

文章编号 1004-924X(2006)02-0236-06

模式搜索法在光纤有源自动对准中的应用

淳 静, 吴宇列, 戴一帆, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院机电工程系, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出基于模式搜索法的光纤有源自动对准算法, 实现了多自由度同时寻优, 解决了不同自由度之间的交叉耦合问题, 提高了对准速度和对准精度。通过仿真与实验研究, 与传统的爬山法进行对比。仿真结果表明, 激光二极管与单模光纤五自由度对准时, 模式搜索法只需 20 次迭代就可以找到最大点, 收敛速度是爬山法的 9 倍。实验结果证明, 横向调整两个自由度对准时, 模式搜索法搜索速度比爬山法平均快 10 s, 定位成功率达到 90%。

关键词: 光纤自动对准; 模式搜索法; 爬山法

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Application of pattern search method to fiber-optic active alignment automation

CHUN Jing, WU Yu-lie, DAI Yi-fan, Li Sheng-yi

(*College of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract: Application of the pattern search method to fiber active alignment automation was developed for adjusting misalignments on multiple axial directions simultaneously. The interaction problem among axes was solved and the potential risk of missing the real peak was avoided, so that the alignment process time was reduced, and the alignment accuracy for locating the optimal fiber-optical coupling position was improved. The comparison of simulation and experimental results between pattern search and hill-climbing method was presented. Simulation results indicate that the convergence of pattern search algorithm is nine times as fast as the hill-climbing method; it converges to the maximum coupling efficiency within 20 iterations for the five degrees of freedom alignment between the laser diode and the single mode fiber. The experimental results also demonstrate that the average time for locating the optimal coupling position in x - y plane using pattern search algorithm is 10 s faster than that of hill-climbing method; and the global convergence of the pattern search algorithm is much better than that of the hill-climbing method.

Key words: fiber-optic alignment automation; pattern search algorithm; hill-climbing method

1 引 言

光纤器件是光纤通信系统的核心,不仅影响通信系统的性能,还对整个系统的成本有极大的影响,光纤器件的封装成本约占其总成本的 70%~90%^[1],但是目前,大多数产品的封装仍然是劳动密集型的组装方式,产量低,质量一致性差,价格居高不下,极大阻碍了光纤通信技术的发展。封装过程的自动化是降低光纤器件制造成本的关键,其中最重要的工序之一是光纤对准。光纤对准可以分为无源对准和有源对准两类。无源对准通过组件的物理定位实现对准,而有源对准是根据实时测量的光信号信息调整组件相对位置来实现对准。由于有源对准能够实现更高的耦合效率,而且根据使用要求的不同,可以有选择性地设定对准精度,因此在光纤器件封装制造中应用更多。有源自动对准的传统控制算法是美国 Newport 公司提出的爬山法^[2-3],这是一维搜索方法,对于需要多个自由度调整的光纤对准问题,通过变量轮换完成多自由度搜索,搜索时间随着自由度数量的增加而增加,而且也因为各个自由度的相互作用而经常导致搜索失败^[4]。日本学者在其申请的美国专利中提出“五点法”用于 $x-y$ 平面的光纤自动对准^[5],实质就是多项式拟合的函数插值方法,这种方法在搜索速度上有提高,但是与爬山法一样,每次只能进行一个自由度的搜索,仍然无法解决多自由度交叉耦合问题。

模式搜索法是从几何意义出发,解无约束最优化问题的直接方法,在测量、稳定性分析等许多领域都得到广泛应用,但在光纤有源器件自动化封装方面尚无报导。而且,与 BP 算法^[6]等使用导数的最优化方法不同,模式搜索法不需要梯度信息,也不像遗传算法那样需进行复杂的种群选择和迭代^[7],因而更适用于光纤器件封装有源自动对准问题,在实际的工程应用中更容易实现。本文将模式搜索法应用到光纤有源自动对准的多自由度寻优,由于其矢量前进的特点,不再是单自由度寻优而是多自由度同时搜索,因此可以解决多自由度交叉耦合的问题。针对半导体激光器封装中激光器芯片与单模光纤的自动对准,进行了仿真与实验研究。结果表明,与爬山法对比,模式搜索法搜索速度更快,算法收敛性更好。

2 光纤自动对准

光纤器件封装中,光源和接收光纤之间对接误差包括垂直于光纤轴的横向错位,平行于光纤轴的纵向间隙以及角度偏差,如图 1 所示。

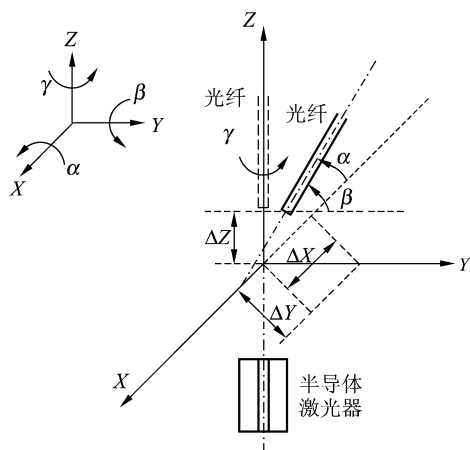


图 1 半导体激光器与光纤耦合六自由度对准
Fig. 1 Six degrees of freedom alignment between a laser diode and a single-mode fiber

这些对准误差尤其是横向错位和角度偏差会极大地降低光源到光纤的耦合效率,从而使器件的性能劣化。光纤自动对准的目的就是在算法控制下实现光源到光纤的亚微米对准,尽量减小甚至消除各种对准误差,保证获得最大耦合效率。

图 2 给出了自行研制的 LD 与 SMF 耦合对接试验系统框图。对接平台是核心组成部分,包括五个自由度的运动: $X, Y, Z, \theta_x, \theta_y$,耦合效率对横向错位最为敏感,所以在 XY 方向叠加了两个小量程高分辨率的柔性铰链微动平台 X_1, Y_1 , 以

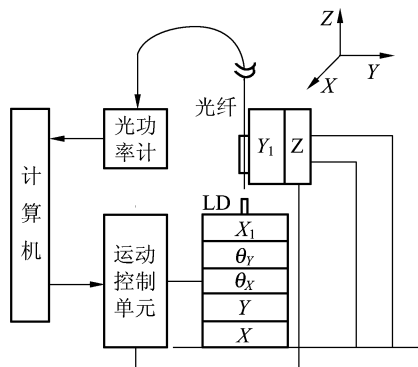


图 2 LD 与 SMF 耦合对接试验系统
Fig. 2 Experimental system for LD-SMF coupling

保证亚微米精密对准,由于对称性,绕轴的旋转对耦合对准没有影响,可以不予考虑。

3 爬山法及其缺陷

美国 Newport 公司提出的爬山法是一维搜索算法,因其方法简单、容易实现而在光纤器件封装制造行业得到广泛应用。但是爬山法在实际应用中也存在一些问题,主要是:

(1) 搜索定位的时间较长。由于爬山法每次只能进行一个自由度的搜索,而光纤对准需要多个自由度的调整,此时,爬山法需要在完成一个自由度的搜索后,再进行下一个自由度的搜索,依次轮流,反复循环,直到达到终止条件,因此比较费时。

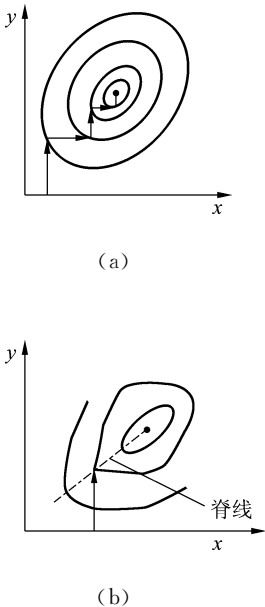


图 3 爬山法的缺陷

Fig. 3 Defects of the hill-climbing method

(2) 可能会陷入局部最大点而无法完成搜索定位。如果用于光纤对准的调整平台各个运动方向不存在交叉耦合,而且光源输出是比较平滑的单峰函数,则使用爬山法一般能搜索到功率耦合的最佳位置,获得光源到光纤的最大耦合效率。但实际上,受平台直线度和垂直度的影响,对准平台各个运动方向不可避免存在交叉耦合,即一个方向的运动可能引起另一个方向的微小变化,同时,平台垂直于光轴的运动方向与半导体激光器输出光斑的长短轴不一定平行,那么,各个自由度

之间总存在一定的相互作用,爬山法通过变量轮换原理完成多自由度搜索无法克服这种影响^[9],很容易陷入局部最大而导致搜索失败。如图 3 所示,图 3(a)中, x 和 y 两个变量存在一定相互作用,则目标函数的等高线接近椭圆并且其长短轴与坐标轴不平行,此时,爬山法在两个自由度之间反复循环,搜索速度很慢,如果这种相互作用很强,如图 3(b),则目标函数等高线出现“脊线”,爬山法就会陷入局部最大点。光纤对准时,实际的目标函数更加不规则,爬山法搜索更容易陷入局部最大点。

4 用于光纤对准的模式搜索法

模式搜索法是由 Hooke 和 Jeeves 于 1961 年提出的,因此又称为 Hooke-Jeeves 方法^[10],与爬山法一样,它不需要目标函数的导数信息,仅通过比较目标函数值的大小来移动迭代点,因此可用于光纤对准问题。与爬山法不同的是,它可以多个自由度同时进行寻优迭代过程,并通过模式移动保证迭代方向始终朝着“山峰”的走向逼近极大点,适合于多自由度搜索。

4.1 基本原理

模式搜索法通过探测移动和模式移动完成对目标函数极大值的搜索,算法实现的关键在于确定基点、沿基点方向的移动以及后退策略。如图 4,以两个自由度的模式搜索为例,初始点 $x^{(1)}$ 为第一个基点,从该基点开始沿 x 和 y 方向进行探测性移动,得到第二个基点 $x^{(2)}$,条件是 $x^{(2)}$ 处的函数值比 $x^{(1)}$ 位置更大,然后,沿着 $x^{(2)} - x^{(1)}$ 的矢量方向向前跨越一步,即进行模式移动,步长是 $x^{(1)}$ 到 $x^{(2)}$ 的距离,随后从模式移动到达的位置 \bar{x}_1 再次开始探测移动,如此迭代,直到基点的函数值开始减小(图 4 中的 $x^{(5)}$),此时,这一次的探测移动和模式移动都是无效的,应该退回到前一基点 $x^{(4)}$,减小步长,重新开始搜索,终止条件是步长达到搜索精度要求或者函数值达到设定的参考目标。可见,算法中,探测移动的作用是确定基点和保证函数值增大的方向,即为寻找“山峰”提供信息,而模式移动则沿着“山峰”走向使函数值增加得更快。由于该算法在 x 和 y 方向同时探测,然后沿着两个基点的矢量方向前进,所以能够克服两个自由度交叉耦合的影响。

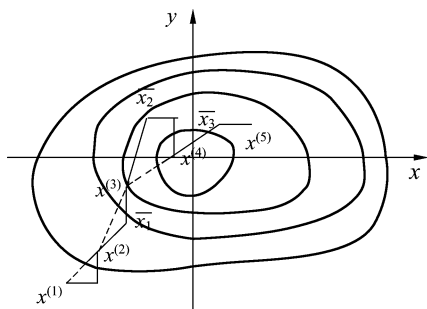


图 4 两个自由度的模式搜索法

Fig. 4 Illustration of the two DOF pattern search method

4.2 仿真分析

为了分析模式搜索法的搜索性能,以半导体激光器(LD)到单模光纤(SMF)的耦合进行仿真分析。

半导体激光器与单模光纤耦合效率计算主要基于高斯光束传播理论,高斯光束近似引入的误差不会超过 1%^[11],而处理比较方便。为简单起见,假定相位完全匹配,并且认为半导体激光器的模场是圆对称的,只考虑横向偏移、角度偏转以及纵向间距引起的耦合损耗,可以得出 LD 到 SMF 耦合效率计算公式。设 ω_0 是 LD 激光束的束腰半径, ω_f 是 SMF 的模场半径, d 表示横向错位, θ 表示角度偏移,单位是弧度, z 为光斑束腰位置到耦合端面的距离,经过距离 z 的传播,

$$\omega_0^2(z) = \omega_0^2 [1 + (\lambda z / \pi \omega_0^2)^2], \quad (1)$$

总的耦合效率:

$$\eta = \eta_x \eta_y, \quad (2)$$

而

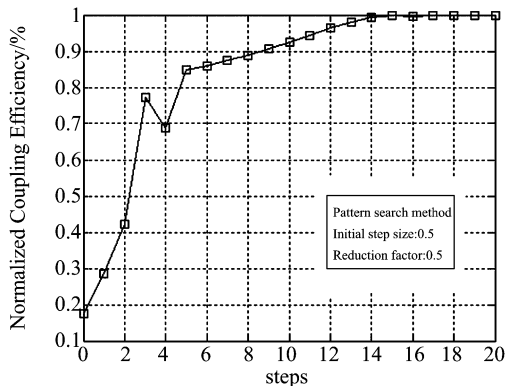
$$\eta_x = k \exp(-k \{ \frac{d_x^2}{2} (1/\omega_0^2 + 1/\omega_f^2) + \pi^2 \theta_x^2 [\omega_0^2(z) + \omega_f^2] / 2\lambda^2 - d_x \cdot \theta_x \cdot z / \omega_0^2 \}), \quad (3)$$

其中:

$$k = 4\omega_0^2 \omega_f^2 / [(\omega_0^2 + \omega_f^2)^2 + \lambda^2 z^2 / \pi^2], \quad (4)$$

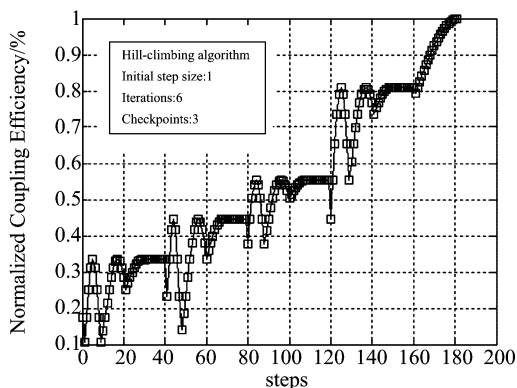
公式(3)反映了横向偏移、角度偏转以及纵向间距对耦合效率的影响,公式(3)中的 x 换成 y ,即可得到 η_y 的计算式。从式(3)可见, $z \neq 0$ 时,角度和横向对准误差引起的附加损耗互相关联,存在交叉耦合。若 $z = 0$,即入射光束的束腰位置正好处于光纤端面,不存在纵向间隙,此时,横向错位和角度偏转引起的耦合损耗是相互独立的。

从相同的起点位置出发,分别使用爬山法和



(a)模式搜索法

(a)Pattern search method



(b)爬山法

(b)Hill-climbing algorithm

图 5 模式搜索法与爬山法搜索轨迹比较

Fig. 5 Searching trajectory comparison between the pattern search method and hill-climbing algorithm

模式搜索法搜索目标函数最大值,终止控制条件是归一化最大耦合效率达到 99.9%,同时使用步长收敛精度作为辅助控制条件。初始对准误差为 $x = 3 \mu\text{m}$, $y = 2 \mu\text{m}$, $\theta_x = 3^\circ$, $\theta_y = 4^\circ$, $z = 20 \mu\text{m}$,因此,需要进行五个自由度调整以完成目标优化。图 5 给出了分别使用模式搜索法和爬山法的搜索轨迹。结果表明,模式搜索法只需 20 次迭代就可以找到耦合效率最大点,而爬山法则需要 180 步。而且,模式搜索法没有在极值点附近的反复振荡,搜索过程简洁清晰。

4.3 试验结果

为了实际评定模式搜索法的效果,以半导体激光器与单模光纤的对准为实验对象,用模式搜索法和爬山法完成自动对准的搜索定位,并进行

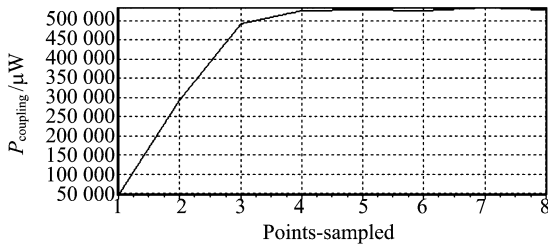
对比研究。实验系统如图 2。实验时使用尚未封装的 1 310 nm 激光二极管,通过单透镜与 1 310 nm 截止波长的平端单模光纤耦合,光功率计测量接收光纤的功率值,根据激光器输出功率和实际耦合效率设定对准位置的参考目标,取值 $500 \mu\text{W}$ 。

表 1 模式搜索法与爬山法试验对比结果

Tab.1 Comparison of experimental results of pattern search and hill-climbing

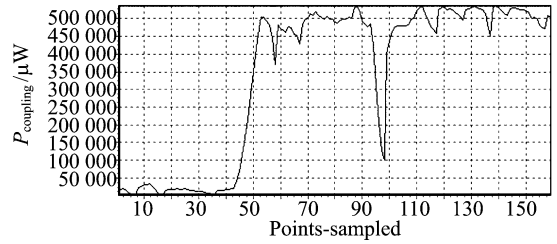
搜索算法	搜索次数		对准时间		全局收敛性
	失败次数	成功次数	最快	最慢	
模式搜索法	4	36	17 s	30 s	好
爬山法	18	22	28 s	39 s	一般

由于横向偏差对耦合效率影响最大,搜索只在 x - y 平面进行。首先找到 LD 与 SMF 耦合功率最大时的位置,接着在耦合区内 x 和 y 方向任意偏离一定距离 ($1 \sim 4 \mu\text{m}$),然后两种算法都从相同的起点开始搜索,每种算法共进行了 40 次搜索实验。表 1 给出了对比结果。从试验结果来看,模式搜索法的搜索定位成功率可以达到 90%,而爬山法只有 50% 左右,主要原因就在于爬山法是一维搜索,无法解决两个自由度交叉耦合的问题,而模式搜索法则不受影响。同时,模式搜索法在搜索速度上也有一定优势,比爬山法平均快 10 s。



(a) 模式搜索法 LD 与 SMF 自动对准功率跟踪曲线

(a) Power track curve in alignment automation of LD and SMF by pattern search method



(b) 爬山法 LD 与 SMF 自动对准功率跟踪曲线

(b) Power track curve in alignment automation of LD and SMF by hill-climbing method

图 6 LD 与 SMF 自动对准时使用不同算法比较

Fig. 6 Comparison with different algorithms for LD-SMF coupling

图 6 给出了两种算法都从 x 方向错位 $3 \mu\text{m}$ 位置开始搜索的具体结果,从而可清楚地比较搜索过程。横坐标表示搜索步数,纵坐标表示耦合功率值,单位是 μW 。对两种算法比较,所需的搜索步数相差很大,搜索过程上的差别也与仿真分析的结果基本一致。实际定位时间模式搜索法用时 20 s,爬山法用时 39 s,最后获得耦合功率为 $525 \mu\text{W}$ 。

5 结 论

光纤器件封装制造中传统的爬山法存在着对准时间较长,搜索定位成功率一般等缺点。分析了问题产生的根本原因,认为采用一维搜索的爬山法来完成光纤对准多自由度的寻优过程难以克服多自由度交叉耦合问题,也容易受到光源-光纤耦合面各种噪声的影响。为此,提出模式搜索法用于光纤自动对准,模式搜索法具有明显的几何意义,可实现多个自由度同时搜索,从而克服了光纤对准时不同自由度之间的相互作用,与爬山法仿真和实验比较表明,模式搜索法在搜索速度上有一定提高,算法收敛性上则大大优于爬山法。

参考文献:

- [1] HUNZIKER W, VOGT W. Low-loss, self-aligned flip-chip technique for interchip and fiber array to waveguide OEIC packaging [C]. *LEOS94 Conference Proceedings, IEEE*, 1994, 2: 269-270.
- [2] TANG Z, ZHANG R, SHI F G. Effects of angular misalignment on fiber-optic alignment automation[J]. *Optics Communications*, 196(2001):173-180.
- [3] MOBARHAN K S, HAGENBUECHLE M, HEYLER R. Fiber to waveguide alignment algorithm[J]. *Application*

Notes No. 6, Newport Inc. <http://www.newport.com/Support/Application Notes/>, 2000. 7.

- [4] ZHANG R, MONDAL S K, TANG Z, *et al.* Fiber-optic angular alignment automation: recent progress[C]. *Proceedings of the Technical Program for SMTA Conference on Opto-Electronics & Telecom Revolution*. Dallas, TX, 14~15, 2001: 67-73.
- [5] MIYAZAKI K. Method for aligning laser diode and optical fiber[P]. United States Patent, Patent No.: US6690865B2, Date of Patent: Feb. 10, 2004.
- [6] 许廷发, 张敏, 顾海军, 等. 改进的BP算法在多目标识别中的应用[J]. *光学精密工程*, 2003(10): 513-515.
XU T F, ZHANG M, GU H J, *et al.* Multi-target recognition with improved BP algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003(10): 513-515. (in Chinese)
- [7] 李和平, 李德华, 朱洲, 等. 基于遗传算法的结构光条纹中心检测方法[J]. *光学精密工程*, 2004(1): 82-87.
LI H P, LI D H, ZHU Z, *et al.* Detection of structured light strip centre line based on genetic algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004(1): 82-87. (in Chinese)
- [8] 淳静, 吴宇列, 戴一帆, 等. 用于光纤对准的柔性铰链微位移机构[J]. *机械科学与技术*, 2004, 23(12): 1444-1446.
CHUN J, WU Y L, DAI Y F, *et al.* A micro-displacement mechanism for fiber alignment based on flexible hinge [J]. *Mechanical science and technology*, 2004, 23(12): 1444-1446. (in Chinese)
- [9] 符曦 编著. 系统最优化及控制[M]. 北京: 机械工业出版社. 1995.
FU X. *System optimization and control* [M]. Beijing: China Machine Press, 1995. (in Chinese)
- [10] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社. 1989.
CHENG B L. *Optimum theory and algorithms* [M]. Beijing: TsingHua University Press. 1989. (in Chinese)
- [11] SARUWATERI M, NAWATA K. Semiconductor laser to single-mode fiber coupler[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(11): 1847-1856. (in Chinese)

作者简介:淳 静(1972—),男,湖南常德人,在读博士,研究方向为精密工程与计算机控制,目前主要从事光纤器件的亚微米制造理论与关键技术研究。Email:chunjing66@163.com