

文章编号:1001-5078(2007)03-0220-03

准分子激光近视矫正系统的基本原理及实现

郑晓华, 吕建平

(苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215012)

摘 要:小光斑准分子激光辅助角膜磨镶术(LASIK)手术具有术后反应较轻、视力恢复快、屈光回退少等优点,成为目前近视矫正效果最好的角膜屈光手术方法。文中研究了 LASIK 术治疗近视的原理,定量地分析了近视度数以及手术区直径和最大切削深度的关系,给出某种小光斑准分子激光治疗近视的软件硬件的基本实现方法,经过临床表明,文中所给出治疗模型的效果良好。

关键词:激光辅助角膜磨镶术;近视;激光;飞点扫描

中图分类号:TN249;R772.2

文献标识码:A

The Principle of a LASIK Model and its Realization

ZHENG Xiao-hua, LÜ Jian-ping

(School of EE & Information Soochow University, Soochow 215012, China)

Abstract: LASIK (laser-assisted in situ keratomileusis) is a surgical procedure intended to reduce a person's dependency on glasses or contact lenses. As the expectation after surgery is good, it is one of the best cornea refractive surgery at present, especially for myopia. In this paper the main principle of LASIK was described, relationship among refractive degree, surgical area and maximum stroma cutting depth were analyzed, the hardware and software realization of a LASIK machine were also discussed. With the clinical practice, the model given in the paper is satisfied for patients.

Key words: LASIK; myopia; laser; flying spot scanning

1 引 言

ArF 准分子激光由于其具有相当高的光子能量和紫外光极小的热效应,使其和生物组织有着独特的光化学分解作用机理^[1],它能轻松地打断生物分子的化学键,从而切开组织,并对周围组织无损伤,所以成为激光手术特别是眼科手术最有效的工具。

目前在准分子激光角膜切除手术中,广泛采用的是激光辅助角膜磨镶术(LASIK)。比较著名的几个 LASIK 术治疗仪器品牌有德国蛇牌公司的 MEL70G-SCAN 型(采用新一代的飞点扫描技术及扫描反馈机制)、美国爱尔康公司 LADARVISION 4000 型(高精度的主动眼球跟踪系统,确保了角膜切削的精确性)和日本 NIDEK 公司的 EC-5000 型。本文讨论的 LASIK 治疗近视的原理是以苏州

某医疗器械公司生产的 AOV-FB LASIK 术治疗仪系统为背景。此治疗技术先用极为精密的微型角膜刀在角膜中央掀开一个厚度仅为 130 μm 的角膜瓣,再用激光对下面的角膜基质进行切削,最后将角膜瓣复位。它最大的优点是保留了角膜上皮和前弹力膜的完整,符合角膜的生理结构,因此几乎没有 PRK^[2]术后易见的角膜混浊现象。此外与 PRK^[2]相比,还有以下优点:矫正近视范围大,治疗单纯近视可高达 -15D,手术前后患者无明显疼痛,手术反应轻,视力恢复快,屈光回退少,因而深受患者欢迎。本文讨论了 LASIK 治疗近视的原理^[3],定量地分析

作者简介:郑晓华,研究生,苏州大学电子信息学院,研究方向为医疗器械与图像自动跟踪。

收稿日期:2006-07-18

了近视度数和手术区直径与最大切削深度的关系,给出了小光斑准分子激光治疗近视的软件硬件实现方法,经过临床表明,本文给出的治疗模型效果良好。

2 LASIK 治疗近视原理

眼睛的屈光系统包括角膜、房水、晶状体和玻璃体这样一系列屈光介质,其总的屈光力为 +58.64D,而角膜的屈光力为 43.05D,占总屈光力的 70% 以上,可见眼球的屈光力主要取决于角膜,因此可用改变角膜表面的曲率半径来矫正眼睛屈光不正。下面以单纯近视为例,推出近视手术前后角膜表面的数学模型以及角膜的修正量和手术区直径的关系。

2.1 单纯近视角膜前表面的数学模型

单纯近视的角膜前表面在光学区内可以认为是球面的一部分,角膜表面各经线上的曲率半径相同,这样角膜面可以用一个球面方程来描述。以眼视光轴线为 Z 轴,取角膜前面对应的球心为原点,任意取过原点与 Z 轴垂直的直线为 X 轴, Y 轴按右手法则来定,这里只给出 $X-Z$ 平面的角膜图,如图 1 所示。角膜前表面的方程如下^[4]:

$$Z_i(x, y) = \sqrt{R_i^2 - x^2 - y^2} \quad (1)$$

式中, R_i 表示激光切削前的角膜前表面初始半径。

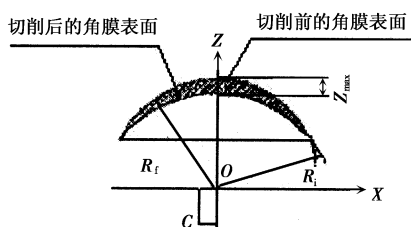


图1 单纯近视角膜修正量示意图

运用计算机辅助角膜分析系统可以绘出角膜地形图,能够精确分析角膜表面 95% 的曲率状况,单纯近视各经线曲率半径相同。根据测量得到的角膜 K 值 D_K ,由式(2)计算得到初始角膜前表面半径,单位为毫米,一般为 7~8mm。

$$R_i = 376/D_K \quad (2)$$

2.2 单纯近视切削量和手术后的角膜表面数学模型

为了计算角膜的切削量,要在手术之前用主觉插片法测量眼的屈光不正度,包括球镜度数和柱镜度数,纯近视的情况下,柱镜度数为 0,这样可以得到球镜度数 D_{sph} 。这里得到的球镜度数与人眼屈光不正有一点微小差别,需要用公式(3)转换。

$$D_{sph} = D_{sphg} / (1 - dD_{sphg}) \quad (3)$$

式中, d 为镜目距离(成人一般取 12mm); D_{sph} 为人眼纯近视的球镜度数,该数值为负数。这样,对于纯

近视术后的角膜屈光力 D_f 为:

$$D_f = D_{sph} + D_K \quad (4)$$

修正后的角膜在光学区内仍为一个球面,其半径 R_f 由式(5)求得,单位为毫米,比初始的半径值大。

$$R_f = 376/D_f \quad (5)$$

于是可以得到术后角膜表面的半径,两个 Z 轴同向的球面相交区域即手术区域。手术后的角膜表面的球心 C 与手术区域范围有关,先设其与初始的圆心 O 的距离为 c ,如图 1 所示,则得到手术后的角膜表面(在光学区域内)的曲面方程如式(6):

$$Z_f(x, y) = \sqrt{R_f^2 - x^2 - y^2} - c \quad (6)$$

可以得到,切削量的方程为:

$$\Delta Z(x, y) = \sqrt{R_i^2 - x^2 - y^2} - \sqrt{R_f^2 - x^2 - y^2} + c \quad (7)$$

由边界条件可得:

$$\begin{aligned} \Delta Z(D/2, 0) \\ = \sqrt{R_i^2 - (D/2)^2} - \sqrt{R_f^2 - (D/2)^2} + c = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

得到: $c = \sqrt{R_f^2 - (D/2)^2} - \sqrt{R_i^2 - (D/2)^2}$

式中, D 为手术区域直径,大小一般取为 6.5mm。根据最大修正量可以做调整,保证切削深度不大于 200 μ m,单纯近视修正量的最大值由式(9)求得:

$$Z_{max} = R_i - R_f + \sqrt{R_f^2 - (D/2)^2} - \sqrt{R_i^2 - (D/2)^2} \quad (9)$$

2.3 单纯近视最大切削量和近视度数以及手术区直径的关系

为了更直观地表明单纯近视的最大切削深度与手术区域直径的关系,采用上述模型,用 Matlab 工具软件绘制了最大切削深度和手术区域直径的图形,如图 2 所示。

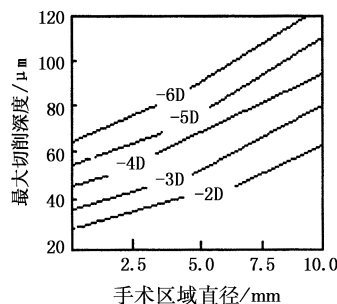


图2 单纯近视最大切削深度与手术区域直径及近视度数的关系图

图 2 中,每一条曲线上的数字表示的是近视度数,横坐标为手术区域直径,纵坐标表示最大切削深度,取角膜 K 值为 44D。结果表明,对同一近视度数,最大切削深度随着手术区域直径的增大而增大;

取同样的手术区域直径,最大切削深度随近视度数的加深而增大。取单纯近视-5D时,在通常手术区域直径取6.5mm时的最大切削深度为73 μm 。

3 小光斑准分子激光治疗近视的软硬件实现方法和结果

根据检测患者得到的角膜K值和屈光不正度数,采用上述的公式(这里只给出了单纯近视的计算公式),可以计算得到角膜的修正量。按照激光在角膜上的光斑的大小分类,有三种消融方式,即:大孔径掩模式、狭缝掩模式和飞点扫描式。掩模式是让激光通过掩模光栅形成阶梯式的连续可变的光斑于角膜表面上来消融修正量,使用这种扫描方式要使用的激光器能量高,光学系统复杂,而且中心岛的几率发生大;扫描式是通过聚焦在角膜表面上的小光斑通过切削量的叠加到达要修正的量,容易实现个性化切削,而且发生中心岛的几率极小。本项目采用小光斑准分子激光的飞点扫描方式,软件硬件结合实现角膜的精确消融^[5]。

3.1 准分子激光矫正系统硬件设计

准分子激光近视矫正系统主要包括计算机、准分子激光器、能量测控系统、汇聚器、扫描器和眼跟踪器,硬件示意图如图3所示。

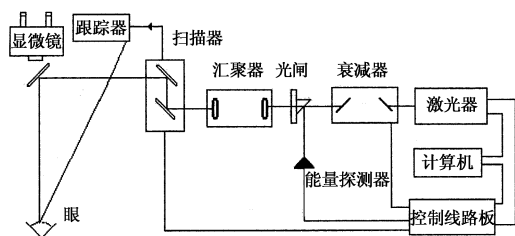


图3 准分子激光近视矫正系统硬件示意图

计算机是整个系统的控制核心,负责病人参数的输入,角膜切削量的计算,飞点扫描^[6]算法的实现和对激光器的维护。准分子激光器采用Lambda Physik公司的OPTex准分子激光器,该公司提供激光器的操作和维护应用程序接口。计算机通过串口和激光器进行通讯,通过应用程序接口设置激光器的发射激光工作模式和参数,并进行激光器的充换气等维护工作。控制线路板在系统中的主要功能是信号变换。

采用准分子激光脉冲对角膜的消融对激光能量稳定性有很高的要求,因此这里采用了粗调和微调两部分来完成。图3中的衰减器、光闸和能量探测器构成了能量的粗调部分。激光的通过率由衰减器的偏转角度决定,角度达到垂直时,通过率最大,这样当光闸关闭时,激光不能进入汇聚器,而是被光闸

上的全反镜反射到能量探测器,计算机根据该能量值和PMMA板实验结果计算所需要设定的能量值进行比较,驱动衰减器转动一个角度,达到能量的粗控制。激光手术时,光闸必须打开,这时通过激光器内部的监控器进行微调,计算机设置好激光器的工作模式,在恒能工作模式下,能量的控制精度小于2%,实现手术过程的能量微控制。

准分子激光器出来的激光光斑是 $7 \times 4 \text{ mm}^2$ 的准高斯光束,必须通过光路变换,使光斑到达角膜面上成为直径为1.2mm的小光斑,这里采用一个由球镜和柱镜组成的汇聚器,调整好两镜片的位置,便可以达到要求。准分子激光扫描与跟踪系统由扫描器和跟踪器组成,是由两片装在电流驱动的转动器的镜片(震镜)组成,转动角度依赖于驱动电流的大小,其转动角度轴相互垂直,构成X-Y扫描器,激光光斑要扫描的点的位置(以角膜中心为原点)信号经过变换后送入X-Y扫描器,驱动扫描器,使得计算机可以控制小光斑消融角膜上的手术区域内的任意一点。

准分子激光屈光矫正手术过程中,由于眼球的移动或眼球的不自主颤动,造成了激光束的偏中心切削,为此需要采用跟踪器。在眼角膜上贴一片红外反射片,眼球的移动反映为反射回来的红外光线,跟踪器根据反射回来的红外光线的偏移信号,处理后送入扫描器进行眼球的实时跟踪。

准分子激光到角膜表面上是直径为1.2mm的光斑,校正好激光脉冲的能量,可使得每个脉冲消融0.22 μm 厚度的角膜,而且每次消融的一致性非常好,不会有忽深忽浅的情况,因此,切削的深度是所有脉冲切削的累加。根据飞点扫描算法计算出要在角膜表面上扫描的点数量和每个点的位置,使最后叠加的深度与要消融的深度一致。

4 准分子激光矫正系统软件流程

根据上述的模型和硬件原理,我们设计了准分子激光手术控制软件。软件的基本流程如图4所示,不再赘述。

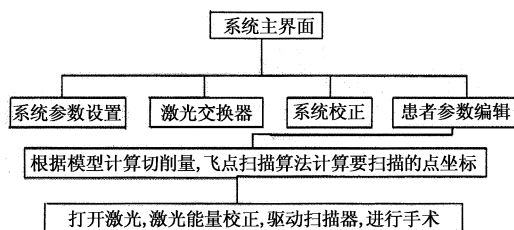
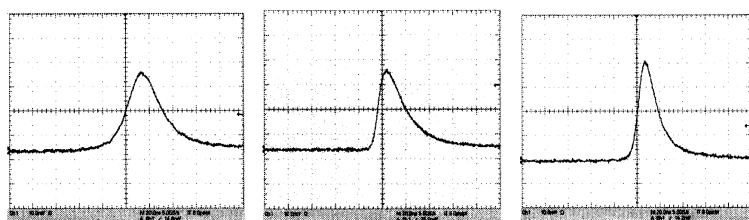


图4 准分子激光矫正系统软件流程简图

(下转第229页)

复频率为 10kHz 时,获得最大单脉冲能量 45.8μJ 及相应峰值功率 2.29 kW。

图 5 为泵浦功率 7.7W 时,被动调 Q 及重复频率为 10kHz 时,声光调 Q 和双调 Q 相应的脉冲波形。从图 5 可以看出,双调 Q 的脉冲宽度与单纯的声光调 Q 相比,脉宽明显变窄,波形对称性得到改善。这是因为声光调 Q 具有较快的上升沿,较慢的下降沿;被动调 Q 则相反,具有较慢的上升沿,较快的下降沿^[5,7-8]。基于声光调 Q 和被动调 Q 各自的特点,可等效地缩短单声光调 Q 的开关时间,加速开关打开时系统损耗的变化率^[4]。同时由于 Cr⁴⁺:YAG 的非线性吸收特性,导致了脉冲具有较快的下降沿,使双调 Q 输出脉冲的对称性得到改善,从而获得窄脉宽调 Q 脉冲输出。



(a) 被动调 Q (b) 声光调 Q (c) 双调 Q

图 5 泵浦功率 7.7W 时,三种调 Q 的脉冲波形

Fig. 5 pulse profile for the three Q-switched at the pump power of 7.7W

4 结 论

本文报道了结构紧凑的 LD 泵浦 Nd:GdVO₄ 双调 Q 激光器,采用声光器件、Cr⁴⁺:YAG 实现 1.06μm 双调 Q 激光运转。在泵浦功率 7.7W,重复频率 10kHz 时,获得平均输出功率 458mW,最短脉冲宽度 20ns,单脉冲能量 45.8μJ 及相应峰值功

率 2.29kW 的激光脉冲。可以看出,双调 Q 与单纯的声光调 Q 和被动调 Q 相比,脉宽窄,波形对称性得到了改善。

参考文献:

- [1] 孙渝明,侯学元,李宇飞. LD 泵浦的声光调 Q 高重复率 Nd:GdVO₄ 激光器[J]. 光子学报,2004,33(6):645-647.
- [2] 杜晨林,阮双琛,于永芹,等. LD 泵浦 Nd:GdVO₄/GaAs 被动调 Q 激光器研究[J]. 光子学报,2004,33(7):774.
- [3] 王鹏飞,金煜坚,潘虎. 二极管泵浦被动调 Q 激光器[J]. 激光与红外,2005,35(8):560-562.
- [4] 张小洁,杨杰,等. 声光-染料双调 Q 激光器的理论与实验研究[J]. 中国激光,1992,19(4):241-246.
- [5] Wei Wu, Guiqiu Li, Shengzhi Zhao, et al. Pulse width reduction in diode-pumped doubly Q-switched Nd:GdVO₄/KTP green laser[J]. Chin. Opt. Lett., 2005,3(7):402-404.
- [6] Kejian Yang, Shengzhi Zhao, Guiqiu Li, et al. Compression of pulse duration in a laser-diode end-pumped, double Q-switched laser[J]. Appl. Opt. 2005,44(2):271-277.
- [7] Zhigang Li, Z Xiong, N Moore, et al. Pulse width reduction in AO Q-switched diode-pumped Nd:YVO₄ laser with GaAs coupler[J]. Opt. Commun. 2004,237:411-416.
- [8] Guiqiu Li, Shengzhi Zhao, Kejian Yang, et al. Pulse shape symmetry and pulse width reduction in diode-pumped doubly Q-switched Nd:YVO₄/KTP green laser with AO and GaAs[J]. Opt. Exp. 2005,13(4):1178-1187.

(上接第 222 页)

以上原理应用于国产准分子激光眼科设备,目前已经应用于临床,经过某市医院眼科中心的临床,收集该院眼科中心接受 LASIK 手术治疗的单纯近视 32 眼的病历,以下为手术前后裸眼视力的相关数据:术前裸眼视力平均为 0.13±0.05,93.7% 的眼睛裸眼视力≤0.2;术后第一天的裸眼视力平均为 0.99±0.22,84.3% 的眼睛裸眼视力≥0.8;术后一个月的裸眼视力平均为 1.03±0.23,71.9% 的眼睛裸眼视力≥1.0。说明本模型治疗近视效果良好,可以采用本文所述的模型进行 LASIK 手术治疗单纯近视。

参考文献:

- [1] Markolf H Niemz. 激光与生物组织的相互作用[M]. 张

镇西译. 西安:西安交通大学出版社,1999:120-143.

- [2] Ambrosion R Wilson. LASIK vs Lasek vs PRK: Advantages and indications[Z]. Ophthalmol. 2003 Mar,18(1):2-10.
- [3] 江海河,余吟山,陆志贤,等. 近视眼激光眼角膜切除术原理及控制方法[J]. 激光生物学报,1998,7(4):249-253.
- [4] 陆文秀,准分子激光屈光性角膜手术学[M]. 北京:科学技术文献出版社. 2000:44-64.
- [5] 张运海,沈建新,廖文和. 准分子激光矫正复性近视散光的屈光学机理及应用[J]. 光学精密工程,2003,11(3):291-296.
- [6] 邓国庆,余吟山. 飞点扫描式准分子激光角膜矫正系统[J]. 量子电子学报,2001,18 增刊:61-64.