

Numerical Simulation of Multi-Effect Distillation/Multi-Stage Flash Desalination System Powered by Solar Energy: Part 2

—The System Operation Characteristics and Analysis

Xiajing Cui¹, Shiming Xu^{1*}, Shunquan Chen², Ruxu Du²

¹Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, School of Energy and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian

²Guangzhou Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou
Email: cytheriachoi@126.com, *xsming@dlut.edu.cn

Received: May 10th, 2012; revised: May 22nd, 2012; accepted: Jun. 8th, 2012

Abstract: Based on the determined desalination system driven by solar energy and the structure parameters of the distillatory in the system, the system operation characteristics were analyzed by numerical simulation under the conditions of solar intensity and ambient temperatures at June solstice in Guangdong. The system has five effect distillations. By changing the system starting temperature, strong brine circulation ratio, cooling seawater temperature and atmosphere transparency, the operation parameters of the system like the hot water temperature in the hot water reservoir, transient water produced rate and performance coefficient of the system were obtained by simulation, in which the solar collector area and structure parameters of the distillatory are invariant. The results are helpful for the system operation.

Keywords: Solar Energy; Desalination; Multi-Effect Distillation; Numerical Simulation

多效蒸馏/多级闪蒸太阳能海水淡化系统数值模拟：第 2 部分

——系统工作特性及影响因素分析

崔夏菁¹, 徐士鸣^{1*}, 陈顺全², 杜如虚²

¹大连理工大学能源与动力学院, 教育部海洋能及节能重点实验室, 大连

²中国科学院广州先进技术研究所, 广州
Email: cytheriachoi@126.com, *xsming@dlut.edu.cn

收稿日期: 2012 年 5 月 10 日; 修回日期: 2012 年 5 月 22 日; 录用日期: 2012 年 6 月 8 日

摘要: 在按设计工况确定的太阳能海水淡化系统及换热设备结构参数的基础上, 根据广东地区夏至日环境温度和太阳能辐射情况, 采用数值模拟的方法对所设计的五效太阳能海水淡化系统运行参数进行分析。在太阳能集热面积和蒸馏器结构参数不变的条件下, 通过改变启动温度、浓海水再循环比、冷却海水温度及大气透明度, 得到储热水箱热水温度、系统瞬态产水率、系统瞬态性能系数等参数随时间变化的关系, 以及对系统日产水量的影响, 从而为太阳能海水淡化系统运行提供依据。

关键词: 太阳能; 海水淡化; 多效蒸馏; 数值模拟

1. 引言

太阳能海水淡化技术已成为最有发展潜力的海水淡化技术发展方向之一。太阳能海水淡化有多种方

*通讯作者。

法, 其中低温多效蒸馏技术可以充分利用平板或真空管太阳能集热器及传统海水淡化技术的优点, 尤其是水平管外降膜蒸发与管内凝结小温差换热及多效热利用等, 使太阳能海水淡化系统具有低投资、低耗能、

高产水率等特点^[1,2]。

由于太阳能的不稳定性，导致太阳能海水淡化系统动态的运行特性。因此研究非稳态情况下太阳能海水淡化系统的运行特性具有重要的意义。陈子乾^[3]等通过模拟计算，研究分析与一套低温四效太阳能海水淡化系统匹配的太阳能集热系统参数，给出了太阳能集热系统集热器面积，储热水箱容积，海水淡化系统启动和暂停温度等参数的最佳取值范围，但是没有给出在太阳能集热系统一定的条件下海水淡化的最佳运行参数。郑宏飞^[4]等人对一台具有三效回热性能的太阳能多级蒸馏装置进行了模拟实验，分析了加热水温度，系统运行压力对系统产水率及性能系数的影响，给出了合理的取值范围。尽管以往有学者从事过此类研究，但大多以实验的形式进行，用数值模拟的方法进行研究还不多见。

在前文(多效蒸馏/多级闪蒸太阳能海水淡化系统数值模拟——模型建立及设计工况下换热设备结构参数确定)，已对一套利用太阳热能驱动的五效蒸馏/四级闪蒸的海水淡化系统建立了数学模型，并在设计工况下，通过静态循环热力计算得到系统内各换热设备的工作参数，由此对换热设备进行换热设计计算，确定各效蒸馏器换热面积及管束尺寸和排布方式。本文将在此条件下，根据广东地区夏季典型日环境温度和少云天气太阳能变化情况，对所设计的太阳能海水淡化系统进行数值模拟，得到在广东地区夏季典型日所设计的太阳能海水淡化系统及各效蒸馏器工作参数的变化情况，以确定最佳运行参数。

2. 太阳能海水淡化系统及基本数学模型

采用顺流流程的五效蒸馏/四级闪蒸的太阳能海水淡化系统已在前文[5]中做过详细介绍，本文仅作简单叙述。如图 1 所示的太阳能海水淡化系统由太阳能

集/蓄热子系统和五效蒸馏/四级闪蒸海水淡化子系统组成。海水淡化子系统内的蒸馏器全部采用水平管外降膜蒸发方式来强化海水蒸馏过程热、质传递。

在忽略一些次要因素的假设下，系统建模遵循质量和能量守恒原理。即，在任意时刻(τ)，系统内所有热、质交换设备必须满足如下基本数学模型，

质量守恒模型

$$0 = \sum \frac{dm_{in}(\tau)}{d\tau} - \sum \frac{dm_{out}(\tau)}{d\tau} \quad (1)$$

$$0 = \sum \left[\frac{dm_{in}(\tau)}{d\tau} \xi_{in} \right] - \sum \left[\frac{dm_{out}(\tau)}{d\tau} \xi_{out} \right] \quad (2)$$

以上两式中， m ——质量，kg； ξ ——海水中盐质量分数；下标：in——入；out——出。

能量守恒模型

$$0 = \sum \frac{dQ_{in}(\tau)}{d\tau} + \sum \left[\frac{dm_{in}(\tau)}{d\tau} h_{in}(\tau) \right] - \sum \frac{dQ_{out}(\tau)}{d\tau} - \sum \left[\frac{dm_{out}(\tau)}{d\tau} h_{out}(\tau) \right] \quad (3)$$

式中， Q ——热量，kJ。

系统动态性能系数

$$\eta(\tau) = \frac{2450 \times \dot{m}_{des}(\tau)}{\dot{Q}_{des}(\tau)} \quad (4)$$

系统日平均性能系数

$$\eta_t = \frac{2450 \times M_{des}}{Q_{des}} \quad (5)$$

$$Q_{des} = Q_{solar} = \int_{\tau_0}^{\tau_s} \dot{Q}_s(\tau) d\tau = \int_{\tau_0}^{\tau_s} \dot{Q}_{des}(\tau) d\tau \quad (6)$$

$$M_{des} = \int_{\tau_0}^{\tau_s} \dot{m}_{des}(\tau) d\tau \quad (7)$$

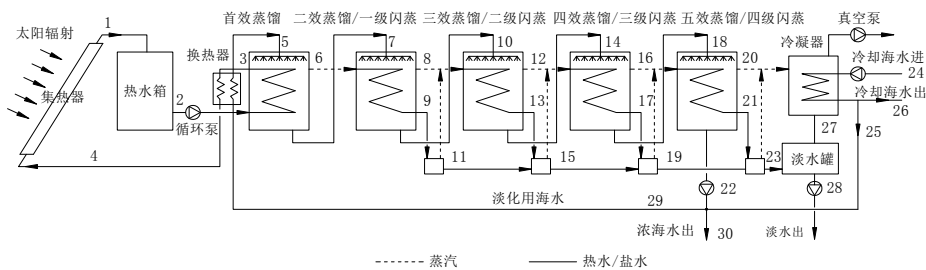


Figure 1. The working flow of the down-flow five effect distillation/flash desalination system powered by solar
图 1. 顺流五效蒸馏/闪蒸太阳能海水淡化装置流程简图

式中，2450——水的气化潜热，kJ/kg； $\dot{m}_{des}(\tau)$ —— τ 时刻系统产出的淡水流量，kg/s； $\dot{Q}_{des}(\tau)$ —— τ 时刻系统首效蒸馏器热负荷，kW； M_{des} ——日总产水量，kg； Q_{des} ——日总消耗热量，kJ； Q_{solar} ——日太阳能集热器总收集的太阳能，kJ； τ_0 ， τ_s ——分别为日出和日落时刻。

3. 数值模拟

根据前文建立的数学模型及在设计工况下静态循环热力计算结果，结合各效蒸馏器换热设计计算结构，确定日产淡水 10 吨的五效蒸馏/四级闪蒸太阳能海水淡化系统所有设备的设计参数。即：在设计工况下，太阳能辐射强度为 730 W/m²，产水率为 1200 kg/h，海水淡化需要的热负荷为 226.5 kW，需要铺设的太阳能集热器面积为 600 m²，热水循环泵流量为 13,000 kg/h，蓄热水箱热水容量 6 m³，海水冷却泵流量为 37,700 kg/h，浓海水再循环比为 1。各效蒸馏器换热管束有效长度为 1.35 m，顺列排布，冷凝器换热管束为错列排布。管束排布与实际换热面积如表 1 所列。

根据前文所建立的太阳能海水淡化系统动态数学模型，以及所确定的五效蒸馏/四级闪蒸海水淡化装置各换热设备结构参数，采用 2010 年广东省深圳市夏至日平均环境温度数据及少云日(大气透明度为 0.75)太阳能辐射强度变化数学模型，经过计算机编程计算(图 2 为编制的计算机计算程序框图)，可得到太阳能海水淡化系统运行特性及运行参数对系统性能的影响。

4. 数值模拟结果与讨论

4.1. 启动温度

尽管在太阳能海水淡化系统中设置热水水箱，可以缓冲太阳辐射变化，避免因热水温度剧烈波动而导致系统不能正常运行。但是采用显热蓄能，热水水箱的蓄能密度有限，太阳能海水淡化系统不能 24 小时连续运行，当水箱内热水温度降低到一定温度后，系统就停止工作。在数值模拟条件下，设定的系统停运温度为 60℃，并认为系统保温良好。次日系统接受太阳能后水箱内水温升高到一定值后，启动系统运行。启动温度对系统运行参数有较大的影响。设计的夏至日冷却海水温度为 25℃，在不同启动温度(61℃、63℃

Table 1. Main structural parameters of each distillatory in the solar desalination system

表 1. 太阳能海水淡化装置各换热设备主要结构参数

项目	换热器	首效	二效	三效	四效	五效	冷凝器
管束排布		7 × 13	7 × 13	9 × 13	11 × 13	14 × 13	18 × 16
实际换热面积/m ²		6.94	6.94	8.93	10.91	13.89	21.98

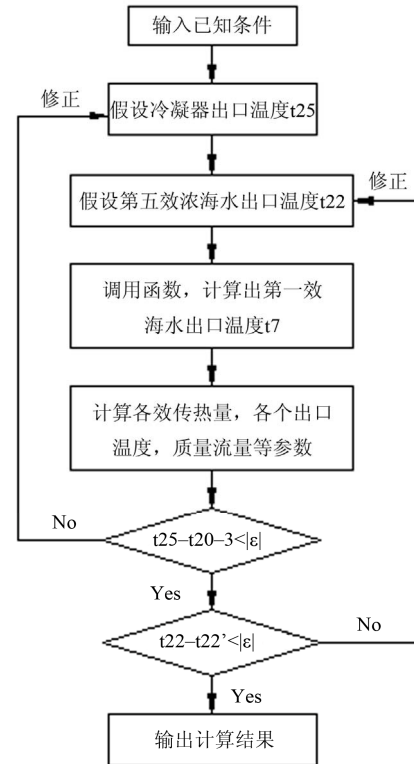


Figure 2. Block diagram of the numerical simulation for the solar desalination system

图 2. 太阳能海水淡化数值模拟程序框图

和 65℃)下储热水箱热水温度、系统产水率及系统性能系数随时间变化关系如图 3~5 所示。

由图 3 可见，太阳能海水淡化系统启动温度对储热水箱内热水温度有较大的影响。储热水箱内热水温度随时间开始逐渐上升，然后逐渐下降。与太阳能辐射强度变化不同的是，储热水箱内热水温度最高点出现在 14:30 左右，而非太阳能辐射强度最大时刻(12:00)。水箱内热水升温 and 降温曲线不同的是，升温过程相对较慢，而降温过程相对较快。当启动温度分别为 61℃、63℃和 65℃时，水箱内热水最高温度分别为 66℃、67.7℃和 69℃。在设计日水箱内热水温度达到相应启动温度的时间分别为 8:24、9:24 和 10:06，系统停止运行时间分别为 18:12、18:36 和 19:00。与 61℃启动

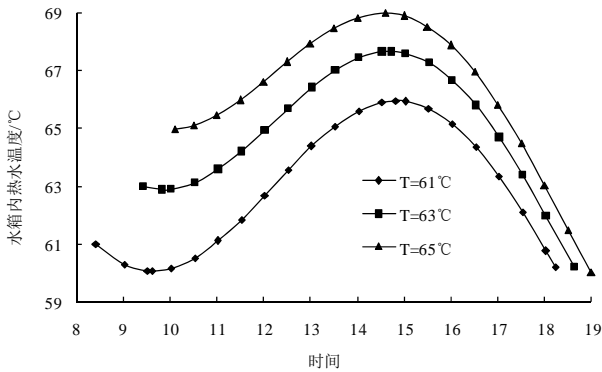


Figure 3. The variations of the hot water temperature in the hot water reservoir under different system starting temperature with respect to the time

图 3. 不同启动温度下储热水箱内热水温度随时间的变化

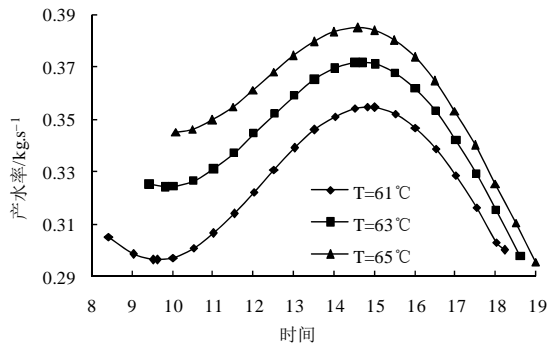


Figure 4. The variations of the water produced rate under different system starting temperature with respect to the time

图 4. 不同启动温度下太阳能海水淡化系统产水率随时间的变化

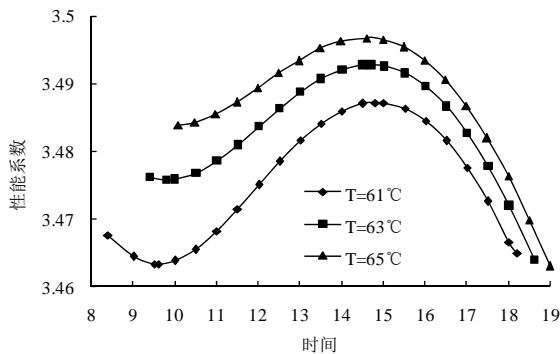


Figure 5. The variations of the performance coefficient of the system under different starting temperature with respect to the time

图 5. 不同启动温度下系统性能系数随时间的变化

温度相比，63°C 和 65°C 水温启动，系统运行时间相应缩短了 36 和 54 分钟，尽管启动温度越高，水箱内平均温度也越高。

比较图 3 和 4 可以发现，系统的产水率变化规律与热水温度变化规律相同，这说明热水温度升高可以提高系统的产水率，文献[4]通过实验研究也得到了相

同的规律。热水温度提高，各效蒸馏器传热温差增大，在蒸馏器结构参数不变的条件下换热量增加，系统产水率提高。从图 4 中可见，在 3 种启动温度下，系统最大产水率分别为 0.355 kg/s、0.372 kg/s 和 0.385 kg/s。与 61°C 启动温度相比，63°C 和 65°C 启动温度下的系统产水率分别上升了 4.79% 和 8.45%。

海水淡化系统产水率升高并不代表系统日总产水量增加，系统运行时间的缩短对系统总产水量会有影响。在 3 种启动温度下，设计日系统日产水量分别为 11558.8 kg/d、11532.7 kg/d 和 11515.1 kg/d。启动温度升高，一方面使得系统产水率增大；但另一方面也使得系统运行总时间缩短。而后者影响更大，导致系统日总产水量减小。从太阳能集热器效率角度分析，提高热水平均温度，会使集热器效率降低，集热器回收的太阳能热量减少。

但从系统产水相对变化量而言，不同启动温度下系统日产水量的变化几乎可以忽略不计，其原因在于启动温度提高后，海水淡化系统的性能系数得以提高。系统性能系数随时间的变化关系如图 5 所示，其变化规律与图 3 中热水温度变化规律相同。在 3 种启动温度下，系统平均性能系数分别为 3.476、3.483 和 3.488。文献[4]的实验研究结果也表明，当其它条件相同时，运行温度越高，性能系数越大。海水淡化系统性能系数提高意味着单位产水量所消耗的能量减少。虽然，当水箱内热水温度达到 65°C 时启动海水淡化系统，日产水量仅比 61°C 启动时少 43.7 kg，但系统的运行时间却减少近 1 小时，对降低系统内各种泵单位产水量耗能有利。因此，系统启动温度定为 65°C，对降低系统单位产水成本有利。

4.2. 浓海水再循环比

改变浓海水再循环比将影响各效蒸馏器内水平换热管上的喷淋密度，从而影响各效蒸馏器负荷和产水率。在系统启动运行温度为 65°C，停止运行温度为 60°C 条件下，对浓海水再循环比为 0.5、1、1.5 和 2 四种情况进行数值模拟，探讨改变浓海水再循环比对系统运行特性的影响情况，数值模拟结果如图 6~8 所示。

图 6 可见，浓海水再循环比越大，系统运行过程中储热水箱内的热水温度越低。其原因在于浓海水再循环比增大，各效蒸馏器热负荷提高，海水淡化消耗

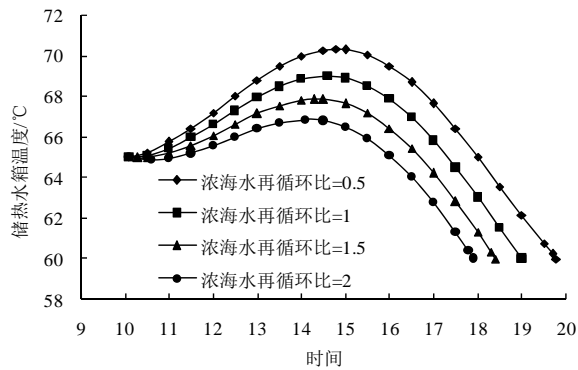


Figure 6. The variations of the hot water temperature in the hot water reservoir under different strong brine circulation ratio with respect to the time

图 6. 不同浓海水再循环比时储热水箱温度随时间的变化

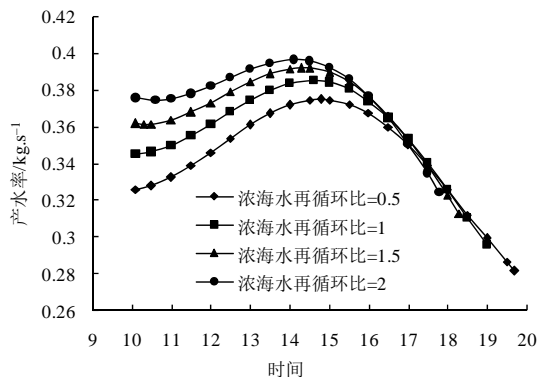


Figure 7. The variations of the water produced rate of the system under different strong brine circulation ratio with respect to the time

图 7. 不同浓海水再循环比时系统产水率随时间的变化

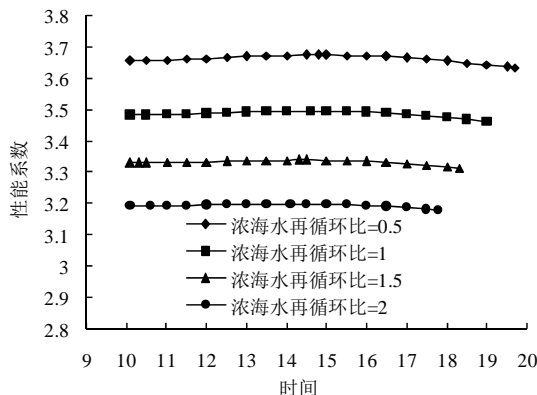


Figure 8. The variations of the performance coefficient of the system under different strong brine circulation ratio with respect to the time

图 8. 不同浓海水再循环比时系统性能系数随时间的变化

的总能量增大，抑制了储热水箱内热水温度的升高。在四种浓海水再循环比的情况下，储热水箱内热水最高温度分别为 70.3℃、69℃、67.9℃和 66.9℃。随着

循环热水温度的降低，系统停止运行时间是依次提前的。经计算，系统起始运行时间为 10:06，停止运行时间分别为 19:42、19:00、18:18 和 17:48，与浓海水再循环比为 0.5 时相比，系统运行时间分别缩短了 42、84 和 114 分钟。随着浓海水再循环比增大，系统的瞬态产水率也随之增大(见图 7)。从图中可以看出，当浓海水再循环比从 0.5 增至 2 时，系统最大瞬态产水率从 0.3746 kg/s 增至 0.3961 kg/s，这与文献[6]实验所得到的结论一致。即，当喷淋密度较小时，适当提高喷淋密度有利于降膜管壁的湿润，提高产水率及单位能耗产水率。但瞬态产水率的提高并不代表系统日产水量一定增加，系统日产水量还受系统日总运行时间的影响。

图 8 给出了太阳能海水淡化系统瞬态性能系数随着浓海水再循环比而变化的关系。图中可见，浓海水再循环比从 0.5 增加至 2 时，系统平均性能系数从 3.664 降至 3.195，浓海水再循环比的变化对系统性能系数有较大的影响。这与文献[4]实验得到的结论一致，即，浓盐水排除时要带走一部分显热，当供海水流率降低时，系统的性能系数普遍升高。从系统日产淡水量模拟计算结果看，浓海水再循环比越大，系统日总产淡水量越小。在四种浓海水再循环比条件下，系统日总产淡水量分别为 12022.2 kg/d、11515.1 kg/d、11055.1 kg/d 和 10626.2 kg/d。其原因在于，浓海水再循环比增大，一方面使得每效蒸馏器内水平换热管上的喷淋密度增大，传热系数和传热量增大，瞬态产水率提高，储热水箱内热水平均温度降低，以利于提高太阳能集热器效率；另一方面循环热水平均温度降低，使得系统性能系数降低，运行时间缩短。两个方面的因素综合影响，后者影响更大，导致总产水量下降。所以浓海水再循环比应控制在一个合适的范围内，在满足水平换热管能被完全湿润的条件下，浓海水再循环比越小越好。

4.3. 冷却海水温度

冷却海水温度是影响太阳能海水淡化系统产水量的因素之一。当冷却海水温度由设计值的 25℃ 升高或降低 3℃ 时，数值模拟给出 65℃ 启动温度下储热水箱水温、产水率及系统性能系数变化规律如图 9~11 所示。

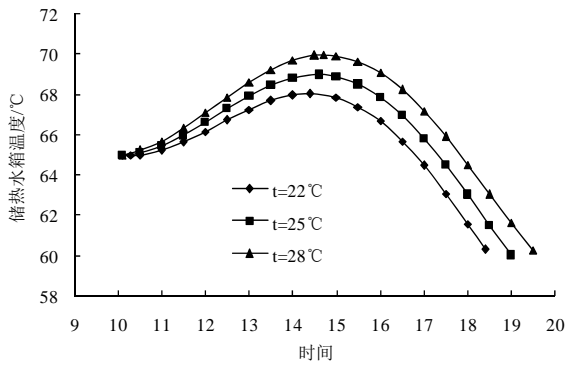


Figure 9. The variations of the hot water temperature in the hot water reservoir under different cooling seawater temperature with respect to the time
图 9. 不同冷却海水温度下储热水箱温度随时间的变化

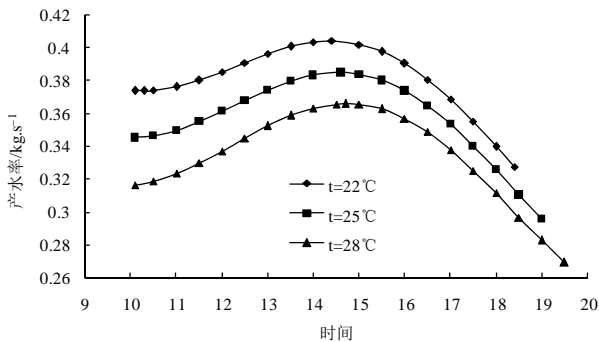


Figure 10. The variations of the water produced rate under different cooling seawater temperature with respect to the time
图 10. 不同冷却海水温度下系统产水率随时间的变化

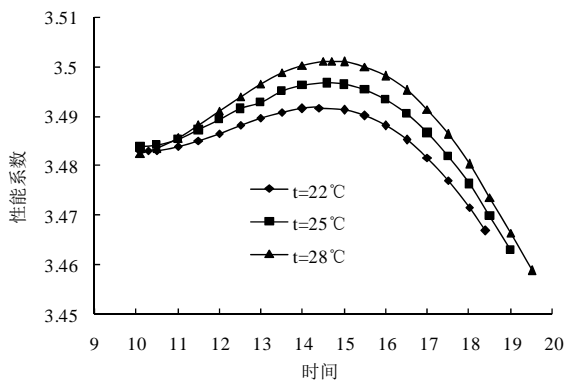


Figure 11. The variations of the performance coefficient of the system under different cooling seawater temperature with respect to the time
图 11. 不同冷却海水温度下系统性能系数随时间的变化

图 9 表明，冷却海水温度越低，储热水箱内热水平均温度也就越低。冷却海水温度分别为 22℃、25℃和 28℃的条件下，设计日储热水箱热水能达到的最高温度分别为 68℃、69℃和 70℃。由于系统启动时间和停止运行的热水温度相同，从模拟结果看冷却海水

温度越低，系统停止运行时间越早，分别为 18:24、19:00 和 19:30，依次分别缩短运行时间 36 和 66 分钟。

冷却海水温度变化对太阳能海水淡化系统产水率的影响如图 10 所示。冷却海水温度越低，系统产水率越高。其原因在于，对于一个确定的海水淡化装置，冷却海水温度降低，系统总换热温差和换热量增大，使得系统产水率提高。冷却海水从 28℃降至 22℃，系统产水率最大值分别为 0.3660 kg/s、0.3849 kg/s 和 0.4040 kg/s。

尽管较低的冷却海水温度使得系统运行时间缩短，并且系统运行性能系数也略有降低(见图 11，冷却水温度分别为 22℃、25℃和 28℃的情况下，系统的平均性能系数分别为 3.4855、3.4879 和 3.4895)，但太阳能集热效率的提高，使得系统日产水量有较大幅度的增加。当冷却海水温度从 28℃降至 22℃，系统日总产水量从 11468.04 kg/d 增加到 11553.8 kg/d。而且，随着冷却海水温度降低，海水淡化装置的运行时间缩短，各种泵消耗的电量减少。所以在实际情况允许的范围，冷却海水温度应尽量低一些。

4.4. 大气透明度

由于太阳辐射通过大气层和云层时会被不同程度地吸收、散射和反射，到达地面的太阳辐射强度要比大气层外弱的多。在晴朗少云的天气(大气透明度高)的条件下，到达地面的太阳辐射强度大，反之则小。所以，大气透明度是影响地面太阳辐射强度的重要因素之一。太阳辐射强度变化对太阳能海水淡化系统运行有较大的影响。

设不同天气状况(晴朗无云、少云、轻度多云、多云)下的大气透明度分别为 0.9、0.75、0.6 和 0.45。在其它工作条件相同的情况下，研究太阳辐射强度变化对太阳能海水淡化系统运行的影响。不同天气状况下，系统数值模拟结果如图 12~14 所示。

由图 12 可见，在其它运行条件相同的情况下，大气透明度增大，太阳能海水淡化系统内储热水箱热水温度提高。其原因是大气透明度增大，到达太阳能集热器处的太阳辐射强度增大，相同集热面积的太阳能集热器收集的太阳能增加，用于加热循环热水的能量增大，导致储热水箱热水温度升高。模拟结果表明，当系统启动温度为 65℃时，大气透明度分别为

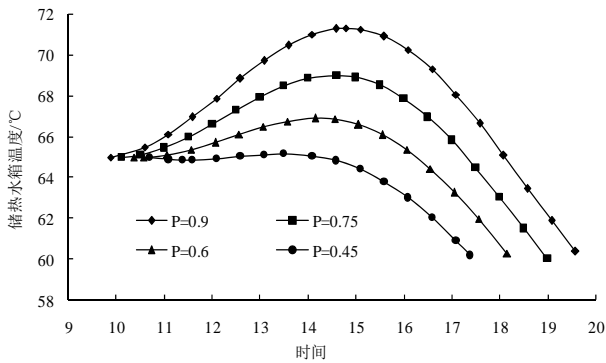


Figure 12. The variations of the hot water temperature in the hot water reservoir under different atmosphere transparency with respect to the time

图 12. 不同大气透明度下储热水箱温度随时间的变化

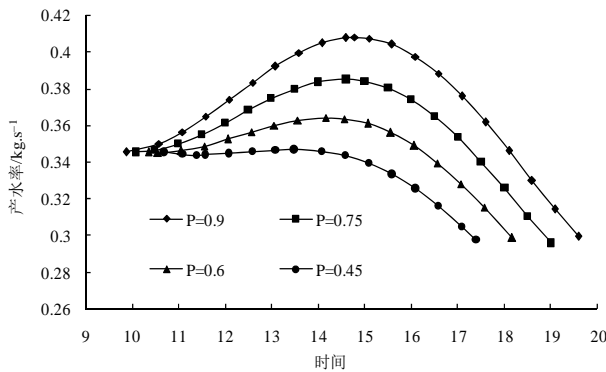


Figure 13. The variations of the water produced rate under different atmosphere transparency with respect to the time

图 13. 不同大气透明度下系统产水率随时间的变化规律

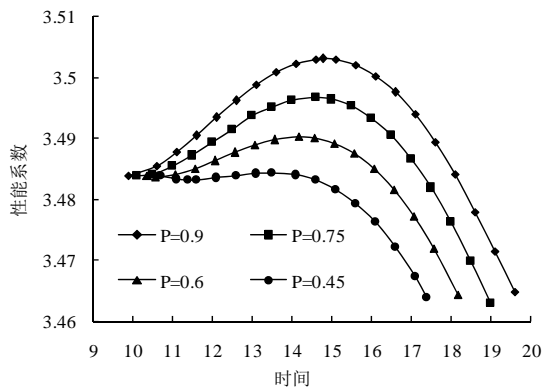


Figure 14. The variations of the performance coefficient of the system under different atmosphere transparency with respect to the time

图 14. 不同大气透明度下系统瞬态性能系数随时间的变化

0.45、0.6、0.75 和 0.9 的情况下，储热水箱热水能达到的最高温度分别为 65.2℃、66.9℃、69℃和 71.3℃。图 12 还显示，四种天气状况下，储热水箱温度达到系统启动温度的时间分别是 10:42、10:24、10:06 和

9:54，系统运行结束时间分别为 17:24、18:06、19:00 和 19:36。由此可见，随着大气透明度的增加，系统日总运行时间增加，产水量增大。

图 13 给出了大气透明度对太阳能海水淡化系统瞬态产水率的影响。图中可见，大气透明度越高，系统瞬态产水率越大，这是由储热水箱内热水温度提高所致。循环热水温度升高，使得系统换热温差增加，各效蒸馏器换热负荷增大，系统产水率增大。四种大气透明度条件下，设计日太阳能海水淡化系统产水率最大值分别为 0.347 kg/s、0.364 kg/s、0.385 kg/s 和 0.408 kg/s。

图 14 给出了大气透明度对太阳能海水淡化系统性能系数的影响关系。图中可见，系统瞬态性能系数随着大气透明度的增加而增大。数值模拟结果得到，在四种大气透明度条件下，系统的平均性能系数分别为 3.4804、3.4843、3.4879 和 3.4919。

大气透明度增加，不仅使太阳能集热器集热效率提高，能吸收更多的太阳辐射能量，而且因收集的热量增大使得加热海水淡化装置的循环热水温度升高，导致系统性能系数提高，单位产水量所消耗的热量减小。这两种情况综合影响，使得系统瞬态产水率有较大幅度增加。同时，大气透明度增加，系统总运行时间延长，产水量增大。在四种大气透明度情况下，系统日总产水量分别为 8213.3 kg/d、9887.1 kg/d、11515.1 kg/d 和 13137.5 kg/d。由此可见，天气条件对太阳能海水淡化系统产水量有较大的影响。

5. 结论

实际上气候、环境及运行控制条件的变化对太阳能海水淡化系统运行特性均有较大的影响，受限于论文的篇幅，不能对所有影响系统运行特性参数进行逐一分析。但从以上太阳能海水淡化系统模拟结果分析可以得出如下结论：

- 1) 在夏季晴朗或少云天气条件下，在广东沿海地区太阳能海水淡化系统按设计温度(65℃)启动运行比较合理。
- 2) 在满足水平换热管完全被海水湿润条件下，尽可能降低浓海水再循环比。即，尽可能降低水平换热管的喷淋密度。
- 3) 在允许的情况下，尽可能降低冷却海水温度，

以达到提高系统日产淡水量的目的。但是，对于采用 U 型管做为效间压力控制单元，其效间压差控制范围较小，当冷却海水温度偏离设计值太大时，必须改变系统启动温度。

4) 天气条件或太阳能辐射强度对太阳能海水淡化系统有较大的影响，太阳能海水淡化系统应设置在太阳能较为丰富并缺乏淡水资源的海岛或苦咸水地区。

参考文献 (References)

[1] 郑宏飞, 何开岩, 陈子乾. 太阳能海水淡化技术[M]. 北京:

- 北京理工大学出版社, 2005: 3.
- [2] 陈子乾, 郑宏飞, 何开岩等. 一种新型多效内回热式太阳能海水淡化装置[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(9): 761-764.
- [3] 陈子乾, 郑宏飞, 马朝臣等. 低温多效太阳能海水淡化装置最优集热系统的匹配研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 672-677.
- [4] 郑宏飞, 杨英俊, 陈子乾等. 横管降膜蒸发内系统自平衡多效回热式太阳能海水淡化装置模拟[J]. 太阳能学报, 2006, 27(5): 478-483.
- [5] 徐士鸣, 崔夏菁, 陈顺全等. 多效蒸馏/多级闪蒸太阳能海水淡化系统数值模拟——1. 模型建立及设计工况下换热设备结构参数确定[J]. 可持续能源, 2012, 2(3): in press.
- [6] 张小艳, 郑宏飞, 王强等. 横管降膜蒸发闭式循环太阳能海水淡化装置的实验[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(2): 35-36.