

---

---

文章编号 1674-2915(2010)02-0140-06

# 卫星太阳能电池阵破损自动检测系统的研究

林晓珑, 千庆姬, 张铁强  
(吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**介绍了国内首次研制的卫星太阳能电池阵破损自动检测系统的检测原理、系统结构与设计及现场试用结果。系统采用专用照明系统, 电池阵列经光学系统清晰成像至 CCD 传感器上, 经信号放大、A/D 转换后输入计算机管理和控制系统。图像传感探头自动扫描整块电池板, 并由距离传感器控制, 始终保持采集图像清晰。利用特有的系统控制和检测软件, 处理每幅电池图像信息, 检测结果通过列表形式给出损伤电池的位置、破损类型、破损度等参数。现场试验结果表明: 该系统的检出率达 98.5% 以上, 检测速度为每分钟 20 片电池, 达到了快速、高精度、自动化检测太阳能电池阵的使用要求。

**关键词:**卫星太阳能电池阵; 破损检测; 视频图像; LED 光源

**中图分类号:** TM914.4; V423.44 **文献标识码:** A

## Automatic damage detection system for satellite solar array

LIN Xiao-long, QIAN Qing-ji, ZHANG Tie-qiang

(College of Physics, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The automatic damage detection system for a satellite solar array was firstly developed in China, and its detection theory, structure and design of detection system and the results of on-site trial were introduced. By using a unique lighting system, the image of the solar array was focused clearly onto a CCD sensor via an optical system, then the signals were multi-amplified and A/D converted to store in a computer system. An imaging probe automatically scans the whole array and keeps the image clear through the control of a distance sensor. The customized system control and detection software were used to process every battery image, then testing results were shown on a table to offer the location of the damaged battery, damage types and damage degree etc. An on-site test shows that detection rate of the system is over 98.5% and detection speed is 20 batteries per minute, which meets the requirements of fast, accurate and automatic detection of the solar array.

**Key words:** satellite solar array; damage detection; video image; LED lighting source

## 1 引言

太阳能电池阵是唯一主动提供卫星能源的核心部件,该部件性能直接决定卫星的正常运行及寿命。卫星太阳能电池阵是由上万块 Si 晶体电池片或 GaAs/Ge 电池片串联和并联粘接而成,由于单体电池片是脆性材料,在加工、安装和运输过程中难免损坏,而破损直接影响电池阵列的性能指标。所以太阳能电池阵在加工、出厂、安装到卫星之前,都要做很严格的破损检查。目前国内采用的人工目测方式存在费时、工作效率低,检查质量受人为主观因素影响等问题,因此,研制卫星太阳能电池阵破损自动检测系统很有必要<sup>[1]</sup>。

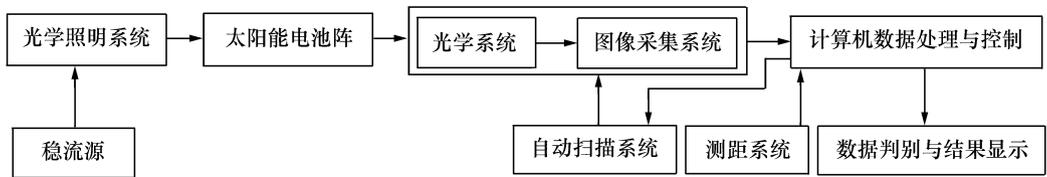


图1 卫星太阳能电池阵破损自动检测系统原理框图

Fig. 1 Automatic damage detection system for satellite solar array

用 LED 阵列组成的特定波长的光源,从四面以小角度照射太阳能电池阵,并由光学系统将其清晰成像至高速 CCD 传感器靶面上,然后将 CCD 采集的清晰太阳能电池图像信息,经信号放大、A/D 转换后输入计算机系统。光学系统和 CCD 组成的图像传感器通过三维移动机械机构,自动扫描整块电池板。为了在扫描过程中始终保持图像清晰,由两个距离传感器控制机械扫描机构的纵向距离,使摄像头始终与太阳能板之间保持最佳的成像距离。在扫描的同时自动采集每块单体电池的图像信息,利用自主研发的图像处理软件处理每幅电池图像,识别电池的崩边、裂纹、缺角等表面缺陷,最后检测结果通过列表形式给出损伤电池的位置、破损类型、破损度等参数,并自动判断合格与否<sup>[2]</sup>。

## 3 系统结构与检测原理

系统由图像传感探头(成像物镜和 CCD 传感

作者利用视频图像检测技术,研制了国内首台卫星太阳能电池阵破损自动检测系统。本文叙述了该系统的检测原理、系统设计及试验结果。依据图像检测原理及设计指标和使用要求,设计了可调照明方位的 LED 光源,编制了特有的系统控制和检测软件。试用结果表明,系统达到了快速、高精度、自动化检测太阳能电池阵的使用要求,并为现场试用提供了样机。

## 2 系统结构与检测原理

卫星太阳能电池阵破损自动检测系统采用了机器视觉检测系统原理,其结构框图如图 1 所示。

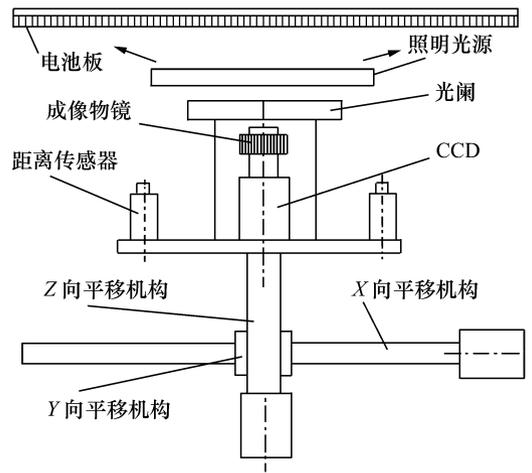


图2 总体结构示意图

Fig. 2 Chart of system structure

器组成)、照明系统、测距系统、自动扫描系统、控制系统、图像处理及控制软件组成,如图 2。

### 3.1 照明系统

照明系统决定了获取图像及裂纹等破损状态

的清晰程度,因而决定系统检测精度,其由照明光源和调整照射角度的机械结构组成。

照明光源应满足:(1)照明光的波长与 CCD 器件光谱最佳响应波长匹配,(2)长寿命。基于以上考虑,采用了蓝绿光 LED,其发光中心波长为 490 nm,基本落在 CCD 最佳光谱响应区间。

光源的光照射角度是获取突出裂纹图像的关键因素之一。一般来说,电池片出现裂纹、崩边等现象时,电池外表面上保护玻璃也会损伤,因此,损伤处以漫反射光为主;而无损伤处则以镜反射光为主。因为成像探头位于垂直被测面的方向上,所以照明灯的照射方向应以小角度方向为宜。而被成像的电池片是方形的,所以采用方形灯,照射角度可调。由于四面均有照射光,不管裂纹在哪个方位,都会被照射到,产生较强的漫反射光,进入传感探头。照射光的角度越小,成像效果越好,其结构简图如图 3 所示<sup>[3]</sup>。

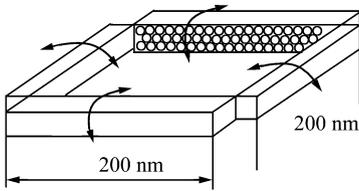


图 3 照明光源示意图

Fig. 3 Lighting source

### 3.2 成像物镜

成像物镜将电池片成像在面阵 CCD 图像传感器的靶面上,因此,成像透镜性能的好坏直接影响成像质量。性能好的透镜能够清晰地分辨细微信息的图像,从而获得高精度、高分辨率的图像检测结果。

本系统要求在物距为 50 mm 左右时,一次成像约 60 mm × 30 mm 大小的电池片。因物距短、物面较大,故选择了广角透镜。

检测中选择了日本产、用于视觉检测系统的百万像素级成像透镜 computar-mo814-MP, Computar FA 物镜是专用于工业和自动化领域,有高分辨率、高像质、无畸变、高稳定性(能够锁定光圈和焦距)的高品质物镜,其焦距可调,分辨率 > 100 l/mm。

为了消除镜头玻璃面上的反射光对成像质量的影响,在镜头前表面镀有中心波长  $\lambda_0$  为 490 nm 的增透膜。

### 3.3 CCD 图像传感器

CCD 图像传感器必须满足采集速度快,灵敏度高,分辨率高的要求。图像采集时间和一次成像被测太阳能电池的面积将决定检测太阳能电池板的速度。因图像传感器(CCD 器件)的尺寸和透镜的视场角决定一次成像面积的大小,为此,应选择较大尺寸、高像素、响应速度快的传感器件。这里选择了日本产 IAI 牌 CM-200GE 型相机, CCD 芯片面积为 1.4 cm (1/1.8 in) 口径, 200 万像素,可以提供 25 frame/s 高分辨率图像,能将单体电池片的整片数字图像传送到计算机内存,以备处理。

### 3.4 测距系统

在物距一定时,调好并锁定相机的焦距,以获得清晰成像。当探头在整个电池阵面上扫描时,由于电池板面的倾斜或电池粘接不平等原因使物距发生变化,当物距偏离最佳初始位置的距离超过相机景深时,图像开始模糊,裂纹等甚至在像面中消失,这将严重影响检测精度,增加误检率或漏检率。因此,在探头扫描电池板的全过程中,物距必须始终保持在初始调好的最佳区间。

测距传感器的作用是测探头到电池板的距离(物距),当物距偏离景深时,进行 Z 向扫描,控制物距始终在景深区间内。

距离传感器应满足如下要求:(1)检测精度 > 0.2 mm,距离检测时分辨率在 0.1% 以上;(2)检测信号稳定、快速;(3)与计算机连接以便控制;(4)轻便、耐用。

选用德国产品 FT50RLA-220SIL8 型激光距离传感器,可满足以上要求。

### 3.5 自动扫描系统与控制

最大太阳能电池板长 3.5 m,宽 2.5 m,由上万片单体电池横竖粘接而成。检测时是把成品太阳能电池板悬挂在刚性固定架上,由于电池板的自重,其成垂直状态。为节省检测时间,先沿 X 向快速扫描电池板,由距离传感器测两侧电池板到探头的垂直距离(Y 向),调整固定架的方位,使

电池板倾斜很小。

检测时将探头按  $X$ 、 $Y$  向交替移动,扫描整块太阳能电池板。当扫描到每个单片电池中间时,对每个单片电池快速照相,然后传给计算机做图像处理。其扫描参数通过解析电池板设计 CAD 文件获得,利用运动控制卡控制。

$Z$  向移动是利用两个测距传感器始终测量探头到电池板间的距离,然后取平均值,当超出探头的景深距离,随时调整,使物距保持在最佳位置。这样可避免单片电池粘接不平和电池板倾斜所引

起的物距变化问题,扫描过程中始终保持成像清晰。

扫描机构为三维平移机构,导轨均为滚珠直线导轨, $X$ 、 $Y$  向是齿形带传动,伺服电机驱动。 $Z$  向为滚轴丝杠传动,步进电机驱动,由距离传感器控制。

## 4 计算机图像处理

软件系统构成如图 4 所示。



图 4 软件系统组成模块框图

Fig. 4 Software system components module chart

图像处理模块的功能是从采集的图像中提取被检测部分,去除栅极线和噪声。

根据电池片内部区域与边界处图像的不同特征,确定电池片实际所占区域,去掉边沿和其它电池片残留部分,保留被检区域。被检区域中栅极线会影响裂纹等缺陷的辨别,利用阈值二值化算法对图像二值化,利用栅极线亮度比背景和裂纹等缺陷高的特点,去除栅极线,通过跟踪方法辨别栅极线断开处。阈值的选取极其重要,选得过高,误检率增加;相反,则漏检率增加,要经过反复试验确定<sup>[4,5]</sup>。

缺陷辨别模块的主要功能是辨别裂纹、崩边、缺角、污迹等缺陷。缺陷定义如下:裂纹为线条状的伤痕;崩边为单片电池边缘棱角处的缺损;缺角为单片电池四角的缺损(这种缺陷极少出现);污迹为沾到电池片上面,面积超过一定大小的粘接剂等。一般成像后的裂纹等缺陷是比较暗的,并且容易受噪音点的影响,直接采用阈值二值化算法很难分离裂纹,采用峰值二值化算法,利用裂纹灰度比周围亮度稍高的特点进行二值化,其效果比较理想。一般裂纹缺陷横跨栅极线,因此,在去除栅极线中被断开,采用连接算法处理;然后依据面积、长度、周长、位置、面积与长度之比等参数对缺陷进行辨别。由于崩边、缺角、污迹等缺陷的反射光与无缺陷处的反射光差别很大,成像很容易

辨别,故需将辨别结果存入检查报表数据库中。

检查结果输出和浏览核实模块的功能是把检查结果以报表形式显示或打印,报表中包含:检查日期、检查电池总片数、缺陷电池片位置坐标、缺陷类别和缺陷数量等信息。提取浏览已经检查过的所有电池片图像,以备人工核实<sup>[6,7]</sup>。

## 5 测试结果及分析

系统对太阳能电池板进行了半年的现场检测,结果表明:在整块太阳能电池阵上以 60 cm/min 速度扫描,从采集到的图像可清晰地看

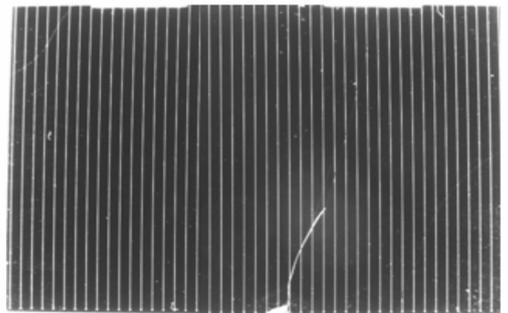


图 5 基片损伤原始图片

Fig. 5 Original Image of substrate damage

到细微的裂纹和微小的破损部位,经图像处理后才能更清晰地显示裂纹信息,如图5、图6所示。



图6 图像处理后的效果  
Fig.6 Processed image

在贴有 60 mm × 30 mm 大小,5 000 个 Si 晶体的电池片的成品太阳能电池阵上,做了检测系统的精度试验,结果如表 1。

由于所检测的电池板是从超净室刚生产出的成品,所以只有裂纹状缺陷。为了增加使用功能,图像处理软件中加入了测崩边、缺角、污迹等缺陷的功能。检测结果报表给出缺陷电池片位置坐标、数量、缺陷类别,并将辨别结果存入检查报表数据库中。

由表 1 看出,检出率 > 98.5%,误检率或漏检率均 < 1%,说明图像处理中的阈值设定是最佳状态。总之,该系统能获得清晰的图像,从而保证了系统的高检测精度,稳定性和可靠性好,达到了高精度、自动化检测太阳能电池阵的目的。

表 1 系统检测率测试表

Tab.1 System detection rates

检测次数	检测速度/(cm/min)	误检数/片	漏检数/片	误检率	漏检率	检出率
1	40	35	8	0.7%	0.2%	99.1%
2	50	40	10	0.8%	0.2%	99.0%
3	60	40	25	0.7%	0.5%	98.8%
4	60	41	24	0.8%	0.5%	98.7%
5	60	40	23	0.7%	0.5%	98.8%
6	60	41	23	0.8%	0.7%	98.5%
7	60	39	20	0.8%	0.4%	98.8%

## 6 结 论

卫星太阳能电池阵破损自动检测系统利用自动扫描图像法来检测电池阵玻璃盖片的裂纹、划

痕、崩边、掉角等缺陷,检测范围可达到 4 m × 3 m,检测速度为每分钟 20 片电池,检出率高于 98.5%,误检率或漏检率均低于 1%,检测速度快,精度高,可用于卫星太阳能电池阵的成品检测,并兼有操作简便、实用的特点。

## 参考文献:

- [1] QJ2171A-98 航天器产品保证要求[S/OL]. [2010-2-12] <http://www.reliacenter.com/QJ.html.pdf>. 2008. 05. QJ2171A-98 Quality Requirements on Spacecraft Products[S/OL]. [2010-2-12] <http://www.reliacenter.com/QJ.html.pdf>. 2008. 05. (in Chinese)
- [2] 王伟,郑永果. 基于机器视觉的在线电池检测系统研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(z1):425-429. WANG W,ZHENG Y G. Research of digital battery system based on machine vision[J]. *System Emulation Journalist*, 2006,18(z1):425-429. (in Chinese)
- [3] 周太明. 光源原理与设计[M]. 上海:复旦大学出版社,2006. ZHOU T M. *Lighting Source Theory and Design*[M]. Shanghai:Fudan University Publishing House,2006. (in Chinese)
- [4] 张德丰. 数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社,2009. 10. ZHANG D F. *Digital Image Processing*[M]. Beijing:Posts and Telecom Press,2009. 10. (in Chinese)

- [5] 王彦春,梁德群. 基于邻域非一致性图像过渡区提取与分割[J]. 光电子激光,2008,19(3):404-408.  
WANG Y CH,LIANG D Q. Extract and division of neighborhood inconsistent image transition area[J]. *Photoelectronic Laser*,2008,19(3):404-408. (in Chinese)
- [6] 苏彦华. Visual C++ 数字图像识别技术典型案例[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.  
SU Y H. *Case Study for Visual C++ Digital Imaging Identification Technology*[M]. Beijing:Posts and Telecom Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 祝培,朱虹. 一种有雾天气图像景物影像的清晰化方法[J]. 中国图像图形学报,2007,9(1):124-127.  
ZHU P,ZHU H. *Method of Image and Graphics Clarification in Foggy Weather*[M]. *J. Image Graphics China*,2007,9(1):124-127. (in Chinese)

作者简介:林晓珑(1960—),女,吉林长春人,硕士研究生,高级工程师,主要从事光学精密机械设计、光电检测、物理实验教学等工作。E-mail:lxzhzzxl@yahoo.com.cn

## 向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国最早创办的液晶学科专业期刊之一
- 中国液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊,中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新能力,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价40.00元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

E-mail:yjxs@ciomp.ac.cn

国内统一刊号:CN 22-1259/O4

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

电话:(0431)86176059

网址:http://www.yjxs.com