

# 高精度光学平面浮动式连续抛光法运动学机理

王宝林 肖意新

**摘要：**本文论述了从古典光学平面加工到高精度光学平面浮动式连续抛光法的演变过程。重点对高精度光学平面浮动连续抛光法从抛光运动学角度出发做了理论上的探讨与分析，进行了相应的公式推导。初步提出并论证了等行程磨削概念，并结合实践进行分析比较。提出了为趋近理论上的等行程磨削，如何创造出最佳抛光状态的问题，以期达到高精度抛光的目的。通过理论分析与实践相比较还是符合的。

## 一、前 言

随着我国科学技术的飞跃发展，特别是激光技术、微电子学技术、空间技术的发展，在现代的干涉计量学、光谱学等领域中，越来越多地采用了高精度光学平面。诸如干涉仪的标准平板、可调谐染料激光器中的标准具、同步辐射中的平面反射镜等。其精度要求为表面面型精度  $\frac{\lambda}{20} \sim \frac{\lambda}{100}$ ；表面粗糙度  $5\text{nm} \sim 1\text{nm}$ 。从而促进了高精度光学平面零件的磨制技术与检测技术的发展。使之在光学冷加工行业中，逐步地形成了一个新的技术领域。

为适应这一需要，从1979年以来开展了浮动式连续抛光研制工作。并先后改装研制了  $\phi 600$ 、 $\phi 1100$  浮动式连续抛光机。如图 1。

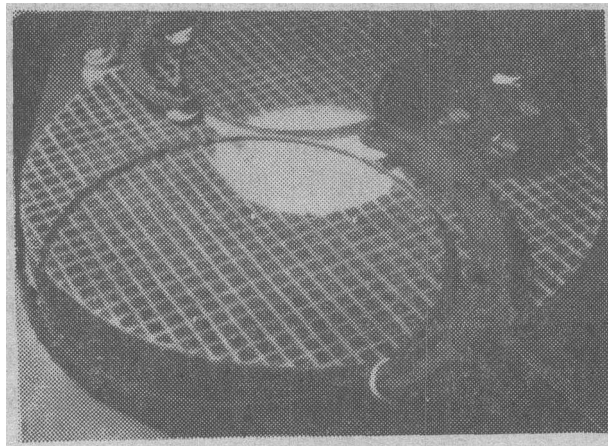


图 1 浮动式连续抛光状态图

目前已稳定地投入生产。它不仅适用于规整的圆形平面，对长方形平面的磨制与棱镜和楔形镜的精修均获得满意的效果。

实践证明，浮动式连续抛光法对高精度光学平面加工确实是一行之有效的方法。

本文将从该种抛光法的演变过程入手，从运动学角度对其实现高精度抛光的机理作粗浅的分析。以期望促进此项工作的进展。

## 二、浮动式连续抛光的演变（发展）

浮动式连续抛光是从古典平面抛光逐步改进演变而成的。大致过程如下：

### 1. 古典法抛光

该种抛光方法是目前光学平面抛光的传统加工法，即由摆架带动工件沿平面作弧线摆动的抛光法。如图 2。

### 2. 蟹钳式抛光

为克服在古典抛光中摆头的压力  $P$  施于工件上力的不均匀性，提高光学平板的面形精度，出现了蟹钳式抛光。如图 3。

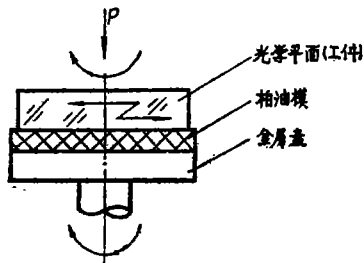


图 2 古典抛光法

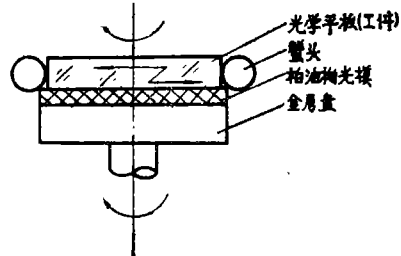


图 3 蟹钳式抛光

蟹钳式抛光去除了铁笔的压力，工件由蟹钳爪拨动。蟹钳式抛光虽然有所改进，但因工件口径与模盘口径相近，面形精度不易提高，精度控制也很困难。为此发展了分离器抛光法。

### 3. 分离器抛光

分离器抛光法即是工件由分离板带动而进行的一种抛光。该方法的抛光原理是基于光圈数与工件直径（口径）的平方成正比，即从抛光盘的大面积上复制小面积的零件。若抛光盘直径越大，则复制的小面积零件相对精度也越高。如图 4。

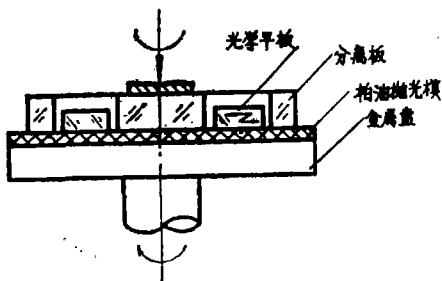


图 4 分离器抛光

虽然分离器抛光从原理上看可抛出精度相当高的零件，但因分离器时时受到铁笔的压力  $P$ ，并因分离板受其带动产生一力矩，影响分离器与抛光模盘的很好吻合，导致影响零件的加工精度的提高，一般只能达到  $\frac{\lambda}{20}$ 。同时，不同口径的零件要有相应分离板相匹配，给加工带来不便。为了进一步提高零件的磨制精度，改进分离器的不足，发展到目前的浮动式连续抛光。

### 4. 浮动式连续抛光

浮动连续抛光法即工件在不受任何外力作用下，在经校正盘修正好的模盘上作自由的浮动连续抛光。如图 5。该种抛光法的主要优点是：

- (1) 工件在不受任何外力状态下进行磨制，下盘后没有因外力作用引起变形的问題；
- (2) 校正盘、护环、工件与抛光模盘之间有相互修磨的作用，易于调整，便于实现高精

度加工；

(3) 可以在不停机的状态下取出工件和放入工件，易于实现连续加工；

(4) 用校正盘和护环取代分离器，但保持了分离器的良好作用，同时创造了均匀磨损的条件。并当工件尺寸与形状改变时，不需要更换高精度平面分离器，只需改变护环就可以了；

(5) 胶盘裸露在外边，易散热，易于实现自动加抛光剂和水。

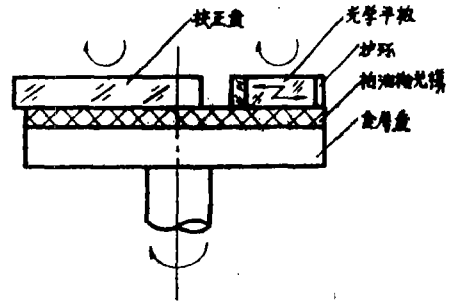


图5 浮动式连续抛光

### 5. 浸液抛光

为了创造工件磨制当中的稳定抛光条件，进一步提高磨制精度，特别是提高零件表面的粗糙度，使之达到 $2\text{nm}$ 左右的水平，出现了浸液抛光法。如图6。

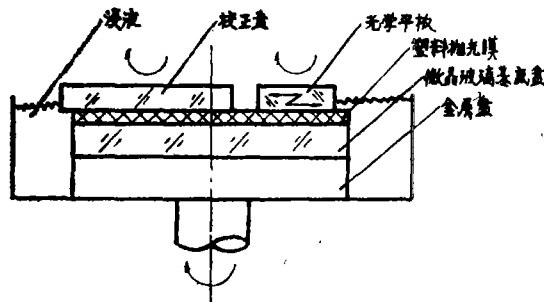


图6 浸液抛光

在此基础上，为克服柏油抛光模的不稳定性，可采用低膨胀系数玻璃等做基底的塑料（如特氟隆）抛光盘。

## 三、浮动式连续抛光运动学机理

浮动式连续抛光是基于光圈数与工件直径平方成正比，其表达式如下：

$$\frac{h_1}{h_2} = \left( \frac{D}{\phi} \right)^2$$

式中：

$h_1$ ——工件的矢高（光圈数）

$h_2$ ——抛光盘全直径矢高（光圈数）

$D$ ——工件的直径

$\phi$ ——抛光盘的直径

即抛光盘越大，所复制的小工件平面度越高。

但从抛光运动学角度分析，正确地抛光运动是形成高精度平面的关键。这里指的抛光运动系工件相对于抛光盘的运动，从机械磨削观点来看，获得高精度平面的首要条件是工件上各点在相对于模盘运动中其行程应彼此相等。在不考虑其它因素的影响、压力为均匀的理想条件下，各点磨损相等（抛光去除量相等），即可得到高的平面度。

下面按图7进行运动学分析。任取工件上的一点M做运动分析，并设 $xoy$ 坐标系为定坐标

系,  $x'o'y'$  坐标系为动坐标系。

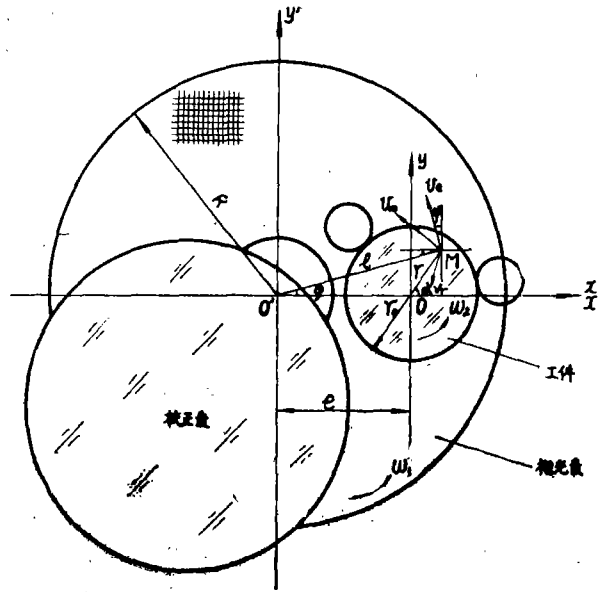


图7 运动分析图

图中:

- $v_m$  ——  $M$  点绕  $O$  点转动的绝对速度;
- $v_e$  ——  $M$  点随模盘绕  $O'$  转动的牵连速度;
- $v_r$  ——  $M$  点的相对速度;
- $R$  —— 抛光模盘半径;
- $r_0$  —— 工件半径;
- $r$  ——  $M$  点距工件中心的距离;
- $\omega_1$  —— 抛光模盘转动的角速度;
- $\omega_2$  —— 工件转动的角速度;
- $e$  —— 抛光模盘与工件的中心距;
- $l$  ——  $M$  点到抛光模盘中心的距离。

下面分析均在  $r \leq l \leq R - r_0$  条件进行的。

并令:  $K = \omega_2 / \omega_1$        $\alpha = \omega_2 \cdot t$

$$\text{由 } v_r = \vec{v}_m - \vec{v}_e \tag{1}$$

$$v_m = r \cdot \omega_2 \tag{2}$$

$$v_e = l \cdot \omega_1 \tag{3}$$

将  $v_m$  和  $v_e$  分别向  $x$  轴和  $y$  轴投影则有

$$\begin{aligned} v_{rx} &= v_{mx} - v_{ex} \\ &= -v_m \cos(90^\circ - \alpha) - (-v_e \sin \varphi) \\ &= v_e \sin \varphi - v_m \sin \alpha \end{aligned} \tag{4}$$

$$v_{ry} = v_{my} - v_{ey}$$

$$\begin{aligned}
 &= v_m \sin(90^\circ - \alpha) - v_c \cos\varphi \\
 &= v_m \cos\alpha - v_c \cos\varphi
 \end{aligned} \tag{5}$$

于是:

$$\begin{aligned}
 v_r &= \sqrt{v_{rx}^2 + v_{ry}^2} \\
 &= \sqrt{(v_c \sin\varphi - v_m \sin\alpha)^2 + (v_m \cos\alpha - v_c \cos\varphi)^2} \\
 &= \sqrt{v_c^2 + v_m^2 - 2v_c v_m \cos(\alpha - \varphi)}
 \end{aligned} \tag{6}$$

在 $\triangle OO'M$ 中:

$$e^2 = l^2 + r^2 - 2lr \cos(\alpha - \varphi) \tag{7}$$

$$l^2 = e^2 + r^2 + 2er \cos\alpha \tag{8}$$

所以:

$$\cos(\alpha - \varphi) = \frac{l^2 + r^2 - e^2}{2lr} = \frac{r + e \cos\alpha}{\sqrt{e^2 + r^2 + 2er \cos\alpha}} \tag{9}$$

将(2)、(3)、(8)、(9)分别代入(6)式有:

$$\begin{aligned}
 v_r &= \sqrt{v_c^2 + v_m^2 - 2v_c v_m \cos(\alpha - \varphi)} \\
 &= \sqrt{(e^2 + r^2)\omega_1^2 + (r\omega_2)^2 - 2r^2\omega_1\omega_2 + (2er\omega_1^2 - 2r\omega_1\omega_2e) \cos\alpha}
 \end{aligned} \tag{10}$$

令:

$$a = (e^2 + r^2)\omega_1^2 + (r\omega_2)^2 - 2r^2\omega_1\omega_2$$

$$x = (2er\omega_1^2 - 2r\omega_1\omega_2e) \cos\alpha$$

再将(10)式按 $(a+x)^n$ 展开有:

$$\begin{aligned}
 v_r &= \sqrt{(e^2 + r^2)\omega_1^2 + (r\omega_2)^2 - 2r^2\omega_1\omega_2} \\
 &+ \frac{(2er\omega_1^2 - 2r\omega_1\omega_2e) \cos\alpha}{2\sqrt{(e^2 + r^2)\omega_1^2 + (r\omega_2)^2 - 2r^2\omega_1\omega_2}} \\
 &- \frac{(2er\omega_1^2 - 2r\omega_1\omega_2e)^2 \cos^2\alpha}{8\sqrt{[(e^2 + r^2)\omega_1^2 + (r\omega_2)^2 - 2r^2\omega_1\omega_2]^3}}
 \end{aligned} \tag{11}$$

由于:

$$a = \omega_2 t \quad da = \omega_2 dt \quad dS = v_r dt$$

因此工件在抛光盘上自转一周后,  $M$ 点的行程 $S$ 为:

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{1}{\omega_2} \int_0^{2\pi} v_r da \\
 &= 2\pi \left\{ \sqrt{(e^2 + r^2) \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 2r^2 \frac{\omega_1}{\omega_2} + r^2} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{r^2 e^2 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 \frac{\omega_1}{\omega_2}}{4\sqrt{[(e^2 + r^2) + r^2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - 2r^2 \frac{\omega_2}{\omega_1}]^3}} \right\}
 \end{aligned} \tag{12}$$

由 (12) 式可知, 工件上各点的行程是由速比所决定, 当速比一定时其行程也就一定了。从上式不难看出只有当速比为 1 时最理想, 即为等行程磨削。

利用上式对  $l=200$ ,  $r_0=75$ ,  $K=0.8、1、1.5、2$  几种情况进行计算, 定量地给出  $M$  点的行程, 如表 1:

表 1

K		0	$1/4r_0$	$1/2r_0$	$3/4r_0$	$r_0$
S	0.8	1570.80	1570.93	1571.35	1572.04	1573.30
	1	1256.64	1256.64	1256.64	1256.64	1256.64
	1.5	841.95	842.38	843.70	845.94	849.16
	2	628.32	629.71	634.02	641.61	652.91

由表 1 给出速比与行程的曲线如图 8:

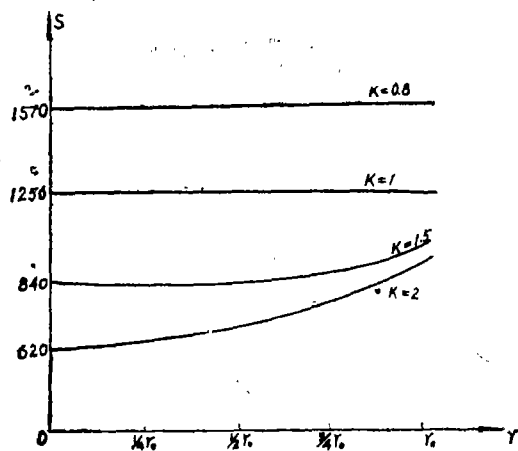


图 8 行程与速比曲线

从曲线上很容易看出只有当速比为 1 时, 工件上各点行程相等, 图上为一直线, 即等行程磨削。而速比为 0.8、1.5、2 时, 其行程均不相等, 即工件上各点之磨削不均, 图上为一曲线。当工件自转一周后其中心点与边缘点的行程差  $\Delta S$  分别为:

$$\begin{aligned}
 K = 1 & \quad \Delta S = 0 \\
 K = 0.8 & \quad \Delta S = 2.5(\text{mm}) \\
 K = 1.5 & \quad \Delta S = 7.2(\text{mm}) \\
 K = 2 & \quad \Delta S = 24.6(\text{mm})
 \end{aligned}$$

从而可见, 磨削时间越长行程差越大, 边缘易多磨, 造成塌边。

从上面的运动学分析中, 清楚地说明在速比为 1 时是完全可以实现等行程磨削的, 即工件上各点相对于抛光盘运动中其行程彼此相等。但在实际加工中, 由于抛光时诸因素的影响, 如: 抛光液的浓度、抛光盘的性能及限位卡轮的摩擦力矩等, 其速比很难为 1。再从力学角度看从动件 (工件) 靠主动件 (抛光模盘) 带动转动时, 其速比也不可能为 1, 只能在极限状

态下才可能。

在实践中也注意到工件的转速往往大于抛光模盘的转速，对此也做了初步分析，认为其主要原因是由于工件与抛光模盘之间的接触面上压强分布不均而引起的。压强分布不均的主要是由于两限位卡轮的约束反力的合力 $Q$ 与抛光模盘对工件的摩擦力 $f$ 形成一倾倒地力矩所致，如图9。该力矩的大小为：

$$M_a = Q \cdot h \\ = \mu \cdot P \cdot h$$

式中：

$\mu$ ——摩擦系数  
 $P$ ——工件重量  
 $h$ ——限位轮高度

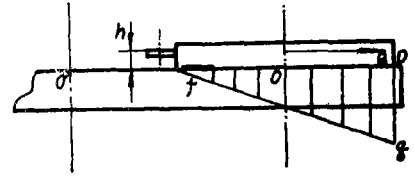


图9 力矩分布图

其力矩 $M_a$ 的大小随 $h$ 的增加而线性增加。由于此力矩的存在，使得工件与抛光模盘之间出现了一微小夹角，从而使处于两表面间的抛光液薄层厚度不为恒量，并随着工件口径的增加，薄层厚度呈线性增加。而压强 $q$ 随之呈线性减小。由于 $D$ 点处的抛光液薄层最小，故压强为最大，造成工件边缘多磨，导致塌边。为克服此种毛病，有利于实现等行程磨削，势必要减小倾倒地力矩。为此必须要将限位轮的高度 $h$ 减到最低限度。其一是使限位轮尽量接近抛光模盘，其二是将限位轮做得薄些。从而使得抛光运动更加合理化，有利于实现最佳抛光状态，使速比接近于1。最终达到等行程磨制，以提高抛光精度的目的。

## 四、结束语

文中对高精度光学平面浮动式连续抛光法，从运动学角度出发做了理论上粗浅探讨与分析，初步提出并论证了等行程磨削的概念。依据多年的工作实践，还是与实际加工情况比较符合的。

### 参 考 文 献

- [1] 王宝林；高精度光学平面的磨制，光学机械，1982年4期38。
- [2] B.Л. 高尔巴奇；光学精磨抛光机床的工作构件运动学，国防工业出版社。
- [3] 国外光学工艺第一册，机械工业出版社。1976年，
- [4] キヤノン 佐柳和男；光学部品の高精度化。

# The Kinematics Mechanism of Continuous Floating Polish Method for Making High Precision Optical Flat

Wang Baolin Xiao Yixin

## Abstract

In this paper, evolutional process from classical optical processing to continuous polishing method is discussed.

We stress on analysing and discussing theory for continuous floating polish method from viewpoint of polishing kinematics and deduces relative formulas.

This paper describes preliminarily the method of equal-stroke grinding method and carries out some analyses according to our experiences.

In arder to get a precision polishing surbace, the question of getting an optimum polishing state is aiscussed.