

基于品位耦合的太阳能互补联合循环发电系统集成评价理论

施瑶璐,张振文,孙杰,魏进家

(西安交通大学 化学工程与技术学院,陕西 西安 710049)

摘要: 太阳能互补联合循环 (ISCC) 系统被认为是高效利用太阳能与化石能源的最有前景的途径之一。然而,由于目前缺乏对太阳能互补集成系统的普适性分析与评价,导致统一评价体系下不同集成系统方案之间的直接性能对比难以实现。鉴于此,首先提出并建立一套具有普适性的 ISCC 系统理论模型,该模型涵盖了太阳能集成到布雷顿循环与朗肯循环的不同耦合方案,对不同集成系统进行合理概括。基于焓分析理论推导得到统一性评价指标——燃料节省因子理论表达式,并对其进行验证,运用该评价方法对不同集成方案进行横向性能评估。然后基于能量品位耦合思想,利用统一表达式中的桥接项揭示了 ISCC 系统集成中的“分配效应”,即分配给布雷顿循环和朗肯循环的总输入(焓)比例因太阳能投入位置的不同而改变。最后扩展了前期工作提出的“叠加效应”在 ISCC 系统中的应用,说明系统总燃料节省因子由代表太阳能投入带来直接效益的基本项、代表太阳能投入对系统中各组件浮动影响的浮动项和代表太阳能投入后隐含的循环间影响的桥接项叠加综合决定,包括太阳能局部整合的直接影响和各部分之间的相互影响。该研究结果具有普适性,为未来复杂太阳能互补多循环系统研究应用提供理论指导。

关键词: 太阳能;太阳能互补联合循环 (ISCC);燃料节省因子;焓分析;品位耦合;太阳能份额
中图分类号: TK114;TK514 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2022)11-0064-09

Theoretical study on evaluation of integrated solar combined cyclesystem based on energy level coupling

SHI Yaolu,ZHANG Zhenwen,SUN Jie,WEI Jinjia

(School of Chemical Engineering and Technology,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) system is considered as a promising route to utilize both solar energy and fossil fuel. However, due to the absence of a unified framework and universal analysis of ISCC, it is difficult to achieve direct performance comparison between different integrated system schemes under the unified evaluation system. In the present work, a generalized model of ISCC system was proposed and established, which covered various integration schemes of solar energy taken into the Brayton and the Rankine cycles and the different integrated systems were reasonably summarized. Based on the model, the unified expression of fuel-savability was derived. The expression was verified and applied to evaluate the lateral performance of different integration schemes. Secondly, based on the idea of energy grade coupling, the "allocation effect" in ISCC system integration was revealed by using the bridge term in the unified expression, that is, the proportion of the total input (exergy) allocated to the Brayton cycle and Rankine cycle changes due to the different positions of solar energy input. Thirdly, based on previous work, the "superposition effect" was expanded that the total system fuel-savability was comprehensively determined by the superposed sum of the basic term, which was the direct benefit of local solar integration, the floating term, which stood for the explicit influence of solar integration on each main component, and the bridging term, which stood for the implicit inter-cycle influence of solar integration. This work provides theoretical guidance for the research and application

收稿日期:2022-08-15;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.RE22081501

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52176202)

作者简介:施瑶璐(1998—),女,江苏南通人,硕士研究生。E-mail:syl1119@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者:孙杰(1982—),男,河南郑州人,研究员,博士生导师,博士。E-mail:sunjie@xjtu.edu.cn

引用格式:施瑶璐,张振文,孙杰,等.基于品位耦合的太阳能互补联合循环发电系统集成评价理论[J].洁净煤技术,2022,28(11):64-72.

SHI Yaolu,ZHANG Zhenwen,SUN Jie,et al.Theoretical study on evaluation of integrated solar combined cyclesystem based on energy level coupling[J].Clean Coal Technology,2022,28(11):64-72.



移动阅读

of more generalized multi-cycle systems integrated with solar energy.

Key words: solar energy; Integrated Solar Combined Cycle (ISCC); fuel-savability; exergy analysis; energy level coupling; solar share

0 引言

能源几个世纪以来一直是人类赖以生存的物质基础。传统化石能源的资源局限性和污染问题导致能源利用结构转型成为重中之重。绿色和可再生能源发展迅速,太阳能因其丰富性和可持续性成为最有前景的未来能源之一^[1]。在太阳能利用中,与高成本、低效的独立太阳能系统相比,综合太阳能热互补联合循环系统(Integrated Solar Combined Cycle, ISCC)将太阳能热发电系统与传统燃气轮机循环发电系统(Combined Cycle Gas Turbine, CCGT)相结合,使整体系统既受益于太阳能集成的高效利用,又受益于联合循环的能源匹配,可有效利用化石燃料和太阳能^[2]。

基于温度范围匹配,从理论上讲,各种聚光太阳能发电技术均可与 CCGT 系统集成,形成不同的 ISCC 系统集成方案。KRIBUS 等^[3]基于 34 MW CCGT 电站,分析了 ISCC 系统的 2 种集成方案:向朗肯循环提供蒸汽和在布雷顿循环中加热或预热工作液。后者被认为能够实现更高的能量转换效率和更充分地太阳能利用。YANG 等^[4]以 200 MW 电站光煤互补系统改造为例,指出不同光煤互补形式在热效率等性能指标上的优势。MANENTE 等^[5]基于某 390 MW 三压联合循环燃气轮机厂,寻求适用于 ISCC 系统的聚光太阳能技术和最佳集成方案。LI 等^[6]提出了一种两级式 ISCC 系统,将太阳能分 2 个阶段引入朗肯循环,优化了余热锅炉换热匹配,使系统太阳能效率和太阳能净发电效率与常规 ISCC 机组相比分别提升了 2.5% 和 1.2%。DUAN 等^[7]提出了一种 ISCC 系统,该系统使用太阳能驱动吸收式制冷机冷却燃气轮机进口的空气,该 ISCC 系统的太阳能发电效率比参考系统高 5%。此外,为获得更好的性能,还提出了一些复杂的集成太阳能联合循环系统,如与有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)集成的 ISCC 系统^[8-9]。ISCC 系统具有以下优点:① ISCC 系统相比纯太阳能发电系统具有更高的热力学效率;② ISCC 系统不需要储能子系统^[10],节省了相应的投资成本;③ 与原始 CCGT 系统相比,ISCC 系统可减少化石燃料消耗和温室气体释放。

大多数 ISCC 系统研究均提出了具体的集成方案,结论仅适用于特定系统,缺乏评价不同 ISCC 系统性能的统一理论。在整个 ISCC 系统内,布雷顿循

环与朗肯循环相互作用,太阳能热形式的投入对循环内部与循环之间的作用机理缺乏研究验证。笔者基于品位耦合思想,从理论上揭示太阳能、布雷顿循环和朗肯循环之间的作用机制,可更好地理解 ISCC 系统。在笔者课题组前期工作^[11]中,已建立了统一理论模型,提出并阐明了“叠加效应”,将其应用于不同太阳能-燃煤互补发电系统的性能评价。基于此,笔者提出了一种基于品位耦合的普适性 ISCC 系统理论模型,更具体地揭示了引入太阳能对燃料节省量的影响机制,推导得到了燃料节省因子的统一表达式,并分析拓展了“叠加效应”,以及对于布雷顿循环与朗肯循环之间相互影响的“分配效应”,拓展了前期工作中提出的节煤系数,为改造光煤互补电站及其他燃料形式的太阳能发电站提供普适性理论指导,直接或间接减少化石燃料消耗,为未来复杂太阳能互补多循环系统的研究和应用提供借鉴。

1 理论建模与推导

1.1 ISCC 系统理论模型

ISCC 系统的理论建模示意如图 1 所示,该模型是前期工作^[11]中已得到验证的 SCPGS 模型的发展与完善。ISCC 系统利用聚光镜场将汇聚太阳光转化为太阳热,然后引入不同联合循环中,具体包括系统中的燃烧室或余热锅炉,或二者兼有。太阳能耦合在联合循环系统不同位置时,可分别加热系统中做功工质、压缩空气或加热即将进入余热锅炉的饱和蒸汽等,从而将太阳能转化为热能,进而转化成电能。图 1 左侧为布雷顿循环,其输入能量来自燃料化学能及太阳能;右侧为朗肯循环,其输入能量来自布雷顿循环排气余热及太阳能。整个系统的输出功包括燃气轮机的净输出功和蒸汽轮机的输出功。

通常,ISCC 系统根据工作模式分为 2 种方案,即功率增强方案和燃料节省方案^[12]。对于功率增强型 ISCC 系统,燃料总量保持不变,投入额外的太阳能到 CCGT 系统中,使工质吸热总量和整个系统的输出功率增加。对于燃料节省型 ISCC 系统,工质吸热总量不变,系统总出功量不变,只将某部分燃料加热段热源替换为太阳能加热以节省燃料。

ISCC 系统 2 种不同方案(功率增强型及燃料节省型系统)的焓分析示意如图 2 所示。矩形条表示工质从燃料中或太阳能中获得的焓能,其定义为系统通过热源达到平衡时所获得的最大有用功^[13-14],焓分析是 ISCC 系统热力学评估的重要方法^[15]。对

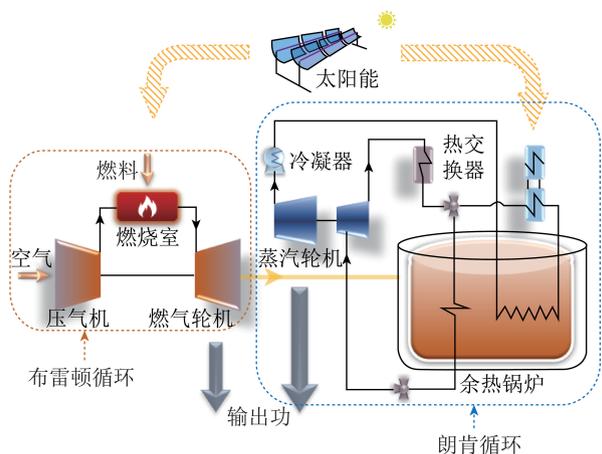


图1 ISCC系统示意

Fig.1 Schematic of ISCC system

于功率增强型系统,太阳能投入环节可以是布雷顿循环或朗肯循环,或二者兼有。增加工质获得焓有2种方法:增强工质热力学参数和增加流量^[16]。因此,对于朗肯循环,2种方法均适用,而对于布雷顿循环,太阳能以热的形式引入,只能增加工质的热力学参数。对于燃料节省型系统,根据布雷顿循环和朗肯循环输出功率的不同,可细分为3种工况(图2中a、b、c)。b类工况中工质获得的焓与原CCGT系统相同,因此燃气轮机和蒸汽轮机的焓效率不变,布雷顿循环和朗肯循环的输出功率与CCGT系统相同($W_B^I = W_B^C, W_R^I = W_R^C, W$ 为输出功率;下标B、R分别表示布雷顿循环和朗肯循环;上标I、C分别表示ISCC系统和CCGT系统,下同)。太阳能单独引入朗肯循环或引入布雷顿循环的太阳能不足时,会出现a类工况,而当太阳能单独引入布雷顿循环或引入布雷顿循环的太阳能过量时,会出现c类工况,这2种工况下,燃气轮机和蒸汽轮机的焓效率会发生变化且通常呈下降趋势。因此,为了保持输出功率不变,在a和b类工况下运行的ISCC系统工质相比原始CCGT消耗更多焓。

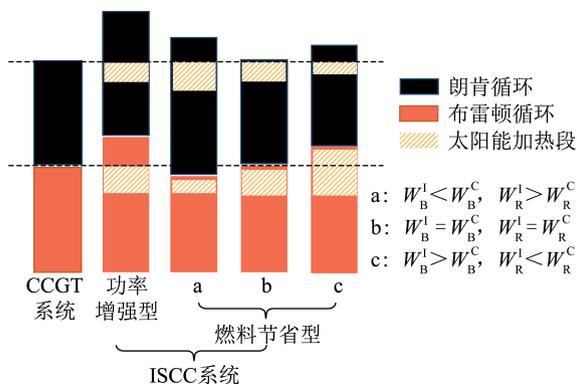


图2 ISCC系统加热段能量分析示意

Fig.2 Schematic of heating section modelling for ISCC system

1.2 燃料节省因子的推导

关于ISCC系统的分析主要基于以下假设:添加太阳能仅影响主要部件;仅考虑主要部件的热损失;朗肯循环冷凝器出口工质的热力学参数保持恒定。在本研究中,燃料节省因子 ξ 定义为ISCC系统燃料消耗量与参考CCGT系统燃料消耗量的比值,具体为

$$\xi = \frac{\Delta B^I}{B^C}, \quad (1)$$

式中, ΔB^I 定义为ISCC系统燃料消耗量 B^I 与CCGT系统燃料消耗量 B^C 之差。

CCGT的理想温度-熵图($T-s$ 图)如图3(a)所示。各部件的焓效率 $\eta_{ex,k}$ 为

$$\eta_{ex,k} = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}}, \quad (2)$$

式中, E_F 为该部件消耗的燃料焓; E_P 为该部件中能量转换过程中的焓^[17-18];k为某一具体部件。

因此,CCGT系统的焓效率 η_{ex}^C 为

$$\eta_{ex}^C = \frac{W_B^C + W_R^C}{B^C e_{fuel}}, \quad (3)$$

式中, e_{fuel} 为单位质量燃料的化学焓。

1.2.1 CCGT系统的焓分析

1) 布雷顿循环。CCGT中布雷顿循环的焓平衡

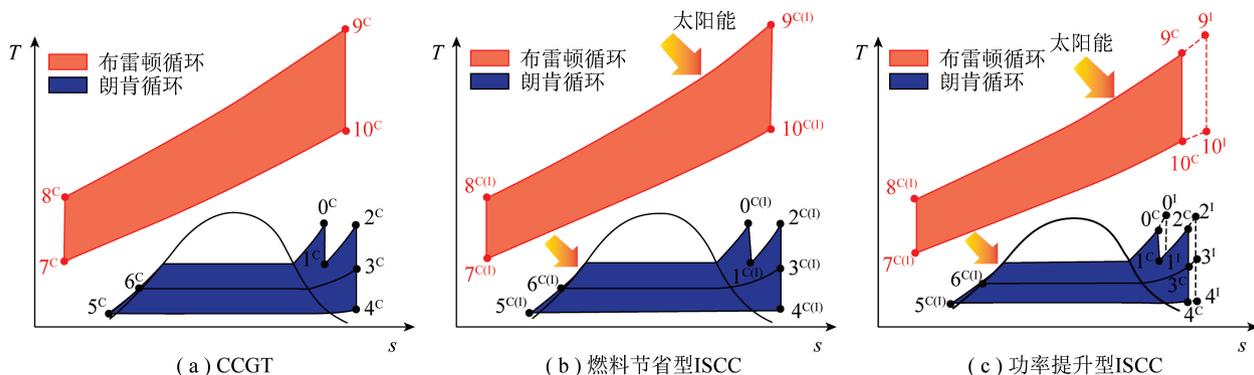


图3 不同系统T-s图

Fig.3 T-s diagram for different systems

为

$$B^C e_{\text{fuel}}^C \eta_{\text{ex,CC}}^C = \dot{m}_{\text{gas}}^C e_9^C - \dot{m}_{\text{air}}^C e_8^C \approx \dot{m}_{\text{gas}}^C (e_9^C - e_8^C), \quad (4)$$

$$W_{\text{GT}}^C = \eta_{\text{ex,GT}}^C \dot{m}_{\text{gas}}^C (e_9^C - e_{10}^C), \quad (5)$$

$$W_{\text{AC}}^C \eta_{\text{ex,AC}}^C = \dot{m}_{\text{air}}^C (e_8^C - e_7^C), \quad (6)$$

$$W_{\text{B}}^C = W_{\text{GT}}^C - W_{\text{AC}}^C = W_{\text{GT}}^C \eta_{\text{net}}^C, \quad (7)$$

$$(B^C e_{\text{fuel}}^C \eta_{\text{ex,CC}}^C + W_{\text{AC}}^C \eta_{\text{ex,AC}}^C - E_e^C) \eta_{\text{ex,GT}}^C = W_{\text{GT}}^C, \quad (8)$$

式中, $e_7^C \sim e_{10}^C$ 分别为工作流体在压气机入口、燃烧室入口、燃气轮机入口和燃气轮机出口处的比焓,其下标分别对应图 3(a) 中数字; $\eta_{\text{ex,AC}}^C$ 、 $\eta_{\text{ex,CC}}^C$ 、 $\eta_{\text{ex,GT}}^C$ 分别为压气机、燃烧室和燃气轮机的焓效率; η_{net}^C 为燃气轮机的净效率; \dot{m}_{gas}^C 、 \dot{m}_{air}^C 分别为燃气和空气的质量流量; W_{AC}^C 为压气机的消耗功率; W_{GT}^C 为燃气轮机的输出功率; E_e^C 为燃气轮机排气的焓。

式(4)中,由于燃油-空气比通常小于0.03^[19-21],且燃料量可以忽略,因此, $\dot{m}_{\text{gas}}^C = \dot{m}_{\text{air}}^C + B^C \approx \dot{m}_{\text{air}}^C$ 。式(7)和(8)分别用于推导布雷顿循环的输出功率和整个布雷顿循环的焓平衡,式(9)由式(8)推导而来。布雷顿循环的焓效率 $\eta_{\text{ex,B}}^C$ 为

$$\eta_{\text{ex,B}}^C = \frac{(k_e^C - \eta_{\text{ex,CC}}^C) \eta_{\text{net}}^C}{\eta_{\text{ex,AC}}^C (1 - \eta_{\text{net}}^C) - 1/\eta_{\text{ex,GT}}^C}, \quad (9)$$

式中, k_e^C 为燃气轮机排气的焓与原 CCGT 系统燃料消耗的总化学焓之比。

2) 朗肯循环。CCGT 中的朗肯循环的焓平衡为

$$E_e^C \eta_{\text{ex,HRSG}}^C = \dot{m}_s^C (e_0^C - e_6^C + e_2^C - e_1^C), \quad (10)$$

$$W_{\text{R}}^C = W_{\text{ST}}^C = \eta_{\text{ex,ST}}^C \dot{m}_s^C [e_0^C - e_1^C + e_2^C - e_3^C + (1 - \alpha^C) (e_3^C - e_4^C)], \quad (11)$$

$$W_{\text{R}}^C = \eta_{\text{ex,HRSG}}^C \eta_{\text{ex,ST}}^C \eta_{\text{ex,theo,R}}^C E_e^C, \quad (12)$$

式中, $e_0^C \sim e_6^C$ 分别为工作流体在蒸汽轮机入口、再热器入口、再热器出口、泄放点、蒸汽轮机出口、冷凝器出口和余热锅炉入口处的比焓,其下标分别对应图 3(a) 中数字; $\eta_{\text{ex,HRSG}}^C$ 、 $\eta_{\text{ex,ST}}^C$ 、 $\eta_{\text{ex,theo,R}}^C$ 分别为余热锅炉、蒸汽轮机和理论朗肯循环的焓效率; \dot{m}_s^C 为朗肯循环中蒸汽的质量流量; W_{R}^C 为朗肯循环的输出功率,等同于蒸汽轮机的输出功率 W_{ST}^C ; α^C 为排出蒸汽的份额。

朗肯循环的焓效率 $\eta_{\text{ex,R}}^C$ ^[22] 为

$$\eta_{\text{ex,R}}^C = \eta_{\text{ex,HRSG}}^C \eta_{\text{ex,ST}}^C \eta_{\text{ex,theo,R}}^C \quad (13)$$

1.2.2 ISCC 系统的焓分析

1) 布雷顿循环。ISCC 系统中布雷顿循环的焓平衡为

$$B^I e_{\text{fuel}}^I \eta_{\text{ex,CC}}^I + E_{\text{sol,wf,B}} = \dot{m}_{\text{gas}}^I (e_9^I - e_8^I), \quad (14)$$

$$W_{\text{GT}}^I = \eta_{\text{ex,GT}}^I \dot{m}_{\text{gas}}^I (e_9^I - e_{10}^I), \quad (15)$$

$$W_{\text{AC}}^I \eta_{\text{ex,AC}}^I = \dot{m}_{\text{air}}^I (e_8^I - e_7^I), \quad (16)$$

$$W_{\text{B}}^I = W_{\text{GT}}^I - W_{\text{AC}}^I = W_{\text{GT}}^I \eta_{\text{net}}^I, \quad (17)$$

$$(B^I e_{\text{fuel}}^I \eta_{\text{ex,CC}}^I + E_{\text{sol,wf,B}} + W_{\text{AC}}^I \eta_{\text{ex,AC}}^I - E_e^I) \eta_{\text{ex,GT}}^I = W_{\text{GT}}^I \quad (18)$$

其中, $E_{\text{sol,wf,B}}$ 为太阳能加热段工质的焓增益。假设燃气轮机的净效率为常数,因此 $\eta_{\text{net}}^I = \eta_{\text{net}}^C = \eta_{\text{net}}$ 。假设朗肯循环冷凝器出口工质的热力学参数保持恒定,冷凝器出口的焓应为常数,因此, $e_5^I = e_5^C \eta = e_5^C$ 。

为反映太阳能焓所占份额,布雷顿循环 $k_{\text{sol,B}}$ 中太阳能的份额及朗肯循环 $k_{\text{sol,R}}$ 中太阳能的份额分别定义为

$$k_{\text{sol,B}} = \frac{E_{\text{sol,B}}}{B^C e_{\text{fuel}}^C}, \quad (19)$$

$$k_{\text{sol,R}} = \frac{E_{\text{sol,R}}}{B^C e_{\text{fuel}}^C}, \quad (20)$$

式中, $E_{\text{sol,B}}$ 为太阳能热焓投入布雷顿循环中的部分; $E_{\text{sol,R}}$ 为太阳能热焓投入朗肯循环中的部分。

能量品位 A 可以反映能量质量,其定义为某一能量传递过程中焓变 ΔE 与焓变 ΔH 的比值^[23]:

$$A = \frac{\Delta E}{\Delta H} \quad (21)$$

由于太阳能和工质的焓变相等,布雷顿循环 $A_{\text{sol,B}}^*$ 与朗肯循环 $A_{\text{sol,R}}^*$ 对应的能量品位为

$$A_{\text{sol,B}}^* = \frac{E_{\text{sol,wf,B}}}{E_{\text{sol,B}}} = \frac{A_{\text{sol,wf,B}}}{A_{\text{sol,B}}}, \quad (22)$$

$$A_{\text{sol,R}}^* = \frac{E_{\text{sol,wf,R}}}{E_{\text{sol,R}}} = \frac{A_{\text{sol,wf,R}}}{A_{\text{sol,R}}}, \quad (23)$$

式中, $A_{\text{sol,wf,B}}$ 、 $A_{\text{sol,wf,R}}$ 分别为布雷顿循环与朗肯循环中工质吸收热能的品位; $A_{\text{sol,B}}$ 、 $A_{\text{sol,R}}$ 分别为布雷顿循环与朗肯循环中太阳能品位。

因此,将式(18)与式(20)代入式(17),可得到布雷顿循环的焓效率:

$$\eta_{\text{ex,B}}^I = \frac{(k_e^I - \eta_{\text{ex,CC}}^I - k_{\text{sol,B}} A_{\text{sol,B}}^*) \eta_{\text{net}}^I}{\eta_{\text{ex,AC}}^I (1 - \eta_{\text{net}}^I) - 1/\eta_{\text{ex,GT}}^I} \times \frac{B^I e_{\text{fuel}}^I}{B^I e_{\text{fuel}}^I + k_{\text{sol,B}} A_{\text{sol,B}}^* / \eta_{\text{ex,CC}}^I} \quad (24)$$

2) 朗肯循环。ISCC 系统中朗肯循环的焓平衡为

$$E_e^I \eta_{\text{ex,HRSG}}^I + E_{\text{sol,wf,R}} = \dot{m}_s^I (e_0^I - e_6^I + e_2^I - e_1^I), \quad (25)$$

$$W_{\text{R}}^I = W_{\text{ST}}^I = \eta_{\text{ex,ST}}^I \dot{m}_s^I [e_0^I - e_1^I + e_2^I - e_3^I + (1 - \alpha^I) (e_3^I - e_4^I)], \quad (26)$$

$$W_{\text{R}}^I = (\eta_{\text{ex,HRSG}}^I E_e^I + E_{\text{sol,wf,R}}) \eta_{\text{ex,ST}}^I \eta_{\text{ex,theo,R}}^I, \quad (27)$$

式中, $E_{\text{sol,wf,R}}$ 为太阳能加热段中工质的焓增益。

1.2.3 功率增强型 ISCC 系统燃料节省因子

为统一评价标准,通过式(28)将功率增强量 $(\Delta W_B^I, \Delta W_R^I)$ 等效转换为燃料节省量 ΔB^I :

$$\Delta B^I = \frac{\Delta W_B^I + \Delta W_R^I}{\eta_{ex}^C e_{fuel}^C}, \quad (28)$$

将式(28)代入式(1),可得到功率增强型 ISCC 系统的燃料节省因子为

$$\xi = \frac{\Delta B^I}{B^C} = \frac{\Delta W_B^I + \Delta W_R^I}{\eta_{ex}^C B^C e_{fuel}^C}. \quad (29)$$

由于燃料量不变,即 $B^I = B^C = B$ 。在布雷顿循环中,燃气的质量流量恒定,即 $\dot{m}_{air}^I = \dot{m}_{air}^C = \dot{m}_{gas}$ 。在朗肯循环中,过热器出口工质的热力学参数升高,蒸汽

$$\Delta W_R^I = \eta_{ex,ST}^I \frac{e_0^I - e_0^C + e_2^I - e_2^C - (e_1^I - e_1^C) - (1-\alpha)(e_4^I - e_4^C) - \alpha(e_3^I - e_3^C)}{e_0^I - e_0^C + e_2^I - e_2^C - (e_1^I - e_1^C) - (e_6^I - e_6^C)} (E_e^I \eta_{ex,HRSB}^I - E_e^C \eta_{ex,HRSB}^C + E_{sol,wf,R}) + \frac{\eta_{ex,ST}^I - \eta_{ex,ST}^C}{\eta_{ex,ST}^C} W_{R,C}^C \quad (31)$$

通过替换式(29)~(31),得到功率增强型 ISCC 系统的燃料节省因子为

$$\xi = \gamma_1 \frac{\eta_{ex,CC}^I - \eta_{ex,CC}^C + \frac{E_{sol,wf,B}}{B^C e_{fuel}^C}}{\eta_{ex,CC}^C} + \gamma_2 \frac{\eta_{ex,GT}^I - \eta_{ex,GT}^C}{\eta_{ex,GT}^C} + \gamma_3 \frac{\frac{E_e^I}{E_e^C} \eta_{ex,HRSB}^I - \eta_{ex,HRSB}^C + \frac{E_{sol,wf,R}}{E_e^C}}{\eta_{ex,HRSB}^C} + \gamma_4 \frac{\eta_{ex,ST}^I - \eta_{ex,ST}^C}{\eta_{ex,ST}^C}. \quad (32)$$

$$\text{其中, } \gamma_1 = \frac{\eta_{ex,GT}^I \eta_{ex,CC}^C}{\eta_{ex}^C} \frac{\Delta E_{GT}}{\Delta E_{CC}}, \quad \gamma_2 = \frac{W_{GT}^C}{W_B^C + W_R^C} =$$

$$\frac{\eta_{ex,B}^C}{\eta_{ex}^C \eta_{net}^C}, \quad \gamma_3 = \frac{k_e^C \eta_{ex,ST}^I \eta_{ex,HRSB}^C}{\eta_{ex}^C} \frac{\Delta E_{ST}}{\Delta E_{HRSB}}, \quad \gamma_4 = \frac{W_R^C}{W_B^C + W_R^C} \times \frac{\eta_{ex,R}^C}{\eta_{ex}^C}.$$

为了表达简洁,重新定义 $\Delta E_{CC} = e_9^I - e_9^C - (e_8^I - e_8^C)$, $\Delta E_{GT} = e_9^I - e_9^C - (e_{10}^I - e_{10}^C)$, $\Delta E_{HRSB} = e_0^I - e_0^C + e_2^I - e_2^C - (e_1^I - e_1^C) - (e_6^I - e_6^C)$, $\Delta E_{ST} = e_0^I - e_0^C + e_2^I - e_2^C - (e_1^I - e_1^C) - (1-\alpha)(e_4^I - e_4^C) - \alpha(e_3^I - e_3^C)$ 。

1.2.4 燃料节省型 ISCC 系统燃料节省因子

在燃料节省型 ISCC 系统中,总输出功率的变化应为 0,即 $\Delta W_B^I + \Delta W_R^I = 0$ 。工质质量流量恒定,即 $\dot{m}_{gas}^I = \dot{m}_{gas}^C = \dot{m}_{gas}$ 且 $\dot{m}_s^I = \dot{m}_s^C = \dot{m}_s$ 。根据图 2,燃料节省型 ISCC 系统分为 3 种工况,其中 b 类工况的推导过程最简单,因为燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机的焓效率不变,即 $\eta_{ex,GT}^I = \eta_{ex,GT}^C = \eta_{ex,GT}$, $\eta_{ex,HRSB}^I = \eta_{ex,HRSB}^C = \eta_{ex,HRSB}$, $\eta_{ex,ST}^I = \eta_{ex,ST}^C = \eta_{ex,ST}$ 。当燃气轮机进口燃气

的质量流量恒定,即 $\dot{m}_s^I = \dot{m}_s^C = \dot{m}_s$;排出蒸汽的份额不变,即 $\alpha^I = \alpha^C = \alpha$ 。虚线表示 ISCC 系统(图 3(c))。

压气机的工作状态不变,因此布雷顿循环的功率增强量等于燃气轮机的功率增强量。通过式(5)及式(15)得出:

$$\Delta W_B^I = \eta_{ex,GT}^I \frac{e_9^I - e_9^C - (e_{10}^I - e_{10}^C)}{e_9^I - e_9^C - (e_8^I - e_8^C)} \times [B e_{fuel}^I (\eta_{ex,CC}^I - \eta_{ex,CC}^C) + E_{sol,wf,B}] + \frac{\eta_{ex,GT}^I - \eta_{ex,GT}^C}{\eta_{ex,GT}^C} W_{GT,C}^C \quad (30)$$

式(26)减式(11),式(25)减式(10)得出:

的焓增益等于联合循环燃气轮机系统的焓增益时,布雷顿循环和朗肯循环的输出功率可保持不变。图 3(b)是 b 类工况下燃料节省型 ISCC 系统的 T-s 图。

使式(4)与式(14)相等,可得:

$$B^I e_{fuel}^I \eta_{ex,CC}^I + E_{sol,wf,B} = m_{gas} (e_9 - e_8) = B^C e_{fuel}^C \eta_{ex,CC}^C. \quad (33)$$

将式(33)代入式(1),得到 b 类工况下燃料节省型 ISCC 系统的燃料节省因子为

$$\xi = \frac{B^C - B^I}{B^C} = \frac{\eta_{ex,CC}^C}{\eta_{ex,CC}^C} \frac{\eta_{ex,CC}^I - \eta_{ex,CC}^C + \frac{E_{sol,wf,B}}{B^C e_{fuel}^C}}{\eta_{ex,CC}^C}. \quad (34)$$

对于燃料节省型 ISCC 系统 a 类和 c 类工况,总输出功率变化也为 0($\Delta W_B^I + \Delta W_R^I = 0$)。然而,每个循环输出功率的变化不是 0($\Delta W_B^I \neq 0, \Delta W_R^I \neq 0$)。因此,燃气轮机和蒸汽轮机的焓效率可能发生变化。从式(15)中减式(5),从式(14)中减式(4),可得:

$$\Delta W_B^I = \eta_{ex,GT}^I \frac{e_9^I - e_9^C - (e_{10}^I - e_{10}^C)}{e_9^I - e_9^C - (e_8^I - e_8^C)} \times (B^I e_{fuel}^I \eta_{ex,CC}^I - B^C e_{fuel}^C \eta_{ex,CC}^C + E_{sol,wf,B}) + \frac{\eta_{ex,GT}^I - \eta_{ex,GT}^C}{\eta_{ex,GT}^C} W_{GT,C}^C \quad (35)$$

从式(26)中减去式(11),从式(25)中减去式(10),可得:

$$\Delta W_R^I = \eta_{\text{ex,ST}}^I \frac{e_0^I - e_0^C + e_2^I - e_2^C - (e_1^I - e_1^C) - (1-\alpha)(e_4^I - e_4^C) - \alpha(e_3^I - e_3^C)}{e_0^I - e_0^C + e_2^I - e_2^C - (e_1^I - e_1^C) - (e_6^I - e_6^C)} \times$$

$$(E_e^I \eta_{\text{ex,HRSB}}^I - E_e^C \eta_{\text{ex,HRSB}}^C + E_{\text{sol,wf,R}}) + \frac{\eta_{\text{ex,ST}}^I - \eta_{\text{ex,ST}}^C}{\eta_{\text{ex,ST}}^C} W_R^C, \quad (36)$$

$$\Delta W_B^I + \Delta W_R^I = 0. \quad (37)$$

将式(35)和式(36)代入式(37),得到燃料节

省型 ISCC 系统 a 类和 c 类工况下的燃料节省因子为

$$\xi = \kappa_1 \frac{\eta_{\text{ex,CC}}^I - \eta_{\text{ex,CC}}^C + \frac{E_{\text{sol,wf,B}}}{B^C e_{\text{fuel}}}}{\eta_{\text{ex,CC}}^C} + \kappa_2 \frac{\eta_{\text{ex,GT}}^I - \eta_{\text{ex,GT}}^C}{\eta_{\text{ex,GT}}^C} + \kappa_3 \frac{\frac{E_e^I}{E_e^C} \eta_{\text{ex,HRSB}}^I - \eta_{\text{ex,HRSB}}^C + \frac{E_{\text{sol,wf,R}}}{E_e^C}}{\eta_{\text{ex,HRSB}}^C} + \kappa_4 \frac{\eta_{\text{ex,ST}}^I - \eta_{\text{ex,ST}}^C}{\eta_{\text{ex,ST}}^C}, \quad (38)$$

$$\text{式中, } \kappa_1 = \frac{\eta_{\text{ex,CC}}^C}{\eta_{\text{ex,CC}}^I}, \kappa_2 = \frac{W_{\text{GT}}^C}{B^C e_{\text{fuel}} \eta_{\text{ex,CC}}^I \eta_{\text{ex,GT}}^I} \frac{\Delta E_{\text{ex,CC}}}{\Delta E_{\text{ex,GT}}}, \kappa_3 =$$

$$\frac{E_e^C \eta_{\text{ex,ST}}^I \eta_{\text{ex,HRSB}}^C}{B^C e_{\text{fuel}} \eta_{\text{ex,CC}}^I \eta_{\text{ex,GT}}^I} \frac{\Delta E_{\text{ex,CC}}}{\Delta E_{\text{ex,GT}}} \frac{\Delta E_{\text{ex,ST}}}{\Delta E_{\text{ex,HRSB}}}, \kappa_4 = \frac{W_{\text{ST}}^C}{B^C e_{\text{fuel}} \eta_{\text{ex,CC}}^I \eta_{\text{ex,GT}}^I} \times$$

$$\frac{\Delta E_{\text{ex,CC}}}{\Delta E_{\text{ex,GT}}}.$$

工作模式为 b 类工况时,由于 $\eta_{\text{ex,GT}}^I = \eta_{\text{ex,GT}}^C = \eta_{\text{ex,GT}}$, $\eta_{\text{ex,HRSB}}^I = \eta_{\text{ex,HRSB}}^C = \eta_{\text{ex,HRSB}}$, $\eta_{\text{ex,ST}}^I = \eta_{\text{ex,ST}}^C = \eta_{\text{ex,ST}}$, 此时式(37)等于式(34)。因此,燃料节省型 ISCC 系统的燃料节省因子可由式(38)统一表示。

1.2.5 ISCC 系统燃料节省因子的统一表达

由于式(32)和式(38)具有相似的表达式形式,将其通过恒等式转换,则得到 ISCC 系统燃料节省因子的统一表达式为

$$\xi = (\lambda_1 k_{\text{sol,B}}^* + \lambda_2 \Delta \eta_{\text{ex,CC}}^* + \lambda_3 \Delta \eta_{\text{ex,GT}}^*) +$$

$$(\lambda_4 k_{\text{sol,R}}^* + \lambda_5 \Delta \eta_{\text{ex,HRSB}}^* + \lambda_6 \Delta \eta_{\text{ex,ST}}^*) + \lambda_7 \Delta \varepsilon^*. \quad (39)$$

其中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 、 λ_6 、 λ_7 为相关系数。 $k_{\text{sol,B}}^*$ 、 $\Delta \eta_{\text{ex,CC}}^*$ 、 $\Delta \eta_{\text{ex,GT}}^*$ 、 $k_{\text{sol,R}}^*$ 、 $\Delta \eta_{\text{ex,HRSB}}^*$ 、 $\Delta \eta_{\text{ex,ST}}^*$ 、 $\Delta \varepsilon^*$ 分别为主要参数,具体定义见表 1。

表 1 ISCC 系统主要参数表达式

Table 1 Expressions of the main parameters for ISCC system

序号	主要参数	表达式
1	$k_{\text{sol,B}}^*$	$k_{\text{sol,B}} A_{\text{sol,B}}^*$
2	$\Delta \eta_{\text{ex,CC}}^*$	$\frac{\eta_{\text{ex,CC}}^I - \eta_{\text{ex,CC}}^C}{\eta_{\text{ex,CC}}^C}$
3	$\Delta \eta_{\text{ex,GT}}^*$	$\frac{\eta_{\text{ex,GT}}^I - \eta_{\text{ex,GT}}^C}{\eta_{\text{ex,GT}}^C}$
4	$k_{\text{sol,R}}^*$	$k_{\text{sol,R}} A_{\text{sol,R}}^*$
5	$\Delta \eta_{\text{ex,HRSB}}^*$	$\frac{\eta_{\text{ex,HRSB}}^I - \eta_{\text{ex,HRSB}}^C}{\eta_{\text{ex,HRSB}}^C}$
6	$\Delta \eta_{\text{ex,ST}}^*$	$\frac{\eta_{\text{ex,ST}}^I - \eta_{\text{ex,ST}}^C}{\eta_{\text{ex,ST}}^C}$
7	$\Delta \varepsilon^*$	$\frac{E_e^I - E_e^C}{E_e^C}$

2 结果与讨论

2.1 燃料节省因子统一表达式的物理含义

基于前述推导过程,获得 ISCC 系统燃料节省因子的统一表达式(式(39))。 $\lambda_1 \sim \lambda_7$ 通常用于将主要参数转化为 ξ 。以燃料节省型 ISCC 系统为例,利用 λ_1 和 λ_4 可以将太阳能焓转换为燃料焓。 $\lambda_1 = 1/\eta_{\text{ex,CC}}^I$ 表示布雷顿循环中的太阳能比 $k_{\text{sol,B}}^*$ 除以 ISCC 系统燃烧室的焓效率。 $\lambda_4 = k_e^C \eta_{\text{net}} \frac{\Delta \eta_{\text{ex,R}}^I}{\Delta \eta_{\text{ex,B}}^I} \frac{1}{\eta_{\text{ex,B}}^I}$

中, $1/\eta_{\text{ex,HRSB}}^I$ 和 λ_1 具有相似的物理含义,即 $\Delta \eta_{\text{ex,R}}^I / (\Delta \eta_{\text{ex,B}}^I / \eta_{\text{net}})$ 为朗肯循环和布雷顿循环中焓效率变化的比值。 $k_e^C \eta_{\text{net}} \frac{\Delta \eta_{\text{ex,R}}^I}{\Delta \eta_{\text{ex,B}}^I}$ 为蒸汽轮机和燃气轮机的输出功率之比 ($\Delta W_{\text{ST}}^I / \Delta W_{\text{GT}}^I$)。

因此, λ_4 表示朗肯循环中的太阳能焓比 $k_{\text{sol,R}}^*$ 与余热锅炉的焓效率之间的比值。由于作用于朗肯循环中的太阳能热能需要转换为布雷顿循环,该比值还需按照输出功比例转化为 ξ 。 λ_2 、 λ_3 、 λ_5 、 λ_6 可将太阳能引起的各部件焓效率的相对变化转化为燃料焓,如 λ_2 为燃烧室在 CCGT 系统与 ISCC 系统中的焓效率比值 ($\eta_{\text{ex,CC}}^C / \eta_{\text{ex,CC}}^I$), 相当于在相同单位焓增益情况下,燃烧室在 ISCC 系统中与 CCGT 系统中的燃料消耗比 ($\frac{1/\eta_{\text{ex,CC}}^C}{1/\eta_{\text{ex,CC}}^I}$)。 λ_3 从

$\frac{\eta_{\text{ex,B}}^C}{\eta_{\text{net}} \eta_{\text{ex,CC}}^I \eta_{\text{ex,GT}}^I} \frac{\Delta E_{\text{ex,CC}}}{\Delta E_{\text{ex,GT}}}$ 改写为 $\frac{\eta_{\text{ex,B}}^C}{\Delta \eta_{\text{ex,B}}^I} (\Delta \eta_{\text{ex,B}}^I = \frac{\Delta E_{\text{ex,GT}}^I \eta_{\text{ex,GT}}^I \eta_{\text{net}}}{\Delta E_{\text{ex,CC}}^I / \eta_{\text{ex,CC}}^I})$, 表示布雷顿循环焓效率相对变化的倒数。在上述参数中, ΔE_{CC} 、 ΔE_{GT} 、 ΔE_{HRSB} 、 ΔE_{ST} 为 ISCC 和 CCGT 系统各部件的焓增益之差。类似地,

有 $\lambda_5 = k_e^C \eta_{\text{net}} \frac{\eta_{\text{ex,HRSB}}^C}{\eta_{\text{ex,HRSB}}^I} \frac{\Delta \eta_{\text{ex,R}}^I}{\Delta \eta_{\text{ex,B}}^I}$, $\lambda_6 = k_e^C \eta_{\text{net}} \frac{\eta_{\text{ex,R}}^C}{\Delta \eta_{\text{ex,B}}^I}$, $\lambda_7 = k_e^C \eta_{\text{net}} \frac{\Delta \eta_{\text{ex,R}}^I}{\Delta \eta_{\text{ex,B}}^I}$ 。

综上所述,统一表达式的主要参数表示由于太阳能投入而造成的每个组件的性能变化,系数 λ 用于将每个组件的性能参数变化转换为燃料可节省性。

2.2 燃料节省因子的分配效应

燃料节省因子统一表达式中存在 $\xi_{br} = \lambda_7 \Delta \varepsilon^*$ 项,其中 $\Delta \varepsilon^*$ 为燃气轮机排气焓的相对变化。燃气轮机排气被视为连接布雷顿循环和朗肯循环的桥梁。因此,可将 $\lambda_7 \Delta \varepsilon^*$ 写为 ξ_{br} , ξ_{br} 代表由于太阳能引入位置不同而分配给布雷顿循环和朗肯循环的焓变化。由于布雷顿循环的焓效率不同于朗肯循环,在此引入的太阳能焓对于电能的转化效率不同。因此,分配效应可由燃料节省因子统一表达式中的桥接项 ξ_{br} 揭示:分配给布雷顿循环和朗肯循环的总输入(焓)比例因太阳能投入位置不同而异。

分配效应示意如图4所示,其中ISCC系统选取图2中c类为例, E_e^I 、 E_e^C 分别代表在ISCC和CCGT系统中工质从燃料中获得的焓能。在ISCC系统的布雷顿循环中,各主要部件的性能参数降低。原本应经布雷顿循环作用的部分焓(矩形条 E_e^I – E_e^C 部分),由于太阳能投入位置的不同而直接被分配至余热锅炉,并在朗肯循环中转化为电能。 $\eta_{ex,B}^I > \eta_{ex,R}^I$ 表示这部分焓的利用效率相比在布雷顿循环中有所降低,因此,燃料节省因子降低。这种情况下,分配效应揭示了太阳能引入布雷顿循环对燃料节省性的影响。

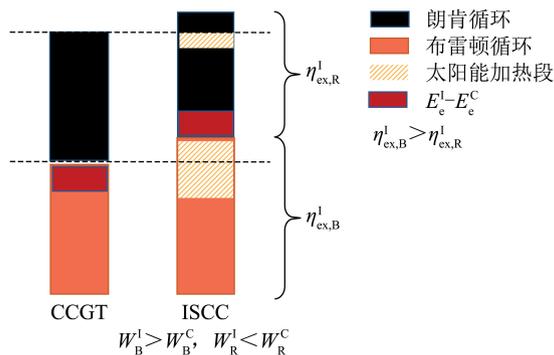


图4 分配效应示意

Fig.4 Schematic of the "allocation effect" in fuel-savability

2.3 燃料节省因子的叠加效应

本课题组前期工作揭示了太阳能-燃煤互补系统的燃料节省因子中存在叠加效应^[24]。本文中该叠加效应概念可进一步推广到ISCC系统中。燃料节省因子的统一表达式(式(39))可转换为基本项 ξ_{ba} 、浮动项 ξ_{fl} 及桥接项 ξ_{br} 之和,即

$$\xi = \xi_{ba} + \xi_{fl} + \xi_{br}, \quad (40)$$

$$\xi_{ba} = \xi_{ba,B} + \xi_{ba,R} = \lambda_1 k_{sol,B}^* + \lambda_4 k_{sol,R}^*, \quad (41)$$

$$\xi_{fl} = \xi_{fl,B} + \xi_{fl,R} = (\lambda_2 \Delta \eta_{ex,CC}^* + \lambda_3 \Delta \eta_{ex,GT}^*) + (\lambda_5 \Delta \eta_{ex,HRSG}^* + \lambda_6 \Delta \eta_{ex,ST}^*). \quad (42)$$

基本项($\xi_{ba} = \xi_{ba,B} + \xi_{ba,R}$)表示太阳能焓对应的基本燃料节省因子。 $\xi_{ba,B}$ 和 $\xi_{ba,R}$ 两项在式(40)和(41)中分别表示为 $\lambda_1 k_{sol,B}^*$ 和 $\lambda_4 k_{sol,R}^*$,存在于布雷顿循环和朗肯循环中。浮动项($\xi_{fl} = \xi_{fl,B} + \xi_{fl,R}$)表示太阳能投入对系统间接影响导致燃料节省因子的浮动性。 $\xi_{fl,B}$ 项为 $\lambda_2 \Delta \eta_{ex,CC}^*$ 与 $\lambda_3 \Delta \eta_{ex,GT}^*$ 之和, $\xi_{fl,R}$ 项为 $\lambda_5 \Delta \eta_{ex,HRSG}^*$ 与 $\lambda_6 \Delta \eta_{ex,ST}^*$ 之和。 $\xi_{fl,B}$ 和 $\xi_{fl,R}$ 在物理上表示由于焓效率变化对每个组件的附加影响。桥接项 ξ_{br} 表示太阳能投入对内部循环之间的间接影响,影响布雷顿循环和朗肯循环的总焓分配。由于本课题组前期研究中太阳能-燃煤互补系统仅包含朗肯循环^[24],而本文研究中ISCC系统包含布雷顿循环和蒸汽朗肯循环,因此在ISCC系统叠加效应中发现关于相关循环之间影响的桥接项。叠加效应表明ISCC系统的燃料节省性能由基本项、浮动项及桥接项叠加构成,共同决定了互补系统的综合性能。

2.4 统一表达式中各项之间关系

燃料节省因子的统一表达式(式(39))可转换为以下形式:

$$\xi = \xi_B + \xi_R + \xi_{br}, \quad (43)$$

$$\xi_B = \xi_{ba,B} + \xi_{fl,B} = \lambda_1 k_{sol,B}^* + (\lambda_2 \Delta \eta_{ex,CC}^* + \lambda_3 \Delta \eta_{ex,GT}^*), \quad (44)$$

$$\xi_R = \xi_{ba,R} + \xi_{fl,R} = \lambda_4 k_{sol,R}^* + (\lambda_5 \Delta \eta_{ex,HRSG}^* + \lambda_6 \Delta \eta_{ex,ST}^*). \quad (45)$$

各项关系示意如图5所示。燃料节省因子 ξ 可视为 ξ_B 、 ξ_R 和 ξ_{br} 之和或 ξ_{ba} 、 ξ_{fl} 和 ξ_{br} 总和。前1组($\xi = \xi_B + \xi_R + \xi_{br}$)将能量转换过程作为分类标准。燃料节省能力由布雷顿循环的燃料节省能力、朗肯循环的燃料节省能力和循环之间的燃料节省能力决定,在每个循环中,燃料节省因子由基本项和浮动项组成(式(44)、(45))。后1组($\xi = \xi_{ba} + \xi_{fl} + \xi_{br}$)以对系统的影响作为分类标准,燃料节省因子由基本项、浮动项及桥接项组成。

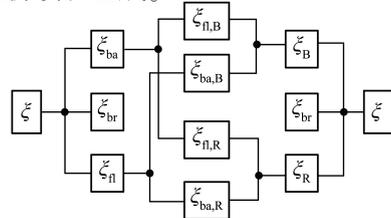


图5 统一表达式各项之间关系示意

Fig.5 Schematic of the relationship between terms in the unified expression of fuel-savability

叠加效应中基本项与浮动项之间的关系如图6所示。投入太阳能后,必然可以节省一部分燃料,因此基本项总是正的($\xi_{ba,B} > 0, \xi_{ba,R} > 0$)。浮动项可正可负,因为引入太阳能对各部件的影响不确定。对于

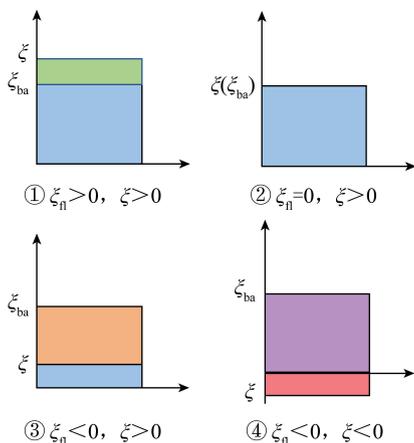


图6 叠加效应示意

Fig.6 Schematic of the "superposition effect" in fuel-savability

2个燃料节省能力有类似情况,可分为4类:①浮动项为正值($\xi_{n,B} > 0, \xi_{n,R} > 0$),燃料节省因子必为正值($\xi > 0$);②浮动项为0($\xi_{n,B} = 0, \xi_{n,R} = 0$),燃料节省因子必为正值($\xi > 0$);③浮动项为负值($\xi_{n,B} < 0, \xi_{n,R} < 0$),燃料节省因子可以为正($\xi > 0$);④浮动项为负值($\xi_{n,B} < 0, \xi_{n,R} < 0$),燃料节省因子也可以为负值($\xi < 0$),这意味着引入太阳能可能导致ISCC系统相对于CCGT系统消耗更多燃料。实际上,大多数情况下,浮动项为负值,因为投入太阳能会导致部件功率偏离额定负载,从而降低焓效率。

2.5 验证燃料节省因子统一表达式

ISCC系统案例计算参数见表2。案例1中的功率增强型ISCC系统将太阳能热能引入朗肯循环中,验证燃料节省因子统一表达式的正确性。根据式(30),ISCC的燃料节省因子可计算为

$$\xi = \frac{\Delta W_B^I + \Delta W_R^I}{\eta_{ex}^C B^C e_{fuel}} = \frac{\Delta W_R^I}{\eta_{ex}^C B^C e_{fuel}} = 0.0550 \quad (46)$$

表2 ISCC系统案例计算参数比较

Table 2 Comparison between various individual cases of ISCC systems

案例	太阳能投入循环	$B^C e_{fuel}/MW$	W^I/MW	ξ_{ba}	ξ_n	ξ_{br}	ξ
1 ^[21]	朗肯循环	691.48	400.0	0.012 1	0.044 3	0	0.056 4
2 ^[25]	布雷顿循环	315.97	160.1	0.015 8	0.151 2	0.002 4	0.169 4

根据统一公式(式(39))计算ISCC的燃料节省因子,该系统的布雷顿循环不受太阳能加入的影响,因此,统一方程可简化为

$$\xi = \lambda_4 k_{sol,R}^* + \lambda_5 \Delta \eta_{ex,HRSG}^* + \lambda_6 \Delta \eta_{ex,ST}^* \quad (47)$$

根据式(47)和表2,计算ISCC系统的燃料节省因子为0.0564。提出的节油性统一表达式与参考值的相对偏差为2.545%,验证了本文工作的正确性。

案例2的ISCC系统将太阳能热能引入布雷顿循环。由于案例2中浮动项 ξ_n 较高导致其燃料节省因子较高。案例1中,太阳能引入朗肯循环,而太阳能对于朗肯循环的影响不能溢出到布雷顿循环,因此案例1的桥接项 ξ_{br} 为0。与之相反,对于案例2,太阳能引入布雷顿循环,进而影响朗肯循环,因此案例2的桥接项 $\xi_{br} > 0$ 。

3 结论

1)基于焓分析提出了ISCC系统统一模型,该模型涵盖了将太阳能集成到布雷顿循环与朗肯循环的不同系统方案。从理论推导得到普适性评价指标——燃料节省因子的统一表达式,包括燃料节省型与功率增强型2种ISCC系统形式,并验证了模型及统一表达式的可靠性与准确性。

2)揭示了燃料节省因子统一表达式中的分配效应,即分配给布雷顿循环和朗肯循环的总输入焓的比例因太阳能投入位置而有条件地变化。

3)课题组前期工作提出的叠加效应在本文得到扩展,即系统总燃料节省因子由基本项、浮动项和桥接项叠加后综合决定。基本项表明太阳能投入带来的直接效益,浮动项代表太阳能投入对系统中每个主要组件的浮动影响,桥接项代表太阳能投入后隐含的循环间影响。

4)本文工作可为光煤互补电站设计及各类燃煤燃气电站的优化改造提供理论指导,能直接或间接减少化石燃料使用,优化化石燃料使用结构。

参考文献(References):

- [1] OMU A, HSIEH S, OREHOUNIG K. Mixed integer linear programming for the design of solar thermal energy systems with short-term storage[J]. Applied Energy, 2016, 180: 313-326.
- [2] MONTES M J, ROVIRA A, MUNOZ M, et al. Performance analysis of an integrated solar combined cycle using direct steam generation in parabolic trough collectors[J]. Applied Energy, 2011, 88:3228-3238.
- [3] KRIBUS A, ZAIBEL R, CAREY D, et al. A solar-driven combined cycle power plant[J]. Solar Energy, 1998, 62: 121-129.
- [4] YANG Y, YAN Q, ZHAI R. An efficient way to use medium-or-

- low temperature solar heat for power generation - integration into conventional power plant [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31: 157-162.
- [5] MANENTE G, RECH S, LAZZARETTO A. Optimum choice and placement of concentrating solar power technologies in integrated solar combined cycle systems [J]. *Renewable Energy*, 2016, 96: 172-189.
- [6] LI Y, YANG Y. Thermodynamic analysis of a novel integrated solar combined cycle [J]. *Applied Energy*, 2014, 122: 133-142.
- [7] DUAN L, WANG Z. Performance study of a novel integrated solar combined cycle system [J]. *Energies*, 2018, 11: 3400-3422.
- [8] SHAABAN S. Analysis of an integrated solar combined cycle with steam and organic Rankine cycles as bottoming cycles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126: 1003-1012.
- [9] WANG S C, FU Z G. Thermodynamic investigation of an integrated solar combined cycle with an ORC system [J]. *Entropy*, 2019, 21: 428-448.
- [10] MONTES M J, ROVIRA A, MUNOZ M, et al. Performance analysis of an integrated solar combined cycle using direct steam generation in parabolic trough collectors [J]. *Applied Energy*, 2011, 88: 3228-3238.
- [11] WANG R L, SUN J, HONG H, et al. Comprehensive evaluation for different modes of solar-aided coal-fired power generation system under common framework regarding both coal-savability and efficiency-promotability [J]. *Energy*, 2018, 143: 151-167.
- [12] HU E, YANG Y P, NISHIMURA A. Solar thermal aided power generation [J]. *Applied Energy*, 2010, 87: 2881-2885.
- [13] ANVARI S, KHOSHBAKHTI Saray R, BAHLOULI K. Employing a new optimization strategy based on advanced exergy concept for improvement of a tri-generation system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 1452-1463.
- [14] WANG S C, FU Z G, SAJID S, et al. Thermodynamic and economic analysis of an integrated solar combined cycle system [J]. *Entropy*, 2018, 20: 313-331.
- [15] LEE M C, CHUNG J H, PARK W S, et al. The combustion tuning methodology of an industrial gas turbine using a sensitivity analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50: 714-721.
- [16] WANG R L, SUN J, HONG H, et al. Comprehensive evaluation for different modes of solar-aided coal-fired power generation system under common framework regarding both coal-savability and efficiency-promotability [J]. *Energy*, 2018, 143: 151-167.
- [17] IORA P, BERETTA G P, GHONIEM A F. Exergy loss based allocation method for hybrid renewable-fossil power plants applied to an integrated solar combined cycle [J]. *Energy*, 2019, 173: 893-901.
- [18] BAGHERNEJAD A, YAGHOUBI M. Multi-objective exergoeconomic optimization of an integrated solar combined cycle system using evolutionary algorithms [J]. *International Journal of Energy Research*, 2011, 35: 601-615.
- [19] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [20] ISHIDA M, KAWAMURA K. Energy and exergy analysis of a chemical process system with distributed parameters based on the enthalpy-direction factor diagram [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21: 690-695.
- [21] MARTIN J R, RODRIGUEZ E B, PANIAGUA I L, et al. Thermoeconomic evaluation of integrated solar combined cycle systems (ISCCS) [J]. *Entropy*, 2014, 16: 4246-4259.
- [22] BAGHERNEJADA, YAGHOUBI M. Exergy analysis of an integrated solar combined cycle system [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35: 2157-2164.
- [23] ZHANG N, DUAN L, HUANG C, et al. Operation strategy and dynamic performance study of integrated solar combined-cycle system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 228: 113716.
- [24] 王瑞林, 孙杰. 基于品位耦合的光煤互补发电系统集成理论分析 [J]. *科学通报*, 2017, 62(22): 2564-2576.
WANG Ruilin, SUN Jie. Comprehensive evaluation for solar-aided coal-fired power generation system based on energy level coupling [J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(22): 2564-2576.
- [25] WANG S C, ZHANG G Q, FU Z G. Performance analysis of a novel integrated solar combined cycle with inlet air heating system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114010.