

凹面衍射光栅刻划机

庄 夔 刘 桂 琴

长春光机所于1979年研制了一台凹面光栅刻划机，可刻划光栅面积为 70×90 毫米²，每毫米可刻划600、1200、2400条线的凹面光栅。1980年末刻出半径为0.35米的I型试用光栅，1981年刻出半径为1米的I型试用光栅。

一、两种方案及其特点

我所的凹面光栅刻划机，是利用小型平面光栅机（1号机）的分度部分⁽¹⁾，并设计安装凹栅刻桥系统而成（也可利用光电式分度部分），该机示意图如图1所示。根据凹面光栅成形原理⁽²⁾⁽³⁾，我们拟定了两种方案（见图2）。第一方案的运动方式与瑞典式相同，即毛坯作间歇移动，刀桥作往复刻线运动，它能形成弦上等分直线条的I型凹面光栅，象差较大。只要光栅刻线短，宽度在允许值范围内，象差就不会超过允许值⁽³⁾。又因为光栅中部刀尖的运动轨迹与毛坯表面形状相符合，刻划到前部后部时，钻石刀的压痕有变化，能造成微弱的环形

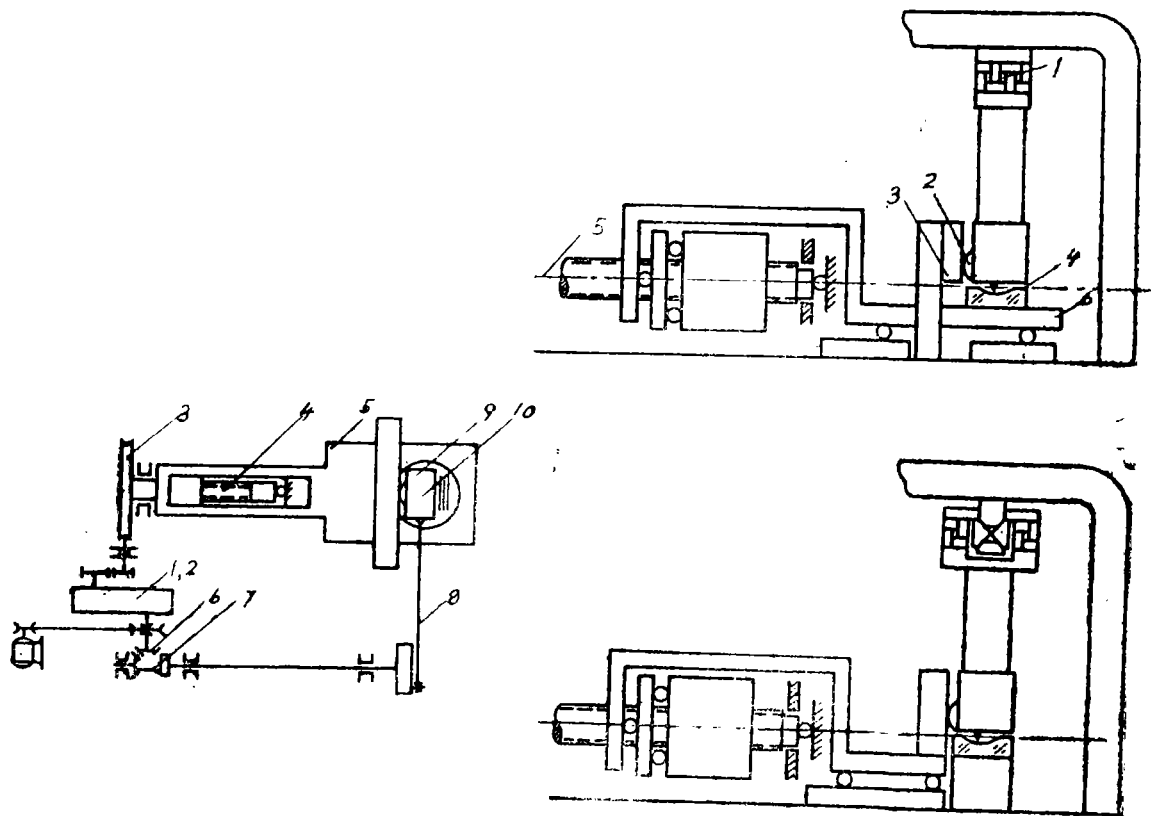


图1 凹面光栅刻划机结构示意图

第一方案 (上) 第二方案 (下)

图2 两种方案

阴影(俗称“核拉圈”)。但因结构简单,运动平稳可靠,零件均可达到高精度,因而我们先采用此方案。

第二方案毛坯固定不动,刀桥既作往复刻线运动,又作间歇移动,即刀桥导轨安装在滑座上,作间歇分度,不等分由棘轮棘爪的附加机构实现,刀桥又沿此导轨作往复运动,它能形成弦上不等分、线条为不同的椭圆形的凹面光栅,有消象差的作用。刻槽定向面的法线会聚于毛坯球表面中心,有利于集光效率的提高,并能消除“核拉圈”。但结构较复杂,有待今后试验研究。亦可采用其他机构形成不等分和曲线条,用来刻制消象差凹面光栅^{[4][5][6]}。

凹面光栅刻划机的分度机构,由曲柄连杆1、棘爪棘轮2、蜗杆蜗轮3、丝杆螺母4、滑座5组成。刻线机构由伞齿轮6、减振器7、曲柄连杆8、刀桥9、小刀架10组成。分度机构和刻线机构之间有传动机构,能互相配合进行刻划(见图1)。

凹栅刻机的精度要求很高,累积误差、偶然误差及刻线直线性为光栅常数的十分之一,周期误差为光栅常数的百分之一。机械式光栅刻划机要达到这样高的精度,必需要有精巧合理的设计和优良的零件和器件。分度部分仍沿用1号机的机构和零件,这些主要零件都是经过多次时效处理和精密研磨,其精度为:分度丝杆在长100毫米内累积误差为0.3微米,非线性累积误差为0.17微米,周期误差为0.01~0.02微米^[7]。分度蜗轮的累积周节误差为8",相邻周节误差为3"。导轨平面度为 $\lambda/8 \sim \lambda/10$,表面光洁度为 $\nabla_{11} \sim \nabla_{12}$ 。

我们设计了悬臂式凹栅刀桥(见图2),刀桥可绕上悬点1作摆动,刀桥下端一侧有聚四氟乙烯球面触点2,沿刀桥平导轨3滑动,平导轨平面度为 $\lambda/8$,表面光洁度为 ∇_{11} 。上悬点采用了一个新式机构——十字簧片支承万向接头式的空间摆动机构(见图3),它具有两个方向摆动的自由度,结构简单,加工容易,在小转角时精度很高,无动静摩擦差,无间隙,用在凹栅刀桥上较合适,(也可采用V形轴系)。这种刀桥有极高的重复性精度和优良的减振性能。

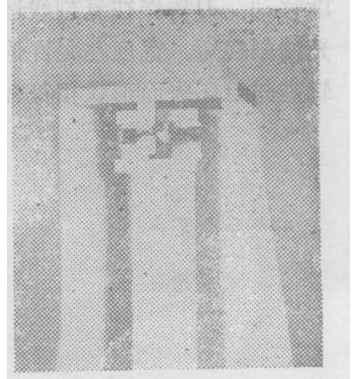


图3 空间摆动机构

1号机曾刻出过较多的合格平面光栅,仅举两例于下表(1200线/毫米,平面光栅):

编 号	刻划面积 (毫米 ²)	分辨本领 (一级) (万) (%)	集 光 效 率 (%)					罗兰鬼线 相对强度 (一级) (%)
			6438 埃	5461 埃	5085 埃	4358 埃	3650 埃	
17219	64 × 40	5.6 (78%)		29		44	47	<0.2%
17221	35 × 35	3.5 (82%)	57	66	68	45		<0.13%

这些衍射光栅的使用结果表明,刻机的精度符合要求。改装时,只要凹栅刀桥系统的精度与平面光栅刀桥相同,就能满足要求。

我们仍采用原来的温度控制系统和隔振基础,保温罩内温度波动在 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 以内,隔振效果良好,因而保证了刻划工作的正常进行。

二、凹栅刻机总体设计的几个问题

(一) 基准选择及运动学设计原理的运用^[8]

选用结构最简单的机构式蜗轮加丝杆螺母作分度基准，完全能满足刻划等分直线条凹面光栅的要求（也可采用光电式）。

该刻划机的机构，都没有过度约束，符合运动学设计原理。例如：精密丝杆的定位，前后端为V形轴承，限制了四点，止推为球面平面相接触限制了一点，因而丝杆只有一个自由度，即绕中心线转动。又例如：凹栅刀桥上端簧片万向接头，限制了四点，只有两个方向摆动的自由度，由刀桥导轨又限制了一点，因而刀桥只有一个自由度，即沿刀桥导轨往复移动。它有下列几个优点：

- (1) 各接触点受力可以预计且稳定；
- (2) 运转误差主要来自弹性变形和磨损；
- (3) 重复性精度很高；

这样的设计有利于机构精密度的提高。

(二) 阿贝原理的应用

将刻划平面4安置在丝杆中心线的延长线5上（见图2），则承载毛坯4的滑座6的微量偏摆，对刻划精度的影响是二级小量，可忽略不计，因而可以相应降低导轨的精度要求，我们应尽量接近符合阿贝原理。实际因刻线长和凹面高差导致阿贝误差，今水平偏摆小于 $0.2''$ ，垂直偏摆小于 $0.5''$ ，刻线长为40毫米，最大凹面高差0.5毫米，滑座被带动点距光栅第一条线约600毫米，则引起的刻划误差为。

$$\Delta = h \cdot \Delta\theta$$

式中 h ——偏离丝杆中心线的距离；

$\Delta\theta$ ——滑座的微量偏摆；

$$\Delta_{\text{垂直}} = \frac{0.5 \times 1000 \times 0.5'' \pi}{2 \times 60 \times 60 \times 180} = 6.06 \times 10^{-4} \text{ 微米}$$

$$\Delta_{\text{水平}} = \frac{40 \times 1000 \times 0.2'' \pi}{2 \times 60 \times 60 \times 180} = 1.94 \times 10^{-2} \text{ 微米}$$

这些误差都在允许范围之内。

(三) 承重、定位分离原则的考虑

由于光栅的扇形误差对光栅光谱成象质量影响较大，因而要求滑座运动的水平方向的直线性在 $0.2''$ 以内，而垂直方向的直线性要求可适当放宽到 $0.5''$ 。采用承重与定位分离原则，有利于实现这些要求。滑座的全部重量由承重导轨担负，并兼水平导向，可用滚动副。垂直导向由高精度的玻璃导轨和聚四氟乙烯触点担负，侧向封闭力由弹簧施加，导向精度稳定可靠，保证了滑座直线性在 $0.2''$ 以内。刀桥悬挂点为承重，而精度要求高的垂直导向，由侧向刀桥导轨单独承担，这种承重与定位分离的办法，保证了刻线的直线性和稳定性。

(四) 变形影响最小原则的利用

刀桥导轨尽量靠近光栅刻划面，且尽量接近丝杆止推点，这样，能减小由于滑座全程移动时，底座变形的变化量所引起的刻划误差。（如果采用三层台方案，刀桥导轨支架固于最下层台，则能完全不反映底座变形的变化量，它所引起的刻划误差为零）。

三、凹栅刻机的精度计算及精度分配

文章及资料多介绍误差综合公式^[10]，它用于产品的精度分析较为方便。在精密机床的总

体设计中,经常需要进行误差分配,今利用误差分配公式进行计算。

(一) 系统误差的不等作用分配

将总误差 Δ_s 按分配系数 α, β 分为系统误差 $\Delta_{系}$ 及偶然误差 $\Delta_{偶}$, 即:

$$\Delta_{系} + \Delta_{偶} = \alpha \Delta_s + \beta \Delta_s = \Delta_s$$

系统误差按作用系数 P_i 分配, 其精度分配公式为:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)} \cdot \left(\frac{P_i}{\sum P_i}\right) \cdot \Delta_{系}$$

式中 ε_i —— 系统原始误差;

$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)$ —— 精度传动比;

P_i —— 各项系统误差误差分量的作用系数;

1. 累积误差

它包括光栅丝杆非线性累积误差 ε_1 , 因温度或底座等变形所引起的累积误差 ε_2 , 累积误差的允许值为 $a/10$ 即 0.17 微米 (600 线/毫米一级)。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)} \left(\frac{P_{01}}{\sum P_i}\right) \varepsilon_{系} = \frac{1}{1} \times \frac{2}{3} \times 0.17 = 0.11 \text{ 微米}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{1} \times \frac{1}{3} \times 0.17 = 0.056 \text{ 微米}$$

2. 周期误差 (允许值为 $a/100$ 即 0.017 微米)

它包括光栅丝杆周期误差 ε_3 , 分度蜗轮的累积误差 ε_4 。

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{1} \times \frac{1.9}{3} \times 0.017 = 0.011 \text{ 微米}$$

$$\varepsilon_4 = \frac{1}{7.7 \times 10^{-4}} \times \frac{1.1}{3} \times 0.017 = 8."03$$

3. 扇形误差 (允许值为 $\lambda/10$ 即 0.054 微米)

$$\varepsilon_{扇} = \left(\frac{L/2}{206}\right) \Delta\beta = 0.054$$

设 $L = 100$, $\therefore \Delta\beta \approx 0."2$

式中 L —— 刻线长度;

$\Delta\beta$ —— 刻线不平行的偏角;

(二) 偶然误差的不等作用分配

偶然误差按作用系数 P_i 分配, 其精度分配公式为:

$$\Delta_{偶} = \sqrt{\sum (\Delta S_i)^2} = \sqrt{\sum (P_i \Delta)^2} = \sqrt{\sum P_i^2} \Delta$$

$$\therefore \Delta = \frac{1}{\sqrt{\sum P_i^2}} \Delta_{偶}$$

$$\Delta S_i = \frac{P_i}{\sqrt{\sum P_i^2}} \cdot \Delta_{偶} = \left(\frac{\partial f}{\partial \delta_i}\right) \cdot \left(\frac{\delta_i}{K_i}\right)$$

$$\text{故 } \delta_i = \frac{K_i}{\left(\frac{\partial f}{\partial \delta_i}\right)} \cdot \left(\frac{P_i}{\sqrt{\sum P_i^2}}\right) \cdot \Delta_{\text{偶}}$$

式中 δ_i ——偶然原始误差；

K_i ——置信系数；

$\left(\frac{\partial f}{\partial \delta_i}\right)$ ——精度传动比；

P_i ——各项偶然误差误差分量的作用系数；

凹面光栅刻划机的分度系统包括滑座误差 δ_1 ，连接环误差 δ_2 ，丝杆误差 δ_3 ，蜗轮误差 δ_4 ，齿轮及间歇机构误差 δ_5 ，刻划系统包括小刀架误差 δ_6 ，凹栅刀桥导轨误差 δ_7 ，凹栅刀桥上悬点误差 δ_8 ；环境影响包括温度影响误差 δ_9 ，振动影响误差 δ_{10} ； $\Delta_{\text{偶}}$ 的允许值为 $\alpha/1^0$ 即 0.17 微米。

设 $P_{\delta_2} = P_{\delta_3} = 2$ ， $P_{\delta_1} = P_{\delta_6} = P_{\delta_7} = P_{\delta_8} = P_{\delta_9} = P_{\delta_{10}} = 1$ ， $P_{\delta_4} = 0.1$ ， $P_{\delta_5} = 0.01$ ；都为均匀分布， $K_i = \sqrt{3}$ ； $\left(\frac{\partial f}{\partial \delta_1}\right) = 0.097$ ， $\left(\frac{\partial f}{\partial \delta_i}\right)_{i=2,3,4,7,9,10} = 1$ ， $\left(\frac{\partial f}{\partial \delta_4}\right) = 7.7 \times 10^{-4}$ ， $\left(\frac{\partial f}{\partial \delta_5}\right) = 1.8 \times 10^{-5}$ ， $\left(\frac{\partial f}{\partial \delta_8}\right) = 0.05$ ；由公式计算得：

$\delta_1 = 0."8$ ， $\delta_2 = \delta_3 = 0.16$ 微米， $\delta_4 = 10"$ ， $\delta_5 = 44$ 微米， $\delta_6 = \delta_7 = \delta_8 = \delta_{10} = 0.08$ 微米； $\delta_9 = 1.7$ 微米；

以上误差分配是合理的。

按影响误差的因素分类，这些误差属于制造误差和使用误差。目前这台刻划机只能刻划 I 型凹面光栅，还存在原理误差，但仍能满足很多真空紫外单色仪的使用要求，我们可以采用非球面光栅毛坯刻划，不等分刻划，曲线槽刻划等方法，减小原理误差，以便刻出消象差光栅。

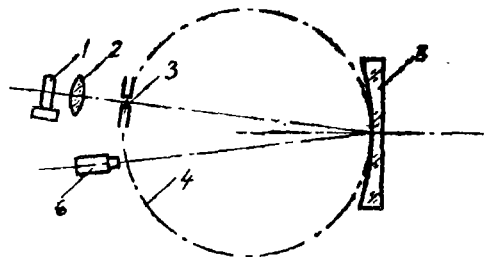
四、初步结果

将1981年刻出的半径为 1 米、600 线/毫米的 I 型试用凹面光栅（编号为 08102，由庄夔、刘桂琴刻出），按正入射式安排，罗兰圆上放一狭缝和一台观测谱线用的读数显微镜，光源用钠光灯，单色光经聚光镜系统成象在入射狭缝上，再直接入射到被测凹栅上，衍射后在罗兰圆上形成谱线，用读数显微镜观测（或拍照或用光电倍增管接收，扫描谱线轮廓），此时凹栅置于旋转台上（见图 4）。

观测到钠双线 5890 埃及 5896 埃清楚分开，谱线整齐清晰，两谱线约相距 0.43 毫米。

用宽为 0.022 毫米的入射狭缝，测得谱线半宽度约 0.06 毫米，即凹面光栅的分辨能力优于 0.9 埃。

罗兰鬼线相对强度与平面光栅的相当，估计约 1%（目测）。



1. 光源 2. 聚光镜 3. 入射狭缝
4. 罗兰圆 5. 凹栅 6. 接收系统

图 4 凹栅检验布置图

此试用凹栅刻划面积为 32×35 毫米。

以上试用凹栅的光谱性能，说明此台凹面光栅刻划机的精度，可以满足刻制普通真空紫外单色仪用凹栅的要求。

1983年初刻出1米、1200线/毫米的I型试用凹面光栅（由张庆英、李春启刻出）。

本刻划机还可刻划各种非球面光栅（超环面、柱面、椭球面等）及用于各种正入射、掠入射的单色仪中的可见、紫外、真空紫外、软X射线波段使用的凹面光栅。

总之，所做的工作只是初步的，有待今后进一步提高。我们还将继续开展不等分曲线条的消象差凹面光栅的研究，凹栅各项检验设备的建立和完善，继续开展真空紫外、软X射线波段的镀膜技术、刻划技术的研究。凹栅检验的有：孙景椿、王友民、刘书弟、李秀红等，曾得到梁浩明、张庆英、李春启、李永贵、张秀兰等同志的帮助，一并表示感谢！

参 考 文 献

- [1] 梁浩明、庄夔、张庆英、杨厚民：“衍射光栅刻划机”，《光学学报》Vol.1, No1, (1981)
- [2] 庄夔、赵明辰译：“凹面光栅及其象散和象差”，《光学与光谱技术》，1981, No1
- [3] 吴振华：《北光通讯》1981, No2, 3, p.1~3
- [4] 王金波译：《光学精密机械》1981. No1
- [5] 北京第二光学仪器厂译：《北光通讯》1981, No2, 3 p119~123
- [6] T.Harada and T.Kita: 《Appl. Opt.》Vol.19, No23, 3987, 1980
- [7] 张泰，顾方舟：“光栅刻划机高精度丝杠的研磨”，《仪器制造》1983, No2
- [8] 上海科大，上海机院编：《精密机械设计》，（教材）
- [9] 长春光机学院编：《精度理论》（教材）