

美国基特峰天文台的衍射光栅刻划机

梁 浩 明

美国基特峰国家天文台 (Kitt Peak National Observatory) 的衍射光栅刻划机是一台干涉控制连续刻划光栅刻划机, 它是美国麻省理工学院 (M.I.T) 哈里逊教授 (G.R. Harrison) 的第三台机器*, 于1973年转到天文台。该机是以美国摩尔特种工具公司 (Moore Special Tool Co.) 一台M32 (4号) 万能测量机为基础改制的, 在完整的机械传动链上加入激光干涉装置、交流讯号发生器、精密测角装置、气压补偿装置以及相应的各控制电路形成一台光电干涉控制连续光栅刻划机。机器行程到750mm, 已刻出许多宽500mm以下质量优良的天文光栅和小阶梯光栅。

机器示意如图1, 最右端为驱动马达1, 用美国电器公司E650MG型带发电绕组的力矩马达, 1/5马力, 调速范围3到3000rpm, 转速稳定到1% (E650MG Motomatic, Elect-

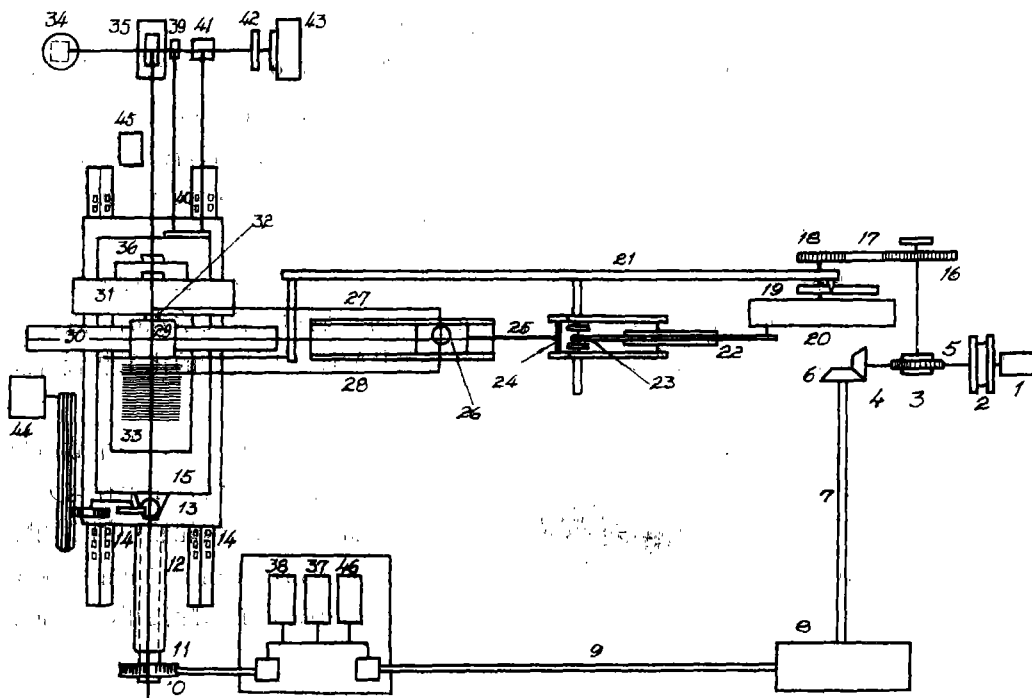


图1 美国基特峰天文台的光栅刻划机示意图

* G.R.Harrison, S.W.Thompson, H.Kazukonis, J.R.Connell, J.Opt. Soc. Am. 62, 751(1972)

ro-Craft Corporation, Minnesota) 马达轴上装一个小带轮, 通过平带带动另一个大带轮减速, 在大带轮 2 轴上装有一根蜗杆 3 和一个伞齿轮 4, 蜗杆带动一个蜗轮 5, 再带动刻线机构, 伞齿轮则带动分度机构。

先说分度机构。另一个相同的伞齿轮 6 转向后通过一根长轴 7 传到交换齿轮箱 8。图 2 为交换齿轮箱的示意图, 箱内有两对伞齿轮和两对平齿轮, 传动轴进入齿轮箱后, 经第一对伞齿轮转向朝下, 然后带动两对平齿轮变换刻线密度, 变换这两对平齿轮可使刻线从每毫米 23.2 条到 1200 条, 中间可调出 25 种刻线密度, 为此需用齿轮 22 个。第二对伞齿轮把向下的转动变为向左的转动, 通过一个弹性联轴节, 带动一根很长的轴 9, 继续传动至主齿轮箱。

图 3 为主齿轮箱的示意图, 传动轴从右往左进入此箱, 经过四对平齿轮及一组差动伞齿

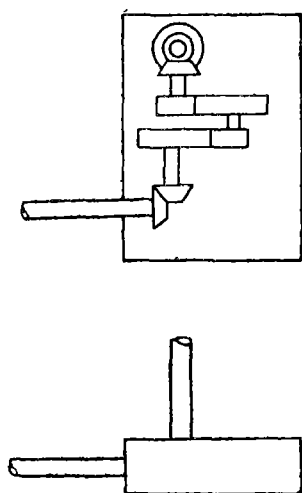


图 2 交换齿轮箱示意图

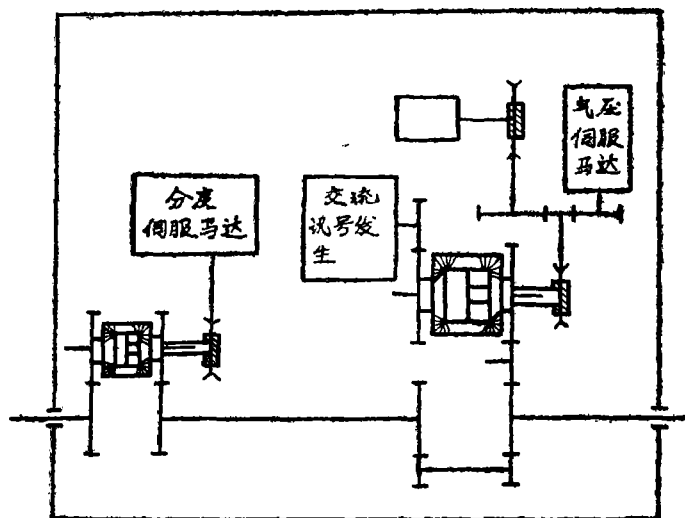


图 3 主齿轮箱示意图

轮后, 往左传出箱外, 带动分度蜗杆转动。这一传动系统在图 3 的下部, 是机器作纯机械刻划时的基本传动系统。齿轮箱上部是与机器电控电路相连系的机电机构: 交流讯号发生器用美国电表公司的 FBSX-1212-M 10 交流电发电机, 2 极最高转速 12000rpm (Electric Indicator Co. Inc. Conn. FBSX-1212-M 10 A.C. Generator) 用它产生代表钻石刻刀位置的电讯号。由传入齿轮箱的传动轴往上经介轮带动一组差动伞齿轮, 再通过一对齿轮带动此电机发出电讯号; 气压伺服量通过伺服马达带动齿轮、蜗杆、蜗轮及差动轮组来改变交流讯号的频率; 分度校正量则通过同步机带动蜗杆、蜗轮、差动轮组从而传入基本传动系统中而起修正作用。已经上述修正的、准确的动量, 从齿轮箱左边的传动轴传出, 带动分度蜗杆。

分度蜗杆 10 带动蜗轮 11, 通过丝杠 12 及螺母, 带动放有待刻光栅毛坯的工作台 13 作分度运动。蜗轮付传动比为 180:1, 丝杠用梯形扣, 中径约 40mm, 每英寸 10 扣。螺母用整个螺母, 刚固于工作台底面, 长约 60mm。丝杠用氮化钢, 传动 18 英寸长累积误差不大于 0.00003 英寸, 周期误差为 5×10^{-6} 英寸 (相当于 $\pm 0.06 \mu\text{m}$)。这几件都是摩尔公司 M32 (4 号) 测量机的原有零件, 只是在丝杠的止推轴承和螺母上有些改变。丝杠的止推轴承从轴向滚珠轴承改为轴向硬质石墨滑动轴承, 所用硬质石墨是美国威克斯公司的 18 和 67 石墨 (Graphitar grade 18 and 67, Wickes Engineered Materials Div of Wickes Corporation), 特

点是高硬度、低摩擦系数和耐磨，其摩擦系数在润滑状态可达0.004到0.025之间，一旦跑合好之后几乎不磨损。螺母则从整个改成大半个。工作台所用导轨14是双V形滚动导轨。工作台系双层结构，上台15是一个特殊的弹簧台（图4）即在铸铁台子上铣出如图的沟槽，用9个螺丝把此台三小块向下凸出的平面刚固在下台面，其余部份则籍槽间连接部份与此三小块联接而悬起来，形成了上下台间有可作相对微量转动的一点弹性。待刻光栅坯33即放在上台面。

再说刻线机构。驱动蜗轮轴的上端是一个齿带带轮16，齿带用美国斯托克驱动产品公司的TWX510-223-0643齿带（TWX510-223-0643 Timing Belt Stook Drive products, New York）通过齿带17带动另一个带轮18以及抬落刀凸轮19和刻线曲柄盘20。凸轮推动一根很长的抬落刀杆21再带动靠近刻线导轨的另一段抬落刀机构。曲柄盘则通过连杆22推动一套摆动杠杆以改变连杆端点23的简谐运动为杠杆上端点24的直线运动（图5）。通过一根连

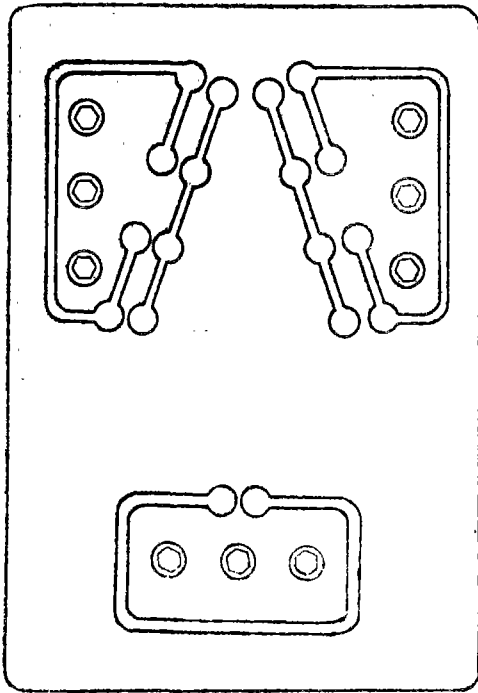


图4 光栅工作台上台示意图

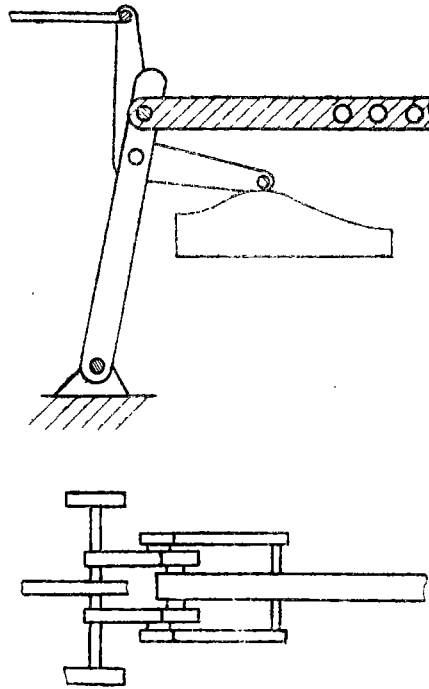


图5 变简谐运动为匀速运动的摆杆机构示意图

杆25继续往左推动滑块26。滑块两边各带动一根连杆27（28）继续往左推动装有刻刀架的滑套29。滑套在一根圆导轨30上滑动，并依靠一根熔石英方导轨31来保证刻槽的直线性。在熔石英导轨长400mm的工作面上直线性为1/10条纹。在此导轨面上滑动的触点32用美国卡狄利克塑料化学公司的OILON Pv80塑料（OILON Pv80, Cadillac plastic and Chemical Co.）特点是自润滑，摩擦系数低且耐磨，滑动摩擦系数到0.05。

机器的三个电控系统为：

1. 移动控制系统

用激光干涉仪（34、35、36）产生工作台的移动讯号，用交流发电机37产生刻刀的移动

讯号，两路讯号进入电路比相，经伺服电机38补偿锁相，其电路原理见图6。所用激光器是

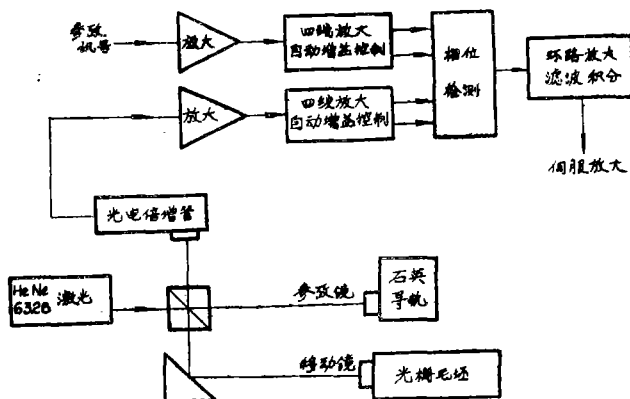


图6 分度部分光电原理图

美国相干辐射公司200型氦氖单频激光器(TROPEL Model 200 HeNe 6328 Single Frequency Laser, Coherent Radiation, Calif.) 长期稳频 1×10^{-8} 。干涉仪用泰曼型，其固定反射镜定位在熔石英导轨的背面，移动反射镜则经常放在待刻毛坯的后侧面。用1p21光电倍增管接收。实测已校正的误差曲线，如图7，可见其校正量约为 $0.5 \mu\text{m}$ ，主要是周期误差。图8是移控电路实测的残差记录，此残差量约相当于干涉条纹的 0.1° 位相差，换算成

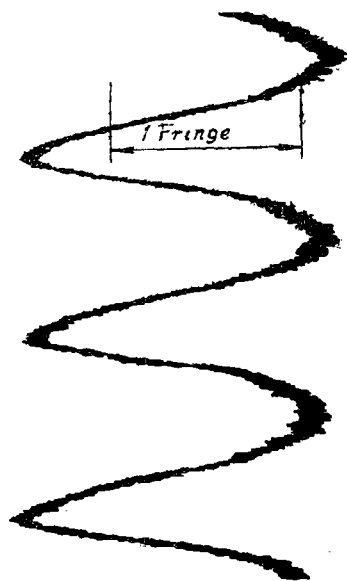


图7 已校正的分度误差的实测曲线



图8 实际记录的分度残差曲线

线位移约为 $0.0001 \mu\text{m}$ 。

2. 转动控制系统

用激光干涉仪 (34、39、40、41) 产生工作台的转动讯号，经调制器42进入光电倍增管43转为电讯号，再经伺服电机44校准工作台上台的运动直线性。其电路原理见图9。所用激

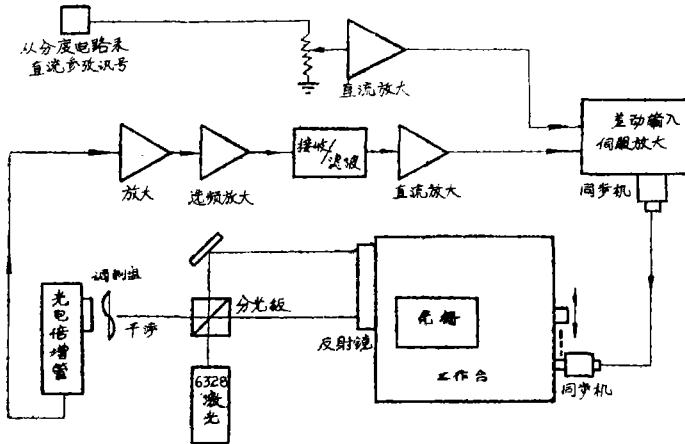


图9 转控部分光、机、电原理图

光是从移动控制系统的激光器分束。干涉仪仍用泰曼型，但干涉仪的两面反射镜都在同一条跟着工作台一起移动的长镜子上，如果工作台不转动，视场内的干涉条纹也不动，用调制器获得一定幅度的交流讯号，经电路放大，再经检波滤波变回直流。调节另一从同一激光器来的标准参考电压与之相等。一旦工作台有转动，讯号电压随之而变，伺服系统转动工作台使讯号恒等于参考讯号，亦即保持工作台恢复原始的角方位。所用激光测角仪镜子长约350mm，相干光束相距约300mm，可控工作台精度不低于 $0.01''$ 。

3. 气压补偿系统

由气压敏感元件45进行气电转换，经伺服电机46在分度运动链中加入差动量予以补偿。其电路原理见图10。偏离始刻气压的气压差值，由气压敏感元件测出，经放大后送入电路。

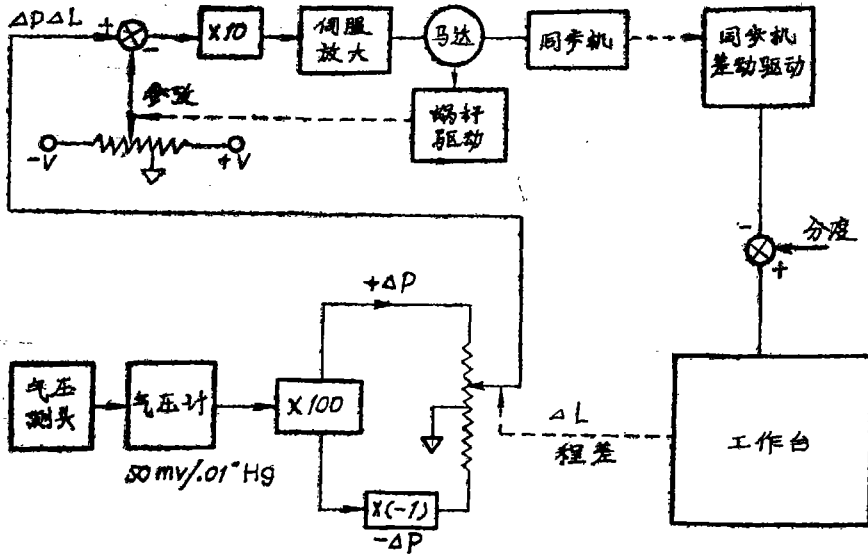


图10 气压校正部分机电原理图

敏感元件用美国596型绝对气压传感器 (Type 596 Absolute Vacuum / Pressure Transducer, Datametries·Dresser Industries, Inc. MA.) 精度到读数的0.05%。偏离始刻光程的光程差值, 由工作台拉动精密电位器作为变量送入电路。表1列出刻划 KPC 19这块光栅时的实际记录。从这5天记录的11个数据可算出平均校正残差换算至对刻线分度的影响为0.0074干涉条纹, 相当于 $0.0047\mu\text{m}$ 。计算的均方差为0.0043条纹 ($0.0027\mu\text{m}$)。

图11是实际测定的气压偏差(下曲线)及其校正曲线(上曲线), 格值为0.032条纹

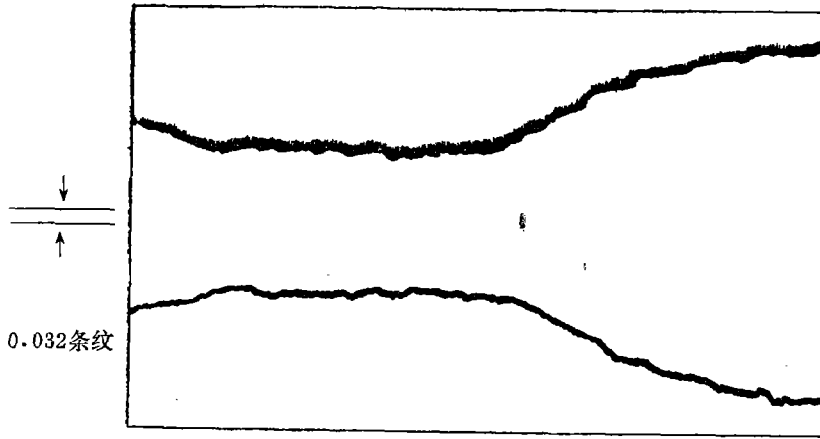


图11 实测气压变化及其校正曲线

表1 气压变化及其补偿实测记录

日期	时间	读数	记录		$\Delta L\text{mm}$	$\Delta P''$	计算	
			误差(格)	校正(格)			误差(CF)	校正(CF)
4日	23:50	+220	+8.4	-11.0	149.9	+0.044	+18.3	-17.6
5日	16:00	-85	-3.6	+3.8	108.0	-0.017	-5.1	+6.1
6日	09:00	+580	+13.1	-14.7	73.5	+0.116	+23.8	-23.5
	13:19	+280	+11.1	-7.5	81.0	+0.056	+12.6	-12.0
	23:25	+115	+4.4	-2.0	58.0	+0.023	+3.7	-3.2
7日	08:40	+540	+21.9	-7.8	36.6	+0.108	+11.0	-12.5
	16:00	+195	+7.8	-0.9	20.0	+0.039	+2.2	-1.21
8日	00:05	+460	+18.5	+0.2	1.6	+0.092	+0.1	-0.3
	08:25	+735	+29.8	+6.0	-20.1	+0.147	-8.3	+9.6
	17:10	+355	+14.3	+5.2	-37.6	+0.071	-7.4	+8.3
	22:55	+610	+11.3	-11.3	-513.	+0.122	-18.0	+18.1

($0.02\mu\text{m}$), 可见此系统的灵敏度甚高。

从上述整机概貌中可看出机器的关键机构有:

1. 双V形滚动导轨付图12, 由于工作台太重, 连毛坯总重超过500kg, 故用滚动导轨付。上下导轨均用铸铁, 没有硬化, 并在表面刮研出小花点。用 $\phi 6 \times 25\text{mm}$ 滚柱, 精度约

0.1 μm ，台下用100个。工作台在移动时的偏转量在垂直方向，全程为0.6′，水平方向全程为0.4′。

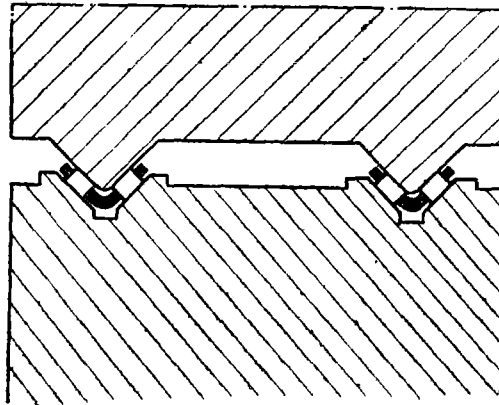


图12 双V形滚动导轨付示意图

2. 转控微调工作台双层台的上台已如上述，推动上台的推杆也是刚固于下台的特殊弹簧推杆系统（图13），其杠杆比约为240:1。伺服量通过同步机带动安装在主机座边上的一根

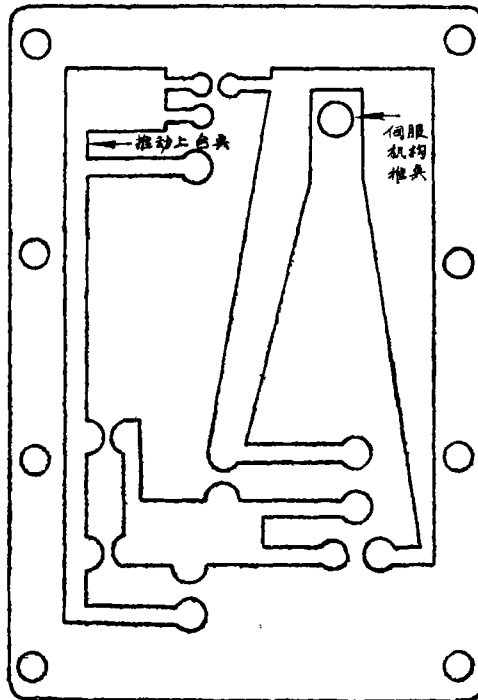


图13 弹簧推杆示意图

长齿条，装在工作台下台上的一个塑料齿轮总是和这根长齿条啮合，并通过齿轮系统推动弹簧推杆的输入端。

3. 单圆导轨及平导轨定位刀架。刀架是用一根圆导轨承受重量。一根平导轨定位的双导轨结构。圆导轨用氮化钢，长约1000mm，直径62.5mm，线性1个条纹。熔石英方导

轨700×100×100mm，直线性为1/10条纹，刻线长406mm。滑套长125mm，两端各有三片和圆导轨接触，刀架上另有一点（一个小面）和平导轨接触。

4. 凸轮摆杆式匀速校正机构，因机器采用连续刻划的方式，需将刻刀的简谐运动修正为匀速运动。此机在曲柄连杆后，加上一套双摆杆及校正板来修正。

5. 刀架触点磨损监测干涉仪，用激光干涉仪监测刀架与平导轨之间在刻划一块光栅的整个过程中距离的变化。

机器放在一块大小约为 $3 \times 2.5 \times 0.4 \text{m}^3$ 的混凝土厚板上，板下垫入厚约 2 英寸的泡沫塑料，下面是厚约 0.8m 的砂层，砂层四周用钢板围住。整个基础的四周与地 块离开。为了温度的稳定，四周地块还用厚约 50mm 的两面贴有铝纸的泡沫塑料遮严。

刻机房间内用单点控制温度，控制点放在推动刻刀架滑套机构的上方，是用美国 YSI 44033 热敏电阻 (YSI44033 Precision Thermistor, Yellow Springs Instrument Co. Ohio) 此热敏电阻在 20°C 附近的灵敏度约为每度 130Ω 。房间四周用厚约 50mm 两面贴有铝纸的泡沫塑料板铺档，四个拐角各有两台风扇吹风，其中一台风扇前面放有加热器。房间 4 面是夹层。房间的循环空气是从已控制温度的前一套间再经另一控温器后进入，从包围着基础的下面的四周缝隙中的一个出口而排出。房间内的温度控制到 $25.3 \pm 3 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$ 。图14是一段实测的控温曲线，从它可计算出温度的波动量约在 $\pm 2.8 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$ 。尚应说明，在长几十个小时，[即相应长达几米的记录纸上，此控温曲线的中心线很直，不超过 $1.4 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$ 。此外，还用石英温度计监测机器表面的温度。所用石英温度计是美国 DY-2801A 型 (Model DY-2801 A Quartz Thermo meter, DYMEC Div of Hewlett-Pac Kard Co. Calif.) 6 位数字显示，可测到 0.0001°C 。表 2 是在刻制 KPC 9G 光栅时的记录。可以看出，在所记录的五天内，机器表面温度最大波动仅为 0.0042°C 。值得注意的是，他们还测定出基座底部比基座表面(上部)的温度低了约 0.05°C ，认为对精度有影响，为此又在机座下部另设一控温系统以提高下部温度，改进后温差已小至 0.007°C 。

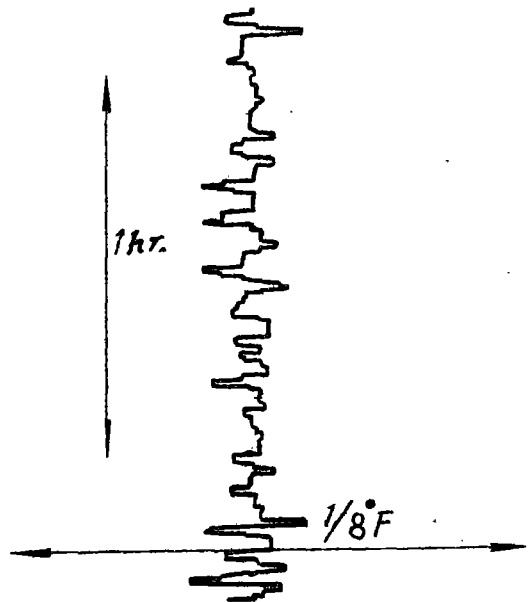


图14 机器房间内的实测控温曲线

这台机器常刻光栅宽在165到400mm之间，刻线每毫米在32到790条之间，刻线长不超过300mm。所用毛坯常用微晶玻璃和熔石英，毛坯是鲍许隆公司 (Baush & Lomb) 抛磨的，平面度要求 $1/10\lambda$ 。铝膜是在该台镀膜机上镀出的，机器很大，直径约2米，镀膜时真空度用到 10^{-7} ，例如去年镀的一块光栅所用 Cr 纯度为 99.5%，镀层厚 104\AA ，所用 Al 纯度为 99.999%，镀层厚 15690\AA ，蒸镀速率 $4.7\text{\AA}/\text{sec}$ ，刻出光栅的绝对集光强度在 6328\AA 处为 87%，在 4420\AA 处为 67%，膜镀完后即存入氮箱内以减少铝膜与空气接触的机会。钻石刀是从美国另一家公司买的 (J. Robert Moore Co. Inc. Massachusetts) 用双锥交线的圆弧刃，常用刀尖角为 95° 到 97° ，闪耀角大小与所需理论值相同。

表2 机器表面温度实测数据

日期	时间	温度	温度波动
19日	09:15	24.7862℃	0.0000℃
	18:40	24.7856	-0.0006
20日	01:30	24.7869	+0.0007
	10:55	24.7870	+0.0008
	22:35	24.7870	+0.0008
21日	08:55	24.7873	+0.0011
	16:00	24.7871	+0.0009
	00:00	24.7898	+0.0036
22日	09:25	24.7890	+0.0028
	16:00	24.7880	+0.0018
	22:05	24.7874	+0.0012
23日	08:30	24.7862	0.0000
	14:45	24.7858	-0.0004
	21:45	24.7869	+0.0007

刻划时先用小千分表以刀架运动方向为准找平待刻光栅表面，然后把已对好刀刃方向的钻石小刀架装到刻线机构上，试刻光强时用日本Nikon双目显微镜及粗测衍射光强的方法微调刻刀角度及所加负重，直至所需光强达到可能达到的极大值。

图15为用显微镜观察光栅表面(1500×)及其对应槽形轮廓的图样(用Talystep测)，可

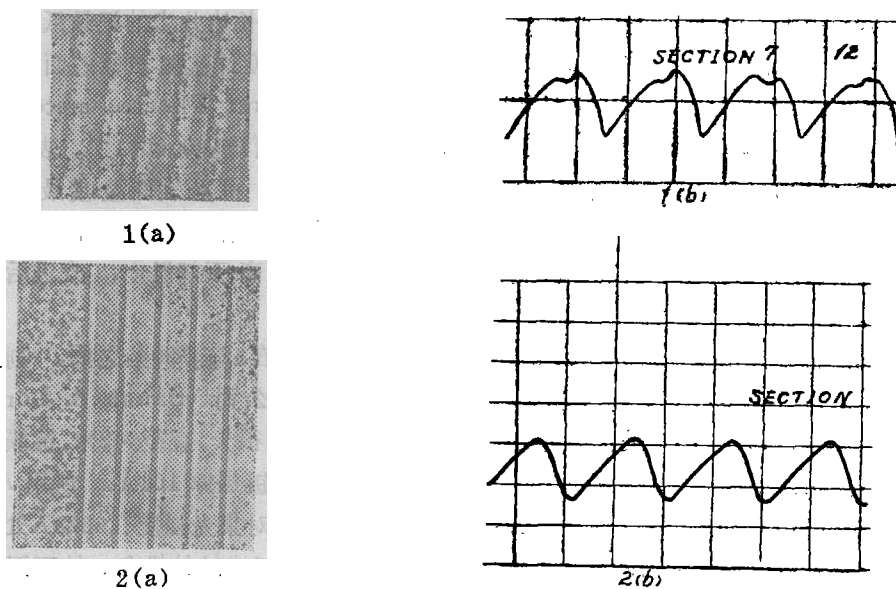


图15 光栅线槽形状

①不全槽 ②全槽 a、显微镜观察 b、光洁度仪描绘

明显看出不全槽和全槽两种情况。

图16为粗测宽仅1mm的试段光栅的衍射光强曲线，直接用功率计 (Model 212 Power meter, Coherent Radiation) 测定，只测定HeNe 6328一级及HeCd 4420一级及二级三个衍射光强数值，与激光光源相比较算出其绝对效率。在此基础上再用白光经十多块滤光片进一步细测不同波段的衍射效率。

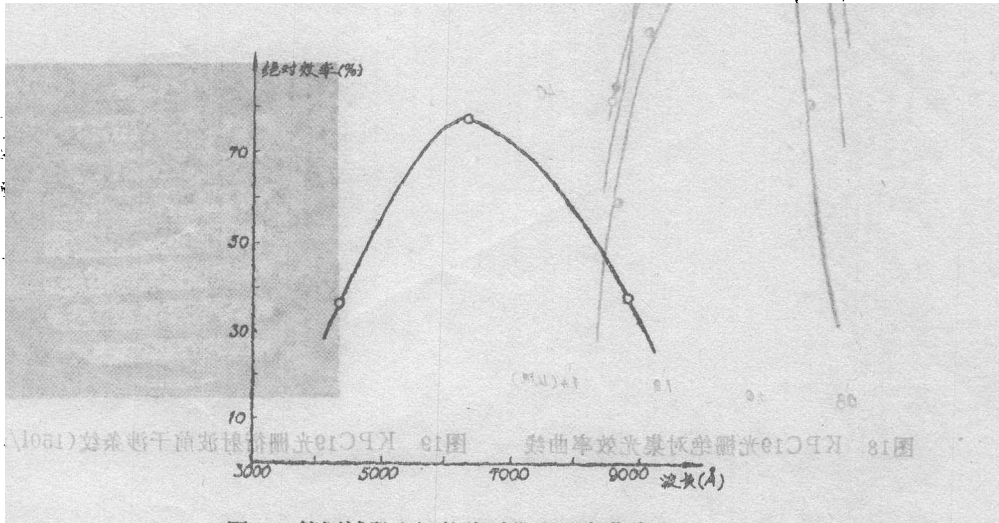


图16 简测试段光栅的绝对集光效率曲线

从他们的记录来看，刻一块大光栅是不容易的，例如1981年12月所刻 KPC 9G 光栅就没刻成，该光栅刻划面积 $12'' \times 16'' \sim 632$ l/mm，闪耀 58° ，连续刻了19天，从刻划记录来看，刻划当中温控系统断过一次保险丝，又因下大雨而湿度显著上升过，所刻光栅误差较大，其衍射波前干涉条纹如图17 (58°)。

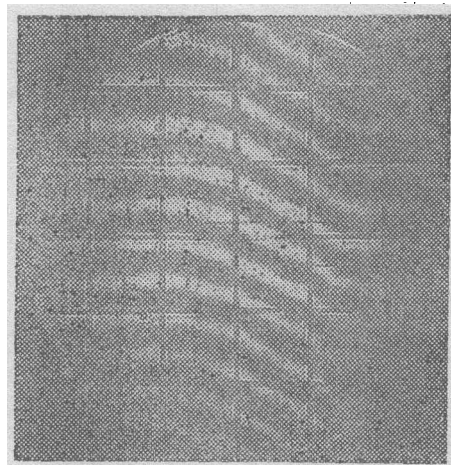


图17 KPC9G的衍射波前干涉条纹(632 l/mm, 58°)

1982年9月所刻KPC19光栅是成功的，光栅刻划面积 $220 \times 170 \sim 150$ ，闪耀 4.5° ($1\mu\text{m}$)，刻三天，刻速每分钟5.7线，分度速度每秒2.3纹，刻刀 $3^\circ/96^\circ$ ，压重61g，刻刀速度每秒75mm，膜层Cr厚 100\AA ，Al厚 $1.5\mu\text{m}$ ，绝对集光效率平均70% (图18)，衍射波前质量很好

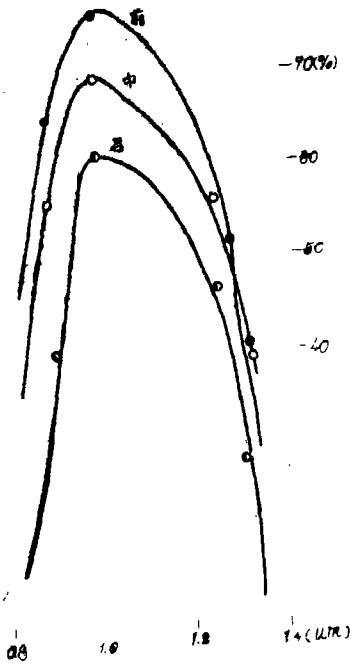


图18 KPC19光栅绝对集光效率曲线

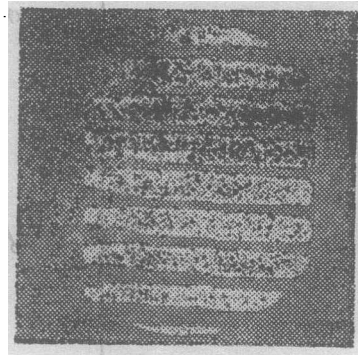


图19 KPC19光栅衍射波前干涉条纹(150l/mm、~60°)

(图19), 衍射角约60°, 宽6.7英寸。

一般来说, 这台机器刻成的光栅分辨本领可到90%, 绝对集光效率可到70%, 卫线到 10^{-4} , 杂散光很低, 鬼线观察不到。这是目前世界上刻划光栅最大、精度高的光栅刻划机。

注: 本文为笔者1983年到该台考察后写出。