

塔式太阳能热发电自主式定日镜系统设计

刘 琨¹, 邹琴梅², 胡玉超¹, 黄文君², 祝雪妹³

(1. 中控科技集团有限公司, 杭州 310053; 2. 浙江大学 智能系统与控制研究所, 杭州 310027;
3. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 南京 210042)

摘 要: 设计了一种应用于塔式太阳能热发电聚光系统的具有自主供电和智能跟踪功能的定日镜. 该定日镜采用小面积的反射镜面, 具有高度角和方位角二维转动功能, 并采用低功耗的微控制器实现对太阳实时有效地跟踪, 基于无线技术实现定日镜控制器与中央服务器的无线通讯, 采用太阳能光伏组件和可充电电池实现定日镜两轴电机的功率驱动和持续运转, 并进一步优化定日镜的间歇式跟踪, 以保证整个系统低功耗运行. 通过设计分析和仿真验证, 该系统能实现最大 3 m^2 镜面的定日镜的自主式供电和智能跟踪.

关键词: 塔式太阳能发电; 定日镜; 自主式供电; 智能跟踪

中图分类号: TK 519

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2014)07 - 1073 - 06

Design of Self-powered Heliostat in Concentrating Solar Tower Power Plant

LIU Kun¹, ZOU Qin-mei², HU Yu-chao¹, HUANG Wen-jun², ZHU Xue-mei³

(1. Zhejiang SUPCON Technology Co., Ltd., Hangzhou 310053, China;

2. Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: This paper proposed a small size heliostat that was self-powered and realized zenith-azimuth sun-tracking intelligently. It implemented the real-time and efficient track of the sun with the low-power microcontroller, and had wireless communication between the microcontroller and the central server based on wireless technology. The two-axis motors of heliostats achieved power-driving and sustainable operation with PV modules and rechargeable batteries. Moreover, the interval sun-tracking of the heliostat was optimized to guarantee the system operating in the low-power state. Through theoretical analysis and simulation, self-powered and intelligent-tracking properties of the maximum area heliostat with a mirror of 3 m^2 were validated.

Key words: solar tower power plant; heliostat; self-powered; intelligent-tracking

塔式太阳能热发电技术是已开发的太阳能技术的一种^[1], 具有发电效率高、高温蓄热等优点^[2]. 定

日镜是塔式太阳能热发电技术的关键部件之一, 其成本约占发电厂总投资的 50%^[3]. 以往定日镜设

收稿日期: 2013-04-10

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2013AA050201); 国家自然科学基金资助项目(61273100)

作者简介: 刘 琨(1981—), 女, 工程师, 主要从事工业控制系统、太阳能热发电技术与产业化方面的研究, E-mail: liukun@supcon.com

通信作者: 黄文君(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事自动控制技术、实时分布式控制系统、工业以太网技术方面的研究, E-mail: wjhuang@iipc.zju.edu.cn

计追求大型化,虽然机械成本有所降低,但是系统成本却被抬高.定日镜的传动机构^[3]比较复杂,跟踪精度^[4]要求高,使定日镜制造成本大幅上升.另外,定日镜供电系统都来自于固定的电源模块,增加了电力成本.

本文针对定日镜数量巨大而引起定日镜控制系统复杂、需耗费大量的供电电缆和通讯线路来实现全局跟踪控制的诸多缺点,提出了一种能实现自主供电和智能跟踪的小面积定日镜^[5].小面积定日镜的平整度较好,它既可降低聚光的光斑形变率,又可通过超大齿轮传动比的传动机构实现高精度智能跟踪和降低定日镜的制造成本.该定日镜基于无线通讯技术^[6]实现了定日镜微控制器与中央服务器的无线通讯,采用低功耗的微控制器^[7]实现了智能跟

踪和控制,采用太阳能光伏电池和可充电电池实现了定日镜跟踪系统的两轴电机的功率驱动和可持续运转,并优化定日镜跟踪运转特性实现了其间歇式运转,以保证整个系统低功耗运行.

1 自主式定日镜系统

本文提出的定日镜控制系统如图1所示.该系统主要包括定日镜、光伏板、可充电电池(蓄电池)、定日镜微控制器、智能跟踪传动机构和无线通讯设备.

定日镜功耗小,因此设计合适的光伏板尺寸和可充电电池容量来实现其自主式跟踪供电,可减少供电电缆成本.采用无线通讯技术和跟踪控制算法实现定日镜智能跟踪,可减少通讯线路成本.

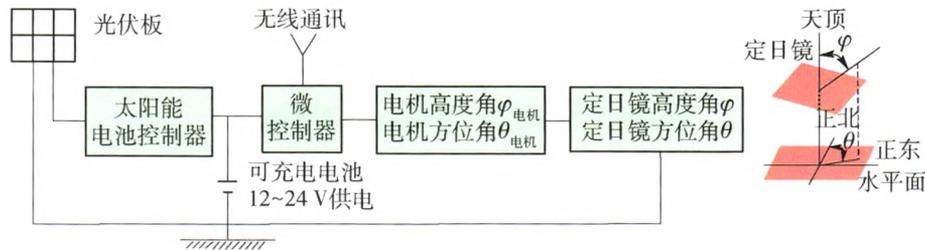


图1 定日镜控制系统

Fig 1 Control system of the heliostat

1.1 自主供电和低功耗设计

本文采用低功耗微控制器实现定日镜的智能跟踪控制算法,上位机对定日镜控制采用间歇式通讯,定日镜实现间歇式运转,均保证系统低功耗运行.以青海德令哈地区(纬度 36.68° ,经度 97.25°)的设计为例,150面定日镜为一个镜行,对其所需的光伏板尺寸及蓄电池容量进行设计.

1) 光伏板尺寸

$$P = Q_L U 1.05 (D_c / D_{mc} + 1) 1.24 / h \quad (1)$$

式中: Q_L 为负载日平均耗电量(工作电流乘以日工作小时数); U 为系统电压;1.05是系统损耗系数; D_c 为最长连续阴雨天数; D_{mc} 为2组最长连续阴雨之间的最短间隔天数; h 为每天平均的有效光照时间.

其光伏板功率为

$$P = 1.05 \times 12 \text{ A} \times 9 \times 24 \text{ V} \times (1/7 + 1) \times 1.24 / 5.2 = 741.7 \text{ W} \quad (2)$$

约需要750W的光伏组件.可配置130W(1480mm×665mm)光伏组件6块,给24V蓄电池组充电的太阳能组件额定输出电压35.5V.

由式(2)可知,考虑光伏板的光电转化效率约

为10%左右,每面定日镜所需日平均功率约为0.5W,满足低功耗设计.

2) 蓄电池容量

$$C = S \times Q_L \times (D_c + 1) \times T_m / x \quad (3)$$

式中: S 为安全系数(包括蓄电池内损和线缆损耗,取1.1~1.4); T_m 为温度修正系数(一般在 0°C 以上取1, -10°C 以上取1.1, -10°C 以下取1.2); x 为蓄电池放电深度,一般取0.8.

其蓄电池容量为

$$C = 1.1 \times 12 \text{ A} \times 9 \text{ h} \times 2 \times 1.2 / 0.8 = 356.4 \text{ A} \cdot \text{h} \quad (4)$$

蓄电池充满电压为28.8V,蓄电池容量不足的保护电压为22V,蓄电池供电电压范围内满足系统正常工作.

3) 间歇式运转特性分析

理想情况下,定日镜需每时每刻对太阳进行智能跟踪,调整姿态保证其最佳的聚光效果.这会极大减小定日镜的使用寿命,同时增加定日镜工作运行总功耗.本文研究的定日镜采用间歇式运转.由于太阳的位置在1min内变化较小,由此引起的定

日镜转动的角度变化也较小,因此,完全可通过合理设计定日镜的转动速度,保证定日镜在 1 min 内只需转动几秒,剩余时间处于待机状态,既可以实现其最佳的聚光效果,又能保证整个系统的低功耗运行.

1.2 无线通讯与智能跟踪控制

在地平坐标系中,太阳高度角 h_s 和方位角 θ_s 如图 2 所示. 太阳高度角 h_s 为自观察者所在地的地平面至观察者与太阳连线之间的夹角;太阳方位角 θ_s 为自观察者所在地朝正北的水平线至观察者与太阳连线在地平面上的投影之间的夹角. 太阳高度角和方位角由以下 2 式^[8]可得:

$$\sin h_s = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (5)$$

$$\cos \theta_s = \frac{\sin h_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos h_s \cos \phi} \quad (6)$$

式中: δ 为太阳赤纬角; ϕ 为当地的纬度; ω 为太阳时角.

利用光学反射原理,定日镜高度角 φ 和方位角 θ 如图 3 所示. 定日镜高度角 φ 为定日镜平面与水平面的夹角;定日镜方位角 θ 为定日镜表面法线在地平面上的投影与正北方的夹角. 定日镜和吸热器中心相对于原点的向量分别为 x_h 和 x_r . 反射单位向量为 $r = \left(\frac{x_r - x_h}{\| \cdot \|} \right)^T$,太阳光入射单位向量 $s = [-\cos \theta_s \cos h_s, \sin \theta_s \cos h_s, \sin h_s]^T$, z 为初始状态下 z 轴的方向单位向量,且 $z = [0, 0, 1]^T$.

定日镜、吸热器和太阳在直角坐标系中相对位置如图 4 所示.

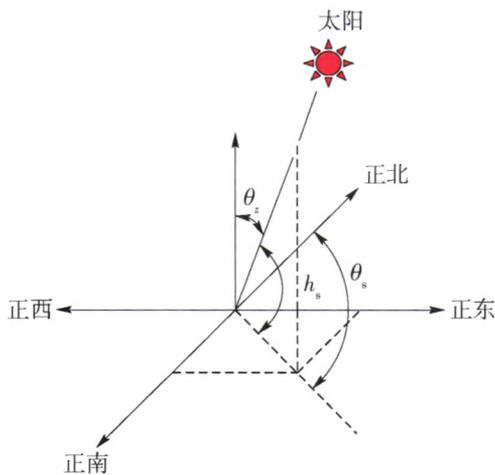


图 2 太阳角度定义
Fig. 2 Sun's angles definition

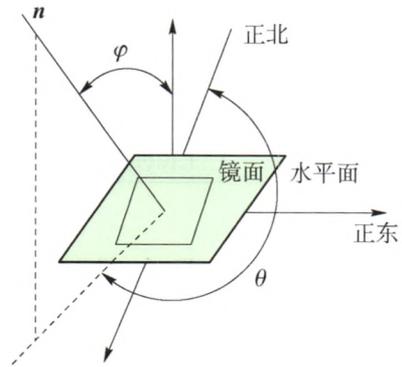


图 3 定日镜角度定义
Fig. 3 Heliostat's angles definition

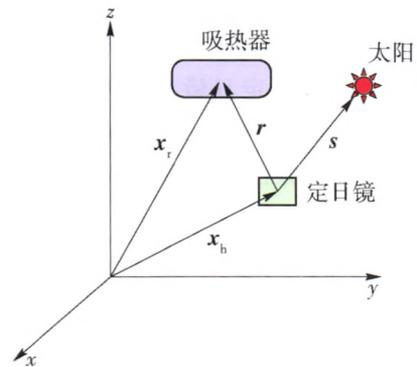


图 4 定日镜、吸热器和太阳相对位置
Fig. 4 Relative position of the heliostat, the receiver and the sun

$R_z(\theta)$ 、 $R_y(\varphi)$ 为旋转矩阵,则定日镜高度角和方位角计算式为

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

定日镜无线通讯和智能跟踪流程见图 5. 根据式(5)(6),提前一天计算定日镜所在地的太阳高度角和方位角并存储在上位机的存储器中. 根据 GPS 提供的定位授时和通过 Zigbee 无线通讯技术,上位机每间隔 1 min 将其存储器中的太阳高度角和方位角下发给定日镜微控制器,电机根据微控制器的跟踪控制指令进行定日镜高度角和方位角的调整.

本文研究的定日镜微控制器为 TMS320F2801. 该控制系统每隔 15 min 和 GPS 时钟校正一次时间,每隔 1 min 上位机通过 Zigbee 无线通讯技术将太阳高度角和太阳方位角下发给微控制器 TMS320F2801.

微控制器 TMS320F2801 根据式(7)~(8)计算出定日镜的方位角和高度角.

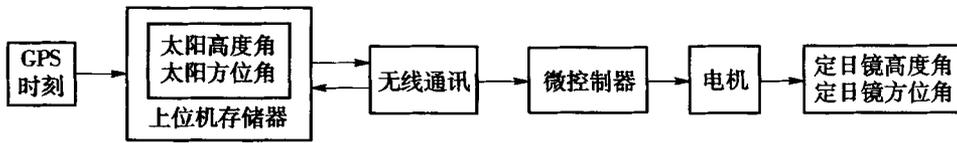


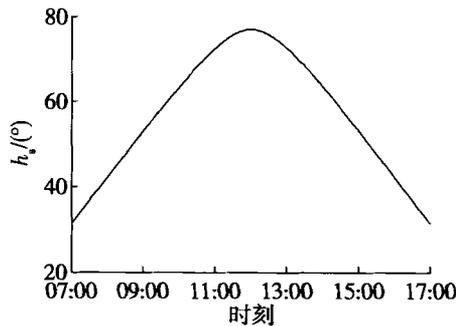
图5 无线通讯和智能跟踪流程

Fig. 5 Flowchart of wireless communication and intelligent-tracking

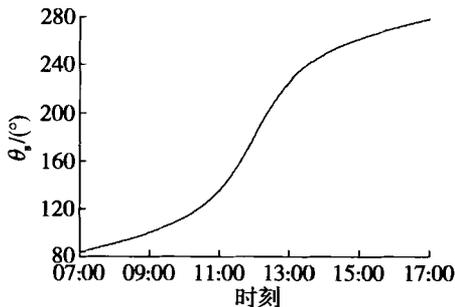
2 系统分析与仿真测试

2.1 定日镜智能跟踪

对青海德令哈夏至日(2010-06-22)进行仿真,德令哈地区纬度为 36.68° , 经度为 101.68° . 坐标系以吸热器基座中心为原点, 正北为 x 轴, 正东为 y 轴, 天顶方向为 z 轴. 定日镜参数为 $(60, 0, 0.5)$ m, 吸热器中心点坐标 $(0, 0, 50)$ m. 通过仿真, 太阳和定日镜的高度角和方位角如图6和图7所示.



(a) 太阳高度角 h_s 随时刻变化曲线



(b) 太阳方位角 θ_s 随时刻变化曲线

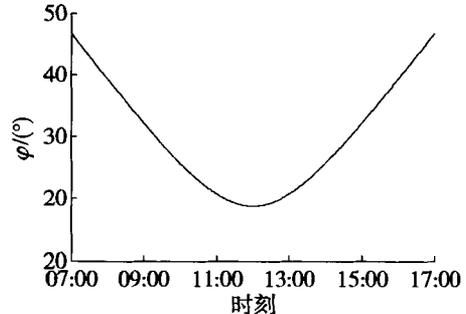
图6 夏至日太阳高度角 h_s 和方位角 θ_s 随时刻变化曲线

Fig. 6 Curve of the sun's zenith and azimuth angles with moment T in summer solstice

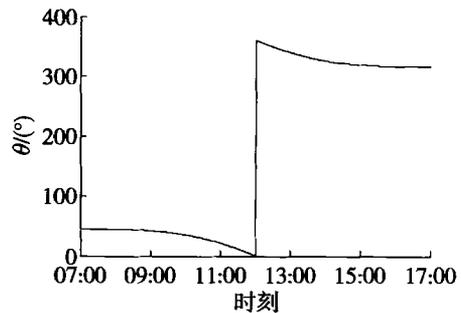
太阳角度和定日镜角度的变化规律为:

1) 图6中, 夏至日太阳高度角先增大后减小, 符合太阳东升西落现象; 太阳方位角呈递增规律, 与太阳和地球的相对运行规律一致.

2) 图7中, 夏至日定日镜高度角先减小后增



(a) 定日镜高度角 ϕ 随时刻变化曲线



(b) 定日镜方位角 θ 随时刻变化曲线

图7 夏至日定日镜高度角 ϕ 和方位角 θ 随时刻变化曲线

Fig. 7 Curve of heliostat's zenith and azimuth angles with moment T in summer solstice

大, 与太阳高度角变化相反, 符合光学反射原理和本文对太阳角度和定日镜角度的定义. 按照定日镜方位角定义, 定日镜方位角始终递减, 转动方向单一. 定日镜方位角在12点出现跳变, 和定日镜方位角定义相关.

定日镜的高度角和方位角可随太阳角度变化而变化, 达到智能跟踪太阳的目的.

2.2 定日镜 1 min 间歇式运转

通过综合计算, 驱动 3 m^2 镜面的定日镜的双轴电机转动功耗为 18 W , 通讯功耗为 1 W , 待机功耗为 0.4 W . 由于通讯速度较快, 暂且忽略通讯时间. 主要考虑定日镜转动和待机2个状态. 基于选择的控制电机和传动部件传动比和定日镜扭矩要求, 定日镜运转速度为 $1.5^\circ/\text{s}$. 对位于 $(60, 0, 0.5)$ m 的定日镜进行仿真, 该定日镜在春分、夏至、秋分和

冬至的间歇式运转特性如表 1 所示. 冬至日定日镜运转时间最大, 夏至日定日镜运转时间最小, 春分和秋分定日镜运转时间居中并基本相等, 符合太阳的运行规律. 仿真结果验证了定日镜间歇式运转使系统处于低功耗运行状态, 其能量完全可由光伏组件和可充电电池供给.

2.3 定日镜能耗动态分布

表 2 为定日镜在不同位置、时节(春分、夏至、秋分和冬至)的能耗动态分布, 以 1 min 时间计算为基准. 同一位置的定日镜, 间歇式运转的最大时刻基本相同, 并不会随着季节有大幅度变化; 相同时节

的定日镜, 随着定日镜位置西移, 其间歇式运转的最大时刻变大. 上述规律符合太阳东升西落的规律.

表 1 不同时间定日镜间歇式运转特性
Table 1 Interval property of the heliostat

时间	1 min 内运转 最大角度/(°)	1 min 内最大 运转时间/s	最大瞬时 功率/W
春分	1.49	0.99	0.69
夏至	0.44	0.29	0.49
秋分	1.57	1.05	0.71
冬至	2.40	1.60	0.87

表 2 不同位置、时节, 定日镜能耗动态分布

Table 2 Energy dynamic distribution of heliostats in different seasons

定日镜位置/m	时节	最大瞬时能耗的时刻	最大瞬时能耗/J	日需能耗/kJ	日均功耗/W
(60, 60, 0.5)	春分	9:41	45.71	13.4	0.50
	夏至	9:48	29.48	12.5	0.46
	秋分	9:40	47.14	13.5	0.50
	冬至	8:53	45.86	14.1	0.52
(60, 0, 0.5)	春分	12:02	41.49	13.4	0.50
	夏至	12:19	29.13	12.5	0.46
	秋分	11:57	42.39	13.4	0.50
	冬至	12:01	52.15	14.4	0.53
(60, -60, 0.5)	春分	14:18	45.71	13.4	0.50
	夏至	14:11	29.48	12.5	0.46
	秋分	14:19	47.14	13.5	0.50
	冬至	15:06	45.86	14.1	0.52

2.4 全镜场能耗仿真

本文镜场中定日镜面积为 3 m², 间距为 2.3 m, 镜场阵列为 150 × 150 面定日镜(150 面镜子为 1 个镜行). 对于上述镜场, 本文选择在吸热器正北方向第 1 行、第 10 行、第 50 行、第 150 行的定日镜在春分、夏至、秋分和冬至等 4 个不同时节进行日均能耗的仿真, 定日镜日均能耗 E 随正北方向距离 x_i 的变化曲线如图 8 所示. 仿真结果表明: 靠近吸热塔的定日镜日均能耗较大, 远离吸热塔的定日镜日均能耗较少, 以正北方向对称. 春分和秋分日均能耗分布特性基本一致, 夏至和冬至日均能耗差别较大, 这主要和太阳轨迹及定日镜位置有关. 夏至和秋分阳光比较充足, 适宜发电. 以夏至为例, 镜行日均能耗

最大为 1.88 MJ, 单面定日镜日均功耗为 0.46 W, 则 150 面定日镜日均功耗共约为 69 W. 考虑设计的光伏板光电转化率为 10%, 则所需光伏板功率为 690 W. 本文设计的 750 W 的光伏板和仿真结果基本一致.

3 结论

应用于太阳能热发电聚光系统的智能定日镜控制系统实现了定日镜自主式供电和智能跟踪, 显著降低了系统成本, 并具有安装简单、功耗低等特点. 本文设计的定日镜还需在温度、湿度和沙尘等不同工况下进行具体化设计.

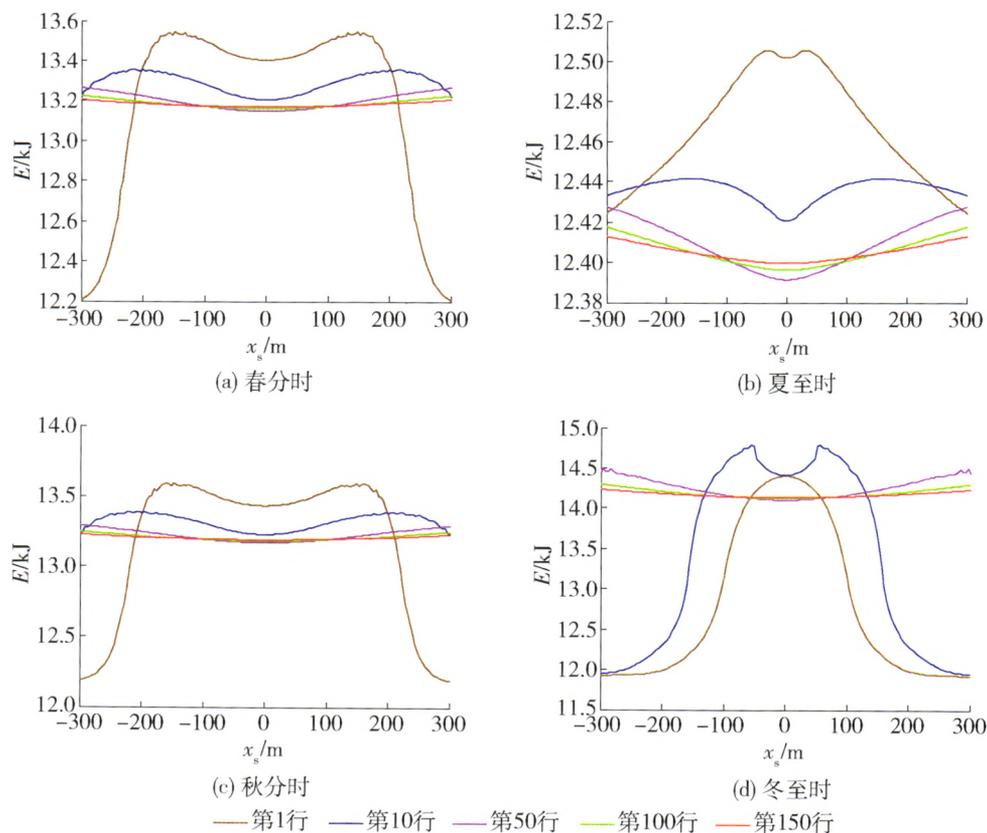


图8 定日镜日均能耗 E 随正北方向距离 x_s 的变化曲线

Fig. 8 Curve of average daily energy of heliostat with its north projection distance away from the receiver

参考文献:

- [1] PAVLOVIĆ T M, RADONJIĆ I S, et al. A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3891-3902.
- [2] YANG M L, YANG X X, YANG X P, et al. Heat transfer enhancement and performance of the molten salt receiver of a solar power tower [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(9): 2808-2811.
- [3] 王昱涵, 余小孔. 定日镜反射板力学模型及设计方法 [J]. *太阳能学报*, 2011, 32(11): 1636-1639.
WANG Yu-han, YU Xiao-kong. Mechanical model and design method for reflector plate of heliostat [J]. *Solar Energy*, 2011, 32 (11): 1636-1639. (in Chinese)
- [4] 马建华. 塔式定日镜跟踪控制系统的研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学机械电子工程学院, 2010.
MA Jian-hua. Study on a tracking control system for tower heliostats [D]. Hangzhou: Department of Mechanical and Electronic Engineering, Hangzhou Dianzi University, 2010. (in Chinese)
- [5] 马佩杰, 汪知恩. 利用小镜阵列聚光太阳能系统的研究 [J]. *上海电力学院学报*, 2010, 26(6): 555-558.
MA Pei-jie, WANG Zhi-en. Research on solar concentrating systems using minimirror array [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2010, 26(6): 555-558. (in Chinese)
- [6] 张磊, 胡永刚. 一种 Zigbee 网络群控聚光光伏系统设计 [J]. *皖西学院学报*, 2011, 27(5): 76-79.
ZHANG Lei, HU Yong-gang. Design of a kind of group control CPV system based on Zigbee network [J]. *Journal of West Anhui University*, 2011, 27 (5): 76-79. (in Chinese)
- [7] 郭铁铮, 刘德有, 钱艳平, 等. 基于 DSP 的定日镜跟踪控制系统研究 [J]. *太阳能学报*, 2010, 31(1): 5-11.
GUO Tie-zheng, LIU De-you, QIAN Yan-ping, et al. Study on tracking control system of heliostat based on a DSP-controlled [J]. *Solar Energy*, 2010, 31(1): 5-11. (in Chinese)
- [8] 张闯, 吕东辉, 项超静, 等. 太阳实时位置计算及在图像光照方向中的应用 [J]. *光电测试技术*, 2010, 33(11): 87-93.
ZHANG Chuang, LÜ Dong-hui, XU Chao-jing, et al. Computation for solar real-time position and its application in illuminant direction of image [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33 (11): 87-93. (in Chinese)

(责任编辑 张 蕾)