

文章编号: 1001-3806(2009)04-0369-05

动光式激光切割无缝拼接技术的研究与应用

王平江, 吴浩, 陈吉红, 唐小琦

(华中科技大学 国家数控系统工程技术研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了提高动光式激光切割振镜加工网格之间的拼接精度, 首先采用线性插值方法, 补偿激光光点在不同区域内两轴的区域系数, 再利用射影变换建立任意两个平面之间点的射影变换矩阵, 以补偿双振镜的梯形以及菱形畸变, 通过上述补偿保证整个扫描场中所有的坐标都符合一个线性的比例关系。将该方法应用于柔性印制电路板的切割, 得到的切割精度和效率远高于普通的定光式切割。结果表明, 通过以上方法的补偿后, 激光切割系统的网格之间拼接精度大幅度提升, 达到国外最新同类系统的精度与效率, 具有广阔的应用前景。

关键词: 激光技术; 动光式激光切割; 无缝拼接; 振镜畸变; 区域补偿; 射影变换; 梯形补偿

中图分类号: TG485 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.010

Research and application of dynamic-optic-type laser cutting and seamless splicing technology

WANG Ping-jiang, WU Hao, CHEN Ji-hong, TANG Xiao-qi

(National Numerical Control System Engineering & Technology Research Center, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study how to improve splicing precision between galvanometer processing grids cut by dynamic-optic-type laser, a seamless splicing method for grids was introduced. Firstly, the area coefficients of laser points for both axes were compensated with linear interpolation. Then projective transformation was applied to establish the projective transformation matrixes of points in two optional planes to compensate trapezium and diamond distortion of dual galvanometers. After the above compensation, all coordinates in the entire scanning filed accord with a certain linear proportion relationship. Applying this method to cut flexible printed circuit board, experimental results showed that cutting precision and efficiency of this system were much higher than ordinary static-optic-type cutting. The splicing precision between grids of laser cutting system is greatly improved up to the precision and efficiency of the latest foreign system of the same kind.

Key words: laser technique; dynamic-optical-type laser cutting; seamless stitching; galvanometer distortion; area compensation; projective transformation; trapezium compensation

引言

激光切割技术是激光加工技术的重要组成部分, 是激光加工行业中一项重要的应用技术。激光切割系统根据激光运动与否可分为定光式和动光式两种^[1]。定光式激光切割系统在工作过程中光路固定, 依靠工作台与激光头之间的相对运动实现对工件的加工, 以传统的灯抽运 Nd:YAG 定光式激光切割系统为典型代表。这种定光式系统的切割速度主要取决于工作台的运动速度, 但由于受工作台本身的运动速度限制, 其加工速度不可能太高, 其速度最快也就 200mm/s。这种

定光式结构主要优点是成本较低、无网格块之间的拼接符合无缝拼接的苛刻要求, 适用于小批量、零散加工, 以及对速度和效率要求不高的场合。动光式激光切割系统依靠受计算机控制的两个振镜实现激光的 2 维高速扫描, 从而完成高速切割加工。振镜扫描速度比工作台的移动速度快得多, 一般可以达到 1000mm/s 以上, 所以, 这种方式的加工效率比定光式高得多, 其应用前景远大于定光式。但是受动光式激光切割加工幅面的限制, 必须将待加工对象分割成网格块, 以每一个网格块为单元通过振镜扫描完成切割加工, 然后移动到下一个块。依次逐块进行加工从而完成整个零件的切割加工。由于振镜自身的畸变误差(枕型和桶形畸变), 以及加工过程中网格块的变换, 使得如何处理好各块之间被网格切分的切割轨迹无缝对接技术, 成为实现动光式激光切割中的关键技术。

作者简介: 王平江(1963-), 男, 副教授, 博士, 主要从事机器视觉、数控技术、红外图像处理等方面的研究工作。

E-mail: pj_wang@hust.edu.cn

收稿日期: 2008-07-01; 收到修改稿日期: 2008-09-02

1 动光式激光切割中的问题

该动光式激光切割系统主要应用于电子电路行业柔性印制电路板(flexible printed circuit board, FPCB)样品以及其辅材覆盖膜的切割,当然也可以扩展到其它激光切割领域。FPCB板生产厂家能否拿到订单,取决于其能否在最短的时间内提供样品给客户,而专门为1张FPCB板做一套冲压模具最短也需要3天的时间,而且价格昂贵。因此,是否拥有高速、高精、高效、价廉的FPCB切割设备,便成为厂家首选。由于定光式切割效率很低,难以满足生产的需求,而动光式主要依靠两个惯量非常小的镜子转动来完成切割扫描,其速度在一个刷新周期(大约为200 μ s)内就可以达到目标速度,加工效率很高。由于振镜切割范围(一般为40mm \times 40mm)的限制,需要将待切割的全图分割成如图1所示的很多块。动光式激光切割依靠工作台和双振镜的协调运动来完成切割,工作台以Zig-Zag的运动方式,依次完成各块之间的位置移动,到位后由振镜运动实现该块的切割。

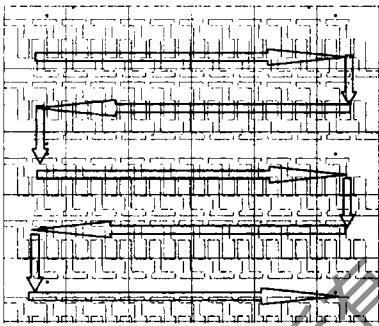


Fig. 1 Grid partition

动光式激光切割过程中产生误差的因素很多,主要包括以下几个方面^[2-3]:(1)由于光路的原因,激光振镜扫描方式存在着固有的扫描场的几何畸变,表现为 x 方向上的枕形失真和 y 方向上的桶形失真,而且这两种失真都呈非线性;(2)一般的D/A线性失真、振镜输入与输出之间的非线性失真以及平面场上成像光束的焦点失真;(3)机械装置以及控制器本身带来的误差,主要表现为梯形及菱形失真。激光扫描加工误差并不是单一原因引起的,而是多种因素共同作用的结果。当扫描场较大时,这些误差极大地影响到加工质量,如圆度、直线度误差,尤其是相邻网格拼接处的开裂、断头等。而FPCB板上的金手指对切割精度的要求相当高,因此,必须采用一定的技术,补偿上述几种误差。

2 无缝拼接的关键技术

2.1 振镜畸变补偿

如图2所示,振镜式扫描系统由 x, y 轴伺服系统

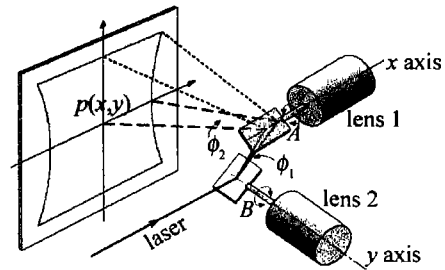


Fig. 2 Schematic diagram of 2-D lens scan

和 x, y 两轴全反射振镜1、振镜2组成。当向 x, y 轴伺服系统发出指令信号, x, y 轴振镜就能分别绕 A 轴和 B 轴做出快速、精确偏转。根据待扫描切割图形的轮廓要求,在计算机指令的控制下,通过两个振镜镜片的配合运动,控制投射到工作台面上的激光束在 $x-y$ 平面进行快速扫描,而实现激光切割。

激光束以一定入射角照射到振镜2上,经振镜2反射到振镜1上,然后经过振镜1反射,投射到工作台面上的某一点 $p(x, y)$ 。设 ω_x 为 x 轴反射镜的偏转角, ω_y 为 y 轴反射镜的偏转角。当 ω_x, ω_y 均为0时,光斑打在工作平面的点称之为振镜的原点。当光斑打在工作平面上的任意一点 $p(x, y)$ 时,所对应的 x, y 轴振镜转角分别为 ω_x 和 ω_y 。

理想坐标系到实际坐标系映射关系的非线性,是双振镜激光扫描加工产生误差的最直接、最主要原因。经分析扫描加工平面任意点 $p(x, y)$ 的坐标为^[4-5]:

$$\begin{cases} x = f \times \sin(2\omega_x) \times \cos^{-1}[\cos(2\omega_x) \times \cos(2\omega_y)] \times \\ [1 - \cos^2(2\omega_x) \cos^2(2\omega_y)]^{-1/2} \\ y = f \times \sin(2\omega_y) \times \cos(2\omega_x) \cos^{-1}[\cos(2\omega_x) \times \\ \cos(2\omega_y)] [1 - \cos^2(2\omega_x) \times \cos^2(2\omega_y)]^{-1/2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 为聚焦镜焦距, ω_x, ω_y 为振镜转动角度。

将(1)式按泰勒级数展开,经过数学处理后得到近似的公式为:

$$\begin{cases} x = f \times (2\omega_y) + C_1 \times \omega_y \times \omega_x^2 \\ y = f \times (2\omega_x) + C_2 \times \omega_x^2 \times \omega_y \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_1, C_2 为正常数。当 ω_x, ω_y 分别为0时扫描在两个轴上有失真。其对应的坐标值为 x_0, y_0 :

$$\begin{cases} x_0 = f \times 2\omega_y \\ y_0 = f \times 2\omega_x \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_0, y_0 分别为 ω_x, ω_y 为0时的坐标值。将(3)式带入(2)式中得:

$$\begin{cases} x = y_0 + a y_0 x_0^2 \\ y = x_0 - b y_0^2 x_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $a = C_1 / (4f^2), b = C_2 / (4f^2)$, (4)式为振镜畸变校正的依据。

这种双振镜扫描方式的主要缺点,是在其双轴平面场扫描时存在固有误差,包括枕形失真、桶形失真和成像光束的焦点误差^[6]。通过在双振镜扫描系统后增加一个 $F-\theta$ 物镜,可以对焦点误差进行适当校正,使得激光束在一定范围内能够聚焦在同一焦平面上;但 $F-\theta$ 物镜无法实现对枕形失真和桶形失真的校正。直接根据(1)式振镜扫描原理,亦可得到的振镜畸变校正,但这种算法的不足之处在于其含有较多的三角函数,要花费大量的计算时间,使得加工效率显著降低,因此,需要找到一种简单快速的振镜畸变校正算法。解决振镜的枕形失真和桶形失真问题,可以采用硬件校正或者软件校正的方法,鉴于硬件校正成本高,而且参量调整不方便,文中采用软件校正。图3所示为振镜畸变的软件校正流程图,软件校正经济、精确而且参量调整容易,实现起来很方便。图4a和4b所示为振镜的软件畸变校正结果,校正后的效果很明显。

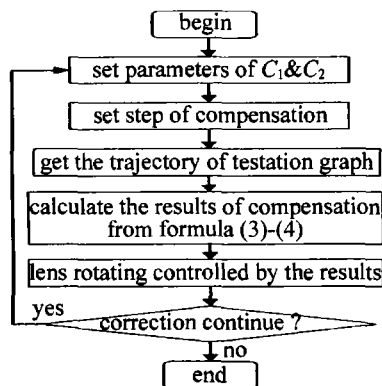


Fig. 3 Flow chart of calibration test of lens distortion

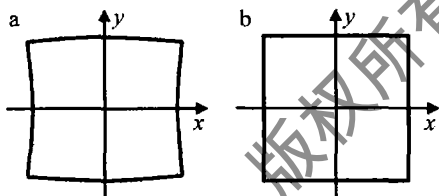


Fig. 4 Contrast of lens distortion before and after calibration
a—square before calibration b—square after calibration

2.2 振镜区域失真的线性插值补偿

首先振镜在加工过程中当接受到计算机发出的 x, y 轴的控制指令后^[6-7],首先要将数字信号转换为振镜加工需要的模拟信号,振镜伺服系统将输入的模拟信号驱动振镜自身输出角度。理论上,输入的模拟信号和输出的角度是呈线性关系,实际上振镜很难保证其输入输出的线性关系,在一些对精度要求不是很高的场合,可以将其近视地看成线性关系。由于本系统对拼接精度要求很高,所以必须考虑其非线性并加以补偿。其次由于振镜扫描系统两轴的光路长度不一样,以及驱动板电路的电子元件的差异,将导致两轴的比例失真不一样,因此也需要分别给予补偿。由于两

轴的扫描原理是一样的,所以补偿的方法相同。最后需要说明的是在(1)式到(2)式的简化过程中,采用了 $\tan\theta \approx \theta$,当 θ 越大时误差越大。综合考虑以上原因,文中提出振镜的区域系数概念:即在不同的加工范围内, x, y 两轴分别使用不同的线形失真系数来补偿由于以上原因造成的非线性失真,最终的目的是要保证整个扫描场中所有的坐标都符合一个线性的比例关系。

作者采用线性插值,分别拟合不同区域内振镜 x 轴和 y 轴的区域系数,用户可以根据扫描场的大小、精度要求来设置插值的步长。本系统所使用的振镜加工范围为 $40\text{mm} \times 40\text{mm}$,在 x 轴上将此范围分成 N 份,每一点的坐标为 $(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$ 。测得每一点在两轴上的线性系数(斜率)是 K_1, K_2, \dots, K_n (测量方法见下面实验方案),那么求任一给点 x 在 $i, i+1$ 之间上 x 方向上的区域系数,其插值公式为:

$$\frac{x_{i+1} - x_i}{x - x_i} = \frac{K_{i+1} - K_i}{K_x - K_i} \quad (5)$$

由(5)式求得:

$$K_x = \frac{(K_{i+1} - K_i)(x - x_i)}{x_{i+1} - x_i} + K_i \quad (6)$$

根据实际情况一般 N 取 8 时的精度就已经比较高了,对本系统而言分别测试边长为 $5\text{mm}, 10\text{mm}, 35\text{mm}, 40\text{mm}$ 正方形的 x, y 方向的失真系数,即可以满足实际要求。切割系统在切割过程中会根据(6)式动态地获取区域系数,然后控制振镜输出。如何测得区域系数 K_i ,在下面实验方案中再详述。

2.3 梯形及菱形误差的补偿

梯形及菱形畸变产生的原因^[8-10]:主要包括振镜驱动器速度的非线性引起的扫描的非线性、连接轴承的动态不平衡等,机械装置以及控制器本身带来的误差。理论上激光经过透镜聚焦后出射的光是垂直于工作台平面的,但是由于镜头安装在悬臂梁上,振镜头的主光轴与工作台面不一定垂直,使得射出的激光有一定角度的偏转,当要扫描一个正方形时,在工作台面平面上振镜扫描得到的是一个梯形或者菱形。这样必然造成相邻图形的错位,降低拼接精度。因此必须加以校正。校正的基本思想为:通过给原畸变量添加一个人为控制的反方向上的畸变量,达到控制振镜相对原输出轨迹多偏转或少偏转一定角度量,从而达到校正的目的。校正通过 2 维空间射影变换来实现。具体实现如下: N 维射影空间的点变换若满足 $\rho y = Mx$,则称其为射影变换,其中, ρ 为标量, x 与 y 分别为变换前、后空间点的齐次坐标, $x = (x_1, x_2, \dots, x_{n+1})^T, y = (y_1, y_2, \dots, y_{n+1})^T, M$ 为满秩的矩阵。

以 2 维射影变换为例写出上述变换:

$$\rho \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由(7)式得:

$$y_1' = \frac{m_{11}x_1 + m_{12}x_2 + m_{13}x_3}{m_{31}x_1 + m_{32}x_2 + m_{33}x_3} \quad (8)$$

$$y_2' = \frac{m_{21}x_1 + m_{22}x_2 + m_{23}x_3}{m_{31}x_1 + m_{32}x_2 + m_{33}x_3} \quad (9)$$

上式中可以改变矩阵 M 的值,使 $m_{33} = 1$,因此平面射影有 8 个独立的参量。由(7)式可知,仿射变换为射影变换的一个特例。射影变换可以比仿射变换描述的变换方式更多。

由上文可知,2 维射影变换实际上只有 8 个自由度。如果两个平面之间有 4 对对应点(任何 3 点都不共线) $(x_i, y_i), (x_i', y_i')$,其中 $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。每一对对应点提供两个限制条件,则这 8 个点可以确定唯一的一个射影变换矩阵 M 。具体的步骤如下。

将上述 4 个点带入(8)式和(9)式,得到 8 个相似的关于矩阵 M 中元素的线性方程:

$$\begin{cases} x_i' = \frac{m_{11}x_i + m_{12}y_i + m_{13}}{m_{31}x_i + m_{32}y_i + 1} \\ y_i' = \frac{m_{21}x_i + m_{22}y_i + m_{23}}{m_{31}x_i + m_{32}y_i + 1} \end{cases}, (i \in \{1, 2, 3, 4\}) \quad (10)$$

因为任意 3 点都不共线,所以上述矩阵是满秩的,这个方程组可以直接求解,从而可以求得矩阵 M 的各个元素。这样,就唯一的确定了从 (x_i, y_i) 到 (x_i', y_i') 的射影变换式。

依照上述原理,任意给定两个平面上的 4 个点,只要知道它们在 2 个平面上的坐标值,就可以建立这两个平面之间的射影变换矩阵。

根据平面射影矩阵和补偿基本思想,可以把原始图形做一个变换来补偿由于以上原因产生的梯形和菱形畸变。图 5 所示实线表示要加工的图形,实线表示畸变后的图形,虚线表示反畸变补偿后的图形。下面

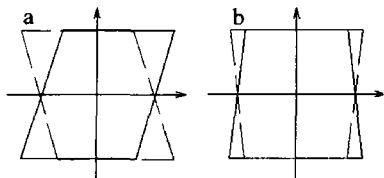


Fig. 5 Contrast between trapezium and rhombic compensation

以梯形为例介绍补偿过程,如图 6b 所示为振镜扫描的理论形状(为正方形)。由于梯形误差,实际上扫描出来的图形为图 6a 所示。图 6b 中正方形的 4 个顶点 1, 2, 3, 4 与图 6a 梯形中的 4 个顶点 1', 2', 3', 4' 一一对应。可以利用射影变换将图 6a 中的梯畸变形,校正为图 6b 中的正方形。由图 6c 和图 6b 来建立,只要将

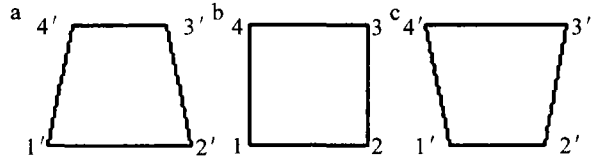


Fig. 6 Schematic diagram of trapezium compensation

a—theoretical output value of lens b—practical output value of lens c—output value of lens after calibration

图 6c 中 1', 2', 3', 4' 点绕其对称轴相两边拉伸或者收缩即可。可以将图 6c 和图 6b 中 2 个 4 边形的 4 个顶点对应,然后带入(10)式中来求得射影变换矩阵,平面内的任意点均可通过该变换获得,这样再控制振镜输出之前将所有加工对象先离散成微小直线段,然后将所有微小直线段的端点经过射影变换后再输出即可。

3 综合误差补偿实验方案

激光扫描加工误差并不是单一原因引起的,而是多种因素共同作用的结果。因此,设计一种简便、高效的实验方法来测试补偿畸变与区域放大系数的效果对本系统至关重要,该方法不仅要反映出是哪一方面的因素造成拼接质量不好,而且还要能够比较精确地测量出系数的值。系统在振镜加工补偿过程中首先需要补偿畸变;其次就是根据 x, y 方向上的区域系数插值补偿,根据第 2.2 节知道,需要测得振镜在几个特定点出的 x, y 方向的 K_i 值,图 7 为测量过程中可能出现的情况和如何修改相关参量;最后就是补偿梯形和菱形,根据第 2.3 节中提出来的梯形菱形补偿思想和实际情况,获取参量确定相关变换矩阵。

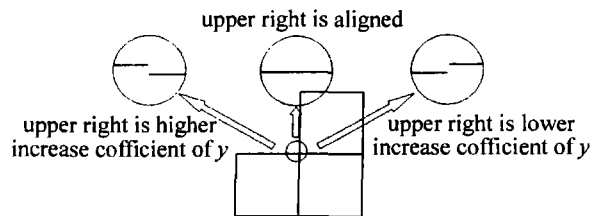


Fig. 7 Influence of area index on stitching at x direction and adjustment measures

如图 6、图 7 所示,综合考虑各方面有可能对系统精度产生影响的因素,本文中设计了 3 矩形拼接的测试方案。100mm × 100mm 的壁厚 0.1mm ~ 0.3mm 的金属薄片若干张,将薄片平铺固定在工作台适当位置。(1)激光不动,振镜划 1 个 40mm × 40mm 的方形;(2)待振镜停稳后,工作台沿 x 方向走 40mm;(3)工作台停稳后,用振镜划一个 40mm × 40mm 的方形;(4)工作台在 y 方向上走 40mm,用振镜划一个同样尺寸的方形;(5)在高倍放大镜下观察 3 个正方形之间的连接情况,如果出现图 6 或图 7 的现象,按照图 6、图 7 中的提示,改变相应补偿系数,返回到步骤(1);(6)3 个正方形之间无分离,角点之间无间隙,满足切割要求,停

止测试。

如图8所示,用一个160mm×160mm的正方形,按45°交叉线形成网格进行切割试验(此时激光器的输出能量很小,只是将白纸烧焦),来测试补偿前后的综合效果。图8a为补偿前的切割效果,可以观察到各块之间的拼接处有明显的重叠、错位现象,而采用本文中所述的补偿措施后,同样的图形切割的效果如图8b所示,各个块之间已无明显的重叠、错位,在高倍显微镜下观察,估计误差为5μm左右,满足FPCB板的切割工艺要求。

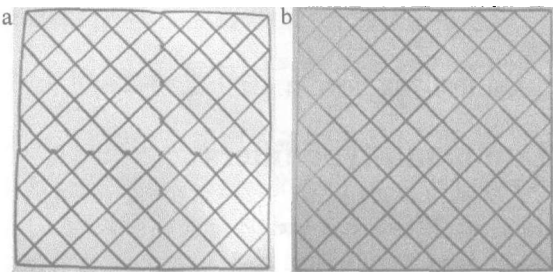


Fig. 8 Contrast of results after stitching compensation
a—shape before compensation b—shape after compensation

4 结论

网格切缝的拼接是动光式激光切割的关键所在,在振镜畸变矫正的基础之上,作者通过线性插值和射影变换方法来分别补偿振镜的区域系数、梯形以及菱形畸变,并设计了一种简单、有效的方案来测试补偿的效果,并将该方法应用到激光振镜切割系统中,极大地提高了激光切割的效率。本机与传统定光式激光切割

机相比,平均效率提高了将近8倍,与国外最新切割机的效率基本持平。

参 考 文 献

- [1] JIANG H H. Development and prospect of application of laser cutting technique [J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 2001, 14(4): 1-12 (in Chinese).
 - [2] SUN H L, LIN Sh Zh. Error analysis on dual-lens laser scanning process [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(3): 161-163 (in Chinese).
 - [3] CHEN Zh, LIU X D. Research on fast software calibration arithmetic of laser lens scanning system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2003, 31(5): 68-69 (in Chinese).
 - [4] WANG H Q, SHI Y Sh, HUANG Sh H. Control arithmetic and application of 3-D dynamic focusing laser lens scanning system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2003, 31(5): 70-71 (in Chinese).
 - [5] GUO F, HU B, YING H Sh. Hardware calibration of geometric distortion of dual-lens scan [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 337-341 (in Chinese).
 - [6] LONG Y H, XIONG L C, SHI T L. The quality study on excimer laser-induced electrochemical etching of silicon [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 235-237 (in Chinese).
 - [7] WANG J Zh, SHI T L, XIONG L C. A shortened procedure of micro-electromechanical systems fabrication by means of femtosecond laser [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 88-91 (in Chinese).
 - [8] ZHU L Q. Error analysis and calibration technique of dual-lens 2-D scanning system [J]. *Applied Laser*, 2001, 20(5): 325-327 (in Chinese).
 - [9] WAN Zh, DU W X. Calibration of graphic distortion and compensation of exposure for dual galvanometer scanning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 115-118 (in Chinese).
 - [10] GEDACH K H, JERSCH J, DICHMANN K, et al. Design and performance of an excimer laser based optical system for high precision micro-structuring [J]. *Optics and Laser Technology*, 1997, 29(8): 439.
-
- (上接第368页)
- 相互作用过程中伴有能量的转移,两区间中能量转移方向相反。多个同相屏蔽光伏孤子相互作用时,开始相互融合,然后由排斥相互分开,中间的孤子保持直线传播,两边孤子的能量能量绝大不分都转移到中间孤子上。多个反相孤子之间是相互排斥的,处于中间孤子保持相对稳定的传播方式。利用孤子间相互作用对相位的依赖关系,可通过控制一束光的相位来实现对另一束光的控制,即全光控光,这使得光折变空间孤子及其相互作用在全光通信中有很大的应用前景。
- #### 参 考 文 献
- [1] SINGH S R, CHRISTODOULIDES D N. Evolution of spatial optical solitons in biased photorefractive media under steady state conditions [J]. *Opt Commun*, 1995, 118(5/6): 569-576.
 - [2] CHRISTODOULIDES D N, CARVALHO M I. Bright, dark and gray spatial soliton states in photorefractive media [J]. *J O S A*, 1995, B12(9): 1628-1633.
 - [3] SEGEV M, VALLY G C, BASHAW M C, et al. Photovoltaic spatial solitons [J]. *J O S A*, 1997, B14(7): 1772-1781.
 - [4] JI X M, WANG J L, LIU J S, et al. The temperature dependence of separate spatial soliton pairs in an unbiased series photorefractive crystal circuit [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 102-105 (in Chinese).
 - [5] JI X M, WANG J L, LIU J S, et al. The temperature dependence of incoherently coupled bright-dark screening photovoltaic solution pairs [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 387-389 (in Chinese).
 - [6] HOU C F, LI S Q, LI B, et al. Spatial solitons in photorefractive media [J]. *Progress in Physics*, 2001, 21(2): 237-245 (in Chinese).
 - [7] JIANG D S, OUYANG S G, SHE W L. Interaction of photovoltaic spatial solitons between dark and dark as well as dark and bright [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(11): 3777-3785 (in Chinese).
 - [8] SHIH M F, CHEN Z G, SEGEV M, et al. Incoherent collisions between one-dimensional bright steady-state photorefractive spatial screening solitons [J]. *A P L*, 1996, 69(27): 4151-4153.
 - [9] SHIH M F, SEGEV M. Incoherent collisions between two-dimensional bright steady-state photorefractive spatial screening solitons [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(19): 1538-1540.
 - [10] STEPKEN A, KAISER F, BÉLIC M R, et al. Interaction of incoherent two-dimensional photorefractive solitons [J]. *Phys Rev*, 1998, E58(4): 4112-4115.