

文章编号:1671-6833(2011)06-0088-04

# 半导体激光器与单模光纤对准平台运动误差分析

段吉安, 赵文龙, 郑煜, 唐皓

(中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 为了实现半导体激光器与单模光纤快速精确耦合对准, 需分析对准平台的扰动特性. 首先, 基于半导体激光器与单模光纤的对准误差, 构建了五维对准平台. 然后, 针对半导体激光器与单模光纤对准过程中运动误差的随机性问题, 运用多体系统理论, 建立了对准平台的拓扑结构模型, 并分析了其运动过程中的位姿, 得到了半导体激光器末端点运动误差模型. 最后, 利用 Monte Carlo 方法, 结合该运动误差模型, 对运动误差进行了概率分析. 结果表明: 在不考虑静止误差的情况下, 半导体激光器末端点的位置在  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向上的运动误差近似为中间高两边低的对称分布. 此分析可为对准过程中运动误差补偿提供数据参考.

**关键词:** 半导体激光器; 单模光纤; 对准平台; 运动误差; Monte Carlo 方法

**中图分类号:** TN248.4      **文献标志码:** A

## 0 引言

同轴型光收发器件封装的主要工艺过程包括对准、焊接和焊后位移校正, 半导体激光器(LD)与单模光纤(SMF)耦合对准是同轴型光收发器件封装的关键, 其耦合效率的高低直接影响器件的性能, 其对准时间的长短决定封装的成本. LD与SMF的对准需要五维调整, 对准过程中不同维运动间存在非严格正交特性, 使得光通道对准过程中逐维位置调节相互耦合干扰, 从而使光路的高精度耦合对准十分困难. 实际对准过程中, 对准平台受多种误差源的影响, 如加工误差、装配误差、运动误差和环境因素等, 导致运动轨迹发生偏离, 加大了耦合对准的难度, 影响了器件封装质量<sup>[1]</sup>.

近年来, 运用多体系统理论研究多自由度系统误差的方法得到了广泛的应用, 尤其是在数控机床方面, 大都基于多体系统理论进行空间误差建模<sup>[1-5]</sup>. 笔者在构建的 LD 与 SMF 五维对准平台上, 运用多体系统理论, 得到了 LD 末端点运动误差模型, 利用 Monte Carlo 方法, 结合该运动误差模型, 对运动误差进行了概率分析. 此分析对运动误差补偿具有指导意义, 并可为多自由度运动系统的误差建模提供理论参考.

## 1 LD 与 SMF 对准平台

### 1.1 LD 与 SMF 对准

由于 LD 模场是椭圆的, SMF 模场是圆对称的, 因此 LD 与 SMF 对准耦合时, 只存在 5 个自由度的调整, 故 LD 与 SMF 的对准误差包括: 垂直于光轴的横向错位  $x$  和  $y$ 、平行于光轴的纵向间隙  $z$ 、以及角度偏差  $\alpha$  和  $\beta$ , 如图 1 所示<sup>[6]</sup>.

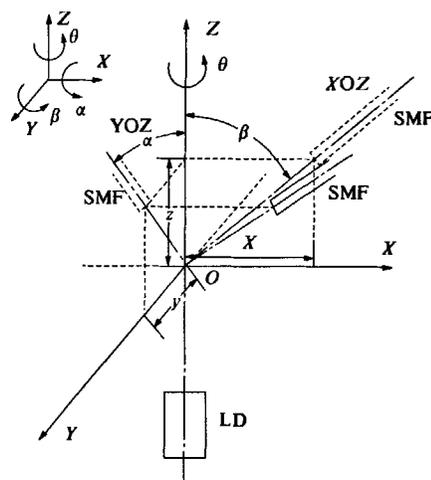


图 1 LD 与 SMF 对准误差

Fig. 1 Alignment errors between LD and SMF

### 1.2 对准平台构建

由 LD 与 SMF 对准误差可知, 对准平台应该

收稿日期: 2011-06-27; 修订日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975293)

作者简介: 段吉安(1969-), 男, 湖南新化人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事光电子器件制造技术与装备、精密运动控制理论与技术研究, E-mail: duanjian@mail.csu.edu.cn.

包括  $x, y, z, \alpha$  和  $\beta$  五维的调整平台. 基于不同维之间交叉耦合影响和平台所承受负载影响尽可能小的设计前提, 得到对准平台结构的搭建方案, 如图 2 所示, 其中  $\theta_z$  是用于焊后位移校正. 图中  $x, y, z, \theta_x$  和  $\theta_y$  采用的都是分辨率高、定位精度高、往返精度高和运动刚性强的步进电机驱动平台<sup>[7]</sup>.

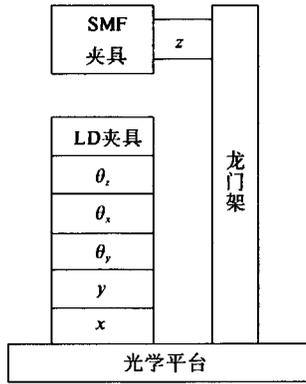


图 2 对准平台结构搭建方案

Fig. 2 The program of alignment stages structure

## 2 运动误差模型

### 2.1 对准平台的拓扑结构模型

多体系统是对一般机械系统的抽象、完整和有效描述, 是分析和研究机械系统的最优模型形式<sup>[3-4]</sup>. 拓扑结构是多体系统分析研究的基础, 是对多体系统的高度提炼和概括<sup>[1]</sup>.

LD 与 SMF 对准平台运动误差问题可以转化为多体系统问题, 图 3 为对准平台的拓扑结构图, 图 3 中相邻体 0~10 的划分如表 1 所示.

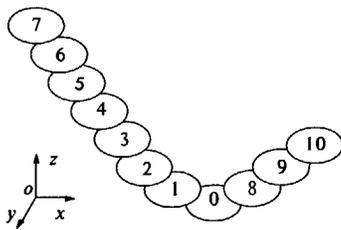


图 3 对准平台的拓扑结构图

Fig. 3 The topological structure of alignment stages

为了便于建立运动误差模型, 设光学平台为惯性体  $B_0$ , 惯性体上的坐标系为参考坐标系. 多体系统中个体的研究可以转化为对个体坐标系的研究, 体与体的坐标系可以通过作适当的变换得到, 这样为运动误差的建模提供了方法.

### 2.2 对准平台的位姿模型

多体系统中各体的位姿(位置和姿态)可以用 3 个平动参数和 3 个转动参数描述. 任意平移运动都可以分解为 3 个沿  $x, y$  和  $z$  轴的基本平移

表 1 相邻体划分

Tab. 1 The division of adjacent bodies

单元体序号	单元体名	单元体序号	单元体名
0	光学平台单元	6	LD 夹具单元
1	$x$ 轴平动单元	7	LD 单元
2	$y$ 轴平动单元	8	$z$ 轴平动单元
3	$y$ 轴转动单元	9	SMF 夹具单元
4	$x$ 轴转动单元	10	SMF 单元
5	$z$ 轴转动单元		

运动, 任意旋转运动也可以分解为 3 个绕  $x, y$  和  $z$  轴的基本旋转运动<sup>[1]</sup>.

多体系统中各体都存在 6 个自由度, 其处于相对静止或相对运动时, 都会在 6 个自由度上产生相应的误差, 称为静止误差或运动误差. 静止误差取决于相对静止状态的位姿, 受环境温度、振动和噪声等外部因素的影响; 运动误差取决于运动过程的运动精度, 与运动量有关.

以  $x$  轴平动为例, 分析运动误差的变换矩阵. 设体  $j$  相对相邻体  $i$  沿  $x$  轴平动的过程中将会产生 6 项误差, 分别是:  $\Delta x_{ijx}, \Delta y_{ijx}, \Delta z_{ijx}, \Delta \alpha_{ijx}, \Delta \beta_{ijx}$  和  $\Delta \gamma_{ijx}$  (“ $s$ ”表示运动误差, “ $x$ ”表示  $x$  轴平动). 当  $\Delta \alpha_{ijx}, \Delta \beta_{ijx}$  和  $\Delta \gamma_{ijx}$  很小时, 则沿  $x$  轴平动的运动误差变换矩阵为<sup>[1]</sup>

$$\Delta T_{ijx} = \Delta T_{ijx}(R) \cdot \Delta T_{ijx}(M) = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta \gamma_{ijx} & \Delta \beta_{ijx} & \Delta x_{ijx} \\ \Delta \gamma_{ijx} & 1 & -\Delta \alpha_{ijx} & \Delta y_{ijx} \\ -\Delta \beta_{ijx} & \Delta \alpha_{ijx} & 1 & \Delta z_{ijx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\Delta T_{ijx}(M)$  和  $\Delta T_{ijx}(R)$  分别为沿  $x$  轴平动的平动和转动运动误差变换矩阵.

### 2.3 运动误差模型

以光学平台坐标系  $O_0-X_0Y_0Z_0$  作为变换基准, 根据齐次坐标变换, LD 坐标系相对 SMF 坐标系的实际变换矩阵为

$$T_{10a}^7 = (T_0^{10})_a^{-1} \cdot (T_0^7)_a = \begin{pmatrix} 0 \\ \prod_{10}^0 [T_{ip}] [\Delta T_{ip}] [T_{is}] [\Delta T_{is}]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \prod_7^0 [T_{ip}] [\Delta T_{ip}] [T_{is}] [\Delta T_{is}] \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:  $(T_0^{10})_a^{-1}$  为参考坐标系相对 SMF 坐标系的实际变换矩阵;  $(T_0^7)_a$  为 LD 坐标系相对参考坐标系的实际变换矩阵;  $[T_{ip}]$  为相邻体静止位姿变换矩阵;  $[\Delta T_{ip}]$  为相邻体静止误差变换矩阵;  $[T_{is}]$  为相邻体运动位姿变换矩阵;  $[\Delta T_{is}]$  为相邻体运动误差变换矩阵, 由于笔者只考虑运动误差

的影响,故 $[\Delta T_{ij}]$ 为 $I_{4 \times 4}$ .

LD坐标系相对SMF坐标系的理想变换矩阵为

$$T_{10i}^7 = (T_0^{10})_i^{-1} \cdot (T_0^7)_i = \left( \prod_{10}^0 [T_{ij}] [T_{ij}]^{-1} \right) \cdot \left( \prod_7^0 [T_{ij}] [T_{ij}] \right) \quad (3)$$

式中: $(T_0^{10})_i^{-1}$ 为参考坐标系相对SMF坐标系的理想变换矩阵, $(T_0^7)_i$ 为LD坐标系相对参考坐标系的理想变换矩阵.

设LD末端点的坐标为 $\nu = [\nu_x \ \nu_y \ \nu_z \ 1]^T$ ,可得LD末端点相对SMF的运动误差 $\varepsilon$ 为:

$$\varepsilon = (T_{10a}^7 - T_{10i}^7) \cdot \nu \quad (4)$$

由于运动误差参数随运动量变化,且具有不确定性,不可能得到准确的运动误差.因此,可以通过Monte Carlo方法,通过分析各运动误差参数的分布情况,进行大量数据的试验,得到运动误差的分布.

### 3 Monte Carlo方法

Monte Carlo方法是在已知各随机变量概率分布的前提下,利用计算机对有关变量乃至整个工程系统进行随机抽样模拟的强有力工具<sup>[8]</sup>.笔者对对准平台运动误差进行Monte Carlo模拟,分析运动误差参数导致的对准偏差.Monte Carlo模拟仿真步骤如下:

①根据运动误差参数分布规律,对模型中的误差变量进行随机抽样,得到一个样本 $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$ ;②将样本 $x^i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 代入运动误差模型中进行求解,得到运动误差 $\varepsilon^i = (\Delta\nu_x^i, \Delta\nu_y^i, \Delta\nu_z^i)$ ;③步骤①和②即为完成一次实验,重复①和② $N$ 次,得到 $N$ 次运动误差的分布.根据大数定理, $N$ 越大,仿真程度越高,一般取 $N = 10\ 000$ 次.

### 4 运动误差概率分析

#### 4.1 误差源分析

根据误差的来源和特性来分析,可将误差分为外部误差和内部误差.外部误差主要指受周围环境温度、振动和噪声等影响;内部误差主要指几何误差、受力变形和热变形等<sup>[1-2]</sup>.其中,几何误差是最主要的,几何误差与平台的加工精度、装配精度和运动精度有关,笔者不考虑装配误差的影响,就运动精度引起的各项基本误差对运动误差

进行概率分析.驱动平台的运动精度主要由往返精度、上下摇动、左右摇动和运动刚性确定.假定往返精度、上下摇动、左右摇动的误差分布为正态分布,运动刚性引起的误差分布为均匀分布,根据对准平台的结构搭建方案,结合驱动平台的运动精度,可以得到各运动误差参数的分布函数,如表2所示.

表2 运动误差参数分布函数表

Tab.2 Distribution functions of motion errors

参数名称	分布函数
$\Delta x_{01ax}$	$N(0, 0.000\ 3^2)$
$\Delta y_{12ay}$	$N(0, 0.000\ 3^2)$
$\Delta z_{05az}$	$N(0, 0.000\ 3^2)$
$\Delta \alpha_{01ax}$	$N(0, 0.005\ 6^2) + U(-0.001\ 3, 0.001\ 3)$
$\Delta \beta_{01ax}$	$N(0, 0.006\ 9^2) + U(-0.001\ 9, 0.001\ 9)$
$\Delta \alpha_{12ay}$	$N(0, 0.006\ 9^2) + U(-0.002\ 1, 0.002\ 1)$
$\Delta \beta_{12ay}$	$N(0, 0.005\ 6^2) + U(-0.000\ 2, 0.000\ 2)$
$\Delta \alpha_{23a\beta}$	$U(-0.000\ 7, 0.000\ 7)$
$\Delta \beta_{23a\beta}$	$N(0, 0.003^2) + U(-0.001\ 7, 0.001\ 7)$
$\Delta \alpha_{34ax}$	$N(0, 0.003^2) + U(-0.001\ 2, 0.001\ 2)$
$\Delta \beta_{34ax}$	$U(-0.000\ 4, 0.000\ 4)$
$\Delta \alpha_{05ax}$	$N(0, 0.006\ 9^2) + U(-0.000\ 4, 0.000\ 4)$
$\Delta \beta_{05ax}$	$N(0, 0.005\ 6^2) + U(-0.000\ 1, 0.000\ 1)$

表中 $N(\mu, \sigma^2)$ 表示均值为 $\mu$ ,标准差为 $\sigma$ 的正态分布, $U(a, b)$ 表示在 $(a, b)$ 上服从均匀分布,位移单位为mm,角度单位为度.

#### 4.2 运动误差概率分析

应用Monte Carlo方法进行仿真分析,得到运动误差 $\varepsilon = (\varepsilon^1, \varepsilon^2, \dots, \varepsilon^{10000})$ ,由 $\varepsilon$ 可以得出 $\Delta\nu_x$ 、 $\Delta\nu_y$ 和 $\Delta\nu_z$ 频数分布直方图分别如图4所示,均值和方差如表3所示.

由图4可知: $\Delta\nu_x$ 、 $\Delta\nu_y$ 和 $\Delta\nu_z$ 3者的分布近似为中间高两边低的对称分布,其分布范围分别为: $-0.1 \sim 0.1\ \text{mm}$ ,  $-0.2 \sim 0.2\ \text{mm}$ ,  $-0.8 \sim 0.8\ \text{mm}$ .由表3可知:3者均值 $\mu$ 均处于亚微米级及以下,可近似为零,符合对称分布;方差 $\sigma^2$ 依次递增,可见它们的分布越来越发散.

表3 运动误差均值和方差表

Tab.3 Mean and variance of motion errors mm

误差名称	$\mu$	$\sigma^2$
$\Delta\nu_x$	$3.979\ 1 \times 10^{-4}$	$3.514\ 1 \times 10^{-4}$
$\Delta\nu_y$	$-7.894\ 6 \times 10^{-5}$	0.001\ 2
$\Delta\nu_z$	$1.747\ 1 \times 10^{-5}$	0.011\ 6

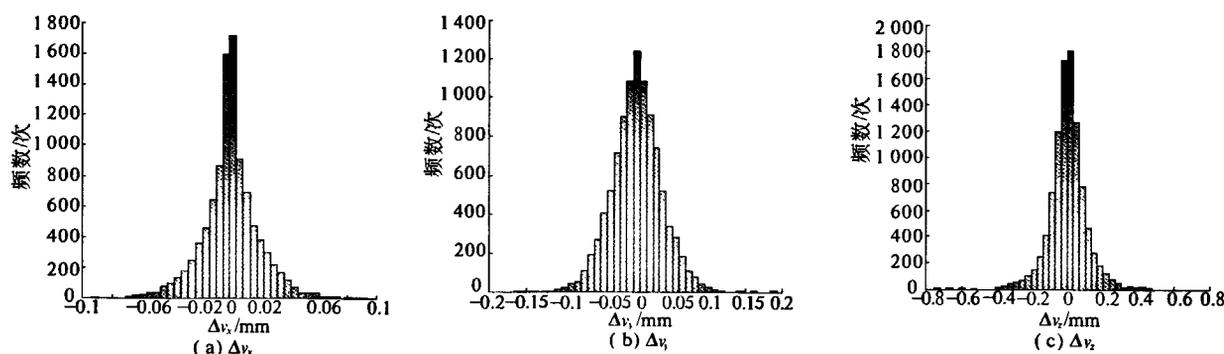


图4 频数分布直方图

Fig.4 The frequency distribution histogram

## 5 结论

本研究基于半导体激光器与单模光纤的对准误差,构建了五维对准平台.运用多体系统理论,得到了半导体激光器末端点的运动误差模型.利用 Monte Carlo 方法,结合该运动误差模型,对运动误差进行了概率分析.结果表明:在不考虑静止误差的情况下,半导体激光器末端点的位置在  $x$ ,  $y$  和  $z$  三个方向的运动误差近似为中间高两边低的对称分布.

## 参考文献:

- [1] 杨程旭. 阵列波导器件封装系统中运动平台误差建模及仿真分析[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2009:7-62.
- [2] 曲智勇,陈维山,姚郁. 某型六自由度运动系统误差建模[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(9):1345-1349.
- [3] 杨程旭,郑煜,徐洲龙. 多体系统理论的四轴运动平台综合空间误差建模[J]. 现代制造工程,2009(4):1-4.
- [4] 粟时平,李圣怡. 五轴数控机床综合空间误差的多体系统运动学建模[J]. 组合机床与自动化加工技术,2003(5):15-19.
- [5] SRIVASTAVA A K, VELDHUIS S C, ELBESTAWIT M A. Modelling geometric and thermal errors in a five-axis cnc machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,1995,35(9):1321-1337.
- [6] 淳静,吴宇列,李圣怡. 半导体激光器与单模光纤自动对准[J]. 光电工程,2005,32(8):31-35.
- [7] 淳静. 光纤有源器件激光焊接封装的关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学机电工程与自动化学院,2006:19-23.
- [8] 郭鹏飞,阎绍泽. 含间隙四连杆机构运动误差的 Monte Carlo 模拟[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(11):1989-1993.

## The Motion Errors Analysis of Laser Diode and Single-Mode Fiber Alignment Stages

DUAN Ji-an, ZHAO Wen-long, ZHENG Yu, TANG Hao

(State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to achieve fast and accurate coupling alignment between laser diode and single-mode fiber, disturbance characteristics need to be analyzed. First, based on the alignment errors between laser diode and single-mode fiber, a 5-dimension alignment stages was designed. And then, aiming at the randomness problems of motion errors in the alignment process of laser diode and single-mode fiber, the multi-body system theory was used for establishing the topological structure model of alignment stages and analyzing their positions and orientations in the movement, the motion error model of the end point of laser diode was obtained. Finally, combined with this motion error model, the Monte Carlo method was used for a probability analysis of motion errors. In the case of without considering static errors, the result indicates that the position of the end point of laser diode in the  $x$ ,  $y$  and  $z$  direction motion errors are similar to symmetrical distribution, which is high in the middle and low on both sides. This analysis could provide a data reference for motion error compensation in the alignment process.

**Key words:** laser diode; single-mode fiber; alignment stages; motion errors; Monte Carlo method