

注入模式下 DSG 槽式系统滑模温度控制器设计

潘小弟¹, 王桂荣¹, 纪云锋²

(1. 中国计量学院 机电工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 杭州和利时自动化有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 以注入模式下 DSG(直接产汽)槽式太阳能热发电系统中的太阳能阵列研究对象, 创新性地运用滑模控制, 结合 PI 与串级控制算法设计温度控制器, 以理论分析与仿真研究相结合的方法进行蒸汽温度控制研究, 以在光照强度允许且给水已加热并稳定在 200 °C 的条件下, 通过调节给水阀门给水流量控制太阳能阵列出口蒸汽温度稳定、准确地达到 320 °C, 并控制各级集热器出口蒸汽温度稳定于期望值, 初步解决太阳能阵列出口蒸汽温度稳定性与准确性控制问题。研究表明, 将滑模算法用于太阳能阵列蒸汽温度控制是完全可行的, 其稳定性、准确性与抗干扰控制性能较好。

关 键 词: DSG; 太阳能阵列; 注入模式; 非线性方程; 出口温度; 串级控制; 滑模算法

中图分类号: TM615; O232 文献标识码: A

符号说明

- I —太阳辐射强度/ $W \cdot m^{-2}$;
 - T_{amb} —外界环境温度/ $^{\circ}C$;
 - $G = 6$ —集热槽宽度/ m ;
 - $\alpha = 0.78$ —光学集热峰值效率/ $\%$;
 - $U_{LT} = 0.85$ —吸收管平均热损/ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$;
 - $D = 0.12$ —集热器吸收管内径/ m ;
 - $L_1 = 12$ —集热器吸收管长度/ m ;
 - $L_2 = 14$ —集热器内外吸收管总长度/ m ;
 - A_1 —集热器吸收管横截面积/ m^2 ;
 - A_2 —集热器吸收管表面积/ m^2 ;
 - T —给水或蒸汽的温度/ $^{\circ}C$;
 - F —给水或蒸汽的质量流量/ $kg \cdot s^{-1}$;
 - c —给水或蒸汽的体积流速/ $m^3 \cdot s^{-1}$;
 - P —给水或蒸汽的压力/ MPa ;
 - ρ —密度/ $kg \cdot m^{-3}$;
 - v —比容/ $m^3 \cdot kg^{-1}$;
 - c_p —定压比热容/ $kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$;
 - t_d —给水/蒸汽在吸收管内的延时/ s ;
 - m —蒸汽输出阀, 置 1 表示开启, 反之关闭;
 - n —给水注入阀, 置 1 表示开启, 反之关闭;
 - k —集热器接通阀, 置 1 表示开启, 反之关闭;
- 下标:
 b —进入集热器的给水/蒸汽参数;

- e —从集热器输出的蒸汽参数;
- j —注入水相应参数;
- x —集热器入口给水/蒸汽与注入水混合后的相应参数。

引 言

注入模式运行的 DSG 槽式系统具有蒸汽流状态高可控性与系统运行可靠性等优势, 但因耗资高、系统复杂等缺点而虽有理论证明其可行性, 却未被试验证实, 亦未有相关报道。针对该模式动态系统高不确定性、强非线性且强干扰性(外界大气温度、太阳辐射强度、给水品质及注入流量)导致的太阳能阵列短时/长时蒸汽参数波动较大的问题, 本研究创新性地运用滑模算法进行系统温度控制。

滑模算法是解决参数不确定或时变参数系统、干扰等控制问题的一种新型控制策略。对于具有不确定动态特性的非线性系统, 滑模控制是一种强有力的设计方法, 这种控制策略能使系统沿已设计好的“滑动模态”轨迹运动。滑模控制的突出优点是可实现滑动模态与系统的外干扰和参数摄动完全无关, 这种滑动模态的不变性是该控制算法受到重视的主要原因^[1]。

基于国外已有实体电站运行经验^[2~3], 在太阳能阵列入口给水压力 $P_1 = 1.6 MPa$ 、温度 $T_1 = 200 ^{\circ}C$ 的条件下, 将滑模算法创新性地用于注入模式下 DSG 槽式系统温度控制算法设计并进行仿真, 通过调节入口给水流量, 控制太阳能阵列出口蒸汽温度稳定准确地达到期望值 $T_2 = 320 ^{\circ}C$ 及蒸汽流状态高可控性要求。

1 太阳能阵列动态方程

DSG 槽式系统注入模式运行的太阳能阵列如图 1 所示, 其特点是各个集热单元入口处均有注入阀 n 、集热器接通阀 k 及蒸汽输出阀 m 。

收稿日期: 2010-07-09; 修订日期: 2010-11-29

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y11108131)

作者简介: 潘小弟(1985-)女, 甘肃甘谷人, 中国计量学院硕士研究生。

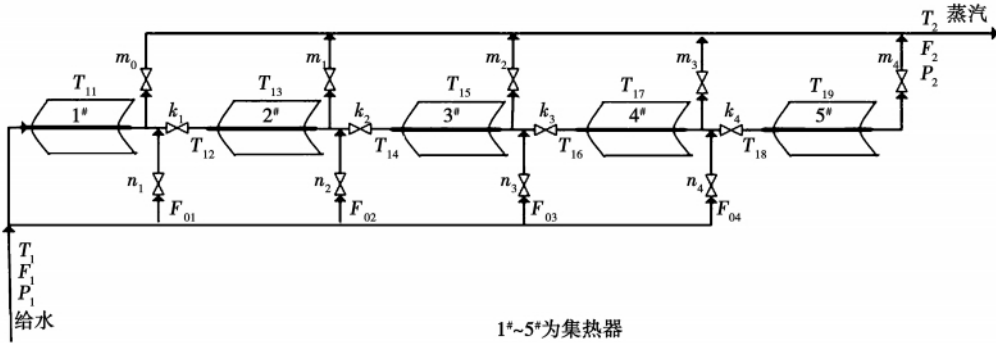


图 1 太阳能阵列结构

太阳能阵列工作原理: 抛物槽集热单元聚集太阳光, 加热吸收管内给水产生蒸汽, 驱动汽轮机旋转发电。注入模式是指水在每个集热单元的入口处经开启的阀门注入相应吸收管中, 不仅能使沿途产生过热的蒸汽, 而且也较易实现蒸汽流动状态的控制。

已有集热器动态方程将集热器及其接通阀、注入阀与输出阀视为集热器单元, 其动态方程为^[4]: 在式(1)集热器动态方程基础上, 从能量、质量守恒的角度研究集热器单元子模型, 推导出其动态方程, 进而得到太阳能阵列动态方程。将 2~4 号集热器单元注入给水流量作为内部干扰, 将太阳能辐射强度与外界环境温度作为外部干扰, 取 5 片集热器的出口蒸汽温度作为状态变量, 设定第一级集热器给水流量为控

制变量, 简化的太阳能阵列动态方程为:

$$\begin{cases} T_x = \frac{kF_b c_p (T_b) T_b + nF_j c_p (T_j) T_j}{kF_b c_p (T_b) + nF_j c_p (T_j)} \\ F_e = kF_b + nF_j \\ \rho (T_m) c_p (T_m) A_1 \frac{dT_e}{dt} = \alpha GI - F_e c_p (T_m) \frac{T_e - T_x}{L_2} - \\ A_2 U_{LT} \frac{T_m - T_{amb}}{L_2} \\ T_m = \frac{T_x + T_e}{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = - \begin{bmatrix} r\theta_0(x_1 + T_1) \\ r\theta_1(x_2 + T_{12}) \\ r\theta_2(x_3 + T_{14}) \\ r\theta_3(x_4 + T_{16}) \\ r\theta_4(x_5 + T_{18}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \theta_0 (T_1 - x_1) \\ \varepsilon_1 \theta_1 (T_{12} - x_2) k_1 \\ \varepsilon_2 \theta_2 (T_{14} - x_3) k_1 k_2 \\ \varepsilon_3 \theta_3 (T_{16} - x_4) k_1 k_2 k_3 \\ \varepsilon_4 \theta_4 (T_{18} - x_5) k_1 k_2 k_3 k_4 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \beta\theta_0 I + 2\theta_0 r T_{amb} \\ \beta\theta_1 I + 2\theta_1 r T_{amb} \\ \beta\theta_2 I + 2\theta_2 r T_{amb} \\ \beta\theta_3 I + 2\theta_3 r T_{amb} \\ \beta\theta_4 I + 2\theta_4 r T_{amb} \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} 0 \\ \varepsilon_1 \theta_1 (T_{12} - x_2) n_1 F_{01} \\ \varepsilon_2 \theta_2 (T_{14} - x_3) (k_2 n_1 F_{01} + n_2 F_{02}) \\ \varepsilon_3 \theta_3 (T_{16} - x_4) (k_2 k_3 n_1 F_{01} + k_3 n_2 F_{02} + n_3 F_{03}) \\ \varepsilon_4 \theta_4 (T_{18} - x_5) (k_2 k_3 k_4 n_1 F_{01} + k_3 k_4 n_2 F_{02} + k_4 n_3 F_{03} + n_4 F_{04}) \end{bmatrix} \\ x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{13} \\ T_{15} \\ T_{17} \\ T_{19} \end{bmatrix}, \mathcal{C} = m = \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \end{bmatrix}^T, \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_0 &= \frac{v(\frac{T_1 + T_{11}}{2})}{A_1 L_2 C_p (\frac{T_1 + T_{11}}{2})} & \theta_1 &= \frac{v(\frac{T_{12} + T_{13}}{2})}{A_1 L_2 C_p (\frac{T_{12} + T_{13}}{2})}, \\ \theta_2 &= \frac{v(\frac{T_{14} + T_{15}}{2})}{A_1 L_2 C_p (\frac{T_{14} + T_{15}}{2})} & \theta_3 &= \frac{v(\frac{T_{16} + T_{17}}{2})}{A_1 L_2 C_p (\frac{T_{16} + T_{17}}{2})}, \\ \theta_4 &= \frac{v(\frac{T_{18} + T_{19}}{2})}{A_1 L_2 C_p (\frac{T_{18} + T_{19}}{2})} & \varepsilon_0 &= C_p (\frac{T_1 + T_{11}}{2}), \\ \varepsilon_1 &= C_p (\frac{T_{12} + T_{13}}{2}) & \varepsilon_2 &= C_p (\frac{T_{14} + T_{15}}{2}), \\ \varepsilon_3 &= C_p (\frac{T_{16} + T_{17}}{2}) & \varepsilon_4 &= C_p (\frac{T_{18} + T_{19}}{2}), \\ \beta &= \alpha G L_2 \quad r = \frac{A_2 U_{LT}}{2} \end{aligned} \right.$$

注入模式运行的太阳能动态方程的标准非线性形式为:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u + h_1(x)d_1 + h_2(x)d_2 \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

太阳能阵列初始条件:集热器单元接通阀、注入阀和蒸汽阀均关闭,出口蒸汽温度为 0℃。考虑到蒸汽温度的高可控性,设定太阳能阵列模块化从 1号~5号顺序启动,且蒸汽从 5号集热器蒸汽输出阀输出,其入口给水流量的边界条件为:

$$F_{s \min} \leq F_1 \leq F_{s \max} \quad (4)$$

2 滑模温度控制器设计

为保证进口水的品质及太阳辐射的变化等扰动只影响出口蒸汽的产量,而不影响蒸汽的品质及其电站效率,在干扰变化较大时,应快速调节给水流量以保证太阳能阵列输出蒸汽温度始终满足汽轮机入口蒸汽需求。由此,温度控制器在外界干扰变化条件下,通过调节给水阀开度控制给水流量,始终保持太阳能阵列各级集热器出口蒸汽温度稳定,最终保证太阳能阵列出口蒸汽温度稳定、准确地达到期望值要求。

2.1 滑模控制算法

针对式(3)所示的太阳能阵列非线性方程,先定义切换方程 $s = j(y - y_d) = je$,系统的开环误差动态特性为:

(1) 当 $s = 0$ 时,有 j 为非零任意实数时 $y - y_d = 0$,系统能很好地跟踪输出,完全满足系统要求。

(2) 当 $s \neq 0$ 时,有:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= j(\dot{y} - \dot{y}_d) \\ &= j(Cf(x) + Ch_1(x)d_1 + Ch_2(x)d_2) \end{aligned} \quad (5)$$

滑模运动包括系统从任意初始状态趋向切换面,直至切换面的趋近运动和趋向运动到达滑模面的滑模运动两个过程,趋近运动即为 $s \rightarrow 0$ 的过程,滑模到达条件为 $s\dot{s} < 0$ 。为简化计算与分析,选择等速趋近律方法设计滑模控制器,改善趋近运动的动态品质。等速趋近律为:

$$\dot{s} = -\eta \text{sgn}(s) \quad \eta > 0 \quad (6)$$

式中: η —系统的运动点趋近切换面 $s = 0$ 时的速率。 η 的大小与趋近速度成正比,但太大会导致运动点到达切换面时具有较大速度,从而产生大幅抖振。

令 $\eta = jR$ R 为滑模控制器的控制增益,则通过控制给水流量调节蒸汽温度的温度控制器算法为:

$$u = [Cg(x)]^{-1} [\dot{y}_d - Cf(x) - Ch_1(x)d_1 - Ch_2(x)d_2 - R\text{sgn}(s)] \quad (7)$$

式中:

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ -1 & s < 0 \end{cases}$$

最后,对该滑模控制器进行性能分析,定义李雅普诺夫函数 $V(x) = \frac{1}{2}s^2$,到达切换面时系统全局稳定的条件^[5]为:

$$\dot{V}(x) = s\dot{s} = -\eta|s| \leq 0 \quad (8)$$

根据已选择的等速控制律型切换函数,其完全满足上述要求,因而能很好地达到控制目标。

2.2 温度控制器设计

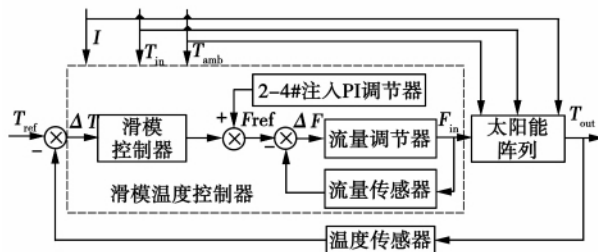


图2 滑模温度控制器结构

图2为滑模温度控制器设计原理图,由串级温度主调节器、给水阀流量调节器及2号~4号注入

流量 PI 调节器构成。考虑到蒸汽温度的稳定性与准确性,只有 2 号~4 号集热器依据实际与期望温度进行注入水量的 PI 调节。因而给水阀依据串级温度主调节器设定流量值与注入流量 PI 调节器调节值调节给水流量,进而调节 1 号集热器入口给水及 2~4 号集热器注入水流量,以保证各级集热器温度达期望值要求。

根据式(3),定义切换函数为 $s = j(y - y_d)$,得到本研究的太阳能阵列滑模温度-流量串级控制器主调节器为:

$$u = [mg(x)]^{-1} [\dot{y}_d - R \operatorname{sgn}(s) - mf(x) - mh_1(x) d_1 - mh_2(x) d_2] \quad (9)$$

式(9)根据太阳能阵列出口蒸汽温度计算得出应送入太阳能阵列 1 号集热器的给水流量,控制器增益 R 可从计算值的稳定性角度设计经验值,而各个 PI 调节器的比例与积分参数也是以“快、准、稳”为控制目标进行工程经验值整定。

3 仿真试验

在和利时公司 Codesys 控制算法软件平台上编程实现滑模温度控制器的设计,以集热管类型为 PTIII,型号为 HY-TroughIII60-2 的华园槽式太阳能集热器参数为仿真参数,在太阳能阵列模块化结构上进行仿真运行。

在太阳能阵列启动阶段,当实际给水流量已达到最大给水流量设定值后,太阳能阵列模块化结构顺序启动,当 5 号集热器蒸汽输出阀开启,滑模温度控制器投入运行,各个注入流量 PI 调节器也投入运行。考虑到注入流量对各级集热器出口温度稳定性影响,在不投入注入流量 PI 调节器的条件下,该滑模温度控制器仿真试验结果如图 3~图 6 所示。

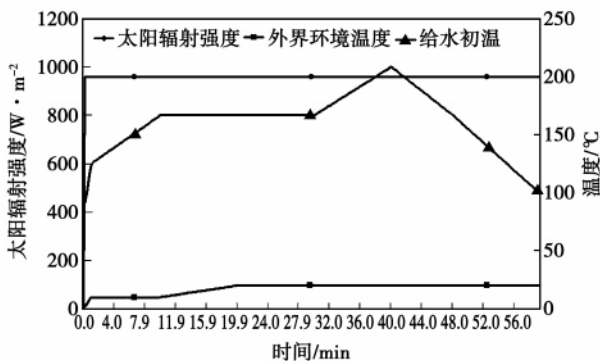


图 3 滑模温度控制器运行外部干扰曲线

在外界强干扰下(如图 3 所示),太阳能阵列出口蒸汽温度稳定并达到期望值(如图 4 所示),各级集热器出口给水/蒸汽温度稳定(如图 5 所示),但给水流量波动较大(如图 4 所示),不利于给水阀调节,与实际电站运行情况不符,且在调节控制器增益后,蒸汽温度仍有 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的波动,蒸汽温度稳定性较差。原因在于未考虑管内工质的延时,实际蒸汽温度变化过快,导致串级主调节器运行值随之快速变化,使蒸汽温度与给水流量波动,为保证蒸汽温度与流量调节的匹配性,应考虑吸收管内工质延时。吸收管内工质的延时为:

$$t_d = \frac{L_2}{c} = \frac{L_2 A_1}{v(T_m) F_e} \quad (10)$$

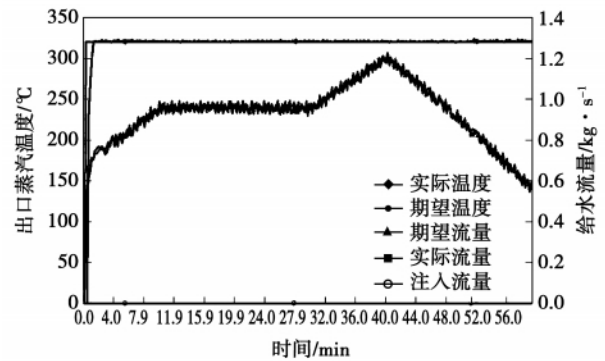


图 4 太阳能阵列出口蒸汽温度-给水流量曲线

考虑时间常数 t_d 的惯性环节作用于太阳能集热器子模块后,仿真试验曲线如图 6~图 8 所示。

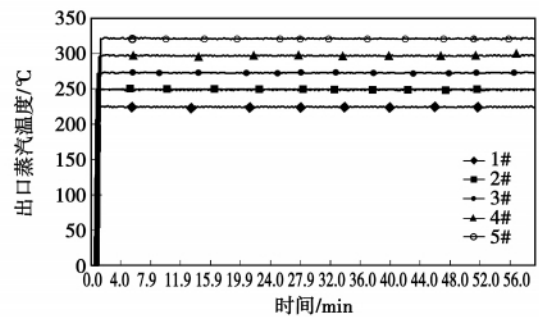


图 5 太阳能集热器出口蒸汽温度曲线

在考虑集热管内工质延时后,在外界干扰影响下,如图 6 所示,以蒸汽温度的稳定性与准确性为目标,在 0.2~1.0 范围内调节滑模控制器增益时,温度与流量曲线变化非常平稳,如图 7 和图 8 所示,实际蒸汽温度稳定于期望值。仿真试验得到的滑模温度控制器性能如表 1 所示。

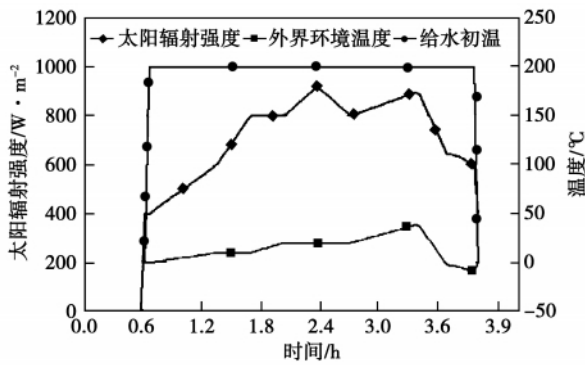


图 6 滑模温度控制器运行外部干扰曲线

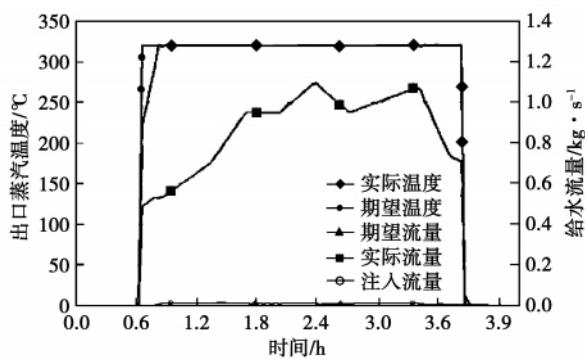


图 7 太阳能阵列出口蒸汽温度-给水流量曲线

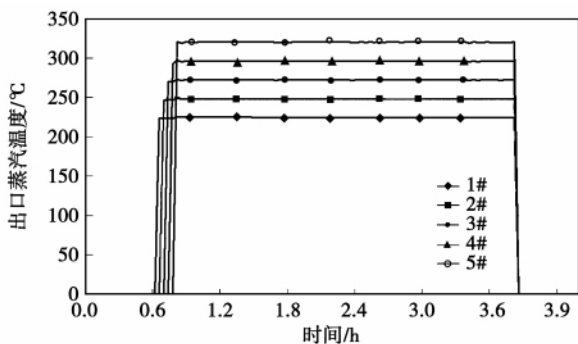


图 8 太阳能集热器出口蒸汽温度曲线

表 1 滑模温度控制器控制性能

集热器	太阳能阵列	各级集热器				
		1号	2号	3号	4号	5号
期望值/°C	320	224	248	272	296	320
峰值/°C	320.22	224.76	248.77	272.57	296.3	320.22
超调/%	0.069	0.339	0.311	0.21	0.101	0.069

由表 1 可知: 滑模控制器增益过小时, 温度控制器调节极慢, 实际温度偏离期望值, 经过一段时间后才可达到期望值; 滑模控制器增益过大时, 实际温度可保持在期望值, 但有明显的抖振现象, 给水流量波动频率与振幅都比较大, 不符合系统控制要求。因而应选择适合的控制器增益, 才能保证较好的温度控制器控制性能。

4 结 论

针对注入模式运行的 DSG 槽式太阳能热发电系统蒸汽温度难以控制的问题, 创新性地运用滑模控制算法进行温度控制器设计并进行仿真试验, 得到如下结论:

(1) 滑模控制算法创新性应用于该系统温度控制是可行的。

(2) 温度控制器操作便捷, 可接受度较高, 系统稳定性与准确性, 及抗干扰性较好, 完全体现了注入模式蒸汽流状态高可控性优势。

(3) 滑动模式的不变性有利于太阳能热发电系统的控制, 且滑模控制调节作用较为迅速。由于存在无法避免的抖振问题, 只能将抖振降到最小, 其实际应用的可行性还有待于进一步的深入研究。

参考文献:

[1] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[2] CAMACHO E F, RUBIO F R. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part I: Modeling and basic control approaches [J]. ScienceDirect: Solar Energy, 2007, 81: 1240 - 1251.

[3] VALENZUELA L, ZARZA E. Control scheme for direct steam generation in parabolic troughs under recirculation operation mode [J]. ScienceDirect: Solar Energy, 2006, 80: 1 - 17.

[4] CIRRE CRISTINA M, MANUEL BERENGUEL. Feedback linearization control for a distributed solar collector field [J]. ScienceDirect: Control Engineering Practice, 2007, 15: 1533 - 1544.

[5] 方勇纯, 卢桂章. 非线性系统理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

different water flow rates and the corresponding output characteristics of the photovoltaic cells were studied. The test results show that when the temperature of the heat dissipating device is 1373 K, the cooling water flow rate reaches 25 mL/s and the cell temperature hits 302 K, the heat dissipating device thus designed can effectively control the temperature of the photovoltaic cells. By using the software Fluent, the influence of such structural parameters as the height and number of guide baffles, and the diameters of the cooling water inlet and outlet tubes etc. on the performance of the device was analyzed. The calculation results show that to increase the diameters of the cooling water inlet and outlet tubes can effectively reduce the pressure loss but not affect the heat dissipating effectiveness. The numerical simulation results are in a relatively good agreement with the test ones, thus verifying the correctness of the numerical simulation method. **Key words:** thermophotovoltaic power generation system, water-cooled heat dissipating device, cell temperature, pressure loss

注入模式下 DSG 槽式系统滑模温度控制器设计 = **Design of a Sliding Mode Temperature Controller in a DSG (Direct Steam Generation) Trough Type System Under an Injection Mode** [刊, 汉] PAN Xiao-di, WANG Gui-rong (College of Electromechanical Engineering, China Metering College, Hangzhou, China, Post Code: 310018), JI Yun-feng (Hangzhou Hollysys Automation Co. Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310018) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 466 ~ 470

With a solar energy array in a DSG (direct steam generation) trough type solar energy power generation system under an injection mode serving as an object of study, designed was a temperature controller by creatively employing a sliding mode control and combining the PI (proportional and integral) control algorithm with the cascade one. Moreover, the steam temperature control was studied by using a method integrating the theoretical analysis with the simulation investigation. Under the condition that the sunshine illumination intensity is allowed and the feedwater has been heated and stabilized at 200 °C, the steam temperature at the outlet of the solar energy array was controlled to stably and accurately attain 320 °C by adjusting the feedwater flow rate of the feedwater valve and the steam temperature at the outlet of various stages of the heat accumulator was controlled and stabilized at a value above the expected one, thus preliminarily solving the problem in controlling the stability and accuracy of the steam temperature at the outlet of the solar energy array. It has been found that to use the sliding mode algorithm to control the steam temperature of a solar energy array is fully feasible and the stability, accuracy and disturbance-resistant control performance are relatively good. **Key words:** DSG (direct steam generation), solar energy array, injection mode, nonlinear equation, outlet temperature, cascade control, sliding mode algorithm

严寒地区太阳能-土壤源热泵运行经济性分析 = **Analysis of the Operation Cost-effectiveness of a Solar Energy-Soil Source Heat Pump in Frigid Regions** [刊, 汉] LIU Yi, LI Bing-xi, FU Zhong-bin (College of Energy