

文章编号: 0258-702X(2001)07-0664-05

接触式激光手术刀出射光束的 Monte-Carlo 模拟^{*}

李振华¹ 徐晓东² 王振东¹ 来建成¹ 陶海林³ 贺安之¹

(¹南京理工大学理学院 南京 210094; ²南京大学电子系 南京 210008; ³海军医学高等专科学校 南京 210049)

提要 基于几何光学的基本原理,建立了变截面波导刀体中光传输的约束方程,利用 Monte-Carlo 法模拟了激光手术刀出射光束的空间分布,计算结果与实验结果基本吻合,讨论了不同设计参数对激光手术刀出射光束空间分布的影响,为该刀头的设计提供了理论依据及直观有效的数值模拟方法。

关键词 Monte-Carlo 模拟 接触式激光手术刀 光传输

中图分类号 R 730.57; O 242.2 文献标识码 A

Monte-Carlo Simulation of Emergent Power Distribution of Contact Laser Scalpels

LI Zhen-hua¹ XU Xiao-dong² WANG Zhen-dong¹

LAI Jian-cheng¹ TAO Hai-lin³ HE An-zhi¹

(¹School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)
(²Department of Electronic Engineering, Nanjing University, Nanjing 210008)
(³China Naval Medical College, Nanjing 210049)

Abstract Based on the principle of geometry optics, the confined equations of light propagation in contact laser scalpels are developed in this paper. By use of the Monte-Carlo method, the emergent power distribution of the laser scalpels is simulated, the simulation results are consistent with that of the experimental measurements. Different design parameters that effect the emergent power distribution are discussed comprehensively. The simulation results will be benefit for the design of such scalpels and the determination of treatment schemes.

Key words Monte-Carlo, contact laser scalpel, light transmission

1 引 言

在激光外科的临床实践中,接触式激光手术刀^[1]与非接触式激光手术刀相比,具有刀尖直径小,输出功率密度大,刀锋锋利,切割速度快,出射光束的发散角大,组织损伤小而浅,切割时烟雾小,止血性能好等优点,自 80 年代中期出现以后,对它的研究和应用日益受到各国的重视^[2,3]。典型的接触式激光手术刀以医疗中常用的 Nd:YAG 激光为光源,用人造蓝宝石(Al₂O₃)材料制成刀头。为保证接触式 Nd:YAG 激光手术刀有较好的切开能力和止血性

能,同时又能最大限度地减少切口周围组织的损伤,关键是激光刀头的设计。因为 Nd:YAG 激光虽然具有较好的止血性能,但由于其组织穿透较深,在切口的底部和周围,将形成一个很厚的坏死区,这就是所谓的深度损伤。这种损伤是光与生物组织相互作用中的热效应引起的。当组织温度升高到某个临界温度以上时,组织会发生变性反应,而组织损伤的程度和范围,则取决于组织中的温度分布和变性反应所持续的时间。除了组织本身的光学和热学性质以外,组织中的温度分布直接由照射到组织上的光束的分布所决定,由此可见,通过改变激光刀出射激光束的分布,可以改变被照组织的损伤范围和程度。

根据接触式激光手术刀的工作原理,应将出射光束的焦点置于手术刀刀头的顶端,但如出射光束

* 江苏省自然科学基金资助项目。

的发散角太小,易造成深度损伤,而发散角过大,往往加重切口周围组织的损伤,因此在刀头设计中,出射光束的发散角是一个非常重要的指标。本文基于几何光学的基本原理,建立了变截面波导刀体中光传输的约束方程,采用不受边界条件、几何结构和入射光束空间分布等条件限制的、能较好反映复杂约束条件下光传输规律的 Monte-Carlo 方法^[4,5],对激光刀出射光束的空间分布进行了模拟,探讨了激光刀头各几何参量对光束压缩及发散角的影响,为该刀头的设计提供了理论依据及直观有效的数值模拟方法。

2 理论模型

典型的切割用刀头为圆台体,即锥形光波导。刀头的设计过程,就是根据不同的医疗要求,建立相应的约束方程,从而确定圆台体的独立参数。

本文采用几何光学的方法来建立接触式激光手术刀刀头的约束方程。图 1 中所示为一条边缘光路示意图,这条光路应满足以下条件:1)该光线的出射角是光束的最大发射角;2)该光线不会从侧面或

圆台端面返回。

刀体的柱长 LH 是可以根据安装要求预先确定的,为了耦合装置的通用性,柱长是一定值。对于一定的激光器,其最大输出功率是一定的,而对于某种特定的切开操作,刀头的输出功率密度应满足相应要求,这样就可以根据所需的要求确定相应的刀尖的直径 DN ;同时用于切开用的接触式手术刀出射光束要求有一个恰当的出射角,根据国外的研究结果,以取 $2\gamma = 100^\circ \sim 120^\circ$ 为宜^[1,2]。

由图 1 可以看出

$$n_1 \sin(2N\theta + \alpha_2) = n_2 \sin(\gamma) \quad (1)$$

式中, n_1 为刀头折射率; n_2 为组织的折射率; N 为边缘光线在刀体内所经历的全反射次数。

本文中由于仅模拟刀头出射光束的空间分布,因此取 n_2 为空气折射率 1 (1) 式虽确立了一个约束条件,但又引入了变量 N ,因而不能确定锥角 θ ,由图 1 可以推出边缘光线在锥面上的反射次数 N 与刀头总长 L 和锥角 θ 有下列关系

$$\frac{L_N}{\sin(90^\circ - 2N\theta - \alpha_2)} = \frac{D_N}{\sin[(2N + 1)\theta + \alpha_2]} \quad (2)$$

$$\frac{L_N}{\sin(90^\circ - 2N\theta - \alpha_2)} = \frac{D_{N+1}}{\sin[(2N - 1)\theta + \alpha_2]} \quad (3)$$

由上述关系式,对于某根确定的光线就可以确定其任意一全反射点的位置,反之,对于给定的刀体,可以确定任意一根入射光线所能经历的全反射次数。第一次的全反射点的位置由耦合决定,从第一全反射点到刀头顶端的母线长为

$$LM = \sum_{i=1}^{N-1} L_i + \Delta L \quad (4)$$

于是 p_1 平面至刀头顶端的距离为

$$H = LM \cdot \cos\theta \quad (5)$$

式(2)(5)与光纤的耦合条件结合提供了一个约束条件,加上式(1)就有两个约束条件,这样刀体的独立变量除了柱长 LH 和尖端直径 DN 已确定外,还有两个未确定:锥角 2θ 和刀长 L ,但由于方程中引入了参数 N ,问题就变为由两个约束方程确定三个独立变量,因此它的解不是唯一的。换言之,可以设计出具有相同的刀尖尖端直径,但具有不同的锥角和长度的刀头,相同的入射光束经过这些形状不同的刀头后具有相同的发散角,边缘光线在这些刀头内的全反射次数是各不相同的。但是,并非所有的 N 值都对应着合理的刀头,考虑到下列因素:1)输入光

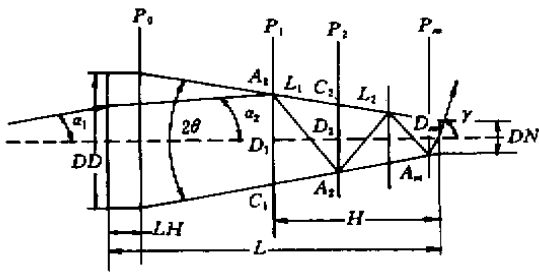


图 1 接触式激光手术刀光路示意图

DD :刀头底端直径; DN :刀头顶端直径; LH :刀头柱体的长度; L :刀头全长; p_0, p_2, \dots, p_m :第 1, 2, ..., m 次全反射点所在的垂直于轴线的平面; L_1, L_2, \dots, L_m :上述 p_1, p_2, \dots, p_m 面间的母线长度; D_1, D_2, \dots, D_m :各全反射点所在处的直径; $2\alpha_1$:入射角; $2\alpha_2$:进入刀头后光束的发散角; 2γ :从刀头出射的光束的发散角; 2θ :刀体的锥角; H :从第一次全反射点到顶端的轴上距离

Fig. 1 Sketch map of the light in the contact laser scalpel
 DD : bottom diameter of the scalpel; DN : tip diameter of the scalpel; LH : length of the column; L : total length of the scalpel; p_0, p_2, \dots, p_m : A series of reflection planes that are perpendicular to the axis; L_1, L_2, \dots, L_m : length of the generating line between the planes of p_1, p_2, \dots, p_m ; D_1, D_2, \dots, D_m : diameter of the perfect reflection point; $2\alpha_1$: angle of incidence; $2\alpha_2$: angle of divergence of the light after entering the scalpel; 2γ : angle of divergence of the emergent light; 2θ : cone angle of the scalpel; H : axis length between the first perfect reflection point and the tip

束与刀头的匹配问题 2) 光线从侧面上的泄漏 3) 光线在刀头顶端上的反射。

光线所经历的全反射次数 N 由以下约束方程确定

$$\sum_{i=1}^N L_i \leq \frac{H}{\cos\theta} \quad (6)$$

$$90^\circ - (2N - 1)\theta - \alpha_2 \geq \sin^{-1}\left(\frac{1}{n_1}\right) \quad (7)$$

3 模拟结果与分析

3.1 激光光束的离散

理想的激光束为高斯光束,因而在辐射面上光能呈高斯分布,我们利用呈高斯分布的光子来模拟辐射面上的光能分布。从几何光学的角度出发,将每个光子的行进轨迹看成一条光线,这样通过随机抽样^[6]产生呈高斯分布的二维随机数来模拟光子分布,从而确定入射光能的分布。

如图 1 所示,入射在端面上的任意光子所形成的光线进入刀体,服从 Snell 定律

$$n_0 \sin\alpha_1 = n_1 \sin\alpha_2 \quad (8)$$

在远场情况下,入射光线的入射角为

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \frac{r}{l} \quad (9)$$

其中

$$r = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2} \quad (10)$$

ξ_1, ξ_2 为二维随机数, l 为激光束腰到刀头底端面的距离。

3.2 计算网格的划分

计算网格划分为面积相等的同心圆环网格,如图 2 所示

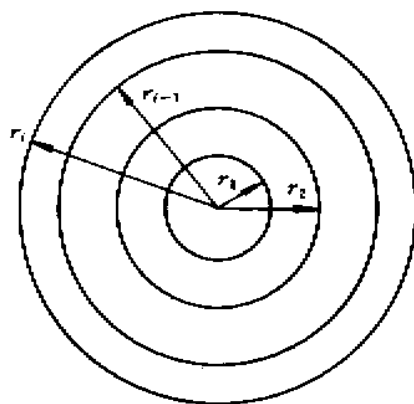


图 2 统计网格

Fig.2 Statistic grid

$$r_i = r_1 \sqrt{m}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (11)$$

i 为划分的网格数; r_1 为第一圆环的半径。

这样追迹光子在网格中的分布规律,就可得到相应的光能分布,从而得到光在空间的分布规律。

3.3 接触式手术刀出射光束的空间分布规律模拟

激光手术刀的模拟过程为:首先在手术刀的底端面上抽样产生呈二维高斯分布的随机点,每个随机点的位置代表了入射光子的入射点,根据已建立的刀头内光线轨迹的约束方程,对模拟每个光子的传播路径进行模拟,直到该光子从手术刀的刀尖射出,统计光子在距刀头端面不同距离处垂直于刀体轴线的接收屏上的分布规律。本文从以下三个方面讨论了 Monte-Carlo 方法模拟接触式激光手术刀出射光束的空间分布。

1) 对出射光束在刀尖端面、距刀尖端面分别为 20 mm、40 mm 处的空间分布规律进行模拟。模拟使用的刀头尺寸参数如表 1。

表 1 刀头几何尺寸参数

Table 1 Geometrical parameters of the scalpel used in the simulation

| Total length/mm | Length of the column LH /mm | Tip diameter of the scalpel DN /mm | Cone angle (2θ) | n_0 | n_1 |
|-----------------|----------------------------------|---|-----------------------------|-------|-------|
| 31.20 | 1.67 | 0.59 | 2.91° | 1 | 1.76 |

根据测算采用独立高斯分布 $N(\mu_2, \Sigma_2)$ 模拟入射面上光能分布,与激光在手术刀前端面上的光分布较为吻合:

入射面上高斯分布为 $\mu_2 = (0, 0), \Sigma_2 = \begin{pmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 0.8 \end{pmatrix}$, 接触式激光手术刀出射光束空间分布的模拟结果如图 3 所示。

由图 3 可见,能量在端面处最集中,随深度增加光能迅速发散,符合手术刀的设计要求,图 3(c) 与图 4 分别为相同条件下的模拟与实验结果,比较 2 图结果基本吻合,由此说明本文所采用的模拟方法是正确的。

2) 模拟不同入射分布的激光光源对手术刀出射光束的空间分布的影响。

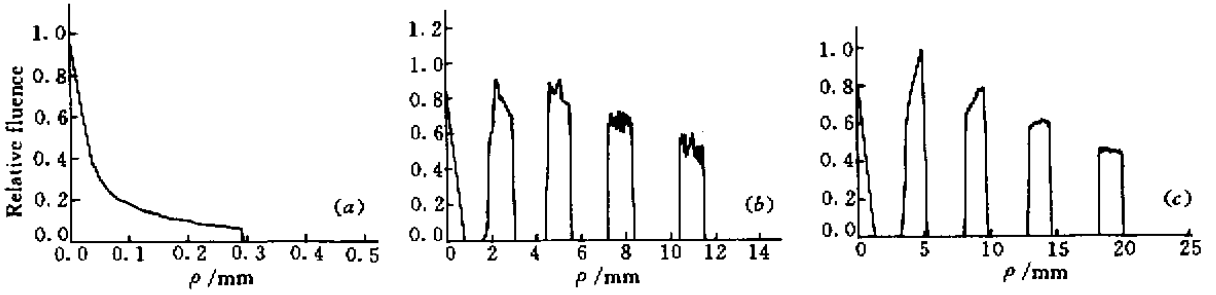


图 3 出射光束光能分布模拟图

(a) 刀头端面处 (b) 距端面 20 mm 处 ; (c) 距端面 40 mm 处

Fig.3 Simulation graph of the emergent power distribution

(a) on the scalpel's headface ; (b) on the plane which is 20 mm from the headface ; (c) on the plane which is 40 mm from the headface

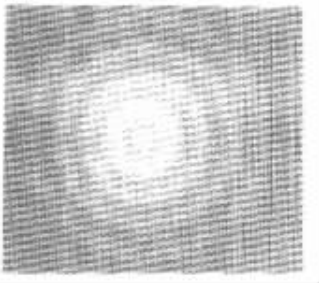


图 4 距端面 40 mm 处出射光束光能分布实验图

Fig.4 Experiment graph of the emergent power distribution on the plane which is 40 mm from the headface

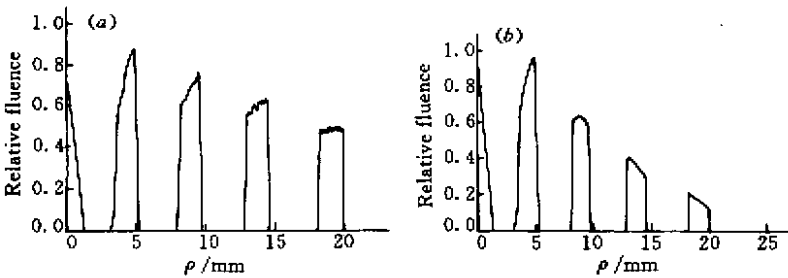


图 5 出射光束光能分布模拟图

Fig.5 Simulation graph of the emergent power distribution

表 2 刀头的几何参数

Table 2 Geometrical parameters of laser scalpel

| Total length/mm | Length of the column <i>LH</i> /mm | Tip diameter of the scalpel <i>DN</i> /mm | Cone angle (2θ) | n_0 | n_1 |
|-----------------|---------------------------------------|--|-----------------------------|-------|-------|
| 35.20 | 1.67 | 0.59 | 3.41° | 1 | 1.76 |

取不同分布的入射光源,模拟其出射光束在距刀头 40 mm 处的光束空间分布,结果如图 5(a), (b)所示。

图 5(a)为入射面上高斯分布为 $\mu_2 = (0, 0)$, $\Sigma_2 = \begin{pmatrix} 1.2 & 0 \\ 0 & 1.2 \end{pmatrix}$ 的模拟光源,在距刀头 40 mm 处

出射光束空间分布的模拟结果;图 5(b)为入射面上高斯分布为 $\mu_2 = (0, 0)$, $\Sigma_2 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.4 \end{pmatrix}$ 的模拟光源,距刀头 40 mm 处出射光束空间分布的模拟结果。

比较图 3(c),图 5(a)(b)在距刀头端面 40

mm 处的模拟结果,不同分布的入射光源,将引起出射光束各亮环相对强度的显著变化,而亮环的位置不受影响,后者仅取决于刀头的几何参数。

3) 改变接触式激光手术刀的锥角,模拟距刀头 40 mm 处出射光束的空间分布。

取入射面上高斯分布为 $\mu_2 = (0 \ 0)$, $\Sigma_2 = \begin{pmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 0.8 \end{pmatrix}$, 刀头的几何参数如表 2, 模拟结果如图 6。

比较图 3(c), 图 6 可知,增大锥角后光束发散角随之明显变大,同样如改变刀长也能改变光束的发散角。

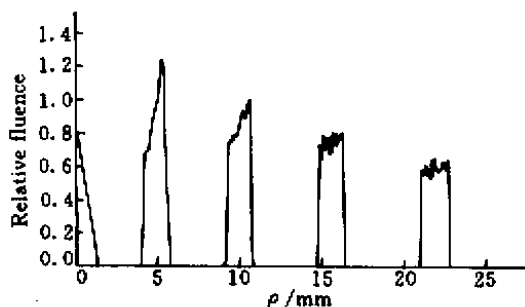


图 6 出射光束光能分布模拟图

Fig.6 Simulation graph of the emergent power distribution

4 结 论

本文建立了模拟接触式激光手术刀出射光束空间分布的 Monte-Carlo 模型,通过该模型模拟接触式激光手术刀出射光束的空间分布,可以分析激光刀设计参数对出射光束空间分布的影响,为优化设计接触式激光手术刀提供简便的模拟方法。

参 考 文 献

- 1 N. Daikuzono, S. N. Joffe *et al.*. Artificial sapphire probe for contact photocoagulation and tissue vaporization and the Nd:YAG Laser. *Med. Instrum.*, 1985, **19**:173~178
- 2 R. Richards-Kortum, R. P. Rava, M. Fitzmaurice *et al.*. A one-layer model of laser-induced fluorescence for diagnosis of disease in human tissue: applications to atherosclerosis. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1989, **36**:1222~1231
- 3 S. N. Joffe, Sankar My, D. S. Kionocaid. Preliminary report using the contact endoprobes and the laser scalpel with the Nd:YAG laser in gestational surgery. W. Waidehieh, P. Kiefhaber. *Laser*. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 367~371
- 4 Lucheng Pei. Monte-Carlo Method and the Application in the Particle Propagation. Beijing: Science Press, 1980
- 5 Xingzhan Wu, Xingheng Wu. The Random Model and Computer Simulation. Beijing: The Electron Industry Publishing House, 1990
- 6 Zhongji Xu. Monte-Carlo Method. Shanghai: The Shanghai Publishing House, 1985