

衍 射 光 栅 刻 划 机

梁浩明 庄 夔 张庆英 杨厚民
(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文介绍了长春光学精密机械研究所研制成功的四台衍射光栅刻划机。该机自1958年开始设计。1号、2号光栅刻划机为机械型,分别于1959年、1965年安装调试完毕。3号、4号光栅刻划机为光电干涉控制型,分别于1970年、1975年制成,每台光栅刻划机都有自己的特点。4号机连续运动时的锁相误差平均为1/100条纹,个别的最大不超过1/36条纹。利用这些类型的光栅刻划机已刻划出许多平面光栅,最大的刻划宽度达185毫米,刻线密度从每毫米60条到1200条。实测分辨本领最高达20万,相对效率最高达90%,一级罗兰鬼线最低为 4×10^{-5} ,赖曼鬼线观察不到。

概 述

长春光学精密机械研究所于1958年开始研制衍射光栅,1959年试制成一台机械式光栅刻划机,可刻划光栅面积为 $80 \times 100 \text{ mm}^2$,每毫米刻划200、300、600条线,称为1号机。1964年设计了2号机,也是机械式刻划机,可刻划面积为 $120 \times 185 \text{ mm}^2$,每毫米刻60至600条线,1965年安装调试完毕并刻划出每毫米600条线的光栅。1972年1号机又刻划出每毫米1200条线的光栅。

1970年研制成功一台以衍射光栅为分度基准的光电光栅刻划机。所用的光栅是在2号机上刻出的槽形对称的衍射光栅。机器仍然以间歇运动的方式运转,可刻划面积为 $120 \times 150 \text{ mm}^2$,每毫米可刻300、600、1200条线,称为3号机。所刻划的光栅罗兰鬼线几乎已全部消除。1975年又试制了一台光电控制连续运动的刻划机,称为4号机,现已刻划出面积为 $120 \times 150 \text{ mm}^2$ 、每毫米600条线可见光三级使用的光栅。

下面分别介绍这四台光栅刻划机。

一、机械式平面衍射光栅刻划机

1号、2号机是机械式平面衍射光栅刻划机,它们的机构基本相同,仅在所刻划的光栅大小上有所差别。该机采用了光栅坯作间歇运动,刻刀作往复运动的工作方式,由分度机构和刻线机构互相配合进行刻划。分度机构由曲柄连杆、棘爪棘轮、蜗杆蜗轮、丝杆螺母带动承载光栅坯的滑座组成。刻线机构由伞齿轮副、减振器、曲柄连杆、刻桥及摇刀架带动钻石刻刀组成。1号及2号机外形如图1和图2所示。

光栅刻划精度要求很高,一般累积误差为光栅常数的十分之一,周期误差为光栅常数的

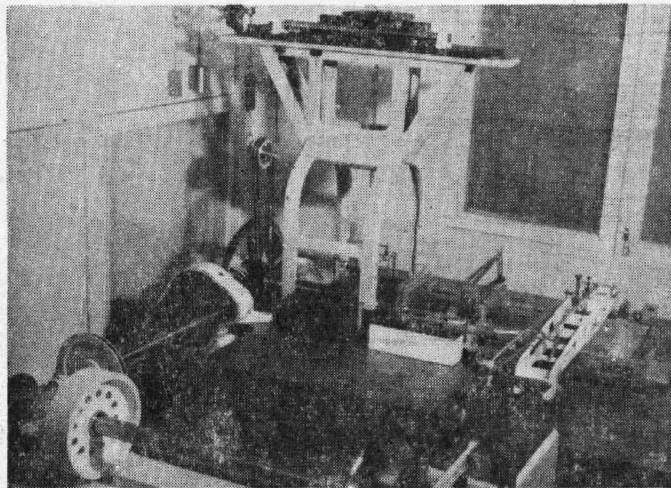


图1 1号光栅刻划机外形

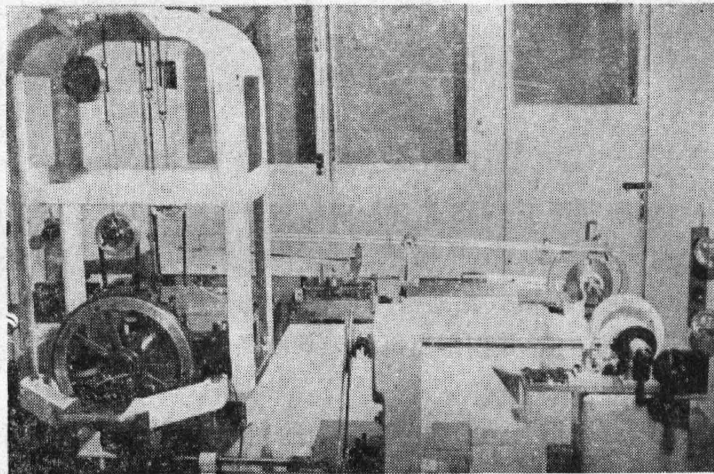


图2 2号光栅刻划机外形

百分之一,刻线的直线性相当于累积误差的要求。机械式光栅刻划机全靠机械来达到精度。主要零件的精度由精密研磨获得,几个零件的实测精度为:分度丝杆在长100mm内累积误差为 0.3μ ,误差曲线呈弧形,其偏离圆弧的数量略小于 0.17μ ,周期误差为 $0.01\sim 0.02\mu$,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 $\lambda/8\sim\lambda/10$ ($\lambda=5461\text{\AA}$),表面光洁度为 $\nabla 11\sim\nabla 12$ 。

整机采用了机动设计原则,如分度丝杆是安置在两个“V”形轴承上,止推用一颗钢球(图3(a));刻桥以三点支承在三根平面导轨上,以两点支承在两根垂直的平面导轨上(图3(b))。这样的设计有利于机构精密度的提高。

关于机构的弹性变形对精度的影响,在光栅刻划机上必须考虑的。从传动链中各零件的承载结构差别很大这一点来看,问题特别集中在螺母与滑座相连接的连接件上,为此设计了用三个连接环和双层滑座的机构(图4)。

刻桥的导轨触点布置成磨损对消的方式^[4],使触点磨损对光栅精度的影响为两触点磨损的差值。

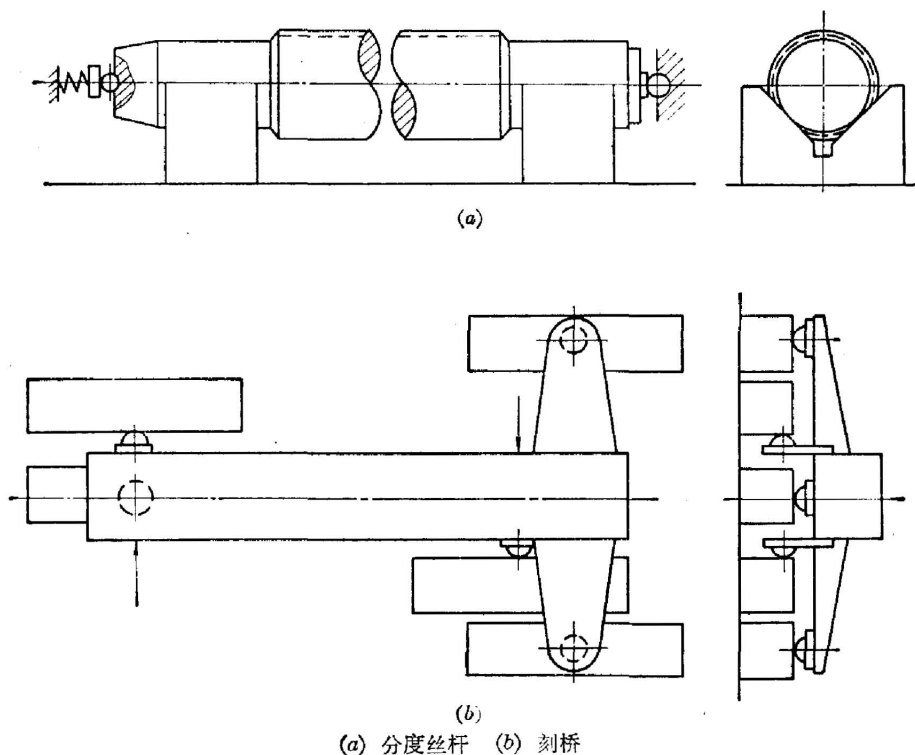


图3 按机动设计原则设计的机构

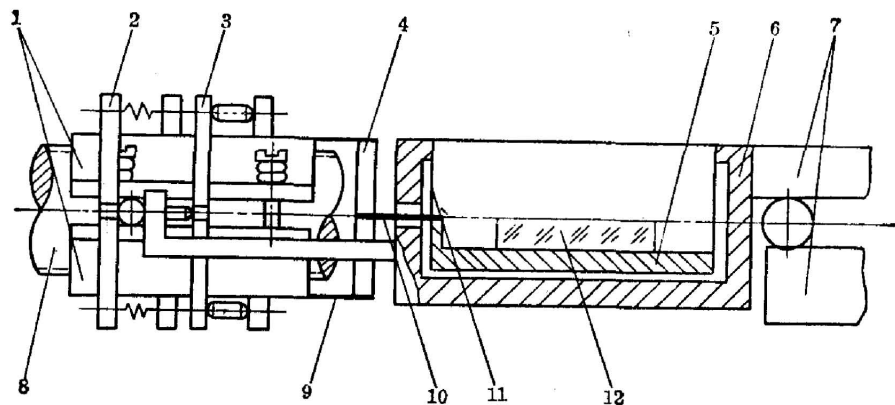


图4 “三环连接”和“双螺母弹簧台”示意图

1—螺母；2—封闭环；3—基台环；4—弹台环；5—弹台；6—基台；7—滚动导轨付；
8—分度丝杆；9—钢丝；10、11—簧片；12—光栅坯。

除刻机外，光栅刻划对环境的要求是比较严格的。我们采用了大块混凝土垫上弹性体的防振基础，基础的自振频率达到1.5赫，刚度达到50 kg/mm，效果良好。恒温采用了机房控温、房间控温和刻机罩内控温三层控温措施，刻机上刻划部分空间温度的稳定度控制在±0.02℃。

二、光电干涉控制平面光栅刻划机

为了简化机器结构，降低关键机械零件要求，提高刻机精度，我们研制了干涉控制的3

号及 4 号光栅刻划机(图 5 和图 6)。

这两台机器均采用类似于苏联格拉西莫夫提出的方法,用光栅构成的干涉仪作为分度的基准^[2]。我所顾去吾同志对这种光路进行了改进,他以两个棱镜代替平行的分束板(图 7),这样可以改变光束的入射情况,以适于各种精度使用。这两台机器均使用每毫米 600 条线



图 5 3 号光栅刻划机外形

反射衍射光栅的二级条纹。此时,当光栅沿其表面移动一个光栅常数的距离时,干涉仪视场中将移过四个干涉条纹。由于参加干涉的每一光束复盖了约 6000 个刻槽,故条纹信号所代表的滑座进程是这些刻槽距离的平均值。3 号机的工作原理与格拉西莫夫的机器相似^[3]。刻划过程象机械刻划机一样,所不同的是每当刻划完一条线,刻线机构上的凸轮机构触动开关使计数器置零,计数器通过功率输出级使离合器啮合,从动轴开始随主动轴转动,再通过机构的传动链使滑座移动。此时,放在滑座上的干涉计量系统产生条纹变化,通过电子学系统计数。当计数器记满所需要的条纹数,功率输出级立即使离合器脱开,并使制动器啮合。这样离合器从动轴就不再随主动轴转动,滑座也停止了运动,分度过程終了。同时,作连续运动的刀桥在毛坯上刻划一条线。刻划完毕后,凸轮机构又触动开关,计数器置零,机器进入下一个分度过程。

电子学系统应排除外界无关脉冲的干扰,这是本机必须保证的条件。在刻划一块光栅的近百小时内,只要计数器错记一个数,所刻划的光栅就要报废。采用干扰抑制器及其它措施,可解决错记数的问题,这些措施是参考博·维雷尔的文章^[4]后采取的。

本机是开环控制系统,离合器脱开后滑座每次滑移量的一致将造成残余误差,3 号机滑移量约 0.1μ ,其最大不重复量小于 0.02μ 。

4 号机是闭环的干涉控制滑座连续运动光栅刻划机,这类机器的工作原理早有描述^[5],它与前述各机不同,其显著特点是滑座作连续的等速移动,而不是作“停”、“动”的间歇运动。这种运动方式有助于控制精度的提高。

图 8 给出机器结构的示意图,采用了与 3 号机相同的光栅干涉仪系统,它给出的干涉条纹就是代表机器滑座位置的“测量信号”。

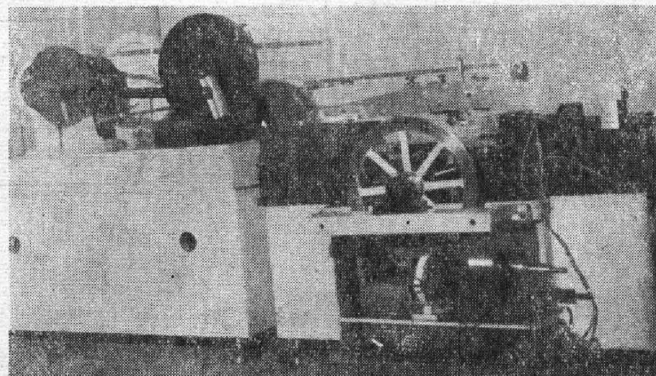


图 6 4 号光栅刻划机外形

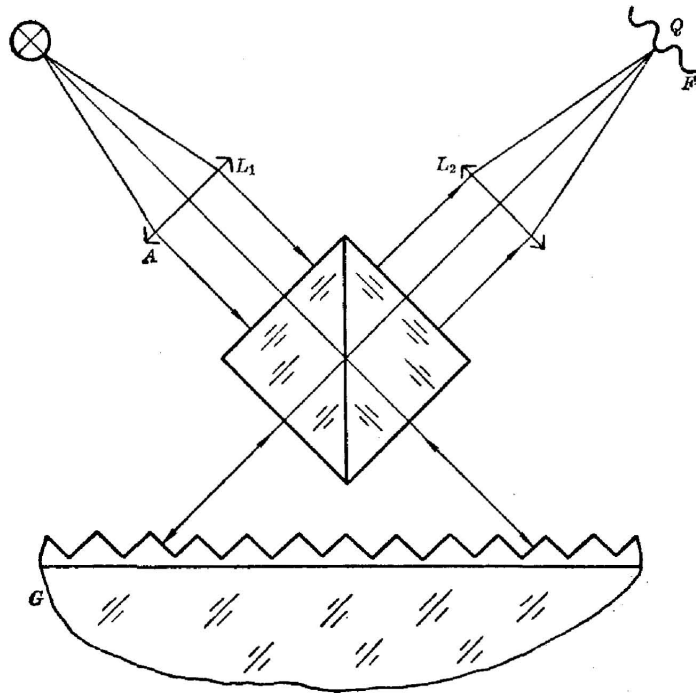


图7 胶合双棱镜分束的光路

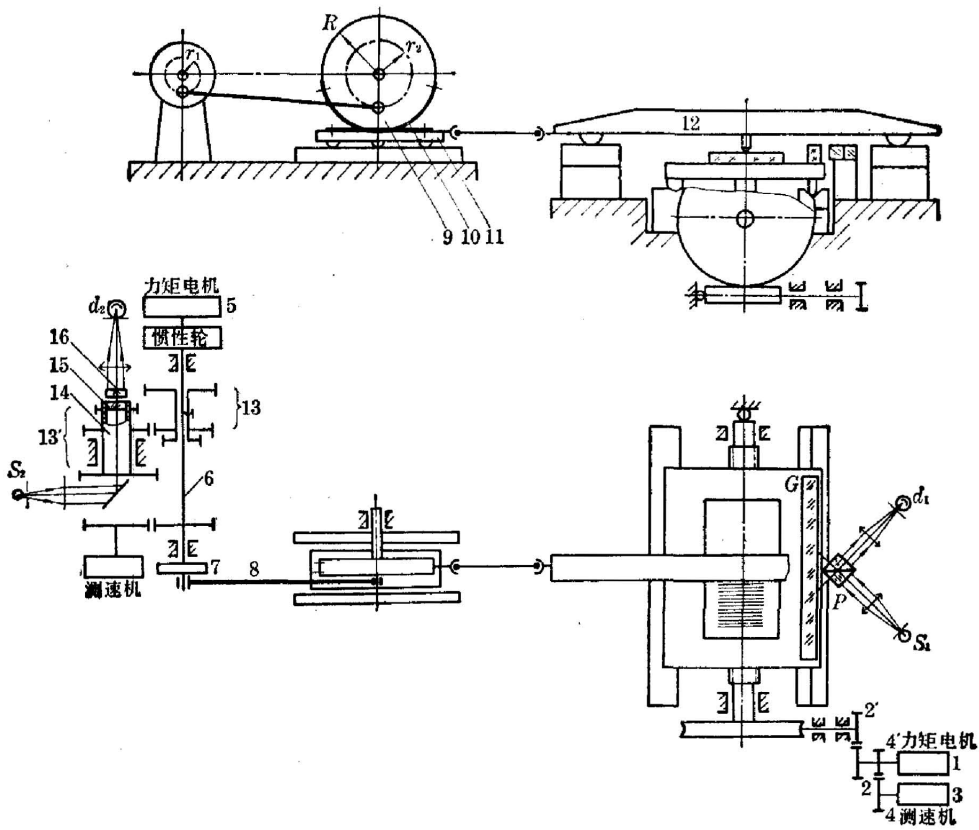


图8 4号机结构示意图

机器分度系统和刻线系统分别由两个力矩电机单独驱动,分度系统的传动部分与3号机不同的是没有离合器,而由力矩电机1通过齿轮2、2'带动分度蜗杆。测速机3通过齿轮4、4'与力矩电机连接,并且通过速度反馈改善机器的动态性能。在整个刻划过程中,光栅滑座作连续等速直线运动。

刻线系统力矩电机5的转子直接安装在系统的驱动轴6上,使其均匀转动。轴6通过由带偏心轴的圆盘7、连杆8、带偏心轴的摆盘9、钢带10、滑车11组成的等速机构推动刀桥作往复直线运动。滑车11及刻划刀桥在刻线范围内应作等速运动才能刻划出直的光栅线条。采用双曲柄机构后,在所需120毫米刻线范围内,刀桥运动速度的变化小于4%。

轴6通过齿轮组13、13'带动空心轴14转动,固定于空心轴内的旋转偏振片(起偏光镜)15也随之转动。光源 S_2 、旋转偏振片15、固定偏振片(检偏光镜)16、接收元件 d_2 组成产生“参考信号”的光学系统。当刻机运转时,接收元件 d_2 接收的是强度起伏的光信号,即本机的参考信号,它代表刻刀的位置,是刻机运动速度的基准。

滑座与刀桥需精确地同步运动,为此,必须使代表滑座移动速度的信号与代表刀桥运动速度的信号频率相等,并且两者相位差的变化也要很小。

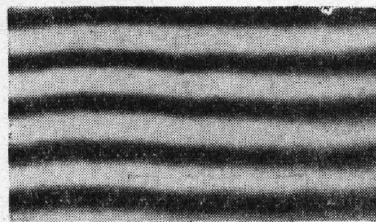
所用电路从原理上说,是一个超低频的锁相环路。

实测4号机在连续七天的工作中,两路信号的锁定最大误差小于电相角 10° ,即相当于定位精度高于1/36干涉条纹,而平均误差只有 4° ,相当于1/100个干涉条纹左右,证明系统的性能良好。

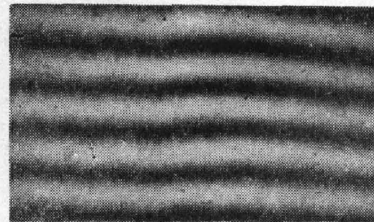
三、光栅质量

将刻划出的光栅逐块检验其分辨本领、罗兰鬼线、赖曼鬼线、集光效率,并把衍射波阵面的干涉图样拍成照片。

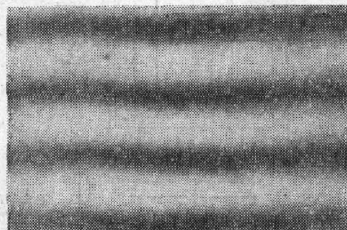
部分光栅的检验结果列于下表及图9。图表中的光栅编号如下:第1位数为机器号,第



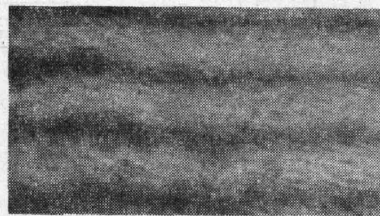
(a) 16603号光栅,刻线宽度100mm
600线/mm,5461Å I级(衍射角 $9^\circ 25'$)



(b) 26503号光栅,刻线宽度100mm
600线/mm,5461Å I级(衍射角 $9^\circ 25'$)



(c) 37211号光栅,刻线宽度50mm
1200线/mm,5461Å I级(衍射角 $19^\circ 5'$)



(d) 47904号光栅,刻线宽度150mm
600线/mm,6328Å III级(衍射角 $34^\circ 38'$)

图9 光栅衍射波阵面干涉图

刻制的部分光栅数据表

光栅号	刻线面积 (mm ²)	刻线密度 (线/mm)	实测分辨本领 (万)	罗兰鬼线 相对强度 I级(%)	赖曼鬼线	集光效率 (%)	散射光总和 (4358Å) (III级)
16512	45×100	600	4.5 ^(5461Å) 9 ^(II级)	<0.1	观察不到	67 ^(5461Å) I级	
17405	40×50	1200	4.6 ^(5461Å) I级	<0.4	观察不到	65 ^(3132Å) I级	
17320	40×45	1200	5.6 ^(5461Å) I级	<0.4	观察不到	70 ^(5461Å) I级	
26502	50×100	600	4.2 ^(5461Å) 8.4 ^(II级)	<0.2	观察不到	60 ^(6438Å) I级	
27833	30×30	100				92 (10.6μ)	
37209	52×70	1200	7.5 ^(4358Å) I级	观察不到	观察不到	65 ^(4358Å) I级	
37303	100×100	600	9.1 ^(5461Å) II级	观察不到	观察不到	78 ^(5461Å) II级	
37501	120×150	600	20 ^(4358Å) III级	未测	观察不到	43 ^(5461Å) III级	3%
47702	95×100	600	9.0 ^(5461Å) II级	观察不到	观察不到	73 ^(5461Å) II级	
47801	40×60	600	3.6 ^(5461Å) I级	观察不到	观察不到	81 ^(5461Å) I级	
47904	120×150	600	20 ^(4358Å) III级	观察不到	观察不到	57 ^(5461Å) III级	2%

2、3 位数为光栅刻制年份,第 4、5 位数为序号。

近廿年来,衍射光栅刻划机已为国内、外刻制出从每毫米 60 条线到 1200 条线宽度小于 150mm 的光栅 500 多块,使用结果表明,这些机器的设计是成功的。

参 考 文 献

- [1] Ф. М. Герасимов; *Опт. Мех. Пром.*, 1957, **3**, 47.
- [2] Ф. М. Герасимов; *Опт. и Спектр.* 1963, **XIV**, № 3, 406; 1963, **XIV**, № 4, 559.
- [3] Ф. М. Герасимов; *Опт. и Спектр.*, 1965, **XIX**, №2, 270.
- [4] V. Boas; *IEEE Spectrum*, 1973, **10**, No. 1, 53.
- [5] G. R. Harrison; *J. O. S. A.*, 1955, **45**, No. 2(Feb), 112.

The diffraction grating ruling engines

LIANG HAOMING, ZHUANG KUI

ZHANG QINGYING and YANG HOUMIN

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 11 February 1980)

Abstract

The four diffraction grating ruling engines developed in Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics are described. The design of the 1st engine started in 1958. The 1st and 2nd engines are mechanical engines. They were built up at 1959 and 1965 respectively. The 3rd and 4th engines are photoelectrically controlled engines. They were built up in 1970 and 1975 respectively. Each engine has its special constructional features. The 4th engine has phase lock error of about 1/100 fringe in average in the case of continuous carriage motion and 1/36 fringe in maximum. Many plane diffraction gratings have been produced from these engines. The maximum ruling width is 185 mm among these gratings. The ruling density is from 60 l/mm to 1200 l/mm. Practical resolving power is up to 200,000, relative efficiency up to 90%, relative intensity of Rowland ghost down to 4×10^{-6} in 1st order. Lyman ghost is not observable.