

多模光纤的类型演进和性能特点分析

胡先志,杨博,廖伯勋

(广州工商学院 电子信息工程系,广州 510850)

摘要:为了构建高速数据中心、高速以太网和光纤到户,正确选择多模光纤的类型很重要。简单介绍了多模光纤的类型演进、性能研究和多模光纤标准内容,详细地分析了常用的多模光纤、宽带多模光纤和弯曲不敏感多模光纤的性能特点,得出结论:在不同的高速数据传输网中应该选择不同类型和不同传输性能的多模光纤。

关键词:多模光纤;梯度折射率;高宽带;弯曲不敏感;以太网

中图分类号:TN915.62 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)04-0029-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Types evolution and properties analysis of multi-mode optical fibers

HU Xianzhi, YANG Bo, LIAO Boxun

(Department of Electronic Information Engineering, Guangzhou College of Technology and Business, Guangzhou 511495, China)

Abstract: In order to structure the high rate data center, high rate ethernet and the fiber to home, select types of multi-mode optical fiber correctly is important. After evaluating the types evolution, properties research and standard contents of multi-mode optical fibers, this paper reviews the properties of the common multi-mode optical fiber and high bandwidth multi-mode optical fiber and bend insensitive multi-mode optical fiber. It comes to the conclusion that is to select different types and different properties in the different high data transmission networks.

Key words: multi-mode optical fiber; graded index; high bandwidth; bend insensitive; ethernet

0 引言

梯度折射率分布、激光优化的多模光纤(GI-MMF)与价格便宜的垂直腔表面发射激光器(VCSEL)的结合,是构建高速率、短距离和低成本的高速以太网与数据中心数据传输线路的最佳解决方案。因此,掌握通信MMF的类型演进和性能特点十分必要。

过去40多年,数据宽带业务快速发展、高性价比的光器件(如VCSEL)和高速率的传输系统推动了MMF的类型演进。光纤研究人员先后开发出了常用的

收稿日期:2018-11-12。

基金项目:光纤光缆制备技术国家重点实验室开放课题资助项目(SKLD1704)资助。

作者简介:胡先志(1953-),男,湖北武汉人,本科,教授。主要研究方向是光纤、光缆、光器件和光纤传输系统。主持起草国家通信行业标准3个,已出版光纤通信方面的学术著作23部,译作11部,已发表论文75篇,先后荣获省部级科研成果奖励4项。



GI-MMF(OM1、OM2、OM3)、高带宽GI-MMF(OM4、OM5)、弯曲不敏感多模光纤(BIMMF)和多芯GI-MMF,从而满足了高速以太网、大数据中心和光纤接入网的发展需求。本文介绍通信MMF的类型演进和性能特点,为在构建高速以太网、大数据中心和光纤接入网时正确选择MMF提供了必要的理论依据。

1 MMF 类型演进

通信MMF的类型演进和性能研究经历40多年的历程,MMF从低带宽、小容量的阶跃MMF(Step Index-Multimode Fiber, SI-MMF)发展到高带宽、大容量的GI-MMF;VCSEL收发机调制格式从非归零调制(NRZ)发展到脉冲幅度调制(PAM4)、短波长的波分复用(SWDM)技术和双向传输(BiDi)技术,这些使以太网的数据传输速率从10/100/1000M提高到100/400G甚至于100/400/800/1600G。图1为通信MMF类型、光源与光纤传输系统的演进历程^[1]。

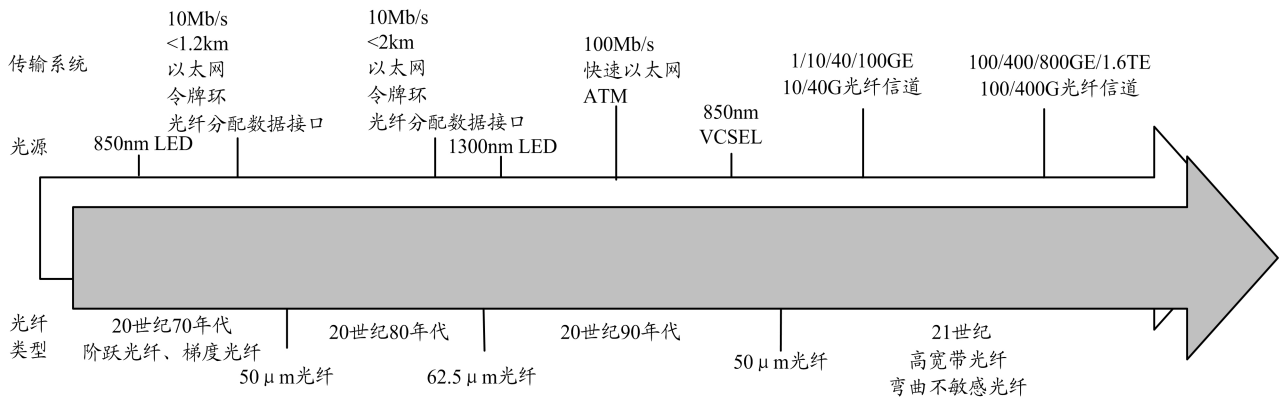


图1 通信 MMF 类型、光源与光纤传输系统的演进

20 世纪 80 年代,利用纤芯直径为 $50\mu\text{m}$ 的通信 MMF 和 850nm 发光二极管(LED)构建的 MMF 传输系统能实现传输速率为 10M/s、距离小于 1.2km 的以太网、令牌环和光纤分配数据接口等局域网数据传输。

20 世纪 90 年代中期,1Gb/s 以太网标准和工作波长为 850nm 的高性价比 VCSEL 问世,使得纤芯直径为 $50\mu\text{m}$ 的 GI-MMF 受到青睐。纤芯/包层直接为 $50/125\mu\text{m}$ 的 GI-MMF 具有更小的模间色射、更大的工作带宽和小光斑尺寸等优点;而 VCSEL 则具有光谱性能好、发光效率高、耦合性能好和价格便宜等优点。 $50/125\mu\text{m}$ 的 GI-MMF 与 VCSEL 构建的 GI-MMF 传输系统可以满足 1/10/40Gb/s 以太网的传输要求。

进入 21 世纪后,为了满足 100/400/800Gb/s 以太网传输带宽的需求,研究人员又开发出了 $50/125\mu\text{m}$ 高带宽 GI-MMF(OM4、OM5)。OM4/OM5 光纤是具有差分模时延小、激光优化和带宽高的 GI-MMF;OM4 光纤可以在点到点以太网上实现 40/100Gb/s、150m 的数据传输;OM5 光纤在 850~950nm 的工作波长范围内传输带宽较高,采用短波波分复用(SWDM)技术可以使 40/100/400Gb/s 的多波长系统实现 200m 传输。

在光纤到户的发展中,GI-MMF 被布放在数据中心、局域网和高速光互连的空间狭小和急转弯环境,GI-MMF 本身必然受到较大的弯曲应力作用。弯曲应力过大会导致 GI-MMF 损耗增加,降低光纤使用寿命。为了减小 GI-MMF 弯曲损耗,确保 GI-MMF 可靠工作,研究人员在 $50/125\mu\text{m}$ GI-MMF 的基础上,采用环型下凹包层提高光纤的耐弯曲性能,开发出 BIMMF。在 BIMMF 中,辅助凹陷的环槽折射率分布区有 2 个导光界面,其内界面折射率从大到小,形成导光界面。由于导光界面的存在,增强了光纤纤芯中传导模的导光能力,使原为弱导状态的高阶模变换为强导模。通过控制纤芯和凹槽之间的空间距离,从而有

效地提高了 MMF 的耐弯曲性能。BIMMF 在弯曲半径为 7.5mm 时,850nm 波长的宏观弯曲损耗仅为 0.2dB,非常适用于室内空间狭窄和频繁急弯环境布线。

为了提高 GI-MMF 的传输容量,解决大数据中心机架-机架、芯片-芯片的光互连接线路拥挤问题,人们又开发出多芯 GI-MMF。多芯 GI-MMF 的研究重点是包层直径、纤芯数量和纤芯几何排列。借助于多芯光纤耦合器将一根多芯 GI-MMF 中多个纤芯构建的多个并行空间信道与 VCSEL 阵列进行有效耦合,既可以提高 GI-MMF 的传输容量,又解决了光互连线路拥挤的问题。目前,多芯 GI-MMF 处在研究阶段,没有商用产品上市。

总结以上发展进程,MMF 经历了一个从降低衰减系数、提高带宽(减小模间色散,精确控制折射率分布)、改善弯曲性能和扩大容量(多芯空分复用)的演进过程,具体演进过程如图 2 所示^[4]。

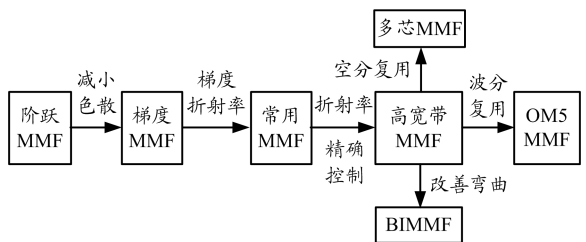


图2 MMF 演进过程

2 通信 MMF 性能研究

2.1 MMF 的衰减系数研究

光纤中传输的光信号随着传输距离的延长,其功率会逐渐下降,即出现光纤损耗。衰减系数 $\alpha(\lambda)$ 是衡量光纤损耗性能的参数,定义为单位长度光纤引起的光功率衰减,主要用来评价光纤质量和确定光纤传输系统的中继距离。

光纤总光损耗 $\alpha_a(\lambda)$ 是各光损耗因素之和, $\alpha_a(\lambda)$ 的数值^[5]为:

$$\alpha_a(\lambda) = \alpha_{\text{RS}} + \alpha_{\text{OTHER}} = \alpha_{\text{RS}} + (\alpha_{\text{IR}} + \alpha_{\text{UV}} + \alpha_{\text{TM}} + \alpha_{\text{OH}} + \alpha_{\text{IM}}) \quad (1)$$

其中, α_{RS} 是瑞利散射损耗, 它是指纤芯中微小的密度(粘度)起伏和浓度(成分)起伏引起的折射率不均匀性, 使得光向各个方向分散辐射, 引起向前传输的光的光功率损耗, α_{RS} 在 600~1600nm 波段对光纤通信产生影响, 研究发现, α_{RS} 大约占总损耗的 50%~85%; α_{IM} 是波导结构不完善的散射损耗, 大约占总损耗的 13%~35%; α_{UV} 是电子跃迁引起的紫外吸收损耗; α_{IR} 是红外分子吸收引起的光损耗; α_{TM} 为过渡金属吸收损耗。 α_{OH} 是 OH 离子吸收损耗。 光纤制造工艺日益完善, 超高纯度原料、气相沉积和氯气干燥, 能使 α_{UV} 、 α_{IR} 、 α_{TM} 和 α_{OH} 对光纤损耗的影响作用小到几乎可以忽略不计^[4]。 因此, 降低光纤损耗的研究重点在于减小 α_{RS} 和 α_{IM} 。 减小 α_{RS} 和 α_{IM} 的具体措施有: ①通过采用纯硅芯和下凹包层, 减小因掺杂剂引起的浓度起伏; ②在光纤拉丝过程中, 通过降低假想温度, 改善密度起伏; ③提高光纤拉丝速度的控制精度, 确保光纤波导结构完善。 主要光纤制造商生产的常用 MMF 的衰减系数如表 1 所示^[2]。

表 1 商用通信 MMF 的衰减系数

光纤类型	光纤衰减系数	
	850nm 工作波长	1300nm 工作波长
62.5/125 μm MMF	$\leq 2.7\text{dB/km}$	$\leq 0.6\text{dB/km}$
50/125 μm MMF	$\leq 2.3\text{dB/km}$	$\leq 0.6\text{dB/km}$

2.2 通信 MMF 的色散研究

色散是指光纤中传输光波(传导模)的光频谱展宽现象, 可以用最大时延差 $\Delta\tau$ 表示, 其物理描述为光纤中传输的速度最快的传导模和传输的速度最慢的传导模到达终端的光谱时延之差。 时延差越大, 色散越严重。 在数字光纤通信系统中, 严重的色散会使光脉冲展宽, 导致光脉冲前后重叠, 造成码间干扰, 增加误码率, 限制光纤传输系统的传输速率和传输距离。 随着光纤损耗的不断降低, 光纤色散成为影响光纤传输系统性能提高的主要问题。

根据产生原因不同, 光纤色散主要有模式色散、材料色散和波导色散。 MMF 中以模间色散为主, 其次是材料色散, 波导色散比较小。 通过调整光纤纤芯-包层折射率分布, 减小模间色散 $\Delta\tau$ 是提高通信 MMF 宽带的主要方法。 光纤的径向纤芯/包层折射率分布 $n(r)$ 为:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right], & 0 \leq r \leq a (\text{纤芯区}) \\ n_2, & r \geq a (\text{包层区}) \end{cases} \quad (2)$$

其中, n_1 是纤芯折射率, n_2 是包层折射率, Δ 是纤芯-包层的相对折射率差, r 为离开光纤轴心的距离, a 是纤芯半径, g 为折射率分布指数。 通过给 g 选不同值, 使纤芯与包层呈现不同折射率分布形状, 或调整纤芯-包层几何尺寸和几何形态, 都能制造出不同色散性能的光纤, 满足不同光纤传输系统的传输性能要求^[3]。

2.3 MMF 的带宽研究

MMF 不断发展的目的是: 减小纤芯直径, 减少传导模数, 降低模间色散, 提高传输带宽。 SI-MMF 的纤芯折射率分布简单、制造容易, 但是 SI-MMF 的纤芯越大, 允许传输的传导模越多。 众多的传导模在纤芯中以不同的传输速度和不同的传输路径传输, 从而产生非常大的模间色散, 使 SI-MMF 的传输带宽限制在 100MHz·km 左右。 因此, SI-MMF 仅适用于数据速率为 10Mb/s、传输距离为 10km 的局域网。

为了减小 SI-MMF 众多传导模多径传输路径差造成的模间色散, 纤芯采用梯度折射率分布, 即折射率从纤芯(最大)到包层(最小)逐渐递减(梯度), 以折射率沿光纤径向的梯度变化量调整众多传导模的传输速度(路径)差, 尽量使众多传导模同时到达传输终端, 实现提高通信 MMF 带宽的目的。 提高通信 MMF 带宽的具体技术措施是: ①减小纤芯直径, 减少传导模数; ②纤芯折射率采用梯度分布, 降低模间色散。 GI-MMF 的带宽是 SI-MMF 带宽的几十倍, 例如, 50/125 μm 梯度 MMF (OM2, OM3) 在 850nm 的有效带宽为 500MHz·km, 支持数据速率为 1Gb/s 或 10Gb/s 实现的传输距离分别为 550m 或 82m。 因此, 50/125 μm 的 GI-MMF 为常用通信 MMF。

为了满足以太网从 1/10/40Gb/s 向 100/400/800Gb/s 的发展需求, 采用计算机控制气相薄层沉积工艺, 消除常用 GI-MMF 纤芯折射率分布中心出现的下凹现象, 确保纤芯折射率分布呈现精确的梯度分布($g=2$), 从而使 GI-MMF 的带宽得到大幅度提高。 高宽带 GI-MMF (OM4, OM5) 和长波长 VCSEL 的结合, 为构建 10/40/100/400Gb/s 以太网提供了必要的基础。

3 通信 MMF 标准和类型介绍

3.1 通信 MMF 标准

GI-MMF 主要使用在局域网、以太网和数据中心,

表 2 IEC/ISO11801 与 IEEE802.3 规范的 MMF 带宽和传输距离的关系

光纤类型	纤芯直径 (μm)	IEC/ISO11801 规范的最小带宽($\text{MHz}\cdot\text{km}$)			IEEE802.3 规范的传输距离		
		满注入带宽		有效模带宽			
		850nm 工作波长	1300nm 工作波长	850nm 工作波长	1GBase-SX	10GBase-SX	40G/100GBase-SX
OM1	62.5	200	500	不规定	275m	33m	不规定
OM2	50	500	500	不规定	550m	82m	不规定
OM3	50	1500	500	2000	不规定	300m	mm
OM4	50	≥ 3500	500	4700	不规定	400m	150m
OM5	50	≥ 3500	500	≥ 4700	不规定	不规定	150m

实现高速率、短距离的数据通信。按照纤芯直径、满注入带宽(OFLBW)和有效模带宽的不同,国际标准化组织/国际电工委员会标准(ISO/IEC 11801)将 GI-MMF 分为 OM1、OM2、OM3、OM4 和 OM5 几种类型。表 2 为 ISO/IEC 11801 标准规范的 50/125 μm GI-MMF 类型、最小带宽和 IEEE802.3 标准规范的该光纤在不同传输速率的以太网系统中的传输距离^[4]。

3.2 常用 MMF

OM1 光纤是纤芯直径为 62.5 μm 、纤芯折射率呈梯度分布的 MMF。OM1 的相对折射率差 $\Delta=2\%$,在 OFLBW 条件下,工作波长分别为 850nm 和 1300nm 的光纤最小带宽分别是 200MHz $\cdot\text{km}$ 和 500MHz $\cdot\text{km}$ 。OM1 光纤具有数值孔径大、集光能力强和抗弯曲性能好的特点,20 世纪 90 年代,OM1 主要应用在带宽要求不高、低速率数据通信的局域网。

OM2 光纤是纤芯直径为 50 μm 、纤芯折射率呈梯度分布的 GI-MMF。OM2 光纤的相对折射率差 $\Delta=1\%$,在 OFLBW 条件下,工作波长分别为 850nm 和 1300nm 的最小带宽都是 500MHz $\cdot\text{km}$ 。与 OM1 光纤性能相比,OM2 光纤的纤芯直径、数值孔径明显减小,传导模数量下降了 1/2.5,有效地降低了 MMF 的模间色散,使带宽得到明显提高。进入 20 世纪末,OM2 光纤和 LED 为光源构建的吉比特以太网在数据传输速率为 1Gb/s 时实现了 550m 距离传输。

OM3 光纤是纤芯直径为 50 μm 的较高带宽的 GI-MMF,在 OFLBW 条件下,其 850nm 的最小带宽为 1500MHz $\cdot\text{km}$,有效模带宽为 1500MHz $\cdot\text{km}$ 。21 世纪初,工作波长为 850nm 的激光光源 VCSEL 和 OM3 光纤共同构建了 10Gb/s 的以太网,在数据传输速率为 10Gb/s 时实现了 300m 传输。

3.3 高带宽 MMF

为了满足云计算、大数据中心实现高速率、短距离和低成本的发展需求,光纤研究人员通过采用等离子气相沉积工艺,以计算机精确控制数千层超薄沉积,形成精确的梯度折射率分布,消除中心凹陷制得了高宽带 GI-MMF(OM4 光纤和 OM5 光纤)。

OM4/OM5 光纤具有纤芯直径大、可以传输多个模式,光耦合效率高、允许的纤芯对准容差宽松和可以使用价格便宜的光连接器等优点。多模 VCSEL 具有制造简单、便于集成、功率低、耦合效率高和价格便宜等优点。OM4/OM5 光纤与 VCSEL 结合是构建 100/400/800/1600G 以太网、100/200/400G 光纤信道性价比最高的技术方案。

OM4 光纤在工作波长为 850nm 处的满注入最小带宽 $\geq 3500\text{MHz}\cdot\text{km}$,有效模带宽为 4700MHz $\cdot\text{km}$,满足 IEEE802.3ba 标准的要求,可以使 10Gb/s 的数据实现 550m 距离的传输,10/40Gb/s 的数据实现 150m 距离的传输。

OM5 光纤是 OM4 光纤的升级版,工作波长范围为 850~950nm。其在工作波长为 850nm 处的满注入最小带宽 $\geq 3500\text{MHz}\cdot\text{km}$,有效模带宽 $\geq 4700\text{MHz}\cdot\text{km}$ 。OM5 光纤为 SWDM 系统提供稳定可靠的传输线路,可以使高速以太网实现 100/400/800Gb/s 多波长、大容量传输。

IEEE802.3ba、IEEE802.3cd 和 IEEE802.3cm 规定的以太网使用的高带宽 OM4/OM5 光纤支持的传输速率和传输距离等主要性能参数如表 3 所示,使用 4 对光纤、2 个波长、50G PAM4、BiDi 双工和 MMF 光收发机,在 400G-BiDi 系统和 OM5 光纤上可以实现传输速率为 400Gb/s 的 150m 传输^[5]。

表 3 高带宽 OM4 光纤和 OM5 光纤支持的传输速率和传输距离

传输速率(Gb/s)	以太网标准	光调制格式	光纤对数	波长数量	OM4 的传输距离(m)	OM5 的传输距离(m)
50	50GBASE-SR	50G PAM4	1	1	100	150
100	100GBASE-SR2	50G PAM4	2	1	100	150
100	100G-SWDM4	25G NRZ	1	4	100	100
100	100G-BiDi	50G PAM4	1	2	100	100
200	200GBASE-SR4	50G PAM4	4	1	100	100
400	400GBASE-SR8	50G PAM4	8	1	100	100
400	400GBASE-SR4.2	50G PAM4	4	2	100	150
400	400G-BiDi	50G PAM4	4	2	100	150
800	800GBASE-SR8	100G PAM4	8	1	30	30

3.4 弯曲不敏感 MMF

弯曲不敏感的单模光纤(G.657 光纤)在光纤到户中广泛使用,G.657 光纤进入家庭,像电话线那样铺设和使用。在弯曲半径为 5mm,弯曲圈数为 1 的条件下,G.657B3 光纤允许的弯曲损耗为 0.15dB。与 G.657B3 光纤不同,BIMMF 通常不进入家庭,其主要使用在企业事业单位的局域网、以太网、大数据中心或高速光互连等场所。因此,在弯曲半径为 7.5mm,弯曲圈数为 2 的条件下,BIMMF 允许的弯曲损耗为 0.2dB。由此可见,BIMMF 的弯曲性能要求比 G.657B3 宽松。表 4 为常用的 GI-MMF、BIMMF 标准要求与长飞公司超贝 BIMMF 产品的宏观弯曲耗性能对比^[6]。

表 4 常用 MMF、BIMMF 标注要求与超贝 BIMMF 的宏观弯曲耗性对比

弯曲半径 (mm)	圈数	MMF 的宏观弯曲损耗,最大值(dB)					
		常用 GI-MMF		BIMMF 标准要求		超贝 BIMMF	
		850nm	1300nm	850nm	1300nm	850nm	1300nm
37.5	100	0.5	0.5	不规定	不规定	不规定	不规定
15	2	1.0	1.0	0.1	0.3	≤0.2	≤0.5
7.5	2	不规定	不规定	0.2	0.3	≤0.2	≤0.5

4 结束语

本文通过对 GI-MMF 的类型演进、性能研究和性能特点的分析得到以下 3 个结论:

①宽带业务迅速发展,带动了用户带宽需求增长,促进了 GI-MMF 传输系统的传输容量持续提升,进而推动了 GI-MMF 类型演进和性能研究特点。

②不同性能特点的 GI-MMF 满足不同 GI-MMF 传输系统的传输性能要求。OM4 光纤在波长为 850nm 处可以实现数据传输速率为 400Gb/s 的 mm 距离传输。OM5 光纤在 850~950nm 波长范围内可以通过 SWDM 实现 100/400/800Gb/s 多波长、大容量传输。BIMMF 可以满足 FTTX 中频繁的小急弯环境下的使用要求。

针对高速以太网、大数据中心和光纤接入网的发展需求,光纤研究人员分别开发出了高宽带 GI-MMF 和 BIMMF。高速以太网的快速发展,将进一步促进 GI-MMF 类型演进与性能研究持续深入进行。

参考文献:

[1] LI Ming-Jun, DANIEL A N. Optical Transmission fiber Design Evolution [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(9): 1079-1092.

[2] 胡明. 新一代高速率、大容量、长距离传输光纤技术展望[J]. 电信工程技术与标准化,2017(3):1-5.

[3] 顾畹仪. 光纤通信[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,2011.

[4] 陈炳炎. 光纤光缆的设计与制造 [M]. 3 版. 杭州:浙江大学出版社,2016.

[5] CHOUDHURY G Mabud, LINGLE Robert, KAMINO Jr John, et al. Standards, Technology, Market and Trends for MMF[C]//Proceeding of the IWCS TM2018 Internation Cable & Connectivity Symposioum, October 14-17, Rhode Island, USA. Rhode Island: 2018.

[6] 胡先志. 通信光纤及其系统应用前沿研究[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2016.