

光学计量中的光电技术

1. 前言

所谓光学计量，广义上讲是包括长度或角度等机械量，及光能方面的光测技术。本文以测量显微镜和投影仪等为重点，叙述精密测量领域内有关光学计量方面的应用。

近年来，许多部门对计量工作实行自动化的要求越来越高，在与此相适应的光学计量方面，首先要提到与光电转换技术有关的电子技术，还有激光的应用，以及普及微型计算机的数据处理技术等，继承过去光学计量的原理，并继续开拓新的计量技术领域。因此，从这一领域中，仅举已经达到使用要求的光电计量仪器进行叙述。

2. 长度、角度的自动测量

一般的精密测量大部分属于长度、角度的测量。因此，对这一基本量实现自动测量具有非常重要的意义，并正在研究适用于各种测量目的的测量方法。

1) 数字转换器

目前的自动测量，多数情况是把测量结果采用数字形式输出，作为以后数据处理系统的输入信号，因此利用好这种长度、角度的A/D转换器，就能实现现有测量仪或工作机系统的自动化。

这种转换器按机能分类，有测量角位移或角位置的旋转型转换器（轴角编码器），和测量直线位移或直线位置的直线型转换器（长度编码器）。此外，根据输出信号的形式还可分为两种：增量式和绝对式。关于这些

已有不少文章说明，因此，本文仅举图1所示的工业上最为普及的增量式轴角编码器的原理图来说明。

这类编码器，不局限于光学方式，还有磁感应式、机械接触式及电子学细分方式等多种类型。下面只举光学转换方式的一些特点。

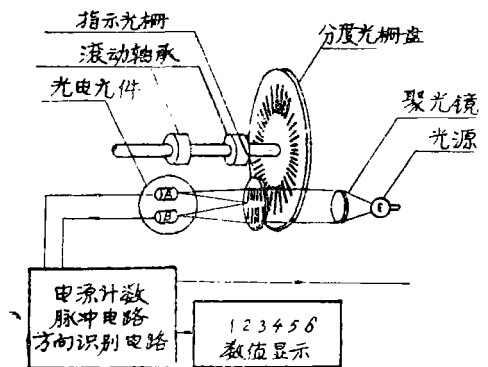


图1 增量式轴角编码器原理图

- (1) 因为拾取方式是非接触式，因此转矩小适用于高速旋转，并且可靠性及寿命高。
- (2) 因为玻璃制的分度光栅盘是应用照相腐蚀技术制成的，所以分辨率及精度可以达到很高。
- (3) 因为指示光栅是由多狭缝组成的，因此周期误差得到平均并具有提高可靠性的效果。
- (4) 由于光源和接收器均可采用小型而稳定的元件，因此对整体实现了小型化。例如光源用发光二极管，接收元件用光敏三极管或光电池等。

作为轴角编码器的应用，在很多场合下把它直接安装在旋转轴上，用于测量轴的转角变量，如安装在天平的指针轴或安装在

工作机械的进给丝杠上，都是用于测量移动量的。图2所示的是加工过程中，自动测量大型工件直径时所用的轴角编码器。预先确定好摩擦轮的直径，旋转工作台的旋转量并由另外一个方向识别器来读数。如果摩擦轮直径为50mm，安装在摩擦轮上的轴角编码器

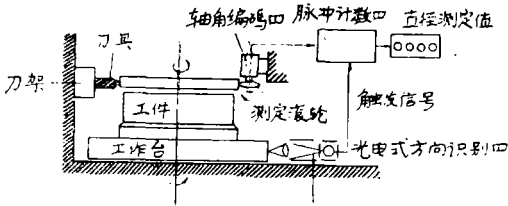


图2 轴角编码器的应用

的输出脉冲为5000次/转时，当安装在工作台上的工件旋转一周时产生的输出脉冲数用计数器进行累计计数，就能把工件的直径用数字形式表示到0.01mm单位。

长度编码器在原理上和轴角编码器大致相同，也就是当轴角编码器的光栅刻划半径变为无限大时就成为长度编码器。对节距为 8μ 左右的分度刻尺进行光学或电子学细分时，可以得到 1μ 的分辨率。在测量直线变位时，轴角编码器必须借助于把旋转角位移转换成直线位移的丝杠或齿条等机械式的转换机构，而长度编码器可以直接安置在被测件上，测出其移动量，结构简单精度高。利用这种转换可对座标镗床、座标磨床等高精度的工作机械及座标测定仪等精密测量方面实现数字化测量。

(2) 激光干涉测长仪

激光干涉仪适用于要求测量精度为 1μ 或超过 1μ 米以上的工作机械上进行高精度测长。这个装置是以激光波长作为长度基准，激光波长必须始终保持稳定。为此，使用特殊的措施来获得稳频的激光（稳定度 $\pm \times 10^{-7}$ 左右）。较困难的是由于光波波长受温度、气压等环境条件的影 响，因此高精度测量时必须给予补偿。商品化的激光干涉测长仪，

包括补偿机构在内有许多可供选择的备品。

它的测量分辨率可达 0.1μ 以内，测量精度达到 0.5μ 。作为应用的例子要在第5节有关坐标测定仪中叙述。此外，这种装置在加工精度要求特别高的特殊的工作机械，如螺纹磨床或刻划机的控制系统中得到了广泛的应用。

(3) 光波测距仪

这个装置，作为精密测量仪，应该属于测量仪的范畴，但在这里仍然作为应用光电技术的测长仪的例子来说明。

近年来，造船、土木建筑等结构庞大的方面要求在10米到1千米的范围内进行高精度测距，本装置就是为此而研制的。

原理是把光速作为基准，从基点发射的光被放在目标上的反射镜反射回来并用光电方式测量出返回原点时的瞬时时间。这种方法也有两种不同的方式。一种是利用发出瞬时快速光脉冲，照射到目标上，把反射回来的时间用计时脉冲进行测量，它适合于类似月地之间那种长距离的测量。另一种方法是把连续发射的光调制成适当的频率，采用上述方法测出起始信号光和返回光之间的位相差并算出往返时间，它适用于短距离的测量。其原理如图3所示。设大气中的光速为 v ，调制频率为 f ，波长为 λ ，用下式表示为：

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

这种装置采用粗信号的组合测量方式，因此选择调制频率为 $f_1 (\cong 150\text{kHz})$ ， $f_2 (\cong 15\text{mHz})$ 时，波长分别为2km、20m。可是这

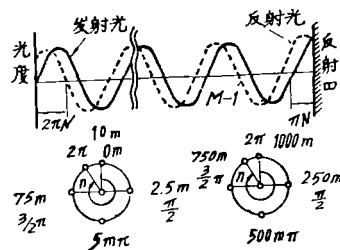


图4 光波测距仪原理图

种装置测量的位相差是对基点与目标的往返光程而言，因此测量的单程位相差相当于 $1\text{ km}(\lambda_1)$, $10\text{ m}(\lambda_2)$ 的测量结果。如果从基点到目标之间的短波波长 $\lambda_2 = 10\text{ m}$ 的波只包含 $M + N$ 个的话 (M : 整数; $0 \leq N \leq 1$)，通过下式

$$L = \lambda_2(M + N) \quad (2)$$

可算出要测量的距离 L 。这样，为了求 N 的精信号、即采用了波长为 λ_2 的光波；而求 M 用粗信号则采用波长为 λ_1 的光波。图 4 所示的测距仪方块图包括了测量位相差的线路，仪器的操作方法对准目标位置上的反射棱镜，把光源和探测器调整到灵敏度最佳的方向。然后再通过测距开关，插入光路转换装置，并利用参考光路进行校准。在这一过程中，对 λ_1 、 λ_2 的光波分别测量 1000 次并存储内部常数，再移开参考光路，用测量光路进行实际测距。根据 λ_2 的精信号 (15MHz) 按 14.85MHz、135KHz 的顺序混合，减低到 15KHz，在这种状态下，比较 15KHz 的标准信号与位相，求出相当于 (2) 式 N 的值。该值用 15MHz 的计数脉冲测量就能得到 1 cm 的测量分辨率。粗信号也用同样的方



照片 1 Nikon 光波测距仪外观

法，利用转换信号使 λ_1 , (150KHZ) 的光波在测定光路上发出信息 150KHZ 的光电输出与前相同减低到 15KHZ 并测出位相差。测量结果相当于 (2) 式 M 的值。这样 10 米以下的尾数由 λ_2 来决定，10 米以上的数由 λ_1 来决定，在 10 米—1,000 米的测量范围内，测距精度很高可达到 1 cm。与方块图一样，把 1000 次的测量平均值在 3 秒钟内用数字显示出来。照片 1 是架在 Nikon MND-2 型经纬仪上的情况。上面的双镜筒是测距仪的光学头，光源是发光二极管。

3. 自动测位

对精密测定仪测量机件的尺寸、形状等动作，如果进行分析，可分为决定测量点的位置 (如，使用测量点与显微镜或投影仪的视准线重合) 和测量定位后被测点之间距离 (如用读数显微镜读取标准尺的刻度) 两种。测距可采用与上述相同的方法利用编码器或激光干涉测长仪等以数字化来自动测量。与此相反，测点的定位仍旧依赖于操作者的熟练程度，即使分度尺的精度再高，这种操作带来的测量误差还是很大，有时很难对误差进行平均处理。因此针对特殊用途介绍几种成型的自动测量装置。

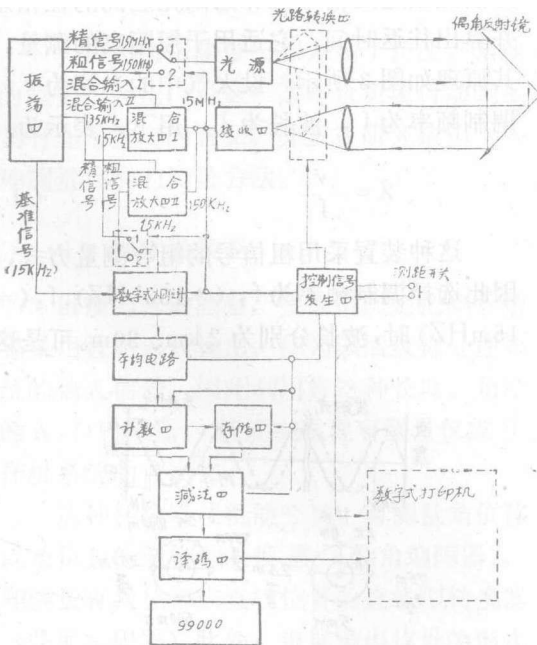


图 4 精密光波测距系统图

1) 光电显微镜

光电显微镜是很早就作为标准刻线尺的最基本的自动读数显微镜。原理如图5所示，目的是自动地把刻线像的中心位置与视准线重合。在显微镜的物镜像面位置配置一个以固定频率 f Hz振动的狭缝，狭缝后放置光电元件把通过狭缝的光转换成电信号。标

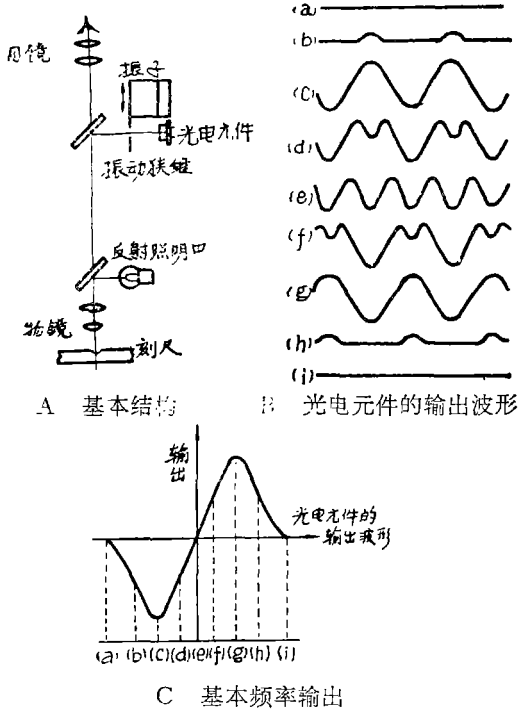


图5 使用振子的光电显微镜原理图

准的刻线像随着从视场外逐渐进入到狭缝的振幅区，输出波形从(a)逐渐变成(b)、(c)的波形，如果刻尺刻线像与狭缝的振幅中心完全重合，产生(e)那样 $2f$ 频率的输出。这个输出信号通过频率识别电路并与计算机相连接，就能够用刻尺以 0.1μ 的精度测量出这点位置。因此用微动丝杠移动像面上的振幅中心并安置扫描机构，可以以 0.1μ 的精度测得刻线间隔值或者对标准尺内插。

如图5所示，光电输出波形由于刻线像偏离了狭缝的振幅中心位置(c, 或g)，而产生 f Hz成份的输出，因此把它提供给随动系统，就能够进行 f Hz为0的自动跟踪。这种机构应用于集成电路制造工艺中的屏蔽和校正机构以及对加工件进行准确定位等装置上。

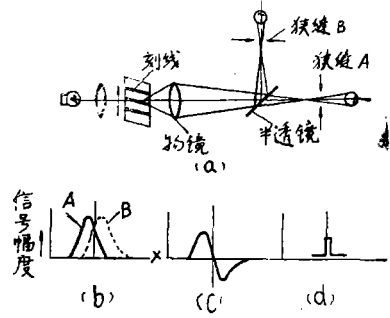


图6 双狭缝光电显微镜原理图

图6所示的是同类显微镜的光电测量例子。方法如下：当试件以稳定的速度移动时测量刻线像通过视准线位置的瞬间，这是自动测量中一种常用的方法。二个狭缝A、B放在与光轴反向、稍稍错开的位置上，刻线像向图中箭头所指的方向移动，(b)所示的A、B两个输出信号，是利用它们后面的光电转换元件获得的。把A、B两信号进行差动放大之后，找出输出为零的点作为刻线通过光轴的位置，在这种情况下也可以以 0.1μ 左右的精度测量位置。

2) 界限传感器

以上是测量线状或点状图案中心位置的方法。下面介绍测量直线端面的方法。

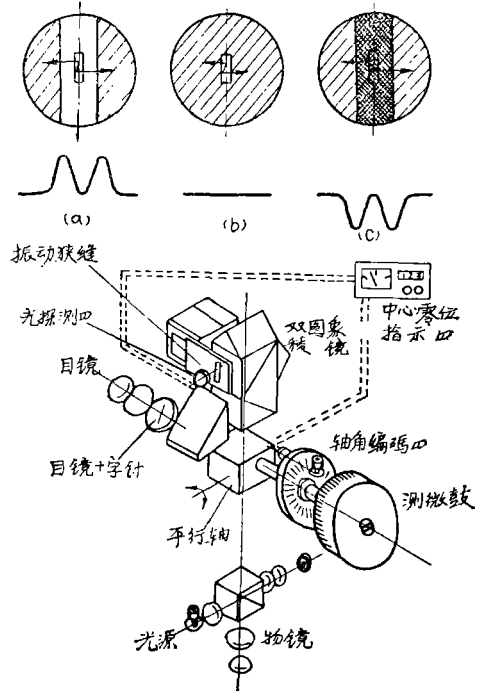


图7 Nikon 界限传感器

界限传感器如图 7 所示，是一种测量短光栅状图案界限位置的装置。在这种情况下也采用显微物镜，在像一侧的光路中插入双像棱镜，试件的图案端面出现在像面上与光轴左右对称的位置。随着光面不断接近光轴，目镜所看到的像由(a)透明部分逐渐减少，端面与光轴完全重合时，就像(b)那样整个视场均匀地变暗。端面过了光轴时两边的像就如(c)那样完全重合，这一部分变成更暗的状态。因此为找出(b)那样均匀状态的位置，应像光电显微镜那样在像面上放有振动狭缝，当调整到它的振幅中心正好与光轴重合时，从安置在它后面的光电转换元件上，可获得对应各种位置的输出波形，如图(a)、(b)、(c)所示那样。所以在相位反转的瞬间取出交流输出为 0 点的位置就能够读出像的边缘线与光轴重合的位置，重复性达 $0.1-0.2\mu$ 。同时，光路中就置了倾斜的平行玻璃板，在像面上能够把边缘的位置平行移动。利用这种机构以 0.1μ 的分辨率测量 IC 图案那种非常细的线条。在这个装置上把轴角编码器装在读数头上的内部并以数字形式显示出来。

3) 二维图案的位置测量

上述例子，均为有关线中心或直线界限的一维定位方法。下面是有关圆形或四边形图案的二维位置测量方法，作为经常采用的方法对圆形图案定心。如图 8，X、Y 轴方向上分别安置一对狭缝 A_1 、 A_2 和 B_1 、 B_2 ，如果各自相对应光电转换元件的输出始终不变，就能确定图案的位置。这种方法实际应

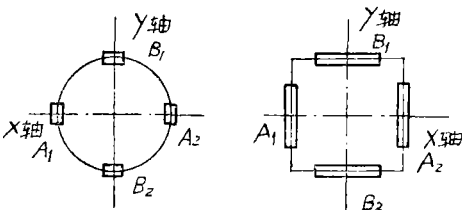


图 8 二维图案的定位

用在望远镜的自动跟踪方面。此外，市面上的激光校准仪是把激光光束作为基准来测量真直度。这是拾取激光光束截面的中心位置，把光束的直线性具体地体现了的装置。这时，光束的截面大致为圆，为找出这个圆的中心把圆分成四份的四个光电转换元件组成一个圆，使对应组成的一对光电输出信号保持平衡。

这种复数测量仪的光能平衡器结构简单，重复性、灵敏度都很高。但是存在着测量头部分的灵敏度变化及系统的漂移等，长期使用后稳定性要差一点。为避免这些问题考虑采用适当的交变装置，减少测量头的数目并用调制盘对图案进行扫描等方法。

4) 自动仿型传感器

前面所谈的是在垂直于光轴的平面上定位的装置。在这里介绍一种沿光轴方向进行

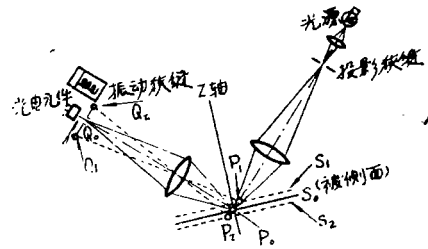


图 9 Z轴方向的定位

测量的方法，一般采用投影仪或测量显微镜等测量 Z 轴位置时，利用被测物表面上调焦的方法进行定位。自动操作的方法很多，如图 9 所示例子，是把狭缝状的光从倾斜方向投影到被测表面上，再用另一侧的光学系统接收反射光。因此被测表面位置上下移动时，接收部位的像面上，狭缝反射像 Q_1 、 Q_2 相对于光轴方向横向移动，然后使狭缝像始终对准 Q 的位置就能够达到跟踪被测面高度的目的，原理与光电显微镜相同。这时，光学系统或被测物任何一方做上下相对移动，从位移量就可以知道 Z 轴方向的形状。图 10 所示的例子是最完善的方法，它除了表示出 Z 轴方向的前后位置外，还能测量被测

出该面的倾斜度。这个装置的特点是小而紧凑，被侧面在光轴方向上的定位精度达 1μ 以内。

5) 光波干涉式坐标测定仪 (照片 2)

前面所叙述的都是单一的拾取测定点位置的装置。一般情况下，还需付加一个能够测量长度的机构。如坐标测定仪这类精密测量 IC 屏蔽等微小图案尺寸或反复出现的图案节矩的例子。图 11 所示的是用上述激光干涉方式以 0.1μ 单位数字式测量直接装有反射镜的 X、Y 载物工作平台的移动量，它完全排除了进给丝杠或刻尺的误差，满足了阿贝测量系统的条件，因而实现了高精度的测量。在高精度的位移测量中测定点的定位如达不到相应的精度是毫无意义的。因此，这类仪器可根据不同的测量目的使用具有两种位置测量机能的转换系统。

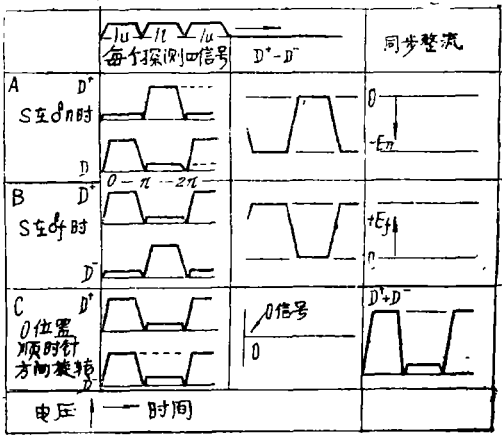
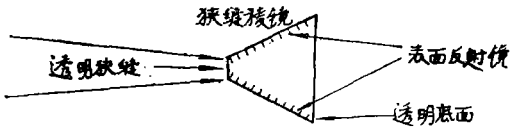
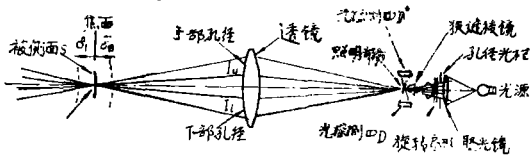
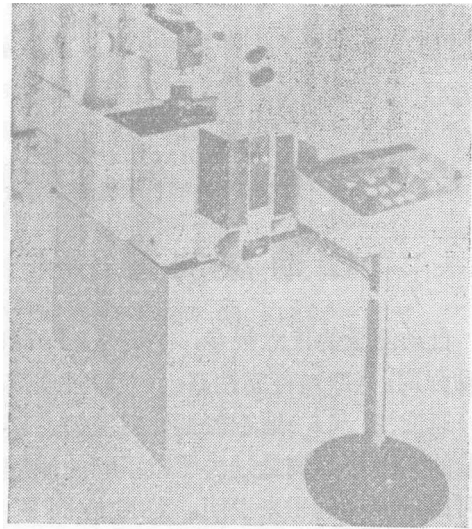


图 10 自动仿型传感器

面的倾斜度。在光源位置上的聚光镜后面，分成对称于光轴的上下两光束，并设有光栏。它的特点是可用双目观测。这两束光用旋转调制盘交替地照明在特殊的屋脊形棱镜顶点的狭缝上（在图中放大表示出来），狭缝安置在透镜 L 的光轴上，所有通过透镜 L 的光把狭缝的像投影到物体表面上。这个表面反射出来的光再次经过透镜 L，返回屋脊棱镜上。屋脊的斜面作为一个反射镜，如果被侧面从透镜 L 的焦面上向 δn 或 δf 方向错开时，与其相对应的反射光反射到 D^+ 、 D^- 两个探测器上。这时由 l_1 、 l_2 两个交替照明的光束从 D^+ 、 D^- 两个探测器上取出的光电输出波形，根据被测面的位置，就形成图示那样的关系，一方面取出两个探测器的输出差并根据位相反转 180° ，就可以知道被测面的前后位置，另一方面从同步整流输出中测量



照片 2 光波干涉坐标测定仪

一种是测量图案节距的装置，像图 6 那样的扫描式光电显微镜。方法是以 $1\text{mm}/\text{Sec}$ 速度扫描试件并以 0.1μ 的精度拾取特定图案的位置。另一个是测量 $2 - 3\mu$ 左右的细小图案宽度的装置，采用与微光测量仪完全相同的原理。用它测量图案的界面宽度时，从微光测量仪分别跟踪上下两个边缘的输出就可以测量出刻线宽度。图 11 右侧接收部位

上的反射镜朝箭头所标的方向旋转 90° ，这样就很容易地转接成两种机能。利用从测量头上获得的光电输出，取出测量位置的脉冲，由它控制光波干涉仪的条纹计数器的控制极、就能自动而又连续地对细微的刻线宽及

交变图案的周期进行测量。结果以数字形式显示，也可以输入打字机或数据处理线路。细微图案、可在短时间内以 0.2μ 的高精度测出，这是过去难以想象的很有价值的测量方法。

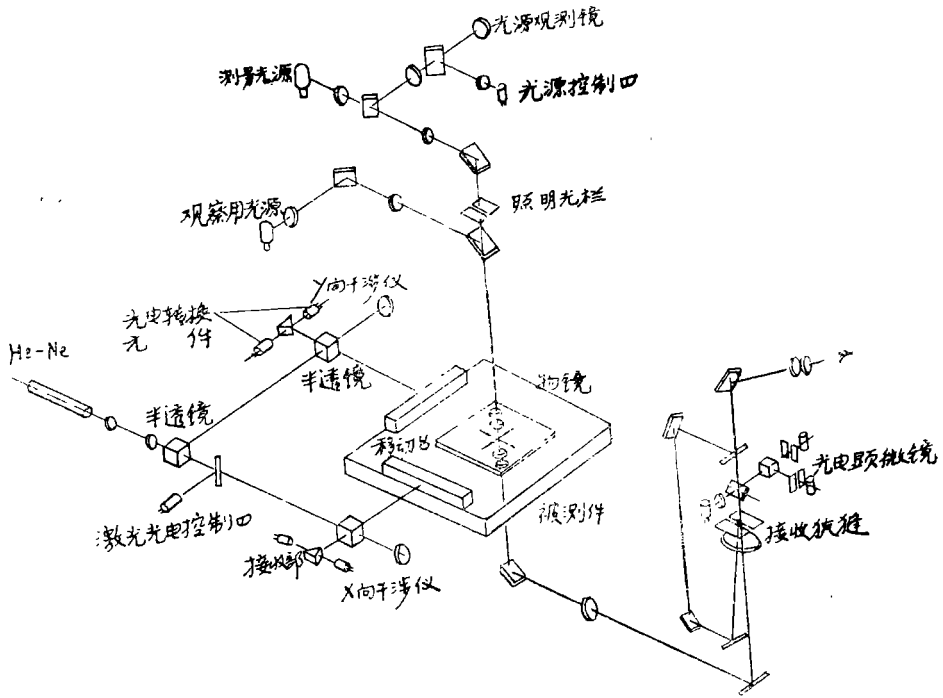


图11 光波干涉式坐标测定机光学系统配置图。

4. 动态测量

自动测量的优点很多，主要是(1)减轻劳动强度；(2)可靠性高；(3)精度高；(4)速度快；(5)适于数据处理等等。自动测量的实现可以测量过去所做不到的测量，这可以用许多例子来说明。尤其是高速测量，其优点不仅是提高了测量效率，还可以在动态条件下测量。换言之，迄今为止依靠人工方法，用刻尺的刻度来读取时间变化的值，是一件困难的工作。所以工件的尺寸，只有在加工完成之后才能测量。如果很好地采用自动测量方式，可以在动态变化的条件下测量被测物的尺寸。即实现了动态测量。这类测量仪为数不多，因此可拿作者试制的测量仪作为例子来说明。

1) 断面测量仪

原理如图12所示，用于测量棒料或管子外径的装置，L是激光光源，旋转反射镜M通过F绕垂直于纸面的轴匀速旋转，F位于准直透镜 CL_1 、 CL_2 的前焦点位置上，M反射的光经分光器分成两束后，通过 CL_1 、 CL_2 变成平行于光轴的细光束。通过被测件所在空间，经 CL'_1 、 CL'_2 的聚光透镜，投射到它们焦点上的光电转换器 P_1 、 P_2 上。在这种情况下，旋转反射镜M相应地进行旋转，两个细光束保持平行光轴的状态，从上到下反复扫描，如果光路的空间中放有如图所示的物体O。由 P_1 、 P_2 获得的光电输出在图(b)中用 S_1 、 S_2 表示。图(c)所示 S_2 的上升点、 S_1 的下降点的时间用时间脉冲计数时，

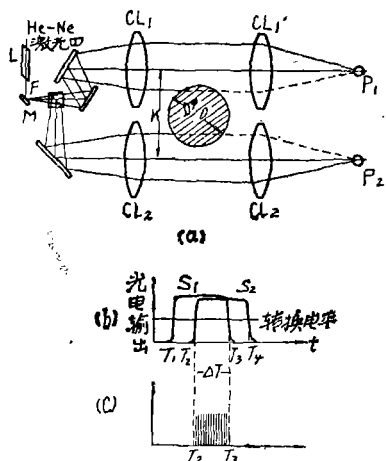


图12 断面测定仪原理

从 ΔT 值通过下式

$$D = K - A \cdot \Delta T$$

可求出直径 D 。 K 是两光轴的距离， A 是取决于光束的扫描速度和时间脉冲频率的常数，根据时间 T_2 、 T_3 的顺序确定 A_2 的正负号。这个方法的特点是被测物即使在光束中移动也不影响测定值，每秒能测量25—30次，在压延机上可以测量轴向连续进给的圆棒直径，由于多次的测量结果可以用数据处理系统平均，因此能够获得较高的测量精度。用这种方法可测量110—180mm的直径，测量误差控制在20—40 μ 左右。

2) 延伸率的自动测量仪

另一个动态测量实例是在拉伸试验机上对延伸量进行自动测量，它是从开始时的标

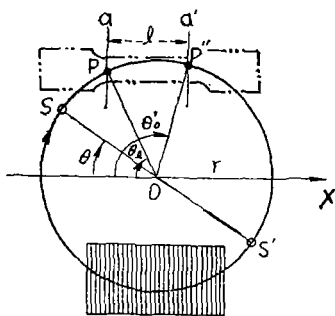


图13 延伸率的自动测量仪原理图

线间隔的值和断裂时的延伸量计算出材料延伸率的装置。测量原理如图13， a 、 a' 是刻在试验片上的标线，标记 S 是为测量该线的

传感器。为了测量 a 、 a' 尺寸，传感器 S 可沿着它们垂直相交的直线扫描，但是实际上很难找到使 S 作往返匀速直线运动的机构。因此由等速旋转的同步电机作为代用机构，传感器 S 在 P 和 P_1 点分别对准标线 a 、 a' 并产生出光电脉冲信号。这两个脉冲之间的时间最好能用时间脉冲束计数，然而为了在旋转时进行扫描，旋转角不应当与长度 L 成比例。因此，从一般的振荡器发出的是不等时间间隔的脉冲，而需要补偿圆弧扫描的非直线性误差。因而如图所示在传感器 S 的同一轨道对面上再安置一个传感器 S' ， a 、 a' 正对面的位置上安置一个等距光栅，当 S 、 S' 一起旋转时，由传感器 S' 分度光栅的明暗条纹产生脉冲信号。为了测量 a 、 a' 间隔，把这一脉冲信号游程作为计数脉冲使用，就补偿了上述的非直线性部分，读取与分度脉冲相对应的值，就能进行数字化测量。每秒可测量25—30次连续变化的延伸量。这个测量值在数据处理系统中不断更新、存储当从试验机上的应变仪发出断裂信号时，使这个测量值固定下来，就可以自动地测量断裂时的延伸量，从而完成了高效率试验。本装置测量延伸率的精度达2%以内。

结 束 语

综上所述，在自动测量的新时代，我们认为光学这门学科是一种有力的工具。主要理由是(1)分辨率与精度高；(2)非接触测量；(3)高速响应；(4)采用先进的光电转换技术；(5)肉眼识别信号等等。但也存在一些缺点如对油或尘埃的抗污能力差，受高温、湿度、振动等环境影响，这些都是今后需要解决的问题。而且光电测量并不局限于尺寸的测量范畴，如探伤或测量污染、以及在各种检测部门中为实现自动化、减轻劳动强度的目的，也要逐渐研制各种光电测量装置。

译自《光学技术ユンタクト》Vol.11

1973.No. 4