency and ratio of heat to electricity

图 8. 抽汽量变化时总效率和热电比的变化

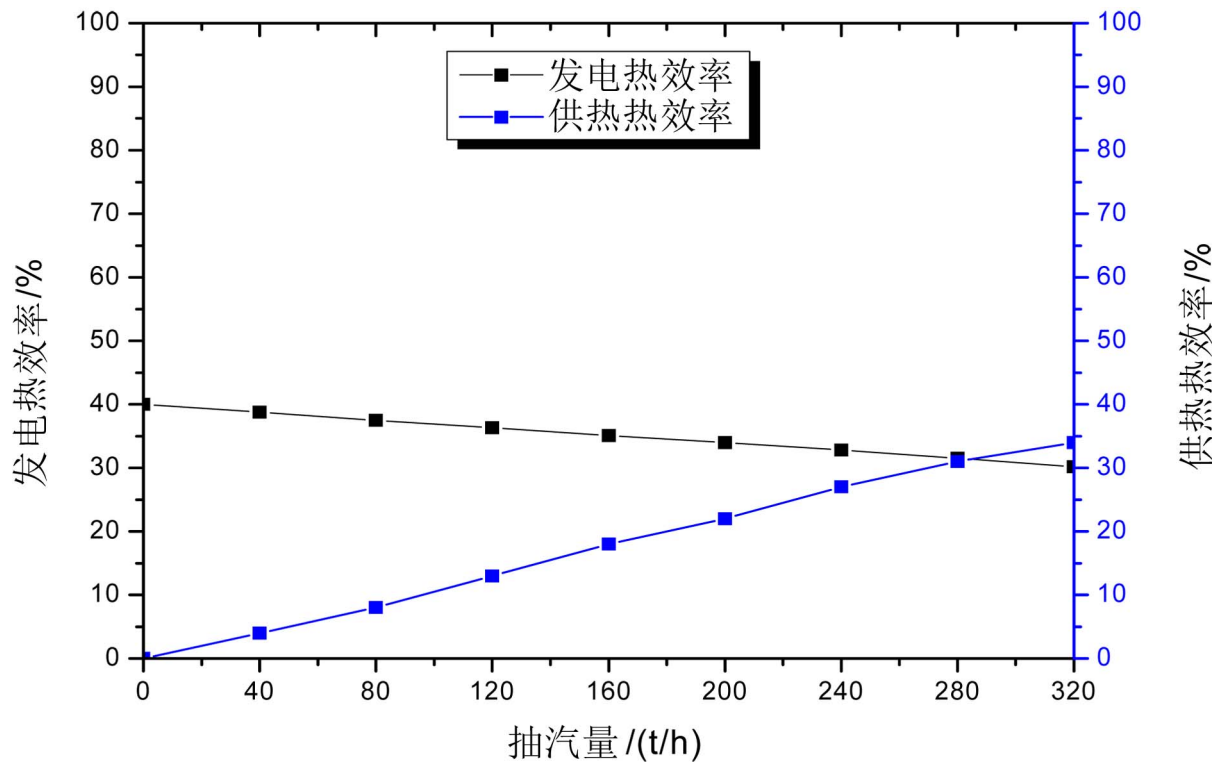


Figure 9. the change of generating efficiency and heating efficiency

图 9. 抽汽量变化时发电效率和供热效率的变化

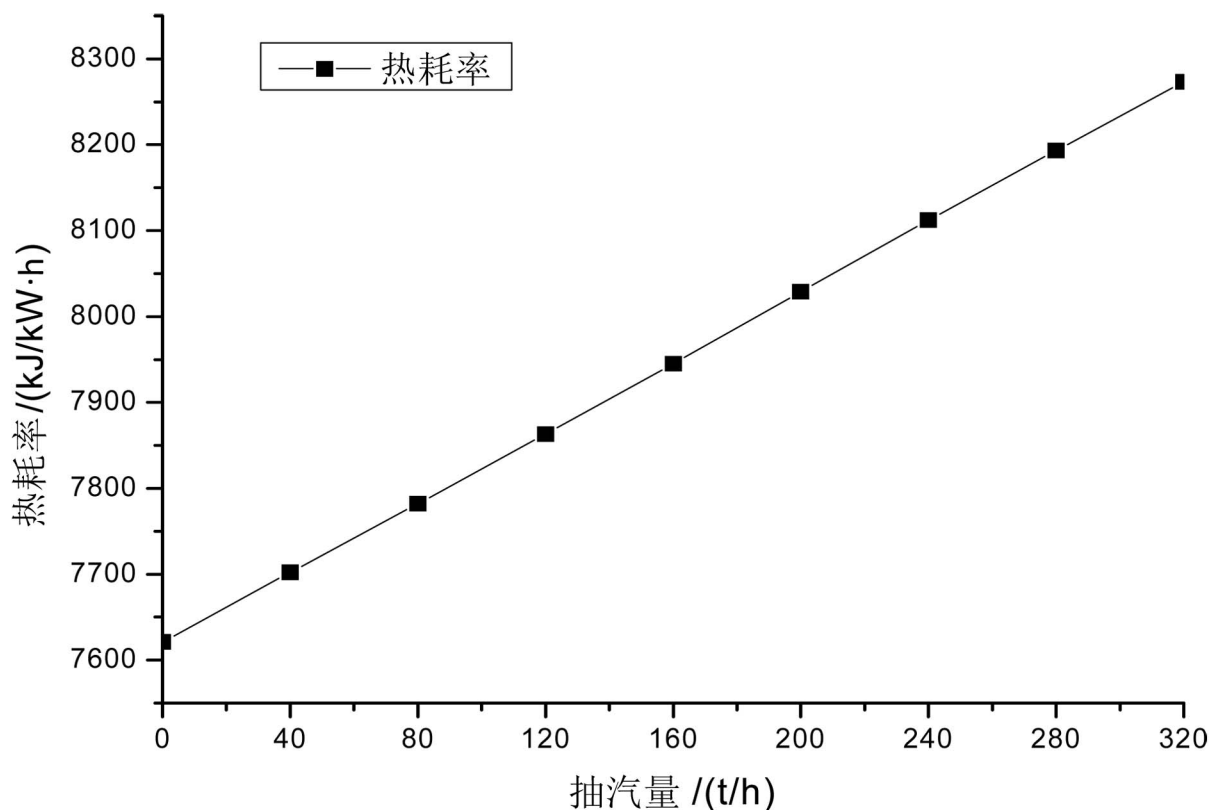


Figure 10. The change of heat consumption rate of electricity generation

图 10. 抽汽量变化时发电热耗率的变化

加, 热电厂发电量将会受到明显的影响。在汽轮机抽汽参数一定的情况下, 当供热抽汽量达到最大值时, 热电厂的总效率最高。因此, 应尽量增加热电厂的供热负荷, 从而使其效率最高。

根据我国下发的《关于发展热电联产的规定》, 热电联产机组的总效率应不低于 45%。由图 8 可以看出, 当供热抽汽量为 0 时, 即热电厂只发电不供热, 全厂总效率为 40%。随着供热抽汽量的增加, 总效率不断提高, 在供热抽汽量达到最大值时, 总效率提高到 67%。因此, 热电厂必须向外供热才能保证总效率大于 45%, 达到使用热电联产的节能效果。

#### 4.2.2. 热电厂技术指标随供热抽汽位置的变化

根据热电厂实际运行数据及计算模型进行计算, 根据计算数据绘制变化趋势图, 见图 11~图 13。

由图 11 能够看出, 随着供热抽汽位置的变化, 总效率始终保持不变。这是因为抽汽位置的改变对汽轮机的排汽量不造成影响, 不改变汽轮机蒸汽发电和供热的总量。随着抽汽位置的转移, 热电比逐渐下降, 在 3 号抽汽位置时热电比突然增加, 这是由于蒸汽再热的影响。

随着供热抽汽位置的不断变化, 机组用来发电和用来供热的蒸汽参数也发生改变, 导致热电厂的发电效率和供热效率受到较大影响。由图 12 能够得出, 随着供热抽汽位置由高压缸向低压缸逐渐后移, 机组发电热效率整体增加, 而机组供热效率整体降低, 两者变化趋势正好相反, 与总效率不变正好相对应。发电热耗率整体呈现降低的趋势。在 3 号抽汽位置时发电热耗率突然增加, 这是由于蒸汽再热的影响。

随着供热抽汽位置由高压缸向低压缸不断后移, 抽汽的温度和压力等参数不断下降, 此时热电厂的发电量增加。因此, 在热电厂实际运行中应尽量在低压缸进行供热抽汽, 提高能源利用率和电厂的经济效益。

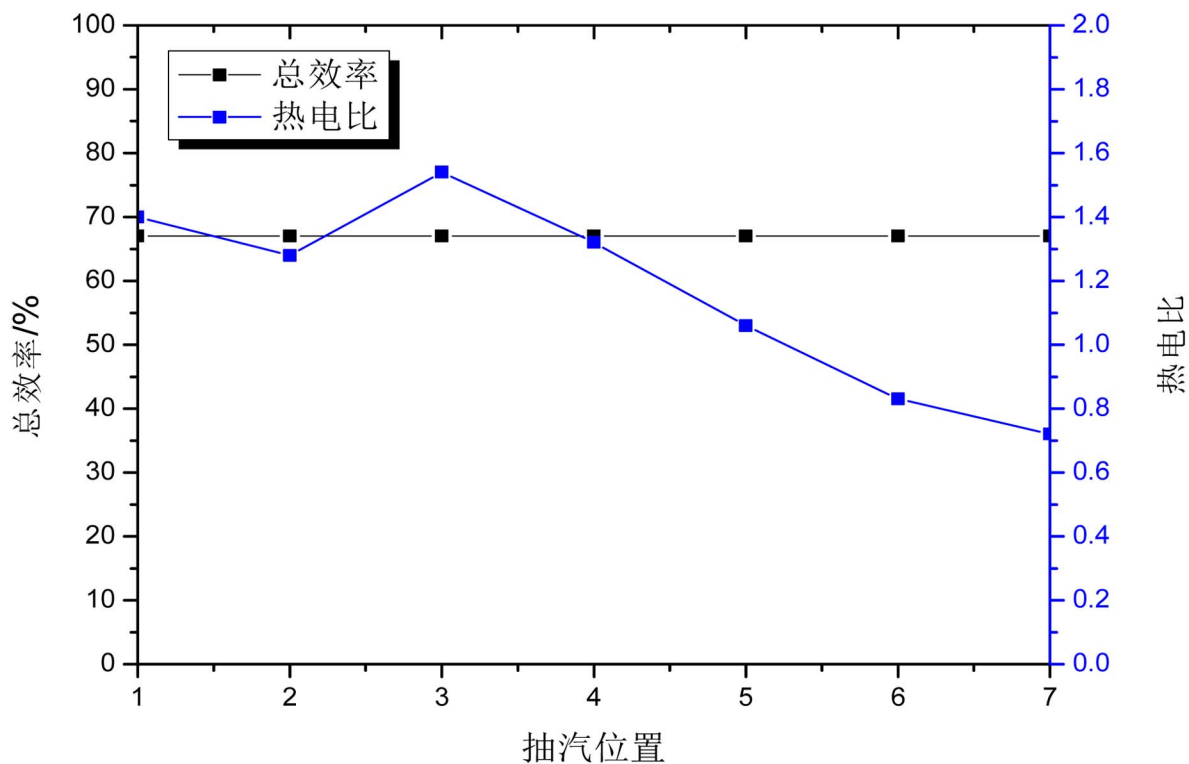


Figure 11. The change of overall efficiency and ratio of heat to electricity

图 11. 抽汽位置变化时总效率和热电比的变化

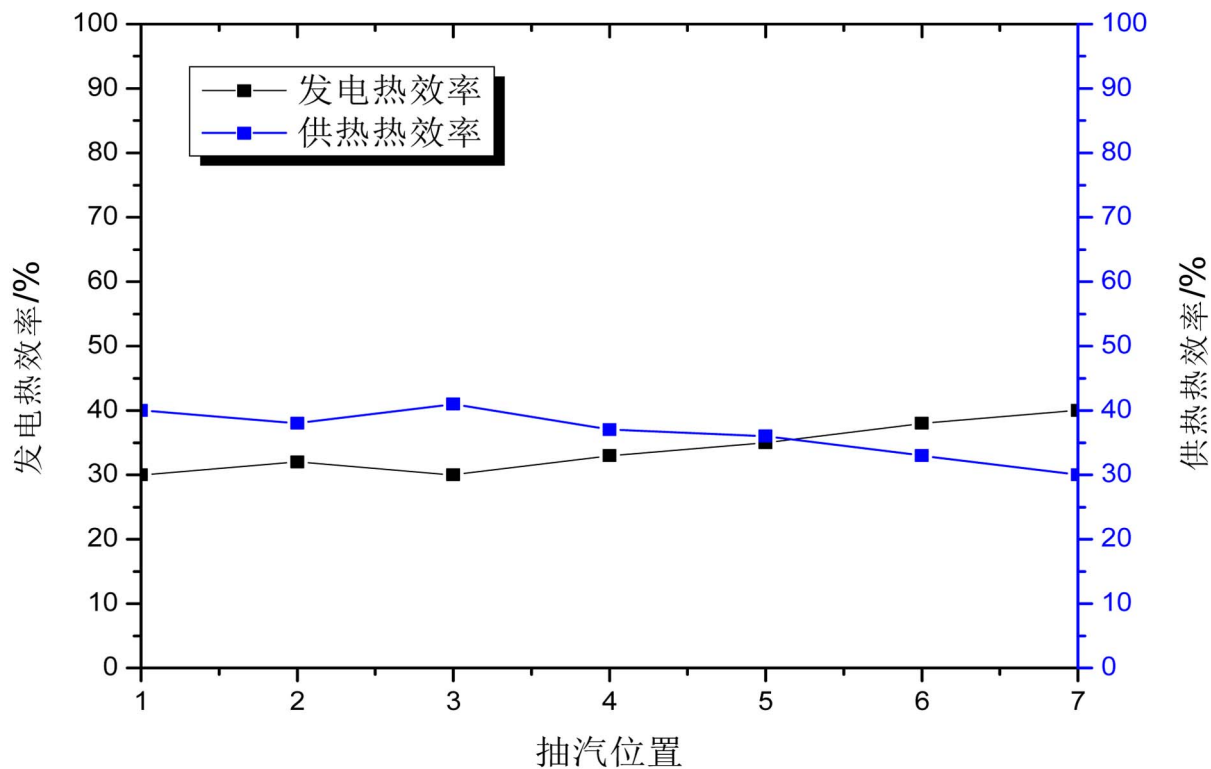


Figure 12. The change of generating efficiency and heating efficiency

图 12. 抽汽位置变化时发电效率和供热效率的变化



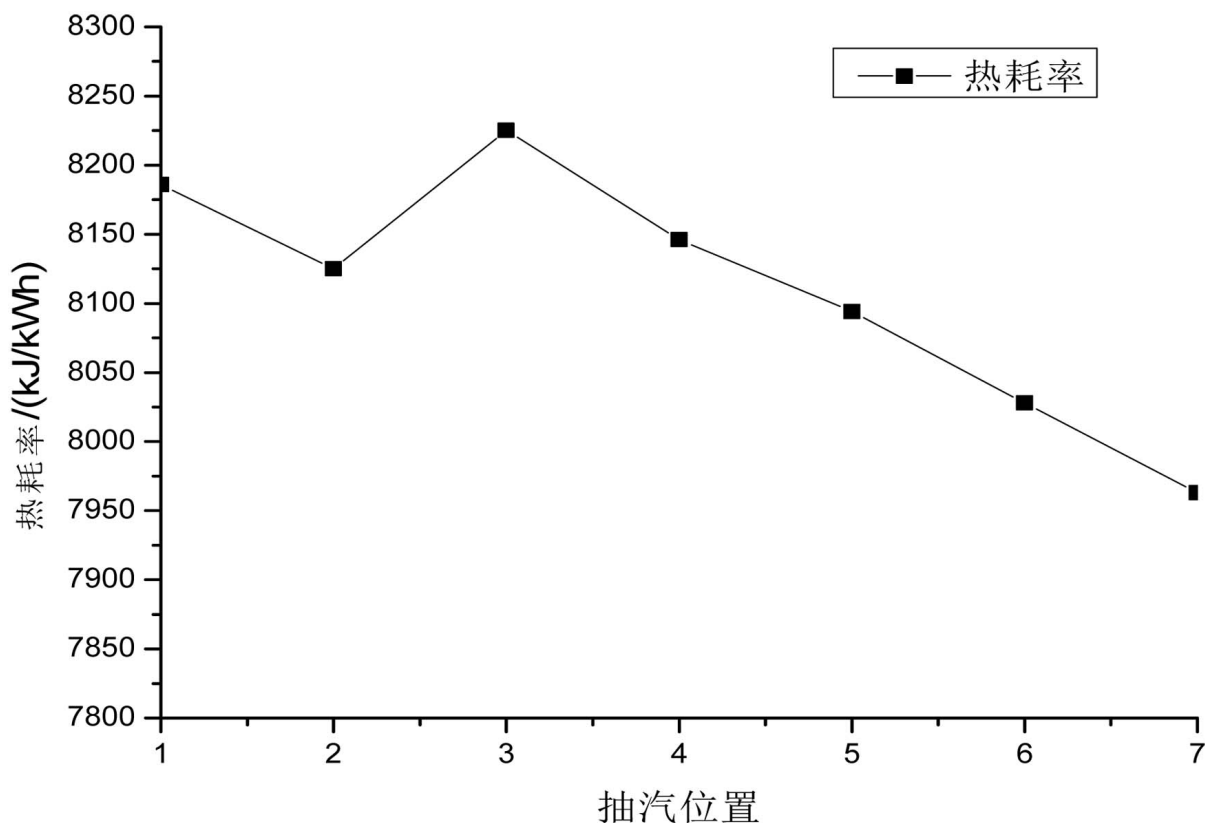


Figure 13. The change of heat consumption rate of electricity generation

图 13. 抽汽位置变化时发电热耗率的变化

### 4.3. 热电厂的焓分析

本系统的能耗分析主要是从热力学第一定律的角度出发，计算得出方案改造前后系统消耗能量的数量变化，它只能反映能量的多少，不能体现能量品位的高低。因此考虑通过热力学第二定律，计算出系统的焓损失和焓效率，从能量质量的角度来评价系统的用能情况，分析影响系统焓损失的主要因素。通过对改造前后的系统进行焓分析得出：原供热锅炉的焓效率为 15.35%，实施热电联产改造后热电厂锅炉的焓效率为 42.6%，改造后系统的总输入焓为 3,826,201 MJ/h，系统总焓效率为 32.23%，可见改造后系统的焓效率得到明显提高。额定工况下各设备的焓损失、焓效率以及焓损率计算结果如表 9 所示。

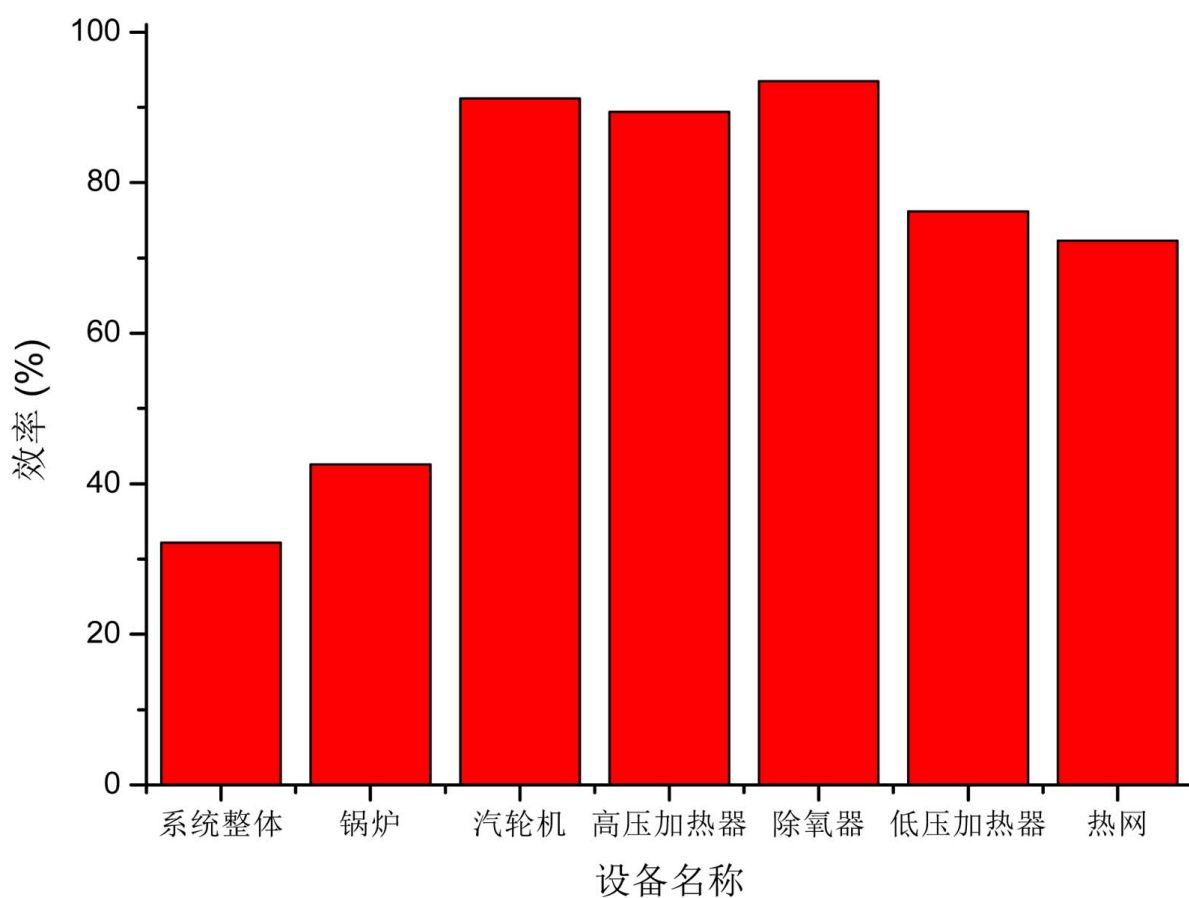
由表 9 可知，在热电联产系统中热电厂锅炉装置的焓损失最大，占系统总焓损失的 81.2%，凝汽器的焓损失仅次于锅炉，占系统焓损失的 12.4%，汽轮发电机组的焓损失占系统焓损失的 4.2%，各级加热器和供热管网的焓损失相对较小，其总和仅占系统总焓损失的 2.2%。因此，降低锅炉装置的焓损失是降低系统总焓损失的主要途径。热电厂各设备的焓效率和焓损率分布如图 14 和图 15 所示。

由图 14 和图 15 能够看出，热电厂各设备中锅炉装置的焓效率明显低于其他设备，只有 42.6%，同时锅炉也是系统中焓损率最大的设备，因此该热电厂锅炉具有较大的节能潜力，在机组的节能优化中应该以锅炉作为重点研究对象，对其做出进一步细致的分析，找出焓损失较大的环节进行改进。汽轮机的焓效率较高，为 91.2%，同时其焓损率相对较低，说明热电联产对汽轮机具有一定的节能效果。在各级加热器中，低压加热器的焓效率相对较低，只有 76.2%。加热器的总焓损率仅为 1.5%，焓损失较小。凝汽器的焓损率较高，仅次于锅炉，应对凝汽器做进一步的研究。供热管网的焓效率为 72.3%，相对较低，因此在热网建设中应采取适当的节能措施，减少供热管网的焓损失。



**Table 9.** Computed results of exergy of thermal power plant  
**表 9.** 热电厂各设备焓分析计算结果

设备	焓损失(MJ/h)	焓效率(%)	焓损率(%)
锅炉	2,105,530	42.6	81.2
汽轮机	108,907	91.2	4.2
高压加热器	20,744	89.4	0.8
除氧器	5186	93.5	0.2
低压加热器	12,965	76.2	0.5
凝汽器	321,534	—	12.4
热网	18,151	72.3	0.7



**Figure 14.** The exergy efficiency of different equipments  
**图 14.** 不同设备的焓效率

## 5. 结论

通过建立能耗计算模型对改造后的供热系统进行计算分析得出结论：对集中供热系统实施热电联产改造后，热电厂生产电能的煤耗率与凝汽式电厂生产电能的煤耗率相比，降低了 0.085 kg/kWh，发电年煤耗量节约 327,250 t。热电厂锅炉的热效率明显高于原区域锅炉房的平均热效率，同时改造后锅炉房生产热能的煤耗率得到明显降低，供热年煤耗量节约 186,136 t。发电和供热的年总煤耗量节约 513,386 t，

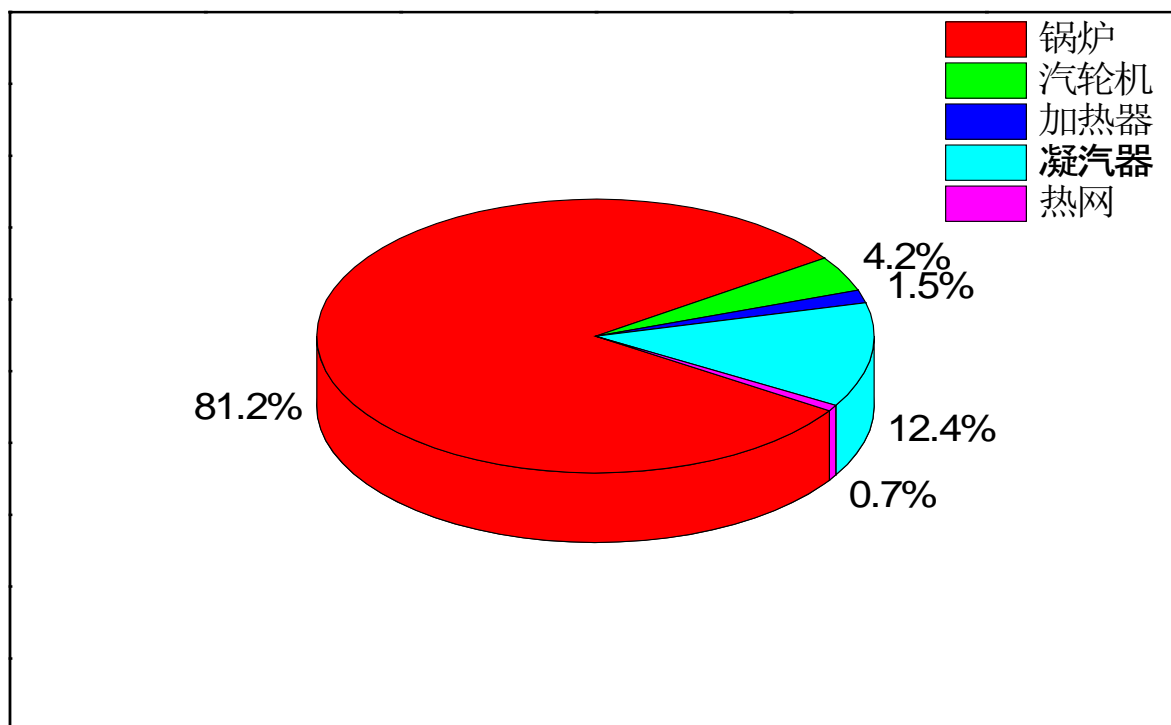


Figure 15. The exergy loss rate of different equipments

图 15. 各设备的焓损率

全年总能耗下降 26.5%，节能效果显著。

增加供热抽汽量能够明显提高热电厂的总效率，在实际运行中应优先使供热抽汽量达到额定数值。随着供热抽汽位置由高压缸向低压缸不断后移，总效率始终保持不变，热电厂的发电量逐渐增加。因此，在热电厂实际运行中应尽量在低压缸进行供热抽汽，提高能源利用率和电厂的经济效益。

焓分析的计算结果表明：改造前区域供热锅炉的焓效率只有 15.35%，热电厂锅炉的焓效率为 42.6%，改造后系统的总焓效率为 32.23%，可见改造后系统的焓效率得到明显提高。对系统各设备的焓计算结果显示：热电厂各设备中锅炉的焓效率明显低于其他设备，且锅炉的焓损失占系统总焓损失的 81.2%，具有较大的节能潜力，应对锅炉设备做进一步的研究，找出焓损失较大的环节进行改良。供热管网的焓效率为 72.3%，仅高于锅炉的焓效率，因此在热网建设中应采取适当的节能措施，减少供热管网的焓损失。

通过将采用热电联产的集中供热改造方案与现有的集中供热系统进行对比分析能够得出：该改造方案能够显著降低发电和供热能耗，有效提高供热系统的热效率和焓效率，能够实现节能减排的目标，该方案具有一定的推广价值，可对其他地区的集中供热系统整体节能改造提供参考。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(NO. 51274224)。

## 参考文献 (References)

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ26-1995 建筑节能设计标准: 采暖居住建筑部分[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 91-92.
- [2] 徐逢祥. 建筑节能形势与发展[J]. 供热信息, 2006(2): 45-49.

- 
- [3] 陈和平. 我国热电联产概况与政策[J]. 区域供热, 2001(2): 45-49.
- [4] 王振铭, 郁刚. 我国热电联产的现状、前景与建议[J]. 中国电力, 2003(9): 43-49.
- [5] 2010年热电联产发展规划及远景发展目标[Z]. 国家发展改革委员会能局, 2002: 73-75.
- [6] 武学素. 热电联产[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 117-121.
- [7] 杨项劲, 由世俊. 单纯供热负荷下热电联产与热电分产的能耗分析比较[J]. 煤气与热力, 2003(2): 68-72.
- [8] 李维仲. 锅炉热力计算与焓分析[J]. 大连理工大学学报, 2006(4): 451-455.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aepe@hanspub.org](mailto:aepe@hanspub.org)