

文章编号 1004-924X(2006)02-0159-08

# 光纤连接器端面研磨装置运动分析

刘德福,段吉安,钟 掘

(中南大学 机电工程学院,湖南 长沙 410083)

**摘要:**分析了一种具有两个自由度的双驱动行星式光纤连接器端面研磨装置的运动原理,并求解出光纤连接器在研磨时相对于研磨盘(研磨砂纸)的运动轨迹。通过引入定义“速比”,建立了研磨装置两个独立主动件之间的转速关系。针对光纤连接器研磨中存在的问题,从速比入手,以运动轨迹曲线、研磨运动路程偏差、切削速度、速度周期变换系数为纽带,将研磨运动、研磨工艺以及研磨质量联系起来,得出了一组优化的光纤连接器研磨装置的运动参数。当系杆的转速设定为 132 r/min 时,根据粗、精研磨不同的工艺要求,其内齿轮的转速应在 31~54 r/min 调整。此时,速度周期变换系数小于 2.2;运动路程偏差小于 0.5%;研磨运动轨迹密集而不重复。实验证明了分析结果的正确。

**关键词:**光纤连接器;研磨装置;研磨运动轨迹;速比;顶点偏移

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## Motion analysis of lapping machine for end-face of optical fiber connector

LIU De-fu, DUAN Ji-an, ZHONG Jue

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The motion principle of a two-motor driven lapping machine with an epicyclic gear and 2 degrees of freedom for Optical Fiber Connectors (OFC) was analyzed. The lapping motive path of OFC relative to lapping tool (lapping film) was also figured out. The rotating speed relationship between two independent driving components of lapping machine was established by introducing the definition on "velocity ratio". In order to solve the problems existing duration of lapping OFC, considering the velocity ratio and building relationship of lapping motion, lapping process and lapping quality, the optimal results of motion parameters of lapping machine for OFC were obtained with the aid of lapping motive path curves, lapping distance difference, cutting velocity and transform coefficient of velocity cycle. When rotating speed of the tie bar is 132 r/min, according to coarse or fine lapping processes, the rotating speed of the ring gear should be between 31~54 r/min. Here, the transform coefficients of velocity cycle and lapping distance differences are less than 2.2 and 0.5%, respectively, lapping motive paths are very dense and not overlapped. The analyzing results are proved by experimental results.

**Key words:** optical fiber connector; lapping machine; lapping motion path; velocity ratio; apex offset

收稿日期:2005-11-22;修订日期:2006-01-05.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 50235040),教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-040753)

## 1 引言

光纤连接器是实现光纤之间活动连接的无源光器件。随着光纤技术正在向高带宽、高数据速率的方向发展,要求光纤连接器的插入损耗更低、回波损耗更高<sup>[1-3]</sup>。保证光纤连接器获得良好光学性能的关键就是用磨料为金刚石细微颗粒的研磨砂纸对由陶瓷插针体及光纤组成的复合端面进行精密研磨加工<sup>[4-8]</sup>。一方面要保证连接器的研磨加工质量;另一方面,由于研磨连接器端面用的金刚石砂纸属于价格较高的消耗品,为降低生产成本,应使连接器相对于研磨砂纸形成的一系列运动轨迹密集且不重合,使得研磨砂纸的磨损均匀。这两方面都与研磨装置的运动参数的合理选择有关,必须对其进行研究和优化,以满足连接器相对于砂纸的研磨轨迹均匀、连接器端面每一点相对于砂纸的运动路程相等、研磨速度平稳等保证产品质量的工艺条件<sup>[9-13]</sup>。本文以一种具有两个独立自由度的双驱动行星式光纤连接器研磨装置为例,详细分析了连接器相对于研磨砂纸的运动轨迹、运动路程、运动速度等运动规律,为运动参数的优化奠定了基础,并通过光纤连接器研磨实验对理论分析结果进行了验证。

## 2 光纤连接器端面研磨装置

图 1 为光纤连接器端面研磨装置的结构示意图,其运动机构是由行星齿轮、内齿轮以及系杆  $H$  构成的差动周转轮系,研磨盘固定在行星齿轮上构成一个整体,行星齿轮的运动即为研磨盘的运动。经分析,该机构有两个自由度,须有两个主动原动件。设定系杆  $H$  和内齿轮为其原动件,系杆  $H$  和内齿轮各由一台直流变频无级调速电机驱动,其转速分别为  $n_H$ 、 $n_2$ ,其对应的角速度分别为  $\omega_H$ 、 $\omega_2$ 。行星齿轮(研磨盘)的运动是既有自转也有公转的复合运动,即:行星齿轮由系杆  $H$  带动绕中心  $O$  公转,同时绕其中心  $O_1$  自转。设行星齿轮的转速为  $n_1$ ,其对应角速度为  $\omega_1$ ,根据周转轮系传动比计算原理,求得:

$$\omega_1 = \frac{Z_2}{Z_1} \omega_2 + \frac{\omega_H (Z_1 - Z_2)}{Z_1}, \quad (1)$$

或,

$$n_1 = \frac{Z_2}{Z_1} n_2 + \frac{n_H (Z_1 - Z_2)}{Z_1}, \quad (2)$$

式中:

$Z_1$ :行星齿轮的齿数;

$Z_2$ :内齿轮的齿数。

行星齿轮的自转中心  $O_1$  与内齿轮的回转中心  $O$  之间的偏心距离,即为系杆  $H$  的长度  $e$ :

$$e = \frac{m(Z_2 - Z_1)}{2}, \quad (3)$$

式中:

$m$ :行星齿轮及内齿轮的模数。

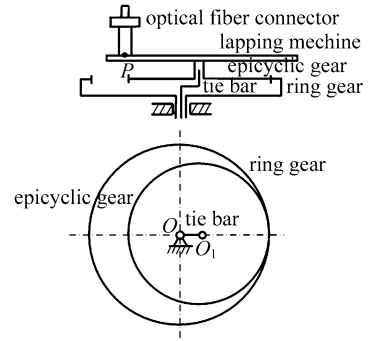


图 1 光纤连接器研磨装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lapping machine for optical fiber connectors

研磨机工作时,光纤连接器安装在夹具上,并固定不动;在研磨盘上放上薄的研磨砂纸,通过研磨盘的运动来实现工件和砂纸之间的相对运动,完成光纤连接器的端面研磨加工。

## 3 连接器相对于研磨盘(研磨砂纸)的运动分析

研磨光纤连接器时,研磨砂纸固定在研磨盘上,故光纤连接器相对于研磨盘的运动即为光纤连接器相对于研磨砂纸的运动。

### 3.1 运动轨迹求解

如图 2 所示,  $xOy$  为固定在夹具上的坐标系,其坐标原点与内齿轮及系杆  $H$  的旋转中心  $O$  重合;  $x_1O_1y_1$  为固定在系杆  $H$  末端的坐标系,原点  $O_1$  绕  $xOy$  坐标系的原点  $O$  旋转,角速度为  $\omega_H$ ,  $x_1$  轴、 $y_1$  轴分别与  $x$  轴、 $y$  轴始终平行;  $x_2O_2y_2$  为固定在行星齿轮上的坐标系,原点  $O_2$

与行星齿轮的自转中心重合,则坐标系的自转速度即为行星齿轮的自转速度  $\omega_1$ 。

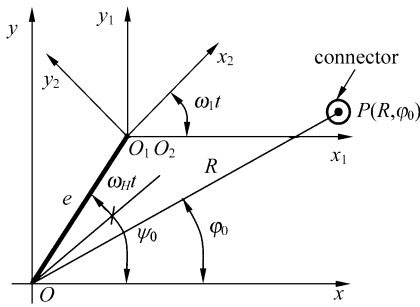


图2 连接器相对于研磨盘的运动分析

Fig. 2 Relative motion analysis between optical fiber connector and lapping machine

研磨光纤连接器端面时,连接器安装在夹具上,其位置是固定的。只要求出光纤连接器端面的中心点  $P$  相对于研磨盘的运动轨迹,则连接器端面上的其他位置相对于研磨盘的运动轨迹很容易求得。设点  $P$  与原点  $O$  的距离为  $R$ ,  $OP$  与  $Ox$  轴的夹角为  $\varphi_0$ ;不失一般性,在初始  $0$  时刻,设系杆  $H$  与  $Ox$  轴的夹角为  $\psi_0$ ,  $O_2x_2$  轴与  $O_1x_1$  轴重合。经过一段时间  $t$  后,行星轮在系杆  $H$  的带动下绕  $O$  点公转角度  $\omega_H t$ ,同时绕  $O_1(O_2)$  点自转角度  $\omega_1 t$ 。要求出光纤连接器相对于研磨盘的运动轨迹,只要求出点  $P$  于  $t$  时刻在  $x_2O_2y_2$  坐标系中的坐标即可。

首先通过坐标平移变换,求出点  $P$  在坐标系  $x_1O_1y_1$  中的坐标  $(x_1, y_1)$ :

$$\begin{cases} x_1 = R \cos \varphi_0 - e \cos(\omega_H t + \psi_0) \\ y_1 = R \sin \varphi_0 - e \sin(\omega_H t + \psi_0) \end{cases}, \quad (4)$$

然后通过坐标旋转变换,求出点  $P$  在坐标系  $x_2O_2y_2$  中的坐标  $(x_2, y_2)$ :

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos(-\omega_1 t) - y_1 \sin(-\omega_1 t) \\ y_2 = x_1 \sin(-\omega_1 t) + y_1 \cos(-\omega_1 t) \end{cases}, \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式,即得到光纤连接器端面的中心点  $P$  相对于研磨盘的运动轨迹方程:

$$\begin{cases} x_2 = R \cos(\omega_1 t - \varphi_0) - e \cos[(\omega_1 - \omega_H)t - \psi_0] \\ y_2 = -R \sin(\omega_1 t - \varphi_0) + e \sin[(\omega_1 - \omega_H)t - \psi_0] \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} dx_2 = \{-R(1-I)\omega_H \sin[(1-I)\omega_H t - \varphi_0] - eI\omega_H \sin(-I\omega_H t - \psi_0)\} dt \\ dy_2 = \{-R(1-I)\omega_H \cos[(1-I)\omega_H t - \varphi_0] - eI\omega_H \cos(-I\omega_H t - \psi_0)\} dt \end{cases}, \quad (11)$$

则,点  $P$  相对于研磨盘的运动路程  $S$  为:

由(6)式可知,光纤连接器端面的中心点  $P$  相对于研磨盘的运动轨迹是一簇摆线。

为方便讨论光纤连接器与研磨盘之间的相对运动关系,选择系杆  $H$  作为参照坐标系,即置身于系杆  $H$  上,观测光纤连接器与研磨盘(行星齿轮)的相对运动。给整个周转轮系加上一个公共角速度“ $-\omega_H$ ”,将周转轮系转化为定轴轮系,设连接器及研磨盘的角速度分别为  $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ ,分别为:

$$\begin{cases} \Omega_1 = 0 - \omega_H \\ \Omega_2 = \omega_1 - \omega_H \end{cases}, \quad (7)$$

称这两个角速度之比为速比  $I$ :

$$I = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega_H}{-\omega_H}, \quad (8)$$

将(1)式代入(8)式可得:

$$I = -\frac{Z_2}{Z_1} \left( \frac{\omega_2 - \omega_H}{\omega_H} \right) = -\frac{Z_2}{Z_1} \left( \frac{n_2 - n_H}{n_H} \right), \quad (9)$$

将(8)式代入(6)式,可将连接器端面的中心点  $P$  相对于研磨盘的运动轨迹方程改写为:

$$\begin{cases} x_2 = R \cos[(1-I)\omega_H t - \varphi_0] - e \cos(-I\omega_H t - \psi_0) \\ y_2 = -R \sin[(1-I)\omega_H t - \varphi_0] + e \sin(-I\omega_H t - \psi_0) \end{cases}, \quad (10)$$

### 3.2 运动路程偏差计算

光纤连接器的插针体是一陶瓷圆柱体(其外径为  $2.5$  mm,内径为  $0.126$  mm),用环氧树脂将直径为  $0.125$  mm 的光纤固定于插针体的内孔中,然后对插针体端面进行精密研磨加工<sup>[5-7]</sup>。为保证光纤连接器的性能,要求连接器在对接时光纤端面能保持良好的物理接触<sup>[14]</sup>,即要求连接器端面各点在研磨加工时受到均匀研磨。光纤连接器端面的各点相对于研磨盘运动路程的多少,将会影响到光纤连接器被研磨端面上各点的材料去除量,所以,连接器在研磨过程中插针体端面上的所有点相对于研磨盘的运动路程应相等,以保证连接器端面受到均匀研磨。

假设研磨时间为  $t$ ,图3所示的连接器端面中心点  $P$  相对于研磨盘的运动路程为  $S$ 。对(10)式微分得:

$$S = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{dx_2}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_2}{dt}\right)^2} dt$$

$$= \omega_H \int_0^t \sqrt{[R^2(1-I)^2 + e^2 I^2 + 2eRI(1-I)\cos(\omega_H t + \psi_0 - \varphi_0)]} dt, \quad (12)$$

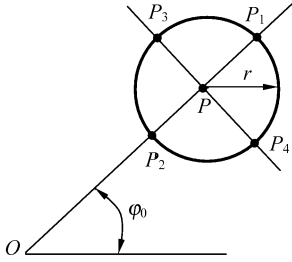
图 3 连接器端面上的特征点 ( $r=1.25 \text{ mm}$ )

Fig. 3 Typical points on the connector end-face

由式(12)可知,连接器端面上与内齿轮的中心  $O$  距离相等的点,只是初始角  $\varphi_0$  不同,其相对研磨盘的运动路程是相同的。显然,如图 3 所示,与中心  $O$  距离最远的点  $P_1$  相对研磨盘的运动路程  $S_1$  最长,而与中心  $O$  点距离最近的点  $P_2$  相对研磨盘的运动路程  $S_2$  最短。令点  $P_1$ 、 $P_2$  的路程偏差  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{|S_1 - S_2|}{S} \times 100\%, \quad (13)$$

用  $(R+1.25)$  替换(11)式中的  $R$  即为  $S_1$ ,用  $(R-1.25)$  替换(12)式中的  $R$  即为  $S_2$ 。由式(12)及(13)可知,当速比  $I=1$  时,  $P_1$ 、 $P_2$  两点的运动路程的偏差  $\eta$  为 0。将  $I=1$  代入式(10),消除时间参数  $t$ ,得到插针体端面中心  $P$  点相对于研磨盘的运动轨迹方程为:

$$(x_2 - R\cos\varphi_0)^2 + (y_2 - R\sin\varphi_0)^2 = e^2, \quad (14)$$

可以看出,插针体端面任意点在研磨盘上走过的轨迹都是半径为  $e$  的圆,只是由于各点的初始角不同而其圆心位置不同而已,即插针体端面任意点在研磨盘上走过的路程相等。此时,虽然插针体端面上各点的材料去除相同,但连接器端面任意点在砂纸上走过的轨迹位置在研磨过程中完全固定,研磨运动轨迹的重复性太强,这对砂纸的均匀磨损极为不利。希望找到合适的速比  $I$ ,既使得  $\eta$  很小,又能保证砂纸的均匀磨损。

### 3.3 研磨切削速度及其周期变换系数计算

连接器相对于研磨盘的运动速度即为连接器研磨时的切削速度。将式(12)对时间  $t$  求导,得到研磨切削速度:

$$v = \frac{dS}{dt} = \omega_H$$

$$\sqrt{R^2(1-I)^2 + e^2 I^2 + 2eRI(1-I)\cos(\omega_H t + \psi_0 - \varphi_0)}, \quad (15)$$

从(15)式可以看出研磨切削速度  $v$  是与  $\omega_H$  有关的周期函数。易求得其周期:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_H}, \quad (16)$$

速度周期变换系数  $\lambda$  表示最大研磨切削速度  $v_{\max}$  与最小研磨切削速度  $v_{\min}$  之比,联立式(15)、(16)可得,

$$\lambda = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} = \sqrt{\frac{R^2(1-I)^2 + e^2 I^2 + 2eRI \cdot |1-I|}{R^2(1-I)^2 + e^2 I^2 - 2eRI \cdot |1-I|}}, \quad (17)$$

由于光纤连接器相对于研磨盘的运动轨迹是一簇摆线,因此其运动方向在不断变化。连接器的整个研磨过程自始至终应力求平稳,运动方向的改变要缓慢<sup>[7]</sup>,所以需要正确地选择有关参数,将其变化控制在可以接受的范围内,否则连接器的质量难以保证。

## 4 研磨装置主要运动参数的选定

为保证光纤连接器的质量,连接器研磨装置的研磨运动和运动轨迹必须满足以下要求:第一,为适应连接器的粗、精研磨,应选择合适的研磨切削速度及其周期变换系数  $\lambda$ ;第二,应使连接器端面相对于研磨砂纸(研磨盘)形成一系列密集而不重合的运动轨迹,从而达到研磨砂纸的均匀磨损;第三,应当使连接器端面上每点相对于研磨盘(研磨砂纸)的研磨运动路程相等,以保证连接器端面上各点的材料去除量一致。

本文所分析的研磨装置的齿轮模数  $m=2$ ,行星齿轮齿数  $Z_1=24$ ,内齿轮齿数  $Z_2=36$ ,代入(3)式,得系杆  $H$  的长度  $e=12 \text{ mm}$ 。光纤连接器端面中心点  $P$  与内齿轮中心  $O$  之间的距离  $R=35 \text{ mm}$ ,连接器插针体半径  $r=1.25 \text{ mm}$ 。由(13)式可知,当速比  $I=1$  时,连接器相对于研磨盘的运动轨迹退化为圆,此时的研磨速度称为基本研磨速度,  $v_B = \omega_H e$ 。实验证明,当基本研磨速度  $v_B$  为

5~15 m/min 时,研磨效果较好<sup>[15-16]</sup>。取  $v_B$  为 10 m/min,得到系杆  $H$  的转速  $n_H=132$  r/min。

将以上参数代入(13)式,得到研磨时间为 120 s<sup>[5-8]</sup> 时速比  $I$  与运动路程偏差  $\eta$  的关系曲线,如图 4 所示。为保证连接器端面上各点的材料去除量一致,要求运动路程偏差  $\eta < 0.5\%$ ,由式(12)计算得到速比  $I \in [0.886\ 3, 1.147\ 7]$ 。由(9)式可得到内齿轮的转速  $n_2$  应在 31~54 r/min 之间调整,以得到合适的速比  $I$ 。

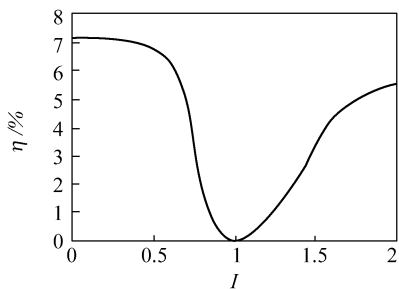


图 4 速比与运动路程偏差关系曲线( $n_H = 132$  r/min)

Fig. 4 Relationship curve between velocity ratio and lapping distance difference( $n_H = 132$  r/min)

在研磨过程中,轨迹的变化形态以及轨迹的疏密度等对连接器端面研磨的质量影响较大<sup>[10-11]</sup>。分析式(10)可知,轨迹曲线函数是与速比  $I$  有关的周期函数。要使研磨砂纸均匀磨损,应避免连接器端面相对于它的研磨轨迹过早地出现周期性重复。理论上讲,当研磨时间为无限长时,要使研磨轨迹不重复,速比  $I$  应为无理数<sup>[13]</sup>。但在实际应用中,研磨时间较短,速比  $I$  不为整数即可满足要求<sup>[13]</sup>。图 5 为几种典型的运动轨迹模拟图。当设定内齿轮的转速为 44 r/min 时,速比  $I=1$ ,连接器相对于研磨砂纸的运动轨迹如图 5(c),为一半径为  $e$  的圆。当设定内齿轮的转速为 43 r/min 时,速比  $I=1.011\ 4$ ,连接器相对于研磨砂纸的运动轨迹如图 5(d)所示,轨迹分布非常均匀,这可使得砂纸的磨损也非常均匀,从而延长砂纸的使用寿命;同时,路程偏差  $\eta$  仅为 5/100 000,可忽略不计。

图 6 示出了速比  $I$  与速度周期变换系数  $\lambda$  的关系。研究表明,研磨时的材料去除率与速度周期变换系数  $\lambda$  密切相关。一般来说,速度周期变换系数越大,材料去除率越高<sup>[11]</sup>。研磨光纤连接器时,分为粗研磨、精研磨、精细研磨等几个步

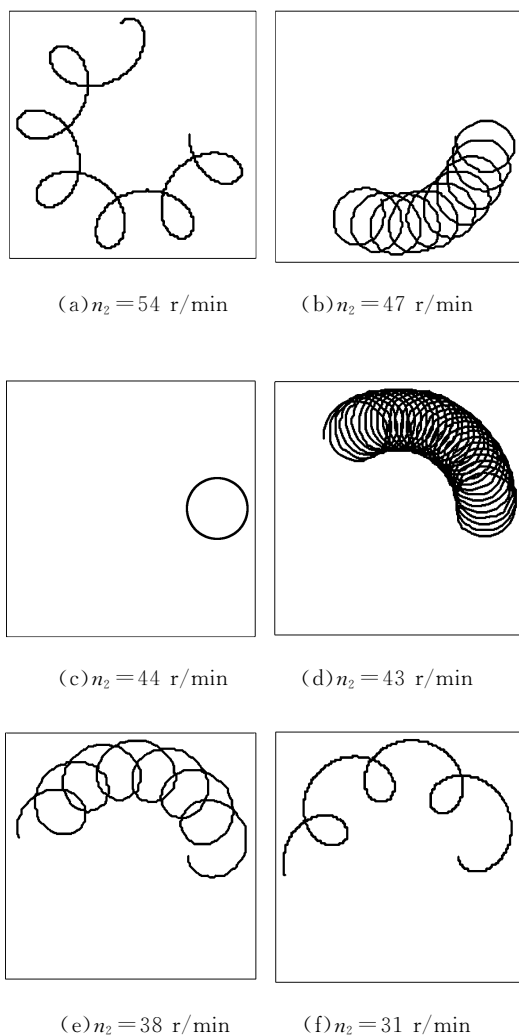


图 5 光纤连接器相对于研磨盘的运动轨迹模拟( $n_H = 132$  r/min)

Fig. 5 Simulating lapping path of optical fiber connector relative to lapping machine( $n_H = 132$  r/min)

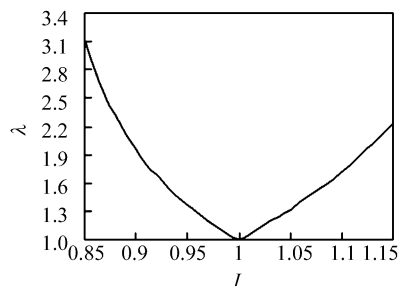


图 6 速比与速度周期变换系数的关系

Fig. 6 Relationship between velocity ratio and transform coefficient of velocity cycle

骤<sup>[8]</sup>。这样,在粗研磨时,为提高研磨效率,速度周期变换系数 $\lambda$ 可取得大些;在精研磨及精细研磨时,为保证表面质量,速度周期变换系数 $\lambda$ 可取为接近 1。当速比 $I=1$ 时,速度变换周期系数 $\lambda=1$ ,即切削速度恒定,但其运动轨迹重复(图 5(c)),不利于研磨砂纸的均匀磨损,所以在选择运动参数时应避免速比 $I=1$ 。当速比 $I$ 分别等于 0.886 3 和 1.147 7 时(运动轨迹如图 5(a)、(f)),其相应的速度变换周期系数 $\lambda$ 都为 2.2,切削速度波动比较大,此时研磨效率较高,对粗研磨比较有利。当速比 $I=1.011 4$ 时(运动轨迹如图 5(d)),速度变换周期系数 $\lambda=1.068$ ,其切削速度波动较小,同时运动轨迹分布非常均匀(图 5(d)),可使得砂纸的磨损也非常均匀,对精细研磨比较有利。图 7 所示为系杆  $H$  转速  $n_H=132$  r/min 时,速比与切削速度的关系。

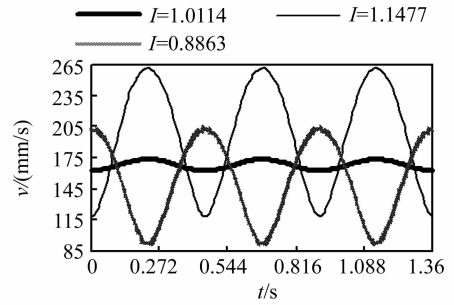


图 7 速比与切削速度的关系( $n_H=132$  r/min)

Fig. 7 Relationship between velocity ratio and cutting velocity ( $n_H=132$  r/min)

通过以上分析和计算,根据研磨切削速度、研磨效率、研磨质量、砂纸磨损均匀性等要求,将优选的光纤连接器研磨装置的主要运动参数列于表 1。

表 1 光纤连接器研磨装置运动参数优选结果

Tab. 1 Optimal results of motion parameters of lapping machine for optical fiber connectors

序号	系杆 $H$ 转速 $n_H/(r/min)$	内齿轮转速 $n_2/(r/min)$	速比 $I$	速度周期 变换系数 $\lambda$	运动路程 偏差 $\eta(\%)$	运动轨迹图	应用范围
1		31	1.147 7	2.201 8	0.50	图 5(f)	粗研磨
2		38	1.068 2	1.457 7	0.14	图 5(e)	精研磨
3	132	43	1.011 4	1.068 0	0.05	图 5(d)	精细研磨
4		47	0.965 9	1.229 6	0.11	图 5(b)	精研磨
5		54	0.886 3	2.195 7	0.50	图 5(a)	粗研磨

## 5 实验

### 5.1 实验过程

以 FC 型单模光纤连接器作为实验对象,采用 3 步研磨法(粗研磨、精研磨及精细研磨),验证了研磨装置运动参数对光纤连接器顶点偏移的影响。粗研磨、精研磨及精细研磨分别采用 3, 1, 0.5  $\mu\text{m}$  颗粒大小的金刚石研磨砂纸;单颗连接器插针体所受研磨压力均为 1.0 N;每步的研磨时

间为 120 s;研磨时在砂纸上添加适量的纯净水作为研磨剂;在各个研磨步骤,研磨装置系杆  $H$  转速  $n_H$  均设为 132 r/min,其它运动参数如表 2 所示。共进行了 5 组实验,每组研磨光纤连接器 24 个。工艺 A 为表 1 中所推荐的优选运动参数。测量光纤连接器端面几何形状参数采用的是 DORC 公司的 ZX-1 型非接触式光纤连接器端面检测仪,利用其配套的专用软件可非常方便地测量出连接器端面的顶点偏移量。

表 2 光纤连接器端面研磨运动参数

Tab. 2 Motion parameters of end-face lapping of optical fiber connectors

工艺	粗研磨			精研磨			精细研磨		
	内齿轮转速 $n_2/(r/min)$	速比 $I$	运动路程 偏差 $\eta(\%)$	内齿轮转速 $n_2/(r/min)$	速比 $I$	运动路程 偏差 $\eta(\%)$	内齿轮转速 $n_2/(r/min)$	速比 $I$	运动路程 偏差 $\eta(\%)$
A	31	1.147 7	0.5	38	1.068 2	0.14	43	1.011 4	0.05
B	43	1.011 4	0.05	43	1.011 4	0.05	43	1.011 4	0.05
C	98	0.386 4	6.963 5	98	0.386 4	6.963 5	98	0.386 4	6.963 5
D	3	1.465 9	2.987 1	3	1.465 9	2.987 1	3	1.465 9	2.987 1
E	98	0.386 4	6.963 5	47	0.965 9	0.11	43	1.011 4	0.05

## 5.2 实验结果

图 8 示出了 5 种不同研磨运动参数条件下光纤连接器端面顶点偏移量。工艺 A、B 条件符合表 1 中的研磨装置运动参数优选结果,顶点偏移的平均值分别为 10.3、9.1  $\mu\text{m}$ ,且其偏差值较小;工艺 C、D 条件不符合表 1 中的研磨装置运动参数优选结果,运动路程偏差  $\eta$  均超过了 0.5%,顶点偏移的平均值分别达到了 46.9 和 30.6  $\mu\text{m}$ ,且其偏差值较大;工艺 E 粗研磨的运动参数与工艺 C 粗研磨的运动参数一致,但其精研磨及精细研磨的运动参数符合表 1 中的研磨装置运动参数优选结果,顶点偏移值仍高达 27.5  $\mu\text{m}$ ,与工艺 C 条件相比稍有好转。从实验结果可以看出,对研磨装置的运动分析计算正确可靠。

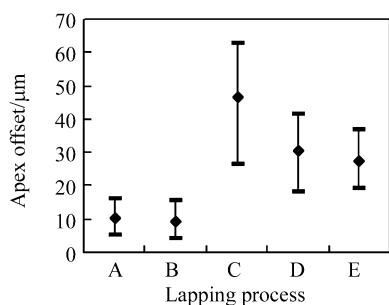


图 8 不同研磨工艺的连接端面顶点偏移

Fig. 8 Apex offsets of OFC for different lapping processes

## 6 结 论

通过对连接器相对于研磨盘的运动分析及计

### 参考文献:

[1] 黄尚廉,石文江,饶云江.单模光纤连接损耗研究[J].光子学报,1994,23(2):127-132.

HUANG SH L, SHI W J, RAO Y J. Study on connecting loss of single-mode optical fiber[J]. Acta Photonica Sinica,

算,可得到如下结论:

(1)行星式光纤连接器研磨装置是具有 2 自由度的运动机构,可将光纤连接器相对于研磨盘的运动转化为相对于系杆的两个回转运动,其相对运动轨迹是一簇摆线。

(2)依据速比  $I$ ,得到了光纤连接器相对于研磨盘的运动轨迹方程、运动路程偏差  $\eta$ 、研磨切削速度  $v$ 、速度周期变换系数  $\lambda$  等主要运动参数,为运动参数的优化奠定了理论基础。

(3)当速比  $I=1$  时,运动路程偏差  $\eta$  及速度周期变换系数  $\lambda$  均达到最优。但连接器相对于研磨砂纸(研磨盘)的运动轨迹重复性太强,不利于研磨砂纸的均匀磨损,所以在选择运动参数时应避免速比  $I=1$ 。

(4)通过实例计算,根据研磨工艺要求,得到一组既能保证研磨效率又能保证研磨质量的研磨装置运动参数的优选结果。当系杆  $H$  的转速设定为 132 r/min 时,内齿轮 2 的转速应在 31~54 r/min 之间调整。此时,速度周期变换系数  $\lambda$  小于 2.2;运动路程偏差  $\eta$  小于 0.5%;研磨运动轨迹密集而不重复。

(5)实验证明,光纤连接器端面顶点偏移与连接器相对于研磨盘的运动路程偏差  $\eta$  存在密切关系。 $\eta$  越小,顶点偏移相对较小,且各连接器顶点偏移的偏差也较小。当选用的研磨运动参数符合推荐的优选结果时,光纤连接器端面顶点偏移平均值仅为 10.3  $\mu\text{m}$ 。

- 1994,23(2):127-132. (in Chinese)
- [2] 毕卫红. 光纤连接器反射特性的研究[J]. 光电子·激光,1999,10(6):531-534.  
BI W H. Study of reflectance of optical fiber connectors[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*,1999,10(6):531-534. (in Chinese)
- [3] ROSA M D,CARBERRY J,BHAGAVATULA V,*et al.* High-power performance of single-mode fiber-optic connectors[J]. *Journal of Lightwave Technology*,2002,20(5):879-885.
- [4] TAKAHASHI M. Elastic polishing plate method and conditions for forming angled convex surface on ferrule end-face[J]. *Journal of Lightwave Technology*,1997,15(9):1675-1680.
- [5] LIN S I-EN. Effect of polishing conditions on terminating optical connectors with spherical convex polished ends[J]. *Applied Optics*,2002,41(1):88-95.
- [6] 杨福兴. 光纤连接器超精密加工技术的研究[J]. 航空精密制造技术,2003,39(3):1-3.  
YANG F X. Study on ultraprecision machining technique of optical fiber connectors[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*,2003,39(3):1-3. (in Chinese)
- [7] YIN L,HUANG H,CHEN W K,*et al.* Polishing of fiber optic connectors[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2004,44:659-668.
- [8] 刘德福,段吉安. 光纤端面研磨加工机理研究[J]. 光学精密工程,2004,12(6):570-575.  
LIU D F,DUAN J A. Mechanism research on lapping of optical fiber end-face[J]. *Optics and Precision Engineering*,2004,12(6):570-575. (in Chinese)
- [9] YANG J D,WEN X H,ZHU Y Q,*et al.* Discussing on solid abrasive lapping path[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,1997,10(2):101-105.
- [10] 张红霞,吴明根,高红刚. 定偏心锡磨盘超精密平面抛光均匀去除模拟计算[J]. 光学精密工程,1998,6(2):77-82.  
ZHANG H X,WU M G,GAO H G. Simulation of even material removal during eccentric plane polishing by a tin-polisher[J]. *Optics and Precision Engineering*,1998,6(2):77-82. (in Chinese)
- [11] UHLMANN E,ARDELT T. Influence of kinematics on the face grinding process on lapping machines[J]. *Annals of the CIRP*,1999,48(1):281-284.
- [12] 孙新民,李树文,王永梁. 四轴球体研磨机实现球体均匀研磨的充分必要条件[J]. 光学精密工程,1999,7(1):70-74.  
SUN X M,LI SH W,WANG Y L. Full conditions of the uniform lap for the four shafts ball-lapping machine[J]. *Optics and Precision Engineering*,1999,7(1):70-74. (in Chinese)
- [13] 吴宏基,曹利新,刘健. 基于行星式平面研磨机研抛过程的运动几何学分析[J]. 机械工程学报,2002,38(6):144-147.  
WU H J,CAO L X,LIU J. Analysis of kinematic geometry on face grinding process on lapping machines[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,2002,38(6):144-147. (in Chinese)
- [14] SHINTAKU T,SUGITA E,NAGASE R. Highly stable physical-contact optical fiber connectors with spherical convex ends[J]. *Journal of Lightwave Technology*,1993,11(2):241-248.
- [15] CHANG K Y,SONG Y H,LIN T R. Analysis of lapping and polishing of gauge block[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2002,20:414-419.
- [16] HUANG H,CHEN W K,YIN L,*et al.* Micro/meso ultra precision grinding of fibre optic connectors[J]. *Precision Engineering*,2004,28:95-105.

作者简介:刘德福(1971—),男,湖南茶陵人,副教授,中南大学机电工程学院微纳制造中心博士研究生,主要研究方向为超精密加工、机械 CAD/CAM 等,发表论文 10 余篇。Email: liudefu@mail.csu.edu.cn