张航宇, 姜鸣州, 贾栋华,等. 基于 TracePro 建模的多模光纤成像特征教学仿真设计[J]. 智能计算机与应用,2026,16(7):218-224. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24103104

基于 TracePro 建模的多模光纤成像特征教学仿真设计

张航宇, 姜鸣州, 贾栋华, 施 怡, 张雷洪
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要: 多模光纤的高信息吞吐量和小尺寸芯径使得其在内窥、通信等方面有着巨大的应用潜力,本文基于光线追迹法,采用光学仿真软件 TracePro 设计了多模光纤成像教学仿真系统,创建与实际环境相似的仿真系统用于教学中,为学生提供沉浸式的学习体验,增强学生的参与感和专注度,并结合理论推导验证了关键参数对系统性能的影响。研究表明:增大光纤的核心半径或光纤弯曲的曲率半径,可显著降低光线的出射角,从而提高光纤的传输效率。采用二氧化硅作为光纤纤芯材料,配以氟化镁包层,相较于其他材料组合,展现出更优异的传输效率。在可见光范围内,光源类型对光纤传输的影响较小,但红光照明的散斑传输效率更高。此外,仿真结果进一步表明,在多模光纤输入端添加一层浑浊介质层可以有效扩展系统的视场范围。

关键词: TracePro; 多模光纤; 光线追迹; 散斑图; 散射成像
中图分类号: TN253-4 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)07-0218-07

Simulation design for teaching multimode fiber imaging features based on TracePro modeling

ZHANG Hangyu, JIANG Mingzhou, JIA Donghua, SHI Yi, ZHANG Leihong
(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The high information throughput and small-size core diameter of multimode optical fiber make it have great application potential in internal snooping and communication, etc. Based on the ray tracing method, this paper designs a multimode optical fiber imaging teaching simulation system by using the optical simulation software TracePro, creates a simulation system that is similar to the actual environment to be used in teaching, provides students with immersive learning experience, enhances the students´ sense of participation and concentration, and combined with theoretical derivation to verify the impact of key parameters on system performance. The study shows that increasing the core radius of the optical fiber or the radius of curvature of the fiber bend can significantly reduce the exit angle of the light, thus improving the transmission efficiency of the optical fiber. The use of silica as the fiber core material with magnesium fluoride cladding demonstrates superior transmission efficiency compared to other material combinations. In the visible range, the type of light source has less effect on the fiber transmission, but the scattering transmission efficiency is higher for red light illumination. In addition, the simulation results further show that adding a turbid dielectric layer at the input end of the multimode fiber can effectively extend the field of view range of the system.

Key words: TracePro; multimode fiber; light tracing; scattering map; scattering image

0 引 言

成像技术是光学领域的一个重要研究方向,近年来发展迅速,并且在众多工业场景中得到了广泛应用,比如医疗诊断、遥感遥测和虚拟现实等。特别是在生物医学成像方面,随着技术的进步,医用内窥镜的应用得到了极大的发展。多模光纤(MMF)作为一种大容量信息传输器件,其在内窥镜[1-4]、光学成像[5-6]和光纤通信[7]等领域得到了越来越广泛的关注和应用。MMF 能够在保持较高成像质量的同时,传输大量的图像数据,从而实现更高分辨率的成像,满足现代医学成像对细节精度和数据量的需求[8]。目前对于多模光纤成像的研究已经陆续展开,传统光学方法对 MMF 图像传输的研究已经取

基金项目: 基础科研条件与重大科学仪器设备研发重点专项(2023YFF0718103)。
作者简介: 张航宇(2000—),男,硕士研究生。主要研究方向:多模光纤成像。
通信作者: 张雷洪(1981—),男,博士,教授。主要研究方向:计算关联成像技术。Email: lhzhang@usst.edu.cn 。
收稿日期: 2024-10-31

得了一些成果，如数字相位共轭[9-11]、光斑扫描成像[12]、传输矩阵[13-14]等方法被用来克服模态间色散、光纤耦合与其他影响 MMF 成像的外部因素。

TracePro 是由美国 Lambda Research 公司开发的一款基于蒙特卡罗法的非序列光线追踪软件，广泛应用于照明设计、光学分析、辐射与光度分析等领域。该软件能够处理复杂的几何形状，并能同时追踪数百万条光线。通过建立实体模型，TracePro 模拟光线在系统中的传播过程，计算光线与物体表面的反射、折射、吸收和衍射等现象。这使其能够有效地模拟和分析真实世界中的光学行为[15-16]，因此，本次研究通过 TracePro 模拟光线在多模光纤中不同模式间传输时发生色散的过程，得到多模光纤传输的图像经过这些混乱的模态后呈现出振幅和相位在空间上随机分布的散斑图像[17-19]。

近年来，TracePro 被许多国内外学者用于模拟分析导光管的性能，如吴新汶等学者[20]通过模拟多种不同类型导光管的传输效率，分析其变化规律。王书晓等学者[21]验证了一种导光管光传输特性数学模型的准确性。Sharma 等学者对几种结构设计改变的光导管进行光线的追踪模拟[22]。目前的研究表明，利用 TracePro 模拟分析不同类型导光管的采光性能是可行且可靠的。然而，迄今为止，尚未有文献专门使用光线追踪法，通过专业模拟软件来研究多模光纤在直线传输、弯曲状态以及不同材料条件下的传输效率。换句话说，虽然光线追踪法在导光管领域得到了验证，但在多模光纤传输特性方面的应用仍是一个亟待深入探讨的研究方向。

本文采用光线追迹的方法，利用光学模拟软件 TracePro 来对图像经过多模光纤过程中光线的传播轨迹，以及所呈现的散斑图进行研究分析，避免了复杂而繁琐的公式，以模型的方式更加直观地展示。同时对不同情况下的光纤进行仿真，对得到的散斑图进行分析得出规律。

1　多模光纤模式理论

现实通信中使用的光纤，纤芯的折射率(n_1)和包层折射率(n_2)相差很小，即纤芯和包层的相对折射率差(D_{ref})满足如下关系[23]：

$$D_{\text{ref}}(\Delta)=\frac{n_1^2-n_2^2}{2n_1^2}\approx\frac{n_1-n_2}{n_1}\approx\frac{n_1-n_2}{n_2}<<1 \tag{1}$$

弱波导光纤的特点是光在纤芯与包层之间的全反射接近于 90°临界角，使得光在光纤中传播时几乎平行于光纤轴线。这种情况下，光纤中的电磁波主要呈现横向极化，电场和磁场的纵向分量(沿光纤轴向的分量)相比横向分量很小，因此可以近似认为光纤中的电场和磁场满足标量波动方程，从而简化了模场分布的分析[24]。

弱导波光纤中横向场的极化方向保持不变，横向电场 Er 和 $E\varphi$ 的振幅都满足标量亥姆霍兹方程。为了方便分析，将同时采用直角坐标系和圆柱坐标系来表示场分量，如图 1 所示。分析时，直角坐标系(x、y、z)表示含有几个场量，而用圆柱坐标系(r、θ、z)表示各分量在空间变化情况。

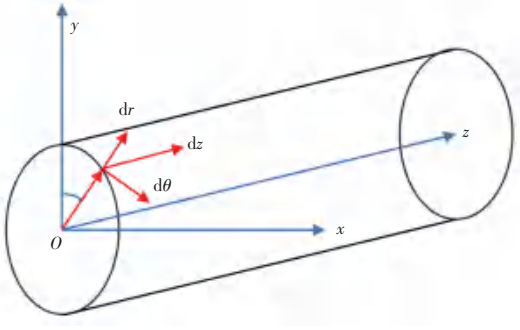


图 1　光纤坐标

Fig. 1　Optical coordinate

如选横向电场的极化方向与 y 轴一致，则横向电场只有 E_y 分量，而 $E_x=E_z=0$，在圆柱坐标系(r、θ、z)中展开得：

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial E_y}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 E_y}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2}+k_0^2 n^2 E_y=0 \tag{2}$$

根据光纤截面折射率分布的圆柱对称性和轴向平移不变性，利用分离变量法求解式(2)中 E_y，光纤中导波场的分布有下列形式：

$$E_y(r,\theta,z)=\mathrm{AR}(r)\Theta(\theta)Z(z) \tag{3}$$

依据光波导理论可知：$Z(z)$ 表示光纤内电磁波的横向电场 E_y 随轴向距离 Z 的变化规律，并沿 Z 向呈行波状态传输，则可表示为：

$$Z(z)=\exp(-\mathrm{j}\beta z) \tag{4}$$

其中，β 为轴向传播的相位常数。

$\Theta(\theta)$为E_y 沿圆周方向的变化规律，可表示为：

$$\Theta(\theta)=\begin{cases}\sin m\theta\\ \cos m\theta\end{cases}\quad m=0,1,2,\cdots \tag{5}$$

根据上述 $Z(z)$、$\Theta(\theta)$ 的表达方程式，E_y 可写成：

$$E_y(r、\theta、z)=\mathrm{AR}(r)\cos m\theta e^{-\mathrm{j}\beta z} \tag{6}$$

将式(6)代入式(2)中得：

$$r^2\frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2}+r\frac{\partial R(r)}{\partial r}+[r^2(k_0^2n^2-\beta^2)-m^2]R(r)=0 \tag{7}$$

由于纤芯折射率 n_1 和包层折射率 n_2 不相等,且 $n_1>n_2$,而对于在纤芯中的导波传输需要满足关系:$k_0n_2<\beta<k_0n_1$,因此在纤芯中的模场表达式可化为标准贝塞尔方程,而包层中的模场表达式可化为第二类变态贝塞尔方程,由此可得出 $R(r)$ 的表达式:

$$R(r)=\begin{cases}J_m(\sqrt{k_0^2n_1^2-\beta^2}r), & r\leqslant a\\ k_m(\sqrt{\beta^2-k_1^2n_2^2}r), & r>a\end{cases} \tag{8}$$

对于多模光纤传输来说,影响光源传输的因素包括:光纤的吸收、散射及端面散射等[25]。因此为了计算光纤的传输效率,需要考察模场的分布以及其能量分布。模场的能量密度 W 与电场的平方成正比,光纤的传输效率可以通过以下方式来定量计算:

$$E_T=\frac{\mathrm{En}_T}{E_{\mathrm{Tot}}}=\frac{\int_0^a|R(r)|^2r\mathrm{d}r}{\int_0^\infty|R(r)|^2r\mathrm{d}r} \tag{9}$$

其中,E_T 表示传输效率;En_T 表示能量传输效率、是光纤纤芯区域内能量的积分;E_{Tot} 表示总能量、是整个光纤区域的能量积分。

(1)为了推导光纤芯半径 a 对传输效率的影响,需要将传输效率公式中积分上下限进行变换。具体来说,纤芯半径 a 决定了分子部分的积分范围,因此直接影响传输效率。为了分析纤芯半径 a 的影响,由于电场分布 $|R(r)|$ 是已知的,用贝塞尔函数或者修正贝塞尔函数来表示。研究将传输效率视为纤芯半径 a 的函数。

研究后可知,在纤芯区域 $(r<a)$,电场分布 $|R(r)|$ 较强,通常以贝塞尔函数形式分布;在包层区域 $(r>a)$,电场分布 $|R(r)|$ 逐渐衰减,以修正贝塞尔函数或指数形式衰减。

假设分子部分可以表示为:

$$\int_0^a|R(r)|^2r\mathrm{d}r=F(a) \tag{10}$$

则传输效率为:

$$E_T=\frac{\mathrm{En}_T}{E_{\mathrm{Tot}}}=\frac{\int_0^a|R(r)|^2r\mathrm{d}r}{\int_0^\infty|R(r)|^2r\mathrm{d}r}=\frac{F(a)}{\int_0^\infty|R(r)|^2r\mathrm{d}r} \tag{11}$$

其中,E_T 表示传输效率;En_T 表示能量传输效率;E_{Tot} 表示总能量。

对 a 求导,可以得到:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}a}(E_T)=\frac{F'(a)}{\int_0^\infty|R(r)|^2r\mathrm{d}r} \tag{12}$$

其中,$F'(a)=|R(a)|^2a$ 表示在 $r=a$ 处的能量密度。因此,只要 $|R(a)|^2a>0$,则传输效率随 a 增大而增大。这表明增大纤芯半径可以提高传输效率,因为更多的模场能量集中在纤芯内。

(2)当光纤发生弯曲时,横向电场 E_y 的分布会发生变化,导致光纤芯和包层之间的折射界面不再严格对称。模场的一部分能量会穿透到包层,甚至泄漏到外界,从而造成能量损失。

这种能量泄漏的量取决于弯曲半径 R 的大小。通常,弯曲半径越小,泄漏越严重,传输效率越低;弯曲半径越大,泄漏减少,传输效率越高。

在光纤的弯曲部分,存在一个临界弯曲半径 R_{crit},小于该半径时,模场的能量将大量泄漏到包层。对于弯曲半径 $R_b<R_{\mathrm{crit}}$ 的情况,光纤中的模式传播受到显著影响。

光纤弯曲时,横向电场 E_u 的分布可以通过以下步骤来分析其对传输效率的影响:

分析可知,弯曲导致模场偏移。在弯曲部分,模场的中心会向弯曲的外侧偏移,导致纤芯区域内的能量减少。

对于弯曲光纤的能量泄漏,可以用泄漏损耗的表达式近似表示:

$$\alpha_b\approx C\exp\left(-\frac{2R_b}{a}\right) \tag{13}$$

其中,α_b 表示弯曲损耗;C 表示与纤芯折射率和包层折射率有关的常数;a 表示纤芯半径。

则传输效率 E_T 为:

$$E_T=\exp\left(-C\exp\left(-\frac{2R_b}{a}\right)\cdot L\right) \tag{14}$$

通过式(13)和式(14)表明:随着弯曲半径 R_b 的减小,损耗 α_b 迅速增加,传输效率随之减小。随着弯曲半径 R_b 的增大,损耗 α_b 迅速减小,传输效率随之增加。当弯曲损耗项趋近于 0,传输效率趋近于 1(即无损耗)。

2 构建 TracePro 模型

2.1 多模光纤模型的构建

在建立多模光纤模型过程中有 3 点假设:

(1)包层厚度恒定,忽略激光在包层中的传播。

(2)纤芯和包层的接触面完全透光,不反射;包

层外表面完全吸收光线，忽略端面的反射和其他光损失。

（3）光纤的圆柱段没有弯曲时，传播过程没有损耗或畸变[26]。具体过程如图 2 所示。

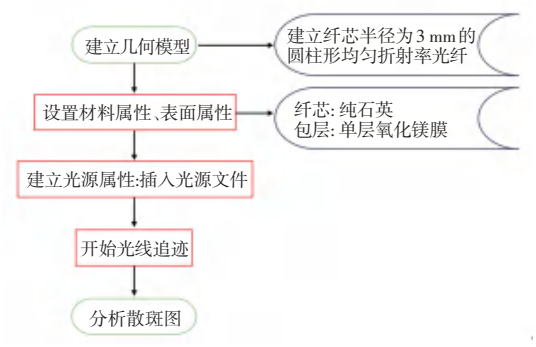


图 2　建模流程图

Fig. 2　Flow chart of modeling

仿真设计中，在光纤前端设计了一个锥形收集装置，以模拟物镜对激光光源进行集光与聚焦。这种结构能够最大程度地减少光线的传播损失，确保光源稳定有效地传入光纤输入端。光纤输出端的光线经过多模光纤后，形成了特定的散斑图。为了捕捉和分析这些散斑图，在光纤输出端设置了一块挡屏以模拟 CCD 相机，尺寸为 10×10（mm×mm），位于距离光纤端面约 10 mm 的位置。挡屏接收从光纤输出端射出的光线，并通过散斑图分析光强分布特性。多模光纤图像传输如图 3 所示，不同输入图像产生不同的散斑图，为了提高仿真精度，考虑到光纤实际尺寸较小（约 100 μm），研究中将其直径增大至 6 mm，减少光纤尺寸对结果的影响。



图 3　多模光纤图像传输

Fig. 3　Multimode fiber image transmission

2.2　TracePro 中多模光纤传输效率的计算

在实验中，通过测量光纤传输前后的光强来计算其传输效率。首先，用 CCD 相机拍摄光源的光斑图像，以获得输入光强的分布信息。接着，再拍摄经过光纤传输后的光斑图像，以记录输出光强的情况。输出散斑模式如图 4 所示。随后，将这些图像导入图像处理软件（如 Matlab），对光斑进行处理，提取总光强或亮度分布的数据。最后，通过对比输入光强和输出光强，计算两者比值，从而得出光纤的传输效率。

TracePro 使用蒙特卡洛光线追踪方法模拟光线在系统中的传播。运行光线追踪后，软件计算光线的路径并模拟与光学元件的相互作用，如折射、反射和吸收。通过追踪光线的传输，软件记录每条光线是否成功到达目标区域（如挡屏）。光纤的传输效率由挡屏上接收到的光线与发射光线的比值决定。TracePro 还提供了一种简便的计算方式，通过挡屏上接收的光通量与发射光通量的比值来得到传输效率，具体数据可通过报告查看。

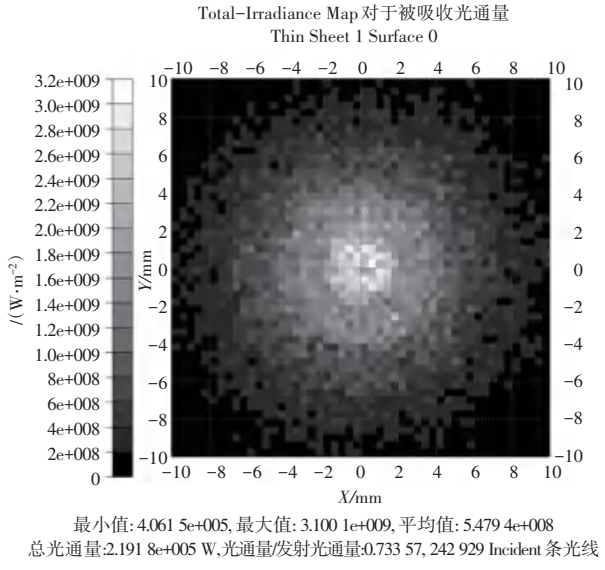


图 4　输出散斑模式

Fig. 4　Output speckle mode

3　仿真分析

3.1　不同粗细的光纤输出的光斑模式分布

不同半径的光纤模型如图 5 所示，装置前端半径为 3 mm，长度为 40 mm，末端半径与光纤的纤芯半径一致，即为 2 mm。此外，光纤部分采用的是均匀折射率的圆柱形多模光纤，纤芯半径为 2 mm，长度为 120 mm。通过改变光纤纤芯的半径，来模拟分析不同光纤尺寸条件下光线的传播轨迹，并通过挡屏记录下相应的散斑图，以进一步分析和研究光纤传输的特性。



图 5　不同半径的光纤模型

Fig. 5　Fiber model with different radius

在仿真过程中仅改变后端的粗细，如图 6 所示，结果表明：

（1）随着光纤半径的增大，传输效率也在逐步提高。

（2）当光纤半径小于 2 mm 时，传输效率急剧下降。

(3)当光纤半径大于 2 mm 后,则逐步趋于一个稳定的状态。这是由于随着半径的减小。部分角度光线在锥形光纤中传输时无法进入到圆柱形光纤中,而被反向反射出光纤,不过这是少量的,最主要是半径的减小,光线在光纤中传输时,与包层介质的夹角在逐渐增大,在出射端出射时发散角也变大,使得很多光纤无法到达挡屏上,导致成像散斑比较分散,传输效率较低。同时可以看出传输效率无法达到 1,这是因为光束经过光纤时,光纤表面对光的反射和吸收等因素,导致了光能量的损耗。

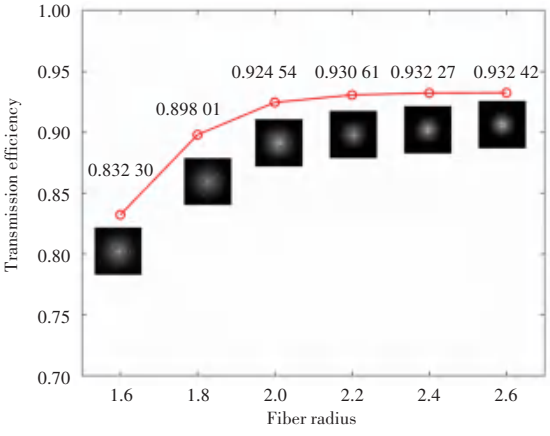


图 6 光纤半径与传输效率的关系

Fig. 6 Relationship between fiber radius and transmission efficiency

3.2 不同弯曲半径的光纤输出的光斑分布模式

不同弯曲半径的光纤模型如图 7 所示,装置的前端半径为 3 mm,末端半径与光纤半径一致,均为 2 mm,长度为 120 mm,采用了均匀折射率的圆柱形多模光纤。此外,光纤的输出端还连接了一个弯曲角度为 180°的光纤,以模拟实际应用中光纤弯曲对传输效率的影响。该系统通过模拟计算了光纤在不同弯曲半径条件下的传输效率。

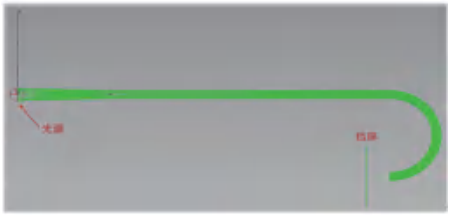


图 7 不同弯曲半径的光纤模型

Fig. 7 Fiber model with different bending radius

光纤弯曲半径与传输效率的关系如图 8 所示,从结果中可以看出:

(1)随着光纤半径的增大,传输效率也在逐步提高。

(2)当光纤半径小于 20 mm 时,传输效率急剧下降。

(3)当光纤半径大于 30 mm 后,则逐步趋于一个稳定的状态。当光纤弯曲半径很小时,光线经过弯曲部分时因为不满足全反射条件而发生透射,导致部分光线的缺失,同时满足全反射条件的光线在传播过程中由于光纤曲率的减小,在包层界面反射时入射角会增大而导致出射时发散角的增大,也会导致部分光线无法到达接收屏,这时就会导致弯曲半径小的光纤成像散斑比较分散,传输效率低。通过式(13)和式(14)可以知道,当光纤在弯曲状态下,会有一个弯曲损耗,因此,相较于图 6 可以看出,光纤的临近饱和值是更低的,这是因为弯曲损耗的存在使得光纤在传输过程中损失了更多的光能量。

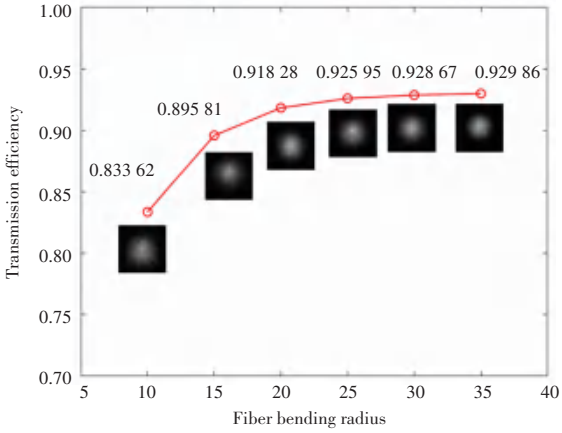


图 8 光纤弯曲半径与传输效率的关系

Fig. 8 Relationship between fiber bending radius and transmission efficiency

3.3 不同材料的光纤输出的光斑分布模式

采用图 7 装置,通过改变纤芯和包层材料,分析了不同组合下光纤的传输效率。不同材料与传输效率的关系如图 9 所示。研究表明,不同材料组合对光纤传输效率有显著影响,采用二氧化硅(SiO_2)作为纤芯材料并结合氟化镁(MgF_2)作为包层时,光纤传输效率最高。这是因为 SiO_2 具有较高的折射率和低光损耗,而 MgF_2 的适中折射率能够有效保持光线的全反射条件,减少光损失。此外,MgF_2 的低吸收和低散射特性进一步提升了光纤的传输性能。相反,使用镜面包层的光纤传输效率最低。虽然镜面包层能够反射光线,但其表面可能存在微小不规则性或散射效应,导致光线传播过程中产生较大损耗。同时,镜面包层无法像 MgF_2 那样有效控制光的全反射,从而增加光损失。不同纤芯材料的选择也对光纤传输效率产生显著影响。塑料纤芯相比熔融石英和 BK7 光学玻璃纤芯的传输效率较低。原因在于塑料材料折射率较低,无法有效耦合光线,且其光学损失较高。

熔融石英和 BK7 光学玻璃纤芯则具有较高的折射率和较低的光损耗，在相同包层材料条件下提供更高的传输效率。

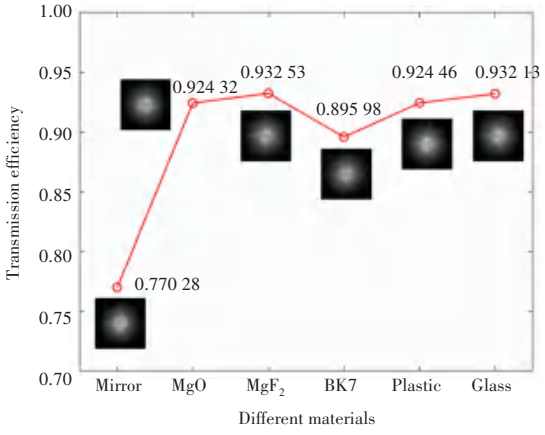


图 9　不同材料与传输效率的关系

Fig. 9　Relationship between different materials and transmission efficiency

3.4　不同波长的高斯光源输出的光斑分布模式

采用图 7 装置研究了红、橙、黄、绿、蓝、紫等不同波长光源下的光纤传输效率。不同光源与传输效率的关系如图 10 所示。

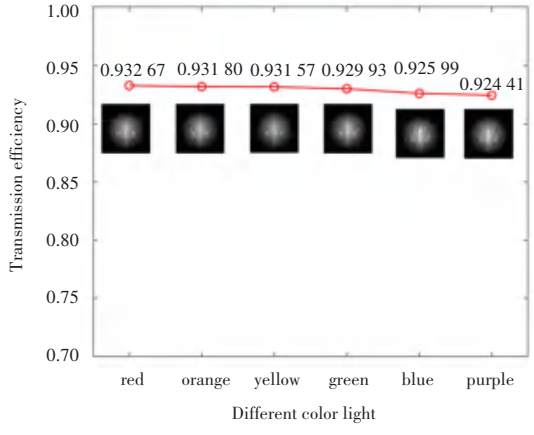


图 10　不同光源与传输效率的关系

Fig. 10　Relationship between different light sources and transmission efficiency

图 10 中，光纤的传输效率在不同波长下变化较小，表明多模光纤的传输特性对波长变化并不敏感，红光的传输效率略高于其他波长光源。分析发现，红光由于波长较长，在光纤中传播时模式数量较少，模式耦合和干扰较小，衍射效应较弱，散射和损耗较低，导致其传输效率较高。相比之下，紫光和蓝光由于波长较短，具有较多传播模式，模式之间的相互干扰较强，且衍射效应明显，散射和损耗较大，因此传输效率较低。此外，在光纤弯曲的情况下，红光的波长较长，能更好地适应光纤弯曲的曲率，损耗较小，而短波长的光线（如紫光和蓝光）在弯曲处更容易发生强烈的散射和衍射，导致较高的损耗。因此，尽管不同波长之间的传输效率差异不大，红光由于较少的模式干扰、衍射和散射效应以及较低的弯曲损耗，在光纤中的传输效率较高。这表明，红光在光纤通信、传感和成像等领域可能是更优选的光源。

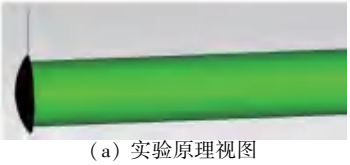
4　浑浊介质扩大视场

4.1　浑浊介质扩大视场原理

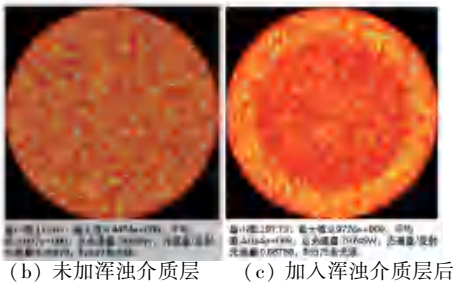
在正常情况下，视野外的物体点散射的光波通常无法到达接收面，无法被成像系统捕捉。然而，存在混浊介质时，光波会在其中发生多次散射，一部分光波被重新引导至接收面。由于介质中的散射颗粒，光波朝不同方向散射，包括大角度的出射光线，从而使得本来无法直接到达接收面的光波能够被接收。随机介质的存在显著增加了成像系统的有效数值孔径和视场，改善了图像获取和成像性能[27]。为验证这一点，本研究通过在多模光纤输入端放置人体组织液介质层，模拟了浑浊介质扩大视场的效果。

4.2　仿真分析

本研究建立了一种纤芯直径为 5 mm 的圆柱形多模光纤模型，并在前端加装了椭圆形黑色浑浊介质层（人体组织液）。光源采用直径为 6 mm、角分布为 1°的均匀格点光源，如图 11（a）所示。未加浑浊介质层时，光线通过光纤系统传播在挡屏上形成散斑图像，如图 11（b）所示，共接收到 82 937 条光线，表明系统的光线接收能力有限。加入浑浊介质层后，光线与介质层发生散射，接收到的光线数量增加至 85 575 条，增加了约 2.9%，如图 11（c）所示。这一结果表明，浑浊介质层通过散射作用有效扩展了光纤系统的视场范围，能够收集到一些原本无法直接传输的光线。



（a）实验原理视图



（b）未加浑浊介质层　　（c）加入浑浊介质层后

图 11　浑浊介质散射成像

Fig. 11　Turbid medium scattering imaging

5 结束语

本研究通过光学仿真软件 TracePro 对多模光纤系统进行了系统设计与性能分析,揭示了光纤几何参数、材料选择、光源波长和介质层设计等因素对光纤传输效率和视场扩展的影响。仿真结果表明:增大光纤的半径,以及增大光纤弯曲的半径都会减小光线的出射角,可以有效地提高光纤的传输效率;采用二氧化硅的纤芯和氟化镁包层相比于其他材料,会有更好的传输效率;而对于可见光的光源,不同波长的光源对光纤传输效率的影响不大,不过采用红光相比于其他光源,传输效率会更高。最后,仿真验证浑浊介质可以扩大视场,通过数据可以看到增加了浑浊介质后,接收到的光线数也有所增加,以此验证了浑浊介质可以起到扩大视场的作用。为光纤系统在光学成像、通信和传感等领域的优化设计提供了重要的理论依据和应用指导。

参考文献

[1] Wen Z, Dong Z, Deng Q, et al. Single multimode fibre for in vivo light - field - encoded endoscopic imaging [J]. Nature Photonics, 2023, 17(8): 679-687.

[2] Gu R Y, Mahalati R N, Kahn J M. Design of flexible multi-mode fiber endoscope [J]. Optics Express, 2015, 23(21): 26905-26918.

[3] Psaltis D, Moser C. Imaging with multimode fibers[J]. Optics and Photonics News, 2016, 27(1): 24-31.

[4] Turtaev S, Leite I T, Altwegg-Boussac T, et al. High-fidelity multimode fibre-based endoscopy for deep brain in vivo imaging [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 92.

[5] Rahmani B, Oguz I, Tegin U, et al. Learning to image and compute with multimode optical fibers[J]. Nanophotonics, 2022, 11(6): 1071-1082.

[6] Liu Z, Wang L, Meng Y, et al. All-fiber high-speed image detection enabled by deep learning[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1433.

[7] Rehan M, Chowdhury R, Biswas P, et al. Low-threshold cascaded Raman scattering and intermodal four-wave mixing in cascaded multimode fiber system [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(13): 4636-4642.

[8] 张鑫磊. 基于深度学习的多模光纤成像技术[D]. 北京:北京邮电大学, 2000.

[9] Papadopoulos I N, Farahi S, Mdser C, et al. Focusing and scanning light through a multimode optical fiber using digital phase conjugation[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10583-10590.

[10] Ma C, Di J, Li Y, et al. Rotational scanning and multiple-spot focusing through a multimode fiber based on digital optical phase conjugation [J]. Applied Physics Express, 2018, 11(6): 062501.

[11] Ma C, Di J, Zhang Y, et al. Reconstruction of structured laser beams through a multimode fiber based on digital optical phase conjugation[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3333-3336.

[12] Shimizu S, Matsuura T, Umezawa M, et al. Preliminary analysis for integration of spot-scanning proton beam therapy and real-time imaging and gating[J]. Physica Medica, 2014, 30(5): 555-558.

[13] N′gom M, Norris T B, Michielssen E, et al. Mode control in a multimode fiber through acquiring its transmission matrix from a reference-less optical system[J]. Optics Letters, 2018, 43(3): 419-422.

[14] Reslsl S, Viernik Y, Popoff S M, et al. Wavefront shaping in multimode fibers by transmission matrix engineering[J]. APL Photonics, 2020, 5(3): 036103.

[15] 唐小村. 基于 TracePro 的光学仿真实验教学[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(1): 94-96.

[16] 李慧,胡欣,殷瑞光,等. 激光干扰试验中光纤耦合效率与稳定性研究[J]. 应用激光, 2011, 31(4): 296-298.

[17] Horisaki R, Takagi R, Tanida J. Learning-based imaging through scattering media[J]. Optics Express, 2016, 24(13): 13738-13743.

[18] Fan W, Chen Z, Gezhi Z, et al. Control the normalized polarization ratio of a focal spot in speckle field formed by non-polarization-maintaining multimode fiber[J]. Journal of Optics, 2019, 21(4): 045704.

[19] Gusachenko I, Chen M, Dholakia K. Raman imaging through a single multimode fibre [J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13782-13798.

[20] 吴新汶,王春苑,欧阳金龙. 利用 TracePro 模拟分析导光管的传输效率[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 145-150.

[21] 王书晓, 利岚, 张滨. 基于日光系数法的导光管效率计算方法研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(8): 12-15.

[22] 吴延鹏, 王志华. 太阳直射下反光片提高导光管效率的模拟与实验分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1941-1948.

[23] 李玉权, 崔敏. 光波导理论与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.

[24] 夏明耀, 王均宏. 电磁场理论与计算方法要论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.

[25] 瞿航. 有源光缆中光路耦合系统的设计[D]. 南京:南京邮电大学, 2018.

[26] 胡欣,张文攀,殷瑞光,等. 激光在锥形多模光纤中的耦合效率与传输模式[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 372-375.

[27] 杜新超. 随机介质成像图像重建技术及单光纤成像探索[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2016.