

三种基于光纤产生无衍射 Bessel 光束的技术

李攀, 吴逢铁

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于不同光纤结构产生无衍射光束的器件是一种集成整合的光学器件,其转换率高,简单易行,无需准直调节即可直接产生无衍射贝塞尔(Bessel)光束.文中介绍 3 种基于光纤产生贝塞尔光束的新技术,即单模-多模光纤激发 $LP_{0,n}$ 模产生贝塞尔光束、光纤光栅激发 $LP_{0,n}$ 模产生贝塞尔光束,以及光纤端面熔接聚合物透镜产生贝塞尔光束,并分析它们的优缺点和适用范围.

关键词: Bessel 光束;单模-多模光纤;光纤光栅;复合光纤;聚合物透镜

中图分类号: O 436.1

文献标志码: A

1987 年, Durnin 等^[1]提出无衍射贝塞尔(Bessel)光是自由空间标量波动方程的一组特殊解.贝塞尔光束具有无衍射和自重建的特性,这些特性使得该光束在精密光学检测、光学微操作和光学囚禁^[2-3]、带电粒子和中性原子引导^[4-5],以及光学相干断层扫描^[6-7]等方面有着非常重要的应用.理想的无衍射光束可扩展到无限大的空间且具有无限大的能量,因此无法在实验上获得理想的无衍射光束,但近似无衍射光束可以用很多方法在实验上获得.传统产生无衍射贝塞尔光束的方法有一定的局限,比如环缝透镜法的能量利用率比较低,轴棱锥法对精密加工和准直要求很高.传统产生 Bessel 光束的方法有环缝-透镜法^[1,8]、轴棱锥法^[9-16]、计算机全息法^[17]等.环缝-透镜法是由 Durnin 最早提出的产生 Bessel 光束的一种装置,它装置简单,但光能利用率低.轴棱锥法产生近似无衍射光束,其实验装置简单、转换效率高、光损伤阈值大^[18-20],但由于轴棱锥的加工精度要求很高,加工误差会对光束质量产生严重的影响^[21-25].近年来,为了克服分散元件产生 Bessel 光束的缺点,国外的一些研究小组提出了利用光纤集成化整形系统产生 Bessel 光束的方法^[26-30].本文分别介绍 3 种基于光纤产生贝塞尔光束的新技术.

1 单模-多模光纤激发 $LP_{0,n}$ 模产生 Bessel 光束

2009 年, Zhu 等^[26]设计了一种利用单模-多模光纤产生无衍射光束的装置,如图 1 所示.装置的原理:在单模光纤(SMF)传输的基模 $LP_{0,1}$ 耦合到多模光纤(MMF)中激发产生 $LP_{0,n}$ 模.由于在多模光纤中,不同阶模的传播是独立的,都有各自的传播常数,所以多模光纤的端面光场是各阶模式叠加成的无衍射光场,可以表示为

$$E_{\text{out}}(r, L) = \sum_{n=1}^N C_n J_0(k_{z, \text{fn}} r) \exp(i\beta_{\text{fn}} L), \quad r \leq R.$$

其中: N 为多模光纤中激发的模数; C_n 为分解系数; r 为径向坐标; R 为多模光纤的纤芯半径; L 为多模光纤长度; Bessel 函数 $J_0(k_{z, \text{fn}} r)$ 有不同的波矢; $k_{z, \text{fn}} = (n_1^2 k^2 - \beta_{\text{fn}}^2)^{1/2}$ 代表多模光纤

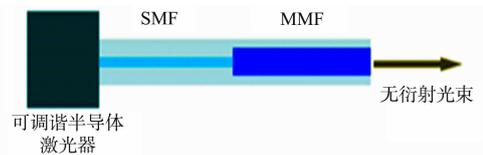


图 1 单模-多模光纤激发 $LP_{0,n}$ 模产生近似无衍射光束的装置

Fig. 1 Device of Bessel beam generator via exciting $LP_{0,n}$ modes with a multimode fiber onto single-mode fiber

收稿日期: 2013-05-04

通信作者: 吴逢铁(1958-),男,教授,主要从事光束传输与变换、短脉冲技术及非线性光学等方面的研究. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178015);福建省自然科学基金资助项目(2012J01278);福建省泉州市科技计划重点项目(2011G9)

中 $LP_{0,n}$ 的模场的横向波矢, $k = 2\pi/\lambda$; n_f 是在多模光纤纤芯的折射率; β_{fn} 为 $LP_{0,n}$ 模的传播常数.

从多模光纤出射到自由空间传播时, 其光场可近似表示为

$$E_{fs}(r, z) = \sum_{n=1}^N C_n J_0(k_{z,n} r) \exp(i(\sqrt{k^2 - k_{z,n}^2} z + \beta_{fn} L)), \quad k_{z,n} = k_{z,fn}.$$

实验中采用半导体激光器作为光源 ($\lambda = 1\ 570\ \text{nm}$), 入射光耦合进单模光纤 (SMF-28, 纤芯半径为 $8.2\ \mu\text{m}$), 再进入与单模光纤接合的多模光纤 (长度为 $43\ \text{mm}$, 纤芯直径为 $105\ \mu\text{m}$), 成像透镜 (焦距 $8\ \text{mm}$, $\text{NA} = 0.2$). 把多模光纤的出射光汇聚进 CCD, 其传播方向上近场和远场 ($10\ \text{cm}$) 不同位置的光斑图, 如图 2 所示.

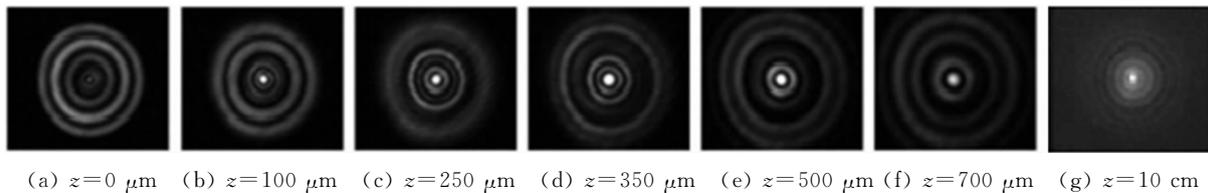


图 2 不同轴向位置的光斑图

Fig. 2 Beam intensity profiles measured at selected distances from the fiber facet

单模-多模光纤激发 $LP_{0,n}$ 模产生 Bessel 光束的方法结构简单、价格低廉、易于操作. 所输出光束可以形成各式各样的横向光强分布, 但是在微米级近场处轴上光强变化较大, 对输入波长的依赖性较强.

2 光纤光栅激发 $LP_{0,n}$ 模产生 Bessel 光束

2011 年, Steinvurzel 等^[27] 利用长周期光纤光栅 (LPG) 有选择地激发 $LP_{0,n}$ 模. 不同的 $LP_{0,n}$ 模可以获得不同锥角的 Bessel 光束, 从而获得不同长度和中心亮斑大小的无衍射光束. 实验中, 所使用的 LPG

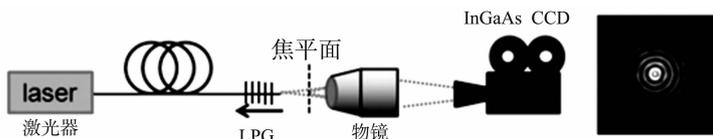


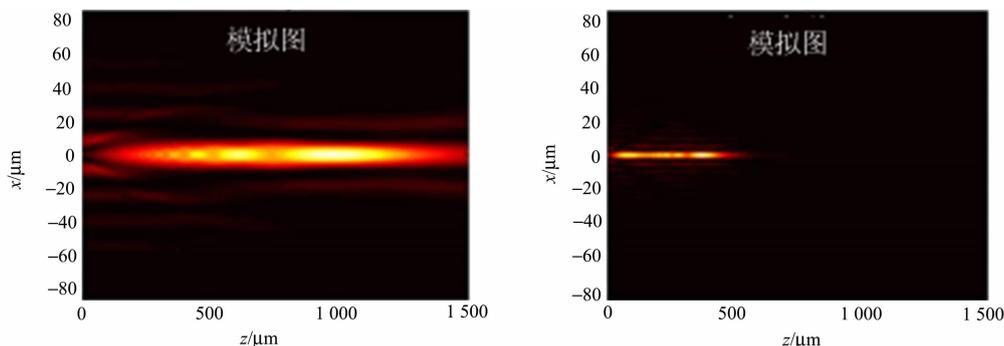
图 3 光纤光栅产生无衍射光束的装置图

Fig. 3 Device of Bessel beam generator via a long period fiber grating

(长为 $1 \sim 1.5\ \text{cm}$) 是将氩离子倍频激光写入经过氢载处理的普通单模光纤上而获得的长周期光纤光栅, 实验装置如图 3 所示. 图 3 中: 光纤光栅的周期可在 $100 \sim 200\ \mu\text{m}$ 之间改变, 耦合产生波长为 $1\ 064\ \text{nm}$ 的 $LP_{0,5} \sim LP_{0,15}$ 模.

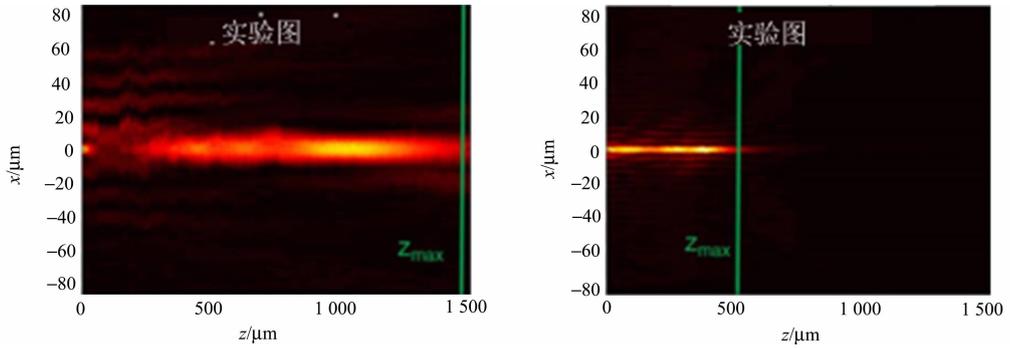
以激光二极管 (LD) 为光源, 12 bit 的 InGaAs CCD 相机记录所获得的出射光斑图的变化情况, 如图 4 所示. 图 4 中: x 为横向位置; z 为传输距离.

$LP_{0,8}$ 的轴上光强分布, 如图 5 所示. 从图 5 可知: 轴上光强分布变化较大, 光强不稳定, 但与其他基于光纤的方法^[26,28] 具有可比性. 通过改变纤芯和包层的数值孔径 (NA) 可获得较好的光束质量. 虽然 LPG 具有波长选择性, 但可以有选择地激发 $LP_{0,n}$ 模来改变无衍射光束的参数, 使方法的应用更灵活.



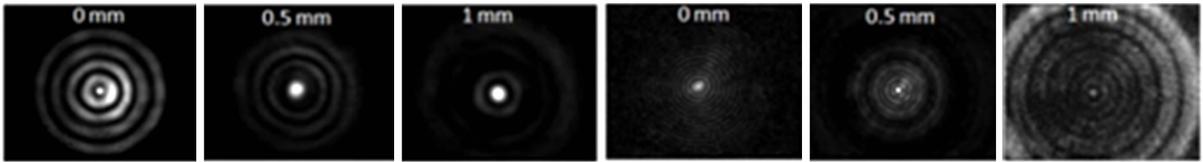
(a) $LP_{0,5}$ 包层模仿真结果图

(b) $LP_{0,15}$ 包层模仿真结果图



(c) LP_{0,5}包层模实验结果图

(d) LP_{0,15}包层模实验结果图



(e) 传播方向不同位置的光斑图

图4 InGaAs CCD相机记录的出射光斑图

Fig. 4 Beam intensity profiles measured by a InGaAs CCD camera

3 光纤端面熔接聚合物透镜产生 Bessel 光束

Kim 等^[28-30]提出了几种用复合光纤产生无衍射光束的方法,通过不断改进,获得的 Bessel 光束质量不断地得到提高.复合光纤由单模光纤(single-mode fiber, SMF)、空心光纤(hollow optical fiber, HOF)、无心石英光纤(coreless silica fiber, CSF)和聚合物透镜组成,与传统的环缝-透镜产生 Bessel 光束的方法^[1,8]相对应的该复合光纤的结构图,如图 6 所示.图 7 为不同的光纤的截面图.图 7 中:SMF 和 HOF 都是特制的只能传输掺 Yb 光纤激光器输出的波长为 1 080 nm 的基模;光纤包层直径都是 125 μm;CSF 的长度是 283 μm;聚合物透镜的曲率半径是 50 μm.

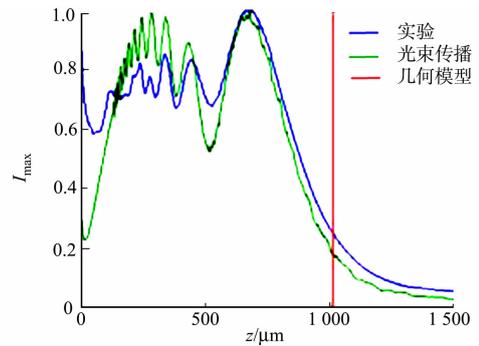
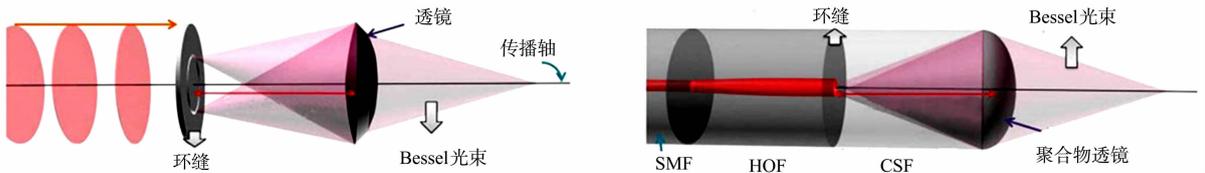


图5 LP_{0,8}模的出射光束中心最大光强分布图

Fig. 5 Maximum central intensity distribution for the LP_{0,8} mode



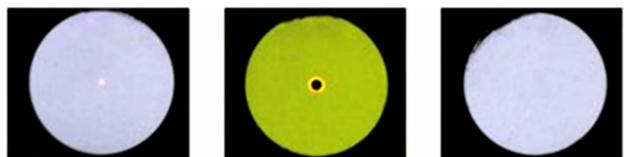
(a) 传统的环缝-透镜方法

(b) 复合光纤方法

图6 环缝-透镜法所对应的复合光纤结构图

Fig. 6 Structure chart of a hybrid optical fiber corresponding annular apertures

实验中使用波长为 1 080 nm 的连续掺 Yb 石英光纤激光器耦合进入单模光纤,功率约为 65 mW,输出的 Bessel 光束的功率约为 50 mW,光转换效率达 80%.输出的 Bessel 光束用装有显微镜的 CMOS 相机记录,在不同轴上位置获得的光斑图,如图 8 所示.



(a) SMF

(b) HOF

(c) CSF

图7 不同光纤的截面图

Fig. 7 Cross section diagram for different optical fibers

该方法与文献[26, 28-29]提出的方法相

比,有更高的转换效率,中心光斑更小,中心光强峰值更高,且有较高的光学梯度力,微粒操控能力较强.

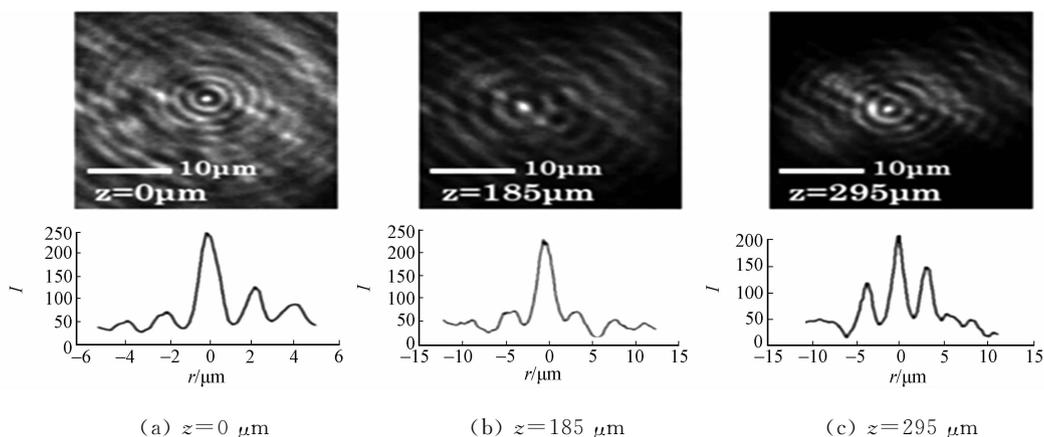


图 8 显微镜 CMOS 相机记录的在不同轴上位置获得的光斑图

Fig. 8 Measured beam profiles at several axial locations by a microscope CMOS camera

4 讨论

上述的几种基于不同光纤结构器件, 无需准直调节而直接产生 Bessel 光束的简单易行方案具有各自的优缺点和适用范围. 单模-多模光纤激发 $LP_{0,n}$ 模产生 Bessel 光束的优点是装置简单、成本低, 缺点是对输入波长和多模光纤的长度依赖性较强, 光源适用于窄带单频光源; 光纤光栅激发 $LP_{0,n}$ 模产生 Bessel 光束的优点是可通过激发不同阶 $LP_{0,n}$ 模来调节无衍射距离, 应用较灵活, 缺点是轴上光强变化较大, 对温度较敏感, 光源适用于窄带单频光源; 光纤端面熔接聚合物透镜产生 Bessel 光束的优点是转换效率高, 可获得较长无衍射距离, 且具有较强的光学梯度力, 缺点是需要特殊光纤, 装置较复杂, 光源适用于宽光谱光源.

基于光纤产生 Bessel 光束的方法, 其装置简单、成本低、易操作; 基于不同光纤结构产生 Bessel 光束的装置紧凑简洁, 与光纤兼容, 使用时无需准直调节, 灵活度高. 这些优点使得装置在光学俘获、光学相干断层成像、高精度激光加工等方面具有较高的应用潜能. 特别是在生命科学中, 可以将装置至于溶液中对细胞或微粒进行微操作, 也使 Bessel 光束内窥显微镜成为可能.

参考文献:

- [1] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [2] 刘彬, 吴逢铁, 江新光. 利用无衍射 Bessel 光束多层面操控微粒[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 379-382.
- [3] GRIER D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810-816.
- [4] ARLT J, HITOMI T, DHOLAKIA K. Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams[J]. Appl Phys B, 2000, 71(4): 549-554.
- [5] SUMMERS M D, REID J P, MCGLOIN D. Optical guiding of aerosol droplets[J]. Opt Exp, 2006, 14(14): 6373-6380.
- [6] DING Z H, REN H W, ZHAO Y H, et al. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens[J]. Opt Lett, 2001, 27(4): 243-245.
- [7] TAN K M, MAZILU M, CHOW T H, et al. In-fiber common-path optical coherence tomography using a conical-tip fiber[J]. Opt Express, 2009, 17(4): 2375-2384.
- [8] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams (I): The scalar theory[J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(4): 651-654.
- [9] SOTT G, ARDE N M C. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon[J]. Opt Eng, 1992, 31(12): 2640-2643.
- [10] 郑维涛, 吴逢铁, 张前安. 双轴棱锥产生长距离近似无衍射光的新技术[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 144201.
- [11] BURVALL A, KOLACZ K, JAROSZEWICZ Z, et al. Simple lens axicon[J]. Applied Optics, 2004, 43(25): 4838-4844.
- [12] 张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 等. 高阶贝塞尔-高斯光束的自重建特性[J]. 中国科学: G 辑, 2011, 41(10): 1131-1137.

- [13] 程治明,吴逢铁,范丹丹,等.绿光LED产生无衍射Bessel光束[J].中国科学:G辑,2012,42(8):805-811.
- [14] PONNAN S,CHELLADURAI M,BALASUNDARAM R K,et al. Generation of a strong uniform transversely polarized nondiffracting beam using a high-numerical-aperture lens axicon with a binary phase mask[J]. Applied optics,2013,52(4):849-853.
- [15] 马宝田,吴逢铁,马亮.非稳腔主动式直接获取纳秒近似无衍射贝塞尔绿光[J].物理学报,2010,59(9):6213-6218.
- [16] PARSA S,FALLAH H R,RAMEZANI M,et al. Theoretical and experimental investigation of generating pulsed Bessel-Gauss beams by using an axicon-based resonator[J]. Applied optics,2012,51(31):7475-7481.
- [17] TURUENEN J,VASARA A,FRIBERG A T. Holographic generation of diffraction-free beams[J]. Appl Opt,1988,27(19):3959-3962.
- [18] 马亮,吴逢铁,黄启禄.一种产生无衍射Bessel光的新型组合锥透镜[J].光学学报,2010,30(8):2417-2420.
- [19] 吴逢铁,陈云彬,郭东栋,等.纳秒无衍射Bessel光脉冲参量的分析与测定[J].中国激光,2007,34(8):1073-1076.
- [20] WU Feng-tie,CHEN Yun-bin,GUO Dong-dong. Nanosecond pulsed Bessel-Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon-based resonator[J]. Appl Opt,2007,46(22):4943-4947.
- [21] 曾夏辉,吴逢铁,邢笑雪,等.轴棱锥非圆对称加工误差对贝塞尔光束质量的影响[J].中国激光,2006,33(6):809-813.
- [22] 江新光,吴逢铁,刘彬.轴棱锥椭圆加工误差产生畸变无衍射光的修正[J].中国激光,2007,34(11):1538-1542.
- [23] 吴逢铁,江新光.轴棱锥顶点加工误差的修正[J].光学精密工程,2009,17(10):2506-2511.
- [24] ZHAO Bin,LI Zhu. Diffraction property of an axicon in oblique illumination[J]. Appl Opt,1998,37(13):2563-2568.
- [25] 江新光,吴逢铁.像散对轴棱锥衍射特性的影响与修正[J].物理学报,2008,57(7):4202-4207.
- [26] ZHU Xiu-shan,SCHULZGEN A,LI Li-feng,et al. Generation of controllable nondiffracting beams using multimode optical fibers[J]. Appl Phys Lett,2009,94(20):1101-1103.
- [27] STEINVURZEL P,TANTIWANICHAPAN K,GOTO M,et al. Fiber-based Bessel beams with controllable diffraction-resistant distance[J]. Opt Lett,2011,36(23):4671-4673.
- [28] KIM J K,KIM J,JUNG Y,et al. Compact all-fiber Bessel beam generator based on hollow optical fiber combined with a hybrid polymer fiber lens[J]. Opt Lett,2009,34(19):2973-2975.
- [29] LEE S R,KIM J,LEE S,et al. All-silica fiber Bessel-like beam generator and its applications in longitudinal optical trapping and transport of multiple dielectric particles[J]. Opt Express,2010,18(24):25299-25305.
- [30] KIM J,JEONG Y,LEE S,et al. Fourier optics along a hybrid optical fiber for Bessel-like beam generation and its applications in multiple-particle trapping[J]. Opt Lett,2012,37(4):623-625.

Technique of Generating Non-Diffracting Bessel Beam Based on Three Kinds of Optical Fibers

LI Pan, WU Feng-tie

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The Bessel beam generator based on different fiber structure is a kind of compact optical device. It's efficient, simple, practicable and requiring no alignment to generate Bessel beam directly. This paper reports the three different new methods on Bessel beam generator based on optical fiber: generating Bessel beams via exciting $LP_{0,n}$ modes with a multimode (MM) fiber onto single-mode (SM) fiber, generating Bessel beams via exciting $LP_{0,n}$ modes with a long period fiber grating, and generating Bessel beams via optical fiber splicing a polymer lens. We analyze the advantages and disadvantages of these generating methods and proposed the scope of their applications.

Keywords: Bessel beam; single-mode/multimode fibers; long period fiber grating; composite fiber; polymer lence

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)