

槽式太阳能直接蒸汽发生系统的热力特性研究

楚攀^{1,2}, 白凤武¹, 黄长华², 陈澜²

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]研究典型的槽式直接蒸汽循环系统的热力性能, 给出该系统的结构组成和主要性能参数。针对 DSG 系统的两相区复杂的换热问题, 结合两相区的实际流型, 考虑分层现象对实际换热过程的影响, 更加准确地对两相区的换热过程进行模拟研究。[方法]基于槽式集热器内的流动型态, 建立槽式集热两相区内的传热模型, 利用 Matlab 编程, 针对槽式集热器内的 DSG 过程进行模拟。[结果]揭示了 DSG 技术沿着管长方向的换热特性变化规律, 分层现象大约出现在两相流区域干度为 0.7~0.8 之间的位置, 分层现象的出现降低了管内工质与金属管管壁之间的对流换热系数, 减弱了换热效果。[结论]该研究为 DSG 电站的设计和运行提供了参考依据, 验证了 DSG 集热场的最佳布置方式为再循环式。

关键词: 槽式; 直接蒸汽发生系统; 两相区; 再循环式; 聚光太阳能热发电

中图分类号: TK519; TK513

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0086-06

Thermal Performance Analysis of a Parabolic Trough DSG System

(CHU Pan^{1,2}, BAI Fengwu¹, HUANG Zhanghua², CHEN Lan²)

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] In this paper, the thermal performance of a parabolic trough direct steam generation system (DSGS) is investigated. With the considerations of the stratified flow phenomenon and real flow patterns in the complex two-phase flow, the heat transfer progress in the DSG system is numerically studied, and the thermodynamic performances are revealed. [Method] Based on the flow pattern inside the trough collector, the two-phase heat transfer model in the trough-type heat collecting region was established, and the DSG process in the trough collector was simulated by MatLab programming. [Result] The variation of heat transfer characteristics of DSG technology along the length of the tube is revealed. The stratification phenomenon occurs in the two-phase flow region where the dryness is between 0.7 and 0.8. The occurrence of delamination reduces the heat transfer between the working medium and metal tube, which weakens the heat transfer effect. [Conclusion] This study provides a reference for the design and operation of DSG power stations, and verifies that the optimal arrangement of DSG collectors is recirculating.

Key words: parabolic troughs; direct steam generation; two-phase region; recirculation; concentrating solar power

槽式太阳能集热技术是目前太阳能热利用中商业化程度最高的利用形式。在太阳能热利用过程中, 传热工质的类型对系统的设计、运行和维护都有重要影响。目前在太阳能光热发电行业最常用的导热介质有熔融盐, 高温导热油以及水。相比导热

油和熔盐集热技术, 以水为传热介质的直接蒸汽槽式太阳能集热技术(Direct Steam Generation, 以下简称 DSG)的突出优点正日益受到重视。

针对该技术的热力过程特性的模拟和实验探究正逐步开展。

Zarza 等^[1]完成了对 5 MW 准商业化 DSG 电站性能进行了分析, 并建立了集热过程的水动力稳态供了重要依据。

S. D. Odeh 等^[2]对 DSG 集热技术的模型, 模拟了集热器内的流型分布和压力损失, 结果表明:

DSG 集热管沿管程的压力损失只有同等的性能模拟, 为建立 DSG 技术太阳能热发电站提边界条件下导热油技术的一半。德国宇航中心 M. Eck 等^[3]模拟了太阳能集热场的性能, 利用编程模拟等方式开发了 DSG 集热技术的研究工具。另外, Feldhoff 等人^[4]分析了 DSG 技术的经济性能, 结果表明其经济成本相比导热油 SEGS 电站成本可以下降 11%。在 DSG 电站关键部件改进以及小型示范性电站系统研究上, 西班牙和德国的相关研究机构取得了有益的成果^[5], 并建立了基于 INDITEP 和 DISS 技术的小型示范电站和相关的实验台, 为 DSG 电站的商业化运行提供了重要依据。

由于直接采用水作为传热工质, DSG 电站系统运行中涉及复杂的两相流动过程, 两相流动的不稳定性使得系统的研究也更加困难。目前对 DSG 对应相变过程的研究大都采用近似模拟的方法, 忽略两相区内分层等现象对流动换热过程的影响, 导致模拟结果和实际流动形态有一定的偏离。为避免这一问题, 本文研究了典型的槽式 DSG 热力发电系统的太阳能岛的热力性能, 在对两相区内热力特性进行的过程中, 考虑了分层现象对流动换热过程的影响, 模拟结果相对原有结果有一定的修正, 能够更好反映流型变化对换热的影响, 研究结果为 DSG 集热场的设计、运行提供了优化方案。

1 槽式 DSG 系统设计

槽式直接蒸汽热发电 (DSG) 技术采用水替代最为普遍的导热油作为工作介质, 水在给水泵的作用下进入太阳能集热场, 吸收投射在集热管上的太阳能依次经过预热、蒸发和过热过程变成高温高压水蒸汽, 之后进入动力子系统做功发电。之后, 乏汽进入冷凝器、除氧器在被泵入到太阳能集热场进行下一个吸热-发电循环。流程示意如图 1 所示。

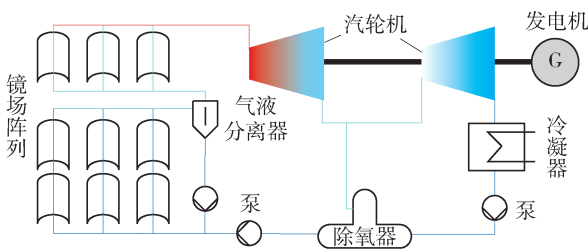


图 1 DSG 槽式太阳能热发电示意图

Fig. 1 Parabolic trough direct steam generation system

2 槽式 DSG 系统性能模拟

2.1 槽式 DSG 系统主要性能参数

槽式 DSG 集热场的所有回路 (Loop), 均通过串联的方式, 由抛物槽式太阳能集热器模块构成, 基于技术原因, 系统选择了 ET-100 型集热器, 集热场内跟踪太阳的方式是南北轴走向, ET-100 型集热器的性能参数如表 1 所示, 前提是集热管在比较高温的条件下还能够正常工作^[6]。

表 1 ET-100 型集热器参数
Tab. 1 Parameter of ET-100 collector

项目	数值
集热器组件长度/m	98.50
抛物槽开口宽度/m	5.76
集热器模块长度/m	12.27
集热器模块数	8
涂层发射率	$4.795 \times 10^{-2} + 2.331 \times T(^{\circ}\text{C}) \times 10^{-4}$
入射角修正因子	$\cos\theta - 2.859621 \times 10^{-5}\theta^2 - 5.25097 \times 10^{-4}\theta$
玻璃套管外径/m	0.115
玻璃套管内径/m	0.109
金属管外径/m	0.070
金属管内径/m	0.055
峰值光学效率	0.765

2.2 DSG 槽式集热器能量传递与转换模型

DSG 槽式集热器内的能量传递过程决定了 DSG 系统的热力性能。下面从 DSG 系统管内流型入手探究 DSG 系统的能量传递特征。

2.2.1 DSG 槽式集热器内流型

真空式太阳能集热管内的能量转化与传递过程在文献^[7]中示出。集热管内传热工质的流动形态对换热特性有重要影响。水在集热管内的流型如图 2 所示^[8]。其中两相区流型较为复杂, 归结起来主要有泡沫状流型、阻塞状流型、子弹状流型、波状流型、环状流型和分层流型, 如图 3 所示。两相区的换热性能影响直接蒸汽槽式太阳能技术的效果, 因此对两相区的换热过程进行简述。

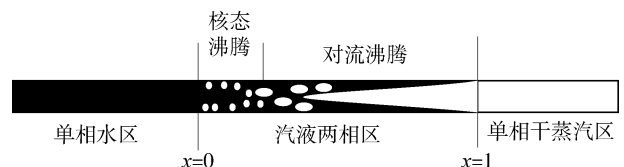


图 2 集热管内流动状态

Fig. 2 The flow pattern inside the collector

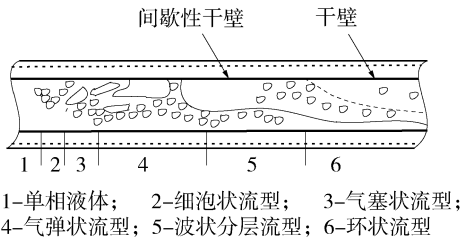


图3 水平管内气液两相区的流型

Fig. 3 Gas-liquid multi-phase flow pattern in a horizontal tube

2.2.2 槽式DSG集热两相区内的传热模型

DSG系统中,为了评估换热管内的流动型式和对流换热系数,引入了弗劳德数(Fr)。当Fr小于0.04时,换热管内的流动型式为层状流,此时其对流换热系数由Shah的方程^[9]确定:

$$Fr = \frac{G^2}{\rho_l^2 g D_2} \quad (1)$$

$$\frac{h_{2ph}}{h_1} = 3.9 Fr^{0.24} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.64} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.4} \quad (2)$$

$$h_1 = 0.023 \left(\frac{k_i}{D_{ab,i}} \right) \left(\frac{G(1-x)D_{ab,i}}{\mu_l} \right)^{0.8} Pr_l^{0.4} \quad (3)$$

式中: h_{2ph} 为两相流区域的对流换热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; h_1 为传热介质在其流动液态充满全管时的换热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; x 为干度系数; ρ_l 为传热介质分液相密度, ρ_g 为传热介质的分气相密度,单位为 kg/m^3 。

如果 $Fr > 0.04$,则换热管内的流动形态为环形流动,则其换热系数由Gungor和Winterton发明的关联式^[9]确定。根据其研究成果,此时两相区的对流换热系数可由下式确定:

$$h_{tp} = Eh_1 + Sh_{NB} \quad (4)$$

式中: h_{tp} 代表两相区的对流换热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; h_1 为其分液相(饱和水)换热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; h_{NB} 为其核态沸腾时的换热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; E 代表强化因子; S 代表限制因子。

分液相(或称其为饱和水)的换热系数由下式确定:

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.023 \left(\frac{k_i}{D_{ab,i}} \right) Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} \\ &= 0.023 \left(\frac{k_i}{D_{ab,i}} \right) \left(\frac{G(1-x)D_{ab,i}}{\mu_l} \right)^{0.8} Pr_l^{0.4} \quad (5) \end{aligned}$$

式中所有物性参数均为当时压力下的饱和参数

或者过冷参数。其中, Re_l 代表分液相的雷诺数。

对于流动型式为核态沸腾的换热,有大量文献给出了很多的计算方法,其中Cooper给出了较好的计算方法^[10],如下:

$$\begin{aligned} h_{NB} &= 55 P_r^{0.12} (-\log_{10} P_r)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67} \\ &= 55 P_r^{0.12} (-0.434 3 \ln P_r)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67} \quad (6) \end{aligned}$$

$$P_r = P/P_{cr} \quad (7)$$

$$Bo = \frac{q}{G(h'' - h')} = \frac{q}{Gr} \quad (8)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1} \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \quad (9)$$

$Fr < 0.05$ 时,水平管内的两相流动,会出现分层,考虑分层影响时应采用以下计算式。

$$E = (1 + 24000 Bo^{1.16} + 1.37 X_{tt}^{-0.86}) Fr^{(0.1-2Fr)} \quad (10)$$

$$S = (1 + 1.15 \times 10^{-6} E^2 Re_l^{1.17})^{-1} Fr^{1/2} \quad (11)$$

若 $Fr > 0.05$,

$$E = 1 + 24000 Bo^{1.16} + 1.37 X_{tt}^{-0.86} \quad (12)$$

$$S = (1 + 1.15 \times 10^{-6} E^2 Re_l^{1.17})^{-1} \quad (13)$$

式中: μ_g 为工质气相动力粘度,而 μ_l 为工质的液相动力粘度。 ρ_g 为工质气相密度,而 ρ_l 为传热工质的液相密度,它们的单位都是 kg/m^3 ; Bo 为沸腾数; X_{tt} 则为Martinelli数; r 代表传热介质在汽化时的潜热,其单位是 J/kg ; x 为我们常说的干度; P_r 代表相对压力,而 P 则代表工作压力,单位都是 bar ; P_{cr} 代表了临界压力,水则假定为 $221 bar$ ^[8]; M 代表了传热介质分子质量,单位是 $kg/kmol$; q 为热流密度,其单位是 W/m^2 ;其余单相区的换热计算均采用水平管内单向流动的换热计算模型。

2.3 DSG直接蒸汽太阳能集热器性能模拟

为了简化模拟计算过程,在模拟中我们将整个长度的吸热管(换热管)沿着长度方向划分为若干个单独的微元段,然后针对每一个单独的微元段采用常用工质如热水或导热油等的相关计算模型,基于每一个微元段的进口参数,给定一个微元段管外壁温度,并结合我们熟知的能量守恒定理,通过迭代的方法,最终求出对应的微元段管外壁温度的真实值,进而依次计算出微元段的管内工质所对应的相关出口参数,基于这样的方法,连续计算,直至换热管的出口。在开始计算过程的时候,判断微元管段内的流动型式非常重要,假设微元段里的流动状态处于两相流状态,则接下来就要判断换热管内所

出现的流型状态, 对应不同的区域和不同的流型, 分别采用不同的模型进行相关的计算, 直至计算完毕所有的微元段, 并输出相应的计算结果, 详细的模拟计算过程的流程图如图4所示。

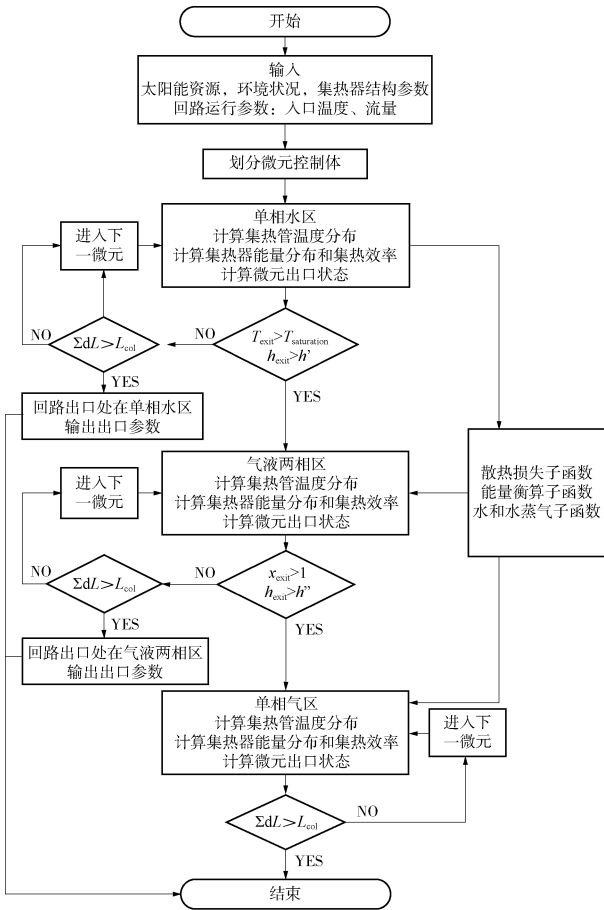


图4 DSG槽式热发电系统模拟程序框图

Fig. 4 Program chart for DSG thermal plant

3 槽式DSG集热系统相关性能模拟

3.1 集热性能沿着管长的变化

集热管内部会出现两相流动的情况, 因此有必要对两相流动换热过程的相关计算进行归纳。运用Matlab等对槽式集热管内的DSG过程进行模拟, 如图5~图6所示。

为直观地表示换热过程中装置与工质之间的温度变化关系, 利用该程序模拟了沿管长方向工质和金属内壁温度的差异, 为集热管的安全运行提供了指导。

3.2 流动分层对换热的影响

当管内流动速度较慢时, 在两相区内就会出现

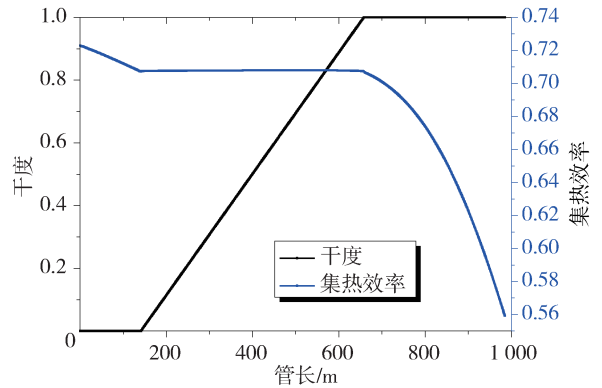


图5 集热效率沿管长方向的变化

Fig. 5 Heat collecting efficiency along the longitudinal direction

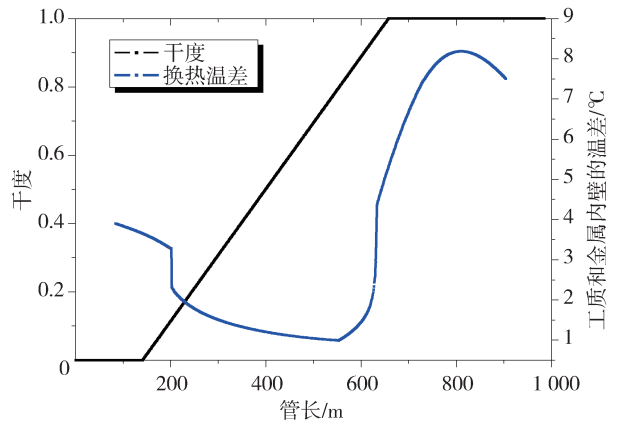


图6 DSG集热金属管和管内工质温差随着集热管长的变化

Fig. 6 The variation of heat transfer temperature difference along the longitudinal direction

分层现象, 分层现象的出现影响了两相区内的对流换热效果, 为探究该影响, 本文分别模拟了考虑分层和不考虑分层时的DSG槽式集热器沿管长方向对流换热系数的变化, 模拟结果如图7所示。由该图可知, 分层现象大约出现在两相流区域干度为0.7~0.8之间的位置, 分层现象的出现降低了管内工质与金属管管壁之间的对流换热系数, 减弱了换热效果。

为避免分层现象的出现, 一种较为普遍的方式是气液分离, 即随着水在集热管内的蒸发, 沿管长方向将集热管内产生的蒸汽适时分离, 在一定程度上避免了分层现象的出现。适时分离的方法常用的有边蒸发边分离和在一定干度分离的方法。

对两相区采用边蒸发边分离的方法, 将两相区内产生的蒸汽及时分离出去, 这样预定的两相区内

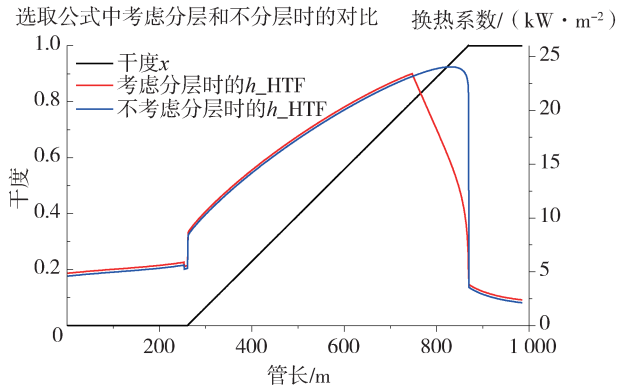


图7 考虑和不考虑分层时管内换热系数沿管长方向的变化

Fig. 7 The variation of heat transfer coefficient along the longitudinal direction

始终处于单相水区。对其换热过程进行模拟，得到如图8所示的结果。由图8可知边蒸发边分离的方式下，两相区内的换热系数有较大幅度的降低，因此不宜采用这种方式。

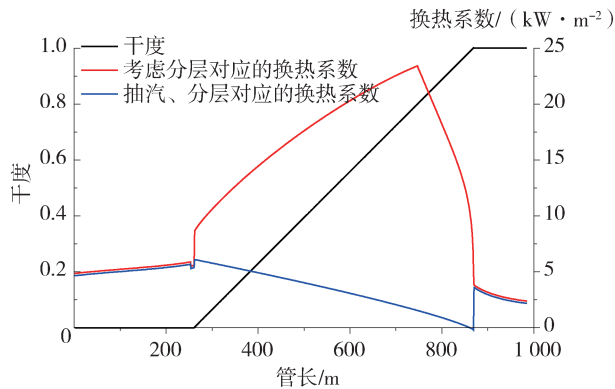


图8 边蒸发边分离方式下考虑和不考虑分层时管内换热系数沿管长方向的变化

Fig. 8 The variation of heat transfer coefficient along the longitudinal direction

由图8可知，两相区内的换热系数明显高于单相区内的换热系数，这是因为两相区内流动扰动大，换热效果增强。因此为了保持较好的换热效果，应该尽量保证两相区的长度。所以为避免分层现象带来的换热效果的降低，可以在即将出现分层现象的拐点区域内对两相区进行气液分离，一方面可以保持最长的两相区长度，使更多的区域处于较好的换热效果。另一方面，分层流动流型中，管子上部会周期性与蒸汽和水膜交替接触，与蒸汽接触会使管壁温度突然升高，而与水膜接触会使得其温

度降低，这种典型的周期性的壁温度变化对换热管金属强度是不利的，在分层现象开始出现的点将两相工质进行分离可以使集热管的安全性升高。

4 结论

槽式太阳能直接产蒸汽发电系统是太阳能热发电的重要形式，本文开展了一种典型的槽式直接蒸汽循环系统和关键过程的研究。主要结论如下：

1)从典型的槽式直接蒸汽发电系统集热系统构成和 workflow 出发，给出了系统的结构组成和主要性能参数。

2)研究槽式直接产蒸汽集热系统的能量传递与转化，通过对系统各热力过程中传热模型和水动力模型的选取，建立了槽式集热两相区内的传热模型，开发了基于 Matlab 模拟程序，研究了槽式太阳能直接产蒸汽的管路内各处的热物理参数变化特性。

3)通过程序验证分析，得出了最适合的 DSG 集热场布置方式，即再循环式，再循环装置应安装在干度为 0.7~0.8 范围所对应的位置。

研究结果为 DSG 电站的设计和运行提供了基础数据，同时也验证了槽式太阳能直接产蒸汽集热的最佳方式为可再循环式。

参考文献：

- [1] ZARZA E, ROJAS M E, GONZÁLEZ L, et al. Inditep: the first pre-commercial DSG solar power plant [J]. Solar Energy, 2006, 80(10): 1270-1276.
- [2] ODEH S D, BEHNIA M, MORRISON G L. Hydrodynamic analysis of direct steam generation solar collectors [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, 2000, 122(1): 14-22.
- [3] ECK M, STEINMANN W D. Modelling and design of direct solar steam generating collector fields [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, 2005, 127(3): 371-380.
- [4] FELDHOFF J F, BENITEZ D, ECK M, et al. Economic potential of solar thermal power plants with direct steam generation compared with HTF plants [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, 2010, 132(4): 041001-1-041001-9.
- [5] BIRNBAUM J, FELDHOFF J F, FICHTNER M, et al. Steam temperature stability in a direct steam generation solar power plant [J]. Solar Energy, 2011, 85(4): 660-668.

- [6] MONTES M J, ABÁNADES A, MARTÍNEZ-Val J M. Thermofluidynamic model and comparative analysis of parabolic trough collectors using oil, water/steam, or molten salt as heat transfer fluids [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, 2010, 132(2): 021001-1-021001-7.
- [7] 高志超, 隋军, 刘启斌, 等. 30 m² 槽式太阳能集热器性能模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(4): 541-544.
GAO Z C, SUI J, LIU Q B, et al. Simulation on the performance of a 30 m² parabolic trough collector [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(4): 541-544.
- [8] ODEH S D, MORRISON G L, BEHNIA M. Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors [J]. Solar Energy, 1998, 62(6): 395-406.
- [9] STEPHEN K. Heat transfer in condensation and boiling [M]. Germany: Springer-Verlag, 1992.
- [10] FORRISTALL R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory,

2003, NREL/TP-550-34169.

作者简介:



楚攀

1983-, 男, 河南荥阳人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 西安交通大学工学博士, 主要从事大规模储能技术, 可再生能源发电技术的研究及设计 (e-mail) chupan@gedi.com.cn。

CHU P

白凤武(通信作者)

1975-, 男, 吉林九台人, 研究员, 中国科学院工学博士, 主要从事新能源发电与大规模储能方面的研究 (e-mail) baifw@mail.iee.ac.cn。

(责任编辑 李辉)

