

文章编号 1004-924X(2011)02-0297-07

# 制造用高功率激光器光束质量的评价与测量

陈虹,王旭葆

(北京工业大学 激光工程研究院,北京 100124)

**摘要:**建立了制造用高功率激光器光束质量的评价体系与测量方法,研究了该体系所采用的评价参数、测量原理、测量方法、测量仪器以及测量结果的计算和分析方法。首先,对目前存在的评价激光光束质量的参数进行了比较和判断。接着,以光束传输比( $M^2$ )和光束参数积( $K_f$ )为重点,阐述了光束质量评价参数与光束束宽定义之间的关系,提出了工业应用背景下光束质量的评价参数。最后,介绍了基于实测目的的光束质量测量方法和实际测量结果。测量结果显示,DC035Slab CO<sub>2</sub>激光器的  $K_f$  值为 3.78 mm·mrad,TLF6000tCO<sub>2</sub>激光器的  $K_f$  值为 8.67 mm·mrad,表明  $K_f$  值是评价制造用高功率激光器光束质量的较为合适的参数。由于该值是在实际光束传输路径上不同位置处对光束束宽进行测量后用双曲线方法拟合得到的结果,所以更好地反映了高功率激光束的传输和聚焦性能,诠释了激光制造系统的制造能力。

**关键词:**激光制造;光束质量;光束束宽;空心探针

中图分类号:TN249 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111902.0297

## Evaluation and measurement of beam quality of high power manufacturing laser

CHEN Hong, WANG Xu-bao

(*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

**Abstract:** The evaluation and measurement of the beam quality for a high power manufacturing laser were established based on modern laser manufacturing. The measuring parameters, measuring principle, method, equipment and calculation were investigated. Firstly, based on the parameter analysis on distinguishing the laser beam quality at present, the relationship between beam quality and beam width was discussed by taking the beam propagation ratio( $M^2$ ) and beam parameter product ( $K_f$ ) for examples. Then, the proper parameters were proposed. Finally, a method based on the object of actual measurement and results were introduced. Experimental results indicate that the  $K_f$  value of DC035Slab CO<sub>2</sub> laser and TLF6000tCO<sub>2</sub> laser are 3.78 mm·mrad and 8.67 mm·mrad, respectively. It is concluded that the  $K_f$  value is the calculation results of hyperbolic fitting based on the actual measurement of beam radius at different positions along the laser beam propagating direction, the capability and focus ability of high power laser propagation can be reflected better, which defines well the laser performance for manufacturing systems.

**Key words:** laser manufacturing; beam quality; beam width; hollow needle

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展规划资助项目(No. 2006CB605206-3);北京市教委科技计划资助项目(No. JC101012200903)

## 1 引言

随着新型激光制造系统的不断更新换代以及激光功率的不断提高,光束质量在一定程度上可作为激光系统之间进行比较的依据。对光束质量的深入理解,有助于完整地描述激光系统的性能。

目前评价激光光束质量的参数和测量方法很多,互不相同,也无法统一,例如,光束传输比  $M^2$ 、光束发散角、光束参数积、光束相干性、斯特列尔比(Strehl Ratio)、亮度、桶中功率、光束衍射极限倍数因子等等<sup>[1-9]</sup>。对光束质量的定义和测量存在诸多方法的原因之一是不同的应用领域都根据自己的理解和需求来解释光束质量。另外一个原因在于对束宽定义的不统一。光束束宽的定义也有很多种,例如光束半宽度、二阶矩半径、能量降至  $1/e$  或者  $1/e^2$  时的束宽等等。光束质量的测量很大程度上取决于束宽的测量方法,可以说,束宽的定义不同决定了光束质量的评价方法不同<sup>[10]</sup>。

激光束可以通过聚焦获得极小的光斑和极高的能量密度,使被加工材料瞬间汽化,从而高效率、高质量地完成加工任务,工业激光制造看中的正是激光束的可聚焦能力。但到目前为止,大多数人还没有意识到是光束质量真正体现了激光束的聚焦性能。对于激光制造系统,多关注功率、波长、发散角等参数,忽视了光束质量本身;而实际上,光束质量越好,激光束就越容易理解和控制。

本文研究了隐藏在不同光束质量定义和测量方法背后的共性,以现代激光工业制造为应用背景,讨论了制造用高功率激光器光束质量的评价体系与测量方法,解释了光束质量与传统概念中光束模式的不同,以便在实际工业应用中能够根据任务需求选择合适的了解光束质量的方法。

## 2 光束质量

### 2.1 光束的特性参数

光束的特性参数包括那些经验参数,或者说可以直接测量得到的参数,例如激光功率(或能量)、波长、束宽等;还包括可以通过这些参数计算

得到的参数,如光束发散角。图 1 为光束的基本参数示意图,由于激光束的传输都是依双曲线规律从中心向外扩展,光束束宽在远场增大形成渐近的面锥,光束远场发散角  $\theta$  定义为双曲线的两根渐近线之间的夹角。

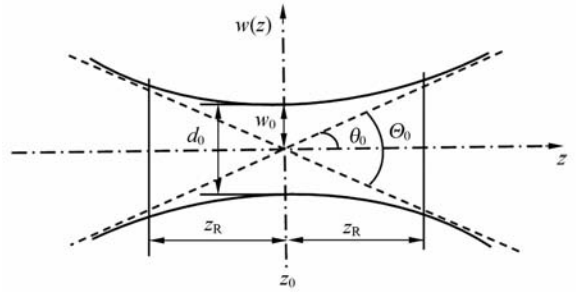


图 1 激光束的束腰、远场发散角和瑞利长度

Fig. 1 Sketch of laser beam waist, divergence angle and Rayleigh length

图中  $D_0, w_0$  分别表示光束的束腰直径和束腰半径,  $\Theta_0, \theta_0$  分别表示光束的束散角和束散半角,  $z_R$  表示瑞利长度。

$\theta_0$  定义为:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0}, \quad (1)$$

式(1)中瑞利长度  $z_R$  表示沿光束传播方向光束直径(或半径)增长为束腰直径(或半径)的  $\sqrt{2}$  倍时到束腰位置的距离,可以理解为光束的准直距离,表示在这段长度内,光束可以近似认为是平行的。瑞利长度越长,就意味着光束准直的范围越大。 $z_R$  表示为:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (2)$$

此外,光束特性还包括一些通过比较获得的参数,例如光束传输比  $M^2$ 、斯特列尔比(Strehl Ratio)等等。

### 2.2 评价光束质量的参数

由于激光技术应用广泛,目前对激光光束质量并没有统一的定义和评价标准,不同的应用领域都根据自己的理解和需求来解释光束质量。例如,在大气光学以及光学雷达和通讯中,习惯上用 Strehl Ratio 比作为光束质量的评价参数。Strehl Ratio 是实际光束的峰值光强与理想光束峰值光强的比值,对于设计光学系统或者查找光学系统的问题,很实用也很方便,但在其他应用领域并不合适。

我国对激光器的研制起步较早,1961年8月就诞生了第一台红宝石激光器。但我国的激光制造业则是随着激光器功率的不断提高逐渐发展起来的,对激光功率一枝独秀的追求掩盖了光束质量本身。提到光束质量,由A. E. Siegman教授提出的 $M^2$ 因子理论成为绝大多数专家学者和激光器制造商的依据,商品化的光束质量分析仪器,也都宣称可以测量激光束的 $M^2$ 因子。本文重点分析了光束传输比 $M^2$ 和光束参数积(Beam Parameter Product, BPP,  $K_f$ ),探讨有关 $M^2$ 因子理论的新进展,总结工业制造背景下最符合实际应用需求的光束质量评价参数。

### 2.2.1 光束参数积

国际标准ISO11145<sup>[11]</sup>《激光和激光相关设备的术语与符号》中将光束参数积定义为束腰直径与束散角的乘积除以4,即:

$$BPP = K_f = \frac{D_0 \cdot \Theta_0}{4}, \quad (3)$$

式(3)中,光束聚焦特征参数值 $K_f$ 是光束参数积的另一种表示方法,其中 $K$ 代表光束传输因子,下标 $f$ 表示“focus”,即聚焦,它从实际应用的角度,综合表征了激光束的传输和聚焦能力。

### 2.2.2 光束传输比 $M^2$

$M^2$ 因子理论最早是20世纪90年代初由A. E. Siegman教授提出的描述激光光束质量较为完整的理论,用光束横截面上强度分布的二阶距表示光束束宽,用因子表示光束质量。最初将因子定义为实际光束束腰直径与远场发散角的乘积与基模高斯光束束腰直径与远场发散角乘积的比值。 $M^2$ 是从高斯模式理论发展起来的,是基于二阶定义的光束直径,如果光束直径不是用二阶距定义的,那么 $M^2$ 就没有意义。近年来随着对激光光束质量研究的不断深入,对 $M^2$ 因子有了更加全面的认识。

ISO11145中将光束质量因子 $M^2$ 修订为光束传输比(Beam Propagation Ratio),将 $K$ 值修订为光束传输因子,定义为光束参数积逼近理想高斯光束衍射极限程度的度量,即:

$$M^2 = \frac{1}{K} = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{D_0 \Theta_0}{4}. \quad (4)$$

公式(4)说明光束传输比等于实际光束的光束参数积与基模高斯光束的光束参数积之比。对于理论上的理想高斯光束, $M^2 = 1$ ;而对于任何实

际光束, $M^2 > 1$ 。

### 2.2.3 $K_f$ 与 $M^2$ 的比较

两者的比较主要针对光束直径和波长两个参数。

第一个参数是光束直径。激光束通常都没有清晰的锐边,所以光束质量的计算很大程度上取决于光束束宽的定义方法。同样,根据ISO11145,光束宽度有两种定义方法,一种是用功率(或能量)密度分布的二阶矩关系定义光束宽度;另一种是分别在两个所选的相互正交且垂直于光束轴的 $x$ 和 $y$ 方向上的内含功率(或能量)占总功率(或能量)规定比例( $u\%$ )的最小宽度。二阶矩是辐照重心的平方,理论上讲,二阶矩定义束宽非常合理,适用于所有不同的光束形状。但是在实际应用中,为了增大模体积实现高功率,常常采用非稳腔结构来实现多模式输出。

国际电工组织(IEC)出版的IEC60825—“激光产品的安全”系列标准的第一部分—“设备分类和要求”也对光束宽度的定义做出规定<sup>[12]</sup>。将光束直径定义为:“在空间某点处的光束直径 $d_u$ 是指其功率(或能量)为总激光功率(或能量)的 $u\%$ 的最小圆直径”。此外,还特别指出,二阶矩的直径定义不用于剖面具有中心高辐射峰值和低背景的激光束,例如由非稳定腔产生的远场激光束。因为当使用二阶矩和用高斯光束剖面假设计算功率时,通过孔径的功率会被显著低估。

也就是说, $M^2$ 不适合作为评价高功率激光光束质量的参数,特别是工业制造领域。如果用 $M^2$ 评价高功率非稳腔的光束质量,那就是给激光设计者提出了一个不可能完成的任务,设计出的激光器不能完成所需的工作。实际上,在工程应用中,精确获得光束横截面的模式成分也是非常困难的。

另一个参数是波长。波长在激光与物质相互作用过程中主要对3个方面产生影响。首先,波长影响材料对激光的吸收率,波长越短,吸收率越高;其次,波长影响光束精细聚焦的极限可能性,波长越短,越能精细聚焦;最后,波长影响激光深熔焊接中光致等离子体的形成,波长越短,越容易产生等离子体。在 $K_f$ 与 $M^2$ 的定义公式中,前者是一个乘积,后者是一个比值。 $M^2$ 包含了波长的因素, $M^2$ 相同而波长不同的激光器,光束质量可能会有很大的不同。实际上,决定光束制造

性能的就是围绕在焦斑附近的功率(或能量)。所以,如果想比较不同波长激光器的制造能力, $K_f$ 值更合适。

### 3 光束质量的测量

早在 1992 年,国家就颁布过推荐性国家标准指导光束参数的测量。例如,“激光辐射发散角测试方法(GB/T 13740-1992)”、“激光辐射光束直径测试方法(GB/T 13739-1992)”。其中推荐的方法主要是套孔法和小孔扫描法,套孔法是通过测量有无光阑时的能量比,根据光阑透过率计算光斑半径;小孔扫描法是用小孔探测到归一化的光强分布曲线,然后计算出该处的光束半径。由于 20 世纪 90 年代初还未出现大规模工业制造用的大功率激光器,这两种测量方法适用于中小功率激光器。

适用于中高功率激光的测量方法主要包括 CCD 法、移动刀口法、移动狭缝法。目前工业上常用大功率激光器的功率都在千瓦至万瓦,在这样的高功率情况下,以上几种基本的测量方法都无法直接使用,需要对激光束进行衰减,即用分束仪或衰减器得到衰减后的激光,再用上述方法对弱光功率进行探测。

随着激光应用技术的发展,进一步了解高功率激光的目的是能够更好地满足加工需求。理想的光束质量测量包括以下几个方面:

- 既能够测量稳腔激光器,也能够测量非稳腔激光器;
- 不同激光制造系统之间的测量结果可以直接对比其优劣性;
- 可重复性高,与应用直接相关;

目前,基于空心探针原理的测量方法满足上述 3 个要求。

#### 3.1 测量原理

测量系统借助于一个转动的、能传输激光束的空心探针对大功率激光光束光斑进行直接测量。图 2(a)所示为在一个旋转转台上固定一根末端有小孔的探针,该小孔面向激光入射的方向,通过转动和平动对光束横截面进行扫描,激光束的横截面分布信息如图 2(b)所示,扫描探针的结构如图 2(c)所示。入射光束通过小孔照射到探针的两个倾斜的反射面上后,被反射到探测器上

获得该位置激光的强度。探测信号经过放大、数字化后传输到计算机中进行进一步的处理。

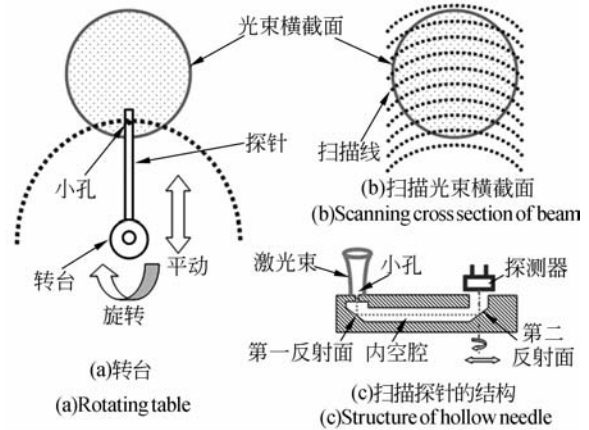


图 2 空心探针测量原理图

Fig. 2 Sketch of measurement principle of hollow needle

#### 3.2 测量结果计算

在光传输路径上的不同位置对激光束进行测量,得到了不同位置处光束或光斑半径;然后采用多点测量双曲线拟合法计算光束特性参数。

ISO11146<sup>[13]</sup>规定将沿光束传输路径上由测量所得的光束束宽结果拟合出位置( $z$ )和光斑直径( $d$ )二次双曲线,然后根据双曲线系数来计算其他光束参数。二次双曲线形如:

$$d^2 = A + Bz + Cz^2, \quad (5)$$

式(5)中, $d$ 为光束(光斑)直径, $z$ 为每一个光束(光斑)所对应的位置,位置可以是相对位置,也可以是绝对位置。草案规定,沿光束传输路径,测量 10 个位置上的光束束宽,其中 5 个要在一倍瑞利距离之内,而且每个束宽要测量 5 次,取其平均值,然后根据拟合方程求出  $A$ ,  $B$ ,  $C$  系数。需要计算的光束参数,例如光束远场发散角(全角)、束腰位置光束(光斑)直径、束腰位置、瑞利长度、 $M^2$  值以及  $K_f$  值可表示为:

$$\Theta = \sqrt{C}, \quad (6)$$

$$D_0 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}}, \quad (7)$$

$$z_0 = -\frac{B}{2C}, \quad (8)$$

$$z_R = \sqrt{\frac{4A}{C} - \frac{B^2}{C^2}}, \quad (9)$$

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \sqrt{AC - \frac{B^2}{4}}, \quad (10)$$

$$K_f = \frac{\sqrt{4AC - B^2}}{8} \quad (11)$$

## 4 光束质量测量实验与结果

### 4.1 实验设备

采用基于空心探针测量原理的 PROMETEC 公司的 LASERSCOPE UFF100 大功率光束光斑质量检测仪对 3 种高功率激光制造系统进行了测量。

Rofin Sinar DC035 Slab CO<sub>2</sub> 激光器是大功率扩散型冷却板条 CO<sub>2</sub> 激光器,是目前国际上最新一代的 CO<sub>2</sub> 激光器。

Trumpf TLF6000t 大功率 CO<sub>2</sub> 激光器是快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,最高输出功率为 6 000 W,采用射频激励,可连续或脉冲输出,激光器输出激光束的模式结构为模。

Rofin Sinar CW025 固体激光器是直流激励灯泵浦固体激光器,可以连续或者脉冲输出,最大输出功率为 2 500 W,脉冲频率为 10~500 Hz,脉宽为 1~8 ms,脉冲最大峰值输出功率

为 4 500 W。

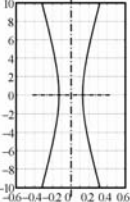
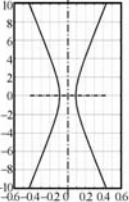
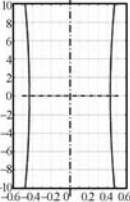
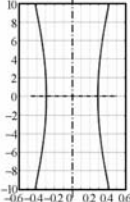
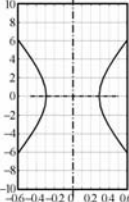



### 4.2 实验结果

测量结果列于表 1,可以看出,DC035 Slab CO<sub>2</sub> 激光器的  $K_f$  值为 3.78 mm·mrad, TLF6000t CO<sub>2</sub> 激光器的  $K_f$  值为 8.67 mm·mrad, CW025 YAG 激光器的  $K_f$  值为 25 mm·mrad。采用不同焦距的聚焦镜对激光束进行聚焦的结果表明,短焦距可以获得小的焦斑半径,长焦距可以获得长焦深。在实际工程应用中,理想的聚焦光束应既具有小焦斑半径以获得高能量密度,又要有长焦深来保证大范围加工过程和质量的稳定性。从表 1 中可以看出,采用高光束质量的 Slab CO<sub>2</sub> 激光器,即使采用长焦距,仍然能够获得小的聚焦光斑,这也正是激光器的发展不断追求高光束质量的原因之一。

表 1 中还列出了 3 个激光深熔焊接焊缝的截面形状,实验材料为普通低碳钢。所采用的激光焊接工艺参数为,功率 3 000 W,焊接速度 3 m/min,双层保护气体,中心保护气为 He 气,流量为 15 L/min,外层保护气为 Ar 气,流量为 6 L/min。

表 1 测量实验结果

Tab. 1 Results of experimental and measurement

Lasers	DC035 Slab CO <sub>2</sub>		TLF 6000t CO <sub>2</sub>		CW025 YAG
$K_f$ /(mm·mrad)	3.78		8.67		25
$f$ /mm	300	200	300	200	200
$w_f$ /mm	0.13	0.09	0.43	0.22	0.29
$z_{Rf}$ /mm	4.68	2.1	21.7	9.63	3.27
Simulation					
Weld seam					
$P=3$ kW					
$v=3$ m/min					

激光焊接实验结果说明了光束质量对焊接过程的影响。采用高光束质量激光器可以通过长焦距聚焦有效获得小聚焦光斑、聚焦角以及长焦深,从而获得深宽比高的焊缝,得到理想的焊接质量。激光光束质量通过聚焦光束的焦斑、聚焦角和焦深的影响,不仅体现了激光制造系统的可聚焦性,也标志了激光制造系统的可加工能力。

## 5 结 论

本文以现代激光工业制造为应用背景,提出了符合工业应用的光束质量评价参数,并介绍了测量原理、方法和仪器。实际测量了两个波长不同的激光制造系统,并对比了它们的聚焦特性。

### 参考文献:

- [1] SIEGMAN A E. New development in laser resonators[J]. *SPIE*, 1990,1224:2-20.
- [2] ANTHOY E. SIEGMAN S W. Output beam propagation and beam quality from a multimode stable-cavity laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993,29(4):1212-1217.
- [3] WRIGHT D,GREVE P,FLEISCHER J,*et al.*. Laser beam width, divergence and beam propagation factor-an international standardization approach [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1992,24:993-1000.
- [4] JOHNSTON T F.  $M^2$  concept characterizes beam quality [J]. *Laser Focus World*, 1990,26(2):173-183.
- [5] 吕百达. 关于激光光束质量若干问题的分析[J]. *激光技术*, 1998,22(1):14-17.  
LV B D. Analyzing some problems of laser beam quality[J]. *Laser Technology*, 1998,22(1):14-17. (in Chinese)
- [6] 吴晗平. 激光光束质量的评价与应用分析[J]. *光学精密工程*, 2000,8(2):128-132.  
WU H P. Evaluation and applied analysis of laser beam quality [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(2):128-132. (in Chinese)
- [7] 高卫. 激光束衍射极限倍数  $\beta$  的确定方法[J]. *光子学报*, 2003,23(9):1038-1040.

理论分析和实验结果表明:不同光束质量评价参数的定义都是清晰的,实际应用中可根据应用需求选择合适的参数。

对制造用高功率激光器来说, $K_f$  值是合适的参数,它不仅综合体现了激光束的聚焦性能,而且是实测值,而不是比值。DC035Slab  $\text{CO}_2$  激光器的  $K_f$  值为  $3.78 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,TLF6000t $\text{CO}_2$  激光器的  $K_f$  值为  $8.67 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,CW025YAG 激光器的  $K_f$  值为  $25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。采用  $K_f$  值评价光束质量,可以方便地对不同波长激光制造系统进行比较,而且可直接体现是否满足应用需求,能够更好地反应高功率激光束的传输和聚焦性能,诠释激光制造系统的制造能力。

GAO W. Definition of laser beam quality  $\beta$  factor [J]. *ACTA Photonica Sinica*, 2003,23(9):1038-1040. (in Chinese)

- [8] 刘泽金,陆启生,赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨[J]. *中国激光*, 1998,25(3):193-196.  
LIU Z J, LU Q SH, ZHAO Y J. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998,25(3):193-196. (in Chinese)
- [9] 高爱华,陆治国. 光束的空间相干性与空间质量评价[J]. *光子学报*, 1998,27(12):1125-1128.  
GAO A H, LU ZH G. Spatial coherence and evaluation of space quality on laser beam [J]. *ACTA Photonica Sinica*, 1998,27(12):1125-1128. (in Chinese)
- [10] SEAN R T,LATHAM W P. Appropriate measures and consistent standard for high energy laser beam quality[J]. *Journal of Directed Energy*, 2006,2:22-58.
- [11] ISO11145:2001, Optics and optical instruments-Lasers and laser-related equipment-Vocabulary and symbols; 5-18.
- [12] IEC60825:2007, Safety of laser products-Part I: Equipment classification and requirements;18-21.
- [13] ISO11146:1999. Lasers and laser-related equipments—Test methods for laser beam parameters—Beam widths, divergence angle and beam propagation factor; 1-10.

## 作者简介:



陈虹(1977—),女,河北沙河人,博士,助理研究员,1999年于天津大学获得学士学位,2006年于北京工业大学获得博士学位,主要从事激光光束质量检测、激光光束质量对激光制造的影响、激光辐射安全与防护等方面的研究。E-mail: chenhong@bjut.edu.cn

王旭葆(1972—),男,黑龙江庆安人,博士,副研究员,2002年、2006年于北京工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光技术及光学设计等方面的研究。E-mail: wangxubao@bjut.edu.cn

## ● 下期预告

## 星载成像光谱仪杂散光测量与修正

张军强<sup>1,2</sup>,吴清文<sup>1</sup>,颜昌翔<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

星载成像光谱仪用于获得高精度的光谱遥感数据,而杂散光是影响其光谱测量精度的重要原因之一。为了降低杂散光对星载成像光谱仪光谱测量精度的影响,分析了此类光谱仪器杂散光的来源和危害,介绍了点扩散函数描述成像光谱仪杂散光的原理,推导了杂散光影响矩阵和杂散光修正矩阵的求解,给出了杂散光测量和修正的具体方案,并对测量和修正精度进行了分析。实验表明,基于点扩散函数的矩阵法可实现成像光谱仪杂散光的测量和修正:像元中心波长入射时,修正后有效信号降低不足1%,杂散光信号降低至少99%;像元中心波长和非像元中心波长同时入射时,修正后像元中心波长处有效信号降低7%左右,非像元中心波长处有效信号降低25%左右,杂散光信号降低近50%。最后,从原理上解释了杂散光修正效果受入射光波长影响的原因。