

文章编号 1004-924X(2017)06-1418-07

电致发光缺陷检测仪的成像性能评估

林剑春*, 杨爱军, 沈熠辉

(福建省计量科学研究院 国家光伏产业计量测试中心, 福建 福州 350003)

摘要:针对电致发光缺陷检测仪的成像性能不一致的现状,结合光伏组件自身的电致发光原理,对分辨率、图像均匀性、图像显示等技术指标进行了分析和比较,提出了一种适用于光伏组件生产线现场快速有效的检测技术。研制了相应的检测评估装置,开展了相关测试试验。实验结果表明,利用该技术对粘贴在组件上的分辨率测试板的图像进行视觉判读,可实现 1.98 lp/mm(线对每毫米)的最高分辨率检测以及 0.1 mm 线宽的最小单条纹缺陷模拟检测,从而保证光伏组件的缺陷检测工作能够更加准确有效,促进光伏产业的质量提升。经测试,该评估技术适用于光伏组件生产线上的电致发光缺陷检测仪,可满足目前光伏产业的检测需求。

关键词:光伏组件;电致发光;缺陷检测;分辨率;线对

中图分类号: TM914.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1418

Evaluation of imaging performance for electroluminescence defect detector

LIN Jian-chun*, YANG Ai-jun, SHEN Yi-hui

(Fujian Metrology Institute, National Photovoltaic Industry Measurement and Testing Center, Fuzhou 350003, China)

* Corresponding author, E-mail: linjc04@163.com

Abstract: Technical indexes such as resolution, image uniformity, and image display were analyzed and compared, aiming at the inconsistency of current imaging performance of electroluminescent (EL) defect detector in combination with electroluminescent principles of Photovoltaic (PV) modules. A rapid and effective on-line detection technique for PV modules was proposed. Corresponding detection and assessment devices were developed, and related test experiments were implemented. The experiment results show that for a visual judgment of images on test board of resolution ratio pasted in modules, the technique can realize a detection with the highest resolution of 1.98 lp/mm and a simulative detection of minimum single stripe flaw with line width of 0.1 mm, thus guaranteeing more accurate and effective defect detection for PV modules and promoting production quality of PV industry. The assessment technique is feasible to EL defect detector in production line of PV modules and can satisfy current detection demands of photovoltaic industry.

Key words: photovoltaic module; electroluminescence; defect detection; resolution; line pair

收稿日期:2017-02-14;修订日期:2017-03-20.

基金项目:国家质检总局科技项目(No. 2015QK120);福建省质监局科技项目(No. FJQI2015030);福建省科技计划资助项目(No. 2014R1033-1)

1 引言

伴随着全球对能源、环境危机关注的不断增强,光伏发电等新能源技术在过去十几年中得到了迅速发展。然而,随着光伏电站的投入使用,越来越多的质量问题也逐渐暴露出来。光伏组件是光伏电站的重要组成部分,是影响电站发电的重要因素,其产品质量的好坏直接影响到光伏电站的效益和长期可靠性。而且由于光伏组件在整个光伏系统中占据的成本最高,对其生产的各个环节以及后期的包装、运输、搬运、摆放、安装等过程进行严格的缺陷检测就显得尤为重要。

目前除了目视外观检查之外,利用电致发光(Electroluminescence, EL)原理对光伏组件进行隐裂等缺陷的检测已经成为光伏行业普遍采用的有效手段。2005年, Fuyuki T 等人就已经对 EL 图像与多晶硅少子寿命的关系做了分析^[1]。Rau U 对光伏电池的量子效率和 EL 图像进行了研究^[2]。之后 Kendig D 等人分析了 EL 缺陷识别技术^[3]。T. Weber 等人研究了薄膜组件的 EL 检测^[4]。近些年来, EL 检测技术不断发展,并已经在光伏组件的产品检测、户外实证、长期可靠性、电站检测等方面得到了广泛应用^[5-12]。

EL 是指由于电场作用而产生的发光现象。EL 通常有两种类型:一种是半导体 p-n 结的注入式电致发光;另一种是本征型 EL。目前,光伏产业大多使用注入式电致发光检测设备,也就是太阳能电池正向偏置下少子注入式的 EL^[13]。

EL 检测仪在光伏组件的生产制造和使用中均有使用^[14-15]。在组件的生产制造过程中, EL 检测通常是在生产车间内完成。这类设备通常为箱体式结构,配有遮光暗室或者遮光盖板,并有固定的摆放位置。通常被检测组件通过传送带或者人工搬运放置在被检测位置,其操作空间通常较小。在组件工作的过程中, EL 检测通常在运输后以及现场安装后进行,采用的是便携式 EL 检测仪。便携式 EL 检测仪主要由三角架、便携式成像相机(由成像镜头、包含成像探测器的机身等组成)以及便携式供电电源等组成。该类设备一般用于户外检测,采用每个独立零部件现场组装

进行检测操作,在被检测组件和成像镜头之间一般没有其他支撑结构,且工作时间通常为晚上,不需要另外搭建暗室,因此其操作空间较大。

EL 缺陷检测仪主要是通过成像方法对产生 EL 的光伏组件进行图像信息的采集,再通过显示器将处理后的图像呈现给检测人员,进而由检测人员通过目视检查的方法来判断光伏组件的缺陷情况。因此, EL 缺陷检测仪的成像性能是设备的关键指标。然而,目前还缺少相关标准来规范 EL 检测仪的技术指标,因此不同设备对同一个光伏组件进行缺陷检测的时候存在较大差异,该问题甚至可能引起贸易纠纷。

针对 EL 检测仪的成像性能规范问题,本文结合光伏组件自身的 EL 原理,分别从分辨率、成像均匀性、图像显示等方面提出评估方案。该方案可以有效地对不同 EL 检测仪的性能进行量化评价,满足目前光伏产业的检测需求。

2 EL 检测仪的组成及工作原理

EL 检测仪通常由成像相机、直流电源、暗室、操作软件、图像处理软件及图像显示系统等组成,如图 1 所示。

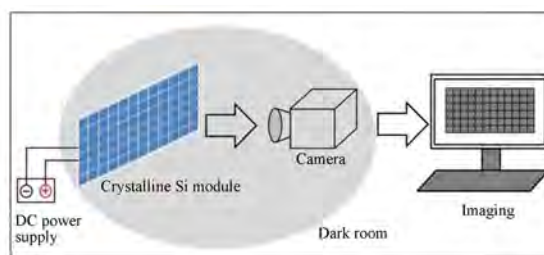


图 1 EL 检测仪示意图

Fig. 1 Framework of EL defect detector

检测时,首先将被检测光伏组件放置在检测位置上,再将组件的正负极分别与直流电源的正负极相连,并通过直流电源控制组件的通电以及相机对组件电致发光信号的采集,最后利用图像处理软件将被测组件的 EL 图像显示在电脑屏幕上,完成组件的 EL 图像检测。对于部分 EL 检测仪,可以通过配备暗室或者采用特定波长的滤光片等设计来抑制杂散光,提高成像质量。

由于 EL 图像是输出到显示屏幕上再由检测

人员进行目视检查的,因此,图像质量很大程度上决定了检测人员对缺陷的判断。图像质量直接取决于成像设备的光学性能、信号处理能力、测试条件以及成像环境等多种因素,正确评价图像质量需要对图像的获取、处理等各环节进行监控。而组件 EL 图像的质量取决于 EL 检测仪的分辨率、成像均匀性、图像显示等成像性能。

3 EL 图像质量评估

3.1 分辨率评估

分辨率用来度量数字图像拍摄系统或数字图像拍摄系统组件分辨空间图像细节的能力。常见的分辨率测量指标包括视觉分辨率、极限分辨率、空间频率响应(Spatial Frequency, SFR)、调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)和光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF)等。分辨率指标的评估通常采用国际标准 ISO 12233,但是由于 EL 检测仪工作在近红外波段,人眼无法进行观察,因此需要结合该类成像检测系统的实际使用情况重新设计制作分辨率测试板。

本文在设计时充分利用光伏组件作为背景光源,采用在组件上进行遮挡成像的方法显示分辨率板上的图案特征。用于 EL 检测仪分辨率性能评估的分辨率测试板采用不透光的金属板制作,并采用精密加工工艺得到测试图案,如图 2 所示。该分辨率板的尺寸为 156 mm×156 mm,与一个 6 寸太阳能电池的尺寸相同,测试图案的基本组成是不同宽度尺寸的单条条纹以及线对条纹。其中,线对条纹就是排列在一起的具有相等宽度的黑白条纹,如图 3 所示。线对条纹共有竖直和水平两个方向,用于评估 EL 检测仪的横向分辨率和纵向分辨率。

分辨率评估指标的描述除了采用线对数之外,为了方便沟通,也可以采用最小可分辨的线对条纹中的单个条纹宽度。线对的单个条纹宽度与每毫米中的线对数满足关系:

$$D = \frac{1}{2N}, \quad (1)$$

式中: D 为线对中的单个条纹宽度; N 为每毫米中的线对数。

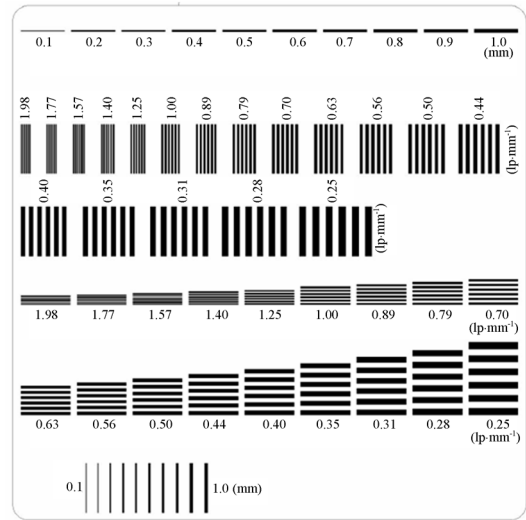


图 2 分辨率测试板示意图

Fig. 2 Test chart of resolution

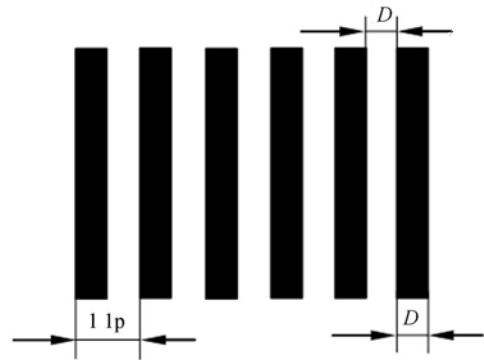


图 3 线对条纹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of line pairs

测试板包含的不同宽度线对组采用等比数列排列,比例系数为 $10^{1/20}$,范围为 0.25~1.98 lp/mm,对应的线对中的单个条纹宽度为 2.00~0.25 mm。

采用该分辨率测试板可以对 EL 缺陷检测仪的分辨率进行快速有效的检测。根据实际开展的测试实验情况来看,大多数光伏组件用 EL 检测仪能够分辨的线对条纹中单个条纹宽度基本上都大于 0.3 mm(对应于 1.67 lp/mm)。该评估技术可实现最高分辨率为 1.98 lp/mm 的检测以及最小单条纹线宽缺陷为 0.1 mm 的检测,满足目前光伏产业的检测需求。

在测试时,需要在同一个组件的 4 个角以及中心区域附近共计 5 个电池上紧贴组件表面平整地放置 5 个分辨率测试板,再通过 EL 检测在一次成像过程中得到该组件的 EL 图像,进而根据 5

个分辨率板的目视检测结果得到该 EL 检测仪的分辨率指标的性能评估结果。

图 4 为粘贴分辨率测试板的光伏组件示例图,图中左上角电池上方粘贴有一张与电池尺寸相近的分辨率测试板,该测试板紧贴在组件前表面的玻璃上。采用上述方法,在某单晶组件上进行分辨率测试,结果如图 5 所示。



图 4 粘贴分辨率测试板的光伏组件

Fig. 4 PV module with resolution test board



图 5 带有分辨率测试板的组件的 EL 图像

Fig. 5 EL image of PV module with test chart

之所以选取 5 个测试点是因为 EL 检测仪在边缘位置和中心位置的清晰度通常会存在一定的差异,而用于封装成组件的电池是分布在整个组件中的,任何一个电池的缺陷都会对组件的质量造成影响,因此,必须保证组件内部不同位置上的电池都能够在相应的分辨率条件下进行检测。评估 EL 检测仪的分辨率指标必须根据这 5 个测试板的目视检测结果,取其中最低的最小目视可分辨的线对数作为该 EL 检测仪的空间分辨率指标的性能评估结果。

在分辨率测试的过程时,可对被观察的电池图像或黑白条纹图像进行缩放操作,以满足人眼

的最佳观察条件和目视检测需求,从而得到最准确的视觉分辨率测试结果。图 6 为进行目视检测的分辨率板的 EL 图像实例。

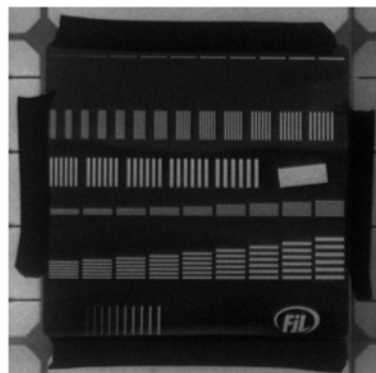


图 6 分辨率测试板的 EL 图像实例

Fig. 6 EL image of resolution test chart

目测结果表明,该缺陷检测仪在水平方向上的线对条纹分辨率为 1.0 lp/mm (即单个条纹宽度 $D=0.5 \text{ mm}$),在垂直方向上的线对条纹分辨率为 0.89 lp/mm (即单个条纹宽度 $D=0.56 \text{ mm}$)。而该组件的尺寸为 $1650 \text{ mm} \times 990 \text{ mm}$,EL 图像像素为 4896×3034 ,因此,从理论上计算可知每个像素对应的尺寸约为 0.3 mm 。而人眼能够识别的条纹宽度通常应综合考虑条纹对应的像素数和图像成像。根据空间采样定律和该类设备的光学系统设计方案可知,通常需要 2~3 个像素对应于一个条纹宽度才能保证条纹被人眼识别。因此,上述目视检测结果与被测缺陷检测仪的像素配置以及光学系统配置的计算结果相一致,能够较好地反映设备的成像性能。

在进行分辨率指标判读时应从低空间频率向高空间频率的方向依次观察,并以可分辨的线数发生变化处的截止空间频率作为视觉分辨率的读取值,从而完成 EL 检测仪分辨率性能的评估。

本文采用该方法在国内几十家光伏组件企业进行了实际检测。统计结果表明,不同设备的分辨率测试结果与其对应的组件 EL 图像的清晰度差异相同,且分辨率测试结果与相机的光学系统和像素等因素直接相关。因此,该方法的测试结果与理论分析值基本相同。

3.2 图像均匀性评估

图像均匀性主要指的是 EL 检测仪对于同一个被测对象在不同位置上的成像灰度差异。该差

异与 EL 检测仪的相机灵敏度、组件正向电流大小、设备杂散光抑制能力以及成像探测器噪声处理能力等密切相关。这就要针对每一台设备的 EL 图像进行灰度值评估。

成像均匀度为：

$$K = (L_{\min} / L_{\max}) \times 100\%, \quad (2)$$

式中： K 为成像均匀度； L_{\min} 为被测样品不同位置 EL 图像中灰度峰值的最小值； L_{\max} 为被测样品不同位置 EL 图像中灰度峰值的最大值。

目前，大多数图像查看处理软件都具有图像灰度值的查看功能，该功能再结合自动亮度、自动曝光等图像处理功能，有助于生产线上测试人员的直接观察和判断。测试时采用一个封装了单个电池的测试样品，先后放置在缺陷检测仪检测面的中间位置和 4 个角点共 5 个不同位置，在相同的测试条件下进行 EL 检测，得到 5 张被测样品的 EL 图像。用图像处理软件对被测样品 EL 图像的灰度峰值 L 进行查看，并计算其 L 值的最小值与最大值的之比。通过图像均匀性评估可以确定 EL 检测仪对于同一个被测电池的 EL 图像灰度值是否相同。

3.3 图像显示评估

EL 图像在经过软件处理后通过显示器呈现在检测人员面前，再通过检测人员的判读得到检测结果。因此，图像显示质量是影响检测人员判断的直接因素。

人眼的最小分辨视角通常为 $1.0''$ ，按照 0.688 m 的最佳观察距离计算，对应于显示屏幕上的尺寸为 0.2 mm 。显示器的像素间距 (pixel pitch) 与其屏幕面板的尺寸以及解析度有关，以 14 英寸液晶显示器为例，其可视面积一般为 $300 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ ，分辨率为 1280×800 ，从而计算出其像素间距是 $300/1280 = 0.2344 \text{ mm}$ 或者 $190/800 = 0.2375 \text{ mm}$ 。这与人眼的最小分辨间距相近。因此，对于图像像素与显示器像素一一对应的情况，显示器的显示不会影响人眼的正常识别。

按照国标《GB/T 29195-2012 地面用晶体硅太阳能电池总规范》中对电池隐性裂纹测试分辨率优于 0.5 mm/pixel 的技术要求，对于 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ 电池而言，其边长方向至少应有 312 个像素 ($156 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm/pixel}$)。根据上述人眼的最佳观察条件，在该显示器规格条件下，单个电池在显示器上至少要以单个边长为 7.4 cm ($312 \text{ pixel} \times 0.2375$

$\text{mm/pixel} \approx 74 \text{ mm}$) 的长度进行显示。

对于常规的 72 片 (12×6) 电池封装结构的光伏组件而言，如果整个组件能够按照上述要求进行显示，则其长度方向约需要 4 000 个像素，对应的显示器面板长度约为 950 mm 。经过调查，目前 EL 检测仪所配备的显示器尺寸大多数都小于这个尺寸，因此，为了不影响 EL 图像的显示，可以利用看图软件对图像进行局部放大的功能，以满足检测需求。因此，图像显示评估主要是针对 EL 检测仪是否满足图像实际尺寸显示和人眼目视检测最小分辨率等要求。

3.4 其他成像性能评估

EL 检测仪的其他成像性能主要还涉及图像畸变、拼接处理等。这些性能都可以通过相应的测试板或者限制条件进行评估，以保证 EL 图像的一致性。其中，图像畸变的评估主要是根据测得的 EL 图像，采用图像处理软件对组件图像进行分析。以 EL 图像中组件的 4 个角点作为固定特征点，分析组件图像中各边长的轮廓，并计算其包含的区域面积以及最小外接矩形面积，得到两者的面积比值。

对于采用拼接方式对电致发光图像进行处理缺陷检测仪，为了保证图像拼接处理带来的拼缝和错位等图像信息变化不影响太阳能电池组件缺陷特征的正确识别，其评估方法是在计算机上目视判断图像拼接是否造成电池成像信息的丢失和误判。

4 结 论

本文针对不同的光伏组件用 EL 缺陷检测仪成像性能存在较大差异的问题，提出了成像性能评估技术要求，对分辨率、图像均匀性、图像显示等技术指标进行了分析和比较，形成了适用于光伏组件生产线现场快速有效的检测技术，研制了相应的检测评估装置，并开展了相关测试，对电致发光缺陷检测仪的成像性能进行了比较。试验结果表明，该评估技术可操作性强、便于生产线应用，不仅可实现 1.98 lp/mm (线对每毫米) 的空间分辨检测以及 0.1 mm 线宽的最小单条纹缺陷模拟，还可对图像均匀性和图像显示性能进行量化评估。该评估技术可以对不同 EL 检测仪的成像性能进行有效的量化评估和区分，从而减小不同

设备检测结果的差异性,实现 EL 检测技术的规

范化,促进光伏产业的技术发展和质量提升。

参考文献:

- [1] FUYUKI T, KONDO H, YAMAZAKI T, *et al.*. Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(26): 262108.
- [2] RAU U. Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells[J]. *Physical Review B*, 2007, 76: 085303.
- [3] KENDIG D, ALERS G B, SHAKOURI A. Characterization of defects in photovoltaics using thermoreflectance and electroluminescence imaging[C]. *Proceedings of the 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE*, 2010: 1733-1736.
- [4] WEBER T, BENFARES E, KRAUTER S, *et al.*. Electroluminescence on the TCO corrosion of thin film modules[C]. *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, EU PVSEC*, 2010: 3169-3173.
- [5] GUO S Y, SCHNELLER E, DAVIS K O, *et al.*. Quantitative analysis of crystalline silicon wafer PV modules by electroluminescence imaging[C]. *Proceedings of 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference, IEEE*, 2016: 3688-3692.
- [6] ADAMS J, DOLL B, BUERHOP-LUTZ C, *et al.*. Non-stationary outdoor el-measurements with a fast and highly sensitive InGaAs camera[C]. *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, EU PVSEC*, 2016: 1837-1841.
- [7] GADE V, SHIRADKAR N, VAISHNAV S, *et al.*. Performance evaluation of PV modules after accelerated testing followed by four years of field exposure in hot-humid climate of Florida[C]. *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, EU PVSEC*, 2016: 1915-1919.
- [8] BERTANI D, LICOTTI C, GUASTELLA S, *et al.*. Investigation and diagnostic tool comparison: infrared thermography vs. electroluminescence[C]. *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, EU PVSEC*, 2016: 2098-2104.
- [9] LOUWEN A, DE WAAL A C, SCHROPP R E I, *et al.*. Comprehensive characterisation and analysis of PV module performance under real operating conditions[J]. *Progress in Photovoltaics*, 2017, 25(3): 218-232.
- [10] KOCH S, WEBER T, SOBOTTKA C, *et al.*. Outdoor electroluminescence imaging of crystalline photovoltaic modules: comparative study between manual ground-level inspections and drone-based aerial surveys[C]. *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, EU PVSEC*, 2016: 1736-1740.
- [11] 陈文志, 张凤燕, 张然, 等. 基于电致发光成像的太阳能电池缺陷检测[J]. *发光学报*, 2013, 34(8): 1028-1034.
- CHEN W ZH, ZHANG F Y, ZHANG R, *et al.*. Defect detection of solar cells based on electroluminescence imaging[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(8): 1028-1034. (in Chinese)
- [12] 鲁伟明, 李省, 张付特, 等. 基于不同电压下的电致发光和红外成像的太阳能电池缺陷检测[J]. *发光学报*, 2014, 35(12): 1511-1519.
- LU W M, LI X, ZHANG F T, *et al.*. Defect detection of solar cell based on electroluminescence and thermography imaging with different bias voltage[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(12): 1511-1519. (in Chinese)
- [13] 刘恩科, 朱秉生, 罗晋生, 等. 半导体物理学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- LIU E K, ZHU B SH, LUO J SH, *et al.*. *The Physics of Semiconductors*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998. (in Chinese)

- [14] 沈文忠. 太阳能光伏技术与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
SHEN W ZH. *Solar Photovoltaic Technologies and Applications* [M]. Shanghai: Profile of Shanghai Jiao Tong University Press, 2013. (in Chinese)
- [15] 肖娇, 徐林, 曹建明. 缺陷太阳电池 EL 图像及伏安特性分析[J]. 现代科学仪器, 2010(5): 105-108.
XIAO J, XU L, CAO J M. Electroluminescence images and I-V characteristic analysis of defective crystalline silicon solar cells[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2010(5): 105-108. (in Chinese)

作者简介:



林剑春(1985—),男,福建莆田人,工程师,2008年于清华大学获得学士学位,2013年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,主要从事红外成像、航天遥感、光伏计量测试技术的研究。E-mail: linjc04@163.com