

文章编号:1007-2780(2017)11-0895-10

基于菌群算法的飞机铆钉表面缺陷检测系统 光源优化控制

周 强,王 峥*,李 敏

(陕西科技大学 电气与信息工程学院,陕西 西安 710021)

摘要:由于飞机铆钉缺陷检测系统的光照效果对缺陷检测质量发挥着关键作用,因此本文对其照明系统进行优化。以被测零件背景图像灰度的均匀度为优化目标,在拟合 LED 点光源照度分布函数的基础上,利用菌群算法对光源系统参数进行寻优运算,根据寻优结果对光源系统进行结构优化同时对各 LED 点光源进行功率控制,并通过光学元件进一步提高优化效果。实验结果表明:优化后光照均匀度在 95% 以上,满足铆钉检测的光照要求。该方法实现了照明系统对铆钉顶圆面均匀照射的效果,成像质量显著提高。

关 键 词:飞机铆钉表面缺陷;菌群算法;光源结构优化;光源优化控制;灰度均匀度

中图分类号:TB811⁺.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/JYXS20173211.0895

Bacterial foraging optimization control of light source for surface defect detection system based on colony algorithm

ZHOU Qiang, WANG Zheng*, LI Min

(College of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University
of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: As the lighting effects of aircraft rivets defect detection system play a key role on the defect detection quality, this paper optimized its lighting system. Based on the distribution function of fitting LED point light source illumination, taking the uniformity of background image grayscale of the measured part as optimization goal, the bacterial population algorithm is used to optimize the light source system parameters. According to the optimization results, the structure optimization of the light source system is carried out. The power control of each LED point light source is carried out, and the optimization effect is further improved through the optical component. The experimental results show that the optimal light uniformity is more than 95%, to meet the lighting requirements of rivet detection. This method realizes the effect of illumination system on the top surface of rivet, and the image quality is improved obviously.

收稿日期:2017-04-07;修订日期:2017-07-10.

基金项目:陕西省教育厅专项科技项目(No.16JK1105);陕西省科技攻关项目(No.2016GY-005)

Supported by Special Science and Technology Project of Shaanxi Provincial Department of Education(No. 16JK1105); Shaanxi Science and Technology project(No.2016GY-005)

* 通信联系人, E-mail:295252145@qq.com.cn

Key words: aircraft rivet surface defects; bacterial foraging optimization; source optimization; intensity homogeneity

1 引言

飞机铆钉被广泛应用于飞机装配连接中,具有不易脱落、拆装方便的特点,便与飞机进行经常性的检测维修。由于飞机在每次飞行过程中受机体表面与空气强烈摩擦的影响,飞机表面的温度会急剧上升,结构连接部位可能产生严重的应力集中,连接处铆钉表面特别是顶圆面的划痕、碰伤、麻坑、裂纹、掉角等缺陷都会影响飞机的安全飞行,因此飞机铆钉的质量显得尤为重要^[1-2]。

目前,飞机生产线中铆钉检测主要靠人工完成,即用肉眼检查表面缺陷并使用一些简易的测量工具进行手工测量,其检测效率和检测精度都难以得到保证。机器视觉作为一种新兴技术,具有高效率、高精度和非接触的优点^[3],已经应用于飞机铆钉的缺陷检测中,其中工业相机拍摄图像的质量是缺陷高精度检测的先决条件,然而受光照均匀度的影响,被测物表面不同缺陷有不同的反射光强,部分缺陷如麻坑、掉角、刀纹等显现力比较强,而裂纹和划痕等缺陷显现力相对较弱^[4],所以光源对待检测零件的照明效果直接关系到成像质量。当前大量研究集中在对图像的处理算法上,较少关注光学元件的选型和机器视觉照明系统的控制,对光源不予控制或仅手动调节,且调节的光照效果缺少指导性的物理量,致使成像质量难以保证。

为此,本文对飞机铆钉缺陷检测的光源系统进行以下研究和改进:

(1)设计了光源照射效果可控的光源优化控制系统。系统以 LED 为照射光源,以工业相机为传感器,能够对光源系统进行结构优化和参数优化控制,并对优化控制效果进行反馈;

(2)利用菌群算法进行寻优运算。以图像的灰度均匀度为优化目标,LED 阵列中点光源的排列方式、距离和各个 LED 点光源发光功率为优化参数。建立光源照射模型和优化目标函数,由于优化目标函数十分复杂而难以求解,本文使用菌群算法实现寻优计算;

(3)系统结构优化。在确定 LED 点光源排列方式的基础上,根据优化计算的部分结果,即相邻

LED 点光源间距对光源结构进行调整,提高整体的均匀性。

(4)系统参数优化控制。根据优化计算的另一部分结果,即每个 LED 点光源的发光功率,对光源进行开环控制,以获得最佳照明效果;

(5)通过光学元件进一步提高结构优化效果,在光源下方添加光扩散板,使线光源或点光源转换为面光^[5],进一步保证光照均匀性;

通过以上工作,实现对飞机铆钉顶圆面的照明。实验表明:检测系统拍摄的图像灰度均匀性好,对于外界光线的变化和干扰能够迅速补偿,能消除环境变化对于铆钉图像的影响。

2 检测系统与成像质量

2.1 缺陷检测系统组成

铆钉缺陷检测系统的结构框图如图 1 所示,包括 CCD 工业相机、光源系统和计算机 3 大部分。

(1)CCD 相机。相机: MV-EM120M 面阵相机,镜头: AFT-ZML1024,物距: 150 mm,通过网线将拍摄的图像传送给计算机。

(2)光源系统。光源系统由光扩散板、LED 光源阵列和光源驱动电路组成。驱动电路是以单片机为控制单元的多路可控恒流源作为 LED 阵列的驱动电路^[6],它接收计算机发出的控制信号,调节各个 LED 点光源的发光功率,同时以前置光源的反射照明方式来突出被测物体表面的细节特点^[7],保证光源阵列照明动态均匀照明,光扩散板使各点光源转换为面,进一步提升光源系统照明

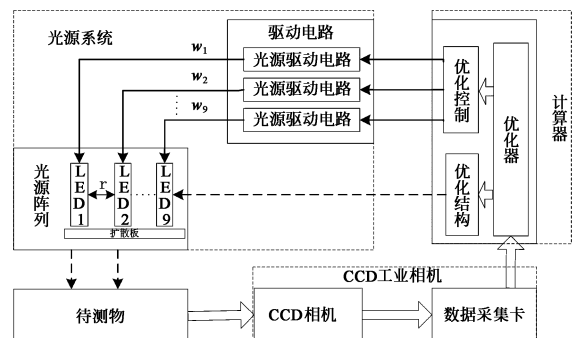


图 1 检测系统结构框图

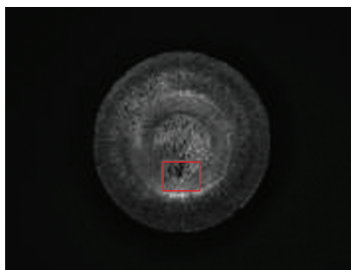
Fig.1 Test system structure diagram

均匀性。

(3)计算机。工作中作为优化控制器的计算机,以光照效果为优化目标对 LED 光源结构和各点光源驱动功率进行优化;优化结果可以用于指导 LED 光源结构完善,并对各个 LED 的亮度进行控制,以克服外界光线影响以及各个点光源间耦合作用,获得对拍摄对象最佳照射效果。

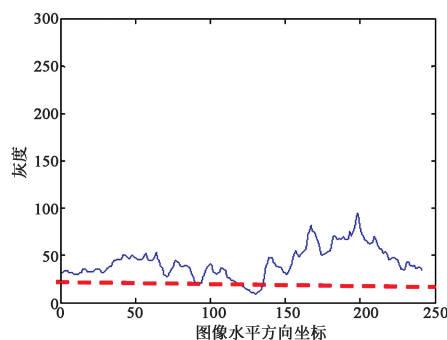
2.2 成像质量与光源优化的关系

光源系统是影响缺陷检测质量重要因素,直接影响输入图像的质量和至少 30% 的应用效果^[8]。特别是在零件的缺陷检测中光源系统的照射效果会直接影响到后期铆钉缺陷图像处理的精度以及检测算法的复杂程度,如图 2 所示,不同的光照强度分布会影响所拍摄图像的成像质量,进而对同一缺陷的反映效果也会不同,若所用光源与应用对象不匹配,就会引起一系列的问题,例如:过度曝光造成的高光区域会湮灭很多有用的信息;由于遮挡造成的阴影则会引起边缘检测时的错误等^[9]。由于没有通用的机器视觉照明设备,所以针对每个特定的应用实例,要搭建相应的光源系统,并通过对系统的优化以达到最佳成像效果。



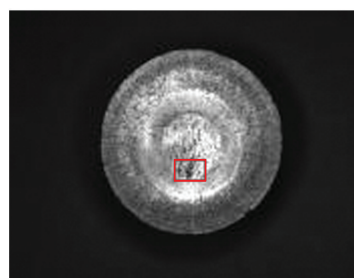
(a)照度 6 000 lx 下的灰度图像

(a) Grayscale images under illumination 6 000 lx



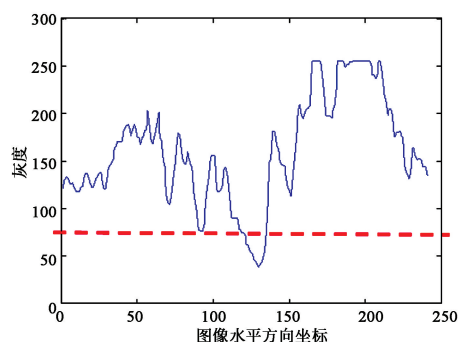
(b)6 000 lx 照度下缺陷区域的图像灰度

(b) Image gray level of the defect region under 6 000 lx illumination



(c)照度 10 000 lx 下的灰度图像

(c) Grayscale images under illumination 10 000 lx



(d)10 000 lx 照度下缺陷区域的图像灰度

(d) Image gray level of the defect region under 10 000 lx illumination

图 2 不同光照强度下的零件缺陷图像灰度分布

Fig.2 Gray distribution of the defect image under different illumination intensity

2.3 光源优化控制系统

以光照效果为优化目标对 LED 光源结构和各点光源的驱动功率进行优化。一组优化参数是 LED 点光源间距 r_t ($t=1,2,\dots$), 可用于调整点光源的相对位置, 完善 LED 光源结构; 另一组参数是各点光源的驱动功率 w_k ($k=1,2,\dots$) 被用于对 LED 进行功率控制, 改变 LED 亮度, 以克服各点光源之间的耦合作用, 获得拍摄时的最佳效果。

3 机器视觉光源系统优化

3.1 光源参数优化

在本次光源设计中, 采用前置光源的反射照明方式来突出被测物体表面的细节特点, 便于后期的图像分割和特征提取。根据飞机铆钉圆头面的形状, 设计有方形和环形有两种 LED 点光源的

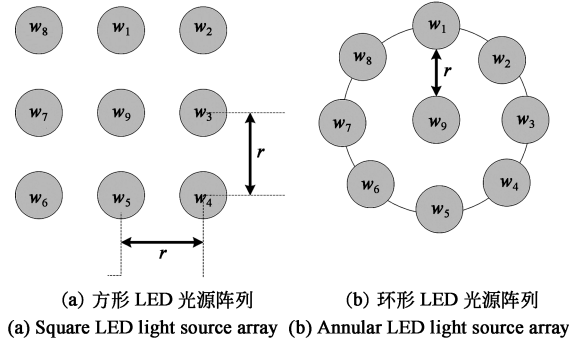


图 3 两种 LED 点光源排列方式及驱动功率

Fig.3 Two kinds of LED point light source arrangement and driving power

排列方式。

3.1.1 优化目标和优化参数

(1) 优化目标

为量化光源照明效果最佳这一优化目标,本文以被检测零件表面光照度的均匀性为优化目标,但由于光照度难以实时测量,系统用图像中零件表面灰度代替光照度,并以灰度的方差为优化目标,定量描述光照效果,系统的优化目标和约束条件分别为:

$$\begin{cases} \min D = \frac{\sum_i \sum_j (G_{ij} - \bar{G})^2}{n-1} \\ s.t. 0 \leq \bar{G} \leq 255, s > P_1 \end{cases}, \quad (1)$$

其中: D 代表图像灰度的方差, G_{ij} 是区域离散化后坐标 (i, j) 处的灰度值, n 表示离散化后辐照区域的坐标点数, $\bar{G}$ 为辐照区域灰度的均值, s 表示为辐照区域面积, P_1 是辐照区域面积的阈值,根据被测物材质不同 P_1 取值不同。

(2) 优化参数

能够有效改变被测零件表面光照效果的参数包括 LED 点光源之间的相对距离为 r ($r = r_1 = r_2 = \dots$) 和各 LED 功率 w_k ($k = 1, 2, \dots, 9$), 因此系统以 r, w_k 为优化参数, 通过调整 r, w_k 寻找最佳的照明效果。

3.1.2 优化目标的建立

建立优化目标函数 D 与优化参数 r, w_k 间的函数关系。

(1) 拟合 LED 点光源照度分布函数

g_{ij} 表示某一点的图像灰度值, 它与光源的照度有直接关系, 利用仿真软件 tracePro 对单个 LED 光源进行仿真, 其照度分布如图 4 所示。

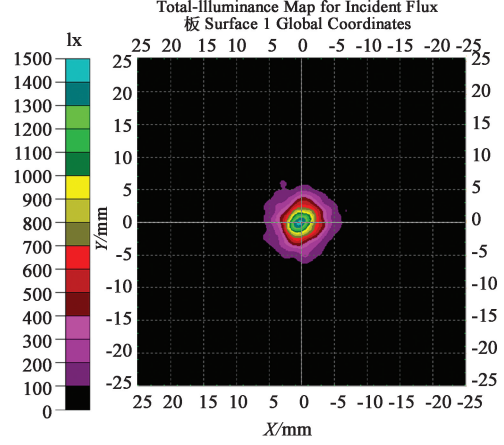


图 4 单颗 LED 点光源仿真照度分布图

Fig. 4 Simulation of illuminance distribution of single LED point light source

通过单颗 LED 点光源光源仿真的照度分布进行拟合, 获得描述其照度分布的二维高斯函数:

$$e_k(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2 H^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right], \quad (2)$$

由于光源阵列平面与铆钉顶圆面所在平面平行, 且光源阵列中心与铆钉顶圆面中心垂直, 因此以铆钉顶圆面中心所在的位置为坐标原点建立直角坐标系, 式中 $e_k(x, y)$ 为坐标 (x, y) 处的照度值, H 是 LED 点光源到顶圆面的垂直距离, 在本次试验中 H 取固定值 150 mm, μ_1, μ_2, σ 都是常数, 取值范围分别为: $-\infty < \mu_1 < +\infty, -\infty < \mu_2 < +\infty, \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \geq 0$ 。

(2) 多个 LED 照明亮度函数

由于 LED 是一种非相干光源,顶圆面上某一点的照度是各 LED 光源在该点处照度的叠加,该点的照度 E 可表示为:

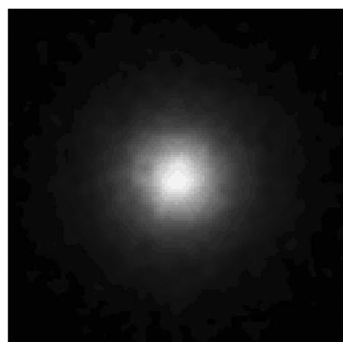
$$E(x, y) = \sum_{k=1}^n w_k \cdot e_k(x, y), \quad (3)$$

其中: k 是 LED 点光源个数, w_k 是第 k 个点光源

在该点的驱动功率,取值范围是 $[0, 1]$, e_k 是第 k 个 LED 光源在该点处的照度。

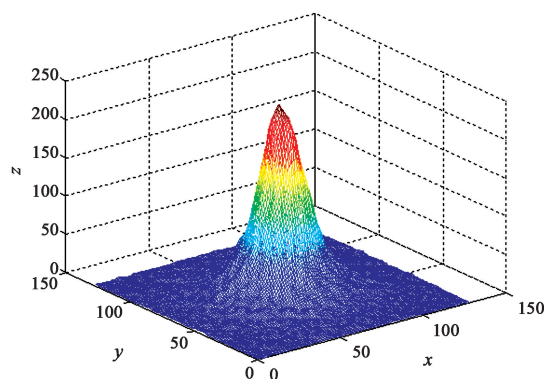
(3) 灰度与亮度的关系

对于 CCD 相机,在曝光时间和增益固定的条件下,在一定范围内图像灰度与光源照度呈线性关系^[7],因而单个 LED 点光源照射下的图像灰度分布如图 5 所示。



(a) 图像灰度图

(a) Image grayscale



(b) 灰度分布图

(b) Grayscale distribution map

图 5 单颗 LED 点光源图像灰度图

Fig.5 Single point LED light source image grayscale

其函数可以表示为:

$$g_k(x, y) = \begin{cases} A \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right], & g_k(x, y) < 255 \\ 255, & g_k(x, y) \geq 255 \end{cases} \quad (4)$$

将图 5 中所得到的数据进行高斯拟合, A 为拟合系数。可得到待测参数 $A = 242, \sigma_1 = 9.991, \sigma_2 = 9.986, \mu_1 = 64, \mu_2 = 64$ 。

(4) 灰度均值与优化目标函数的关系

图像灰度与光源照度在一定范围内呈线性关系,所以类比照度叠加公式,某一点的灰度值可表示为:

$$G_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^n w_k \cdot g_k, & G_{ij} < 255 \\ 255, & G_{ij} \geq 255 \end{cases}, \quad (5)$$

在式(5)中, k 的数值由辐照区域的面积决定,不同的 LED 点光源排列方式决定了面积的大小,方形灯阵 $n = r^2$, 环形灯阵 $n = \pi r^2$, r 是相邻两点光源之间的距离,为本次优化参数之一。

根据公式(6)将 r, w_i 分别带入公式(5)优化

目标函数中,可得,

环形灯阵优化目标函数为:

$$\begin{cases} \min D = \frac{\sum_i \sum_j ((\sum_{k=1}^9 w_k \cdot g_k) - \bar{G})^2}{\pi r^2} \\ s.t. 0 \leq G \leq 255, s > P_1, 0 \leq \sum_{k=1}^9 w_k \cdot g_k \leq 255, r > 0 \end{cases} \quad (6)$$

方形灯阵优化目标函数为:

$$\begin{cases} \min D = \frac{\sum_i \sum_j ((\sum_{k=1}^9 w_k \cdot g_k) - \bar{G})^2}{(2r)^2} \\ s.t. 0 \leq G \leq 255, s > P_1, 0 \leq \sum_{k=1}^9 w_k \cdot g_k \leq 255, r > 0 \end{cases} \quad (7)$$

将 9 个点光源的功率 w_k ($k=1,2,\dots,9$) 与 r 一起作为本次实验的优化参数进行优化。

3.1.3 优化过程

由于多优化目标函数较为复杂难以求解,本文使用菌群算法实现光源系统的参数寻优过程。菌群优化算法是由 K.Passino 教授在 2002 年提出的一种新型智能仿生算法,以大肠杆菌的菌群四个觅食行为趋向性、聚集、繁殖、迁徙完成优化^[10-12]。

在寻优过程中,将 LED 光源的优化参数: r, w_k ($k=1,2,\dots,9$),分别设置为细菌在 10 维空间中的具体位置信息,模拟菌群的趋向性、觅食、繁殖、迁徙 4 种基本行为对点光源的相关参数空间内寻优,使代表 LED 点光源相关参数的菌群不断搜索并且向最优区域移动^[13],最终可得到在约束条件下的各点光源参数。并以图像灰度方差 D 作为 LED 光源参数优化的指标,并且以此构成细菌适应度函数,记为 $J = D_{j,k,l}^i(\theta, r, w_1, w_2, \dots, w_9)$,其中 θ 表示第 i 个点光源在第 j 次趋向性操作,第 k 次复制操作和第 l 次迁徙操作后的位置信息,为点光源此刻的位置信息,每一次趋向性操作后位置信息更新为:

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\Phi(j), \quad (8)$$

其中: $C(i)$ 是细菌趋药性的步长, $\Phi(j)$ 为随机方向上的单位向量。

实现菌群寻优算法步骤为:

第一步:初始化每个细菌的适应度。对待优化的各参数初始化,根据辐照面积和实际情况确定 LED 光源各个参数的上下限 $r_{\min} = 1, r_{\max} = 40, w_{k\min} = 0.1, w_{k\max} = 1$ ($k=1,2,\dots,9$)。对 LED 光源参数初始化:

$$r(0) = R(r_{\max} - r_{\min}) + r_{\min}, \quad (9)$$

$$w_k(0) = R(w_{k\max} - w_{k\min}) + w_{k\min}, \quad (10)$$

其中: R 是 $[0,1]$ 上的随机数, $r(0), w_k(0)$, 均为优化前 LED 点光源参数的初始值,其寻优空间 $D=10$, 菌群规模为 $S=9, i=1,2,\dots,S$ 。初始化菌群参数,第 i 个点光源的初始位置信息为:

$$\theta_h(0) = (r(0), w_1(0), w_2(0), \dots, w_9(0)), \quad (11)$$

第二步:趋向性操作,计算每个细菌的新位置,并将其与前一个位置的适应度函数做比较,若在细菌前进步数范围内,新的方差小于前一次,更新参数信息;反之则保持不变,记 $J_{\text{last}} =$

$J(i, j, k, l)$ 为细菌 i 此时的最好位置信息。

第三步:繁殖操作,分别计算 S 个细菌在循环中各位置适应度总和,适应度值之和越大,方差越大,说明细菌健康程度越差,反之则说明细菌越健康。淘汰后 $S_r = S/4$ 个细菌。

第四步:迁徙操作,细菌完成多次繁殖操作后,以一定概率重新分布到新的位置空间^[13]。

第五步:根据方差值是否最小判断寻优是否结束。若算法结束,就返回当前最优的 LED 参数值 $r, w_1, w_2, \dots, w_9$, 否则返回第二步继续寻优。

流程图如图 6 所示,其中 N_c, N_{re}, N_{ed} 分别为趋向性、繁殖和迁徙的执行次数。

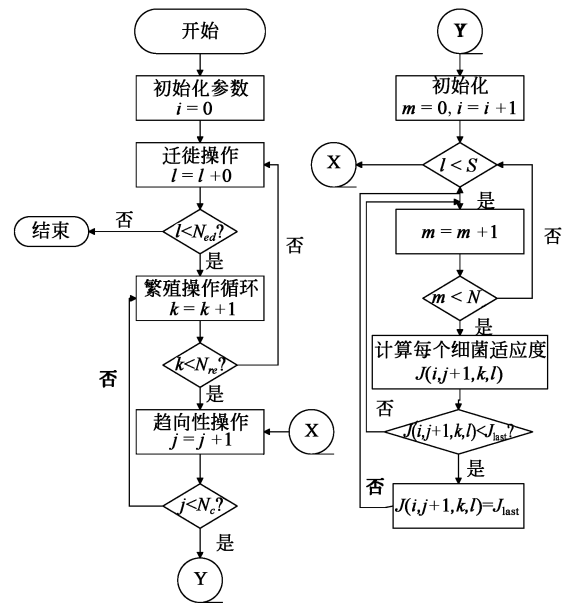


图 6 寻优算法流程图

Fig.6 Flow chart of optimization algorithm

3.2 光源结构优化

光源结构优化一方面优化 LED 阵列的排列方式和点光源间距,另一方面加入扩散板进一步提高光照的均匀性。

(1) LED 阵列排列方式及点光源间距优化

在设计优化 LED 阵列时,首先对以下两个参数进行设定:(1)各个阵列的 LED 个数 n ;(2)探测面与 LED 所在平面与之间的垂直距离 d 。为了不同 LED 阵列之间的比较与分析,在此统一将两个参数设定为: $n=9, d=150$ mm。

经优化后环形灯阵、方形 LED 阵列各优化参

数如表 1 所示。

(2) 扩散板对光照均匀性的提高

扩散片是使入射光束光强在空间一定范围内

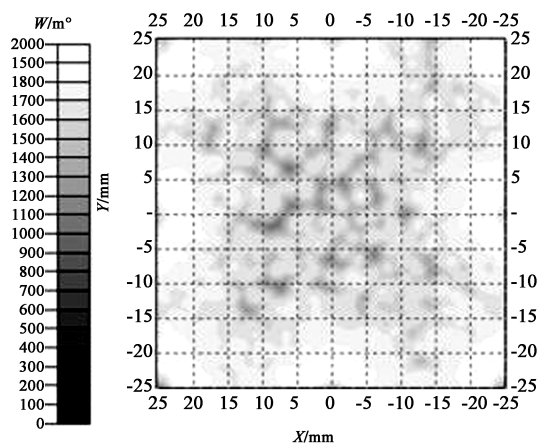
均匀分布的光器件,能在保持高透光率的同时,实现理想的均光效果,在 LED 照明和成像系统中重要应用^[14-15]。

表 1 经优化的环形、方形 LED 阵列参数

Tab.1 Optimized annular and square LED array parameters

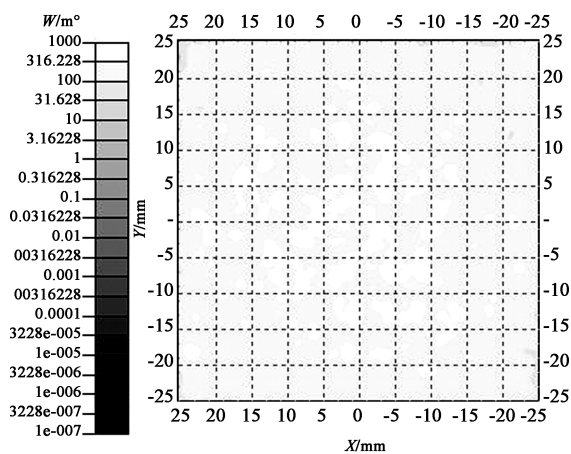
Shape	r (mm)	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9
Annular	22	0.70	0.65	0.69	0.67	0.71	0.64	0.71	0.65	0.61
Square	19	0.61	0.61	0.60	0.59	0.61	0.62	0.60	0.60	0.52

如图 7 所示(a)(b)分别为环形光源阵列参数优化前后系统照度分布,经过光源参数寻优,改善



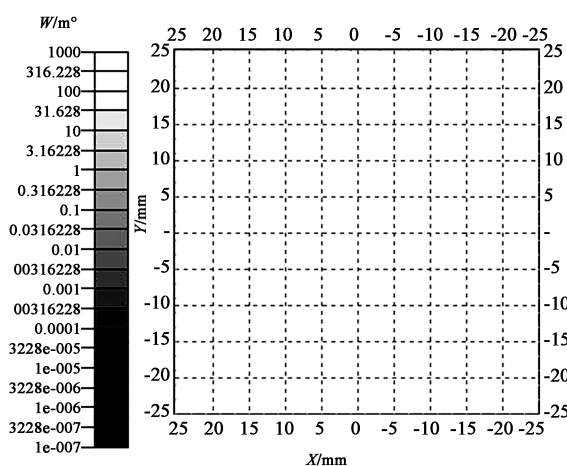
(a) 优化前系统照度分布

(a) Distribution of illuminance before optimization



(b) 优化后未加扩散板系统照度分布

(b) After optimization, the illuminance distribution is not added to the diffusion plate system



(c) 优化后加扩散板系统照度分布

(c) After optimization, the illuminance distribution of diffuser plate system is optimized

图 7 优化前后系统照度分布

Fig.7 Distribution of system illuminance before and after optimization

了光源照度均匀度,(c)图为光源参数优化后,加扩散板的照度分布图,由图可知,经过光源参数优化和加入扩散片,系统的光照均匀度有明显的提高。

根据方形和环形 LED 排列方式的寻优结果, $r_{\text{方}}$ 和 $r_{\text{环}}$ 对两种光源机构进行调节,完善光源硬件系统的搭建。

3.3 光源优化控制

根据优化后的驱动功率 w_k ($k=1,2,\dots,9$),对各 LED 点光源进行独立控制,控制系统如图(8)所示。由于整个功率优化系统构成闭环回路,能够根据 CCD 相机拍摄的飞机铆钉顶圆面图像效果,对光源系统进行循环优化控制。

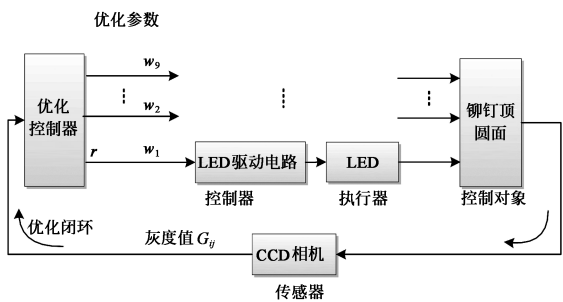
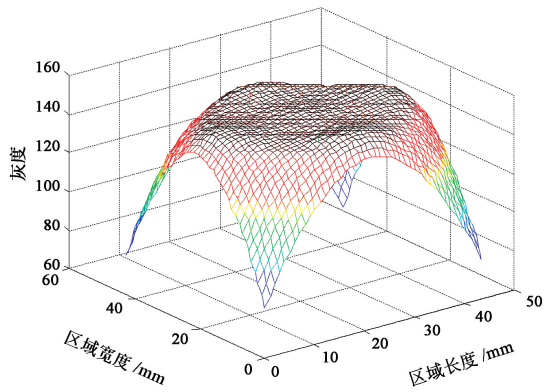
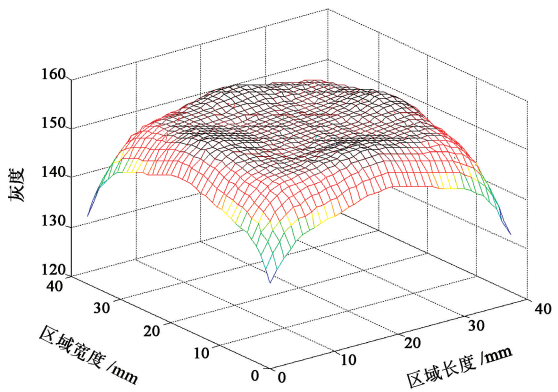


图 8 LED 点光源优化控制系统
Fig.8 LED point light source optimization control system

经优化的 LED 光源照射下飞机铆钉顶圆面灰度分布情况如图 9 所示。



(a) 环形 LED 光源
(a) Annular LED light source



(b) 方形 LED 光源
(b) Square LED light source

图 9 环形灯阵与方形灯阵的最优模型
Fig.9 Optimal model of annular lamp array and square lamp array

4 优化控制结果

为了验证系统优化控制效果,采集优化后 LED 光源阵列照射下铆钉顶圆面的照度进行分析。根据国家标准 GB/T5700-2008 照明测量方法规定照度均匀度通常是指规定表面上最小照度与平均照度之比,记符号为 U_2 ,如式(12)所示:

$$U_2 = E_{\min} / E_{av}, \quad (12)$$

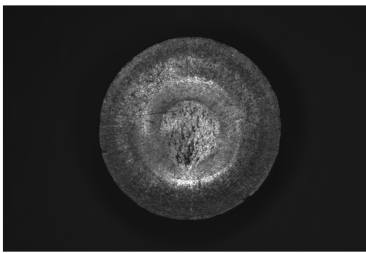
其中: $E_{\min}$ 为规定辐照表面的最小照度, E_{av} 为规

表 2 均匀度测量
Tab.1 Uniformity measurement

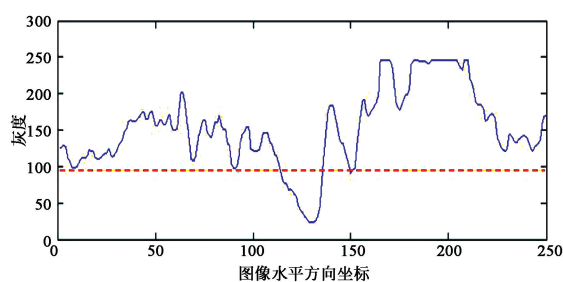
Shape	Zone	Zone	Zone	Zone	Zone	Zone	Zone	Zone	Zone	Illuminance uniformity/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Annular(klx)	8.32	8.57	8.49	8.55	8.69	8.36	8.40	8.68	8.51	97.79
Square(klx)	7.89	7.95	7.82	7.96	8.11	8.01	7.96	7.98	7.92	98.30

定辐照表面的平均照度。根据公式(12),将辐照区域均分为 9 个部分,依次测量并计算。由表 2 可知,在优化后,各参数下的方形和环形灯阵的各照度均匀度均达到 95% 以上,其中方形灯阵的均匀度更高,满足光照检测的均匀度要求。

用经过参数优化的方形 LED 阵列为飞机铆钉照明,对其顶圆面进行拍摄,得到图 10 所示的图像。与图 2 相比,优化后光源照明均匀,背景与待测物对比度明显,缺陷轮廓清晰,图像缺陷区域



(a) 光源优化后拍摄缺陷图片
(a) Defect picture after the light source is optimized



(b) 图像缺陷区域灰度

(b) Image defect area grayscale

图 10 优化前后方形 LED 光源下的铆钉图案

Fig.10 Rivet pattern of square LED light source before and after optimization

灰度特征有变化范围约 90~255,而缺陷区域造成的灰度变化范围为 20~90(图 2 缺陷区域的变

化范围分别为 20~25,30~75),有明显的跳变,使得用于区分缺陷和正常区域的灰度阈值有明显区分,便于后期的缺陷识别与处理。

5 结 论

本文针对传统缺陷检测系统中光源照射效果差的问题,以 LED 光源建模、基于菌群算法的参数量化、光源结构优化和点光源的优化控制等工作,对飞机铆钉表面缺陷检测系统的光源部分进行了改进和优化,并且通过在系统中增加光学元件,进一步提高了提高光照均匀性。实验结果表明,各参数下的方形和环形灯阵的各照度均匀度均达到 95%以上实现了光源系统的优化,光源照明效果获得了显著的提高。

参 考 文 献:

- [1] 田冬凤.飞机机身铆接构件疲劳性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
TIAN D F. Research on fatigue property of riveted component for aircraft fuselage [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [2] 严素欣,黄其青,殷之平,等.基于损伤力学的飞机铆接结构疲劳损伤分析[J].航空计算技术,2013,43(4):43-46.
YAN S X, HUANG Q Q, YIN Z P, *et al.* Analysis of fatigue damage of aircraft riveted structure based on damage mechanics [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2013, 43(4): 43-46. (in Chinese)
- [3] 贾方庆.基于机器视觉的带钢表面缺陷检测系统研究[D].重庆:重庆大学,2007.
JIA F Q. Research on surface defects detection for steel strips based on machine vision [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- [4] 孔祥伟.组合光源与图像处理算法在工件表面缺陷检测中的应用[D].天津:天津大学,2007.
KONG X W. The application of combinatorial lamp-house and image processing algorithm in workpiece surface defect inspecting [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [5] 庄孝磊,周芳,陈林森.微透镜阵列光扩散片特性研究及制备[J].苏州大学学报:自然科学版,2009,25(4):48-52.
ZHUANG X L, ZHOU F, CHEN L S. The research of micro-lens array diffuser and its fabrication [J]. *Journal of Suzhou University: Natural Science Edition*, 2009, 25(4): 48-52. (in Chinese)
- [6] 许文海,赵欢,芦永军.LED阵列式紫外固化光源光学系统设计[J].光学精密工程,2007,15(7):1032-1037.
XU W H, ZHAO H, LU Y J. Design of an optical system for UV curing source with LED array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(7): 1032-1037. (in Chinese)
- [7] 郝飞,史金飞,朱松青,等.机器视觉系统前置矩形LED阵列的优化布置[J].光学学报,2014,34(12):1215001.
HAO F, SHI J F, ZHU S Q, *et al.* Optimal positioning of forward installed square LED arrays for machine vision system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1215001. (in Chinese)
- [8] 徐岩,史燕琼.线扫描缺陷检测系统中的LED光源设计[J].光学与光电技术,2011,9(3):28-30,43.
XU Y, SHI Y Q. Design of LED illuminators used in line scan defect inspection system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(3): 28-30, 43. (in Chinese)
- [9] 高光明.基于物体反射特性的LED光源优化设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
GAO G M. Light optimal design for machine vision based on reflection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

- [10] PASSINOK M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. *IEEE Control Systems*, 2002, 22(3): 52-67.
- [11] BERG H C, BROWN DA. Chemotaxis in *Escherichia coli* analysed by three-dimensional tracking [J]. *Nature*, 1972, 239(5374): 500-504.
- [12] LOWE G, MEISTER M, BERG HC. Rapid rotation of flagellar bundles in swimming bacteria [J]. *Nature*, 1987, 325(6105): 637-640.
- [13] 李亚楠. 菌群优化算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LI Y N. The algorithm of bacterial foraging optimization [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] 李道萍, 郑继红, 韦晓鹏, 等. 基于菌落挑选仪的背光源优化设计[J]. 光学技术, 2015, 41(5): 404-407.
LI D P, ZHENG J H, WEI X P, *et al.* Optimal design of backlight source based on colony selection device [J]. *Optical Technique*, 2015, 41(5): 404-407. (in Chinese)
- [15] 庄孝磊, 周芳, 申溯, 等. 层叠微透镜阵列光扩散片特性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3306-3310.
ZHUANG X L, ZHOU F, SHEN S, *et al.* Characteristics of diffusers with cascaded-microlens arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3306-3310. (in Chinese)

作者简介: 周强(1969—), 男, 重庆人, 教授, 研究生导师, 1993 年于西北轻工业学院获得学士学位, 2001 年于西北轻工业学院获得硕士学位, 2010 年于西安交通大学获得博士学位, 主要研究方向为非平稳随机信号分析、图像处理技术。E-mail: zhouqiang@sust.edu.cn

王峥(1992—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 2011 年于陕西科技大学获得学士学位, 2011 年就读于陕西科技大学, 攻读硕士学位, 主要从事机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail: 295252145@qq.com.cn