

太阳能辅助燃煤发电技术经济分析

毛剑, 杨勇平, 侯宏娟, 张楠

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Techno-economic Analysis of Solar Thermal Aided Coal-fired Power Plants

MAO Jian, YANG Yongping, HOU Hongjuan, ZHANG Nan

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The solar aided coal-fired power generation system is one of the trends of the solar thermal applications on a large scale recently. The performance of a solar trough collector aided 330MW plant with part of extraction steam in high-pressure (HP) heaters replaced was analyzed as an example. The design point and typical annual performance of solar aided coal-fired power generation in fuel-saving operation mode was analyzed. The results show that the performance of solar aided coal-fired power generation system is superior to trough solar thermal power unit and the solar to power efficiency can reach 20.41%. On this basis, the economic benefits of the solar aided coal-fired power generation system was analyzed with internal rate of return (IRR) as index by using the fundamental theories of techno-economy, and the main factors which affect the project economy were evaluated quantitatively. The influences of electricity prices, collector prices, fuel prices on IRR were gained.

KEY WORDS: solar energy; trough collector; solar aided coal-fired power generation system; performance analysis; internal rate of return

摘要: 太阳能与燃煤互补发电方式是近年来大规模太阳能热利用的发展方向之一。以槽式太阳能集热系统辅助某330MW燃煤机组替代高加回热抽汽加热给水的互补发电系统为例,对功率不变型互补发电系统的设计点热力性能及年热力性能进行了分析。结果表明,太阳能辅助发电系统的年光电转换效率可达到20.41%,高于单纯槽式太阳能热发电方式。在此基础上,以内部收益率(internal rate of return, IRR)作为评价指标,运用技术经济的基本原理对太阳能辅助燃煤机组互补发电系统的经济性能及其主要影响因素进行了定

量的分析评价,得到了太阳能上网电价、集热器造价、燃料成本等关键因素对内部收益率的影响。

关键词: 太阳能; 槽式集热器; 太阳能辅助燃煤发电系统; 性能分析; 内部收益率

0 引言

我国的电力结构以燃煤机组为主,截至2013年底,我国火电装机比重高达69.2%,其中煤电装机占比91.6%,同时据相关数据显示,火电行业大气污染物排放量占全国大气污染物总排放量的90%以上。因此,以化石燃料为主体的能源结构所带来的资源短缺与环境污染问题日趋严重,且短期内难以改变,故燃煤电站的节能减排具有重要战略意义。

太阳能作为可再生能源技术的首要发展方向之一,已受到越来越多的重视,但现有太阳能热发电的高成本阻碍了其自身发展。将太阳能产生的热量引入常规燃煤电厂,一方面可利用燃煤电站调整范围大、透平系统效率高的优势,节省单纯太阳能热发电所需的大型蓄热和透平系统,大幅度降低太阳能热发电成本,实现太阳能热发电规模化、低成本的开发利用,另一方面也可进一步促进燃煤电站的节能减排。因此,研究高效、规模化的中低温太阳能与常规燃料互补发电技术是近、中期太阳能热发电发展的一个重要突破口。目前有关太阳能与燃煤互补发电的技术已受到广泛的关注^[1-23]。国际上,太阳能集热与燃煤火力发电系统集成最早由澳大利亚的Eric Hu团队提出^[1-3],其利用太阳能热作为辅助热源代替原燃煤机组汽轮机抽汽加热锅炉给水,并以Victoria的一个火力发电站为例做了理论分析。文献[2-13]对太阳能辅助燃煤互补发电的耦

基金项目: 国家自然科学基金项目(51206049); 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050604)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51206049); The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program) (2012AA050604)。

合集成方式进行了研究，结果表明太阳能替代汽轮机回热抽汽加热给水是所有可能方式中最为简单易行且经济性能较好的耦合方式，具有对原热力系统影响小、切换方便等诸多优点。文献[14-15]对直接蒸汽发生器和间接蒸汽发生器(油水换热器)两种形式的太阳能辅助不同容量燃煤发电系统建立仿真模型。文献[15-17]对燃煤机组的容量、运行模式及电网侧负荷对辅助发电系统热力性能的影响进行了静态和动态定量分析。文献[5,18-21]从热力学第二定律的角度，对互补发电系统进行了研究。文献[22-23]对辅助发电系统中太阳集热场的最优集热面积和集热器的最佳工作温度等关键参数的选取展开了研究。文献[23]开展了不同气象条件及运行工况下，太阳能辅助燃煤机组发电系统年性能的优化分析。但是，这些已有的研究大都集中在集成方案比较、案例分析、热力学经济性评估上，缺乏对示范项目的工程实施及投资效益的可行性分析。

本文通过案例，针对功率不变型互补发电系统展开分析，并利用银川地区典型年的气象数据对互补发电系统年热力性能进行计算，剖析了示范项目的投资结构，运用技术经济的基本原理，对太阳能辅助燃煤机组互补发电系统进行了定量的分析评价，以内部收益率、总投资收益率作为技术经济性评价指标，为项目投资决策提供了系统和客观的依据。

1 太阳能辅助燃煤机组集成方案

本文所研究的太阳能辅助燃煤发电系统如图 1 所示。在此系统中，太阳能作为辅助热源，部分或全部替代原燃煤机组的回热抽汽加热锅炉给水，被替代的抽汽留在汽轮机中继续做功，达到增加机组发电功率(功率增大)或减少燃煤消耗(功率不变)的目的。在该系统中，太阳集热系统采用定出口温度模式，因而，其流量会随太阳辐照强度的变化而调整。

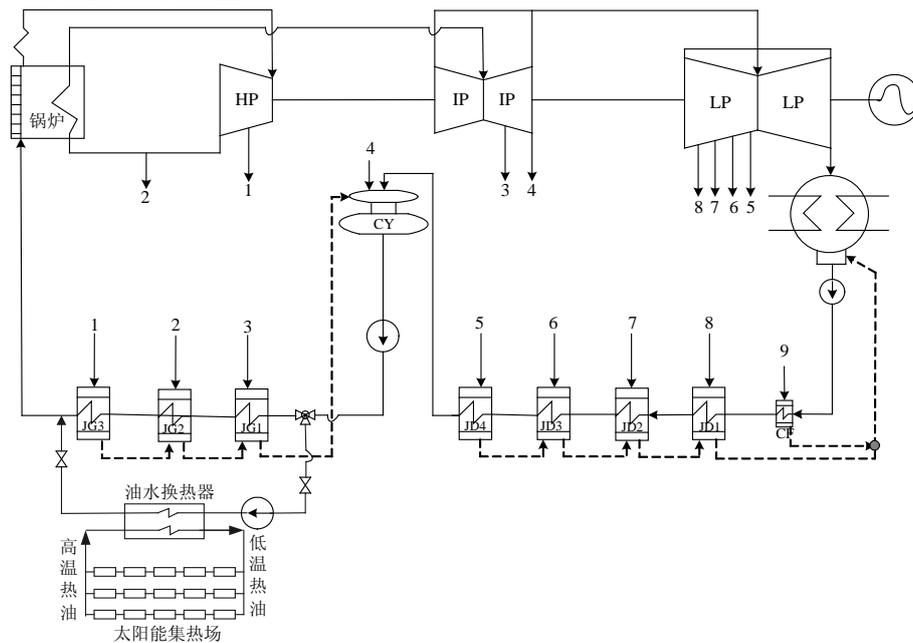


图 1 太阳能辅助燃煤系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Solar aided coal-fired power generation system

2 系统建模

2.1 建模方法简介

太阳能热量的引入必然会引起原有燃煤发电热力系统参数的变化，进而对其热力性能产生影响。在分析过程中，为使计算简化做了如下的假设，假设锅炉为效率不变的黑箱；汽轮机排气压力保持恒定；汽轮机的变工况计算采用改进型弗留格尔(Flugel)公式^[24]。集热场得热量的计算采用文献[25]的方法。在此基础上采用热平衡法对互补发电系统

进行热力学建模分析，得到引入太阳能后系统各参数的分布，进而对互补发电系统开展性能评价。

2.2 互补发电系统评价模型

2.2.1 太阳能光电转换效率

定义太阳能互补发电系统中太阳能光电转换效率为

$$\eta_{se} = \frac{P_s}{Q_{Ld}} = \frac{P_Z - Q_b \cdot \eta_{ref}}{Q_{Ld}} \quad (1)$$

式中： P_s 为集热场输出热量转化为电的发电功率，

kW; Q_{Ld} 为落在集热器上太阳辐射能, kW; P_z 为太阳能辅助燃煤发电系统总发电功率 kW; Q_b 为锅炉热负荷, kW; η_{ref} 为参考燃煤机组的发电效率, %。

2.2.2 标准煤耗率

定义互补发电系统的标准煤耗 b_h^s 为机组的标准煤耗率, 可由式(2)表示:

$$b_h^s = M / W \quad (2)$$

式中: M 为每小时机组的标准煤耗量(标准煤低位发热量为 29, 307 kJ/kg), kg/h; W 为每小时机组的发电功率, kW·h。

2.2.3 节煤率

定义节煤率 Δb 为互补发电系统与单纯燃煤机组标准煤耗率之差, 可由式(3)表示:

$$\Delta b = b^s - b_h^s \quad (3)$$

式中: b^s 为单纯燃煤机组的标准煤耗率, g/(kW·h); b_h^s 为互补发电系统的标准煤耗率, g/(kW·h)。

2.3 技术经济评价模型

技术经济评价的指标是多种多样的, 从不同的角度反映了工程技术方案的经济性。这些指标大致分为 3 类: ①时间作为计量单位的时间型指标, 如投资回收期、借款偿还期等; ②以货币金额表示的价值型指标, 如净现值、净年值等; ③反映资源利用率的效率型指标, 如投资利用率、内部收益率、

投资净现值率等。在项目的投资效益分析中, 一般以财务内部收益率指标为项目的主要盈利性指标, 其他指标可以作为重要的参考依据。财务内部收益率是项目在整个建设生产期内各年的净现金流量现值累计等于零时对应的折现率, 是评价项目盈利能力的动态指标, 可由式(4)表示:

$$\sum_{t=0}^n (C_1 - C_0)_t (1 + I_{RR})^{-t} = 0 \quad (4)$$

式中: C_1 为现金流入量; C_0 为现金流出量; I_{RR} 为内部收益率; $(C_1 - C_0)_t$ 为第 t 年的净现金流量; n 为建设生产期年数。

项目内部收益率(I_{RR})设基准折现率为 I_c , 若 $I_{RR} \geq I_c$, 则项目在经济上可以接受, 即认为项目的盈利能力能够满足要求; 若 $I_{RR} < I_c$, 则项目在经济上不可以接受。对于电力行业基准折现率暂定为: 全部投资的 8%或资本金的 10%。

3 案例分析

3.1 案例介绍

本文以太阳能辅助银川某 330 MW 燃煤机组(其中太阳能发电功率为 10 MW(电))为例, 针对功率不变型互补发电系统展开分析。原燃煤机组的主要参数及银川太阳直射辐射(D_{NI})分布分别示于图 2、3。

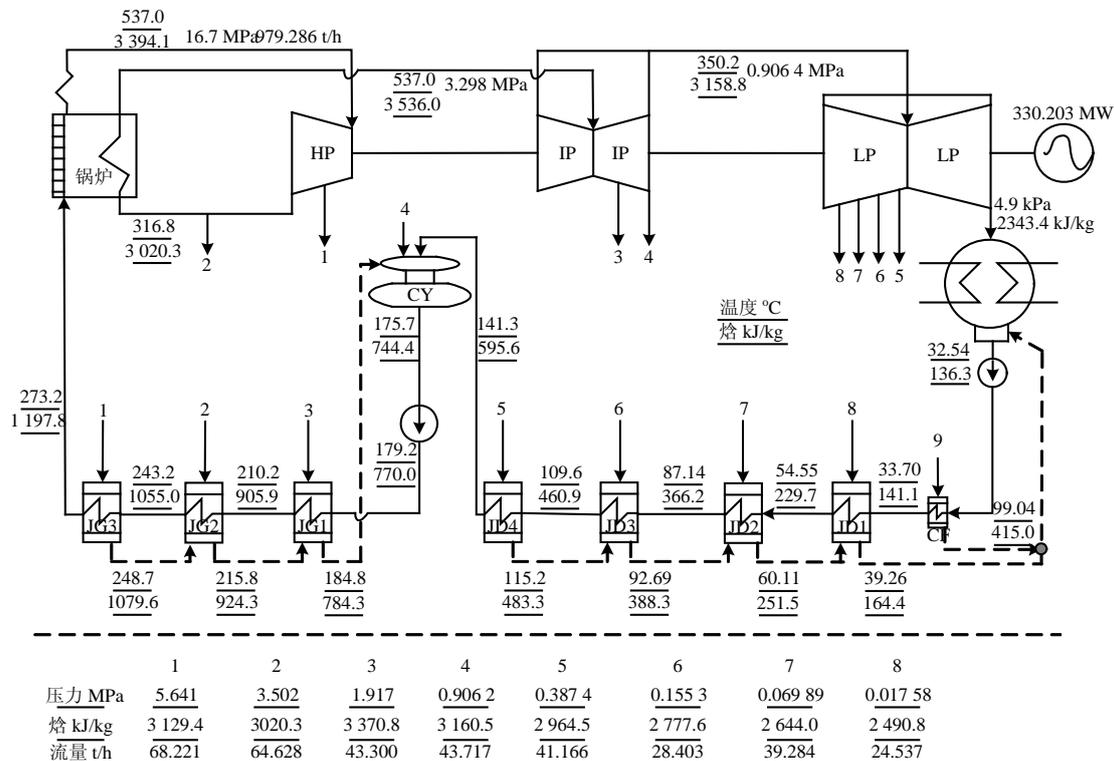


图 2 330 MW 电厂额定负荷热力系统简图

Fig. 2 A diagram of 330 MW power plant thermal system

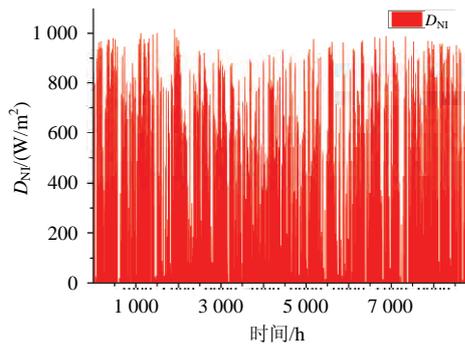


图 3 银川典型年年太阳直射辐射量分布图
Fig. 3 A diagram of typical annual direct solar radiation in Yin Chuan

取夏至日太阳时正午为设计点，此时太阳直射辐射强度(direct normal irradiance, D_{NI})为 800 W/m^2 ，入射角为 5° ，经优化分析，取集热器间距为 15 m ；集热场的进出口温度为 $199.2 \text{ }^\circ\text{C}/293.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ；集热场采用 ET150 典型槽式集热器，南北水平轴单轴跟踪布置；集热场内传热工质为导热油。通过互补系统热性能计算得出在设计条件下，太阳能发电功率为 10 MW 时其所需集热场采光面积为 49049.62 m^2 (由 30 个 loop 组成，每个 loop 包含 2 个集热器模块(solar collector array, SCA)，每个 SCA 采光面积为 817.5 m^2 规格都为 $5.77 \text{ m} \times 141.68 \text{ m}$)。此时其设计点主要参数经热力计算列于表 1。

表 1 太阳能互补发电系统技术方案设计点主要参数

Tab. 1 Main design point parameters of solar assisted coal fired power generation system

参数	数值
互补发电系统输出功率/MW	330.58
太阳能发电功率/MW	10.47
太阳能光电效率/%	23.65
集热场集热效率/%	50.95
发电标准煤耗率/(g/(kW·h))	276.55
节煤率/(g/(kW·h))	7.42

注：由于构成集热场的单位集热器模块面积限制，此处太阳能发电功率与原设定的 10 MW 稍有差异。

利用典型年逐时气象数据^[26]对互补发电系统年热力性能进行计算，结果列于表 2 中。

3.2 技术经济分析

3.2.1 项目总投资分析

项目的总投资主要涉及固定资产投资、建设期利息和流动资金。固定资产主要分为设备购置费、建筑安装费和其他费用 3 大类。鉴于本项目是在原有电厂的基础上进行改造，技术改造部分主要包括两个系统：集热系统和辅助系统。集热系统主要包括集热器、循环泵、集热场定压系统及相关的管路

表 2 太阳能互补发电系统年热力性能

Tab. 2 Typical annual performance of solar assisted coal fired power generation system

参数	数值
全年总体节煤量/(t/年)	3427.9
节煤率/(g/(kW·h))	1.17
互补发电系统平均煤耗/(g/(kW·h))	282.81
设计点太阳能发电规模容量/MW	10.47
年太阳能光电转换效率/%	20.41
典型年 D_{NI} 总量/((kW·h)/(m ² ·年))	1854.26
落在集热器上的年直射辐射量/((kW·h)/(m ² ·年))	1548.4
年平均集热场热效率/%	43.97
年发电量/(kW·h/年)	1.44×10^7
每 kW 初投资/(万元/kW)	0.7633

系统。辅助系统主要是包括相关的消防系统等。除了集热系统和辅助系统的设备购置费用外，投资的主要费用还包括安装工程费用、土地费用和建筑工程费用等，其投资估算如表 3 所示。

表 3 投资估算表

Tab. 3 Investment estimate table

序号	名称	建安费/万元	设备费/万元	其他费用/万元	合计/万元	比例/%
1	小计	3,005	7,636	764	11,405	100
1.1	集热器场	—	7,186	—	7,186	63.01
1.2	换热器	—	250	—	250	2.19
1.3	循环泵	—	200	—	200	1.75
1.4	建筑工程	1,860	—	—	1,860	16.31
1.5	安装工程	1,145	—	—	1,145	10.04
1.6	其他费用	—	—	764	764	6.7
2	预备费	—	—	—	342	—
3	静态投资	—	—	—	11,747	—
4	建设利息	—	—	—	798	—
5	动态投资	—	—	—	12,545	—
6	流动资金	—	—	—	235	—

3.2.2 技术经济指标计算

表 4 列出了技术经济分析所需参数及假设，其中厂用电在原燃煤机组的基础上考虑了集热场自用电部分，根据查阅的资料文献及其他项目运行经验，集热场厂自用电率取 3.8% ^[27]。

技术经济分析如表 5 所示。

表 4 技术经济基本参数表

Tab. 4 Basic parameter table of technical and economic basic

设计年限/年	利率/%	维护成本/(元/m ²)	综合折旧率/%	厂用电率/%	煤炭价格/(元/t)
25	6	50	3.88	3.8	700

表5 技术经济分析表

Tab. 5 Analysis table of technical and economic basic

方案	LEC/ 元/(kW·h)	税后全投资 内部收益/%	税后资本金 内部收益/%	总投资 收益/%	静态投资 回收期/年
功率不变型	0.58	9.05	10.18	6.27	11.2

3.2.3 内部收益率(I_{RR})的敏感性分析

除了辐射强度的影响外，内部收益率(I_{RR})还受到集热器造价、上网电价、燃料成本等因素的影响，本文对此进行了分析，结果示于图4—6，其中上网电价仅对太阳能发电部分进行敏感性分析。可以看出 I_{RR} 随单位集热器成本增大而降低，造价每提高10%，全部投资的内部收益率下降8.2%；此外，IRR随电价、煤价增加而增加，其中电价每提高10%，全部投资的内部收益率提高11.6%；煤价每提高

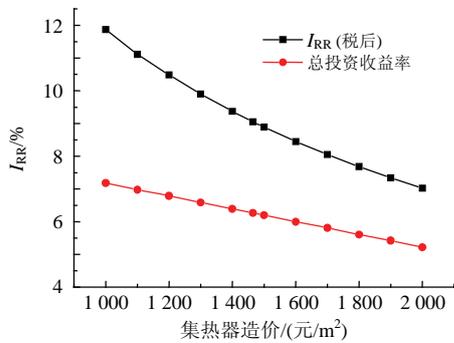


图4 内部收益率(I_{RR})随集热器造价的变化
Fig. 4 Changing of IRR with collector prices

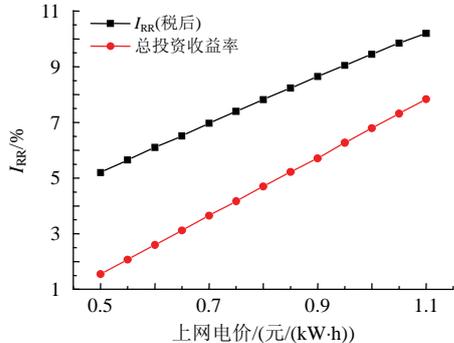


图5 内部收益率(I_{RR})随太阳能电价的变化
Fig. 5 Changing of IRR with electricity prices

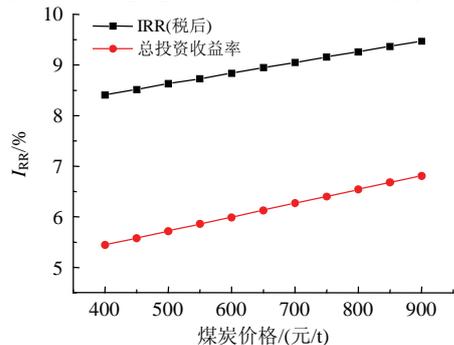


图6 内部收益率(I_{RR})随煤价的变化
Fig. 6 Changing of I_{RR} with coal prices

10%，全部投资的内部收益率提高1.8%。

4 结论

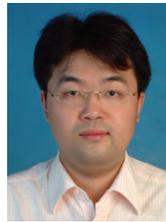
本文针对槽式太阳热能取代330MW燃煤机组高加抽气加热给水的互补发电系统(太阳能发电功率10MW)的热经济性进行分析，得出在此互补发电系统中，年平均太阳能光电转换效率可达20.41%以上，优于单纯太阳能热发电效率。同时，对集热器造价、上网电价、燃料成本等关键因素对项目内部收益率的影响进行了研究，得到了电价和集热器造价分别是影响经济效益的第一和第二敏感性指标。结果表明，积极争取较好的电价政策支持，加强工程造价管理、优化设计，尽可能的降低初期投资，将混合电厂建在辐射条件好、煤价较高的地区，是提高太阳能光热项目的经济效益主要途径。

参考文献

- [1] You Y, Hu E. Thermodynamic advantages of using solar energy in the regenerative Rankine power plant [J]. Applied Thermal Engineering, 1999, 19(11): 1173-1180.
- [2] Hu E, Yang Yongping, Nishimura A, et al. Solar thermal aided power generation[J]. Applied Energy, 2010, 87(9): 2881-2885.
- [3] Hu E, Yang Y, Nishimura A, et al. Solar thermal aided power generation[J]. Applied Energy, 2010: 87(9): 2881-5.
- [4] Yang Yongping, Cui Yinghong, Hou Honjuan, et al. Research on solar aided coal-fired power generation system and Performance Analysis[J]. Science in China Series E: 2008, 51(8): 1211-1221.
- [5] 侯宏娟, 高嵩, 杨勇平. 槽式集热场辅助燃煤机组回热系统混合发电热性能分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1772-1776.
Hou Hongjuan, Gao Song, Yang Yongping. Thermodynamics analysis of coal-fired power generation system aided by parabolic trough collective fields[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(12): 1772-1776(in Chinese).
- [6] 崔映红, 杨勇平, 杨志平, 等. 太阳能辅助燃煤一体化热发电系统耦合机理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 99-104.
Cui Yinghong, Yang Yongping, Yang Zhiping, et al. Coupling mechanism of solar supported coal-fired

- electric generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 99-104(in Chinese).
- [7] 崔映红, 杨勇平, 张明智. 太阳能-煤炭互补的发电系统与互补方式[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 102-107, 2008.
Cui Yinghong, Yang Yongping, Zhang Mingzhi. Solarcoal complementary electric generation system and its modes [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 102-107(in Chinese).
- [8] 崔映红, 陈娟, 杨阳, 等. 太阳能辅助燃煤热发电系统性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23): 92-98.
Cui Yinghong, Chen Juan, Yang Yang, et al. Performance research on solar aided coal-fired electricity generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(23): 92-98(in Chinese).
- [9] Popov D. An option for solar thermal repowering of fossil fuel fired power plants[J]. Solar Energy, 2011, 85(2): 344-349.
- [10] Yan Qin, Yang Yongping, Nishimura A, et al. Multi-point and multi-level solar integration into conventional power plant[J]. Energy Fuels, 2010, 24(7): 3733-3738.
- [11] Yang Y, Yan Q, Zhai R, et al. 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(2/3): 157-62.
- [12] 赵军, 杨昆. 燃煤锅炉集成太阳能热发电系统经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(zl): 93-100.
Zhao Jun, Yang Kun. Economic Analysis of the solar thermal power generation system integrated with a pulverized coal fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(zl): 93-100(in Chinese).
- [13] 赵军, 杨昆. 集成太阳能对燃煤锅炉热力性能影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(23): 98-104.
Zhao Jun, Yang Kun. Research on the thermal performance of a pulverized coal boiler integrated with solar energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(23): 98-104(in Chinese).
- [14] 崔凝, 徐国强, 马士英. DSG 型抛物面槽式太阳能热电站热力系统实时动态仿真模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(11): 1787-1798.
Cui Ning, Xu Guoqiang, Ma Shiyang. Study on real-time dynamic simulation model for DSG parabolic trough solar power station thermodynamic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(11): 1787-1798(in Chinese).
- [15] 阎秦. 太阳能辅助燃煤发电系统热力特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
Yan Qin. Thermodynamic characteristic research on solar aided coal-fired power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011(in Chinese).
- [16] 赵雅文, 洪慧, 金红光. 中温太阳能升级改造火电站的变辐照性能分析[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2): 213-217.
Zhao YaWen, Hong Hui, Jin HongGuang. Off-design performance of repowered coal-fired power plant by low-grade solar heat with varying direct normal solar radiation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2): 213-217(in Chinese).
- [17] Zhao Yawen, Hong Hui, Jin Hongguang. Off-design performance of repowered coal-fired power plant by low-grade solar heat with varying direct normal solar radiation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2): 213-217.
- [18] Suresh M V J J, Reddy K S, Kolar A K. 4-E (energy, exergy, environment, and economic) analysis of solar thermal aided coal-fired power plants[J]. Energy for Sustainable Development, 2010, 14(4): 267-79.
- [19] 侯宏娟, 王梦娇, 杨勇平. 太阳能辅助燃煤发电系统性能的焓方法分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (1): 119-125.
Hou Hongjuan, Wang Mengjiao, Yang Yongping. Exergy evaluation of solar aided coal-fired power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 119-125(in Chinese).
- [20] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87.
Jing Youyin, Bai He, Zhang Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87(in Chinese).
- [21] Peng S, Wang Z, Hong H, et al. Exergy evaluation of a typical 330MW solar-hybrid coal-fired power plant in China. Energy Conversion and Management, 2014(85): 848-855.
- [22] 侯宏娟, 毛剑, 杨勇平, 等. 太阳能辅助燃煤机组发电系统集热温度优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 76-81.

- Hou Hongjuan, Mao Jian, Yang Yongping, et al. Optimization of solar collector working temperature for solar aided coal-fired power generation systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 76-81(in Chinese).
- [23] Hou Hongjuan, Yu Zhenyue, Yang Yongping, et al. Performance evaluation of solar aided feedwater heating of coal-fired power generation (SAFHCPG) system under different operating conditions[J]. Applied Energy, 2013(112): 710-718.
- [24] 沈士一, 庄贺庆, 康松等. 汽轮机原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 130-209.
Sheng Shiyi, Zhuang Heqin, Kang Song, et al. The principle of turbine[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 130-209(in Chinese).
- [25] 於震跃. 槽式太阳能集热场辅助燃煤发电系统的性能分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
Yu Zhenyue. Performance Analysis of trough solar collector field aided coal-fired power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012(in Chinese).
- [26] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Department of Building Science and Technology of Tsinghua University. Meteorological Data Room of Meteorological Information Center of the China Meteorological Administration. Chinese architectural thermal environment special meteorological dataset [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005 (in Chinese).
- [27] Sargent & Lundy LLC Consulting Group. Assessment of parabolic trough and power tower solar technology cost and performance forecasts[R]. Chicago, Illinois: National Renewable Energy Laboratory, 2003.



毛剑

收稿日期: 2014-12-31。

作者简介:

毛剑(1980), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源与节能技术, j_mao@chnng.com.cn。

(责任编辑 王庆霞)