

doi:10.3788/gzxb20144312.1222001

## 基于虚拟样机的光纤旋转连接器损耗研究

张敏睿<sup>1,2</sup>, 贺正权<sup>1</sup>, 胡宝文<sup>1</sup>, 孔德鹏<sup>1</sup>, 杜新超<sup>1,2</sup>, 田进寿<sup>1</sup>, 李育林<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**提出一种基于虚拟样机的光纤旋转连接器损耗的分析方法. 建立了道威棱镜系统中的光线输入-输出方程, 采用光线追迹和解析模型的混合架构建立了齐次坐标系下的光线分析模型. 模型中的输入误差包括输入、输出准直透镜和道威棱镜的角度和位移误差、轴承游隙和齿轮准确度; 对 30 000 个角度准确度 $\pm 100''$ 、位移准确度 $\pm 0.01$  mm 的随机误差样本的损耗特性进行计算, 结果表明:若要使公差引起的最大损耗小于 4 dB、损耗分布  $P(X > 3 \text{ dB})$  小于 0.5%, 则光纤旋转连接器中准直透镜和道威棱镜角度误差必须控制在 $\pm 1'$ 以内.

**关键词:**光通信; 光纤网络; 光纤旋转连接器; 几何光学; 虚拟样机; 光线追迹; 解析模型; 损耗分析

**中图分类号:** O435.1; O182.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)12-1222001-6

## Research on Loss of Fiber Optic Rotary Joint Based on Virtual Prototype

ZHANG Min-rui<sup>1,2</sup>, HE Zheng-quan<sup>1</sup>, HU Bao-wen<sup>1</sup>, KONG De-peng<sup>1</sup>,  
DU Xin-chao<sup>1,2</sup>, TIAN Jin-shou<sup>1</sup>, LI Yu-lin<sup>1</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A fiber optic rotary joint loss analysis method based on virtual prototype was proposed. The input-output equations of light in dove prism are derived. A hybrid architecture based on ray tracing model and analytical model was employed in a homogeneous coordinate system; the angle and position deviations of collimating lens and dove prism were considered as input error in the model as well as bearing clearance and gear precision. 30 000 random samples, of which angle precision is  $\pm 100''$  and position precision is  $\pm 0.01$  mm, were studied. The result shows that angle error of dove prism and collimating lens must be  $\pm 1'$  or less while the maximum loss is required less than 4dB, the distribution of loss  $P(X > 3 \text{ dB})$  is required less than 0.5%.

**Key words:** Optical communication; Fiber optic networks; Fiber optic rotary joint; Geometric optics; Virtual prototype; Ray tracing; Analytical model; Loss analysis

**OCIS Codes:** 220.4880; 060.1810; 060.2320; 080.4295; 120.4880

## 0 引言

光纤旋转连接器(Fiber Optic Rotary Joint, FORJ)是在旋转平台之间实现光网络互联的关键器件,尤其在科学研究<sup>[1-2]</sup>、飞行器<sup>[3]</sup>、航天器<sup>[4]</sup>、雷达<sup>[5]</sup>等大型装备中发挥着关键作用. FORJ 的加工、装配和磨

损会产生误差,由于光斑尺寸小、耦合距离长,微小的公差就会产生较大的耦合损耗. 贾大功等<sup>[6]</sup>对基于道威棱镜的 FORJ 误差进行了定量研究,分析了道威棱镜角度和位移误差对耦合效率的影响,建立了装配公差与损耗的静态关系式. 王光辉<sup>[7]</sup>对因角度误差产生的损耗做出了进一步的研究,分析了此类损耗与道威

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61275086)资助

**第一作者:**张敏睿(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为光信息处理. Email: m\_rzhang@163.com

**通讯作者:**贺正权(1965-),男,副研究员,硕士,主要研究方向为光信息处理及光纤传感技术. Email: zhqhe@opt.ac.cn

**导师:**田进寿(1970-),男,研究员,博士,主要研究方向为超快诊断技术、光电成像技术. Email: tianjs@opt.ac.cn

**收稿日期:**2014-04-03; **录用日期:**2014-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

棱镜旋转角度的关系. 但是, FORJ 结构参量多而且处于一个动态的工作过程中, 难以通过一组解析的数学形式对其特性进行准确的描述; 常用的光线追迹软件如 Tracepro 等, 虽然通过完整的图形化建模可以完成光线分析, 但其图形接口会生成大量的冗余数据, 不利于大数据计算.

本文提出一种基于虚拟样机的 FORJ 损耗分析方法. 推导了笛卡尔坐标系下的 FORJ 中道威棱镜的光线输入-输出方程, 采用光线追迹和解析模型的混合架构建立了齐次坐标系下的 FORJ 光线分析模型, 并对模型进行了验证和分析.

## 1 基本原理及模型

光纤旋转连接器按不同的标准可以分为无源和有源、单通道和多通道、同轴和离轴等. 其中, 像消旋透镜结构是常用的多通道无源旋转连接器结构, 如图 1.

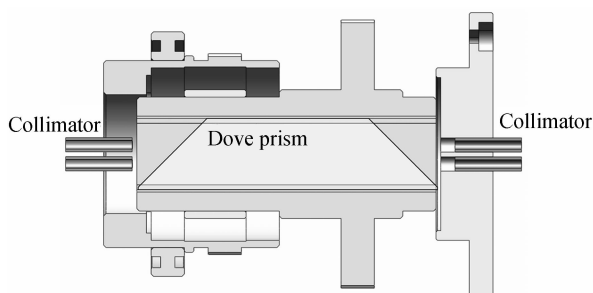


图 1 一种 FORJ 结构

Fig. 1 Schematic illustration of a FORJ

### 1.1 道威棱镜静态分析

采用光线追迹<sup>[8]</sup>和解析模型<sup>[9]</sup>相结合的光线算法架构, 笛卡尔右手坐标系下道威棱镜光路如图 2, 图中  $v$  轴为道威棱镜光轴.

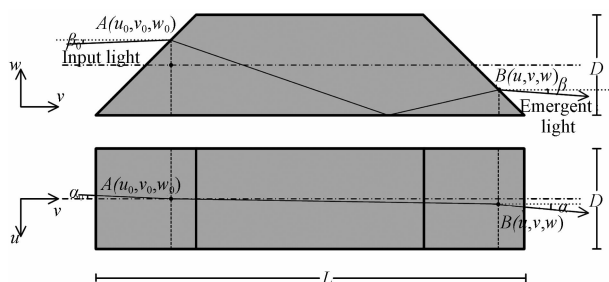


图 2 道威棱镜中的光路

Fig. 2 Optical path in dove prism

其中,  $(u_0, v_0, w_0)$  和  $(u, v, w)$  分别为道威棱镜上的光线入射点  $A$  和出射点  $B$  坐标,  $(\alpha_0, \beta_0)$  为入射光线的水平角和俯仰角,  $(\alpha, \beta)$  为出射光线的水平角和俯仰角,  $L$  为道威棱镜长度,  $D$  为道威棱镜高度和宽度,  $n$  为介质折射率. 可得道威棱镜工作在消旋模式下的光线方程为

$$\begin{cases} u = u_0 + \Delta u \\ \alpha = \alpha_0, \beta = -\beta_0 \\ \beta_{in} = \beta_0 + \pi/4 \\ w = \frac{L}{1 + \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta_{in}} + \sin \beta_{in}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta_{in}} - \sin \beta_{in}}} - w_0 - D \\ v = L - D/2 - w \\ \Delta u = \frac{\sin \alpha_0}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_0}} \frac{nL}{\sqrt{2n^2 - 2\sin^2 \beta_{in}}} \\ L = \frac{2nD}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1} \\ n = \sqrt{1 + \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda^2 - a_4} + \frac{a_2 \lambda^2}{\lambda^2 - a_5} + \frac{a_3 \lambda^2}{\lambda^2 - a_6}} \end{cases} \quad (1)$$

若玻璃的材料为 BK7, 则有

$$\begin{aligned} a_1 &= 1.03961212, a_2 = 0.23179234, \\ a_3 &= 1.01016945, a_4 = 0.0060006986, \\ a_5 &= 0.0200179144, a_6 = 103.560653 \end{aligned}$$

### 1.2 坐标映射

$3 \times 3$  矩阵常用于的笛卡尔坐标系下的几何光学建模<sup>[10-11]</sup>, 但其难以执行平移、投影和反射等运算. 本文将笛卡尔坐标系映射至齐次坐标系. 笛卡尔空间的点可以被表示为一个四维向量<sup>[12]</sup>, 若  $A = (x, y, z, 1)$  则其在另一笛卡尔坐标系  $(u, v, w, 1)$  中的映射<sup>[13]</sup>可以表示为

$$A_w = A \cdot R_x \cdot R_y \cdot R_z \cdot T \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} R_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & R_z &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_y &= \begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & -\sin \omega & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \omega & 0 & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_x & p_y & p_z & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\theta, \gamma, \omega$  分别是坐标系  $(x, y, z)$  到坐标系  $(u, v, w)$  所需绕  $x, z, y$  轴旋转的角度;  $p_x, p_y, p_z$  分别是坐标系  $(x, y, z)$  到坐标系  $(u, v, w)$  所需要沿  $x, y, z$  轴的位移量.

### 1.3 模型

本文所建立的 FORJ 虚拟样机包括世界坐标系  $(x, y, z)$  和随棱镜旋转位移的局部坐标系  $(u, v, w)$ ; 模型考虑的系统输入误差包括静态误差和动态误差. 静态输入误差包括输入透镜水平角误差  $e_{\theta_{din}}$ 、俯仰角误差  $e_{\gamma_{din}}$ , 水平位移误差  $e_{x_{din}}$ 、俯仰位移误差  $e_{z_{din}}$ ; 输出透镜

水平角误差  $e_{\theta_{dout}}$ 、俯仰角误差  $e_{\gamma_{dout}}$ ,水平位移误差  $e_{r_{dout}}$ 、俯仰位移误差  $e_{z_{dout}}$ ;道威棱镜水平角  $e_{\theta_{dove}}$ 、俯仰角度  $e_{\gamma_{dove}}$ ,水平位移误差  $e_{r_{dove}}$ 、俯仰位移误差  $e_{z_{dove}}$ ;动态误差包括轴承径向游隙  $e_g$ ,道威棱镜旋转误差  $R_w$ . 道威棱镜长度为 51.238 mm,折射率 1.506 4,输入输出自聚焦透镜之间距离为 59.238 mm.

如图 3 所示,光线分析主要分为三个步骤:根据 FORJ 设计参量、静态输入误差初始化道威棱镜和自聚焦透镜的状态;根据 FORJ 运行状态和动态输入误差调整道威棱镜和自聚焦透镜位置参量;在  $(x, y, z)$  坐标系中执行光线追迹和误差计算,在  $(u, v, w)$  坐标系中执行道威棱镜中的光线计算.

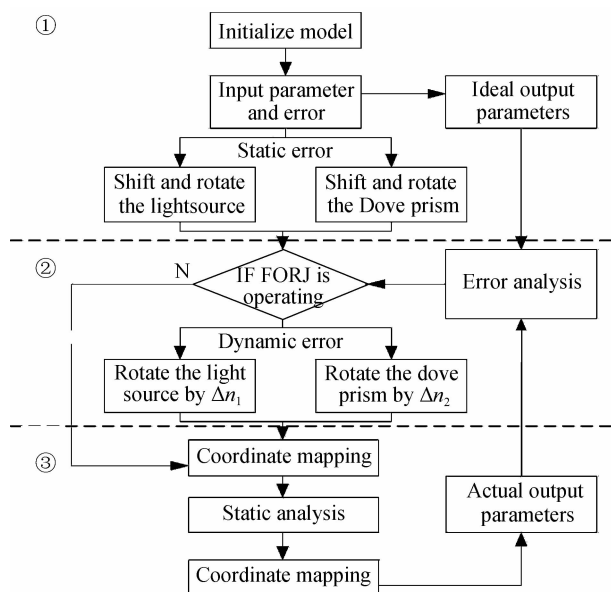


图 3 虚拟样机流程图

Fig. 3 Flowchart of virtual prototype

## 2 误差

由于系统输入误差的存在,道威棱镜的出射光线会在输出自聚焦透镜面上产生两种偏离设计值的输出误差,如图 4 所示, $e_p$  为位移输出误差和  $e_\phi$  为角度输出误差.

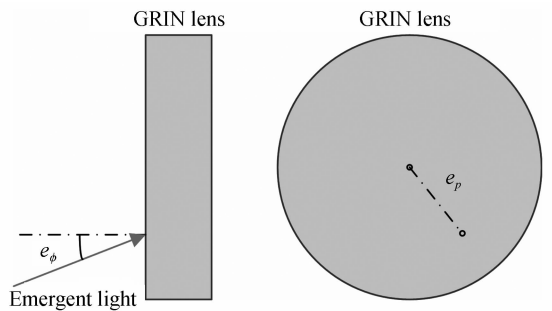
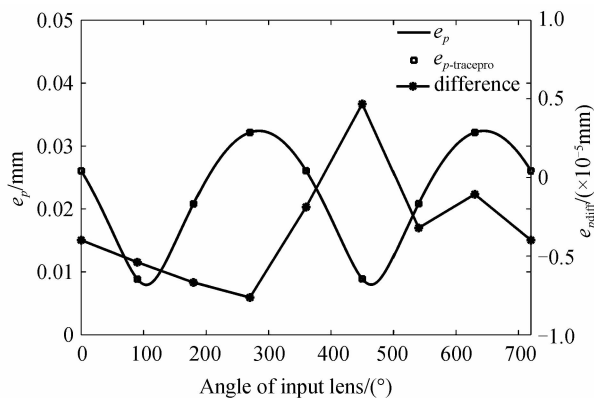


图 4 输出误差示意图

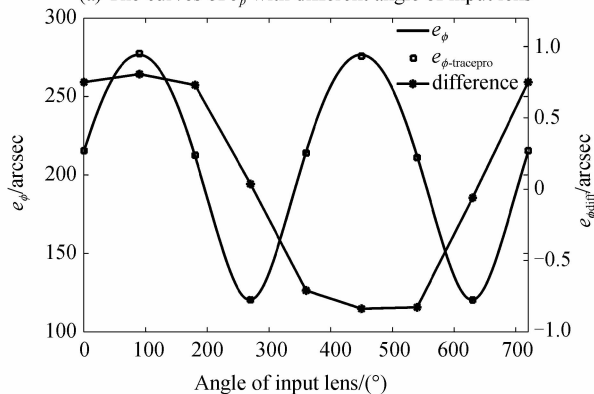
Fig. 4 Diagram of output error

### 2.1 静态输入误差

模型中所指静态输入误差是指特定时间内不随 FORJ 运转改变的输入误差,包括输入透镜、输出透镜和道威棱镜水平、俯仰角度误差等. 当  $e_{\theta_{dove}} = 70''$ ,  $e_{\gamma_{dove}} = 100''$ ,  $e_{\theta_{kin}} = -60''$ ,  $e_{\gamma_{din}} = 50''$ ,  $e_{r_{dove}} = e_{z_{dove}} = 0.01$  mm 时,  $e_p$  和  $e_\phi$  随输入透镜旋转角度变化如图 5.



(a) The curves of  $e_p$  with different angle of input lens



(b) The curves of  $e_\phi$  with different angle of input lens

图 5  $e_p$  和  $e_\phi$  随输入透镜角度变化曲线

Fig. 5 The curves of  $e_p$  and  $e_\phi$  with different angle of input lens

如图 5 所示,输出误差  $e_p$  和  $e_\phi$  随输入透镜旋转角度成周期性变化;计算结果与 Tracepro 软件对比表明,  $e_p$  之差小于  $0.5 \times 10^{-5}$  mm,  $e_\phi$  之差小于  $1''$ ;因此,本模型完全满足 FORJ 损耗分析需要. 若  $e_p$  和  $e_\phi$  的最大值为  $e_{p-max}$  和  $e_{\phi-max}$ ,则其随折射率变化曲线如图 6 所

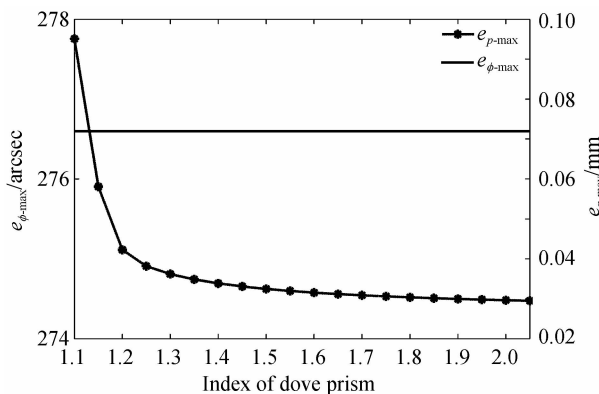


图 6  $e_p$  和  $e_\phi$  随折射率变化

Fig. 6 The curves of  $e_p$  and  $e_\phi$  with different index of dove prism

示,  $e_{p-\max}$  随折射率增加逐渐下降; 当  $n > 1.5$  时,  $e_{p-\max}$  无显著变化, 而  $e_{\phi-\max}$  不随折射率变化。

## 2.2 动态输入误差

FORJ 的输出误差除了受静态输入误差影响之外, 还有轴承游隙、齿轮间隙产生的所产生动态输入误差, 即轴承间隙导致道威棱镜在间隙内沿俯仰水平方向产生随机抖动; 齿轮间隙使棱镜旋转角偏离  $\omega/2$ 。若道威棱镜采用双轴承支撑如图 7 所示,  $B_1, B_2$  为支撑轴承,

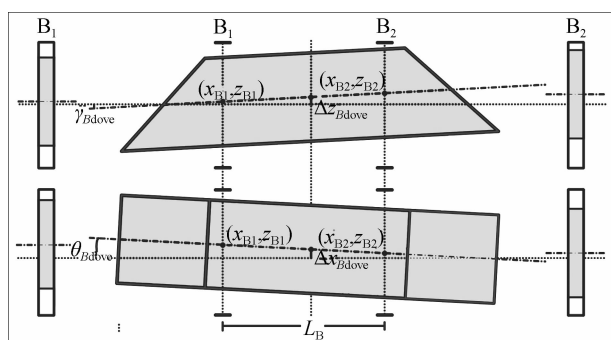


图 7 轴承中的道威棱镜

Fig. 7 Dove prism in bearings

$(x_{B_1}, z_{B_1}), (x_{B_2}, z_{B_2})$  为道威棱镜光轴与  $B_1, B_2$  交点的坐标,  $L_B$  为轴承之间的距离; 则  $\theta_{Bdove}$  振动俯仰角,  $\gamma_{Bdove}$  振动水平角,  $\Delta x_{Bdove}$  振动位移量,  $\Delta z_{Bdove}$  振动位移量, 传动误差  $R_\omega$  可以表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{Bdove} = \arctan \left( \frac{x_{B_1} - x_{B_2}}{L_B} \right) \\ \gamma_{Bdove} = \arctan \left( \frac{z_{B_1} - z_{B_2}}{L_B} \right) \\ \Delta x_{Bdove} = \frac{x_{B_1} - x_{B_2}}{2} \\ \Delta z_{Bdove} = \frac{z_{B_1} - z_{B_2}}{2} \\ R_\omega = \frac{\sum_{i=0}^N \Delta \omega_i}{\omega} \end{array} \right. \quad (4)$$

坐标  $(x_B, z_B)$  可以表示为

$$(x_B, z_B) = (x_0, z_0) + (\Delta x, \Delta z) \quad (5)$$

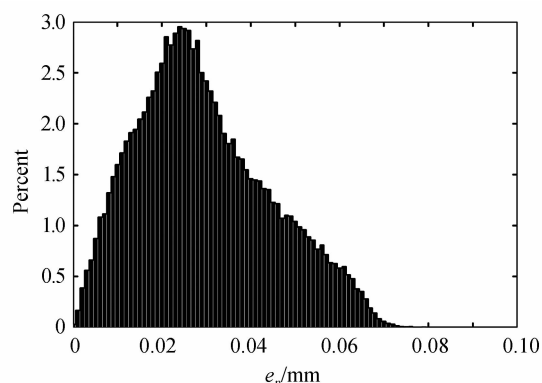
式中  $(x_0, z_0)$  为轴承内中心坐标;  $f(\Delta x, \Delta z)$  为随机位移量的密度函数, 若以均匀分布描述, 则

$$f(\Delta x, \Delta z) = \begin{cases} \frac{1}{A}, & (x, z) \in D \\ 0, & (x, z) \notin D \end{cases} \quad (6)$$

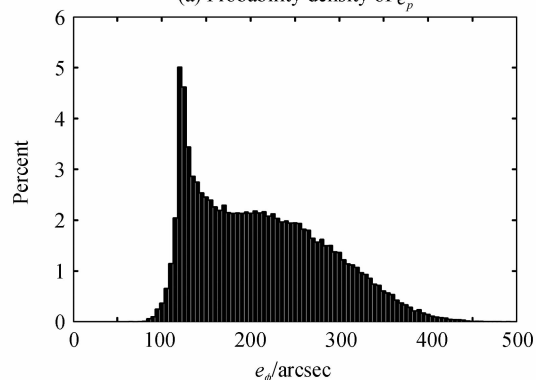
$A$  为游隙区域面积,  $D$  为游隙区域范围;  $\sum_{i=0}^N \Delta \omega_i$  为总的转角误差和,  $\omega$  为道威棱镜转过的角度。

阮萍<sup>[14]</sup>对像消旋结构传动误差的研究结果表明, 当轴承径向游隙取 0.01 mm, 齿轮六级准确度时像消旋误差为 5.7'。因此, 本文取  $x_B, z_B \in [-0.01, 0.01]$ , 旋转  $\omega \in [0, 2\pi]$ ,  $R_\omega = 0.1\%$ ,  $n = 1.5064$ ; 当静态输入误差如 2.1 节所述时, 得  $e_p$  和  $e_\phi$  统计特性如图 8 所

示,  $e_p$  和  $e_\phi$  统计密度分布中心近似等于静态误差下的  $e_p$  和  $e_\phi$ ; 其分布特性是由是各类误差随转角  $\omega$  的独立分布和分布之间相关性决定, 本文不做进一步研究。



(a) Probability density of  $e_p$



(b) Probability density of  $e_\phi$

图 8  $e_p$  和  $e_\phi$  概率密度

Fig. 8 Probability density of  $e_p$  and  $e_\phi$

## 3 损耗分析

公差损耗是由 FORJ 加工和装配过程中偏离设计值产生的附加损耗, 是 FORJ 中最主要的损耗来源。公差损耗产生的直接原因是光斑偏离输出自聚焦透镜的中心, 如图 4。由于输入误差  $\theta, \gamma \ll 1^\circ$ , 因此产生的附加距离损耗可以忽略, 这里主要考虑位移损耗  $L_{offs}$  和倾角损耗  $L_{tilt}$ , 其与  $e_p$  和  $e_\phi$  的关系为<sup>[15]</sup>

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{offs} (\text{dB}) = 4.343 \left( \frac{\pi n_0 \sqrt{A} \tau \omega_0 e_p}{\lambda} \right)^2 \\ L_{tilt} (\text{dB}) = 4.343 \left( \frac{\tan e_\phi}{n_0 \sqrt{A} \omega_0} \right)^2 \\ L_{sys} = L_{offs} (\text{dB}) + L_{tilt} (\text{dB}) \end{array} \right. \quad (7)$$

式中,  $n_0$  为自聚焦透镜的中心折射率,  $\sqrt{A}$  为自聚焦透镜的梯度折射率常量,  $\lambda$  为波长,  $\omega_0$  为光斑尺寸。若  $n_0 = 1.592$ ,  $\omega_0 = 5.25 \mu\text{m}$ , 由 2.2 已知的  $e_p, e_\phi$  和式 (7) 可得如图 9 所示的因公差引起的损耗特性曲线。

如图 9(a) 所示, 当  $\sqrt{A} = 0.336 \text{ mm}^{-1}$  时的  $L_{sys}$  概率分布, 此时  $P(X < 3 \text{ dB}) = 99.9431\%$ , 最大损耗  $L_{\max} = 3.676 \text{ dB}$ ; 如图 9(b) 所示, 当  $\sqrt{A} = 0.39 \text{ mm}^{-1}$  时最大

损耗最小,继续增加 $\sqrt{A}$ 会使 $L_{\max}$ 增加.

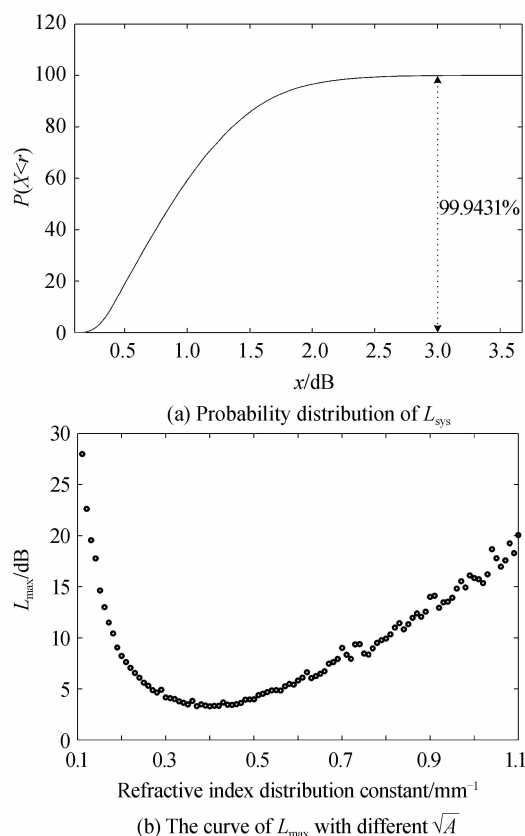


图9 因公差引起的损耗特性

Fig. 9 Characteristics of tolerances-induced loss

$L_{\text{offs}}$ 、 $L_{\text{tilt}}$ 和 $L_{\text{sys}}$ 随折射率变化如图10所示。 $L_{\text{tilt}}$ 随折射率增加没有显著变化; $L_{\text{offs}}$ 随折射率增加下降; $L_{\text{sys}}$ 受 $L_{\text{offs}}$ 的影响随折射率增加逐渐下降,当 $n > 1.5$ 总附加损耗无显著下降.

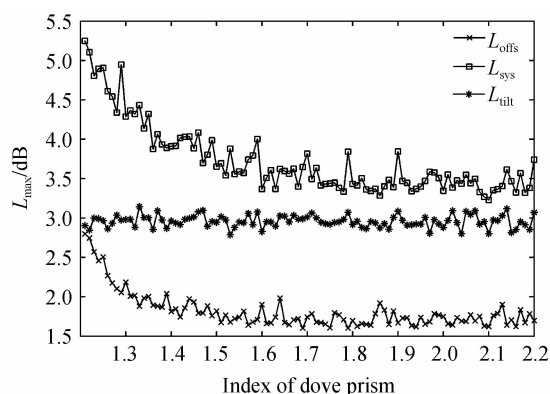


图10 损耗随折射率变化曲线

Fig. 10 The curve of coupling loss with different index of dove prism

实际加工和装配过程中往往只能控制公差范围,为描述公差范围与FORJ损耗的关系,取轴承游隙 $0.01\text{ mm}$ , $R_w = 0.1\%$ ,角度准确度 $e_\theta$ , $e_\gamma$ 为 $\pm 100''$ 、位移准确度 $e_x$ , $e_z$ 为 $\pm 0.01\text{ mm}$ 的均匀分布的随机误差样本30 000个.计算 $F_p = P(P(X < 3\text{ dB}) > 99.5\%)$ ,

$L_{\max} < 4\text{ dB}$  ( $|e_x, e_z| < a$ ,  $|e_\theta, e_\gamma| < b$ ),即当位移误差 $|e_x, e_z| < a$ ,角度误差 $|e_\theta, e_\gamma| < b$ 时,满足 $P(X < 3\text{ dB}) > 99.5\%$ , $L_{\max} < 4\text{ dB}$ 的样本数比率,如图11.

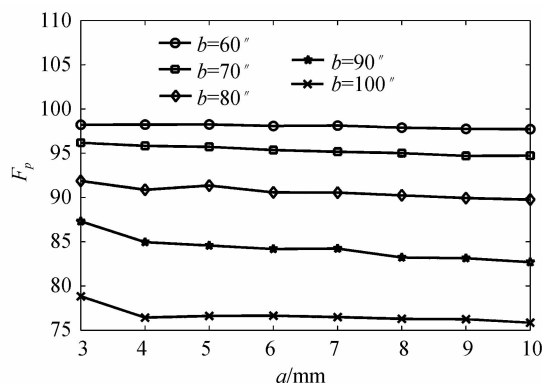


图11 误差样本统计

Fig. 11 Statistics of error samples

$a$ 和 $b$ 分别为位移和角度输入误差准确度参数;当 $a = 0.003\text{ mm}$ , $b = 60''$ 时, $F_p = 98.2\%$ ;  $a = 0.01\text{ mm}$ , $b = 60''$ 时, $F_p = 97.72\%$ ;  $F_p$ 受位移参数 $a$ 影响较小.而当 $a = 0.003\text{ mm}$ , $b = 100''$ 时, $F_p = 78.83\%$ ;显然, $F_p$ 受角度误差参数 $b$ 影响非常大.因此,考虑到简化和未包含的因素,要使 $F_p > 95\%$ 则至少需要保证 $|e_\theta, e_\gamma| < 60''$ ,即准直透镜和道威棱镜角度误差必须控制在 $\pm 1'$ 以内.

## 4 结论

本文提出了一种基于虚拟样机的光纤旋转连接器损耗的分析方法.建立了道威棱镜消旋系统的光线输入-输出方程;采用光线追迹和解析模型的混合架构建立了齐次坐标系下的光线分析模型.模型中的输入误差包括输入、输出准直透镜和道威棱镜的角度和位移误差、轴承游隙和齿轮准确度.结果表明,本文所建立的模型与Tracepro软件位移输出误差差异小于 $0.5 \times 10^{-5}\text{ mm}$ 、角度输出误差差异小于 $1''$ ,满足FORJ损耗分析需要;特定公差参量下,选取合适的棱镜和自聚焦透镜参量有助于显著降低耦合损耗;取轴承游隙 $0.01\text{ mm}$ 、消旋准确度 $0.1\%$ 、角度准确度 $\pm 100''$ 、位移准确度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 的随机误差样本30 000个,计算结果表明,若要使公差引起的最大损耗小于 $4\text{ dB}$ ,损耗分布 $P(X > 3\text{ dB})$ 小于 $0.5\%$ ,则光纤旋转连接器中的准直器和道威棱镜角度误差必须控制在 $\pm 1'$ 以内.

### 参考文献

- [1] XI Jie-feng, ZHANG An-qi, LIU Zhen-yu, et al. Diffractive catheter for ultrahigh-resolution spectral-domain volumetric OCT imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(7): 2016-2019.
- [2] KIM K, LEE J M, HWANG Y. Determination of engineering strain distribution in a rotor blade with fibre Bragg grating array and a rotary optic coupler[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46**(10): 758-762.
- [3] KELLNER A. Interferometric strain field sensor system for

- measuring rotor state; US. 0092786[P]. 2013-04-18.
- [4] JOHN A K, SHAWN P. The 28M TM tactical aerostat system: enhanced surveillance capabilities for a small tethered aerosta [C]. Floria; American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2013.
- [5] MUN J L, HAN Y T, KIM S M. Fiber-optic rotary joint and optical link for RF-antenna measurement [J]. *Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(7): 447-449.
- [6] JIA Da-gong, YU Chang-song, JING Wen-cai, *et al.* Effect of misalignment on rotating coupling efficiency of cove prism[C]. SPIE, 2007, **6829**: 68290S1-68290S9.
- [7] WANG Guang-hui. Research and experiment of fiber optic rotary joint[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [8] HSUEH Chun-che, LIN Psang-dain, SASIAN Jose. Worst-case -based methodology for tolerance analysis and tolerance allocation of optical systems[J]. *Applied Optics* , 2010, **49** (31): 6179-6188.
- [9] GONZALEZ N, MOLINA T G, TORRES J P. How a dove prism transforms the orbital angular momentum of a light beam[J]. *Optics Express* ,2006, **14**(20): 9093-9102.
- [10] PENG Qi, WANG Xing-hui, REN Ge, *et al.* Analytical direct solutions of the Risley prism systems for tracking and pointing[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(13): C83-C90.
- [11] PETR P. One-mirror and two-mirror three-dimensional optical scanners-position and accuracy of laser beam spot[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**: 2730-2740.
- [12] Peter S, 计算机图形学[M]. 高春晓, 赵清杰, 张文耀, 译. 第2版, 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [13] PI Jun, SHANG Kai. Normal incident invalid light of micro prism reflective sheeting based on tracepro [J]. *Acta Photonica Sinica* , 2014, **43**(4): 0423003. 皮钧, 商开. 基于 Tracepro 的微棱镜反光膜正入射无效光分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(4): 0423003.
- [14] RUAN Ping. Design of image-rotation eliminated structure and accuracy analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29** (2): 192-192. 阮萍. 一种消像旋转机构的设计与准确度分析[J]. 光子学报, 2000, **29**(2): 190-192.
- [15] HU Wei-sheng, ZENG Qing-ji. Misalignment-induced excess loss in Gradient-index-rod lens collimation system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **26**(3): 221-224. 胡卫生, 曾庆济. 自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析[J]. 中国激光, 1997, **26**(3): 221-224.