

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.10.021

光纤旋转连接器耦合误差分析

千应庆, 王晓锋, 蒋良荭, 徐润华, 陈锐
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对 2 根光纤进行无接触动态连接时机械精度及装配技术都无法满足需要的问题, 对光纤旋转连接器耦合误差进行分析。在分析光纤准直器中光线轨迹的基础上, 建立一种光纤准直器插入损耗和耦合效率理论模型, 从径向偏差、轴向偏差和角度偏差 3 个方面进行规律分析, 并通过实验数据获取了误差对光路传输损耗的影响规律, 得出光纤准直器耦合损耗对于角度偏差最敏感, 径向偏差次之, 轴向偏差影响较小的结论。该研究实现了光纤旋转连接, 为研制单/多通道光纤旋转连接器提供了理论依据。

关键词: 光纤连接; 光纤准直器; 自聚焦透镜; 光纤旋转连接器

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Coupling Error Analysis of Fiber Optic Rotary Connector

Qian Yingqing, Wang Xiaofeng, Jiang Lianghong, Xu Runhua, Chen Rui

(Academy of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: According to the problem that mechanical precision and assembly technology cannot meet the application demands when a couple of fibers non-contact dynamic connected each other, this article analyzes the coupling error of optical fiber rotate connector. Based on analyzing the trace of fiber collimator, it is established an insertion loss and coupling efficiency theory model that analyze the discipline in aspect of radial deviation, axial deviation and angular deviation. This research obtains the effect discipline of the three errors on transmission loss of optical path through experimental data. With the result that the sensitivity sequence from big to small of coupling error of fiber collimator is angular deviation, radial deviation and axial deviation. The researches accomplish the rotary connection of optic fiber and provide the theoretical basis of developing of single and multi channel fiber optic rotary connectors.

Key words: optical transceiver; fiber connection; fiber collimator; graded refractive index lens; fiber optic rotary connector

0 引言

在光通信中, 光纤的连接方式除有接触连接外, 经常还要进行无接触的动态连接, 如光纤旋转连接器。但多模光纤的光芯一般为 62.5 μm, 大小只有头发的 1/10, 在光纤进行无接触的动态连接时, 2 根光纤的准直度要求极高, 机械精度及装配技术都无法满足需要, 因此必须对光纤传输的光束进行扩束传输, 光纤准直器就具备扩束传输的能力。

光纤准直器是光纤通信系统和光纤传感系统中的基本光学器件, 它由 1/4 节距的自聚焦透镜 GRIN 和光纤组成, 其用途是对光纤中传输的高斯光束进行扩束准直, 同时也可以把准直光以非常小的损耗耦合到光纤中, 以提高光纤与光纤间的耦合效率, 被广泛用于光开关、光信号处理、光纤旋转连接、光测量等系统; 因此, 笔者对光纤准直器的耦合误差进行分析。

1 在光纤准直器中光线的轨迹

光纤准直器中光线轨迹如图 1 所示, 其中自聚焦透镜 GRIN 的节距定义如式 (1)^[1]:

$$P = \frac{\sqrt{AZ}}{2\pi} \quad (1)$$

式中: p 是自聚焦透镜的节距, \sqrt{A} 是自聚焦透镜的聚焦常数, Z 是光纤棒的长度。

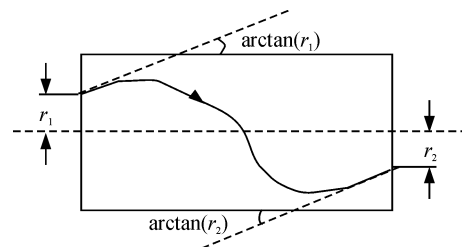


图 1 自聚焦透镜 GRIN 中光线轨迹

1/4 节距的自聚焦透镜光纤准直器意味着 $\sqrt{AZ} = 2\pi$ 。如果将从光纤中发出的光视为点光源,

收稿日期: 2012-06-31; 修回日期: 2012-08-26

作者简介: 千应庆(1959—), 男, 河南人, 硕士, 研高工, 从事车载武器系统的机电控制技术、作战车辆综合电子信息与组网技术, 车载武器系统光纤通信网络、旋转武器平台的大容量数据非接触高速数据传输和功率传输技术研究。

在自聚焦透镜中光纤轨迹类似正弦曲线，1/4 周期的光线出射时正好为平行光。

2 插入损耗和耦合效率数学模型

2 个光纤准直器的耦合损耗，或由装配偏差引起的耦合损耗有 3 种：径向偏差、轴向偏差和角度偏差。

2.1 径向偏差耦合效率模型

径向偏差是 2 个光纤准直器的光轴平行且有一定的间距 X_0 产生的偏差，图 2 是光纤准直器径向偏差示意图。因波导中基模的场分布通常可用高斯函数近似，所以可以高斯模场分布计算光纤准直器装配误差引起耦合损耗^[2]。

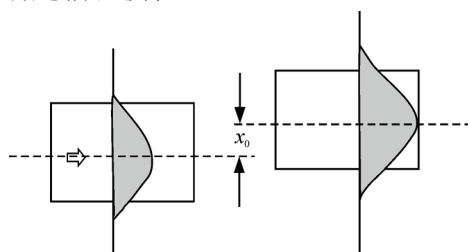


图 2 光纤准直器径向偏差

通过二维高斯函数对于 2 个光纤准直器的径向偏差 X_0 ，透镜的光斑尺寸 ω_1 进行变形，可得出 L_{X_0} 径向偏差耦合损耗的数学模型如式 (2)：

$$L_{X_0} = 4.343 \frac{X_0^2}{\omega_1^2} \quad (2)$$

2.2 轴向偏差耦合效率模型

轴向偏差是 2 个光纤准直器的光轴重叠，但两者有一定的间距 Z 产生的偏差，即装配间距引起了轴向偏差，如图 3 所示。

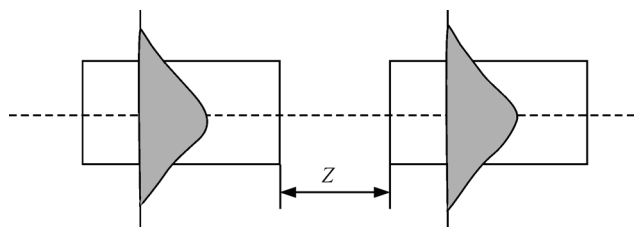


图 3 光纤准直器轴向偏差

同样通过二维高斯函数对于 2 个光纤准直器的轴向偏差 X_0 ，透镜的光斑尺寸 ω_1 进行变形，可得出轴向 L_z 偏差耦合损耗的数学模型如式 (3)：

$$L_z = 4.343 \ln \left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{2\pi n \omega_1^2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

2.3 角度偏差耦合效率模型

角度偏差是 2 个光纤准直器的光轴安装有一定的角度产生的偏差，对于 2 个光纤准直器装配时引起的角度偏差，如图 4 所示。

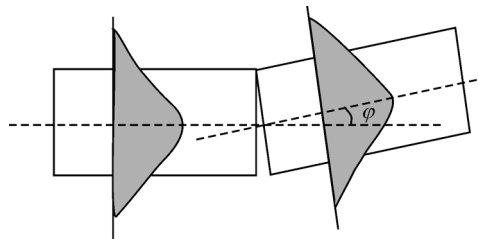


图 4 光纤准直器的角度偏差

图中 2 根光纤准直器之间只有角度偏差，忽略轴向偏离和径向偏差，只需对角度偏差 φ ，光纤准直器中自聚焦透镜轴线处的折射率 n_0 ，透镜的光斑尺寸 ω 和自聚焦透镜的聚焦常数 \sqrt{A} 计算。

角度偏差产生的耦合损耗数学模型为如式 (4)：

$$L_\varphi = 4.343 \left[\frac{\tan \varphi}{n_0 \sqrt{A} \omega} \right]^2 \quad (4)$$

3 不同误差的耦合损耗规律分析

上面讨论了 3 种装配误差引起的耦合损耗值的数学模型，下面通过实验数据分析每种耦合损耗的影响。

3.1 实验与验证平台

实验与验证平台采用日本西格玛公司的高精度调整仪。轴向采用 X 轴调整仪来调整 2 个自聚焦透镜之间的距离，调节范围：0~125 mm，精度：0.1 mm；径向采用 Y 轴调整仪来调节 2 个光纤准直器在径向水平方向上的距离，调节范围：0~20 mm，精度 0.5 μm ；倾角采用 2 组电动微分头控制，精度为 0.005°。

此外采用标准光源和光功率计作为测量工具。

3.2 实验与验证方法

首先在调整仪上将一对光纤准直器的耦合损耗调整至较小值，以此值为标准值。然后，根据实验需要人为调整轴向、径向和倾角的偏差，从而得出对应的耦合损耗值。

3.3 径向偏差的敏感度

调节一对光纤准直器中的一根的光纤准直器的 y 轴，分别在不同的径向偏差点进行记录，结果如表 1 所示。

表 1 径向偏差和耦合损耗

序号	径向偏差/ μm	耦合损耗/ dB	序号	径向偏差/ μm	耦合损耗/ dB
1	1	0.02	5	50	0.32
2	5	0.04	6	100	0.97
3	10	0.09	7	150	2.15
4	25	0.15	8	200	4.17

根据表 1 所列数据绘制出径向偏差损耗曲线图如图 5 所示, 由图 5 可知: 随着径向偏差增加, 2 个光纤准直器之间的耦合损耗随之增加。在 50 μm 以内时, 光纤准直器的耦合损耗可忽略; 当径向偏差在 100 μm 以上时, 光纤准直器的耦合损耗迅速增加; 到 150 μm 时, 耦合损耗为 2 dB 以上。上述情况与 2 根光纤直接耦合相比, 当耦合损耗为 0.25 dB 时, 光纤准直器的径向装配误差为 30 μm, 而光纤直接耦合的径向偏差仅有 1.6 μm^[3], 所以, 光纤准直器对径向偏差敏感度较光纤直接耦合对径向偏差的敏感度低得多。由此可见, 设计光纤旋转连接器的指导思想是: 2 根光纤的耦合必须通过自聚焦透镜耦合而不能通过 2 根光纤直接耦合。

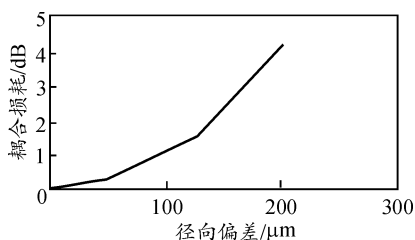


图 5 径向偏差损耗曲线

3.4 轴向偏差损耗的影响规则

调整一对光纤准直器之间的轴向距离, 分别在不同的轴向偏差点进行记录, 结果如表 2 所示。

表 2 轴向偏差和耦合损耗

序号	轴向偏差/ mm	耦合损耗/ dB	序号	轴向偏差/ mm	耦合损耗/ dB
1	1	0.01	5	40	0.48
2	5	0.04	6	60	1.09
3	10	0.09	7	80	2.03
4	20	0.21	8	100	3.15

根据表 2 所列数据绘制出轴向偏差损耗曲线图如图 6 所示, 由图 6 可知: 光纤准直器对于轴向偏差不是很敏感。当轴向偏差为 40 mm 时, 光纤准直器之间的耦合损耗值为 0.48 dB。而光纤直接耦合在耦合损耗为 0.15 dB 时, 2 根光纤之间的轴向偏差仅为 16.917 6 μm^[4], 且轴向距离越是偏大, 则耦合损耗值呈几何级增长。所以, 在设计光纤旋转连接器时应选用 2 个光纤准直器进行耦合, 且可放宽轴向距离的要求, 以降低制造成本。

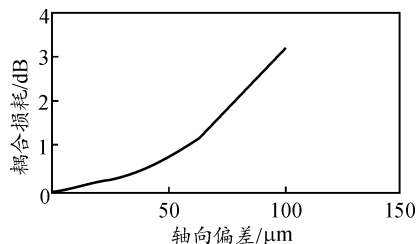


图 6 轴向偏差损耗曲线

3.5 角度偏差损耗的影响规则

对一对光纤准直器中的一根的光纤准直器的电动微分头进行角度调节, 分别在不同的角度偏差点进行记录, 结果如表 3 所示。

表 3 角度偏差和耦合损耗

序号	角度偏差/ (°)	耦合损耗/ dB	序号	角度偏差/ (°)	耦合损耗/ dB
1	0.01	0.12	5	0.05	1.31
2	0.02	0.26	6	0.06	1.93
3	0.03	0.45	7	0.08	3.47
4	0.04	0.86	8	0.10	5.45

根据表 3 所列数据绘制出角度偏差损耗曲线图如图 7 所示, 由图 7 可知: 光纤准直器对角度偏差敏感。角度偏差略微变化就可能引起耦合损耗较大的变化, 当 2 个光纤准直器之间的偏角为 0.1° 时, 耦合损耗值为 5.45 dB。所以, 在设计光纤旋转连接器时, 要严格控制光纤准直器间的角度偏差。

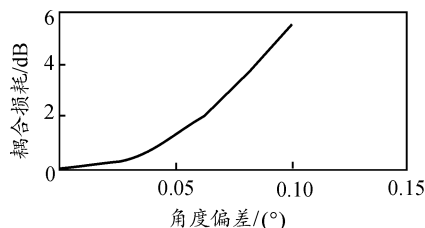


图 7 角度偏差耦合损耗曲线

4 单通道光纤旋转连接器的设计

4.1 单通道光纤旋转连接的耦合原理

单通道光纤旋转连接依照耦合方式不同分为 4 种形式: 直接耦合、双透镜扩束耦合、单透镜耦合和自聚焦透镜扩束耦合^[5]。这 4 种光纤耦合方式中, 目前最常用的耦合方式是利用 1/4 节距的自聚焦透镜耦合方式, 即光纤准直器耦合方式。

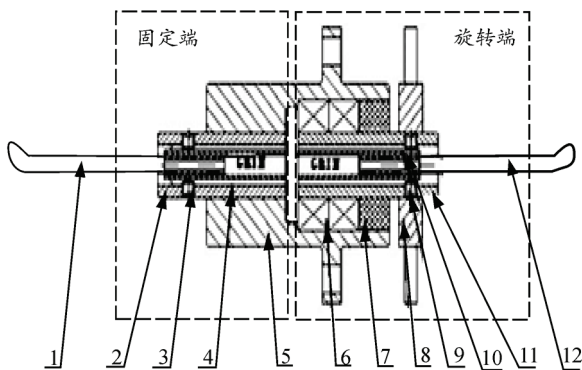
由于光纤很细, 多模光纤的纤芯只有 62.5 μm, 2 根光纤通过直接耦合、单/双透镜耦合时, 只要径向有一点跳动, 光信号的损失就很大, 该方案对机械精度要求很高, 因此难以实际应用。为降低对机械精度的要求, 很自然会想到将光纤内纤细的一束光放大成几十甚至几百倍的平行光束, 由自聚焦透

镜和光纤组合形成的光纤准直器就具备该特性。

由于透镜或 1/4 节距自聚焦透镜的光学特性，改变了原来锥形光束，在两透镜之间形成平行光束，这样不仅改善光纤间光的耦合，而且降低了光能损失，还大大降低了旋转连接器对旋转轴装配精度的要求，所以常见的单通道光纤旋转连接器大部分采用光纤准直器来耦合光信号。

4.2 单通道光纤旋转连接器总体结构

如图 8，单通道光纤旋转连接器的总体结构可分为 3 部分：光纤准直器、旋转部件和固定部件。



1. 输入/出多模光纤 1; 2. 精密套筒; 3. 调整螺钉; 4. 聚脂胶水; 5. 壳体; 6. 精密轴承; 7. 密封圈; 8. 旋转头; 9. 调整螺钉; 10. 聚脂胶水; 11. 精密套筒; 12. 输入/出多模光纤 2。

图 8 单通道光纤旋转连接器总体结构图

输入/出多模光纤 1、2 端都连接光纤准直器，多模光纤光束直径 62.5 μm，平行光束直径 Φ1.8 mm (外壳 3.8 mm)，光束直径放大了 24.8 倍，有效地降低了对机械精度的要求。

实验分析结果表明：由于本结构采用精密套筒和调整螺钉对一对光纤准直器的径向尺寸进行了精密控制，将这个对耦合损耗影响较大的因素控制在径向偏差损耗曲线的平滑段，而对影响较小的轴向尺寸则相对放宽了定位尺寸上的要求。

单通道光纤旋转连接器的转动端的旋转由滚动

轴承完成。旋转过程中耦合损耗的变化量是衡量光纤旋转连接器性能的重要指标，由于光纤准直器对角度偏差很敏感，为了耦合损耗的旋转变量要小于 0.5 dB，应保证角度偏差变化在 0.03°以内，所以对于滚动轴承就要选择高精度的轴承，才能满足系统设计的要求。

通过对耦合损耗有影响的 3 种误差因素的控制，单通道的光纤旋转连接器的耦合损耗可控制在 1.5 dB 以下，旋转一周的耦合偏差值也在 0.5 dB 以下。

5 结束语

笔者在自聚焦透镜 GRIN Lens 构成的光纤准直器的基础上，推导出计算光纤准直器 3 种装配误差造成的耦合效率的理论模型。通过分析 3 种装配误差与耦合损耗的影响规则，得出光纤准直器耦合损耗对于角度偏差最敏感，径向偏差次之，轴向偏差影响较小的结论。因此在使用光纤准直器设计光纤旋转连接器时，相应可放松一对光纤准直器间轴向偏差的要求，适当控制径向偏差，但要严格控制角度偏差。笔者在此基础上研制了单通道光纤旋转连接器，并已应用于武器装备。

参考文献：

- [1] Martin Van Buren, Nabeel A, Riza. Foundation for low loss fiber gradient index lens pair coupling with the self-imaging mechanism[J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 550-565.
- [2] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [3] 王宇华, 李志华, 段发阶. 光纤耦合效率与接收光强计算研究[J]. 光电工程, 2005, 07.
- [4] 郑煜, 段吉安. 平面光波导与阵列光纤耦合分析[J]. 中南大学学报, 2009, 40(3): 681-686.
- [5] 陈亮, 王其林, 李旭松. 基于光纤光栅传感器的齿轮箱状态监测系统[J]. 兵工自动化, 2011, 30(6): 63-65.