

# 多光谱多点标定的 CCD 二维温度场重建方法的研究

张福才<sup>1,2</sup>, 孙晓刚<sup>1\*</sup>, 邢 键<sup>3</sup>

1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001
2. 黑龙江科技大学, 黑龙江 哈尔滨 150022
3. 东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040

**摘 要** 以多光谱技术作为基础, 针对 CCD 二维温度场测量的特点, 提出了彩色 CCD 二维温度场多光谱真温在线多点标定系统。通过对多光谱辐射测温理论和 CCD 的测量模型的分析, 推导出气体燃烧时的真温与 CCD 亮度之间的近似关系。使用多光谱多点测温技术计算出多点的发射率和真温并使用这些真温值完成 CCD 面阵上与之对应点的真温标定。将该真温标定系统应用于 CO<sub>2</sub> 激光焊接火焰的二维温度场测量过程中, 不但得到了波长与光谱发射率之间的变化规律同时也得到了 CO<sub>2</sub> 激光焊接火焰的二维真温分布图。研究提出的多光谱标定技术具有实时性、灵活性的特点, 是一种可行的 CCD 在线真温多点标定与测量的方法。

**关键词** 多光谱; CCD; 温度场; 真温; 发射率

**中图分类号:** TH811.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)07-2283-05

## 引 言

高温温度场的测量是温度测量领域中重要的研究分支, 该测量在气体状态判别、火箭尾焰温度、激光焊接等多方面都有着广泛的应用。传统的接触式测温, 如采用多个热电偶的组合形式来完成温度场的构建, 除了热电偶的响应速度较慢外, 还会受到测试目标的外形和结构的限制, 不利于温度场的构建。目前, 较为先进的非接触测温技术, 如激光诱导荧光技术、拉曼散射技术和反斯托克斯光谱技术, 对测量环境要求较高、较高的测试成本等因素, 很少能应用于工业生产过程中, 大部分仍处于实验室应用研究阶段<sup>[1-3]</sup>。二维温度场测量(charge coupled device, CCD)测温主要有彩色 CCD 相机与分光镜或黑白 CCD 相机与分光镜两种组合形式, 通过采集不同波长范围内的亮度信息, 再运用相关的测温理论进行计算得到温度值。

国内外多位学者在 CCD 测温及温度场构建方面做了较多的研究工作。Vattulainen 和 Brisley 等<sup>[4-5]</sup>运用 CCD 采集辐射带下的辐射能量信息, 采用灰体模型实现温度场的计算。Philippe Herve 等<sup>[6]</sup>提出, 在材料动态行为研究的背景下, 通过使用红外辐射实现了一种同时温度和固体表面的发

射率测量方法。Vuelban 等<sup>[7]</sup>提出了非接触温度计设计的原则和一些新的扩展技术, 应用上述技术在实验室条件下, 完成了高温合金样品温度和发射率的测定。周怀春等<sup>[8]</sup>使用彩色 CCD 获取了锅炉火焰图像并应用相应的方法对图像进行了后续的处理, 得到炉膛火焰的温度分布规律图。程晓昉等<sup>[9]</sup>将反映实际辐射的 Planck 定律和复现物体颜色的彩色三基色原理结合, 建立了彩色三基色温度测量原理。以严建华<sup>[10]</sup>等采用 CCD 双色炉膛温度及浓度重建方法, 建立了一种不考虑重建区域内火焰形式的烟黑三维温度场重建模型, 通过重建算法实现了温度场的重建。蔡小舒等<sup>[11]</sup>的光纤光谱仪辐射温度测量技术, 通过改进标定与实测时的 CCD 光谱响应系数以及标定和实测强度差的修订, 使得光纤光谱仪测温误差大幅减小, 测温范围大幅度扩大。万熊<sup>[12]</sup>等的多光谱辐射层析技术, 基于 Randon 逆变换理论和 CCD 图像采集技术, 提出了少投影三维温度场重建算法。符泰然等将光谱仪和 InGaAs 近红外光谱仪结合形成了紫外-可见-近红外多光谱光纤高温计, 波长的选择范围更宽, 选择相邻波段时, 发射率近似认为与波长呈线性关系<sup>[13]</sup>。由此可知, 对于温度场的非接触测量仍以 CCD 测量方法为主, 但是迄今为止尚没有基于多光谱辐射测温原理的 CCD 多点在线标定方面的相关报道。

收稿日期: 2015-06-11, 修订日期: 2015-12-10

基金项目: 2014 年国家重大科学仪器设备开发专项项目(2013YQ470767), 国家自然科学基金项目(61405045), 黑龙江省教育厅科技项目(12521487)资助

作者简介: 张福才, 1978 年生, 哈尔滨工业大学博士研究生 e-mail: qingtengzfc@yeah.net

\* 通讯联系人 e-mail: 510132156@qq.com

本工作提出了一种新的高温辐射物体 CCD 温度场测量在线标定方法。采用彩色 CCD 相机获取高温辐射源的光强场的同时采用多点多波长高温计实时测量高温辐射源的发射率和真温。通过辐射光强场、发射率和辐射真温之间的关系完成对辐射温度场的在线标定。将本套标定系统应用于 CO<sub>2</sub> 激光焊接火焰的温度场测量中, 在得到发射和真温的同时也获得了 CO<sub>2</sub> 激光焊接火焰的二维温度场分布图, 验证了标定方法的可行性。

### 1 高温二维温度场测量原理

#### 1.1 CCD 测温理论

假设高温辐射源是存在真实辐射面的余弦体、辐射面可被分割为若干个微小辐射单元且在每一个微小辐射单元内部温度都相等, 如图 1 所示。

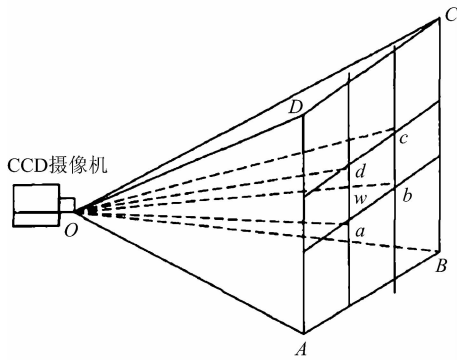


图 1 高温辐射等效原理图

Fig. 1 The equivalent schematic diagram of high temperature radiation

调节镜头的焦距, 并在此时检测 CCD 输出电压, 当此电压达到最大值时可认为在 CCD 靶面上已经得到了高温物体清晰的图像。设  $W$  为燃烧气体表面的一个微小单元且其位于 CCD 主光轴的延长线上, 温度为  $T$  辐射亮度为  $L(T)$ , 此微小单元产生的辐射照度  $E$  为

$$E = \frac{\pi Z_\lambda L(T)}{4} \left(\frac{2r}{f}\right)^2 \cos\beta \quad (1)$$

式(1)中,  $Z_\lambda$  为光学系统的通过率,  $r$  和  $f$  分别为棱镜的半径和焦距。由于所选取的微小单元位于 CCD 主光轴的延长线上, 所以  $\beta$  为选取的微小单元与轴线的夹角<sup>[14-15]</sup>。由余弦体理论见式(2)

$$L(T) = \frac{E(T)}{\pi} \quad (2)$$

根据 Stefan-Boltzmann 定律有式(3),

$$E(T) = \int_0^\infty E_{\lambda} d\lambda = \int_0^\infty \frac{c_1 \epsilon(\lambda, T) \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda \quad (3)$$

即

$$L(T) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty E_{\lambda} d\lambda = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{c_1 \epsilon(\lambda, T) \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda \quad (4)$$

式(4)中,  $\lambda$  为波长,  $m$ ;  $T$  为黑体温度,  $K$ ;  $c_1$  为第一辐射常数,

$3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ;  $c_2$  为第二辐射常数,  $1.4388 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{K}$ 。

在 CCD 可以敏感的光谱范围(380 nm, 780 nm)内的像面照度如式(5)所示

$$E = c_1 Z_\lambda \left(\frac{r}{f}\right)^2 \times \int_{380}^{780} \frac{\epsilon(\lambda, T) \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda \cos\beta \quad (5)$$

CCD 摄像机输出电流信号不仅与像面照度有关而且还与曝光时间  $t$  有关, 其输出电流信号  $I$  为

$$I = \mu E t \quad (6)$$

式(6)中  $\mu$  是光电转换系数。所以

$$I \approx \mu c_1 Z_\lambda \left(\frac{r}{f}\right)^2 \times \int_{380}^{780} \frac{\epsilon(\lambda, T) \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda \cos\beta \quad (7)$$

$I$  是 CCD 的输出电流, 代表了 CCD 亮度信息, 据此可知, CCD 的亮度信息与高温辐射体的温度之间存在一定的关系。进一步分析可知, 式(7)的左边的电流值  $I$  可以通过电子电路进行测量, 式(7)的右边有  $\epsilon(\lambda, T)$  和  $T$  两个未知数, 所以通过测量电流来计算  $T$  的方式在这里实际上是无法做到的。下面介绍一种基于参考温度的多光谱测温方法来求解  $\epsilon(\lambda, T)$ 。

#### 1.2 多光谱测温理论

设多光谱温度测量系统有  $n$  个通道, 则第  $i$  个通道输出信号的电压值  $V_i$  可以表示为

$$V_i = A_{\lambda_i} \epsilon(\lambda_i, T) C_1 \lambda_i^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式(8)中,  $A_{\lambda_i}$  是只与波长有关的仪器常数, 它与该波长下探测器的光谱响应率、光学元件透过率、几何尺寸及第一辐射常量有关,  $\epsilon(\lambda_i, T)$  是温度  $T$  时的目标光谱发射率,  $\lambda_i$  是相应通道的波长,  $C_1$  是第一辐射常数,  $C_2$  是第二辐射常数。对(8)式两端分别取对数并整理, 得式(9)

$$\ln \epsilon(\lambda_i, T) = \ln V_i + 5 \ln \lambda_i - \ln(A_{\lambda_i} C_1) + C_2 / \lambda T \quad (9)$$

为便于计算, 令  $K = \ln V_i + 5 \ln \lambda_i - \ln(A_{\lambda_i} C_1)$ , 则式(9)变为

$$\ln \epsilon(\lambda_i, T) = K + C_2 / \lambda T \quad (10)$$

根据相关的辐射测温理论<sup>[14]</sup>, 假设发射率的对数与波长呈下列关系,  $\ln \epsilon(\lambda_i, T) = a_0 + a_1 \lambda_i + a_2 \lambda_i^2 + \dots + a_m \lambda_i^m$  代入式(10)并在两端乘以  $\lambda$ , 得式(11)

$$K \lambda = -\frac{C_2}{T} + a_0 \lambda_i + a_1 \lambda_i^2 + \dots + a_m \lambda_i^{m+1} \quad (11)$$

式(10)将表示成以  $(C_2/T, a_i)$  为系数的  $\lambda$  的  $m+2$  阶的函数。在测量中取  $n$  个波长处的光谱强度进行测量就可得到符合式(7)的  $n$  个方程。再用回归算法求得这  $m+2$  个系数, 便可拟合出发射率函数和动态的温度, 这就是多光谱测温法的基本原理。至此, 通过式(8)一式(11)求解即获得某一点的光谱发射率  $\epsilon(\lambda, T)$  和真温  $T$ 。将光谱发射率代入式(7)再读取 CCD 每一个单元的电流即可计算出每一个单元的真温, 进而可以实现真温温度场的构建。

系统的测量结构如图 2 所示。包括热源、分光系统、光学瞄准、光学分光、光电转换、数据采集卡和计算机几个部分。调整光学瞄准透镜的焦点位置和焦点的大小可以实现焊接火焰整体或不同位置的测量。

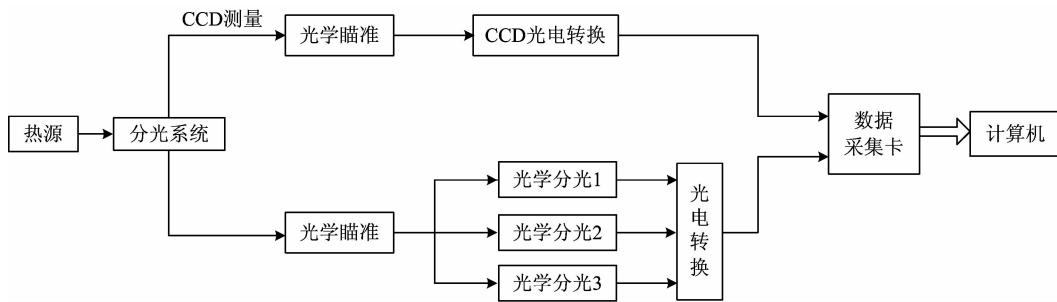


图 2 CCD 测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CCD measurement system

### 2 发射率的测量

通过测量每一个通道光谱强度的对应值，对式(8)一式(11)求解即获得某一点的光谱发射率  $\epsilon(\lambda, T)$  和真温  $T$ 。由于上述迭代方式得到的  $\epsilon(\lambda, T)$  是某一波长下的点值，而不是连续值，而采用式(7)进行温度场的计算时实际需要  $\epsilon(\lambda, T)$  连续值，所以采用已有的  $\epsilon(\lambda, T)$  的值，通过分段多项式进行迭代，计算发射率与波长的关系如图 3 所示。

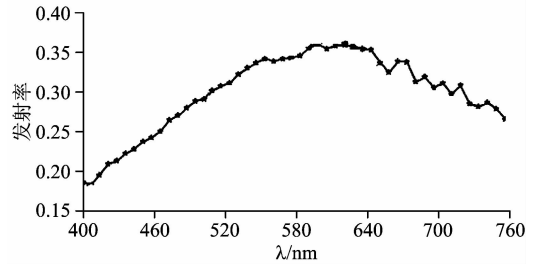


图 3 发射率和波长之间的关系

Fig. 3 Relationship between emissivity and wavelength

### 3 多目标真温测量结果

采用多光谱测量技术在进行 CCD 温度场测量同时可以计算出光谱发射率，利用计算所得发射率求解真温并利用 CCD 测量得到 CO<sub>2</sub> 激光焊接二维温度场如图 4 所示，在此

基础上构建的等温曲线如图 5 所示。

由于进行温度求解时几乎没有两点温度是完全相同的，所以在进行等温线绘制时，只要任何两点的温度误差小于 10 °C 即认为这两点的温度是相同的，这样才能绘制出等温线，否则等温线绝大多数是绘制的。



图 4 CO<sub>2</sub> 激光焊接火焰温度场

Fig. 4 The temperature field of a CO<sub>2</sub> laser welding flame

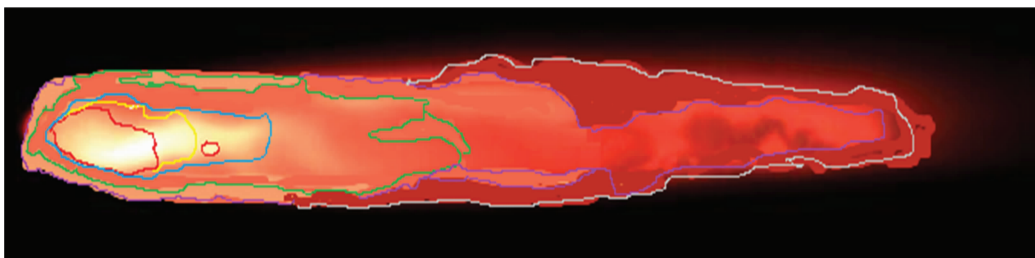


图 5 CO<sub>2</sub> 激光焊接二维温度等温曲线

Fig. 5 Isothermal curves of the two dimensional temperature field of CO<sub>2</sub> laser welding

## 4 结 论

(1) 在使用黑体炉对 CCD 进行标定时需要在实验室中完成, 而采用多光谱的标定方法可以在测量环境中完成, 从而

减少由于测试的环境对测量精度的影响; (2) 在以往的温度测量过程中, 一般多采用一点进行温度的标定, 而采用本套多光谱的标定方法使用六个点进行标定, 从而提高了标定结果的准确性和可靠性; (3) 多光谱的标定方法在测量中随时可以进行标定, 相比于黑体炉标定, 更具有较大的灵活性。

## References

- [ 1 ] MIAO Rui-xia, ZHAO Ping, LIU Wei-hong, et al(苗瑞霞, 赵 萍, 刘维红, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34(1): 108.
- [ 2 ] ZHANG Yan, YANG Ze-hou, LI Xiao-feng, et al(张 艳, 杨泽后, 李晓峰, 等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2014, (3): 030002-1.
- [ 3 ] ZHU Hai-peng, JIN Zhong-xie(朱海鹏, 金钟燮). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2014, 44(1): 0106002-1.
- [ 4 ] Vattulainen J, Hämäläinen E, Hernberg R, et al. Journal of Thermal Spray Technology, 2001, 10(1): 94.
- [ 5 ] Brisley Phillip M, Lu Gang, Yan Yong, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(4): 1417.
- [ 6 ] Herve P, Cedelle J, Negreanu I. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(1): 1.
- [ 7 ] Vuelban E M, Girard F, Battuello M. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(7): 1545.
- [ 8 ] ZHOU Huai-chun, HAN Shu-dong, SHENG Feng, et al(周怀春, 韩曙东, 盛 锋, 等). Dongli Gongcheng/Power Engineering(动力工程), 2003, 23(1): 2154.
- [ 9 ] CHENG Xiao-fang, XIN Cheng-yun, WANG Lu-ping, et al(程晓舫, 辛成运, 王鲁平, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2013, 62(12): 149.
- [10] YAN Jian-hua, ZHAO Jing-de, WANG Fei, et al(严建华, 赵敬德, 王 飞, 等). Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering(中国电机工报), 2004, 24(10): 174.
- [11] CAI Xiao-shu, ZHOU Wu, YANG Hui-nan, et al(蔡小舒, 周 骛, 杨荟楠, 等). Journal of Experiments in Fluid Mechanics(实验流体力学), 2014, 28(1): 12.
- [12] WAN Xiong, HE Xing-dao, GAO Yi-qing(万 雄, 何兴道, 高益庆). Acta Optica Sinica(光学学报), 2003, 23(12): 1433.
- [13] Fu Tairan, TAN Peng, PANG Chuanhe, et al. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(6): 064902-1.
- [14] DAI Jing-min, SONG Yang, WANG Zong-wei(戴景民, 宋 扬, 王宗伟). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2009, 38(4): 710.
- [15] LI Han-zhou, ZHANG Min-gui, PAN Quan, et al(李汉舟, 张敏贵, 潘 泉, 等). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2003, 24(6): 653.

## Research of Multi Points and Multi Spectral Calibration in Two-Dimensional Temperature Field Reconstruction Based on CCD

ZHANG Fu-cai<sup>1, 2</sup>, SUN Xiao-gang<sup>1\*</sup>, XING Jian<sup>3</sup>

1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China

3. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract** Based on the multi-spectral technology and the characteristics of CCD two-dimensional temperature field measurement, this paper proposes a colorful CCD two-dimensional temperature field multi-spectral true temperature online multi-point calibration system. With the analysis of multi-spectral measurement model and CCD measurement model, the approximate relation between the true temperature and the brightness of CCD is deduced during the gas combustion. With multi-spectral multi-points temperature measurement technology, the true temperature to calculate the emissivity and the true temperature of multi-points and use values of the true temperature, the corresponding points of CCD array can be calibrated. Applying the two-dimensional temperature field true temperature calibration system in CO<sub>2</sub> laser welding flame, we not only get the variation between the emissivity and the wavelength but also two-dimensional true temperature distribution maps of flame of CO<sub>2</sub> laser welding. Multi-spectral calibration technology has the feature of real time and flexible and is a really feasible temperature CCD online multi-points calibration and measurement method.

**Keywords** Multi-spectral; CCD; Temperature field; True temperature; Emissivity

\* Corresponding author

(Received Jun. 11, 2015; accepted Dec. 10, 2015)

## 《光谱学与光谱分析》投稿简则

《光谱学与光谱分析》是由中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的专业学术期刊。国内外公开发行人,从2004年起为月刊,大16开本,2017年仍为月刊,每期332页。《光谱学与光谱分析》主要报道我国光谱学与光谱分析领域内具有创新性科研成果,及时反映国内外光谱学与光谱分析的进展和动态;发现并培育人才;推动和促进光谱学与光谱分析的发展。为科教兴国服务。读者对象为从事光谱学与光谱分析的科研人员、教学人员、分析测试人员和科研管理干部。

### 栏目设置和要求

1. 研究报告 要求具有创新性的研究成果,一般文章以8000字(包括图表、参考文献、作者姓名、单位和中文、英文摘要,下同)为宜。

2. 研究简报 要求在前人研究的基础上有重大改进或阶段性研究成果,一般不超过5000字。

3. 评述与进展 要求评述国内外本专业的发展前沿和进展动态,一般不超过10000字。

4. 新仪器装置 要求介绍新型光谱仪器的研制、开发、使用性能和应用,一般不超过5000字。

5. 来稿摘登 要求测试手段及方法有改进并有应用交流价值,一般以3000~4000字为宜。

### 稿件要求

1. 投稿者请经本刊编委(或历届编委)一人或本专业知名专家推荐,并附单位保密审查意见及作者署名顺序,主要作者介绍。文章有重大经济效益或有创新者,请说明,同时注明受国家级基金或国家自然科学基金资助情况。

2. 来稿要观点明确、数据真实可靠、层次分明、言简意明、重点突出。来稿必须是网上在线投稿(含各种符号和外文字母大写、小写、正体、斜体;希腊字母、拉丁字母;上角、下角标位置应标清楚)。中文摘要以500字为宜,英文摘要以2500字符(相当于400个英文单词)为宜;另附关键词。要求来稿应达到“齐、清、定”,中文、英文文字通顺,方可接受送审。

3. 为了进一步统一和完善投稿方式、缩短论文发表周期,本刊只接收网上在线投稿,不接收以邮寄方式或e-mail方式的投稿,严禁“一稿多投”,对侵权、抄袭、剽窃等学术不端行为,一经发现,取消三年投稿资格。

4. 文中插图要求完整,图中坐标、线条、单位、符号、图注等应标注准确、完整。如作者特殊要求需出彩色插图者,必须在投稿时事先加以说明,并承担另加的彩印费用。图幅大小:单栏图7.5cm(宽)×6cm(高);双栏图:14cm(宽)×6cm(高);图中数字、图题、表题全部用中文、英文对照,图中数字、中文、英文全用6号字(电子文档中除实物图外,曲线图尽可能用Matlab, Excel, Visio或Origin等软件制作,稿件中图片的原图并转成相应的文件格式(.fig, .xls, .vsd, .opj),非“.jpg”格式的文档,随电子版修改稿一同发送到本刊的修改稿专用邮箱)。

5. 文中出现的单位必须按“中华人民共和国计量标准”及有关GB标准规定缮写。物理量符号一律用斜体,单位符号和词头用正体字母。

6. 名词术语,请参照全国科学技术名词规定缮写。

7. 参考文献,采用顺序编码制,只列主要文献;以15~20条为宜。内部资料、私人通讯、未经公开发表的一律不能引用。日文、俄文等非英文文献,请用英文表述;中文文献和中文图书采用中、英文对照表述,文献缮写格式请参照本刊。

8. 请在投稿第一页左下角写明投稿联系人的电话和两个e-mail,以便及时联系。

### 稿件处理

1. 自收到稿件之日起,一个月内作者会收到编辑部的稿件处理意见。请根据录用通知中所提出的要求认真修改,希望修改稿在30天内寄回编辑部,并作为作者最终定稿(当作者接到校样时,以此修改稿为准进行校对,请勿再做大的改动),若二个月内编辑部没收到修改稿,将视为自行撤稿处理。

2. 有重大创新并有基金资助者可优先发表;不录用的稿件,编辑部将尽快通知作者,底稿一律不退,请自留底稿。

3. 来稿一经发表将酌致稿酬并送样刊2册。

4. 遵照“中华人民共和国著作权法”,投稿作者须明确表示,该文版权(含各种媒体的版权)授权给《光谱学与光谱分析》期刊社。国内外各大文献检索系统摘录本刊刊出的论文;凡不同意被检索刊物无稿酬摘引者,请在投稿时事先声明,否则,本刊一律认为已获作者授权认可。

5. 修改稿请寄:100081北京市海淀区学院南路76号,《光谱学与光谱分析》期刊社(收)

电话:010-62182998 或 62181070 传真:010-62181070

e-mail: chngpxygpfx@vip.sina.com; 修改稿专用邮箱: gp2008@vip.sina.com 网址: http://www.gpxygpfx.com