

文章编号: 1001-3806(2003)06-0563-04

激光动态高速打孔系统的研究

王晓东 赵学民 汪盛烈 何云贵 杨海
(华中科技大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 介绍了一种用于连续生产线的新型激光动态打孔系统, 它特别适用于薄型材料上的群孔加工。对应于此系统的动态跟踪、辨向方法和双振镜系统校正等关键技术作出分析和实践研究。

关键词: 激光打孔; 动态跟踪; 双振镜扫描; 辨向方法

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

The study on dynamic and high speed laser drilling system

Wang Xiaodong, Zhao Xuemin, Wang Shenglie, He Yungui, Yang Hai
(Institute of Laser Technology and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: In this paper, a new dynamic and high speed laser drilling system equipped on product line is presented, which is especially fit for thin material's drilling. Moreover some related key technology such as dynamic track, method of distinguishing direction and distortion correction for dual galvanometer scanning has been discussed.

Key words: laser drilling; dynamic track; dual galvanometer scanning; distinguishing direction

引言

随着工业激光技术与自动控制技术的发展, 激光作为一种加工手段, 已被广泛应用于切割、焊接、标记、打孔、微处理等工业领域。激光打孔是其中重要而有效的加工方法之一, 它对某些特殊材料, 诸如多层陶瓷基片、半导体 SOS 基片、多层印刷线路板、复合材料以及其它高硬度、高熔点、易碎材料的小孔, 可达到普通工艺难以实现的要求。对于金属等较厚、难以快速穿孔的材料, 一般为静止打孔, 即被打孔材料在激光作用时保持静止。对于如香烟水松纸等薄型材料^[1], 多采用转镜脉冲动态打孔, 实现了在被打孔材料连续运动中打孔。然而, 其打孔大小和疏密不易调整, 当要求孔数较多时, 转镜系统显得过于复杂。

作者介绍了一种用于连续生产线的新型激光打孔系统, 采用加入动态跟踪技术的高速振镜扫描打孔方法, 解决了动态打孔时孔的跟踪定位问题, 定位精度 0.1mm, 可灵活控制孔的数目、疏密和排列图样, 特别适用于厚度小于 1mm 的薄型材料上的群孔加工。先对动态跟踪技术、辨向方法和双振镜系统

校正等关键问题作出分析, 再简要介绍系统构成, 最后依据实验结果进行总结。

1 控制原理研究

1.1 动态跟踪

动态跟踪打孔是指在被打孔材料连续运动(匀速或变速)时, 激光束跟随材料运动同步移动, 保证群孔孔形、疏密一致, 行列整齐。为达到动态跟踪效果, 必须能实时、精确获得材料运动产生的位移。目前成熟的位移检测设备多种多样, 为直接获得数字信号输出, 采用光电脉冲盘式传感器^[2], 其由光源、转盘、光电元件等组成。它可将位移转变为电脉冲, 通过对电脉冲的计数, 得到数字输出量。

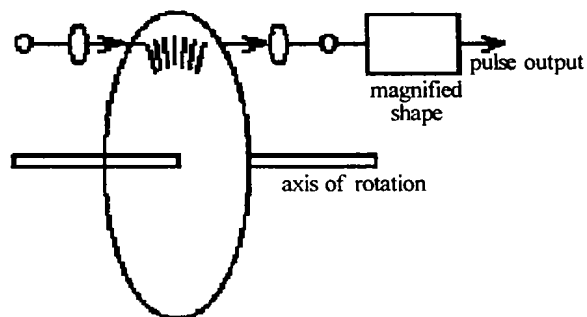


Fig. 1 Structure of encoder

如图 1 所示, 在转动圆盘边缘上等角距地开一些孔, 光源发出的光经圆盘的孔透过, 被光电元件接收。当盘转动时, 光源发出的光经圆盘遮挡交替地

作者简介: 王晓东, 男, 1977 年 11 月出生。硕士研究生。主要从事射频 CO₂ 激光器及其应用研究。

收稿日期: 2002-12-13; 收到修改稿日期: 2003-03-24

照射到光电元件上,经放大整形后得到脉冲序列输出。计数电路记录脉冲个数,就可测得转角大小,由连接轴直径即可换算为位移偏移量。

生产线连续运动时,计数电路将位移传感器产生的位移脉冲进行累加,控制计算机通过并行口定时获取位移累加值,折算成偏移量后实施于光束偏转系统。偏移量可用以下公式表示:

$$l = \frac{(m_2 - m_1) \cdot L}{(m_2 + x - m_1) \cdot L} \quad \begin{matrix} (m_2 > m_1) \\ (m_2 < m_1) \end{matrix} \quad (1)$$

式中, m_2 表示计算机本次获取的脉冲数值, m_1 表示计算机上次获取的脉冲数值, x 表示记数电路最大记数值, L 表示每脉冲代表的生产线位移长度。

在每次打孔前,控制计算机按设定的图样参数(孔的个数、间隔)计算出用于控制光束偏转系统的静态位置坐标集 $\{(x_{n_0}, y_{n_0})\}$, 当被打孔材料静止时,按 $\{(x_{n_0}, y_{n_0})\}$ 输出将得到要求图样。当被打孔材料连续运动时,必须实时加入动态补偿量。加入动态补偿后的光束偏转系统控制坐标 (x_n, y_n) 可表示为:

$$\begin{cases} x_n = x_{n_0} \\ y_n = y_{n_0} + \frac{m}{m=1} \cdot n \end{cases} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中, x_{n_0} 表示垂直于生产线运动方向第 n 个坐标位置, y_{n_0} 表示补偿前沿生产线运动方向第 n 个坐标位置, m 表示实际坐标与光束偏转系统控制坐标的转换系数。

1.2 辨向方法

在某些生产条件下,还要求系统能自动判别生产线运动方向。为解决这一问题,可再加装一套发光二极管-光敏元件系统,两光敏元件相隔半个通光槽宽,即空间相差 90 电角度。光敏元件的输出信号首先被送到辨向电路进行处理,然后送到可逆计数器。辨向电路框图如图 2 所示,其各点电压波形如图 3 所示。

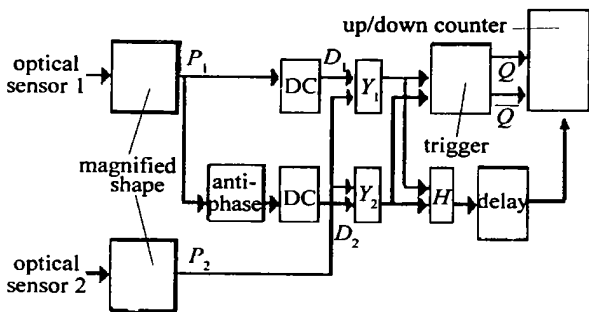


Fig. 2 Logic electrocircuit diagram of distinguishing direction

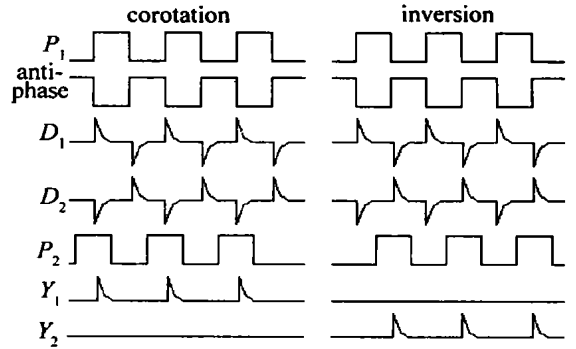


Fig. 3 Waveform of distinguishing direction

可逆计数器的加减由辨向电路控制。正转时,与门 Y_1 输出脉冲使可逆计数器置为加运算,这时每接收到 1 个电脉冲,计数器就加 1。反转时,与门 Y_2 输出脉冲使可逆计数器置为减运算,这时每接收到 1 个电脉冲,计数器就减 1。这样就实现了辨向功能。

以上仅分析了单一运动方向的位移跟踪,对于在 $x-y$ 平面中的多方向运动,可采用由转动轨迹球带动两个相互垂直、分别对应于 x 轴、 y 轴的位移传感器,将 x 轴、 y 轴的位移信号合并就可得到实际运动方向和距离。由于其数据处理方法和控制与单向相同,在此不做赘述。

1.3 双振镜扫描系统校正

本文中采用物镜前双振镜光束扫描系统,其结构如图 4 所示。 x, y 构成扫描平面,振镜 b 的转轴与坐标轴 x 平行,振镜 a 的转轴垂直于 $x-y$ 平面。设光线经振落在 $x-y$ 平面原点时振镜 a, b 所处位置为起始位置,图中振镜 a, b 分别从起始位置绕轴偏转了 α, β 角弧度,聚焦镜 c 是焦距为 f 的 f 透镜,且平行于 $x-y$ 平面。

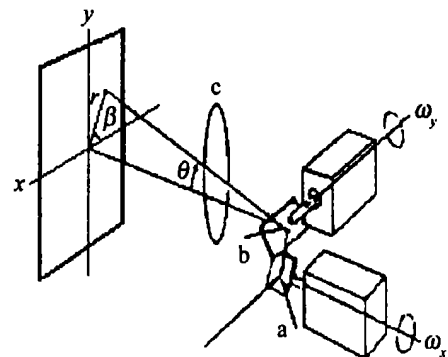


Fig. 4 Two galvanometer scanners system

每个振镜由伺服电机和固定在伺服电机转轴上的反射镜组成,反射镜平面与伺服电机转轴平行。数模转换电路将计算机控制信号转换成两路模拟信号,分别控制两伺服电机带动反射镜偏转,从而控制光束落在 $x-y$ 平面上的位置。

采用双振镜扫描系统后,由于像点坐标与振镜摆角呈非线性关系(仅当 x, y 至少有一个为 0 时呈线性)、入瞳漂移、 f 特性误差等因素的影响,使该系统存在固有的几何畸变。在这些影响因素中,后两者属于光学器件所固有的误差,难以对其进行完全的校正,而前者则是由于将像点坐标控制等效为振镜摆角控制这一处理上引起的畸变,可以采用硬件电路或软件方法进行校正。在该系统中,采用软件校正方法,几何方法计算得到^[3]: $\cos^2 = \cos^2 x \cos^2 y, r = f \cdot = f \cos^{-1}(\cos^2 x \cos^2 y), \tan = \cos^2 x \sin^2 y / \sin^2 x$ 。其中, θ 为出射光线与聚焦镜 c 轴线的夹角; r 为落在 $x-y$ 平面上光点与原点的距离; α 为落在 $x-y$ 平面上光点对 x 轴的角坐标。则扫描场上每一点坐标可表示为:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \alpha = f \cdot \sin^2 \alpha \cos^{-1}(\cos^2 x \cos^2 y) \times \\ (1 - \cos^2 x \cos^2 y)^{-1/2} \\ y = r \cdot \sin \alpha = f \cdot \sin^2 \alpha \cos^2 x \cos^{-1}(\cos^2 x \times \\ \cos^2 y) (1 - \cos^2 x \cos^2 y)^{-1/2} \end{cases} \quad (3)$$

定义畸变量: $x = x - x_0; y = y - y_0$ (4)

式中, x, y 由(3)式给出, x_0, y_0 分别对应于 $y = 0, x = 0$ 时的 x, y 值,易得 $x_0 = 2f x, y_0 = 2f y$,将 x_0, y_0 及(3)式代入(4)式中得:

$$\begin{cases} x = f \cdot \sin^2 \alpha \cos^{-1}(\cos^2 x \cos^2 y) \times \\ (1 - \cos^2 x \cos^2 y)^{-1/2} - 2f x \\ y = f \cdot \sin^2 \alpha \cos^2 x \cos^{-1}(\cos^2 x \cos^2 y) \times \\ (1 - \cos^2 x \cos^2 y)^{-1/2} - 2f y \end{cases} \quad (5)$$

令 $x = x_n, y = y_n$, 为振镜控制坐标转换为振镜轴偏转角度的转换系数,综合(2)式、(4)式和(5)式,得到加入位移校正和双振镜畸变校正后的最终校正公式为:

$$\begin{cases} x_n = x_n + f \cdot \sin^2 \alpha \cos^{-1}(\cos^2 x_n \cos^2 y_n) \times \\ (1 - \cos^2 x_n \cos^2 y_n)^{-1/2} - 2f x_n \\ y_n = y_n + f \cdot \sin^2 \alpha \cos^2 x_n \cos^{-1}(\cos^2 x_n \times \\ \cos^2 y_n) (1 - \cos^2 x_n \cos^2 y_n)^{-1/2} - \\ 2f y_n \end{cases} \quad (6)$$

式中, x_n, y_n 由(2)式给出。将上式化简后用于振镜动态打孔,很好地消除了枕形和桶形失真现象(效果比较可参见第 3 节)。

2 系统构成

2.1 系统框图

作者所述激光打孔系统包括激光器(它是整个加工系统的核心)、光路系统、振镜系统、控制电路和其它辅助装置,系统框图如 5 所示。

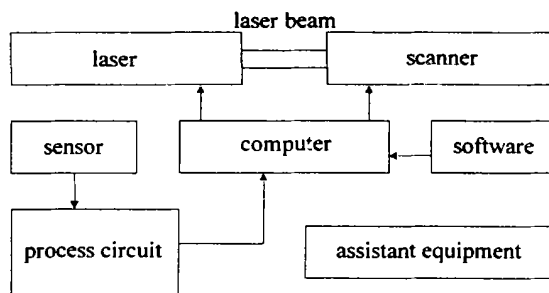


Fig. 5 Laser drilling system chart

激光器产生的激光束由扫描振镜实施偏转,用来定位打孔。激光器的开关和扫描振镜的偏转方向均由计算机按程序指令控制。信号处理电路位移传感信号,判断方向并计算位移,将结果提供给控制计算机。外部辅助系统包括激光器冷却系统、烟尘排放系统和安全报警系统。

2.2 系统软件流程图

系统软件流程图如图 6 所示。软件系统按照预先设定的参数,计算出静态位置坐标,由获取到的位移脉冲数对静态位置坐标进行校正,并在输出前进行双振镜校正,校正过程随位移变化实时进行,直到本次任务终止。另外,软件系统还提供激光器温度报警,打孔区域温度报警和各外部设备的运行状态控制、监测等功能模块,在框图中没有给出。

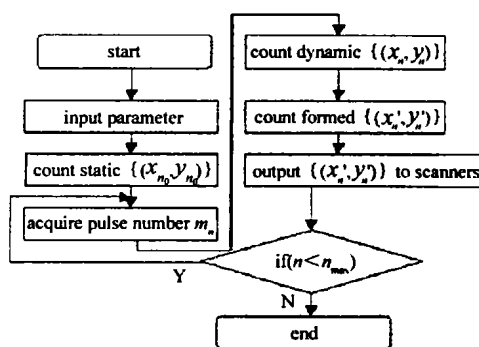


Fig. 6 Flow process diagram of control software

2.3 讨论

影响激光动态打孔质量的因素很多,首先,不同波长激光适合于不同材料的打孔。对于中低功率激光(数百瓦以下)而言,通常 CO_2 气体激光器产生的 $10.6\mu\text{m}$ 波长激光束聚焦后可用于木材、陶瓷、高分子有机材料等非金属材料打孔, NdYAG 激光器产生的 $1.06\mu\text{m}$ 波长激光束聚焦后用于金属材料打孔。

另外,打孔厚度由激光高斯光束的瑞利区域所

决定,瑞利区域在工业界称作焦深(depth of focus, DOF),其物理表达式为^[41]:

$$H_{\text{DOF}} = 16 (f/D)^2 / \lambda \quad (7)$$

式中, λ 为波长, f 和 D 分别为会聚透镜的焦距和直径。焦深给出的是切割厚度的上限。若选用CO₂激光器, f 透镜焦距200mm,直径40mm,则计算得 $H_{\text{DOF}} = 1.35\text{mm}$ 。

最后讨论一下打孔速度的影响因素。若打孔图样为行列整齐的矩阵,将垂直于材料运动方向定义为行,则打孔的行间距由下式决定:

$$L = v \cdot (t_1 \cdot n + t_2) \quad (8)$$

式中, t_1 为打一个孔的激光作用时间, n 为每行孔数, t_2 为光束偏转机构的空走时间, v 为材料运动速度。由上式可见,为提高材料的运动速度,并要求群孔疏密不变(行间距 L 不变,每行孔数 n 不变),必须减小打一个孔的激光作用时间 t_1 和光束偏转机构的空走时间 t_2 ,为减小 t_1 必须增加激光功率,为减小 t_2 必须选择高速偏转机构。

3 实验结果比较

图7是在厚度为0.5mm的化纤织物上进行打孔实验的效果图。图7a显示了在被打孔材料沿图示箭头方向以6m/min左右的速度运动,激光未做任何补偿,输出5×4点阵时的效果图。由图可明显看出,原本四方的点阵由于被打孔材料速度的影响被“拉成”了菱形,且每一孔还出现了孔形拉长现象;图7b是静态情况下的打孔效果图,激光输出5×5点阵,没有进行双振镜扫描校正,可明显看出存在桶形和枕形失真。图7c则是在速度6m/min左

右的动态情况下,将动态跟踪校正和双振镜扫描校正共同作用于激光输出,得到了预定义图样的正确输出。孔形无拉长现象,孔大小、疏密一致,行列均匀,达到了预想的目的。由以上实验图示可看出,动态跟踪校正和双振镜扫描校正正在打孔算法中起到重要作用,动态跟踪校正和双振镜扫描校正的精确与否直接影响打孔效果。

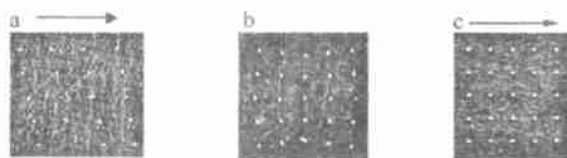


Fig. 7 a—the result without any correction in dynamic state b—the result without correction for dual galvanometer scanning in static state c—the result with correction for dual galvanometer scanning and dynamic track in dynamic state

4 结论

在理论分析的基础上对基于振镜的高速动态打孔方法进行了研究,实现了很好的动态打孔效果。所述打孔系统可适应连续生产线生产的需要,打孔速度快,打孔图样调整灵活,能广泛应用于薄型材料透气孔、透光孔、通风孔的加工。该系统已成功应用于某著名企业,并长期可靠运行。对动态跟踪和双振镜校正方法的研究也为进一步实现动态精确切割和标刻等相关加工领域打下了基础。

参考文献

- [1] 周卓尤,陈培锋.薄型材料高速激光打孔方法.中国专利:CN1327897A,2001-12-26.
- [2] 周予为主编.自动检测技术.武汉:华中理工大学出版社,1996:60~63.
- [3] 虞孝舜.激光与红外,1998,28(2):45~47.
- [4] 黄开金,谢长生.激光与光电子学进展,1998,35(4):1~4.

(上接第553页)

5 小结

已有的理论和实验表明,薄片圆盘薄片激光器是二极管泵浦固体激光器向高功率发展的一个很有潜力的技术方案,可有效地实现能量、功率的定标放大并保持良好光束质量和高效率。在国际上,已研制成功了千瓦级的圆盘固体激光器。我国清华大学、上海光机所和中国工程物理研究院应用电子学研究所等多个单位也开展了圆盘固体激光器的研究工作,但与国外水平相比,尚有差距。对实用化高功率圆盘固体激光器二极管泵浦技术方案和系统冷

却技术,热效应和降低热效应影响的措施,以及放大自发辐射对光束质量的影响和抑制等问题应做进一步的研究。

参考文献

- [1] Karsten C,Uwe B,Adolf G *et al.* SPIE,2986:2~9.
- [2] Gesen A,Hügel H,Voss A *et al.* Appl Phys,1994,B58:365~372.
- [3] Hügel H. Optics and Lasers in Engineering,2000,34(4~6):213~229.
- [4] Hönninger C,Johannsen I,Möser M *et al.* Appl Phys,1997,B65:423~426.
- [5] Gesen A. CLEO-Technical Digest,2001,1:1548~1549.
- [6] Stewen C,Contag K,Larionov M *et al.* IEEE J S T Q E,2000,6(4):650~657.