

“磨玻璃”的那些事（一） | 流光 E 彩

编者注：半个世纪光电情，披星戴月星辰明。中科院之声与中国科学院光电技术研究所联合开设“流光 E 彩”科普专栏，讲述生活中的光电科普趣事，传播最生动的光电知识，展示最前沿的光电进展。光学仪器或光学制造都绕不开对光学镜片的研究和讨论，特别是当前信息时代关注最多的工业母机——光刻机，其实也是一个超精密光学系统，这个系统也包含了大家非常熟悉的镜片。那么你知道在这些系统里被广泛应用的光学镜片是如何制造出来的吗？

一、光及光的应用

光究竟是什么？我们又是如何利用光和控制光的呢？

日出、日落、大海、星辰、浩瀚宇宙、奇妙的大自然，我们都是通过光，获取了对于它们的认识。

光，是一种电磁波。1864 年，英国科学家麦克斯韦在总结前人研究电磁现象的基础上，建立了完整的电磁波理论。他断定电磁波的存在，推导出电磁波与光具有同样的传播速度。1887 年，德国物理学家赫兹用实验证实了电磁波的存在。之后，1898 年，马可尼又进行了许多实验，不仅证明光是一种电磁波，而且发现了更多形式的电磁波，它们的本质完全相同，只是波长和频率有很大的差别。

1905 年，爱因斯坦提出了光电效应的光量子解释，人们开始意识到光同时具有波和粒子的双重性质。1924 年，德布罗意提出“物质波”假说，认为和光一样，一切物质都具有波粒二象性。光（子）既不是（经典意义下的）粒子，也不是（经典意义下的）波。光子是客观存在的，取决于观察者，有时候表现出粒子性，有时候表现出波动性，这就是光的波粒二象性。

光的应用场景（图片来自网络）

光具有携带信息和能量的特点，它的存在贯穿于我们的学习、生产、生活和科学研究中，是我们认识世界和改造世界的重要媒介和工具。光信息/光感知方面包括：视觉，望远镜（视觉的宏观拓展），显微镜（视觉的微观延伸），光子计算机，光量子隐形传态，光纤通信；光能量/光加工方面包括：太阳能电池，光学聚焦核聚变技术，生物能（光合作用）激光武器，CD 盘的读写激光头，光刻技术，激光切割（加工）技术。



光信息的获取和光能力的操控，取决于光子与相应光学元件的相互作用。今天，我们就沿着光的足迹概略地探讨一些光学制造的事。

二、光学制造技术有哪些

最早有文物佐证的光学镜片，应该是“鉴”，一种盛水的器皿，用来当镜子用。后来演化成铜镜。这可能是最早的大面积用的“光学装置”。在《墨经》里记载了中国古代最早的光学现象，在晋代的《博物志》中记载了用冰做凸透镜，汇聚太阳光。近代以来，1609 年伽利略用两块透镜做出了望远镜，是公认的光学系统的新的起点。从此，天文光学不断地推动了人类对于浩瀚宇宙的认识，也实质性地推动了光学制造技术的发展。几乎每一代新的天文仪器的发展都对应着新的光学制造技术的进步。

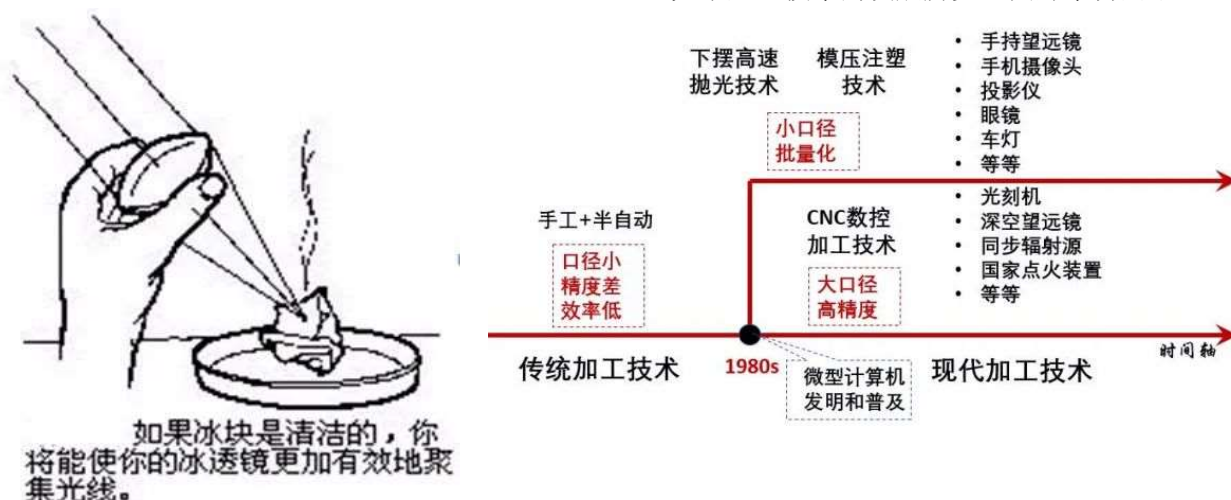
一般来说，制造对应的不仅包含加工部分，也包含测量部分。本文只涉及加工方面。

光学加工近代应用可以说是伽利略时期才开始的，但光学加工的大致方法起源于百姓的生活。出土的石

器时代的工具，在没有更硬、更高精度的制造工具的时候，都是采用相互摩擦研磨才制造的。光学加工类似如此。

光学加工，采用相互凹凸对偶的工件和工具，两者中间参细小的研磨砂，相互运动，不断迭代检查，实现所需要光学元件的轮廓的加工。工件与模具的相互压力、相对运动和磨料的磨削能力三者与加工能力直接相关。

光学加工技术的发展历史（图片来自网络）↓



伽利略时期开始是全手工的加工。机器逐渐普及后，简单的电机驱动部分替代了人工动作，但原理都几乎一样。手工加工技术是相对运动的稳定性和压力都依赖于加工者的技艺，半自动的传统加工技术，用机床实现了运动的基本稳定，但是加工压力并不均匀。现在，这种技术也还在较大范围类应用。

下摆高速抛光技术和模压注塑加工技术是伴随消费类光学特别是数码相机的普及由日本发展起来的规模化光学元件制造技术。下摆式高速抛光技术，用机械结构实现了压力的稳定，进而实现了中低精度的光学透镜的高速制造。模压注塑技术本质上是一种模具的复制技术，而模具的加工是一种精密机械的加工。

计算机数控加工技术是用计算机控制磨削工具，通过磨削过程的线性控制来实现大口径光学零件加工的制造技术，主要用于大口径望远镜零件的加工。近 20 余年来，还发展出了能流束超高精度光学加工技术，主要是指采用等离子体、磁流体、射流体等非固态工具的确定性光学加工技术，一般能实现精度优于纳米精度的光学元件制造。

三、传统光学加工技术

传统的光学加工大致分为：粗磨、研磨、抛光几个阶段。主要是根据不同精度时期所应用的磨料颗粒的粗细来划分。大致方式是工件主轴旋转，顶针驱动模具往复摆动，通过抛光液在透镜与抛光模具之间流动，实现透镜的光学加工。主要的缺点是磨削压力控制不均匀，零件精度很难控制，对于加工者技艺要求很高。



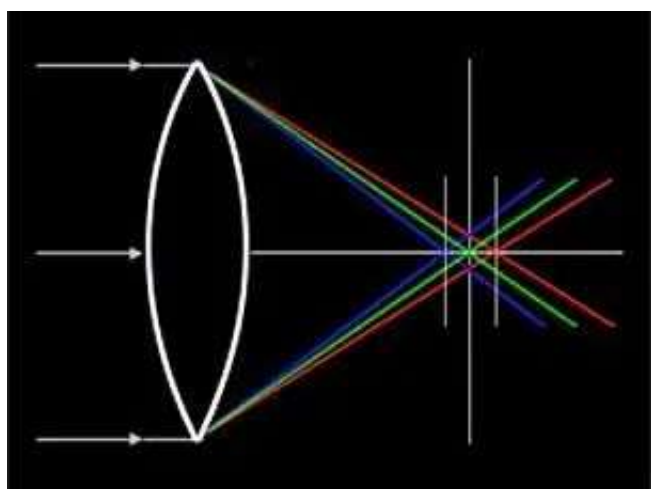
←（传统光学加工技术）

从伽利略时期开始的很长时间里，望远镜主要是折射式望远镜，光学元件主要是透镜，就是采用这种加工手段。

叶凯士折射望远镜（图片来自网络）→

鼎峰时期是 1897 年建成的叶凯士望远镜，望远镜口径 102 厘米。由于色差的影响，折射式望远镜的发展难以为继。

光的色差（图片来自网络）↓



色差，简单来说就是颜色的差别，发生在以多色光为光源的情况下。不同波长的光，颜色各不相同，其通过透镜时的折射率也各不相同，这样物方一个点，在像方则可能形成一个色斑。色差使像在任何位置观察，都带有色斑或晕环，使图像模糊不清。

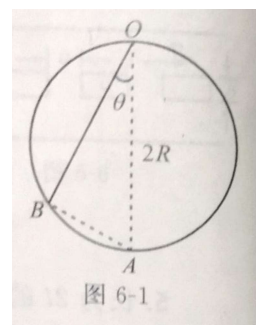
反射式望远镜最早于 1668 年牛顿和 1672 年卡塞格林各自提出，后来分别命名为牛顿式望远镜和卡塞格林式望远镜。这类结构主要是用反射镜替代了透镜，回避了色差问题。但反射镜主要是非球面轮廓，这对于加工而言是一个巨大的挑战。德国音乐师和天文学家威廉·赫歇尔从 1873 年开始制造反射式望远镜。在 1900s 年代到 1970s 年代，运用手工修抛的方式，遵循“哪里高，去掉哪里”的朴实原则，建造了不少空间望远镜。

廓，这对于加工而言是一个巨大的挑战。德国音乐师和天文学家威廉·赫歇尔从 1873 年开始制造反射式望远镜。在 1900s 年代到 1970s 年代，运用手工修抛的方式，遵循“哪里高，去掉哪里”的朴实原则，建造了不少空间望远镜。

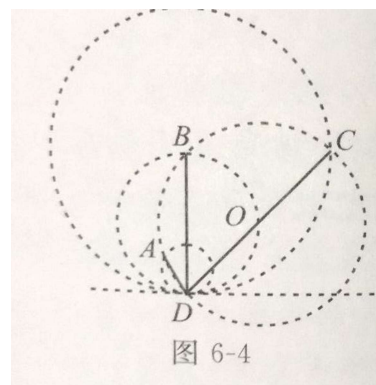
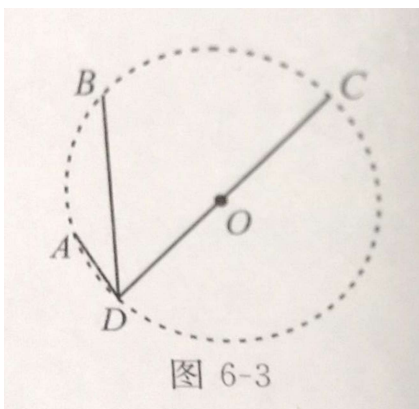
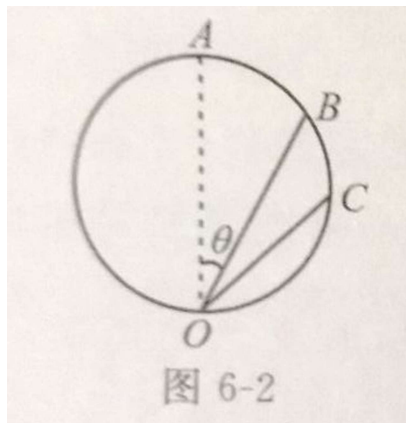
Something insteresting

等时圆的性质

如图 6-1 所示，处在半径为 R 的竖直圆内的任一光滑细杆 OB ，一端 B 在圆周上，另一端 O 在圆的最高点。 OB 与竖直方向的夹角为 θ ，根据牛顿第二定律及匀变速直线运动规律，质点 m 沿杆从静止开始下滑的加速度为 $a=g\cos\theta$ ，在杆上运动的时间为 $t=\sqrt{2x/a}=\sqrt{2\times 2R\cos\theta/g}=2\sqrt{R/g}$



因此，质点沿杆下滑所需的时间跟杆与竖直方向的夹角 θ 无关，仅由半径 R 决定，且等于质点从圆的最高点 O 到最低点 A 做自由落体运动的时间，这个圆就是重力场中的“等时圆”，这个性质叫圆的自由弦的等时性。



说明:如果细杆是粗糙的,质点与细杆间的动摩擦因数为 μ . 有 $2R\cos\theta = \frac{1}{2}(g\cos\theta - \mu g\sin\theta)t^2$, 解得 $t = 2\sqrt{R\cos\theta / (g\cos\theta - \mu g\sin\theta)} = 2\sqrt{R/g(1 - \mu\tan\theta)}$, t 与 θ 有关, 则上述规律不成立

同理, 如图 6-2 所示情形, 从圆周上不同点沿光滑斜面滑到圆周上的最低点 O , 所需时间也相等. 需要说明的是等时圆中的端点应是几何空间的最高点或最低点. 如果像如图 6-3 所示, 光滑直杆 AD 、 BD 、 CD 处在竖直平面内, 杆的三个端点均在同一圆周上, CD 杆过圆心, 若从 A 、 B 、 C 三点同时静止释放套在杆上的小球, 则它们滑到 D 点的时间并不相等. 要比较时间应该以 D 点为最低点, 人为地画出三个等时圆, 如图 6-4 所示 CD 杆对应的等时圆的竖直方向直径最长, AD 杆对应的直径最短, 所以 $t_{CD} > t_{BD} > t_{AD}$.

例 2: 两光滑斜面的高度都为 h , OC 、 OBD 的总长度均为 L , 只是 OBD 由两个斜面连接而成. 如图 6-7 所示. 将甲乙两个相同的小球从斜面的顶端 O 同时由静止释放, 不计拐角处的能量损失, 问哪个球先到达斜面底端?

解析: 本题的一般解法是用 $v-t$ 图来讨论求解, 但 $v-t$ 图中的面积表示的是位移, 而 OC 、 OBD 两斜面的长度相等, 小球运动的路程相等, 位移并不相等. 因此要把 $v-t$ 图像理解为速率-时间图像, 图线包国的面积表示的是路程. 总之, 解释起来颇费口舌.

我们可以构建如图 6-8 所示的等时圆, 交 OC 于 A 点, 交 OB 于 B 点, 由等时圆可知. $t_{OB} = t_{OA}$. 由机械能守恒定律, 有 $VB > VA$, $VC = VD$, 所以可 $V_{\text{平均} BD} > V_{\text{平均} AC}$, 又因两斜面的总长度相等, 故 $x_{BD} < x_{AC}$, 根据 $V_{\text{平均}} = x/t$ 得 $t_{BD} < t_{AC}$, 所以有 $t_{乙} < t_{甲}$, 即乙球先到达斜面的底端.

