DOI: 10.3901/JME.2019.06.178

基于有机朗肯循环的太阳能驱动冷热电联供系统设计方法及性能分析*

马铭璐 邓帅 赵力 林杉 张莹 倪佳鑫 苏文
(天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室 天津 300350)

摘要: 经济发展与环境污染解耦发展的新模式,促使利用太阳能等可再生能源的冷热电联供系统(Combined cooling heating and power system, CCHP 系统)研究成为热点。针对一种太阳能光热驱动的串联式 CCHP 系统展开研究,系统由槽式集热器(Parabolic trough collector, PTC)、集热环路、储热罐、补燃锅炉、有机朗肯发电循环(Organic rankine cycle, ORC)和溴化锂吸收式制冷循环组成,夏季供冷,冬季供暖,全年供电。提出一套针对系统 PTC 面积、储热罐和补燃锅炉容量的工程设计方法,可分别采用能量利用效率、年值费用和效率与费用的耦合式作为系统的设计指标。基于该方法,针对一个实际建筑,以耦合指标为例,确定出系统关键部件容量,并应用上述三种不同指标,对设计辐射、太阳能保证率和储能比例的敏感程度进行分析。结果表明,为了在设计阶段使三种评价指标达到最优,随着设计辐射量的增加,选取的太阳能保证率也应增加。

关键词: 太阳能; ORC; CCHP; 设计辐射; 设计方法

中图分类号: TK123

Design Method and Performance Analysis of CCHP Driven by Solar Energy and Based on Organic Rankine Cycle

MA Minglu DENG Shuai ZHAO Li LIN Shan ZHANG Ying NI Jiaxin SU Wen

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract: Under the new decoupling development pattern of economic development and environmental pollution, combined cooling, heating and power system (CCHP) using renewable energy sources such as solar energy has become a hot spot. Integrated with solar energy, a CCHP system which can meet cooling load in summer, provide heat in winter and supply electricity throughout the year is investigated. The system contains a parabolic trough collector (PTC) circuit, a heat storage tank, an auxiliary boiler, an organic Rankine cycle (ORC) and an absorption cooling system. A design method to determine the PTC area of the system, the capacity of the storage tank and the backup boiler is proposed, which can choose system energy efficiency, annual total cost or the coupling between efficiency and cost as evaluation criteria. Based on this method combined with a building simulation load, the capacity of the key components is determined using the evaluation criteria of coupling between efficiency and cost as an example. The sensitivity of design radiation, solar energy assurance rate and storage ratio were analyzed by using the above three evaluation criteria. The result shows that, in order to optimize the three evaluation criteria, the solar energy assurance rate should increase as the design radiation increases.

Key words: solar energy; ORC; CCHP; design radiation; design method

0 前言

随着社会经济的发展,化石燃料大量消耗,一方面造成严重污染,另一方面形成能源危机。经济发展与环境污染解耦发展的新模式迫使我们寻找一

种更加清洁的供能模式。太阳能作为一种典型的清洁能源,因其广泛分布、获取自由等特点,成为各国科研人员的研究重点。同时,分布式系统能够独立于集中式能源向建筑供能,因此受到广泛关注。作为分布式能源最常用的一种技术,冷热电联供系统(Combined cooling heating and power system, CCHP)是基于能量梯级利用原则,可同时产生冷、热、电的多联供系统。此外,它可以通过太阳能等可再生能源的接入,降低对一次能源和大电网的依

* 国家海洋经济创新发展示范(舰船余热驱动冷热电淡水多联供设备开发与测试公共服务平台)和天津市科技支撑计划(15ZCZDZX01030)资助项目。20180318 收到初稿,20181109 收到修改稿

赖^[1], 缓解用电高峰, 灵活独立。

热电冷联合有机朗肯循环(Combined cooling heating and power-organic rankine cycle, CCHP-ORC)系统是利用低温有机朗肯循环进行发电的冷热电联供系统。系统设计方面, 洪光等^[2]构建了内置热泵的CCHP-ORC系统, 得到了给定条件下系统最佳工作参数, 与外置热泵的CCHP-ORC相比, 系统能量利用率更高。AL-SULAIMAN等^[3]提出了用辛烷为工质以ORC为原动机的CCHP系统, 考虑将储能设备加入其中, 对低辐照强度、强辐照强度和夜晚三种模式的净发电功、电热比、电冷比和三联供效率进行研究, 得出低辐照模式下效率和发电量最大, 膨胀机进口压力对机组性能影响小等结论。此外, 在系统优化方面, 国内外学者也进行了大量的研究。HAJABDOLLAHI^[4]研究了一个以内燃机为原动机的CCHP系统的优化, 针对无储热无储冷、储热、储冷、储热加储冷四种情况进行研究, 得出储热加储冷模式下收益情况最佳, 年收益率分别较无储热无储冷、储热、储冷三种模式提高了9.48%、5.19%和2.23%。曾蓉等^[5]基于多种群遗传算法, 得出三联供-地源热泵耦合系统与分供系统相比, 一次节能率、二氧化碳减排比、年总成本节省率和整体效率分别是26.10%、35.02%、15.13%和25.42%的结论。BOYAGHCHI等^[6-8]研究了带储能的, 用真空管太阳能集热器的三联供系统, 系统采用ORC进行发电, 采用喷射式循环制冷, 用CuO纳米流体作为集热环路中的介质, 前后分别研究了7种工质各自的优势。WANG等^[9]针对一个利用太阳能平板集热器收集太阳能, 结合ORC发电和喷射式制冷的CCHP系统进行了优化研究, 分别得出发电模式、电冷模式和电热模式下的平均有用能输出和总换热面积的最优值。

然而, 针对太阳能驱动的CCHP-ORC系统如何在设计环节确定出太阳能集热器面积和储热罐容量等关键设备大小的问题, 目前的研究还存在欠缺。现有文献多数针对能量转换侧的参数进行系统优化, 很少考虑能量供应侧参数变化。在集热器面积设计环节, 已有文献大多将集热器供能量直接等于系统负荷, 即集热器供能与系统总负荷需求热之比为1; 而文献[10]通过ORC年平均输出的0.5倍计算镜场和储热, 即比值取0.5, 没有考虑该比值变化对系统性能的影响。此外, 文献中设计辐射量都取定值, 补燃锅炉容量根据最大供能量计算, 且没有明确给出储热罐容量确定方法。针对以上问题, 本文基于一个由槽式集热器(Parabolic trough collector, PTC)、储热罐、补燃锅炉、ORC循环、溴化锂吸收

式制冷系统和供热系统组成的CCHP串联系统, 引入了太阳能保证率和储能比例的概念, 提出了确定系统集热器面积、储热罐和补燃锅炉容量的方法, 给出流程图, 结合建筑负荷模拟情况进行了案例分析, 最后对设计辐射、太阳能保证率和储能比例进行了敏感性分析。

1 CCHP系统描述

本文所描述的串联式冷热电联供系统由槽式集热器、储热器、补燃锅炉、ORC发电系统、单效溴化锂吸收式制冷系统和供热系统几部分组成。如下图1, 经由抛物槽式太阳能集热器加热后的导热油先将多余部分能量储存于储热罐, 再流经发电环路中的蒸发器, 将热量释放给有机工质使其吸热蒸发成过热蒸气, 从而在膨胀机中做功发电。经过膨胀机后的有机工质仍然有较高温度, 因此在冬天可以利用此部分乏气与水直接换热进行供暖, 夏天利用冷凝器中的高温冷却水驱动单效溴化锂吸收式机组为建筑提供冷负荷。辐照量大时, 多余热量进储热罐, 辐照强度不够时可利用储热罐中的热量, 并且可以打开补燃锅炉为系统供能。

图1 以 PTC 和 ORC 为特征的 CCHP 系统图

2 模型建立

2.1 PTC 模型

槽式集热器具有加工简单, 成本低, 效率高等特点。本文采用 PTC 集热器, 模型如下^[11]

$$Q_s = A \cdot E_d \cdot \cos \theta \cdot \eta \quad (1)$$

$$\eta = (0.768 \pm 0.013) \cdot K(\theta) \cdot F_c -$$

$$\frac{(26 \pm 5) \cdot \Delta T + (8.5 \pm 1.6) \cdot 10^{-7} \cdot \Delta T^4}{409.908 E_d \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

$$\Delta T = \bar{T}_{\text{abs}} - T_{\text{abm}} \quad (3)$$

式中, Q_s 表示太阳能集热量; A 为集热器面积; E_d 为法向直射辐射强度; θ 为太阳光入射方向与反射面张口平面法线的夹角; η 为集热器效率; $K(\theta)$ 为入射角修正系数, 取 0.95; F_c 为洁净系数, 取 0.967; $\bar{T}_{\text{abs}}$ 与 T_{abm} 分别为集热器中平均流体温度与环境温度。

2.2 基于 ORC 的冷热电联供模型

CCHP 系统中的 ORC 发电模型如下

$$\eta_p = \frac{h_{10s} - h_9}{h_{10} - h_9} \quad (4)$$

$$\eta_t = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8s}} \quad (5)$$

$$W_t = \dot{m}_r (h_7 - h_8) \quad (6)$$

式中, η_p 和 η_t 分别表示泵和膨胀机的等熵效率; W_t 表示膨胀机功率; $\dot{m}_r$ 表示工质质量流量; h 代表图 1 中各点对应的焓值。

$$Q = KF \Delta t_m \quad (7)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln(\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min})} \quad (8)$$

式中, Q 是换热器中的换热量; K 是换热系数; F 是换热器面积; Δt_m 代表对数传热温差; $\Delta t_{\max}$ 和 $\Delta t_{\min}$ 分别代表换热器两端流体换热温差的极大值与最小值。

经过膨胀做功的工质仍有较高的温度, 因此将此部分能量利用起来, 冬天直接与来自用户侧的水换热, 以暖气形式供热; 夏天需要冷负荷, 可利用系统的高温冷凝水驱动溴化锂吸收式制冷机组提供冷量。

$$COP = \frac{Q_c}{Q_{\text{con}}} \quad (9)$$

式中, Q_c 表示制冷量; Q_{con} 表示冷凝热量。

2.3 评价指标

能量利用率代表了系统的整体输出与进入系统的能量之间的比值。

$$\eta_h = \frac{E + Q_c + Q_h}{Q_s + Q_b} \quad (10)$$

式中, η_h 代表 CCHP 系统的能量利用率; E 、 Q_c 和 Q_h 分别代表了系统的发电量、制冷量以及制热量;

Q_s 和 Q_b 分别表示太阳能输入量以及补燃锅炉燃烧天然气的热量。

本文采用年值法作为经济性指标, 即将设备在其生命周期中的总投资按照一定的折现率换算成等额年值, 包括初投资和运行费用两方面。

$$IC = \sum_{k=1}^l N_k IC_k \quad (11)$$

式中, IC 为 CCHP 系统总体投资, N_k 为第 k 个设备的安装容量, IC_k 为第 k 个设备的单位容量投资, l 为设备总数。

$$OC = F_{ik} \times c_f \quad (12)$$

式中, OC 为系统总运行费用, F_{ik} 为每小时天然气消耗量, c_f 为天然气价格。

$$ATC = R \times IC + \sum_{j=1}^{8760} OC \quad (13)$$

式中, ATC 为费用年值; R 为投资回收系数。

$$R = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (14)$$

式中, i 为年利率, n 表示设备使用年限。

引入综合评价指标 γ , 由于费用年值的数量级很大, 而能量利用率仅为小于 1 的数, ATC 需乘以系数 β , 将其转化到与 η_h 相同的数量级下。由于系统设计时希望能量利用率最大, 费用年值最小, 因此其中的 η_h 取负值, 即综合指标最小值为优。综合评价指标如下

$$\gamma = \beta \cdot ATC - \eta_h \quad (15)$$

本文中确定 CCHP 系统的部件容量方法如图 2 流程所示。基于该流程, 可通过改变太阳能保证率和储能比例得到系统最优配置。

3 案例分析

本文中的建筑选取位于天津滨海新区的天津大学滨海工业研究院 3 号楼。结合天津气象情况, 其中每年的 11 月至次年 2 月供暖, 6 月至 8 月供冷, 其余过渡季节只有电负荷, 由于是办公型建筑, 只有在周一至周五 7:00~19:00 有负荷, 其余时间负荷为零。假设每天的电负荷变化情况相同, 利用 TRNSYS 软件模拟出该建筑全年 8760 小时的负荷情况。结合本案例中经济性参数数量级, 系数 β 取 10^{-6} 。系统参数见表 1, 设备投资详见表 2^[12-16], 燃气价及其他经济性参数见表 3。

图 2 流程图

表 1 系统参数

项目	参数
设计辐射/(W/m ²)	550
太阳能保证率	0.4
储能比	0.3
供热效率	0.9
ATC 转换系数	10 ⁻⁶
COP	0.7
工质	甲苯
过热度/℃	10
蒸发温度/℃	220
冷凝温度/℃	110
导热油 T-62 进口温度/℃	250
膨胀机等熵效率	0.85
膨胀机发电效率	0.9
泵等熵效率	0.6
蒸发器过冷段换热系数/[W/(m ² ·K)]	450
蒸发器两相区换热系数/[W/(m ² ·K)]	900
蒸发器过热段换热系数/[W/(m ² ·K)]	240
冷凝器两相区换热系数/[W/(m ² ·K)]	800
冷凝器过热段换热系数/[W/(m ² ·K)]	300
暖气进回水温度/℃	60, 80
冷却水进出口温度/℃	30, 90

表 2 设备投资

设备	投资/元
聚焦式槽式太阳能集热器/m ²	800
储热罐/kW	230
补燃锅炉/kW	300
冷凝器	1 020(A _{con}) ^{0.8}
蒸发器	1 875(A _{con}) ^{0.8}
膨胀机	17.93+9.83lg(W _t)-1.21[lg(W _t)] ²
发电机	408(W _t) ^{0.95}
泵	23 800(W _p) ^{0.41}
溴化锂吸收式制冷机组/kW	1 200

表 3 燃气价及其他经济性参数

项目	参数
燃气价格/(元/(N·m ³))	3.25
年利率(%)	4
使用年限/年	20

4 结果与讨论

4.1 系统容量确定

选取冬至夏至两个典型日, 由于冬至是周六无负荷, 因此顺延到下一个周一, 即 12 月 24 日。这两天的逐时负荷情况如图 3a 所示, 其中纵坐标表示对应负荷所需要的热量。可以看到夏季典型日最大热量需求出现在 15 点, 冬季最大热量需求出现在 9 点, 图 3b 展示了这两个时刻各自的冷热电负荷以及对应负荷所需的驱动热量。纵轴左侧是夏季典型日的情况, 纵轴右侧是冬季典型日的情况。夏季下午气温高, 因此这两天中的最大负荷驱动热量 Q_A 发生在夏至日下午 3 点, 为 3 200.84 kW。后面的设计均以 6 月 21 日为基础。

(a) 典型日热量需求分布图

(b) 平衡测算图

图3 典型日各刻冷热电负荷对应的热量需求

天津地区全年的法向直射辐射如图 4 所示, 本文设计辐射选取 6 月 21 日下午 3 点对应的法向直射辐射 550 W/m^2 , 入射角余弦值取 1。根据流程图方法, 设计时可选择不同的评价指标, 本案例以综合指标为例, 为了使 γ 最小, 太阳能保证率 u 和储能比 w 见表 1, 分别取 0.4 和 0.3, 对两参数取值的讨论详见 4.2 节。CCHP 的运行策略主要包括以电定热和以热定电两种^[17], 本文中选用以电定热策略。将求得的 PTC 面积下的 6 月 21 日逐时集热量与当天的负荷驱动热进行对比, 见图 5。图中阴影部分表征集热量大于需求量。本文采取削峰填谷策略^[18], 将多余集热量存入储能设备, 集热量小于需求热时放出能量, 其余部分用天然气为燃料的补燃锅炉供

能。最大差异值发生在 18 时, 结合流程图的方法, 确定出储热罐容量以及补燃锅炉容量。

图4 天津典型年法向直射辐射

图5 典型日下负荷需求热与 PTC 集热量对比图

针对前面确定出的设备容量进行全年校核, 见图 6。图的下侧选取了全年每个月中的最大负荷所对应的需求热。由于 3~5 月, 9~10 月为过渡季, 因此只有电负荷。此外, 由于每天的电负荷变化趋势相同, 因此每个月最大负荷中电负荷数值相同。全年中负荷最大值出现在 6 月 19 日下午 2 点, 冷负荷 2 505.79 kW, 电负荷 247.09 kW, 对应的总需求热为 3 854.24 kW。同时由图 6 可以看出, 热量需求夏季大于冬季, 过渡季节最小。供应侧由补燃锅炉

图6 全年供需校核图

供能、储能放能和 PTC 直供三部分组成。其中 PTC 供给量最大和最小发生在 6 月和各个过渡季节，分别是 733.92 kW 和 274.54 kW；由于过渡季节只有电负荷，太阳能收集的热量足够满足需求，不需要储能和锅炉；补燃量最大发生在 6 月，由于夏季总需求热较多，太阳能法向直射辐射与冬季相差不大，因此夏季的补燃锅炉量明显高于冬季，平均每个月是冬季的 2.13 倍。经过全年的校核，确定出系统的容量以及其他参数，如表 4 所示。

表 4 系统容量以及其他参数

项目	参数
集热器面积/m ²	3 739.58
储热器容量/kW	555.38
补燃锅炉容量/kW	2 564.94
蒸发器面积/m ²	122.74
冷凝器面积/m ²	58.38
年运行费用/万元	37.65
设备初投资/万元	802.50
费用年值/万元	96.70
能量利用率(%)	85.57
综合评价指标(%)	11.13

4.2 参数敏感性分析

由图 4 可以看出天津的直射辐射变化情况，因此本文按照表 5 的范围和步长依次改变参数，研究设计辐射量、太阳能保证率和储能比的变化对系统各评价指标的影响。太阳能保证率为 0 表示系统能量全部由补燃锅炉燃烧天然气提供；太阳能保证率为 1 表示设计系统时，设计日最大负荷都由太阳能提供。

表 5 研究变量，变化范围以及变化步长

变量	开始	终止	步长
设计辐射/(W/m ²)	400	900	50
太阳能保证率	0	1	0.1
储能比	0	1	0.1

以设计辐射 550 W/m²，太阳能保证率 0.4 为例，改变储能比，系统的能量利用率、年值费用和综合指标分别按图 7 所示进行变化。当储能比到达 0.3 以后，各指标不再变化，这是因为程序中设定：储热罐容量上限为最大太阳能剩余量，当通过储能比确定的储热罐容量大于这一值时，设备容量不再改变。因此，设计辐射和太阳能保证率一定，而变储能比的情况下，各指标的最优值在 w 为 0.3 时取得。下面即将讨论的图 8~10 是在图 7 基础上，不展示出储能比 w 的情况，每个点都表示变化 w 得到的最优值。

图 7 550 W/m² 设计辐射和 0.4 太阳能保证率下，能量利用率随储能比 w 的变化

图 8 中每个点代表设计辐射量和太阳能保证率 u 不变，改变储能比的情况下得到的最大能量利用率的数值。由图可以看出，同一设计辐射量下的能量利用率呈现先增大后减小的趋势，要想取得最大的能量利用率，随着选择的设计辐射量的增加，太阳能保证率也需要增加。随着设计辐射量的增大，能量利用率对太阳能保证率的敏感程度降低。在研究的几种设计辐射中，400 W/m² 的变化范围最大，从 36.27%~85.13%；900 W/m² 的变化范围最小，从 75.67%~85.36%。各个设计辐射量下能量利用率的极大值以及所对应的太阳能保证率和储能比见表 6。

图 8 设计辐射和太阳能保证率与能量利用率的变化

图 9 中每个点代表设计辐射量和太阳能保证率 u 不变，改变储能比的情况下得到的最小 ATC 值。同一设计辐射量下的点连成线可以看出，ATC 呈现先减小后增大的趋势，要想取得最小的费用年值，随着设计辐射量的增加，太阳能保证率也需要增加。各个设计辐射的最优 ATC 都在 92 万元左右，最高可到达 140 万元以上。不同 ATC 的最优值以及所对应的太阳能保证率和储能比见表 6。

表 6 各设计辐射量下最优指标及其对应的 u 、 w 值

设计辐射/ (W/m^2)	能量利用率 η_h			年值费用 ATC			综合指标 γ		
	值(%)	u	w	值/万元	u	w	值	u	w
400	85.13	0.3	0.3	91.73	0.5	0.7	0.110 4	0.3	0.3
450	85.36	0.3	0.3	91.63	0.5	0.6	0.116 4	0.4	0.4
500	85.00	0.3	0.3	91.60	0.6	0.6	0.110 4	0.4	0.4
550	85.57	0.4	0.3	91.70	0.6	0.6	0.111 3	0.4	0.3
600	85.36	0.4	0.3	91.56	0.7	0.6	0.111 7	0.5	0.4
650	85.09	0.4	0.3	91.67	0.8	0.7	0.110 2	0.5	0.3
700	85.61	0.5	0.3	91.57	0.8	0.6	0.113 4	0.6	0.4
750	85.36	0.5	0.3	91.60	0.9	0.6	0.110 4	0.6	0.4
800	85.14	0.5	0.3	91.59	0.9	0.6	0.110 4	0.6	0.3
850	85.56	0.6	0.3	91.57	1	0.6	0.111 2	0.7	0.4
900	85.36	0.6	0.3	91.63	1	0.6	0.110 1	0.7	0.3

图 9 设计辐射和太阳能保证率与 ATC 的变化

图 10 中每个点代表设计辐射量和太阳能保证率 u 不变, 改变储能比的情况下得到的最小综合指标值 γ 。将能量利用率和费用年值化在同一数量级下, 因此综合指标是一个小于 1 的数。同一设计辐射量下的点连成线可以看出, γ 呈现先减小后增大的趋势, 随着设计辐射量的增加, 每条线最小 γ 点对应的太阳能保证率增加。各 γ 最优点以及对应的太阳能保证率和储能比见表 6。

图 10 设计辐射和太阳能保证率与综合指标的变化

表 6 展示了三种指标最优值对应的太阳能保证率和储能比。可以看出, 不同设计辐射下的能量利用最大值都在 85% 左右, 年值费用最小值在 92 万元左右, 综合指标最小值在 0.11 左右。可以看出, 最优能量利用率对应的 u 与 w 普遍低于取得最优经济性能对应的 u 与 w 。本文根据设计日最大负荷时刻的辐射量作为设计辐射量, 太阳能保证率以及储能比的选择满足了综合指标 γ 的最优。

5 结论

提出一种确定太阳能冷热电三联供系统中 PTC 集热器面积、储热罐和补燃锅炉容量的方法, 可用于 CCHP-ORC 系统设计中。基于此方法, 文章根据建筑负荷进行了案例分析, 并得到如下结论。

(1) 所提方法可结合当地的气象数据以及建筑负荷情况, 选择不同评价指标, 确定出最优的太阳能保证率以及储能比例, 从而得到系统各部分容量, 具有普适性。

(2) 为了使系统能量利用率达到最大值, 设计辐射越大, 太阳能保证率应越大; 并且随着选取的设计辐射量增大, 系统能量利用率对于太阳能保证率的敏感度降低。

(3) 为了使年值费用达到最小值, 设计辐射越大, 太阳能保证率应越大; 并且其对应的太阳能保证率和储能比例大于其他两种指标最优时对应的值。

(4) 为了使效率与费用耦合的综合指标达到最小值, 设计辐射越大, 太阳能保证率应越大。

参 考 文 献

- [1] 苏亚欣, 费正定, 杨翔翔. 太阳能冷热电联供分布式能源系统的研究[J]. 能源工程, 2004, 5: 24-27.
SU Yaxin, FEI Zhengding, YANG Xiangxiang. Investigation on the distributed energy system for cooling-heating-power combined cycle driven by solar energy[J]. Energy Engineering, 2004, 5: 24-27.
- [2] 洪光, 张新铭, 李建军. 内置热泵的热电冷联合有机朗肯循环能效分析[J]. 合肥工业大学学报, 2012, 35(10): 1297-1301.
HONG Guang, ZHANG Xinming, LI Jianjun. Thermodynamic analysis of combined cooling heat and power-organic rankine cycle system installed with heat pump[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2012, 35(10): 1297-1301.
- [3] AL-SULAIMAN F A, HAMDULLAHPUR F, DINCER I. Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production[J]. Renewable Energy, 2012, 48: 161-172.
- [4] HAJABDOLLAHI H. Evaluation of cooling and thermal energy storage tanks in optimization of multi-generation system[J]. Journal of Energy Storage, 2015, 4: 1-13.
- [5] ZENG R, LI H, LIU L, et al. A novel method based on multi-population genetic algorithm for CCHP-GSHP coupling system optimization[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 105: 1138-1148.
- [6] BOYAGHCHI F A, CHAVOSHI M, SABETI V. Optimization of a novel combined cooling, heating and power cycle driven by geothermal and solar energies using the water/CuO (copper oxide) nanofluid[J]. Energy, 2015, 91: 685-699.
- [7] BOYAGHCHI F A, HEIDARNEJAD P. Thermoeconomic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on organic rankine cycle for domestic application[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 97: 224-234.
- [8] BOYAGHCHI F A, MONTAZERINEJAD H. Multi-objective optimisation of a novel combined cooling, heating and power system integrated with flat plate solar collectors using water/CuO nanofluid[J]. International Journal of Exergy, 2016, 21(2): 202-238.
- [9] WANG M, WANG J, ZHAO P, et al. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating and power system driven by solar energy[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 289-297.
- [10] GARG P, OROSZ M S, KUMAR P. Thermo-economic evaluation of ORCs for various working fluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 841-853.
- [11] VALENZUELA L, L PEZ-MART N R, ZARZA E. Optical and thermal performance of large-size parabolic-trough solar collectors from outdoor experiments: A test method and a case study[J]. Energy, 2014, 70: 456-464.
- [12] WANG J, ZHAI Z, JING Y, et al. Influence analysis of building types and climate zones on energetic, economic and environmental performances of BCHP systems[J]. Applied Energy, 2011, 88(9): 3097-3112.
- [13] WANG J J, JING Y Y, ZHANG C F. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1325-1335.
- [14] BOYAGHCHI F A, CHAVOSHI M. Multi-criteria optimization of a micro solar-geothermal CCHP system applying water/CuO nanofluid based on exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental concepts[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 660-675.
- [15] EL-EMAM R S, DINCER I. Exergy and exergoeconomic analyses and optimization of geothermal organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 59(1-2): 435-444.
- [16] PIEROBON L, NGUYEN T V, LARSEN U, et al. Multi-objective optimization of organic Rankine cycles for waste heat recovery: Application in an offshore platform[J]. Energy, 2013, 58(3): 538-549.
- [17] WANG Jiangjiang, ZHAI Zhiqiang, JING Youyin, et al. Particle swarm optimization for redundant building cooling heating and power system[J]. Applied Energy, 2010, 87(12): 3668-3679.
- [18] 黄畅, 侯宏娟, 丁泽宇, 等. 太阳能辅助燃煤发电系统蓄热运行策略优化[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(3): 453-458.
HUANG Chang, HOU Hongjuan, DING Zeyu, et al. Optimization of storage operation strategy for solar aided coal-fired power generation (SACPG) System[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(3): 453-458.

作者简介: 马铭璐, 女, 1994 年出生。主要研究方向为 CCHP 系统设计。
E-mail: maminglu_zoe@tju.edu.cn
赵力(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为太阳能光热利用。
E-mail: jons@tju.edu.cn