

# 光在半无限厚多层矩形生物组织中的稳态漫射方程

王喜昌

烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005

**摘要** 传统的漫射方程均假设生物组织在纵向上是半无限厚的, 横向上是无限大的。针对某些在横向上不是无限大的生物组织(如前臂和手指), 建立了一个任意多层矩形生物组织漫射模型, 该模型假设生物组织在纵向上是半无限厚的、多层的, 在横向上是个矩形。在矩形边界条件下, 根据光在生物介质中传播的漫射方程, 结合外推边界条件, 建立并给出了光在半无限厚稳态多层矩形介质中的漫射方程的精确解, 利用建立的模型计算了空间分辨漫反射, 同时编写相应的蒙特卡罗模拟程序, 验证方程的正确性。建立的方程不但能解决横向上是矩形的介质问题, 还能解决横向上无限大、纵向上半无限厚的介质问题, 更能解决在横向上  $x$  或  $y$  轴之一是无限大、另一个轴是有限大小的组织问题。

**关键词** 生物光学; 光子迁移; 漫射方程; 蒙特卡罗模拟; 稳态

**中图分类号** O439

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0317003

## Steady-State Diffusion Equation of Light in Semi-Infinite Multilayer Rectangular Biological Tissues

Wang Xichang

*School of Opto-Electronic Information Science and Technology, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China*

**Abstract** The assumption that biological tissues are semi-infinite in the longitudinal direction and infinite in the transverse direction is applied in traditional diffusion equations. Aiming at the biological tissues, e.g. forearms and fingers, that are not infinite in the transverse direction, a diffusion model for random multi-layer rectangular biological tissues is established. It is assumed that biological tissues are semi-infinite and multi-layered in the longitudinal direction, and are rectangular in the transverse direction. Under the rectangular boundary conditions, exact solution of the diffusion equation for light in semi-infinite multi-layer rectangular media in steady-state is provided based on the diffusion equation of light propagating in biological media and by combining with the extrapolated boundary conditions. The spatially resolved diffusion is calculated using the established model, and corresponding Monte Carlo simulation is programmed to demonstrate correctness of the equation. The established equation does not only solve the problem of rectangular media in the transverse direction, but also the problem of media that are infinite in the transverse direction and semi-infinite in the longitudinal direction, even the problem of tissues that are infinite in the transverse  $x$  or  $y$  axial direction and finite in the other axial direction.

**Key words** biotechnology; photon migration; diffusion equation; Monte Carlo simulation; steady-state

**OCIS codes** 170.5280; 170.5270; 170.7050; 170.6935

### 1 引言

目前,漫射方程以其预测比较准确的特点而成为光在生物组织中的传输特性研究的基本理论。很多国外研究者都对光在生物组织传播中的漫射方程进行了研究,并建立了相关的数学模型。Haskell等<sup>[1]</sup>建立了部分流边界条件、零边界条件、外推边界条件的时域和稳态解;Kienle等<sup>[2]</sup>建立了稳态的双层介质漫射方程模

收稿日期: 2015-10-08; 收到修改稿日期: 2015-11-10

作者简介: 王喜昌(1968—),男,博士,教授,主要从事组织光学、色度学、光纤传感等方面的研究。

E-mail: xichang\_wang@sohu.com

型。这些模型都假定介质在纵向上是半无限厚的,横向上是无限大的。但是,对某些生物组织(如手指、前臂)来说,在某个横向上是可以看成有限大小的。Liemert等<sup>[3]</sup>建立了圆形介质的稳态漫射方程,前提是假设介质在横向上是个圆形。而像手指、前臂等生物组织,在某个横向上可以将其视为有限大小的矩形,因此需要建立横向上是矩形的介质的漫射方程。

在国内,也有很多研究人员对光在生物组织中传播的漫射方程进行研究,并建立了相关的数学模型,如王锐等<sup>[4]</sup>建立的双点源 Delta-P<sub>1</sub>近似模型,田会娟等<sup>[5]</sup>建立的 P<sub>3</sub>近似和漫射近似等混合漫射近似模型。除了漫射模型的研究,很多人还对光在生物组织中传播性质的其他方面进行了各种研究。杨强等<sup>[6]</sup>对可抑制生物组织散射效应进行了研究,王安乐等<sup>[7]</sup>对前臂进行了蒙特卡罗模拟, Jia等<sup>[8]</sup>采用双虚光源法解决近场问题。这些研究理论上都采用单层半无限厚介质模型,其在纵向上是半无限厚的,横向上是无限大的。因此,这些研究不能解决任意多层介质问题,也不能解决横向有限大小对组织的影响。解决多层介质问题只能借助蒙特卡罗模拟,并且需要建立新的模型。

本课题组曾对光在多层生物组织中的漫射模型进行了系统的研究,建立了相应的多层半无限厚匹配介质和不匹配介质漫射模型的时域、稳态和频域解<sup>[9-11]</sup>。在此研究基础上, Liemert等<sup>[12]</sup>建立了生物组织的多层平板模型,其格式与方程解完全类似。

到目前为止,人们对生物介质的漫射研究均使用半无限厚生物介质模型。近年来, Liemert等<sup>[3]</sup>建立了柱形生物组织的漫射模型,假设横向上是一个圆形组织。然而,人体有些组织类似于矩形,因此,根据漫射方程建立了矩形模型,该模型能解决任意多层介质问题,同时,建立的方程不但能解决横向上是矩形介质的问题,而且能解决横向上无限大的介质问题。

为此本文采用外推边界条件,建立了矩形生物组织半无限厚介质稳态漫射方程的解,并采用蒙特卡罗模拟检验方程的正确性。

## 2 理论模型

如图1所示,令一束无限细的光照射在矩形介质中,矩形长度为 $2a$ ,宽度为 $2b$ ,介质为 $n$ 层,最后一层厚度为无限厚,图中采用直角坐标系, $z$ 轴为入射光的方向。光束在深度为 $z=z_0=1/(\mu'_{s1}+\mu_{a1})$ 的最上层被介质散射,其中 $\mu'_{si}$ 和 $\mu_{ai}$ 为第 $i$ 层介质的约化散射系数和吸收系数, $\mu'_{si}=\mu_{si}(1-g)$ , $\mu_{si}$ 为第 $i$ 层散射系数, $g$ 为各向同性因子。各层参数为 $(L_i, N_i, D_i, \mu_{ai})$ ,其中 $L_i$ 为厚度, $N_i$ 为折射率, $D_i=1/3(\mu'_{si}+\mu_{ai})$ 。

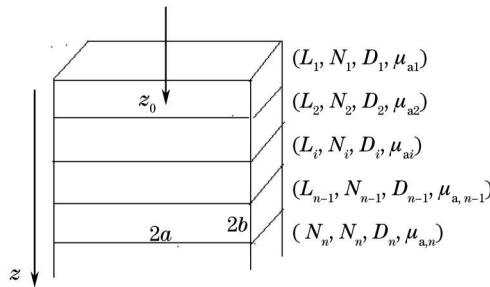


图1 矩形生物组织的几何模型

Fig.1 Geometric model of the rectangular biological tissue

光源的入射点为 $\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0)$ ,在匹配介质中,不考虑折射率 $N$ ,则多层漫射方程可以改写为

$$D_1 \Delta \Phi_1(r) - \mu_{a1} \Phi_1(r) = -\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0), \quad 0 \leq z < L_1, \quad (1)$$

$$D_i \Delta \Phi_i(r) - \mu_{ai} \Phi_i(r) = 0, \quad L_{i-1} \leq z < L_i, \quad 2 \leq i < n. \quad (2)$$

采用外推边界条件,如果长度为 $a$ ,则在侧面 $a+z_b$ 或 $-a-z_b$ 处能流率为0,即

$$\Phi(a+z_b, y, z) = 0, \quad \Phi(-a-z_b, y, z) = 0, \quad \Phi(x, -b-z_b, z) = 0, \quad \Phi(x, -b+z_b, z) = 0. \quad (3)$$

在上表面和边界上满足方程

$$\Phi_i(x, y, -z_{bi}) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\Phi_i(x,y,L_i)}{\Phi_{i+1}(x,y,L_i)} = 1, i=1,2,\dots,n-1, \quad (5)$$

$$D_i \frac{\partial \Phi_i(x,y,L_i)}{\partial z} \Big|_{L_i} = D_{i+1} \frac{\partial \Phi_{i+1}(x,y,L_i)}{\partial z} \Big|_{z=L_i}, i=1,2,\dots,n-1, \quad (6)$$

$$\Phi_n(x,y,\infty_b) = 0, \quad (7)$$

式中  $z_{bi} = \frac{1+R_{\text{eff}}}{1-R_{\text{eff}}} 2D_i$ , 其中  $R_{\text{eff}}$  为光在边界处的内部反射率, 其值可以根据相关的文献计算得出。

采用分离变量法求解(1)式, 令方程的解为

$$\Phi_i(x,y,z) = \sum \sum f_i(x)f_i(y)f_i(z). \quad (8)$$

根据(3)式和  $\delta$  函数用广义傅里叶展开, 可以得到

$$f_i(x) = \frac{1}{a} \cos \frac{(n+0.5)\pi}{a+z_{bi}} x_0 \cos \frac{(n+0.5)\pi}{a+z_{bi}} x, f_i(y) = \frac{1}{b} \cos \frac{(m+0.5)\pi}{b+z_{bi}} y_0 \cos \frac{(m+0.5)\pi}{b+z_{bi}} y, \quad (9)$$

将(8)式和(9)式代入(1)式和(2)式中得到

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} f_i(z) - \alpha^2 f_i(z) = -\frac{1}{D_1} \delta(z-z_0), \quad 0 < z < L_1, \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} f_i(z) - \alpha^2 f_i(z) = 0, L_{i-1} < z < L_i, \quad (11)$$

$$\text{式中 } \alpha_i^2 = \left\{ D_i \left[ \left[ \frac{(n+0.5)\pi}{a+z_{bi}} \right]^2 + \left[ \frac{(m+0.5)\pi}{b+z_{bi}} \right]^2 \right] + \mu_{ai} \right\} / D_i.$$

经过推导可以得到:

$$f_1(z) = \frac{\sinh \alpha_1(z_b+z_0)}{D_1 \alpha_1} \times \frac{D_1 \alpha_1 l_1 \cosh \alpha_1(L_1-z) + D_2 \alpha_2 m_1 \sinh \alpha_1(L_1-z)}{D_1 \alpha_1 l_1 \cosh \alpha_1(L_1+z_b) + D_2 \alpha_2 m_1 \sinh \alpha_1(L_1+z_b)} - \frac{\sinh \alpha_1(z_0-z)}{D_1 \alpha_1}, \quad 0 \leq z < z_0, \quad (12)$$

$$f_1(z) = \frac{\sinh \alpha_1(z_b+z_0)}{D_1 \alpha_1} \times \frac{D_1 \alpha_1 l_1 \cosh \alpha_1(L_1-z) + D_2 \alpha_2 m_1 \sinh \alpha_1(L_1-z)}{D_1 \alpha_1 l_1 \cosh \alpha_1(L_1+z_b) + D_2 \alpha_2 m_1 \sinh \alpha_1(L_1+z_b)}, \quad z_0 \leq z < L_1, \quad (13)$$

$$f_{i+1}(z) = \frac{\sinh \alpha_i(z_b+z_0) \prod(D_i \alpha_i l_i)}{D_1 \alpha_1 \prod(h_i)} \times \frac{D_{i+1} \alpha_{i+1} l_{i+1} \cosh \alpha_{i+1}(L_{i+1}-z) + D_{i+2} \alpha_{i+2} m_{i+1} \sinh \alpha_{i+1}(L_{i+1}-z)}{D_{i+1} \alpha_{i+1} l_{i+1} \cosh \alpha_{i+1}(L_{i+1}-L_i) + D_{i+2} \alpha_{i+2} m_{i+1} \sinh \alpha_{i+1}(L_{i+1}-L_i)}, \quad (14)$$

$$2 \leq i+1 \leq n-1,$$

$$f_n(z) = \cos \left[ \frac{\sinh \alpha_1(z_b+z_0)}{D_1 \alpha_1} \times \frac{\prod(D_{n-1} \alpha_{n-1} l_{n-1})}{\prod(h_{n-1})} \right] \times \exp[\alpha_n(L_{n-1}-z)], \quad (15)$$

$$m_{n-1}=1, l_{n-1}=1, \quad (16)$$

$$m_{n-2} = D_n \alpha_n \cosh \alpha_{n-1}(L_{n-1}-L_{n-2}) + D_{n-1} \alpha_{n-1} \sinh \alpha_{n-1}(L_{n-1}-L_{n-2}), \quad (17)$$

$$l_{n-2} = D_n \alpha_n \sinh \alpha_{n-1}(L_{n-1}-L_{n-2}) + D_{n-1} \alpha_{n-1} \cosh \alpha_{n-1}(L_{n-1}-L_{n-2}), \quad (18)$$

$$m_i = D_{i+1} \alpha_{i+1} l_{i+1} \sinh \alpha_{i+1}(L_{i+1}-L_i) + D_{i+2} \alpha_{i+2} m_{i+1} \cosh \alpha_{i+1}(L_{i+1}-L_i), \quad (19)$$

$$l_i = D_{i+1} \alpha_{i+1} l_{i+1} \cosh \alpha_{i+1}(L_{i+1}-L_i) + D_{i+2} \alpha_{i+2} m_{i+1} \sinh \alpha_{i+1}(L_{i+1}-L_i), \quad (20)$$

$$\prod(D_i \alpha_i l_i) = (D_1 \alpha_1 l_1) \times (D_2 \alpha_2 l_2) \times \dots \times (D_i \alpha_i l_i), \quad (21)$$

$$h_1 = D_1 \alpha_1 l_1 \cosh \alpha_1(L_1+z_b) + D_2 \alpha_2 m_1 \sinh \alpha_1(L_1+z_b), \quad (22)$$

$$h_i = D_i \alpha_i l_i \cosh \alpha_i(L_i-L_{i-1}) + D_{i+1} \alpha_{i+1} m_i \sinh \alpha_i(L_i-L_{i-1}), \quad (23)$$

$$\prod(h_i) = h_1 \times h_2 \times \dots \times h_i. \quad (24)$$

这样, 半无限厚矩形介质漫射方程的精确解得以建立。以空间分辨漫反射为例进行验证, 方法为

$$R(\rho) = \int_{2\pi} d\Omega \left[ 1 - R_{\text{res}}(\theta) \times \frac{1}{4\pi} \Phi(\rho, z=0) + 3D \frac{\partial \Phi(\rho, z=0)}{\partial z} \cos \theta \right] \times \cos \theta, \quad (25)$$

式中  $R_{\text{res}}$  为非涅耳反射系数,  $\theta$  为入射角, 如果折射率不同, (25)式可以改写为

$$R(x,y) = C_1 \Phi(x,y,z=0) + C_2 D \frac{\partial \Phi(x,y,z=0)}{\partial z}, \quad (26)$$

如果生物组织的折射率为 1.4, 则  $C_1=0.118, C_2=0.306$ 。使用(26)式计算空间分辨漫反射, 并和蒙特卡罗模拟比较。

### 3 原理验证

蒙特卡罗模拟作为检测光在生物组织中传输的常用方法,其主要原理是通过计算大量光子的统计特性平均值,进而计算光在生物组织中的传播参数。蒙特卡罗模拟的主要步骤有光子的发射、光子步长的计算、光子的散射和吸收、光子的运动方向、光子在边界处透射和反射判断,判断光子权重若小于阈值,则停止对光子跟踪,然后重复上述步骤开始跟踪第2个光子。根据前人的研究成果编写蒙特卡罗模拟程序,并用来验证所提出的理论。

分别采用1层、3层、4层和5层介质作为漫射模型进行验证。计算过程中假设矩形边界的长度  $a=50\text{ mm}$ , 宽度  $b=50\text{ mm}$ , 组织的折射率为 1.4。漫反射模型计算结果和蒙特卡罗模拟结果如图(2)所示,图中黑色方框是蒙特卡罗模拟结果,直线是理论计算结果。

图 2(a)为采用单层半无限厚介质进行验证的结果,介质的基本参数设置为:  $\mu_s = 15.0\text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_a = 0.005\text{ mm}^{-1}$ ,  $g=0.9$ , 1层介质的相对误差如图 3(a)所示。

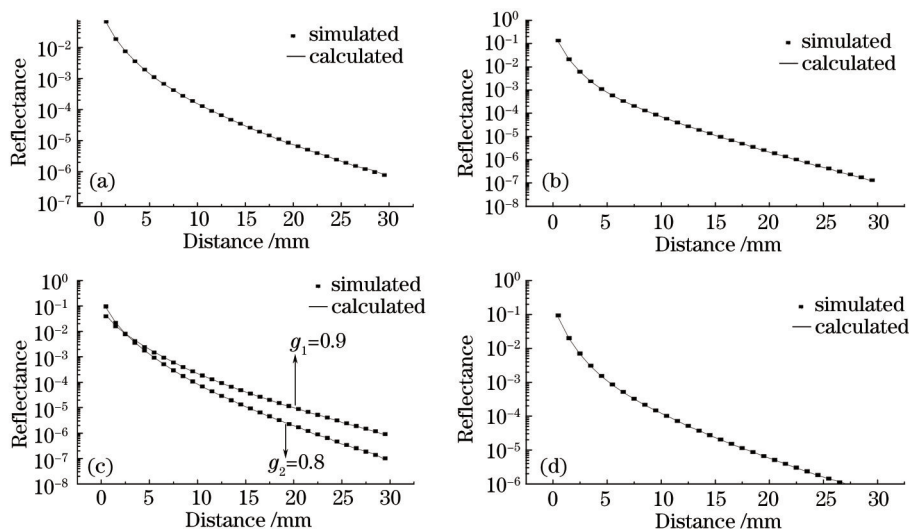


图 2 漫射模型计算结果与蒙特卡罗模拟的比较。(a) 1层介质; (b) 3层介质; (c) 4层介质; (d) 5层介质

Fig.2 Comparison of calculation results of the diffusion model and Monte Carlo simulation results. (a) One layer media; (b) three layer media; (c) four layer media; (d) five layer media

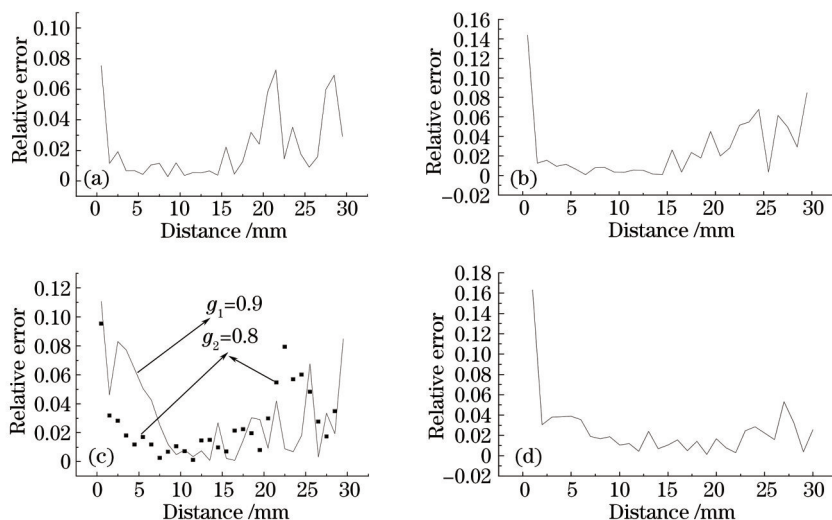


图 3 漫射模型与蒙特卡罗模拟的相对误差。(a) 1层介质; (b) 3层介质; (c) 4层介质; (d) 5层介质

Fig.3 Relative error of diffusion model and Monte Carlo simulation. (a) One layer media; (b) three layer media; (c) four layer media; (d) five layer media

图 2(b)是 3 层介质的漫射方程与蒙特卡罗模拟进行比较的结果。基本参数为： $\mu_a = 0.005 \text{ mm}^{-1}$ ,  $g=0.8$ , 前两层的厚度为 2 mm,  $\mu_{s1} = 15 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s2} = 10 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s3} = 15 \text{ mm}^{-1}$ , 3 层介质的相对误差如图 3(b)所示。

图 2(c)是两个 4 层介质的漫射方程与蒙特卡罗模拟进行比较的结果。基本参数为： $\mu_a = 0.005 \text{ mm}^{-1}$ , 前 3 层的厚度为 2 mm,  $\mu_{s1} = 10 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s2} = 20 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s3} = 10 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s4} = 20 \text{ mm}^{-1}$ ,  $g_1=0.9$ ,  $g_2=0.8$ 。这两个 4 层介质的相对误差如图 3(c)所示。

图 2(d)是 5 层介质的漫射方程与蒙特卡罗模拟进行比较的结果。基本参数为： $\mu_a = 0.005 \text{ mm}^{-1}$ ,  $g=0.8$ , 前 4 层的厚度为 2 mm,  $\mu_{s1} = 10 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s2} = 7 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s3} = 10 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s4} = 7 \text{ mm}^{-1}$ , 5 层介质的相对误差如图 3(d)所示。

从图 2 和图 3 可以看出,无论单层还是多层介质,建立的漫射模型与蒙特卡罗模拟都能较好地吻合,说明该漫射模型能够精确计算空间分辨漫反射,因此可以广泛应用于预测生物组织的光学特性等方面的研究。

为了说明多层漫射方程方形边界尺寸对空间分辨漫反射的影响,也为了说明建立的漫射模型与横向上无限大的半无限厚介质模型的关系,以 5 层介质为例,缩短矩形边界尺寸,计算其空间分辨漫反射,介质参数与图 2(d)相同,结果如图 4 所示。

图 4 中,最上方的实线是边界尺寸  $a=b=50 \text{ mm}$  的介质的结果,矩形黑点是边界尺寸  $a=b=40 \text{ mm}$  的介质的结果,可以看出两条线完全重合。对探测器来说,距离光源 30 mm 处可以看成无限大。横坐标 30 mm 处的曲线是边界尺寸  $a=b=30 \text{ mm}$  的介质的结果,20 mm 处的曲线是边界尺寸  $a=b=20 \text{ mm}$  的介质的结果,从这两条曲线可以看出,随着矩形边界减小,靠近边界处的反射率迅速下降,另外边界尺寸只是影响距离边界 5 mm 范围内的测量结果,距离边界 5 mm 以外的区域可以按照无限大处理。这些结果表明:1) 横向上介质的边界尺寸对漫射模型是有影响的;2) 建立的漫射模型可以解决传统的横向上无限大的半无限厚介质问题;3) 通过设置不同的边界尺寸,能够解决横向上  $x$  或  $y$  轴之一无限大、另一个轴有限的组织问题。

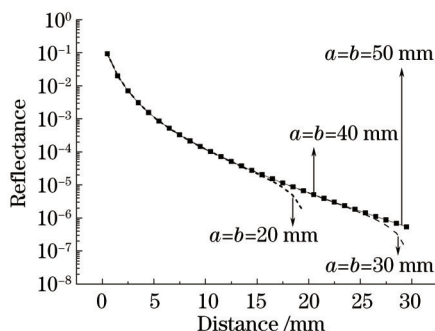


图 4 不同边长矩形介质的空间分辨漫反射结果

Fig.4 Spatially resolved reflectance results of the rectangular media with different side length

## 4 结 论

传统的漫射方程均假设生物组织在横向上是无限大的,纵向上是半无限厚的。在建立多层半无限厚漫射方程的基础上,建立了横向上为矩形、纵向上为半无限厚的任意多层介质的精确解。该漫射模型完全不同于 Liemert 等<sup>[3]</sup>的柱形生物组织模型,他们的模型只能解决横向上是圆形的生物组织问题。

使用蒙特卡罗模拟验证建立的矩形半无限厚多层介质漫射方程,结果显示漫射模型与蒙特卡罗模拟的结果在误差允许范围之内,说明建立的漫射方程是有效的。

讨论了矩形半无限厚介质的边界尺寸对探测结果的影响,进一步证明了建立的漫射模型的正确性,说明提出的方程可以解决横向上是无限大的半无限厚介质问题。对于具体的生物组织(如手指、前臂)来说,可以在某个横向上设置为实际值,另一个方向上设置为较大值,这样就能解决横向上  $x$  或  $y$  轴之一是无限大、另一个轴是有限大小的组织问题。

- 1 Haskell R C, Svaasand L O, Tsay T T, *et al.*. Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer[J]. *JOSA A*, 1994, 11(10): 2727–2741.
- 2 Kienle A, Patterson M S, Dögnitz N, *et al.*. Noninvasive determination of the optical properties of two-layered turbid media[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(4): 779–791.
- 3 Liemert A, Kienle A. Light diffusion in a turbid cylinder. I. Homogeneous case[J]. *Opt Express*, 2010, 18(9): 9456–9473.
- 4 Wang Rui, Liu Ying. Study of delta- $P_1$  approximation model for two-point-source[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(4): 1147–1152.  
王 锐, 刘 迎. 双点源 Delta- $P_1$  近似模型的理论研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 1147–1152.
- 5 Tian Huijuan, Niu Pingjuan. Sensitivity of spatially-resolved diffuse reflectance to optical parameters in the hybrid diffuse approximation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 184214.  
田会娟, 牛萍娟. 基于混合漫射近似的空间分辨漫反射光学参量灵敏度的研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 184214.
- 6 Yang Qiang, Cao Liangcai, Jin Guofan. Progress in optical focusing techniques aiming to suppress scattering effect in biomedical tissues [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0901001.  
杨 强, 曹良才, 金国藩. 可抑制生物组织散射效应的光学聚焦技术研究进展[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0901001.
- 7 Wang Anle, Li Ting, Deng Yong, *et al.*. Influence of real forearm structure on light transport based on MCVM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0317002.  
王安乐, 李 婷, 邓 勇, 等. 基于 MCVM 研究真实前臂结构对光传输的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0317002.
- 8 Jia M Y, Chen X Y, Zhao H J, *et al.*. Virtual-source diffusion approximation for enhanced near-field modeling of photon-migration in low-albedo medium[J]. *Opt Express*, 2015, 23(2): 1337–1352.
- 9 Wang Xichang, Gong Yanjun, Song Dongcao, *et al.*. The spatially resolved scattered reflection of three-layered matched media diffusion equation in the steady-state[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(3): 377–380.  
王喜昌, 宫彦军, 宋东草, 等. 平稳状态下匹配介质三层漫射方程的空间分辨漫反射[J]. *光学学报*, 2005, 25(3): 377–380.
- 10 Wang X C, Wang S. Light transport model in a  $n$ -layered mismatched tissue[J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2006, 16(2): 121–135.
- 11 Wang Xichang, Song Dongcao, Gong Yanjun, *et al.*. Time resolved diffuse reflectance of three layered mismatched media diffusion equation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(9): 1254–1259.  
王喜昌, 宋冬草, 宫彦军, 等. 不匹配介质三层漫射方程的时间分辨漫反射[J]. *光学学报*, 2005, 25(9): 1254–1259.
- 12 Liemert A, Kienle A. Light diffusion in  $N$ -layered turbid media: Steady-state domain[J]. *J Biomed Opt*, 2010, 15(2): 025003.

栏目编辑: 吴秀娟