

# 基于生命周期理论的储热式电锅炉经济性对比分析

阮文骏<sup>1</sup>, 蔡 亮<sup>2</sup>, 周 强<sup>3</sup>, 徐嘉锐<sup>3</sup>, 张汇婷<sup>2</sup>, 李光华<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 南京 210008; 2. 东南大学 能源与环境学院, 南京 210096;  
3. 国网江苏综合能源服务有限公司, 南京 210019)

## Contrastive analysis of economics of electric boiler with heat storage based on life cycle theory

RUAN Wenjun<sup>1</sup>, CAI Liang<sup>2</sup>, ZHOU Qiang<sup>3</sup>, XU Jiarui<sup>3</sup>, ZHANG Huiting<sup>2</sup>, LI Guanghua<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;  
2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
3. State Grid Jiangsu Integrated Energy Service Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

**摘要:** 新能源的高比例渗透对我国风力与光伏发电的经济与效益产生影响, 导致电网灵活性下降、调峰能力不足、就地消纳困难、弃风弃光等现象的发生。针对当前电力系统所处的困境, 有必要适度发展蓄热技术, 研究基于风电和光电就地消纳的熔盐蓄热技术, 提高电力系统调峰调频能力, 有效发挥移峰填谷的优势。以江苏省的学校、医院锅炉使用情况为依据, 进行电能替代潜力分析, 通过建立生命周期成本模型(LCC)对不同类型的锅炉进行经济性对比分析, 包括初投资成本、运行成本、维护成本, 从而为设备选择、投资优化提供依据。

**关键词:** 储热式电锅炉; 替代潜力; 生命周期成本

**Abstract:** The high proportion of new energy penetration has affected the economy and benefits of wind power and photovoltaic power generation in China, resulting in the decline of power grid flexibility, insufficient peaking capacity, difficulty in local consumption, and the abandonment of wind and light. In view of the predicament of the current power system, it is necessary to vigorously develop heat storage technology, study thermal storage technology of molten salt based on local consumption of wind power and photoelectric power, improve the capacity of peak and frequency regulation of power system, and effectively exert the advantages of shifting peaks and valleys. Based on the use data of schools and hospital boilers in Jiangsu Province, the potential of electric energy substitution is analyzed. And life cycle cost model (LCC) is established to conduct economic comparative analysis of various types of boilers, including initial investment cost, operating cost, maintenance cost, so as to provide a strong basis for equipment selection and investment optimization.

**Key words:** thermal storage electric boiler; alternative potential; life cycle cost

中图分类号: TM715 文献标志码: A

## 0 引言

在国家可再生能源政策的推动下, 为应对以煤炭为主体的消费结构所引起的世界范围内的全球气候变化等生态环境问题, 调整能源结构、以清洁能源替代和电能替代为重点的能源变革势在必行<sup>[1]</sup>。由于风力与光伏发电存在着明显的逆调峰特性, 随着新能源的高比例渗透, 普遍存在电网灵活性下降、可调性低、就地消纳困难、利用效率不高、弃风弃光现象严重等问题<sup>[2]</sup>, 严重影响了我国风力发电、光伏发电的经济性与效益性。

针对以上问题, 储能技术必须得到重视与发展, 以利于解决当前风力与光伏发电所面临的困境。储热式电锅炉具有环保无污染、安全稳定运行、系统设备简

单等优点, 相较于其他类型锅炉存在着明显的优势<sup>[3]</sup>。

基于国网江苏省电力公司与东南大学关于“利于电网调峰及新能源消纳的分布式小容量电蒸汽锅炉融合熔盐储热系统研究开发”项目, 通过对江苏省学校和医院行业应用蒸汽锅炉情况的调研, 了解各锅炉类型的分布情况以及分析蓄热电锅炉在各领域的替代潜力。此外, 本文建立了生命周期成本模型(life cycle cost, LCC)并对锅炉类型进行经济性分析, 通过初投资成本、运行成本、维护成本、残值对比分析、经济性对比分析等, 对锅炉类型进行各方面对比评估, 分析储热式电锅炉的替代潜力, 并且为以后的设备配置选择、投资政策优化提供一定的依据。

## 1 电能替代潜力分析

电蒸汽锅炉广泛应用于商业和工业领域, 在不同程度上影响着人们的生产生活。在商业领域方

收稿日期: 2019-07-28; 修回日期: 2019-09-18

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018018)

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (NO.J2018018)

面,电蒸汽锅炉主要应用于学校、医院、酒店等场所;在工业领域方面,电蒸汽锅炉主要分布在化工、医疗、食品、服装加工以及建材等领域。目前各行业小容量电蒸汽锅炉(0.1~0.5 t/h)使用情况如表1所示。

表1 各行业电锅炉使用情况  
Table 1 The usage of boiler in various industries

| 行业    | 分布数量/万台 | 储热空间满足情况/% |
|-------|---------|------------|
| 工业    | 25      | 90         |
| 一般工商业 | 15      | 80         |
| 医院    | 8       | 70         |
| 学校    | 5       | 90         |

2017年初,国网江苏省电力公司组织各地市公司对省内学校、医院领域的蒸汽锅炉进行调查。本次调研共涉及13个市、1 923家医院以及4 545家学校。江苏省学校、医院各类型锅炉的数量和容量统计情况如表2所示。

表2 江苏省内各类型锅炉数量和容量分布情况  
Table 2 Distribution of quantity and capacity of various types of boilers in Jiangsu Province

| 项目    | 数量/台  |       | 容量/(t·h <sup>-1</sup> ) |       |
|-------|-------|-------|-------------------------|-------|
| 场所    | 学校    | 医院    | 学校                      | 医院    |
| 电锅炉   | 5 608 | 2 445 | 207.2                   | 137.7 |
| 煤锅炉   | 216   | 66    | 77.1                    | 83.7  |
| 天然气锅炉 | 477   | 355   | 388.5                   | 447.6 |
| 生物质锅炉 | 6     | 6     | 3.2                     | 13.1  |
| 其他锅炉  | 94    | 421   | 10.9                    | 111.3 |
| 总计    | 6 401 | 3 293 | 686.9                   | 793.4 |

为更好地反映各锅炉类型的电能替代潜力,分别从各锅炉类型在江苏省内学校和医院的的数量占比和容量占比方面进行进一步的直观体现,统计情况如图1所示。根据调研结果可知:电锅炉是江苏省内使用最多的锅炉类型,达到8 053台,占有所有锅炉类型的83.07%,然而其蒸发量仅占比23%;天然气锅炉现存832台,在全省除淮安地区外的范围内均有分布,占总量的8.58%,但是其蒸发量却占据了所有锅炉蒸发量总和的57%;燃煤锅炉数量占比2.91%,容量占比达到11%。

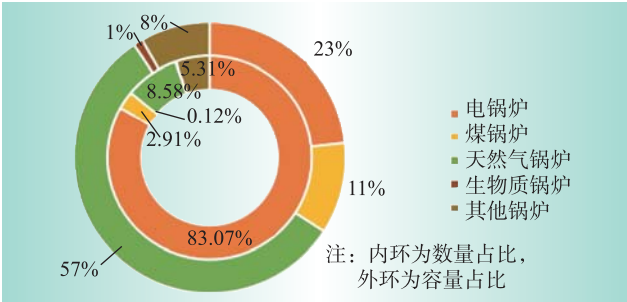


图1 江苏省各锅炉类型数量和容量占比  
Fig. 1 Proportion of quantity and capacity of various boiler types in Jiangsu Province

根据调研结果,进一步从学校和医院两个领域分别分析各锅炉电能替代潜力的大小。

在学校领域:江苏省内燃煤锅炉现存216台,蒸发量达到77.1 t/h,调研结果显示燃煤锅炉目前主要

存在于徐州、南通、盐城等8个地区;天然气锅炉方面,全省学校现存477台,蒸发量达到了388.5 t/h,其中南京地区天然气锅炉有85台,数量最多;生物质锅炉存在于徐州、扬州、泰州和盐城,分别有2台、2台、1台、1台,合计蒸发量3.2 t/h;在燃油锅炉方面,现存9台,合计蒸发量9.4 t/h。

在医院领域:医院锅炉主要应用于医用工作、生活热水以及食堂餐饮。医院内存在最多的锅炉类型为电锅炉,有2 445台,然而其容量只有137.7 t/h;相较于数量最多的电锅炉,天然气锅炉只有355台,蒸发量达到447.6 t/h,其中南京地区医院天然气锅炉数量达到68台,蒸发量为全省最大,达到176.9 t/h;医院燃煤锅炉现存66台,合计蒸发量83.65 t/h;燃油锅炉方面,现存7台,合计蒸发量5.1 t/h;生物质锅炉存在于徐州、盐城和淮安,分别有3台、2台、1台,合计蒸发量13.1 t/h。

如实现电锅炉替代,预计可增加电容量和年可实现替代电量的情况如表3所示。

表3 电能替代潜力统计情况  
Table 3 Statistics on the potential of electric energy substitution

| 项目    | 可替代台数/台 |     | 预计可增加电容量/kW |           | 年可实现电替代量/万kWh |           |
|-------|---------|-----|-------------|-----------|---------------|-----------|
| 场所    | 学校      | 医院  | 学校          | 医院        | 学校            | 医院        |
| 燃煤锅炉  | 216     | 66  | 53 981.9    | 58 555.0  | 10 796.40     | 11 711.00 |
| 天然气锅炉 | 477     | 355 | 271 968.2   | 313 306.0 | 543 936.60    | 62 661.20 |
| 燃油锅炉  | 9       | 7   | 6 580.0     | 3 570.0   | 1 316.00      | 714.00    |
| 生物质锅炉 | 6       | 6   | 2 205.0     | 9 149.0   | 441.00        | 128.98    |
| 总计    | 708     | 434 | 334 735.1   | 384 580.0 | 556 490.00    | 75 215.18 |

综上所述,学校电锅炉替代潜力设备数为708台,预计可增加电容量334 735.1 kW,年可实现电替代容量556 490万kWh;医院电锅炉替代潜力设备数为434台,预计可增加电容量384 580 kW,年可实现电替代量75 215.18万kWh。目前电锅炉市场份额较大,电能替代潜力可观,但是削峰填谷的优势没有发挥,加大了电力系统负荷。针对以上问题,储热式电锅炉必将成为新的电力需求侧资源,发展前景广阔。

## 2 生命周期成本模型

本文建立了生命周期成本模型,站在系统整个生命周期的角度上,对整个生命周期的各个阶段进行分析,对成本加以控制,以确保成本最小化、利益最大化的工程目标的实现。生命周期成本模型<sup>[4]</sup>包括初投资成本、运行成本、维护成本以及残值等出现在设备生产至报废整个生命周期过程的全部费用<sup>[5]</sup>,模型表达为

$$\begin{cases} LCC = C_0 + \sum_{t=0}^T O \times PV_{\text{SUM}} + \sum_{t=0}^T M \times PV_{\text{SUM}} - S \times PV \\ PV_{\text{SUM}} = \frac{(1+r)^t - 1}{r \times (1+r)^t} \\ PV = \frac{1}{(1+r)^t} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C_0$ 、 $O$ 、 $M$ 、 $S$  分别为初投资成本、运行成本、维修成本和残值,元;  $PV_{\text{SUM}}$  和  $PV$  分别为现值之和和现值,元;  $T$ 、 $t$ 、 $r$  分别为生命周期、时间(用年份的序号表示)、折现率。

为了便于比较不同方案的经济性<sup>[6]</sup>,引入全年均值费用( $EUAC$ )和各方案的生命周期成本系数 $C_i$

$$\begin{cases} EUAC = LCC \cdot F_R \\ F_R = \frac{r \times (1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \end{cases} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{EUAC_i}{\sum_{i=1}^m EUAC_i} \quad (3)$$

式中:  $EUAC_i$  为全年均值费用;  $F_R$  为资本回收系数;  $C_i$  为生命周期成本系数。

在相同的供暖效果下,生命周期成本( $LCC$ )、全年均值费用( $EUAC$ )以及生命成本系数( $C_i$ )越小,则该系统的经济效益也越高。本文对江苏省调研结果中所存在的供暖系统依次进行生命周期成本分析,包括以电锅炉、燃煤锅炉、燃油燃气锅炉、水蓄热锅炉以及熔融盐蓄热式电锅炉等为热源的供暖系统,以生命周期成本最小为方案择优的原则。

## 2.1 初投资成本

锅炉初投资为供暖系统各部分的费用之和,主要包括设备费和安装费。基本设备主要包括锅炉、水泵、设备用房以及管网等主辅助设备。安装费主要指设备的装配费和调试费<sup>[6]</sup>。

### (1) 锅炉的初投资

根据供暖系统形式和计算所得到的设计热负荷进行锅炉的选型,由此确定锅炉的规格和台数,进而根据市面上规定的品牌、规格和台数来分析初投资成本。锅炉容量与供暖电锅炉所采用的系统的形式有关,锅炉容量的确定可以按照面积指标法进行计算,即

$$Q_b = 1.1 \times \frac{F \times q}{\eta} \quad (4)$$

式中:  $Q_b$  为锅炉容量, W;  $F$  为供暖面积,  $\text{m}^2$ ;  $q$  为建筑供暖热指标,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\eta$  为锅炉热效率。

锅炉的初投资成本与锅炉容量有关,以锅炉容量为基准进行计算,表达式为

$$C_b = Q_b \times M_b \quad (5)$$

式中:  $C_b$  为锅炉初投资成本,元;  $M_b$  为单位功率电锅炉费用,元。

采用水蓄热电锅炉时,锅炉初投资成本应包含水箱的费用。蓄热水箱的成本与水箱的材质和体积有关,其费用计算方法为

$$C_t = V_t \times \frac{X \times m}{\eta_t \times \eta_v} M_t \quad (6)$$

式中:  $C_t$  为蓄热水箱成本,元;  $V_t$  为蓄热水箱的体积,  $\text{m}^3$ ;  $X$  为蓄热率;  $M$  为蓄热量, W;  $\eta_t$  为蓄热水箱的蓄热效率;  $\eta_v$  为蓄热水箱的容积安全系数,取 0.95;  $M_t$  为单位体积蓄热水箱费用,  $\text{元}/\text{m}^3$ 。

水泵是电锅炉供暖系统中不可或缺的重要部件,其功率主要由水泵的扬程、流量以及耗电功率

确定,其中流量由热负荷与供回水温差确定<sup>[4]</sup>,得到公式(7)和公式(8)

$$Q_{pu} = \frac{\rho g H G}{3600 \eta_{pu}} \quad (7)$$

$$C_{pu} = Q_{pu} \times M_{pu} \quad (8)$$

式中:  $Q_{pu}$  为水泵的功率, W;  $\rho$  为水泵输送液体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $H$  为水泵扬程,  $\text{mmH}_2\text{O}$ ;  $G$  为水泵流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\eta_{pu}$  为水泵的总效率;  $C_{pu}$  为水泵成本,元;  $M_{pu}$  为水泵价格系数,  $\text{元}/\text{kW}$ 。

### (2) 管道的初投资

供暖系统中管道的初投资包括管网成本和管道保温材料的成本,在计算管道初投资成本时需要考虑管材价格

$$\begin{cases} C_{pi} = \sum_{i=1}^n M_p \times L_i \\ C_{bc} = \pi \times M_b \times \sum_{i=1}^n (L_i \times \delta_i \times d_i) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $C_{pi}$  为管道的投资成本,元;  $M_{pi}$  为第  $i$  段管道的单价,  $\text{元}/\text{m}$ ;  $L_i$  为第  $i$  段管道的长度,  $\text{m}$ ;  $\delta_i$  和  $d_i$  分别为保温材料的厚度、直径,  $\text{m}$ ;  $C_{bc}$  为管道保温材料的投资成本,元;  $M_b$  为保温材料单价,  $\text{元}/\text{m}$ 。

### (3) 安装费

在分析锅炉系统的安装费时应明确其分为两部分:装配费和系统调试费。其中设备的装配费应当适当参照当地设备的装配薪资标准,调试费应当适当参照已建成系统的调试费用<sup>[7]</sup>。系统的安装费等于各部分费用之和乘以费率

$$C_{i,s} = k \times \sum_{i=1}^n C_i \quad (10)$$

式中:  $k$  为安装费率;  $C_i$  为各部分设备的费用,元。

### (4) 总初投资成本

锅炉的初投资成本计算模型为

$$C_0 = C_b + C_t + C_{pu} + C_{pi} + C_{bc} + C_{i,s} \quad (11)$$

式中:  $C_0$  为总初投资成本,元;  $C_b$  为锅炉的初投资成本,元;  $C_t$  为蓄热水箱的费用,元;  $C_{pu}$  为水泵成本,元;  $C_{pi}$  为管道成本,元;  $C_{bc}$  为管道保温材料的投资成本,元;  $C_{i,s}$  为安装费,元。

## 2.2 运行成本

我国局部地区用电负荷严重不平衡,大部分电厂不能满负荷发电,调峰困难,无法充分利用削峰填谷的优势。特别是在我国风电、光电较为充足的东北、西北等地区存在严重的“弃风弃光”现象<sup>[8]</sup>。针对上述问题,本文提出了大力发展储能式电锅炉的方案,蓄热式锅炉能够充分利用峰谷电差,充分利用盈余电力,降低机组负荷和用户电费支出,提高电力系统的经济效益。本文对以锅炉为热源的供暖系统进行了运行成本对比分析,其中锅炉在整个供暖期的运行成本为

$$C_R = \frac{Q_b \times M_R \times t \times d}{q \times \eta} \quad (12)$$

式中:  $C_R$  为锅炉周期的运行成本,元;  $Q_b$  为锅炉容量, W;  $M_R$  为单位燃料价格,元;  $t$  为日供暖时间, h;  $d$  为年供

暖天数,天; $q$ 为燃料单位热值,kJ/kg; $\eta$ 为电锅炉的热效率。

峰谷电价可以直接影响储热式电锅炉的经济效益,江苏省内的一般工商业和其他类别的电锅炉主要应用于宾馆、饭店、医院、商场、办公楼等。江苏省一般工商业的分时电价明细如图2所示。电蒸汽锅炉的储热系统按照1~10 kV进行用电测算时,平段电价为0.760 7元/kWh,低谷电价为0.353 6元/kWh,峰谷电差可达到0.407 1元/kWh,可以充分利用削峰填谷优势,具有巨大的节能潜力。

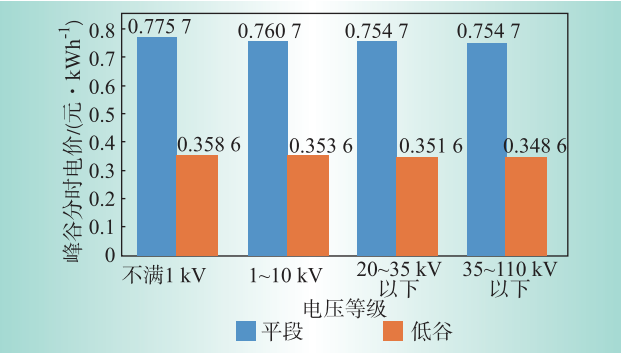


图2 江苏省一般工业及其他类别分时电价

Fig. 2 Time-of-use tariffs for general industry and other categories in Jiangsu Province

对各燃料锅炉的运行成本对比分析,以一台1 t/h锅炉满负荷日运行8 h,运行1年为限制条件进行比较,其中储热电锅炉的燃料是指低谷电。根据市场各燃料锅炉热能利用价格,由公式(1)计算得到的各燃料锅炉运行成本如表4所示,表4中的价格均为市场均价。其中,燃料锅炉各燃料种类的每小时耗量如下:燃气锅炉中天然气耗量为77.6 m<sup>3</sup>/h;城市煤气耗量为166.7 m<sup>3</sup>/h;燃油锅炉中柴油耗量为69.2 kg/h;电热锅炉中电耗量为711.1 kWh;储热电锅炉中电耗量为711.1 kWh;燃煤锅炉中的精煤耗量为162.8 kg/h;水蓄热锅炉中的电耗量为711.1 kWh。

根据计算结果可知,运行成本最为昂贵的是电锅炉,单位时间运行成本达到了540.9元;其次是燃油锅炉,单位时间运行成本达到451.2元;水蓄热锅炉的单位时间运行成本也达到251元;相对于直热电锅炉,低谷电蓄热式锅炉单位时间运行成本降低了近50%,单位时间运行成本为251元;最为便宜的是燃精煤锅炉,单位时间运行成本为130.3元。其中运行成本最低的是燃精煤锅炉,但由于需要为下次启动锅炉预留火种,燃料耗费量要大于表4所估算的燃料需求量,故运行成本最为节省的是低谷电储热式锅炉与

表4 各燃料锅炉运行成本

Table 4 Operating costs for each type of boiler

| 项目          | 燃气锅炉        |         | 燃油锅炉    | 电热锅炉    | 储热电锅炉   | 燃煤锅炉    | 水蓄热锅炉   |
|-------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 燃料种类        | 天然气         | 城市煤气    | 柴油      | 电       | 电       | 精煤      | 电       |
| 单位热值/kcal   | 8 500       | 4 000   | 10 200  | 861     | 861     | 5 500   | 861     |
| 实际单位热/kcal  | 7 735       | 3 600   | 8 670   | 844     | 844     | 3 685   | 844     |
| 每小时吸收热/kcal | 600 000     | 600 000 | 600 000 | 600 000 | 600 000 | 600 000 | 600 000 |
| 设备功率/kW     | 700         | 700     | 700     | 700     | 700     | 700     | 700     |
| 锅炉热效率/%     | 91          | 90      | 85      | 98      | 98      | 67      | 98      |
| 燃料单价/元      | 2.50~3.50   | 1.10    | 6.00    | 0.76    | 0.35    | 0.80    | 0.35    |
| 每小时费用/元     | 194.0~271.0 | 184.0   | 415.2   | 540.9   | 251.0   | 130.3   | 251.0   |
| 日运行小时数/h    | 8           | 8       | 8       | 8       | 8       | 8       | 8       |
| 月运行天数/d     | 30          | 30      | 30      | 30      | 30      | 30      | 30      |
| 月燃料费用量/万元   | 6.47        | 4.40    | 9.96    | 12.98   | 6.02    | 3.13    | 6.02    |
| 年燃料费用量/万元   | 77.68       | 52.8    | 119.57  | 154.80  | 72.24   | 37.52   | 72.24   |

注:天然气实行阶梯气价,其中当天然气用量 $\leq 300$  m<sup>3</sup>时,单价为2.5元/m<sup>3</sup>;当天然气用量为300~600 m<sup>3</sup>时,单价为3元/m<sup>3</sup>;当天然气用量 $\geq 600$  m<sup>3</sup>时,单价为3.5元/m<sup>3</sup>,表4年费用按此时阶梯价计算。

水蓄热式锅炉。此外,燃煤锅炉的使用会加剧环境污染,而储热式电锅炉清洁无污染的特性更适应当代社会发展要求,因此具有巨大的发展潜力。

2.3 维护成本和残值

维护成本包含人力费和维修费。人力费按照一台锅炉配备一名工人,薪资3 000元/月;维修费按照折旧费的10%进行估算;折旧费依照年均进行计算,假设锅炉系统折旧年限为15年;残值按照系统初投资成本的4%进行计算;初投资以容量为1 t/h的电蒸汽锅炉按照上述3.1节所述步骤进行计算。由此得到各方案的维护成本和残值如表5所示。

表5 各类型锅炉系统的维护成本和残值

Table 5 Maintenance costs and residual values for each type of boiler system

| 项目    | 燃气锅炉  | 燃油锅炉   | 电热锅炉   | 熔融盐蓄热电锅炉 | 燃煤锅炉   | 水蓄热电锅炉 |
|-------|-------|--------|--------|----------|--------|--------|
| 人工费   | 3.60  | 3.60   | 3.60   | 3.60     | 3.60   | 3.60   |
| 维修费   | 1.30  | 1.80   | 0.70   | 1.60     | 1.80   | 1.60   |
| 维护成本  | 4.90  | 5.40   | 4.20   | 5.20     | 5.40   | 5.20   |
| 初投资成本 | 78.00 | 128.00 | 135.00 | 102.00   | 135.00 | 130.00 |
| 残值    | 3.12  | 5.12   | 3.52   | 4.08     | 5.40   | 5.20   |

2.4 经济性对比分析

由公式(1)、公式(2)与公式(3)可计算各类型锅炉系统的生命周期成本,计算结果如表6所示。

通过生命周期模型分析各类型锅炉的经济性,判断依据是在满足蒸汽系统锅炉容量为1 t/h的前提下, $LCC$ 、 $EUAC$ 和 $C_i$ 越好,系统经济效益越好。由计算结果可知,熔融盐储热式电锅炉的全生命周期成本比电热锅炉降低近50%,比天然气锅炉低约5.8%,具有良好的经济效益。

通过各类资源的互补利用,能够有效缓解目前电力市场所存在的新能源消纳问题,而峰谷分时电价则是激发需求响应的重要措施。面对当前电力市场存在的问题,储热式电锅炉能够有效发挥削峰填谷的优势,能更好地满足电力用户的需求。

(下转第84页)