

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.050

太阳能饲草干燥空气集热器自动跟踪系统应用研究*

杜建强¹ 张俊国¹ 郭志平² 石文斌³

(1. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010010; 2. 内蒙古工业大学机械学院, 呼和浩特 010051;

3. 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 呼和浩特 010020)

摘要: 为了提高太阳能饲草干燥设备空气集热器对太阳能的吸收集热效率,最大限度的利用太阳能,分析了太阳能空气集热器自动跟踪太阳技术,比较了被动跟踪模式和主动跟踪模式运行过程中的优缺点。针对太阳能饲草干燥空气集热器提出了被动跟踪模式与主动跟踪模式相结合的单轴跟踪结构,该跟踪模式结合了两种跟踪模式的优点,很好地克服了两者的不足。试验表明,本系统适用于太阳能饲草干燥,转动跟踪精度高,工作稳定性好,而且太阳能接收损失小,结果显示本系统可使集热器出口温度平均提高 15℃,集热器效率得到提高,达到太阳能饲草干燥设备优化的目的。

关键词: 太阳能 集热器 太阳跟踪 饲草 干燥

中图分类号: S375; S818.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0309-05

引言

太阳能作为一种取之不尽、用之不竭的清洁能源,具有很大的开发潜能。结合内蒙古自治区农牧业发展需求和新能源应用研究,在收获和制备干草过程中,利用太阳能干燥设备进行饲草的干燥处理,干燥后饲草的品质高、成本低、经济效益显著^[1]。但太阳能利用效率低这一问题始终阻碍着太阳能饲草干燥设备的普及和推广。目前我国太阳能饲草干燥设备中大多数太阳能空气集热器为平板式集热器^[2],倾斜一定角度朝南固定安装,集热效率小于 0.5。为了提高太阳能的接收效率,提高设备生产率,提出一种太阳跟踪技术应用到牧草干燥设备的方法,通过跟踪太阳,可使太阳照射过程中集热器受光面与太阳光线始终保持垂直,在有效的使用面积内能够收集到更多的太阳能,进而提高干燥设备的生产效率。目前太阳跟踪技术主要用于太阳能发电领域,而在太阳能饲草干燥领域中与太阳能发电所使用的跟踪系统在工作状况、结构原理和控制策略上都有很大的差异。太阳能发电主要工作部件为光伏电板,外形简单,通过电缆直接输出电流,跟踪方式采用双轴跟踪系统,跟踪传感器采用四象限探测器^[3],而太阳能饲草干燥工作过程是通过集热器把太阳能转化为空气的热能,输出热空气吹入干燥

仓完成饲草的干燥,在跟踪系统的研究设计中需考虑支撑和传动部分的强度可靠性、输出需要连接风管的结构布局,因此跟踪方式设计为单轴跟踪,采用光敏二极管进行光线的追踪,同时还要根据跟踪模式、干燥饲草工况下季节性和时效性设计相应的控制策略和程序,同太阳能发电跟踪系统有很大的区别。从跟踪系统的应用效果来看,依据对以往太阳跟踪方面所做的试验,对于相同规格的太阳能平板集热器,在不同接收方式下对其进行辐射值的测量,采用太阳跟踪技术的集热器要比朝南以一定角度固定安装的集热器所接收到的太阳辐射量多 3 倍,而且通过理论对比分析,跟踪与非跟踪两者之间的太阳能接收效率可相差 37.7%。可见太阳能饲草干燥空气集热器自动跟踪系统的研究可以使空气集热器接收太阳能的效率大大提高,有效地缩短饲草干燥的作业时间,达到太阳能饲草干燥设备优化的目的。本文从跟踪模式开始分析,并根据目前跟踪模式存在的问题,提出解决方案并进行设计优化。

1 跟踪模式的确定

太阳自动跟踪从跟踪模式上可分为两大类^[4]。一类是主动式跟踪:依据太阳单位时间转过的角度计算出太阳能接收装置自身单位时间所转过的角度,角度信号驱动步进电动机转动保证太阳能空气

收稿日期: 2014-07-19 修回日期: 2014-08-09

* 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2013MS0727)

作者简介: 杜建强,高级工程师,博士,主要从事太阳能干燥技术及装备研究,E-mail: djq968@163.com

通讯作者: 郭志平,教授,博士生导师,主要从事机械设计及理论研究,E-mail: 121375322@qq.com

集热器接收面与太阳入射光线的垂直。另一类是被动式跟踪:通过光电传感器对太阳光强进行检测,由于太阳偏转,光电传感器会产生一个光强变化的反馈信号,经放大整理后送入到控制单元,控制单元负责驱动步进电动机转动来使太阳能接收装置对准太阳。由于主动式跟踪是通过计算每一时刻太阳的空间位置来完成跟踪,长时间运行会产生计算的累积误差,导致跟踪精度降低。而被动式跟踪主要优点是对太阳的位置变化反应灵敏,跟踪精度高,但缺点是容易受到外界环境的干扰,稳定性差,如遇到多云、阴天、雨雪等天气状况时,可能导致跟踪装置无法对准太阳甚至出现误动作。从跟踪系统结构上又可分为双轴跟踪和单轴跟踪系统。双轴跟踪系统是通过两根旋转轴来完成对太阳方位角和高度角全方位的精确跟踪,该系统结构复杂,维修困难,而且成本偏高,目前主要应用于太阳能发电领域;相比双轴跟踪系统,单轴跟踪系统仅有一根转动轴对太阳进行方位角或者高度角的跟踪,系统结构简单,成本较低。根据牧草干燥设备实际的工作情况分析,由于太阳能饲草干燥空气集热器上连有风管,将热空气通过风管输出到干燥仓内对饲草进行干燥,这就在结构上约束了空气集热器的运动自由度,双轴跟踪在结构上不太容易实现,因此决定采用单轴跟踪结构,对太阳自东向西进行方位角的跟踪,高度角在短时期内变化不大可根据当地的地理位置等环境条件定期人为地对集热器支架进行调整。跟踪模式上采用主动跟踪与被动跟踪相结合的混合跟踪模式,解决了跟踪误差的计算累积和外界气候原因干扰的问题,确保了系统对太阳跟踪的精确度和稳定性。

2 跟踪系统控制原理

2.1 主动跟踪算法原理

太阳方位角计算公式为

$$A = \arctan(\sin\omega / (\cos\omega\sin\varphi - \tan\delta\cos\omega)) \quad (1)$$

式中 A ——太阳方位角 ω ——太阳时角

φ ——当地的地理纬度

δ ——当天的赤纬角

太阳方位角 A 是太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角^[5-6]。

太阳时角 ω 是单位时间地球自转的角度。地球 24 h 自转 360°, 每个小时的自转角为 15°。当地正午时的时角为 0°, 上午为负, 下午为正。例如, 10:00 时, $\omega = -30^\circ$, 14:00 时, $\omega = 30^\circ$ 。

太阳赤纬角 δ 是太阳光线与地球赤道的夹角, 以北为正。一年内, 太阳赤纬角在 $\pm 23^\circ 27'$ 之间变动。确定某一天的太阳赤纬角 δ 的计算式为

$$\delta = 23.45 \sin(2\pi d/365)$$

$$\text{或 } \delta = 23.45 \sin(-360(284 + m)/365) \quad (2)$$

式中 d ——由春分算起的天数

m ——一年当中的日期序号

将计算程序写入单片机中, 系统工作时自动进行时间的读取和计算策略的执行, 由于每间隔时间段内计算得出的太阳方位角是一个近似值, 误差主要来自于时钟芯片产生的时钟误差和计算过程中对一些小数进行四舍五入后产生的计算误差, 故经过时间间隔的不断累积计算, 本系统设定为 10 min 执行一次, 误差累积会不断增加, 当累积误差达到一定时, 会导致跟踪失效, 此时需要被动跟踪来进行主动跟踪的校正和累积误差的消除。在所设计的主动跟踪系统中, 计算参数涉及到当地的地理纬度 φ , 可通过查询地理数据得出, 其他参数则通过计算得出, 由单片机中计算程序来完成, 该控制系统成本低廉, 适用于太阳能饲草干燥设备中使用, 在现有技术中也可利用 GPS 和网络授时的技术手段来降低当地地理位置和时钟芯片所产生的偏差, 从而提高主动跟踪的精度。太阳方位角最终是通过式(1)计算得出的, 计算误差难以避免, 若利用高精度卫星定位系统势必增加制造成本, 并不适用于饲草干燥这种微利行业, 因此设计中增设被动跟踪系统, 其主要工作部件被动跟踪传感器由光敏二极管、桥式电阻和运算放大器组成, 检测信号直接输入单片机, 被动跟踪装置造价低廉, 可有效消除主动跟踪产生的计算误差。

2.2 被动跟踪传感器检测电路设计

本系统的被动跟踪传感器及检测电路主要由 2 个光敏二极管与匹配电阻构成的惠斯通电桥以及信号放大器等组成, 其中光敏二极管用于检测天空光线强度位置的变化, 确定跟踪太阳的方位。光敏二极管 GL5516 为关键部件, 其主要特性是电阻随着光照强度的变化而发生变化, 阻值与所检测到的照射光强之间呈线性关系。光敏电阻分别与滑动变阻器、2 个 5 k Ω 的电阻一起组成惠斯通电桥。电压前置放大器为运算放大器, 主要作用是将桥臂的输出信号放大后, 送入单片机再进行数据处理。光电传感器电桥及输出电路如图 1 所示。

当太阳能集热器正对太阳时, 光敏二极管 G1 和 G2 所接收到的光照强度相同, 此时相应桥臂所输出的信号电压差小于设定阈值时, 驱动步进电动机不运转。当太阳能集热器偏离太阳的角度逐渐增大时, 光敏二极管 G1 和 G2 接收到不同的光照强度, 桥臂输出端电压差信号超过阈值, 如果输出为较大的正电压信号, 则通知单片机发出控制指令, 令驱动步进电动机正向转动, 直到信号压差小于阈值; 反

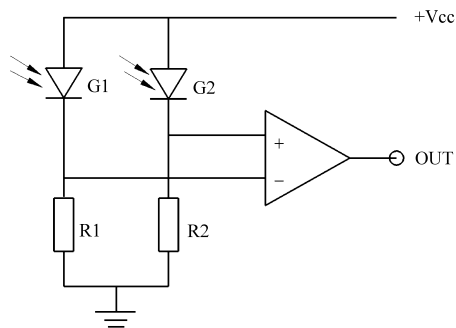


图1 光电传感器电桥及输出电路

Fig. 1 Photoelectric sensor bridge and output circuit

之,若输出一个比较大的负电压信号,则单片机指令驱动步进电动机反向转动,直到集热器对正太阳为止。

3 集热器跟踪系统与调试

3.1 系统工作原理

太阳能饲草干燥空气集热器跟踪系统采用单轴自动跟踪原理,主要包括自动控制和机械结构两大部分。机械装置由步进电动机驱动,通过传动系统使太阳能空气集热器在东西方向上 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内自由转动;控制部分采用单片机系统,单片机本身具有成本低,智能化控制程度高,而且扩展性强等优点,由单片机控制系统配合外围的电路元件共同实现对太阳能空气集热器的跟踪控制。由于太阳高度角在同一季节内变化不大,因此可以根据不同的季节,一年内手动进行几次集热器架体在太阳高度方向的调整,可满足高度角跟踪要求。工作时,单片机读取时钟芯片的时刻信息,经过内部方位角转动角度程序计算,发出指令驱动电动机使太阳运行与集热器同步转动。在集热器箱体上安装有光电传感器,光电传感器每隔一段时间检测太阳与集热器之间的同步效果,当同步产生了一定的偏差,光电传感器将偏差电信号输入单片机,单片机分析处理输出引脚发生电平变化,该变化信号经过放大电路放大来驱动步进电动机一定方向转动,驱动步进电动机再带动太阳能空气集热器绕旋转轴转过一定角度,完成方向角的校准和精确跟踪。到了夜间驱动步进电动机反转,太阳能空气集热器在设定程序控制下自动回到初始位置。太阳能空气集热器自动跟踪系统主要由5部分组成:光电转换传感器、信号输入装置、单片机处理控制系统、信号放大器和驱动步进电动机,具体控制系统硬件设计和软件编程可详见文献[3]中的相关内容。

3.2 机械结构

3.2.1 太阳能饲草干燥设备主要结构与干燥原理

太阳能饲草干燥设备主要由太阳能饲草干燥空

气集热器跟踪系统、饲草干燥仓、饲草干燥自动控制系統、饲草装卸设备等组成。其技术特征及主要工作部件:采用由支架、滚动支撑套、集热器箱体、光电传感器、齿轮副、电动机等主要部件组成的太阳能饲草干燥空气集热器跟踪系统;采用有空气分配筛的热风吹送系统;采用了由8个单元组成的干燥仓,可实现依次装仓、干燥、卸草的流水作业;饲草干燥控制系统全程实现计算机干燥仓内饲草温湿度的监测,进而控制风机风量,提高了自动化水平。

太阳能饲草干燥工艺为先将割倒的苜蓿草进行田间晾晒,待含水率降到40%左右时捡拾装车,然后通过太阳能饲草干燥设备进一步干燥处理。太阳能饲草干燥设备在作业时,先将待干燥的苜蓿草均匀地堆放在干燥仓内,起动风机,太阳能饲草干燥空气集热器跟踪系统时刻跟踪太阳,进行太阳能的高效收集,并同时加热在风机作用下流过集热器箱体中的空气,加热的空气通过风道进入空气分配筛,在风机的作用下,热空气穿透草层并从草层上部释出进入大气,热空气穿过草层时将饲草中的水分带走,即达到干燥的目的。其干燥原理如图2所示。

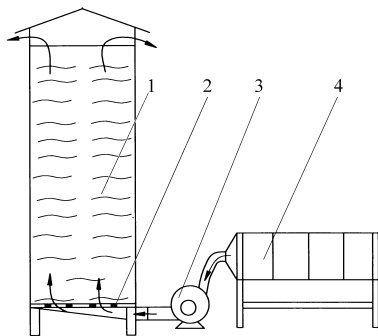


图2 太阳能饲草干燥设备原理图

Fig. 2 Structure of solar energy forage drying equipment

1. 饲草 2. 空气分配筛 3. 风机 4. 太阳能饲草干燥空气集热器跟踪系统

3.2.2 空气集热器跟踪系统结构与传动

依据太阳能饲草干燥设备主要结构与干燥原理,对关键部件太阳能饲草干燥空气集热器跟踪系统进行机械结构和传动系统的设计,机械结构如图3所示。支架置于集热器两端,通过滚动支撑套一端与出风管端转动支撑连接,另一端与传动端转动支撑连接,进风口置于集热器箱体背光面,配有入风口空气过滤筛,光电传感器置于集热器上面,步进电动机与齿轮副连接,通过太阳跟踪系统对太阳的跟踪,步进电动机驱动集热器,以滚动支撑套为支点转动。

3.3 跟踪系统的联机调试

将跟踪系统应用到 25.6 m^2 太阳能饲草干燥太阳能空气集热器中,安装于中国农业机械化科学研

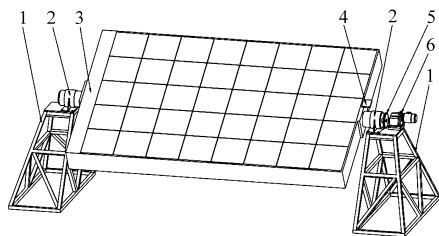


图3 太阳能饲草干燥空气集热器跟踪系统结构简图

Fig. 3 Structure diagram of solar forage drying air collector tracking system

1. 支架 2. 滚动支撑套 3. 集热器箱体 4. 光电传感器 5. 齿轮副 6. 电动机

究院呼和浩特分院太阳能试验室屋顶上面(东经 $111^{\circ}41'$,北纬 $40^{\circ}49'$),跟踪控制器的工作时间可通过程序人为设定,因日照长短不同而不同,设定从8:00工作至17:00。本太阳跟踪控制器在实际工作中效果良好。跟踪控制器如图4所示。



图4 跟踪控制器实物图

Fig. 4 Object tracking controller

4 太阳能饲草干燥集热器跟踪系统试验

试验采用对比的方法,将有自动跟踪系统的集热器和不安装自动跟踪的普通太阳能空气集热器在风量 $3000\text{ m}^3/\text{h}$ 的工况下同时运行,时间为2013年4月6日8:00~17:00,每隔1h记录1次集热器出口温度,将所测结果绘成曲线如图5所示。

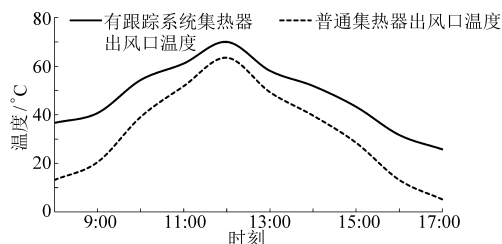


图5 有自动跟踪系统集热器与普通集热器出口温度对比

Fig. 5 Outlet temperature contrast between of automatic tracking system collector and the common one

从图中可以得出,在12:00~13:00之间,集热器出口温度达到峰值,有自动跟踪系统集热器出口温度达到 70°C ,而普通集热器出口温度也有

60°C ;早晚温度最低,有自动跟踪系统集热器出风口温度大于 30°C ,而普通集热器出风口温度仅在 10°C 左右,两种集热器之间的温差在早晚达到最大。这是由于有自动跟踪系统集热器在早晚自动跟踪太阳,提高了集热器接收太阳能的效率,而普通集热器在早晚接收太阳光时,太阳光始终处于斜射状态,集热器所得到的太阳能能流密度小,同时在集热器上产生的反射和漫反射损失增大,故集热效率偏低;中午两集热器都处在接收太阳直射光状态,故温差最小。有自动跟踪系统集热器出风口温度要比普通集热器出风口温度平均提高 15°C 。

5 自动跟踪系统与普通集热系统热收益与费用对比

根据公式 $E = Cm\Delta t$,其中 E 为所获得的能量, C 为工质比热容, m 为工质质量, Δt 为工质的温升,集热器内工质为空气,可算出 25.6 m^2 自动跟踪集热器在风量 $3000\text{ m}^3/\text{h}$ 的工况下,温度提升 15°C ,每小时可多获得 58476 kJ 的能量。由于一天中太阳的方位角变化比较慢,因此跟踪系统中采用传动比非常大的齿轮传动,以保证传动的精度和稳定性,同时集热器转动负载力矩非常小,选用 22 W 直流步进电动机即可驱动,通过饲草干燥设备试验证实该驱动系统至少还可驱动 100 m^2 以上的集热器进行跟踪,风量达到 $12000\text{ m}^3/\text{h}$,每小时可多获得 233903.7 kJ 的能量。在饲草干燥作业中,对干燥效率产生影响的因素多而复杂,包括饲草的干燥特性、饲草的温升、干燥仓的热损失和内部热气流的空气动力学特性等,故采用两套太阳能饲草干燥设备同时进行试验,集热面积都是 100 m^2 ,其中一套配有自动跟踪集热系统,另一套不带跟踪的普通集热系统,集热器朝南固定倾斜布置,倾角 30° 。试验物料选定为紫花苜蓿,2013年8月6日9:00时开始,首先通过快速水分测定仪,测得苜蓿初始平均含水率为 45% ,然后在两套干燥设备干燥仓中分别放入等量苜蓿 3 t ,同时进行干燥,通过设备干燥试验,得到如表1所示数据。

表1 两套设备干燥试验对比

Tab. 1 Drying test of two equipments

	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	太阳辐射量/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	干燥 时间/h	平均 含水率/%
跟踪	83	849(9:00)	4.5	19
普通	82	936(11:00) 1027(13:00)	9	23

从两套设备的干燥试验可以看出,在相同的太阳辐射量的条件下,具有自动跟踪系统的设备干燥

效率要高于普通干燥设备一倍。通过计算, 收益与费用对比如表 2 所示。我国农牧区苜蓿草干燥价格基本在 100 元/t, 因此每批次干燥 3 t 鲜草, 可回收资金 300 元, 而在自动跟踪系统进行试制时, 其制造成本为 2 万元左右, 设备的使用寿命为 10 年, 每年设备使用 150 d, 可算出使用自动跟踪系统太阳能干燥设备每天增加成本为 13.3 元, 而资金可多回收 286.7 元, 可见太阳能自动跟踪集热系统应用到太阳能干燥设备中可得到很好的收益。

表 2 每日收益与费用对比

Tab. 2 Contrast of daily income and expenditure

	作业时间/h	作业批次/次	增加成本/元	资金回收/元
跟踪	9	2	13.3	600
普通	9	1		300

跟踪结构简单, 传动装置刚度高, 跟踪转动精度高且稳定性好, 对太阳能的接收损耗小, 制造成本低, 主控部件光电传感器和控制单元都被很好地保护, 实际运行中系统不易受天气等外界环境因素的干扰, 不存在跟踪不准、跟踪失步甚至误跟踪的情况, 可长期稳定运行。通过对比试验自动跟踪系统可使集热器出口温度平均提高 15℃, 有效提高了太阳能饲草干燥空气集热器的集热效率, 太阳能饲草干燥空气集热器作为太阳能饲草干燥设备的核心部件, 通过太阳能饲草干燥空气集热器自动跟踪系统的研究进一步提高了饲草干燥设备的生产能力, 为太阳能干燥饲草提供了高效优质的热风干燥源, 同时在结构上优化了太阳能饲草干燥设备, 在饲草干燥方面取得了很好的收益。

6 结束语

试验表明, 太阳能饲草干燥空气集热器自动跟

参 考 文 献

- 董宽虎, 沈益新. 饲草生产学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- 杨世昆, 苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- 邹建, 姬兴, 杜海涛. 一种新型的太阳自动跟踪系统研究[J]. 光电子技术, 2010, 30(3): 159-163.
Zou Jian, Ji Xing, Du Haitao. Research of a new automatic solar tracking system [J]. Optoelectronic Technology, 2010, 30(3): 159-163. (in Chinese)
- 郑小年, 黄巧燕. 太阳跟踪方法及应用[J]. 能源技术, 2003, 24(4): 149-151.
Zheng Xiaonian, Huang Qiaoyan. Study on sun-tracking methods and application [J]. Energy Technology, 2003, 24(4): 149-151. (in Chinese)
- 贺晓雷, 于贺军, 李建英, 等. 太阳方位角的公式求解及其应用[J]. 太阳能学报, 2008, 29(1): 69-73.
He Xiaolei, Yu Hejun, Li Jianying, et al. An engineering formula solution for the solar azimuth and its application [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(1): 69-73. (in Chinese)
- 王炳忠, 汤洁. 几种太阳位置计算方法的比较研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 413-416.
Wang Bingzhong, Tang Jie. Comparison of the different methods for solar position calculation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22(4): 413-416. (in Chinese)
- 何月娥, 杨孝文, 张梧邨. 农机试验设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- 罗运俊, 何梓年, 王长贵. 太阳能利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- 高钟毓, 王永梁. 机电控制工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- 郭廷玮, 刘鉴明. 太阳能的利用[M]. 北京: 科技文献出版社, 1987.
- Green M A, Emery K, King D L, et al. Solar cell efficiency tables; version 22 [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Application, 2003, 11(5): 347-352.
- Ong K S. Thermal performance of solar air heaters; mathematical model and solution procedure [J]. Solar Energy, 1995, 55(2): 93-110.
- Roth P, Georgiev A. Design and construction of a system for sun-tracking [J]. Renewable Energy, 2004, 29(3): 393-402.
- Roth P, Georgiev A, Boudinov H. Cheap two axis sun following device [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(7): 1179-1192.
- Kh S Karimov, Saqib M A, Akhter P. A simple photo-voltaic tracking system [J]. Solar Energy Material and Solar Cells, 2005, 87(1-4): 49-59.
- Abdallah S. The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(11-12): 1671-1679.

- 15 Ruschau J J, John R. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21 (Supp.) : 199 – 209.

Experiments on Erosion Resistance of Bionic Surface with Coupling Characteristics of Material and Morphology Inspired by Scapharca Shell

Zhang Chengchun¹ Li Xueli¹ Zhang Chunyan¹ Zhang Gan¹ Wang Xianbao¹ Wang Jing^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China*

2. *Teaching Center of Basic Course, Faculty of Agriculture, Jilin University, Changchun 130062, China*)

Abstract: Based on the characteristics of morphology and hardness distribution of scapharca shell surface, a bio-inspired model of the material coupled with pattern was proposed. The major and minor relationship and optimal combination of the main factors which affected the erosion resistance of the bio-inspired surface was obtained through experiments. Erosion resistant tests were carried out under the following test conditions: abrasive was the compound of silica sand of 80 ~ 140 mesh size and water; wear time was 30 h; and the rotating speed of 1 400 r/min. Compared with the smooth testing samples, the erosion resistance of the smooth testing sample of alloying with laser, the smooth one of laser hardening, the bio-inspired model with the non-smooth pattern and the bio-inspired model of the material coupled with pattern can improve the anti-erosion performance of the samples surface. The bio-inspired model of the material coupled with pattern was the best one among all the testing samples. The order of major and minor factors affecting the relative wear rate of samples was laser hardening, amplitude, periodic and the stripe direction. Results showed that the testing sample with optimal anti-erosion performance was the one with laser surface strengthening, amplitude of 3 mm, period of 10 mm and the direction of the stripes normal to the flow direction of particles.

Key words: Bionic engineering Bionic coupling Erosion Orthogonal experimental design

(上接第 313 页)

Application Research of Solar Forage Drying Air Collector Automatic Tracking System

Du Jianqiang¹ Zhang Junguo¹ Guo Zhiping² Shi Wenbin³

(1. *Huhhot Branch, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010010, China*

2. *College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China*

3. *Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Huhhot 010020, China*)

Abstract: A sun-tracking system was developed in order to improve the collection efficiency of solar air collector and receive more solar energy. Several main tracking modes were briefly introduced. The passive-tracking mode was likely to be perplexed by weather condition and the active-tracking mode could not avoid the cumulative error. A single-axe automatic tracking mode which combined active-tracking mode and passive-tracking mode was presented. The proposed combined mode overcame the shortcomings of the two modes. Experiments showed that this system works with high precision, good stability and little loss of solar energy. Automatic tracking system could make the collector outlet temperature increased an average of 15°C, so that the collector efficiency was improved.

Key words: Solar Heat collector Sun-tracking Forage Dry