

•信号与信息处理•

## 基于谱域-空域结合的高光谱异常探测

雷武虎<sup>1,2,3</sup>,任晓东<sup>1,2,3</sup>,孙越娇<sup>1,2,3</sup>,王 迪<sup>1,2,3</sup>

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037; 2. 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥 230037; 3. 电子工程学院, 合肥 230037)

**摘要:**针对高光谱遥感空域信息利用率低给侦查带来的问题,提出了一种基于谱域-空域联合特征的异常检测算法。首先,利用光谱梯度角余弦值给邻域像元赋予权值,通过对邻域像元加权求和的方式得到空域特征;将空域特征与谱域特征进行加权拟合得到谱域-空域联合特征;然后,将由谱域-空域联合特征所组成的高光谱影像进行主成分分析以提取主要成分进行异常检测。通过对比异常检测效果二值图和ROC曲线,说明算法具有优越性,能够提高检测效果。

**关键词:** 高光谱;空谱结合;主成分分析;异常检测

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-05-0036-06

## Spectral-spatial Joint Method for Hyper-spectral Anomaly Detection

LEI Wu-hu<sup>1,2,3</sup>, REN Xiao-dong<sup>1,2,3</sup>, SUN Yue-jiao<sup>1,2,3</sup>, WANG Di<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Pulse Power Laser Technology, Hefei 230037, China;

2. Key Laboratory of Electronic Restriction Technology of Anhui Province, Hefei 230037, China;

3. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** For the reconnaissance problem of the spatial information's low utilization in hyper-spectral sensing, a novel anomaly detection algorithm based on spectral domain-spatial joint characteristics is proposed. At first, each neighborhood pixel is given weights through the cosine of the spectral gradient angle and the spatial feature is gotten by adding the weighted neighborhood pixels together. The spectral domain-spatial joint characteristic is gotten by adding the weighted spectral feature and the spatial feature together. And then, the hyper-spectral data with the spectral domain-spatial joint characteristics is carried out principal component analysis to extract the main components to carry on anomaly detection. At end, from the binary image and the receiver operating characteristic curve (ROC) of the anomaly detection, it can be seen that the proposed algorithm has superiority and it could improve the detection effect.

**Key words:** hyper-spectral; integrate both spatial and spectral information; principal component analysis (PCA); anomaly detection

高光谱遥感(hyperspectral remote sensing)是一项多维信息获取技术,能够同时获取目标地物的二维空间信息与目标地物的光谱特征信息,从而得到一个“图谱合一”的三维立方体图像。高光谱图像具有很高的光谱分辨率,波段近似连续,从而能够对地表物质的细微差异进行识别,使得对地物目标进行精确的分类成为可能。但是仅利用光谱信息难以对高光谱图像进行准确、清晰而全面的解译,

难以达到理想的目标识别效果,如果将谱域信息与空域信息相结合,充分拟合各自的优势,这将对提升目标检测效果非常关键。同时目前大部分目标识别方案是基于目标的先验信息或者背景的先验信息,文中试图探索在无任何先验信息的条件下对目标进行异常探测。基于以上两点,提出了一种基于谱域-空域结合的高光谱异常探测方案。

近年来,高光谱图像处理方面的研究学者也逐

渐加大了联合利用空域、谱域方面的研究力度,取得了一系列的成果。Jinghui YANG<sup>[1]</sup>用主成分分析法实现光谱特征的提取,用Gabor滤波器实现空域特征的提取,将提取的空-谱信息相结合用于分类取得了较好的效果,但是其参数设置比较复杂。Liangliang Wang<sup>[2]</sup>把局部线性嵌入法(the local linear embedding algorithm, LLE)进行改进,用光谱梯度法替代欧拉距离法来改进空间邻域的确定提高了异常检测效果。Liangliang Wang<sup>[3]</sup>等提出了一种结合局部和全局统计数据的RX异常检测算法,该算法把k均值聚类法引入到RX异常检测中,充分利用了图像的光谱信息与空间信息,具有较好的效果。尤雅萍<sup>[4]</sup>提出了基于谱域-空域结合特征和图割原理的高光谱图像分类,在实验验证中取得了良好的分类效果,其在空域特征提取时利用了欧拉距离来进行空域特征提取,然而欧拉距离在解译相似性方面的性能有所欠缺,导致其权值赋予方面有待优化。董超等<sup>[5]</sup>提出了采用局部正交子空间投影的高光谱图像异常检测算法,该算法以OSP算法为基础,以被检测点作为感兴趣目标,以被检测点邻域像元均值为背景构造局部正交投影算子,该算法运算速度快、检测精度有所提高,但是背景子空间的构造方法没有考虑到复杂背景的情况,使其鲁棒性能变差。刘明等<sup>[6]</sup>提出了一种局部投影可分离的异常检测算法,该算法以待测像素光谱作为参考光谱,构造目标子空间,然后把邻域背景像素投影到该子空间,并用投影后向量模值构造异常度计算式。仿真表明,该算法对临近异常像素干扰和背景地物复杂问题的解决取得了较好的效果。刘志刚<sup>[7]</sup>等借助图像插值的思想得到了邻域像元与目标像元的定量权值关系,再利用正交投影算法(OSP)的思想对异常噪声进行估计,在去除噪声后进行异常检测,效果有一定提高,但是该算法在邻域权值赋予方面还不够科学性、物理意义不够明晰。

为了更加有效地联合利用空域、谱域信息提高异常检测效果,提出了一种基于谱域-空域结合的高光谱异常探测方案。首先,利用光谱梯度角余弦值给邻域像素赋予权值,通过对邻域像元加权求和的方式得到空域特征;然后,将空域特征与谱域特征进行拟合得到一个将谱域-空域联合特征;其次,将由构造的新特征所组成的高光谱影像进行主成分分析(principal component analysis, PCA)以提取

主要成分;最后对降维后高光谱数据进行RX异常检测。进行仿真实验验证文中方案的可行性。

文中下述第一部分将详细阐述谱域-空域联合特征构造方案;第二部分对主成分分析(PCA)方法及RX异常检测方法进行简单介绍;第三部分进行实验仿真,进行定性与定量分析;最后第四部分对全文进行总结。

## 1 谱域-空域结合的特征提取

### 1.1 基于谱域的特征

高光谱图像是通过成像光谱仪获取的一个“图谱合一”的三维立方体图像,光谱分辨率小于10 nm,波段多达成百上千个,可以得到每个像元近似连续的光谱曲线。由于不同种类地物目标具有不同的物理属性,这也导致了不同地物目标的光谱辐射曲线有所差别,因此,可以将光谱曲线上的光谱强度值作为光谱特征来描述不同类别标签的判断依据,文中将这种特征称为基于谱域的特征。假设目标像素点表示为 $T$ ,它的谱域特征表示为 $x_T$ 。其中 $x_{\text{spec}_T} = (x_{T1}, x_{T2}, x_{T3}, \dots, x_{Tp})$ ,  $P$ 表示波段数目。

图1为目标像元 $T$ 的谱域特征示意图。横坐标为波段数,纵坐标为DN值。

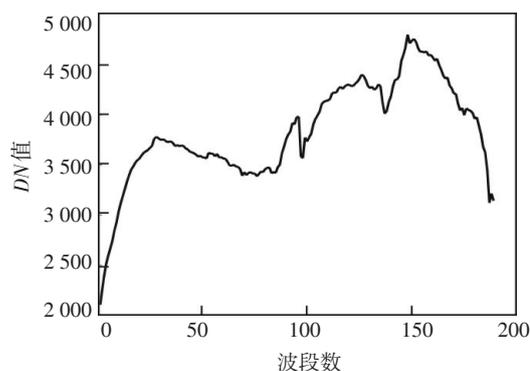


图1 目标像元 $T$ 的谱域特征 $x_{\text{spec}_T}$

### 1.2 基于空域的特征

为了更加有效的反映邻域像元对目标像元的影响。首先需要定义一个邻域,空间邻域范围可包括一阶邻域、二阶邻域、 $3 \times 3$ 、 $5 \times 5$ 等,根据实验时成像光谱仪的空间分辨率采用 $3 \times 3$ 的空间邻域范围。如图2所示。

$x(i-1,j-1)$	$x(i-1,j)$	$x(i-1,j+1)$
$x(i,j-1)$	$x(i,j)$	$x(i,j+1)$
$x(i+1,j-1)$	$x(i+1,j)$	$x(i+1,j+1)$

图2 目标点  $x(i,j)$  的  $3 \times 3$  邻域定义

其次,要确定一个对空间邻域像素的加权规则。文献[4]中利用邻域像素与目标像素的欧拉距离的反比来得到对应的权值,然而欧拉距离对光谱曲线的形状不敏感,在描述光谱曲线相似性方面性能较差,而光谱梯度可以很好的描述目标像元与邻域像元光谱的相似性,而且具有能够反映光谱局部特征变化的优势,特别是能很好的反映光谱曲线斜率的变化。从而在一定程度上消除了光强大小变化所带来的对光谱相似性的误判。因此文中选择用光谱梯度角余弦值的归一化值分别给目标像元的邻域像元赋予权值。

设两个像元光谱矢量为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$  和  $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp})$ , 则二者之间的欧式距离为

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|_2 = \left[ \sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

两个像元光谱的梯度向量分别为

$$SG(x_i) = (x_{i2} - x_{i1}, x_{i3} - x_{i2}, x_{i4} - x_{i3}, \dots, x_{ip} - x_{ip-1}) \quad (2)$$

$$SG(x_j) = (x_{j2} - x_{j1}, x_{j3} - x_{j2}, x_{j4} - x_{j3}, \dots, x_{jp} - x_{jp-1}) \quad (3)$$

两梯度向量的广义夹角为

$$SGA(x_i, x_j) = \cos^{-1} \left( \frac{\langle SG(x_i), SG(x_j) \rangle}{|SG(x_i)| \cdot |SG(x_j)|} \right) \quad (4)$$

简要说明光谱梯度在判断光谱相似性方面的优越性:图3中  $y_1$ 、 $y_2$  分别为 ENVI 软件从光谱库获取的 Cotton Cellulose、Apple Pectin 反射率光谱曲线,  $y_3$  为人为仿真产生的反射率光谱曲线,其与  $y_1$  形状完全相同,幅度整体向下平移 0.5; 分别利用欧氏距离与光谱梯度角判断  $y_2$  与  $y_1$ 、 $y_3$  与  $y_1$  的相似性,两条光谱曲线的欧式距离与光谱梯度的比较如表1。

从图表中可以很明显的看出,欧氏距离更关注的是两条光谱曲线纵坐标之间的距离,而在判断光谱曲线相似性时对于辐射值相近的两条光谱曲线容易出现误判。而用光谱梯度更加注重曲线的形状和局部斜率的变化,能正确的判断两像元的相似

性。而且在实际应用中,同类物体的两个不同端元由于大气、地形变化的影响虽然在谱线形状上很相似,但是往往在光谱强度上有所差异,当用欧氏距离来判断时,具有同类像元就有了较大的欧氏距离,对相似性就出现了误判,而用光谱梯度能实现很好的相似性判断。

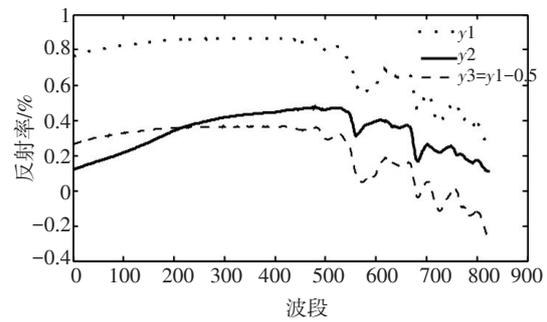


图3 三条反射率光谱曲线

表1 欧氏距离与光谱梯度角判别相似性

	$y_2$ 与 $y_1$	$y_3$ 与 $y_1$	比较结果	正确与否
欧氏距离	12.274 1	14.370 1	$y_2$ 与 $y_1$ 更相似	错误
光谱梯度角	0.786 2	2.107 3e-008	$y_3$ 与 $y_1$ 更相似	正确

光谱梯度夹角范围为  $0 \sim \pi/2$ , 邻域像元中越是相似的像元应该赋予的权值应该越大,由此文中用光谱梯度夹角的余弦值来给邻域像元赋予权值。余弦值越接近于 1 说明两像元光谱越相似,由此,对于目标像素点  $T$ , 设  $N(T)$  表示其空间邻域点的集合,那么,空间邻域内像元  $x$  对应的权值计算公式如下

$$k(x) = \frac{\cos(SGA(x, x_T))}{\sum_{x \in N(T)} \cos(SGA(x, x_T))} \quad (5)$$

式中,  $x_T$ 、 $x$  分别是中心像元和邻域像元的光谱矢量即谱域特征;  $k(x)$  是权值,与光谱梯度角余弦值成正比。

对于像素点  $T$ ,  $N(T)$  表示其空间邻域点的集合,那么,对邻域像元进行加权得到其空域的特征  $x_{spa\_T}$  为

$$x_{pa\_T} = \sum_{x \in N(T)} k(x) \cdot x_{spec} \quad (6)$$

式中,  $x_T$  是中心像元;  $x_{spec}$  是邻域像元的光谱矢量即谱域特征;  $k(x)$  是权值,与光谱梯度角成正比。

### 1.3 谱域-空域联合特征

目前在大部分的高光谱图像处理方法当中,普遍使用的是原始光谱域特征,或者基于原始光谱特征的一个特征提取。由于高光谱图像具有空间相似特性,可以将空间域特征加入到高光谱图像处理中,光谱域与空间域特征的合理构造与拟合必将提高目标探测识别效果。因此,文中构造了一种基于谱域-空域联合特征,该特征由两部分特征组成:中心像素自身的谱域特征及其空间邻域点加权计算得到的空域特征。由于自身的谱域特征和周围空间特征的重要性并不是同等的,所以通过特征权值修正量的设置来实现对两部分特征在组合当中的贡献率的调整。对于像素点  $T$ ,最终提取得到的空谱结合的新特征为

$$x_{\text{new}_T} = w \cdot x_{\text{spec}_T} + (1-w)x_{\text{pa}_T} \quad (7)$$

式中,  $w$  为常数且  $0 \leq w \leq 1$ ; 然后依次遍历整幅图像,得到由空谱结合新特征组成的高光谱影像。

## 2 高光谱降维与异常检测方法

### 2.1 利用主成分降维

对高光谱数据进行有效的降维已成为高光谱数据分析的一项关键技术。对由空谱结合新特征组成的高光谱图像用主成分分析方法进行降维,算法简单介绍如下。

高光谱图像中设像素总个数为  $N$ , 原始波段的数目  $L$ , 将高光谱图像数据整理成  $L \times N$  的矩阵  $X$ ,  $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$ , 其中  $x_i$  表一个像素点, 每一行代表一个波段。估算矩阵  $X$  的协方差矩阵  $C$ , 并将估算的背景协方差矩阵进行特征值分解为

$$C = V\Lambda V \quad (8)$$

$$\text{其中, } \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_p \end{bmatrix}, V = [V_1, V_2, V_3, \dots, V_p]。$$

前  $d$  个主成分所占百分比为

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^d \lambda_i}{\sum_{i=1}^L \lambda_i} \times 100\% \quad (9)$$

其中,背景协方差矩阵  $C$  的非零特征值为  $\Lambda$  的对角元素,  $V$  表示与  $\Lambda$  的非零特征值相对应的特征向

量,各特征向量之间相互正交或不相关。 $R_i$  代表变换后前  $d$  个主成分占图像的信息主成分的百分量,取  $R_i > \eta$  (如  $\eta = 99\%$ ),可以得到  $d$  的值,从而可以将高光谱数据  $X$  投影到特征向量  $V_d$  上,得到下式

$$Y = TX, T = [V_1, V_2, V_3, \dots, V_d]^T \quad (10)$$

### 2.2 RX异常检测

RX 检测算法是异常检测里面的经典算法,由 Reed 和 Yu 提出,是在无先验光谱信息的条件下,以背景正态分布为基础建立的二元假设,其中,  $H_0$  代表目标不存在,  $H_1$  代表目标存在。

$$\begin{cases} H_0: x = n \\ H_1: x = as + n \end{cases} \quad (11)$$

式(10)中,  $n$  和  $s$  分别代表背景噪声和目标光谱信号;  $a$  为系数,在二元假设的基础上,定义如下检测算子

$$RX(x) = (x - u)^T \tau^{-1} (x - u) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \eta \quad (12)$$

$$u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \tau = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - u)^T (x - u) \quad (13)$$

式(11)中,  $x$  为待测目标像元;  $u_0$  为背景均值;  $\tau$  为背景协方差矩阵;  $\eta$  为判决门限。将降维所得高光谱数据逐点进行RX异常检测,进而评估效果。

## 3 实验与结果分析

实验仪器采用机载/地面两用可见光到近红外高光谱成像光谱仪(Hyperspec VNIR),波段范围400~1 000 nm,共825个波段,图4为高光谱成像光谱仪实物图。图5为实验时的场景图。



图4 高光谱成像光谱仪



图5 实验场景

成像光谱仪固定于三脚架上,调整俯仰角、左右扫描范围、扫描速度来拍摄高光谱影像,地点在学院操场,目标为飞机模型,时间为中午 12:00-14:00,天气晴朗,拍摄图像大小 1 004×250。图 6 为用 ENVI 遥感图像处理软件得到的原始高光谱图像的 RGB 图,为了方便处理,剪取 200×200 大小图像进行仿真实验,图 7 为剪切后假彩色合成图像,图 8 为飞机目标标准图。

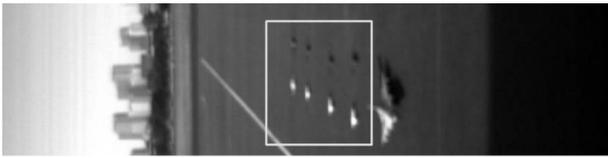


图6 原始高光谱RGB图像

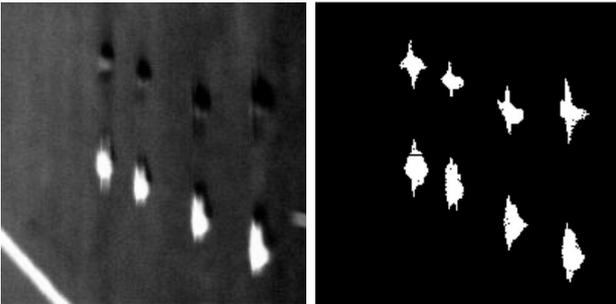


图7 剪切后假彩色合成图像

图8 标准图

实验中,首先对高光谱数据进行归一化,然后依据式(7)构造各像元的新特征矢量,遍历整幅图像,参数  $W$  以步进的方式确定最佳值,然后对由新特征构成的高光谱影像进行主成分分析,特征值图像如图 9 所示。

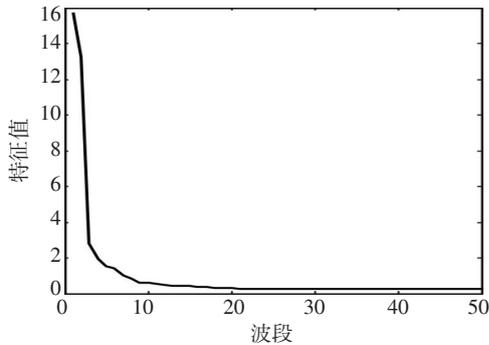
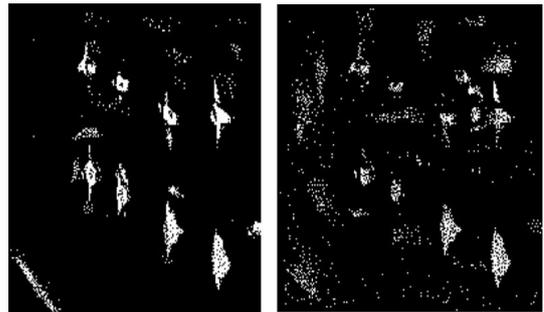


图9 特征值曲线

提取其中的前 30 个主成分分析,其所占百分比  $R_1 = 71.65%$ ,然而原始高光谱数据经过归一化,主

成分分析时前 30 个主成分其所占百分比仅为  $R_1 = 52.07%$ ,前 120 个主成分其所占百分比为  $R_1 = 71.63%$ ,这说明经过处理,高光谱图像信息更加集中,使用低维信息代表高维信息的可行性更强。

然后对降维以后的高光谱数据进行 RX 异常检测。并将其与 PCA-RX 方法进行对比,其中 PCA-RX 算法为原始高光谱数据经过主成分分析然后再进行 RX 异常检测。图 10 为检测效果二值图。



(a)文中算法

(b) PCA-RX 算法

图10 异常检测二值图对比

从图 10 的比较结果可知,文中算法较之 PCA-RX 算法具有更加优越的探测效果,能够探测出所有飞机目标,探测率高,且具有较低的虚警率。

为了更加科学、定量的进行分析,使用接收机操作特性曲线进一步进行分析。ROC 曲线横坐标表示虚警率 ( $P_f$ ),纵坐标表示目标的探测率 ( $P_d$ ),通过变化阈值,得到不同的检测率和虚警率,将其描点连线即可得到 ROC 曲线,从而可以定量而直观的说明检测效果的优劣性。图 11 给出了两种方法的 ROC 曲线。可以看出,在相同的虚警率下文中方法有更高的探测率,说明空间邻域信息的加入增强了检测效果,文中方法要优于 PCA-RX 算法。

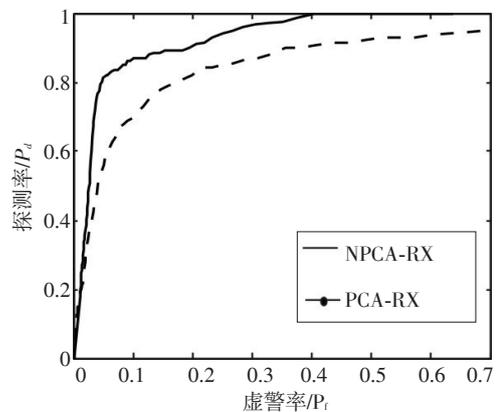


图11 ROC曲线

## 4 结论

提出了基于谱域-空域联合特征的异常检测。将光谱梯度角的度量方法用于构造空域特征,并与谱域特征相结合构造了一种谱域-空域联合特征用于异常检测。利用高光谱成像光谱仪获取的高光谱数据进行实验验证,通过对比异常检测效果二值图和ROC曲线,说明了文中提出方法的有效性,提高了检测效果。

## 参考文献

- [1] YANG Jing-hui, WANG Li-guo, QIAN Jin-xi. Research on the optimal classification method for remote sensing image based on the Gabor-PCA analysis [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 989-994: 3617-3620.
- [2] WANG Liang-liang, LI Zhi-yong, SUN Ji-xiang. Anomaly detection in hyperspectral imagery based on spectral gra-

dient and LLE [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012,121-126: 720-724.

- [3] WANG Liang-liang, LI Zhi-yong, SUN Ji-xiang. Improved RX algorithm with global statistics applied mechanics and materials[J]. 2014, 446-447: 942-945.
- [4] 尤雅萍,成运,苏松志,等.基于谱域-空域结合特征和图割原理的高光谱图像分类[J]. *智能系统学报*,2015,7(2):1-8.
- [5] 董超,赵慧洁,王维,等.采用局部正交子空间投影的高光谱图像异常检测[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8) 2004-2010.
- [6] 刘明,杜小平,夏鲁瑞.局部投影可分离的高光谱图像异常检测[J]. *中国图像图形学报*,2013,18(5):558-564.
- [7] 刘志刚,卢云龙,刘翔.一种改进的高光谱RX异常检测方法[J]. *四川兵工学报*,2014(5):93-96.
- [8] 张修宝,袁艳,景娟娟,等.信息散度与梯度角正切相结合的光谱区分方法[J]. *光谱学与光谱分析*,2011,31(3):853-857.

(上接第31页)

的升高而逐渐升高,初态下电流增加79.3%,光通量增加75.3%;稳态下,电流增加80.28%,光通量增加45.93%。初态和稳态下光效随电压的升高而逐渐下降,初态下光效下降18.67%,稳态下光效下降33.22%。在AC LED光源点亮后,灯片中心的最高温度随电压的升高而升高,从205~235 V,温度升高91.80%。由此看出,电压的变化直接影响AC LED的光电性能,产业化生产AC LED产品的成本和亮度是比较重要的因素,AC LED具有很多优良性能,当AC LED长时间工作时,芯片的温度升高降低了蓝光芯片的辐射复合效率,减少了蓝光的发射,相应的白光发光效率会降低,因此要提高AC LED的亮度和发光效率,提高AC LED散热性能是非常必要的。

## 参考文献

- [1] 姚琦,林思棋,郭自泉,等. InGaN基高压LED和传统大功率LED的发光效率比较[J]. *光电技术应用*,2015,30

(2):37-41.

- [2] 满瑞,李秋俊.AC LED的研究现状与发展[J]. *电源技术*,2012,36(7):1068-1070.
- [3] 毕建峰,邹念育,杨轶,等.交流LED与高压LED的特性实验研究[J]. *半导体光电*,2013, 34(6):975-978.
- [4] 颜重光.发展迅速的AC直接驱动LED光源技术[J]. *电子质量*,2009(9):25-27.
- [5] 邹军,李杨,朱伟,等.立体发光LED灯片的光学性能研究[J]. *发光学报*,2015,36(6):12-15.
- [6] 王健,黄先,刘丽,等.温度和电流对白光LED发光效率的影响[J]. *发光学报*,2008,29(2):358-362.
- [7] 杨玲,董小鹏,洪龙龙.交流LED发光特性的测量与研究[J]. *电子测量技术*,2012,35(11):108-111.
- [8] 田传军,张希艳,邹军,等.温度对大功率LED照明系统光电参数的影响[J]. *发光学报*,2010,31(1):96-100.
- [9] 徐淳,杨磊,曲士巍,等. COB封装LED的光学性能研究[J]. *光电器件与材料*,2015,30(4):16-19.
- [10] 郭旭,杨轶,张竞辉,等.交流电参数对AC LED光源色度学特征的影响[C]//海峡两岸第二十二届照明科技与营销研讨会专题报告暨论文集,2015.