

光电位移测定

上海光学仪器厂情报组
上海光学仪器研究室

61年国庆节

光电位移测定

工业技术院中央計量檢定所

櫻井好正

1. 引言

把位移变换成光量变化后，再用光电管把它变成电量，予以测定。这种所谓光电子学（Photo electronic）的位移测定法，由于战后迅速发展起来的电子学的导入而获得了显著的进展。其中大部分是把过去已经完成了的光学测定法，作为出发点而发展起来的。其结果，其中也有仅仅止于把成为母体的光学测定法加以能率化简单化的东西，但也有许多能把测定的精密密度更加大，提高起来的东西。其中有若干，已经超越试制阶段，而已经正式投入生产。

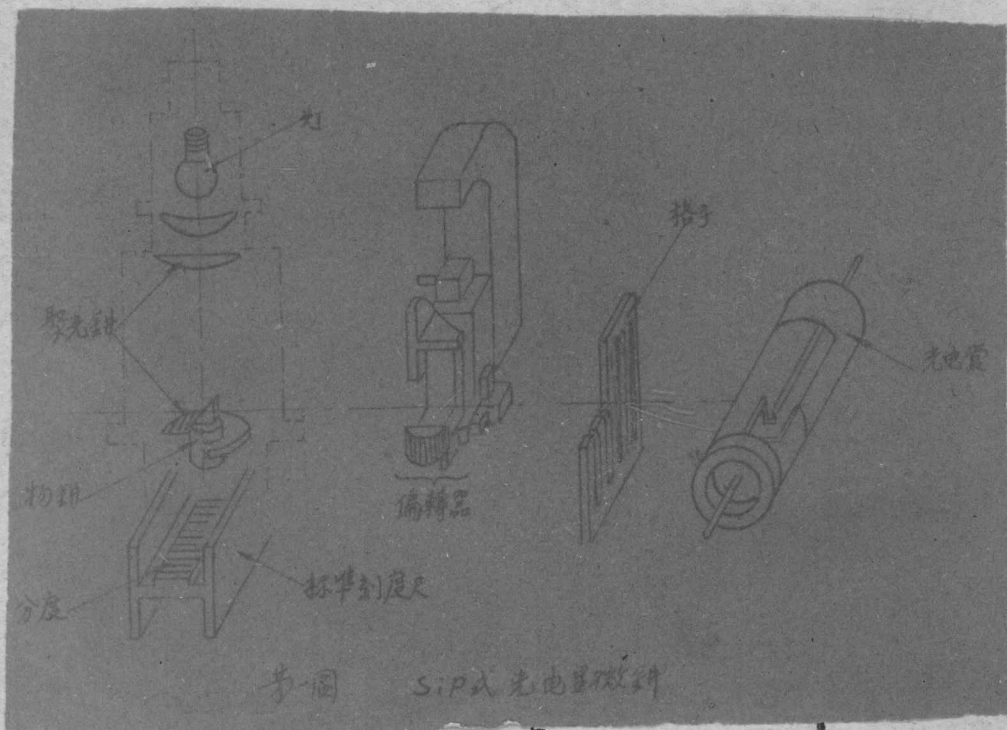
2. 光电显微镜

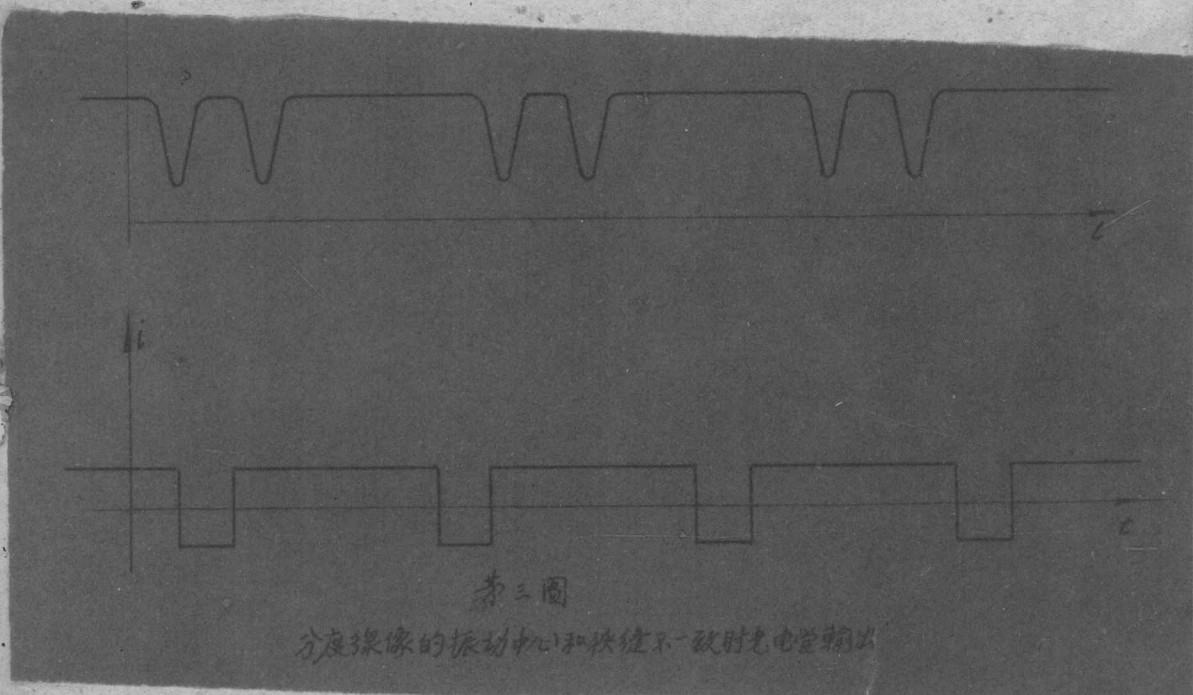
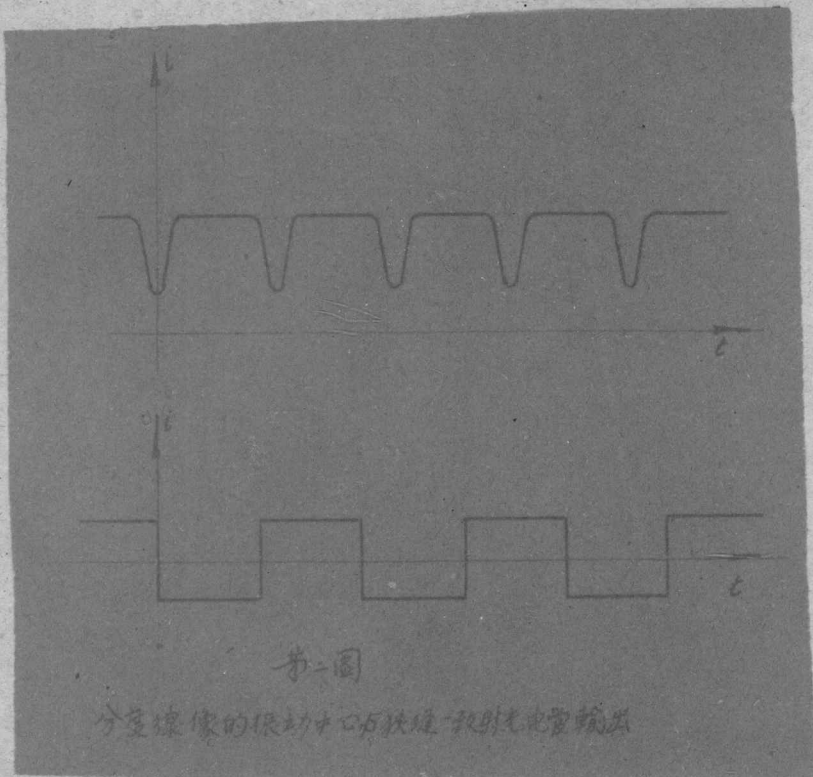
光电显微镜，是用以测定标准尺的分度线位置的装置。作为母体曾使用过的东西，当然是测微显微镜。今天所制成的东西，在测定能率上和测定精度上，都要远远地超过测微显微镜。此项显微镜的初期试制品，曾经有过缺点，就是当分度线靠近光轴（即零位附近）的时候，虽也表现了极高的精度，但是当离开光轴的时候，精度就急剧地降低下来。因而过去只能应用在光轴附近，或者应用在当标准尺仅仅在分度线间隔间移动の場合，断定分度线位置上。但是在最近，已经制成了可以在广大范围内作出正确测定的东西。

2.1 初期的S型式光电显微镜^{1) 2) 3)}

光电显微镜之中，最初制成的东西，其概要状况，有如第1图所示。标准尺的线，是用灯、聚光器（Condenser）的照明系统来照明的。分度线用物镜扩大起来，它的实像、成像在格子（grid）位置上。在成像光学系统的中途，插有偏转器（Deflector），它的结构是：在平行平面玻璃的四周，绕上线圈，

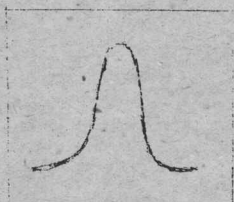
(Coil) 把它放在永久磁铁的磁场之间，在线圈上施加交流电压，使它在轴的周围旋转振动。因而分度线的像，在格子面上，于对线的直角方向上振动起来。在图上的格子，是有着几根狭缝 (Slit)。但在测定每一个分度线的时候，是用一个狭缝，选择它的幅度和分度线的扩大像的幅度要大致相等。当振动之际，分度线的像和狭缝一致着的时候，通过的光量就减少。因而用光电管取出这个光的话，输出就起着和分度线的像有关联的变化。就是说：在分度线的振动中心和狭缝一致着的时候，像第2图中的上图那样，可以获得在时间上相等间隔的信号。再者，当振动的中心和狭缝不一致的时候，像第3图中的上图那样，可以获得在时间上不相等间隔的信号。此地值得注意的事情是：横轴不是位移量而乃是时间的这一点。因此之故，例如变换为第3图中的下图状况，在电流闭合的时候和开启的时候的时间差，用电表来予以指示的那种方法下，即使把振幅怎样正确地予以固定起来，电表的指示与振动的中心和狭缝的位移的量之间，还是不能成比例。仅仅位移的量在振幅范围极小时，可以认为是成比例的。比例常数会受到振幅变化的影响，





乃是当然的事。据说用这种方法，可以获致 0.05μ 程度的测定精度。不过象第2图那样，位移零的位置，亦即电表所指示的零的位置，是和振幅没有关系的，因而在标准尺只在分度间隔之间移动着的场合，用以规定分度线位置，是很适宜的。

把光电管输出直接 $\times$ 在白朗示波管的纵轴上，在它的横轴上接上偏转器的电压，这时候在白朗管上就呈现第4图那样的分度线波形。当分度线的振动中心和狭缝一致的时候，波形的顶点是在振幅的中央位置上，整个波形是相称的。在分度线位移起来。振幅中心和狭缝不一致的时候，波形顶点就比例的位置移，而从中心脱离开，它的比例常数，是只对横轴的放大率有关系，对于偏转器的振幅上，是没有关系的。在笔者⁴⁾所作的试验结果上，认为用在对于广大范围的测定上，也是不适当的，若用以规定分度线位置，是最 $\times$ 好的。不过这种方式，对于，为了要除掉由斜照明所起的位置的误差起见，所作的照明的调度上，是极其适宜的。关于位置规定上的精度，是在 $0.03 \sim 0.04 \mu$ 左右。



第 4 图

光电显微镜所起的位置的波形

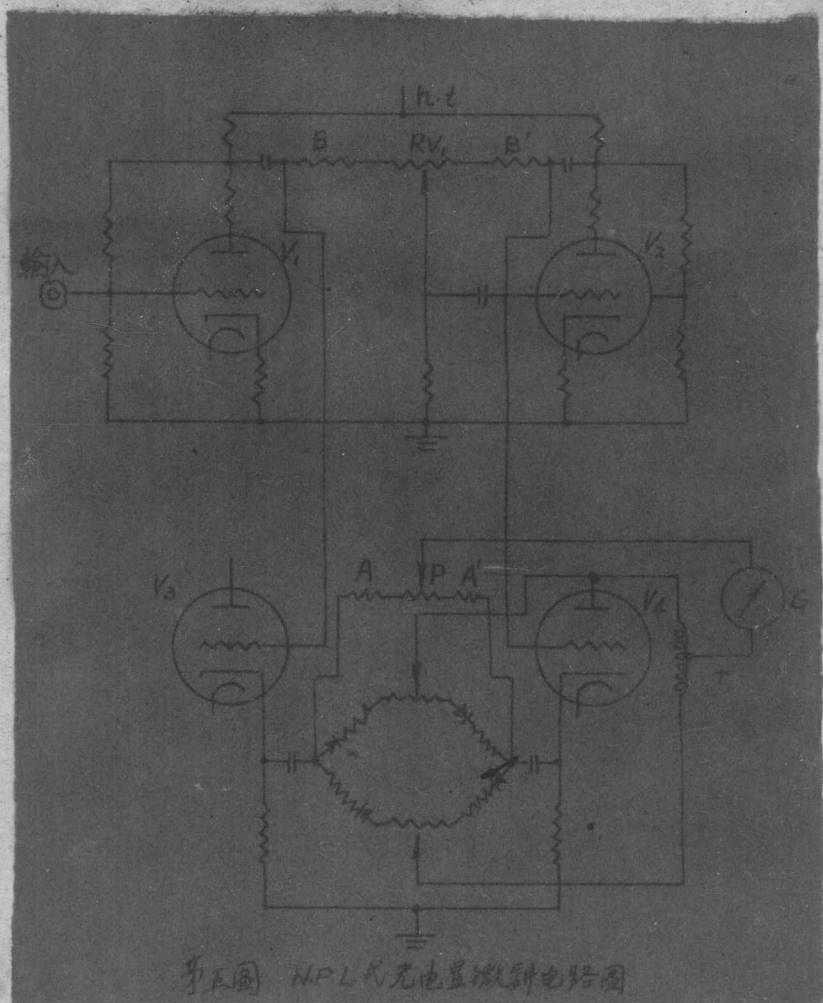
照片

再者，在利用刻线装置上的场合，是用像第1图中那样的几根狭缝，在总标准尺的几根分度线的平均位置上画出分度线。此项 S 氏式的初期的测定法，后来发展成为测定范围广泛的东西。关于这一点，将在下面再讲。

2.2 N. P. L. 的光电显微镜⁵⁾

初期的 S 氏式的东西和 N. P. L. (国家物理实验所(英国))试制的光电显微镜之间的最大区别，在于后者的偏转器上，采用着反射镜。不过在后面所讲的 S 氏式的最新的东西上，为了想取得大的振幅，已采用着反射式。此外，分度线的振动中心和狭缝之间的间隔，也就是在指示位移的方法上，也存在着区别。第5

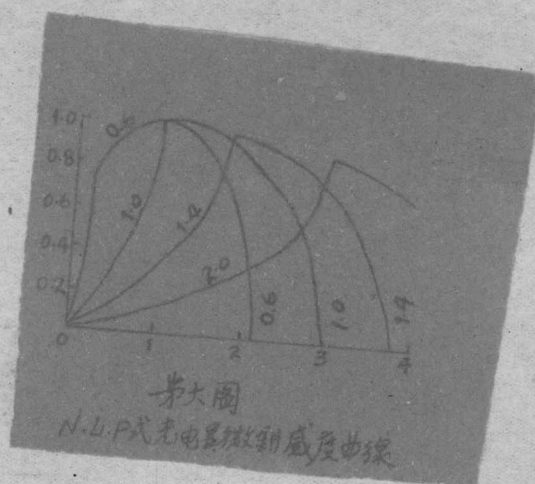
图是它的电路。



从光电管所起的信号，从输入导入到这一电路上。在变压器上施加以和反射镜的振动同一周期的交流。在振动中心和狭缝一致着的场合，光电流是以振动周期的2倍的周期来起变化。在不一致的场合，则出现和振动为同一周期的成分。此项成份的大小，是和位移的量成比例。由图中的电表来指示，不过在此项比例常数中，存在着，在原理性质上照明的亮度本身也包含在内的缺点。在2.1的方法上，亮度是项有关系的。此外，关于电路的稳定性等也有着关联，所以实际上主要是仅仅使用在测定位置的用途上。

按照此项方式的场合的感度，除和照明的亮度以外，还和分度线象的幅度 (l)，狭缝的幅度 (S)，分度线象的振动幅度

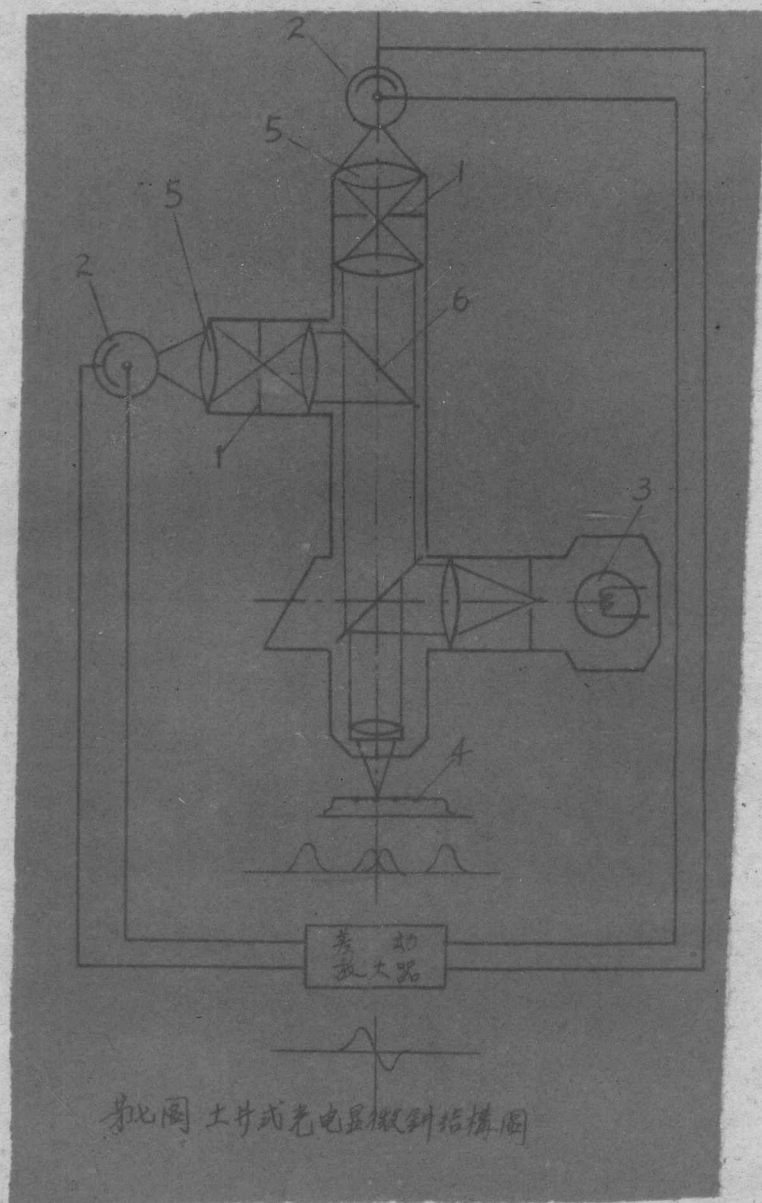
(a). 也有着关系。设若分度线是和幅度同样黑暗的带，作为 $\sigma = s/L$, $\alpha = a/l$ 。考虑到感度是和亮度成比例，在纵轴上取着相对感度画成曲线时，有如第6图所示。在实际的分度线的场合，和这一理论曲线，似乎弄不一致的样子。



2.3 土井式光电显微镜⁶⁾

此项光电显微镜，和历来的东西不同，不须把分度线象予以振动，而是在分度线位置上取出信号的办法。再者，它的主要着眼点，并不放在测定分度线位移的量这一件事上它的结构，有如第7图所示，由半透明薄片(6)把分度线的像分为二个使之成像，各别地射入光电管内。二个像由于对中心轴相对地略有参差用一些，所以在移动分度线时，就产生误差信号。

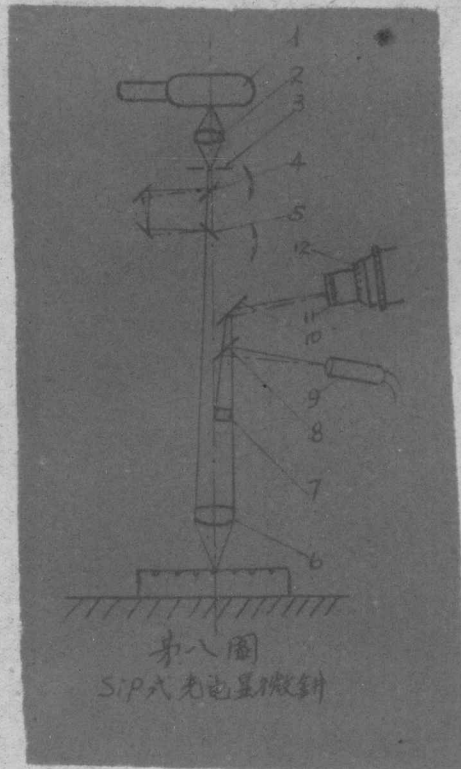
把它放在差动放大器的各个栅极上时，可以获得被微分了的信号。在微分被心的中点上，它能正确地放出脉冲波。



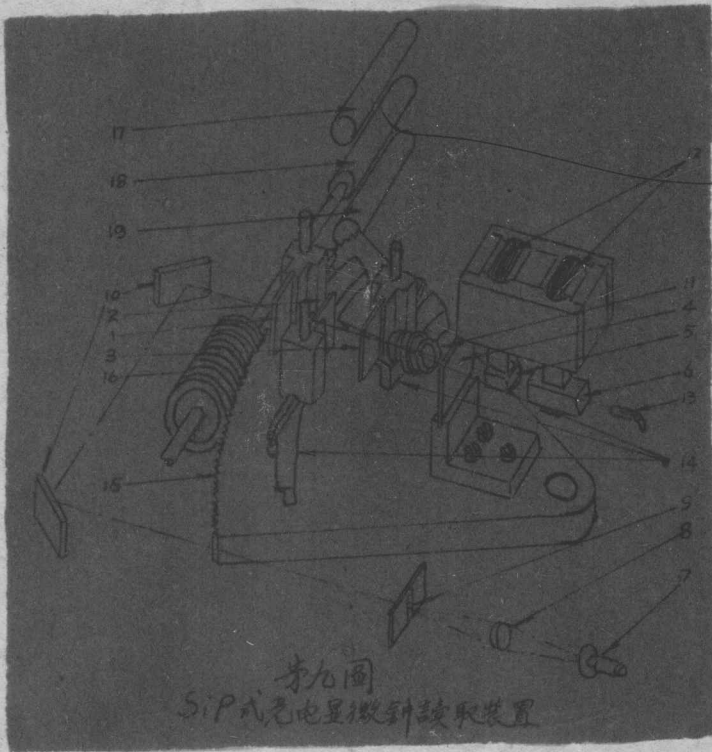
2.4 最近的Sip式光电显微镜⁷⁾

最近发表的Sip式光电显微镜，在它的设计上，已能获得和测微显微镜同等广泛的测定范围。因而在具有，毫米间隔的分度线的标准尺上，把这一显微镜配合上去的时候，不拘任何尺寸，都能在 0.1μ 程度的精度下予以读出。

它的光学系统，有如第8图所示的情形。



光源灯(1)的光，是聚光器透镜，由(2)至狭缝；在(3)上集光；通过(3)的光，在色括(4)(5)振动镜在内的4块反射镜上反射之后，通到物镜(6)上。在这一光学系统上，(3)的像在分度线的线上聚焦，狭缝的扩大像的幅度和分度线的幅度，是大致程度相等。从分度线上所起的光经过物镜(6)，镜(7)，在半透明膜(8)上反射之后，进入到光电管(9)之中。通过(8)的光，进入到目镜(11)，于是线的像就和标线一起，可以肉眼观测得到。在此项装置上，在它的两个旋转镜之中的一个上，和历来的装置同样地给予交流电压，使它振动起来，而在另外一个上则给予可变直流，用这样的办法来以进行零位的调整。



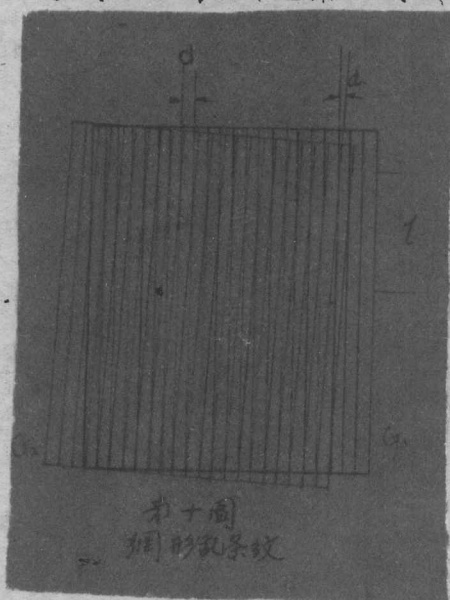
第9图是读取装置，做成功可以从远离开本体的位置上来操作的情状。从光源(7)所发出的光，由聚光器透镜聚集到狭缝(Slit)上。狭缝的像，由物镜而聚焦在光电管(13)的地方。在这个成像系统上，插有(1)至(6)为止的光学平板。平板(6)，由交流电压电磁性地旋转着。因此之故，像是近似正弦地来振动。如果平板(4)对光轴是垂直的话，光电管的输出，就成为第2图的情形。(4)由于蜗桿(16)的旋转而旋转起来的时候，电流就成为第3图的上图的情状，起着和光电显微镜的场合相同的那样的波形的这些输出，变形成为第2图第3图中的下图的情状。这个输出和光电显微镜中出来的输出方形波被加在一起，当它们不是同一相位的时候，就产生出误差信号。这一个信号传到辅助电动机上，驱动着蜗桿，一直旋转到误差信号变成零为止。(6)的振动和(4)的旋转所起的光的位移，正确地来讲，并不是正弦的。(1)~(3)的玻璃，是用作补充修正的东西，随着节段(Segment)的动作，由齿轮的引导来旋转。其所以需要有三的原因，是为了适应3种类型的

振幅的缘故。

在分度线从光轴上脱离开的测定上，可以用这个装置而把它变换到光学平面玻璃的旋转角的测定上。这个角和位移量之间，是应当成比例的。能在 10^{-4} 那样精度上作出测定。

3. 用网形乱条纹所作的位移测定

用具有同样格子定数的衍射格子，靠拢而相对起来，在分度线上让它带着很小角度，就出现第10图那样的网形乱条纹。



图中 G_1 , G_2 分别地都是衍射格子，把 G_1 和格子面平行起来并和分度线在直角方向上，只在格子间隔 d 的程度移动着的时候，条纹也只移动一个条纹的程度。因而在那用光栅把条纹取出，把光电管等上所通过的光，变更成电流的时候， G_1 在每次 d 移动时，就产生出一个周期的电流变化。

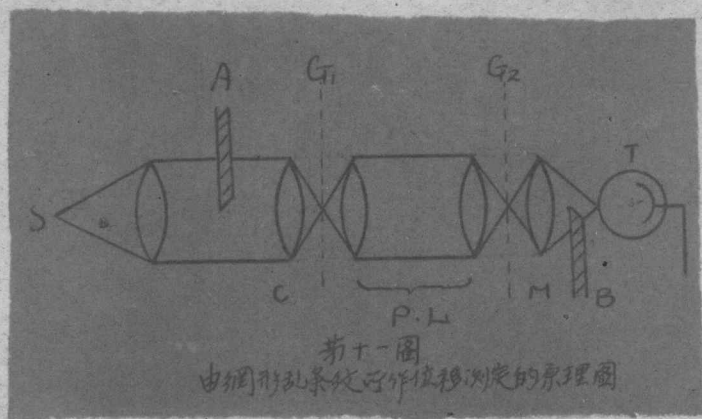
在图上，格子之间相互形成的角，作为 α ，以条纹的幅度作为 l ，就成立下式的关系。

$$d = \alpha \cdot l$$

也就是， α 是扩大率的逆数。

3.1 钻模(jig)中转盘的自动定位装置⁶⁾

在用标准尺来作出钻模中转盘的自动规定位置的场合，把分度线和分度线之间的尺寸以 1μ 的精度来规定，采用着网形乱条纹。所用的衍射格子，它的格子常数是 1μ 程度的东西，而而是互相非常密接，但是最低限度。如果在格子常数上没有保持间隔的话，条纹就不会看到稳定。为了避免这样的困难起见，采用着下列那样的系统。在第11图中，S是光源，C是聚光器透镜，照明到衍射格子 G_1 上。第1个衍射格子 G_1 ，是由薄倍投影透镜 P、L，成像到第2个衍射格子 G_2 的面上，在这里就造成网形乱条纹。 G_1 、 G_2 两个格子成为一体，对于其余的系统，在上下方向上移动，把条纹的移动通过光学系统的 M，接受到光电管 T 上，把亮度的变化予以放大计数。图中的 A、B 是为了提高条纹的对衬 (Contrast) 所设的遮蔽板。



3.2 振幅的测定⁸⁾

把衍射格子中的一个，装在予以测定的振动物体上，或者是在格子上装上测定接头，依靠接触到振动物体的办法，就能把振动变换成网形乱条纹的振动。第12图就是它的结构图。4个光电管各从网形乱条纹的每1条纹的 $\frac{3}{4}$ 上，把光取出来。这些的输出，使用着第13图那样的电路，施行推挽 (push-pull) 放大。把它在白朗管的各个偏向板上按适当的次序接进去的时候，白朗管面上的波形，按照振动而画出圆弧。在圆弧，旋转着的场合，振幅是正确地 and 格子常数相等。也就是可

以从对着圆弧的中心所做的角度上，把振幅予以直读。光电管的频率特性是和测定精度上没有关系的。不过可动部分的动的特性，限制着频率的范围。

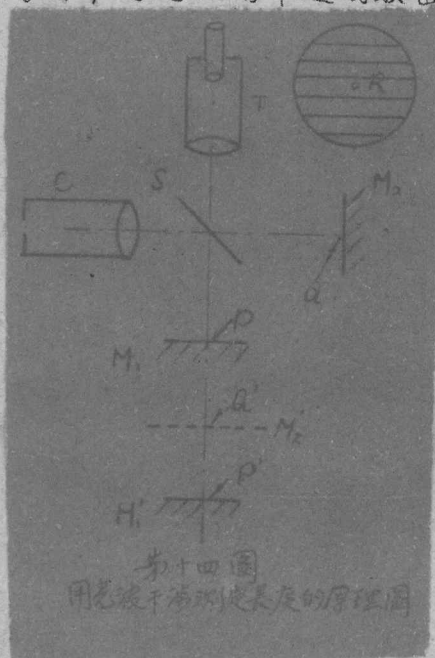
4. 利用光波干涉计的位移测定

使用光波干涉计，用光的波长作为基准来测定长度的技术，是早在前世纪的末期，已经开端。在1930年前后，曾作为测定规块用的东西，制造成工业的测定器。它的测定原理，亦即适合于肉眼观测干涉条纹的，被称为符合法的方法。战前所制的东西，十足地全部都是利用这种方法。

关于计数的原理，是早就已被知道的，当迈克尔逊把cd的红色波长和计量器原器作比较观测时，也曾一部分采用过这种方法。但是广泛地被利用起来，还是战后的事情。二次增倍光电管及电子管计标器的迅速的进步，也对此项技术的发展上，成了很大的原动力，这一点是用不到多加说明的。

4.1 符合法与计数法

第14图所示是利用干涉计以测定长度时的原理图。用平行光管C成为平行线的单色光，用半透明膜面S，分割成为两



第十四图
用光波干涉测定长度的原理图

尔之后，分别地用反射镜 M_1 及 M_2 予以反射。反射后的光，在 S 上再合并为一而后干涉起来，此项干涉条纹可以从望这镜下中观测到。把参照面 M_2 对于光线微微地倾斜着的时候，视野中的干涉条纹有如右角图的情形。

现在把 M_1 在单色光检波长的半程度上，于平行而垂直的方向上移动的时候，视野中的干涉条纹，逐一地平行着向相邻的条纹的位置上移动过去，这件事从干涉的原理上来讲，乃是当然的事情。作为 R 是相等于 P 的点，把 P 予以移动，在 R 上把通过该处的干涉条纹的数目 $(N + \varepsilon)$ 加以计数的话， P 的移动距离 PP' 可以从下式计算出来。

$$PP' = \frac{\lambda}{2} (N + \varepsilon)$$

N 是整数， ε 是零头数目，这种方法，就是计数法。

其次就半透明膜 S 来考虑 M_2 的像 M_2' 。在这个场合，长度 PQ 可以用次式来表示。

$$PQ = \frac{\lambda}{2} (N_1 + \varepsilon_1)$$

N_1 是整数， ε_1 是零头数目， λ 是波长，在 $PQ = 0$ 的时候就成为 $\varepsilon_1 = 0$ 。当考虑到此时的干涉条纹乃是通过 R 这件事的时候就可以从 R 是处于干涉条纹的哪一位置上予以测定，从而求得 ε_1 。因此之故，在上的右边，只有 N_1 是一个未知数。其次把 M_1 移动到 M_2 上的时候。

$$PQ = \frac{\lambda}{2} (N_2 + \varepsilon_2)$$

也就是
$$PP' = \frac{\lambda}{2} (N_1 + N_2 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2) = \frac{\lambda}{2} (N + \varepsilon)$$

测定是归结到把 N 予以决定的这一事上。在求取它的办法上，用导入几种波长的办法来求得各个 ε ，再者，把 PP' 的大致的长度预先予以测定，在它的附近，寻找出具有各个 ε 的排列的长度，从而来决定 N 。这就是符合法。把这两种方法的得失长短加以比较时，有如下述的情况。

(a) 在附合法上，须把应予测定的长度，预先用别种方法加以确定起来，这是它的必要条件。而在计数法上，它的计数速

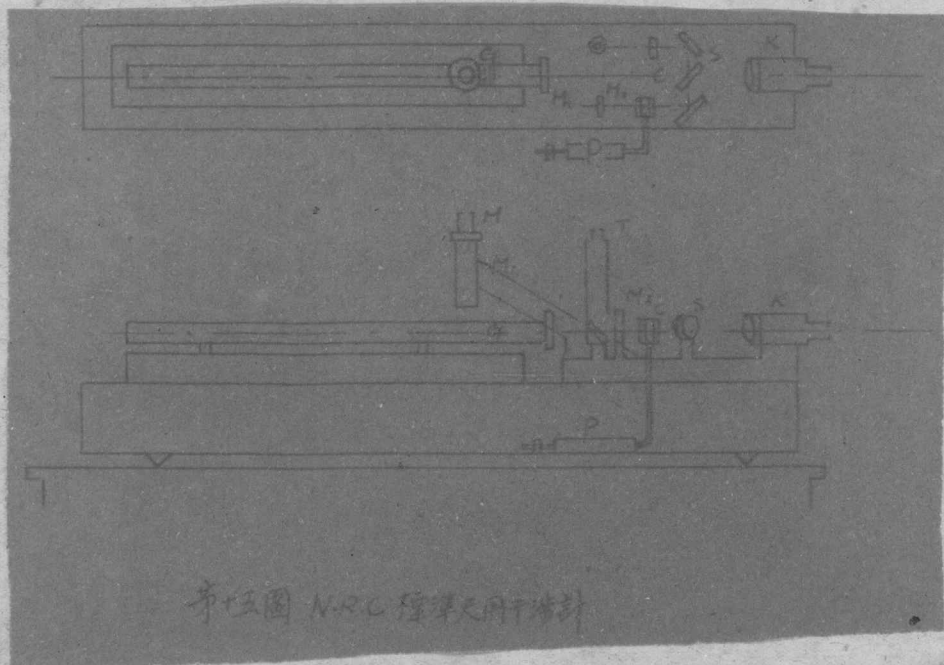
度，如果考虑到由于空气的流动而起干涉条纹的紊乱，以及机械的震动等的时候，就不能够做到怎样的大。因此之故，可知计数法对于测定很多数目的较短的长度的场合是特别有利的。

(b) 在符合法上能测定的最大的长度是由所使用的光谱线中干涉限度最短的线所局限着的。而在计数法上，因为只用着1根光谱线，因而，可能加以测定的最大长度，是由这一个线来决定的。

(c) 在符合法上，随着波长的种类及其配合，和作为目标的测定精度上不发生关系。有在高精度上(0.01μ 程度)施行零头数目读取的必要。第15图是置备着高精度的零头数目读取装置的标准尺测定装置(9)(10)的一个事例。在干涉光路中，没有可以变更气压的空气层，改变着压力来施行干涉条纹的“零配合”，从压力上来读取零头数目，在这上面，再给予压力的周期的变化，施行着光电的办法。而在计数法上，只要按照规定精度施行读取就行了。

(d) 在计数法上，限制着光电管的噪声所能测定的最大长度。干涉计的平面反射镜，是按照着移动平行度而使用面积受着限制，因而有使用特殊的反射镜来增加全部光量的必要。如直角棱镜、立方角棱镜(Corner-cube prism)，或透镜与凹面镜的集合物等东西都能予以利用。

(e) 在计数法上，可以作自动测定。



4.2 計数法上所用的干涉計的事例

在測定大的位移，即長的長度時用的干涉計上，如想把移動反射鏡在廣大的範圍內，在平行的原狀下予以移動的這件事，在機械的性質上，是非常困難的，因而，像已經說明過的那樣，在反射鏡上採用着立方角稜鏡等東西。

4.2.1 標準尺測定裝置⁽¹⁾ (中檢式)

第16圖是它的光學系統，從光源A所起的光，經由聚光器透鏡B，集光到狹縫(Slit)C上。經過C后的光，在平行光管物鏡D上，成為平行，通過分光稜鏡E， E_2 而進入F。F是克爾(Köslers)的稜鏡，它的中央的稜接面是形成為半透明膜，由這方面分成為兩部分的光，分別地走向固定鏡H和移動鏡G上。(H和G都是立方角稜鏡)

在反射后再在F上合併為一束干涉，在K的後面，造成干涉條紋。I是楔形的光學玻璃，起着把光的方向微微地予以變更的作用。因而在視野上有連續着次數的平行干涉條紋排成行

