



聚光能流密度测量方法研究

孙飞虎 郭明焕 中国科学院电工研究所 2019年8月21日























- 聚光能流密度测量简介
- 聚光光斑叠加重建法
- 月光法聚光能流密度分布测量法
- 边界插值重建方法计算能流密度分布









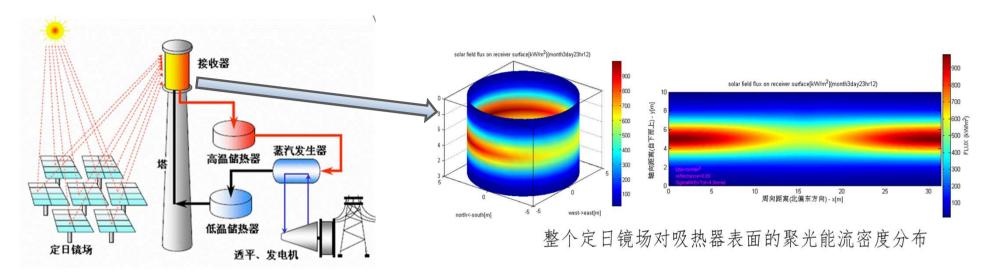












定日镜场中大量的定日镜同时聚光, 在塔顶吸热器采光面上形成高强度非均匀的能流密度。

受太阳位置、太阳辐照度、环境条件以及定日镜跟踪质量等因素影响,能流密度分布随时间不断变化。

能流密度分布实时测量是评价定日镜场和吸热器性能的重要参数,同时是优化定日镜场跟踪目标点设置的重要依据。

在塔式太阳能热发电系统中,吸热器采光口平面聚光能流密度分布的测量对优化整个系统的光热性能及安全性具有着重要意义。











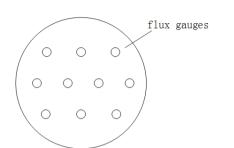












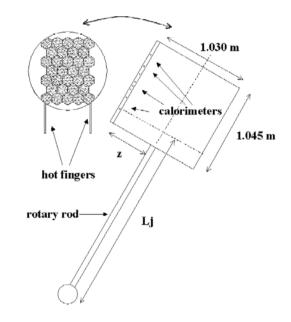


- ▶ 应用于PS10
- ▶ 热流计序列进行测量

直接式

- ▶应用于PSA测试平台
- > 安装有8个热流密度传感器的移动靶
- > 不测量时靶位于保护板后





MDF in SSPS-CRS















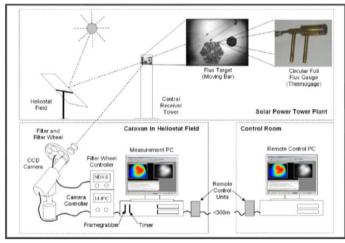






间

*移动靶+CCD *摄影能流测量法 *无需接受靶测量法 *红外相机法

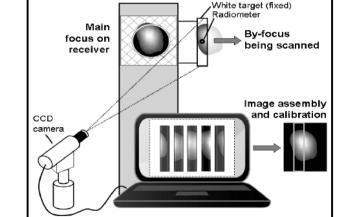


ProHERMES

- > 镜场光斑经过目标靶
- ▶ 借助CCD获得光斑灰度分布
- ▶ 热流计标定



- ▶ 应用在PSA
- ▶ CCD采集移动靶上的光斑
- 热流计标定



静止条形靶法





























中国科学院电工研究所三套基于间 接式测量方法的能流密度测量设备。 分别用于太阳炉及太阳模拟器。

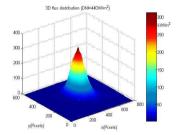




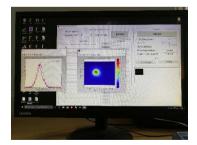
























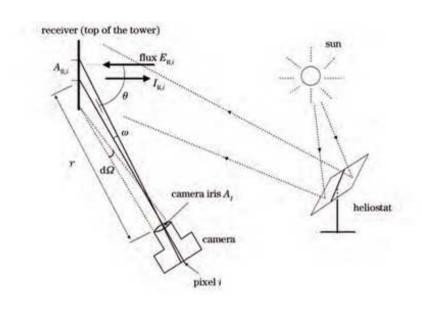








摄影能流测量法



摄影能流测量法示意图

$$E_{R,i} = \frac{\left(P_{CCD,i} - P_{CCD-ambient,i}\right)E_{DNI}}{\rho_{R,i} \tan^2(\delta_{sun}/2)} \frac{\pi n_{sun-pixels}^2}{\sum_i P_{CCD_sun,i}} \frac{f_{receiver}}{f_{sun}}$$

- ▶ 利用CCD相机拍摄接受靶上的光斑图像;
- ▶ 同一部相机,完全相同的相机参数正对太阳拍摄太阳的图像:
- ▶ 根据太阳灰度图像并结合当时的DNI 来标定相机像素灰度值与能流密度值的比例因子;
- ▶ 接受靶上的光斑亮度图像转换成接受靶上的能流密度分布。



















无需接受靶测量法

- ▶ 直接将吸热器的表面作为接受面, 无需额外的接受靶;
- ▶ 这种方法结构简单,支持持续测量,但要求接受面具有漫反射 特性。



- ▶ 运用红外相机直接拍摄接受器的表面图像,经过图像处理得到 吸热器表面的温度分布:
- ▶ 构建热力学模型,把温度分布转换为能流密度分布。











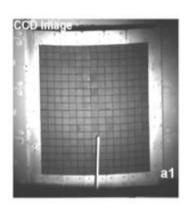


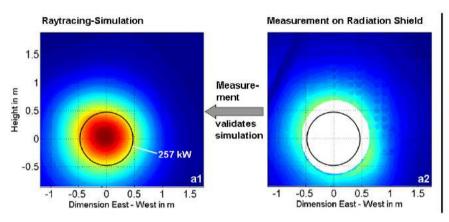


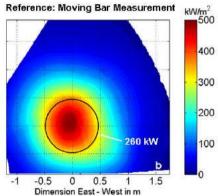




实验支撑的仿真法







- ➤ 应用于PSA
- ▶ 利用仿真软件STRAL, 通过输入各项参数获得仿真值
- ▶ 借助实验验证仿真值
- ▶ 通过仿真来计算吸热器采光口聚光能流密度分布





















- 聚光能流密度测量简介
- 聚光光斑叠加重建法
- 月光法聚光能流密度分布测量法
- 边界插值重建方法计算能流密度分布













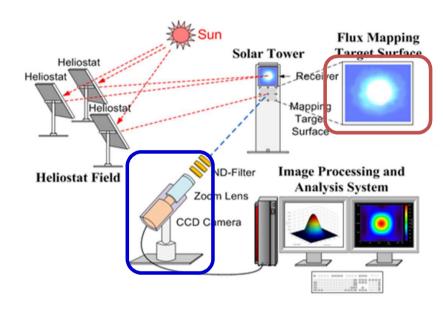






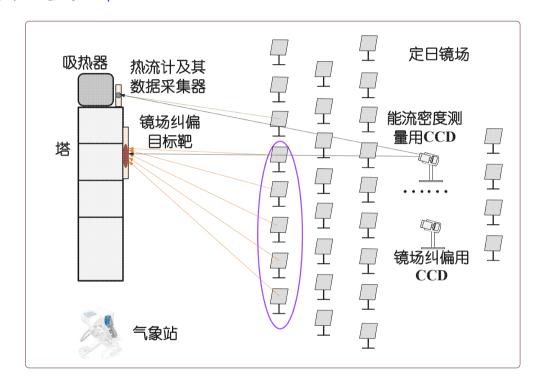


聚光光斑叠加重建法计算聚光能流密度分布



塔式太阳能热发系统定日镜跟踪校正系统示意图

- 校正系统的目标靶无法承受一定数量的定日镜同时聚焦产生的光斑;
- > 聚光光斑灰度图像像素值与能流密度值转换因子。



- ✓ 镜场多区域依次连续在目标靶上形成聚焦光斑;
- ✓ 多区域光斑叠加重建全镜场聚焦光斑;
- ✓ CCD标定系统 & 气象站。

















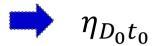




矾山黄帝城太 阳能跨季节储 热试验示范工 程的集热场

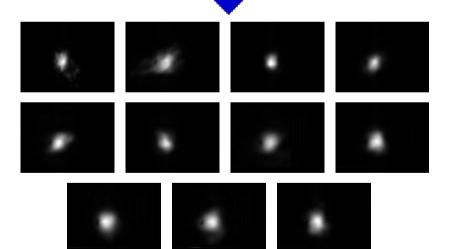






CCD工作参数与能 流密度值标定系统

分组光斑的 连续测量



- > 便携移动式设备
- ▶ 无需水冷系统
- ▶ 镜场分成11组,以组为单位控制定日镜;
- ▶ 调节CCD工作参数使其工作在动态范围内;
- ▶ 全程测量DNI;













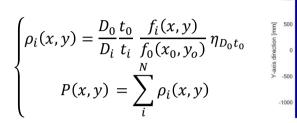


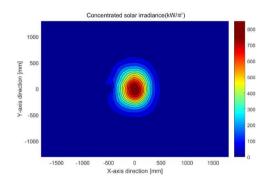




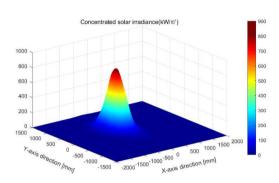


叠加重建镜场聚光 光斑灰度图像





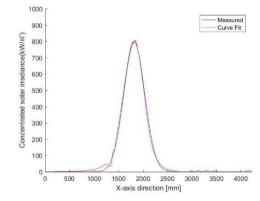
聚光光斑能流密度 分布图



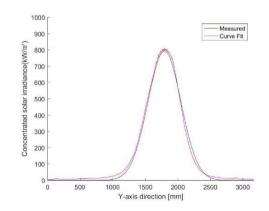
聚光光斑能流密度 三维网格图

$$P'_{(x,y)} = A_0 \exp\left\{-\left[\frac{\left((x - x_0)\cos\theta_0 + (y - y_0)\sin\theta_0\right)^2}{2\sigma_a^2} + \frac{\left(-(x - x_0)\sin\theta_0 + (y - y_0)\cos\theta_0\right)^2}{2\sigma_b^2}\right]\right\}$$

$$P_{tot} = (dpx \cdot dpy) \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} P(i,j) = 329kW$$



X方向剖线



Y方向剖线























- 聚光能流密度测量简介
- 聚光光斑叠加重建法
- 月光法聚光能流密度分布测量法
- 边界插值重建方法计算能流密度分布















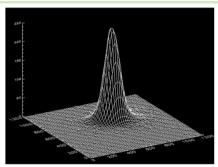




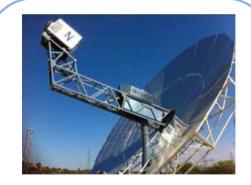
月光法定日镜场聚光能流密度分布测量法



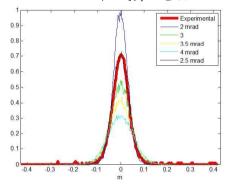
Ivanpah光热电站定日镜反射月光拼 出登月先驱巨幅肖像



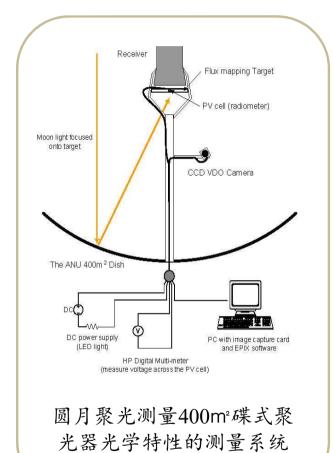
圆月聚光实验测量500m²碟式聚光器 聚光光斑曲面图



DS1碟式聚光器



X轴能流密度模拟值 与实测值对比



















结构图





理想假设:太阳和月亮的一致性

 $CR(x,y)_{moon} = I(x,y)/DNI_{moon}$

 $CR(x,y)_{moon}$: 直接测量得到月光聚光光斑的聚光比分布

I(x,y): 聚光光斑照度值在xy平面的离散采样

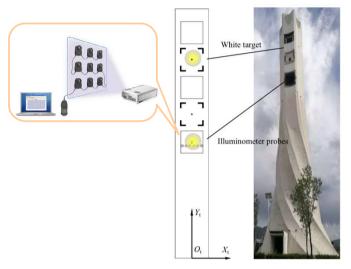
DNI_{moon} : 月光法向直射辐照度

 $CR(x, y)_{sun} = CR(x, y)_{moon}$

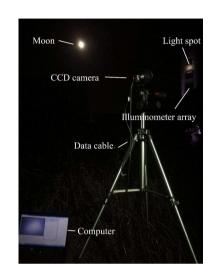
CR(x,y)sum : 日光聚光光斑的能流密度相对比值分布

 $F(x, y) = CR(x, y)_{sun} \cdot DNI = CR(x, y)_{moon} \cdot DNI$ F(x,y) : 日光聚光光斑的离散点处的能流密度

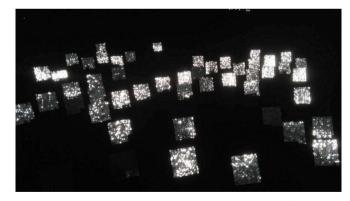
- ▶ 通过数据插值可以得到连续的日光聚光光斑能流密度分布:
- ▶ 公式中的各个参数都是时间函数,并随时间的变化而变化:
- 由于各种误差的影响, $CR(x,y)_{moon}$ 并不等于 $CR(x,y)_{sum}$, 因此需 要明确两者之间的对应关系。



朗伯靶及照度计阵列的安装位置



月光光斑测量系统



2018年9月24日晚21:21镜场状态











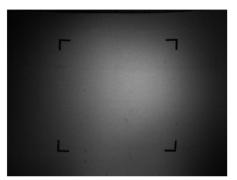




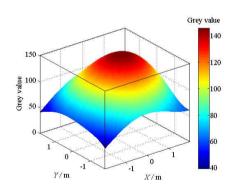








2018年9月25日 01:59月光 聚光光斑



月光光斑灰度值分布

实验1: 照度计标定CCD采集的光斑图像

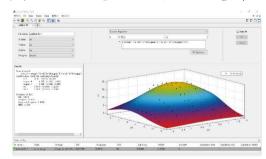
$$I(x, y) = 0.14G(x, y) - 3.05$$

I(x,y): 光斑各处的照度

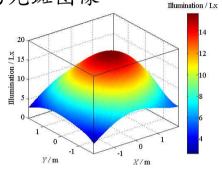
G(x,y): 光斑各处的灰度值

 $DNI_{moon} = 0.168Lx$

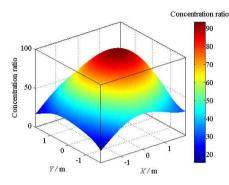
实验2: 光斑扫描照度计



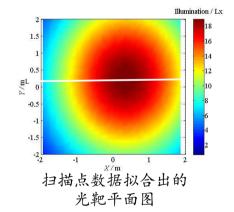
$$f(x,y) = A \cdot \exp\left(-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right)$$

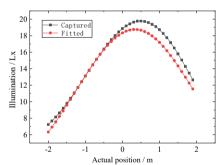


月光光斑照度分布



9月 28日 01:59的(x,y)_{moon}





两种实验得到的光斑平面图 在L截线上的对应照度分布

由扫描进行高斯拟合得到的光斑照度分布与用照度计实 测数据标定光斑图像得到的光斑照度分布大致相同。





















- 聚光能流密度测量简介
- 聚光光斑叠加重建法
- 月光法聚光能流密度分布测量法
- 边界插值重建方法计算能流密度分布













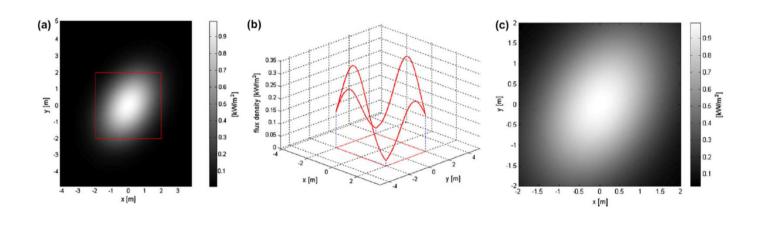




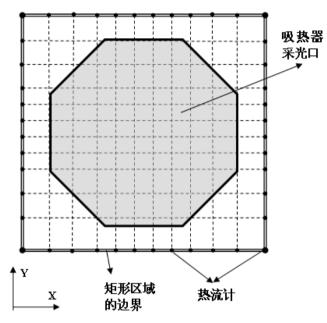


边界插值重建方法计算能流密度分布

任何二元高斯函数 (椭圆形高斯函数) 可以完全由其矩形区域边界上的 函数值准确插值重建, 无需知道函数具体的表达式或者特征参数值。



边界插值重建方法使用条件: 聚光光斑呈高斯分布。



基于边界插值重建方法计 算吸热器采光口聚光能流 密度分布的方案

















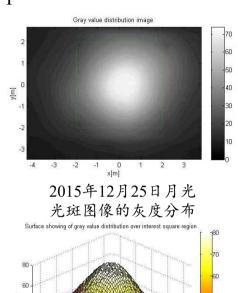


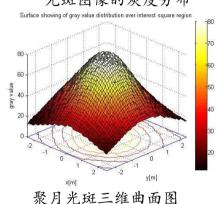




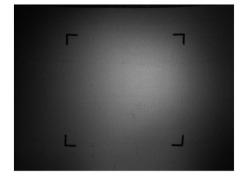
TEST 1

| 図月 | 定日镜场在 目标靶上形成光斑

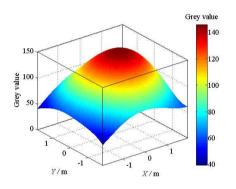




TEST 2

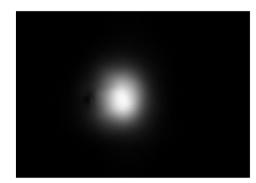


2018年9月25日 01:59月光 聚光光斑

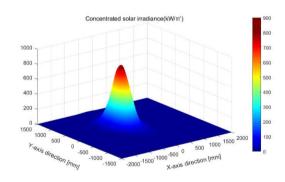


月光光斑灰度值分布

TEST 3



叠加重建镜场聚光光斑灰度图像



聚光光斑能流密度三维网格图

- ▶ 利用照度计标定CCD采集聚月光斑图像;
- ▶ 光斑扫描照度计阵列拟合镜场聚光光斑。











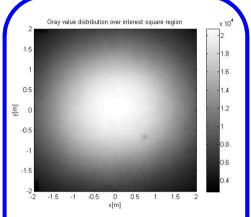




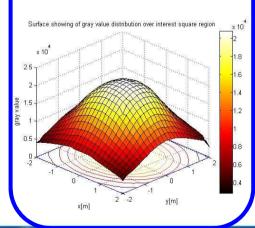




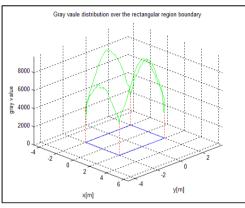


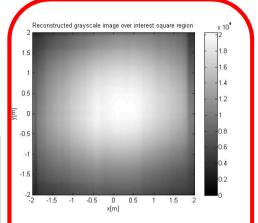


有效区域内的灰度图 像以及三维曲面图

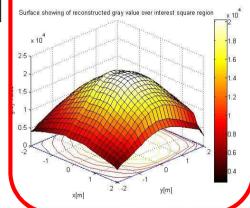


有效区域边界上 的函数值





重建后有效区域内 的灰度图像以及三 维曲面图



4m*4m有效 区内	叠加光斑有 效区域内	重建光斑有 效区域内
灰度最大值	20774	20342
灰度最小值	2775	2775
灰度值总和	3.0925*109	3.1648*109

有效区域内的灰度 最大值偏差量	2.07%
有效区域内的灰度 最小值偏差量	0%
有效区域内的灰度 值总和偏差量	2.34%





















谢谢!

孙飞虎 13810146636 sunfeihu@mail.iee.ac.cn

















