

旋转双光楔光路引导系统 Matlab 仿真研究

郭云曾^{1,2}, 杨小军¹, 杨小君¹, 贾海妮^{1,2}, 王海涛¹, 刘 锋¹, 姜 志³

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710126; 2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘 要: 由于光楔在高精度微孔加工中起着对激光光束引导作用, 为了提高激光微细孔加工质量, 给出了一种提高光楔对激光微加工精度分析的方法。首先提出了单光楔矢量等效概念, 基于单光楔矢量定义对双光楔矢量模型进行了建立与分析, 并得出了多个光楔进行矢量叠加的新方法; 其次, 应用 Matlab 编写了仿真软件, 仿真得出了激光束经过两个相同光楔后的轨迹, 并指出了由于运动系统的不同步对激光微孔加工中打孔质量的影响, 进行了误差定量分析并给出了误差计算公式。文中结论对高精度激光微孔加工控制系统设计时的性能指标提供参考。

关键词: 矢量; 同步; 激光打孔; 误差分析

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0856-05

Simulation study of rotating double optical wedge vectoring optics path based on Matlab

Guo Yunzeng^{1,2}, Yang Xiaojun¹, Yang Xiaojun¹, Jia Haini^{1,2}, Wang Haitao¹, Liu Feng¹, Jiang Zhi³

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710126, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China)

Abstract: The optical wedge plays a guiding and key role on the processing of high-precision micro-hole drilling by laser pulses. In order to improve the laser micro-hole processing quality, a method was presented to improve the analysis on the impact of the optical wedge on accuracy of laser micro-manufacturing. First the concept of the equivalent of a single wedge vector was proposed. The double wedge vector model was established and analyzed based on the definition of a single wedge vector, and the new method of the vector superposition of the multiple wedges was came up with. Secondly, the simulation software was programmed by using Matlab. The simulation results show the trail of the laser pulses through the double optical wedge. The effect of the quality of the micro-hole caused by the unsynchronization of the motion system is investigated. The deviation quantitative analysis is carried and the formula of calculation the deviation is given. The conclusion is of great value to the performance indicators of designing the controlling system in the high-precision micro-hole drilling by laser pulses.

Key words: vector; synchronization; laser drilling; error analysis

收稿日期: 2013-07-07; 修订日期: 2013-08-13

基金项目: 国家重大科学仪器设备专项(2011YQ120075)

作者简介: 郭云曾(1988-), 男, 硕士生, 主要从事激光加工控制系统方面的研究。Email: guoyz_312@163.com

导师简介: 杨小军(1967-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事伺服控制技术方面的研究。Email: yxj1967@sohu.com

0 引言

光楔作为光学系统中实现光束小角度偏摆的光学元件,被广泛应用于光路引导系统中。文中采用折射率相同、折射棱角相等的两块相互靠近的光楔组成的光路引导系统(以后简称“双光楔系统”),除了可实现单光楔的功能外,两个光楔的相对运动可以产生新的特性和用途,如两个光楔的等效折射棱角可以在0到2倍单光楔折射棱角范围内变化,选择不同的转速和方向,可以得到不同的扫描图像。这一特性被广泛应用于高精度的角度发生器、激光微孔加工光路控制、激光雷达系统、卫星间的激光通信的测试系统等^[1-6]。

一般研究双光楔时都是把双光楔看成两个分立的光学元件,逐一对它们进行光学分析,得到光的出射情况,这样的分析方法对少量的光楔组是可行的。但是对于多个光楔组其计算量无疑是巨大的。文中通过研究光楔的折射特性,把单个旋转光楔简化成一个运动的矢量,运用矢量叠加的分析方法大大简化了计算,并计算出了双光楔扫描轨迹的解析解。根据理论结果通过 Matlab 软件编程模拟出了激光通过旋转双光楔后轨迹,并对仿真后的轨迹进行了详细的分析。指出了若要实现高精度激光打孔,使孔的圆度改善关键点在于高转速下保证运动控制系统的同步精度,这对旋转双光楔控制系统设计有着指导意义。

1 双光楔对光波的折射分析

1.1 单光楔矢量模型

折射棱角 α 很小的棱镜称为光楔,当光线进入光楔时会发生折射现象,入射角和出射角的夹角为偏转角 δ ,偏转角 δ 满足公式(1),如图1所示。

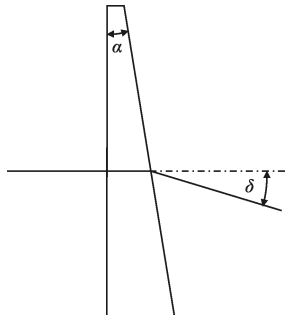


图1 单光楔光路

Fig.1 Single photon wedge light path

$$\delta=(n-1)\alpha \tag{1}$$

式中: n 为光楔的折射率。

由于光楔对光线的偏转具有方向性,当单光楔绕光轴以角速度 ω 旋转时。此时出射光线将在空间扫描出一个顶角 2δ 的圆锥面。在距离出射点 l 垂直于光轴的平面建立一个平面直角坐标系,以光轴在平面上的投影为原点,则出射光线在该平面直角坐标系扫描出的轨迹为一半径为 r 的圆。如图2所示。

$$r=l \times \sin(\delta) \tag{2}$$

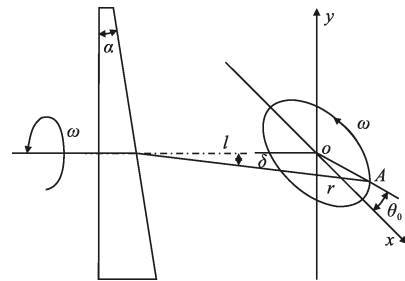


图2 旋转单光楔光路

Fig.2 Single photon wedge of rotating light path

若要确定某一瞬时出射光线所处的空间位置,除了要知道光楔的偏转角 δ 以外,还须知道出射光线此刻处于图2中圆上的哪点,假设此刻出射光线处于 A 点,连接 A 点与圆心 O ,定义 OA 与 X 轴的夹角为相位 θ_0 ,定义此时光楔所处的相位为 θ 。

$$\theta=\omega t+\theta_0 \tag{3}$$

当光楔加工完成后,其折射率 n 和折射棱角 α 已经固定,那么由公式(1)可知偏转角 δ 为一定值,在光楔以角速度 ω 旋转时,只需知道 θ_0 和 ω 可通过公式(3)推出 θ 。当知道 θ 和 δ 即可确定此时出射光线所处的空间位置。故此可将单光楔看做一个大小为 δ ,初始相位为 θ_0 ,旋转速度为 ω 的一个旋转矢量。如图3所示。

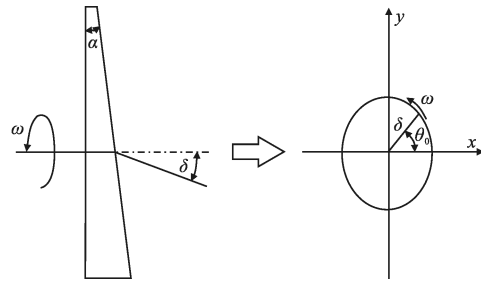


图3 旋转单光楔等效矢量模型

Fig.3 Model of effective vector of the rotating photon wedge

1.2 双光楔矢量模型

如图 4 所示,双光楔的折射棱角均为 α ,当两光楔主截面平行且同向放置时,如图 4(a)所示,所产生的偏向角最大 2δ (为两光楔偏向角之和);当一个光楔绕光轴旋转 180° 时,所产生的偏向角为 0 ,如图 4(b)所示;当两光楔处于任意位置时,所产生的偏向角在 $0\sim 2\delta$,如图 4(c)所示。

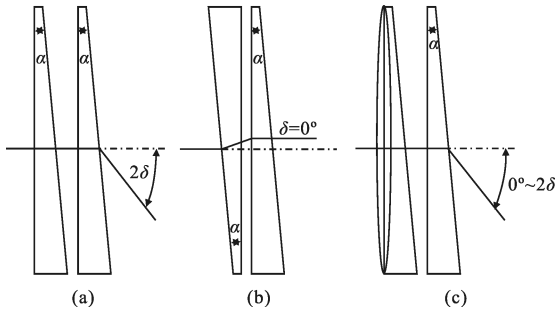


图 4 双光楔光路

Fig.4 Double wedge light

笔者运用上述的方法,把两个光楔看做两个旋转的向量,将入射光楔等效成一大小为 δ ,角速度为 ω_1 ,初始相位为 θ_{01} 的旋转矢量,同理出射光楔等效成一大小为 δ ,角速度为 ω_2 ,初始相位为 θ_{02} 的旋转矢量。此时若要确定出射光线的偏转角和偏转相位,只需确定此刻两矢量所处的相位 θ_1 和 θ_2 即可。 θ_1 和 θ_2 可通过公式(4)、(5)算得:

$$\theta_1 = \omega_1 t + \theta_{01} \tag{4}$$

$$\theta_2 = \omega_2 t + \theta_{02} \tag{5}$$

根据矢量叠加的平行四边形法则,如图 5 所示。可得此时总偏转角 φ

$$\varphi = 2\delta \cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \tag{6}$$

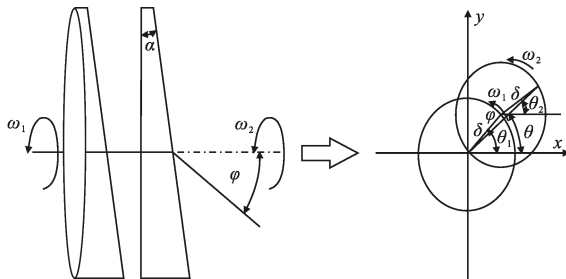


图 5 旋转双光楔等效矢量模型

Fig.5 Model of effective vector of the double rotating wedge

总偏转相位 θ

$$\theta = \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \tag{7}$$

将公式(4)、(5)带入公式(6)、(7)可得

$$\varphi = 2\delta \cos\left(\frac{\omega_2 t + \theta_{02} - \omega_1 t - \theta_{01}}{2}\right) \tag{8}$$

$$\theta = \omega_1 t + \theta_{01} + \frac{\omega_2 t + \theta_{02} - \omega_1 t - \theta_{01}}{2} \tag{9}$$

当知道了 φ 和 θ 时,出射光线就能唯一地确定下来。运用这种矢量合成的方法可以很简单地计算出任意时刻光线通过双光楔的光线偏转。而且不仅仅局限于两个折射率相同、折射棱角相等的双光楔系统,对于三光楔甚至更多的光楔组也是同样适用的,可以大大地简化计算,只需将各个光楔进行矢量等效变化并在平面直角坐标系下对各个向量运用平行四边形矢量叠加法则进行叠加即可。

2 MATLAB 仿真分析

根据公式(8)、(9),只需给定 $\omega_1, \omega_2, \theta_1, \theta_2, \delta$ 即可算出任一时刻出射光线所处位置,即可通过 Matlab 对其轨迹进行数值仿真。

当 $\omega_1 = \omega_2$ 时,由公式(8)、(9)可得:

$$\varphi = 2\delta \cos\left(\frac{\theta_{02} - \theta_{01}}{2}\right) \tag{10}$$

$$\theta = \omega_1 t + \theta_{01} + \frac{\theta_{02} - \theta_{01}}{2} \tag{11}$$

即总偏转角 φ 始终保持不变,总偏转相位 θ 以转速 ω_1 随时间递增。如图 6 所示。

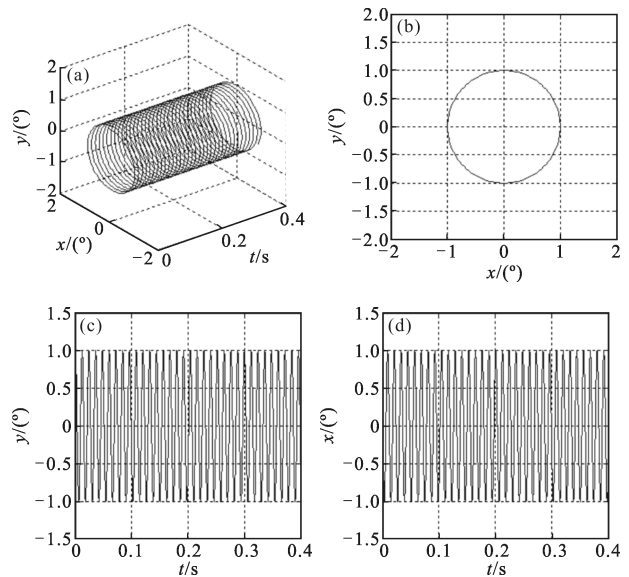


图 6 理想速度下旋转双光楔扫描轨迹

Fig.6 Scanning track of rotating double wedge under ideal speed

在微细孔加工中,激光通过旋转双光楔偏转后经过聚焦镜聚焦,微孔直径与两个楔片之间的相对偏角相关。令 $\beta = \theta_2 - \theta_1$ 。

$$r = 2\delta f \cos \frac{\beta}{2} \quad (12)$$

式中: β 为两个光楔的相对偏转角; f 为聚焦镜焦距^[7]。

将公式(1)、(4)、(5)带入公式(12)得:

$$r = 2(n-1)\alpha f \cos \left(\frac{\omega_2 t + \theta_{02} - \omega_1 t - \theta_{01}}{2} \right) \quad (13)$$

由公式(13)可知,微孔孔径由光楔的棱角 α , 折射率 n , 聚焦镜焦距 f , 两光楔初始时所处的相位 θ_{01} , θ_{02} , 双光楔旋转速度 ω_1 , ω_2 直接决定。若要保证在加工时孔的圆度和半径,则要保证上述 7 个量。

而如今光楔的加工棱角误差可以控制在 $\pm 1''$ 以内^[8-10], 聚焦镜加工成型后, 焦距测量精度可达 0.001 mm。而在光楔装配时所用的高精度垂直度测量仪, 精度可达微米级。这样一来, 光学元件在制造和装配时带来的误差只影响孔径范围, 在不考虑光斑直径的条件下, 由 $0 \sim r$ 变为 $f^* 10^{-5} \sim r$, 而工业用聚焦镜焦距通常采用 100 mm, 则最小加工孔径只增加了 1 μm , 可以忽略不计。那么在孔加工过程中 $\frac{\omega_2 t + \theta_{02} - \omega_1 t - \theta_{01}}{2}$ 的相对稳定度则直接决定微孔加工质量。在微孔加工过程中旋转双光楔是由两个高速电机直接带动的, 两光楔初始时所处的相位 θ_{01} , θ_{02} 可由电机编码器决定, 选择高精度的光电编码器则可有效降低误差。而电机在高速运动下, 由于机械结构自身的抖动, 电流控制不平衡等问题则不可避免地产生电动机转速的波动, 这种速度的波动会导致光楔旋转速度波动, 直接带来双光楔相对偏角的变化。

$$\beta + \Delta\beta = (\omega_2 + \Delta\omega_2)t + \theta_{02} - (\omega_1 + \Delta\omega_1)t - \theta_{01} \quad (14)$$

将公式(14)带入公式(13)得:

$$r + \Delta r = 2(n-1)\alpha f \cos \left(\frac{\beta + \Delta\beta}{2} \right) = 2(n-1)\alpha f \times \cos \left(\frac{(\omega_2 + \Delta\omega_2)t + \theta_{02} - (\omega_1 + \Delta\omega_1)t - \theta_{01}}{2} \right) \quad (15)$$

激光加工中电机的高速旋转能有效地降低微孔加工时的热效应和重铸层, 而且更多的重复次数在小孔加工中起着比激光能量更重要的作用^[5]。但电机在高速运转时, 速度波动在时域上的累加以相位差波动 $\Delta\beta$ 来表现出来。若能在高速运动时实时地将相位差 β 控制在一定范围内, 就可以有效地控制打

孔的圆度和光滑度。同时由公式(15)可知, $\Delta\beta$ 与最终 Δr 的变化并不呈现出线性关系, 而呈现出一种余弦关系, 也就是说在不同的 β 处, 相同的 $\Delta\beta$ 带来的 Δr 并不同。这对控制精度定义带来了一定难度。

为了解决上述问题, 不妨考虑当 β 为何值时, $\Delta\beta$ 带来的 Δr 最大, 以这个极限位置作为加工的精度要求。由于 $\cos(x)$ 的导数为 $-\sin(x)$, 而正弦在 $\pm \frac{\pi}{2}$ 时取得极值, 从而证明了在 $\beta = \pm \pi$ 时, $\Delta\beta$ 对 Δr 的影响最大。

$$\Delta r = 2(n-1)\alpha f \cos \left(\frac{180 + \Delta\beta}{2} \right) \quad (16)$$

由公式(16)即可确定出所需同步精度 $\Delta\beta$ 。假设需要控制孔径精度在 $\pm 1.5 \mu\text{m}$, 选择偏转角 $\delta = 0.2^\circ$ 的双光楔, 焦距为 10 mm 的聚焦镜, 通过公式(16)可计算出同步精度 $\Delta\beta \approx 0.1^\circ$, 所以需要将总偏转角 β 的波动范围控制在 $\pm 0.1^\circ$ 范围内。

假设速度 5 000 r/min 时, 速度有千分之一的波动, 运行 0.4 s, 可以看到双光楔的偏转角在 $1^\circ \pm 0.3^\circ$ 范围内波动。波动范围大致在 0.3° , 不能满足加工所需同步精度的要求, 如图 7 所示。

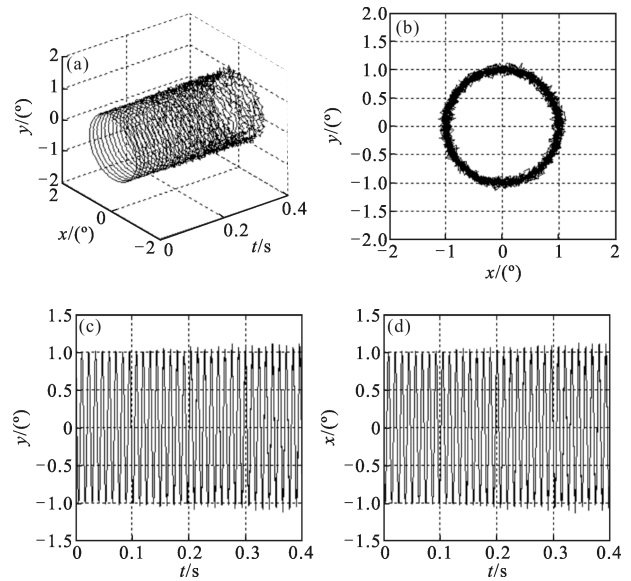


图7 速度波动带来的轨迹误差

Fig.7 Trajectory error of velocity fluctuations

将转速降低至原先的一半, 速度波动仍是千分之一, 运行 0.4 s, 可以看到双光楔的偏转角在 $1^\circ \pm 0.1^\circ$ 范围内波动。波动范围大致在 0.1° , 能满足加工所需的同步精度要求, 如图 8 所示。

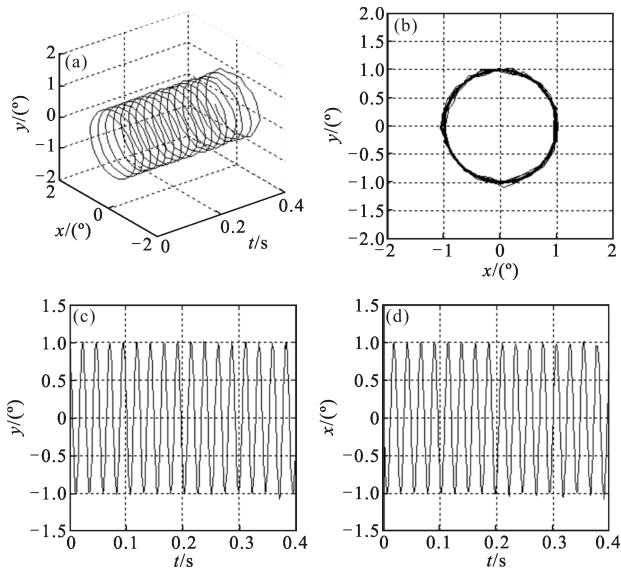


图 8 控制速度波动后轨迹误差降低

Fig.8 Trajectory error is reduced after speed fluctuation is controlled

但是若为了保证加工的精度而降低光楔的转速,一方面会造成加工效率的低下,另一方面激光在同一点上停留时间过长产生明显的热影响区和重铸层,并出现如飞溅物、微裂纹等许多缺陷。控制系统的设计不仅需要在旋转的过程中保证两个电机的相对相位稳定,而且要在稳定的情况下尽可能的提高转速。那么对于控制系统而言,在高速的情况下如何克服各种干扰而保证两个光楔转速的同步对于激光微孔加工品质至关重要。

3 总结

文中提出了光楔矢量叠加的概念和方法,大大降低了光线经过光楔的叠加轨迹的运算量,同时编写了仿真软件,对激光经过双光楔后的轨迹进行仿真,一方面能更直观地观察到不同状态下的光路变化以及扫描后各方向的投影轨迹;另一方面指出了在激光加工微孔时运动系统由于不同步对加工孔径误差的影响,并对误差进行定量分析给出误差计算公式,这一结论对将来控制系统的设计有着一定的参考价值。

参考文献:

[1] Hu Yuxi, An Liansheng. Applied Optics [M]. Anhui: University of Science and Technology of China, 1996. (in Chinese)

胡玉禧,安连生.应用光学[M].安徽:中国科学技术大学出版社,1996.

[2] He Lei, Yuan Jiahu, Li Zhan, et al. Design of high-precision angle generator with double optical wedges [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(6): 46-49. (in Chinese)
贺磊,袁家虎,李展,等.双光楔高精度角度发生器设计[J].光电工程,2002,29(6):46-49.

[3] Pan Yong, Jiang Zhaohua, Zhang Tongxing, et al. Application of rotating pairs of optical wedge in the laser micro-holes processing[J]. *Applied Laser*, 2009, 29(6): 515-517. (in Chinese)
潘涌,姜兆华,张同兴,等.旋转双光楔在激光微孔加工中的应用[J].应用激光,2009,29(6):515-517.

[4] Amirault C T, Dimarzio C A. Precision pointing using a dual-wedge scanner[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(9): 1302-1308.

[5] Li A, Liu L, Sun J, et al. Double-prism scanner for testing tracking performance of inter-satellite laser communication terminals[C]//SPIE, 2006, 6304: 6304-1R.

[6] Lou Qihong. Recent progress of laser technology and it's application in solar cell research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3187-3192. (in Chinese)
楼祺洪.激光技术新进展及其在光伏产业中的应用[J].红外与激光工程,2012,41(12):3187-3192.

[7] Shen Yiyu, Pan yong, Luo Gongxu, et al. The application of rotary wedge scanner in laser micro processing [J]. *Applied Laser*, 2012, 32(5): 408-411. (in Chinese)
沈一愚,潘涌,骆公序,等.楔形扫描器在激光微加工中的应用[J].应用激光,2012,32(5):408-411.

[8] Hui Changshun. Fabricating and testing of Ge scanning wedge with the accuracy of second [J]. *Optical Technology*, 1996, 25(1): 22-25. (in Chinese)
回长顺.秒级锗扫描光楔加工及检测方法[J].光学技术,1996,25(1):22-25.

[9] Zhao Junli, Wu Yiming, Gao Limin. Detecting method of right-angled prism tilting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 228-232. (in Chinese)
赵军丽,吴易明,高立民.直角棱镜棱脊不平度的检测方法[J].红外与激光工程,2013,42(1):228-232.

[10] Guo He, Wang Jianzhao, Luo Changzhou. Influence of prism with large-angle tilt on aiming accuracy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 138-142. (in Chinese)
郭贺,王建钊,罗长洲.棱脊大角度倾斜下的瞄准误差分析[J].红外与激光工程,2011,40(1):138-142.