

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212254

供热补偿设备对热电企业优化运行影响的对比研究

章艳¹, 王一泽¹, 周运虎²

(1.大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2.中国船级社天津分社, 天津 300450)

[摘要] 针对热电企业广泛应用的供热补偿设备, 构建了抽凝机组配置固体蓄热式电锅炉后的电热可行域模型以及节煤率模型, 对比分析了固体蓄热式电锅炉与电极式电锅炉、储水式蓄热罐对热电机组在供热能力、调峰能力、运行成本3方面的影响。基于当前热电企业现状, 对配置供热补偿设备的灵活性热电厂建立了电热联合调度通用模型, 结合实际热电厂运行数据, 校验了上述模型并量化分析了不同补偿供热方案在运行灵活性、场景适应性以及节煤效果、运行成本方面的差异性。结果表明: 同等供热能力下, 固体蓄热式电锅炉灵活性最强, 节煤效果相对最弱, 节煤率仅为0.11; 蓄热罐节煤效果最佳, 节煤率达到0.27, 但其场景适应性不及其他供热补偿方案。本文所建模型与研究结果可为热电企业的优化运行提供理论工具及参考。

[关键词] 供热补偿; 固体蓄热式电锅炉; 运行灵活性; 优化运行

[引用本文格式] 章艳, 王一泽, 周运虎. 供热补偿设备对热电企业优化运行影响的对比研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 129-137. ZHANG Yan, WANG Yize, ZHOU Yunhu. Comparative study on the influence of heat compensation equipment on the optimal operation of combined heat and power plant[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 129-137.

Comparative study on the influence of heat compensation equipment on the optimal operation of combined heat and power plant

ZHANG Yan¹, WANG Yize¹, ZHOU Yunhu²

(1.School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2.China Classification Society, Tianjin Branch, Tianjin 300450, China)

Abstract: In view of the heat compensation equipment widely used in combined heat and power (CHP) plant, the feasible operation region model and coal-saving rate model of the CHP plant equipped with a solid heat storage electric boiler are constructed. The effects of the solid heat storage electric boiler, the electrode electric boiler and the water storage heat accumulator on the heat-supply capacity, regulation ability and operation cost of the CHP plant are compared and analyzed. Based on the current status of a CHP plant, a general model for combined dispatching of the CHP plant with flexibility to configure heat compensation equipment is established. Combining with the actual operation data of the CHP plant, the above models are verified and the differences in operation flexibility, scene adaptability, coal-saving effect and operation cost among different heat compensation equipment are quantitatively analyzed. The results show that under the same heating capacity, the solid heat storage electric boiler has the strongest flexibility and the lowest coal saving rate. The heat accumulator has the best coal-saving effect, but the scene adaptability is lower than other heat compensation schemes. The model and research results can provide theoretical tools and reference for the optimal operation of CHP plants.

Key words: heat compensation; solid heat storage electric boiler; operation flexibility; optimize operation

在我国力争实现“双碳”目标的大背景下, 高效节能的热电机组受到青睐, 然其“以热定电”的运行方式, 却不利于灵活地为新能源腾让上网空间, 这一矛盾在“三北”地区供暖季最为明显。为

修回日期: 2022-12-24 网络首发日期: 2023-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51607021)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51607021)

第一作者简介: 章艳(1980), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统经济运行与调度, zy@dlut.edu.cn.

此,常需借助供热补偿设备松弛机组的电热耦合关系,增加热电企业整体电出力的灵活性^[1-3]。

热电企业配置的主要供热补偿设备有电极式电锅炉(电锅炉)、储水式蓄热罐(蓄热罐)和固体蓄热式电锅炉(固蓄电锅炉)。其中电锅炉、蓄热罐配置后对热电机组煤耗特性、电出力灵活性的影响研究已经较为成熟^[4-6],而对固蓄电锅炉的研究则不多见。早期文献^[7-9]围绕蓄热材料开发,对氧化镁、堇青石、碳化硅陶瓷、高温混凝土等材料进行研究,分析不同粒径、配置不同添加剂后的热导率等参数。文献^[10-12]采用电阻丝、风箱等材料进行改进,提高固蓄电锅炉的结构和性能。文献^[13-14]对蓄热能力进行仿真模拟,得出了在添加不同传热结构时最优的放热效率、放热时间以及蓄热成本。随着其应用日渐普及^[15],研究者开始关注固蓄电锅炉的运行策略与应用价值,对比分析固蓄电锅炉的高峰低谷电价所产生的经济性收益^[16-17]。同时文献^[18-20]从系统层面对弃风消纳进行研究,分析在不同电、热负荷下固蓄电锅炉采取不同的运行方式对弃风消纳效果的影响。而站在热电企业角度,固蓄电锅炉的供热补偿能力将会如何参与厂内优化运行,其对机组电热运行区间的影响以及整体节煤效果目前尚未有明确模型与定性分析。

此外,固蓄电锅炉和电锅炉、蓄热罐同为供热补偿设备,在当前热电企业中均有广泛应用^[15],它们之间对于企业电出力灵活性的提升效果是否相当,彼此是否具有可替代性或是互补性,尚需进一步明确。现有研究对于热电机组配置电锅炉与蓄热罐的对比颇为丰富,或从供热能力、成本等技术经济性角度^[21-25],或从电力市场层面^[26]对比了二者对热电企业带来的经济效果与投资回报,而固蓄电锅炉与它们的对比研究则鲜有报道。

因此,本文重点以固蓄电锅炉为研究对象,基于工作原理研究其对传统抽凝机组电热可行运行域以及煤耗特性的影响。在此基础上,对比分析其与其他补偿供热设备对热电机组运行成本、灵活性、供热能力3方面的影响差异。对配置有供热补偿设备的灵活性热电厂构建电热联合调度通用模型,结合东北实际热电厂数据,对上述研究进行量化分析与校验。

1 固蓄电锅炉的运行原理

1.1 固蓄电锅炉的结构和原理

固蓄电锅炉的原理如图1所示。其主要由蓄热

材料、控制柜、导热管、换热器、循环风机、保温层及加热元件构成,还包括相应的智能系统等。与水蓄热锅炉电极式加热方式不同,固蓄电锅炉采用电阻式加热的方式对蓄热体进行加热,蓄热体一般选用氧化镁等材料,最高加热温度可以到800℃左右;而且占地面积更小、容量更大、储热能力更强。

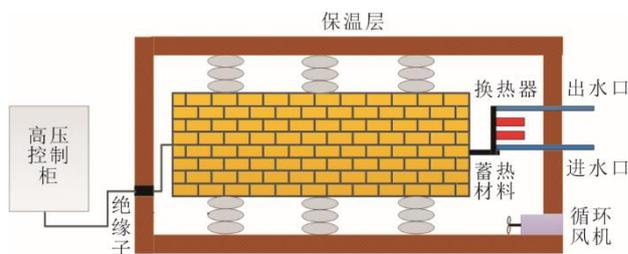


图1 固蓄电锅炉原理

Fig.1 Schematic diagram of solid heat storage electric boiler

固蓄电锅炉的电-热传输情况如图2所示。由图2可以看出,热电厂配置固蓄电锅炉后可以在满足供电前提下将多余电量转移成热量储存起来,在热负荷有需要时将热量放出,通过热交换的形式释放热量,达到能量的时、空转移作用。

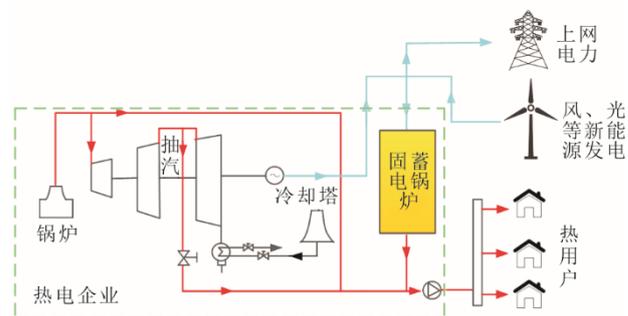


图2 固蓄电锅炉电-热传输情况

Fig.2 Electric heat transmission of solid heat storage electric boiler

1.2 固蓄电锅炉对机组运行区间的影响及其建模

传统抽凝机组配置固蓄电锅炉后,上下调峰能力均得以提升,这是因为固蓄电锅炉兼具蓄热罐的放热特性和电锅炉的电转热特性。机组可行运行区间的变化如图3所示。由图3可以看出,对于抽凝机组原有运行区间 $ABCD$ 而言,当固蓄电锅炉放热时,运行域整体向右平移(其中 AB 平移至 EF ,移动距离与最大放热功率 $P_{h,SH,out,max}$ 相关)。同时,因固蓄电锅炉的电转热功能,图3中 BCD 段将向下(减小整体发电)并向右侧(增大整体供热)平移,其中 DL 、 CK 、 FH 段长度相等,代表固蓄电锅炉的容量 $P_{e,SH,max}$ 。

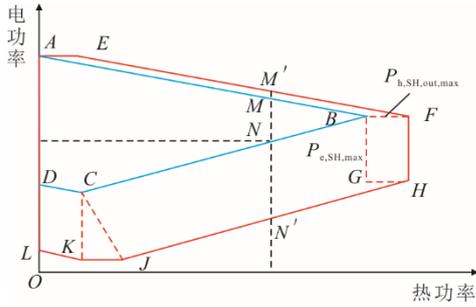


图3 配置固蓄电锅炉后机组可行运行区间
Fig.3 Feasible operation region of the CHP unit with solid heat storage electric boiler

对于可行运行区间的边界，图3中KJ段代表

$$\begin{cases} 0 \leq P_h \leq P_{h,CHP,max} + P_{h,SH,out,max} \\ P_e \leq \min\{P_{e,Con,max}, P_{e,Con,max} - c_v P_{h,CHP} - c_v P_{h,SH,out,max}\} \\ P_e \geq \max\left\{ \begin{array}{l} P_{e,min,Con} - c_v P_{h,CHP}, P_{e,CHP,min}, \\ P_{e,CHP,0} + c_m P_{h,CHP} + c_m P_{h,SH,out,max} \end{array} \right\} - P_{e,SH,max} \end{cases} \quad (1)$$

式中： P_e 、 P_h 为机组与固蓄电锅炉整体可输出的电、热功率； $P_{h,CHP}$ 为机组输出的热功率； $P_{e,Con,max}$ 、 $P_{e,Con,min}$ 为机组在纯凝工况下的最大、最小发电功率； c_v 为图3中AB段斜率， c_m 为BC段斜率； $P_{h,CHP,max}$ 为抽汽式机组的最大供热功率； $P_{e,CHP,min}$ 为机组可输出的最小电功率； $P_{e,CHP,0}$ 为图3中BC延长线与纵轴交点值。

2 补偿供热设备对抽凝机组技术经济特性的影响

固蓄电锅炉与电锅炉和蓄热罐的组合应用方案工作原理不同，主要体现在组合方案中蓄热罐的热源仅来源于抽凝机组，电锅炉电转热产生的热功率直接供给负荷；而固蓄电锅炉不能对外直接供热，必须经由蓄热体发出，且机组多余热功率无法由蓄热体存储。因此电锅炉、蓄热罐以及固蓄电锅炉虽然都能对抽凝机组起到热补偿作用，但它们对抽凝机组运行煤耗率、供热能力以及整体电出力灵活性（调峰能力）的影响仍然有所不同。

2.1 供热能力

固蓄电锅炉所提供的热量来源于其蓄热体向外供给的热量，不仅与当前储热及自身电锅炉电转热能力有关，还受单时段最大放热功率制约：

$$\Delta P_{h,SH,max} = \min\{S_{h,SH} + \eta_{SH} P_{e,SH,t}, P_{h,SH,out,max}\} \quad (2)$$

式中： $S_{h,SH}$ 为t时刻固蓄电锅炉蓄热体内的热量； $P_{e,SH,t}$ 为t时刻电锅炉的耗电功率； η_{SH} 为固蓄电锅

炉的电转热效率。机组运行在C点时，固蓄电锅炉消耗最大电功率（C点下移至K点）并由蓄热体最大程度放热（K点平移至J点）的过程。FH段代表机组运行在B点时，固蓄电锅炉在蓄热体放热量最大（B点平移至F点），且消耗的电功率不断增加（F点下移至H点）的过程。

可见，抽凝机组配备固蓄电锅炉后，在确定热负荷下，其调峰区间可由MN扩展到M'N'，灵活性双向改善。改善程度方面，上调峰与蓄热体最大放热功率有关，下调峰与固蓄电锅炉容量以及蓄热体最大放热功率有关。

整体可行运行区间模型为：

炉的电转热效率。

蓄热罐的补偿供热能力同时受单时段最大放热功率以及当前时段储热状态影响，最大供热功率 $\Delta P_{h,HA,f,max}$ 为：

$$\Delta P_{h,HA,max} = \min\{P_{h,HA,f,max}, S_{HA,t}\} \quad (3)$$

式中： $P_{h,HA,f,max}$ 为蓄热罐最大放热功率； $S_{HA,t}$ 为t时刻蓄热罐内的热量。

电锅炉的最大补偿供热功率 $\Delta P_{h,EB,max}$ 与其容量 C_{EB} 直接相关：

$$\Delta P_{h,EB,max} = \eta_{EB} C_{EB} \quad (4)$$

2.2 调峰能力

配置供热补偿设备后抽凝机组的可行运行区间变化如图4所示。以最大供热能力相同为前提，对比电锅炉、蓄热罐、固蓄电锅炉分别可为抽凝机组提供的灵活性。

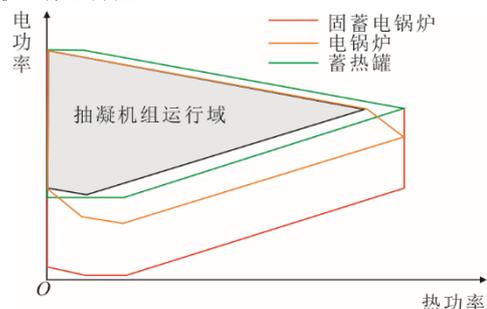


图4 抽凝机组配置不同供热补偿设备后的可行运行域
Fig.4 Feasible operation regions of the CHP unit with different heat compensation equipment

显然，蓄热罐、电锅炉、固蓄电锅炉都能提升

机组的下调峰能力。由于固蓄电锅炉的容量要高于电锅炉。因此,下调峰能力固蓄电锅炉优于电锅炉,也优于蓄热罐。

而对于上调峰需求,电锅炉无法为机组提供上调峰灵活性;固蓄电锅炉与蓄热罐均可以通过补偿供热的方式降低机组热负荷,从而获得相应灵活性。若忽略固蓄电锅炉在储放时能量损耗,二者上调峰能力相同。

综上,抽凝机组配备固蓄电锅炉后上下调峰能力表现最佳,电出力灵活性最强。

2.3 节煤效果

考虑到抽凝机组每下调 1 单位发电,可为新能源上网腾让 1 单位空间,进而替代 1 单位煤电,带来一定的节煤效果。而热电机组每下调 1 单位发电,也将减少 $1/c_m$ 单位供热,这将需由补偿供热设备提供。因此,补偿供热设备实际可带来的节煤效果为:

$$f_{e,CHP} + \frac{f_{h,CHP}}{c_m} - \frac{f_{h,x}}{c_m} \quad (5)$$

式中: $f_{e,CHP}$ 、 $f_{h,CHP}$ 分别为煤电机组边际发电煤耗率和边际供热煤耗率; $f_{h,x}$ 为补偿供热设备的边际供热煤耗率。

传统抽凝机组煤耗运行成本 F_{CHP} 为^[4]:

$$F_{CHP} = a(P_{e,CHP} + c_v P_{h,CHP}) + b \quad (6)$$

式中: $P_{e,CHP}$ 、 $P_{h,CHP}$ 分别为机组的发电、供热功率; c_v 为因抽汽供热损失的发电比例,即图 3 所示 AB 段斜率; a 、 b 为机组的煤耗系数,可见,煤电机组的边际发电煤耗率 $f_{e,CHP}=a$ 。

对于固蓄电锅炉而言,其储存热量完全来自自身电锅炉的电转热,同时考虑蓄热体储热过程中存在散热现象(假设蓄热体储放效率为 η_{SH-cf} ,其中 $\eta_{SH-cf}<1$),则总补偿供热量为:

$$\Delta P_{h,SH} = (\eta_{HS} + \frac{1}{c_m}) \Delta P_{e,SH} \cdot \eta_{SH-cf} \quad (7)$$

为此需额外消耗的煤耗成本为:

$$\Delta F_{SH} = a \Delta P_{e,SH} + \frac{a c_v \Delta P_{e,SH}}{c_m} \quad (8)$$

故固蓄电锅炉的补偿供热煤耗率为:

$$f_{h,SH} = \frac{\Delta F_{SH}}{\Delta P_{h,SH}} = \frac{a}{\eta_{SH-cf}} \cdot \frac{c_v + c_m}{1 + \eta_{SH} c_m} \quad (9)$$

其节煤率为:

$$\frac{a(c_v + c_m)}{c_m} \left[1 - \frac{1}{\eta_{SH-cf}(1 + \eta_{SH} c_m)} \right] \quad (10)$$

蓄热罐可提供的补偿供热量全部来源于抽凝机组,其补偿供热煤耗率与抽凝机组边际供热煤耗率相同,若考虑蓄热罐的存储效率 η_{HA} ,则其节煤率为:

$$a \left[1 - \frac{(1 - \eta_{HA}) c_v}{c_m \eta_{HA}} \right] \quad (11)$$

电锅炉补偿供热的煤耗率较高^[4],在考虑电锅炉效率 η_{EB} 的情况下,节煤率为:

$$\frac{a \eta_{EB} (c_v + c_m)}{1 + \eta_{EB} c_m} \quad (12)$$

由于固蓄电锅炉蓄热体储热过程中存在散热现象,其边际供热煤耗率会稍高于电锅炉。当机组同时配置电锅炉与蓄热罐时,由于电锅炉边际煤耗率较大,热电厂会优先调用蓄热罐进行补偿供热,当蓄热罐补偿能力不足时才会调用电锅炉,故组合方式下补偿供热煤耗率介于二者之间。

综上,不同补偿供热方案中,配置蓄热罐的节煤效果最好,蓄热罐叠加热锅炉的组合方式次之,电锅炉与固蓄电锅炉的节煤率相对较低,且固蓄电锅炉因储放过程中存在能量损耗,其节煤率最低。

3 灵活性热电企业电热联合调度通用模型

为进一步量化分析不同供热补偿设备的技术与经济特性的差异性,同时考虑到热电企业可能采用组合方案以提高企业整体性能,本节构建了配置多种供热补偿设备的灵活性热电企业电热联合调度通用模型。

3.1 目标函数

兼顾企业运行成本与灵活性,以周期内发电供热煤耗率以及电量偏差惩罚费用之和最小为目标函数,调度模型的目标函数为:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n [a(P_{e,CHP,t,i} + c_v P_{h,CHP,t,i}) + b] \cdot \tau + \alpha \Delta P_{e,W+,t} \tau + \beta \Delta P_{e,W-,t} \tau \quad (13)$$

式中: $t \in [1, T]$, T 为调度周期; τ 为单位时段; $P_{e,CHP,t,i}$ 代表第 i 台抽凝机组在 t 时刻的供电功率; $P_{h,CHP,t,i}$ 代表第 i 台抽凝机组在 t 时刻的供热功率; $\Delta P_{e,W+,t}$ 和 $\Delta P_{e,W-,t}$ 分别为 t 时刻企业整体电出力与系统下发负荷之间的正、负偏差; α 和 β 为惩罚系数。

3.2 约束条件

1) 抽凝机组电热运行区间

$$\begin{cases} P_{e,CHP} \leq P_{e,Con,max} - c_v P_{h,CHP} \\ P_{e,CHP} \geq \max\{P_{e,Con,min} - c_v P_{h,CHP}, P_{e,CHP,0} + c_m P_{h,CHP}\} \\ 0 \leq P_{h,CHP} \leq P_{h,CHP,max} \end{cases} \quad (14)$$

2) 电锅炉约束

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_{e,EB,t} \leq C_{EB} \\ \Delta P_{h,EB,t} = \eta_{EB} \Delta P_{e,EB,t} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\Delta P_{e,EB,t}$ 为 t 时刻电锅炉消耗的电功率; $\Delta P_{h,EB,t}$ 为 t 时刻电锅炉产生的热功率。

3) 蓄热罐约束

$$\begin{cases} -P_{h,HA,c,max} \leq \Delta P_{h,HA,t} \leq P_{h,HA,f,max} \\ S_{HA,t} = \eta_{HA} S_{HA,t-1} - \Delta P_{h,HA,t} \\ 0 \leq S_{HA,t} \leq S_{HA,max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{h,HA,c,max}$ 和 $P_{h,HA,f,max}$ 为 t 时刻蓄热罐最大充、放热能力; $\Delta P_{h,HA,t}$ 为 t 时刻释放的储热功率; $S_{HA,max}$ 为蓄热罐的最大蓄热量。

4) 固蓄电锅炉约束

$$\begin{cases} 0 \leq S_{h,SH,t} \leq S_{h,SH,max} \\ 0 \leq P_{e,SH,t} \leq P_{e,SH,t,max} \\ 0 \leq P_{h,SH,out,t} \leq P_{h,SH,out,t,max} \\ P_{h,SH,t} = \eta_{SH} P_{e,SH,t} \\ S_{h,SH,t} = \eta_{HS-cf} S_{h,SH,t-1} + P_{h,SH,in,t} - P_{h,SH,out,t} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $S_{h,SH,t}$ 为 t 时刻蓄热罐中的蓄热量; $P_{e,SH,t}$ 为 t 时刻对蓄热体的加热耗电功率; $P_{h,SH,out,t}$ 为 t 时刻蓄热体的放热功率; $P_{h,SH,t}$ 为 t 时刻电锅炉的制热功率。

5) 发电功率约束

$$\begin{cases} \Delta P_{e,W-t} = P_{e,LD,t} - (\sum_i^n P_{e,CHP,i,t} - \Delta P_{e,EB,t} - \Delta P_{e,SH,t}) > 0 \\ \Delta P_{e,W+t} = (\sum_i^n P_{e,CHP,i,t} - \Delta P_{e,EB,t} - \Delta P_{e,SH,t}) - P_{e,LD,t} > 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{e,LD,t}$ 为热电厂的电负荷。

6) 供热平衡约束

$$P_{h,LD,t} = P_{h,Ex,t} + P_{h,EB,t} + P_{h,HA,t} + P_{h,SH,out,t} \quad (19)$$

式中: $P_{h,LD,t}$ 为热电厂的热负荷。

4 算例分析

以含 2 台 350 MW 抽凝机组的丹东某热电厂为例, 量化校验不同供热补偿设备对机组运行灵活性提升、供热能力以及运行煤耗率的影响差异。优化模型采用 IBM ILOG CPLEX 软件进行求解。

4.1 基础数据

厂内机组参数见表 1, 以 24 h 为调度周期。

4.1.1 可配置的补偿供热设备

以可为抽凝机组提供相同的最大补偿供热能

力 (42 MW) 为前提, 固蓄电锅炉、电锅炉、蓄热罐的参数见表 2。其中, 为保障供热补偿设备在多日场景下循环使用, 假设固蓄电锅炉和蓄热罐在调度初末期存热量均达到总蓄热量的 1/2 (固蓄电锅炉 480 MW·h, 蓄热罐 168 MW·h)。

表 1 机组运行参数
Tab.1 Operating parameters of units

项目	数值	项目	数值
最大发热量/MW	359.2	$b/(t \cdot h^{-1})$	9.797
最大发电功率/MW	350.0	c_v	0.248
最小发电功率/MW	129.0	c_m	0.419
$a/(t \cdot (MW \cdot h)^{-1})$	0.269	$P_{e,CHP0}/MW$	110

表 2 补偿供热设备参数
Tab.2 Operating parameters of different heat compensation equipment

补偿供热设备	容量	电转热效率/%	最大放热功率/MW	单时段储热效率/%
固蓄电锅炉	120 MW	98	42	0.1
电锅炉	42.8 MW	98		
蓄热罐	336 MW·h		42	0.1

4.1.2 电、热负荷

根据热电厂实际运行情况, 将整个供暖期划分为高热、中热、低热 3 种情况, 如图 5a) 所示; 等效电负荷如图 5b) 所示, 包括无风光并网 (无风光)、风电上网 (有风无光)、光伏上网 (有光无风) 3 种典型场景。

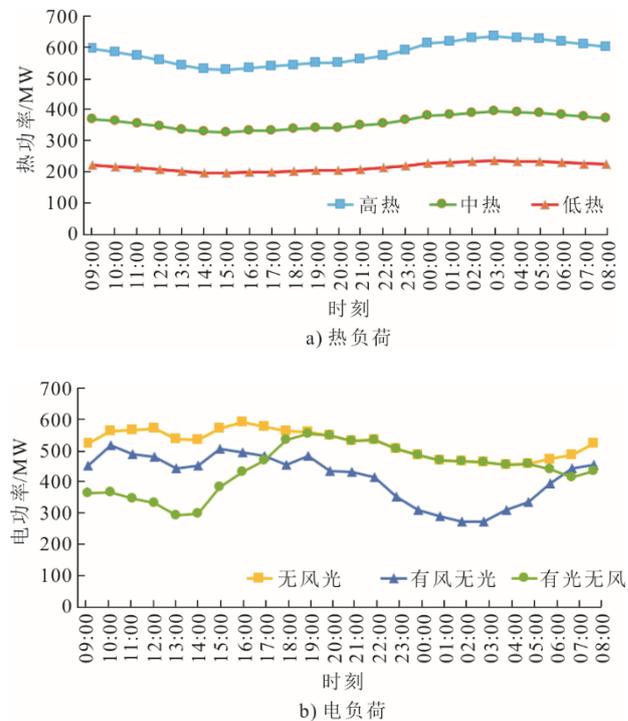


图 5 热电厂日内电、热负荷
Fig.5 Daily electric and heat load of the CHP plant

4.1.3 偏差惩罚

电厂实际发电功率高于等效负荷需求时（正偏差），新能源上网空间存在被挤占风险，惩罚系数 α 设为 1 t/(MW·h)；反之负偏差将导致系统缺电，惩罚系数 β 取 10 t/(MW·h)。

4.2 不同供热补偿设备的对比分析

针对热电厂配置不同供热补偿设备（电锅炉、蓄热罐、固蓄电锅炉、电锅炉+蓄热罐）时，不同场景下各方案的技术经济性对比如下。

4.2.1 运行灵活性及场景适应性

在“以热定电”方式下，热负荷越高，热电厂整体电出力可调节范围越窄。无供热补偿时高热场景下仅为 90.8 MW；配置供热补偿设备后，热电厂整体电出力可调区间不同程度放宽（图 6）。在高热情况下，固蓄电锅炉的可调范围扩展最大，本算例中达到 4.35 倍，电锅炉次之（2.31 倍），蓄热罐相对最弱（1.68 倍）。

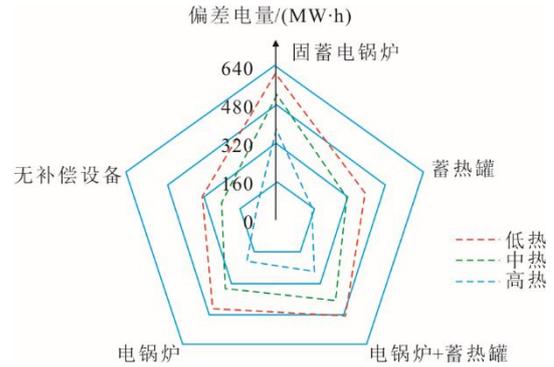


图 6 在不同热量下机组配置不同供热补偿设备调峰空间
Fig.6 The output power range for the plant with different heat compensation equipment

9 种场景下对比热电机组配置不同解耦设备后的日内电量偏差情况如图 7 所示。由图 7 可以看出，机组在配备供热补偿设备后，可在不同程度上降低偏差电量。其中，固蓄电锅炉场景适应性最佳，除高热有风场景（存在 212.4 MW·h 正偏差电量）外，能够完全消除正偏差电量。

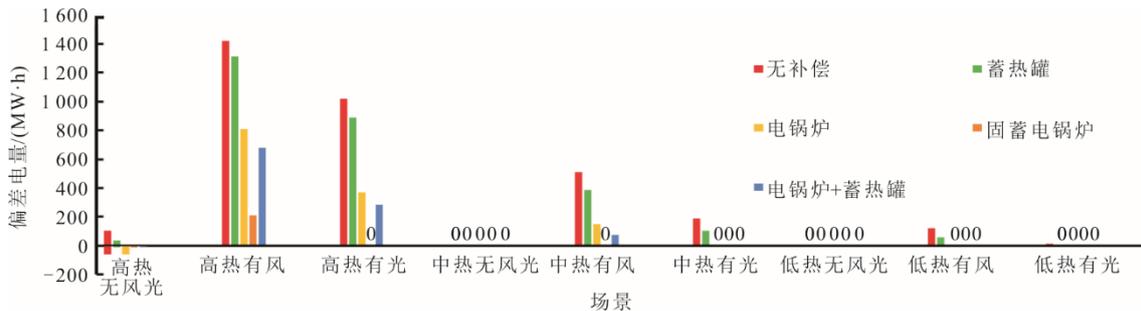
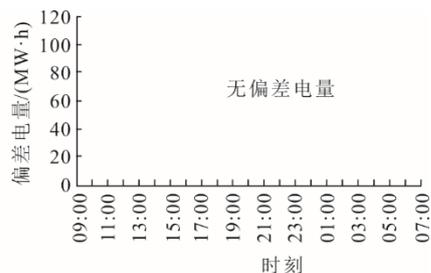
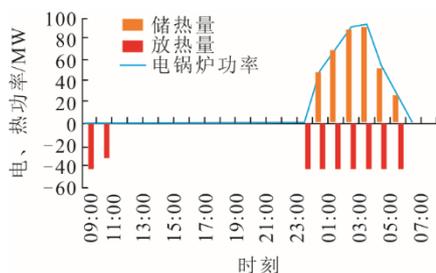


图 7 机组配置不同供热补偿设备日内偏差电量统计
Fig.7 Electric deviation of the plant with different heat compensation equipment in high heat scene

以供暖季持续时间最长的中热情况为例，在有风电加入的情况下，在未配置解供热补偿设备、夜间（23:00—05:00）风电大发时，机组下调峰能力不足，产生正偏差。配置不同供热补偿设备后，设备与机组的运行状态如图 8 所示。由图 8 可以看出：固蓄电锅炉补充方案，热电厂能够完全消除 509.75 MW 的正偏差电量；而其他供热补偿方案，包括配置电锅炉+蓄热罐的组合方案也未能完全消除正偏差，足见固蓄电锅炉在运行灵活性提升方面

能力相对最强。分析上述现象出现的原因，蓄热罐由于最大放热功率不足（23:00—05:00 时段），无法满足偏差时段放热需求；电锅炉受容量限制，导致 00:00—04:00 时段正偏差难以完全消除；电锅炉+蓄热罐组合方案，电厂在成本最低的目标引导下，优先调用了节煤效果最佳的蓄热罐，而在放热功率不能满足需求的时段，电锅炉参与补偿供热，组合方案的场景适应性优于二者独立运行。但因电锅炉容量有限，仍有 15% 正偏差电量未被消除。



a) 机组配置固蓄电锅炉运行状态及其偏差电量

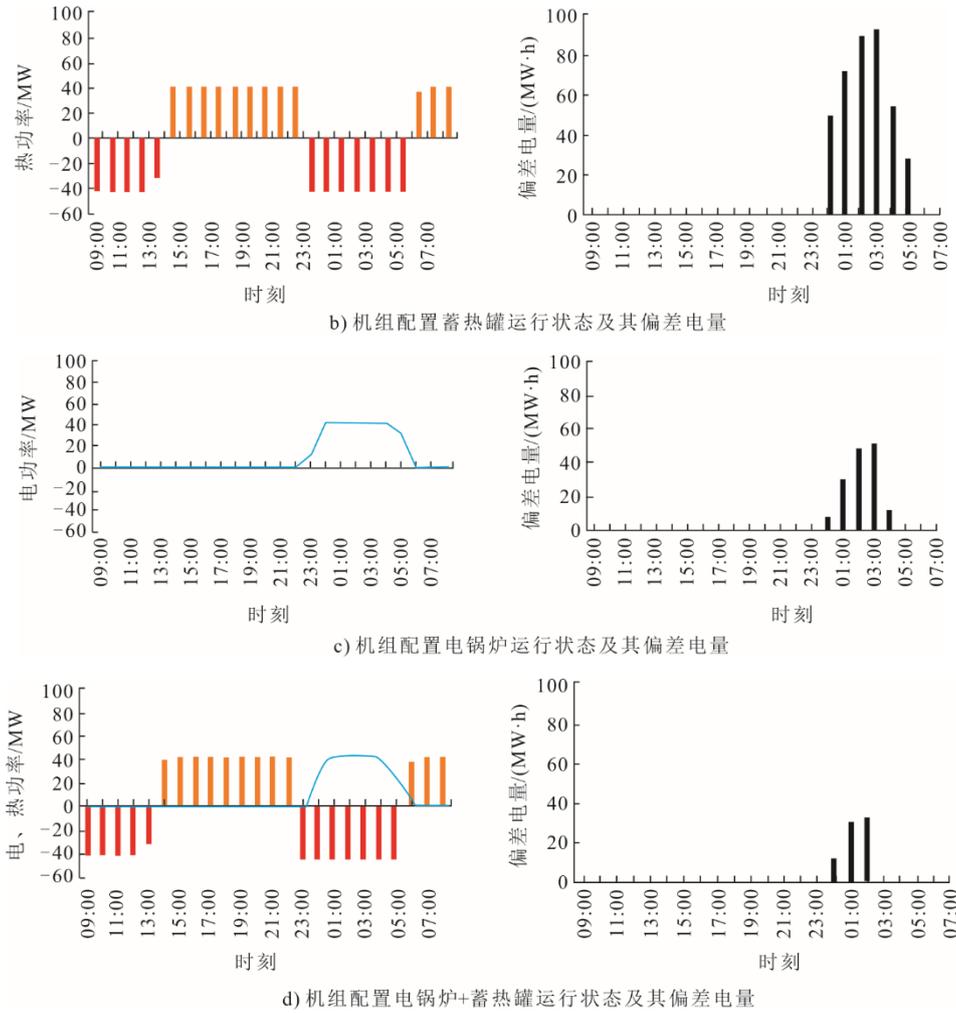


图 8 供热补偿设备的运行状态与偏差电量

Fig.8 Operation status and electric deviation of heat compensation equipment

综上所述，在提升热电厂运行灵活性方面，固蓄电锅炉优于电锅炉+蓄热罐的组合方案，电锅炉再次之，蓄热罐最弱，且前 2 种方案对场景适应性优于后 2 种方案，这与 2.2 节理论分析结果相符。

4.2.2 节煤效果对比

以正偏差明显的高热场景为例，抽凝机组在配

置不同供热补偿设备后的弃风消纳量、节煤量见表 3。由表 3 可以看出，机组配置蓄热罐、电锅炉、固蓄电锅炉时的节煤率与 2.3 节理论分析相一致，3 种方案节煤效果依次递减。其中固蓄电锅炉节煤率略低于电锅炉方案的原因主要在于固体蓄热体储放效率的影响，若不考虑其影响，二者近似相等。

表 3 机组配置不同供热补偿设备节煤效果对比

Tab.3 Comparison of coal saving effect of different heat compensation equipment operation parameters of CHP plants

场景	补偿供热方案	节煤量/t	正偏差减少量/(MW·h)	节煤率仿真结果/(t·(MW·h) ⁻¹)	节煤率理论计算结果/(t·(MW·h) ⁻¹)
高热 有光	电锅炉	80.99	648.62	0.12	0.12
	蓄热罐	35.04	130.90	0.27	0.27
	固蓄式电锅炉	119.46	1 018.48	0.11	0.11
	电锅炉+蓄热	110.12	732.30	0.15	0.12~0.27
高热 有风	电锅炉	76.58	613.34	0.12	0.12
	蓄热罐	28.63	107.62	0.26	0.27
	固蓄式电锅炉	127.55	1 209.27	0.10	0.11
	电锅炉+蓄热	107.45	739.88	0.14	0.12~0.27

电锅炉+蓄热罐的组合方案,节煤率随着场景不同而波动。原因在于负荷不同时,蓄热罐、电锅炉的调用情况存在差别:高热下,节煤效果较好的蓄热罐会因容量限制无法在所有偏差时段补偿供热,不得不启用节煤率较低的电锅炉。因此中热场景下组合方案较高热场景的节煤效果更好,但无论场景如何,组合方案节煤率的波动范围始终介于电锅炉和蓄热罐之间。

4.2.3 热电厂运行成本分析

在上述9种场景下,热电厂采用不同供热补偿设备后日内煤耗成本如图9所示。由图9可见,在新能源(风、光)场景下,供热补偿设备对成本的

影响明显,尤其随着热负荷的增加,影响加剧。因此,在高热且新能源大发场景下,固蓄电锅炉优势更为明显。而在无风光场景下,固蓄电锅炉的煤耗成本甚至超过了无补偿情况。究其原因,是因为高热无风光时为了补偿负偏差,机组需要额外出力,煤耗成本增加。与同样可以降低负偏差的电锅炉+蓄热罐组合方案对比,固蓄电锅炉中储存的热量在运行过程中要经过电锅炉的转换过程,考虑电转热效率,煤耗损失量更大,而组合方式中蓄热罐没有电转热的能量损失。中热无风光、低热无风光场景下,机组由于不需要进行调峰不对供热补偿设备进行调用,固蓄电锅炉和蓄热罐由于存在蓄热损失煤耗量略高。

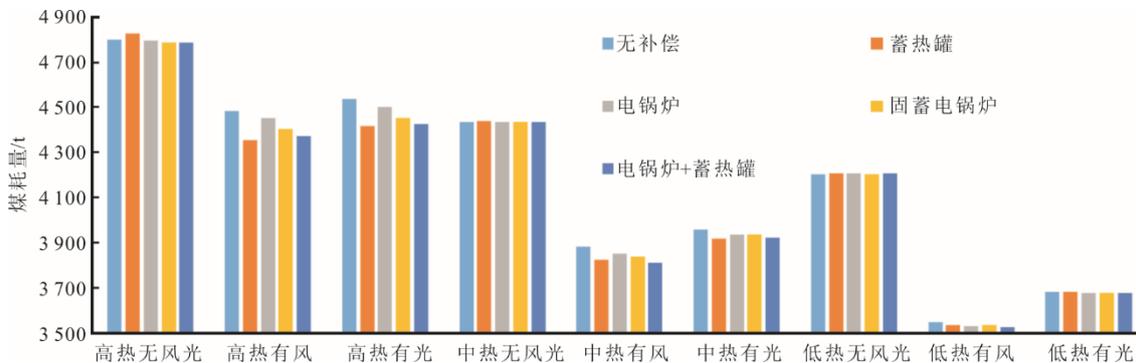


图9 机组配置不同供热补偿设备日内煤耗量统计

Fig.9 Statistics of coal consumption in days for unit configuration with different heat compensation equipment

5 结 论

本文主要针对固蓄电锅炉原理,构建了抽凝机组配置固蓄电锅炉后电热运行域模型,对比分析了固蓄电锅炉与其他供热补偿设备(电锅炉、蓄热罐)对热电机组供热能力、运行灵活性以及节煤效果的影响。通过对配置供热补偿设备的灵活性热电企业建立电热联合调度通用模型,基于东北实际热电厂数据对上述理论分析进行了量化分析与对比较验。研究表明:在同等供热能力下,固蓄电锅炉提升的运行灵活性最高,但节煤效果相对较低,节煤率与电锅炉相当,仅为0.11,不到蓄热罐节煤率1/2。蓄热罐节煤效果最好,但场景适应性较差。蓄热罐+电锅炉的组合方案,以及固蓄电锅炉方案场景适应性较好,且后者在高热且新能源大发场景下节约运行成本明显。

上述研究结论可为热电企业进行灵活性提升改造提供理论参考,所建模型也可为灵活性热电企业进行优化运行提供分析工具。本文仅考虑运行成

本,对于补偿设备的安装成本、投资回报等将是下一步的研究内容。

[参 考 文 献]

- [1] JIANG X S, JING Z X, WU Q H, et al. Modeling of a central heating electric boiler integrated with a stand-alone wind generator[C]//Proceedings of the 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Kowloon, China: IEEE, 2013: 1-6.
- [2] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 配置储热后热电机组调峰能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 34-41. LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 34-41.
- [3] HUANG X, XU Z, SUN Y, et al. Heat and power load dispatching considering energy storage of district heating system and electric boilers[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 992-1003.
- [4] 章艳, 吕泉, 李杨, 等. 四种热电厂电热解耦改造方案的运行灵活性剖析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 164-172. ZHANG Yan, LYU Quan, LI Yang, et al. Analysis on operation flexibility of combined heat and power plant with four improved power-heat decoupling schemes[J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 164-172.
- [5] 许梦莹, 蒋东翔. 风电供热系统的能源利用率和经济性分析[J]. 可再生能源, 2015, 37(8): 42-47.
XU Mengying, JIANG Dongxiang. Energy efficiency and economic analysis of wind power heating system[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 37(8): 42-47.
- [6] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4081.
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4072-4081.
- [7] KOACK B, PAKSOY H. Performance of laboratory scale packed-bed thermal energy storage using new demolition waste based sensible heat materials for industrial solar applications[J]. Solar Energy, 2020, 211(17): 1335-1346.
- [8] 黄新晨, 秦勤, 于庆波. 固体电蓄热装置结构优化及蓄放热特性的模拟[J]. 材料与冶金学报, 2021, 20(4): 290-296.
HUANG Xincheng, QIN Qin, YU Qingbo. Simulation on structure optimization and heat storage and release characteristics of solid electric heat storage device[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2021, 20(4): 290-296.
- [9] 梁爽, 徐耀祖, 商向东, 等. 基于固体蓄热材料的蓄热过程分析[J]. 节能技术, 2019, 37(6): 545-548.
LIANG Shuang, XU Yaozu, SHANG Xiangdong, et al. Analysis of heat storage process based on solid heat storage materials[J]. Energy Conservation Technology, 2019, 37(6): 545-548.
- [10] 赵颀, 王启民. 基于 ANSYS 分析的蓄热砖蓄热特性数值模拟及实验研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2020, 16(2): 34-38.
ZHAO Di, WANG Qimin. Numerical simulation and experimental study on thermal storage characteristics of thermal storage brick based on ANSYS analysis[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering(Natural Science), 2020, 16(2): 34-38.
- [11] 王媛哲. 电加热固体储能供热机组送风系统优化研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2021: 1.
WANG Yuanzhe. Study on optimization of air supply system of electric heating solid energy storage heating unit[D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2021: 1.
- [12] TENG Y, SUN P, LENG O, et al. Optimal operation strategy for combined heat and power system based on solid electric thermal storage boiler and thermal inertia[J]. IEEE Access, 2019, 7: 180761-180770.
- [13] LIZARRAGA- GARCIA E, MITSOS A. Effect of heat transfer structures on thermoeconomic performance of solid thermal storage[J]. Energy, 2014, 68(3): 896-909.
- [14] MIAO X Y, KOLDITZ O, NAGEL T. Modelling thermal performance degradation of high and low-temperature solid thermal energy storage due to cracking processes using a phase field approach[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180(2): 977-989.
- [15] 孙立本, 张少成, 许冰, 等. 66 kV 固体电蓄热装置在火电机组深度调峰中的应用[J]. 华电技术, 2018, 40(7): 38-39.
SUN Liben, ZHANG Shaocheng, XU Bing, et al. Application of 66 kV solid electric heat storage device in vigorous peak load regulation of thermal power units[J]. Huadian Technology, 2018, 40(7): 38-39.
- [16] 刘景霞, 张学让. 利用弃风电量进行移动固体电蓄热供暖[J]. 自动化应用, 2020(3): 94-96.
LIU Jingxia, ZHANG Xuerang. Using abandoned wind power for mobile solid electric heat storage heating[J]. Automation Applications, 2020(3): 94-96.
- [17] 苗常海, 白中华, 王雯, 等. 典型蓄热式电采暖项目经济性对比分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6): 36-39.
MIAO Changhai, BAI Zhonghua, WANG Wen, et al. Economic comparison and analysis of typical regenerative electric heating projects[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6): 36-39.
- [18] LEI Z, WANG G, LI T, et al. Strategy analysis about the active curtailed wind accommodation of heat storage electric boiler heating[J]. Energy Reports, 2021, 7: 65-71.
- [19] 潘跃. 固蓄电锅炉弃风消纳优化研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020: 1.
PAN Yue. Study on optimization of abandoned wind power consumption in solid regenerative electric boilers[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020: 1.
- [20] CHEN X, KANG C, O'MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modeling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.
- [21] 吕泉, 刘永成, 刘乐, 等. 两种风电供热模式的节煤效果比较[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 49-59.
LYU Quan, LIU Yongcheng, LIU Le, et al. Comparison of coal saving performance of two wind power heating modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 49-59.
- [22] 吕泉, 胡炳廷, 王海霞, 等. 风热冲突下热电厂供热问题研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 236.
LYU Quan, HU Bingting, WANG Haixia, et al. Heat-supply of thermal power plant in wind-heat conflict[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 236.
- [23] 李虹, 王晓丹, 周晓洁, 等. 基于储热热电机组和电锅炉的风电消纳调度模型[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(1): 11-17.
LI Hong, WANG Xiaodan, ZHOU Xiaojie, et al. Wind power accommodation dispatching model based on thermo-electric unit with heat storage device and electric boiler[J]. Electric power science and engineering, 2018, 34(1): 11-17.
- [24] 于娜, 李宏伟, 葛延峰, 等. 风荷组合场景下计及调峰效益的电锅炉和储热系统容量优化配置[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 41-52.
YU Na, LI Hongwei, GE Yanfeng, et al. Optimal capacity configuration of electric boiler and heat storage system considering peak-shaving benefit under wind-load combination scenario[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(1): 41-52.
- [25] 吕泉, 杜思瑶, 刘乐, 等. 东北辅助服务市场下热电厂配置电锅炉调峰的经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 49-56.
LYU Quan, DU Siyao, LIU Le, et al. Economic analysis of peak shaving of combine heat and power plant with electric boilers in auxiliary service market of northeast China[J]. Automation of Electric Power System, 2019, 43(20): 49-56.
- [26] 苏鹏, 王文君, 杨光, 等. 提升火电机组灵活性改造技术方案研究[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 87-94.
SU Peng, WANG Wenjun, YANG Guang, et al. Research on the technology to improve the flexibility of thermal power plants[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 87-94.

(责任编辑 刘永强)